



## บทที่ 2

### ทฤษฎีการออกแบบเสาเข็มและโปรแกรมการออกแบบ

#### 2.1 ฐานรากเสาเข็ม

เสาเข็มเป็นโครงสร้างเพื่อรับน้ำหนักหรือถ่ายน้ำหนักลงบนชั้นดินที่แข็งแรงกว่าเบื้องล่างโดยมักทำมาจากเหล็ก, คอนกรีต หรือไม้เพื่อรับน้ำหนักจากโครงสร้างถ่ายลงสู่ชั้นดินในระดับที่สามารถรับน้ำหนักนั้นได้ ทั้งยังทำให้การทรุดตัวลดลงจนไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับสิ่งก่อสร้างและใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ และการใช้เสาเข็มควรพิจารณาในแง่ของความปลอดภัยของโครงสร้างก่อนจะคำนึงถึงราคาค่าก่อสร้างของเสาเข็ม โดยมีเงื่อนไขที่ใช้สำหรับพิจารณาการออกแบบ ดังนี้

1. หากดินชั้นบนหรือระดับต้นมีความสามารถในการรับกำลังน้ำหนักของโครงสร้างไม่พอ รวมถึงดินมีค่าการอัดตัวมาก ๆ และชั้นดินแข็งที่สามารถรับน้ำหนักอยู่ลึก ควรพิจารณาใช้เสาเข็มเพื่อถ่ายน้ำหนักลงชั้นดินแข็งหรือชั้นหิน ดังรูป 2.1(a) แต่ถ้าชั้นดินแข็งหรือชั้นหินอยู่ลึกเกินไป การถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างจะถ่ายน้ำหนักไปที่พื้นที่รอบๆผิวเสาเข็มโดยใช้ ใช้แรงเสียดทาน ( Friction ) ในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง ดังรูป 2.1(b)

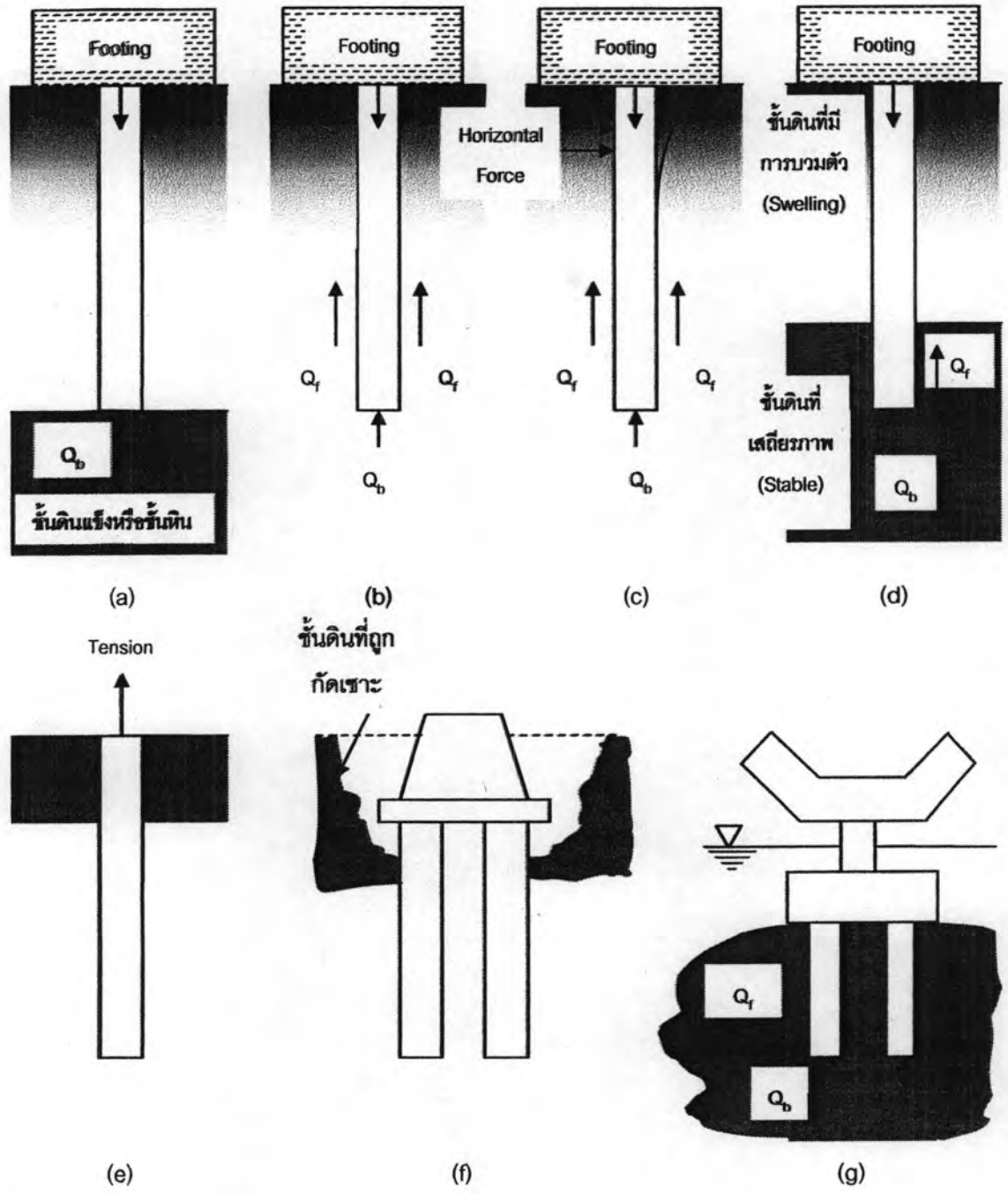
2. หากต้องก่อสร้างเสาเข็มในดินประเภทที่ขยายได้ (Expansive Soil) ซึ่งดินประเภทนี้ถ้าได้รับความชื้น (Moisture Content) จะเกิดการบวมตัว (Swell) และถ้าสูญเสียความชื้นมาก ๆ จะเกิดการหดตัว (Shrinkage) และดินอีกประเภทคือดินที่เกิดการพังทลาย (Collapsible Soil) หากดินประเภทนี้ได้รับความชื้นมาก ๆ จะเกิดการพังทลายอย่างรวดเร็วเช่นพวกดินที่มีการกระจายตัว (Dispersive soil) เป็นต้น ทำให้เราควรที่หลีกเลี่ยงการถ่ายน้ำหนักลงบนชั้นดินประเภทนี้จึงควรใช้เสาเข็มแทนฐานรากตื้น (Shallow Foundation) เพื่อถ่ายน้ำหนักลงบนชั้นดินที่เสถียรภาพ (Stable Soil) มากกว่า ดังรูป 2.1(d) หรือตอกเสาเข็มจนพ้นชั้นดินที่มีปัญหา

3. ฐานรากที่ต้องต้านทานแรงดึง (Tension) เช่น ตึกสูง (High Tower) หรือพวกฐานรากที่ต้องต้านทานแรงยกตัวของฐานราก (Uplifting Force) เช่น ฐานรากที่อยู่ใต้ระดับน้ำ ควรออกแบบให้ต้านทานแรงดังกล่าวได้ดังรูป 2.1(e) และโมเมนต์ที่มากกระทำ

4. การก่อสร้างต่อม่อสะพาน (Bridge Abutment) ต้องเผชิญกับปัญหาการกัดเซาะฐานราก (Erosion) ของแรงดันกระแส น้ำทำให้ฐานรากตื้น (Shallow Foundation) สูญเสีย

ความสามารถในการรับน้ำหนัก ดังนั้นให้การก่อสร้างเราควรก่อสร้างต่อม่อวางไว้บนฐานราก  
เสาเข็มอีกทีเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว ดังรูป 2.1 (f)

5. การก่อสร้างฐานรากบริเวณชายฝั่งทะเล (Beach) หรือ ในทะเลสาป (Lake) ควรจะ  
เลือกฐานรากแบบเสาเข็มเพื่อถ่ายน้ำหนักลงบนชั้นดินที่แข็งแรงดังรูป 2.1 (g) เพื่อรับแรง  
ด้านข้างที่จะเกิดจากคลื่นทะเลหรือกระแสน้ำ



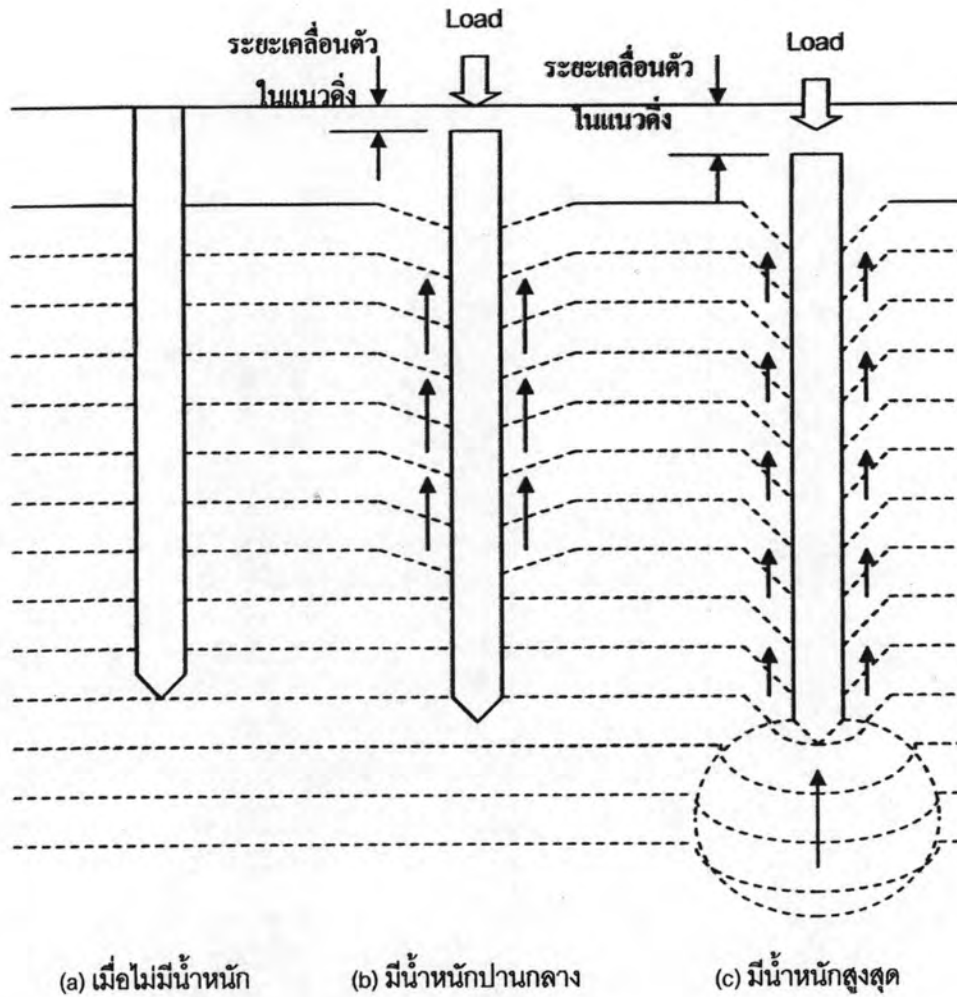
รูปที่ 2.1 ลักษณะของการเลือกใช้ฐานรากเสาเข็มในกรณีต่างๆ

## 2.2 พฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มลงบนชั้นดิน

การก่อสร้างเสาเข็มไม่ว่าวิธีใดก็ตาม เมื่อเราไม่พิจารณาระบบการก่อสร้างจนกระทั่งแล้วเสร็จ โดยปกติเสาเข็มนั้นเมื่อติดตั้งแล้วเสร็จบริเวณปลายเสาเข็มจะมี excess pore pressure ดันที่ปลายเสาเข็มทำให้เสาเข็มมีการเคลื่อนที่เล็กน้อย และเมื่อเราเริ่มบรรทุกน้ำหนักลงบนหัวเสาเข็ม เสาเข็มจะเริ่มมีพฤติกรรมต่อต้านน้ำหนักที่บรรทุกโดยดินที่หุ้มรอบๆ เสาเข็มอยู่ เมื่อรับน้ำหนักไม่ไหวจึงมีการถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินที่ปลายเสาเข็มซึ่งจะพยายามดันน้ำหนักบรรทุกไว้เช่นกัน ส่วนตัวเสาเข็มกับชั้นดินที่รับน้ำหนักก็จะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของน้ำหนักบรรทุก โดยถ้าน้ำหนักบรรทุกยิ่งมากยิ่งทำให้การเคลื่อนที่ของเสาเข็มกับชั้นดินยิ่งมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากเกินไป จนชั้นดินไม่สามารถที่จะรองรับได้อีกก็จะเกิดการวิบัติรอบๆ เสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งจุดๆ นั้นเรียกว่า น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Bearing Load) ซึ่งเมื่อผ่านจุดนี้ไปเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนที่ลงมาก

โดยคุณสมบัติทางอีลาสติกที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ซึ่งเราจะพิจารณาการพัฒนาของกำลังของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม (Skin Friction Pile) โดยจะเพิ่มมากที่สุดเมื่อการเคลื่อนที่ระหว่างเสาเข็มและดินมีระยะประมาณ 5-10 มม. โดยไม่เกี่ยวข้องกับขนาดและความยาวของเสาเข็ม แต่เราจะพิจารณาแรงที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Pile) ก็ต่อเมื่อเสาเข็มมีการเคลื่อนที่ลงมากกว่า 1 เซนติเมตรของเสาเข็มตอก และประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะในกรณีที่มีการควบคุมการก่อสร้างที่ดี (ผศ.ร.ต.หญิง วรณี ศุขสาตร)

เนื่องจากการตอกจะทำให้ดินบริเวณปลายเสาเข็มมีการอัดตัวแน่นกว่ากระบวนการเจาะ กำลังของแรงเสียดทานของเสาเข็มจะมีการพัฒนาจนมีมากที่สุดก่อนกำลังของแรงที่ปลายเสาเข็มดังในรูป 2.2 (b) จะเห็นความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ระหว่างดินและเสาเข็ม ซึ่งแรงเสียดทานด้านข้างจะมีค่าเกือบจะคงที่ถึงแม้จะมีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มอยู่ในรูป 2.2 (c) ซึ่งจะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ระหว่างดินและการรับแรงที่ปลายเสาเข็มยกเว้นในดินเหนียวแข็ง ( Stiff Clay ) จะมีค่าลดลงเมื่อเสาเข็มเคลื่อนที่ลงเพื่อพัฒนากำลังไปให้ถึงจุดสูงสุด



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมของดินในการเคลื่อนตัวบริเวณเสาเข็ม

### 2.3 ลักษณะดินบริเวณเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร

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

### 2.3.1 ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

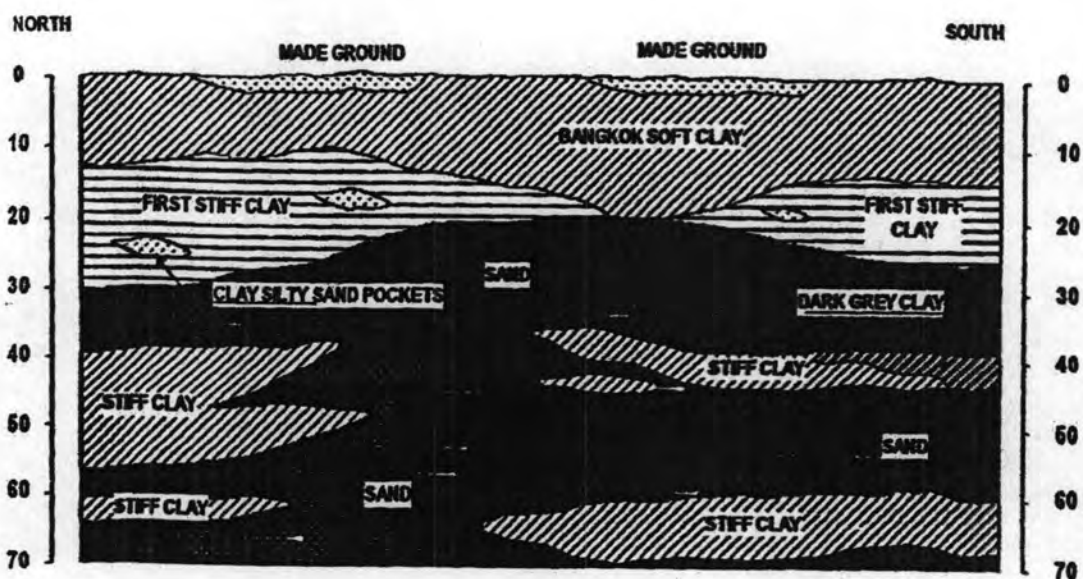
ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ ได้เคยมีการศึกษาทางคุณสมบัติทางวิศวกรรมในอดีตที่ผ่านมามากมาย ซึ่งสามารถสรุปลักษณะชั้นดินแต่ละชั้นจากผิวดินดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.3 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ก. ดินชั้นบน (Top Soil or Weathered Bangkok Clay) มีลักษณะเป็นดินเหนียวสีเทาและน้ำตาล มีความหนาประมาณ 1-4 เมตร มักอยู่ในสภาพที่มีความแข็งปานกลางเนื่องจากดินชั้นนี้ถูกแปรสภาพมาก 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) เป็นดินเหนียวแข็งชั้นแรกสีเทาและน้ำตาลที่มีความหนาประมาณ 5-10 เมตร ความหนาจะน้อยในบริเวณทางเหนือและตะวันตกของส่วนกลางกรุงเทพฯ ค่าปริมาณความชื้นประมาณ 20-30% และค่า  $S_u$  ประมาณ 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 ลักษณะดินมีแนวโน้มที่จะเป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นเกินตัวน้อยหรือสภาพกักแน่นปกติ (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	$\gamma$ ( $t/m^3$ )	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)

รูปที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ (Teparaksa, 1999)

### 2.3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ

#### ก. ดินเหนียว

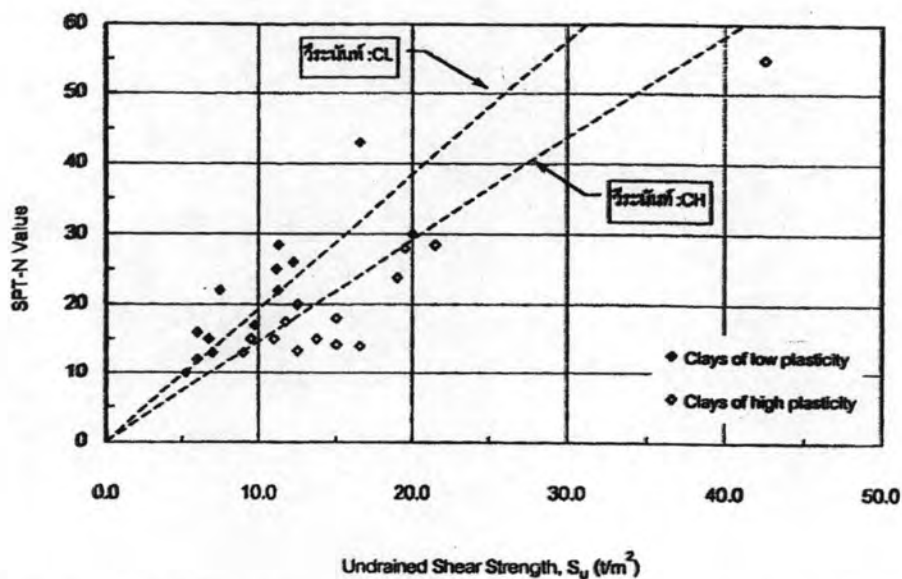
ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $S_u$ ) สามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและจากการทดสอบในสนาม โดยทั่วไปค่า  $S_u$  จะได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแรงเฉือนโดยแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) หรือการใช้ความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า  $N$  จากการทดสอบ SPT กับ  $S_u$

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N$  กับค่า  $S_u$  สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ชั้นแรกนั้น วีรพันธ์ (2526) ได้ให้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N$  จากการทดสอบ SPT กับ  $S_u$  ดังนี้

$$S_u = 0.685 N \text{ (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียว CH} \quad (2.1)$$

$$S_u = 0.520 N \text{ (ตันต่อตารางเมตร) สำหรับดินเหนียว CL} \quad (2.2)$$

$N$  วัดในค่าจำนวนครั้งต่อฟุต โดยการจำแนกดินเหนียวใช้ระบบ Unified Soil Classification และค่า  $N$  ที่ใช้เป็นค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้และควรมากกว่า 8 เมื่อรวมผลวิเคราะห์เพิ่มเติมจากการศึกษาของแมนสรวง, มนัสพลและณัฐพล (2540) ดังแสดงในรูป 2.4 พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้สอดคล้องกับผลการวิจัยของวีรพันธ์



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N$  กับ  $S_u$  (แมนสรวง, มนัสพลและณัฐพล, 2540)

### ข. ดินทราย

สำหรับชั้นทราย ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure;  $\sigma'_{vo}$ ) และค่ามุมต้านแรงเฉือน (Angle of Internal Friction;  $\phi$ ) สำหรับดินกรุงเทพฯ จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากการสูบน้ำใต้ดินซึ่งมีผลทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินผิดปกติ

-ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective Overburden Pressure;  $\sigma'_{vo}$ ) การคำนวณหาค่า  $\sigma'_{vo}$  ต้องรู้ค่าความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักรวมของมวลดินและค่าแรงดันน้ำ ณ จุดที่พิจารณา (Total Unit Weight of soil and The Pore Pressure at a particular dept) ซึ่งหาได้จากการวัดในสนามหรือการใช้ค่าความสัมพันธ์แบบ Empirical ที่เคยมีการวิจัย

ค่าแรงดันน้ำในมวลดินสำหรับดินกรุงเทพฯ จะต้องพิจารณาผลของการสูบน้ำใต้ดินที่มีต่อแรงดันน้ำในมวลดิน ซึ่ง NG (1983) ได้เสนอความสัมพันธ์ ดังนี้

$$U = 0.747(D - 15) \quad (2.3)$$

โดย

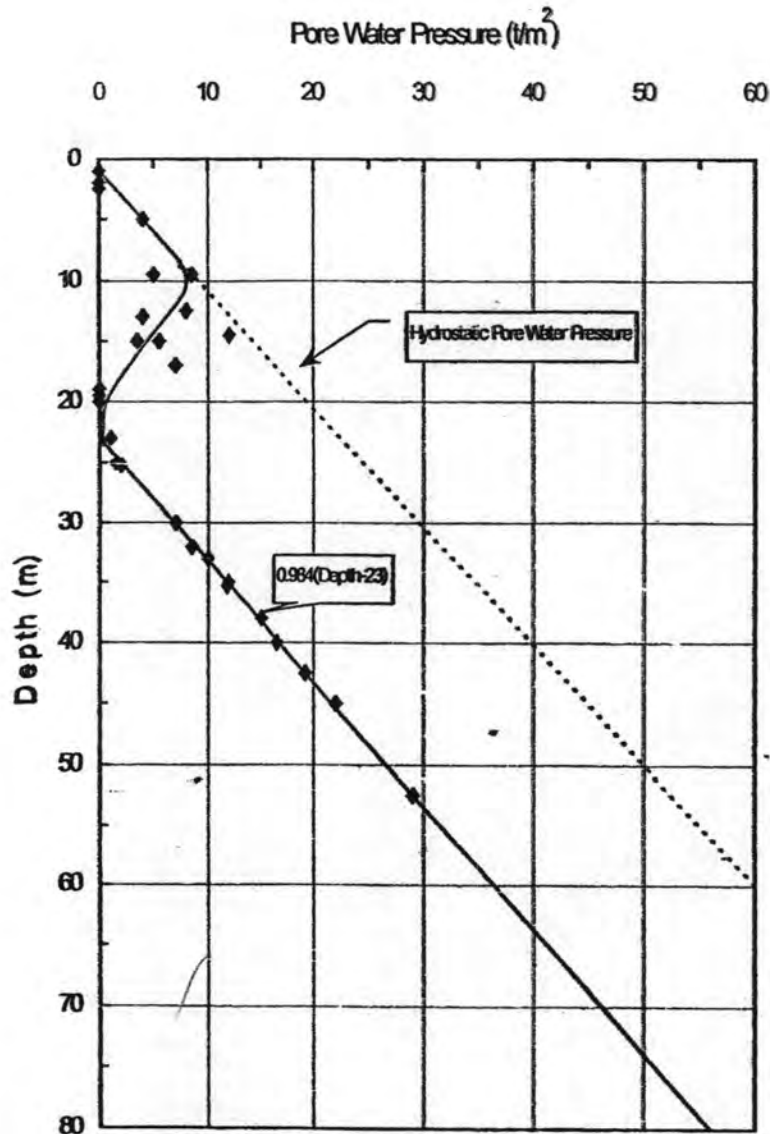
$$U = \text{แรงดันน้ำ (ตัน/ตารางเมตร)}$$

$$D = \text{ความลึก (เมตร)}$$

จากข้อมูลการวัดแรงดันน้ำใต้ดินของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินที่มีการก่อสร้างในขณะนี้ (2542) พบว่าผลของการสูบน้ำใต้ดินในกรุงเทพฯ ได้ให้ค่าแรงดันน้ำในมวลดินเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยแรงดันน้ำในมวลดินสำหรับดินกรุงเทพฯ หาได้จาก

$$U = 0.984(D - 23) \quad (2.4)$$





รูปที่ 2.5 แรงดันน้ำสำหรับดินกรุงเทพฯ (Teparaksa, 1999)

-ค่ามุมต้านแรงเฉือน (Angle of Internal Friction;  $\phi$ ) สำหรับทรายจะใช้ในรูปแบบหน่วยแรงประสิทธิผล ( $\phi'$ ) การหาค่ามุม  $\phi'$  สามารถหาได้จากการทดสอบ Direct Shear หรือ Triaxial ในห้องปฏิบัติการ แต่ทั้งนี้อาจเกิดปัญหาต่างๆ คือความยากลำบากในการเก็บตัวอย่างทรายให้อยู่ในสภาพตามธรรมชาติโดยไม่ถูกรบกวน นอกจากนี้ในการทดสอบ Triaxial สำหรับตัวอย่างทรายอาจจะเกิดปัญหาการเตรียมตัวอย่างเป็นรูปทรงกระบอกและต้องใช้ membrane ที่หนาพอๆ ธรรมดา

การหาค่ามุม  $\phi'$  โดยวิธีการทดสอบในสนามในรูปแบบความสัมพันธ์แบบ empirical ได้มีผู้เสนอไว้มากมาย เช่น สำหรับดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) วีรพันธ์ (2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม  $\phi'$  กับค่า SPT-N Value ซึ่งได้จากผลวิเคราะห์กลับจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ดังนี้

$$\phi' = 12.041N^{0.162} \quad (2.5)$$

โดย  $N$  ที่ใช้เป็นค่าที่วัดได้โดยไม่ต้องมีการปรับแก้  $N$  อยู่ในหน่วย ครั้งต่อฟุต

Peck , Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.6 ซึ่งเหมาะสำหรับทรายละเอียดที่ไม่มีดินเหนียวปนอยู่แต่อาจมีทรายแป้งปนอยู่ได้บ้าง สำหรับชั้นทรายกรุงเทพฯ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินทรายปนดินแป้ง (Silty Sand, SM) ผลการศึกษาของ Thanudkleung (1974) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม  $\phi'$  กับค่า SPT - N Value ที่ได้มีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Peck , Hanson & Thornburn (1974) โดยที่ค่า  $N$  จะต้องทำการปรับแก้เนื่องจากผลของ  $\sigma'_{vo}$  ที่เสนอโดย Peck , Hanson & Thornburn (1974) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยมีสมการการปรับแก้ดังนี้

$$N' = C_N \times N \quad (2.6)$$

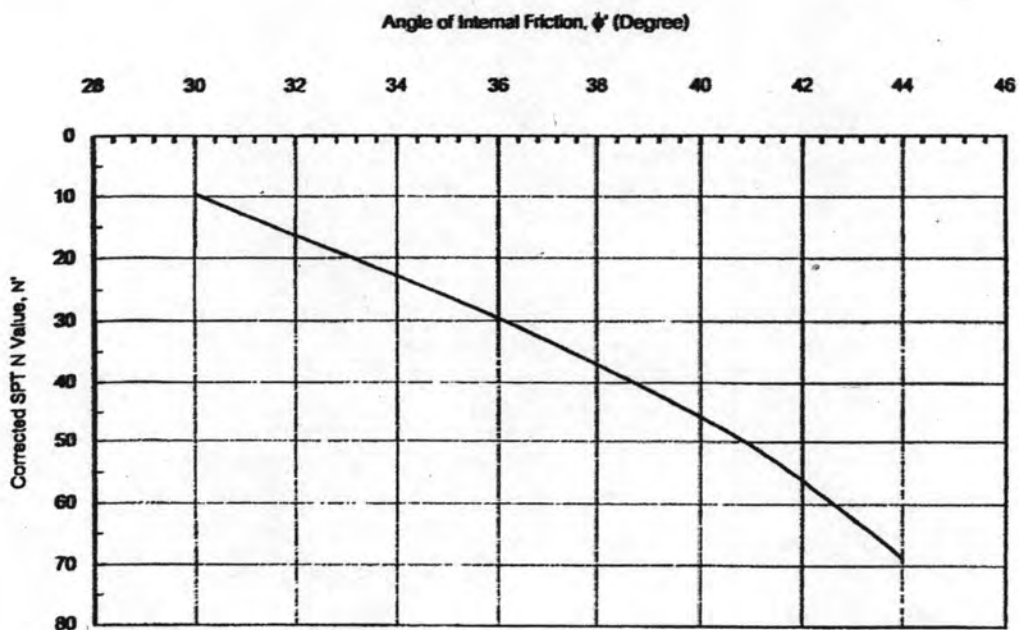
$$C_N = 0.77 \log (20 / \sigma'_{vo}) \quad (2.7)$$

โดย

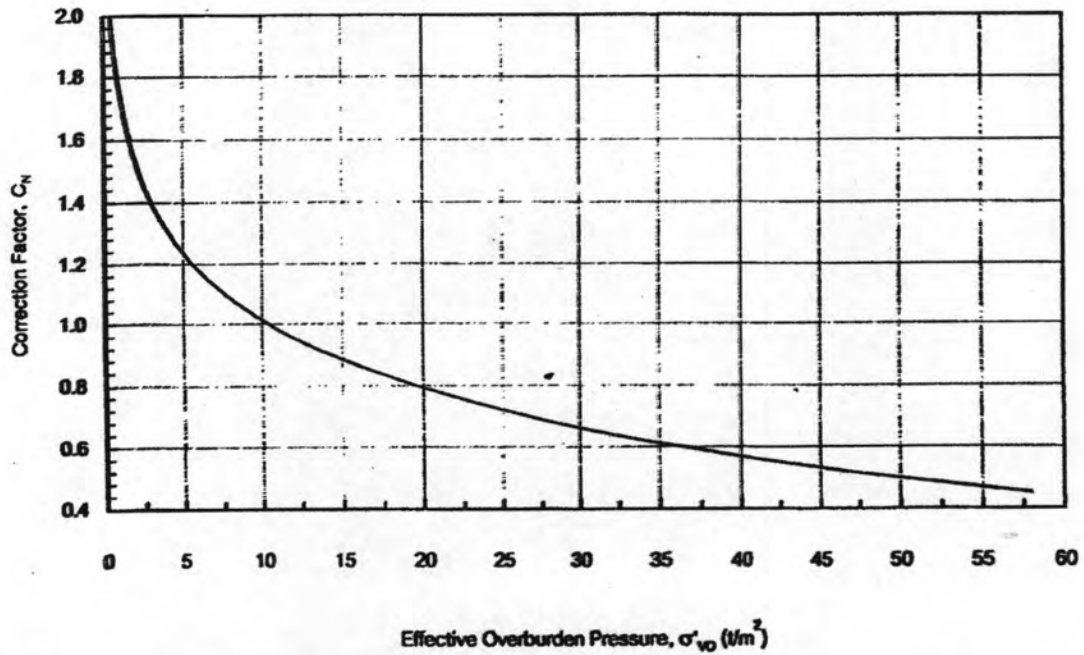
$$N' = \text{ค่า } N \text{ ที่ได้รับการปรับแก้}$$

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

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



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N'$ (SPT)กับค่า  $\phi'$  (Peck , Hanson & Thornburn, 1974)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_N$  กับค่า  $\sigma'_{vo}$  (Peck , Hanson & Thornburn, 1974)

#### 2.4 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของดินรองรับฐานราก (Ultimate Bearing Capacity of Soil ; $Q_u$ )

การพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวที่ปลายเสาเข็มที่วางไว้บนชั้นดินที่สามารถแบกรับน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายลงมาบนเสาเข็มเดี่ยวเรียกชั้นชั้นนี้ว่า Bearing Stratum หรืออาจจะวางบนชั้นหินแข็ง (Rock Stratum) โดยสมการกำลังรับน้ำหนักประลัยจะเท่ากับ

$$Q_u = Q_b + Q_f - W_p \quad (2.8)$$

โดยที่

$Q_b$  = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็ม

$Q_f$  = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกระหว่างเสาเข็มกับชั้นดิน

$W_p$  = น้ำหนักเสาเข็ม

##### 2.4.1 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดินรองรับฐานรากโดยปลอดภัย (Gross Allowable Bearing Capacity, $Q_{all}$ )

ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในการออกแบบในงานทางด้านวิศวกรรม ดังสมการ

$$Q_{all} = \frac{Q_b + Q_f}{F.S.} - W_p \quad (2.9)$$

ซึ่งการกำหนดค่าความปลอดภัย (Factor of safety, F.S.) สำหรับดินในบริเวณ กรุงเทพมหานคร นั้น ก็มีการกำหนดไว้ในกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ซึ่งออกตามความใน พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทย ไว้ว่า

- ให้ใช้กำลังแบกทานได้ไม่เกิน 50% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด
- เสาค้ำต้องทรุดตัวต้องไม่เกิน 25 มม. และอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยต้องไม่เกิน 0.25 มม. ต่อต้น เมื่อทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่น้ำหนักสูงสุดต้องไม่เกิน 6 มม.

และในข้อบัญญัติกรุงเทพมหานครเรื่องควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ.2522

- ให้ใช้กำลังแบกทานได้ไม่เกิน 50% ของกำลังแบกทานสูงสุด
- อัตราการทรุดตัวที่ก้ำลังแบกทานสูงสุดต้องไม่เกิน 0.25 มม. ต่อต้นและการทรุดตัวสุทธิต้องไม่เกิน 6 มม. หลังจากทิ้งน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 24 ชั่วโมง

(คณะกรรมการสภาวิศวกรมปฏิฐพี คณะกรรมการวิชาการสภาวิศวกรมโยธา ,2542)

## 2.5 กำลังรับน้ำหนักประลัยที่ปลายเสาค้ำ (Ultimate End Bearing Load; $Q_u$ )

เมื่อปลายเสาค้ำวางอยู่บนชั้นดินแข็งหรือชั้นหินนั้นกำลังที่ถ่ายลงมาบนเสาค้ำนั้น จะถ่ายทอดลงไปบนชั้นดินแข็งหรือชั้นหินค่าจึงทำให้ค่าแรงเสียดทานระหว่างเสาค้ำกับดินรอบข้าง ( $Q$ ) น้อยมาก ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจะมีค่าประมาณ

$$Q_u = Q_b - W_p \quad (2.10)$$

### 2.5.1 กำลังรับน้ำหนักประลัยที่ปลายเสาค้ำแบ่งตามค่าสัมประสิทธิ์ในการรับน้ำหนักบรรทุก (Bearing Capacity Factor)

#### 2.5.1.1 สำหรับการออกแบบในดินทุกประเภท

Terzaghi (1943)

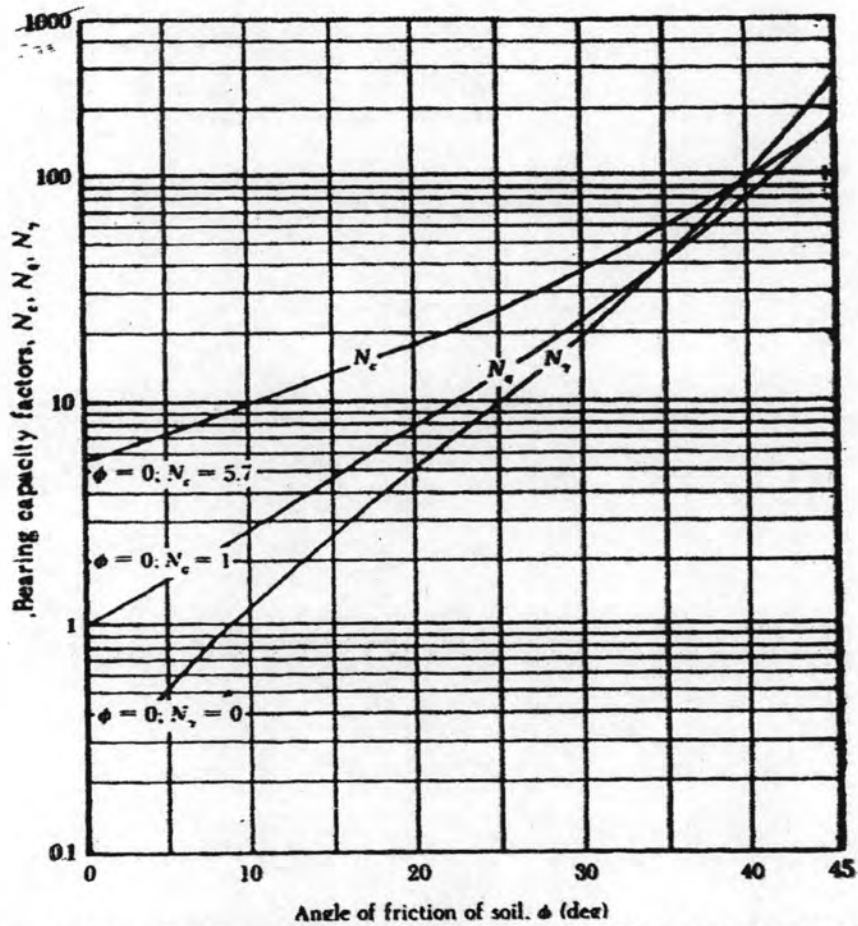
Terzaghi (1943) ได้เสนอสมการการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาค้ำในชั้นดินเหนียวและดินทราย ไว้ดังสมการ

$$Q_b = A_b (1.3c'N_c + qN_q + k\gamma DN_\gamma) \quad (2.11)$$

เมื่อ  $k = 0.4$  สำหรับการออกแบบเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Pile) และ  $k = 0.3$  สำหรับการออกแบบเสาเข็มรูปหน้าตัดวงกลม (Circular Pile)

โดยที่ค่า

- $A_b$  = พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม
- $s_u$  = ค่า Undrained Shear Strength
- $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
- $q$  = ค่า Surcharge จากดินส่วนที่อยู่เหนือระดับปลายเสาเข็ม
- $N_c, N_q, N_\gamma$  = Bearing Capacity Factor ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงค่า Bearing Capacity Factor, :  $N_c, N_q, N_\gamma$  (Terzaghi, 1943)



ตารางที่ 2.2 Bearing Capacity Factors (C.M Martin, 2005)

$\phi$ (°)	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$				
	$\delta/\phi = \text{any}$	$\delta/\phi = \text{any}$	$\delta/\phi = 0$	$\delta/\phi = 1/3$	$\delta/\phi = 1/2$	$\delta/\phi = 2/3$	$\delta/\phi = 1$
0	5.14159	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	5.37926	1.09390	0.0106339	0.0110586	0.0112596	0.0114539	0.0118240
2	5.63160	1.19666	0.0242179	0.0257878	0.0265319	0.0272506	0.0286045
3	5.89977	1.30919	0.0408212	0.0443525	0.0460261	0.0476371	0.0506295
4	6.18504	1.43250	0.0607622	0.0672331	0.0702954	0.0732293	0.0785916
5	6.48882	1.56770	0.0844649	0.0950574	0.100057	0.104821	0.113371
6	6.81264	1.71604	0.112443	0.128586	0.136180	0.143368	0.156020
7	7.15820	1.87892	0.145304	0.168723	0.179693	0.190002	0.207770
9	7.92217	2.25475	0.228629	0.273262	0.293945	0.313066	0.344540
10	8.34493	2.47144	0.280879	0.340379	0.367775	0.392867	0.433164
11	8.79814	2.71019	0.341627	0.419603	0.455253	0.487578	0.538175
12	9.28461	2.97351	0.412173	0.512957	0.558674	0.599689	0.662191
13	9.80746	3.26423	0.494036	0.622817	0.680737	0.732111	0.808259
14	10.3701	3.58556	0.588986	0.751982	0.824616	0.888264	0.979939
15	10.9765	3.94115	0.699096	0.903758	0.994049	1.07216	1.18139
16	11.6309	4.33511	0.826793	1.08205	1.19345	1.28852	1.41748
17	12.3381	4.77215	0.974928	1.29147	1.42803	1.54291	1.69393
18	13.1037	5.25764	1.14685	1.53753	1.70397	1.84190	2.01746
19	13.9336	5.79771	1.34653	1.82673	2.02861	2.19325	2.39600
20	14.8347	6.39939	1.57862	2.16686	2.41065	2.60618	2.83894
21	15.8149	7.07076	1.84869	2.56721	2.86050	3.09162	3.35737
22	16.8829	7.82112	2.16332	3.03892	3.39057	3.66260	3.96449
23	18.0486	8.66119	2.53035	3.59535	4.01573	4.33468	4.67604
24	19.3235	9.60339	2.95919	4.25262	4.75384	5.12649	5.51080
25	20.7205	10.6621	3.46108	5.03017	5.62641	6.06038	6.49131
26	22.2544	11.8542	4.04956	5.95158	6.65942	7.16328	7.64467
27	23.9422	13.1991	4.74097	7.04550	7.88433	8.46773	9.00358
28	25.8033	14.7199	5.55510	8.34686	9.33941	10.0132	10.6076
29	27.8605	16.4433	6.51599	9.89841	11.0713	11.8475	12.5050
30	30.1396	18.4011	7.65300	11.7527	13.1371	14.0294	14.7543
31	32.6711	20.6308	9.00208	13.9744	15.6069	16.6306	17.4275
32	35.4903	23.1768	10.6074	16.6437	18.5673	19.7393	20.6131
33	38.6383	26.0920	12.5237	19.8603	22.1254	23.4649	24.4203
34	42.1637	29.4398	14.8188	23.7485	26.4145	27.9427	28.9849
35	46.1236	33.2961	17.5771	28.4643	31.6012	33.3421	34.4761
36	50.5855	37.7525	20.9049	34.2044	37.8947	39.8748	41.1059
37	55.6296	42.9199	24.9357	41.2180	45.5591	47.8083	49.1416
38	61.3518	48.9333	29.8388	49.8224	54.9296	57.4811	58.9219
39	67.8668	55.9575	35.8302	60.4242	66.4339	69.3250	70.8787
40	75.3131	64.1952	43.1866	73.5471	80.6214	83.8937	85.5656
41	83.8583	73.8969	52.2656	89.8703	98.2022	101.902	103.697
42	93.7064	85.3736	63.5316	110.280	120.100	124.280	126.203
43	105.107	<b>99.0143</b>	<b>77.5929</b>	<b>135.943</b>	<b>147.525</b>	<b>152.243</b>	154.300

ตารางที่ 2.2 Bearing Capacity Factors ของ Terzaghi (C.M Martin, 2005) (ต่อ)

φ (°)	N <sub>c</sub>	N <sub>q</sub>	N <sub>γ</sub>				
	δ/φ = any	δ/φ = any	δ/φ = 0	δ/φ = 1/3	δ/φ = 1/2	δ/φ = 2/3	δ/φ = 1
44	118.369	115.308	95.2519	168.401	182.075	187.396	189.592
45	133.874	134.874	117.576	209.715	225.876	231.874	234.213
46	152.098	158.502	145.996	262.657	281.784	288.541	291.026
47	173.640	187.206	182.449	330.993	353.662	361.270	363.907
48	199.259	222.300	229.584	419.882	446.795	455.359	458.150
49	229.924	265.497	291.056	536.469	568.482	578.119	581.067
50	266.882	319.057	371.967	690.752	728.912	739.755	742.863
51	311.752	385.982	479.523	896.883	942.480	954.679	957.947
52	366.660	470.304	624.024	1175.14	1229.77	1243.49	1246.92
53	434.421	577.496	820.392	1554.95	1620.59	1636.04	1639.63
54	518.805	715.074	1090.56	2079.65	2158.80	2176.18	2179.93
55	624.924	893.484	1467.23	2814.00	2909.77	2929.35	2933.25
56	759.793	1127.44	2000.05	3856.36	3972.74	3994.80	3998.85
57	933.170	1437.96	2765.60	5358.81	5500.86	5525.73	5529.93
58	1158.83	1855.52	3884.45	7560.90	7735.20	7763.26	7767.58
59	1456.54	2425.08	5550.24	10847.9	11063.0	11094.7	11099.1
60	1855.10	3214.14	8081.21	15853.6	16120.6	16156.5	16161.0

Meyerhof (1963)

Meyerhof (1963) ได้ศึกษากำลักรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ปลายเสาเข็ม ( $q_b$ ) สำหรับออกแบบเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทราย

$$Q_b = A_b (c'N_c F_{cd} + q'N_q F_{qd}) \quad (2.12)$$

โดยที่ค่า

- $A_b$  = พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม
- $c$  = cohesion ของชั้นดินรองรับปลายเสาเข็ม
- $q'$  = ค่า Effective Surcharge ของชั้นดินจากผิวดินจนถึงปลายเสาเข็ม
- $N_c, N_q$  = Bearing Capacity Factor

สามารถหาได้จาก  $N_c = (N_q - 1) \cot \phi'$  (2.12.1)

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2.12.2)$$

$F_{cd}, F_{qd}$  = Depth Factor จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงวิธีการหาค่า  $F_{cd}, F_{qd}$  ของ Hansen (1970)

Factor	Relationship
Depth	เมื่อ $D_f/B \leq 1$ ; $F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \frac{D_f}{B}$
	เมื่อ $D_f/B \geq 1$ ; $F_{cd} = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{D_f}{B}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \tan^{-1} \left( \frac{D_f}{B} \right)$

แต่เมื่อปลายเสาเข็มจมอยู่ในชั้นดินเหนียวซึ่งมีค่า  $\phi' = 0$  แล้วทำให้ค่า  $N_q$  มีค่าเท่ากับ 1.0 และค่า  $N_c$  เท่ากับ 5.14 จากสมการที่ 2.12 ค่า  $c'$  จะกลายเป็นค่า  $s_u$

Janbu (1976)

Janbu (1976) ได้ออกแบบวิธีการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_b$ ) เมื่อปลายเสาเข็มจมอยู่ในชั้นทราย ดังสมการ

$$Q_b = A_b (c' N_c + (\sigma'_z)_b N_q) \quad (2.13)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ในการรับน้ำหนักบรรทุก (Bearing Capacity Factor) สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$N_q = \left( \tan \phi' + \sqrt{1 + \tan^2 \phi'} \right)^2 \exp^{2\eta' \tan \phi'} \quad (2.13.1)$$

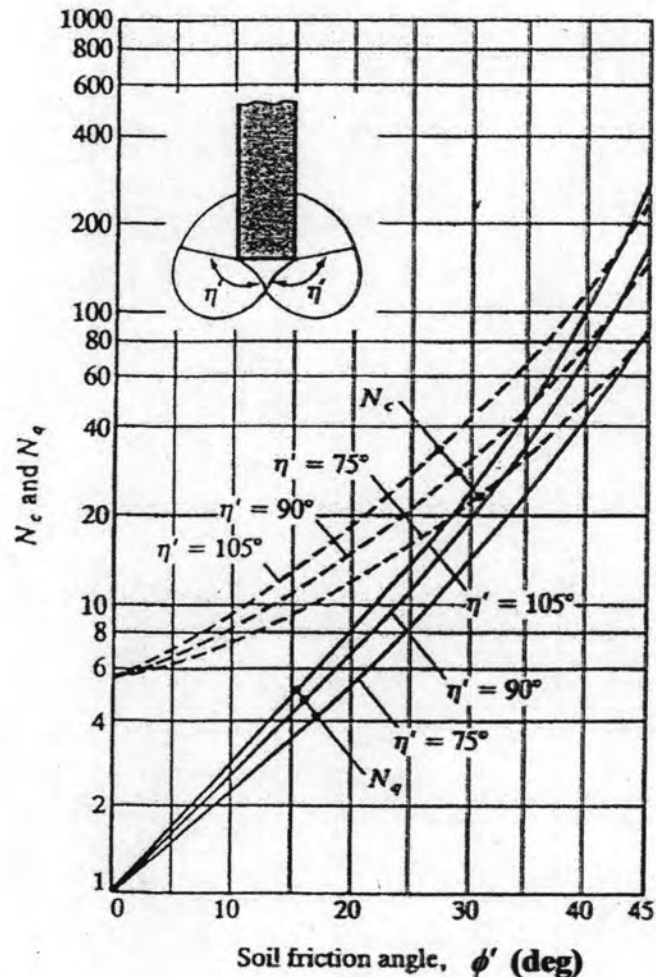
$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (2.13.2)$$

โดยค่า

$\eta'$  = ค่ามุมของ Plastic dilation ดังแสดงในรูปที่ 2.8

$\eta' = 60^\circ$  (สำหรับดินเหนียวอ่อน) ถึง  $105^\circ$  (สำหรับชั้นทรายแน่น)

โดยที่  $\eta'$  จะมีค่าน้อยก็ต่อเมื่อเป็นดินในสภาพอ่อน, ดินเม็ดละเอียด (Soft, fine-grained soil) และจะมีค่ามากก็ต่อเมื่อเป็นดินสภาพอัดแน่น, เนื้อหยาบ (Dense, coarse-grained soil) และ ดินเม็ดละเอียดที่ผ่านการบดอัดตัวแน่นแล้ว (Overconsolidation, fine-grained)



รูปที่ 2.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การรับน้ำหนัก (Janbu, 1976)

ที่มา: Janbu (1976)

แต่เมื่อปลายเสาเข็มจมอยู่ในชั้นดินเหนียวซึ่งมีค่า  $\phi' = 0$  แล้วทำให้ค่า  $N_q$  มีค่าเท่ากับ 1.0 และค่า  $N_c$  เท่ากับ 5.74 จากสมการที่ 2.13 ค่า  $c'$  จะกลายเป็นค่า  $s_u$

Vesic (1977)

Vesic (1977) ได้นำเสนอวิธีในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_b$ ) โดยได้นำหลักการของทฤษฎี Cavities Expansion Theory โดยมาจาก Effective Stress Parameter เมื่อปลายเสาเข็มจมอยู่ในชั้นทราย ดังสมการ

$$Q_b = A_b (c' N^*_c + \sigma'_o N^*_\sigma) \quad (2.14)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} \sigma'_o &= \text{Mean normal ground stress ตรงปลายเสาเข็ม} \\ &= \left( \frac{1+2K_0}{3} \right) q' \end{aligned}$$

โดยที่ค่า

$$\begin{aligned} K_0 &= \text{สัมประสิทธิ์แรงดันของดิน (Earth pressure coefficient)} \\ &= (1 - \sin \phi') \end{aligned}$$

$N^*_\sigma, N^*_c$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการรับน้ำหนักบรรทุก (Bearing capacity factor) ที่พิจารณาค่า Shape factor และค่า Depth factor แล้ว

$$N^*_\sigma = \frac{3N^*_q}{(1+2K_0)} \quad (2.14.1)$$

$$N^*_c = (N^*_q - 1) \cot \phi' \quad (2.14.2)$$

โดยที่ค่า

$$N^*_\sigma = f(I_r) \quad (2.14.3)$$

$I_r$  = ค่า Rigidity Index ของดินที่ปรับค่าแล้ว

$$I_r = \frac{I_r}{1 + I_r \varepsilon_v}$$

โดยที่ค่า

$I_r$  = Rigidity index

$$I_r = \frac{E_s}{2(1+\nu)(c' + q' \tan \phi')} \quad (2.14.4)$$

$$I_r = \frac{G}{c' + q' \tan \phi'} \quad (2.14.5)$$

$E_s$  = ค่ายังโมดูลัส (Young's Modulus) ของดิน



- $\nu$  = ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ของดิน  
 $G$  = ค่าโมดูลัสแรงเฉือน (Shear Modulus) ของดิน  
 $\epsilon_v$  = ค่า Volumetric Strain ที่เกิดโดยเฉลี่ยภายใต้ปลายเสาเข็มในสถานะ Plastic

สำหรับดินที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า Volumetric Strain ( $\Delta=0$ ) อาทิเช่น ดินทรายอัดตัวแน่น (Dense Sand) หรือ ดินเหนียวอิ่มตัว (Saturated Clay) จะทำให้ค่า

$$I_r = I_{rr}$$

ค่าของ  $N_c^*$ ,  $N_c^*$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า Angle of Friction ( $\phi'$ ) และค่า  $I_{rr}$  ของดิน โดยตรวจสอบจากตารางที่ 2.5 แต่เมื่อปลายเสาเข็มจมอยู่ในชั้นดินเหนียวทำให้ค่า  $\phi' = 0$  หรืออยู่ในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained) แล้ว

$$N_c^* = \frac{4}{3}(\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (2.14.6)$$

ค่าของ  $I_r$  นั้นสามารถหาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยวิธี Consolidation และ Triaxial Test แต่ก็ได้มีการแบ่งค่าของ  $I_r$  จำแนกไว้ตามชนิดของดิน ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ค่า  $I_r$  ที่แบ่งตามชนิดของดิน

ประเภทของดิน	ค่า $I_r$
ทราย(Sand)	70-150
โคลนและดินเหนียว(Silt and Clay)	50-100
สภาวะระบายน้ำ(Drained Condition)	
ดินเหนียว(Clay)	100-200
สภาวะไม่ระบายน้ำ(Undrained Condition)	

ที่มา : Das (1995)

ตารางที่ 2.5 แสดงค่า  $N_c^*$  และ  $N_c^*$  (Vesic, 1977)

$\phi'$	$I_{rr}$									
	10	20	40	60	80	100	200	300	400	500
0	6.97	7.90	8.82	9.36	9.75	10.04	10.97	11.51	11.89	12.19
	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	7.34	8.37	9.42	10.04	10.49	10.83	11.92	12.57	13.03	13.39

	1.13	1.15	1.16	1.18	1.18	1.19	1.21	1.22	1.23	1.23
2	7.72	8.87	10.06	10.77	11.28	11.69	12.96	13.73	14.28	14.71
	1.27	1.31	1.35	1.38	1.39	1.41	1.45	1.48	1.50	1.51
3	8.12	9.40	10.74	11.55	12.14	12.61	14.10	15.00	15.66	16.18
	1.43	1.49	1.56	1.61	1.64	1.66	1.74	1.79	1.82	1.85
4	8.54	9.96	11.47	12.40	13.07	13.61	15.34	16.40	17.18	17.80
	1.60	1.70	1.80	1.87	1.91	1.95	2.07	2.15	2.20	2.24
5	8.99	10.56	12.25	13.30	14.07	14.69	16.69	17.94	18.86	19.59
	1.79	1.92	2.07	2.16	2.23	2.28	2.46	2.57	2.65	2.71
6	9.45	11.19	13.08	14.26	15.14	15.85	18.17	19.62	20.70	21.56
	1.99	2.18	2.37	2.50	2.59	2.67	2.91	3.06	3.18	3.27
7	9.94	11.85	13.96	15.30	16.30	17.10	19.77	22.46	25.71	27.33
	2.22	2.46	2.71	2.88	3.00	3.10	3.43	3.63	3.79	3.91
8	10.45	12.55	14.90	16.41	17.54	18.45	21.51	23.46	24.93	26.11
	2.47	2.76	3.09	3.31	3.46	3.59	4.02	4.30	4.50	4.67
9	10.99	13.29	15.91	17.59	18.87	19.90	23.39	25.64	27.35	28.73
	2.74	3.11	3.52	3.79	3.99	4.15	4.70	5.06	5.33	5.55
10	11.55	14.08	16.97	18.86	20.29	21.46	25.43	28.02	29.99	31.59
	3.04	3.48	3.99	4.32	4.58	4.78	5.48	5.94	6.29	6.57
11	12.14	14.90	18.10	20.20	24.81	23.13	27.64	30.61	32.87	34.73
	3.36	3.90	4.52	4.93	5.24	5.50	6.37	6.95	7.39	7.75
12	12.76	15.77	19.30	21.64	23.44	24.92	30.03	33.41	36.02	38.16
	3.71	4.35	5.10	5.60	5.98	6.30	7.38	8.10	8.66	9.11
13	13.41	16.69	20.57	23.17	25.18	26.84	32.60	36.46	39.44	41.89
	4.09	4.85	5.75	6.35	6.81	7.20	8.53	9.42	10.10	10.67
14	14.08	17.65	21.92	24.80	27.04	28.89	35.38	39.75	43.15	45.96
	4.51	5.40	6.47	7.18	7.74	8.20	9.82	10.91	11.76	12.46
15	14.79	18.66	23.35	26.53	29.02	31.08	38.37	43.32	47.18	50.39
	4.96	6.00	7.26	8.11	8.78	9.33	11.28	12.61	13.64	14.50
16	15.53	19.73	24.86	28.37	31.13	33.43	41.58	47.17	51.55	55.20
	5.45	6.66	8.13	9.14	9.93	10.58	12.92	14.53	15.78	16.83
17	16.30	20.85	26.46	30.33	33.37	35.92	45.04	51.32	56.27	60.42
	5.98	7.37	9.00	10.27	11.20	11.98	14.77	16.69	18.20	19.47
18	17.11	22.03	28.15	32.40	35.76	38.59	48.74	55.80	61.38	66.07
	6.56	8.16	10.15	11.53	12.62	13.54	16.84	19.13	20.94	22.47
19	17.95	23.26	29.93	34.59	38.30	41.42	52.71	60.61	66.89	72.18
	7.18	9.01	11.31	12.91	14.19	15.26	19.15	21.87	24.03	25.85
20	18.83	24.56	31.81	36.92	40.99	44.43	56.97	65.79	72.82	78.78
	7.85	9.94	12.58	14.44	15.92	17.17	21.73	24.94	27.51	29.67
21	19.75	25.92	33.80	39.38	43.85	47.64	61.51	71.34	79.22	85.90
	8.58	10.95	13.97	16.12	17.83	19.29	24.61	28.39	31.41	33.97

22	20.71	27.35	35.89	41.98	46.88	51.04	66.37	77.30	86.09	93.57
	9.37	12.05	15.50	17.96	19.94	21.62	27.82	32.23	35.78	38.81
23	21.71	28.84	38.09	44.73	50.08	54.66	71.56	83.68	93.47	101.83
	10.21	13.24	17.17	19.99	22.26	24.20	31.37	36.52	40.68	44.22
24	22.75	30.41	40.41	47.63	53.48	58.49	77.09	90.51	101.39	110.70
	11.13	14.54	18.99	22.21	24.81	27.04	35.32	41.30	46.14	50.29
25	23.84	32.05	42.85	50.69	57.07	62.54	82.98	97.81	109.88	120.23
	12.12	15.95	20.98	24.64	27.61	30.16	39.70	46.61	52.24	57.06
26	24.98	33.77	45.42	53.93	60.87	66.84	89.25	105.61	118.96	130.14
	13.18	17.47	23.15	27.30	30.69	33.60	44.53	52.51	59.02	64.62
27	26.16	35.57	48.13	57.34	64.88	71.39	95.02	113.92	128.67	141.39
	14.33	19.12	25.52	30.21	34.06	37.37	49.88	59.05	66.56	73.04
28	27.40	37.45	50.96	60.93	69.12	76.20	103.01	122.79	139.04	153.10
	15.57	20.91	28.10	33.40	37.75	41.51	55.77	66.29	74.93	82.40
29	28.69	39.42	53.95	64.71	73.58	81.28	110.54	132.23	150.11	165.61
	16.90	22.85	30.90	36.87	41.79	46.05	62.27	74.30	84.21	92.80
30	30.03	41.49	57.08	68.69	78.30	86.64	118.53	142.27	161.91	178.98
	18.24	24.95	33.95	40.66	46.21	51.02	69.43	83.14	94.48	104.33
31	31.43	43.64	60.37	72.88	83.27	92.31	126.99	152.95	174.49	193.23
	19.88	27.22	37.27	44.79	51.03	56.46	77.31	92.90	105.84	117.11
32	32.89	45.90	63.82	77.29	88.50	98.28	135.96	164.29	187.87	208.43
	21.55	29.68	40.88	49.30	56.30	62.41	85.96	103.66	118.39	131.24
33	34.41	48.26	67.44	81.92	94.01	104.58	145.46	176.33	202.09	224.62
	23.34	32.34	44.80	54.20	62.05	68.92	95.46	115.51	132.24	146.87
34	35.99	50.72	71.24	86.80	99.82	111.22	155.51	189.11	217.21	241.84
	25.28	35.21	49.05	59.54	68.33	76.02	105.90	128.55	147.51	164.12
35	37.65	53.30	75.22	91.91	105.92	118.22	166.14	202.64	233.27	260.15
	27.36	38.32	53.67	65.36	75.47	83.78	117.33	142.89	164.33	183.16
36	39.37	55.99	79.39	97.29	112.34	125.59	177.38	216.98	250.30	279.60
	29.60	41.68	58.68	71.69	82.62	92.24	129.87	158.65	182.85	204.14
37	41.47	58.81	83.77	102.94	119.10	133.34	189.25	232.17	268.36	300.26
	32.02	45.31	64.13	78.57	90.75	104.48	143.61	175.95	203.23	227.26
38	43.04	61.75	88.36	108.86	126.20	141.50	201.78	248.23	287.50	322.17
	34.63	49.24	70.03	86.05	99.60	111.56	158.65	194.94	225.62	252.71
39	44.99	64.83	93.17	115.09	133.66	150.09	215.01	265.23	307.78	345.41
	37.44	53.50	76.45	94.20	109.24	122.54	175.11	215.78	250.23	280.71
40	47.03	68.04	98.21	121.62	141.51	159.13	228.97	283.19	322.24	370.04
	40.47	58.10	83.40	103.05	119.74	134.52	193.13	238.62	277.26	311.50
41	49.16	71.41	103.49	128.48	149.75	168.63	243.69	302.17	351.95	396.12
	43.74	63.07	90.96	112.68	131.18	147.59	212.84	263.67	306.94	345.34
42	51.38	74.92	109.02	135.68	158.41	178.62	259.22	322.22	375.97	423.74

	47.27	68.46	99.16	123.16	143.64	161.83	234.40	291.13	339.52	382.53
43	53.70	78.60	114.82	143.23	167.51	189.13	275.59	343.40	401.36	452.96
	51.08	74.30	108.08	134.56	157.21	177.36	257.99	321.22	375.28	423.39
44	56.13	82.45	120.91	151.16	177.07	200.17	292.85	365.75	428.21	483.88
	55.20	80.62	117.76	146.97	172.00	194.31	283.80	354.20	414.51	468.28
45	58.66	86.48	127.28	159.48	187.12	211.79	311.04	389.35	456.57	516.58
	59.66	87.48	128.28	160.48	188.12	212.79	312.03	390.35	457.57	517.58
46	61.30	90.70	133.97	168.22	197.67	224.00	330.20	414.26	486.54	551.16
	64.48	94.92	139.73	175.20	205.70	232.96	342.94	429.98	504.82	571.74
47	64.07	95.12	140.99	177.40	208.77	236.85	350.41	440.54	518.20	587.72
	69.71	103.00	152.19	191.24	224.88	254.99	376.77	473.42	556.70	631.25
48	66.97	99.75	148.35	187.04	220.43	250.36	371.70	468.28	551.64	626.36
	75.38	111.78	165.76	208.73	245.81	279.06	413.82	521.08	613.65	696.64
49	70.01	104.60	156.09	197.17	232.70	264.58	394.15	497.56	586.96	667.21
	81.54	121.33	180.56	227.82	268.69	305.37	454.42	573.38	676.22	768.53
50	73.19	109.70	164.21	207.83	245.60	279.55	417.82	528.46	624.28	710.39
	88.23	131.73	196.70	248.68	293.70	334.15	498.94	630.80	744.99	847.61

หมายเหตุ : แถวบนเป็นค่า  $N_c^*$

แถวล่างเป็นค่า  $N_{\sigma}^*$

### 2.5.1.2 สำหรับออกแบบในดินเหนียว

Skempton (1959)

Skempton (1959) ได้เสนอค่าสมการในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_b$ ) ในชั้นดินเหนียว

โดยมีข้อจำกัดของสูตรคือให้อัตราส่วนความยาวเสาเข็มต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ต้องมากกว่า 3 และมีข้อกำหนดให้ค่า  $N_c = 9$

$$f_b = N_c (s_u)_b + \sigma_{vo} \quad (2.15)$$

โดยที่ค่า

$(s_u)_b$  = ค่าแรงยึดเกาะของดินใต้ฐานรากที่ปลายเสาเข็ม

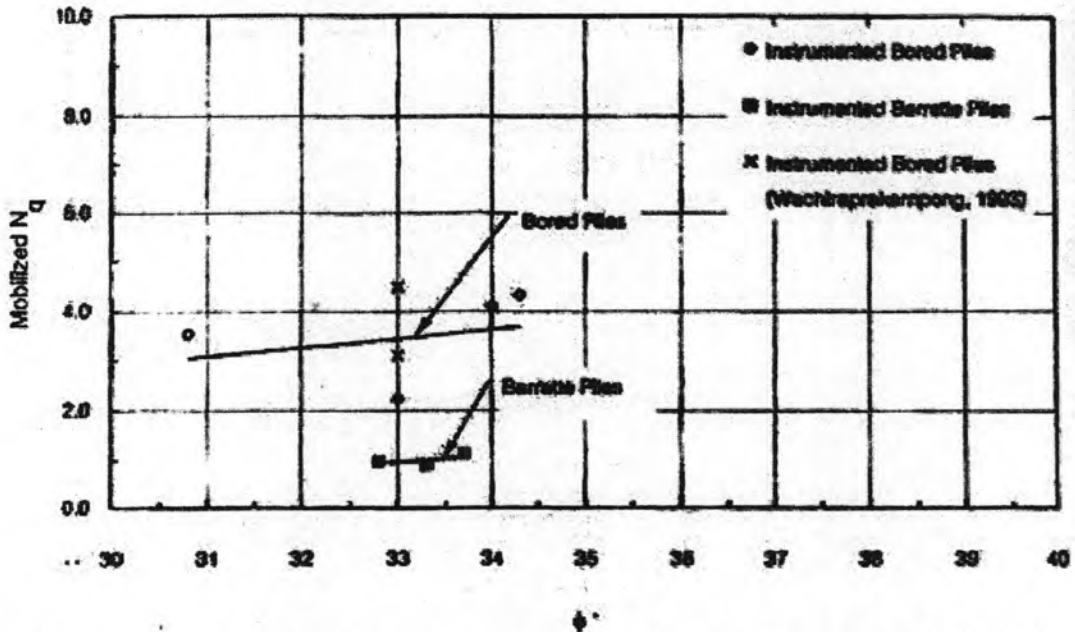
2.5.1.3 สำหรับออกแบบในดินทราย

ชาญชัย (2542)

สูตรที่ใช้ในการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากกำลังรับน้ำหนักประลัยที่ปลายเสาเข็มสามารถออกแบบได้ในดินทราย โดยมีข้อจำกัดคือเสาเข็มที่ใช้ในการออกแบบต้องเป็นเสาเข็มเจาะ และปลายเสาเข็มต้องอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 กราฟคือเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม และเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

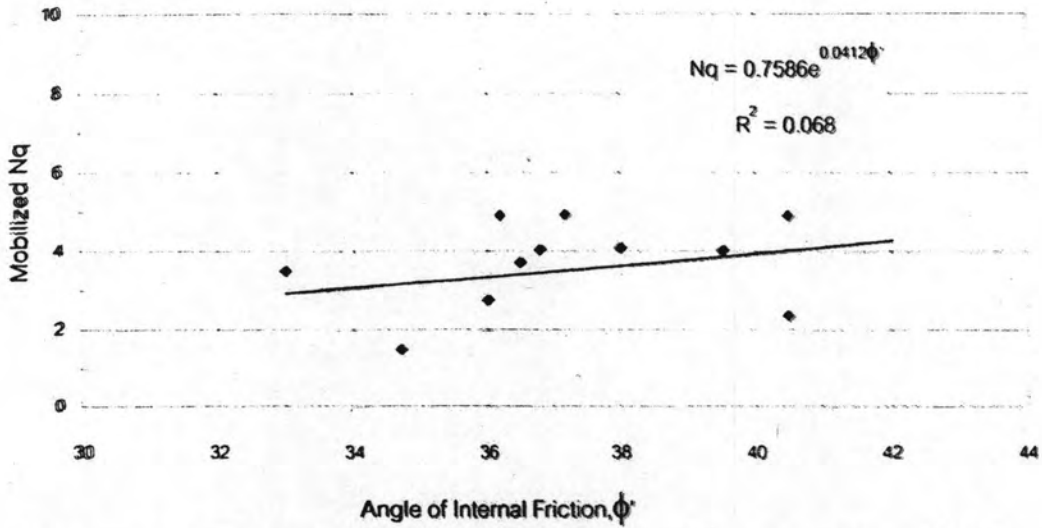
$$Q_b = A_b (f_b) \tag{2.16}$$

โดยที่ค่า  $f_b = N_q (\sigma'_z)_b$  (2.16.1)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized  $N_q$  กับค่า  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง (ชาญชัย, 2542)





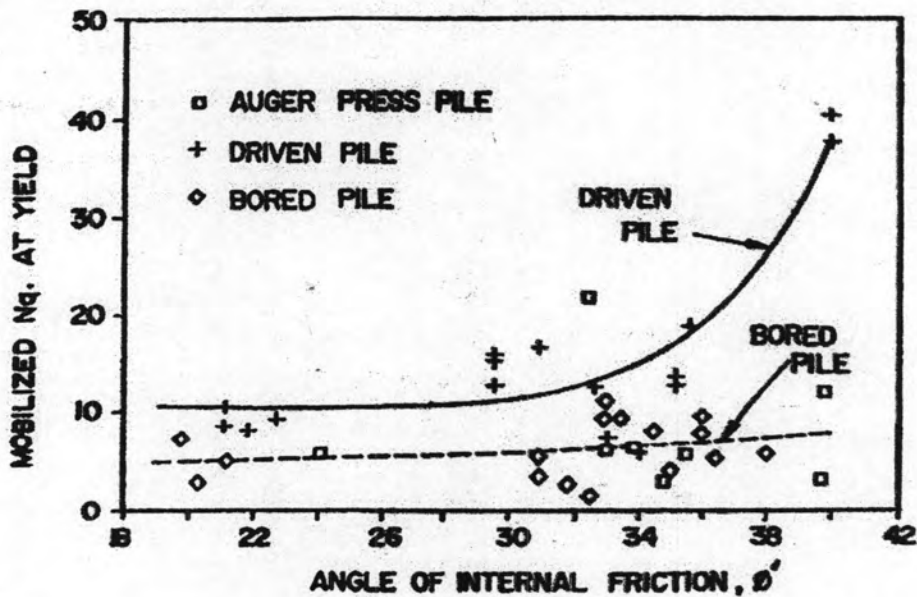
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized  $N_q$  กับค่า  $\phi'$  สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง (ชาญชัย, 2542)

Pimpasugdi (1989)

Pimpasugdi (1989) ได้เสนอค่าพารามิเตอร์ที่ในการออกแบบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็มในชั้นทราย โดยมีข้อจำกัดคือ ปลายเสาเข็มต้องอยู่ในชั้นทรายชั้นที่ 1 เท่านั้น

$$Q_b = A_b (f_b) \tag{2.17}$$

โดยที่ค่า  $f_b = N_q (\sigma'_z)_b \tag{2.17.1}$



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized  $N_q$  กับค่า  $\phi'$  (Pimpasugdi, 1989)

API (1984)

API (1984) ได้เสนอค่าสมการในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็ม ( $Q_b$ ) ในชั้นดินทราย ไว้ดังนี้

โดยมีข้อจำกัดของสูตรคือค่า  $N_q = 40$  และค่า  $f_{b(\text{lim it})} = 10 - 15 \text{ MPa}$  โดยใช้สมการ

$$f_b = N_q (\sigma'_z)_b \leq f_{b(\text{lim it})} \quad (2.18)$$

2.6 กำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน (Ultimate Skin Frictional Resistance Load;  $Q_f$ )

ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินมีค่าดังนี้

$$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter})_i \times (\text{Length})_i \quad (2.19)$$

โดยกำหนด

$L$  = ช่วงชั้นดินที่กำลังพิจารณาอยู่

$f_s$  = หน่วยแรงเสียดทานในช่วงชั้นดินที่กำลังพิจารณา

สำหรับกำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินในชั้นทราย

$$f_s = (K \tan \delta) (\sigma')_o \quad (2.20)$$

โดยกำหนด

$K$  = สัมประสิทธิ์แรงดันของดิน (Earth Pressure Coefficient)

$\delta$  = มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับชั้นดิน

$(\sigma')_o$  = Vertical Stress เฉลี่ยที่ความลึกที่กำลังพิจารณา

$$= \gamma' \frac{L}{2}$$

โดยค่า  $K$  เมื่อแบ่งตามชนิดของเสาเข็มแล้วจะมีค่าดังนี้

ตารางที่ 2.6 ค่า  $K_0$  ของเสาเข็มแต่ละชนิด (Das, 1995)

ชนิดของเสาเข็ม	ค่า K
เสาเข็มเจาะ (Bored Piles)	$K_0 = 1 - \sin \phi$
เสาเข็มตอกแบบ Small Displacement (ต่ำสุด)	$K_0$
(สูงสุด)	$1.4 K_0$
เสาเข็มตอกแบบ Large Displacement (ต่ำสุด)	$K_0$
(สูงสุด)	$1.8 K_0$

2.6.1 กำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินแบ่งตามค่า  $\lambda$ ,  $\alpha_u$  และ  $\beta$

2.6.1.1 สำหรับออกแบบเสาเข็มทุกประเภท

วิธี แลมด้า (Lamda Method)

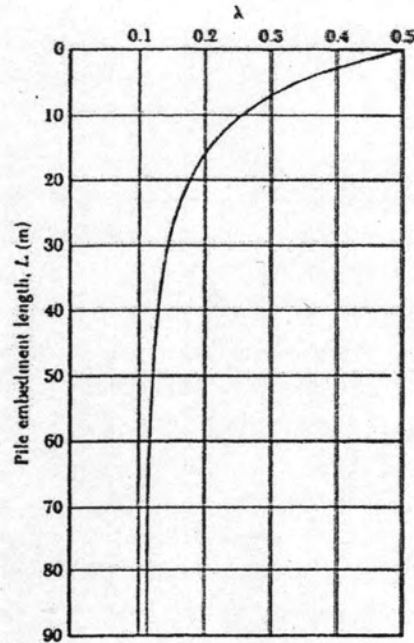
นำเสนอโดย Vijayvergiya และ Focht (1972) ซึ่งเสนอรูปแบบการเคลื่อนตัวของดิน เนื่องจากการตอกเสาเข็มในรูปของ Passive Lateral Pressure ในระดับความลึกในช่วงใด ๆ ในสมการ ดังนี้

$$f_s = \lambda(\bar{\sigma}'_o + 2s_u) \quad (2.21)$$

โดยค่า

$\bar{\sigma}'_o$  = ค่าเฉลี่ยของ Effective vertical Stress ในระดับที่กำลังพิจารณา

$s_u$  = ค่า Undrained Shear Strength



รูปที่ 2.13 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแลมดา ( $\lambda$ ) ที่แปรผันตามค่าความยาวของเสาเข็ม ( $L$ ) (Vijayvergiya, Focht, 1972)

โดยที่ค่า  $\lambda$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความลึกโดยจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.13

#### วิธี แอลฟา (Alpha Method)

นำเสนอสมาการดังนี้

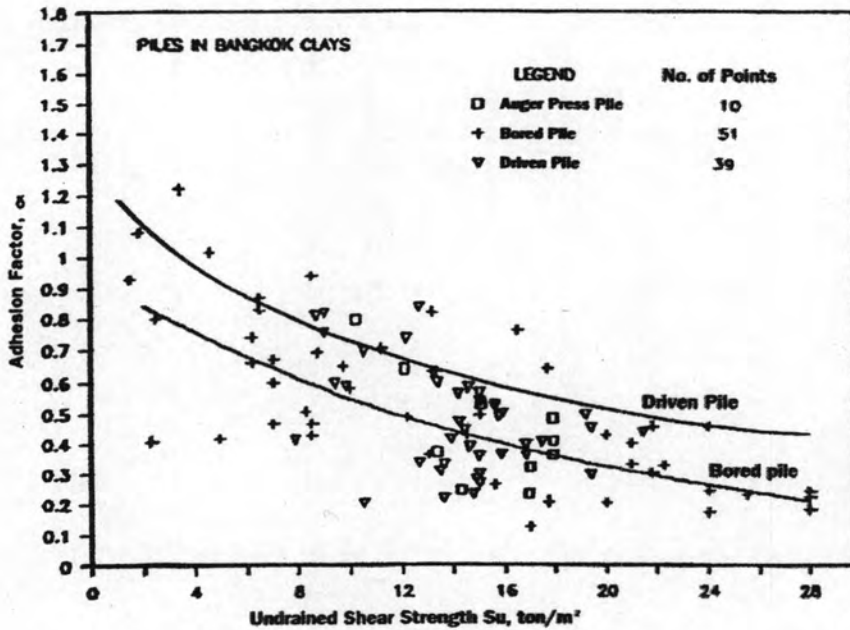
$$f_s = \alpha s_u \quad (2.22)$$

โดยค่า

$\alpha$  = ค่า Empirical Adhesion Factor ซึ่งจะแปรผันตาม

ค่า  $s_u$  ดังรูปที่ 2.14

$s_u$  = ค่า Undrained Shear Strength



รูปที่ 2.14 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอลฟา ( $\alpha$ ) กับค่า Undrained Shear Strength ของดินเหนียว (Pimpasugdi, 1989)

#### วิธี เบต้า (Beta Method)

นำเสนอโดย Burland (1973) ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าตอกเสาเข็มลงในชั้นดินทราย แล้วระหว่างการติดตั้งและเพิ่มกำลังให้กับเสาเข็มจะทำให้เกิดการระบายน้ำ (Drained) ออกจากดิน และทำให้ดินรอบๆเสาเข็มมีสภาพเป็น Remolded State ซึ่งทำให้ค่า Cohesion เป็นศูนย์ ซึ่งทำให้ค่า Effective Horizontal Stress ที่ผิวก่อนติดตั้งมีค่ามากกว่า Effective Stress ที่เกิดขึ้นที่ผิวเสาเข็มในระหว่างการติดตั้ง โดยนำเสนอสมการดังนี้

$$f_s = \beta(\sigma')_o \quad (2.23)$$

โดยค่า

$$\beta = K \tan \delta$$

$\delta$  = มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับชั้นดิน

$K$  = สัมประสิทธิ์แรงดันของดิน (Earth Pressure Coefficient) จากตารางที่ 2.6



### 2.6.1.2 สำหรับออกแบบเสาเข็มเจาะ

#### ชาญชัย (2542)

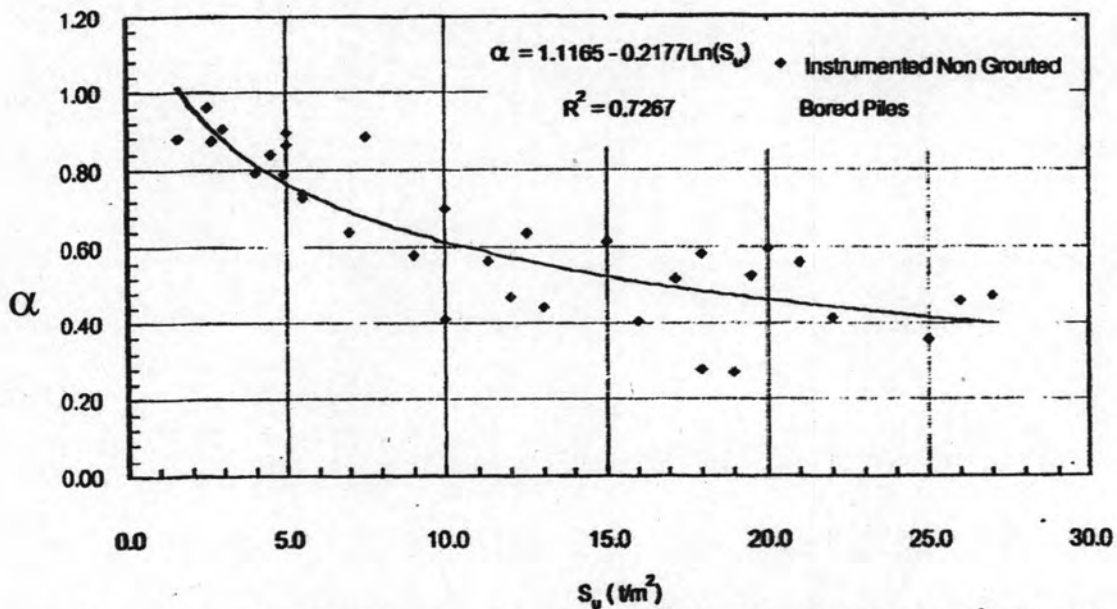
ชาญชัย (2542) ได้นำเสนอสูตรที่ใช้ในการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินสามารถออกแบบได้ในดินเหนียว และใช้ได้กับเสาเข็มเจาะ ไว้ดังสมการ

$$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length}) \quad (2.24)$$

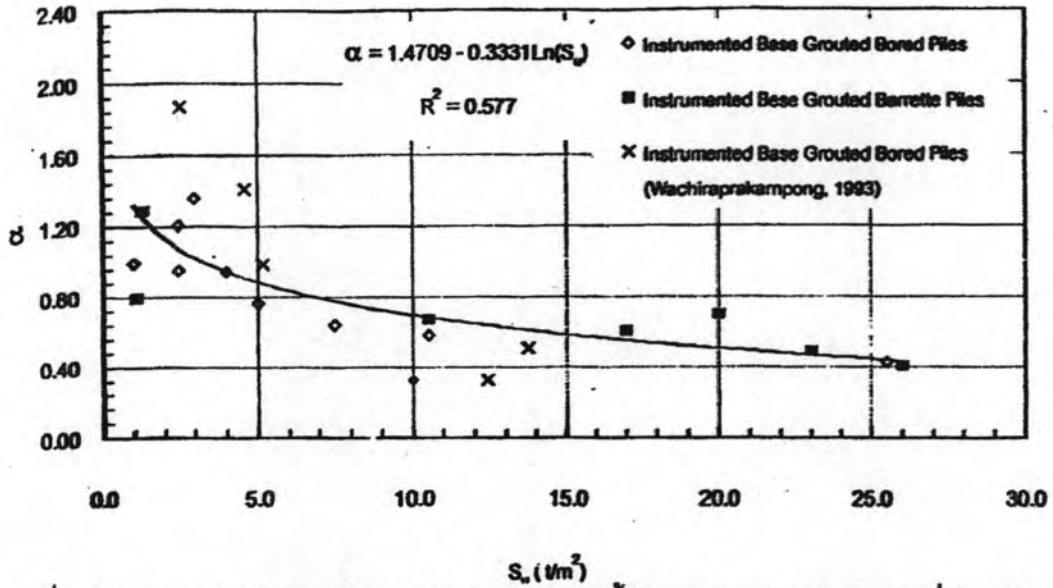
โดยที่ค่า

$$f_s = \alpha s_u \quad (2.24.1)$$

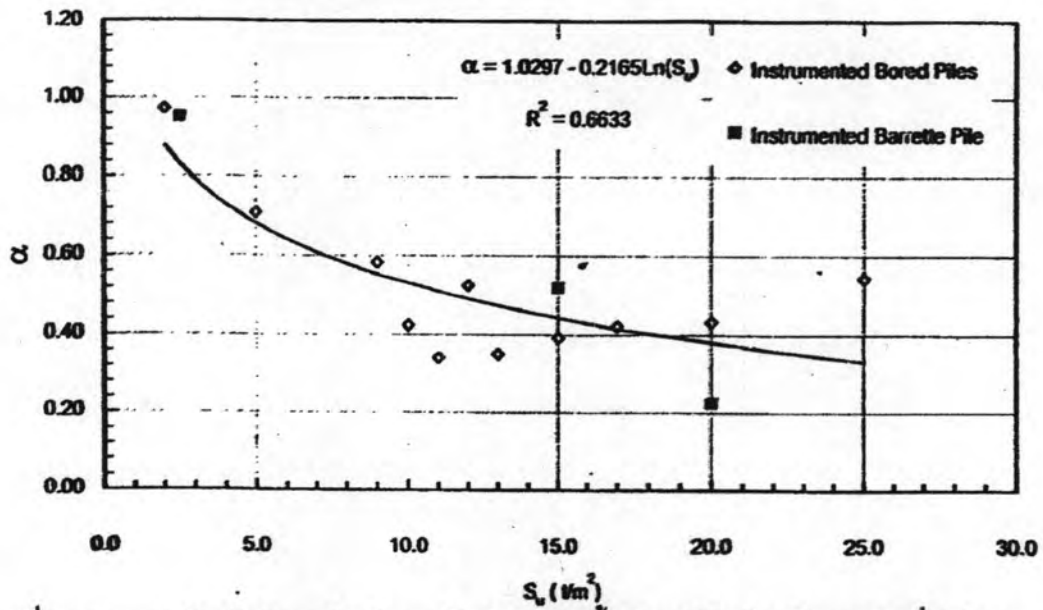
และค่า  $s_u$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $\alpha$  แบ่งออกเป็น 3 กราฟคือ เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองดังรูป 2.15 เสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองดังรูป 2.16 และปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\alpha$  กับค่า  $s_u$  ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง (ชาญชัย, 2542)



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\alpha$  กับค่า  $s_u$  ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง (ชาญชัย, 2542)



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\alpha$  กับค่า  $s_u$  ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มที่มีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง (ชาญชัย, 2542)

**ธยานันท์ (2544)**

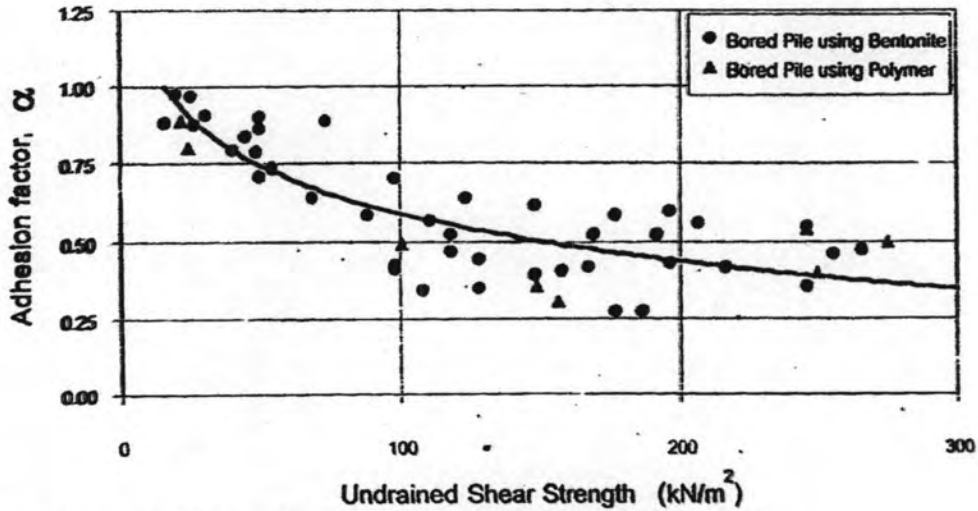
ธยานันท์ (2544) สูตรที่ใช้ในการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินสามารถออกแบบได้ในดินเหนียว สามารถใช้ออกแบบกับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์และเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ ดังสมการ

$$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length}) \tag{2.25}$$

โดยที่ค่า

$$f_s = \alpha s_u \quad (2.25.1)$$

และค่า  $s_u$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $\alpha$  ดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\alpha$  กับค่า  $s_u$  ของ (ธยานันท์, 2544)

#### ชาญชัย (2542)

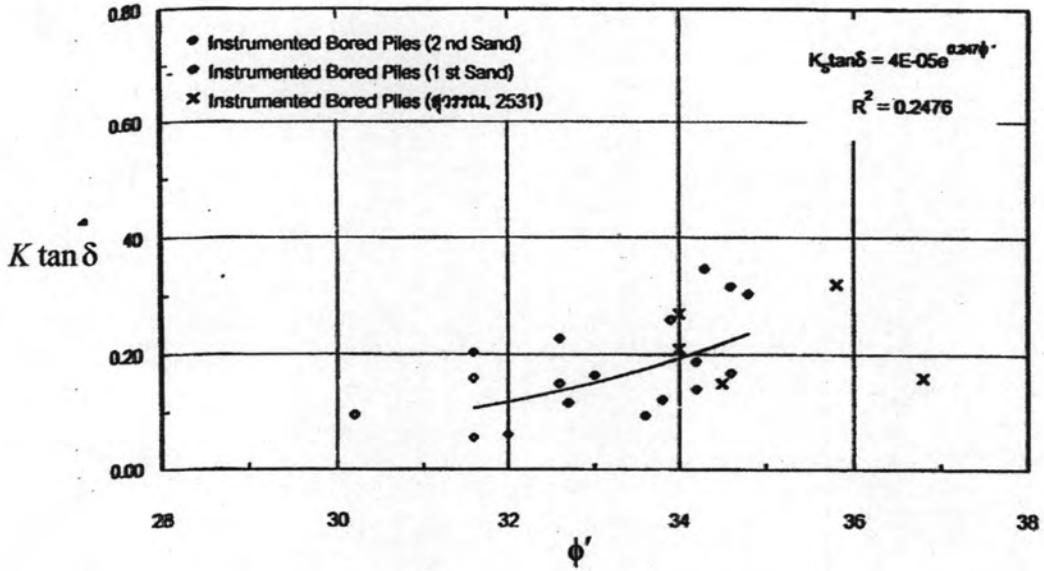
ชาญชัย (2542) สูตรที่ใช้ในการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินสามารถออกแบบได้ในชั้นดินทราย และใช้ได้กับเสาเข็มเจาะ ดังสมการ

$$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length}) \quad (2.26)$$

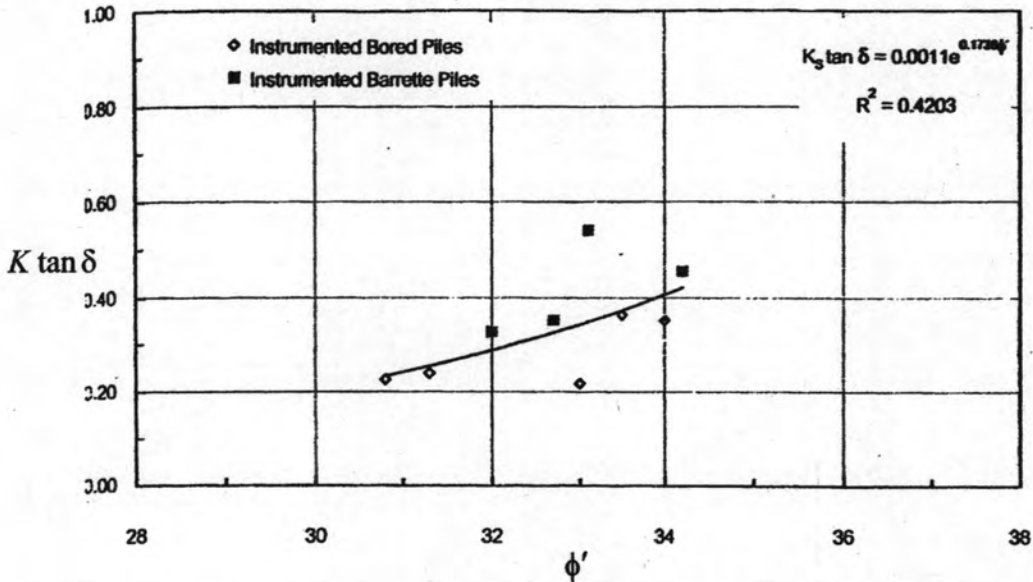
โดยที่ค่า

$$f_s = \beta(\sigma')_o = k_s \tan \delta(\sigma')_o \quad (2.26.1)$$

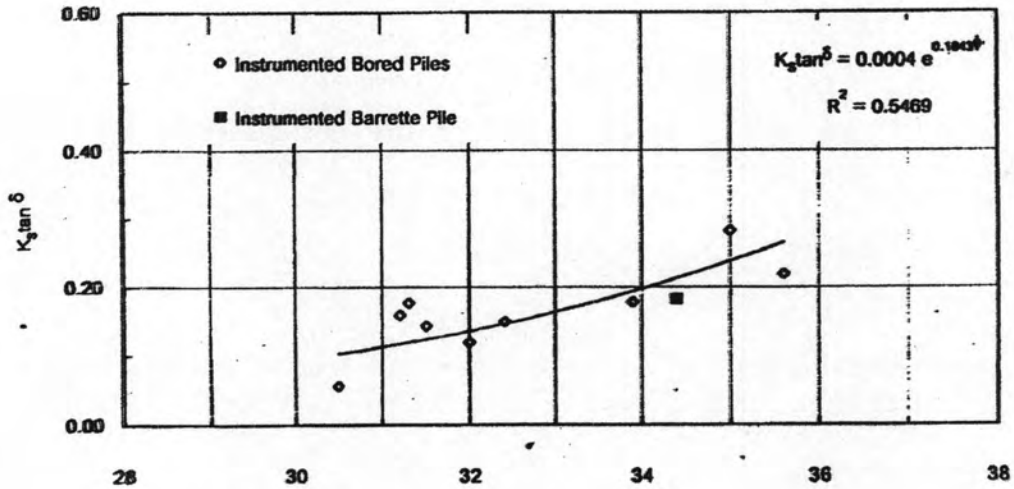
และค่า  $\beta$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $\phi'$  แบ่งออกเป็น 3 กราฟคือ เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองดังรูป 2.19 เสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองดังรูป 2.20 และปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง ดังรูป 2.21



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่า  $\phi'$  ในชั้นดินทรายสำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง (ชาญชัย, 2542)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่า  $\phi'$  ในชั้นดินทรายสำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง (ชาญชัย, 2542)



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่า  $\phi'$  ในชั้นดินทรายสำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง (ชาญชัย, 2542)

ธยานันท์(2544)-เบนโทไนท์

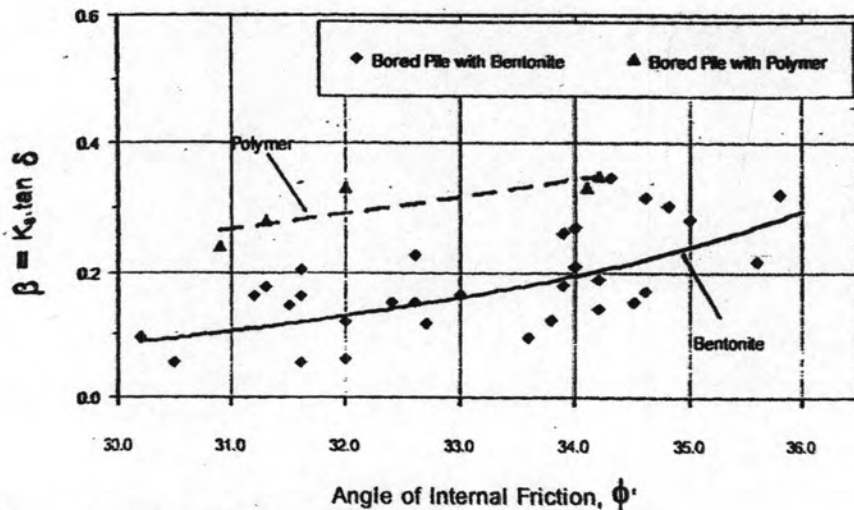
ธยานันท์(2544)-เบนโทไนท์ สูตรที่ใช้ในการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินสามารถออกแบบได้ในทราย และใช้ได้กับเสาเข็มเจาะดังสมการ

$$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length}) \tag{2.27}$$

โดยที่ค่า

$$f_s = \beta(\sigma')_o = k_s \tan \delta(\sigma')_o \tag{2.27.1}$$

และค่า  $\beta$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $\phi'$  ดังรูป 2.22



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่า  $\phi'$  (ธยานันท์, 2544)



### ธยานันท์(2544)-โพลีเมอร์

ธยานันท์(2544)-โพลีเมอร์ สูตรที่ใช้ในการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินสามารถออกแบบได้ในทราय และใช้ได้กับเสาเข็มเจาะดังสมการ

$$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length}) \quad (2.28)$$

โดยที่ค่า

$$f_s = \beta(\sigma')_o = k_s \tan \delta(\sigma')_o \quad (2.28.1)$$

และค่า  $\beta$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $\phi'$  ดังรูป 2.22

### Fleming et al. (1985)

Fleming et al. (1985) ได้เสนอการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน ( $Q_f$ ) ในชั้นดินเหนียว สำหรับเสาเข็มเจาะ (Bore piles) ดังนี้

$$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length}) \quad (2.29)$$

โดยที่ค่า

$$f_s = \beta \sigma'_o$$

$$f_s = (K \tan \delta) \sigma'_o$$

โดยที่ค่า

$$K = 0.5(1+K_o)$$

$K_o$  = สัมประสิทธิ์แรงดันของดิน (Earth Pressure Coefficient)

$$= (1 - \sin \phi')$$

## 2.6.2 กำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียหายระหว่างเสาเข็มและดินโดยใช้ค่า SPT (N-Value) ในการออกแบบ

### 2.6.2.1 สำหรับเสาเข็มตอก (Small Driven Piles)

Meyerhof (1956)

Meyerhof (1956) ได้นำเสนอการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียหายระหว่างเสาเข็มและดิน ( $Q_u$ ) ในชั้นดินทราย

โดยมีข้อจำกัดของสูตรคือใช้เฉพาะเสาเข็มตอก (Small Driven Piles) โดยใช้สมการ

$$f_s = 2.0N \text{ (kPa)} \quad (2.30)$$

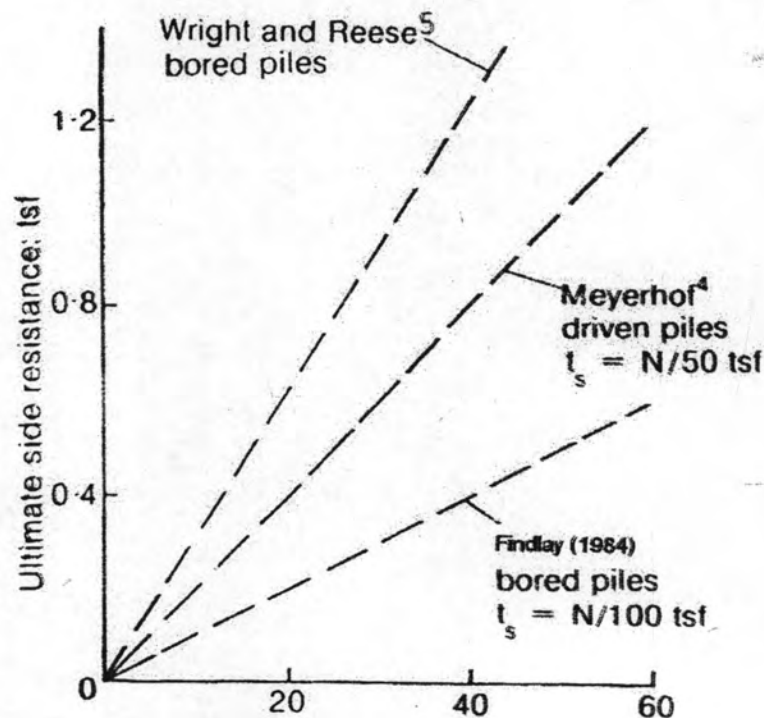
โดยค่า

$N = N\text{-Value}$  ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected) ในหน่วย

ของ blow/ft หรือ blows/0.31m.

หรือจะดูความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate Side Resistance กับค่า N-value ในรูปที่

2.23



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate Side Resistance กับค่า N-value

**Shioi and Fukui (1982)**

Shioi and Fukui (1982) ได้นำเสนอการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน ( $Q_p$ ) ในชั้นดินเหนียว

โดยมีข้อจำกัดของสูตรคือใช้เฉพาะเสาเข็มตอกโดยใช้สมการ

$$f_s = 1.0N \text{ (kPa)} \quad (2.31)$$

โดยค่า

$N = N\text{-Value}$  ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected) ในหน่วยของ blow/ft หรือ blows/0.31m.

**Findlay (1984)**

Findlay (1984) ได้นำเสนอการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน ( $Q_p$ ) ในชั้นดินทราย

โดยมีข้อจำกัดของสูตรคือใช้เฉพาะเสาเข็มเจาะโดยใช้สมการ

$$f_s = 1.0N \text{ (kPa)} \quad (2.32)$$

โดยค่า

$N = N\text{-Value}$  ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected) ในหน่วยของ blow/ft หรือ blows/0.31m.

**Wright and Reese (1979)**

Wright and Reese (1979) ได้นำเสนอการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน ( $Q_p$ ) ในชั้นดินทราย

โดยมีข้อจำกัดของสูตรคือใช้เฉพาะเสาเข็มเจาะโดยใช้สมการ

$$f_s = 3.3N \text{ (kPa)} \quad (2.33)$$

โดยค่า

$N = N\text{-Value}$  ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected) ในหน่วยของ blow/ft หรือ blows/0.31m.

**Shioi and Fukui (1982)**

Shioi and Fukui (1982) ได้นำเสนอการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน ( $Q_p$ ) ในชั้นดินเหนียว

โดยมีข้อจำกัดของสูตรคือใช้เฉพาะเสาเข็มเจาะโดยใช้สมการ

$$f_s = 5.0N \text{ (kPa)} \quad (2.34)$$

โดยค่า

$N = N\text{-Value}$  ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected) ในหน่วย  
ของ blow/ft หรือ blows/0.31m.

Shioi and Fukui (1982)

Shioi and Fukui (1982) ได้นำเสนอการออกแบบค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยจาก  
ความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน ( $Q_u$ ) ในชั้นดินเหนียว

โดยกำหนดให้ออกแบบในตัวเข็มเจาะที่มีสารละลายเบนโทไนท์ที่มีค่า  
 $50 \geq N \geq 3$  และ  $f_s \leq 170$  (kPa) โดยมีสมการดังนี้

$$f_s = 1.0 + 3.3N \text{ (kPa)} \quad (2.35)$$

โดยค่า

$N = N\text{-Value}$  ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected) ในหน่วย  
ของ blow/ft หรือ blows/0.31m.

## 2.7 ฐานรากเสาเข็มกลุ่ม (Group Piles Foundation)

การออกแบบเสาเข็มกลุ่มนั้น ส่วนมากจะออกแบบคล้ายรูปที่ 2.23 โดยที่มีหมวกรัด  
หัวเสาเข็ม (pile cap) ยึดเสาเข็มกลุ่มทั้งหมดเข้าไว้ด้วยกันเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวรับน้ำหนักเพื่อ  
ถ่ายน้ำหนักไปยังเสาเข็มแต่ละต้น แต่การถ่ายน้ำหนัก ไปยังเสาเข็มกลุ่มนั้นทำให้  
ความสามารถในการรับน้ำหนักโดยรวมน้อยกว่าหรือเท่ากับความสามารถในการรับน้ำหนักใน  
แต่ละต้น เนื่องจากเกิดการรบกวนของหน่วยแรงจากหน่วยแรงเสียดทานจากเสาเข็มใกล้เคียง  
ที่ถ่ายลงไปในดินของแต่ละต้นดังรูป 2.24 จึงได้มีการกำหนดระยะห่างของแต่ละเสาเข็ม ไม่  
ควรจะน้อยกว่า 2.5 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม แต่โดยทั่วไปมักจะกำหนดไว้  
ประมาณ 3 ถึง 3.5 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

โดยที่การคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่ม (Failure Load-Bearing  
Capacity of pile group,  $Q_{g(u)}$ ) นั้นมีสูตรดังนี้

$$Q_{g(u)} = \eta \sum Q_u \quad (2.36)$$

เมื่อ

$\eta$  = ค่าประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม (Efficiency of Group  
Piles)

$$\begin{aligned} \sum Qu &= (n_1 \times n_2) Qu \\ (n_1 \times n_2) &= \text{จำนวนของเสาเข็ม} \\ Qu &= \text{กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มแต่ละต้น} \\ Qu &= Qb + Qf - W_p \end{aligned}$$

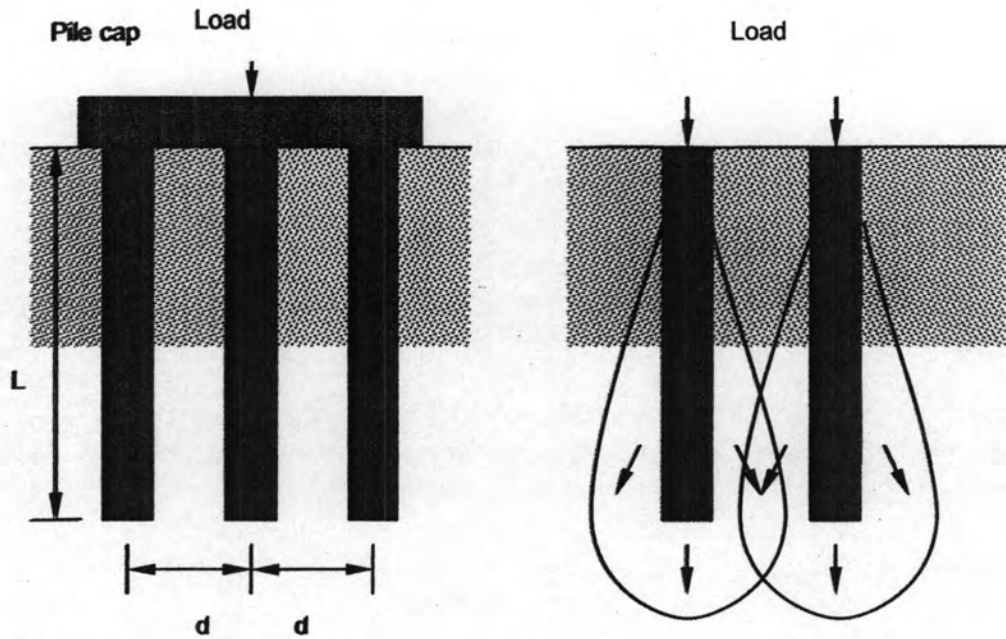
จากสมการ Converse Labarre ค่า  $\eta$  จะมีค่าเท่ากับ

$$\eta = 1 - \frac{[(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1]\theta}{90n_1n_2} \quad (2.37)$$

เมื่อ

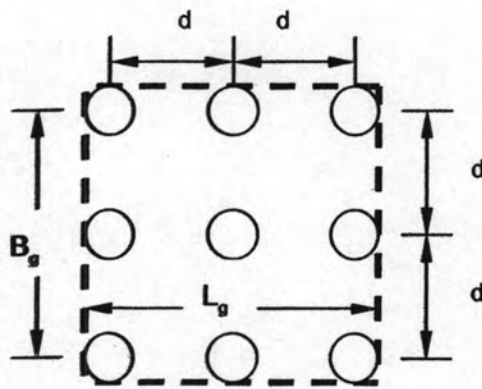
$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{D}{d}\right) \text{ หน่วยเป็น องศา} \\ D &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเสาเข็ม} \\ d &= \text{ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม} \end{aligned}$$





รูปตัดตามยาว

(b)



รูปตัดตามขวาง

(a)

จำนวนเสาเข็ม =  $n_1 \times n_2$

$$L_g = (n_1 - 1)d + 2\left(\frac{D}{2}\right)$$

$$B_g = (n_2 - 1)d + 2\left(\frac{D}{2}\right)$$

รูปที่ 2.24 แสดงฐานรากเสาเข็มกลุ่ม

จากรูปจะแสดงให้เห็นรูปตัดเสาเข็มกลุ่มตามยาวและตามขวาง (a) พร้อมแสดงให้เห็นการซ้อนทับของหน่วยแรงเฉือนของเสาเข็มที่อยู่ใกล้กันในรูป (b)

## 2.8 สรุปสูตรต่างๆในการออกแบบฐานราก

ตารางที่ 2.7 แสดงกำลังรับน้ำหนักประลัยที่ปลายเสาเข็ม

ผู้นำเสนอ	สูตร	ประเภท	ชั้นดินที่สามารถออกแบบได้	ข้อกำหนดและข้อจำกัด
Terzaghi (1943)	$Q_b = A_b (1.3c'N_c + qN_q + k\gamma DN_r)$	TSA,ESA	ชั้นดินเหนียวและ ดินทราย	$k = 0.4$ สำหรับการออกแบบเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Pile) และ $k = 0.3$ สำหรับการออกแบบเสาเข็มรูปหน้าตัดวงกลม (Circular Pile)
Meyerhof (1963)	$Q_b = A_b (c'N_c F_{cd} + q'N_q F_{qd})$	ESA	ชั้นดินเหนียวและ ดินทราย	ใช้ตารางของ Hansen(1970)ช่วยในการหาค่า $F_{cd}, F_{qd}$
Janbu (1976)	$Q_b = A_b (c'N_c + (\sigma'_z)_b N_q)$	ESA	ชั้นดินเหนียวและ ดินทราย	$\eta' = 60^\circ$ (สำหรับดินเหนียวอ่อน) ถึง $105^\circ$ (สำหรับชั้นทรายแน่น)
Vesic (1977)	$Q_b = A_b (c'N^*_c + \sigma'_o N^*_o)$	ESA	ชั้นดินเหนียวและ ดินทราย	
Skempton (1959)	$Q_b = A_b (f_b)$ $f_b = N_c (s_u)_b + \sigma_{vo}$	TSA	ชั้นดินเหนียว	สูตรนี้ใช้ก็ต่อเมื่ออัตราส่วน ความยาวเสาเข็มต่อขนาดเส้นผ่าน

ตารางที่ 2.7 แสดงกำลังรับน้ำหนักประลัยที่ปลายเสาเข็ม (ต่อ)

ผู้นำเสนอ	สูตร	ประเภท	ชั้นดินที่สามารถออกแบบได้	ข้อกำหนดและข้อจำกัด
				ศูนย์กลางเสาเข็ม ต้องมากกว่า 3 และมีข้อกำหนดให้ค่า $N_c = 9$
ชาญชัย (2542)	$Q_b = A_b (f_b)$ $f_b = N_q (\sigma'_z)_b$	ESA	ชั้นดินทราย	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 กราฟคือเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม และเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม เมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่ 2
Pimpasugdi (1989)	$Q_b = A_b (f_b)$ $f_b = N_q (\sigma'_z)_b$	ESA	ชั้นดินทราย	ออกแบบได้ทั้งเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่ 1
API (1984)	$Q_b = A_b (f_b)$ $f_b = N_q (\sigma'_z)_b \leq f_{b(\text{limit})}$	ESA	ชั้นดินทราย	ค่า $N_q = 40$ และค่า $f_{b(\text{limit})} = 10 - 15$ MPa

ตารางที่ 2.8 กำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน

ผู้นำเสนอ	สูตร	ประเภท	ชั้นดินที่สามารถออกแบบได้	ข้อกำหนดและข้อจำกัด
แลมด้า (Lamda Method)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = \lambda(\bar{\sigma}'_o + 2s_u)$	ESA	ชั้นดินเหนียวและ ดินทราย	ค่าแลมด้า ( $\lambda$ ) ที่แปรผันตามค่าความยาวของเสาเข็ม (L)
แอลฟา (Alpha Method)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = \alpha s_u$	TSA	ชั้นดินเหนียว	
เบต้า (Beta Method)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = \beta \sigma'_o$	ESA	ชั้นดินทราย	
ชาญชัย (2542)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = \alpha s_u$	TSA	ชั้นดินเหนียว	ออกแบบเสาเข็มเจาะเท่านั้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่ 2 และชั้นดินเหนียวแข็งชั้น 2
ธยานันท์ (2544)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = \alpha s_u$	TSA	ชั้นดินเหนียว	ออกแบบกับเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์และเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์
ชาญชัย (2542)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = \beta(\sigma')_o = k_s \tan \delta(\sigma')_o$	ESA	ชั้นดินทราย	ออกแบบเสาเข็มเจาะเท่านั้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายชั้นที่ 2 และชั้นดินเหนียวแข็งชั้น 2



ตารางที่ 2.8 กำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน (ต่อ)

ผู้นำเสนอ	สูตร	ประเภท	ชั้นดินที่สามารถออกแบบได้	ข้อกำหนดและข้อจำกัด
ธยานันท์(2544)-เบนโทไนท์	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = \beta(\sigma')_o = k_s \tan \delta(\sigma')_o$	ESA	ชั้นดินทราย	ออกแบบเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์
ธยานันท์(2544)-โพลีเมอร์	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = \beta(\sigma')_o = k_s \tan \delta(\sigma')_o$	ESA	ชั้นดินทราย	ออกแบบเสาเข็มเจาะที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์
Fleming et al. (1985)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = (K \tan \delta) \sigma'_o$	ESA	ชั้นดินเหนียว	$K = 0.5(1 + K_o)$
Meyerhof (1956)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = 2.0N \text{ (kPa)}$	SPT N-Value	ชั้นดินทราย	ออกแบบในตัวเข็มตอกและ $N = N\text{-Value}$ ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected)
Shioi and Fukui (1982)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = 1.0N \text{ (kPa)}$	SPT N-Value	ชั้นดินเหนียว	ออกแบบในตัวเข็มตอกและ $N = N\text{-Value}$ ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected)
Findlay (1984)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = 1.0N \text{ (kPa)}$	SPT N-Value	ชั้นดินทราย	ออกแบบในตัวเข็มเจาะและ $N = N\text{-Value}$ ที่ไม่มีการปรับแก้ (Uncorrected)



ตารางที่ 2.8 กำลังรับน้ำหนักประลัยจากความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน (ต่อ)

ผู้นำเสนอ	สูตร	ประเภท	ชั้นดินที่สามารถออกแบบได้	ข้อกำหนดและข้อจำกัด
Wright and Reese (1979)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = 3.3N \text{ (kPa)}$	SPT N-Value	ชั้นดินทราย	ออกแบบในดิวเข็มเจาะและ $N = N\text{-Value}$ ที่ไม่มีการ ปรับแก้ (Uncorrected)
Shioi and Fukui (1982)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = 5.0N \text{ (kPa)}$	SPT N-Value	ชั้นดินเหนียว	ออกแบบในดิวเข็มเจาะและ $N = N\text{-Value}$ ที่ไม่มีการ ปรับแก้ (Uncorrected)
Decourt (1982)	$Q_f = f_s \times (\text{Perimeter}) \times (\text{Length})$ $f_s = 1.0 + 3.3N \text{ (kPa)}$	SPT N-Value	ชั้นดินเหนียว	ออกแบบในดิวเข็มเจาะที่มี สารละลายเบนโทไนท์ที่มีค่า $50 \leq N \leq 3$ และ $f_s \leq 170 \text{ (kPa)}$ โดยที่ $N = N\text{-Value}$ ที่ไม่มีการ ปรับแก้ (Uncorrected)