

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีของการหาค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในการก่อสร้างอาคารนั้นเพื่อความมั่นใจในความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินว่าอาคารนั้นจะไม่เกิดความเสียหายหรือพังทลายลงมา เนื่องจากการทรุดตัวที่มากเกินไปเนื่องจาก การใช้ขนาดและความยาวของเสาเข็มที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม วิศวกรผู้ออกแบบจะต้องทำการเจาะสำรวจชั้นดิน และนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาคำนวณหาขนาดและความยาวของเสาเข็มในขั้นตอนการออกแบบจากข้อมูลชั้นดิน วิศวกรผู้ออกแบบจะทราบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่ต้องการ และกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ โดยจะทำการทดสอบน้ำหนักที่ออกแบบไว้อีกครั้งโดยวิศวกรผู้คุมงานก่อสร้างเพื่อเป็นการยืนยันค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติการจากออกแบบโดยใช้ผลการเจาะสำรวจชั้นดินนั้นถูกต้องหรือไม่

2.1 การคาดคะเนความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

โดยปกติ วิธีการคาดคะเนความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยทั่วๆ ไป มี 3 วิธี คือ วิธีสมดุกลศาสตร์ (Static Method) โดยใช้ความรู้ทางวิศวกรรมปฐพีคำนวณหาความสามารถการรับน้ำหนักของเสาเข็มจากข้อมูลชั้นดินและคุณสมบัติของดิน ที่ได้จากการเจาะสำรวจ วิธีทางพลศาสตร์ (Dynamic Method) เป็นวิธีการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากสูตรเสาเข็มตอก โดยวิเคราะห์จากข้อมูลการตอกเสาเข็ม และในปัจจุบันมีการใช้การทดสอบแบบ Dynamic โดยใช้หลักการของคลื่นในการทดสอบ และสุดท้ายวิธีคาดคะเนจากการทดสอบ เป็นวิธีการคาดคะเนโดยอาศัยข้อมูลจากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

2.2 วิธีสมดุกลศาสตร์ (Static Method)

สำหรับเสาเข็มเดี่ยว น้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนที่กระทำบนหัวเสาเข็ม จะส่งถ่ายกำลังไปสู่ดินรอบตัวเสาเข็มเอง โดยสามารถแยกการพิจารณาออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่รอบๆ เสาเข็ม และส่วนที่อยู่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งหมดทางทฤษฎีกลศาสตร์ จึงเท่ากับ

$$Q_u = Q_{su} + Q_{bu} - W \quad (2.1)$$

$$Q_u = q_s A_s + q_b A_b - W \quad (2.2)$$

พิจารณากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่อยู่รอบๆ เสาเข็ม ความต้านทานรอบๆ ตัวเสาเข็มเกิดจากความต้านทานของดินรอบๆ กับผิวเสาเข็ม เป็นความต้านทานต่อการลื่นไถลระหว่างผิวสัมผัส (Vesic, 1975)

$$q_s = C_a + \sigma_v K_s \tan \theta_a \quad (2.3)$$

เมื่อ $C_a = \alpha C \quad (2.4)$

พิจารณากำลังรับน้ำหนักของปลายเสาเข็ม (End bearing resistance) คำนวณจากสมการ Bearing capacity สำหรับ Deep foundation โดย Terzaghi (1943) ได้เสนอสมการสำหรับฐานรากยาวแบบตื้น โดยตั้งสมมุติฐานว่าการพังทลายเกิดขึ้นเนื่องจากการเฉือนขาดของดินใต้ฐานราก และดินเกิดเคลื่อนตัวขึ้นทางด้านข้างของฐานราก ต่อมาเขาได้ขยายสมการของเขา ใช้สำหรับฐานรากแบบตื้นที่มีรูปร่างกลม และรูปสี่เหลี่ยม โดยการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ค่าคงที่

สำหรับฐานรากรูปสี่เหลี่ยม

$$q_b = 1.3CN_c + \gamma D_f N_q + 0.4\gamma BN_\gamma \quad (2.5)$$

สำหรับฐานรากรูปวงกลม

$$q_b = 1.3CN_c + \gamma D_f N_q + 0.3\gamma r N_\gamma \quad (2.6)$$

เมื่อ

γ = หน่วยน้ำหนักของดิน

D_f = ความลึกของฐานราก

N_c, N_q, N_γ = Bearing capacity factor

B, r = ความกว้าง, รัศมีของฐานราก

สำหรับฐานรากที่เป็นเสาเข็ม (Deep foundation) Terzaghi (1943) ให้ใช้สมการเช่นเดียวกับฐานรากแบบตื้นดังกล่าวในการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักจากปลายเสาเข็ม Meyerhof (1951) ได้สมมุติตำแหน่งของพื้นผิวการพังทลาย (failure surface) ของดินที่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็มแตกต่างไปจาก Terzaghi (1943) ซึ่งมีผลทำให้ค่าคงที่ที่ใช้มีค่าแตกต่างกัน และสำหรับฐานรากที่เป็นเสาเข็มแล้วความต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็ม

$$q_b = CN_c + \sigma_{vb}N_q + 0.5\gamma BN_\gamma \quad (2.7)$$

Poulos และ Davis (1980) แนะนำสมการที่ใช้คาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

$$Q_b = (CN_c + \sigma_{vb}N_q + 0.5\gamma BN_\gamma)A_b \quad (2.8)$$

$$Q_s = (\alpha C + \sigma_v K_s \tan \theta_a)A_s \quad (2.9)$$

$$Q_u = (CN_c + \sigma_{vb}N_q + 0.5\gamma BN_\gamma)A_b + (\alpha C + \sigma_v K_s \tan \theta_a)A_s - W \quad (2.10)$$

การคาดคะเนจะถูกต้องใกล้เคียงกับกำลังรับน้ำหนักที่แท้จริงเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ค่าคงที่ต่างๆ ในสมการได้เหมาะสมเพียงใด

2.2.1 เสาเข็มในชั้นดินเหนียว

ระยะแรกที่ดินเหนียวรับน้ำหนัก ดินเหนียวจะอยู่ในสถานะ undrain โดยทั่วไปแล้วจะใช้วิธีการวิเคราะห์ในรูปแบบของ Total stress analysis Skempton (1948) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์นี้โดยให้ $\theta = 0$ ดังนั้นเราจะได้ $N_q=1$ และ $N_\gamma=0$ (Poulos และ Davis 1980) สมการที่ใช้คาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม คือ

$$Q_u = (CN_c + \sigma_{vb}N_q)A_b + \alpha CA_s - W \quad (2.11)$$

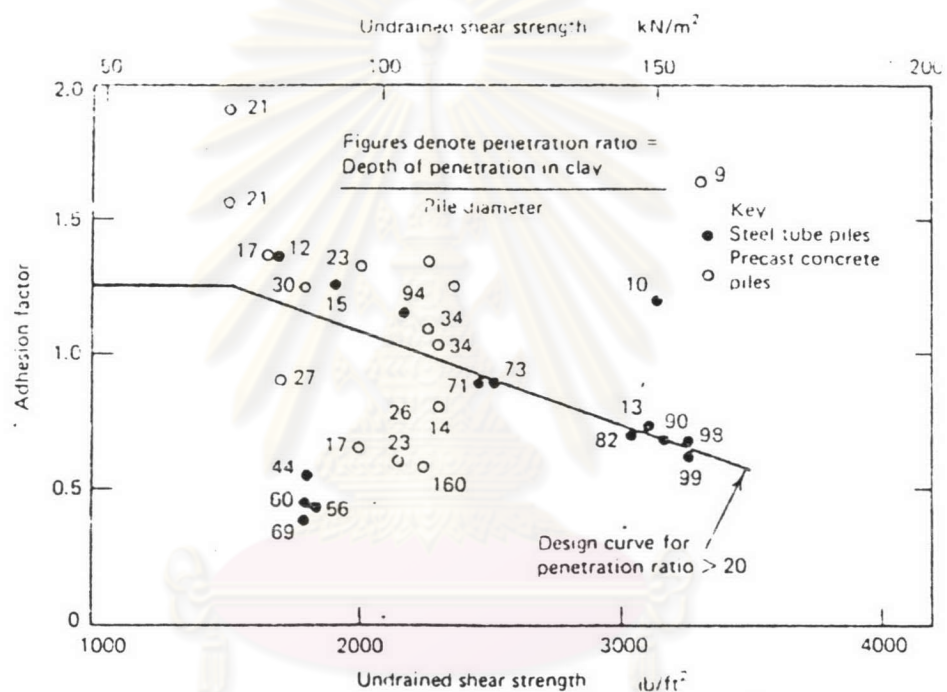
โดยสมมติให้น้ำหนักของดินเท่ากับน้ำหนักของเสาเข็มโดยประมาณ

$$Q_u = CN_c + \alpha CA_s \quad (2.12)$$

ความต้านทานของดินเหนียวที่ปลายเสาเข็มนี้ ปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10-20% ของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม ดังนั้น ความแปรผันของความต้านทานของดินเหนียวที่ปลายเสาเข็มจะไม่มีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มมากนัก (Broms, 1966) และ $N_c=9$ เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มตอกซึ่งอยู่ในชั้นดินเหนียว (Whitaker และ Cooke, 1966)

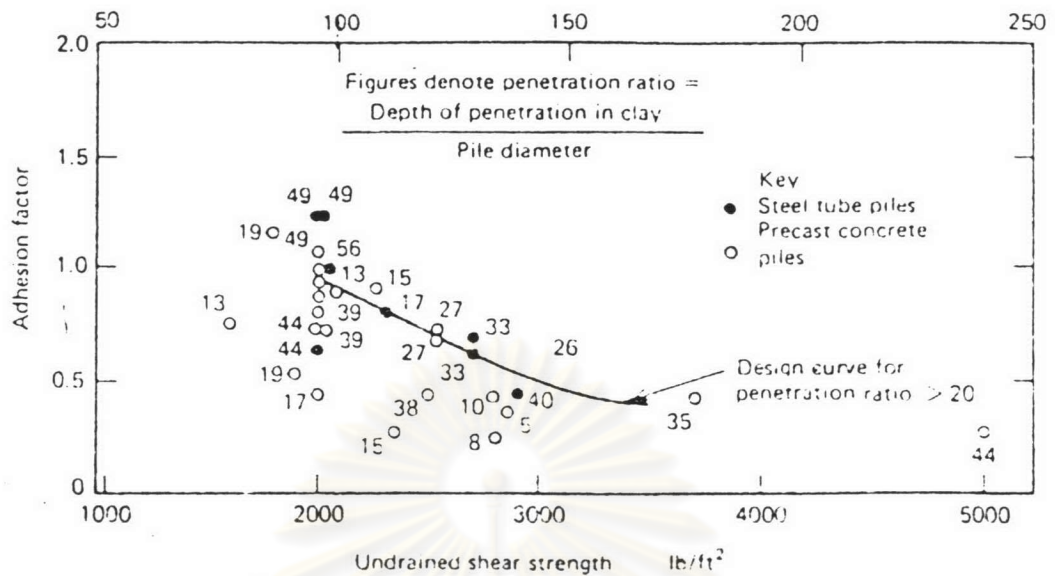
ค่า adhesion factor (α) ขึ้นอยู่กับกำลังรับน้ำหนักของดินเหนียว รูปร่างทางเรขาคณิตของเสาเข็ม ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม วิธีการก่อสร้างเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มตอก จาก

การศึกษาของ Tomlinson (1957,1970); Peck (1958); Woodward, Lundgren และ Boitano (1961); Coyle และ Reese (1966); Vesic (1967) และ McClland (1974) ให้ผลสรุป คือ สำหรับดินเหนียวอ่อนมาก α มีค่าใกล้เคียงหนึ่งและจะมีค่าลดลง เมื่อค่า undrain shear strength ของดินสูงขึ้น ส่วน α สำหรับดินเหนียวแข็งจะมีค่าค่อนข้างกระจาย Tomlinson (1970) ได้ศึกษาเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียวและพบว่า ชั้นดินต่างๆ ที่อยู่บนดินเหนียวมีผลต่อค่า α ด้วย โดยเสนอให้ใช้ค่า α ดังแสดงในตาราง



รูปที่ 2.1 Adhesion factor สำหรับ sand และ gravel อยู่บน stiff to very stiff cohesive soils (Tomlinson 1970)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 Adhesion factor สำหรับ stiff to very stiff clay
without overlying strata (Tomlinson 1970)

ตารางที่ 2.1 Adhesion factors สำหรับ bored piles ในชั้น Clay

Soil type	adhesion factor	Reference
London clay	0.25-0.7 Average 0.45	Golder และ Leonard(1954) Tomlinson(1957), Skempton(1989)
Sensitive clay	1	Golden(1957)
Highly expansive clay	0.5	Mohan และ Chandra(1961)

ตารางที่ 2.2 ค่าออกแบบสำหรับ adhesion factor ในชั้น stiff cohesive soils

Case	Soil condition	Penetration Ratio	adhesion factor
I	Sand or sandy soils overlying stiff cohesive soils	< 20	1.25
		> 20	ดูรูปที่ 2.1
II	Soft clays or silts overlying stiff cohesive soils	< 20	0.40
		> 20	0.70
III	Stiff cohesive soils without overlying strata	< 20	0.40
		> 20	ดูรูปที่ 2.2

Penetration ratio = Depth of penetration in stiff clay/Pile diameter

Note 1 : Adhesion factors not applicable to H-section piles

Note 2 : Shaft adhesion in overburden soil for case I and II must be calculated separately

การตอกเสาเข็มในชั้นดินเหนียว จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นบางส่วนระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มและดินรอบๆเสาเข็ม ช่องว่างเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือนจากการตอกเสาเข็ม และเนื่องจากดินเกิดการเคลื่อนตัวขึ้นหรือเคลื่อนตัวออกจากตัวเข็มระหว่างที่เข็มตอกจมลง สำหรับในชั้นดินเหนียวอ่อนแล้ว ดินเหนียวอ่อนสามารถเคลื่อนตัวกลับได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมี plasticity สูง จึงทำให้ดินเกาะสัมผัสตัวเสาเข็มได้สมบูรณ์ตลอดแนว ค่า α จึงมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนในดินเหนียวแข็ง ดินจะไม่เคลื่อนตัวจะทำให้เกิดช่องว่างดังกล่าว การยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสของดินและเสาเข็มจึงมีค่าน้อยกว่า 1

ค่า α สำหรับเสาเข็มเจาะควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.6 โดยการศึกษาจากผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม และแนะนำให้ใช้ $\alpha=0.45$ สำหรับเสาเข็มเจาะในสภาวะปกติซึ่งการขุดหลุมเจาะและเทคอนกรีตหล่อเข็มกระทำในเวลาใกล้เคียงกัน (Poulos และ Davis, 1980) ได้สรุปค่า α จากผู้ศึกษาต่างได้ศึกษาไว้แล้ว ดังในตารางที่ 2.1

สำหรับกรุงเทพ เสาเข็มเจาะ ค่า α ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.9 และสำหรับดินเหนียวแข็งควรมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.45 ดังรูป (Ng Kim Cheng, 1983) ค่า α ของเสาเข็มตอกมี

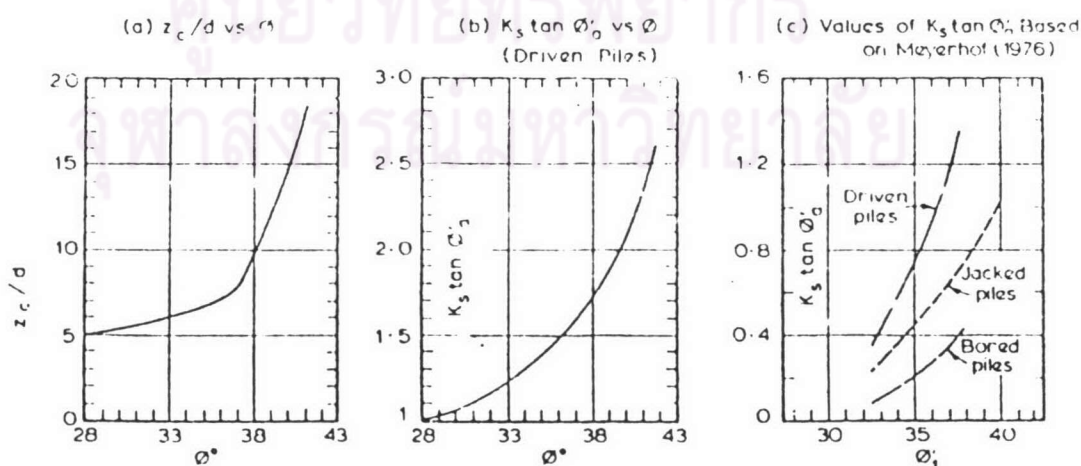
ค่าแปรผันอยู่ระหว่าง 0.3-1.0 (Holmberg, 1970) และดินเหนียวอ่อนมีค่าเข้าใกล้ 1 (Brand, 1970)

2.2.2 เสาค้ำในชั้นดินทราย

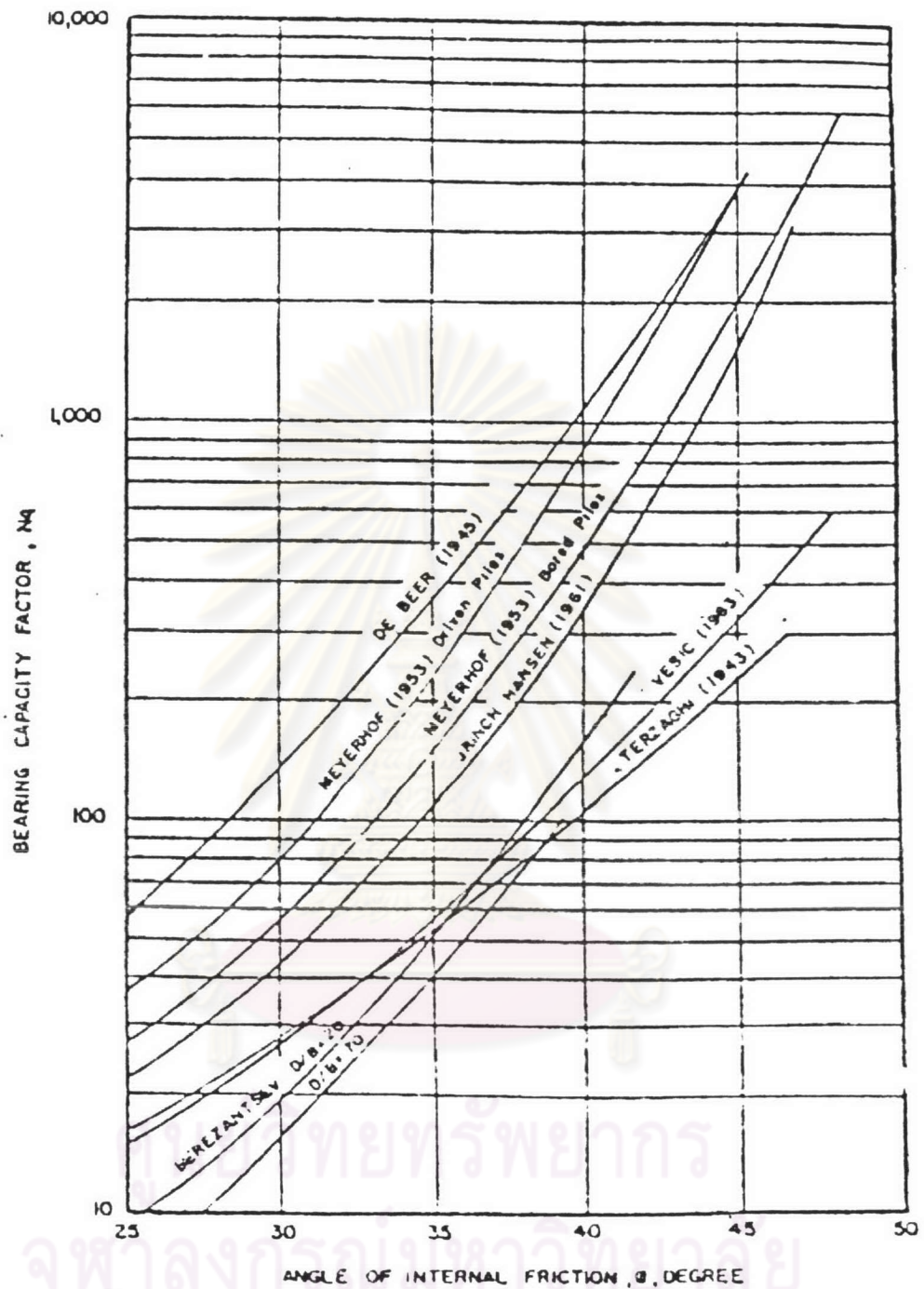
เมื่อดินทรายรับน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเสาค้ำ ดินทรายจะอยู่ในสภาวะ drain ดังนั้นจึงใช้วิธีวิเคราะห์แบบ effective stress และให้ค่าความเชื่อมแน่นมีค่าเป็น 0 จาก สมการที่ 2.11 ของ $0.5\gamma_{BN}\gamma$ มีค่าน้อย และสมมติให้น้ำหนักของดินประมาณเท่ากับน้ำหนักของเสาค้ำเอง ดังนั้น สมการการคาดคะเนความสามารถการรับน้ำหนักของเสาค้ำในชั้นทรายจึงเป็น

$$Q_u = \sigma'_{vb} (N_q - 1)A_b + A_s \sum (\sigma'_v K_s \tan \theta'_a) \quad (2.13)$$

จากงานวิจัยของ Vesic (1967); Kerisel (1961) และ Tevenas (1971) สรุปว่า เมื่อเสาค้ำอยู่ในชั้นดินทราย ความต้านทานของดินที่ปลายและรอบๆเสาค้ำ จะไม่เพิ่มขึ้นตามความลึกของเสาค้ำที่ยาวเพิ่มขึ้นตลอดไป แต่จะเพิ่มขึ้นตามความลึกจนถึงค่าวิกฤตแล้วคงที่ จึงเสนอให้คำนวณการคาดคะเนความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาค้ำในชั้นทราย โดยให้ σ'_{vb} และ σ'_v มีค่าเท่ากับ σ'_{vc} หรือ effective overburden stress ที่ระดับความลึกวิกฤต Z_c ในส่วนของเสาค้ำที่อยู่ลึกเกินความลึกวิกฤต Z_c ในกรณีที่เป็น layered-soil profile ค่า Z_c อ้างอิงเฉพาะส่วนของเสาค้ำที่จมอยู่ในชั้นทราย ความลึกวิกฤต Z_c สามารถหาจากรูปที่ 2.3 ซึ่งใช้ได้กับทั้งเสาค้ำเจาะ และเสาค้ำตอก



รูปที่ 2.3 ค่าของ Z_c/d และ $K_s \tan \phi'_0$ สำหรับเข็มในชั้นทราย (Poulos และ Davis, 1980)



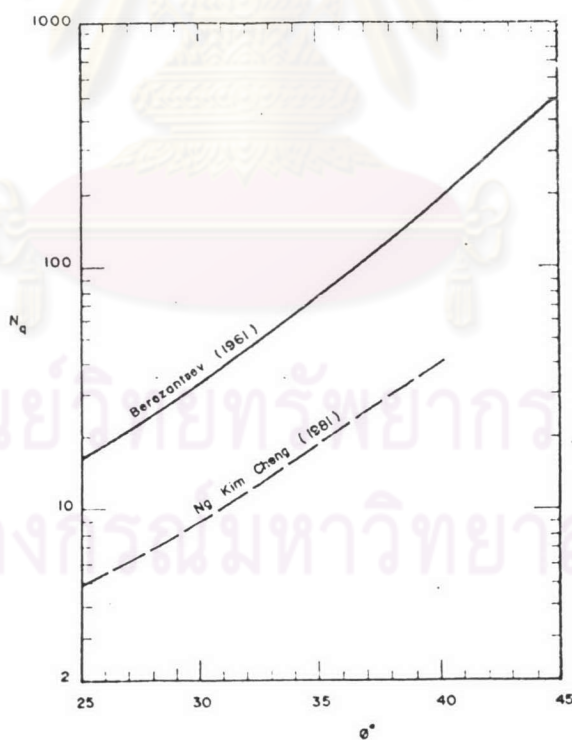
รูปที่ 2.4 Bearing capacity factor for circular deep foundation in sand

ความสัมพันธ์ระหว่าง bearing capacity factor (N_q) และ angle of internal friction (θ) ใช้คาดคะเนให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก (load test) ของเสาเข็มจริง (Nordlund, 1963 และ Vesic, 1964) ดังรูปที่ 2.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง N_q และ θ สำหรับเสาเข็มตอกที่ได้จากการศึกษาของ Berezantsev et.al. (1961) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แม้ความสัมพันธ์ระหว่าง N_q และ θ ที่เสนอจะไม่ได้คำนึงถึงผลของ relative embedment depth

(L/d) ซึ่งต่างกับ Meyerhof (1976) ซึ่งได้คำนึงถึงผลของ relative embedment depth (L/d) แต่ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง N_q และ θ ยังอยู่ในช่วงเฉลี่ยได้จากการศึกษาของ Meyerhof (1976) (Poulos และ Davis 1980)

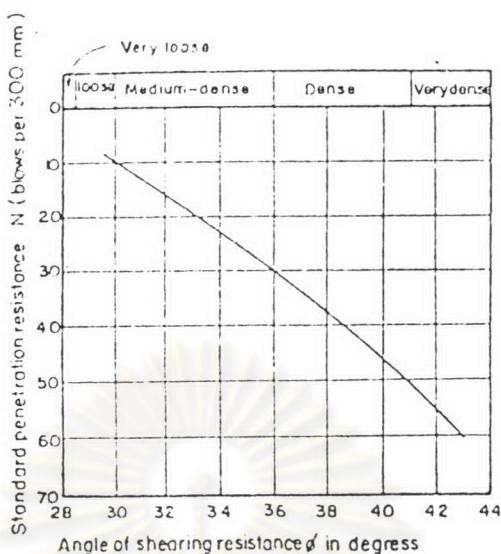
ในทางปฏิบัติแล้วค่า effective angle of shearing resistance θ' ของทรายเรา จะหาจากความสัมพันธ์ระหว่าง standard penetration resistance (N) จากการทดสอบ SPT และค่า θ' ที่ได้เสนอโดย Peck Hanson และ Thornburn (1974) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และปรับแก้ ด้วยค่าปรับแก้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (Poulos และ Davis, 1980)

สำหรับเสาเข็มเจาะ การก่อสร้างเสาเข็มเจาะอาจทำให้ดินรอบๆ หลวมเจาะเพื่อ หล่อเสาเข็มนั้น หลวมได้ (Poulos และ Davis, 1980) เพื่อคำนึงถึงผลของการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ ที่อาจมีผลต่อสภาพดินทรายได้เสาเข็ม Poulos และ Davis (1980) จึงเสนอให้ใช้ค่า θ' สำหรับ เสาเข็มเจาะในดินทรายมีค่าเท่ากับค่า θ' ของดินทรายในสภาพไม่ถูกรบกวนด้วย 3 แล้วใช้ค่า θ' ดังกล่าวนี้ เพื่อหาค่า N_q โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง N_q และ θ' ดังแสดงในรูปที่ 2.5

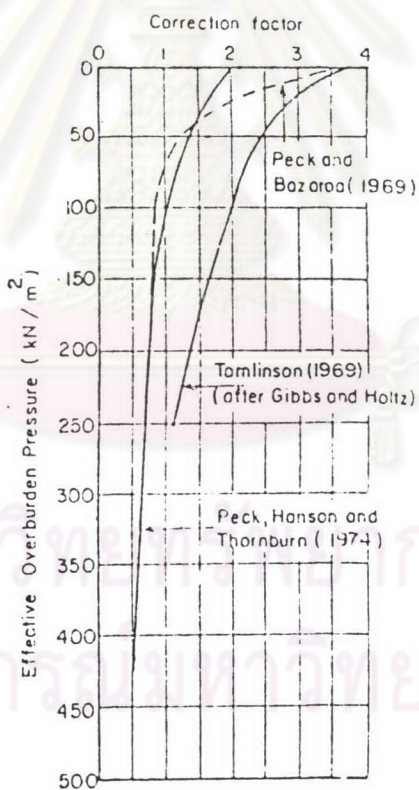


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_q และ ϕ°

สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง N_q และ θ' เป็นดังรูปที่ 2.5 (Ng Kim Cheng, 1983)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT N value กับ angle of shearing resistance

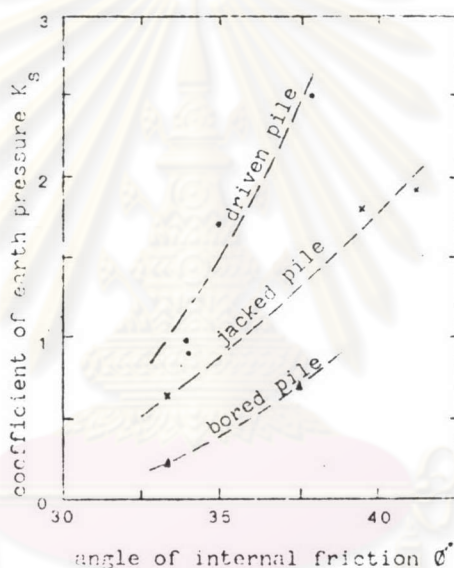


รูปที่ 2.7 Correction เนื่องจาก effective overburden pressure ที่มีต่อ SPT

Coefficient of earth pressure (K_s) อาจจะมีค่าอยู่ระหว่าง K_a และ K_p ก็ได้ ขึ้นอยู่กับวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม Broms (1966) เสนอให้ใช้ค่าของ K_s และ θ'_s สำหรับเสาเข็มตอก ดังนี้

ตารางที่ 2.3 Coefficient of earth pressure (K_s) (Broms, 1966)

ชนิดของเสาเข็ม	K_s		θ'_a
	ทรายหลวม	ทรายแน่น	
เหล็ก	0.5	1.0	20°
คอนกรีต	1.0	2.0	$3/4 \theta'$
ไม้	1.5	3.0	$2/3 \theta'$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Coefficient of earth pressure K_s และ angle of internal friction ϕ' (Meyerhof, 1976)

สำหรับเสาเข็มเจาะ Meyerhof (1976) ได้ทำการศึกษาค่าของ K_s ของเสาเข็มเจาะ เสาเข็มกด (jacked pile) และเสาเข็มตอก โดยนำผลการศึกษาต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ผลดังแสดงในรูปที่ 2.10 ค่าที่เหมาะสมของ K_s และ $\tan \theta'_a$ สำหรับเสาเข็มเจาะ คือ ให้ใช้ค่า $\theta'_a = 0.75 \theta'$ (Poulos และ Davis, 1980) และใช้ค่า K_s ดังที่ Meyerhof (1976) ได้ศึกษาไว้แล้ว ความสัมพันธ์ระหว่าง $K_s \tan \theta'_a$ และ θ' ที่แนะนำโดย Poulos และ Davis (1980) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่ θ' เป็น angle of internal friction ของดินทรายในสภาพที่ปราศจากการรบกวนก่อนที่จะก่อสร้างเสาเข็ม

2.3 วิธีทางพลศาสตร์ (Dynamic Method)

สูตรการตอกเสาเข็ม (Pile Driving Formula) เป็นสูตรที่ใช้สำหรับหาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม โดยอาศัยข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในระหว่างที่มีการตอกเสาเข็ม เช่น น้ำหนักลูกตุ้มตอก น้ำหนักของเสาเข็ม ระยะยกของลูกตุ้ม ชนิด ขนาด และความยาวของเสาเข็ม ไปแทนค่าในสูตร โดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลทางวิศวกรรมของชั้นดินที่ลึกลงไปเลย ดังนั้นการหาความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มในวิธีนี้ จึงสามารถทำได้สะดวกกว่าวิธีอื่นๆ

2.3.1 ที่มาของสูตรการตอกเสาเข็ม

ที่มาโดยใช้หลักการของ Impulse-Momentum กำหนดให้

g = ความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก

h = ระยะยกของลูกตุ้ม

I = Impulse ที่ทำให้เกิด Compression

m = มวลวัตถุ

M_r = โมเมนตัมของลูกตุ้ม

M_p = โมเมนตัมของเสาเข็ม

n = สัมประสิทธิ์ของการคืนตัว

n_i = Impulse ที่ทำให้เกิดการคืนตัว

R_u = น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม

S = ระยะจมของเสาเข็ม

V_{ce} = ความเร็วของลูกตุ้มและเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการเกิด Compression

V_i = ความเร็วของลูกตุ้มในขณะที่กระทบกับเสาเข็ม

V_p = ความเร็วของเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว

V_r = ความเร็วของลูกตุ้มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว

W_r = น้ำหนักของลูกตุ้ม

W_p = น้ำหนักของเสาเข็ม รวมทั้งน้ำหนักของที่รองเสาเข็ม

(รูป)

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของลูกตุ้มขณะเกิด Compression

$$I = \frac{W_r V_i}{g} - \frac{W_r V_{ce}}{g} \quad (2.13)$$

$$V_{ce} = \left(\frac{W_r V_i}{g} - I \right) \frac{g}{W_r} \quad (2.14)$$

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของเสาขณะเกิด Compression

$$I = \frac{W_p V_{ce}}{g} \quad (2.15)$$

$$V_{ce} = \frac{I g}{W_p} \quad (2.16)$$

สมมติว่าเสาเข็มและลูกตุ้มไม่มีการแยกกันในช่วงสุดท้ายของการเกิด Compression ความเร็วของเสาเข็มและลูกตุ้มในขณะนี้มีค่าเท่ากัน จาก (2.14) และ (2.16)

$$I = V_i \frac{W_r W_p}{g(W_r + W_p)} \quad (2.17)$$

ในช่วงสุดท้ายของการคืนตัวโมเมนตัมของเสาเข็ม

$$I + nI = \frac{W_p V_p}{g} \quad (2.18)$$

ของลูกตุ้ม

$$\frac{W_r V_i}{g} - I - nI = \frac{W_r V_r}{g} \quad (2.19)$$

แทนค่า I ลงในสมการ (2.17) , (2.18) และ (2.19)

$$V_p = \left(\frac{W_r + nW_p}{W_r + W_p} \right) V_i \quad (2.20)$$

$$V_r = \left(\frac{W_r - nW_p}{W_r + W_p} \right) V_i \quad (2.21)$$

พลังงานของเสาเข็มและลูกตุ้มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว

$$\frac{W_r V_r^2}{2g} + \frac{W_p V_p^2}{2g} = W_r h \left(\frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \right) \quad (2.22)$$

จากหลักการของพลังงานถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงาน

$$R_u S = W_r h \quad (2.23)$$

ถ้าให้ E_n = ประสิทธิภาพของเครื่องตอกเสาเข็ม

$$R_u S = E_h W_r h \quad (2.24)$$

แทนค่า W_m ด้วยค่า Equivalent จากสมการที่ (2.22) จะได้

$$R_u = \frac{E_h W_r h}{S} \left[\frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \right] \quad (2.25)$$

ในขณะที่ตอกเสาเข็ม ระยะเคลื่อนที่ของปลายเสาเข็มและหัวเสาเข็มจะไม่เท่ากัน เนื่องจาก elastic compression คือ เมื่อปลายเสาเข็มเคลื่อนที่ไปได้ระยะ = S หัวเสาเข็มจะเคลื่อนที่ไปได้ระยะ $S+C_1+C_2+C_3$ เมื่อ

C_1 = Elastic Compression ของเครื่องรอกหัวเสาเข็ม

C_2 = Elastic Compression ของเสาเข็ม

C_3 = Elastic Compression ของดิน

t = ความหนาของที่รอกหัวเสาเข็ม

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

L = ความยาวของเสาเข็ม

E_t = Modulus of elasticity ของที่รอกหัวเสาเข็ม

E_L = Modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม

ค่า Elastic compression ของที่รอกหัวเสาเข็ม เสาเข็ม และดินนี้ เราสมมุติว่ามีค่าแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กดหัวเสาเข็ม ดังนั้นงานที่หาได้จากพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของการตอกเสาเข็ม จะเท่ากับ

$$R_u \left(S + \frac{C_1 + C_2 + C_3}{2} \right) = R_u \left(S + \frac{C}{2} \right) \quad (2.26)$$

เมื่อแทนค่าในสมการ (2.25) จะได้

$$R_u = \frac{E_h W_r h}{\left(S + \frac{C}{2} \right)} \left[\frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \right] \quad (2.27)$$

2.3.2 ที่มาโดยใช้หลักการของพลังงาน

โดยใช้หลักที่ว่า งานที่ได้รับ = งานที่ทำ - งานที่สูญเสียไป โดยแบ่งออกเป็นงานที่สูญเสียไปเนื่องจาก Impact ของลูกตุ้มและเสาเข็ม และ งานที่สูญเสียไปเนื่องจาก Elastic compression ของที่รอกหัวเสาเข็ม เสาเข็มและดิน

พลังงานของลูกตุ้มก่อนกระทบหัวเสาเข็ม

$$E_i = \frac{W_r V_i^2}{2g} \quad (2.28)$$

พลังงานของลูกตุ้มและเสาเข็มในช่วงสุดท้าย

$$E_f = \frac{W_r V_r^2}{2g} + \frac{W_p V_p^2}{2g} \quad (2.29)$$

ดังนั้น พลังงานที่สูญเสียไป $E_l = E_i - E_f$

$$E_l = \frac{W_r V_i^2}{2g} - \left(\frac{W_r V_r^2}{2g} + \frac{W_p V_p^2}{2g} \right) \quad (2.30)$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้งานที่สูญเสียไปเนื่องจาก Impact ของลูกตุ้มและเสาเข็ม

$$E_l = \frac{W_r h W_p (1 - n^2)}{W_r - W_p} \quad (2.31)$$

พิจารณาที่ Elastic compression ของที่รองรับเสาเข็ม เสาเข็ม และดิน

$$R_u \frac{(C_1 + C_2 + C_3)}{2} = R_u \frac{C}{2} \quad (2.32)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ จะได้

$$R_u S = E_h W_r h - E_h \frac{W_r h W_p (1 - n^2)}{(W_r - W_p)} - R_u \frac{C}{2} \quad (2.33)$$

เมื่อจัดรูปใหม่จะได้

$$R_u = \frac{E_h W_r h (W_r + n^2 W_p)}{\left(S + \frac{C}{2} \right) (W_r + W_p)} \quad (2.34)$$

2.3.3 สูตรการตอกเสาเข็ม ส่วนใหญ่ก็จะดัดแปลงมาจากสมการนี้ เพียงแต่เปลี่ยนค่าคงที่บางตัวให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

Hiley's Formula สูตรนี้มีรูปของสมการเหมือนสมการในรูปทั่วไป คือ

$$R_u = E_n \frac{eW_r h}{\left(S + \frac{C}{2}\right)} \quad (2.35)$$

โดยที่

$$e = \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

C คือ การยุบตัวของกระสอบรองหัวเสาเข็มหนา L_2 เมตร

$$= 1.8 R_u L_2 / A \quad \text{หน่วยเป็นเซนติเมตร}$$

$$= 1.25 R_u L_2 / A \quad \text{หน่วยเป็นเซนติเมตร (กรณีที่ใช้ที่รองหัวเสาเข็มเป็นไม้อัด$$

ซึ่งหาค่า การยุบตัวจากสมการ $Q_u L_2 / A$ โดยการแทนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 80000 ksc)

C_2 คือ การยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยาว L เมตร

$$= 0.72 Q_u L / A \quad \text{หน่วยเป็นเซนติเมตร}$$

C_3 คือ การยุบตัวของดินใต้และรอบเสาเข็ม

$$= 3.6 Q_u / A \quad \text{หน่วยเป็นเซนติเมตร}$$

Engineering News Formula สูตรนี้ได้จากการตั้งสมมติฐาน คือ ให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องจักรในการตอกเสาเข็มเป็น 100% ดังนั้นจะได้ค่า $E_n = 1.0$ ไม่มีการสูญเสียพลังงานจากการตกกระทบระหว่างลูกตุ้มกับที่รองหัวเสาเข็ม ดังนั้นจะได้ค่า $e = 1.0$ ให้ค่าการยุบตัวชั่วคราวทั้งสามส่วน ($C_1/2$, $C_2/2$ และ $C_3/2$) มีค่ารวมกันเป็นค่า C ซึ่งค่านี้ปกติมีหน่วยเป็นนิ้ว แต่เนื่องจากการแปลงจากหน่วยนิ้วเป็นเซนติเมตรจึงต้องมีการคูณด้วยค่า 2.54 ดังนั้นกำลังรับน้ำหนักประลัยเสาเข็มหาได้จาก

$$R_u = \frac{W_r h}{\left(S + 2.54 \times C\right)} \quad (2.36)$$

ซึ่งค่า $C = 0.9$ นิ้ว สำหรับกรณีเป็นลูกตุ้มปล่อย (Drop Hammer)

$C = 0.1$ นิ้ว สำหรับกรณีที่เป็นลูกตุ้มชนิดอื่น

Janbu's Formula สูตรนี้ได้จากการตั้งสมมติฐาน คือ ให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องในการตอกเสาเข็มเป็น 100% ดังนั้นจะได้ค่า $E_n = 1.0$ ไม่มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการตกกระทบระหว่างลูกตุ้มกับที่รองหัวเสาเข็มดังนั้นจะได้ค่า $E = 1.0$ คิดค่าการยุบตัวชั่วคราวเป็นสัดส่วนกับค่าระยะจมนิ้ว (S) โดยใช้ค่า K_u เป็นตัวคูณเพิ่มค่า S ดังนั้นกำลังรับน้ำหนักประลัยได้จาก

$$R_u = \frac{W_r h}{(K_u S)} \quad (2.37)$$

โดยที่

$$K_u = C_d \left(1 + \left(1 + \frac{K}{C_d}\right)^{0.5}\right)$$

$$K = \frac{W_r h L}{AES^2}$$

$$C_d = 0.75 + 0.15 \frac{W_p}{W_r}$$

ซึ่ง E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม

ปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานการทรุดตัวของเสาเข็ม เนื่องจากระยะทรุดตัวของเสาเข็มในระหว่างที่ทำการตอกเสาเข็ม มีผลต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม (Pile driving formula) การที่ค่าระยะทรุดตัวของเสาเข็มต่างกันมากอาจไม่ใช่เนื่องมาจาก ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มต้นนั้นต่างกัน แต่อาจมาจากสาเหตุหลายประการด้วยกัน

น้ำหนักของลูกตุ้มเสาเข็ม และน้ำหนักของเสาเข็ม ในการตอกเสาเข็ม โดยใช้ลูกตุ้มแบบ Drop hammer มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับน้ำหนักของลูกตุ้ม เพราะถ้าใช้น้ำหนักของลูกตุ้มตอกที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มต่างกันไปมาก และอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเสาเข็มได้ คือ ถ้าน้ำหนักของลูกตุ้มตอกมากเกินไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเสาเข็ม อาจทำให้เสาเข็มในช่วงกลางเสา และปลายล่างเสา เกิดความเสียหาย และค่าระยะทรุดตัวของเสาเข็มจะมีค่ามาก ทำให้การคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจากสูตรการตอกเสาเข็ม มีค่าน้อยกว่าปกติ แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้ลูกตุ้มตอกเสาเข็มที่เบาเกินไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเสาเข็ม จะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าปกติ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มจะมีค่ามากกว่าที่เป็นจริง และถ้าใช้ลูกตุ้มเสาเข็มที่เบาเกินไปแล้วพยายามยกลูกตุ้มให้สูงเพื่อให้เสาเข็มจมลงไปจนถึงระดับที่ต้องการ อาจจะทำให้หัวเสาเข็มที่ลูกตุ้มกระทบเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการเลือกใช้น้ำหนักของลูกตุ้มที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญต่อน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม ที่ได้จากสูตรการตอกเสาเข็มมาก

อัตราเร็วของตุ้มตอก พลังงานของลูกตุ้มตอกเสาเข็มจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วที่ใช้ในการตอก โดยทั่วไปแล้ว ถ้าใช้อัตราเร็วในการตอกเสาเข็มมากจะทำให้พลังงานถ่ายไปสู่เสาเข็ม

มาก และจะทำให้ระยะทรุดของเสาเข็มมีค่ามากตามไปด้วย อันอาจจะทำให้หน้าหนักบรรทุกสูงสุด จากสูตรการตอกเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าปกติได้

มีการรบกวนในระหว่างการตอกเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มที่ตอกในดินเหนียว Cohesive soil ถ้ามีการรบกวนในระหว่างการตอกเสาเข็ม ทำให้เสาเข็มตอกไม่ต่อเนื่องมีการหยุดพัก ทั่วๆไปที่การตอกเสาเข็มลงไปไม่ถึงระดับที่ต้องการ เช่น ขณะที่ทำการตอกเสาเข็มแล้วเครื่องมือที่ใช้เกิดขัดข้อง การหยุดพักไปชั่วขณะจะทำให้แรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินรอบๆ เสาเข็มเพิ่มขึ้น เมื่อเริ่มตอกเสาเข็มใหม่จะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มลดลงจากเดิมก่อนการหยุดตอกมาก ในกรณีนี้จะต้องทำการตอกเสาเข็มให้ลึกลงไปดินสักระยะก่อน เพื่อทำลายแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินรอบๆ เสาที่เกิดขึ้นในระหว่างหยุดตอกเสาเข็มให้หมดไปก่อน จึงจะเริ่มจุดระยะทรุดตัวของเสาเข็มใหม่ได้ ระยะที่ต้องตอกใหม่นี้อาจจะอยู่ระหว่าง 2-3 นิ้ว จนถึงหลายเมตร แต่โดยทั่วไปแล้วเราจะกำหนดให้ตอกเสาเข็มต่อลงไปอีกประมาณ 1.50 เมตร แล้วจึงทำการจุดระยะทรุดตัวของเสาเข็มใหม่ได้

ที่รอกหัวเสาเข็ม ในระหว่างการตอกเสาเข็ม ลูกตุ้มที่ใช้จะต้องกระทบกับที่รอกหัวเสาเข็มก่อนทำให้พลังงานส่วนหนึ่งสูญหายไปจนถึงตัวเสาเข็ม ดังนั้นในระหว่างตอกเสาเข็มที่รอกหัวเสาเข็มต้องอยู่ในสภาพดี และการจุดค่าระยะทรุดตัวของเสาเข็มไม่ควรทำทันทีหลังจากเปลี่ยนที่รอกหัวเสาเข็มใหม่ ควรจะรอจนกระทั่งวัสดุที่ใช้รอกหัวเสาเข็มอยู่ในสภาพเหมือนก่อนเปลี่ยนที่รอกหัวเสาเข็มก่อน

เสาส่ง คือ เสาที่ใช้สำหรับสวมหัวเสาเข็มแล้วตอกให้เสาเข็มจมลึกกลงไปในดิน ในกรณีที่ต้องการให้ระดับหัวเสาเข็มอยู่ลึกกลงไปจากระดับผิวดิน เสาส่งจะมีผลต่อระยะทรุดตัวของเสาเข็ม คือ ทำให้น้ำหนักเสาเข็มเพิ่มขึ้น เสาเข็มจะตอกลงไปได้ยากกว่าเดิมระยะทรุดตัวของเสาเข็มจะลดน้อยลงจากเดิม และถ้าเสาส่งสวมไม่พอดีกับหัวเสาเข็มจะทำให้พลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไป และทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มลดน้อยลง ดังนั้นเสาส่งที่ใช้ควรเป็นเสาท่อนเดียว และมีความแข็งแรงพอ การสวมเสาส่งกับหัวเสาเข็มต้องทำอย่างแน่นหนา เสาส่งควรเป็นเสาท่อนเดียว และมีความแข็งแรงพอ การสวมเสาส่งกับหัวเสาเข็มต้องทำอย่างแน่นหนา เสาส่งควรทำด้วยเหล็ก ไม้เนื้อแข็ง หรือวัสดุอื่นๆ ที่ไม่ทำให้พลังงานสูญเสียไปในขณะทำการตอกเสาเข็ม

2.4 วิธีคาดคะเนจากผลการทดสอบ (Load test)

จากทฤษฎีกลศาสตร์ของแข็ง เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะเกิดการกระจายของหน่วยแรงในวัสดุ มีผลทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนตัว ลักษณะและขนาดของการเคลื่อนตัวจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (Stress-strain relation) โดยวัสดุต่างชนิดกันจะมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ต่างกัน การศึกษาพฤติกรรมเหล่านี้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้ เป็นที่ทราบกันดีว่า พฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียดของดินไม่เป็น Linear elastic ตลอดช่วงการรับแรงกระทำ และมีพฤติกรรมแตกต่างกันไปตามสภาพที่แตกต่างกัน ไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์ใดที่สามารถใช้แทนพฤติกรรมเชิงซ้อนของดินตลอดจนถึงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในทุกกรณีได้อย่างสมบูรณ์ การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มจากปัจจัยอื่นๆประกอบด้วย

2.4.1 วิธีหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติจากการทดสอบ

การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเพื่อให้ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุด ที่มีผู้รวบรวมไว้หลายๆ รูปแบบต่างๆ กัน ซึ่งวิธีการต่างๆ ได้ถูกรวบรวมไว้ ดังนี้

1 วิธีของ Davisson

2 วิธีของ Chin

3 วิธีของ De Beer

4 วิธีของ Brinch Hansen 90 percent criterion

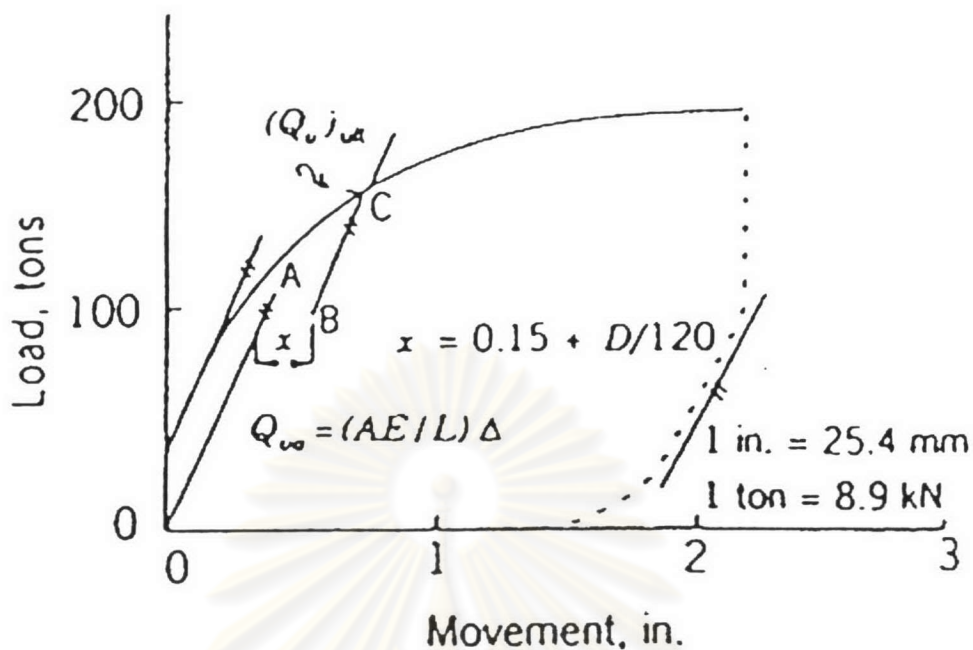
5 วิธีของ Brinch Hansen 80 percent criterion

6 วิธีของ Mazurkiewicz

7 วิธีของ Fuller และ Hoy

8 วิธีของ Butler และ Hoy

9 วิธีของ Van der Veen



รูปที่ 2.9 Davisson's method

Davisson (1972) การหาค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติของ Davisson โดยลากเส้นขนานระยะ offset จากเส้น initial modulus ไปตัดเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบ สามารถทำตามขั้นตอนได้ ดังนี้

ก. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทดสอบกับค่าการทรุดตัว ดังแสดงในภาพ

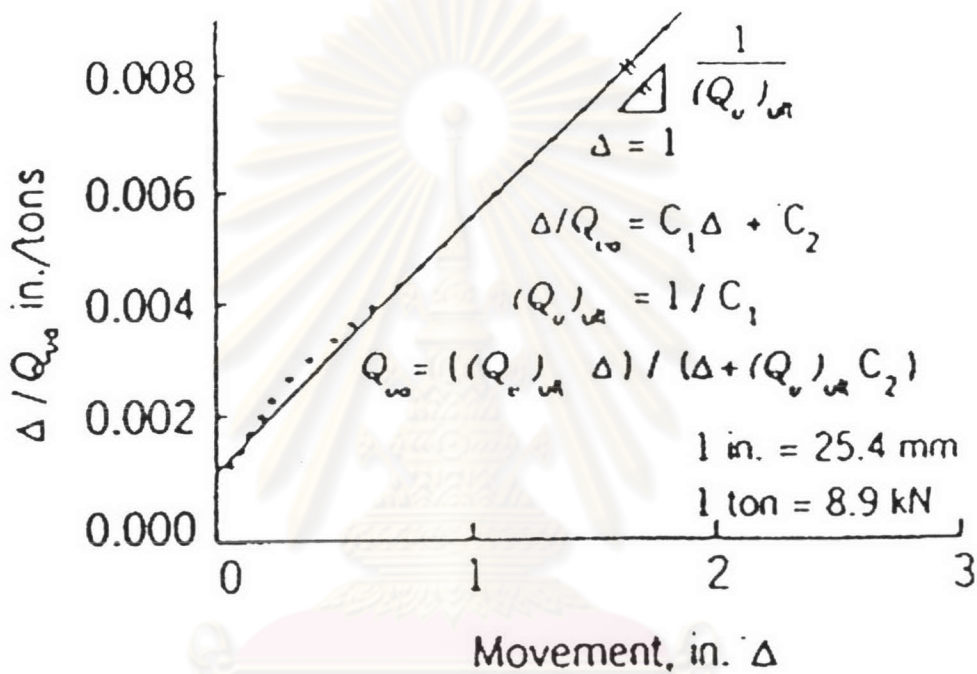
ข. คำนวณหาค่าการเคลื่อนตัวในช่วง elastic ของเสาเข็มทดสอบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\Delta = Q_{vs}L/AE$ โดยที่ Q_{vs} น้ำหนักบรรทุก, L คือความยาวของเสาเข็ม, A คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม และ E คือ modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม

ค. ลากเส้น OA ตามสมการ การเคลื่อนที่ในช่วง elastic (Δ) ที่ได้จากข้อ ข. ลงบนกราฟ จากนั้นลากเส้น BC ขนานกับเส้น OA เป็นระยะ x โดยให้ $x = 0.15 + D/120$ นิ้ว, (D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม, นิ้ว)

ง. น้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ คือ จุดตัดกันของเส้น BC กับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว (จุด C ในรูปที่ 2.9)

วิธีนี้จะแนะนำให้ใช้กับเสาเข็มตอก และใช้ได้ดีกับวิธีการทดสอบแบบ Quick load test ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือ เส้น BC สามารถลากได้ก่อนการทดสอบเสาเข็ม ดังนั้นจึงสามารถกำหนดเกณฑ์การทดสอบเสาเข็มสำหรับการทดสอบ Proof test ได้

Chin (1970,1971) วิธีนี้จะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด เท่ากับค่า asymptote ของกราฟความสัมพันธ์ที่ถูกแทนด้วยสมการไฮเพอร์โบลิก ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.10 Chin's method

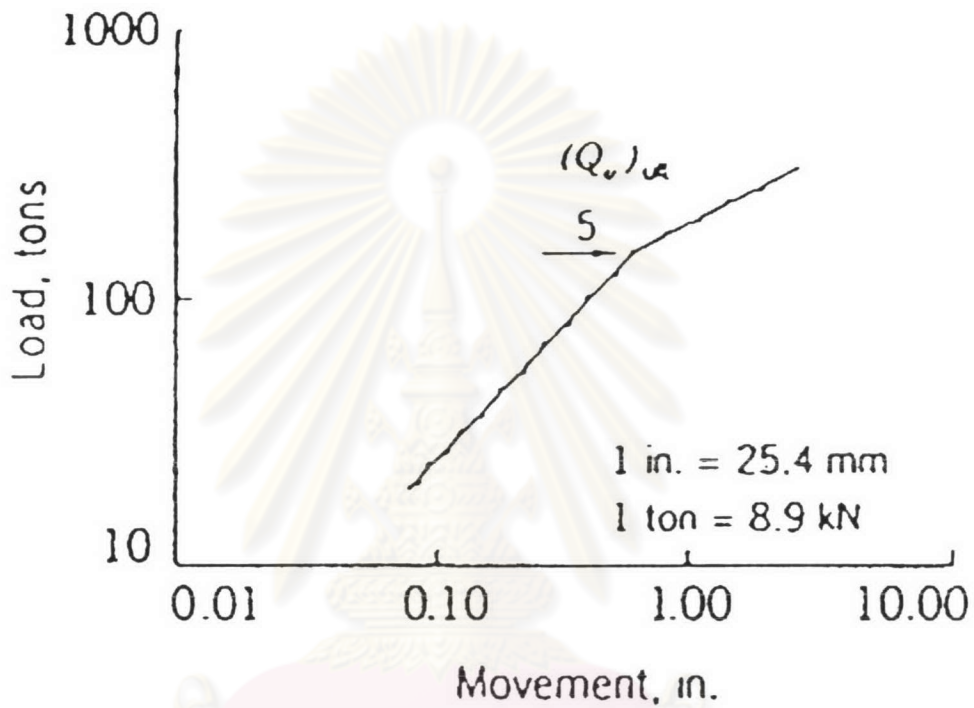
ก. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/Q_{va} กับ Δ โดยที่ Δ คือการเคลื่อนที่ และ Q_{va} คือน้ำหนักบรรทุกที่ทดสอบ ณ. ค่าการทดสอบตัวนั้น

ข. คำนวณน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ $(Q_{va})_{ult}$ มีค่าเท่ากับ $1/C_1$ โดยที่ C_1 คือค่าความชันของกราฟ อธิบายได้ตามภาพ ซึ่งถ้ากราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับการทดสอบ มีความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบลิกแล้ว วิธีนี้จะเป็วิธีที่เหมาะสม

วิธีการแปลผลนี้ถูกนำมาใช้กับการทดสอบแบบ Quick load test และ Standard loading procedure ซึ่งจะใช้เวลาเท่าๆ กันในแต่ละน้ำหนักทดสอบ โดยกราฟของ Chin นี้จะเริ่ม

แสดงรูปแบบเป็นเส้นตรง เมื่อน้ำหนักทดสอบเกินกว่า Davisson's limit วิธีนี้จะได้น้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติที่น่าเชื่อถือ ถ้าไม่ทดสอบในช่วงเวลาเท่าๆกันของการเพิ่มน้ำหนักในแต่ละช่วง

DeBeer (1967) เป็นการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จากจุดเปลี่ยนความชันของเส้นตรงบนความสัมพันธ์แบบลอการิทึมสเกล แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ซึ่งได้อธิบายไว้ตามขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.11 DeBeer's method

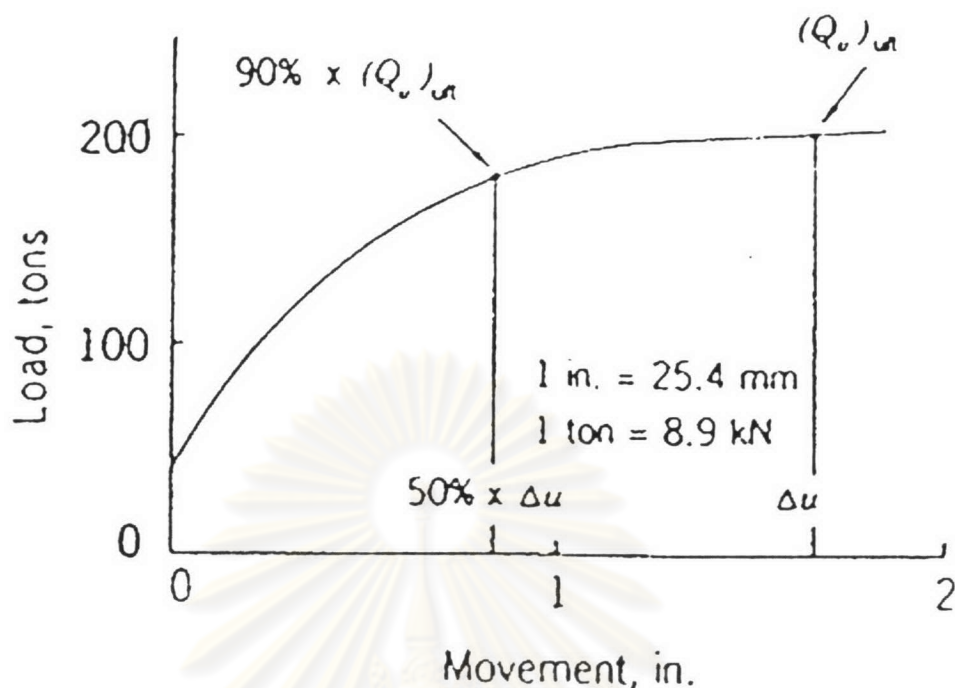
ก. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว บนกราฟลอการิทึมสเกล

ข. ซึ่งจะได้รูปกราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง 2 เส้น

ค. น้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ สามารถหาได้จากจุดตัดกันของเส้นตรง 2 เส้นนั้น

วิธีนี้แนะนำไว้สำหรับเสาเข็มที่ทดสอบแบบ Standard procedure

Brinch Hansen 90% criterion วิธีนี้เป็นวิธีลองผิดลองถูก เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ ณ จุดที่การทรุดตัวมีค่าเป็น 2 เท่า ของค่าการทรุดตัวที่ 90% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.12 และสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้



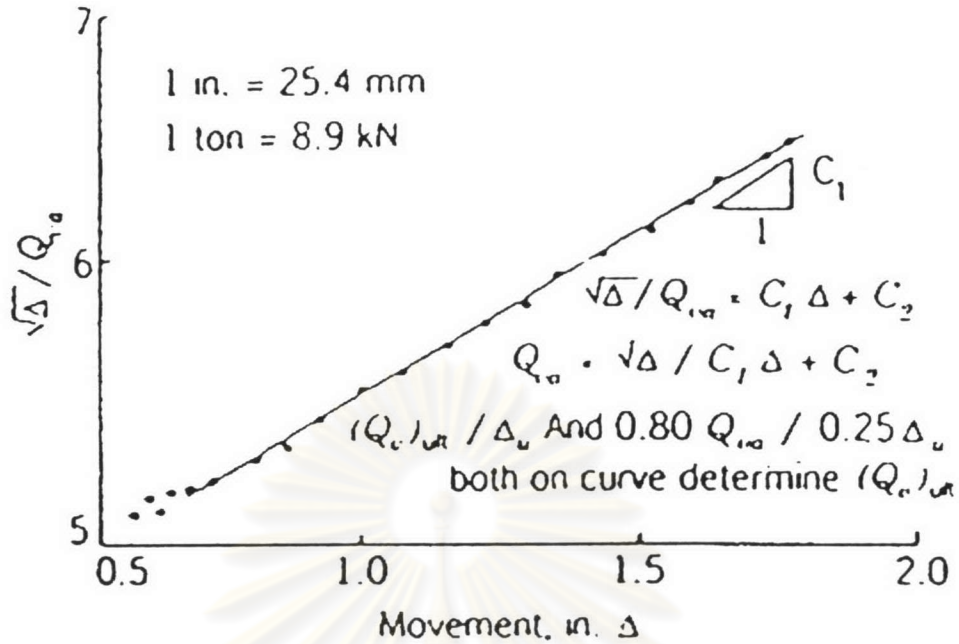
รูปที่ 2.12 Brinch Hansen 90% method

ก. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และการทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบ

ข. หาค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ $(Q_{va})_{ult}$ โดยที่ค่าการทรุดตัวที่จุดพิบัติ (Δu) จะมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าการทรุดตัวที่ 90% ของค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ $(Q_{va})_{ult}$

วิธีหาค่าวิธีนี้ถูกนำมาใช้กับการทดสอบแบบ Constant rate of penetration test โดยไม่ขึ้นกับชนิดของดิน

Brinch Hansen 80% criterion การแปรผลวิธีนี้พัฒนามาจากวิธี Brinch Hansen 90% ที่มีขั้นตอนยุ่งยากในการหาค่าน้ำหนักบรรทุก จึงได้พัฒนาให้วิธี Brinch Hansen 80% ใช้วิธีการแก้สมการเส้นตรง โดยกำหนดว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ คือจุดที่ค่าการทรุดตัวมีค่าเป็น 25% ของค่าการทรุดตัวที่ 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ แสดงไว้ในรูป 2.13 และแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ได้ ดังนี้



รูปที่ 2.13 Brinch Hansen 80% method

ก. เขียนกราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{\sqrt{\Delta}}{Q_{va}}$ กับ Δ ซึ่ง Δ คือการทรุดตัวและ Q_{va} คือน้ำหนักบรรทุก ซึ่งจะได้จากสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{\sqrt{\Delta}}{Q_{va}} = C_1 \Delta + C_2 \quad (2.38)$$

ข. ค่าของน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ $(Q_u)_{ult}$ จะเป็นตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดใดๆ ณ ตำแหน่งที่การทรุดตัวมีค่าหนึ่งในสี่ของการทรุดตัวที่จุดนั้นสามารถหาค่าได้โดยการกำหนดตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวที่จุดใดๆ กับน้ำหนักบรรทุกที่ 80% และการทรุดตัวที่ 25% ของจุดนั้นลงในสมการเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ดังนี้

แทนค่า Q_u, Δ_u ลงในสมการที่ จะได้

$$Q_u = \frac{\sqrt{\Delta_u}}{C_1 \Delta_u + C_2} \quad (2.39)$$

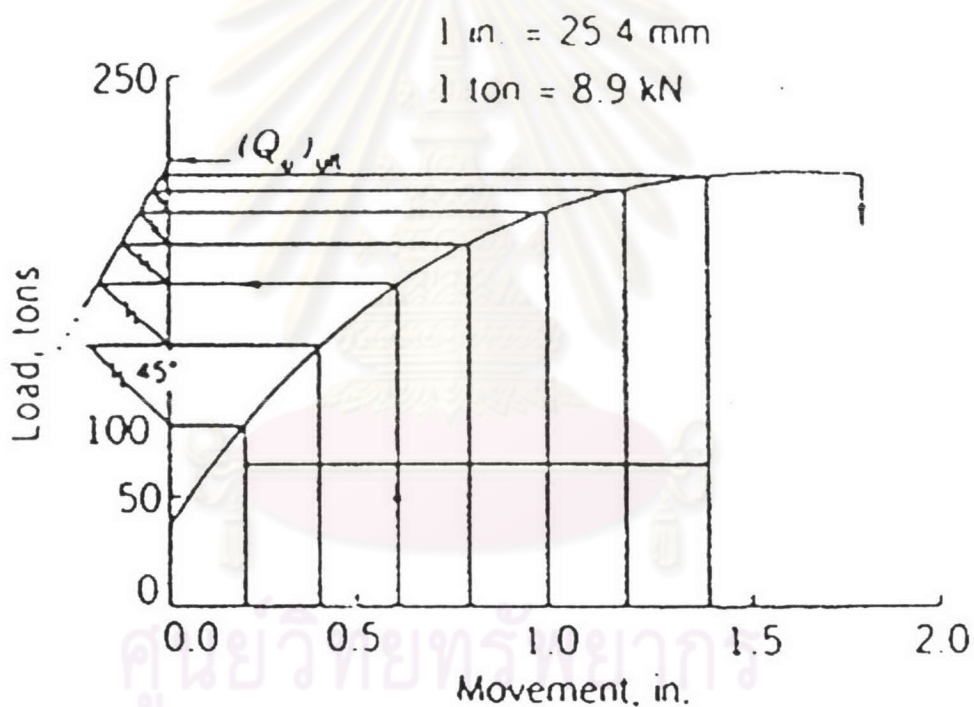
แทนค่า $0.8Q_u, 0.25\Delta_u$ ลงในสมการที่ จะได้

$$0.8Q_u = \frac{\sqrt{0.25\Delta_u}}{0.25C_1 \Delta_u + C_2} \quad (2.40)$$

จากนั้นแก้สมการโดยให้ เท่ากับ เพื่อหาค่า Δu ที่ทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ตามข้อกำหนดของวิธีนี้

ตัวอย่างกราฟ Brinch Hansen 80% ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 ซึ่งวิธีนี้นั้นรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวควรเป็นพาราโบลา เป็นวิธีที่ใช้ได้กับการทดสอบแบบ Quick load test และ Standard loading procedure โดยเป็นเกณฑ์กำหนดที่เหมาะสมสำหรับการพิบัติแบบการปักลง (Plunging failure)

Mazurkiewicz (1972) เป็นวิธีที่ใช้ลากเส้นหาจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดชันของกราฟความสัมพันธ์ที่เกิดการทรุดตัวแบบการเคลื่อนที่ลงโดยเร็ว จะเป็นค่าที่เสาะห้เกิดการพิบัติ แสดงรูปแบบไว้ในรูปที่ 2.14 ตามขั้นตอนการแปลผลดังนี้



รูปที่ 2.14 Mazurkiewicz's method

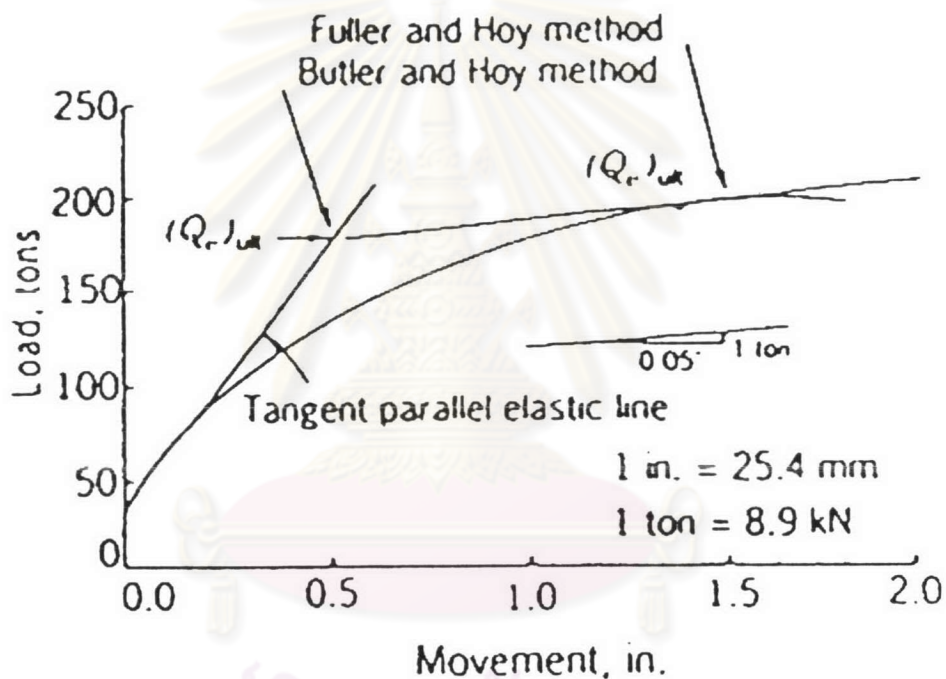
ก. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาะห้การทดสอบ

ข. ทำการแบ่งช่วงการทรุดตัวเท่าๆ กันบนแกน X และลากเส้นแนวตั้งขึ้นไปตัดบนส่วนโค้งของกราฟ จากนั้นให้ลากเส้นในแนวนอนจากจุดตัดนี้บนส่วนโค้ง ไปตัดกับแกนของน้ำหนักบรรทุก (Y)

ค. จากจุดตัดบนแกน Y ของแต่ละน้ำหนักทดสอบ ลากเส้น 45° ไปตัดกับเส้นน้ำหนักทดสอบถัดขึ้นไป ถ้าลากต่อจุดตัดนี้ ไปตัดแกนน้ำหนัก (Y) จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งจุดตัดแกน Y นี้คือ น้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ

วิธีนี้จะเหมาะสมกับรูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นพาราโบลา คำนำน้หนักบรรทุกที่หาโดยวิธีนี้มีค่าใกล้เคียงกับเกณฑ์ 80% ซึ่งวิธีของ Mazurkiewicz นี้มีข้อสังเกตว่า จะต้องพยายามบังคับให้จุดตัดที่เกิดขึ้นนี้มีรูปแบบเป็นเส้นตรง

Fuller และ Hoy (1970) เป็นวิธีที่กำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ จะเป็นจุดที่ความลาดชันของเส้นความสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.05 นิ้ว/ตัน แสดงขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 Fuller&Hoy's method และ Butler&Hoy's method

ก. เขียนกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวดังแสดงในรูปที่ 2.15

ข. คำนำน้หนักบรรทุกสูงสุด $(Q_u)_{ult}$ คือ น้ำหนักบรรทุกที่มีความชันของส่วนโค้งของกราฟความสัมพันธ์ที่ 0.05 นิ้ว/ตัน

วิธีนี้มักใช้แปลผลกับการทดสอบ Quick load test ข้อเสียของวิธีนี้ คือถ้าเป็นเสาเข็มยาวซึ่งมีค่าการเคลื่อนตัวแบบอีลาสติกมาก ทำให้ความชันที่ 0.05 นิ้ว/ตัน จะต้องถูกปรับค่าให้เกิดได้ค่าน้ำหนักที่จุดพิบัติที่การทรุดตัวน้อยขึ้น

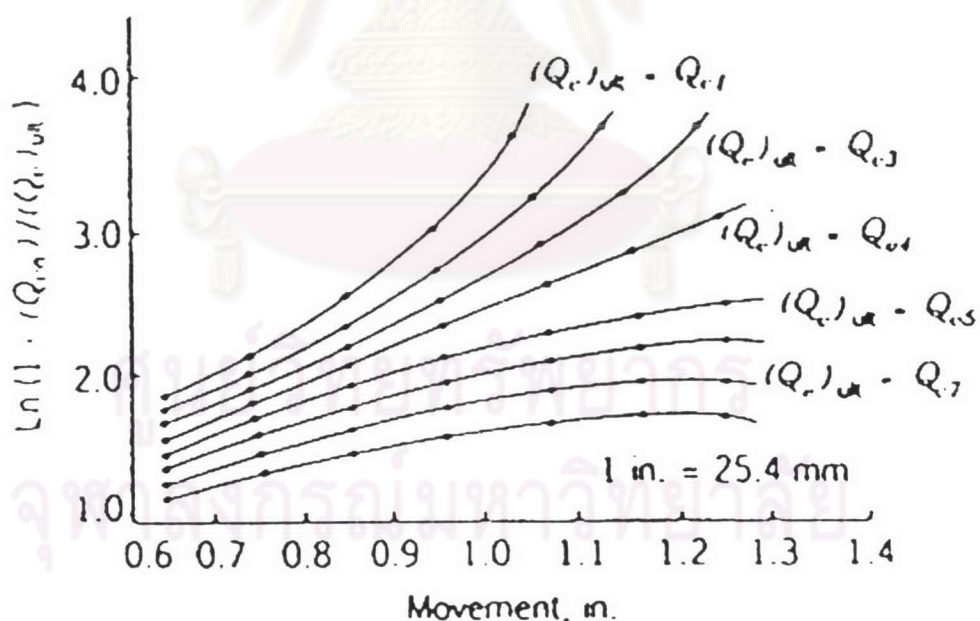
Butler และ Hoy (1971) กำหนดว่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ คือ จุดที่เส้นสัมผัสเส้นโค้งความสัมพันธ์ที่มีความลาดชัน 0.05 นิ้ว/ตัน ตัดกับเส้นอัสติคของความสัมพันธ์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 ซึ่งมีขั้นตอนการแปลผลดังนี้

ก. เขียนกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัว

ข. น้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ คือจุดตัดกันของส่วนของเส้นตรงที่มีค่าความชัน 0.05 นิ้ว/ตัน กับเส้นซึ่งเป็นส่วนของเส้นตรงเริ่มต้นของส่วนโค้ง หรือ เส้นขนานกับเส้น rebound curve หรือ เส้นอัสติคเริ่มต้น

วิธีนี้นำมาใช้กับการทดสอบแบบ Quick load test

Van der Veen (1953) เป็นวิธีที่ใช้การทดลองสมมติค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติบนกราฟความสัมพันธ์ใหม่ ถ้าค่าน้ำหนักที่สมมติทำให้กราฟมีรูปแบบเป็นเส้นตรง ก็จะได้ค่าที่สมมตินั้นเป็นน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.16 Van der Veen's method

ก. เลือกค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ ในที่นี้สมมติให้เท่ากับ $(Q_v)_{ult}$

ข. เขียนกราฟความสัมพันธ์กับค่าการทรุดตัวนั้นๆ สำหรับค่าน้ำหนักบรรทุก (Q_{va}) ต่างๆกัน

ค. เมื่อค่าที่สมมติ นำมาเขียนกราฟได้เป็นเส้นตรง ดังนั้นจะได้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติสมมตินั้นเป็นน้ำหนักที่จุดพิบัติที่หาได้จากวิธีนี้ ดังในรูปที่ 2.16

ข้อเสียของวิธีนี้ คือ จะใช้เวลาในการแปลผลมากเพื่อที่จะลองสมมติค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ

Joshi และ Hari (1987) ได้ทำการศึกษาการแปลค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มที่มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม ที่มีค่าอยู่ในช่วง 12 ถึง 32 จากผลการทดสอบเสาเข็มโดยวิธี Standard loading procedure มีรูปแบบการพิบัติเป็นแบบการปักลงของเสาเข็ม (Plunging failure) ซึ่งผลการศึกษาจากการใช้วิธีการแปลผลหาค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติจาก 9 วิธีที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. สำหรับเสาเข็มเจาะ วิธีของ Fuller และ Hoy สามารถประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติได้น่าเชื่อถือ

2. สำหรับเสาเข็มที่มีการกระทุ้งที่ปลายเสาเข็มให้ใหญ่ขึ้น วิธีของ Davisson, Butler และ Hoy, Fuller และ Hoy สามารถประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติได้น่าเชื่อถือ

3. สำหรับเสาเข็มตอรูป H วิธีของ Brinch Hansen 90% และ Fuller และ Hoy สามารถประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้ใกล้เคียงกับน้ำหนักทดสอบที่พิบัติ

Fellenius (1980) ได้ทำการศึกษาวิธีการแปลผลการทดสอบจากวิธีเดียวกันนี้ โดยใช้เสาเข็มคอนกรีตที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 นิ้ว ทดสอบกำลังรับน้ำหนักโดยวิธี Constant rate of penetration จากการแปลผลค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ พบว่า วิธีการ Fuller และ Hoy, Brinch Hansen 90% และวิธีของ Van der Veen สามารถประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติได้น่าเชื่อถือ

จากการศึกษายังพบอีกว่าวิธีของ Davisson สามารถประมาณค่าได้ค่อนข้างต่ำกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่จุดพิบัติ วิธีของ Chin จะให้ค่าที่สูงเกินกว่าผลการทดสอบที่จุดพิบัติ โดยวิธีของ Fuller และ Hoy จะได้ค่าที่จุดพิบัติ มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกที่ทดสอบจริง ผลสรุปจากการวิจัยของ Wachiraprakarnpong A.(1993) และ Soontornsiri A.(1995) พบว่าทฤษฎีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้น วิธีของ Mazurkiewicz และวิธีของ Butler และ Hoy จะมีความใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติจริงของเสาเข็มมากที่สุด

2.5 วิธีใช้และผลการวิเคราะห์จาก CAPWAPC

CAPWAPC เป็นการวิเคราะห์สัญญาณของแรงและความเร็วที่วัดจาก PDA โดยการใส่ resistance, damping factor, quake ตามเงื่อนไขไปตามชั้นดิน โดยใช้ค่า แรงทางสถิติศาสตร์ที่หาได้จาก case method เป็นแนวทาง และทำการวิเคราะห์ผล trail and error จนแรงและความเร็วที่คำนวณได้ match กับสัญญาณที่วัดได้ในสนาม ด้วยคุณภาพการ match ที่ดีที่สุด และมีความสมเหตุสมผล อันเป็นการยืนยันว่าผลจากการวิเคราะห์สามารถให้ทำนายผลที่ได้จากการวัดและแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง

การทดสอบเสาเข็มโดยวิธีนี้ สามารถทำการทดลองได้กับ เสาเข็ม คอนกรีต เข็มตอกและเข็มเจาะ) เสาเข็มเหล็ก และเสาเข็มไม้ เป็นการทดสอบเพื่อหาลำดับการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม ค่า stress และ tension force ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ และทราบถึงประสิทธิภาพป็นจันที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม ตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มที่ทดสอบว่ามีความเสียหายหรือข้อบกพร่องหรือไม่ รวมทั้งสามารถที่จะกำหนดมาตรฐานสำหรับการตอกเสาเข็มได้สำหรับพื้นที่โครงการนั้นๆ

ลักษณะการทดสอบ Dynamic load test จะใช้ลูกตุ้มน้ำหนักปล่อยกระแทกที่หัวเสาเข็ม เพื่อให้เสาเข็มมีการเคลื่อนตัวจากแรงกระแทกของลูกตุ้มบนหัวเสาเข็มนั้นจะทำให้เกิดคลื่นความเค้น (stress wave) ลงไปตลอดของตัวเสาเข็ม และคลื่นความเค้นดังกล่าวจะสะท้อนกลับขึ้นมา เมื่อเกิดแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม แรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม และคุณสมบัติทางกายภาพของเสาเข็มรวมถึงพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น วังคลื่นความเค้นดังกล่าวจะถูกบันทึกโดยตัว Transducers ประกอบด้วย Strain gauges และ Accelerometers ที่

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า CAPWAPC Variables (CAPWAPC Manual, 1993)

Quantity	Program Symbol	Dimension	Recommended Minimum	Recommended Maximum	Recommended Starting Value
Skin Quake	QSkn	Inch/cm	0.01/0.025	Max 4 ⁽²⁾	0.1/0.25
Toe Quake	QToe	Inch/cm	0.01/0.025	Max 4 _{toe} - TGap	0.1/0.25
Skin Unld Quake ⁽¹⁾	CSkn	--	0.01	1.0	1.0
Toe Unld Quake ⁽¹⁾	CToe	--	0.01	1.0	1.0
Unloading Level ⁽¹⁾	UTld	--	0	1.0	1.0
Skin Reloading Level ⁽¹⁾	LSkn		-1.0	1.0	-1.0
Toe Reloading Level ⁽¹⁾	LToe	--	0.0	1.0	0
Skin Damping					
Case	JSkn	--	N/A	N _s	0.1
Smith	SSkn	s/ft s/m	0.025/0.08		N/A
Toe Damping					
Case	JToe	--	N/A	1.0	0.1
Smith	SToe	s/ft s/m	0.025/0.08	0.31/1.0 ⁽³⁾	N/A
Smith Damping Option	OPtd	--	0	2.0	0
Pile Damping	PIld	--	0	0.03	0
Skin Soil Dashpot	SKdp	--	0.02	N/A	0
Skin Soil Mass	MSkn	Fu	0	N/A	0
Toe Soil Dashpot	BTdp	--	0.02	N/A	0
Toe Soil Mass	MToe	Fu	0	N/A	0
Plug Mass	PLug	Fu	0	3 toe weight	0
Toe Gap	TGap	Inch/cm	0	Max U _{toe} - Q _{bc}	0
Residual Stress Option	REss	--	0	5	0

Notations :

(1) Multiplier

(2) Maximum displacement

Higher values are possible though uncommon

ได้รับการติดตั้งบริเวณใกล้กับหัวเสาเข็ม สัญญาณที่ได้ขณะการทดสอบจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของหน่วยแรงและความเร็ว ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาค่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต่อไป

ในกรณีการทดสอบสำหรับเสาเข็มตอกนั้น การทดสอบโดยวิธี Dynamic load test สามารถทำได้ 2 ลักษณะ กล่าวคือ

Initial driving test เป็นการทดสอบขณะทำการตอกเสาเข็ม โดยทั่วไปเป็นการทดสอบเพื่อหาความยาวของเสาเข็มสำหรับโครงการ ตรวจสอบประสิทธิภาพของปั้นจั่นที่ใช้ในการตอก (Hammer efficiency) ว่ามีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร ตรวจสอบหน่วยแรงดันสูงสุด (แรงอัดและแรงดึง) ในระยะยกต่างๆ ที่ใช้ในการตอกเสาเข็มอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยหรือไม่ รวมถึงบอกความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ทำให้สามารถควบคุมงานการตอกเสาเข็มได้ และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการตอกเสาเข็ม

Restrike drive test เป็นการทดสอบหลังการตอกเสาเข็มไปแล้วในระยะเวลาหนึ่ง โดยทั่วไปเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ออกแบบหรือไม่ ปกติทั่วไปของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้นจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ดินมีการคืนตัวหลังการตอก (soil set-up) ในส่วนแรงเสียดทานด้านข้าง ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวนั้นขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพของดินในบริเวณนั้นๆ

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบโดยวิธี dynamic load test นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 25 วิธีกล่าวคือ

Case method เป็นวิธีการที่ให้ผลการทดสอบได้อย่างรวดเร็ว โดยจะให้ผลทันทีหลังจากการทดสอบ ซึ่งจะปรากฏค่าต่างๆ ในเครื่องมือ PDA (pile driving analyzer) เป็นการวิเคราะห์จากค่าที่วัดได้ในภาคสนาม คือ แรง F (Pile top force) และความเร่ง (Acceleration) และความเร็ว V (Velocity) และค่า Damping (J_c) ที่กำหนดให้ ดังสมการต่อไปนี้

$$R_t = (1-J_c)[F_{(1)} + ZV_{(2)}]/2 + (1-J_c)[F_{(2)} + ZV_{(1)}]/2 \quad (2.41)$$

โดยที่ t_1 = เวลาที่เกิดความเร็วมากที่สุดที่หัวเสาเข็ม

$$t_2 = t_1 - 2L/c$$

$$Z = \text{Pile Impedance} = Mc/L$$

การวิเคราะห์โดยโปรแกรม CAPWAPC เป็นการวิเคราะห์ที่แม่นยำและให้ค่าที่ถูกต้องที่สุด กลางคือ เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในภาคสนาม (Case method) มาทำการวิเคราะห์อีกครั้ง ดังสมการต่อไปนี้

$$R_s = R_t - R_d \quad (2.42)$$

ผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม CAPWAPC จะทำให้ทราบถึงข้อมูลต่อไปนี้ คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม แรงเสียดทานด้านข้างเสาเข็ม แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว ความสมบูรณ์ของเสาเข็ม และหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นในระหว่างการตอกเสาเข็ม



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย