

บทที่ 4

กรณีศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มจากการขุดเจาะอุโมงค์

4.1 กล่าวนำ

จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบและพฤติกรรมในลักษณะต่างๆของเสาเข็มจากการก่อสร้างอุโมงค์โดย Morton and king (1979) และ Loganathan et al.(2000) ได้ศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่า การขุดเจาะอุโมงค์อาจจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อเสาเข็ม โดยเฉพาะเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินอ่อน โดยขึ้นอยู่กับระยะห่างของเสาเข็มจากศูนย์กลางของอุโมงค์และตำแหน่งของเสาเข็มเป็นสำคัญ Chen et al.(1999) และ Loganathan et al.(1999) ใช้วิธีสองขั้นตอนเพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็ม ซึ่งพบว่า การขุดเจาะอุโมงค์เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดการแอ่นตัว และแรงตามแกนในเสาเข็มที่อยู่บริเวณข้างเคียง Mroueh and Shahrour (2002) และ Cheng et al.(2007) ใช้วิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ วิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของดินและเสาเข็ม พบว่า ตำแหน่งปลายเสาเข็มและระยะห่างของเสาเข็มจากศูนย์กลางของอุโมงค์มีอิทธิพลต่อเสาเข็มทั้งเสาเข็มกลุ่มและเสาเข็มเดี่ยว ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการศึกษาและกรณีศึกษาผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่น่าสนใจจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งแต่ละวิธีมีลักษณะและขั้นตอนการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันและมีรายละเอียดดังนี้

4.2 วิธีการทำนายผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์

ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีผู้ทำการศึกษาวิจัยผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์อย่างแพร่หลายและมีการพัฒนาวิธีการทำนายผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์อย่างต่อเนื่อง โดยสามารถทำการแบ่งวิธีการศึกษาผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ทั้งหมดออกเป็น 4 วิธีหลักๆด้วยกัน ได้แก่

1. วิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) เป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาค่าผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ได้ เช่น วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีนักวิจัยหลายท่านที่ใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์ เช่น Mroueh and Shahrour (2000), Chang et al (2007), Suwansawat (2006) ปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ที่ทันสมัยขึ้นจึงสามารถจำลองสภาพของปัญหาได้ทั้งกรณีปัญหา 2 มิติและ 3 มิติ

2. วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory experiment) โดยจะจำลองสภาพการขุดเจาะอุโมงค์เพื่อสังเกตพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของดินและโครงสร้างข้างเคียง ปัจจุบันที่นิยมใช้เป็นการทดสอบจำลองแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifuge test) เช่น ที่นำเสนอโดย Loganathan et al. (2000) เป็นต้น

3. วิธีสองขั้นตอน (Two – Stage) โดยที่วิธีนี้ในการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 จะทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินอันเนื่องมาจากการเจาะอุโมงค์ที่ไม่มีเสาเข็มฝังอยู่ ส่วนขั้นตอนที่ 2 จะทำการวิเคราะห์โดยนำค่าการเคลื่อนตัวของดินจากขั้นตอนที่ 1 มาทำการวิเคราะห์หาผลการตอบสนองของเสาเข็มต่อการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีเสาเข็มฝังอยู่ด้วยวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์หรือวิธี boundary element method ตัวอย่างการศึกษาผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธีนี้ เช่น, Loganathan et al (2001) ,Xu and Polos (2001) , Kitiyodom et al (2005), Chen et al (2006) เป็นต้น

4. วิธีผสมทางเลือก (Combine Method) วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ โดยที่ในการวิเคราะห์จะใช้วิธีการมากกว่า 1 วิธี แล้วนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกัน เช่น Shahin et al (2006) และ Lee and Bassett (2006) เป็นต้น

วิธีการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์แต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบและข้อจำกัดแตกต่างกันไป เช่น วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวของดินได้ดีและสามารถวิเคราะห์ผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงได้ แต่มีข้อจำกัดหรือความเสี่ยงต่อความผิดพลาดอย่างยิ่งหากค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณและการจำลองพฤติกรรมอยู่บนพื้นฐานที่ไม่ถูกต้องรวมทั้งยังต้องการเวลาในการวิเคราะห์พอสมควร วิธีการทดลองในห้องปฏิบัติการสามารถสังเกตพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวและพังทลายของดินได้อย่างชัดเจน แต่มีอุปสรรคในกระบวนการจำลองให้เหมือนสภาพจริงและใช้เวลาในการวิเคราะห์มากที่สุด

วิธีสองขั้นตอนสามารถนำมาใช้วิเคราะห์การตอบสนองของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ได้ดี ทำให้ทราบลักษณะรูปแบบและค่าการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นนั้น ส่งผลผลกระทบต่อเสาเข็มอย่างไร แต่ถ้าหากการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 1 ได้ค่าการเคลื่อนตัวของดินที่ไม่ถูกต้องแล้ว จะส่งผลต่อการวิเคราะห์การตอบสนองของเสาเข็มในขั้นตอนที่ 2 ที่อาจจะส่งผลให้การวิเคราะห์การตอบสนองของเสาเข็มไม่ถูกต้องด้วยเช่นกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 1 จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

4.3 กรณีศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็ม

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างเสาเข็มด้วยวิธีที่แตกต่างกันซึ่งแต่ละวิธีมีความน่าสนใจและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงกรณีศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มอันเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์จากอดีตจนถึงปัจจุบันที่น่าสนใจ

4.3.1 Loganathan et al. (2000)

Loganathan et al. (2000) ได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อฐานรากเสาเข็มโดยใช้การทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง (Centrifuge test) ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบทั้งหมด จะมีตำแหน่งความลึกของอุโมงค์ที่แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง (Test1, Test2 1 และ Test3) ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ถูกจำลองให้มีมาตราส่วนย่อ 1: 100 ของขนาดจริงของเสาเข็ม ในการทดสอบจะทำการจำลองขนาดของเสาเข็มและอุโมงค์ตามมาตราส่วนย่อ ซึ่งขนาดจริงของเสาเข็มและอุโมงค์แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง (ขนาดจริง)

Test No.		Tunnel depth , H: (m)
1	Pile length, $L_p = 18\text{ m}$ Pile diameter , $d = 0.8\text{ m}$	15
2	$EI = 1400\text{ MNm}^2$ Tunnel diameter , $D = 6.0\text{ m}$	18
3	Stiff kaolin clay, $\sim 75\text{ kPa}$	21

เสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มมีระยะห่างจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งของอุโมงค์ถึงแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเดี่ยวและแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มกลุ่มแถวแรกเท่ากับ 5.5 เมตร ในเสาเข็มกลุ่ม 2×2 ต้นแต่ละต้นมีระยะห่าง 2.50 เมตร การทดสอบจะทำการจำลองสภาพเงื่อนไขต่างๆ ของการทดสอบ ในกล่องที่ทำมาจากอลูมิเนียมที่มีความกว้างภายใน 200 มิลลิเมตร ความยาวภายใน 650 มิลลิเมตรและความสูงภายในมีค่าเท่ากับ 470 มิลลิเมตรที่ด้านล่างของกล่องจะมีรูระบายน้ำเพื่อระบายน้ำได้โดยตรงผ่านทางรูระบายน้ำนี้ ดินเหนียว Kaolin จะถูกผสมกับน้ำด้วยปริมาณ water content เท่ากับ 120%โดยใช้เครื่องผสมทำการผสมภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมงแล้วจึงเทส่วนผสมที่ได้ลงในกล่องอลูมิเนียมแต่ก่อนที่จะเทต้องวางกระดาษกรองบนชั้นทรายระบาย ที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร เพื่อที่จะป้องกันการผสมกันระหว่างทรายและดินเหนียวที่ทำการผสม ค่า Strength ของดินที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าประมาณ 75 kPa

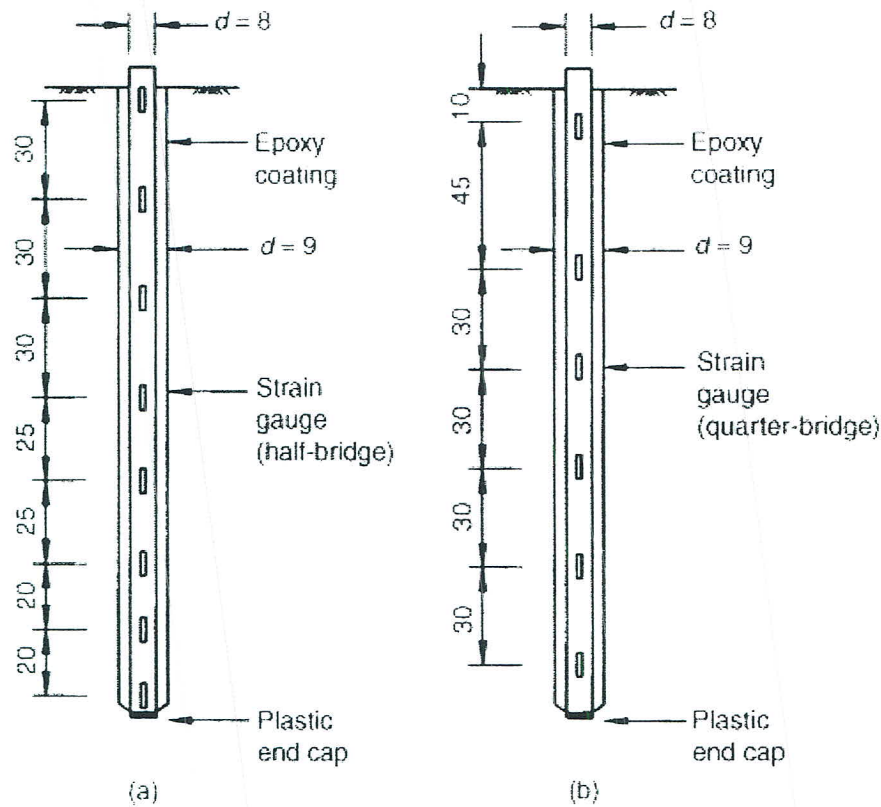
สมมติเสมอตลอดความหนาของตัวอย่างที่มีค่าเท่ากับ 300 มิลลิเมตร หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดของการอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation) ประมาณ $2 \text{ m}^2/\text{year}$ ตัวอย่างดินถูกเตรียมเป็น 2 ชั้น เพื่อให้ได้ความหนาของตัวอย่าง 300 มิลลิเมตรตามที่ต้องการ

$$S_r/\sigma'_v = 0.18 \text{ OCR}^{0.8} \quad (4.1)$$

ดินเหนียว Kaolin มีค่าน้ำหนักขึ้น (bulk unit weight) เท่ากับ $16.5 \text{ kN} / \text{m}^3$ และสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation) ประมาณ $2 \text{ m}^2/\text{year}$ ตัวอย่างดินถูกเตรียมเป็น 2 ชั้น เพื่อให้ได้ความหนาของตัวอย่าง 300 มิลลิเมตรตามที่ต้องการ

เสาเข็มตามขนาดจริงเป็นเสาเข็มคอนกรีตมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร มีค่า Bending Rigidity (EI) เท่ากับ 1400 MNm^2 ในขณะที่เสาเข็มที่ทำการจำลองแบบย่อส่วนหาได้จากความสัมพันธ์ $E_p I_p = N^4 E_m I_m$ สำหรับค่า Bending Rigidity และ $d_p = N d_m$ สำหรับค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเมื่อ d คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม, N คือค่ามาตราส่วนแบบจำลองหมุนเหวี่ยง ซึ่งในการทดสอบนี้ N มีค่าเท่ากับ 100, E คือค่ายังโมดูลัส, I คือค่า Section Modulus และ ตัวสับสคริป p และ m แสดงถึงขนาดจริง (prototype) และขนาดย่อส่วน (model) ตามลำดับ

ซึ่งเมื่อทำการหาขนาดของเสาเข็มที่ย่อส่วนจะได้ขนาดของเสาเข็มที่ทำการทำจากแท่งทองเหลือง ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 8 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 7.24 มิลลิเมตร และมีความยาว 180 มิลลิเมตร ที่ด้านล่างสุดของเสาเข็มที่ย่อส่วนจะทำการติดแน่นด้วยแผ่นพลาสติก อุปกรณ์ Strain gauges จะถูกติดตั้งภายในจำนวน 8 จุดเพื่อวัดการตอบสนองทางด้านข้างของเสาเข็มโดยที่ในการวัดการตอบสนองของเสาเข็มทางด้านข้างนี้จะทำการติดตั้งกับเสาเข็มจำนวน 3 ต้นคือ เสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่มต้นที่อยู่ด้านหน้า (front pile) 1 ต้นพร้อมกับเสาเข็มต้นที่อยู่ทางด้านหลัง (rear pile) อีก 1 ต้น ในขณะที่การตอบสนองตามแนวแกนของเสาเข็มจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ Strain gauges ภายในเสาเข็มจำนวน 6 จุด โดยจะทำการติดตั้งกับเสาเข็มกลุ่มต้นที่อยู่ด้านหน้า รูปที่ 4.1 แสดงขนาดและการติดตั้งอุปกรณ์ Strain gauges ของเสาเข็มที่ย่อส่วน และคอนกรีตที่ยัดรีงเสาเข็มถูกจำลองย่อส่วนโดยใช้แผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร แผ่นอลูมิเนียมนี้จะยึดกับเสาเข็มเมื่อเสาเข็มมีระยะห่างจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงศูนย์กลางเสาเข็มเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ในแบบจำลองย่อส่วน เสาเข็มตามขนาดจริงรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดประมาณ 2.68 MN สำหรับเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เมตร ยาว 18 เมตร ในขณะที่เสาเข็มที่ย่อส่วน น้ำหนักที่ให้เสาเข็มรับมีค่าเท่ากับ 134 กรัม สำหรับเสาเข็มเดี่ยว และ 455 กรัม สำหรับเสาเข็มกลุ่ม



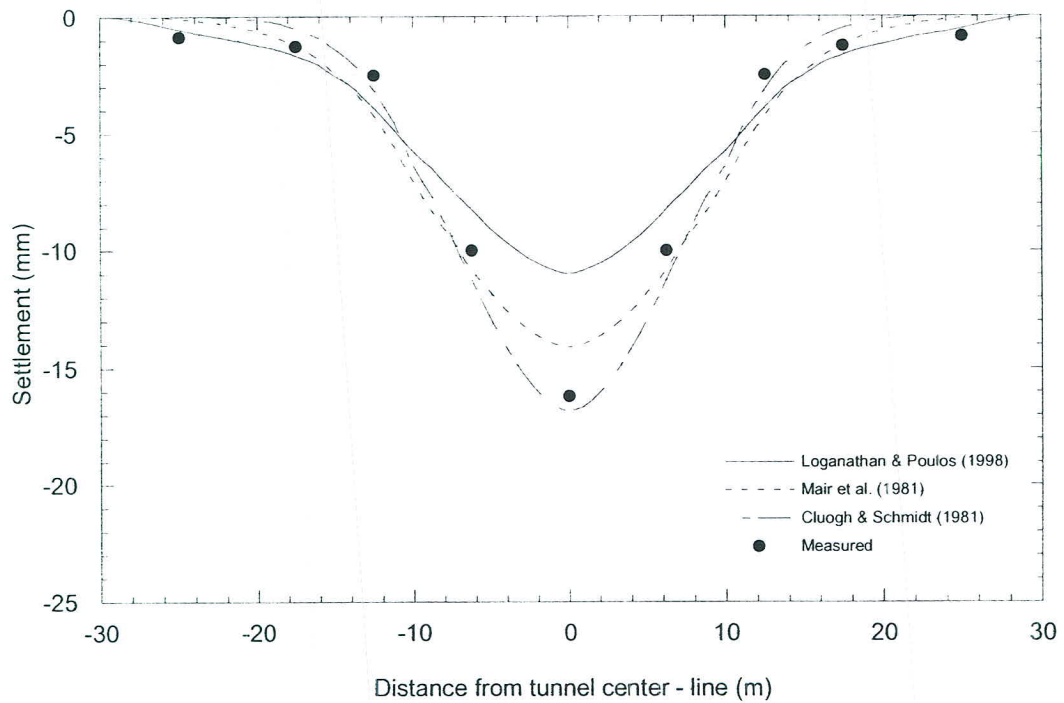
รูปที่ 4.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การวัดการตอบสนองต่อแรงทางด้านข้างและแรงตามแนวแกนของเสาเข็มในแบบจำลองของเสาเข็มแบบย่อส่วน

ในการวัดค่าการตอบสนองของเสาเข็มจะทำการวัดโดยใช้อุปกรณ์ Laser displacement-sensors เพื่อที่จะวัดการเคลื่อนที่บริเวณส่วนหัวเสาเข็มทั้งในแนวดิ่งและในแนวด้านข้าง Potentiometers จะใช้ในการวัดการทรุดตัวที่ผิวดิน Pore pressure transducers และ mark beads จะใช้วัดการเคลื่อนตัวของผิวดิน ในการทดสอบแต่ละชุดการทดสอบจะทดสอบวัดผลลัพธ์ตามค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลดิน ซึ่งค่าการสูญเสียมวลดินที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าเท่ากับ 1, 2.5, 5 และ 7.5 ตามลำดับ จากผลการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยงที่ทำการทดสอบโดย Loganathan et al. (2000) ได้ผลการทดสอบดังนี้

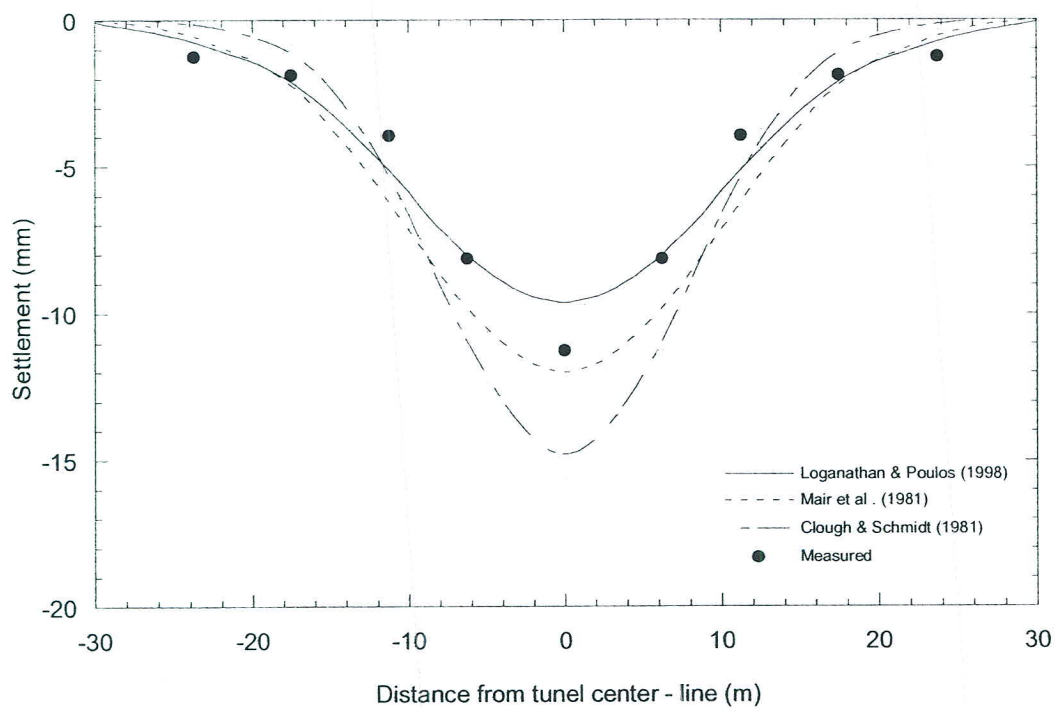
1. ค่าการทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlements)

ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินจะทำการเปรียบเทียบกับวิธี empirical และวิธี analytical ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 , 4.3 และ 4.4 ที่เป็นผลการทรุดตัวของ การทดสอบที่มีตำแหน่งความลึกของอุโมงค์แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง (Test 1, Test 2 และ Test 3) และค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลดิน 1% จากรูปจะพบว่าค่าที่คำนวณด้วยวิธี analytical มีความสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบแบบหมุนเหวี่ยงสำหรับการทดสอบที่ 2 และ 3 ในขณะที่ในการทดสอบ Test 1 ค่าการทรุด

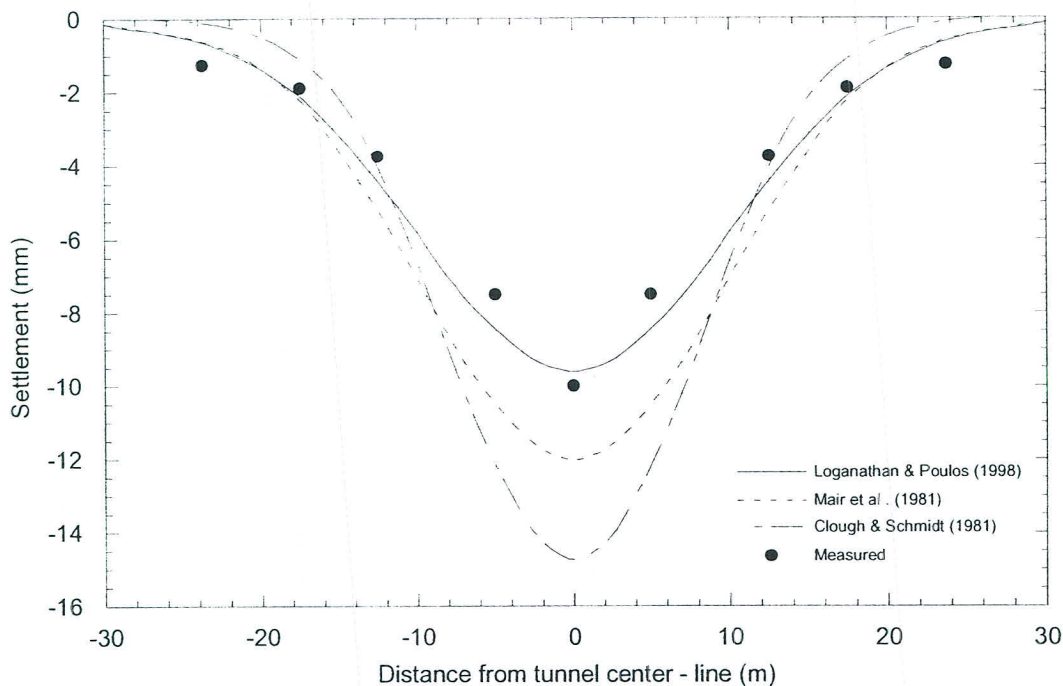
ตัวที่ผิวดินที่วัดได้จากการทดสอบแบบหมุนเหวี่ยง ณ จุดกึ่งกลางของอุโมงค์มีค่ามากและไม่สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวที่ผิวดินดังแสดงใน รูปที่ 4.5



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินในการทดสอบที่ 1 (Test 1)



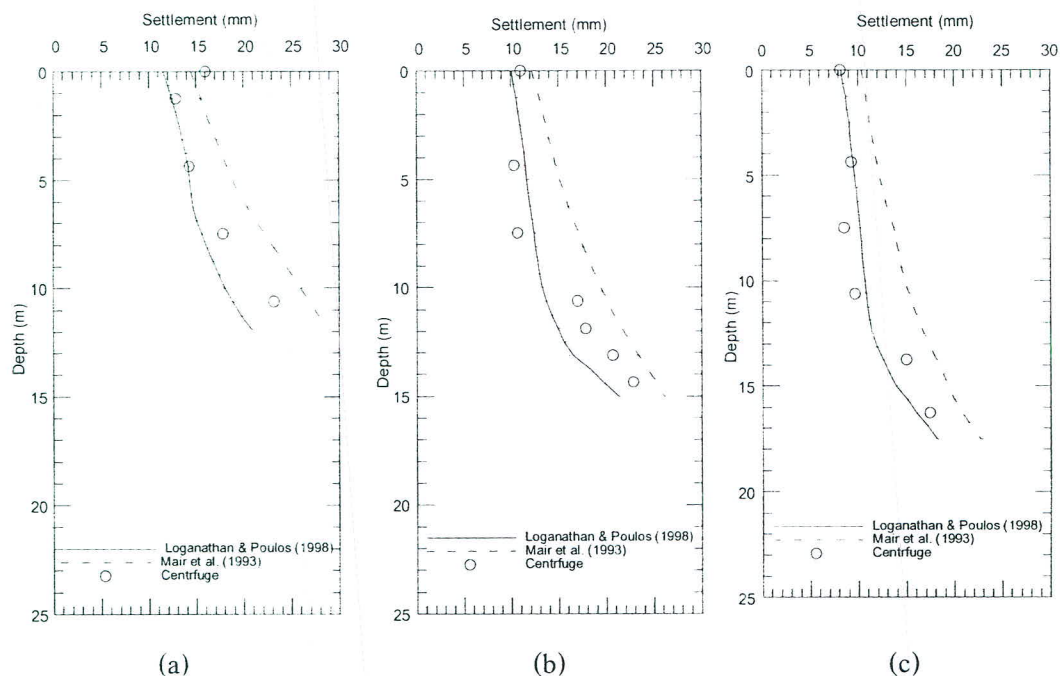
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินในการทดสอบที่ 2 (Test 2)



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินในการทดสอบที่ 3 (Test 3)

2. การทรุดตัวใต้ผิวดิน (Subsurface settlement)

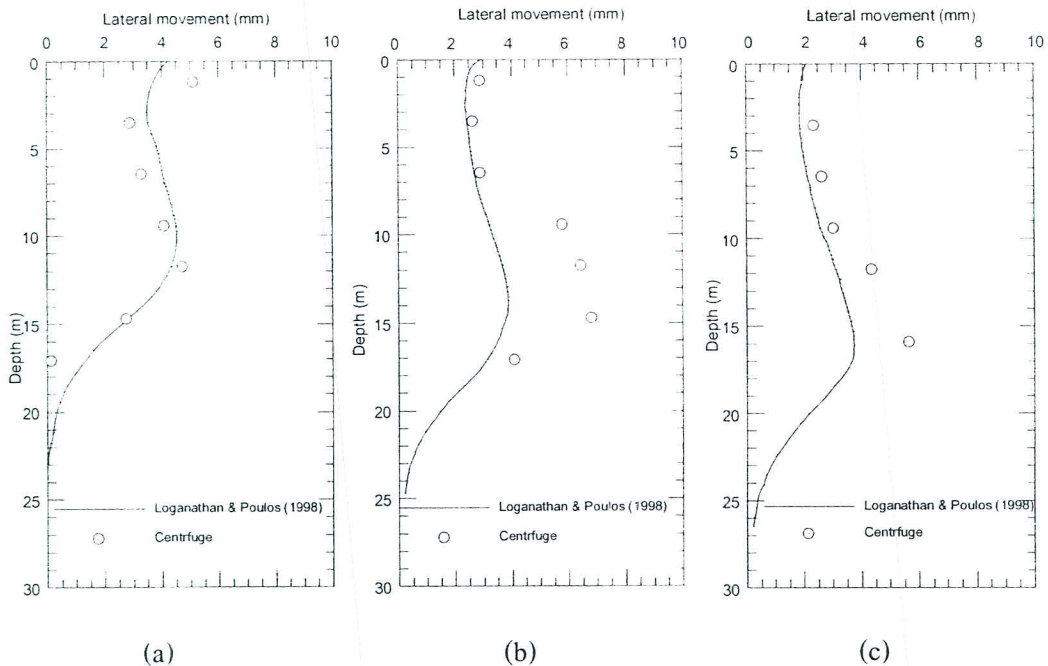
ค่าการเคลื่อนตัวใต้ผิวดินที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบหมุนเหวี่ยงนี้จะเสนอโดยเปรียบเทียบ กับค่าการเคลื่อนตัวใต้ผิวดินด้วยวิธี Empirical ที่เสนอโดย Mair et al (1993) และวิธี analytical ที่เสนอโดย Loganathan and Poulos (1998) ที่มีการสูญเสียมวลดิน 1% ซึ่งพบว่าค่าการเคลื่อนตัวใต้ผิวดินที่วัดได้จากการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยงมีค่าที่สอดคล้องกับวิธีที่เสนอโดย Loganathan and Poulos (1998) และต่างจากวิธีที่เสนอโดย Mair et al (1993) เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวใต้ผิวดิน: (a) test 1, (b) test 2, (c) test 3

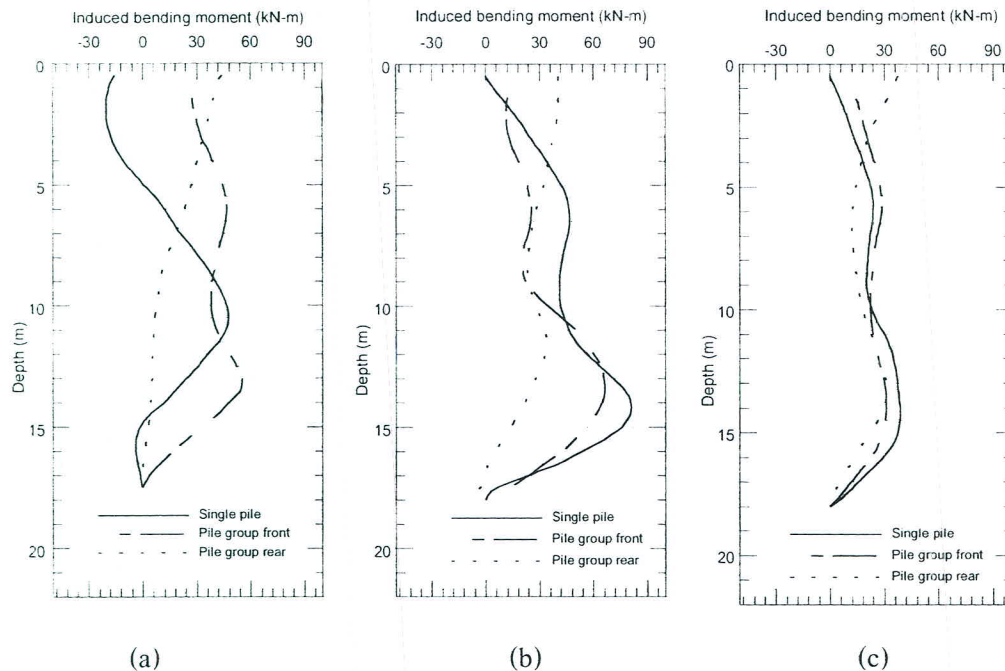
3. การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral movements)

การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินด้วยวิธีจำลองหมุนเหวี่ยงจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ด้วยสมการเชิงวิเคราะห์ที่ระยะในแนวราบ $X = 5.5$ m. สำหรับการสูญเสียมวลดิน 1% และผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างที่ได้จากสองวิธี ข้างต้นสอดคล้องกันดี แต่ในทางทดสอบ Test 3 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบหมุนเหวี่ยงที่ความ ลึกใต้ผิวดินจะขาดหายไป เนื่องจากข้อจำกัดในการบันทึกข้อมูลในการทดสอบ



รูปที่ 4.6 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่ระยะห่างจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งของ
อุโมงค์เท่ากับ 5.5 เมตร : (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 3

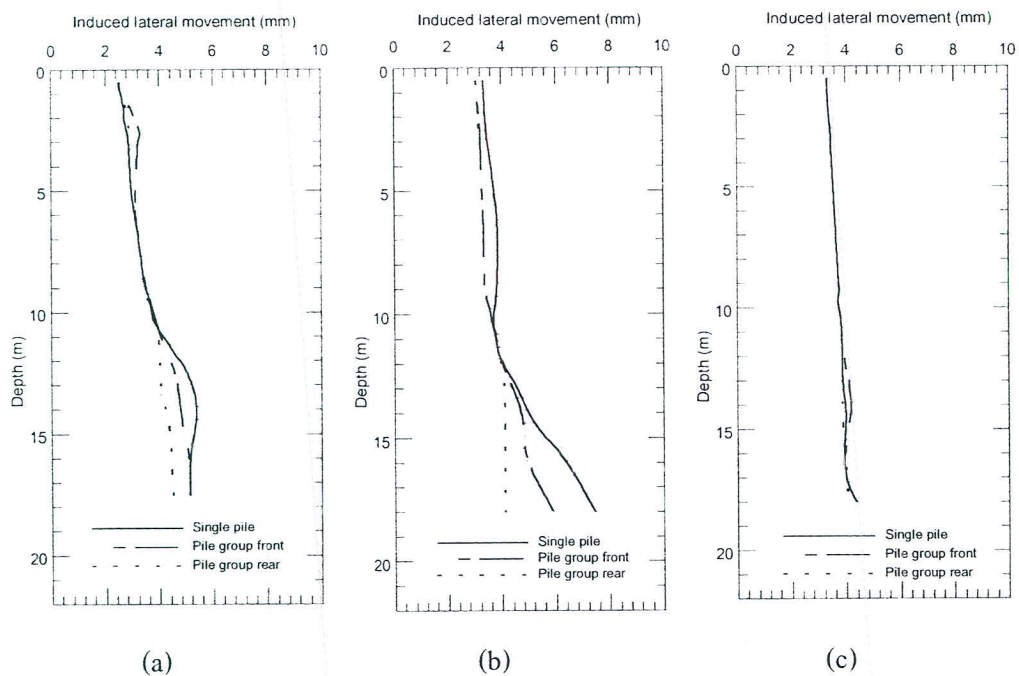
เมื่อพิจารณาถึงการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง โดยที่ทำการวิเคราะห์ห้กับเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มคั่นที่อยู่ในแถวแรกของกลุ่ม (front pile) พร้อมกับเสาเข็มกลุ่มคั่นที่อยู่ในแถวถัดมา (rear pile) จากผลการทดสอบที่ได้แสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งพบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่อยู่ในแถวแรกของกลุ่ม (front pile) จะเกิดขึ้นบริเวณส่วนล่างของเสาเข็มในขณะที่เสาเข็มที่อยู่ในแถวถัดจากแถวแรก (rear pile) จะเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของเสาเข็ม ลักษณะตามรูปตัดจะเห็นได้ว่าในกรณีของเสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่ม (front pile) จะมีลักษณะเหมือนกันและแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยที่บริเวณส่วนบนของเสาเข็ม เนื่องจากอิทธิพลของการยัดรีงบริเวณส่วนหัวของเสาเข็มกลุ่ม และเป็นที่น่าสังเกตว่าในการทดสอบ Test 2 ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มจะมีค่ามาก ถ้าตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์อยู่ที่บริเวณปลายของของเสาเข็ม ในขณะที่การทดสอบ Test 3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์อยู่ใต้บริเวณปลายของเสาเข็ม โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่คล้ายกัน



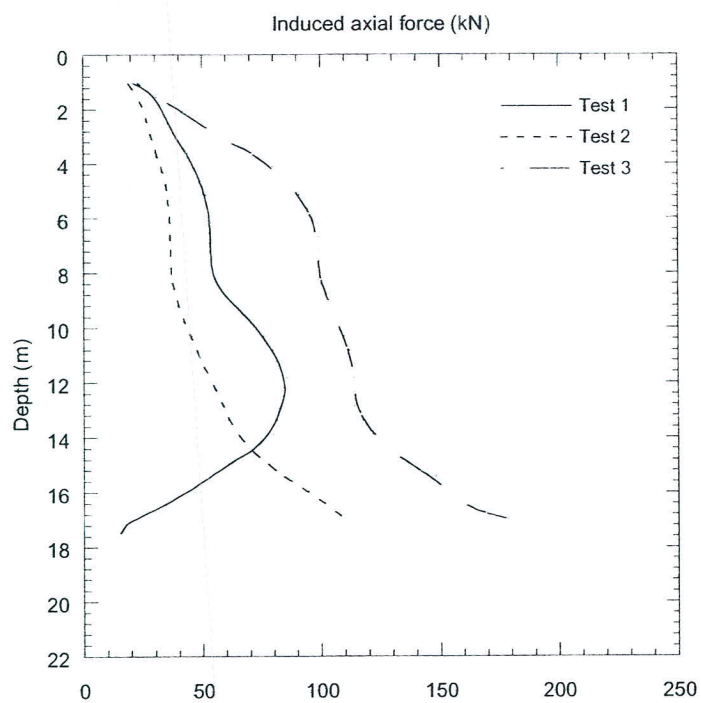
รูปที่ 4.7 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มจากการทดสอบ: (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 3

รูปที่ 4.8 แสดงการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม (Front pile , rear pile) สำหรับการทดสอบทั้งสามการทดสอบ (Test 1, Test 2, Test 3) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการแอ่นตัวทางด้านข้างสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งปลายของเสาเข็ม สำหรับทั้งสามการทดสอบ และในการทดสอบ Test 2 เสาเข็มจะมีการแอ่นตัวทางด้านข้างสูงโดยเฉพาะเสาเข็มเดี่ยว ในขณะที่ในการทดสอบ Test 3 การแอ่นตัวของเสาเข็มจะมีลักษณะเหมือนกัน และการเคลื่อนตัวทางด้านข้างบริเวณหัวเสาเข็มที่ทำการทดสอบมีลักษณะคล้ายกัน

รูปที่ 4.9 แสดงค่าของแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มคั่นที่อยู่ในแถวแรกของเสาเข็มกลุ่ม (front pile) ทั้งสามการทดสอบซึ่งพบว่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Test 3 จะมีค่ามากกว่าการทดสอบ Test 1 และ Test 2 และค่าแรงตามแนวแกนสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นที่ระดับเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์สำหรับการทดสอบ Test 1 ในขณะที่ในการทดสอบ Test 3 จะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายของเสาเข็ม



รูปที่ 4.8 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากการทดสอบ: (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 3



รูปที่ 4.9 แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็มจากการทดสอบ

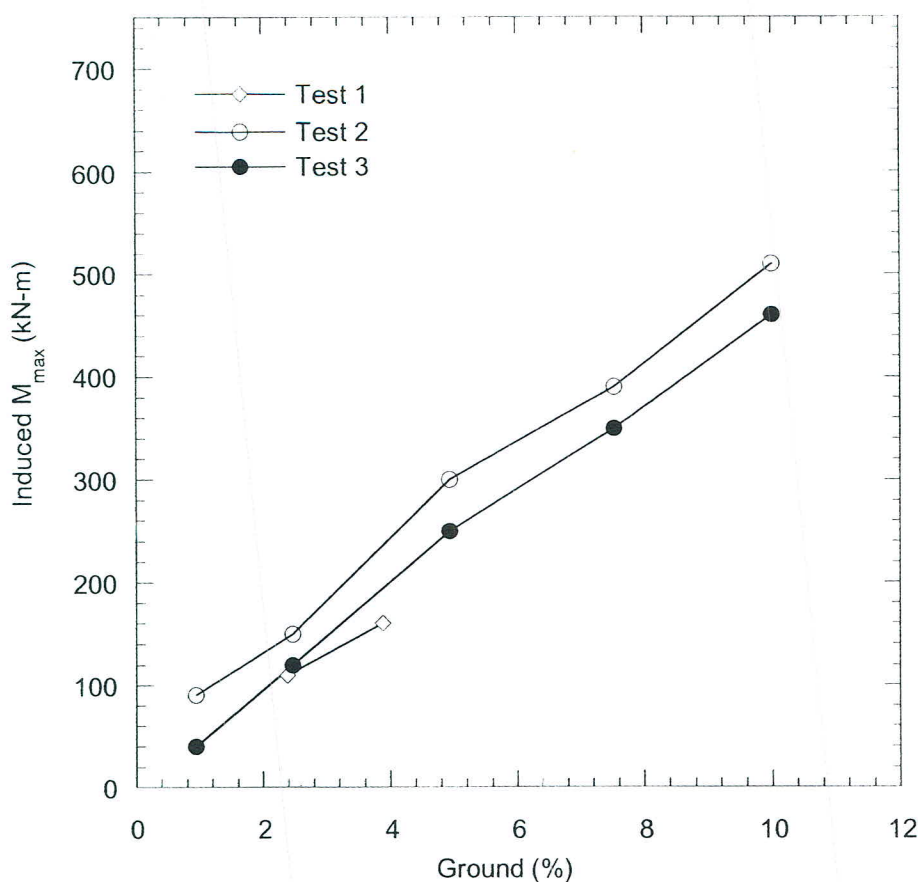
ตารางที่ 4.2 แสดงการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างบริเวณส่วนหัวของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม (Front pile, rear pile) ที่มีค่าการสูญเสียมวลดิน 1% ซึ่งพบว่าค่าการทรุดตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของเสาเข็มจะเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งของอุโมงค์อยู่ที่ระดับปลายของเสาเข็ม

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการเคลื่อนที่บริเวณส่วนหัวของเสาเข็มที่วัดได้จากการทดสอบ

Test No.	Settlement : mm		Lateral defection : mm	
	Single Pile	Pile group	Single Pile	Pile group
1	10.5	6.6	2.0	3.7
2	11.8	12.2	4.4	5.7
3	11.6	7.6	6.4	5.3

โมเมนต์คราก (Yield moment) ของเสาเข็มที่ย่อส่วนที่ทำการประมาณในระหว่างการสอบเทียบมีค่าประมาณ 0.75 Nm ซึ่งมีค่าประมาณ 750 kNm. ในเสาเข็มขนาดจริงในขณะที่ย่อโมเมนต์คัตสูงสุดเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่วัดได้ในระหว่างการทดสอบในเสาเข็ม(เสาเข็มเดี่ยว และเสาเข็มกลุ่ม) ที่มีค่าการสูญเสียมวลดิน 1 % มีค่าประมาณ 90 kNm. ซึ่งมีค่าประมาณ 12% ของโมเมนต์ครากของเสาเข็มค่ากำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาเข็มขนาดจริงมีค่าประมาณ 2680 kN ค่าแรงตามแนวแกนที่วัดได้จากการทดสอบที่ค่าการสูญเสียมวลดิน 1% มีค่าประมาณ 180 kN ในการทดสอบ Test 3 ซึ่งค่านี้แสดงว่าการขุดเจาะอุโมงค์ จากการทดสอบทำให้เกิดแรงตามแนวแกนประมาณ 7% ของค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม

รูปที่ 4.10 แสดงค่าโมเมนต์คัตสูงสุด อันเนื่องมาจากการทดสอบที่วัดได้ในเสาเข็มเดี่ยวที่มีอัตราค่าการสูญเสียมวลดินแตกต่างกัน อาจจะสังเกตได้ว่าโมเมนต์คัตสูงสุดที่วัดได้เมื่อนำไปทำการพล็อตกราฟระหว่างอัตราการสูญเสียมวลดินและโมเมนต์คัตสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเกือบจะเป็นเส้นตรงเมื่ออัตราการสูญเสียมวลดินน้อยกว่า 5 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของเสาเข็มที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ในดินเหนียวแข็งเมื่ออยู่ใกล้กับแนวการขุดเจาะอุโมงค์จะมีลักษณะเกือบจะเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์แบบอิลาสติกอาจจะนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีค่าการสูญเสียมวลดินน้อยกว่าประมาณ 5 %



รูปที่ 4.10 ค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบสำหรับค่าการสูญเสียมวลดินที่ต่างกัน

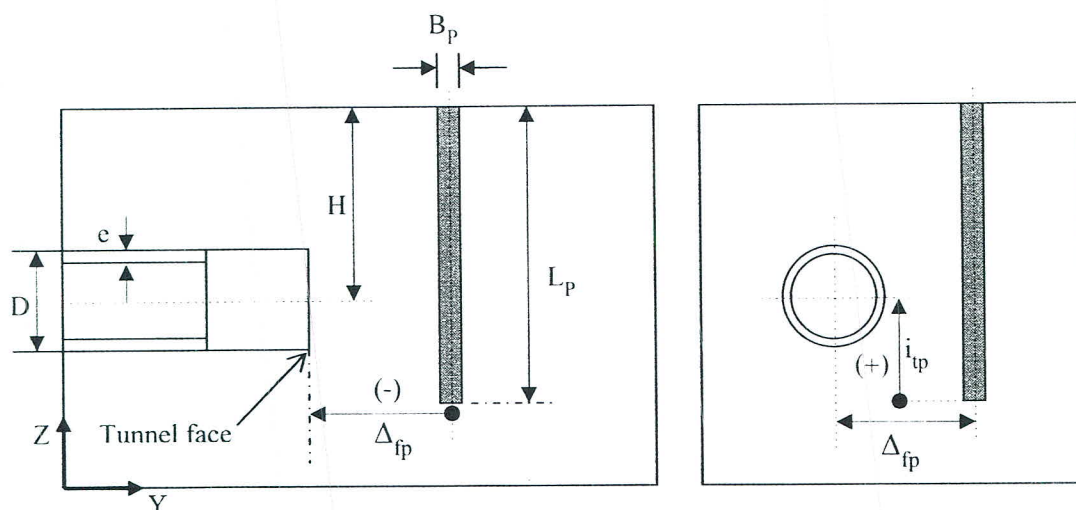
4.3.2 Mroueh and Shahrour (2002)

Mroueh and Shahrour (2002) ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในพื้นที่เมือง ที่อยู่ใกล้กับฐานรากเสาเข็มด้วยการใช้วิธี finite element โดยใช้แบบจำลอง Elastoplastic โดยจะทำการศึกษาการตอบสนองของเสาเข็มเดี่ยว และแนวคิดเกี่ยวกับอิทธิพลจากการเจาะอุโมงค์ที่มีต่อเสาเข็มกลุ่ม ปัญหาที่ทำการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.11 เมื่อ

i_{fp} คือระยะห่างระหว่างปลายเสาเข็มและเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์

Δ_{fp} คือระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของอุโมงค์กับแนวศูนย์กลางของเสาเข็ม

Δ_{fp} คือระยะห่างจากด้านหน้าของอุโมงค์ถึงแนวศูนย์กลางของเสาเข็ม

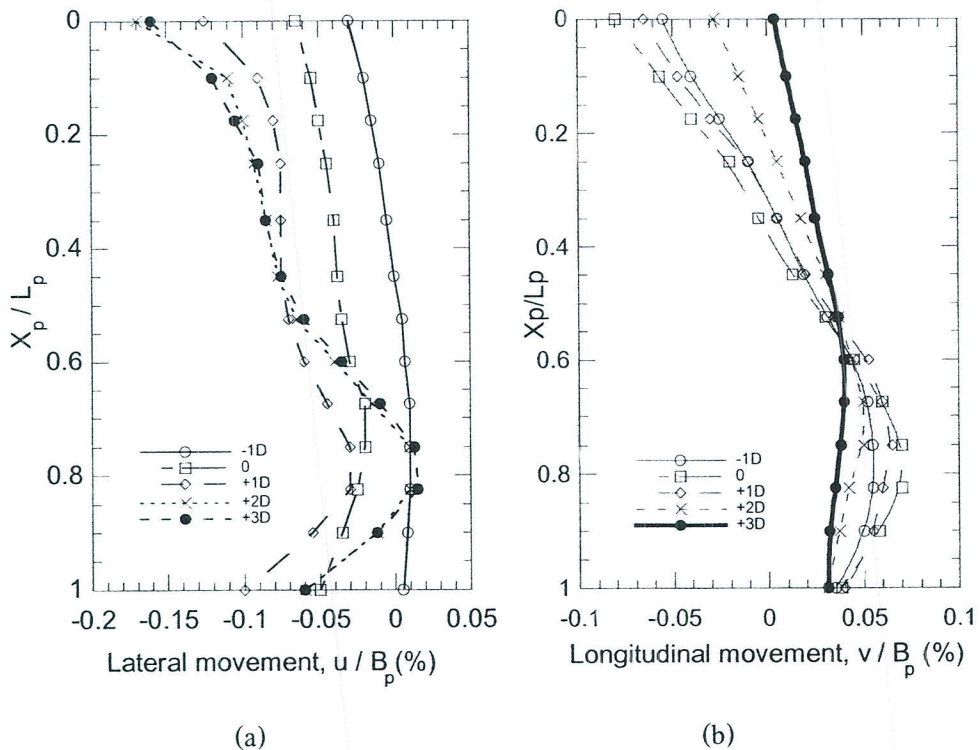


รูปที่ 4.11 ปัญหาที่วิเคราะห์: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม

ในการวิเคราะห์ขนาดของอุโมงค์ (D) และความลึกจากเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ถึงผิวดิน (H) มีค่าเท่ากับ 7.5 เมตร และ 18.75 เมตร ตามลำดับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของผนังอุโมงค์มีสมมติฐานเป็นอีลาสติกเชิงเส้นที่มีค่ายังโมดูลัส $E = 35000$ MPa และมีค่าอัตราส่วนปัวซอง $\nu = 0.25$ ค่าสติเฟนส์ต้านทานแรงตามแนวแกน (K_{sn}) โมเมนต์ดัด (K_{sp}) มีค่าเท่ากับ 4978 MPa และ 7.4 MNm^2 ตามลำดับ เสาเข็มมีรูปร่างหน้าตัดทรงกลมและความยาว $L_p = 22.5$ เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม $B_p = 1.0$ เมตร ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มและเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของอุโมงค์ $\Delta_{fp} = 1D$ และระยะห่างระหว่างปลายเสาเข็มและเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ $i_{tp} = +0.5D$ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเสาเข็มมีสมมติฐานเป็นอีลาสติกเชิงเส้นที่มีค่ายังโมดูลัส $E = 23500$ MPa และมีค่าอัตราส่วนปัวซอง $\nu = 0.25$ ค่าสติเฟนส์ต้านทานแรงตามแนวแกน (EA) และ โมเมนต์ดัด (EI) มีค่าเท่ากับ 23500 MN และ 1960 MNm^2 ตามลำดับ พฤติกรรมของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบอีลาสโตพลาสติกแบบสมบูรณ์ที่มีค่ายังโมดูลัส $E = 30 \text{ MPa}$, อัตราส่วนปัวซอง $\nu = 0.3$, ค่าแรงยึดเหนี่ยว $C = 5 \text{ kPa}$, มุมเสียดทาน $\phi = 27$ องศา และมุมไดเลชัน (Dilatancy angle) $\psi = 5$ องศา

ผลการศึกษาเป็นดังนี้ รูปที่ 4.12 (a) และ 4.12 (b) แสดงรูปตัดการโค้งตัวของเสาเข็มในแนวขวางและตามแนวยาวของอุโมงค์ ซึ่งพบว่าเมื่อทำการพิจารณาในแนวขวางของอุโมงค์รูปที่ 4.12(a) การโค้งตัวของเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อการเจาะอุโมงค์ยังไม่ถึงตำแหน่งที่มีเสาเข็มฝังอยู่ ($\Delta_{fp} < 0$) โดยที่ส่วนบนของเสาเข็มจะโค้งตัวเข้าหาแกนในแนวดิ่งของอุโมงค์ แต่ส่วนล่างของเสาเข็มส่วนที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่มีการขุดเจาะอุโมงค์การโค้งตัวของเสาเข็มจะเคลื่อนที่ในทิศทาง

ตรงกันข้ามกับส่วนบนของเสาเข็ม การโก่งตัวของเสาเข็มจะน้อยลงเมื่อทำการขุดเจาะผ่านตำแหน่งที่มีเสาเข็มฝังอยู่เป็นระยะมากกว่าสองเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ($\Delta f_p > +2D$) และค่าการโก่งตัวจะมากที่สุดประมาณ 1.4 มิลลิเมตร หรือประมาณ 0.14 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม B_p ในขณะที่เมื่อพิจารณาตามแนวยาวของอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 4.12(b) พบว่าการโก่งตัวของเสาเข็มส่วนใหญ่จะเกิดก่อนที่การขุดเจาะอุโมงค์จะถึงตำแหน่งที่มีเสาเข็มฝังอยู่ ($\Delta f_p < 0$) ค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ตำแหน่งผิวดินตามแนวยาวของอุโมงค์นี้มีค่าประมาณ 0.80 มิลลิเมตร หรือประมาณ 0.08 เปอร์เซ็นต์ของระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม B_p และค่าการโก่งตัวจะลดลงเมื่อการขุดเจาะอุโมงค์ผ่านตำแหน่งที่มีเสาเข็มฝังอยู่ ($\Delta f_p > 0$) ซึ่งจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อการขุดเจาะอุโมงค์ผ่านตำแหน่งที่มีเสาเข็มฝังอยู่ไปประมาณ $3D$

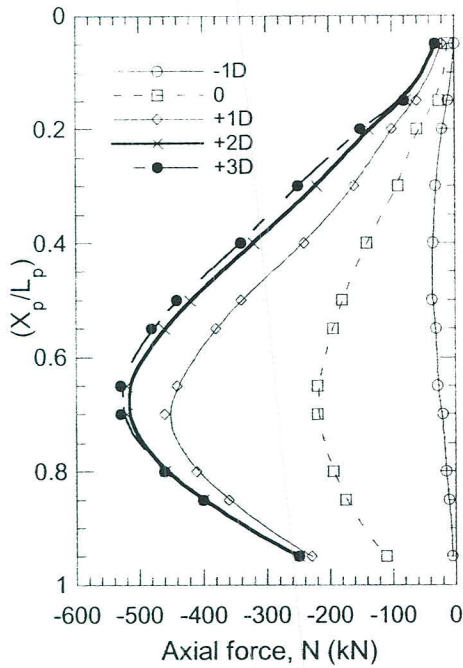


รูปที่ 4.12 การโก่งตัวของเสาเข็มจากการขุดเจาะอุโมงค์: (a) การโก่งตัวตามแนวขวางของอุโมงค์, (b) การโก่งตัวตามแนวยาวของอุโมงค์

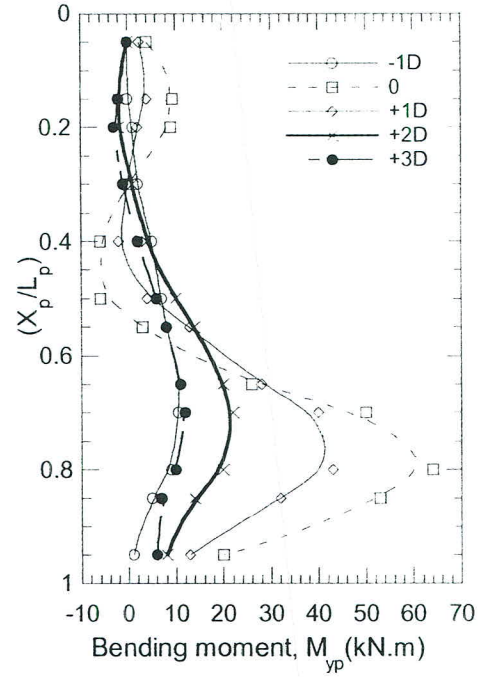
รูปที่ 4.13(a) – 4.13(c) แสดงแรงภายในต่างๆในเสาเข็มซึ่งพบว่า การขุดเจาะอุโมงค์อาจจะทำให้เกิดแรงอัดตามแนวแกนในเสาเข็มที่ความลึกจาก 0 ถึง $0.70 L_p$ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ขึ้นของดินในบริเวณนี้และค่าแรงตามแนวแกนสูงสุด ณ ตำแหน่ง $X_p = 0.70 L_p$ มีค่าเท่ากับ 540 kN

ในขณะที่โมเมนต์ดัดที่หน้าตัดตามแนวยาวของอุโมงค์ (M_{yp}) โดยส่วนมากแล้วจะเกิดขึ้นก่อนที่การขุดเจาะอุโมงค์จะมาถึงตำแหน่งที่มีเสาเข็มฝังอยู่ ซึ่งมีค่าสูงสุดประมาณ 65 kN-m เกิดขึ้นใกล้กับแกนในแนวราบของอุโมงค์ แต่โมเมนต์ดัดที่หน้าตัดตามแนวขวางของอุโมงค์ (M_{xp}) จะเกิดหลังจากที่การขุดเจาะอุโมงค์ผ่านตำแหน่งของเสาเข็มไปแล้ว

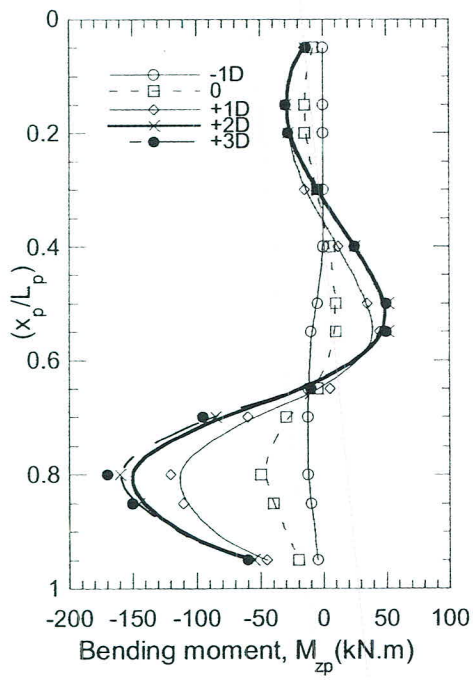
รูปที่ 4.14 แสดงอิทธิพลของตำแหน่งปลายเสาเข็ม ในขณะที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ จากการศึกษาพบว่าระยะห่างระหว่างปลายของเสาเข็มกับเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ (i_p) มีผลกระทบต่อแรงตามแนวแกนอย่างมาก เมื่อตำแหน่งปลายของเสาเข็มอยู่เหนือเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ ($i_p < 0$) แรงตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวของดินใกล้ๆกับตำแหน่งเสาเข็ม และเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ใต้แกนในแนวราบของอุโมงค์ ($i_p > 0$) พบว่าแรงตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุด จากนั้นจะลดลงซึ่งมีสาเหตุจากการเคลื่อนที่ลงของดินใต้แนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ และพบว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็มมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มเช่นกัน เมื่อปลายของเสาเข็มอยู่เหนือแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ การขุดเจาะอุโมงค์จะเกิดโมเมนต์ดัดที่ไม่มากนัก แต่เมื่อปลายเสาเข็มอยู่ใต้แนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ จะได้ค่าโมเมนต์ดัดที่มีค่าสูงและมีค่าสูงสุดเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเสาเข็มและแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ $i_p = 0.50$



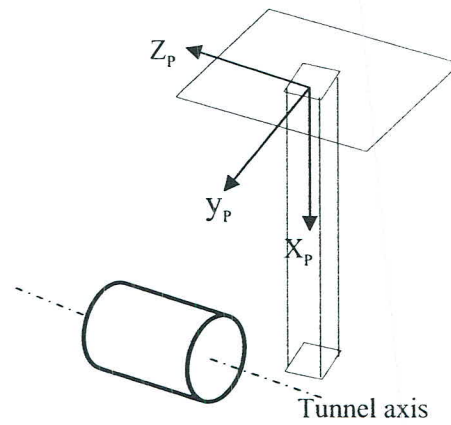
(a)



(b)

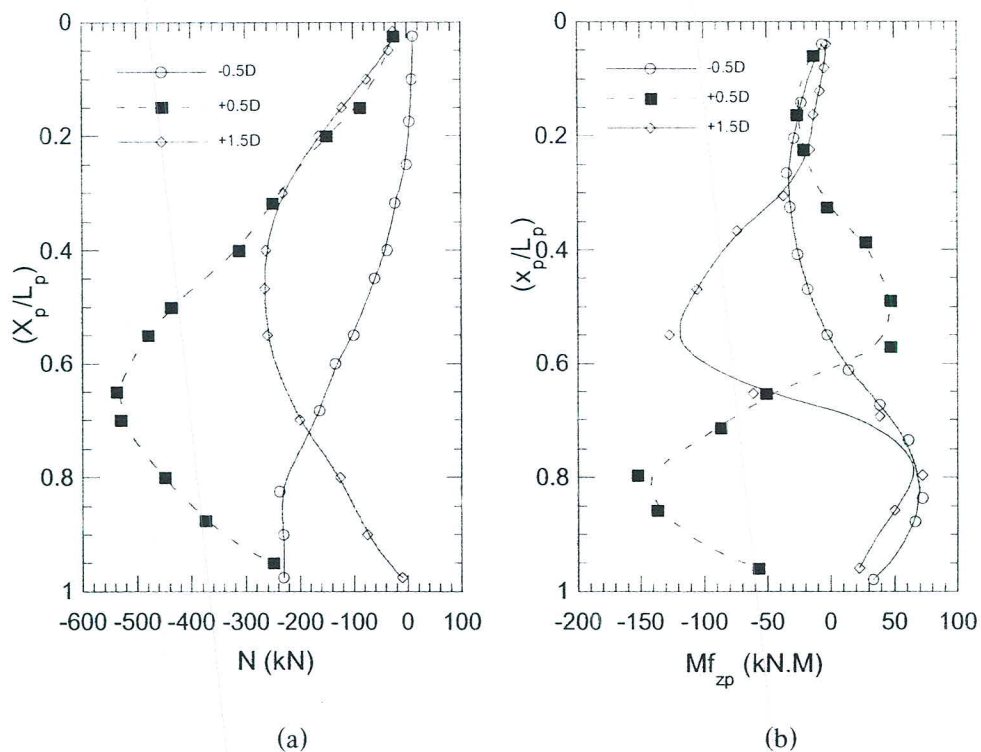


(c)



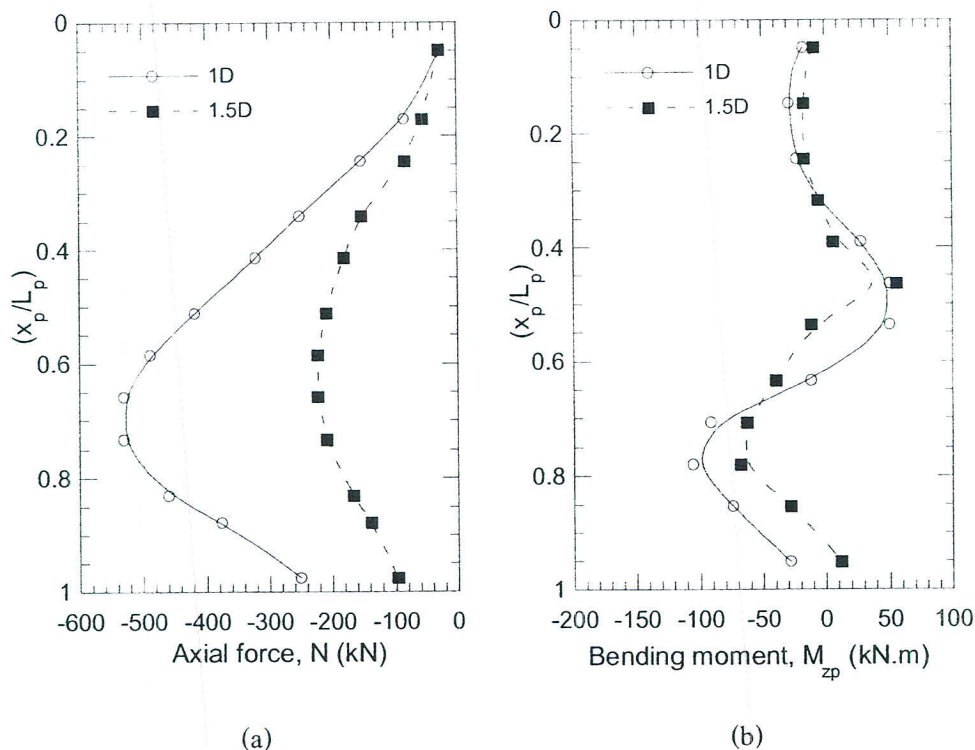
รูปที่ 4.13 แรงภายในที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์: (a) แรงตามแนวแกน (N),

(b) โมเมนต์คดัด (M_{yp}) และ (c) โมเมนต์คดัด (M_{zp})



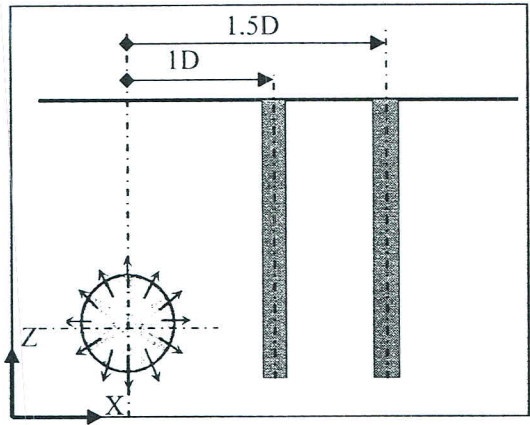
รูปที่ 4.14 อิทธิพลของระยะห่างปลายเสาเข็มจากศูนย์กลางอุโมงค์ที่เกิดแรงตามแกนและโมเมนต์คัตในเสาเข็ม: (a) แรงตามแนวแกน N , (b) โมเมนต์คัต M_{zp}

รูปที่ 4.15 แสดงอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแนวศูนย์กลางของเสาเข็มและแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งของอุโมงค์ (Δ_p) ซึ่งพบว่า เมื่อ Δ_p เพิ่มขึ้นจาก 1D ไปถึง 1.5D จะทำให้แรงตามแนวแกนสูงสุดลดลงจาก 540 kN ถึง 225 kN ในขณะที่ค่าโมเมนต์คัตสูงสุด M_{zp} ลดลงจาก 170 kN.m ถึง 70 kN.m

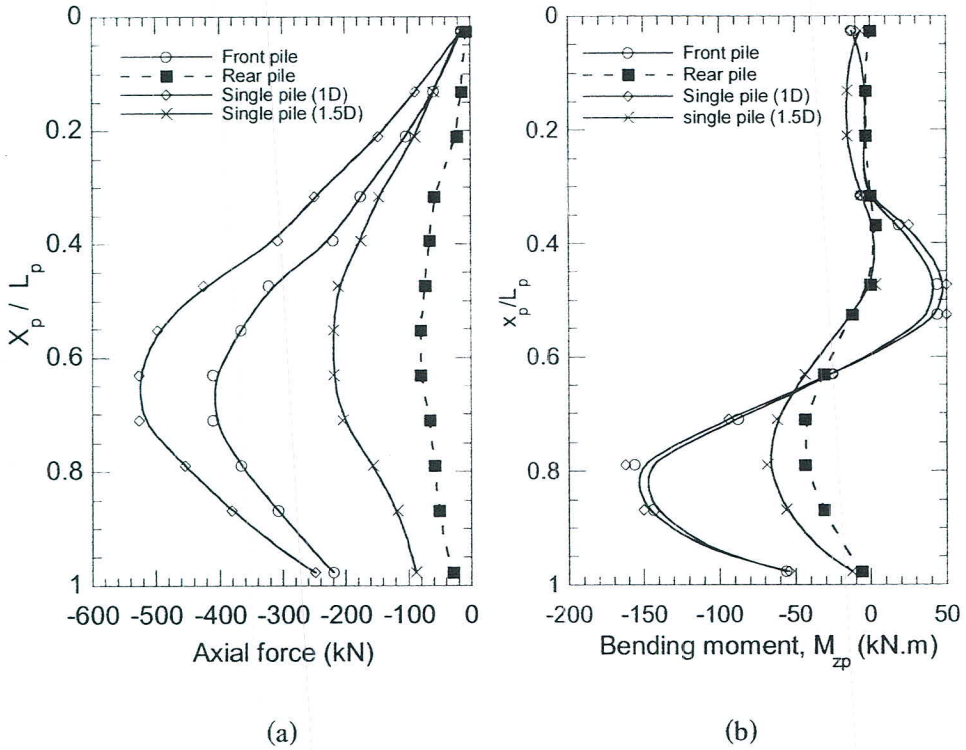


รูปที่ 4.15 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มกับศูนย์กลางของอุโมงค์ที่เกิดแรงตามแกนและโมเมนต์คดในเสาเข็ม : (a) แรงตามแนวแกน N, (b) โมเมนต์คด M_{zp}

ผลจากการวิเคราะห์อิทธิพลเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีต่อเสาเข็มกลุ่ม เมื่อเสาเข็มกลุ่มไม่ได้ถูกยึดรั้งที่ส่วนหัวของเสาเข็มและเสาเข็มกลุ่มประกอบด้วยเสาเข็ม 2×2 ต้นมีระยะห่าง $S = 4 B_p$ เสาเข็มต้นที่อยู่แถวด้านหน้า (rear pile) และเสาเข็มต้นที่อยู่แถวด้านหลัง (front pile) มีระยะห่างจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งของอุโมงค์เท่ากับ $\Delta_{tp} = 1D$ และ $\Delta_{tp} = 1.5D$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ในขณะที่รูป 4.17 (a) และ 4.17 (b) แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองของเสาเข็มกลุ่มและเสาเข็มเดี่ยว เมื่อเสาเข็มเดี่ยวมีตำแหน่งที่เท่ากันกับตำแหน่งแต่ละตำแหน่งในเสาเข็มกลุ่มจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งของอุโมงค์ ซึ่งพบว่าแรงภายในที่เกิดจากเสาเข็มกลุ่มมีค่าน้อยกว่าที่เกิดจากเสาเข็มเดี่ยว ซึ่งผลลัพธ์นี้เป็นผลดีของเสาเข็มกลุ่ม โดยเฉพาะเสาเข็มต้นที่อยู่ด้านหลังที่อยู่ถัดจากเสาเข็มต้นที่อยู่ด้านหน้า เสาเข็มต้นที่อยู่ด้านหลังนี้สามารถลดแรงตามแนวแกนสูงสุดได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดโมเมนต์คดสูงสุดได้ประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับเสาเข็มต้นที่อยู่ด้านหน้าสามารถลดแรงตามแนวแกนและโมเมนต์คดสูงสุดได้น้อยมาก โดยเฉพาะโมเมนต์คดสูงสุดที่อาจจะไม่สามารถลดได้ในขณะที่แรงตามแนวแกนสูงสุดสามารถลดได้เพียงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.16 ระยะห่างของศูนย์กลางเสาเข็มถึงศูนย์กลางของอุโมงค์ในเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.17 การตอบสนองของเสาเข็มกลุ่มที่ไม่มีการยึดรั้งส่วนบนของเสาเข็ม: (a) แรงตามแนวแกน N, (b) โมเมนต์ดัด M_{zp}

เมื่อเสาเข็มกลุ่มถูกยึดรั้งที่ส่วนหัวของเสาเข็ม จากการศึกษพบว่า ผลของการยึดรั้ง ณ ตำแหน่งหัวเสาเข็มจะเกิดขึ้นที่ส่วนบนที่ระยะ $(X_p/L_p < 0.30)$ ที่จะเกิดแรงดึงเพียงเล็กน้อย ที่ส่วนหัวของเสาเข็มต้นแรก เนื่องจากว่าส่วนบนของเสาเข็มมีผลกระทบเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์น้อย

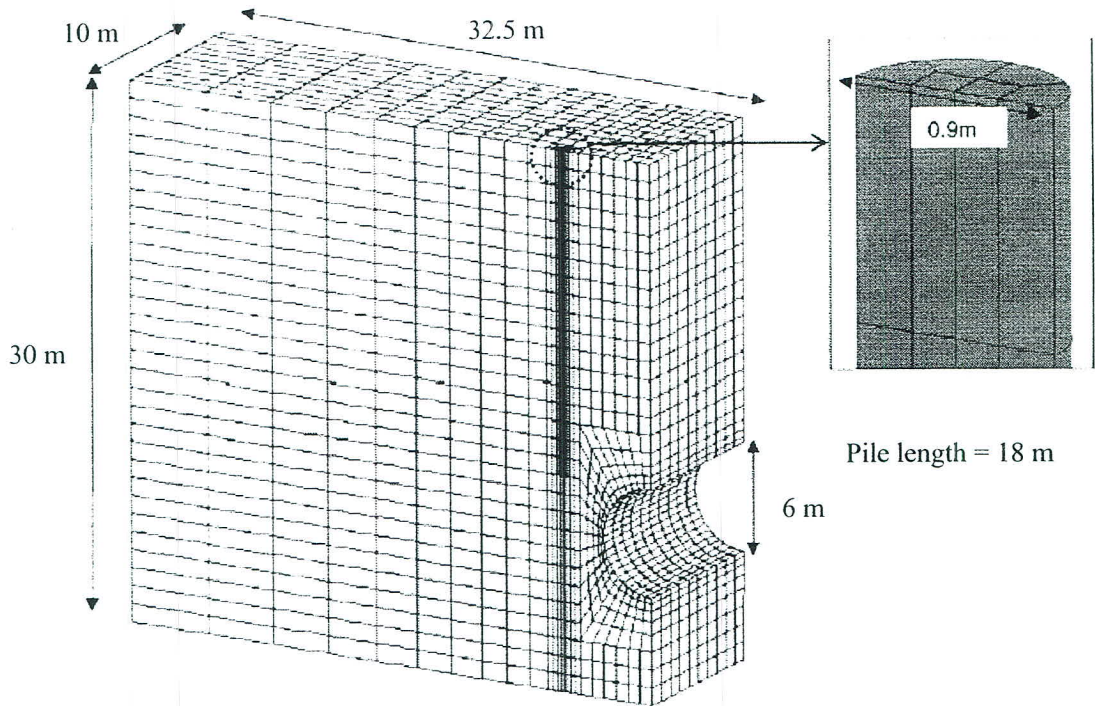
กว่าส่วนล่างของเสาเข็ม ดังนั้นการยึดรั้งที่ส่วนบนที่หัวเสาเข็มจึงไม่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสาเข็มกลุ่มจากการขุดเจาะอุโมงค์

4.3.3 Cheng et al (2007)

Cheng และคณะ (2007) ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ดินบริเวณข้างเคียงและเสาเข็ม ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติโดยที่แบบจำลองที่ใช้ทำการวิเคราะห์จะจำลองโดยใช้ Displacement Controlled Model (DCM) ซึ่งในกรณีของผลกระทบที่มีต่อเสาเข็มนั้นจะทำการวิเคราะห์ย้อนกลับ (back analysis) จากกรณีศึกษา 2 กรณีคือการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง (Centrifuge model test) เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินและเสาเข็มที่เสนอโดย Loganathan et al.(2000) และการวิเคราะห์ย้อนกลับจากการตรวจวัดข้อมูลในสนามที่มีการขุดเจาะอุโมงค์คู่สาย NEL ในสิงคโปร์

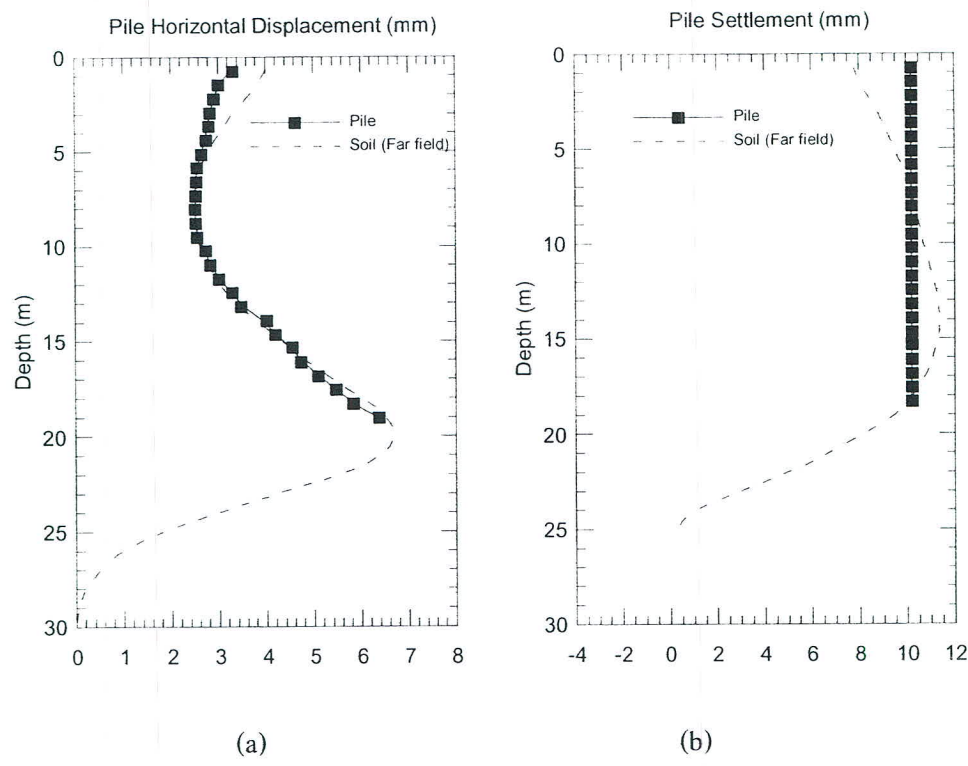
1. ผลการวิเคราะห์ย้อนกลับจากแบบจำลองหมุนเหวี่ยง

ผลจากการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยงจากการทดสอบ Test 3 (ยอดส่วนบนของอุโมงค์อยู่ที่ระดับเดียวกับปลายของเสาเข็ม) ที่เสนอโดย Loganathan et al (2000) ได้ถูกนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ได้ทำการจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์ ดินและเสาเข็ม ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์จะจำลองโดยใช้ Displacement Controlled Model (DCM) ที่มีรูปแบบขนาดและคุณสมบัติต่างๆของตัวแปรสอดคล้องกับการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง Test 3 ที่เสนอโดย Loganathan et al (2000) แสดงในรูปที่ 4.18 อุโมงค์มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 เมตรและระยะจากแนวแกนของอุโมงค์ถึงผิวดิน 21.0 เมตร เสาเข็มยาว 18 เมตร ซึ่งไม่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อหัวเสาเข็มก่อนที่จะมีการขุดเจาะอุโมงค์ ตำแหน่งของเสาเข็มมีระยะ 5.5 เมตร จากศูนย์กลางของอุโมงค์ที่มีปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับยอดของอุโมงค์ หลักการสมมาตรรอบศูนย์กลางของอุโมงค์ถูกนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อลดขั้นตอนการวิเคราะห์ขณะที่ mesh dimension ถูกเลือกตามการจำลองเงื่อนไขตามการทดสอบจริง



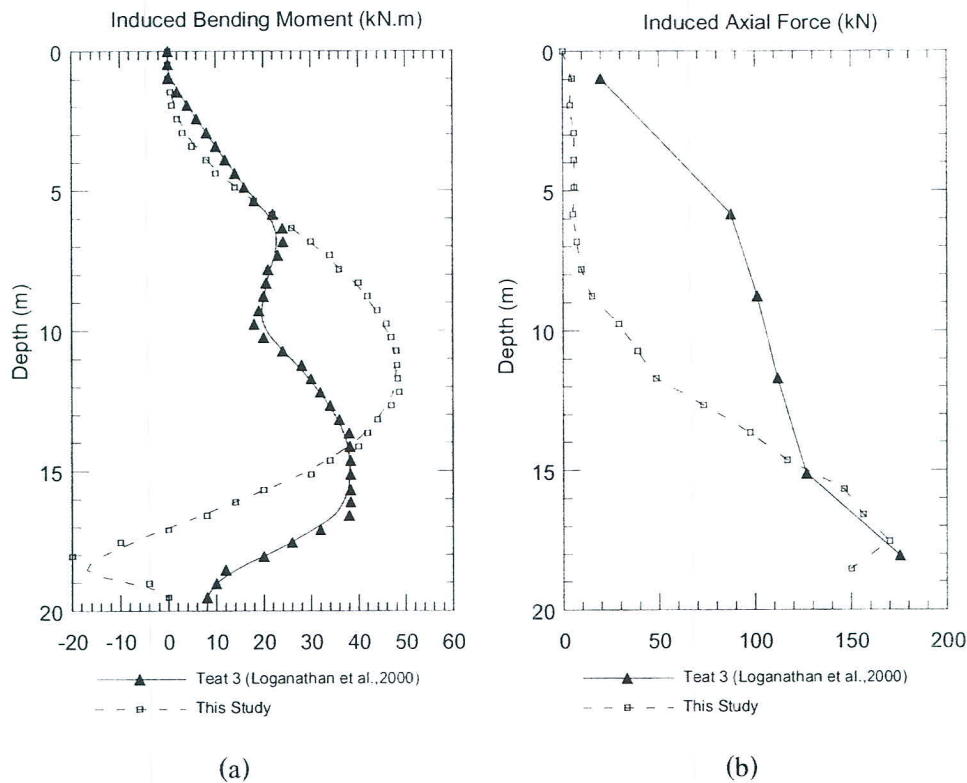
รูปที่ 4.18 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของชิ้นส่วนสำหรับการวิเคราะห์ย้อนกลับจากการทดสอบจำลองแบบหมุนเหวี่ยง Test 3 ของ Loganathan et al (2000)

การเคลื่อนตัวของเสาเข็มและดิน (pile and for field ground displacement) ได้ถูกเปรียบเทียบในรูป 4.19(a) และ 4.19(b) การเคลื่อนตัวของดิน (Far field soil displacement) จะกล่าวถึงการเคลื่อนตัวของดินที่ไม่มีอิทธิพลของเสาเข็มมาเกี่ยวข้อง แต่ระยะห่างที่ทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มและดินจะเป็นระยะห่างที่เท่ากัน ซึ่งเป็นระยะห่างจากแนวเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวดิ่งของอุโมงค์ถึงตำแหน่งแนวศูนย์กลางของเสาเข็ม หรือดินในแนวขวางที่พิจารณา เสาเข็มจะถูกพิจารณาเพื่อที่จะสมมุติรูปร่างจากการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบ ซึ่งการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจะมีค่าน้อยกว่าการเคลื่อนตัวของดินที่ทำการประเมิน เมื่อพิจารณาตำแหน่งใกล้เคียงกับบริเวณผิวดินดังแสดงในรูปที่ 4.19(a) ในขณะที่รูปที่ 4.19(b) แสดงว่าการทรุดตัวของดินใน far field มีค่าน้อยกว่าเสาเข็มเมื่อพิจารณาที่ความลึกจาก 0 ถึง 8.0 เมตร และที่ได้ความลึกนี้การทรุดตัวของดินจะมากกว่าเสาเข็ม ดังนั้นความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวระหว่างดินและเสาเข็มในทิศทางดังมีความสำคัญมากกว่าในแนวราบ



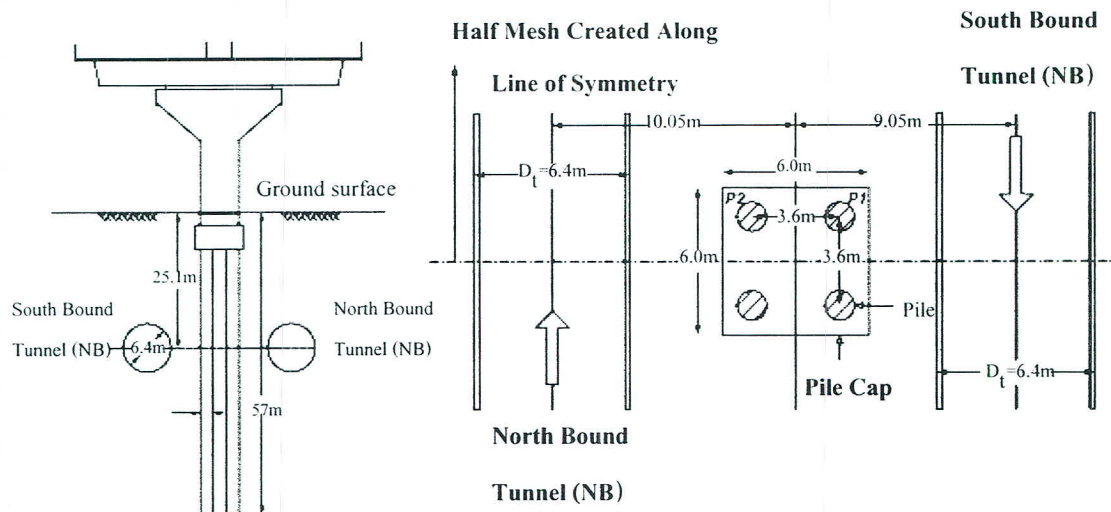
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและดินในแนวราบและแนวดิ่ง
: (a) การเคลื่อนตัวในแนวราบและ (b) การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง

รูปที่ 4.20(a) แสดงการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการวิเคราะห์และจากการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง Test 3 ซึ่งพบว่าเสาเข็มจะมีโค้งการแอ่นตัวในลักษณะที่เกิดเป็นโค้งทางเดียว (Single curvature) เหมือนกับที่สังเกตจากการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง ในขณะที่ค่าแรงจากแนวแกนตามความยาวของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์ และจากการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง Test 3 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.20(b) จะมีความแตกต่างกันที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับผิวดิน แต่ที่ระดับปลายเข็มจะมีค่าที่สอดคล้องกัน Jacobsz et al (2001) ได้ทำการศึกษาโดยทำการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยงได้เป็นผลสำเร็จ เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ ดินบริเวณข้างเคียงและเสาเข็ม (tunnel – soil – pile interaction) ซึ่งพบว่าถ้าปลายเสาเข็มอยู่ในตำแหน่งบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวของดินมาก ที่ซึ่งนิยามด้วยพื้นที่เหนือเส้นที่ลากทำมุม $45+\phi/2$ จากเส้น tunnel springing

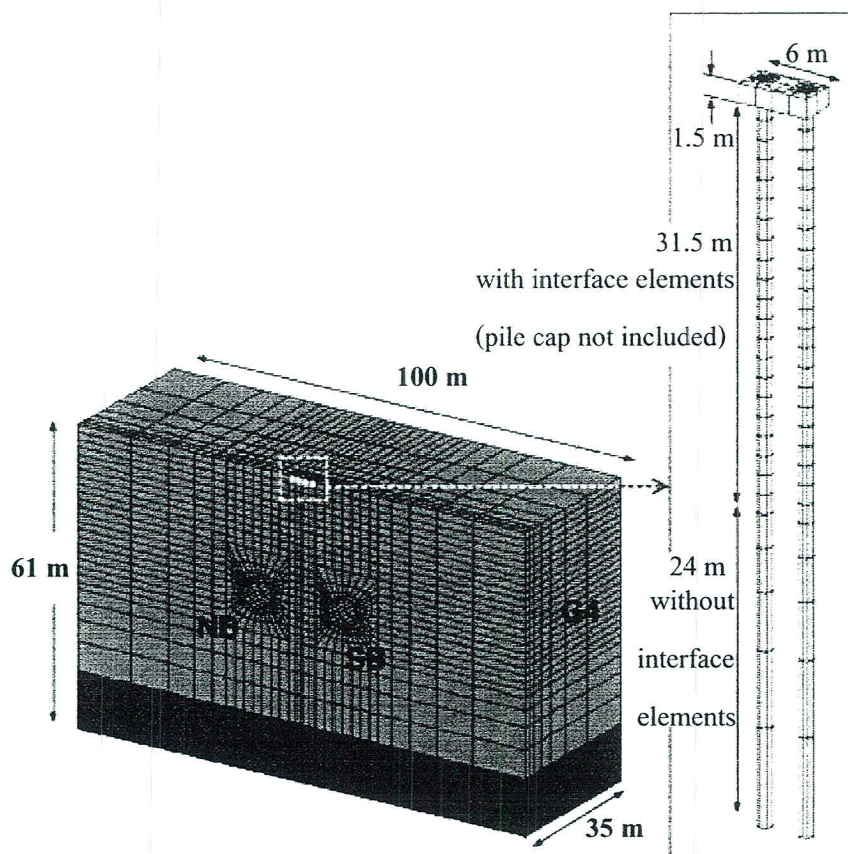


รูปที่ 4.20 การแปรเปลี่ยนของแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม: (a) โมเมนต์ดัด, (b) แรงตามแนวแกน

เสาเข็มที่อยู่ใกล้กับผิวดินจะเคลื่อนตัวมากกว่าดินรอบๆเสาเข็ม เนื่องจากเสาเข็มไม่ได้ถูกรองรับเพื่อให้เกิดเสถียรภาพและมีการทรุดตัวไปพร้อมกับดินได้ปลายเข็ม ที่สามารถพิสูจน์ได้จากการทรุดตัวของเสาเข็มและดิน (far field) ดังแสดงในรูปที่ 4.19(b) เมื่อเสาเข็มทรุดตัวมากกว่าดินเมื่อพิจารณาที่บริเวณผิวดิน ลักษณะนี้อาจก่อให้เกิดหน่วยแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างดินกับเสาเข็มสูงขึ้น (upward soil – pile interface shear stresses) ด้วยเหตุนี้แรงตามแนวแกนจึงลดลงจากปลายของเสาเข็มถึงผิวดิน การลดลงของแรงตามแนวแกนในการศึกษามีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง ถึงแม้ว่าค่าโมเมนต์สูงสุดและแรงตามแนวแกนสูงสุดจากการวิเคราะห์และการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง จะใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.21 แต่ค่าต่างๆตามความลึกมีค่าแตกต่างกัน

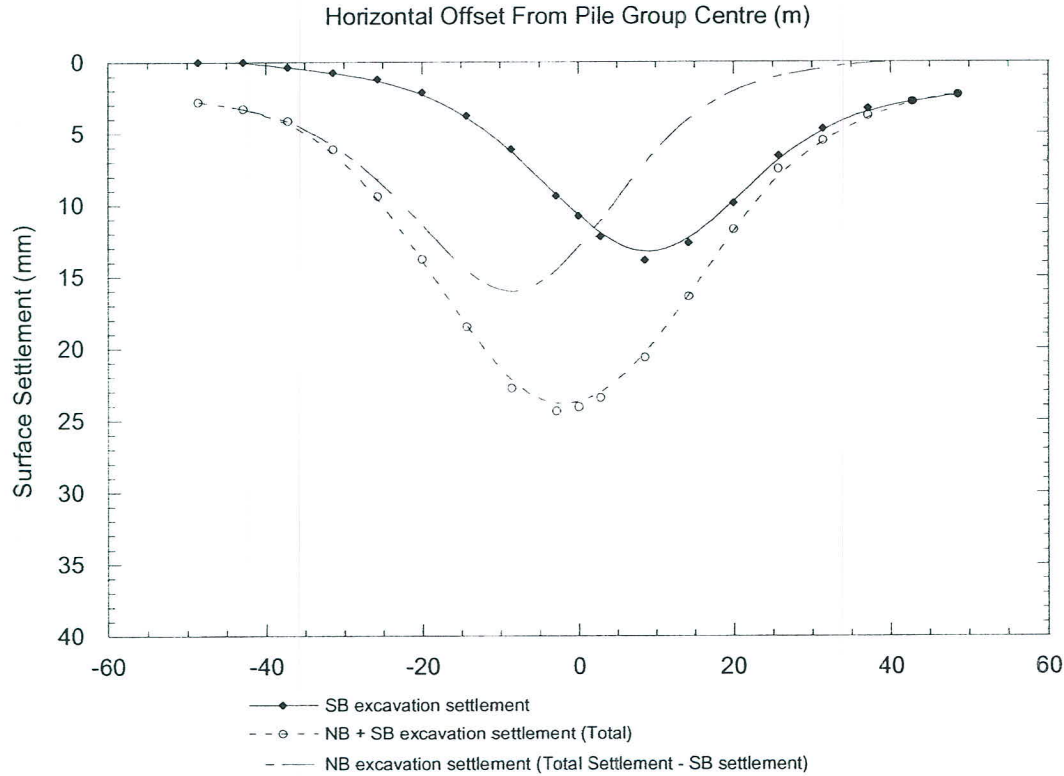


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของต่อมอัสะพานสูง ตำแหน่งของอุโมงค์ เสาเข็มกลุ่มพร้อมกับระยะต่างๆ

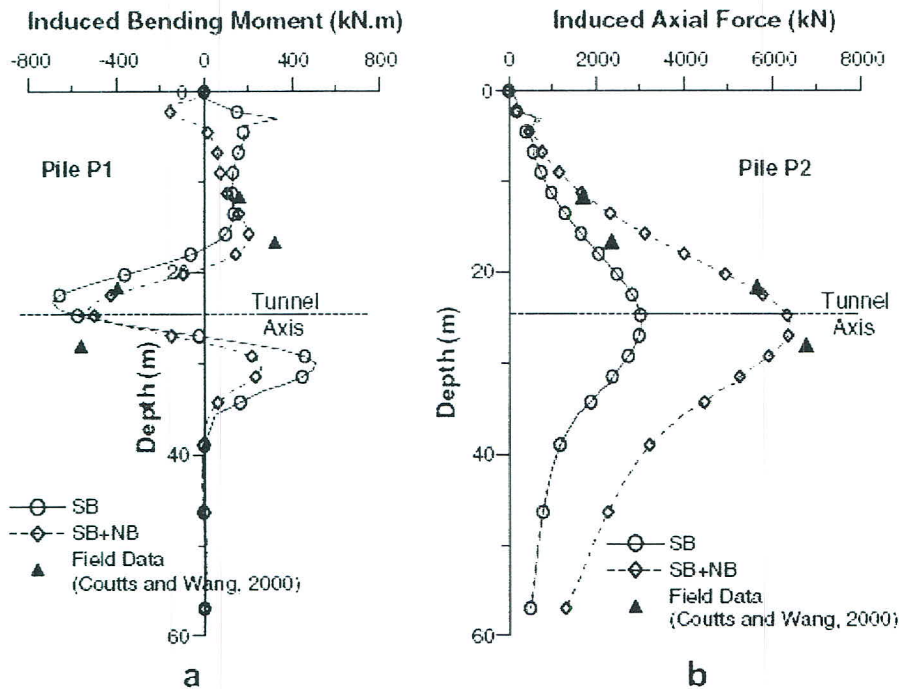


รูปที่ 4.23 แสดงขนาดของ Mesh ที่ทำการวิเคราะห์สำหรับอุโมงค์คู่ สาย NEL

รูปที่ 4.24 แสดงการทรุดตัวที่ผิวดินที่เพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ SB ตามด้วยอุโมงค์ NB ค่า S_{max} ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ทำการบันทึกในสนาม รูปที่ 4.25(a) แสดงค่าของโมเมนต์คดที่เกิดขึ้นสูงสุดในเสาเข็ม P1 ซึ่งจะเกิดหลังจากขุดเจาะอุโมงค์ SB และความเอนตัวของเสาเข็ม P1 จะลดลงเมื่อมีการขุดเจาะอุโมงค์ NB เนื่องจากดินมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับความเอนตัวของเสาเข็ม P1 และเมื่อพิจารณาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับเข็มทั้ง P1 และ P2 หลังจากขุดเจาะอุโมงค์ NB ซึ่งแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม P2 แสดงได้ในรูป 4.25(b) ค่าโมเมนต์สูงสุดและแรงตามแนวแกนสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์หัดซึ่งแสดงมีความสอดคล้องกับข้อมูลการวัดค่าในสนาม



รูปที่ 4.24 การทรุดตัวที่ผิวดินที่เพิ่มขึ้นเมื่อขุดเจาะอุโมงค์ SB ก่อนและตามด้วยอุโมงค์ NB

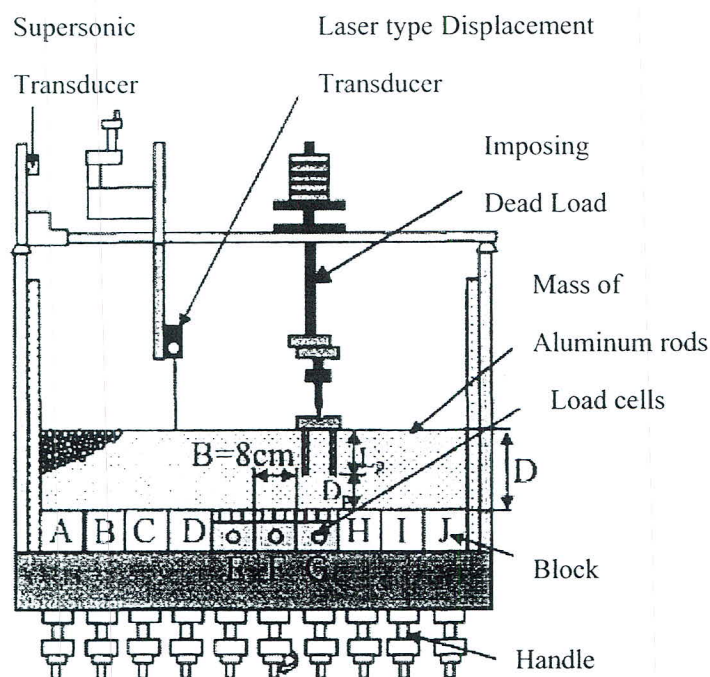


รูปที่ 4.25 ค่าโมเมนต์คดและแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ NB และ SB: (a) ค่าโมเมนต์คดในเสาเข็ม P1, (b) ค่าแรงตามแนวแกนในเสาเข็ม P2

4.3.4 Shahin et al (2006)

Shahin และคณะ (2006) ได้ทำการวิเคราะห์ห้อธิพลของอาคารเมื่อดินมีการเคลื่อนตัวและมีแรงดันด้านข้าง อันเนื่องมาจากการเจาะอุโมงค์ดิน โดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยการใช้แบบจำลองทางกายภาพสองมิติ (Two – Dimensional Model) และวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ฐานรากแบบ Flat และฐานรากแบบ Piled Raft รองรับน้ำหนักคงที่เริ่มต้น (Initial dead load) ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นจะใช้แบบจำลอง elastoplastic constitutive model โดยที่ในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับในสถานะ green field ด้วย

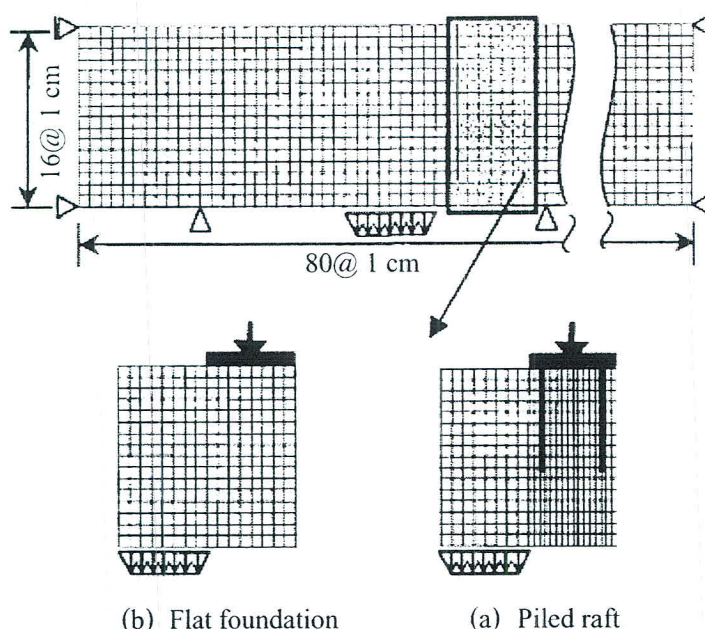
ในการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองมิติ จะใช้อุปกรณ์ trap door ในการทดสอบ ดังรูปที่ 4.26 อุปกรณ์ประกอบไปด้วยบล็อกทองเหลือง 10 ชั้น (A ถึง J) แต่ละชั้นกว้าง 8 เซนติเมตร แบบจำลองของดินใช้แท่งอลูมิเนียมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร และ 3.0 มิลลิเมตร ผสมกันในอัตราส่วน 3 : 2 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการติดตั้งเสาเข็มในชั้นดินในแบบจำลองเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะเริ่มทดสอบการขุดอุโมงค์โดยเลื่อนบล็อก F เข้าไปจนกระทั่งได้ระยะเท่ากับ 4 มิลลิเมตรในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจะทำการจำลองเพื่อทดสอบกับฐานรากแบบ Flat และ ฐานรากแบบ Piled Raft แต่รูปที่ 4.26 แสดงการจำลองทดสอบของฐานรากแบบ Piled Raft



รูปที่ 4.26 อุปกรณ์การทดสอบโดยใช้แบบจำลองสองมิติ ที่จำลองขึ้นสำหรับทดสอบฐานรากแบบ Piled Raft

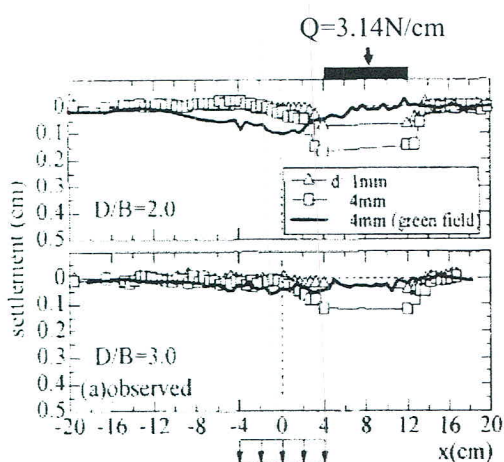
การทดสอบจะประกอบไปด้วยการจำลองดินที่อยู่เหนือยอดแบบจำลองอุโมงค์ (Tunnel Block); D/B เท่ากับ 2 กับ 3 และ D_p / B เท่ากับ 1 และ 2 เมื่อ D เป็นความลึกจากผิวดินถึงยอดแบบจำลองอุโมงค์ และ B เป็นความกว้างของบล็อกดังแสดงในรูปที่ 4.26 D_p เป็นระยะในแนวดิ่งระหว่างปลายของเสาเข็มและแบบจำลองอุโมงค์ (Tunnel Block) ดังนั้นความยาวเสาเข็ม L_p จะเท่ากับ $D - D_p$

รูปที่ 4.27 แสดงการแบ่งชิ้นส่วนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ ชิ้นส่วนที่แบ่งเป็นไอโซพารามेटริกที่มี 4 จุดต่อ การแบ่งชิ้นส่วนในแนวดิ่งทั้งสองข้างไม่จำกัดและผิวด้านล่างยึดแน่นเพื่อที่จะจำลองให้มีสภาพเหมือนกับสภาพการขุดเจาะอุโมงค์จริง ในการวิเคราะห์ จะทำการจำลองสภาพการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ และในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้ส่วนของเสาเข็มและส่วนบนที่ยึดรั้งเสาเข็ม จะถูกจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นอิลาสติกเชิงเส้น (linear elastic)

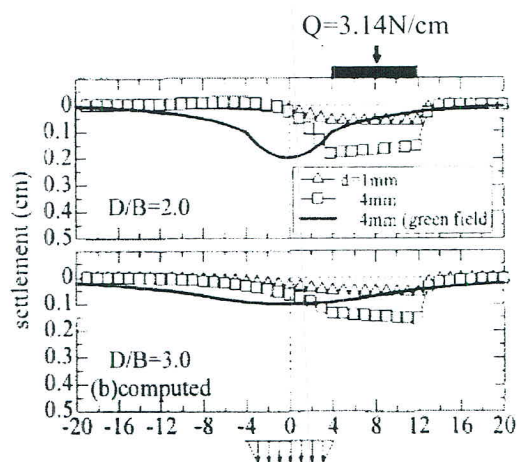


รูปที่ 4.27 การแบ่งชิ้นส่วนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ: (a) Flat foundation, (b) Piled raft

ผลการศึกษาพบว่า การทรุดตัวที่ผิวดิน (Surface settlement) จะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งของฐานรากของอาคารที่รับน้ำหนัก และการทรุดตัวสูงสุดของ Flat Foundation จะมีค่ามากกว่าในสภาพ green field ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งแสดงการทรุดตัวที่ผิวดินของ Flat Foundation ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ และจากการใช้แบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ ที่ทำการจำลองการขุดเจาะอุโมงค์โดยเลื่อนบล็อก F จนกระทั่งได้ระยะเท่ากับ 1 และ 4 มิลลิเมตร เมื่อ $D/B = 2$ และ 3 ตามลำดับ พร้อมทั้งแสดงผลการจากสภาพ green field ในขณะที่รูปที่ 4.29 เป็นการแสดงการทรุดตัวของฐานราก Piled raft ซึ่งพบว่าตำแหน่งของการทรุดตัวที่ผิวดินสูงสุดจะเคลื่อนเข้าหาตำแหน่งที่น้ำหนักกองที่กระทำ เหมือนกับฐานรากแบบ Flat Foundation และจะเห็นได้ว่าแนวร่องของการทรุดตัวที่ผิวดิน (Settlement troughs) เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์จะไม่ใช่ไปตามรูปแบบของ Gaussian Curve

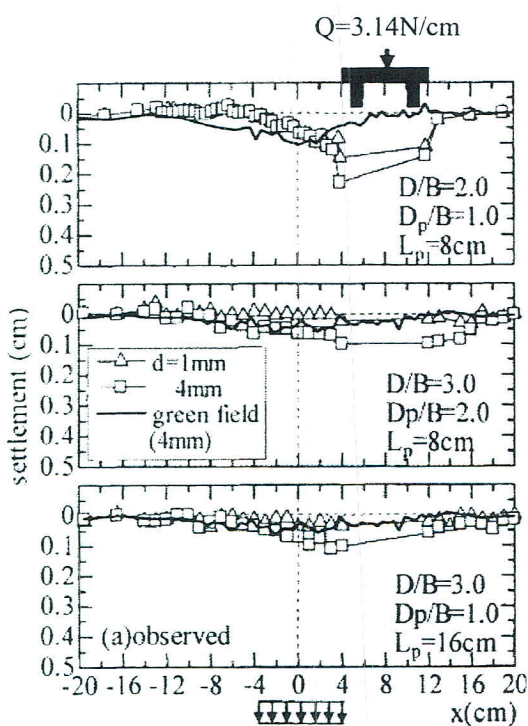


(b) Model tests

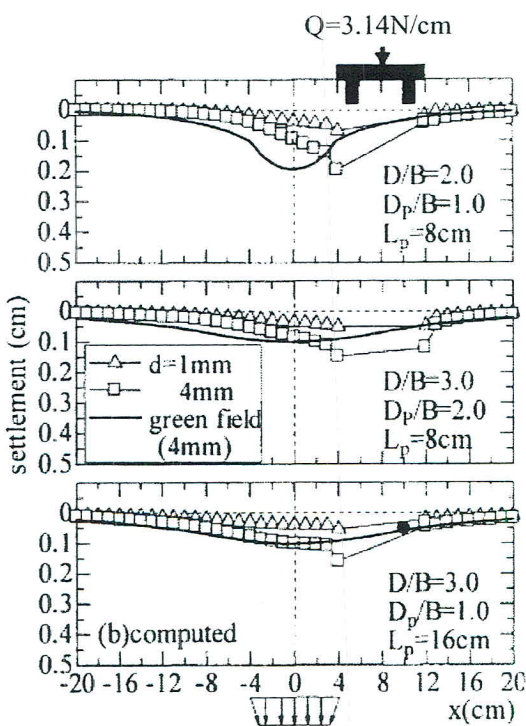


(a) Numerical analyses

รูปที่ 4.28 การทรุดตัวที่ผิวดินของ Flat Foundation: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ (b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ



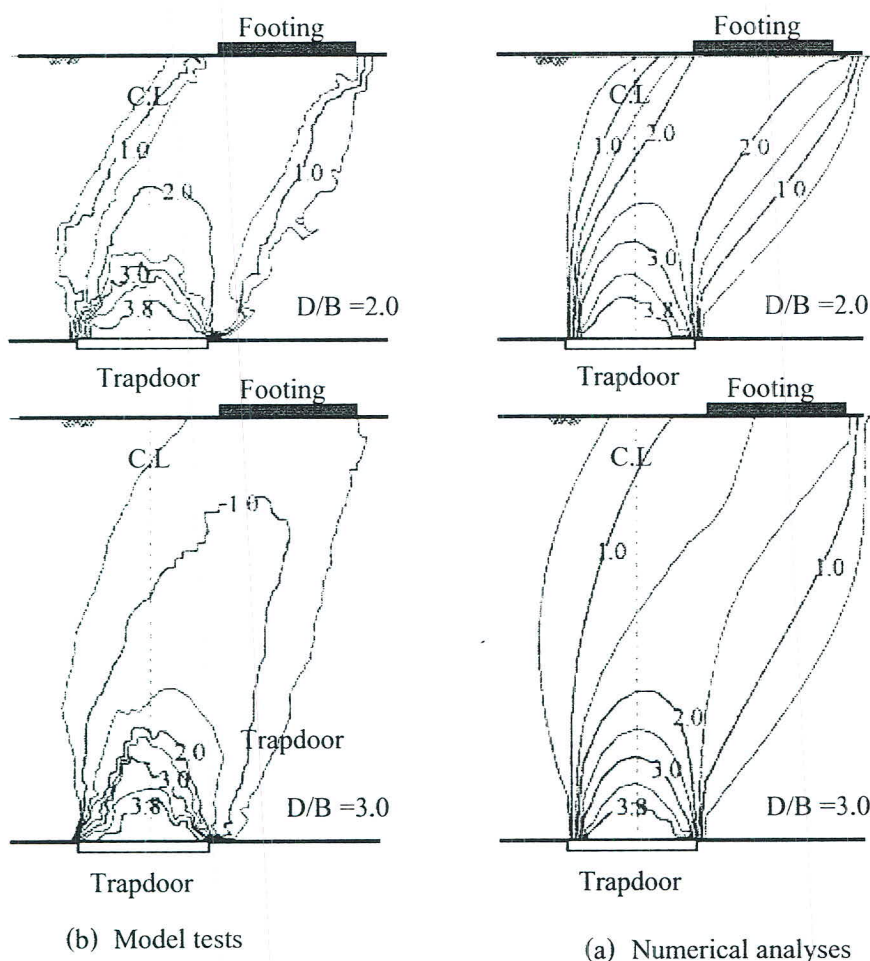
(a) Model tests



(b) Numerical analyses

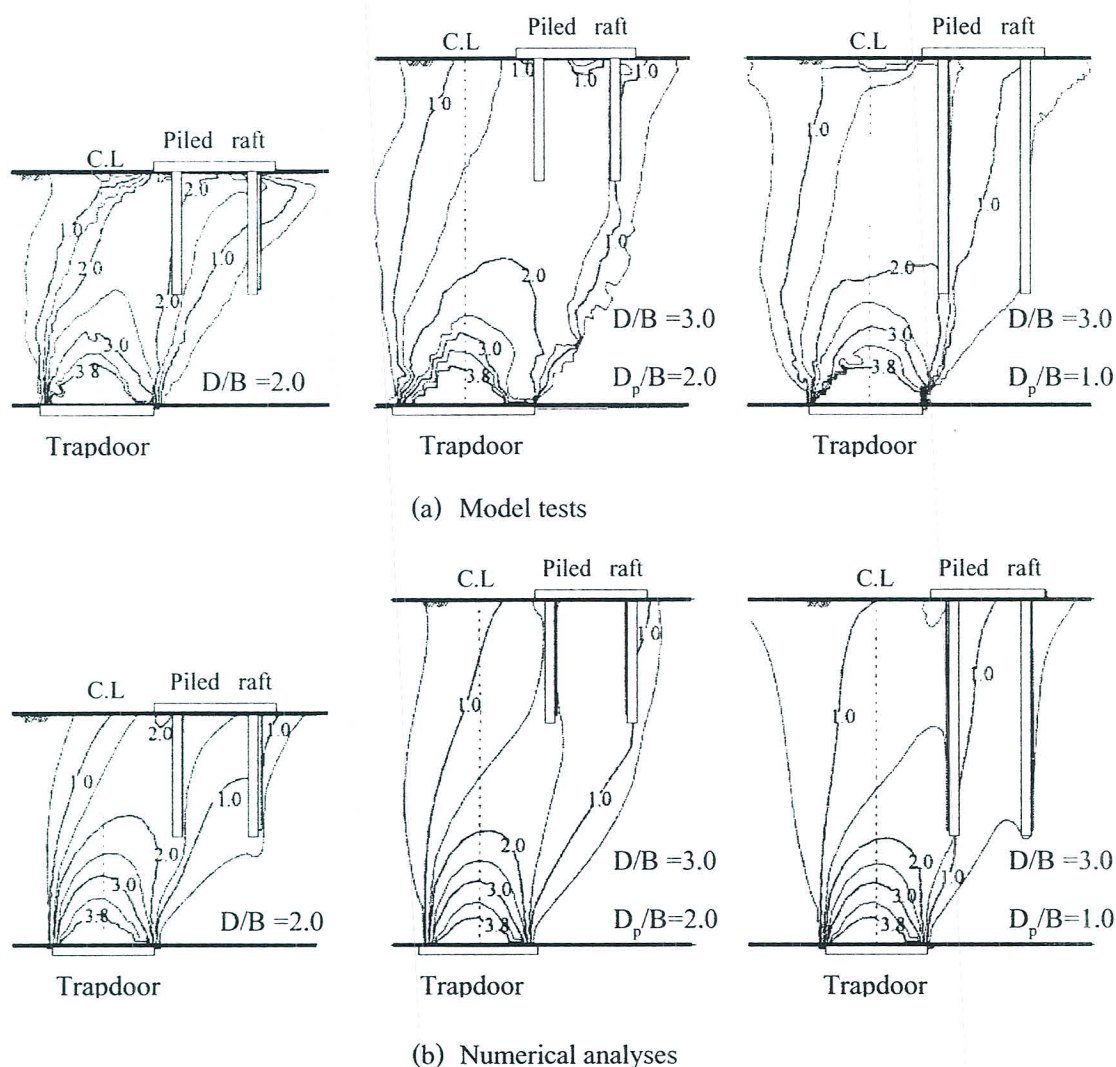
รูปที่ 4.29 การทรุดตัวที่ผิวดินของ Piled raft: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ , (b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ

รูปที่ 4.30 แสดงเส้นระดับค่าการเคลื่อนตัว (Displacement Contours) ในกรณีของ Flat-Foundation เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ เส้นระดับการเคลื่อนตัวของดินจะมากกว่า 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกรบกวนจากการขุดอุโมงค์ (disturbed zone) จากรูปแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มีการเสียรูป (deformation zone) จะแผ่ขยายจากบล็อกล้อด้านล่าง (Trapdoor) ไปยังแผ่นเพลทที่รับน้ำหนักที่ถูกจำลองให้เป็นฐานรากในการทดสอบ ซึ่งสังเกตได้ว่าบริเวณที่ถูกรบกวนจากการขุดอุโมงค์ จะถูกจำกัดในขอบเขตระหว่างบล็อกล้อด้านล่างและแผ่นเพลท ที่จะใช้น้ำหนักและแผ่ขยายครอบคลุมส่วนของ Flat foundation ทั้งหมด เส้นระดับการเคลื่อนตัวที่ถูกคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลขที่แสดงจะให้ผลที่สอดคล้องกับผลจากการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ



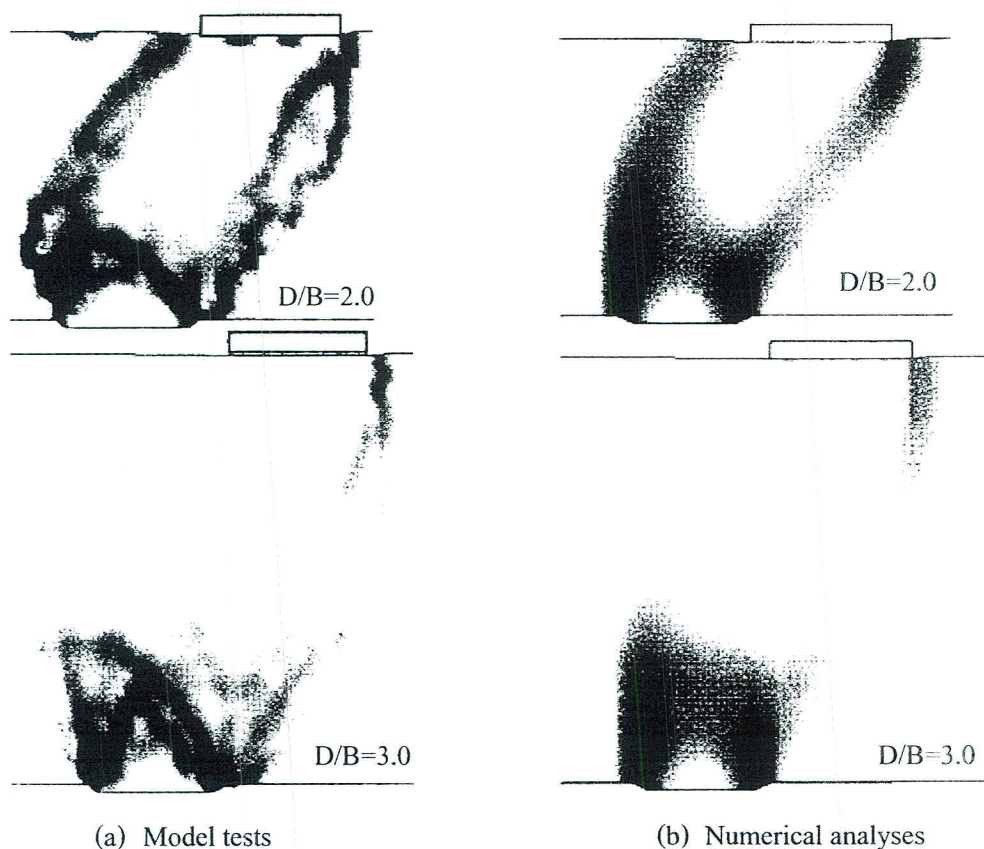
รูปที่ 4.30 เส้นระดับค่าการเคลื่อนตัวของ Flat Foundation: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ, (b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ

รูปที่ 4.31 แสดงเส้นระดับค่าการเคลื่อนตัวในกรณีของ Piled raft ซึ่งพบว่าการเสียรูปของดิน (Deformation of the ground) จากการขุดเจาะอุโมงค์จะแผ่ขยายไปยังเสาเข็มต้นที่อยู่ด้านหน้า (front piles) และเสาเข็มต้นที่อยู่ด้านหลัง (rear piles) ในกรณีของ $D_p/B = 1$, $D/B = 2$ และ 3 อย่างไรก็ตามในกรณีที่ $D_p/B = 2$ การเสียรูปของดินจะแผ่ขยายไปยังเฉพาะเสาเข็มต้นที่อยู่ด้านหลังเท่านั้น จากผลที่แสดงนี้จะกล่าวได้ว่า ระยะจากปลายของเสาเข็มถึงบล็อกที่อยู่ด้านล่างมีอิทธิพลที่สำคัญเกี่ยวกับกลไกการเสียรูปของดิน ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขสอดคล้องกันดีกับผลที่ได้จากการใช้แบบจำลอง 2 มิติ ทั้งในด้านรูปร่างและขนาดของการเสียรูป



รูปที่ 4.31 เส้นระดับค่าการเคลื่อนตัวของ Piled raft: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ , (b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ

รูปที่ 4.32 เป็นการกระจายของความเครียดเฉือน (Shearing Strain) สำหรับ Flat Foundation เนื่องจากการขุดอุโมงค์ ซึ่งจากรูปนี้สังเกตได้ว่าแถบของการเฉือนของดินจะเพิ่มขึ้นระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ เนื่องจากหน่วยแรงเบี่ยงเบนถูกรบกวน การเพิ่มขึ้นของแถบแรงเฉือนทางด้านซ้ายและทางด้านขวาจากการขุดเจาะอุโมงค์ โดยใช้บล็อกที่จำลองการขุดอุโมงค์จะมีความแตกต่างกัน สำหรับ $D/B = 2.0$ ความเครียดเฉือนจะมีค่ามากกว่าทางด้านซ้ายของเพลท ในขณะที่เมื่อ $D/B = 3.0$ ความเครียดเฉือนจะมีค่ามากกว่าทางด้านขวาของเพลท รูปแบบที่แตกต่างกันของความเครียดเฉือนจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของดิน



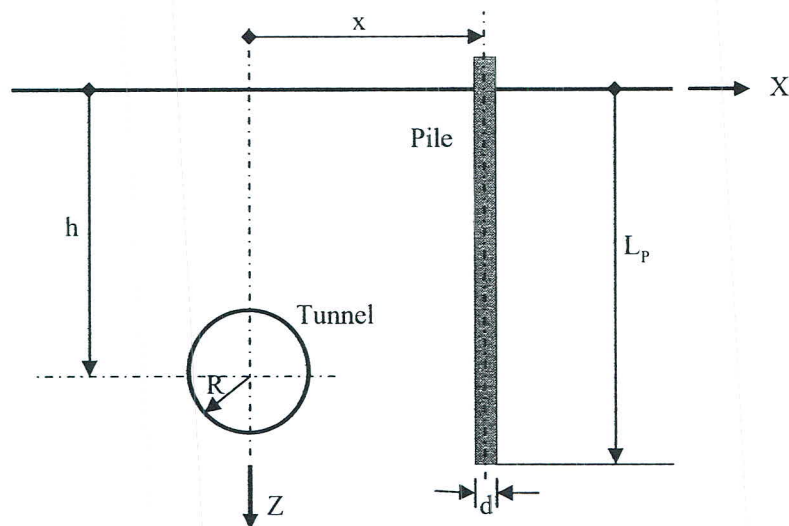
รูปที่ 4.32 ค่า Shearing Strain ของ flat foundation: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ, (b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ

4.3.5 Chen et al (1999)

Chen และคณะ (1999) ได้ทำการวิเคราะห์การตอบสนองของเสาเข็มตามแนวแกนและทางด้านข้างเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์โดยมีการวิเคราะห์อยู่ 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนที่ 1 จะทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินอันเนื่องมาจากการเจาะอุโมงค์ที่ไม่มีเสาเข็มฝังอยู่ ซึ่งจะทำให้วิเคราะห์โดยใช้วิธีสมการเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) ส่วนขั้นตอนที่ 2 จะทำการวิเคราะห์

โดยนำค่าการเคลื่อนตัวของดินจากขั้นตอนที่ 1 มาทำการคำนวณหาการตอบสนองของเสาเข็ม เนื่องจากการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีเสาเข็มฝังอยู่ด้วยวิธี boundary element method การศึกษาผลการตอบสนองของเสาเข็มเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ ได้ใช้โปรแกรม PALLAS ในการวิเคราะห์การตอบสนองทางด้านข้างของเสาเข็ม และใช้โปรแกรม PIES ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของเสาเข็มในแนวดิ่งและแรงตามแนวแกนของเสาเข็ม

โดยที่พื้นฐานที่จะทำการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.33 ซึ่งเสาเข็มเดี่ยวอยู่ใกล้กับบริเวณการก่อสร้างอุโมงค์ โดยทั่วไปแล้วการขุดเจาะอุโมงค์จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินทั้งแนวราบและแนวดิ่ง การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งนั้นแนวโน้มดินจะเคลื่อนตัวลงในบริเวณแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ซึ่งจะทำให้เกิด Negative Skin Friction ต่อเสาเข็ม แต่การเคลื่อนที่ของดินได้แนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์จะเคลื่อนที่ขึ้น และเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการผลักเสาเข็มขึ้น ในขณะที่การเคลื่อนตัวของดินในแนวราบนั้นมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนเข้าสู่แนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของอุโมงค์และอาจจะนำไปสู่การแอ่นตัวทางด้านข้างและโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม



รูปที่ 4.33 เสาเข็มเดี่ยวที่อยู่ใกล้กับบริเวณก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์

ซึ่งสมมุติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1. เป็นชั้นดินเหนียวที่มีสภาพ Undrained ที่มี Undrained shear strength

$$C_u = 60 \text{ kPa, Young's modulus } E_s = 24 \text{ MPa}$$

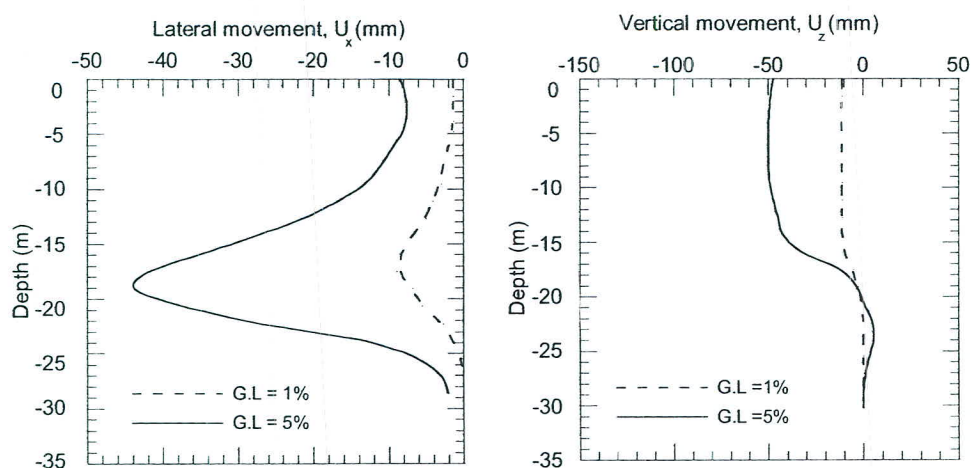
2. รัศมีอุโมงค์ $R = 3.0$ เมตร และความลึกจากผิวดินถึงแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ $h = 20$ เมตร

- เสาเข็ม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง $d = 0.5$ เมตร, ค่า Young's Modulus $E_p = 30,000$ MPa, พิกัดแรงดันด้านข้างระหว่างดินและเสาเข็ม $P_u = 540$ kPa, พิกัดของแรงเสียดทาน $f_s = 48$ kPa, พิกัดแรงต้านส่วนปลายของเสาเข็ม $f_p = 540$ kPa สำหรับเสาเข็มที่มีความยาว 25 เมตร และค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่ยอมให้เท่ากับ 796 kN และกำลังรับแรงดึงตามแนวแกนที่ยอมให้ เท่ากับ 754 kN
- วัสดุที่ทำเสาเข็มเป็น Precast Concrete ที่มีปริมาณเหล็กเสริมครึ่งส่วนบนของความยาวเสาเข็มเท่ากับ 2.5 % และครึ่งส่วนล่างของเสาเข็มเท่ากับ 1 % ตามลำดับ
- ความยาวของเสาเข็มที่ศึกษา มีสามกรณีประกอบไปด้วย กรณีแรกปลายของเสาเข็มอยู่เหนือแนวเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ $L_p = 15$ ม.กรณีที่สองปลายของเสาเข็มอยู่ที่ตำแหน่งแนวเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ $L_p = 20$ ม. และกรณีที่สามปลายของเสาเข็มอยู่ใต้แนวเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ $L_p = 20$ ม.

ซึ่งผลการวิจัยที่ได้มีดังนี้

1. การเคลื่อนตัวของดิน

การเคลื่อนตัวของดินจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการสูญเสียมวลดินเพิ่มขึ้น และการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบและแนวตั้งที่สูงที่สุดจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเหนือแนวเส้นผ่าศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ และพบว่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดของดินจะเพิ่มขึ้นจาก $X = 0$ ถึงค่าสูงสุดประมาณ $X = 3.0$ เมตร. หลังจากนั้นจะลดลงเมื่อ X เพิ่มมากขึ้น อีกประการหนึ่งการเคลื่อนที่สูงสุดของดินในแนวตั้งจะลดลงเมื่อ X เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.34 ซึ่งแสดงการคำนวณการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบและในแนวตั้ง เนื่องจากการเจาะอุโมงค์ที่มีอัตราการสูญเสียมวลดิน (Ground loss, G.L) เท่ากับ 1% และ 5% และระยะ X เท่ากับ 4.5 ม.



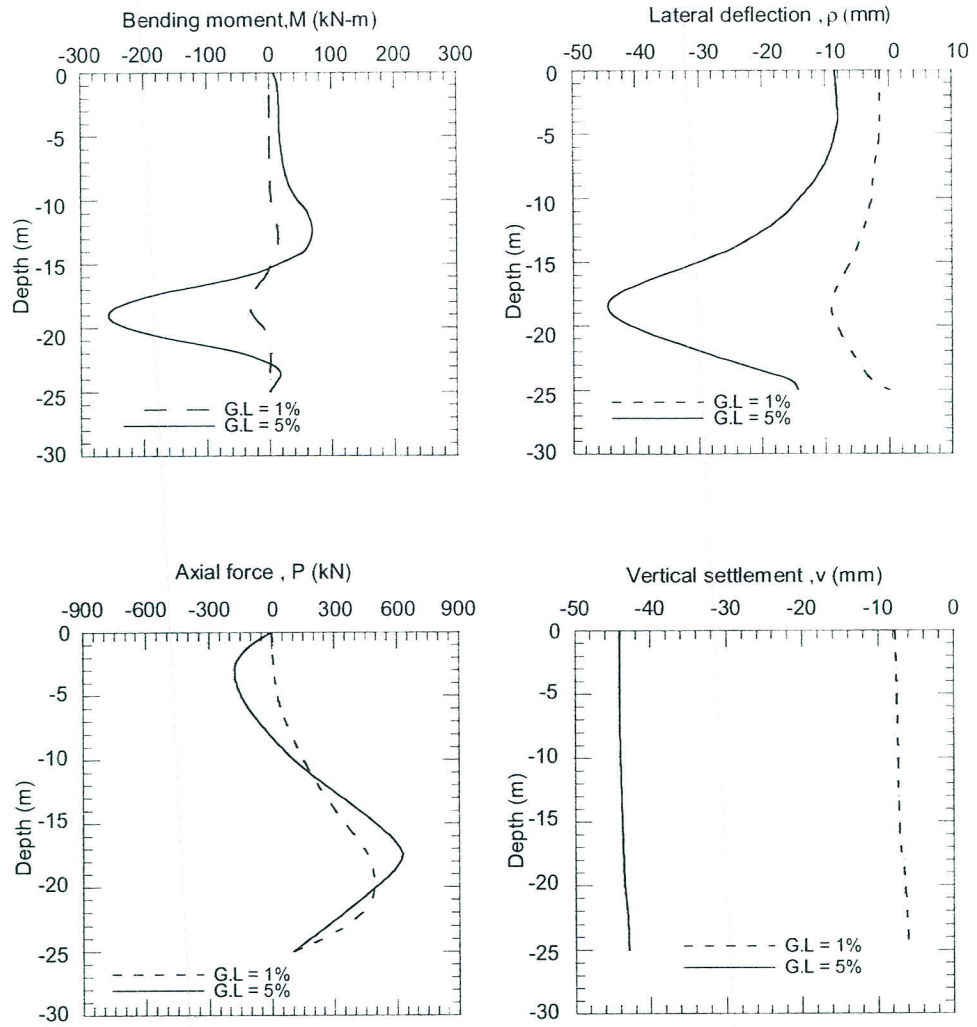
รูปที่ 4.34 การเคลื่อนตัวของดินในแนวราบและในแนวตั้งที่ระยะ $X = 4.5$ เมตร

2. การตอบสนองของเสาเข็ม

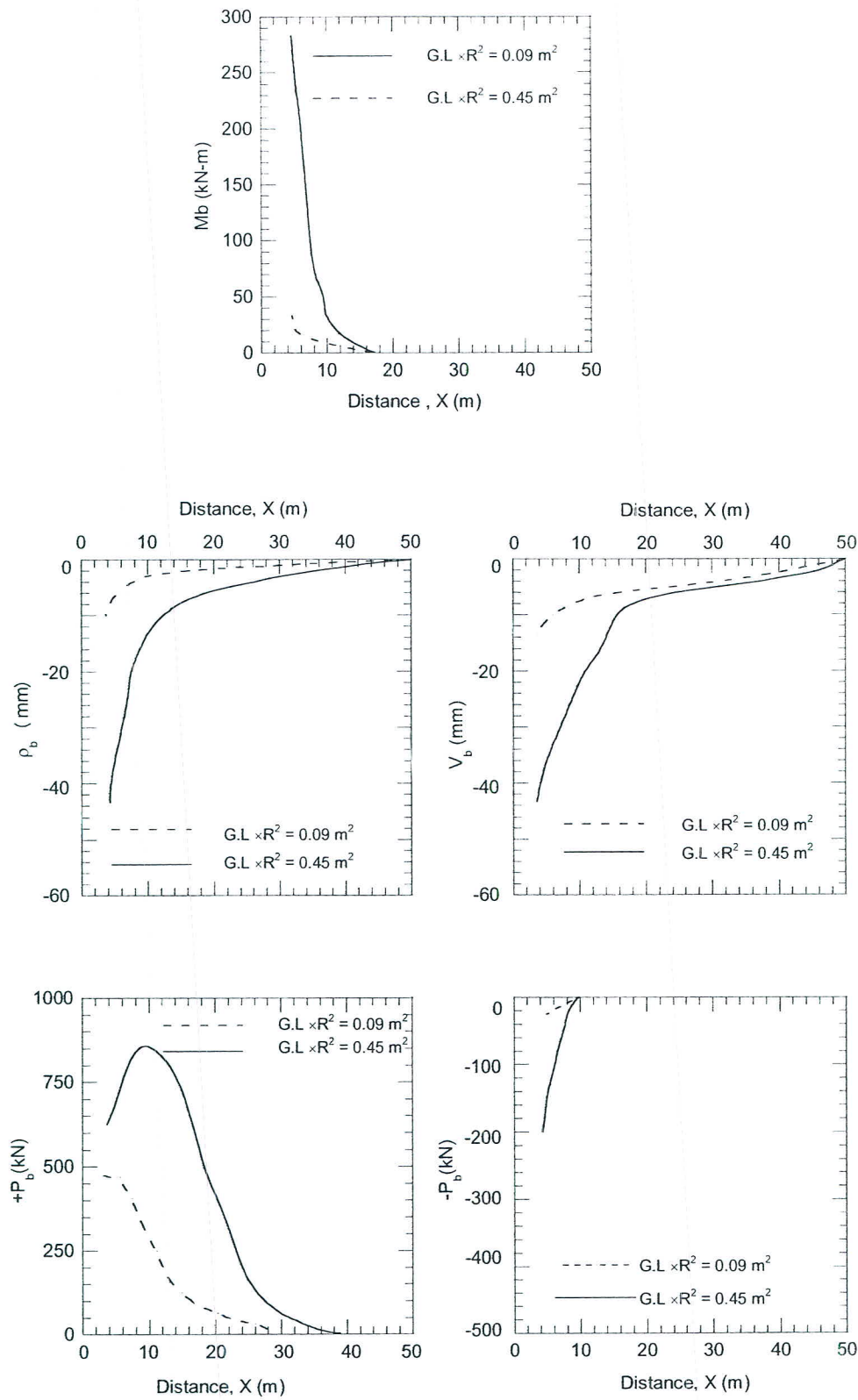
การตอบสนองของเสาเข็มแสดงดังรูปที่ 4.35 ซึ่งมีลักษณะสำคัญดังนี้

1. การโก่งตัวทางด้านข้างของเสาเข็ม จะมีลักษณะเหมือนกับรูปแบบของการเสียรูปของมวลดินอย่างมาก และค่าสูงสุดจะเกิดขึ้นเหนือระดับแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์
2. โมเมนต์ดัดจะมีลักษณะเป็นโค้งสองทาง (double curvature) ที่มีค่าสูงสุดเกิดขึ้นเหนือระดับแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์
3. การทรุดตัวของเสาเข็มจะมีค่าสม่ำเสมอตลอดความยาวของเสาเข็ม และการทรุดตัวที่ตำแหน่งหัวเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในแนวตั้งของดิน สำหรับแต่ละอัตราการสูญเสียมวลดิน
4. แรงดึงและแรงอัดตามแนวแกนของเสาเข็ม จะเพิ่มขึ้นไปตามความยาวของเสาเข็มแต่แรงอัดจะมากกว่าแรงดึง และเมื่อแรงตามแนวแกนมีค่าสูงที่สุดค่าอัตราการสูญเสียมวลดินจะไม่เกิน 5 %
5. แรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้น พิจารณาเฉพาะอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์เท่านั้น ไม่พิจารณาถึงปัจจัยจากแรงกระทำอื่นๆ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดอาจจะเกินค่าที่ใช้งานสำหรับในกรณีอัตราการสูญเสียมวลดิน 5 %

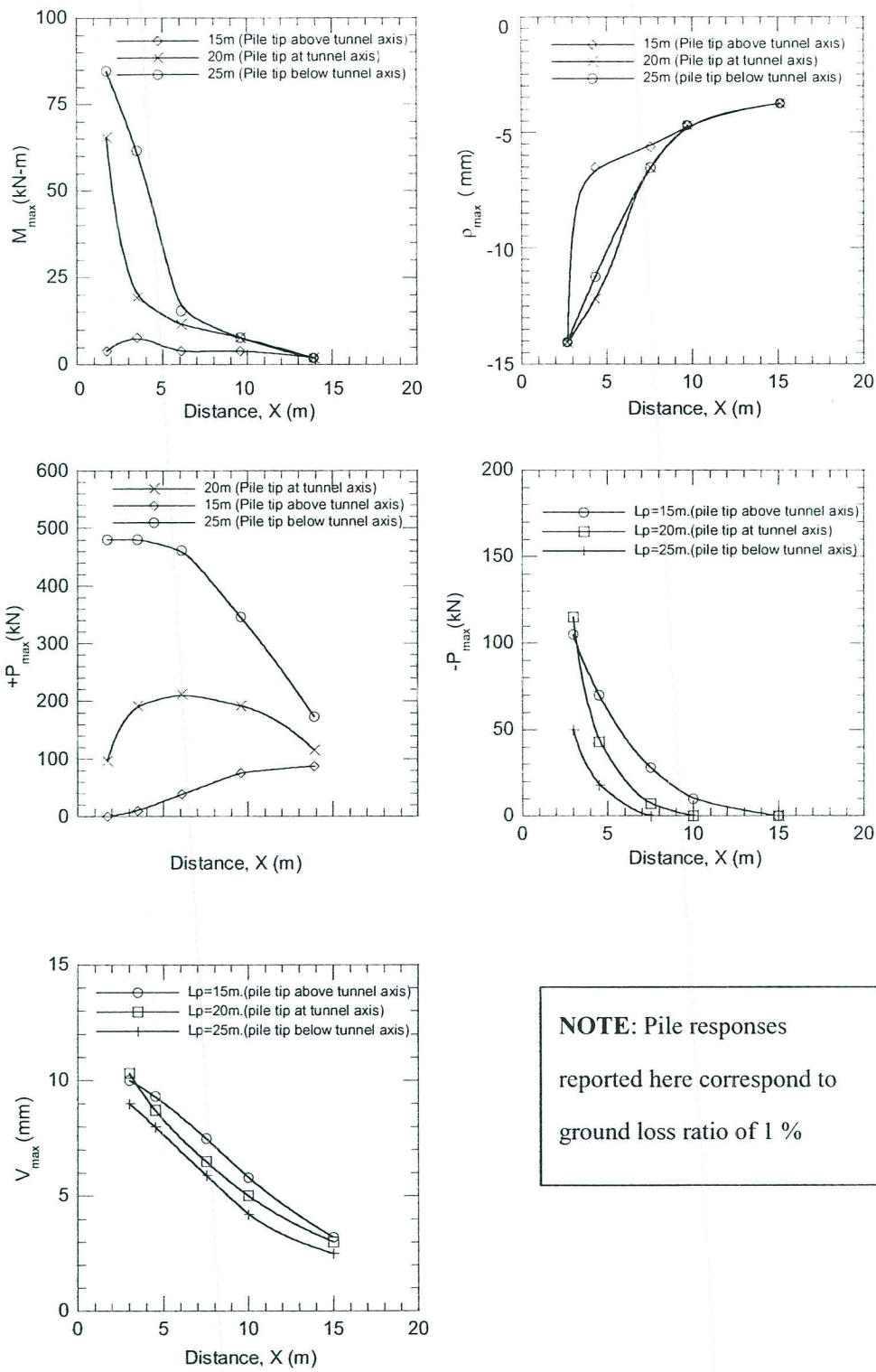
รูปที่ 4.36 แสดงค่าการตอบสนองต่อแรงกระทำต่างๆของเสาเข็มที่มีค่าสูงสุดกับระยะ X สำหรับเสาเข็มยาว ($L_p = 25$ m) ที่มีค่า $G.L.XR^2$ เท่ากับ 0.09 และ 0.45 m^2 จากรูปพบว่าค่าโมเมนต์ดัด M_b , ค่าการโก่งตัวทางด้านข้าง p_b , ค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม v_b และค่าแรงดึงตามแนวแกน $-P_b$ ค่าทั้งหมดนี้ลดลง เมื่อ X เพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงอัดตามแนวแกน $+P_b$ มีค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งที่ X ประมาณ 9 ม. (นั่นคือ ประมาณ 3 เท่าของรัศมีอุโมงค์)



รูปที่ 4.35 ตัวอย่างการตอบสนองของเสาเข็มที่ตำแหน่ง $X = 4.5$ เมตร ($L_p = 25$ m.)



รูปที่ 4.36 การตอบสนองของเสาเข็มที่มีค่าสูงสุดที่ระยะ X ต่างๆสำหรับเสาเข็มยาว



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบการตอบสนองสูงสุดของเสาเข็มที่มีความยาวเสาเข็ม 15, 20 และ 25 เมตร

รูปที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองสูงสุดของเสาเข็ม ที่มีอัตราการสูญเสียมวลดิน 1% สำหรับความยาวเสาเข็ม $L_p = 15, 20$ และ 25 เมตร ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. เสาเข็มที่มีความยาว 15 เมตร โมเมนต์คัตจะมีค่าน้อยเนื่องจากเสาเข็มได้รับแรงจากการเคลื่อนตัวของดินที่มีค่าไม่มาก ซึ่งการเคลื่อนตัวของดินส่วนใหญ่เกิดขึ้น ณ ระดับที่ต่ำกว่า
2. ค่าโมเมนต์และแรงตามแนวแกนสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเสาเข็มมีความยาวเพิ่มมากขึ้น
3. การโก่งตัวทางด้านข้างจะไม่ขึ้นอยู่กับความยาวของเสาเข็มในส่วนที่ต่ำจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์
4. การทรุดตัวของหัวเสาเข็มในแนวดิ่งจะไม่แตกต่างกัน ในกรณีที่เสาเข็มมีความยาว 15 , 20 และ 25 เมตร

เมื่อเราพิจารณาเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการศึกษาปรากฏว่าได้ผลการทดสอบดังนี้

1. ค่าโมเมนต์คัตสูงสุด M_{max} , การโก่งตัวสูงสุดทางด้านข้างของเสาเข็ม ρ_{max} , แรงอัดตามแนวแกนสูงสุด $+P_{max}$, แรงดึงตามแนวแกนสูงสุด $-P_{max}$ และค่าการทรุดตัวสูงสุด U_{max} พารามิเตอร์ของเสาเข็มทั้งหมดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีของอุโมงค์ R และอัตราการสูญเสียมวลดินเพิ่มมากขึ้น
2. M_{max} , ρ_{max} , $+P_{max}$ และ $-P_{max}$ จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า C_u เพิ่มขึ้น เพราะว่าการเพิ่มขึ้นของ C_u ทำให้แรงเสียดทานและพิคัดแรงดันของดินทางด้านข้างเพิ่มมากขึ้น U_{max} ก็เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อ C_u เพิ่มขึ้น
3. ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดค่า M_{max} ที่เพิ่มมากขึ้นแต่ ρ_{max} จะลดลงและแรงดึงและแรงอัดตามแนวแกนจะเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ U_{max} จะลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเพิ่มมากขึ้น
4. ผลของความลึกจากผิวดินถึงแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ h และความยาวของเสาเข็ม L_p จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน L_p/h การตอบสนองสูงสุดของเสาเข็ม อาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L_p/h ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

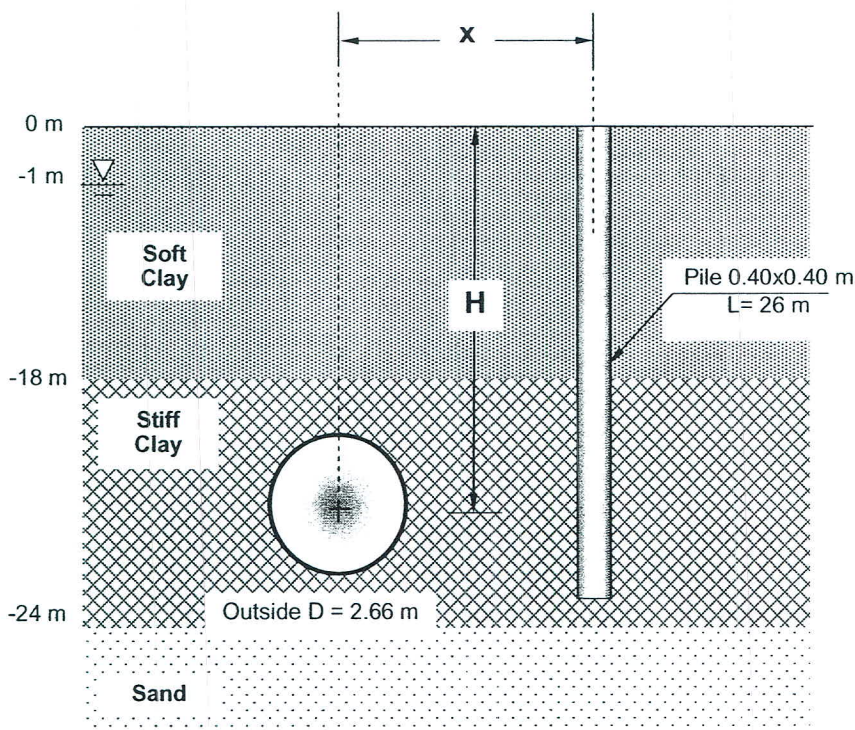
4.3.6 Suwansawat, (2006)

Suwansawat, (2006) ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม อันเนื่องมาจากการสูญเสียมวลดินในการขุดเจาะอุโมงค์ โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 2 มิติ เพื่อวิเคราะห์และสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบระหว่างผลกระทบและการสูญเสียมวลดิน โดยที่ในการศึกษาได้ใช้โครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำลอดใต้แนวคลองพระยาราชมนตรีและถนนพระราม 2 ความยาว 6 กิโลเมตรเป็นกรณีศึกษา

ในการศึกษาได้จำลองรูปแบบของปัญหาดังแสดงใน 4.38 โดยมีค่าตัวแปร X เป็นระยะห่างจากศูนย์กลางของอุโมงค์ถึงศูนย์กลางของเสาเข็ม ซึ่งกำหนดให้หลากหลายครอบคลุมปัญหาที่

เกิดขึ้นทั้งหมดของโครงการตั้งแต่ระยะ 2-7 เมตร ด้านข้างของอุโมงค์จะเป็นเสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด 40 x 40 เซนติเมตร และมีค่าตัวแปร H เป็นค่าความลึกถึงศูนย์กลางอุโมงค์ซึ่งอยู่ที่ความลึกคงที่เท่ากับ 21 เมตร อีกทั้งยังจำลองพฤติกรรมการสูญเสียมวลดินเป็น 2 กรณี คือ 0.5% และ 1.5% จากนั้นจึงวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าดังต่อไปนี้

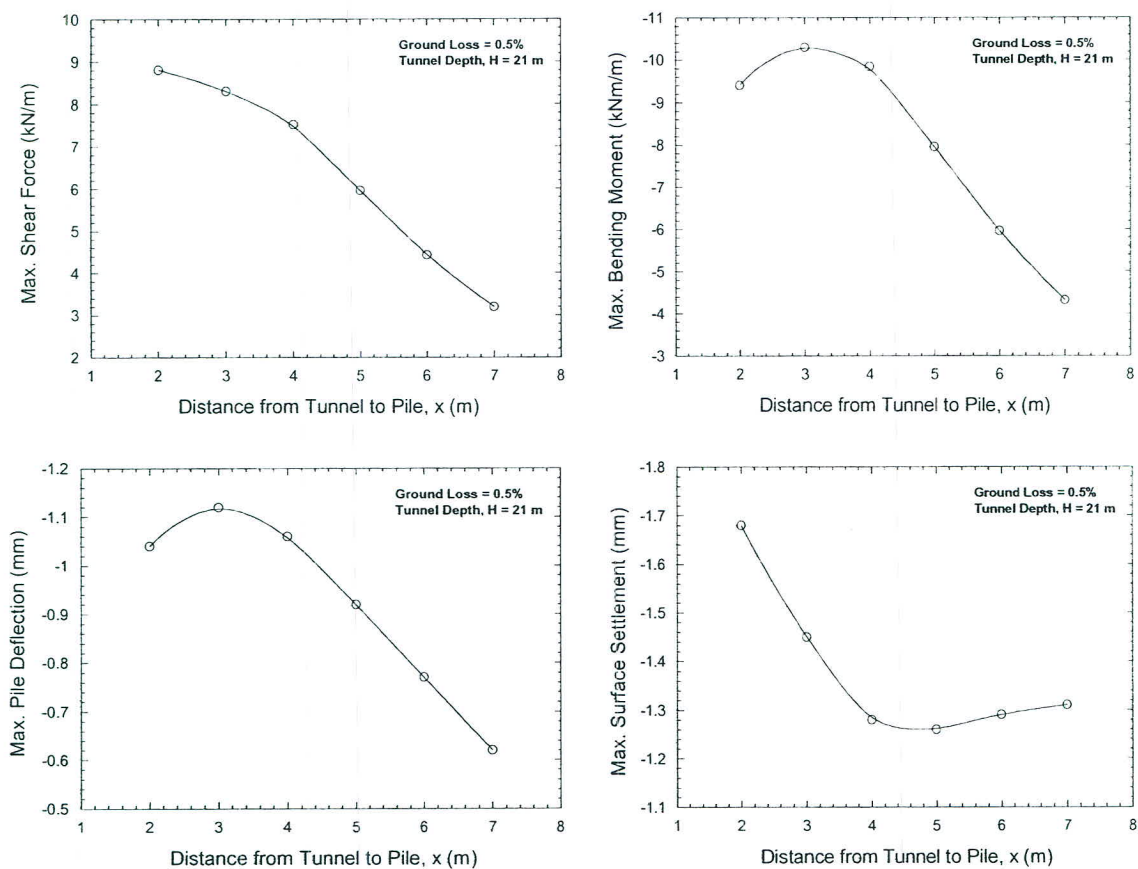
- (1) ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของเสาเข็ม (Max. Pile deflection, mm)
- (2) ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดกระทำต่อเสาเข็ม (Max. Bending moment, kN-m/m)
- (3) ค่าแรงเฉือนสูงสุดกระทำต่อเสาเข็ม (Max. Shear force, kN/m)
- (4) ค่าการทรุดตัวสูงสุดของผิวดิน (Max. Surface settlement, mm)



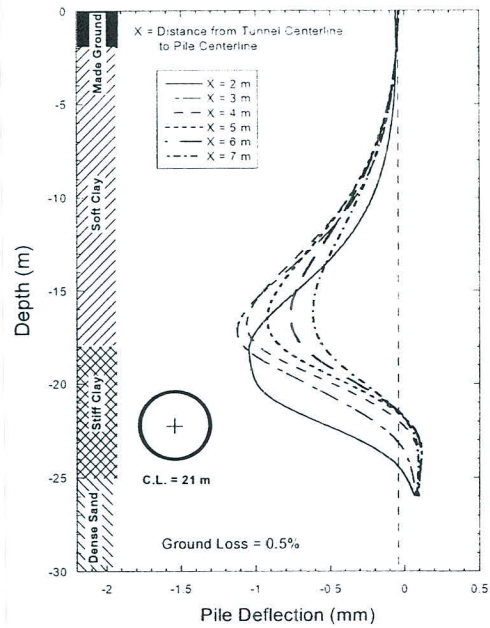
รูปที่ 4.38 ลักษณะรูปแบบและตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสาเข็ม

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ในกรณี Ground loss = 0.5% แสดงดังรูปที่ 4.39 จากผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ พบว่าการแอ่นตัวของเสาเข็มและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับระยะห่างจากอุโมงค์ นอกจากนี้แล้วการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถแสดงถึงลักษณะการแอ่นตัวของเสาเข็มที่มีตำแหน่งห่างจากอุโมงค์เป็นระยะต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.40 อย่างไรก็ตามการแอ่นตัวสูงสุดจะมีค่าน้อยเพียง 1 มม. เท่านั้น แม้ว่าเสาเข็มจะอยู่ห่างจากอุโมงค์เพียง 2 เมตร พฤติกรรมลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นในกรณีของโมเมนต์ดัด แรงเฉือนและการทรุดตัวของผิวดินที่ตำแหน่งของเสาเข็มด้วยเช่นกันดังรูปที่ 4.39 หรือเมื่อเสาเข็มอยู่ในตำแหน่งห่าง

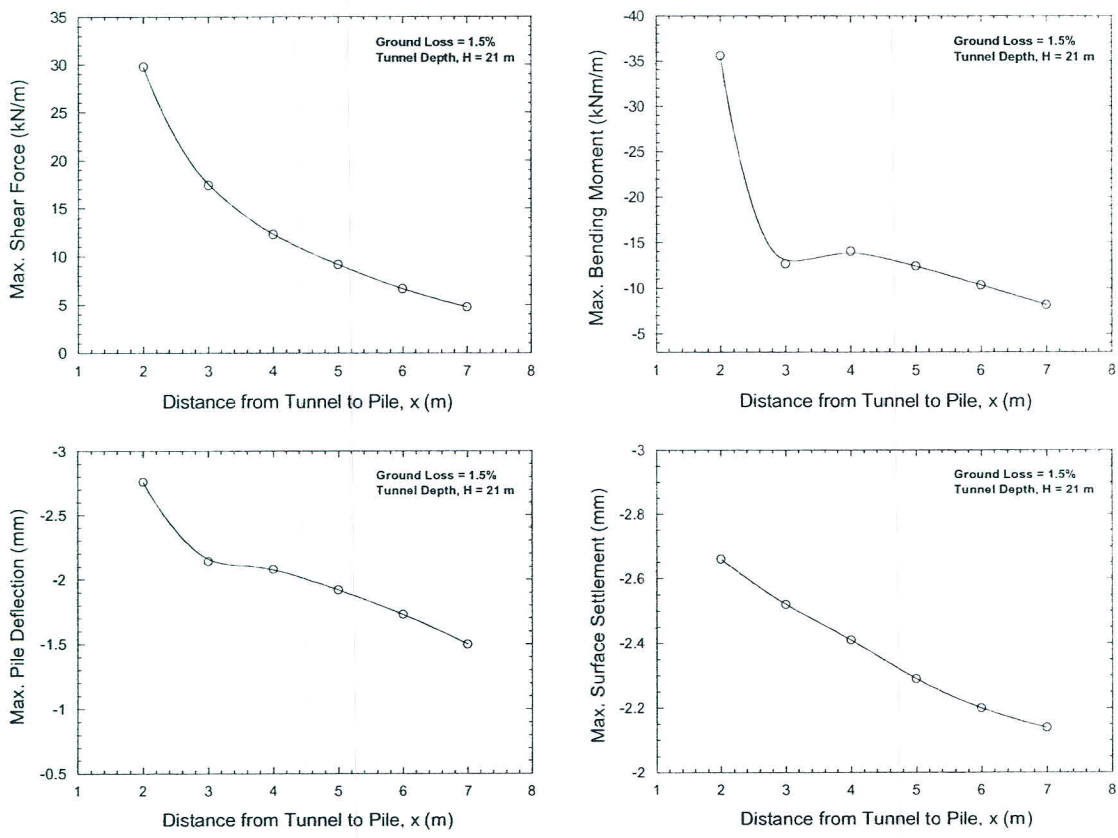
ออกไปผลกระทบจะยิ่งน้อยลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่มีการก่อสร้างอุโมงค์ก่อให้เกิดการสูญเสียมวลดิน $\text{Ground loss} = 0.5\%$ หรือน้อยกว่า จะส่งผลกระทบต่อฐานรากเสาเข็มน้อยมาก และอยู่ในระดับที่ปลอดภัย ส่วนผลลัพธ์การวิเคราะห์ในกรณี $\text{Ground loss} = 1.5\%$ แสดงดังรูปที่ 4.41 ซึ่งพบว่าผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์ต่อเสาเข็มมีความรุนแรงกว่าในกรณี $\text{Ground loss} = 0.5\%$ โดยค่าการแอ่นตัวสูงสุดของเสาเข็มที่ระยะ 2 เมตร จากอุโมงค์เท่ากับ 2.8 มม. ซึ่งก่อให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดถึง 36 kN-m/m และเมื่อวิเคราะห์จากลักษณะการแอ่นตัวของเสาเข็ม ดังรูปที่ 4.42 จะสังเกตได้ว่าเสาเข็มจะแอ่นตัวมากอย่างชัดเจน และเมื่อเสาเข็มอยู่ในตำแหน่งที่ห่างออกไป ผลกระทบจะน้อยลง



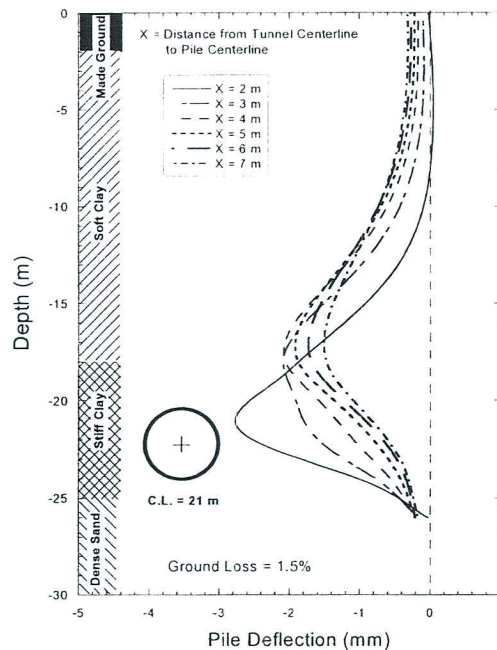
รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบ (Design chart) ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มจากอุโมงค์และผลกระทบจากการสูญเสียมวลดิน $\text{Ground loss} = 0.5\%$



รูปที่ 4.40 รูปแบบการแอ่นตัวของเสาเข็มจาก FEM (Ground loss = 0.5%)



รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบ (Design chart) ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มจากอุโมงค์และผลกระทบ ที่การสูญเสียมวลดิน Ground loss = 1.5%



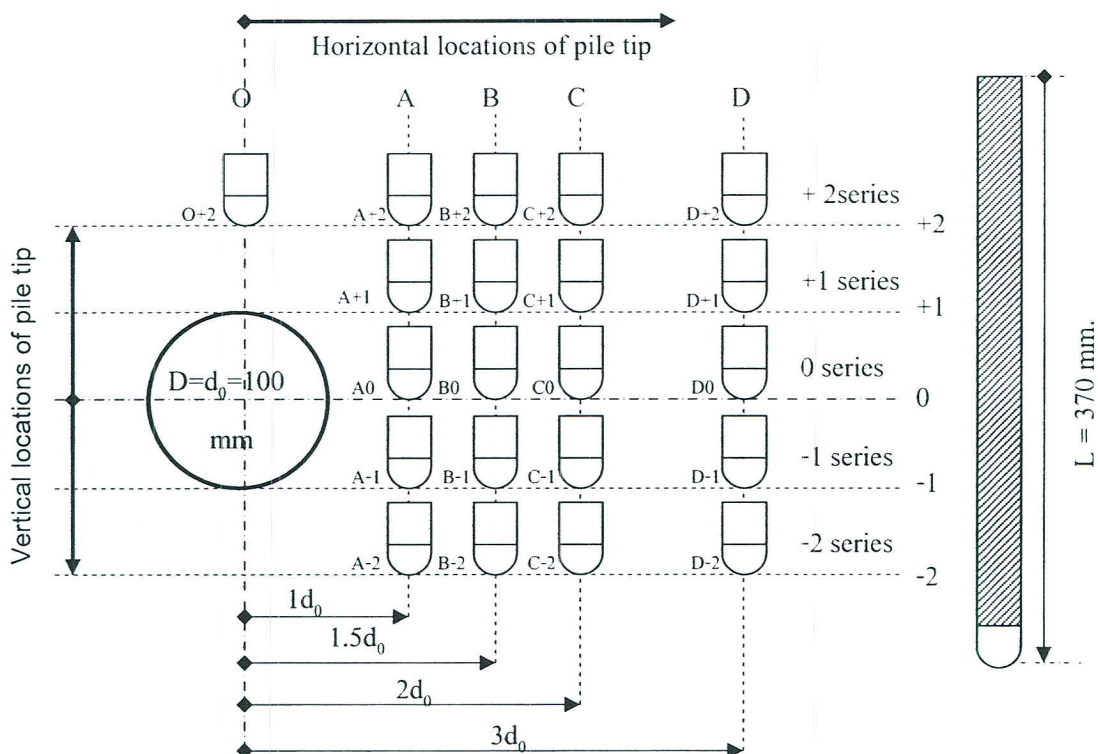
รูปที่ 4.42 รูปแบบการเอนตัวของเสาเข็มจาก FEM (Ground loss = 1.5%)

4.3.7 Lee and Bassett (2006)

Lee and Bassett (2006) ได้ทำการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มและดินอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ โดยใช้วิธีทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองทางกายภาพแบบ 2 มิติ และวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยเน้นการศึกษาการทรุดตัวของปลายเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ใกล้กับแนวของเสาเข็มที่รับน้ำหนักเป็นหลัก พร้อมทั้งศึกษาบริเวณที่มีอิทธิพลต่อเสาเข็ม โดยที่ในการศึกษาการขุดเจาะอุโมงค์จะถูกขุดเจาะในดินที่ไม่มีความเชื่อมั่นแน่น และเป็นดินเม็ดหยาบ (granular material)

1. แบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ

ในการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพนั้น การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มและดินอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์จะมีกรณีของตำแหน่งปลายเสาเข็มทั้งหมด 21 กรณี ดังรูปที่ 4.43 ในการจำลองวัสดุเม็ดหยาบจะใช้แท่งของอลูมิเนียมที่มีขนาดต่างกัน ได้แกขนาด 2 และ 3 มิลลิเมตร ใช้กับบริเวณที่ใกล้กับการขุดเจาะอุโมงค์และมีเสาเข็มฝังอยู่ แต่ขนาด 6, 9 และ 12 มิลลิเมตรใช้กับบริเวณมุมของกล่องบรรจุที่ใช้ทดสอบ ในการจำลองเสาเข็มจะจำลองโดยใช้โลหะผสมอลูมิเนียม ที่มีขนาดหน้าตัด (25 mm × 75 mm.) เสาเข็มจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนจะเชื่อมต่อกับด้วย load cell ค่าแรงกดที่กระทำกับเสาเข็มที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 27 kg

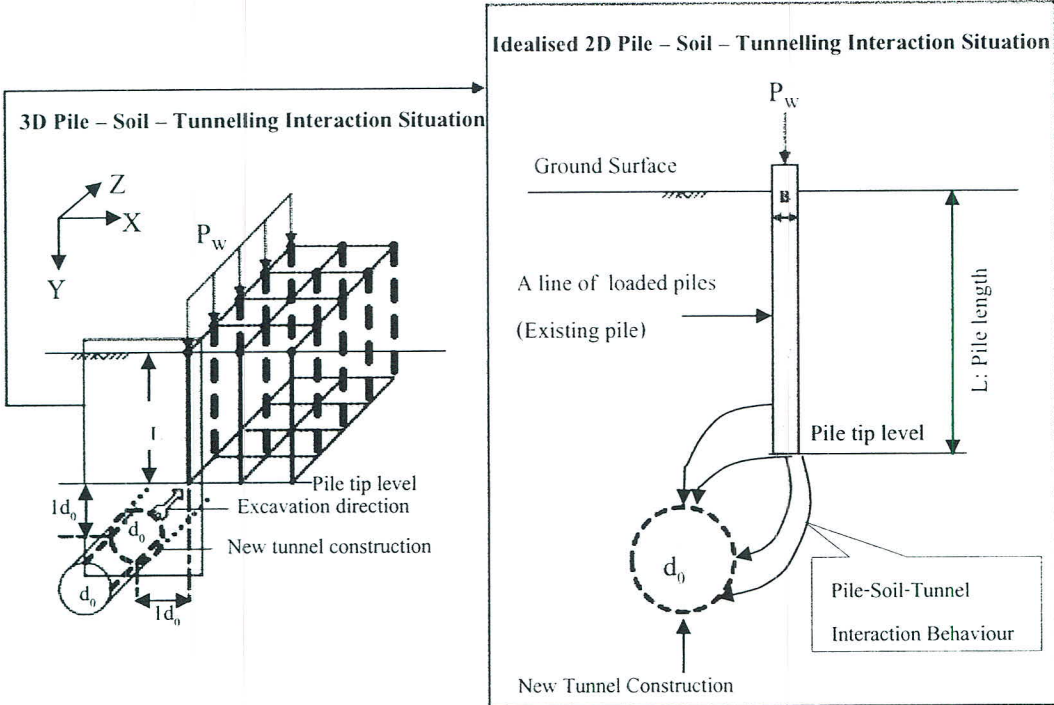


รูปที่ 4.43 ตำแหน่งของปลายเสาเข็มที่ทำการทดสอบเมื่อเสาเข็มมีความยาวเท่ากัน

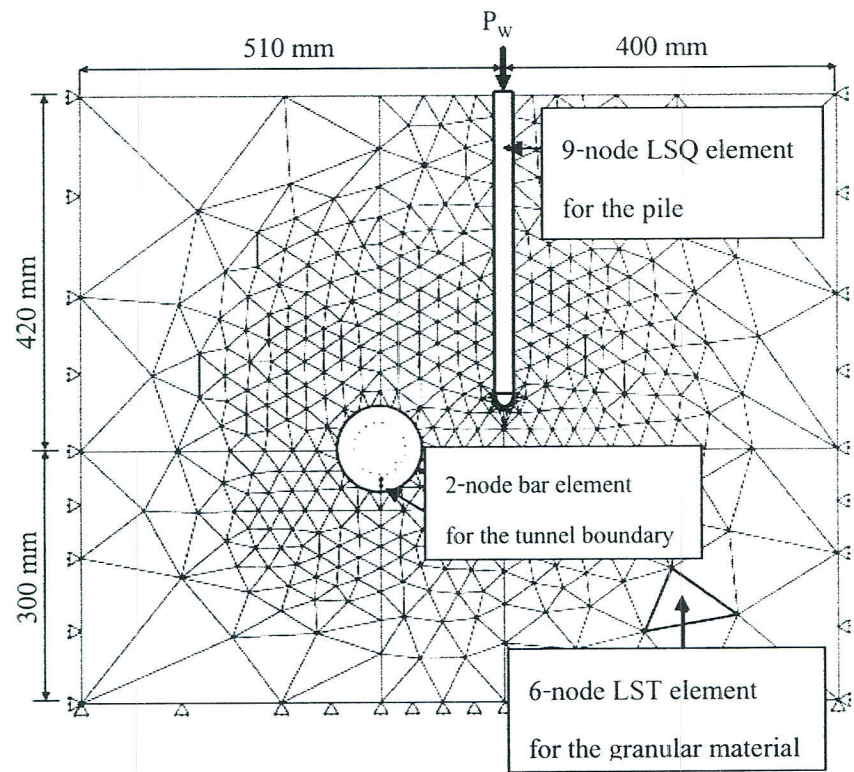
2.การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical analysis)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ทำการจำลองปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มและดินอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ และทำการจำลองปัญหาที่อยู่ในสภาพ 3 มิติ ให้อยู่ในสภาพระนาบความเครียด (Plane strain) 2 มิติในอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 4.44 เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จะทำการทดลองรูปทรงทางเรขาคณิตของอุโมงค์ ขนาดของเสาเข็ม และตำแหน่งของเสาเข็มเหมือนกับการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ

รูปที่ 4.45 แสดง 2D finite element mesh สำหรับกรณี B +1 ที่แสดงในรูปที่ 4.43 เมื่อ mesh มีความกว้าง 910 mm และสูง 720 mm ประกอบไปด้วย 1062 อีลิเมนต์ และ 566 จุดต่อ เงื่อนไขขอบเป็น Roller supports ทั้งหมดที่ด้านข้างของ mesh และเป็น Pin supports ที่ด้านล่างของ mesh ในการวิเคราะห์จะจำลองพฤติกรรมของดินเป็น elastic – perfectly – plastic ที่ยึดแบบจำลองของ Mohr – Coulomb และกฎการไหลแบบไม่สอดคล้อง (non – associated flow rule) เป็นหลัก



รูปที่ 4.44 ปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มและดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพระนาบความเครียด 2 มิติ

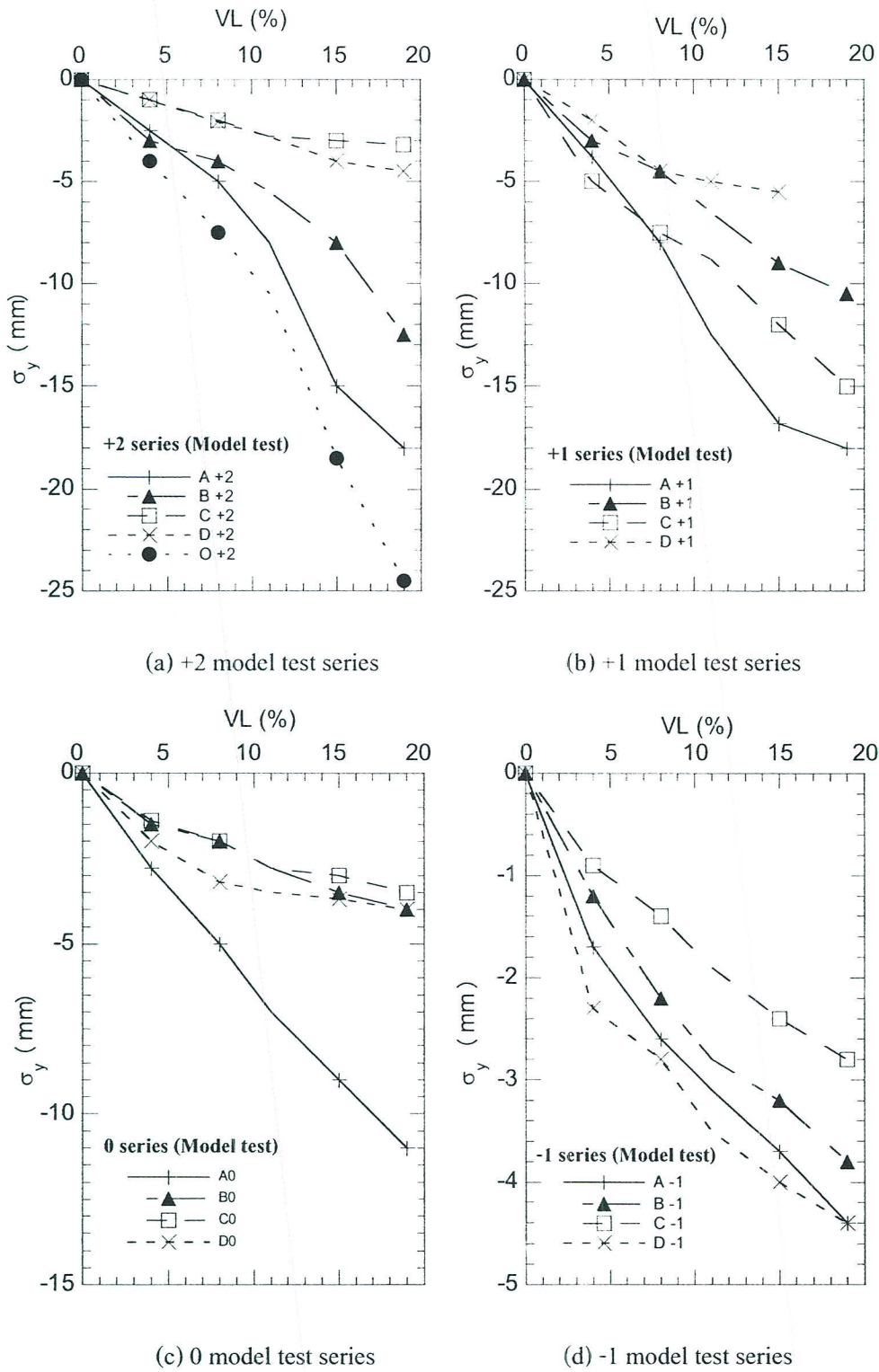


รูปที่ 4.45 2D finite element mesh สำหรับกรณี B +1

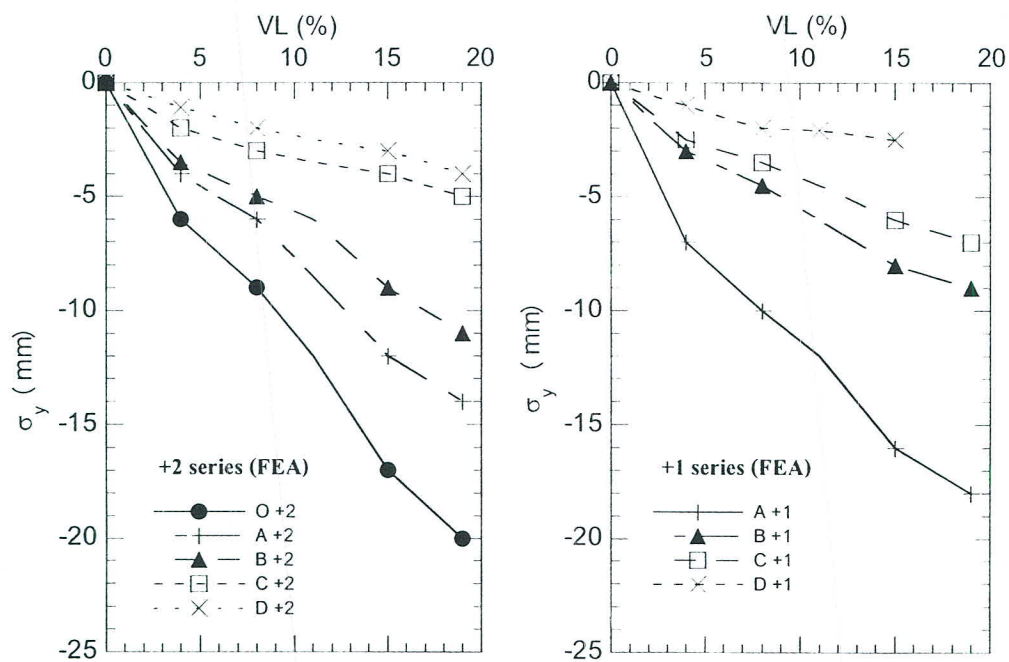
3. ผลการทดสอบ

แรงตามแนวแกนของเสาเข็มจากการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ รูปที่ 4.46 แสดงการพล็อตแรงตามแนวแกนของเสาเข็ม P กับระยะห่างจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม กับแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของอุโมงค์ โดยที่ทำการพล็อตแต่ละชุดของการทดสอบ นั้นก็คือจากชุด +2 ลดลงมาถึงชุด -2 ซึ่งพบว่าทุกชุดการทดสอบมีรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จากตำแหน่ง A ที่อยู่ใกล้กับแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของอุโมงค์มากที่สุดถึงตำแหน่ง D ที่ห่างจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของอุโมงค์เท่ากับ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ซึ่งที่ตำแหน่งนี้แรงตามแนวแกนเฉลี่ยจะเท่ากับ 23.5 kg มีการสูญเสียแรงตามแนวแกน 3.5 kg จากแรงตามแนวแกนใช้งานที่ใช้ทดสอบ $P_w = 27$ kg ที่ชุดการทดสอบที่อยู่ใต้แกนในแนวราบของอุโมงค์ (ชุด -1 และ -2) มีการสูญเสียแรงเสียดทานน้อย ในขณะที่เมื่อตำแหน่งของปลายเสาเข็มอยู่เหนือเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบของอุโมงค์ (ชุดการทดสอบ 0, +1, -2) จะมีค่าการสูญเสียแรงเสียดทานที่สูง ในกรณี A +2 มีการสูญเสียแรงเสียดทานเฉลี่ยสูงถึง 12 kg

บริเวณที่มีอิทธิพลสำหรับปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มและดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ การทรุดตัวของปลายเสาเข็ม (p_y) ระหว่างที่มีการสูญเสียมวลดินแบบ 2 มิติ (V_L) แสดงในรูปที่ 4.47 ในชุดที่ทำการทดสอบทั้งหมดพบว่า การทรุดตัวของเสาเข็มจะกระจายเป็นเชิงเส้นเมื่อการสูญเสียมวลดิน $V_L = 4\%$ และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ก็จะมีการทรุดตัวของเสาเข็มกระจายเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.48 อย่างไรก็ตามในบางกรณีมีการทรุดตัวของเสาเข็มที่มากเกินไป (กรณี C + 1 , D 0 , D -1) พฤติกรรมเช่นนี้แสดงว่าระบบการจัดเรียงตัวในขั้นตอนการติดตั้งแบบจำลองก่อนที่จะมีการทดสอบอาจจะไม่สม่ำเสมอหรือเกิดการผิดพลาดในการวัดขณะที่ทำการทดสอบ เมื่อทำการเปรียบเทียบการทรุดตัวของปลายเสาเข็มตามตำแหน่งต่างๆพบว่า มีค่าที่เหมาะสม นั่นก็คือ $O > A > B > C > D$

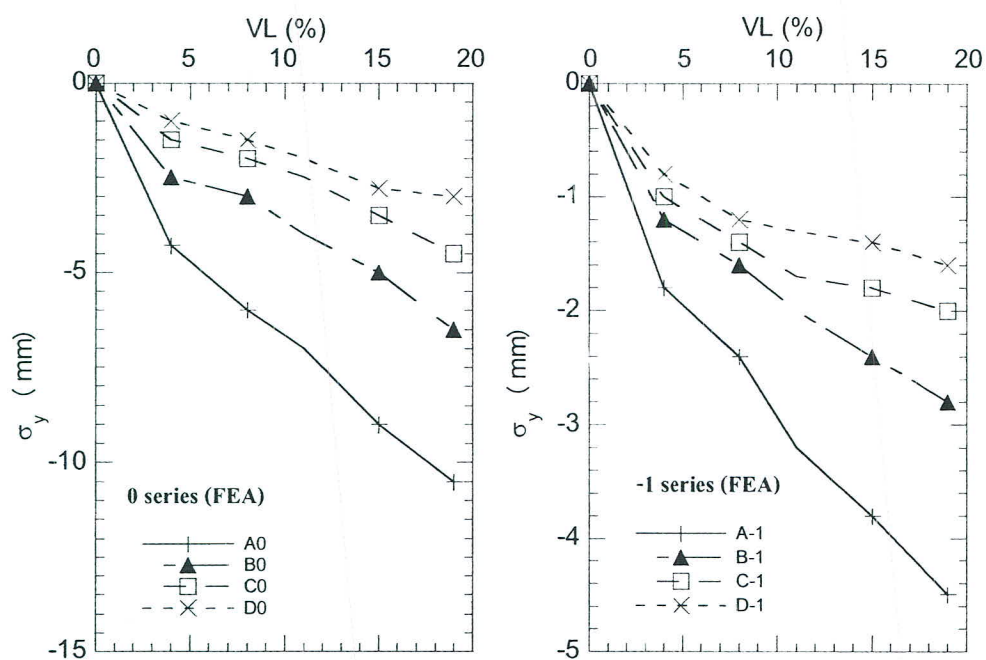


รูปที่ 4.47 การทรุดตัวของปลายเสาเข็มในแนวดิ่ง(p_y) กับการสูญเสียมวลดินแบบ 2 มิติ (V_L) จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ



(a) FEA for +2 series

(b) FEA for +1 series

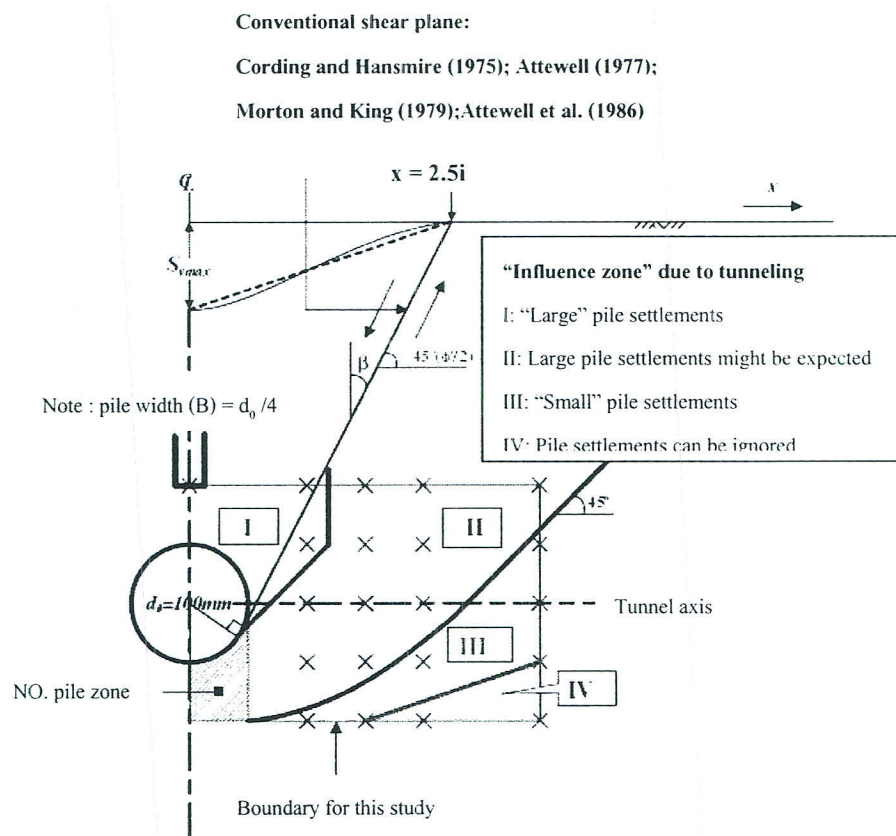


(c) FEA for 0 series

(d) FEA for -1 series

รูปที่ 4.48 การทรุดตัวของปลายเสาเข็มในแนวดิ่ง(p_y) กับการสูญเสียมวลดินแบบ 2 มิติ (V_L) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

จากการศึกษาสามารถแบ่งบริเวณที่มีอิทธิพลต่อเสาเข็มได้เป็น 4 บริเวณ (I, II , III และ IV) ดังแสดงในรูปที่ 4.49 ซึ่งบริเวณทั้ง 4 บริเวณที่เสนอจะกว้างและลึกกว่าที่มีผู้เสนอมาก่อนหน้านี้ โดยที่บริเวณ I จะมีการทรุดตัวของเสาเข็มมาก บริเวณ II การทรุดตัวของเสาเข็มอาจจะมีการทรุดตัวที่มาก ซึ่งเมื่อเสาเข็มอยู่ในบริเวณนี้จะต้องมีการตรวจสอบอย่างละเอียด ในขณะที่บริเวณที่ III การทรุดตัวของเสาเข็มจะมีค่าน้อย และบริเวณที่ IV การทรุดตัวของเสาเข็มมีค่าน้อยมาก บริเวณที่มีอิทธิพลต่อเสาเข็มดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของปลายเสาเข็ม ปริมาณการสูญเสียมวลดิน กำลังของดิน แรงตามแนวแกนใช้งานของเสาเข็ม ขนาดเสาเข็ม พฤติกรรมไคเลชันของวัสดุหยาบ และขนาดของอุโมงค์



รูปที่ 4.49 แสดงบริเวณที่มีอิทธิพลต่อเสาเข็มสำหรับปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มและดินอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ในดินที่ไม่มีความเชื่อมั่น

5.4 สรุปกรณีศึกษาผลกระทบต่อน้ำขึ้นอันเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ในอดีต

จากการศึกษากรณีศึกษาผลกระทบต่อน้ำขึ้นอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันพบว่าแต่ละกรณีศึกษามีการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆที่แตกต่างกันซึ่งแต่ละวิธีก็มีลักษณะที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปลักษณะของกรณีศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มจากอดีตจนถึงปัจจุบัน

หัวข้อ	ผู้วิจัย	วิธีศึกษา	ปีที่พิมพ์	ลักษณะหรือคุณสมบัติ
Pile responses caused by tunneling.	Chen et al.	Two - Stage	1999	ทำการศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มเดี่ยว ผลที่ได้พบว่าผลกระทบของเสาเข็มจากการขุดเจาะอุโมงค์ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเสาเข็มและความลึกของปลายเสาเข็มเป็นสำคัญ และได้สร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบแต่ในการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1 ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้ไม่สมจริงมากนัก และไม่มีกรกล่าวถึงปัจจัยในการควบคุมหัวเจาะในการวิเคราะห์
Three-dimension finite analysis of the interaction between tunneling and pile foundation	Mroueh and Shahrouh.	FEM- 3D	2002	ทำการศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มทั้งเสาเข็มกลุ่มและเสาเข็มเดี่ยว ผลที่ได้พบว่าการขุดเจาะอุโมงค์ก่อให้เกิดผลกระทบต่อเสาเข็ม โดยเฉพาะเสาเข็มเดี่ยว และในเสาเข็มกลุ่มนั้นเสาเข็มที่อยู่ใกล้กับอุโมงค์จะได้รับผลกระทบมากกว่าเนื่องจากได้สัมผัสกับการเคลื่อนตัวของดินที่มีค่ามากกว่า พารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์มีลักษณะที่เฉพาะแตกต่างจากสภาพพารามิเตอร์ของประเทศไทย
Centrifuge model testing of tunnelling - induced ground and pile deformations	Loganathan-et al.	Laboratory	2000	ศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มด้วยแบบจำลองทางกายภาพ ผลที่ได้เป็นที่น่าสนใจในระดับหนึ่ง ผลที่ได้พบว่าการขุดเจาะอุโมงค์ที่มีค่าการสูญเสียมวลดินที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เสาเข็มได้รับผลกระทบมากขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเสาเข็มและความยาวของเสาเข็มจากผิวดินเป็นสำคัญ แต่ในการจำลองปัญหายังมีข้อจำกัดอยู่มากเมื่อเปรียบเทียบกับ การก่อสร้างอุโมงค์จริง โดยเฉพาะปัจจัยในการควบคุมหัวเจาะที่ไม่ได้ถูกกล่าวถึงในการศึกษานี้
Finite element analysis of tunnel- soil - pile interaction using displacement controlled model	Cheng et al.	FEM- 3D	2007	ศึกษาการตอบสนองของเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์ 3 มิติ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลการทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งค่าที่ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลในห้องปฏิบัติการไม่สอดคล้องกันนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในสนามจะให้ค่าที่สอดคล้องกันพอสมควร
2D Model Tests and Numerical Simulation in Shallow Tunneling Considering Existing Building Load	Shahin et al	Combine - Method	2006	เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบต่อฐานราก Flat foundation และ Piled raft ด้วยวิธี FEM-2D และ Laboratory ผลการทดสอบจากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันแต่รูปแบบการทรุดตัวของผิวดินไม่เป็นตามรูปแบบของ Gaussian Curve ในการจำลองการทดสอบยังไม่สอดคล้องกับวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ในปัจจุบันอีกด้วย
Effects of Tunneling on Adjacent Piles	Suwansawat	FEM- 2D	2006	ศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มเดี่ยวจากการขุดเจาะอุโมงค์ ผลการวิเคราะห์ได้สร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบแต่แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ ยังไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของการขุดเจาะอุโมงค์

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

หัวข้อ	ผู้วิจัย	วิธีศึกษา	ปีที่พิมพ์	ลักษณะหรือคุณสมบัติ
Influence zones for 2D Pile - Soil - Tunnelling interaction based on model test and numerical analysis	Lee and Bassett	Combine - Method	2006	ศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มโดยวิเคราะห์เพื่อหาบริเวณที่มีอิทธิพลต่อเสาเข็มในดินที่ไม่มีความเชื่อมั่นแน่น ทำให้ได้บริเวณที่มีอิทธิพลต่อเสาเข็ม แต่ในการวิเคราะห์การจำลองพฤติกรรมการขุดเจาะอุโมงค์ยังมีข้อจำกัดค่อนข้างมาก