

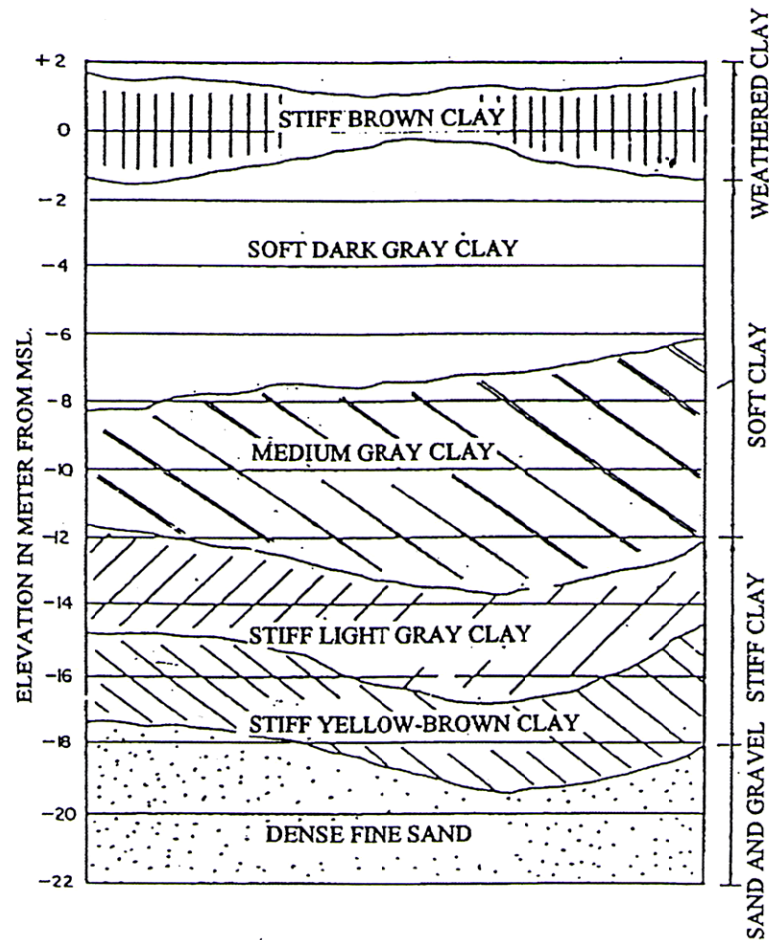
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพ

บริเวณพื้นที่ในประเทศไทยนั้นสภาพชั้นดิน โดยเฉพาะแถบที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างจะถูกปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนาโดยตลอดพื้นที่บริเวณแถบปากอ่าวไทย ซึ่งดินเหนียวอ่อนผืนนี้ได้ปกคลุมเต็มพื้นที่และบางส่วนของ 14 จังหวัด ได้แก่ ราชบุรี สมุทรสาคร สมุทรสงคราม กรุงเทพฯ สมุทรปราการ ชลบุรี นครปฐม นนทบุรี ปทุมธานี ฉะเชิงเทรา สุพรรณบุรี พระนครศรีอยุธยา นครนายก และปราจีนบุรี รวมพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 14,000 ตารางกิโลเมตร วัดความกว้างบริเวณปากอ่าวไทย (จากราชบุรีถึงชลบุรี) ได้ระยะทางประมาณ 140 กิโลเมตร และวัดขึ้นไปทางเหนือสิ้นสุดที่บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยาได้ระยะทางประมาณ 100 กิโลเมตร ลักษณะของดินดังกล่าวได้ก่อให้เกิดผลกระทบกับงานก่อสร้างบนพื้นที่นี้เป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนนี้จะมีความสามารถรับแรงเฉือนต่ำ ในขณะที่ค่าการยุบตัวสูง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางด้านความมีเสถียรภาพและการทรุดตัวอย่างมาก

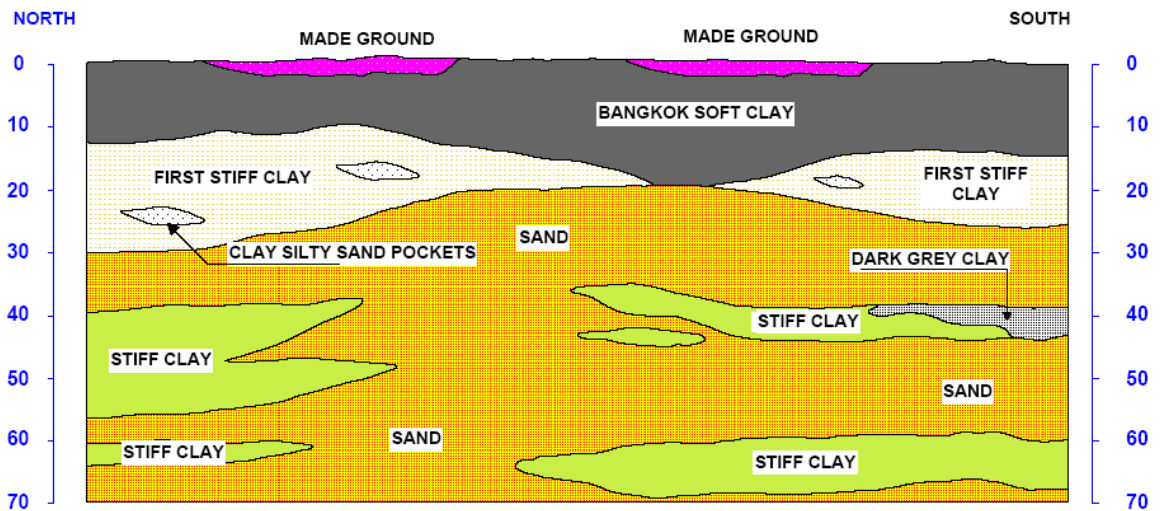
Holmberg (1970) พบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) จะมีช่วงความลึกอยู่ในช่วง 5-15 เมตร เป็นดินที่มีค่าปริมาณน้ำบรรจุ (Water Content) และดัชนีพลาสติก (Plasticity Index) สูง คล้ายกับ Gothen Berg Clay ค่าความไวตัว (Sensitivity) สูง ซึ่งจะเกิดการยุบอัดตัวลำดับที่สอง (Secondary Consolidation) อย่างมาก ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ประมาณ 1-2 ตัน/ตร.ม. และในทางธรณีวิทยาจัดอยู่ในดินประเภท Normally Consolidation Clay

Moh และคณะ (1969) ได้แบ่งชั้นดินบริเวณพื้นที่ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง จากระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 22.00 เมตร ออกเป็น 4 ชั้น ดังนี้ ชั้นผิวดินจะเป็นชั้นเปลือกดินเหนียวแห้งแข็งซึ่งมีความหนาเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 1.50-4.00 เมตร ขึ้นอยู่ในแต่ละสถานที่ ปกคลุมชั้นดินเหนียวอ่อนที่หนาประมาณ 10.00-15.00 เมตร และค่อยๆเปลี่ยนเป็นชั้นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งหนาประมาณ 5.00-15.00 เมตร ถัดจากนั้นลงมาจะเป็นชั้นทรายแน่นผสมกรวดหนาประมาณ 10.00 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะสภาพชั้นดินโดยทั่วไปบริเวณกรุงเทพมหานครถึงที่ระดับความลึก 22.00 เมตร
(ข้อมูลจาก : Moh และคณะ, 1969)

จากรูปที่ 2.2 เป็นลักษณะชั้นดินโดยทั่วไปของกรุงเทพมหานคร จากเอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7 ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นดินต่าง ๆ กันคือชั้นดินบนสุดจะเป็นชั้นดินเปลือก (Weathered Crust) หนาประมาณ 2-3 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินอ่อนหนาประมาณ 12 เมตร และค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) ถึงระดับความลึกประมาณ 15-18 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินแข็งจนถึงระดับชั้นทรายชั้นแรกที่อยู่ระดับความลึกประมาณ 25-30 เมตร ถัดจากชั้นทรายชั้นแรกจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็งสลับกับชั้นทรายจนถึงระดับชั้นทรายชั้นที่ 2 ที่อยู่ระดับความลึกประมาณ 45-60 เมตร ซึ่งฐานรากส่วนใหญ่ของอาคารที่มีน้ำหนักสูงมากมักจะกำหนดให้ปลายเสาเข็มฝังอยู่ในทรายชั้นนี้ ค่าคุณสมบัติต่างๆของชั้นดินกรุงเทพดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ลักษณะสภาพชั้นดินโดยทั่วไปบริเวณกรุงเทพมหานครถึงที่ระดับความลึกประมาณ 60 ม.
(ข้อมูลจาก : กมล สิงห์โตแก้ว, ชาญชัย ทรัพย์มณีวงศ์ และพรพจน์ ดันเส็ง, 2544)

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของชั้นดินต่างๆสำหรับชั้นดินกรุงเทพ (ข้อมูลจาก : Chin, 1972; Tonyagate, 1978)

ชนิดดิน	ลึก ม.	W_n %	LL %	PL %	PI %	LI	Su ตัน/ตร.ม.	e	G
ตะกอนดินเหนียว	0-2	35-70	35-55	-	23-30	0.7-1.0	1.6-1.8	1.3-1.4	2.6-2.7
ดินเหนียวอ่อน	1-16	65-90	65-95	30-40	40-63	0.6-0.9	1.5-1.7	1.5-2.6	2.7
ดินเหนียวแข็ง	10-25	24-34	40-75	20-28	18-50	0.1-0.2	1.9-2.0	0.65-0.95	2.7-2.8
ทรายชั้นที่ 1	14-38	17-25	-	-	-	-	1.8-2.1	0.7	2.7
ดินเหนียวแข็ง	24-43	30-35	55-69	18-25	31-44	0.1-0.3	1.8-2.0	0.8-0.95	2.7
ทรายชั้นที่ 2	30-58	20	-	-	-	-	1.8-2.6	0.75	2.7
ดินเหนียวแข็ง	51-67	22-26	48-70	23-25	25-46	0.1	2.04	0.65-0.72	2.74
ทราย	67-85	16	-	-	-	-	-	-	2.69
ดินเหนียวแข็ง	79-96	19-20	56-57	22-26	32-34	-0.1	2.0-2.1	0.55-0.61	2.7-2.6

งาน ไซวรณและคณะ(2550) ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ในชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็ม และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์ประกอบไปด้วย การทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test และ Bi-Directional Static Load Test ซึ่งมีทั้งหมด 12 ต้น และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8 ถึง 2.0 เมตร และความยาวอยู่ในช่วง 41 ถึง 62 เมตร ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์กลับประกอบไปด้วยค่า Adhesion Factor α , ค่า Friction Factor β และค่า Bearing Capacity Factor N_q นอกจากนี้ยังวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทั้ง 2 วิธี พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีผลที่แตกต่างกันเนื่องมาจากวิธีการทดสอบเสาเข็มที่แตกต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์ ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8 ถึง 2.0 เมตร และมีความยาวอยู่ในช่วง 41 ถึง 62 เมตร จำนวน 12 ต้น โดยวิธี Conventional Static Pile Load Test และวิธี Bi-Directional Cell Load Test พบว่าสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งมีค่า S_u อยู่ในช่วง 3 ถึง 32 ตัน/ตร.ม. นั้น ค่า Adhesion Factor (α) ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 0.2 ตามลำดับ สำหรับดินทรายซึ่งมีค่า ϕ ในช่วง 32° ถึง 40° นั้น ค่า Friction Factor (β) มีค่าส่วนใหญ่ในช่วง 0.20 ถึง 0.55 ตามลำดับ ค่า Bearing Capacity Factor, N_q มีค่าสอดคล้องกับค่าที่เสนอโดย Pimpasudgi (1989) สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ และมีค่าต่ำกว่าค่า N_q สำหรับดินเหนียวทั่วไป ค่า Bearing Capacity Factor, N_c เฉลี่ยของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าเท่ากับ 9.4 ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่เสนอโดย Skemton (1951) และนิยมใช้โดยทั่วไปซึ่งมีค่าเท่ากับ 9

2.2 พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

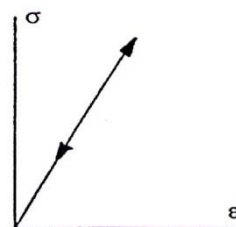
จุดประสงค์ของฐานรากคือการถ่ายน้ำหนักหรือแรงลงสู่ชั้นดินด้านล่างที่มีความแข็งแรงกว่า ฐานรากแบบเสาเข็มจะใช้ในกรณีที่จำเป็นต้องถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินอ่อนหรือดินที่อาจเกิดการอัดตัวคายน้ำได้ง่าย เมื่อเสาเข็มเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกก็จะเริ่มเคลื่อนที่ลงตามทิศทางของแรงมีการถ่ายเทแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดินและเกิดการเคลื่อนที่ของชั้นดินตามเสาเข็มลงไปด้วย หากมีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นการเคลื่อนตัวของดินก็มากขึ้นตามไปด้วย จนชั้นดินไม่สามารถจะต้านทานได้ก็จะทำให้ดินเกิดการเคลื่อนพัง ซึ่งพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสามารถที่จะเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุทางวิศวกรรมโดยทั่วไป

วัสดุที่มีแรงมากระทำ ซึ่งเมื่อนำแรงกระทำออกความเครียดทั้งหมดที่เกิดขึ้นสามารถคืนกลับได้เปรียบได้กับพฤติกรรมของการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในช่วงน้ำหนักทดสอบน้อยๆ พฤติกรรมของเสาเข็มในลักษณะนี้เรียกว่า พฤติกรรมแบบ elastic และถ้าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด หรือน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มเป็นสัดส่วนที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (linear) ดังรูปที่ 2.3(ก) แสดงว่าวัสดุนี้มีพฤติกรรมแบบ linear elastic แต่ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวเป็นลักษณะเส้นโค้งแต่ยังคงคืนตัวได้ ดังรูปที่ 2.3(ข) แสดงว่าพฤติกรรมเป็นแบบ nonlinear elastic

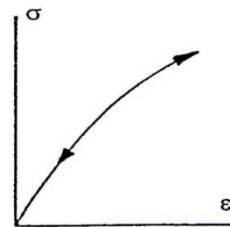
สำหรับกรณีที่ความเครียดหรือการทรุดตัวของเสาเข็มไม่สามารถคืนตัวกลับได้ทั้งหมดเมื่อนำแรงกระทำออก ดังรูปที่ 2.3(ค) ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า plastic strain หรือ plastic settlement เสาเข็มจะแสดงพฤติกรรมแบบพลาสติก และสำหรับรูปที่ 2.3(ง) แสดงพฤติกรรม rigid-plastic ซึ่งไม่มีช่วงความเครียดในลักษณะ elastic เลย หรือการทรุดตัวของเสาเข็มที่ไม่สามารถกลับคืนได้

สภาพธรรมชาติวัสดุอาจจะเกิดความเสียหายเครียดทั้งแบบที่สามารถคืนตัวกลับได้ ซึ่งมีพฤติกรรมแบบผสมผสานทั้ง elastic และ plastic หรือ elastoplastic ดังรูปที่ 2.3(จ) แสดงถึงพฤติกรรมแบบ elastoplastic สามประเภท ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันหลังจากหน่วยแรงเพิ่มขึ้นถึงจุดคลาก (yield stress) โดยที่กราฟที่ 1 เป็น perfectly plastic เป็นกรณีหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นจนเลยจุดคลากแล้ว ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นโดยที่ค่าหน่วยแรงคงที่ ส่วนกราฟที่ 2 และ กราฟที่ 3 เป็นพฤติกรรมในกรณีของการเพิ่มหน่วยแรงที่เกินกว่าจุดคลาก และมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าหน่วยแรงเพิ่มขึ้น เรียกว่า strain hardening แต่ถ้าหน่วยแรงลดลง เราเรียกว่า strain softening ซึ่งผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจนถึงจุดพิบัติ พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวจะมีพฤติกรรมได้ทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวข้างต้น

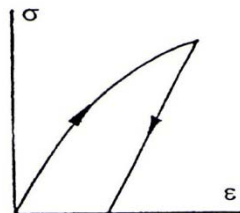
นอกจากนี้วัสดุบางชนิดอาจมีพฤติกรรมขึ้นกับเวลา เนื่องจากมีความหนืด (viscous material) โดยอาจมีคุณสมบัติเป็น viscoelastic, viscoplastic หรือ elastoviscoplastic ซึ่งถ้าอัตราการเพิ่มแรงกระทำที่ต่ำกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุ (การกระจายหน่วยแรงและความเครียด) พฤติกรรมของวัสดุจะมีลักษณะเช่นเดียวกับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบไม่ขึ้นกับเวลา แต่ถ้าอัตราการเพิ่มแรงกระทำสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้วัสดุได้รับหน่วยแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดและถ้าหยุดการเพิ่มน้ำหนักกระทำจะทำให้หน่วยแรงในวัสดุคงที่ โดยมีความเครียดเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่มีการพิบัติแบบที่มีการทรุดตัวอย่างรวดเร็ว ขณะที่ไม่มีการเพิ่มน้ำหนักเลย ดังแสดงในรูปที่ 2.3(จ) แต่ถ้าเป็นการคลายตัวของความเค้น ณ ที่ความเครียดคงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนไป จะเป็นพฤติกรรมดังในรูปที่ 2.3(ข) ตัวอย่างเช่น การคลายตัวของลวด prestress ในเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น



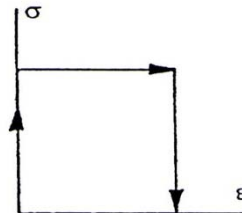
ก. linear elastic



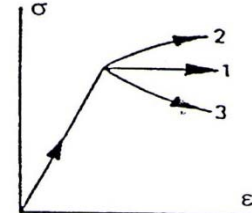
ข. nonlinear elastic



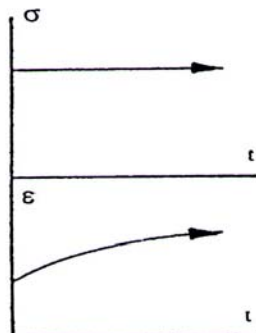
ค. plastic



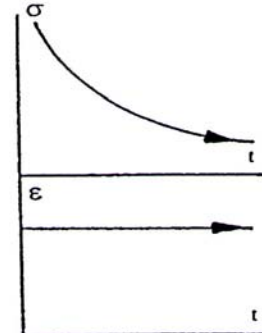
ง. perfect plastic



จ. elastoplastic



ฉ. creep at constant stress for viscous material



ช. relaxation at constant strain for viscous material

รูปที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด

(ข้อมูลจาก : Cristian และ Desai, 1977)

2.2.1 พฤติกรรมการทรุดตัวเนื่องจากหน่วยแรงในมวลดิน

หน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักภายนอกกระทำกับมวลดิน ทำให้มวลดินมีการเคลื่อนตัวทั้งแบบอีลาสติกและพลาสติกเกิดขึ้นในมวลดิน โดยในช่วงที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกน้อยๆ มีการเคลื่อนตัวแบบอีลาสติกจนเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น ไม่เพียงแต่การเคลื่อนตัวที่เพิ่มมากขึ้นเท่านั้นพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มยังมีสภาพเป็นแบบพลาสติกอีกด้วย จนในที่สุดเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกจนเกินจุดคลากของเมื่อดินที่อยู่บริเวณโดยรอบผิวเสาเข็มจะเกิดการเลื่อนไถลจากกัน

พฤติกรรมของหน่วยแรงในอนุภาคเม็ดดิน เนื่องจากการยุบตัวของดินซึ่งมีสาเหตุจากหน่วยแรงประสิทธิผลที่ส่งผ่านเป็นแรงกดและแรงเฉือนบริเวณรอบผิวเสาเข็มกระทำระหว่างผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดิน ถ้าแรงเฉือนที่ส่งผ่านมาจากเสาเข็มมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงเฉือนระหว่างเม็ดดินแล้ว จะทำให้เม็ดดินเลื่อนไถลออกจากกัน เป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนตัวและจัดเรียงตัวใหม่โครงสร้างของเม็ดดินรอบผิวเสาเข็ม ซึ่งสามารถแยกพฤติกรรมของเม็ดดินที่ถูกเสาเข็มบีบอัดตัว ขณะที่พัฒนาากำลังรับน้ำหนักตามพฤติกรรมของหน่วยแรงในเม็ดดินได้ 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 แรงกดรอบอนุภาคของเม็ดดิน ทำให้ปริมาตรของเม็ดดินลดลง รูปแบบของอนุภาคเม็ดดินยังคงเหมือนเดิม จะเกิดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเพียงเล็กน้อย ขณะที่ทดสอบที่น้ำหนักบรรทุกทุกต่ำๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก)

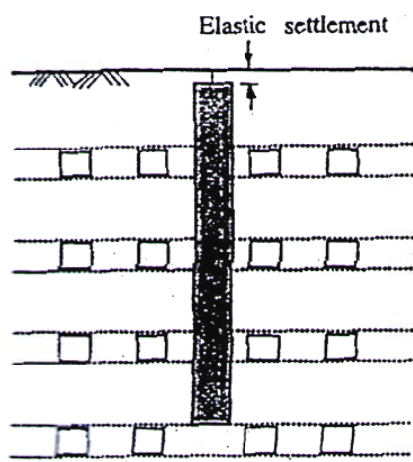
กรณีที่ 2 แรงเฉือนระหว่างอนุภาคเม็ดดิน ทำให้รูปแบบของอนุภาคเม็ดดินเปลี่ยนแปลงแต่ปริมาตรของเม็ดดินยังคงเท่าเดิม ซึ่งเราเรียกพฤติกรรมนี้ว่า การบิดตัว (Distortion) เกิดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มทดสอบในช่วงพลาสติกเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกเกินกว่าช่วงการเคลื่อนตัวแบบอีลาสติก แสดงในรูปที่ 2.4(ข)

สำหรับในกรณีที่ 1 มีการเคลื่อนตัวลงของเสาเข็มเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยมากขณะทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม เมื่ออนุภาคดินเริ่มส่งผ่านแรงกระทำระหว่างกันซึ่งไม่สม่ำเสมอในแต่ละผิวสัมผัสของเม็ดดิน และเริ่มมีแรงเฉือนเกิดขึ้นบ้างในบางจุดของเม็ดดิน โดยจะเพิ่มมากขึ้นเป็นสัดส่วนกับแรงกด (Normal Load) ที่เพิ่มขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเม็ดดินกับผิวเสาเข็ม ชั้นดินจึงมีความแข็งแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก)

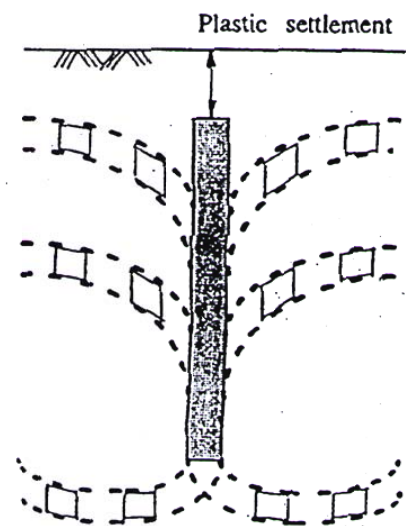
ส่วนในกรณีที่ 2 คือ กรณีของการเกิดการบิดตัวของเม็ดดิน การเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนในระหว่างผิวสัมผัสที่มีค่าสูงขึ้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มทดสอบเพิ่มมากขึ้น เมื่อการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนถูกส่งผ่านไปยังเม็ดดินต่อเนื่องกันไปทั้งชั้นดิน จนในที่สุดเป็นเหตุให้เม็ดดินเกิดการเลื่อนไถลจากกัน เกิดการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเพิ่มมากยิ่งขึ้น การเคลื่อนตัวเนื่องจากการบิดนี้มีค่ามากกว่าการยุบตัวเนื่องจากการถูกกดอัดมาก การบิดตัวนี้ชั้นดินจะสูญเสียความแข็งแรงลงไป

เพราะว่าในทุกอนุภาคดินจะเกิดการจัดตำแหน่งใหม่โดยการเลื่อนไถลระหว่างเม็ดดิน และสภาพการจัดเรียงตัวของเม็ดดินจะไม่คืนกลับอีกเมื่อน้ำหนักบรรทุกทดสอบถูกถอนออกไป จึงทำให้เสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวแบบพลาสติกขณะทดสอบที่น้ำหนักสูงเกินกว่าช่วงอีลาสติก

การเลื่อนเป็นกระบวนการที่ส่วนใหญ่ไม่สามารถย้อนกลับได้จึงเป็นเหตุให้เกิดการเคลื่อนที่แบบถาวร เมื่อน้ำหนักทดสอบถูกถอนออกไปแล้ว ภายใต้การเพิ่มน้ำหนักรอบใหม่ เม็ดดินที่แตกออกเนื่องจากการรับน้ำหนักครั้งก่อนหน้าทำให้เกิดผิวสัมผัสที่มากขึ้น เป็นเหตุให้ชั้นดินมีความแข็งแรงขึ้นเมื่อต้องรับน้ำหนักทดสอบในครั้งต่อมา แต่ถ้าเสาเข็มต้องรับน้ำหนักมากกว่าครั้งก่อนหน้านี้อาจทำให้เกิดการทรุดตัวที่สูงมากขึ้น



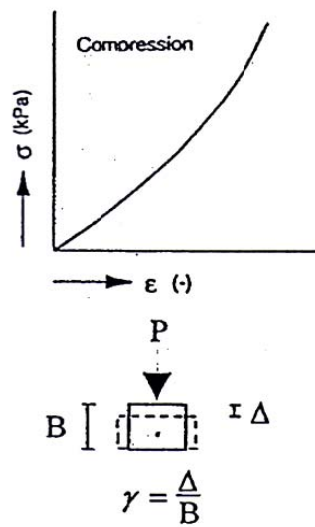
(ก) การเคลื่อนตัวของเม็ดดินเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย



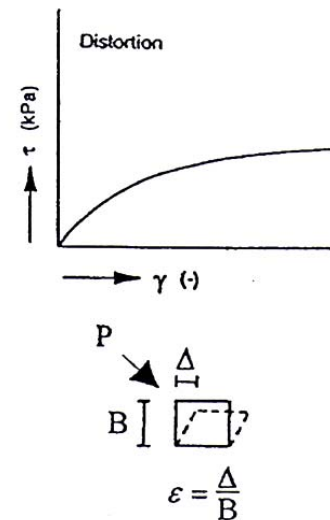
(ข) เกิดการบิดตัวของเม็ดดินรอบเสาเข็ม

รูปที่ 2.4 การจำลองพฤติกรรม的移动ตัวของชั้นดิน โดยรอบเสาเข็มด้วยรูปลูกบาศก์

(ข้อมูลจาก : CUR, 1996)



ก. ความเครียดจากการอัดตัวของมวลดิน

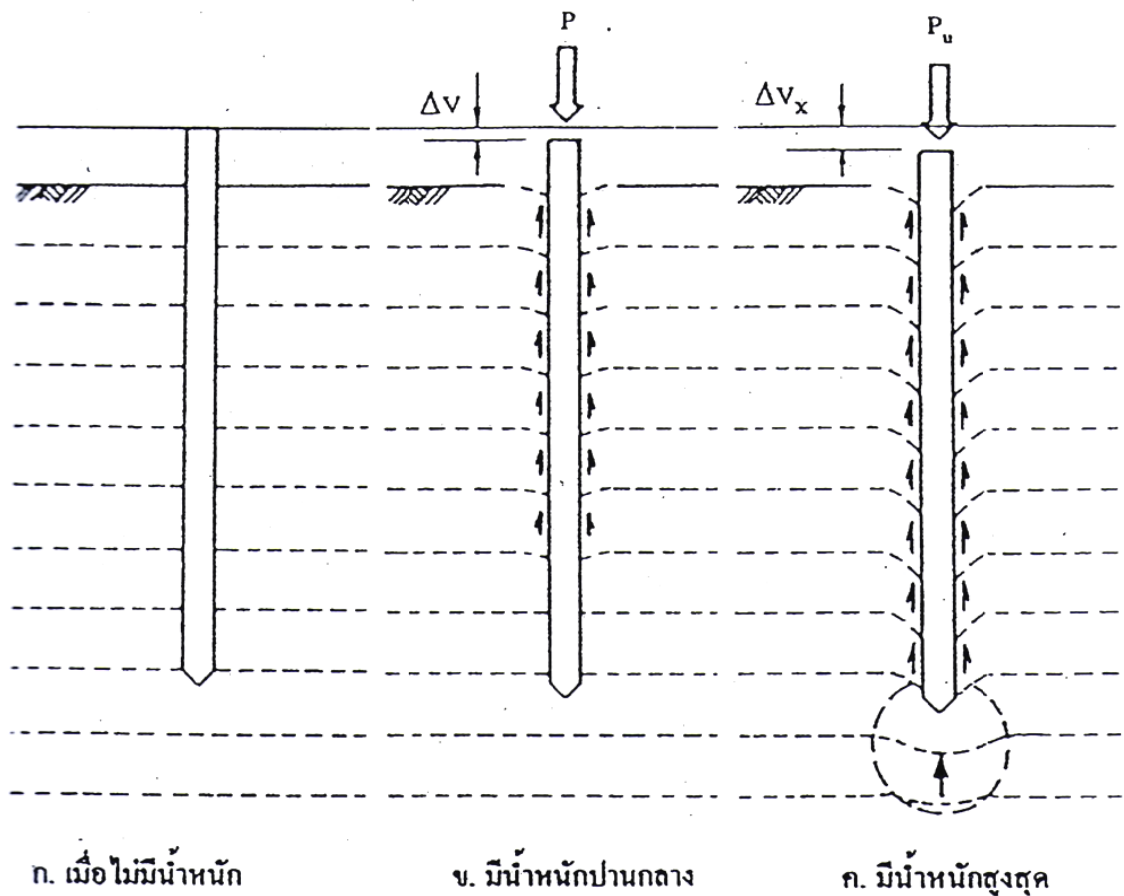


ข. ความเครียดจากการเคลื่อนตัวแบบเฉือนของมวลดิน

รูปที่ 2.5 พฤติกรรมของความเครียดในมวลดินระหว่างการอัดตัวและการเคลื่อนตัวแบบเฉือน
(ข้อมูลจาก : CUR, 1996)

2.2.2 พฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มลงบนชั้นดินฐานราก

เสาเข็มเมื่อตอกหรือติดตั้งลงในชั้นดินด้วยวิธีใดๆแล้วก็ตาม ถ้าไม่พิจารณาถึงการกระทบกระเทือนของชั้นดินเนื่องจากการตอกหรือเจาะเพื่อติดตั้งเสาเข็มแล้ว ชั้นดินและเสาเข็มจะยัง不会有การเคลื่อนที่ของชั้นดินเนื่องจากการตอกหรือเจาะเพื่อติดตั้งเสาเข็มแล้ว ชั้นดินและเสาเข็มจะยัง不会有การเคลื่อนที่ต่อเมื่อเริ่มบรรทุกน้ำหนักลงบนเสาเข็ม เสาเข็มก็จะเคลื่อนที่ลงตามทิศทางองแรง ในขณะที่ผิวชั้นดินที่เกาะอยู่ข้างๆผิวเสาเข็มก็พยายามต้านทานไว้ จึงมีการถ่ายแรงจากเสาเข็มลงสู่ชั้นดิน ชั้นดินเองก็จะเคลื่อนที่ตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่จะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น และในช่วงหลังจะเกิดการต้านทานที่ปลายเสาเข็มเข้ามาร่วมด้วย ในลักษณะเดียวกับฐานแผ่ที่มีพื้นที่เท่าปลายเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นชั้นดินไม่สามารถต้านทานได้ ก็จะเกิดเป็นแนวเคลื่อนพังโดยรอบเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม ทำให้มีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า “น้ำหนักบรรทุกสูงสุด” (Ultimate Pile Capacity)

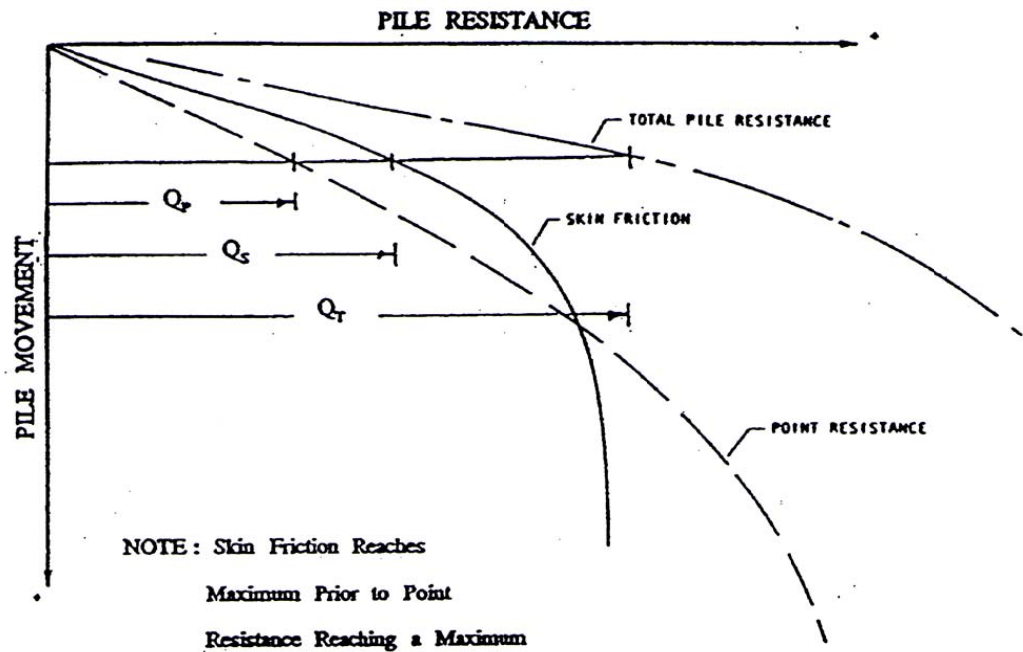


รูปที่ 2.6 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม

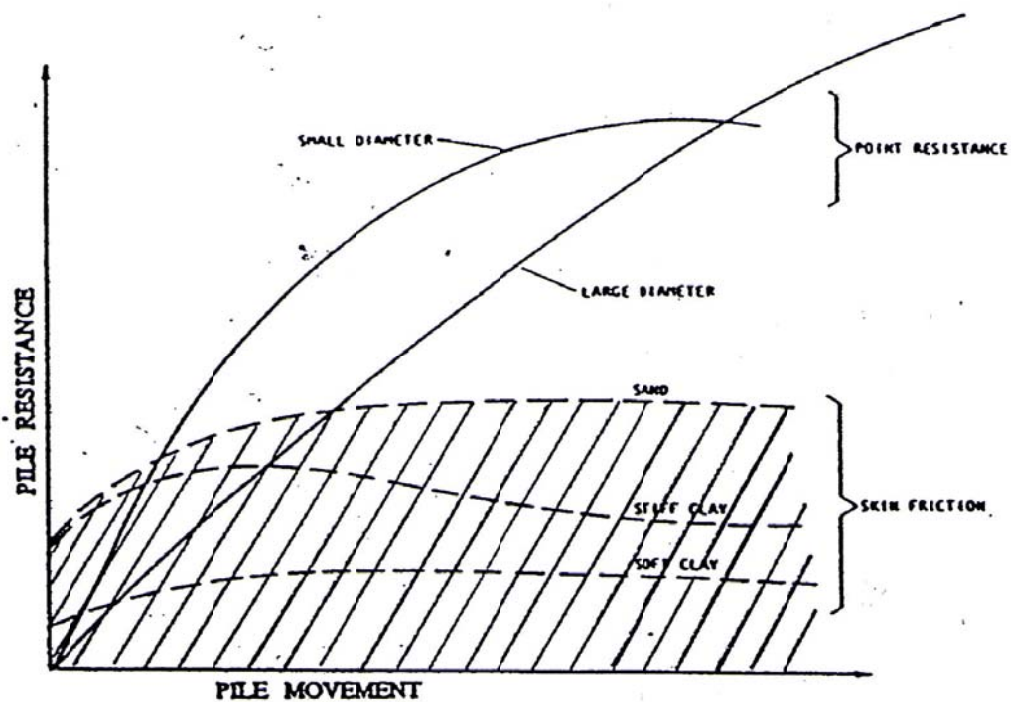
(ข้อมูลจาก : วรากร ไผ่เรียง และ ธนาถ คงสมบูรณ์, 2540)

โดยทั่วไปแล้ว การเคลื่อนที่ที่มีสาเหตุจากคุณสมบัติทางด้านอีลาสติก มีค่าเพียงพอที่จะทำให้เกิดการพัฒนากำลังของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction) ส่วนแรงต้านทานที่ปลาย (End Bearing) จะถูกพิจารณา เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ลงมากกว่า 10% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มตอกและอาจถึง 30% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะเนื่องจากเสาเข็มตอก สภาพดินที่ปลายเสาเข็มจะถูกอัดตัวให้แน่นในกระบวนการตอกมากกว่ากระบวนการเจาะเสาเข็ม เพราะฉะนั้นเสาเข็มตอกจะเคลื่อนตัวน้อยกว่าเสาเข็มเจาะในการเคลื่อนตัวจนถึงจุดพิบัติ การที่เสาเข็มมี Skin Friction จนเต็มกำลัง จำเป็นที่จะต้องเกิดการเคลื่อนที่ลงระยะหนึ่ง ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนที่ลงที่จะต้องใช้เพื่อพัฒนาจนถึงแรงต้านทานสูงสุดของ End Bearing หรือกล่าวได้ว่า Skin Friction จะถูกพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดก่อนพัฒนาจนถึงจุดสูงสุดของ End Bearing ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และข้อสังเกตที่ได้จากรูปที่ 2.7 แสดงว่า กำลังต้านทานของ Skin Friction เมื่อพัฒนาถึงค่าสูงสุดแล้วจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แม้ว่าจะยังมีการเคลื่อนที่ลงของเสาเข็มอยู่อีก ยกเว้นในชั้น Stiff Clay อาจเกิดค่า Skin Friction ลดลง หลังจากที่เสาเข็มเคลื่อนที่ลงเพื่อพัฒนากำลังไปจนถึงสูงสุดแล้ว เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากจนชั้นดินไม่สามารถจะต้านทานการถ่วงน้ำหนักจากเสาเข็มได้แล้ว ก็จะเป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear

Plane) โดยรอบผิวเสาเข็ม และที่ปลายเสาเข็ม โดยมีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียก
น้ำหนักบรรทุกที่จุดนี้ว่า น้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติของเสาเข็ม (Ultimate Pile Capacity)



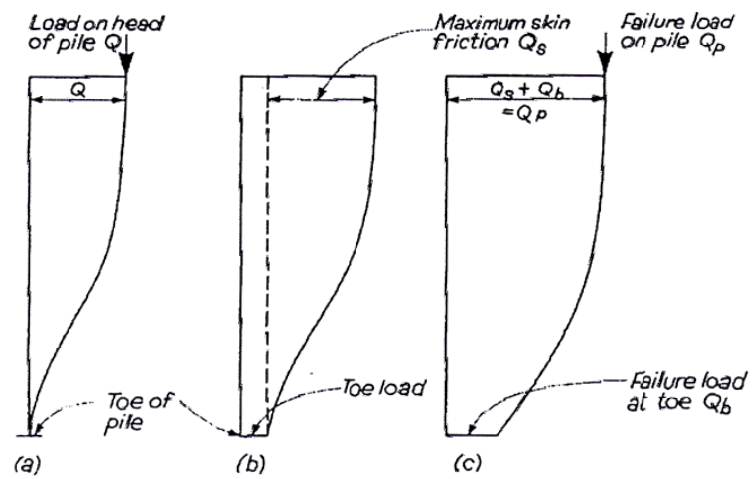
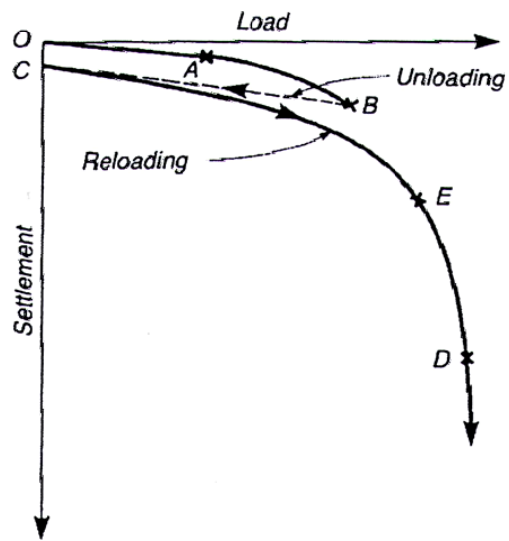
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของเสาเข็มเพื่อพัฒนากำลังรับน้ำหนักจนถึงจุดสูงสุด
(ข้อมูลจาก : Carroll, 1994)



รูปที่ 2.8 การพัฒนากำลังรับแรงเสียดทานและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม
(ข้อมูลจาก : Carroll, 1994)

Tomlinson ศึกษาพบว่าเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักลดลงในแนวดิ่งในลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆต่อเนื่องกันตลอด จะสามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการทรุดตัวได้ดังรูปที่ 2.9 ในช่วงแรกของกราฟ ระบบเสาเข็มและดิน (Pile-Soil System) จะแสดงพฤติกรรมเป็นอีลาสติกความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการทรุดตัวจะเป็นเส้นตรงจนถึงจุด A ซึ่งในช่วงแรกนี้ถ้าปล่อยน้ำหนักที่กดออกหัวเสาเข็มจะคืนตัวมาอยู่ที่ระดับเดิม เมื่อทำการกดน้ำหนักต่อไปจนเลยจุด A จะเกิด Yielding และเกิด Slippage ที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวเข็มกับดินโดยรอบ และเมื่อถึงจุด B ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่เกิด Maximum Skin Friction บนผิวเสาเข็มถ้าปลดน้ำหนักออกที่จุดนี้หัวเสาเข็มจะคืนตัวไปที่จุด C ระยะ OC ถือว่าเป็น Permanent Settlement ระยะการทรุดตัวที่จะทำให้เกิด Maximum Skin Friction จะมีค่าประมาณร้อยละ 0.3-1 ของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม สำหรับแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Base Resistance) จะถือว่าเป็นค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อมีการทรุดตัวประมาณร้อยละ 10-20 ของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายเสาเข็ม เมื่อเสาเข็มมีการทรุดตัวลงจนถึงจุด D ในรูปที่ 2.9 ค่าแรงต้านทานที่ปลายเข็มมีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นเสาเข็มจะทรุดตัวลงเรื่อยๆโดยไม่ต้องเพิ่มน้ำหนักกดหรืออาจจะเพิ่มเพียงเล็กน้อยแต่การทรุดตัวกลับเพิ่มมากขึ้นซึ่งถือว่าน้ำหนักกดที่จุด D นั้น เป็นจุดพิบัติของเสาเข็ม ถ้าใส่ Strain Gauges ตามความยาวของเสาเข็มเพื่อวัดน้ำหนักกดที่ถ่ายมาในตัวเสาเข็มตามจุดต่างๆ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าเมื่อใส่น้ำหนักจนถึงจุด A น้ำหนักทั้งหมดถูกรับโดย Skin Friction ที่ผิวเสาเข็มโดยไม่มีน้ำหนักถ่ายไปที่ปลายเสาเข็มเลย เมื่อใส่น้ำหนักจนถึงจุด B ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่เกิด Maximum Skin Friction น้ำหนักบางส่วนจะถูกรับโดยแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม และเมื่อถึงจุด D จะไม่มีน้ำหนักถ่ายไปที่ Skin Friction อีก แต่จะถูกถ่ายไปที่ปลายเสาเข็มทั้งหมด ถ้าเลยจุดนี้ไปแล้วปลายเสาเข็มจะไม่มีแรงต้านเพิ่มขึ้น เสาเข็มจึงทรุดตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อน้ำหนักกดมากขึ้น

Vesic (1970) อธิบายว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่ผิวเสาเข็มจะพัฒนาอย่างเต็มกำลังได้นั้นจะต้องมีการทรุดตัวของเสาเข็มที่ 0.25-0.35 นิ้ว โดยไม่คำนึงถึงชนิด ขนาด ความยาว และกระบวนการในการติดตั้งเสาเข็ม การพัฒนากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่ผิวเสาเข็ม จะถูกพัฒนาขึ้นอย่างเต็มกำลังก่อนจึงส่งถ่ายแรงไปยังปลายเสาเข็ม



รูปที่ 2.9 พฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินฐานราก

(ข้อมูลจาก : Tomlinson, 1994)

2.3 การประเมินน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากข้อมูลดิน

ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Bearing Capacity) ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับน้ำหนักของตัวเสาเข็มเอง ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินรอบๆเสาเข็มและที่ปลายเสาเข็ม ถ้าความสามารถในการรับน้ำหนักของตัวเสาเข็มสูงกว่าความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน ค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจริงๆ จะขึ้นอยู่กับกำลังรับน้ำหนักได้ของดินรอบเสาเข็มนั้น เสาเข็มจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างผ่านมายังชั้นดิน โดยอาศัยแรงยึดเกาะหรือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเสาเข็มกับมวลดินที่ล้อมรอบเสาเข็มซึ่งจะเรียกเสาเข็มที่แสดงพฤติกรรมอย่างนี้ว่า เสาเข็มเสียดทาน (Friction Piles) ในทางตรงข้ามเมื่อน้ำหนักบรรทุกส่วนใหญ่จะรับไว้โดยแรงต้านทานของดินบริเวณปลายของเสาเข็ม เรียกเสาเข็มที่แสดงพฤติกรรมแบบนี้ว่า เสาเข็มรับน้ำหนักที่ปลาย (End Bearing Piles)

การหาน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้น สามารถหาจากคุณสมบัติทางดานวิศวกรรมของดินและพื้นฐานทางกลศาสตร์ของดิน (Soil Mechanics) ซึ่งเป็นการคาดคะเนน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่มีขนาดต่างกันและความลึกต่างกันว่ารับน้ำหนักได้เท่าใด โดยอาศัยข้อมูลจากการสำรวจสภาพชั้นดิน ค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงเพียงใดขึ้นอยู่กับความละเอียดและความถูกต้องของข้อมูลและการแปรข้อมูล ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม

ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยทั่วไปนั้นกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจะประกอบด้วยสองส่วน ได้แก่ แรงเสียดทานรอบเสาเข็ม (Q_s) และ แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม(Q_b) การคำนวณนั้นจะพิจารณาในแต่ละส่วนแยกจากกันซึ่งจะไม่มีผลกระทบต่อกันแต่ในความเป็นจริงนั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าทั้งสองส่วนนั้นจะมีผลเกี่ยวข้องกันโดยตรงก็ตาม (Meyerhof, 1951)

$$Q_u = Q_s + Q_b \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} Q_u &= \text{กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Load)} \\ Q_s &= \text{แรงต้านทานผิวเสาเข็ม (Friction Resistance)} \\ Q_b &= \text{แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Point Bearing)} \end{aligned}$$

2.3.1 แรงต้านทานผิวเสาเข็ม (Q_s)

การวิเคราะห์เพื่อประมาณค่ากำลังต้านทานแรงที่ผิวของเสาเข็ม เป็นวิธีการที่พิจารณาถึงพื้นผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็ม และค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเป็นหลัก การตอกเสาเข็มจะมีผลต่อแรงเสียดทานจะมากหรือน้อยขึ้นกับเครื่องมือที่ใช้เนื่องจากการรบกวนต่อโครงสร้างของดินโดยตรง ดินเหนียวจะให้แรงต้านทานได้ดีกว่าทรายเป็นส่วนใหญ่ แต่มีการพิสูจน์ได้ว่าค่าหน่วยแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นดินเหนียวจะมีค่าลดลง เมื่อค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเพิ่มมากขึ้น และด้วยเหตุผลดังกล่าวค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจึงถูกปรับค่าด้วยตัวคูณลดค่า Adhesion Factor, α

2.3.1.1 ดินเหนียว (Cohesive Soil)

สำหรับดินเหนียวนี้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำค่อนข้างช้ามาก การวิบัติหรือการพังทลายของดินส่วนใหญ่จึงเกิดในลักษณะของ undrained conditions เพราะจะมีความดันของน้ำสะสมมากขึ้นอันเนื่องมาจากการตอกเสาเข็มอย่างต่อเนื่อง มุม ϕ ของดินเหนียวมีค่าน้อยมากในการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ประมาณได้เท่ากับศูนย์ ($\phi = 0$ analysis) โดย Burland (1973), Clark and Meyerhof (1972) Tomlinson (1957) ได้ทำการศึกษาและกำหนดสูตรการหาแรงเสียดทานที่ผิว (Q_s) ให้อยู่ในรูปของ Adhesion Factor (α), Undrained Shear Strength (S_u) และพื้นที่ผิวของเสาเข็ม (A_f) ดังสมการ

$$Q_s = \alpha S_u A_f \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$\alpha = \text{Adhesion Factor}$$

$$S_u = \text{Undrained Shear Strength (หรืออาจใช้ } c_u \text{)}$$

$$A_f = \text{พื้นที่ผิวสัมผัส pile – soil}$$

2.3.1.2 ทราย (Cohesionless Soil)

สำหรับทรายแม้ว่าอาจจะมี cohesion เพียงเล็กน้อยแต่ในทางปฏิบัติถือว่าเป็น frictionless soil และน้ำสามารถซึมผ่านได้อย่างรวดเร็ว การวิบัติหรือการพังทลายของดินจึงอยู่ในลักษณะของ drained conditions และคุณสมบัติของดินต้องใช้ในการหาค่าของ effective stress เสมอ เพราะ effective stress ควบคุมทั้งความแข็งแรงและการทรุดตัวของดิน ดังนั้นแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็มจะถูกพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ของ effective drained shear strength ของดินที่อยู่โดยรอบผิวของเสาเข็ม (Koizumi and Ito, 1967; Burland, 1973) และจากสูตรพื้นฐานของกำลังรับแรงเสียดทานประลัยที่ผิวเสาเข็มจึงแสดงให้อยู่ในเทอมของ effective overburden pressure, σ'_{vo}

$$\begin{aligned}
 f_s &= \beta \cdot \sigma'_{vo} \\
 \beta &= K_o \tan \delta \\
 f_s &= K_o \sigma'_{vo} \tan \phi'
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

ค่า β ถูกแสดงให้อยู่ในเทอมพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นฐานกฎการวิบัติของ Mohr - Coulomb โดยมีสมมุติฐานว่าแรงยึดเหนี่ยวของดินเป็นศูนย์ ($c' = 0$) ดังนั้นกำลังรับแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มจึงเป็นดังสมการ

$$Q_s = (K_o \sigma'_{mid} \tan \delta) A_f \tag{2.4}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 \beta &= K_o \tan \phi \\
 K_o &= \text{Coefficient of Lateral Earth Pressure} \\
 &(\sigma'_{ho} / \sigma'_{vo}) = (1 - \sin \phi) \text{ โดย (Burland, 1973)} \\
 \sigma'_{mid} &= \text{Effective Overburden Pressure at Midlayer} \\
 \delta &= \text{มุมเสียดทานระหว่างทรายและเสาเข็ม}
 \end{aligned}$$

2.3.2 แรงต้านทานปลายเสาเข็ม (Q_b)

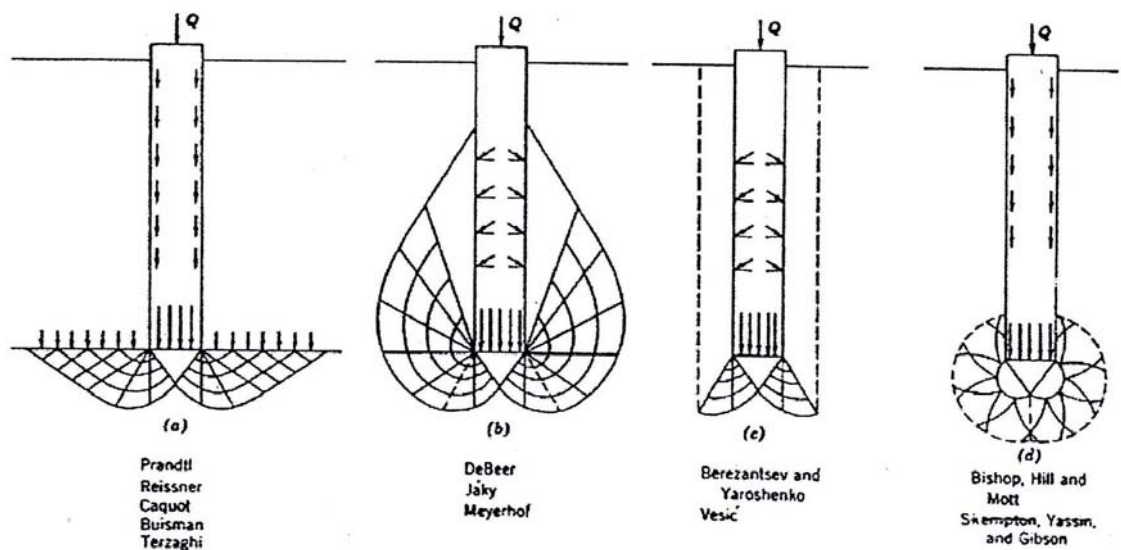
สภาพการพังทลายหรือวิบัติด้านแรงเฉือนของเสาเข็มและฐานรากแบบลึกจะคล้ายคลึงกับของฐานรากแบบตื้น แต่จะมีส่วนที่แตกต่างกันก็คือขนาดและขอบเขตของระนาบการพังทลาย (failure surface) ซึ่งการวิเคราะห์เพื่อประมาณค่ากำลังต้านทานแรงที่ปลายเสาเข็ม สามารถคำนวณโดยใช้สมการสำหรับคำนวณกำลังรับน้ำหนักของฐานรากตื้นที่เสนอโดย Terzaghi, 1943

$$\begin{aligned}
 Q_b &= A_b \cdot q_{ult} \\
 Q_b &= A_b [c N_c + \sigma'_v N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma]
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 Q_b &= \text{หน่วยแรงต้านทานบริเวณปลายเข็ม} \\
 A_b &= \text{พื้นที่หน้าตัดบริเวณปลายเสาเข็ม} \\
 c &= \text{แรงยึดเหนี่ยว (cohesion) บริเวณปลายเสาเข็ม} \\
 \sigma'_v &= \text{หน่วยแรงประสิทธิผลตามแนวดิ่ง (effective vertical)}
 \end{aligned}$$

	stress)
N_c, N_q, N_γ	= สัมประสิทธิ์ของการรับน้ำหนักบรรทุก (bearing capacity factor)
γ	= ความหนาแน่นของดิน
B	= ขนาดของเสาเข็ม (เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความกว้าง)



รูปที่ 2.10 ระบายการพังทลายที่สมมุติขึ้นของฐานรากแบบลึก
(ข้อมูลจาก : Vesic, 1967)

2.3.2.1 ดินเหนียว (Cohesive Soil)

สำหรับดินเหนียวนั้นถือได้ว่า $\phi = 0$ ซึ่งจะให้ค่า $N_q \approx 1$ และ $N_\gamma \approx 0$ หรือมีค่าน้อยกว่ามาก ดังนั้นจึงเขียนสมการได้เป็น

$$Q_b = N_c S_u A_b \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$N_c = \text{Bearing Capacity Factor} = 9$$

$$A_b = \text{พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม}$$

ค่า N_c สำหรับ $\phi \approx 0$

Skempton (1951)

$$6.14 \leq N_c \leq 9 \text{ Length to width ratio } (D/B) \geq 4$$

Skempton (1959)

$N_c = 9$ ขึ้นขึ้นด้วยการทดสอบของ London clay

Sowers และคณะ (1961) $5 \leq N_c \leq 8$ จากการทดสอบแบบจำลอง

Mohan&Jain (1961) $5.7 \leq N_c \leq 8.2$ สำหรับ expansive clays

Ladanyi (1963) $7.4 \leq N_c \leq 9.3$ สำหรับ in expansive clays

Bishop และคณะ (1961) $N_c = 1 + \frac{4}{3}l + \ln \frac{E}{3C_u}$ สำหรับเสาเข็มกลม

Tomlinson (1986) $N_c = \text{length to width ratio in bearing stratum} \geq 5$

Bowles (1986) $N_c = 5.74$

ในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปนิยมใช้ ค่า N_c เท่ากับ 9 (de Ruiter and Beringen, 1979) สำหรับเสาเข็มตอกในดินเหนียว

2.3.2.1 ททราย (Cohesionless Soil)

สำหรับทรายนั่นค่า $c = c' = 0$ และ $\phi = \phi'$ ส่วนค่าของ N_q จะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของ N_q และ soil parameters ต้องใช้ในรูปแบบของ effective เพราะเป็น long-term ultimate load capacity (drained condition) ดังนั้น

$$Q_b = N_q \sigma' A_b \quad (2.7)$$

เมื่อ

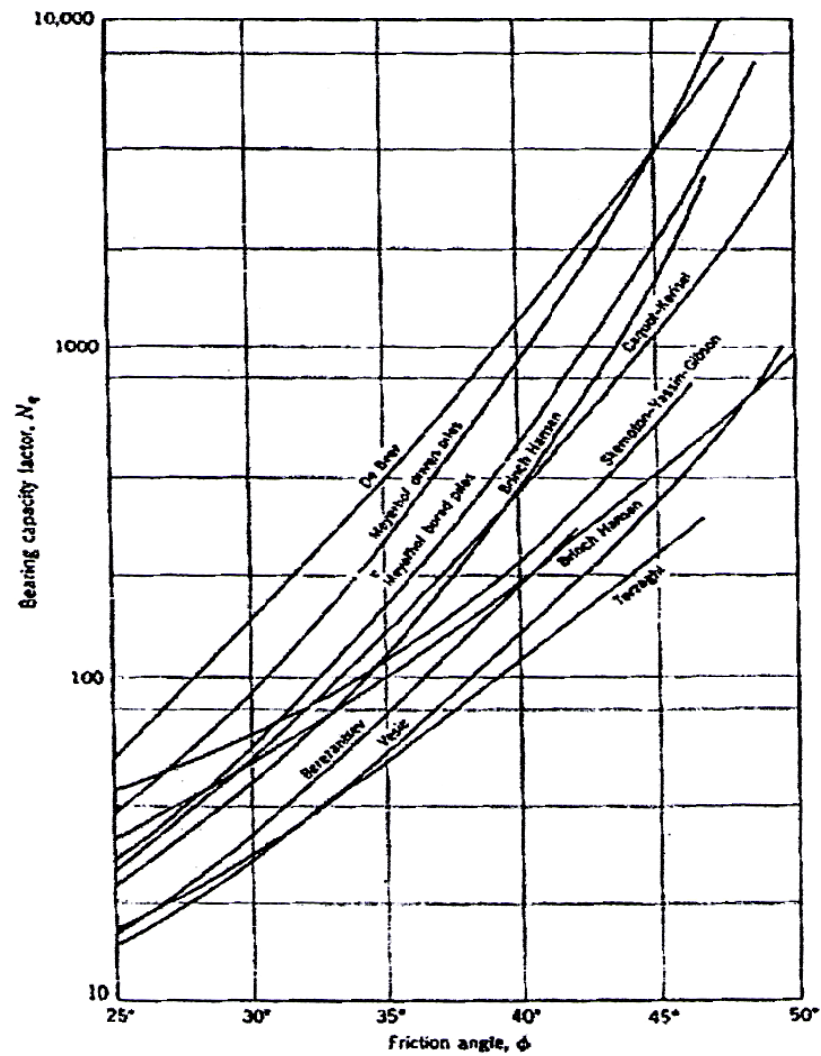
$$N_q = \text{Bearing Capacity Factor}$$

$$\sigma' = \text{Effective Overburden Pressure ที่ปลายเสาเข็ม}$$

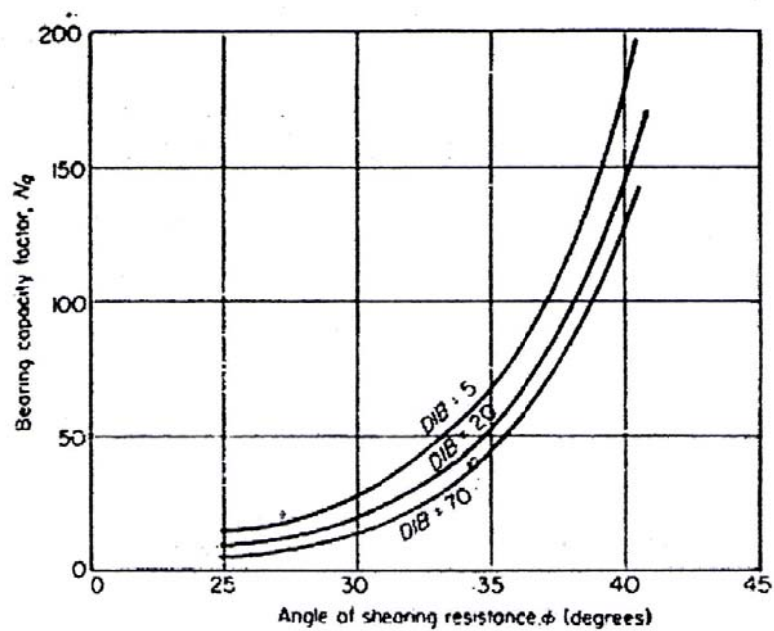
N_q ตามลักษณะของระนาบการพังทลายที่สมมุติขึ้นมาจากผู้เชี่ยวชาญหลายท่านได้สรุปและแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้รูปที่ 2.12 หาค่าของ N_q ซึ่งเสนอและแนะนำโดย Berezantsev (Tomlinson, 1986; Poulos and Davis, 1980)

ค่าของมุม ϕ ที่ใช้ในรูปที่ 2.12 นั้นได้มาโดยทำ trial tests หรือ penetration tests ส่วนผลจากการตอกเสาเข็มจะทำให้ทรายแน่นขึ้น โดยเฉพาะในชั้นทรายที่แน่นซึ่งจะทำให้ค่า ϕ สูงขึ้น แต่สำหรับชั้นทรายหลวมนั้นมีผลค่อนข้างน้อย การตอกเสาเข็มใน carbonate sand จะทำให้เม็ดทรายแตกเป็น silt และทำให้ค่า ϕ ลดลงได้ แม้ว่าจะมีผู้พยายามปรับการแก้ไข เช่น Kishida ซึ่งให้ค่าหลังการปรับแก้เป็น $0.5(\phi+45)$ แต่ก็มีผู้แนะนำให้ใช้ค่า ϕ คงเดิม (Poulos and Davis, 1980; Tomlinson, 1986) ดังนั้นจึงสมควรที่จะใช้ค่า ϕ เท่าเดิม โดยไม่มีการปรับแก้ไข จากการทดสอบพบว่าแรงต้านทานส่วนปลาย (ประลัย) ไม่ควรมีค่าเกิน 1,100 ตันต่อตารางเมตร และควรจะตอกเสาเข็มให้จมลงใน bearing stratum ไม่น้อยกว่า 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนเสาเข็มที่ฝังจมลงในชั้นดินที่มีดินเหนียวอ่อนหรือวางอยู่

บนชั้นทรายแน่น (bearing stratum) ค่า D/B (depth (length) to width ratio ของเสาเข็ม) ในรูปที่ 2.12 ให้คิดเฉพาะความยาวของเสาเข็มที่จมใน bearing stratum



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน ϕ และสัมประสิทธิ์ของการรับน้ำหนักบรรทุก N_q
(ข้อมูลจาก : Vesic, 1967)

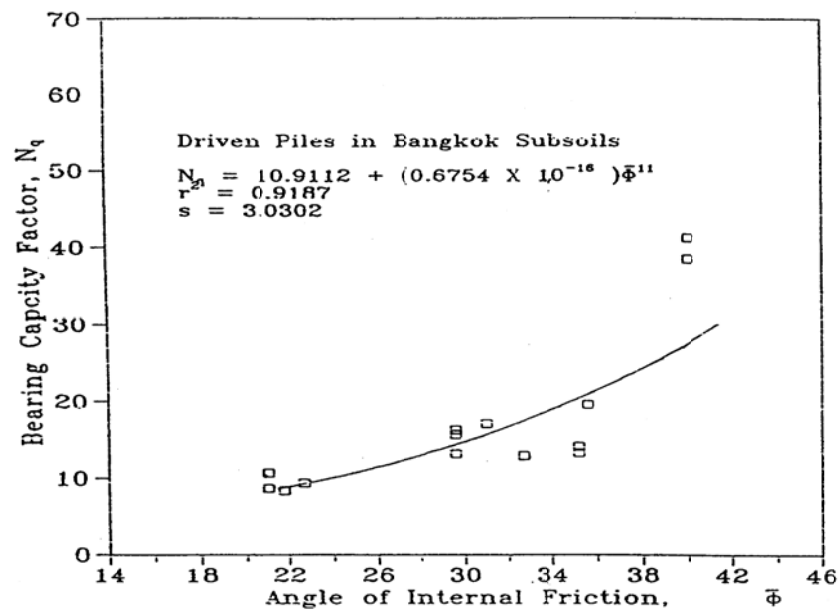


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน ϕ และสัมประสิทธิ์ของการรับน้ำหนักบรรทุก N_q
(ข้อมูลจาก : Berezantzev, 1961)

ค่า N_q ที่แนะนำโดย Berezantzev et al., (1961) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในสนามและเป็นค่าที่ถูกนำไปใช้ในการออกแบบเสาเข็มตอกที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยอย่างกว้างขวาง (Broms, 1966; Vesic, 1967; Fleming et. al., 1985) โดยวิธีการของ Berezantzev et al., (1961) นี้ได้ระบุไว้ว่า ผลกระทบจากความสัมพันธ์ของ $D/B = S$ มีน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตาม Meyerhof (1976) ได้แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากความสัมพันธ์ของ D/B มีค่าค่อนข้างสูงและมีค่าเฉลี่ย N_q เข้าใกล้ค่าของ Berezantzev

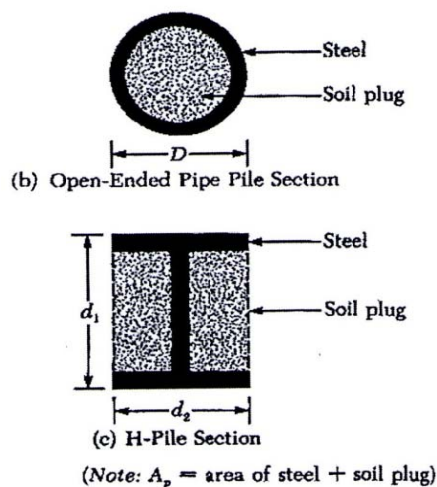
Suchada (1989) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ' กับ N_q สำหรับเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพ ดังสมการที่ 2.8 และรูปที่ 2.13

$$\text{สำหรับเสาเข็มตอก} \quad N_q = 10.9 + (0.6754 \times 10^{-16}) \phi'^{11} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเสียดทาน ϕ กับสัมประสิทธิ์ของการรับน้ำหนักบรรทุก, N_q สำหรับเสาเข็มตอก (ข้อมูลจาก : Suchada, 1989)

Braja M. Das, (1999) แนะนำว่า การคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่มีหน้าตัดรูปตัว H หรือ Steel H-Pile และเสาเข็มกลมกลวงปลายเปิด (Open-end Pipe Pile) ให้พิจารณาถึงผลกระทบของดินที่จะเข้ามาอุดแน่นที่ปลายเสาเข็ม (Soil Plug) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงพิจารณาให้พื้นที่ของปลายเสาเข็ม, A_p และเส้นรอบรูปของเสาเข็ม, p เท่ากับพื้นที่หน้าตัดรวม (Gross Area) ที่มีดินเข้ามาอุดแน่นเต็มพื้นที่ของเสาเข็ม ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มที่พิจารณาถึงผลกระทบของดินที่จะเข้ามาอุดแน่นที่ปลายของเสาเข็ม (Soil Plug) (ข้อมูลจาก : Das, 1999)

API (2000) ได้ให้ข้อเสนอแนะสำหรับเสาเข็มกลมกลวงปลายเปิด (Open-end Pipe Pile) ที่ถูกตอกลงในชั้นดินเหนียวว่ากำลังการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสามารถหาได้จากผลรวมของกำลังรับแรงเสียดทานตลอดความยาวของเสาเข็มกับกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มโดยไม่ต้องคิดกำลังรับแรงเสียดทานระหว่างดินที่เข้ามาอุดแน่นภายในช่องว่างของเสาเข็มกลวงกับเสาเข็ม ให้ทำการคำนวณกำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็มกับกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มได้เหมือนกับเสาเข็มปลายปิดแต่ควรคูณด้วยตัวคูณลดกำลังด้วย 0.8 สำหรับกำลังรับแรงเสียดทานของเสาเข็ม และคูณด้วย 0.5 สำหรับกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม และต้องใช้พื้นที่หน้าตัดรวม (Gross Area) ที่มีดินเข้ามาอุดแน่นเต็มพื้นที่ของเสาเข็มในการคำนวณหาลำกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม, Q_b แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มสามารถเป็นผลรวมของกำลังรับแรงเสียดทานที่ผิวภายนอกและภายในของเสาเข็มกลวงกับกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มเมื่อทำการพิจารณาด้วยพื้นที่หน้าตัดสุทธิของเสาเข็มที่ปลายเสาเข็ม (the net cross-sectional area of the pile toe) หรือพิจารณากำลังรับแรงเสียดทานของดินที่จะเข้ามาอุดแน่นที่ปลายของเสาเข็มแล้วแต่อย่างใดจะน้อยกว่า

Tomlinson (1994) ได้ทำการศึกษาภาคสนาม พบว่ากำลังรับแรงเสียดทานที่ปลายเสาเข็มชนิดปลายเปิดหรือเสาเข็มชนิดกลวง จะมีค่าไม่เกิน 5 MPa โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มหรือความหนาแน่น (density) ของดินที่ทำการตอกเสาเข็ม ซึ่งค่ากำลังรับแรงเสียดทานที่ปลายเสาเข็มชนิดปลายเปิดนี้สามารถใช้ร่วมกับการออกแบบที่มีค่าความปลอดภัย (F.S.) เท่ากับ 2.5 ได้

Yildirim (2009) ได้ทำการศึกษาการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกชนิด H-Pile ขนาด 310x110 มม. ในชั้นดินที่มี Soil Profile หลายชั้น เพื่อเทียบกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ทำการประเมินกับการทดลองด้วยวิธี Static Load Test โดยมีสมมติฐานว่า ในการตอกเสาเข็ม H-Pile มีดินเข้าไปอัดแน่นที่ผิวของเสาเข็มเต็มหน้าตัดตลอดความยาวเสาเข็มให้ทำการคำนวณเส้นรอบรูปของเสาเข็มตามเส้นรอบรูปจริงของเสาเข็ม H-Pile สำหรับการคำนวณแรงเสียดทานที่ผิว (Shaft capacity) เสาเข็ม ส่วนการคำนวณแรงต้านทานที่ปลาย (Base capacity) เสาเข็มให้ใช้พื้นที่หน้าตัดรวม (Gross Area) ที่มีดินเข้ามาอุดแน่นเต็มพื้นที่ของเสาเข็ม (พื้นที่หน้าตัด = ความกว้างของปีก x ความสูง) ในการคำนวณ ผลคือ การคำนวณกำลังรับแรงต้านที่ผิวเสาเข็มหากใช้เส้นรอบรูปจริงที่คำนวณได้จากหน้าตัด H-Pile จะทำให้ค่าที่ได้ออกมาสูงกว่ากำลังรับแรงต้านทานที่ผิวจริงรับได้ โดยที่ค่าที่คำนวณต่อค่าที่วัดได้จริง สำหรับแรงต้านทานที่ผิวจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.22-2.42 ดังนั้น หากนำเส้นรอบรูปจริงมาใช้คำนวณในการคำนวณแรงต้านทานที่ผิวเสาเข็มตอกชนิด H-Pile ตัวคูณลดค่า (Reduction Factor) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาปรับแก้ค่าลงให้มีความใกล้เคียงยิ่งขึ้น ซึ่งตัวคูณลดค่านี้นี้มีค่าอยู่ระหว่าง

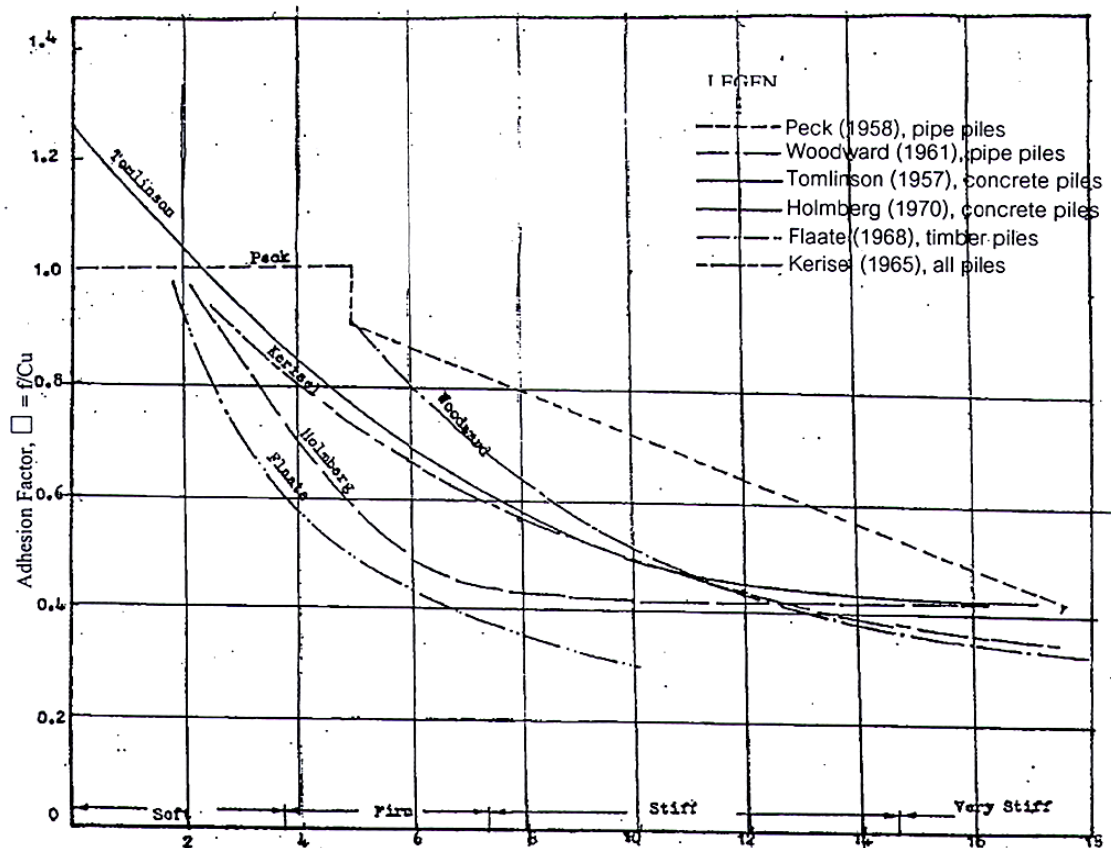
0.41-0.88 แต่อย่างไรก็ตาม การนำเฉพาะค่าความกว้างของปีกของเสาเข็ม H-Pile (H-Pile outer perimeter) มาใช้ก็ยังได้ผลการคำนวณออกมาดีกว่า โดยมีค่าการประเมินกำลังรับน้ำหนักที่ผิวเสาเข็มออกมาเท่ากับ 0.82-1.64 เท่าของค่าแรงต้านทานที่วัดได้จริง

2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion Factor)

ค่า Adhesion Factor (α) ของเสาเข็มแต่ละต้นจะมีค่าแตกต่างกันออกไป แม้ว่าเสาเข็มจะอยู่ในสถานที่เดียวกันและเลือกใช้วิธีการทำเสาเข็มที่เหมือนกัน ค่า Adhesion Factor สามารถหาได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มจนวิบัติ อย่างไรก็ตามในเวลานี้ยังไม่มีใครทราบว่าค่า Adhesion Factor และค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินในสภาวะไร้การระบายน้ำ, S_u ควรมีค่าเป็นเท่าไร ค่าต่างๆเหล่านี้จะต้องอยู่ในดุลยพินิจของวิศวกรผู้ออกแบบ และโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มประกอบการตัดสินใจ

ผลการศึกษาวิจัยที่ได้อธิบายไว้เกี่ยวกับค่า Adhesion Factor ที่นำมาอ้างอิงนี้คือ Tomlinson (1957, 1971); Peck (1954, 1958); Bergfelt (1957); Seed และ Reese (1955); Woodward et al (1961); Kerisel (1967); Broms (1966); Flaate (1968, 1972) และ Holmberg (1970) แสดงความคิดเห็นตรงกันว่า สำหรับดินเหนียวอ่อนมากค่า Adhesion Factor จะมีค่าเท่ากับ 1.00 โดยพวกเขาอธิบายว่า เมื่อเสาเข็มถูกตอกลงไปในชั้นดินอ่อน ดินจะถูกรบกวนและสูญเสียกำลังไป แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการตอกเสาเข็ม เมื่อการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มกระทำหลังจากที่แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการตอกเสาเข็มหมดไป ค่าหน่วยแรงต้านทานแรงเฉือนที่ผิวของเสาเข็มที่วัดได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินหรือมากกว่าเล็กน้อย ด้วยเหตุผลเนื่องจากว่าดินเหนียวอ่อนสามารถคืนกำลังการต้านแรงเฉือนของดินได้ แต่อย่างไรก็ตามค่า Adhesion Factor จะมีค่าลดลงในชั้นดินเหนียวแข็งเนื่องจากว่า ดินเหนียวแข็งสูญเสียกำลังแล้วยากที่จะมีกำลังคืนกลับได้ดังเดิม

Tomlinson (1957) แนะนำว่า ค่าหน่วยแรงต้านทานแรงเฉือนที่ผิวของเสาเข็มเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับวัสดุที่นำมาทำเสาเข็ม และค่าหน่วยแรงต้านทานแรงเฉือนที่ผิวเสาเข็มจะมีค่าลดลงเมื่อดินเหนียวมีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้น และเขายังเป็นผู้หนึ่งซึ่งได้เสนอค่า Adhesion Factor ที่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ได้จากการทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 2.15 จากรูปยังได้รวบรวมผลการศึกษาเกี่ยวกับค่า Adhesion Factor ที่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีผู้เสนอไว้เช่น Peck (1958); Woodward et al (1961); Kerisel (1965); Flaate (1968) และ Holmberg (1970)

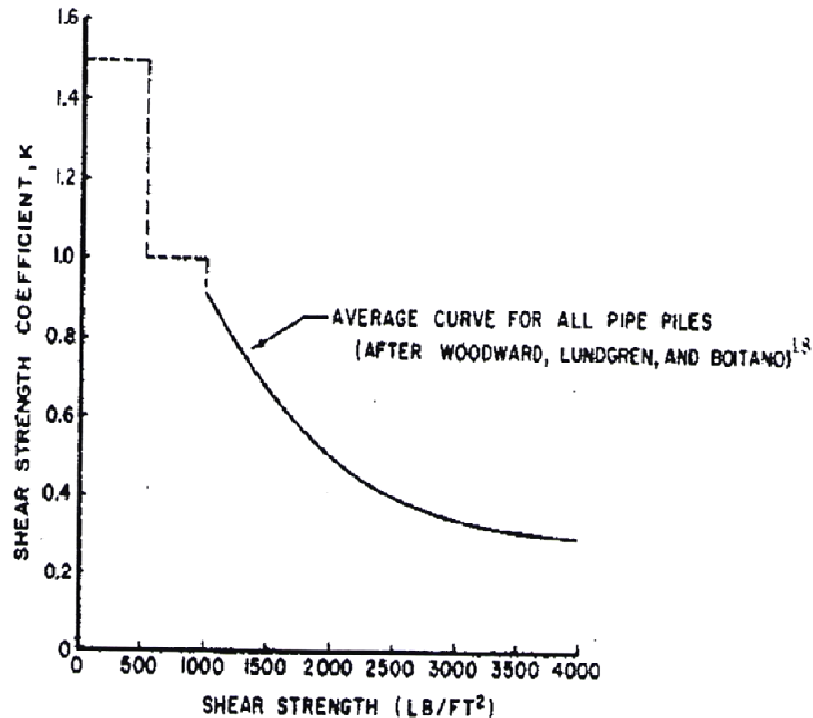


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน
(ข้อมูลจาก : Lim Shu Yun, 1978)

Bjerrum (1973) แสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับค่า Adhesion Factor ที่มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินว่า การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจากการทดสอบกำลังอัดทิศทางเดียว (Unconfined Compression Test) กับตัวอย่างดินที่เก็บมาจากสนามเพื่อทำการทดสอบนั้น ดินตัวอย่างดังกล่าวจะถูกรบกวนในระหว่างการเก็บตัวอย่าง เขาจึงทำการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินโดยการทดสอบ Field Vane Shear Test และเสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับค่าที่ได้เสนอไว้โดย Flaate (1968) และ Holmberg (1970) แต่จะให้ค่า Adhesion Factor ที่ต่ำกว่าของ Tomlinson (1957) ที่ทำการทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินจากการทดสอบกำลังอัดทิศทางเดียว (Unconfined Compression Test)

Reese และ Seed (1955); Coyle และ Reese (1966) ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับค่า Shear Strength Coefficient, k ว่าสำหรับดินเหนียวอ่อนที่มีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนน้อยกว่า 500 ft^2 ($S_u < 500 \text{ ft}^2$) ควรใช้ค่า Shear Strength Coefficient, k เท่ากับ 1.5 สำหรับดินเหนียวแข็งปานกลางที่มีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนอยู่ระหว่าง 500 ft^2 ถึง $1,000 \text{ ft}^2$ ควรใช้ค่า Shear Strength Coefficient, k เท่ากับ 1.00

และสำหรับดินเหนียวแข็งที่มีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินมากกว่า 1,000 ft^2 ควรใช้ค่า Shear Strength Coefficient, k ที่แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear Strength Coefficient, k กับค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (ข้อมูลจาก : Reese และ Seed, 1995; Coyle และ Reese, 1966)

Holmberg (1970) ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มตอกที่ฝังในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor (α) กับค่า Undrained Shear Strength (S_u) สำหรับในดินเหนียวที่มีค่า S_u น้อยกว่า 2 ค่า α จะมีค่าประมาณ 1

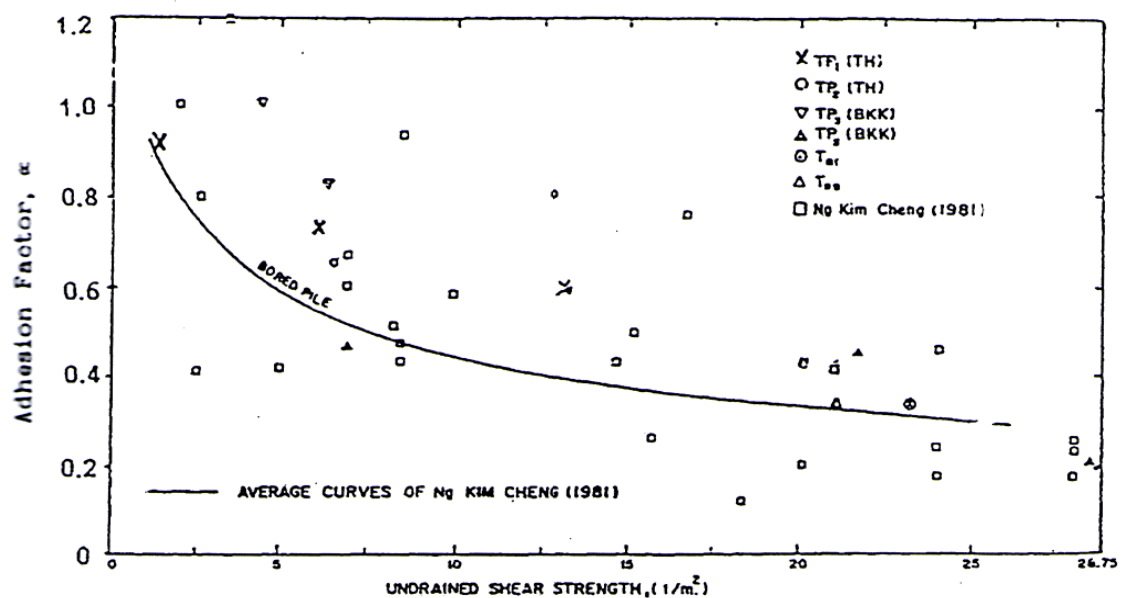
Pimpasugdi (1989) วิเคราะห์ผลการทดสอบเสาเข็มเจาะ 25 ต้น ในบริเวณกรุงเทพฯและใช้วิธีสมการถดถอย (Regression Method) หาค่า α สำหรับดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งสามารถแสดงถึงสมการความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ S_u ได้ดังสมการนี้

$$\alpha = 0.94\exp(-0.0054S_u) \quad (2.9)$$

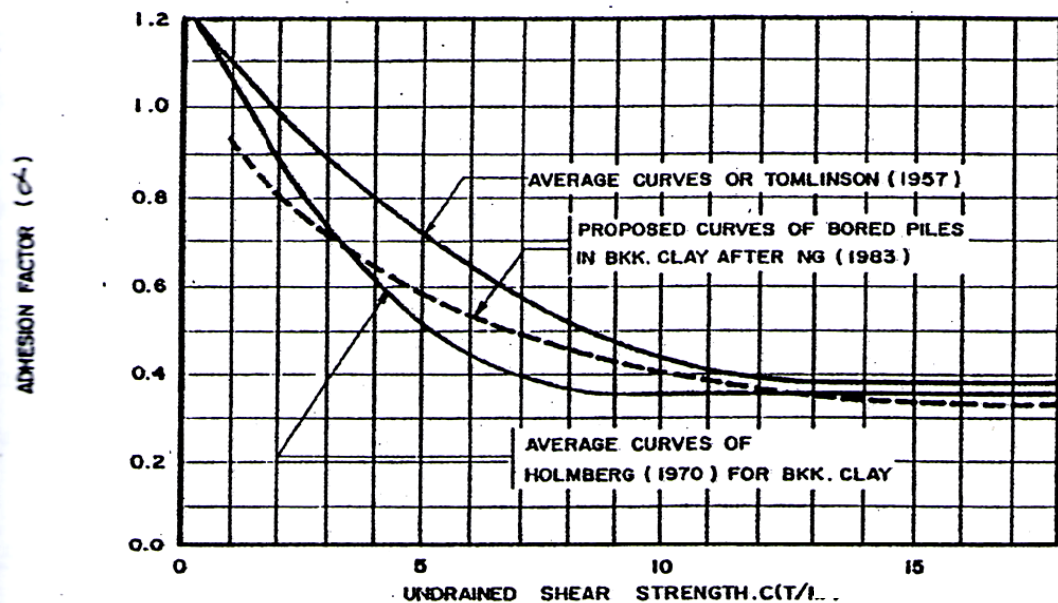
โดยที่

S_u อยู่ในช่วง 1-28 ตัน/ตร.ม.

Ng (1982) ศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะในบริเวณดินเหนียวกรุงเทพฯ จากการทดสอบในสนาม และข้อมูลการวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion Factor กับ Undrained Shear Strength ได้แก่การศึกษารวบรวมของ Chiruppapa (1968); Suwanakul (1969); Bandekar (1980); Promboon และ Brenner (1981) โดยค่า Undrained Shear Strength ที่หาได้จาก Unconfined Compression Test พบว่าค่า α ที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าของ Holmberg (1970) ที่เป็นกรณีของเสาเข็มตอก และใช้ Vane Shear Test ในการหาค่า Undrained Shear Strength แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลของ สุวรรณ เขียวชาญศิลป์ (2531) เป็นการศึกษาในกรณีเสาเข็มเจาะเช่นเดียวกันพบว่ามีค่าที่สอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ได้ทำการสรุปค่า α ของเสาเข็มเจาะในบริเวณดินเหนียวกรุงเทพฯ จากรายงาน การวิจัยในอดีต



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion Factor กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
(ข้อมูลจาก : Ng, 1982)



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion Factor กับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
(ข้อมูลจาก : Ng, 1982)

Vere Suwanakul (1969) ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มชนิดหล่อในที่จำนวน 5 ต้น ในกรุงเทพฯ เพื่อศึกษาและหาค่า Adhesion Factor ค่า Shaft Friction และ End Bearing ของเสาเข็มจะหาได้จากค่าที่วัดโดย Load cell ค่า Adhesion Factor สามารถคำนวณได้จาก Shaft Load ที่ได้จาก Load cell จะคำนวณได้ดังสมการ

$$\alpha = \frac{F_s}{A_s \times C} \quad (2.10)$$

โดย

F_s = Shaft Load (Tons)

A_s = Surface Area of Pile Shaft (m^2 .)

C = Average Soil Shear Strength around the Pile Shaft ($Tons/m^2$.)

Helmberg (1970) ได้ทำการศึกษาวิจัยค่า Adhesion Factor ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) ซึ่งพบว่าเสาเข็มที่ใช้วัสดุที่แตกต่างกัน และความเค้นเฉือนของดินแตกต่างกันค่า Adhesion Factor มีค่าใกล้เคียง 1 สำหรับดินเหนียวอ่อน และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ (น้อยกว่า 1) เมื่อค่า Undrained Shear Strength ของดินเพิ่มขึ้น เงื่อนไขดังกล่าวนี้มีความสอดคล้องกับแนวความคิดของ Tomlinson (1959) ซึ่งได้ให้เหตุผลเกี่ยวกับเรื่องนี้ว่า เมื่อมีการขุดเจาะดินเพื่อหล่อเสาเข็มหรือการติดตั้งเสาเข็ม จะเกิดการรบกวนดินในช่วงแรกจะมีช่องว่างดังกล่าวลดลงไปหรือไม่มีช่องว่างเหลืออยู่เลย ค่า Adhesion Factor ของดินเหนียวอ่อนจะมีค่าสูง สำหรับดินเหนียวแข็งการคืนตัวกลับเข้าสู่

สภาพเดิมนั้นเป็นไปได้อย่างช้าๆหรือเป็นไปได้เลย ทำให้ยังคงมีช่องว่างระหว่างเสาเข็มและดินอยู่ ดังนั้นค่า Adhesion Factor จึงมีค่าน้อยกว่า

(Poulos, 2001) เสนอแนวทางเลือกในการออกแบบเสาเข็มตอกด้วยวิธีใหม่ซึ่งถูกพัฒนาโดย Fleming และคณะ (1985) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า Undrained shear strength ไว้ดังนี้

$$f_s = \alpha * S_u * F_1 \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.5 / (S_u / \sigma'_v)^{1/2} && \text{For } S_u / \sigma'_v < 1 \\ \alpha &= 0.5 / (S_u / \sigma'_v)^{1/4} && \text{For } S_u / \sigma'_v > 1 \end{aligned}$$

สัมประสิทธิ์การปรับลดเนื่องจากความชะลูดของเสาเข็ม (Reduction Factor for Pile Slenderness, F_1) เป็นความสัมพันธ์ในรูปอัตราส่วนของ ความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (L/d) (Semple and Rigden, 1984)

$$\begin{aligned} F_1 &= 1 && \text{For } L/d < 50 \\ F_1 &= 0.7 && \text{For } L/d > 120 \end{aligned}$$

Saldivar et al. (2005) ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบเสาเข็มตอกโดยให้ชื่อว่า ICP (Imperial College pile) ซึ่งนำไปลองประเมินกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียวโซนทะเลสาบที่เม็กซิโก พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังรับน้ำหนักจริงสูง หลักการคำนวณด้วยวิธีนี้มีพื้นฐานจากวิธีการคิดหน่วยแรงประสิทธิผลของชั้นดิน (Effective Stress Method) ทำการพัฒนามาจนได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของชั้นดินที่แตกต่างไปจากการคำนวณด้วยวิธีอื่นๆซึ่งเมื่อพิจารณาจากการศึกษาแล้วมีความแม่นยำสูงกว่าการคำนวณด้วยวิธีของ α ที่ใช้กันโดยทั่วไป ค่าพารามิเตอร์ของวิธีนี้ได้มาจากการศึกษาวิจัยและการทดสอบที่ได้ทำการบันทึกไว้ โดยสูตรในการวิเคราะห์กำลังการรับน้ำหนักบรรทุกมีพื้นฐานมาจากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) ดังนี้

$$\tau_{zrf} = \sigma'_{rf} \tan \delta_f \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \tau_{zrf} &= && \text{ความเค้นเฉือนเฉพาะแห่ง (local shear stress)} \\ \sigma'_{rf} &= && \text{รัศมีความเครียดประสิทธิผล} \\ \delta_f &= && \text{มุมเสียดทาน} \end{aligned}$$

ซึ่งเป็นการยากที่จะทำการประเมินค่าโปรไฟล์รัศมีมีความเครียดประสิทธิผล (the radial effective stress profile) ที่พัฒนาขึ้นหลังจากทำการตอกเสาเข็มแล้วให้มีค่าใกล้เคียงกับค่า σ'_{rc} จึงได้ทำการทดสอบในสนามพบว่าค่าพารามิเตอร์ดินที่สำคัญในการควบคุมค่า σ'_{rc} คือ ค่าความเครียดประสิทธิผลในแนวตั้งของดินเหนียว (σ'_{vo}), อัตราส่วนการอัดตัวเกินปกติ (Overconsolidation Ratio, OCR) หรือ อัตราส่วนความเค้นจุดคราก (Yield Stress Ratio, $YSR = \sigma'_{vy}/\sigma'_{vo}$) และค่าการตอบสนองความไว (Sensitivity, $S_t = C_u/C_{ur}$) ยังมีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดิน (Earth Pressure Coefficient) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการ $K_c = \sigma'_{rc}/\sigma'_{vo}$ ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า YSR และมีค่าลดลงหากค่า S_t มีค่าต่ำลง

เมื่อทำการพิจารณาข้อมูลทั้งหมดของกลุ่มนักวิจัยที่ทำการศึกษาคำนวณด้วยวิธี ICP คนอื่นๆ พบว่า Lethane et al., (1994), Jardine และ Chow (1966) ได้ทำการพัฒนาสูตรอย่างง่ายเพื่อการคำนวณค่าของ σ'_{rc} สำหรับเสาเข็มตอกทรงกระบอกทั้งแบบปลายปิดและปลายเปิดในชั้นดินเหนียว ดังนี้

$$\sigma'_{rc} = K_c \sigma'_{vo} \quad (2.13)$$

$$K_c = (2.2 + 0.016YSR - 0.87\Delta I_{vy}) YSR^{0.42} (h/R^*)^{-0.20} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Delta I_{vy} &= \log St \\ I_{vo} &= \text{ดัชนีช่องว่างระยะต้น (the in situ void indices)} \\ I_{vy} &= \text{ดัชนีช่องว่างที่จุดคราก (at-yield void indices)} \\ R^* &= \text{รัศมีรอบนอกของเสาเข็ม (the pile's outer radius)} \\ &= b/\sqrt{\pi} \end{aligned}$$

เมื่อค่าโปรไฟล์รัศมีมีความเครียดประสิทธิผลถูกทำการประเมินจากสูตรดังที่กล่าวมาข้างบน ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม (Q_s) จึงสามารถทำการหาค่าได้จาก τ_{rzf} ตลอดความยาวของเสาเข็ม โดยอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าค่า σ'_r จะมีค่าลดลงที่น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม ดังนี้

$$\sigma'_{rf} = 0.8 \sigma'_{rc} \quad (2.15)$$

Smith (1992) และ Chow (1997) ได้ทำการพัฒนาสูตรการตอบสนองความไวจากการทดสอบหาค่าการตอบสนองความไวด้วยเครื่อง oedometer ดังนี้

$$S_t = \frac{\left(\frac{C_u}{\sigma'_{vy}} \right) \sigma'_{vy}}{\left(\frac{C_{ur}}{\sigma'^*_{vy}} \right) \sigma'^*_{vy}} = \frac{\sigma'_{vy}}{\sigma'^*_{vy}} \quad (2.16)$$

พรพจน์ (2552) ได้ทำการประเมินวิธีการทำนายพฤติกรรมของเสาเข็มเจาะบนชั้นดินอ่อนกรุงเทพเพื่อหาความเหมาะสมของวิธีคำนวณการทำนายกำลังของเสาเข็ม โดยใช้ 4 วิธี ประกอบด้วยวิธีของ Total Stress, Poulos, Randolph และ ICP และยังได้ทำการทำนายการเสีรูปของเสาเข็มจาก 4 วิธี ประกอบไปด้วยวิธีของ Poulos, Vesic, Bowles และ Budhu และยังได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์ อิลิเมนต์ PLAXIS 2D เพื่อทำนายค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb เพื่อจำลองพฤติกรรมของดินนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดสอบของเสาเข็มเจาะในสนามจำนวน 29 ต้น จากการเปรียบเทียบการประเมินการทำนายกำลังของเสาเข็มกับผลทดสอบพบว่า การคำนวณด้วยวิธี ICP เป็นวิธีที่ให้ผลประมาณค่ากำลังการรับน้ำหนักของ เสาเข็มได้ดี ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสามวิธี ส่วนการทำนายการทรุดตัวของเสาเข็มพบว่าวิธีของ Budhu เป็นวิธีการ ที่สามารถทำนายการทรุดตัวได้ใกล้เคียงที่สุดในช่วงของน้ำหนักที่กระทำกับเสา เข็มไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ ของความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

2.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

ฐานรากเสาเข็มเป็นโครงสร้างสำคัญที่จะต้องรับน้ำหนักจำนวนมาก ดังนั้นจะต้องมีวิธีที่เหมาะสมในการคำนวณหาและตรวจสอบยืนยันค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยสามารถจำแนกได้เป็น 3 วิธี คือ

1. Static Method เป็นการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบบรรทุกน้ำหนักจริง ในสถานที่ก่อสร้างจริง โดยใช้น้ำหนักบรรทุกลงบนเสาเข็มและทำการวัดค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ เพื่อนำมาศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็ม แล้วทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งตามกฎหมายกระทรวงฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) ออกตาม พรบ.ควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 ข้อที่ 21(2) กำหนดให้ใช้ตัวทอนความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 2 และ ข้อที่ 22 กำหนดการทดสอบกำลังแบกทานของเสาเข็ม อัตราการทรุดตัวและการทรุดตัวของเสาเข็มเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะต้องอยู่ในเกณฑ์ ดังต่อไปนี้

- (1) การทรุดตัวทั้งหมดของเสาเข็มจากรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด แล้วปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลาสี่สิบสี่ชั่วโมง ต้องไม่เกิน 25 มิลลิเมตร
- (2) อัตราการทรุดตัวเฉลี่ยของเสาเข็มหลังจากรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด แล้วปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลาสี่สิบสี่ชั่วโมง ต้องไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
- (3) การทรุดตัวสุทธิของเสาเข็มหลังจากปล่อย ให้รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเป็นเวลาสี่สิบสี่ชั่วโมง แล้วคลายน้ำหนักบรรทุกจนหมดปล่อยทิ้งไว้โดยไม่รับน้ำหนักอีก สี่สิบสี่ชั่วโมง ต้องไม่เกิน 6 มิลลิเมตร

2. Dynamic Method เป็นการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากข้อมูลการตอกเสาเข็ม ซึ่งนอกจากจะคำนวณแรงต้านทานการตอกเสาเข็มได้แล้ว ในทางปฏิบัติยังเป็นการทดสอบว่าปลายของเสาเข็มยังลงถึงชั้นดินที่มีความแข็งแรงเพียงพอหรือไม่ โดยใช้กฎการตกกระทบของ Newton มาประยุกต์เพื่อหาแรงต้านทานของเสาเข็มจากการปล่อยลูกตุ้มลงกระทบบนหัวเสาเข็มจะเกิดการถ่ายพลังงานสักระยะเสาเข็มทำให้เสาเข็มเคลื่อนที่ลงไปชั้นดิน ในทางปฏิบัตินั้นยากที่จะทราบค่าที่แท้จริงของพลังงานที่สูญหายไปในขณะที่ตอกเสาเข็ม จึงเป็นเหตุให้วิธีนี้ไม่เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป แต่ก็ยังมีประโยชน์ในการตรวจสอบการตอกเสาเข็มร่วมไปกับการคำนวณด้วยวิธีอื่นๆ

3. การทดสอบน้ำหนักบรรทุกจริงของเสาเข็มในสนาม เป็นการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ทดสอบส่วนมากจะใช้ขนาดและวิธีการตอกเช่นเดียวกับการตอกใช้งานจริง โดยจะทำการวัดค่าการทรุดตัวของเสาเข็มตามน้ำหนักบรรทุกที่ประเมินไว้และบางครั้งอาจทำการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกจนถึงการพังทลายของดิน แต่ส่วนใหญ่จะทดสอบจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ใช้ในการ

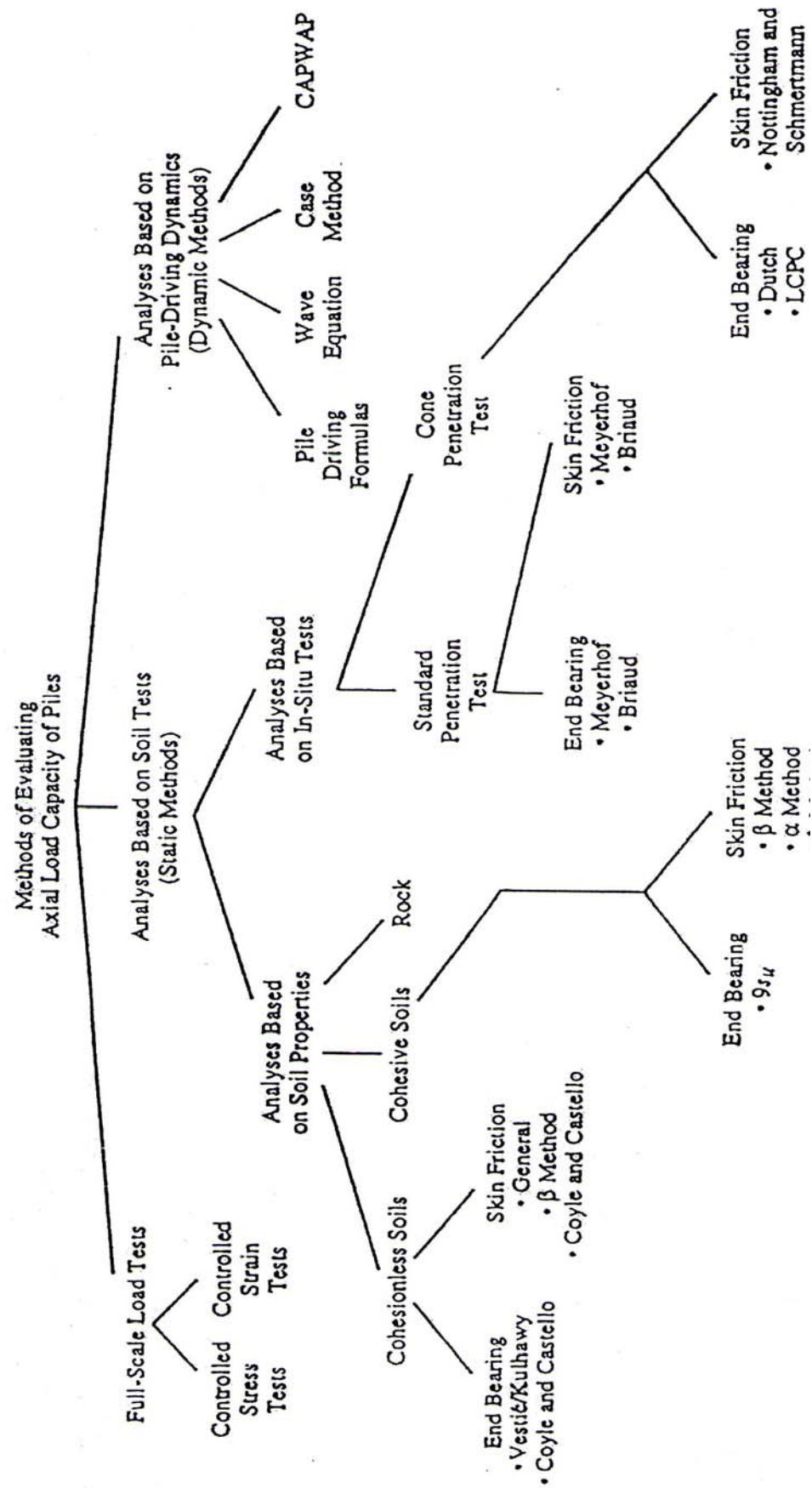
ออกแบบแล้ววัดการทรุดตัวของเสาเข็ม ซึ่งหากไม่เกินขีดจำกัดก็แสดงว่าเสาเข็มนั้นรับน้ำหนักดังกล่าวได้ วัตถุประสงค์ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจริงในสนามของเสาเข็มอาจแยกได้เป็น

3.1 Proof Load Test เพื่อตรวจสอบว่าเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ การทดสอบเช่นนี้มักทำในกรณีที่มิประสบความสำเร็จในการออกแบบในบริเวณที่ทำการตอกเสาเข็มและทำการทดสอบนี้มาแล้ว จึงจะสามารถทำการกำหนดขนาด ความยาวและระดับปลายหยั่งของเสาเข็มที่จะตอกได้ก่อนทำการทดสอบและมักจะทำการทดสอบการรับน้ำหนักจนถึง ประมาณ 2-2.5 เท่าของน้ำหนักที่ทำการออกแบบไว้ เนื่องจากไม่สามารถทำการทดสอบกับเสาเข็มทั้งหมดทุกต้นได้จึงอาจจะมีเสาเข็มบางต้นที่มีการทรุดตัวมากกว่าที่ทำการออกแบบไว้

3.2 Ultimate Load Test เพื่อหาน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่สามารถรับได้จริง และดูพฤติกรรมของเสาเข็มในขณะรับน้ำหนักต่างๆกัน ในบริเวณสถานที่ก่อสร้าง เพื่อใช้ผลและข้อมูลเหล่านี้ทำการออกแบบในครั้งต่อไป การทดสอบแบบนี้มักทำในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบเสาเข็มในบริเวณที่ตอกเสาเข็มมาก่อน

เสาเข็มที่จะนำมาทดสอบทั้ง 2 วิธีนี้ จะต้องเป็นเสาเข็มที่มีชนิด ขนาด ความยาว และใช้เครื่องมือในการตอกเสาเข็มเหมือนกันกับเสาเข็มที่จะใช้ในการก่อสร้างจริงๆ และการทดสอบจะต้องทำการทดสอบในบริเวณสถานที่ก่อสร้างจริงหรือพื้นที่ใกล้เคียงที่มีผลจากการทำการเจาะสำรวจดินแล้วว่ามีชั้นดินเหมือนกับบริเวณสถานที่ก่อสร้าง

การทดสอบเสาเข็มโดยทั่วไปมักจะทำการทดสอบแบบแรก คือ กำหนดน้ำหนักที่จะให้เสาเข็มรับก่อน แล้วจึงทำการทดสอบดูว่าเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้จริงหรือไม่ โดยเพิ่มน้ำหนักขึ้นเป็น 2 ถึง 3 เท่าของน้ำหนักที่กำหนดให้เสาเข็มรับ แล้วดูค่าการทรุดตัวของเสาเข็มว่าอยู่ในข้อกำหนดหรือไม่ วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ค่อยประหยัดนักในการออกแบบเพราะเสาเข็มจะรับน้ำหนักปลอดภัยได้มากกว่าที่เรากำหนดไว้ก็ได้



รูปที่ 2.19 แผนภูมิการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (ข้อมูลจาก : Coduto 1994)