บทที่ 4
สูตรเสาเข็มตอก

4.1 สูตรเสาเข็มตอก

จากสภาพน้ำหนักบรรทุกกับการจมตัวของเสาเข็มภายใต้น้ำหนักกระทำสถิตย์ ได้จำลองผลการตอกเสาเข็มลงดิน ในลักษณะเดียวกัน ดังเช่นเส้นการจมตัวของเสาเข็มตามเส้น oeb ในรูปที่ 4.1 สำหรับดินทราย แรงต้านทานเสาเข็มอาจค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ขณะที่เสาเข็มจมตัว จากผลการตอก ดังรูป 4.1(ก) แต่สำหรับดินเหนียวแข็งแล้ว การเคลื่อนตัวของเสาเข็มในดิน อาจเลยจุดกำลังดินสูงสุดของดินเหนียวก็ได้ ดังรูป 4.1(ข)

ดังนั้น ที่มาของสมการเสาเข็มตอก จึงเกิดจากสมมุติฐานที่ว่า แรงต้านทานการจมตัวของเสาเข็มมีค่าคงที่ เป็น Q_d ตลอดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเป็นระยะ $\Delta\rho$ และจากกฎของงาน ด้วยผลการตอกเสาเข็มที่ระยะยก H ด้วยขนาดตุ้ม W จะได้

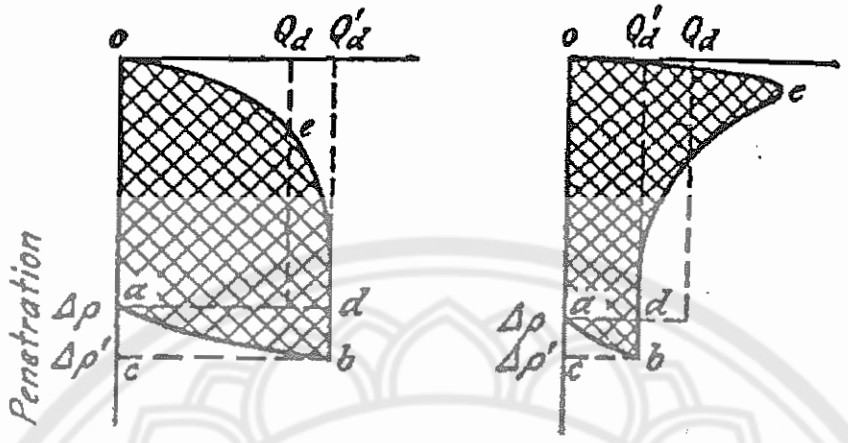
$$WH = Q_d \Delta\rho + E_1 \qquad (4.1)$$

ให้ E_1 เป็นพลังงานที่สูญเสียไป

เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการจมตัวของเสาเข็ม จากแนวคิดสมมุติของสมการเสาเข็มตอก กำหนดให้ส่วนพื้นที่ abd เป็นพลังงานที่สูญเสียไป และส่วนพื้นที่ oade จึงเป็นพลังงานประสิทธิผลที่ใช้ในการเคลื่อนเสาเข็มจมดิน

$$Q_d = \text{ส่วนพื้นที่ oade} / \Delta\rho \qquad (4.2)$$

ซึ่งจะเป็นแรงต้านทานเสาเข็มตอกของดิน จากพฤติกรรมของดินภายใต้กฎพลศาสตร์ แรงต้านทานรวม (Q'_d) มีค่าเป็นผลรวมจาก แรงต้านทานสถิตย์ Q_d และส่วนแรงต้านทานพลศาสตร์ ดังนั้นจากรูปที่ 4.1 แรงต้านทานสถิตย์อาจมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า Q'_d ก็ได้



(ก) ในชั้นดินทราย (ข) ในชั้นดินเหนียว

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_d กับระยะจมของเสาเข็มจากการตอก

จากสมมุติฐานที่มาของพลังงานที่สูญเสียไป E_1 ในสมการ 4.1 แบ่งได้ดังนี้

. ให้พลังงานที่สูญเสียไปมีค่าเท่ากับ พลังงานที่ใช้ในช่วงการคืนตัว $Q_d (\Delta\rho' - \Delta\rho)$

. E_1 เท่ากับการเสียพลังงานเนื่องจากหดตัวของเสาเข็ม

. E_1 เท่ากับการเสียพลังงานเนื่องจากการดล

. E_1 เป็นผลรวมจากการหดตัวและการเสียพลังงานเนื่องจากการดล

อ้างสมมุติฐาน (ก) : $$E_1 = Q_d (\Delta\rho' - \Delta\rho) \quad (4.3)$$

และ $$Q_d = WH/\Delta\rho' \quad (4.4)$$

การใช้สมการจำเป็นต้องวัดหาค่า การจมตัวสูงสุด $\Delta\rho'$ ของเสาเข็มขณะถูกตอก ซึ่งทำให้ได้ยากในสนาม

อ้างสมมุติฐาน (ข) : $$E_1 = \tfrac{1}{2} (Q^2_d L / A_p E_p) \quad (4.5)$$

และ $$Q_d = - (\Delta\rho A_p E_p / L) + \sqrt{ [(2W_H H A_p E_p / L) + (\Delta\rho A_p E_p / L)^2]} \quad (4.6)$$

เมื่อ L = ความยาวของเสาเข็ม A_p = พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของเสาเข็มและ E_p = โมดูลัสอิลาสติกของวัสดุเสาเข็ม ซึ่งทำให้สามารถหาค่าแรงต้านทานของดินได้เป็นดังสมการของ Weisbach

อ้างสมมุติฐาน (ค) : $E_1 = W_H H (W_p (1-n_e^2) / W_{p+} W_H)$ (4.7)

และ $Q_d = W_H H / \Delta\rho(1 + W_p / W_H)$ (4.8)

สมการ Eytelwin **ของเสาเข็มตอกและถ้าให้** $C_p = \Delta\rho\ W_p / W$ **เป็นค่าที่ประมวล จะได้สมการ** Engineering News

สุดท้ายสมมุติฐาน (ง) รวมผลการสูญเสียพลังงานระหว่างการตอกเสาเข็ม เนื่องจากการหดตัวอิลาสติกสมการ (4.5) การดลในสมการ (4.7) และส่วนพลังงานสูญเสียที่เกิดจากการหดตัวของดิน **และ** อุปกรณ์ครอบหัวเสาเข็มจะได้สมการซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของสมการ Hiley (1930)

$$WH = Q_d\Delta\rho + WH(W_p (1-n_e^2) / W_p + W) + (Q_d^2 L / 2A_pE_p) + E_{ls} \quad (4.9)$$

และ $$Q_d = [e_f WH / (S+ \tfrac{1}{2}(c_1+ c_2+ c_3))][(W+ n_e^2 W_p) / (W + W_p)] \quad (4.10)$$

หรือ $Q_d = (e_f WHZ) / (S+ C/2)$

เมื่อ Q_d = กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม

n_e^2 = coefficient of restitution = 0.25

W_p = น้ำหนักของเสาเข็ม

W = น้ำหนักของตุ้ม

$Z = (W + n_e^2 W_P) / (W + W_p)$

e_f = ประสิทธิภาพของลูกตุ้ม

= 0.80เมื่อปล่อยด้วยลวดและเครื่องจักร

H = ระยะยกลูกตุ้มสูงจากหัวเสาเข็ม

S = ระยะหัวเสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง

C = Temporary compression = $c_1+ c_2+ c_3$

c_1 = ระยะยุบตัวของหมอนรองหัวเสาเข็มหนา L_2 (ม.) =1.8 $Q_d L_2 / A$ (ซม.)

c_2 = ระยะยุบตัวของเสาเข็มคอนกรีตยาว L (ม.) = 0.72 $Q_d L / A$ (ซม.)

c_3 = ระยะยุบตัวของดินใต้และรอบเสาเข็ม = 0.36 Q_d / A (ซม.)

A_p = เนื้อที่หน้าตัดของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตัวอย่างการคำนวณ

W = 3.5ตัน , H =60 ซม. , Q_a= 20 ตัน (Working load)

L = 21 ม., W_p = 2.0 ตัน , A_p = 650 ซม.^{2}

L_2= 10 ซม. , S = ?

ถ้าใช้ ส่วนปลอดภัย (F.S.) = 4.0

Q_d = 20.0 × 4.0 = 80.0 ตัน

จากสูตร

$$Q_d = (e_i WHZ) / (S + C/2)$$

$$Z = (3.5 + 2.0(0.25^2)) / (3.5+2.0)$$

$$= 0.659$$

$$C_2 = (0.72 \times 80 \times 21) / 650 = 1.86 \text{ ซม.}$$

$$C_1 = (1.8 \times 80 \times 0.10) / 650 = 0.022 \text{ ซม.}$$

$$C_3 = (3.6 \times 80) / 650 = 0.443 \text{ ซม.}$$

แทนค่า

$$80 = (0.659 \times 3.5 \times 60 \times 0.80) / [S + (1.86+0.022+0.443) /2]$$

$$S = 0.2214 \text{ ซม.}$$

ค่าเฉลี่ย 10 ครั้งสุดท้ายได้ไม่มากกว่า 0.2214 ซม. หรือการทรุดสุดท้ายต้องไม่มากกว่า 2.2 ซม.

4.2 การเปรียบเทียบสูตรเสาเข็มตอก

จากสูตรการคำนวณการตอกเข็มที่ ว.ส.ท แนะนำให้ใช้ทั้ง 4 วิธี ด้วย F.S. = 4 ซึ่งจะได้ ค่า Q_d = 80ตัน ค่า S ที่ได้จากการคำนวณจากทั้ง 4 วิธี มีดังนี้

สมการ Engineering News	S = 0.339 ซ.ม.
สมการ Hiley's	S = 0.2214 ซ.ม.
สมการ Janbu's	S = 0.845 ซ.ม.
สมการ Load Bearing Capacity	S = 1.077 ซ.ม.

จะพบว่าจากสูตรของ Hiley's จะให้ค่าการทรุดตัวน้อยที่สุด และจากสูตรของ Load Bearing Capacity จะให้ค่าการทรุดตัวมากที่สุด

4.3 แรงต้านทานการจมของเสาเข็ม

แรงต้านทานพลศาสตร์ของเสาเข็มต่อการจมตัวลงดิน จากการตอกตุ้มบนเสาเข็มย่อมแตกต่างกับแรงต้านทานสถิตย์ของเสาเข็ม จากน้ำหนักบรรทุกสถิตย์กระทำซึ่งให้การจมตัวของเสาเข็มในดินเป็นไปอย่างเชื่องช้า ความแตกต่างมาจากเหตุผลหลายประการ เพราะการจมตัวของเสาเข็มจากการตอกจะถูกต้านทานโดยแรงเสียดทานรวมกับแรงยึดเกาะสถิตย์ของดิน และแรงเหนี่ยวหนืดของดินด้วย ดังลักษณะเดียวกับแรงเหนี่ยวหนืดต้านทานจากของไหลต่อการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว อีกนัยหนึ่งก็คือการดกกระทบและผลการตอกหัวเสาเข็มอย่างต่อเนื่อง ทำให้แรงยึดเกาะของดินต่อผิวเสาเข็มหลวมตัว ในกรณีที่สุดแล้ว การตอกเสาเข็มจะทำลายแรงเสียดทานรวมกับแรงยึดเกาะสถิตย์ของดินเกือบสมบูรณ์ตลอดเวลาการตอก และถ้าไม่หยุดตอกนานเกินไป

ความเกี่ยวเนื่องกับการออกแบบฐานราก คือค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยสถิตย์ของเสาเข็ม ดังนั้นคำตอบคือความสัมพันธ์ของแรงต้านทานพลศาสตร์ของเสาเข็ม ด้วยระบบการทดสอบในสนามที่น่าเชื่อถือ กับกำลังรับน้ำหนักประลัยสถิตย์ของเสาเข็มภายใต้สภาพดินชนิดต่างๆ จนกว่าจะเชื่อมั่นได้ " สมการสูตรเสาเข็มตอกควรใช้เพียงเป็นการวัดเพื่อช่วยการตัดสินใจเลือกของวิศวกร ต่อระบบฐานรากเสาเข็มที่ปลอดภัยสมเหตุผลสำหรับโครงการหนึ่งๆเท่านั้น " อย่างไรก็ตาม เนื่องจากที่มาของสูตรเสาเข็มตอกมีข้อบกพร่องจากพื้นฐานที่สมมติ จึงควรใช้ดังลักษณะกฎประมวลการทดลอง ประกอบกับประสบการณ์วิศวกรในพื้นที่และประสบการณ์การตอกเสาเข็มในพื้นที่ลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 4.1 สมการสูตรเสาเข็มตอก (ค่า F.S. แนะนำ)

Formula	Equation for Q_d	Remarks
Sanders	$\frac{WH}{S}$	
Engineering New Record (F.S. = 6)	$\frac{WH}{S+2.54C}$	C = 0.9 for drop hammer
Eytelwein (F.S. = 6)	$\frac{e_f WH}{S+0.1(W_p+W)}$	
Weisbach (F.S. = 4)	$-\frac{SAE_p}{L}+\sqrt{\left(\frac{2WHAE_p}{L}\right)+\left(\frac{SAE_p}{L}\right)^2}$	
Hiley (F.S. = 3)	$\frac{e_f WH}{S+1/2(c_1+c_2+c_3)} \cdot \frac{W+n_e^2 W_p}{W+W_p}$	
Janbu (F.S. = 3)	$\frac{1}{k_u} \cdot \frac{WH}{S}$	$K_u = C_d\{1+(1+\lambda e/C_d)^{1/2}\}$ $C_d = 0.75+0.15\ W_p/W$ $\lambda e = WHL/AES^2$
Danish (F.S. = 4.5)	$\frac{e_f WH}{S+(e_f WHL/2AE_p)^{1/2}}$	See Table 3.2 for e_f values.
Gates (F.S. = 3)	$4.0\sqrt{e_f WH}\ \log_{10}(25/S)$	Units are metric tons (1000 kg) and centimeters.
Olsen & Flaate (1967) (F.S. ≈ 3)	$7.2\sqrt{e_f WH}\ \log_{10}(10/S)-17$ $9.0\sqrt{e_f WH}\ \log_{10}(10/S)-27$ $13.0\sqrt{e_f WH}\ \log_{10}(10/S)-83$	For timber piles For concrete piles For steel piles
Navy – Mc Kay (F.S. = 6)	$\frac{e_f WH}{S(1+0.3\frac{W_p}{W})}$	
Pacific Coast Uniform Building Code (F.S. = 3)	$\frac{e_f WH\left(\frac{W+kW_p}{W+W_p}\right)}{S+\frac{Q_d L}{AE_p}}$	k = 0.25 for steel piles = 0.1 for all other piles

ตารางที่ 4.2 ค่าประสิทธิภาพการตอกเสาเข็ม, e_f[a]

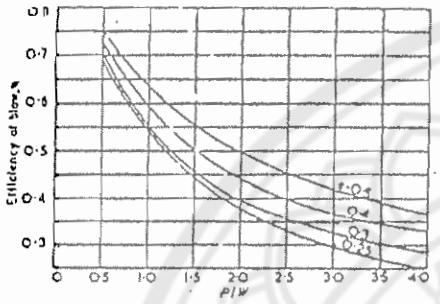
Hammer Type	e_f
Drop hammer released by trigger	1.00
Drop hammer actuated by rope and friction which	0.75
McKiernan-Terry single-acting hammers	0.85
Warrington-Vulean single-acting hammers	0.75
Different-acting hammers	0.75
McKiernan-Terry. Industrial Brownhoist. Nation & Union double-acting hammers	0.85
Diesel hammers	1.00

[a] After Chellis (1961)

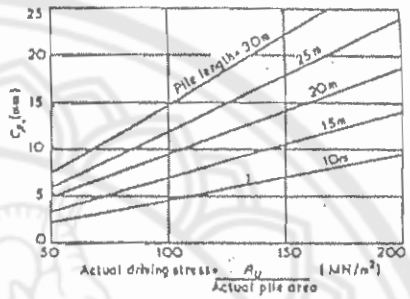
ตารางที่ 4.3 ค่า n_e^2 (COEFFICIENT OF RESTITUTION)[a]

Pile Type	Head Condition	Drop, Single-acting. or Diesel Hammers	Double-acting Hammers
Reinforced concrete	Helmet with composite plastic or greenheart dolly and packing on top of pile	0.4	0.5
	Helmet with timber dolly. And packing on top of pile	0.25	0.4
	Hammer direct on pile with pad only	-	0.5
Steel	Driving cap with standard plastic or greenheart dolly	0.5	0.5
	Driving cap with timber dolly	0.3	0.4
	Hammer direct on pile	-	0.5
Timber	Hammer direct on pile	0.25	0.4

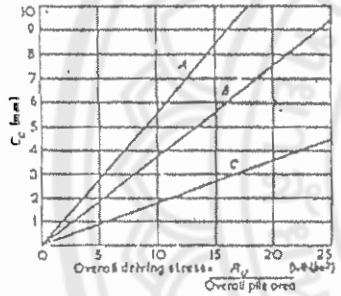
[a] After Whitaker (1970)



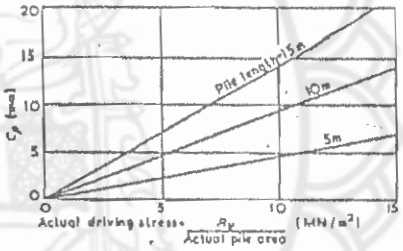
Determination of efficiency factor, n, for use in the Hiley pile driving formula, after BSP Pocket Book (1969)



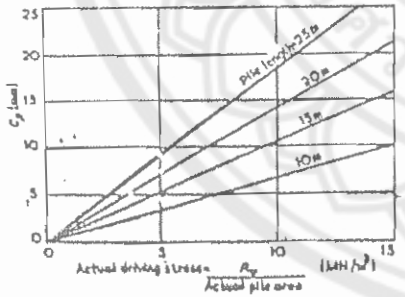
Determination of temporary elastic compression C_p, for steel piles, after BSP Pocket Book (1969)



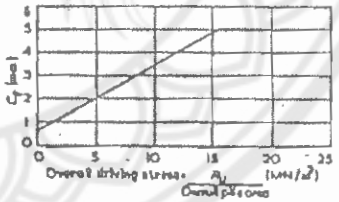
Determination of temporary elastic compression C_c, after BSP Pocket Book (1969)
Key: A = concrete pile, 75 mm packing under helmet; B = concrete or steel pile, helmet with dolly or head of timber pile. C = 25 mm pad only on head of RC pile



Determination of temporary elastic compression C_p, for timber piles, after BSP Pocket Book (1969)



Determination of temporary elastic compression C_p, for concrete piles, after BSP Pocket Book (1969)



Determination of temporary elastic compression C_p, after BSP Pocket Book (1969)

รูปที่ 4.2 ค่า c_1 ,c_2 ,c_3 สำหรับสมการ Hiley

สมการเสาเข็มตอก ในทางปฏิบัติ

สมการเสาเข็มตอกนั้นมักจะจำกัดการใช้กับชั้นดินทราย ซึ่งมาจากสมการพลังงาน

$$Wh = R_u / s$$

หรือ $$s = Wh / R_u \qquad (4.11)$$

สมการข้างต้นเป็นสมการพื้นฐานต่อการประยุกต์รวมผลการสูญเสียพลังงานจากตัวเสาเข็ม , ครอบหัวเสาเข็มและมวลดิน

สูตรการตอกเสาเข็มที่นิยมในภูมิภาคนี้

ก.สมการ Hiley (1925)

ข.สมการ Engineering News (1965)

และ ค.การวิเคราะห์โดยสมการคลื่น (Wave Equetion Analysis)

4.4.1 สมการ Hiley (1925) โดยวิธีทดลองสมมติ

เกิดจากพลังงานที่ใส่เข้าไป = งานที่เกิดขึ้น + การสูญเสียจากการกระทบ

\+ การสูญเสียจากตัวเสาเข็ม , หัวครอบและมวลดิน

ได้เป็น

$$Q_d' = (e_f WhZ) / (S + C/2)$$

โดยที่ $C = c_1$ (เสาเข็ม)+ c_2 (หัวครอบ)+ c_3 (มวลดิน)

และ $Z = (W + n_e^2 W_p) / (W + W_p)$

ซึ่งค่ากำลังต้านทานสถิตย์ของดิน (Q_d) หาได้จากการทดลองสมมติจนได้ค่า $Q_d' \cong Q_d$

4.4.2 สมการ Engineering News (1965)

$$Q_d' = [(e_f WH) / (S + 0.1) \times 0.025] \times (W + n_e^2 W_p) / (W + W_p) \qquad (4.12)$$

4.5 ข้อจำกัดการใช้สูตรเสาเข็มตอก

ก. สมมติฐานจากสูตรเสาเข็มตอก มิคำนึงถึงแรงและการเคลื่อนอนุภาคบนตัวเสาเข็ม รวมทั้งผลทางพลศาสตร์จากมวลดินโดยรอบระหว่างการตอกจริง

ข. สูตรเสาเข็มตอกไม่ค่อยน่าเชื่อถือสำหรับเสาเข็มฐานรากยาวๆ เช่น ฐานรากในทะเล

ค. สูตรเสาเข็มตอกบ่อยครั้งจำกัดการใช้กับดินชนิดมวลเม็ดหยาบ เช่น กรวดและทรายซึ่งพฤติกรรมขึ้นกับเวลามีการเปลี่ยนแปลงน้อย

ง. สูตรเสาเข็มตอกใช้กับเสาเข็มเดี่ยว ต้องปรับใช้ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มกลุ่ม

จ. สมมติฐานต่างๆของสูตรเสาเข็มตอก มาจากประสบการณ์ของผู้คิดค้น จึงควรใช้ควบคู่กับประสบการณ์ในสนามของวิศวกร

ยังพบอยู่เสมอว่าสูตรเสาเข็มตอก แม้พยายามคำนึงปัจจัยทุกด้านของพลังงานให้ความคลาดเคลื่อนในการทำนายกำลังของเสาเข็มในสนามและพื้นฐานจากสมมติของสูตรเสาเข็มตอกไม่เข้มข้นพอเมื่อตรวจสอบด้วยทฤษฎี วิศวกรยังคงใช้สูตรเสาเข็มตอกหนึ่งหรือสองสูตรในการควบคุมการทำงานในสนาม ทั้งนี้น่าจะเป็นผลมาจากความง่ายในการใช้ภายใต้สภาพเงื่อนไขหน้างานต่างๆ นอกจากรวมทั้งความประหยัดและรวดเร็ว

การยอมรับการคำนวณสูตรเสาเข็มตอกทำได้โดยการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบการรับน้ำหนักเสาเข็มสถิตย์ในสนาม