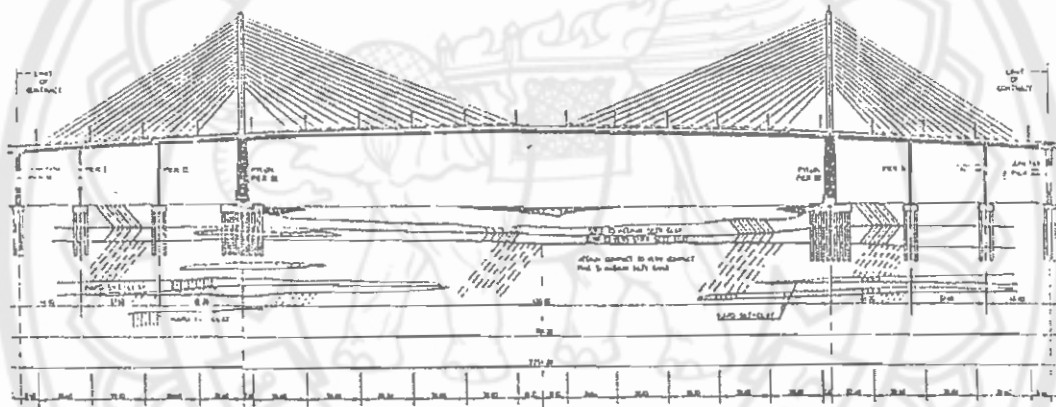


บทที่ 2

ฐานรากเสาเข็ม

บริเวณเมืองใหญ่ของหลายๆ ประเทศทั่วโลก รวมทั้งกรุงเทพมหานคร ของไทยเราด้วย มักจะตั้งอยู่ใกล้แม่น้ำหรือริมทะเล ดังนั้นอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ ก็จะต้องอยู่บนดินตะกอน หรือที่เกิดจากการทับถมของดินที่พัดพามากับกระแสน้ำ แล้วมาตกตะกอนในบริเวณลุ่มน้ำหรือปากอ่าว ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วดินจำพวกนี้จะเป็นดินเหนียวอ่อน ถึงอ่อนมากในส่วนบน ทั้งยังมีความชื้นในมวลดินสูงมีการทรุดตัวได้มาก แล้วจะค่อยๆ แข็งตัวขึ้นตามความลึก รวมทั้งอาจจะมีชั้นทรายค่อนข้างแน่นปนสลับกันไป ดังตัวอย่างชั้นดินกรุงเทพฯ บริเวณสะพานทางด่วน ดาวคะนองที่แสดงในรูปที่ 2.1

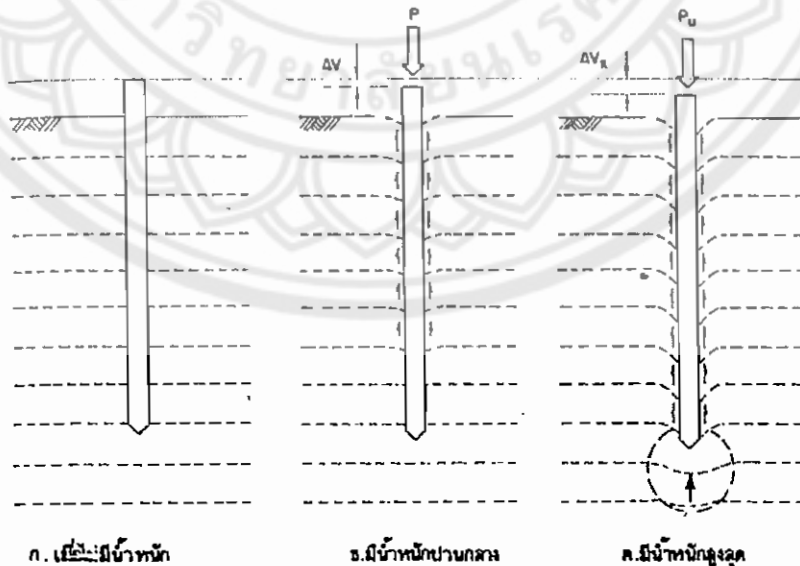


รูปที่ 2.1 ชั้นดินกรุงเทพฯ บริเวณสะพานทางด่วนดาวคะนอง-ท่าเรือ (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

ดังนั้นอาคารหรือสิ่งก่อสร้างต่างๆ จึงต้องวางอยู่บนฐานรากเสาเข็ม หรือเดซอง (Caisson) เพื่อถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่าเบื้องล่าง ทั้งยังทำให้การทรุดตัวลดลงจนไม่เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างอีกด้วย ปัจจุบันอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร อาจจะต้องหยั่งฐานรากลงไปถึงชั้นทรายชั้นที่ 2 ซึ่งอยู่ลึกถึงประมาณ 40-50 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการทรุดตัว ความต้องการเสาเข็มขนาดใหญ่และมีความยาวมากๆ จึงเพิ่มขึ้นทุกวันจนมีการนำเอาเทคนิคใหม่ๆ ในการติดตั้งเข็มเจาะ (Bored Pile) ขนาดใหญ่เข้ามาใช้ ไปจนกระทั่งเริ่มมีการใช้เข็มเหล็ก ซึ่งมีราคาแพงกว่า แต่สามารถเชื่อมต่อความยาวได้ตามความต้องการ และมีประสิทธิภาพในการทะลุทะลวงลงไปถึงชั้นดินแข็งที่ต้องการได้ดีกว่า

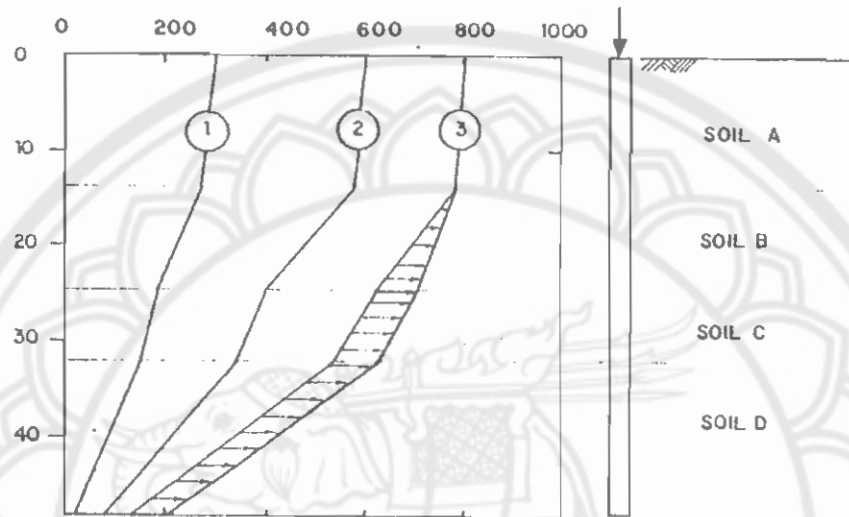
2.1 พฤติกรรมของดินโดยรอบเสาเข็ม(อ้างอิง ดร.วรากร ไม้เรียง)

เสาเข็มเมื่อติดตั้งลงในชั้นดินด้วยวิธีใดๆ แล้วก็ตาม ถ้าไม่พิจารณาถึงการกระทบกระเทือนของชั้นดิน เนื่องจากการตอกหรือเจาะเพื่อติดตั้งเสาเข็มแล้วละก็ ชั้นดินและเสาเข็มก็จะยังไม่มีอาการเคลื่อนที่ ดังในรูปที่ 2.2 ต่อเมื่อเริ่มบรรทุกน้ำหนักลงบนเสาเข็ม ก็จะเคลื่อนที่ลงตามทิศทางแรง ในขณะที่เดียวกันดินที่เกาะอยู่ข้างๆ ผิวเข็มก็พยายามต้านทานไว้ จึงมีการถ่ายแรงจากเข็มลงสู่ชั้นดิน ชั้นดินเองก็จะเคลื่อนตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่ที่จะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น และในช่วงหลังจะเกิดการต้านทานที่ปลายเข็มเข้ามาร่วมด้วย ในลักษณะเดียวกับ ฐานแผ่ที่มีพื้นที่เท่าปลายเข็ม ผลสุดท้ายเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากจนชั้นดินไม่สามารถจะต้านทานได้ ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear Plane) โดยรอบผิวเสาเข็ม และที่ปลายเสาเข็ม และมีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า “น้ำหนักบรรทุกสูงสุด” (Ultimate Pile Capacity) ในกรณีที่เป็นชั้นดินหลายชนิดตลอดความยาวเข็ม จะมีการถ่ายน้ำหนักลงชั้นดินจากผิวเข็ม (Friction Load Transfer) ได้ไม่เท่ากันถึงแม้ว่า การเคลื่อนตัวจะใกล้เคียงกันก็ตาม ดินที่แข็งแรงกว่าจะสามารถถ่ายน้ำหนักได้มากกว่าดินอ่อนในระดับการเคลื่อนตัวเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะรับตอม่อสะพานสาธารเป็นเสาเข็มขนาด ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งจากรูปที่ 2.3 คือ น้ำหนักที่ถ่ายลงชั้นดิน ส่วนใหญ่เป็นการถ่ายที่ส่งผ่านทางผิวเข็ม (Friction Resistance) ราว 90% ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ส่วนที่ปลายเสาเข็มมีน้ำหนักถ่ายลงชั้นดิน (End หรือ Point Bearing) เพียง 10% เท่านั้นแต่จะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากการคลายแรงด้านที่ผิวเข็มของดินส่วนบน แต่สัดส่วนของการถ่ายแรงเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะดิน เช่นในกรณีของเข็มขั้วลง



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม(อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

ถึงชั้นหินแข็ง การถ่ายน้ำหนักจะเกิดขึ้นที่ปลายเป็นส่วนใหญ่หรือทั้งหมด เพราะเข็มเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อย ชั้นหินก็จะรับน้ำหนักได้มากในขณะที่ดินรอบผิวเข็มยังไม่สามารถรับน้ำหนักได้เลย ดังนั้นในการวิเคราะห์แรงต้านทานของเสาเข็ม เราจึงมักแบ่งแรงต้านทานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดที่ผิวของเข็ม และส่วนที่เกิดที่ปลายเสาเข็ม เข็มที่มีแรงต้านทานส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวเข็ม เรามักจะเรียกว่า “Friction Pile” ส่วนเข็มที่ยังบนชั้นดินแข็งมากหรือชั้นหิน ซึ่งมีการถ่ายเทน้ำหนักที่ปลายเข็มเป็นส่วนใหญ่ ก็จะเรียกว่า “End Bearing Pile”



รูปที่ 2.3 การถ่ายน้ำหนักของเข็มบนดินหลายชั้น (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

2.2 ชนิดของเสาเข็ม (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

ชนิดของเสาเข็มแบ่งออกเป็น 2 กรณีด้วยกันคือ แบ่งตามชนิดของวัสดุหรือแบ่งตามลักษณะการติดตั้ง

2.2.1 ชนิดของเข็มตามลักษณะของวัสดุ

เข็มอาจทำมาจากวัสดุหลายอย่างตามความเหมาะสมทางด้านความประหยัด และทางด้านวิศวกรรม ที่นิยมใช้กันมากในประเทศไทยได้แก่

2.2.1.1 เข็มไม้ เป็นเข็มขนาดเล็กทำจากไม้สน หรือไม้เบญจพรรณ มักมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 3-8 นิ้ว และยาว 3-8 เมตร ใช้รับน้ำหนักไม่เกิน 5 ตัน/ต้น มักใช้กับงานขนาดเล็ก เช่น บ้านพักอาศัย

2.2.1.2 เข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ นิยมใช้แพร่หลายมากในอาคารขนาดกลางและใหญ่มีทั้งคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งยาวประมาณ 3-12 เมตร และคอนกรีตอัดแรงซึ่งทำให้สามารถ

หล่อได้ยาวขึ้น โดยไม่เกิดความเสียหายในระหว่างการขนส่ง อาจมีความยาวตั้งแต่ 7-26 เมตร โดยมีรูปร่างหน้าตัดต่างๆ กัน

2.2.1.3 เข็มคอนกรีตหล่อในที่ ใช้ในกรณีโครงสร้างขนาดใหญ่ มีน้ำหนักลงฐาน รากมาก สามารถมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึง 1.5 เมตร และลึกถึงกว่า 40 เมตร แต่ขนาดที่ใช้มากในประเทศไทย คือ 0.5-1.20 เมตร โดยจะรับน้ำหนักบรรทุกตลอดภัยได้ระหว่าง 50-600 ตัน/ต้น และในบางกรณีเข็มคอนกรีตหล่อในที่หรือเข็มเจาะอาจนำไปใช้ในกรณี ซ่อมแก้ไขฐานรากภายในอาคารซึ่งมีเนื้อที่จำกัด โดยเฉพาะไม่สามารถนำปั้นจั่นเข้าไปตอกเข็มหล่อสำเร็จได้ หรือการตอกทำให้เกิดความสั่นสะเทือน ซึ่งอาจจะเกิดความเสียหายแก่อาคารข้างเคียงได้ โดยทั่วไปแล้วราคายังสูงกว่าเข็มคอนกรีตหล่อสำเร็จ เมื่อเทียบการรับน้ำหนักที่เท่ากัน เพราะต้องการเทคนิคในการก่อสร้างสูงกว่า ขั้นตอนการทำเข็มเจาะ อาจสรุปเป็นขั้นตอนในรูปที่ 2.5

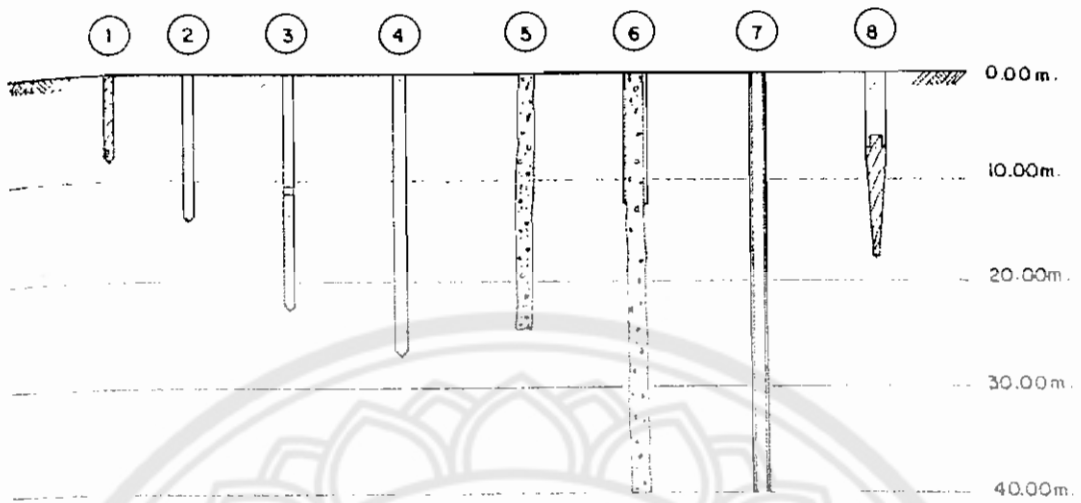
2.2.1.4 เข็มเหล็ก เป็นเข็มทำจากเหล็กรูปพรรณ โดยเฉพาะ WIDE FLANGE, I-BEAM หรือเหล็กท่อ นำไปติดตั้งโดยการตอกลงในชั้นดิน อาจมีการเชื่อมต่อหรือตัดออกโดยง่าย ในสนาม มีการทะลุทะลวงชั้นดินได้ดีจึงสามารถหยั่งถึงชั้นที่แข็งแรงกว่าได้ดี แต่มีข้อเสียเรื่องการเกิดสนิม และราคาแพง

2.2.1.5 เข็มประกอบ เป็นเข็มซึ่งวัสดุ 2 ชนิดประกอบกัน เช่น คอนกรีตและไม้ หรือไม้และเหล็ก หรือคอนกรีตและเหล็ก กรณีที่ไม่มีไม้ประกอบอยู่ด้วย ส่วนที่เป็นไม้ควรจมอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินตลอดเวลาเพื่อป้องกันการผุของเนื้อไม้ ปัจจุบันไม่นิยมใช้เพราะอาจมีปัญหาตรงรอยต่อ

2.2.2 ชนิดของเข็มตามลักษณะการติดตั้ง

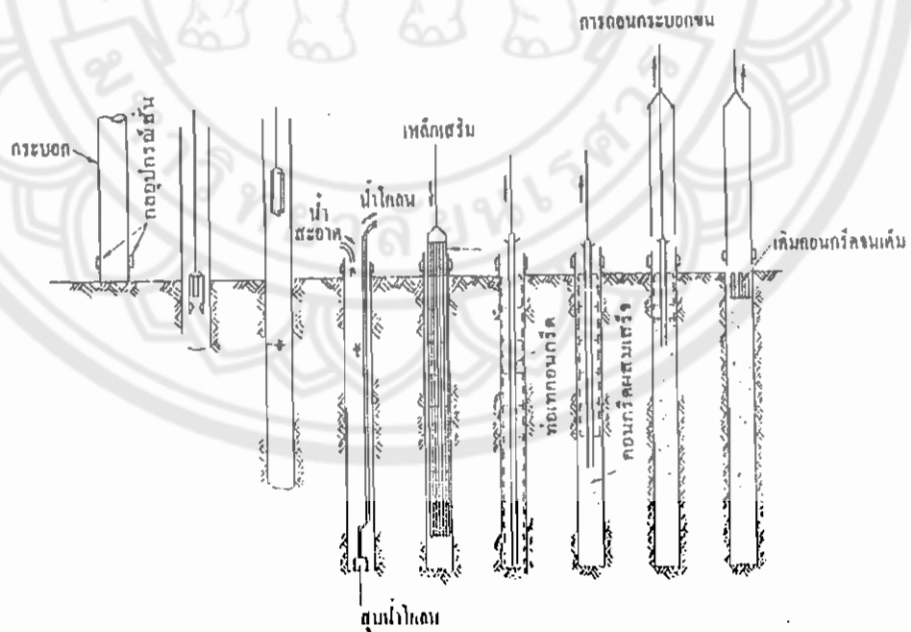
2.2.2.1 เข็มแทนที่ดิน (Displacement Pile) ได้แก่ เข็มที่ติดตั้งด้วยการตอกหรือการกด เข็มซึ่งไม่มีช่องกลวงที่ปลายลงในชั้นดิน ดังนั้นเข็มจึงไปแทนที่ดินเท่าปริมาตรของเข็มจึงมีการเคลื่อนตัวโดยรอบเข็ม ในกรณีที่มีเข็มจำนวนมากในบริเวณก่อสร้าง การเคลื่อนตัวของดินอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อาคารข้างเคียง

2.2.2.2 เข็มกึ่งแทนที่ดิน (Semi-displacement Pile) ได้แก่ เข็มเหล็ก หรือเข็มคอนกรีตซึ่งมีการเจาะนำ จะมีการแทนที่ดินส่วนน้อย จะก่อให้เกิดปัญหาจากการเคลื่อนตัวของดินน้อยลง



- 1) เข็มไม้
- 2) เข็มคอนกรีตเสริมเหล็กท่อนเดียว
- 3) เข็มคอนกรีตเสริมเหล็กสองท่อน
- 4) เข็มคอนกรีตอัดแรง
- 5) เข็มเจาะไม่มีปลอก
- 6) เข็มเจาะมีปลอกตอนบน
- 7) เข็มเหล็ก WIDE FRANGE
- 8) เข็มไม้ประกอบคอนกรีต

รูปที่ 2.4 ลักษณะเข็มชนิดต่างๆ (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)



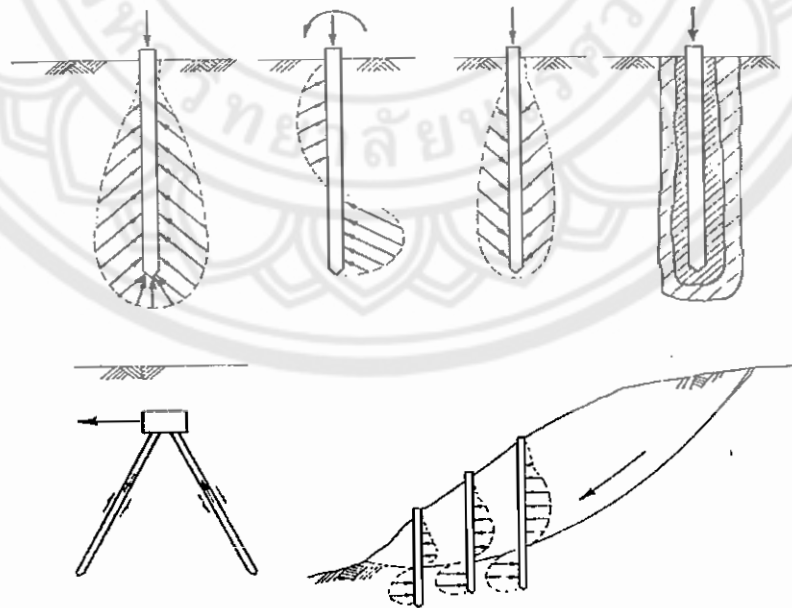
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำเข็มคอนกรีตหล่อในที่ (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

2.2.2.3 เข็มไม่แทนที่ดิน (Non-displacement Pile) ได้แก่ เข็มเจาะหรือเข็มคอนกรีตหล่อในที่ ซึ่งมีการเจาะเอาดินออกก่อนแล้วจึงเทคอนกรีตลงไปแทน จึงไม่เกิดปัญหาการเคลื่อนตัวของดิน แต่ก็อาจมีการถล่มของผนังหลุม จึงต้องมีการป้องกันหลุมพังโดยใช้ปลอกเหล็กหรือมีน้ำโคลนใส่ประคองหลุมไว้

2.3. ลักษณะการใช้งานของเข็ม(อ้างอิง ดร.วรากร ไม้เรียง)

วัตถุประสงค์หลักของเสาเข็ม คือ การใช้รับน้ำหนักในแนวตั้ง แล้วส่งผ่านแรงสู่ชั้นดินที่ดีกว่าเบื้องล่าง แต่เสาเข็มก็ยังนำมาใช้งานในลักษณะอื่นๆ ด้วย เช่น

- รับแรงทางด้านแนวเอียงหรือแนวราบ ซึ่งปกติเข็มที่ติดตั้งแนวตั้ง จะสามารถรับแรงด้านข้างได้ในลักษณะโมเมนต์คด แต่ถ้าเข็มที่เอียงทำมุมกับแนวตั้ง ซึ่งเรียกว่า “Battered Pile” จะทำให้รับแรงด้านข้างได้มากขึ้น ดังในรูปที่ 2.6
- รับแรงดึง เช่น ในกรณีบ่อน้ำที่มีแรงลอยตัว หรือโครงสร้างที่มีโมเมนต์ถ่ายลงสู่ฐานรากมาก จะเกิดแรงดึงในด้านหนึ่งและแรงกดอีกด้านหนึ่งของฐานราก
- ทำให้ชั้นดินทรายนั่นขึ้น โดยแรงสั่นสะเทือนจากการตอก และการแทนที่ของดิน จึงทำให้ชั้นดินแข็งแรงขึ้น
- ช่วยยึดหรือป้องกันการเคลื่อนพังของลาดดิน มักใช้ในกรณีที่แก้ไขซ่อมแซมเพื่อชะลอการพังถล่ม ก่อนทำการแก้ไขด้วยวิธีอื่นต่อไป
- เป็นเข็มรับแรงกระแทก จากเรือในการเข้าจอดในท่าเทียบเรือ



รูปที่ 2.6 ลักษณะการใช้งานของเข็ม(อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

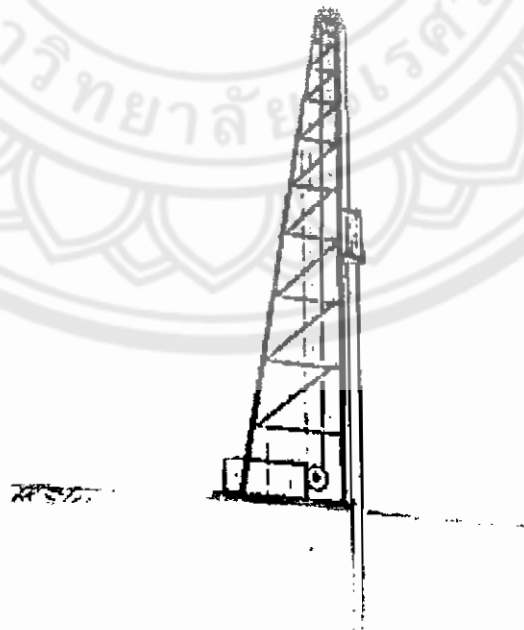
2.4. เครื่องมือในการตอกเข็ม(อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

การตอกเข็มเป็นขั้นตอนสำคัญในการติดตั้งเข็มตอก อาจทำได้โดยการใช้แรงสำหรับเข็มไม้หรือเข็มขนาดเล็ก หรือใช้เครื่องจักรตอกสำหรับเข็มขนาดใหญ่ โดยพิจารณาตามความเหมาะสมทางความประหยัด ความสะดวกและความรวดเร็วในการตอก ดังรายละเอียดดังนี้

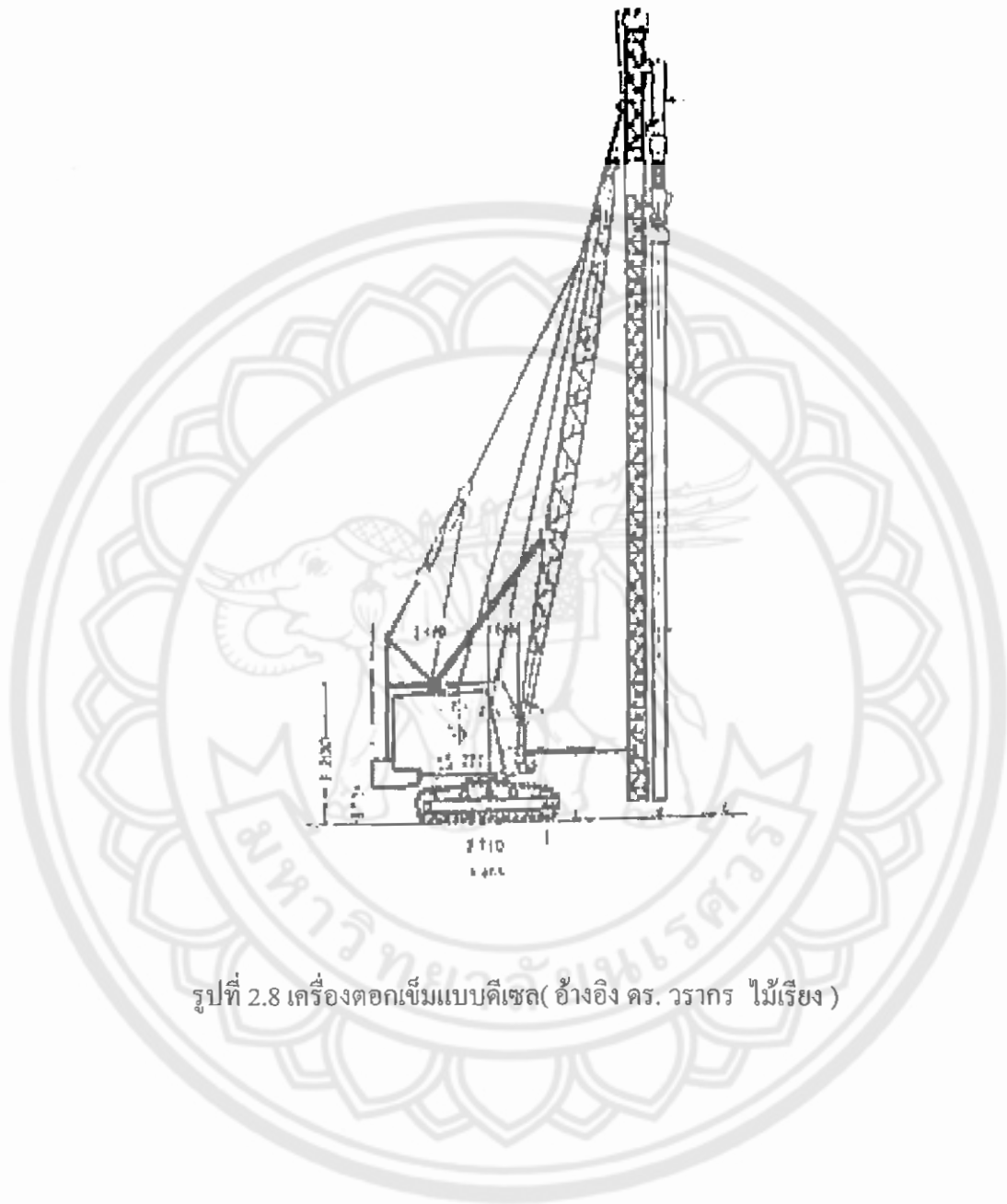
2.4.1 สามเกลอ เป็นเครื่องมือตอกด้วยแรงคนตั้งแต่ 2 ถึง 4 คนทำจากเสาไม้เนื้อแข็ง มีมือจับโดยรอบ หนักประมาณ 50 กิโลกรัม สามารถใช้ตอกเข็มขนาดเล็ก เช่น เข็มไม้ หรือเข็มคอนกรีต ความยาวไม่เกิน 5 เมตร

2.4.2 ปั่นจั่นลูกตุ้ม เป็นเครื่องมือตอกเข็มที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ประกอบด้วย ปั่นจั่น โครงถัก มีความสูงตั้งแต่ประมาณ 8 เมตร ถึง 30 เมตร ลูกตุ้มเหล็กใช้ตอก หนักตั้งแต่ 1 ถึง 5 ตัน และมีเครื่องกว้านสำหรับยกลูกตุ้ม หรือยกเสาเข็มขึ้นตอก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ใช้ในการตอกเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตอัดแรง ยาวที่สุดถึง ประมาณ 25 เมตร ระยะยกลูกตุ้มอยู่ในช่วง 30 ถึง 120 ซม.

2.4.3 ปั่นจั่นและเครื่องตอกดีเซล เป็นวิวัฒนาการของระบบการตอกเสาเข็ม โดยใช้ลูกตุ้มที่อยู่ในกระบอกลูกสูบ และมีการจุดระเบิดของน้ำมันดีเซล เพื่อยกตุ้มน้ำหนักขึ้น แล้วปล่อยให้กระแทกลงจนมีการจุดระเบิดอีกครั้ง ซึ่งจะเกิดพลังงานในการตอกเข็มลงในชั้นดินด้วยอัตรา 40 – 60 ครั้งต่อนาที ทั้งด้านความเที่ยงตรงของการตอก และความรวดเร็ว ส่วนมากจะใช้ในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ รูปที่ 2.8 แสดงปั่นจั่นและเครื่องตอกดีเซล และตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างและรายละเอียดของเครื่องตอกดีเซล



รูปที่ 2.7 เครื่องตอกเข็มแบบปั่นจั่นลูกตุ้ม (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)



รูปที่ 2.8 เครื่องตอกเข็มแบบคิเซล (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

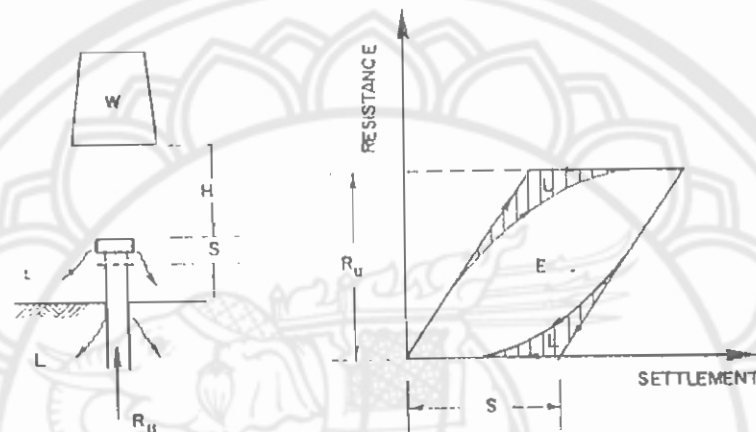
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดเครื่องตอกเข็มแบบดีเซล(อ้างอิง คร. วรากร ไม่เรียง)

Maker	Type	Mass of ram		Energy per blow		Max striking blows/min
		kg	lb	m/kg	ft/lb	
BSP International Foundations Utd.(UK)	DE30B	1360	1000	3211	27000	47
	DE50B	2260	5000	6219	45000	47
	B15	3300	3670	3630	26300	80-100 (double-acting)
	B45	4500	9920	10900	78840	80-100 (double-acting)
Delmag (W.Germany)	D2	220	485	120-250	868-1815	60-70
	D4	380	840	225-500	1625-3630	50-60
	D5	500	1100	1250	9050	40-60
	D12	1250	2760	3125	22610	40-60
	D22	2700	5950	5500	39780	40-60
	D30	3000	6610	3300-7500	23870-54200	39-60
	D36	3600	7940	4300-10200	30380-73780	37-53
	D44	4300	9480	6000-12000	43500-87000	37-56
Hera (Holland)	H1500	1500	3300	4140	29900	40-60
	H2500	2500	5510	8000	57900	37-50
	H3500	3500	7720	11200	81000	37-50
	H5000	5000	11020	16000	115700	37-50
	HD	7500	16540	27000	195300	37-50
Ishikawajima Harima (Japan) Kobe (Japan)	J22	2200	4850	5410	39100	42-70
	J35	3500	7720	8780	63500	42-70
	J44	4400	9700	11000	79400	42-70
	K13	1300	9700	3700	26760	40-60
	K25	2500	2870	7500	54200	39-60
	K35	3500	5510	10500	75900	39-60
	K45	4500	7720	13500	97600	39-60
	KB45	4500	9920	13500	97600	35-60
	KB60	6000	13230	16000	115700	35-60
K150	15000	33070	39500	286000	42-60	
Koehring-MKT (McKiernan-Terry USA)	DE10	500	1100	1220	8800	48
	DE20	910	2000	2200	16000	48
	DE30A	1270	2800	3100	22400	48
	DE40	1810	4000	4400	32600	48
	DE70	3175	7000	8700	63000	48
	DA35B	1270	2800	3100	22400	48 single-acting 82 double-acting
	DA55B	2270	5000	5500	40000	48 single-acting 82 double-acting

2.5. การหาแรงต้านของเสาเข็มโดยวิธีไดนามิกส์ (อ้างอิง ดร.วรากร ไม้เรียง)

การประมาณแรงต้านของเสาเข็มจากข้อมูลการตอกเข็มได้ปฏิบัติกันมานานแล้ว นอกจากจะคำนวณแรงต้านได้แล้วยังเป็นทางปฏิบัติที่จะตรวจสอบว่า ปลายเข็มยึดถึงชั้นที่ต้องการหรือไม่

ในขณะที่ปล่อยลูกตุ้มลงกระทบบนหัวเข็มจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานสู่เสาเข็มทำให้เข็มเคลื่อนที่ลงได้ชั้นดิน ดังนั้นจึงสามารถนำทฤษฎีทางพลศาสตร์ (Dynamics) จากกฎการตกกระทบของ Newton มาประยุกต์เพื่อหาแรงต้านทานของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 พลังงานในการตอกเสาเข็ม (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

จากทฤษฎีการตกกระทบ

พลังงานในการตอกเข็ม - แรงต้านของเข็ม \times ระยะจม + พลังงานที่สูญหาย

$$WH = R_u \cdot S + L \quad (2.1)$$

เมื่อ

W = น้ำหนักของลูกตุ้มตอก

H = ระยะยก

R_u = แรงต้านทานสูงสุดของชั้นดิน

S = ระยะจม

L = พลังงานส่วนที่สูญหาย

พลังงานส่วนที่สูญหายไป เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น

- การปล่อยลูกตุ้มไม่เป็นอิสระโดยสมบูรณ์
- ความยืดหยุ่นของหมอนรองหัวเข็ม และความร้อนที่เกิดขึ้นที่หมอนรอง
- ความยืดหยุ่นของตัวเข็มเอง
- ความยืดหยุ่นของดิน โดยรอบเข็ม

ซึ่งในทางปฏิบัติยากที่จะทราบค่าที่แท้จริงของพลังงานที่สูญหายไปนี้ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่วิธีนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป และมักจะต้องใช้อัตราส่วนปลอดภัยสูง (F.S. = 3- 6) แต่วิธีนี้ก็ยังมีประโยชน์ในการตรวจสอบการตอกเข็มร่วมไปกับการคำนวณ โดยวิธีอื่น ตารางที่ 2.1 ถึง 2.4 ได้รวบรวมสมการที่นิยมใช้ในการคำนวณหาแรงต้านเสาเข็มจากการตอกในหน่วยเมตริก

ตารางที่ 2.2 สมการแรงต้านเสาเข็มจากการตอก

ชื่อสูตร	สมการ	หมายเหตุ
1. Engineering News ค่า F.S. = 6.0	$R_u = \frac{WH}{S+C}$	C = 2.54 ซม. สำหรับลูกค้อนปล้อ = 0.25 ซม. สำหรับ Steam Hammer
2. Hiley ค่า F.S. = 2.4	$R_u = \frac{e \cdot WH}{S + 0.5C} \cdot \frac{W + k^2 W_p}{W + W_p}$	C = C ₁ + C ₂ + C ₃ ค่า C ₁ , C ₂ และ C ₃ แสดงในตารางที่ 2.3 ค่า e แสดงในตารางที่ 2.2
3. Janbu ค่า F. S.=2.0	$R_u = \frac{WH}{K_u \cdot S}$	$K_u = C_d (1 + \sqrt{1 + \lambda / C_d})$ $C_d = 0.75 + 0.15 W_p / W$ $\lambda = \frac{WHL}{AES^2}$
4. Danish ค่า F. S.=2.3	$R_u = \frac{e \cdot WH}{S + (2 \cdot eWHL / AE)^{1/2}}$	ค่า e แสดงในตารางที่ 2.2
5. Gates ค่า F. S. =2.3	$R_u = 4.0 \sqrt{eWH} \cdot \log(25/S)$	ค่า e แสดงในตารางที่ 2.2

เมื่อค่าในตารางที่ 2.1 เป็นหน่วยเมตริก โดยมีหน่วยดังนี้

R_u = แรงดันสูงสุดของเข็ม, ตัน

W = น้ำหนักลูกตุ้ม, ตัน

H = ระยะยกของลูกตุ้ม, ตัน

S = ระยะจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง, ซม.

C = สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน, ซม.

e = ประสิทธิภาพของการตอกในตารางที่ 2.3, ไม่มีหน่วย

L = ความยาวของเข็ม, ซม.

A = พื้นที่หน้าตัดของเข็ม, ตร.ซม.

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเข็ม, ตัน/ตร.ซม.

สำหรับคอนกรีตประมาณ 300 ตัน/ตร.ซม. เมื่อ $f_c = 350$ ksc

ตารางที่ 2.3 ค่าประสิทธิภาพของค้อนตอก, e

ชนิด	ประสิทธิภาพ, e
ค้อนน้ำหนักปล่อยด้วยมือ	1.00
ค้อนน้ำหนักปล่อยด้วยเชือกหรือลวดและเครื่องกว้าน	0.75
Single Acting Steam Hammer	0.80
Double Acting Steam Hammer	0.85
Diesel Hammer	1.00

ตารางที่ 2.4 ค่า C_1 , C_2 และ C_3 จาก Hiley

ก. ค่า C_1 การยุบตัวของหัวเข็มและหมอนรอง	
- สำหรับเข็มไม้เนื้อแข็ง	0.25-0.40 ซม.
- สำหรับเข็มคอนกรีตรองด้วยไม้ในหัวครอบเหล็ก	0.20-0.40 ซม.
ข. ค่า C_2 การยุบตัวของตัวเข็ม	$= \frac{R_u \cdot L}{A \cdot E}$ ซม.
ค. ค่า C_3 การยุบตัวของดินรอบเข็ม	$= 0.25$ ซม.

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ k ของการรองดอก

ชนิดเข็ม	ลักษณะการรองหัวเข็ม	k
เข็มเหล็ก	-แผ่นรองพลาสติก	0.50
	-ไม้รองในหัวครอบเหล็ก	0.30
	-ดอกหัวบนเข็มโดยตรง	0.50
เข็มไม้	-ดอกหัวบนเข็มโดยตรง	0.25

ความเชื่อถือได้ของการคำนวณโดยวิธีนี้ไม่ค่อยแน่นอน เพราะมีความไม่แน่นอนของอิทธิพลเกี่ยวข้องมาก เช่น

- แรงต้านของชั้นดินเปลี่ยนไปในระหว่างดอก
- พลังงานส่วนที่สูญหายไป ไม่สามารถทราบค่าที่แน่นอน
- วิธีการตอกเข็มเปลี่ยนไปในแต่ละประเทศ

ได้มีผู้วิเคราะห์เปรียบเทียบการคำนวณจากสูตรต่างๆ กับการทดสอบแรงต้านในสนาม เช่น Sorensen และ Hansen (1957), Agerchou (1962), Flaate (1964) และ วิเชียร เต็งอำนวย, สนิท พิพิชสมบัติ (พ.ศ. 2523)

ซึ่งพอสรุปได้ว่า สมการ Janbu, Danish และ Hiley มีความเชื่อถือได้ค่อนข้างสูง ในขณะที่สมการ Engineering News Recosd ให้ค่าแปรปรวนที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สรุปข้อมูลทางสถิติของสมการตอกเสาเข็ม (อ้างอิง ดร.วรากร ไม้เรียง)

ชื่อสมการ	แหล่งข้อมูล	ค่าเบี่ยงเบน* มาตรฐาน	Nominal F.S.	จำนวนข้อมูล
ENR	A	0.78	0.86	171
	F	0.70	5.80	116
Hiley	S และ H	0.27	1.40	50
	F	0.37	2.40	116
Janbu	S และ H	0.25	2.30	78
	F	0.22	2.00	116
Denish	S และ H	0.25	2.00	78
	F	0.30	2.30	123
Gates	O และ F	0.35	2.30	55

หมายเหตุ A = Agerschu (1962)

F = Flaate (1964)

S และ H = Sorensen and Hansen (1957)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงถึงการกระจายของข้อมูล ถ้ามีค่าน้อยจะกระจายน้อย หรือมีความหนาแน่นสูง

2.6 การหาแรงต้านของเข็มโดยวิธีสแตติกส์ (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

การคำนวณแรงต้านของเสาเข็ม โดยอาศัยคุณสมบัติความแข็งแรงของชั้นดินที่อยู่โดยรอบ และที่ปลายของเสาเข็ม เป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ โดยเฉพาะเมื่อทราบลักษณะชั้นดินจากการสำรวจ และทดสอบคุณสมบัติในบริเวณที่จะทำการก่อสร้าง

หลักการของการคำนวณคือ สมมุติให้เข็มรับแรงต้านถึงจุดสูงสุด (Ultimate Capacity) ซึ่งหมายความว่า ดิน โดยรอบและปลายเสาเข็มเกิดการเคลื่อนพัง (Failure) แล้ว (ดังเช่นในรูปที่ 2.2 ค) จึงคำนวณย้อนกลับไปว่า จะเป็นน้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็ม, P_u เท่าใดจึงสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเหล่านี้ คือ

$$P_u = f(c, \theta, \gamma, B, L, \text{อื่น ๆ}) \quad (2.2)$$

โดย

c = ความเหนียวของดิน

θ = มุมเสียดทานภายในของดิน

γ = ความหนาแน่นของดิน

B = ขนาดของเสาเข็ม

L = ความยาวเสาเข็ม

เมื่อนำไปใช้ออกแบบ จะต้องมียัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) มาทอน แรงต้านสูงสุดลงไปเป็น “แรงต้านปลอดภัย” (Safe หรือ Allowable Pile Capacity), P_a โดยใช้หลักพิจารณาคือ

$$P_a = \frac{P_u}{F.S.} \quad (2.3)$$

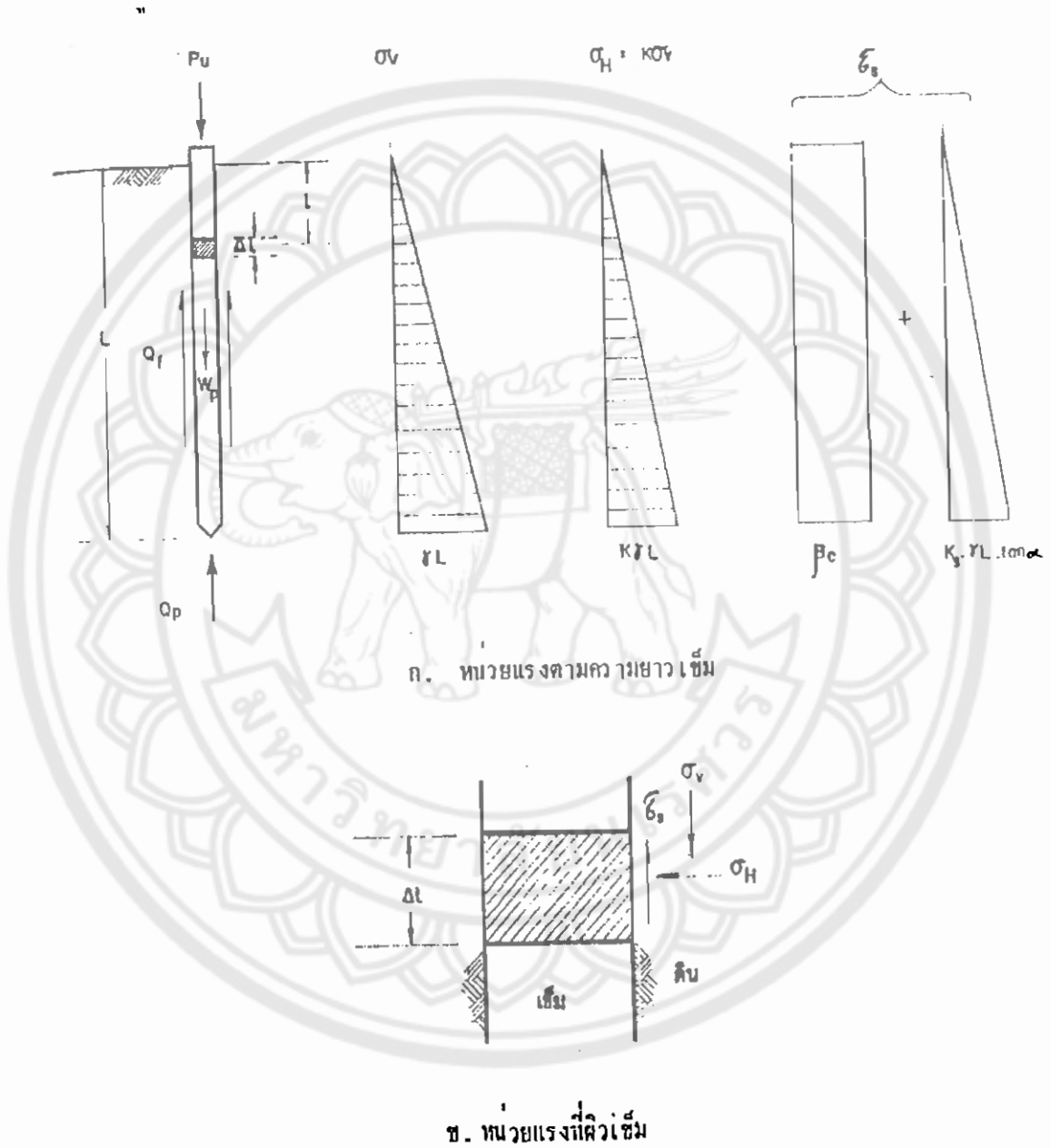
ค่า F.S. นั้น ส่วนมากอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 3.0

ในกรณีที่พิจารณาน้ำหนักของเสาเข็มมาร่วมด้วย จะต้องหักน้ำหนักเข็มออกไปเสียก่อนที่จะหารด้วยอัตราส่วนปลอดภัย คือ

$$P_a = \frac{(P_u - W_p)}{F.S.} \quad (2.4)$$

เมื่อ w_p = น้ำหนักของเสาเข็ม

หลักทั่วไปในการหาแรงต้านของเข็มเดี่ยวถ้าเราพิจารณากรณีตัวอย่างที่ง่ายที่สุดคือเสาเข็มเดี่ยวจมอยู่ในมวลดินสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การรับแรงต้านของเข็มเดี่ยว (อ้างอิง คร. วรากร ไม่เรียง)

แรงต้านของชั้นดินคอเสาเข็ม จะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

- แรงต้านที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction), Q_f
- แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing), Q_p

ดังนั้น $P_u = Q_f + Q_p - W_p$

แรงต้านที่ผิวเสาเข็ม

หน่วยแรงต้านที่ผิวเสาเข็ม เกิดจากความฝืดระหว่างผิวของเข็ม และดินบริเวณรอบข้าง ซึ่งจากรูปที่ 2.10 ณ ส่วนใดๆ ของเสาเข็ม จะสามารถหาได้เป็น

$$\tau_s = \beta \cdot C + K \cdot \gamma L \cdot \tan \alpha \quad (2.5)$$

และถ้าเรารวมหน่วยแรงจากความฝืดทั้งหมดรอบผิวเสาเข็มแล้วก็จะได้แรงต้านที่ผิวเสาเข็มทั้งหมดคือ

$$Q_f = \int \tau_s \cdot \partial A_s \quad (2.6)$$

หรือ

$$Q_f = \tau_a \cdot L_s \cdot L \quad (2.7)$$

เมื่อ

L_s = ความยาวเส้นรอบรูปของเสาเข็ม

L = ความยาวเสาเข็ม

$$\partial A_s = L_s \cdot \partial L$$

τ_s = หน่วยแรงต้านที่ผิวเข็มที่ตำแหน่ง L จากผิวดินจากสมการที่ 2.5

τ_a = หน่วยแรงต้านที่ผิวเฉลี่ยได้จากการอินทิเกรตสมการ (2.6)

$$= \beta C + \frac{K \gamma L}{2} \tan \alpha$$

β = สัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวของผิวเข็มและดินรอบข้างเป็นอัตราส่วนของค่า c แสดง

ในรูปที่ 2.11

K_s = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของดินรอบผิวเข็ม

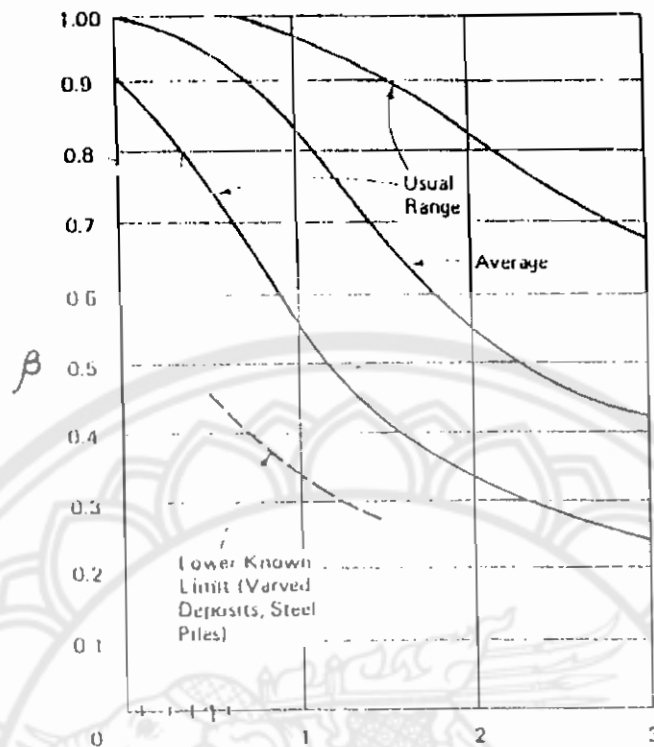
γ = หน่วยน้ำหนักของดินรอบเข็ม

α = มุมความเสียดทานระหว่างผิวเข็มและดินรอบข้าง ซึ่งมักจะน้อยกว่าค่ามุม

แต่ในทางปฏิบัติแล้ว สมการที่ 2.7 จะถูกทอนให้ง่ายลง โดยมีจะแยกคำนวณเป็นชั้นดินเหนียว

หรือดินทรายแต่เพียงอย่างเดียว โดยเหตุผลที่ว่า

ในดินเหนียวอิมตัวการเคลื่อนพังจะเกิดรวดเร็ว ความดันน้ำโดยรอบไม่สามารถไหลออกไปได้ทัน จึงทำให้เกิดสถานะ “Undrained” ขึ้น และทำให้ค่า $\theta = 0$



รูปที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์ β และ C ของดินเหนียว (อ้างอิง คร. วรากร ไม้เรียง)

ตารางที่ 2.7 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเข็ม K_s และมุม α ของดินทราย (อ้างอิง Tomlinson, 1974)

ลักษณะเข็ม	มุมเสียดทาน α	สัมประสิทธิ์ K_s	
		$N < 20$	$N > 20$
เข็มเหล็ก	20°	0.5	1.0
เข็มคอนกรีต	0.75 θ	1.0	2.0
เข็มคอนกรีตหล่อในที่	1.00 θ	1.0	2.0
เข็มไม้	0.67 θ	1.5	4.0

ในขณะที่ดินทราย ความเหนียว (Cohesion), e จะมีค่าเท่ากับ 0 คงเหลือแต่ความเสียดทาน α เท่านั้น

ส่วนดินที่มีคุณสมบัติที่อยู่ระหว่างดินเหนียว และดินทราย จะต้องดูผลจากการทดสอบค่าความแข็งแรงจาก Direct Shear หรือ Triaxial Test เพื่อวินิจฉัยโดยละเอียดต่อไป

ดังนั้นในกรณีดินเหนียว สมการ (2.7) จึงอาจตัดทอนเหลือ

$$Q_f = \beta C \cdot L_s \cdot L \quad (2.8)$$

และในกรณีดินทรายคงเหลือเพียง

$$Q_f = K_s \cdot \frac{\gamma L}{2} \cdot \tan \alpha \quad (2.9)$$

แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม สามารถคำนวณได้จากหลักการเช่นเดียวกับฐานรากระดับตื้น

กล่าวคือ

$$Q_p = A_p \cdot q_u \quad (2.10)$$

เมื่อ A_p = พื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพที่ปลายเสาเข็ม

q_u = หน่วยแรงต้านของชั้นดินที่ปลายเสาเข็ม มีค่าคำนวณได้จาก

$$= CN_c + qN_q + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma$$

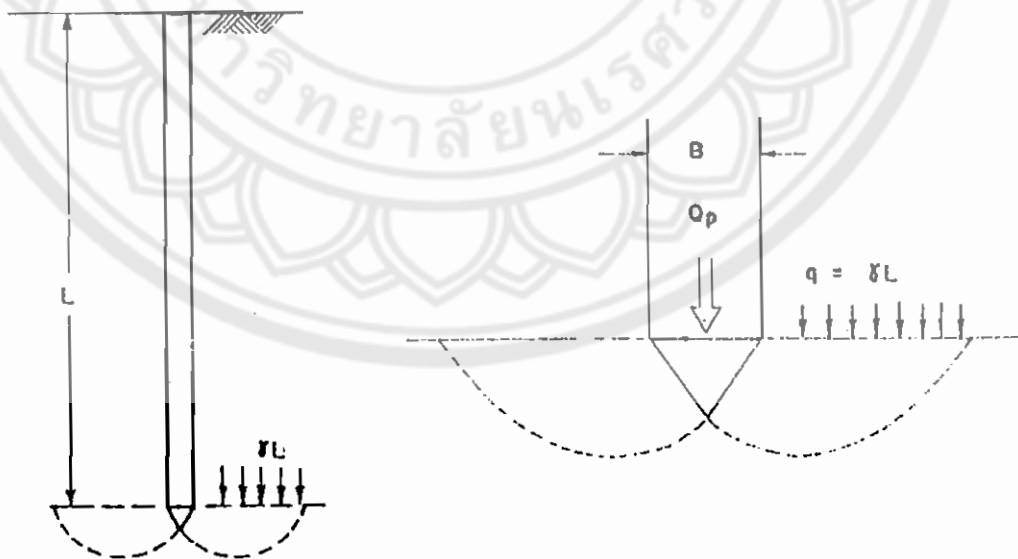
จากรูปที่ 2.12 เมื่อปลายเข็มอยู่ที่ระดับลึกมาก เมื่อเทียบกับฐานรากระดับตื้น ดังนั้นค่า $q = L \cdot \gamma$ จึงมีค่าสูง ในขณะที่ปลายเข็ม (B) ค่าน้อย และในดินเหนียวค่า $\theta \approx 0$

ในกรณีดินเหนียว

$$q_u = 5.14C \quad (2.11)$$

ในกรณีดินทราย

$$q_u = L \cdot \gamma \cdot N_q \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.12 แรงต้านที่ปลายเข็ม (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

ดังนั้นสมการที่ 2.10 เมื่อแทนค่า Q_f และ Q_p ของดินเหนียวและดินทรายชั้นเดียวเข้าไป จึงเป็น

สำหรับดินเหนียว

$$P_u = \beta C \cdot L_s \cdot L + 5.14 C \cdot A_p - W_p \quad (2.15)$$

สำหรับดินทราย

$$P_u = K_s \cdot \frac{\gamma L}{2} \cdot \tan \alpha + \gamma L \cdot N_q - W_p \quad (2.16)$$

แรงต้านของเสาเข็มบนดินหลายชั้น

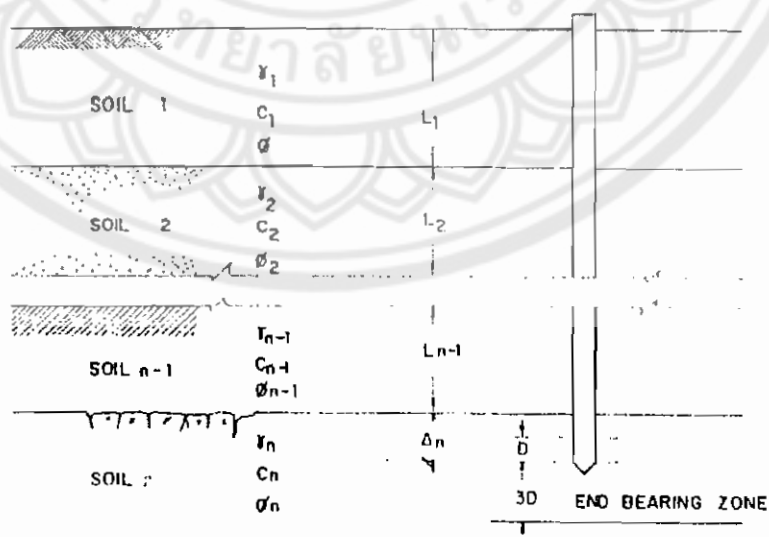
ในชั้นดินธรรมชาติมักจะพบว่าตลอดความยาว เสาเข็มพบชั้นดิน ซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปหลาย ๆ ชั้น โดยเฉพาะในดินตะกอนที่เกิดขึ้นตามลุ่มแม่น้ำ เสาเข็มจะต้องหยั่งลงไป ผ่านชั้นดินอ่อนลงไปจนกระทั่งถึงดินแข็ง เพื่อจะให้มีการถ่ายน้ำหนักจากสิ่งก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยทั่ว ๆ ไป ปลายเข็มควรจะจมอยู่ในชั้นดินแข็ง ประมาณ 1 – 3 เท่าของขนาดเข็ม เพื่อให้การถ่ายน้ำหนักที่ปลายเข็มเป็นไปได้เต็มที่ แต่จะมีขอยกเว้นในบางกรณีต่อไป ซึ่งปลายเข็มไม่สามารถหยั่งลงไปได้มากนัก คือ

ก. เมื่อชั้นแข็งข้างล่างเป็นหิน

ข. เมื่อเป็นเข็มตอกที่ปลายป้าน

ค. เมื่อจำนวนครั้งของการตอกมากกว่า 100 ครั้งต่อ 20 ซม. หรือ 10 ต่อ 1 ซม. ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวในเนื้อเข็มเอง และจะเป็นผลเสียเนื่องจากการเข่นมากจนเกินไป

ปัญหาดังกล่าวข้างต้นมักจะเกิดขึ้น เฉพาะเข็มตอกเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องพยายามระบุข้อกำหนดในการตอกให้พอเหมาะ



รูปที่ 2.13 เสาเข็มในดินหลายชั้น (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

ในการคำนวณแรงต้าน ก็จะต้องพิจารณาคุณสมบัติของดินทุก ๆ ชั้นที่เกี่ยวข้องดังในรูปที่ 2.13 และแรงต้านของเสาเข็มที่เกิดขึ้นที่ผิวเข็ม ก็คือผลบวกแรงต้านที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นรวมกันซึ่งอาจเขียนได้เป็น

$$Q_f = L_s \sum_{i=1}^n (\beta_i \cdot C_i \cdot L_i) + (K_{si} \cdot \bar{P}_{vi} \cdot \tan \alpha_i) \quad (2.15)$$

เมื่อ n = จำนวนชั้นของดินตลอดความยาวเสาเข็ม

\bar{P}_{vi} = หน่วยแรงกดประสิทธิผลในแนวตั้งเฉลี่ยในดินแต่ละชั้น
และแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม เมื่อชั้นดินที่ปลายเข็มเป็นดินเหนียว

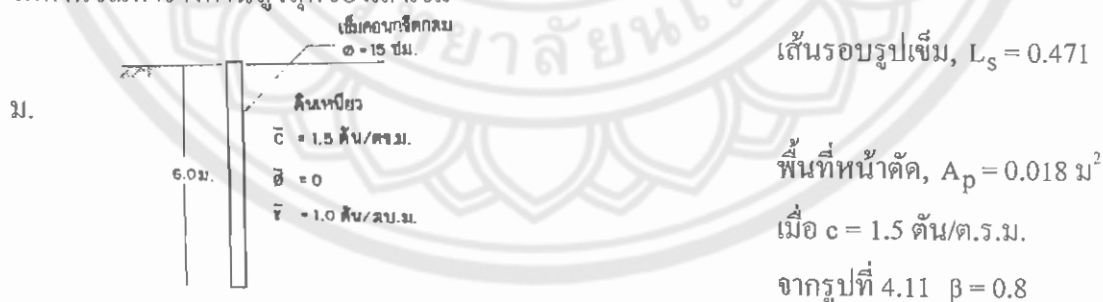
$$Q_p = A_p \cdot (5.14C_n) \quad (2.16)$$

เมื่อ C_n เป็น Cohesion ของดินชั้นล่างสุดที่ปลายเข็มในช่วง 4D และสำหรับดินทราย

$$Q_p = A_p \cdot \bar{P}_{vn} \cdot N_{qn} \quad (2.17)$$

เมื่อ \bar{P}_{vn} เป็นหน่วยแรงกดประสิทธิผลในแนวตั้งที่ระดับปลายเข็ม

ตัวอย่างที่ 2.1 เข็มคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ยาว 6 เมตร คอกลงในชั้นดินเหนียวดังรูป ให้คำนวณหารางต้านสูงสุดของเสาเข็ม



รูปที่ 2.14 รูปประกอบตัวอย่าง

จากสมการ (2.13) เมื่อไม่คิดน้ำหนักเข็ม

$$P_u = \beta C \cdot L_s \cdot L + 5.14 C \cdot A_p$$

แทนค่า ; $P_u = 0.8 \times 1.5 \times 0.471 \times 6 + 5.14 \times 1.5 \times 0.018$
 $= 3.39 + 0.139 = 3.53$ ตัน



จะเห็นได้ว่าแรงต้านส่วนที่ปลายเข็ม มีค่าเพียง 3.9 % ของแรงต้านทั้งหมด ในกรณีเช่นนี้จึงสามารถ
เรียกว่า “Friction Pile” และมีจะตัดส่วนของแรงต้านที่ปลายเข็มทิ้งไปได้ คงเหลือ

๑๐ ต.ย. ๒๕๖๓
๕๘๔๐๐๙๔

$$P_u = \beta C \cdot L_s \cdot L \quad (2.18)$$

2.7 การหาแรงต้านของเสาเข็มโดยเทศบัญญัติกรุงเทพมหานคร (อ้างอิง พ.ศ. ๒๕๒๒)

กรุงเทพมหานครได้ตราพระราชบัญญัติว่าด้วยการควบคุมการก่อสร้างอาคาร พ.ศ. ๒๕๒๒
ได้กำหนดวิธีการคำนวณแรงต้านของเสาเข็ม ในบริเวณเขตกรุงเทพฯ ฯ เมื่อมีได้มีข้อมูลการสำรวจ
ดินไว้ดังนี้

“ข้อ ๖.๗ หมวด ๖ กำลึงวัตถุและน้ำหนักบรรทุก

ในการคำนวณฐานรากบนเสาเข็ม ถ้าไม่มีเอกสารผลการทดสอบคุณสมบัติดิน และกำลึง
แบกทานสูงสุดของเสาเข็มให้ใช้ค่าหน่วยแรงฝืดของดิน ดังนี้

(๑) สำหรับดินที่อยู่ในระดับลึกไม่เกิน ๗ เมตร ได้ระดับน้ำทะเลปานกลาง ให้ใช้ค่าหน่วย
แรงฝืดของดินได้ไม่เกิน ๖๐๐ กิโลกรัมต่อหนึ่งตารางเมตรของผิวประสิทธิผลของเสาเข็ม

(๒) สำหรับดินที่มีความลึกเกินกว่า ๗ เมตร ได้ระดับน้ำทะเลปานกลาง ค่าหน่วยแรงฝืดของ
ดินเฉพาะส่วนที่ลึกเกินกว่า ๗ เมตร ลงไปให้คำนวณตามสมการต่อไปนี้

หน่วยแรงฝืด เป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตร = ๘๐๐+๒๐๐ (ย).

ย. = ความยาวของเสาเข็มเป็นเมตรเฉพาะส่วนที่ลึกเกินกว่า ๗ เมตร ได้ระดับน้ำทะเลปาน
กลาง”

ข้อความข้างบนดังกล่าว สามารถประยุกต์ใช้ได้กับชั้นดินบริเวณกรุงเทพฯ ฯ และจังหวัด
ใกล้เคียงซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกันเท่านั้น แต่ถึงอย่างไรก็ตาม วิศวกรที่นำเทศบัญญัตินี้ไปใช้งาน
จะต้องพึงระลึกเสมอว่า เทศบัญญัติเป็นข้อแนะนำโดยประมาณเท่านั้น ถ้าโครงการใดสามารถทำ
การสำรวจ ดินหรือทดสอบเสาเข็มได้ ควรเลือกใช้วิธีหลังดีกว่า โดยส่งเอกสารไปประกอบการ
พิจารณาขอใบอนุญาตปลูกสร้าง จากกรุงเทพมหานคร เพื่อเป็นหลักฐาน

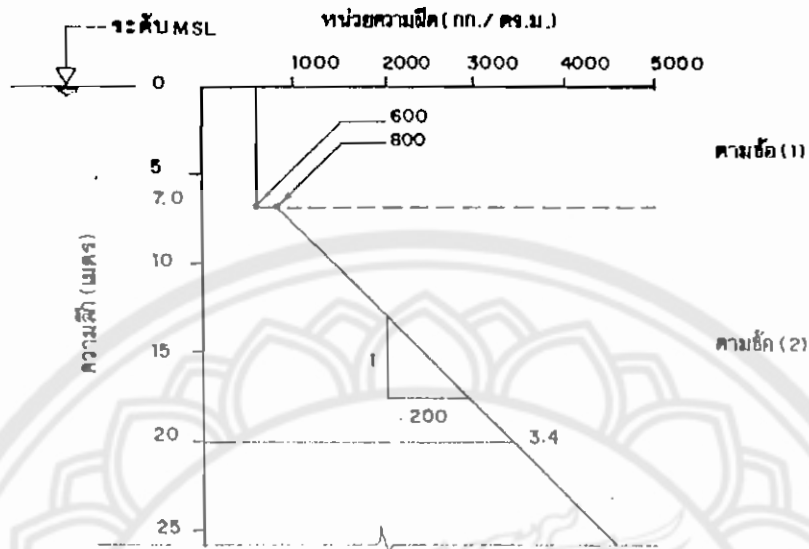
จากเทศบัญญัตินี้ดังกล่าวข้างต้น จะสามารถเขียนเป็นไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงของหน่วย
แรงฝืดได้ดังรูปที่ ๒.๑๔

ข้อที่น่าสังเกตเกี่ยวกับบัญญัติ คือ

ก. แรงต้านที่คำนวณได้จากหน่วยแรงฝืดที่กำหนด เป็นแรงต้านปลอดภัย

ข. แรงต้านที่ปลายเสาเข็มไม่นำมาคิด

ค. เมื่อเข็มมีความยาวกว่าชั้นดินเหนียวแข็ง ซึ่งอยู่ประมาณ 20 – 30 เมตร จะเกิดความคลาดเคลื่อนสูง เพราะไม่ได้นำแรงต้านของชั้นทรายมาคิดด้วย



รูปที่ 2.15 ค่าหน่วยความฝืดบนผิวเข็มตามเทศบัญญัติ ก.ท.ม.(อ้างอิง ดร. วรากร ไม่เรียง)

ตัวอย่างที่ 2.2 ให้คำนวณแรงต้านของเข็มสี่เหลี่ยมขนาด 35×35 ซม. ยาว 25 เมตร จากรูปที่ 2.14 จากความลึก 0 – 7 เมตร

$$Q_f(0-7) = 7 \times 1.4 \times 0.6 = 5.88 \text{ ตัน}$$

จากความลึก 7 – 25 เมตร

หน่วยความฝืดที่ 7 เมตร = 0.8 ตัน/ตร.ม.

" 25 เมตร = 4.4 "

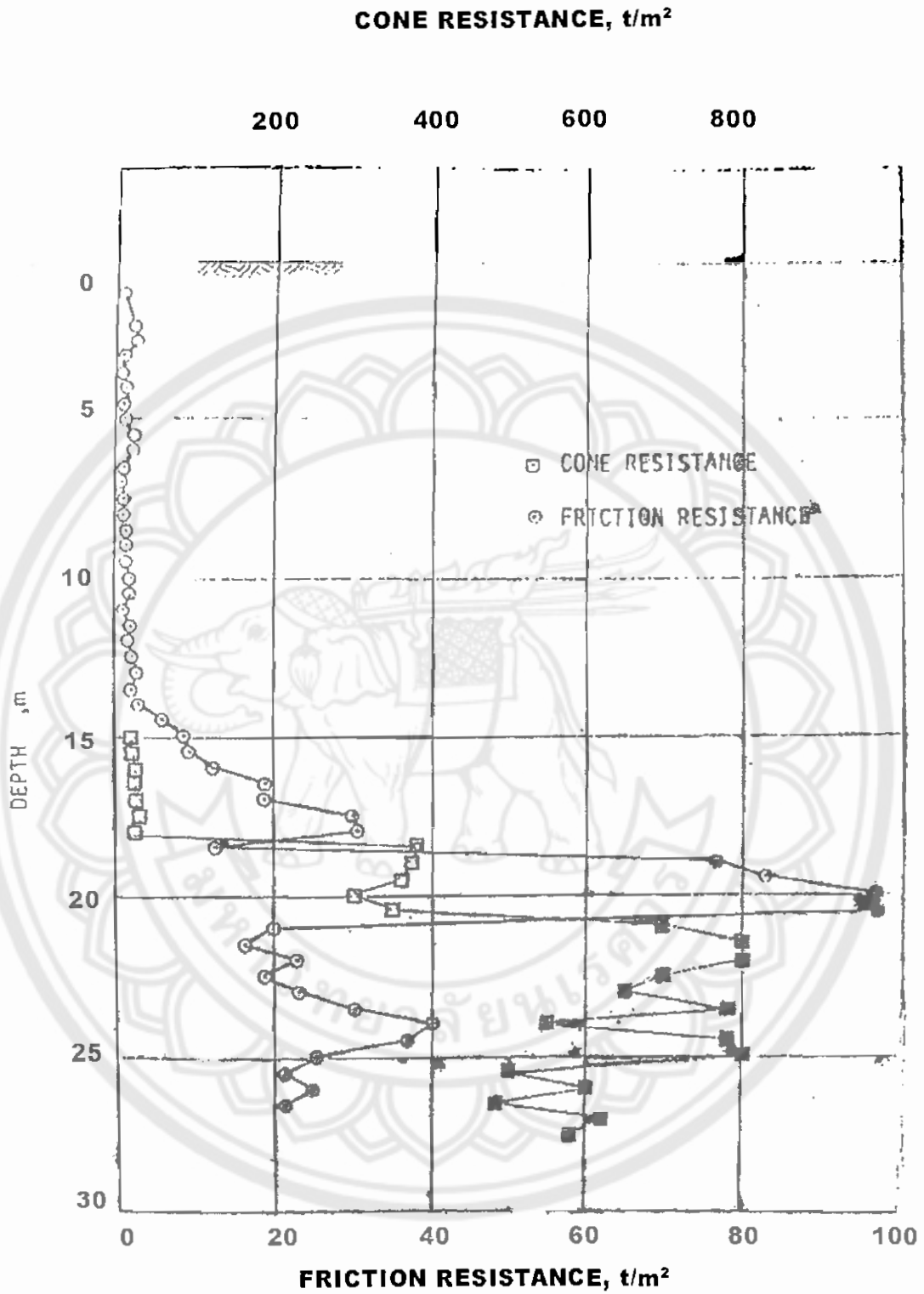
" เฉลี่ย = 2.6 "

$$\therefore Q_f(7-25) = 18 \times 1.4 \times 2.6 = 65.52 \text{ ตัน}$$

$$\therefore \text{แรงต้านปลอกกั๊วรวม} = 71.40 \text{ ตัน}$$

2.8 การหาแรงต้านเสาเข็มโดยข้อมูลจาก Dutch Cone Penetration

การออกแบบฐานรากเสาเข็ม โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการหยั่งชั้นดินด้วยเครื่องมือ Dutch Cone Penetration ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากประเทศเนเธอร์แลนด์ เริ่มเข้ามาใช้ในไทยเมื่อราวปี พ.ศ. 2515 โดยเครื่องมือดังกล่าวมีลักษณะการวัดแรงต้านของชั้นดินด้วยการกดหัวกรวย และปลอกคล้ายกันแรงต้านที่ปลายเข็ม และผิวเข็ม ดังนั้นการนำข้อมูลมาประยุกต์ในการคำนวณการแรงต้าน



รูปที่ 2.17 แรงต้านของชั้นดินจากการหยั่งด้วย Dutch Cone Penetrometer (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

ตารางที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์ α และ λ ของดินกรุงเทพฯ(อ้างอิง ดร.วรากร ไม้เรียง)

ผู้ศึกษา	ดินอ่อน	ดินปาน	ดินแข็ง	ทราย	ดินเหนียว	ทราย
	กลาง					
- Nam. (1972)	1.4	1.4	0.7	-	0.33	1.0
- อภิชัย จุฑะสิริวงศ์ (1972)	1.0	1.0	1.0	1.0	0.33	1.0
- เรืองวิทย์ โชติวิทยธานินทร์ (1976)	1.0	0.7	0.5	0.5	0.33	0.5
- ชูเกียรติ โพธาณูวัฒน์ (1979)	1.0	0.7	0.5	0.8	0.33	0.5

ตัวอย่างที่ 2.3 จากข้อมูลการหยั่งชั้นดินด้วย Dutch Cone Penetrometer ในรูปที่ 2.16 ให้คำนวณหาแรงต้านของเสาเข็ม ดังต่อไปนี้

- เข็มสี่เหลี่ยมคี่ขนาด 35 x 35 ซม. ปลายเข็มที่ระดับ 20 เมตร
- เข็มสี่เหลี่ยมคี่ขนาด 52.5 x 52.5 ซม. ปลายเข็มที่ระดับ 21 เมตร
- เข็มเจาะกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ซม. ปลายเข็มที่ระดับ 25 เมตร

จากสมการ $Q_f = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot q_{fi} \cdot l_i \cdot P)$ และ $Q_p = \lambda A_p \cdot q_c$ สามารถคำนวณเป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 2.8 ตารางแสดงรายการคำนวณ (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

ค่าที่คำนวณ	35 x 35	52.5 x 52.5	เข็มเจาะ $\phi 50$
	ยาว 20 ม.	ยาว 21 ม.	ยาว 20 ม.
- ชั้น Soft Clay (0-14.0 ม.)			
α_1	1.0	1.0	1.0
q_{fi}	1.67	1.67	1.67
l_1	14.0	14.0	14.0
P	1.40	2.10	1.57
$\therefore Q_{fi} = \alpha_1 \cdot q_{fi} \cdot l_1 \cdot P_1$	32.73	49.10	36.71

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) ตารางแสดงรายการคำนวณ (อ้างอิง คร. วรากร ไผ่เรียง)

ที่คำนวณ	35 x35	52.5 x 52.5	เข็มเจาะ $\phi 50$
	ยาว 20 ม.	ยาว 21 ม.	ยาว 20 ม.
- ชั้น Medium Clay (14.0-18.0 ม.)			
α_2	0.7	0.7	0.7
q_{f2}	15.73	15.73	15.73
l_2	4.0	4.0	4.0
P	1.40	2.10	1.57
$\therefore Q_{f2} = \alpha_2 \cdot q_{f2} \cdot l_2 \cdot P_1$	61.66	79.28	69.15
- ชั้น Stiff Clay (18.0-Pile Tip)			
α_3	0.5	0.5	0.5
q_{f3}	71.47	71.47	71.47
l_3	2.0	3.0	2.0
P	1.40	2.10	1.57
$\therefore Q_{f3} = \alpha_3 \cdot q_{f3} \cdot l_3 \cdot P$	100.06	225.13	112.21
$\therefore \sum Q_f = Q_{f1} + Q_{f2} + Q_{f3}$	194.45	353.51	218.07
แรงต้านที่ปลายเข็มในช่วง 4B (จากปลายเข็มลงไป 3B)			
λ	0.33	0.50	0.30
A_p	0.1225	0.2756	0.1964
q_c	450	540	450
$\therefore Q_p = \lambda A_p \cdot q_c$	18.38	74.41	26.51
แรงต้านรวม			
$Q = Q_f + Q_p$ (ตัน)	212.83	427.92	244.58
น้ำหนัก, W_p (ตัน)	5.88	10.33	9.42
Net $Q_u = Q_u - W_p$ (ตัน)	206.95	417.59	235.16
$Q_a = \frac{\text{Net } Q_u}{2.5}$ (ตัน)	82.78	167.04	94.06

2.9 การหาแรงต้านเสาเข็มโดยข้อมูลจากการตอกทดลอง (Standard Penetration Test)

(อ้างอิง ดร.วรากร ไม้เรียง)

ในกรณีโครงการก่อสร้างขนาดกลางและขนาดเล็ก การสำรวจโดยการเจาะสำรวจและการเก็บตัวอย่างดินคงสภาพมาทดสอบหาค่า C และ ϕ อาจไม่คุ้มค่างับราคางาน เช่นเดียวกับในชั้นดินทรายหรือหินผุ การเก็บตัวอย่างคงสภาพทำได้ยาก การสำรวจจึงต้องมักอาศัยวิธีตอกทดลอง (Standard Penetration Test) หรือ SPT. โดยการวัดแรงต้านดินโดยการตอกหยั่ง ด้วยลูกตุ้มซึ่งมีระยะยกมาตรฐาน ผลที่ได้คือ จำนวนครั้งการตอกให้หัวจมนลงไป 30 เซนติเมตร ซึ่งเรียกว่า Blow Count หรือ N (blows/ ft)

ตัวอย่างผลการสำรวจชั้นดิน โดยการตอกทดลอง สามารถนำมาใช้คำนวณแรงต้านเสาเข็มได้ 2 ลักษณะ

ก. นำค่า N ไปแปลงเป็นค่าประมาณของ N หรือ ϕ โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางสถิติของข้อมูลที่มีอยู่ และคำนวณด้วยวิธีสถิตติคส์ (Static Method)

ข. นำค่า N ไปออกแบบโดยตรง ด้วยวิธีของ Meyerhof

วิธีการหาค่า SPT โดย Meyerhof

นอกจากการสังเกตความสัมพันธ์ระหว่าง SPT และการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มสามารถใช้ในการคำนวณพื้นฐาน ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่มีแรงยึดเหนี่ยวน้อย ทั้ง 2 ความสัมพันธ์นี้นำไปสู่การวิเคราะห์ การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มได้หลายวิธีในสภาพดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวน้อยในระดับต่างๆ ซึ่งวิธีการของ Meyerhof สามารถใช้ง่ายและง่ายต่อการเข้าใจ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าพื้นฐานเท่านั้น และจะไม่ใช้หาค่า Final Design เพราะวิธีการคำนวณหาค่า SPT Test Data จะได้รับผลกระทบจากหลายๆปัจจัย

Meyerhof กล่าวว่าแรงต้านทานเฉลี่ยที่จะทำให้เสาเข็มเคลื่อนตัว เช่น ปลายเสาเข็มและเสาเข็มหล่อสำเร็จ ในหน่วย kPa ดังนี้

$$f_s = 2\bar{N}' \leq 100 \text{ kPa}$$

แรงต้านทานเฉลี่ยในกรณีที่เสาเข็มไม่มีการเคลื่อนไหว เช่นเสาเข็มรูปตัว H ในหน่วย kPa คือ

$$f_s = \bar{N}' \leq 100 \quad \text{kPa}$$

เมื่อ \bar{N}' คือค่า SPT ที่ปรับแก้แล้วในหน่วยครั้งต่อ 300 มม. ตามยาวของเสาเข็ม เดิม ลักษณะจะแสดงความหนาของชั้นดินที่ระดับความหนา 3-6 ม. และแรงต้านทานเฉลี่ยสามารถหาได้จากชั้นดินแต่ละชั้น

Meyerhof กล่าวว่า toe Resistant (q_t) ในหน่วยของ kPa สำหรับเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินทรายและกรวด ซึ่งจะหาได้จาก สูตร

$$q_t = 400 \bar{N}'_O + \left(\frac{40 \bar{N}'_B - 40 \bar{N}'_O}{b} \right) D_B \leq 400 \bar{N}'_B$$

เมื่อ \bar{N}'_O = ค่า N' ปรับแก้สำหรับชั้นดินด้านบน
 \bar{N}'_B = ค่า N' ปรับแก้สำหรับชั้นดินด้านล่าง
 D_B = ความลึกของปลายเสาเข็มที่ฝังอยู่ (เมตร)
 b = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (เมตร)

สมการข้างบนใช้ก็ต่อเมื่อ Pile toe ซึ่งตั้งอยู่กับชั้นดิน 2 ชั้น คือชั้นหินกับดินอ่อน

สำหรับเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินจะมีค่า Cohesion น้อยและสมำเสมอใช้สมการ

$$q_t = \frac{40 \bar{N}'_B D_B}{b} \leq 400 \bar{N}'_B$$

กล่าวคือ ค่า N' เฉลี่ยที่ปรับแก้ \bar{N}'_B จะหาได้จากค่าเฉลี่ย N' ภายในบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ซึ่งต่ำกว่า Pile toe สำหรับเข็มที่อยู่ในชั้นดิน non - plastic silts Meyerhof ได้แนะนำแรงต้านทานปลายเสาเข็ม q_t ซึ่งมีค่าน้อยกว่า \bar{N}'_B ซึ่งสามารถแทนที่ $400 \bar{N}'_B$ ในสมการด้านบน

ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูล SPT (อ้างอิง Federal Highway Administration)

ขั้นตอนที่ 1 การหาค่า N สำหรับแรงดันดิน ใช้ Factor ที่ถูกต้องมาเพื่อปรับแก้ค่า N'

ขั้นตอนที่ 2 หาค่า N' ที่ถูกต้องในแต่ละชั้นดินจากความยาวของเสาเข็มจะบอกถึงลักษณะของดินแต่ละชั้นสามารถทำให้ทราบถึงความหนาแน่นของดินนั้นก็คือ ค่า N' ในชั้นดินแต่ละชั้นควรจะเลือกความหนา 3-6 เมตร

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าแรงต้านทานด้านข้างของ f_s (kPa)

สำหรับเข็มที่มีการเคลื่อนตัวใช้สูตร $f_s = 2\bar{N}' \leq 100$ kPa

สำหรับเข็มที่ไม่มีการเคลื่อนตัวใช้สูตร

$$f_s = \bar{N}' \leq 100 \text{ kPa}$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความต้านทานสุทธิ Q_s (kN)

$$Q_s = f_s A_s$$

เมื่อ A_s = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

ขั้นตอนที่ 5 หาค่า SPT, N' , \bar{N}'_B , \bar{N}'_O ที่ปลายเสาเข็ม

ในกรณีที่ปลายเสาเข็มอยู่ระหว่างชั้นดินอ่อนสามารถที่จะคำนวณหาค่า SPT ที่ถูกต้องหรือค่า N' สำหรับค่า bearing ชั้นดินด้านบน และชั้นดินปรับแก้สำหรับชั้นดินด้านล่าง \bar{N}'_B

ในดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำก็สามารถหาค่า N' โดยที่ ค่า N' เฉลี่ยมีขนาด 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งจะอยู่ตำแหน่งต่ำกว่าปลายเข็ม 3 เท่า

ขั้นตอนที่ 6 หาค่าแรงต้านทานของปลายเข็ม q_t สำหรับชั้นดินอ่อน

$$q_t = 400 \bar{N}'_O + \left(\frac{40 \bar{N}'_B - 40 \bar{N}'_O}{b} \right) D_B \leq 400 \bar{N}'_B$$

สำหรับเข็มที่วางอยู่ในชั้นดินที่มีค่าแรงยึดเหนี่ยวดินน้อย

$$q_t = \frac{40 \bar{N}'_B D_B}{b} \leq 400 \bar{N}'_B$$

สำหรับเข็มที่อยู่ในชั้นดิน Non - plastic silts Meyerhof ได้แนะนำแรงต้านทานปลายเสาเข็ม q_t โดยใช้ $300 \bar{N}'_B$ แทนที่ $400 \bar{N}'_B$

ขั้นตอนที่ 7 หาค่าแรงต้านทานปลายเสาเข็มสุทธิ (Q_t) (kN)

$$Q_t = q_t A_t$$

เมื่อ A_t คือพื้นที่หน้าตัดปลายเสาเข็ม

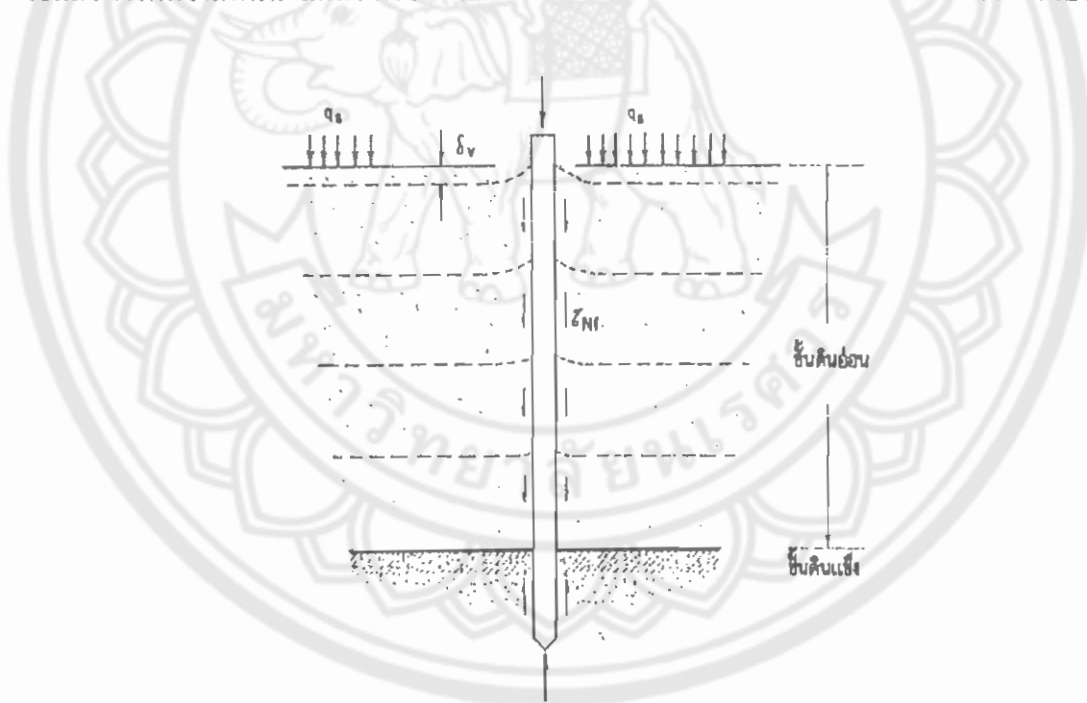
ขั้นตอนที่ 8 หากำลังรับน้ำหนักดินสุทธิ (Q_u) (kN)

$$\text{คังนั้น } Q_u = Q_s + Q_t$$

2.10 แรงดูดลงของเข็มในชั้นดินอ่อน (Negative Skin Friction)(อ้างอิง ดร.วรากร ไม้เรียง)

เป็นทราบกันอยู่แล้วว่า เข็มที่ผ่านชั้นดินเหนียวอ่อน และปลายเหล็กอยู่ในชั้นดินแข็ง เมื่อมีการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนมากกว่าการเคลื่อนตัวของเข็มก็จะเกิดแรงดูดลงที่ถ่ายจากดินอ่อนมาบรรทุกเพิ่มบนเสาเข็มอีกส่วนหนึ่งด้วยซึ่งเรียกว่า “Negative Skin Friction” วิศวกรจึงต้องสามารถประมาณค่าแรงส่วนนี้เพื่อจะเผื่อเพิ่มเข้าไปในการออกแบบ หรือหาวิธีป้องกันมิให้เกิดขึ้นได้

การทรุดตัวในชั้นดินอ่อนที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดูดเสาเข็มนี้ อาจเกิดได้จากสาเหตุดังต่อไปนี้ คือ มีน้ำหนักบรรทุกกดทับบนผิวดิน เช่น ทรายถม หรือน้ำหนักอื่น ๆ มีการสูบน้ำใต้ดินไปใช้แล้วทำให้ความดันน้ำลดลง หรืออาจเกิดจากการกระทบกระเทือนชั้นดินจากการตอกเข็มก็เป็นไปได้

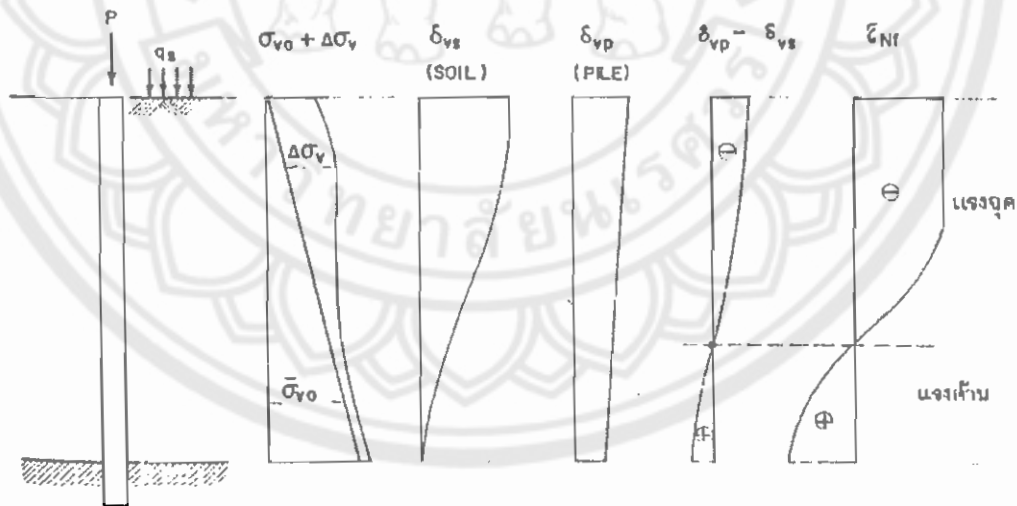


รูปที่ 2.18 การเกิดแรงดูดลงของเสาเข็มบนดินอ่อน (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

การคำนวณหาแรงจุด อาจทำได้ 2 ลักษณะ คือ

ก. กำหนดจากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเข็ม และดินรอบข้าง เมื่อดินเคลื่อนที่ลง หรือยุบตัวมากกว่า เข็มก็จะเกิดแรงจุดเกิดขึ้น มากหรือน้อยตามระดับความต่างของการเคลื่อนตัวจึงจำเป็นต้องทราบ คุณสมบัติการทรุดตัวของดิน และของเสาเข็มโดยละเอียด ประกอบกับความสัมพันธ์ ของ Shearing Stress และ Strain ของดินและผิวเข็ม จึงเป็นการยุ่งยากมาก จะใช้วิธีนี้ก็ต่อเมื่อมีความจำเป็นเท่านั้น โดยจะขอกกล่าวถึงขั้นตอนโดยย่อดังนี้

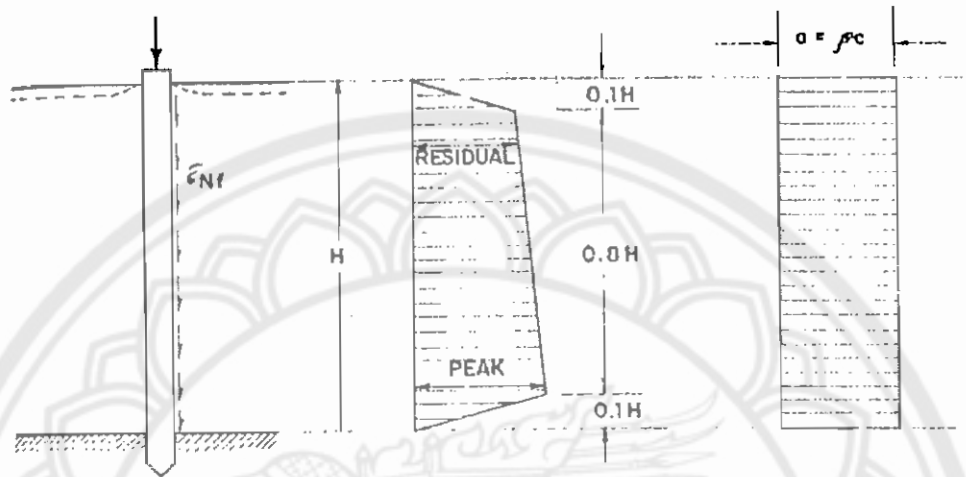
1. เขียนลักษณะชั้นดิน และเสาเข็มที่ยั่งในชั้นดิน รวมทั้งคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการทรุดตัว เนื่องจาก Consolidation และ Elastic Settlement ของดินและเข็ม
2. วิเคราะห์หาปริมาณการทรุดตัวของดินเนื่องจาก Consolidation และการหดตัวของเข็มเนื่องจาก น้ำหนักกด และการยืดหยุ่นของดินที่ปลายเข็ม
3. หาผลต่างของการเคลื่อนตัวของดิน และเสาเข็มที่ระดับต่าง ๆ ตามความลึกจนกระทั่งถึงจุดที่มีการเคลื่อนที่เท่ากัน
4. นำปริมาณการเคลื่อนที่ไปหาหน่วยแรงฝืดที่สัมพันธ์กัน จากข้อมูลการทดสอบความฝืด ระหว่างผิวเข็มและดิน แล้วจึงคำนวณและจุดที่เกิดขึ้นบนพื้นที่เสาเข็มทั้งหมด เป็นแรงจุดรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.19 การคำนวณแรงจุดโดยวิเคราะห์จากการเคลื่อนตัว (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

ข. การคำนวณค่าโดยประมาณ ซึ่งอาจทำได้โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- แรงจุดเกิดขึ้นในเฉพาะชั้นดินอ่อน
- หน่วยแรงจุดมีค่าเท่ากับทั้งหมดตลอดชั้นดินอ่อน และเท่ากับแรงฝืดที่ผิวเข็มตามสมมุติฐานนี้ สามารถเขียนได้ในรูปที่ 2.19 ซึ่งมีส่วนคล้ายกับการสำรวจจริงในสนาม (Tomlinson 1980)



ก. Tomlinson (1980)

ข. ค่าประมาณ

รูปที่ 2.20 การคำนวณแรงจุดโดยประมาณ (อ้างอิง ดร. วรากร ไม่เรียง)

จากรูปที่ 2.19 ข) ค่าประมาณของแรงจุดอาจคำนวณได้ดังนี้

$$N_f = \beta \cdot c \cdot L_s \cdot H \quad (2.25)$$

เมื่อ

β = สัมประสิทธิ์แรงยึดเหนี่ยวของผิวเข็มและดินในรูปที่ 2.11

c = ความเหนียวของดิน

L_s = เส้นรอบรูปประสิทธิผลของเสาเข็ม

ค. การคำนวณโดยใช้ค่าความฝืด

ถ้าแรงจุดบนเสาเข็มเกิดจาก Consolidation เป็นส่วนใหญ่แล้ว การนำเอาความฝืดที่เกิดขึ้นบนผิวเข็มมาคิดชดเชยเป็นไปไม่ได้ โดยในขณะนั้นถึงว่าดินอยู่ในสถานภาพ Drained มนุษย์ อารยะศิริ (2522) ได้คำนวณแรงจุดในการออกแบบเข็มในโครงการทางควนพิเศษ สายดินแดน-ท่าเรือ โดยใช้ความฝืดมาคิดคือ

$$T_f = \overline{\sigma}_v (K \tan \alpha) \quad (2.26)$$

เมื่อแทนค่าเฉลี่ยของ $\bar{\gamma}$ และ $K \tan \phi$ ของดินอ่อนกรุงเทพฯ เท่ากับ 0.6 และ 0.26 ตามลำดับและรวมหน่วยแรงจุดตลอดความเข็ม

$$N_f = 0.16 \frac{D_{sc}^2}{2} \cdot L_s \quad (2.27)$$

เมื่อ D_{sc} = ความหนาของชั้นดินอ่อนเป็นเมตร (ชั้นที่มีค่า $S_u < 5$ ตัน/ตร.ม.)

ตัวอย่างที่ 2.4 ความลึกชั้นดินอ่อน 15 เมตร ถ้าเข็มขนาด 40 x 4 ซม. สัมผัสดินตอกหยั่งลงถึงชั้นทราย จงหาค่าแรงจุด โดยวิธีของ มนูญ อริยะศิริ และถ้าทราบว่าแรงต้านทานสูงสุดของเสาเข็ม (Q_u) มีค่า 175 ตัน จงหาว่า แรงต้านปลอดภัยของเสาเข็มจะมีค่าเท่าใด โดยใช้ อัตราส่วนปลอดภัย (F.S.) = 2.5

จากสมการ (4.32) , $D_{sc} = 15$ เมตร, $L_s = 1.6$ เมตร

$$\begin{aligned} \therefore N_f &= 0.08 (15)^2 (1.6) \\ &= 28.8 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Net } Q_u &= Q_u - N_f \\ &= 175 - 28.8 = 146.2 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

$$\text{F.S.} = 2.5$$

$$\begin{aligned} \therefore Q_a &= \frac{\text{Net } Q_u}{2.5} = \frac{146.2}{2.5} \\ &= 58.48 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

2.11 การทดสอบเสาเข็มในสนาม (Pile Load Test) (อ้างอิง ดร.วรารกร ไม่เรียง)

ในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ที่ต้องใช้เข็มจำนวนมาก วิศวกรควรทำการทดสอบแ่งต้านของเข็มในสถานที่ก่อสร้างจริง จะเป็นประโยชน์ทั้งในการก่อสร้างและการแก้ไขแบบให้เหมาะสม ซึ่งหมายถึงค่าก่อสร้างอาจประหยัดลงได้ วัตถุประสงค์หลักในการทดสอบออกแบบเสาเข็มในสนามคือ

1. เพื่อเป็นการพิสูจน์แ่งต้านทานในสนามกับแ่งต้านที่ต้องการในการออกแบบซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลดิน โดยวิธีสะแตกคิดหรืออื่น ๆ ในกรณีนี้ ไม่จำเป็นต้องทดสอบถึงจุดพิบัติ อาจจะเป็นลองเท่าของแ่งในการออกแบบก็เพียงพอแล้ว

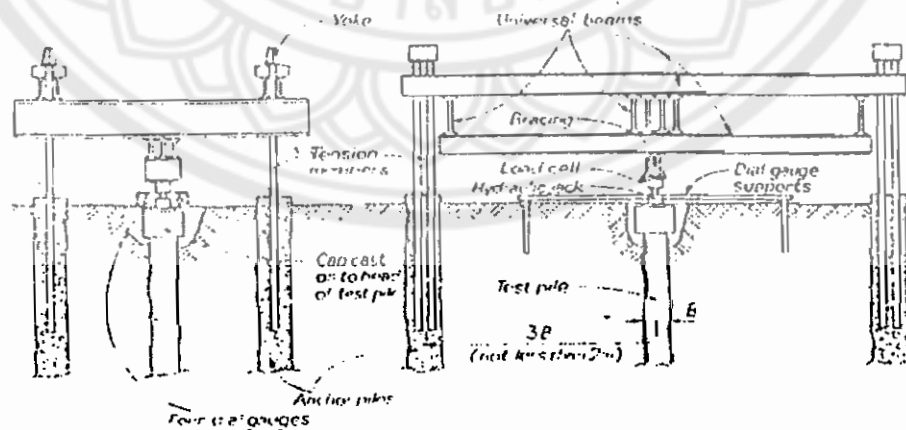
2. เพื่อหาแรงต้านสูงสุดของเข็มและพฤติกรรมการทรุดตัว เพื่อนำไปปรับแรงแบกทางในการแบกทานในการออกแบบของเสาเข็ม และศึกษาการทรุดตัวของฐานเสาเข็ม
3. หาข้อมูลเกี่ยวกับความยาวเข็มที่แท้จริง เครื่องจักรในการติดตั้ง และจำนวนครั้งของการตอกขณะที่ยังถึงชั้นดินแข็ง เพื่อ เป็นแนวทางในการก่อสร้างและการควบคุมคุณภาพต่อไป
4. ตรวจสอบความแข็งแรงทางโครงสร้างของหัวเสาเข็มเอง

การทดสอบอาจทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้เป็นมาตรฐานในประเทศไทยคือ วิธี " Maintained Loading Test " กล่าวคือ จะเพิ่มน้ำหนักให้เสาเข็มเป็นช่วง ๆ ในแต่ละช่วงจะคงน้ำหนักไว้ระยะหนึ่งจนการทรุดตัวเกิดขึ้นน้อย แล้วจึงเพิ่มในช่วงต่อไป ในการลดน้ำหนักก็อาจทำเช่นเดียวกัน วิธีนี้มีรายละเอียดอยู่ในมาตรฐานหลายแห่ง ASTM D 114357 T, New York City Code, เทศบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522 เป็นต้น หลักการจะคล้ายกัน นอกจากรายละเอียดปลีกย่อยที่ต่างกันออกไปบ้าง เช่น ในเทศบัญญัติ ก.ท.ม. พ.ศ. 2522 ข้อ 68 หมวด 6 ข้อย่อย 3 กล่าวว่า "กำลังแบกทานของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบกำลังแบกทานสูงสุด ให้ใช้กำลังแบกทานได้ไม่เกินร้อยละ 50 ในการทดสอบกำลังแบกทานสูงสุด ของเสาเข็มให้มีการทรุดตัวได้ไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร ต่อน้ำหนักแบกทาน 1000 กิโลกรัม และหลังจากเอาน้ำหนักแบกทานออกหมดแล้วเป็นเวลา 24 ชม. การทรุดตัวที่ปรากฏต้องไม่เกิน 6 มิลลิเมตร "

วิธีทดสอบโดยทั่วไป

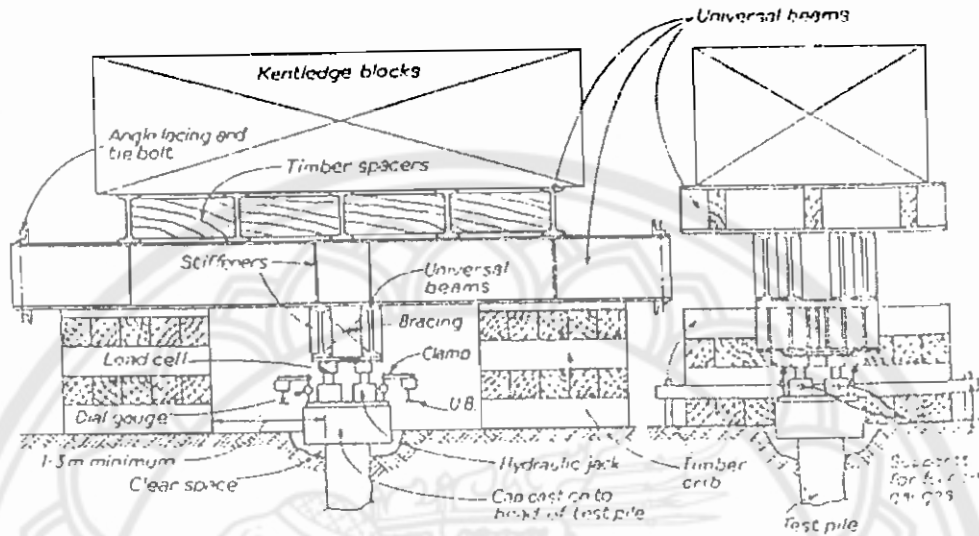
วิธีทดสอบเสาเข็มมีรายละเอียดปลีกย่อยมากมายแตกต่างกันไป ในที่นี้จะขอกล่าวถึงวิธีการทั่วไปที่มักปฏิบัติกันคือ

1. การจัดอุปกรณ์สำหรับบรรทุกน้ำหนัก มี 2 ลักษณะคือ
 - ก. ใช้เข็มสมอ มักใช้ในกรณีที่เข็มกลุ่ม โดยทำการทดสอบเข็มต้นกลางโดยใช้เข็มรอบข้าง 2 ถึง 4 ต้นเป็นสมอยึด ดังแสดงในรูปที่ 2.20



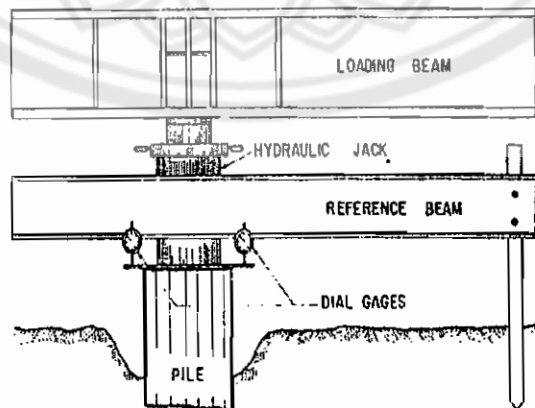
รูปที่ 2.21 การบรรทุกน้ำหนักโดยใช้เข็มสมอ (อ้างอิง ดร. วรากร ไ้ม่เรียง)

- ข. ใช้น้ำหนักจริง มักใช้กับเข็มเคียว ที่มีขนาดใหญ่มากนัก โดยมีพื้นรองรับน้ำหนัก ครอบอยู่บน เข็มคั่นที่จะทดสอบ น้ำหนักที่ใช้บรรทุกอาจเป็นถุงปูน เหล็กเส้น หรือ เสาเข็มที่ยังไม่ได้ใช้ ซึ่งสามารถหาได้บริเวณก่อสร้างดังในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.22 การบรรทุกน้ำหนักโดยใช้วัสดุ (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

2. การวัดการทรุดตัวของเสาเข็ม ส่วนมากจะเป็นการวัดการทรุดตัวที่หัวเข็ม โดยใช้ Dial Gage เป็นหลัก ซึ่งสามารถวัดละเอียดได้ถึง 0.001 นิ้ว โดยการทรุดตัวของเข็มจะเทียบกับคานคงที่ (Reference Beam) ซึ่งยึดอยู่กับจุดซึ่งห่างออกไปจากเสาเข็ม เพื่อชนิดอิทธิพลการเคลื่อนตัวของดินบริเวณใกล้เสาเข็มการติดตั้ง Dial Gage อาจทำได้ดังในรูปที่ 2.22 นอกจากนี้แล้วยังมีการวัดในลักษณะอื่น ๆ อีก เพื่อเป็นการตรวจสอบกันการผิดพลาด เช่นวัดด้วยกล้องระดับ เส้นลวดเปียนโย กระจกเงาและบรรทัด (Paralax) วัดด้วยเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าหรือแสง ในขณะเดียวกันการวัดที่ระดับลึกจากผิวดินลงไปอาจทำได้ โดยใช้ก้านต่อจากระดับต่างๆ ในเสาเข็มเรียกว่า " Tall Tale "



รูปที่ 2.23. การติดตั้ง Dial Gage เพื่อวัดการทรุดตัวของเข็ม (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

3. การบรรทุกน้ำหนัก มักจะควบคุมการบรรทุกน้ำหนักด้วย Hydraulic Jack โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 % ของสเกลหน้าปัทม์ ช่วงของการบรรทุกน้ำหนักควรเป็น 25 50 75 100 125 150 200 250 300..... เปอร์เซนต์ของน้ำหนักปลอดภัยที่คาดไว้
4. ช่วงเวลาที่จะต้องคองน้ำหนักและการบันทึกข้อมูล ในช่วงน้ำหนักบรรทุกใด ๆ ที่ยังไม่ถึงน้ำหนักปลอดภัย ต้องคองไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง ยกกว่านั้นต้องคองน้ำหนักไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง หรือ อัตราการทรุดตัวไม่เกิน 0.001 ฟุตใน 1 ชั่วโมง แล้วแต่อย่างไรจะเกิดขึ้นก่อนในการลดน้ำหนัก ต้องทำเป็นช่วง ๆ ไม่เกิน 25% ของน้ำหนักปลอดภัยโดยคองน้ำหนักไว้นานกว่า 1 ชม. จนถึงช่วงสุดท้ายต้องทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนอ่านค่า สำหรับในช่วงน้ำหนักหนึ่ง ๆ การอ่านค่าจะต้องทำเวลานี้ 0.5,1,2,4,8,..... นาทีไปเรื่อย ๆ
5. ข้อมูลเกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่จะต้องบันทึกไว้คือ
 - ผังบริเวณการทดสอบ
 - ลักษณะชั้นดิน
 - ข้อมูลเกี่ยวกับเข็มและการตอก

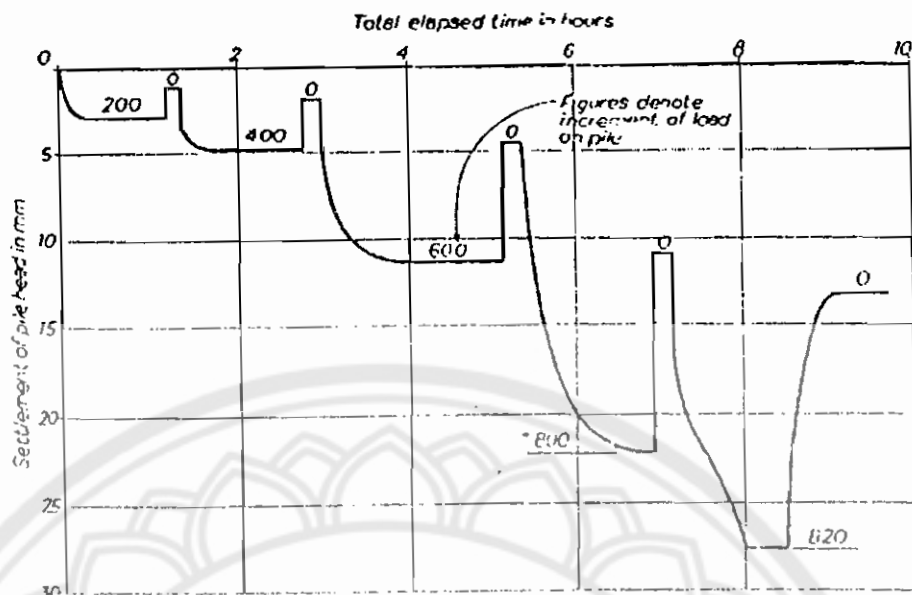
การหาค่าแรงต้านสูงสุดจากการทดสอบเสาเข็ม

วัตถุประสงค์หลักของการทดสอบเสาเข็มคือ ทราบค่าแรงต้านสูงสุดของเสาเข็มดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะต้องมีการตีความหรือวิเคราะห์แรงต้านทานสูงสุดให้ได้

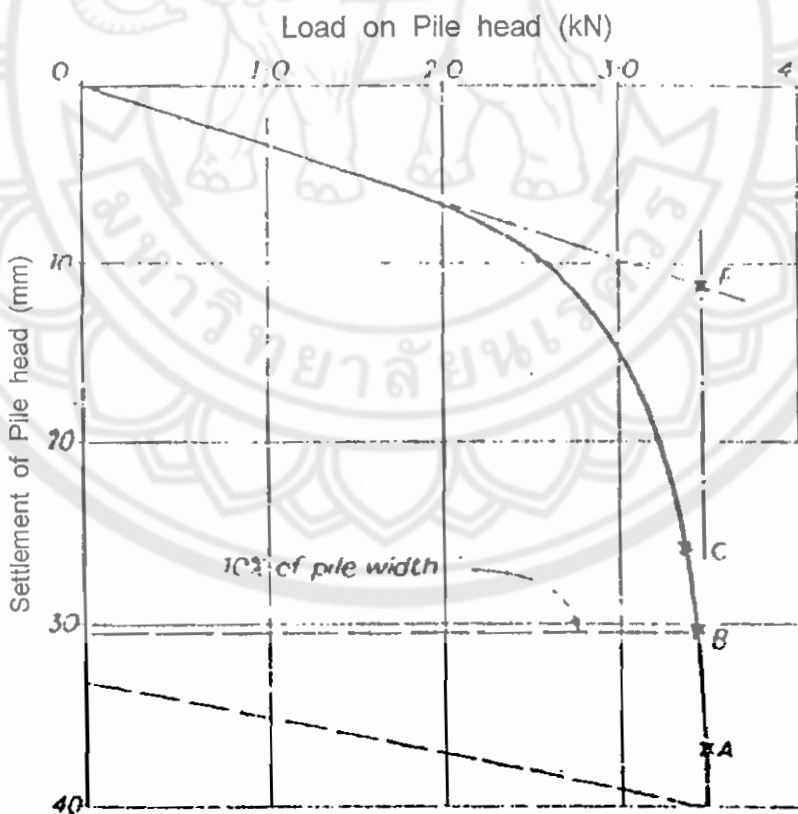
มีผู้ให้คำจำกัดความของแรงต้านสูงสุดไว้หลายประเภทด้วยกันคือ

1. Terzaghi - เป็นน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการทรุดตัวเท่ากับ 10 % ของเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม
2. Civil Engineering Code of Dra - เป็นน้ำหนักที่ทำให้ เกิดอัตราการทรุดตัวต่อเนื่องโดยไม่มี การเพิ่มน้ำหนัก
3. AASTHO - เป็นน้ำหนักสูงสุดที่ทำให้เกิดการทรุดตัวสุทธิ (Net Settlement) ภายหลังการลด น้ำหนักจนหมด ไม่มากกว่า 0.25 นิ้ว
4. International Conferene of Building Officials - เป็นน้ำหนักสูงสุดที่ทำให้เกิดการทรุดตัวไม่ มากกว่า 0.01 นิ้วต่อน้ำหนัก 1 ตัน เมื่อคองน้ำหนักไว้ 24 ชม.

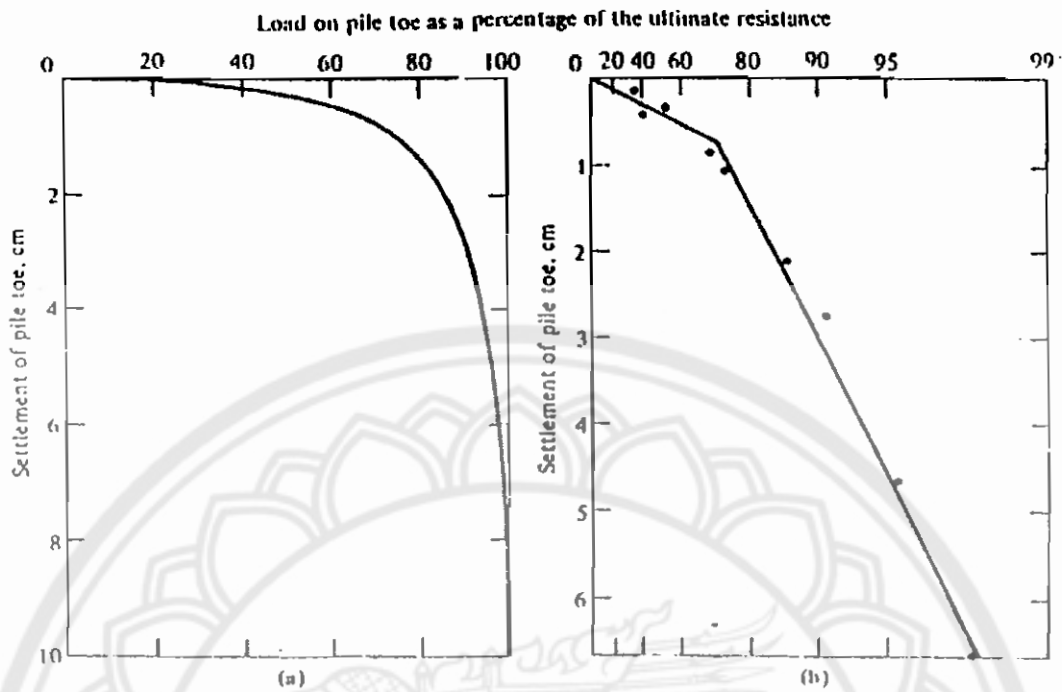
ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะตีความได้แน่นอน แต่พอจะมีวิธีการวิเคราะห์ จากข้อมูลได้ ดังนี้คือ จาก ข้อมูล น้ำหนักกด -เวลา - การทรุดตัว ดังรูปที่ 2.23 นำมา เขียนเป็นกราฟ น้ำหนักและการทรุดตัว ดังในรูปที่ 2.24 ถ้ามีส่วนของเส้นตรง 2 ส่วน ลากมาตัดกันได้ดังที่ จุด F ให้ถึงเป็นแรงต้านสูงสุด ถ้าส่วนล่างของเส้นไม่ปรากฏช่วงเส้นตรงแน่นอน ให้เขียนกราฟระหว่างลอคการิทึมของน้ำหนัก ต่อการทรุดตัวหรือ อัตราการทรุดตัวต่อน้ำหนักจะทำให้เห็นจุดเปลี่ยนความโค้ง ได้ชัดเจนขึ้น ดังใน รูป 2.25



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนัก - เวลา- การทรุดตัวของเข็มทดสอบ (อ้างอิง คร. วรากร ไม่เรียง)



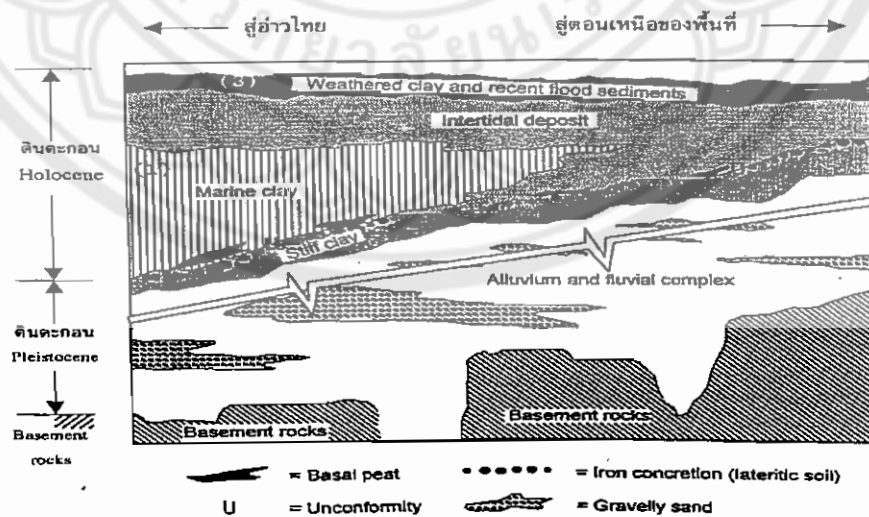
รูปที่ 2.25 กราฟ น้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว (อ้างอิง คร. วรากร ไม่เรียง)



รูปที่ 2.26 การเขียนกราฟน้ำหนักบรรทุกทุกบนสเกลลอกลอการิทึม (อ้างอิง ดร. วรากร ไม้เรียง)

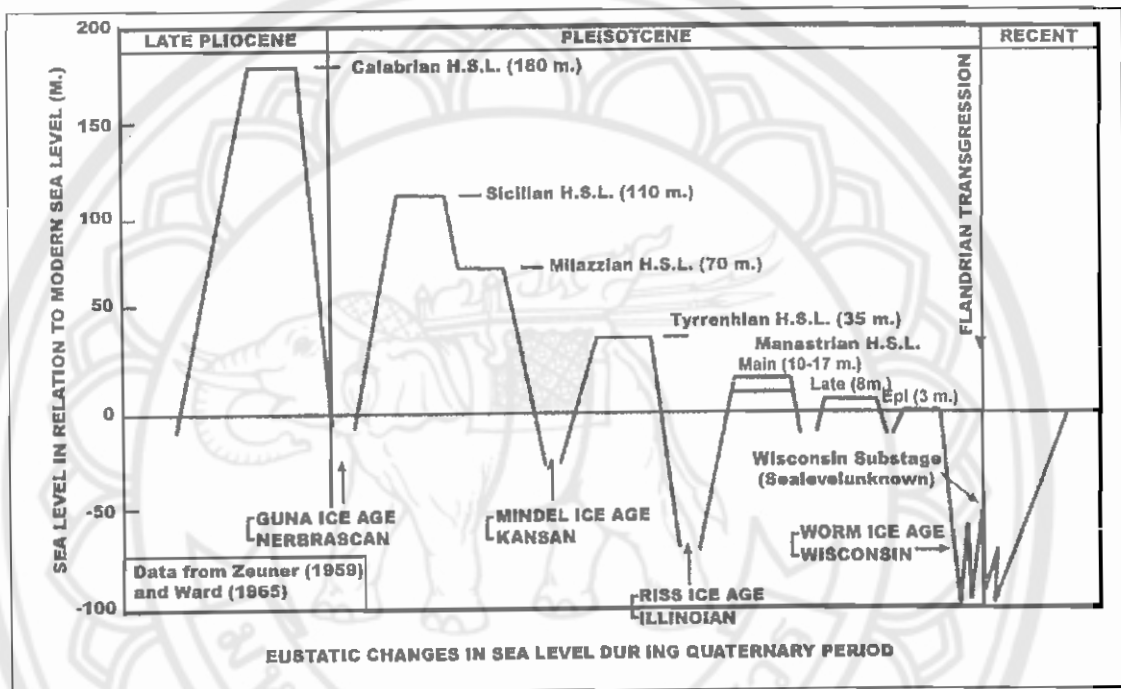
2.12 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ที่ศึกษา (อ้างอิง ทิพย์วิมล แตะกระโทก, 2547)

ลักษณะชั้นดิน โดยทั่วไปของพื้นที่ที่ทำการศึกษา คือบริเวณภาคกลางตอนล่างแถบจังหวัดนนทบุรี นครปฐม และทางด้านตะวันออกของกรุงเทพมหานครซึ่งมีความแปรปรวนของสภาพชั้นดินตามรูป



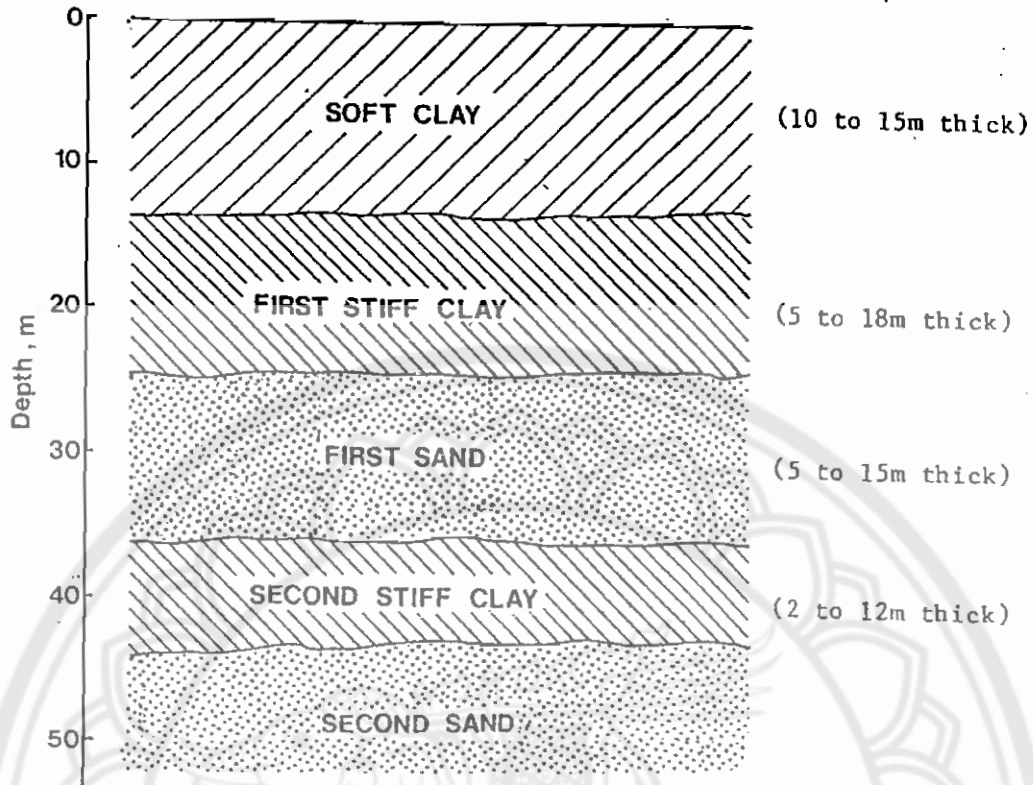
รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา(อ้างอิง วิชาญ ภูพัฒน์)

ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากปัจจัยหลายอย่างเช่น สภาพภูมิอากาศ น้ำ อัตราการตกตะกอน ลักษณะการวางตัวของดินคอนสามเหลี่ยม และระดับน้ำทะเล (การกำเนิดของพื้นที่นี้ค่อนข้างซับซ้อนเพราะเป็นการเกิดของแผ่นดินเนื่องมาจากการพัดพาตะกอนของน้ำเช่นบริเวณจังหวัดชัยนาท จนกระทั่งการตกตะกอนโดยอิทธิพลเนื่องมาจากระดับน้ำทะเลหนุนระดับน้ำในแม่น้ำ และรวมถึงการตกตะกอนเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลในบริเวณจังหวัดแถบ(อ่าวไทย) พบการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลในอ่าวไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันดังแสดงในภาพ



รูปที่ 2.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลตั้งแต่อดีตเปรียบกับระดับน้ำทะเลในปัจจุบัน (อ้างอิง Cox 1968 คัดแปลงโดย วิชาญ ภูพัฒน์ และคณะ)

นักธรณีวิทยาเชื่อว่าดินคอนสามเหลี่ยมแม่น้ำเจ้าพระยาในช่วงความลึกประมาณ 0-300 เมตรเกิดในช่วงปลายของ Pleistocene เนื่องมาจากอิทธิพลการวางตัวแบบ alluvial และ fluvial โดยประกอบไปด้วยกรวด, ทราย, ทรายแป้ง และดินเหนียว ทรายเป็นส่วนประกอบหลักและอยู่ระหว่างชั้นดินเหนียวซึ่งสามารถแสดงลักษณะของชั้นดินบริเวณกรุงเทพฯฯ ได้ดังรูป



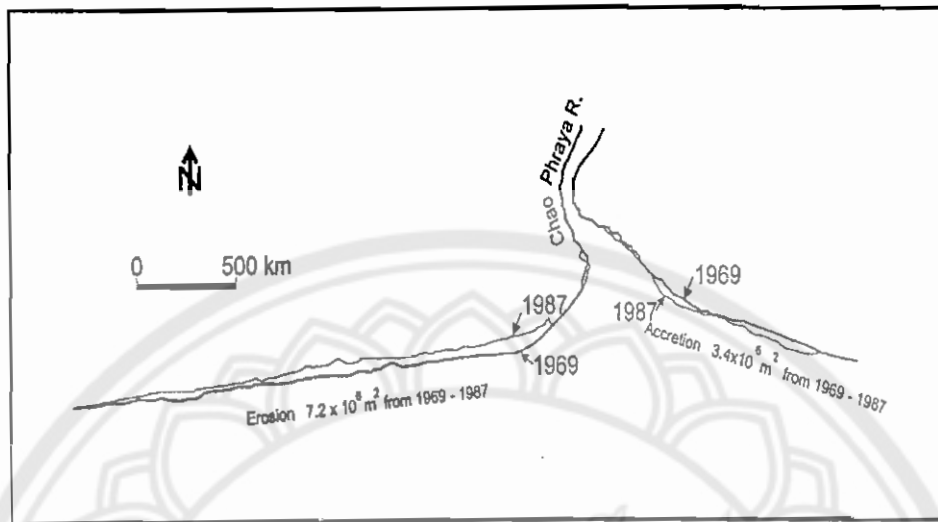
รูปที่ 2.29 แสดงสภาพชั้นดินบริเวณกรุงเทพฯ ฯลฯ (อ้างอิง Kerdsuwan, 1984)

จากการวิเคราะห์ชั้นดินเหนียวแข็ง (stiff clay) พบว่ามีความสามารถในการรับแรงต่ำ มีความเป็นด่างเล็กน้อย มีความเข้มข้นของ chloride-iron ต่ำ และแร่ดินเหนียวส่วนใหญ่คือแร่ Kaolinite

ในช่วงปลาย Pleistocene เกิดการลดของระดับน้ำทะเลบริเวณปากอ่าวไทยทำให้บริเวณอ่าวไทยในปัจจุบันแห้ง และระดับน้ำทะเลอยู่ห่างจากอ่าวไทยในปัจจุบันประมาณ 100 เมตร (ชายหาดอยู่ห่างจากชายหาดปัจจุบัน) ในช่วงนี้เกิดการผุกร่อนและกัดกร่อน เกิดการพัดพาของตะกอนตามกระแสน้ำตามความลาดชันทำให้เกิดดินคอนรูปพัดที่ซับซ้อนซึ่งสังเกตจากความเข้มข้นของแร่เหล็กและชั้นของดินลูกรัง (laterite) ที่เป็นผลเนื่องมาจากสภาวะอากาศแห้งเกิดการผุกร่อนทางเคมีเช่นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ขณะที่ระดับน้ำทะเลลดต่ำลงนั้นบริเวณชายนาทจนถึงสิงห์บุรีเริ่มมีตะกอนโคลนพื้นระดับน้ำทำให้เกิดการผุกร่อนและการกัดกร่อนซึ่งการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลนี้เป็นปัจจัยหลักและสำคัญในการเปลี่ยนแปลงลักษณะภูมิประเทศของดินดอนสามเหลี่ยมเจ้าพระยา การไหลของแม่น้ำต่างๆปะทะกับน้ำทะเลทำให้ความเร็วของน้ำในแม่น้ำลดลง ตะกอนเริ่มวางตัวเมื่อความเร็วของตัวน้ำในที่นี้คือกระแสน้ำลดลงทำให้มีการกองของแผ่นดินและการกัดกร่อนรอบบริเวณอ่าวไทยดัง

รูป การกัดกร่อนของชายฝั่งด้านตะวันตกเป็นความยาวเท่ากับ 30 กิโลเมตรในอัตรา 5 เมตรต่อปี ทำให้เกิดการสูญเสียแผ่นดินในแถบชายฝั่งด้านตะวันตกของประเทศไทยดังแสดงในภาพ



รูปที่ 2.30 แสดงการกัดกร่อนและฝูกร่อนบริเวณอ่าวไทย(อ้างอิง Vongviesessomjai, 1992)

ต่อมาในช่วง Holocene ประมาณ 8000 ปีก่อนปัจจุบัน ระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้นท่วมบริเวณที่ราบและขยายในแนวราบและทางด้านเหนือไปจนถึงอยุธยาหรือบางที่อาจถึงอ่างทอง บริเวณชัยนาท มีการตตะกอนที่ถูกพัดพามาโดยแม่น้ำและปะทะกับน้ำทะเลที่ท่วมไปจนถึงบริเวณดังกล่าว ระดับน้ำทะเลนี้ท่วมบริเวณจังหวัดชัยนาทเรื่อยมาจนถึงประมาณ 6000 ปีก่อนปัจจุบัน ระดับน้ำทะเลเริ่มลดลงจนถึงระดับน้ำทะเลในปัจจุบันประมาณ 1500 ปีก่อนปัจจุบัน

ดินเหนียวที่เกิดจากอิทธิพลของน้ำทะเลมีปริมาณน้ำในธรรมชาติสูง (High water content), plasticity index สูง มีความไวต่ำ (low sensitivity) ความชื้นน้ำต่ำและเกิดการยุบตัวสูง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูงเมื่อมีการสูบน้ำไปใช้ในชีวิตประจำวัน