



## การควบคุมงานตอกเสาเข็มตามหลักสมดุลพลังงาน

### PILE DRIVING CONTROL BY THE PRINCIPLE OF ENERGY BALANCE

วีรพงษ์ ขวัญเซ่ง (Weerapong Kwanseang)<sup>1</sup>

ก่อโชค จันทวารงูร (Korchoke Chantawarungul)<sup>2</sup>

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ (Suttisak Soralump)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (w\_kwanseang@hotmail.com)

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (korchoke.c.@ku.ac.th)

<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (fengsus@ku.ac.th)

**บทคัดย่อ :** จากหลักพลังงาน ในการควบคุมงานตอกเสาเข็ม อาจมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนัก ยกตัวอย่าง เช่น ENR Formula, Hiley Formula etc. เมื่อนำไปใช้งานทำให้การควบคุมงานตอกเสาเข็มมีความคลาดเคลื่อน จึงได้พัฒนาสู่การใช้งานแบบจำลองการถ่ายทอดพลังงานขณะทำการตอกเสาเข็ม คือ Smith's Model แทน ร่วมกับการพิจารณาความสัมพันธ์การกระจายตัวของพารามิเตอร์ดินฐานราก คือ Damping Factor, Quake Value พารามิเตอร์ดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์กลับจากการทดสอบ Dynamic Load Test โดยกระบวนการ Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) ประกอบด้วยค่าเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และความน่าจะเป็นในการกระจายตัวของข้อมูล พัฒนาเป็นวิธี Probabilistic Energy Approach ซึ่งใช้ข้อมูลจากบันทึกการตอกเสาเข็มร่วมในการคำนวณ ประกอบด้วย พลังงานจากตุ้มขณะทำการตอกเสาเข็ม, จำนวนครั้งการตอกใน 30 เซนติเมตร, ความเร็วคลื่นหน่วยแรงสูงสุดที่หัวเสาเข็ม, ขนาดเสาเข็ม และค่าอีลาสติกโมดูลัสของเสาเข็ม การคำนวณได้ผล กำลังรับแรงต้านทานเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิว และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม สามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักจากการทดสอบ Dynamic Load Tests ซึ่งวิเคราะห์ด้วย CAPWAP ปรากฏความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงสามารถใช้ควบคุมงานตอกเสาเข็ม และประเมินกำลังรับน้ำหนักได้จากความสัมพันธ์ของ การเคลื่อนตัวจากการตอกเสาเข็ม 1 ครั้ง – แรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

**ABSTRACT :** Following the principal of work - energy previously developed as an alternative to the conventional dynamic pile driving control methods for example, ENR Formula, Hiley's Formula etc., Which are uncertain in pile driving control. Therefore, the driving energy while hammering the pile down is Smith's Model was developed pile driving control, considering parameters in relation to soil foundation i.e. Damping Factor, and Quake Value. For this case, the Smith parameters for each pile were derived from the back - calculation process of the Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) which is consist of mean value, standard deviation and probability distribution function. It was developed to be Probabilistic Energy Approach Method which is on the information of pile driving control method plus computation. There are also supporting with the energy derived to the pile head during each hammer blow, the blow count per 0.3 m. of pile penetration, maximum velocity at the pile head, the pile dimensions and elastic properties. The results are pile driving resistance from shaft resistance and toe resistance. The nearest of this method is



compared to dynamic load test which is analyzed by CAPWAP and the result has linear relationship to be used for pile driving control and estimation of toe resistance from Permanent Set.

**KEYWORDS :** Dynamics Load Test, Wave Equation Analysis, Damping Factor, Quake Value, Smith-model

## 1. บทนำ

การก่อสร้างอาคารจำนวนมากใช้เสาเข็มตอรับน้ำหนักในการก่อสร้างฐานรากเพื่อให้โครงสร้างเหล่านั้นมีความมั่นคงปลอดภัยในการใช้งาน นอกจากการสำรวจ การออกแบบแล้วการควบคุมงานตอกเสาเข็มเป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญ ปัจจุบันนิยมใช้หลักการของพลังงานเป็นหลัก แต่การตอกเสาเข็มในแต่ละครั้งนั้นการส่งผ่านพลังงานในการตอกมีค่าต่างกัน ขณะดำเนินการตอกเสาเข็มลงไปดิน จะมีการนับจำนวนครั้งที่ตอกต่อหน่วยความยาวของเสาเข็มที่จมลงดิน (Blow Count) เพื่อนำผลมาคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่จะได้รับหลังจากเสร็จสิ้นการตอกโดยใช้สมการทางพลวัต (Dynamic Formula) ในการคำนวณการใช้หลักการดังกล่าวซึ่งเป็นสมการแบบอิมพีริคัล (Empirical Formula) อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

Dynamic Formula ได้มีการพัฒนาและศึกษาเปรียบเทียบกับมากมาย โดยมากปรับปรุงมาจาก ENR Formula เพื่อประมาณกำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม แต่ไม่มีวิธีใดได้ผลตรงกับที่ทดสอบ Liang และ Zhou [3] ได้ให้เหตุผลที่ทำให้ Dynamic Formula มีความน่าเชื่อถือน้อยเนื่องจากเหตุผลต่อไปนี้

- สมมุติฐานให้เสาเข็มมีความแข็ง (Rigid Pile) ; พลังงานที่ส่งผ่านลงในเสาเข็มในการตอกแต่ละครั้งทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของเสาเข็มสูญเสีย
- ไม่มีการพิจารณาการสัมผัสกันของเสาเข็มกับดิน ; เนื่องจากดินแต่ละชนิด และคุณสมบัติของเสาเข็ม มีความต่างกัน
- ไม่พิจารณาถึง Damping Coefficient จึงไม่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง แรงต้านทานแบบสถิตย์ และพลวัต เนื่องจากการตอกเสาเข็ม

ดังนั้นการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ดีขึ้นได้พัฒนาโดยอาศัยการวิเคราะห์จากหลักการส่งผ่านพลังงานของ Smith's Model [5] แทน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์จากการเดินทางของคลื่นความเค้น (Stress Wave) ในตัวกลางอีลาสติก

Liang และ Husein [2] ได้รวม Dynamic Pile – Soil Interaction Model ในรูปแบบการส่งผ่านพลังงาน เพื่อปรับปรุง Dynamic Pile - Driving Formulas โดยในวิธีการนี้จะพิจารณาค่าเฉลี่ยของ Smith's Model Parameters ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวยากในการหาจากคุณสมบัติพื้นฐานของดิน หรือจากการทดสอบดินในสนามโดยจะขึ้นกับธรรมชาติของการกำเนิด และการตกตะกอน ดังนั้นต้องนำมาพิสูจน์ตามทฤษฎีความน่าจะเป็นศึกษาลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลก่อนนำมาใช้งาน

Liang และ Zhou [3] นำเสนอทฤษฎีความน่าจะเป็น และหลักการถ่ายทอดพลังงาน สำหรับใช้ในการควบคุมงานก่อสร้างเสาเข็มตอก โดยพิจารณาผลการบันทึก Blow Count/0.3 เมตร , ความยาวเสาเข็ม, คุณสมบัติอีลาสติก และผลการทดสอบเสาเข็มทางพลวัต (Dynamic Load Test) ซึ่งประกอบด้วยการส่งพลังงานจากค้ำตอกเสาเข็ม, ความเร็วคลื่นหน่วยแรงที่หัวเสาเข็ม , Smith's Model Parameters ซึ่งได้จากการคำนวณกลับจาก CAPWAP [4] ต่อมาทำการรวบรวมพารามิเตอร์และหาการกระจายตัวของข้อมูล พบว่ามีการกระจายตัวแบบ Log – Normal เมื่อหาความสัมพันธ์กับหลักการถ่ายทอดพลังงาน พัฒนาเป็นวิธี Probabilistic Energy Approach เพื่อใช้ในการควบคุมงานตอกเสาเข็มในสนาม

บทความนี้ได้นำผลการวิเคราะห์จากการคำนวณด้วยวิธี Probabilistic Energy Approach (PEA) สำหรับใช้ในการควบคุมงานก่อสร้างเสาเข็มตอกบนหินแกรนิตโดยแบ่งเป็น แรงเสียดทานที่ผิว, แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม และ กำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ CAPWAP จากกระบวนการทดสอบ Dynamic Load Test และ ผลการคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจากการคำนวณโดยวิธี Static Method ( $\beta_s$  พารามิเตอร์) กับ แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจากการวิเคราะห์โดย CAPWAP ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์สอดคล้องกันเป็นสมการเส้นตรง และการคำนวณกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มโดยวิธีการดังกล่าว กับ การเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มในการตอก 1 ครั้ง (Permanent Set) ให้ความสัมพันธ์เป็นสมการยกกำลัง



## 2. ลักษณะโครงการและสภาพพื้นที่

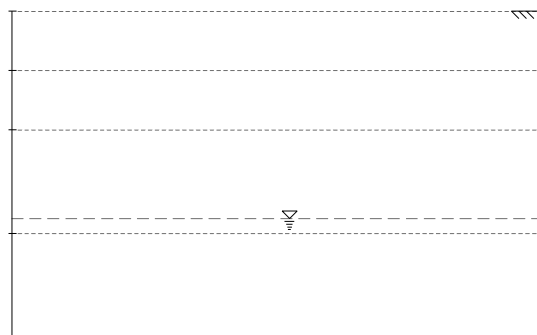
โครงการก่อสร้างเจดีย์บูรพาวิद्याปริยาสมาคมตั้งอยู่ที่วัดเขาสุกิม อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดพื้นที่ฐานราก  $99.00 \times 99.00$  เมตร ความสูง 199 เมตร โครงการตั้งอยู่บนไหล่ภูเขาหินแกรนิต ทำการปรับระดับพื้นที่โดยการระเบิดภูเขาบางส่วนและนำมาถมกลับ โดยนำดินจากนอกพื้นที่บางส่วนถมเพิ่มเติมโดยไม่ทำการบดอัด เพื่อปรับพื้นที่ก่อนการก่อสร้าง ทำให้ชั้นดินมีความต่างกัน 5 – 25 เมตร โดยประมาณ ดินชั้นบนซึ่งเป็นดินถมจะมีความแน่นตัวเพิ่มขึ้นตามความลึก ก่อนถึงหน้าหินจะปกคลุมด้วยดินเดิม (Residual Soil) ซึ่งเกิดจากการผุพังของหินแกรนิต ดังแสดงลักษณะพื้นที่ก่อสร้างในภาพที่ 1 และลักษณะชั้นดิน ในภาพที่ 2 และภาพที่ 3

ฐานรากบางส่วนเป็นฐานรากตื้น (Shallow Foundation) วางอยู่บนหน้าหิน ซึ่งอยู่ในส่วนที่ระดับชั้นดินมีความหนา น้อย เสริมฐานราก เดิมได้ออกแบบเป็นเสาเข็มเจาะระบบ แห้ง เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 เมตร ให้มีกำลังรับน้ำหนักใช้งาน (Allowable Load) 120 ตัน (อัตราส่วนความปลอดภัย 2.5) ดำเนินการก่อสร้างฐานรากเมื่อปี พ.ศ. 2541 จนแล้วเสร็จ แล้วทำการทดสอบเสาเข็มแบบสถิตย์ (Static Load Test) จำนวน 8 ตัน ผลการทดสอบไม่ผ่านทุกต้น และทดสอบเสาเข็มแบบพลวัต (Dynamic Load Test) จำนวน 42 ตัน ผลการทดสอบไม่ผ่าน 22 ตัน การก่อสร้างจึงหยุดดำเนินการหลังจากนั้นเป็นเวลา 8 ปี

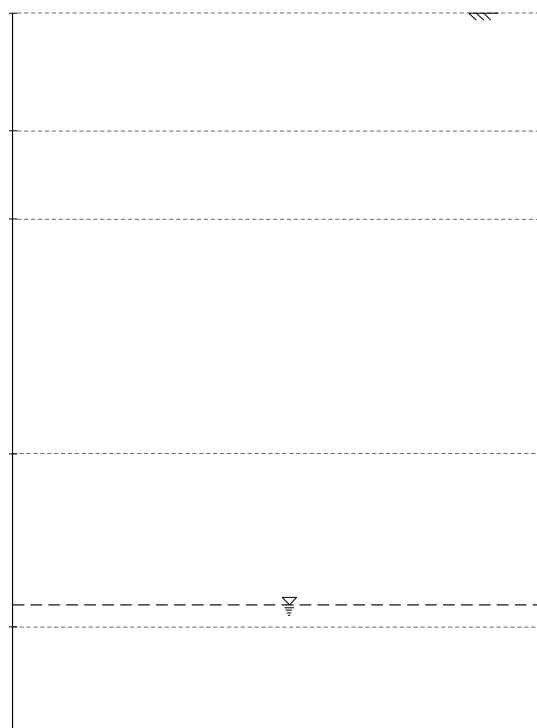
ต่อมาเมื่อปี 2548 ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพี และฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้นำคณะผู้เชี่ยวชาญเข้าไปศึกษาหาแนวทางแก้ไขให้สามารถดำเนินการก่อสร้างต่อไปได้ โดยวิเคราะห์ลักษณะการรับน้ำหนักเสาเข็มเจาะเดิมเป็นการรับแรงเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเป็นหลัก (Shaft Resistance Pile) เนื่องจากปลายเสาเข็มเจาะเดิมมีข้อบกพร่องในวิธีการก่อสร้างให้สามารถถ่ายแรงลงไปได้ อย่างมีประสิทธิภาพ จึงปรับปรุงโดยใช้เสาเข็มตอกรับน้ำหนักแทน ตอกแซมระหว่างเสาเข็มเจาะเดิม (ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดเสาเข็มตอกในหัวข้อที่ 4) เพื่อปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มให้สามารถถ่ายแรงลงปลายเสาเข็มเป็นหลัก (Toe Resistance Pile)



ภาพที่ 1 ลักษณะพื้นที่ก่อสร้าง



ภาพที่ 2 ความลึกชั้นดิน 0.00 – 10.00 เมตร



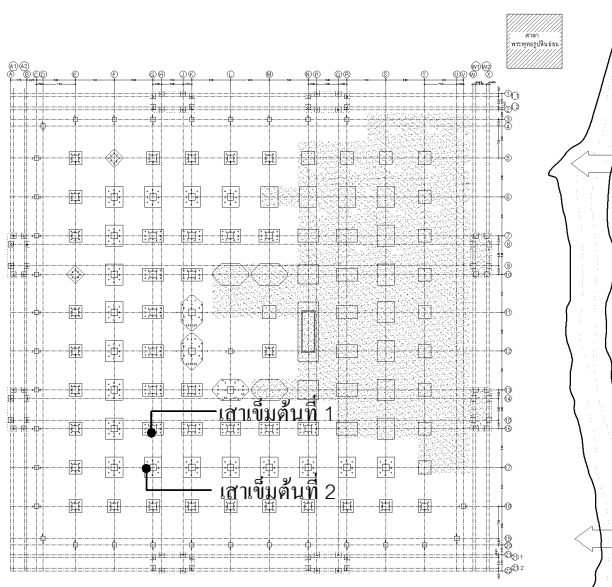
ภาพที่ 3 ความลึกชั้นดิน 0.00 – 25.00 เมตร

### 3. การตอกเสาเข็ม และการทดสอบเสาเข็ม

เสาเข็มสำหรับโครงการนี้ เป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง สี่เหลี่ยมตันขนาด 0.525 เมตร ปลายติดตั้งเหล็กหล่อเพื่อให้สามารถตอกส่งปลายเสาเข็มลงในหินได้, ความยาวเสาเข็ม 11, 18, 21 และ 24 เมตร ให้เหมาะสมกับระดับความหนาของชั้นดิน ได้รับการออกแบบให้มีกำลังรับน้ำหนักใช้งาน (Allowable Load) 120 ตัน (อัตราส่วนความปลอดภัย 2.5) โดยใช้ปั้นจั่นตอกเสาเข็ม ขนาดค้ำตอก 8 และ 9 ตัน ค้ำตอกเสาเข็ม 8 ตัน ใช้กับความหนาของชั้นดินไม่เกิน 15 เมตร และ 9 ตัน ใช้กับความหนาของชั้นดินมากกว่า 15 เมตร

ในการก่อสร้างจะดำเนินการเจาะดินออกให้ถึงชั้นหินผุ ก่อนตอกเสาเข็ม ทำการบันทึก Blow Count และ ความยาวเสาเข็มตอกจมลงดิน รวมจำนวนเสาเข็มทั้งสิ้น 408 ตัน

การทดสอบเสาเข็ม ดำเนินการทดสอบ Dynamic Load Test จำนวน 208 ตัน ครอบคลุมเสาเข็มในทุกฐานราก และทดสอบ Static Load Test จำนวน 8 ตัน โดย 2 ตัน ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (Strain Gauge) ในเสาเข็ม (ความยาว 21 เมตร) ประโยชน์เพื่อการวิเคราะห์หาค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ( $\beta_s$  พารามิเตอร์) ใช้ในการออกแบบเสาเข็มโดยวิธี Static Method แสดงตำแหน่งตอกเสาเข็ม และเสาเข็มติดตั้ง Strain Gauge ในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงแสดงตำแหน่งตอกเสาเข็ม และเสาเข็มติดตั้ง Strain Gauge

เสาเข็มต้นที่ 1 ที่ทำการติดตั้ง Strain Gauge นั้นเมื่อทำการตอกเสาเข็มแล้วเสร็จ Strain Gauge ไม่สามารถทำงานได้

เนื่องจากแรงกระทำจากการตอกเสาเข็มนั้นทำให้เกิดความเครียด (Strain) เกินกว่า Strain Gauge จะรับได้ ในการตอกเสาเข็มต้นที่ 2 จึงกำหนดระยะยกให้น้อยลง และความถี่ในการตอกต่ำ ปรากฏว่า Strain Gauge ตำแหน่งไกลออกไปจากกึ่งกลางความยาวเสาเข็มสามารถใช้งานได้

### 4. การวิเคราะห์ผลการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมในเสาเข็ม (Strain Gauge)

การติดตั้ง Strain Gauge ที่ตำแหน่ง หัวเสาเข็ม, ระดับความลึก 7.40 , 11.40 เมตร จากผิวดิน และที่สูงกว่าปลายเสาเข็ม 0.5 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งชั้นดินเปลี่ยนแปลงความแน่น ค่า Strain และ การเคลื่อนตัวที่อ่านได้ จากการบรรทุกน้ำหนักในการทดสอบเสาเข็มแบบ Static Load Test นำไปคำนวณแรงกระทำถ่ายทอดลงเสาเข็มที่ระดับการติดตั้ง Strain Gauge จากผลต่างของแรงกระทำ ที่ประเมินได้ที่ระดับชั้นดินเปลี่ยนแปลง มาประเมินค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ค่าแรงกระทำตรวจวัดที่ระดับปลายเสาเข็ม แทนค่าเป็นแรงดันที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นกระบวนการติดตั้ง Strain Gauge ไว้ในเสาเข็มทดสอบ สามารถแยกส่วนการรับน้ำหนัก ที่ผิวและที่ปลายเสาเข็มออกจากกันได้

ในการทดสอบ Static Load Test ของเสาเข็มที่ติดตั้ง Strain Gauge ได้ทดสอบถึงน้ำหนัก 150 ตัน เพื่อพิจารณาแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม เนื่องจากหินฐานรากมีกำลังรับน้ำหนักสูง (End Bearing Capacity) จึงไม่สามารถทดสอบเสาเข็มถึงจุดพิบัติได้

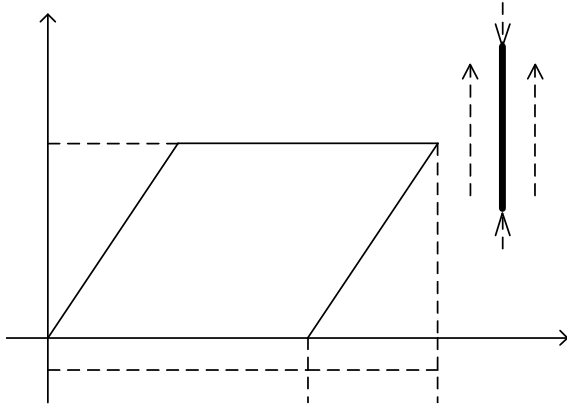
การคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นดินทรายตามวิธี Static Method กรณีแรงดันดินกระทำตั้งฉากกับผิวเสาเข็มเกิดแรงเสียดทาน ในสภาพดินรับแรงเฉือนมีการระบายได้ดี ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มแสดงในสมการที่ (1)

$$f_s = K\sigma'_v \tan\delta = \beta_s \sigma'_v \quad (1)$$

Burland [1] อธิบายการรวมค่าพารามิเตอร์  $K \tan\delta$  ไว้ด้วยกัน คือ  $\beta_s = K \tan\delta$  ซึ่งสามารถวิเคราะห์ย้อนกลับจากผลการทดสอบเสาเข็มได้ง่ายกว่า และสามารถทำการวิเคราะห์หาค่ากลับทั้งในสภาพดินฐานรากต่างกัน

### 5. การวิเคราะห์โดยวิธี Probabilistic Energy Approach (PEA)

Smith [5] นำเสนอระบบ Soil – Pile Interaction แสดงในภาพที่ 5 เมื่อความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนตัวสามารถแสดงพารามิเตอร์ในแบบจำลอง คือ 1.กำลังรับน้ำหนักดินที่จุดพีบีดี 2. Soil Quake 3. Soil damping



ภาพที่ 5 Smith's Model [5] (Linearly Elastic, Perfectly Plastic Model) for Dynamic Soil – Pile Interaction

### 5.1 ลักษณะการกระจายตัวของ Smith's Model Parameter

ความสัมพันธ์ในกราฟแสดงค่าสถิติความถี่ โดยข้อมูลประกอบด้วย Tip Quake ( $Q_p$ ), Side Quake ( $Q_s$ ), Tip Damping ( $j_p$ ), Side Damping ( $j_s$ ) Liang และ Zhou [3] พบว่าจากกระจายความสัมพันธ์เป็นแบบ Log – normal โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์แสดงในสมการที่ (2)

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad (2)$$

เมื่อ  $\lambda$  = ค่าเฉลี่ยของ  $\ln(X)$   
 $\xi$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $\ln(X)$

แสดงค่า  $\lambda$ ,  $\xi$  กับความสัมพันธ์ ค่าเฉลี่ย,  $\mu$  และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน,  $\sigma$  มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่า X ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) และ (4)

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2}\xi^2 \quad (3)$$

$$\xi^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right) \quad (4)$$

### 5.2 สมการการถ่ายทอดพลังงาน (Energy Approach)

จากหลักสมดุลของพลังงานในระบบการตอกเสาเข็ม พลังงานได้รับจากค้ำตอกเสาเข็ม เท่ากับ พลังงานที่สูญเสีย และพลังงานที่คงอยู่ พลังงานที่ให้ไปนั้นทำให้เกิดสมดุลในสองลักษณะ คือ พลังงานที่คงอยู่เนื่องจากความเป็นอีลาสติกของเสาเข็ม - ดินฐานราก (กระจายพลังงานด้วย Damping) และ การผิดรูปเนื่องจากสภาพพลาสติก (Plastic Deformation) ของดินฐานราก หลักการคำนวณโดยสมการทางคณิตศาสตร์แสดงในสมการที่ (5)

$$E_{in} = E_{e,soil} + E_{p,soil} + E_{e,pile} \quad (5)$$

เมื่อ  $E_{in}$  = พลังงานเนื่องจากการตอกเสาเข็ม  
 $E_{e,soil}$  = Elastic energy stored in the soil  
 $E_{p,soil}$  = Energy dissipated in the soil  
 $E_{e,pile}$  = Elastic energy stored in the pile

### 5.3 การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

Total Soil Resistance จากการตอกเสาเข็ม  $R^T$  เป็นผลรวมของ Dynamic Resistance,  $R^D$  และค่า Static Resistance,  $R^S$  แสดงในสมการที่ (6)

$$R^T = R^D + R^S = R^S(1 + jV) \quad (6)$$

เมื่อ  $j$  = Smith Damping Factor  
 $V$  = ความเร็วคลื่นหน่วยแรงสูงสุดที่หัวเสาเข็ม  
 $R^D = jVR^S$

การนำค่าความเร็วคลื่นหน่วยแรงที่หัวเสาเข็ม ตามสมการที่ (6) ทำให้การคำนวณค่า  $R^S$  จะมีค่าน้อยที่สุด ค่าดังกล่าวนำไปสู่การพิจารณา ประมาณค่า Static Pile Capacity



Tip Resistance ต้องการค่า Pile Movement ที่ปลายเสาเข็ม เช่นเดียวกับ การศึกษา Shaft Resistance ความสัมพันธ์ทั้งสอง แสดงตามสมการที่ (7)

$$R^T = R_s^S (1 + j_s V) + R_p^S (1 + j_p V) \quad (7)$$

เมื่อ  $R_s^S =$  Static Shaft Resistance  
 $R_p^S =$  Static Tip Resistance

ผลเนื่องจากดินซึมซับพลังงานทั้ง Elastic Energy ( $E_{e,soil}$ ), Irrecoverable Energy ( $E_{p,soil}$ ) จำนวนในสมการที่ (8) และ (9)

$$E_{e,soil} = \frac{1}{2} R_s^S (1 + j_s V) Q_s + \frac{1}{2} R_p^S (1 + j_p V) Q_p \quad (8)$$

$$E_{p,soil} = R_s^S (1 + j_s V) S + R_p^S (1 + j_p V) S \quad (9)$$

เมื่อ  $Q_s =$  Shaft Quake  
 $Q_p =$  Tip Quake  
 $S =$  Permanent Set

Elastic Energy stored in pile ( $E_{e,pile}$ ) สามารถคำนวณตาม สมมติฐานการกระจายแรงต้านทาน ตลอดความยาวเสาเข็ม ใน สมการที่ (10)

$$E_{e,pile} = \beta [R_s^S (1 + j_s V) + R_p^S (1 + j_p V)]^2 \quad (10)$$

เมื่อ  $\beta = \frac{L}{10EA}$  สำหรับดินทราย (การกระจายแรง ลักษณะสามเหลี่ยม) (11a)

$\beta = \frac{L}{6EA}$  สำหรับดินเหนียว (การกระจายแรง ลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้า) (11b)

เมื่อ  $L =$  Embedded pile length  
 $E =$  Young's modulus of the pile  
 $A =$  Cross - section area of the pile

ดินตามธรรมชาติการตกตะกอน มักได้ดินทราย หรือดินเหนียวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นการประมาณค่า  $\beta$  จึงทำได้ยาก

นำสมการที่ (8), (10), (11) แทนค่าในสมการที่ (5) และ กำหนดค่า Factor,  $\alpha$  เป็นค่าอัตราส่วนของ Static Tip Resistance / Static Shaft Resistance ( $R_p^S / R_s^S$ )

$$E_{in} = R_s^S [(1 + j_s V)(S + \frac{1}{2} Q_s) + \alpha(1 + j_p V)(S + \frac{1}{2} Q_p)] + (R_s^S)^2 \beta [(1 + j_s V) + \alpha(1 + j_p V)]^2 \quad (12)$$

การจัดเทอมของ Static Shaft Resistance,  $R_s^S$  สามารถคำนวณตามสมการที่ (13)

$$R_s^S = \frac{(1 + j_s V)(S + \frac{1}{2} Q_s) + \alpha(1 + j_p V)(S + \frac{1}{2} Q_p)}{2\beta[(1 + j_s V) + \alpha(1 + j_p V)]^2} + \frac{\left\{ \left[ (1 + j_s V)(S + \frac{1}{2} Q_s) + \alpha(1 + j_p V)(S + \frac{1}{2} Q_p) \right]^2 + 4E_{in}\beta[(1 + j_s V) + \alpha(1 + j_p V)]^2 \right\}}{2\beta[(1 + j_s V) + \alpha(1 + j_p V)]^2} \quad (13)$$

Total Static Resistance สามารถหาค่าตามสมการที่ (14)

$$R^S = R_s^S (1 + \alpha) \quad (14)$$

การศึกษาค่า Quake และ Damping สามารถสรุปว่า ค่าเฉลี่ยของ Damping Factor ( $j_p$ ) มีค่าประมาณเท่ากับค่าเฉลี่ยของ Tip Damping Factor ( $j_p$ ) ดังนั้นค่า Tip Quake ( $Q_p$ ) และ Shaft Quake ( $Q_s$ ) จะมีค่าแตกต่างกันน้อยเมื่อเปรียบเทียบกันพิจารณา ค่า Permanent Set,  $S + \frac{Q_p}{2} \approx S + \frac{Q_s}{2}$ , ดังนั้น สามารถประมาณค่า  $R_s^S$  ตามความสัมพันธ์ตามสมการที่ (15)

$$R_s^S = -\frac{(S + \frac{1}{2} Q_s)}{2\beta(1 + j_s V)(1 + \alpha)} + \frac{\sqrt{(S + \frac{1}{2} Q_s)^2 + 4E_{in}\beta}}{2\beta(1 + j_s V)(1 + \alpha)} \quad (15)$$



และ Total Static Resistance สามารถประมาณตามสมการที่ (16)

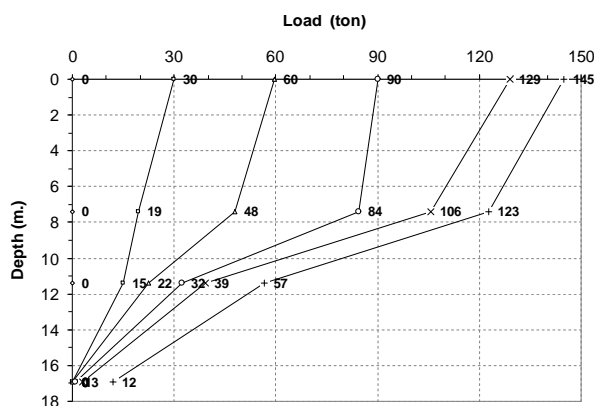
$$R^S = -\frac{(s + \frac{1}{2}q_s)}{2\beta(1+j_sV)} + \frac{\sqrt{(s + \frac{1}{2}q_s)^2 + 4E_m\beta}}{2\beta(1+j_sV)} \quad (16)$$

จากสมการที่ (16) ไม่ปรากฏ Factor  $\alpha$  เนื่องจากการคำนวณ Total Static Resistance ไม่มีผลกระทบต่อค่า Factor  $\alpha$

## 6. ผลการวิเคราะห์

### 6.1 การวิเคราะห์ผลการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมในเสาเข็ม (Strain Gauge)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มมีการถ่วงน้ำหนักเป็นแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยน้ำหนักทดสอบที่ 90 ตัน เสาเข็มจะเริ่มถ่วงน้ำหนักลงที่ปลายเสาเข็มดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แรงถ่ายทอดลงในเสาเข็มจากการแปลค่าผลตรวจวัดโดย Strain Gauge

แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในแต่ละชั้นดิน นำมาวิเคราะห์กลับหาค่า  $\beta_s$  พารามิเตอร์ได้แสดงในตารางที่ 1

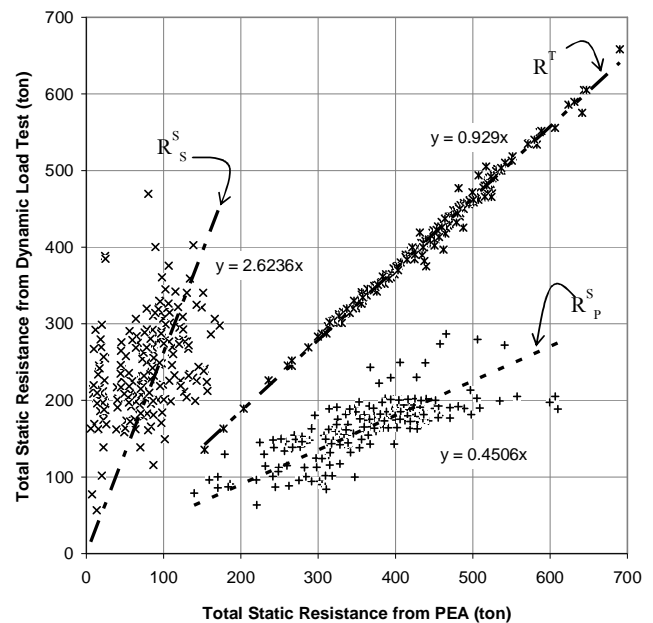
ตารางที่ 1 แสดงค่า  $\beta_s$  พารามิเตอร์

ระยะความลึก (เมตร)	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	หน่วยแรงเสียดทาน ที่ผิวเสาเข็ม(ตัน/ตร.ม.)	$\beta_s$
0.00 – 07.40	1.86	1.51	0.22
07.40 – 11.40	2.01	7.91	0.44
11.40 – 16.90	2.10	11.00	0.40

ค่า  $\beta_s$  พารามิเตอร์จะนำไปใช้ประโยชน์ในคำนวณประมาณการค่า  $\alpha$  พารามิเตอร์ โดยเป็นพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งนำไปคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในวิธี Probabilistic Energy Approach ตามสมการที่ (15)

### 6.2 การวิเคราะห์ผลโดยวิธี Probabilistic Energy Approach

จากการนำค่าพารามิเตอร์จากการวิเคราะห์ที่กลับโดย CAPWAP และ Permanent Set คำนวณตามสมการที่ (15), (16) และนำไปเปรียบเทียบกับผลจาก Dynamic Load Test พบว่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 7 และแสดงตามสมการที่ (17), (18), (19)



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ผลการประมาณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจาก Dynamic Load Test กับวิธี Probabilistic Energy Approach (PEA)

$$R^S(CAPWAP) = 0.929 \times R^S(PEA) \quad (17)$$

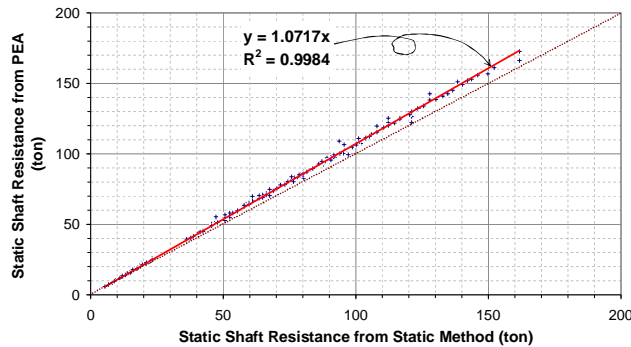
$$R^S_P(CAPWAP) = 0.451 \times R^S_P(PEA) \quad (18)$$

$$R^S(CAPWAP) = 2.624 \times R^S(PEA) \quad (19)$$

เมื่อนำ  $\beta_s$  พารามิเตอร์ หาค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธี Static Method ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (1) กับผลการวิเคราะห์แรงเสียดทานที่



ผิวเสาค้างจากการวิเคราะห์โดยวิธี Probabilistic Energy Approach แล้ว ปรากฏความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงดังแสดง กราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 8 และสมการที่ (20)



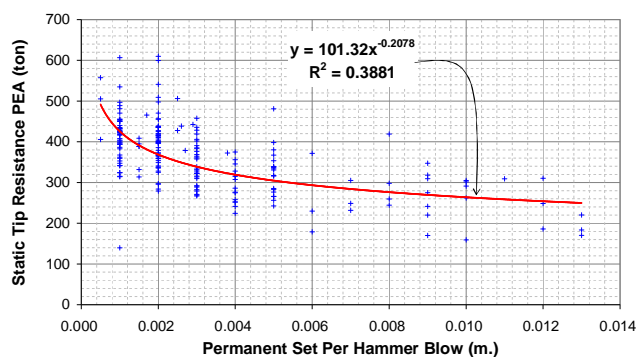
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงเสียดทานที่ผิวเสาค้างจากการวิเคราะห์ โดย Static Method กับ วิธี Probabilistic Energy Approach

$$R_s^S(PEA) = 1.0717 \times R_s^S(\text{Static Method}) \quad (20)$$

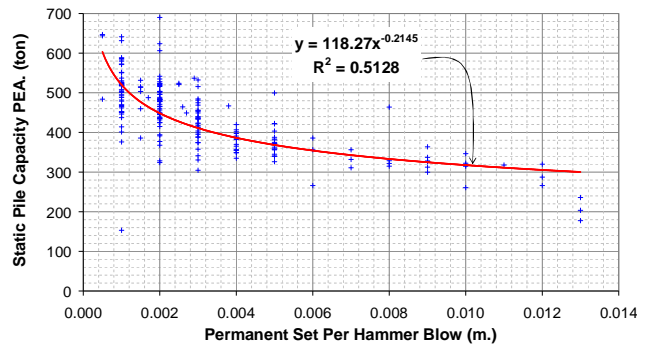
การพิจารณาใช้ประโยชน์ในการควบคุมงานตอกเสาเข็ม สามารถนำผลของการคำนวณแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม และ กำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม เปรียบเทียบกับ Permanent Set ซึ่งสามารถบันทึกจากการตอกเสาเข็มในสนามปรากฏความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงในสมการที่ (21), (22) และแสดงกราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 9, 10 ตามลำดับ

$$R_p^S(PEA) = 101.32 \times S^{-0.2078} \quad (21)$$

$$R^S(PEA) = 118.27 \times S^{-0.2145} \quad (22)$$



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ Permanent Set กับ แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม จากการวิเคราะห์โดย PEA



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ Permanent Set กับ กำลังรับน้ำหนักเสาค้างจากการวิเคราะห์โดย PEA

## 7. สรุปผลการวิเคราะห์

วิธี Probabilistic Energy Method เพื่อควบคุมงานตอกเสาเข็มในสนามสามารถอธิบาย ระบบ Pile – Soil Interaction Model (Smith Model) ซึ่งได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ CAPWAP จากการทดสอบ Dynamic Load Test , ความยืดหยุ่นของเสาค้างจากการตอก, และสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแรงเสียดทานที่ผิวเสาค้าง และแรงต้านทานที่ปลายเสาค้าง เป็นข้อดีกว่า Pile Driving Formula เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ CAPWAP กำลังรับน้ำหนักเสาค้างมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกำลังรับแรงต้านทานที่ปลายเสาค้าง และแรงเสียดทานที่ผิวเสาค้างมีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงในส่วนแรงเสียดทานที่ผิวเสาค้าง มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงกับผลการวิเคราะห์จาก Static Method ได้จากข้อมูลจากการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรม (Strain Gage) กับการวิเคราะห์โดยวิธี Probabilistic Energy Approach ดังกล่าว

ในการประยุกต์ใช้ในการควบคุมงานตอกเสาเข็มในสนามนั้นสามารถใช้ค่า Permanent Set ในการประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มของโครงการได้

ทั้งนี้การวิเคราะห์จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากผลที่ตรวจวัด โดยเครื่องมือทดสอบที่มีคุณภาพเพื่อให้ได้ข้อมูลในการคำนวณผลที่ถูกต้อง และสามารถใช้ประโยชน์ได้

## 8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





## 9. บรรณานุกรม

- [1] Burland, J. B., 1973. "Shaft Friction of Piles in Clay – A simple Fundamental Approach." Ground. Eng., vol. 6 no. 3, May: 30-42.
- [2] Liang, R., and Husein, A. I., 1993. "Simplified Dynamic Method for Pile-Driving Control". J. Geotech. Engrg., ASCE, 119(4): 694-713.
- [3] Liang, R., and Zhou, J., 1997. "Probabilistic Method Applied to Dynamic Pile-Driving Control". J. Geotech. Engrg., ASCE, 123(2): 137-144.
- [4] Rausche, F., Goble, G., and Likins, G., 1985. "Dynamic Determination of Pile Capacity". J. Geotech. Engrg., ASCE, 86(4): 367-383.
- [5] Smith, E. A. L., 1960. "Pile Driving Analysis by the Wave Equation". J. Soil Mech. And Found. Engrg., ASCE, 86(4): 35-61.