บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ ทั้งจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือภายในสนามและผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม PLAXIS โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการประเมินการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินในระหว่างทำการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเทคนิควิธีทั้ง 3 แบบคือ ระบบจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก, ระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall

ในการวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวของดินด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS นั้น ได้ทำการป้อนข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของชั้นดิน เช่น ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน, ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิตและค่าโมดูลัสของดิน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ รวมทั้งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS นั้น จะได้นำเสนอในหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1 กำลังรับแรงเฉือนของดิน

กำลังรับแรงเฉือนของดินเป็นหน่วยแรงที่ใช้ในการต้านทานหน่วยแรงภายนอกที่กระทำกับมวลดิน โดยกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวเกิดจากแรงเสียดทาน, แรงเสียดสีและแรงเชื่อมแน่น (Cohesion) ซึ่งเกิดจากความต้านทานของโครงสร้างของดินต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความต้านทานที่เกิดบริเวณที่เม็ดดินติดกัน ส่วนกำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบเกิดจากแรงต้านทานต่อการเสียดสีและแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดิน รวมทั้งแรงต้านทานที่เกิดจากการทำให้เม็ดดินที่เรียงตัวกันแบบอัดแน่นขยายตัวขึ้น (Dilatancy)

4.1.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว

การประเมินกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจากในสนามและห้องปฏิบัติการที่นิยมใช้โดยทั่วๆ ไปมีดังนี้

4.4.3.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบ Field Vane Shear Test

การทดสอบดินโดยวิธี Field Vane Shear Test เป็นการทดสอบดินในสนามที่นิยมใช้ในการหากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งมีความไวสูงมาก เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ทำให้ดินเหนียวถูกรบกวนน้อยกว่าการเก็บตัวอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบแบบการอัด

ตัวแบบอิสระ (Unconfined Compression Test) จากการเก็บตัวอย่างดินจากสนามด้วยกระบอกบางธรรมดา

Bjerrum (1972) พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Field Vane Shear Test มีค่าสูงเกินไปสำหรับดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลาง จึงต้องทำการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วยค่าปรับแก้ μ ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$S_{u(Field)} = \mu \cdot S_{u(FV)} \qquad (4.1)$$

โดย $S_{u(Field)}$ คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนในสนาม

$S_{u(FV)}$ คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนที่วัดได้จากการทดสอบแบบเวนในสนาม

μ คือค่าปรับแก้ของ Bjerrum (1972) ที่ได้จากการทดสอบการวิบัติของคันดินบนดินอ่อน โดยค่า μ ที่เหมาะสมของดินกรุงเทพฯ อยู่ระหว่าง 0.70-0.85

4.4.3.2 กำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบค่าทะลุทะลวงมาตรฐาน (SPT-N Value)

กำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบชนิดนี้ได้จากการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) ในสนาม โดยหาจากค่าสหสัมพันธ์แบบ Empirical ของพารามิเตอร์ N หรือจำนวนครั้งที่ตอกที่ทำให้กระบอกผ่ามาตรฐาน (Split Spoon Sampler) จมลงไปในดิน 1 ฟุต สุดท้ายของการตอกต่อเนื่องกัน 1.5 ฟุต โดยใช้ตุ้มเหล็กหนัก 140 ปอนด์ ยกสูง 30 นิ้ว

สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ชั้นแรก วีระนันท์ (2526) ได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ S_u ไว้ดังนี้

$S_u = 0.685\ N\ (t/m^2)$ สำหรับดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง (4.2)

$S_u = 0.520\ N\ (t/m^2)$ สำหรับดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (4.3)

โดย N หาจากการทดสอบโดยใช้ Hammer เป็นแบบ Safety ซึ่งถ่ายพลังงานได้มากกว่า Hammer แบบ Donut ประมาณ 25%

4.4.3.3 กำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ

การทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined Compressive Test) เป็นการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการเพื่อหากำลังรับแรงเฉือน ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มหน่วยแรงรวมในแนวดิ่งจนกระทั่งตัวอย่างดินเกิดการพิบัติ โดยหน่วยแรงสูงสุดในแนวดิ่งนี้เรียกว่า Unconfined Compressive Strength (q_u) หรือกำลังการอัดตัวแบบอิสระ

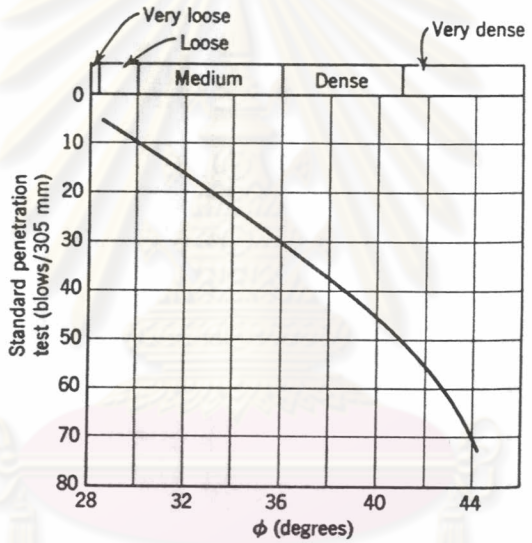
ในกรณีที่ดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับหลักการ $\phi = 0$ Concept

$$\tau_f = \frac{q_u}{2} = S_u \tag{4.4}$$

โดย τ_f คือหน่วยแรงเฉือนสูงสุดของดินขณะเกิดการวิบัติ (Shearing Strength)

4.1.2 กำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบ

การหากำลังรับแรงเฉือนของดินเม็ดหยาบในสนามสามารถทำได้โดยการทดสอบ SPT เช่นเดียวกับในดินเหนียว โดยความสัมพันธ์ของ SPT-N Value กับมุมต้านทานแรงเฉือนในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ') ซึ่งเสนอโดย Peck Hanson and Thornburn (1973) เป็นดังรูปที่ 4.1

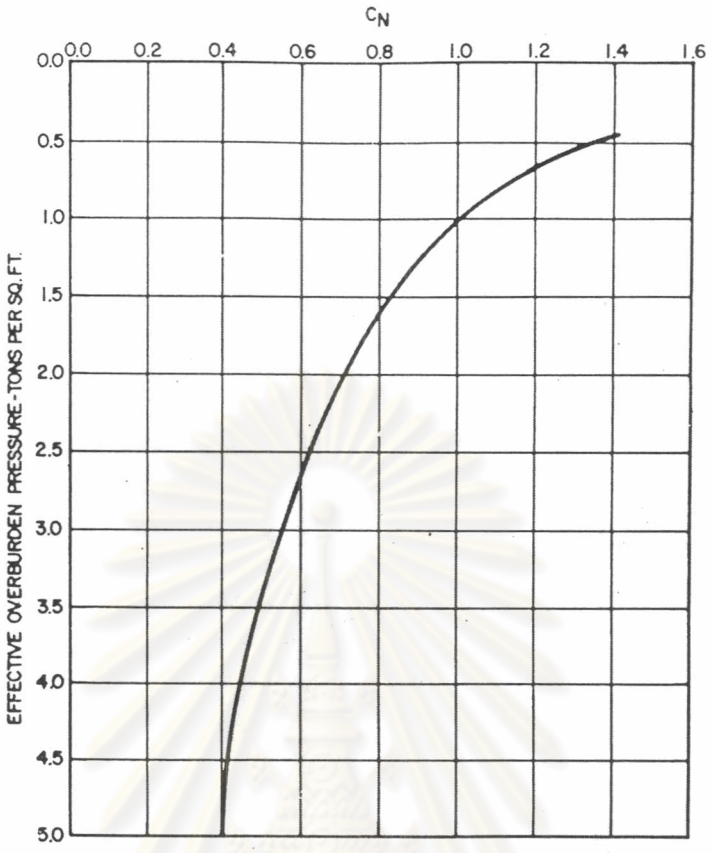


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมต้านทานแรงเฉือนของดินทรายในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ') และ ค่า (Corrected) N ที่ได้จากการทดสอบ SPT ในสนาม (After Peck, Hanson, and Thornburn, 1974)

สำหรับค่า N ที่นำมาใช้ต้องได้รับการปรับแก้ด้วยผลจากหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติในตำแหน่งที่ทำการทดสอบเสียก่อนโดยสมการ

$$N = C_N \cdot N_{field} \tag{4.5}$$

โดย C_N คือค่าปรับแก้ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ SPT ภายใต้หน่วยแรงกดดันมาตรฐาน $\sigma_{vo} = 1$ t/ft^2 โดยความสัมพันธ์ระหว่าง C_N กับ σ'_{vo} แสดงในรูปที่ 4.2 และ N_{field} คือค่า N ที่วัดได้จากในสนามที่หน่วยแรงมาตรฐาน ($\sigma_{vo} = 1$ t/ft^2)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปรับแก้ C_N กับ σ'_{vo} เพื่อใช้ปรับแก้ค่า N ที่ได้จากการทดสอบ SPT ในสนาม (DM7.3, 1982)

4.2 สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต

สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต (K_o) ของดินเหนียวขึ้นอยู่กับค่าพลาสติกซิตี้ (PI) และประวัติหน่วยแรงของดินที่แสดงอยู่ในรูปของสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidated Ratio, OCR)

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_o กับ PI ของดินเหนียวในสภาวะอัดแน่นปกติ (Brooker&Ireland, 1965) เป็นดังนี้

$$K_o = 0.4 + 0.007(PI) \quad ;PI = 0\text{-}40\% \tag{4.6}$$

$$K_o = 0.64 + 0.001(PI) \;;PI = 40\text{-}80\% \tag{4.7}$$

Schmidt (1966) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิตของดินอัดแน่นเกินตัว $K_{o(OC)}$ เป็นฟังก์ชันกับ OCR ดังนี้

$$K_{o(OC)} = K_{o(NC)} \cdot (OCR)^m \tag{4.8}$$

โดย m เป็นค่าคงที่ขึ้นกับค่า PI ของดิน สำหรับดินกรุงเทพฯ ใช้ค่า m = 0.39 (สุรฉัตร, 2540)

ในการวิเคราะห์แบบ Short Term หรือ Total Stess Analysis จะใช้ค่า $K_{o(Total)}$ หมายถึงอัตราส่วนของหน่วยแรงรวมด้านข้างต่อหน่วยแรงรวมในแนวดิ่ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องทราบค่าแรงดันน้ำ โดย Pender (1980) ได้เสนอการหาค่า $K_{o(Total)}$ ไว้ดังนี้

$$K_{o(Total)} = K_o - \frac{\rho_w}{\rho}(K_o - 1) \tag{4.9}$$

โดย ρ, ρ_w คือหน่วยน้ำหนักของดินและน้ำตามลำดับ

สำหรับดินเม็ดหยาบ ค่า K_o ขึ้นอยู่กับสภาวะความแน่นและสัดส่วนการอัดแน่นเกินตัว ในกรณีที่ทรายมีค่าความแน่นปานกลาง (Medium Dense) หรือแน่น (Dense) และ OCR = 1 ค่า K_o สามารถประเมินได้จากสมการ (Jaky , 1944 cited in Terzaghi, Peck, and Mesri, 1996:104) ดังนี้

$$K_o = 1 - \sin\phi' \tag{4.10}$$

ค่า K_o สำหรับดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ เท่ากับ 0.75 และ 0.65 ตามลำดับ

4.3 โมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

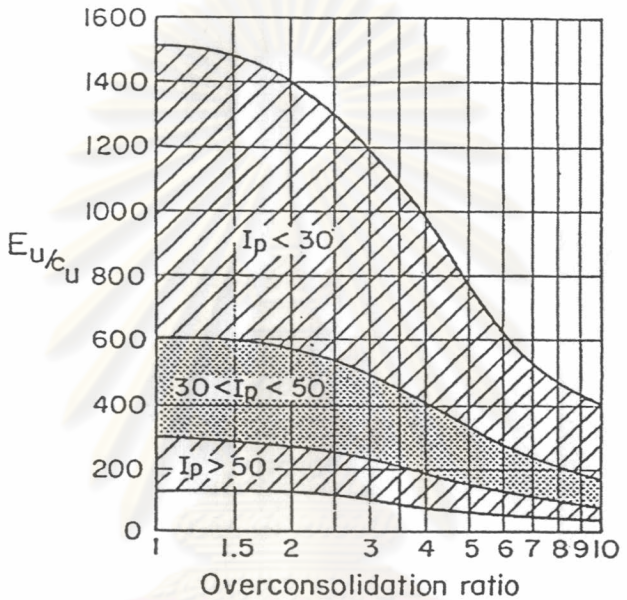
ค่าโมดูลัสของดิน (Young's Modulus, E) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินโดย Finite Element Method ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าโมดูลัสของดินกรุงเทพฯ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์แบบ Empirical กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (S_u), ค่าดัชนีความเหลว (PI) และ OCR ที่เสนอโดย Duncan and Buchigani (1976) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยปกติแล้วสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งมีค่า PI อยู่ระหว่าง 30-50% และมีค่า OCR ประมาณ 1.60 ค่าของ $\frac{E_u}{S_u}$ จะอยู่ระหว่าง 300-600

นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Mair (1993) พบว่าค่าโมดูลัสแรงเฉือน (G) มีความสัมพันธ์กับ Shear Strain (ε_s) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งสำหรับโครงสร้างกำแพงกันดิน (Retaining Walls) ค่า ε_s จะอยู่ระหว่าง 0.01-0.1% และจากการทดสอบ Self Boring Pressuremeter Test ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าในการก่อสร้างห้องใต้ดินลึกในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยระบบ Diaphragm Wall (Teparaksa, 1999) ซึ่งมีค่า ε_s อยู่ระหว่าง 0.1-0.2% จะมีค่า $\frac{G}{S_u}$ ประมาณ 160 หรือ $\frac{E_u}{S_u}$ เท่ากับ 480

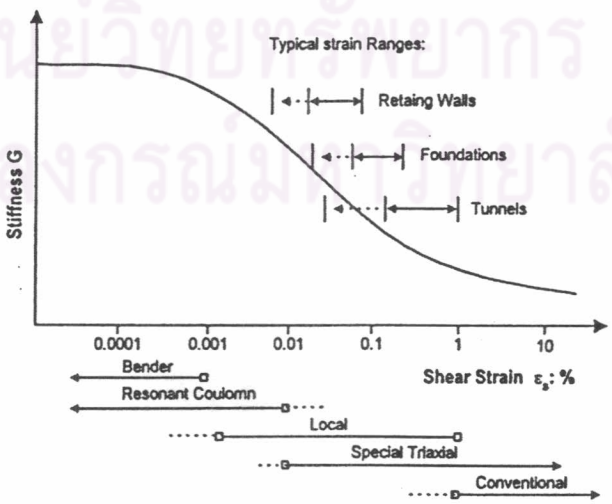
สำหรับดินเหนียวแข็ง ซึ่งมีค่า ε_s อยู่ระหว่าง 0.05-0.1% จะมีค่า $\frac{G}{S_u}$ ประมาณ 340 หรือ $\frac{E_u}{S_u}$ เท่ากับ 1020 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง G กับ E_u เป็นดังสมการ

$$G = \frac{E_u}{2(1+\nu)} \tag{4.11}$$

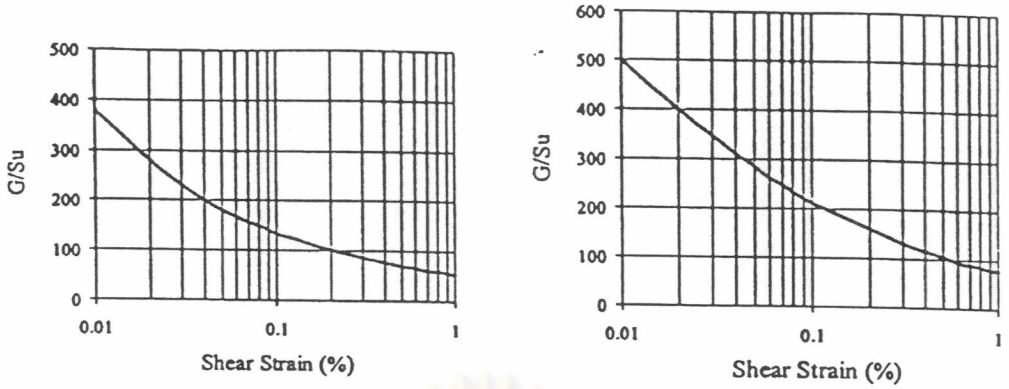
โดย ν คืออัตราส่วนปัวซองของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ สำหรับดินเหนียว = 0.5



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ขึ้นกับค่าดัชนีความเหลวและ OCR (Duncan and Buchigani, 1976)



รูปที่ 4.4 ค่า Stiffness ของดินกับการเสียรูป (Mair, 1993)



ผลการทดสอบ Pressuremeter ในดินเหนียวอ่อน ผลการทดสอบ Pressuremeter ในดินเหนียวแข็ง

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบ Pressuremeter Test ในชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa, 1999)

4.4 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินในการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS นั้น ได้ทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาลักษณะของปัญหาเป็นแบบ Axisymmetry และใช้แบบจำลองดินชนิด Mohr-Coulomb ในการจำลองพฤติกรรมของมวลดิน สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวจะใช้วิธีของหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) ร่วมกับหลักการของ $\phi = 0$ Concept ส่วนการวิเคราะห์ในชั้นทรายจะใช้วิธีของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) โดยใช้ Surcharge เท่ากับ 30.00 kN/m^2

สำหรับผนังของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ พิจารณาเป็น Beam Element โดยมีคุณสมบัติ (ค่า EA และ EI) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต (ν) เท่ากับ 0.20

ตาราง 4.1 คุณสมบัติของผนังบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ทั้ง 5 บ่อ

ชนิดของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์	Normal Stiffness, EA (kN/m)	Flexural Rigidity, EI (kNm^2/m)
1. Caisson No.1 (ถ.ประชาชื่น)	1.127E+08	4.119E+07
2. Caisson No.2 (ถ.วิภาวดีฯ)	5.170E+07	2.737E+06
3. Caisson No.3 (ถ.งามวงศ์วาน)	9.850E+07	1.356E+07
4. Diaphragm Wall (ถ.ประชาชื่น)	1.077E+08	1.871E+07
5. Secant Pile Wall (ถ.ประชาราษฎร์2)	1.744E+07	1.0996E+06

4.4.1 ข้อมูลเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่างๆ ของดินสำหรับการวิเคราะห์

การวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวของดินด้วยโปรแกรม PLAXIS ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำกำหนดพารามิเตอร์ของดินดังแสดงในตารางที่ 4.2 ถึง 4.6 โดยที่กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางได้จากการปรับแก้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระในห้องปฏิบัติการให้เป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่วัดได้จากการทดสอบแบบเวนในสนามโดยสมการ

$$S_{u(UC)} = \mu \cdot S_{u(FV)} \qquad (4.12)$$

โดย $S_{u(UC)}$ คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนจากการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ

$S_{u(FV)}$ คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบอันเดรนที่วัดได้จากการทดสอบแบบเวนในสนาม

μ คือค่าปรับแก้ของ S_u ของดินกรุงเทพฯ ซึ่งเท่ากับ 0.70

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีตบริเวณถนนประชาชื่น (Caisson No.1)

Soil Type	γ_{wet} (kN/m^3)	N (blow/ft)	ϕ (^{o})	ν	E (kN/m^2)	S_u (kN/m^2)	E/S_u	E'/N_{60} (kN/m^2)
Soft Clay	14.51	-	-	0.495	14080	28.16	500	-
Medium Clay	19.02	-	-	0.495	23676	47.35	500	-
Stiff Silty Clay	19.61	23	-	0.495	117288	117.29	1000	-
Dense Sand(layer1)	19.61	32	37	0.300	64640	-	-	2000
Hard Silty Clay	19.61	45	-	0.495	344213	229.48	1500	-
Dense Sand(layer2)	19.61	28	36	0.300	55680	-	-	2000

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีตบริเวณถนนวิภาวดีฯ (Caisson No.2)

Soil Type	γ_{wet} (kN/m^3)	N (blow/ft)	ϕ ($^\circ$)	ν	E (kN/m^2)	S_u (kN/m^2)	E/S_u	E'/N_{60} (kN/m^2)
Soft Clay	16.28	-	-	0.495	11698	23.40	500	-
Medium Clay	16.38	-	-	0.495	17512	35.02	500	-
Stiff Silty Clay(layer1)	19.61	19	-	0.495	96890	96.89	1000	-
Dense Sand(layer1)	19.61	35	37	0.300	69780	-	-	2000
Stiff Silty Clay(layer2)	19.61	13	-	0.495	87279	87.28	1000	-
Dense Sand(layer2)	19.61	22	34	0.300	44614	-	-	2000
Very Stiff Silty Clay	19.61	27	-	0.495	181423	181.42	1000	

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีตบริเวณถนนงามวงศ์วาน (Caisson No.3)

Soil Type	γ_{wet} (kN/m^3)	N (blow/ft)	ϕ ($^\circ$)	ν	E (kN/m^2)	S_u (kN/m^2)	E/S_u	E'/N_{60} (kN/m^2)
Soft Clay	17.36	-	-	0.495	13729	27.46	500	-
Medium Clay	17.65	-	-	0.495	22765	45.53	500	-
Stiff Silty Clay	19.32	17	-	0.495	114149	114.15	1000	-
Medium Dense Sand	19.61	20	33	0.300	39006	-	-	2000
Dense Sand	19.61	24	35	0.300	48658	-	-	2000

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบ Diaphragm Wall บริเวณถนนประชาชื่น

Soil Type	γ_{wet} (kN/m^3)	N (blow/ft)	ϕ ($^\circ$)	ν	E (kN/m^2)	S_u (kN/m^2)	E/S_u	E'/N_{60} (kN/m^2)
Soft Clay	14.66	-	-	0.495	11208	22.415	500	-
Medium Clay	16.48	-	-	0.495	36775	49.033	750	-
Stiff Silty Clay	18.83	16	-	0.495	68647	68.647	1000	-
Dense Sand(layer1)	19.61	31	36	0.300	62136	-	-	2000
Hard Silty Clay	21.08	36	-	0.495	367161	183.580	2000	-
Dense Sand(layer2)	19.61	32	37	0.300	64774	-	-	2000

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบ Secant Pile Wall บริเวณถนนประชาราษฎร์สาย 2

Soil Type	γ_{wet} (kN/m^3)	N (blow/ft)	ϕ ($^\circ$)	ν	E (kN/m^2)	S_u (kN/m^2)	E/S_u	E'/N_{60} (kN/m^2)
Soft Clay	16.48	-	-	0.495	12433	24.87	500	-
Medium Clay	17.26	-	-	0.495	50434	67.25	750	-
Stiff Silty Clay(layer1)	19.61	15	-	0.495	73256	73.26	1000	-
Medium to Dense Sand(layer1)	19.61	23	34	0.300	46720	-	-	2000
Very Stiff Silty Clay(layer2)	19.61	32	-	0.495	326365	163.18	2000	-
Medium Dense Sand(layer2)	19.61	20	33	0.300	39684	-	-	2000
Dense Sand	19.61	28	36	0.300	56440	-	-	2000

4.4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ของทั้ง 5 บ่อ ซึ่งใช้เทคนิควิธีการก่อสร้างโดยระบบจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก, ระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall เป็นดังนี้

4.4.2.1 ผลการวิเคราะห์ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีตบริเวณถนนประชาชื่น (Caisson No.1)

ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีต เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงซึ่งวัดได้จากการติดตั้งเครื่องมือในสนาม พบว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างสูงดังแสดงในตารางที่ 4.7 และในรูปที่ 4.6

โดยตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจริงและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ที่บริเวณจุดกึ่งกลางของแต่ละชั้นดิน โดยที่ความลึกของปลาย Cutting Shoe และระดับดินขุดภายในบ่อซึ่งวัดจากระดับพื้นดินเป็นดังนี้

1) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 3.937 ม., ยังไม่มีการขุดดิน
2) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 11.034 ม., ยังไม่มีการขุดดิน
3) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 16.694 ม., ความลึกของระดับดินขุด 10.852 ม.
4) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 19.668 ม., ความลึกของระดับดินขุด 17.787 ม.

ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจริงในสนามและผลการวิเคราะห์ เป็นผลมาจากในระหว่างการก่อสร้าง ตัวบ่อจะมีการเคลื่อนตัวไม่หยุดนิ่งตลอดเวลาจากการขุดดินภายในบ่อไปพร้อมๆ กับการจมของบ่อ และขั้นตอนการก่อสร้างรวมทั้งวิธีการขุดดินภายในบ่อในสภาพหน้างานจริงจะมีการปรับเปลี่ยนตลอดเวลาเพื่อควบคุม Vertical Alignment ของบ่อ ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์จึงมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

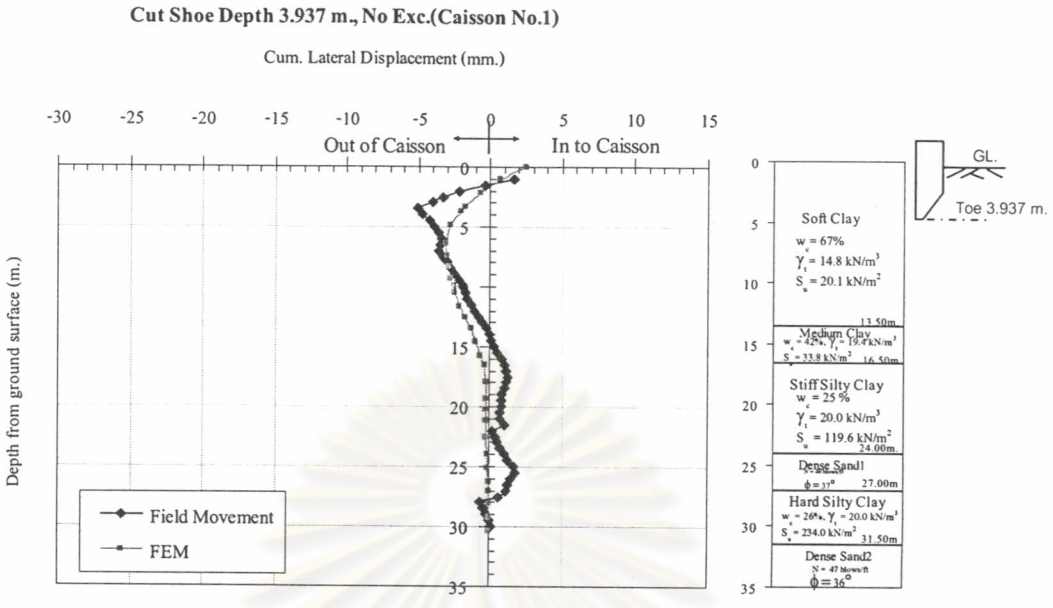
ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากในสนามและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์บริเวณถนนประชาชื่น (Caisson No.1)

Soil Type	Depth (m.) (Ground to Mid-Layer)	Cumulative Lateral Displacement (mm)											
		Cut Shoe Depth 3.937 m., No Exc.			Cut Shoe Depth 11.034 m., No Exc.			Cut Shoe Depth 16.694 m., Exc.Depth 10.852 m.			Cut Shoe Depth 19.668 m., Exc.Depth 17.787 m.		
		Field	Plaxis	Diff.(%)	Field	Plaxis	Diff.(%)	Field	Plaxis	Diff.(%)	Field	Plaxis	Diff.(%)
Soft Clay	6.75	-3.600	-3.027	15.905	-12.375	-4.385	64.568	-10.030	-4.527	54.861	-5.600	-4.546	18.819
Medium Clay	15.00	0.320	-0.875	373.293	-4.840	-2.920	39.662	-13.000	-3.272	74.831	-9.800	-3.182	67.535
Stiff Silty Clay	20.25	0.780	-0.241	130.871	-0.160	-0.826	415.967	-1.135	-0.492	56.660	-0.370	-0.220	40.409
Dense Sand	25.50	1.700	-0.118	106.937	1.370	-0.417	130.408	1.520	-0.089	105.865	2.020	0.609	69.858
Hard Silty Clay	27.75	-0.135	-0.065	52.162	-0.275	-0.227	17.348	-0.220	-0.091	58.629	-0.115	0.275	339.325

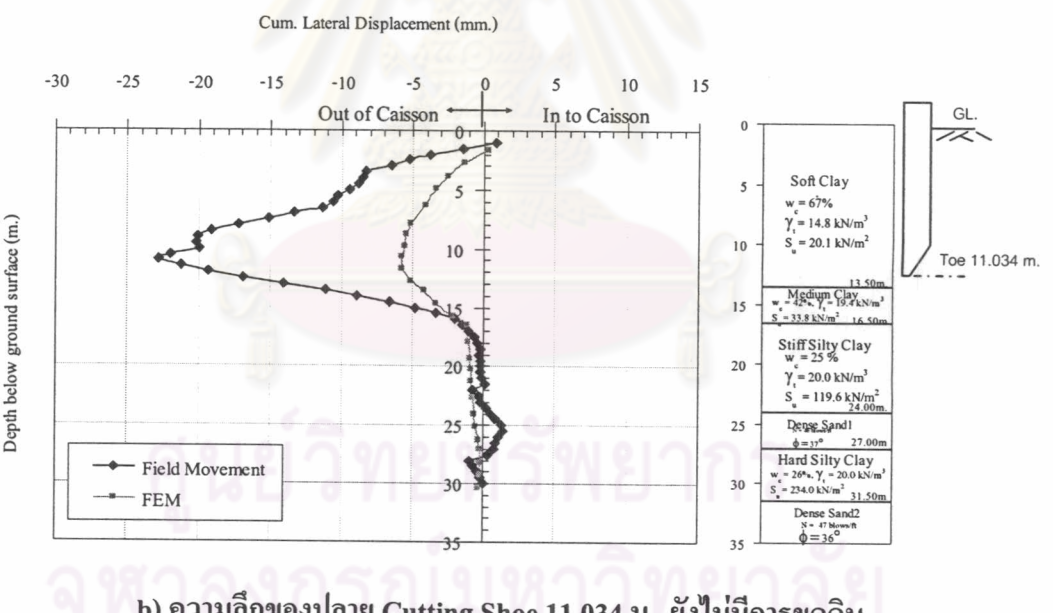
หมายเหตุ - Field คือค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นจริงจากการวัดด้วยเครื่องมือในสนาม

- Plaxis คือค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS

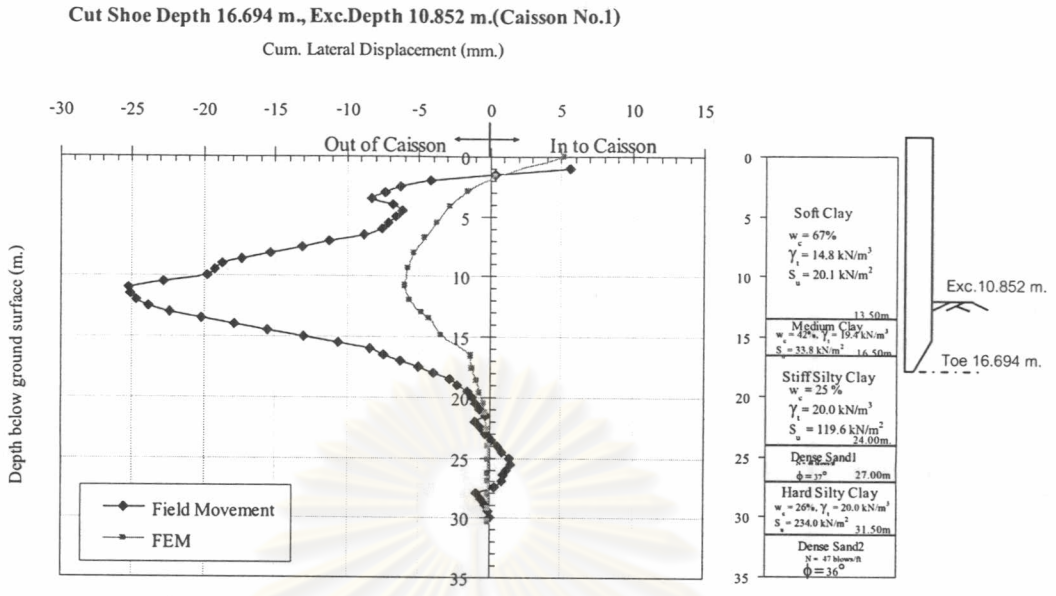
- Diff. = [(Field-Plaxis)/Field] x 100%



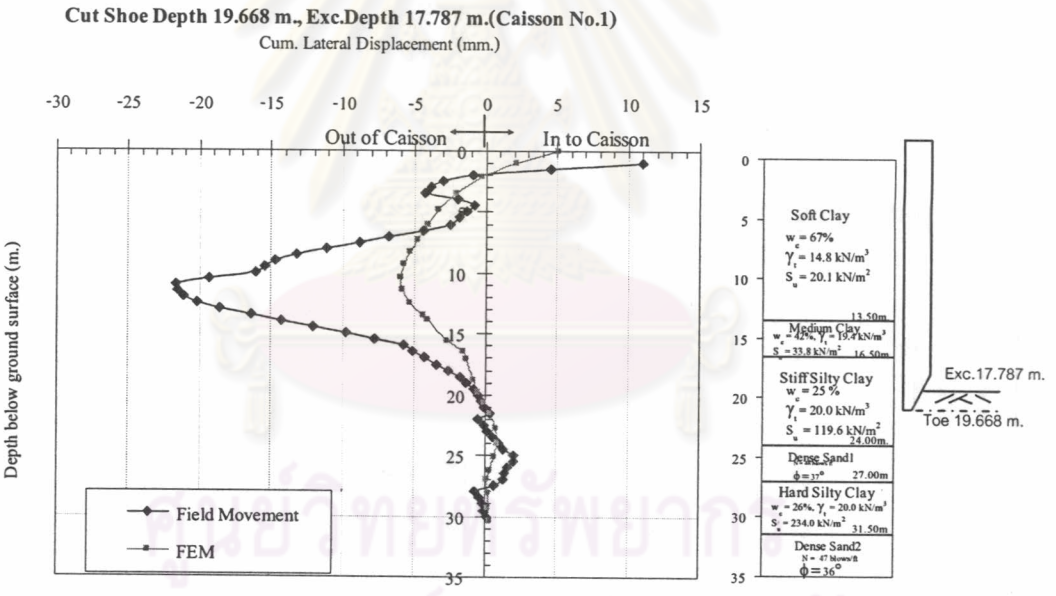
a) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 3.937 ม., ยังไม่มีการขุดดิน



b) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 11.034 ม., ยังไม่มีการขุดดิน



c) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 16.694 ม., ความลึกของระดับดินขุด 10.852 ม.



d) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 19.668 ม., ความลึกของระดับดินขุด 17.787 ม.

รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากในสนามและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์บริเวณถนนประชาชื่น (Caisson No.1)

4.4.2.2 ผลการวิเคราะห์ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีตบริเวณถนนวิภาวดีฯ (Caisson No.2)

ผลการเปรียบเทียบระหว่างการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจริงในสนามจากการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีตกับค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ พบว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างสูงดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.7

โดยตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจริงและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ที่บริเวณจุดกึ่งกลางของแต่ละชั้นดิน โดยที่ความลึกของปลาย Cutting Shoe และระดับดินขุดภายในบ่อซึ่งวัดจากระดับพื้นดินเป็นดังนี้

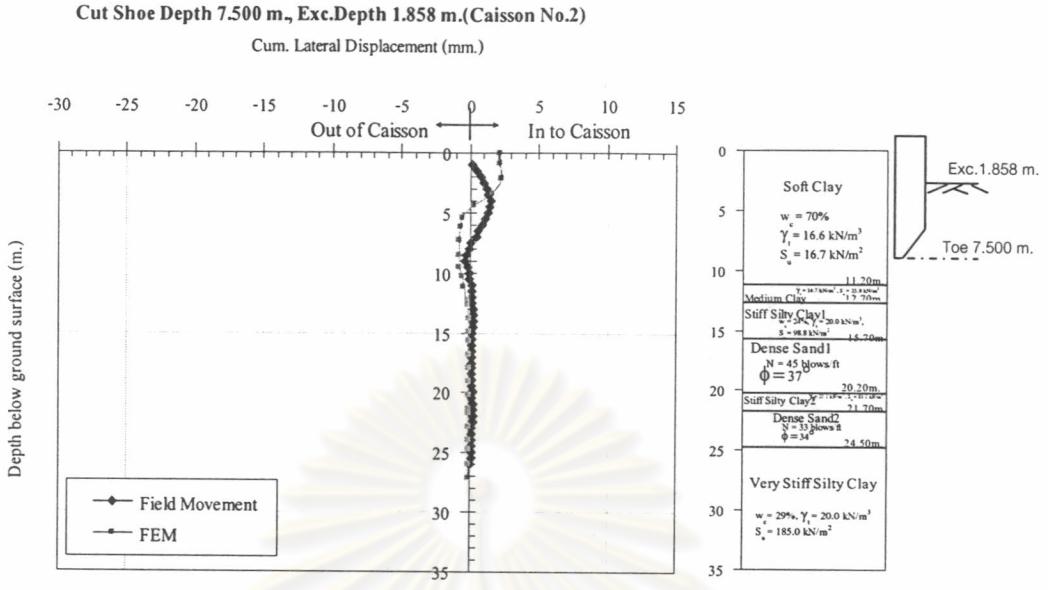
1) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 7.500 ม., ความลึกของระดับดินขุด 1.858 ม.
2) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 18.000 ม., ความลึกของระดับดินขุด 17.800 ม.

ตารางที่4.8 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากในสนามและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์บริเวณถนนวิภาวดี (Caisson No.2)

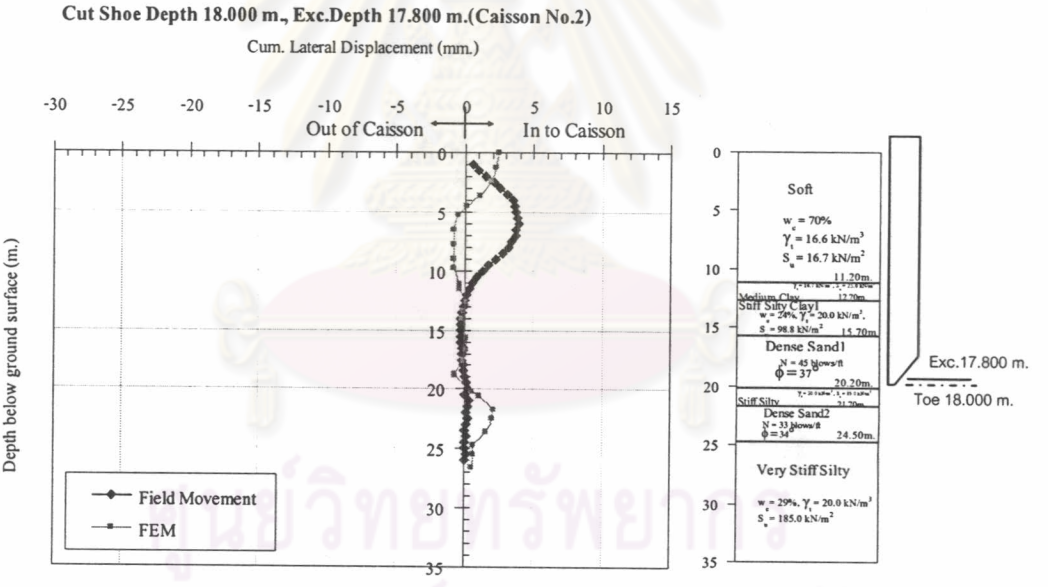
Soil Type	Depth (m.) (Ground to Mid-Layer)	Cumulative Lateral Displacement (mm)					
		Cut Shoe Depth 7.500 m., Exc.Depth 1.858 m.			Cut Shoe Depth 18.000 m., Exc.Depth 17.800 m.		
		Field	Plaxis	Diff.(%)	Field	Plaxis	Diff.(%)
Soft Clay	5.60	1.056	-0.664	162.915	3.850	-0.575	114.933
Medium Clay	11.95	0.180	-0.291	261.864	0.172	-0.179	203.891
Stiff Silty Clay1	14.20	0.220	-0.119	154.149	-0.266	-0.141	46.969
Dense Sand1	17.95	0.126	-0.088	169.575	-0.061	-0.260	325.993
Stiff Silty Clay2	20.95	0.280	-0.073	126.023	0.302	1.443	377.957
Dense Sand2	23.20	0.156	-0.051	132.747	0.082	1.759	2045.377

หมายเหตุ - Field คือค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นจริงจากการวัดด้วยเครื่องมือในสนาม

- Plaxis คือค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS
- Diff. = [(Field-Plaxis)/Field] x 100%



a) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 7.500 ม., ความลึกของระดับดินขุด 1.858 ม.



b) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 18.000 ม., ความลึกของระดับดินขุด 17.800 ม.

รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากในสนามและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์บริเวณถนนวิภาวดี (Caisson No.2)

ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจริงในสนามและผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 4.8 มีค่าค่อนข้างสูง เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นระบบที่ไม่หยุดนิ่งคือ ในระหว่างการก่อสร้างตัวบ่อมีการเคลื่อนตัวลงตลอดเวลาที่มีการขุดดินภายในบ่อ และขั้นตอนการ

ก่อสร้างต้องปรับเปลี่ยนตลอดเวลาเพื่อควบคุม Vertical Alignment ของบ่อ ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์จึงมีความคลาดเคลื่อนสูงมากเมื่อเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

4.4.2.3 ผลการวิเคราะห์ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีตบริเวณถนนงามวงศ์วาน (Caisson No.3)

ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบจมบ่อคอนกรีต เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงซึ่งวัดได้จากการติดตั้งเครื่องมือในสนาม พบว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างสูงดังแสดงในตารางที่ 4.9 และในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจริงและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ที่บริเวณจุดกึ่งกลางของแต่ละชั้นดิน โดยที่ความลึกของปลาย Cutting Shoe และระดับดินขุดภายในบ่อซึ่งวัดจากระดับพื้นดินเป็นดังนี้

1) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 9.91 ม., ความลึกของระดับดินขุด 1.41 ม.
2) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 12.11 ม., ความลึกของระดับดินขุด 5.41 ม.
3) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 20.41 ม., ความลึกของระดับดินขุด 20.16 ม.
4) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 22.16 ม., ความลึกของระดับดินขุด 21.16 ม.

ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นจริงในสนามและผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 4.9 มีค่าค่อนข้างสูง เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นระบบที่ไม่หยุดนิ่งคือ ในระหว่างการก่อสร้างตัวบ่อมีการเคลื่อนตัวลงตลอดเวลาที่มีการขุดดินภายในบ่อ และขั้นตอนการก่อสร้างต้องปรับเปลี่ยนตลอดเวลาเพื่อควบคุม Vertical Alignment ของบ่อ ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิเคราะห์จึงมีความคลาดเคลื่อนสูงมากเมื่อเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

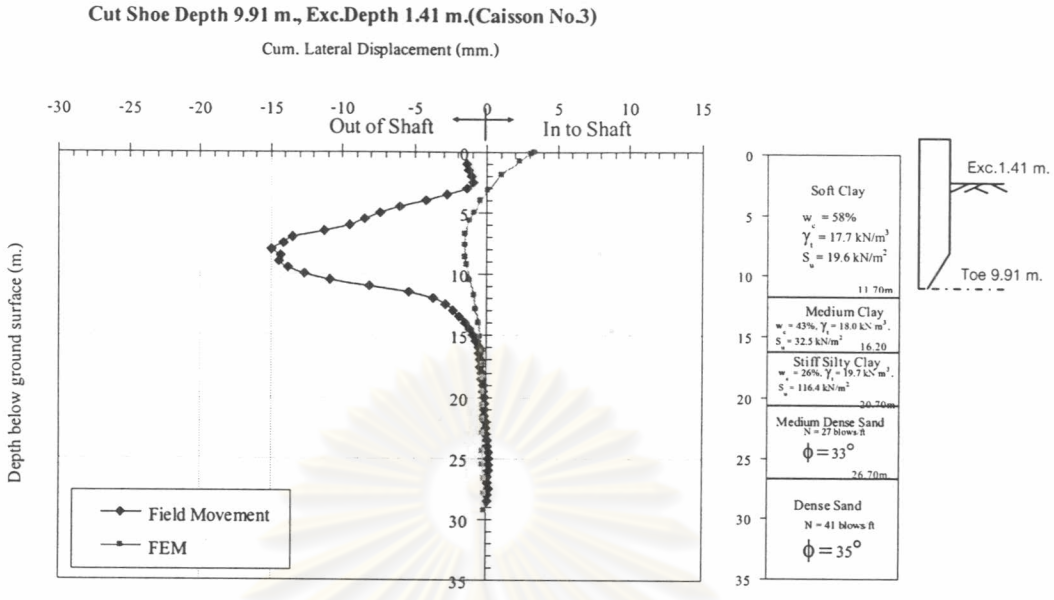
ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากในสนามและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์บริเวณถนนงามวงศ์วาน (Caisson No.3)

Soil Type	Depth (m.) (Ground to Mid-Layer)	Cumulative Lateral Displacement (mm)											
		Cut Shoe Depth 9.91 m., Exc.Depth 1.41 m.			Cut Shoe Depth 12.11 m., Exc.Depth 5.41 m.			Cut Shoe Depth 20.41 m., Exc.Depth 20.16 m.			Cut Shoe Depth 22.16 m., Exc.Depth 21.16 m.		
		Field	Plaxis	Diff.(%)	Field	Plaxis	Diff.(%)	Field	Plaxis	Diff.(%)	Field	Plaxis	Diff.(%)
Soft Clay	5.85	-9.200	-1.281	86.071	-7.254	-1.399	80.710	-2.384	-2.064	13.437	-6.161	-2.118	65.624
Medium Clay	13.95	-1.578	-0.605	61.684	-2.347	-0.477	79.664	-0.326	-1.258	286.001	0.467	-1.279	373.853
Stiff Silty Clay	18.45	-0.343	-0.242	29.531	0.074	-0.019	126.326	-0.955	-0.277	70.994	1.594	-0.439	127.521
Dense Sand	23.70	0.070	-0.240	443.000	0.170	0.021	87.459	0.348	0.653	87.707	-0.570	-0.057	89.937

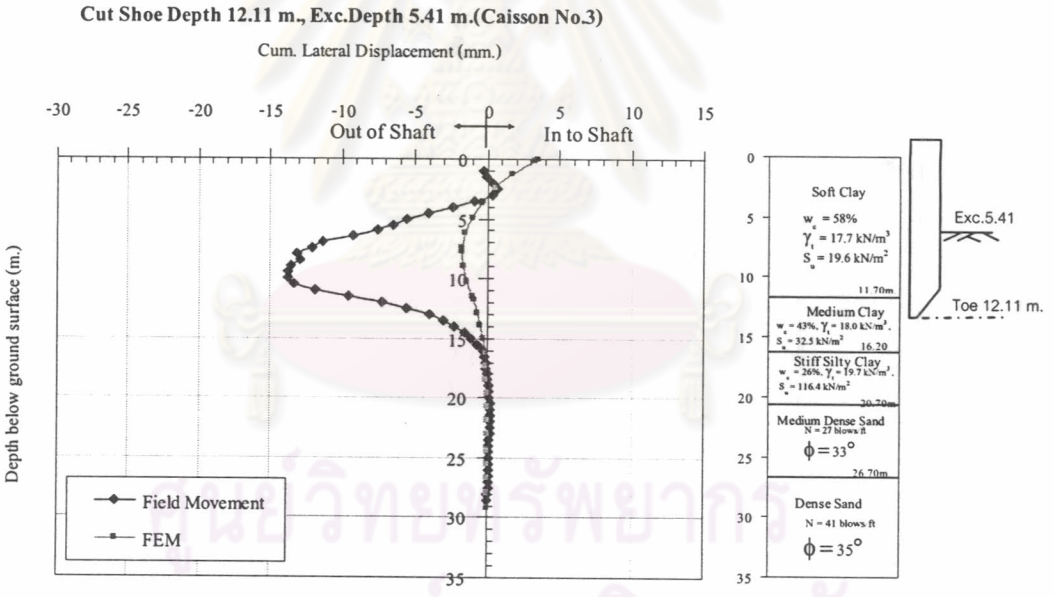
<u>หมายเหตุ</u> - Field คือค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นจริงจากการวัดด้วยเครื่องมือในสนาม

- Plaxis คือค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS

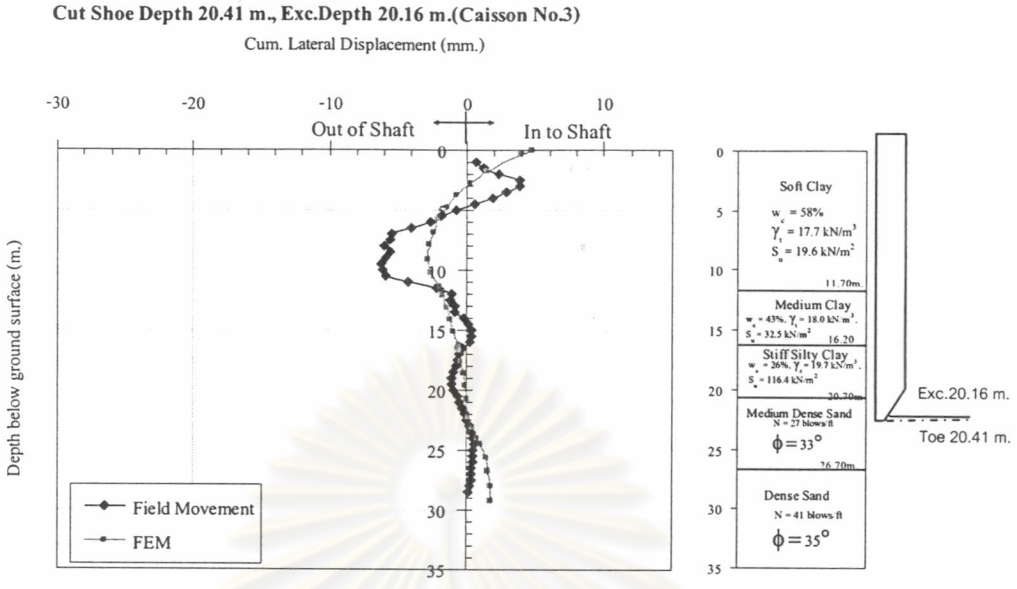
- Diff. = [(Field-Plaxis)/Field] x 100%



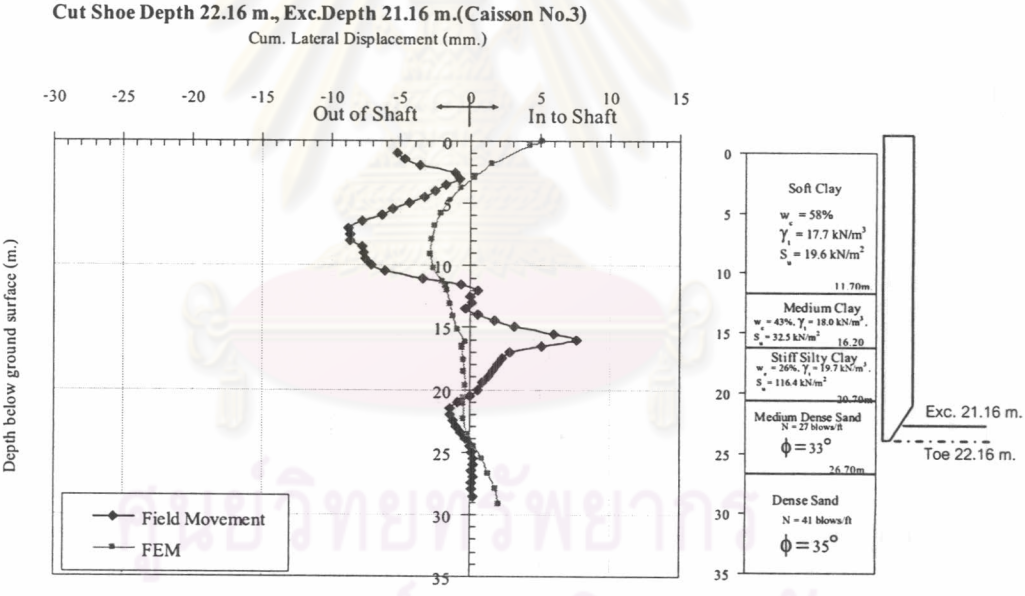
a) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 9.91 ม., ความลึกของระดับดินขุด 1.41 ม.



b) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 12.11 ม., ความลึกของระดับดินขุด 5.41 ม.



c) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 20.41 ม., ความลึกของระดับดินขุด 20.16 ม.



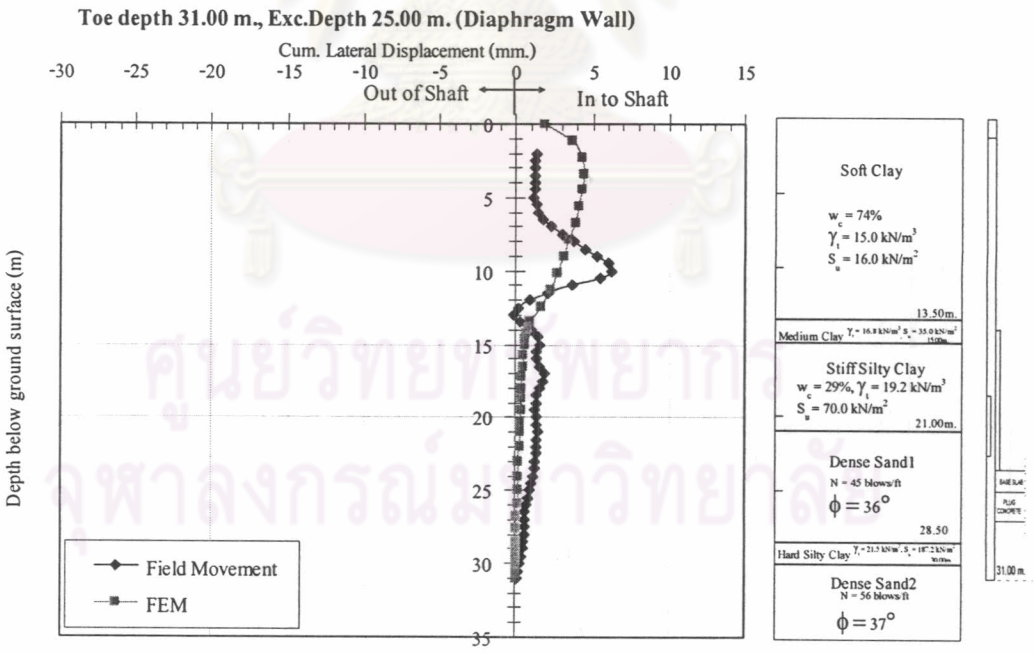
d) ความลึกของปลาย Cutting Shoe 22.16 ม., ความลึกของระดับดินขุด 21.16 ม.

รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จากในสนามและจากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์บริเวณถนนงามวงศ์วาน (Caisson No.3)

4.4.2.4 ผลการวิเคราะห์ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบ Diaphragm Wall บริเวณถนนประชาชื่น

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขุดดินในบ่อออกเป็นระยะ 25.00 เมตร จากผิวดิน จนกระทั่งเสร็จสิ้นการก่อสร้าง Base Slab ด้วยวิธี FEM พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวเป็นแบบ Cantilever Type โดยการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจะเกิดขึ้นมากที่บริเวณช่วงบนของ Diaphragm Wall ซึ่งปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดประมาณ 4.5 มิลลิเมตร และการเคลื่อนตัวจะค่อยๆ ลดน้อยลงจนกระทั่งที่ความลึกจากผิวดิน 25.00 เมตร การเคลื่อนตัวมีค่าประมาณ 0.14 มิลลิเมตร ส่วนที่ปลายล่างของ Diaphragm Wall พบว่ามีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเกิดขึ้นเพียง 0.06 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างด้วยโปรแกรม PLAXIS และการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงจากที่วัดได้ในสนามจากรูปที่ 4.9 พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างด้วยโปรแกรม PLAXIS โดยใช้ค่า $\frac{E_u}{S_u}$ และ $\frac{E'}{N_{60}}$ ตามที่ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4.5 มีความน่าเชื่อถือพอสมควร

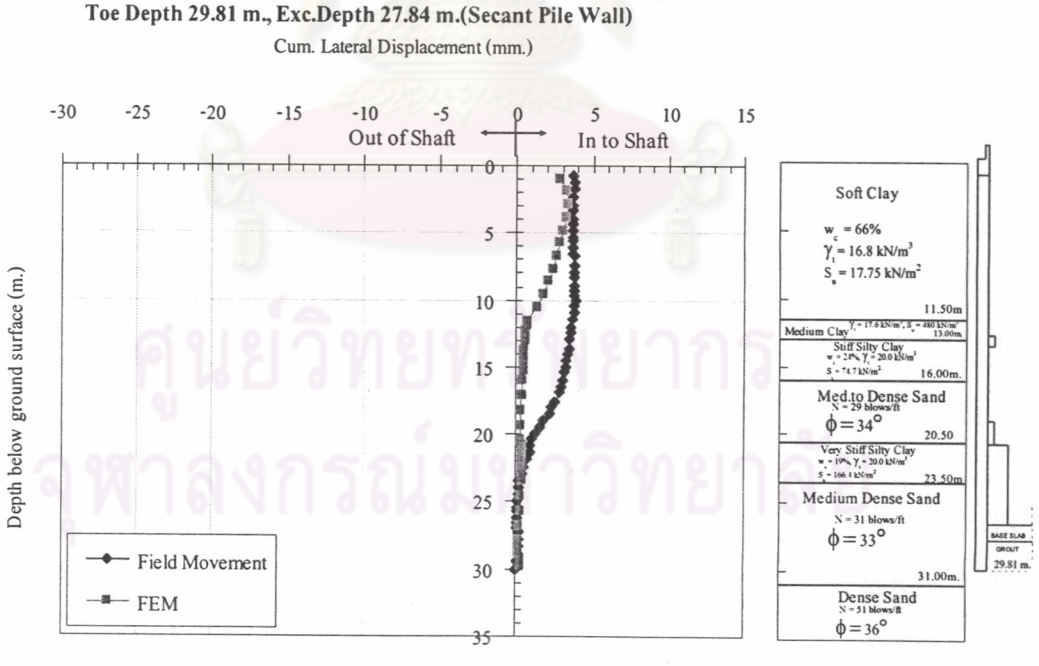


รูปที่ 4.9 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ได้จากโปรแกรม PLAXIS กับค่าจากการวัดจริงในสนามของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบ Diaphragm Wall บริเวณถนนประชาชื่น

4.4.2.5 ผลการวิเคราะห์ของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบ Secant Pile Wall บริเวณถนนประชาราษฎร์สาย 2

ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขุดดินในบ่อออกจนถึงระดับความลึก 27.84 เมตร จากผิวดิน จนกระทั่งเสร็จสิ้นการก่อสร้าง Base Slab พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวเป็นแบบ Cantilever Type โดยการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจะเกิดขึ้นมากที่บริเวณช่วงปลายด้านบนของผนัง Secant Pile Wall ซึ่งปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดประมาณ 3.3 มิลลิเมตร และการเคลื่อนตัวจะค่อยๆ ลดน้อยลงจนกระทั่งถึงระดับที่สิ้นสุดงานขุดคือที่ความลึกจากผิวดิน 27.84 เมตร การเคลื่อนตัวมีค่าประมาณ 0.15 มิลลิเมตร ส่วนที่ปลายล่างของ Secant Pile Wall พบว่ามีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเกิดขึ้น 0.26 มิลลิเมตร

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างด้วยวิธี FEM และการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจริงจากที่วัดได้ในสนามจากรูปที่ 4.10 พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางด้านข้างด้วยโปรแกรม PLAXIS โดยใช้ค่า $\frac{E_u}{S_u}$ และ $\frac{E'}{N_{60}}$ ตามที่ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4.6 มีความน่าเชื่อถือพอสมควร



รูปที่ 4.10 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างจากโปรแกรม PLAXIS กับค่าจากการวัดจริงในสนามของบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบ Secant Pile Wall บริเวณถนนประชาราษฎร์ 2

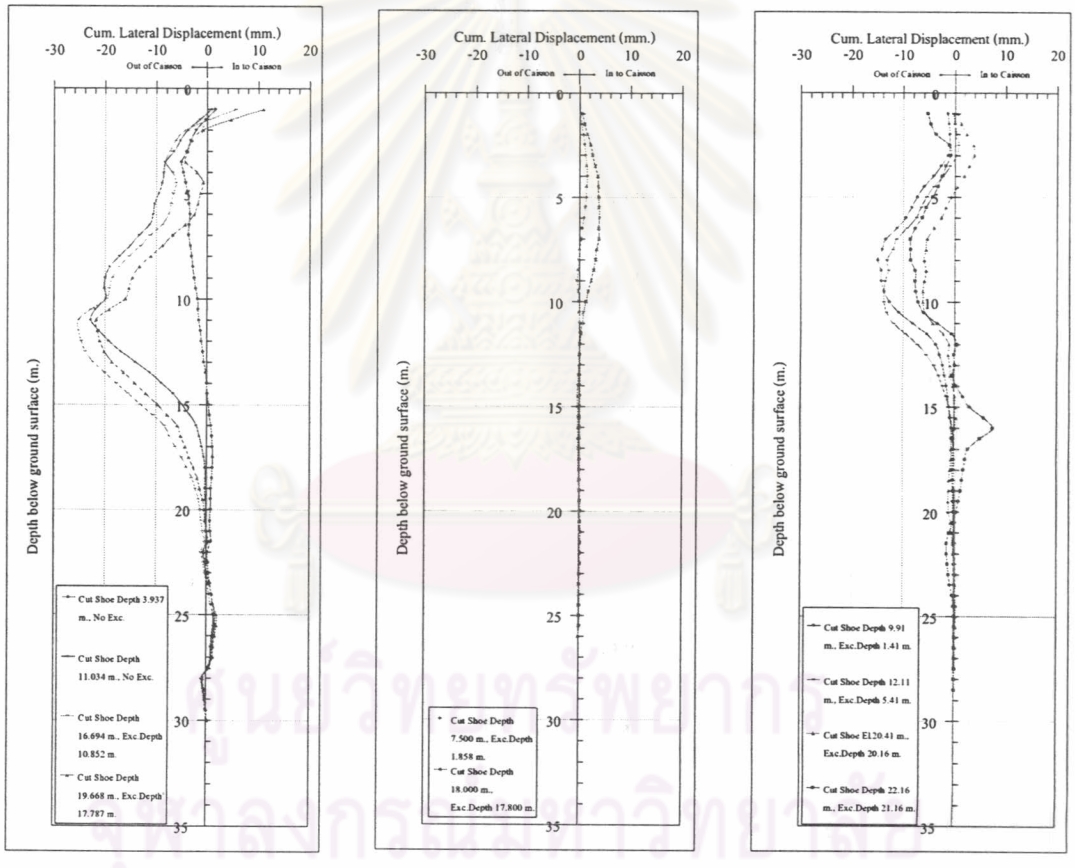
4.4.3 พฤติกรรมของดินระหว่างการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์

4.4.3.1 การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์

การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบจมบ่อคอนกรีตฯ ,ระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall จากการศึกษาข้อมูลที่วัดจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในสนามเป็นดังนี้

1) ระบบจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking RC. Caisson)

จากข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในสนามของการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบจมบ่อคอนกรีตฯ (รูปที่ 4.11) สามารถวิเคราะห์โดยแบ่งตามเทคนิควิธีการก่อสร้างได้ดังตารางที่ 4.10



a) b) c)

รูปที่ 4.11 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในสนามของการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบจมบ่อคอนกรีตฯ

a) Caisson No.1 บริเวณ ถ.ประชาชื่น

b) Caisson No.2 บริเวณ ถ.วิภาวดีฯ

c) Caisson No.3 บริเวณ ถ.งามวงศ์วาน

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในของการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบจมบ่อคอนกรีตฯ

รายละเอียดการวิเคราะห์	Caisson No.1	Caisson No.2 และ 3
1. วิธีการก่อสร้าง	- ก่อสร้างโดยระบบ Open Caisson โดยเริ่มขุดดินภายในบ่อเมื่อปลาย Cut Shoe จมผ่านดินชั้น Soft Clay	- ก่อสร้างโดยระบบ Open Caisson, ใช้ Jacking Frame ช่วยควบคุมอัตราการจมและ Vertical Alignment ของบ่อ โดยการขุดดินภายในบ่อเริ่มตั้งแต่ช่วงแรกของการจมบ่อ
2. ลักษณะการเคลื่อนตัวของดิน	- เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินในทิศทางเคลื่อนที่ออกจากบ่อ โดยมีปริมาณมากที่สุดประมาณ 25 มม. ในชั้นดิน Soft Clay ซึ่งอาจเป็นผลมาจากน้ำหนักของผนังบ่อคอนกรีตฯ (หนา 1.50 ม.) ที่จมลงไปในดิน ทำให้เกิด Compression Stress ปริมาณมากจนดินบริเวณรอบๆบ่อ โดยเฉพาะในชั้นดิน Soft Clay ซึ่งมี Shear Strength ต่ำ) เกิดการเคลื่อนตัว	- ในการก่อสร้าง Caisson No.2 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินมีทิศทางเคลื่อนที่เข้าหาบ่อโดยมีปริมาณมากที่สุดประมาณ 4 มม. ในชั้นดิน Soft Clay ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการ flow ของดินเข้าไปภายในบ่อใต้ระดับงานขุดดิน (Heave) แต่ในกรณีของ Caisson No.3 ซึ่งมีน้ำหนักของผนังบ่อคอนกรีตฯ (หนา 1.00 ม.) มากกว่า Caisson No.2 (ผนังบ่อหนา 0.65 ม.) ทำให้เกิด Compression Stress ปริมาณมากจนดินบริเวณรอบๆบ่อเกิดการเคลื่อนตัว โดยการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดขึ้นมีทิศทางการเคลื่อนที่ออกจากบ่อ และปริมาณการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นมากที่สุดประมาณ 15 มม. ในชั้นดิน Soft Clay

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

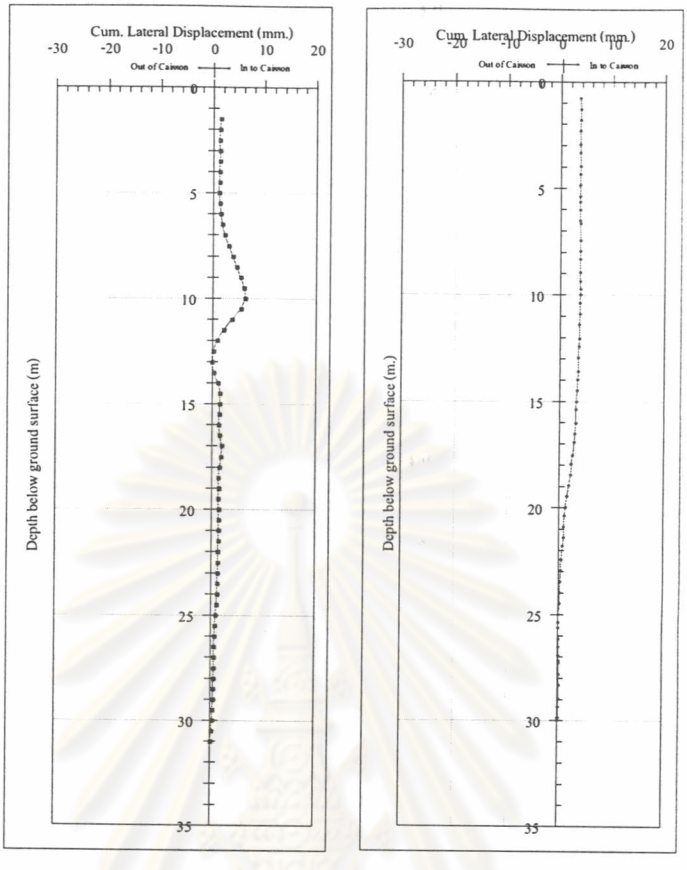
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในของการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบจมบ่อคอนกรีตฯ

รายละเอียดการวิเคราะห์	Caisson No.1	Caisson No.2 และ 3
3. ข้อดี	- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำกว่า - ไม่มีปัญหา Heave ในงานขุดดินในชั้นดิน Soft Clay เนื่องจากไม่มีการขุดดินภายในบ่อระหว่างที่ทำการจมบ่อในชั้นดิน Soft Clay	- ควบคุม Vertical Alignment และอัตราการจมของบ่อได้ดีกว่าโดยใช้ Jacking Frame
4. ข้อเสีย	- การควบคุม Vertical Alignment และอัตราการจมของบ่อทำได้โดยการควบคุมวิธีการขุดดินภายในบ่อเท่านั้น	- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูงกว่า เนื่องจากต้องทำการติดตั้งระบบ Jacking Frame - อาจเกิดปัญหา Heave ใต้ระดับดินขุดได้ เนื่องจากทำการขุดดินในระหว่างที่ทำการจมบ่อในชั้นดิน Soft Clay
ราคาก่อสร้างโดยประมาณต่อปริมาตรการใช้งาน (บาท/ม.^{3})	4,100	7,300

2) ระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall

รูปที่ 4.12 แสดงข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในสนามของการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall โดยปริมาณการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของผนังบ่อเกิดขึ้นมากที่สุดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ในชั้นดิน Soft Clay และมีทิศทางเข้าหาบ่อ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันดินด้านข้างแบบสถิต (At Rest Earth Pressure) กระทำกับผนังบ่อจนเกิด Bending Moment ในผนังบ่อคอนกรีต

จากรูปที่ 4.12 พบว่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากในการก่อสร้างโดยระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall จะเริ่มจากการก่อสร้างกำแพงกันดินโดยปลายล่างของกำแพงฝังอยู่ในชั้นดินแข็งก่อนที่จะทำการขุดดินภายในบ่อ ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาการไหลเข้าของดินใต้ระดับขุดในชั้นดิน Soft Clay (Heave) สำหรับราคาค่าก่อสร้างโดยประมาณต่อปริมาตรการใช้งานในการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ระบบ Diaphragm Wall คือ 5,500 บาท/ม.^{3}



a) b)

รูปที่ 4.12 ข้อมูลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในสนามของการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบ

a) Diaphragm Wall บริเวณ ถ.ประชาชื่น

b) Secant Pile Wall บริเวณ ถ.ประชาราษฎร์สาย 2

4.4.3.2 พฤติกรรมของดินบริเวณ Cutting Shoe ระหว่างการจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการจมบ่อคอนกรีตฯ เริ่มจากการก่อสร้างผนังบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก แล้วจึงทำการขุดดินภายในบ่อบริเวณรอบ Cutting Shoe เพื่อลดแรงต้านจากดิน หลังจากที่ดินบริเวณรอบ Cutting Shoe เข้าสู่สภาวะ Plastic Equilibrium (Shear Stress ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของผนังบ่อและการขุดดินเท่ากับ Peak Shear Strength ของดิน) ดินจะเกิดการเคลื่อนตัว (Soil Deformation) ในขณะที่ Shear Strength ของดินจะลดต่ำลง ซึ่งการเคลื่อนตัวของดินจะหยุดเมื่อปลาย Cutting Shoe จมลงไปในดินเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งดินกลับเข้าสู่สภาวะ Equilibrium อีกครั้ง โดยที่กำลังรับแรงเฉือนของดินเท่ากับ Residual Shear strength

4.4.3.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์

จากรูปแบบการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยแต่ละเทคนิควิธี สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ

1) ระบบจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking RC. Caisson)

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินโดยระบบจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็กทำได้ยากกว่า ระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่นิ่งคือตัวบ่อจะมีการเคลื่อนตัวลงไปในดินพร้อมๆ กับการขุดดินภายในบ่อ และความไม่แน่นอนของการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างและวิธีการขุดดินภายในบ่อจะต้องมีการปรับเปลี่ยนตลอดเวลาที่ทำการจมบ่อคอนกรีตฯ เพื่อควบคุมไม่ให้บ่อเกิดการเอียง (Tilting) มากเกินไป ซึ่งจะมีผลกระทบต่อ Vertical Alignment ของบ่อ นอกจากนี้เมื่อทำการขุดดินภายในบ่อจนถึงชั้นทรายยังเกิดการ flow ของดินเข้ามาภายในบ่อ (Heave) จนทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินรอบๆ บ่อค่อนข้างสูง

2) ระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall สามารถทำได้ดีกว่าระบบจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากเป็นระบบที่หยุดนิ่ง คือในการก่อสร้างจะเริ่มจากการก่อสร้างโครงสร้างกำแพงกันดินก่อนแล้วจึงทำการขุดดินภายในบ่อออกจนถึงระดับที่ต้องการ ซึ่งผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินที่ได้จะมีความแน่นอนเหมือนในการวิเคราะห์จากระบบการก่อสร้างแบบ Braced Cut

4.4.3.4 พฤติกรรมของดินเนื่องจากการขุดดินภายในบ่อคอนกรีตฯ

ในขณะทำการขุดดินภายในบ่อคอนกรีตฯ จะเกิดการลดของหน่วยแรงดันดิน (Unloading หรือ Rebound) ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ซึ่งจะมีผลทำให้ดินเกิดการเคลื่อนตัวทั้งบริเวณใต้งานขุดและที่หลังกำแพงจนกระทั่งดินกลับเข้าสู่สภาวะ Equilibrium อีกครั้ง

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS สำหรับการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบ Diaphragm Wall และระบบ Secant Pile Wall พบว่ายิ่งทำการขุดดินที่ระดับลึกลงไปภายในบ่อ การเกิด Plastic Point เนื่องจากการ Rebound จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น แต่ภายหลังจากการเทคอนกรีต Base Slab สำหรับระบบ Diaphragm Wall หรือภายหลังการ Grout ที่บริเวณใต้ Base Slab สำหรับระบบ Secant Pile Wall พบว่าปริมาณของ Plastic Point ที่บริเวณใต้ระดับขุดจะลดลงทันที ดังรูปที่แสดงในภาคผนวก ค ดังนั้นในการก่อสร้าง Base Slab จึงควรกระทำในทันทีภายหลังจากการขุดดินจนถึงระดับที่ต้องการแล้ว เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดินเข้าภายในพื้นที่ขุดและเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบกำแพงกันดินอีกด้วย

4.4.4 แนวทางการเลือกใช้เทคนิควิธีการก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์

การเลือกใช้เทคนิควิธีที่เหมาะสมในการก่อสร้างจะต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้

4.4.4.1 ลักษณะของชั้นดินและระดับน้ำใต้ดินของพื้นที่ก่อสร้าง

การก่อสร้างบ่ออำนวยการก่อสร้างอุโมงค์โดยระบบจมบ่อคอนกรีตเสริมเหล็ก (Sinking RC. Caisson) เหมาะสำหรับสภาพชั้นดินที่ไม่มีวัสดุกีดขวางในการจมบ่อเช่นก้อนหินหรือรากไม้ใหญ่ และในกรณีที่ชั้นดินมีกำลังไม่สูงมากนัก เนื่องจากจะทำให้เกิดแรงต้านในการจมบ่อมากจนบ่อไม่สามารถจมลงไปด้วยน้ำหนักของตัวบ่อเอง นอกจากนั้นการวางแผนงานในกรณีที่ต้องขุดดินภายในบ่อโดยที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่เหนือระดับงานขุดเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงก่อนทำการจมบ่อคอนกรีต เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากการเกิด Piping ในชั้นทรายซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของงานขุดและระบบกำแพงกันดิน ดังนั้นในการขุดดินภายในบ่ออาจต้องพิจารณาเลือกใช้วิธีการขุดดินใต้น้ำโดยใช้ Clam Shell หรือ Grab ซึ่งมีข้อเสียคือต้องใช้ระยะเวลาในการขุดดินมากพอสมควร

การก่อสร้างโดยระบบ Diaphragm Wall และ Secant Pile Wall เริ่มจากการก่อสร้างผนังกำแพงกันดินให้เสร็จก่อนแล้วจึงทำการขุดดินภายในบ่อออก ดังนั้นการควบคุมให้เกิดเสถียรภาพในการขุดดินภายในบ่อจึงสามารถทำได้โดยการออกแบบให้ผนังบ่อมีระยะฝังในชั้นดินแข็งให้เพียงพอ (Fixed End) ที่จะไม่ทำให้เกิดสภาวะ Piping ในชั้นทราย

4.4.4.2 ลักษณะพื้นที่ก่อสร้าง

ในกรณีที่พื้นที่ก่อสร้างมีโครงสร้างที่สำคัญ เช่น ฐานรากสะพานหรืออาคารบ้านเรือนอยู่ในบริเวณใกล้เคียง การพิจารณาเลือกใช้ระบบ Diaphragm Wall และ Secant Pile Wall จะมีความเหมาะสมกว่าเนื่องจากเป็นระบบที่มีการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างการก่อสร้างเกิดขึ้นน้อยกว่าระบบจมบ่อคอนกรีตฯ เพราะเป็นระบบที่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหา Heave ในการขุดดินในชั้นดิน Soft Clay และสภาวะ Piping ในชั้นดินทรายได้

ในการก่อสร้างโดยระบบ Diaphragm Wall และ Secant Pile Wall ต้องใช้พื้นที่ในการก่อสร้างมากในการจัดวางเหล็กเสริมโครงสร้างผนังบ่อ รวมทั้งวัสดุ, อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้างที่มีจำนวนมากกว่าระบบจมบ่อคอนกรีตฯ ดังนั้นในกรณีที่ต้องก่อสร้างในพื้นที่จำกัดและไม่มีโครงสร้างหรืออาคารบ้านเรือนในบริเวณใกล้เคียงเช่นบริเวณริมถนน การเลือกใช้ระบบจมบ่อคอนกรีตฯ จึงอาจมีความเหมาะสมมากกว่า

4.4.4.3 การวางแผนงานและการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้าง

การวางแผนขั้นตอนการก่อสร้างรวมทั้งแนวทางการป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการจมบ่อคอนกรีตฯ ก่อนทำการก่อสร้างมีความสำคัญมาก เช่น การวางแผนการขุดดินภายในบ่อต้องคำนึงถึงปัญหา Heave ในชั้นดิน Soft Clay, ปัญหา Piping ในชั้นดินทราย และการควบคุม Vertical Alignment ของบ่อ และการแบ่งชั้น (ความสูง) ของผนังบ่อคอนกรีตฯ เพื่อให้มีน้ำหนักของผนังบ่อเพียงพอที่จะจมลงในดินด้วยอัตราการจมที่เหมาะสม นอกจากการวางแผนงานที่ดีแล้ว การควบคุมงานก่อสร้างอย่างใกล้ชิดต้องทำตลอดระยะเวลาที่ทำการจมบ่อคอนกรีตฯ เพื่อป้องกันปัญหาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียหายต่อระบบกำแพงกันดินและบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงได้

โครงสร้างผนังบ่อมีความสำคัญมากในการก่อสร้างบ่อโดยระบบ Diaphragm Wall และ Secant Pile Wall เนื่องจากในการก่อสร้างผนังบ่อต้องแบ่งทำเป็นแผงๆ (Panel) ในระบบ Diaphragm Wall และสำหรับผนังบ่อในระบบ Secant Pile Wall เกิดจากการหล่อเสาเข็มโดยให้ Secondary Piles กัดกับ Primary Piles เพื่อให้เกิด Interlocking ระหว่างเสาเข็มจนสามารถเรียงตัวเป็นผนังบ่อ จึงทำให้โครงสร้างผนังบ่อที่ก่อสร้างโดยระบบ Diaphragm Wall และ Secant Pile Wall เกิดรอยต่อขึ้น ซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดปัญหาการไหลเข้าของดินและน้ำใต้ดินในกรณีที่ระดับของการขุดดินอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ดังนั้นการควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้างผนังบ่อโดยระบบ Diaphragm Wall และ Secant Pile Wall จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในการก่อสร้างโดยระบบ Secant Pile Wall ซึ่งมีรอยต่อระหว่างเสาเข็มเป็นจำนวนมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย