

บทที่ 2

บททวนงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 พฤติกรรมที่เกิดจากการตอกเสาเข็ม

2.1.1 พฤติกรรมของดินเมื่อถูกกระทำโดยหน่วยแรงจากการตอกเสาเข็ม

2.1.1.1 เสาเข็มตอกในดินเหนียว

ผลจากการตอกเสาเข็ม เป็นการรบกวนดินที่อยู่รอบและปลายเสาเข็ม (remold state) ซึ่งมีผลต่อดินในช่วงเท่ากับความกว้างของเสาเข็ม สำหรับดินที่อยู่ห่างเสาเข็มออกไป ผลการรบกวนจะน้อยลง นอกจากนี้ การตอกเสาเข็มยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดดิน (soil skeleton) และแรงดันน้ำในโพรงดิน (pore pressure) อันเนื่องมาจากการเพิ่มแรงด้านข้าง (horizontal stress) ดังนั้น จึงมีผลให้กำลังรับแรงเฉือน (undrained shear strength) ของดินเปลี่ยนแปลงไปด้วย

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การตอกเสาเข็มจึงทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงในตอนแรกเมื่อสิ้นสุดการตอกเสาเข็มและกำลังรับแรงเฉือนจะสูงขึ้นกับเวลา อันเนื่องมาจากผลของการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้าง เม็ดดินโดยปริมาตรคงเดิม (thixotropic)

สำหรับ Normal Consolidated Clay (NC Clay) และ Slightly Over Consolidated Clay (Slight OC Clay) นั้น ผลของการตอกเสาเข็มจะทำให้ ความดันน้ำในโพรงดินเพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ (consolidation process) ดังนั้นกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็มจึงเพิ่มขึ้นกับเวลา

สำหรับดินซึ่ง Heavy Over Consolidated Clay (Heavy OC Clay) การจัดตัวใหม่ของโครงสร้างของเม็ดดินใหม่หลังการตอกเสาเข็ม จะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของกำลังการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ส่วนความดันน้ำในโพรงดินจะลดลงเมื่อมีการตอกเสาเข็ม และความดันน้ำดังกล่าว

จะกลับสู่สภาพสมดุลในเวลาต่อมา จึงทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มลดลงเล็กน้อย ดังนั้น การเพิ่มกำลังรับน้ำหนักกับเวลาจึงมีไม่มากนัก

2.1.1.2 เสาเข็มตอกในดินที่ไม่มีความเชื่อมั่น

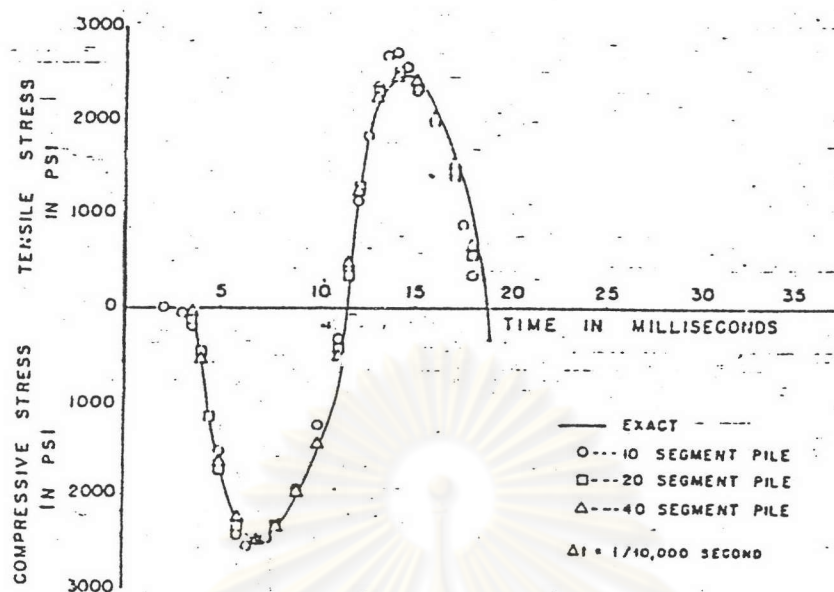
สำหรับเสาเข็มซึ่งตอกในดินที่ไม่มีความเชื่อมั่น (cohesionless soil) ซึ่งไม่มีดินเม็ดละเอียดปนอยู่ (fine grained soil) และอยู่ในสภาพปกติ (หลวมถึงแน่น) ค่ากำลังรับแรงเฉือน (ϕ) จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการตอกเสาเข็มทำให้ทราย มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ (D_r) เพิ่มขึ้น ส่วนความดันน้ำในโพรงมีค่าคงที่ จึงไม่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงเฉือน และการตอกเสาเข็ม จะให้ผลในทางตรงกันข้ามสำหรับดินทรายแน่น ซึ่งอยู่ในสภาพแน่นที่สุด (very dense sand) ส่วนการตอกเสาเข็มในทรายที่มีดินเม็ดละเอียดผสมอยู่ มีผลทำให้ความดันน้ำในโพรงมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ในทรายแน่นกำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันน้ำในโพรงมีค่าลดลง และในทรายหลวมกำลังเฉือนจะลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความดันน้ำในโพรง

2.1.2 พฤติกรรมของเสาเข็มเมื่อถูกหน่วยแรงกระทำเนื่องจากการตอก

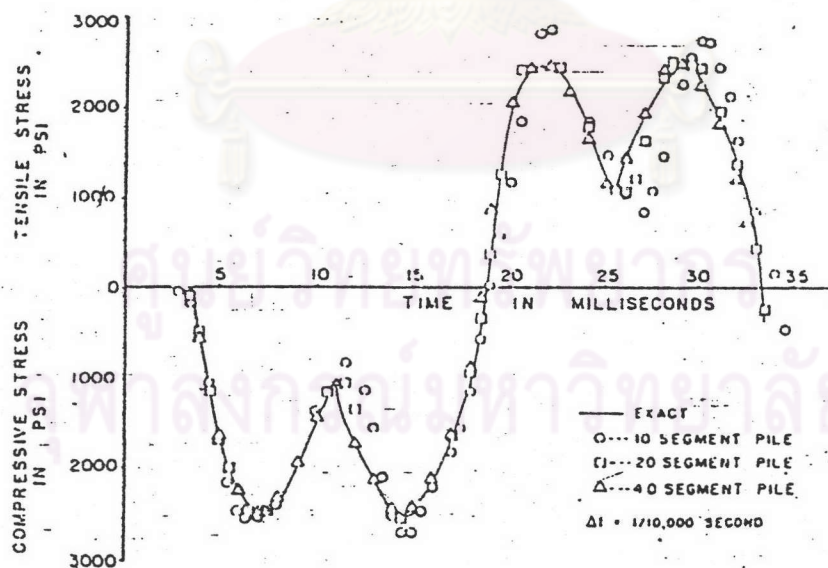
เมื่อต้อน้ำหนักกระทบหัวเสาเข็มจะเกิดคลื่นหน่วยแรง (stress wave) เคลื่อนที่ไปตามความยาวของเสาเข็มด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ความเข้มของคลื่นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของต้อน้ำหนักที่กระทบเสาเข็ม (Broms & Hellmen, 1971) และคลื่นหน่วยแรงจะมีความเข้มลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น

C.H.Samson, T.J.Hirsch และ L.L.Lowery (1963) ได้ศึกษาลักษณะ ของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะตอกเสาเข็มพบว่า

1.) สำหรับเสาเข็มยาว L ปลายปล่อยอิสระที่เวลา $t = L/c$ เมื่อ c คือความเร็วคลื่น (m/s) คลื่นหน่วยแรงจากหัวเสาเข็ม ซึ่งเป็น compressive stress มาถึงปลายเสาเข็ม และมีการสะท้อนกลับไปยังหัวเสาเข็มเป็น tension wave โดยความเร็วของคลื่นทั้ง 2 นี้ จะมีการซ้อนทับ (superimpose) กันขณะสะท้อนกลับ ทำให้ความเร็วที่ปลายเสาเข็ม เป็นสองเท่าของความเร็วที่หัวเสาเข็มเดิม ลักษณะคลื่นดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางเสาเข็มคอนกรีต ปลายปล่อยอิสระ
(C.H.Samson , T.J.Hirsch และ L.L.Lowery , 1963)



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่กึ่งกลางเสาเข็มคอนกรีต ปลายยึดแน่น
(C.H.Samson , T.J.Hirsch และ L.L.Lowery , 1963)

2.) สำหรับในเสาเข็มปลายยึดแน่นเมื่อเวลา $t = L/c$ คลื่นหน่วยแรงจากหัวเสาเข็มมาถึงปลายเสาเข็มเป็น compressive wave และเมื่อมีการสะท้อนกลับไปยังหัวเสาเข็ม ยังคงเป็น compressive wave ซึ่งมีขนาดและทิศทางเช่นเดียวกับ compressive wave ที่มาจากหัวเสาเข็ม จนเมื่อ compressive wave เคลื่อนที่กลับมาถึงหัวเสาเข็มซึ่งเสมือน หัวเสาเข็มนั้นเป็นปลายปล่อยอิสระ คลื่นที่สะท้อนกลับจึงเป็น tension wave เหมือนกรณี ปลายเข็มปล่อยอิสระ แต่ลักษณะของคลื่นจะเป็น 2 peak เนื่องจาก คลื่นสะท้อนเป็นคลื่นชนิดเดียวกับคลื่นที่เกิดขึ้นในตอนแรก จึงเกิดการเสริมกัน ดังแสดงในรูป 2.2

2.2. การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

การประเมินค่าการรับน้ำหนักของเสาเข็มสามารถทำได้หลายวิธี กล่าวคือ ในเบื้องต้นจะใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจดิน (soil investigation) นำมาประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยวิธีปฐพีกลศาสตร์ (Soil mechanics method) เพื่อกำหนดความยาวเสาเข็ม จากนั้นเมื่อทำการตอกเสาเข็ม driving formulars เป็นที่นิยมนำมาใช้เพื่อควบคุมการตอกเสาเข็มในสนามเมื่อตอกด้วยระบบ drop hammer ซึ่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนหลายอย่าง

ในปัจจุบัน จึงนิยมใช้การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic pile load test) ซึ่งนอกจากจะสามารถใช้ประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มแล้ว ยังสามารถให้ค่าที่เกี่ยวข้องกับการตอกเสาเข็ม เพื่อใช้ในการควบคุมการตอกเสาเข็มจริงในสนามให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ส่วนการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์ ((Static pile load test) นั้น เป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะใช้ตรวจสอบการประเมินการรับน้ำหนักของเสาเข็มทุกวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว

2.2.1 การประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีปฐพีกลศาสตร์

การประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยวิธีปฐพีกลศาสตร์นี้ อาศัยหลักการสมดุลของแรงโดยคิดว่าการรับน้ำหนักของเสาเข็มจุดวิบัติ (P_u) นั้น มีค่าเท่ากับ ผลรวมของแรงเสียดทาน (P_f) รอบผิวนอกของเสาเข็ม และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ที่จุดวิบัติ (P_b) ลบด้วยน้ำหนักของเสาเข็ม (W_p)

$$P_u = P_f + P_b - W_p \quad \dots(2.1)$$

$$\text{เมื่อ } P_f = \int_0^L A_p (C_a + \sigma'_{vs} K_s \tan \phi_a) dl \quad \dots(2.2)$$

$$P_b = A_b (c N_c + \sigma'_{vb} N_q + 0.5 \gamma d N_\gamma) \quad \dots(2.3)$$

A_p = ความยาวของเส้นรอบรูปของเสาเข็ม

L = ความยาวของเสาเข็ม

C_a = หน่วยแรงยึดเกาะ (adhesion)

σ'_{vs} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งที่ผิวเสาเข็ม

(effective overburden pressure in soil at pile shaft)

K_s = สัมประสิทธิ์ของแรงดันดินด้านข้าง (coefficient of lateral earth pressure)

ϕ_a = มุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม (angle of friction between soil and pile)

A_b = พื้นที่หน้าตัดที่ปลายของเสาเข็ม

c = cohesion of soil

σ'_{vb} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งที่ปลายเข็ม

(effective overburden pressure in soil at pile tip)

γ = หน่วยน้ำหนักของดินที่ปลายเข็ม

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่ปลายเสาเข็ม

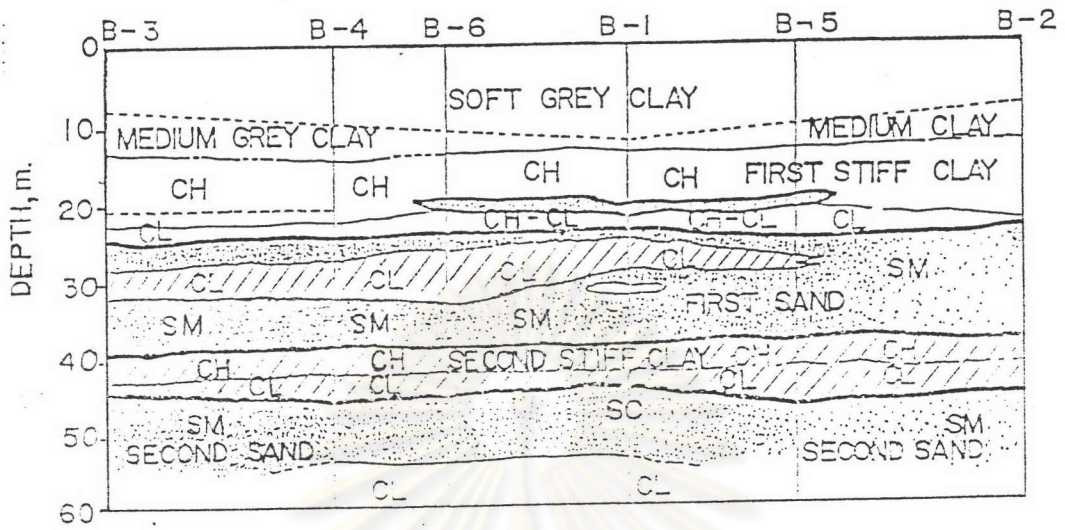
N_c, N_q, N_γ = สัมประสิทธิ์กลางของค่าหน่วยแรงรับแรงธรร

2.2.1.1 วิธีประเมินค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

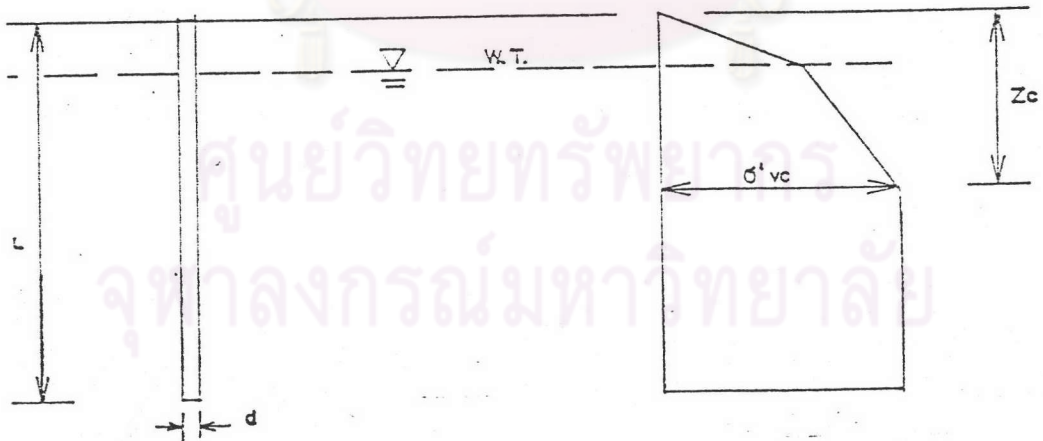
a.) สำหรับเสาเข็มที่ตอกใน NC Clay

เป็นกรณีที่พบอยู่ทั่วไปของเสาเข็มที่ตอกในดินกรุงเทพฯ ลักษณะสภาพชั้นดิน และคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้น ของชั้นดินกรุงเทพฯ ได้มีผู้วิจัยแนะนำไว้หลายท่าน ดังรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.1 โดยกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จะเพิ่มขึ้นตามเวลา ทำให้ critical condition เกิดขึ้นที่เวลาเริ่มแรก (short term) ซึ่งยังไม่มี การระบายน้ำ (undrained condition) การวิเคราะห์จึงทำในลักษณะของหน่วยแรงรวม (total stress analysis) โดย $\phi = 0$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$ จากสมการที่ 2.1 จึงได้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยดังนี้

$$P_{ult} = \int_0^L A_p (C_a dl) + A_b c N_c \quad \dots(2.4)$$



รูปที่ 2.3 ลักษณะสภาพชั้นดินกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการกระจายหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง ของดินทรายรอบเสาเข็ม

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติดินโดยประมาณของชั้นดินกรุงเทพฯ (Tonyagate, 1978)

Soil Type	Depth m	Kn %	LL %	PL %	PI %	LI	t t/m ²	e	G _s
Weathered Clay	0-2	35-70	35-55	-	23-30	0.7-1.0	1.6-1.8	1.3-1.4	2.6-2.7
Soft Clay	1-16	65-90	65-90	30-40	40-63	0.6-0.9	1.5-1.7	1.5-2.6	2.7
Stiff Clay	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
First Sand	14-38	17-25	-	-	-	-	1.8-2.1	0.7	2.7
Hard Clay	24-43	30-35	55-69	18-25	31-44	0.1-0.3	1.8-2.0	0.8-0.95	2.7
Second Sand	30-58	20	-	-	-	-	1.8-2.6	0.75	2.7
Hard Clay	51-67	22-26	48-70	23-25	25-46	0.1	2.04	0.65-0.72	2.74
Sand	67-85	16	-	-	-	-	-	-	2.69
Hard Clay	79-96	19-20	55-57	22-26	32-34	-0.1	2.0-2.1	0.55-0.61	2.7-2.6

เมื่อ $W_p = A_b \sigma'_{vb}$ และค่า C_u และ N_c จะได้ออกมาดังต่อไปนี้

b.) สำหรับเสาเข็มที่ตอกใน Heavy OC Clay

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม มีโอกาสจะลดลงกับเวลา ทำให้ critical condition อาจเกิดขึ้นในระยะยาว (long term) ซึ่งการวิเคราะห์จะพิจารณาในลักษณะที่คิดว่า ไม่มี excess pore pressure นั่นคือ คุณสมบัติทางด้านแรงเฉือนจะอยู่ในรูปหน่วยแรงประสิทธิผล นอกจากทั้งสองกรณีแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผล ทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ทั้งเพิ่มและลด ในเวลาเดียวกัน ซึ่งต้องพิจารณาว่า ปัจจัยตัวใดมีผลมากเท่าใด เพื่อหาข้อสรุปว่าเวลา มีผลต่อการรับน้ำหนักของเสาเข็มอย่างไร ส่วนการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{ult} = \int_0^L A_p (\sigma'_{vs} K_s \tan \phi_a) dl + A_b (c' N_c + \sigma'_{vb} N_q) - W_p \quad \dots(2.5)$$

ค่า $K_s \tan \phi_a$ และ N_q ดังจะได้เสนอต่อไป และสมมติให้ σ'_{vs} และ σ'_{vb} มีค่าเท่ากับ effective vertical over burden pressure (σ'_{vo})

c.) สำหรับเสาเข็มที่ตอกใน cohesionless soil

ดังที่กล่าวไว้แล้ว ในเรื่องของพฤติกรรมของเสาเข็มที่ตอกใน cohesionless soil จะเห็นว่า กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สำหรับ clean cohesionless soil ซึ่งหลวมถึงแน่นปกติ เนื่องจาก ค่าความดันน้ำในโพรง (pore pressure) มีค่าคงที่ ดังนั้น การวิเคราะห์จึงอยู่ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress)

Brom (1966) ได้เสนอว่า เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จะสมมติให้ σ'_{vs} และ σ'_{vb} มีค่าเท่ากับ effective vertical over burden pressure (σ'_{vo}) ซึ่งต่อมาได้มีการศึกษาเพิ่มเติมจาก Vesic (1967) พบว่า หน่วยแรงต้านที่ผิว และปลายเสาเข็ม ไม่จำเป็นต้องเพิ่มตามความลึกตลอดความยาวเสาเข็ม แต่จะมีค่าคงที่ภายใต้ความลึกในระดับหนึ่ง ซึ่งแนวคิดนี้ได้ถูกใช้ในเวลาต่อมา และชี้ให้เห็นว่า หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งของดินที่อยู่รอบและใต้เสาเข็มไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากับ effective over burden pressure แต่จะมีค่าจำกัดอยู่ที่ความลึกระดับหนึ่งเรียกว่า ความลึกวิกฤติ (critical depth) ดังรูปที่ 2.4 จากแนวคิดนี้เองจึงทำให้ หน่วยแรงเสียดทานที่ผิว และ

หน่วยแรงดันที่ปลายเสาเข็ม มีค่าคงที่ภายใต้ความลึกวิกฤติ และจะสามารถหาน้ำหนักบรรทุก
ประลัยได้จาก

$$P_{ult} = \int_0^L A_p (\sigma'_{vs} K_s \tan \phi_a) dl + A_b \sigma'_{vb} N_q - W_p \quad \dots(2.6)$$

โดย $K_s \tan \phi_a$ และ N_q จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ส่วน σ'_{vs} และ σ'_{vb} จะใช้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.5 โดยพิจารณาค่า Z_c เฉพาะส่วนของเสาเข็มที่จมในชั้นทราย

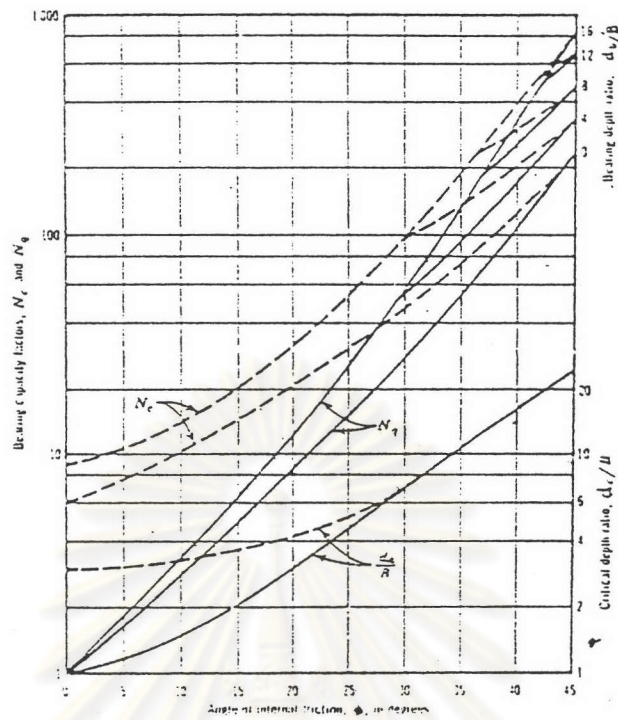
จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่า ในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม
ด้วยวิธีนี้นั้น ความถูกต้องแม่นยำ ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น soil parameter ที่ได้จากการ
ทดสอบในสนามและในห้องปฏิบัติการ ซึ่งยากที่จะใกล้เคียงสภาพจริง และเวลาซึ่งมีความซับซ้อน
เป็นอย่างมาก ต้องมีการเลือกพิจารณา ระยะสั้นหรือระยะยาว นอกจากนี้ ยังมีขบวนการบางอย่าง
ซึ่งไม่สามารถกำหนดแน่นอนตายตัว แต่มีผลต่อการรับน้ำหนักของเสาเข็ม เช่น การอัดตัวคายน้ำ
(Consolidation) , การบวมตัวของดิน (Swelling) , การปูดของดิน (Heaving) และ Thixotropy

2.2.1.2 ค่าคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

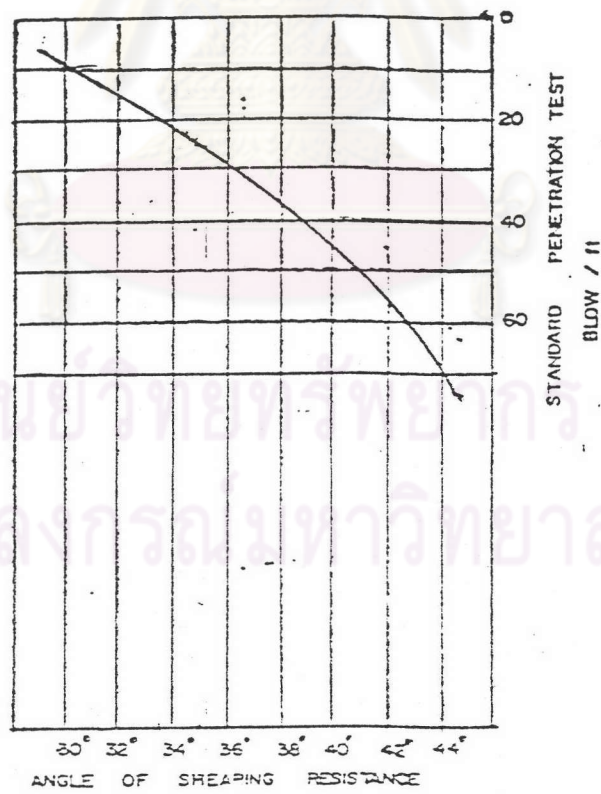
1.) ความสัมพันธ์ระหว่าง N กับกำลังรับแรงเฉือน (Undrained shear strength)

1.1) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ S_u โดยทั่วไป S_u จะหา
จากการทดสอบในสนามและการทำ Unconfined Compressive Test ในห้องปฏิบัติการ หรือโดยใช้
ค่า N เมื่อเป็นดินเหนียวแข็ง

- Terzaghi และ Peck (1948) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า
 N กับ q_u ไว้ คือ $q_u = 0.12$ ถึง $0.13 N$ หรือ ประมาณ $N/8$ ksc ดังแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกวิกฤติ กับมุมเสียดทานภายใน (After Meyerhof , 1976)



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N (SPT) กับ ϕ (Peck , Hansen และ Thornburn , 1974)

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u (Terzaghi และ Peck , 1948)

N (blows/ft)	q_u (ksc)	consistency
น้อยกว่า 2	น้อยกว่า 0.25	very soft
2 - 4	0.25 - 0.50	soft
4 - 8	0.50 - 1.00	medium
8 - 15	1.00 - 2.00	stiff
15 - 30	2.00 - 4.00	very stiff
มากกว่า 30	มากกว่า 4.00	hard

- วีรนนท์ (2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ดังกล่าว ของดินเหนียวชั้นแรกในชั้นดินกรุงเทพ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Terzaghi และ Peck (1948) และ Sower et.al. (1961) สำหรับดินเหนียวประเภท CH และ CL ตามลำดับ และการแบ่งประเภทของดินเหนียว เป็นไปตาม Unified Soil Classification ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้มานี้ มาจากการศึกษาชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก (First stiff clay) ซึ่งมีความลึกช่วง 14 - 25 เมตร มีค่า N มากกว่า 8 โดยค่า N นี้ ไม่ต้องปรับแก้

สำหรับดินเหนียวซึ่งมีความเป็นพลาสติกสูง (CH)

$$S_u = 0.678 N \text{ tsm.} \quad \dots(2.7)$$

สำหรับดินเหนียวซึ่งมีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL)

$$S_u = 0.5175 N \text{ tsm.} \quad \dots(2.8)$$

เมื่อ N = ค่าการทดสอบการทะลุทะลวงมาตรฐาน

(Standard Penetration Test)

q_u = ค่า Unconfine compressive strength

S_u = ค่า Undrained shear strength

1.2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ ϕ

- Meyerhof (1956) และ Peck (1958) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ ϕ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า N กับ ϕ เสนอโดย Meyerhof (1956) และ Peck (1958)

ค่า N (blows/ft)	มุมเสียดทานภายใน ϕ (องศา)	
	เสนอโดย Peck	เสนอโดย Meyerhof
0 - 4	น้อยกว่า 28.5	น้อยกว่า 30
4 - 10	28.5 - 30.0	30 - 35
10 - 30	30.0 - 36.0	35 - 40
30 - 50	36.0 - 41.0	40 - 45
มากกว่า 50	มากกว่า 41	มากกว่า 45

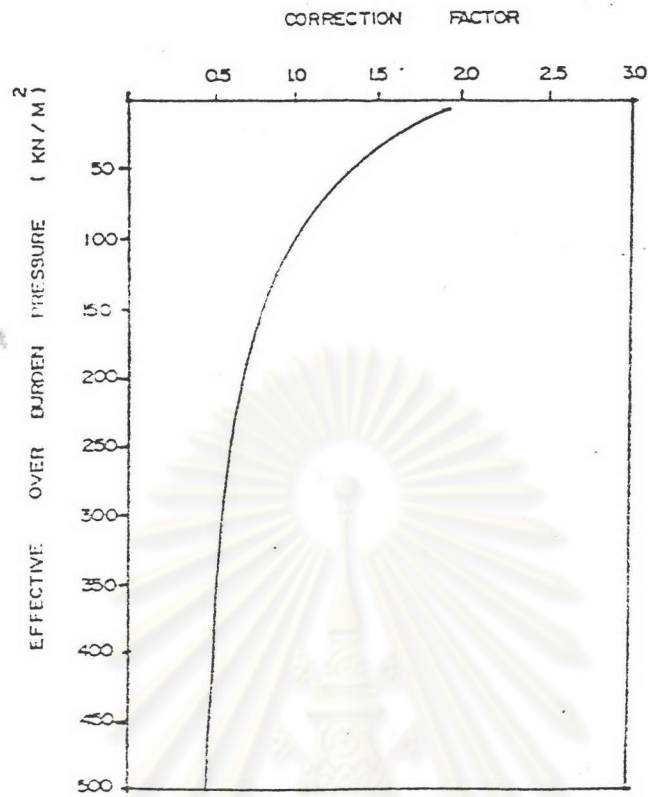
- Peck Hanson และ Thornburn (1974) ได้เสนอเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N กับ ϕ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งค่า N ที่นำมาใช้หาค่า ϕ นี้ จะต้องปรับแก้ค่า N ที่วัดได้ในสนาม เนื่องจากอิทธิพลของความดันประสิทธิผลจากน้ำหนักดินชั้นบน ในรูป 2.7 เสียก่อน เพื่อเทียบกับค่า N เป็นค่ามาตรฐานเมื่อวัดที่ความกดดินประสิทธิผลมีค่า 1 ตันต่อตารางฟุต (หรือประมาณ 10 kN/m^2) เพื่อนำไปหาค่า ϕ

- Thanuklueng (1987) แนะนำว่า ความสัมพันธ์ที่ศึกษาโดย Peck , Hansen และ Thornburn (1974) ตามรูปที่ 2.6 ให้ผลซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการศึกษา Silty sand ของชั้นทรายกรุงเทพฯ ซึ่งค่า N ที่จะนำมาใช้ในรูปที่ 2.6 นี้ นั้น จะต้องมีการปรับแก้เนื่องจาก σ'_{vo} เสียก่อน ซึ่งค่าปรับแก้ (C_N) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7

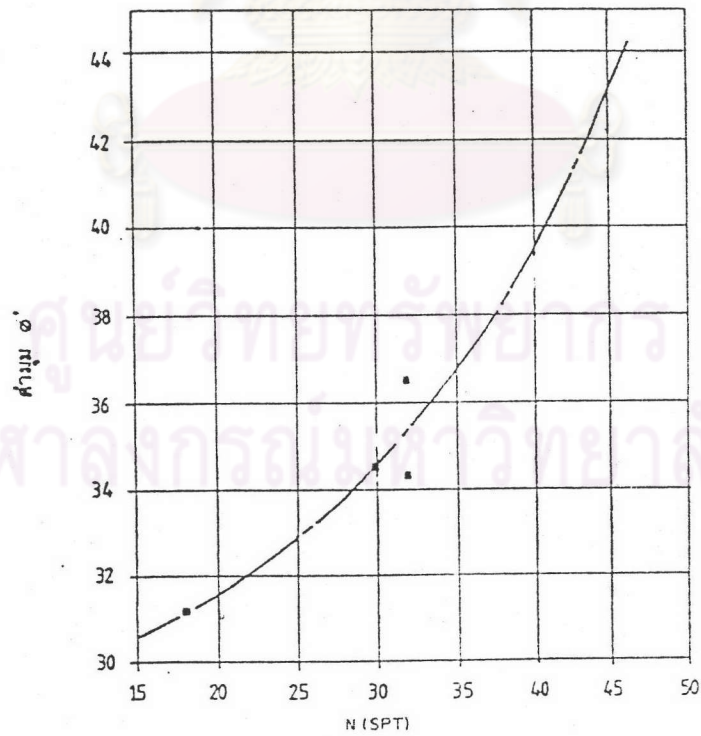
$$N' = C_N N \quad \dots(2.9)$$

$$C_N = 0.77 \log (20/\sigma'_{vo}) \quad \dots(2.10)$$

เมื่อ N' คือ ค่า N ที่ปรับแก้แล้ว



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_n กับ σ'_{vo} (Peck , Hansen และ Thornburn , 1974)



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N (SPT) กับ มุมเสียดทานภายใน สำหรับดินทราย จังหวัดระยอง (นริศ , 1993)

C_N คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของ σ'_{vo}

N คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบ SPT ในสนาม (ครั้งต่อฟุต)

σ'_{vo} คือ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (ต้นตอตารางฟุต)

- นริศ (1993) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ ϕ จากผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct Shear Test) สำหรับทรายปนดินเหนียว (Clayey sand) ในชั้นดินจังหวัดระยองไว้ดังรูปที่ 2.8 โดยค่า N ไม่ต้องปรับแก้

2.) Undrained pile soil adhesion (C_u)

ค่า C_u ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดและขนาดของเสาเข็ม ชนิดและค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน วิธีการก่อสร้างเสาเข็มและเวลาในการพิจารณา ที่ดีที่สุดในการคิดค่า C_u คือ การคำนวณกลับจากผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ซึ่งได้มีการหาความสัมพันธ์แบบ empirical ระหว่าง C_u กับตัวแปรต่างๆ ในรูปของ C_u/S_u ซึ่งมักเรียกว่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (adhesion factor, α)

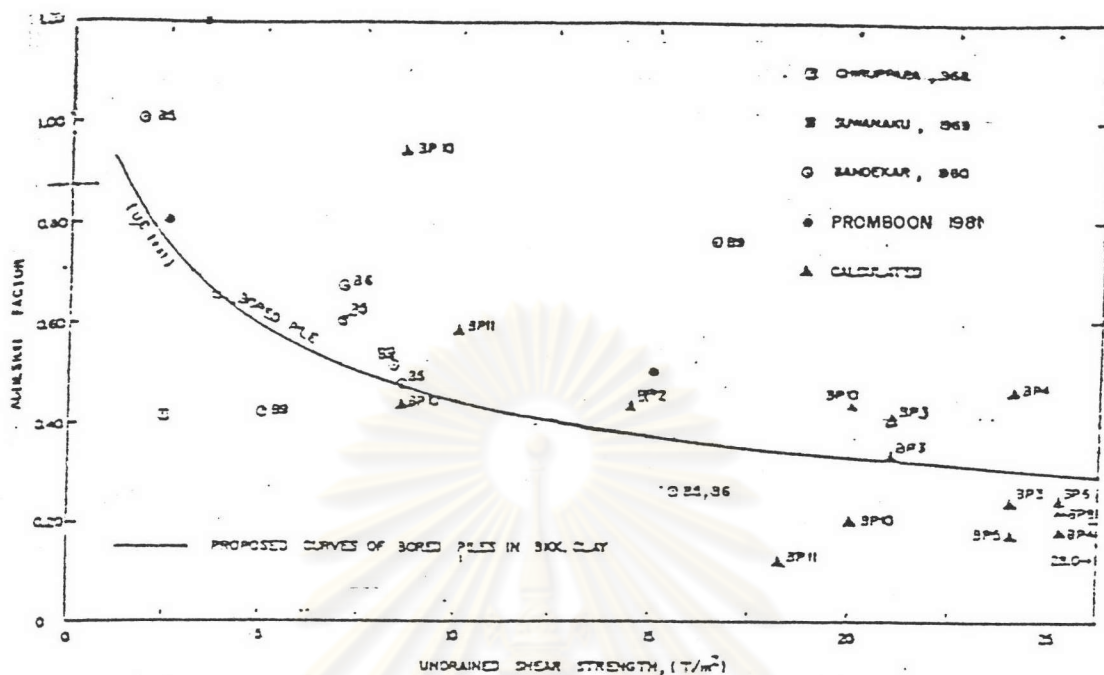
- NG (1983) ได้รวบรวมค่า α อันเป็นผลการศึกษาของ Chiruppapa (1968), Suwanakul (1969), Bandekar (1980), Promboon & Brenner (1981) และรวบรวมผลการศึกษาโดย NG (1983) เอง สำหรับชั้นดินกรุงเทพดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยค่า S_u หาจากการทดสอบ Unconfined compression test อีกทั้ง สุวรรณ (2531) และ Pimpasugdi (1989) ก็ได้รวบรวมผลการทดสอบเพิ่มเติมซึ่งได้ผลออกมาในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10

3.) สภาพความดันน้ำ และหน่วยแรงประสิทธิผลในชั้นดินกรุงเทพ

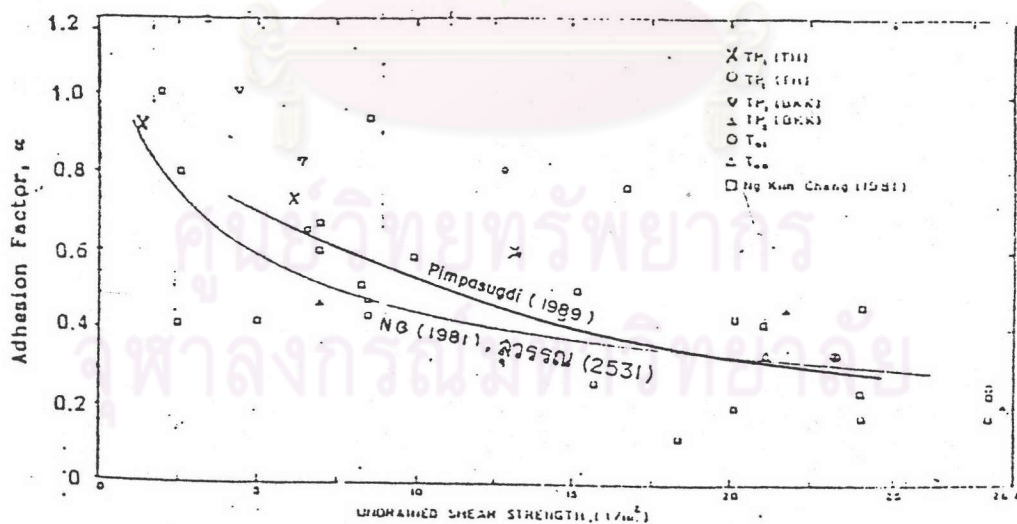
- NG (1983) ได้เสนอความสัมพันธ์ เพื่อหาความดันน้ำในโพรงดิน โดยคำนึงถึง ผลการสูบน้ำบาดาล (deep well pumping) ดังสมการที่ 2.12 และรูปที่ 2.11

$$U = 0.747 (D - 15) \text{ tsm.} \quad \dots(2.12)$$

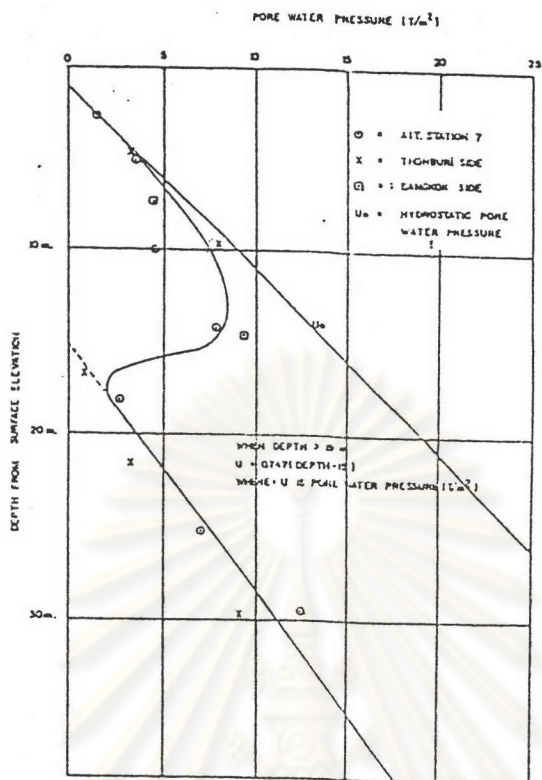
เมื่อ D = ความลึกจากผิวดิน (m.)



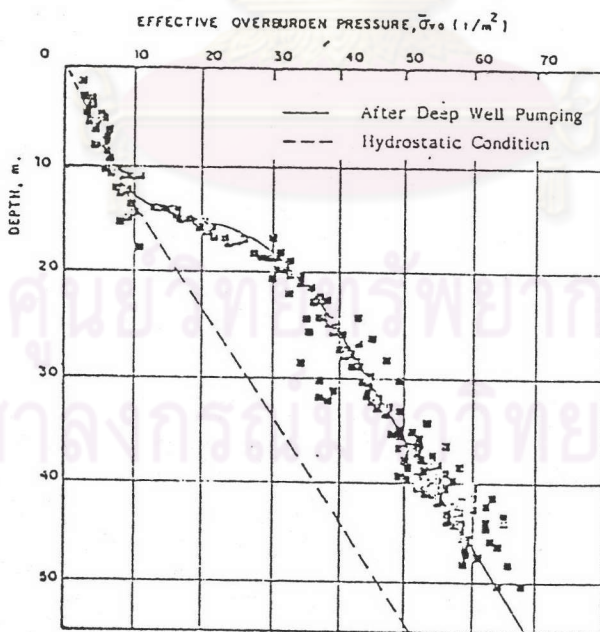
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของเสาเข็ม กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ สำหรับดินกรุงเทพฯ (NG , 1983)



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของเสาเข็ม กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ สำหรับดินกรุงเทพฯ (NG (1983) , สุวรรณ (2531) , Pimpasugdi (1989))



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันน้ำในโพรงกับความลึก ในชั้นดินกรุงเทพ (NG , 1983)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง กับความลึก ในชั้นดินกรุงเทพ (Kurdsuwan , 1984)

- Kerdsuwan (1984) เสนอความสัมพันธ์ เพื่อหาหน่วยแรงประสิทธิผล ในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักทัณฑ์ของดิน σ'_{vo} ดังรูปที่ 2.12 และสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการในกรณีที่ระดับลึกกว่า 15.7 เมตร ได้ดังนี้

$$\sigma'_{vo} = 15.7 + 0.98 h \text{ tsmi.} \quad \dots(2.13)$$

เมื่อ h = ความลึกจากผิวดิน

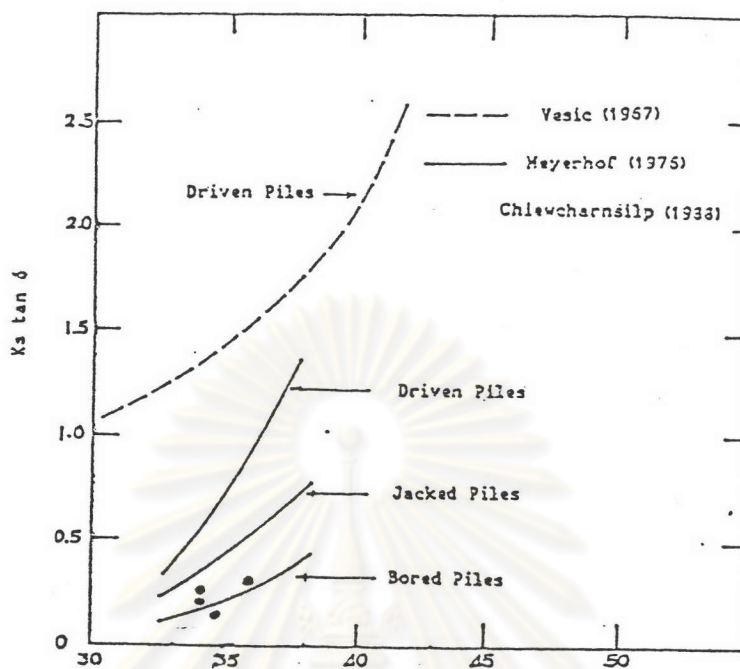
4.) Skin friction parameter ($K_s \tan \phi_a$)

- Meyerhof (1976) ได้เสนอว่า ค่า $K_s \tan \phi_a$ จะลดลง เมื่อความยาวเสาเข็มเพิ่มขึ้น และแรงเสียดทานวิบัติที่ผิว (Ultimate skin friction) จะลดลงตามความลึก ดังนั้น K_s ของเสาเข็มตอก จึงมีค่ามากที่สุดในช่วงบนของเสาเข็ม และมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างชนิด passive (K_p) และเป็น at rest (K_o) ที่ไกลปลายเสาเข็ม ซึ่ง K_s และ $K_s \tan \phi_a$ ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม

Meyerhof (1951) ได้สรุปเอาไว้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้าง (K_s) ของทรายจะขึ้นกับ compressibility ของดินหลังการตอกเสาเข็ม สำหรับทรายแน่นมีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับทรายหลวมมีค่าเท่ากับ 0.5 ซึ่งค่า N และ K_s ได้แนะนำไว้ดังนี้

N	K_s
0 - 4	0.5
4 - 10	0.6
10 - 30	0.7
30 - 50	0.8
> 50	1.0

นอกจากนี้ Meyerhof (1976) ยังได้เสนอความสัมพันธ์ ของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ($K_s \tan \phi_a$) กับ ϕ ดังรูปที่ 2.13

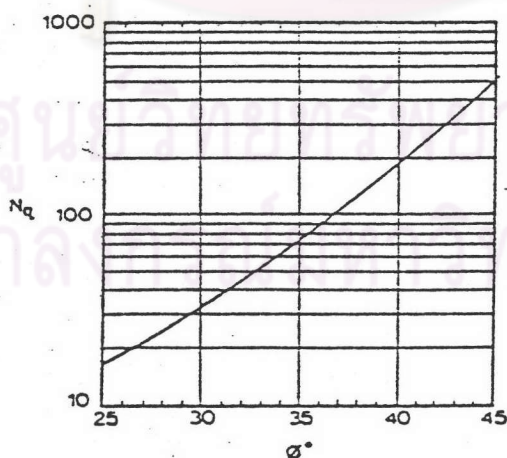


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน กับค่ามุมเสียดทานภายใน (Vesic (1967) , Meyerhof (1976) , Chiewcharnsilp (1988))

For driven piles, $\phi = \frac{\phi_1 + 40}{2}$

For bored piles, $\phi = \phi_1 - 3$

where ϕ_1 = angle of internal friction prior to installation of pile



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบกับแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม กับค่ามุมเสียดทานภายใน (After Berezantzev et.al. , 1961)

5.) Bearing capacity factor (N_c)5.1) เมื่อ $\phi = 0$

- Meyerhof (1959) เสนอว่าสำหรับเสาเข็มที่มีความยาวมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางหลายๆแล้ว $N_c = 9.3$ และ 9.8 ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานที่ปลายเสาเข็ม

- Holmberg (1970) ได้เสนอว่าค่า N_c จากผลการทดสอบเสาเข็มแปดเหลี่ยมกลวง เส้นผ่าศูนย์กลาง 58 ซม. ในดินกรุงเทพฯ พบว่า $N_c = 10$

- Muktabhand and Suwanakul (1971) พบว่า จากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม ในดินเหนียวอ่อนและแข็งในกรุงเทพฯ จะได้ค่า N_c ต่ำกว่า 9

เนื่องจากในสภาพความเป็นจริง น้ำหนักที่เสาเข็มถ่ายลงที่ปลายเสาเข็มนั้น นับว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่ถ่ายสู่ผิว ทำให้ N_c มีผลต่อการประเมินค่าไม่มากนัก ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงถือว่าใช้ $N_c = 9$ เป็นการเพียงพอ

5.2) เมื่อ $\phi > 0$

- Meyerhof (1976) ได้เสนอค่า N_c ของ $c - \phi$ soil อยู่ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล ความสัมพันธ์ของ N_c กับ ϕ ดังรูปที่ 2.5

6.) Bearing capacity factor (N_q)

- Broms (1966) , Vesic (1967) , Flemming et.al. (1985) พบว่าความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Berezantzev et. al. (1961) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง

- Tomlinson (1969) เสนอว่า ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.14 ใช้ได้ดีกับเสาเข็มตอกในชั้นทราย ซึ่งความลึกของเสาเข็มในชั้นทราย (D_p) ต้องไม่น้อยกว่า 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (B) อีกทั้งผลการวิจัยของ Berezantzev et. al. (1961) ไม่คำนึงถึงอิทธิพลของ D_p/B แสดงว่า D_p/B ไม่มีผลต่อ N_q

- Meyerhof (1976) ได้เสนอว่าอัตราส่วน D_p/B มีผลอย่างมาก ต่อ N_q และได้กำหนด limit ของค่า end bearing ไว้ดังนี้

$$q_e = 50 N_q^* \tan \phi \quad (\text{kN/m}^2) \quad \dots(2.15)$$

เมื่อ q_e = end bearing

N_q^* = Bearing capacity factor ดังรูปที่ 2.15

ϕ = soil friction angle ที่ปลายเสาเข็ม

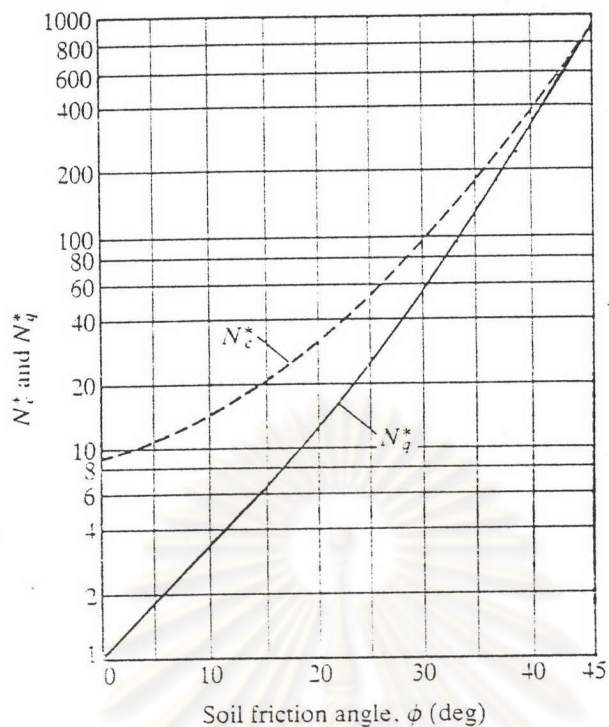
- สุรฉัตร (2524) ได้เสนอค่า N_q สำหรับเสาเข็มตอกในชั้นทรายกรุงเทพ โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Vesic (1977) ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งสำหรับเสาเข็มเจาะค่าดังกล่าวจะลดลงเหลือเพียง 1/2 ถึง 1/3 ของค่าที่แสดงจากรูป

- Pimpasugdi (1989) ได้หาค่า N_q สำหรับเสาเข็มตอก และเสาเข็มเจาะในดินกรุงเทพ โดยใช้วิธีของ Butler และ Hoy (1977) ในการหา failure load ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้ yield condition ของ ความสัมพันธ์ของ load - deformation ของเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.17

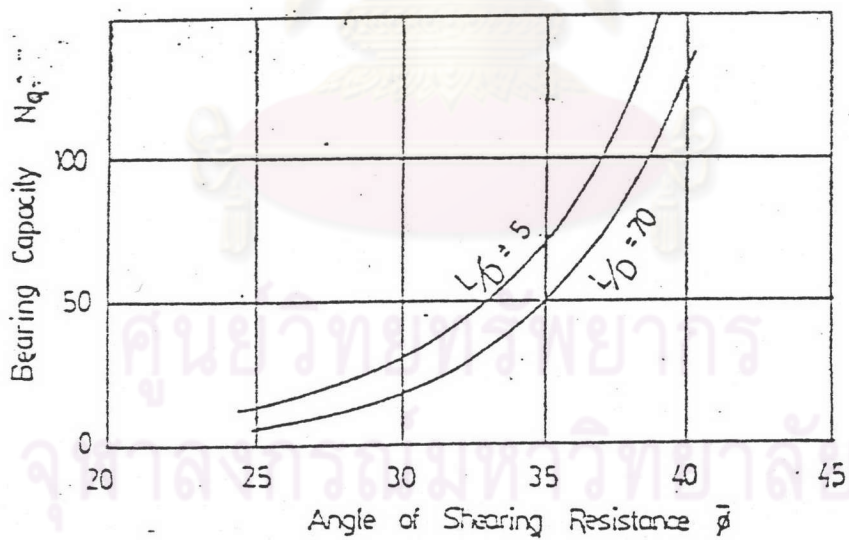
2.2.2 การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีสถิตศาสตร์ (Static Pile Load Test)

การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มมีจุดประสงค์ดังนี้

- 1.) เพื่อหาค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาเข็ม
- 2.) เพื่อตรวจสอบค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติของเสาเข็มที่หาได้ จากวิธีปฐพีกลศาสตร์ (Soil mechanics) และจากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test)
- 3.) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัว และน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบแรงดันที่ปลายเสาเข็มสูงสุดกับค่ามุมเสียดทานภายใน (Meyerhof, 1976)



รูปที่ 2.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบแรงดันที่ปลายเสาเข็มกับค่ามุมเสียดทานภายใน ในทราย (Vesic, 1977)

4.) เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างของเสาเข็ม

2.2.2.1 วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบที่นิยมใช้คือ Compression Test สามารถทำได้โดยการขึ้นน้ำหนักเป็นขั้นโดยมีการคบน้ำหนักไว้ จนกระทั่งการทรุดตัวของเสาเข็มน้อยลงหรือคงที่ แล้วจึงทำการขึ้นน้ำหนักเพิ่มต่อไปจนถึงน้ำหนักที่ต้องการทดสอบ ซึ่งมาตรฐานของ ASTM D1143-57T ได้กำหนดว่าหากอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มน้อยกว่า 0.012 in/hr (0.305 mm/hr) หรือเมื่อทิ้งไว้ 2 ชั่วโมงแล้วแต่ว่าเหตุการณ์ใดจะเกิดก่อน สามารถเพิ่มน้ำหนักในขั้นต่อไปได้เลย การเพิ่มน้ำหนักจะทำจนถึงน้ำหนักใช้งาน และคบน้ำหนักไว้จนอัตราการทรุดตัว อยู่ในพิสัยและครบเวลาในการแช่น้ำหนัก จึงลดน้ำหนักลงเป็นขั้นๆ จนถึงศูนย์ จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ให้เสาเข็มมีอัตราการลอยตัวที่คงที่แล้ว จึงเริ่มขึ้นน้ำหนักเป็นขั้นๆ ต่อไป จนถึงน้ำหนักสูงสุดที่ต้องการ แล้วจึงคลายน้ำหนักเป็นขั้นๆ จนถึงศูนย์อีกครั้ง โดยในการลดน้ำหนักแต่ละขั้น จะต้องรอให้อัตราการลอยตัวคงที่และอยู่ในพิสัย ก่อนจะทำการลดน้ำหนักขั้นต่อไป

2.2.2.2 ความหมายของผลการทดสอบ

การค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

- Boston Building Code กำหนดว่าน้ำหนักที่ทดสอบ อย่างน้อยควรเป็น 2 เท่าของน้ำหนักใช้งาน และคบน้ำหนักไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง จนกระทั่งการทรุดตัว หรือลอยตัวของเสาเข็มไม่เกิน 0.22 in. ในเวลา 24 ชั่วโมง โดยน้ำหนักใช้งาน ไม่ควรมากกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำหนักสูงสุดที่ทดสอบ เพื่อให้ไม่ให้เกิดการวิบัติ และการทรุดตัวของเสาเข็มไม่เกิน 0.5 in.

- Building Laws Of The City Of New York กำหนดว่าน้ำหนักใช้งาน ควรเป็นครึ่งหนึ่งของน้ำหนักทดสอบสูงสุด ซึ่งหลังจากคลายน้ำหนักบรรทุกนี้ออกเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว การทรุดตัวรวมมากกว่า 0.01 in. ต่อดันของน้ำหนักทดสอบสูงสุด

- W.H.Rabe แนะนำว่าน้ำหนักใช้งานมีค่าเป็น 1/2 เท่า ของน้ำหนักทดสอบสูงสุด ในการใช้งานทางสถิตศาสตร์ (static) และเป็น 1/3 เท่าของน้ำหนักทดสอบสูงสุด

สำหรับการใช้งานทางพลศาสตร์ (dynamic) ซึ่งการทรุดตัวรวมเริ่มเกินกว่า 0.05 in. ต่อต้น ของ น้ำหนักทดสอบที่เพิ่มขึ้น

- United States Steel Co. กำหนดว่าค่าน้ำหนักใช้งานเป็น 2/3 เท่า ของ น้ำหนักทดสอบสูงสุด ซึ่งการทรุดตัวจะต้องไม่มากเกินไป และความสัมพันธ์ของ Load-Settlement ยังอยู่ในรูปเส้นตรง

การหาค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติ

- Terzaghi (1942) แนะนำว่า น้ำหนักบรรทุกวิบัติคือ น้ำหนักบรรทุกที่ ปริมาณการทรุดตัวมีค่าเท่ากับ 0.1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม

- Civil Engineering Code Of Practice No.4 (1954) กำหนดว่า น้ำหนักบรรทุกประลัย คือน้ำหนักบรรทุกซึ่งเกิดที่อัตราการทรุดตัวเพิ่มขึ้นไม่หยุด โดยน้ำหนักบรรทุกคงที่

- De Beer (1967) แนะนำว่าน้ำหนักบรรทุกประลัย สามารถหาได้จาก เมื่อนำค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม กับค่าน้ำหนักทดสอบมาพล็อตใน log-log scale ซึ่งจะได้กราฟ เส้นตรง 2 เส้นโดยประมาณจุดตัดของเส้นตรง 2 เส้นนี้ คือ ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย

- Chin (1970) แนะนำว่า จากการพล็อตความสัมพันธ์ของการทรุดตัว ต่อน้ำหนักทดสอบ กับ การทรุดตัว จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งส่วนกลับของเส้นตรงนี้คือ น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

- Mazukiewicz (1972) แนะนำว่า จากการพล็อตน้ำหนักทดสอบกับการทรุดตัว เมื่อลากเส้นจากจุดแบ่งค่าการทรุดตัวเป็นส่วนๆที่เท่ากัน ไปตัดเส้นกราฟของ Load-Settlement แล้วลากเส้นจากจุดตัดนั้นขนานกับแกนการทรุดตัวไปตัดแกนน้ำหนักทดสอบ จุดตัดบนน้ำหนักทดสอบนี้ ลากเส้น 45 องศา กับแกนน้ำหนักทดสอบ ไปตัดกับเส้นที่ลากขนานกับแกนการทรุดตัว เมื่อเชื่อมจุดตัดเหล่านี้เข้าด้วยกัน จะได้เส้นเส้นหนึ่งซึ่งประมาณเป็นเส้นตรงตัดกับแกนของน้ำหนักทดสอบ ที่จุดนี้คือ น้ำหนักบรรทุกประลัย

- Davisson (1975) แนะนำว่าจะต้องหา Elastic line ของเสาเข็มจากนั้นลากเส้น offset ซึ่งมีระยะห่าง 4.0 mm. บวกกับ 0.01 เท่าของความกว้าง ที่ปลายเสาเข็ม ลากเส้นขนานกันขึ้นไปตัด Load-Settlement curve จุดตัดนั้นคือ น้ำหนักบรรทุกประลัย

- นอกจากนี้ Fuller & Hoy (1970) , Butler & Hoy (1977) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม โดยอาศัยหลักเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน และ Fellenius (1980) ได้เสนอการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตามวิธีการต่างๆ ดังแสดงในรูป 2.18

2.2.3 การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Pile Load Test)

การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

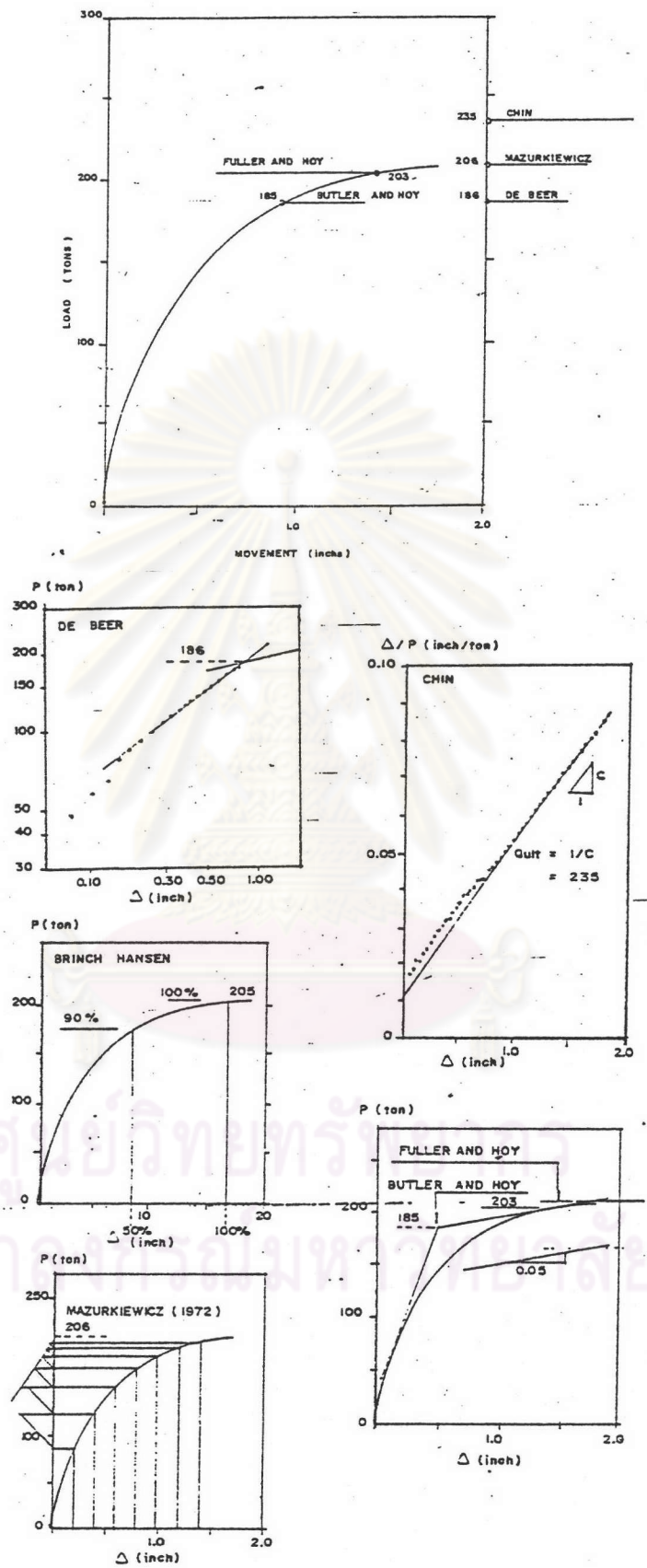
- 1.) เพื่อหาค่า Pile Bearing Capacity
- 2.) เพื่อหาหน่วยแรง (Pile stress) ที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม
- 3.) เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างเสาเข็ม (Pile integrity)
- 4.) เพื่อหาประสิทธิภาพของปั้นจั่น (Hammer performance)

2.2.3.1 ทฤษฎีคลื่น (Wave Theory)

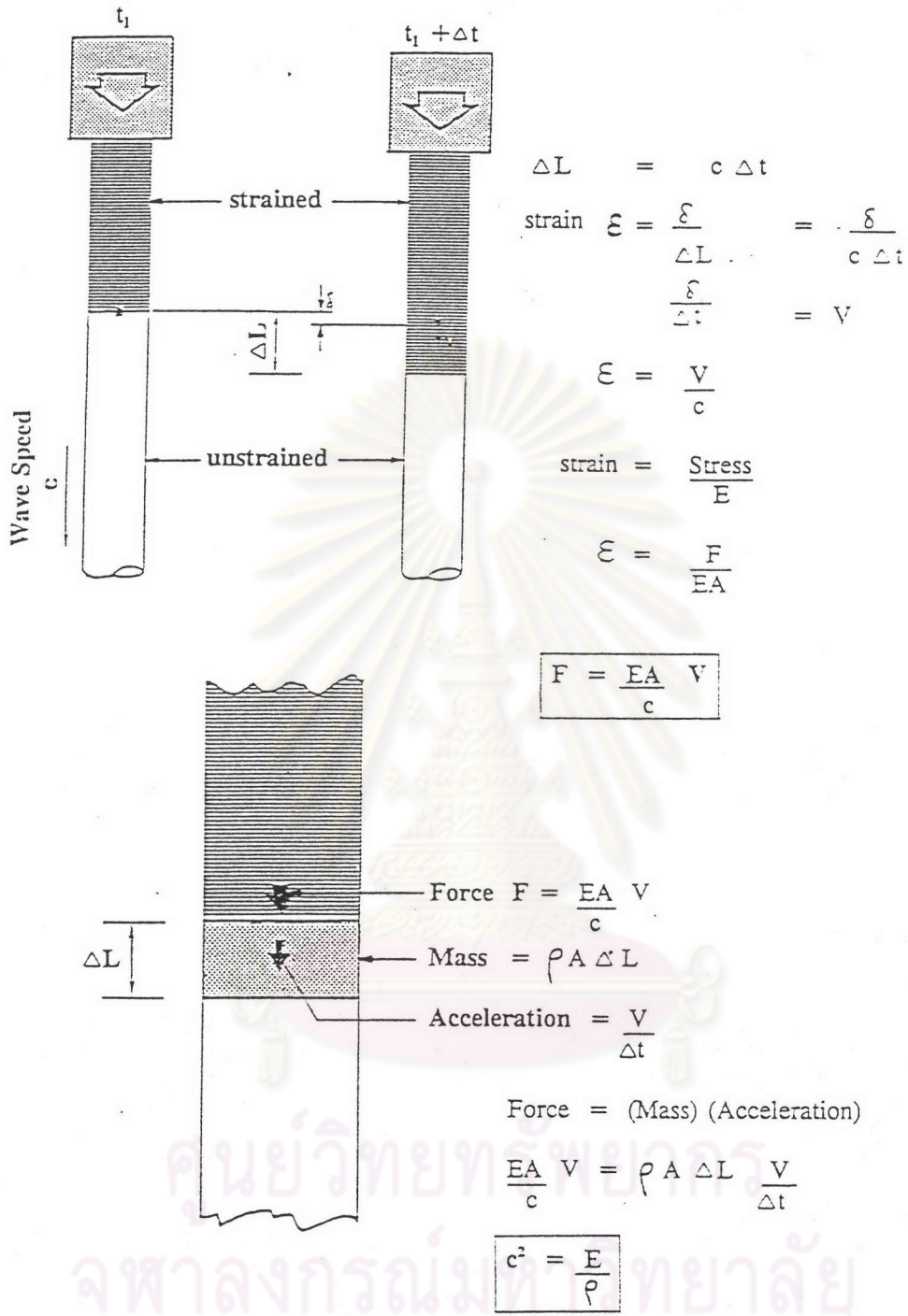
a.) กลศาสตร์ของคลื่น (Wave Mechanics)

เมื่อเสาเข็มถูกกระทำด้วยแรงตามแนวแกนขนาดหนึ่ง บริเวณส่วนเล็กๆ ของเสาเข็ม (ΔL) จะถูกกด ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความยาว (δ) และมีการเคลื่อนที่ของอนุภาค ภายในเสาเข็มด้วยความเร็ว (v) ในเวลา (Δt) เมื่อคิดว่าเสาเข็มเป็น linear elastic material หนาตัดเสาเข็มมีความสม่ำเสมอ (uniform) จะได้ความสัมพันธ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20

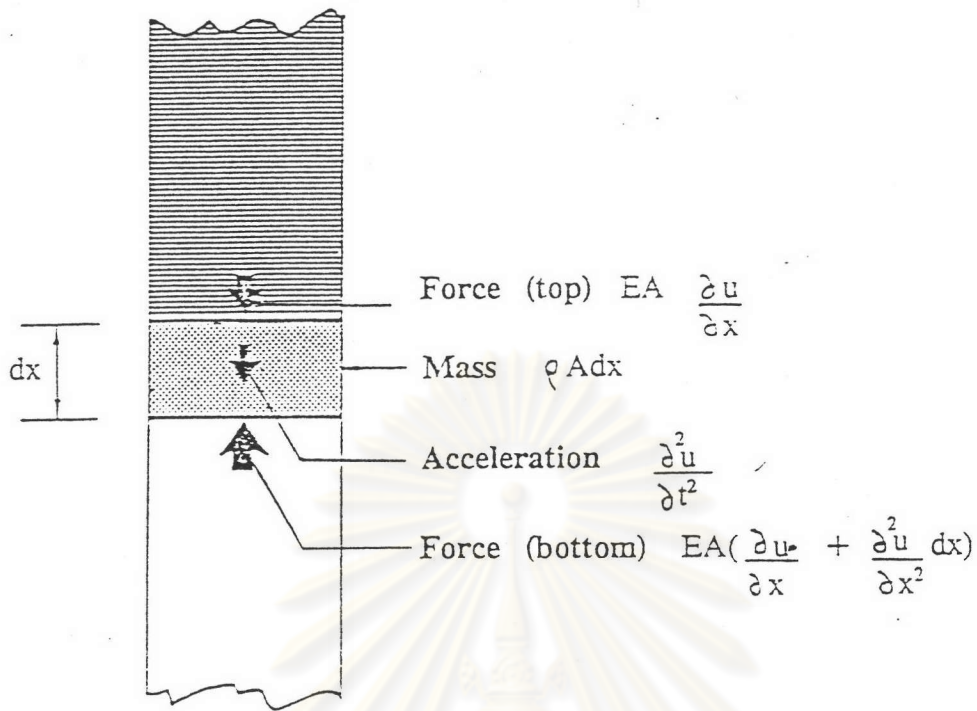
เมื่อ	c	= ความเร็วคลื่น
	v	= ความเร็วของอนุภาคของเสาเข็ม
	E	= Elastic modulus



รูปที่ 2.18 แสดงถึงการหาค่านำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม ด้วยวิธีต่างๆ



รูปที่ 2.19 แสดงการหาความสัมพันธ์ต่างๆ และความเร็วคลื่น



$$\begin{aligned}
 \text{Force in element} &= \text{Force (bottom)} - \text{Force (top)} \\
 &= EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \right) - EA \frac{\partial u}{\partial x} \\
 &= EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Force in element} &= (\text{Mass}) (\text{Acceleration}) \\
 &= A \rho dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}
 \end{aligned}$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}}$$

$$c^2 = \frac{E}{\rho}$$

รูปที่ 2.20 แสดงการพิจารณาสมการคลื่น 1 มิติ ในแท่งโลหะ

ϵ	=	strain
A	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มซึ่งมีความสม่ำเสมอ
ρ	=	ความหนาแน่นของเสาเข็ม
Z	=	ความต้านทานเพื่อหน่วงเหนี่ยวการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (impedance) = AE/c

b.) คลื่นแรงต้าน (Resistance wave ,R)

ขณะเริ่มทำการตอกเสาเข็ม แรงต้านของดินที่ตำแหน่ง x ใดๆ บนเสาเข็ม จะเกิดที่เวลา $t = x/c$ โดยจะอยู่ในลักษณะของคลื่นต้านแรงอัด (compressive resistance wave) ซึ่งมีทิศทางขึ้น และคลื่นต้านแรงดึง (tensile resistance wave) มีทิศทางลง แต่คลื่นจะมีขนาดเท่ากับ $R/2$ ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งแรงต้านของดินสามารถแสดงอยู่ในรูปผลรวมของ elasto - plastic static portion (R_s) และ dashpot force (R_d)

$$R = R_s + R_d \quad \dots(2.16a)$$

$$R = R_s + J_v V \quad \dots(2.16b)$$

$$\text{เมื่อ } R_s = k_s u ; u < q \quad \dots(2.17a)$$

$$R_s = R_u ; u \geq q \quad \dots(2.17b)$$

J_v = damping parameter (kips/ft/s)

R_u = Ultimate static resistance

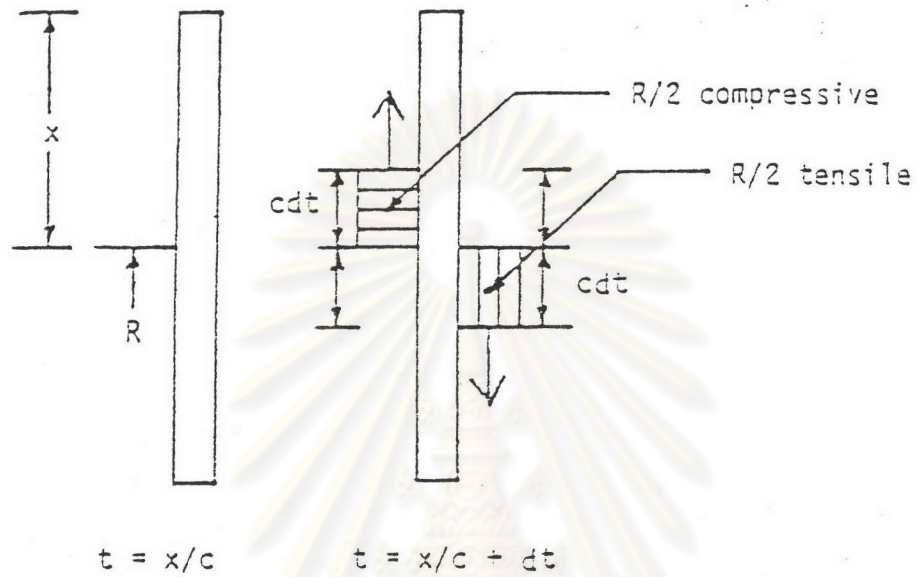
k_s = soil stiffness

u = pile displacement

q = quake หรือ pile displacement ขณะที่ดินเริ่มมีพฤติกรรม

เป็น plastic

เมื่อพิจารณา แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Pile with toe resistance) โดยคิดว่าแรงจากการตอกเสาเข็ม (F_{imp}) คือผลคูณของความเร็วของการตอกเสาเข็ม (V_{imp}) กับ impedance (Z) พบว่า คลื่นที่สะท้อนกลับจะมีความเร็ว (V_{toe}) เป็นสองเท่าของความเร็วที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม (V_{imp}) และแรงต้านทานของดิน (resistance force, R) จะมีผลต่อการสะท้อนกลับ



รูปที่ 2.21 แสดงคลื่นต้านทานการตอกเสาเข็ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ของคลื่นที่ปลายเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.21 จึงได้ความสัมพันธ์ของความเร็วที่ปลายเสาเข็มในรูปของความเร็วที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม และแรงต้านในดินดังนี้

$$V_{toe} = 2V_{imp} - R/Z \quad \dots(2.18)$$

2.2.3.2 การวิเคราะห์การตอกเสาเข็มโดยใช้สมการคลื่น

- St.Venant ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับการตอกเสาเข็ม ในรูปของการเคลื่อนที่ของคลื่น 1 มิติ ในแท่งโลหะที่มีความยืดหยุ่น (Elastic) $\partial^2 u / \partial t^2 = c^2 \partial^2 u / \partial x^2$ ซึ่งพบว่ามีข้อจำกัดหลายอย่าง แต่ก็ยังเป็นพื้นฐานที่ดีในการคิดค้นต่อมา

- Isaacs (1931) and Fox (1932) ได้ศึกษาเรื่องการตอกเสาเข็มในเวลาต่อมาและได้คำตอบซึ่งใกล้เคียง แต่มีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากพฤติกรรมที่แท้จริง ของระบบตุ้มน้ำหนัก-เสาเข็ม-ดิน

- Smith (1955) ได้พัฒนาแบบจำลองดั้งเดิม โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย ในการวิเคราะห์สมการคลื่นเป็นครั้งแรกโดยใช้สมการคลื่น 1 มิติ ให้แบบจำลองของดินประกอบด้วย ส่วนของแรงทาง static อยู่ในรูปของ elasto-plastic และส่วนของแรงทาง dynamic เป็น viscous component ซึ่งใช้กับตุ้มน้ำหนักแบบธรรมดา เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของความสามารถในการรับน้ำหนักวิบัติ , หน่วยแรงที่เกิดในเสาเข็มเมื่อถูกตอก กับการจมของเสาเข็มในการตอกแต่ละครั้ง (pile set/blow)

- Michican Department Of Highways (1960) ได้มีโครงการค้นคว้าขนาดใหญ่ เพื่อออกแบบเครื่องมือวัดแรงและความเร่งโดยมีจุดประสงค์เพื่อหา hammer performance (ENTHRU)

- Case Institute Of Technology (1964) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานาน โดยความสนับสนุนจาก Ohio Department Of Transportation , Federal Highway Administration และ State Highway Department ของรัฐต่างๆ ด้วยจุดประสงค์เพื่อหา Pile Bearing Capacity จากการตอกเสาเข็มด้วยตุ้มน้ำหนักแต่ละครั้งโดยใช้ Pile Driving Analyser

(PDA) เป็นเครื่องมือวัด และวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม เรียกว่าวิธีนี้ว่า Case Method และได้มีการเสนอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การทดสอบเสาเข็มในปัจจุบันมากที่สุดวิธีหนึ่งคือ Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) โดย Rausche (1970) และได้มีการพัฒนาโปรแกรมในเวลาต่อมา เรียกว่า CAPWAPC ดังจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

- Texas A&M University (1967) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ต่อจากแนวคิดของ Smith ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาโปรแกรมนี้อีกขึ้นโดย Department Of Transportation ของ Texas Transportation Institute เรียกว่า โปรแกรม TTI

- Rembe (1975) พบว่า การประเมินการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยใช้สมการคลื่น จะให้ค่าที่แตกต่างจาก static load test ประมาณ 10 %

- Holloway (1978) ได้อธิบายถึง residual stress ที่ยังคงอยู่ในเสาเข็มและดิน หลังจากการตอกสิ้นสุดแล้วนั้น มีความสำคัญที่ต้องนำมาวิเคราะห์

- Matlock และ Foo (1979) ได้เสนอวิธีการคำนวณที่เพิ่มความละเอียดมากขึ้น เพื่อให้เกิดความถูกต้องมากที่สุด ทั้งยังรวมถึงสามารถทำการวิเคราะห์ residual stress ตามที่เสนอโดย Holloway ได้อีกด้วย

- Goble และ Rausche (1976) , Rempe และ Davisson (1977) ได้เสนอเทคนิคการวิเคราะห์สมการคลื่นโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขั้นสูงขึ้นโดยมีการรวมแบบจำลองของค้อนน้ำหนักในการคิดด้วย ซึ่ง Goble และ Rausche (1976) ร่วมกับ Federal Highway Administration เรียกโปรแกรมนี้อีกว่า WEAP ซึ่งโปรแกรมนี้นี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อทำนาย blow count และ stress ที่เหมาะสม กับสภาพชั้นดิน ระบบการตอกเสาเข็ม และ Ultimate load ที่ต้องการก่อนทำการตอกเสาเข็ม

สมการคลื่น (Wave equation)

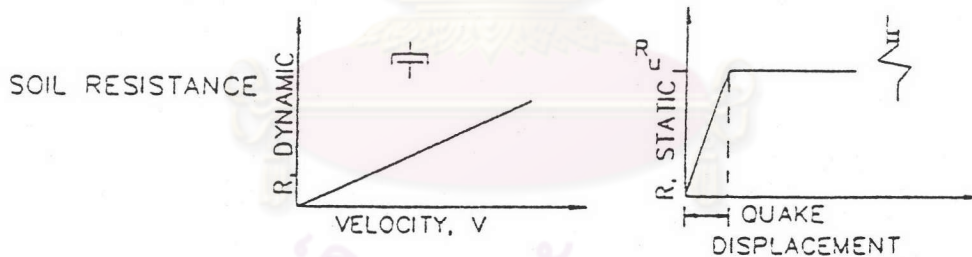
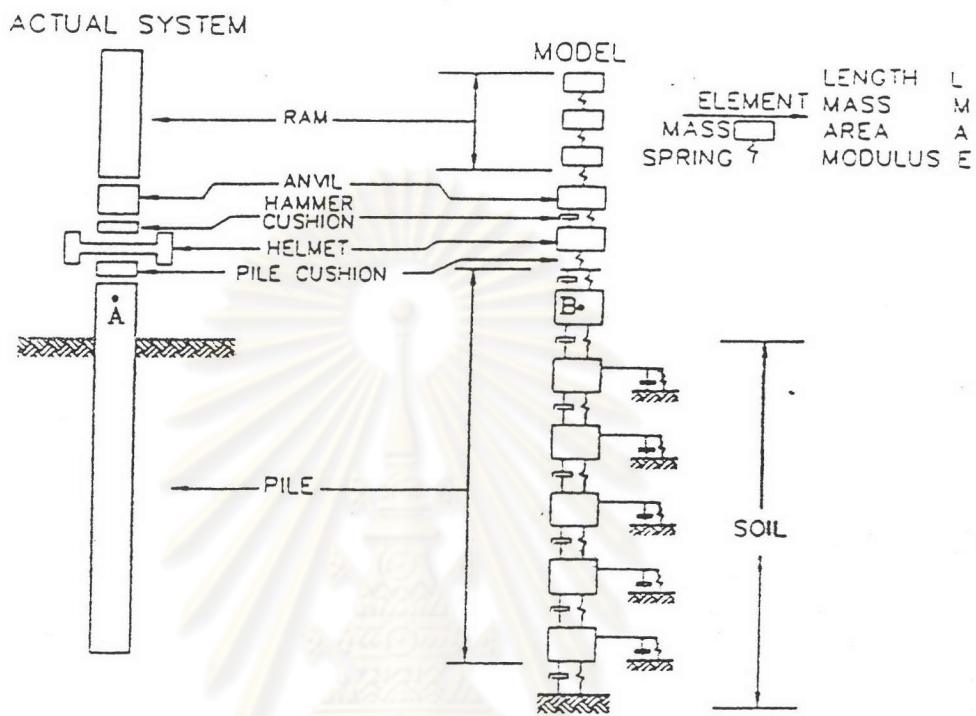
จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.3.1 ถึงสมการคลื่น 1 มิติ ในแท่งโลหะ ซึ่งอยู่ในรูปของ finite difference แต่สำหรับกรณีของเสาเข็ม การใช้สมการดังกล่าวเพื่อวิเคราะห์การตอกเสาเข็มจะต้องพิจารณาพร้อมกับแรงต้านทานในดิน จึงได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = (E/\rho) \left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \right) \pm R \quad \dots(2.19)$$

- เมื่อ
- D = longitudinal displacement ของอนุภาคเสาเข็มจากตำแหน่งเดิม
 - E = modulus of elasticity ของเสาเข็ม
 - ρ = density ของเสาเข็ม
 - t = เวลา
 - x = ทิศทางตามยาวของเสาเข็ม
 - R = soil resistance term

สมการดังกล่าวถูกใช้เพื่อหาคำตอบของความสัมพันธ์ระหว่าง displacement กับเวลาจากตำแหน่งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรง แต่เนื่องจากมีความซับซ้อนในทางปฏิบัติ ในเวลาต่อมา Smith(1960) จึงได้พัฒนาสมการคลื่นดังกล่าวโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อใช้หา pile-set สำหรับ Ultimate pile load ที่กำหนด ซึ่งได้แสดงระบบการตอกเสาเข็มในอุดมคติ ว่าประกอบด้วย ram ซึ่งรู้ความเร็วต้น, capblock, pilecap, cushion block, เสาเข็ม และดินที่อยู่ล้อมรอบเสาเข็ม

องค์ประกอบของระบบการตอกเสาเข็มจะถูกแสดงด้วยน้ำหนักที่เหมาะสมร่วมกับสปริง และแรงต้านของดินจะอยู่ในรูปของ แรงต้านทางพลศาสตร์ และสถิตศาสตร์ ซึ่งแสดงโดยอนุกรมของ dashpot และ สปริง ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.22 แรงต้านทางสถิตศาสตร์จะถูกสมมติให้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับ displacement จน displacement ถึงจุดซึ่ง soil resistance จะเปลี่ยนพฤติกรรมจาก elastic เป็น plastic เรียก displacement นั้นว่า quake หลังจากนั้นการเพิ่ม displacement จะไม่มีผลกับ resistance ส่วนแรงต้านทางพลศาสตร์ ซึ่งถูกแสดงด้วย dashpot นั้นถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับ pile element velocity



$$R_D = J_S \cdot V_p \cdot R_S$$

รูปที่ 2.22 แสดงแบบจำลองสมการคลื่นของ Smith (Goble และ Rausche , 1976)

การวิเคราะห์โดยสมการคลื่นจะพิจารณาเป็น element ด้วยการเพิ่มขึ้นของเวลาเป็นขั้นๆ ในเบื้องต้น soil model (quake และ damping) และ ultimate resistance (R_u) จะถูกสมมติ และเลือก hammer efficiency เพื่อหาความเร็วของการตอก จากนั้นคอมพิวเตอร์จะคำนวณหาแรง และ displacement ของแต่ละ element ในแต่ละขั้นเวลา และทำอย่างต่อเนื่อง ผลจากการวิเคราะห์นี้จะได้ผลรวมของ resistance เป็นฟังก์ชันของ permanent set จึงได้ bearing graph ซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง permanent set กับ bearing capacity รวมทั้ง critical stress ในเสาเข็มเนื่องจากแรงในเสาเข็มแต่ละส่วน และแต่ละช่วงเวลาที่จะสามารถพบได้ขณะวิเคราะห์

อย่างไรก็ดี เนื่องจากข้อมูลที่จะต้องใส่เพื่อทำการวิเคราะห์การตอกเสาเข็มโดยวิธีนี้นั้น มีเป็นจำนวนมาก เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับระบบการตอก ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วต้นขณะตอก น้ำหนักของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการตอก ค่าคงที่ของสปริงของระบบที่ใส่ตอก ค่าคงที่ของสปริงในเสาเข็ม และในดิน เป็นต้น ข้อมูลเกี่ยวกับเสาเข็ม และข้อมูลเกี่ยวกับดิน ซึ่งข้อมูลบางตัวสามารถหาได้ แต่บางตัวมีความซับซ้อน จึงต้องใช้การสมมติให้มีความสมเหตุสมผล และใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด ดังนั้น ความถูกต้องของการวิเคราะห์การรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีนี้จึงขึ้นอยู่กับ ความถูกต้องของข้อมูลดินที่ใส่ และความถูกต้องของ parameters ของระบบการตอก ซึ่งหากระบบการตอกเสาเข็มแตกต่างกันไป model ที่กำหนดไว้ ก็จะต้องมีการประยุกต์เพื่อใช้งานต่อไป

คุณสมบัติของดินที่ใช้กับการวิเคราะห์ได้มีผู้เสนอไว้ดังต่อไปนี้

1) Ultimate soil resistance (R_u) ค่า R_u และสัดส่วนของแรงต้านที่ผิว (shaft resistance) และปลายเสาเข็ม (base resistance) สามารถหาได้จากคุณสมบัติของดินโดยวิธีปฏิสัมพันธ์ศาสตร์ หรือในกรณีที่ไม่มีข้อมูลดิน อาจใช้วิธีที่แนะนำโดย Forehand และ Reese (1964) เป็นแนวทาง ซึ่งได้แนะนำค่าของ Quake (Q), Damping factor (J) และ % side adhesion (% R_u) ดังตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า Quake, damping factor, % R_u (Forehand และ Reese, 1964)

ชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม	Q(in.)	J(s/ft.)	% R_u
coarse sand	0.10	0.15	35
sand gravel mixed	0.10	0.15	75 - 100
fine sand	0.15	0.15	100
sand and clay or loam, at least 50 %	0.20	0.20	25
silt and fine sand underlain by hard strata	0.20	0.20	40
sand and gravel underlain by hard strata	0.15	0.15	25

2) Quake (Q) คือค่า displacement ซึ่ง static soil resistance เปลี่ยนจากพฤติกรรมแบบ elastic เป็น plastic ค่า quake ได้ถูกพิจารณาในรูปแบบ empirical และแนะนำโดย Forehand and Reese (1964) ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งจากทฤษฎีของเสาเข็ม และการทรุดตัว เมื่อรู้ค่า elastic soil parameter จะสามารถหาค่า quake ได้ และค่าดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนตามความยาวเสาเข็ม โดยค่าที่ปลายเสาเข็มจะมากกว่าที่ผิวเสาเข็ม ต่อมา Goble และ Rausche (1986) ได้แนะนำว่าค่า quake โดยทั่วไป จะถูกสมมติให้มีค่าเท่ากับ 0.1 นิ้ว เท่ากันทั้งที่ผิว และปลายเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มแบบแทนที่ (displacement pile) quake ที่ปลายเสาเข็มอาจมีค่ามากกว่าที่ผิว จึงแนะนำให้ quake มีค่าเท่ากับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มหน่วยเป็นนิ้วหารด้วย 120

3) Damping factor (J)

- ความสัมพันธ์แบบ empirical ของ damping กับชนิดของดิน ซึ่งเสนอโดย Forehand and Reese (1964) ในตารางที่ 2.4 นั้นเป็นค่า damping สำหรับปลายเสาเข็ม (J(p)) แต่สำหรับที่ผิวเสาเข็ม (J(m)) นั้น ได้มีการแนะนำว่า

$$J(m) = J(p)/3 \quad \dots(2.20)$$

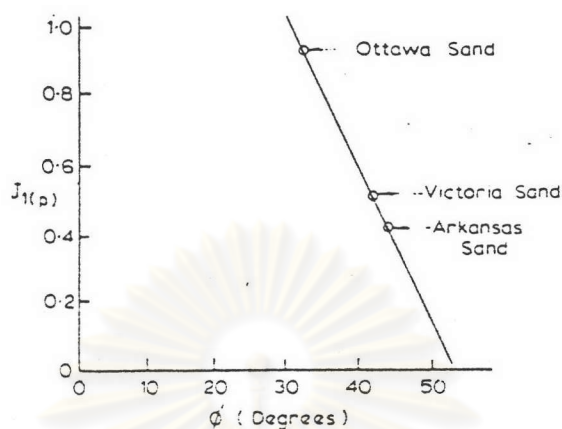
- Coyle and Gibson (1970) ได้เสนอความสัมพันธ์ของ damping factor (Jp) และ internal shearing resistance (ϕ') ของทราย และความสัมพันธ์ของ liquidity index กับ damping constant ของดินเหนียว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ

- Texas Transportation Institute (TTI) ได้แนะนำค่า damping factor หน่วยเป็น s/ft ไว้ดังนี้

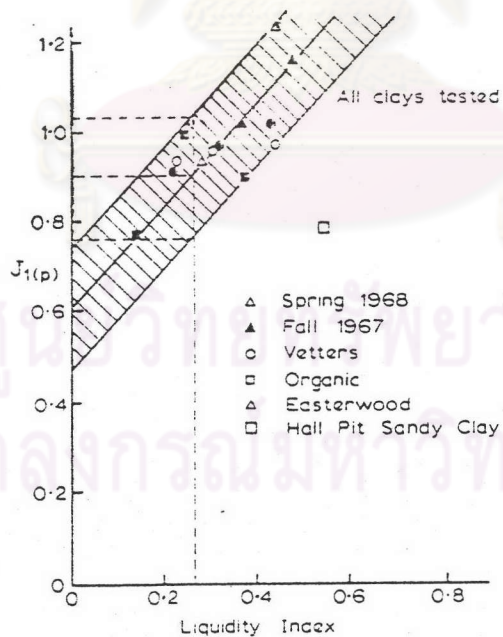
	ดินเหนียว	ดินทราย
ที่ผิวของเสาเข็ม	0.20	0.05
ที่ปลายเสาเข็ม	0.01	0.15

- Goble และ Rausche (1986) ได้แนะนำค่า damping factor หน่วยเป็น s/ft ไว้ดังนี้

	ดินเหนียว	ดินทราย
ที่ผิวของเสาเข็ม	0.20	0.05
ที่ปลายเสาเข็ม	0.15	0.15



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง damping factor กับ มุมเสียดทานภายในของทราย (Coyle และ Gibson , 1970)



รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า damping factor กับ Liquidity index ของดินเหนียว (Coyle และ Gibson , 1970)

ตารางที่ 2.5 แสดงค่า damping ที่ผิวเสาเข็ม และ Damping laws (After To , 1986 และ Holeyman , 1986)

Author	Clay		Sand		Application and Comments
	J'	J	J'	J	
Sullivan and Ehlers (1972)	0.492	0.492			For various offshore projects
Coyle et al (1977)	0.656	0.033	1.64	0.492	For parametric analysis of pile driveability
Hansen and Schroeder (1977)	0.333	1.0	0.1	0.3	For 5 projects in USA
Naughton and Miller (1978)	0.164	0.492	—	—	Hondo platform
Young et al (1979)	0.49	0.16 - 0.49	—	—	Thistle platform
Rigden et al (1979)	0.38	0.00328	—	—	For Cowden clay
Sutton et al (1979)	0.656	0.033	—	—	Forties platform

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 แสดงค่า damping ที่ปลายเสาเข็มผิวเสาเข็ม และ Damping laws (After To , 1986 และ Holeyman , 1986)

Author	Damping law	Clay	Sand	Range of velocities applicable (m/s)	Comments
Smith (1980)	Linear	0.164	0.164	All	1-D wave equation code
Forehan and Reese (1964)	Linear	0.328-0.984	0.098-0.197	2.5-5.0	Interpreted from field driving tests
Airhart et al (1967)	Linear	0.328-0.984	0.033-0.098	1.0-3.0	J (m) increases with and 3
Gibson and Coyle (1968)	1+Jv	0.328-3.937	0.23-3.609	0-3.6	From triaxial tests
De Reuter and Beringen (1979)	Linear	0.656	0.164	2.5-5.0	Interpreted from field driving tests
Herema (1979)	$\sigma'_h = \sigma_h^{0.7} (a_1 + a_2 V^{0.2})$	$a_1, a_2 = f(C_u)$	0	$8 \times 10^{-7} - 10$	From laboratory shear tests
Litkohui and Poskitt (1980)	Linear	0.6-2.8	-	0-0.5	From model penetration tests
	$1 + Jv^{0.2}$	6-12.7	-	0-0.5	
Holeyman (1985) (1986)	$\tau = \frac{\tau_r (1 + Jv^{0.2})}{Q/u + 1}$	-	-	-	Simplified soil model

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 แสดงค่า damping ตามแนวคิดของ Smith (1960) (After To , 1986)

Author	Damping law	Clay	Sand	Range of velocities applicable (m/s)	Comments
Smith (1960)	Linear	0.492	0.164	All	1-D wave equation code
Gibson and Coyle (1968)	$1 + Jv^{0.2}$	0.75 - 1.15	0.8 - 1.6	0 - 3.6	From triaxial tests
Dayal and Allen (1975)	$1 + v^{0.2}$	0 - 1.0	0 (dry)	0.0013 - 0.8114	From model penetration tests
Litkouhi and Poskitt (1980)	Linear	0.36 - 0.87	- 0 - 0.5	0.05	From model penetration tests
	$1 + Jv^{0.2}$	8 - 36.0	-		
Herema (1981)	$1 + Jv^{0.2}$	-	2 ($\phi = 30^\circ$)	0.0002 - 0.16	From model penetration tests
Holeyman (1986)	$q_v = E_i \epsilon' + E' \partial \epsilon / \partial t$ $q_h = \frac{\epsilon}{1/E_i - \epsilon/q_r}$ $q_r = (q_1 + Jv^{0.2})/1.473$				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้ ยังมีผู้ค้นคว้าหาค่า damping factor ด้วยวิธีต่างๆ ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 ถึง 2.7

2.2.3.3 วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์

a.) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย อุปกรณ์ที่ใช้ในการตอกเสาเข็มโดยทั่วไป ซึ่งควรมีการประเมินอย่างคร่าวๆมาก่อน โดยพิจารณาถึงลักษณะชั้นดิน ระบบปั้นจั่น และองค์ประกอบในการตอกเสาเข็ม เช่น ขนาดของตุ้มน้ำหนัก และระยะยก โดยอาจใช้โปรแกรม WEAPทำการวิเคราะห์หา blow count ที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้เสาเข็มเกิดความเสียหาย และเป็นที่น่าใจว่าก่อให้เกิดพลังงานที่เพียงพอ ที่จะทำให้นดินรอบเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวจนได้ fully mobilized load

และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณของแรงและความเร็วขณะทำการทดสอบในสนาม ซึ่งประกอบด้วย

- strain transducer จำนวน 2 ตัว เพื่อวัดแนวทางการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม จะติดที่ด้านข้างเสาเข็มซึ่งอยู่ตรงกันข้ามกัน 2 ด้าน ที่ระดับเดียวกับที่ติด accelerometer strain transducer นี้ประกอบด้วย foil gauge 4 ตัวติดอยู่ที่จุดรวมหน่วยแรงบน flexible aluminum transducer frame ซึ่ง foil gauge มีการเชื่อมกันและมีสายเคเบิลหุ้มสายอยู่ข้างใน เพื่อความแม่นยำในการรับข้อมูล

- accelerometer จำนวน 2 ตัว เป็นเครื่องมือ piezoelectric ที่มีการรวม amplifier ไว้ภายใน เพื่อลดเสียงรบกวน และจะหลอมกับชั้นพลาสติก ที่ออกแบบพิเศษป้องกันไฟฟ้ารั่วลงดิน นอกจากนี้ชั้นพลาสติกยังมีคุณสมบัติจำกัดความถี่ เพื่อป้องกันการเกิด resonance ตำแหน่งที่ติดตั้งจะอยู่ใต้หัวเสาเข็มลงมาอย่างน้อย 1 - 1.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม โดยจะติดไว้ด้านตรงข้ามกันอย่างแน่นอนหนาโดยใช้ concrete anchor-bolt และไม่ถูกกระทบเนื่องจากการเกิด bending ถ้าเป็นเสาคอนกรีต สายเคเบิลที่ต่อจาก accelerometer และ strain transducer จะมารวมกันที่ connection box และต่อไปที่ PDA

- Pile Driving Analyzer (PDA) เป็น microcomputer ที่ใช้ในการรับสัญญาณของ strain และความเร่งในสนามจาก strain transducer และ accelerometer และจะทำการขยาย กรองและปรับสัญญาณจาก transducer แต่ละตัว ซึ่งสัญญาณจาก accelerometer จะถูกส่งไปที่ integrator ทั้งสัญญาณจาก strain transducer และ accelerometer จะต้องผ่านการกลั่นกรองเพื่อให้มีความถี่ใกล้เคียงกับ frequency response ที่ 1600 Hz เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการเปลี่ยนสัญญาณ

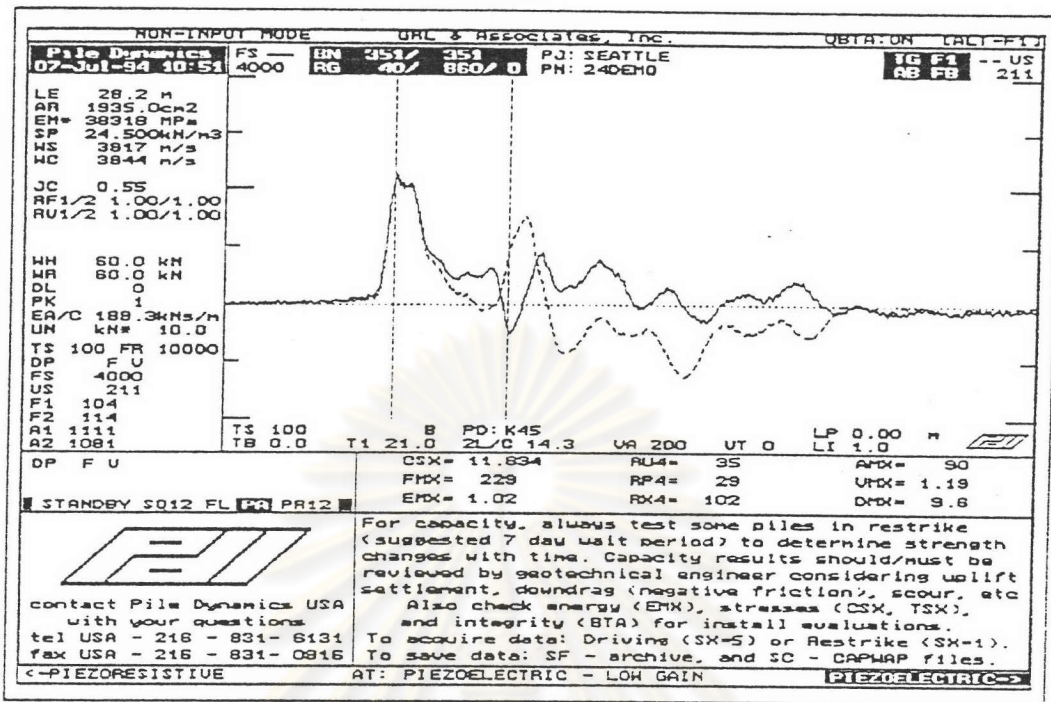
ขณะบันทึกทำการตอก PDA จะเปลี่ยนสัญญาณ analog ที่วัดได้เป็น digital และแปลงเป็นแรงและความเร็วซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา คลื่นของแรงและความเร็วจะปรากฏบนเครื่อง Osilloscope เพื่อแสดงคุณภาพของสัญญาณซึ่งสามารถปรับข้อมูลได้ถ้าจำเป็น ซึ่งแรงความเร็วและความเร่งจะถูกบันทึกลงใน diskette เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ภายหลังได้ ในแต่ละ blow PDA จะให้ข้อมูล 5 ข้อมูลพร้อมๆกัน คือ maximum pile displacement , Case method pile capacity , maximum force ที่ตำแหน่งของ transducer, maximum transferred energy และ maximum computed tension เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันเครื่องมือนี้ได้รวมเป็นชิ้นเดียวกับ เครื่องมือบันทึกสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่บันทึกสัญญาณจาก transducer , Portable PC Computer และ Osilloscope แสดงคุณภาพสัญญาณที่วัดได้ ผลที่แสดงหน้าจอดังรูปที่ 2.25

การติดตั้งเครื่องมือดังแสดงในรูป 2.26 และตัวอย่างข้อมูลที่ได้จาก PDA ตามความยาวเสาเข็ม ดังแสดงในภาคผนวก ก.1

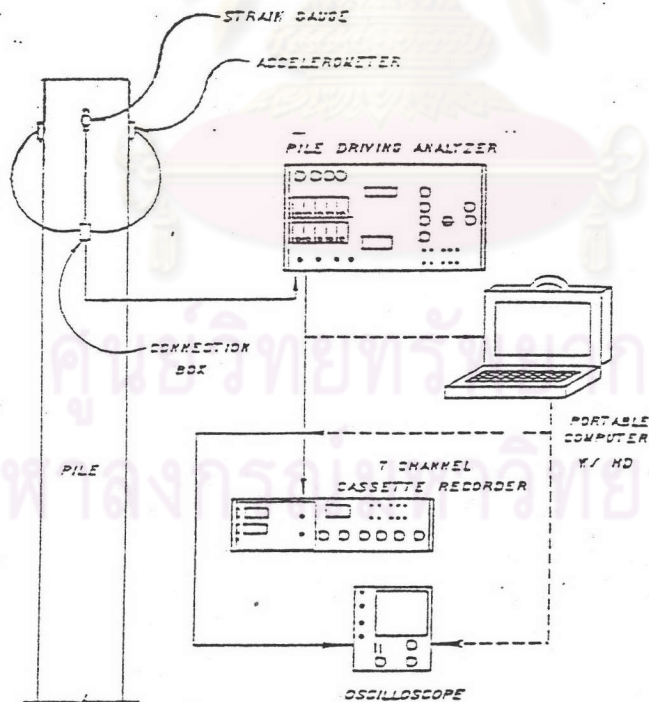
สำหรับการหาความเร็วคลื่น สามารถทำได้โดยการวางเสาเข็มลงบน support หรือพื้นอย่างอิสระและไม่มีสิ่งกีดขวาง ติด accelerometer ที่ปลายเสาเข็ม แล้วไขน็อตซึ่งมีน้ำหนักที่พอเหมาะไม่มากจนทำให้เสาเข็มเสียหาย ทำการเคาะลงไปจะสามารถหา positive acceleration peak ได้ ซึ่งช่วงเวลาระหว่าง peak หารด้วย 2 เท่าของ ความยาวเสาเข็ม ก็คือค่าความเร็วคลื่นนั่นเอง ดังรูป 2.27 ซึ่งค่าความเร็วคลื่น ได้ถูกจำแนกตามชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม ดังตารางที่ 2.8. ส่วนค่า Elastic modulus สามารถหาได้จากสมการ $E = c^2 \rho$ ซึ่งได้กล่าวไว้ในทฤษฎีคลื่นแล้ว

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความเร็วคลื่นในวัสดุต่างๆ

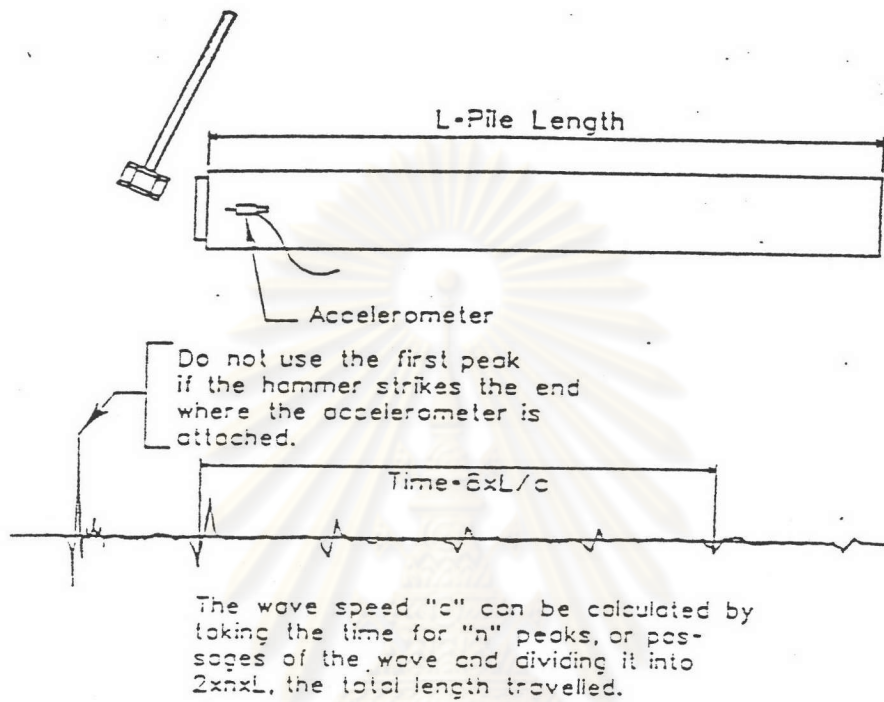
ชนิดของวัสดุ	ความเร็วคลื่น (m/s)
อลูมิเนียม	5200 - 5300
เหล็ก	5000 - 5200
คอนกรีต	3800 - 4000



รูปที่ 2.25 แสดงถึงการแสดงผลข้อมูลบนหน้าจอ PDA



รูปที่ 2.26 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณโดย PDA



รูปที่ 2.27 แสดงวิธีหาความเร็วคลื่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b.) การวิเคราะห์คำตอบจาก PDA

จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบพลศาสตร์ สัญญาณของแรง และความเร็ว ที่วัดได้ จะถูกนำมาวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงแรงกระทำเนื่องจากการตอกเสาเข็มและความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นที่หัวเสาเข็ม ความสมบูรณ์ของโครงสร้างเสาเข็มและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตอก ประสิทธิภาพในการตอก เป็นต้น ซึ่งค่าต่างๆดังกล่าวนี้จะช่วยในการควบคุมการตอกเสาเข็มให้มีความเหมาะสม เมื่อจะทำการตอกเสาเข็มจริง อีกทั้งยังทำให้ทราบค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดย Case method และ CAPWAPC อีกด้วย

b.1) หน่วยแรง (Stress) โดยทั่วไปพบว่า ความเสียหายของเสาเข็มที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็ม มักเกิดจากการวางแนวบ้นั่นไม่ดี หรือเกิดจากการใช้หน่วยแรงในการตอกมากเกินไป สำหรับเสาเข็มคอนกรีต หน่วยแรงดึง (tension stress) เป็นสิ่งสำคัญซึ่งสามารถค้นพบได้อย่างง่ายดายจากแรงที่เคลื่อนที่ขึ้นกล่าวคือ เมื่อทำการตอกเสาเข็ม คลื่นหน่วยแรง (stress wave) ซึ่งเป็นคลื่นแรงอัด (compressive wave) จะเคลื่อนที่ตามความยาวเสาเข็ม (L) ด้วยความเร็ว (c) และจะสะท้อนจากปลายเสาเข็มที่เวลา L/c มาถึงหัวเสาเข็มที่เวลา $2L/c$ ถ้าที่ปลายเสาเข็มมีแรงต้านทาน (resistance) น้อย คลื่นที่สะท้อนดังกล่าวจะเป็นคลื่นแรงดึง (tension wave) มีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นผ่านตามผิวเสาเข็ม และเกิดการซ้อนทับกับคลื่นแรงอัด (compressive wave) ซึ่งเคลื่อนที่ลง เรียกว่า net tension (CTN)

ดังนั้น หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่งใดๆ จะพิจารณาในรูป net tension ซึ่งเป็นการรวม downward compressive stress ที่น้อยที่สุด ที่เวลา $t < 2L/c$ ($F_{d,t3}$) กับ upward tension wave ที่สะท้อนจากปลายเสาเข็มมาถึงหัวเสาเข็มที่เวลา $2L/c$ ($F_{u,t2=2L/c}$) และสามารถแสดงค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด (net tension, CTN) ในรูปสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

$$CTN = \text{tension}_{\max} = F_{(u,t2=2L/c)} + F_{(d,t3<2L/c)\min} \leq 0 \quad \dots(2.21)$$

Federal Highway Administration ได้แนะนำเกณฑ์ของหน่วยแรงไว้ดังตารางที่ 2.9 ซึ่งรวบรวมโดย Vanikar (1986)

ตารางที่ 2.9 แสดงถึงเกณฑ์ของค่าความเค้นอัด และความเค้นดึงสูงสุดที่ยอมให้ แนะนำโดย Federal Highway Administration รวบรวมโดย Vanikar (1986)

ชนิดเสาเข็ม	Maximum Compressive Stress	Maximum Tensile Stress
steel	$0.9 F_y$	$0.9 F_y$
timber	$3 \sigma_a$	$3 \sigma_a$
precast concrete	$0.85 f'_c$	$3\sqrt{f'_c}$
prestressed concrete	$0.85 f'_c - f_{pe}$	$3\sqrt{f'_c + f_{pe}}$

เมื่อ F_y = yield strength
 σ_a = allowable design stress
 f'_c = concrete compressive strength
 f_{pe} = effective prestress after losses

b.2) ความสมบูรณ์ของโครงสร้างเสาเข็ม (Pile Integrity) เป็นการทดสอบด้วยหลักการที่ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง impedance คลื่นหน่วยแรงจะมีการสะท้อนกลับ ซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนทั้งแรงและความเร็วที่หัวเสาเข็ม ตามมาตรฐานการทดสอบของ AASHTO T 298-93 หรือ ASTM D-4945 เรียกการทดสอบนี้ว่า High Strain Test

ดังนั้น สำหรับเสาเข็มซึ่งมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (uniform pile) คลื่นแรงดึงที่เคลื่อนที่ขึ้นจะพบที่เวลา $2L/c$ ที่หัวเสาเข็ม หลังจากที่สะท้อนมาจากปลายเสาเข็ม หากพบคลื่นดังกล่าวที่เวลาก่อน $2L/c$ นั่นคือ มีการเปลี่ยนแปลง impedance เกิดขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด , การเปลี่ยน Modulus , คุณภาพการเชื่อมต่อเสาเข็มไม่ดีพอ (กรณีของเสาเข็มต่อ) หรือมีความเสียหายเกิดขึ้นในเสาเข็ม โดยใช้ค่า BETA ซึ่งเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเสาเข็ม (Z_2/Z_1) ใช้เป็นตัวจำแนกความสมบูรณ์ของเสาเข็ม เรียกวิธีนี้ว่า Beta method (Rausche และ Goble , 1979)

ซึ่ง BETA สามารถแสดงอยู่ในรูปของคลื่นที่เคลื่อนที่ลงเมื่อพบความไม่ต่อเนื่อง ($F_{d,1}$) กับคลื่นที่เคลื่อนที่สะท้อนกลับจากบริเวณที่ไม่ต่อเนื่อง ($F_{u,1}$) ของเสาเข็มส่วนที่ 1 ดังสมการที่ 2.22

$$BETA = (F_{d,1} + F_{u,1}) / (F_{d,1} - F_{u,1}) \quad \dots(2.22)$$

Rauche และ Goble (1979) ได้จำแนกความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (BETA) ไว้ดังนี้

BETA	pile condition
1.0	uniform
0.8-1.0	slight change
0.6-0.8	damage
below 0.6	broken

บริเวณส่วนของหน้าตัดเสาเข็มพบความไม่ต่อเนื่องนี้ จะสามารถถูกตรวจพบได้จากคลื่นสัญญาณของแรงและความเร็วที่วัดได้ในสนาม กล่าวคือ คลื่นของความเร็วซึ่งแต่เดิมจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับคลื่นของแรงนั้น จะเกิดการยกตัวขึ้นที่เวลาก่อน $2L/c$ ขณะที่คลื่นของแรงจะลดลงอย่างทันที ดังรูปที่ 2.28 a และ 2.28 b ซึ่งขนาดของช่องว่างระหว่างเสาเข็ม 2 หน้าตัดที่อยู่ติดกัน สามารถหาได้จากการสะท้อนกลับของคลื่น โดยใช้ integration ของการเปลี่ยนแปลง relative velocity

$$\delta = 1/2 \int_{t_1}^{t_2} (v - (F - R_{\Delta})/I) dt \quad \dots(2.23)$$

เมื่อ t_1, t_2 = เวลาที่เริ่มพบ slack และสิ้นสุด ตามลำดับ

$F - R_{\Delta}$ = ผลต่างของแรงที่วัดได้กับแรงเนื่องจากความเร็วที่เป็นสัดส่วนกัน
ที่เวลา t_1

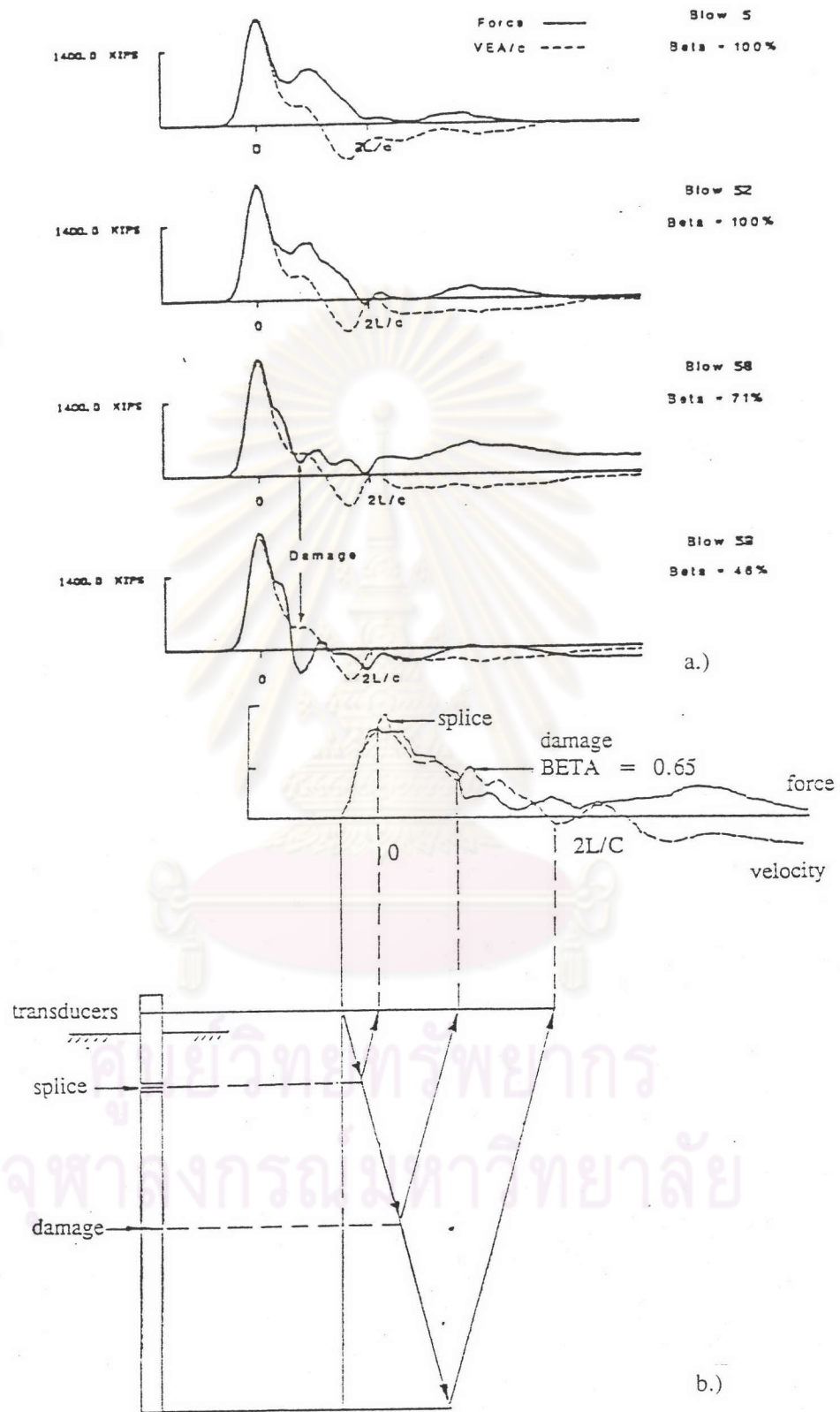
I = impedance

v = ความเร็วที่เกิด slack

โดย Canadian manual of foundation engineering (1978) ได้แนะนำว่าขนาดของรอยขาดไม่ควรมากกว่า 0.5 มิลลิเมตร

b.3) ประสิทธิภาพของปั้นจั่น (Hammer Performance) จะสามารถคำนวณพลังงานที่ถ่ายลงสู่หัวเสาเข็ม ได้จาก

$$E(t) = \int_0^t F(t)V(t)dt \quad \dots(2.24)$$



รูปที่ 2.28 a และ b แสดงแนวทางของคลื่นของแรงและความเร็ว เมื่อเกิดความเสียหายในเสาเข็มคอนกรีต

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } E(t) &= \text{พลังงานที่ตำแหน่งติดตั้ง gage} \\ F(t) &= \text{แรงที่วัดได้ที่ตำแหน่งติดตั้ง gage} \\ V(t) &= \text{ความเร็วที่วัดได้ที่ตำแหน่งที่ติดตั้ง gage} \end{aligned}$$

ค่าสูงสุดของ $E(t)$ curve เรียกว่า E_{\max} (ENTHRU) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการประเมินค่าต่างๆของระบบการตอกเสาเข็ม การวิเคราะห์ hammer performance อาจพิจารณาในรูปของอัตราการถ่ายพลังงานประสิทธิผล อัตราการถ่ายพลังงานประสิทธิผล ประสิทธิภาพระบบการตอก และ ประสิทธิภาพการส่งถ่ายพลังงานที่แท้จริง เป็นต้น

b.4) Bearing Capacity สัญญาณของแรงและความเร็วที่วัดโดย PDA ขณะเวลาทำการทดสอบ จะถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อหา bearing capacity อย่างคร่าวๆในสนาม โดย Case method และใช้ CAPWAPC วิเคราะห์โดยละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งวิธี Case method และ CAPWAPC ดังจะกล่าวถึงต่อไป

2.2.3.4 Case Method วิธีนี้อยู่บนพื้นฐานการแพร่ของคลื่น 1 มิติ เป็นวิธีซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าตอบ ด้วยสมมติฐานว่า ดินมีพฤติกรรมเป็น ideal plastic และเสาเข็มเป็น ideal elastic และมีความสม่ำเสมอ ข้อมูลของแรงและความเร็วที่วัดได้ที่หัวเสาเข็มจาก PDA นั้นสามารถนำไปหาค่าแรงต้านทานรวมของดิน (total soil resistance , R_t) เมื่อ แรงต้านทานรวม (R_t) คือผลรวมของแรงทางพลศาสตร์ (R_d) และแรงทางสถิตยศาสตร์ (R_s) ซึ่งแรงทางพลศาสตร์ ถูกสมมติให้สัมพันธ์กับความเร็วที่ปลายเสาเข็ม (Goble et al., 1984) และความเร็วที่ปลายเสาเข็มสัมพันธ์กับความเร็วที่หัวเสาเข็มที่ได้จากการวัด ดังกล่าว ดังนั้น เมื่อคำนวณแรงทางพลศาสตร์ได้จาก soil damping factor(J) และ pile velocity ($V(t)$) ที่ปลายเสาเข็ม จึงสามารถหาแรงทางสถิตยศาสตร์ (R_s) ได้ ซึ่งเป็นค่าที่ประเมินที่เวลาขณะหนึ่งระหว่างการตอกแต่ละครั้ง

แรงต้านทานรวม (total resistance , R_t) ที่พบระหว่างช่วงเวลา $2L/c$ จะประกอบด้วยแรงต้านทางสถิตยศาสตร์(static resistance , R_s) และแรงต้านทางพลศาสตร์ (dynamic resistance , R_d)

$$R_t = 1/2 \{F(t_1) + F(t_2)\} + 1/2 \{V(t_1) + V(t_2)\} Z \quad \dots(2.25a)$$

$$R_d = J_c \{F(t_1) + ZV(t_1) - R_t\} \quad \dots(2.26b)$$

$$R_s = R_t - J_c \{F(t_1) + ZV(t_1) - R_t\} \quad \dots(2.27c)$$

เมื่อ	$F(t_1)$	= แรงที่วัดได้ที่เวลา t_1 (kips)
	$F(t_2)$	= แรงที่วัดได้ที่เวลา t_2 (kips)
	$V(t_1)$	= ความเร็วที่เวลา t_1 (ft/s)
	$V(t_2)$	= ความเร็วที่เวลา t_2 (ft/s)
	J_c	= Case damping factor
	Z	= impedance = $M c/L$
	M	= มวลของเสาเข็ม ($\text{kip-s}^2/\text{ft}$)
	c	= ความเร็วคลื่น (ft/s)
	L	= ความยาวเสาเข็ม (ft)

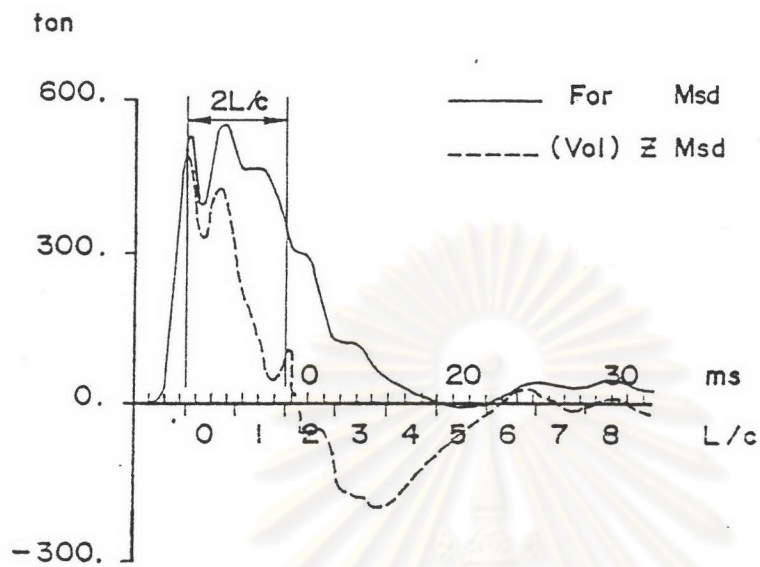
ตัวอย่างการคำนวณดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.29 และวิธีการหาความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Pile bearing capacity) ด้วยวิธี Case method นี้ สามารถแสดงที่มาได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2

ค่าของ Case damping factor ขึ้นกับขนาดของเม็ดดินที่ปลายเสาเข็ม (Rausche , 1985) สำหรับดินชนิดต่างๆ สามารถหาได้โดยการคำนวณกลับของสมการที่ 2.36 c เมื่อ R_s คือ Ultimate static resistance หาจาก static load test โดยใช้ Davisson's failure criterion ซึ่ง damping factor นี้ อยู่ในช่วง 0.1 สำหรับทราย ถึง 1 สำหรับดินเหนียว หรือหาจาก CAPWAPC จะทำให้ได้ค่า Case damping factor (J_c) ของดินที่ปลายเสาเข็ม

- Rausche และ Goble (1975) ได้แนะนำค่า Case damping factor ซึ่งจำแนกตามชนิดของดินที่ปลายเสาเข็มไว้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงค่า Case damping factor จำแนกตามชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม (Rausche และ Goble , 1975)

ชนิดดินที่ปลายเสาเข็ม	ช่วงที่แนะนำ	Correlation value
sand	0.05 - 0.20	0.05
silty sand or sandy silt	0.15 - 0.30	0.15
silt	0.20 - 0.45	0.30
silty clay and clayey silt	0.40 - 0.70	0.55
clay	0.60 - 1.10	1.10



$$F(t_1) = 530 \text{ tons} \quad F(t_2) = 340 \text{ tons}$$

$$Z_v(t_1) = 490 \text{ tons} \quad Z_v(t_2) = 90 \text{ tons}$$

$$\begin{aligned} R &= [F(t_1) + F(t_2) + Z_v(t_1) - Z_v(t_2)]/2 \\ &= [530 + 340 + 490 - 90]/2 = 635 \text{ tons} \end{aligned}$$

$$S = R - j_c [F(t_1) + Z_v(t_1) - R]$$

$$= 635 - (0.55) [530 + 490 - 635]$$

$$= 423 \text{ tons}$$

รูปที่ 2.29 แสดงตัวอย่างการคำนวณการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดย Case method

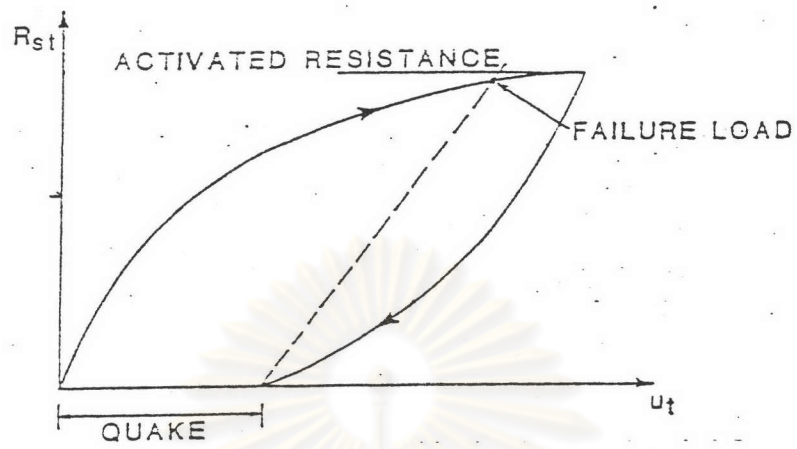
2.2.3.5 CAPWAPC (Case Pile Wave Analysis Program - Continuous version)

เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ใช้วิเคราะห์แรงและความเร็วที่หัวเสาเข็ม ด้วยสมการคลื่น โดยใช้ pile - soil model และ Smith - type parameter ผลลัพธ์ที่ต้องการจะเกิดเมื่อมีการจับคู่ที่ดีที่สุดระหว่างค่าที่วัดได้ในสนามกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ CAPWAPC ซึ่งเป็นการทำซ้ำ (trial & error) เพื่อจับคู่ (match) สัญญาณที่วัดได้จาก PDA หากการจับคู่ยังไม่เป็นที่น่าพอใจสามารถทำการวิเคราะห์ใหม่โดยการเปลี่ยนข้อมูลดิน

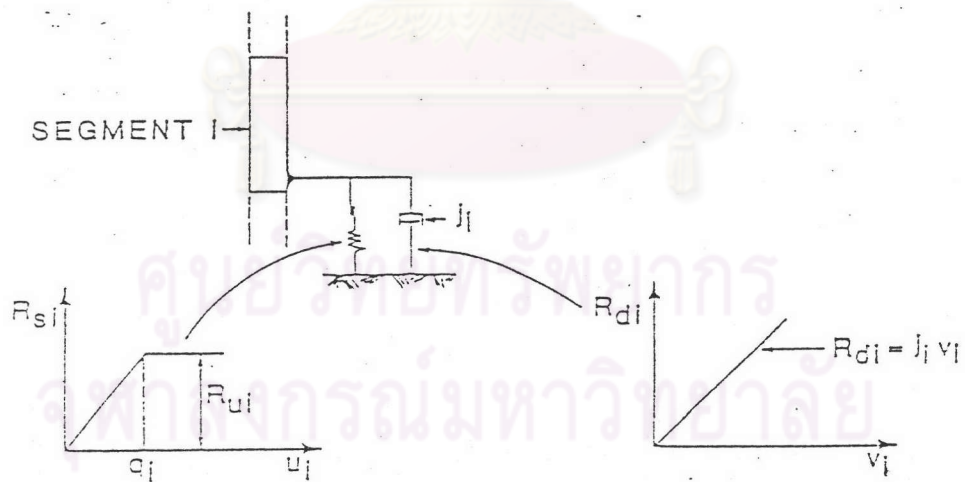
ผลจากการวิเคราะห์จะประกอบด้วย การเปรียบเทียบระหว่างแรงและความเร็ว ที่วัดได้ กับที่ได้จากการคำนวณ ค่าการกระจายของแรงต้านของดินทางสถิตศาสตร์ (Static soil resistance) และค่าของแรงในเสาเข็มที่ Ultimate capacity นอกจากนี้ ยังแสดงค่าของแรง ความเร็ว displacement และพลังงาน ที่เกิดในเสาเข็มได้ทุกส่วน รวมทั้ง parameters ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ และหา Load-Settlement curve โดยทำการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ใน CAPWAPC ซึ่งการวิเคราะห์นี้ จะคิดว่า เสาเข็มจะถูกกดโดยน้ำหนักที่แบ่งเป็นส่วนๆ (Simulated Static Load) ค่าของแรงและ displacement ที่หัวและปลายเสาเข็ม จะถูกคำนวณออกมา จึงสามารถหากราฟดังกล่าวได้

การประเมินค่า static resistance ใน CAPWAPC นั้น เป็นไปตาม Davisson's failure criterion ซึ่งกล่าวว่า failure จะเกิดเมื่อการเคลื่อนที่ที่ปลายเสาเข็ม (quake) มีค่าเท่ากับ $0.15 + D/120$ เมื่อ D คือความกว้างของปลายเสาเข็ม มีหน่วยเป็นนิ้ว ดังนั้น ในการพิจารณาจะให้การจมที่หัวเสาเข็ม ซึ่งปลายเสาเข็ม fail นั้น จะเท่ากับความยืดหยุ่นในการรับแรงกดของเสาเข็มรวมกับการเคลื่อนตัววิถีที่ปลายเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.30 ซึ่งขณะทำการทดสอบในสนามสามารถตรวจสอบได้จาก pile set per blow โดย CAPWAPC Manual (1993) ได้แนะนำว่าค่านี้ควรอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 12 มิลลิเมตร

สำหรับแบบจำลองเสาเข็มรุ่นแรกๆ ของโปรแกรมนี้ ได้คิดค้นตามวิธีของ Smith (1960) กล่าวคือ ใช้หลักการแบ่งมวลของเสาเข็มเป็นส่วนๆ เชื่อมต่อกันด้วยสปริง เรียกโปรแกรมนี้ว่า CAPWAP ซึ่งโปรแกรมดังกล่าว ได้ถูกปรับปรุงเรื่อยมา จนปัจจุบัน เสาเข็มได้ถูกพิจารณาในรูปแบบ Continuous Wave Transmission Model เรียก CAPWAPC โดยคิดว่า ค่าแรงต้านของดิน (Soil resistance) เป็น passive และประกอบด้วยส่วน static และ dynamic เกิดขึ้นที่ผิวและปลายเสาเข็ม จากแบบจำลองนี้ ทำให้จุดใดๆ บนเสาเข็มจะมีตัวไม่รู้ค่า 3 อย่าง คือ Elasticity (quake) , Plasticity(R_u) และ Viscosity(J) ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งจะคล้ายกับแบบจำลองของดินในสมการคลื่น รวมทั้งมีการเพิ่ม option อีกหลายอย่างซึ่งจะช่วยให้การ match สัญญาณให้



รูปที่ 2.30 แสดงถึงความสัมพันธ์ของ quake กับ static resistance ใน CAPWAPC



รูปที่ 2.31 แสดงแบบจำลองของ Smith และความต่อเนื่องของส่วนของเสาเข็ม

สามารถทำได้ง่ายขึ้น สิ่งหนึ่งที่ CAPWAPC ต่างไปจากสมการคลื่นคือ CAPWAPC สนใจเฉพาะแรงและความเร็วที่วัดที่หัวเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.32 ส่วนสมการคลื่นจะต้องมีแบบจำลองสำหรับระบบการตอก

a.) การวิเคราะห์ผล

แนวคิดโดยทั่วไปของโปรแกรมคือ แบ่งเสาเข็มเป็นส่วนๆ ด้วยเวลาของการเคลื่อนที่ของคลื่นให้เท่าๆดังรูป 2.33 หากเสาเข็มประกอบด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน ความยาวของเสาเข็มแต่ละส่วน ก็จะถูกแบ่งแตกต่างกันไป ซึ่ง displacement และความเร็วของเสาเข็มแต่ละส่วนที่อยู่ในดิน จะถูกนำมาคำนวณหาแรงต้านของดิน ต่อไป

จากแบบจำลองของ Smith ได้คิดว่าดิน ประกอบด้วย elasto-plastic spring และ linear dashpot ดังนั้น สำหรับเสาเข็มส่วนที่ i แรงต้านของดินถูกจำลองโดย Ultimate resistance (R_{ui}) , quake (q_i) และ viscous damping factor (J_i) ซึ่ง Total static bearing capacity (R_{ui}) คือผลรวมของ R_{ui} ส่วน Total resistance force (R_i) ที่เสาเข็มส่วนที่ i คือ

$$R_i = R_{si} + R_{di} \quad \text{.....(2.26)}$$

เมื่อ R_{si} และ R_{di} คือ แรงต้านทางสถิตศาสตร์ และพลศาสตร์ ของเสาเข็มส่วนที่ i ที่เกิดขึ้น ขณะเวลานั้น ตามลำดับ จะได้

$$R_{si} = k_{si} u_i \quad \text{.....(2.27a)}$$

$$R_{di} = J_i v_i \quad \text{.....(2.27b)}$$

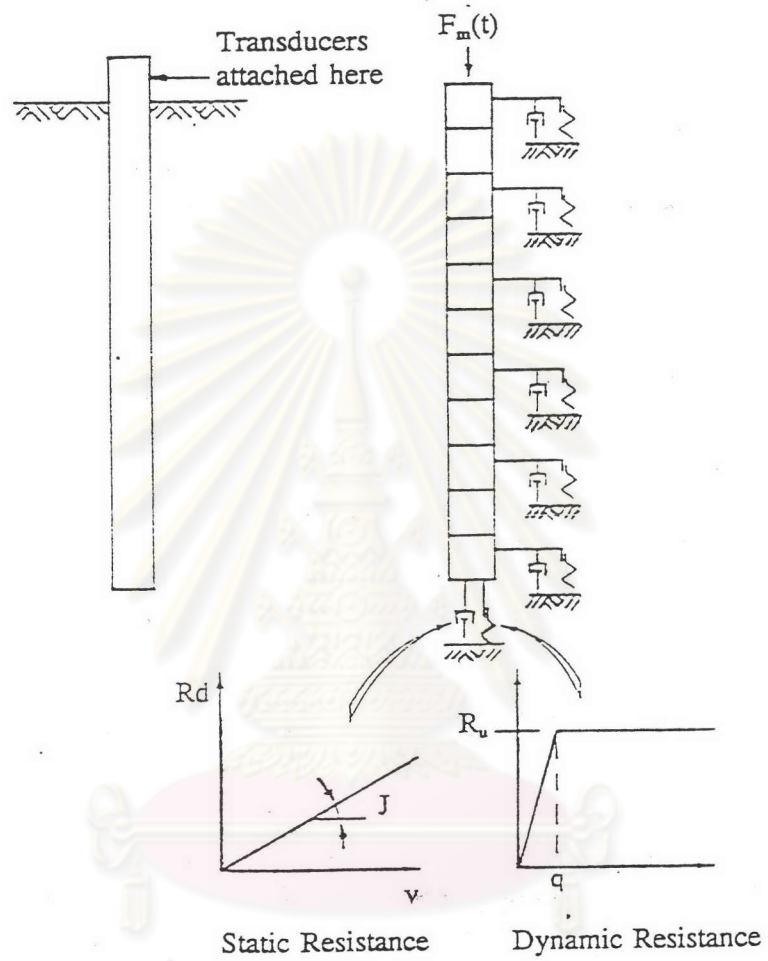
$$k_{si} = R_{ui} / q_i \quad \text{.....(2.27c)}$$

เมื่อ u_i = displacement ของเสาเข็มส่วนที่ i

v_i = ความเร็วของอนุภาคเสาเข็มในส่วนที่ i

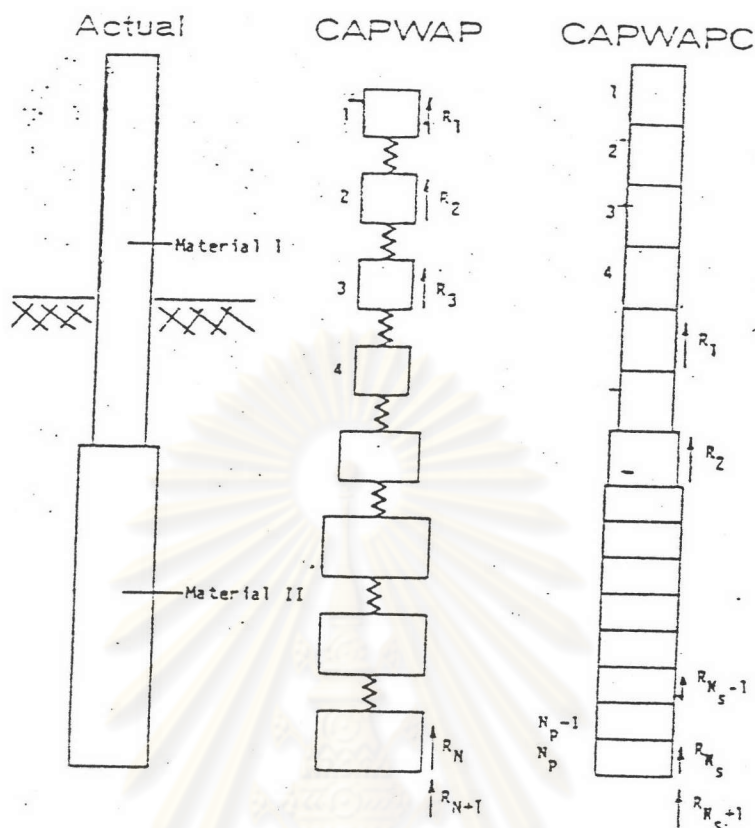
k_{si} = soil stiffness ของส่วนที่อยู่รอบเสาเข็มส่วนที่ i

q_i = loading quake ของดินส่วนที่อยู่รอบเสาเข็มส่วนที่ i

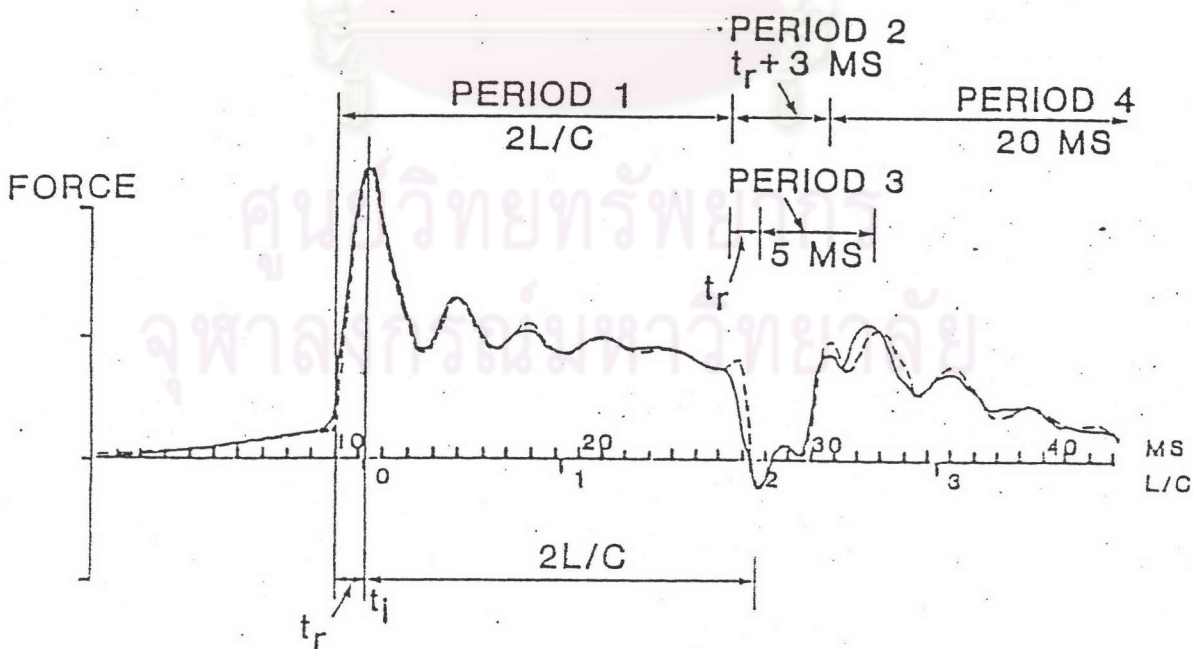


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.32 แสดงแบบจำลองใน CAPWAPC



รูปที่ 2.33 แสดงแบบจำลองแรงต้านในดินและการแบ่งส่วนของเสาเข็ม



รูปที่ 2.34 แสดงถึงการแบ่งช่วงเวลาในการวิเคราะห์ด้วย CAPWAPC

- สำหรับเสาเข็มที่มีความสม่ำเสมอ ที่เวลา t_j ใดๆ จะสามารถหาคลื่นที่เคลื่อนที่ขึ้น ($F_{u,i,j}$) และคลื่นที่เคลื่อนที่ลง ($F_{d,i,j}$) ของเสาเข็มส่วนที่ i ได้ดังนี้

$$F_{u,i,j+1} = F_{u,i+1,j} + 1/2R_{i,j+1} \quad \text{.....(2.28a)}$$

$$F_{d,i,j+1} = F_{d,i-1,j} - 1/2R_{i,j+1} \quad \text{.....(2.28b)}$$

และสามารถคำนวณหาแรง และความเร็ว ที่เวลา j ($F_{c,j}$ และ $V_{c,j}$) ได้จากค่าแรง ($F_{m,j}$) และความเร็ว ($V_{m,j}$) ที่วัดได้จากหัวเสาเข็ม

$$F_{c,j} = Z V_{m,j} + 2F_{u,1,j-1} \quad \text{.....(2.29a)}$$

$$V_{c,j} = (F_{m,j} - 2F_{u,1,j-1})/Z \quad \text{.....(2.29b)}$$

ส่วนที่ปลายเสาเข็ม จะสามารถหาคลื่นที่เคลื่อนที่ขึ้นได้จก

$$F_{u,j} = -F_{d,j-1} + R_{Ns} + R_{Ns+1} \quad \text{.....(2.29c)}$$

เมื่อ $R_{Ns+1} =$ แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (toe resistance)

$R_{Ns} =$ แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (shaft resistance)

ดังนั้น แรง ความเร็ว displacement และ resistance ของเสาเข็มส่วนที่ i จะสามารถหาได้ดังนี้

แรงที่ส่วนของเสาเข็มส่วนที่ i คือ ผลรวมของแรงที่เคลื่อนที่ขึ้นที่เวลา j กับแรงที่เคลื่อนที่ลงที่เวลา $j-1$ ดังสมการ 2.52 a

$$F_{i,j} = F_{u,i,j} + F_{d,i,j-1} \quad \text{.....(2.30a)}$$

ความเร็วของเสาเข็มส่วนที่ i คือ ผลต่างของแรงที่เคลื่อนที่ลงที่เวลา $j-1$ กับ แรงที่เคลื่อนที่ขึ้นที่เวลา j หาด้วย impedance ของเสาเข็มส่วนที่ i ดังสมการที่ 2.30 b

$$V_{i,j} = [F_{d,i,j-1} - F_{u,i,j}]/Z_i \quad \text{.....(2.30b)}$$

displacement ของเสาเข็มส่วนที่ i คือ displacement ที่เวลา $j-1$ บวกกับความเร็วเฉลี่ยของเสาเข็มส่วนที่ i ที่เวลา j กับ $j-1$ คูณด้วยเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.30 c

$$u_{i,j} = u_{i,j-1} + 1/2(V_{i,j-1} + V_{i,j})dt \quad \dots(2.30c)$$

resistance ของดินที่เสาเข็มส่วนที่ i คือ ผลคูณของ soil stiffness กับ displacement บวกกับ ผลคูณของ viscous damping factor กับความเร็วที่เวลา j ดังสมการที่ 2.30d

$$R_{i,j} = k_{si} u_i + J_i v_{i,j} \quad \dots(2.40d)$$

- Match Quality Evaluation (MQN) เป็นตัวชี้ให้เห็นถึงคุณภาพการจับคู่ (matching) สัญญาณที่ได้จากการวัด และที่คำนวณได้ ว่ามีความใกล้เคียงกันเพียงใด ซึ่งจะหาได้จากการรวมค่า absolute ของความแตกต่างระหว่างค่าความสัมพันธ์ที่วัดและคำนวณได้ที่หัวเสาเข็ม โดยพิจารณาเป็นช่วงเวลา k

$$MQN_k = \text{SUM} [ABS(f_{jc} - f_{jm})/F_m] \quad \dots(2.31)$$

เมื่อ f_{jc} = ค่าต่างๆ ที่คำนวณได้ที่หัวเสาเข็มที่เวลา j

f_{jm} = ค่าที่วัดได้ที่หัวเสาเข็มที่เวลา j

F_m = แรงที่วัดได้สูงสุดที่หัวเสาเข็ม

การวิเคราะห์จะแบ่งเวลาพิจารณาเป็น 4 ช่วง ดังรูป 2.34 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

1) พิจารณาเมื่อเริ่มตอกถึงเวลา $2L/c$ เป็นตัวแสดงว่าการกระจายของแรงเสียดทานที่ผิวเป็นอย่างไร

2) เวลาช่วงที่ 2 เริ่มเมื่อสิ้นสุดเวลาในช่วงแรก ถึง $t_1 + 3ms$. เมื่อ t_1 คือเวลาที่วัดเมื่อเริ่มตอกถึงเวลาที่มีความเร็วสูงสุด ซึ่งเวลาในช่วงนี้ ใช้สำหรับหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

3) เวลาช่วงที่ 3 พิจารณาที่เวลา t_1 หลังจาก $2L/c$ ถึง $5 ms$. ช่วงเวลานี้ค่าของ R_{ut} จะปรากฏชัด

4) ช่วงเวลาสุดท้าย เริ่มพิจารณา เมื่อสิ้นสุดเวลา ช่วงที่ 2 ถึงประมาณ $20 ms$. พฤติกรรมที่ปล่อยน้ำหนักของดิน มีผลต่อค่าต่างๆ ที่หัวเสาเข็ม

Match Quality ทั้งหมดของแต่ละช่วงเวลาจะถูกนำมารวมกันและเนื่องจากมีการซ้อนทับกันของช่วงเวลา ซึ่ง R_{ui} มีผลต่อ MQN มากกว่า soil resistance parameter ตัวอื่น ๆ

b.) CAPWAPC variables

ตามแบบจำลองใน CAPWAPC นั้น นอกจากค่า ultimate resistance จะมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ผลแล้ว ยังมี damping factor และ quake ซึ่งถูกใช้ร่วมกับ ultimate resistance ในการวิเคราะห์ผล ตลอดจนยังมี variables อีกเป็นจำนวนมากที่ใช้ในการคำนวณเพื่อจับคู่กับสัญญาณคลื่นที่วัดได้

- Skin quake (QSkn) คือ ค่า quake ของดินที่ผิวเสาเข็ม ตามทฤษฎีของ ideal plastic ค่านี้จะต้องไม่เท่ากับศูนย์ และต้องไม่เกินค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็ม ถ้า QSkn มีค่ามากจะทำให้แรงต้านทานเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกนั้นเกิดขึ้นช้า ค่าที่แนะนำคือ 0.25 เซ็นติเมตร

- Toe quake (QToe) คือ ค่า quake ของดินที่ส่วนปลายเสาเข็ม ค่านี้จะไม่เป็นศูนย์ และจะต้องไม่มากกว่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ปลายเสาเข็มรวมกับช่องว่างที่ปลายเสาเข็ม (toe gap) ซึ่งผลกระทบนี้จะเหมือนกับ skin quake ตามปกติแล้ว ค่า QToe ควรมากกว่า QSkn

- Damping เดิมอยู่ในรูปของ Smith damping factor ดังสมการที่ 2.32 a

$$R_{di} = J_{si} V_i R_{si} \quad \dots(2.32a)$$

เมื่อ R_{di} = แรงต้านทางพลศาสตร์

J_{si} = Smith damping factor

V_i = ความเร็ว

R_{si} = แรงต้านทางสถิตศาสตร์

R_{di} ขึ้นกับทั้งความเร็วของอนุภาคใน element และ แรงต้านทางสถิตศาสตร์ เพื่อความสะดวกในการ matching CAPWAPC จึงพิจารณา damping ในรูปของ linear viscous coefficient เมื่อให้ $R_{ui} = R_{si}$ จึงได้ความสัมพันธ์ $J_{si} = J_{vi}/R_{ui}$

$$R_{di} = J_{vi} V_i \quad \dots(2.32b)$$

เมื่อ J_{vi} = Viscous damping factor

เพื่อหลีกเลี่ยง individual viscous skin damping จึงมีการใช้ Case skin damping factor (J_c) ซึ่งอยู่ในรูปไม่มีหน่วย $J_c = \sum(J_{vi})/Z$ และ Case toe damping factor $J_c = J_{v,n+1}/Z$ สิ่งสำคัญสำหรับ Case damping factor คือการใช้แต่ damping force เป็น model ซึ่งสำหรับดินอ่อน จะไม่มีค่า static resistance force คงอยู่เลย ดังนั้น การวิเคราะห์หาค่า static resistance ที่แตกต่างกัน แต่ Case damping factor จะค่อนข้างคงที่

ในการวิเคราะห์ สามารถใส่ค่า Case damping factor หรือ Smith damping factor ก็ได้ แต่สำหรับ Smith damping factor ค่า static resistance จะมีผล ส่วน Case damping factor ค่า static resistance จะไม่มีผล และเนื่องจาก Smith damping factor สัมพันธ์กับ static resistance ดังกล่าวมาแล้ว จึงเป็นการดีกว่าในการเลือกใส่ค่า Smith damping factor ในการวิเคราะห์ผลด้วย CAPWAPC

สำหรับ Skin Damping (soil) สามารถพิจารณาจาก

1) Case damping (J_{Skn}) อยู่ในรูปไม่มีหน่วย มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 3 แต่ที่พบโดยทั่วไปนั้นมักมีค่าไม่เกิน 1

2) Smith Skin Damping (SSkn) เป็นค่าที่แนะนำว่าดีกว่า Case damping เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับแรงต้านทานทางสถิติศาสตร์ ซึ่ง SSkn จะถูกคำนวณโดย CAPWAPC ค่าที่แนะนำอยู่ในช่วง 0.025 s/ft - 0.33 s/ft

สำหรับ Toe Damping (soil) จะใช้ Case damping (J_{Toe}) หรือ Smith damping (S_{Toe}) ก็ได้ ซึ่ง Case damping ไม่ควรเกิน 1 และ Smith damping ค่าที่แนะนำอยู่ในช่วงเดียวกับ Skin damping

Fernando (1993) ได้แนะนำค่าของ toe damping factor และ skin damping factor โดยจำแนกตามชนิดของชั้นดิน และใช้ skin quake เท่ากับ 2.54 มิลลิเมตร รวมทั้งได้แนะนำการกระจาย resistance ของเสาเข็มแรงเหวี่ยง และเสาเข็มตอกชนิดอื่น จำแนกตามชนิดของชั้นดิน สำหรับใช้กับ CAPWAPC ในดินกรุงเทพฯ ได้ดังตารางที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.11 แสดงค่า damping factor ที่ปลาย และผิวเสาเข็ม สำหรับ CAPWAPC
(Fernando , 1993)

ชนิดของชั้นดิน	Toe damping factor		Skin damping factor	
	ช่วงที่แนะนำ	จำนวนข้อมูล	ช่วงที่แนะนำ	จำนวนข้อมูล
Soft clay	-	-	0.70 - 0.95	11
Stiff clay CH	0.30 - 0.42	6	0.58 - 0.80	11
Stiff clay CL	0.29 - 0.31	2	0.45 - 0.55	4
1 st Sand layer	0.26 *	1	0.35 - 0.40	4
2 nd Sand layer	0.29 - 0.39 *	2	0.30 - 0.45	2

* จำนวนข้อมูลควรเพิ่ม

ตารางที่ 2.12 แสดงการกระจายแรงต้านทานในดิน สำหรับ CAPWAPC (Fernando , 1993)

Description of soil layer	Resistance distribution (t/m ²)	จำนวนข้อมูล
Soft clay	2.18	7
Stiff clay CH	12.10	5
Stiff clay CL	8.90	3
1 st Sand layer	13.70	5

ค่า CAPWAPC variable ที่แนะนำโดย CAPWAP Manual (1993) ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.13

c.) วิธีใช้และผลการวิเคราะห์จาก CAPWAPC

CAPWAPC เป็นการวิเคราะห์สัญญาณของแรงและความเร็วที่วัดจาก PDA โดยการใส่ resistance , damping factor , quake ตามเงื่อนไขของชั้นดิน โดยใช้ค่า แรงทางสถิติศาสตร์ที่หาได้จาก Case method เป็นแนวทาง และทำการวิเคราะห์ผล trial and error จนแรงและความเร็วที่คำนวณได้ match กับสัญญาณที่วัดได้ในสนาม ด้วยคุณภาพการ match ที่ดีที่สุดและมีความสมเหตุสมผล อันเป็นการยืนยันว่าผลจากการวิเคราะห์สามารถใช้ทำนายผลที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 2.13 แสดงค่า CAPWAPC Variables (CAPWAPC Manual , 1993)

Quantity	Program Symbol	Dimension	Recommended Minimum	Recommended Maximum	Recommended Starting Value
Skin Quake	QSkn	inch/cm	.01/.025	max $4^{(2)}$	0.1/0.25
Toe Quake	-QToe	inch/cm	.01/.025	max $4_{toe} - TGap$	0.1/0.25
Skin Unld'Quake ⁽¹⁾	CSkn	--	.01	1.0	1.0
Toe Unld'Quake ⁽¹⁾	CToe	--	.01	1.0	1.0
Unloading Level ⁽¹⁾	UNld	--	0	1.0	1.0
Skin Reloading Level ⁽¹⁾	LSkn	--	-1.0	1.0	-1.0
Toe Reloading Level ⁽¹⁾	LToe	--	0.0	1.0	0
Skin Damping					
Case	JSkn	--	N/A	N_s	0.1
Smith	SSkn	s/ft s/m	0.025/.08	0.31/1.0 ⁽³⁾	N/A
Toe Damping					
Case	JToe	--	N/A	1.0	0.1
Smith	SToe	s/ft s/m	0.025/.08	0.31/1.0 ⁽³⁾	N/A
Smith Damping Option	OPtd	--	0	2.0	0
Pile Damping	PIld	--	0	0.03	0
Skin Soil Dashpot	SKdp	--	0.02	N/A	0
Skin Soil Mass	MSkn	Fu	0	N/A	0
Toe Soil Dashpot	BTdp	--	0.02	N/A	0
Toe Soil Mass	MToe	Fu	0	N/A	0
Plug Mass	PLug	Fu	0	3 toe weight	0
Toe Gap	TGap	inch/cm	0	max $u_{toe} - Q_{toe}$	0
Residual Stress Option	REss	--	0	5	0

Notations:

- (1) Multiplier
- (2) Maximum displacement
- (3) Higher values are possible though uncommon

และแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง ขั้นตอนการ match สัญญาณ ดังรูปที่ 2.35 ซึ่งวิธีใช้ CAPWAP ตลอดจนเมนูที่จำเป็นในการวิเคราะห์ผลโดยย่อ และตัวอย่างผลการวิเคราะห์ ดังแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.3

- Hussein (1986) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ parameter ของ CAPWAP พบว่า ผลการ match ที่ดีที่สุดจะให้คำตอบที่ unique ซึ่งสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมที่แท้จริงของดิน ที่เวลาขณะทดสอบได้

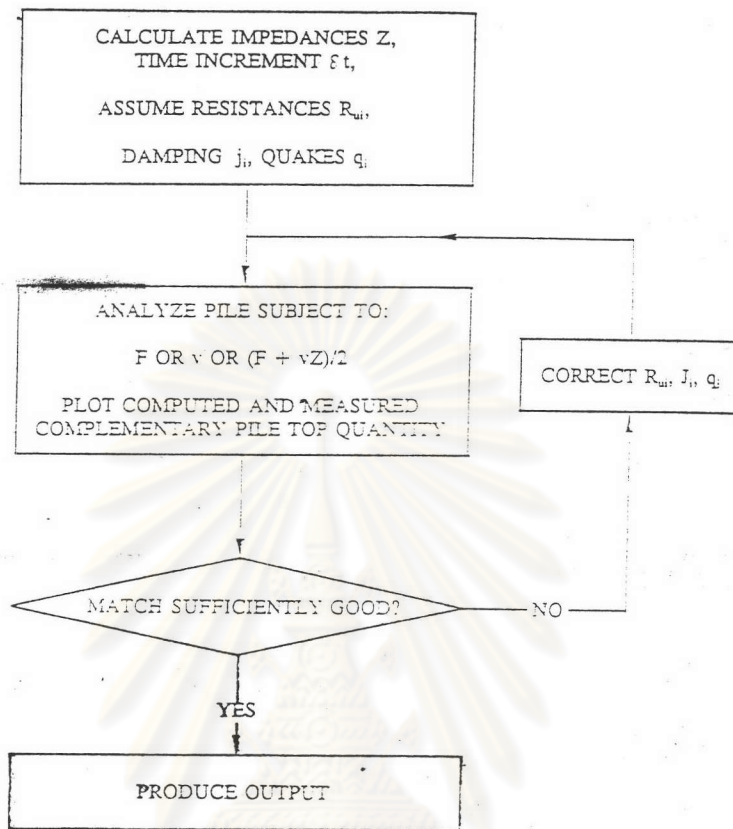
- Fellenius (1988) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ variation ของ ผลจาก CAPWAP เป็น function ของผู้ทำการวิเคราะห์ เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่แตกต่างกัน 4 กลุ่ม ด้วย CAPWAP โดยผู้ดำเนินการวิเคราะห์ 19 คน พิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่า กลุ่มที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากนั้นคือกลุ่มที่ทำการวิเคราะห์ผลจากเสาเข็มที่ตอกในชั้นดินที่แตกต่างไปจาก model ในโปรแกรม

- Rausche , Goble และ Likins (1985) ได้เสนอว่า ในทางทฤษฎี การวิเคราะห์ผลด้วย CAPWAP จะให้ค่า resistance distribution ที่มีความ unique

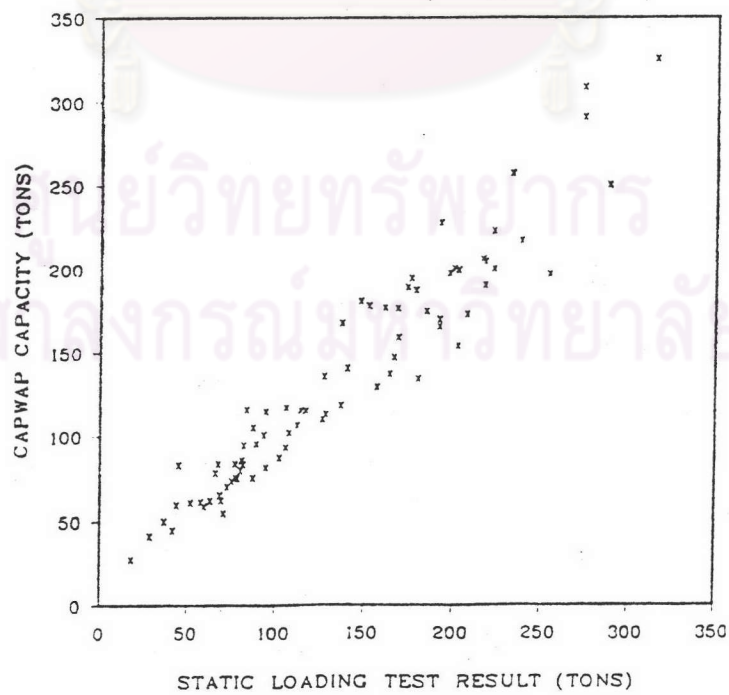
2.2.4 แนวคิดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test) โดย CAPWAP กับ ทดสอบด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์ (Static pile load test)

- Goble , et al. (1980) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ โดย CAPWAP กับ ทดสอบด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์นั้น มีความแตกต่างกัน $\pm 15 \%$ ซึ่งการทดสอบทั้งสองวิธีจะต้องให้ค่า Static resistance เกิดขึ้นอย่างเต็มที่ และเวลาที่ทำการทดสอบทั้งสองวิธีดังกล่าว ควรใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 2.36

- Fellenius (1980) ได้เสนอว่า ความแตกต่างของการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งสองวิธีดังกล่าวนี้ จะมีความแตกต่างประมาณ 10 - 15 % ด้วยเงื่อนไขเดียวกับ



รูปที่ 2.35 แสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลด้วย CAPWAPC



รูปที่ 2.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CAPWAP capacity กับ Static load test (Goble et al. , 1980)

Goble, et al. (1980) ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า สำหรับการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์นั้น จะสามารถหาค่าน้ำหนักสูงสุดได้หลายวิธี

นอกจากนี้ Fellenius (1984) ได้เปรียบเทียบ การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งสองวิธี ใช้การหาน้ำหนักสูงสุดตามวิธีของ Davisson (1975) โดยข้อมูลส่วนใหญ่เป็นผลจากการทำ restrike test หลังตอกเสาเข็มเสร็จ 4 วัน และทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์ หลังจากตอกเสาเข็มเสร็จ 12 วัน ดังตารางที่ 2.14 และรูปที่ 2.37 ซึ่งพบว่า สำหรับเสาเข็มที่ทำ restrike test ก่อน static pile load test นั้น ค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเมื่อทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ จะน้อยกว่า ค่าที่ได้จากการทำ static pile load test และในทางกลับกัน สำหรับเสาเข็มที่ทำ static pile load test ก่อน restrike test จะได้ผลที่ตรงกันข้ามกับกรณีแรก

- Hannigan และ Webster (1987) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ โดย CAPWAP กับทดสอบด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์ โดยใช้ วิธีของ Davisson (1975) หาน้ำหนักสูงสุด สำหรับการทดสอบแบบสถิตศาสตร์นั้น มีความแตกต่างกัน 20 % ดังรูปที่ 2.38

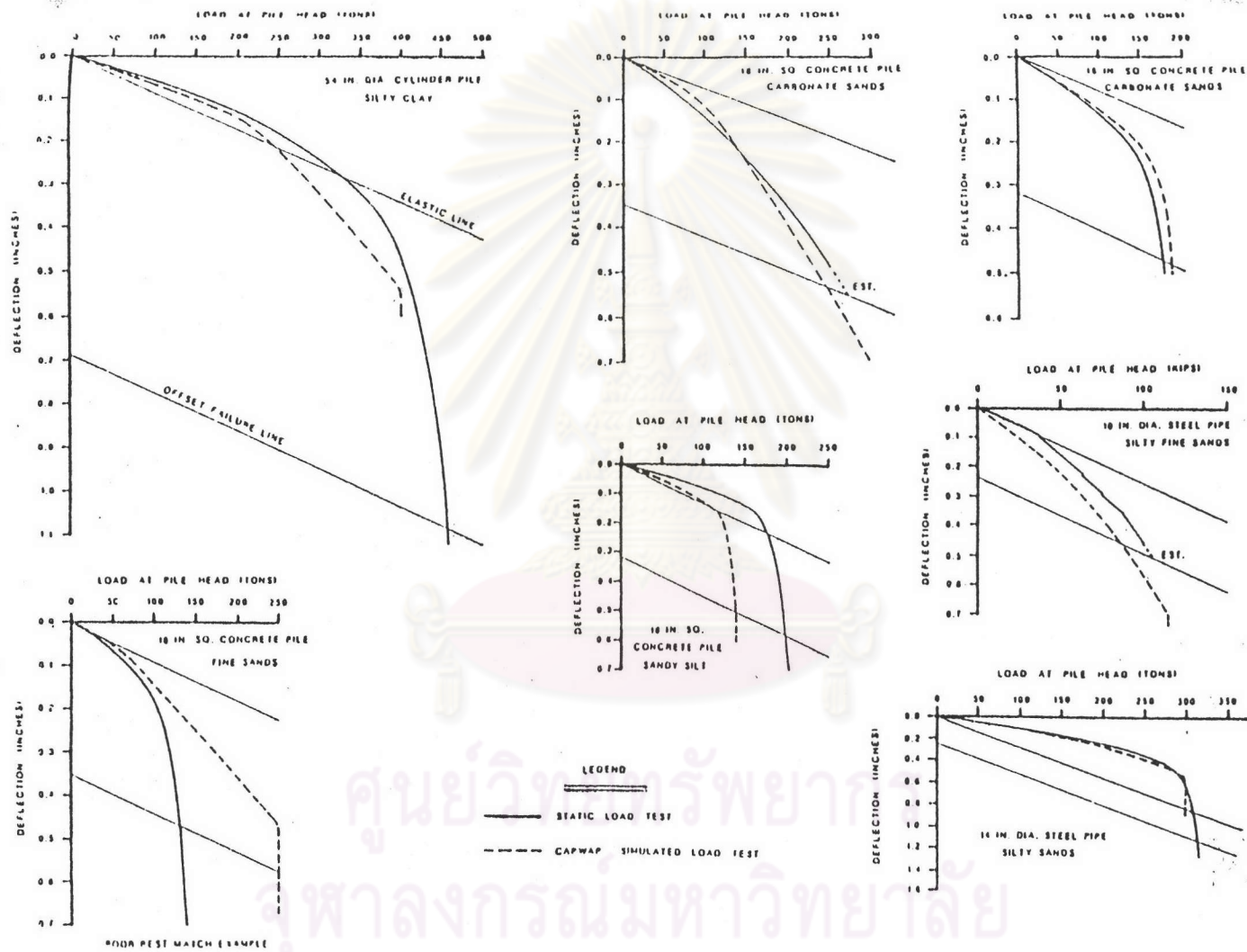
- Fernando (1993) ได้พิจารณาเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่าง การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ โดย CAPWAP กับ ทดสอบด้วยวิธีแบบสถิตศาสตร์ โดย Davisson (1975) และ Mazurkiewicz (1972) โดยแยกเป็นเสาเข็มแรงเหวี่ยง (spun pile) และเสาเข็มตอกชนิดอื่น ดังตารางที่ 2.15 ทั้งยังได้หา initial gradient ของ load - settlement curve จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับ simulated load - settlement curve จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ ได้ค่าเฉลี่ย ดังตาราง 2.16

ตารางที่ 2.14 แสดงค่าผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบ พลศาสตร์ โดย CAPWAPC กับวิธีแบบสถิตศาสตร์ (Fellenius , 1984)

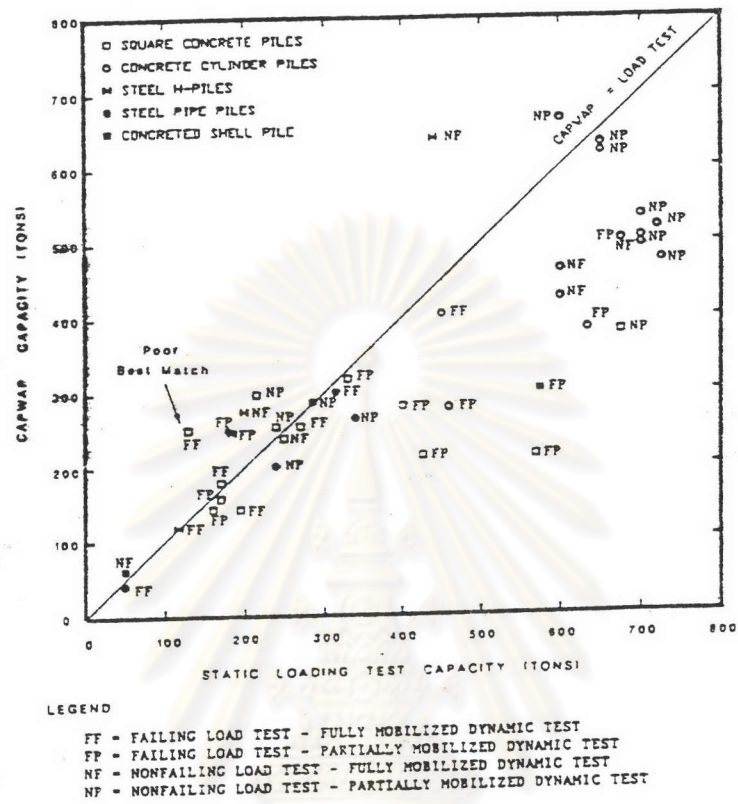
Pile Type	Soil Condition	Penetration Resistance (Blows/Ft.)	CAPWAP-C Capacity (tons)	Static Load Test Capacity (tons)	Difference (%)	Static Loading Procedure	Load Cell	Remarks
18" SQ. PS Concrete	Calcareous Sand	29	182	172	5.5	Q-ML	Yes	
18" SQ. PS Concrete	Calcareous Sand	41	255	270	5.5	Q-ML	Yes	
18" SQ. PS Concrete	Sandy Silt	40	142	195	27.1	S-ML	Yes	
18" SQ. PS Concrete	Fine Sand	33	251	130	93.4	Q-ML	Yes	Poor Best Match See Fig. 46
54" O.D. Cylinder Pile	Silty Clay	94	404	450	10.3	Q-ML	Yes	
10" O.D. × .188" Pipe	Silty Fine Sand	32	41	52	21.9	S-ML	No	
14" O.D. × .750" Pipe	Silty Fine Sand	72	300	315	4.7	Q-ML	Yes	
HP 10 × 42	Silty Clay	84	117	118	0.4	Q-ML	Yes	

Notes: Q-ML = Quick, Maintained Load
S-ML = Slow, Maintained Load

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.37 แสดงการเปรียบเทียบโดยใช้วิธีของ Davisson หาน้ำหนักสูงสุด ระหว่าง CAPWAP กับ Static load test โดยพิจารณาจาก load - deformation curve (Fellenius, 1984)



รูปที่ 2.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CAPWAP capacity กับ Static load test ซึ่งใช้วิธีของ Davisson หานำหนักสูงสุด (Hannigan และ Webster ,1987)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ และแบบสถิตศาสตร์ (Fernando , 1993)

ชนิดเสาเข็ม	จำนวนข้อมูล	Criteria	$Q_{CAPWAPC} = (\text{Correlation factor}) Q_{static}$	
			Correlation factor	r^2
เสาเข็มตอก	6	Davisson	0.926	0.87
		Mazurkiewicz	0.826	0.88
เสาเข็มแรงเหวี่ยง*	6	Davisson	1.010	0.88
		Mazurkiewicz	0.935	0.91

* หมายถึง ข้อมูลเฉพาะแต่ในดินกรุงเทพ

ตารางที่ 2.16 แสดงถึงการเปรียบเทียบ Initial gradient จากผลการทดสอบการรับน้ำหนัก ของเสาเข็มด้วยวิธีทดสอบแบบพลศาสตร์ และแบบสถิตศาสตร์ (Fernando , 1993)

ชนิดเสาเข็ม	จำนวนข้อมูล	$\text{Initial gradient}_{CAPWAPC} = (I_d) \cdot \text{Initial gradient}_{static}$	
		I_d	standard deviation
เสาเข็มตอก	6	0.719	0.24
เสาเข็มแรงเหวี่ยง*	6	0.813	0.30

* หมายถึง ข้อมูลเฉพาะแต่ในดินกรุงเทพ