

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สภาพชั้นดินกรุงเทพฯ

ชั้นดินกรุงเทพฯเป็นดินตกตะกอน (Transported Soil) ชนิด Marine และ Alluvial ซึ่งเป็นแบบ Terrestrial Deposit (การตกตะกอนจากน้ำหรือสิ่งพัดพาจากพื้นดิน) เป็นส่วนหนึ่งของชั้นดินที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ตัวเมืองกรุงเทพฯตั้งอยู่บนสองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยอยู่ห่างจากทะเลฝั่งอ่าวไทยประมาณ 20 กิโลเมตร ความยาวเฉลี่ยจากเหนือถึงใต้และจากตะวันออกไปถึงตะวันตกประมาณ 250 และ 200 กิโลเมตร ตามลำดับ พื้นที่รวมประมาณ 53,400 ตารางกิโลเมตร (ว.ส.ท. 2520)

2.1.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

ชาญชัย (2542) ได้รวบรวมและสรุปลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ แต่ละชั้นจากผิวดินดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. ดินชั้นบน (Top Soil or Weathered Bangkok Clay) มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทาและน้ำตาล มีความหนาประมาณ 1-4 เมตร มักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งปานกลาง เนื่องจากดินชั้นนี้ถูกแปรสภาพมาก ในบริเวณส่วนใหญ่ของกรุงเทพฯ ใกล้ปากอ่าวจะไม่ค่อยพบดินชั้นนี้

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) เป็นดินเหนียวแข็งชั้นแรก สีเทาและน้ำตาลที่มีความหนาประมาณ 5-10 เมตร ความหนาจะน้อยในบริเวณทาง

เหนื่อและตะวันตงของส่วนกลางกรุงเทพฯ ค่าปริมาณความชื้นประมาณ 20-30% และ S_u ค่าประมาณ 5-15 ตันต่อตารางเมตร

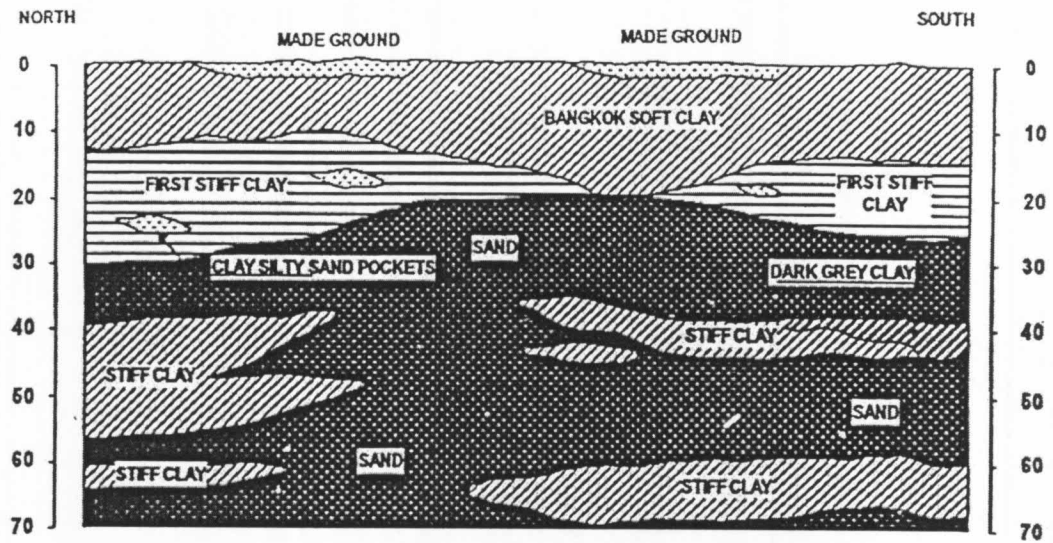
ง. ชั้นทรายชั้นแรก (First Silty Sand Layer) จะพบที่ความลึกประมาณ 22-25 เมตร โดยมีความหนาไม่แน่นอนกล่าวคือมีความหนาประมาณ 5-15 เมตร ทรายชั้นนี้เป็นทรายเม็ดละเอียด ในบางพื้นที่อาจพบดินเหนียวหรือ Silt ปนอยู่บ้าง

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)		W _n %	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	1.60-1.80	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	1.65-1.95	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	2.70-2.80



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,1999)

2.1.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ

ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

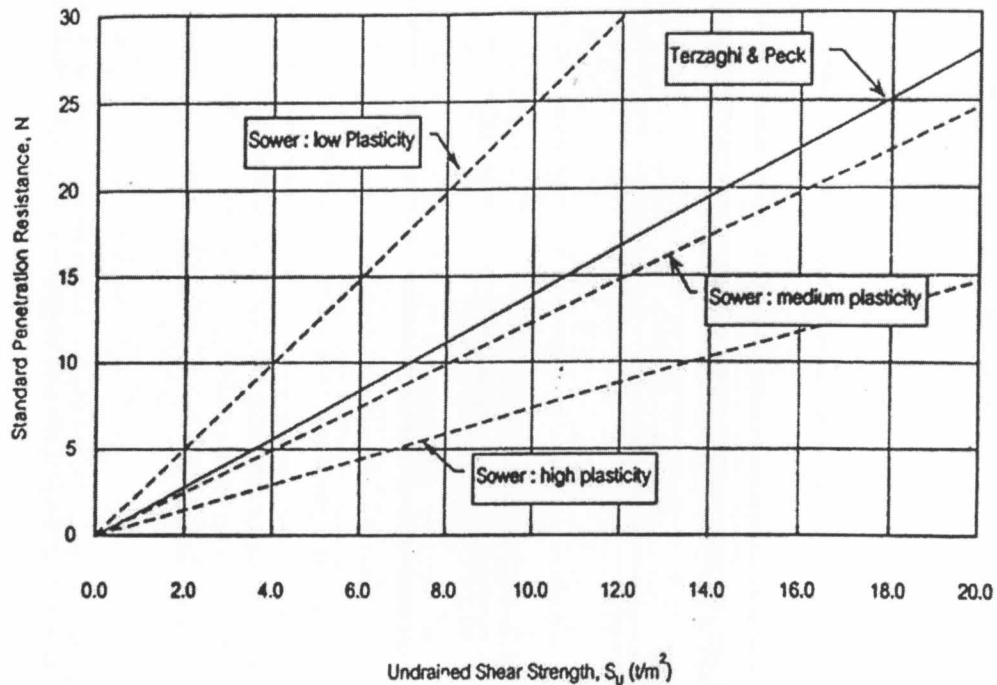
- ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo})
- ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain Shear Strength; S_u) สำหรับชั้นดินเหนียว
- ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ) สำหรับชั้นทราย

เนื่องจากลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดินในแต่ละสถานที่จะไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์แบบ Empirical ที่ไม่มีรากฐานมาจากทฤษฎีซึ่งจะใช้ได้เฉพาะแห่งเป็นส่วนใหญ่ สำหรับดินกรุงเทพฯ ได้เคยมีการวิจัยค่าต่างๆ ไว้ดังนี้

ก. ดินเหนียว

ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test) และการทดสอบในสนาม (Field Vane Shear Test) แต่โดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า S_u จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined

Compression Test) หรือการใช้ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า N จากการทดสอบ SPT กับ S_u ที่เสนอโดย DM 7.1 (รูปที่ 2.2)



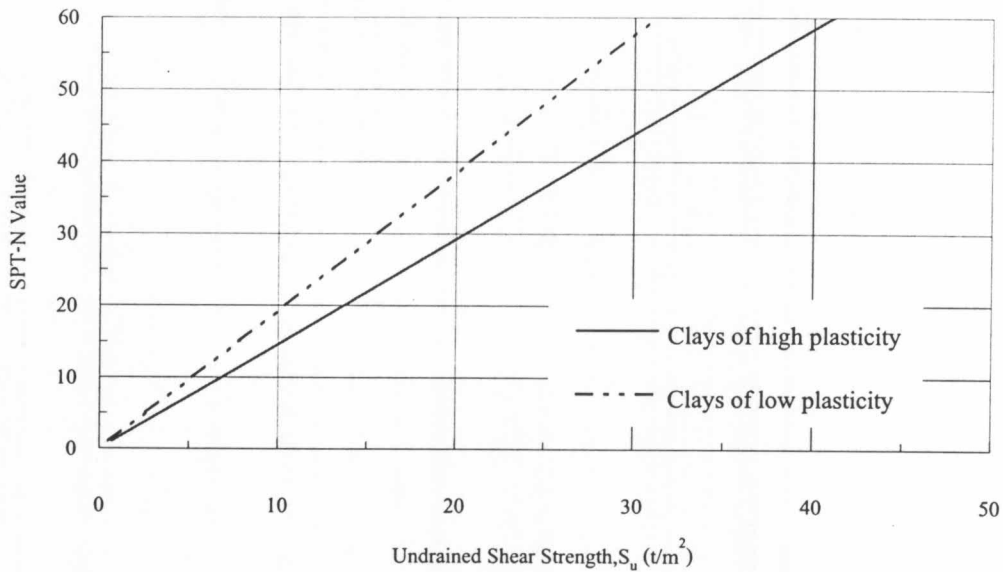
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (DM 7.1)

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

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

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

N วัดในค่าจำนวนครั้งต่อฟุต โดยการจำแนกดินเหนียวใช้ระบบ Unified Soil Classification และค่า N ที่ใช้เป็นค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้และควรจะมีค่ามากกว่า 8



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u (วีระนันท์, 2526)

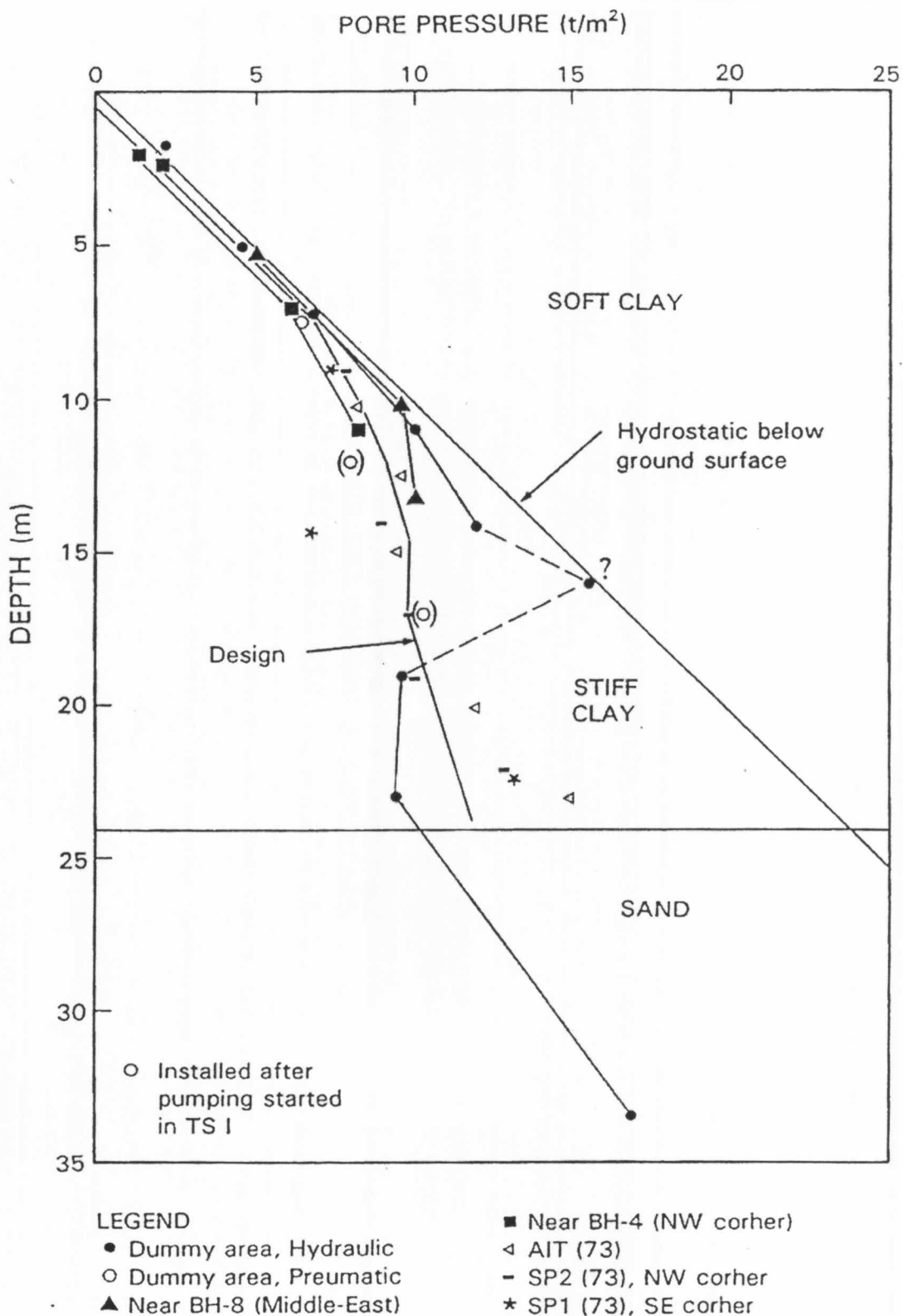
ข.ทราย

ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับดินทราย คือ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo}) และค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ) สำหรับการวิจัยครั้งนี้จะพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในบริเวณชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งมีผลทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินเปลี่ยนแปลงไปจากในอดีต

- ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure; σ'_{vo})

ในการคำนวณค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดิน ณ จุดที่พิจารณานั้น จำเป็นต้องทราบค่าหน่วยน้ำหนักรวมของมวลดิน (Total Unit Weight) โดยหาค่าได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และค่าความดันน้ำ (Pore Pressure) ณ ความลึกที่พิจารณา ซึ่งหาค่าได้โดยการวัดในสนามหรือหาจากความสัมพันธ์แบบ Empirical ตามที่เคยมีผู้วิจัยไว้ในอดีต

จากข้อมูลการวัดค่าแรงดันน้ำใต้ดินในพื้นที่โครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิที่ทำการศึกษาโดยความร่วมมือระหว่างบริษัท เอส ที เอส เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด กับ Norwegian Geotechnical Institute (NGI) พบว่า ผลกระทบจากการสูบน้ำบาดาลในชั้นดินกรุงเทพฯ ทำให้แรงดันน้ำใต้ดินลดลงแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แรงดันน้ำใต้ดินบริเวณโครงการก่อสร้างสนามบินสุวรรณภูมิ (STS & NGI,1992)

- ค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (Angle of Internal Friction; ϕ)

สำหรับทรายจะใช้ในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ') การหาค่ามุม ϕ' สามารถหาได้จาก การทดสอบ 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) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า Correction Factor ซึ่งใช้เป็นค่าปรับแก้เนื่องจากผลของ σ'_{vo} ที่ระดับความลึกที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีสมการการปรับแก้ดังนี้

$$N' = C_N \times N$$

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

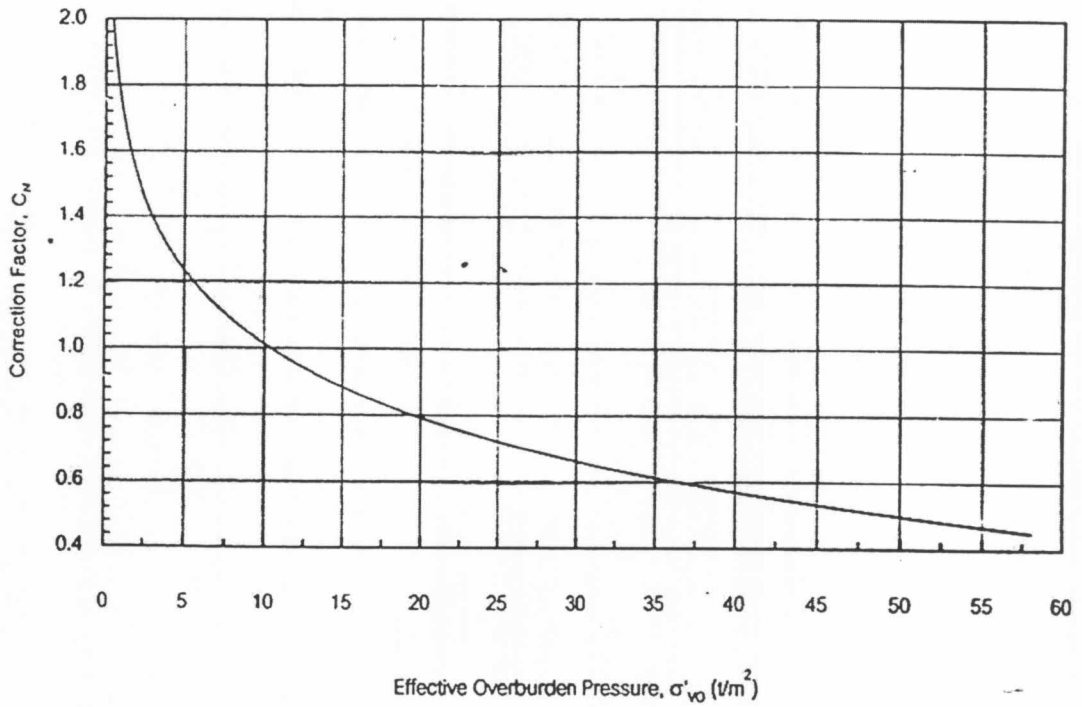
โดยที่

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

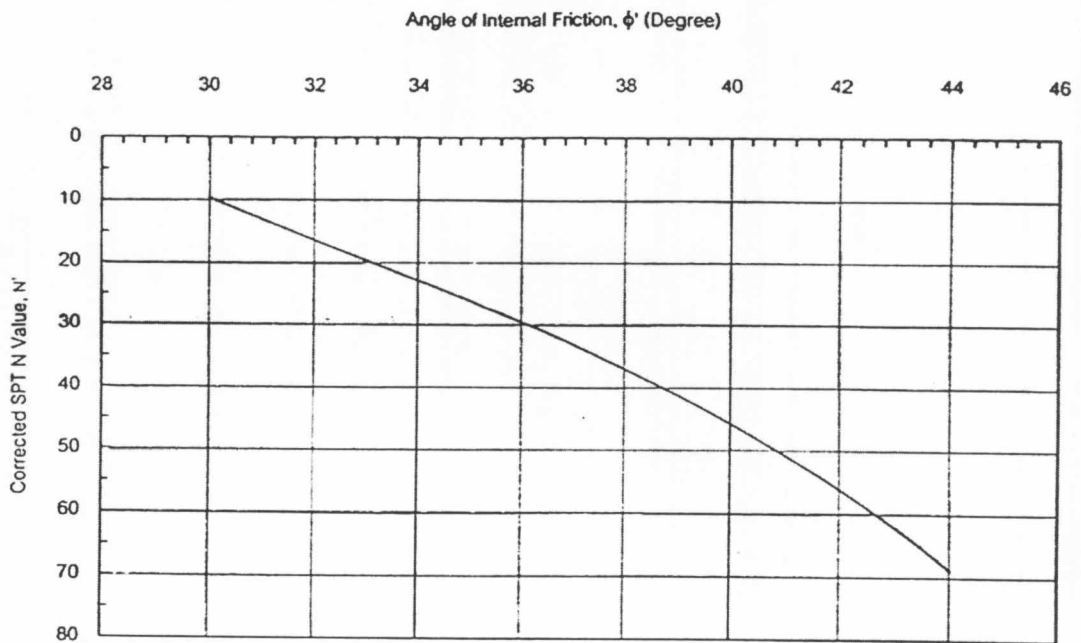
$$C_N = \text{ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของ } \sigma'_{vo}$$

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

สำหรับชั้นทรายกรุงเทพฯ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินทรายปนดินแป้ง (Silty Sand, SM) จากผลการศึกษาของ Thanudkleung (1987) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ϕ' กับค่า N' ของดินกรุงเทพฯ ที่ได้มีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Peck , Hanson & Thornburn (1974) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งค่า N' เป็นค่า N ที่ปรับแก้มาจากรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_N กับค่า σ'_{vo} (Peck , Hanson & Thornburn ,1974)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N' (SPT) กับค่า ϕ' (Peck , Hanson & Thornburn ,1974)

2.2 ชนิดของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยและเทคนิคการก่อสร้าง

ในปัจจุบันการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มได้มีการนำเสาเข็มเจาะ (Bored Pile) มาใช้แทนเสาเข็มตอก (Driven Pile) มากขึ้นเนื่องด้วยเหตุผลหลายประการได้แก่ สามารถทำในพื้นที่หรือความสูงจำกัด, ลดแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากการตอกเข็ม, ลดปัญหาการทรุดตัวของดินในบริเวณข้างเคียง, ลดเสียงรบกวนต่อผู้อยู่อาศัยข้างเคียง, สามารถขยายขนาดเสาเข็มเจาะ เพื่อให้รับน้ำหนักปลอดภัยได้เหมาะสมกับน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการ, ดินที่ถูกเจาะและนำขึ้นมา สามารถตรวจสอบได้ว่าแตกต่างไปจากข้อมูลที่เจาะสำรวจไว้หรือไม่และไม่จำกัดความยาวของเสาเข็ม สามารถเจาะให้ลึกเพื่อให้ปลายเข็มวางอยู่ในชั้นดินหรือทรายที่มั่นคงแข็งแรง ทั้งนี้เสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเสาเข็มเจาะ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 เสาเข็มเจาะ (Bored Pile)

การทำเข็มเจาะทั้งใน Cohesive Soil และ Cohesionless Soil นั้นทำให้มวลดินในบริเวณใกล้เคียงถูกรบกวนน้อยกว่าในเข็มตอกและ Total Horizontal Stress (σ_h) ก็จะลดลงแทนที่จะเพิ่มขึ้นแบบเข็มตอก ด้วยเหตุนี้กำลังเสียดทาน (Skin Friction) และกำลังแรงดันที่ปลายเข็ม (End Bearing) ของเข็มเจาะ จึงน้อยกว่าเข็ม ตอกการที่ขุดเอาดินออกก็ทำให้ Total Vertical Stress (σ_v) ที่ปลายเข็มลดลงไป ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงใน Effective Stress ในดินและการขยายตัวของดิน(เฉพาะทราย) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอันหนึ่งที่ทำให้กำลังต้านที่ปลายเข็มน้อยกว่าเข็มตอก การที่ทำให้ Stress ในดินลดลง ผลก็คือกำลังรับน้ำหนักของเข็มเจาะอาจลดลงไปกับเวลา

ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มนั้น วิศวกรจำเป็นต้องคิดถึงวิธีการทำเข็มเจาะด้วย ในการทำเข็มเจาะใน Cohesionless Soil นั้น ถ้า Effective Stress ใน Soil ทั้งด้านข้างและที่ก้นหลุมลดลงไปมาก ๆ หรือถ้าเกิดการพังทลายหรือ Relative Density ลดลง กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มก็จะลดลง ส่วนใน Cohesive Soil กำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มจะลดลงเมื่อการทำเข็มเจาะทำให้เกิด Remolding Action ขึ้นมาก ๆ การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะก็ทำได้เช่นเดียวกับการคาดคะเนสำหรับเสาเข็มตอก แต่ Soil Parameter ที่ใช้จะต่างกันสำหรับดินชนิดเดียวกันหรือที่ Site เดียวกัน

เสาเข็มเจาะสามารถแบ่งออกได้ตามระบบการก่อสร้าง โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบเสาเข็มเจาะแบบแห้ง (Dry Process) และระบบเสาเข็มเจาะแบบเปียก (Wet Process) กล่าวคือในกรณีที่ต้องการให้ปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นดินแข็งที่ไม่ถึงชั้นทรายชั้นที่หนึ่งก็สามารถใช้

ระบบแห้ง โดยใช้ปลอกเหล็กชั่วคราว (Casing) ป้องกันเพียงดินชั้นอ่อน เสาเข็มระบบนี้ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือประเภท เครื่องเจาะแบบสามขา (Tri - Pod Rod) ซึ่งในกรุงเทพฯ มักจะใช้ก่อสร้างเสาเข็มที่รับน้ำหนักไม่มากนัก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35-0.60 เมตร และเจาะได้ลึกประมาณไม่เกิน 23.00 เมตร

เสาเข็มเจาะระบบเปียก โดยทั่วไปจะเป็นเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ที่มีปลายหยั่งลงในชั้นทรายแน่นชั้นที่หนึ่งหรือชั้นที่สอง โดยการเจาะในชั้นทรายใช้สารละลายเบนโทไนท์ (Bentonite Slurry) หรือสารละลายโพลิเมอร์ผสมสารละลายเบนโทไนท์เป็นตัวช่วยด้านมิให้ผนังหลุมเจาะเกิดการพังทลาย เสาเข็มเจาะระบบเปียกนิยมใช้ระบบ Rotary Drill (R.D.) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้แพร่หลายทั่วโลก ในกรุงเทพฯ มักจะใช้ในงานก่อสร้างอาคารสูง และสะพานขนาดใหญ่ โดยมักจะใช้ก่อสร้างเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80, 1.00, 1.20 และ 1.50 เมตร ที่รับน้ำหนักปลอดภัยประมาณ 300-1000 ตัน ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเสาเข็มที่ใช้

ในการทำเสาเข็มเจาะข้อควรระวังใหญ่ ๆ มี 3 ประการคือ

ก. Stability ของ Side Wall ของเข็ม เพื่อป้องกันการพังทลายของดินทางด้านข้าง ผู้ทำเสาเข็มอาจใช้ Casing หรือ Bentonite Slurry ใส่ลงไปหลุมเพื่อแก้ปัญหา

ข. Upheave ที่กั้นหลุม วิธี Minimize ปัญหานี้คือการเติม Bentonite Slurry ลงไป Bentonite Slurry เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในกรณีที่ดินกั้นหลุมเป็นทราย เพื่อป้องกันมิให้เกิด Quick Condition ในทราย อย่างไรก็ตาม ไม่มีทางใดที่จะป้องกันไม่ให้ทรายที่กั้นหลุมหลวมได้

ค. การเทคอนกรีต ต้องไม่เทคอนกรีตแทนที่ Bentonite จนกว่าจะแน่ใจว่ากั้นหลุมสะอาดและไม่มี Local Failure ในดินทางด้านข้างซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เมื่อขุดหลุมทิ้งไว้นาน ๆ การเทควรพยายามไม่ให้ Concrete แยกตัวและควรมีวิธีการตรวจสอบสมบัติของคอนกรีตที่เทไปแล้วว่ามีดินมาปนหรือไม่ เช่น การ Core เอา Concrete ขึ้นมาทดสอบหรือทำ Indirect Test เช่น Sonic Test Method การตรวจความสะอาดกั้นหลุมและตรวจสอบสมบัติของ Bentonite ควรทำหลังจากที่ใส่ Reinforced Steel Cage แล้ว

ขั้นตอนการก่อสร้างโดยสังเขปสำหรับเสาเข็มเจาะระบบเปียกระบบ Rotary Drill (R.D.) มีดังนี้

1. ทำการลงปลอกเหล็กชั่วคราว Casing เพื่อป้องกันชั้นดินอ่อนซึ่งสำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ปกติจะใช้ปลอกเหล็กยาวประมาณ 15.0 เมตร
2. ขุดเจาะดินภายในปลอกเหล็กโดยใช้สว่าน (Auger) เป็นตัวเจาะจนถึงระดับก่อนถึงชั้นทราย

3. เติมน้ำสารละลายเบนโทไนท์หรือสารละลายโพลีเมอร์ผสมสารละลายเบนโทไนท์ลงในหลุมเจาะแล้วทำการเจาะต่อโดยใช้หัวเจาะแบบถัง (Bucket)
4. เมื่อเจาะจนถึงระดับที่ต้องการแล้วจึงทำความสะอาดก้นหลุม
5. ลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตผ่านท่อเท (Trimie)
6. ทำการถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออก

2.2.2 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

โดยทั่วไปแล้วการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจะเป็นไปในลักษณะของ Top Load Testing หรือ Conventional Static Load Test แต่ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอวิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มอีกวิธีมาใช้คือ Bi-Directional Static Load Test ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และข้อจำกัดในการทดสอบ

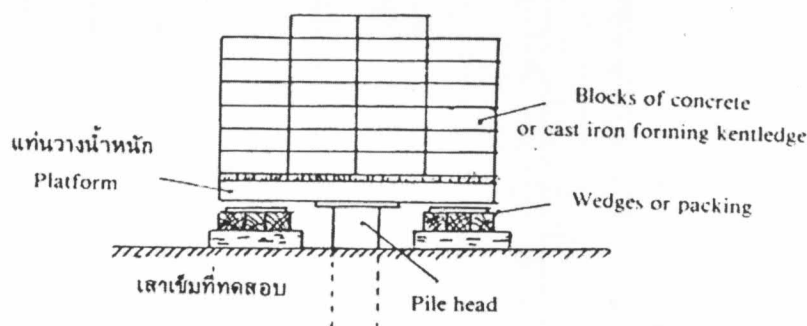
ก. เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test แบ่งประเภทของการให้น้ำหนักได้เป็น 3 ระบบดังนี้

- 1) ระบบที่ 1 เป็นระบบ Kentledge Method คือ ทำแท่นไว้บนหัวของเสาเข็มที่ซึ่งสามารถใช้สำหรับวางวัตถุหนักๆ เป็นจำนวนมากได้ การวางน้ำหนักลงบนแท่นต้องทำด้วยความระมัดระวังเพื่อให้ศูนย์กลางของน้ำหนักลงตรงกลางตามแนวแกนของเสาเข็ม ในทางปฏิบัติวิธีนี้อาจทำได้ยาก วิธีการให้น้ำหนักของระบบนี้ค่อนข้างลำบากและเชื่อถือไม่ได้ ดังนั้นจึงไม่ได้รับความนิยมมากนัก เพราะการเสียน้ำหนักของน้ำหนักอาจจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดในเสาเข็มได้
- 2) ระบบที่ 2 เป็นระบบ Kentledge Method เช่นเดียวกับระบบที่ 1 แต่จะให้น้ำหนักด้วยแม่แรงโดยมีโครงเหล็กบรรทุกน้ำหนักเป็นตัวยัน โครงเหล็กตัวยันมีลักษณะเป็นสะพานพาดข้ามหัวของเสาเข็มและวางอยู่บนไม้หมอนซึ่งเป็นที่รองรับชั่วคราวขณะที่แม่แรงยังไม่ทำงาน ไม้หมอนนี้จะต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสดินเพียงพอสำหรับการกระจายน้ำหนักไม่ให้เข็มขยับเกินกำลังของดินที่รองรับอยู่น้ำหนักสำหรับยันหัวแม่แรงปกตินิยมใช้แท่งเหล็กหรือแท่งคอนกรีตหลายๆ แท่งในบางครั้งเพื่อความสะดวกในการขนถ่ายน้ำหนักอาจใช้น้ำบรรจุใส่ถังเหล็กเพื่อใช้เป็นน้ำหนักยันหัวแม่แรงได้ น้ำหนักที่กล่าวมานี้ไม่ใช่ตัวให้แรงในเสาเข็มแรงที่กระทำบนเสาเข็มจริงๆ นั้นเกิดจากกำลังของแม่แรงไฮดรอลิกซึ่งติดตั้งไว้บนหัวของเสาเข็มโดยตรงพร้อมทั้งมีเกจสำหรับวัดการทรุดตัวระหว่างเวลาที่

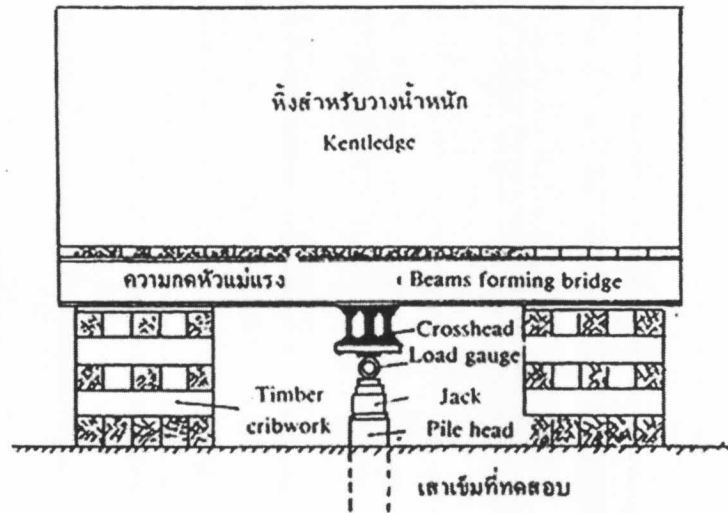
แม่แรงทำงาน ในบางครั้ง แรงดันของแม่แรงอาจจะสูงมากพอๆ กับน้ำหนักของ โครงเหล็กที่บรรจุน้ำหนักอยู่เต็ม ดังนั้นจะต้องแน่ใจว่าแม่แรงไม่ถูกใช้งานเกิน กว่าน้ำหนักที่กดแม่แรงไว้

- 3) ระบบที่ 3 เป็นระบบที่ใช้เข็มสมอยึดคานกดหัวแม่แรง ระบบการให้น้ำหนักแก่เสาเข็มแบบนี้เหมือนกับระบบที่ 2 คือใช้แม่แรงแตกต่างกันที่ระบบนี้ใช้สมอเป็น เครื่องยึดคานกดหัวแม่แรง แทนที่จะใช้น้ำหนักวางไว้บนคานสมอนี้โดยปกติทำ ด้วยเสาเข็มธรรมชาติขนาดโตพอต้านทานแรงดึงได้ และฝังอยู่สองข้างของเสาเข็ม ที่ต้องการทดสอบ โดยมีระยะห่างกันพอสมควร ระหว่างเสาเข็มสมอ 2 ชุดนี้ มี คานแข็งแรงพาดอยู่เหนือหัวของเสาเข็มที่ต้องการทดสอบ ปลายสุดทั้งสองของ คานนี้ผูกติดกับเสาเข็มสมออย่างมั่นคง ข้อเสียของระบบนี้คือ ทุกครั้งที่ทำการ ทดลองจะต้องเตรียมเสาเข็มสมอใหม่ นับว่าเป็นการสิ้นเปลืองมาก ถ้าการ ทดสอบมีมาก สำหรับกรณีเช่นนี้ ระบบที่ 2 อาจจะประหยัดกว่าตรงที่อุปกรณ์ ประกอบการทดสอบสามารถเคลื่อนย้ายไปทำการทดสอบแห่งใหม่ได้ ระบบที่ 2 จะไม่ดีกว่าที่อุปกรณ์ประกอบการทดสอบมีราคาแพง ในระบบที่ 1 แรงที่กระทำ บนเสาเข็มหาได้จากน้ำหนักของแท่นบวกกับน้ำหนักที่วางทับอยู่ ส่วนระบบที่ 2 และ ระบบที่ 3 ปกตินิยมใช้เครื่องมือวัดแรง เช่น Load Cell หรือ Proving Ring ถ้าการวัดนี้เป็นไปไม่ได้ แรงดันของแม่แรงอาจจะคำนวณหาได้จากความ ดันไฮดรอลิกของน้ำมันในแม่แรง แต่เพื่อความถูกต้อง เกจความดันของแม่แรง ควรจะได้รับการคาลิเบรทกับเครื่องทดสอบวัสดุ

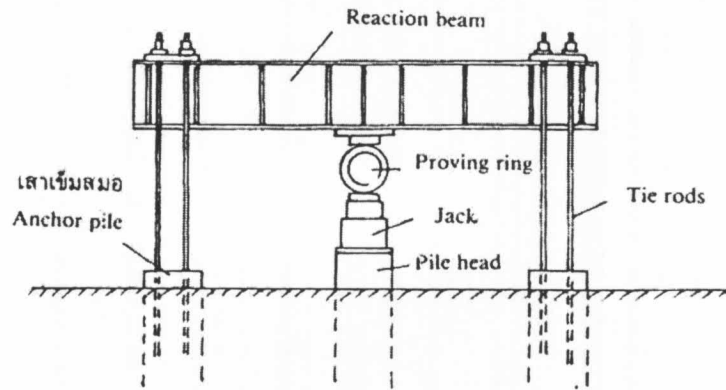
รูปแสดงการติดตั้งเครื่องมือทดสอบทั้ง 3 ระบบแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7a การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Conventional Static Load Test ระบบที่ 1



รูปที่ 2.7b การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Conventional Static Load Test ระบบที่ 2



รูปที่ 2.7c การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบ Conventional Static Load Test ระบบที่ 3

ข. เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test

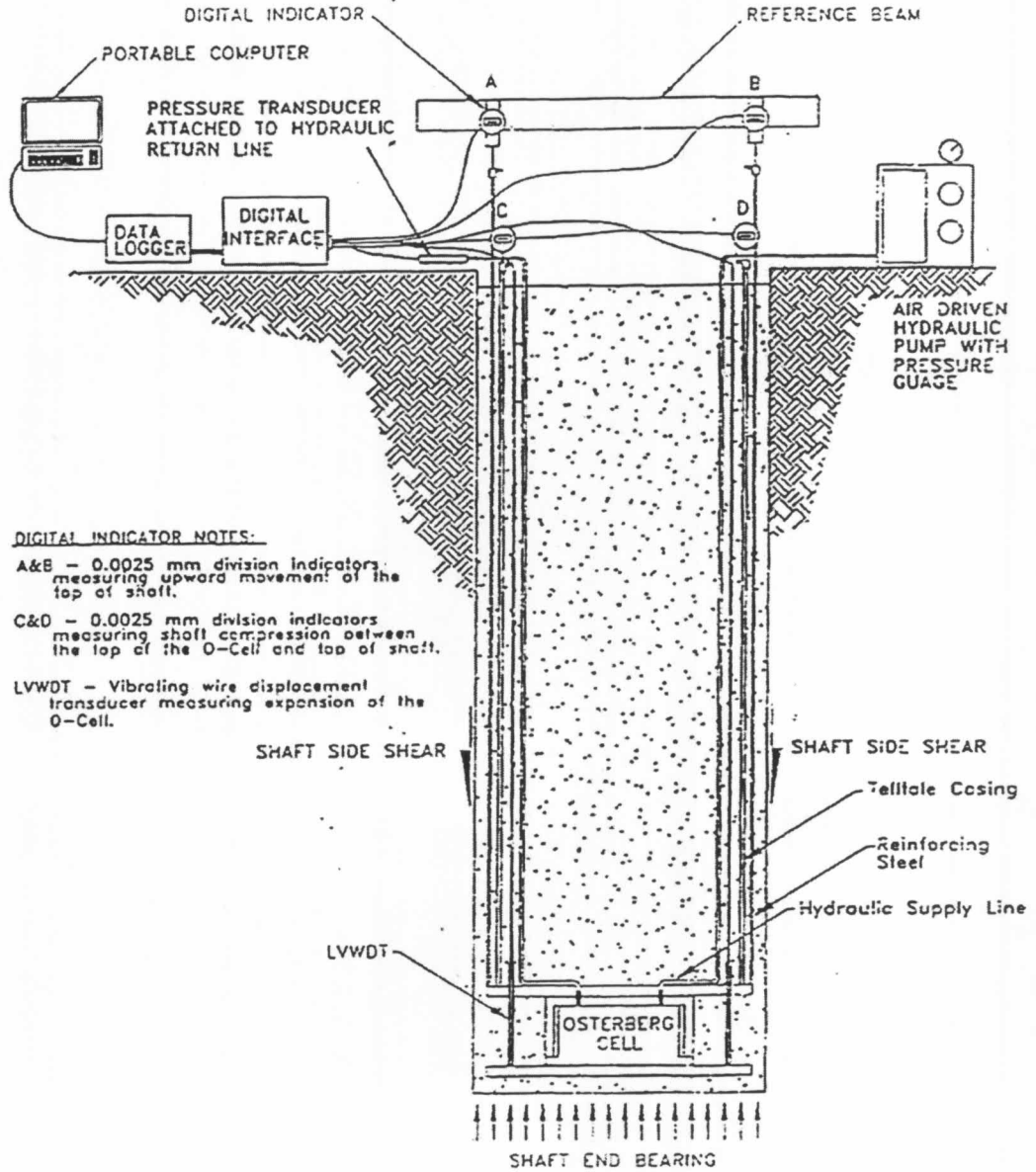
การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test เป็นวิธีการทดสอบวิธีใหม่ที่น่าเข้ามาใช้ในประเทศไทยขณะนี้ โดยสามารถทำได้ทั้งเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ แต่ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลการทดสอบจากเสาเข็มเจาะ โดยทั่วไปแล้วเสาเข็มเจาะที่มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงมากที่ต้องใช้น้ำหนักทดสอบสูงกว่า 10 MN จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงหรืออาจใช้ไม่ได้ในทางปฏิบัติจริง แต่สำหรับการทดสอบโดยการใช้ Bi-Directional Static

Load Test จะประหยัดและสะดวกกว่า จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ

ขั้นตอนการก่อสร้างขั้นแรกจะทำการติดตั้ง Hydraulic Jack ที่ปลายเสาเข็มเจาะโดยยึดติดไว้กับโครงเหล็ก ในขั้นตอนการทดสอบนั้นจะเกิดแรงกระทำกับเสาเข็มในลักษณะแรงกด เช่นเดียวกับ Conventional Static Load Test แต่จะกระทำจากด้านล่างของเสาเข็มเมื่อ Hydraulic Jack ขยายตัว แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) จะเป็นแรงปฏิกริยากับแรงเสียดทานรอบ ๆ เสาเข็ม (Skin Friction) โดยเพิ่มแรงจาก Jack จนเข้าใกล้ Ultimate Capacity ของแรงใดแรงหนึ่ง (ส่วนใหญ่จะเข้าใกล้ Ultimate Capacity ของ End Bearing ก่อน) ซึ่งการทดสอบวิธีนี้สามารถแยก End Bearing และ (Skin Friction) ออกจากกันได้อย่างอัตโนมัติ

การทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test โดยทั่วไปจะทำตาม ASTM Quick Test Method D1143 ส่วนการติดตั้งเครื่องมือวัด Load และ Deflection แสดงดังรูปที่ 2.8

TYPICAL TEST INSTRUMENTATION



รูปที่ 2.8 รูปแสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับวิธี Bi-Directional Static Load Test ในเสาเข็มเจาะ (Schmertmann and Hayes, 1997)

2.3 กลไกระหว่างดินและเข็ม (Mechanism of Soil-Pile Interaction)

เมื่อเข็มรับน้ำหนักบรรทุก น้ำหนักบรรทุกจากตัวเข็มจะส่งถ่ายไปยังดินที่อยู่รอบตัวเสาเข็ม การส่งถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer) นี้ เป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อน ได้มีผู้ศึกษาไว้หลายรายซึ่ง สุวรรณ (2531) ได้กล่าวไว้ ดังนี้

Whitaker and Cooke (1966) O' Neill and Reese (1970) ได้ศึกษาและพบว่าองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อการส่งถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มไปสู่ดินในชั้นดินเหนียวคือ Shear Strength ของดิน

Skemton (1959) ได้ศึกษาผลการทดสอบเสาเข็มเจาะใน London Clay พบว่า การเคลื่อนตัวของน้ำจากคอนกรีตที่ใช้ทำเข็มเจาะ เป็นผลทำให้เกิด Shear Strength ของดินรอบตัวเสาเข็มลดลง การศึกษาของ O'Neill and Reese (1970) โดยการขุดเจาะเก็บตัวอย่างดินตามแนวเสาเข็มเจาะที่ระยะต่างๆ ห่างจากเสาเข็มออกไป ก็พบว่า การเคลื่อนตัวของน้ำจากคอนกรีตที่ใช้ทำเข็มเจาะได้เกิดขึ้นจริงตามที่ Skemton (1959) ได้ศึกษาไว้แล้ว

Barker and Reese (1970) ได้ศึกษาผลของการใช้ Drilling Fluid ที่มีต่อการส่งถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มเจาะไปสู่ดิน และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม พบว่า การใช้ Drilling Fluid ในการช่วยทำให้หลุมเจาะเกิดเสถียรภาพ หากก่อสร้างด้วยวิธีที่ถูกต้องคือ คอนกรีตที่ใช้ทำเข็มจะต้องมีความเหลวพอโดยมี Slump อย่างน้อย 6 นิ้ว ก็จะไล่ที่ Drilling Fluid ออกจากหลุมเจาะได้หมด และวิธีเทคอนกรีตโดยใช้ Tremie หรือใช้ Concrete Pump ให้มี Head สูงพอแล้ว คอนกรีตที่เทลงและเอ่อสูงขึ้นนี้จะไปขูดลอก Drilling Fluid ที่จับเกาะติดอยู่กับผนังของหลุมเจาะได้หมด แต่ถ้าหากยังปรากฏมี Drilling Fluid เกาะติดอยู่ที่ผนังหลุมเจาะแล้ว Drilling Fluid นี้ ก็จะแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวของเสาเข็มและผนังหลุมเจาะ จะมีผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะลดลง

Cooke and Whitaker (1961) โดยการจำลองเข็มในห้องทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกที่รับโดยดินรอบๆ ลำตัวเสาเข็มและปลายเสาเข็ม พบว่า ความต้านทานของดินที่อยู่รอบลำตัวเสาเข็ม (Side Resistance) จะเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ (Fully Mobilized) เมื่อการเคลื่อนตัวของเข็มเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือ ประมาณ 0.5% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม ในขณะที่ความต้านทานของดินที่ปลายเข็ม จะเกิดขึ้นเต็มที่เมื่อการทรุดตัวของเข็มมีค่าอยู่ระหว่าง 10-15% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเข็ม

Aurora and Reese (1976) ได้ศึกษาการส่งถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มไปสู่ดินของเข็มใน Clay Shale พบว่า การส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ดินรอบลำตัวเสาเข็มจะมีค่าสูงสุด เมื่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มมีค่าประมาณ 0.25 นิ้ว หรือ 0.8% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง และความต้านทานของดินสูงสุดที่ปลายเข็ม (Ultimate Tip Resistance) จะเกิดขึ้นที่การเคลื่อนตัวของเข็มโดยเฉลี่ยเท่ากับ 5% ของเส้นผ่านศูนย์กลางหรือประมาณ 1.5 นิ้ว แต่โดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นที่การเคลื่อนตัวของเสาเข็มประมาณ 0.75 นิ้ว ส่วนการขุดหลุมเจาะเพื่อทำเสาเข็มเจาะนั้น จะทำให้ Shear Strength ของดินลดลงเนื่องจาก Confining Pressure ลดลง

Engling and Reese (1974) พบว่า ความต้านทานของดินรอบๆ ลำตัวเสาเข็มเจาะจะถึงค่าสูงสุด เมื่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็มอยู่ในช่วง 0.2-0.4 นิ้ว หรือ 0.7-1.3% ของเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม และความต้านทานของดินที่ปลายเข็มจะถึงค่าสูงสุด เมื่อการทรุดตัวของปลายเข็มอยู่ในช่วง 1.2-1.6 นิ้ว หรือ 4-5% ของเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม

อย่างไรก็ตาม วิธีการศึกษาหลักการส่งถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มไปสู่ดินที่เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติคือ วิธี Distribution Function Approach ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- วิธี Distribution Function Approach

เสนอโดย Seed and Reese (1957) การเปลี่ยนแปลงของแรงภายในตัวเข็มตามแนวความยาวของเข็มจะเขียนอยู่ในรูปของ Load Distribution Curve ดังรูป 2.9b ที่ความลึก Z ใดๆ แรงภายในตัวเข็มจะเท่ากับผลต่างระหว่างแรงกระทำที่หัวเข็ม Q_T และแรงความต้านทานด้านข้างของดิน (Side Resistance of Soil) ที่กระทำอยู่รอบๆ ลำตัวเสาเข็มตั้งแต่หัวเข็มจนถึงความลึก Z ดังนั้น ที่ปลายเข็มจะได้สมการ $Q_T = Q_B + Q_S$ เมื่อ Q_B คือ ความต้านทานของดินที่ปลายเข็ม และ Q_S คือ แรงต้านทานของดินรอบๆ ลำตัวเสาเข็มทั้งหมดตลอดทั้งเข็ม การเคลื่อนตัวของผนังเข็มที่ความลึก Z จะต่างกับที่ความลึก $Z + dZ$ เท่ากับ Elastic Compression ของขนาดความยาวของเข็ม dZ และ

$$\frac{dW_z}{dz} = \frac{Q_z}{AE}$$

เมื่อ W_z คือการเคลื่อนตัวของผนังของเข็มที่ความลึก Z เนื่องจากการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ดังนั้น dW_z ก็คือ Elastic Compression ของขนาดของเข็ม dZ ส่วน A คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม และ E คือ Modulus of Elasticity ของเข็ม

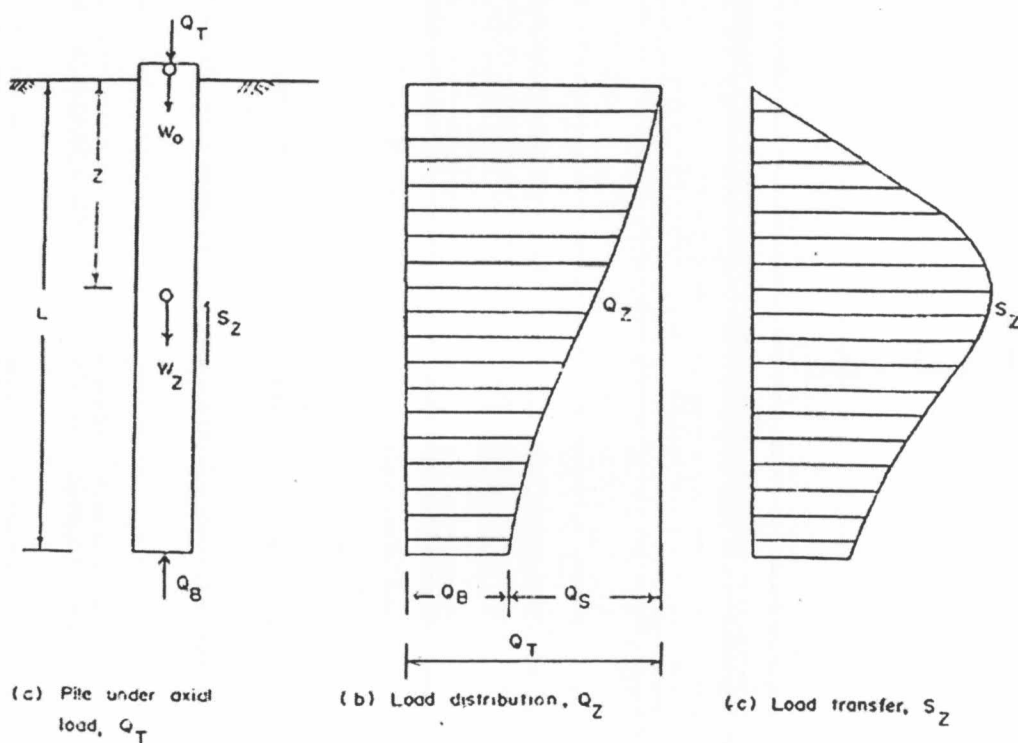
ดังนั้น ถ้าแรงที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มที่ความลึก Z เนื่องจากเข็มรับน้ำหนัก Q_T ที่หัวเข็มมากกว่าแรงที่เกิดขึ้นภายในตัวเข็มที่ความลึก $Z + dZ$ ด้วยปริมาณ dQ_Z แล้ว

$dQ_Z = -(S_Z) \cdot (L_C) \cdot (d_z)$ (เครื่องหมายลบหมายถึงทิศทางตรงข้ามกันระหว่าง dQ_Z และ S_Z)

เมื่อ S_Z คือ น้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเข็มไปสู่ดินรอบลำตัวเสาเข็มที่ความลึก Z โดยคิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของลำตัวเสาเข็ม

และ L_C คือ เส้นรอบรูปของเสาเข็ม ดังนั้น

$$S_Z = -\left(\frac{1}{L_C}\right)\left(\frac{dQ_Z}{dz}\right)$$



รูปที่ 2.9 Distribution Function Approach สำหรับเข็มเดี่ยว

ดังนั้น น้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเสาเข็มไปสู่ดินที่ความลึก Z โดยคิดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของลำตัวเสาเข็มจะเท่ากับ Slope ของ Load Distribution Curve ที่ความลึก Z นั้น หาด้วยเส้นรอบรูปของเสาเข็ม สมการข้างต้นสามารถใช้หาการทรุดตัวของเสาเข็ม w_Z ที่ความลึก Z ถ้ารู้การทรุดตัวที่หัวเข็ม w_0 ดังนี้

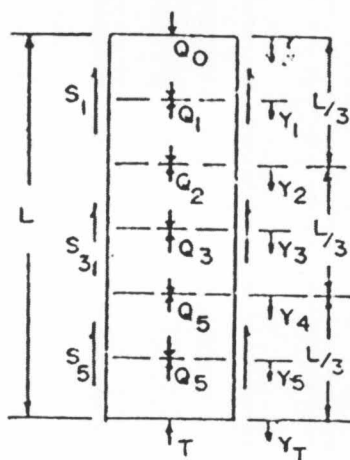
$$W_o = W_z + \int_0^z \frac{Q_z}{AE} dz$$

หรือ $W_z = W_o - \int_0^z \frac{Q_z}{AE} dz$

เมื่อหาค่าของ S_z และ W_z ได้แล้ว ก็สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเข็มไปสู่ดิน และการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ความลึกใดๆ ก็ได้ ตลอดความยาวของเข็ม

วิธี Distribution Function Approach นี้ เป็นวิธีที่ยอมรับและใช้อย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติ เพียงแต่ว่า การพิจารณาการส่งถ่ายน้ำหนักในช่วงความยาวของเข็ม dz ใดๆ นี้ ไม่ได้นำผลการส่งถ่ายน้ำหนักของส่วนอื่นของเข็มที่นอกเหนือจากช่วงที่กำลังพิจารณาอยู่นี้ นำมาพิจารณาประกอบด้วย (Poulos and Davis 1980) วิธีการ Distribution Function Approach เป็นวิธีการที่ใช้ศึกษา Interaction ระหว่างเข็มและดินที่ดีที่สุดในปัจจุบัน (Aurora and Reese 1976)

Colyle and Reese (1966) โดยการใช้ Load Cell หรือ Strain Gauge ติดอยู่ในตัวเข็ม เมื่อทำการทดสอบการรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาเข็มก็จะทราบการกระจายการรับน้ำหนักของเสาเข็มตลอดความยาวของตัวเข็มโดยใช้หลักการ Distribution Function Approach ที่เสนอโดย Seed and Reese (1957) ศึกษาการส่งถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ดินที่อยู่ติดรอบๆ ลำตัวเสาเข็ม ดังนี้ จากรูป 2.10



รูปที่ 2.10 Axial loaded pile divided into three segments

1. สมมติว่าเข็มยาวเท่ากับ L แบ่งความยาวของเข็มออกเป็นส่วนๆ แต่ละส่วนยาวเท่าๆ กัน สมมติแบ่งเป็นสามส่วน แต่ละส่วนยาวเท่ากับ $L/3$
2. หาน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากตัวเข็มไปสู่ดินที่อยู่ติดรอบๆ เข็มที่จุดกึ่งกลางของแต่ละส่วนของเข็มที่ได้แบ่งนั้น

สำหรับส่วนบนสุด Load Transfer $S_1 = \frac{Q_0 - Q_2}{(\pi D)(L/3)}$

เมื่อ	S_1	=	Load Transfer ของส่วนบนสุดที่จุดกึ่งกลางของส่วนบนสุดนั้น
	Q_0	=	น้ำหนักกระทำที่หัวเข็ม
	Q_2	=	น้ำหนักกระทำที่ปลายของส่วนบนสุดนั้น หาได้จากเส้นแสดงการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Curve) ซึ่งได้จากการวัดของ Strain Gauge
	D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม
	$L/3$	=	ความยาวของส่วนบนสุดที่แบ่ง

ในการทำงานเดียวกัน จะหา S_3 และ S_5 ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากตัวเข็มไปสู่ดินที่อยู่ติดกับตัวเข็มตามส่วนที่สองและที่สามตามลำดับได้

3. การหาการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่จุดกึ่งกลางของแต่ละส่วนของเสาเข็มที่ได้แบ่งนั้น โดยการหักการหดตัวยืดหยุ่น (Elastic Compression) ของเสาเข็มออกจากการทรุดตัวของเสาเข็มที่วัดได้ที่หัวเข็มภายใต้การรับน้ำหนักหนึ่งๆ

สำหรับส่วนบนสุด $Y_1 = \delta - \left[\frac{Q_0 + Q_1}{2} \left(\frac{L}{3} \right) \left(\frac{1}{2} \right) / \left(\frac{AE_0 + AE_1}{2} \right) \right]$

เมื่อ	Y_1	=	การเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่จุดกึ่งกลางของส่วนที่แบ่งนั้น
	δ	=	การทรุดตัวของเสาเข็มภายใต้น้ำหนักกระทำหนึ่งๆ ที่หัวเข็ม และวัดได้ที่หัวเข็ม
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

E_0 และ E_1 = Modulus of Elasticity ของเสาเข็มที่หน้าตัด 0 และ 1 ตามลำดับ

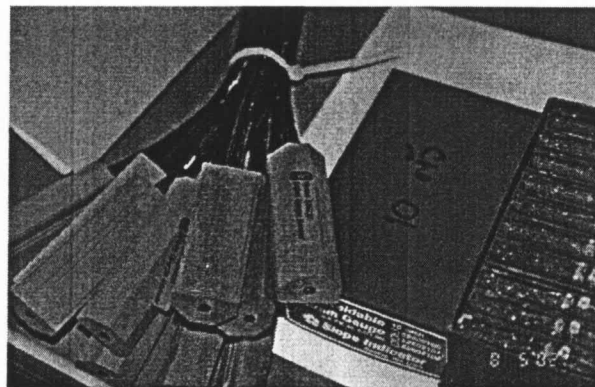
ในทำนองเดียวกัน จะหาการเคลื่อนตัวของเสาเข็มส่วนที่สองและที่สามได้

2.4 เครื่องมือวัดในเสาเข็ม

การศึกษาการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกทุกจากเสาเข็มสู่ดินรอบ ๆ เสาเข็มจะต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดภายในตัวเสาเข็ม เพื่อวัดหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในตัวเสาเข็มที่ระดับต่าง ๆ ขณะที่มีการบรรทุกกระทำ เครื่องมือที่ติดตั้งคือ Vibrating Wire Strain Gauges (VWSGs) และ Extensometer หรือ Telltale Rod รายละเอียดของเครื่องมือทั้ง 2 ชนิด มีดังต่อไปนี้

2.4.1 Vibrating Wire Strain Gauge

Vibrating Wire Strain Gauge (VWSGs) ใช้ยึดติดกับเหล็กเสริมด้วยการเชื่อมและใช้ Plastic Tie หุ้มป้องกันสายนำ (Sensor) ซึ่งจะถูกติดตั้งกับเสาเข็มเจาะทดสอบโดยการยึดแท่ง VWSGs กับโครงเหล็กเสริมของเสาเข็มในขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม ณ ตำแหน่งหรือระดับที่ต้องการทราบแรงตามแนวแกน ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ค่าความเครียดที่จุดที่ติดตั้ง เพื่อนำไปคำนวณหาค่าแรงได้ ลักษณะของ VWSGs แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของ Vibrating Wire Strain Gauges

- การหาแรงตามแนวแกนโดย Vibrating Wire Strain Gauges (VWSGs)

การหาแรงตามแนวแกน ณ จุดที่ทำการติดตั้ง VWSGs ทำได้โดยการนำค่าความเครียดที่วัดได้จาก VWSGs มาคำนวณตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} P_i &= (A_c E_c + A_s E_s) \times \varepsilon_i \\ &= [A_s (n-1) + A_g] E_c \times \varepsilon_i \\ &= (AE)_p \times \varepsilon_i \end{aligned}$$

โดยที่

P_i	=	แรงตามแนวแกนที่จุดที่ติดตั้ง VWSGs ที่ระดับ i
A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต
A_s	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม
A_g	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
n	=	E_s / E_c
E_c	=	อีลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต
E_s	=	อีลาสติกโมดูลัสของเหล็กเสริม
$(AE)_p$	=	ค่าสติเฟนสมคูลย์เสาเข็ม (Equivalent Pile Stiffness)
ε_i	=	ความเครียดที่วัดได้จาก Strain Gauge

2.4.2 Extensometer

การติดตั้ง ในตัวเสาเข็มเพื่อวัดค่าการหดตัวที่ส่วนต่าง ๆ ของเสาเข็มระหว่างหัวเสาเข็มกับค่าระดับความลึกที่ต้องการ ค่าการหดตัวที่วัดได้จะสามารถนำมาคำนวณหาการถ่ายแรงตามแนวแกนของเสาเข็ม การติดตั้งจะทำการติดตั้งกับโครงเหล็กเสริมของเสาเข็มในขั้นตอนการลงกรงเหล็กเสริมระหว่างการก่อสร้างเช่นเดียวกับการติดตั้ง VWSGs

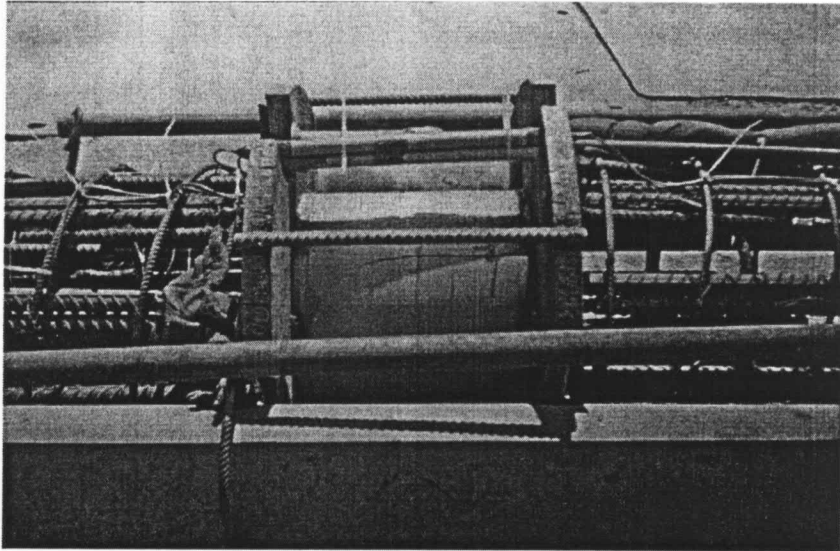
- การหาแรงตามแนวแกนโดย Extensometer

Extensometer ใช้สำหรับการคำนวณหาแรงตามแนวแกนตลอดช่วงที่ทำการพิจารณา โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

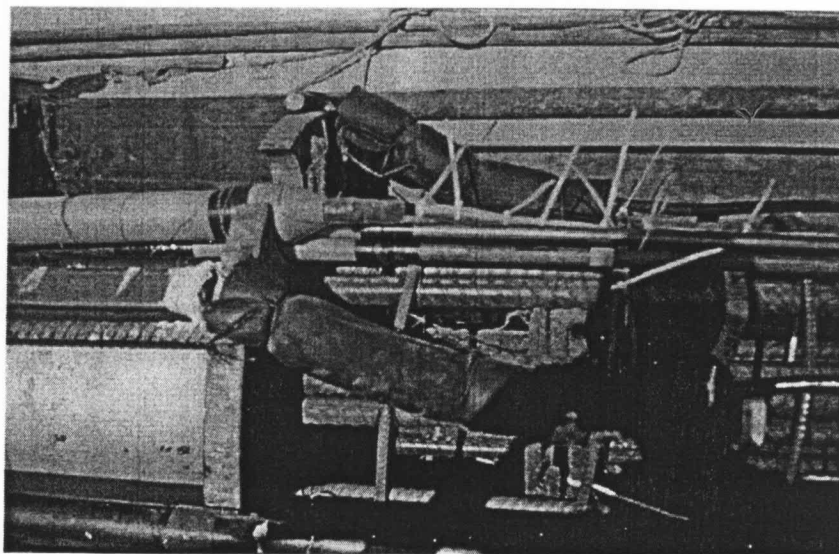
$$P_i = \frac{2(AE)_p \times e}{L} - P_T$$

โดยที่

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



รูปที่ 2.12a แสดงการติดตั้ง Extensometer กับโครงเหล็กเสริม



รูปที่ 2.12b แสดงการติดตั้ง Extensometer กับโครงเหล็กเสริม

2.5 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเดี่ยว

2.5.1 วิธีสถิตยศาสตร์ (Static Method)

วิธีสถิตยศาสตร์เป็นการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มจากค่าพารามิเตอร์ของดินโดยอาศัยหลักการสมดุลย์ของแรงกล่าวคือ พฤติกรรมของเสาเข็มขณะรับน้ำหนักบรรทุกจะประกอบไปด้วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม (Skin Friction) และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) ลบด้วยน้ำหนักของเสาเข็ม ดังสมการ

$$Q_{ult} = Q_F + Q_E - W_p$$

โดยที่

$$Q_F = \text{แรงเสียดทานรอบ ๆ ผิวเสาเข็ม}$$

$$Q_E = \text{แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม}$$

$$W_p = \text{น้ำหนักของเสาเข็ม}$$

สมการข้างต้นมีสมมติฐานว่า “หน่วยแรงเสียดทานและหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าสูงสุดที่ Displacement ของเข็มเดียวกัน ซึ่งไม่เป็นความจริงเพราะหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มจะถึงค่าสูงสุดต้องใช้ Displacement สูงกว่า” ดังนั้น สมการดังกล่าวจึงเป็นเพียงสมการแบบ Semi Empirical

ก. การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มเดี่ยวในชั้นดินเหนียว

การวิเคราะห์จะอยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์แบบ Total Stress โดยใช้หลักการ ($\phi = 0$ Concept) ซึ่งหมายความว่าค่า Cohesion, C จะมีค่าเท่ากับค่า Undrained Shear Strength, S_u เพื่อให้ได้ค่าที่ไม่ Conservative การใช้ค่า S_u ในการคำนวณควรคิดถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า Undrained Shear Strength กับความลึกด้วยและค่าที่ใช้ควรใกล้เคียงกับความเป็นจริง

สมการทั่วไปในการหาค่าแรงเสียดทานรอบ ๆ ผิวเสาเข็ม (Q_F) คือ

$$Q_F = \sum f_s A_s$$

$$f_s = \alpha S_u$$

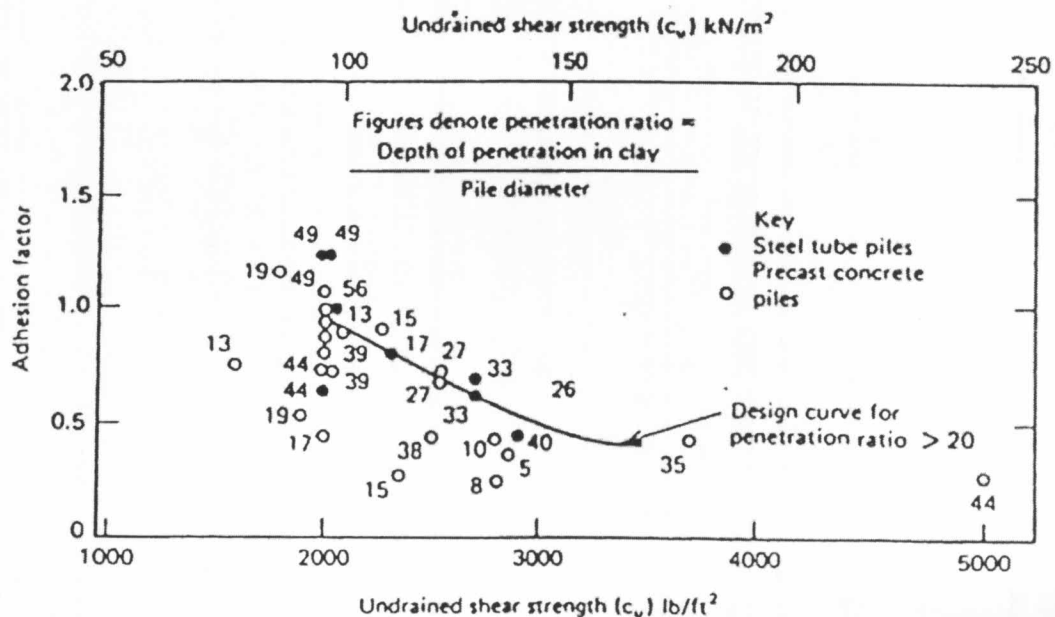
โดยที่

- α = Adhesion Factor
- S_u = กำลังรับแรงเฉือนของดิน
- A_s = พื้นที่ผิวของ Soil Block ที่เกิด Failure ถ้าเป็นเสาเข็มสี่เหลี่ยมหรือวงกลม A_s คือพื้นที่ผิวของตัวเสาเข็ม
- f_s = Shear Stress ที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม

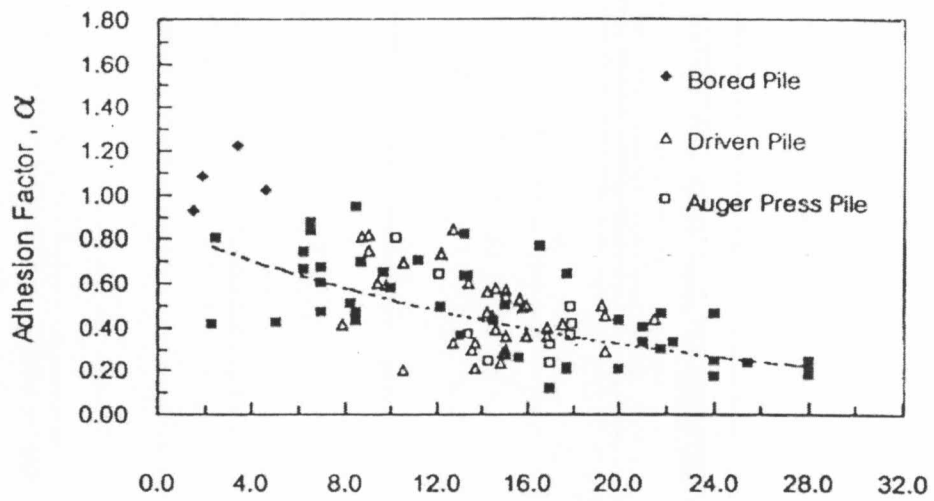
ค่า α เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดและรูปร่างของเสาเข็ม ชนิดของดินและวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม โดยมีจะหาจากความสัมพันธ์กับค่าของ S_u ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (Tomlinson,1970)

สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ Pimpasugdi (1989) ได้ทำการรวบรวมผลวิจัยก่อนหน้า (NG,1983 และ สุวรรณ,2531) พร้อมทั้งทำการวิจัยเพิ่มเติมจากข้อมูลการทดสอบเสาเข็มหลายชนิด ได้แก่เสาเข็มตอก เสาเข็ม Auger Press และเสาเข็มเจาะ โดยได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งพบว่าค่า α มีลักษณะกระจัดกระจาย (Scatter) โดยผลจากวิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่แตกต่างกันไม่ได้มีอิทธิพลต่อค่า α อย่างเด่นชัด

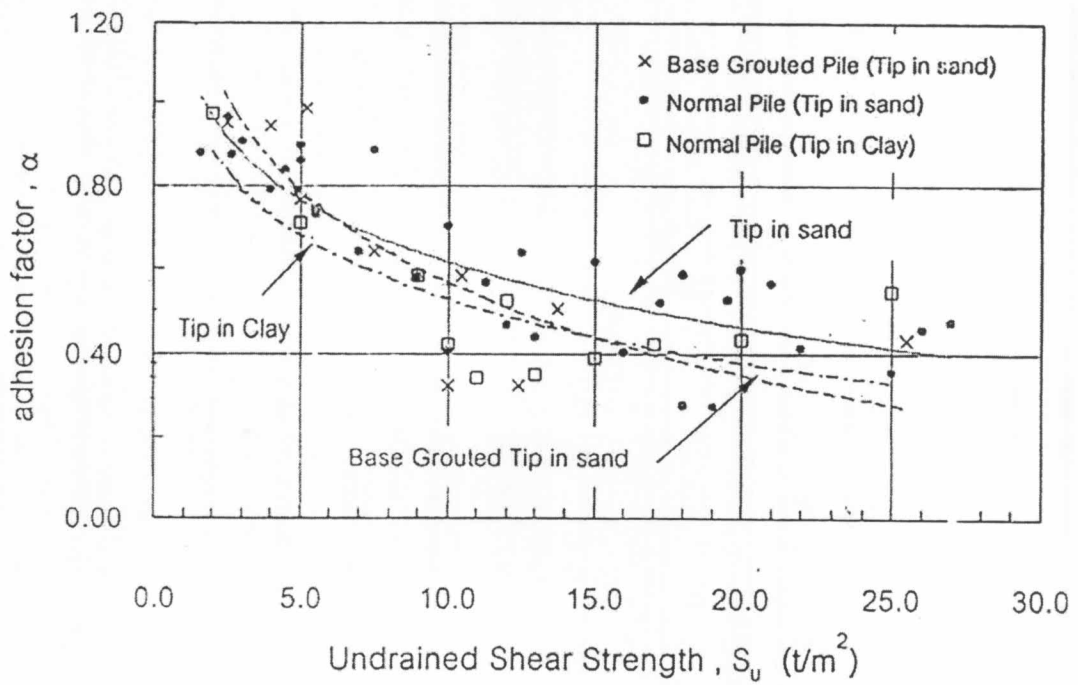
นอกจากนี้ Teparaksa (2001) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภทในดินกรุงเทพฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u (Tomlinson,1970)



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับดินกรุงเทพฯ (Pimpasugdi,1989)



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภท
ในดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,2001)

สมการทั่วไปที่ใช้ในการหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q_E) คือ

$$Q_E = q_E A_p$$

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

โดยที่

$$N_c = \text{Bearing Capacity Factor}$$

$$\sigma_{vo} = \text{หน่วยแรงรวมในแนวตั้งที่ระดับปลายเสาเข็ม}$$

$$A_p = \text{พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม}$$

สำหรับค่า N_c ได้มีผู้ทำการศึกษาในอดีตมากมายได้แก่

- Meyerhof (1951) ได้ค่า $N_c = 9.3-9.8$ โดยขึ้นอยู่กับ Frictional Resistance ที่เกิดขึ้นบริเวณปลายเสาเข็ม
- Skemton (1951) พบว่าค่า N_c ที่วิเคราะห์จากเสาเข็มกลมมีค่าอยู่ระหว่าง 6.14-9.00 สำหรับเสาเข็มที่มีความยาวมากกว่าหรือเท่ากับ 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม และจากการทดลองกับเสาเข็มใน London Clay พบว่าค่า $N_c = 9$ เป็นค่าที่ถูกต้องเพียงพอในการคำนวณหาค่า End Bearing Capacity ของเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ
- Sower (1961) ทำการศึกษาจากแบบจำลอง พบว่าค่า N_c มีค่าอยู่ระหว่าง 5-8
- Whitaker and Cooke (1966) พบว่าค่า N_c ที่เหมาะสมสำหรับชั้นดินเหนียวแข็งมีค่าเท่ากับ 9
- Muktabhand & Suwanakul (1971) พบว่าค่า N_c สำหรับชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าต่ำกว่า 9

สังเกตได้ว่าค่า N_c ที่ได้จากการวิจัยในอดีตมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากดินแต่ละชนิดมีพฤติกรรมของ Stress-Strain แตกต่างกัน (Poulos and Davis 1980) อย่างไรก็ตาม ค่า N_c ที่ใช้กันทั่วไปมีค่าเท่ากับ 9 ทั้งในเสาเข็มตอกและเสาเข็มเจาะ

ข. การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวในชั้นทราย

การวิเคราะห์จะอยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์แบบ Effective Stress เนื่องจากน้ำสามารถซึมผ่านชั้นทรายได้รวดเร็ว โดยที่การวิเคราะห์ใช้หลักการของ Mohr Coulomb ในรูปของ Effective Stress

สมการทั่วไปในการหาค่าแรงเสียดทานรอบ ๆ ผิวเสาเข็ม (Q_p) ในชั้นทรายคือ

$$Q_F = \sum f_s A_s$$

$$f_s = K_s \tan \delta (\sigma'_{vi})$$

หรือ $f_s = \beta (\sigma'_{vi})$

โดยที่

$$\beta = K_s \tan \delta$$

$$K_s = \text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง}$$

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

$$\sigma'_{vi} = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลที่กึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา}$$

ค่า K_s เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความแน่นเริ่มต้นของทราย วิธีการก่อสร้างเสาเข็ม รูปทรงทางเรขาคณิตและความยาวเสาเข็ม Brom & Aas (1966) ได้เสนอค่า K_s และ δ สำหรับเสาเข็มตอก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

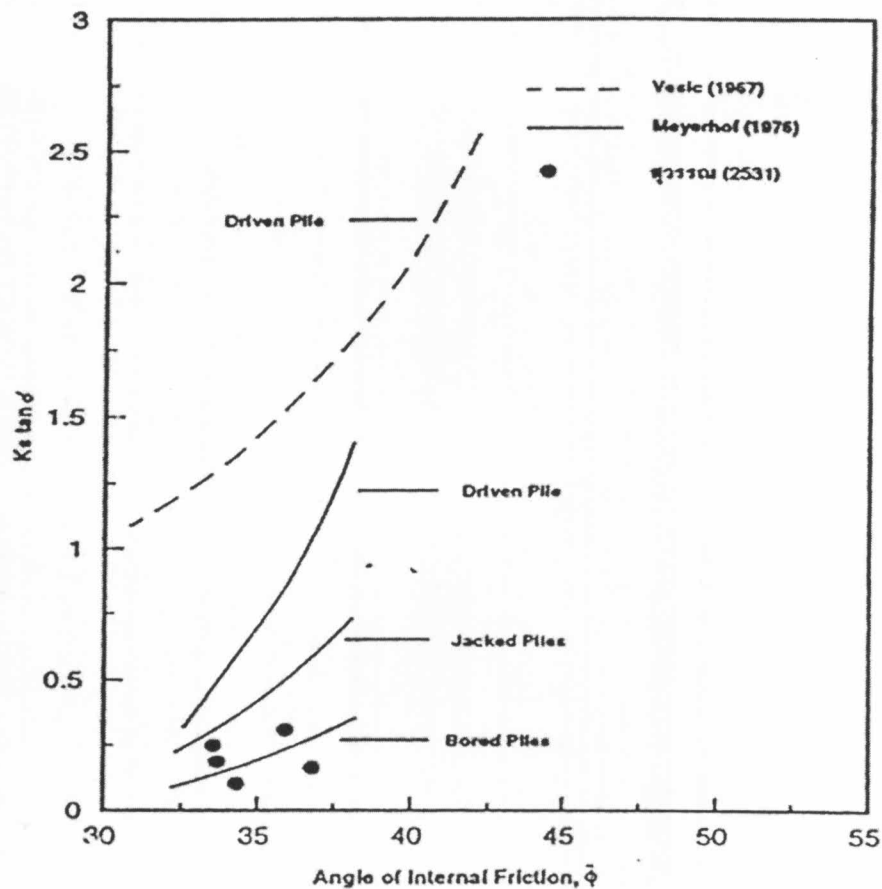
ตารางที่ 2.2 แสดงค่า K_s และ δ สำหรับเสาเข็มตอกที่เสนอโดย Brom & Aas (1966)

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	$(2/3)\phi$

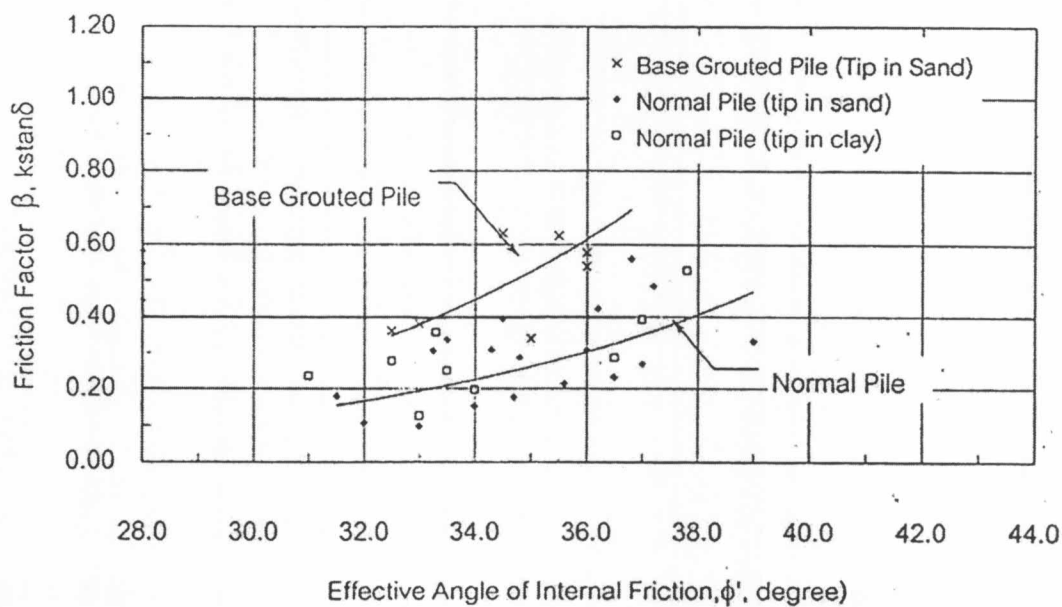
สำหรับเสาเข็มเจาะค่า K_s อยู่ระหว่าง 0.7 – 0.9 (Fleming, 1984) นอกจากนี้ Vesic (1967) และ Meyerhof (1976) ได้เสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับมุม ϕ' ดังแสดงใน

รูปที่ 2.16 โดยที่สุวรรณ (2531) ได้ทำการวิจัยจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นแรกของดินกรุงเทพฯ ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับมุม ϕ' ที่ได้มีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Meyerhof (รูปที่ 2.16)

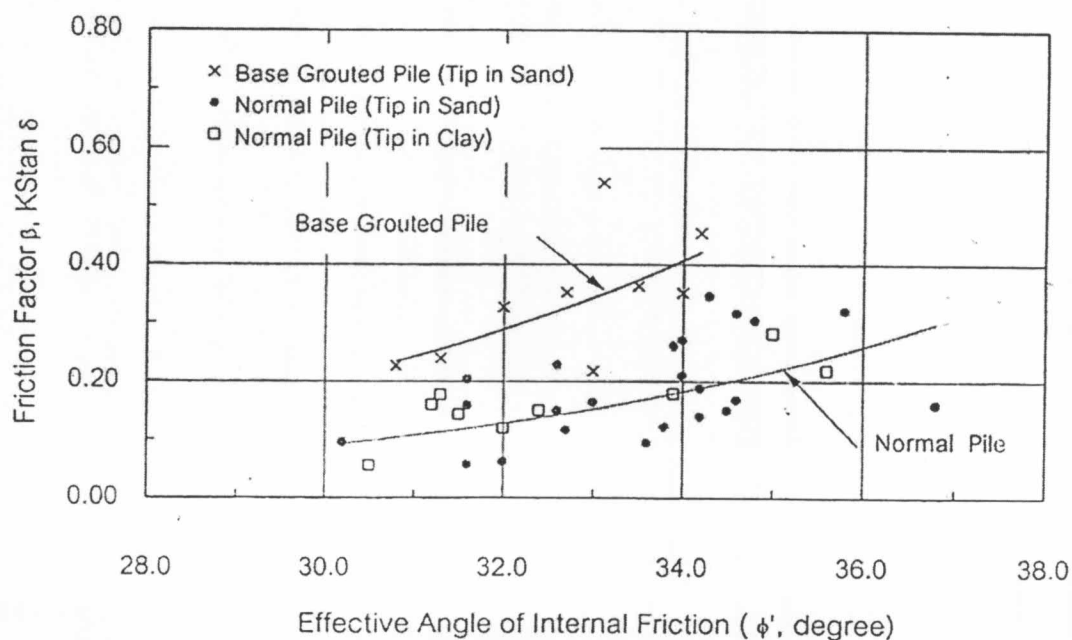
นอกจากนี้ Teparaksa (2001) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\beta, K_s \tan \delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน, ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภทในดินกรุงเทพฯ โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ ไม่คิดผล Drawdown และคิดผล Drawdown เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯ และบริเวณใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.17a และ 2.17b ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน, ϕ'
(Vesic, 1967 และ Meyerhof, 1976)



รูปที่ 2.17a ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\beta, K_t \tan \delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน, ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภทในดินกรุงเทพฯ กรณีไม่คิดผล Drawdown (Teparaksa, 2001)



รูปที่ 2.17b ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\beta, K_t \tan \delta$ กับค่ามุมเสียดทานภายใน, ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะแต่ละประเภทในดินกรุงเทพฯ กรณีคิดผล Drawdown (Teparaksa, 2001)

สมการทั่วไปที่ใช้ในการหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q_E) คือ

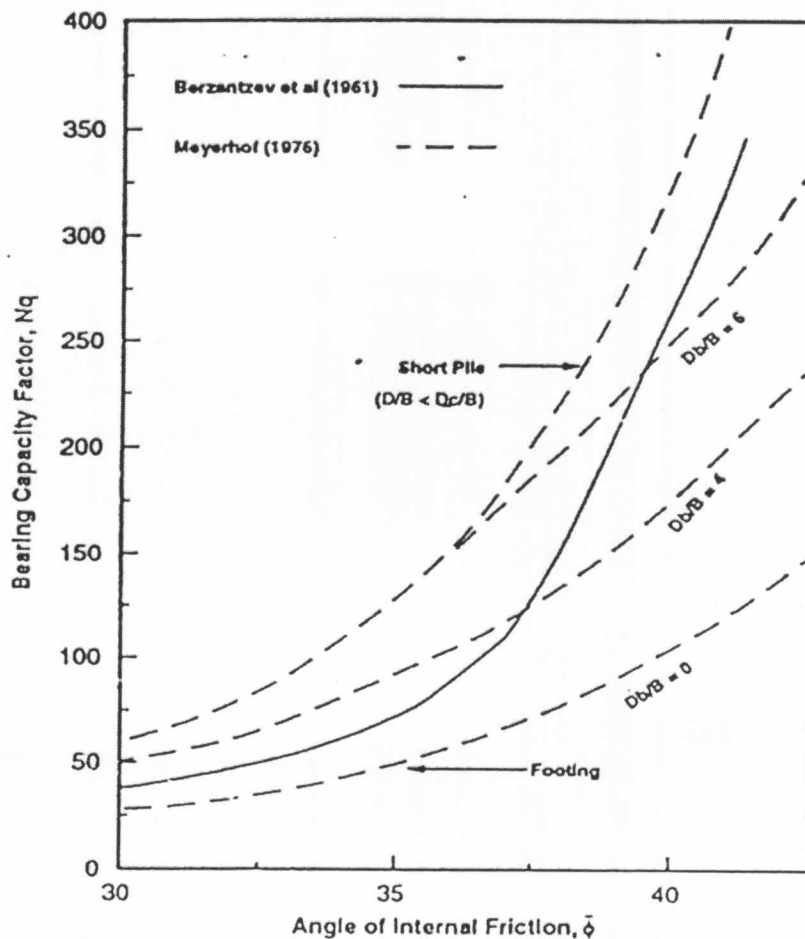
$$Q_E = q_E A_p$$

$$q_E = \sigma'_v N_q$$

โดยที่

- N_q = Bearing Capacity Factor
- σ'_v = หน่วยแรงประสิทธิผลบริเวณปลายเข็ม

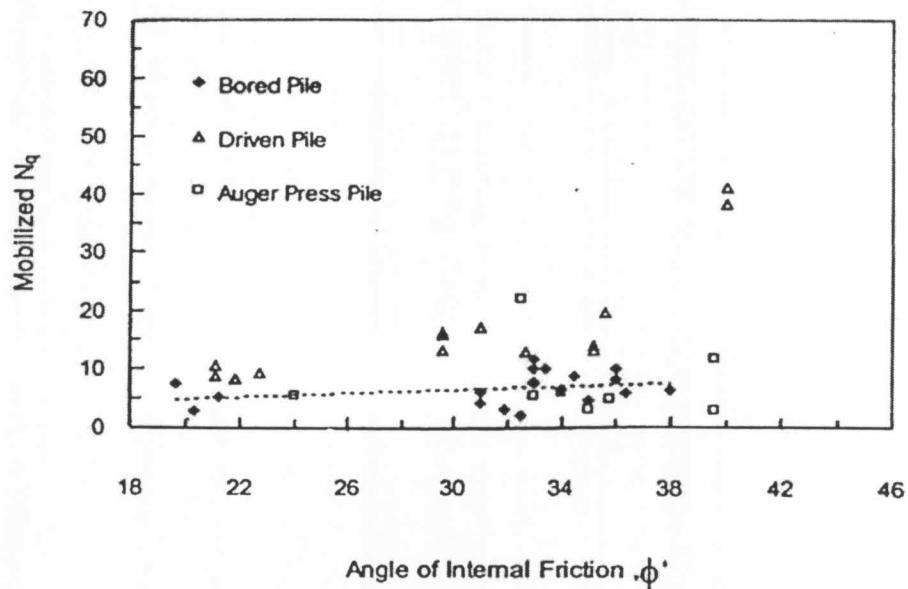
Berezantzev (1961) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มตอก ในการคำนวณออกแบบเสาเข็มโดยพิจารณาค่า Relative Embedment Depth (D_o/B) เป็นค่าประมาณเท่ากับ 5 ซึ่งต่างกับ Meyerhof (1976) ที่ได้พิจารณาอิทธิพลของค่า D_o/B ด้วย (รูปที่ 2.18) แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าที่เสนอโดย Berezantzev อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของค่าที่เสนอโดย Meyerhof



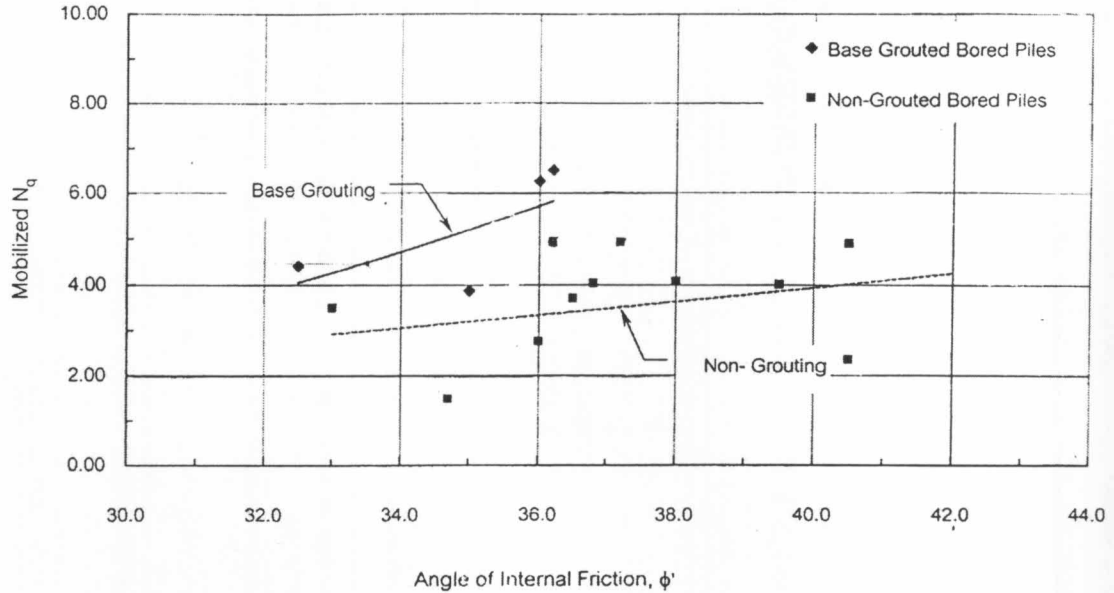
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน ϕ' สำหรับเสาเข็มตอก (Berezantzev,1961 และ Meyerhof,1976)

สำหรับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับค่ามุม ϕ' เสนอ โดย Pimpasugdi (1989) ซึ่งได้ทำการวิจัยและรวบรวมผลการวิจัยก่อนหน้า (NG,1983 และ สุวรรณ ,2531) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยที่ข้อมูลส่วนใหญ่เป็นข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนัก บรรทุกของเสาเข็มเจาะที่มีปลายเสาเข็มอยู่ที่ชั้นทรายชั้นแรกของดินกรุงเทพฯ

นอกจากนี้ Teparaksa (2001) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ โดยแบ่งเป็น 2 กรณีตามวิธีการก่อสร้าง คือ Non-Grouted Bored Piles และ Base Grouted Bored Piles ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน , ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ (Pimpasugdi,1989)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bearing Capacity Factor, N_q กับค่ามุมเสียดทานภายใน, ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพฯ (Teparaksa,2001)

2.5.2 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Load Testing of Piles)

การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติ (Q_{ult}) ซึ่งมีหลาย ๆ วิธีที่เคยมีผู้วิจัยไว้ Fellenius (1980) ได้ทำการรวบรวมซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

ก.วิธีของ Davisson (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิกฤติ เป็นน้ำหนักที่เสาเข็มเกิดการทรุดตัวจนเกินค่าความยืดหยุ่นที่ถูกกำหนดไว้ค่าหนึ่งคือ 0.15 นิ้ว (4 mm.) บวกกับ Factor ค่าหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (นิ้ว)หารด้วย 120

$$x = 0.15 + D/120 \text{ , นิ้ว}$$

โดยที่

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

พิจารณาจากรูปที่ 2.21 ก ทำการลากเส้น (BC) ขนานระยะ Offset (x) จากเส้น Initial Modulus (OA) จุดตัดระหว่างเส้นตรง BC กับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว คือจุด Q_{ult} (จุด C)

ข.วิธีของ Chin (1970-71)

ค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติเท่ากับค่าส่วนกลับของความชันที่ได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกแต่ละค่าหารด้วยค่าการเคลื่อนที่ที่น้ำหนักบรรทุกนั้น บนแกน y และ ค่าการเคลื่อนที่ (Movement) บนแกน x

พิจารณาจากรูปที่ 2.21 ข ค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ $(Q_v)_{ult}$ มีค่าเท่ากับ $1 / C_1$ โดยที่ C_1 คือค่าความชันของกราฟ

ค.วิธีของ De Beer & Wallays (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติหาได้โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวบนกราฟแบบลอการิทึมสเกล พิจารณาจากรูปที่ 2.21 ค ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติเท่ากับจุดที่เปลี่ยนความชันของเส้นตรงบนความสัมพันธ์แบบลอการิทึมสเกล

ง.วิธีของ Brinch Hanson (1972) 90% Criterion

วิธีนี้เป็นการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ $(Q_v)_{ult}$ คือ ค่า ณ จุดที่มีการทรุดตัว Δu เป็นสองเท่าของค่าการทรุดตัวที่ 90% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ (รูปที่ 2.21 ง)

จ.วิธีของ Brinch Hanson (1972) 80% Criterion

วิธีนี้พัฒนามาจาก Brinch Hanson (1972) 90% Criterion โดยใช้วิธีการแก้สมการเส้นตรงโดยกำหนดค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติคือตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดใด ๆ ณ ตำแหน่งที่การทรุดตัว (Δu) มีค่าหนึ่งในสี่ของค่าการทรุดตัวที่จุดนั้น (รูปที่ 2.21 จ)

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

$$\frac{\sqrt{\Delta u}}{Q_u} = C_1 \Delta u + C_2 \quad (1)$$

ตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดใด ๆ ณ ตำแหน่งที่การทรุดตัว (Δu) มีค่าหนึ่งในสี่ของค่าการทรุดตัวที่จุดนั้น แสดงสมการได้ดังนี้

$$\frac{\sqrt{0.25\Delta u}}{0.8Q_u} = 0.25C_1 \Delta u + C_2 \quad (2)$$

แก้สมการ (1) และ (2) เพื่อหาค่า Δu ที่ทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามวิธีนี้

ฉ. วิธีของ Mazurkiewicz (1972)

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติหาได้จากเส้นตรงสมมติที่สร้างขึ้นมาลากตัดกับแกนน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเส้นสมมตินี้สร้างได้โดยการแบ่งค่าการทรุดตัวออกเป็นส่วน ๆ ที่มีขนาดเท่ากัน ลากตัดเส้นโค้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว จนสามารถทราบค่าน้ำหนักบรรทุกที่ตำแหน่งการทรุดตัวนั้น ๆ ดังรูปที่ 2.21 ฉ จากนั้นลากเส้นตรงทำมุม 45 องศาับแกนน้ำหนักบรรทุก เพื่อสร้างจุดตัดกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่จุดถัดไป จุดตัดเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลากเป็นเส้นตรง และใช้เป็นเส้นตรงสมมติสำหรับหาค่าตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดบนแกนน้ำหนัก โดยจุดตัดของเส้นตรงนี้บนแกนน้ำหนักบรรทุกคือค่า Q_{ult}

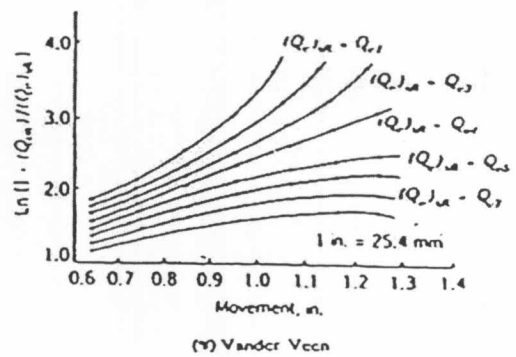
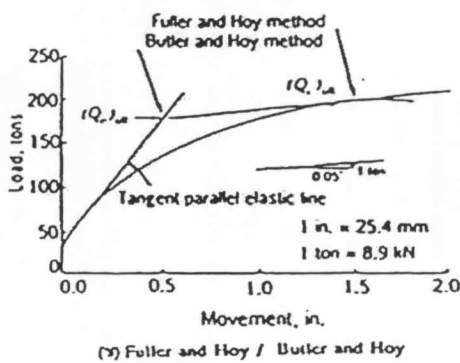
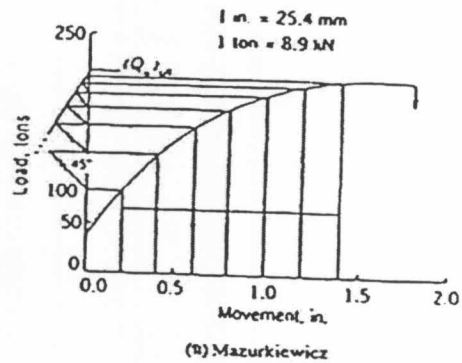
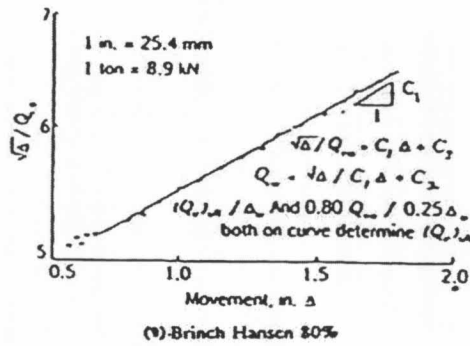
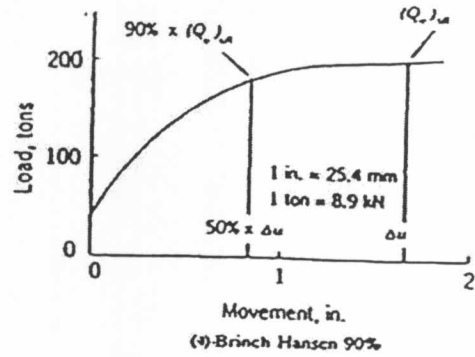
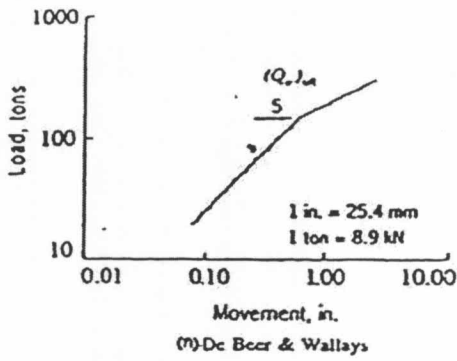
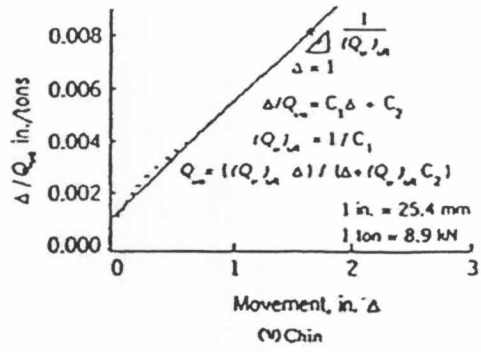
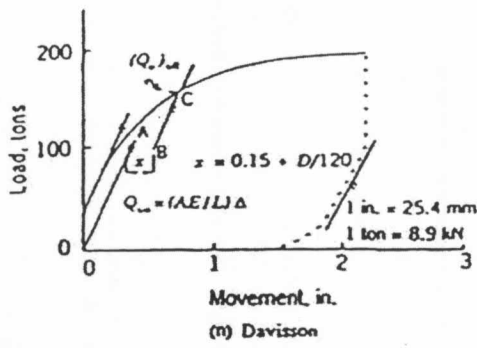
ช. วิธีของ Fuller & Hoy (1970) และ Butler & Hoy (1977)

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติตามวิธีของ Fuller & Hoy (1970) มีค่าเท่ากับค่าที่จุดที่เส้นสัมผัสส่วนโค้งมีความลาดชัน 0.05 นิ้ว/ตัน (รูปที่ 2.15 ช) สำหรับวิธีของ Butler & Hoy (1977) ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติมีค่าเท่ากับค่าที่จุดที่เส้นสัมผัสส่วนโค้งมีความลาดชัน 0.05 นิ้ว/ตัน ตัดกับส่วนของเส้นตรงเริ่มต้นของส่วนโค้งหรือเส้นขนานกับเส้น Rebound Curve หรือเส้นอิลาสติกเริ่มต้น ดูรูปที่ 2.21 ช

๗.วิธีของ Vander Veen (1953)

การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติหาโดยสมมติค่า $(Q_v)_{ult}$ ที่ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \{ (1 - Q_v) / (Q_v)_{ult} \}$ กับ ค่าการทรุดตัวนั้น ๆ มีรูปแบบเป็นเส้นตรง ซึ่งค่าที่สมมติจะเป็นค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติ ดูรูปที่ 2.21 ๗

รายละเอียดวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติจากการทดสอบในแต่ละวิธี จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 รูปแบบวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติจากการทดสอบเสาเข็ม (Fellenius, 1980)