

การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติของการแผ่กระจายคลื่นแผ่นดินไหว

นายปรีชา กระจ่างอินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ONE-DIMENSIONAL GROUND RESPONSE ANALYSIS OF EARTHQUAKE WAVE  
PROPAGATION

Mr.Preecha Kratai-intr

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University



ปรีชา กระต่ายอินทร์ : การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติของการแผ่  
กระจายคลื่นแผ่นดินไหว (ONE-DIMENSIONAL GROUND RESPONSE ANALYSIS  
OF EARTHQUAKE WAVE PROPAGATION) อ.ที่ปรึกษา:รศ.ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน ,  
196 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการตอบสนองของชั้นดินแบบ 1 มิติของคลื่นแผ่นดินไหว และ  
นำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์กับชั้นดินกรุงเทพ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและ  
สามารถคำนวณการตอบสนองต่างๆ ของชั้นดินได้ทุกค่าความลึก ได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว การ  
เคลื่อนตัว ความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน เส้นทางการเดินทางของหน่วยแรง และ ความดันน้ำ  
ส่วนเกิน การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมทำการสอบเทียบผลลัพธ์กับโปรแกรม  
EDUSHAKE ที่ใช้ข้อมูลรับเข้าเหมือนกันและใช้ดินชนิดอิลาสติก ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้  
จากการสอบเทียบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 98.75% ซึ่งถือว่าความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของ  
โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นอยู่ในเกณฑ์ดีมาก

แบบจำลองดินที่ใช้ในโปรแกรมมีทั้งหมด 2 รูปแบบคือ ชนิดอิลาสติกและไม่เป็นอิลาสติก  
แบบจำลองชนิดอิลาสติกมีทั้งหมด 5 แบบจำลองและแบบจำลองชนิดไม่เป็นอิลาสติกมี 1  
แบบจำลอง แบบจำลองชนิดไม่เป็นอิลาสติกอ้างอิงจาก Pestana and Biscontin (2000) ซึ่งมี  
ข้อดีคือ เป็นแบบจำลองชนิดหน่วยแรงประสิทธิผล และสามารถจำลองการลดลงของหน่วยแรง  
ประสิทธิผล และการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำส่วนเกินภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร แบบจำลองดินมี  
พารามิเตอร์รับเข้าทั้งหมด 7 ตัว ซึ่งสามารถหาค่าที่เหมาะสมกับดินกรุงเทพได้ด้วยการนำสมการ  
ของแบบจำลองไปสอบเทียบกับผลการทดสอบ DSS (Direct simple shear) ค่าสัมประสิทธิ์  
สหสัมพันธ์ของแบบจำลองนี้กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 85% ผลการวิเคราะห์การ  
ตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพความลึก 80 เมตรด้วยแบบจำลองชนิดไม่เป็นอิลาสติกกับชั้นดิน  
เหนียวอ่อนได้ อัตราส่วนของความเร่ง ความเร็ว และการเคลื่อนตัวที่ผิวดินต่อค่าที่ชั้นดินมี  
ค่าประมาณ 4.5 เท่า 6.5 เท่า และ 5.5 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับกรณีที่ใช้  
คุณสมบัติชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นแบบอิลาสติกได้ผลเหล่านั้นน้อยกว่าประมาณ 10%

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

สาขาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4870376321: MAJOR OF CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: EARTHQUAKE / WAVE PROPAGATION / FINITE DIFFERENCE / SOIL  
MODEL / BANGKOK SOIL PROPERTY

PREECHA KRATAIINTR: ONE-DIMENSIONAL GROUND RESPONSE ANALYSIS  
OF EARTHQUAKE WAVE PROPAGATION  
ASSOC PROF. BOONCHAI UKRITCHON, Sc.D., 196 pp.

This research studied one-dimensional ground response of earthquake wave and applied to analyze with Bangkok soil profile. The developed program uses the finite difference method and can calculate different ground responses at any depth, namely acceleration, velocity, displacement, shear stress and strain, stress path, and excess pore pressure. Verification of program correctness was carried out by calibrating with EDUSHAKE program using same input data and elastic soil model. Coefficient of correlation obtained from the calibration has the average value approximately about 98.75%, indicating reliability and correctness of the developed program are very good.

Soil models used in the program have two kinds, elastic and inelastic types. There are five types of elastic model and one type of inelastic model. The inelastic model is based on Pestana and Biscontin (2000), whose advantages are: effective stress model, and ability to model decrease of effective stress and increase of excess pore pressure under cyclic loading. There are seven input parameters for this model which can be obtained optimally from test results of DSS (Direct simple shear). Coefficient of correlation for Bangkok soft clay has the average value about 85%. Results of ground response analysis of 80 meter thick Bangkok soil layer using inelastic model for soft clay layer give ratios of acceleration, velocity, and displacement at the ground surface to those at the bed rock approximately 4.5, 6.5, 5.5, respectively. In comparing results of analysis for the case of using elastic model for soft clay, those values are about 10% smaller.

Department ..... Civil Engineering ..... Student's signature .....

Field of study ..... Civil Engineering ..... Advisor's signature .....

Academic year .. 2008 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยต้องขอขอบคุณ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏาชน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยให้  
ความรู้ในเรื่องการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหว, การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และความรู้ทางด้าน  
วิศวกรรมธรณีเทคนิค จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จได้ด้วยดี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาใช้เวลาและให้คำแนะนำรวมทั้งให้  
ข้อคิดเห็น ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บิดา-มารดา และครอบครัว สำหรับร่างกาย แรงใจ และทุนทรัพย์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์  
ฉบับนี้เสร็จได้ด้วยดีและคุณกมลภักที่ช่วยปรึกษาในเรื่องเทคนิคการจัดทำรูปเล่ม

รวมถึงผู้ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ  
ทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

## สารบัญ

หน้า

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                    | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                 | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                    | ฉ  |
| สารบัญ.....                                                             | ช  |
| สารบัญตาราง.....                                                        | ฎ  |
| สารบัญภาพ.....                                                          | ฏ  |
| สัญลักษณ์.....                                                          | ณ  |
| <br>                                                                    |    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                       | 1  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                                 | 1  |
| 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....                                              | 2  |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                                        | 3  |
| 1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....                                                 | 3  |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                      | 3  |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                              | 5  |
| 2.1 ความเป็นมาของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแผ่นดินไหว.....           | 5  |
| 2.1.1 คลื่นแรงเฉือน.....                                                | 5  |
| 2.1.2 คลื่นแรงอัด.....                                                  | 5  |
| 2.2 ความรุนแรงและขนาดของแผ่นดินไหว.....                                 | 6  |
| 2.2.1 Seismic moment.....                                               | 6  |
| 2.2.2 Surface wave magnitude.....                                       | 6  |
| 2.2.3 Richer local magnitude.....                                       | 7  |
| 2.2.4 Body wave magnitude.....                                          | 7  |
| 2.3 พลังงานของคลื่นแผ่นดินไหว.....                                      | 8  |
| 2.4 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน.....                               | 9  |
| 2.4.1 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธี Amplitude parameter..... | 9  |
| 2.4.1.1 ความเร่งสูงสุด .....                                            | 10 |
| 2.4.1.2 ความเร็วสูงสุด.....                                             | 10 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.1.3 Sustained maximum acceleration and velocity.....                                | 10 |
| 2.4.1.4 Effective design acceleration.....                                              | 11 |
| 2.4.2 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีส่วนประกอบของความถี่.....                 | 11 |
| 2.4.2.1 Fourier spectrum of ground motion.....                                          | 11 |
| 2.4.2.2 Power spectrum.....                                                             | 12 |
| 2.4.2.3 Response spectra .....                                                          | 13 |
| 2.4.2.4 Spectral parameters .....                                                       | 13 |
| 2.4.2.5 อัตราส่วนของ $v_{\max}/a_{\max}$ .....                                          | 14 |
| 2.4.3 ตัวแปรทางด้านระยะเวลาของการสั่นสะเทือน.....                                       | 15 |
| 2.4.4 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินโดยฟังก์ชันการแปลงผล<br>ในสภาวะเชิงเส้น .....     | 16 |
| 2.4.4.1 การวิเคราะห์แบบพฤติกรรมเชิงเส้น.....                                            | 17 |
| 2.4.4.2 การวิเคราะห์ฟังก์ชันการแปลงผล.....                                              | 17 |
| 2.4.5 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม<br>ในภาวะไม่เชิงเส้น..... | 24 |
| 2.4.5.1 สมการเชิงอนุพันธ์.....                                                          | 24 |
| 2.4.5.2 การเคลื่อนที่ของเคลื่อน 1 มิติในวัสดุที่ยาวเป็นอนันต์.....                      | 26 |
| 2.5 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินโดยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม<br>ในภาวะไม่เชิงเส้น.....   | 28 |
| 2.5.1 สมการคลื่นแผ่นดินไหวในกรณีที่ไม่ทำการคิดค่าความหนืดของดิน.....                    | 29 |
| 2.5.2 สมการผลต่างแบบตรงกลาง.....                                                        | 32 |
| 2.6 สมการคลื่นแผ่นดินไหวในกรณีที่ทำกรคิดค่าความหนืดของดินในกรณีต่างๆ.....               | 34 |
| 2.6.1 กรณีที่ไม่มีค่า Damping ชั้น n (ชั้นดิน).....                                     | 34 |
| 2.6.2 กรณีที่มีค่า Damping ชั้น n (ชั้นดิน).....                                        | 34 |
| 2.6.3.กรณีที่ไม่มีค่า Damping ชั้น N (ชั้นหิน).....                                     | 35 |
| 2.6.4 กรณีที่มีค่า Damping ชั้น N (ชั้นหิน).....                                        | 36 |
| บทที่ 3 รายละเอียดของโปรแกรมที่พัฒนา.....                                               | 38 |
| 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....                                                      | 38 |
| 3.2 การอ่านข้อมูลการวิเคราะห์.....                                                      | 38 |
| 3.2.1 การอ่านข้อมูลชั้นดินและชั้นหิน.....                                               | 39 |



|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.2 การอ่านข้อมูล Input acceleration .....                    | 41 |
| 3.2.3 การอ่านข้อมูล Input soil model.....                       | 43 |
| 3.2.4 การอ่านข้อมูล Input damping ratio.....                    | 45 |
| 3.3 การคำนวณของโปรแกรม.....                                     | 46 |
| 3.4 การแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ.....                        | 56 |
| 3.4.1 การเคลื่อนตัว.....                                        | 56 |
| 3.4.2 ความเร็ว.....                                             | 57 |
| 3.4.3 ความเร่ง.....                                             | 58 |
| 3.4.4 ความเค้นเฉือน.....                                        | 59 |
| 3.4.5 ความเครียดเฉือน.....                                      | 60 |
| 3.4.6 แรงดันประสิทธิผล.....                                     | 61 |
| 3.4.7 แรงดันน้ำส่วนเกิน.....                                    | 62 |
| บทที่ 4 แบบจำลองดินที่ใช้ในโปรแกรม.....                         | 63 |
| 4.1 Linear elastic stress-strain relation (Hooke's law).....    | 64 |
| 4.1.1 ระบายสมมาตร.....                                          | 66 |
| 4.1.2 ระบายสมมาตร 2 ระบาย.....                                  | 67 |
| 4.1.3 Transverse isotropy.....                                  | 68 |
| 4.1.4 Full isotropy .....                                       | 69 |
| 4.1.5 Tensor form.....                                          | 69 |
| 4.1.5.1 การทดลอง Hydrostatic pressure .....                     | 70 |
| 4.1.5.2 การทดลอง Simple compression test .....                  | 70 |
| 4.1.5.3 การทดลอง Pure shear test .....                          | 71 |
| 4.1.5.4 การทดลอง Uniaxial test .....                            | 71 |
| 4.2 แบบจำลอง Linear elastic model .....                         | 73 |
| 4.3 แบบจำลอง Viscoelstetic model .....                          | 73 |
| 4.4 แบบจำลอง Hyperbolic model .....                             | 74 |
| 4.5 แบบจำลอง Ivan and mroz model .....                          | 75 |
| 4.6 แบบจำลอง User define soil model .....                       | 77 |
| 4.7 แบบจำลอง Pesstana model .....                               | 79 |
| 4.7.1 การวิเคราะห์แบบจำลองดินPresstana แบบแรงเฉือนทางเดียว..... | 79 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.7.2 การวิเคราะห์แบบจำลองดิน Pestana แรงกระทำแบบวัฏจักร.....           | 86  |
| บทที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหว..... | 97  |
| 5.1 การทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา         |     |
| กับโปรแกรม Edushake .....                                               | 97  |
| 5.1.1 คลื่นแผ่นดินไหว Taft .....                                        | 98  |
| 5.1.2 คลื่นแผ่นดินไหว Treas.....                                        | 106 |
| 5.1.3 คลื่นแผ่นดินไหว Yerba.....                                        | 114 |
| 5.2 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้น   |     |
| กับโปรแกรม Edushake.....                                                | 121 |
| บทที่ 6 การประยุกต์ใช้แบบจำลองดิน Pestana กับชั้นดินกรุงเทพ.....        | 123 |
| 6.1 การทดสอบเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับผลการทดลอง                |     |
| Direct simple shear test ในสภาวะ Monotonic loading .....                | 124 |
| 6.2 การทดสอบเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับผลการทดลอง                |     |
| Direct simple shear test ในสภาวะ Cyclic loading.....                    | 130 |
| 6.3 การวิเคราะห์ชั้นดินกรุงเทพที่มีความหนา 80 เมตร โดยใช้แบบจำลองดิน    |     |
| Pestana และ Linear elastic .....                                        | 139 |
| 6.4 การวิเคราะห์ชั้นดินกรุงเทพที่มีความหนา 30 เมตร โดยใช้แบบจำลองดิน    |     |
| Pestana และ Linear elastic .....                                        | 153 |
| 6.5 การวิเคราะห์ชั้นดินกรุงเทพที่มีความหนา 80 เมตร โดยใช้แบบจำลองดิน    |     |
| Linear elastic อย่างเดียว .....                                         | 160 |
| 6.6 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน Pestana        |     |
| และ Linear elastic กับชั้นดินที่มีความลึก 80 เมตร.....                  | 167 |
| บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัย.....                                             | 173 |
| รายการอ้างอิง.....                                                      | 177 |
| ภาคผนวก.....                                                            | 178 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....                                         | 197 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                                                            | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 ความถี่ของการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวขนาดต่างๆ.....                                                                                                                  | 9    |
| 2.2 ค่าประมาณของค่า $\frac{V_{max}}{a_{max}}$ ที่ตรวจวัด ณ สถานีตรวจวัดที่ห่างจาก<br>การเกิดคลื่นแผ่นดินไหวไม่เกิน 50 กิโลเมตร .....                                | 14   |
| 2.3 การเปรียบเทียบจำนวนรอบเทียบเท่าของคลื่น Harmonic loading<br>กับขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว .....                                                                     | 15   |
| 2.4 ค่าประมาณการสั้นสะเทือนตามวิธี Bracketed duration<br>ณ จุดที่ห่างจากคลื่นแผ่นดินไหวไม่เกิน 10 กิโลเมตร.....                                                     | 16   |
| 2.5 ค่าคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ .....                                                                                                                             | 28   |
| 6.1 คุณสมบัติและการหาค่า Parameter ของแบบจำลองดิน Pestan.....                                                                                                       | 123  |
| 6.2 ค่า Parameter เฉลี่ยทั้งหมดที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง Pestana<br>กับดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานครในกรณีแรงเฉือนทางเดียว (Monotonic loading).....          | 129  |
| 6.3 ค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่า Parameter<br>ที่ได้การเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับ การทดลอง DSS test.....                                              | 130  |
| 6.4 ค่าParameter ที่ใช้ในแบบจำลองดิน Pestana เปรียบเทียบกับผลการทดลอง DSS test...                                                                                   | 136  |
| 6.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้การเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana<br>กับ การทดลอง DSS test.....                                                       | 137  |
| 6.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์( $R^2$ ) ของค่า Parameter เฉลี่ย<br>ที่ได้การเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับ การทดลอง DSS test .....                               | 138  |
| 6.7 ค่า Parameter เฉลี่ยทั้งหมดทุกความถี่ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองดิน<br>Pestana กับดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานครในกรณีแรงเฉือนวัฏจักร (Cyclic loading)..... | 138  |
| 6.8 คุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพฯที่มีความหนา 80 เมตร.....                                                                                                               | 139  |
| 6.9 คุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพฯที่มีความหนา 30 เมตร.....                                                                                                               | 153  |
| 6.10 สมบัติชั้นดินกรุงเทพฯที่มีความหนา 80 เมตร.....                                                                                                                 | 160  |
| 6.11 ตารางการเปรียบเทียบผลการทดสอบการตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพฯที่<br>ความถี่ 80 เมตร ระหว่างแบบจำลองดิน Pestama และ Linear elastic.....                             | 172  |

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบที่                                                                                             | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม Edushake.....                                                            | 4    |
| 2.1 รูปแบบการกำหนดการเคลื่อนตัวของของชั้นดินอันเนื่องมาจาก<br>แรงกระทำจากแผ่นดินไหวตามสมการที่ 2.44..... | 29   |
| 2.2 การสั่นไหวของชั้นดินและการสั่นไหวของชั้นหิน (bedrock motion).....                                    | 29   |
| 2.3 การเกิดการเคลื่อนตัวของดิน การเกิดค่าความเค้น (strain)<br>ความเครียด (Shear stress) .....            | 32   |
| 3.1 Common dialog box ทำการเลือกข้อมูล .....                                                             | 39   |
| 3.2 โครงสร้างการทำงานของกรอ่านข้อมูล .....                                                               | 40   |
| 3.3 วิธีการอ่านข้อมูลของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น.....                                                      | 41   |
| 3.4 Input acceleration แบบที่ 1 .....                                                                    | 42   |
| 3.5 Input acceleration แบบที่ 2 .....                                                                    | 43   |
| 3.6 การอ่านข้อมูล Input soil model และ Input damping ratio.....                                          | 44   |
| 3.7 ข้อมูลที่ได้จากการอ่าน File แบบ Input soil model.....                                                | 45   |
| 3.8 ผลจากการอ่านข้อมูล Input damping ratio.....                                                          | 45   |
| 3.9 การคำนวณหน่วยแรงรวมของชั้นดิน .....                                                                  | 47   |
| 3.10 การคำนวณแรงดันน้ำ .....                                                                             | 47   |
| 3.11 การคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลของชั้นดิน .....                                                          | 48   |
| 3.12 การคำนวณของโปรแกรม .....                                                                            | 54   |
| 3.13 ผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัว .....                                                                       | 56   |
| 3.14 ผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัวจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน.....                                | 56   |
| 3.15 ผลลัพธ์ของความเร็ว .....                                                                            | 57   |
| 3.16 ผลลัพธ์ของความเร็วจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน.....                                     | 57   |
| 3.17 ผลลัพธ์ของความเร่ง .....                                                                            | 58   |
| 3.18 ผลลัพธ์ของความเร่งจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน .....                                    | 58   |
| 3.19 ผลลัพธ์ของความเค้นเฉือน .....                                                                       | 59   |
| 3.20 ผลลัพธ์ของความเค้นเฉือนจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน.....                                | 59   |
| 3.21 ผลลัพธ์ของความเครียดเฉือน.....                                                                      | 60   |
| 3.22 ผลลัพธ์ของความเครียดเฉือนจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน .....                             | 60   |
| 3.23 ผลลัพธ์ของแรงดันดินประสิทธิผล .....                                                                 | 61   |

| ภาพประกอบที่                                                                                                                                                                                  | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.24 ผลลัพธ์ผลลัพธ์ของแรงดันดินประสิทธิผลจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน.....                                                                                                        | 61   |
| 3.25 ผลลัพธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกิน.....                                                                                                                                                         | 62   |
| 3.26 ผลลัพธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน.....                                                                                                                 | 62   |
| 4.1 ความเค้นเฉือน Stress ที่ชั้นดินใดๆมีค่าคงที่ (ค่า R).....                                                                                                                                 | 75   |
| 4.2 ลักษณะของชั้นดินแต่ละชั้นในด้านข้างที่รับแรงเฉือนเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว<br>ที่เกิดขึ้นโดยชั้นดินแต่ละชั้นจะมีค่าความแข็ง (Stiffness) และค่าความเค้นเฉือน<br>เป็นค่าคงที่.....           | 76   |
| 4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่เป็นไปตาม Masing Rule.....                                                                                                            | 76   |
| 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าความเครียดเฉือนกับค่าความแข็ง (Stiffness)<br>และค่าความหนืดของวัสดุ (Damping material).....                                                                             | 78   |
| 4.5 ตัวอย่างข้อมูลที่แสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าความเครียดเฉือน<br>กับค่าความแข็ง (Stiffness) และค่าความหนืดของวัสดุ (Damping material).....                                                    | 78   |
| 4.6 การจำลองแรงดันน้ำในแบบจำลองดินโดยการเขียนโปรแกรมจำลอง<br>ขึ้นมาจากสมการที่ 4.53.....                                                                                                      | 80   |
| 4.7 การการจำลองทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path)<br>ในแบบจำลองดินของ Pestana.....                                                                                          | 81   |
| 4.8 แบบจำลองดิน Pestana ในแบบที่ชั้นดินมีความลาดชัน.....                                                                                                                                      | 81   |
| 4.9 ผลลัพธ์จากการเขียนโปรแกรมขึ้นมาจากสมการแบบจำลองดิน Pestana<br>การเฉือนทางเดียวโดยชั้นดินมีความชันขนาดต่างๆ.....                                                                           | 82   |
| 4.10 แบบจำลองดิน Pestana ในกรณีที่ชั้นดินมีความชันและมีแรงเฉือนทางเดียว.....                                                                                                                  | 83   |
| 4.11 ความสัมพันธ์ค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่ได้จากการเขียนโปรแกรม<br>ที่ค่า $G_p$ ต่างๆ โดยแกน $y$ มีค่าเท่ากับ $\eta_i / \tan \psi$ และแกน $x$ เป็นค่าของความ<br>เครียดเฉือน ..... | 84   |
| 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนจากแบบจำลองดิน Pestana...                                                                                                               | 84   |
| 4.13 ความสัมพันธ์ค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่ได้จากการเขียนโปรแกรม<br>ที่ค่า $G_p$ ต่างๆ โดยแกน $y$ มีค่าเท่ากับ $\tau / \sigma_p$ และแกน $x$ เป็นค่าของความเครียดเฉือน.....         | 85   |
| 4.14 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนจากแบบจำลองดิน Pestana...                                                                                                               | 85   |
| 4.15 เส้นทางเดินของหน่วยแรงโดยที่มีการเฉือนทางเดียวโดยใช้สมการที่ 4.53<br>และมีการเฉือนแบบวัฏจักร.....                                                                                        | 87   |
| 4.16 เส้นทางเดินของหน่วยแรงในแบบจำลองดิน Pestana โดยใช้ค่า .....                                                                                                                              | 87   |

| ภาพประกอบที่                                                                                                                                             | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.17 เส้นทางเดินของหน่วยแรงโดยที่มีการเฉือนทางเดียวโดยใช้สมการที่ 4.53<br>และมีการเฉือนแบบวัฏจักรโดยใช้ค่า .....                                         | 88   |
| 4.18 เส้นทางเดินของหน่วยแรงในแบบจำลองดิน Pestana โดยใช้ค่า $\theta = 2.5$ .....                                                                          | 89   |
| 4.19 แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนแบบวัฏจักรจากโปรแกรม.....                                                                                      | 89   |
| 4.20 แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนแบบวัฏจักรจากแบบจำลองดิน Pestana.....                                                                          | 90   |
| 4.21 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน<br>จากการเขียนโปรแกรมโดยใช้สมการที่ 4.59 ที่ $\theta = 5$ .....                                   | 91   |
| 4.22 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน<br>จากการเขียนโปรแกรมโดยใช้สมการที่ 4.59 ที่ $\theta = 10$ .....                                  | 91   |
| 4.23 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรง(Effective stress path)<br>ในการเฉือนแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด (Strain control) เท่ากับ 5% .....  | 93   |
| 4.24 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรง(Effective stress path)<br>ในการเฉือนแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด (Strain control) เท่ากับ 10% ..... | 93   |
| 4.25 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรง(Effective stress path)<br>ในการเฉือนแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด (Strain control) เท่ากับ 20% ..... | 94   |
| 4.26 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงแรงดันน้ำส่วนเกิน ที่เกิดขึ้นในการเฉือนแบบวัฏจักร<br>ในกรณีที่ทำกรควบคุมความเครียด(Strain control) .....                    | 94   |
| 4.27 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในการเฉือนแบบวัฏจักร<br>ที่ควบคุมความเครียด(Strain control) เท่ากับ 5%.....                           | 95   |
| 4.28 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในการเฉือนแบบวัฏจักร<br>ที่ควบคุมความเครียด(Strain control) เท่ากับ 10%.....                          | 95   |
| 4.29 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในการเฉือนแบบวัฏจักร<br>ที่ควบคุมความเครียด(Strain control) เท่ากับ 20%.....                          | 96   |
| 4.30 ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในการเฉือนแบบวัฏจักร<br>ที่ควบคุมความเครียด(Strain control) เท่ากับ 20%, $\theta = 20$ .....          | 96   |
| 5.1 คุณสมบัติของชั้นดินที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบ.....                                                                                                  | 97   |
| 5.2 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft<br>ที่ชั้นผิวดิน.....                                                           | 98   |

|                                                                                                                               |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพประกอบที่                                                                                                                  | หน้า |
| 5.3 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างชั้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน.....                                   | 98   |
| 5.4 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน.....                                   | 99   |
| 5.5 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างชั้น ในคลื่น Taft ที่ชั้นผิวดิน.....                                             | 99   |
| 5.6 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมEdushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน .....                              | 100  |
| 5.7 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างชั้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน .....                             | 100  |
| 5.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1 .....       | 101  |
| 5.9 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1 .....        | 102  |
| 5.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1 ..... | 103  |
| 5.11 ค่าความเครียดเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา.....                                                               | 104  |
| 5.12 ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา.....                                                                 | 104  |
| 5.13 การเปรียบเทียบระหว่างความเค้นเฉือน กับ ความเครียดเฉือนซึ่งใช้แบบจำลองการคำนวณ Linear elastic model .....                 | 105  |
| 5.14 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน .....                                | 106  |
| 5.15 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างชั้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน .....                                | 106  |
| 5.16 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน .....                                | 107  |
| 5.17 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างชั้น ในคลื่น Treas ที่ชั้นผิวดิน.....                                           | 107  |
| 5.18 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมEdushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน .....                            | 108  |

| ภาพประกอบที่                                                                                                                   | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.19 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น<br>ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน .....                         | 108  |
| 5.20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งที่ได้จากโปรแกรม Edushake<br>กับโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1.....      | 109  |
| 5.21 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วที่ได้จากโปรแกรม Edushake<br>กับโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1.....      | 110  |
| 5.22 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรม Edushake<br>กับโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1..... | 111  |
| 5.23 ค่าความเครียดเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา.....                                                                | 112  |
| 5.24 ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา .....                                                                 | 112  |
| 5.25 การเปรียบเทียบระหว่างความเค้นเฉือน กับ ความเครียดเฉือน<br>ซึ่งใช้แบบจำลองการคำนวณ Linear elastic model .....              | 113  |
| 5.26 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake<br>ในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba ที่ชั้นผิวดิน .....                              | 114  |
| 5.27 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น<br>ในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba ที่ชั้นผิวดิน .....                              | 114  |
| 5.28 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake<br>ในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba ที่ชั้นผิวดิน .....                              | 115  |
| 5.29 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่น Yerba ที่ชั้นผิวดิน .....                                           | 115  |
| 5.30 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมEdushake<br>ในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba ที่ชั้นผิวดิน .....                          | 116  |
| 5.31 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น<br>ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน .....                         | 116  |
| 5.32 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งที่ได้จากโปรแกรม Edushake<br>กับโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1.....      | 117  |
| 5.33 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วที่ได้จากโปรแกรม Edushake<br>กับโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1.....      | 118  |
| 5.34 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรม Edushake<br>กับโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1..... | 119  |
| 5.35 ค่าความเครียดเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา.....                                                                | 120  |



| ภาพประกอบที่                                                                                                                                                           | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.36 ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา.....                                                                                                          | 120  |
| 5.37 การเปรียบเทียบระหว่างความเค้นเฉือน กับ ความเครียดเฉือน<br>ซึ่งใช้แบบจำลองการคำนวณ Linear elastic model.....                                                       | 121  |
| 6.1 ผลการเปรียบเทียบค่าของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน<br>ของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana .....                                        | 124  |
| 6.2 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน<br>ของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana<br>โดยการนำผลการทดลองมาพล็อตในกราฟเดียวกัน..... | 125  |
| 6.3 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดลอง<br>Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana<br>โดยการนำผลการทดลองมาในแนวแกน 1:1.....         | 125  |
| 6.4 ผลการเปรียบเทียบของแรงดันน้ำส่วนเกินและความเครียดเฉือน<br>ของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana .....                                       | 126  |
| 6.5 ผลการเปรียบเทียบของแรงดันน้ำส่วนเกินและความเครียดเฉือน<br>ของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana .....                                       | 126  |
| 6.6 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของ<br>การทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana<br>โดยการนำผลการทดลองมาในแนวแกน 1:1.....        | 127  |
| 6.7 ผลการเปรียบเทียบทางเดินของหน่วยแรง(Stress path)<br>ระหว่างการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana .....                                          | 128  |
| 6.8 ผลการเปรียบเทียบทางเดินของหน่วยแรง(Stress path)<br>ระหว่างการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana.....                                           | 128  |
| 6.9 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของ<br>การทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana.....                                            | 129  |
| 6.10 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของ<br>การทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana .....                                          | 130  |
| 6.11 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนของ<br>การทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana.....                                                             | 131  |

|                                                                                  |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพประกอบที่                                                                     | หน้า |
| 6.12 ผลการเปรียบเทียบของแรงดันน้ำส่วนเกินและจำนวนรอบของ                          |      |
| การทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana.....                   | 132  |
| 6.13 ผลการเปรียบเทียบของแรงดันน้ำส่วนเกินของ                                     |      |
| การทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana.....                   | 133  |
| 6.14 ผลการเปรียบเทียบค่าเปรียบเทียบทางเดินของหน่วยแรง(Stress path) ของ           |      |
| การทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana .....                  | 134  |
| 6.15 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนของ                                         |      |
| การทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana.....                   | 135  |
| 6.16 ลักษณะของชั้นดินกรุงเทพฯที่ความลึก 80 เมตร.....                             | 140  |
| 6.17 ความเร่งที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดิน.....             | 141  |
| 6.18 ความเร่งที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดินแบบ 1:1.....      | 141  |
| 6.19 ความเร็วที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดิน.....             | 142  |
| 6.20 ความเร็วที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดินแบบ 1:1.....      | 142  |
| 6.21 การเคลื่อนตัวที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดิน.....        | 143  |
| 6.22 การเคลื่อนตัวที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดินแบบ 1:1..... | 143  |
| 6.23 คาบของการเคลื่อนตัว (Period of motion).....                                 | 144  |
| 6.24 การเปรียบเทียบการความเร่งสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                  | 144  |
| 6.25 การเปรียบเทียบการความเร็วสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                  | 145  |
| 6.26 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน .....               | 145  |
| 6.27 การเปรียบเทียบการความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....             | 146  |
| 6.28 การเปรียบเทียบการความเครียดเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....           | 146  |
| 6.29 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร่งสูงสุด                |      |
| ของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร .....                                               | 147  |
| 6.30 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร็วสูงสุดของ             |      |
| ชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร .....                                                  | 147  |
| 6.31 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับการเคลื่อนตัวสูงสุดของ   |      |
| ชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร .....                                                  | 148  |

| ภาพประกอบที่                                                                                                      | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 6.32 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนแรงเฉือนสูงสุดกับความเค้นอัดสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆ.....                            | 148  |
| 6.33 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำส่วนเกินสูงสุดกับความเค้นอัดที่ตั้งแต่วิวดิน<br>จนถึงระดับความลึก 11 เมตร .....       | 149  |
| 6.34 เส้นทางเดินของความเค้นเฉือนที่ชั้นความลึก 0.5 เมตรจากผิวดิน.....                                             | 150  |
| 6.35 เส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน<br>ที่ชั้นความลึก 0.5 เมตรจากผิวดิน .....          | 151  |
| 6.36 เส้นทางเดินของความเค้นเฉือนที่ชั้นความลึก 6 เมตรจากผิวดิน.....                                               | 151  |
| 6.37 เส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน<br>ที่ชั้นความลึก 6 เมตรจากผิวดิน .....            | 152  |
| 6.38 เส้นทางเดินของความเค้นเฉือนที่ชั้นความลึก 11 เมตรจากผิวดิน.....                                              | 152  |
| 6.39 เส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน<br>ที่ชั้นความลึก 11 เมตรจากผิวดิน .....           | 153  |
| 6.40 ลักษณะชั้นดินที่ความหนา 30 เมตร.....                                                                         | 154  |
| 6.41 การเปรียบเทียบการความเร่งสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                                   | 154  |
| 6.42 การเปรียบเทียบการความเร็วสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                                   | 155  |
| 6.43 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                                 | 155  |
| 6.44 การเปรียบเทียบการความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                              | 156  |
| 6.45 การเปรียบเทียบการความเครียดเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                            | 156  |
| 6.46 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร่งสูงสุดของชั้นดิน<br>ที่ความลึก 30 เมตร .....           | 157  |
| 6.47 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร็วสูงสุดของชั้นดิน<br>ที่ความลึก 30 เมตร .....           | 157  |
| 6.48 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับการเคลื่อนตัวสูงสุด<br>ของชั้นดินที่ความลึก 30 เมตร ..... | 158  |
| 6.49 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นอัดสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆ.....                                    | 158  |
| 6.50 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำส่วนเกินสูงสุดกับความเค้นอัดที่ตั้งแต่วิวดิน<br>จนถึงระดับความลึก 11 เมตร .....       | 159  |
| 6.51 คาบของการเคลื่อนตัว(Period of motion) .....                                                                  | 159  |
| 6.52 ลักษณะของชั้นดินกรุงเทพที่ความลึก 80 เมตร .....                                                              | 161  |

| ภาพประกอบที่                                                                                                                                                     | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 6.53 การเปรียบเทียบการความเร่งสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                                                                                  | 162  |
| 6.54 การเปรียบเทียบการความเร็วสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                                                                                  | 162  |
| 6.55 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                                                                                | 163  |
| 6.56 การเปรียบเทียบการความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                                                                             | 163  |
| 6.57 การเปรียบเทียบการความเครียดเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน.....                                                                                           | 164  |
| 6.58 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร่งสูงสุดของชั้นดิน<br>ที่ความลึก 80 เมตร.....                                                           | 164  |
| 6.59 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร็วสูงสุดของชั้นดิน<br>ที่ความลึก 80 เมตร.....                                                           | 165  |
| 6.60 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับการเคลื่อนตัวสูงสุด<br>ของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร .....                                                | 165  |
| 6.61 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นเฉือนแรงอัดสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆ.....                                                                           | 166  |
| 6.62 คาบของการเคลื่อนตัว(Period of motion) .....                                                                                                                 | 166  |
| 6.63 การเปรียบเทียบการความเร่งสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน<br>ระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic .....                                                | 167  |
| 6.64 การเปรียบเทียบการความเร็วสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน<br>ระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic .....                                                | 167  |
| 6.65 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน<br>ระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic .....                                              | 168  |
| 6.66 การเปรียบเทียบการความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน<br>ระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic .....                                           | 168  |
| 6.67 การเปรียบเทียบการความเครียดเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน<br>ระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic .....                                         | 169  |
| 6.68 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร่งสูงสุด<br>ของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตรระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic.....              | 169  |
| 6.69 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร็วสูงสุด<br>ของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตรระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic.....              | 170  |
| 6.70 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับการเคลื่อนตัวสูงสุด<br>ของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตรระหว่างแบบจำลองดิน Pestana<br>และ Linear elastic..... | 170  |

|                                                                                                                                  |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพประกอบที่                                                                                                                     | หน้า |
| 6.71 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นอัดสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆ<br>ระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic ..... | 171  |
| 6.72 การเปรียบเทียบคาบของการเคลื่อนตัว(Period of motion) .....                                                                   | 171  |

## สัญลักษณ์

$\mu$  = กำลังรับน้ำหนักของวัสดุ (Rupture Strength)

$A$  = พื้นที่ที่เกิดการวิบัติ (Rupture area)

$\bar{D}$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นของรอยแตก (Displacement of rupture)

$A$  = ขนาดการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ผิวดิน (Maximum displacement)

$\Delta$  = ระยะความห่างจากศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว (Eccentric)

$M_L$  = ขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวตามนิยามของ Richer

$A_{100}$  = ขนาดสูงสุดของการเคลื่อนตัววัดด้วยเครื่องมือ Wood-Anderson Seismograph ที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวเป็นระยะทาง 100 กิโลเมตร

$T$  = คาบการเคลื่อนตัวของคลื่น P wave (Period)

$M_0$  = Seismic moment

$E$  = พลังงานในหน่วย ergs

$M_s$  = Surface wave magnitude

$M_w$  = Moment magnitude

$x(t)$  = การสั่นสะเทือนที่เป็น Irregular motion

$c_n$  = ขนาดของ Amplitude

$\phi_n$  = มุมแตกต่าง (Phase different)

$\omega_n$  = ความถี่เชิงมุม (Radius of frequency)

$T_d$  = ช่วงเวลาของการสั่นสะเทือน (Time)

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

$K$  = ค่า wave number =  $\left( \frac{\omega}{v_s} \right)$

$v_s$  = Shear wave velocity

$G$  = ค่า Shear modulus

$\tau$  = ค่า Shear stress

$\gamma$  = ค่า Shear strain

$K$  = ค่า wave number =  $\left( \frac{\omega}{v_s} \right)$

$\rho$  = ความหนาแน่นของชั้นดิน (Density)

$\xi$  = damping ratio

### สัญลักษณ์

$H$  = ระยะความลึกของชั้นดิน

$Z_s$  = ระยะความลึกของชั้นดิน

$Z_r$  = ระยะความลึกของชั้นหิน

$A_r, B_r$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) ของชั้นหิน

$A_s, B_s$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) ของชั้นดิน

$k_s, k_r$  = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$  ของชั้นดินและชั้นหินตามลำดับ

$\alpha'_z$  = complex impedance ratio

$V_{ss}$  = Shear wave velocity ในชั้นดิน

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

$\sigma_{x0}$  = หน่วยแรงของวัสดุ

$U$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวในทิศทางแกน x

$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$  = ความเร่งของอนุภาค

$\rho$  = ความหนาแน่นของวัตถุ

$\sigma_x$  = หน่วยแรงของวัสดุ

$u$  = การเคลื่อนตัวในแนวแกน x

$t$  = ระยะเวลา ของการสั่น (sec)

$\gamma_{i,n}$  = Strain ของชั้นดินที่ i เวลาที่ n

$\Delta z_i$  = ระยะห่างระหว่าง node

$d_{i,n}$  = การเคลื่อนตัว Displacement

$\Delta \gamma_{i,n}$  = การเปลี่ยนแปลง Strain ของชั้นดินที่ i เวลาที่ n

$V_{i,n}$  = ค่าความเร็ว Input velocity

$a_{i,n}$  = ค่าความเร่งเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว (acceleration)

$\Delta t$  = time step

$\rho_N$  = ความหนาแน่นชั้นหิน

$v_s$  = shear wave velocity ของชั้นหิน

$\eta$  = Material damping

$d_{i,n+1}$  = ระยะการเคลื่อนตัวของ Node i เวลา n

$\tilde{v}_{i,n+1}$  = Predict velocity Node i เวลา n+1

## สัญลักษณ์

$v_{i,n}$  = Output velocity

$a_{i,n}$  = Output acceleration

$\sigma_{i,j}$  = ค่าความเค้น (Stress)

$\varepsilon_{kl}$  = ค่าความเครียด (Strain)

$C_{ijkl}$  = Tensor อันดับที่ 4

$W_{ij}$  = Strain energy function

$l_{ijkl}$  = ค่าของมุม Cosine

$\tau_r$  = reversal stress หรือ Stress ย้อนกลับ

$\gamma_r$  = reversal strain หรือ Strain ย้อนกลับ

$R_i$  = Shear stress



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในขณะนี้แผ่นดินไหวในประเทศไทยมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเริ่มมีจำนวนและความถี่มากขึ้นรวมถึงขนาดที่มีขนาดใหญ่กว่าที่เคยมีการบันทึกไว้ในอดีตหลายครั้ง ประกอบกับการตื่นตัวที่เกิดจากแผ่นดินไหวในทะเล จนทำให้เกิดคลื่น ซึนามิ(Tsunami) ในปี 2547 ทำให้เกิดการตื่นตัวที่จะทำการระงับภัยพิบัติในรูปแบบใหม่ เพราะการเกิดภัยพิบัติที่มาในรูปแบบของแผ่นดินไหวนี้นั้นถ้าเปรียบเทียบกับต่างประเทศแล้ว ประเทศไทยได้รับผลกระทบน้อยมากในอดีต แต่ในปัจจุบันแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเริ่มมีผลกระทบมากขึ้นเรื่อยๆต่อประเทศไทย โดยจะเห็นได้จากศูนย์ตรวจวัดแผ่นดินไหวทั้งในภาคใต้ชายฝั่งทะเลอันดามัน ภาคตะวันตก และภาคเหนือ มีการรายงานถึงสภาพการเกิดแผ่นดินไหว โดยมีจุดศูนย์กลางของการเกิดไม่ห่างจากตัวเมืองใหญ่ๆที่อยู่ในประเทศไทยมากนัก โดยบางครั้งอาจจะอยู่ไม่กี่ร้อยกิโลเมตรเท่านั้นเอง

ดังนั้นทั้งภาครัฐและเอกชนจึงต้องเข้ามาทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น รวมถึงทำการป้องกันและทำนายถึงการเกิดว่ามีผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้างที่มีอยู่อย่างไรบ้าง โดยมีทั้งการเริ่มที่จะมีการตรวจวัดหรือทำนายล่วงหน้าถึงการเกิดแผ่นดินไหว การเฝ้าระวังที่เพิ่มขึ้นกับโครงสร้าง

การหลุดตัวที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่มีอยู่แล้ว และการทำการออกแบบโครงสร้างที่กำลังจะทำการก่อสร้างขึ้นมาโดยรวมปัจจัยที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงของแผ่นดินไหวเข้าไปด้วย

โดยในบริเวณกรุงเทพมหานครนี้นั้นถ้าได้ทำการสำรวจถึงชั้นดินจะพบว่า เป็นชั้นดินที่ประกอบไปด้วยดินเหนียวอ่อนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งบ่งบอกให้เห็นถึงสภาพการต้านแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกในตัวดินนั้นมีขนาดที่น้อยอยู่แล้ว ซึ่งถ้าเกิดแรงที่มีขนาดมากๆ และเกิดอย่างฉับพลัน เช่นแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวด้วยแล้ว อาจจะทำให้โครงสร้างที่อยู่บนชั้นดินนั้นได้รับความเสียหายมากได้

ความสำคัญนี้ยังผลให้เกิดการวิจัยที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวต่อชั้นดินเหนียวอ่อนในกรุงเทพ รวมถึงการวิเคราะห์จากข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีอยู่ แล้วนำมาทำนายถึงพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นกับดินเหนียวอ่อน

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในการทำนายถึงลักษณะพฤติกรรมของดินที่เกิดจากแผ่นดินไหวนั้นเป็นแนวทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและเป็นวิธีที่มีความสะดวกรวดเร็ว และมีความถูกต้องแน่นอนที่อยู่ในขอบเขตที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากในระดับที่ยอมรับได้ อีกทั้ง

เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ประหยัดคุ่มค่าต่อการลงทุน จึงทำให้การนำการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการทำนายผลที่เกิดจากแผ่นดินไหวเป็นที่แพร่หลายมาก โดยองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชนส่วนใหญ่ก็ได้ใช้วิธีนี้กันหมดแล้วในปัจจุบัน

ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้นั้นได้จัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับดินเหนียวอ่อนโดยใช้การออกแบบซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ขึ้นมาใช้ในการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมดิน (Soil Model) แบบต่างๆที่เกิดขึ้นกับดินเหนียว มาทำนายถึงการทรุดตัวทั้งในแนวดิ่ง และแนวนอนกับชั้นดิน ทำนายถึงปริมาณแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น แรงดันดินประสิทธิผล หาค่าความเค้น ความเครียด และความเร่งในดินเนื่องจากการแพร่กระจายจากคลื่น เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในดินดินเหนียวอ่อน

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินอันเนื่องมาจากคลื่นแผ่นดินไหวที่ผ่านมานั้นมีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลายโปรแกรมได้แก่

1. โปรแกรม CHARSOIL ใช้แบบจำลองดิน (soil model) ของ Ramberg-Osgood อ้างอิงจาก Streeter et al.(1973)
2. โปรแกรม DESRA-2 ใช้แบบจำลองดิน Hyperbolic อ้างอิงจาก Lee and Fin(1978)
3. โปรแกรม DYNA1D ใช้แบบจำลองดิน Nested yield surface อ้างอิงจาก Prevost(1989)
4. โปรแกรม MASH ใช้แบบจำลองดินของ Martin-Davidenkov อ้างอิงจาก Martin and Seed (1978)
5. โปรแกรม NONLI3 ใช้แบบจำลองดิน Iwan-type อ้างอิงจาก Joyner(1977)
6. โปรแกรม TESS1 ใช้แบบจำลองดิน HDCP อ้างอิงจาก Pyke(1985)
- 7 โปรแกรม Edushake มีแบบจำลองดินให้เลือก ผลิตโดยบริษัท Edupro civil system ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์

โดยในการวิจัยในครั้งนี้เลือกที่จะทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake จะมีการเปรียบเทียบค่าของผลที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมาเทียบกับโปรแกรม Edushake โดยใช้ขนาดและค่า Parameter เป็นค่าเดียวกัน ซึ่งในโปรแกรม Edushake ใช้การคำนวณวิธี Transfer function เป็นวิธีที่ได้ผลการคำนวณที่รวดเร็วและได้ผลลัพธ์เฉพาะชั้นผิวดินและระหว่างชั้นดินเท่านั้น (โดยวิธีการทำงานดูได้จากรูปที่ 1.1) อาจจะไม่ครอบคลุมถึงทุกความต้องการนั้นคือ ในบางครั้งในผู้ใช้ต้องการค่าผลคำตอบซึ่งอยู่ที่ความลึกใดความลึกหนึ่งนอกจากนั้นในบางครั้งผู้ใช้

ต้องการที่จะเลือกใส่แบบจำลองดินแบบที่ผู้ใช้นั้นมีข้อมูลอยู่ก็สามารถที่เลือกใส่ได้ในโปรแกรมที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น โปรแกรมที่ทำการประดิษฐ์ขึ้นนั้น ใช้วิธีการคำนวณ ผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference) ซึ่งใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่ต่างจากเดิมคือ สมการการสั่นของคลื่นแผ่นดินไหวในการทำวิจัยในครั้งนั้นได้ทำการรวมพจน์ความหนืดของชั้นดิน อันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวเข้าไปด้วย ซึ่งทำให้มีความครอบคลุมในคำตอบของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ให้ใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริงยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้การกล่าวในลำดับต่อไป

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

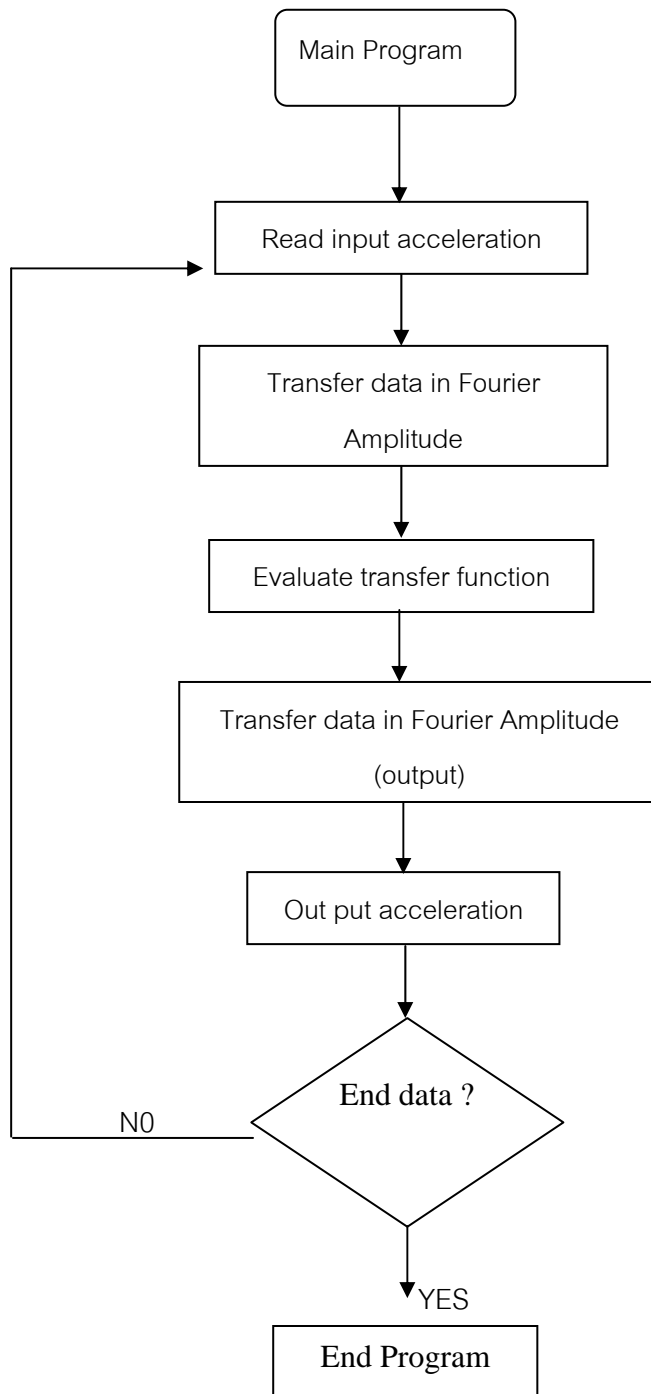
- 1 เพื่อพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหว 1 มิติ
- 2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองดินเหนียวอย่างง่าย สำหรับปัญหาคลื่นแผ่นดินไหว 1 มิติ (1D-Cyclic Model)
- 3 ประยุกต์แบบจำลองดินเหนียวที่พัฒนาขึ้นกับชั้นดินกรุงเทพและศึกษาผลการวิเคราะห์ที่ได้

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1 พัฒนาโปรแกรมโดยใช้วิธีการผลจำกัดแบบสี่เหลี่ยม (Finite difference)
- 2 ใช้วิธีการออกแบบวิธีการคำนวณเชิงเส้น (Linear Analysis) และไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis)
- 3 ใช้แบบจำลองพฤติกรรมดิน (Soil Model) เหนียวอ่อน ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 ทำให้ถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับดินเหนียวอ่อน หลังเกิดแผ่นดินไหว เช่นค่า อัตราการเคลื่อนตัว อัตราความเร่ง ความเร็ว ค่าความเค้น และความเครียด ในดินเหนียวอ่อน
- 2 นำค่าที่ได้จากการคำนวณไปใช้ในการออกแบบ และศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อน
- 3 สามารถนำค่าของความเร่งที่เคยได้บันทึกการสั่นไหว มาจำลองลงในซอฟต์แวร์ เพื่อทำนายผลที่เกิดขึ้นกับดินที่กำลังศึกษาอยู่ได้



รูปที่ 1.1 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม Edushake

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นจะแสดงรายละเอียดของทฤษฎีที่ใช้ทั้งหมดรวมถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดคลื่นแผ่นดินไหว และทฤษฎีในการออกแบบโปรแกรมคำนวณการตอบสนองของชั้นดินอันเนื่องมาจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยมีทั้งวิธีดั้งเดิมที่ใช้คือ Transfer function และวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ความเป็นมาของการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแผ่นดินไหว

ในการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นแผ่นดินไหวนั้นมีการบันทึกไว้ 3000 ปี ในประเทศจีนที่ทำการศึกษาและหลังจากนั้น 1600 ปีก็ได้มีการสำรวจว่าประเทศญี่ปุ่นได้มีการบันทึกเกี่ยวกับการเกิดแผ่นดินไหวไว้เช่นกัน ส่วนในเวลาปัจจุบันนั้นได้มีการบันทึกเกี่ยวกับแผ่นดินไหวครั้งแรกที่สหรัฐอเมริกา ซึ่งทำการบันทึกไว้ 350 ปี จากช่วงเวลาปัจจุบัน ซึ่งสาเหตุหลักของการเกิดแผ่นดินไหวนั้นจากการศึกษาเกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก ซึ่งแผ่นเปลือกโลกนั้นมีทั้งหมด 10 แผ่น ได้แก่ Eurasia Plate, Australia Plate, Philippine Plate, Pacific Plate, Antarctic Plate, Nazca Plate, North America Plate, Caribbean Plate, South America Plate และ Africa Plate การที่เกิดการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกนั้นก็เกิดจากการปรับระดับความสมดุลของของเหลวร้อนซึ่งอยู่ใต้เปลือกโลก เมื่อเกิดการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก ก็จะทำให้เกิดคลื่นแผ่นดินไหวตามมา โดยคลื่นแผ่นดินไหวจะเคลื่อนที่มายังผิวดินซึ่งประกอบไปด้วย

2.1.1 **คลื่นแรงเฉือน (Shear wave) หรือ S-wave** เป็นคลื่นที่มีลักษณะของการเคลื่อนตัวตั้งฉากกับอนุภาคตัวกลางที่เกิดการสั่น โดยคลื่นชนิดนี้นั้นจะเกิดขึ้นไม่ลึกมากจากผิวดิน เช่น อาจจะทำให้บริเวณ Crust and mantle ของชั้นเปลือกโลก คลื่นแรงเฉือนนี้เป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแผ่นดินไหว Body wave

2.1.2 **คลื่นแรงอัด (Compression wave) หรือ P-wave** เป็นคลื่นที่มีลักษณะของการเคลื่อนตัวขนานกับอนุภาคตัวกลางที่เกิดการสั่น คลื่นชนิดนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในบริเวณชั้นในของเปลือกโลก เช่น ชั้น Inner core และ Outer core และเป็นส่วนหนึ่งของคลื่น Body wave เช่นเดียวกับ คลื่นแรงเฉือน

## 2.2 ความรุนแรงและขนาดของแผ่นดินไหว(Earthquake magnitude)

การวัดความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวนั้นมีด้วยกันหลายมาตราโดยมีการวัดความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวในช่วง 60 ปีที่ผ่านมา ซึ่งมีหลายระบบ หลายมาตราที่ใช้ ดังนี้

### 2.2.1 Seismic moment

การประมาณพลังงานที่ออกมาจากการเกิดแผ่นดินไหวแบบ Seismic moment นั้นทำได้โดยการคำนวณซึ่งมีสูตร คือ

$$M_0 = \mu A \bar{D} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\mu$  = กำลังรับน้ำหนักของวัสดุ (Rupture Strength)

$A$  = พื้นที่ที่เกิดการวิบัติ (Rupture area)

$\bar{D}$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นของรอยแตก

การวัดพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวด้วยวิธีนี้นั้น เป็นการวัดในรูปแบบของค่าของงาน คือ มีการนำค่าของ แรงและระยะทางเข้ามาใช้ในการคำนวณและที่สำคัญสามารถวัดได้ในความถี่ต่ำซึ่งเป็นความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 1-10 Hz

### 2.2.2 Surface wave magnitude

การคำนวณค่าความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวด้วยวิธี Surface wave magnitude เป็นการคำนวณที่สามารถหาขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของการเกิดได้ โดย Richer and Gutenberg (1936) ได้เสนอสูตรการคำนวณไว้ คือ

$$M_s = \log_{10} A + 1.66 \log_{10} \Delta + 2.0 \quad (2.2)$$

โดยที่  $A$  = ขนาดการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ผิวดิน

$\Delta$  = ระยะความห่างจากศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว

ค่าของ  $M_s$  นั้นเป็นค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นในชั้นผิวดินดังนั้นจึงสามารถใช้ในการคำนวณการเกิดการเคลื่อนตัวที่ผิวดินได้ แต่ใช้ได้กับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความลึกไม่เกิน 70.0 กิโลเมตร และมีระยะความห่างจากจุดศูนย์กลางของการเกิดแผ่นดินไหวมากกว่า 1000 กิโลเมตร

### 2.2.3 Richer local magnitude

ในปี 1935 Charles Richer (Richer 1935) ได้เสนอการประมาณขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว ที่อยู่ที่ระดับตื้นๆ และมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไม่เกิน 600 กิโลเมตร โดยมีขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว คือ

$$M_L = \log_{10} A_{100} \quad (2.3)$$

โดยที่  $M_L$  = ขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวตามนิยามของ Richer

$A_{100}$  = ขนาดสูงสุดของการเคลื่อนตัววัดด้วยเครื่องมือ Wood-Anderson Seismograph ที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหวเป็นระยะทาง 100 กิโลเมตร

### 2.2.4 Body wave magnitude

ในการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวที่มีศูนย์กลางการเกิดในบริเวณที่มีความลึกมากๆ Gutenberg (1945) ได้เสนอวิธีหาขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งมักจะทำการวัดจากคลื่น P-wave โดยมีสูตรคือ

$$m_b = \log_{10} A - \log_{10} T + 0.01\Delta + 5.9 \quad (2.4)$$

โดยที่ A = ขนาดสูงสุดของคลื่น P-wave

T = คาบการเคลื่อนตัวของคลื่น P wave

### 2.2.5 Moment magnitude

จากการคำนวณทั้งหมดที่ผ่านมาจะพิจารณาจากหลักของการเคลื่อนตัวทั้งหมด ซึ่งจากการศึกษาในระยะหลังนั้นพบว่า อัตราการปลดปล่อยของพลังงานนั้นไม่สัมพันธ์กับการเคลื่อนตัว นั่นคือ ในกรณีที่เกิดคลื่นแผ่นดินไหวใหญ่ๆ นั้นชั้นดิน อาจจะไม่มีการเคลื่อนตัวที่มาก เหมือนกับที่ทำการคำนวณในวิธีที่ผ่านมา ซึ่งจากปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้ Kanamori(1977) ได้ทำการศึกษาและเสนอสูตรการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของคลื่นแผ่นดินไหว ที่เรียกว่า Moment magnitude ดังสมการ

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 10.7 \quad (2.5)$$

โดยที่  $M_0$  = Seismic moment

### 2.3 พลังงานของคลื่นแผ่นดินไหว (Earthquake Energy)

จากหัวข้อที่ผ่านมาการคำนวณขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว สามารถนำมาทำการคำนวณพลังงานที่เกิดขึ้นจากคลื่นแผ่นดินไหวได้ ซึ่งเสนอไว้โดย (Gutenberg and Richter, 1965)

$$\log_{10} E = 11.8 + 1.5M_s \quad (2.6)$$

โดยที่ E = พลังงานในหน่วย ergs

$M_s$  = Surface wave magnitude

ซึ่งสมการที่ 2.6 สามารถนำไปประยุกต์กับสมการของ Kanamori(1977) ได้คือ

$$\log_{10} E = 11.8 + 1.5M_w \quad (2.7)$$

โดยที่ E = พลังงานในหน่วย ergs

$M_w$  = Moment magnitude

จากการคำนวณพลังงานที่แผ่นดินไหวปล่อยออกมา นั้นทำให้ทราบว่า คลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่า Moment magnitude เท่ากับ 5 นั้นมีขนาดเป็น 0.001 เท่าของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดของ



ค่า Moment magnitude กับ 7 ตารางที่ 2.1 แสดงความถี่ของการเกิดคลื่นแผ่นดินไหว เทียบกับขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว

ตารางที่ 2.1 ความถี่ของการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวขนาดต่างๆ

| Description | Moment Magnitude | Average occurrence |
|-------------|------------------|--------------------|
| Great       | สูงกว่า 8        | 1                  |
| Major       | 7-7.9            | 17                 |
| Strong      | 6-6.9            | 134                |
| Moderate    | 5-5.9            | 1319               |
| Light       | 4-4.9            | 13000              |
| Minor       | 3-3.9            | 130000             |
| Very minor  | 2-2.9            | 1300000            |

## 2.4 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน (Ground response)

ในแต่ละเวลาเปลือกโลกมีการเคลื่อนตัวอยู่ตลอดเวลา อาจจะมีขนาดของการเคลื่อนตัวที่มากน้อยต่างกัน บางครั้งเป็นการเคลื่อนตัวที่ไม่อาจจะรู้สึกได้ (Micro-seismic activities) ส่วนใหญ่วิศวกรจะให้ความสำคัญไปที่การเคลื่อนตัวขนาดใหญ่ (Strong ground motion) จะมีผลทำให้เกิดคลื่นแผ่นดินไหวได้ การตอบสนองของชั้นดินเนื่องคลื่นแผ่นดินไหวจะมีในลักษณะ 3 ทิศทาง และข้อมูลที่ได้จากการวัดจากคลื่นแผ่นดินไหวจะมีจำนวนข้อมูลเกิดขึ้นเป็นเป็นจำนวนมาก เช่น กราฟความเร่งที่เกิดขึ้น บางครั้งจะมีจำนวนข้อมูลประมาณ 2000-3000 ข้อมูล ในทุกๆ 0.02 วินาที ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นนั้นมีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันเช่น การวิเคราะห์ด้วยวิธี Amplitude parameters, Frequency content parameters , Duration parameter ,Transfer function, Finite difference

### 2.4.1 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธี Amplitude parameters

การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธี Amplitude parameter เป็นการวิเคราะห์ที่นำผลของข้อมูลที่เกิดขึ้นเนื่องจากกราฟ ความเร่งกับเวลา ซึ่งเมื่อนำกราฟความเร่งกับเวลาที่ได้ทำการอินทิเกรต จะได้ข้อมูลของความเร็ว และเมื่อทำการอินทิเกรตข้อมูลของความเร็วกับเวลา จะได้ข้อมูลของการเคลื่อนตัวกับระยะทาง จะเห็นได้ว่ากราฟความเร่งจะประกอบไปด้วยคลื่นที่มี

ความถี่สูง ในขณะที่กราฟความถี่ต่ำจะประกอบด้วยกราฟระยะการเคลื่อนตัว โดยสามารถกำหนดขนาดของตัวแปรได้ดังนี้

#### 2.4.1.1 ความเร่งสูงสุด (Peak acceleration)

การหาค่าความเร็วสูงสุดในแนวราบนั้นทำได้โดยการนำความเร่งที่เกิดขึ้นจากคลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย 2 ทิศทาง คือในแนวราบและในแนวตั้ง ค่าความเร่งสูงสุดในแนวราบ (PHA, Peak Horizontal ground Acceleration) ได้จากการรวมผลแบบเวกเตอร์สูงสุดที่เกิดขึ้นจากคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 2 ทิศทาง ค่า PHA ได้รับความนิยมในการใช้เป็นตัวแทนในการสันสะเทือน เพราะค่า PHA ส่งผลโดยตรงกับแรงเฉื่อยที่กระทำกับโครงสร้าง และ ค่า PHA ยังส่งผลโดยตรงกับค่าความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Earthquake intensity)

ในการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวนั้นความเร่งในแนวตั้งมักจะไม่ทำความเสียหายให้กับโครงสร้าง เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างมักจะมีพิสัยความปลอดภัยตามแนวโน้มถ่วงของโลกที่สูงอยู่แล้ว ทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นในแนวตั้งได้ค่อนข้างดี ส่วนมากค่าความเร่งสูงสุดในแนวตั้ง (PVA, Peak Vertical ground Acceleration) จะมีค่า 2 ใน 3 ของความเร่งสูงสุด PHA ในแนวราบ และการสันสะเทือนที่มีค่า PHA สูงๆมักจะทำให้เกิดความเสียหายมากกว่าคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่า PHA ต่ำๆ แต่ถ้าค่า PHA เกิดเพียงช่วงเวลาสั้นๆหรือมีความถี่น้อย ก็อาจจะไม่ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น การพิจารณาถึงค่า PHA ในบางกรณีจึงยังไม่ถูกต้องนัก

#### 2.4.1.2 ความเร็วสูงสุด(Peak velocity)

ในการพิจารณาความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอินทิเกรตกราฟของความเร่งกับเวลานั้น การพิจารณาค่าความเร็วสูงสุดในแนวราบ(PHV, Peak Horizontal Velocity) นั้นเหมาะสำหรับการพิจารณากับโครงสร้างที่มีความถี่ธรรมชาติในช่วงความถี่ปานกลาง ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการพิจารณาด้วยค่า PHA

#### 2.4.1.3 Sustained maximum acceleration and velocity

ในการเกิดคลื่นแผ่นดินไหว ในปี 1972 ที่ Stone canyon (M=4.6) เปรียบเทียบกับเหตุการณ์ที่ Koyona 1967 (M=6.5) นั้นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่ Stone canyon ให้ค่า PHA ของแผ่นดินไหวที่มากกว่า ที่ Koyona แต่ผลของเหตุการณ์ที่ 2 นั้นก่อให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงกว่า

ดังนั้น Nuttli(1979) เสนอให้ใช้ค่าของความเร่ง สูงสุดที่มีจำนวนรอบการเกิด 3-5 รอบ เป็นตัวแทนของขนาดแผ่นดินไหว โดยเรียกว่า Sustain maximum acceleration อย่างไรก็ตามวิธีการคำนวณด้วยวิธีนี้นั้นมีความยุ่งยากกว่า วิธีที่ทำการคำนวณด้วยวิธี PHA,PHV อย่างมาก แต่วิธีนี้นั้นก็มีประสิทธิภาพมากกว่าการคำนวณด้วยวิธี PHA,PHV

#### 2.4.1.4 Effective design acceleration

ในการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่สูงนั้น ส่วนมากความถี่ที่ มากกว่า  $8 \text{ H}_z$  นั้นจะไม่ค่อยมีผลมากนักกับโครงสร้าง ดังนั้น Benjamin and associates (1988) ได้เสนอให้กรองเอาคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่มากกว่า  $8 \text{ H}_z$  ออกก่อนแล้วทำการคำนวณหาค่า PHA, PHV ส่วน Kenedy (1980) ได้เสนอให้ใช้ความเร่งประสิทธิผล (Effective design acceleration) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.25 เท่าของความเร่งสูงสุด

#### 2.4.2 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีส่วนประกอบของความถี่ Frequency content parameters

จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ในแบบ Single degree of freedom นั้นทำให้ทราบว่า การสั่นสะเทือนของโครงสร้างนั้นมีความถี่ในการสั่นที่ต่างกันออกไป แรงกระทำเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวนั้นเกิดจากการกระทำของความถี่ที่หลายความถี่ผสมกันไป ดังนั้นการศึกษาทั้งด้านองค์ประกอบของความถี่จึงมีความสำคัญอย่างสูงที่จะนำไปใช้ในการกำหนดคุณสมบัติของแผ่นดินไหวนั้นๆ

##### 2.4.2.1 Fourier spectrum of ground motion

กราฟการสั่นสะเทือนสามารถกระจายให้อยู่ในรูปความถี่สม่ำเสมอได้โดยการใช้ฟังก์ชัน Fourier โดยมีสมการดังนี้

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (2.8)$$

โดยที่  $x(t)$  = การสั่นสะเทือนที่เป็น Irregular motion

$c_n$  = ขนาดของ Amplitude

$\phi_n$  = มุมแตกต่าง (Phase different)

$\omega_n$  = ความถี่เชิงมุม

การใช้อนุกรม Fourier เข้ามาในการคำนวณนั้นมีประโยชน์มาก โดยเฉพาะการคำนวณในลักษณะไม่เชิงเส้น ได้มีการใช้คลื่น Harmonic จากอนุกรม Fourier ในการวิเคราะห์แบบ Single degree of freedom แล้วจึงนำผลที่ได้มารวมกันแบบ Super position ทำให้วิศวกรสามารถที่จะทำการคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างต่อคลื่นการสั่นสะเทือนได้ วิธีนี้ยังคงเป็นที่นิยมใช้ในการคำนวณการตอบสนองของโครงสร้างในเชิงเส้น

จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรม Fourier แล้วได้ผลลัพธ์เป็นคลื่น Harmonic นั้น หากนำผลของขนาด (Amplitude,  $c_n$ ) มาเขียนกราฟสัมพันธ์กับความถี่ซึ่งจะได้กราฟ Fourier amplitude spectrum หากนำค่าของมุมแตกต่าง  $\phi_n$  มาเขียนกราฟสัมพันธ์กับความถี่ก็จะทำให้ได้กราฟ Fourier phase spectrum เป็นแผนภูมิที่แสดงการกระจายของ amplitude ของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งบอกทั้งขนาดและส่วนประกอบของคลื่นสั่นสะเทือน

#### 2.4.2.2 Power spectrum

การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้นั้นเหมาะสมกับการวิเคราะห์เชิงสถิติ (Clough and Penzien, 1975) โดยที่ค่า Power spectrum ที่ความถี่หนึ่งๆ สามารถหาได้จากคลื่น Harmonic ( $c_n$ ) ที่ได้จาก การกระจายอนุกรม Fourier ดังนี้

$$G(\omega) = \frac{1}{\pi T_d} c_n^2 \quad (2.9)$$

โดยที่  $T_d$  = ช่วงเวลาของการสั่นสะเทือน

### 2.4.2.3 Response spectra

Response spectra เป็นวิธีการแจกแจงคลื่นความถี่ที่หาผลการตอบสนองสูงสุดจากคลื่นแผ่นดินไหว ของระบบ Single degree of freedom โดยแสดงผลออกมาในรูปของ ความเร่ง, ความเร็ว, และการเคลื่อนตัว กับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้นั้นทำให้ทราบว่า สิ่งปลูกสร้างที่มีความถี่ธรรมชาติที่ต่ำๆ เช่น สิ่งปลูกสร้างที่มีความสูงไม่มาก จะได้รับผลกระทบจากคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่ต่ำกว่า สิ่งปลูกสร้างที่มีความสูงมาก เช่น อาคารสูงทั่วไป จะได้รับผลกระทบมาก ดังนั้นเมื่อเกิดแผ่นดินไหว ผู้ที่อาศัยอยู่บนอาคารสูงจะรู้สึกได้ถึง การเคลื่อนตัวของอาคารแบบการโยกตัว ในขณะที่ผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคารที่มีความไม่สูงมากจะรับรู้ได้ถึง การสั่นสะเทือนที่มีความถี่มากกว่า

ซึ่งที่กล่าวมานี้จะมีผลต่อการตอบสนองนั้นคืออาคารสูงจะมีการตอบสนองที่มากกว่า อาคารที่มีความสูงไม่มาก เช่น บ้าน ซึ่งการตอบสนองที่เห็นได้ชัดเจนในที่นี้คือ การเคลื่อนตัว โดยอาคารสูงจะมีการเคลื่อนตัวที่มากกว่า ในการเกิดการตอบสนองคลื่นแผ่นดินไหวแบบเดียวกัน ซึ่งตรงจุดนี้มีอันตรายเป็นอย่างมากต่อตัวอาคารเอง

### 2.4.2.4 Spectral parameters

จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยวิธีต่างๆจะเห็นได้ว่า Fourier spectrum และ Power spectrum จะสามารถอธิบายพฤติกรรมของคลื่นแผ่นดินไหวได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ Response spectrum ไม่ได้แสดงถึงคุณสมบัติของคลื่นแผ่นดินไหวโดยตรง แต่บ่งชี้ถึงการตอบสนองของโครงสร้างที่มีต่อคลื่นแผ่นดินไหวมากกว่า ซึ่งกราฟข้อมูล Spectrum มีข้อมูลเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเพื่อความสะดวกในการเลือกใช้ข้อมูลจึงมีการอธิบายการแปรผลดังนี้

#### 1 Predominant period, $T_p$

เป็นค่าตัวแทนของกราฟ Spectrum ค่าหนึ่งที่มีประโยชน์มาก ถึงแม้ว่าวิธีการกำหนด Predominant period จะทำได้ค่อนข้างยาก โดยที่  $T_p$  ได้แก่กราฟการสั่นสะเทือนที่ ให้ค่าสูงสุด จากกราฟ Fourier amplitude spectrum จะเห็นได้ว่า Fourier amplitude spectrum มักจะประกอบไปด้วยจุดยอดหลายจุด ทำให้ยากต่อการกำหนดค่า  $T_p$  โดยทั่วไปมักจะทำการเฉลี่ยและทำการปรับกราฟให้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งค่า  $T_p$  มีประโยชน์ในกรณีที่คลื่นมีส่วนประกอบของ Amplitude ที่มีค่าต่างกันมากๆ

## 2 Bandwidth

จากที่กล่าวมาแล้วนั้น ค่า  $T_p$  ไม่สามารถสื่อถึงการกระจายของคลื่นการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่างกันมากๆ ได้ดังนั้นจึงมีการเสนอให้ใช้ค่า Bandwidth ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ในการอธิบายการกระจายตัวของคลื่นการสั่นสะเทือน Bandwidth เป็นตัวเลขที่บอกช่วงของค่าความถี่ Fourier amplitude ที่มีค่าตั้งแต่  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  ของค่า Fourier amplitude

### 2.4.2.5 ค่าอัตราส่วนระหว่าง $\frac{v_{\max}}{a_{\max}}$

จากกราฟความเร็วสูงสุดและความเร่งสูงสุด นั้นจะเกิดที่ความถี่ไม่เท่ากัน หรืออีกนัยหนึ่ง ค่า  $T_p$  ของ Acceleration และ Velocity spectrum มีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างความเร็วสูงสุดต่อความเร่งสูงสุด ( $\frac{v_{\max}}{a_{\max}}$ ) จึงสามารถให้เป็นตัวชี้ส่วนประกอบทางความถี่ของการสั่นสะเทือนได้ (Newmark, 1973 และ Seed, 1976) ในกรณีของคลื่น Harmonic เช่น คลื่นรูปไซน์ค่า  $\frac{v_{\max}}{a_{\max}}$  จะมีค่าเท่ากับ  $\frac{T}{2\pi}$  โดยที่ T คาบของการสั่นสะเทือน Seed and Idriss (1982) พบว่าการประมาณค่า  $T_p$  ด้วยวิธีนี้มักจะให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง แต่ก็สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินรูปแบบของคลื่นในขั้นต้นได้ โดยได้เสนอค่า  $\frac{v_{\max}}{a_{\max}}$  ที่ได้คลื่นแผ่นดินไหวที่ห่างจากจากสถานีตรวจวัดไม่เกิน 50 กิโลเมตร ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 ค่าประมาณของค่า  $\frac{v_{\max}}{a_{\max}}$  ที่ตรวจวัด ณ สถานีตรวจวัดที่ห่างจากการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวไม่เกิน 50 กิโลเมตร

| สภาพดินที่สถานีตรวจวัด             | $V_{\max}/a_{\max}$ (วินาที) | $2\pi(V_{\max}/a_{\max})$ วินาที |
|------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| ชั้นหิน                            | 0.056                        | 0.35                             |
| ชั้นดินแข็งที่อยู่ลึกกว่า 60 เมตร  | 0.112                        | 0.70                             |
| ชั้นดินแข็งที่อยู่ตื้นกว่า 60 เมตร | 0.138                        | 0.87                             |

### 2.4.3 ตัวแปรทางด้านระยะเวลาของการสั่นสะเทือน (Duration)

ระยะเวลาของการสั่นสะเทือนมีผลกระทบอย่างสูงต่อการพังทลายของโครงสร้าง โดยที่ระยะเวลาของการกระทำนั้นจะมีผลต่อการกระทำซ้ำของแรงที่กระทำ โดยที่การสั่นสะเทือนที่มีระยะเวลาน้อยนั้นจะมีรอบการกระทำของแรงที่น้อยกว่าตามไปด้วย เช่นการเกิดปรากฏการณ์ Liquid faction เกิดเมื่อดินอยู่ในสภาวะที่มีความเครียดเฉือนสูง และมีรอบการกระทำซ้ำของแรงมีมาก และการสั่นสะเทือนสูงๆที่มีระยะเวลาของการสั่นสะเทือนน้อยนั้นก็ไม่อาจทำให้โครงสร้างเกิดการพังทลายเสียหายได้ ดังนั้นระยะเวลาของการสั่นสะเทือนจึงมีผลอย่างมากต่อการพังทลายของโครงสร้าง ระยะเวลาของการสั่นสะเทือนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความยาวของแนววิถีของชั้นเปลือกโลก(Fault rupture) ดังนั้นระยะเวลาของการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของแผ่นดินไหว (เพิ่มขึ้นตามขนาดของแผ่นดินไหว) Hank and McGuire (1981) ได้เสนอว่า ระยะเวลาของการสั่นสะเทือนมีค่าแปรตามรากที่สามของค่า  $M_0$  (Seismic moment)

การคำนวณเพื่อหาระยะเวลาของการสั่นสะเทือนจากกราฟแสดงการสั่นสะเทือนที่ตรวจจากสถานีตรวจหนึ่งค่อนข้างยาก ทั้งนี้เพราะเครื่องมือแต่ละชนิด จะเริ่มและหยุดบันทึกไว้ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งโดยมากจะยาวกว่าการสั่นสะเทือนที่มีความสำคัญในทางวิศวกรรม (Bracketed duration) ในการกำหนดระยะเวลาของการสั่นสะเทือน (Bolton, 1969) โดยกำหนดให้ระยะเวลาการสั่นสะเทือนมีค่าเท่ากับช่วงความเร่งไม่เกิด 0.05 เป็นครั้งแรกและครั้งสุดท้าย (Bore, 1983) ใช้ค่า Corner period (หรือส่วนกลับของ Corner frequency) จากการกระจายการสั่นสะเทือนตามอนุกรมฟูเรียร์ เป็นระยะเวลาการสั่นสะเทือน เมื่อเปรียบเทียบวิธีของ Bolton และ Bore นั้นจะเห็นว่าการใช้ Bracket duration จะให้ค่าการสั่นสะเทือนที่ยาวนานกว่า อย่างไรก็ตามวิธี Bracket duration เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม ตารางที่ 2.3 แสดงระยะเวลาการสั่นสะเทือนที่ได้จากการวัดการเกิดคลื่นแผ่นดินไหว ที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไม่เกิน 10 กิโลเมตร

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบจำนวนรอบเทียบเท่าของคลื่น Harmonic load กับขนาดของแผ่นดินไหว

| ขนาดของแผ่นดินไหว | จำนวนรอบเทียบเท่าของคลื่น |
|-------------------|---------------------------|
| 5.25              | 2-3                       |
| 6.0               | 5                         |
| 6.75              | 10                        |
| 7.5               | 15                        |
| 8.5               | 26                        |

ตารางที่ 2.4 ค่าโดยประมาณของการสั่นสะเทือนตามวิธี Bracketed duration ณ จุดที่ห่างจาก ศูนย์กลางแผ่นดินไหวไม่เกิน 10 กิโลเมตร

| ขนาดของคลื่นแผ่นดินไหว | ระยะเวลาการสั่นสะเทือน(วินาที) |                  |
|------------------------|--------------------------------|------------------|
|                        | บริเวณที่เป็นหิน               | บริเวณที่เป็นดิน |
| 5.0                    | 4                              | 8                |
| 5.5                    | 6                              | 12               |
| 6.0                    | 8                              | 16               |
| 6.5                    | 11                             | 23               |
| 7.0                    | 16                             | 32               |
| 7.5                    | 22                             | 45               |
| 8.0                    | 31                             | 62               |
| 8.5                    | 43                             | 86               |

จากที่กล่าวมาแล้วว่าระยะเวลาการสั่นสะเทือนที่ยาวนานมักจะประกอบไปด้วยรอบของการกระทำซ้ำที่มากกว่า Seed et al. (1975) เสนอให้เปรียบเทียบขนาดของแผ่นดินไหวกับจำนวนแรงกระทำแบบ Harmonic ที่มีขนาด Amplitude เป็น 65% ของหน่วยแรงเฉือนสูงสุด

#### 2.4.4 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน (Ground Response Analysis) โดยใช้ฟังก์ชันการแปลงผล (Transfer Function) ในสภาวะพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear Analysis)

การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเป็นการทำนายหาผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวหาเพื่อค่าของ ค่าความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือน ในสภาวะไม่อยู่นิ่ง (Dynamic) อันเนื่องมาจากคลื่นแรงเฉือนของแผ่นดินไหว (Shear wave propagation) และประกอบไปด้วยการแผ่กระจายของพลังงานจากชั้นหินไปถึงชั้นผิวดินโดยการใช้วิธีฟังก์ชันการแปลงผล (Transfer function) นี้เป็นวิธีหนึ่ง โดยวิธีนี้จะเป็นการประมาณการเกิดสภาวะต่างๆของชั้นผิวดิน เช่น การเกิดค่าการเคลื่อนตัวของดิน

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นดินอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหว เช่นการเกิดรอยแยกในชั้นดินแข็งจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของคลื่นแผ่นดินไหวเมื่อคลื่นแผ่นดินไหวเคลื่อนที่จากชั้นหินไปชั้นดิน จะเกิดการหักเหไปในทิศทางขนานและตั้งฉากกับชั้นดิน โดยวิธีการหาผลตอบสนองของ



ชั้นดินนั้นมีสมมติฐานอยู่ที่ ชั้นดินมีลักษณะขนานกับผิวดินและมีความยาวไม่จำกัด โดยการเคลื่อนตัวนั้นเกิดจากคลื่น SH-wave

#### 2.4.4.1 การวิเคราะห์แบบพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear Approach)

สิ่งสำคัญในการวิเคราะห์โดยวิธีนี้คือ การใช้ฟังก์ชันการแปรผลเข้ามาและใช้หลักการซ้อนทับ(Super position) ในการคำนวณ โดยใช้ค่าคงที่หลายค่าเข้ามาประกอบการพิจารณา และได้ผลการวิเคราะห์ออกมาหลายค่าเช่นกัน เช่น ความเร็ว ความเร่ง ความเค้นเฉือน และความเครียดเฉือน

#### 2.4.4.2 การวิเคราะห์ฟังก์ชันการแปลงผล (Transfer Function)

หลักการที่สำคัญของวิธีนี้คือการหาค่าของฟังก์ชันการแปลงผล(Transfer function) ซึ่งฟังก์ชันนี้หามาได้จากการประมาณทางคณิตศาสตร์ โดยการใช้ออนุกรมฟูเรียร์เข้ามาทำการแปลงคลื่นแผ่นดินไหวที่ได้ทำการบันทึกมาจากแหล่งที่เกิด เรียกว่าฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transfer Function, FTT) โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ประเภทคือ

### 1 ชั้นหินแข็งและชั้นดินที่ไม่มีความหนืดของดิน (Uniform, Undamped Soil on Rigid Rock)

ซึ่งการวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$u(z,t) = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

$$K = \text{ค่า wave number} = \left( \frac{\omega}{v_s} \right)$$

$v_s$  = Shear wave velocity

A, B = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) โดยมีทิศทางทั้งขึ้นและลงตั้งฉากกับชั้นดิน ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนซึ่งในชั้นดินนี้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นคือ

$$\tau(0,t) = G\gamma(0,t) = G \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

โดยที่  $G$  = ค่า Shear modulus

$\tau$  = ค่า Shear stress

$\gamma$  = ค่า Shear strain

แทนค่าสมการที่ 2.10 ใน สมการที่ 2.11 ได้

$$Gik(Ae^{ik(0)} - Be^{-ik(0)})e^{i\omega t} = Gik(A - B)e^{i\omega t} = 0 \quad (2.12)$$

โดยที่  $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

$A, B$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude)

$G$  = ค่า Shear modulus

$k$  = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$

จากสมการที่ 2.10 เมื่อ  $A=B$  ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้คือ

$$u(z,t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} = 2A \cos kz e^{i\omega t} \quad (2.13)$$

โดยที่  $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

$A, B$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude)

$Z$  = ระยะความลึก

$K$  = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$

จากสมการที่ 2.13 สามารถหาฟังก์ชันการแปลง (Transfer Function) ได้โดยการแทนค่า  $Z$  ที่ค่าความลึกเท่ากับ 0 และ  $H$  คือ

$$F_1(\omega) = \frac{u_{\max}(o,t)}{u_{\max}(H,t)} = \frac{2Ae^{i\omega t}}{2A \cos kH e^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{v_s}\right)} \quad (2.14)$$

โดยที่  $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

A, B = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude)

H = ระยะความลึกของชั้นดิน

$v_s$  = Shear wave velocity

K = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$

## 2 ชั้นดินแข็งและชั้นดินที่มีความหนืด (Uniform, Damped Soil on Rigid Rock)

จากการวิเคราะห์ในวิธีแรกนั้นยังไม่ได้รวมถึงผลทางด้าน Physic เข้าไปคือ เป็นการคำนวณแบบไม่มีความหนืดของชั้นดิน ซึ่งการคำนวณโดยใช้ความหนืดของชั้นดินเข้ามาในการคำนวณทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ซึ่งมีสมการ คือ

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2.15)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นของชั้นดิน

G = ค่า Shear modulus

$\eta$  = Material damping

Z = ระยะความลึก

จึงได้สมการของฟังก์ชันการแปลงผลคือ

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos k' H} = \frac{1}{\cos(\omega H / V_s')} \quad (2.16)$$

$$\text{โดยที่ } v_s' = \sqrt{\frac{G'}{\rho}} = \sqrt{\frac{G(1+2i\xi)}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{G}{\rho}}(1+i\xi) = v_s(1+i\xi)$$

$\xi$  = damping ratio

แทนในสมการที่ 2.16 จึงได้สมการฟังก์ชันการแปลงผล คือ

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\cos(\omega H / V_s')} = \frac{1}{\cos(\omega H / v_s(1+i\xi))} \quad (2.17)$$

จาก  $|\cos(x+iy)| = \sqrt{\cos^2 x + \sinh^2 y}$  แทนในสมการที่ 2.17 ได้เป็น

โดยที่  $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

$\xi$  = damping ratio

H = ระยะความลึกของชั้นดิน

K = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + \sinh^2 \xi kH}} \quad (2.18)$$

โดยที่  $\xi$  = damping ratio

H = ระยะความลึกของชั้นดิน

k = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$

### 3. ชั้นดินเป็นวัสดุยืดหดตัวได้และดินมีความหนืด (Uniform, Damped Soil on Elastic Rock)

ในสภาวะที่ชั้นดินอยู่บนชั้นหินที่ยืดหดตัวได้นั้น จะมีการเกิดคลื่นแรงเฉือน (Shear wave) เกิดการเคลื่อนที่ลงสู่ชั้นหิน ซึ่งถ้าพลังงานในส่วนนี้มีมากเกินไปนั้นจะทำให้ชั้นดินเกิดการแยกตัวออกจากชั้นดิน

สำหรับการพิจารณาสมการการเคลื่อนตัวของชั้นดินและดินนั้น กำหนดให้ อักษร S แทน ชั้นดินและอักษร R แทนชั้นหิน ซึ่งสมการ การเคลื่อนตัวของทั้งชั้นดินและดินคือ

$$u_s(z_s, t) = A_s e^{i(\omega t + k_s z_s)} + B_s e^{i(\omega t - k_s z_s)} \quad (2.19)$$

โดยที่ A, B = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude)

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

$k$  = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$

$Z$  = ระยะความลึก

$$u_r(z_r, t) = A_r e^{i(\omega t + k_r z_r)} + B_r e^{i(\omega t - k_r z_r)} \quad (2.20)$$

โดยที่ A, B = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude)

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

$k$  = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$

$Z$  = ระยะความลึก

โดยกำหนดด้วยสมการขอบเขต(Boundary equation) คือ

$$u_s(z_s = H) = u_r(z_r = 0) \quad (2.21)$$

โดยที่  $u_s$  = การเคลื่อนที่ของชั้นดิน

$Z_s$  = ระยะความลึกของชั้นดิน

$Z_r$  = ระยะความลึกของชั้นหิน

$$\tau_s(z_s = H) = \tau_r(z_r = 0) \quad (2.22)$$

โดยที่  $\tau_s$  = ความเค้นเฉือนของชั้นดิน

$\tau_r$  = ความเค้นเฉือนของชั้นหิน

$Z_s$  = ระยะความลึกของชั้นดิน

$Z_r$  = ระยะความลึกของชั้นหิน

แทนสมการที่ 2.19 และ 2.20 ลงใน 2.21 จึงได้ว่า

$$A_s \left( e^{ik_s H} + e^{-ik_s H} \right) = A_r + B_r \quad (2.23)$$

โดยที่ A, B = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude)

จากสมการที่ 2.23 ใช้สมการขอบเขตที่ 2.22 แล้วแทนค่าด้วย  $\tau = G \frac{\partial u}{\partial z}$  คือ

$$A_s i G_s k_s' \left( e^{ik_s H} - e^{-ik_s H} \right) = i G_r k_r' (A_r - B_r) \quad (2.24)$$

โดยที่  $A_r, B_r$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) ของชั้นหิน

$A_s, B_s$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) ของชั้นดิน

$k_s, k_r$  = ค่า wave number =  $\left( \frac{\omega}{v_s} \right)$  ของชั้นดินและชั้นหินตามลำดับ

H = ระยะความลึกของชั้นดิน

$G_s, G_r$  = Shear modulus ของชั้นดินและหินตามลำดับ

ทำการจัดรูปสมการใหม่

$$\frac{G_s k_s'}{G_r k_r'} A_s \left( e^{ik_s H} - e^{-ik_s H} \right) = A_r - B_r \quad (2.25)$$

โดยที่  $\frac{G_s K_s'}{G_r K_r'} = \frac{\rho_s v_{ss}'}{\rho_r v_{sr}'} = \alpha_z'$  = complex impedance ratio

$v_{ss}', v_{sr}'$  = complex shear wave velocity ของ ชั้นดินและหิน

ตามลำดับ ทำการแก้สมการที่ 2.23 และ 2.25 ได้ค่าคือ

$$A_r = \frac{1}{2} A_s \left[ (1 + \alpha_z') e^{ik_s H} + (1 - \alpha_z') e^{-ik_s H} \right] \quad (2.26)$$

$$B_r = \frac{1}{2} A_s \left[ (1 + \alpha_z') e^{ik_s H} - (1 - \alpha_z') e^{-ik_s H} \right] \quad (2.27)$$

โดยที่  $\alpha_z'$  = complex impedance ratio

$A_r, B_r$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) ของชั้นหิน

$A_s, B_s$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) ของชั้นดิน

$k_s, k_r$  = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$  ของชั้นดินและชั้นหินตามลำดับ

$H$  = ระยะความลึกของชั้นดิน

ในการแผ่กระจายของคลื่นแผ่นดินไหวนั้นเมื่อมีชั้นดินวางตัวอยู่บนชั้นหินนั้น ความสูงของคลื่น (Amplitude) จะมีขนาดเท่ากับ  $A$  แต่ถ้าคลื่นแผ่นดินไหวเคลื่อนที่จากชั้นหินโดยไม่ผ่านชั้นดิน (Rock outcrop) จะมีความสูงของคลื่นเท่ากับ  $2A$  ดังนั้นสมการที่ 2.26 จึงอยู่ในรูปแบบสมการที่ 2.28 คือ

$$2A_s = \frac{4A_r}{(1 + \alpha'_z)e^{ik_s H} + (1 - \alpha'_z)e^{-ik_s H}} \quad (2.28)$$

โดยที่  $\alpha'_z$  = complex impedance ratio

$A_r$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) ของชั้นหิน

$A_s$  = ความสูงของคลื่น (Wave Amplitude) ของชั้นดิน

$k_s, k_r$  = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$  ของชั้นดินและชั้นหินตามลำดับ

$H$  = ระยะความลึกของชั้นดิน

จะได้สมการของฟังก์ชันการแปลงผล (Transfer Function) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของ  $\frac{A_s}{A_r}$

$$F_3(\omega) = \frac{2}{(1 + \alpha'_z)e^{ik_s H} + (1 - \alpha'_z)e^{-ik_s H}} \quad (2.29)$$

โดยที่  $\alpha'_z$  = complex impedance ratio

$k_s, k_r$  = ค่า wave number =  $\left(\frac{\omega}{v_s}\right)$  ของชั้นดินและชั้นหินตามลำดับ

$H$  = ระยะความลึกของชั้นดิน

ใช้ Euler's law สมการที่ 2.29 จึงเป็น

$$F_3(\omega) = \frac{1}{\cos k'_s H + i\alpha'_z \sin k'_s H} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{v_{ss}}\right) + i\alpha'_z \sin\left(\frac{\omega H}{v_{ss}}\right)} \quad (2.30)$$

โดยที่  $\alpha'_z$  = complex impedance ratio

$k_s', k_r'$  = ค่า wave number

$H$  = ระยะความลึกของชั้นดิน

$\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของการสั่น

$V_{ss}$  = Shear wave velocity ในชั้นดิน

ส่วนดินที่ไม่มีแรงแดมพ์ฟังก์ชันการแปลงผลคือ

$$|F_3(\omega, \xi = 0)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 k_s H + \alpha_z'^2 \sin^2 k_s H}} \quad (2.31)$$

#### 2.4.5 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน (Ground Response Analysis) โดยการใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference)

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนั้นจะมีการใช้สมการอนุพันธ์เข้ามาเป็นตัวกำหนดสถานะเริ่มต้นของปัญหา (Initial condition) จากนั้นจะกำหนดด้วยขอบเขตของปัญหา (Boundary condition) ซึ่งต้องใช้สมการเชิงอนุพันธ์เข้ามาทำการแก้ปัญห แต่การแก้ปัญหาด้วยสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรงนั้น จะทำให้ได้คำตอบที่ต้องการอย่างจำกัด เช่น ในสมการเริ่มต้นของแผ่นดินไหว ถ้าแก้ปัญหาก็เพียงการแก้ปัญหาคด้วย Ordinary differential equation เพียงอย่างเดียวก็จะได้แต่คำตอบของการเคลื่อนตัวของชั้นดินอย่างเดียว และได้เพียงชั้นผิวดินที่กำลังพิจารณา ดังนั้นจึงทำการแก้ปัญหาคด้วยวิธีเชิงตัวเลขด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมโดยการใช้วิธี Central different algorithm, Hughes 1986 ซึ่งทำให้ได้คำตอบที่หลากหลายกว่า เช่น การเคลื่อนตัวในแนวราบของชั้นดิน (Horizontal displacement), ค่าความเร็ว (Output velocity), ค่าความเร่ง (Output acceleration), ความเค้นเฉือน (Strain), ความเครียดเฉือน (Stress) แต่ก็ยังต้องใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแก้ปัญหาค ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์นั้นมีหลายชนิดได้แก่

##### 2.4.5.1 สมการเชิงอนุพันธ์

คำนิยาม สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้นเป็นสมการที่ประกอบไปด้วยตัวแปร 2 ตัวขึ้นไป เช่น



$$\frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} = 0 \quad (2.32)$$

โดยที่ สมการที่ 2.32 นั้นมี  $x, y$  เป็นตัวแปรต้น และมี  $a, b$  เป็นตัวแปรตาม โดยที่สมการ finite difference นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ แบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น แบบเชิงเส้น นั้นเป็นสมการที่มีค่าของอันดับอนุพันธ์เป็นจำนวนเต็มและสัมประสิทธิ์นั้นจะไม่ประกอบไปด้วยตัวแปรตามเช่น

$$\frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} + 5ab = 0 \quad (2.33)$$

ส่วนสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นเป็นสมการที่ประกอบไปด้วยอันดับเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นจำนวนเต็มและมีสัมประสิทธิ์ของตัวแปรตามอยู่ด้วยดังเช่น

$$\frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \left( \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} \right)^{0.5} + a \frac{\partial a}{\partial x} = b^2 \quad (2.34)$$

ซึ่งการแก้สมการนั้นถ้าใช้การแก้สมการโดยปกติจะใช้เวลาในการแก้สมการที่ค่อนข้างที่จะนานดังนั้นการใช้วิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยนั้นจะทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการแก้ปัญหา ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณหาผลเฉลยแน่นอนตรง สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้นโดยส่วนใหญ่มีรูปแบบอยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับที่ 2 โดยมีรูปแบบทั่วไปคือ

$$i \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + j \frac{\partial^2 b}{\partial x \partial y} + k \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = f \quad (2.35)$$

โดยที่  $i, j, k, f$  เป็นค่าคงที่หรือเป็นฟังก์ชันของสมการที่ 2.35

จากสมการเชิงอนุพันธ์กำลัง 2 แบบมาตรฐานนั้นเราสามารถแบ่งสมการได้เป็น 3 รูปแบบตามวิธีการแก้ปัญหาคือ

1 สมการเอลลิปติก (Elliptic equation) เป็นสมการที่มีรูปแบบคือ  $j^2 - 4ik < 0$  เช่น สมการลาปลาซ (Laplace equation)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (2.36)$$

2 สมการพาราโบลิก (parabolic equation) เป็นสมการที่มีรูปแบบคือ  $j^2 - 4ik = 0$  เช่น สมการการถ่ายเทความร้อนในแท่งโลหะ, สมการการสั่นไหวของคลื่นแผ่นดินไหว

$$k \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} = \frac{\partial a}{\partial x} \quad (2.37)$$

โดยที่ k แทนสัมประสิทธิ์หรือเป็นฟังก์ชันของ x

3 สมการไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic equation) เป็นสมการที่มีรูปแบบคือ  $j^2 - 4ik > 0$  เช่น สมการการสั่นของเส้นลวดปลายตั้งทั้ง 2 ข้าง

$$k \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} \quad (2.38)$$

#### 2.4.5.2 การเคลื่อนที่ของคลื่น 1 มิติในวัสดุที่ยาวเป็นอนันต์

ในวัสดุที่ยาวเป็นอนันต์ คลื่นจะเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกับแกนวัสดุ ด้วยพื้นที่หน้าตัด A สมมติให้ตำแหน่ง  $x_0$  วัสดุมีหน่วยแรงเป็น  $\sigma_{x_0}$  และในขณะเดียวกัน ที่ตำแหน่ง  $x_0 + dx$  หน่วยแรงของวัสดุจะมีค่าเป็น  $\sigma_{x_0} + (\partial \sigma_x / \partial x) dx$  โดยอาศัยสมการของ Newton ภายได้สมมูลแบบมีความเร่ง สมการของการเคลื่อนที่ที่สามารถแสดงได้ดังนี้

$$(\sigma_{x_0} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx) A - \sigma_{x_0} A = \rho(A dx) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.39)$$

โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

$\sigma_{x_0}$  = หน่วยแรงของวัสดุ

$u$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวในทิศทางแกน  $x$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \text{ความเร่งของอนุภาค}$$

จากสมการที่ 2.39 ทำการหารด้วย  $A$  ตลอดทั้งสมการ และทำการจัดรูปใหม่ นั่นจึงได้สมการที่อยู่ในรูปที่น้อยลงดังนี้

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.40)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นของวัตถุ

$\sigma_x$  = หน่วยแรงของวัสดุ

$u$  = การเคลื่อนตัวในแนวแกน  $x$

สมการที่ 2.40 นั้นจะหาคำตอบได้ต้องหาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร  $\sigma_x$  และ  $u$  ก่อน ซึ่งในที่นี้ก็คือสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นและความเครียด Stress-strain relationship เข้ามาเป็นตัวกลาง โดยมีสมการดังนี้

$$\sigma_x = G \varepsilon_x \quad (2.41)$$

โดยที่  $G$  = shear modulus ของวัสดุ

หรือเขียนในสมการที่ 2.40 ได้คือ

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = G \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.42)$$

เมื่อทำการแทนค่าสมการที่ 2.42 เข้าไปในสมการที่ 2.40 จึงได้

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = v_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.43)$$

โดยที่  $v_s = \sqrt{G/\rho}$

$\rho$  = ความหนาแน่นของวัตถุ

$\sigma_x$  = หน่วยแรงของวัสดุ

$u$  = การเคลื่อนตัวในแนวแกน  $x$

จะเห็นได้ว่าความเร็วของคลื่นในวัสดุเป็นฟังก์ชันกับค่า Stiffness โดยความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Stiffness มีค่าเพิ่มขึ้น และความเร็วมีค่าลดลงเมื่อค่า Stiffness ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเร็วคลื่นในวัสดุแต่ละชนิด ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ

| วัสดุ   | ความถ่วงจำเพาะ | คลื่นแรงอัด   |                       |
|---------|----------------|---------------|-----------------------|
|         |                | Modulus (Mpa) | ความเร็วคลื่น (m/sec) |
| เหล็ก   | 7.85           | 7.93E04       | 3178                  |
| ยางแข็ง | 1.2            | 1.15E03       | 979                   |
| น้ำ     | 1.0            | 0             | 0                     |

2.5 การวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน (Ground Response Analysis) โดยใช้สมการผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference) ในสถานะไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis)

2.5.1 สมการคลื่นแผ่นดินไหวในกรณีที่ไม่ทำการคิดค่าความหนืดของดิน (Material damping)

สมการอนุพันธ์ทั้ง 3 แบบข้างต้นนั้นมึวิธีการแก้สมการเชิงตัวเลขที่ต่างกันไปในที่นั้นนั้น สมการแบบที่ 2 ซึ่งเป็นสมการพาราโบลิก ใช้ในการคำนวณการสั่นไหวของคลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งมีสมการเชิงอนุพันธ์คือ

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (2.44)$$

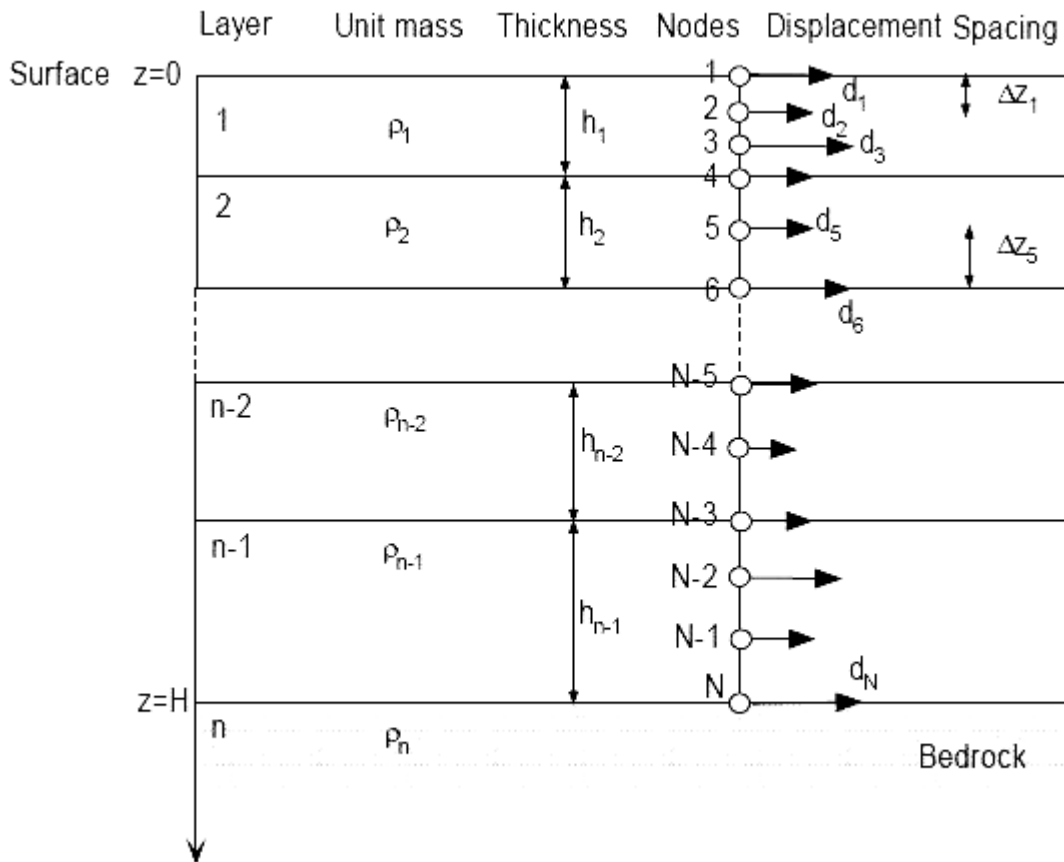
โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นของดิน  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$d$  = ระยะการเคลื่อนตัวของมวลดินในแนวราบ (m)

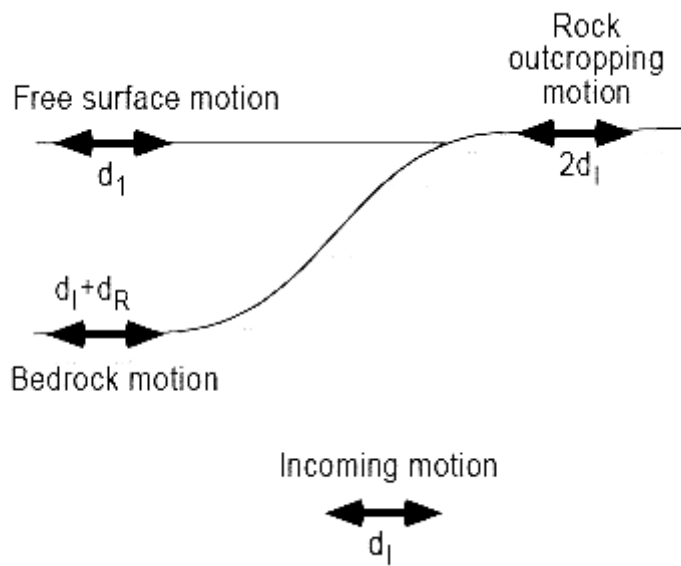
$t$  = ระยะเวลา ของการสั่น (sec)

$z$  = ระดับความหนาของชั้นดิน (m)

โดยกำหนดให้ที่  $z=0, \tau=0$  และ  $z=h, \tau=\tau_b$  ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการกำหนดการเคลื่อนตัวของของชั้นดินอันเนื่องมาจากแรงกระทำจาแผ่นดินไหวตามสมการที่ 2.44



รูปที่ 2.2 การสั่นไหวของชั้นดินและการสั่นไหวของชั้นหิน (bedrock motion)

การสั่นไหวของชั้นผิวดิน (Free surface motion) และ การสั่นไหวของชั้นหินที่ไม่มีชั้นดินปกคลุม (rock outcropping motion) จากรูปที่ 2.2 นั้นเมื่อเกิดการสั่นไหวจะเกิดการแพร่กระจายของคลื่นแผ่นดินไหวในทิศทางขึ้นไปสู่ผิวดิน โดยที่ชั้นหิน (bedrock) นั้นมีขนาดคลื่น (amplitude) เท่ากับ  $d_1 + d_r$  ชั้นผิวดิน (free surface motion) มีขนาด  $d_1$  และชั้นหินที่ไม่มีชั้นดินปกคลุม (outcropping motion) มีขนาด  $2d_1$  โดยมีความสัมพันธ์คือ

$$d_1 = d_1(z + v_z t) \quad (2.45)$$

$$d_r = d_r(z - v_z t) \quad (2.46)$$

และ  $\tau_b$  มีค่าเท่ากับ

$$\tau_b = \mu \left( \frac{\partial d_1}{\partial z} + \frac{\partial d_r}{\partial z} \right) \quad (2.47)$$

โดยที่  $\mu$  =ค่า Shear modulus of bed rock เมื่อหาค่าของอนุพันธ์ของสมการที่ 2.45 และ 2.46 จึงได้

$$\frac{\partial d_1}{\partial z} = \frac{v_1}{v_s} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial d_r}{\partial z} = -\frac{v_r}{v_s} \quad (2.48)$$

โดยที่  $v_1$  และ  $v_r$  =ความเร็วของอนุภาคดินเมื่อมีการแผ่กระจายของคลื่นแผ่นดินไหว เมื่อแทนสมการที่ 2.48 ลงใน 2.47 ได้ค่าความเครียดเฉือนคือ

$$\tau_B = \frac{\mu}{v_s} (2v_1 - v_r) = \rho v_s (2v_1 - v_r) \quad (2.49)$$

ค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) ในแต่ละชั้นดินนั้นสามารถหาได้โดยการสมมุติฐานว่าหินนั้นเป็นวัสดุมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (Joyner and Chen, 1975) ซึ่งเมื่อเกิดคลื่นแผ่นดินไหวคลื่นก็จะมี การแผ่กระจายของ shear wave velocity ขึ้นชั้นบนและลงชั้นล่าง

จากรูปที่ 2.1 นั้นชั้นดินได้แบ่งเป็นหลายชั้นโดยที่แต่ละชั้นนั้นมีความหนา  $h_i$  และมีความหนาแน่น  $\rho_i$  ซึ่งหลังจากที่เกิดการสั่นไหวนั้นได้เกิดมีการเคลื่อนตัว และเกิดค่าความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือนขึ้น ในแต่ละชั้นดิน โดยที่ระยะของการเคลื่อนตัวนั้นเป็นฟังก์ชันของความลึกและเวลา ( $z_i, t_i$ ) ค่าความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือนแสดงสัญลักษณ์โดย  $\tau_{i,t}, \gamma_{i,t}$  และค่าของ

ความเร็วและความเร่งแสดงโดย  $a(z,t), v(z,t)$  ที่จุด  $i$  และเวลา  $t$  การประมาณการทางด้านการหาอนุพันธ์นั้นทำโดยใช้วิธีการประมาณการไปข้างหน้า (Forward Finite Difference) ดังสมการ

$$\frac{df(z_i)}{dz} = \lim \frac{f(z_{i+1}) - f(z_i)}{\Delta z_i} \quad (2.50)$$

และการประมาณการทางด้านการหาค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนนั้นสามารถหาได้โดยใช้วิธีการประมาณการแบบไปข้างหน้า (Forward Finite Difference) ดังสมการ

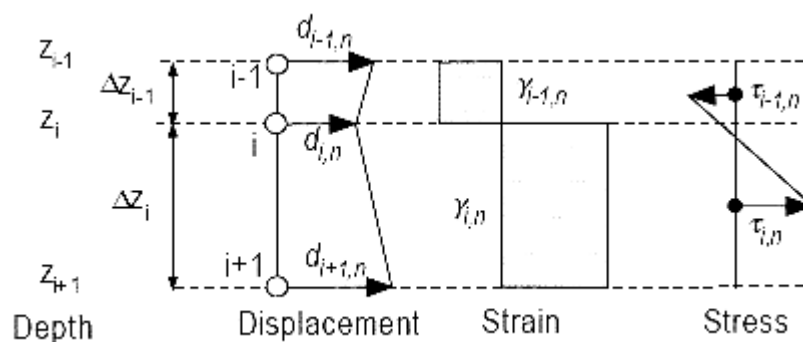
$$\gamma_{i,t} = \frac{\partial d}{\partial z} = \frac{d_{i+1,t} - d_{i,t}}{\Delta z_i} \quad (2.51)$$

และ

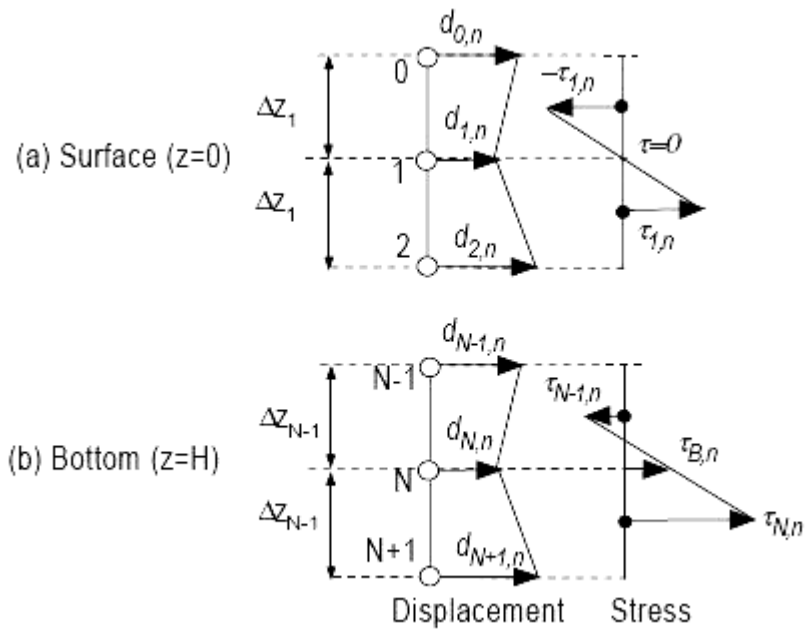
$$\frac{\partial \tau}{\partial z} \approx 2 \frac{\tau_{i,t} - \tau_{i-1,t}}{\Delta z_i + \Delta z_{i+1}} \quad (2.52)$$

โดยที่จุดที่ติดกับชั้นหิน (bed rock) นั้นสามารถหาค่าของความเค้นเฉือน (shear stress) ได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\tau_B$  ดังรูปที่ 2.3 โดยที่การหาค่าความเค้นเฉือนที่จุดบนสุดและล่างสุดของชั้นดินนั้นสามารถหาได้โดยที่มีการกำหนดจุดสมมุติขึ้นมาอยู่เหนือสุดและใต้สุดของจุดที่กำหนดไว้ก่อน โดยที่จุดสมมุติชั้นล่างที่เพิ่มขึ้นมานั้นกำหนดให้เป็นตำแหน่ง  $N+1$  และจุดสมมุติบนสุดกำหนดให้เป็นตำแหน่ง  $N-1$  ดังรูปที่ 2.1 และสามารถหาค่าของความเค้นเฉือน (shear stress) ที่จุดต่ำสุดได้ดังสมการที่ 2.53

$$F_{N,t} = \frac{\tau_{N,t} - \tau_{N-1,t}}{\Delta z_{N-1}} \quad (2.53)$$



รูปที่ 2.3 การเกิดการเคลื่อนตัวของดิน การเกิดค่าความเครียดเฉือน (shear strain) ความเค้นเฉือน (shear stress)



รูปที่ 2.3 การเกิดการเคลื่อนตัวของดิน การเกิดค่าความเครียดเฉือน (shear strain) ความเค้นเฉือน (shear stress) (ต่อ)

### 2.5.2 สมการผลต่างแบบตรงกลาง (Central different algorithm)

ในการคำนวณวิธีผลต่างแบบตรงกลางนั้นใช้รูปแบบการคำนวณของ Newmark (Hurhes, 1986) โดยค่าความเร็วประมาณได้จากสมการ

$$\tilde{v}_{i,t+1} = v_{i,t} + \frac{1}{2} a_{i,t} \Delta t \quad (2.54)$$

โดยที่  $\tilde{v}_{i,t+1}$  นั้นขึ้นอยู่กับความเร่งและเวลา

$$d_{i,t+1} = d_{i,t} + \Delta t \tilde{v}_{i,t+1} \quad (2.55)$$

$$v_{i,t+1} = \tilde{v}_{i,t+1} + \frac{1}{2} a_{i,t+1} \Delta t \quad (2.56)$$

ความเร็วและความเร่งสามารถประมาณได้ในพจน์ของความเร็วประมาณ (Predicted velocity) และ เวลาดังสมการ

$$v_{i,t} = \frac{1}{2} (\tilde{v}_{i,t+1} + \tilde{v}_{i,t}) \quad (2.57)$$



$$a_{i,t} = \frac{1}{\Delta t} (\tilde{v}_{i,t+1} - \tilde{v}_{i,t}) \quad (2.58)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 2.44 ได้สมการที่ 2.59

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \frac{1}{1 + \eta_i \frac{\Delta t}{2\rho_i}} \left( \tilde{v}_{i,t} \left( 1 - \eta_i \frac{\Delta t}{2\rho_i} \right) \right) + F_{i,t} \frac{\Delta t}{\rho_i} \quad (2.59)$$

$$\text{โดยที่ } F_{i,n} = 2 \frac{\tau_{N,t} - \tau_{N-1,t}}{\Delta z_i + \Delta z_{i-1}}$$

ให้ความหนืดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับศูนย์ สมการที่ 2.59 คือ

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \tilde{v}_{i,t} + F_{i,t} \frac{\Delta t}{\rho_i} \quad (2.60)$$

ที่จุด N สมการที่ 2.49 คือ

$$\tau_{B,t} = \rho_N v_s (2V_{I,t} - v_{N,t}) \quad (2.61)$$

นำสมการที่ 2.61 แทนในสมการที่ 2.59 คือ

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \frac{\tilde{v}_{N,t} (\Delta z_{N-1} - v_s \Delta t) + 4v_s V_{I,t} \Delta t - 2\tau_{N-1,t} \Delta t / \rho}{\Delta z_{N-1,t} + v_s \Delta t} \quad (2.62)$$

เมื่อสมมติให้ชั้นหินเป็นวัสดุแข็งเกร็งจึงได้ว่า  $v_s \rightarrow \infty$  สมการที่ 2.62 คือ

$$\tilde{v}_{N,t+1} = -\tilde{v}_{N,t} + 4V_{I,t} \quad (2.63)$$

และสมการของความเร็วที่จุด N คือ

$$v_{N,t} = \frac{1}{2} (\tilde{v}_{N,t+1} + \tilde{v}_{N,t}) = 2V_{I,t} \quad (2.64)$$

## 2.6 สมการคลื่นแผ่นดินไหวในกรณีที่ทำกราคิดค่าความหนืดของดิน (Material damping) ในกรณีต่างๆ

2.6.1 กรณีที่ไม่มีค่า Damping ชั้น n (ชั้นดิน) สมการคลื่นแผ่นดินไหวนั้นในสมการที่ไม่มีการคิดค่าความหนืดของวัสดุชั้นนั้นมีสมการคือ

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (2.65)$$

ทำการกระจายสมการที่ 2.65 ได้สมการของการกระจายสมการที่ 2.65 ดังสมการที่ 2.66

$$\rho_i \frac{(\tilde{v}_{i,t+1} - \tilde{v}_{i,t})}{\Delta t} = 2 \frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z_i + \Delta z_{i-1}} \quad (2.66)$$

จัดรูปสมการที่ 2.66 โดยการย้ายข้างหาความสัมพันธ์ของความเร็วในช่วงเวลาใหม่ได้สมการที่ 2.67 ซึ่งเป็นสมการความเร็วพื้นฐานที่ได้ทำการใช้คำนวณการเคลื่อนตัวในกรณีที่ไม่มีค่าความหนืดของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \tilde{v}_{i,t} + 2 \frac{(\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}) \Delta t}{(\Delta z_i + \Delta z_{i-1}) \rho_i} \quad (2.67)$$

## 2.6.2 กรณีที่มีค่า Damping ชั้น n (ชั้นดิน)

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (2.68)$$

ทำการกระจายสมการที่ 2.68 ได้สมการของการกระจายสมการที่ 2.68 ดังสมการที่ 2.69

$$\rho_i \frac{(\partial \dot{d}_{i,t+1} - \partial \dot{d}_{i,t})}{\Delta t} + \eta_i \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (2.69)$$

โดยที่อนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของการเคลื่อนตัวคือความเร็วทำการกระจายสมการที่ 2.69 ได้  
 ดังสมการที่ 2.70

$$\rho_i \frac{(\tilde{v}_{i,t+1} - \tilde{v}_{i,t})}{\Delta t} + \eta_i \frac{(\tilde{v}_{i,t+1} + \tilde{v}_{i,t})}{2} = 2 \frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z_t + \Delta z_{t-1}} \quad (2.70)$$

กำหนดให้  $F_{i,t} = 2 \frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z_t + \Delta z_{t-1}}$  แทนในสมการที่ 2.70

$$(\tilde{v}_{i,t+1} - \tilde{v}_{i,t}) + (\tilde{v}_{i,t+1} + \tilde{v}_{i,t}) \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i} = F_{i,t} \frac{\Delta t}{\rho_i} \quad (2.71)$$

จัดรูปสมการที่ 2.71 ใหม่โดยการย้ายพจน์ความเร็วครั้งก่อนหน้าไปไว้ข้างเดียวกันจะนำ  
 ความเร็วครั้งล่าสุดมาไว้อีกข้างดังสมการที่ 2.72

$$\tilde{v}_{i,t+1} + \frac{\tilde{v}_{i,t+1} \eta_i \Delta t}{2\rho_i} = \tilde{v}_{i,t} - \tilde{v}_{i,t} \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i} + F_{i,t} \frac{\Delta t}{\rho_i} \quad (2.72)$$

จัดสมการที่ 2.72 เพื่อย้ายข้างหาค่าความเร็ว

$$\tilde{v}_{i,t+1} \left(1 + \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i}\right) = \tilde{v}_{i,t} \left(1 - \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i}\right) + F_{i,t} \frac{\Delta t}{\rho_i} \quad (2.73)$$

ทำการย้ายข้างหาค่าความเร็วในปัจจุบันนั้นคือ

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \left(\frac{1}{1 + \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i}}\right) \left(\tilde{v}_{i,t} \left(1 - \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i}\right) + \frac{F_{i,t} \Delta t}{\rho_i}\right) \quad (2.74)$$

2.6.3. กรณีที่ไม่มีค่า Damping ชั้น N (ชั้นหิน) จากสมการที่ 2.67 สมการของความเร็  
 ที่ได้ในกรณีที่ไม่นำค่าของความหนืดของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยที่สมการที่ 2.67 คือ

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \tilde{v}_{i,t} + \frac{F_{i,t} \Delta t}{\rho_i} \quad (2.75)$$

กำหนดให้  $F_{i,t} = 2 \frac{\tau_{N,t} - \tau_{N-1,t}}{\Delta z_N + \Delta z_{N-1}}$  ทำการแทนค่าความเค้นเฉือน  
ในชั้นหินที่ได้คือซึ่งสมการนี้คือ  $\tau_{B,N} = \rho_N v_s (2v_{I,N} - \tilde{v}_{N,t})$

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \tilde{v}_{i,t} + 2 \frac{(\tau_{B,t} - \tau_{N-1,t}) \Delta t}{(\Delta z_N + \Delta z_{N-1}) \rho_i} \quad (2.76)$$

เมื่อทำการแทนค่าความเค้นเฉือนในชั้นหินที่ได้คือ  $(2.77)$

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \tilde{v}_{N,t} + 2 \frac{(\rho_N v_s (2v_{I,N} - \tilde{v}_{N,t}) - \tau_{N-1,t}) \Delta t}{(\Delta z_N + \Delta z_{N-1}) \rho_N} \quad (2.78)$$

จัดสมการของสมการที่ 2.71

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \tilde{v}_{N,t} + \frac{4\rho_N v_s v_{I,N} \Delta t - 2\rho_N v_s \tilde{v}_{N,t} \Delta t - 2\tau_{N-1,t} \Delta t}{(\Delta z_N + \Delta z_{N-1})} \quad (2.79)$$

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \frac{\tilde{v}_{N,t} (\Delta z_N + \Delta z_{N-1}) - 2v_s \tilde{v}_{N,t} \Delta t + 4v_s v_{I,N} \Delta t - (2\tau_{N-1,t} \Delta t / \rho_N)}{(\Delta z_N + \Delta z_{N-1})} \quad (2.80)$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ได้ในสมการที่ 2.73 นั้นได้สมการของความเร็วคือ

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \frac{\tilde{v}_{N,t} (\Delta z_{N-1} + v_s \Delta t - 2v_s \Delta t) + 4v_s v_{I,N} \Delta t - (2\tau_{N-1,t} \Delta t / \rho_N)}{(\Delta z_N + \Delta z_{N-1})} \quad (2.81)$$

โดยที่  $\Delta z_N = v_s \Delta t$

2.6.4 กรณีที่มีค่า Damping ชั้น N (ชั้นหิน) จากสมการที่ 2.74 นั้นสมการของความเร็ว  
ในกรณีที่ค่าความเร็วที่ได้นั้นคือ

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i}} \right) (\tilde{v}_{i,t} (1 - \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i}) + \frac{F_{i,t} \Delta t}{\rho_i}) \quad (2.82)$$

กำหนดให้  $F_{i,t} = 2 \frac{\tau_{N,t} - \tau_{N-1,t}}{\Delta z_N + \Delta z_{N-1}}$  ทำการแทนเข้าไปในสมการที่ 2.82

$$\tilde{v}_{i,N+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N}} \right) \left( \tilde{v}_{i,t} \left( 1 - \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N} \right) + \frac{2(\tau_{N,t} - \tau_{N-1,t})}{\Delta z_N + \Delta z_{N-1}} \frac{\Delta t}{\rho_N} \right) \quad (2.83)$$

และในส่วนของสมการของความเค้นเฉือนที่ชั้นหินนั้นแทนสมการ  $\tau_{B,N} = \rho_N v_s (2v_{I,N} - \tilde{v}_{N,t})$  เมื่อได้ทำการแทนสมการเข้าไปในสมการที่ 2.83 จึงได้สมการของความเร็วจึงคือ

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N}} \right) \left( \tilde{v}_{N,t} \left( 1 - \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N} \right) + \frac{2(\rho_N v_s (2v_{I,N} - \tilde{v}_{N,t}) - \tau_{N-1,t})}{\Delta z_N + \Delta z_{N-1}} \frac{\Delta t}{\rho_N} \right) \quad (2.84)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 2.84

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N}} \right) \left( \tilde{v}_{N,t} \left( 1 - \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N} \right) + \frac{(4\rho_N v_s v_{I,N} - 2\rho_N v_s \tilde{v}_{N,t}) - 2\tau_{N-1,t}}{\Delta z_N + \Delta z_{N-1}} \frac{\Delta t}{\rho_N} \right) \quad (2.85)$$

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N}} \right) \frac{(\tilde{v}_{N,t} \left( 1 - \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N} \right) (\Delta z_N + \Delta z_{N-1}) + 4\rho_N v_s v_{I,N} \Delta t - 2\rho_N v_s \tilde{v}_{N,t} \Delta t) - 2\tau_{N-1,t} \frac{\Delta t}{\rho_N}}{\Delta z_N + \Delta z_{N-1}} \quad (2.86)$$

จะได้สมการของความเร็วในกรณีนี้ที่คิดค่าความหนืดของวัสดุตั้งสมการที่ 2.87

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N}} \right) \frac{(\tilde{v}_{N,t} \left( 1 - \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N} \right) (\Delta z_N + \Delta z_{N-1}) - 2v_s \tilde{v}_{N,t} \Delta t + 4v_s \tilde{v}_{I,t} \Delta t) - 2\tau_{N-1,t} \frac{\Delta t}{\rho_N}}{\Delta z_N + \Delta z_{N-1}} \quad (2.87)$$

## บทที่ 3

### รายละเอียดของโปรแกรมที่พัฒนา

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงการทำงานของโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นมา โดยเป็นการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม Finite difference โดยใช้โปรแกรม Compaq visual fortran และ Microsoft visual basic ในการเขียนโปรแกรมทำการคำนวณ โดยในการเขียนโปรแกรมขึ้นมาในครั้งนี้นั้น ได้ใช้ Microsoft visual basic ในการเป็นหน้าจอของโปรแกรม (User interface) และได้ใช้ Compaq visual fortran เป็นโปรแกรมย่อยที่ทำการคำนวณอยู่เบื้องหลัง ทั้ง 2 โปรแกรมทำงานร่วมกันโดยใช้ Dynamic link library (dll) ในการเชื่อมต่อ โดยรายละเอียดของโปรแกรมนี้นี้ดังต่อไปนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

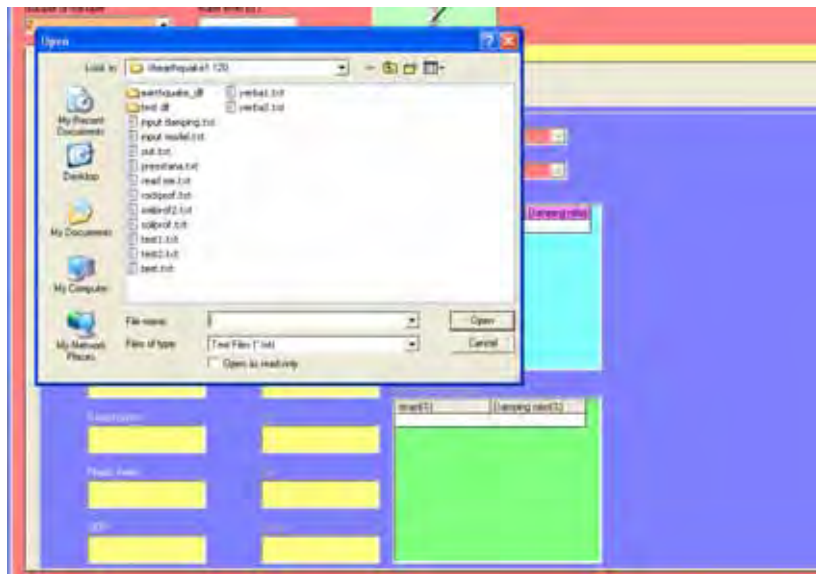
ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมนั้นจะแบ่ง ออกเป็น 2 ส่วนแยกตามชนิดของโปรแกรมที่ทำการเขียน โดยมีขั้นตอนหลักๆ คือ 1 ใส่ข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณ 2 ทำการคำนวณ และ 3 ทำการแสดงผลการคำนวณออกมา ซึ่งขั้นตอนที่ 1 และ 3 นั้นใช้โปรแกรม Microsoft visual basic ส่วนขั้นตอนที่ 2 ใช้โปรแกรม Compaq visual fortran ซึ่งขั้นตอนของการคำนวณขั้นตอนที่ 2 นั้นเป็นการคำนวณด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference) โดยจะทำการอธิบายเรียงลำดับและขั้นตอนของการคำนวณทั้งหมด ดังนี้

#### 3.2 การอ่านข้อมูลการวิเคราะห์ (Read input data)

การอ่านข้อมูลเข้าสู่ตัวโปรแกรมในขั้นตอนแรกนั้น โดยหลักๆ จะต้องใช้การอ่านข้อมูลหลายส่วน คือ ข้อมูลชั้นดิน, ข้อมูลชั้นหิน, ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว ข้อมูล Input damping, ข้อมูลของแบบจำลองดิน (soil model)

### 3.2.1 การอ่านข้อมูลชั้นดินและชั้นหิน

ในการอ่านข้อมูลชั้นดินและชั้นหินนั้น จะทำการอ่านในลักษณะที่เรียกว่า Binary นั่นคือ ตัวโปรแกรมจะทำการอ่านข้อมูล ที่ทำการเลือกจาก Common dialog box ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่บันทึกไว้ใน Text file โดยอ่านข้อมูลที่ละ record ไปจนจบข้อมูล แล้วข้อมูลแต่ละตัวที่ทำการอ่านได้นั้นจะรวบรวมเป็นข้อมูลดิบ เข้าสู่โปรแกรมเพื่อทำการคำนวณ ข้อมูลที่ทำการบันทึกไว้จะมีชื่อ เช่น Soilprof.txt โดยขั้นตอนการทำงานโดยละเอียดของการอ่านข้อมูลมีดังนี้

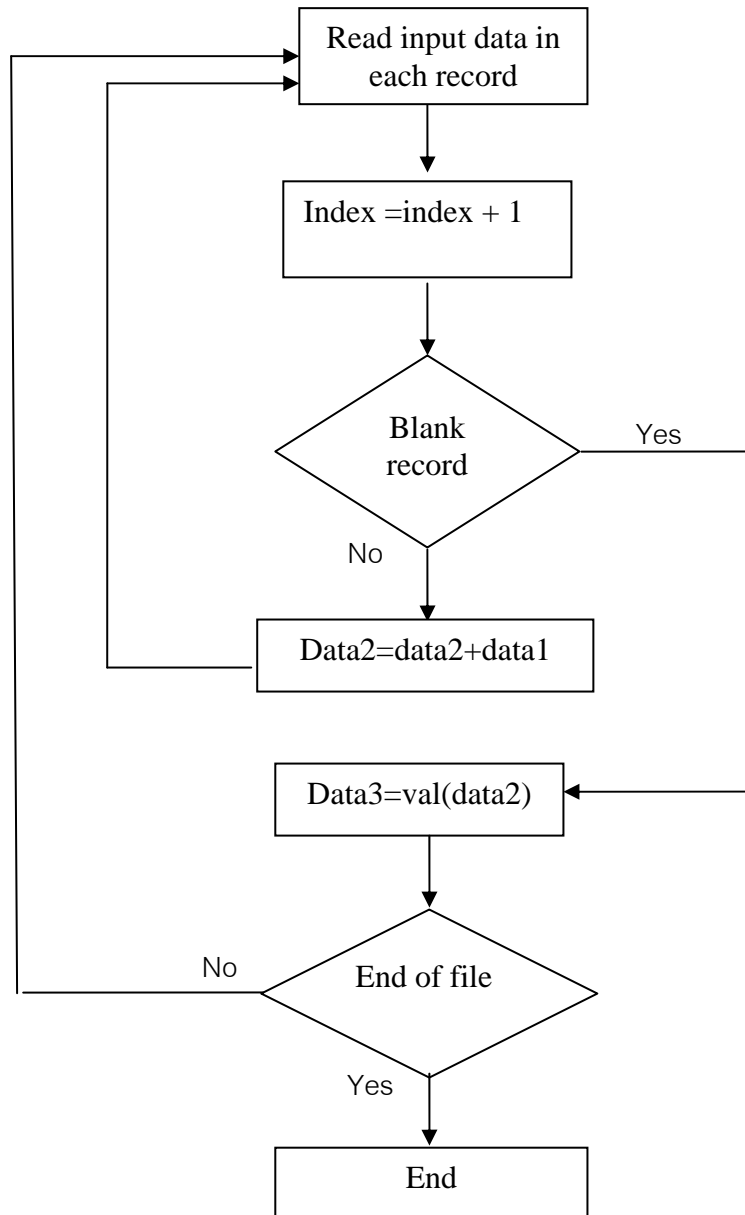


รูปที่ 3.1 Common dialog box ทำการเลือกข้อมูล

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในส่วนของการอ่านข้อมูลชั้นดินและชั้นหิน

1. โปรแกรมจะทำการกำหนด Record ของการอ่านเริ่มต้นให้เป็น Record ที่ 1
2. ทำการกำหนด Index file การกำหนด Index file ก็คือ การกำหนดตำแหน่งที่ว่างใน computer เพื่อทำการจองพื้นที่ ที่จะใช้ในการอ่านข้อมูล โดยสามารถที่จะทำการจองพื้นที่ได้สูงสุดถึง 256 file ในเวลาเดียวกัน สำหรับโปรแกรม Microsoft visual basic ซึ่งในที่นี้กำหนดให้โปรแกรมจัดหมายเลขพื้นที่ว่างให้อัตโนมัติ
3. โปรแกรมจะทำการเรียก Common dialog box เพื่อทำการเลือก file ที่จะทำการอ่านข้อมูลดังรูปที่ 3.1
4. ทำการเริ่มต้นในการอ่าน File ข้อมูลในส่วนนี้โปรแกรมจะทำการตรวจสอบข้อมูลที่อ่านทีละ record ว่ามีค่าเท่ากับช่องว่างหรือยัง ถ้ามีค่าเท่ากับช่องว่างก็จะทำการรวบรวมข้อมูลที่เป็นข้อมูลดิบที่ทำการเก็บเอาไว้เป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้จริงในการคำนวณ แต่ถ้ายังไม่ใช่ช่องว่างโปรแกรมก็จะนำข้อมูลใน record นี้ไปรวมกับข้อมูลในส่วนที่ผ่านมาเพื่อเก็บเป็นข้อมูลดิบ

5. หลังจากที่โปรแกรมได้ทำการอ่านข้อมูลและมีการเว้นช่องว่างไว้แต่ละข้อมูลแล้วนั้นโปรแกรมก็จะทำการตรวจสอบจุดสิ้นสุดของ File เพื่อทำการปิด Index file ที่ได้ทำการจองในเครื่องไว้ในตอนแรกเพื่อไม่ให้เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้เนื้อที่มากเกินไปในการทำงาน โดยแผนผังของการทำงานในส่วนของการอ่านข้อมูลมีดังนี้

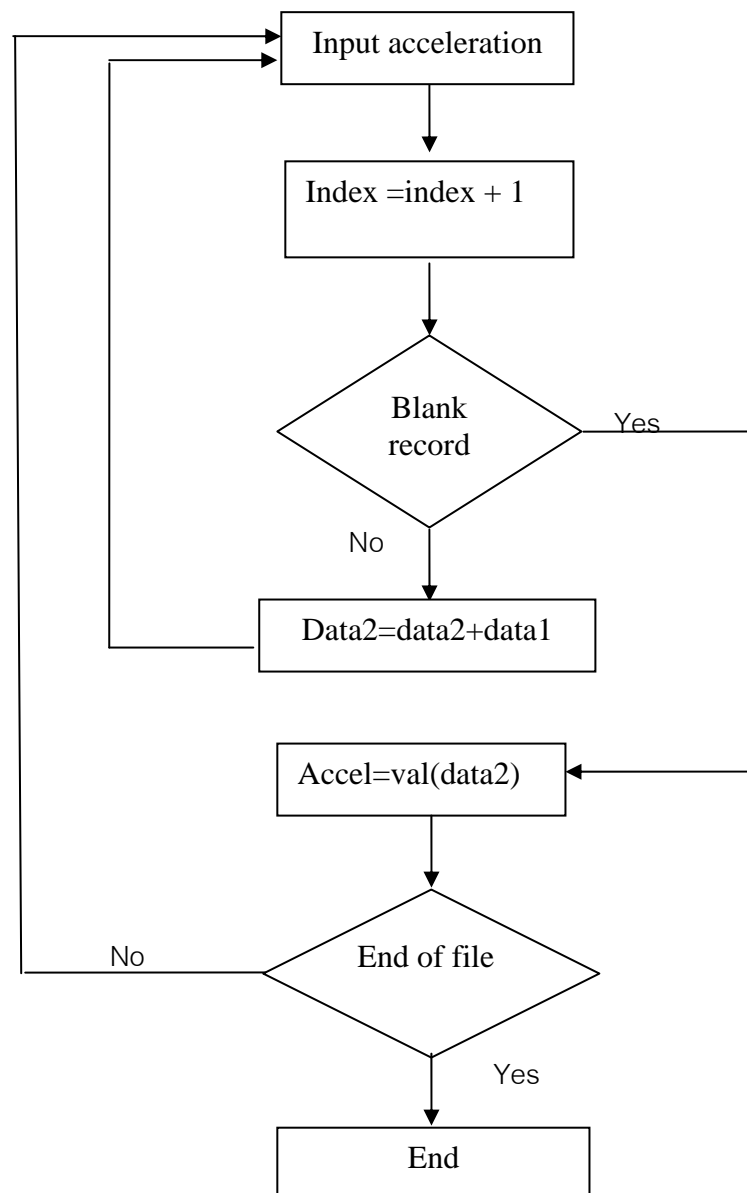


รูปที่ 3.2 โครงสร้างการทำงานของการทำงานของการอ่านข้อมูล



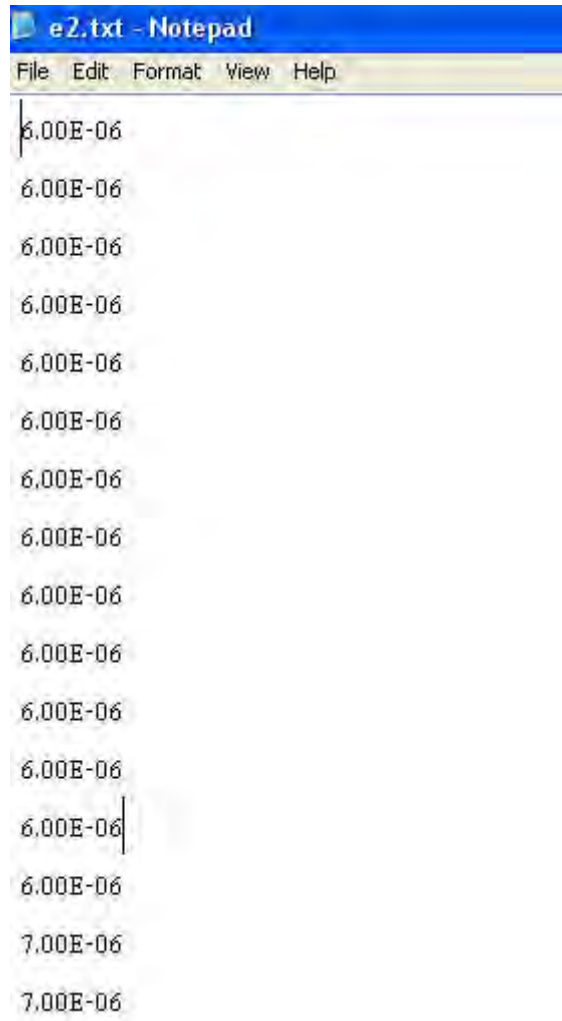
เมื่อได้ทำการอ่านข้อมูลเสร็จแล้วต่อไปในส่วนของการเลือกที่จะทำการใส่ข้อมูล โปรแกรมจะทำการใส่ข้อมูลในช่องข้อมูลดินตามลำดับที่ได้อ่านใน Input file โดยมีลำดับขั้นตอนการเลือกใส่ข้อมูลดังนี้ ข้อมูลชั้นดินชั้นที่ 1 ไปจนถึงชั้นดินที่ N ตามลำดับคือ ,1 Thickness, 2 Unit weight, 3 Shear modulus, 4 Shear wave velocity ,5 Damping ratio, 6 Plastic index ,7 OCR (Over Consolidation Ratio) ส่วนในชั้นหิน โปรแกรมจะทำการอ่านข้อมูลเรียงตามลำดับ คือ 1. Unit weight ,2 shear modulus, 3 Shear wave velocity ,4 Damping ratio

### 3.2.2 การอ่านข้อมูล Input acceleration



รูปที่ 3.3 วิธีการอ่านข้อมูลของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น

การใส่ข้อมูลของ Input Acceleration นั้นจะมีลักษณะของการทำงานที่คล้ายกับการใส่ข้อมูลของ  
 ชั้นดินและชั้นหินเพียงแต่ว่า ข้อมูลที่ได้จากการอ่านจาก Text File นั้น จะทำการเก็บอยู่ในตัวแปร  
 ความเร่งของโปรแกรม และจะแสดงออกมาทางกราฟข้อมูล โดยการทำงานของโปรแกรกดังรูปที่  
 3.3 โดยจุดเด่นของการทำการอ่านข้อมูลตามแบบ Algorithm ในรูปที่ 3.3 นี้มันอยู่ตรงที่ สามารถที่  
 จะ อ่านข้อมูลได้ทุกแบบ (All formatted file) ไม่ว่าจะเป็นแบบรูปที่ 3.4 หรือ 3.5



The screenshot shows a Notepad window titled 'e2.txt - Notepad'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Format', 'View', and 'Help'. The text content consists of a vertical list of numerical values in scientific notation, starting with '6.00E-06' and ending with '7.00E-06'. The values are: 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 6.00E-06, 7.00E-06, and 7.00E-06.

รูปที่ 3.4 Input acceleration แบบที่ 1

```

+0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000006
+0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000006 +0.000007 +0.000007
+0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000007
+0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000007 +0.000008 +0.000008
+0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000008
+0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000008 +0.000009 +0.000009
+0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009
+0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000009 +0.000010
+0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010
+0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010
+0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000010 +0.000011 +0.000011 +0.000011
+0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011
+0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011
+0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011 +0.000011

```

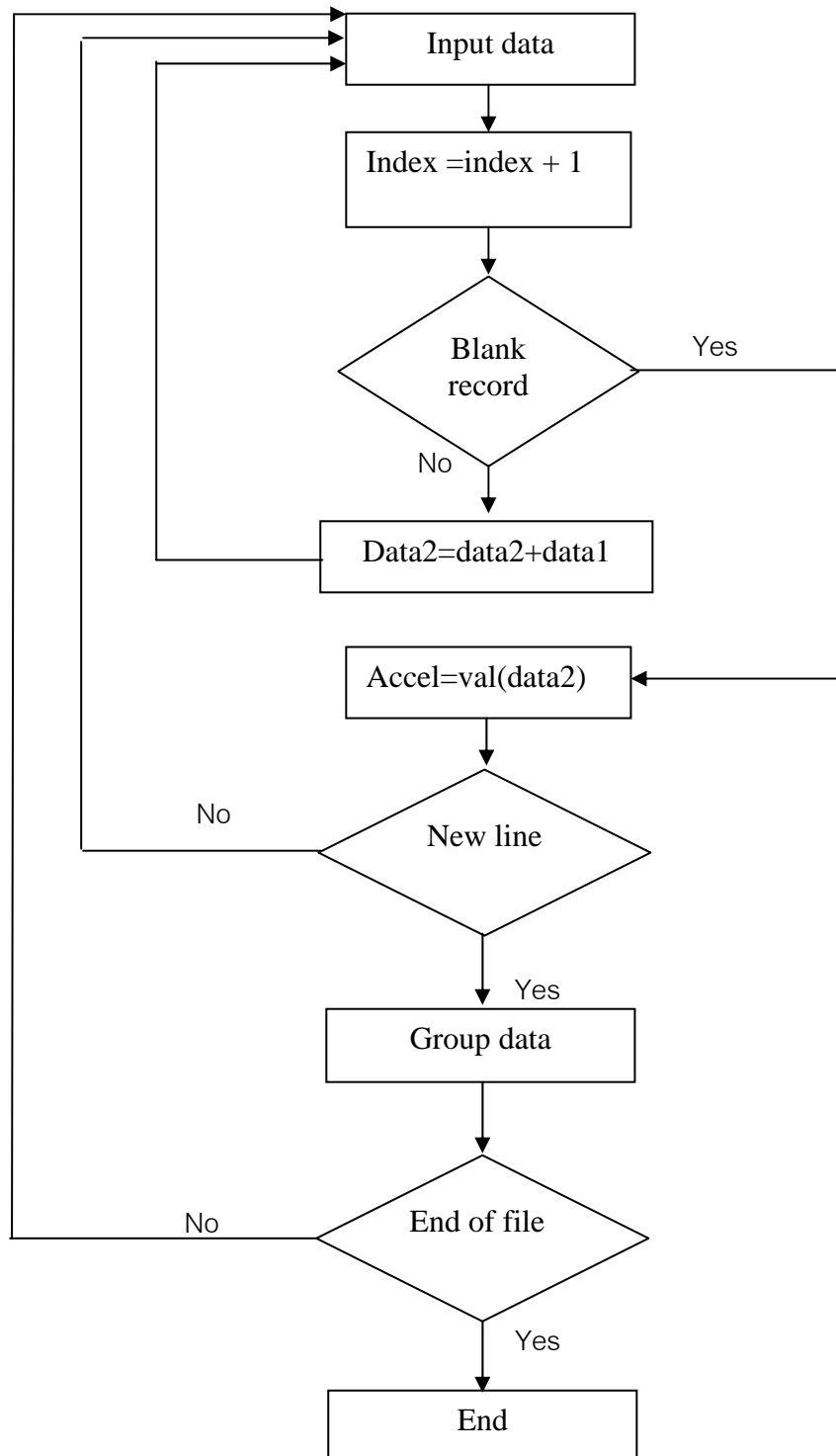
รูปที่ 3.5 Input acceleration แบบที่ 2

### 3.2.3 การอ่านข้อมูล Input soil model

การอ่านข้อมูล Input soil model นั้นจะมีข้อแตกต่างตรงที่จะทำการอ่านข้อมูลในแบบตามแนวนอนทีละบรรทัด เริ่มตั้งแต่ บรรทัดที่ 1 Strain ,2 Shear modulus ,3 Damping ratio สาเหตุที่ต้องทำการอ่านในแบบนี้ก็เพราะว่า ถ้ามีการกำหนดให้โปรแกรมทำการอ่านข้อมูลแบบเดียวกับที่เคยทำใน การอ่านข้อมูล Input acceleration ก็จะไม่สามารถที่จะแยกแยะได้ว่า ข้อมูลชุดไหนเป็น Strain ,Shear modulus หรือ Damping ratio ที่ทำการอ่านข้อมูลแบบนี้ในตัวที่จะทำการจำแนกข้อมูลแต่ละชุดออกจากกันนั้น คือ รหัสของการขึ้น บรรทัดใหม่ ซึ่งจะอยู่ใน Input file ของทุก File อยู่แล้ว ดังนั้นจึงมีลักษณะการทำงานที่ต่างกันออกไปดังรูปที่ 3.6

เมื่อนำข้อมูลที่ได้ทำการจำแนกในการอ่านข้อมูลจาก Input soil model เรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจึงทำการนำข้อมูลที่ได้จัดกลุ่ม มาใส่เข้าไปในตาราง ในที่นี้เรียกตารางว่า Dataflexgrid ซึ่งเป็นชื่อ Control หนึ่งในโปรแกรม Microsoft visual basic โดยจะนำข้อมูลที่ได้

จากจำนวนข้อมูลในแต่ละแถวของการอ่าน Input file มากับเรียงใหม่เป็นในแนวตั้งในตาราง Dataflexgrid ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การอ่านข้อมูล Input soil model และ Input damping ratio

| strain(%) | Shear modulus | Damping ratio |
|-----------|---------------|---------------|
| 0.00001   | 1             | 0.2           |
| 0.00003   | 1             | 0.4           |
| 0.0001    | 0.99          | 0.8           |
| 0.0003    | 0.96          | 1.4           |
| 0.001     | 0.85          | 2.8           |
| 0.003     | 0.64          | 5.1           |
| 0.01      | 0.37          | 9.8           |
| 0.03      | 0.18          | 15.5          |
| 1         | 0.08          | 21            |
| 3         | 0.05          | 25            |

รูปที่ 3.7 ข้อมูลที่ได้จากการอ่าน File แบบ Input soil model

### 3.2.4 การอ่านข้อมูล Input damping ratio

การอ่านข้อมูล Input damping ratio ก็มีลักษณะที่คล้ายกับการอ่านข้อมูล Input soil model คือ จะมีการจำแนกชนิดของข้อมูล ด้วยรหัสของการขึ้นบรรทัดใหม่ ซึ่งมีลักษณะของการทำงานดังรูปที่ 3.6 และเมื่อทำการอ่านข้อมูลเรียบร้อยแล้วข้อมูลก็จะถูกจัดเข้ามาสู่ ตัวโปรแกรม ดังรูปที่ 3.8

| strain(%) | Damping ratio(%) |
|-----------|------------------|
| 0.00001   | 0.24             |
| 0.00003   | 0.42             |
| 0.0001    | 0.8              |
| 0.0003    | 1.4              |
| 0.001     | 2.8              |
| 0.003     | 5.1              |
| 0.01      | 9.8              |
| 0.03      | 15.5             |
| 1         | 21               |
| 3         | 25               |

รูปที่ 3.8 ผลจากการอ่านข้อมูล Input damping ratio

### 3.3 การคำนวณของโปรแกรม

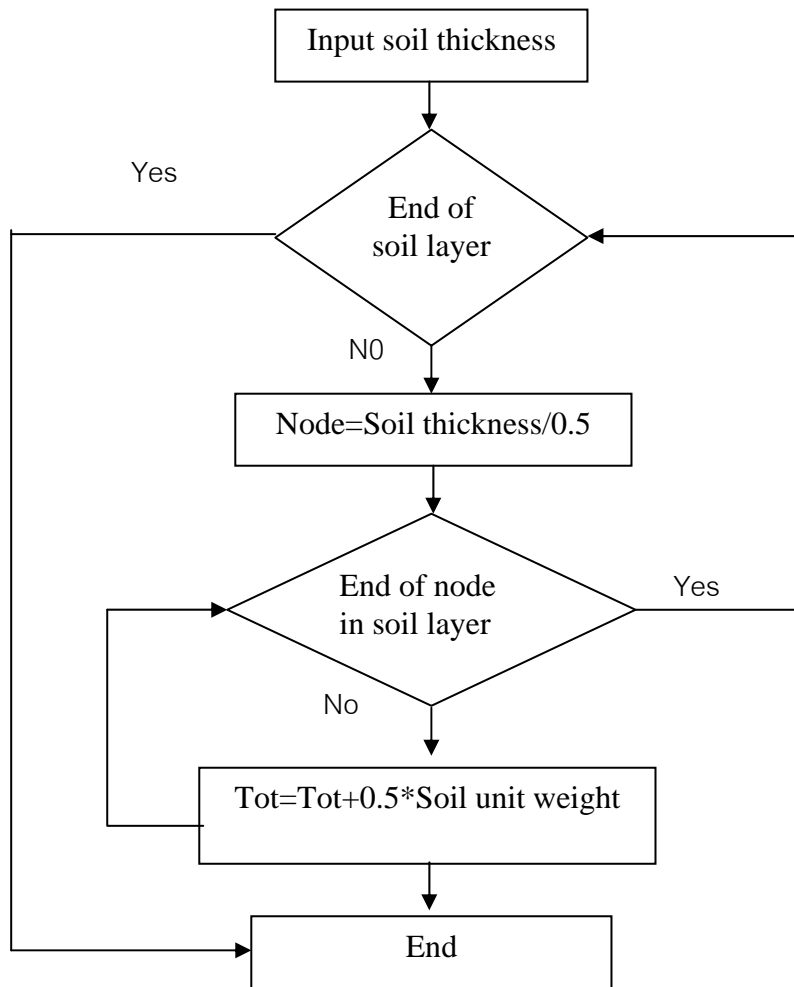
ในการคำนวณของโปรแกรมที่ใช้ในครั้งนี้นั้นทำการคำนวณด้วย Compaq visual fortran โดยใช้วิธีการเชื่อมโปรแกรมทั้ง 2 เข้าด้วยกันแบบ Dynamic link library (dll) เพราะว่าการที่ใช้ Compaq visual fortran เป็นตัวคำนวณนั้นทำให้ในส่วนของคำนวณมีความเร็วเพิ่มขึ้นมาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในการคำนวณที่ใช้แบบจำลองดินที่ซับซ้อน เช่น Pestana เป็นต้น ซึ่งในส่วนนี้จะเริ่มทำการอธิบายกันอย่างละเอียดในขั้นตอนของการคำนวณ โดยจะยังไม่อธิบายในส่วน of แบบจำลองดินที่ใช้ทำการคำนวณ ซึ่งจะอธิบายในบทถัดไป

ในส่วนของการคำนวณด้วยโปรแกรม Compaq visual fortran นั้นได้ทำตัวโปรแกรมให้เป็นลักษณะของ Module นั่นคือ ภายในนั้นจะสามารถที่จะมี Subroutine ได้โดยจะต้องมีตัวแปรที่ทำหน้าที่ในส่งและรับข้อมูล ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

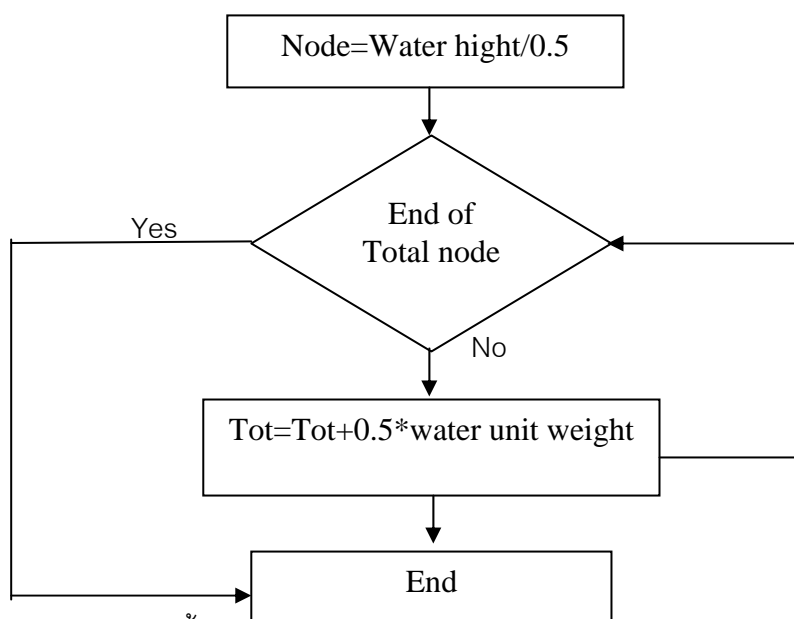
3.3.1 ทำการรับข้อมูลความหนาของชั้นดินเข้ามาเพื่อทำการ คำนวณหา หน่วยแรงรวม (Total stress) ซึ่งมีหลักการทำงานคือ นำความหนาของชั้นที่ 1 มีหารด้วยระยะห่างของ Node ที่กำหนดในที่นี้คือ 0.5 แล้วทำการบวกด้วยค่าที่ได้จากการคูณระหว่าง 0.5 กับ ค่า Unit weight ของ Soil จนครบทุก Node ของชั้นดินชั้นที่ 1 และหลังจากทำในชั้นดินชั้นที่ 1 เสร็จก็ทำในชั้นดินชั้นต่อไปจนครบทุกชั้นดิน ซึ่งการคำนวณเป็นดังภาพที่ 3.9

3.3.2. เมื่อทำการคำนวณหน่วยแรงรวมแล้วต่อไปทำการคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผล โดยก่อนที่จะรู้หน่วยแรงประสิทธิผลนั้น ควรที่จะรู้แรงดันน้ำก่อนโดยการคำนวณแรงดันน้ำนั้น มีขั้นตอนที่คล้ายกับกับคำนวณหน่วยแรงรวมในขั้นตอนที่ 1

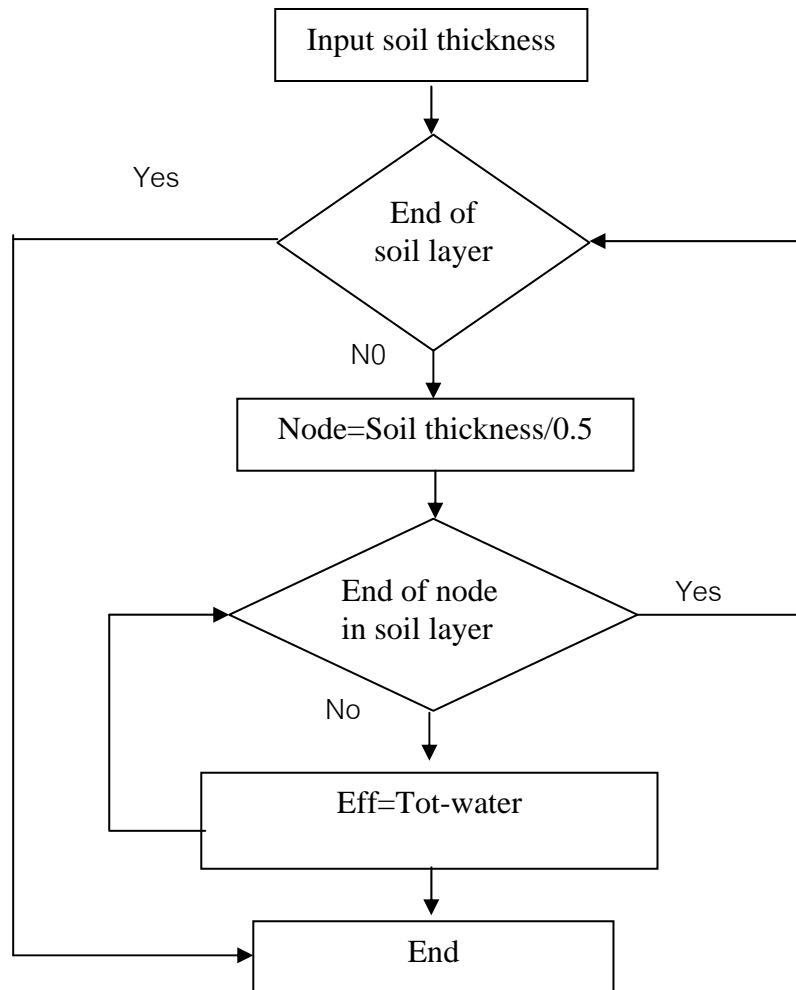
3.3.3. ทำการคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผล การคำนวณหน่วยแรงประสิทธิผลนั้นทำได้ โดยการนำหน่วยแรงรวมลบด้วยแรงดันน้ำ



รูปที่ 3.9 การคำนวณหน่วยแรงรวมของชั้นดิน



รูปที่ 3.10 การคำนวณแรงดันน้ำ



รูปที่ 3.11 การคำนวณหน่วยแรงประสิทธิภาพผลของชั้นดิน

3.3.4 ในขั้นตอนนี้จะอธิบายถึงการทำการคำนวณคลื่นแผ่นดินไหว โดยขั้นตอนการคำนวณจะนำตัวแปรความเร่งเข้ามาทำการคำนวณเพื่อออกเป็นผลลัพธ์ นั่นคือ การเคลื่อนที่ของชั้นดิน (Output displacement), ความเร็ว (Output velocity), ความเร่ง (Output acceleration), ค่าความเค้นเฉือน (Stress), ค่าความเครียดเฉือน (Strain) โดยขั้นตอนของการคำนวณมีดังนี้

3.3.4.1 กำหนดตัวแปรตั้งต้นเท่ากับ 0 ในที่นี้ได้แก่ ค่า Predicted velocity ( $\dot{v}$ ), ค่าความเร่ง  $a_{i,t}$ , ค่าการเคลื่อนที่  $d_{i,t}$ , ค่าความเค้นเฉือน  $\tau_{i,0}$ , ค่าความเครียดเฉือน  $\gamma_{i,0}$ , ค่า Prescribe velocity  $V_{i,t}$



3.3.4.2 ทำการคำนวณหาค่าความเค้นเฉือนที่จุดตั้งแต่มวลดินจนถึงชั้นที่ติดกับชั้นหิน

$$\gamma_{i,t} = \frac{d_{i+1,t} - d_{i,t}}{\Delta z_i} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\gamma_{i,t}$  = Strain ของชั้นดินที่ i เวลาที่ t

$\Delta z_i$  = ระยะห่างระหว่าง node

$d_{i,t}$  = การเคลื่อนตัว Displacement

3.3.4.3 ทำการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียดเฉือนของชั้นดิน

$$\Delta \gamma_{i,t} = \gamma_{i,t} - \gamma_{i,t-1} \quad (3.2)$$

โดยที่  $\gamma_{i,t}$  = Strain ของชั้นดินที่ i เวลาที่ t

3.3.4.4 คำนวณหาค่าความเค้นเฉือนที่ Node ทั้งหมดโดยในที่นี้แสดงในส่วนของแบบจำลองดินชนิด Linear elastic model

$$\tau_{i,t} = \tau_{i,t-1} + G\Delta \gamma_{i,t} \quad (3.3)$$

โดยที่  $\Delta \gamma_{i,t}$  = การเปลี่ยนแปลง Strain ของชั้นดินที่ i เวลาที่ t

G = ค่า Shear modulus

$\tau_{i,t}$  = ค่าความเค้นเฉือน

3.3.4.5 คำนวณค่าความเร็ว Input velocity,  $V_{i,t}$  จากค่าความเร่งเนื่องจากแผ่นดินไหว  $a_{i,t}$

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + \frac{1}{2}(a_{i,t} + a_{i,t-1})\Delta t$$

โดยที่  $V_{i,t}$  = ค่าความเร็ว Input velocity

$a_{i,t}$  = ค่าความเร่งเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว

$\Delta t$  = time step มีค่าเท่ากับ 0.02

3.3.4.6 คำนวณค่าความเร็วเกิดขึ้นในแต่ละ Node ในการคำนวณความเร็วที่เกิดขึ้นในแต่ละ Node นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดนั้นคือ

1 ค่าความเร็วที่ชั้นหิน  $\tilde{v}_{N,t}$  เป็นค่าความเร็วที่ Node สุดท้ายของการคำนวณโดยใน Node นี้เป็น Node ที่ชั้นดินติดกับชั้นหิน

2 ค่าความเร็วที่ชั้นดิน  $\tilde{v}_{i,t}$  เป็นค่าความเร็วที่ Node ที่อยู่ในชั้นดินต่างๆแต่ไม่ถึง Node ชั้นผิวดิน

3 ค่าความเร็วที่ชั้นผิวดิน  $\tilde{v}_{1,t}$  เป็นค่าความเร็วที่ Node ที่อยู่ที่ผิวดิน

ซึ่งทั้งสามความเร็วนั้นมีสูตรการคำนวณที่ต่างกัน โดยค่าความเร็วที่จุดต่างๆนั้นจะต้องทำการอ้างอิงกับสมการคลื่นแผ่นดินไหวดังเช่นสมการที่ 3.4 ซึ่งเป็นสมการแผ่นดินไหวที่ไม่ได้ทำการคิดค่า Material damping,  $\eta$

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3.4)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นของวัตถุ

$d$  = ระยะการเคลื่อนตัวของชั้นดิน

$z$  = ระยะห่างระหว่าง Node

$t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

$\tau$  = ค่าความเค้นเฉือนในชั้นดิน Stress

จากบทที่ 2 เมื่อทำการกระจายค่าสมการที่ 3.4 เพื่อหาค่าความเร็วในชั้นต่างๆนั้นจะได้สมการความเร็วที่ชั้นต่างๆ โดยค่าความเร็วที่ชั้นหินคือ

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \frac{\tilde{v}_{N,t} (\Delta z_{N-1} - v_s \Delta t) + 4v_s V_{I,t} \Delta t - 2\tau_{N-1,t} \Delta t / \rho_N}{\Delta z_{N-1} + v_s \Delta t} \quad (3.5)$$

โดยที่  $\rho_N$  = ความหนาแน่นชั้นหิน

$v_s$  = shear wave velocity ของชั้นหิน

$\Delta z$  = ระยะห่างระหว่าง Node

$\Delta t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

$\tau$  = ค่าความเครียดเฉือนในชั้นหิน

ค่าความเร็วที่ชั้นดินคือ

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \tilde{v}_{i,t} + 2 \frac{\tau_{i,t} - \tau_{i-1,t}}{\Delta z_i + \Delta z_{i-1}} \frac{\Delta t}{\rho_i} \quad (3.6)$$

โดยที่  $\rho_i$  = ความหนาแน่นชั้นดิน

$\Delta z$  = ระยะห่างระหว่าง Node

$\Delta t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

$\tau$  = ค่าความเค้นเฉือนในชั้นดิน

และค่าความเร็วที่ผิวดินคือ

$$\tilde{v}_{1,t+1} = \tilde{v}_{1,t} + 2 \frac{\tau_{1,t}}{\Delta z_1} \frac{\Delta t}{\rho_1} \quad (3.7)$$

โดยที่  $\rho_i$  = ความหนาแน่นชั้นผิวดิน

$\Delta z$  = ระยะห่างระหว่าง Node

$\Delta t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

$\tau$  = ค่าความเค้นเฉือนในชั้นผิวดิน

แต่จากสมการแผ่นดินไหวในแบบที่มีการคิดค่าความหนืดของดิน (Material damping,  $\eta$ ) ดังสมการที่ 3.8 นั้นสมการความเร็วที่ได้จะมีความซับซ้อนกว่าสมการแผ่นดินไหวแบบที่ไม่มีการคิดค่าความหนืดของดิน (Material damping,  $\eta$ ) ซึ่งสมการนี้เป็นสมการที่นำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมทำให้เป็นข้อแตกต่างจากโปรแกรมทั่วไปที่ใช้สมการคลื่นแผ่นดินไหวสมการที่ 3.4

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3.8)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นของวัตถุ

$d$  = ระยะการเคลื่อนตัวของชั้นดิน

$z$  = ระยะห่างระหว่าง Node

$t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

$\tau$  = ค่าความเค้นเฉือนในชั้นดิน Stress

$\eta$  = Material damping

โดยค่าความเร็วในชั้นหินมีค่าเท่ากับ

$$\tilde{v}_{N,t+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N}} \right) \frac{(\tilde{v}_{N,t} (1 - \frac{\eta_N \Delta t}{2\rho_N})(\Delta z_N + \Delta z_{N-1}) - 2v_s \tilde{v}_{N,t} \Delta t + 4v_s \tilde{v}_{1,t} \Delta t) - 2\tau_{N-1,t} \frac{\Delta t}{\rho_N}}{\Delta z_N + \Delta z_{N-1}} \quad (3.9)$$

โดยที่  $\rho_N$  = ความหนาแน่นชั้นหิน

$v_s$  = shear wave velocity ของชั้นหิน

$\Delta z$  = ระยะห่างระหว่าง Node

$\Delta t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

$\tau$  = ค่าความเค้นเฉือนในชั้นหิน

$\eta$  = Material damping ในชั้นหิน

ค่าความเร็วในชั้นดินคือ

$$\tilde{v}_{i,t+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i}} \right) (\tilde{v}_{i,t} (1 - \frac{\eta_i \Delta t}{2\rho_i}) + \frac{F_{i,n} \Delta t}{\rho_i}) \quad (3.10)$$

โดยที่  $\rho_i$  = ความหนาแน่นชั้นดิน

$\Delta z$  = ระยะห่างระหว่าง Node

$\Delta t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

$\tau$  = ค่าความเค้นเฉือนในชั้นดิน

$\eta_i$  = Material damping ในชั้นดิน

$$F_{i,t} = 2 \frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z_i + \Delta z_{i-1}}$$

ค่าความเร็วที่ผิวดินคือ

$$\tilde{v}_{1,t+1} = \left( \frac{1}{1 + \frac{\eta_1 \Delta t}{2\rho_1}} \right) (\tilde{v}_{1,t} (1 - \frac{\eta_1 \Delta t}{2\rho_1}) + \frac{2\tau_{1,t}}{\Delta z_1 \rho_1}) \quad (3.11)$$

โดยที่  $\rho_1$  = ความหนาแน่นชั้นผิวดิน

$\Delta z$  = ระยะห่างระหว่าง Node

$\Delta t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

$\tau$  = ค่าความเค้นเฉือนในชั้นผิวดิน

$\eta_1$  = Material damping ในชั้นผิวดิน

3.3.4.7 เมื่อทำการคำนวณความเร็วจากสมการคลื่นแผ่นดินไหวแล้วนั้นต่อไปจะทำการคำนวณในส่วนของระยะการเคลื่อนตัวที่ Node ต่างๆโดยมีสูตรคำนวณระยะการเคลื่อนตัว คือ

$$d_{i,t+1} = d_{i,t} + \tilde{v}_{i,t+1} \Delta t \quad (3.12)$$

โดยที่  $d_{i,t+1}$  = ระยะการเคลื่อนตัวของ Node i เวลา t

$\tilde{v}_{i,t+1}$  = Predict velocity Node i เวลา n+1

$\Delta t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

3.3.4.8 คำนวณค่า Output velocity ได้จากสมการที่ 3.13

$$v_{i,t} = \frac{1}{2}(\tilde{v}_{i,t+1} + \tilde{v}_{i,t}) \quad (3.13)$$

โดยที่  $\tilde{v}_{i,t+1}$  = Predict velocity Node i เวลา t+1

$v_{i,t}$  = Output velocity

3.3.4.8 คำนวณค่า Output acceleration ได้จากสมการที่ 3.14

$$a_{i,t} = \frac{1}{\Delta t}(\tilde{v}_{i,t+1} - \tilde{v}_{i,t}) \quad (3.14)$$

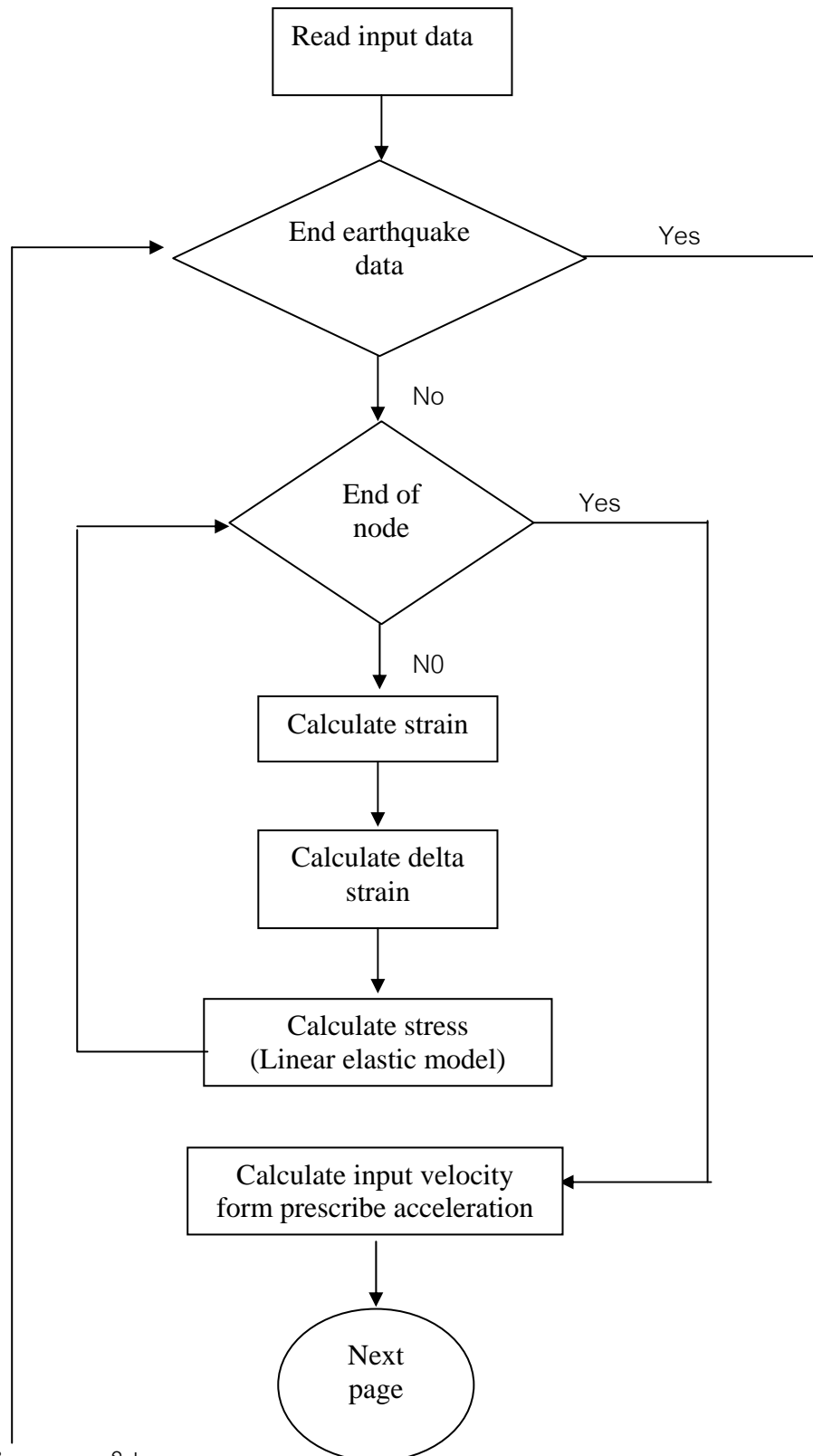
โดยที่  $a_{i,t}$  = Output acceleration

$\tilde{v}_{i,t+1}$  = Predict velocity Node i เวลา t+1

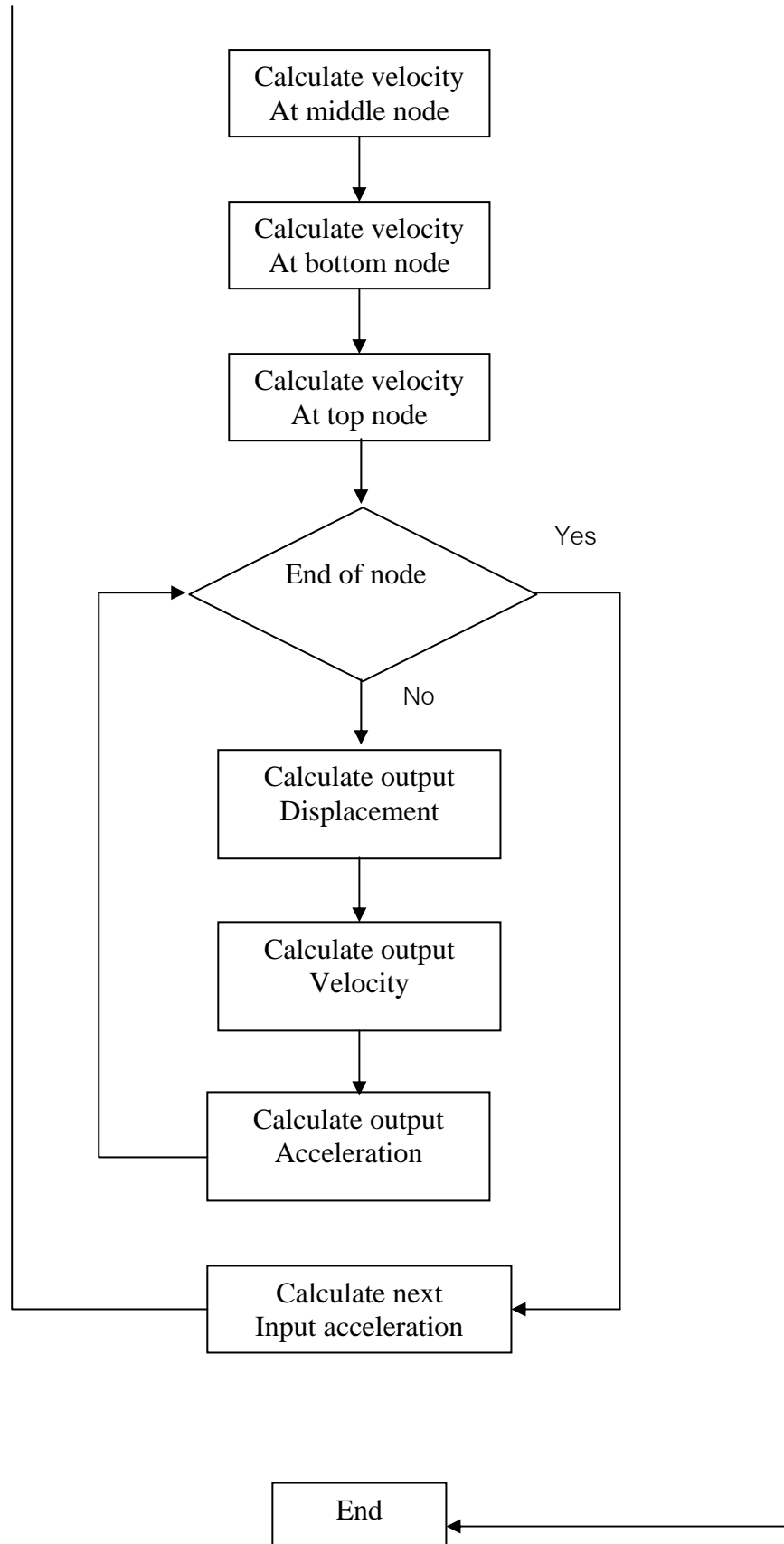
$\Delta t$  = time step ในที่นี้เท่ากับ 0.02

หลังจากที่ทำการคำนวณมาทั้ง 8 ขั้นตอนที่ผ่านมาแล้วโปรแกรมการคำนวณก็จะย้อนกลับไปทำในขั้นตอนที่ 1 ใหม่จนมาถึงขั้นตอนที่ 8 อีกที ซึ่งในแต่ละรอบของการคำนวณทำเพียง 1 ความเร่ง

ที่ได้จากข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว โดยคลื่นแผ่นดินไหวจริงๆจะมีข้อมูลตั้งแต่ 2000 ข้อมูลขึ้นไป  
Algorithm ของการคำนวณมีดังนี้



รูปที่ 3.12 การคำนวณของโปรแกรม

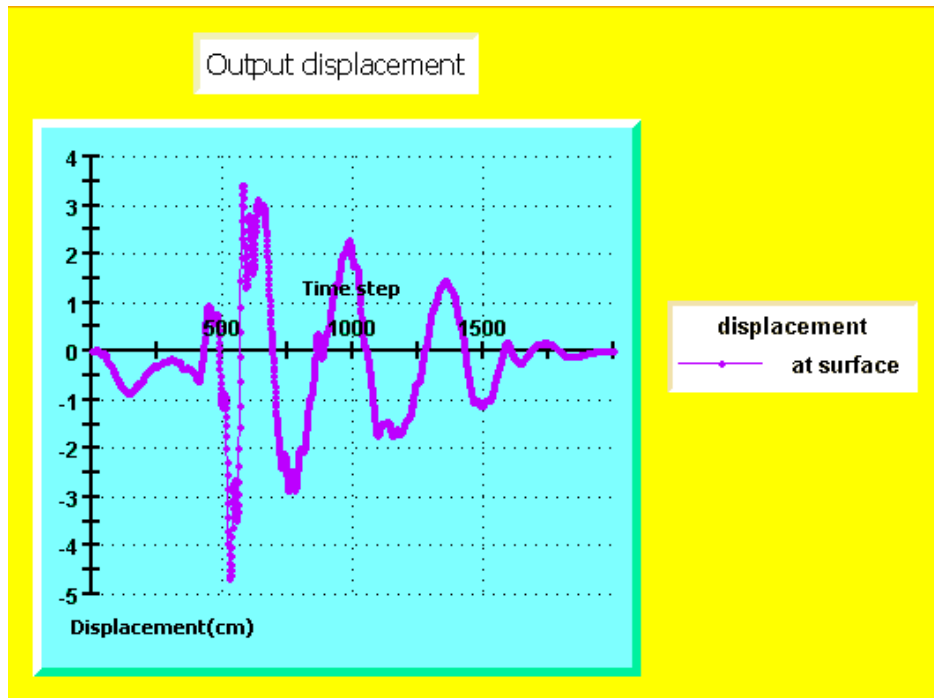


รูปที่ 3.12 การคำนวณของโปรแกรม(ต่อ)

### 3.4 การแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

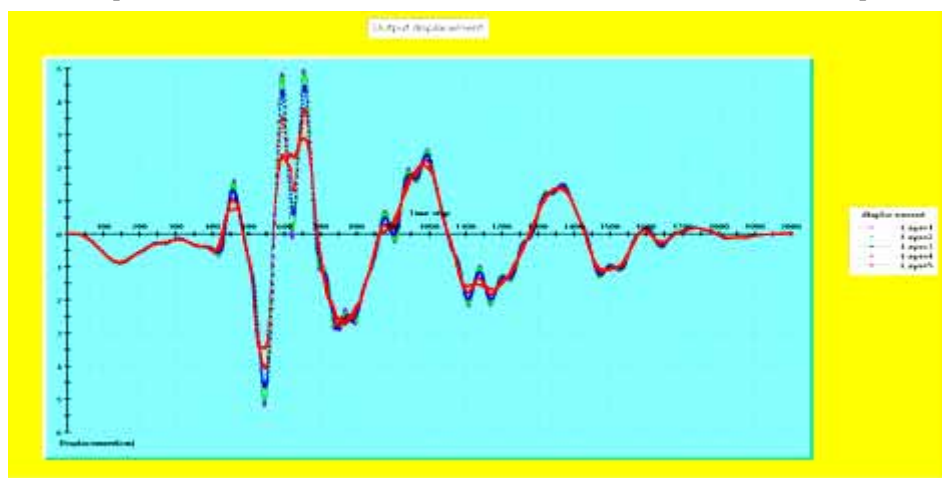
ในส่วนของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนั้นแบ่งออกได้เป็น 7 ส่วนมีดังนี้

3.4.1 การเคลื่อนตัว (Output Displacement) การเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรมนี้สามารถที่จะแสดงออกมาได้หลังจากที่กดปุ่ม Calculation ในโปรแกรม ซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ทุก Node ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual basic ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัว

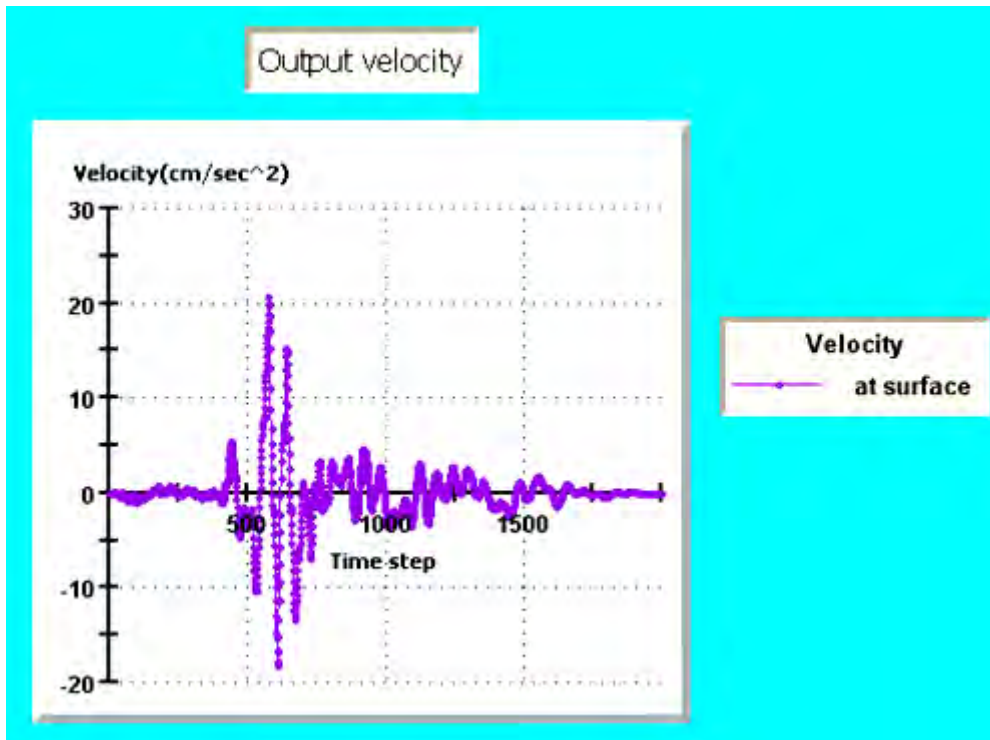
โดยในโปรแกรมสามารถที่จะแสดงผลการเคลื่อนตัวเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดินได้ ซึ่งจะทำให้การนำข้อมูลมาพล็อตกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ผลลัพธ์ของการเคลื่อนตัวจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน

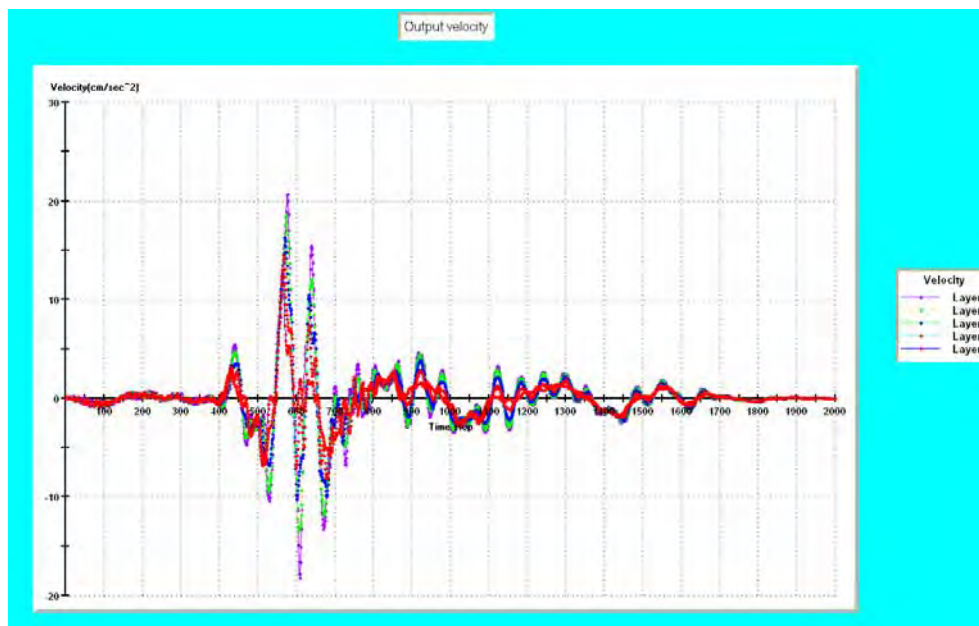


3.4.2 ความเร็ว (Output Velocity) ความเร็วที่ได้จากโปรแกรมนี้ สามารถที่จะแสดงออกมาได้หลังจากที่กดปุ่ม Calculation ในโปรแกรม ซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ทุก Node ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual basic ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.15



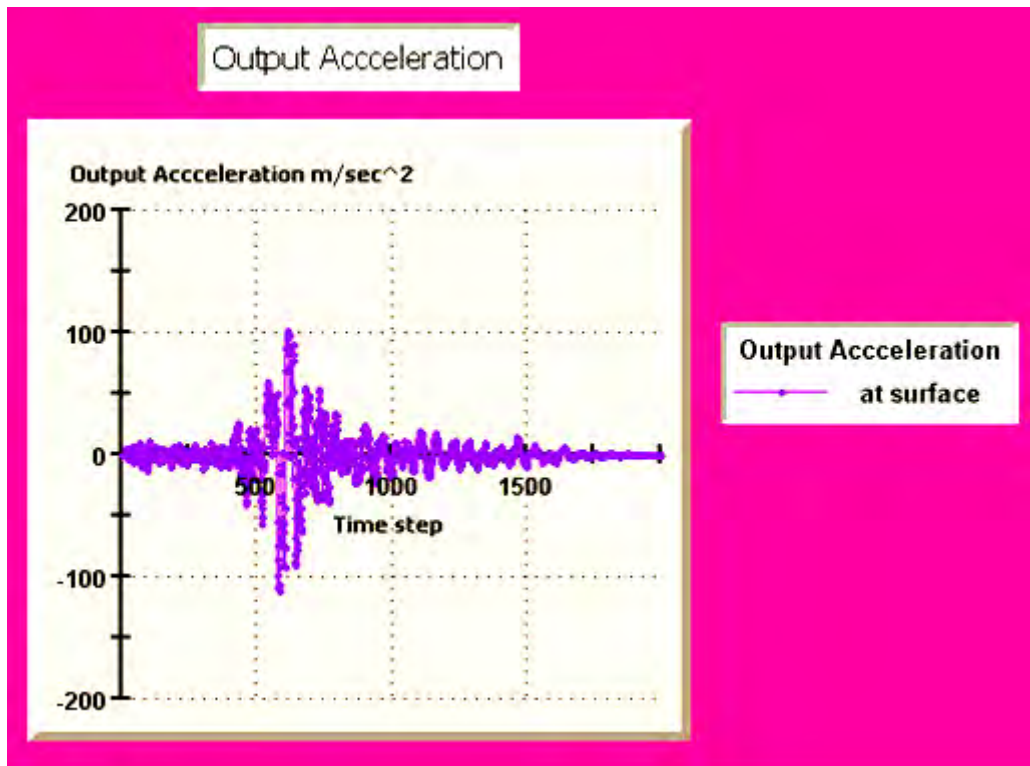
รูปที่ 3.15 ผลลัพธ์ของความเร็วจ

โดยในโปรแกรมสามารถที่จะแสดงความเร็ว เปรียบเทียบในแต่ละชั้นดินได้ ซึ่งจะทำให้การนำข้อมูลมาพล็อตกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.16



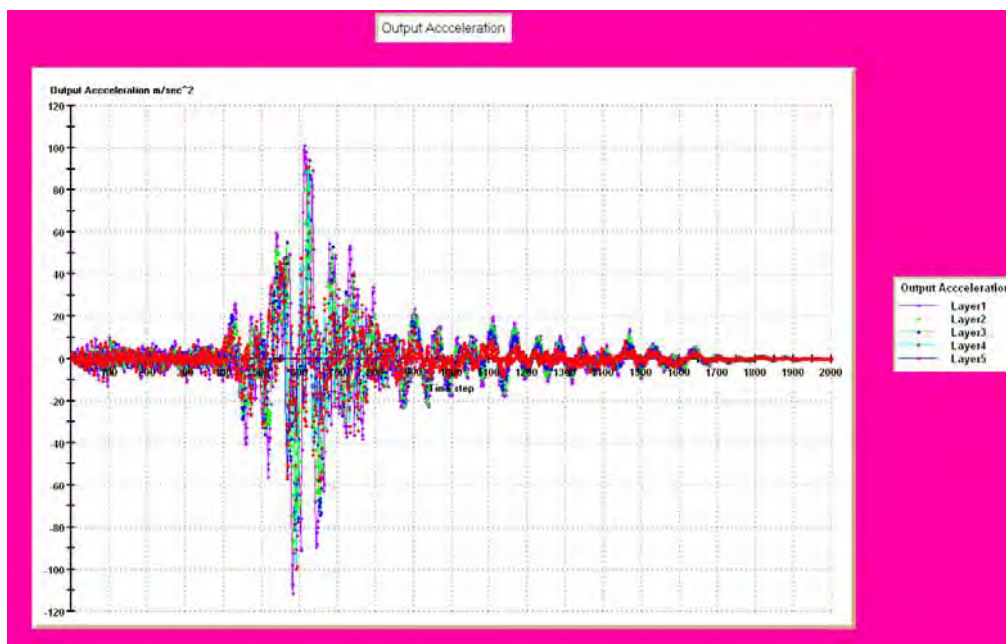
รูปที่ 3.16 ผลลัพธ์ของความเร็วจจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน

3.4.3 ความเร่ง (Output acceleration) ความเร่งที่ได้จากโปรแกรมนั้น สามารถที่จะแสดงออกมาได้หลังจากที่กดปุ่ม Calculation ในโปรแกรม ซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ทุก Node ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual basic ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.17



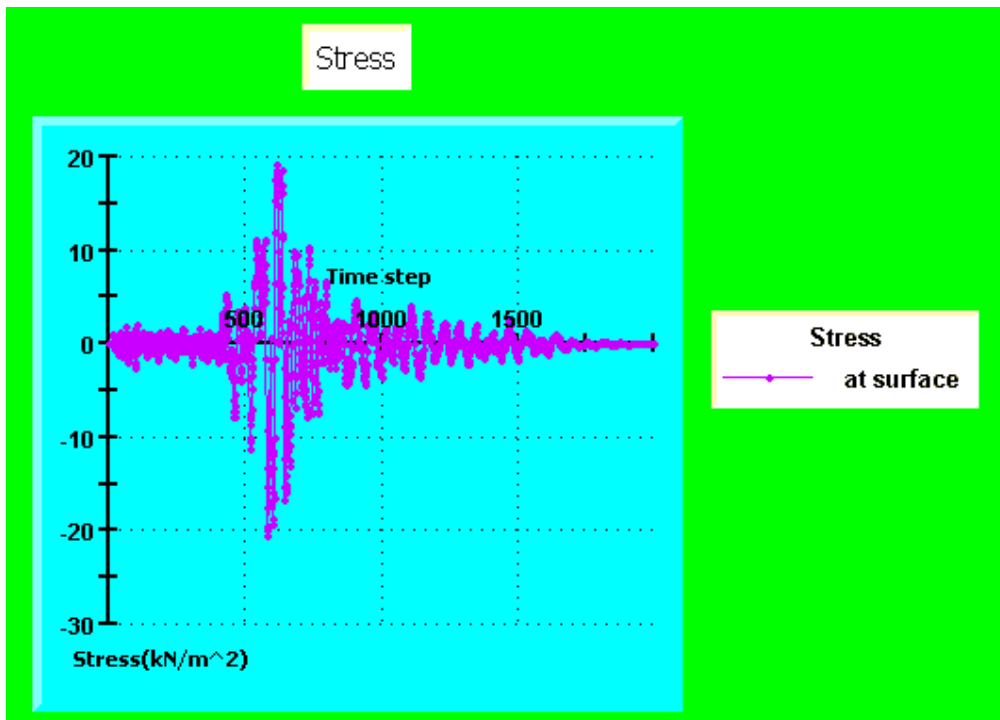
รูปที่ 3.17 ผลลัพธ์ของความเร่ง

โดยในโปรแกรมสามารถที่จะแสดงความเร่ง เปรียบเทียบในแต่ละชั้นดินได้ ซึ่งจะทำให้การนำข้อมูลมาพล็อตกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.18



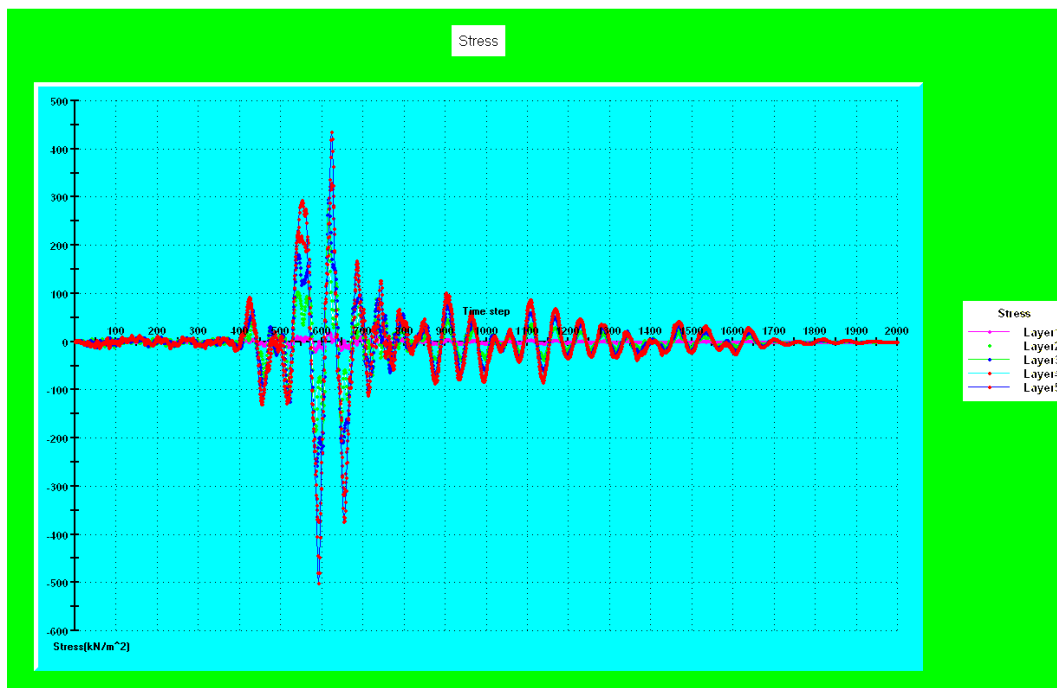
รูปที่ 3.18 ผลลัพธ์ของความเร่งจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน

3.4.4 ความเค้นเฉือน (Output stress) ความเค้นเฉือนที่ได้จากโปรแกรมนี้ สามารถที่จะแสดงออกมาได้หลังจากที่กดปุ่ม Calculation ในโปรแกรม ซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ทุก Node ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual basic ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.19



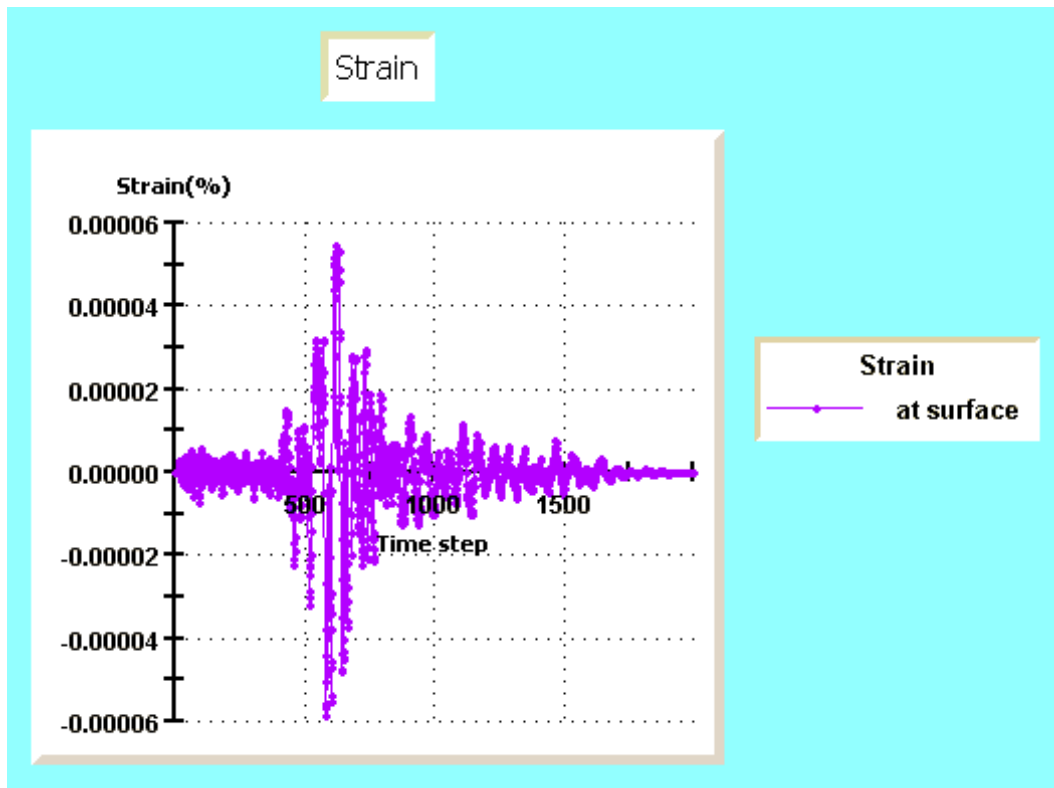
รูปที่ 3.19 ผลลัพธ์ของความเค้นเฉือน

โดยในโปรแกรมสามารถที่จะแสดงความเค้นเฉือน เปรียบเทียบในแต่ละชั้นดินได้ ซึ่งจะทำให้การนำข้อมูลมาพล็อตกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.20



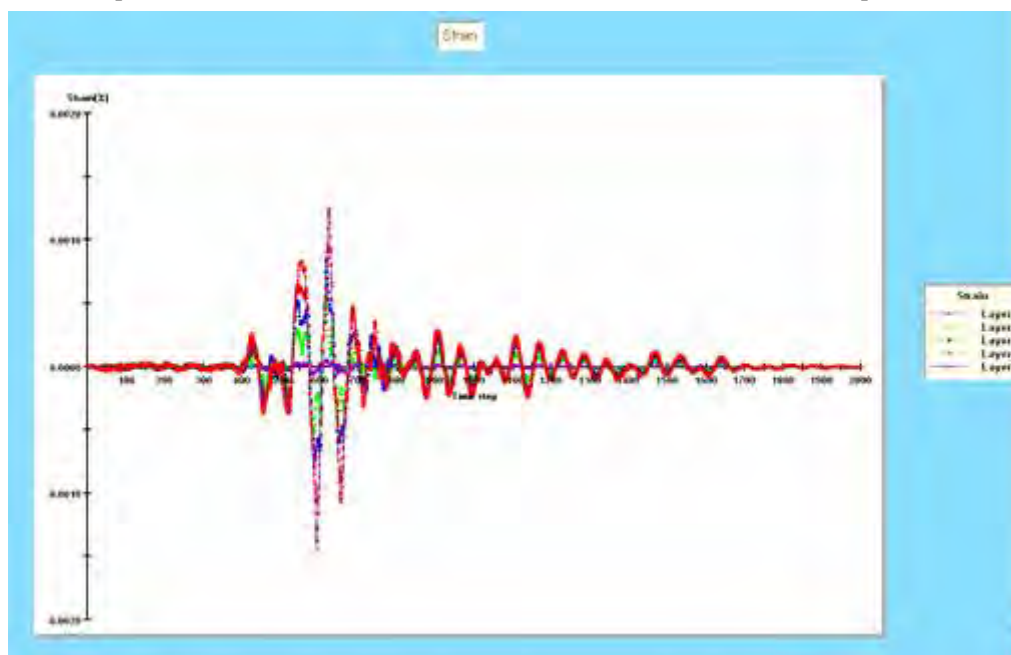
รูปที่ 3.20 ผลลัพธ์ของความเค้นเฉือนจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน

3.4.5 ความเครียดเฉือน (Output strain) ความเครียดเฉือนที่ได้จากโปรแกรมนั้นสามารถที่จะแสดงออกมาได้หลังจากที่กดปุ่ม Calculation ในโปรแกรม ซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ทุก Node ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual basic ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.21



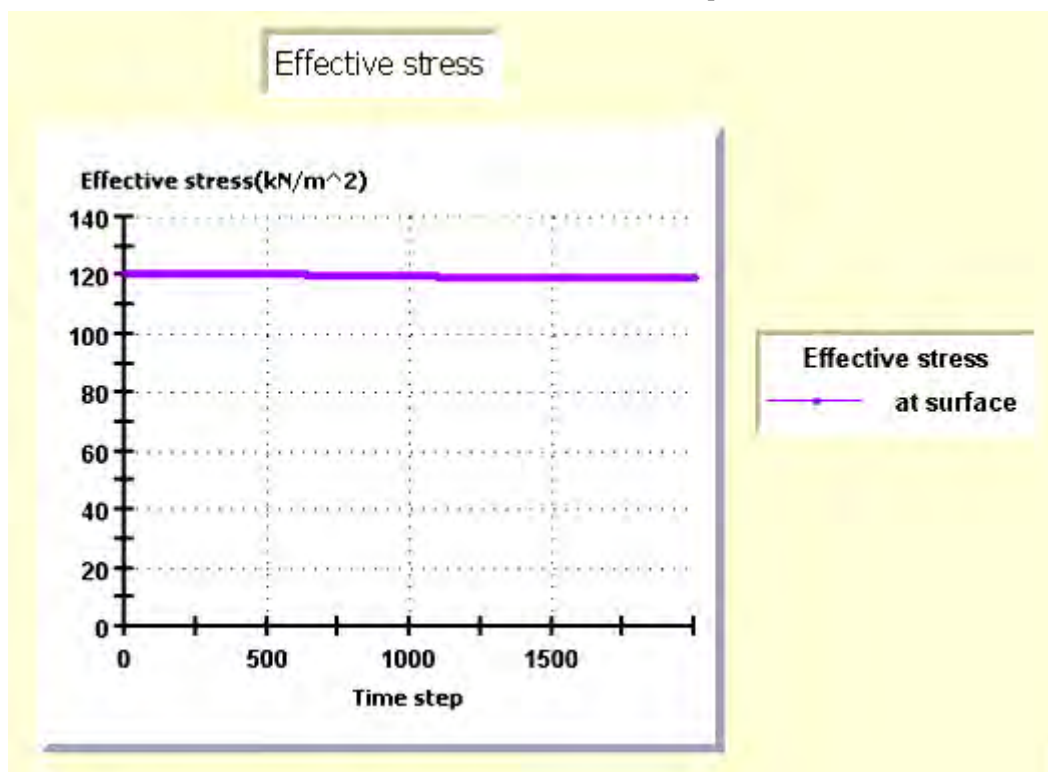
รูปที่ 3.21 ผลลัพธ์ของความเครียดเฉือน

โดยในโปรแกรมสามารถที่จะแสดงความเครียดเฉือน เปรียบเทียบในแต่ละชั้นดินได้ ซึ่งจะทำการนำข้อมูลมาพล็อตกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.22



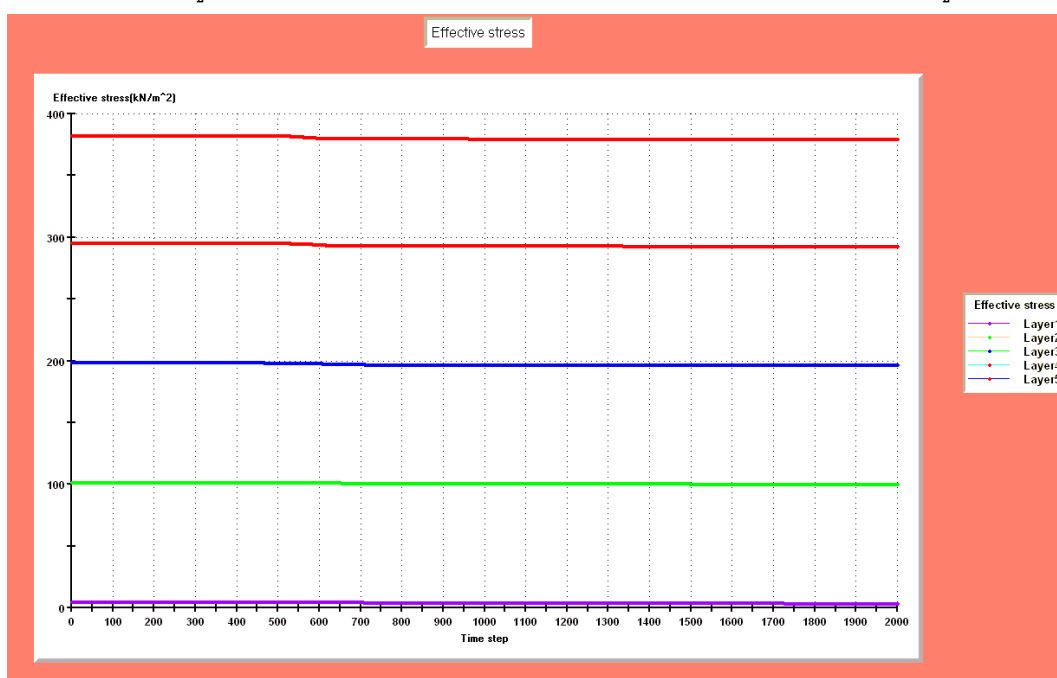
รูปที่ 3.22 ผลลัพธ์ของความเครียดเฉือนจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน

3.4.6 แรงดันดินประสิทธิผล (Effective stress) แรงดันดินประสิทธิผลที่ได้จากโปรแกรมนี้ สามารถที่จะแสดงออกมาได้หลังจากที่กดปุ่ม Calculation ในโปรแกรม ซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ ทุก Node ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual basic ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.23



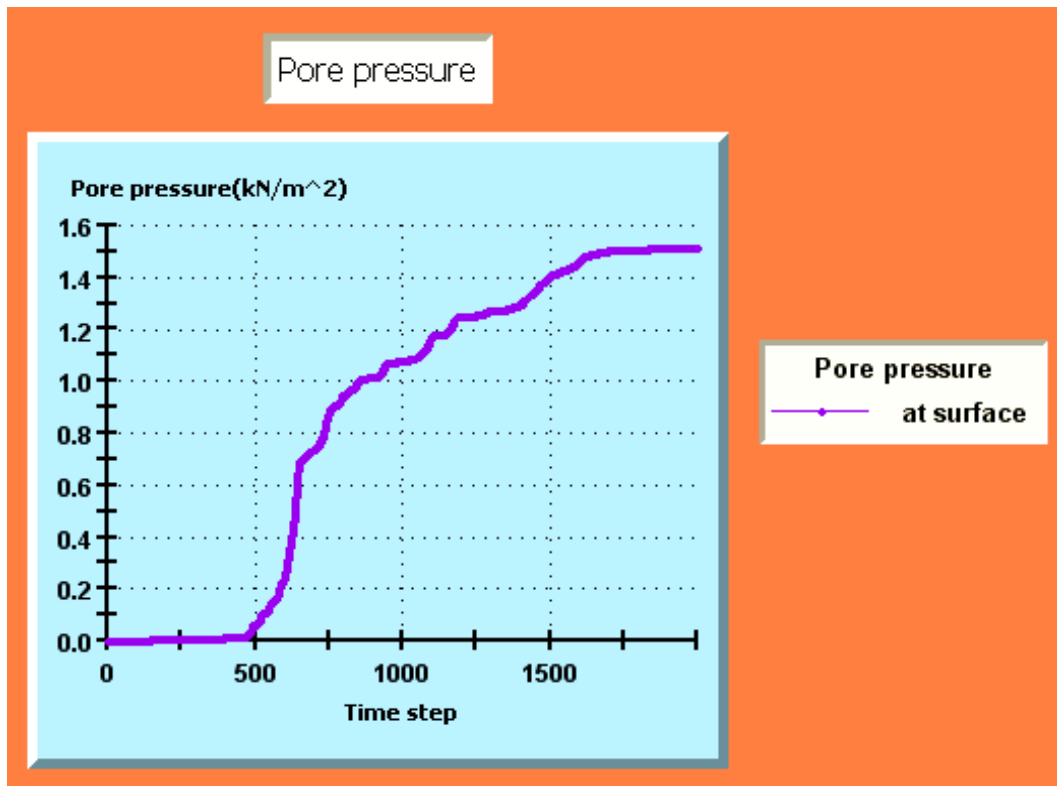
รูปที่ 3.23 ผลลัพธ์ของแรงดันดินประสิทธิผล

โดยในโปรแกรมสามารถที่จะแสดงแรงดันดินประสิทธิผลเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดินได้ ซึ่งจะทำการนำข้อมูลมาพล็อตกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.24



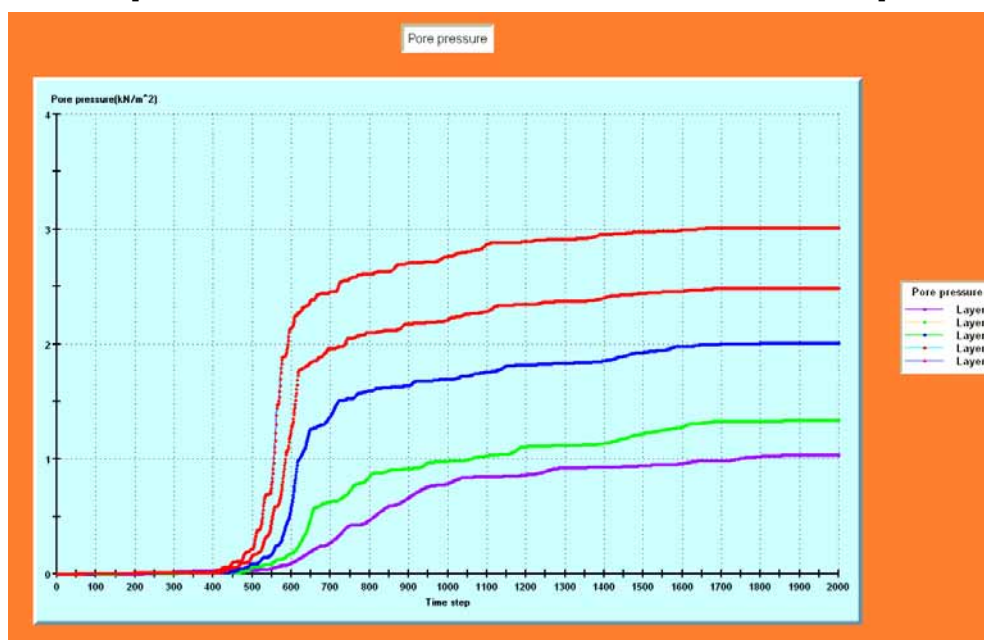
รูปที่ 3.24 ผลลัพธ์ของแรงดันดินประสิทธิผลจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน

3.4.7 แรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore pressure) แรงดันน้ำส่วนเกินที่ได้จากโปรแกรมนี้ สามารถที่จะแสดงออกมาได้หลังจากที่กดปุ่ม Calculation ในโปรแกรม ซึ่งสามารถที่จะแสดงได้ ทุก Node ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual basic ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ผลลัพธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกิน

โดยในโปรแกรมสามารถที่จะแสดงแรงดันน้ำส่วนเกินเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดินได้ ซึ่ง จะทำการนำข้อมูลมาพล็อตกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ผลลัพธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินจากการนำชั้นดินแต่ละชั้นมาเปรียบเทียบกัน



## บทที่ 4

### แบบจำลองดินที่ใช้ในโปรแกรม

บทนี้จะได้กล่าวถึงแบบจำลองดินที่ใช้ในโปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหว 1 มิติ โดยแบบจำลองดินที่ใช้ทั้งหมดนี้จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ แบบจำลองดินโดยที่มีการคิดหน่วยแรงรวม(Total stress model) และ แบบจำลองดินแบบที่คิดหน่วยแรงประสิทธิผล(Effective stress model)

แบบจำลองดินแบบที่คิดหน่วยแรงรวม(Total stress model) ได้แก่

- 1 Linear elastic model
- 2 Viscoelastic model
- 3 Hyperbolic model
- 4 Iwan and Mroz model
- 5 User define soil model

ส่วนแบบจำลองดินแบบที่มีการคิดหน่วยแรงประสิทธิผล(Effective stress model) ได้แก่

- 1 Pestana model

โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะมีความแตกต่างกันนั่นคือ แบบจำลองดินที่ใช้การวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวมนั้นมีข้อดีตรงที่มีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อน แต่ก็มีข้อเสีย นั่นคือไม่สามารถที่จะคิดแรงดันน้ำส่วนเกิน(Excess pore pressure) ส่วนเกินที่เกิดจากคลื่นแผ่นดินไหวได้ในกรณีที่มีระดับชั้นน้ำใต้ดิน ในบทนี้จะทำการอธิบายเป็น 2 ส่วนนั่นคือ ส่วนที่ 1 จะทำการอธิบายแบบจำลองดินแบบหน่วยแรงรวม หลังจากนั้นจะเป็นในส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลที่มีอยู่แบบจำลองเดียวนั่นคือ Pestana Model ซึ่งก่อนที่จะทำการอธิบายถึงแบบจำลองดินแบบต่างๆนั้น จะทำการอธิบายแนวคิดของการประดิษฐ์สมการแบบจำลองดินที่ใช้โดยที่ส่วนใหญ่ในแบบจำลองดินแบบที่คิดหน่วยแรงรวมนั้นมีพื้นฐานมาจากสมการ Linear elastic model แทบทั้งสิ้นแต่จะแตกต่างกันในรายละเอียดของตัวสมการที่ใช้ และแบบจำลองดินที่ใช้ในแต่ละแบบนั้นก็จะมีในส่วนของการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกันออกไปด้วยความยากง่ายขึ้นอยู่กับตัวสมการที่ใช้ โดยแบบจำลองดินที่มีความซับซ้อนที่สุดที่ใช้ในตอนนี้นั่นคือ แบบจำลองดิน Pestana

#### 4.1 Linear elastic stress-strain relation (Hooke's law)

ก่อนที่จะทำการอธิบายแบบจำลองดินที่ใช้ทั้งหมดในโปรแกรมจะทำการอธิบายแนวคิดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองดิน โดยเฉพาะแบบจำลองดินพื้นฐานที่มีค่าของความเครียดเฉือนที่อยู่ในช่วง Small strain ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงๆ ในการเกิดคลื่นแผ่นดินไหวแบบจำลองดินที่มีพื้นฐานทางด้านแนวคิดของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่ง่ายที่สุดก็คือแบบจำลอง ดินชนิด Linear elastic model โดย Hook ซึ่งใช้ค่าความเครียดเฉือนที่ได้จากวัตถุนำมาซึ่งการหาค่าความเค้นเฉือน โดยในที่นี้จะแสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์ในแบบจำลองนี้ที่ละขั้นตอนนี้

สมการพื้นฐานที่เสนอโดย Hooke นั้นเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นหลัก และค่า ความเครียดหลัก โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1

$$\sigma_{i,j} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (4.1)$$

โดยที่  $\sigma_{i,j}$  = ค่าความเค้นหลัก (Normal Stress)

$\varepsilon_{kl}$  = ค่าความเครียดหลัก (Normal Strain)

$C_{ijkl}$  = Tensor อันดับที่ 4

จากสมการ Strain energy function ที่ว่า

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (4.2)$$

โดยที่  $W_{ij}$  = Strain energy function

และค่า Strain energy function มีค่าเท่ากับ

$$W = c_0 + \alpha_{ij} \varepsilon_{ij} + \beta_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} \quad (4.3)$$

โดยที่ค่า  $c_0, \alpha_{ij}, \beta_{ijkl}$  = ค่าคงที่

ดังนั้นค่า Normal Stress จึงมีค่าเท่ากับสมการที่ 4.4 โดยทำการเทียบกับสมการที่ 4.2



$$\sigma_{i,j} = \alpha_{i,j} + (\beta_{ijkl} + \beta_{klij})\epsilon_{kl} \quad (4.4)$$

กำหนดให้สถานะเริ่มต้นนั้น  $\alpha_{i,j} = 0$  สมการที่ 4.4 จึงลดรูปเหลือ

$$\sigma_{i,j} = (\beta_{ijkl} + \beta_{klij})\epsilon_{kl} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 เทียบความสัมพันธ์กับสมการที่ 4.1 จึงได้ความสัมพันธ์ของค่า  $C_{ijkl}$  เท่ากับ

$$C_{ijkl} = \beta_{ijkl} + \beta_{klij} \quad (4.6)$$

จากความสัมพันธ์ของค่า  $C_{ijkl}$  นั้นสามารถที่จะสลับค่าของตัวแปรที่ห้อยท้ายค่า  $C$  ได้ดังสมการที่ 4.7 ตามทฤษฎีของ Green elastic

$$C_{(ij)(kl)} = C_{(kl)(ij)} \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.1 เมื่อทำการกระจายค่าตามแบบวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นเท่ากันทุกประการ (Linear isotropic material) จะได้ค่าดังสมการที่ 4.8

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

*Symmetric*

จากสมการที่ 4.8 เมื่อพิจารณาค่า  $C$  นั้นจะพบว่าจะมีค่า 21 ค่าที่สามารถที่จะมีค่าต่างกันได้ โดยที่อีกครึ่งหนึ่งนั้นจะมีค่าเท่ากันตาม Index ที่ตรงกันข้าม เช่น  $C_{12} = C_{21}$  เป็นต้น

#### 4.1.1 ระนาบสมมาตร (A plane of symmetry)

ในการพิจารณาวัสดุที่เป็นแบบมีคุณสมบัติเชิงเส้นเท่ากันทุกประการ (Linear isotropic material) นั้นวัสดุจะมีค่าคุณสมบัติที่มีค่าเท่ากันแบบสมมาตร โดยในขั้นแรกนี้จะทำการหมุนระนาบ  $x_1$  ไป 180 องศาโดยที่ระนาบอื่นยังคงมีค่าเท่าเดิมซึ่งจะได้ค่าความเค้นเฉือนและค่าความเครียดเฉือนค่าใหม่มีค่า ดังสมการที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

$$\sigma_{ij}^* = l_{ik} l_{jl} \sigma_{kl} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{ij}^* = l_{ik} l_{jl} \varepsilon_{kl} \quad (4.9)$$

โดยที่  $l_{ijkl}$  = ค่าของมุม Cosine ที่แกนนั้นหมุนไปซึ่งเขียนในรูปเมตริกได้เป็น

$$l_{ij} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

เมื่อทำการแทนค่าจากสมการที่ 4.10 ลงในสมการที่ 4.8 และ 4.9 ได้ค่าความเค้นหลักและค่าความเครียดหลักดังสมการที่ 4.11 และ 4.12

$$\sigma_{ij}^* = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & -\sigma_{12} & -\sigma_{13} \\ -\sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ -\sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{ij}^* = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & -\varepsilon_{12} & -\varepsilon_{13} \\ -\varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ -\varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ค่า Normal stress tensor และ ค่า Normal strain tensor ที่เกิดจากการหมุนแกนไปยังคงมีค่าความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1 นั่นคือ

$$\sigma_{ij}^* = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^* \quad (4.13)$$

จากสมการที่ 4.8 ค่าความเค้นหลักมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_1 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2 + C_{13}\varepsilon_3 + C_{14}\varepsilon_4 + C_{15}\varepsilon_5 + C_{16}\varepsilon_6 \quad (4.14)$$

และค่าความเค้นหลักที่ได้จากสมการที่ 4.13

$$\sigma_1^* = C_{11}\varepsilon_1^* + C_{12}\varepsilon_2^* + C_{13}\varepsilon_3^* - C_{14}\varepsilon_4^* + C_{15}\varepsilon_5^* - C_{16}\varepsilon_6^* \quad (4.15)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ 4.14 และ 4.15 จึงได้ค่า  $C_{14}=C_{16}=C_{24}=C_{26}=C_{34}=C_{36}=C_{45}=C_{56}=0$  ค่าสมการที่ 4.8 จึงลดลงรูปเหลือ ดังสมการที่ 4.16

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & C_{15} & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & C_{25} & 0 \\ & & C_{33} & 0 & C_{35} & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & C_{46} \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

*Symmetric*

#### 4.1.2 ระนาบสมมาตรแบบ 2 ระนาบ (Two plane symmetry)

จากที่ได้ทำการหมุนระนาบ  $x_1$  ต่อไปจะทำการหมุนระนาบ  $x_2$  โดยที่ค่า Cosine มีค่าคือ

$$l_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

ซึ่งเมื่อได้ทำในแบบเดียวกับการหมุนระนาบ  $x_1$  ได้ค่าความเค้นหลักและความเครียดหลักคือ

$$\sigma_{ij}^* = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & -\sigma_{12} & -\sigma_{13} \\ -\sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ -\sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\varepsilon_{ij}^* = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & -\varepsilon_{12} & -\varepsilon_{13} \\ -\varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ -\varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมการของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนแบบเดียวกับที่ทำการเปรียบเทียบในการหมุนแกน  $x_1$  จึงสามารถที่จะตัดค่า  $C_{15}, C_{25}, C_{35}$  และ  $C_{46}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 ดังสมการที่ 4.20

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

*Symmetric*

#### 4.1.3 Transverse isotropy

ในการหมุนระนาบในแบบมุมใด ๆ นั้นสามารถที่เขียนสมการของมุมระนาบของการหมุนแบบเมตริกได้คือ

$$l_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

ในรูปแบบของการหมุนมุมแบบใด ๆ นั้นสามารถที่จะได้ค่าดังนี้คือ  $C_{11}=C_{22}$ ,  $C_{13}=C_{23}$ ,  $C_{44}=1/2(C_{11}-C_{12})$ ,  $C_{55}=C_{66}$  แทนค่า  $C$  ที่ได้ในสมการที่ 4.20

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2}(C_{11}-C_{12}) & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

*Symmetric*

#### 4.1.4 Full isotropy

จากสมการ Material constant ในสมการที่ 4.20 นั้นเมื่อได้ทำการหมุน ระบายทั้งหมด 3 แกน จะได้สมการ Material constant ดังสมการที่ 4.23

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 & 0 \\ & \text{Symmetric} & & & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 \\ & & & & & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

จากสมการที่ 4.23 เมื่อแทนค่า  $C_{12}$  และ  $\frac{1}{2}(C_{11} - C_{12})$  ด้วยค่า  $\lambda$  และ  $\mu$  ตามลำดับซึ่งเรียกทั้ง 2 คำว่า Lamé's constant ได้สมการที่ 4.24

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu & 0 & 0 \\ & \text{Symmetric} & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

#### 4.1.5 Tensor form

จากหัวข้อที่ผ่านมาเมื่อได้ทำการหมุน ระบายเข้าสู่ระบบ Full isotropy แล้วแทนค่าตัวแปร ใน Material constant ด้วย Lamé's constant ดังสมการที่ 4.24 ดังนั้นเมื่อเขียนในรูปของ Tensor form แล้วจึงได้สมการที่ 4.25

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (4.25)$$

โดยที่  $\lambda, \mu = \text{Lamé's constant}$

$\delta$  = Kronecker delta

แทนสมการที่ 4.25 ในสมการที่ 4.1 จึงได้สมการที่ 4.26

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} \quad (4.26)$$

โดยที่  $\varepsilon_{kk}$  = Volumetric strain

พิจารณาค่า Volumetric strain โดยกำหนดให้  $i = j$  แล้วทำการย้ายข้างดังสมการที่ 4.27

$$\varepsilon_{kk} = \frac{\sigma_{kk}}{3\lambda + 2\mu} \quad (4.27)$$

โดยที่  $\sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$

แทนค่า สมการที่ 4.27 ลงในสมการที่ 4.26 แล้วทำการจัดรูปดังสมการที่ 4.28

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{\lambda}{2\mu(3\lambda + 2\mu)}\sigma_{kk}\delta_{ij} + \frac{1}{2\mu}\sigma_{ij} \quad (4.28)$$

**4.1.5.1 การทดลอง Hydrostatic pressure** โดยกำหนดให้มีหน่วยแรงที่มากกระทำกับวัสดุที่มีขนาดเท่ากันและกระทำทุกทิศทาง เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยการกำหนดให้ ความเครียดหลักอยู่ในแกน x และความเค้นหลักในแกน y จะได้เส้นความชันของกราฟคือ bulk modulus K จากสมการที่ 4.27 ทำการหารด้วยสาม ได้สมการ bulk modulus คือ

$$K = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_{kk}} = \lambda + \frac{2}{3}\mu \quad (4.29)$$

**4.1.5.2 การทดลอง Simple compression test** กำหนดให้มีหน่วยแรงมากกระทำกับวัสดุในแกน y เพียงอย่างเดียวเมื่อนำค่าความเค้นเชื่อมกับความเครียดเชื่อมมาทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ จะได้เส้นความชันของกราฟคือ ค่า Young's modulus, E จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นหลักในแกน y โดยที่แกนอื่นมีค่าเท่ากับ 0

$$\sigma_{11} = 2\mu\varepsilon_{11} + \lambda\varepsilon_{kk} \quad (2.30)$$

$$0 = 2\mu\varepsilon_{22} + \lambda\varepsilon_{kk} \quad (2.30)$$

$$0 = 2\mu\varepsilon_{33} + \lambda\varepsilon_{kk}$$

ค่า Young's modulus  $E$  ที่ได้โดยการแทนค่า  $i, j$  จากสมการที่ 4.28 ด้วยค่า 1,1 ได้สมการ Young's modulus คือ

$$E = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (4.31)$$

และเมื่อนำอัตราส่วนของความเค้นเฉือนในแกนอื่นๆ เช่น แกน  $x, z$  มาทำเป็นอัตราส่วนกับความเค้นเฉือนในแนวแกน  $y$  แล้วแทนลงในสมการที่ 4.28 จะได้อัตราส่วน Poisson's ratio ดังสมการที่ 4.32

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (4.32)$$

**4.1.5.3 การทดลอง Pure shear test** เป็นการทดลองที่กำหนดไม่ให้มีหน่วยแรงใดๆ กระทำกับวัสดุในแนวแรงกด แต่จะมีหน่วยแรงที่กระทำกับวัสดุในแนวแรงเฉือนแทน โคนเมื่อนำหน่วยแรงความเครียดเฉือนและความเค้นเฉือนในแนวแรงเฉือนมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ในแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับจะได้เส้นความชันของกราฟคือ ค่า Shear modulus,  $G$  จากสมการที่ 4.26 อัตราส่วนของค่า  $\sigma_{12}/2\varepsilon_{12} = \sigma_{12}/\gamma_{12}$  ซึ่งมีเท่ากับค่า  $\mu$  ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์คือ

$$G = \mu \quad (4.33)$$

**4.1.5.4 การทดลอง Uniaxial test** การทดลองนี้คล้ายกับการทดลอง Simple compression test แต่แทนที่จะใช้แรงกดในแนวแกนกลับเป็นการใช้แรงดึงในแนวแกนแทนโดยเมื่อนำหน่วยแรงความเครียดหลักและความเค้นหลักในแนวแรงเฉือนมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ในแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับจะได้เส้นความชันของกราฟคือ Constrain modulus,  $M$  จากสมการที่ 4.26 แทนค่า  $i, j$  เท่ากับ 1 ได้ดังสมการที่ 4.34

$$\sigma_{11} = \lambda\varepsilon_{11} + 2\mu\varepsilon_{11} \quad (4.34)$$

$$M = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} = \lambda + 2\mu \quad (4.35)$$

และเมื่อทำการเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่ได้มีดังนี้ ค่า Bulk modulus,  $K$  กับค่า Young's modulus,  $E$  มีความสัมพันธ์กันคือ

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4.36)$$

ค่า Young's modulus,  $E$  กับค่า Shear modulus,  $G$  มีความสัมพันธ์กันคือ

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.38)$$

ค่า Young's modulus,  $E$  กับค่า Shear modulus,  $G$  และ Bulk modulus,  $K$  มีความสัมพันธ์กันคือ

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (4.39)$$

ค่า Poisson's ratio,  $\nu$  กับค่า Shear modulus,  $G$  และ Bulk modulus,  $K$  มีความสัมพันธ์กันคือ

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (4.40)$$

โดยที่ค่าตัวแปรต่างๆที่มีค่าเป็นไปได้ในทฤษฎีคือ  $G > 0$ ,  $E > 0$ ,  $K > 0$  และ  $-1 < \nu < \frac{1}{2}$



#### 4.2 แบบจำลอง Linear elastic model

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้ทำการอธิบายขั้นตอนและแนวความคิดของแบบจำลอง Linear elastic model ซึ่งสมการนั้นได้ถูกคิดค้นโดย Hooke ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานที่เรียบง่ายและใช้เป็น พื้นฐานของแบบจำลองอื่นๆอีกมากมาย โดยสมการที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแผ่นดินไหวโดยการใช้สมการของ Hooke นั้นเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและค่าความเครียดเฉือนคือ

$$\partial \tau = G \partial \gamma \quad (4.41)$$

ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้ได้ถูกใช้เป็นสมการพื้นฐานที่ได้เริ่มทำการคำนวณกับสมการแผ่นดินไหวเพื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้อง กับโปรแกรมแผ่นดินไหวโปรแกรมอื่นๆว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยสมการนี้ ค่า Shear modulus ,G นั้นได้อธิบายถึงที่มาและความสัมพันธ์จากสมการของ Hooke ในรูปแบบการทดลอง Pure shear test และได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและค่าความเครียดเฉือนเอาไว้ ดังสมการที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนคือ

$$\sigma_{12} = \mu \gamma_{12} \quad (4.42)$$

โดยที่  $G = \mu$  จากการทดลอง Pure shear test

#### 4.3 แบบจำลอง Viscoelastic model

แบบจำลอง Viscoelastic ที่ใช้นั้นมีรูปแบบสมการที่ใกล้เคียงกับ linear elastic แต่สมการนี้จะมีการคิดในส่วนของ damping material และ อัตราของความเครียด (Strain rate) โดยรูปแบบของสมการมีดังนี้คือ

$$\partial \tau = G \partial \gamma + \eta \dot{\gamma} \quad (4.43)$$

โดยที่  $G = \mu$  จากการทดลอง Pure shear test

$\eta$  = Damping material

$\dot{\gamma}$  = Strain rate ( $\frac{\partial \gamma}{\partial t}$ )

#### 4.4 แบบจำลอง Hyperbolic model

ในแบบจำลอง Hyperbolic model เป็นแบบจำลอง Non-linear elastic model โดยเป็นแบบจำลองที่มีสมการยังไม่ซับซ้อนเท่าไรแต่ในการใช้สมการ Hyperbolic นั้นจะต้องทำการเขียนโปรแกรม ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของแบบจำลอง Hyperbolic โดยมีข้อกำหนดดังนี้

1 ในสภาวะเริ่มต้น ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนต้องไม่เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นแต่จะเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะกราฟ backbone curve

2 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนต้องเป็นไปตามกฎของ Masing rule นั่นคือ ลักษณะความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและค่าความเครียดเฉือนทั้งในช่วงที่มีการให้น้ำหนัก (Loading) และลดน้ำหนัก (Unloading) จะมีลักษณะของเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่คล้ายกัน แต่เมื่อผ่านรอบแรกของการเพิ่มและลดน้ำหนักไปแล้วนั้น อัตราส่วนของความสัมพันธ์จะมีค่าเป็น 2 เท่าของความสัมพันธ์แบบเดิม

3 ถ้าค่าของความเค้นเฉือนมากกว่าค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นเดิม จะต้องทำการเปลี่ยนค่าความเค้นเฉือนย้อนกลับเป็นความเค้นเฉือนตัวใหม่ที่มากกว่าความเค้นเฉือนเดิม

โดยแบบจำลอง Hyperbolic นั้นมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.44

$$\frac{\partial \tau - \tau_r}{2} = F_{bb} \left( \frac{\partial \gamma - \gamma_r}{2} \right)$$

(4.44)

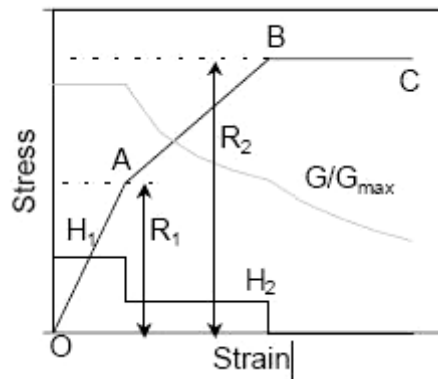
โดยที่  $\tau_r$  = reversal stress หรือ Stress ย้อนกลับ

$\gamma_r$  = reversal strain หรือ Strain ย้อนกลับ

$$F_{bb}(\gamma) = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + (G_{\max} / \tau_{\max}) |\gamma|} \quad (4.45)$$

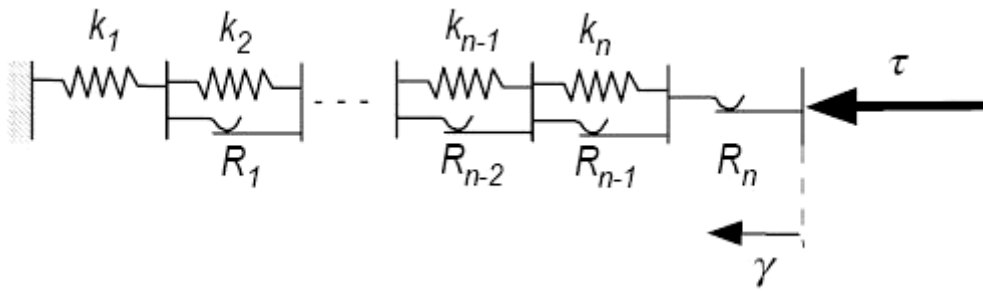
#### 4.5 แบบจำลอง Iwan and Mroz model

แบบจำลองดิน Iwan and Mroz นี้เป็นแบบจำลองดินที่คิดค้นโดย Iwan (1967) and Mroz (1967) โดยมีแนวคิดคือ การพังทลายของชั้นดินนั้นจะมีค่าความเค้นเฉือนคงที่ค่าใดค่าหนึ่งกำหนดอยู่ เมื่อดินชั้นที่ 1 พังทลายเนื่องจากการสั่นไหวการพังทลายก็เข้าไปสู่ชั้นดินชั้นถัดไปซึ่งมีค่าความเค้นเฉือนพังทลายที่มีค่าคงที่เช่นกัน และการพังทลายของชั้นดินจะหยุดลงที่ชั้นใดชั้นหนึ่งเมื่อค่าความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นไม่มากกว่าค่าความเค้นเฉือนวิบัติของดินชั้นนั้นๆ โดยในแต่ละชั้นของการพังทลายจะใช้วิธีสูตรเดียวกับแบบจำลองดิน Linear elastic model นั่นคือใช้สูตรที่ 4.41 ซึ่งลักษณะของชั้นดินแต่ละชั้นจะมีค่าความเค้นเฉือนของชั้นดิน เป็นค่าคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 4.1



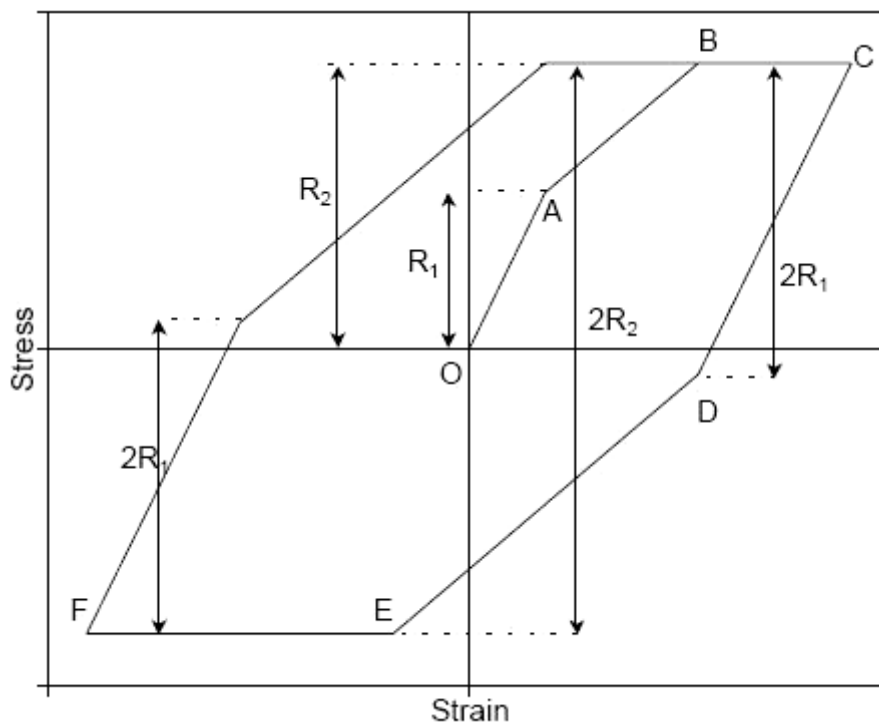
รูปที่ 4.1 ค่าความเค้นเฉือน Stress ที่ชั้นดินใดๆมีค่าคงที่ (ค่า R)

จากรูปที่ 4.1 นั้นเมื่อชั้นดินชั้นที่ 1 มีค่าความเค้นเฉือนมากกว่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นก็จะทำการพิจารณาไปที่ชั้นดินชั้นที่ 2 ที่มีค่า  $R_2$  โดยในแต่ละชั้นดินจะมีค่าความเค้นเฉือนค่าใดค่าหนึ่งคงที่อยู่เสมอเพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว และลักษณะของการคิดในแต่ละชั้นจะคิดแบบ Linear elastic model แต่ต่างกันตรงที่ ดินแต่ละชั้นจะมีค่าความแข็ง (Stiffness) ต่างกันออกไป ซึ่งค่าความแข็งของชั้นดินในแบบจำลองการคำนวณนี้นั้นแทนด้วยสัญลักษณ์ H จากรูปที่ 4.1 เมื่อดินมีค่าความเครียดเฉือนมากขึ้น ค่าความแข็งของดินก็จะมีค่าลดลงแปรผกผันกัน โดยชั้นดินแต่ละชั้นสามารถที่จะทำการแสดงให้เห็นภาพดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะของชั้นดินแต่ละชั้นในด้านข้างที่รับแรงเฉือนเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น โดยชั้นดินแต่ละชั้นจะมีค่าความแข็ง (Stiffness) และค่าความเค้นเฉือนเป็นค่าคงที่

แบบจำลองดิน Iwan and Mroz นั้นเป็นแบบจำลองดินที่เป็นไปตามกฎของ Masing (1926) นั่นคือ รูปแบบความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนจะมีรูปแบบที่เหมือนกันทั้งในด้านของการเพิ่มน้ำหนัก (Loading) และการลดน้ำหนัก (Unloading) โดยรูปแบบนั้นคือค่าความแข็งจะลดลงเมื่อค่าความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นและความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนจะมีค่าเป็น 2 เท่าเมื่อผ่านการเพิ่มน้ำหนักและการลดน้ำหนักในรอบที่ 1 ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่เป็นไปตาม Masing Rule

ค่าความเค้นเฉือนในแต่ละชั้นดินนั้นสามารถที่จะนำมาคำนวณหาค่าคงที่ของความแข็งของชั้นดินได้โดยจะเป็นค่าคงที่ ซึ่งความแข็งของชั้นดินมีสูตรคือ

$$H_i = \frac{G_{i+1}\gamma_{i+1} - G_i\gamma_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i} \quad (4.46)$$

โดยที่  $H_i$  = ค่าความแข็งของชั้นดิน

$G_i$  = Shear modulus

$\gamma_i$  = Shear strain

ค่าความเค้นเฉือนที่ชั้นดินใดๆเป็นไปตามสูตร Linear elastic คือ

$$\partial\tau_i = G_i\partial\gamma_i \quad (4.47)$$

#### 4.6 แบบจำลอง User define soil model

ในแบบจำลองดิน User define soil model นั้นเป็นแบบจำลองดินที่มีลักษณะการทำงานที่คล้ายกับแบบจำลองดิน Iwan and Mroz model นั่นคือในชั้นดินแต่ละชั้นจะมีค่าของความแข็ง (Stiffness) เป็นค่าคงที่ที่กำหนดอยู่ เมื่อดินมีค่าความเครียดเฉือนมากกว่าค่าความเครียดเฉือนที่กำหนดไว้ชั้นดินก็จะมีค่าความเค้นเฉือนมากกว่าชั้นที่ทำการวิเคราะห์และดินในชั้นนั้นก็จะมีค่าความเค้นเฉือนมากกว่าชั้นที่เกิดการพังทลายไปก็จะทำการคิดแบบเดียวกันกับชั้นที่ 1 ที่เกิดการพังทลายคิดไปจนกว่าค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นไม่เกินค่าความเค้นเฉือนวิบัติของชั้นดินนั้นๆ เมื่อค่าความเครียดเฉือนมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ค่าความแข็งของดินลดลง และเมื่อค่าความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 4.4

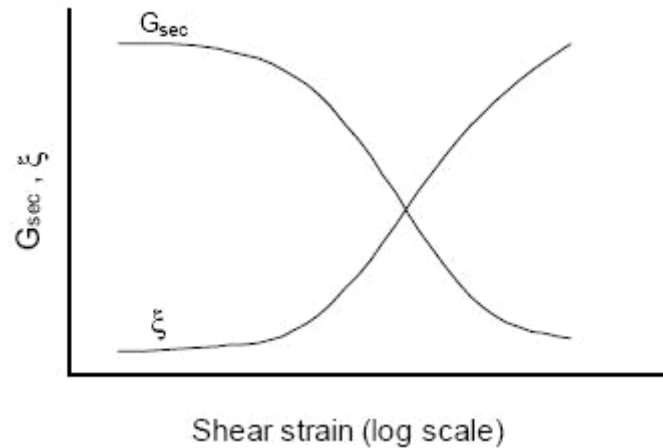
ในการคิดค่าการความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นดินนั้นพิจารณาได้ 2 แบบคือ

1 แบบที่ไม่มีการคิดค่าความหนืดของวัสดุ (Damping material) ซึ่งจะเป็นการใช้สูตร Linear elastic model

$$\partial\tau = G\partial\gamma \quad (4.48)$$

2 แบบที่คิดค่าความหนืดของวัสดุ (Damping material) ซึ่งจะเป็นการใช้สูตร Viscoelastic model

$$\partial\tau = G\partial\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad (4.49)$$



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าความเครียดเฉือนกับค่าความแข็ง (Stiffness) และค่าความหนืดของวัสดุ (Damping material)

ในการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณคลื่นแผ่นดินไหวนั้นได้ใช้สูตรที่ 4.49 ในการวิเคราะห์แบบจำลองดิน User define soil model เพราะค่าคุณสมบัติของแบบจำลองดินแบบนี้ นั้นจะมีข้อมูลของทั้งค่าความแข็งและค่าความหนืดของชั้นดินที่ค่าความเครียดเฉือนใดๆกำหนดไว้ อยู่เสมอ ดังรูปที่ 4.5

*Modulus for sand (Seed & Idriss 1970) - Upper Range and damping for sand (Idriss 1990) - (about LRng from SI 1970)*

| Strain (%) | $G/G_{max}$ | Strain (%) | Damping (%) | Area A <sub>i</sub> | Calculated Damping (%) |
|------------|-------------|------------|-------------|---------------------|------------------------|
| 0.0001     | 1           | 0.0001     | 0.24        | 0.000000            | 0.00                   |
| 0.0003     | 1           | 0.0003     | 0.42        | 0.000000            | 0.00                   |
| 0.001      | 0.99        | 0.001      | 0.8         | 0.000000            | 0.00                   |
| 0.003      | 0.96        | 0.003      | 1.4         | 0.000004            | 0.61                   |
| 0.01       | 0.95        | 0.01       | 2.8         | 0.000044            | 2.53                   |
| 0.03       | 0.84        | 0.03       | 5.1         | 0.000321            | 7.34                   |
| 0.1        | 0.37        | 0.1        | 9.8         | 0.002288            | 15.08                  |
| 0.3        | 0.18        | 0.3        | 15.5        | 0.011358            | 25.84                  |
| 1          | 0.08        | 1          | 21          | 0.058288            | 29.11                  |
| 3          | 0.05        | 3          | 25          | 0.288288            | 17.91                  |
| 10         | 0.035       | 10         | 28          | 2.038288            | 10.49                  |
| 100        | 0.0035      |            |             | 33.538288           | 58.34                  |

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างข้อมูลที่แสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าความเครียดเฉือนกับค่าความแข็ง (Stiffness) และค่าความหนืดของวัสดุ (Damping material)

#### 4.7 แบบจำลองดิน Pestana model

ในแบบจำลองดินที่ผ่านมานั้นทุกแบบการจำลองนั้นเป็นแบบจำลองที่เรียกว่า แบบจำลองการคำนวณแบบหน่วยแรงรวม โดยแบบจำลองแบบหน่วยแรงรวมนั้นเป็นการคิดแบบจำลองที่ไม่มีการพิจารณาถึงแรงดันน้ำส่วนเกิน(Excess pore pressure) จะสังเกตได้ว่าในเรื่องของการคิดทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ที่เกิดขึ้นนั้น แบบจำลองดินแบบหน่วยแรงรวมนั้นไม่สามารถที่จะคิดออกมาได้ ซึ่งต่างจากแบบจำลองดินแบบหน่วยแรงประสิทธิผลที่กำลังจะอธิบายในหัวข้อนี้ แบบจำลองดินแบบหน่วยแรงประสิทธิผลนั้นมีผลตีผลเสียที่ต่างจากแบบจำลองดินแบบหน่วยแรงรวมนั้นคือ แบบจำลองดินแบบหน่วยแรงประสิทธิผลนั้นสามารถที่จะคิดแรงดันน้ำส่วนเกิน(Excess pore pressure) ออกมาได้ และสามารถที่จะคิดในส่วนต่างๆเพิ่มเติมได้ เช่น การเอียงของชั้นดิน ส่วนข้อเสียที่เกิดขึ้น เช่น มีความยากที่จะนำมาใช้ หรือว่าใช้ตัวแปรมากเกินไป ซึ่งข้อเสียของแบบจำลองส่วนใหญ่จะเป็นทางด้านเทคนิคมากกว่า

แบบจำลองดิน Pestana นั้นมีชื่อเต็มๆว่า A simplified model describing the cyclic behavior of lightly over consolidated clay in simple shear ซึ่งแบบจำลองดินนี้เป็นแบบจำลองดินที่พิจารณาค่า Over consolidation ratio (OCR) ที่เท่ากับ 1 เท่านั้นซึ่งอาจจะเป็นข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำการคำนวณกับดินที่มีค่า OCR มากกว่า 1 ได้ ในแบบจำลองดินนี้สามารถที่จะคำนวณชั้นดินที่มีลักษณะเอียงทำมุมกับพื้นราบ และสามารถที่จะคำนวณทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ได้ แบบจำลองดิน Pestana นั้นสามารถที่จะคำนวณได้ทั้งการเฉือนทางเดียว(Monotonic loading) และคำนวณแรงเฉือนแบบวัฏจักร(Cyclic loading) โดยจะได้ทำการอธิบายที่ละส่วนดังนี้

##### 4.7.1 การวิเคราะห์แบบจำลองดิน Pestana แบบแรงเฉือนทางเดียว (Monotonic loading)

การวิเคราะห์แบบจำลองดินแบบที่มีแรงเฉือนทางเดียวของแบบจำลองดิน Pestana นี้จะมีทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) เกิดขึ้น นั้นมี 2 แบบดังนี้

1 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) แบบมีแรงเฉือนทางเดียว โดยที่ชั้นดินไม่มีความชันเกิดขึ้น ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\eta_t^2 = \tan^2 \psi - \tan^2 \psi \left( \frac{(\sigma_n / \sigma_p)^m - \beta^m}{1 - \beta^m} \right) \quad (4.50)$$

$$\text{โดยที่ } \eta_t = \tau / \sigma_n$$

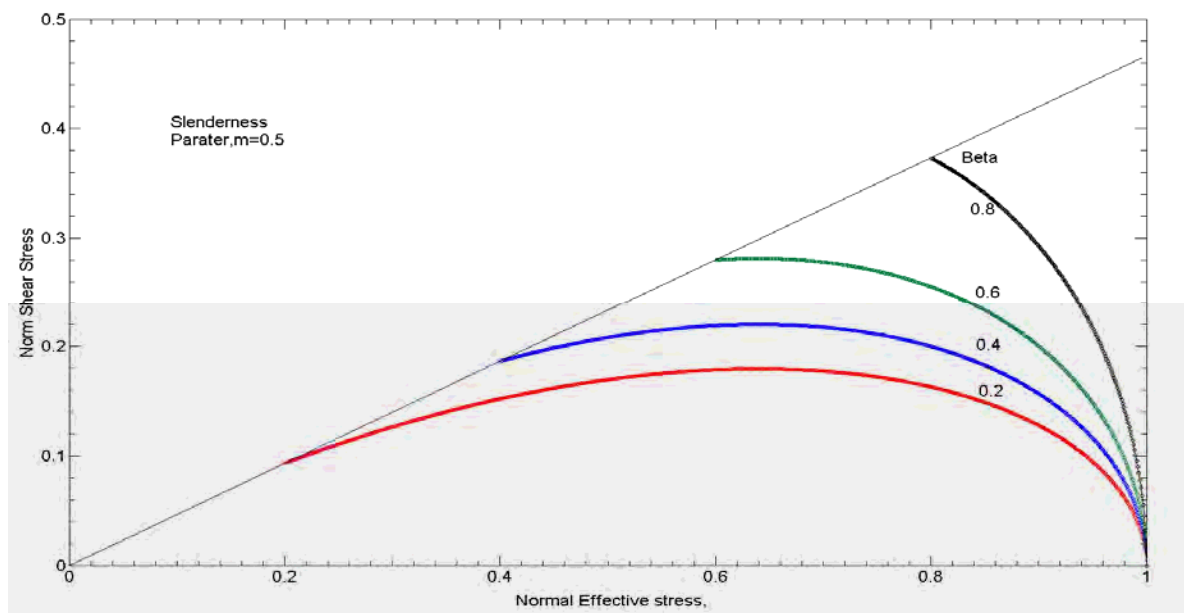
จากสมการที่ 4.50 นั้นเมื่อนำมาทำการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการหาค่าทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ในแบบการเฉือนทางเดียวจะต้องมีการจัดรูปแบบสมการเสียใหม่ ดังสมการที่ 4.52 โดยการคูณด้วยค่า  $\sigma_n^2 / \sigma_p^2$

$$\frac{\tau^2}{\sigma_n^2} \frac{\sigma_n^2}{\sigma_p^2} = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_p^2} \tan^2 \psi - \tan^2 \psi \left( \frac{(\sigma_n/\sigma_p)^m - \beta^m}{1 - \beta^m} \right) \quad (4.52)$$

โดยที่  $\eta_t = \tau/\sigma_n$

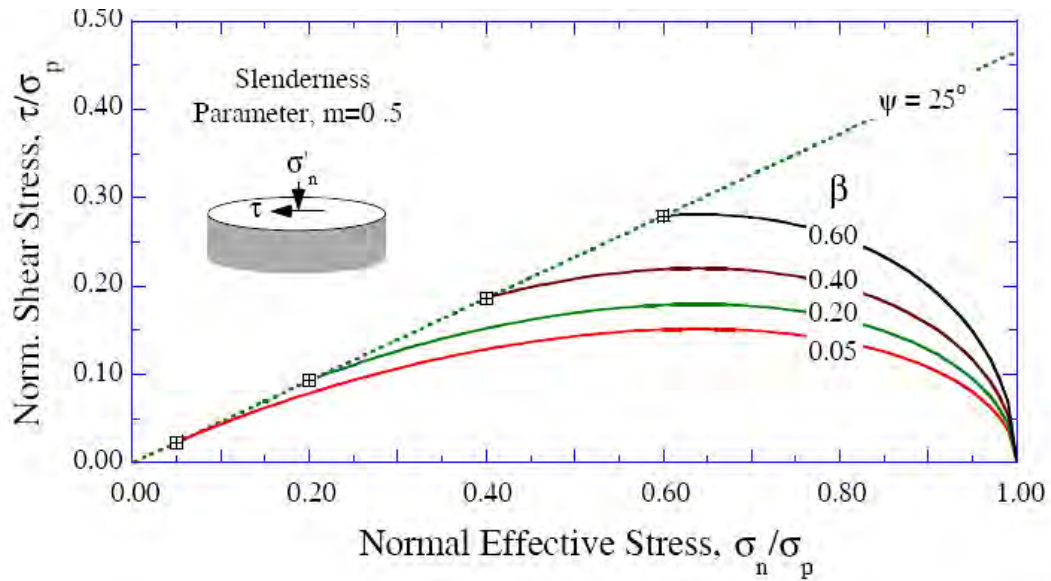
$$\frac{\tau}{\sigma_p} = \frac{\sigma_n}{\sigma_p} \text{sqrt}(\tan^2 \psi - \tan^2 \psi \left( \frac{(\sigma_n/\sigma_p)^m - \beta^m}{1 - \beta^m} \right)) \quad (4.53)$$

โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ในโปรแกรมกับทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ที่เกิดจากแบบจำลองดิน Pestana ได้รูปแบบของการเดินทางของหน่วยแรง (Effective stress path) ดังนี้



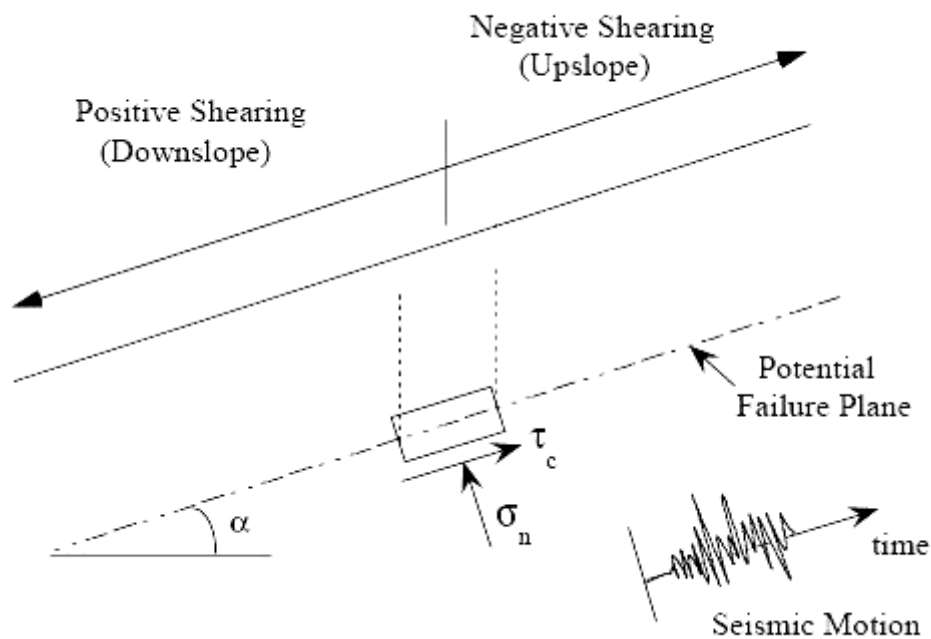
รูปที่ 4.6 การจำลองทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ในแบบจำลองดิน Pestana โดยการเขียนโปรแกรมจำลองขึ้นมาจากสมการที่ 4.53





รูปที่ 4.7 การจำลองทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ในแบบจำลองดินของ Pestana

2 ในแบบจำลองดินแบบ Pestana นั้นสามารถที่คิดในกรณีแบบชั้นดินมีความลาดชันได้ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 แบบจำลองดิน Pestana ในแบบที่ชั้นดินมีความลาดชัน

โดยความลาดชันของชั้นดินนั้นมีค่าได้ไม่ควรเกิน 35 องศาซึ่งสามารถที่จะคิดค่าทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนจากคลื่นแผ่นดินไหวได้โดยมีสมการดังนี้

$$\eta_t^2 = \tan^2 \psi - (\tan^2 \psi + 0.8\eta_{tc}^2 - 1.8\eta_t\eta_{tc}) \left( \frac{(\sigma_n/\sigma_p) - \beta^m}{1 - \beta^m} \right) \quad (4.54)$$

โดยที่  $\eta_t = \tau/\sigma_n$

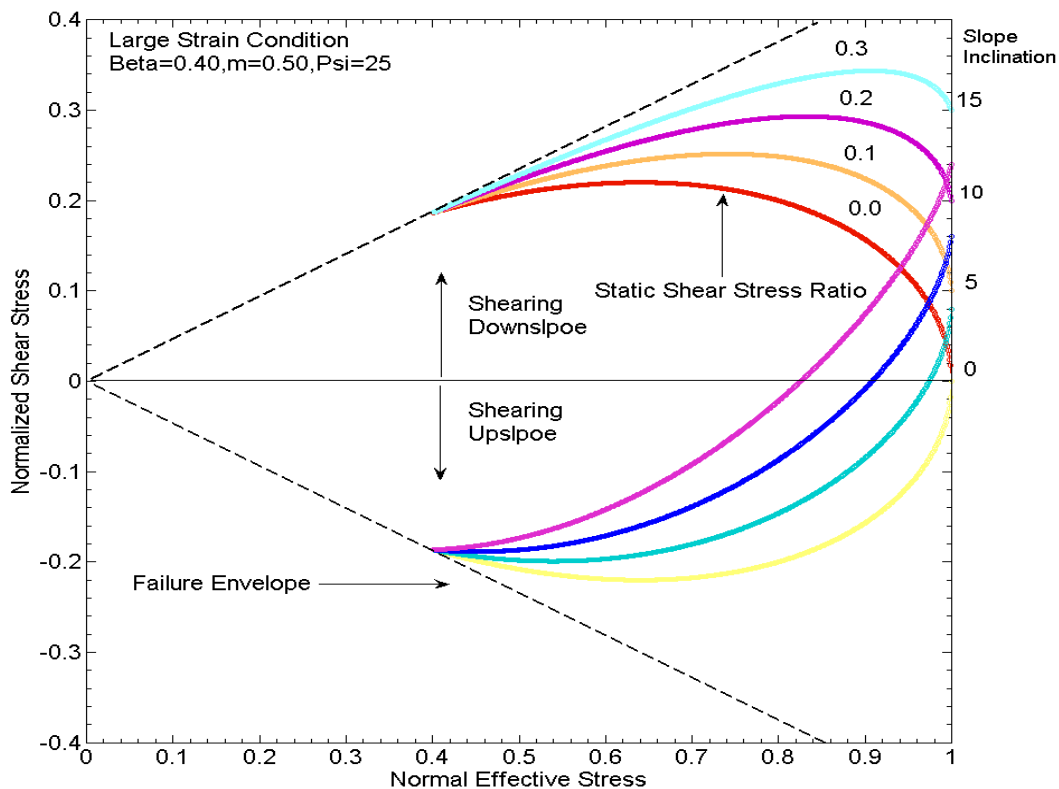
$$\eta_{tc} = \tan \alpha$$

$\alpha$  = ความลาดชันของชั้นดิน

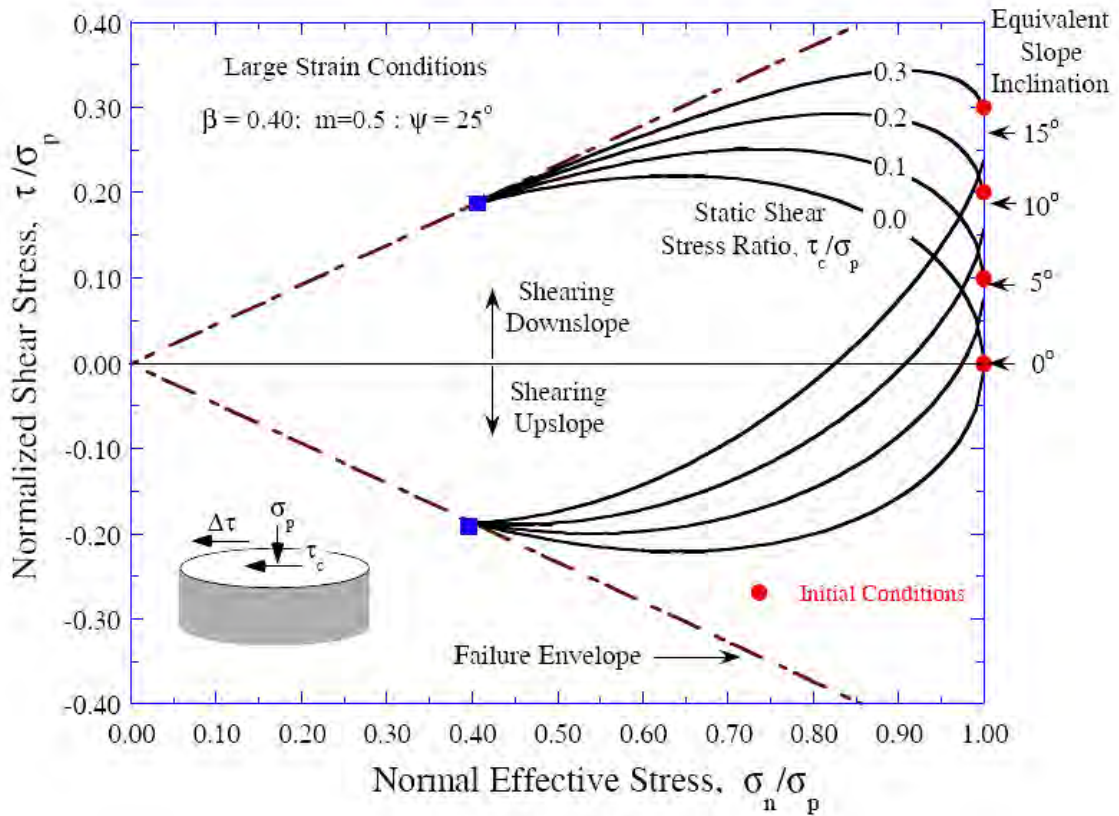
จากสมการที่ 4.54 ทำการแก้สมการเพื่อทำการเขียนโปรแกรมโดยการทำการจัดค่า  $\eta_t$  เพื่อทำการพล็อตกราฟ โดยสมการที่ 4.54 กำหนดให้  $\eta_t = y$ ,  $\tan^2 \psi = a$ ,  $\eta_{tc} = b$ ,  $\sigma_n/\sigma_p = x$ ,  $m=c$ ,  $1 - \beta^m$  ทำการแก้สมการหาค่า  $\eta_t$  ได้ค่าดังสมการที่ 4.55

$$y = \frac{0.1}{e} (9bx^c - 9bd^c \pm (81b^2(x^c)^2 - 162b^2x^cd^c + 81b^2(d^c)^2 + 100ae^2 - 100eax^c + 100ead^c - 80eb^2x^c + 80eb^2d^c)^{0.5})x \quad (4.55)$$

เมื่อนำสมการที่ 4.55 มาทำการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองดินของ Pestana ได้ผลดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์จากการเขียนโปรแกรมขึ้นมาจากสมการแบบจำลองดิน Pestana การเขียนทางเดียวโดยชั้นดินมีความชันขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.10 แบบจำลองดิน Pestana ในกรณีที่ชั้นดินมีความชันและมีแรงเฉือนทางเดียว

3 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในแบบจำลองดิน Pestana นั้นมีส่วนที่เป็นความสัมพันธ์แบบ Elastic และ Plastic โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์คือ

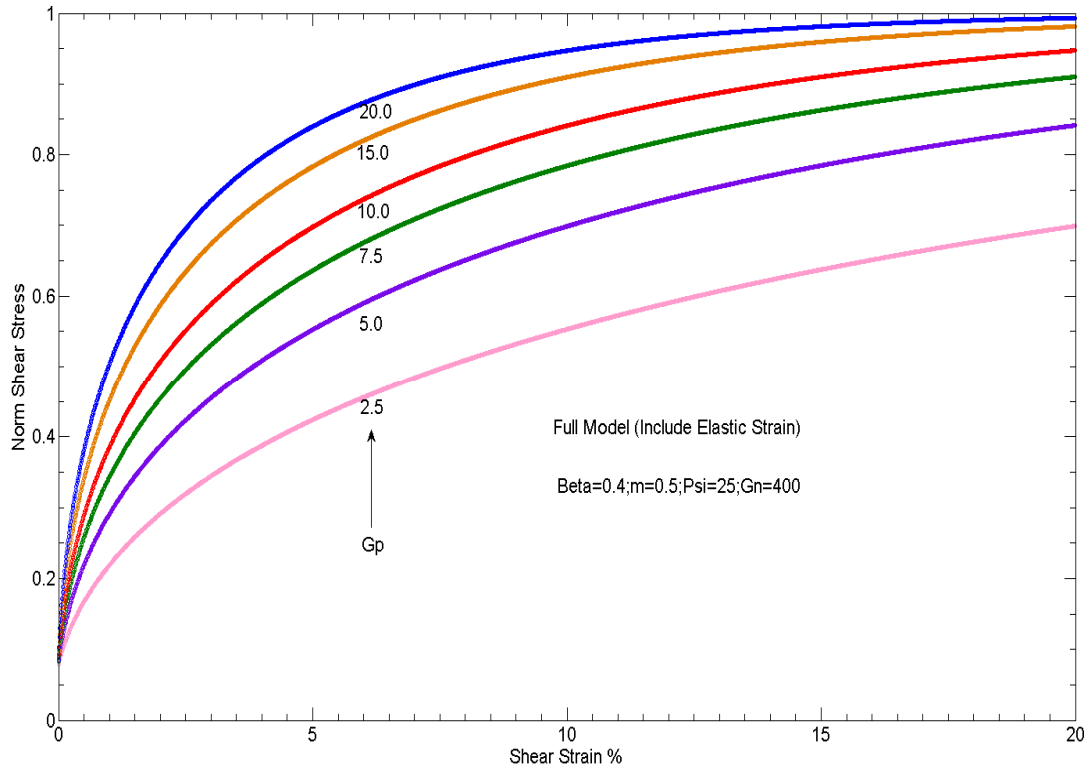
$$\frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} = \left( \frac{1}{(\partial \eta_t / \partial \gamma)^e} + \frac{1}{(\partial \eta_t / \partial \gamma)^p} \right)^{-1} \quad (4.56)$$

$$\text{โดยที่ } \left( \frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} \right)^e = G_n \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \right)^{1-b}$$

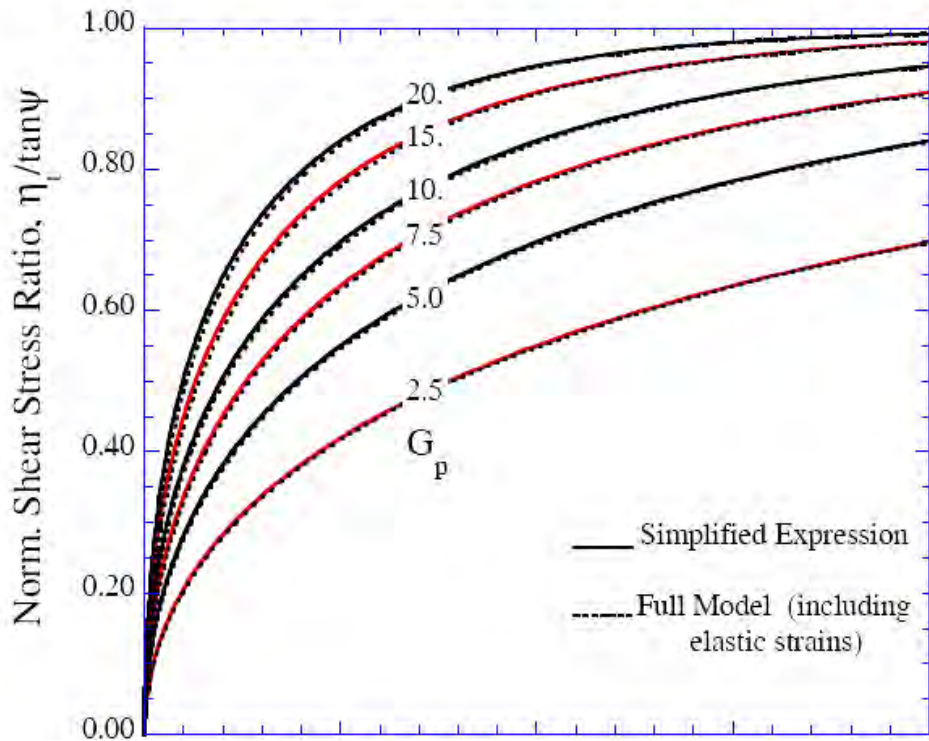
$$\left( \frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} \right)^p = G_p \left( \frac{\tan \psi - \eta_{tc}}{\eta_t - \eta_{tc}} \right) (\tan \psi - \eta_t)$$

$$\partial \eta_t = \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}$$

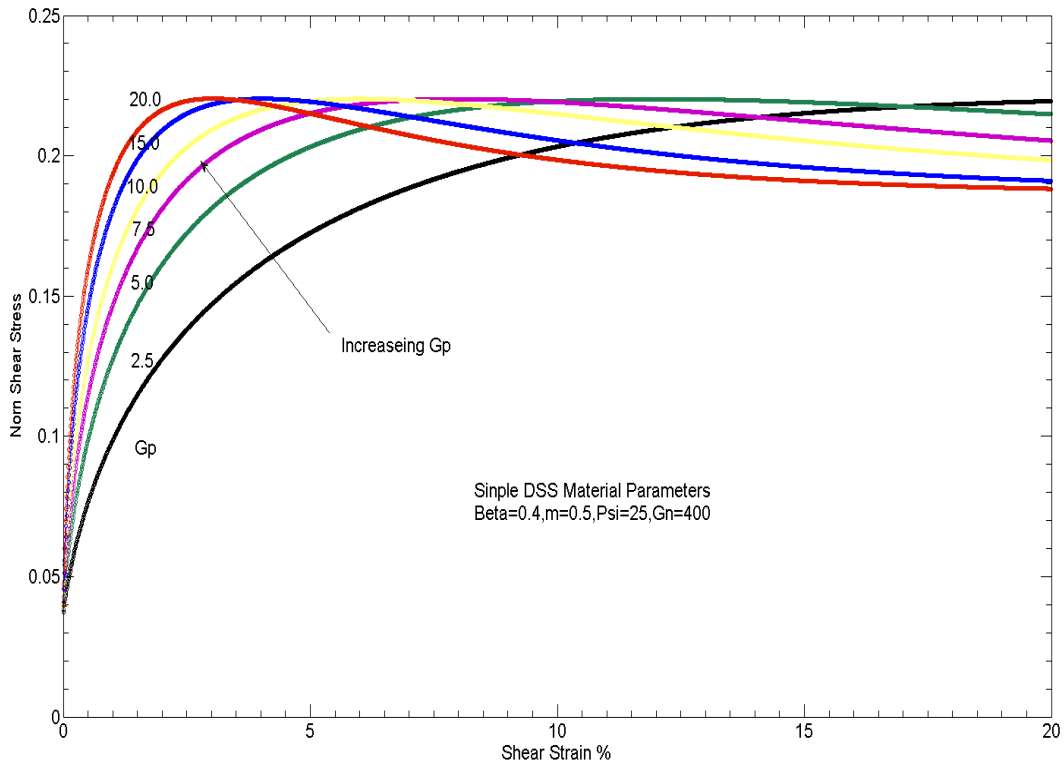
เมื่อนำสมการที่ 4.56 ไปทำการเขียนโปรแกรมเปรียบเทียบกับแบบจำลองดิน Pestana ได้ผลดังรูปที่ 4.11



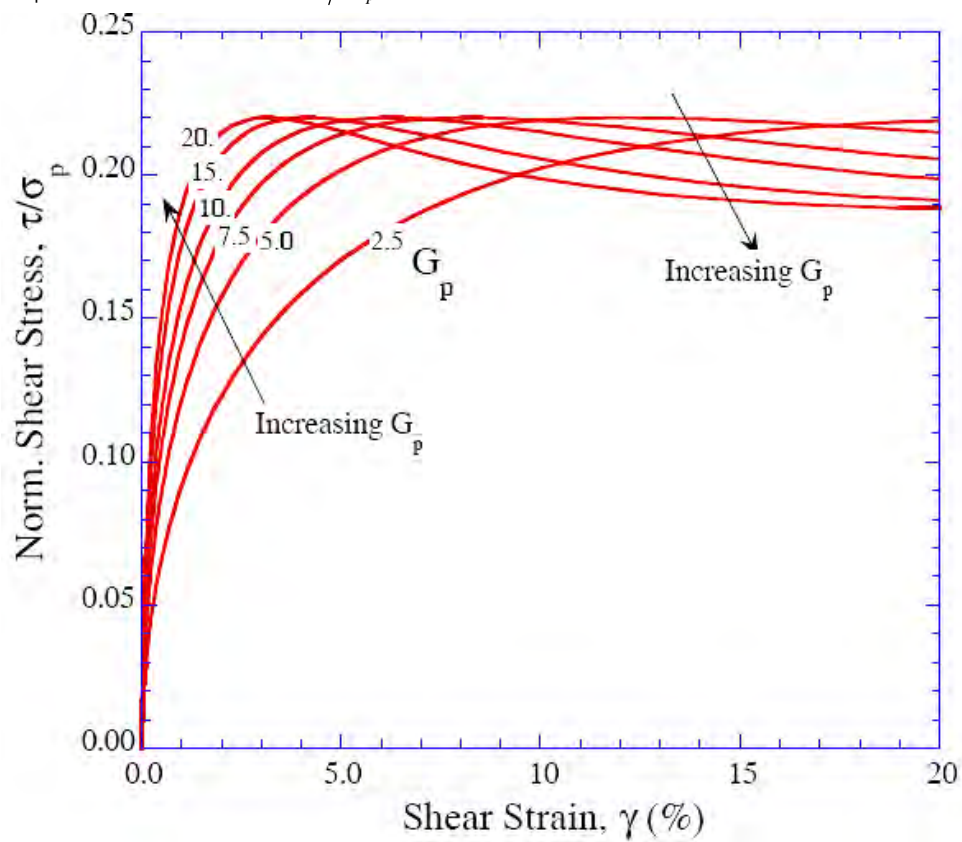
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่ได้จากการเขียนโปรแกรมที่ค่า  $G_p$  ต่างๆ โดยแกน y มีค่าเท่ากับ  $\eta_i / \tan \psi$  และแกน x เป็นค่าของความเครียดเฉือน



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนจากแบบจำลองดิน Pestana



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่ได้จากการเขียนโปรแกรมที่ค่า  $G_p$  ต่างๆ โดยแกน y มีค่าเท่ากับ  $\tau/\sigma_p$  และแกน x เป็นค่าของความเครียดเฉือน



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนจากแบบจำลองดิน Pestana

#### 4.7.2 การวิเคราะห์แบบจำลองดิน Pestana แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic loading)

ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองดิน Pestana โดยมีการเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองดิน Pestana เพื่อเป็นการยืนยันถึงความถูกต้องที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการทำการทำการวิเคราะห์แรงกระทำเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์แบบจำลองดินของ Pestana กันต่อไปโดยจะเป็นการวิเคราะห์แรงกระทำแบบวัฏจักร เพื่อให้มีความคล้ายกับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว มีหัวข้อดังต่อไปนี้

1 ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนสามารถที่จะหาได้จากสมการที่ 4.57 โดยสมการนี้เป็นสมการที่ทำการหารูปแบบของทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress path) โดยสมการมีดังนี้

$$\eta_t^2 = \frac{\tan^2 \psi}{1 - \beta^m} - \left( \frac{\tan^2 \psi}{1 - \beta^m} + \eta_{trev}^2 - 2\eta_t \eta_{trev} \right) \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \quad (4.57)$$

$$\text{โดยที่ } B = \theta \left( \sigma_p / \sigma_{nrev} \right)^2$$

$$\eta_t = \tau / \sigma_n$$

จากสมการที่ 4.57 ทำการจัดสมการเสียใหม่เพื่อทำการแยกหาค่า  $\eta_t$  หลังจากทำการจัดรูปสมการหาค่า  $\eta_t$  ใหม่จึงได้สมการที่ 4.58 คือ

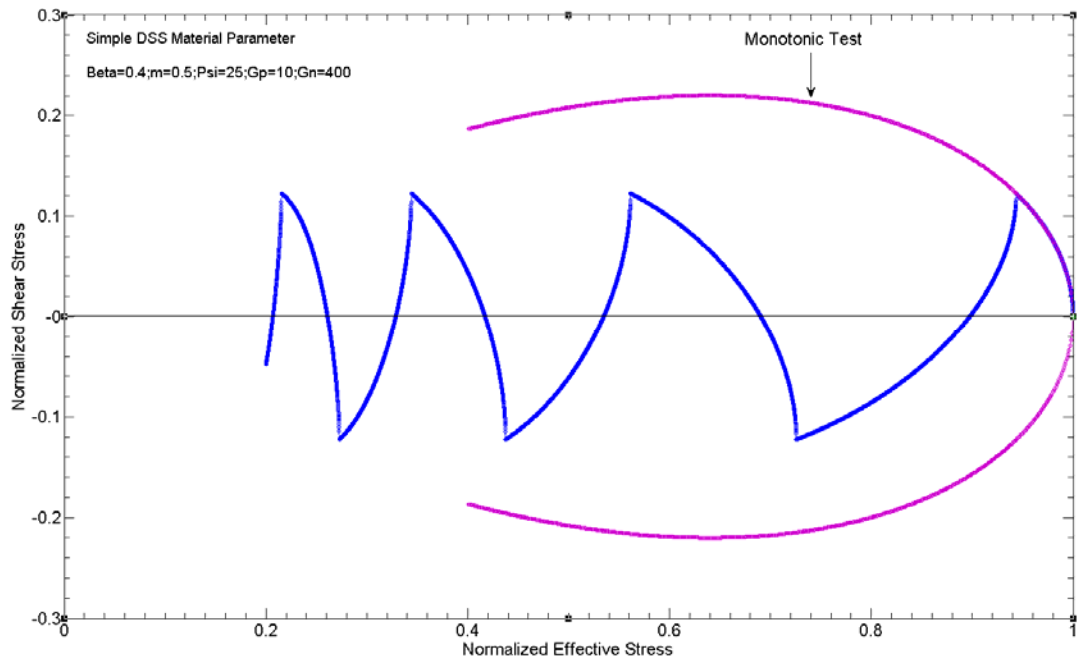
$$\eta_t = \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \eta_{trev} \pm \text{sqr}t \left( \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \eta_{trev}^2 + \frac{\tan^2 \psi}{1 - \beta^m} - \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \left( \frac{\tan^2 \psi}{1 - \beta^m} + \eta_{trev}^2 \right) \right) \quad (4.58)$$

$$\text{โดยที่ } \eta_{trev} = \text{Last reversal of } \eta_t$$

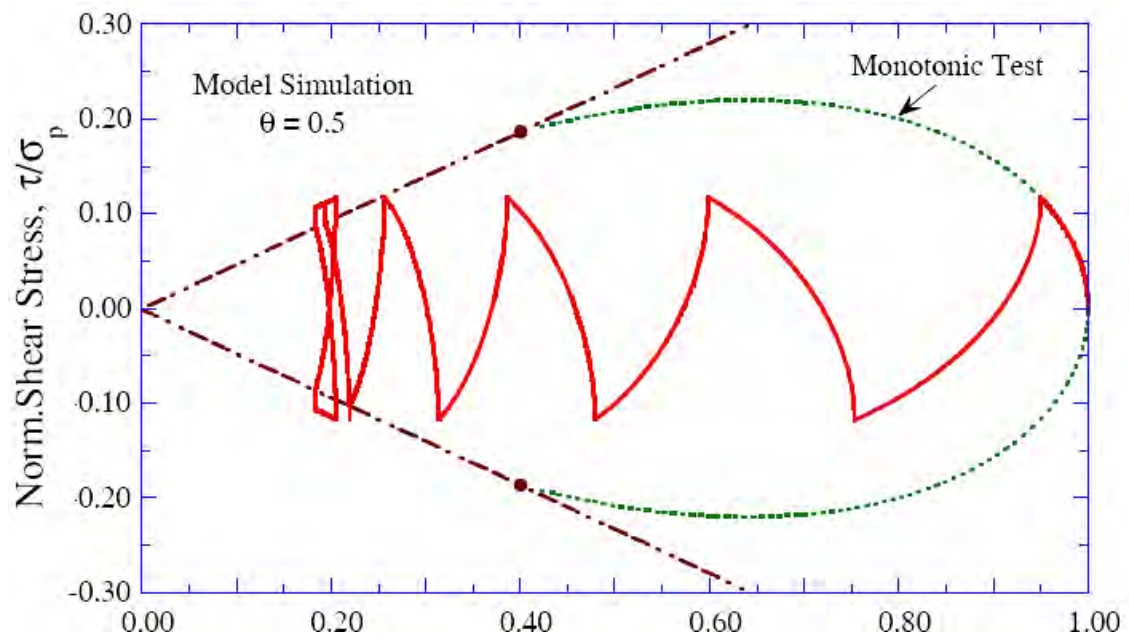
$$\sigma_{trev} = \text{Last reversal of } \sigma_t$$

$$\eta_t = \tau / \sigma_n$$

และเมื่อนำสมการที่ 4.58 มาทำการเขียนโปรแกรมเปรียบเทียบกับแบบจำลองดิน Pestana ได้ผลดังรูปที่ 4.15

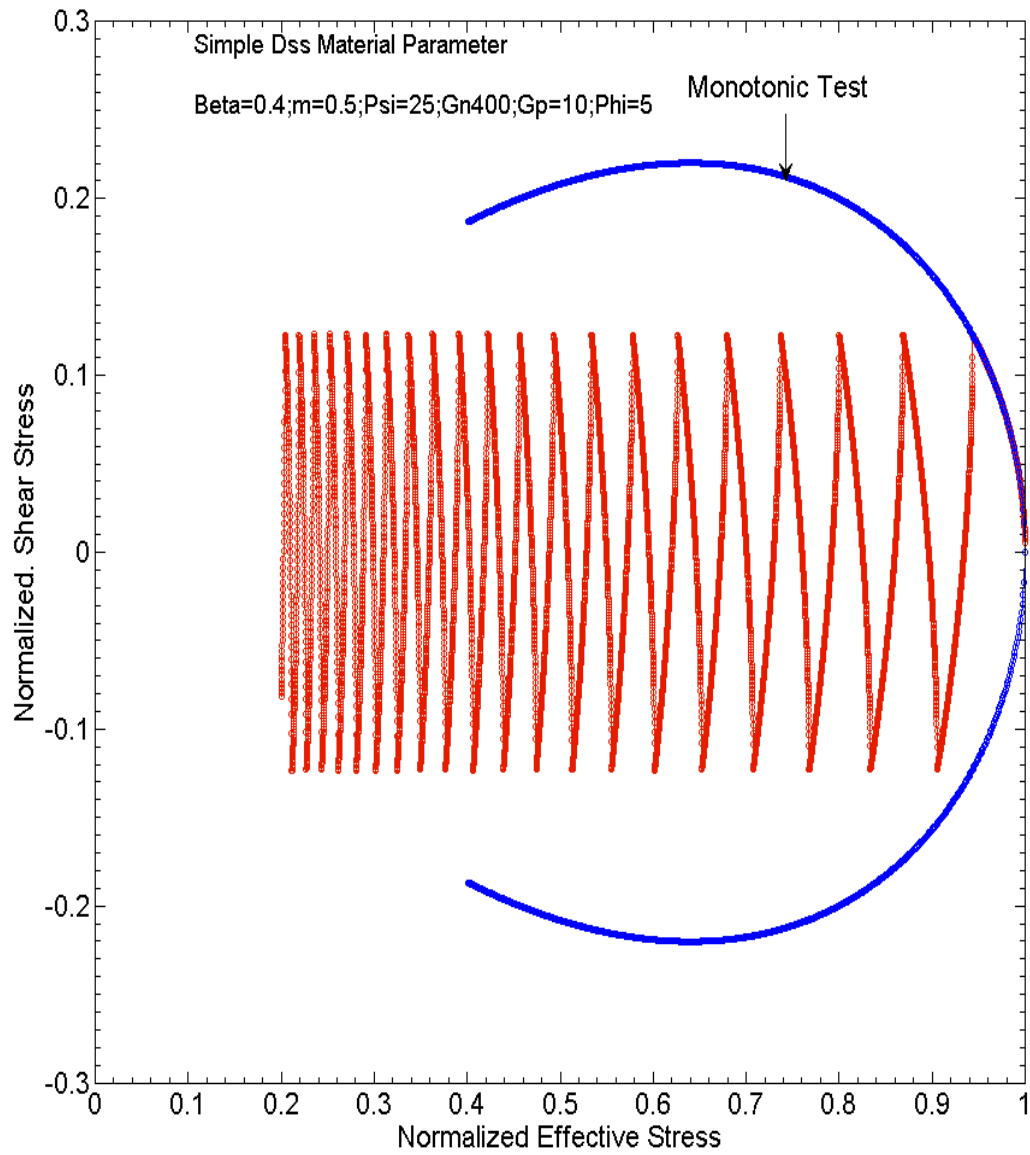


รูปที่ 4.15 เส้นทางเดินของหน่วยแรงโดยที่มีการเฉือนทางเดียวโดยใช้สมการที่ 4.53 และมีการเฉือนแบบวัฏจักรโดยใช้ค่า  $\theta = 5$



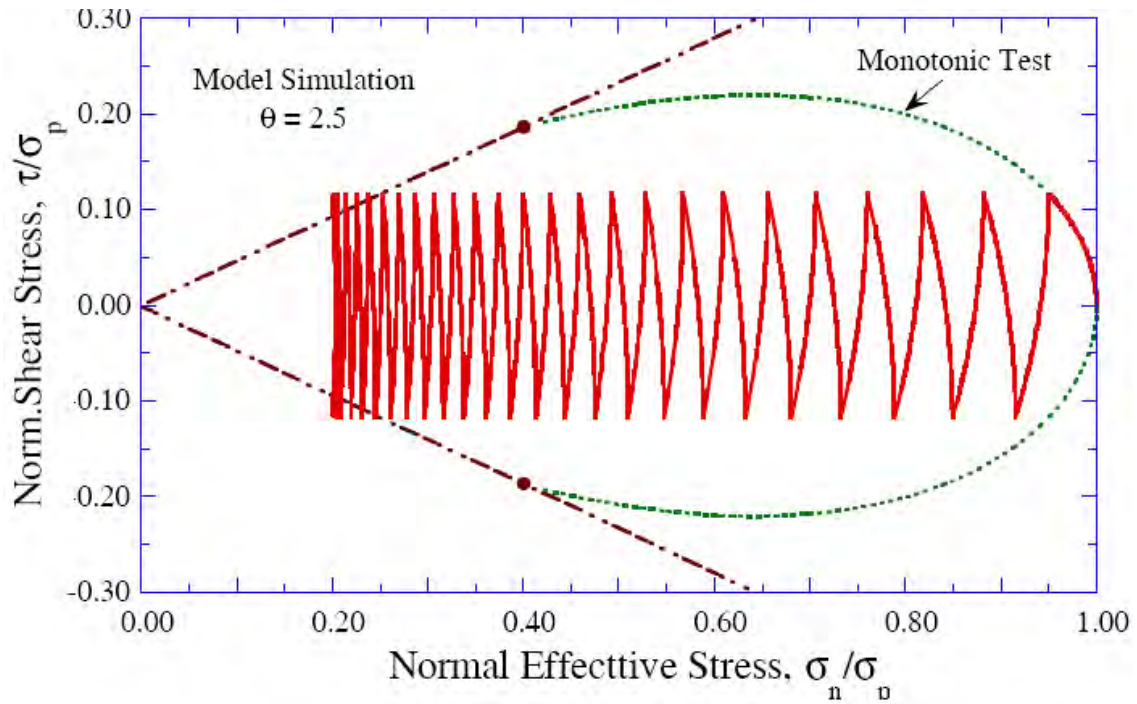
รูปที่ 4.16 เส้นทางเดินของหน่วยแรงในแบบจำลองดิน Pestana โดยใช้ค่า  $\theta = 5$





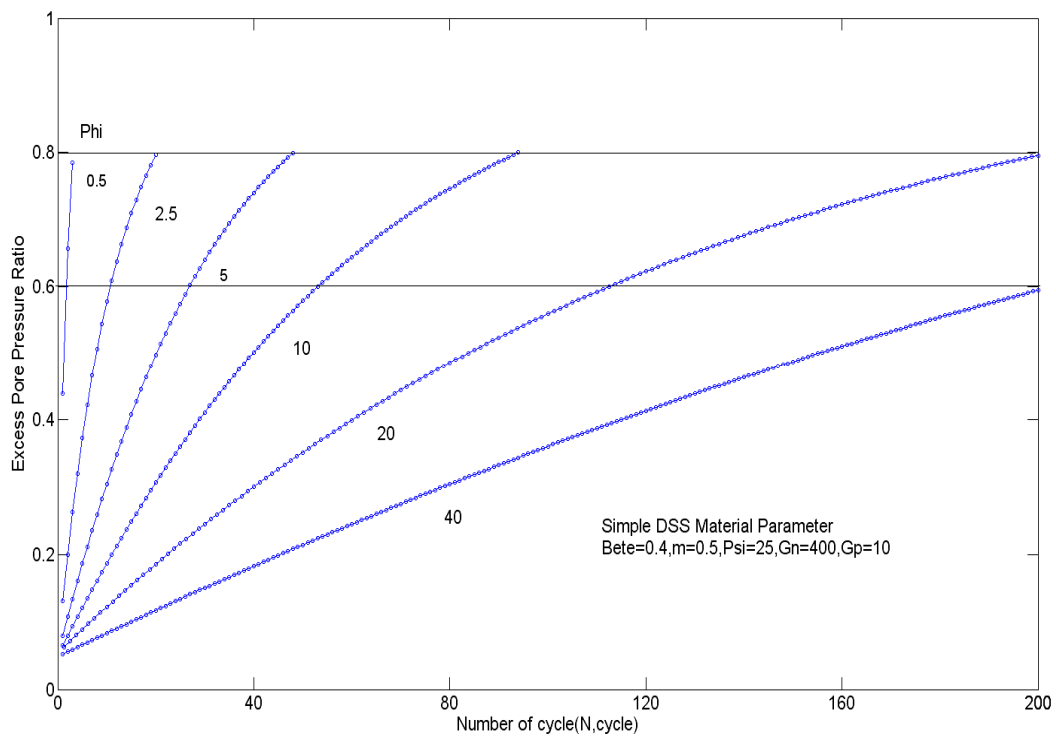
รูปที่ 4.17 เส้นทางเดินของหน่วยแรงโดยที่มีการเฉือนทางเดียวโดยใช้สมการที่ 4.53 และมีการเฉือนแบบวัฏจักรโดยใช้ค่า  $\theta = 2.5$



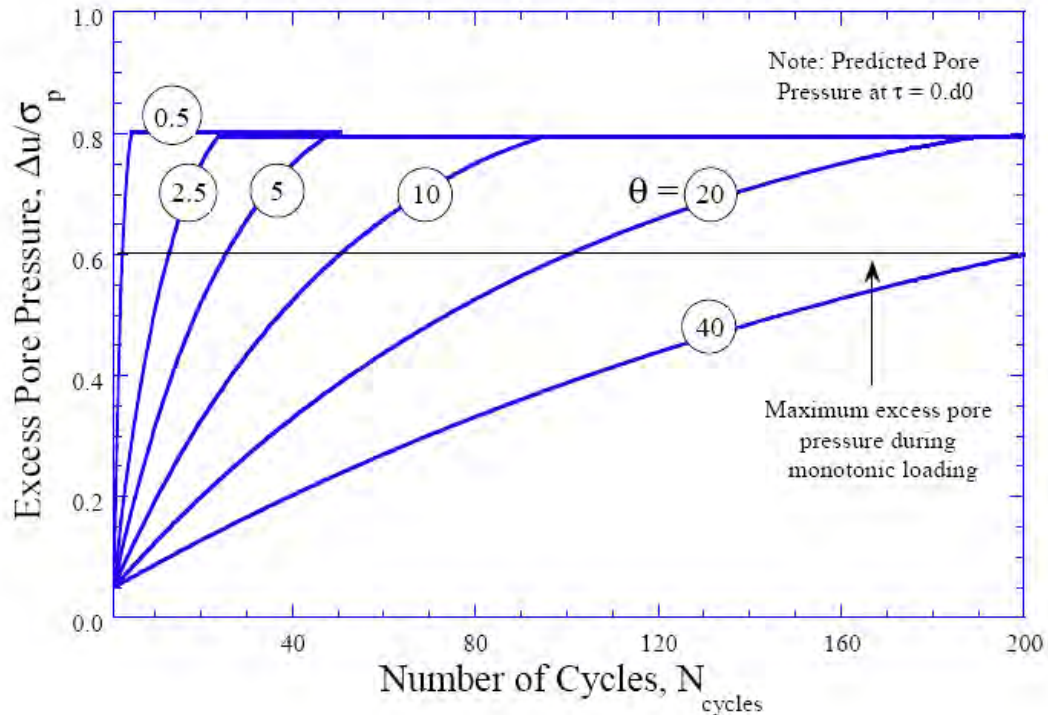


รูปที่ 4.18 เส้นทางเดินของหน่วยแรงในแบบจำลองดิน Pestana โดยใช้ค่า  $\theta = 2.5$

เมื่อนำค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore pressure) ที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดจากหน่วยแรงดันดินในสถานะเริ่มต้นลบด้วยหน่วยแรงที่ลดลงเนื่องจากแรงเฉือนสามารถที่จะทำการแสดงกราฟของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนแบบวัฏจักรจากโปรแกรม



รูปที่ 4.20 แรงดันน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนแบบวัฏจักรจากแบบจำลองดิน Pestana

2 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในแรงเฉือนแบบ 2 ทาง นั้นมีความสัมพันธ์ที่เหมือนกันกับแรงเฉือนทางเดียวแต่ต่างกันในพจน์ของ plastic โดยแสดงในสมการที่ 4.59

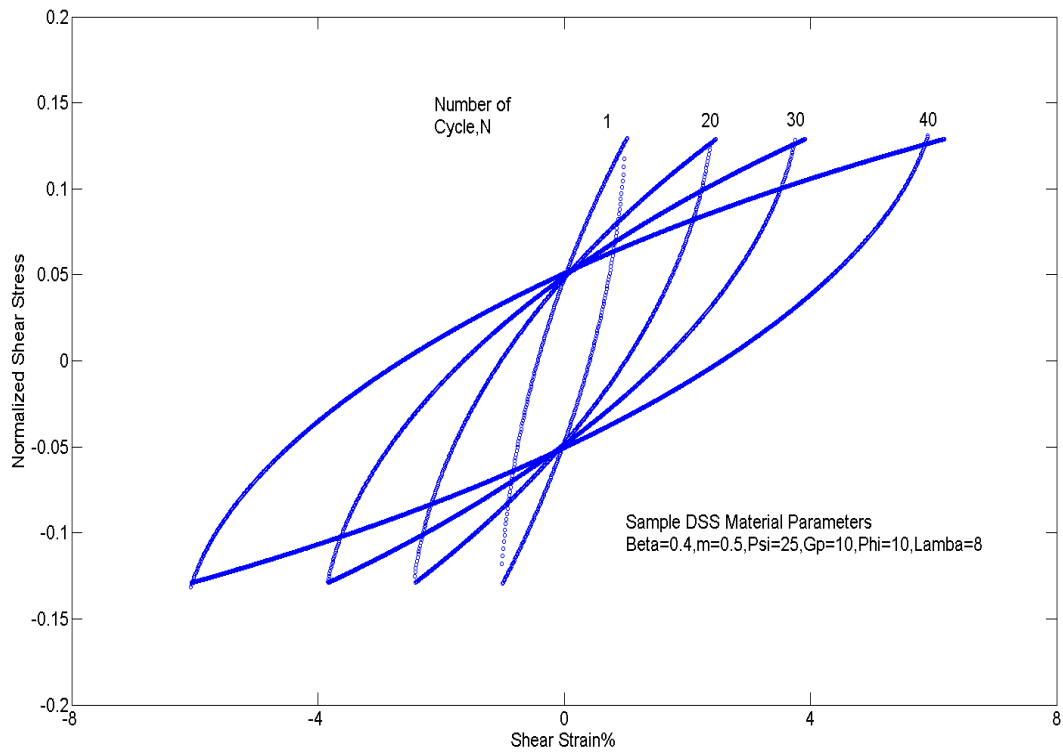
$$\frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} = \left( \frac{1}{(\partial \eta_t / \partial \gamma)^e} + \frac{1}{(\partial \eta_t / \partial \gamma)^p} \right)^{-1} \quad (4.59)$$

$$\text{โดยที่ } \left( \frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} \right)^e = G_n \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \right)^{1-b}$$

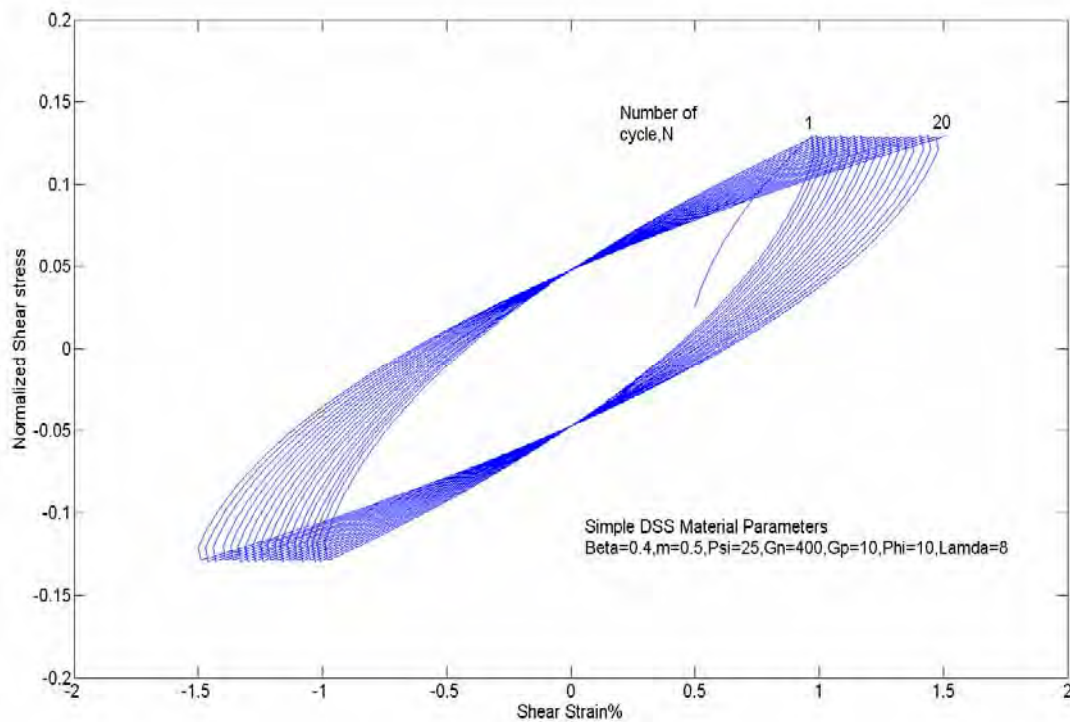
$$\left( \frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} \right)^p = \lambda \left( 1 - \frac{\eta_t^2 (1 - \beta^m)}{\tan^2 \psi} \right) \left( \frac{\tan \psi / \sqrt{(1 - \beta^m)} - \eta_{rev}}{\eta_t - \eta_{rev}} \right)$$

$$\partial \eta_t = \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}$$

หลังจากที่ได้ทำการเขียนโปรแกรมจากสมการที่ 4.59 นั้นได้ผลดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนจากการเขียนโปรแกรมโดยใช้สมการที่ 4.59 ที่  $\theta = 5$



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนจากการเขียนโปรแกรมโดยใช้สมการที่ 4.59 ที่  $\theta = 10$

3 ในแบบจำลองดิน Pestana ที่ผ่านนั้นจะเป็นการพิจารณาในลักษณะของการควบคุมความเค้น (Stress control) ซึ่งนอกจากจะสามารถควบคุมความเค้น (Stress control) ได้แล้วแบบจำลองของ Pestana ยังสามารถที่จะเขียนโปรแกรมในลักษณะของการควบคุมความเครียด (Strain control) ได้อีกด้วยโดยข้อแตกต่างอยู่ที่ขอบเขตของการกำหนดการย้อนกลับของค่าความเค้นเฉือน และความเครียดเฉือน โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนยังคงและสมการทางเดินของหน่วยแรงโดยใช้สมการเดิมที่ 4.60 และ 4.61

$$\eta_t = \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \eta_{trev} \pm \text{sqrt} \left( \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \eta_{trev}^2 + \frac{\tan^2 \psi}{1 - \beta^m} - \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{nrev}} \right)^B \left( \frac{\tan^2 \psi}{1 - \beta^m} + \eta_{trev} \right) \right) \quad (4.60)$$

โดยที่  $\eta_{trev}$  = Last reversal of  $\eta_t$   
 $\sigma_{trev}$  = Last reversal of  $\sigma_t$

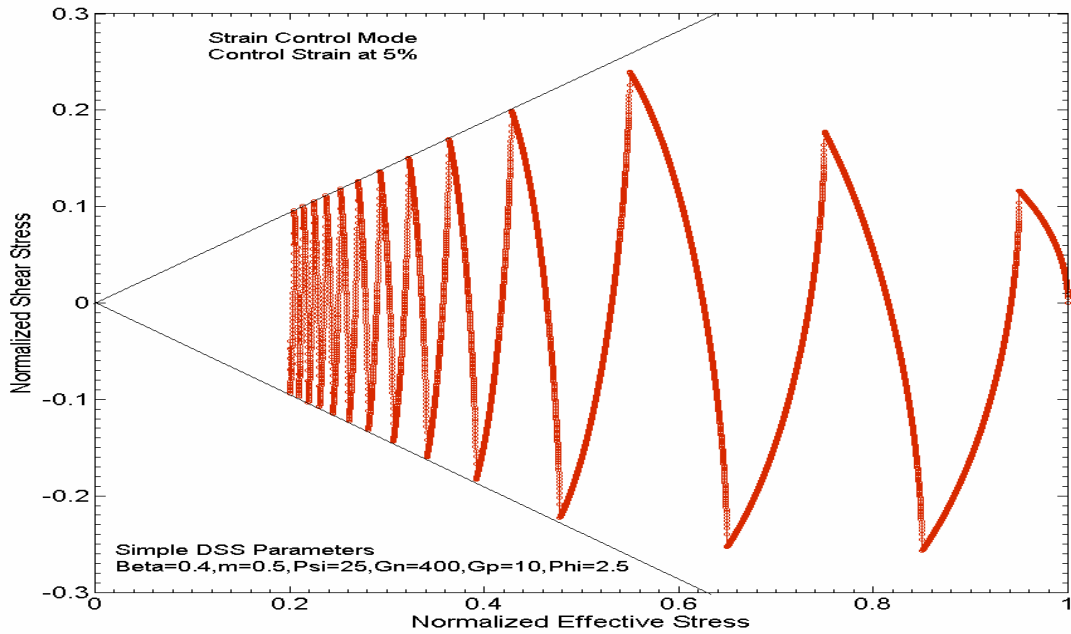
$$\frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} = \left( \frac{1}{(\partial \eta_t / \partial \gamma)^e} + \frac{1}{(\partial \eta_t / \partial \gamma)^p} \right)^{-1} \quad (4.61)$$

$$\text{โดยที่ } \left( \frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} \right)^e = G_n \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \right)^{1-b}$$

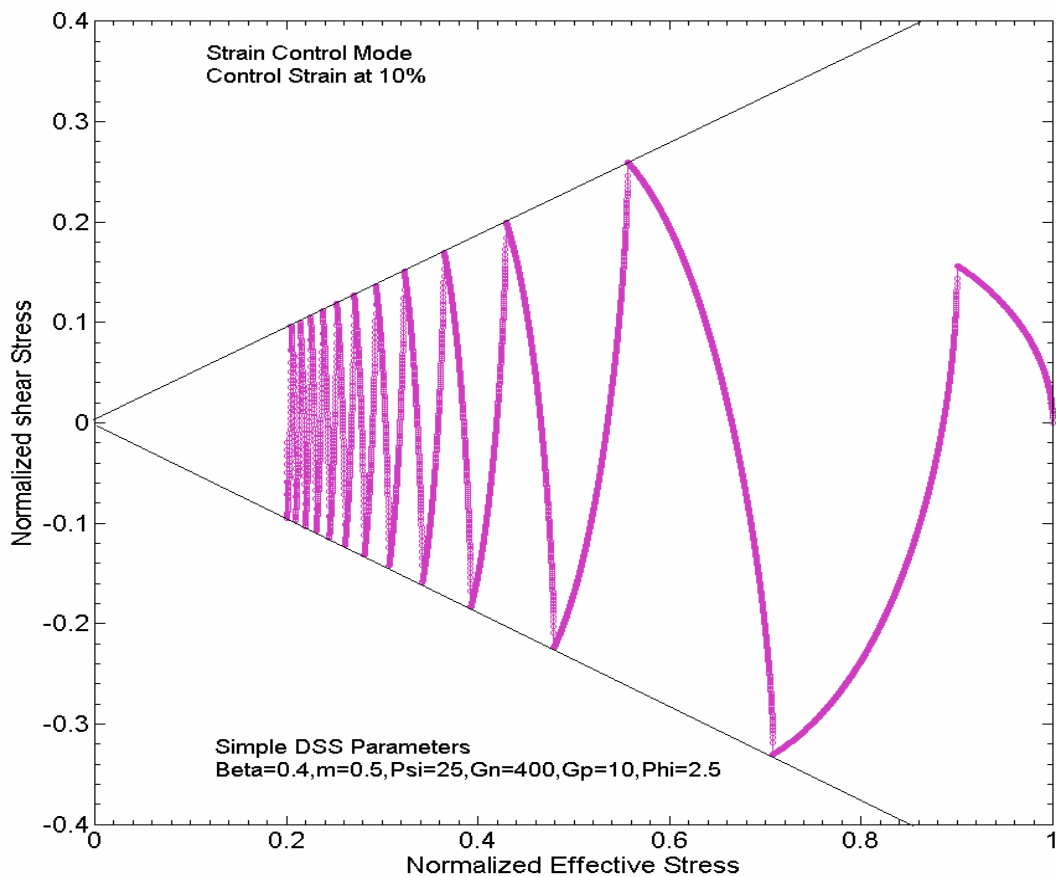
$$\left( \frac{\partial \eta_t}{\partial \gamma} \right)^p = \lambda \left( 1 - \frac{\eta_t^2 (1 - \beta^m)}{\tan^2 \psi} \right) \left( \frac{\tan \psi / \sqrt{1 - \beta^m} - \eta_{rev}}{\eta_t - \eta_{rev}} \right)$$

$$\partial \eta_t = \frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}$$

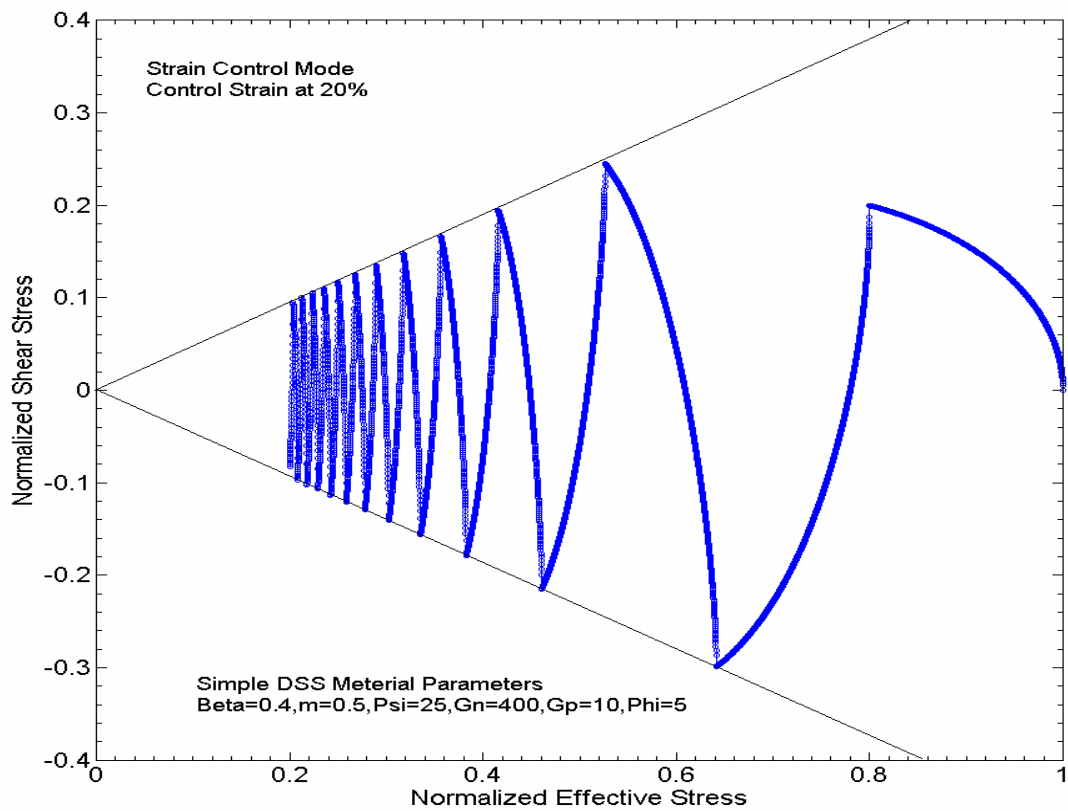
หลังจากที่ทำการเขียนโปรแกรมแบบการควบคุมค่าความเครียด (Strain control) นั้นสามารถที่จะเขียนโปรแกรมและได้ผลลัพธ์ดังที่แสดงในรูปที่ 4.23



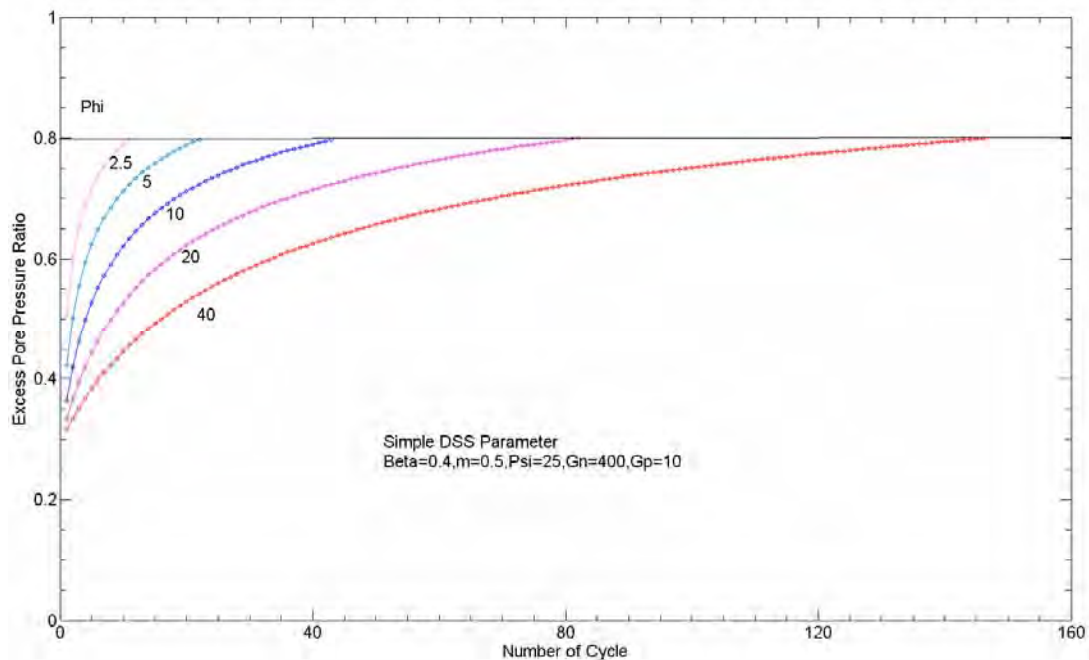
รูปที่ 4.23 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรง(Effective stress path) ในการเค้นแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด (Strain control) เท่ากับ 5%



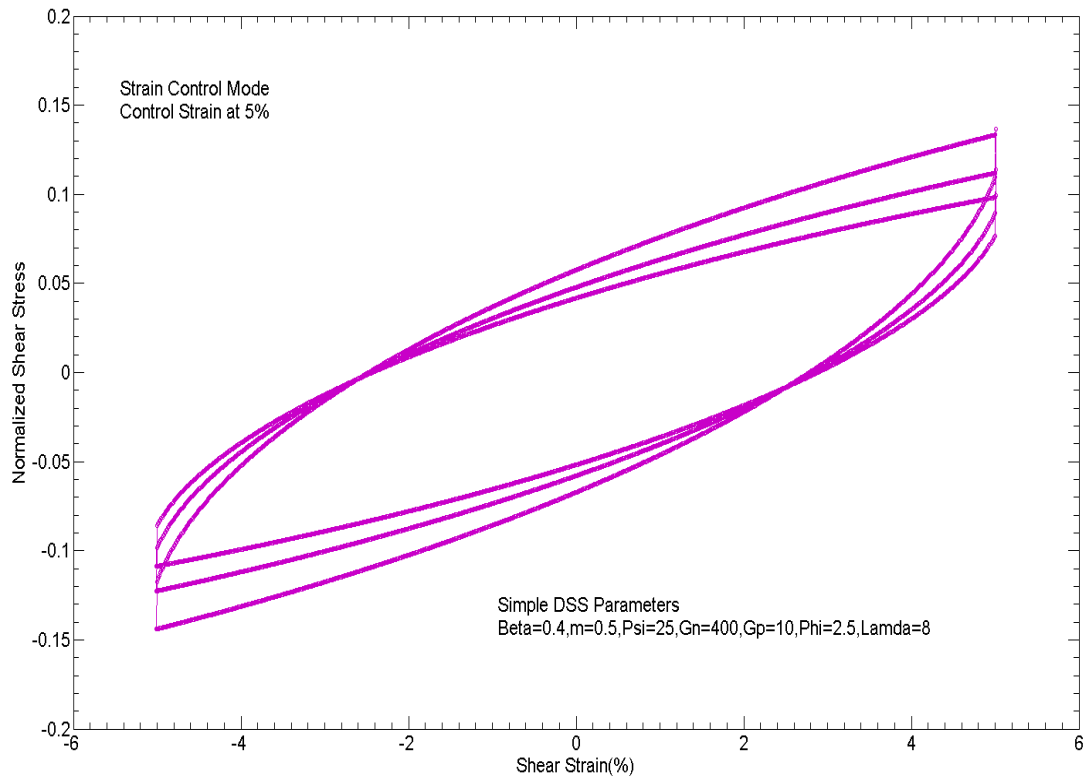
รูปที่ 4.24 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรง(Effective stress path) ในการเค้นแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด (Strain control) เท่ากับ 10%



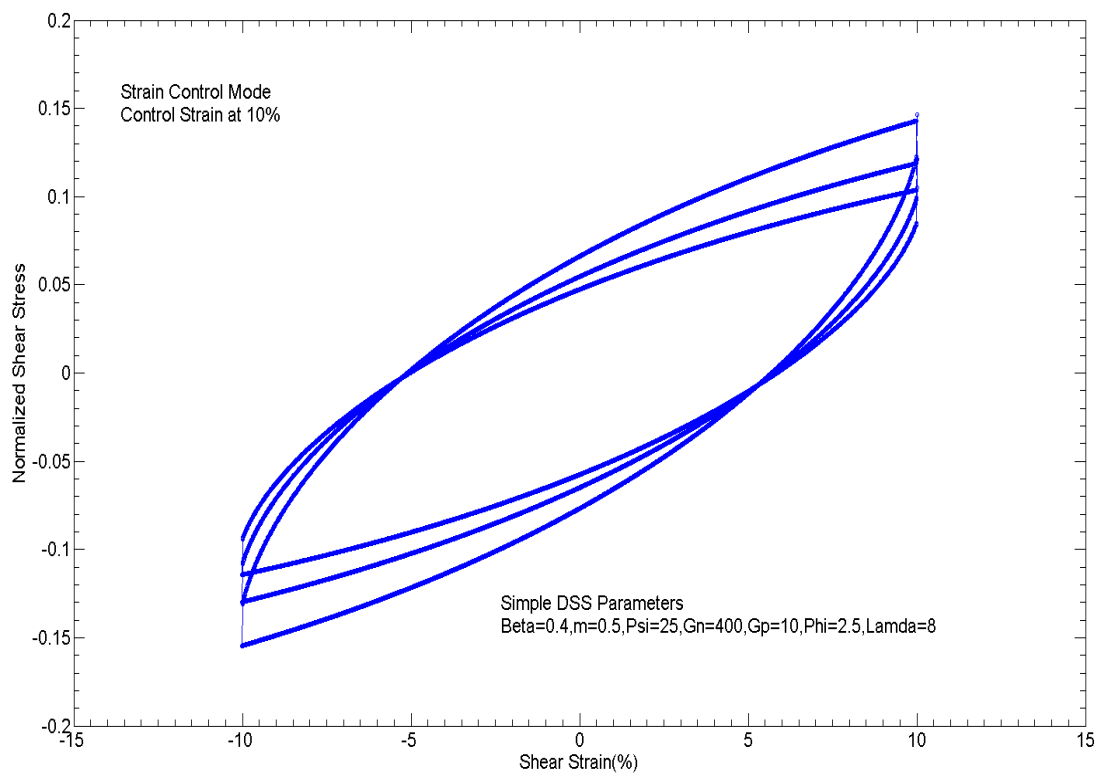
รูปที่ 4.25 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงเส้นทางเดินของหน่วยแรง(Effective stress path) ในการเค้นแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด (Strain control) เท่ากับ 20%



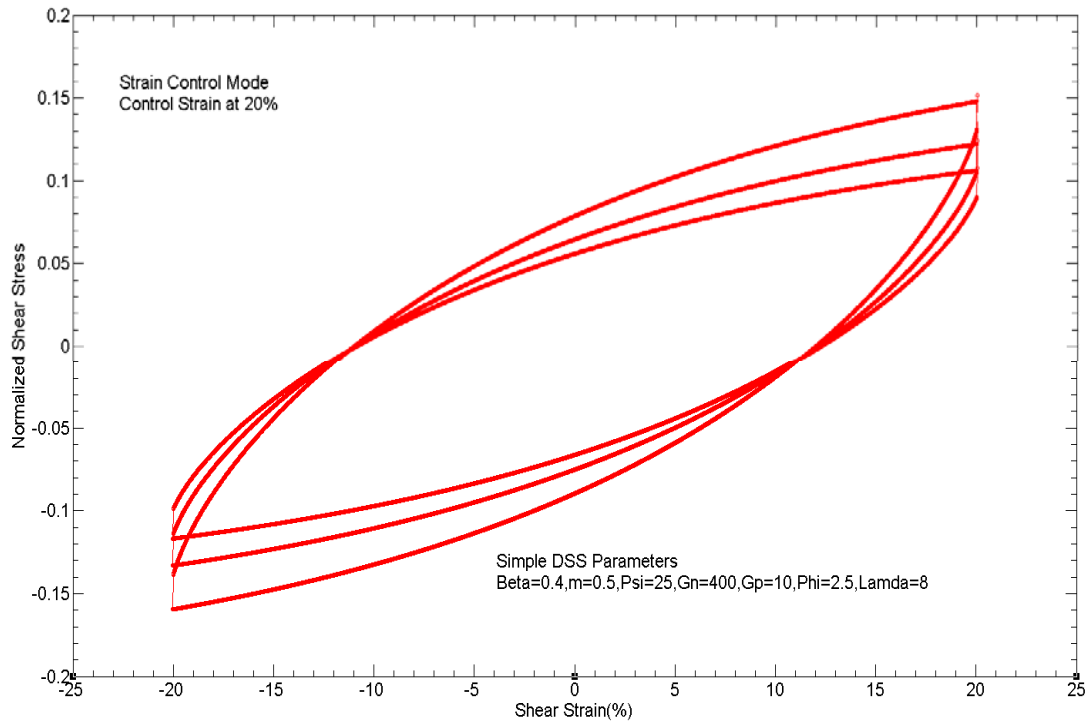
รูปที่ 4.26 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงแรงดันน้ำส่วนเกิน ที่เกิดขึ้นในการเค้นแบบวัฏจักรในกรณีที่ทำการควบคุมความเครียด(Strain control)



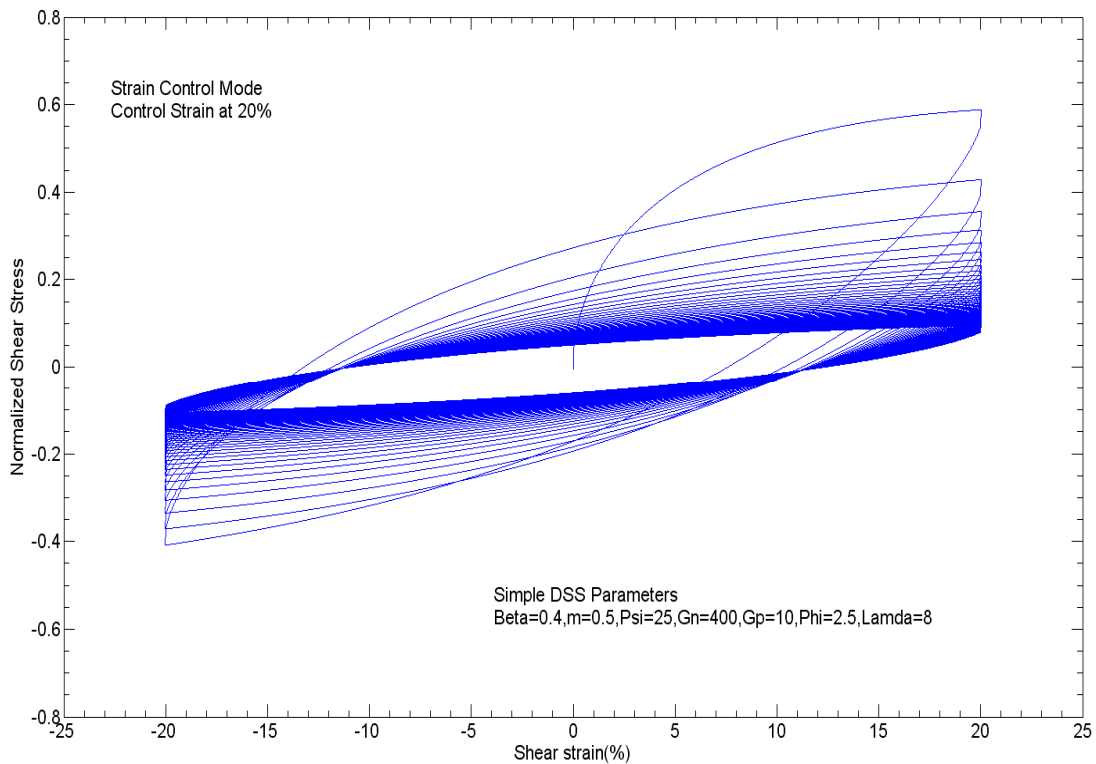
รูปที่ 4.27 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในการเฉือนแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด(Strain control) เท่ากับ 5%



รูปที่ 4.28 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในการเฉือนแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด(Strain control) เท่ากับ 10%



รูปที่ 4.29 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในการเฉือนแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด(Strain control) เท่ากับ 20%



รูปที่ 4.30 ผลจากการเขียนโปรแกรมแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนในการเฉือนแบบวัฏจักรที่ควบคุมความเครียด(Strain control) เท่ากับ 20%,  $\theta = 20$



## บทที่ 5

### การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหว

ในบทนี้นั้นจะทำการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณที่ได้จากการคำนวณคลื่นแผ่นดินไหว โดยโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาโดยใช้คุณสมบัติของชั้นดินและขนาดความหนาของชั้นดินที่ใช้ รวมถึงใช้ขนาดของคลื่นที่มีค่าเท่ากันทั้งหมด เพื่อทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรม ได้ใช้คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 3 คลื่น ด้วยกันโดยแต่ละคลื่นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

1 Taft เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงที่ 7.4 ริกเตอร์มีขนาดความกว้างของการสั่นสะเทือน 42 กิโลเมตร เกิดขึ้นในปี 1952

2 Treas เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงที่ 7 ริกเตอร์มีขนาดความกว้างของการสั่นสะเทือน 97.6 กิโลเมตร เกิดขึ้นที่ อำเภอพานพราวนธิสโก

3 Yerba เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดความรุนแรงที่ 7 ริกเตอร์มีขนาดความกว้างของการสั่นสะเทือน 95.4 กิโลเมตร เกิดขึ้นที่ อำเภอพานพราวนธิสโก ในปี 1989

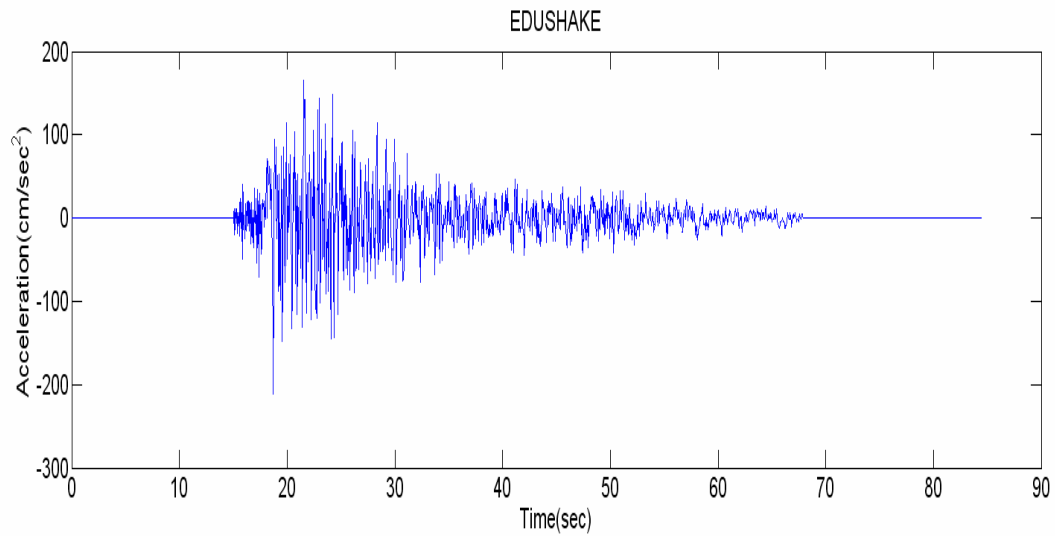
#### 5.1 การทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมากับโปรแกรม Edushake

ในการทดสอบเปรียบเทียบในครั้งนี้ใช้ชั้นดินที่มีความหนา 10 เมตร โดยใช้แบบจำลองการคำนวณ Linear elastic model และคุณสมบัติของความหนืดของวัสดุ (Damping material) มีคุณสมบัติเป็นแบบเชิงเส้น โดยคุณสมบัติของชั้นดิน ดังรูปที่ 5.1

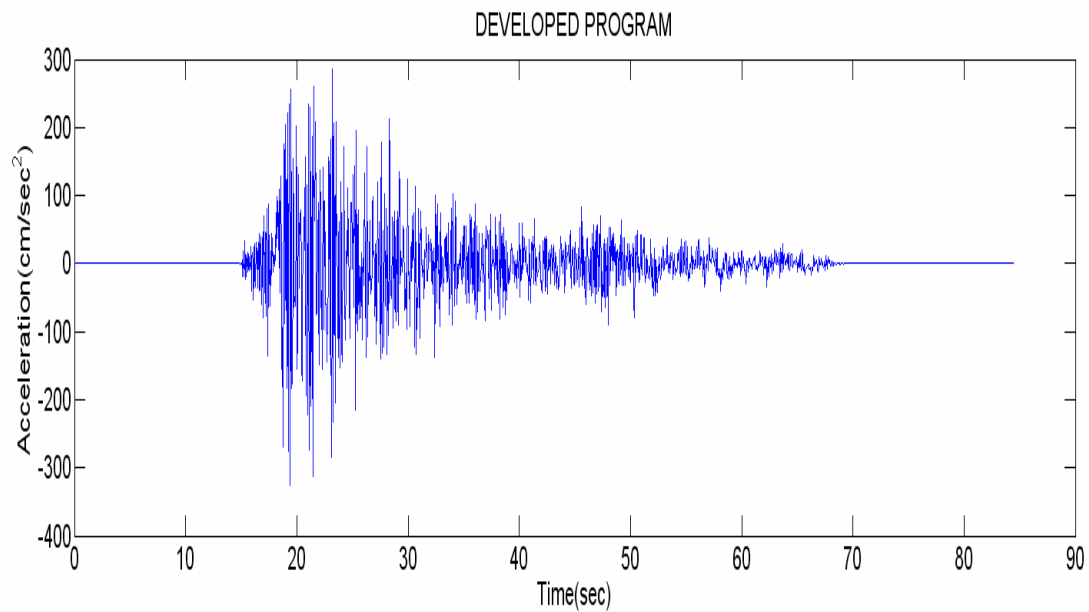
|                                          |                                            |
|------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Clay                                     |                                            |
| Thickness 10 m                           |                                            |
| Unit weigh 19.5 kN/m <sup>3</sup>        |                                            |
| Maximum Shear Modulus (G) 350 Mpa        |                                            |
| Shear wave velocity( $v_s$ ) 419.5 m/sec |                                            |
| Rock                                     | Maximum Shear Modulus (G) 3336.5 Mpa       |
| Unit weigh 22.0 kN/m <sup>3</sup>        | Shear wave velocity ( $v_s$ ) 1219.0 m/sec |

รูปที่ 5.1 คุณสมบัติของชั้นดินที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบ

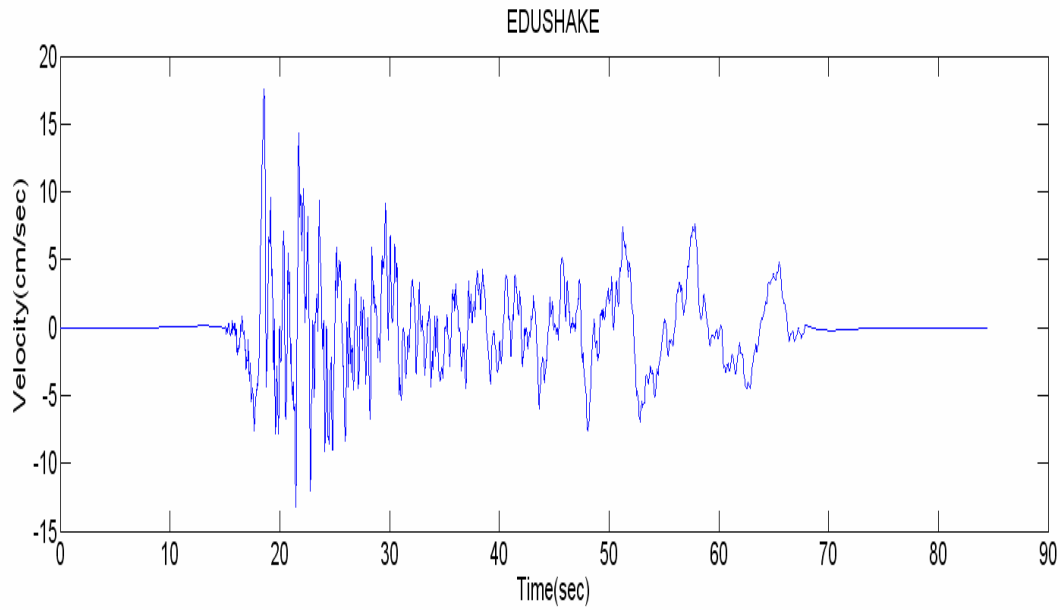
### 5.1.1 คลื่นแผ่นดินไหว Taft



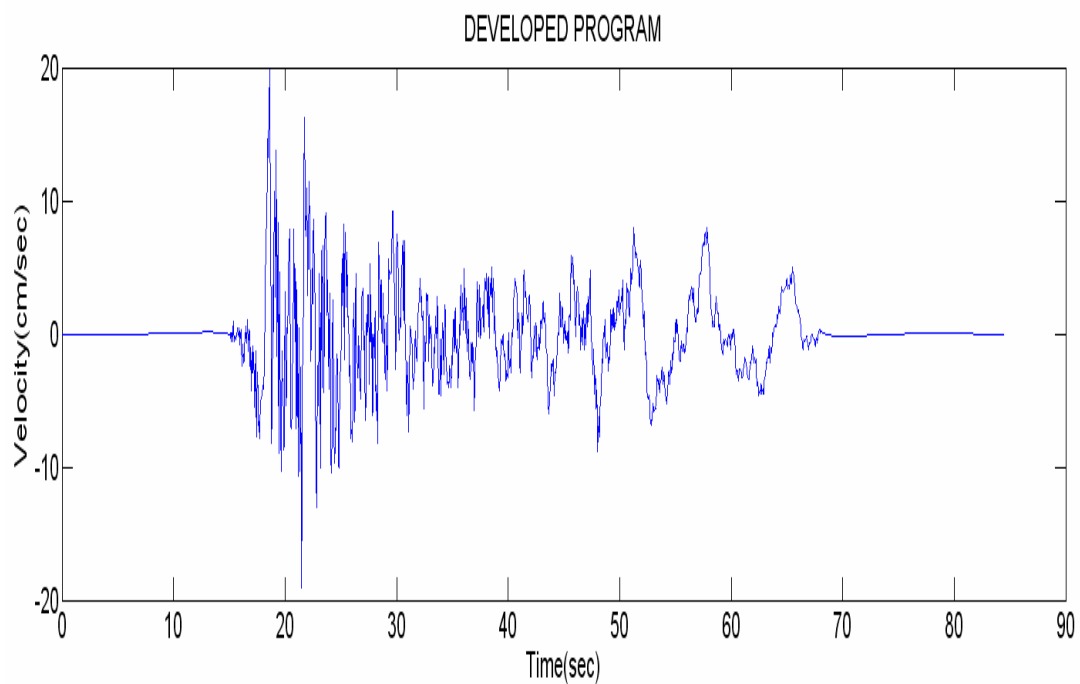
รูปที่ 5.2 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน



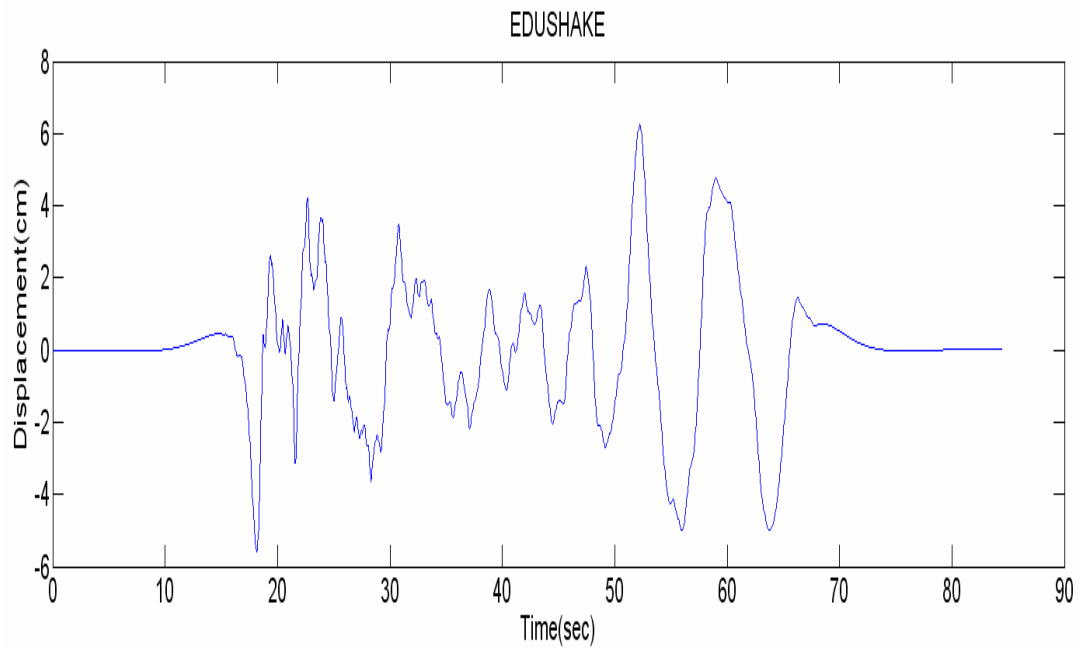
รูปที่ 5.3 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน



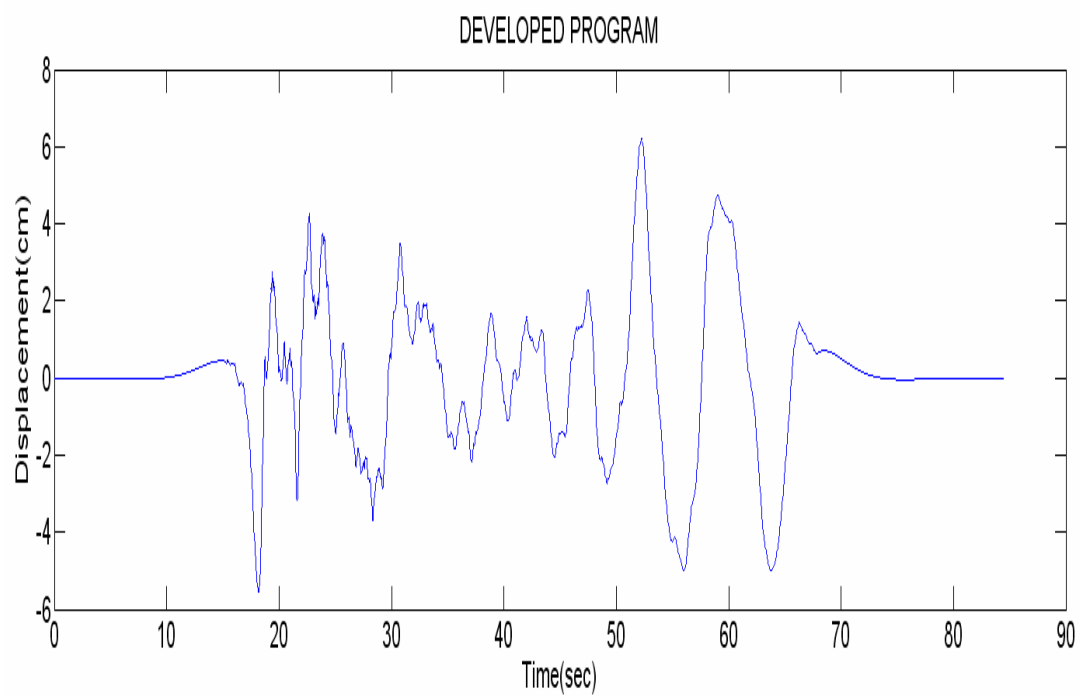
รูปที่ 5.4 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน



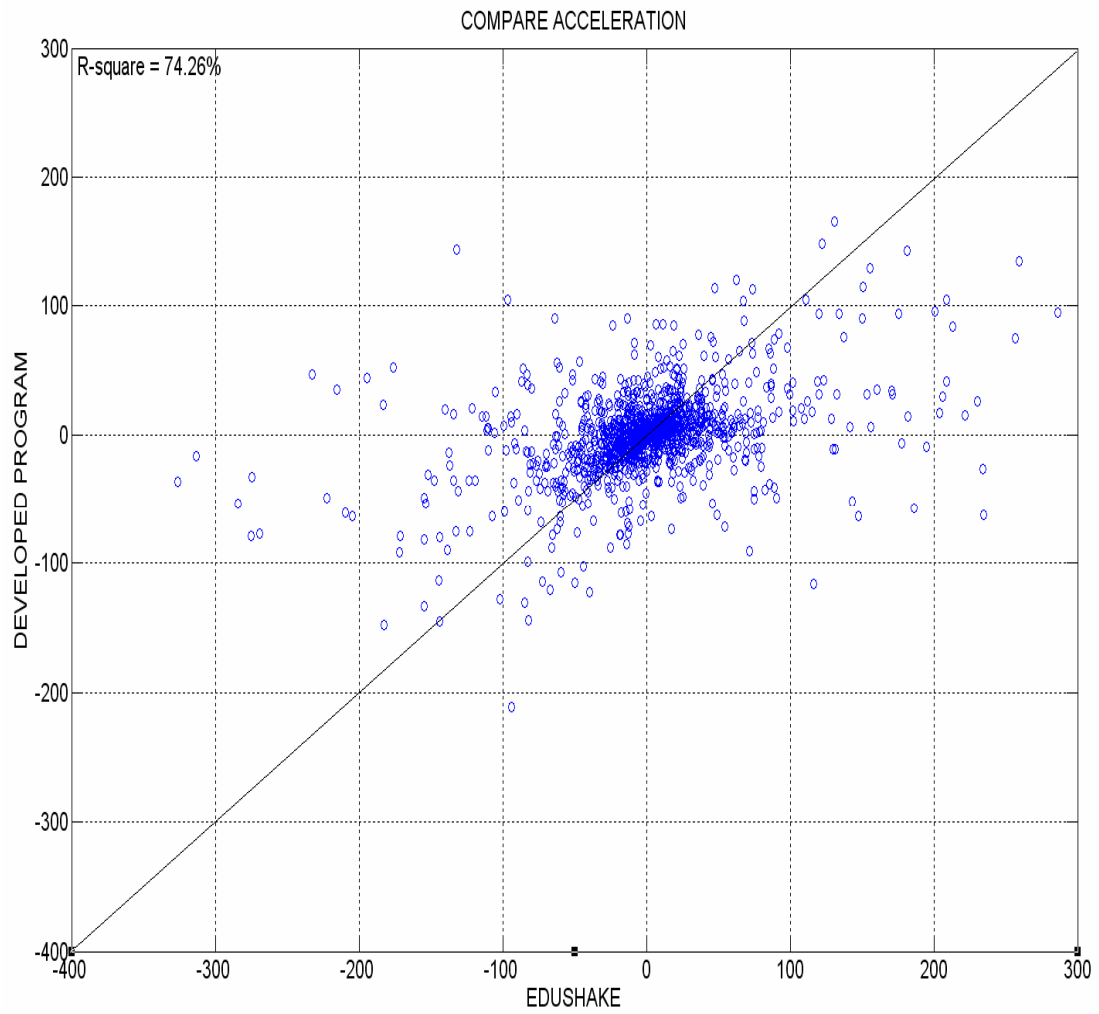
รูปที่ 5.5 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่น Taft ที่ชั้นผิวดิน



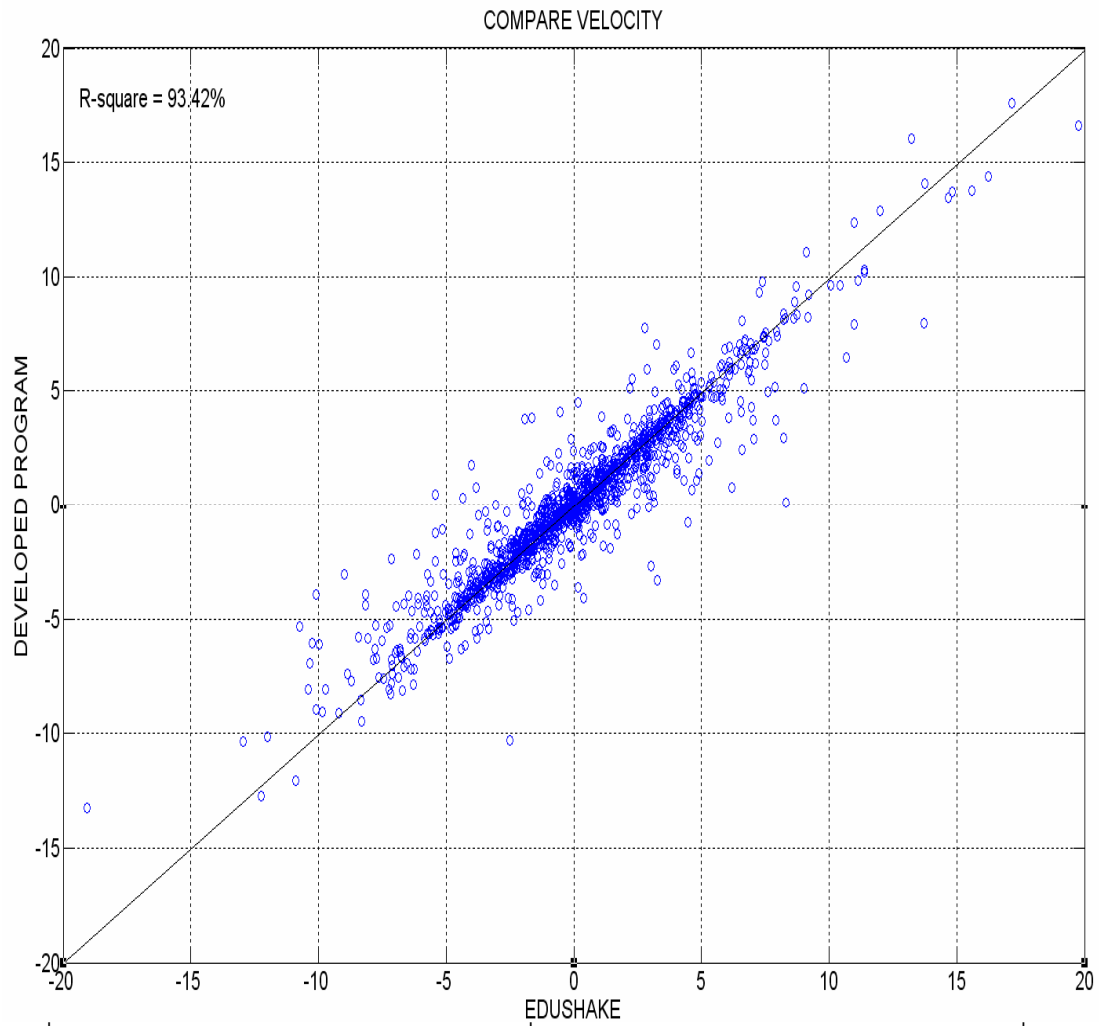
รูปที่ 5.6 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน



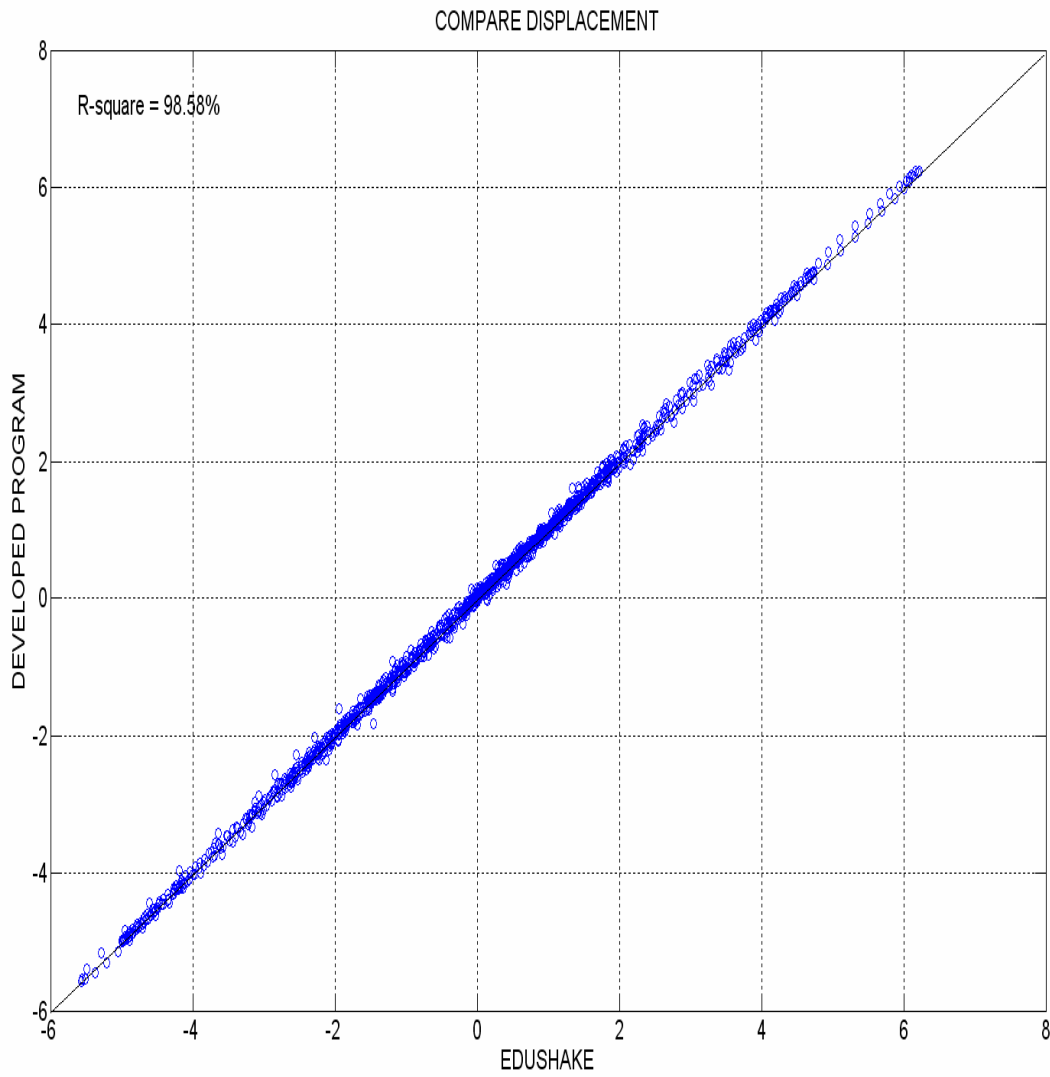
รูปที่ 5.7 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Taft ที่ชั้นผิวดิน



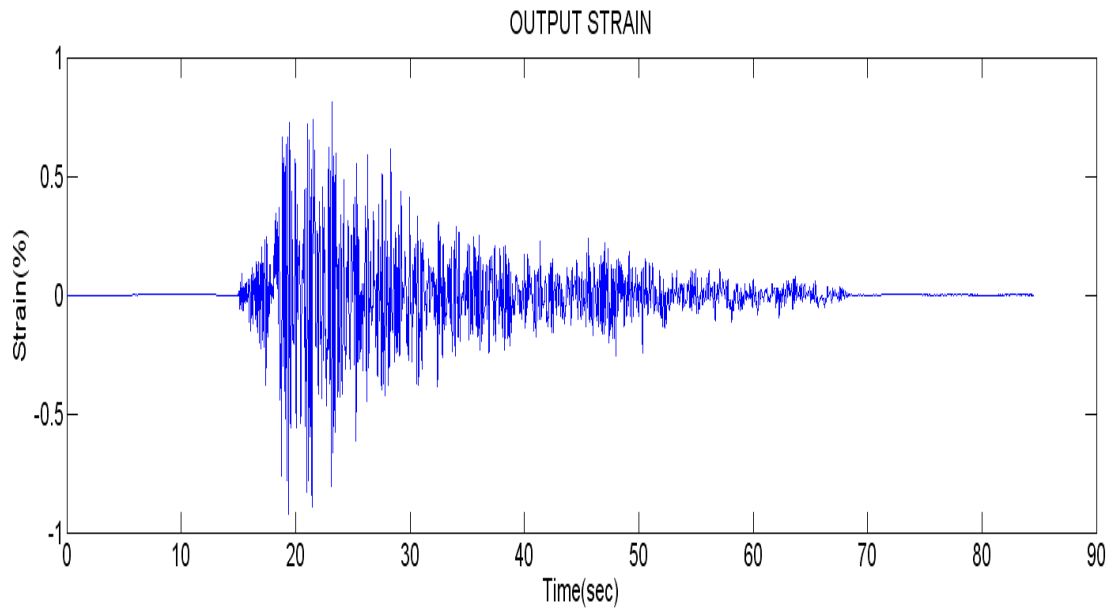
รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1



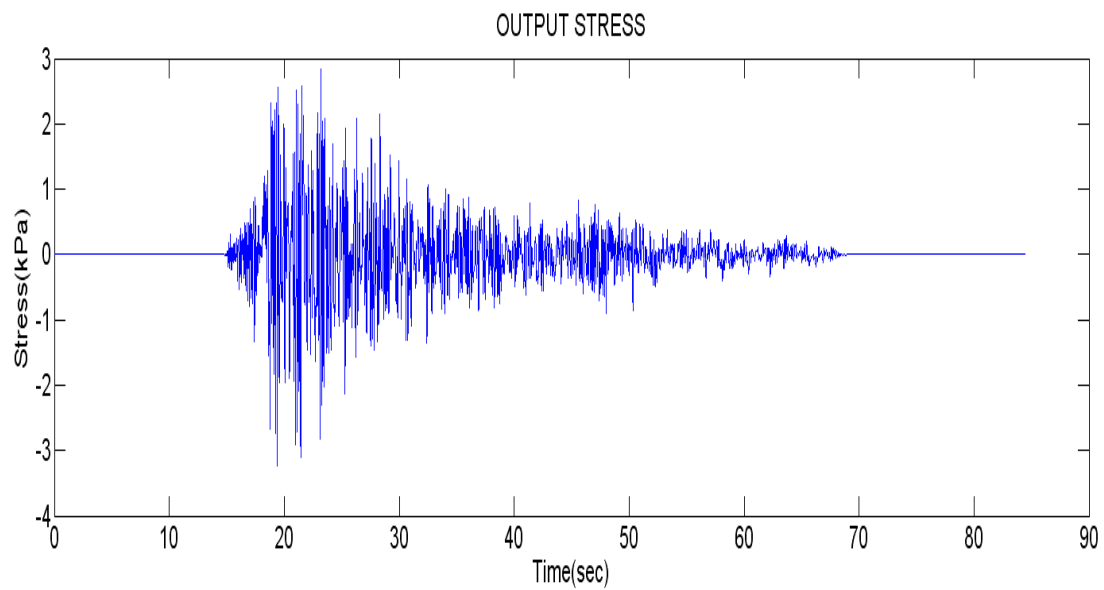
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1



รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำกรเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1

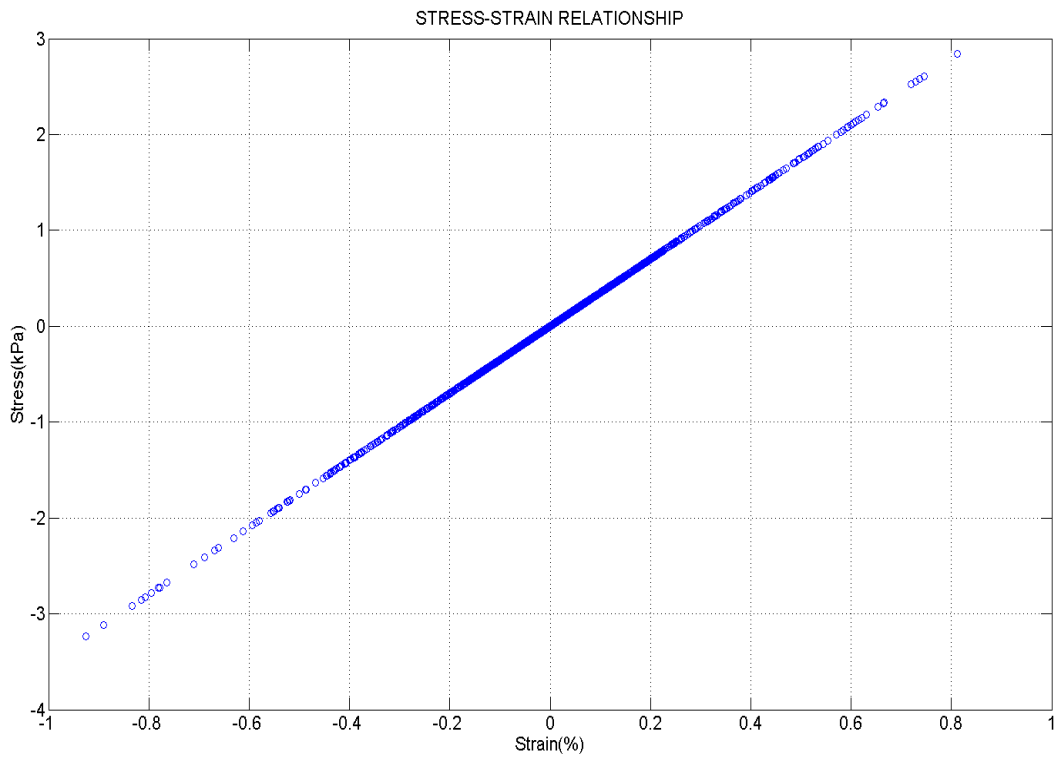


รูปที่ 5.11 ค่าความเครียดเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา



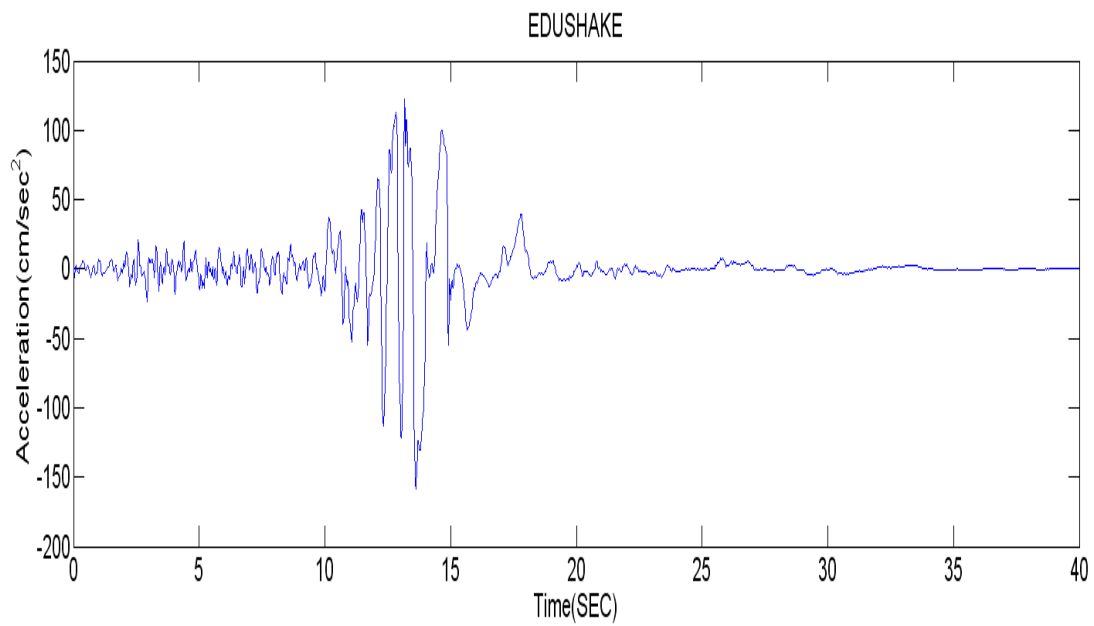
รูปที่ 5.12 ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา



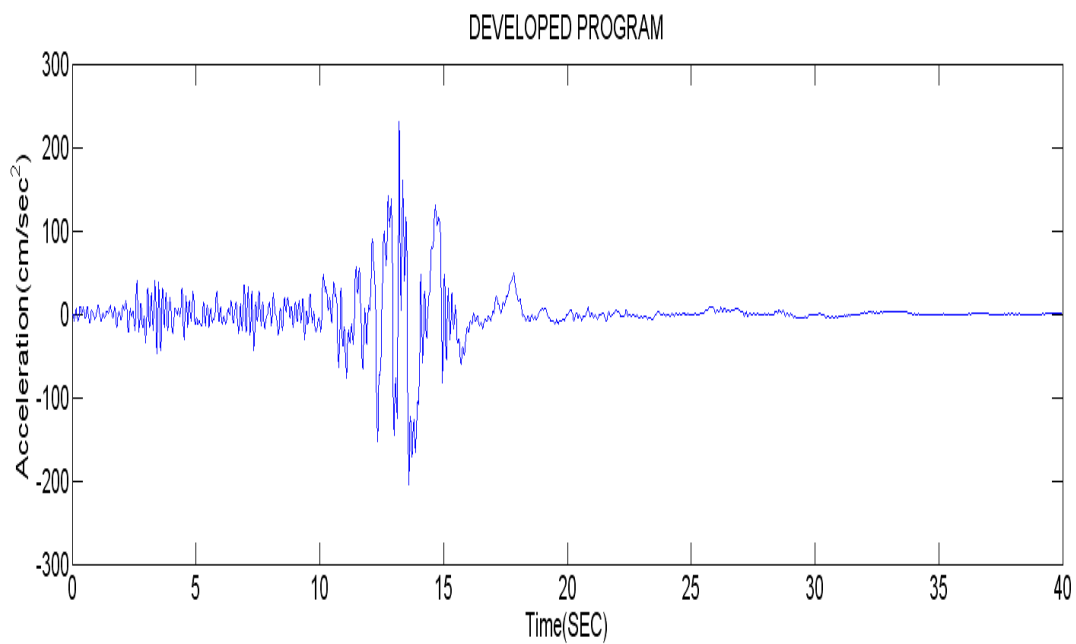


รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบระหว่างความเค้นเคียน กับ ความเครียดเคียนซึ่งใช้แบบจำลองการคำนวณ Linear elastic model

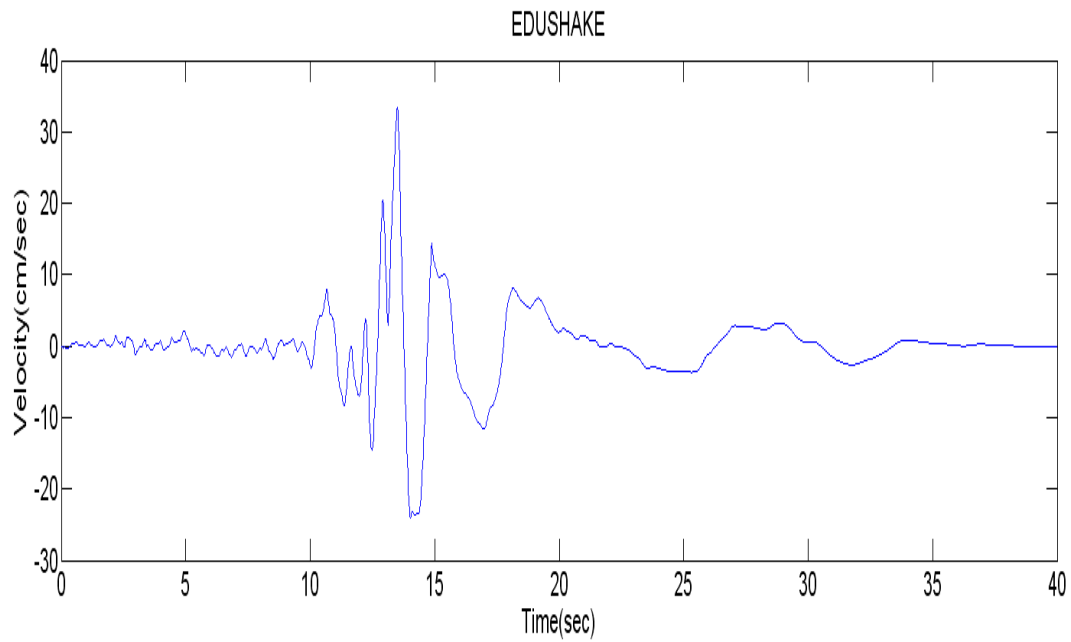
### 5.1.2 คลื่นแผ่นดินไหว Treas



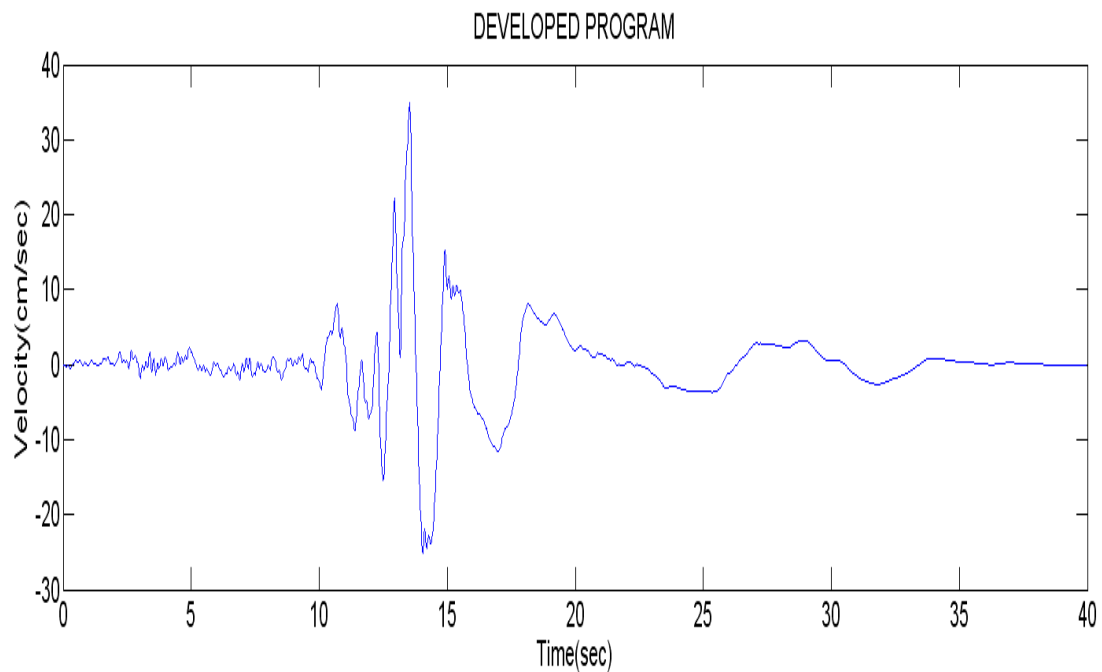
รูปที่ 5.14 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน



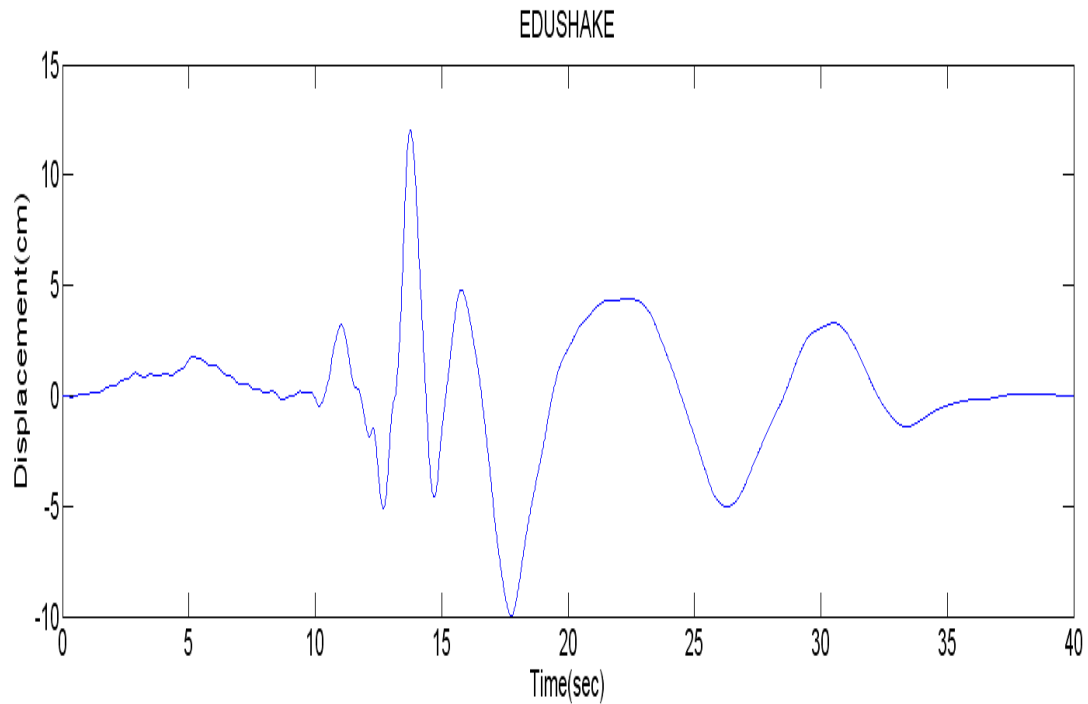
รูปที่ 5.15 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน



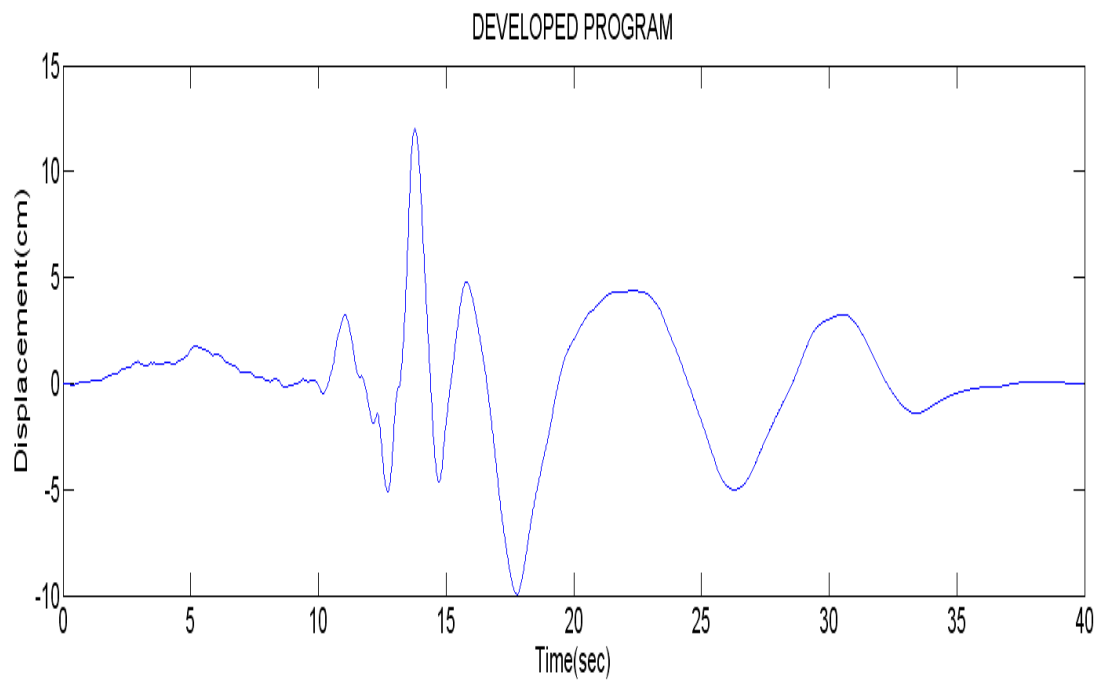
รูปที่ 5.16 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน



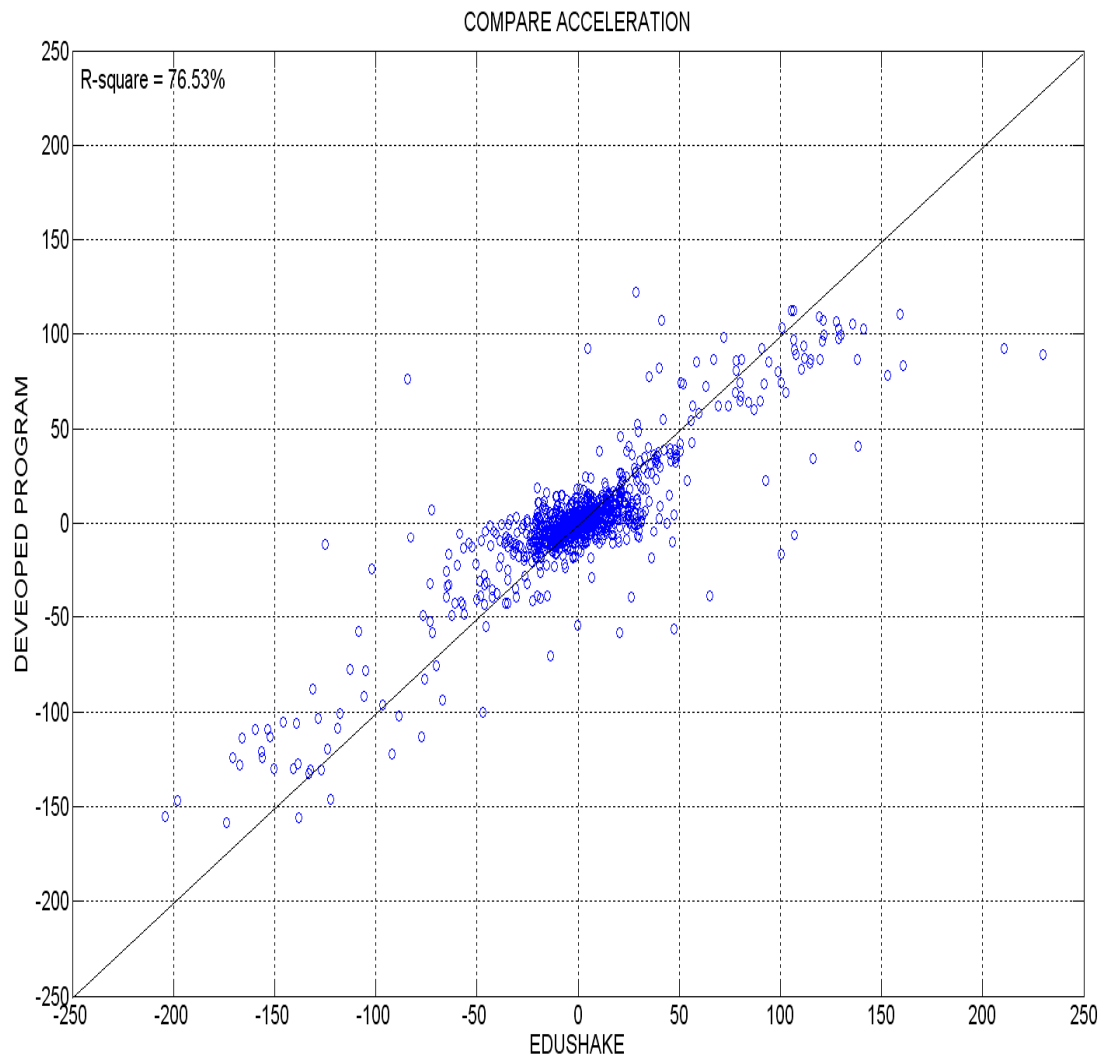
รูปที่ 5.17 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่น Treas ที่ชั้นผิวดิน



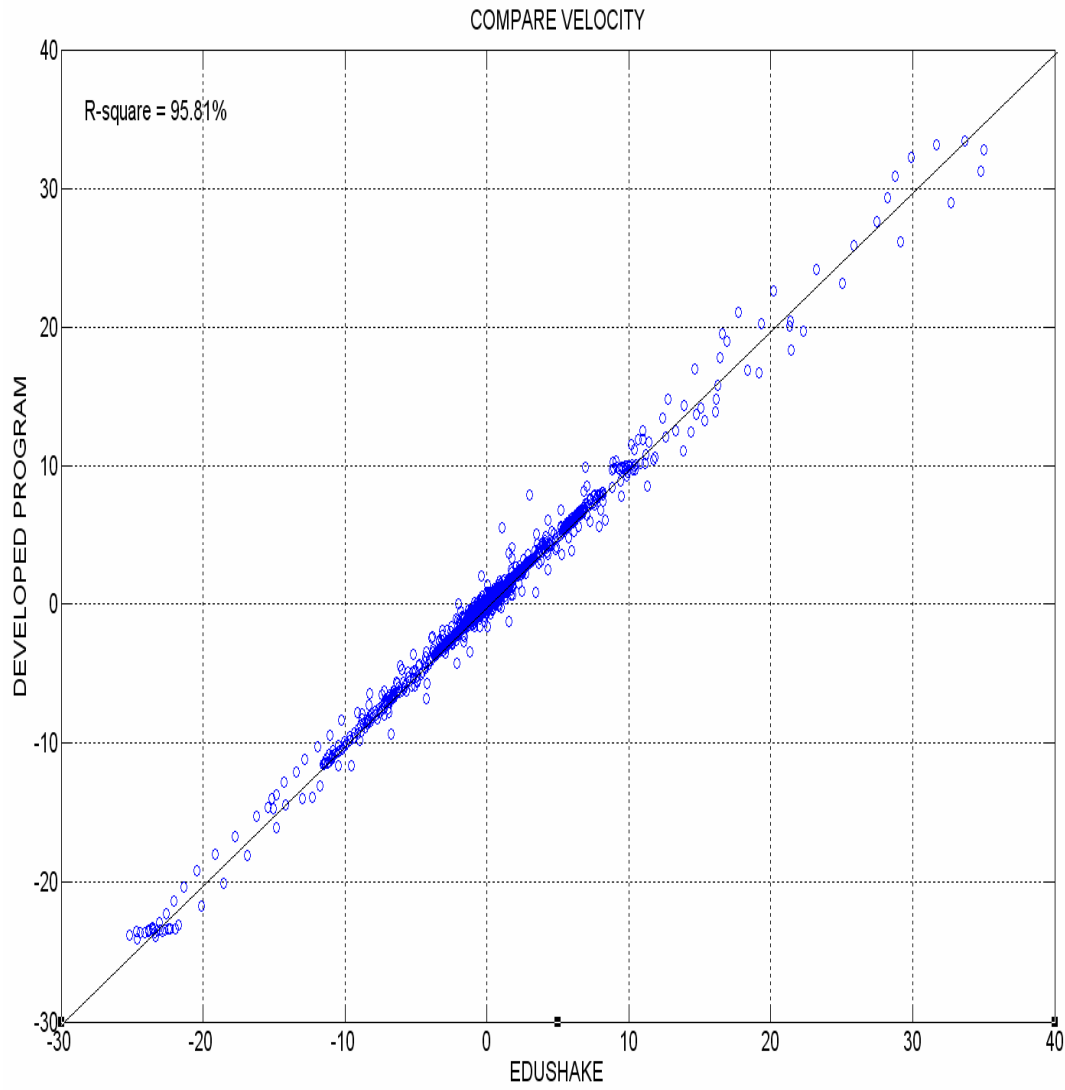
รูปที่ 5.18 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมEdushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน



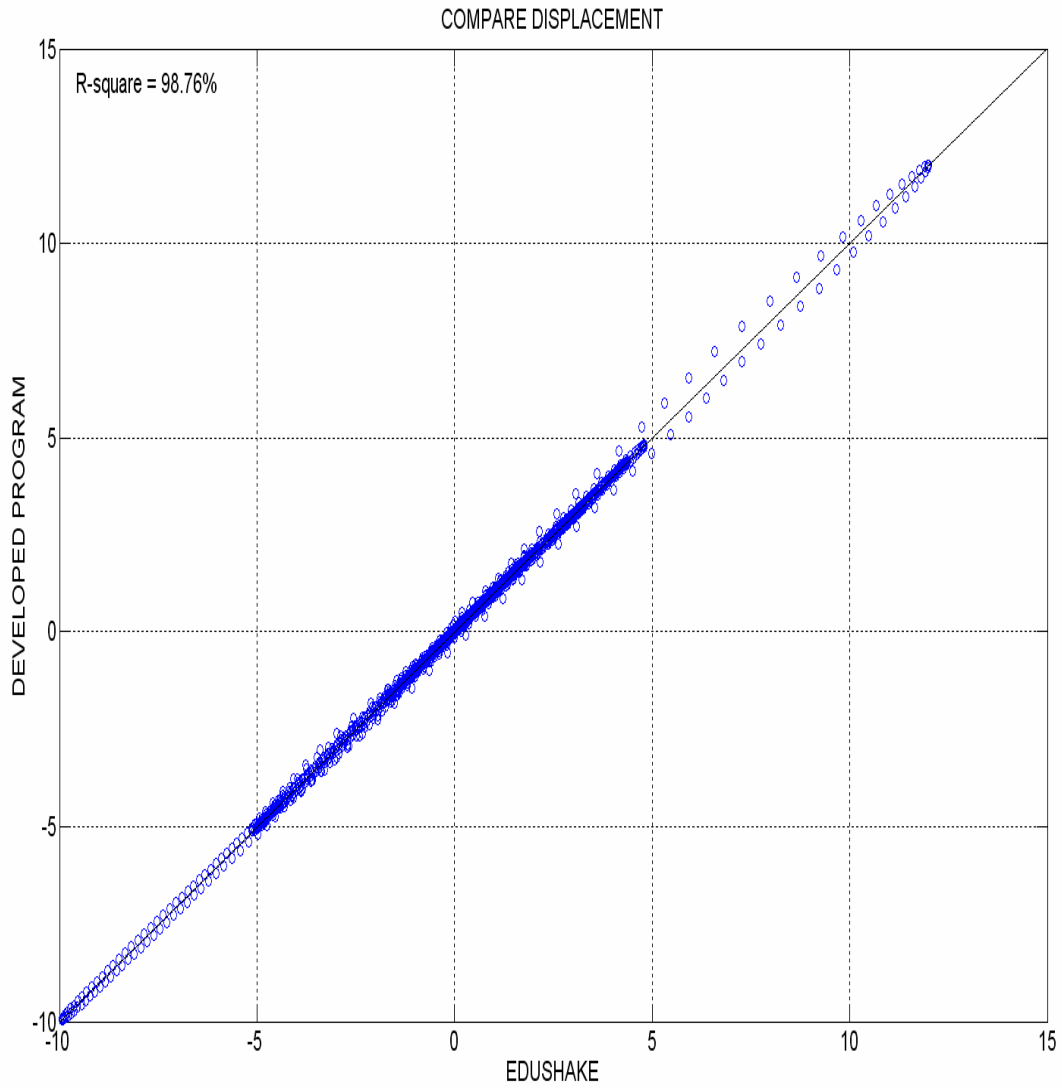
รูปที่ 5.19 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างชั้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน



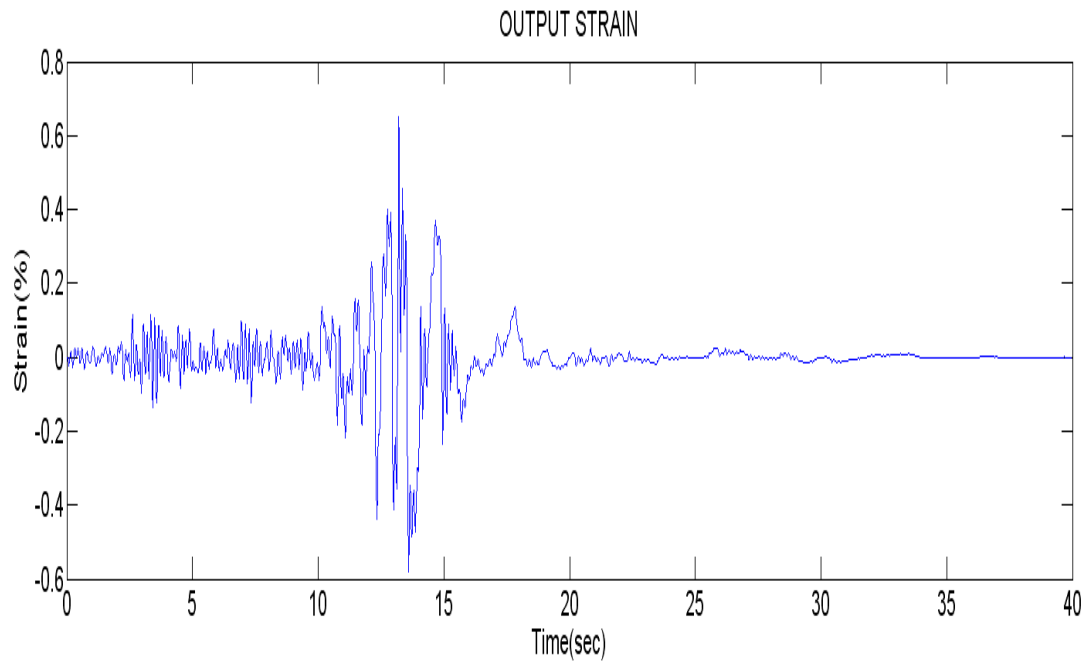
รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำ การเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1



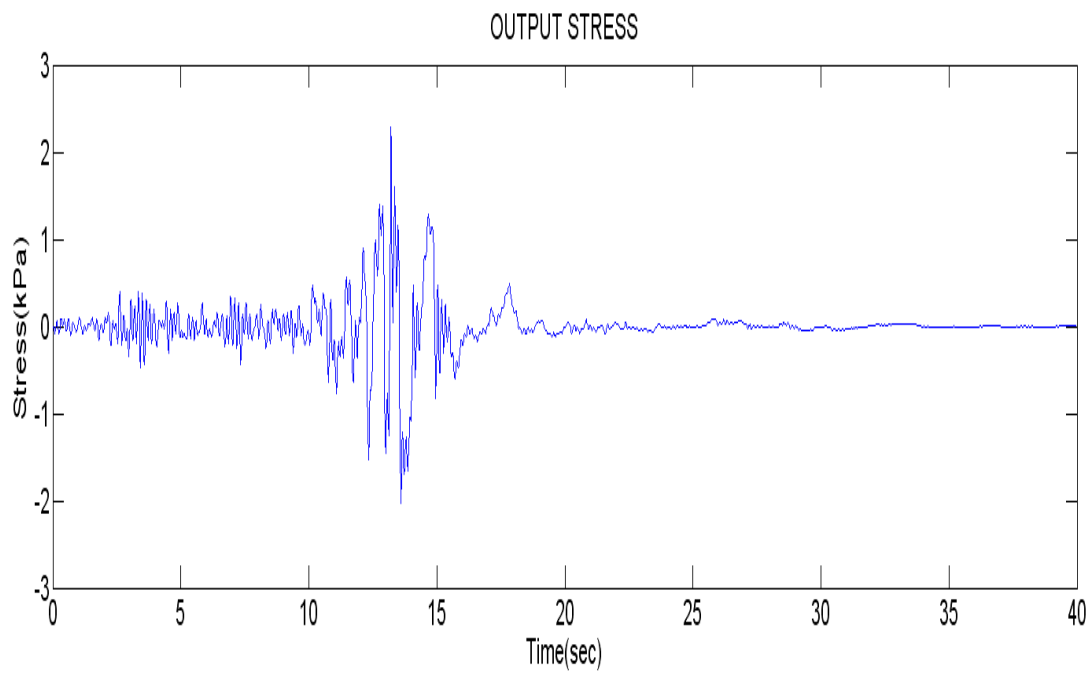
รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1

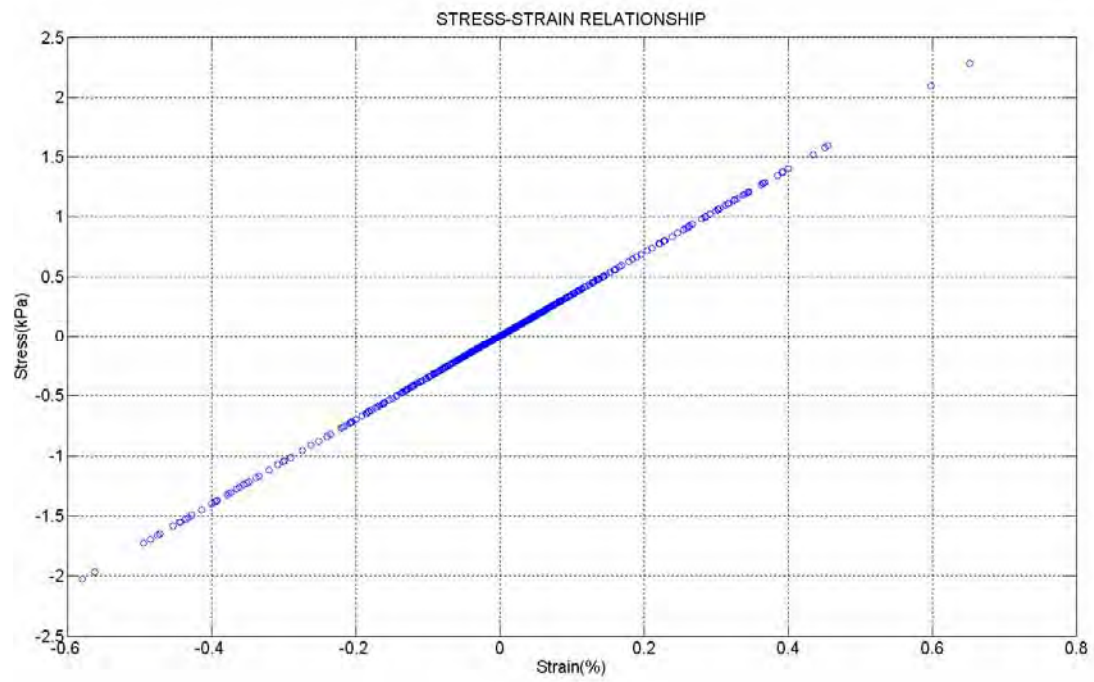


รูปที่ 5.23 ค่าความเครียดเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำกรเขียนขึ้นมา



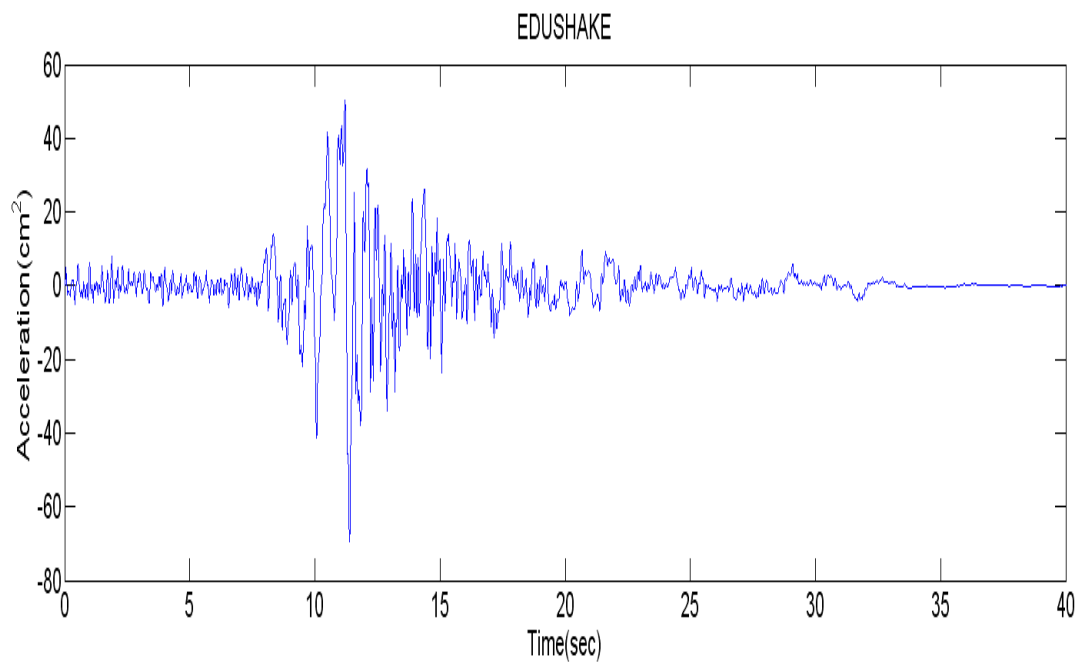
รูปที่ 5.24 ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำกรเขียนขึ้นมา



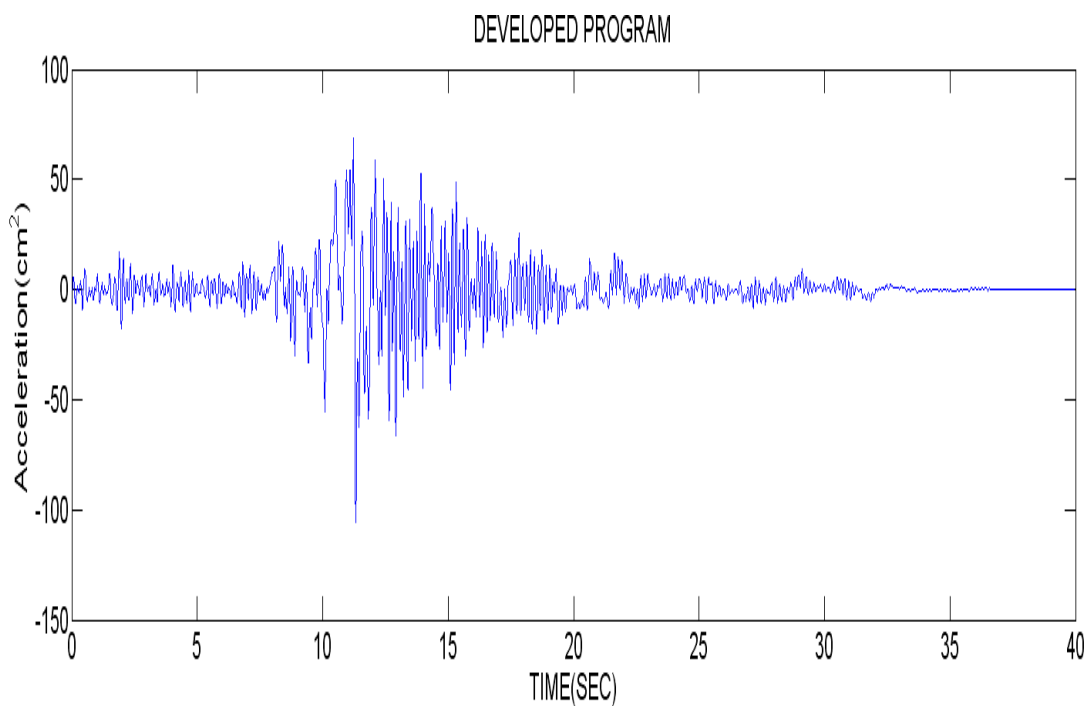


รูปที่ 5.25 การเปรียบเทียบระหว่างความเค้นเฉือน กับ ความเครียดเฉือนซึ่งใช้แบบจำลองการคำนวณ Linear elastic model

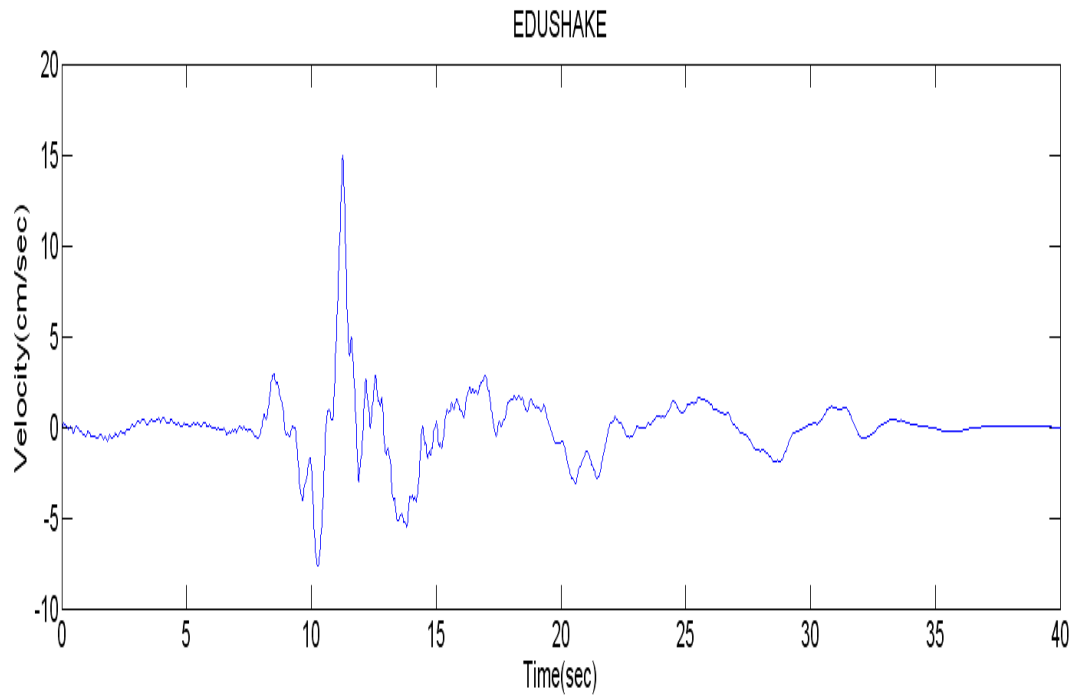
### 5.1.3 คลื่นแผ่นดินไหว Yerba



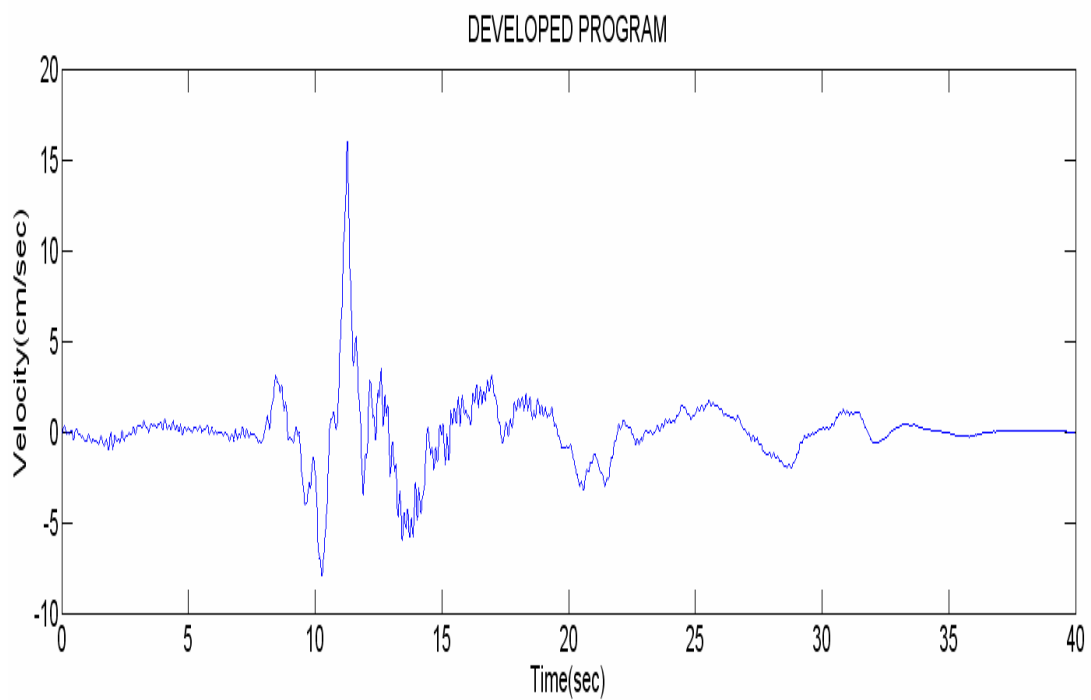
รูปที่ 5.26 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba ที่ชั้นผิวดิน



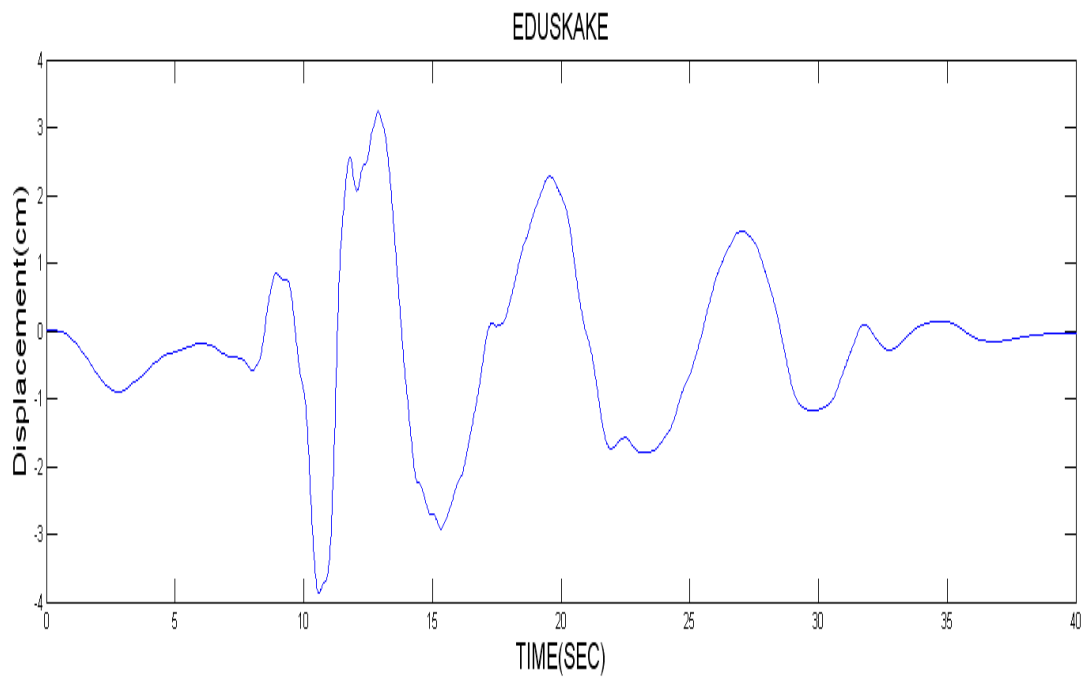
รูปที่ 5.27 ความเร่งที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba ที่ชั้นผิวดิน



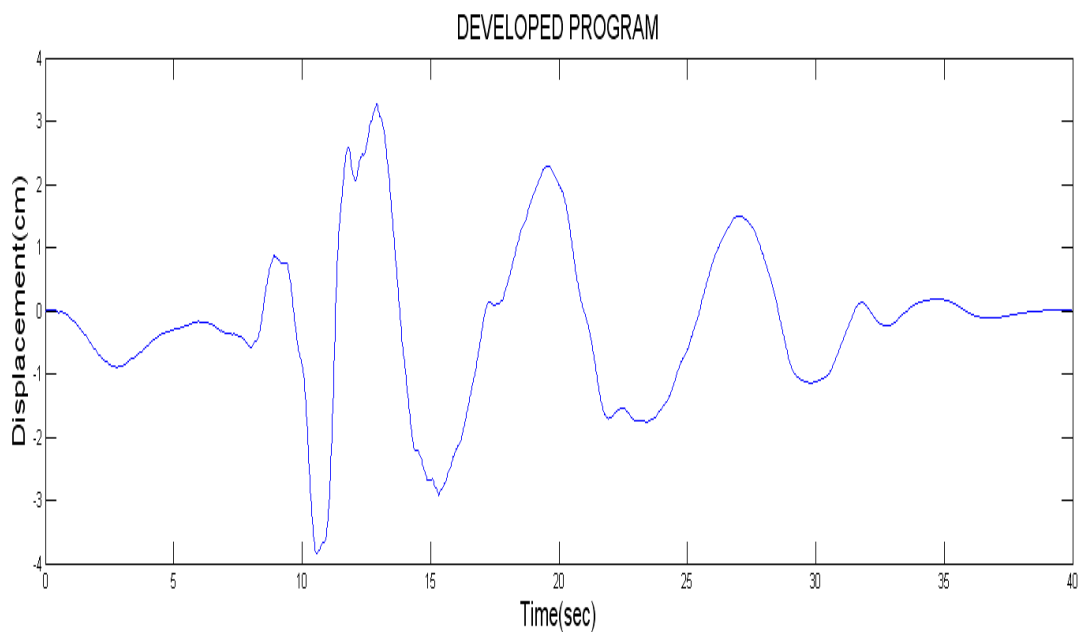
รูปที่ 5.28 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba ที่ชั้นผิวดิน



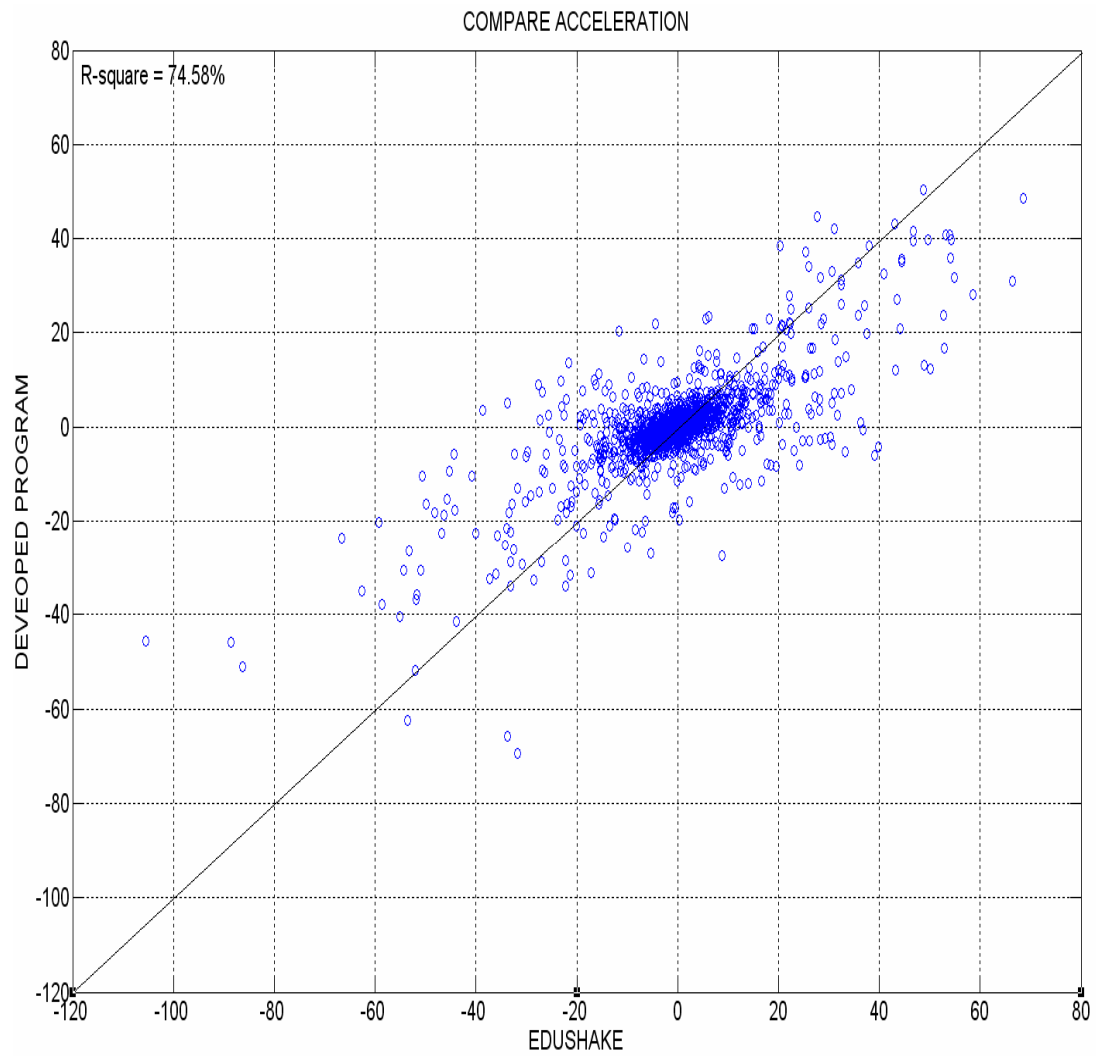
รูปที่ 5.29 ความเร็วที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่น Yerba ที่ชั้นผิวดิน



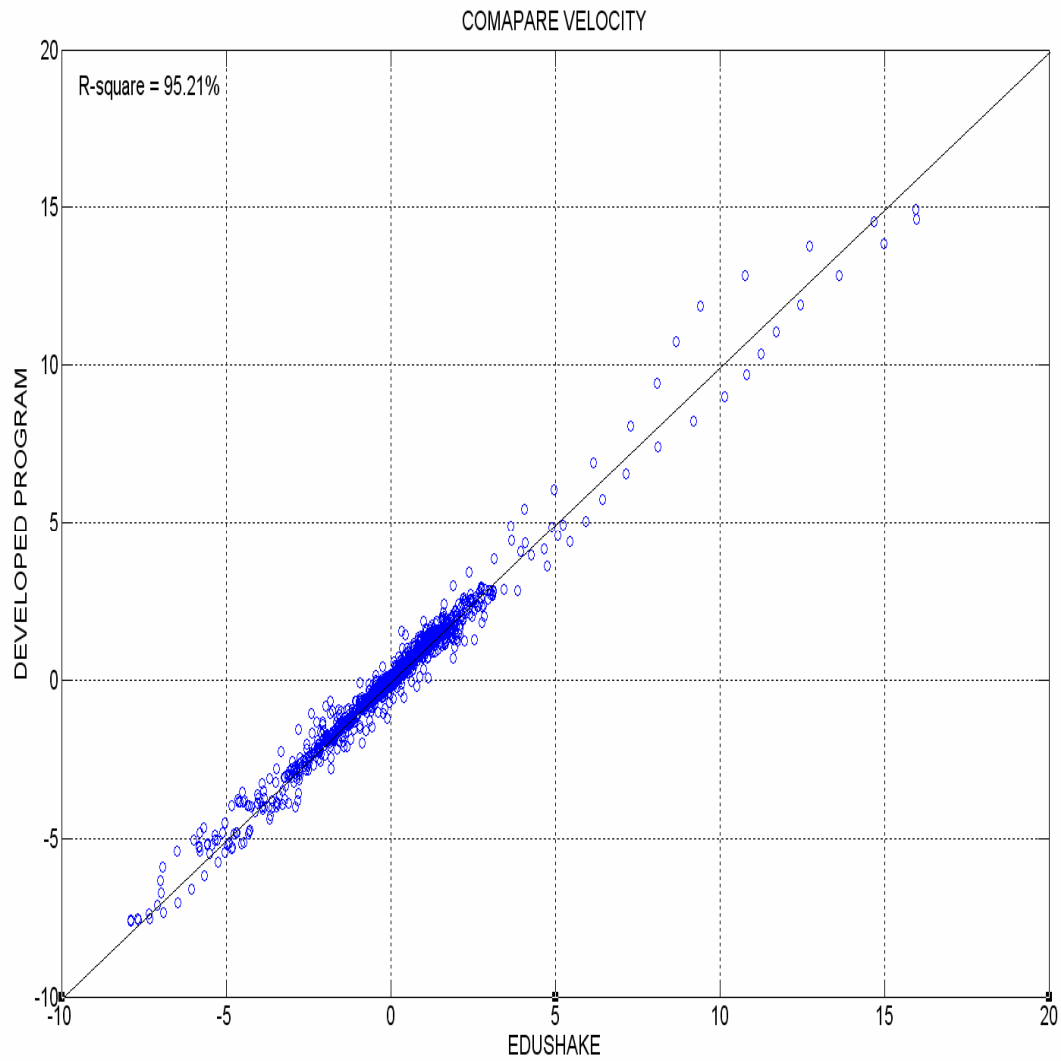
รูปที่ 5.30 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Edushake ในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba ที่ชั้นผิวดิน



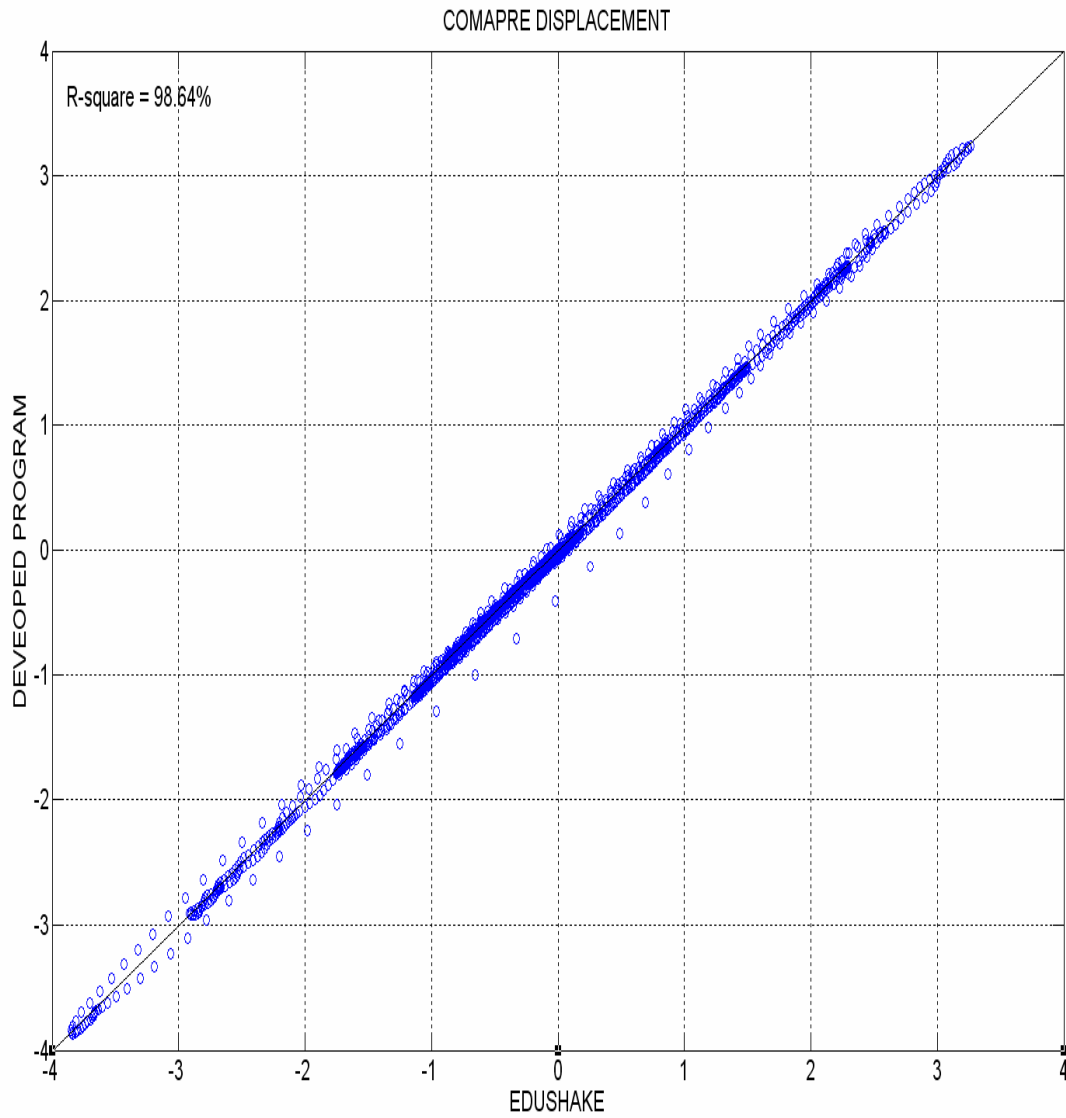
รูปที่ 5.31 การเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสร้างขึ้น ในคลื่นแผ่นดินไหว Treas ที่ชั้นผิวดิน



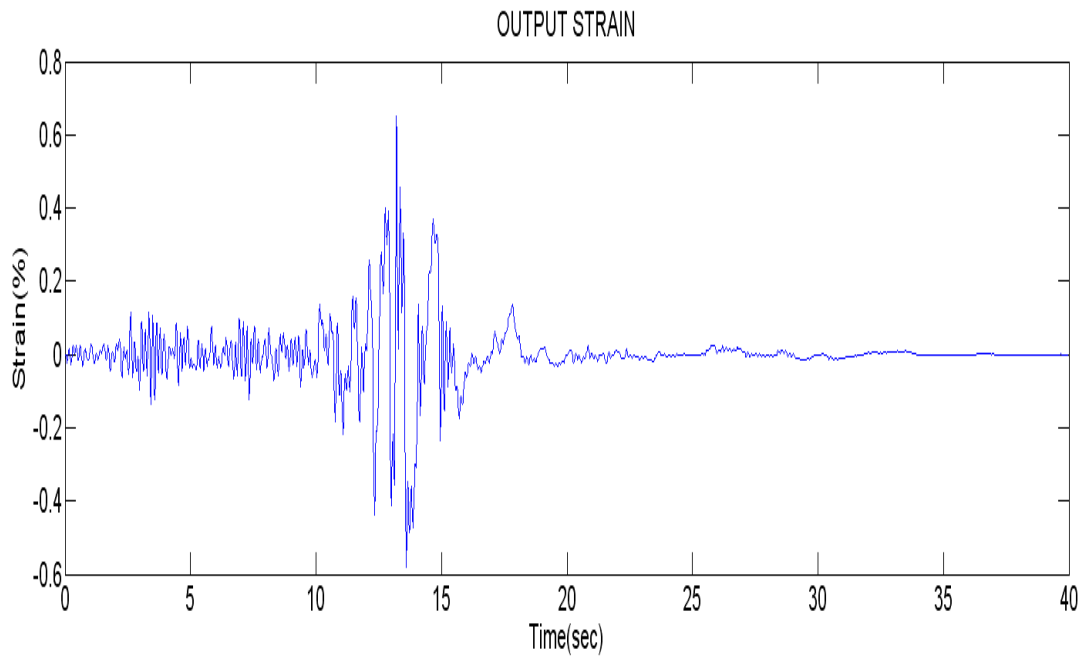
รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1



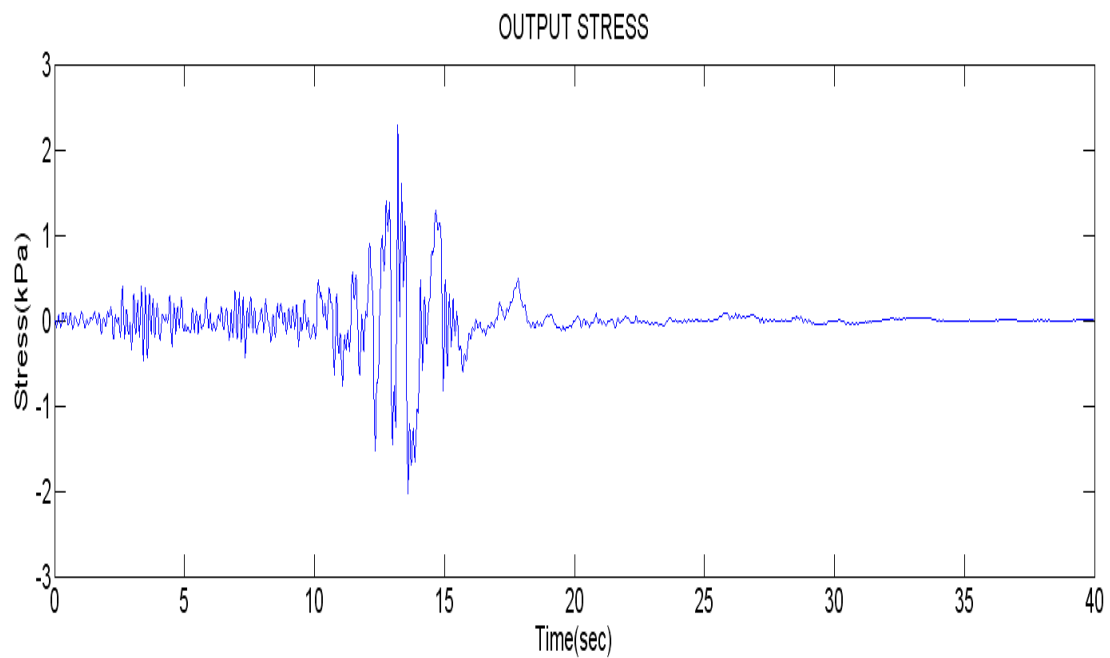
รูปที่ 5.33 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1



รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากโปรแกรม Edushake กับ โปรแกรมที่ทำ การเขียนขึ้นในลักษณะ 45 องศาแบบ 1:1

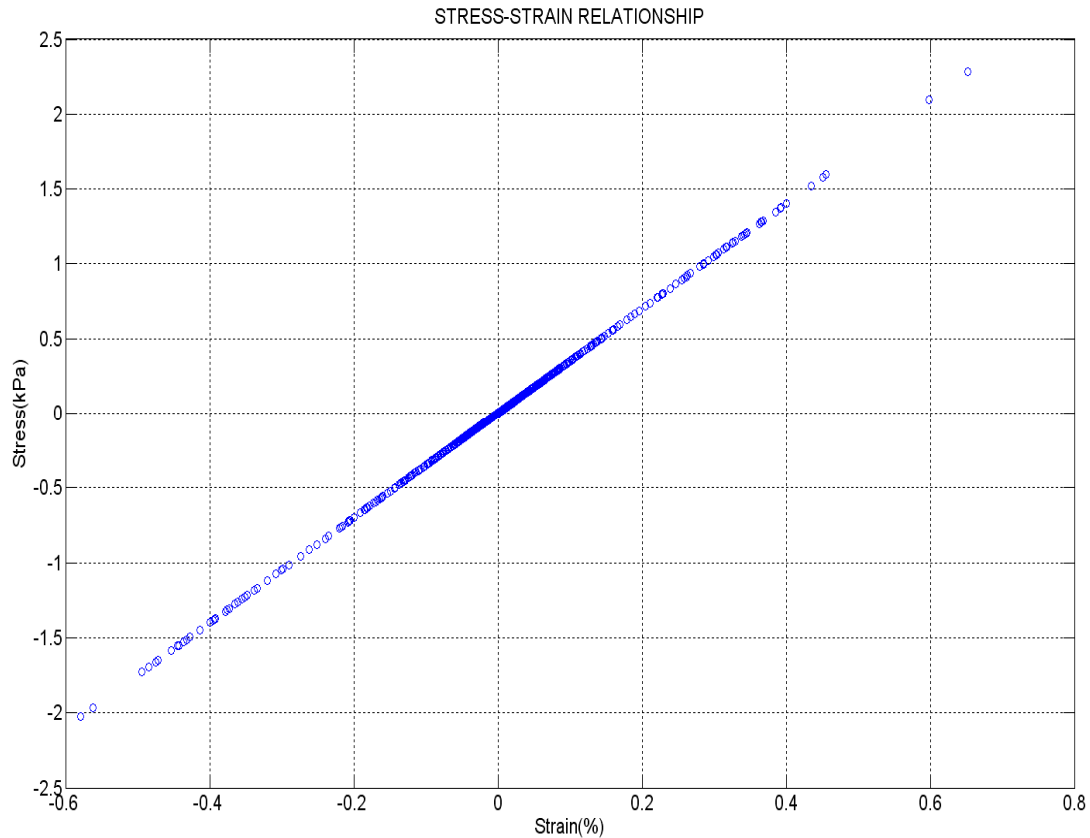


รูปที่ 5.35 ค่าความเครียดเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา



รูปที่ 5.36 ค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา





รูปที่ 5.37 การเปรียบเทียบระหว่างความเค้นเฉือน กับ ความเครียดเฉือนซึ่งใช้แบบจำลองการคำนวณ Linear elastic model

## 5.2 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นกับโปรแกรม Edushake

**5.2.1 คลื่นแผ่นดินไหว Taft** มีขนาดของค่าความเร่งที่ส่งออกมาสูงสุดได้เท่ากับ  $250 \text{ cm/sec}^2$  โดยคิดจากโปรแกรม Edushake ส่วนในโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ในคลื่นแผ่นดินไหวนี้ นั้นได้ค่าความเร่งที่ออกมาจากชั้นดินสูงสุดเท่ากับ  $320 \text{ cm/sec}^2$  โดยในคลื่นแผ่นดินไหว Taft นี้ นั้นมีค่าของความเร็วสูงสุดที่วัดได้ที่ผิวดินด้วยโปรแกรม Edushake มีค่าเท่ากับ  $17 \text{ cm/sec}$  โดยที่โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมานั้นวัดความเร่งสูงสุดของคลื่นได้เท่ากับ  $20 \text{ cm/sec}$  และในส่วนของค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินนั้นโปรแกรม Edushake สามารถวัดการเคลื่อนตัวสูงสุดได้เท่ากับ  $6.5 \text{ cm}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์

**5.2.2 คลื่นแผ่นดินไหว Treas** โดยมีขนาดของค่าความเร่งที่ส่งออกมาได้สูงสุดเท่ากับ  $150 \text{ cm/sec}^2$  โดยคิดจากโปรแกรม Edushake ส่วนในโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ในคลื่นแผ่นดินไหวนี้ นั้นได้ค่าความเร่งที่ออกมาจากชั้นดินสูงสุดเท่ากับ  $200 \text{ cm/sec}^2$  โดยในคลื่นแผ่นดินไหว Treas นี้ นั้นมีค่าของความเร็วสูงสุดที่วัดได้ที่ผิวดินด้วยโปรแกรม Edushake มีค่าเท่ากับ  $35 \text{ cm/sec}$  โดยที่โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมานั้นวัดความเร่งสูงสุดของคลื่นได้เท่ากับ

36.5 cm/sec และในส่วนของค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินนั้นโปรแกรม Edushake สามารถวัดการเคลื่อนตัวสูงสุดได้เท่ากับ 12 cm ซึ่งมีค่าเท่ากับโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์

**5.2.3 คลื่นแผ่นดินไหว Yerba** โดยมีขนาดของค่าความเร่งที่ส่งออกมาได้สูงสุดเท่ากับ  $70 \text{ cm/sec}^2$  โดยคิดจากโปรแกรม Edushake ส่วนในโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ในคลื่นแผ่นดินไหวนี้ได้ออกมาค่าความเร่งที่ออกมาจากชั้นดินสูงสุดเท่ากับ  $110 \text{ cm/sec}^2$  โดยในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba นี้มีค่าของความเร็วสูงสุดที่วัดได้ที่ผิวดินด้วยโปรแกรม Edushake มีค่าเท่ากับ 15 cm/sec โดยที่โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมานั้นวัดความเร่งสูงสุดของคลื่นได้เท่ากับ 16 cm/sec และในส่วนของค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินนั้นโปรแกรม Edushake สามารถวัดการเคลื่อนตัวสูงสุดได้เท่ากับ 3.8 cm ซึ่งมีค่าเท่ากับโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์

## บทที่ 6

### การประยุกต์ใช้แบบจำลองดิน Pestana กับชั้นดินกรุงเทพ

ในบทนี้จะทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองดิน Pestana ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยส่วนที่ 1 จะทำการหาค่า Parameter เปรียบเทียบกับผลการทดลอง Direct simple shear test ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์หาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับชั้นดินในสภาวะ Dynamic loading แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นอีก 2 ส่วนได้แก่ การวิเคราะห์แบบการเฉือนทางเดียว (Monotonic) และการเฉือนแบบวัฏจักร (Cyclic) ซึ่งจะทำการหาค่า Parameter ที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ในกาวิเคราะห์ กับชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวกับชั้นดินกรุงเทพโดยนำชั้นดินและคุณสมบัติจริงที่ได้จากการขุดเจาะสำรวจเพื่อทำการก่อสร้างโดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน Pestana ในชั้นดินที่มีค่า OCR เท่ากับ 1 และชั้นดินที่มีค่า OCR มีค่าไม่เท่ากับ 1 นั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน Linear Elastic โดยทำการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหว Elcentro เดียวกันทั้งหมดเพื่อทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของชั้นดิน โดยก่อนที่ทำการแสดงผลการเปรียบเทียบของแบบจำลองดินกับผลการทดลองนั้นจะแสดงถึงตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองดินและวิธีการหาค่าตัวแปรดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติและการหาค่า Parameter ของแบบจำลองดิน Pestana

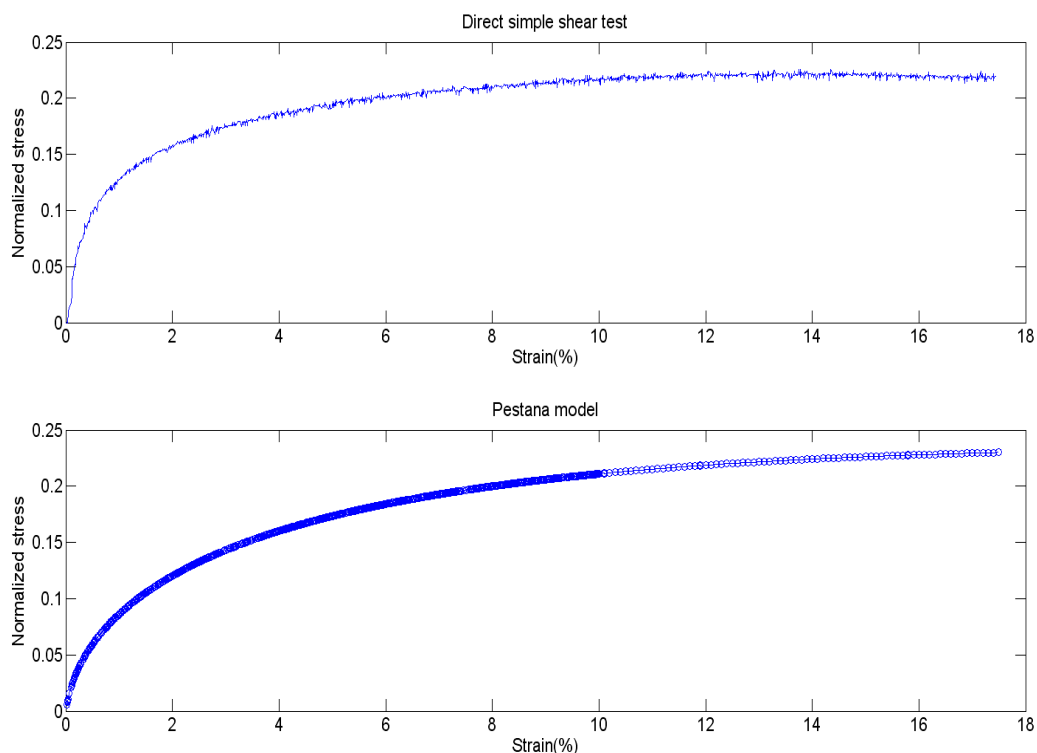
| Parameter | Effect on predicted Behavior                                    | Parameter Determination                                                               | Time Dependency |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $\beta$   | Control(primarily) the sensitivity of the material              | Excess pore water pressure at large strains measured in a DSS test                    | negligible      |
| m         | Control(primarily) the untrained shear strength of the material | Determination from measured values of undrained shear strength, $S_u$                 | yes             |
| $\psi$    | Described the effective Stress Failure Envelope                 | Effective stress obliquity angle at large strain                                      | no              |
| $G_n$     | Control small strain elastic share modulus                      | Shear wave measurement(i.e., $G_{max}$ ), bender element(lab), or seismic CPT( filed) | negligible      |
| $G_p$     | Control the stress-strain during first loading from NC state    | Calibration with measurement stress-strain behavior                                   | yes             |

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติและการหาค่า Parameter ของแบบจำลองดิน Pestana(ต่อ)

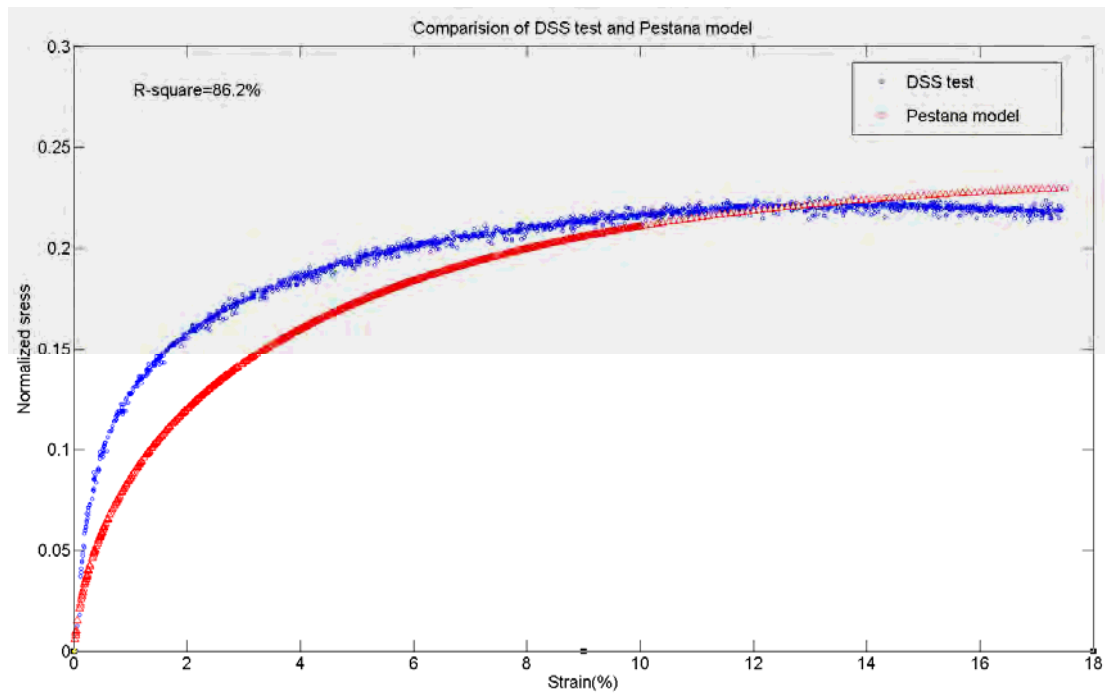
| Parameter | Effect on predicted Behavior                     | Parameter Determination                                                      | Time Dependency |
|-----------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $\theta$  | Control effective stress path for cyclic loading | Calibration with measurement pore pressure development during cyclic loading | yes             |
| $\lambda$ | Control shear stiffness during cyclic loading    | Calibration with measured accumulated shear strain during cyclic loading     | yes             |

### 6.1 การทดสอบเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับผลการทดลอง Direct simple shear test ในสภาวะ Monotonic loading

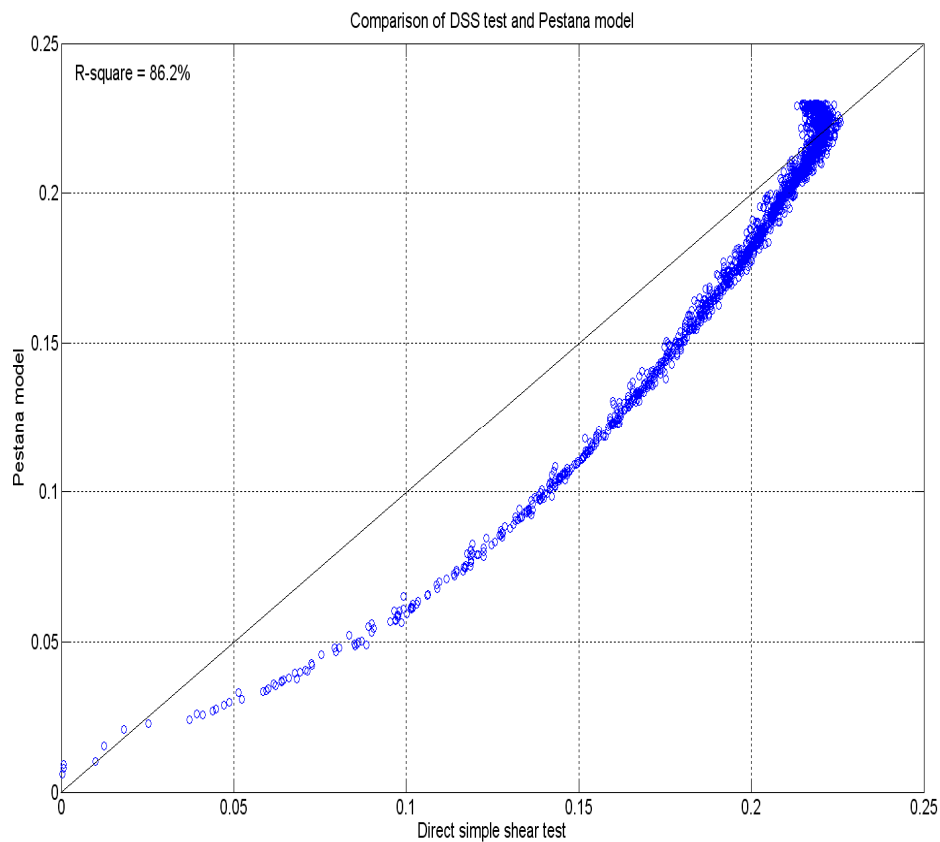
จากรูปที่ 6.1 นั้นเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองซึ่งจะแบ่งผลการเปรียบเทียบทั้งหมดเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนของที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบผลของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนซึ่งรูปบนของรูปที่ 6.1 นั้นเป็นผลที่ได้จากการทำการทดลอง Direct simple shear test ซึ่งได้ค่าความเค้นเฉือนที่ทำการ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) ส่วนรูปล่างนั้นเป็นผลที่ได้จากการใช้แบบจำลอง Pestana



รูปที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบค่าของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana

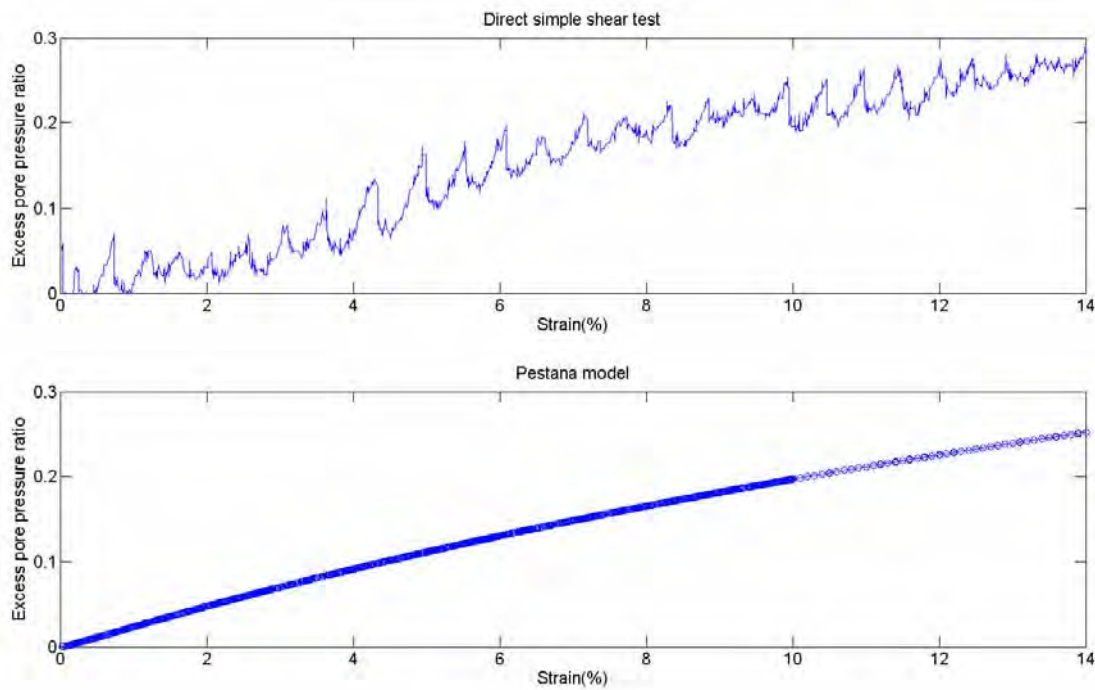


รูปที่ 6.2 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาพล็อตในกราฟเดียวกัน

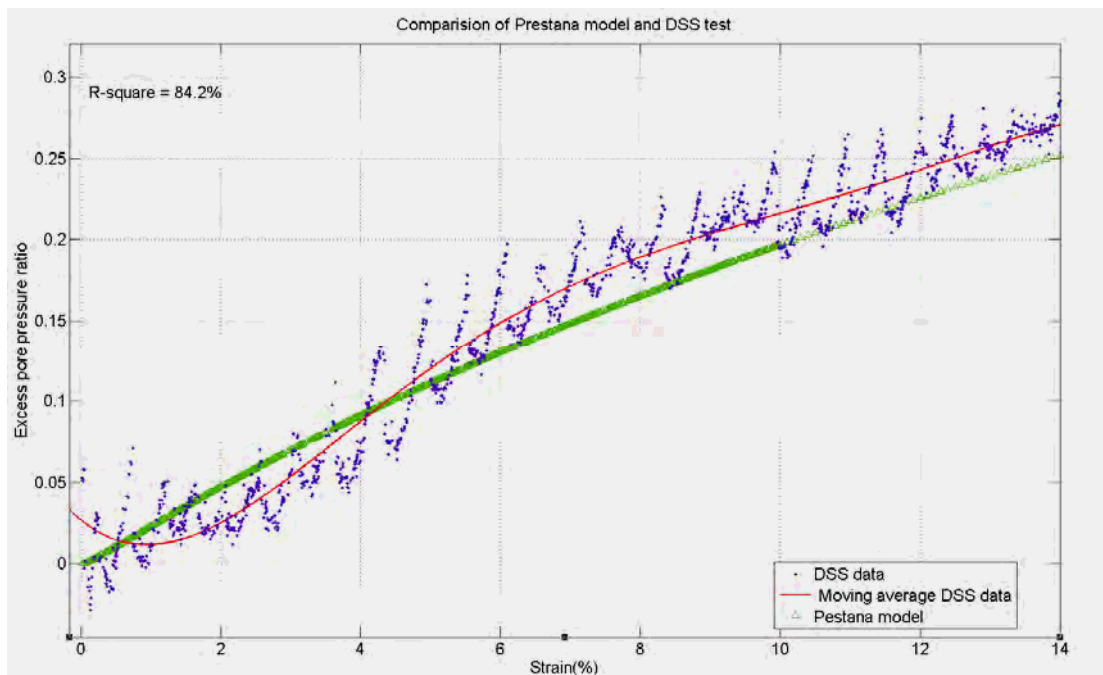


รูปที่ 6.3 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาในแนวแกน 1:1

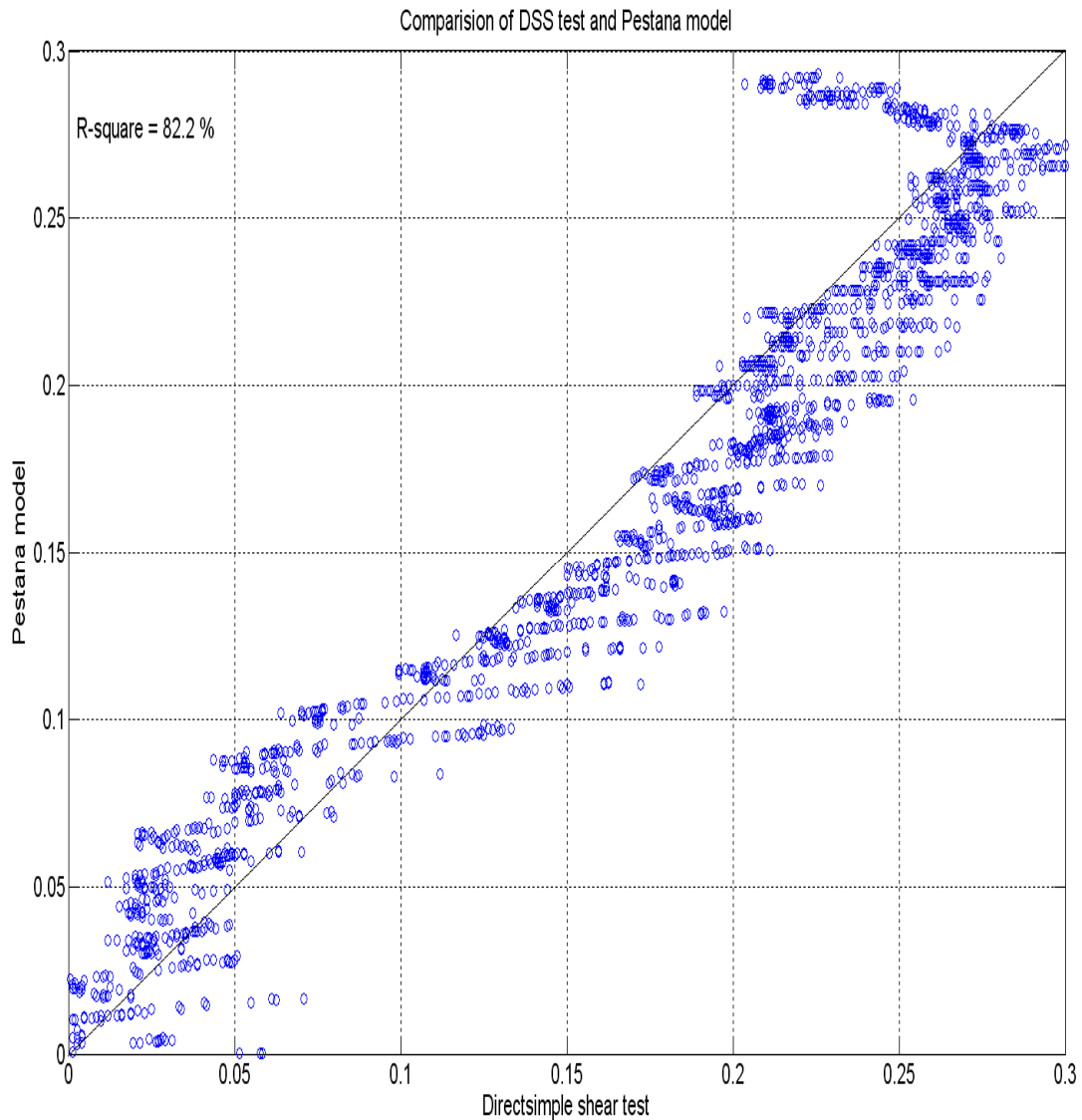
ซึ่งจากผลของการ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) นั้นทำให้ได้ค่าความเค้นเฉือนที่ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) ซึ่งได้ค่าสูงสุดเท่ากับ 0.2 และจากการทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ ผลการเปรียบเทียบของรูปที่ 6.3 ได้เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 86.2%



รูปที่ 6.4 ผลการเปรียบเทียบของแรงดันน้ำส่วนเกินและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana



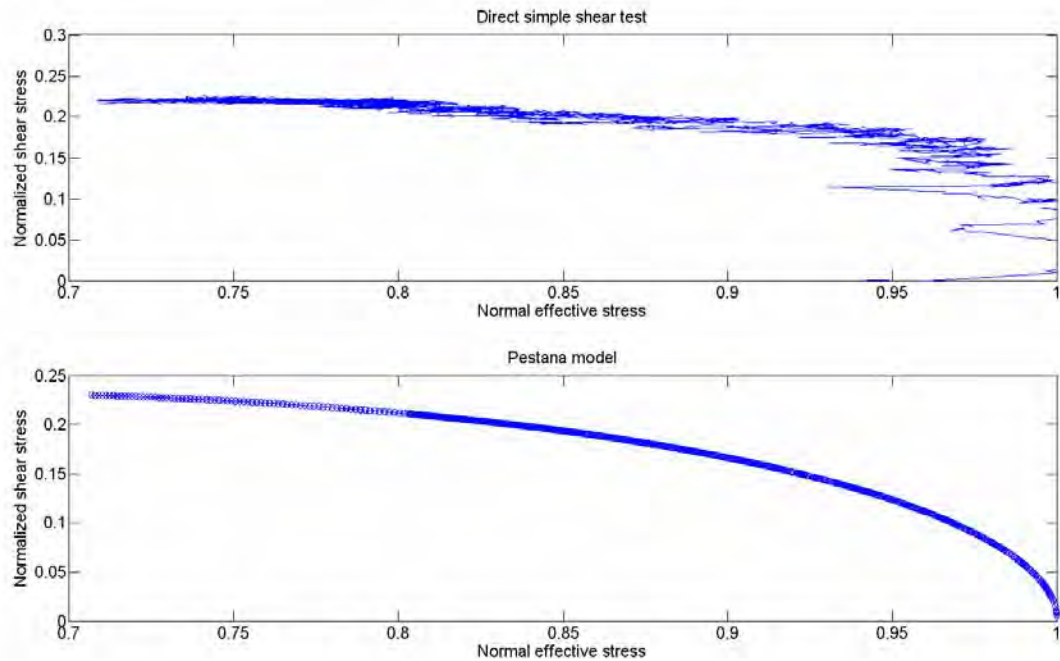
รูปที่ 6.5 ผลการเปรียบเทียบของแรงดันน้ำส่วนเกินและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาพล็อตในกราฟเดียวกัน



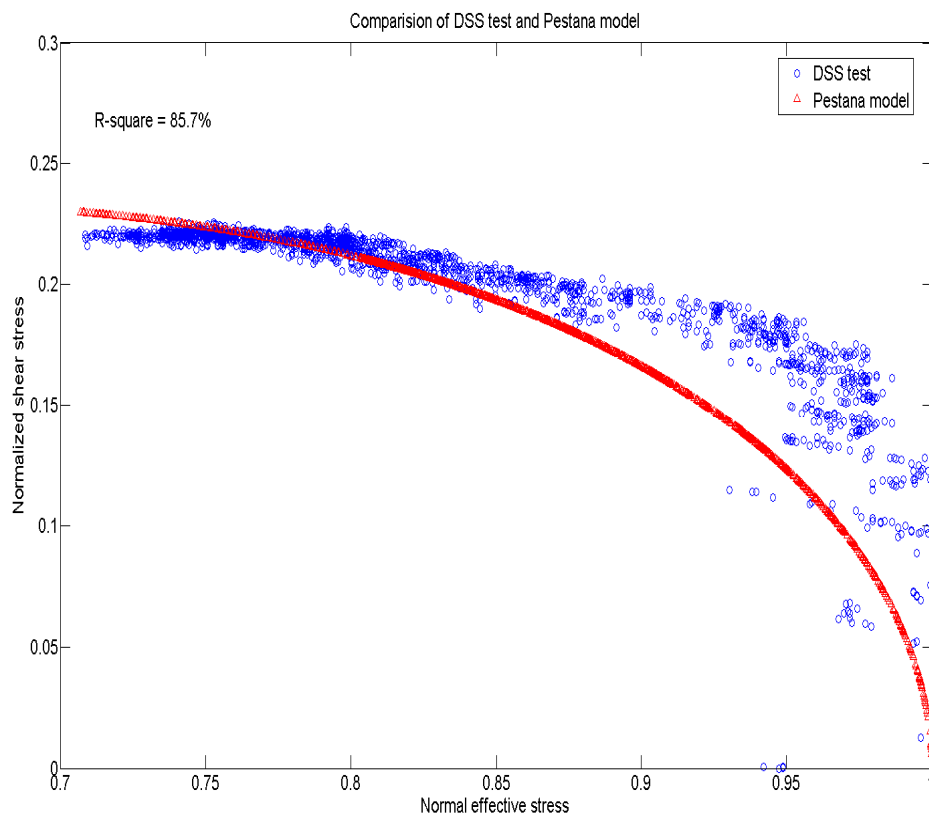
รูปที่ 6.6 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาในแนวแกน 1:1

รูปที่ 6.4 ผลการเปรียบเทียบค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana ส่วนที่ 2 จากการเปรียบเทียบผลของค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน(Excess pore pressure) ซึ่งจากรูปที่ 6.4 นั้นผลการทดลองจากการทดลอง Direct simple shear test นั้นได้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) ซึ่งจากการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Pestana ได้ค่าสูงสุดเท่ากับประมาณ 0.3 และผลจากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการทดลองและแบบจำลองดินนั้นได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 84.2% และรูปที่ 6.6 ก็เป็นผลการทดลองของ Direct simple shear test เปรียบเทียบกับแบบจำลองดิน Pestana ในส่วนที่ 3 เช่นเดียวกัน โดยเป็นการเปรียบเทียบของค่าทางเดินของหน่วยแรง(Stress path)โดยที่รูปบนเป็นผลจากการทดลอง Direct simple shear test และรูปล่างเป็นผลที่ได้จากแบบจำลองดิน Pestana จากรูปได้

ค่าของความเค้นเฉือนที่ทำการ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) สูงสุด เท่ากับ 0.225 โดยที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 85.7%

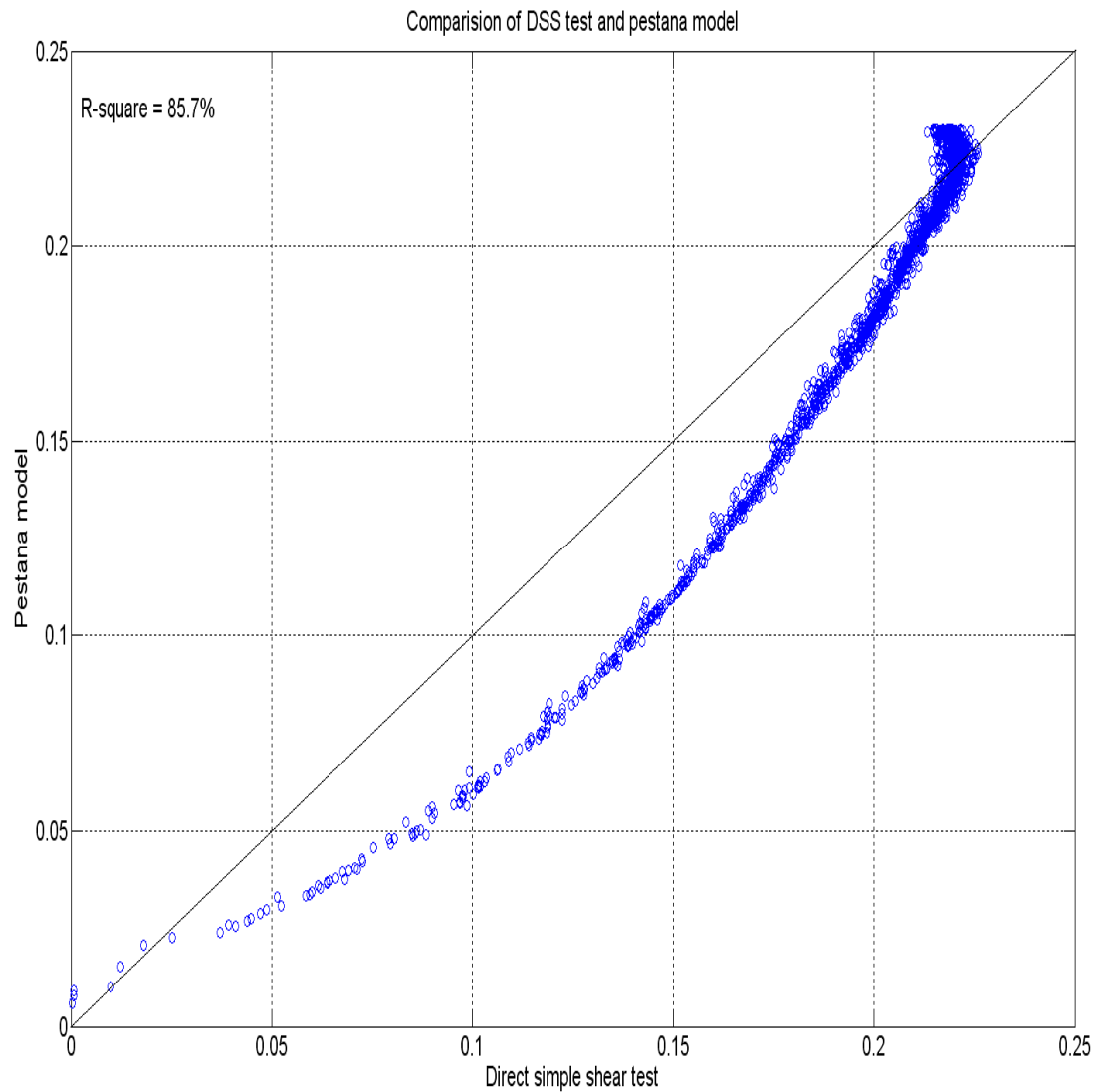


รูปที่ 6.7 ผลการเปรียบเทียบทางเดินของหน่วยแรง (Stress path) ระหว่างการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana



รูปที่ 6.8 ผลการเปรียบเทียบทางเดินของหน่วยแรง (Stress path) ระหว่างการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาพล็อตในกราฟเดียวกัน





รูปที่ 6.9 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาในแนวแกน 1:1 ตารางที่ 6.2 ค่า Parameter เฉลี่ยทั้งหมดที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง Pestana กับ ดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานครแรงเฉือนทางเดียว (Monotonic loading)

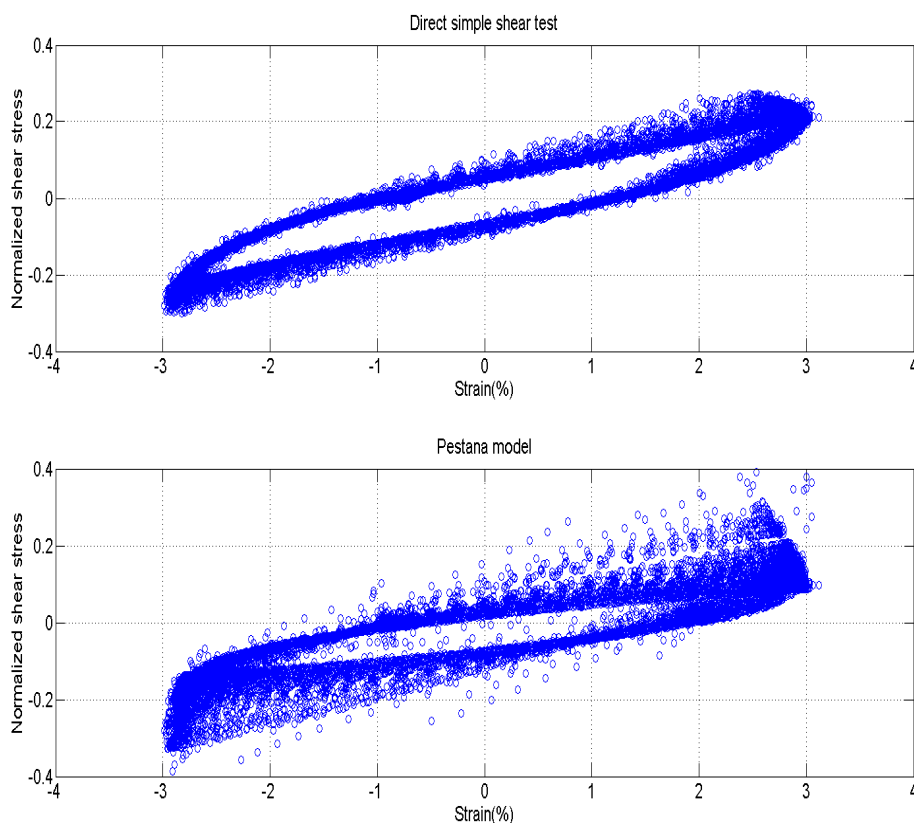
| Parameter | $\varphi$ | $\theta$ | $\beta$ | m    | $G_n$ | $G_p$ | $\lambda$ |
|-----------|-----------|----------|---------|------|-------|-------|-----------|
| Value     | 28.33     | 7.42     | 0.42    | 0.45 | 35.82 | 10.06 | 8.74      |

ตารางที่ 6.3 ค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของของค่า Parameter ที่ได้รับการเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับ การทดลอง DSS test

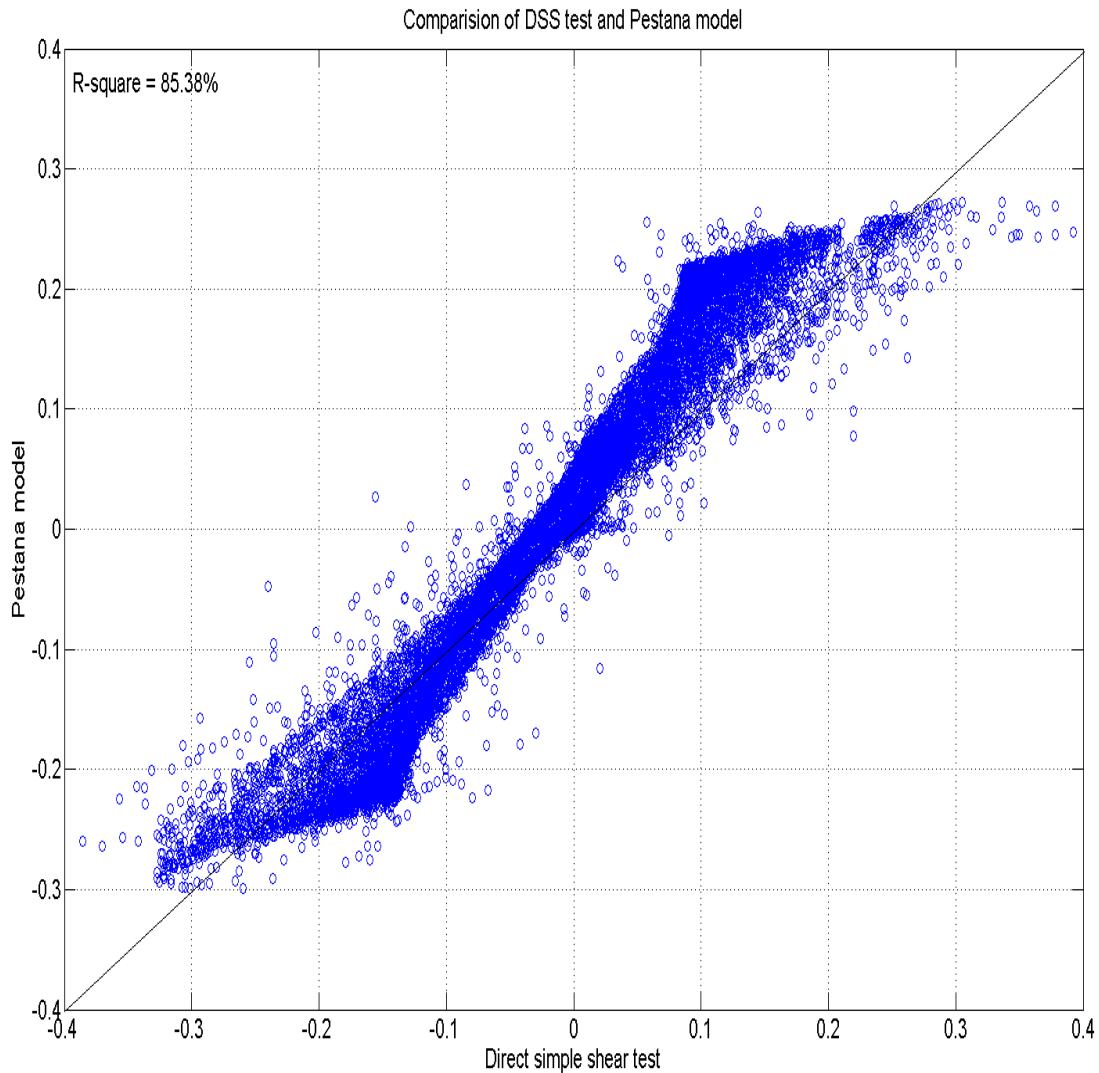
| ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ | $\tau - \gamma$ | Stress path | Excess pore pressure ratio |
|---------------------------|-----------------|-------------|----------------------------|
| R-square                  | 86.20%          | 85.70%      | 84.2%                      |

## 6.2 การทดสอบเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับผลการทดลอง Direct simple shear test ในสภาวะ Cyclic loading

ในการทดสอบเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับผลการทดลอง Direct simple shear test ในสภาวะ Cyclic loading นั้นเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองซึ่งจะแบ่งผลการเปรียบเทียบทั้งหมด เป็น 3 ส่วน โดยในส่วนที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบผลของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน ซึ่งรูปบนของรูปที่ 6.10 นั้นเป็นผลที่ได้จากการทำการทดลอง Direct simple shear test ซึ่งได้ค่าความเค้นเฉือนที่ทำการ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) ส่วนรูปล่างนั้นเป็นผลที่ได้จากการใช้แบบจำลอง Pestana



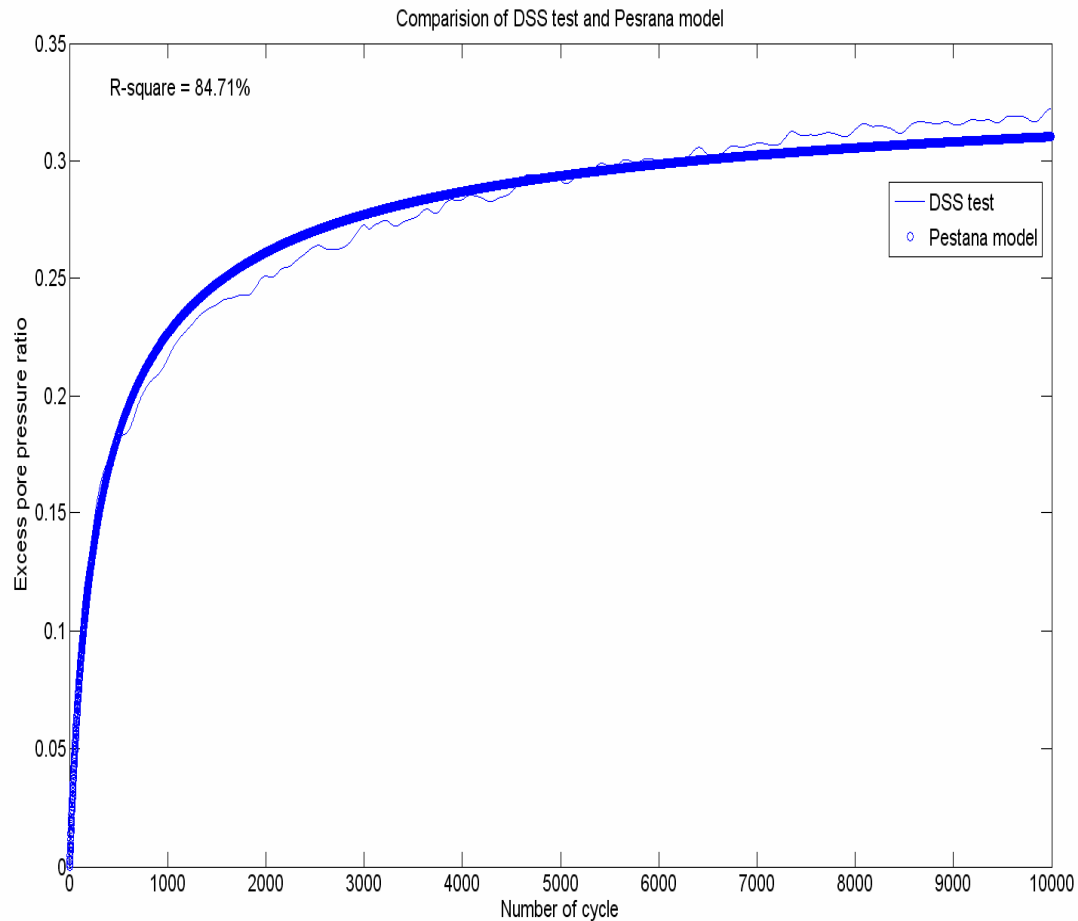
รูปที่ 6.10 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana



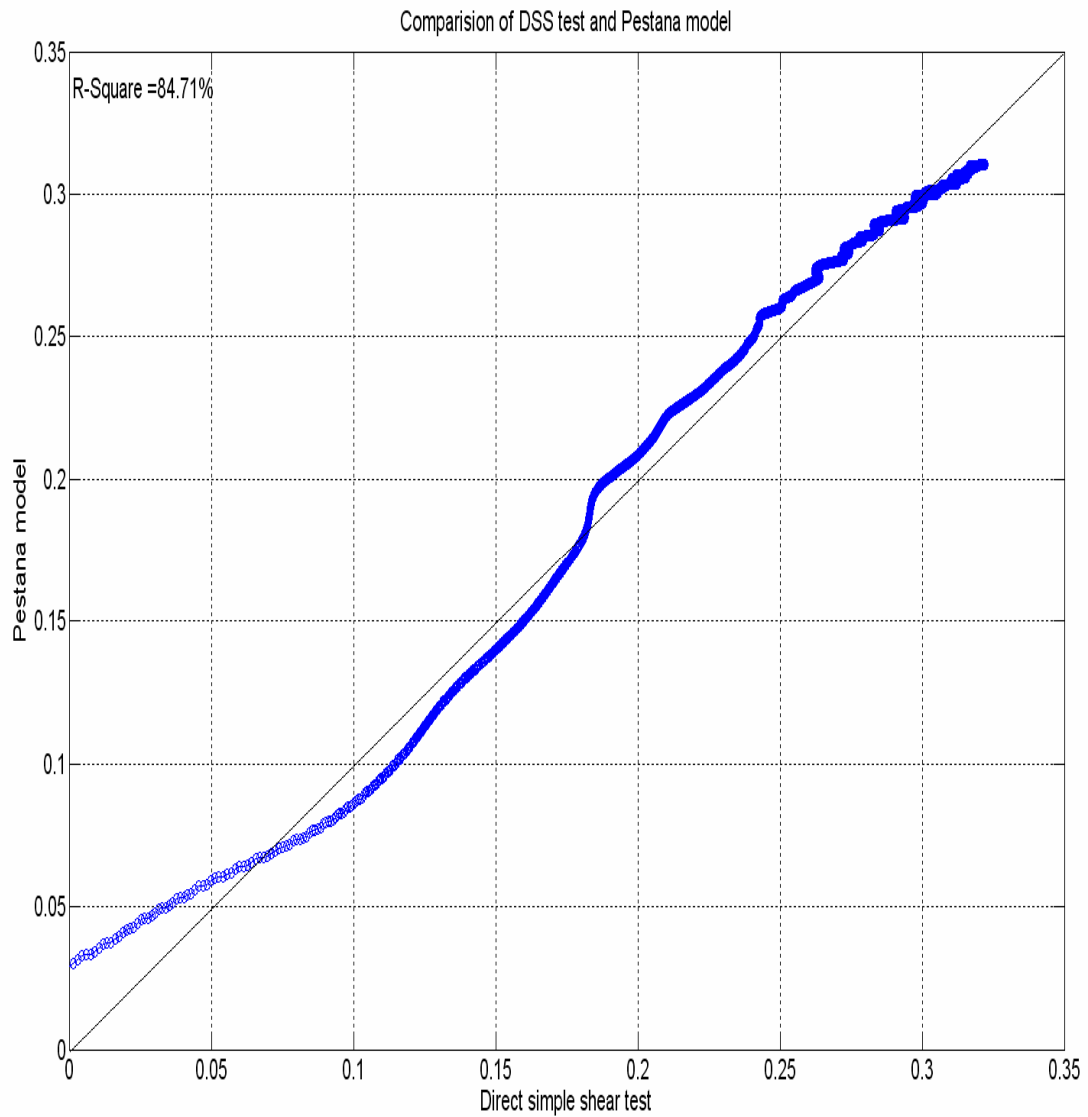
รูปที่ 6.11 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับแบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบในแนวแกน 1:1

ซึ่งจากผลของการ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) นั้นทำให้ได้ค่าความเค้นเฉือนที่ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) ซึ่งได้ค่าสูงสุดเท่ากับ 0.27 และจากการทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ ผลการเปรียบเทียบของรูปที่ 6.10 ได้เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นเท่ากับ 85.38% ส่วนที่ 2 ในรูปที่ 6.12 ผลการเปรียบเทียบค่าของแรงดันน้ำ ส่วนเกินและความเครียดเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana จากการเปรียบเทียบผลของค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน(Excess pore pressure) ซึ่งจากรูปที่ 6.12 นั้นผลการทดลองจากการทดลอง Direct simple shear test ได้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) ซึ่งจากการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Pestana ได้ค่าสูงสุดเท่ากับประมาณ 0.3 และผลจากการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการทดลองและแบบจำลองดินนั้นได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 84.71% และในส่วนที่ 3 รูปที่ 6.14 ก็เป็นผลการทดลองของ Direct simple shear test เปรียบเทียบกับแบบจำลองดิน Pestana เช่นเดียวกันโดยเป็นการเปรียบเทียบทางเดินของหน่วยแรง(Stress path)โดยที่รูปบนเป็นผลจาก

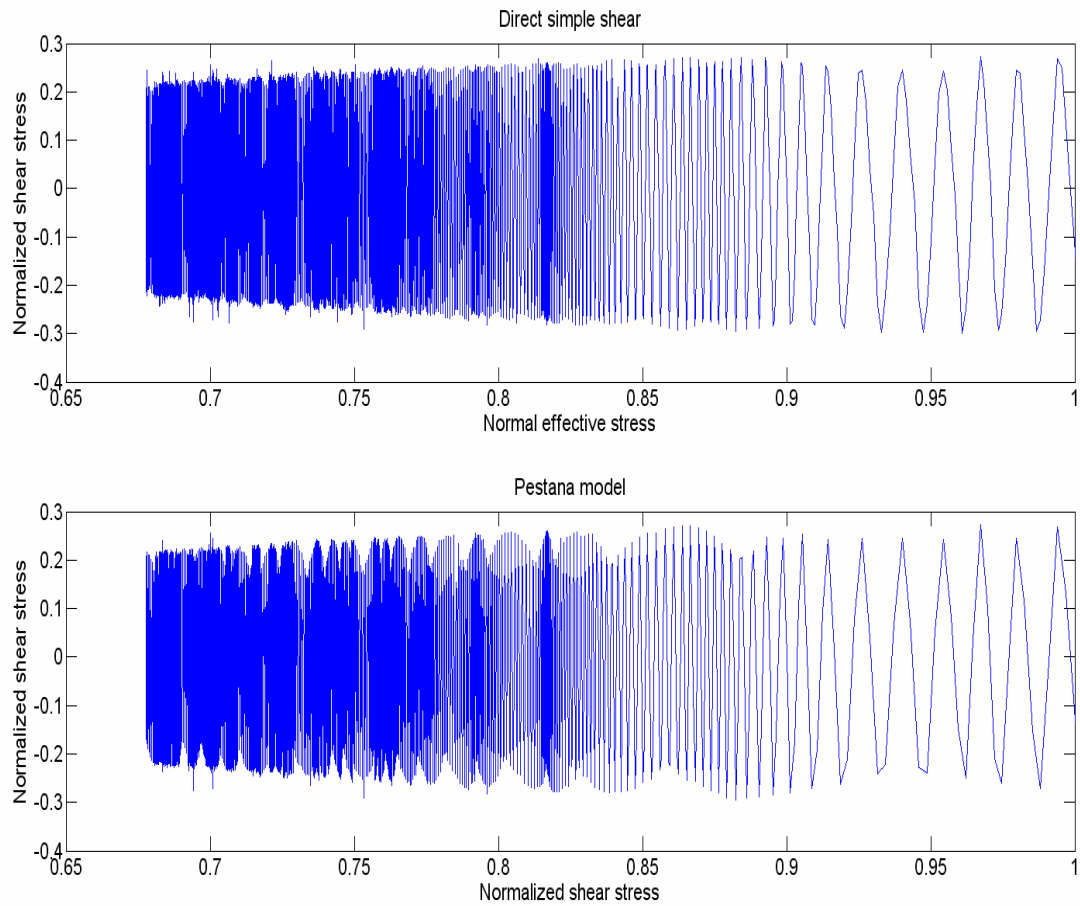
การทดลอง Direct simple shear test และรูปล่างเป็นผลที่ได้จากแบบจำลองดิน Pestana จาก  
รูปได้ค่าของความเค้นเฉือนที่ทำการ Normalized ด้วยค่า Maximum past pressure ( $\sigma_p$ ) สูงสุด  
เท่ากับ 0.27 โดยที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 85.38%



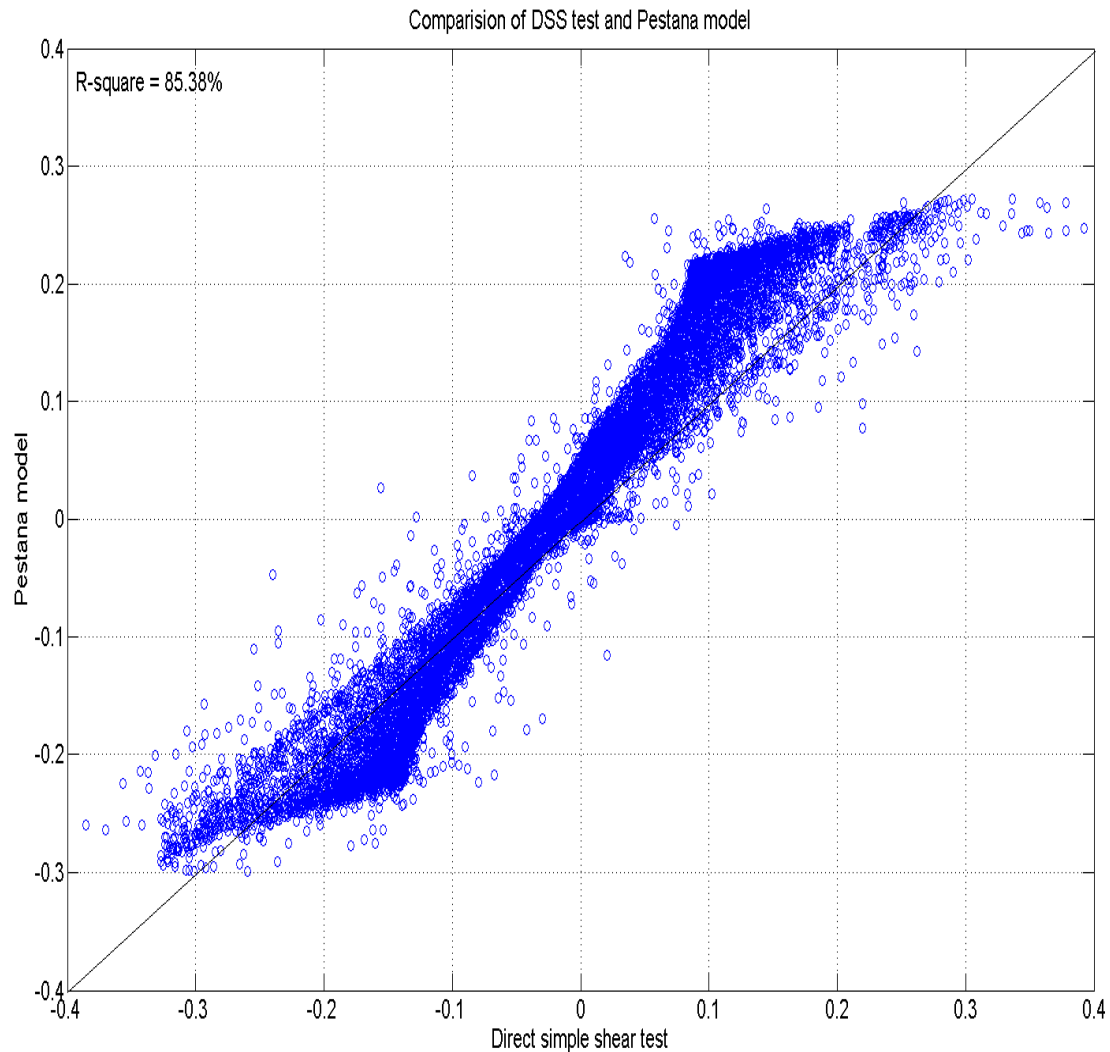
รูปที่ 6.12 ผลการเปรียบเทียบของแรงดันน้ำส่วนเกินและจำนวนรอบของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาพล็อตในกราฟเดียวกัน



รูปที่ 6.13 ผลการเปรียบเทียบของแรงดันน้ำส่วนเกินของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาในแนวแกน 1:1



รูปที่ 6.14 ผลการเปรียบเทียบค่าเปรียบเทียบทางเดินของหน่วยแรง(Stress path) ของการทดลอง Direct simple shear test กับ แบบจำลองดิน Pestana



รูปที่ 6.15 ผลการเปรียบเทียบของความเค้นเฉือนของการทดลอง Direct simple shear test กับแบบจำลองดิน Pestana โดยการนำผลการทดลองมาในแนวแกน 1:1

จากการทำการเปรียบเทียบจากผลการทดลอง Direct Simple Shear test กับแบบจำลองดิน Pestana ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากการทำการเปรียบเทียบจากผลลัพธ์ได้แก่ ค่าของความเค้นเฉือน-ความเครียดเฉือน, ค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น และค่าของทางเดินของหน่วยแรง (Stress path) สรุปได้ดังตารางที่ 6.4-6.8

ตารางที่ 6.4 ค่าParameter ที่ใช้ในแบบจำลองดิน Pestana เปรียบเทียบกับผลการทดลอง DSS test

| ความถี่ | Parameter | Strain 0.5% | Strain 1.5% | Strain 3.0% | เฉลี่ย |
|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------|
| 0.1 Hz  | $\varphi$ | 30.00       | 29.5        | 29.00       | 29.50  |
|         | $\theta$  | 10.00       | 8.00        | 11.50       | 9.83   |
|         | $\beta$   | 0.35        | 0.40        | 0.40        | 0.38   |
|         | m         | 0.42        | 0.45        | 0.46        | 0.44   |
|         | $G_n$     | 30.00       | 33.00       | 33.00       | 32.00  |
|         | $G_p$     | 6.00        | 7.00        | 10.00       | 7.67   |
|         | $\lambda$ | 9.00        | 12.00       | 12.50       | 11.17  |
| 1.5 Hz  | $\varphi$ | 28.50       | 28.50       | 29.40       | 28.80  |
|         | $\theta$  | 8.00        | 9.00        | 10.50       | 9.17   |
|         | $\beta$   | 0.38        | 0.39        | 0.42        | 0.40   |
|         | m         | 0.42        | 0.46        | 0.48        | 0.45   |
|         | $G_n$     | 33.00       | 35.00       | 36.00       | 34.67  |
|         | $G_p$     | 13.00       | 12.00       | 12.50       | 12.50  |
|         | $\lambda$ | 10.50       | 9.50        | 11.50       | 10.50  |
| 3.0 Hz  | $\varphi$ | 28.50       | 29.00       | 30.00       | 29.17  |
|         | $\theta$  | 9.00        | 10.00       | 11.50       | 10.17  |
|         | $\beta$   | 0.38        | 0.42        | 0.40        | 0.40   |
|         | m         | 0.40        | 0.45        | 0.44        | 0.43   |
|         | $G_n$     | 33.50       | 34.00       | 36.00       | 34.50  |
|         | $G_p$     | 12.50       | 13.00       | 13.40       | 12.97  |
|         | $\lambda$ | 10.50       | 10.50       | 11.00       | 10.67  |



ตารางที่ 6.5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์( $R^2$ ) ที่ได้รับการเปรียบเทียบแบบจำลองดิน

Pestana กับ การทดลอง DSS test

| ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์( $R^2$ ) ของ Parameter แต่ละชุด ที่ค่า Strain ต่างๆ |                            |             |             |             |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| ความถี่                                                                       | คุณสมบัติ                  | Strain 0.5% | Strain 1.5% | Strain 3.0% |
| 0.1 Hz                                                                        | $\tau - \gamma$            | 86.50%      | 85.42%      | 84.75%      |
|                                                                               | Stress path                | 85.70%      | 84.56%      | 85.37%      |
|                                                                               | Excess pore pressure ratio | 82.20%      | 83.29%      | 83.42%      |
| 1.5 Hz                                                                        | $\tau - \gamma$            | 86.50%      | 85.12%      | 86.38%      |
|                                                                               | Stress path                | 85.42%      | 84.72%      | 84.26%      |
|                                                                               | Excess pore pressure ratio | 84.33%      | 83.49%      | 84.44%      |
| 3.0 Hz                                                                        | $\tau - \gamma$            | 84.40%      | 85.71%      | 85.38%      |
|                                                                               | Stress path                | 85.54%      | 84.76%      | 85.33%      |
|                                                                               | Excess pore pressure ratio | 83.58%      | 83.74%      | 84.71%      |

ตารางที่ 6.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์( $R^2$ ) ของค่า Parameter เฉลี่ยที่ได้การเปรียบเทียบแบบจำลองดิน Pestana กับ การทดลอง DSS test

| ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์( $R^2$ ) ของค่า Parameter เฉลี่ย |                            |             |             |             |
|------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| ความถี่                                                    | คุณสมบัติ                  | Strain 0.5% | Strain 1.5% | Strain 3.0% |
| 0.1 Hz                                                     | $\tau - \gamma$            | 84.74%      | 84.05%      | 84.08%      |
|                                                            | Stress path                | 85.79%      | 85.38%      | 84.79%      |
|                                                            | Excess pore pressure ratio | 82.47%      | 83.17%      | 82.18%      |
| 1.5 Hz                                                     | $\tau - \gamma$            | 84.59%      | 84.72%      | 84.47%      |
|                                                            | Stress path                | 85.77%      | 85.04%      | 84.05%      |
|                                                            | Excess pore pressure ratio | 83.94%      | 83.25%      | 84.71%      |
| 3.0 Hz                                                     | $\tau - \gamma$            | 83.76%      | 84.71%      | 85.38%      |
|                                                            | Stress path                | 85.86%      | 84.73%      | 84.53%      |
|                                                            | Excess pore pressure ratio | 83.73%      | 83.28%      | 84.71%      |

ตารางที่ 6.7 ค่า Parameter เฉลี่ยทั้งหมดทุกความถี่ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง ดิน Pestana กับดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานครในกรณีแรงเฉือนวัฏจักร (Cyclic loading)

| Parameter | $\varphi$ | $\theta$ | $\beta$ | m    | $G_n$ | $G_p$ | $\lambda$ |
|-----------|-----------|----------|---------|------|-------|-------|-----------|
| Value     | 29.16     | 9.72     | 0.39    | 0.44 | 33.72 | 11.04 | 10.78     |

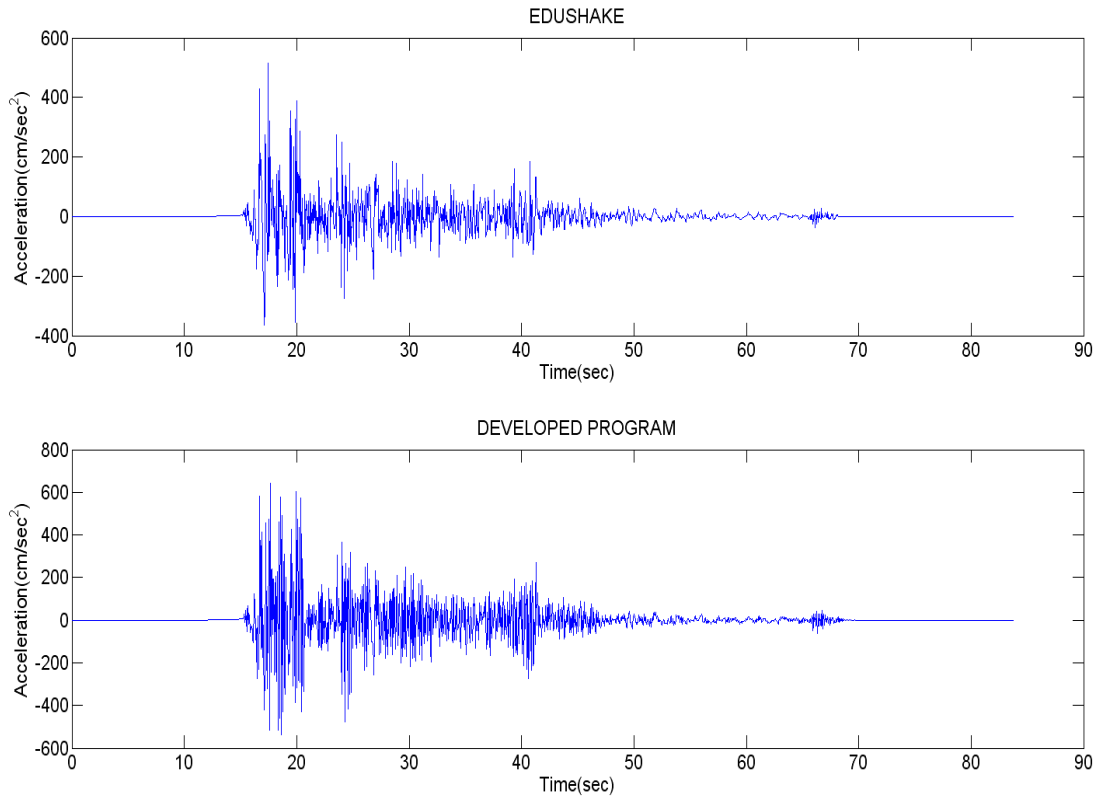
6.3 การวิเคราะห์ชั้นดินกรุงเทพฯที่มีความหนา 80 เมตร โดยใช้แบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic โดยชั้นดินมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 6.8 คุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพฯที่มีความหนา 80 เมตร

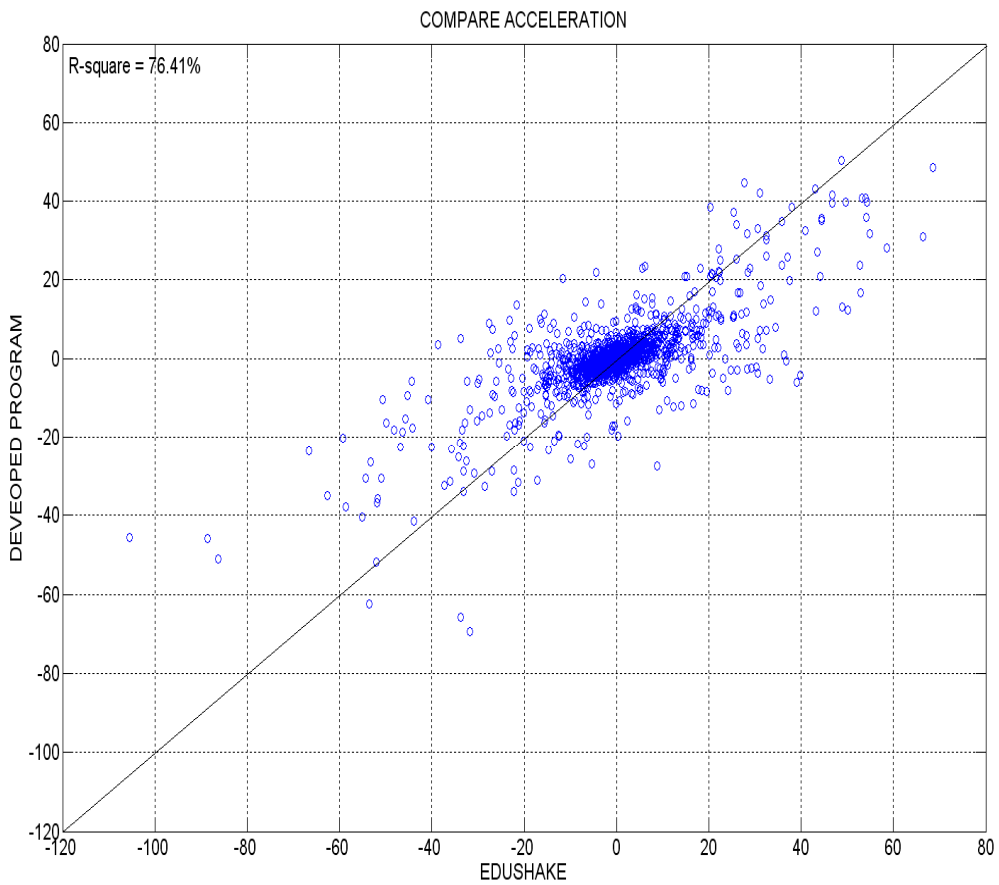
| Thickness | Unit weight (kN/m <sup>2</sup> ) | Shear modulus (MPa) | Shear wave (m/sec) | Damping ratio % | Plastic index | OCR  | Model          |
|-----------|----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------|------|----------------|
| 5.50      | 16.67                            | 8.32                | 70.00              | 5.00            | 45.00         | 1.10 | Pestana        |
| 6.00      | 16.18                            | 10.55               | 80.00              | 5.00            | 65.00         | 1.10 | Pestana        |
| 1.00      | 15.89                            | 19.60               | 110.00             | 5.00            | 70.00         | 2.00 | Linear elastic |
| 16.00     | 19.62                            | 96.83               | 220.00             | 5.00            | 35.00         | 2.00 | Linear elastic |
| 9.00      | 19.62                            | 156.90              | 280.00             | 5.00            | 32.00         | 2.50 | Linear elastic |
| 10.00     | 19.62                            | 204.86              | 320.00             | 5.00            | 30.00         | 2.50 | Linear elastic |
| 2.00      | 19.62                            | 204.86              | 320.00             | 5.00            | 30.00         | 2.50 | Linear elastic |
| 7.00      | 19.62                            | 273.90              | 370.00             | 5.00            | 20.00         | 3.00 | Linear elastic |
| 3.00      | 21.58                            | 301.25              | 370.00             | 5.00            | 20.00         | 3.00 | Linear elastic |
| 21.00     | 19.62                            | 336.30              | 410.00             | 5.00            | 20.00         | 3.00 | Linear elastic |
| Rock      | 22.42                            | 3336.50             | 1208.50            | 10.00           | -             | -    | Linear elastic |

|                                                                |                |
|----------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Soft clay, Grey<br/>Pestana model</b>                       | <b>5.5 m.</b>  |
| <b>Very soft to soft clay, Grey<br/>Pestana model</b>          | <b>6.0 m.</b>  |
| <b>Medium clay , Grey</b>                                      | <b>1.0 m.</b>  |
| <b>Stiff to very stiff clay<br/>Trace fine sand, Grey</b>      | <b>16.0 m.</b> |
| <b>Dense to very dense silty<br/>Fine sand, Grey</b>           | <b>9.0 m.</b>  |
| <b>Hard Clay, Grey</b>                                         | <b>10.0 m.</b> |
| <b>Very dense clayey fine sand, reddish brown</b>              | <b>2.0 m.</b>  |
| <b>Very dense silty fine to medium sand<br/>Brown and grey</b> | <b>7.0 m.</b>  |
| <b>Hard clay yellowish borwn</b>                               | <b>3.0 m.</b>  |
| <b>Very dense silty fine to medium<br/>Sand, grey</b>          | <b>21.0 m.</b> |
| <b>Rock</b>                                                    | <b>∞</b>       |

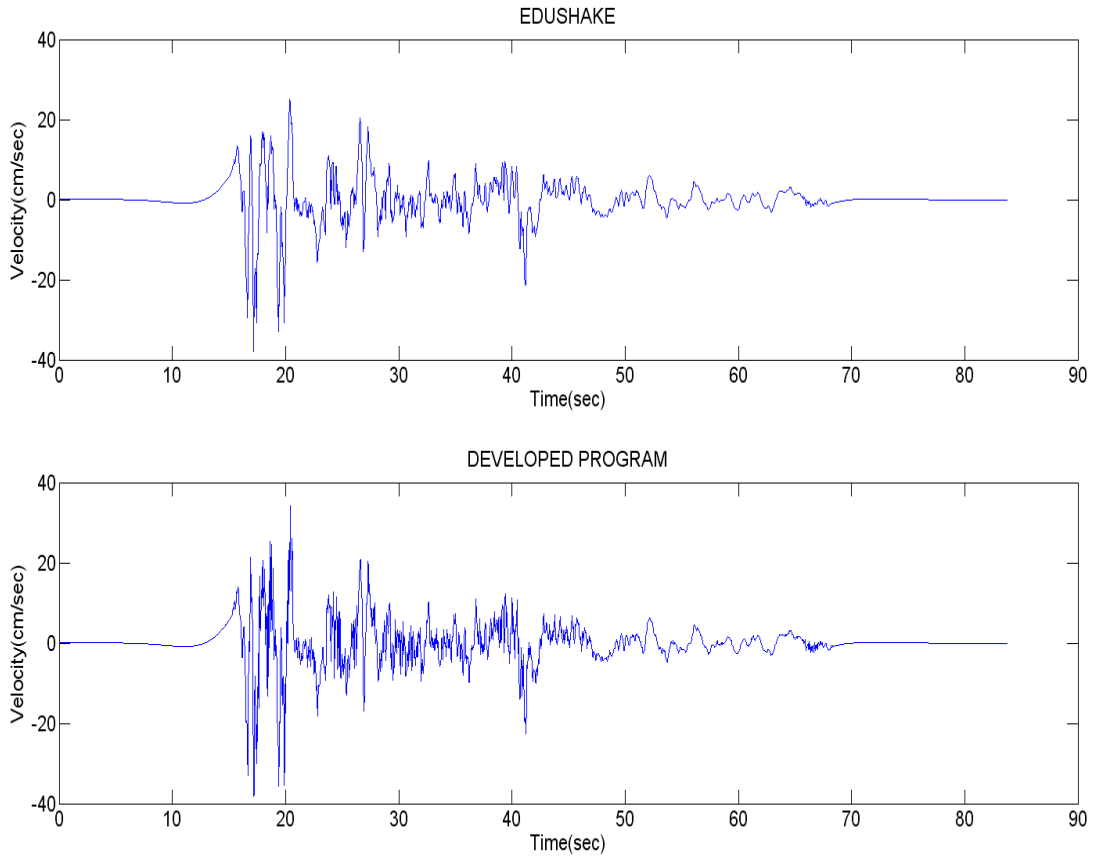
รูปที่ 6.16 ลักษณะของชั้นดินกรุงเทพที่ความลึก 80 เมตร



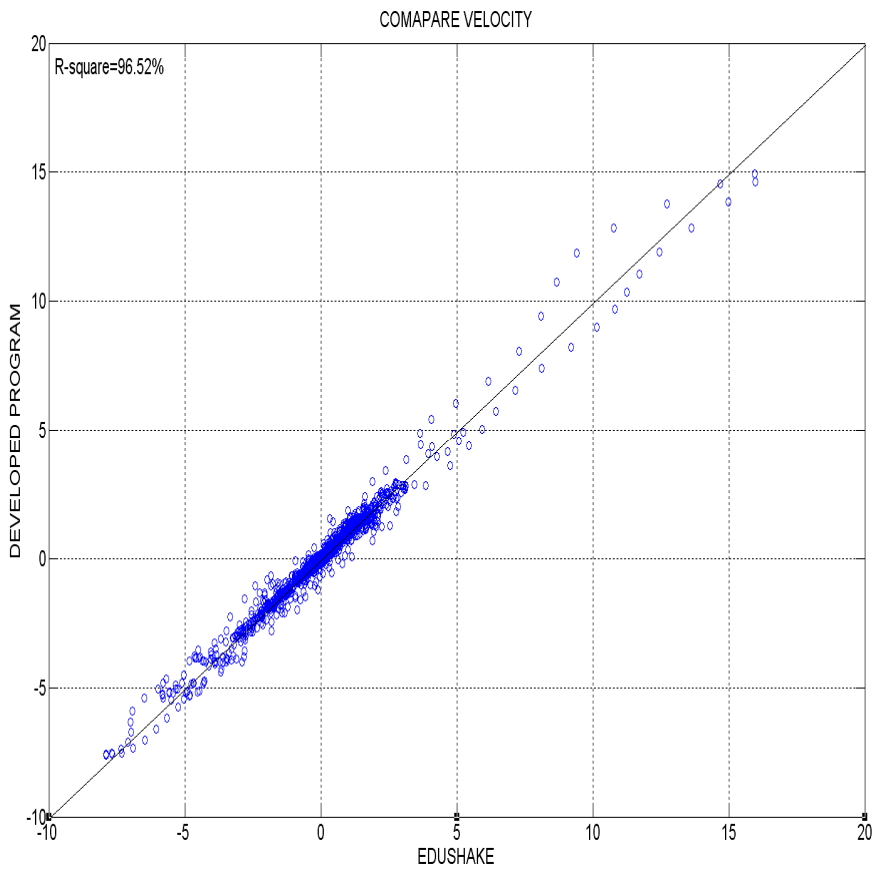
รูปที่ 6.17 ความเร่งที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดิน



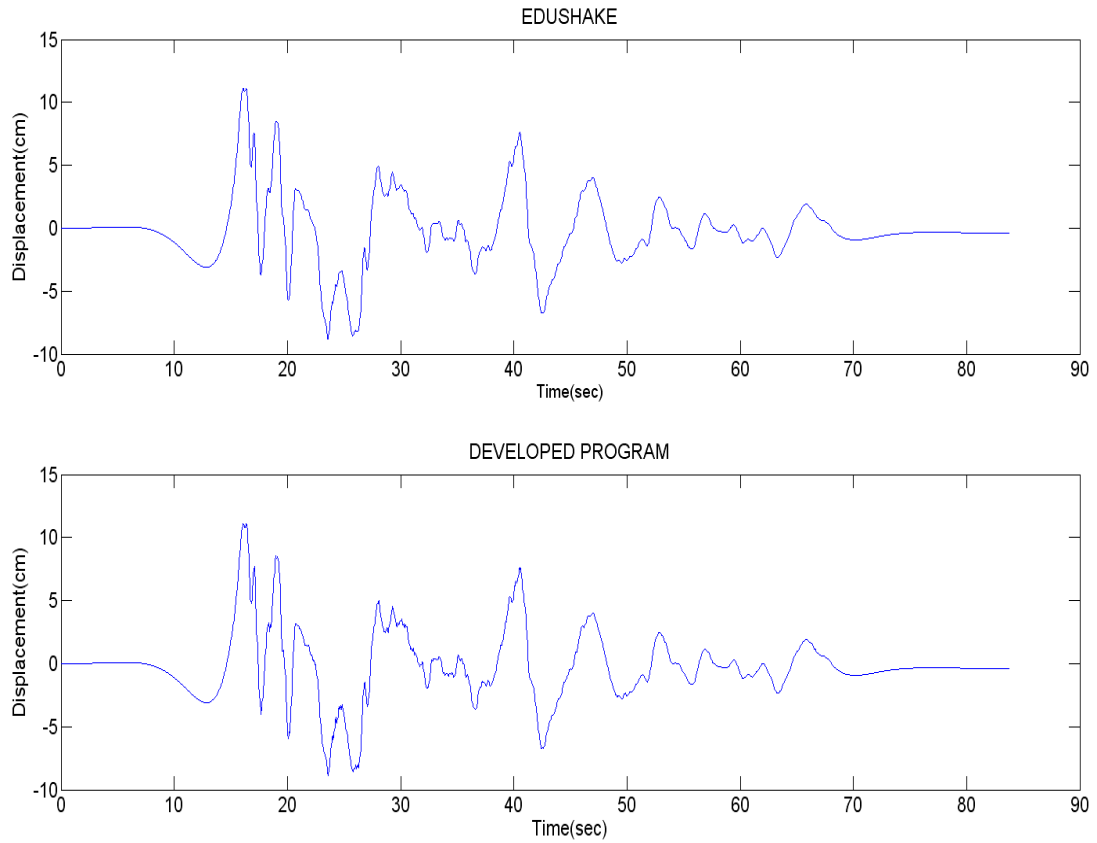
รูปที่ 6.18 ความเร่งที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดินแบบ 1:1



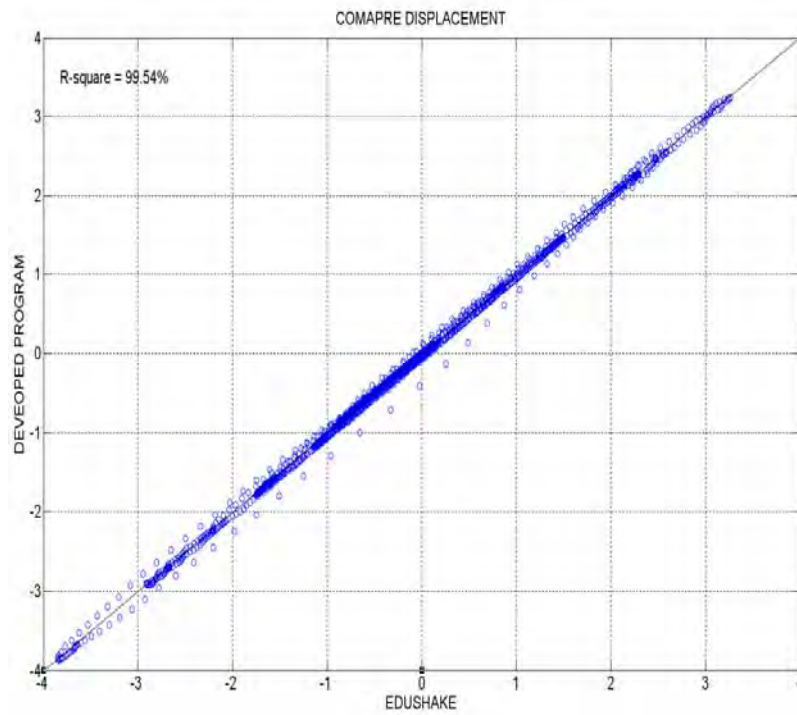
รูปที่ 6.19 ความเร็วที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดิน



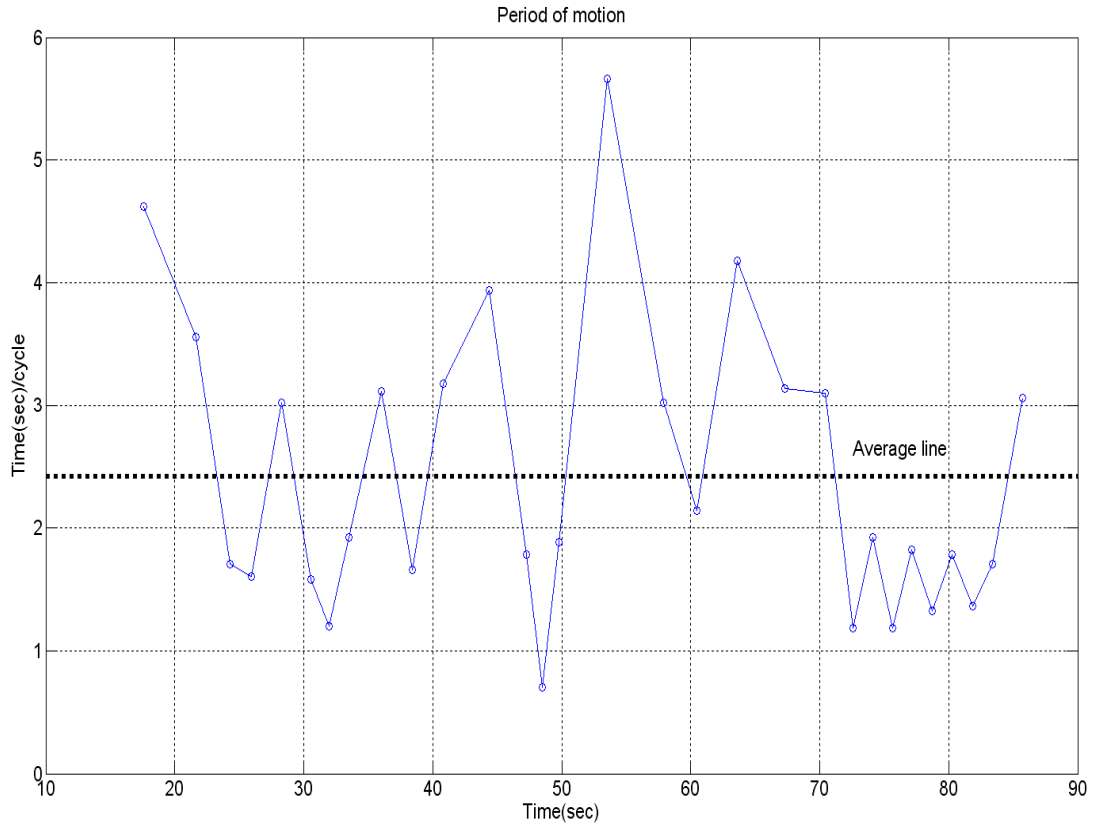
รูปที่ 6.20 ความเร็วที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดินแบบ 1:1



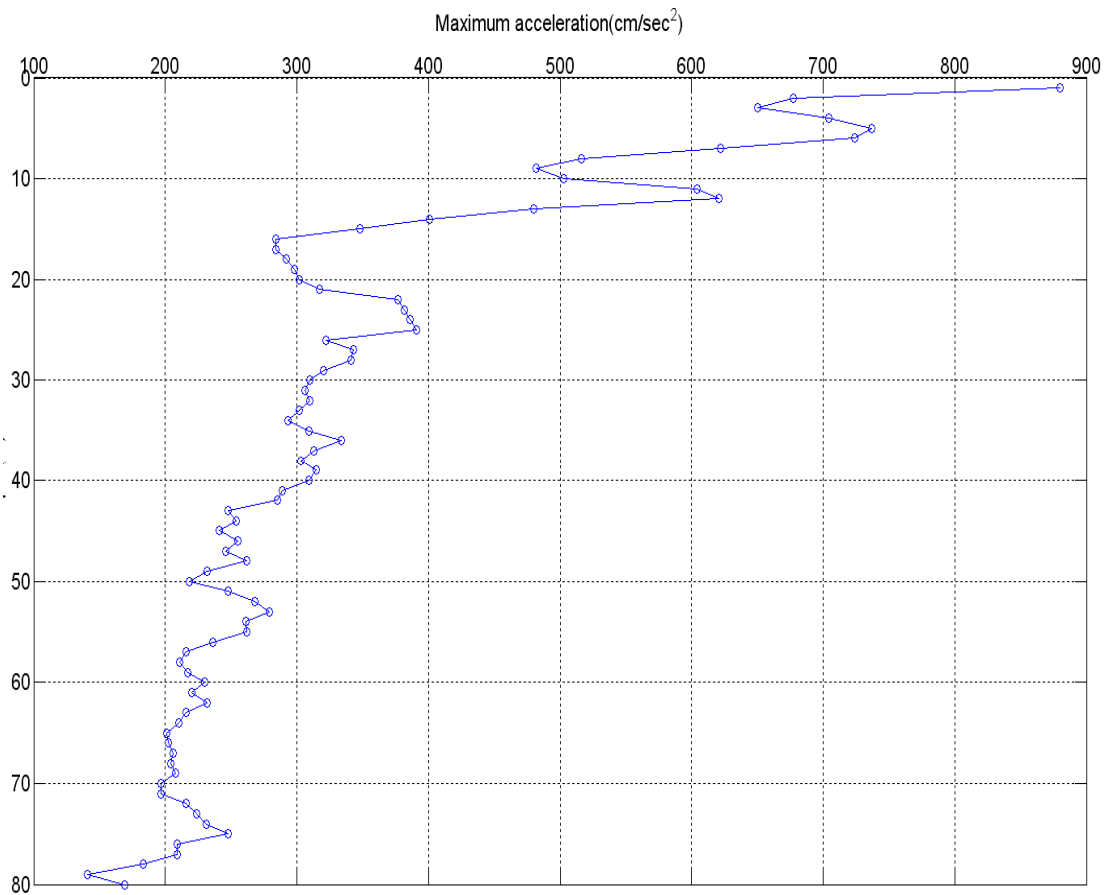
รูปที่ 6.21 การเคลื่อนตัวที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดิน



รูปที่ 6.22 การเคลื่อนตัวที่ได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake ที่ชั้นผิวดินแบบ 1:1

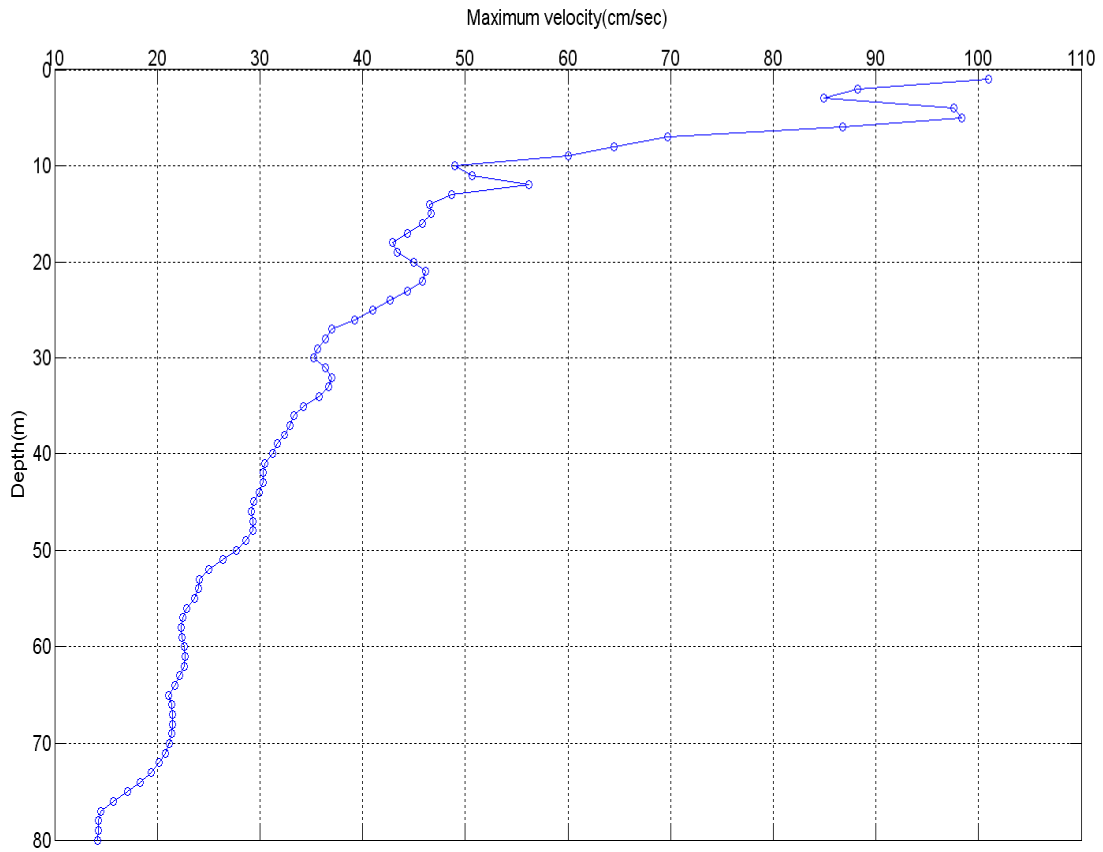


รูปที่ 6.23 คาบของการเคลื่อนตัว (Period of motion)

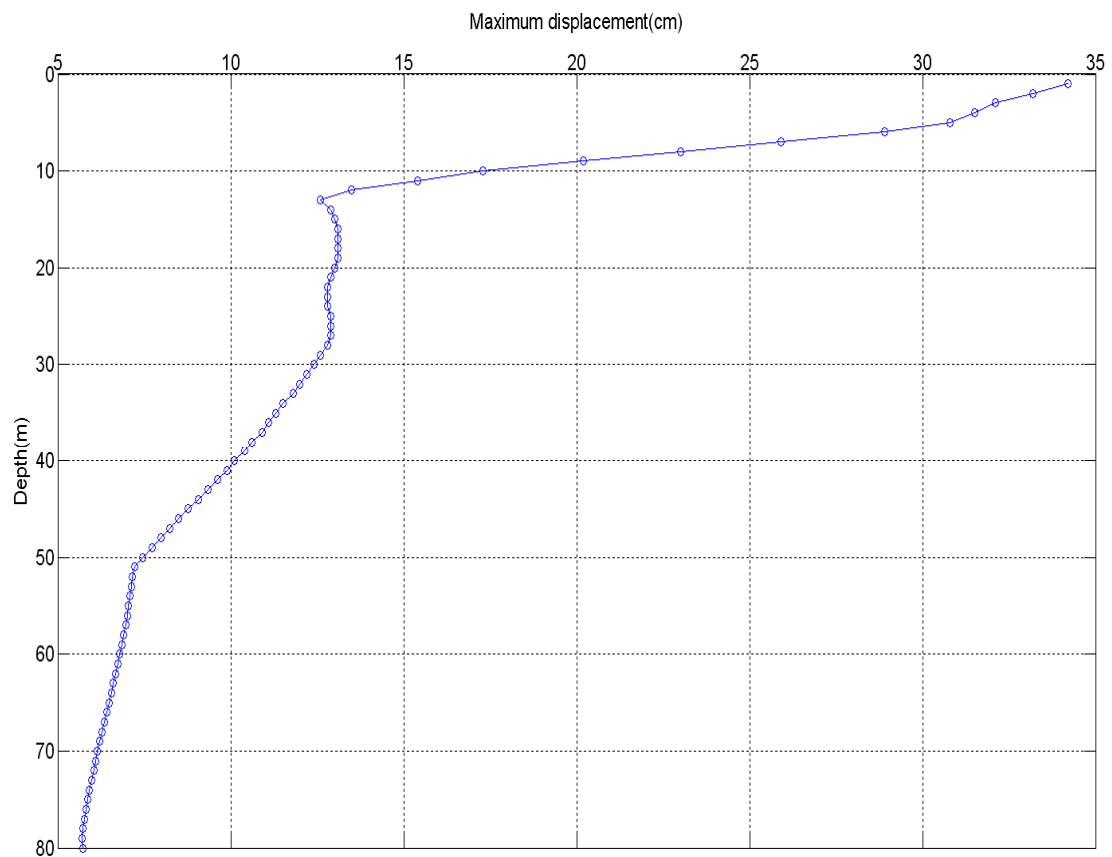


รูปที่ 6.24 การเปรียบเทียบการความเร่งสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน

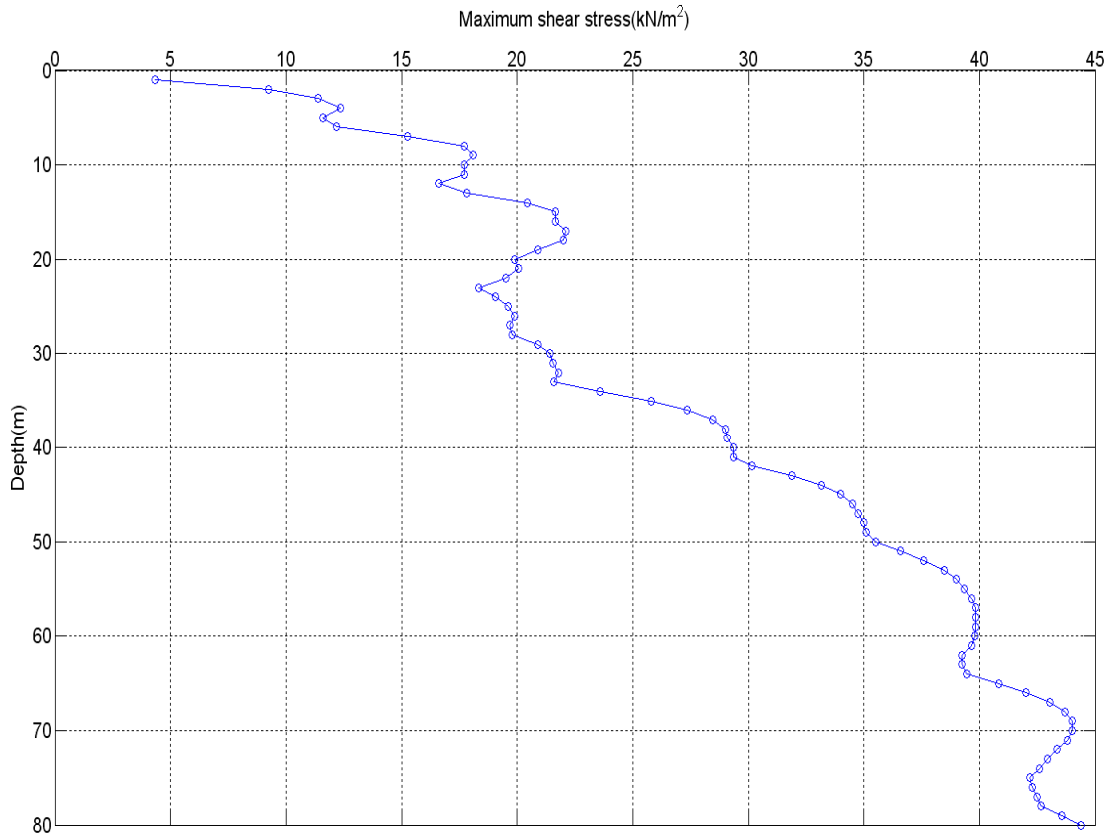




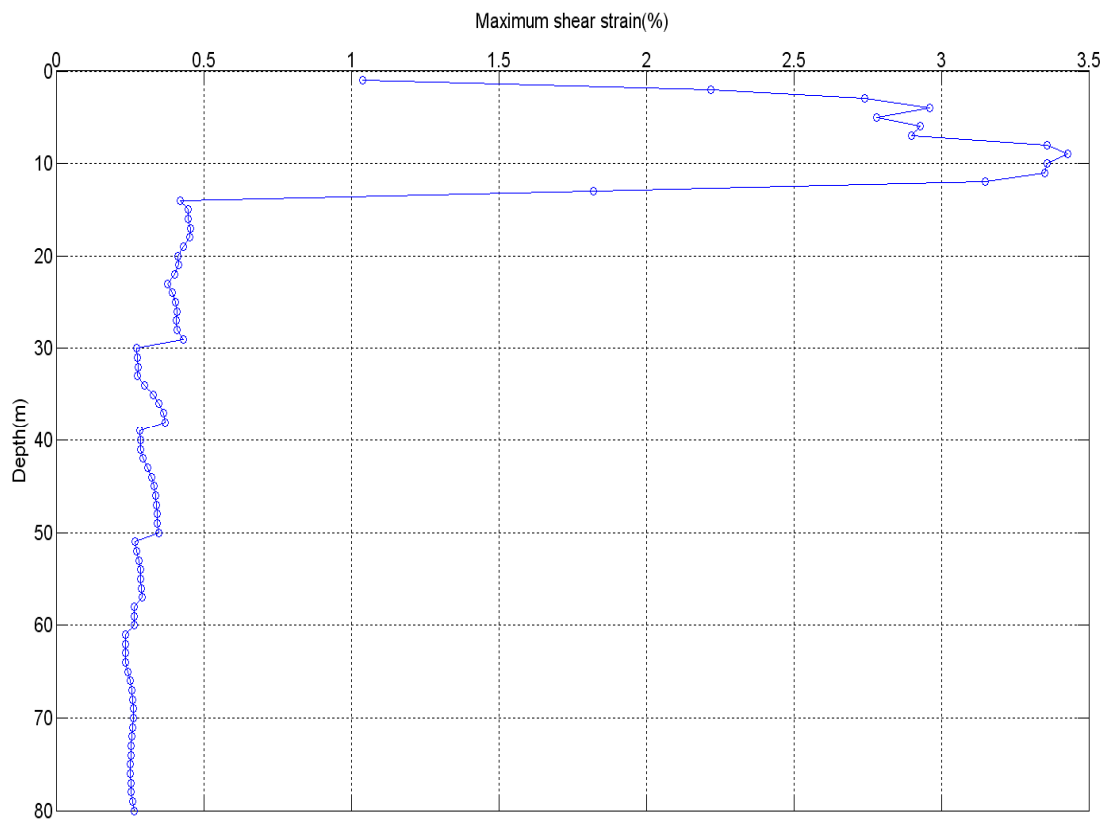
รูปที่ 6.25 การเปรียบเทียบการความเร็วสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



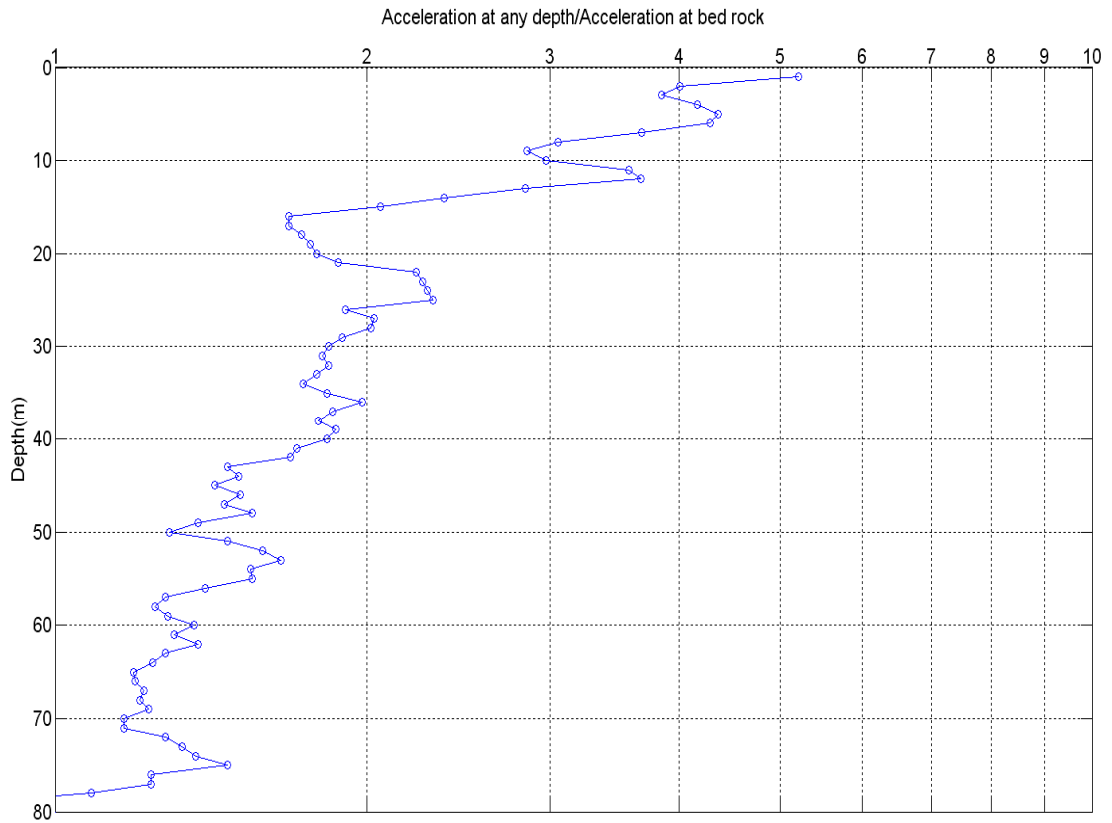
รูปที่ 6.26 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



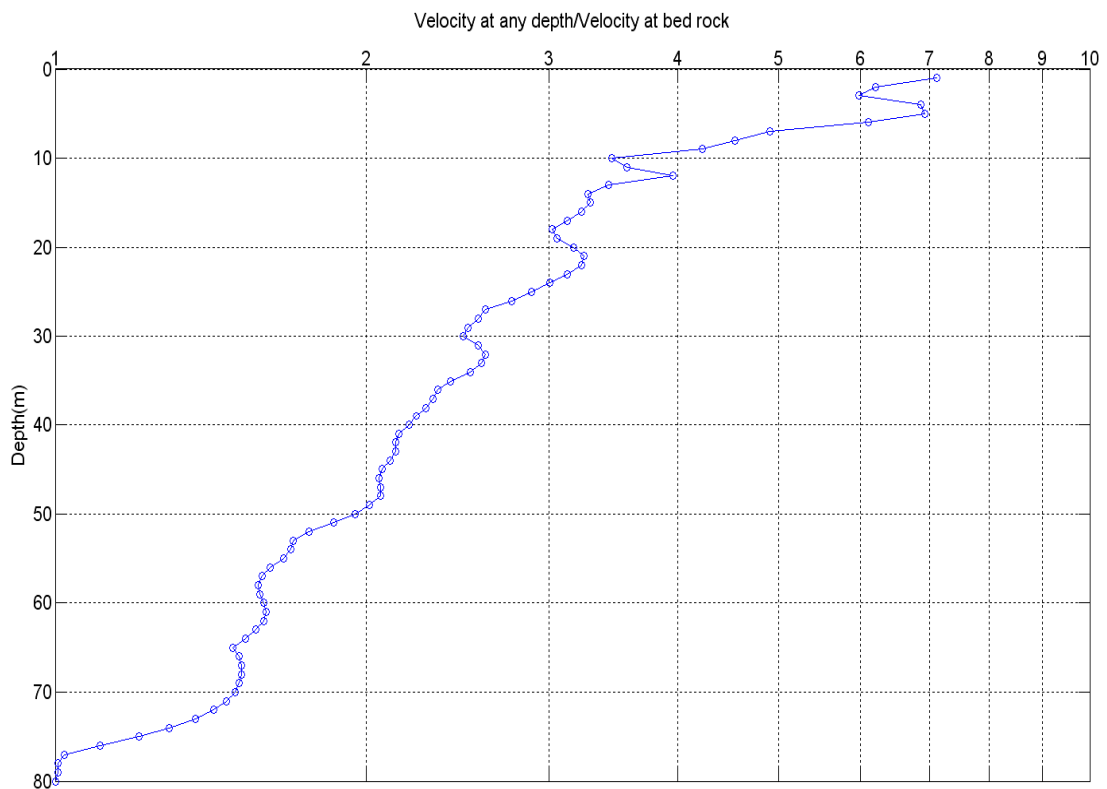
รูปที่ 6.27 การเปรียบเทียบการความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



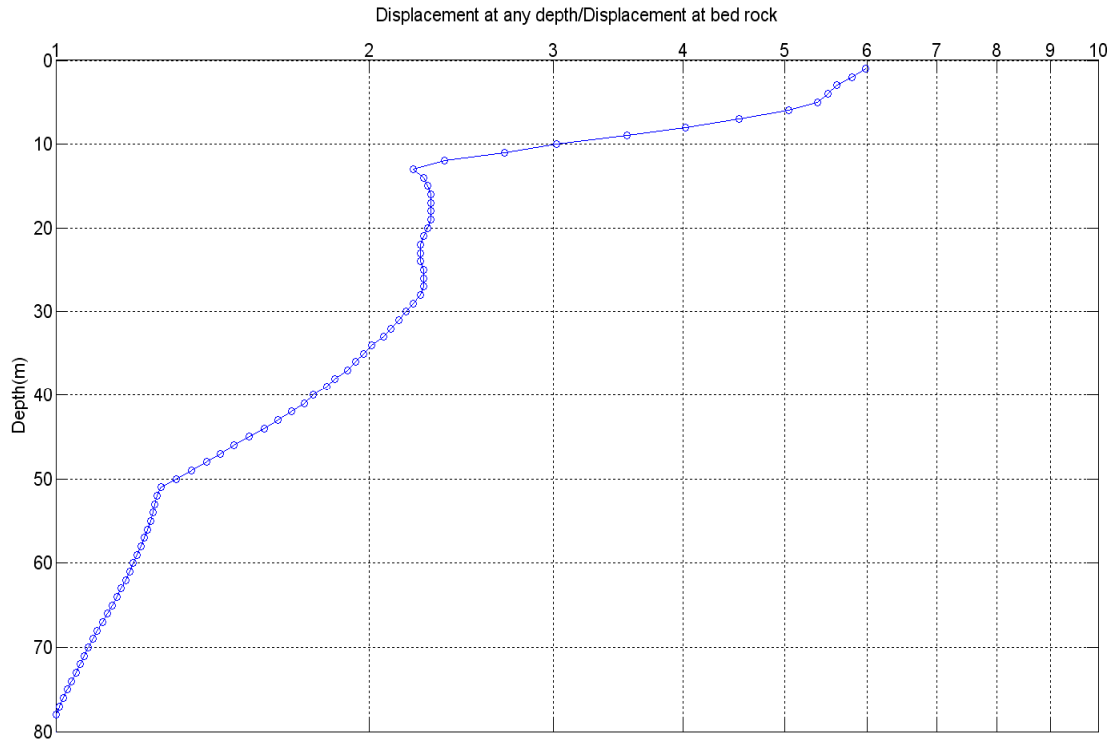
รูปที่ 6.28 การเปรียบเทียบการความเครียดเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



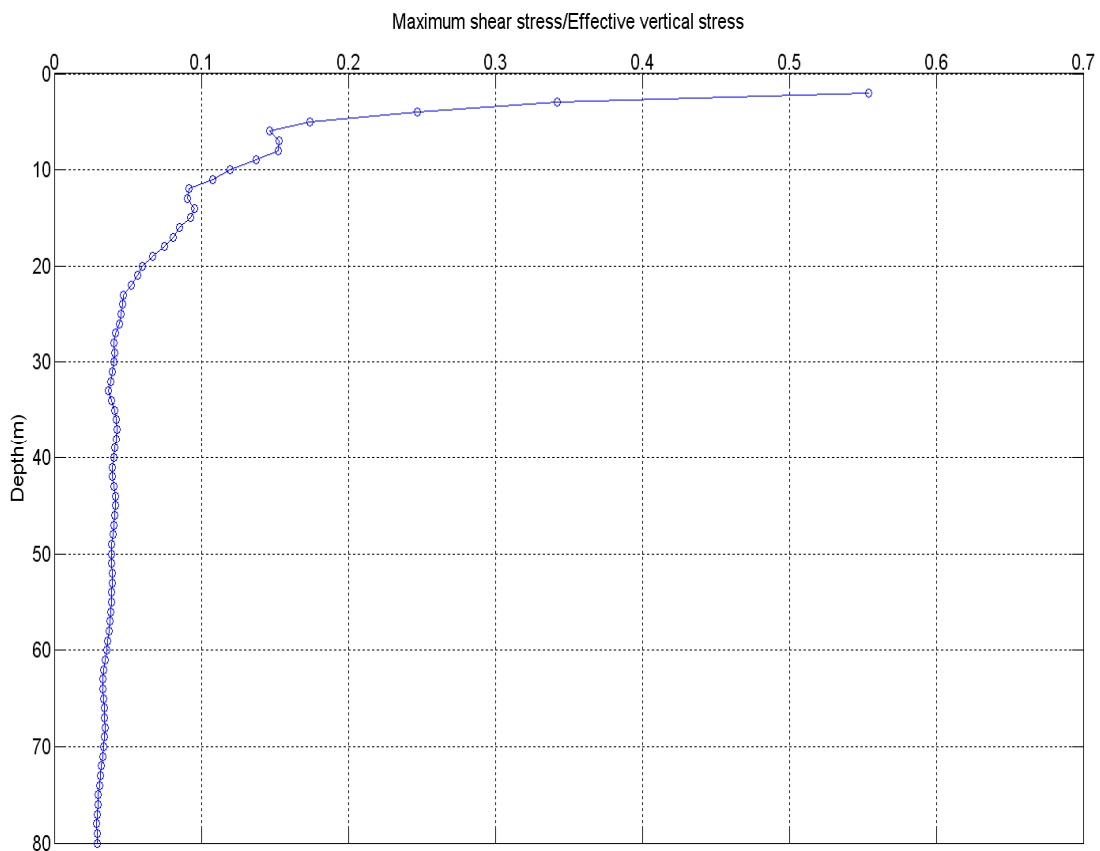
รูปที่ 6.29 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร่งสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร



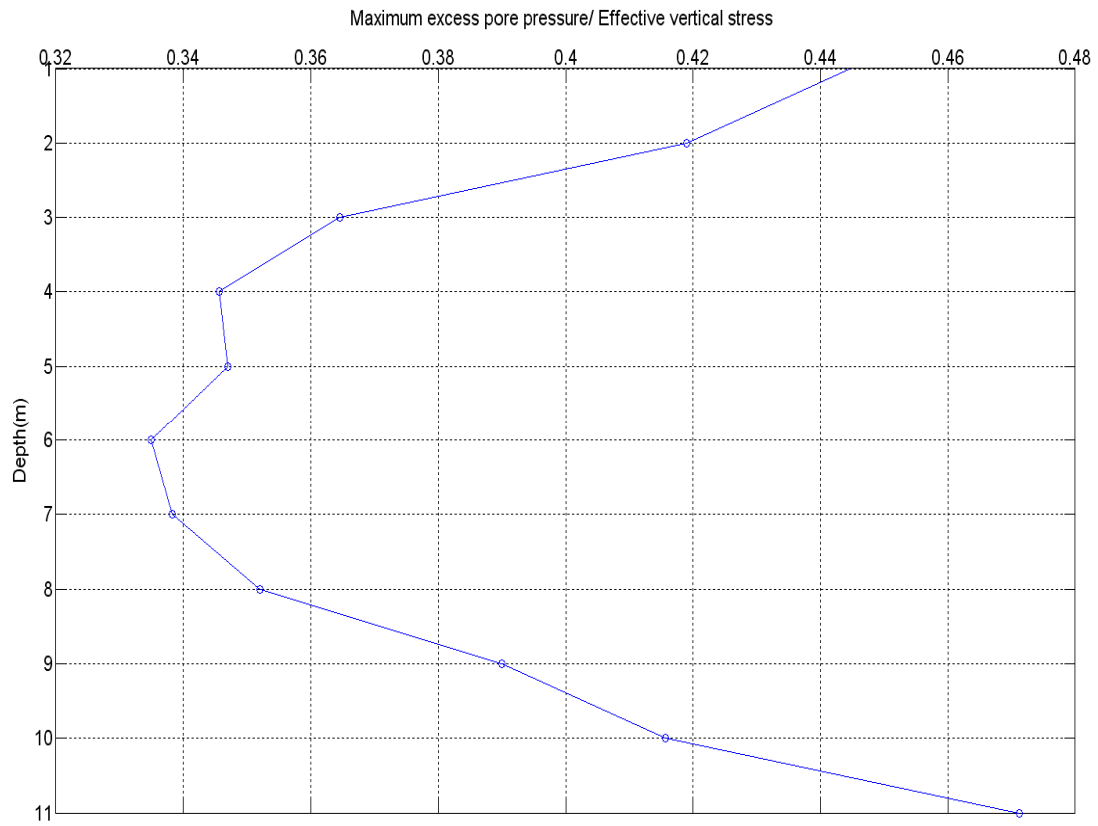
รูปที่ 6.30 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร็วสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร



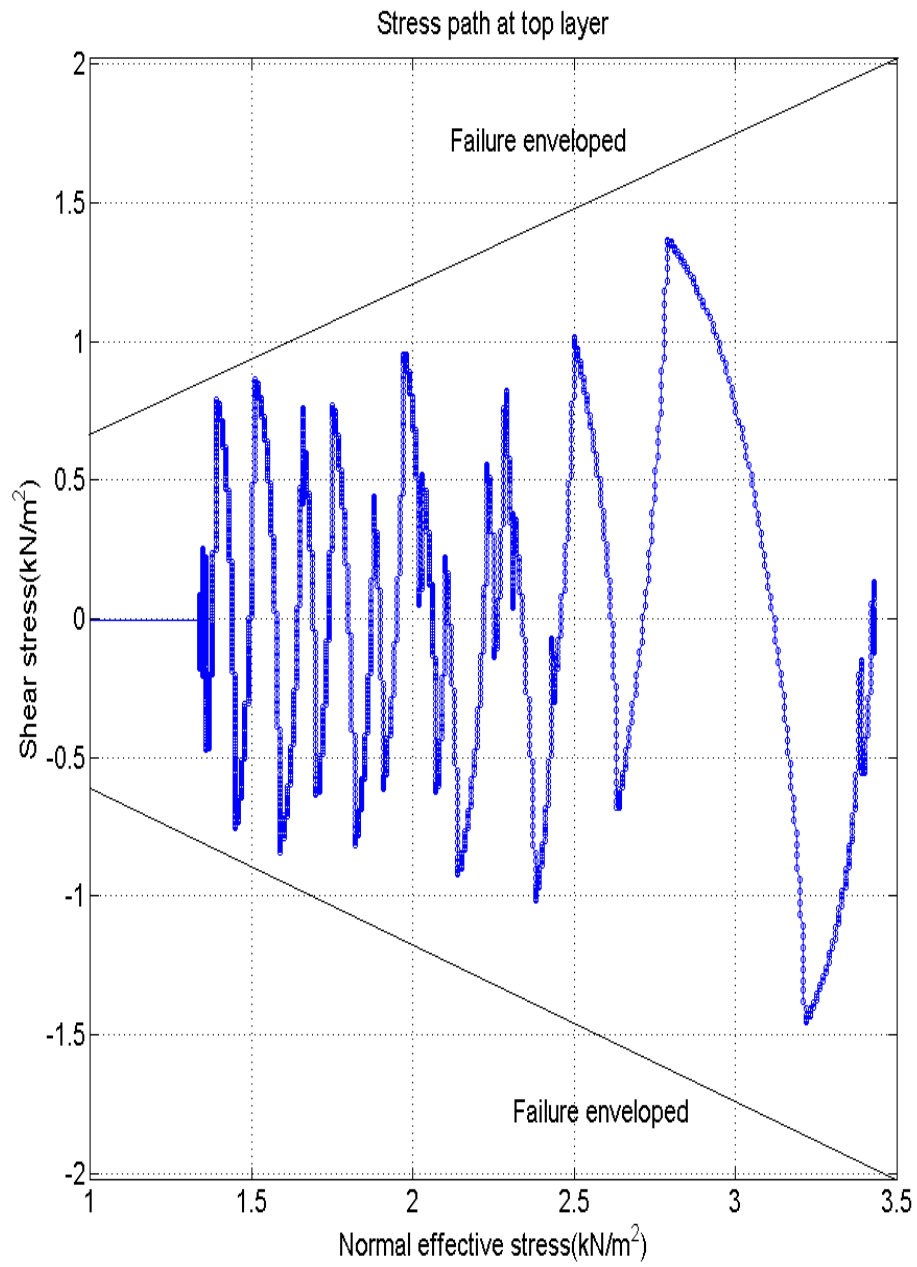
รูปที่ 6.31 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับการเคลื่อนตัวสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร



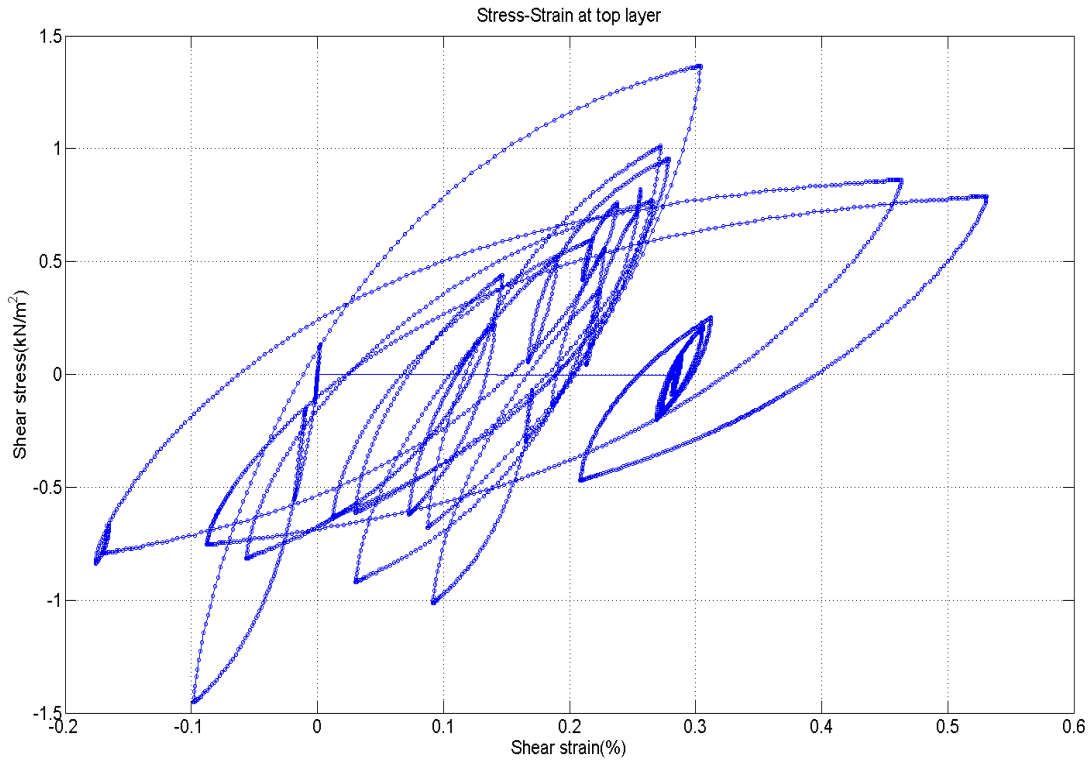
รูปที่ 6.32 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนแรงเฉือนสูงสุดกับความเค้นอัดสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆ



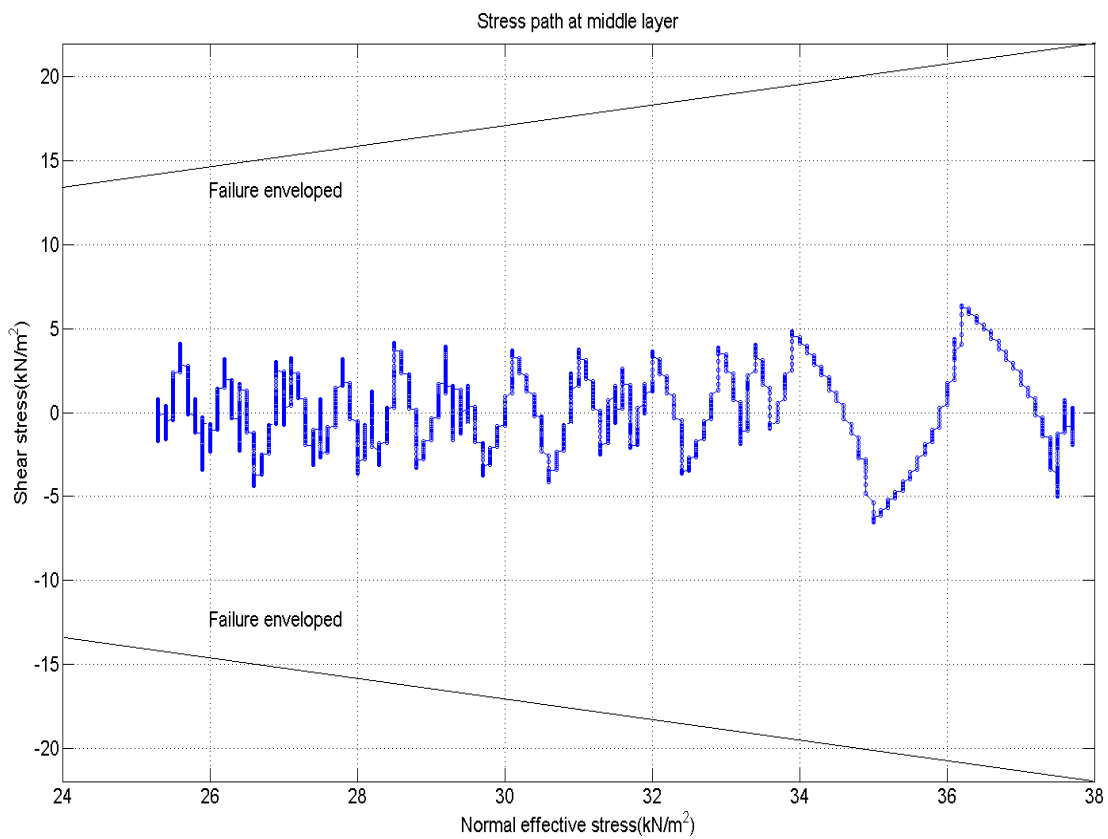
รูปที่ 6.33 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำส่วนเกินสูงสุดกับความเค้นอัดที่ตั้งแต่ผิวดินจนถึงระดับความลึก 11 เมตร



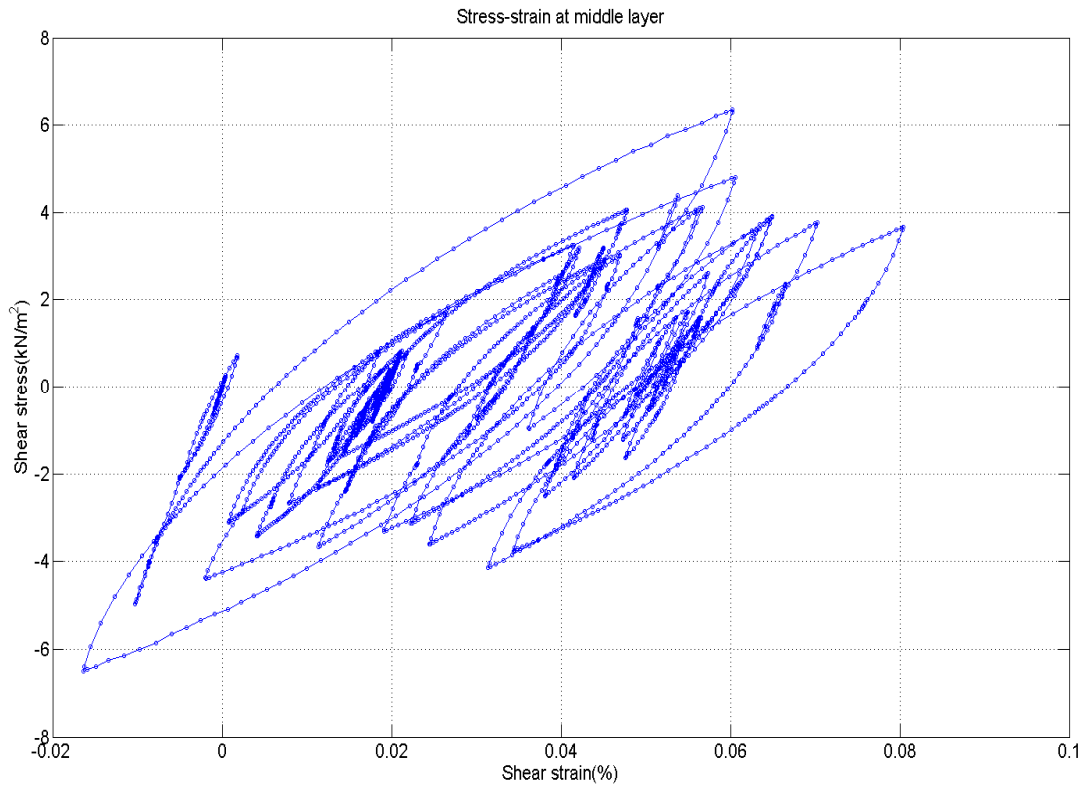
รูปที่ 6.34 เส้นทางเดินของความเค้นเฉือนที่ชั้นความลึก 0.5 เมตรจากผิวดิน



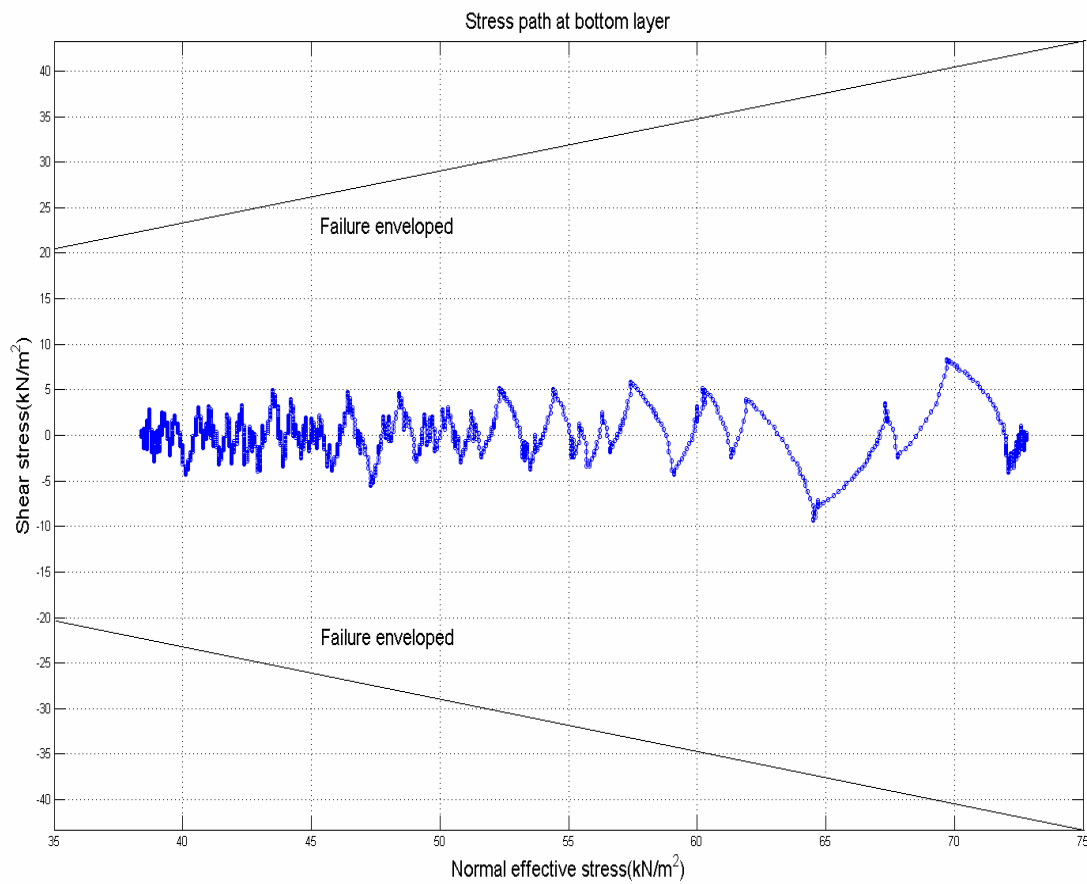
รูปที่ 6.35 เส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและค่าความเครียดเฉือนที่ชั้นความลึก 0.5 เมตรจากผิวดิน



รูปที่ 6.36 เส้นทางเดินของความเค้นเฉือนที่ชั้นความลึก 6 เมตรจากผิวดิน

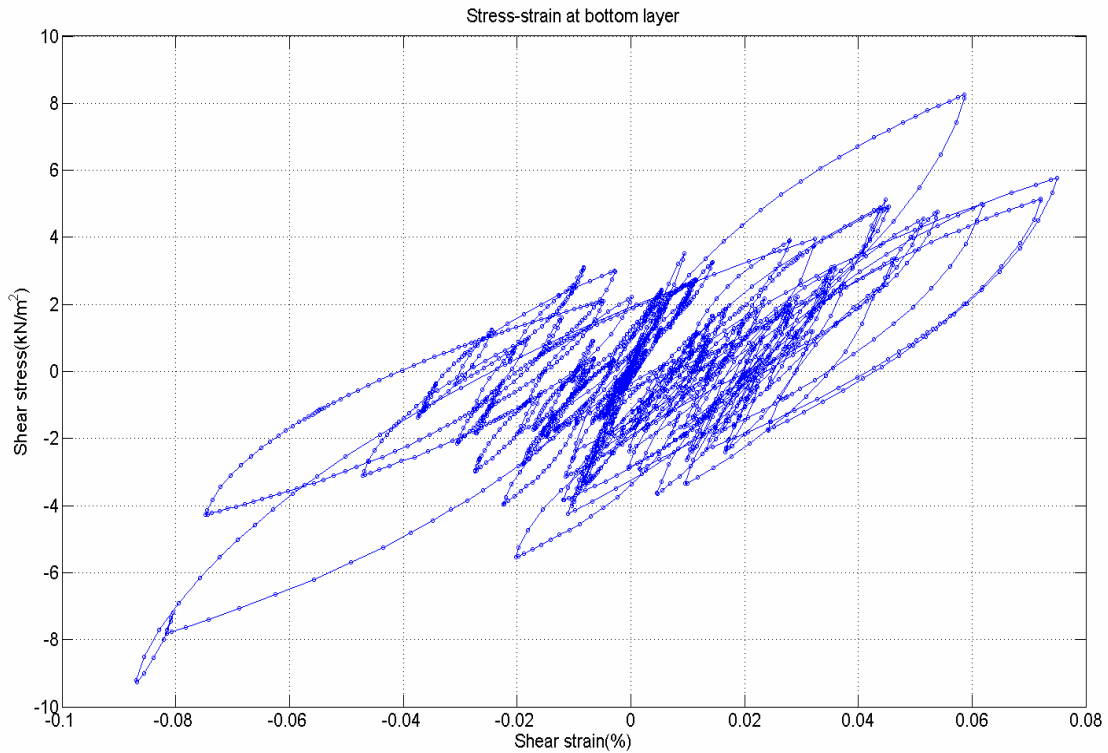


รูปที่ 6.37 เส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่ชั้นความลึก 6 เมตรจากผิวดิน



รูปที่ 6.38 เส้นทางเดินของความเค้นเฉือนที่ชั้นความลึก 11 เมตรจากผิวดิน



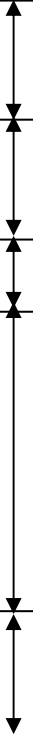


รูปที่ 6.39 เส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนที่ชั้นความลึก 11 เมตรจากผิวดิน

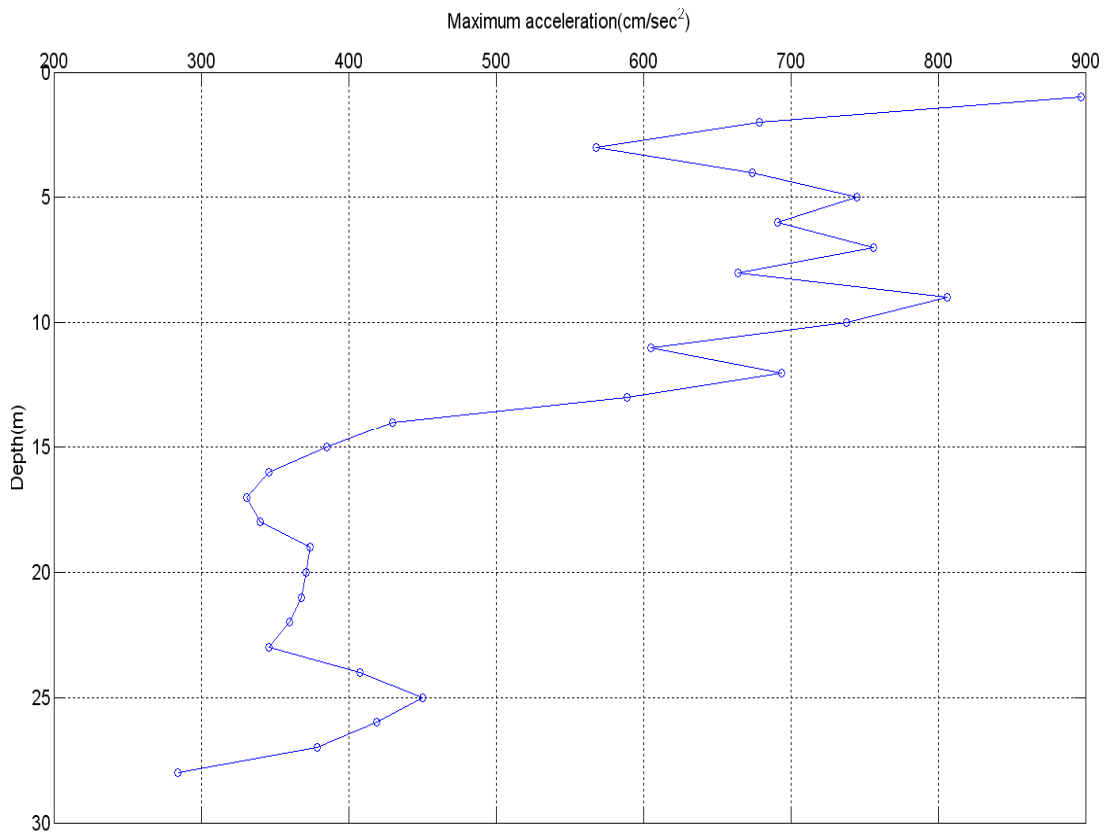
6.4 การวิเคราะห์ชั้นดินกรุงเทพที่มีความหนา 30 เมตร โดยใช้แบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic โดยชั้นดินมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 6.9 คุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพที่มีความหนา 30 เมตร

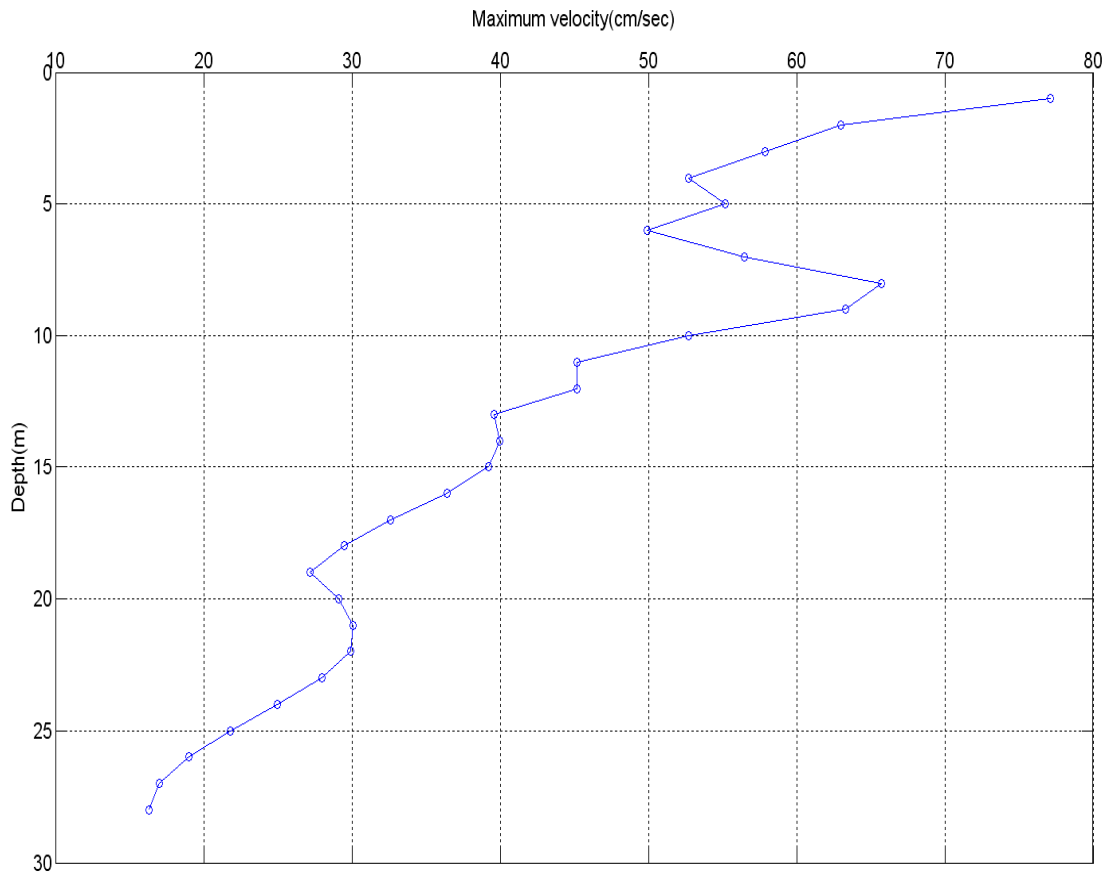
| Thicknes<br>s | Unit<br>weight(k<br>N/m <sup>2</sup> ) | Shear<br>modulus<br>(MPa) | Shear<br>wave(m/<br>sec) | Dampin<br>g ratio % | Plastic<br>index | OCR  | Model             |
|---------------|----------------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|------------------|------|-------------------|
| 5.50          | 16.67                                  | 8.32                      | 70.00                    | 5.00                | 45.00            | 1.10 | Pestana           |
| 6.00          | 16.18                                  | 10.55                     | 80.00                    | 5.00                | 65.00            | 1.10 | Pestana           |
| 1.00          | 15.89                                  | 19.60                     | 110.00                   | 5.00                | 70.00            | 2.00 | Linear<br>elastic |
| 16.00         | 19.62                                  | 96.83                     | 220.00                   | 5.00                | 35.00            | 2.00 | Linear<br>elastic |
| Rock          | 22.42                                  | 3336.50                   | 1208.5                   | 10                  | -                | -    | Linear<br>elastic |

|                                                   |          |                                                                                      |
|---------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Soft clay, Grey<br>Pestana model                  | 5.5 m.   |  |
| Very soft to soft clay, Grey<br>Pestana model     | 6.0 m.   |                                                                                      |
| Medium clay , Grey                                | 1.0 m.   |                                                                                      |
| Stiff to very stiff clay<br>Trace fine sand, Grey | 16.0 m.  |                                                                                      |
| Rock                                              | $\infty$ |                                                                                      |

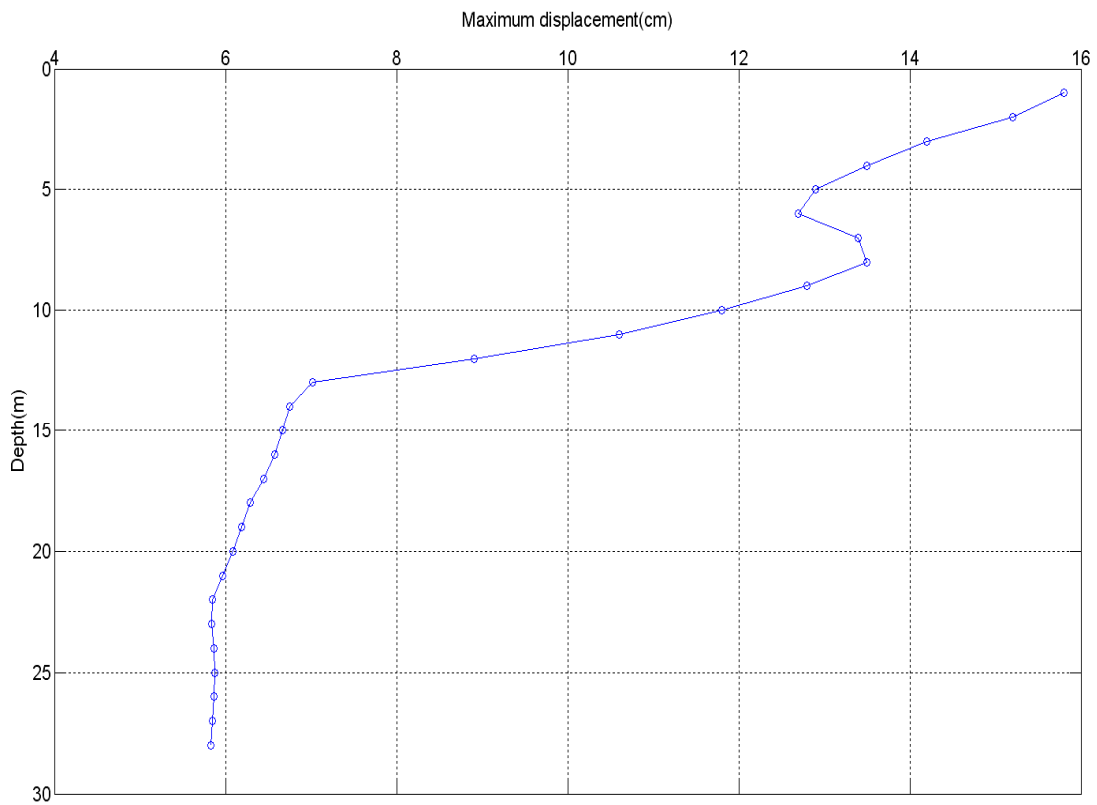
รูปที่ 6.40 ลักษณะชั้นดินที่ความหนา 30 เมตร



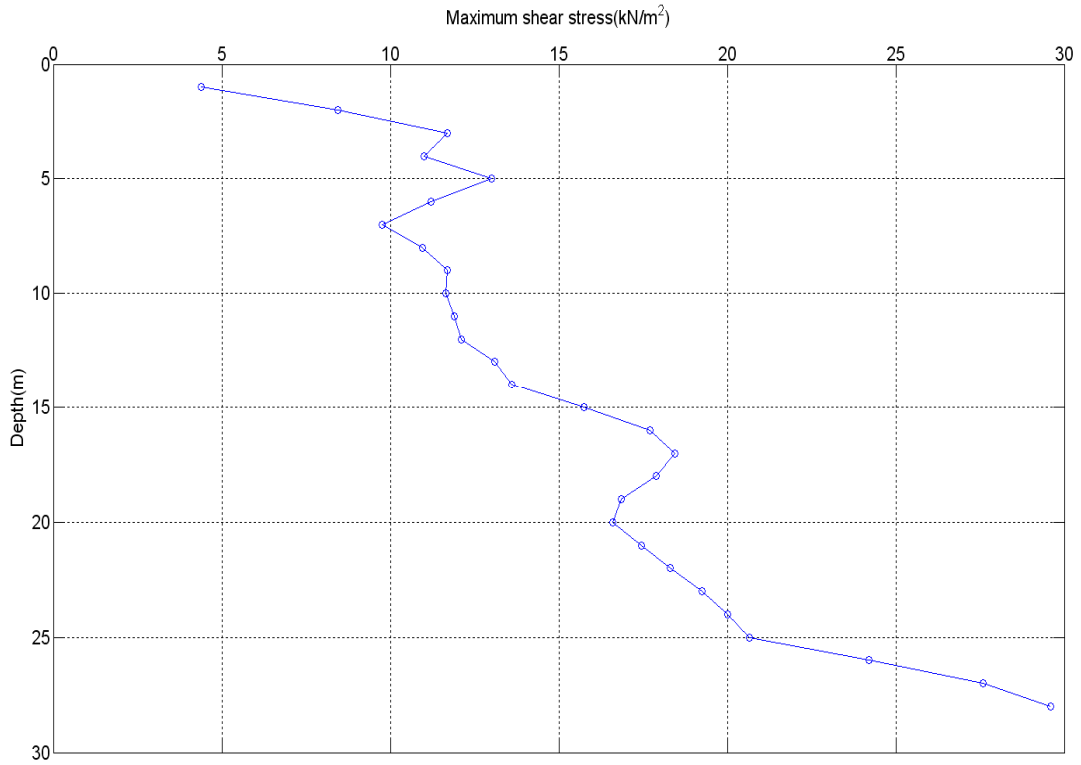
รูปที่ 6.41 การเปรียบเทียบการความเร่งสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



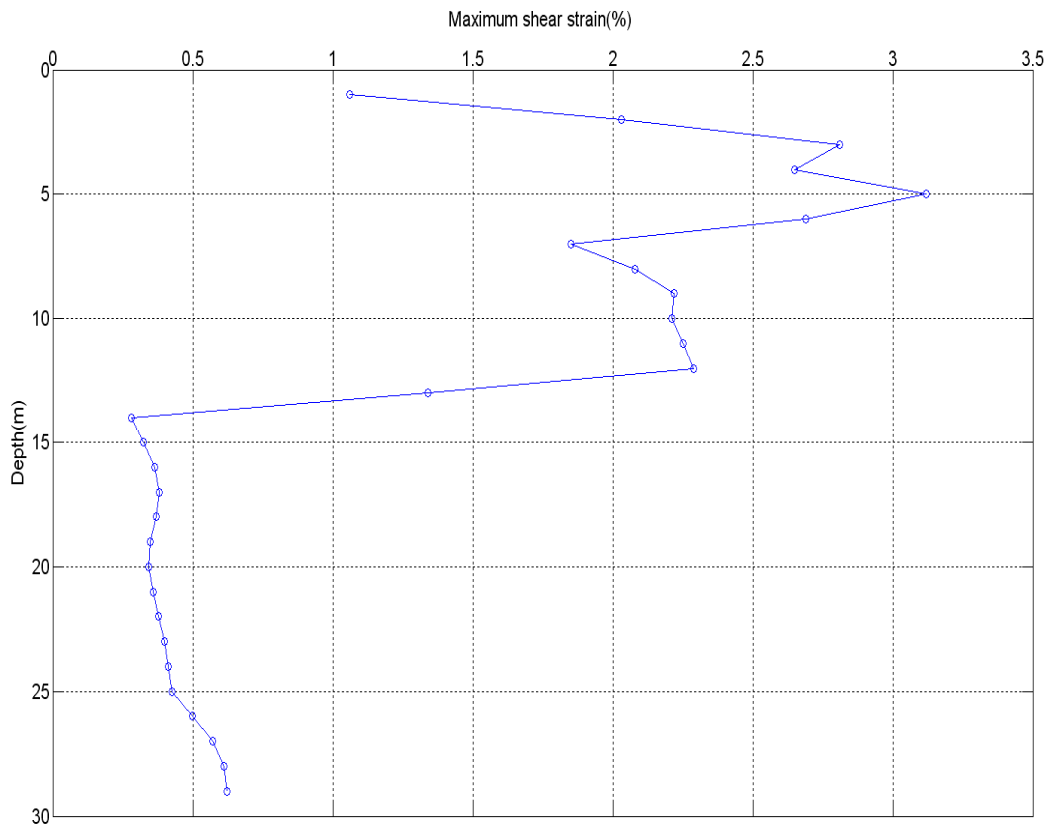
รูปที่ 6.42 การเปรียบเทียบการความเร็วสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



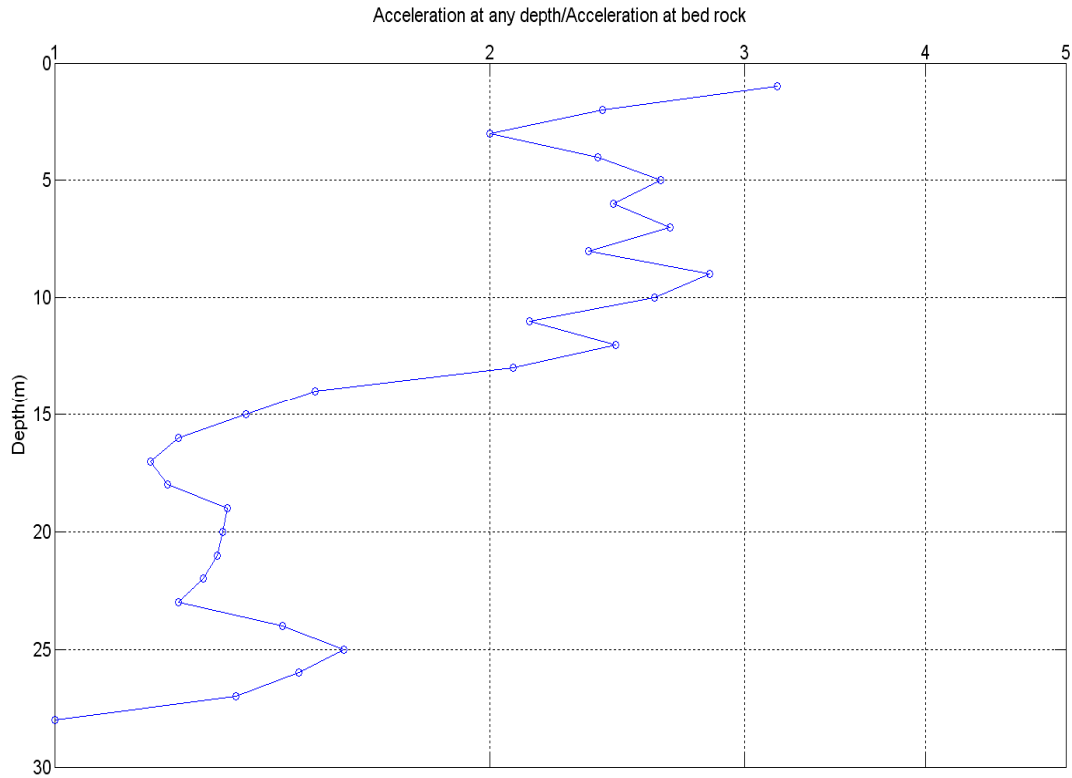
รูปที่ 6.43 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



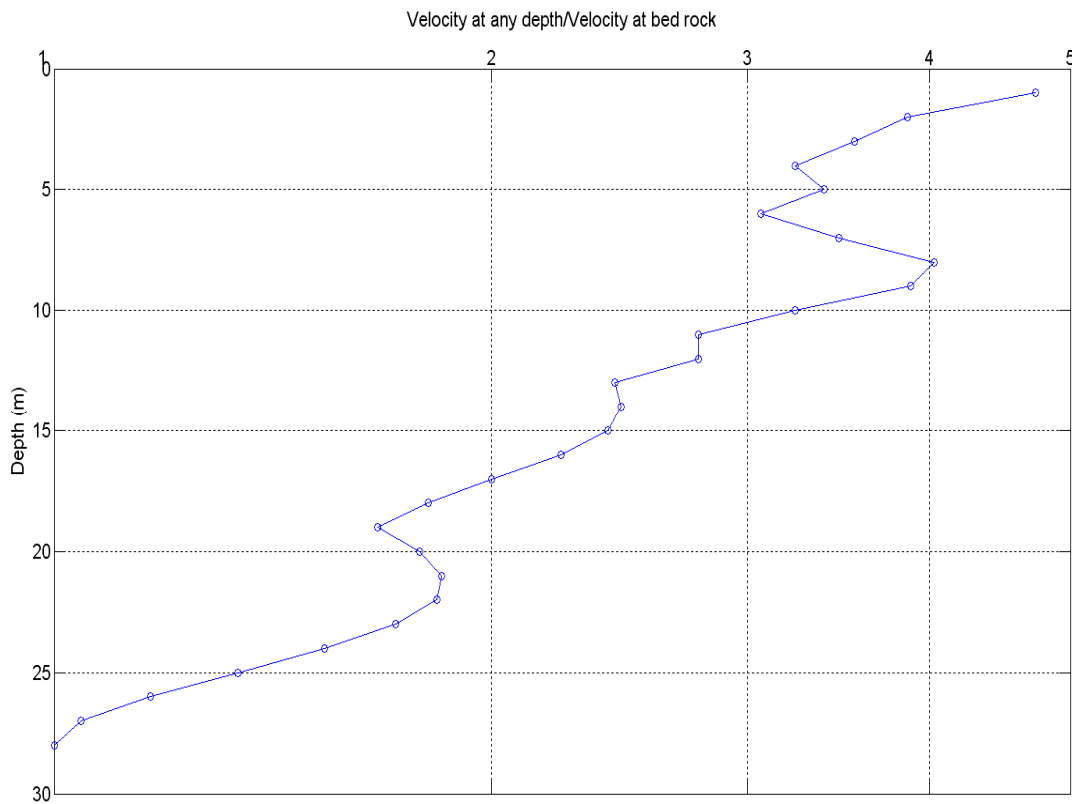
รูปที่ 6.44 การเปรียบเทียบการความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



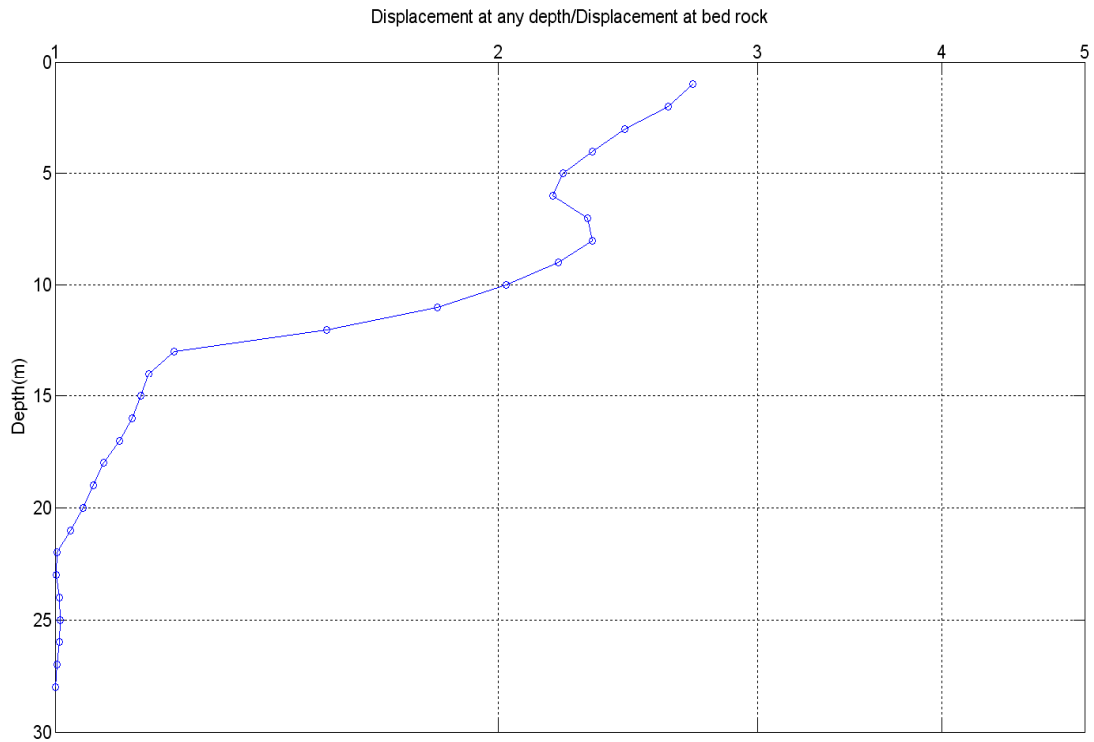
รูปที่ 6.45 การเปรียบเทียบการความเครียดเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



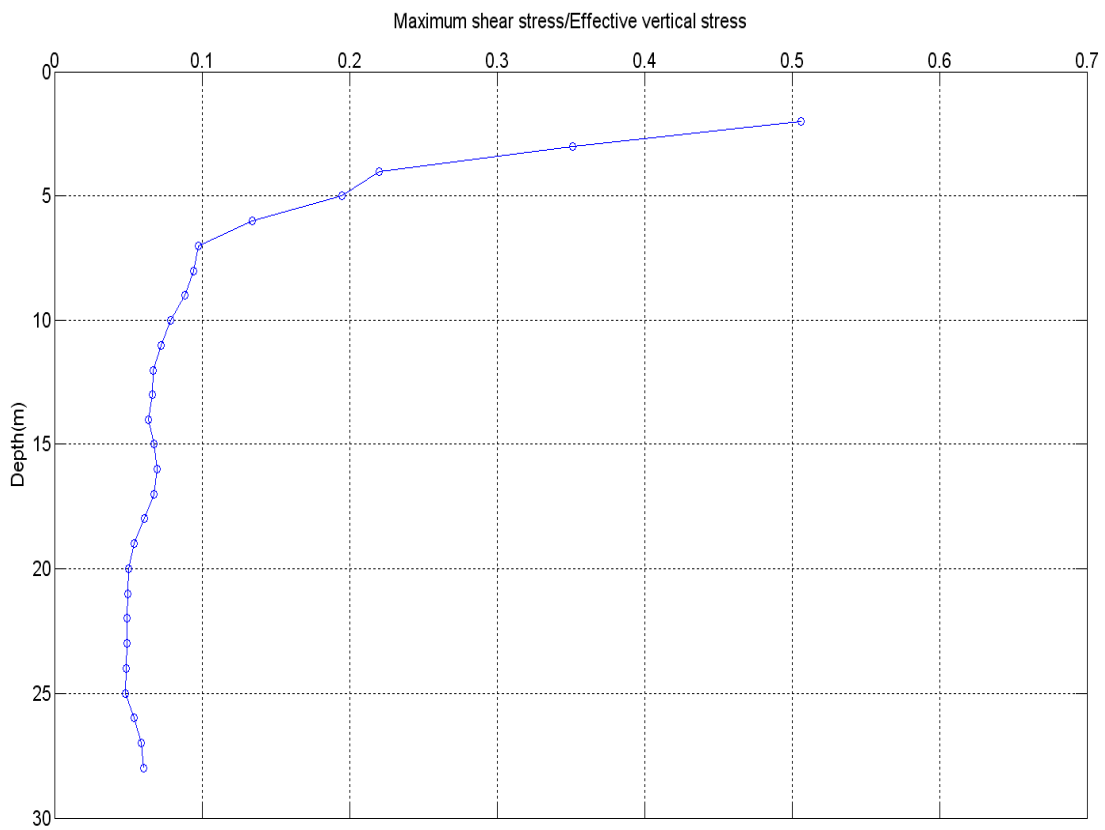
รูปที่ 6.46 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร่งสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 30 เมตร



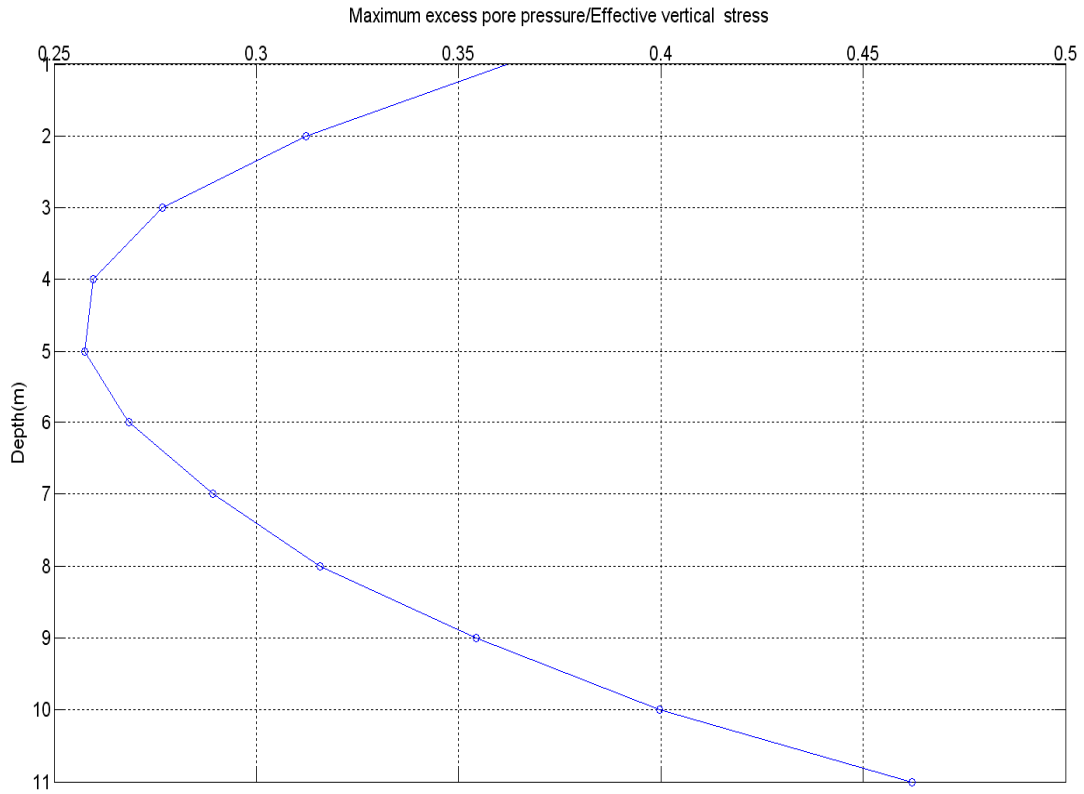
รูปที่ 6.47 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร็วสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 30 เมตร



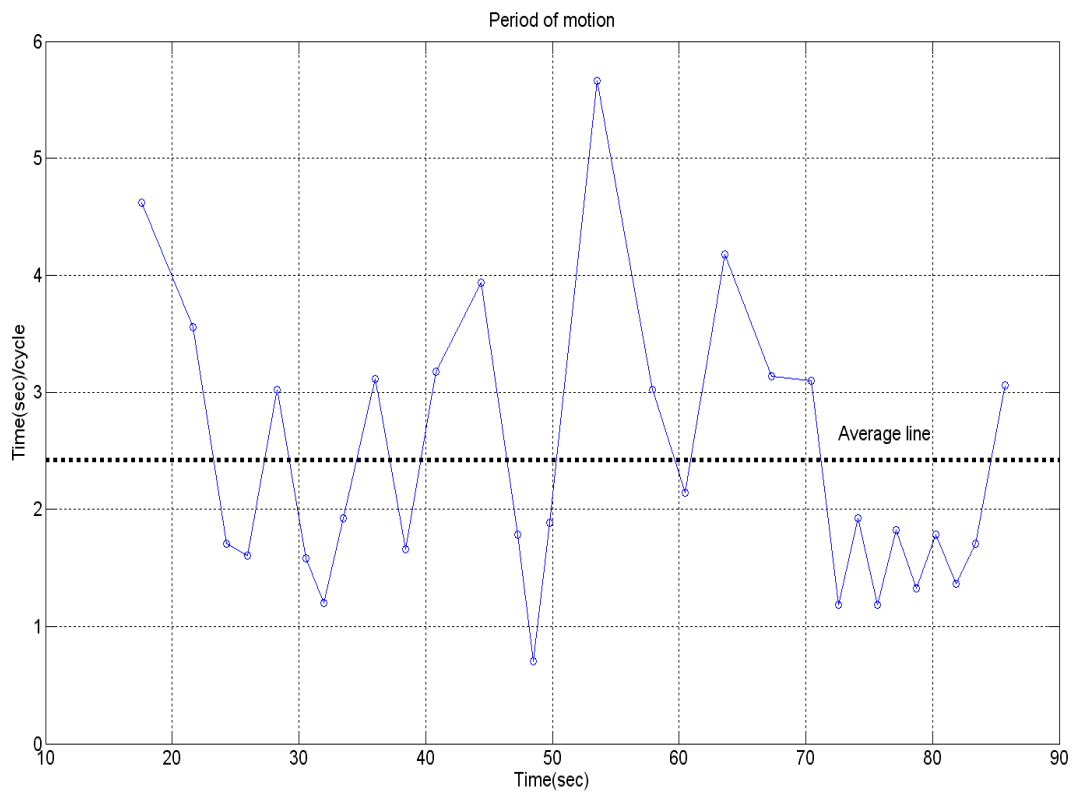
รูปที่ 6.48 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับการเคลื่อนตัวสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 30 เมตร



รูปที่ 6.49 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นอัดสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆ



รูปที่ 6.50 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำส่วนเกินสูงสุดกับความเค้นอัดที่ตั้งแต่วิวดินจนถึงระดับความลึก 11 เมตร



รูปที่ 6.51 คาบของการเคลื่อนตัว(Period of motion)

6.5 การวิเคราะห์ชั้นดินกรุงเทพที่มีความหนา 80 เมตร โดยใช้แบบจำลองดิน Linear elastic อย่างเดียว โดยชั้นดินมีคุณสมบัติดังนี้

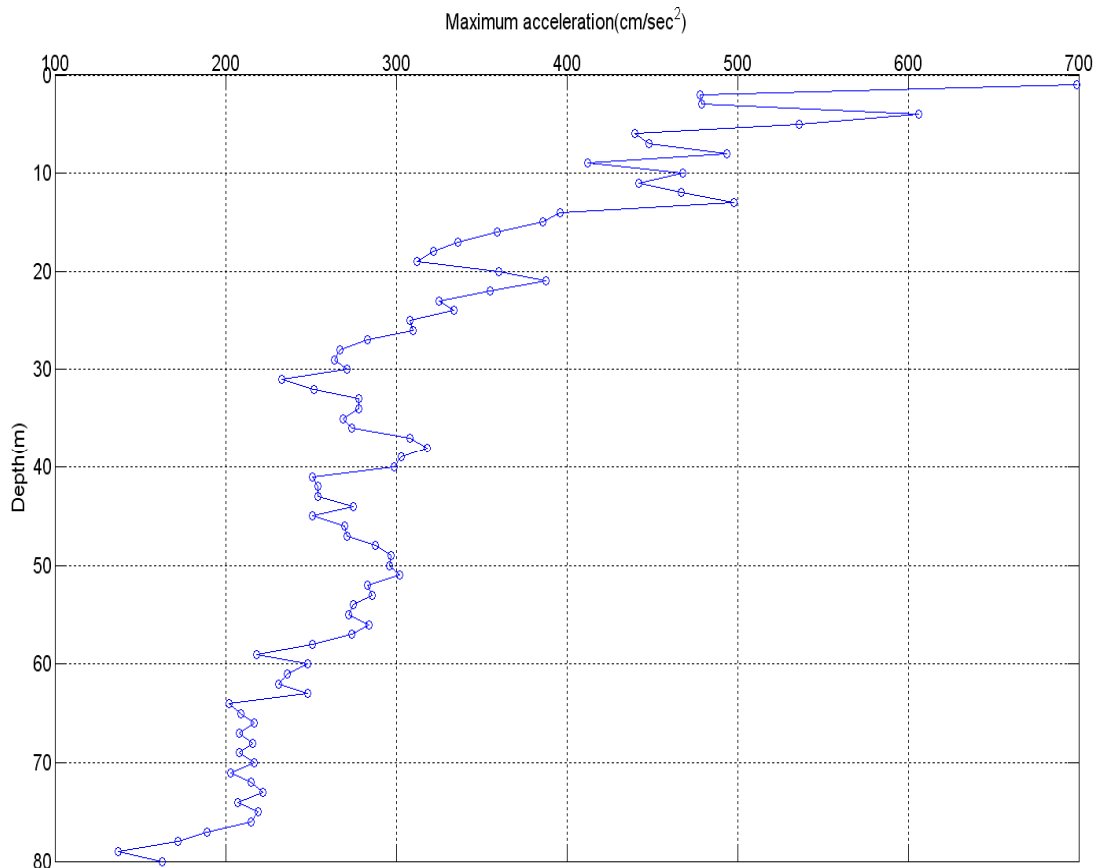
ตารางที่ 6.10 สมบัติชั้นดินกรุงเทพที่มีความหนา 80 เมตร

| Thickness | Unit weight (kN/m <sup>2</sup> ) | Shear modulus (MPa) | Shear wave (m/sec) | Damping ratio % | Plastic index | OCR  | Model          |
|-----------|----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------|------|----------------|
| 5.50      | 16.67                            | 8.32                | 70.00              | 5.00            | 45.00         | 1.10 | Linear elastic |
| 6.00      | 16.18                            | 10.55               | 80.00              | 5.00            | 65.00         | 1.10 | Linear elastic |
| 1.00      | 15.89                            | 19.60               | 110.00             | 5.00            | 70.00         | 2.00 | Linear elastic |
| 16.00     | 19.62                            | 96.83               | 220.00             | 5.00            | 35.00         | 2.00 | Linear elastic |
| 9.00      | 19.62                            | 156.90              | 280.00             | 5.00            | 32.00         | 2.50 | Linear elastic |
| 10.00     | 19.62                            | 204.86              | 320.00             | 5.00            | 30.00         | 2.50 | Linear elastic |
| 2.00      | 19.62                            | 204.86              | 320.00             | 5.00            | 30.00         | 2.50 | Linear elastic |
| 7.00      | 19.62                            | 273.90              | 370.00             | 5.00            | 20.00         | 3.00 | Linear elastic |
| 3.00      | 21.58                            | 301.25              | 370.00             | 5.00            | 20.00         | 3.00 | Linear elastic |
| 21.00     | 19.62                            | 336.30              | 410.00             | 5.00            | 20.00         | 3.00 | Linear elastic |
| Rock      | 22.42                            | 3336.50             | 1208.50            | 10.00           | -             | -    | Linear elastic |

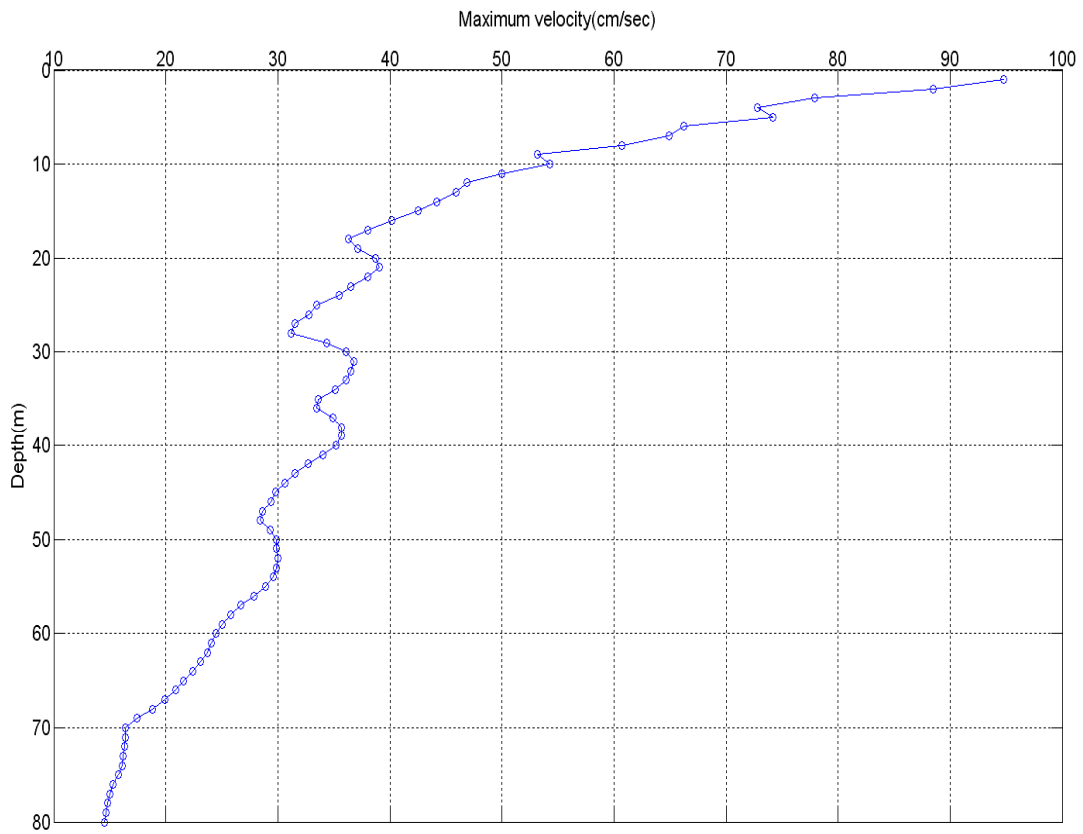


|                                                                |                |
|----------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Soft clay, Grey<br/>Pestana model</b>                       | <b>5.5 m.</b>  |
| <b>Very soft to soft clay, Grey<br/>Pestana model</b>          | <b>6.0 m.</b>  |
| <b>Medium clay , Grey</b>                                      | <b>1.0 m.</b>  |
| <b>Stiff to very stiff clay<br/>Trace fine sand, Grey</b>      | <b>16.0 m.</b> |
| <b>Dense to very dense silty<br/>Fine sand, Grey</b>           | <b>9.0 m.</b>  |
| <b>Hard Clay, Grey</b>                                         | <b>10.0 m.</b> |
| <b>Very dense clayey fine sand, reddish brown</b>              | <b>2.0 m.</b>  |
| <b>Very dense silty fine to medium sand<br/>Brown and grey</b> | <b>7.0 m.</b>  |
| <b>Hard clay yellowish borwn</b>                               | <b>3.0 m.</b>  |
| <b>Very dense silty fine to medium<br/>Sand, grey</b>          | <b>21.0 m.</b> |
| <b>Rock</b>                                                    | $\infty$       |

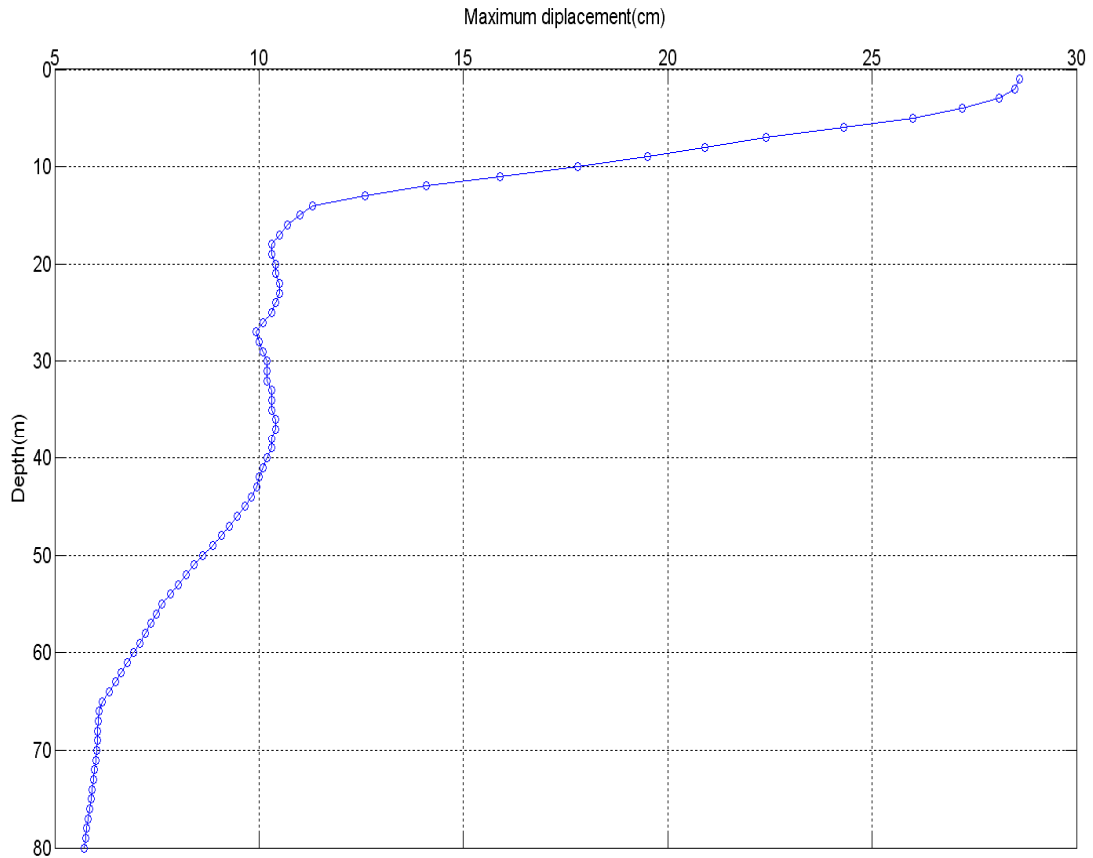
รูปที่ 6.52 ลักษณะของชั้นดินกรุงเทพฯที่ความลึก 80 เมตร



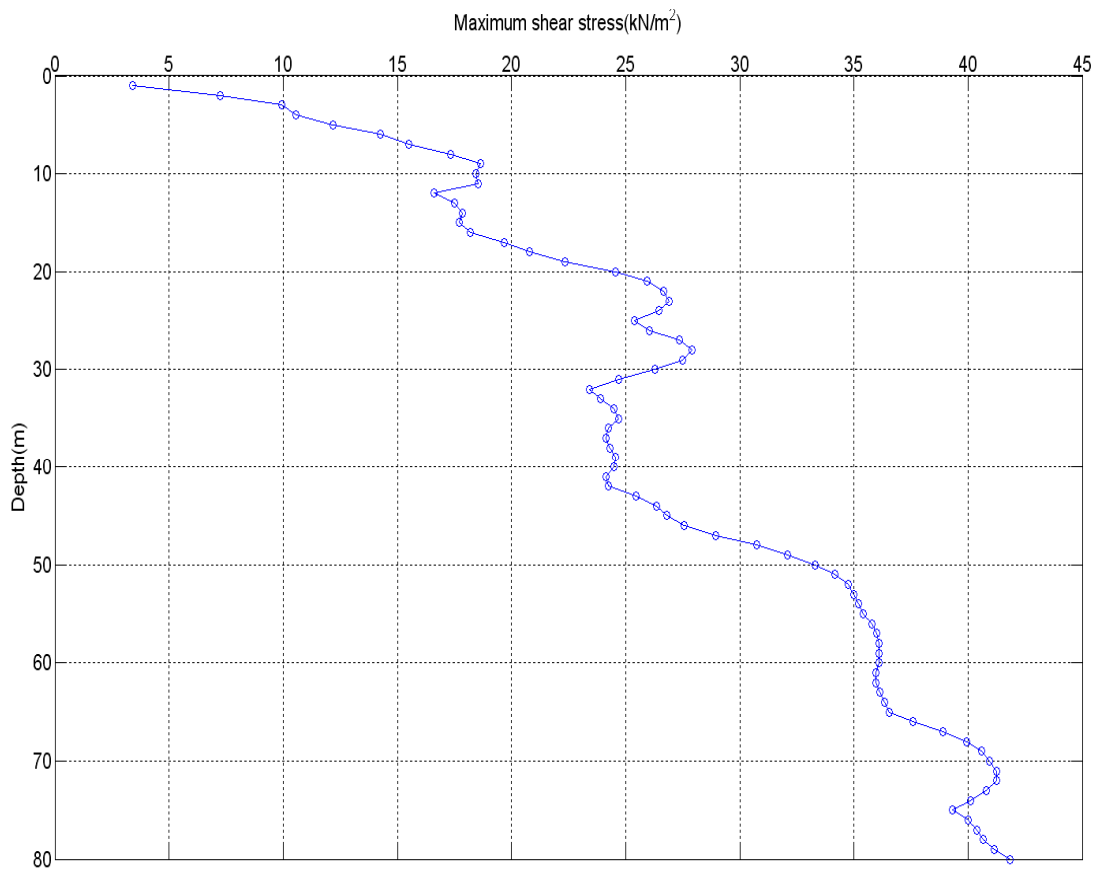
รูปที่ 6.53 การเปรียบเทียบการความเร่งสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



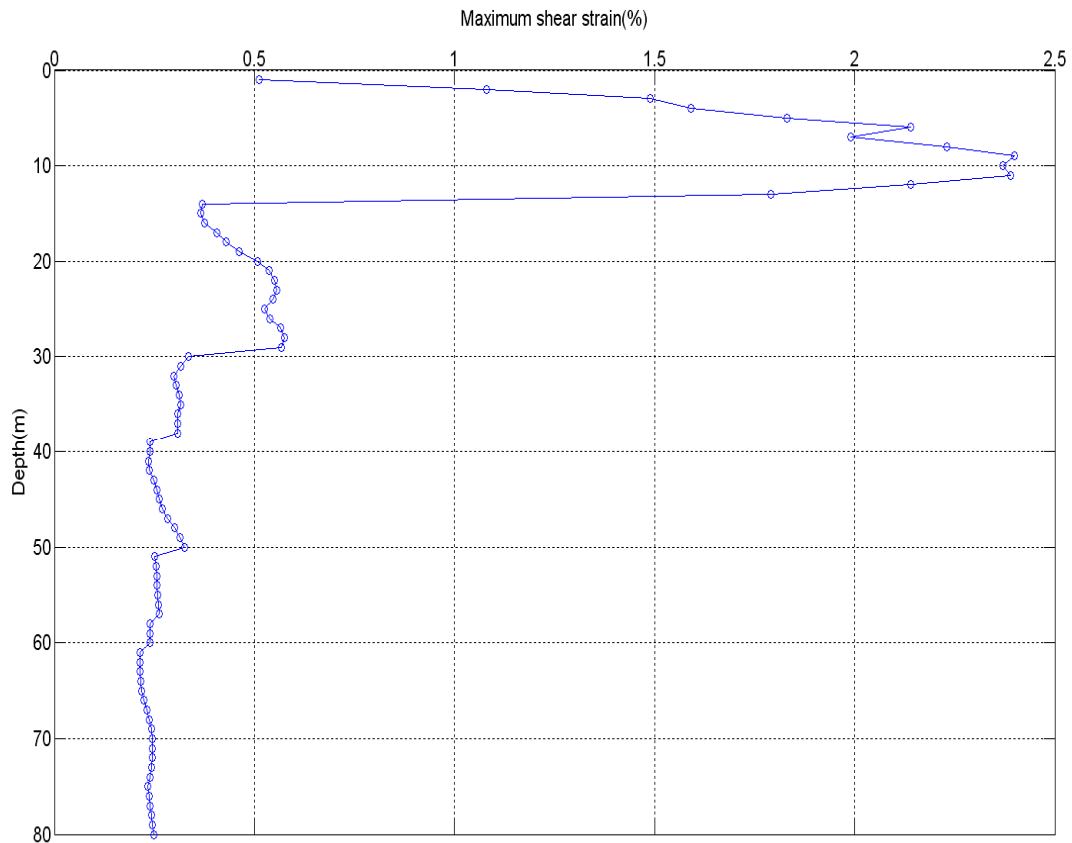
รูปที่ 6.54 การเปรียบเทียบการความเร็วสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



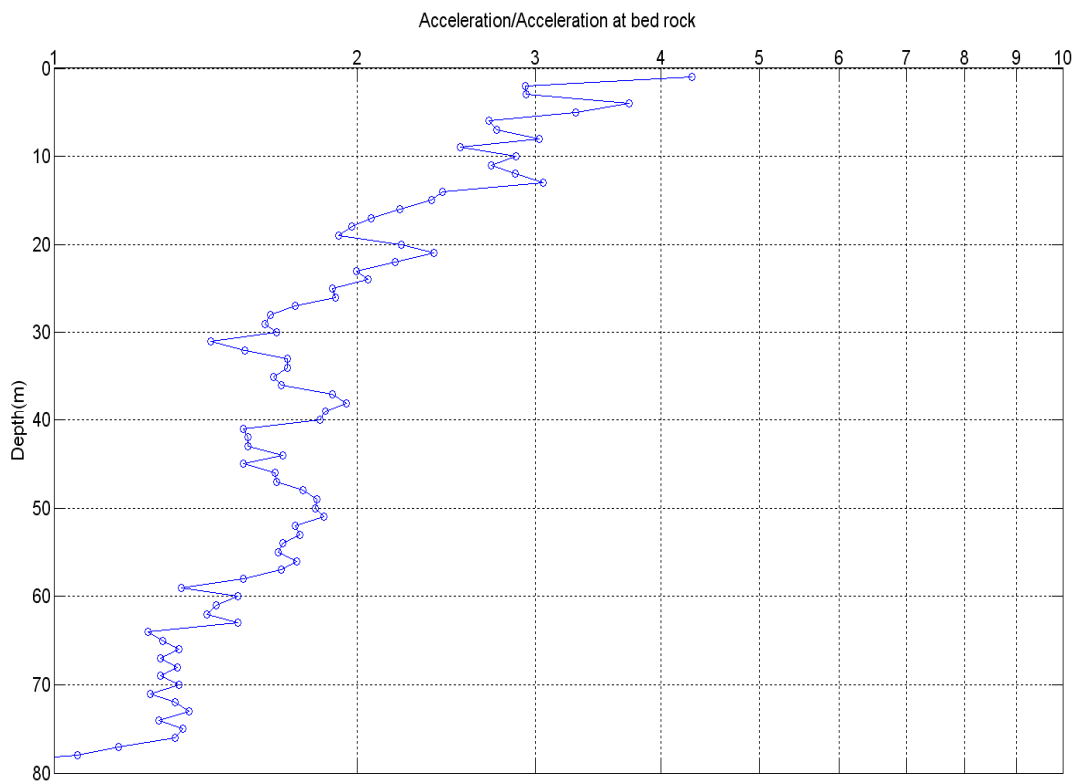
รูปที่ 6.55 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



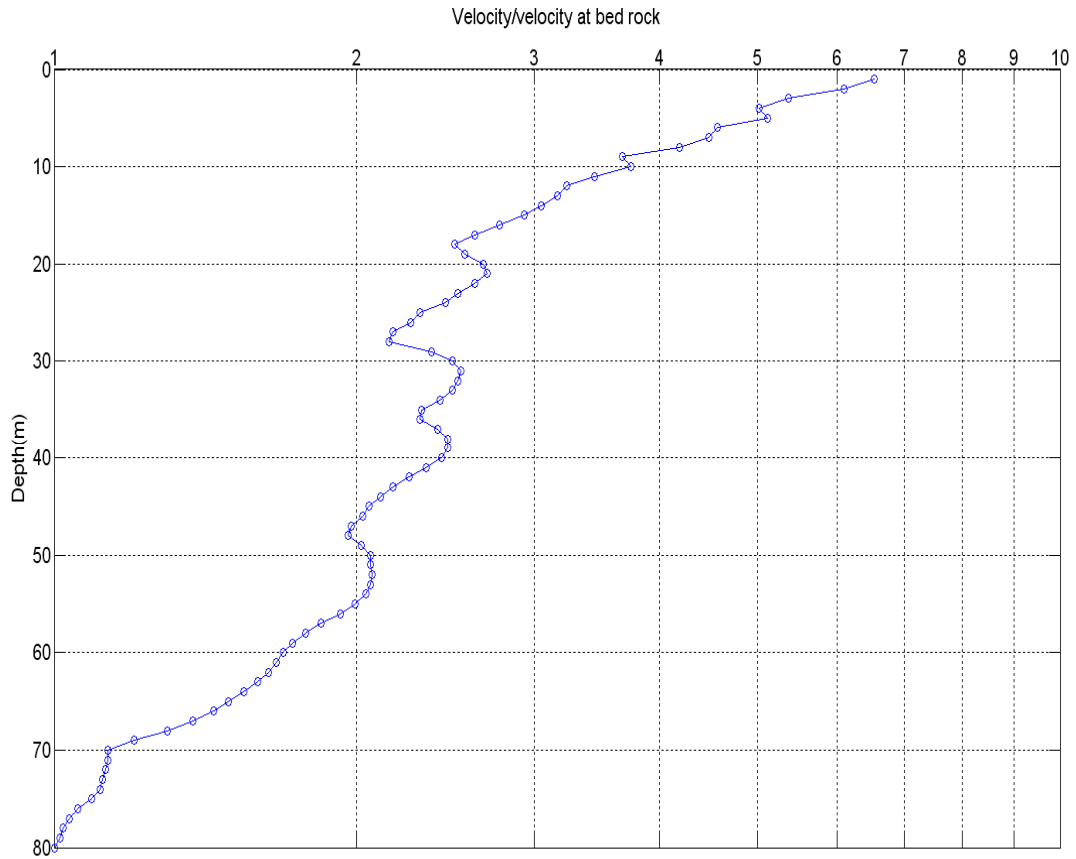
รูปที่ 6.56 การเปรียบเทียบการความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



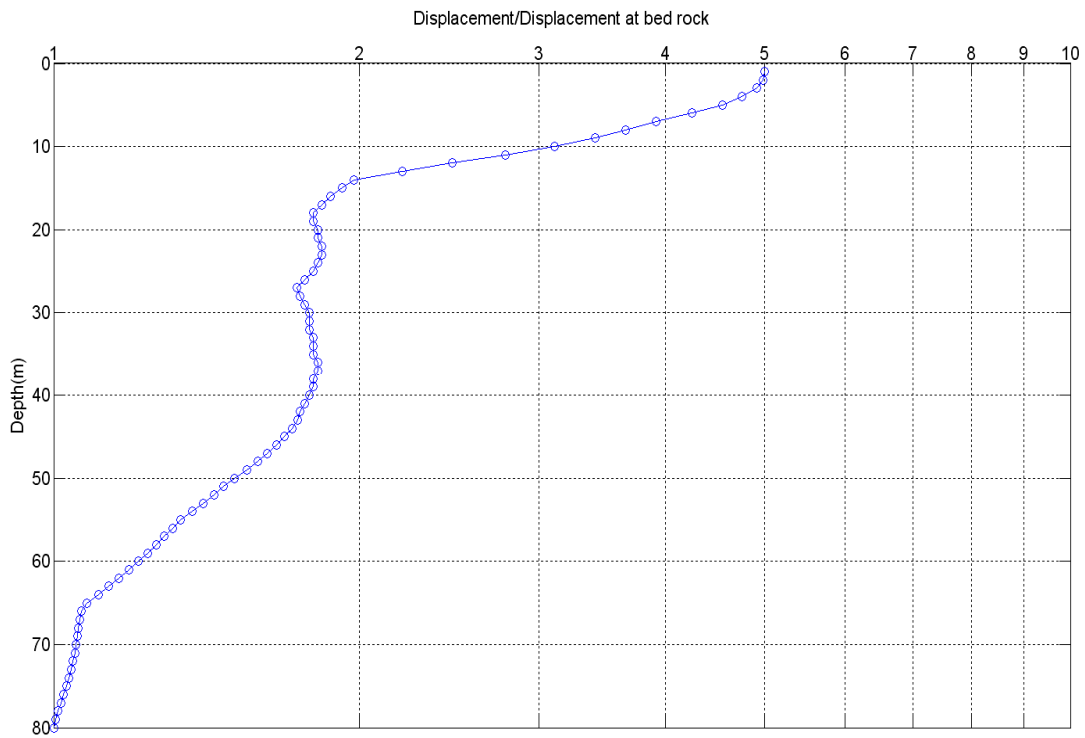
รูปที่ 6.57 การเปรียบเทียบการความเครียดเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน



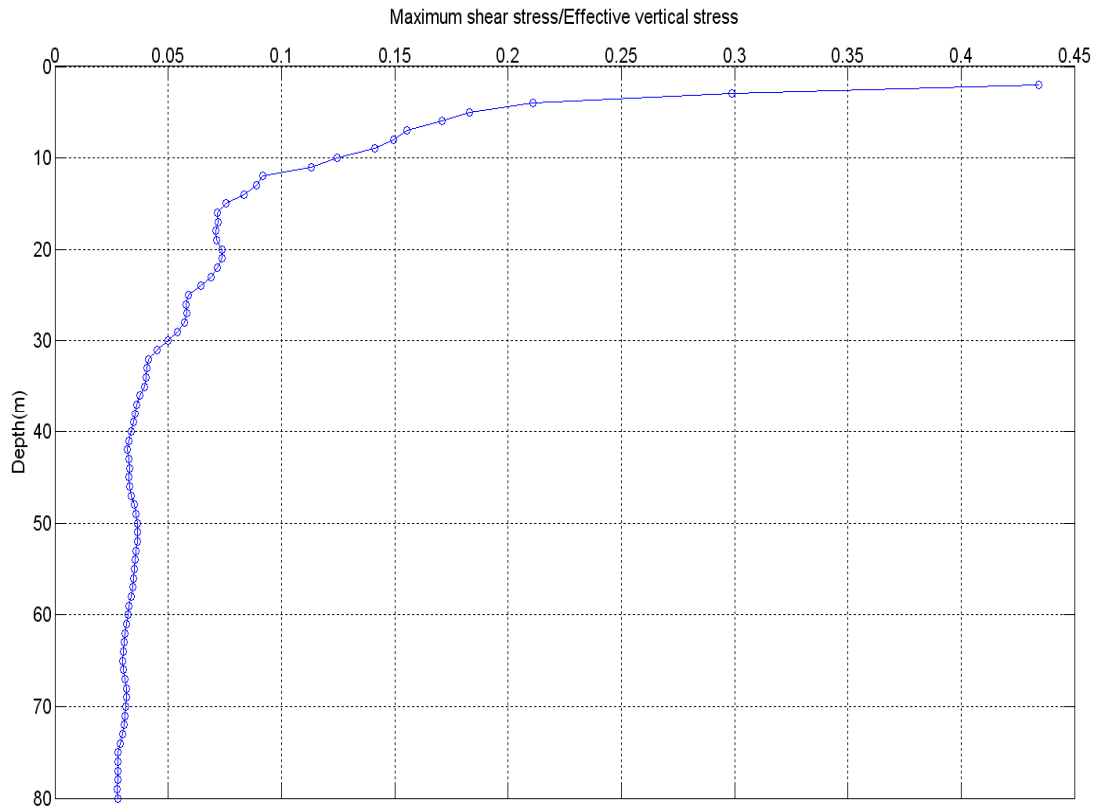
รูปที่ 6.58 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร่งสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร



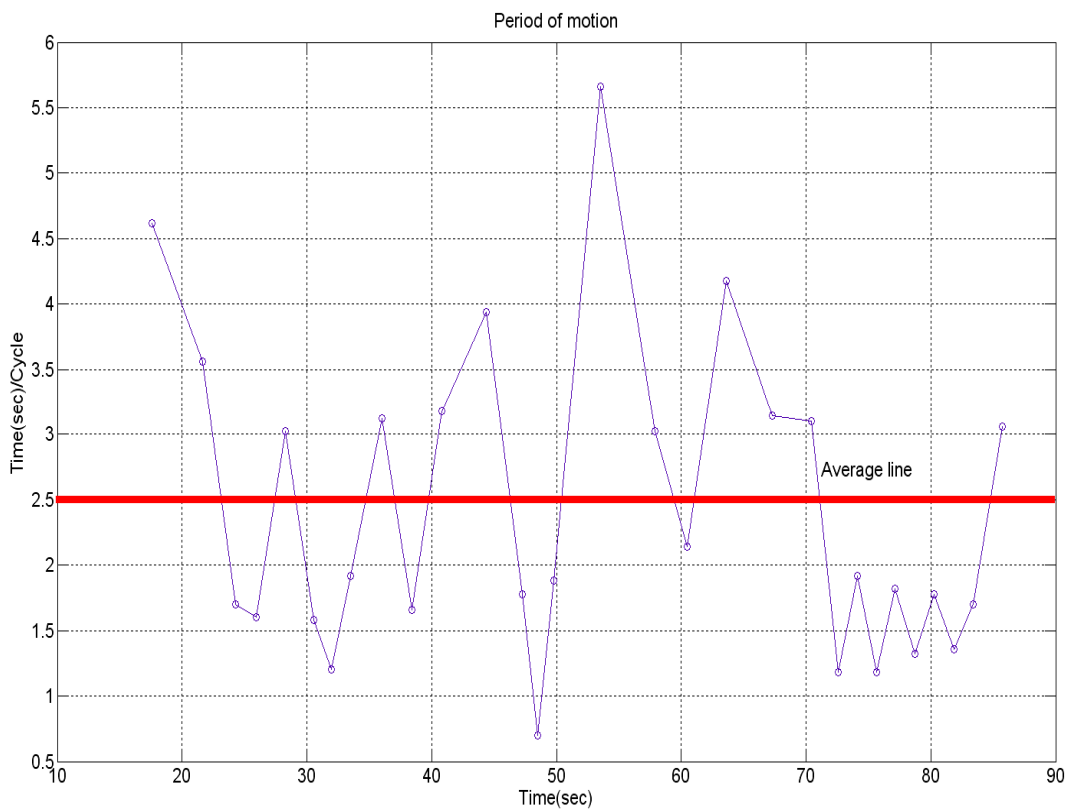
รูปที่ 6.59 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร็วสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร



รูปที่ 6.60 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับการเคลื่อนตัวสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตร

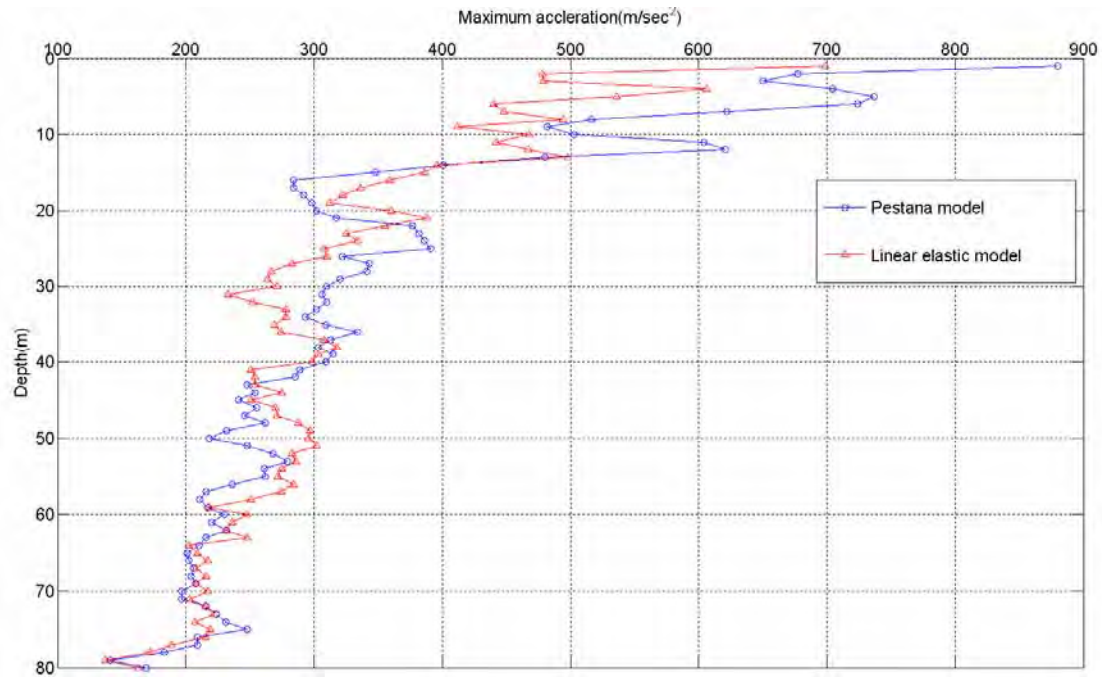


รูปที่ 6.61 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นเฉือนแรงอัดสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆ

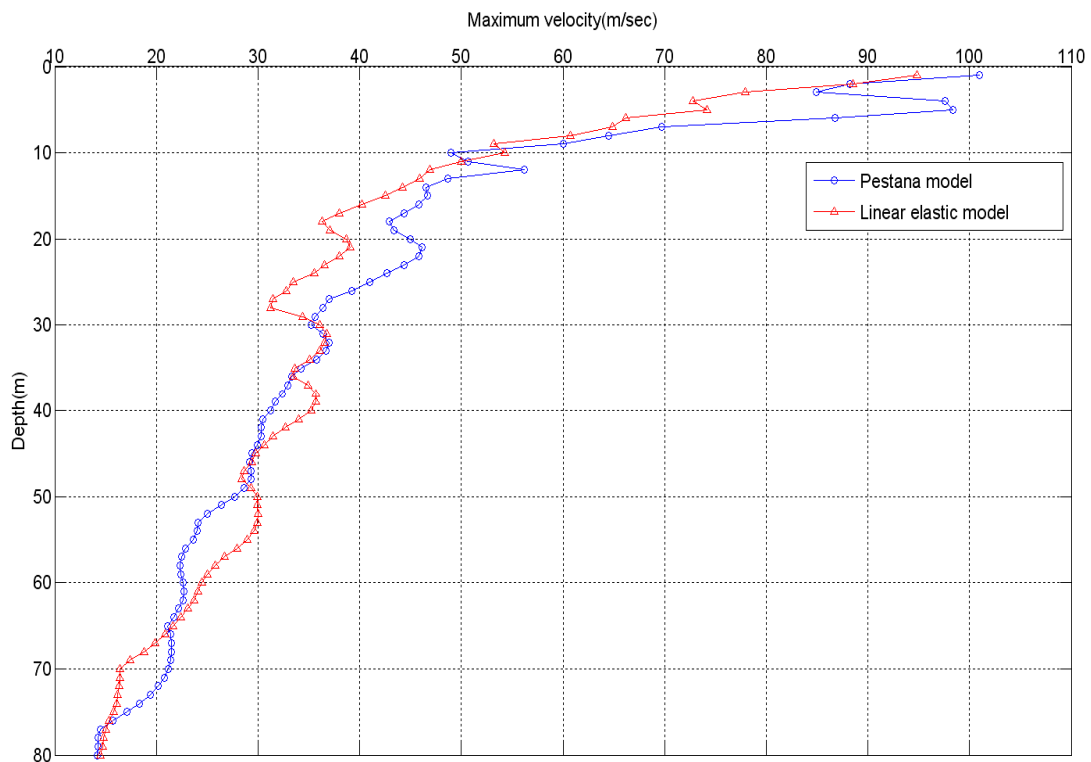


รูปที่ 6.62 คาบของการเคลื่อนตัว(Period of motion)

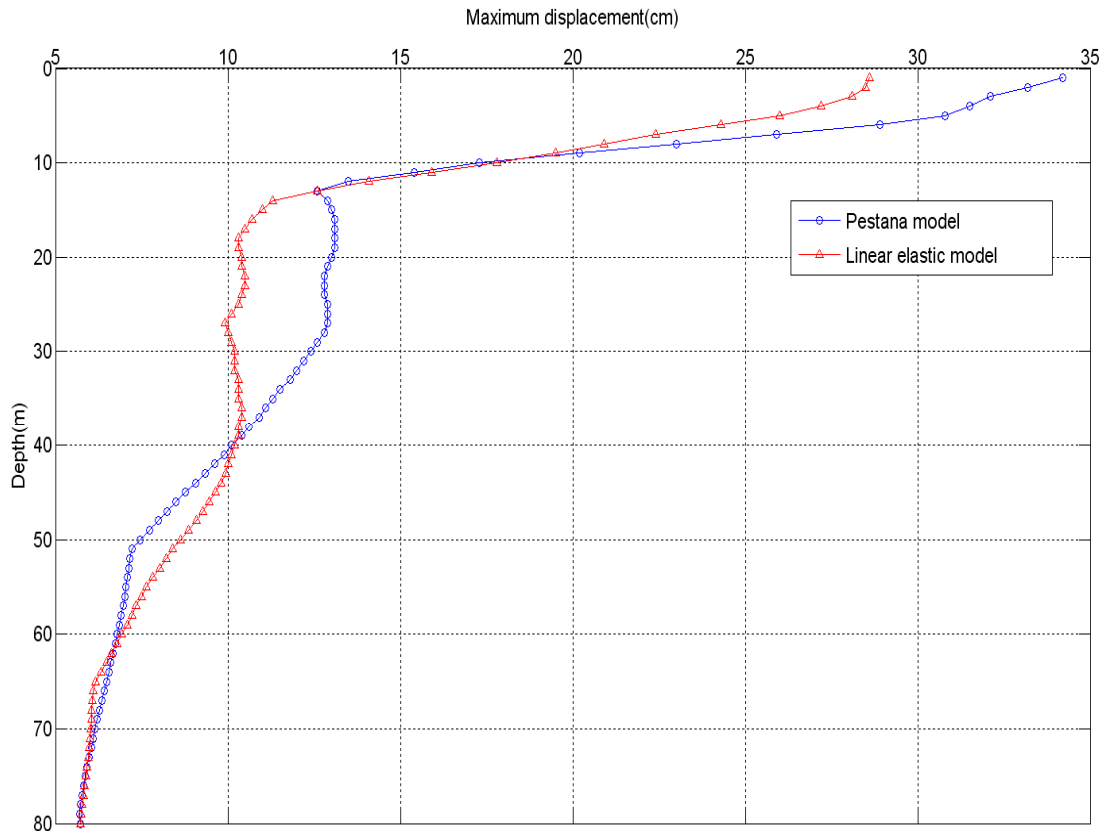
6.6 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic กับชั้นดินที่มีความลึก 80 เมตร



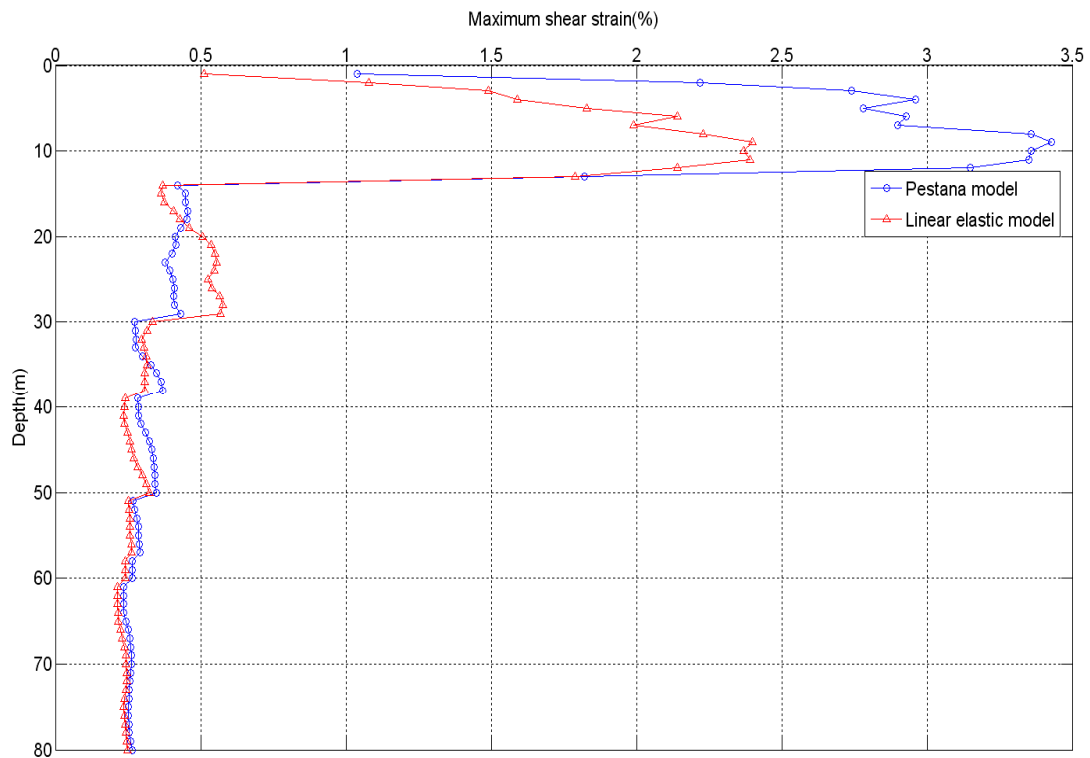
รูปที่ 6.63 การเปรียบเทียบการความเร่งสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดินระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic



รูปที่ 6.64 การเปรียบเทียบการความเร็วสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดิน ระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic

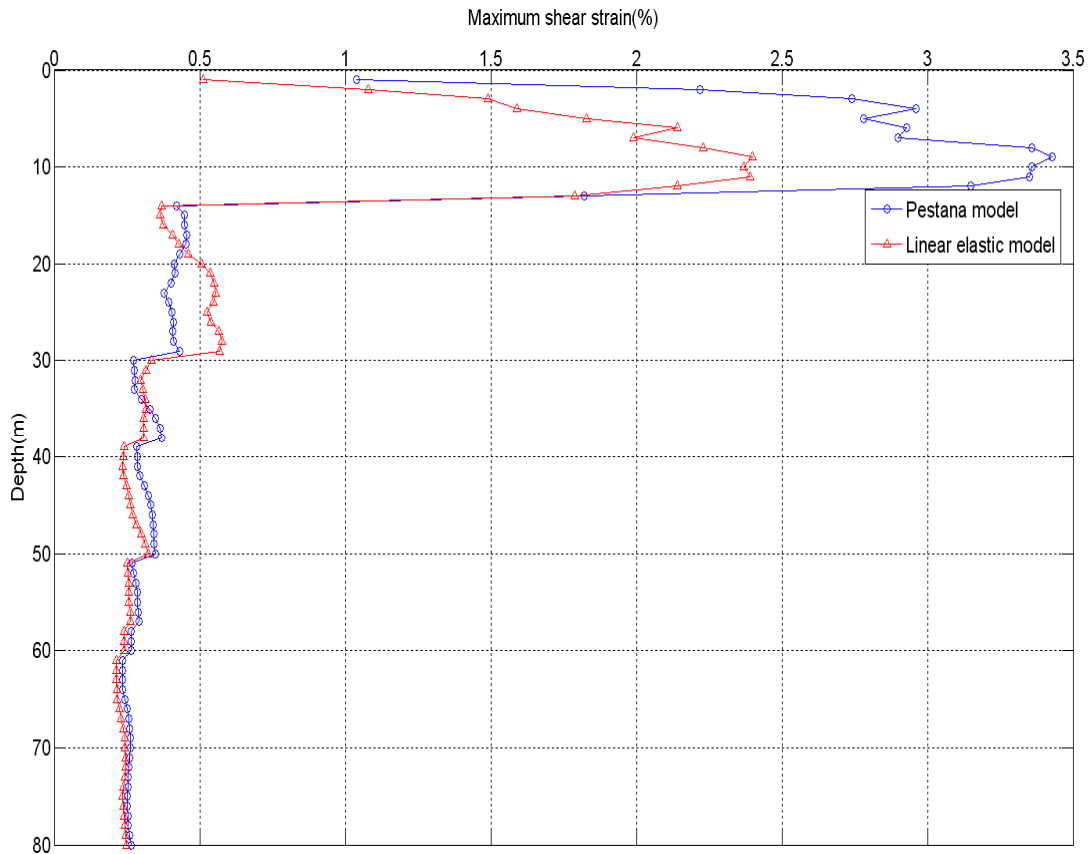


รูปที่ 6.65 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดินระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic

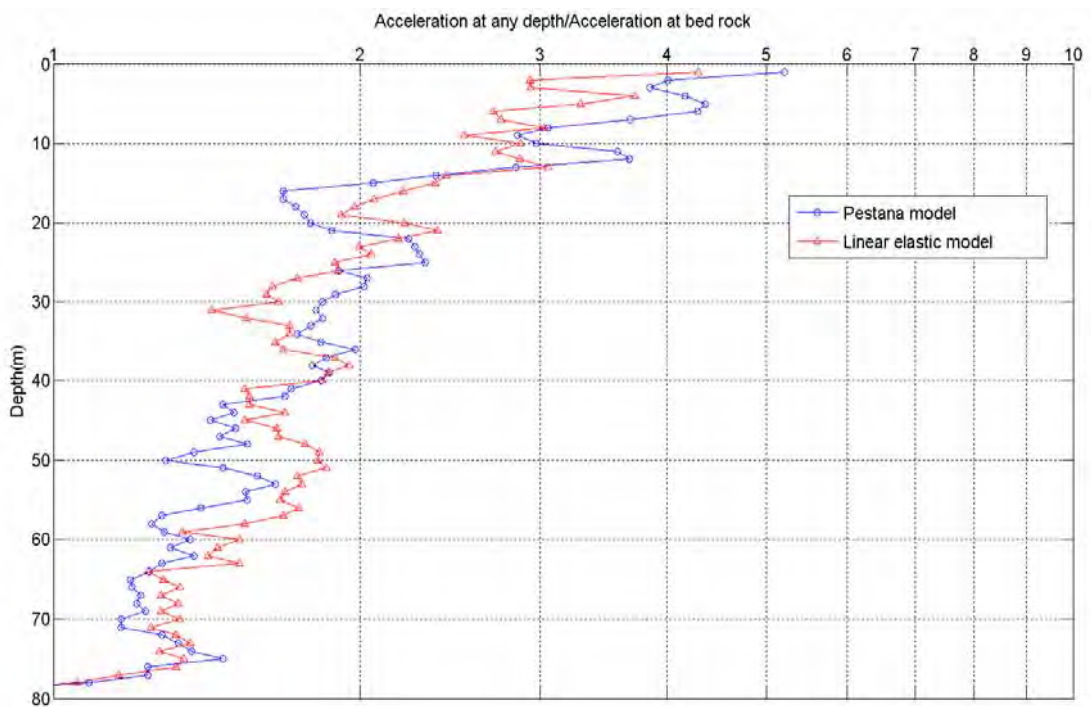


รูปที่ 6.66 การเปรียบเทียบการความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดินระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic

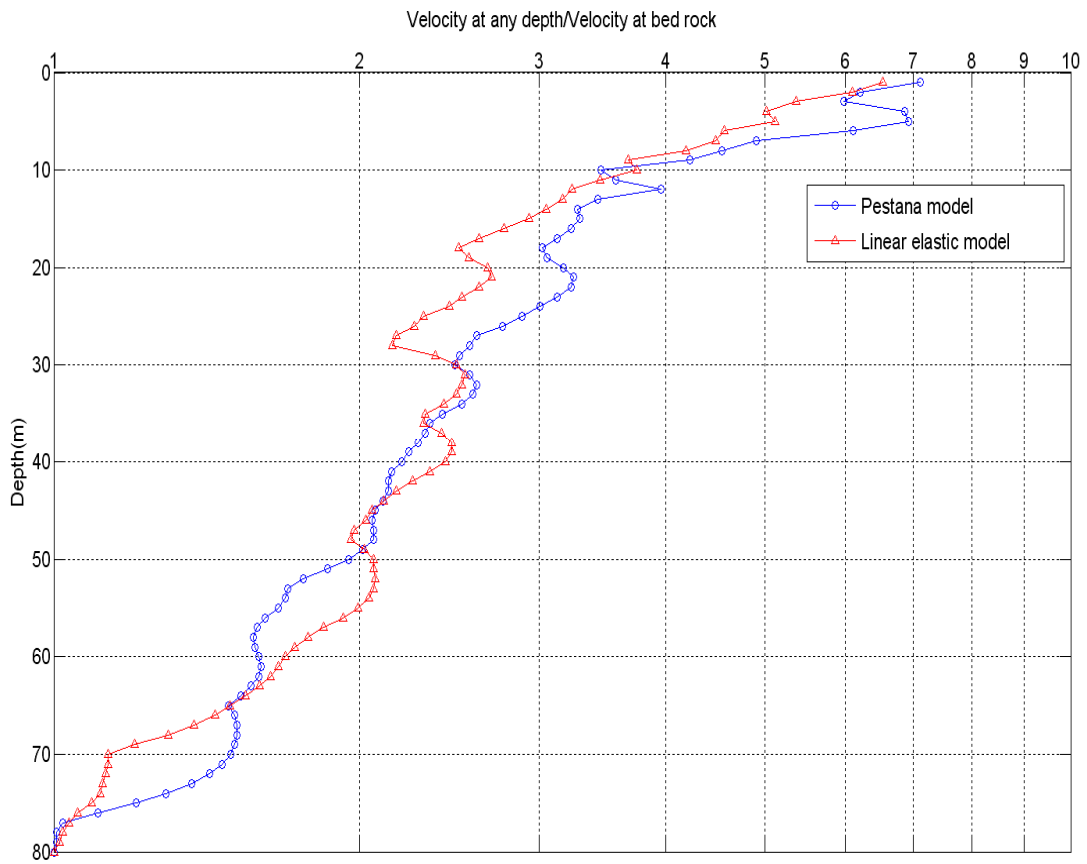




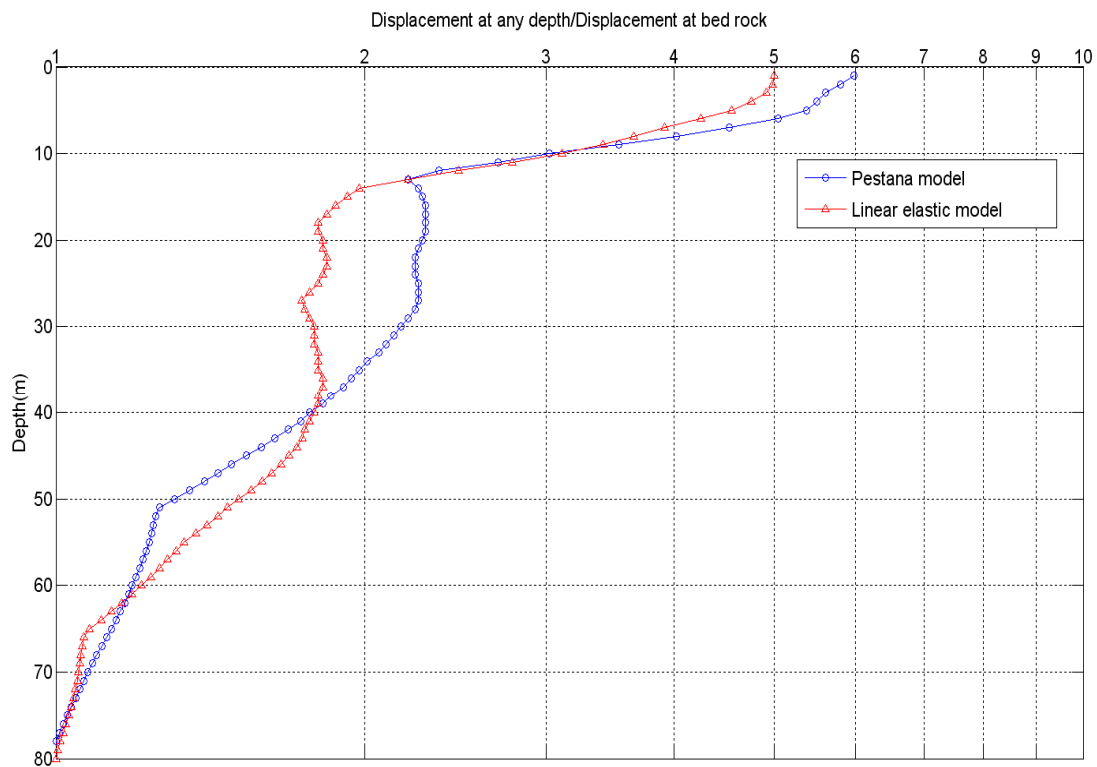
รูปที่ 6.67 การเปรียบเทียบการความเครียดเฉือนสูงสุดที่จุดต่างๆตลอดชั้นดินระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic



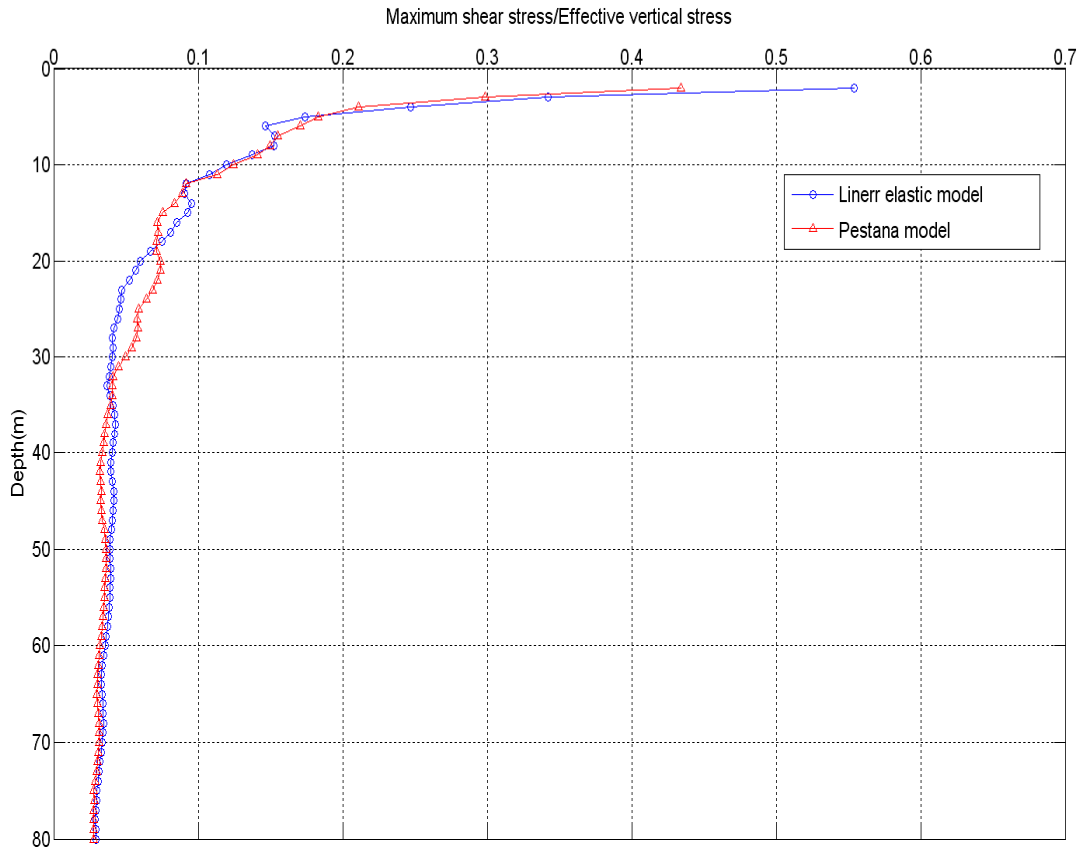
รูปที่ 6.68 การเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร่งสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตรระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic



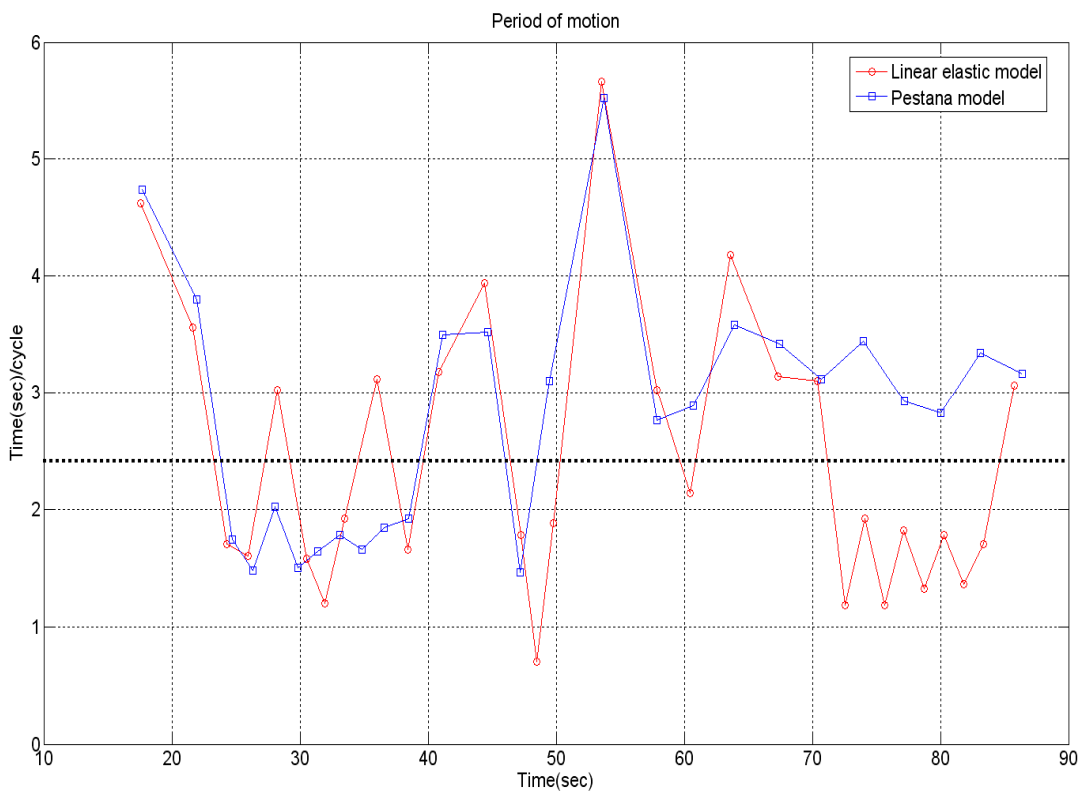
รูปที่ 6.69 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับความเร็วสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตรระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic



รูปที่ 6.70 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆกับการเคลื่อนตัวสูงสุดของชั้นดินที่ความลึก 80 เมตรระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic



รูปที่ 6.71 การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นอัดสูงสุดที่ชั้นดินต่างๆระหว่างแบบจำลองดิน Pestana และ Linear elastic



รูปที่ 6.72 การเปรียบเทียบคาบของการเคลื่อนตัว(Period of motion)

ตารางที่ 6.11 ตารางการเปรียบเทียบผลการทดสอบการตอบสนองของชั้นดินกรุงเทพฯที่ความลึก 80 เมตร ระหว่างแบบจำลองดิน Pestama และ Linear elastic

| การเปรียบเทียบ                            | Pestana model | Linear elastic model |
|-------------------------------------------|---------------|----------------------|
| ความเร่งที่ชั้นผิวดิน/ที่ชั้นหิน          | 5.2เท่า       | 4.3เท่า              |
| ความเร็วที่ชั้นผิวดิน/ที่ชั้นหิน          | 7เท่า         | 6.3เท่า              |
| ความการเคลื่อนตัวที่ชั้นผิวดิน/ที่ชั้นหิน | 6เท่า         | 5เท่า                |
| ค่าความเครียดสูงสุด                       | 3.5%          | 2.3%                 |

## บทที่ 7

### สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์หาการตอบสนองของชั้นดินเนื่องมาจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference) ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์หาการตอบสนองของชั้นดินเนื่องมาจากคลื่นแผ่นดินไหว โดยมีขั้นตอนของการดำเนินการวิเคราะห์ดังนี้

1. สมการคลื่นแผ่นดินไหวเป็นสมการควบคุมระบบทั้งหมดของโปรแกรม โดยสมการแผ่นดินไหวนั้นเป็นสมการที่มีทั้ง สมการที่คิดค่าความหนืดของวัสดุ (Damping material) และสมการที่ไม่มีการคิดค่าความหนืดของวัสดุแต่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้นั้นใช้สมการที่มีความหนืดของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง เพราะในการออกประวัติของโปรแกรมที่ผ่านมานั้น โดยส่วนใหญ่โปรแกรมทั่วไปจะไม่มีการใช้สมการแผ่นดินไหวที่มีค่าความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นในจุดนี้จึงเป็นจุดแตกต่างที่เกิดขึ้นของการทำการวิจัยในครั้งนี้

2. วิธีการวิเคราะห์แบบผลต่างสี่เหลี่ยมแบบ 1 มิติ ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้นั้นจะเลือกความลึกของชั้นดินออกเป็น Node เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนี้มีข้อดีและข้อเสียต่างกัน คือ ในข้อดีนั้นอยู่ที่ปัญหาของคำตอบที่ลู่เข้าโดยที่ถ้าคำตอบของสมการคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำการวิเคราะห์นั้นมีความลู่เข้าคำตอบที่ได้จะใกล้เคียงกับการคิดด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์มาก ส่วนข้อเสียคือ ต้องมีการระวังในเรื่องของการเขียนโปรแกรมในการป้องกันการลู่ออกของปัญหาและที่สำคัญปัญหาที่ลู่ออกนั้นจะสังเกตได้ง่ายคือจะมีค่ามากกว่าเป็นจริงอยู่มาก เช่น การเคลื่อนตัวของชั้นดินที่ได้ผลออกมาในหน่วยกิโลเมตร เป็นต้น ซึ่งการที่จะป้องกันการลู่ออกของคำตอบทำได้โดยการกำหนดค่าของช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Time step) ให้มีค่าน้อยกว่าค่าของระยะห่างระหว่าง Node หรือด้วยค่าความเร็วเฉือน (Shear wave velocity) ในชั้นดิน

3. ลักษณะของภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมตัวภาษาทางคอมพิวเตอร์ในที่นี้ใช้ภาษาที่เขียน 2 ภาษานั้นคือ Compaq visual FORTRAN และ Microsoft visual basic สาเหตุที่ต้องใช้ภาษาที่ใช้ในการทำการเขียนในครั้งนี้ ถึง 2 ภาษาเป็นเพราะว่า ถ้าใช้ภาษา Microsoft visual basic ในการเขียนเพียงภาษาเดียวนั้นจะทำให้ตัวโปรแกรมโดยรวมมีความล่าช้าเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการคำนวณแบบจำลองที่มีความซับซ้อน เช่นแบบจำลอง Presstana ดังนั้นในส่วนของการคำนวณจึงได้มีการเขียนด้วยโปรแกรม Compaq visual Fortran โดยปล่อยให้ในส่วนหน้าจอติดต่อกับผู้ใช้งานนั้น ใช้ภาษา Microsoft visual basic ในการทำงานซึ่งทั้งสองโปรแกรมเชื่อมต่อกันด้วยระบบ DLL (Dynamic Link Library)

4 โปรแกรมที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นเพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเนื่องมาจากคลื่นแผ่นดินไหวนั้น ในที่นี้ใช้โปรแกรม Edushake ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยทำการวิเคราะห์ที่ชั้นดินมีความหนาเท่ากัน, ชั้นหินใช้วัสดุที่เท่ากัน, ชั้นดินใช้วัสดุที่เท่ากัน โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้ควรที่จะเป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่ๆ ตั้งแต่ขนาด 7 ริกเตอร์ขึ้นไปเพื่อใช้ในการสังเกตการเคลื่อนตัวของชั้นดินที่ว่ามีความโน้มไปในลักษณะใด แต่ถ้านำคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดเล็กๆมาทำการเปรียบเทียบวิเคราะห์นั้นจะไม่เห็นผลต่างของการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นระหว่างโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมา กับโปรแกรม Edushake ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่สำคัญในการทำการวิเคราะห์

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการเขียนโปรแกรมขึ้นมาวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินกับ โปรแกรม Edushake มีผลการวิเคราะห์ดังนี้

**คลื่นแผ่นดินไหว Taft** มีขนาดของค่าความเร่งที่ส่งออกมาได้เท่ากับ  $250 \text{ cm/sec}^2$  โดยคิดจากโปรแกรม Edushake ส่วนในโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ในคลื่นแผ่นดินไหวนี้ได้ออกค่าความเร่งที่ออกมาจากชั้นดินเท่ากับ  $320 \text{ cm/sec}^2$  โดยในคลื่นแผ่นดินไหว Taft นี้มีค่าของความเร็วสูงสุดที่วัดได้ที่ผิวดินด้วยโปรแกรม Edushake มีค่าเท่ากับ  $17 \text{ cm/sec}$  โดยที่โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมานั้นวัดความเร็วสูงสุดของคลื่นได้เท่ากับ  $20 \text{ cm/sec}$  และในส่วนของการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินนั้นโปรแกรม Edushake สามารถวัดการเคลื่อนตัวสูงสุดได้เท่ากับ  $6.5 \text{ cm}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์

**คลื่นแผ่นดินไหว Treas** โดยมีขนาดของค่าความเร่งที่ส่งออกมาได้เท่ากับ  $150 \text{ cm/sec}^2$  โดยคิดจากโปรแกรม Edushake ส่วนในโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ในคลื่นแผ่นดินไหวนี้ได้ออกค่าความเร่งที่ออกมาจากชั้นดินเท่ากับ  $200 \text{ cm/sec}^2$  โดยในคลื่นแผ่นดินไหว Treas นี้มีค่าของความเร็วสูงสุดที่วัดได้ที่ผิวดินด้วยโปรแกรม Edushake มีค่าเท่ากับ  $35 \text{ cm/sec}$  โดยที่โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมานั้นวัดความเร็วสูงสุดของคลื่นได้เท่ากับ  $36.5 \text{ cm/sec}$  และในส่วนของการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินนั้นโปรแกรม Edushake สามารถวัดการเคลื่อนตัวสูงสุดได้เท่ากับ  $12 \text{ cm}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์

**คลื่นแผ่นดินไหว Yerba** โดยมีขนาดของค่าความเร่งที่ส่งออกมาได้เท่ากับ  $70 \text{ cm/sec}^2$  โดยคิดจากโปรแกรม Edushake ส่วนในโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ในคลื่นแผ่นดินไหวนี้ได้ออกค่าความเร่งที่ออกมาจากชั้นดินเท่ากับ  $110 \text{ cm/sec}^2$  โดยในคลื่นแผ่นดินไหว Yerba นี้มีค่าของความเร็วสูงสุดที่วัดได้ที่ผิวดินด้วยโปรแกรม Edushake มีค่าเท่ากับ  $15 \text{ cm/sec}$  โดยที่โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นมานั้นวัดความเร็วสูงสุดของคลื่นได้เท่ากับ  $16 \text{ cm/sec}$  และในส่วนของการ

เคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดินนั้นโปรแกรม Edushake สามารถวัดการเคลื่อนตัวสูงสุดได้เท่ากับ 3.8 cm ซึ่งมีค่าเท่ากับโปรแกรมที่ได้ทำการเขียนขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวนั้นใช้แบบจำลองดิน Linear elastic model ในการทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นจะเป็นได้ว่าค่าของความเร่งที่ได้มีค่าต่างกันอยู่และค่าความเร็วนั้นเป็นค่าที่มีผลลัพธ์ต่างกันไม่มาก และในส่วนของค่าการเคลื่อนตัวของชั้นดินนั้นในการวิเคราะห์ทั้ง 2 โปรแกรมนั้นจะให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก สาเหตุที่เกิดขึ้นในกรณีนี้เนื่องจากในโปรแกรม Edushake นั้นใช้วิธี Trenfer function ในการวิเคราะห์หาค่าคำตอบซึ่งเป็นวิธีทาง Mathematic calculation ส่วนในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้นนั้นใช้วิธี ผลต่างสี่บเนื่องในการวิเคราะห์ซึ่งเป็นวิธี Numerical calculation ซึ่งได้ผลลัพธ์ซึ่งเป็นค่าการเคลื่อนตัวออกมาก่อน หลังจากนั้นจึงทำการหาค่าความเร่งและต่อด้วยค่าความเร็วตามลำดับ ซึ่งตรงจุดนี้อาจจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการคำนวณได้ ซึ่งสังเกตได้ถึงการกระจายตัวของกราฟเพื่อทำการเปรียบเทียบกันในแกน x และแกน y แบบ 1:1 จากการทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรม Edushake และโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น ผลการตอบสนองของชั้นดิน ได้ค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์( $R^2$ ) เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 98.75% ซึ่งถือว่าอยู่ในขอบเขตที่น่าเชื่อถือ โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าความเร่ง, ความเร็ว, และค่าการเคลื่อนตัว จากคลื่นแผ่นดินไหวที่ชั้นผิวดิน

5 แบบจำลองดินที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 6 แบบจำลองการคำนวณ ซึ่งแบ่งออกได้ 2 ชนิดตามลักษณะของหน่วยแรง นั่นคือ แบบแรกเป็นแบบจำลองที่คิดในหน่วยแรงรวม ซึ่งได้แก่แบบจำลอง Linear elastic model, Visco elastic model, Hyperbolic model, Ivan and Mroz model , User define soil model , ส่วนแบบจำลองที่มีการคิดหน่วยแรงในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิผลนั้นได้แก่แบบจำลอง Prestana model ซึ่งเมื่อใช้แบบจำลองนี้ในการคำนวณนั้นจะสามารถที่คิดแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวได้ในกรณีที่ชั้นดินมีระดับชั้นน้ำใต้ดิน

ในการค้นหา Parameter ของแบบจำลองดิน Pestana นั้นได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ DSS (Direct simple shear test) โดยได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์( $R^2$ ) อยู่ที่ค่าเฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 85.73% โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าความเค้นเฉือน (Stress), ความเครียดเฉือน (Strain), ความดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore pressure) และเส้นทางเดินของหน่วยแรง (Stress path)

6 ผลการเปรียบเทียบของแบบจำลองดิน Pestana กับ Linear elastic กับคุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพฯ ที่ความลึก 80 เมตรนั้นมีความแตกต่างกันดังนี้ ค่าความเร่งของแผ่นดินไหวที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองดิน Pestana จะมีค่าเท่ากับ 5.3 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความลึกที่

ชั้นหิน ในขณะที่แบบจำลองดิน Linear elastic จะค่าเท่ากับ 4.3 เท่า ค่าความเร็วของแผ่นดินไหวที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองดิน Pestana จะมีค่าเท่ากับ 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความลึกที่ชั้นหิน ในขณะที่แบบจำลองดิน Linear elastic จะค่าเท่ากับ 5 เท่า ค่าการเคลื่อนตัวของแผ่นดินไหวที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองดิน Pestana จะมีค่าเท่ากับ 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความลึกที่ชั้นหิน ในขณะที่แบบจำลองดิน Linear elastic จะค่าเท่ากับ 5 เท่า ค่าความเครียดเฉือนสูงสุดของแบบจำลองดิน Pestana มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.4% ส่วนในแบบจำลองดิน Linear elastic มีค่าเท่ากับ 2.4% สาเหตุที่แบบจำลองดิน Pestana มีค่าผลลัพธ์ในส่วนต่างๆที่มากกว่าเนื่องจากแบบจำลองดิน Pestana นั้นได้คิดไปถึงค่าความเครียดเฉือนในสภาวะพลาสติก(Plastic strain) ที่เกิดสะสมขึ้นในขณะที่แบบจำลองดิน Linear elastic คิดสภาวะของความเครียดเฉือนแค่ในสภาวะอีลาสติก (Elastic strain) เท่านั้น และคาบของการเคลื่อนตัว (Period of motion) เฉลี่ยของแบบจำลองดิน Pestana มีค่าเท่ากับ 2.4 วินาทีต่อรอบ ส่วนแบบจำลองดิน Linear elastic มีคาบของการเคลื่อนตัวเฉลี่ยเท่ากับ 2.7 วินาทีต่อรอบ



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กิตติ ภัคดีวัฒนะกุล,จำลอง ครูอุตุสหะ.Visual basic ฉบับโปรแกรมเมอร์.กรุงเทพฯ:เคทีพี,2549

ฉันทวุฒิ พีชผล, พิชิต สันติกุลานนท์ .คู่มือเรียน Visual basic .กรุงเทพฯ: โปรวิชั่น, 2542.

โชติพันธุ์ หล่อเลิศสุนทร,ฐิตะพันธุ์ หล่อเลิศสุนทร .สอนเขียน Visual basic ให้เป็น Project.  
กรุงเทพฯ:เอสอีแอนด์พี,2548

นิรุจ ก้อนคง. พฤติกรรมเขื่อนไม่ระบายน้ำแบบวัฏจักรของดินเหนียวกรุงเทพฯโดยเครื่องมือทดสอบแรงเขื่อนอย่างง่าย.วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2551.

มนัส สังวรศิลป์,วรรัตน์ ภัทรอมรกุล.คู่มือการใช้งาน Matlab ฉบับสมบูรณ์ .กรุงเทพฯ.

อินโฟเวิร์เพรส,2543

สุพจน์ เตชวรสินสกุล. พฤติกรรมของดินทางพลศาสตร์. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:

ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

### ภาษาอังกฤษ

Bardet,J.P. ,Tobita,T. NERA a Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of layer Soil Deposits. University of Southern California  
Los Angeles, 2001

Juan M. Pestana, Biscontin G .A Simplified Model Describing the Cyclic Behavior of Lightly Overconsolidated Clays in Simple Shear . University of California,  
Berkeley

Kramer, S.L. Geotechnical Earthquake Engineering .Upper Saddle River,New Jersey  
: Prentice Hall,2000

Stephen J Chapman. Fortran90/95 for Scientists Engineers.Singapore:McGraw-Hill,2004

ภาคผนวก

## รายละเอียดการใช้งานของโปรแกรม

1.รายละเอียดของการใช้ โปรแกรม Earthquake 1.0 ในการใช้โปรแกรมEarthquake 1.0 นั้นควรมีเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติดังนี้คือ

1.1 ใช้ระบบปฏิบัติการ Window xp ขึ้นไป

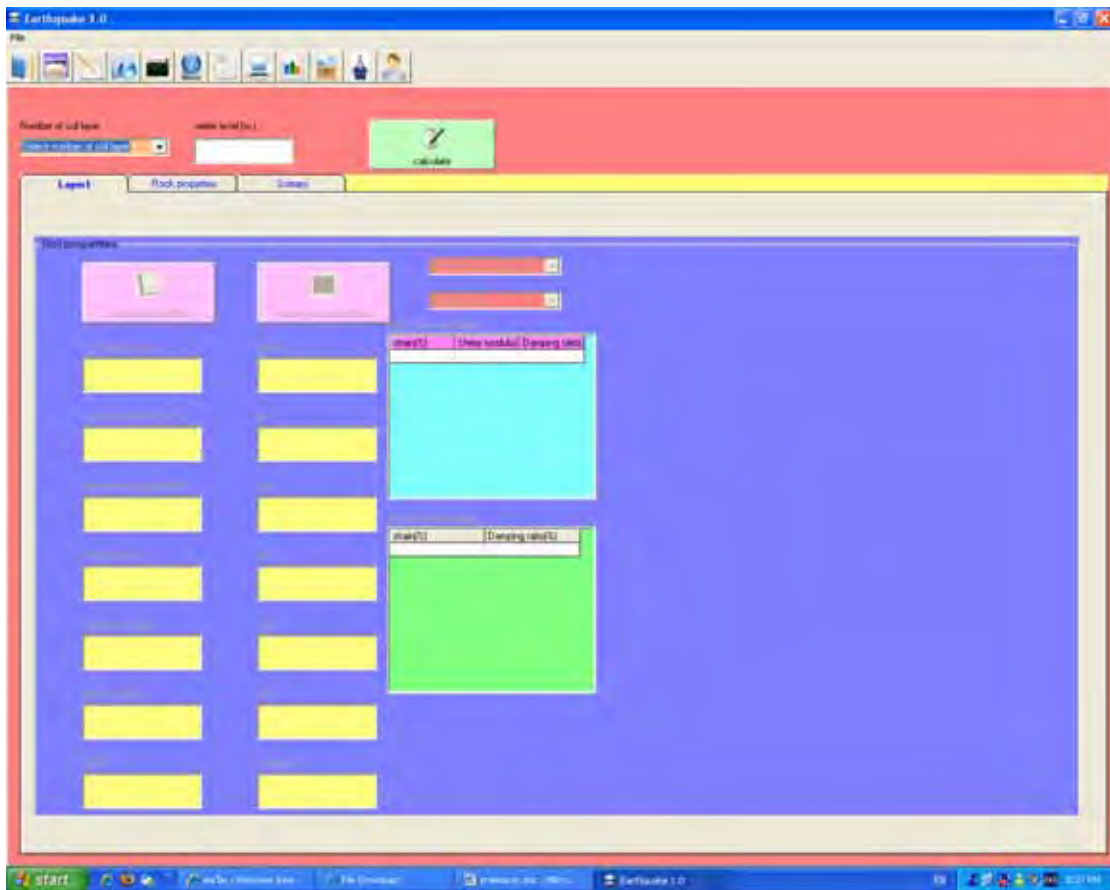
1.2 หน่วยความจำในเครื่องรวมความจำของระบบปฏิบัติการในขณะที่ใช้ไม่ต่ำกว่า 512 MB

1.3 พื้นที่สำหรับลงโปรแกรมประมาณ 15 MB

1.4แนะนำให้ใช้หน่วยประมวลผลกลางที่มีความถี่ 3 GHz<sub>2</sub> ขึ้นไปเพื่อความรวดเร็วในการคำนวณชั้นดินหลายชั้นและใช้กับแบบจำลองดินที่ซับซ้อน เช่น Presstana

2 ลักษณะทั่วไปของโปรแกรม ลักษณะทั่วไปของโปรแกรมและวิธีใช้มีดังนี้

2.1 หน้าจอที่ใช้ในการติดต่อกับผู้ใช้ในโปรแกรม Earthquake 1.0 มีดังรูปที่ ก.1 โดยใช้ในการเขียนด้วยภาษา Microsoft visual basic ทำการติดต่อกับผู้ใช้















รูปที่ ก.1 หน้าจอการคำนวณของโปรแกรม Earthquake 1.0

## 2.2เมนูบาร์ที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมมีดังนี้

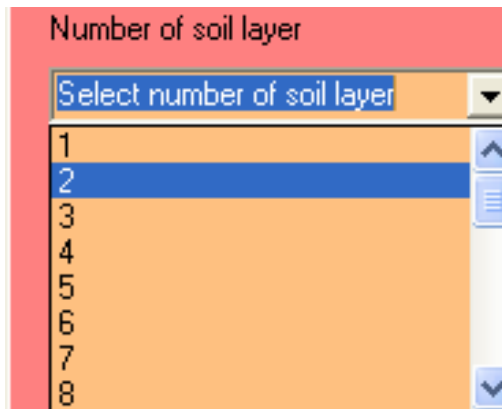


รูปที่ ก.2 เมนูบาร์

เมนูบาร์ทั้งหมดมีหน้าที่ดังต่อไปนี้คือ

1.  ทำหน้าที่สร้างโปรเจกใหม่ซึ่งเหมือนกับปุ่ม new ในโปรแกรมทั่วไป
2.  ทำหน้าที่ในการ Load project ขึ้นมาเพื่อทำการคำนวณ
3.  ทำหน้าที่ในการ Save project ที่ได้ทำการคำนวณ
4.  ทำหน้าที่ Load ข้อมูลชั้นดิน
5.  ทำหน้าที่ Load ข้อมูลความเร่งจากคลื่นแผ่นดินไหว
6.  ทำหน้าที่ Load ข้อมูลชั้นหิน
7.  ทำหน้าที่ในการคำนวณ
8.  ทำหน้าที่ในการสั่งพิมพ์กราฟที่เลือก
9.  ทำหน้าที่ในการแสดงผลกราฟที่ได้จากการคำนวณโดยกดครั้งแรกกราฟจะทำการเลื่อนและกดอีกครั้งเพื่อทำการหยุด
10.  ทำหน้าที่ save ข้อมูลจากตารางที่กำลังแสดงผล
11.  ทำหน้าที่ในการแนะนำวิธีการใช้โปรแกรม
12.  ทำหน้าที่แสดงอีเมลล์ของผู้จัดทำ

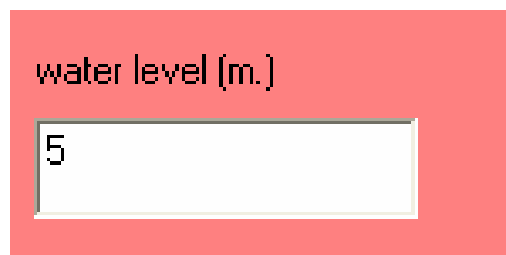
### 2.3 ทำการเลือกจำนวนชั้นดิน



รูป ก.3 การเลือกจำนวนชั้นดิน

ในขั้นแรกของการคำนวณต้องทำการเลือกจำนวนชั้นดินขึ้นมาเพื่อใช้ในการคำนวณโดยการคลิกเลือกที่ Combo box ที่ชื่อ Number of soil layer

### 2.4 ทำการเลือกระดับชั้นน้ำใต้ดิน



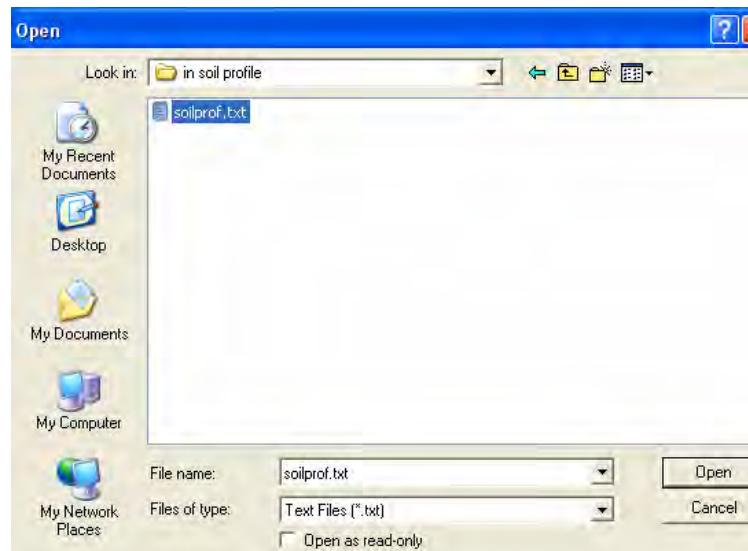
รูป ก.4 การเลือกระดับชั้นน้ำใต้ดิน

ในการเลือกระดับชั้นน้ำใต้ดินนั้นเลือกที่ Text box ที่ชื่อ Water level หลังจากนั้นใส่ระดับความสูงของน้ำใต้ดินที่ต้องการว่าระดับน้ำใต้ดินสูงอยู่ที่เมตรจากชั้นหินแข็ง (Bed rock)

2.5 เมื่อทำการใส่ระดับน้ำและจำนวนชั้นดินเรียบร้อยแล้วต่อไปทำการเลือกคุณสมบัติของชั้นดินโดยการกดที่ปุ่ม Load soil profile หรืออาจจะทำการใส่คุณสมบัติของชั้นดินเองก็ได้ในช่อง Text box ของแต่ละคุณสมบัติของชั้นดิน



รูปที่ ก.5 ปุ่มที่ใช้ในการ Load ข้อมูลชั้นดิน



รูปที่ ก.6 Common dialog box ทำการเลือกข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดิน โดยในที่นี้ทำการเลือก File ที่ชื่อ Soilprof.txt ดังรูปที่ ก.6 หลังจากนั้นข้อมูลของชั้นดินก็จะเข้ามาอยู่ในโปรแกรมซึ่งจะตรงกับคุณสมบัติแต่ละตัวดังรูปที่ ก.7

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| Thickness(m)                    | 10    |
| Unit weight(kN/m <sup>3</sup> ) | 19.5  |
| Shear modulus(MPa)              | 350   |
| Shearwave                       | 419.5 |
| Damping ratio                   | 10    |
| Plastic index                   | 15    |
| OCR                             | 1     |

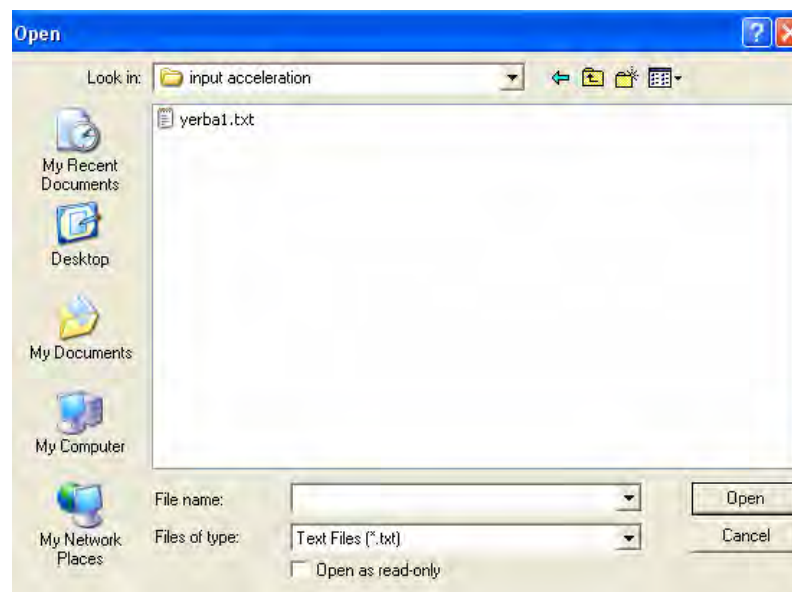
รูปที่ ก.7 ข้อมูลชั้นดินที่ทำการ Load เข้ามาเพื่อทำการคำนวณ

2.6 เลือก Input ground acceleration ของคลื่นแผ่นดินไหวที่ต้องการทำโดยการกดที่ปุ่ม  
Input ground motion



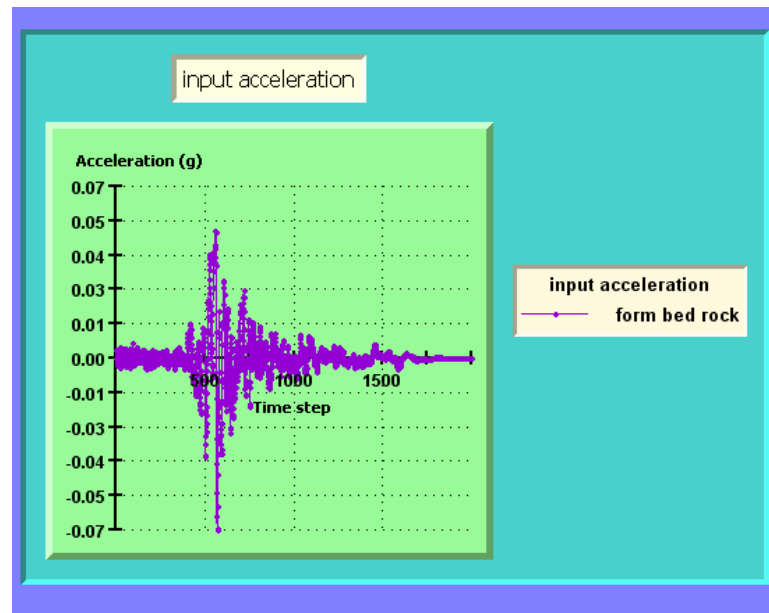
รูปที่ ก.8 ปุ่มเลือก Input ground motion

เมื่อทำการกดที่ปุ่ม Input ground motion แล้วจะปรากฏ Common dialog box ขึ้นมา  
เพื่อทำการเลือก File ที่ต้องการโดยในที่นี้เลือก Yerba1.txt



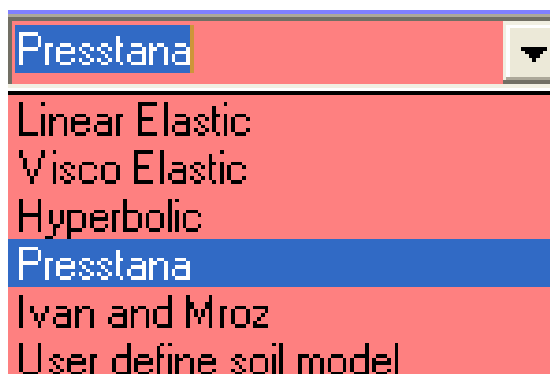
รูปที่ ก.8 Common dialog box แสดง Input ground motion file

หลังจากที่ทำการเลือก Input ground motion file แล้วโปรแกรมจะแสดงลักษณะของ  
แผ่นดินไหวที่ทำการเลือกดังรูปที่ ก.9



รูปที่ ก.9 กราฟแสดง Input ground motion

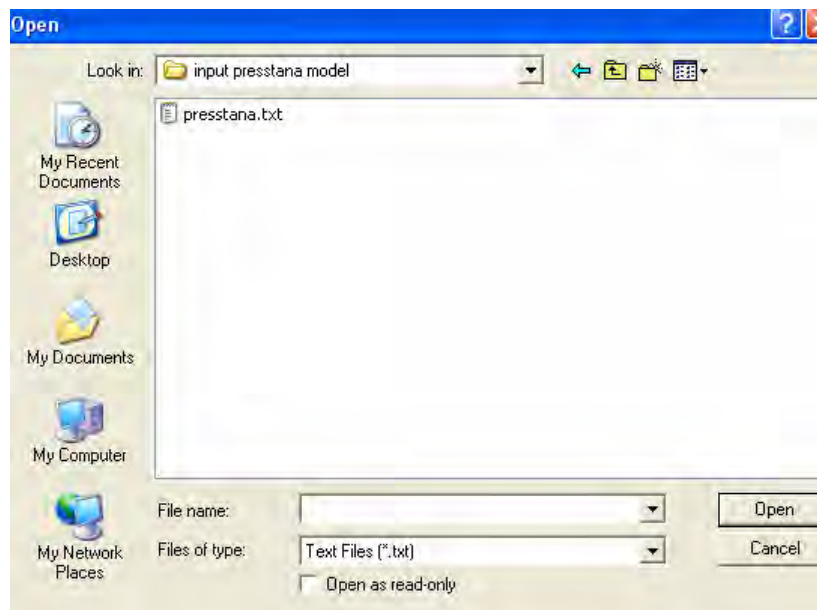
2.7 เลือกแบบจำลองดินที่ต้องการ โดยการคลิกเลือกที่ Combo box ที่ชื่อ Select model to calculate โดยที่ในโปรแกรมมีทั้งหมด 6 แบบจำลอง



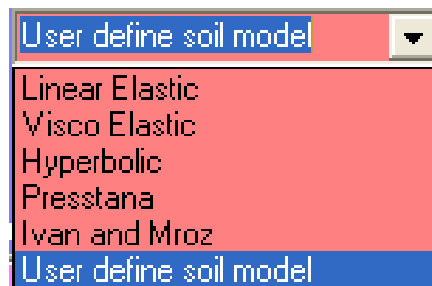
รูปที่ ก.10 Combo box แสดงแบบจำลองที่ทำการเลือก

เมื่อทำการเลือกที่แบบจำลอง เช่น Pestana แล้วจะปรากฏ Common dialog box แสดง  
 แกมาเพื่อหา file ข้อมูลของแบบจำลองดิน Pestana หลังจากนั้นทำการเลือก Presstana.txt





รูปที่ ก.11 Common dialog box แสดง File ข้อมูลของแบบจำลองดิน Presstana หรือถ้าทำการเลือกแบบจำลองดิน Users define soil model ดังรูปที่ ก.12 ก็จะมี Common dialog box ขึ้นมาแล้วทำการเลือก file ที่อยู่ใน folder User define soil model



รูปที่ ก.12 Common dialog box แสดงแบบจำลองดิน

| Input strain and daipng |               |               |
|-------------------------|---------------|---------------|
| strain(%)               | Shear modulus | Damping ratio |
| 0.00001                 | 1             | 0.2           |
| 0.00003                 | 1             | 0.4           |
| 0.0001                  | 0.99          | 0.1           |
| 0.0003                  | 0.96          | 1.0           |
| 0.001                   | 0.85          | 2.0           |
| 0.003                   | 0.64          | 5.0           |
| 0.01                    | 0.37          | 9.0           |
| 0.03                    | 0.18          | 15.0          |
| 1                       | 0.08          | 20.0          |
| 3                       | 0.05          | 25.0          |

รูปที่ ก.13 แบบจำลองดิน User define soil model

เมื่อทำการเลือก File ที่เป็นแบบจำลองดิน User define soil model แล้วจําปรากฎข้อมูลของ User define soil model ซึ่งมี 3 ชุดข้อมูลคือ Strain, Shear modulus และ Damping ratio

2.8 เลือกชนิดของ Damping ratio การเลือกชนิดของ Damping ratio นั้นมี 2 แบบคือ Linear และ Non linear damping ratio โดยถ้าทำการเลือก Linear damping ratio โปรแกรมจะ

ทำการเลือกใช้ Damping ratio ที่มากับข้อมูลของชั้นดินนั้นๆ แต่ถ้าทำการเลือก Non linear damping ratio โปรแกรมจะทำการเลือกข้อมูลจาก File ที่กำหนดชนิดของ Damping ซึ่งอยู่ใน Folder input damping



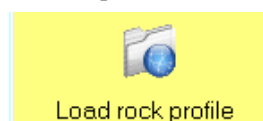
รูปที่ ก.14 Combo box ทำการเลือกชนิดของ Damping ratio

Input nonlinear daping

| strain(%) | Damping ratio(%) |
|-----------|------------------|
| 0.00001   | 1                |
| 0.00003   | 1                |
| 0.0001    | 0.99             |
| 0.0003    | 0.96             |
| 0.001     | 0.85             |
| 0.003     | 0.64             |
| 0.01      | 0.37             |
| 0.03      | 0.18             |
| 1         | 0.08             |
| 3         | 0.05             |

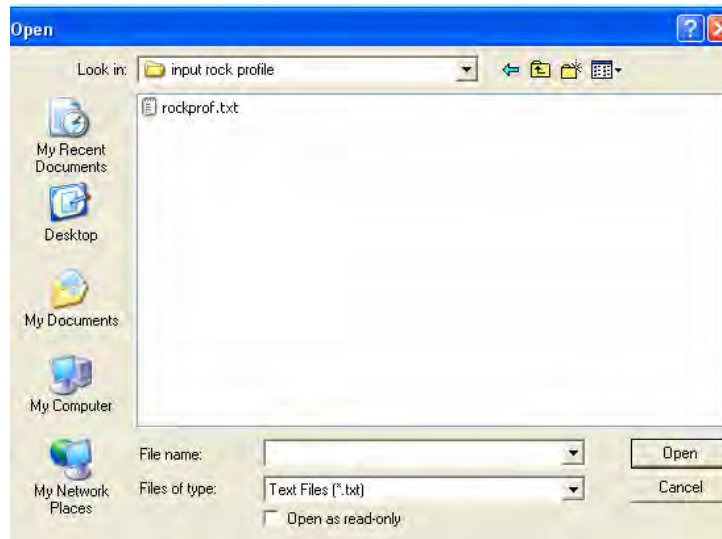
รูปที่ ก.15 แสดงข้อมูลของ Non linear damping ratio

2.9 การใส่ข้อมูลของชั้นหิน นั้นจะเหมือนกับการใส่ข้อมูลของชั้นดินทุกประการแต่แตกต่างกันตรงที่ ทำการเลือกกดที่ปุ่ม Load rock profile ดังรูปที่ ก.16



รูปที่ ก.16 แสดงปุ่มกดเลือกข้อมูลชั้นหิน

และเมื่อทำการกดที่ปุ่ม Input rock profile จะปรากฏ Common dialog box ขึ้นมาเพื่อทำการเลือก file ข้อมูลของชั้นหิน ในที่นี้เลือก rockprof.txt ดังรูปที่ ก.17

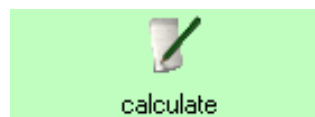


รูปที่ ก.17 แสดง Common dialog box ทำการเลือก File ข้อมูลของชั้นหิน และเมื่อทำการเลือกที่ข้อมูลของชั้นดินแล้วก็จะปรากฏกราฟแสดงข้อมูลของชั้นดินต่างๆ ดังรูปที่ ก.18



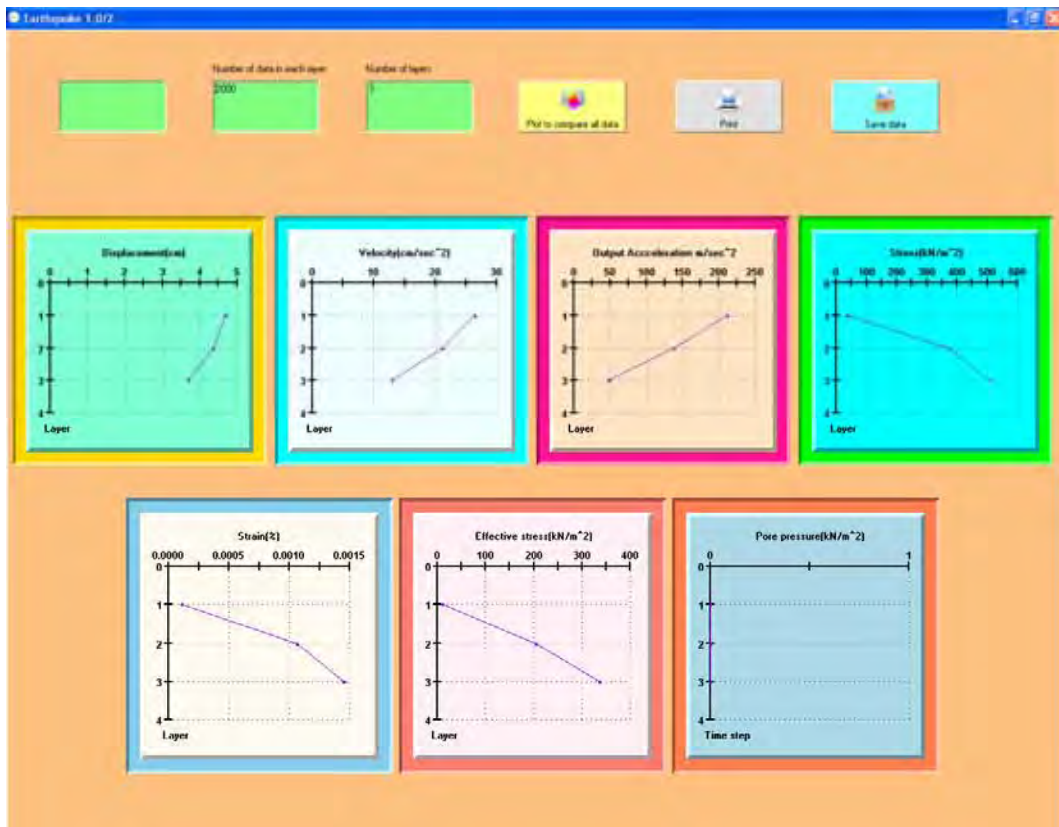
รูปที่ ก.18 กราฟแสดงข้อมูลของชั้นดินต่างๆ

2.10 การคำนวณทำได้โดยการกดที่ปุ่ม Calculate ดังรูปที่ ก.19



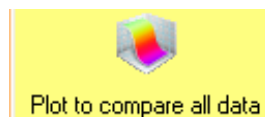
รูปที่ ก.19 ปุ่มแสดงการคำนวณ

เมื่อทำการคำนวณแล้วโปรแกรมจะแสดงรายละเอียดทั้งหมดของผลลัพธ์การคำนวณ ออกมาโดยมีดังนี้คือ Displacement, Velocity, Acceleration, Stress, Strain, Effective stress และ Pore pressure



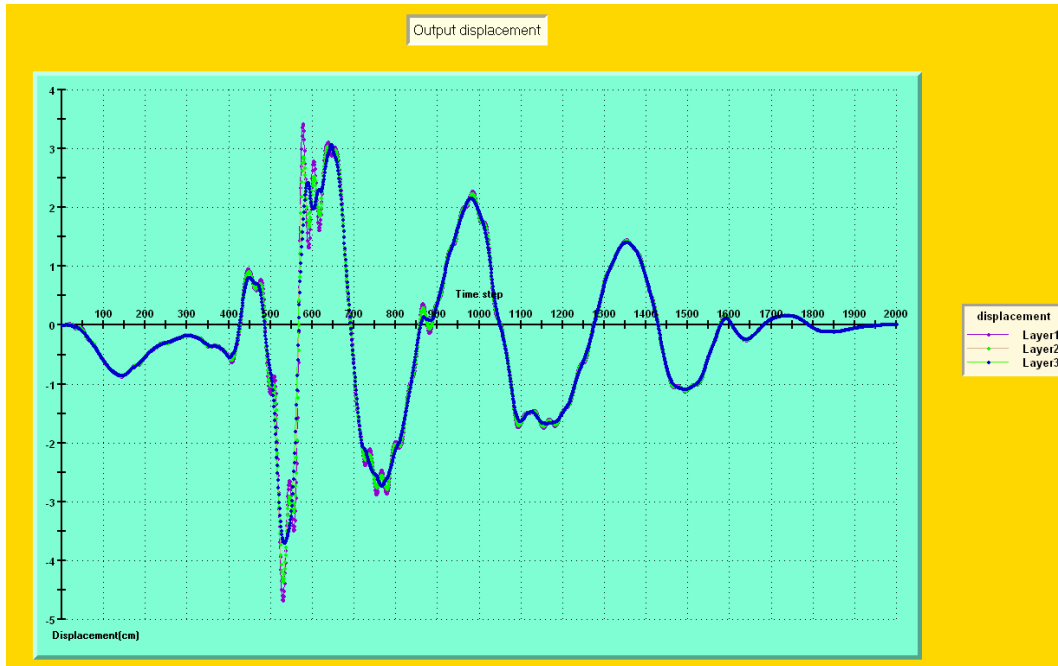
รูปที่ ก.20 ผลลัพธ์จากการคำนวณ

จากการคำนวณถ้าทำการกดที่ปุ่ม Plot to compare all data ดังรูปที่ ก.21 นั้นโปรแกรม จะทำการพล็อตกราฟที่ได้จากการคำนวณโดยทำการพล็อตที่รอยต่อของแต่ละชั้นดิน



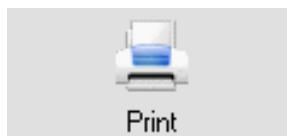
รูปที่ ก.21 ปุ่มกดเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละชั้นดิน

เมื่อทำการกดที่ปุ่ม Plot to compare all data แล้วจะได้รูปแบบของกราฟตามในรูปที่ ก. 22 โดยเป็นการเปรียบเทียบที่บริเวณรอยต่อของแต่ละชั้นดิน



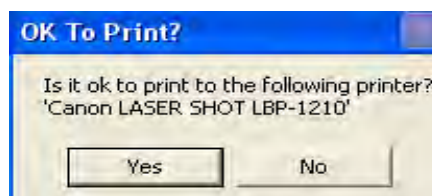
รูปที่ ก.22 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของชั้นดิน

2.11 การทำการแสดงผลข้อมูลทางการพิมพ์ เมื่อต้องการที่จะพิมพ์กราฟที่ได้นั้นทำได้2วิธี คือ 1) กดที่ปุ่ม Print เพื่อพิมพ์กราฟที่กำลังปรากฏ ดังรูป ก.23 2) คลิกเลือกที่ตัวกราฟกราฟจะหยุดเมื่อกดครั้งแรกและเลื่อนไปยังกราฟต่อไปเมื่อกดที่กราฟอีกครั้ง แล้วกดปุ่มพิมพ์



รูป ก.23 ปุ่มทำการแสดงผลโดยการพิมพ์

หลังจากทำการพิมพ์กราฟที่กำลังปรากฏอยู่นั้นจะมี Message box กำหนดขึ้นมาถามถึงการยืนยันที่จะทำการพิมพ์ ดังรูปที่ ก.24



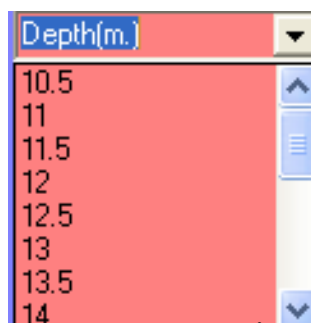
รูปที่ ก.24 Message box ยืนยันที่จะทำการพิมพ์

2.12 การทำการบันทึกข้อมูล การทำการบันทึกข้อมูลจะคล้ายกับการพิมพ์คือจะทำได้เฉพาะกราฟที่กำลังปรากฏ แต่ถ้ามีกราฟปรากฏมากกว่า 1 กราฟต้องทำการเลือกกราฟที่กำลังจะทำการพิมพ์หรือบันทึกข้อมูลก่อนโดยในที่นี่ทำการบันทึกโดยการกดที่ปุ่ม Save data



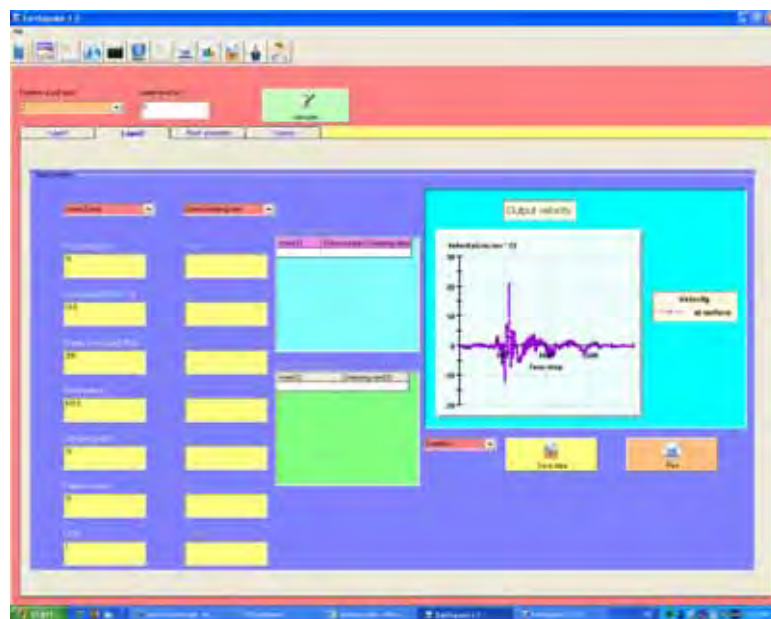
รูปที่ ก.25 ปุ่มที่ใช้ในการทำการบันทึกข้อมูล

จากหน้าจอแสดงผลถ้าต้องการดูข้อมูลที่ระดับความลึกของชั้นดินในระดับ ต่างๆนั้นทำได้โดยการเลือกที่ Combo box ที่ชื่อ Depth ในหน้าจอหลักของโปรแกรม จากนั้นเลือกความลึกที่ต้องการ ดังรูปที่ ก.26



รูปที่ ก.26 Combo box แสดงการเลือกความลึกของชั้นดินที่ต้องการแสดงผล

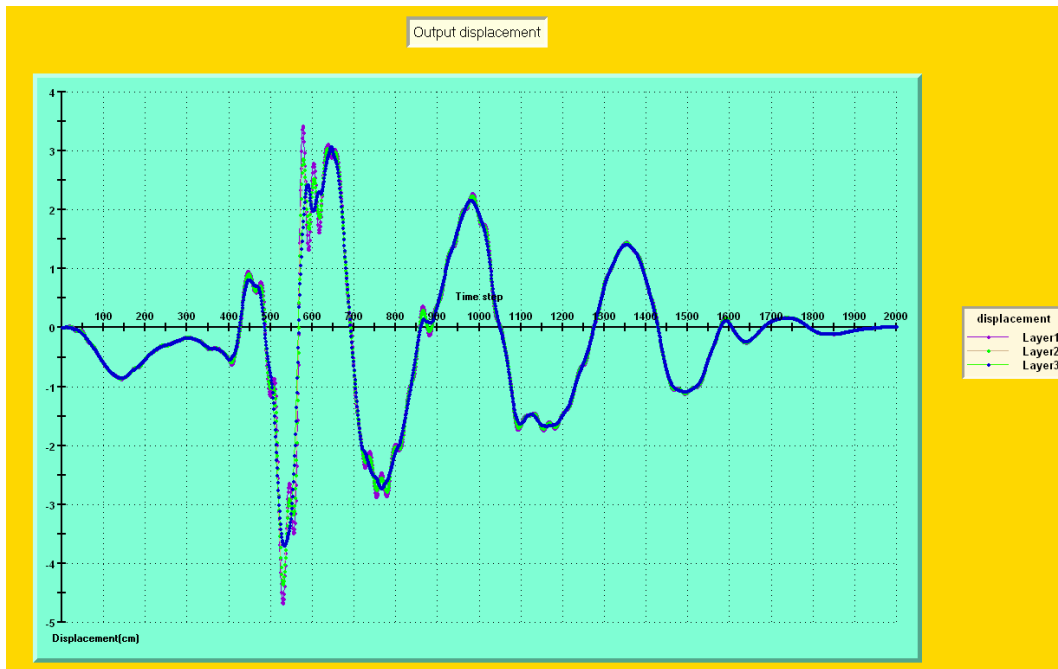
เมื่อต้องการเปลี่ยนกราฟก็ทำการคลิกที่กราฟ จากนั้นกราฟก็จะทำการเลื่อนโดยอัตโนมัติและเมื่อต้องการที่จะพิมพ์หรือ บันทึกข้อมูลของกราฟได้ก็ทำการคลิกเพื่อหยุดกราฟนั้นๆ หลังจากกดที่ปุ่ม Save data หรือ Print ในรูปที่ ก.28



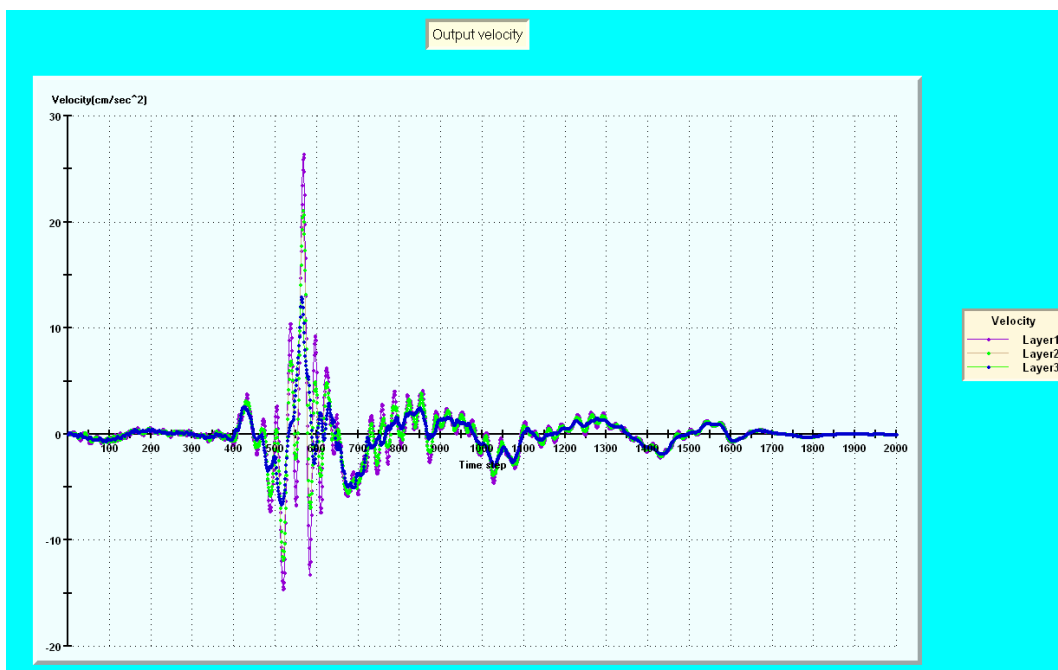
รูปที่ ก.27 การเลือกเพื่อดูรายละเอียดของข้อมูลของชั้นดินที่ความลึกตามต้องการ



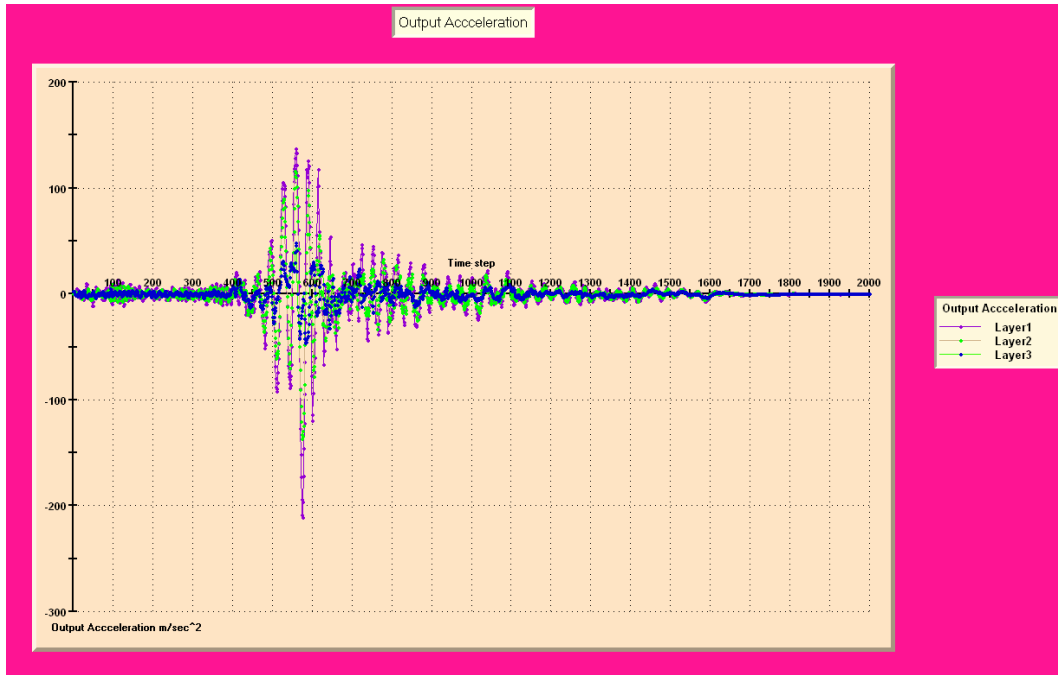
รูปที่ ก. 28 ปุ่มที่ใช้ในการพิมพ์และบันทึกข้อมูลของความลึกชั้นดินที่ต้องการ หลังจากที่ได้ทำการแสดงตัวอย่างของการใช้โปรแกรมโดยใช้แบบจำลองดิน Linear elastic ได้ผลต่างๆดังนี้



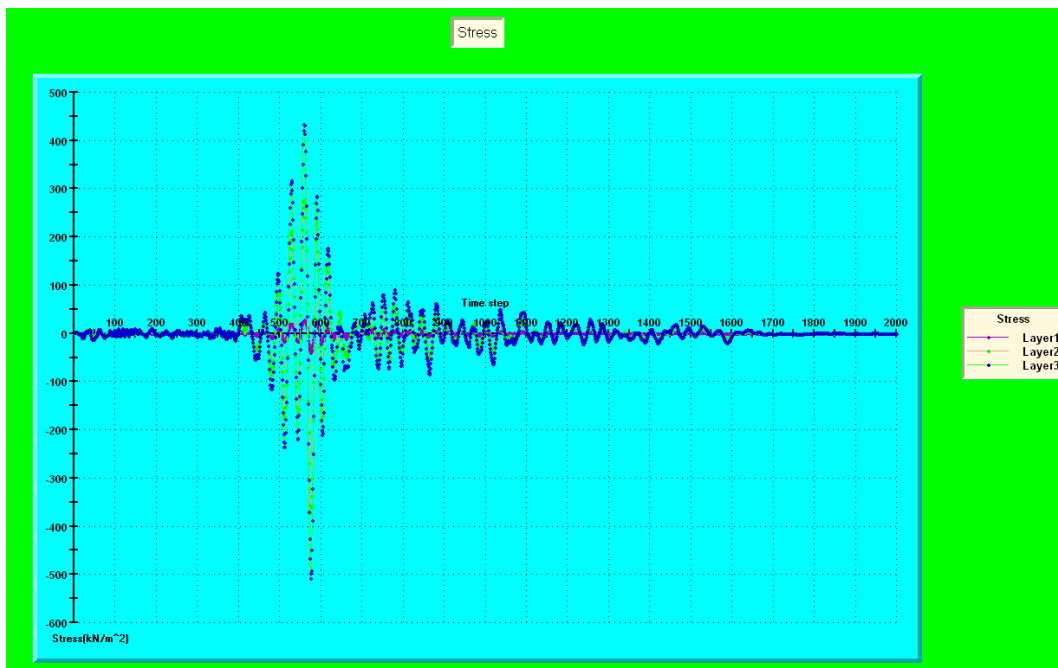
รูปที่ ก.29 แสดงการเคลื่อนตัวของ การเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดิน



รูปที่ ก.30 แสดงความเร็วของการเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดิน

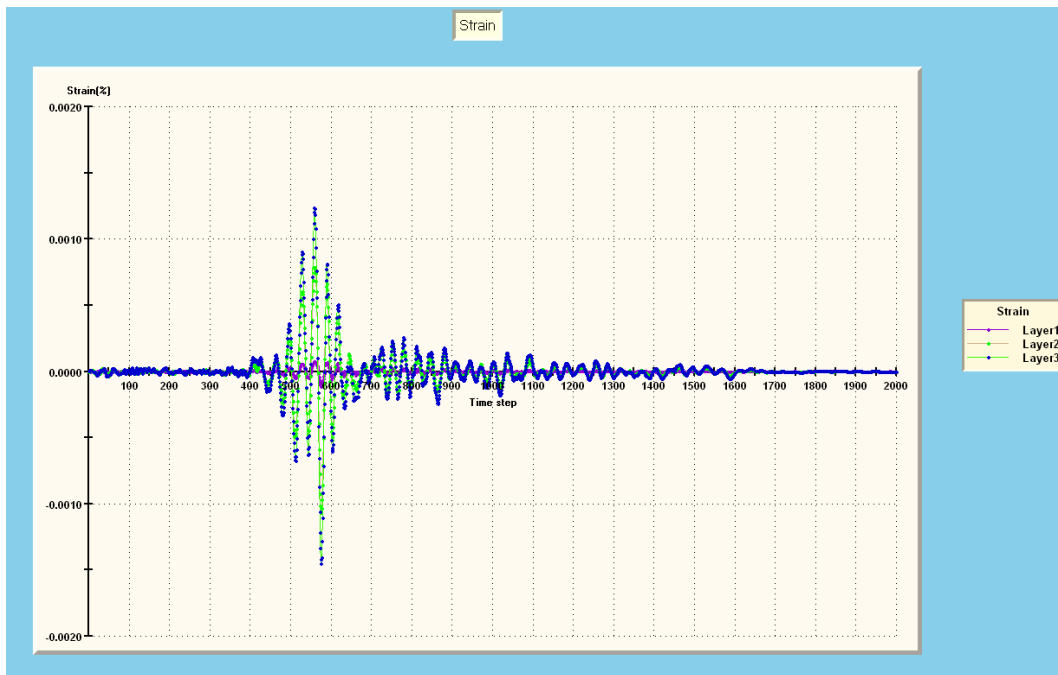


รูปที่ ก.31 แสดงความเร่งของการเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดิน

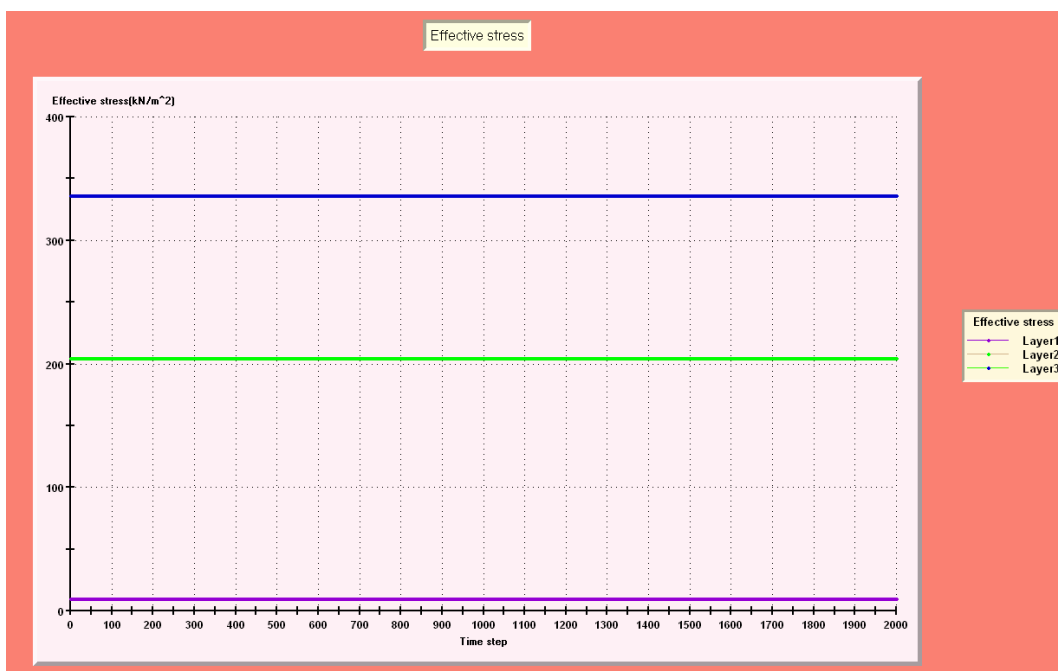


รูปที่ ก.32 แสดงความเค้นเฉือนของการเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดิน





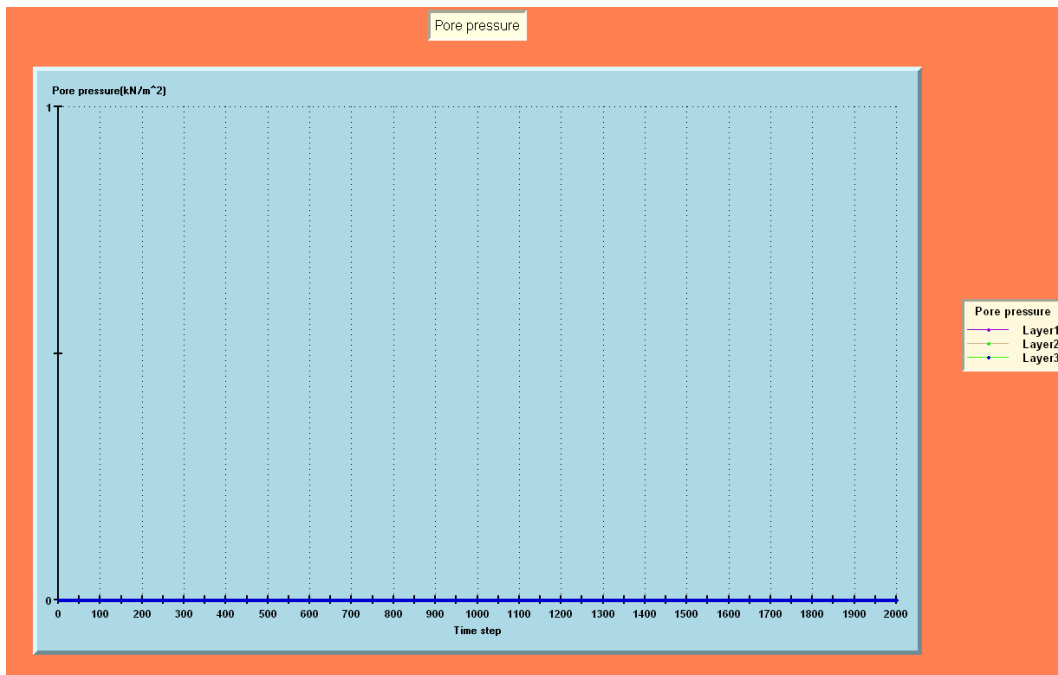
รูปที่ ก.33 แสดงความเครียดเฉือนของการเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดิน



รูปที่ ก.34 แสดงหน่วยแรงในชั้นดินของการเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดิน

จากรูปนี้หน่วยแรงดันน้ำส่วนเกินไม่มีการลดลงของน้ำใต้ดินเนื่องจากการใช้แบบจำลอง

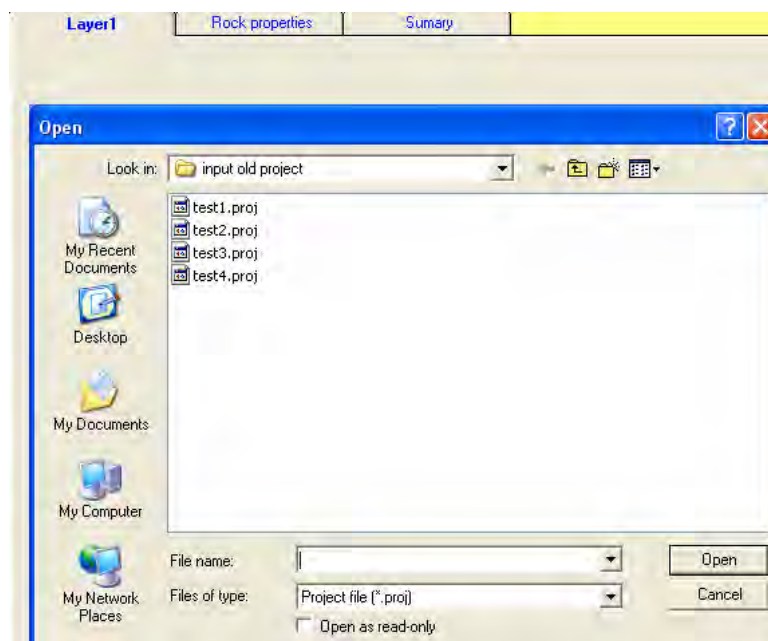
Linear elastic ซึ่งเป็นแบบจำลองดินแบบหน่วยแรงรวม



รูปที่ ก.35 แสดงแรงดันน้ำส่วนเกินของการเปรียบเทียบในแต่ละชั้นดิน

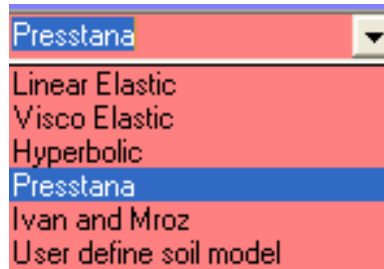
ในการใช้แบบจำลอง Linear elastic นั้นเป็นแบบจำลองดินชนิดหน่วยแรงรวมดังนั้นโปรแกรมจึงไม่มีการคิดแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้น

2.13 การ Load โปรแกรมโดยการ Load แบบ Project file ในเริ่มโปรแกรมแบบรวดเร็วนั้นทำได้โดยการ Load ข้อมูลจาก file ที่มีนามสกุล .proj ดังรูปที่ ก.36 เมื่อทำการ Load โปรแกรมข้อมูลทั้งหมดที่ทำการบันทึกจะกลับเข้าสู่โปรแกรม Earthquake 1.0 หลังจากนั้นทำการกดปุ่ม Calculate เพื่อทำการคำนวณได้เลย

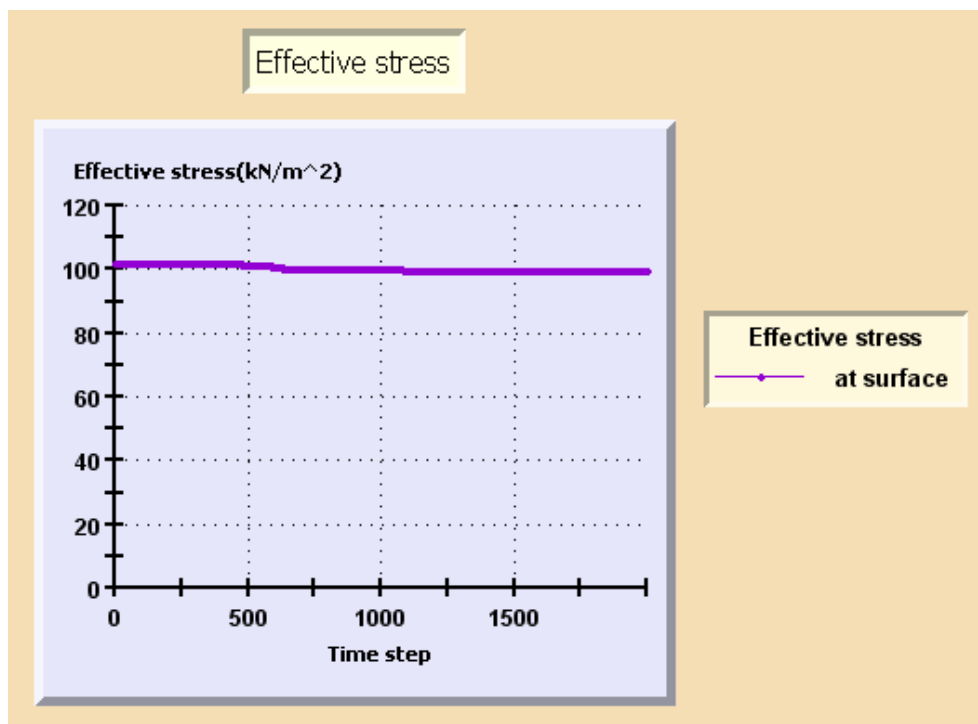


รูปที่ ก.36 เปิดโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณ

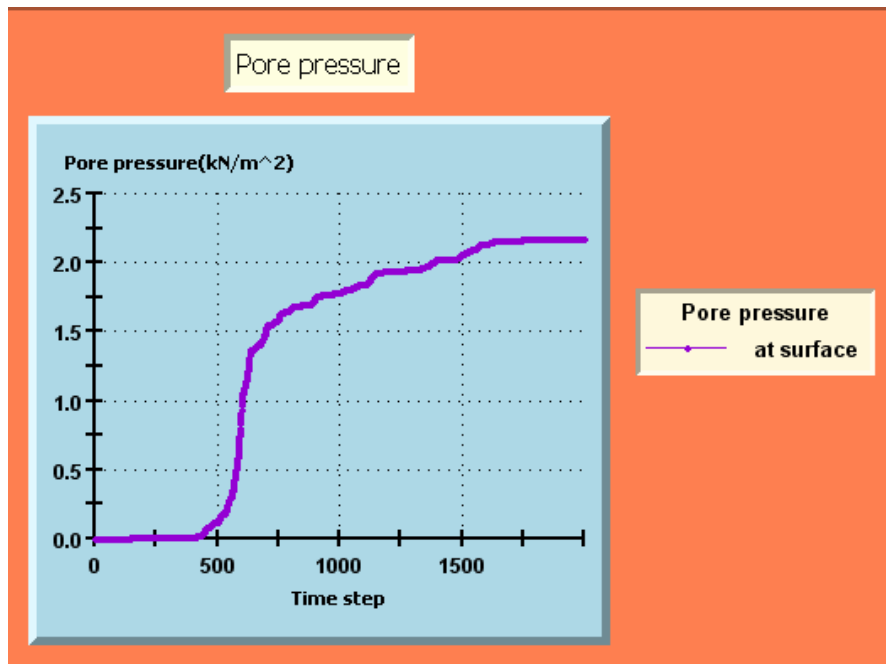
2.14 การคำนวณโดยใช้แบบจำลองดินแบบหน่วยแรงประสิทธิผล ซึ่งในที่นี้ใช้แบบจำลองดิน Presstana



รูปที่ ก.37 การเลือกแบบจำลองดิน Pestana ซึ่งเป็นแบบจำลองดินแบบหน่วยแรงประสิทธิผล โดยในตัวอย่างนี้จะยังใช้ข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดิน, ชั้นหิน, และความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวตัวเดิมแต่เปลี่ยนแบบจำลองดินเป็น Pestana แทนแบบจำลองดินแบบ Linear elastic model เมื่อทำการดูจากผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้แบบจำลองดินแบบ Pestana นั้นได้ว่าแบบจำลองดินนี้จะได้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลลดลงและได้ค่าของแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นดังรูปที่ ก.38 และ ก.39 ตามลำดับ



รูปที่ ก.38 หน่วยแรงในชั้นดินมีการลดลงในแบบจำลอง Pestana



รูปที่ 39 มีแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้แบบจำลอง Pestana

**ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์**

นายปรีชา กระจ่างอินทร์ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในสาขาวิศวกรรมธรณีเทคนิค คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2548