

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับดินกรุงเทพฯ ฯ

ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของชั้นดินต่าง ๆ ในชั้นทรายค่าดังกล่าว คือ ค่ามุมเสียดทานภายใน (angle of internal friction,  $\phi'$ ) และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (effective overburden stress,  $\sigma'_{vo}$ ) สำหรับดินเหนียวค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการคือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength,  $s_u$ )

ค่าต่าง ๆ ข้างต้นบางค่าสามารถหาได้จากการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือจากการเก็บข้อมูลในสนาม ในกรณีที่ไม่สามารถวัดค่าคุณสมบัติของดินได้โดยตรงก็สามารถหาพารามิเตอร์ด้วยความสัมพันธ์แบบ Empirical โดยมีพื้นฐานมาจากข้อมูลการทดสอบในอดีต และใช้ได้เฉพาะบางพื้นที่เท่านั้น สำหรับดินกรุงเทพฯ ฯ ได้เคยมีการวิจัยและหาค่าต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละชั้นดินดังนี้

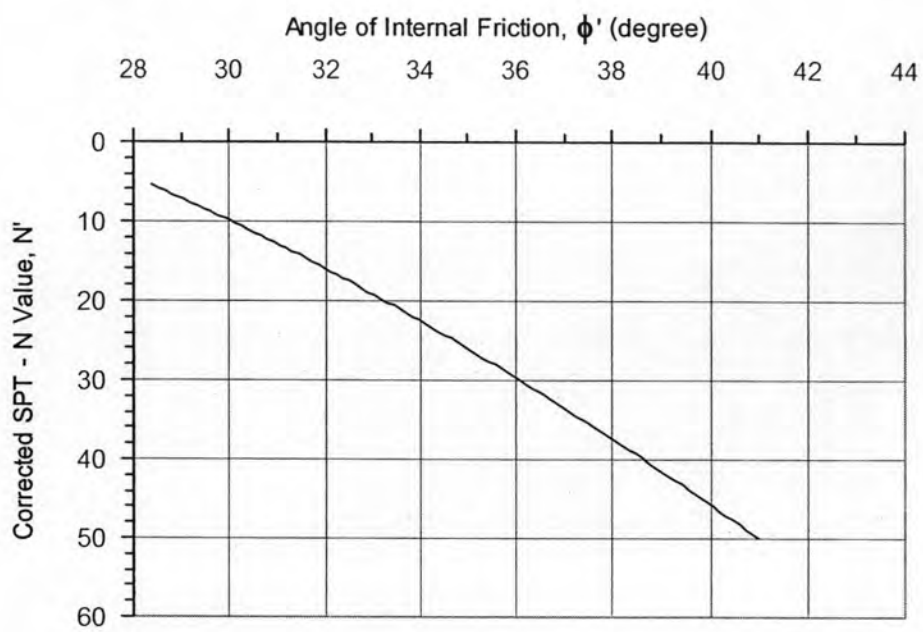
##### 2.1.1 ชั้นทราย

การทดสอบในสนามเพื่อหาค่ามุม  $\phi'$  ทำได้โดยใช้สูตรเชิงประสบการณ์ (empirical formula) ซึ่งได้มีผู้เสนอไว้มากมาย เช่น ในดินทรายปนดินเหนียว (clayey sand, SC) วีระนันท์ (2526) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม  $\phi'$  กับค่า SPT-N Value ซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์กลับจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ ฯ คือ

$$\phi' = 12.041N^{0.162} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$N$  = ค่า SPT-N Value แบบไม่ปรับแก้



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $N'$  (SPT) กับค่า  $\phi'$  (Peck, Hanson & Thornburn, 1974)

Peck, Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอความสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับทรายละเอียดที่มีทรายแป้ง (Silt) ปนอยู่ได้บ้างแต่ไม่มีดินเหนียวปนอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับทรายชั้นที่หนึ่งและสองในกรุงเทพฯ ก็มีลักษณะเป็นทรายละเอียดปนทรายแป้ง (Silty Sand , SM) เป็นส่วนใหญ่ Thanudkleung (1987) ได้ทำการทดสอบกับชั้นทรายกรุงเทพฯ และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม  $\phi'$  กับค่า  $N'$  ที่ได้มีความใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ของ Peck , Hanson & Thornburn (1974) โดยค่า  $N'$  เป็นค่า  $N$  ที่ทำการปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผล ( $\sigma'_{v0}$ ) ซึ่ง Peck , Hanson & Thornburn (1974) ได้เสนอไว้ดังรูปที่ 2.2

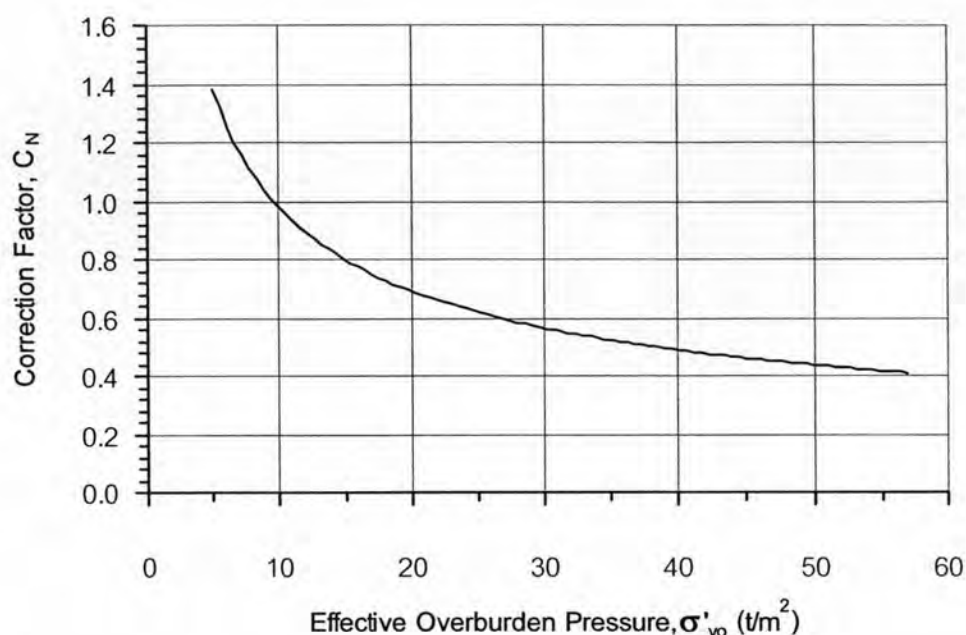
$$N' = C_N \cdot N \tag{2.2}$$

$$C_N = 0.77 \log \left( \frac{1915}{\sigma'_{v0}} \right) \tag{2.3}$$

เมื่อ

- $N$  = ค่า SPT-N Value (ครั้งต่อฟุต)
- $C_N$  = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง

$\sigma'_{v0}$  = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง (kN /m<sup>2</sup>)



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_N$  กับค่า  $\sigma'_{v0}$  (Peck, Hanson & Thornburn, 1974)

### 2.1.2 ชั้นดินเหนียว

ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว ( $s_u$ ) สามารถหาได้จากทั้ง การทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบในสนาม สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการค่า  $s_u$  จะได้จากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (unconfined compressive test, UC) หรือโดยวิธี ทดสอบกำลังอัดสามแกน (triaxial compressive test, UU) แต่ตัวอย่างดินที่จะนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการจะต้องอยู่ในสภาพไม่ถูกรบกวน (undisturbed sample) เพื่อที่จะได้ค่าที่ใกล้เคียง กับสภาพในธรรมชาติ การทดสอบในสนามสามารถหาค่า  $s_u$  ได้จาก Field Vane Test (FV) ใน ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง หรือจากสูตรเชิงประสพการณ์ ระหว่างค่า SPT-N Value กับ  $s_u$  ในชั้นดินเหนียวแข็ง สำหรับค่า  $s_u$  ที่ได้จาก FV จะมีค่าสูงเกินไปจึงต้องทำการปรับแก้โดยค่าที่ ถูกเสนอโดย Bjerrum (1972) ดังสมการ

$$S_{u(\text{corrected})} = \mu S_{u(FV)} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$\mu = 1.7 - 0.54 \log(PI)$$

- $\mu$  = ค่าปรับแก้สำหรับ Field Vane Test  
 $PI$  = ชีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, %)

สำหรับดินเหนียวแข็งกรุงเทพ ฯ ชั้นแรก วีระนันท์ (2526) ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $s_u$  กับ SPT-N Value สำหรับดินเหนียวแต่ละประเภทไว้ดังนี้

$$s_{u(CH)} = 0.685N \text{ (t/m}^2\text{) สำหรับดินเหนียว CH} \quad (2.5)$$

$$s_{u(CL)} = 0.520N \text{ (t/m}^2\text{) สำหรับดินเหนียว CL} \quad (2.6)$$

เมื่อ

- $N$  = ค่า SPT-N Value แบบไม่ปรับแก้และควรมีค่ามากกว่า 8 (หน่วยเป็นครั้งตอ่ฟุต)

ซึ่งการจำแนกประเภทของดินเหนียวต้องใช้ระบบ Unified Soil Classification นอกจากนี้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง  $s_u$  กับ SPT-N Value ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพ ฯ ของ แมน สรวง, มนัสพลและ ณัฐพล (2540) พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลวิจัยของ วีระนันท์

## 2.2 เครื่องมือวัดในเสาเข็มเจาะ

เครื่องมือวัดที่ติดตั้งในเสาเข็มเจาะที่นิยมในประเทศไทยมี 2 ชนิดคือ Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG) และ Extensometer ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาแรงตามแนวแกนของเสาเข็มที่ความลึกต่างๆได้ โดยที่ค่าที่ได้จาก VWSG จะมีความน่าเชื่อถือและมีความละเอียดมากกว่าค่าที่ได้จาก Extensometer สำหรับค่าที่ได้จาก Extensometer นั้นจะใช้สำหรับตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จาก VWSG โดยเครื่องมือวัดทั้ง 2 ชนิดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 Vibrating Wire Strain Gauge (VWSG)

VWSG คือ มาตรวัดความเครียดซึ่งใช้วัดค่าความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นที่ความลึกต่างๆ ค่าความเครียดที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นแรงตามแนวแกนที่ความลึกนั้นๆ โดยถือว่าแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับในเสาเข็มถูกส่งถ่ายไปยังดินรอบๆ ตำแหน่งนั้นโดยแต่ละความลึกจะติดตั้ง VWSG จำนวน 3-5 ตัวที่เหล็กลึกลงในเสาเข็ม ดังแสดงในรูป 2.3 ตามปกติ VWSG จะติดตั้งในระดับความลึกที่ชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งต้องอาศัยผลการเจาะสำรวจชั้นดินบริเวณที่จะก่อสร้างซึ่งแสดงอยู่ในรูปของ Boring Log และการเก็บตัวอย่างลักษณะดินขณะทำการขุดเจาะเสาเข็มสมอ (anchorage pile) เพื่อกำหนดตำแหน่งที่จะติดตั้ง VWSG

ค่าแรงตามแนวแกน ณ จุดที่ทำการติดตั้ง VWSG สามารถหาได้จากสมการ

$$P_{i(VWSG)} = (AE)_p \cdot \varepsilon_i \quad (2.7)$$

เมื่อ

$P_{i(VWSG)}$  = แรงตามแนวแกนจาก VWSG ที่ระดับความลึก  $i$   
(tons)

$(AE)_p$  = ค่าตีฟเนสเทียบเท่าเสาเข็ม (Equivalent Pile Stiffness)

$$= [A_s(n-1) + A_g] E_c \quad (t)$$

$A_s$  = พื้นที่หน้าตัดรวมของเสาเข็มรับแรงอัด ( $m^2$ )

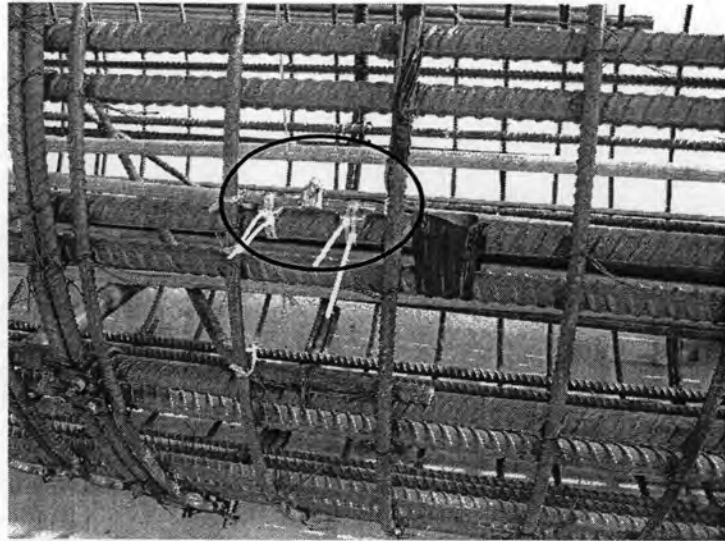
$A_g$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม ( $m^2$ )

$n$  =  $E_s / E_c$

$E_c$  = อิลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต ( $t/m^2$ )

$E_s$  = อิลาสติกโมดูลัสของเหล็กเสริม ( $t/m^2$ )

$\varepsilon_i$  = ความเครียด (Strain) ณ ความลึก  $i$  ได้จาก VWSG



รูปที่ 2.3 ลักษณะการติดตั้ง VWSG ในเสาเข็มเจาะ

### 2.2.2 Extensometer

Extensometer เป็นเครื่องมือวัดการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆ มีอยู่ 2 ชนิดคือ Magnetic Extensometer และ Rod Extensometer หรือ Telltale Rod เมื่อทราบค่าการทรุดตัวจากการวัดที่ระดับต่างๆ จะทำให้สามารถคำนวณหาค่าการหดตัวของเสาเข็มได้ด้วย ความเครียดที่ระดับความลึกต่างๆ กรณีของ Rod Extensometer ติดตั้งโดยยึดกับเหล็กยื่นโดยมีปลายข้างหนึ่งยื่นเลยหัวเสาเข็มออกมาและปล่อยอีกข้างอยู่ที่ระดับความลึกที่ต้องการตาม เนื่องจากไม่สามารถติดตั้ง Extensometer ในเสาเข็มเป็นจำนวนมากได้ ทำให้ไม่สามารถหาค่าการถ่วงน้ำหนักบรรทุกสู่ชั้นดินต่างๆ ได้ละเอียดเท่ากับการวัดโดยใช้ VWSG

การคำนวณแรงตามแนวแกนที่จุดนั้นหาได้จาก

$$P_{i(EXT)} = (AE)_p \cdot \varepsilon_i \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$P_{i(EXT)} = \text{แรงตามแนวแกนจากหัวเสาเข็มที่ระดับความลึกนั้น (t)}$$

$$(AE)_p = \text{ค่าสติฟเนสเทียบเท่าของเสาเข็ม (t)}$$

$$= [A_s(n-1) + A_g] E_c \text{ (ค่าเท่ากับการคำนวณแรงใน VWSG)}$$

$$\varepsilon_i = \text{ความเครียดของ Extensometer จากหัวเสาเข็มที่ความลึกระดับนั้น}$$

## 2.3 การประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยว

### 2.3.1 วิธีสมดุลสถิต (static equilibrium)

วิธีสมดุลสถิตทำนายกำลังรับบรรทุกของเสาเข็มโดยใช้หลักสมดุลของแรงกล่าวคือกำลังรับน้ำหนักที่จุดวิกฤติของเสาเข็ม ( $Q_{ult}$ ) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงเสียดทานรอบผิวเสาเข็มและแรงต้านจากปลายเสาเข็มลบด้วยน้ำหนักของเสาเข็ม ดังสมการ

$$Q_{ult} = Q_f + Q_e - W_p \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$Q_f = \text{แรงเสียดทานรอบๆผิวเสาเข็ม (t)}$$

$$Q_e = \text{แรงต้านที่ปลายเข็ม (t)}$$

$$W_p = \text{น้ำหนักของเสาเข็ม (t)}$$

ในแต่ละส่วนของสมการสามารถแยกกรณีได้ดังนี้

#### 1) แรงเสียดทานรอบผิวเสาเข็ม

การประมาณค่าแรงเสียดทานรอบผิวเสาเข็มจะต้องพิจารณาชั้นดินที่สัมผัสกับเสาเข็มว่าเป็นดินชนิดใดเนื่องจากพฤติกรรมของการเกิดแรงเสียดทานจะแตกต่างกัน

- ชั้นทราย

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในชั้นทรายจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม, ชนิดของทราย, ความเค้นประสิทธิผลของชั้นทราย ซึ่งสมการทั่วไปในการหาค่าแรงเสียดทานคือ

$$Q_{f(sand)} = \sum f_s \cdot A_s \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} A_s &= \text{พื้นที่ผิวสัมผัสของชั้นดินที่พิจารณา (m}^2\text{)} \\ f_s &= \text{หน่วยแรงเสียดทาน (t/m}^2\text{)} \\ &= K_s \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_{v0} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$= \beta \cdot \sigma'_{v0} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$K_s = \text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างระหว่างดินกับเสาเข็ม}$$

$$\delta = \text{มุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม}$$

$$\sigma'_{v0} = \text{ความเค้นประสิทธิผลที่กึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณา (t/m}^2\text{)}$$

ค่า  $K_s$  จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกโดยบริเวณหัวเสาเข็มค่า  $K_s$  จะใกล้เคียงกับ  $K_p$  (Rankine Passive Earth Pressure Coefficient) และจะลดลง จนถึงต่ำกว่า  $K_0$  (at-rest Earth Pressure Coefficient) ที่ความลึกมากขึ้นนอกจากนี้ ค่า  $K_s$  ยังมีค่าความแตกต่างออกไปตามวิธีการก่อสร้างเสาเข็มอีกด้วย Braja M. Das (1990) ได้แบ่งวิธีการหาค่าดังกล่าวตามกรณีดังนี้

เสาเข็มเจาะ :

$$K_s \approx K_0 = 1 - \sin \phi'$$

เสาเข็ม Auger Press :

$$K_s \text{ มีค่าตั้งแต่ } K_0 \text{ ถึง } 1.4K_0$$

เสาเข็มตอก :

$$K_s \text{ มีค่าตั้งแต่ } K_0 \text{ ถึง } 1.8K_0$$



ค่า  $\delta$  คือมุมเสียดทานระหว่างทรายกับผิวของเสาเข็ม ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของผิวเสาเข็ม ชนิดของทรายและวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม ตามปกติค่า  $\delta$  จะมีค่าตั้งแต่  $0.5\phi'$  ถึง  $0.8\phi'$

#### - ชั้นดินเหนียว

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวเสาเข็มกับชั้นดินเหนียวเกิดจากพฤติกรรม Adhesion ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อพฤติกรรมนี้ คือ ชนิดของดินเหนียว วิธีที่นิยมใช้ในการคำนวณค่าแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวเรียกวิธีว่า  $\alpha$  Method ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

$$Q_{f(\text{clay})} = \sum f_s A_s \quad (2.13)$$

$$f_s = \alpha \cdot s_u \quad (2.14)$$

เมื่อ

$f_s$	=	หน่วยแรงเสียดทาน ( $t/m^2$ )
$A_s$	=	พื้นที่ผิวสัมผัสของชั้นดินที่พิจารณา ( $m^2$ )
$\alpha$	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดินเหนียว (Adhesion Factor)
$s_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของ ดินเหนียว ( $t/m^2$ )

ค่า  $\alpha$  เป็นค่าที่ได้จากสูตรเชิงประสพการณ์ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  กับ  $s_u$  เส้นโค้งความสัมพันธ์ดังกล่าวสำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

นอกจากการวิเคราะห์แรงเสียดทานด้วยวิธี  $\alpha$  แรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มกับชั้นดินเหนียวยังสามารถหาได้จากความสัมพันธ์กับแรงดันประสิทธิผล (effective stress analysis) ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า  $\beta$ -Method เช่นเดียวกับกรณีชั้นทราย โดยมีสมการดังนี้

$$f_s = \beta \sigma'_{v0} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$\sigma'_{v0} = \text{แรงดันดินประสิทธิผลในแนวตั้ง (t/m}^2\text{)}$$

$$\beta = K \tan \phi_R \quad (2.16)$$

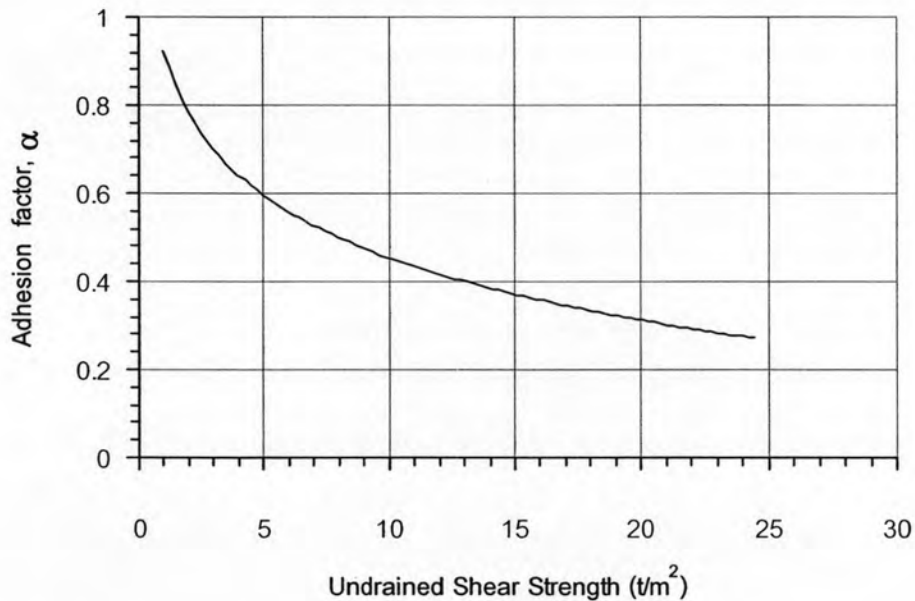
$$K = \text{แรงดันดินด้านข้าง (Braja M. Das (1990))}$$

$$= (1 - \sin \phi_R) \sqrt{OCR} \quad (2.17)$$

$$\phi_R = \text{มุมต้านแรงเฉือนของดินเหนียวในสภาพปั้นใหม่}$$

(Remolded State)

$$OCR = \text{ค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินตัว}$$



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\alpha$  กับ  $s_u$  ของดินเหนียวกรุงเทพฯ (Pimpasugdi, 1989)

## 2) แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

การคิดแรงต้านที่ปลายเข็มต้องพิจารณาชั้นดินที่ปลายเข็มว่าเป็นดินชนิดใดและวิธีการก่อสร้างเสาเข็มที่ต่างกันก็จะมีผลต่อแรงต้านที่ปลายเข็มด้วย ซึ่งสมการที่คำนวณแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจะเป็นสมการ Ultimate Load Bearing Capacity ที่ลดรูปลงดังสมการ

$$Q_{ult} = cN_c + qN_q \quad (2.18)$$

เมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินที่แตกต่างกันสมการที่ใช้คำนวณก็จะต่างกันตามไปด้วย

- กรณีที่ปลายเสาเข็มหยั่งลงในชั้นทราย

สมการที่ใช้คำนวณหาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มที่ใช้กันทั่วไปคือ

$$Q_{e(sand)} = q_E \cdot A_p \quad (2.19)$$

$$q_E = \sigma'_{v0} N_q \quad (2.20)$$

เมื่อ

$N_q$  = สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานปลายเสาเข็ม

$\sigma'_{v0}$  = แรงดันประสิทธิผลในแนวดิ่งที่ระดับปลาย  
เสาเข็ม ( $t/m^2$ )

สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N_q$  กับค่ามุม  $\phi'$  เสนอ  
โดย Pimpasugdi (1989) ซึ่งได้ทำการวิจัยและรวบรวมผลการวิจัยก่อนหน้า (Ng, 1983 และ  
สุวรรณ, 2531) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

- กรณีที่ปลายเสาเข็มหยั่งลงในชั้นดินเหนียว

สมการที่ใช้คำนวณแรงต้านที่ปลายเข็มในชั้นดินเหนียวคือ

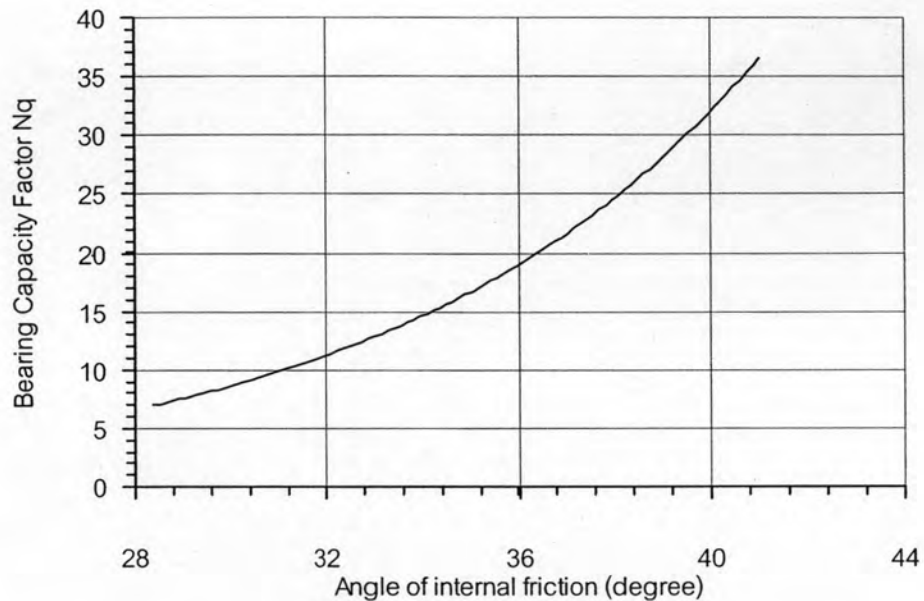
$$Q_{e(clay)} = A_p \cdot s_u \cdot N_c \quad (2.21)$$

เมื่อ

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของปลายเข็ม ( $m^2$ )

$s_u$  = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ( $t/m^2$ )

$N_c$  = สัมประสิทธิ์กำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มใน  
ชั้นดินเหนียว



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $N_q$  กับค่ามุม  $\phi'$  ในชั้นดินกรุงเทพฯ

สำหรับค่า  $N_c$  Skempton (1991) ได้เสนอค่า  $N_c$  สำหรับเสาเข็มกลมที่มีอัตราส่วนความลึกต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง มากกว่า 4 ( $\frac{L}{D} > 4$ ) ว่าให้ใช้เท่ากับ 9.00 Whitaker and Cooke (1966) พบว่าสำหรับเสาเข็มที่มีการขยายปลายจะมีค่า  $N_c = 9$  ต่อเมื่อมีการเคลื่อนตัว 10% - 15% และในเสาเข็มเจาะปกติ ค่า  $N_c$  จะเท่ากับ 9 เมื่อมีการเคลื่อนตัว 20% ในดินเหนียวกรุงเทพฯ Muktabhand and Suwanakul (1971) ได้ทำการวิจัยจากผลการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินเหนียวอ่อนและแข็งได้พบว่า ค่า  $N_c$  จะต่ำกว่า 9 ชาญชัย (2542) ได้ทำการวิจัยและพบว่าค่า  $N_c$  ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ สำหรับเสาเข็มเจาะระบบเปียกมีค่าประมาณ 4-5

## 2.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (Load test of pile)

### 2.4.1 การทดสอบโดยวิธีสถิตศาสตร์ (static load test)

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มโดยเปรียบเทียบกับวิธีสมมูลสถิต นอกจากนั้นผลการทดสอบเสาเข็มยังสามารถใช้คำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในชั้นดินได้ การทดสอบเสาเข็มได้แสดงในรูป 2.6 และแม่แรงไฮดรอลิกที่ใช้ในการกดหัวเสาเข็มได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7

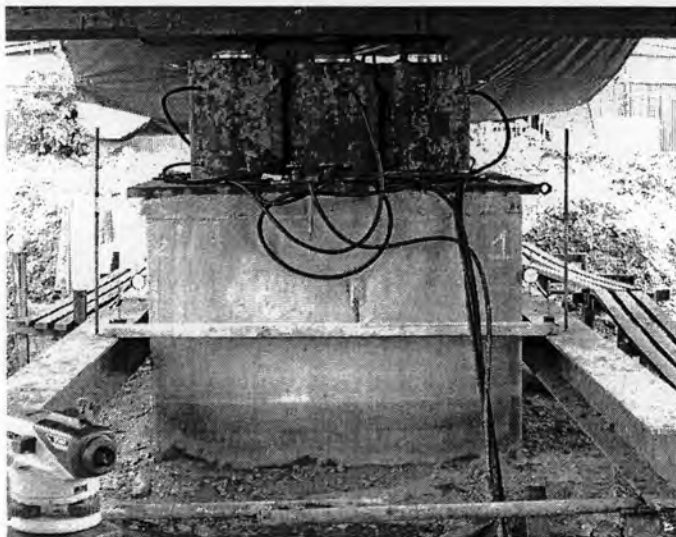


รูปที่ 2.6 แสดงการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตศาสตร์

การทดสอบเสาเข็มแบบสถิตศาสตร์นั้นสามารถแบ่งแยกตามลักษณะของการให้แรงกดเป็นหลายวิธี ในงานวิจัยครั้งนี้จะอ้างถึงวิธีที่นิยมใช้สำหรับการทำงานเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯซึ่งได้แก่การทดสอบแบบรับแรงกด (compression test) โดยมีการค้ำน้ำหนักบรรทุก (maintained load) และใช้เสาเข็มสมอเป็นตัวต้านน้ำหนัก การทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวสำหรับเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่มีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้

1. ก่อสร้างเสาเข็มทดสอบ พร้อมทั้งเสาเข็มสมอ 4 ต้นและก่อสร้าง Pile Cap ทิ้งไว้ให้คอนกรีตมีอายุได้ 28 วัน

2. ปรับผิวสัมผัสระหว่าง Pile Cap กับแม่แรงไฮดรอลิกให้ราบเรียบ
3. ติดตั้งคานอ้างอิงกับและขุดดินข้างใต้ Pile Cap
4. ติดตั้งเครื่องมือวัดทั่วไป
5. ทำการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักที่ละชั้นแล้วคองน้ำหนักไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด
6. ทดสอบจนครบตามรอบที่ออกแบบและบันทึกข้อมูล



รูปที่ 2.7 แสดงแม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic jack) ที่ใช้ในการทดสอบ

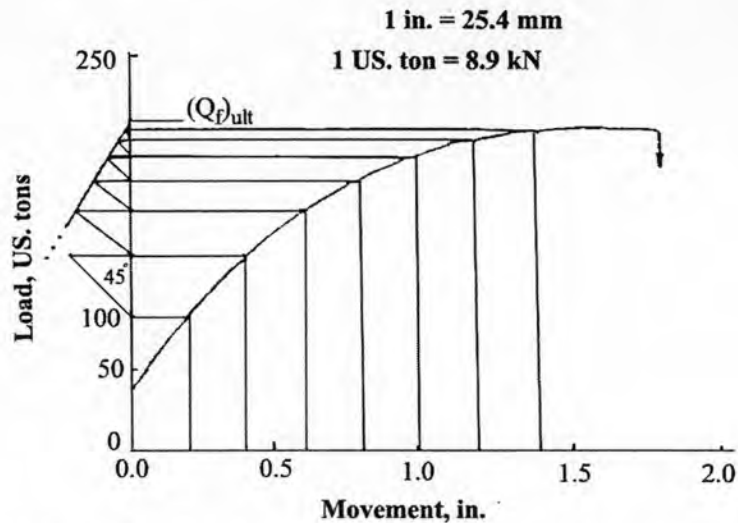
จำนวนรอบของการทดสอบ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแต่ละรอบและการเพิ่มหรือลดน้ำหนักบรรทุกแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดินและข้อกำหนดในการออกแบบเสาเข็มของแต่ละโครงการ

ข้อมูลสำคัญที่จะได้จากการทดสอบเสาเข็มคือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (ultimate load bearing capacity,  $Q_{ult}$ ) และการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ บางครั้งการทดสอบเสาเข็มไม่ได้ทำการทดสอบจนถึงน้ำหนักบรรทุกที่เกิดวิบัติ (failure load) จึงจำเป็นต้องมีการทำนาย  $Q_{ult}$

การทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็มที่วัดได้สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ นั้นได้เคยมีการศึกษาวิจัยโดย Pimpasugdi (1989), Wachiraprakarnpong (1993), Soontornsiri (1995) และชาญชัย (2542) จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการของ Mazurkiewicz (1972) เหมาะสมกับการคาดคะเนในกรณีที่เสาเข็มไม่

เกิดการวิบัติ และวิธีของ Butler&Hoy (1977) เหมาะสมกับการคาดคะเนในกรณีที่เสาเข็มเกิดการวิบัติ

1) การทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยโดย Mazurkiewicz (1972)



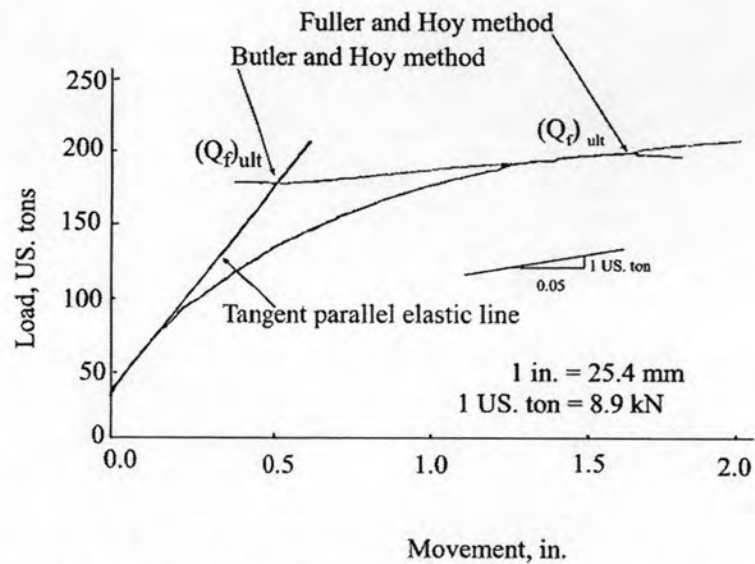
รูปที่ 2.8 วิธีหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของ Mazurkiewicz (1972)

จากรูปที่ 2.8 เป็นการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติหาได้จากเส้นตรงสมมุติที่สร้างขึ้นมาจากการลากเส้นตัดกับแกนน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเส้นสมมุตินี้สร้างโดยการแบ่งค่าการทรุดตัวออกเป็นส่วนๆ ที่มีขนาดเท่าๆ กัน (โดยมีขนาดเท่าไรก็ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม) ลากตัดเส้นโค้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว จนสามารถทราบค่าน้ำหนักบรรทุกที่ตำแหน่งการทรุดตัวนั้นๆ ดังแสดงในรูป จากนั้นลากเส้นตรงทำมุม 45 องศา กับแกนน้ำหนักบรรทุกเพื่อสร้างจุดตัดกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่จุดถัดไป จุดตัดเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลากเป็นเส้นตรงและใช้เป็นเส้นตรงสมมุติสำหรับหาตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดบนแกนน้ำหนัก โดยจุดตัดของเส้นตรงนี้บนแกนน้ำหนักบรรทุกคือค่า  $Q_{ult}$

2) การทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยโดย Butler&Hoy (1977) และ Fuller&Hoy (1970)

จากรูปที่ 2.9 เป็นการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ประลัยตามวิธีของ Butler & Hoy (1977) ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าเท่ากับค่าที่จุดที่สัมผัสส่วนโค้งมีความลาดชัน 0.05

นิ้ว/ตัน ตัดกับส่วนของเส้นตรงเริ่มต้นของส่วนโค้งหรือเส้นขนานกับเส้น Rebound Curve หรือเส้นอิลาสติกเริ่มต้น ส่วน Fuller & Hoy (1970) มีค่าเท่ากับค่าที่จุดเส้นสัมผัสส่วนโค้งมีความชัน 0.05 นิ้ว/ตัน



รูปที่ 2.9 วิธีหาน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ Butler & Hoy (1977)

#### 2.4.2 การทดสอบโดยวิธีพลศาสตร์ (dynamic load test)

การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มจะมีจุดประสงค์ดังนี้

1. เพื่อหาค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม
2. เพื่อหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม (Pile stress)
3. เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างเสาเข็ม (Pile integrity)

โดยการวิเคราะห์และแปลผลจากค่าที่วัดได้ที่จะต้องอาศัยความรู้ทฤษฎีต่างๆหลายทฤษฎีดังนี้

- 1) ทฤษฎีคลื่น (Wave theory)

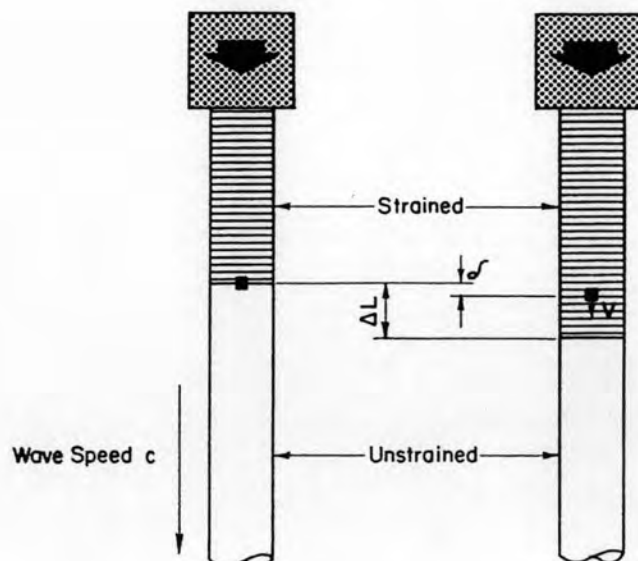


- กลศาสตร์ของคลื่น (Wave Mechanics)

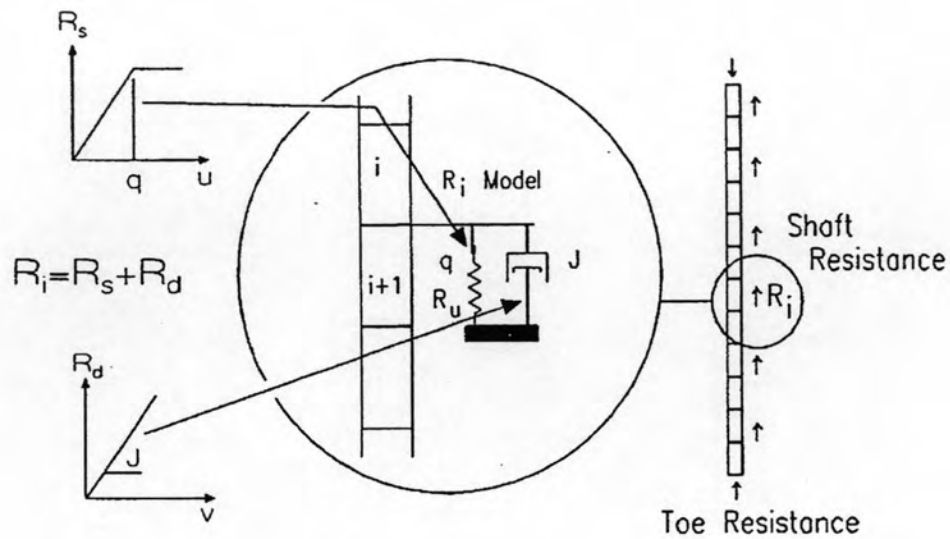
เมื่อเสาเข็มถูกกระทำด้วยแรงตามแนวแกนขนาดหนึ่ง บริเวณส่วนเล็กๆ ของเสาเข็ม ( $\Delta L$ ) จะถูกกด ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความยาว ( $\delta$ ) และมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเสาเข็มด้วยความเร็ว ( $v$ ) ในเวลา ( $\Delta t$ ) เมื่อตั้งสมมติฐานว่าเสาเข็มเป็นวัสดุอีลาสติกเชิงเส้น (linear elastic material) และหน้าตัดของเสาเข็มมีความสม่ำเสมอ (uniform) จะสามารถความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.10

- คลื่นแรงต้าน (Resistance wave,  $R$ )

ขณะเริ่มทำการตอกเสาเข็ม แรงต้านของดินที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ บนเสาเข็มจะเกิดที่เวลา  $t = \frac{x}{c}$  โดยจะอยู่ในลักษณะของคลื่นต้านแรงอัด (Compression resistance wave) ซึ่งมีทิศทางขึ้น และคลื่นต้านแรงดึง (Tensile resistance wave) มีทิศทางลง แต่ละคลื่นจะมีขนาดเท่ากับ  $\frac{R}{2}$  ซึ่งแรงต้านดินสามารถแสดงอยู่ในรูปผลรวมของแรงต้านสถิตศาสตร์ (elasto-plastic static portion,  $R_s$ ) ส่วนแรงหน่วง (dashpot force,  $R_d$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ต่างๆ และความเร็ว



รูปที่ 2.11 แสดงแบบจำลองของ Smith และความต่อเนื่องของส่วนของเสาเข็ม

จากรูปที่ 2.11 แรงต้านทานรวม ( $R_i$ ) ประกอบด้วย แรงต้านสถิตศาสตร์ (static resistance,  $R_s$ ) และแรงหน่วง (damping resistance,  $R_d$ )

$$R_i = R_s + R_d \quad (2.22)$$

เมื่อ แทนค่า  $R_d$  ด้วย  $J_v V$  จะแปลงสมการ 2.22 เป็น

$$R_i = R_s + J_v V \quad (2.23)$$

โดยที่

$$R_u = k_s u; u < q$$

$$R_u = R_u; u \geq q$$

$J_v$  = damping parameter (tons/m/s)

$R_u$  = แรงต้านสถิตประลัย (t)

$k_s$  = สติฟเนสของดิน (t/mm)

$u$  = การเคลื่อนที่ของเสาเข็ม (mm)

$v$  = ความเร็วของเสาเข็ม (m/s)

$q$  = quake หรือ การเคลื่อนที่ของเสาเข็มขณะที่ดินเริ่มมี  
พฤติกรรมเป็นพลาสติก (mm)

เมื่อพิจารณาแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (Toe resistance) โดยคิดว่าแรงจากการตอกเสาเข็ม ( $F_{imp}$ ) คือผลคูณของความเร็วของการตอกเสาเข็ม ( $V_{imp}$ ) กับ impedance ( $Z$ ) พบว่าคลื่นที่สะท้อนกลับจะมีความเร็ว ( $V_{toe}$ ) เป็นสองเท่าของความเร็วที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม ( $V_{imp}$ ) และแรงต้านทานของดิน (resistance force,  $R$ ) จะมีผลต่อการสะท้อนกลับของคลื่นที่ปลายเสาเข็ม จึงได้ความสัมพันธ์ของความเร็วที่ปลายเสาเข็มในรูปของความเร็วที่ใช้ในการตอกเสาเข็มและแรงต้านในดินดังนี้

$$V_{toe} = 2V_{imp} - \frac{R}{Z} \quad (2.24)$$

## 2) การวิเคราะห์การตอกเสาเข็มโดยใช้สมการคลื่น

- Smith (1960) ได้พัฒนาแบบจำลองดั้งเดิมโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์สมการคลื่นเป็นครั้งแรกโดยใช้สมการคลื่น 1 มิติ ให้แบบจำลองของดินประกอบไปด้วยส่วนของแรงต้านสถิตศาสตร์ในรูป elasto-plastic และส่วนของแรงทางพลศาสตร์เป็นแบบแรงหน่วง ซึ่งใช้กับตุ้มน้ำหนักธรรมดา เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักประลัยกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มและการจมตัวของเสาเข็มในขณะการตอกแต่ละครั้ง (Pile set/blow)

- Michican Department Of Highway (1960) ได้มีโครงการค้นคว้าขนาดใหญ่เพื่อออกแบบเครื่องมือวัดแรงและความเร่งโดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการถ่ายทอดพลังงานจากการตอก (hammer performance, ENTHRU)

- Case Institute of Technology (1964) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานานโดยได้รับความสนับสนุนจาก Ohio Department of Transportation, Federal Highway Administration และ State Highway Department ของรัฐต่างๆด้วยวัตถุประสงค์เพื่อหา กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม จากการตอกเสาเข็มด้วยตุ้มน้ำหนักแต่ละครั้งโดยใช้ Pile Driving Analyzer (PDA) เป็นเครื่องมือวัด และวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม เรียกวิธีนี้ว่า Case Method และ

ได้มีการเสนอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การทดสอบเสาเข็มมากที่สุดวิธีหนึ่งคือ Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) โดย Rausche (1970) และได้มีการพัฒนาโปรแกรมในเวลาต่อมา เรียกว่า CAPWAPC ดังที่กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

- สมการคลื่น (Wave equation)

สมการคลื่น 1 มิติ ในแท่งโลหะ ซึ่งมีอยู่ในรูปของ finite difference แต่สำหรับกรณีของเสาเข็ม การใช้สมการดังกล่าวเพื่อวิเคราะห์การตอกเสาเข็มจะต้องพิจารณาพร้อมกับแรงต้านทานใต้ดิน จึงได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \left( \frac{E}{\rho} \right) \left( \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \right) \pm R \quad (2.25)$$

เมื่อ

$D$  = การเคลื่อนที่ทางด้านยาวของอนุภาคเสาเข็มจากตำแหน่งเดิม (mm)

$E$  = อีลาสติกโมดูลัสของคอนกรีต ( $t/m^2$ )

$\rho$  = ความหนาแน่นของเสาเข็ม ( $t/m^3$ )

$t$  = เวลา (s)

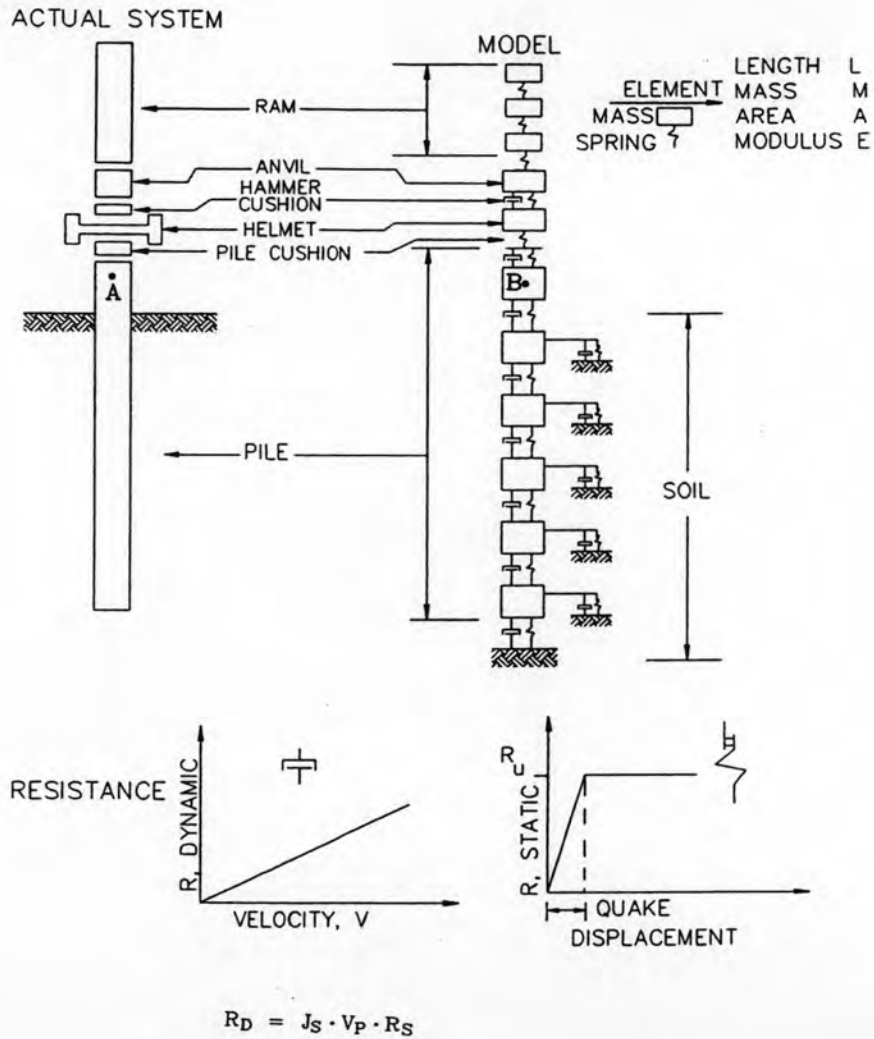
$x$  = ทิศทางตามยาวของเสาเข็ม (m)

$R$  = อยู่ในเทอมของแรงต้านทานดิน (t)

สมการดังกล่าวถูกใช้เพื่อหาคำตอบของความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่กับเวลาจากตำแหน่งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงแต่เนื่องจากมีความซับซ้อนในทางปฏิบัติ ในเวลาต่อมา Smith (1960) จึงได้พัฒนาสมการคลื่นดังกล่าวโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาค่า Pile-set สำหรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กำหนด ซึ่งได้แสดงระบบการตอกเสาเข็มในอุดมคติว่าประกอบด้วยเครื่องตอกซึ่งรู้ความเร็วต้น หัวเสาเข็ม แผ่นหนังรองกันกระแทก เสาเข็มและดินที่อยู่ล้อมรอบเสาเข็ม

องค์ประกอบของระบบการตอกเสาเข็มจะถูกแสดงด้วยน้ำหนักที่เหมาะสมร่วมกับสปริงและแรงต้านของดินจะอยู่ในรูปของแรงต้านพลศาสตร์และสถิตศาสตร์ ซึ่งแสดงโดยอนุกรมของ

dashpot และ สปริง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แรงต้านสถิตศาสตร์จะถูกสมมุติให้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับการเคลื่อนที่จนการเคลื่อนที่ถึงจุดซึ่งแรงต้านทานดินจะเปลี่ยนพฤติกรรมจากอิลาสติกเป็นพลาสติกเรียกการเคลื่อนที่นั้นว่า quake หลังจากนั้นการเพิ่มการเคลื่อนที่ของเสาเข็มจะไม่มีผลกับแรงต้านทานดิน ส่วนแรงต้านพลศาสตร์ซึ่งถูกแสดงด้วย dashpot นั้นถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเร็วในอิลิเมนต์ของเสาเข็ม



รูปที่ 2.12 แบบจำลองสมการเคลื่อนที่ของ Smith (Goble และ Rausche, 1976)

การวิเคราะห์โดยสมการเคลื่อนที่ จะพิจารณาเป็นอิลิเมนต์ด้วยการเพิ่มขึ้นของเวลาเป็นขั้นๆ ในเบื้องต้นแบบจำลองดิน (quake และ damping) และแรงต้านทานประลัย,  $R_u$  จะถูกสมมุติและเลือกประสิทธิภาพของตุ้มเพื่อหาความเร็วของการตอก จากนั้นคอมพิวเตอร์จะคำนวณหาแรงและการเคลื่อนที่ของแต่ละอิลิเมนต์ในแต่ละขั้นเวลาและทำอย่างต่อเนื่อง ผลจากการวิเคราะห์นี้

จะได้ผลรวมของแรงต้านทานเป็นฟังก์ชันของ permanent set จึงได้กราฟแรงต้านทานซึ่งอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง permanent set กับกำลังรับแรงต้านทานรวมทั้งหน่วยแรงวิกฤตในเสาเข็ม เนื่องจากแรงในเสาเข็มแต่ละส่วนและแต่ละช่วงเวลาจะสามารถคำนวณได้ในขณะวิเคราะห์

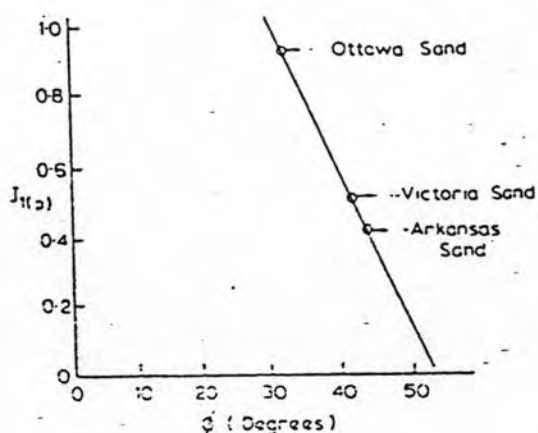
คุณสมบัติของดินควรใช้การวิเคราะห์ได้มีผู้เสนอไว้ดังต่อไปนี้

1. แรงต้านทานดินประลัย ( $R_u$ ) ค่า  $R_u$  และสัดส่วนของแรงต้านที่ผิว (shaft resistance) และปลายเสาเข็ม (base resistance) สามารถหาได้จากคุณสมบัติของดินโดยวิธีสมมูลสถิตหรือในกรณีที่ไม่มีข้อมูลดินอาจใช้วิธีที่แนะนำโดย Forehand and Reese (1964) เป็นแนวทางซึ่งได้แนะนำค่าของ Quake(Q), Damping factor(J) สำหรับปลายเสาเข็ม และ %side adhesion (% $R_u$ ) ดังตารางที่ 2.1

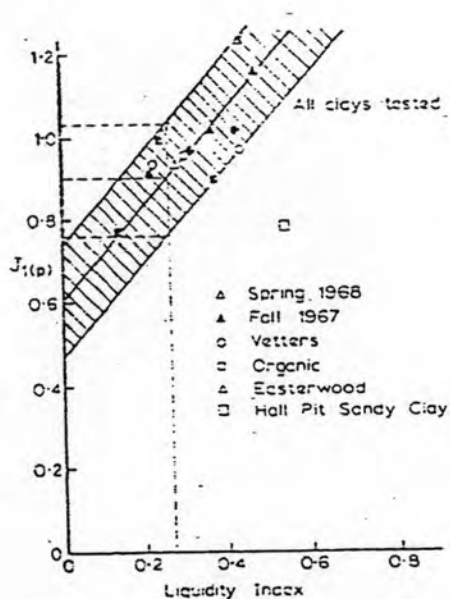
2. Quake (Q) คือค่าการเคลื่อนที่ของเสาเข็มขณะที่แรงต้านดินสถิตเปลี่ยนพฤติกรรมจากแบบอิลาสติกเป็นพลาสติก ค่า quake ได้ถูกพิจารณาในรูปสูตรเชิงประสพการณ์และแนะนำโดย Forehand and Reese(1964) ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจากทฤษฎีของเสาเข็มและการทรุดตัวเมื่อรู้ค่าพารามิเตอร์ของดินในช่วงอิลาสติกจะสามารถหาค่า quake ได้และค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามความยาวเสาเข็ม โดยค่าที่ปลายเสาเข็มจะมากกว่าที่ผิวเสาเข็ม ต่อมา Goble and Rausche (1986) ได้แนะนำว่า ควรสมมุติค่า quake ให้เท่ากับ 2.54 เซ็นติเมตร เท่ากันทั้งที่ผิวและปลายเสาเข็ม เนื่องจากค่า quake ที่ปลายเสาเข็มสำหรับเสาเข็มแบบแทนที่อาจมีค่ามากกว่าที่ผิว จึงแนะนำให้ quake มีค่าเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มหารด้วย 120 หน่วยเป็นนิ้ว

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า %  $R_u$ , Damping factor (J), Quake (Forehand และ Reese, 1964)

ชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม	% $R_u$	J(s/cm)	Q(cm)
ทรายหยาบ	35	0.06	0.254
ทรายผสมกรวด	75-100	0.06	0.254
ทรายละเอียด	100	0.06	0.381
ทรายและดินเหนียว	25	0.08	0.508
ดินตะกอนและทรายละเอียดที่อยู่ใต้ชั้นแข็ง	40	0.08	0.508
ทรายและกรวดที่อยู่ใต้ชั้นแข็ง	25	0.06	0.381



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง damping factor กับมุมเสียดทานภายในของทราย (Coyle และ Gibson, 1970)



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า damping factor กับ Liquidity index ของดินเหนียว (Coyle และ Gibson, 1970)

### 3. Damping factor (J)

- ความสัมพันธ์แบบ empirical ของ damping factor กับชนิดของดินซึ่งเสนอโดย Forehand และ Reese (1964) ในตารางที่ 2.1 นั้นเป็นค่าของ damping factor สำหรับปลายเสาเข็ม ( $J(p)$ ) แต่สำหรับที่ผิวเสาเข็ม ( $J(m)$ ) นั้น ได้มีการแนะนำว่า

$$J(m) = \frac{J(p)}{3} \quad (2.26)$$

- Coyle และ Gibson (1970) ได้เสนอความสัมพันธ์ของ damping factor ( $J_p$ ) และ internal friction angle ( $\phi'$ ) ของทราย และความสัมพันธ์ของ damping constant และ liquidity index กับ ของดินเหนียว ดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

### 3) วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบพลศาสตร์

อุปกรณ์ทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบพลศาสตร์นั้น ประกอบด้วย ตั้มน้ำหนัก เกจวัดความเครียด (strain transducer) และ เกจวัดความเร่ง (accelerometer) และมี ขั้นตอนดังแสดงในภาคผนวก ก

#### - อุปกรณ์ตอกเสาเข็มทดสอบ

ในการเลือกขนาดและระยะยกตุ้มที่เหมาะสมนั้นจะได้จากการวิเคราะห์ การตอกขั้นต้น โดยพิจารณาถึงลักษณะของชั้นดิน ระบบของบ้นจั่น โดยอาจใช้โปรแกรม WEAP ทำการวิเคราะห์หา Blow count ที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้เสาเข็มเกิดความเสียหายและเป็นที่น่าสนใจ ว่าก่อให้เกิดพลังงานที่เพียงพอที่จะทำให้ดินรอบเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวได้ (fully mobilized load) เกจวัดความเครียดและเกจวัดความเร่ง ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 2.15 ส่วนของขั้นตอนการสอบ เสาเข็มเจาะโดยวิธีพลศาสตร์คร่าวๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

- เกจวัดความเครียด จำนวน 2 ตัว ถูกติดตั้งเพื่อใช้แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นขณะ ตอกเสาเข็มโดยจะติดตั้งที่ด้านข้างของหัวเสาเข็มซึ่งอยู่ตรงกันข้ามกัน 2 ด้าน ณ ระดับเดียวกับ เกจวัดความเร่ง นี้ประกอบด้วย foil gauge 4 ตัวติดอยู่ที่จุดรวมหน่วยแรงบน flexible transducer frame ซึ่ง foil gauge มีการเชื่อมกันและมีสายเคเบิลหุ้มสายอยู่ข้างใน เพื่อความแม่นยำในการรับ ข้อมูล

- เกจวัดความเร่ง จำนวน 2 ตัว เป็นเครื่องมือ piezoelectric ที่มีการรวม amplifier ไว้ภายในเพื่อลดสัญญาณรบกวน และจะหลอมกับชั้นพลาสติกที่ออกแบบพิเศษเพื่อ



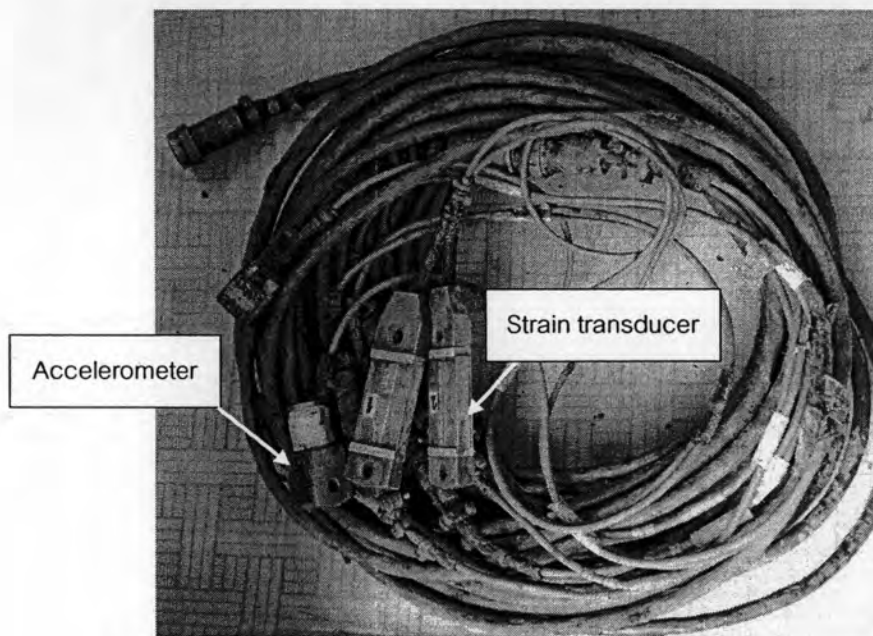
ป้องกันไฟฟ้ารั่วลงดิน นอกจากนี้ชั้นพลาสติกยังมีคุณสมบัติจำกัดความถี่ เพื่อป้องกันการเกิดกำ  
 ทอน ตำแหน่งที่ติดตั้งจะอยู่ใต้หัวเสาเข็มลงมาอย่างน้อย 1-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม  
 โดยจะติดไว้ด้านตรงข้ามกันอย่างแน่นหนาโดยใช้ Concrete anchor-bolt และไม่ถูกกระทบ  
 เนื่องจากการเกิดแรงดัดถ้าเป็นเสาคอนกรีต สายเคเบิลที่ต่อเกจวัดความเครียดและเกจวัด  
 ความเร่ง จะมารวมกันที่ Connection box และต่อไปที่ PDA

- Pile Driving Analyzer (PDA) เป็น microcomputer ที่ใช้ในการรับสัญญาณ  
 จากเกจวัดความเครียดและเกจวัดความเร่ง ขณะปั่นจั่นทำการตอก PDA จะเปลี่ยนสัญญาณจาก  
 analog ที่วัดได้เป็นดิจิตอลและจะทำการขยาย กรองและปรับสัญญาณจาก transducer แต่ละตัว  
 สัญญาณเกจวัดความเครียดและเกจวัดความเร่งจะต้องผ่านการกรองสัญญาณเพื่อให้มีความถี่  
 ใกล้เคียงกับ frequency response ที่ 1600 Hz เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการเปลี่ยนสัญญาณ  
 สัญญาณจากเกจวัดความเร่งจะถูกส่งปริพันธ์เพื่อแปลงเป็นความเร็วซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและ  
 สัญญาณจากเกจวัดความเครียดจะถูกแปลงเป็นแรงตามแนวแกนซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาเช่นกัน  
 คลื่นของแรงและความเร็วจะปรากฏบนเครื่อง Oscilloscope เพื่อแสดงคุณภาพของสัญญาณซึ่ง  
 สามารถปรับข้อมูลได้ถ้าจำเป็น ซึ่งแรง ความเร็วและความเร่งจะถูกบันทึกลงบน Diskette เพื่อนำ  
 ข้อมูลมาวิเคราะห์ภายหลังได้ ในแต่ละ blow เครื่อง PDA จะให้ข้อมูล 5 ข้อมูลพร้อมๆกัน คือ การ  
 เคลื่อนตัวของเสาเข็มสูงสุด กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการคำนวณตามวิธี CASE (case  
 method pile capacity) แรงสูงสุด ที่ตำแหน่งของ transducer, Maximum transferred energy  
 และ Maximum computed tension เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันเครื่องมือนี้ได้รวมเป็นชิ้นเดียวกับ  
 เครื่องมือบันทึกสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่บันทึกสัญญาณจาก transducer, Portable PC Computer  
 และ Oscilloscope แสดงคุณภาพสัญญาณที่วัดได้ผลที่แสดงหน้าจอดังรูปที่ 2.16

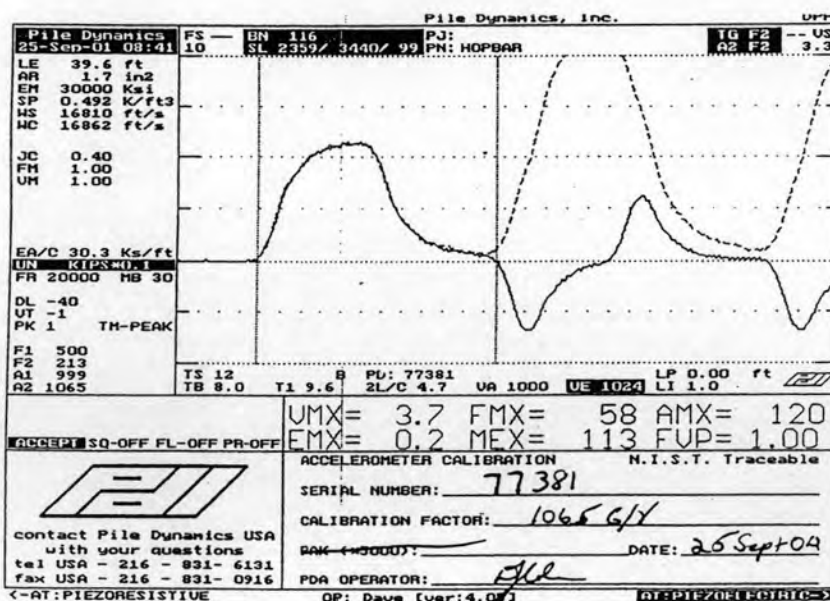
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความเร็วคลื่นในวัสดุต่างๆ

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

สำหรับการหาความเร็วคลื่นสามารถประมาณได้จากชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ส่วนค่าอิลาสติกโมดูลัสสามารถหาได้จากสมการ  $E = c^2 \rho$  ซึ่งได้กล่าวไว้ในทฤษฎีคลื่นแล้ว

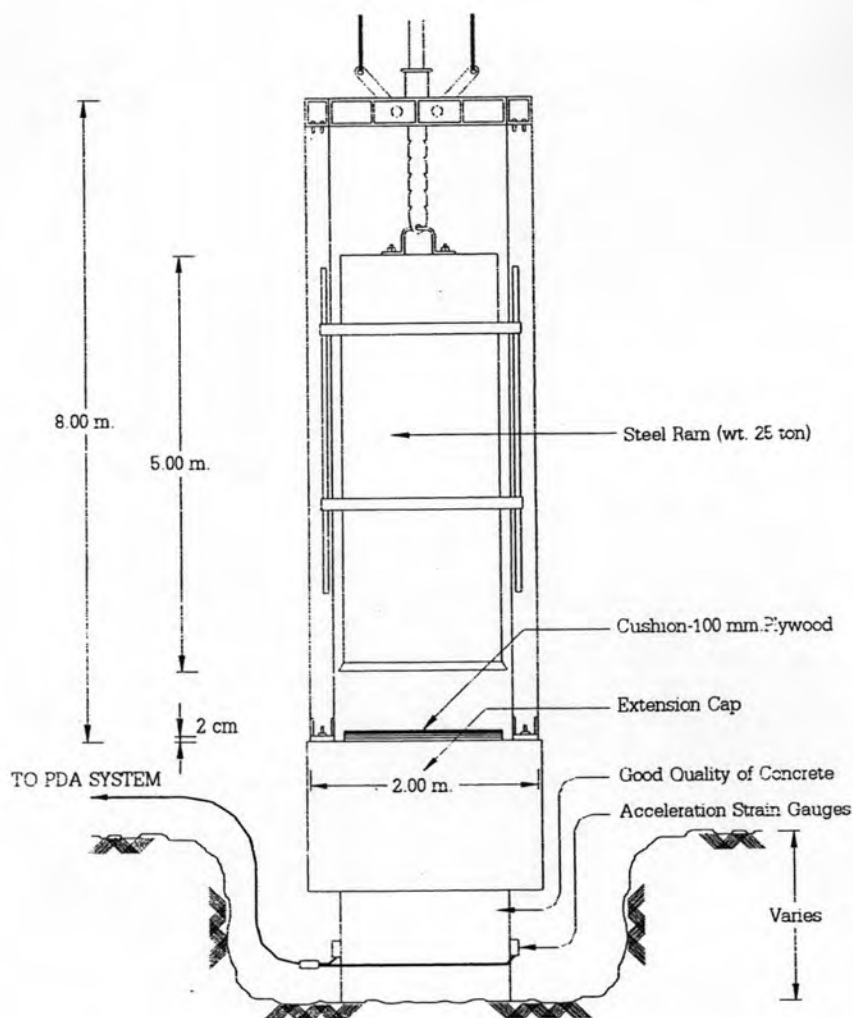


รูปที่ 2.15 แสดง Strain transducer และ Accelerometer



รูปที่ 2.16 แสดงข้อมูลบนหน้าจอ PDA

จากรูปที่ 2.17 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณโดย PDA เพื่อทดสอบโดยวิธี  
พลศาสตร์



รูปที่ 2.17 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณโดย PDA บนเสาเข็มเจาะ

#### - การวิเคราะห์คำตอบจาก PDA

จากการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบพลศาสตร์สัญญาณของแรงและความเร็วที่วัดได้ จะถูกนำมาวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงแรงกระทำเนื่องจากการตอกเสาเข็มและความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นที่หัวเสาเข็ม ความสมบูรณ์ของโครงสร้างเสาเข็มและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตอก ประสิทธิภาพในการตอก เป็นต้น ซึ่งค่าต่างๆดังกล่าวนี้จะช่วยให้การ

ควบคุมการตอกเสาเข็มจริงทำได้ดีขึ้น อีกทั้งยังทำให้ทราบค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดย Case method และ CAPWAPC อีกด้วย

โดยทั่วไปพบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็ม มักเกิดจากการวางแนวปั่นจั่นไม่ดีหรือเกิดจากการใช้หน่วยแรงในการตอกมากเกินไป สำหรับเสาเข็มคอนกรีต หน่วยแรงดึง (tension stress) เป็นสิ่งสำคัญที่สามารถคำนวณจากแรงที่เคลื่อนที่ขึ้น ดังกล่าวคือ เมื่อทำการตอกเสาเข็ม คลื่นหน่วยแรง (stress wave) ซึ่งเป็นคลื่นแรงอัด (compression wave) จะเคลื่อนที่ลงตามความยาวเสาเข็ม (L) ด้วยความเร็ว (c) และจะสะท้อนจากปลายเสาเข็มที่เวลา  $L/c$  มาถึงหัวเสาเข็มที่เวลา  $2L/c$  ถ้าที่ปลายเสาเข็มมีแรงต้านทาน (resistance) น้อย คลื่นที่สะท้อนดังกล่าวจะเป็นคลื่นแรงดึง (tension wave) มีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นผ่านตามผิวเสาเข็ม และเกิดการซ้อนทับของคลื่นแรงอัด (compression wave) ซึ่งเคลื่อนที่ลงและเกิดแรงดึงลัพธ์ เรียกว่า net tension (CTN)

หน่วยแรงดึงสูงสุดที่ตำแหน่งใดๆจะพิจารณาในรูป net tension ซึ่งเป็นการรวม downward compression stress ที่น้อยที่สุด ที่เวลาก่อน  $2L/c$  ( $F_{d,t_3}$ ) กับ upward tension wave ที่สะท้อนจากปลายเสาเข็มมาถึงหัวเสาเข็มที่เวลา  $2L/c$  ( $F_{u,t_2=2L/c}$ ) และสามารถแสดงค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด (net tension, CTN) ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$CTN = tension_{\max} = F_{(u,t_2=1L/c)} + F_{(d,t_3 < 2L/c)\min} \leq 0 \quad (2.27)$$

Federal Highway Administration ได้แนะนำเกณฑ์ของหน่วยแรงไว้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งรวบรวมโดย Vanikar 1986)

ตารางที่ 2.3 แสดงถึงเกณฑ์ของค่าความเค้นอัดและความเค้นดึงสูงสุดที่ยอมให้ แนะนำโดย  
Federal Highway Administration รวบรวมโดย Vanikar (1986)

ชนิดเสาเข็ม	Maximum Compression Stress	Maximum Tensile Stress
เหล็ก	$0.9f_y$	$0.9f_y$
ไม้	$3\sigma_a$	$3\sigma_a$
คอนกรีตหล่อในที่	$0.85f'_c$	$3\sqrt{f'_c}$
คอนกรีตอัดแรง	$0.85f'_c - f_{pe}$	$3\sqrt{f'_c + f_{pe}}$

- เมื่อ
- $f_y$  = กำลังคราก (ksc)
  - $\sigma_a$  = หน่วยแรงออกแบบที่ยอมให้ (ksc)
  - $f'_c$  = กำลังอัดคอนกรีต (ksc)
  - $f_{pe}$  = ประสิทธิภาพในการอัดแรงหลังจากมีการสูญเสียพลังงาน (ksc)

การทดสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างเสาเข็ม (Pile Integrity) เป็นการทดสอบด้วยหลักการที่ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง impedance คลื่นหน่วยแรงจะมีการสะท้อนกลับซึ่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งแรงและความเร็วที่หัวเสาเข็ม ตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM D-4945 เรียกการทดสอบนี้ว่า Low Strain Test

ดังนั้น สำหรับเสาเข็มซึ่งมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (uniform pile) คลื่นแรงดึงที่เคลื่อนที่ขึ้นจะถูกตรวจวัดที่หัวเสาเข็มได้ที่เวลา  $2L/c$  หลังจากที่จะสะท้อนมาจากปลายเสาเข็ม หากพบคลื่นดังกล่าวที่เวลาก่อน  $2L/c$  จะสันนิษฐานได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลง impedance เกิดขึ้นที่ตำแหน่งระหว่างหัวเสาเข็มกับปลายเสาเข็ม ซึ่งอาจมาจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด การเปลี่ยนแปลงโมดูลัส คุณภาพการเชื่อมของเสาเข็มไม่ดีพอ (กรณีของเสาเข็มต่อ) หรือมีความเสียหายเกิดขึ้นในเสาเข็ม โดยใช้ค่า  $\beta$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเสาเข็ม ( $Z_2/Z_1$ ) เมื่อ  $Z_2$  คือ impedance ของเสาเข็มส่วนบน และ  $Z_1$  คือ impedance ในส่วนที่ต้องการพิจารณา เพื่อใช้เป็นตัวจำแนกความสมบูรณ์ของเสาเข็ม เรียกวิธีนี้ว่า Beta method (Rausche and Goble, 1979)

นอกจากนั้นค่า  $\beta$  สามารถแสดงอยู่ในรูปของคลื่นที่เคลื่อนที่ขึ้นลงเมื่อพบความไม่ต่อเนื่อง ( $F_{d,1}$ ) กับคลื่นที่เคลื่อนที่สะท้อนกลับจากบริเวณที่ไม่ต่อเนื่อง ( $F_{u,1}$ ) ของเสาเข็มส่วนที่ 1 ดังสมการที่ 2.28

$$\beta = (F_{d,1} + F_{u,1}) / (F_{d,1} - F_{u,1}) \quad (2.28)$$

ตารางที่ 2.4 จำแนกสภาพความสมบูรณ์ของเสาเข็ม ( $\beta$ ) (Rauche และ Goble, 1986)

$\beta$	สภาพความสมบูรณ์ของเสาเข็ม
0.9 - 1.0	สมบูรณ์
0.8 - 0.9	มีข้อบกพร่องเล็กน้อย
0.6 - 0.8	มีข้อบกพร่อง
น้อยกว่า 0.6	เสาเข็มมีความไม่ต่อเนื่อง

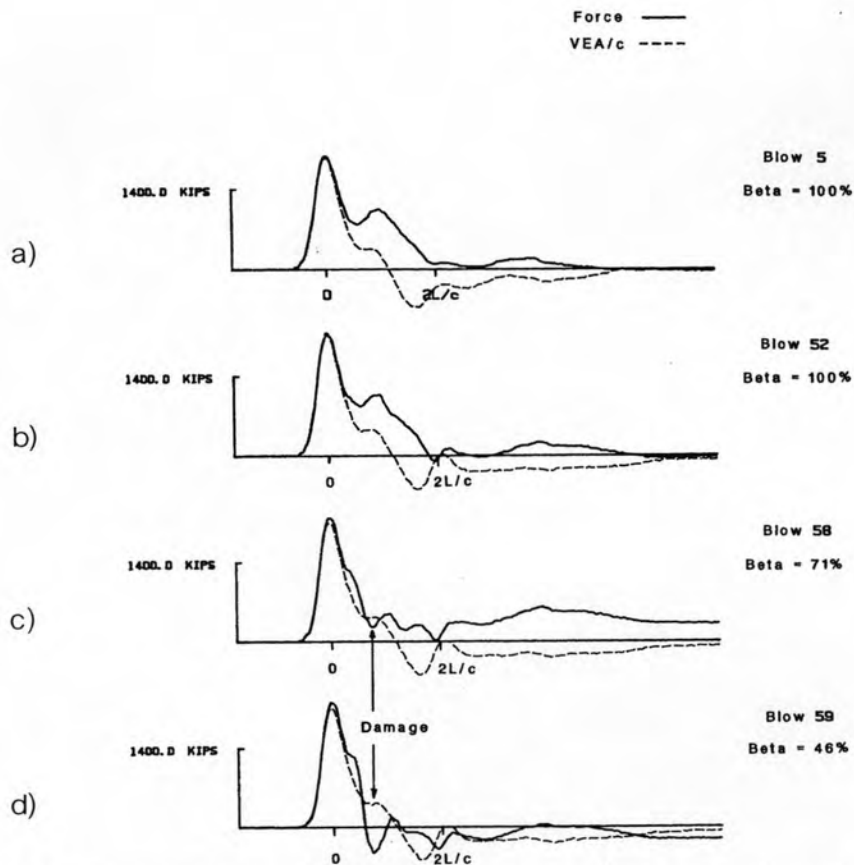
เสาเข็มที่มีความสม่ำเสมอคลื่นสัญญาณของแรงและความเร็วที่วัดได้ในสนามสามารถแสดงดังรูปที่ 2.18a ส่วนรูปที่ 2.18b นำเสนอกคลื่นสัญญาณของแรงและความเร็วของเสาเข็มที่พบความไม่ต่อเนื่องอย่างไม่ชัดเจน ส่วนของหน้าตัดเสาเข็มที่พบความไม่ต่อเนื่องนี้ได้ชัดเจน จะสามารถถูกตรวจพบได้จากคลื่นสัญญาณของแรงและความเร็วที่วัดได้ในสนาม กล่าวคือ คลื่นของความเร็วซึ่งแต่เดิมจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับคลื่นของแรงและความเร็วของแรงนั้น จะเกิดการยกตัวขึ้นที่เวลาก่อน  $2L/c$  ขณะที่คลื่นของแรงจะลดลงอย่างทันที ดังแสดงในรูปที่ 2.18c และรูปที่ 2.18d ซึ่งขนาดของช่องว่างระหว่างเสาเข็ม 2 หน้าตัดที่อยู่ติดกัน สามารถหาได้จากการสะท้อนกลับของคลื่น โดยใช้การหาปริพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ของความเร็ว

$$\delta = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} (v - (F - R_{\Delta}) / Z) dt \quad (2.29)$$

เมื่อ

$t_1, t_2$  = เวลาที่เริ่มพบ slack และสิ้นสุด ตามลำดับ (s)  
 $F - R_{\Delta}$  = ผลต่างของแรงที่วัดได้กับแรงเนื่องจากความเร็วที่เป็นสัดส่วนกันที่เวลา  $t$

$Z$  = impedance  
 $v$  = ความเร็วที่เกิด slack (m/s)



รูปที่ 2.18 แสดงแนวทางของคลื่นของแรงและความเร็ว เมื่อเกิดความเสียหายในเสาเข็มคอนกรีต

Canadian manual of foundation engineering (1978) ได้แนะนำว่าขนาดของรอยขาดไม่ควรมากกว่า 0.5 มิลลิเมตร

- ประสิทธิภาพของปั้นจั่น (Hammer Performance) จะสามารถคำนวณพลังงานที่ถ่ายลงสู่หัวเข็มได้จาก

$$E(t) = \int_0^t F(t)V(t)dt \tag{2.30}$$

เมื่อ  $E(t)$  = พลัง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ง Gage (t-m/s)

$F(t)$  = แรงที่วัดได้ที่ตำแหน่งติดตั้ง Gage (t)

$V(t)$  = ความเร็วที่วัดได้ที่ตำแหน่งติดตั้ง Gage (m/s)

ค่าสูงสุดของ  $E(t)$  curve เรียกว่า  $E_{max}$  (ENTHRU) ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญ สำหรับการประเมินค่าต่างๆของระบบการตอกเสาเข็ม การวิเคราะห์ hammer performance อาจพิจารณาในรูปของอัตราการถ่ายพลังงานประสิทธิผล ประสิทธิภาพของระบบการตอก และประสิทธิภาพการส่งถ่ายพลังงานที่แท้จริง เป็นต้น

- กำลังรับแรงแบกทาน สัญญาณของแรงและความเร็วที่วัดได้ PDA ขณะเวลาทำการทดสอบ จะถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาค่ากำลังรับแรงแบกทานอย่างคร่าวๆในสนามโดย Case method และใช้ CAPWAPC วิเคราะห์โดยละเอียดอีกครั้งหนึ่ง โดยจะกล่าวต่อไป

#### 4) Case method

วิธีนี้อยู่บนพื้นฐานของการแพร่ของคลื่น 1 มิติ เป็นวิธีซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับคำตอบ ด้วยสมมติฐานที่ว่า ดินมีพฤติกรรมเป็น ideal plastic และเสาเข็มเป็น ideal plastic และมีความสม่ำเสมอ ข้อมูลของแรงและความเร็วที่วัดได้ที่หัวเสาเข็มจาก PDA นั้นสามารถนำไปหาค่าแรงต้านทานรวมของดิน (total soil resistance,  $R_t$ ) เมื่อแรงต้านทานรวม ( $R_t$ ) คือผลรวมของแรงพลศาสตร์ ( $R_d$ ) และแรงสถิตศาสตร์ ( $R_s$ ) ซึ่งเมื่อคำนวณแรงพลศาสตร์ได้จาก soil damping factor ( $J$ ) และ ความเร็วในเสาเข็ม ( $V(t)$ ) ที่ปลายเข็ม จึงสามารถหาแรงสถิตศาสตร์ ( $R_s$ ) ได้ซึ่งเป็นค่าที่ประเมินที่เวลาขณะหนึ่งระหว่างการตอกแต่ละครั้ง

แรงต้านทานรวม (total resistance,  $R_t$ ) ที่พบระหว่างช่วงเวลา  $2L/c$  จะประกอบด้วยแรงต้านสถิตศาสตร์ (static resistance,  $R_s$ ) และแรงต้านพลศาสตร์ (dynamic resistance,  $R_d$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.22

$$R_t = \frac{1}{2} \{F(t_1) + F(t_2)\} + \frac{1}{2} \{V(t_1) + V(t_2)\}Z \quad (2.31)$$



โดยที่

$$R_d = J_c \{F(t_1) + ZV(t_1) - R_t\} \quad (2.32)$$

และ

$$R_s = R_t - J_c \{F(t_1) + ZV(t_1) - R_t\} \quad (2.33)$$

เมื่อ	$F(t_1)$	=	แรงที่วัดได้ที่เวลา $t_1$ หน่วย (t)
	$F(t_2)$	=	แรงที่วัดได้ที่เวลา $t_2$ หน่วย (t)
	$V(t_1)$	=	ความเร็วที่เวลา $t_1$ หน่วย (m/s)
	$V(t_2)$	=	ความเร็วที่เวลา $t_2$ หน่วย (m/s)
	$J_c$	=	Case damping factor
	$Z$	=	impedance = $Mc/L$
	$M$	=	มวลของเสาเข็ม หน่วย (t)
	$c$	=	ความเร็วคลื่น หน่วย (m/s)
	$L$	=	ความยาวเสาเข็ม (m)

วิธีการหาความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Pile bearing capacity) ด้วยวิธี Case method นี้ สามารถแสดงที่มาได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในภาคผนวก ข.

ค่าของ Case damping factor ขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดดินที่ปลายเสาเข็ม (Rausche , 1985) สำหรับดินชนิดต่างๆ สามารถหาได้โดยการคำนวณกลับของสมการที่ 2.33 เมื่อ  $R_s$  คือ แรงต้านทานทางสถิติศาสตร์สูงสุด หากจากการทดสอบทางสถิติศาสตร์ โดยใช้ Davisson's failure criterion ซึ่ง damping factor นี้ มีค่าประมาณ 0.1 สำหรับทราย และ 1 สำหรับดินเหนียว หรือหาก จาก CAPWAPC จะทำให้ได้ค่า Case damping factor ( $J_c$ ) ของดินที่ปลายเสาเข็ม

Rausche และ Goble (1975) ได้แนะนำค่า Case damping factor ซึ่ง จำแนกตามชนิดของดินที่ปลายเสาเข็มไว้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงค่า Case damping factor จำแนกตามชนิดของดินที่ปลายเสาเข็ม (Rausche และ Goble, 1975)

ชนิดดินที่ปลายเสาเข็ม	ช่วงที่แนะนำ	ค่าที่แนะนำ
Sand	0.05-0.20	0.05
Silty sand or sandy silt	0.15-0.30	0.15
Silty	0.20-0.45	0.30
Silty clay and clayey silt	0.40-0.70	0.55
clay	0.60-1.10	1.10

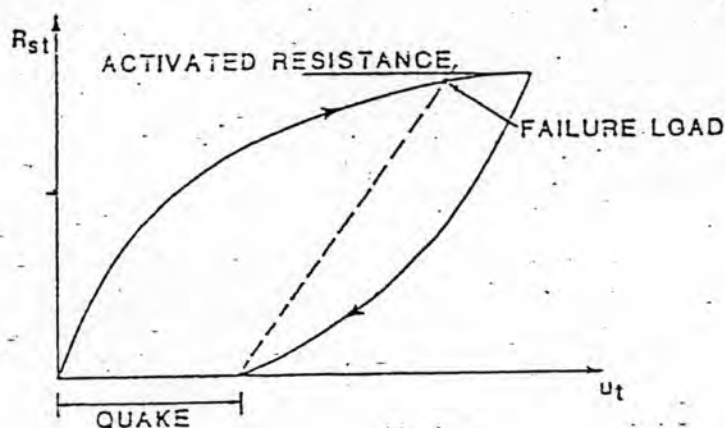
#### 5) CAPWAPC

CAPWAPC (Case Pile Wave Analysis Program – Continuous version) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ใช้วิเคราะห์แรงและความเร็วที่หัวเสาเข็มด้วยสมการคลื่น โดยใช้ Pile-soil model และ Smith-type parameter ผลลัพธ์ที่ต้องการจะเกิดเมื่อมีการจับคู่ที่ดีที่สุดระหว่างค่าที่วัดได้ในสนามกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ CAPWAPC ซึ่งเป็นการทำซ้ำ (Trial & error) เพื่อจับคู่ (Match) สัญญาณที่วัดได้จาก PDA หากการจับคู่ยังไม่เป็นที่น่าพอใจสามารถทำการวิเคราะห์ใหม่ได้โดยการเปลี่ยนข้อมูลดิน

ผลการวิเคราะห์จะประกอบด้วย การเปรียบเทียบระหว่างแรงและความเร็วที่วัดได้กับที่ได้จากการคำนวณ ค่าแรงต้านทานดินสถิต (Static soil resistance) และค่าของแรงในเสาเข็มที่กำลังต้านทานประลัย นอกจากนี้ ยังแสดงค่าของแรง ความเร็ว การเคลื่อนตัวและพลังงาน ที่เกิดในเสาเข็มได้ทุกส่วน รวมทั้งพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์และหาค่ากราฟ แรงกับการเคลื่อนตัว โดยทำการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ใน CAPWAPC ซึ่งการวิเคราะห์นี้ จะคิดว่าเสาเข็มถูกกดโดยน้ำหนักที่แบ่งออกเป็นส่วนๆ (Simulated Static Load) ค่าของแรงและการเคลื่อนตัวที่หัวและปลายเสาเข็ม จะถูกคำนวณออกมาจึงสามารถหาค่ากราฟดังกล่าวได้

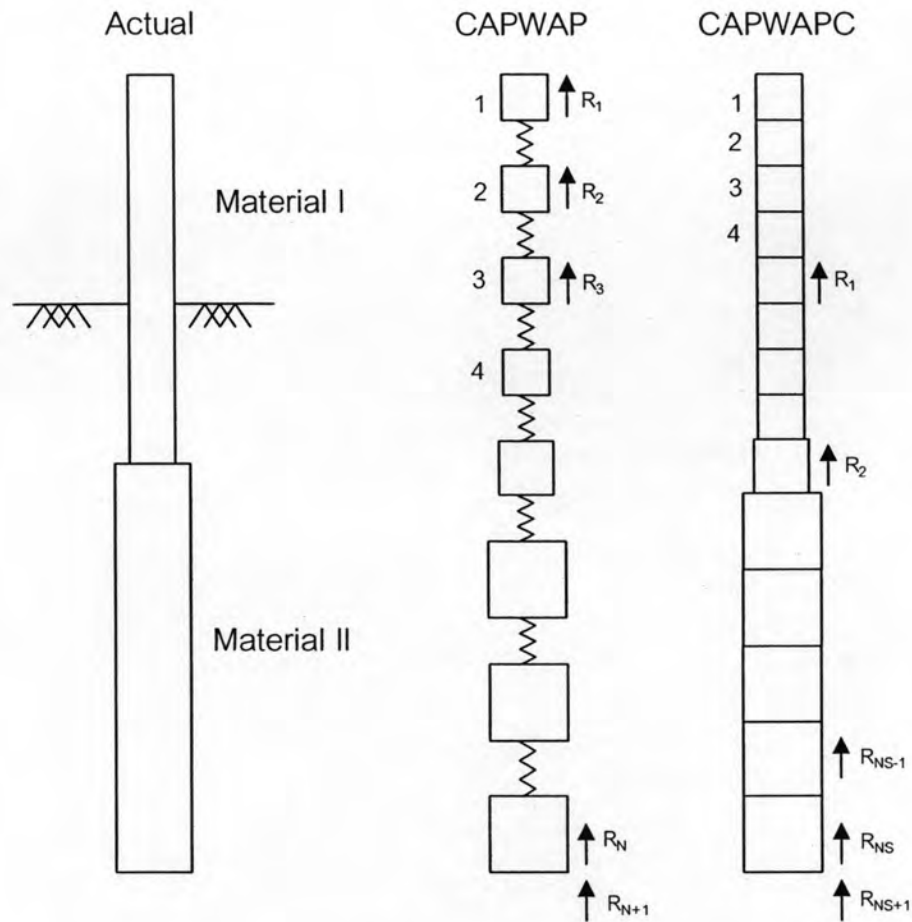
การประเมินผลค่าแรงต้านทานสถิตศาสตร์ใน CAPWAPC นั้นเป็นไปตาม Davission's failure criterion ซึ่งกล่าวว่า failure จะเกิดเมื่อการเคลื่อนที่ที่ปลายเสาเข็ม (quake) มีค่าเท่ากับ

$0.15 + D/120$  เมื่อ  $D$  คือความกว้างของปลายเสาเข็ม มีหน่วยเป็นนิ้ว ดังนั้น ในการพิจารณาจะให้การจมที่หัวเสาเข็ม ซึ่งปลายเสาเข็มวิบัตินั้น จะเท่ากับการหดตัวอิลาสติกของเสาเข็มร่วมกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งขณะทำการทดสอบในสนามสามารถตรวจสอบได้จากการจมของเสาเข็มของการตอกแต่ละครั้ง โดย CAPWAPC Manual (2000) ได้นำเสนอว่าค่านี้ควรอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของ quake กับ แรงต้านสถิตใน CAPWAPC

สำหรับแบบจำลองเสาเข็มในรุ่นแรกของโปรแกรมนี้ได้คิดค้นตามวิธีของ Smith (1960) กล่าวคือ ใช้หลักการแบ่งมวลของเสาเข็มเป็นส่วนๆ เชื่อมต่อกันด้วยสปริง เรียกโปรแกรมนี้ว่า CAPWAP ซึ่งโปรแกรมดังกล่าว ได้ถูกปรับปรุงเรื่อยมาจนถึงปัจจุบันดังแสดงในรูปที่ 2.20 เสาเข็มได้ถูกพิจารณาในรูป Continuous Wave Transmission Model เรียกว่า CAPWAPC โดยคิดว่าค่าแรงต้านทานของดิน (Soil resistance) เป็น Passive และประกอบด้วยส่วนสถิตศาสตร์ (static) และ พลศาสตร์ (dynamic) เกิดขึ้นที่ผิวและปลายเสาเข็ม จากแบบจำลองนี้ ทำให้จุดใด ๆ บนเสาเข็มจะมีตัวไม่รู้ค่า 3 ตัว คือ Quake ( $q_i$ ), แรงต้านทานประลัย ( $R_{ui}$ ) และ Viscous damping factor ( $J_i$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะคล้ายกับแบบจำลองของดินในสมการคลื่น รวมทั้งมีการเพิ่มคุณสมบัติอีกหลายอย่างซึ่งจะช่วยให้การจับคู่สัญญาณสามารถทำได้ง่ายขึ้น สิ่งหนึ่งที่ CAPWAPC ต่างจากสมการคลื่น คือ CAPWAPC สนใจเฉพาะแรงและความเร็วที่วัดที่หัวเสาเข็ม



รูปที่ 2.20 แบบจำลองแรงต้านของดินและการแบ่งชิ้นส่วนของเสาเข็ม

#### - การวิเคราะห์ผล

แนวคิดโดยทั่วไปของโปรแกรม คือ แบ่งเสาเข็มเป็นส่วนๆ ด้วยเวลาของการเคลื่อนที่ของคลื่นให้เท่าๆ กันดังแสดงในรูปที่ 2.20 หากเสาเข็มประกอบไปด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน ความยาวของเสาเข็มแต่ละส่วนก็จะถูกแบ่งแตกต่างกันไป ซึ่งการเคลื่อนตัวและความเร็วของเสาเข็มแต่ละส่วนที่อยู่ในดิน จะถูกนำมาคำนวณหาแรงต้านทานของดินต่อไป

จากแบบจำลองของ Smith ได้สมมติให้แรงต้านดินประกอบด้วย Elasto-plastic spring และ Linear dashpot ดังนั้น สำหรับเสาเข็มส่วนที่  $i$  แรงต้านของดินถูกจำลองโดย แรงต้านทานประลัย ( $R_{wi}$ ), quake ( $q_i$ ) และ viscous damping factor ( $J_i$ ) ซึ่งผลรวมของกำลังรับแรงแบกทานสถิต ( $R_i$ ) คือ ผลรวมของ ( $R_i$ ) ส่วนผลรวมของแรงแบกทาน ( $R_i$ ) ที่เสาเข็มส่วนที่  $i$  คือ

$$R_i = R_{si} + R_{di} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $R_{si}$  และ  $R_{di}$  คือ แรงต้านทางสถิตศาสตร์ และพลศาสตร์ ของเสาเข็มส่วนที่  $i$  ที่เกิดขึ้นขณะนั้น ตามลำดับ จะได้

$$R_{si} = k_{si} u_i \quad (2.35)$$

$$R_{di} = J_i v_i \quad (2.36)$$

$$k_{si} = \frac{R_{ui}}{q_i} \quad (2.37)$$

เมื่อ	$u_i$	=	การเคลื่อนที่ของเสาเข็มส่วนที่ $i$ (mm)
	$v_i$	=	ความเร็วของอนุภาคเสาเข็มในส่วนที่ $i$ (m/s)
	$k_{si}$	=	สติเฟนสของดินส่วนที่อยู่รอบเสาเข็มส่วนที่ $i$ (tons/mm)
	$q_i$	=	quake ของดินส่วนที่อยู่รอบเสาเข็มส่วนที่ $i$ (mm)

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

$$F_{u.i.j+1} = F_{u.i+1.j} + \frac{1}{2} R_{i,j+1} \quad (2.38)$$

$$F_{d.i,j+1} = F_{d.i-1,j} - \frac{1}{2} R_{i,j+1} \quad (2.39)$$

และสามารถคำนวณหาแรงและความเร็ว ที่เวลา  $j$  ( $F_{c.j}$  และ  $V_{c.j}$ ) ได้จากค่าแรง ( $F_{m.j}$ ) และความเร็ว ( $V_{m.j}$ ) ที่วัดได้จากที่หัวเสาเข็ม

$$F_{c.j} = ZV_{m.j} + 2F_{u.1,j-1} \quad (2.40)$$

$$V_{c.j} = (F_{m.j} - 2F_{u.1,j-1})/Z \quad (2.41)$$

ส่วนที่ปลายเสาเข็ม จะสามารถหาคลื่นที่เคลื่อนที่ขึ้นได้จาก

$$F_{u,j} = -F_{d,j-1} + R_{Ns} + R_{Ns+1} \quad (2.42)$$

เมื่อ  $R_{Ns+1}$  = แรงต้านที่ปลายเข็ม (Toe resistance) (ton)  
 $R_{Ns}$  = แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Shaft resistance) (ton)

ดังนั้น แรง ความเร็ว การเคลื่อนตัว และ แรงต้านทานของเสาเข็มส่วนที่  $i$  จะสามารถหาได้ดังนี้

แรงที่ส่วนของเสาเข็มส่วนที่  $i$  คือ ผลรวมของแรงที่เคลื่อนที่ขึ้นที่เวลา  $j$  กับแรงที่เคลื่อนที่ลงที่เวลา  $j-1$  ดังแสดงดังสมการ 2.43

$$F_{i,j} = F_{u,i,j} + F_{d,i,j-1} \quad (2.43)$$

ความเร็วของเสาเข็มส่วนที่  $i$  คือ ผลต่างของแรงที่เคลื่อนที่ลงที่เวลา  $j-1$  กับแรงที่เคลื่อนที่เคลื่อนที่ขึ้นที่เวลา  $j$  หาด้วย impedance ของเสาเข็มส่วนที่  $i$  ดังสมการที่ 2.4

$$V_{i,j} = [F_{d,i,j-1} - F_{u,i,j}] / Z \quad (2.44)$$

การเคลื่อนที่ของเสาเข็มส่วนที่  $i$  คือ การเคลื่อนที่ที่ เวลา  $j-1$  บวกกับความเร็วเฉลี่ยของเสาเข็มส่วนที่  $i$  ที่เวลา  $j$  กับ  $j-1$  คูณด้วยเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.45

$$u_{i,j} = u_{i,j-1} + \frac{1}{2}(V_{i,j-1} + V_{i,j})dt \quad (2.45)$$

แรงต้านทานของดินที่เสาเข็มส่วนที่  $i$  คือ ผลคูณของสตีเฟนส์ของดินกับการเคลื่อนที่บวกกับผลคูณของ Viscous damping factor กับความเร็วที่เวลา  $j$  ดังแสดงดังสมการที่ 2.46

$$R_{i,j} = k_{si}u_i + J_i v_{i,j} \quad (2.46)$$

Match Quality Evaluation (MQN) เป็นตัวชี้ให้เห็นถึงคุณภาพการจับคู่ (matching) สัญญาณที่ได้จากการวัดและคำนวณได้ ว่ามีความใกล้เคียงกันเพียงใด ซึ่งจะหาได้จากการรวมค่า absolute ของความแตกต่างระหว่างค่าความสัมพันธ์ที่วัดและคำนวณได้ที่หัวเสาเข็มโดยพิจารณาเป็นช่วงเวลา  $k$

$$MQN_k = \sum |(f_{jc} - f_{jm}) / F_m| \quad (2.47)$$

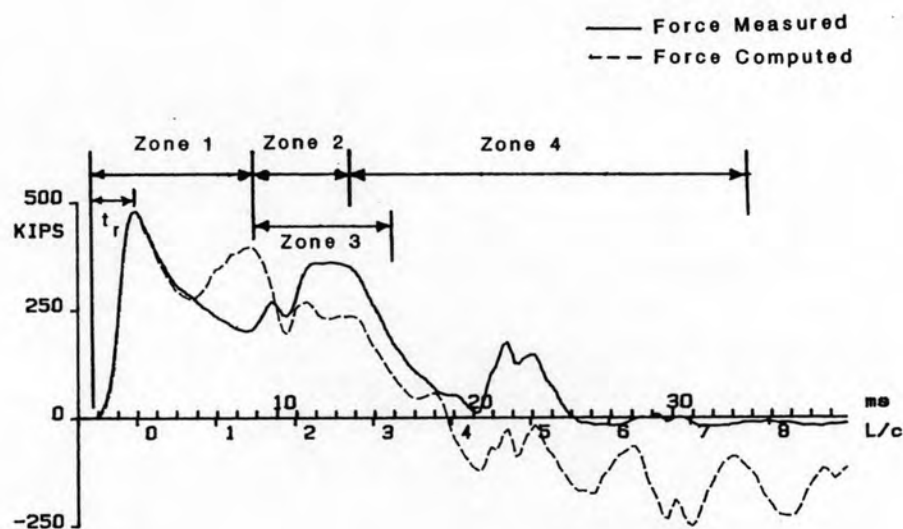
เมื่อ	$f_{jc}$	=	ค่าที่คำนวณได้ที่หัวเสาเข็มที่เวลา $j$
	$f_{jm}$	=	ค่าที่วัดได้ที่หัวเสาเข็มที่เวลา $j$
	$F_m$	=	แรงที่วัดได้สูงสุดที่หัวเสาเข็ม (tons)

การวิเคราะห์จะแบ่งเวลาพิจารณาเป็น 4 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เวลาช่วงที่ 1 พิจารณาเมื่อเริ่มตอกถึงเวลา  $\frac{2L}{c}$  เป็นตัวแสดงว่าการกระจายของแรงเสียดทานที่ผิวเป็นอย่างไร
2. เวลาช่วงที่ 2 เริ่มเมื่อสิ้นสุดเวลาในช่วงแรกถึง  $t_r + 3 \text{ ms}$  เมื่อ  $t_r$  คือ เวลาที่วัดเมื่อเริ่มตอกถึงเวลาที่มีความเร็วสูงสุด ซึ่งเวลาในช่วงนี้ใช้สำหรับหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม
3. เวลาช่วงที่ 3 พิจารณาที่เวลา  $t_r$  หลังจาก  $\frac{2L}{c}$  ถึง 5 ms. ช่วงเวลานี้ค่าของแรงต้านทานสูงสุด ( $R_{ur}$ ) จะปรากฏชัด

4. ช่วงเวลาสุดท้าย เริ่มพิจารณาเมื่อสิ้นเวลา ช่วงที่ 2 ถึงประมาณ 20 ms. พฤติกรรมที่ปล่อยน้ำหนักของดินมีผลต่อค่าต่างๆที่หัวเสาเข็ม

การจับคู่ตัวแปล (Match quality) โดยทั่วไปจะกำหนด Match quality ไม่เกิน 5 ซึ่งทั้งหมดของแต่ละช่วงเวลาก็จะถูกนำมารวมกันและเนื่องจากการซ้อนทับกันของช่วงเวลา ซึ่ง  $R_{u1}$  มีผลต่อ Match quality มากกว่าพารามิเตอร์ของแรงต้านทานดิน ตัวอื่นๆ



- Zone 1 - Shaft Resistance
- Zone 2 - Toe Resistance and Toe Model
- Zone 3 - Total Resistance
- Zone 4 - Soil Unloading Behavior
- $t_r$  - Rise Time

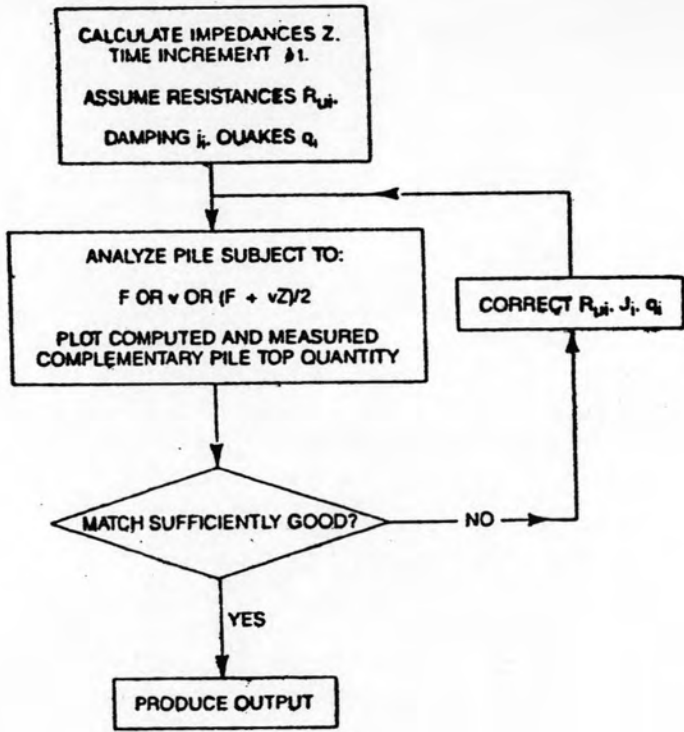
รูปที่ 2.21 การแบ่งช่วงเวลาในการวิเคราะห์ด้วย CAPWAPC

#### - วิธีใช้และผลการวิเคราะห์จาก CAPWAPC

CAPWAPC เป็นการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของแรงและความเร็วที่วัดได้จาก PDA โดยการใส่ แรงต้านทาน, damping factor, quake ตามเงื่อนไขของชั้นดิน โดยใช้ค่าแรงทางสถิตศาสตร์ที่หาได้จาก Case method เป็นแนวทางและทำการวิเคราะห์ผลแบบทองลงสู่ผืน



แรงและความเร็วที่คำนวณได้มีการจับคู่กับสัญญาณที่วัดได้ในสนาม ด้วยคุณภาพการการจับคู่สัญญาณที่ดีที่สุดและมีความสมเหตุสมผล อันเป็นการยืนยันว่าผลการวิเคราะห์สามารถใช้ทำนายผลที่ได้จากการวัดและแสดงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง ขั้นตอนการจับคู่สัญญาณ (match) สัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งวิธีใช้ CAPWAPC ตลอดจนเมนูที่จำเป็นในการวิเคราะห์ผลโดยย่อ



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลด้วย CAPWAPC

