

บทที่ 2

ทฤษฎีแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ

ชั้นดินกรุงเทพฯ เป็นดินตกตะกอน (Transported Soil) ชนิด Marine และ Alluvial เป็นส่วนหนึ่งของชั้นดินราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ตัวเมืองกรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนสองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยอยู่ห่างจากทะเลฝั่งอ่าวไทยประมาณ 20 กิโลเมตร ความยาวเฉลี่ยจากเหนือถึงใต้และจากตะวันออกไปถึงตะวันตกประมาณ 250 และ 200 กิโลเมตร ตามลำดับ พื้นที่รวมประมาณ 53,400 ตารางกิโลเมตร (ว.ส.ท., 2520)

2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

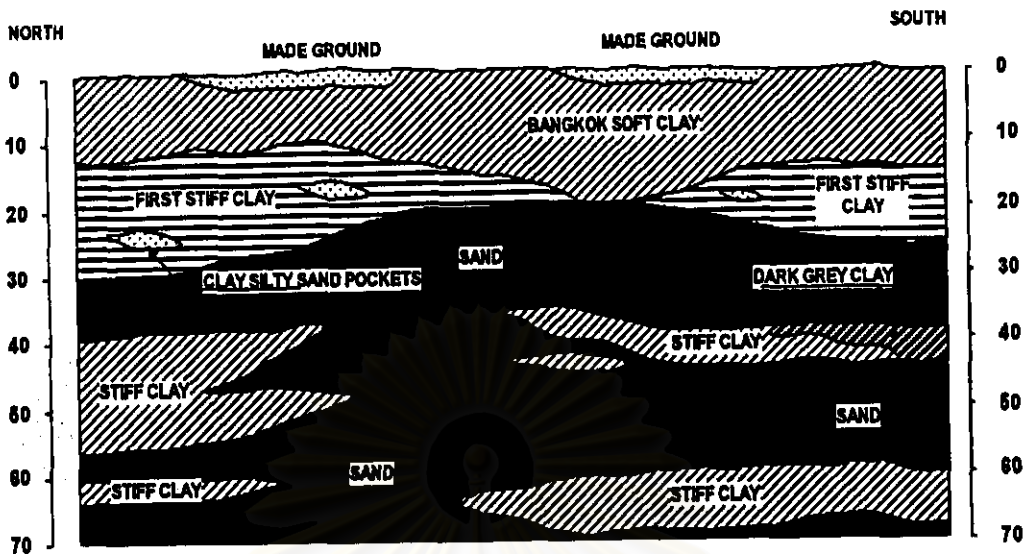
ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ ได้เคยมีการศึกษาทางคุณสมบัติทางวิศวกรรมในอดีตที่ผ่านมามากมาย ซึ่งสามารถสรุปลักษณะชั้นดินแต่ละชั้นจากผิวดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ก. ดินชั้นบน (Top Soil or Weathered Bangkok Clay) มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทา และน้ำตาล มีความหนาประมาณ 1-4 เมตร มักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งปานกลาง เนื่องจากดินชั้นนี้ถูกแปรสภาพมาก ในบริเวณส่วนใหญ่ของกรุงเทพฯ ใกล้เคียงปากอ่าวจะไม่ค่อยพบดินชั้นนี้
- ข. ชั้นดินเหนียวอ่อนมากถึงแข็งปานกลาง (Very Soft to Medium Stiff Marine Clay) เป็นดินเหนียวที่มีสีเทาเข้มหรือเทาปนเขียว หนาประมาณ 10-15 เมตร เป็นดินที่มีความไวตัว (Sensitivity) สูง ค่าปริมาณความชื้นในมวลดินสูงเกือบเท่าปริมาณความชื้นที่ขีดเหลว (Liquid Limit) และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ประมาณ 1-2 ตันต่อตารางเมตร

- ค. ชั้นดินเหนียวแข็งถึงแข็งมาก (Stiff to Very Stiff Clay) เป็นดินเหนียวแข็งชั้นแรกสีเทา และน้ำตลาคที่มีความหนาประมาณ 5-10 เมตร ความหนาจะน้อยในบริเวณทางเหนือ และตะวันตกของส่วนกลางกรุงเทพฯ ค่าปริมาณความชื้นประมาณ 20-30 % และค่า S_u ประมาณ 5-15 ตันต่อตารางเมตร
- ง. ชั้นทรายชั้นแรก (First Silty Sand Layer) จะพบที่ความลึกประมาณ 22-25 เมตร โดยมีความหนาไม่แน่นอนนอกถ้ำคือมีความหนาประมาณ 5-15 เมตร ทรายชั้นนี้เป็นทรายเม็ดละเอียด ในบางพื้นที่อาจพบดินเหนียวหรือ Silt ปนอยู่บ้าง
- จ. ชั้นดินเหนียวแข็งมากถึงดินเหนียวแข็งดินดาน (Very Stiff to Hard Clay) จะอยู่ถัดจากชั้นทรายชั้นแรกซึ่งในบางบริเวณของพื้นที่กรุงเทพฯ จะไม่พบดินชั้นนี้ ลักษณะดินมีแนวโน้มที่จะเป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นเกินตัวน้อยหรือสภาพอัดแน่นปกติ (Slightly Overconsolidated or Normally Consolidated Clay) มีค่า S_u มากกว่า 15 ตันต่อตารางเมตร
- ฉ. ชั้นทรายชั้นที่สอง (Second Sand Layer) โดยทั่วไปจะพบที่ความลึกมากกว่า 50 เมตร เป็นดินทรายที่มีสภาพแน่นมาก

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติชั้นพื้นฐานโดยทั่วไปของดินกรุงเทพฯ (Chin,1972 และ Tonyagate, 1978)

Soil Type	Depth (m)		Wn %	LL %	PL %	PI %	LI	γ (t/m^3)	e	G_s
	From	To								
Weathered Clay	0	2	35-70	35-55	-	23-30	0.7-1.0	1.80-1.80	1.30-1.40	2.60-2.70
Soft Clay	1	16	65-90	65-90	30-40	40-63	0.6-0.9	1.50-1.70	1.50-2.60	2.70
Stiff Clay	10	25	24-34	40-75	20-28	18-50	0.1-0.2	1.90-2.00	1.85-1.95	2.70-2.80
First Sand	14	38	17-25	-	-	-	-	1.80-2.10	0.70	2.70
Hard Clay	24	43	30-35	55-69	18-25	31-44	0.1-0.3	1.80-2.00	0.80-0.95	2.70
Second Sand	30	58	20	-	-	-	-	1.80-2.60	0.75	2.70
Hard Clay	51	67	22-26	48-70	23-25	25-46	0.1	2.04	0.65-0.72	2.74
Sand	67	85	16	-	-	-	-	-	-	2.69
Hard Clay	79	96	19-20	56-57	22-26	32-34	-0.1	2.00-2.10	0.55-0.61	2.70-2.60



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa, 1999)

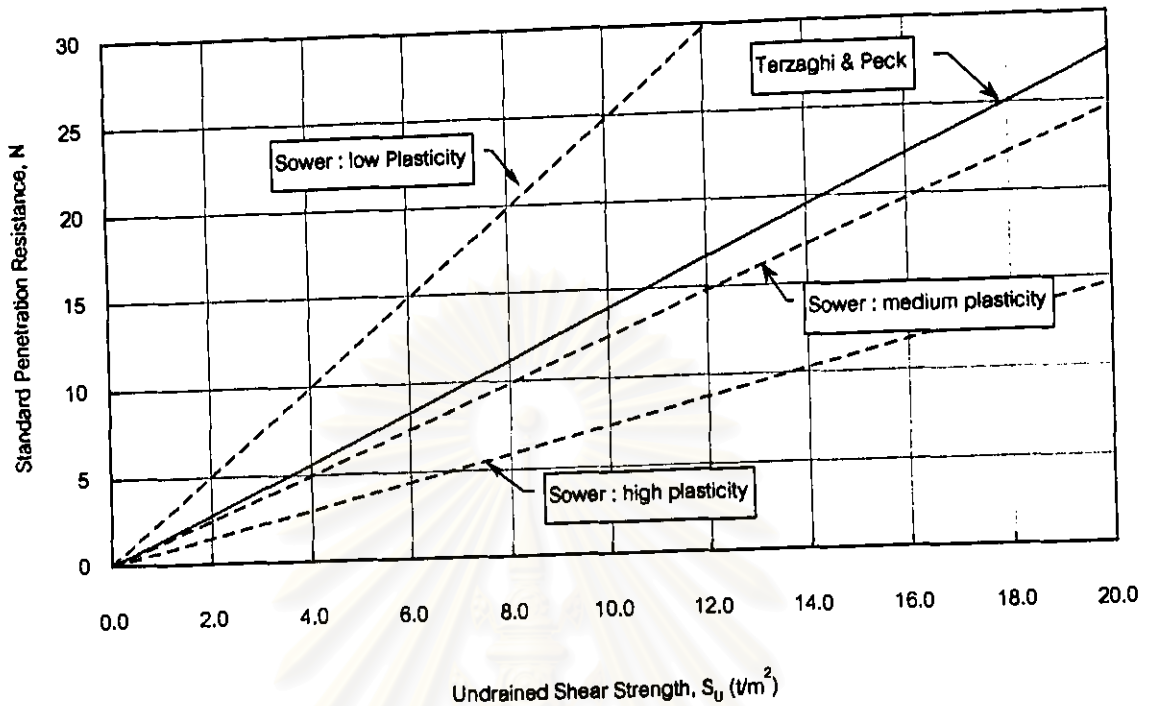
2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ

ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยทั่วไปคือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo}) และค่ามุมต้านแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ) สำหรับชั้นทราย ในกรณีชั้นดินที่พิจารณาเป็นดินเหนียวค่าที่ต้องการคือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength ; S_u) ของดินเหนียว

ค่าต่าง ๆ ข้างต้นบางตัวไม่สามารถทำการทดสอบวัดสมบัติได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์แบบ Empirical ที่ไม่มีรากฐานมาจากทฤษฎีซึ่งจะให้ได้เฉพาะแห่งเป็นส่วนใหญ่ สำหรับดินกรุงเทพฯ ได้เคยมีการวิจัยค่าต่างๆ เหล่านี้ดังรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้

ก. ดินเหนียว

ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และจากการทดสอบในสนาม โดยทั่วไปค่า S_u จะได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) หรือการใช้ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า N จากการทดสอบ SPT กับ S_u ที่เสนอเสนอโดย DM 7.1 (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (DM 7.1)

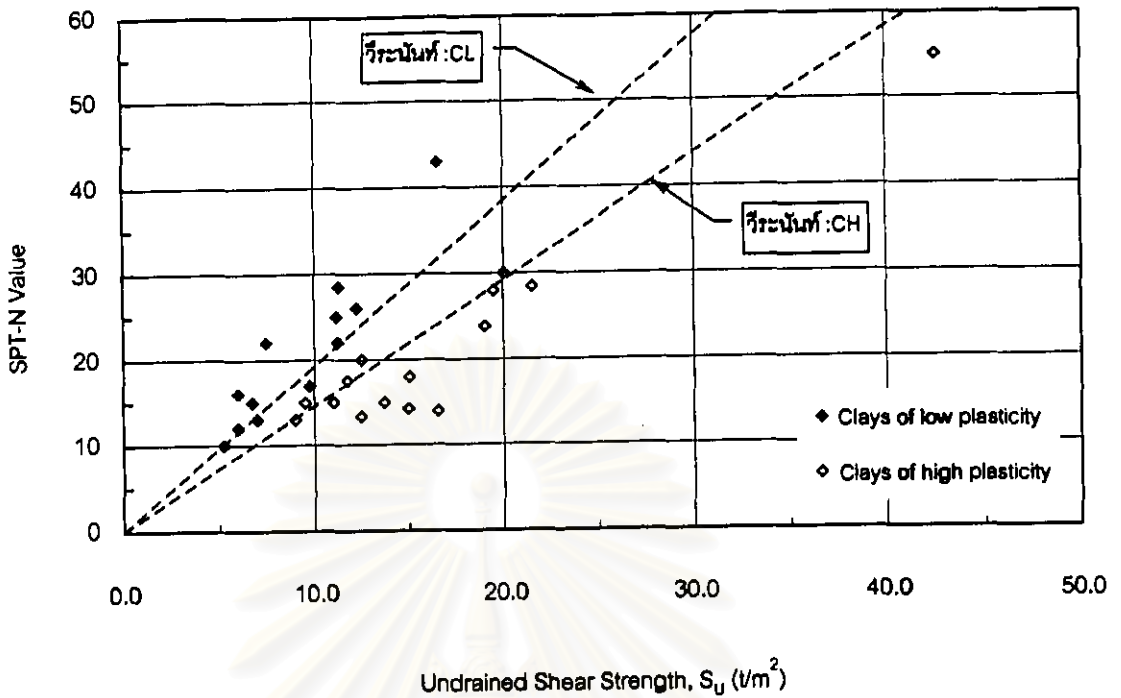
ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ ชั้นแรก วีระนันท์ (2526) ได้ให้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยข้อมูลส่วนใหญ่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N จากการทดสอบ SPT กับ S_u ดังนี้

$$S_u = 0.685 N \text{ (ต้นต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียว CH}$$

$$S_u = 0.520 N \text{ (ต้นต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียว CL}$$

N วัดในค่าจำนวนครั้งต่อฟุต โดยการจำแนกดินเหนียวใช้ระบบ Unified Soil Classification และค่า N ที่ใช้เป็นค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้และควรจะมีค่ามากกว่า 8

เมื่อรวมผลวิเคราะห์เพิ่มเติมจากการศึกษาของแมนสรวง, มนัสพลและณัฐพล (2540) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้สอดคล้องกับผลวิจัยของวีระนันท์



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (แมนสรวง, มนัสพลและณัฐพล, 2540)

ข.ทราย

สำหรับชั้นทราย ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo}) และค่ามุมต้านแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ) สำหรับดินกรุงเทพฯ จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากการสูบน้ำใต้ดินซึ่งมีผลทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินผิดปกติ

ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo}) การคำนวณหาค่า σ'_{vo} ต้องรู้ค่าความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักรวมของมวลดิน และค่าแรงดันน้ำ ณ จุดที่พิจารณา (Total Unit Weight of the soil and The Pore Pressure at a particular depth) ซึ่งหาได้โดยการวัดในสนามหรือการใช้ค่าความสัมพันธ์แบบ Empirical ที่เคยมีการวิจัย

ค่าแรงดันน้ำในมวลดินสำหรับดินกรุงเทพฯ จะต้องพิจารณาผลของการสูบน้ำใต้ดินที่มีต่อค่าแรงดันน้ำในมวลดิน ซึ่ง NG(1983) ได้เสนอความสัมพันธ์ ดังนี้

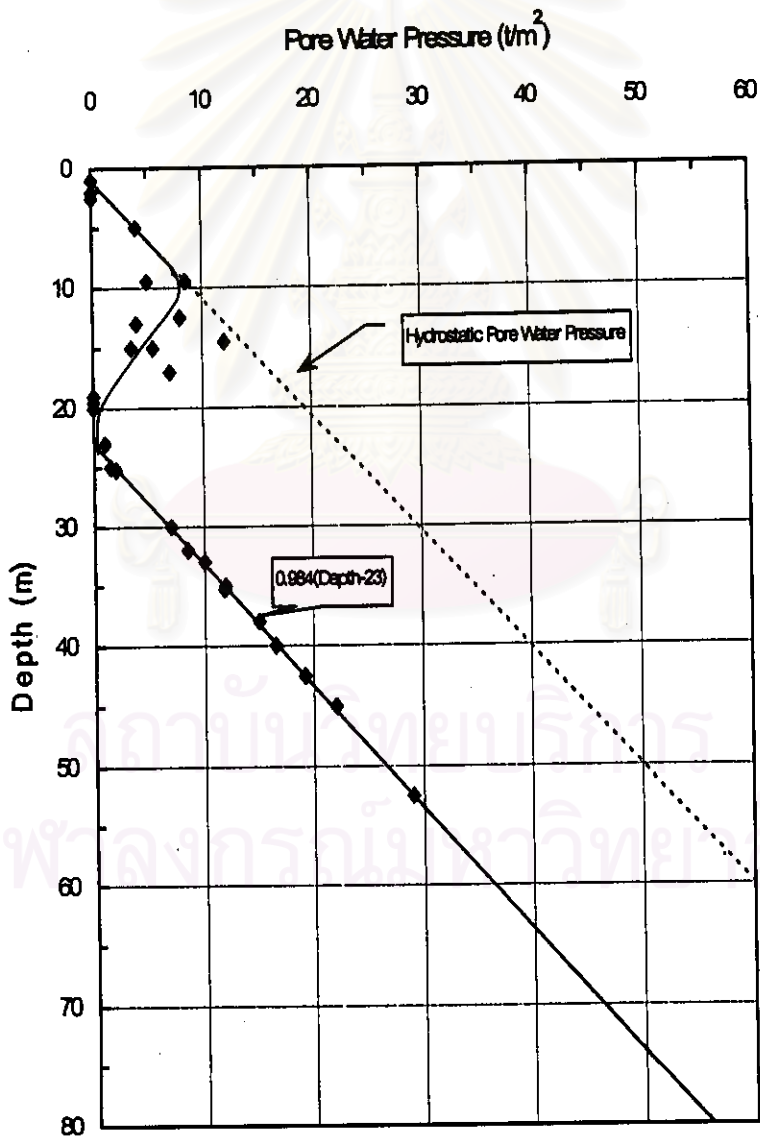
$$u = 0.747 (D-15)$$

ที่ซึ่ง

- u = แรงดันน้ำ (ตัน/ตารางเมตร)
- D = ความลึก (เมตร)

จากข้อมูลการวัดค่าแรงดันน้ำใต้ดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินที่มีการก่อสร้างในขณะนี้(2542) พบว่าผลของการสูบน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯ ได้ทำให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยค่าแรงดันน้ำในมวลดินสำหรับดินกรุงเทพฯ หาได้จาก

$$u = 0.984 (D-23)$$



รูปที่ 2.4 แรงดันน้ำสำหรับดินกรุงเทพฯ (Teparaksa, 1999)

-ค่ามุมด้านแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ) สำหรับทรายจะใช้ในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ') การหาค่ามุม ϕ' สามารถหาได้จากการทดสอบ Direct Shear หรือ Triaxial ในห้องปฏิบัติการ แต่ทั้งนี้อาจเกิดปัญหาต่างๆ คือความยากลำบากในการเก็บตัวอย่างทรายให้อยู่ในสภาพตามธรรมชาติโดยไม่ถูกรบกวน นอกจากนี้ในการทดสอบ Triaxial สำหรับตัวอย่างทรายอาจจะเกิดปัญหาการเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกและต้องใช้ membrane ที่หนากว่าธรรมดา

การหาค่ามุม ϕ' โดยใช้วิธีการทดสอบในสนามในรูปความสัมพันธ์แบบ empirical ได้มีผู้เสนอไว้มากมาย เช่น สำหรับดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) วีระนันท์ (2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ϕ' กับค่า SPT - N Value ซึ่งได้จากผลวิเคราะห์กลับจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ดังนี้

$$\phi' = 12.041 N^{0.162}$$

โดย N ที่ใช้เป็นค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้ N อยู่ในหน่วย ครั้งต่อฟุต

Peck, Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเหมาะสำหรับทรายละเอียดที่ไม่มีดินเหนียวปนอยู่แต่อาจมีทรายแป้งปนอยู่ได้บ้าง สำหรับชั้นทรายกรุงเทพฯ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินทรายปนดินแป้ง (Silty Sand, SM) ผลการศึกษาของ Thanudkleung (1987) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ϕ' กับค่า SPT - N Value ที่ได้มีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Peck, Hanson & Thornburn (1974) โดยที่ค่า N จะต้องทำการปรับแก้เนื่องจากผลของ σ'_{vo} ที่เสนอโดย Peck, Hanson & Thornburn (1974) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีสมการการปรับแก้ดังนี้

$$N' = C_N \times N$$

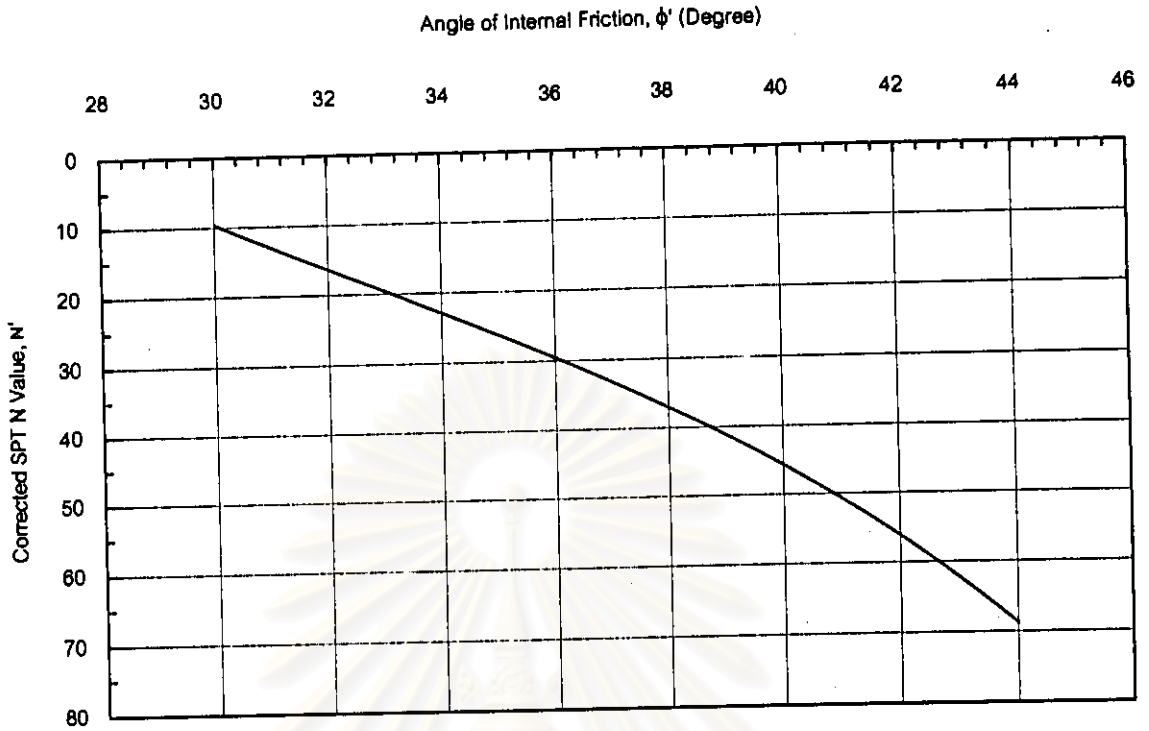
$$C_N = 0.77 \log (20 / \sigma'_{vo})$$

ที่ซึ่ง

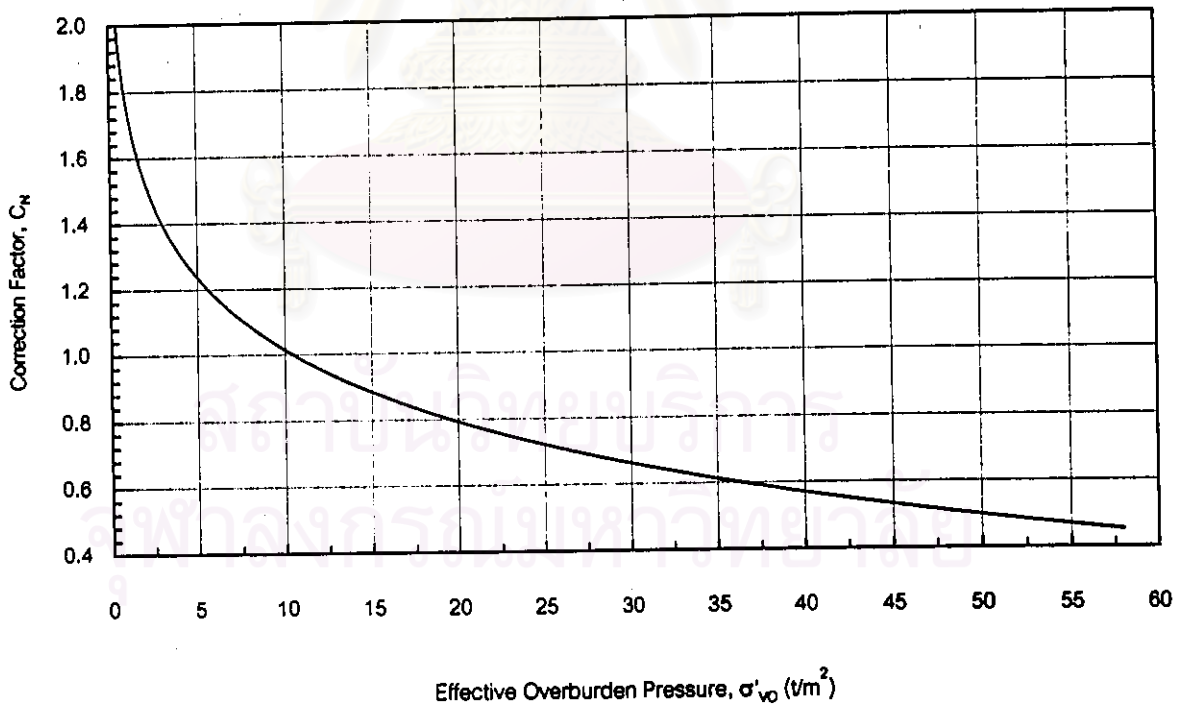
$$N' = \text{ค่า } N \text{ ที่ได้รับการปรับแก้}$$

$$C_N = \text{ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของ } \sigma'_{vo}$$

$$\sigma'_{vo} = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง ในหน่วยตันต่อตารางฟุต}$$



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N' (SPT) กับค่า ϕ' (Peck, Hanson & Thornburn, 1974)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_N กับค่า σ'_{vo} (Peck, Hanson & Thornburn, 1974)

2.2 ชนิดของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยและเทคนิคการก่อสร้าง

เสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเสาเข็มเจาะ (Bored Pile) และเสาเข็มแบเรต (Barrette Pile) ซึ่งจัดเป็นเสาเข็มที่ไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างการติดตั้งเสาเข็ม (Non Displacement Piles) และใช้วัสดุกันดินด้านข้างทั้ง เช่น Casing หรือ Drilling Mud โดยเสาเข็มแบเรตและเสาเข็มเจาะบางต้นที่ใช้มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base Grouted Barrette and Bored Pile) รายละเอียดของเสาเข็มแต่ละประเภทมีดังนี้

2.2.1 เสาเข็มเจาะ (Bored Pile)

เสาเข็มเจาะสามารถแบ่งออกได้ตามระบบการก่อสร้าง ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบเสาเข็มเจาะแบบแห้ง (Dry Process) และระบบเสาเข็มเจาะแบบเปียก (Wet process) กล่าวคือในกรณีที่ต้องการให้ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นดินแข็งที่ไม่ถึงชั้นทรายชั้นที่หนึ่งก็สามารถใช้ระบบแห้ง โดยใช้ปลอกเหล็กชั่วคราว (Casing) ป้องกันเพียงชั้นดินอ่อน เสาเข็มระบบนี้ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือประเภท เครื่องเจาะแบบสามขา (Tri - Pod Rod) ซึ่งในกรุงเทพฯ มักจะใช้ก่อสร้างเสาเข็มที่รับน้ำหนักไม่มากนัก โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.35-0.60 เมตร และเจาะได้ลึกประมาณไม่เกิน 23.00 เมตร

เสาเข็มเจาะระบบเปียก โดยทั่วไปจะเป็นเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ที่มีปลายหยั่งลงในชั้นทรายแน่นชั้นที่หนึ่งหรือชั้นที่สอง โดยการเจาะในชั้นทรายจะใช้สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) หรือสารละลายโพลีเมอร์ผสมสารละลายเบนโทไนท์เป็นตัวช่วยด้านมิให้ผนังหลุมเจาะเกิดการพังทลาย เสาเข็มเจาะแบบเจาะเปียกนิยมใช้ระบบ Rotary Drill (R.D.) ซึ่งเป็นระบบที่แพร่หลายทั่วโลก ในกรุงเทพฯ มักจะใช้ในงานก่อสร้างอาคารสูง และสะพานขนาดใหญ่ โดยมักจะใช้ก่อสร้างเสาเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80, 1.00, 1.20 และ 1.50 เมตร ที่รับน้ำหนักปลอดภัยประมาณ 300-1000 ตัน ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความยาวของเสาเข็มที่ใช้

ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปสำหรับ เสาเข็มเจาะระบบเปียกระบบ Rotary Drill (R.D.) มีดังนี้

1. ทำการลงปลอกเหล็กชั่วคราว (Casing) เพื่อป้องกันชั้นดินอ่อนซึ่งสำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ปกติจะใช้ปลอกเหล็กยาวประมาณ 15.0 ม.

2. ขุดเจาะดินภายในปลอกเหล็กโดยใช้สว่าน (Auger) เป็นตัวเจาะจนถึงระดับก่อนถึงชั้นทราย
3. เติมสารละลายเบนโทไนท์ลงในหลุมเจาะแล้วทำการเจาะต่อโดยใช้หัวเจาะแบบถัง (Bucket)
4. เมื่อเจาะจนถึงระดับที่ต้องการแล้วจึงทำความสะอาดกันหลุม
5. ลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตผ่านท่อเท (Trimie)
6. ทำการถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออก

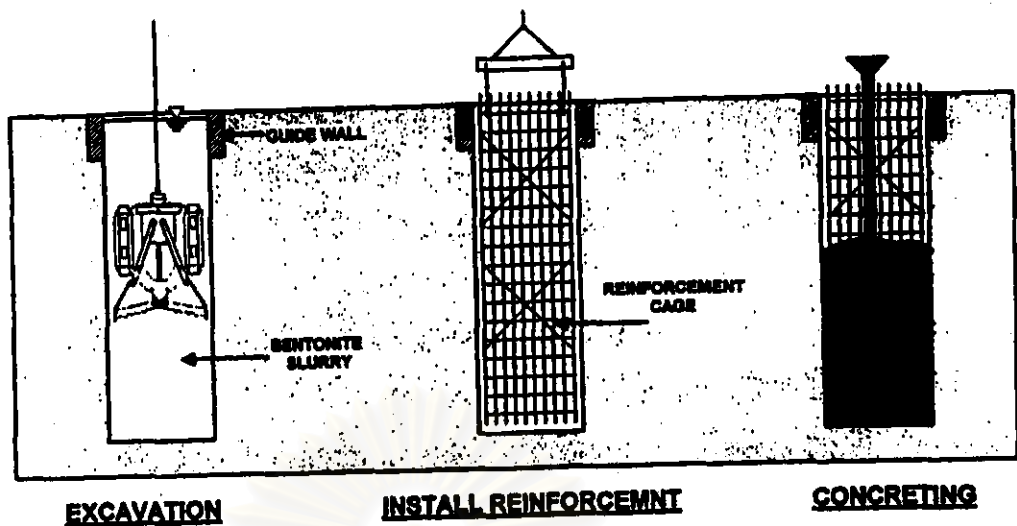
2.2.2 เสาเข็มแบบเรียด (Barrette Pile)

เสาเข็มแบบเรียดเป็นเสาเข็มเจาะแบบเจาะเปียกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในยุโรปมักจะเรียกเสาเข็มประเภทนี้ว่า Strip Pile ในสหรัฐอเมริกาจะเรียกว่า Load Bearing Element เสาเข็มแบบเรียดจะใช้ในกรณีที่เสาเข็มถูกกำหนดให้รับน้ำหนักสูงซึ่งไม่สามารถจัดกลุ่มเสาเข็มเจาะได้ดังนั้นจึงได้มีการนำเสาเข็มแบบเรียดมาใช้แทนเนื่องจากเสาเข็มแบบเรียดมีเส้นรอบรูปและพื้นที่หน้าตัดมากกว่าเสาเข็มเจาะรูปทรงกลมจึงสามารถทำการออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกได้สูง

เสาเข็มแบบเรียดมีขั้นตอนการก่อสร้างคล้ายคลึงกับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะแต่เสาเข็มแบบเรียดจะใช้เครื่องมือประเภทเดียวกับงานก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall (รูปที่ 2.7) คือ Mechanical Hang Grab เป็นหัวเจาะ นอกจากนี้การก่อสร้างเสาเข็มแบบเรียดจะไม่มีการลงปลอกเหล็กชั่วคราวแต่จะก่อสร้างกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก (Guide Wall) ลักษณะเหมือนกับหน้าตัดเสาเข็มที่กำลังจะก่อสร้างและใช้แรงดันของสารละลายเบนโทไนท์ เพื่อต้านแรงดันดินด้านข้างของหลุมเจาะแทน โดยขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มแบบเรียดแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 เครื่องมือเจาะเสาเข็มแบบเรียด



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มแบบเรียด

เสาเข็มแบบเรียดสามารถก่อสร้างได้หลายขนาด ในกรุงเทพฯ ได้เคยมีการใช้ที่ขนาดหน้าตัด 0.80×2.70 , 1.00×2.70 และ 1.50×3.00 ตารางเมตร ลึกประมาณ 50-60 เมตร แต่ไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนักเนื่องจากราคาค่าก่อสร้างแพงและใช้ระยะเวลาการก่อสร้างมากกว่าเสาเข็มเจาะซึ่งโดยปกติการก่อสร้างเสาเข็มแบบเรียดลึกประมาณ 50.0 เมตร ในกรุงเทพฯ เฉพาะการเจาะแต่ละหลุมจะใช้เวลาประมาณ 14 ชั่วโมง รวมเวลาทำความสะอาดสระละลายเบนโทไนท์ การลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตจนแล้วเสร็จจะใช้เวลาการก่อสร้างทั้งสิ้นประมาณ 24 ชั่วโมงต่อเสาเข็มแบบเรียด 1 ต้น

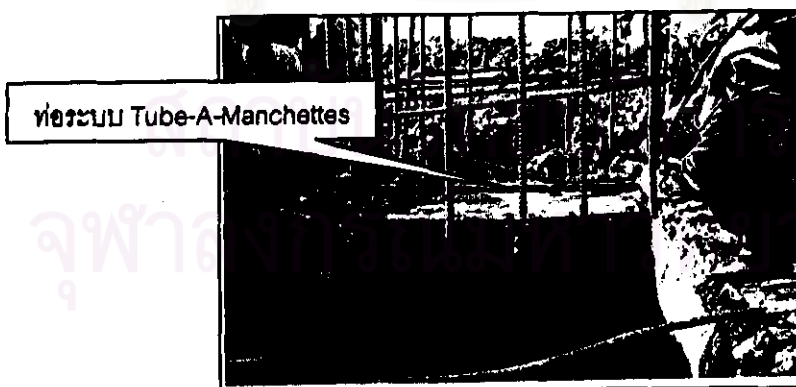
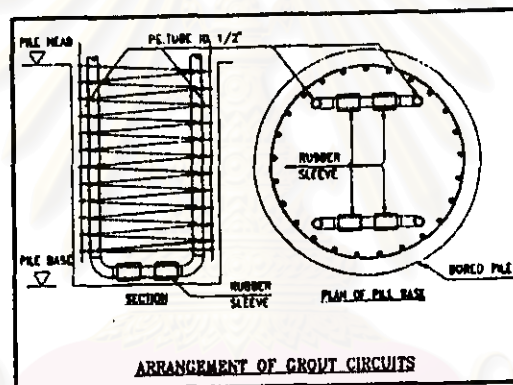
2.2.3 เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base Grouted Pile)

ในการก่อสร้างเสาเข็มแบบเรียดและเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ หลังจากเจาะดินถึงความลึกที่ต้องการ ต้องทำการลงเหล็กเสริม (Steel Cage Installation) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการตกตะกอนของเบนโทไนท์ ดินเหนียว หรือดินทราย อันเป็นสาเหตุของปัญหาตะกอนกันหลุม

ผลของการเกิดตะกอนกันหลุมจะทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทาน (Bearing Resistance) ลดลงและทำให้เกิดการทรุดตัวของปลายเสาเข็มมาก การแก้ไขโดยทั่วไปจะใช้ Airlift แต่ทั้งนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของผู้รับเหมาเสาเข็มว่ามีความชำนาญและระมัดระวังเพียงใด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติงานในสนามก็ไม่สามารถลดปัญหาลงได้ทั้งหมด ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการใช้ระบบ

การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มเพื่อเพิ่มกำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็มและลดการทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก

วิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่นิยมใช้ในประเทศไทยคือระบบท่อ None Return Valve หรือเรียกว่าระบบท่อ Tube-A-Manchettes ซึ่งจะติดตั้งที่ปลายโครงเหล็กเสริมเสาเข็ม 2 ชุด (รูปที่ 2.9) โดยที่ปลายของ Tube-A-Manchettes จะต่อกับท่อยางรับแรงดันสูงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ขึ้นมาถึงระดับพื้นดิน โดยทั่วไปส่วนผสมของน้ำปูนที่ใช้จะมีค่า Water Cement Ratio (W / C) 0.50 - 0.55 ความดันที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำปูนประมาณ 40 - 60 bars (400 - 600 t/m^2) และปริมาณน้ำปูนที่ใช้ประมาณ 500 - 1000 ลิตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดจำนวนรอบในการอัดฉีดน้ำปูน ปริมาณน้ำปูนและแรงดันสุดท้ายที่ใช้ในการอัดฉีดน้ำปูน



รูปที่ 2.9 ลักษณะและการติดตั้งท่ออัดฉีดน้ำปูนระบบ Tube-A-Manchettes

การอัดฉีดน้ำปูนจะกระทำภายหลังขั้นตอนการเทคอนกรีตในหลุมเจาะเสาเข็มเสร็จประมาณ 12 – 24 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนการอัดฉีดน้ำปูนดังนี้

1. ทำการล้างท่อสำหรับการอัดฉีดน้ำปูนด้วยน้ำจนสะอาด
2. อัดน้ำเพื่อเปิดคอนกรีตที่ปลายเสาเข็ม
3. อัดฉีดน้ำปูนลงที่ปลายเสาเข็ม
4. หลังการอัดฉีดน้ำปูนแล้วทำการล้างท่อด้วยน้ำจนสะอาดเพื่อให้สามารถอัดฉีดน้ำปูนรอบต่อไป
5. การอัดฉีดรอบต่อไปจะใช้น้ำปูนเพื่อเปิดคอนกรีตที่ปลายเสาเข็มและทำการอัดฉีดเหมือนขั้นตอนที่ 3
6. เมื่อเสร็จสิ้นการอัดฉีดน้ำปูนแล้วทำการล้างท่อตามขั้นตอนที่ 4

2.3 การติดตั้งเครื่องมือวัดในเสาเข็ม

เครื่องมือวัดที่ติดตั้งในเสาเข็มโดยทั่วไปมี 2 ชนิดคือ Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) และ Extensometer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถนำผลที่ได้มาใช้วิเคราะห์หาแรงตามแนวแกนของเสาเข็มได้ รายละเอียดของเครื่องมือทั้ง 2 ชนิด มีดังต่อไปนี้

2.3.1 Vibrating Wire Strain Gauge

Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) ที่ใช้จะยึดติดกับเหล็ก DB 16 ด้วยการเชื่อมและใช้ Plastic Tie หุ้มป้องกันสายนำ (Sensor) ดังรูปที่ 2.10 VWSG จะถูกติดตั้งกับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรีตทดสอบโดยการยึดแท่ง VWSG กับโครงเหล็กเสริมของเสาเข็มในขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม ณ ตำแหน่งหรือระดับที่ต้องการทราบแรงตามแนวแกน ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ค่าความเครียดที่จุดๆ นั้น เพื่อนำไปคำนวณหาค่าแรงได้

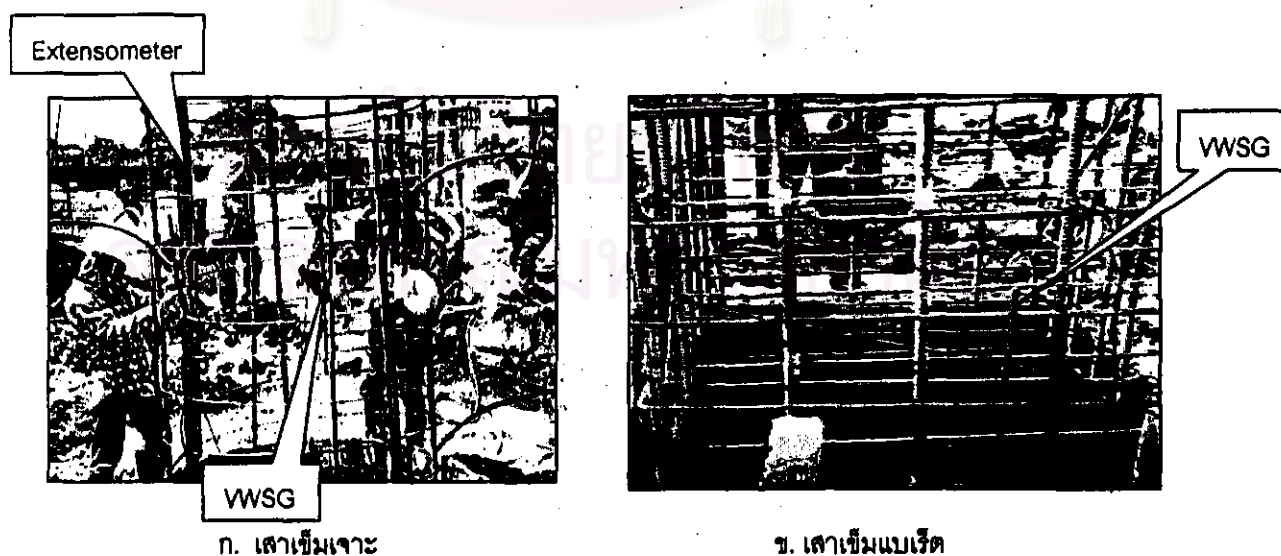


รูปที่ 2.10 ลักษณะ Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG)

2.3.2 Extensometer

การติดตั้ง Extensometer ในตัวเสาเข็มเพื่อวัดค่าการหดตัวที่ส่วนต่างๆ ของเสาเข็มระหว่างหัวเสาเข็ม (Pile head) กับค่าระดับความลึกที่ต้องการ ค่าการหดตัวที่วัดได้จะสามารถนำมาคำนวณหาการถ่ายแรงตามแนวแกนของเสาเข็ม การติดตั้งจะทำการติดตั้งกับโครงเหล็กเสริมของเสาเข็มในขั้นตอนการลงกรงเหล็กเสริมระหว่างการก่อสร้างเช่นเดียวกับการติดตั้ง VWSG

ลักษณะและการติดตั้ง VWSG และ Extensometer ในเสาเข็มแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะและการติดตั้ง VWSG และ Extensometer ในเสาเข็ม

2.4 การส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มสู่ดินรอบ ๆ เสาเข็ม

การศึกษาการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มสู่ดินรอบ ๆ เสาเข็มจะต้องอาศัยข้อมูลการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือภายในตัวเสาเข็ม เพื่อวัดหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเสาเข็มที่ระดับต่างๆขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำ เครื่องมือที่ติดตั้งมีทั้ง Vibrating Wire Strain Gauges และ Telltale rod หรือ Extensometer

2.4.1 การหาแรงตามแนวแกนโดย Vibrating Wire Strain Gauges (VWSG)

การหาค่าแรงตามแนวแกน ณ จุดที่พิจารณา หรือจุดที่มีการติดตั้ง VWSG ซึ่งจะทำการวัดค่าความเครียดเพื่อมาคำนวณแรง ณ จุดนั้น โดยสมการ

$$P_i = (AE)_p \times S_i$$

ที่ซึ่ง

$$P_i = \text{แรงตามแนวแกนที่จุดที่ติดตั้ง VWSG ที่ระดับ } i$$

$$(AE)_p = \text{ค่าสติฟเนสสมมูลย์เสาเข็ม (Equivalent Pile Stiffness)}$$

$$= [A_s(n-1) + A_g] E_c$$

$$A_s = \text{พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม}$$

$$A_g = \text{พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม}$$

$$n = E_s / E_c$$

$$E_c = \text{อิลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต}$$

$$E_s = \text{อิลาสติกโมดูลัสของเหล็กเสริม}$$

$$S_i = \text{ความเครียด}$$

2.4.2 การหาแรงตามแนวแกนโดย Extensometer

Extensometer ใช้สำหรับการคำนวณหาแรงตามแนวแกนตลอดช่วงที่ทำการพิจารณา โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$P_i = \frac{2(AE)_p \times e}{L} - P_T$$

ที่ซึ่ง

- P_l = แรงตามแนวแกนที่จุดต่ำสุด
- $(AE)_p$ = ค่าสติฟเนสเสาเข็ม (Equivalent Pile Stiffness)
- e = Elastic Shortening
- L = ความยาวของเสาเข็มระหว่างช่วงที่พิจารณา
- P_T = น้ำหนักทดสอบ

2.5 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว

2.5.1 วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method)

วิธีการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตยศาสตร์อาศัยหลักการสมดุลย์ของแรงกล่าวคือกำลังรับน้ำหนักที่จุดวิกฤติของเสาเข็ม (Q_{ult}) เท่ากับผลรวมของแรงต้านจากปลายเสาเข็มและแรงเสียดทานรอบผิวของเสาเข็มลบด้วยน้ำหนักของเสาเข็มดังสมการ

$$Q_{ult} = Q_f + Q_e - W$$

ที่ซึ่ง

- Q_f = แรงเสียดทานรอบๆ ผิวเสาเข็ม
- Q_e = แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม
- W = น้ำหนักของเสาเข็ม

ค่าแรงเสียดทานรอบๆ ผิวเสาเข็มและค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะหาด้วยวิธีปฏิภพภทศาสตร์โดยการวิเคราะห์แบบ Total Stress และแบบ Effective Stress ตามความเหมาะสมของชั้นดินที่พิจารณา ดังต่อไปนี้

ก. ชั้นดินเหนียว การวิเคราะห์จะอยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์แบบ Total Stress โดยใช้หลักการ $\phi = 0$ ($\phi = 0$ concept) ซึ่งหมายความว่าค่า Cohesion จะมีค่าเท่ากับ ค่า S_u

สมการทั่วไปในการหาค่า แรงเสียดทานรอบ ๆ ฝิว (Q_p) คือ

$$Q_p = \Sigma f_s \cdot A_s$$

$$f_s = \alpha S_u$$

ที่ซึ่ง

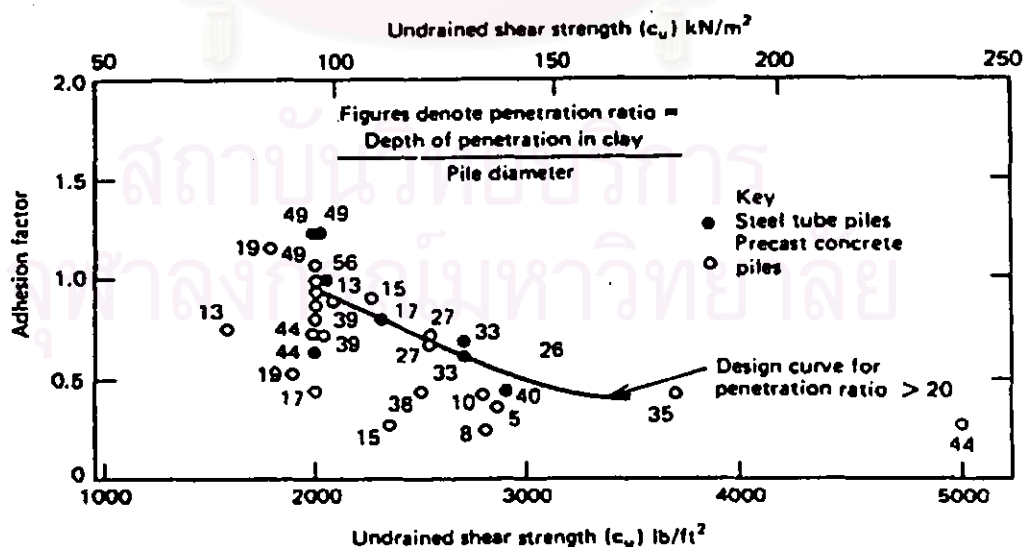
$$\alpha = \text{adhesion factor}$$

$$S_u = \text{กำลังรับแรงเฉือนของดิน}$$

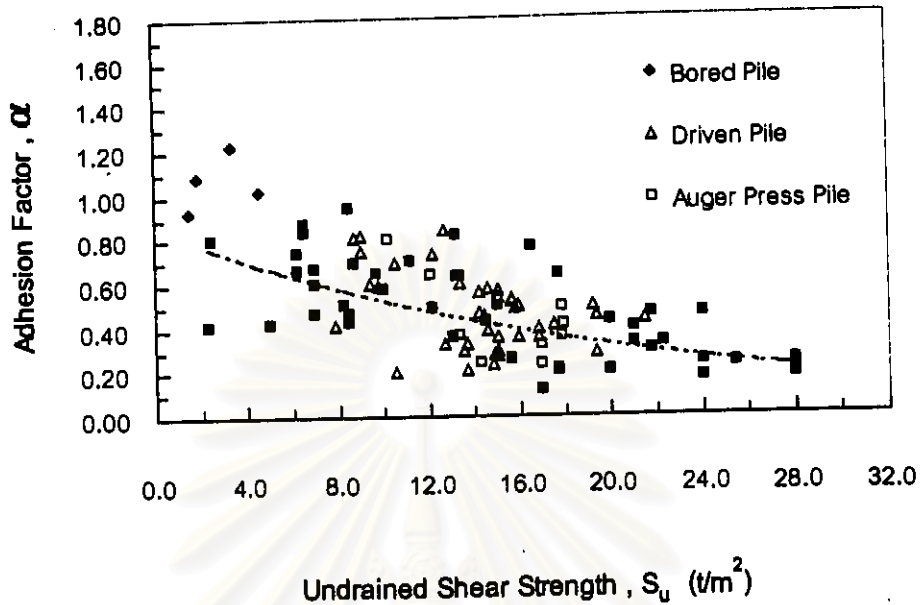
$$A_s = \text{พื้นที่ฝิวของเสาเข็มในช่วงที่รับแรง}$$

ค่า α เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดและรูปร่างของเสาเข็ม ชนิดของดินและวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม (Sambhandharaksa, 1991) โดยมีค่าหาจากความสัมพันธ์กับค่าของ S_u ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (Tomlinson, 1970)

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ Pimpasugdi (1989) ได้ทำการรวบรวมผลวิจัยก่อนหน้า (NG, 1983 และ สุวรรณ, 2531) พร้อมกับทำการวิจัยเพิ่มเติมจากข้อมูลการทดสอบเสาเข็มหลายชนิดได้แก่เสาเข็มตอก เสาเข็ม Auger Press และเสาเข็มเจาะ โดยได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งพบว่าค่า α มีลักษณะกระจัดกระจาย (Scatter) โดยผลจากวิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่แตกต่างกันไม่ได้มีอิทธิพลต่อค่า α อย่างเด่นชัด



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u (Tomlinson, 1970)



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับดินกรุงเทพฯ
(Pimpasugdi, 1989)

สมการทั่วไปในการหาค่า แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q_E) คือ

$$Q_E = q_E \cdot A_p$$

$$q_E = S_u N_c + \sigma_{v0}$$

ที่ซึ่ง

$$N_c = \text{bearing capacity factor}$$

$$\sigma_{v0} = \text{หน่วยแรงรวมในแนวตั้งที่ระดับปลายเข็ม}$$

$$A_p = \text{พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม}$$

ค่า N_c ได้มีการวิจัยมากมายเช่น Skemton (1951) ได้เสนอ ค่า N_c ในกรณีหน้าตัดรูปวงกลมมีค่าเพิ่มจาก 6.14 สำหรับที่ผิวดิน ถึง 9.00 สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ที่ความลึกมากกว่า 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม Sower (1961) ได้ศึกษาจากแบบจำลองพบว่าค่า N_c มีค่าอยู่ระหว่าง 5.0-8.0 ซึ่งค่าที่แตกต่างกันนี้ถูกยอมรับว่าเกิดจากอิทธิพลของพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียด (The Stress-Strain Behavior) ของดินที่แตกต่างกัน

สำหรับชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ๗ Muktabhand & Suwanakul (1971) ได้ทำการวิจัยจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็งซึ่งพบว่าค่า N_c จะต่ำกว่า 9 อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติก็มักจะใช้ค่า N_c เท่ากับ 9 ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่มีปลายในชั้นดินเหนียว

ข. ชั้นทราย การวิเคราะห์จะใช้การวิเคราะห์แบบ Effective Stress เนื่องจากน้ำสามารถซึมผ่านชั้นทรายได้รวดเร็ว โดยที่การวิเคราะห์ใช้หลักการของ Mohr Coulomb ในรูปของ Effective Stress

สมการทั่วไปในการหาค่า แรงเสียดทานรอบๆ ผิว (Q_f) คือ

$$Q_f = \sum f_s \cdot A_s$$

$$f_s = K_s \tan \delta \cdot \sigma'_v$$

ที่ซึ่ง

$$K_s = \text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง}$$

$$\delta = \text{มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน}$$

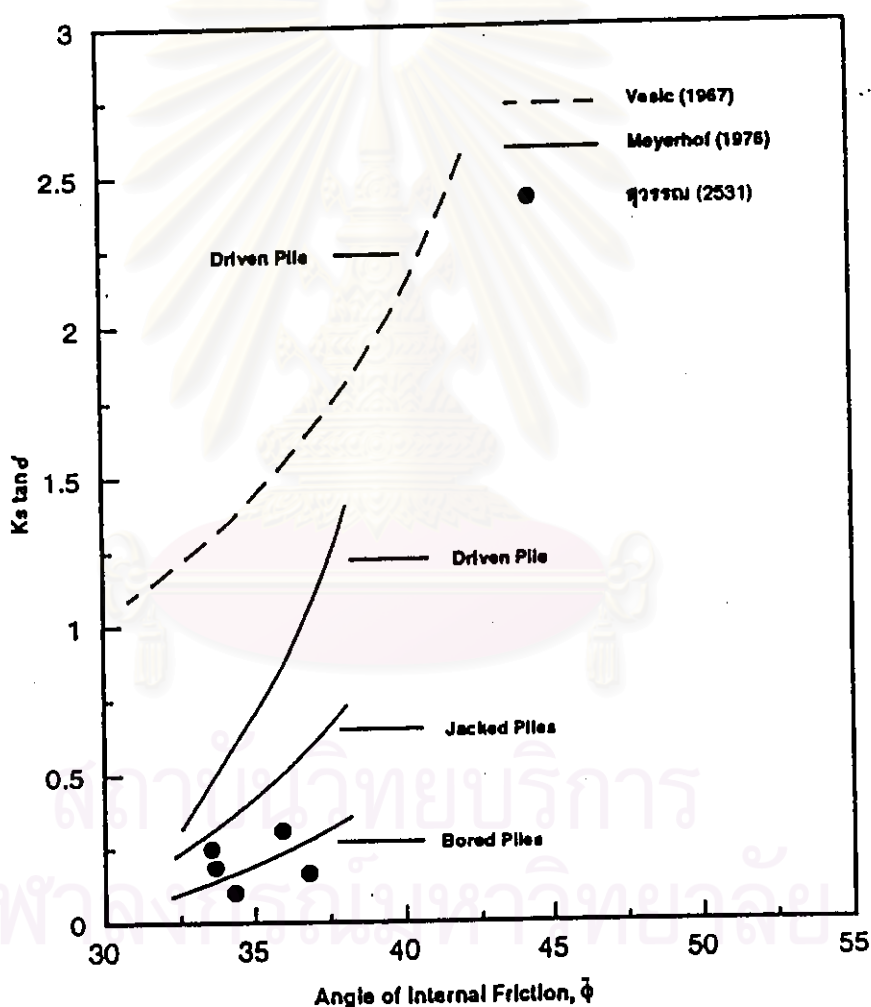
$$\sigma'_v = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา}$$

ค่า K_s เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความแน่นเริ่มต้นของทราย วิธีการก่อสร้างเสาเข็ม รูปทรงทางเรขาคณิตและความยาวเสาเข็ม Broms & Aas (1966) ได้เสนอ ค่า K_s และ δ สำหรับเสาเข็มตอก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า K_s และ δ สำหรับเสาเข็มตอกที่เสนอโดย Broms & Aas (1966)

ชนิดเสาเข็ม	K_s		δ
	ทรายหลวม	ทรายแน่น	
เสาเข็มเหล็ก	0.50	1.00	20
เสาเข็มคอนกรีต	1.00	2.00	$(3/4) \phi$
เสาเข็มไม้	1.50	4.00	$(2/3) \phi$

สำหรับเสาเข็มเจาะค่า K_s จะอยู่ระหว่าง 0.7 – 0.9 (Fleming, 1984) นอกจากนี้ Vesic (1967) และ Meyerhof (1976) ได้เสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับมุม ϕ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยที่ สุวรรณ (2531) ได้ทำการวิจัยจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรกของดินกรุงเทพฯ ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับมุม ϕ ที่ได้มีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Meyerhof (รูปที่ 2.14)



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $K_s \tan \delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ
(Vesic, 1967 และ Meyerhof, 1976)

สมการทั่วไปในการหาค่า แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q_E) คือ

$$Q_E = q_E \cdot A_p$$

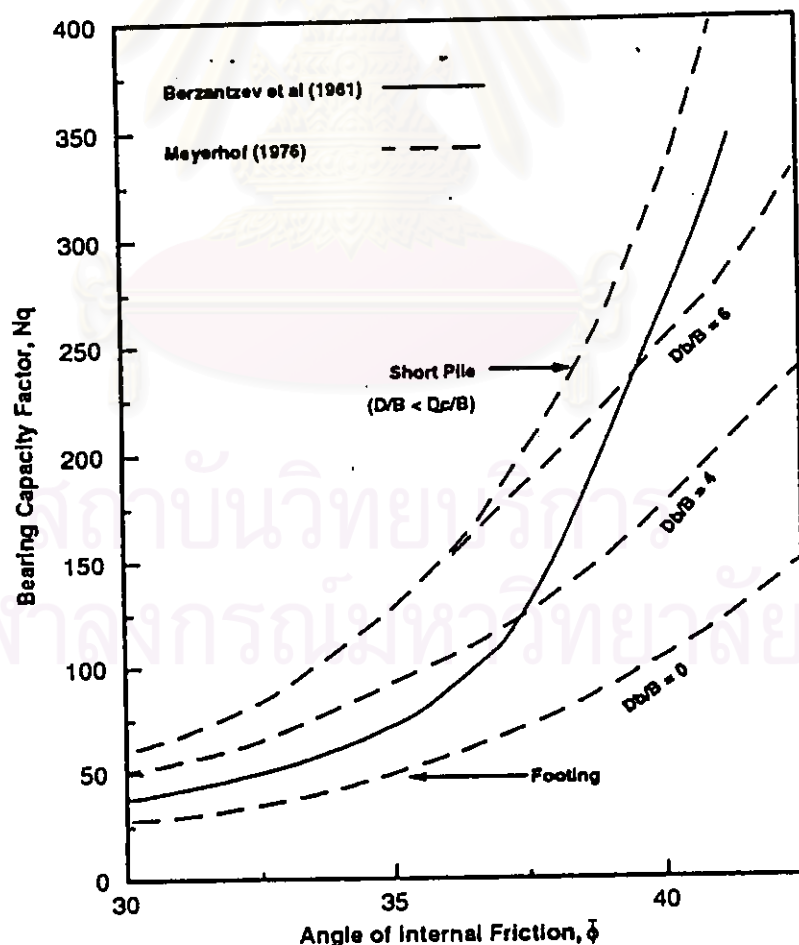
$$q_E = \sigma'_v N_q$$

ที่ซึ่ง

N_q = bearing capacity factor

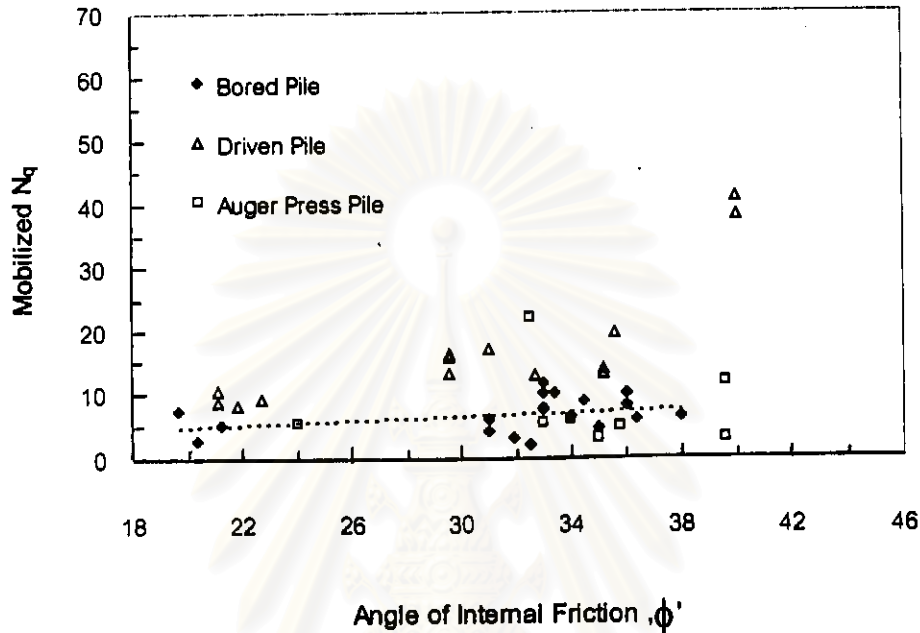
σ'_v = หน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา

Berezantzev (1961) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มตอก ในการคำนวณออกแบบเสาเข็มโดยพิจารณาค่า Relative Embedment Depth (D_v/B) เป็นค่าประมาณเท่ากับ 5 ซึ่งต่างกับ Meyerhof (1976) ที่ได้พิจารณาทิศพลของค่า D_v/B ด้วย (รูปที่ 2.15) แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าที่เสนอโดย Berezantzev อยู่ในวงค่าเฉลี่ยของค่าที่เสนอโดย Meyerhof



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง bearing capacity factor, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' (Berezantzev, 1961 และ Meyerhof, 1976)

สำหรับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับค่ามุม ϕ' เสนอโดย Pimpasugdi (1989) ซึ่งได้ทำการวิจัยและรวบรวมผลการวิจัยก่อนหน้า (NG, 1983 และ สุวรรณ, 2531) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยที่ข้อมูลส่วนใหญ่เป็นข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่มีปลายเสาเข็มอยู่ที่ชั้นทรายชั้นแรกของดินกรุงเทพฯ



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง bearing capacity factor ; N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' (Pimpasugdi, 1989)

2.5.2 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Pile Load Test)

การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ (Q_{ult}) ซึ่งมีหลายวิธีที่เคยมีผู้วิจัยไว้ Fellenius (1980) ได้ทำการรวบรวมซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

ก.วิธีของ Davisson (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติ เป็นน้ำหนักที่เสาเข็มเกิดการทรุดตัวจนเกินค่าความยืดหยุ่นที่ถูกกำหนดไว้ค่าหนึ่งคือ 0.15 นิ้ว (4 mm.) บวกกับ factor ค่าหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (นิ้ว)หารด้วย 120

$$x = 0.15 + D/120 \text{ , นิ้ว}$$

ที่ซึ่ง

$$D = \text{คือเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเสาเข็ม (นิ้ว)}$$

พิจารณาจากรูปที่ 2.17 ก ทำการลากเส้น (BC) ขนานระยะ offset (x) จากเส้น Initial Modulus (OA) จุดตัดระหว่างเส้นตรง BC กับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว คือจุด Q_{ult} (จุด C)

ข.วิธีของ Chin (1970-71)

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติเท่ากับค่าส่วนกลับของความชันที่ได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกแต่ละค่าหารด้วยค่าการเคลื่อนที่ที่น้ำหนักบรรทุกนั้น บนแกน y และ ค่า การเคลื่อนที่ (movement) บนแกน x

พิจารณาจากรูปที่ 2.17 ข คำนำน้หนักบรรทุกที่จุดวิบัติ $(Q_v)_{ult}$ มีค่าเท่ากับ $1 / C_1$ โดยที่ C_1 คือค่าความชันของกราฟ

ค.วิธีของ De Beer & Wallays (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติหาโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวบนกราฟแบบลอการิทึม สเกล พิจารณาจากรูปที่ 2.17 ค. ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติเท่ากับจุดที่เปลี่ยนความชันของเส้นตรงบนความสัมพันธ์แบบลอการิทึม สเกล

ง.วิธีของ Brinch Hanson (1972) 90% criterion

วิธีนี้เป็นการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ $(Q_v)_{ult}$ คือ ค่า ณ จุดที่มีการทรุดตัว (Δu) เป็นสองเท่าของค่าการทรุดตัวที่ 90% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ (รูปที่ 2.17 ง.)

จ.วิธีของ Brinch Hanson (1972) 80% criterion

วิธีนี้พัฒนามาจาก Brinch Hanson (1972) 90% โดยใช้วิธีการแก้สมการเส้นตรง โดยกำหนดค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติคือตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดใดๆ ณ ตำแหน่งที่การทรุดตัว (Δu) มีค่าหนึ่งในสี่ของค่าการทรุดตัวที่จุดนั้น (รูปที่ 2.17 จ.)

วิธีการวิเคราะห์เริ่มจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ของรากที่สองของการทรุดตัวหารด้วยน้ำหนักบรรทุก ($\frac{\sqrt{\Delta}}{Q_{va}}$) กับค่าการทรุดตัว (Δ) ซึ่งจะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{\sqrt{\Delta u}}{Q_u} = C_1 \Delta u + C_2 \quad \text{-----}(ก)$$

ตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดใดๆ ณ ตำแหน่งที่การทรุดตัว (Δu) มีค่าหนึ่งในสี่ของค่าการทรุดตัวที่จุดนั้น แสดงสมการได้ดังนี้

$$\frac{\sqrt{0.25\Delta u}}{0.8Q_u} = 0.25C_1 \Delta u + C_2 \quad \text{-----}(ข)$$

แก้สมการ ก. และ ข. เพื่อหาค่า Δu ที่ทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามวิธีนี้

จ.วิธีของ Mazurkiewicz (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติหาได้จากเส้นตรงสมมติที่สร้างขึ้นมาจากตัดกับแกนน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเส้นสมมตินี้สร้างได้โดยการแบ่งค่าการทรุดตัวออกเป็นส่วนๆ ที่มีขนาดเท่ากันลากตัดเส้นโค้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว จนสามารถทราบค่าน้ำหนักบรรทุกที่ตำแหน่งการทรุดตัวนั้นๆ ดังรูปที่ 2.17 ข. จากนั้นลากเส้นตรงทำมุม 45 องศากับแกนน้ำหนักบรรทุกเพื่อสร้างจุดตัดกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่จุดตัดไป จุดตัดเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลากเป็นเส้นตรงและใช้เป็นเส้นตรงสมมติสำหรับหาตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดบนแกนน้ำหนัก โดยจุดตัดของเส้นตรงนี้บนแกนน้ำหนักบรรทุกคือค่า Q_{un}

ข.วิธีของ Fuller & Hoy (1970) และ Butler & Hoy (1977)

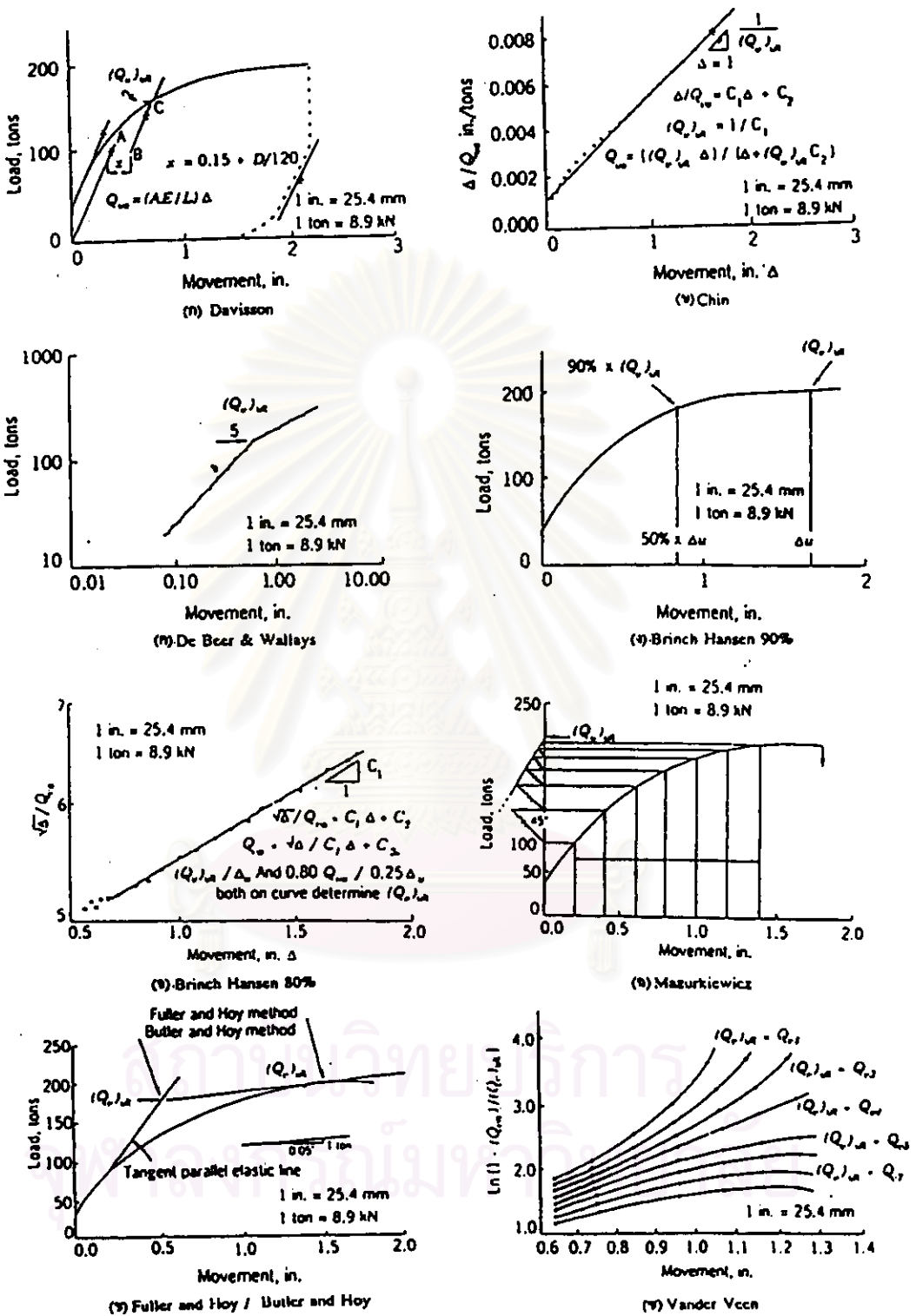
ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติตามวิธีของ Fuller & Hoy (1970) มีค่าเท่ากับค่าที่จุดที่เส้นสัมพันธ์ส่วนโค้งมีความลาดชัน 0.05 นิ้ว / ดัน (รูปที่ 2.17 ข.) สำหรับวิธีของ Butler & Hoy (1977) ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติมีค่าเท่ากับค่าที่จุดที่เส้นสัมพันธ์ส่วนโค้งมีความลาดชัน 0.05 นิ้ว / ดัน ตัดกับส่วนของเส้นตรงเริ่มต้นของส่วนโค้งหรือ เส้นขนานกับเส้น Rebound Curve หรือเส้นอิลาสติกเริ่มต้น รูปที่ 2.17 ข.

ข.วิธีของ Vander Veen (1953)

การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ หาโดยสมมุติค่า $(Q_v)_{ult}$ ที่ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \{(1-Q_v) / (Q_v)_{ult}\}$ กับ ค่าการทรุดตัวนั้นมีรูปแบบเป็นเส้นตรง ซึ่งค่าที่สมมุติจะเป็นค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ รูปที่ 2.17 ข.

รายละเอียดวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติจากการทดสอบในแต่ละวิธีจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 รูปแบบวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติจากการทดสอบเสาเข็ม (Fellenius, 1980)

2.6 การคาดคะเนการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวแบบอีลาสติกตามวิธีของ Poulos

การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธี Poulos & Davis (1980) อยู่บนพื้นฐานทฤษฎีอีลาสติก และการหาค่าคุณสมบัติของดินจากการทดสอบเสาเข็มซึ่งพิจารณาดินมีลักษณะ Homogenous โดยมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นระหว่างเสาเข็มกับดินรอบนอก (Soil-Pile Elastic Modulus ; E_s) และค่าอัตราส่วน Poisson (ν) คงที่ โดยแบ่งประเภทเสาเข็มออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.6.1 เสาเข็มเสียดทานด้านข้าง (Floating Pile)

เสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวซึ่งกำลังรับน้ำหนักบรรทุกส่วนใหญ่รับโดยแรงเสียดทานด้านข้างระหว่างผิวของเสาเข็มและดินรอบๆข้างจัดอยู่ในประเภทเสาเข็มเสียดทานด้านข้างหรือ เสาเข็มลอย (Floating Pile) ซึ่งการคาดคะเนการทรุดตัวสำหรับเสาเข็มเสียดทานด้านข้างสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{P I}{E_s \times d}$$

ที่ซึ่ง

ρ	=	ค่าการทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม
P	=	น้ำหนักที่ทำให้เกิดการทรุดตัว
E_s	=	Soil - Pile Modulus
d	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม
I	=	Influence Factor
	=	$I_0 \times R_x \times R_n \times R_v$
R_x	=	แฟคเตอร์ปรับแก้สำหรับความสามารถในการหดตัวของเสาเข็ม
R_n	=	แฟคเตอร์ปรับแก้สำหรับความหนาจำกัดของชั้นดินที่อยู่บนชั้น Rigid Base
R_v	=	แฟคเตอร์ปรับแก้สำหรับอัตราส่วน Poisson

ค่า I_0 , R_x , R_n และ R_v ได้แสดงในรูปที่ 2.18 ถึง 2.21 ตามลำดับ โดยค่าต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับการหาค่า E_s , L , d_b , K , h และ ν

เมื่อ

E_b	=	โมดูลัสของดินใต้ปลายเข็ม
d_b	=	diameter ที่ปลายเข็ม
L	=	ความยาวเสาเข็ม
h	=	ความหนาชั้นดินจากหัวเสาเข็มถึงชั้นดินที่ไม่ทรุดตัว
K	=	$E_p / (E_s \cdot R_A)$
E_p	=	อีลาสติกโมดูลัสของเสาเข็ม
R_A	=	$A_p / (\pi d^2 / 4)$
ν	=	Poisson ratio

2.6.2 เสาเข็มด้านทานที่ปลาย (End-Bearing Pile)

สำหรับเสาเข็มที่มีปลายฝังอยู่ในชั้นดินที่แข็งมากหรือสภาพแน่นมากจัดเป็นเสาเข็มด้านทานที่ปลาย (End - Bearing Pile) การคาดคะเนการทรุดตัวสำหรับเสาเข็มด้านทานที่ปลาย สามารถหาได้จากสมการดังนี้

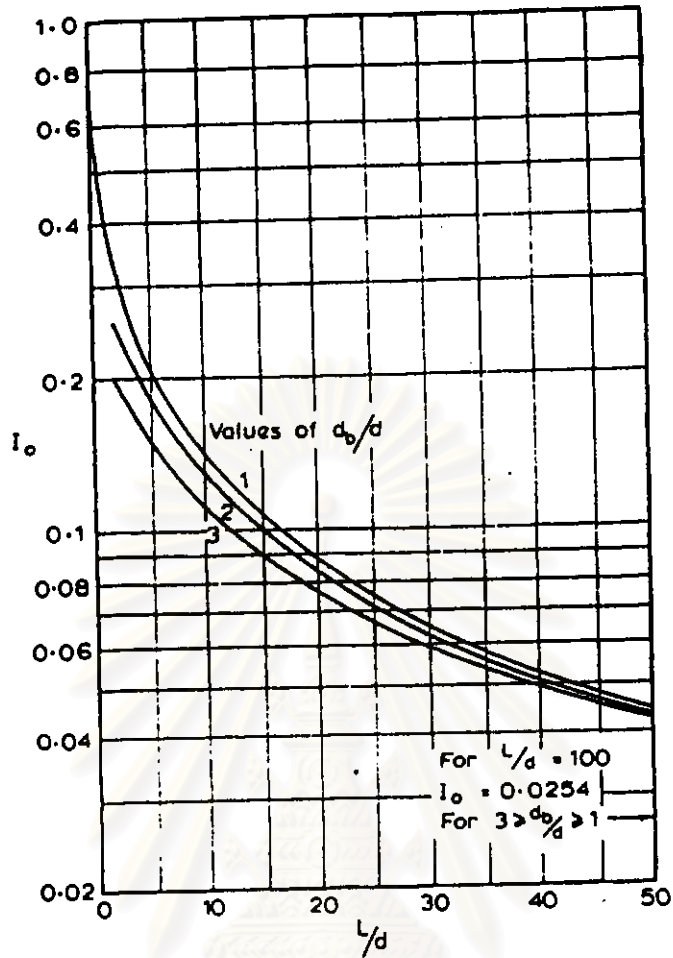
$$\rho = \frac{P I}{E_s \times d}$$

ที่ซึ่ง

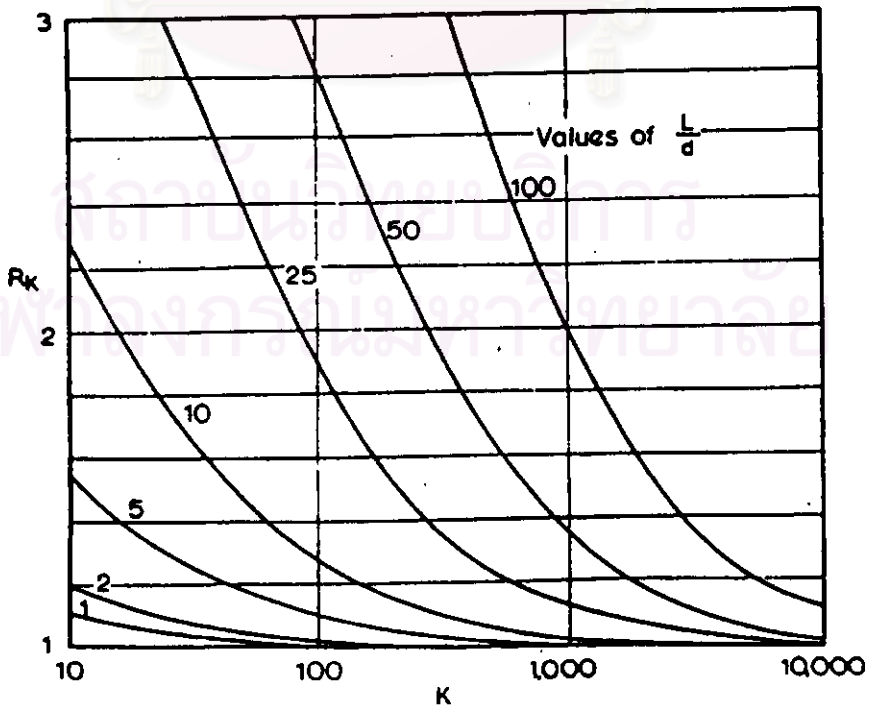
$$I = I_o \times R_k \times R_b \times R_v$$

$$R_b = \text{แฟคเตอร์ปรับแก้สำหรับความความแข็งของ bearing stratum (รูปที่ 2.22)}$$

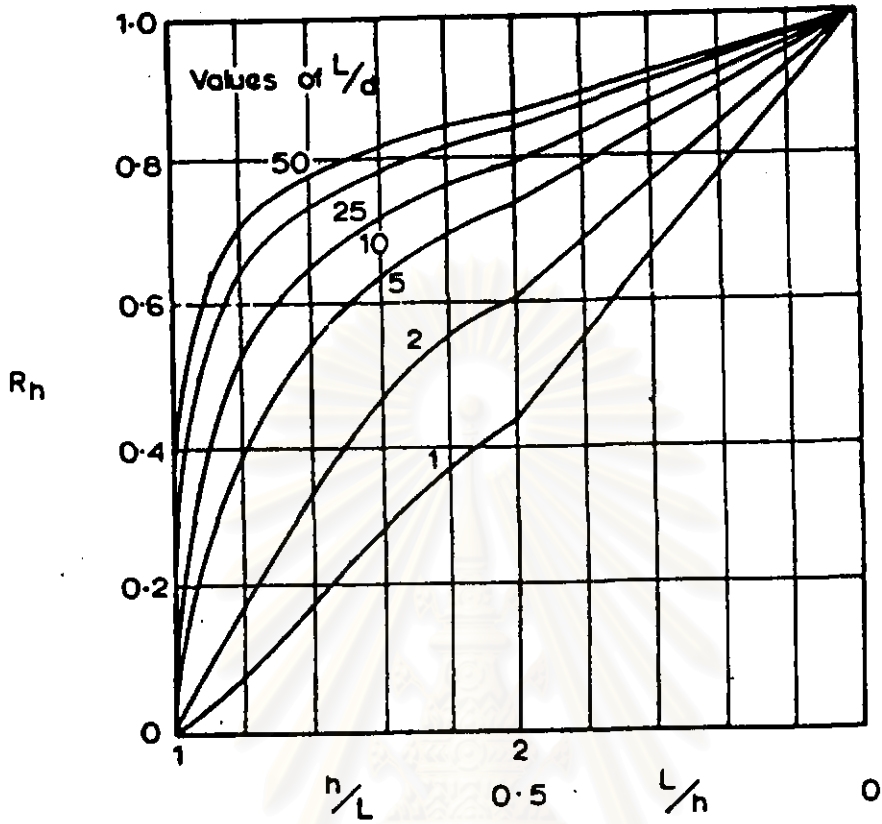
ค่า E_s สามารถหาได้จากการวิเคราะห์กลับ (Back Calculation) จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ Pimpasugdi (1989) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่า น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Working Load) สำหรับเสาเข็มเสียดทานด้านข้างหรือเสาเข็มที่มีปลายหยั่งในชั้นดินเหนียวและเสาเข็มด้านทานที่ปลายหรือเสาเข็มที่มีปลายหยั่งอยู่ในชั้นทรายดังแสดงในรูปที่ 2.23 และ 2.24 ซึ่งพบว่าค่า E_s ขึ้นอยู่กับชนิดและชั้นดินที่ปลายเสาเข็มตลอดจนขนาดของเสาเข็ม



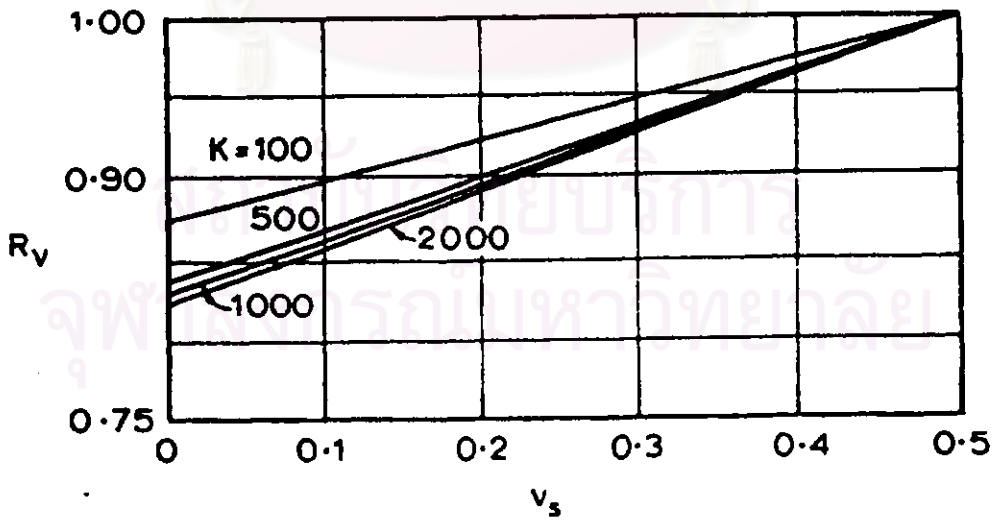
รูปที่ 2.18 Settlement Influence Factor, I_o (Poulos and Davis, 1980)



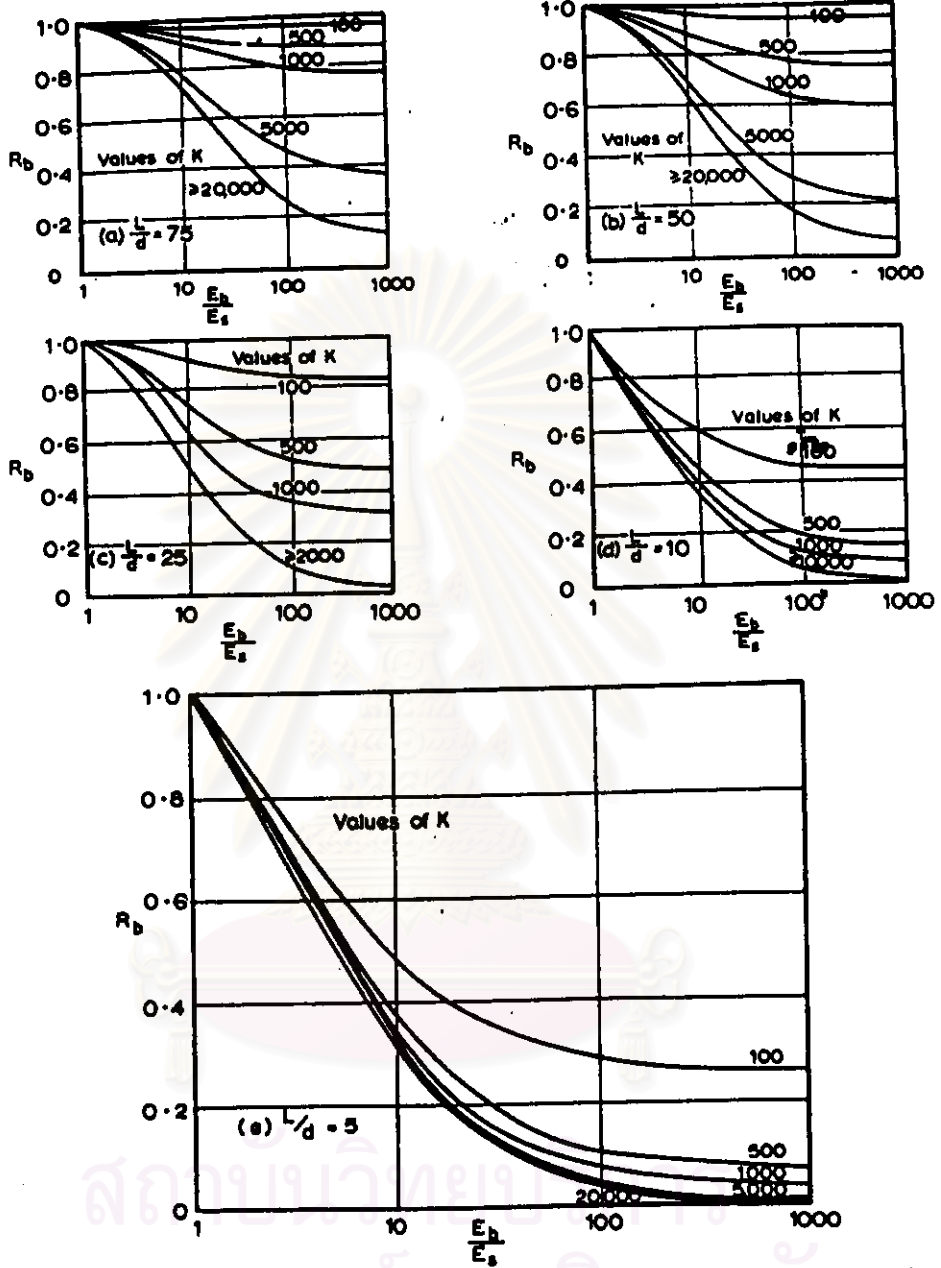
รูปที่ 2.19 Compressibility Correction Factor, R_k (Poulos and Davis, 1980)



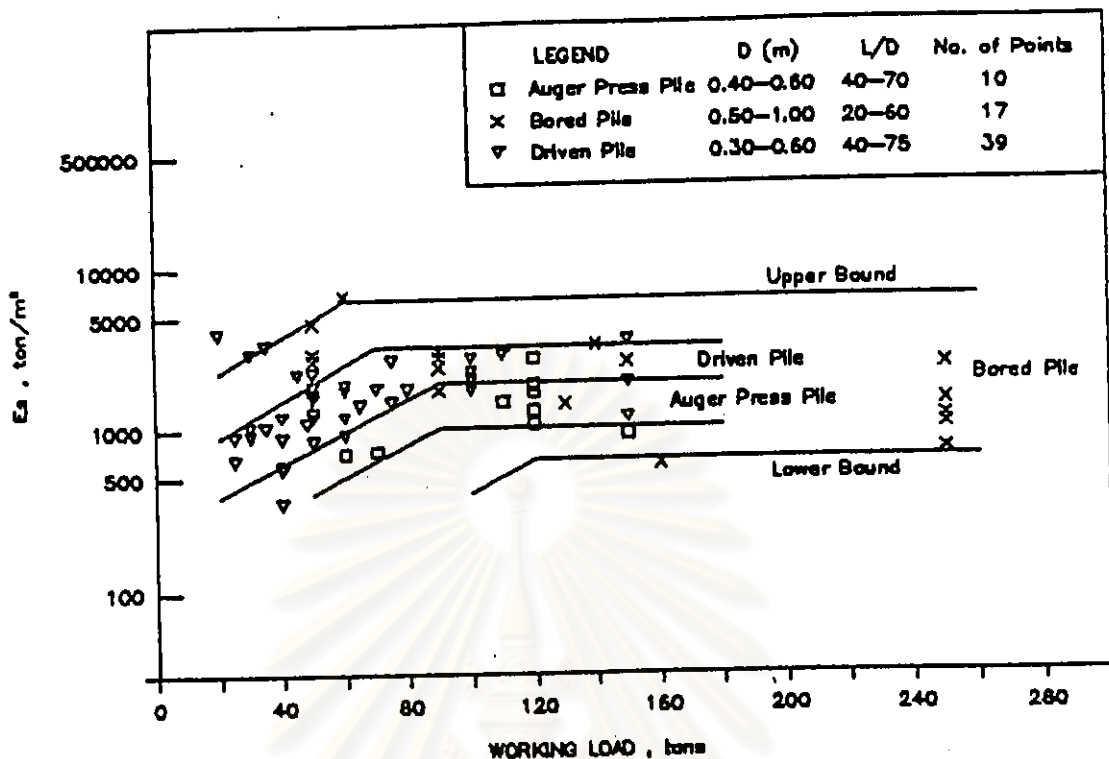
รูปที่ 2.20 Depth Correction Factor, R_n (Poulos and Davis, 1980)



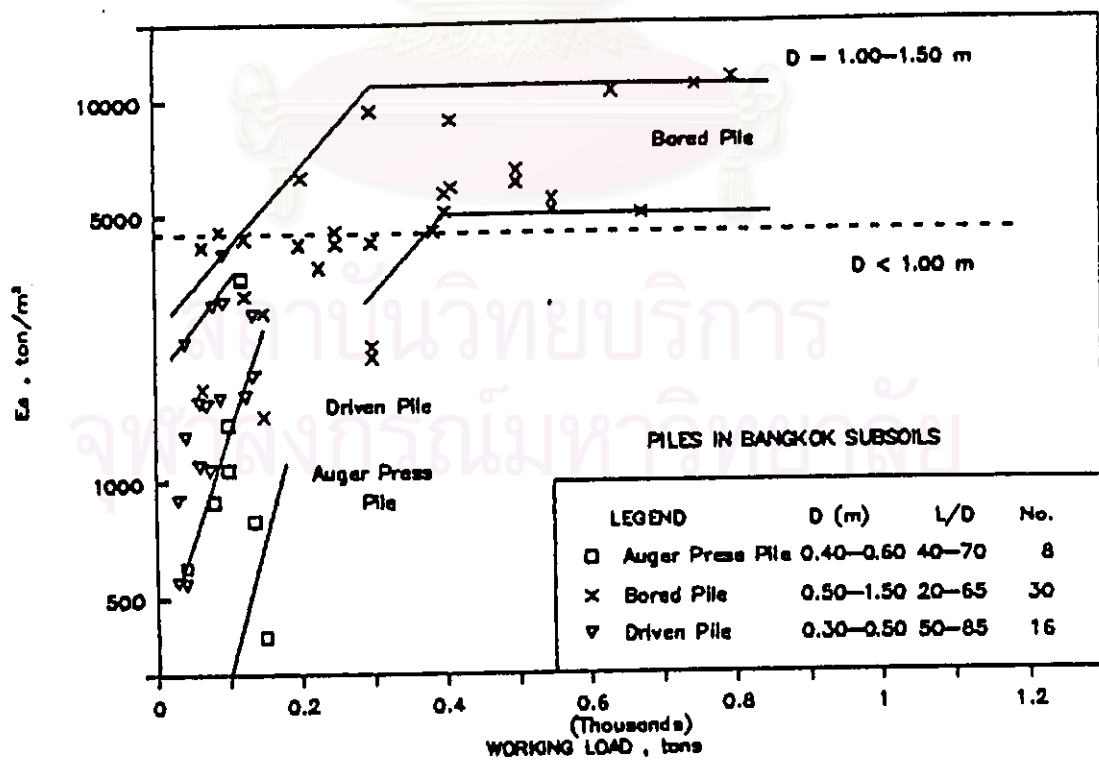
รูปที่ 2.21 Poisson's Ratio Correction Factor, R_v (Poulos and Davis, 1980)



รูปที่ 2.22 Base Modulus Correction Factor, R_b (Poulos and Davis, 1980)



รูปที่ 2.23 ค่า E_s สำหรับเสาเข็มที่มีปลายหยั่งอยู่ในชั้นดินเหนียว (Pimpasugdi, 1989)



รูปที่ 2.24 ค่า E_s สำหรับเสาเข็มที่มีปลายหยั่งอยู่ในชั้นทราย (Pimpasugdi, 1989)

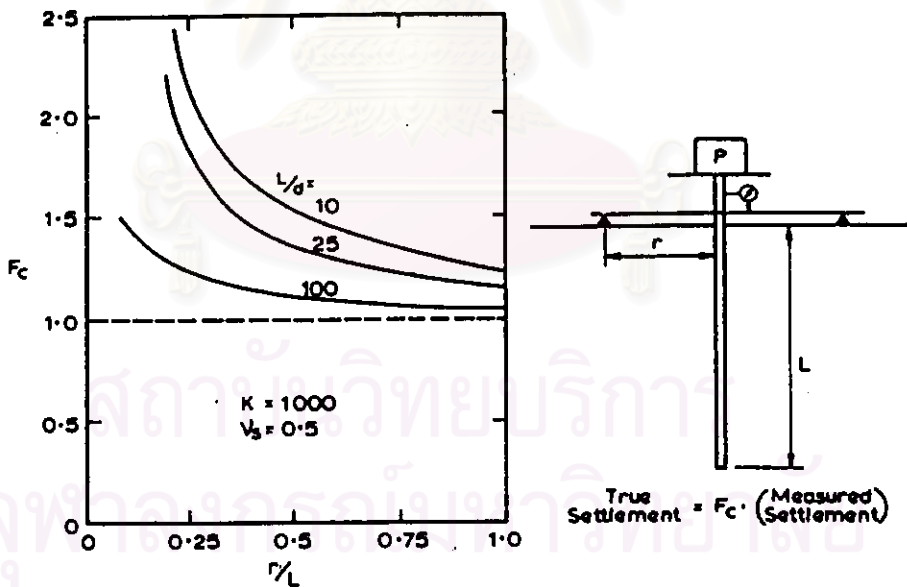
2.6.3 ตัวแปรที่มีผลต่อการคาดคะเนการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

Poulos & Mattes (1975) ได้ทำการศึกษาและตรวจสอบทางทฤษฎีซึ่งพบว่าตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกมีดังนี้

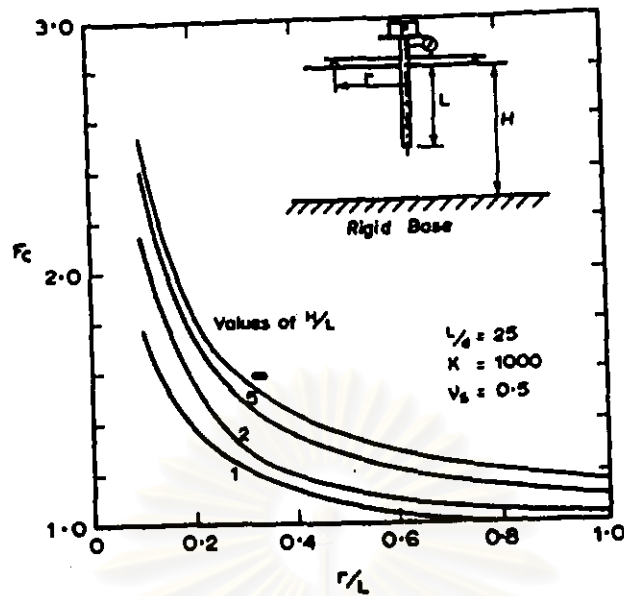
ก. การใช้คานอ้างอิงในการวัดค่าการทรุดตัว ในการเพิ่มน้ำหนักระหว่างการทดสอบ คานอ้างอิงจะเกิดการทรุดตัวไปด้วยทำให้การทรุดตัวที่ (ρ_m) วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ด้วยตัวปรับแก้ (F_c) ดังสมการ

$$\rho = F_c \times \rho_m$$

ค่า F_c แสดงในรูปที่ 2.25 และ 2.26 สำหรับเสาเข็มเสียดทานด้านข้าง



รูปที่ 2.25 ค่าแฟคเตอร์ปรับแก้, F_c สำหรับสำหรับเสาเข็มเสียดทานด้านข้างที่มีปลายเข็มในชั้นดินลึก (Poulos & Davis, 1980)



รูปที่ 2.26 ผลของความหนาชั้นดินที่มีต่อค่าแอมพลิจูดปรับแก้, F_c สำหรับเสาเข็มเสียดทาน ด้านข้างมีปลายเข็มในชั้นดินลึก (Poulos & Davis, 1980)

ข. การให้เสาเข็มสมอเป็นตัวต้านน้ำหนัก การเพิ่มน้ำหนักทดสอบทำให้เสาเข็มสมอที่รับแรงถึงเกิดการเคลื่อนตัวขึ้นด้านบน ซึ่งมีผลทำให้การทรุดตัวที่วัด (p_m) ได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ด้วยตัวปรับแก้ (α) ดังสมการ

$$p = \frac{p_m}{(1 - \alpha)}$$

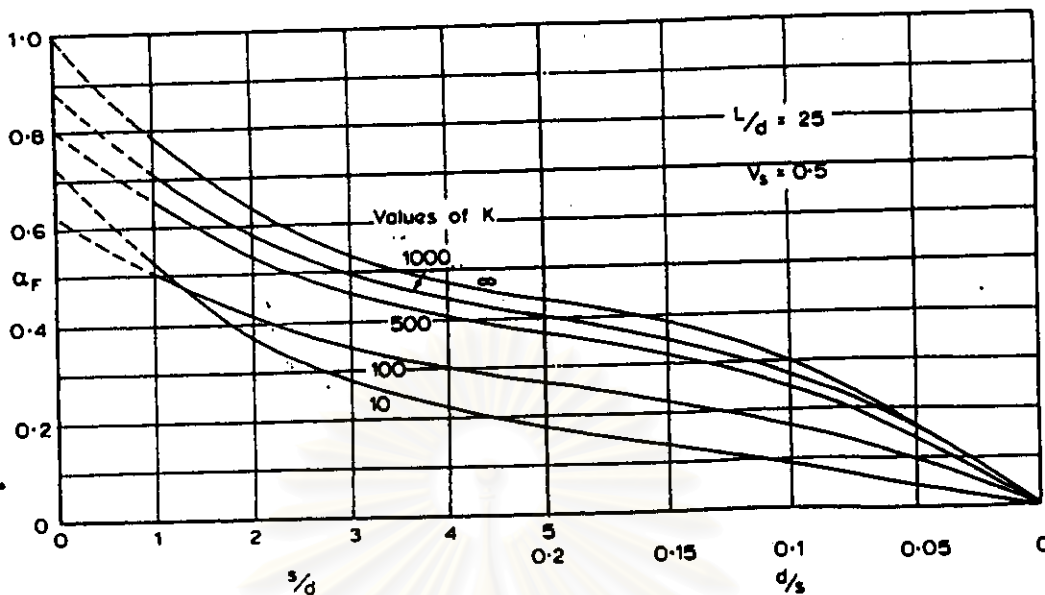
สำหรับเสาเข็มเสียดทานด้านข้าง ค่า α หาได้จาก

$$\alpha = \alpha_f \times N_h$$

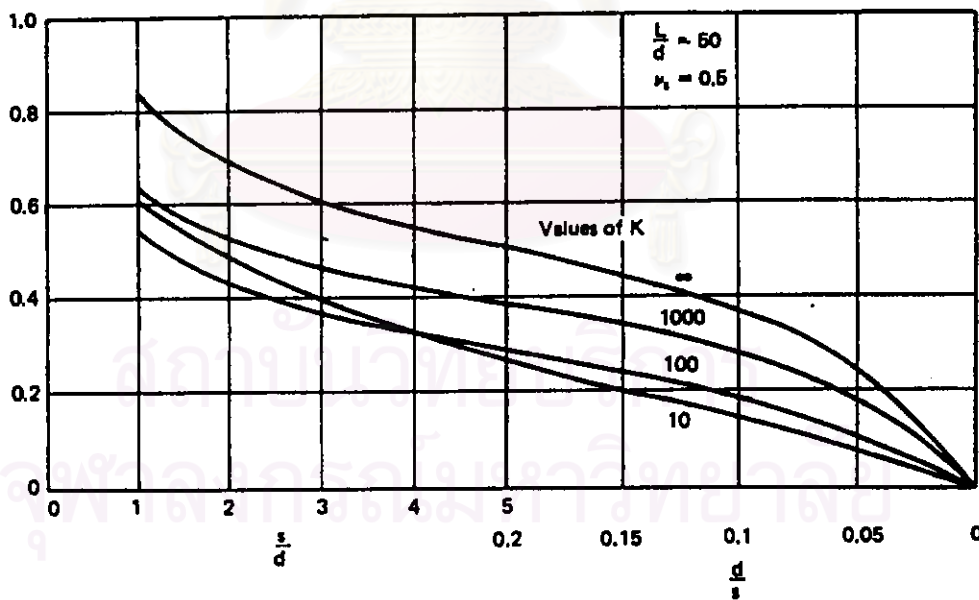
สำหรับเสาเข็มด้านทานที่ปลาย ค่า α หาได้จาก

$$\alpha = \alpha_f \times F_E (\alpha_f - \alpha_E)$$

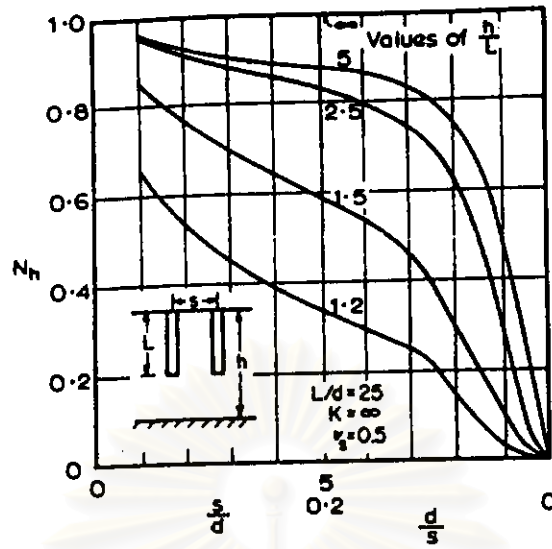
โดยที่ค่า α_f , N_h , F_E และ α_E แสดงในรูปที่ 2.27 ถึง 2.30



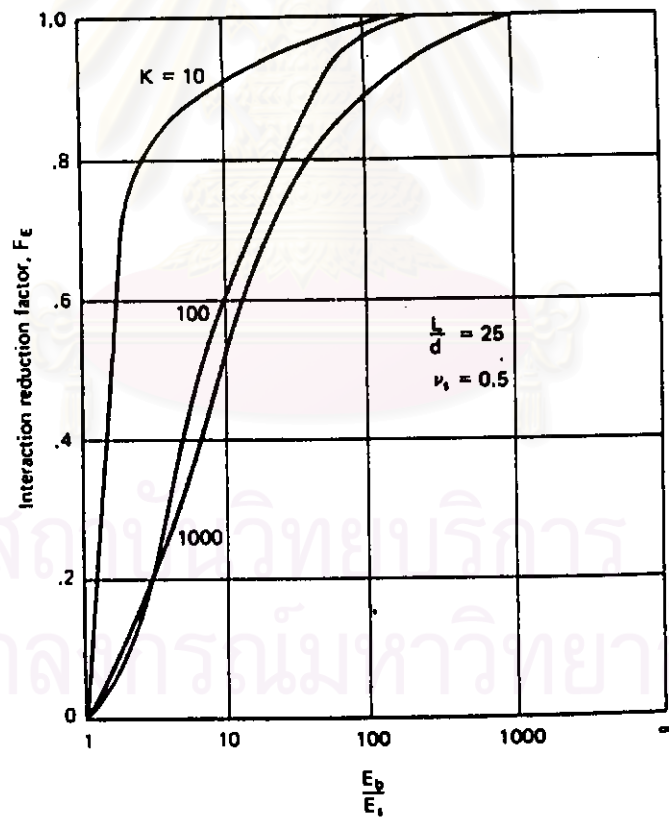
รูปที่ 2.27 ก ค่า Interaction Factor, α_F สำหรับเสาเข็มเสียดทาน
ด้านข้าง , $L/d = 25$ (Poulos & Davis, 1980)



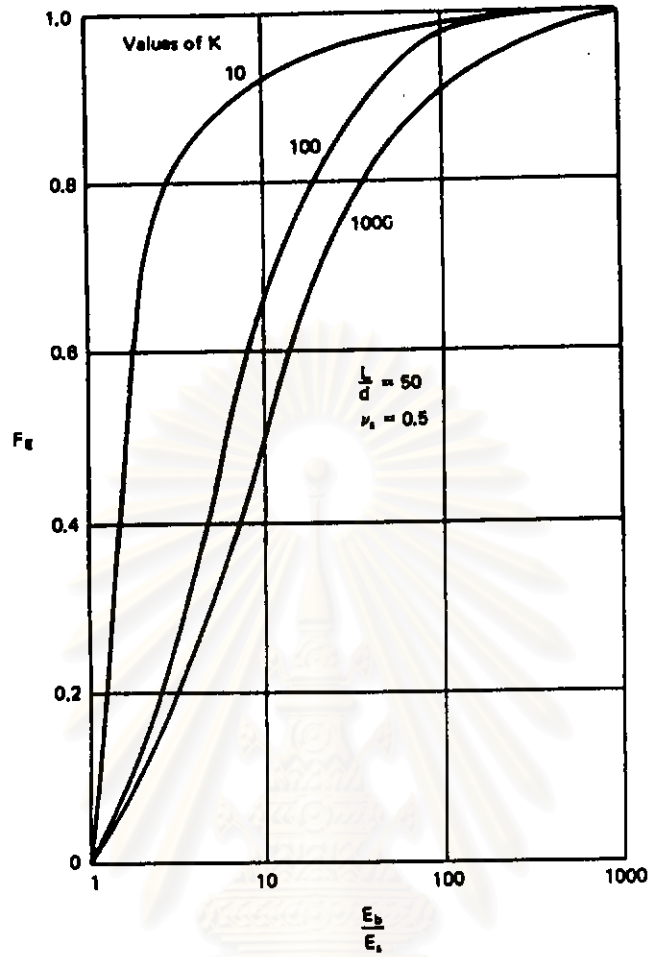
รูปที่ 2.27 ข ค่า Interaction Factor, α_F สำหรับเสาเข็มเสียดทาน
ด้านข้าง , $L/d = 50$ (Poulos & Davis, 1980)



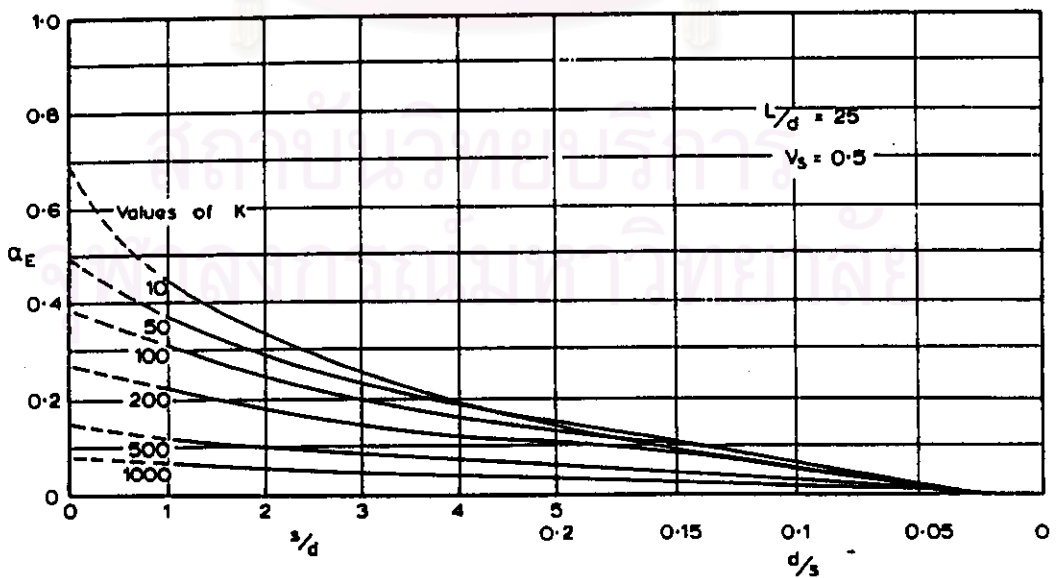
รูปที่ 2.28 Correction Factor, N_h (Poulos & Davis, 1980)



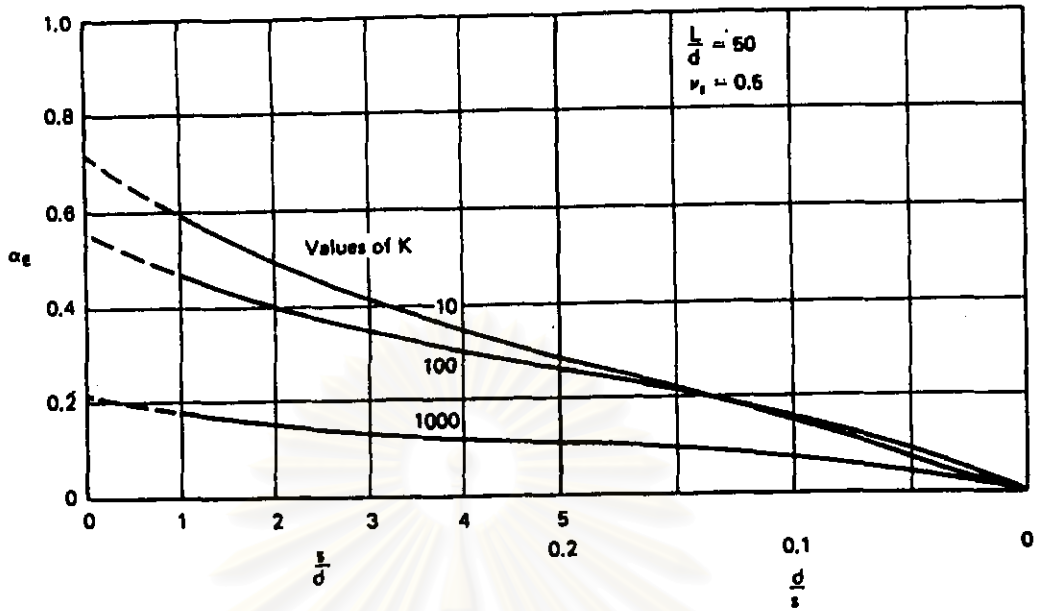
รูปที่ 2.29 ค่า Interaction Factor, F_E (Poulos & Davis, 1980)



รูปที่ 2.29 ก. ค่า Interaction Factor, F_E (Poulos & Davis, 1980)



รูปที่ 2.30 ก. ค่า Interaction Factor, α_E สำหรับเสาเข็มด้านทาน
ที่ปลาย, $L/d = 25$ (Poulos & Davis, 1980)



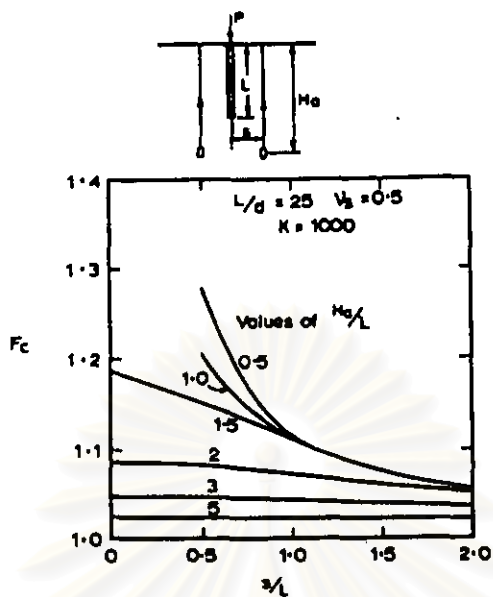
รูปที่ 2.30 ข. ค่า Interaction Factor, α_e สำหรับเสาเข็มด้านทาน
ที่ปลาย , $L/d = 50$ (Poulos & Davis, 1980)

ค.การใช้ Ground Anchors เป็นตัวต้านน้ำหนัก การเคลื่อนที่ขึ้นของ Ground Anchors แต่ละข้างจะทำให้ลดค่าการทรุดตัวที่วัดได้ (p_m) โดยค่าการทรุดตัวจริงที่เกิดขึ้น (p) สามารถหาได้จาก

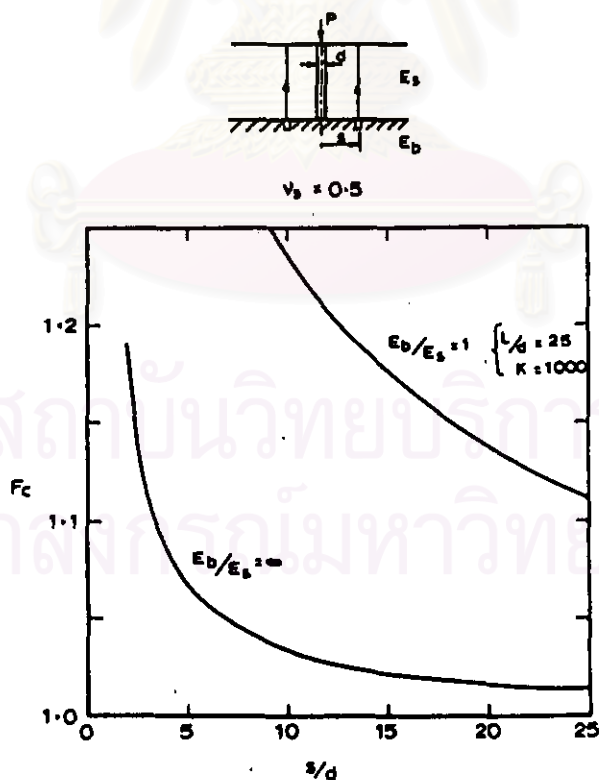
$$p = F_c \times p_m$$

ค่า F_c แสดงในรูปที่ 2.31

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.31 ก. ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้, F_c สำหรับกรณีการใช้ Ground Anchors เป็นตัวต้านน้ำหนัก สำหรับเสาเข็มเสียดทานด้านข้าง (Poulos & Davis, 1980)



รูปที่ 2.31 ข. ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้, F_c สำหรับกรณีการใช้ Ground Anchors เป็นตัวต้านน้ำหนัก สำหรับเสาเข็มด้านทานที่ปลาย (Poulos & Davis, 1980)