



ทฤษฎีและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

แรงพิบัติของ เส้าเข็ม

แรงพิบัติของ เส้าเข็ม หมายถึงน้ำหนักสูงสุดที่เส้าเข็มสามารถรับได้ โดยไม่ทำให้ดินที่รองรับเส้าเข็มเกิดการพิบัติ ควบแรงเฉือน และ/หรือไม่ทำให้เส้าเข็มทรุดตัวมากเกินไปจนขอบเขตที่กำหนด

แรงพิบัติของ เส้าเข็มอาจคำนวณหรือคาดคะเนได้จากวิธีต่างๆกัน ตัวอย่างเช่น

1. สแตติกฟอร์มูลา (Static Formular) เป็นวิธีคาดคะเนแรงพิบัติของ เส้าเข็มจากคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดิน ซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดแรงต้านทานทั้งแรงเสียดทานบนผิว เส้าเข็มตลอดความยาวและแรงต้านทานที่ปลายล่างของ เส้าเข็ม เช่นกำลังแรงเฉือน (Shear Strength) , หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) และหน่วยแรงยึดเกาะ (Cohesion) ของดิน เป็นต้น
2. ไดนามิก ฟอร์มูลา (Dynamic Formular) เป็นวิธีหาแรงพิบัติของ เส้าเข็ม จากพลังงานที่ใช้ในการตอกเส้าเข็ม และระยะทรุดตัวของหัว เส้าเข็มที่เกิดจากการตอก
3. การใช้เครื่องมือชนิดกรวยหนังแบบคัทซ์ (Dutch Cone Penetration) เป็นวิธีหาแรงพิบัติจากการทดสอบในสนามโดยตรง โดยใช้เครื่องมือชนิดกรวยหนังแบบคัทซ์ซึ่งมีลักษณะจำลองการรับแรงของ เส้าเข็ม ณ ชั้นความลึกที่ทดสอบ
4. การทดสอบกำลังการรับน้ำหนัก (Load Test) เป็นวิธีหาแรงพิบัติของ เส้าเข็ม โดยการทดสอบกำลังการรับน้ำหนักของ เส้าเข็มโดยตรง ซึ่งนิยมใช้เป็นวิธีตรวจสอบ หรือใช้ในการทดสอบ เพื่อหาความสัมพันธ์กับ 3 วิธี ข้างต้น

ในการเลือกใช้วิธีการคาคะเนแรงพิบัติของเสาเข็มจากวิธี 1, 2 และ 3 ขึ้นอยู่กับการศึกษาของ Nishada (1957) เขียนไว้ว่า "จากประสบการณ์ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การใช้ โคนามิค φόρμούลา ทำนายกำลังการรับน้ำหนัก - เสถียร (Static Load) ของเสาเข็ม โคนมไม่เป็นที่น่าพอใจนัก การใช้สแตติก φόρμούลา เป็นที่ยอมรับและใช้ในการคำนวณออกแบบเสาเข็มใ้ถูกต้องและมีเหตุผลมากกว่า"

1. สแตติก φόρμούลา รูปสมการในการคำนวณของสแตติก φόρμούลา คือ

$$Q_u = Q_p + Q_f \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ Q_u = ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม

Q_p = ความสามารถในการรับน้ำหนักก่ที่ปลายเสาเข็ม

Q_f = ความสามารถในการรับน้ำหนักบนลำตัวเสาเข็ม เนื่องจากแรงเสียดทาน และ/หรือแรงบึกเกาะระหว่างเสาเข็มกับดิน

1.1 ความสามารถในการรับน้ำหนักก่ที่ปลายเสาเข็ม (Q_p)

ความสามารถในการรับน้ำหนักก่ที่ปลายเสาเข็มของดิน คำนวณได้จากผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม กับหน่วยแรงคานทานของดิน ณ จุดปลายของเสาเข็ม

$$Q_p = A_p q_u \dots\dots\dots (1.1)$$

A_p = พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม

q_u = หน่วยแรงคานทานของดินที่ปลายเสาเข็ม

Terzaghi (1943) แสดงการหาค่าหน่วยแรงคานทานของดิน(q_u) ไว้

ในรูป

$$q_u = \bar{c}N_c + \frac{\gamma BN_\gamma}{2} + \gamma dN_q \dots\dots\dots(1.1.1)$$

ในกรณีดินทรายซึ่งมีการระบายน้ำดี (Free Draining Soils) ค่า
 $c = \bar{c} = 0$ ดังนั้น

$$q_u = \frac{\gamma B N_\gamma}{2} + \gamma d N_q \dots\dots\dots (1.1.2)$$

และค่า $\frac{\gamma B N_\gamma}{2}$ เมื่อเทียบกับค่า $\gamma d N_q$ จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการ
 (1.1.2) แสดงได้เป็น

$$q_u = \gamma d N_q \dots\dots\dots (1.1.3)$$

ในกรณีดินเหนียว (Non-free Draining Soil) ค่า $\phi = 0$
 ดังนั้นสมการ (1.1.1) แสดงได้ในรูป

$$q_u = c N_c + \gamma d \dots\dots\dots (1.1.4)$$

น้ำหนักบรรทุกทุกสภาวะที่เสาเข็มรับได้ จะเท่ากับผลต่างของ ความสามารถในการ
 รับน้ำหนักรวมของเสาเข็ม กับน้ำหนักของเสาเข็ม ดังนั้นเพื่อการคำนวณที่ง่ายขึ้น
 มักจะพิจารณาหน่วยน้ำหนักของเสาเข็ม มีค่าเท่ากับหน่วยน้ำหนักของดิน ซึ่งสมการ
 (1.1.4) จะเขียนได้เป็น

$$q_u = c N_c \dots\dots\dots (1.1.5)$$

$N_c =$ ค่าประกอบหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

ค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (N_c) จากรายงานของ
 Meyerhof (1951) เขียนไว้ว่า ในเสาเข็มซึ่งไม่มีการส่งถ่ายน้ำหนักคานข้าง
 ค่า N_c จะเหมือนกับค่าซึ่งได้จากการทดลอง Plate Load Test ในหลุมเจาะซึ่ง
 มีค่าเท่ากับ 9.3 และในเสาเข็มซึ่งมีแรงคานข้างเนื่องจากแรงยึดเกาะคานข้างเท่า
 กับแรงเฉือนของดินที่ปลายเสาเข็ม ค่า N_c จะเท่ากับ 9.8 แต่จากการทดลอง
 Meyerhof พบว่า ค่าแรงยึดเกาะคานข้างของเสาเข็มโดยทั่วไป จะมีค่าไม่เกิน
 30 เปอร์เซ็นต์ ของค่าแรงเฉือนของดินที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นค่า $N_c = 9.3$ เป็น
 ค่าที่น่าพิจารณาใช้

จากผลการทดสอบเสาเข็มจำลอง Skempton (1951) เขียนไว้ว่า ค่า N_c จะลดลงเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก น้ำหนักที่ถ่ายจากเสาเข็มสึกลงโดยแรงเสียดทาน จะทำให้ชั้นดินที่ปลายเสาเข็มตั้งอยู่เกิดการทรุดตัว และโดยสรุปว่า ค่า $N_c = 9$ เป็นค่าเฉลี่ยที่ใช้ได้ดีในการคำนวณกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มจริง

สำหรับในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยมีรายงานค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ใว้ต่าง ๆ กัน เช่น Chiruppapa (1968) , Holmberg (1970) , Suwanakul (1969) และ Surivonges (1972) ค่าจากรายงานที่ศึกษาแยกตัวอย่างมาแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ; ตัวประกอบหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

ที่มา	ตัวประกอบหน่วยแรง (N_c)	พื้นฐานวิธีหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม	ชนิดเสาเข็มและชั้นดิน
Holmberg (1970)	10 (Vane)	จากการทดสอบเสาเข็มชนิดปลายเคลื่อนที่แยกส่วนไค	เสาเข็มคอนกรีตคอกหยั่งถึงชั้นดินเหนียวแข็ง
Chiruppapa (1968)	7.7 (Vane)	จากการทดสอบโดยใช้ระบบถ่วงน้ำหนักแรง (Load Cell) ที่ปลายเสาเข็ม	เสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ฝังในชั้นดินเหนียวอ่อน
	6.2 (U/C)		
Suwanakul (1969)	8.6 (Vane)	พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของ Van Weele	เสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่ฝังถึงชั้นดินเหนียวแข็ง
	7.3 (U/C)		
	8.1 (U/C)	โดยวิธีใช้ระบบถ่วงน้ำหนักแรง	
	6.5 (SPT)		
10.8 (U/C)	พิจารณาจากกราฟ		
8.4 (SPT)			

ตารางที่ 1 (ต่อ)

Surivonges (1972)	14.1 (U/C)	จากผลต่างของความต้านทาน ต่อแรงกดลงและดึงขึ้น	เสาเข็มคอนกรีต หล่อในที่หยั่งถึง ชั้นดินเหนียวแข็ง
----------------------	------------	-------------------------------------------------	----------------------------------------------------------

- (-----) หมายถึงวิธีการทดสอบกำลังแรงเฉือนของดินที่ใช้ในการคำนวณ
- (Vane) ใช้เครื่องมือทดสอบแบบใบพัด (Vane Shear Test)
- (U/C) โดยวิธี "กำลังอัดทิศทางเดียวไม่ระบายน้ำ (Unconfined Compression Test)
- (SPT) โดยวิธี "กำลังหมั่งมาตรฐาน" (Standard Penetration Test)
-

1.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักบนลำตัวของเสาเข็ม

1.2.1 ในรูปหน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (S_u)

แรกเริ่มมีการพิจารณาว่าหน่วยแรงต้านทานเนื่องจากแรงยึดเกาะ (Adhesion) บนลำตัวของเสาเข็มในดินเหนียว มีค่าเท่ากับหน่วยแรงยึดเกาะระหว่างดินกับดิน (Cohesion) คือเมื่อเสาเข็มถูกทดสอบทันทีหลังจากการตอกค้ำ หน่วยแรงยึดเกาะระหว่างเสาเข็มกับดิน จะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงยึดเกาะของดินที่ถูกรบกวน (c_r , Remould Cohesion) และเมื่อทดสอบหลังจากทิ้งช่วงให้ดินคืนสภาพสู่กำลังเดิม (Regain Strength) หน่วยแรงยึดเกาะระหว่างเสาเข็มกับดินจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงยึดเกาะของดินที่ไม่ถูกรบกวน (c , Undisturbed Cohesion) แต่อย่างไรก็ตาม ต่อมาเมื่อพิจารณาในทั้งสองกรณีดังกล่าว ค่าแรงยึดเกาะระหว่างเสาเข็มกับดิน จะมีค่าน้อยกว่าค่าแรงยึดเกาะระหว่างดินกับดิน และจะมีค่าลดลงเมื่อดินมีความแข็ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น

Tomlinson (1957) ได้แสดงเปอร์เซ็นต์การเกาะตัวของเสาเข็มกับดิน (f , Percentage of Adhesion) ไว้ในรูป

$$f = \frac{Q_a}{Q_c} \dots\dots\dots (1.2.0)$$

Q_a = ความสามารถในการรับน้ำหนักเนื่องจากแรงยึดเกาะบนลำผิวของเสาเข็มจากการทดสอบ

Q_c = ความสามารถในการรับน้ำหนักบนลำผิวของเสาเข็ม ซึ่งคำนวณจากผลคูณของพื้นที่ผิว เสาเข็มกับหน่วยแรงยึดเกาะของดิน

Skempton (1959) แสดงสูตรในการคำนวณกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มเนื่องจากแรงยึดเกาะบนลำผิวเสาเข็ม ในดินเหนียว ไว้เป็น

$$Q_f = A_s c_a \dots\dots\dots (1.2)$$

เมื่อ A_s = พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับเสาเข็ม

c_a = หน่วยแรงยึดเกาะเฉลี่ยระหว่างเสาเข็มกับดินเหนียว

ซึ่งหน่วยแรงยึดเกาะระหว่างเสาเข็มกับดินเหนียว (c_a) Skempton ได้แสดงความสัมพันธ์ในรูปของหน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ (S_u , Undrained Shear Strength) ไว้เป็น

$$c_a = \alpha S_u \dots\dots\dots (1.2.1)$$

เมื่อ S_u = หน่วยแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินเหนียว
= สัมประสิทธิ์การเกาะตัวของเสาเข็มกับดิน
= เปอร์เซ็นต์การเกาะตัวของเสาเข็มกับดิน

ดังนั้น สมการ (1.2) สามารถเขียนได้เป็น

$$Q_f = \alpha S_u A_s \dots\dots\dots (1.1.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การเกาะตัว (α) โดยทั่วไปจะมีค่าไม่เกิน 1 (หนึ่ง) ควบเหตุผลที่ว่าค่าหน่วยแรงบีบเกาะระหว่างดินกับเสาเข็มมีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยแรงบีบเกาะระหว่างดินกับดิน แต่ในดินเหนียวอ่อนบางครั้งค่า α อาจมีค่ามากกว่า 1 เพราะหลังจากการคอกเสาเข็มแล้วปล่อยให้ปริมาณน้ำในเม็ดดิน (w) รอบๆ เสาเข็มจะกระจายออกไปและลดลง เมื่อดินเหนียวเกิดการควบแน่น (Consolidation) ใหม่จะทำให้ค่าหน่วยแรงบีบเกาะมีค่าสูงกว่าเดิม

ค่า α ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดและคุณสมบัติของดิน, ชนิดและรูปร่างของเสาเข็ม, วิธีการคอกเสาเข็ม, ปริมาณน้ำในเม็ดดิน รวมทั้งระยะเวลาในการทิ้งช่วงก่อนการทดสอบ ทั้งตัวอย่างในรายงานที่นำมา เช่น Skempton (1959) พบว่าเมื่อปริมาณน้ำในดินเปลี่ยนแปลงเพียง 1% ค่า α อาจเปลี่ยนแปลงถึง 20% และรวบรวมข้อมูลจาก Tomlinson (1953) เขียนไว้ว่าค่า α เฉลี่ยเท่ากับ 0.28 ในเสาเข็มเจาะ ซึ่งเจาะด้วยสว่านแบบมือหมุน (Hand Auger) และ α เฉลี่ยเท่ากับ 0.32 ในเสาเข็มเจาะ ซึ่งเจาะด้วยสว่านแบบใช้เครื่องยนต์ (Power Auger)

Tomlinson (1970) สรุปไว้ว่า เสาเข็มซึ่งติดตั้งด้วยการคอกด้วยแม่แรง (Jack) จะมีค่า α ค่ากว่าเสาเข็มซึ่งคอกด้วยลูกค้อน และในเสาเข็มยาว ค่า α จะค่ากว่าในเสาเข็มสั้น เช่น ในเสาเข็มสั้นเมื่อคอกด้วยลูกค้อน ค่า α เท่ากับ 0.85 และเท่ากับ 0.6 เมื่อคอกด้วยแม่แรง ในเสาเข็มยาวค่า α เท่ากับ 0.65 เมื่อติดตั้งโดยคอกด้วยลูกค้อน และลดลงเป็น 0.5 เมื่อติดตั้งโดยการคอกด้วยแม่แรง

สำหรับผลเนื่องจากชนิดของดินและเสาเข็ม Tomlinson (1970) สรุปค่า α เท่ากับ 0.2 ในดินเหนียวแข็งมาก (Stiff) และ α เท่ากับ 1.0 ในดินเหนียวอ่อน และเขียนไว้ว่าเสาเข็มซึ่งมีลักษณะปลายเรียว (Taper) จะแสดงค่า α สูงกว่าเสาเข็มซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ (Straight Side)

ในเสาเข็มค้ำข้างชนิดกัน เช่น เสาเข็มเหล็กท่อกลม ทั้งชนิดปลายเปิดและปลายปิด และเสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ Tomlinson (1970) พบว่าค่า α จะแตกต่างกันแต่ไม่สามารถแยกได้อย่างแน่ชัด ทั้งนี้ในการคำนวณหาค่าลึกลงการรับน้ำหนักของเสาเข็มอาจพิจารณาใช้ค่าเดียวกันได้ และในท้ายสรุป Tomlinson ในข้อคิดเห็นว่า ความต้านทานบนลำตัวของเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นบ้างเล็กน้อยเท่านั้นในช่วง 2 - 3 เดือน แต่จะเพิ่มอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ปี

1.2.2 ความสามารถในการรับน้ำหนักบนลำตัวของเสาเข็มในรูปความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) ของดิน

ความสามารถในการรับน้ำหนักบนลำตัวของเสาเข็ม อาจประมาณจากค่าความเค้นประสิทธิผลของดิน เมื่ออัตราความเร็วในการกดน้ำหนักลงสู่เสาเข็มในดิน ช้าพอที่จะทำให้เกิดการระบายน้ำในดิน (Drained Condition) ตลอดความยาวเสาเข็ม เช่น ในกรณีทดสอบแบบคงน้ำหนักถ่วงช้า (Slow Maintained Load Test) และใช้ในการคาดคะเนค่าลึกลงการรับน้ำหนักเสาเข็มในกรณี Long Term (Chandler, 1968)

การพิบัติของเสาเข็มสมมุติว่าเกิดในดินสภาพถูกนวด (Remoulded Soil) ซึ่งอยู่ติดกับเสาเข็ม ภายใต้เงื่อนไขเกิดการระบายน้ำ และค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวราบของดิน ขึ้นอยู่กับค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง ($\sigma_v \propto \sigma_h$) และสมมุติว่าเมื่อออกเสาเข็มดินจะถูกรบกวนและมีสภาพถูกนวด ทั้งนี้จะไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างดิน (Cohesion) รอบเสาเข็ม (Burland, 1973) ทั้งนี้หน่วยความต้านทานบนลำตัวของเสาเข็มสามารถพิจารณาเหมือนกับการวิเคราะห์แรงเสียดทานของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) กับดิน (Vesic, 1975) หรือแสดงได้

$$\begin{aligned} f &= \sigma_h \tan \delta && \dots\dots\dots (1.2^*) \\ &= K \sigma_v \tan \delta \end{aligned}$$

K = สัมประสิทธิ์แรงกันดิน

δ = มุมแรงเสียดทานผิวประสิทธิผลระหว่างเสาเข็มกับดิน

σ_v = ความเค้นในแนวดิ่ง

ค่า K ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่น เงื่อนไขความเค้นเดิมของดิน (Stress History), วิธีการคอกเสาเข็ม, รูปทรงและความยาวของเสาเข็ม เป็นต้น ค่า K อาจประมาณได้เท่ากับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดิน K_0 (Coefficient of Earth Pressure at Rest) ซึ่งคำนวณได้จาก

i) ในกรณีทรายหรือดินความแน่นสูงกว่าปกติ (Sand, Overconsolidated Soils)

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad \dots \dots \dots (1.2.1)$$

ii) ในดินเหนียวความแน่นปกติ (Normally Consolidated Clays)

$$K_0 = 0.95 - \sin \phi \quad \dots \dots \dots (1.2.2)$$

แต่ในความเป็นจริงค่า K ของดินจะเปลี่ยนไปเนื่องจากการคอกเสาเข็ม เช่น ในเสาเข็มเจาะ แรงดันดินจะลดลงและมีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดิน K_a (Active Earth Pressure) ดังนี้

$$K \longrightarrow K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad \dots \dots \dots (1.2.3)$$

และในกรณีเข็มคอก ค่า K จะมีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดิน K_p (Passive Earth Pressure)

$$K \longrightarrow K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \dots \dots \dots (1.2.4)$$

สำหรับค่ามุมแรงเสียดทานประสิทธิผล (δ) มีรายงานแสดงว่าขึ้นอยู่กับชนิด และลักษณะผิวของเสาเข็ม Potyondy (1961) ได้รายงานความสัมพันธ์ระหว่าง δ กับ ϕ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ; มุมแรงเสียดทานประสิทธิผลระหว่างดินกับเสาเข็ม
(คัดจาก Potyondy , 1961)

วัสดุเสาเข็ม	ลักษณะผิวเสาเข็ม	δ/ϕ			
		ทรายแห้ง	ทรายอิ่มตัว	ดินเหนียวปนทราย	ดินเหนียว
เหล็ก	ผิวเรียบ	0.54	0.64	0.40	0.50
	ผิวขรุขระ(สนิม)	0.76	0.80	0.65	0.50
ไม้	ความแนว เสี้ยน	0.76	0.85	0.80	0.60
	ความแนว เสี้ยน	0.88	0.89	0.90	0.70
คอนกรีต	ผิวเรียบ	0.76	0.80	0.84	0.68
	ผิวขยาบ	0.88	0.88	0.90	0.80
	ผิวขรุขระ	0.96	0.90	0.95	0.95

ในดินเหนียวอ่อนเมื่อสมมุติว่าการพิกัดเกิดในดินสภาพถูกกวัดซึ่งอยู่ติดกับเสาเข็ม ดังนั้นอาจพิจารณาว่า ค่า $\delta = \phi_d$ เมื่อ ϕ_d คือความมุมแรงเสียดทานของดินสภาพถูกกวัด ดังนั้นสมการ (1.2*) อาจเขียนได้ใหม่รูป

$$f = K \sigma_v \tan \phi_d \dots\dots\dots (1.2*5)$$

$\phi_d =$ มุมแรงเสียดทานของดินสภาพถูกกวัด

ค่า ϕ_d ในดินเหนียวความแน่นปกติ จะมีค่าโดยประมาณอยู่ระหว่าง $20^\circ - 30^\circ$ (Burland, 1973) และเมื่อพิจารณาใช้ค่า K ในดินเหนียวอ่อนเท่ากับ $1 - \sin \phi_d$ Burland พบว่าค่า $K \tan \phi_d$ เฉลี่ยในเสาเข็มชนิดต่างๆมีค่าอยู่ระหว่าง $0.25 - 0.4$

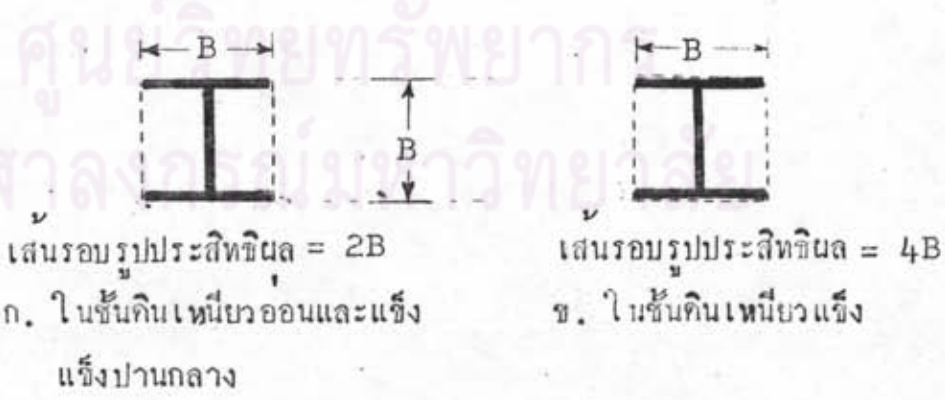
1.2.3 พื้นที่ผิวสัมผัสของ เส้าเข็มรูปตัว เอชกับดิน

Eben Vey (1957) ได้ทดสอบเส้าเข็มรูปตัว เอชซึ่งติด Electrical Strain Gage เป็นช่วงๆ คอกตามชั้นดินเหนียวอ่อน , แข็งปานกลาง และแข็งถึงชั้นดินแข็ง สรุปผลการทดสอบว่า ในชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียว แข็งปานกลาง แรงยึดเกาะระหว่างดินและผิวนอกของปีกเส้าเข็มจะมีผลต่อการรับน้ำหนักสูงสุดของเส้าเข็มอย่างมาก เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่าง เหล็กและดินเหนียว จะหมดไปทันที เมื่อยึด-หลวมตัวของ เส้าเข็มเพียง เล็กน้อย

Vey ได้สนับสนุนข้อสรุปด้วยผลการทดลองการหาแรงเสียดทานระหว่าง เหล็กและดินเหนียวในห้องทดลอง และจากผลการคำนวณความต้านทานบนลำตัวของ เส้าเข็มจากข้อมูลของ Strain Gage ผลแสดงว่า ค่าหน่วยแรงเฉือนของดิน จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลจาก Strain Gage มีค่าเท่ากับค่าหน่วยแรงเฉือน ซึ่งวัดในห้องทดลอง โดยวิธีทดสอบแบบกำลังอัดทิศทางเดี่ยวไม่ระบายน้ำ (U/C Test) รวมทั้งผลการตรวจสอบเส้าเข็มซึ่งถอนขึ้นมา พบว่าไม่มีดินเกาะติดผิวนอกของปีกคาน ในช่วงดินเหนียวอ่อนและแข็งปานกลาง แต่ในช่วงของดินเหนียวแข็งจะมีดินเกาะติดอยู่

ดังนั้นในการคำนวณความสามารถในการรับน้ำหนักบนลำตัวของ เส้าเข็มรูป ตัว เอชในดินเหนียวอ่อนและแข็งปานกลาง Vey สมมติว่าค่าความต้านทานบนลำตัว ของ เส้าเข็มจะ เท่ากับแรง เฉือนของดินบนพื้นที่ซึ่งลากเชื่อมระหว่างปีกของ เส้าเข็ม

ผังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ; เส้นรอบรูปประสิทธิผลของ เส้าเข็มรูปตัว เอช (Eben Vey, 1957)

Chellis (1961) ทดสอบเสาเข็มรูปตัวเอชโดยการดึงขึ้น พบว่า
ของว่างระหว่างปีกเสาเข็ม มีดินเกาะอกแน่นตั้งแต่ปลายเสาเข็มจนถึงระยะประมาณ
2 - 3 ฟุต ใต้วิน และให้ความเห็นวากินซึ่ง เกาะติดแน่นกับเสาเข็มที่ปลาย จะเกิด
ลักษณะอุกคิกแน่นและเคลื่อนตามเสาเข็มลงไป เมื่อเสาเข็มถูกคอกลงสู่ชั้นความลึกเพิ่ม
ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Romualdi (1964) ที่พิจารณาวากินซึ่งอยู่ระหว่างปีกเสา
เข็มมีพฤติกรรมรวมเหมือนกับตัวเสาเข็ม ดังนั้นพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเสาเข็มรูปตัวเอช
คอกหนึ่งหน่วยความยาว จะมีค่าเท่ากับสี่เท่าของความกว้างของเสาเข็ม และพื้นที่หน้าตัด
ประสิทธิผลของเสาเข็ม มีค่าเท่ากับผลคูณของความกว้างเสาเข็ม

A.B. George & Tomlinson (1976) ได้ทดสอบเสาเข็มเหล็กรูป
ตัวเอชในชั้นหินดินดานปนหินชนวน (Slaty Mudstone) วิจัยไว้ว่ากิกซึ่งออก
แน่นอยู่ระหว่างปีกเสาเข็มอาจหลุดจากการเกาะติดเสาเข็ม เมื่อเสาเข็มถูกคอกจน
ลงสู่ชั้นที่แข็งแรง ดังนั้นพื้นที่ซึ่งใช้ในการคำนวณการรับน้ำหนัก อาจพิจารณาใช้พื้นที่ผิว
สุทธิทั้งหมดของเสาเข็ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายน้ำหนักของ เสาเข็ม

เมื่อมีน้ำหนักกดที่หัว เสาเข็ม เสาเข็มจะพยายามเคลื่อนตัวฝั่งลงสู่ดินมากขึ้น ขณะเดียวกันจะเกิดแรงต้านทานบนลำตัว และที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งหมายถึงน้ำหนักจากเสาเข็ม กระจายสู่ดินตลอดความยาว เสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม การกระจายน้ำหนักจากเสาเข็มสู่ดินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายๆอย่าง เช่น ชนิดของดิน , รูปร่าง และลักษณะผิว เสาเข็ม , เฟอร์เรนซ์การควบแน่นและเฟอร์เรนซ์การรื้อตัวของดิน , รวมทั้งวิธีการคอกเสาเข็ม , เวลาถึงช่วงก่อนการทดสอบ และวิธีการทดสอบเสาเข็ม เป็นต้น

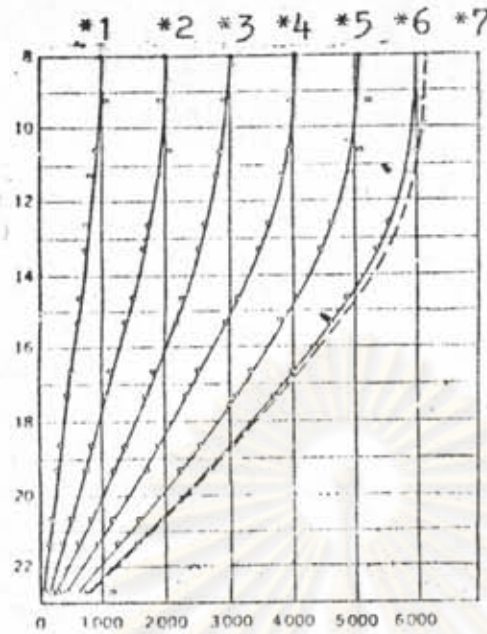
เกี่ยวกับพฤติกรรมของการกระจายน้ำหนักสู่ดินของ เสาเข็ม มีรายงานกล่าวถึงหลายลักษณะ เช่น

Whitaker & Cooke (1961a) เขียนไว้ว่า การกระจายน้ำหนักสู่ดินของ เสาเข็มจะเกิดขึ้นพร้อมๆกับเคลอกลำตัว และที่ปลายเสาเข็ม น้ำหนักจะถูกส่งผ่านตลอดตัวเสาเข็มอย่างรวดเร็ว เมื่อเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวจมลงเพียง เล็กน้อย

Coyle & Reese (1966) ได้ศึกษาการกระจายน้ำหนักของ เสาเข็ม โดยการจำลองขนาด พบว่าในดินเหนียว เมื่อการกระจายน้ำหนักถึงจุดสูงสุดแล้ว จะลดลงเล็กน้อยและคงที่ ถึงแม้ว่าเสาเข็มจะถูกทำให้ทรุดตัว เพิ่มมากขึ้นอีกก็ตาม

Woodward (1961) พบว่าเมื่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการกระจายน้ำหนักจากเสาเข็ม ต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของดินจะลดลง

Seed & Reese (1955) ทดสอบเสาเข็มเหล็กชนิดทอกลมในดินเหนียวสรุปว่า อัตราการกระจายน้ำหนักจากเสาเข็มสู่ดินจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดิน และเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น อัตราการกระจายของน้ำหนักก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2



*1	ทดสอบหลังทิ้งช่วง	3 ชม.
*2	ทิ้งช่วง	1 วัน
*3	ทิ้งช่วง	3 วัน
*4	ทิ้งช่วง	7 วัน
*5	ทิ้งช่วง	14 วัน
*6	ทิ้งช่วง	28 วัน
*7	ทิ้งช่วง	33 วัน

- - นำหนักคคที่หัวเสาเข็ม
- - นำหนักจาก Strain Gage

รูปที่ 2 ; แสดงการกระจายน้ำหนักจากเสาเข็มสู่ดิน (Seed & Reese , 1955)

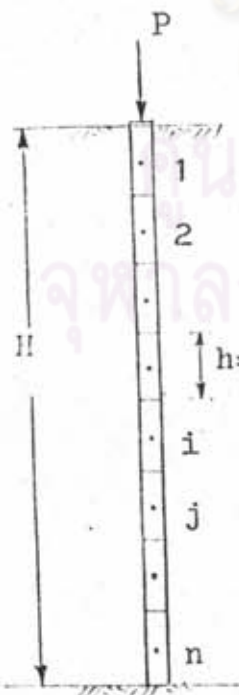
D'Appolonia (1963) ได้เสนอสูตรการหาค่าการกระจายน้ำหนักของเสาเข็มรูปตัวเอช ซึ่งปลายหยั่งถึงชั้นดินแข็ง โดยอาศัยพื้นฐานทฤษฎีอีลาสติค แสดงไว้เป็น

$$\sum_{j=1}^n d_{ij} F_j + \sum_{j=1}^n d'_{ij} F_j = \Delta_i \dots (2)$$

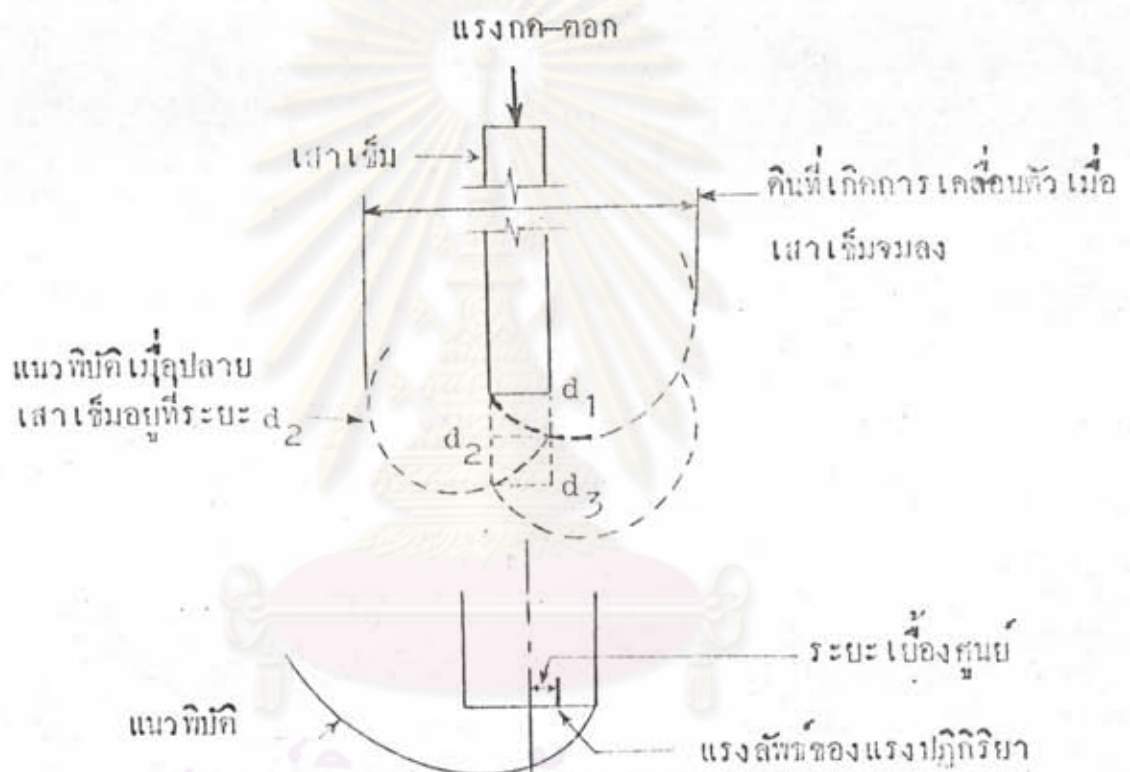
d_{ij} = การเคลื่อนที่ (displacement) ในแนวตั้งของดินที่จุด i ใดๆ เนื่องจากหน่วยแรงที่จุด j

d'_{ij} = การหดตัวของเสาเข็มที่จุด i เนื่องจากหน่วยแรงที่จุด j

Δ_i = การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของเสาเข็มในช่วง i ใดๆ ที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับดิน



Meyerhof (1951) เชื่อกันเกี่ยวกับการแทนที่ของเสาเข็มไว้ว่า เมื่อเสาเข็มถูกตอกปานลงไปในดิน ก็ตั้งอยู่ปลายล่างของเสาเข็มจะถูกแทนที่ และเคลื่อนตัวออกทุกทิศทางโดยรอบ ในจำนวนที่สมมูลกัน แต่จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ Hanna (1968) พบว่าในเสาเข็มที่ Flexible การวิบัติของดินโดยรอบเสาเข็ม จะไม่สมมูลกันอย่างแท้จริง แต่มีแนวโน้มที่จะสมมูลกัน ดังการทดลองในเสาเข็มรูปตัวเอส ซึ่งการแทนที่ของดินจะเกิดขึ้นดัง แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ; การเคลื่อนตัวของดินขณะตอกเสาเข็ม
ตามแนวความลึกของ Hanna (1968)

เมื่อเสาเข็มเกิดค้ำไปค้ำด้านหนึ่ง จะทำให้ค่าแรงดันดินข้างอีกด้านหนึ่งลดลง และเกิดแรงต้านทานน้อยกว่า ทำให้การกระจายกำลังการรับน้ำหนักของดินไม่สมมูล และเกิดแรงปฏิกิริยาเบี่ยงศูนย์กลางที่ปลายเสาเข็ม เป็นผลคือเนื่องจากเสาเข็มเริ่มเรื่อออกจากแนวตั้ง และเกิดการคดหรือโก่งงอ จึงเกิดการกระจายน้ำหนักของเสาเข็มซึ่งยึดหยุ่นได้ และมีอัตราส่วนความระลอกสูง จะแตกต่างกับเสาเข็มชนิดอื่น

การโค้งงอของเสาเข็ม

Whitaker (1970 a) อ้างถึง Granholm (1929) ซึ่งเขียนไว้ว่า จากการทดสอบและสำรวจเกี่ยวกับการโค้งงอ (Buckling) ในเสาเข็มรับแรงในแนวแกน พบว่าเสาเข็มโดยทั่วไป ซึ่งมีรูปร่างและพื้นที่หน้าตัดสัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม (Conventional Section) จะไม่เกิดการโค้งงอแม้ว่าจะฝังอยู่ในดินเหนียวที่อ่อนมาก เพราะแรงคานดินด้านข้าง จะช่วยพยุงเสาเข็มไว้

แต่อย่างไรก็ตามค้อมามีรายงานแสดงว่าเสาเข็มที่มีความชะลูดสูง เมื่อตอกไปถึงชั้นดินเหนียวแข็ง , ทราย หรือหิน ซึ่งมีแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มสูง จะเกิดการโค้งงอคานข้าง และเสาเข็มที่มีความยาวมากๆ มักจะเกิดปัญหาการโค้งงอชะลูดคอก

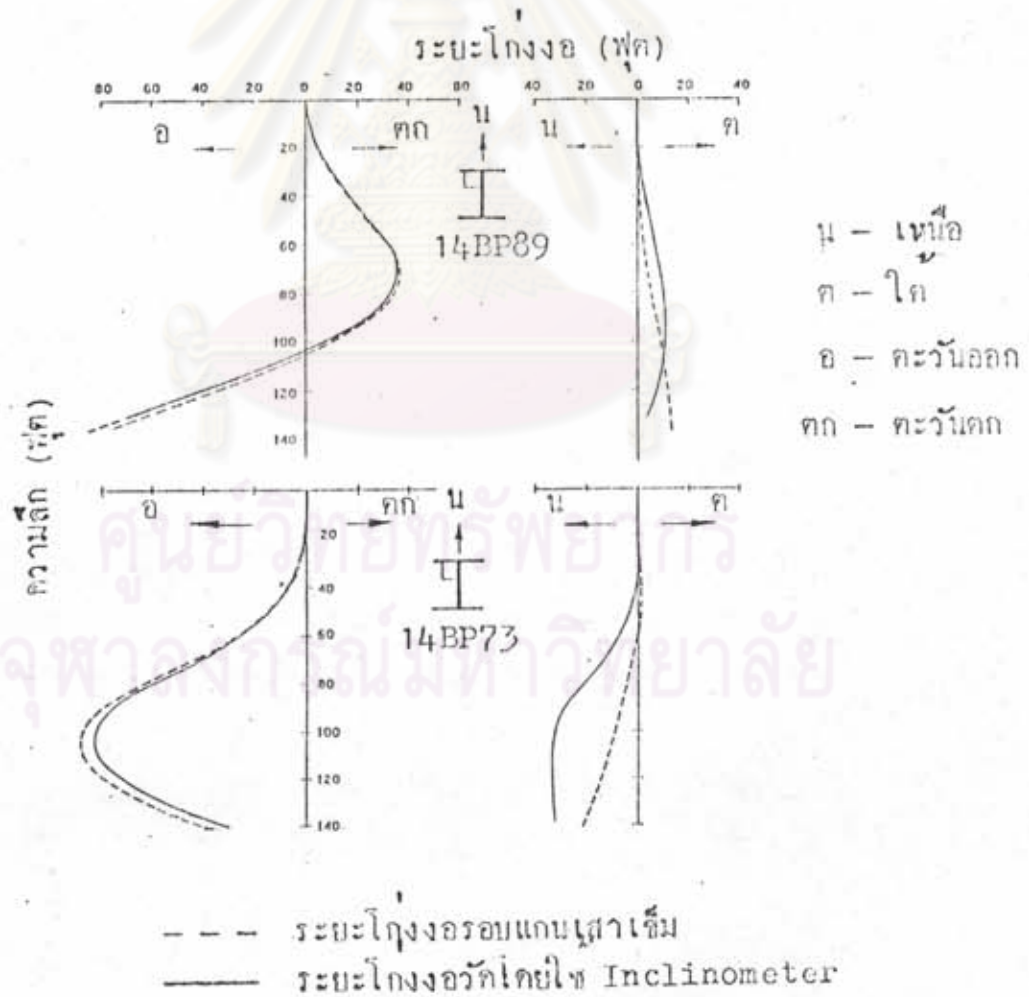
1. การโค้งงอของเสาเข็มเนื่องจากการคก-คอก

Bjerrum (1957) กล่าวว่า การโค้งงอของเสาเข็มขณะคกคอก เป็นเรื่องที่เขาใจยาก การโค้งงออาจเป็นผลเนื่องจากเนื้อของวัสดุไม่แข็งแรงพอ , สิ่งกีดขวางในดิน หรือการคอกเสาเข็มใกล้บริเวณที่มีร่องลึก แต่จากประสบการณ์ก็พบว่าเสาเข็มอาจเฉาจากแนวคิงโคได้ แม้ว่าจะไม่มีสิ่งกีดขวางในดิน หรือไม่มีความแตกต่างของแรงคานดินด้านข้าง คานโคคานหนึ่ง ของ เสาเข็ม

ในระหว่างการคอกเสาเข็มบางครั้งเสาเข็มจะเกิดการงอบิดเป็นลักษณะกนหอย (Helical Curve) หรือเกลียวยาว บางครั้งจะโค้งบิดออกคานข้าง และบางครั้งจะโค้งแบบโค้งงอหรือแบบขาสุนัข (Dog-legs) , (Cumming, 1956)

การโค้งงอของเสาเข็มขณะคก-คอกได้มีการศึกษาและให้ความเห็นในสาขาค่างๆกันอีกหลายสาขา เช่น Smith (1962) เขียนไว้ว่าในการคอกเสาเข็มด้วยลูกค้อนจะทำให้เกิดการส่งถ่ายคลื่นแรงความยาวของเสาเข็มและเป็นผลให้เกิดการสั่นของเสาเข็มในแนวขวาง ทำให้เกิดโมเมนต์แรงกักขึ้น

Hanna (1968) พบว่าเกิดความเค้นสูงมากในเสาเข็มเหล็กรูปตัวเอส เนื่องจากภาระโค้งงอของเสาเข็มระหว่างตค-คอก การโค้งงอของเสาเข็มเชื่อว่าเป็นผลจากการเกิดแรงปฏิกิริยาเบื้องต้นซึ่งจะเกิดขึ้นในการคอกเสาเข็มทุกชนิด แรงปฏิกิริยาเบื้องต้นดังกล่าวจะเป็นตัวก่อให้เกิดการค้ำคอง และทำให้ปลายเสาเข็มเจออกจากแนวคิงคอง และจากการศึกษาต่อมา Hanna (1968) พบว่าเสาเข็มรูปตัวเอสซึ่งคอกมาชั้นดินแข็งปานกลางและหยั่งถึงชั้นหิน เกิดการโค้งงอแบบหักงอ (sharp-bent) ก่อนที่เสาเข็มจะคอกถึงชั้นดินแข็ง และเกิดขึ้นขณะที่การคอกเสาเข็มไม่รุนแรง (Light Driving) การโค้งงอของเสาเข็มจะไม่เกิดเฉพาะในแนวแกนที่อ่อนเท่านั้น จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทิศทางพร้อมกัน แต่ในแนวแกนที่แข็งแรงกว่าจะเกิดขึ้นน้อยกว่าครึ่งแฉกในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ; การโค้งงอของเสาเข็มตามรายงานของ Hanna (1968)

จากรูปที่ 4 ในกรณีที่เสาเข็มเกิดการโค้งกลับนั้น ในชั้นต้น Hanna คาดว่าเป็นผลจากน้ำหนักในแนวตั้งของเสาเข็มที่เอียงทำให้เสาเข็มโค้งงอเปลี่ยนทิศทาง

Parson & Wilson (1954) รายงานเกี่ยวกับการรวบรวมผลการทดสอบเสาเข็มต่อเหล็กกลม ซึ่งคอกผ่านชั้นดินตะกอน (Silty) หนึ่งถึงชั้นหินลึก 40 เมตร โดยการเจาะนำประมาณ 15 เมตร พบว่าเสาเข็มประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์เกิดการเบี่ยงเบนในส่วนปลายล่าง ความลาดเอียงของการเบี่ยงเบนเฉลี่ยประมาณ 15° และบางครั้งเบี่ยงเบนถึง 2 เมตร

จากรายงานอื่นๆอีก แสดงว่า การโค้งงอของเสาเข็มในขณะคอก-คอกอาจเกิดขึ้นได้หลายกรณี และไม่เฉพาะเสาเข็มเหล็กเท่านั้น เช่น Johnson (1962) พบว่าเสาเข็มเหล็กทอกลมซึ่งหล่อภายในคอกคอนกรีต (Composite Pile) ซึ่งคอกในชั้นทรายมีการเบี่ยงเบนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของความยาว และรายงานของ National Swedish Council for Building Research (1964) แสดงว่าเสาเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จที่คอกผ่านชั้นดินเหนียวอ่อนหนึ่งถึงชั้นหินลึกประมาณ 60 เมตร มีการเบี่ยงเบนถึง 11 เมตรจากแนวที่ตั้งการ โดยการเบี่ยงเบนจะคล้อยลาดเอียงตามความลึก

รายงานที่สำคัญเกี่ยวกับการเบี่ยงเบนของเสาเข็มสรุปได้ดังแสดงในตาราง

ที่ 3

ตารางที่ 3 รวบรวมรายงานเกี่ยวกับการวัดการเบี่ยงเบนของเสาเข็ม (คัดจาก Chan, 1979)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3 , รวบรวมรายงานการเป็ียงเบนของเสาเข็ม (คัดจาก Chan , 1979)

ระยะเป็ียงเบน ปลายเสาเข็ม X (ม.)	ความยาว เสาเข็ม L (ม.)	$\frac{X}{L}$ %	$\frac{L}{d}$	ประเภทเสาเข็มและชั้นดิน ที่ตอกผ่าน	ที่มา
0.37	9.14	4		เสาเข็มเหล็กรูปตัว เอชคอก ในชั้นดินเหนียว	Bjerrum (1957)
2.16	42.6	5.1	120	เสาเข็มเหล็กรูปตัว เอชคอก ผ่านชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็ง หยั่งถึงชั้นดินแข็งมาก	Hanna (1968)
1.85	24.6	7.5	69	เสาเข็มเหล็กรูปตัว เอชคอก ผ่านชั้นดินเหนียวแข็งและชั้น ทรายแน่นหยั่งถึงชั้นดินเหนียว แข็งมาก	Worth et al. (1966)
1.06	12.0	8.8	47	เสาเข็มเหล็กรูปตัว เอชคอก ผ่านชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็ง ปานกลาง หยั่งถึงชั้นหินปูน.	Kim and Brungraber (1974)
1.37	18.0	7.6	55	เสาเข็มประกอบท่อเหล็กกลม คอกผ่านชั้นดินตะกอนหยั่งถึง ชั้นดินชีสต์ (Schist)	Parsons and Wilson (1954)
3.19	25.9	12.3	78	เสาเข็มประกอบท่อเหล็กกลม คอกผ่านชั้นดินตะกอนหยั่งถึง ชั้นทราย	Mohr (1963)
3.04	27.4	11.1	75	เสาเข็มประกอบท่อเหล็กกลม คอกในชั้นทราย	Johnson (1962)
2.65	40.0	6.6	133	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงคอก ผ่านชั้นดินเหนียวอ่อนหยั่งถึง ชั้นดินดาน (Mudstone)	Fellenius (1972)

2. น้ำหนักวิกฤตโค้งงอของเสาเข็ม

น้ำหนักวิกฤตโค้งงอของเสาเข็ม (Pile Buckling Load) หมายถึงน้ำหนักที่เสาเข็มสามารถรับได้ ก่อนที่จะเกิดการพิบัติเนื่องจากการโค้งงอ

เมื่อมีการใช้เสาเข็มที่มีความขรุขระสูงมากขึ้น ได้มีการศึกษาค้นคว้าหาวิธีการประมาณค่ากำลังการรับน้ำหนักวิกฤตโค้งงอของเสาเข็มอย่างกว้างขวาง การวิเคราะห์ในระยะหลังส่วนมากจะค้ำบนพื้นฐาน ทฤษฎีชั้นเบรค - รีแอกชัน (Subgrade Reaction) แทนแต่เดิมซึ่งพิจารณาจากทฤษฎีอัสติค

สูตรในการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักวิกฤตโค้งงอของเสาเข็มยกตัวอย่าง แสดงพอสังเขปดังต่อไปนี้

i) Timoshenko (1936) เสนอสูตรซึ่งตั้งบนสมมุติฐานที่ว่า เสาเข็มไม่มีการส่งถ่ายน้ำหนักเนื่องจากแรงเสียดทานคานขวาง และมีปลายทั้ง 2 ข้างเป็นจุดหมุน แสดงไว้เป็น

$$P_{cr} = P_E (n^2 + \beta^2/n^2) \dots\dots\dots (3.1)$$

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \text{กำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มในค้ำกลางซึ่งเป็นอากาศ}$$

n = จำนวนลอนของการโค้งงอ (Buckled Half-wave)

$$\beta^2 = \frac{KL^4}{\pi^4 EI}$$

K = สัมประสิทธิ์แรงคานทานคานขวางของดิน (แรง/ความยาว)

L = ความยาวเสา

จากสมการ(3.1)ในกรณีที่ค่าความยาว 1 ลอนของการโค้งงอน้อยกว่าความยาวของเสาเข็ม Timoshenko แสดงไว้ว่า

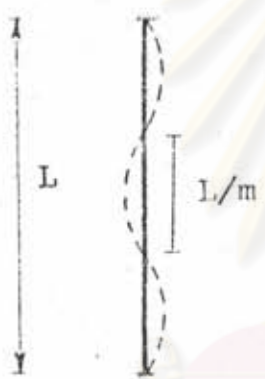
$$P_{cr} = 2 P_E \beta^{\frac{1}{2}}$$

$$P_{cr} = 2 (KEI)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3.2)$$

สมการ (3.2) แสดงว่า ค่าตั้งการรับน้ำหนักวิกฤติโค้งงอของเสาเข็มไม่ขึ้นกับความยาวเสาเข็ม แต่จะขึ้นอยู่กับแรงต้านทานด้านข้างของดิน และค่าความแข็งคอการค้ำงอ (EI) ของเสาเข็ม

Bergfelt (1957) สรุปไว้ว่าสมการ (3.2) สามารถใช้คำนวณค่าตั้งการรับน้ำหนักวิกฤติโค้งงอของเสาเข็มจำลองซึ่งคลกในดินเหนียวได้ แม้ว่าดินเหนียวจะไม่ใช้ตัวกลางอีลาสติคอย่างแท้จริง

ii) Cumming (1938) พิจารณาว่าความต้านทานด้านข้างของดินตลอดความยาวเสาเข็มคงที่ แสดงสูตรการคำนวณน้ำหนักวิกฤติโค้งงอของเสาเข็มไว้เป็น



$$P_{cr} = P_E (2m^2 + 2m + 1) \dots (3.3)$$

$$m^2 (m + 1)^2 = \frac{dk_h L^4}{\pi^4 EI}$$

k_h = โมดูลัสสปริงเกรด-วีเอคชั่น (แรง/ความยาว²)

$$P_E = \pi^2 EI / L^2$$

d = เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความกว้างเสาเข็ม

iii) Hetenyi (1946) ได้เขียนสมการเกี่ยวกับเสถียรภาพจากการโค้งงอของเสาเข็มไว้เป็น

$$E_p I_p \left(\frac{d^4 \rho}{dz^4} \right) + \frac{Pd^2 \rho}{dz^2} + k_h d \rho = 0 \dots (3.4)$$

- เมื่อ
- $E_p I_p$ = ความแข็งคอการค้ำงอของเสาเข็ม
 - k = โมดูลัสสปริงเกรด-วีเอคชั่น
 - d = ความกว้างหรือเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม
 - ρ = ระยะโค้งคานข้างของเสาเข็ม
 - P = น้ำหนักกดที่หัวเสาเข็ม

ในกรณีเสารับแรงกดตามแนวแกนแต่เพียงอย่างเดียว Hetenyi ได้แสดงสูตรการคำนวณหาค่าน้ำหนักวิกฤติโค้งงอตามเงื่อนไขของปลายเสาไว้เป็น

ก. ปลายแบบยึดหมุน (Hinged Ends)

$$P_{cr} = n^2 \frac{2\pi^2 EI}{l^2} + \frac{1}{n^2} \frac{kl^2}{\pi^2} \dots\dots(3.4.1)$$

$$n = \frac{1}{\pi} \sqrt[4]{\frac{k}{EI}}$$

ข. ปลายแบบยึดตรึง (Fixed Ends)

$$P_{cr} = 4 \frac{\pi^2 EI}{l^2} + 2\sqrt{kEI} \dots\dots(3.4.2)$$

ค. ปลายอิสระ (Free Ends)

$$\frac{\sin \frac{1}{2} \sqrt{2y + \pi^2 x}}{\sinh \frac{1}{2} \sqrt{2y - \pi^2 x}} = \mp \frac{(y - \pi^2 x) \sqrt{2y + \pi^2 x}}{(y + \pi^2 x) \sqrt{2y - \pi^2 x}} \dots\dots(3.4.3)$$

$$\text{เมื่อ } x = \frac{P_{cr} l^2}{\pi^2 EI} \quad \text{และ} \quad y = \sqrt{\frac{kl^4}{EI}}$$

เครื่องหมาย \mp ในสมการที่ (3.4.3) แสดงถึงลักษณะการโค้งงอของเสา เครื่องหมายลบหมายถึงเสาเกิดการโค้งแบบ symmetrical และเครื่องหมายบวกหมายถึงการโค้งแบบ antisymmetrical ดังนั้นค่า P_{cr} ที่คำนวณได้จะพิจารณาใช้ค่าที่น้อยกว่าเป็นค่าน้ำหนักวิกฤติโค้งงอ

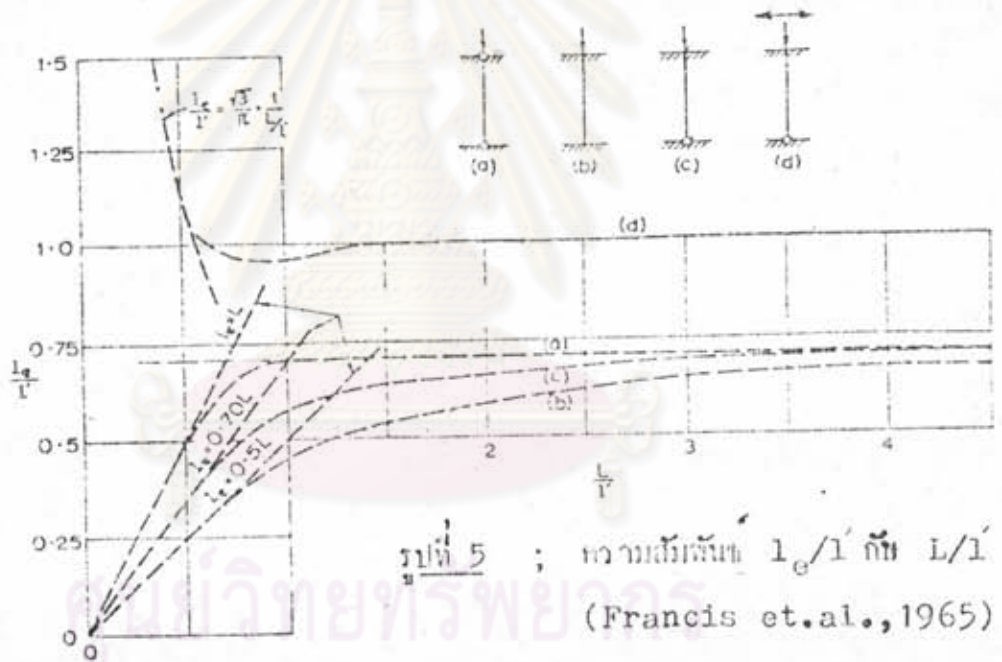
iv) Francis et.al.(1965) แสดงสูตรการหาน้ำหนักวิกฤติโค้งงอ โดยพิจารณาจากลักษณะปลายทั้งสองข้างของเสาเข็ม แสดงไว้เป็น

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_p I_p}{l_e^2} \dots\dots\dots (3.5)$$

l_e/l' แสดงในรูปที่ 5

$$l' = \pi R$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{k_h d}}$$



v) Bjerrum (1957) ได้ใช้สมการของ Timoshenko คำนวณน้ำหนักวิกฤติโค้งงอของเสาเข็ม แสดงไว้ว่าการโค้งงอจะเกิดขึ้นต่อเมื่อ

$$\frac{I_p}{A^2} \leq \frac{\sigma_{max.}^2}{4KE} \dots\dots\dots (3.6)$$

$\sigma_{max.}$ = ความเค้น ณ จุดกลางของวัสดุเสาเข็ม

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

จากสมการ (3.6) Bjerrum พิจารณาว่าถ้าค่าความเค้นที่จุดศูนย์กลางของเสาเข็มเหล็กเท่ากับ $3,600 \text{ กก./ซม.}^2$ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก (E) เท่ากับ $2.1 \times 10^6 \text{ กก./ซม.}^2$ และค่าแรงต้านทานทานข้างของดิน (K) เท่ากับ 5.3 กก./ซม.^2 เสาเข็มจะเกิดการโก่งงอเมื่อค่า I/A^2 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.3 เท่านั้น เสาเข็มที่มีค่า I/A^2 น้อยกว่า 0.3 ส่วนมากจะเป็นเสาเข็มรูปตัวเอช, รูปตัวไอ และท่อเหล็กกลม

3. การควบคุมการโก่งงอของเสาเข็ม

จากรายงานเกี่ยวกับการ เบี่ยงเบน-โก่งงอของ เสาเข็มขณะกด-คอก ทั้งกล่าวข้างต้น แสดงว่าเสาเข็มทุกชนิดที่มีขนาดยาวอาจเกิดการ เบี่ยงเบน-โก่งงอได้โดยง่าย การป้องกันหรือลดการโก่งงอที่อาจเกิดขึ้นได้ง่ายที่สุดคือการควบคุมการกด-คอกเสาเข็มอย่างเข้มงวด เช่นมีการเจาะนำ, บังคับแนว เสาเข็มส่วนเหนือระดับดินและให้การกด-คอกตรงศูนย์กลางมากที่สุด รวมทั้งการ รักษาแนว เสาเข็มให้ตรงขณะคอก

Hanna (1968) ทดสอบเสาเข็มซึ่งคอกโดยควบคุมให้อยู่ในแนวตั้งด้วยการเจาะนำ พบว่าเสาเข็มที่มีการเจาะนำ จะเพิ่มกำลังรับน้ำหนักโคคดีกว่าเสาเข็มซึ่งคอกโดยไม่มีการเจาะนำ และมีระยะทรุดตัวสุทธิเมื่อเอาน้ำหนักคอกออก น้อยกว่า และพบว่าน้ำหนักทดสอบส่วนมากจะกระจายสู่ปลายเสาเข็ม ซึ่งจะทำให้เสาเข็มที่มีการเจาะนำมีแนวใหม่ที่จะประพจน์เป็นเสาเข็มแบบรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม

Fellenius (1972) แนะนำว่าในการคอกเสาเข็มซึ่งมีการคอกควรมีการเจาะนำก่อน เพราะอาจมีการ เบี่ยงเบนของ รอยคอกทำให้เสาเข็มโก่งงอข้างขึ้นขณะคอก ทั้งๆที่ไม่มีสิ่งกีดขวางหรือแรงดันจากข้างเคียง และแนะนำว่าในช่วงห่างจากจุดคอก 1 เมตร เสาเข็มคอกตรงดีและมีการ เบี่ยงเบนไม่เกิน 0.8 องศา

Chiruppapa (1981) ได้แนะนำการบังคับให้เข็มอยู่ในแนวตั้งขณะกดคอก โดยการทำโครงยึดคานข้างโดยรอบ มีช่องขนาดให้เสาเข็มลอคโคคตรงกันในแนวตั้ง 3 ระดับซึ่งนอกจากจะช่วยให้เสาเข็มอยู่ในแนวตั้ง, ป้องกันการโก่งงอเหนือผิวดินแล้ว ยังจะทำให้การรักษาแนว เสาเข็มในขณะคอก เข้มงวดมากยิ่งขึ้น

4. กำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

Chan (1979) ได้เสนอผลการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหาค่ากำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยการทดลองหาค่ากำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ทำใ้ห้องที่จุดกึ่งกลางเสา ก่อนการฝังในทราย พบว่าเสาเข็มที่มีองศาการงอสูง (30°) จะรับน้ำหนักได้ดีกว่าเสาเข็มคิงตรง และองศาการงอของเสาเข็มจะมีผลต่อแรงเสียดทานในช่วงเหนือจุดงออ่อน แต่ในช่วงล่างของจุดงอแรงเสียดทานของเสาเข็มจะลดลง เมื่อองศาการงอของเสาเข็มเพิ่มขึ้น

สำหรับการหาค่าของเสาเข็มที่ Chan พบว่าระยะบรรทุกของหัวเสาเข็มที่งอจะมากกว่าเสาเข็มคิงตรง และการพิบัติของเสาเข็มจะเป็นอย่างช้าๆ ในขณะที่เสาเข็มตรงจะแสดงการพิบัติอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในสนามของ Hanna (1968)

โดยมีรายงานแนวคิดวิธีคำนวณกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มโง่งงอโดยผู้ค้นคว้าและรวบรวมหลายท่าน เช่น Johnson (1962), Broms (1963), Poulos & Davis (1980) เป็นต้น ในที่นี้จะยกตัวอย่างสูตรซึ่งได้จากการรวบรวมของ Poulos & Davis (1980) ซึ่งแสดงไว้เป็น

$$P = 0.5 (b - \sqrt{b^2 - 4c^2}) \dots\dots\dots (3.7)$$

เมื่อ P = กำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

$$b = P_{cr} + A \sigma_{max.}$$

$$c = A \sigma_{max.} - \frac{A}{Z_{R_{min.}}} E_p I_p$$

$$P_{cr} = \text{กำลังการรับน้ำหนักวิกฤติโง่งงอของเสาเข็ม}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม}$$

$$\sigma_{max.} = \text{ความเค้นยอมใ้ของเสาเข็ม}$$

I_p = โมเมนต์อินเนอร์เซียของเสาเข็ม

E_p = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม

Z = โมดูลัสพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

$R_{min.}$ = รัศมีความโค้งที่น้อยที่สุดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม

พื้นฐานของการพิจารณาค่าดังกล่าว รับน้ำหนักขอมให้ ใช้หลักเกณฑ์ที่ว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม (ความเค้นในแนวแกน + ความเค้นแรงค้ำ) น้อยกว่าค่าความเค้นที่ยอมให้

4.1 ความเค้นที่ยอมให้ในการออกแบบเสาเข็มรูปตัว เอช Chellis (1961) แนะนำให้พิจารณาเช่นเดียวกับการออกแบบเสา เหล็กทั่วไปตามข้อกำหนดของ AISC แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเสาเข็มเหล็กอาจเกิดการกัดกร่อนได้บ้าง เพราะการป้องกันการกัดกร่อนทำได้ไม่เต็มที่เหมือนโครงสร้างในอากาศ ดังนั้นในบางแห่งจะกำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้ ในการออกแบบเสาเข็มไว้ต่ำกว่าโครงสร้างในอากาศ เช่น United States Steel Co. ยอมรับการใช้ค่าความเค้นสูงสุดในการออกแบบเสาเข็มภายใต้น้ำหนักใช้งานเป็น 845 กก./ซม.² (12,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว) แทน 1,055 กก./ซม.² (15,000 ปอนด์/ตารางนิ้ว) ซึ่งยอมให้ในโครงสร้างทั่วไป

4.2 ความเค้นแรงค้ำ เมื่อสามารถวัดหารัศมีความโค้งของเสาเข็มได้ ค่าความเค้นแรงค้ำของเสาเข็มโค้งงอ หาได้จากสมการแรงค้ำในคานทั่วไป คือ

$$f_b = E_y/R \dots\dots\dots (3.8)$$

f_b = ความเค้นที่ขอบผิว เสาเข็ม

y = ระยะจากแกนสะเทินถึงขอบผิว เสาเข็ม

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม

R = รัศมีความโค้งของเสาเข็ม

การทดสอบเสาเข็ม (Load Test)

วิธีที่ใช้ เป็นพื้นฐานสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงสถิตย์ที่ตกในแนวแกนของเสาเข็ม ที่นิยมใช้มีอยู่ 3 วิธีคือ

1. การทดสอบวิธีคงน้ำหนักถ่วง (Maintained Load Test)

การทดสอบวิธีนี้ เสาเข็มจะถูกเพิ่มน้ำหนักทดสอบบรรทุกทีละชั้นจนถึง "แรงพิบัติ" หรือถึงน้ำหนักที่กองการ เช่น 2 เท่าของกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ใช้ในการออกแบบ หรือ 1.5 เท่าสำหรับเสาเข็มกลุ่ม แรงทดสอบเสาเข็มแต่ละชั้นจะถูกคงไว้จนกระทั่งอัตราการทรุดคั่นน้อยกว่าอัตราที่กำหนด แล้วจึงเพิ่มแรงทดสอบใหม่ และเมื่อพิจารณาเห็นว่าเสาเข็มเกือบจะถึงจุดพิบัติ อัตราการเพิ่มแรงทดสอบอาจลดลง เพื่อค้นหา "แรงพิบัติ" ทีละเอียดยิ่งขึ้น การทดสอบแบบคงน้ำหนักถ่วงแบ่งเป็น 2 แบบใหญ่ๆคือ

1.1 การทดสอบแบบคงน้ำหนักถ่วงช้า (Slow Maintained Load Test)

A.S.T.M. Designation D1143-74 แนะนำว่าในการทำการทดสอบแบบคงน้ำหนักถ่วงช้า ให้แบ่งการเพิ่มน้ำหนักทดสอบเป็น 8 ส่วนเท่าๆกันโดยให้ทดสอบเสาเข็มถึงแรงทดสอบเสาเข็มเท่ากับ 200% ของแรงที่คาดว่าจะใช้ออกแบบให้เสาเข็มรับ ในการเพิ่มแรงทดสอบแต่ละครั้ง แรงทดสอบจะถูกคงไว้จนกระทั่งอัตราการทรุดคั่นน้อยกว่า 0.01 นิ้ว/ชั่วโมง หรือเมื่อคงแรงทดสอบเสาเข็มไว้เป็นเวลานานถึง 2 ชั่วโมง ทั้งนี้แล้วแต่ว่าอย่างไรจะเกิดขึ้นก่อนกัน

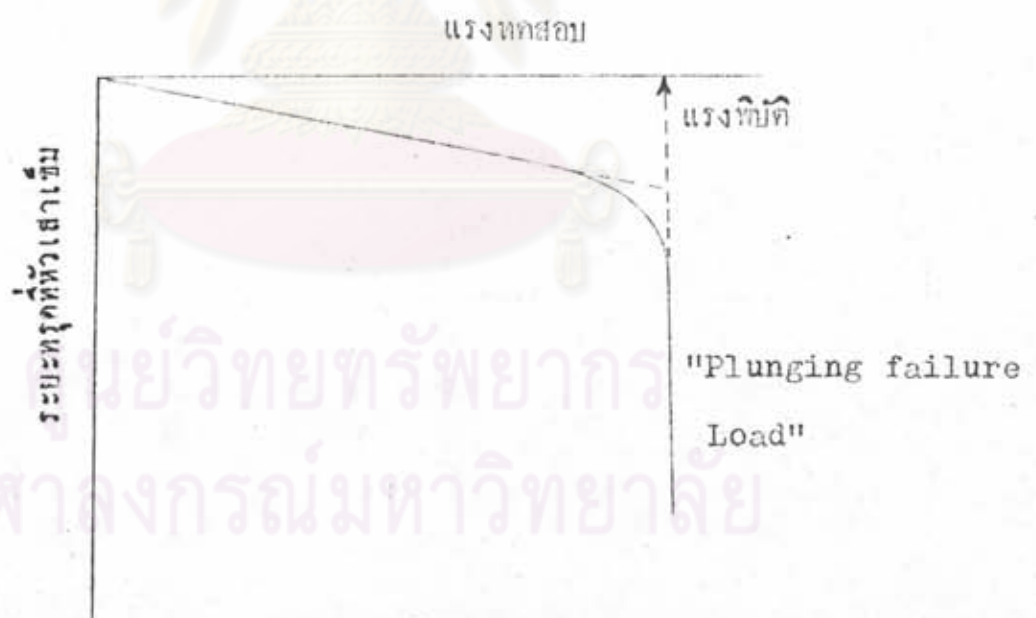
ในการทดสอบเสาเข็มตาม A.S.T.M. Designation D1143-74 เมื่อทดสอบเสาเข็มถึงแรงทดสอบเท่ากับ 200% ของแรงที่คาดว่าจะใช้ออกแบบให้เสาเข็มรับ ถ้าเสาเข็มยังไม่พิบัติ จะต้องคงแรงทดสอบนี้ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือนานกว่า

1.2 การทดสอบแบบคงน้ำหนักถ่วงไว (Quick Maintained Load Test)

ในการทดสอบแบบคงน้ำหนักถ่วงไว A.S.T.M. Designation D 1143-81 แนะนำให้เพิ่มน้ำหนักทดสอบครั้งละ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่

ออกแบบให้เสาเข็มรับ โดยตั้งช่วงเวลาในการเพิ่มน้ำหนักแต่ละครั้งประมาณ 2.5 นาที (หรือจะกำหนดเป็นอย่างอื่น) ก่อนและหลังการเพิ่มน้ำหนักแต่ละครั้ง ให้บันทึก ระยะทรุดตัวรวม ณ. หัว เสาเข็มน้ำหนักดวงทันที และอาจบันทึกข้อมูลถึงกลางในระหว่างการเพิ่มน้ำหนักตามแต่ละระยะ เมื่อถึงน้ำหนักสูงสุดให้บันทึกน้ำหนักและระยะทรุดตัวอีก เมื่อหยุดแม่แรง และบันทึกอีกหลังจากหยุดแม่แรง 2.5 นาที และ 5 นาที แล้วจึงยกแม่แรงออก การทดสอบจะกระทำจนเสาเข็มพินิจ หรือการทรุดตัวของหัว เสาเข็มมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของความยาว เส้นตแยงมุมของพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม หรือความสามารถของ เครื่องมือ

เมื่อทดสอบเสาเข็มจนพินิจ คือ ขณะแรงทดสอบเสาเข็มซึ่งได้จากการโยกแม่แรงคงที่ และเสาเข็มตกลงลงสู่ดินเรื่อยๆ น้ำหนักทดสอบคงที่ซึ่งทำให้เสาเข็มทรุดตัวลง เรื่อยๆนี้เรียกว่า "Plunging failure load" ดังแสดงในรูปที่ 6 (Fuller & Hoy, 1970)



รูปที่ 6 ; การพินิจของเสาเข็มแบบ "Plunging failure"
ตามขอเขียนของ Fuller & Hoy (1970)

2. การทดสอบวิธีอัตราทรุกตัวคงที่ (Constant Rate of Penetration Test , CPR.)

Whitaker (1961b) ได้เสนอการทดสอบโดยวิธีใช้อัตราการทรุกตัวของเสาเข็มคงที่ ตั้งอยู่บนแนวความคิดที่ว่าให้ดินซึ่งรองรับเสาเข็มอยู่ ถูกกดภายใต้แรงเฉือน ความเร็วของการบีบ-ทรุกตัวคงที่ (Constant Rate of Strain) การทดสอบวิธีนี้ตามเหตุผลนั้นว่าสัมพันธ์กับการทดสอบแรงเฉือนของดินแบบรับแรงไว (Quick Shear Test) ในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบ เสาเข็มจะถูกกดลงดินด้วยอัตราทรุกคงที่ เวลาที่ใช้ควบคุมการถึงจุดพิบัติ จะคง เท่ากับหรือใกล้เคียงกับการทดสอบแรงเฉือนของดินแบบรับแรงไว ในทางปฏิบัติทั่วไป ใช้เวลาของการทดสอบเท่ากับ 10 นาที ในกรณีเสาเข็มฝังในดินเหนียว แต่ในกรณีเสาเข็มฝังในกรวดหรือทราย การทดสอบอาจจำเป็นต้องใช้เวลาถึง 1 ชั่วโมง เพราะคงใช้เวลาการทรุกตัวของเสาเข็มมาก

Whitaker (1970b) แนะนำให้ใช้อัตราทรุกของหัวเสาเข็มไว้เท่ากับ 0.75 มม./นาที เมื่อเสาเข็มรับแรงเสียดทานด้านข้างในดินเหนียว ซึ่งส่วนใหญ่ระยะทรุกของเสาเข็มจนถึงจุดพิบัติจะไม่เกิน 25 มม. และเมื่อเสาเข็มรับแรงที่ปลายในทรายหรือกรวด อาจใช้อัตราทรุกของหัวเสาเข็ม 1.5 มม./นาที หรือมากกว่า

การทดสอบวิธีอัตราทรุกตัวคงที่นี้ จุดประสงค์เพื่อจะหาค่าดัง การรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มเท่านั้น กราฟของแรง - ระยะทรุกของหัวเสาเข็ม จะไม่แสดงถึงความสัมพันธ์ของความสามารถในการรับน้ำหนักของ เสาเข็มและการทรุกตัวของ เสาเข็ม ดังนั้นการทดสอบวิธีนี้จะไม่สามารถบอกให้ทราบถึง ระยะทรุกของ เสาเข็มที่น้ำหนักใช้งาน

Fellenius (1975) พบว่า จากประสบการณ์ในสนาม การทดสอบโดยวิธีอัตราทรุกตัวคงที่และวิธีค้ำน้ำหนักถ่วงไว้ ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเสาเข็มรับแรงบนลำฉิวในดินเหนียว

3. การทดสอบวิธีสภาวะสมดุล (Method of Equilibrium)

Mohan (1967) ได้เสนอวิธีการทดสอบเสาเข็มแบบนี้ขึ้น การทดสอบทำโดยการเพิ่มแรงทดสอบแก่เสาเข็มทีละประมาณ 1 ใน 10 ของแรงที่คาดว่าเสาเข็มจะรับได้โดยแรงไฮดรอลิกส์ โดยใช้เวลาในการเพิ่มแรงแต่ละครั้งประมาณ 3 ถึง 5 นาที แล้วปล่อยให้วางไว้ประมาณ 5 นาที ซึ่งในช่วงนี้เสาเข็มจะหยุดการทรุดตัว (ภายในเวลาประมาณ 2 - 3 นาที) และแรงทดสอบจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการทรุดตัวของเสาเข็ม จากนั้นจึงเพิ่มน้ำหนักขึ้นไป ในการทดสอบ เมื่อถึงแรงทดสอบสูงๆ ในค่าน้ำหนักทดสอบไว้ประมาณ 10 - 15 นาที ก่อนที่จะปล่อยให้แรงทดสอบลดลง เนื่องจากการทรุดตัวของหัว เสาเข็ม

การทดสอบวิธีนี้ในดินทราย เสาเข็มจะทรุดตัวสู่สภาวะสมดุลค่อนข้างเร็ว แต่ในดินเหนียวจะใช้เวลามากกว่า เวลาที่ใช้ในการทดสอบวิธีนี้จะใช้เวลาประมาณ 1 ใน 3 ของการทดสอบแบบค่าน้ำหนักถ่วงชา

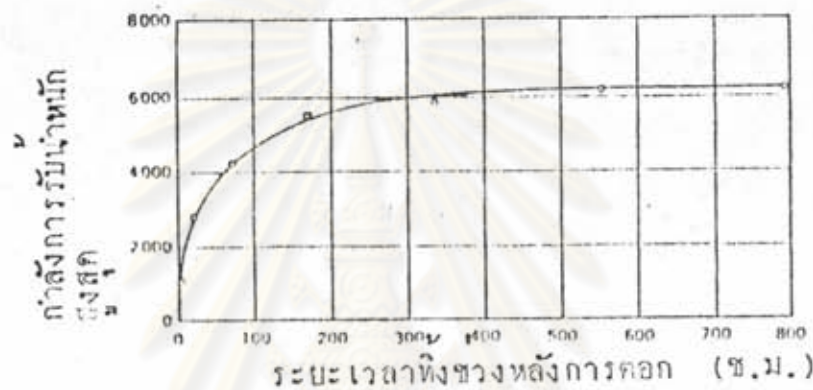
จากการศึกษาในเสาเข็มที่มีความยาว (ลึก) มาก Mohan พบว่าการทดสอบโดยวิธีสภาวะสมดุลใกล้เคียงกับการทดสอบแบบค่าน้ำหนักถ่วงชา

4. ระยะเวลาการทิ้งช่วงก่อนการทดสอบเสาเข็ม

Tomlinson (1970) ได้ทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบทอกลมที่ระยะเวลาทิ้งช่วงหลังการคอกเสาเข็มค่างๆกัน พบว่าที่ระยะเวลา 28 วัน กำลังการรับน้ำหนัก ณ จุดพิบัติจะมากกว่ากำลังการรับน้ำหนักคงค้าง (Residual Stress) ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทดสอบที่ระยะเวลาทิ้งช่วง 3 เดือน ค่าทั้งสองจะน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลองครั้งแรกเล็กน้อย และจะกลับมีค่าเท่ากับครั้งแรก เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 ปี

George and Tomlinson (1976) กล่าวถึงประสบการณ์ซึ่งได้จากการทดสอบเสาเข็มเหล็กรูปตัวเอชว่า ระยะเวลาทิ้งช่วงระหว่างการคอก และการทดสอบเสาเข็ม ไม่ควรน้อยกว่า 2 สัปดาห์ และระยะเวลาทิ้งช่วง 1 เดือนเป็นระยะเวลาที่สมควรพิจารณาใช้

Seed & Reese (1957) สรุปผลการทดสอบเสาคีเอ็มในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน สรุปไว้ว่า ค่าลึงการรับน้ำหนักของเสาคีเอ็มซึ่งทดสอบหลังจากการทิ้งช่วง 30 วันขึ้นไป จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และจะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบหลังจากทิ้งช่วง 4 ชั่วโมงประมาณ 5.4 เท่า และค่าค่าลึงการรับน้ำหนักที่ระยะเวลา 8 วัน จะประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ ของค่าค่าลึงการรับน้ำหนักที่ระยะเวลา 30 วัน ดังแสดงในรูป 7



รูปที่ 7 ; แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลึงการรับน้ำหนักสูงสุดกับเวลา

สำหรับในดินกรุงเทพฯ Sasisuwan (1972) สรุปในรายงานว่า ดินรอบเสาคีเอ็มจะมีค่าลึงกลับคืน (Regain Strength) ภายใน 2 สัปดาห์ หลังการคอกเสาคีเอ็ม เนื่องจากขบวนการ "Thixotropic" และความคืบหน้าในดินที่เพิ่มขึ้นจากการคอกเสาคีเอ็มแต่กระจายออกไป

Surivonges (1972) แนะนำว่า การทดสอบเสาคีเอ็มไม่ควรทำก่อน 2 สัปดาห์หลังการคอกเสาคีเอ็ม และควรรีไ้ระยะเวลาทิ้งช่วงก่อนการทดสอบอย่างน้อย 3 สัปดาห์