

การศึกษาพฤติกรรมบริเวณผิวรอยต่อเบื้องต้น

เนื่องจากพฤติกรรมบริเวณผิวรอยต่อระหว่างเสาเข็ม และ ดิน (Pile-soil interface) มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมของเสาเข็มในสภาวะสุดขีด เนื่องจากพฤติกรรมจริงของเสาเข็มที่สภาวะดังกล่าว จะเกิดการเลื่อนแยกตัว (slippage) ระหว่างเสาเข็ม และดิน ในขณะที่ระบบการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นยังมี ข้อจำกัด คือ พฤติกรรมที่ผิวรอยต่อเป็นแบบยึดเหนี่ยวสมบูรณ์ (Fully bonded) ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ พยายามที่จะศึกษา และจำลองพฤติกรรมบริเวณผิวรอยต่อ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการวิเคราะห์ ที่พัฒนาขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการจำลองพฤติกรรมบริเวณผิวรอยต่อใน 3 มิติ เป็นหัวข้อที่มีความซับซ้อนสูง การศึกษานี้จึงเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเท่านั้น

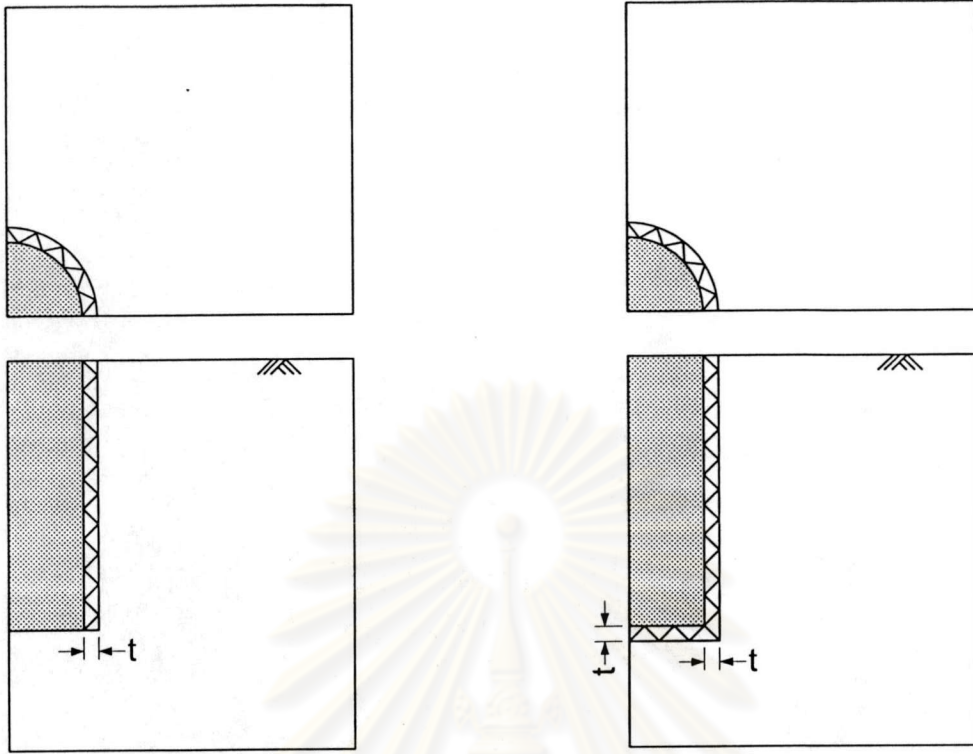
แนวทางที่เลือกใช้ในการพัฒนาพฤติกรรมในส่วนนี้ ได้เสนอไว้ใน 2 แนวทาง คือ การเพิ่มชั้น บาง (Thin layer) ที่บริเวณผิวรอยต่อ และการเพิ่มชั้นพิเศษที่มีความหนาเป็นศูนย์ที่บริเวณผิวรอยต่อ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อต่อไป

6.1 การเพิ่มชั้นบาง (Thin layer) ที่บริเวณผิวรอยต่อ

แนวทางนี้ คือ การแทรกชั้นพิเศษเข้าไปที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างเสาเข็ม และดิน โดยยังคงใช้ โครงข่ายแบบเตตระฮีดรอน 4 จุดต่อที่สร้างจากโปรแกรม GMSH โดยการเพิ่มขอบเขต (region) ใหม่เข้าไป โดยสามารถกำหนดให้มีคุณสมบัติเหมือน หรือแตกต่างจากคุณสมบัติของดินที่อยู่โดยรอบได้ รูปที่ 6.1 แสดงโครงสร้างของปัญหาเสาเข็มเดี่ยว เมื่อมีการแทรกชั้นบางที่บริเวณผิวรอยต่อ ซึ่งได้แสดงไว้ใน 2 รูปแบบ คือ กรณีแทรกชั้นบางเฉพาะที่ผิวเสาเข็ม และกรณีแทรกชั้นบางทั้งที่ผิว และที่ปลายเสาเข็ม

6.1.1 ตัวอย่างปัญหา

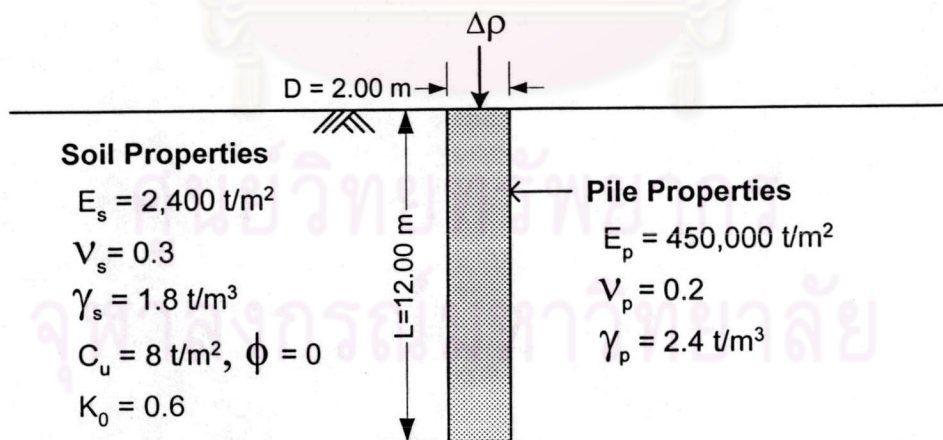
ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการศึกษา และพัฒนา แสดงดังรูปที่ 6.2 เป็นตัวอย่างเสาเข็มเดี่ยว หน้าตัดกลม แบบลอย (Floating pile) โดยดินมีคุณสมบัติแบบอริลาสติก-พลาสติก กำหนดขนาดโครงสร้างเสาเข็ม เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 2 เมตร ยาว (L) 12 เมตร โดยทำการแทรกชั้นบางที่มีความหนา (ค่า t ในรูปที่ 6.1) 0.1 เมตร หรือ 0.005D รูปที่ 6.3 แสดงโครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างนี้ ใน 2 กรณี คือ มี และไม่มีชั้นบางบริเวณปลายเสาเข็ม



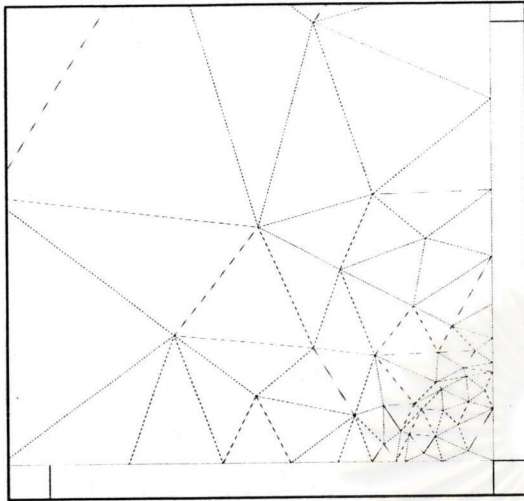
(ก) แทรกชั้นบางเฉพาะที่ผิวเสาเข็ม

(ข) แทรกชั้นบางที่ และที่ปลายเสาเข็ม

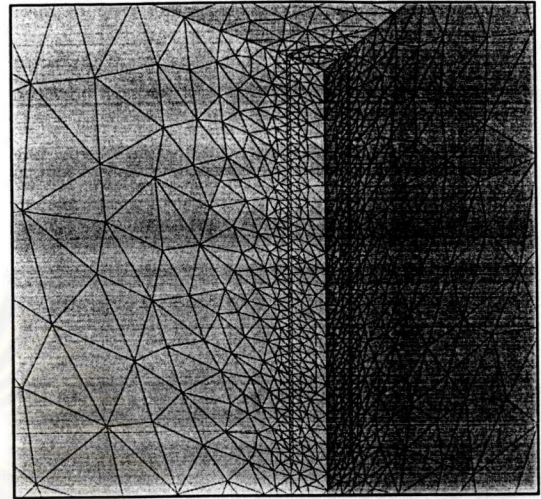
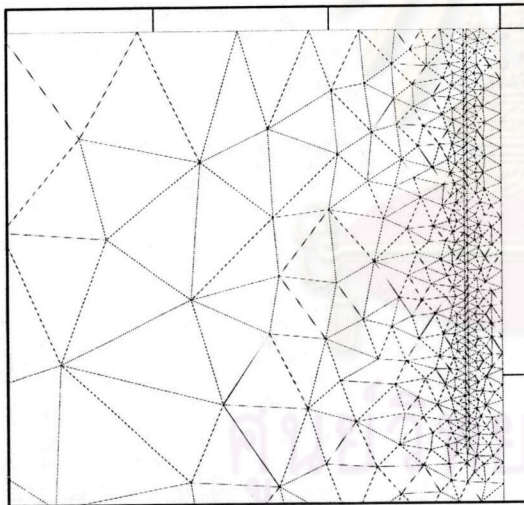
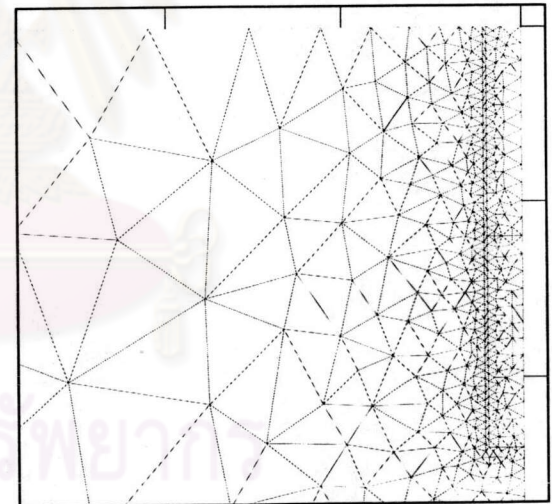
รูปที่ 6.1 แผนภาพแสดงการเพิ่มชั้นบาง(Thin layer) ที่บริเวณผิวรอยต่อในปัญหาเสาเข็มเดี่ยว



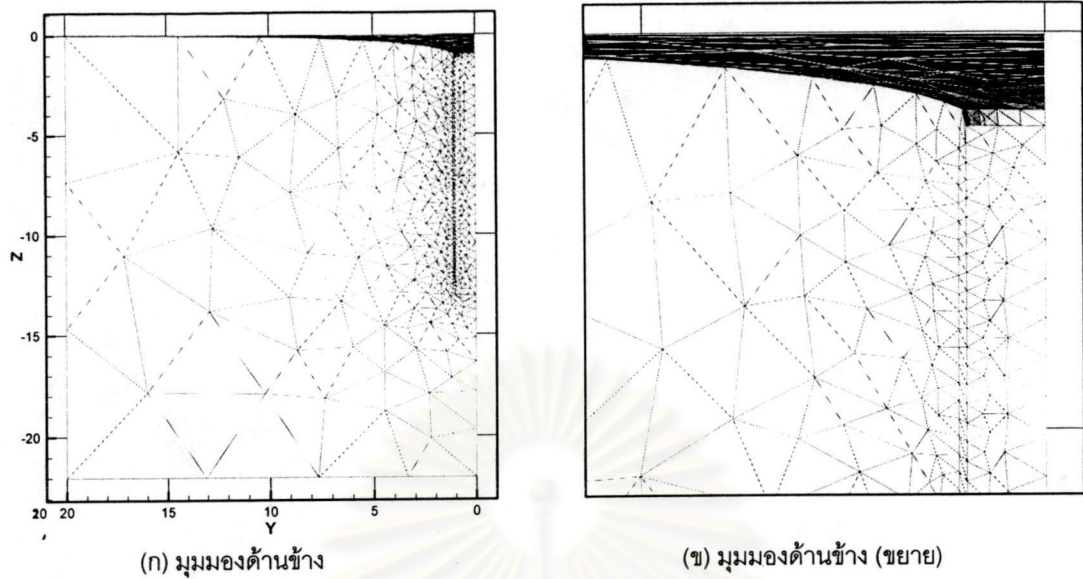
รูปที่ 6.2 ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการศึกษาและพัฒนา การเพิ่มชั้นบาง (Thin layer) ที่บริเวณผิวรอยต่อ



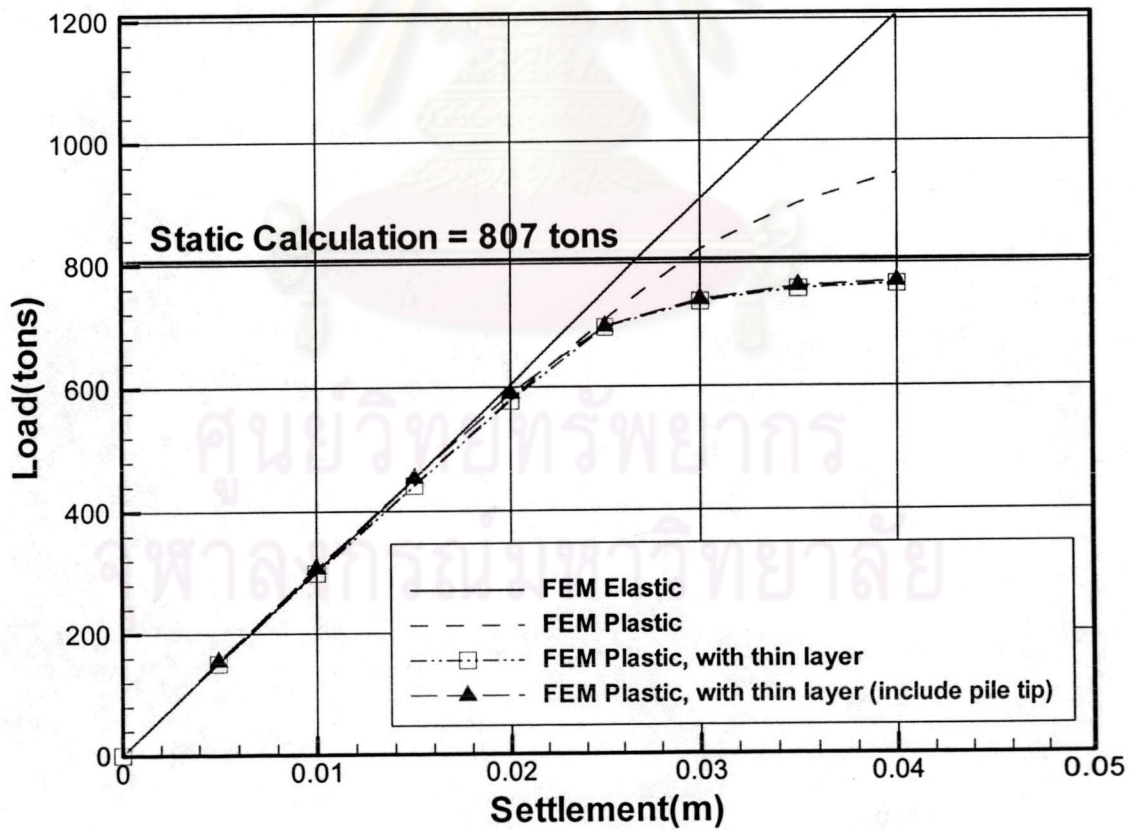
(ก) มุมมองก้านบน

(ข) มุมมอง 3 มิติ (กรณีแทรกชั้น
บางเฉพาะที่ผิวเสาค้ำ)(ค) มุมมองด้านข้าง (กรณีแทรกชั้น
บางเฉพาะที่ผิวเสาค้ำ)(ง) มุมมองด้านข้าง (กรณีแทรกชั้น
ที่ผิว และที่ปลายเสาค้ำ)

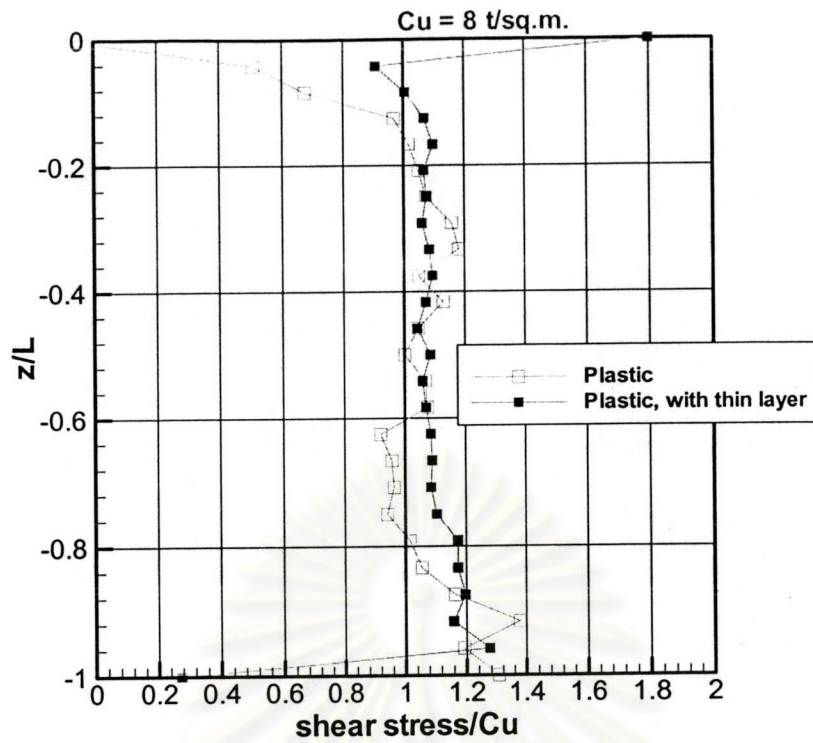
รูปที่ 6.3 โครงข่ายที่ใช้ในตัวอย่างปัญหา กรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (thin layer) ที่บริเวณผิว
รอยต่อ (โครงข่าย 2,823 จุดต่อ และ 14,776 ชิ้นส่วน)



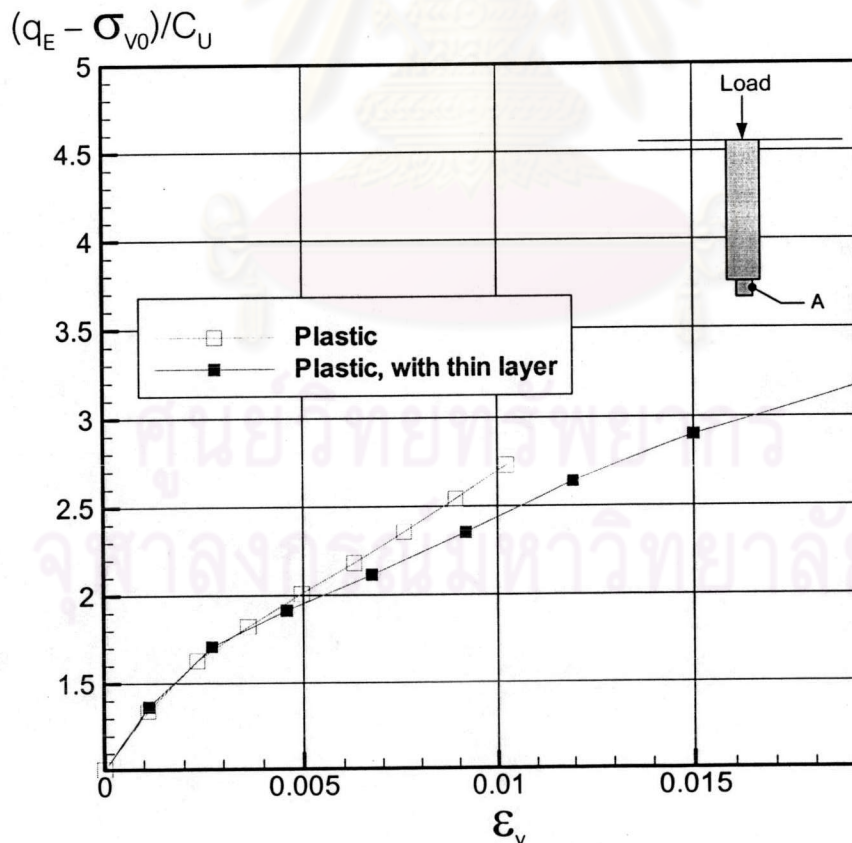
รูปที่ 6.4 โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหา กรณีศึกษา การเพิ่มชั้นบาง (Thin layer) ที่บริเวณผิวเสาเข็ม



รูปที่ 6.5 กราฟแรงกระทำ-การเคลื่อนตัว (Load-settlement curve) ที่ได้จากการวิเคราะห์ ตัวอย่างปัญหา กรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (thin layer) ที่บริเวณผิวเสาเข็ม



รูปที่ 6.6 หน่วยแรงเฉือนตามผิวเสาค้ิม จากตัวอย่างกรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (thin layer) ที่บริเวณผิวเสาค้ิม



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง-ความเครียดในแนวตั้งที่ปลายเสาค้ิม จากตัวอย่างกรณีศึกษาการเพิ่มชั้นบาง (thin layer) ที่บริเวณผิวเสาค้ิม

6.1.2 ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 6.4 แสดงโครงข่ายภายหลังจากเคลื่อนตัว ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จะเห็นว่าที่บริเวณผิวรอยต่อเกิดความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม และดิน โดยเสาเข็มจะทรุดตัวลงมากกว่าดินที่อยู่ใกล้เคียงอย่างเห็นได้ชัด พฤติกรรมในส่วนนี้แสดงผลชัดเจนในกราฟแรงกระทำ-การเคลื่อนตัว (Load-settlement curve) ดังรูปที่ 6.5 พิจารณากรณีที่พฤติกรรมดินเป็นอิลาสติก-พลาสติก กรณีที่มีการแทรกชั้นบางกราฟจะแสดงพฤติกรรมทรุดตัวของเสาเข็ม และลู่เข้าอย่างรวดเร็ว กว่ากรณีโครงข่ายปกติ โดยจะลู่เข้าใกล้กับค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Pile capacity) จากการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งมีค่าประมาณ 807 ตัน (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.) และเมื่อเปรียบเทียบกรณีที่มีการแทรกชั้นบางที่ปลายเสาเข็ม (include pile tip) พบว่าให้ผลใกล้เคียงกัน จึงอาจสรุปได้ว่า การแทรกชั้นบางบริเวณผิวรอยต่อ จะช่วยให้การคาดคะเนพฤติกรรมในภาวะสุดขีดของเสาเข็ม มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

เมื่อศึกษาพฤติกรรมในรายละเอียด โดยรูปที่ 6.6 แสดงหน่วยแรงเฉือนที่ผิวเสาเข็มที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่ระดับการทรุดตัวเป็น 0.04 เมตร พบว่าการเพิ่มชั้นบางจะทำให้ค่าหน่วยแรงมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น โดยค่าเฉลี่ยจะสูงกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือน (C_u) ของดินเล็กน้อย (ประมาณ 10 %) ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่บริเวณปลายเสาเข็ม ดังรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าค่า $(q_E - \sigma_{vo})/C_u$ ที่ระดับความเครียดสูง ๆ ยังคงมีค่าที่ต่ำอยู่ โดยกรณีเพิ่มชั้นบางซึ่งให้ค่าที่สูงกว่า พบว่ามีค่าเพียง 3.2 ซึ่งตามทฤษฎีของฐานรากลึก ควรได้ค่าประมาณ 9.0 จะเห็นว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงนั้น เกิดจากหน่วยแรงเฉือนที่ผิวที่สูงเกินไป และที่ปลายซึ่งยังคงต่ำเกินไป ทั้งหมดนี้ เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากวิธีการ (approach) ที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมพลาสติก ซึ่งควรศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

6.1.3 ปัญหา และข้อจำกัด

ปัญหาหลักที่เป็นข้อจำกัดในการนำแนวทางนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา คือ ปัญหาเกี่ยวกับความสามารถในการสร้างโครงข่าย ของโปรแกรมสร้างโครงข่ายที่ใช้ คือ โปรแกรม GMSH โดยในกรณีชั้นบาง (t) ถูกกำหนดให้มีความบางมาก ๆ เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มการสร้างโครงข่ายจำเป็นต้องกำหนดขนาดของชิ้นส่วนที่ผิวเสาเข็มให้มีขนาดเล็กมาก ๆ (ด้วย characteristic length) ซึ่งในกรณีที่เสาเข็มมีความขรุขระสูง คือ อัตราส่วน L/D สูง จำนวนชิ้นส่วนที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากเกินกว่าจะคำนวณได้ในทางปฏิบัติ และในบางกรณีอาจไม่สามารถสร้างโครงข่ายได้

ดังนั้น การวิเคราะห์ปัญหาในแนวทางนี้ จึงมีข้อจำกัดที่เสาเข็มต้องไม่มีความขรุขระสูงเกินไป และความหนาของชั้นบางต้องไม่บางจนเกินไปเท่านั้น

6.2 การเพิ่มชิ้นส่วนพิเศษที่มีความหนาเป็นศูนย์ที่บริเวณผิวรอยต่อ

แนวทางนี้เสนอโดย Goodman, Taylor และ Brekke (1968) เป็นการแทรกชิ้นพิเศษที่มีความหนาเป็นศูนย์เข้าไปบริเวณผิวรอยต่อ โดยชั้นดังกล่าว จะต้องสร้างขึ้นจากชิ้นส่วนรอยต่อซึ่งมีความหนาเป็นศูนย์ (zero-thickness interface element) ซึ่งการคำนวณสติฟเนสของชิ้นส่วนนี้ จำเป็นจะต้องมีทฤษฎีเฉพาะ และการนำทฤษฎีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในระบบการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น ต้องมีการปรับเปลี่ยนในรายละเอียดบางส่วน ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะแสดงรายละเอียดดังกล่าว รวมถึงตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหา และสรุปข้อจำกัดต่าง ๆ ที่พบในการศึกษา

6.2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

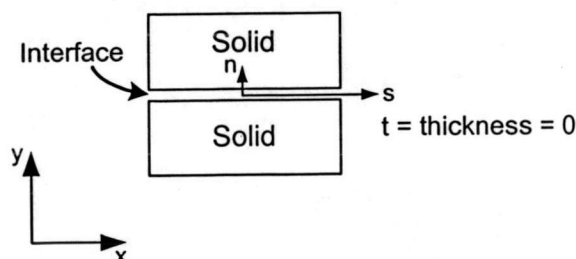
Goodman, Taylor และ Brekke (1968) ได้เสนอให้สร้างสติฟเนสเมตริกซ์ของชิ้นส่วนรอยต่อ (interface element) โดยพิสูจน์จากการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของจุดต่อ (relative nodal displacement) ของชิ้นส่วนปกติที่อยู่ติดกับชิ้นส่วนรอยต่อใด ๆ โดยเสนอตัวอย่าง วิเคราะห์ปัญหา 2 มิติ เบื้องต้น ซึ่งสามารถกำหนดกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (stress-relative displacement relation) ไว้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_r \\ u_r \end{Bmatrix} = [C]_i \begin{Bmatrix} v_r \\ u_r \end{Bmatrix} \quad (6.1)$$

โดยที่

- σ_n : หน่วยแรงในแนวฉาก (normal stress)
- τ : หน่วยแรงในเฉือน (shear stress)
- k_n : สติฟเนสในแนวฉาก (normal stiffness)
- k_s : สติฟเนสในแนวเฉือน (shear stiffness)
- v_r, u_r : การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในแนวฉาก และแนวเฉือน
- $[C]_i$: constitutive matrix สำหรับชิ้นส่วนรอยต่อ

โดยระบบพิกัดที่ใช้ในการหาค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ แสดงได้ดังแผนภาพต่อไปนี้



จากความสัมพันธ์ ดังสมการ (6.1) จะเห็นว่าเป็นความสัมพันธ์ในระบบพิกัดเฉพาะที่ (local coordinate) ดังนั้นจำเป็นต้องทำการแปลงความสัมพันธ์ให้อยู่ในระบบพิกัดทั่วไป (global coordinate) รูปของสติฟเนสเมตริกซ์ก่อน จึงจะสามารถนำไปรวมเข้ากับสติฟเนสเมตริกซ์รวม (global stiffness matrix) ด้วยวิธี direct stiffness ตามปกติได้

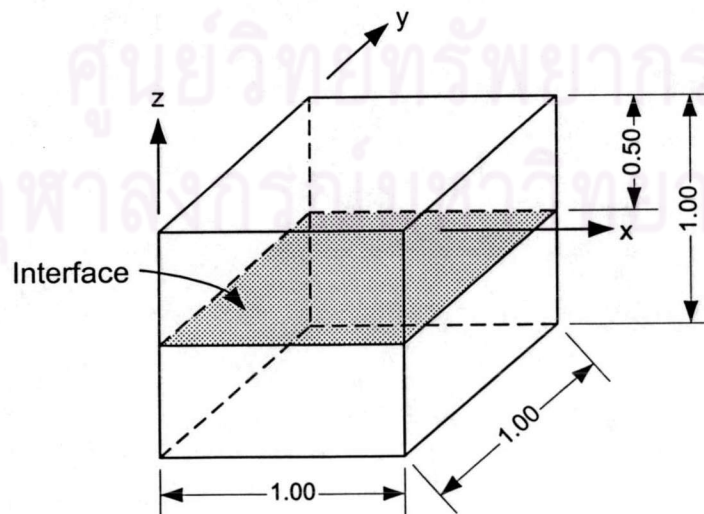
ข้อสังเกตสำหรับการกำหนดค่าสติฟเนส k_s และ k_n คือ ในกรณีที่หน่วยแรงเฉือนที่จุดต่อเกินกำลังรับแรงเฉือนที่ยอมให้ ค่า k_s จะลดลงสู่ค่า k_s residual ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบ และเมื่อหน่วยแรงแนวฉากเปลี่ยนเป็นแรงดึง k_s และ k_n จะถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ และเริ่มการคำนวณในรอบต่อไปทันที

6.2.2 การประยุกต์ใช้ทฤษฎี ในระบบที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้น เป็นการวิเคราะห์ปัญหาใน 3 มิติ ดังนั้นการนำทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดบางส่วน โดยแสดงไว้ในส่วนของการวิเคราะห์ตัวอย่างปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน จากนั้นได้เสนอการประยุกต์ใช้ในปัญหาเสาเข็มเดี่ยวเพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อไป

6.2.2.1 การวิเคราะห์ปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน

โครงสร้างปัญหา

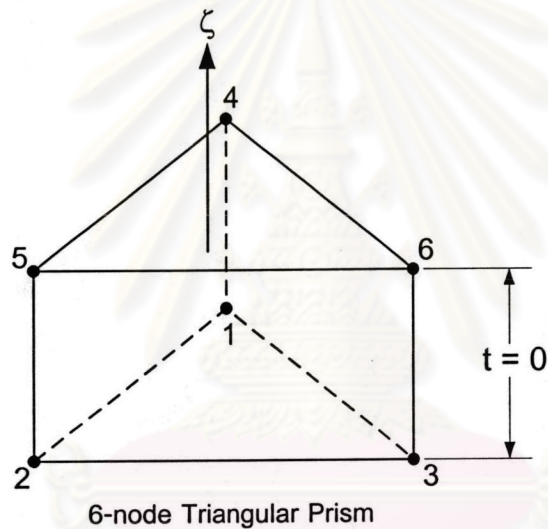


ตัวอย่างปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาจะแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยระหว่างชั้นบน และชั้นล่าง จะมีชั้นของผิวรอยต่อ (interface) ซึ่งต้องแทนด้วยชั้นส่วนรอยต่อที่มีความหนาเป็นศูนย์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในส่วนต่อไป

คุณสมบัติของชั้นส่วนรอยต่อ

เนื่องจากชั้นส่วนปกติ (ซึ่งเป็น solid element) ในรูปทรงสี่เหลี่ยมชั้นบน และชั้นล่างเป็นชั้นส่วนแบบเตตระฮีดรอน 4 จุดต่อ ดังนั้นชั้นส่วนรอยต่อ (interface element) จึงต้องเป็นชั้นส่วนแบบปริซึมสามเหลี่ยม (Triangular Prism) 6 จุดต่อ โดยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

(1) โครงสร้างชั้นส่วน



(2) พิกัดของจุดต่อในระบบพิกัดเฉพาะที่

ตารางที่ 6.1 พิกัดของจุดต่อของชั้นส่วนปริซึมสามเหลี่ยม 6 จุดต่อ ในระบบพิกัดเฉพาะที่

Node	L_1	L_2	L_3	ζ
1	1	0	0	-1
2	0	1	0	-1
3	0	0	1	-1
4	1	0	0	1
5	0	1	0	1
6	0	0	1	1

(3) พิกัดจุดแก๊ส

พิกัดจุดแก๊ส = $(1/3, 1/3, 1/3, 0)$; โดย แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก = 1.0

(4) ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape function)

$$\langle N \rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} L_1(1-\zeta) \\ L_2(1-\zeta) \\ L_3(1-\zeta) \\ L_1(1+\zeta) \\ L_2(1+\zeta) \\ L_3(1+\zeta) \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

เมื่อ $L_3 = 1 - L_1 - L_2$

การสร้างเมตริกซ์สติเฟเนสของชิ้นส่วนรอยต่อ

การสร้างเมตริกซ์สติเฟเนสของชิ้นส่วนนั้น ต้องผ่านการคำนวณเมตริกซ์ความเครียด-การเคลื่อนตัว (Matrix B) และเมตริกซ์ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด (Matrix D) ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.1 ซึ่งในกรณีของชิ้นส่วนรอยต่อนั้น การคำนวณค่าของเมตริกซ์ทั้งสอง จำเป็นต้องมีวิธีการคำนวณเฉพาะ ดังแสดงในส่วนต่อไป

(1) เมตริกซ์ความเครียด-การเคลื่อนตัว (Strain-displacement matrix, B)

ปัญหาสำคัญในการคำนวณเมตริกซ์ B ชิ้นส่วนรอยต่อนั้น คือการคำนวณค่าของเมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) ตามสมการ (3.21) ซึ่งสามารถเขียนในรูปพิกัดของชิ้นส่วนปริซึมสามเหลี่ยมได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N_1 \ N_2 \ \dots \ N_6 \rangle}{\partial L_1} \\ \frac{\partial \langle N_1 \ N_2 \ \dots \ N_6 \rangle}{\partial L_2} \\ \frac{\partial \langle N_1 \ N_2 \ \dots \ N_6 \rangle}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial L_1} & \frac{\partial y}{\partial L_1} & \frac{\partial z}{\partial L_1} \\ \frac{\partial x}{\partial L_2} & \frac{\partial y}{\partial L_2} & \frac{\partial z}{\partial L_2} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix}}_{\text{Jacobian Matrix}} \begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N_1 \ N_2 \ \dots \ N_6 \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N_1 \ N_2 \ \dots \ N_6 \rangle}{\partial y} \\ \frac{\partial \langle N_1 \ N_2 \ \dots \ N_6 \rangle}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

เนื่องจากผลของการใช้ชิ้นส่วนที่มีความหนาเป็นศูนย์ ทำให้ค่าของเมตริกซ์จาโคเบียนในแถว(row) ที่ 3 มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด และเนื่องจากโครงสร้างเฉพาะของปัญหา ซึ่งแกน z ตั้งฉากกับพิกัดในระนาบ L_1, L_2, L_3 เสมอ ทำให้ค่าของเมตริกซ์จาโคเบียนในหลัก(column) ที่ 3 มีค่าเป็นศูนย์ด้วย สมการ (6.3) จึงสามารถลดรูปลงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N_1, N_2 \dots N_6 \rangle}{\partial L_1} \\ \frac{\partial \langle N_1, N_2 \dots N_6 \rangle}{\partial L_2} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial L_1} & \frac{\partial y}{\partial L_1} \\ \frac{\partial x}{\partial L_2} & \frac{\partial y}{\partial L_2} \end{bmatrix}}_{\text{Jacobian Matrix}} \begin{bmatrix} \frac{\partial \langle N_1, N_2 \dots N_6 \rangle}{\partial x} \\ \frac{\partial \langle N_1, N_2 \dots N_6 \rangle}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

โดยผลการอินเวิร์ท(invert) เมตริกซ์จาโคเบียนจะสามารถคำนวณหาค่า $\partial N/\partial x$ และ $\partial N/\partial y$ ได้ แต่สำหรับในส่วนของ $\partial N/\partial z$ ไม่สามารถหาค่าได้โดยตรง ต้องใช้วิธีการลองสุ่มค่า (trial and error) ซึ่งพบว่าในปัญหานี้มีค่าเป็น $-1/6$ ซึ่งการวิเคราะห์ค่า $\partial N/\partial z$ อย่างถูกต้อง จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

นอกจากนี้ เนื่องจากค่าของการเคลื่อนตัวที่ใช้ในชิ้นส่วนรอยต่อนี้ เป็นค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ คือ เป็นค่าเปรียบเทียบระหว่างการเคลื่อนตัวของผิวบน (top) และผิวล่าง (bottom) ของชิ้นส่วน ดังแสดงในสมการ (6.1) ในค่า v_i และ u_i ดังนั้นการคำนวณค่าความเครียด (ϵ) จากเมตริกซ์ B จึงต้องพิจารณาในลักษณะของการคำนวณ ϵ ที่ผิวบนจาก $\partial N/\partial x$, $\partial N/\partial y$ และ $\partial N/\partial z$ เมื่อ $i = 1$ ถึง 3 ลบออกด้วย ϵ ที่ผิวล่างจาก $\partial N/\partial x$, $\partial N/\partial y$ และ $\partial N/\partial z$ เมื่อ $i = 4$ ถึง 6 ดังนั้นค่า $\partial N/\partial x$, $\partial N/\partial y$ และ $\partial N/\partial z$ เมื่อ $i = 4$ ถึง 6 จึงต้องคูณด้วย -1.0 ก่อนเสมอ

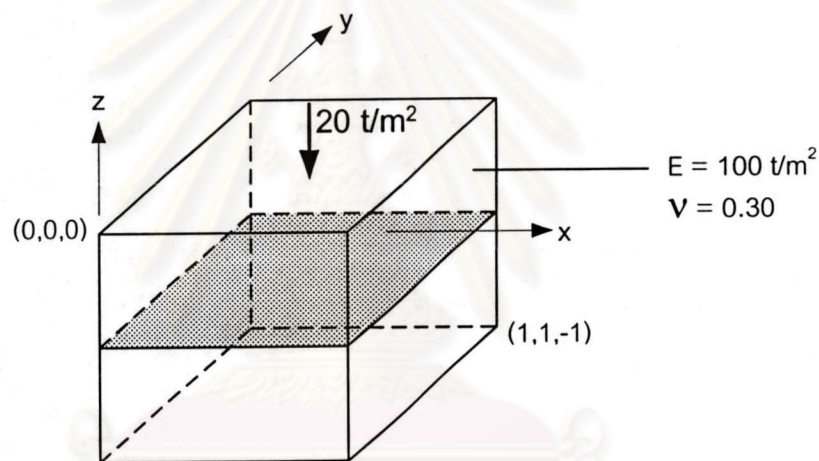
(2) เมตริกซ์ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด (constitutive matrix, D)

การคำนวณเมตริกซ์ D สำหรับชิ้นส่วนรอยต่อนั้น จำเป็นต้องทำการแปลงเมตริกซ์ [C], ดังแสดงในสมการ (6.1) ซึ่งอยู่ในพิกัดเฉพาะที่ (local coordinate) ให้อยู่ในรูปของพิกัดทั่วไป (global coordinate) ก่อน แต่เนื่องจากในปัญหานี้ แกน ζ ของชิ้นส่วน อยู่ในทิศทางเดียวกับแกน z ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องทำการแปลงพิกัด โดยสามารถกำหนดเมตริกซ์ D ดังสมการต่อไปนี้

$$D = \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

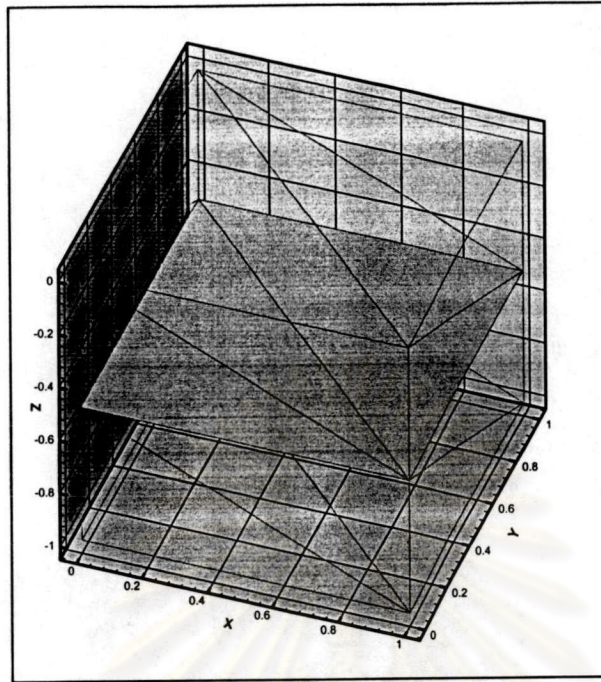
ตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหา

(1) กรณีรับแรงอัดในแนวดิ่ง

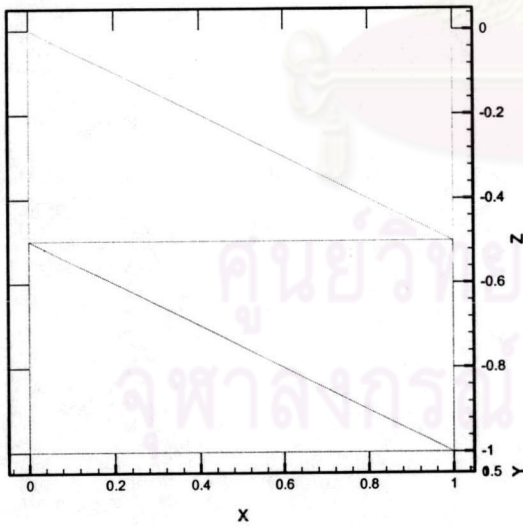


กำหนดแรงกระทำในแนวดิ่งเป็นแรงกระทำสม่ำเสมอขนาด 20 ตัน/ตร.ม. โดยจำกัดการเคลื่อนตัวในทิศทาง x, y และ z ที่ระนาบ $x = 0$, $y = 0$ และ $z = -1$ ตามลำดับ โดยรูปที่ 6.8 แสดงตัวอย่างโครงข่ายเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

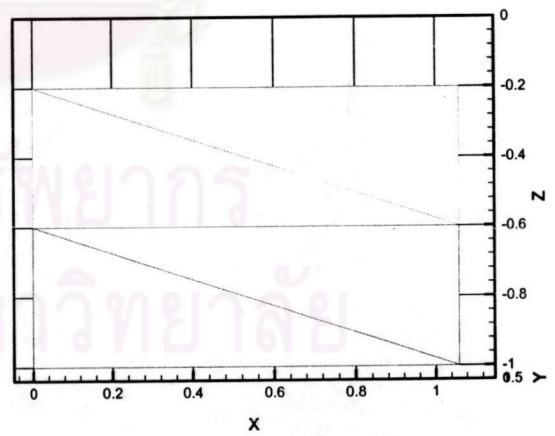
ผลการวิเคราะห์ รูปที่ 6.9 แสดงโครงข่ายเริ่มต้น และภายหลังการเคลื่อนตัว จะเห็นว่าชั้นส่วนที่ผิวรอยต่อสามารถจำลองพฤติกรรมได้อย่างถูกต้อง โดยไม่เกิดการซ้อนเหลื่อมกันของผิวบน และล่างของชั้นส่วน และเกิดการขยายตัวทางข้างอย่างอิสระ การเคลื่อนตัวของโครงสร้างและหน่วยแรงภายในชั้นส่วนรอยต่อ มีความถูกต้องตามทฤษฎี โดยหน่วยแรงในแนวดิ่งมีค่า 20 ตัน/ตร.ม. ในขณะที่หน่วยแรงอื่น ๆ มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเป็น 0.20 เมตร



รูปที่ 6.8 โครงข่ายเริ่มต้น ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน (แสดงผิวรอยต่อ)



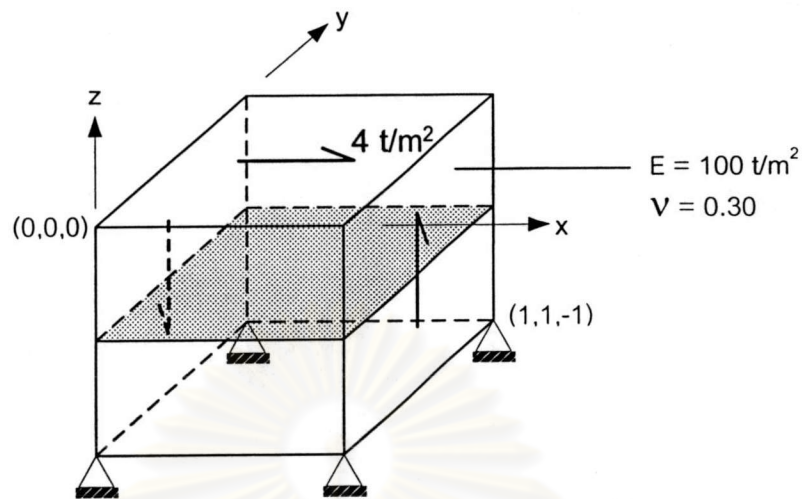
(ก) โครงข่ายเริ่มต้น



(ข) โครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว

รูปที่ 6.9 โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานรับแรงในแนวตั้ง (มุมมองด้านข้าง)

(2) กรณีรับแรงเฉือนสมบูรณ์ (pure shear)

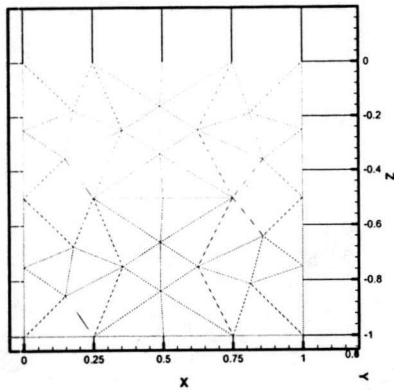


กำหนดแรงกระทำเป็นแรงเฉือนสมบูรณ์ในทิศทาง xz ขนาด 4 ตัน/ตร.ม. โดยจำกัดการเคลื่อนตัวในทิศทาง y ที่ระนาบ $y = 0$ และ $y = 1$ และจำกัดการเคลื่อนตัวที่ฐานดังรูป

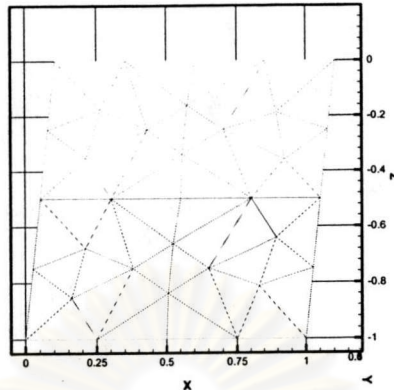
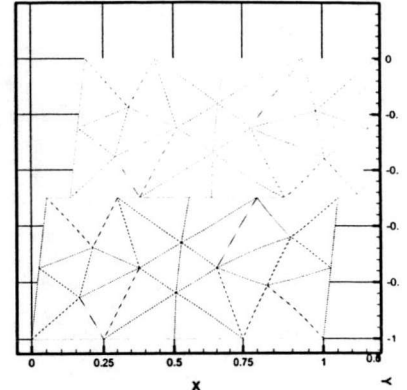
ผลการวิเคราะห์ รูปที่ 6.10 และ 6.11 แสดงโครงข่ายเริ่มต้น และภายหลังการเคลื่อนตัว โดยเปรียบเทียบกรณีที่มีค่า k_s สูง ทำให้ไม่เกิดพฤติกรรมการเลื่อนแยกตัว หรือเป็นกรณีที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นสมบูรณ์ และกรณีที่มีค่า k_s ลงจนเกิดการเลื่อนแยกตัว เมื่อตรวจสอบหน่วยแรงภายในชิ้นส่วนรอยต่อ พบว่าหน่วยแรงเฉือนในทิศทาง xz มีค่าเป็น 4 ตัน/ตร.ม. สม่่าเสมอตลอดผิวรอยต่อ ในขณะที่หน่วยแรงในแนวอื่น ๆ มีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นในแนว zz ซึ่งเกิดค่าหน่วยแรงขึ้น และเป็นค่าที่กระจายไม่สม่ำเสมอ คาดว่าเกิดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ซึ่งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

6.2.2.2 การวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว

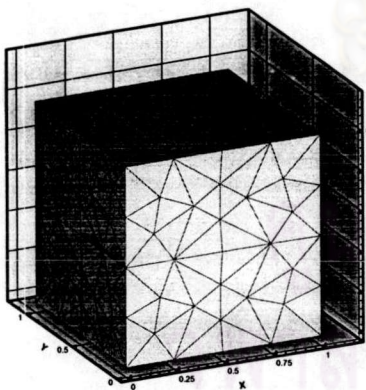
นำหลักการที่ได้เสนอในตัวอย่างปัญหารูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐาน มาประยุกต์ใช้ และทดลองวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มเดี่ยว หน้าตัดสี่เหลี่ยมได้ผลดังแสดงการเปรียบเทียบโครงข่ายก่อนและหลังการเคลื่อนตัวดังรูปที่ 6.12 และ 6.13 ผลการคำนวณยังคงพบปัญหาในหลายส่วนเนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้าง ซึ่งได้สรุปไว้ในหัวข้อ 6.2.3



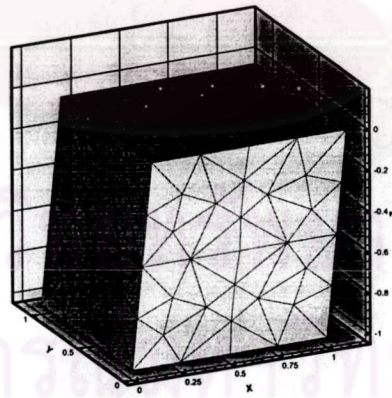
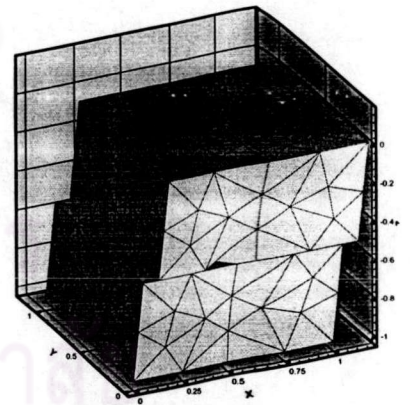
(ก) โครงข่ายเริ่มต้น

(ข) โครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว
(ยึดเหนี่ยวสมบูรณ์)(ค) โครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว
(เลื่อนแยกตัว)

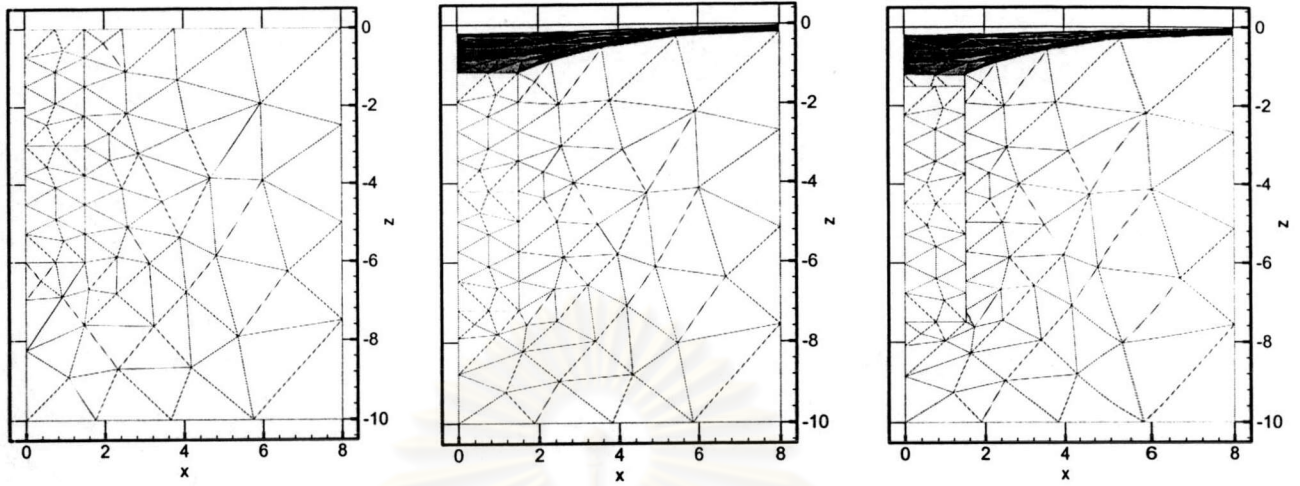
รูปที่ 6.10 โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานรับแรงในเงื่อนไขสมบูรณ์ (มุมมองด้านข้าง)



(ก) โครงข่ายเริ่มต้น

(ข) โครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว
(ยึดเหนี่ยวสมบูรณ์)(ค) โครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว
(เลื่อนแยกตัว)

รูปที่ 6.11 โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานรับแรงในเงื่อนไขสมบูรณ์ (มุมมอง 3 มิติ)

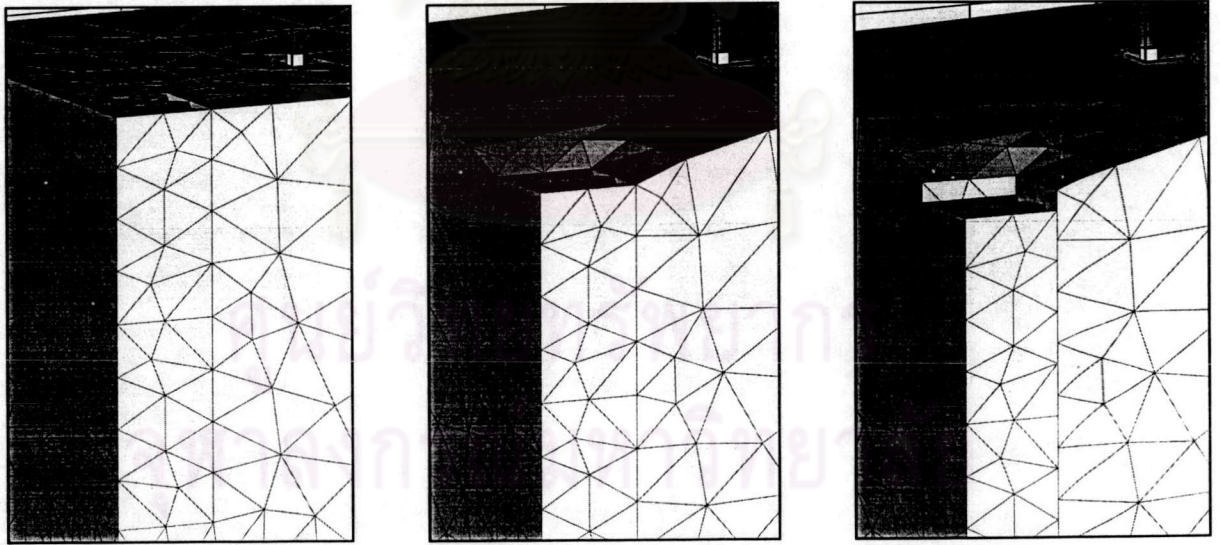


(ก) โครงข่ายเริ่มต้น

(ข) โครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว
(ยึดเหนี่ยวสมบูรณ์)

(ค) โครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว
(เลื่อนแยกตัว)

รูปที่ 6.12 โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์รูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นฐานรับแรงในเงื่อนไขสมบูรณ์ (มุมมองด้านข้าง)



(ก) โครงข่ายเริ่มต้น

(ข) โครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว
(ยึดเหนี่ยวสมบูรณ์)

(ค) โครงข่ายหลังการเคลื่อนตัว
(เลื่อนแยกตัว)

รูปที่ 6.13 โครงข่ายเริ่มต้น และโครงข่ายภายหลังการเคลื่อนตัว ในตัวอย่างการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว หน้าตัดสี่เหลี่ยม (มุมมอง 3 มิติ)

6.2.3 ปัญหา และข้อจำกัด

เนื่องจากการประยุกต์ใช้ชิ้นส่วนฉนวนรอยต่อที่มีความหนาเป็นศูนย์ กับการวิเคราะห์ปัญหาเสาเข็มใน 3 มิติ มีความซับซ้อนสูง และต้องใช้เวลาในการศึกษา ค้นคว้าค่อนข้างมาก ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา และทำการทดสอบในเบื้องต้น และได้พบปัญหาและข้อจำกัดสรุปได้ดังนี้

1. ผลของการกำหนดขนาดของชิ้นส่วนเป็นศูนย์ และเลือกค่า k_n และ k_s ที่สูงทำให้เกิด stiffness matrix อาจเกิดสภาวะ ill condition ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข หรือในบาง solver อาจไม่สามารถแก้สมการ $KU = R$ ได้
2. ความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข จะส่งผลกระทบต่อค่าหน่วยแรง ซึ่งทำให้มีค่าที่ไม่สม่าเสมอ และไม่ถูกต้องในบางกรณี จึงเป็นข้อจำกัดทำให้การตรวจสอบหน่วยแรงกับพื้นผิววัตถุต่าง ๆ เพื่อจำลองพฤติกรรมพลาสติก อาจไม่ได้ผลที่ถูกต้อง
3. ปัญหาการซ้อนทับของจุดต่อที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งเป็นหัวข้อหนึ่งที่ต้องใช้เวลาในการศึกษามาก
4. ข้อจำกัดในการวิเคราะห์ฉนวนรอยต่อที่เป็นผิวโค้ง เช่น ผิวของเสาเข็มกลม การหาคาเมตริกซ์ B ไม่สามารถใช้วิธีเดียวกับเสาเข็มสี่เหลี่ยมได้ และมีความซับซ้อนสูงกว่ามาก

ซึ่งปัญหาต่าง ๆ นี้เป็นหัวข้อที่จำเป็นต้องทำการศึกษาและวิจัยต่อไปในอนาคต เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมบริเวณฉนวนรอยต่อของเสาเข็ม และดินได้อย่างถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย