

บทที่ 5

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และผลวิเคราะห์

5.1 โปรแกรม CRISP 90

CRISP เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกเขียนและพัฒนาโดยกลุ่มผู้ทำงานวิจัยทางด้าน ธรณีวิทยา ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ของ มหาวิทยาลัย Cambridge เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1975. Mark Zytynski ได้เขียนรูปแบบแรกของโปรแกรมและเป็นที่ยอมรับสำหรับเป็นต้นแบบของการ ออกแบบ (Zytynski , 1976) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1977 Mike Gunn และปี ค.ศ. 1980 Arul Britto ได้มีการ ปรับปรุงโปรแกรม เริ่มแรกโปรแกรมนี้ถูกเรียกว่า MZSOL ต่อมาได้มีการปรับปรุงและพัฒนา จนเป็นที่รู้จักกันคือ CRISP ที่ย่อมาจาก CRItical State Program โปรแกรมนี้ สามารถใช้ วิเคราะห์แบบไม่ระบายน้ำ , แบบระบายน้ำ หรือ วิเคราะห์แบบอัดตัวคายน้ำในระบบ 3 มิติ หรือ 2 มิติของ plane strain หรือ axisymmetric ของวัสดุของแข็ง และรูปแบบของแบบจำลองของดินที่ สามารถวิเคราะห์ได้มีทั้งแบบ Anisotropic elasticity , in – homogeneous elasticity , Critical State soil และ Elastic-perfectly plastic

5.2 การผนวกแบบจำลองที่สร้างลงในโปรแกรม

จากการทดสอบ Consolidated Undrained Extension Triaxial ในสภาวะแบบIsotropic สามารถนำสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่า Stiffness ในระหว่างการลด แรง แบบ non – linear ในสภาวะที่มีความเครียดต่ำ (low – strain)ซึ่งระดับความเครียดนี้เป็น ระดับที่ใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ทำการก่อสร้าง

ค่า Modulus Elasticity ของดิน มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์โดยวิธี Finite element ดังนั้นในการผนวกแบบจำลองที่สร้างลงในโปรแกรมจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่า Stiffness เริ่มต้น ณ ที่ตำแหน่งต่างๆให้ถูกต้อง โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\frac{(E_{ini})_p}{(E_{ini})_{pref}} = \sqrt{\frac{p}{p_{pref}}}$$

โดยที่ $(E_{ini})_p$ คือค่า Young's modulus เริ่มต้นเมื่อ ค่า mean stress เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ p

และ $(E_{ini})_{p_{ref}}$ คือค่า Young's modulus เริ่มต้นที่จุดอ้างอิง เมื่อ ค่า mean stress เริ่มต้นที่จุดอ้างอิงมีค่าเท่ากับ p_{ref}

อัตราส่วนของค่า Young's modulus เริ่มต้น ณ ตำแหน่งของค่า mean stress ต่างๆ มีความเกี่ยวข้องกับค่า Young's modulus เริ่มต้น ณ ตำแหน่งที่อ้างอิง และค่า mean stress ที่อ้างอิง จากนั้นก็นำแบบจำลองที่ได้จากการทดสอบนำมาหาค่า Stiffness ของดินในสภาวะการลดแรงในขณะทำการขุดอุโมงค์

ในการปรับปรุงโปรแกรม CRISP นั้น โดยการเพิ่มแบบจำลองที่สร้างขึ้นลงใน Subroutine DLIN โดยให้มีการคำนวณ normal stress, shear stress, mean stress และ deviator stress เริ่มต้น และคำนวณหาค่า Young's modulus เริ่มต้นในทุกจุดของดินโดยอาศัยค่า Young's modulus เริ่มต้น ณ ตำแหน่งที่อ้างอิง และค่า mean stress ที่อ้างอิง ในขณะทำการขุดอุโมงค์ค่า normal stress, shear stress, mean stress และ deviator stress จะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลทำให้ค่า Young's modulus มีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยใช้แบบจำลองที่ได้จากการทดลองนี้เป็นสมการในการกำหนดค่า Young's modulus ของดินในขณะขุดเจาะอุโมงค์ จากนั้นก็จะคำนวณค่า Shear modulus, ค่า deformation ณ ตำแหน่งต่างๆ

5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ undrained

5.3.1 ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นแบบ non-linear elastic

ในการใช้แบบจำลองนี้ จำเป็นจะต้องรู้ค่า Young's modulus เริ่มต้น ณ ตำแหน่งที่อ้างอิง และค่า mean stress ที่อ้างอิง และค่าพารามิเตอร์ m^* และ n^* ที่ได้จากสมการที่ 4.2 ก็สามารถหาค่าการทรุดตัวต่างๆของพื้นแผ่นดินได้ ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ G-BC-B5 Sta. 6+607 และ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนพระราม4 หน้าไร่จุ่มนิสตัน หลุมเจาะที่ BH - 10+890

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Non – linear elasticที่ใช้ในการวิเคราะห์
ในโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ และ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

โครงการ	ระดับความลึก (m)	Eref (kN/m ²)	Pref (kN/m ²)	γ_{bulk} (kN/m ³)
G-BC-B5	16	3,000*	192	16
(Sta.6+607)	36	50,000*	460	18
ถนนศรีนครินทร์				
รถไฟฟ้าใต้ดิน	12	2,452**	140	16
ถนนพระราม 4	20	41,447**	252	19
หน้าโชว์รูมนิสตัน	40	63,800	530	19

ค่า m^* และ n^* ได้จากสมการที่ 4.2 (จูดีพร ชงยศ ,1996) ** (แมนสรวง จีนจิ๋ว, มนัสพล วรสิทธิ์
เศรษฐ์ และ ฌรัฐพล สุขอนันต์,2540)

5.3.2 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง Modified Cam – Clay

ในการใช้แบบจำลอง Modified Cam – Clay จำเป็นจะต้องหาค่า κ คือค่าความชันของ
เส้น swelling ในกราฟ $e - \ln p'$, λ คือค่าความชันของเส้น compression ในกราฟ $e - \ln p'$, e_{cs} คือ
ค่าอัตราส่วนช่องว่างบน critical state line สำหรับค่า p' มีค่าเท่ากับ $1, M$ คือค่าคงที่ของ critical
state frictional, ν คือค่าอัตราส่วนของ Poisson, γ_{bulk} คือความหนาแน่นของดินที่ชั้นที่พิจารณา
แบบจำลองนี้จำเป็นต้องหาค่า initial yield locus (p'_0) ซึ่งเป็นค่าที่จะต้องทราบพารามิเตอร์
หลายค่าอย่างเช่นค่า OCR, K_0 และค่า M ความสัมพันธ์ระหว่างค่า OCR กับค่า K_0 แสดงในรูปที่
5.1 ตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และตารางที่ 1 ใน ผผนวก ก แสดง
ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวกรุงเทพฯ (Lee,1995)

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Modified Cam-clay ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ และ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

โครงการ	ระดับความลึก (m)	K	λ	e_{cs}	M	U	γ_{bulk} (kN/m ³)
G-BC-B5 (Sta.6+607) ถนนศรีนครินทร์	16	0.09	0.372	3.17	0.93	0.49	16
	36	0.026	0.111	1.02	0.88	0.49	18
รถไฟฟ้าใต้ดิน ถนนพระราม 4 หน้าโชว์รูมนิสสัน	12	0.09	0.372	3.17	0.93	0.49	16
	20	0.026	0.111	1.02	0.88	0.49	19
	40	0.026	0.111	1.02	0.88	0.49	19

5.4 การคาดคะเนการทรุดตัวของพื้นแผ่นดิน

5.4.1 การคาดคะเนการทรุดตัวของผิวดินโดยวิธี Empirical

ในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ข้อมูลการสำรวจของโครงการอุโมงค์ส่งน้ำของการประปาโครงการ G-BC-B5 ถนน ศรีนครินทร์ ที่ได้มาจากงานวิจัยของคุณฐิติพร ชงยศ ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

ค่าการทรุดตัวมากที่สุดของผิวดินที่ได้จากการสำรวจ ที่สถานี 6+607 วัดได้ 12 มม. (S_{max}) จากสมการของ PECK และ SCHMIDT , 1969 สามารถหาค่าการทรุดตัวของผิวดิน ณ ตำแหน่งใด

$$S = S_{max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

1) การหาค่า i

โดยวิธี PECK (1969) สำหรับโครงการ G – BC –B5 ที่สถานี 6+607 จุดศูนย์กลางของอุโมงค์อยู่ที่ความลึก (Z) 18.50 เมตรขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ 2.66 เมตร ดังนั้นคำนวณหาค่า Z/2R จะได้เท่ากับ 6.95 และจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.5 จะได้ค่า i/R มีค่าระหว่าง 3.2 ถึง 4.8 และคำนวณหาค่า i ได้ 4.26 และ 6.38

โดยวิธีของ SCHMIDT (1969) ค่า a คือค่ารัศมีของอุโมงค์เท่ากับ 1.33 เมตร และค่า Z มีค่าเท่ากับ 18.5 เมตร ดังนั้นจากรูปที่ 2.6 ค่า i มีค่าเท่ากับ 6.28

โดยวิธีของ NORGROVE, COOPER และ ATTEWELL (1979) โดยแทนค่า K และ n เท่ากับ 1 จะคำนวณหาค่า i ได้เท่ากับ 9.25

โดยวิธีของ O'REILLY และ NEW (1982) โดยแทนค่า K เท่ากับ 0.4 และ Z เท่ากับ 18.5 เมตร จะคำนวณหาค่า i ได้ 7.4

2) การหาค่า S_{max}

การคำนวณหาค่า S_{max} สามารถคำนวณได้จากค่า i และค่า V_s ดังสมการนี้

$$S_{max} = \left(\frac{V_s}{2.5i} \right)$$

โดยที่ V_s คือ ปริมาณการทรุดตัวต่อความยาว

โดยวิธี PECK (1969) สำหรับโครงการ G – BC – B5 ที่สถานี 6+607 จะใช้ % volume loss เท่ากับ 2 ปริมาตรที่ขุดเท่ากับ 6.069 ลบ.ม.ต่อ เมตรขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางหลุมเจาะเท่ากับ 2.78 เมตร ดังนั้นคำนวณค่า V_s ได้เท่ากับ 0.121 เมื่อแทนค่า i และค่า V_s ที่ได้จากวิธี PECK (1969) จะประมาณค่าการทรุดตัวมากที่สุดของผิวดินเท่ากับ 7.59 ถึง 11.36 มิลลิเมตร

โดยวิธีของ SCHMIDT (1969) ค่า ratio ของค่า total overburden pressure กับค่า undrained shear strength มีค่ามากกว่า 1 และแทนค่า m เท่ากับ 0.006 และ 0.02 ดังนั้นคำนวณหาค่า V_s ได้ 1.5 ถึง 4.5 % เมื่อแทนค่า i และค่า V_s ที่ได้ จะประมาณค่าการทรุดตัวมากที่สุดของผิวดินเท่ากับ 5.8 ถึง 17.39 มิลลิเมตร

โดยวิธีของ NORGROVE, COOPER และ ATTEWELL (1979) โดยแทนค่า m เท่ากับ 2.5 สำหรับดินเหนียว และปริมาตรที่ขุด เท่ากับ 6.069 ลบ.ม.ต่อเมตร จะคำนวณหาค่า V_s ได้เท่ากับ 0.151 ลบ.ม.ต่อเมตรเมื่อแทนค่า i และค่า V_s ที่ได้ จะประมาณค่าการทรุดตัวมากที่สุดของผิวดินเท่ากับ 6.53 มิลลิเมตร

โดยวิธีของ O'REILLY และ NEW (1982) โดยแทนค่า m เท่ากับ 0.5 ถึง 3 % สำหรับดินเหนียวแข็ง และปริมาตรที่ขุด เท่ากับ 6.069 ลบ.ม.ต่อเมตร จะคำนวณหาค่า V_s ได้เท่ากับ 0.03 ถึง 0.181 ลบ.ม.ต่อเมตร เมื่อแทนค่า i และค่า V_s ที่ได้ จะประมาณค่าการทรุดตัวมากที่สุดของผิวดินเท่ากับ 1.6 ถึง 9.78 มิลลิเมตร

จากวิธีการหาค่าการทรุดตัวมากที่สุดของผิวดินโดยวิธี Empirical จะพบว่าค่าที่ได้จากวิธีของ PECK และ SCHMIDT, 1969 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่สำรวจได้ รูปที่ 5.1 แสดงค่าการทรุดตัว

ของผิวดินที่ตำแหน่งต่างๆของโครงการ G - BC -B5 ที่สถานี 6+607 ที่ได้จากวิธีการของ PECK และ SCHMIDT , 1969

ส่วนโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินจะใช้วิธีการของ PECK และ SCHMIDT , 1969 โดยใช้ข้อมูลบริเวณถนนพระราม 4 ด้านหน้าไขว้รุมนิสตัน หลุมเจาะที่ BH - 10+890 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์เท่ากับ 6.0 เมตร จุดศูนย์กลางของอุโมงค์อยู่ที่ระดับความลึก 20 เมตร โดยวิธี PECK คำนวณหาค่า $Z/2R$ จะได้เท่ากับ 3.33 และจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.5 จะได้ค่า i/R มีค่าระหว่าง 2.1 ถึง 3.3 และคำนวณหาค่า i ได้ 6.3 และ 9.9 และจะใช้ % volume loss เท่ากับ 2 ปริมาตรที่ขุดเท่ากับ 34.21 ลบ.ม.ต่อ เมตรขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางหลุมเจาะเท่ากับ 6.6 เมตร ดังนั้นคำนวณค่า V_s ได้เท่ากับ 0.684 ลบ.ม.ต่อ เมตร เมื่อแทนค่า i และค่า V_s ที่ได้จากวิธี PECK (1969) จะประมาณค่าการทรุดตัวมากที่สุดของผิวดินเท่ากับ 28 ถึง 43 มิลลิเมตร

โดยวิธีของ SCHMIDT (1969) ค่า a คือค่ารัศมีของอุโมงค์เท่ากับ 3 เมตร และค่า Z มีค่าเท่ากับ 20 เมตร ดังนั้นจากรูปที่ 2.6 ค่า m มีค่าเท่ากับ 8.1 ค่า ratio ของค่า total overburden pressure (32 t/m^2) กับค่า undrained shear strength (16.9 t/m^2) มีค่ามากกว่า 1 และแทนค่า m เท่ากับ 0.006 และ 0.02 ดังนั้นคำนวณหาค่า V_s ได้ 1.5 ถึง 4.9 % เมื่อแทนค่า i และค่า V_s ที่ได้ จะประมาณค่าการทรุดตัวมากที่สุดของผิวดินเท่ากับ 25 ถึง 76 มิลลิเมตร รูปที่ 5.2 แสดงค่าการทรุดตัวของผิวดินที่ตำแหน่งต่างๆของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน ที่บริเวณ BH - 10+ 890 ที่ได้จากวิธีการของ PECK และ SCHMIDT , 1969

5.4.2 การคาดคะเนการทรุดตัวของพื้นแผ่นดินโดยวิธี Numerical

การคำนวณผลโดยวิธี Numerical โดยในโครงข่าย element ของดินดังรูปที่ 5.3 แสดง mesh element ของดิน โครงการอุโมงค์ส่งน้ำ G-BC-B5 Sta. 6+607 และรูปที่ 5.4 แสดง mesh element ของดิน โครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินที่บริเวณ BH - 10+ 890

จากผลการคำนวณค่าการทรุดตัวที่ได้จากโปรแกรมสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) Proposed model และ Modified Cam - Clay นั้นสามารถอธิบายการเคลื่อนตัวของมวลดินอันเนื่องมาจากการก่อสร้างอุโมงค์ในดินเหนียวได้ค่อนข้างดี ดังแสดง ในรูปที่ 5.5 - 5.7 ค่าการทรุดตัวของอุโมงค์ส่งน้ำ G-BC-B5 Sta. 6+607 และ จากที่ทำการตรวจวัดจริง (รูปที่ 5.5 แสดงการเคลื่อนตัวของผิวดิน , รูปที่ 5.6 การเคลื่อนตัวของมวลดินตามระดับความลึก และ รูปที่ 5.7 การเคลื่อนตัวทางแนวราบที่ระยะห่างจากศูนย์กลางอุโมงค์ 3 เมตร) และ ในรูปที่ 5.8 - 5.10 ค่าการทรุดตัวของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินที่บริเวณ BH - 10+ 890 (รูปที่ 5.8 แสดง

การเคลื่อนตัวของผิวดิน , รูปที่ 5.9 การเคลื่อนตัวของมวลดินตามระดับความลึก และ รูปที่ 5.10 การเคลื่อนตัวทางแนวราบที่ระยะห่างจากศูนย์กลางอุโมงค์ 6 เมตร)

- 2) Proposed model ใช้ค่า Stress relaxation ประมาณ 9% มีค่าการทรุดตัวของผิวดินใกล้เคียงกับการสูญเสียมวลดิน 2 % นั้นหมายความว่าเมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์แล้วค่า stress ในดินยังคงค้างอยู่ 91 %

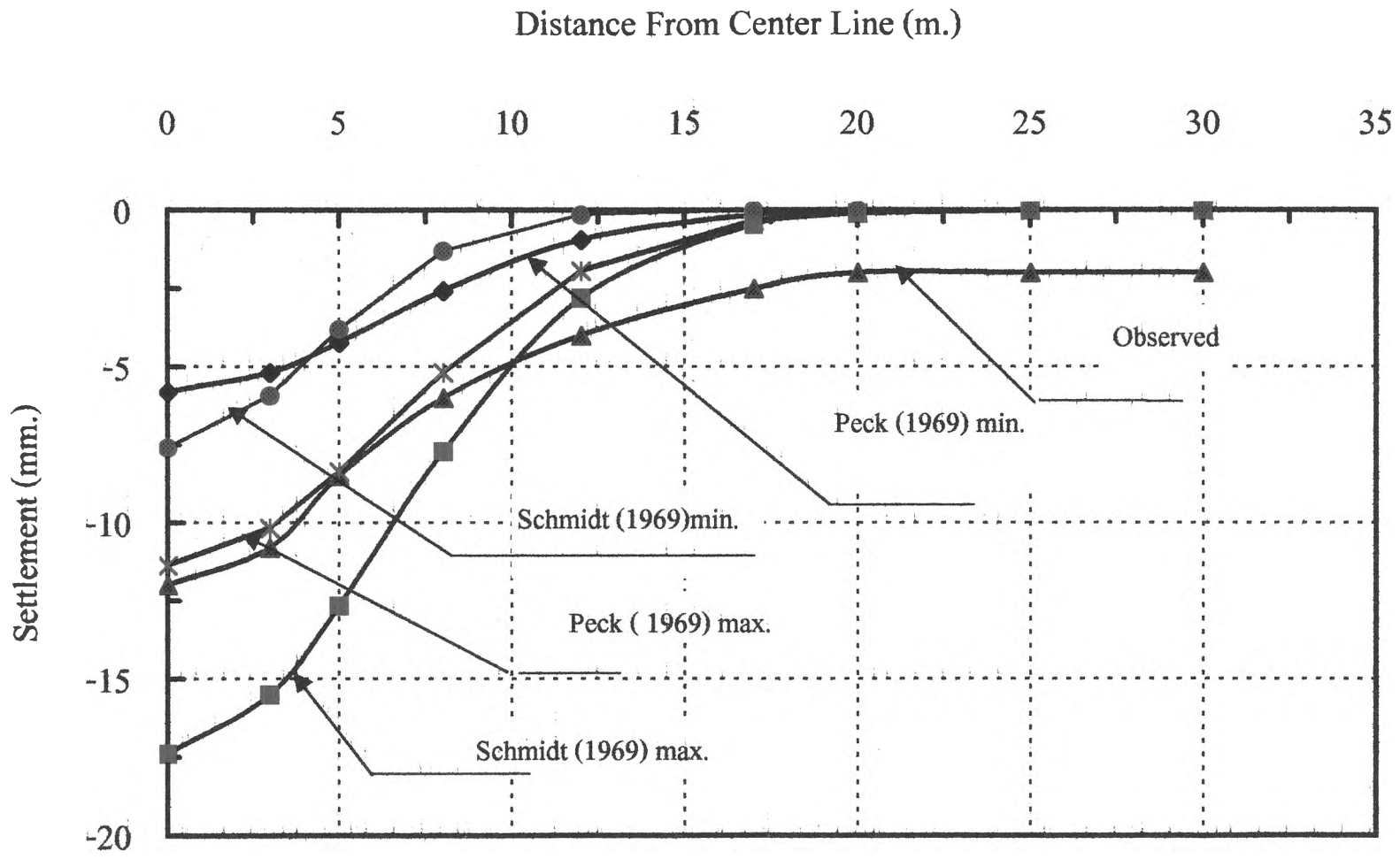
สาเหตุที่แบบจำลองที่เสนอสามารถประมาณการเคลื่อนตัวของมวลดินได้ดีนั้นคาดว่าเป็นมาจากการที่แบบจำลองนี้พิจารณาความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงของมวลดินไว้ แม้แต่ในระดับที่การเคลื่อนตัวยังมีปริมาณน้อย ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งสมมุติให้ดินนั้นมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงในระยะแรกๆ ของการคำนวณ ทำให้พฤติกรรมที่ได้จากการคำนวณในช่วงแรกนั้นแตกต่างจากพฤติกรรมจริงที่ได้จากการทดสอบ

5.5 พฤติกรรมของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์

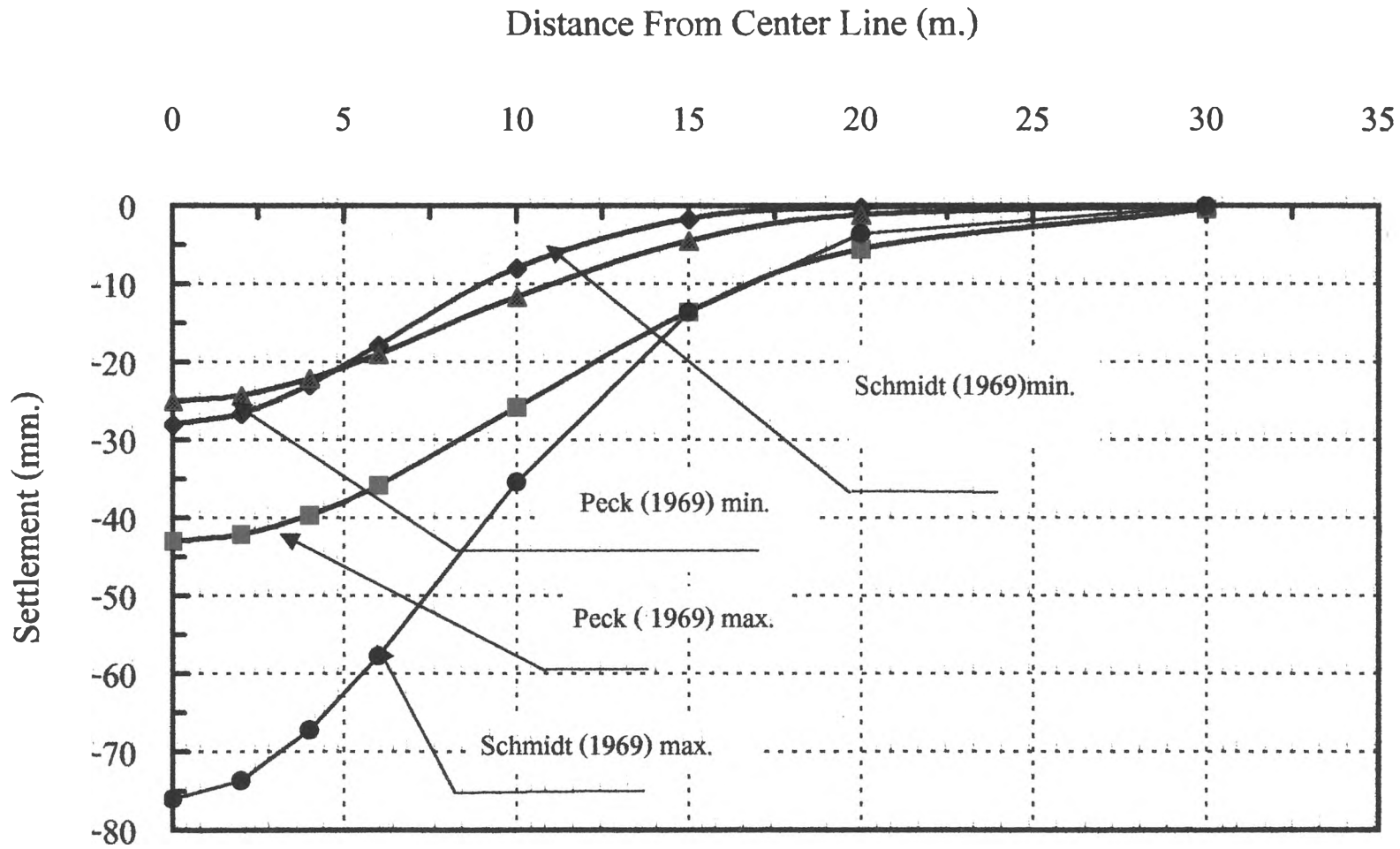
จากการศึกษาโดยทั่วไปพบว่า การเปลี่ยนแปลงของความเค้น (Stress) ของมวลดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์นั้นมีสภาพคร่าวๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ในบริเวณ CROWN ของอุโมงค์ การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงตามแนวแกน (ตามแนวตั้งและแนวราบ) จะมีค่อนข้างมาก และจะเกิดหน่วยแรงเฉือนขึ้นด้วย
- 2) ในบริเวณ SPRING LINE ของอุโมงค์ การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงตามแนวราบและแนวตั้งจะเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของดิน
- 3) ในบริเวณ INVERT ของอุโมงค์การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงตามแนวตั้งจะมีค่อนข้างมาก ในขณะที่ หน่วยแรงตามแนวราบ และหน่วยแรงเฉือนมีค่อนข้างน้อย

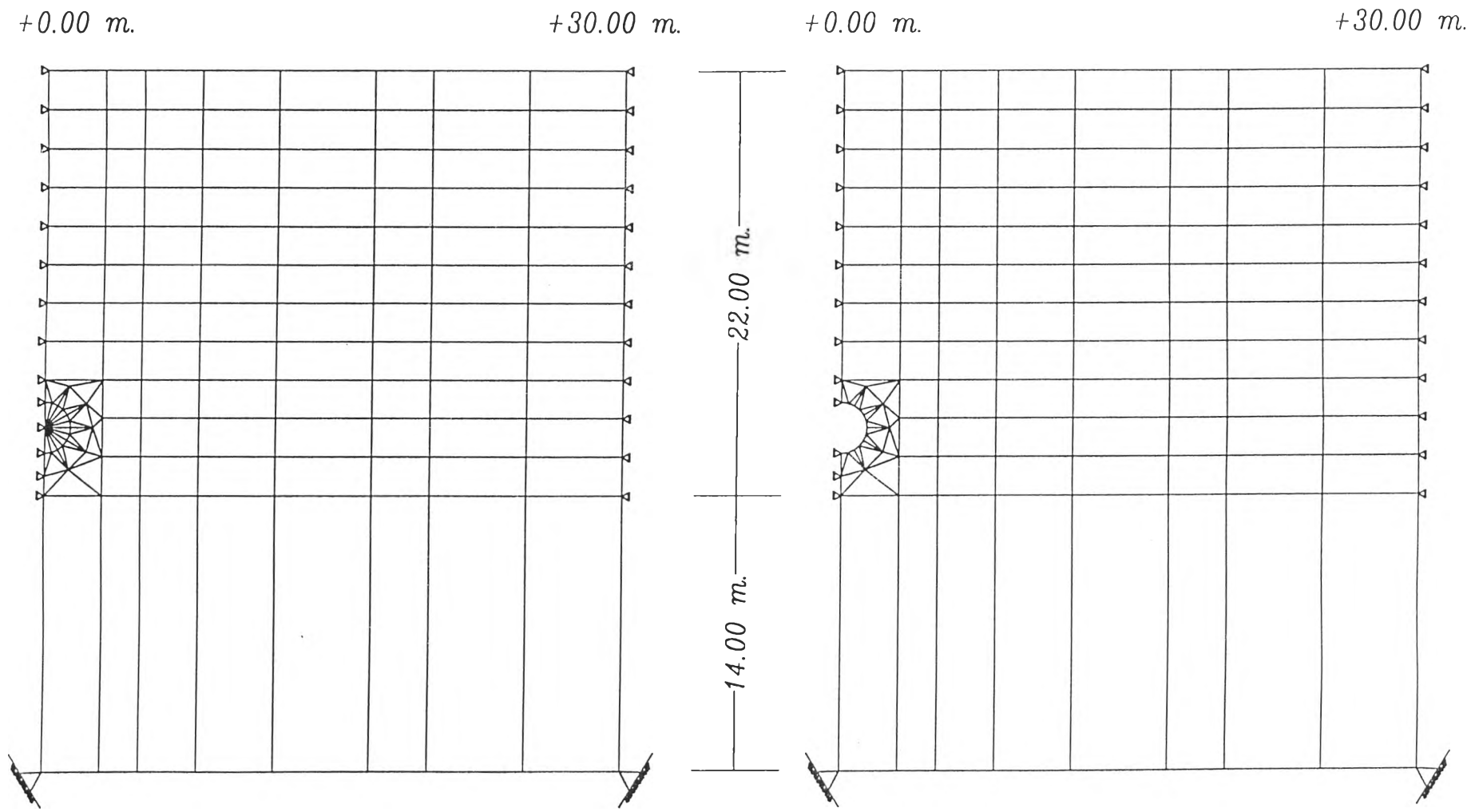
การเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นนี้ ยกเว้นการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงตามแนวราบและแนวตั้งในข้อที่ 2 จะเป็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่มีการลดลงของหน่วยแรงนั้นๆ ข้อควรสังเกต คือหน่วยแรงที่กล่าวถึงนั้นได้กำหนดให้หน่วยแรงอัดมีค่าเป็นบวก ดังนั้นการลดลงของหน่วยแรงไม่ว่าจะเป็นหน่วยแรงตามแนวราบ หรือตามแนวตั้ง เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ จึงหมายถึงการที่เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในมวลดิน ซึ่งลักษณะดังกล่าวในทางวิศวกรรมปฐพีหมายถึงสภาวะของแรงเป็นแบบการปลดแรง (Unloading)



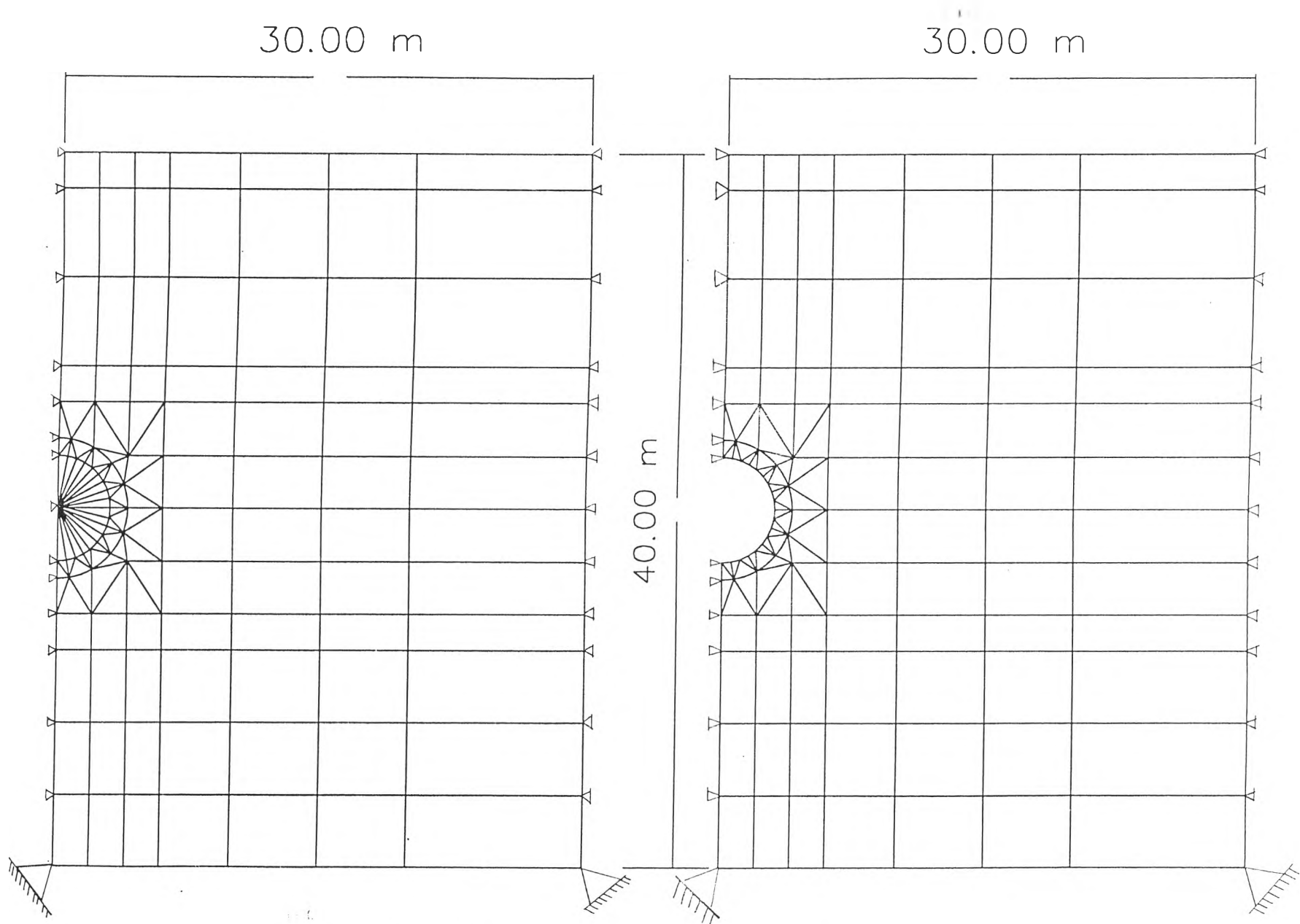
รูปที่ 5.1 การเคลื่อนตัวของมวลดิน จากวิธี Empirical ของอุโมงค์ส่งน้ำ



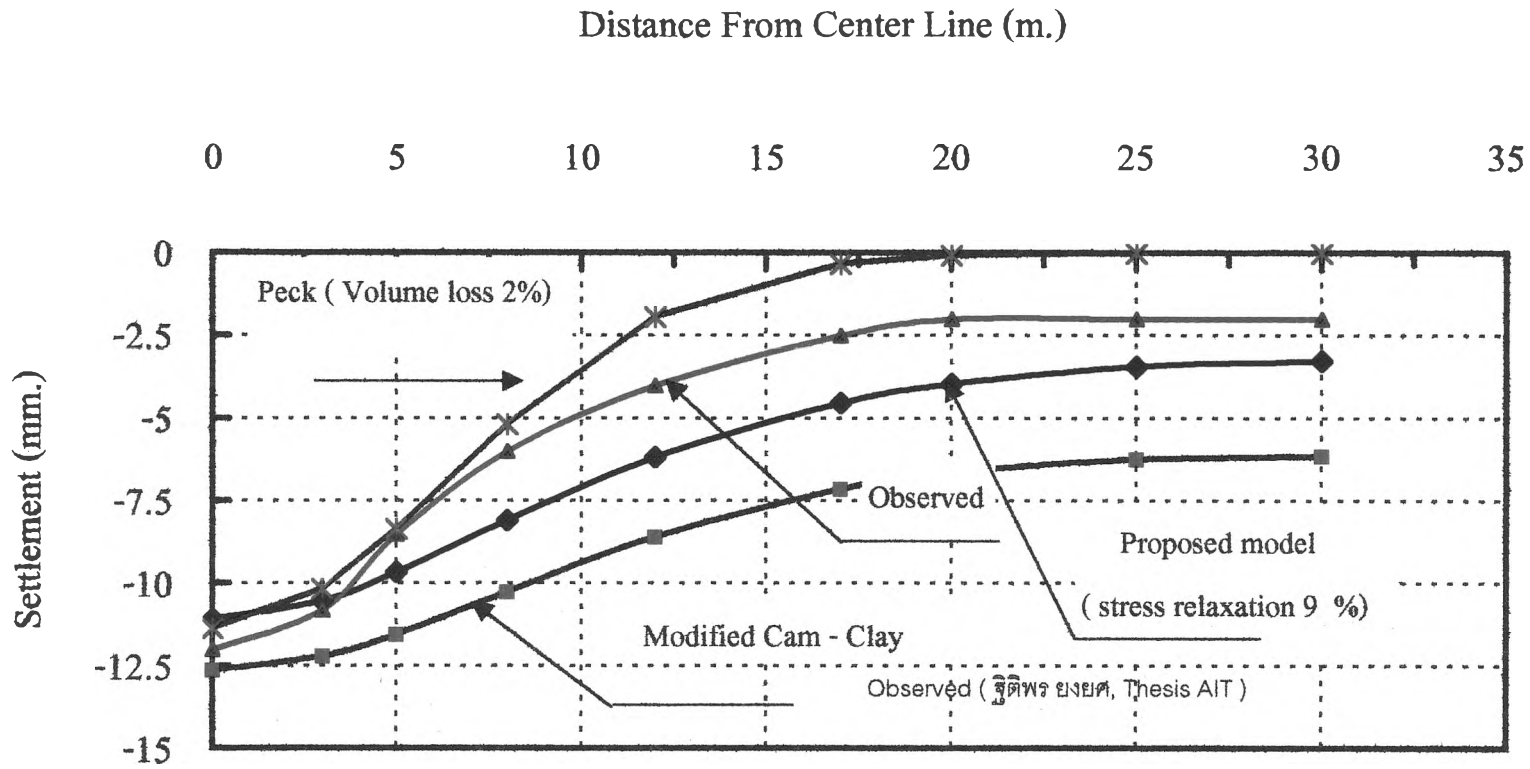
รูปที่ 5.2 การเคลื่อนตัวของมวลดิน จากวิธี Empirical ของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน



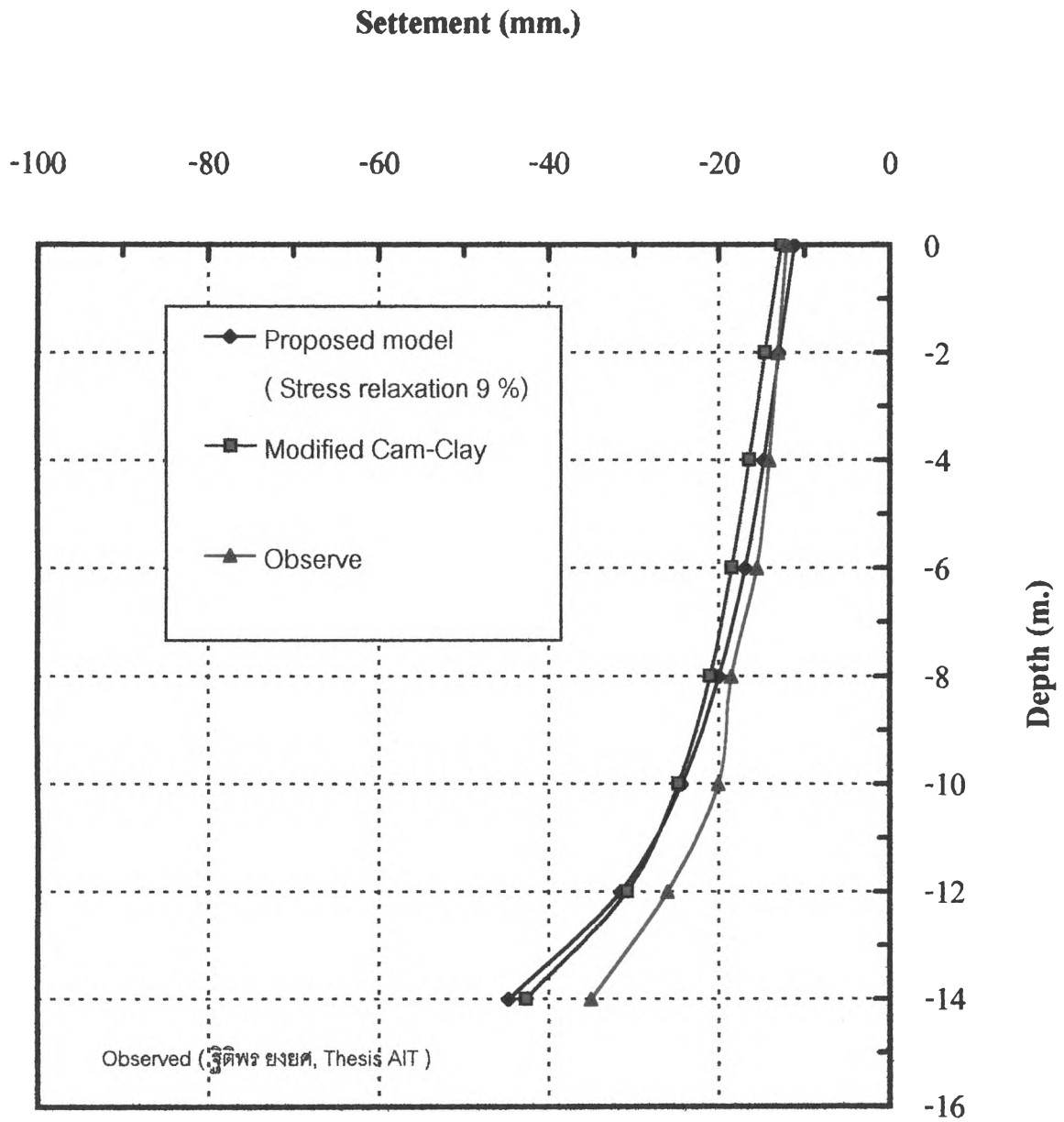
รูปที่ 5.3 แสดง Mesh ของโครงการอุโมงค์ส่งน้ำ G-BC-B5



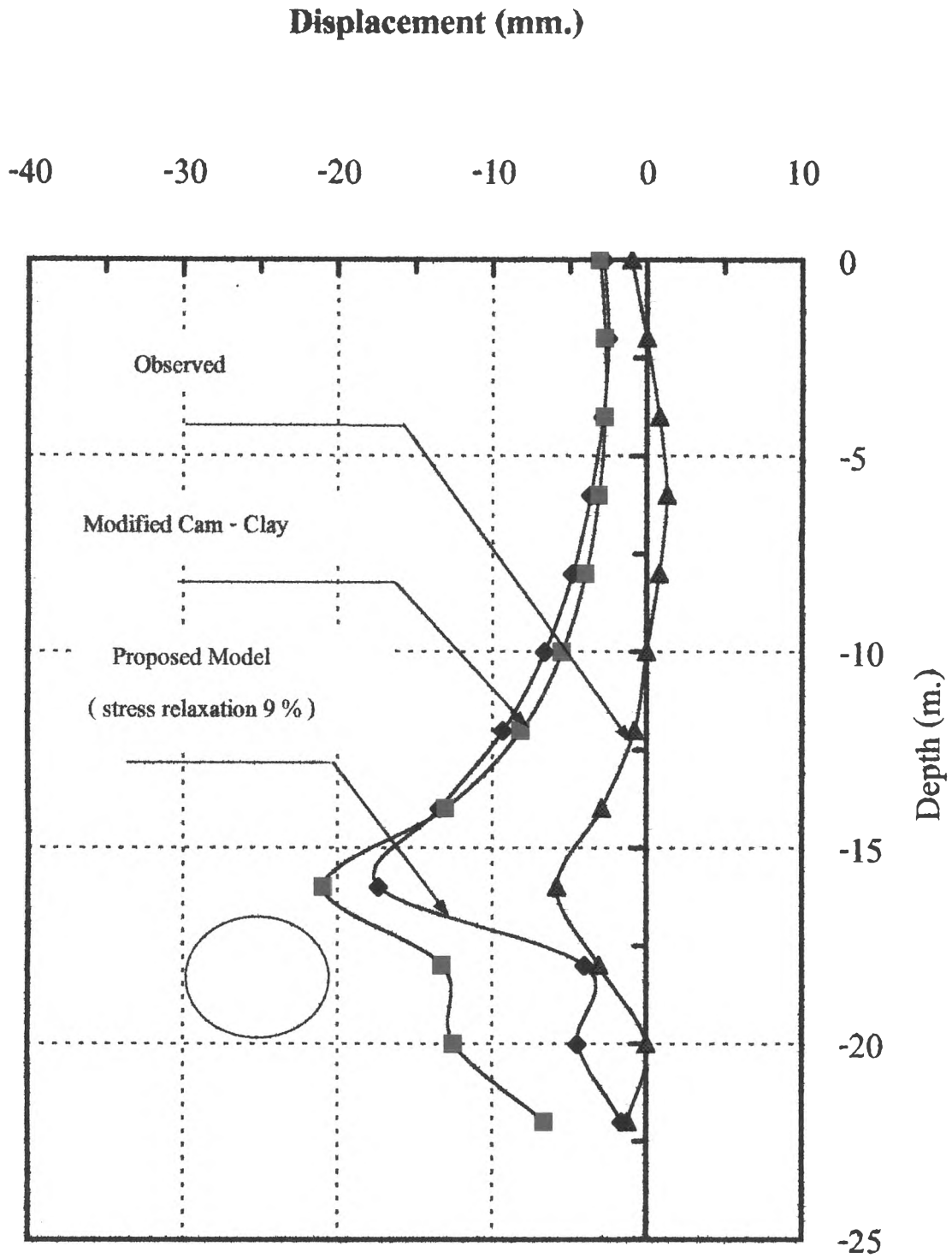
รูปที่ 5.4 แสดง Mesh ของโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินบริเวณถนนพระราม 4 (BH-10+890)



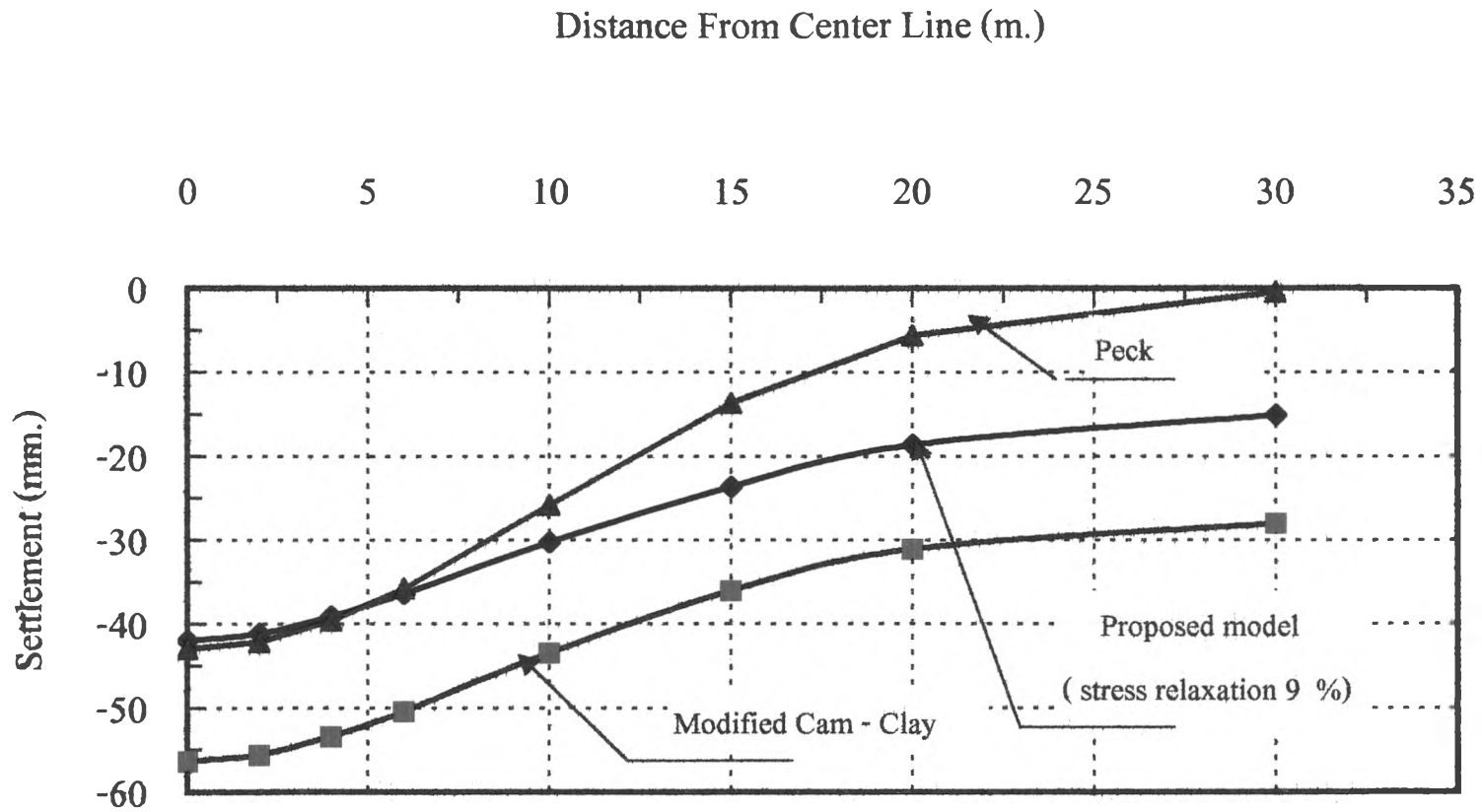
รูปที่ 5.5 การเคลื่อนตัวของผิวดิน จากการคำนวณด้วยแบบจำลองชนิดต่างๆของอุโมงค์ส่งน้ำ G-BC-B5



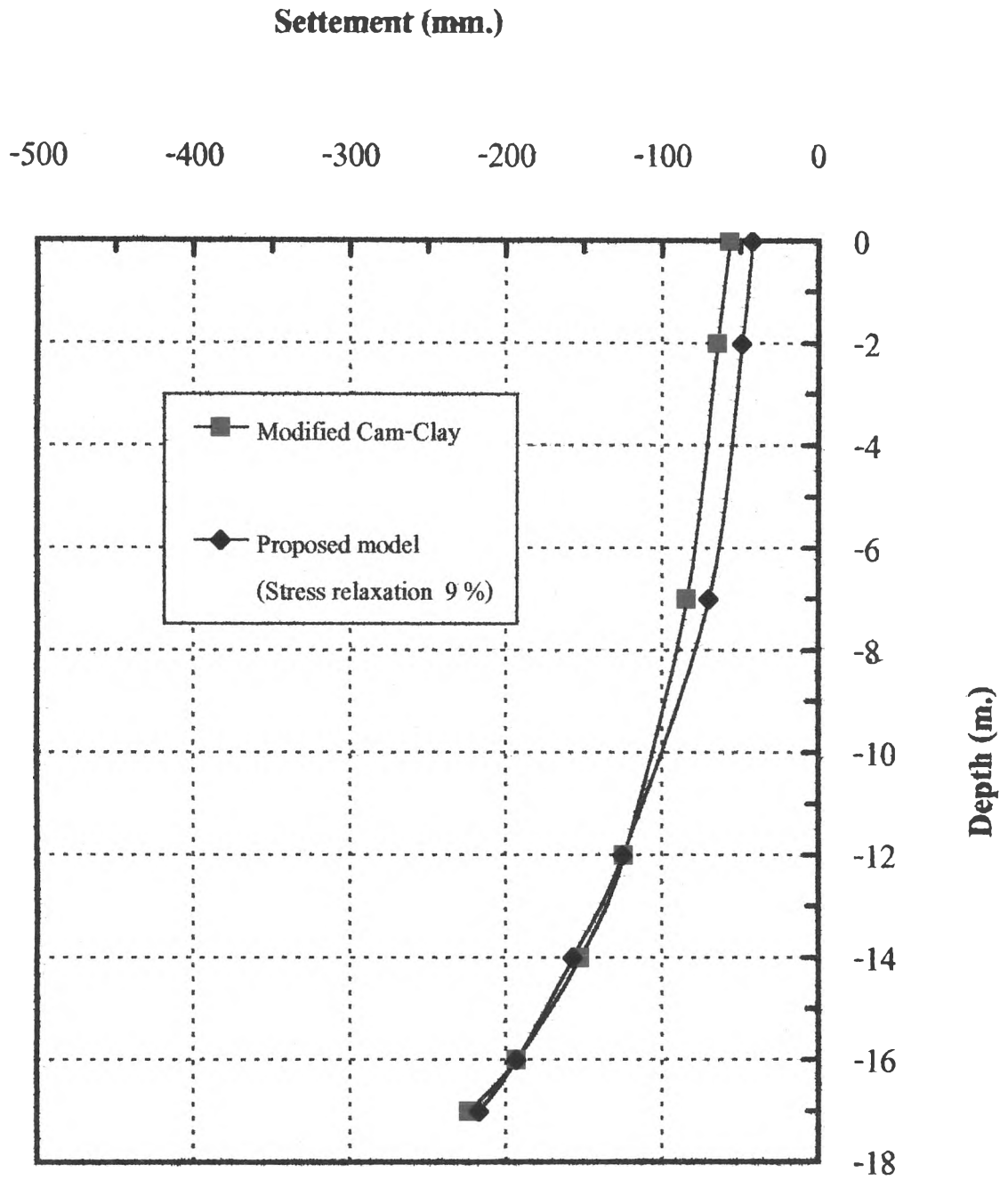
รูปที่ 5.6 การทรุดตัวในแนวดิ่งที่ระยะความลึกต่างๆของอุโมงค์ส่งน้ำ G-BC-B5



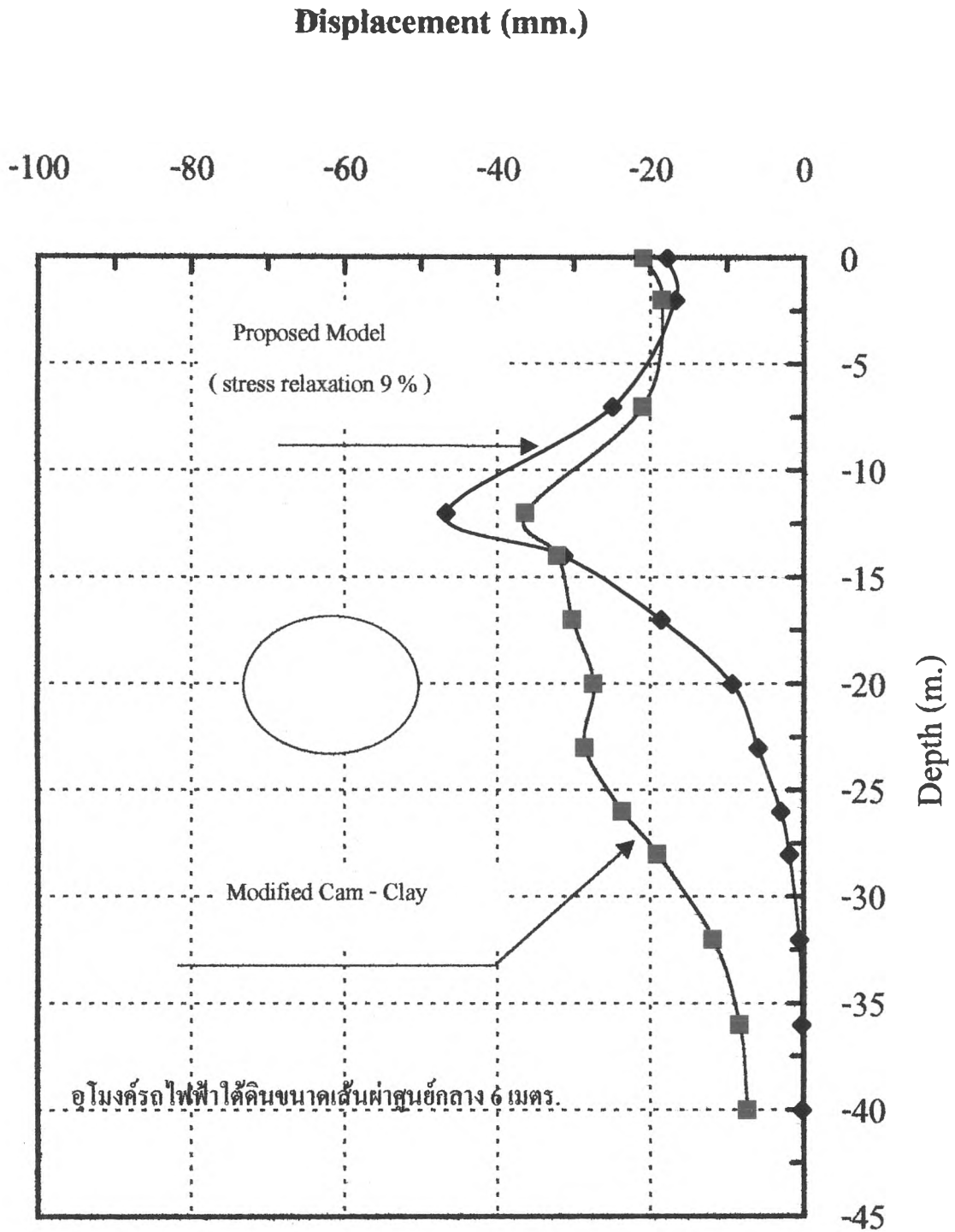
รูปที่ 5.7 การเคลื่อนตัวของมวลดินตามแนวราบของอุโมงค์ส่งน้ำ G-BC-B5 ที่ระยะทางห่างจากศูนย์กลาง 3 เมตร



รูปที่ 5. 8 การเคลื่อนตัวของผิวดิน จากการคำนวณแบบจำลองชนิดต่างๆ ของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน



รูปที่ 5.9 การเคลื่อนตัวของมวลดินตามระดับความลึกจากการคำนวณด้วยแบบจำลองชนิดต่างๆของอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน



รูปที่ 5.10 การเคลื่อนตัวของมวลดินตามแนวราบ ที่ระยะทางห่างจากศูนย์กลาง 6 เมตร