

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

(ปีที่ ๑ ของ โครงการ ๒ ปี)

โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๖

ชื่อโครงการวิจัย

การศึกษาพลังงานประสิทธิผลในการทดสอบ

Standard Penetration Test ตามแนวทางการทดสอบที่ดำเนินการ
ในประเทศไทย

เลขที่ ๖๗/๒๕๕๖

๕๑K0165110

- 7 ก.ค. 2558

354939

โดย

สยาม ยิ้มศิริ

เริ่มบริการ

- 8 ต.ค. 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน ๒๕๕๖

บทคัดย่อ

ลักษณะการทดสอบเจาะทะลุหะแสงมาตรฐานในประเทศไทยจากการสำรวจพบว่าใช้ตุ้มตอก 3 ชนิด คือ โดนต์, เซฟตี้, และทริป โดยแบบโดนต์ได้รับความนิยมที่สุด ก้านเจาะที่ใช้เป็นแบบ AW ขนาดของหลุมเจาะมีขนาด 0.08–0.12 เมตร และทิศทางการหมุนของก้านมี 2 แบบ แต่แบบหมุนทวนเข็มนาฬิกาได้รับความนิยมกว่าแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา อุปกรณ์สำหรับวัดพลังงานสามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วน คือ อุปกรณ์วัดพลังงาน, อุปกรณ์ขยายสัญญาณ, และอุปกรณ์บันทึกผล สำหรับอุปกรณ์วัดพลังงานประกอบด้วยก้านเจาะชนิด AW 0.83 ม., Load cell 2 ชุด, และ Accelerometer 2 ชุด อุปกรณ์ขยายสัญญาณประกอบด้วยชุดขยายสัญญาณสำหรับ Load cell 200 เท่า และ ชุดควบคุมสัญญาณสำหรับ Accelerometer อุปกรณ์บันทึกผลประกอบด้วย NI USB-6009 โดยสัญญาณทั้งหมดจะบันทึกในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Labview เป็นตัวควบคุม

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

Standard Penetration Test (SPT) เป็นเครื่องมือทดสอบดินในสนามที่วิศวกรปฐพีทั่วโลกนิยมใช้ในการเจาะสำรวจดินสำหรับการออกแบบฐานรากทั่วไป ปริมาณการออกแบบฐานรากทั่วไปประมาณ 80-90% จะใช้ข้อมูลดินจากการทดสอบ SPT (Kovacs & Salomone, 1982) อีกทั้งยังมี correlation มากมายที่ใช้ SPT N-value เพื่อประมาณคุณสมบัติของดินอื่นๆ เช่น allowable bearing capacity, shear strength, relative density, settlement, และ compressibility อย่างไรก็ตามผลการทดสอบ SPT จะมีความแปรปรวนและมี repeatability ต่ำ (Coduto, 1994; Kovacs & Salomone, 1982) เนื่องมาจากความแปรปรวนของปริมาณพลังงานจากระบบ SPT ต่างๆกัน ถึงแม้ว่าจะมีความพยายามที่จะสร้างมาตรฐานสำหรับการทดสอบ SPT (ASTM D 1586) ก็ยังคงมีความไม่ตรงกันของการปฏิบัติการทดสอบ โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบ SPT คือ ปริมาณของพลังงานที่ส่งไปที่ drill rod จาก hammer and anvil system ฉะนั้นความสำคัญของการทดสอบ SPT คือการพัฒนา reliability และ repeatability ของการทดสอบ คือ ความสามารถในการได้รับผลการทดสอบที่ตรงกันจาก site ที่มีสภาพเดียวกันเมื่อใช้ drill rig ต่างๆ ซึ่งสำหรับ SPT นั้น repeatability และ reliability ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือ, วิธีการทดสอบ, และผู้ปฏิบัติการทดสอบ

ฉะนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ถูกเสนอขึ้นเพื่อศึกษาค่าพลังงานในการทดสอบ SPT ในประเทศไทยและผลกระทบต่อพลังงานในการทดสอบ เช่น (i) ชนิดของเครื่องมือ (เช่น hammer, anvil, ขนาดของ drill rod, sampling tube, ขนาดของเชือกและ cathead), (ii) การ set-up เครื่องมือ (เช่น จำนวนรอบที่เชือกพันรอบ cathead, วิธีการพัน, สภาพของ rope และ cathead), และ (iii) วิธีการปฏิบัติการทดสอบ (เช่น การใช้ drilling mud และ casing ในการพยุงผนังหลุมเจาะ, ระดับความลึกในการตอกที่ใช้วัดค่า SPT (0-0.30 เมตร หรือ 0.15-0.45 เมตร) เพื่อรวบรวมเป็นฐานข้อมูลของพลังงานของชนิดของเครื่องมือและวิธีการปฏิบัติการทดสอบ SPT แบบต่างๆ เพื่อให้การ correlation กับ database ที่มีอยู่มีความถูกต้องยิ่งขึ้น และใช้สำหรับเป็นแนวทางในการจัดทำมาตรฐานของการทดสอบ SPT ในประเทศไทยต่อไป

คำนำ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาค่าพลังงานในการทดสอบ SPT ในประเทศไทยและผลกระทบต่อพลังงานในการทดสอบ เช่น (i) ชนิดของเครื่องมือ (เช่น hammer, anvil, ขนาดของ drill rod, sampling tube, ขนาดของเชือกและ cathead), (ii) การ set-up เครื่องมือ (เช่น จำนวนรอบที่เชือกพันรอบ cathead, วิธีการพัน, สภาพของ rope และ cathead), และ (iii) วิธีการปฏิบัติการทดสอบ (เช่น การใช้ drilling mud และ casing ในการพยุงผนังหลุมเจาะ, ระดับความลึกในการตอกที่ใช้วัดค่า SPT (0-0.30 เมตร หรือ 0.15-0.45 เมตร) เพื่อรวบรวมเป็นฐานข้อมูลของพลังงานของชนิดของเครื่องมือและวิธีการปฏิบัติการทดสอบ SPT แบบต่างๆ เพื่อให้การ correlation กับ database ที่มีอยู่มีความถูกต้องยิ่งขึ้น และใช้สำหรับเป็นแนวทางในการจัดทำมาตรฐานของการทดสอบ SPT ในประเทศไทยต่อไป

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 (เลขที่ 67/2556) จากมหาวิทยาลัยบูรพา โดยส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ได้ตีพิมพ์เป็นบทความวิจัยในเอกสารการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 บทความ ดังนี้

Yimsiri, S. (2012), "Energy ratio of SPT practice performed in Thailand", Proc. 4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, 4ISC, Brazil, Vol. 1, pp. 391-397

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | i |
| บทสรุปสำหรับผู้บริหาร | ii |
| คำนำ | iii |
| สารบัญ | iv |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย | 1-1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย | 1-1 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย | 1-1 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 1-2 |
| | |
| บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม | |
| 2.1 การทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน | 2-1 |
| 2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ SPT | 2-1 |
| 2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ SPT | 2-4 |
| 2.1.3 การรายงานผลการทดสอบ SPT | 2-5 |
| 2.1.4 ข้อควรระมัดระวังในการทดสอบ SPT | 2-5 |
| 2.1.5 มาตรฐานต่างๆในการทดสอบ SPT | 2-5 |
| 2.2 การปรับแก้ผล SPT | 2-6 |
| 2.2.1 การปรับแก้ผลกระทบจากปริมาณพลังงาน | 2-8 |
| 2.2.2 การปรับแก้ผลกระทบจากความยาวก้านเจาะ (Rod length) | 2-11 |
| 2.2.3 การปรับแก้ผลกระทบจากความดันกดทับ (Overburden pressure) | 2-12 |
| 2.2.4 การปรับแก้เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน | 2-14 |
| 2.3 การทดสอบวัดพลังงานจาก SPT | 2-14 |
| 2.3.1 อุปกรณ์สำหรับการวัดพลังงาน (Apparatus for Measurement) | 2-14 |
| 2.3.2 อุปกรณ์สำหรับการวัด การจัดการ และ การแสดงข้อมูล | 2-15 |
| 2.3.3 การเทียบสอบ (Calibration) | 2-15 |
| 2.3.4 การปฏิบัติกร (Procedure) | 2-16 |
| 2.4 การใช้ค่าจำนวนครั้งของการตอกทะลุทะลวงมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของดิน | 2-18 |
| 2.4.1 การจำแนกประเภทของดิน | 2-18 |
| 2.4.2 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว | 2-19 |

| | | |
|---|---|------|
| 2.4.3 | การหาค่าความแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย | 2-19 |
| 2.4.4 | การหาค่ามุมต้านทานของดินทราย | 2-20 |
| 2.4.5 | การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทราย | 2-20 |
| 2.5 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 2-21 |
| 2.5.1 | ชนิดของตุ้มตอกและความสูงของตุ้มตอกที่ตักกระทบ | 2-21 |
| 2.5.2 | การใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณในการวัดพลังงานการทดสอบ SPT | 2-21 |
| | | |
| บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง, แผนการทดลอง, และวิธีการทดลอง | | |
| 3.1 | เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง | 3-1 |
| 3.2 | แผนการทดลอง | 3-1 |
| 3.3 | วิธีการทดลอง | 3-2 |
| | | |
| บทที่ 4 การประดิษฐ์อุปกรณ์วัดพลังงาน | | |
| 4.1 | การรวบรวมลักษณะการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน | 4-1 |
| 4.2 | การประดิษฐ์อุปกรณ์วัดพลังงาน | 4-3 |
| 4.2.1 | อุปกรณ์วัดสัญญาณ | 4-4 |
| 4.2.2 | อุปกรณ์ขยายสัญญาณ | 4-4 |
| 4.2.3 | อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ | 4-4 |
| 4.3 | การเทียบสอบโพลด์เซล | 4-4 |
| 4.4 | การทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน | 4-6 |
| 4.5 | การวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน | 4-7 |
| | | |
| เอกสารอ้างอิง | | R-1 |
| | | |
| ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์ | | |

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย

การทดสอบเจาะทะลุหะลวงมาตรฐาน (SPT) เป็นเครื่องมือทดสอบดินในสนามที่วิศวกรปฐพีทั่วโลกนิยมใช้ในการเจาะสำรวจดินสำหรับการออกแบบฐานรากทั่วไป ปริมาณการออกแบบฐานรากทั่วไปประมาณ 80-90% จะใช้ข้อมูลดินจากการทดสอบ SPT อีกทั้งยังมีความสัมพันธ์มากมายที่ใช้ประมาณคุณสมบัติของดิน เช่น ความสามารถรับแรงแบกทานที่ยอมให้ ความแข็งแรงเฉือน ความหนาแน่นสัมพัทธ์ การทรุดตัว และความสามารถในการยุบตัว

การทดสอบเจาะทะลุหะลวงมาตรฐานมีความแปรปรวนและความแตกต่างของผลการทดสอบ ทั้งนี้เป็นเพราะค่าที่ทดสอบได้แปรผันกับพลังงานที่ส่งถ่ายไปยังกระบอกผ่า ฉะนั้นจึงได้เริ่มมีการศึกษาถึงปัจจัยที่ควบคุมปริมาณพลังงานนี้ ซึ่งการศึกษาในช่วงแรกจะศึกษาเรื่องความเร็วของดัมตอกก่อนการตกระทบ การวัดความสัมพันธ์ของแรงกระแทกต่อเวลาในก้านเจาะที่อยู่ใต้ฐานรองตอกและในตำแหน่งเหนือกระบอกผ่า จากผลการศึกษาพบว่าการแปรผันของพลังงานในการทดสอบเจาะทะลุหะลวงมาตรฐาน อย่างมากระหว่าง 36-82% โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 56% ภายใต้การทดสอบปกติ โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบเจาะทะลุหะลวงมาตรฐานคือปริมาณของพลังงานที่ส่งไปที่ก้านเจาะจากระบบดัมตอก อย่างไรก็ตามยังไม่เคยมีการวัดพลังงานของการทดสอบ SPT สำหรับการปฏิบัติในประเทศไทย ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค่าพลังงานในการทดสอบ SPT ของเครื่องมือและวิธีการทดสอบที่ใช้ในประเทศไทยโดยเน้นความสนใจไปที่ชนิดของดัมตอกแบบต่างๆ ดังนี้ ดัมตอกโดนัท, ดัมตอกเซฟตี้, และดัมตอกทริป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์สำคัญของโครงการวิจัยนี้คือ

- จัดทำรูปแบบฐานข้อมูลของการทดสอบเจาะทะลุหะลวงมาตรฐาน เช่น ชนิดของเครื่องมือ, การประกอบเครื่องมือ, และวิธีการปฏิบัติการทดสอบ
- ออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือต้นแบบที่ใช้วัดพลังงานในการทดสอบเจาะทะลุหะลวงมาตรฐานตามมาตรฐานที่มีอยู่
- ตรวจสอบพลังงานของการทดสอบเจาะทะลุหะลวงมาตรฐานจากดัมตอกโดนัท, เซฟตี้, และ ทริป กับบริษัทผู้ทดสอบหลายๆบริษัท
- เสนอค่าการปรับแก้ค่าพลังงานและความน่าเชื่อถือของการปรับแก้ค่าตามลักษณะเครื่องมือและวิธีการปฏิบัติการทดสอบ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้มีดังนี้

- พัฒนาเครื่องมือต้นแบบในการวัดพลังงาน SPT ให้สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM D4633-05 และ ISO 22476 – 3:2005
- การทดสอบ SPT ในภาคสนามจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงดินชั้นดินเหนียวแข็งและดินทรายเท่านั้น
- การทดสอบวัดพลังงาน SPT จะทดสอบทั้งหมด 5 ชั้นตามความลึกของหลุมทดสอบโดยการทดสอบวัดพลังงานจะเริ่มการทดสอบที่ระดับความลึกตั้งแต่ 10 เมตรขึ้นไป ซึ่งในการทดสอบนี้จะทดสอบภาคสนามกับบริษัทรับทดสอบ SPT

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้มีดังนี้

- การพัฒนาเครื่องมือต้นแบบในการวัดพลังงาน SPT
- ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อพลังงานจากเครื่องมือ SPT
- ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ $N - blow\ count$ ด้านพลังงาน (ER_p)
- แนะนำแนวทางในการทดสอบ SPT ให้ได้ค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- สามารถนำไปเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานสำหรับการทดสอบ SPT ได้ต่อไป

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม

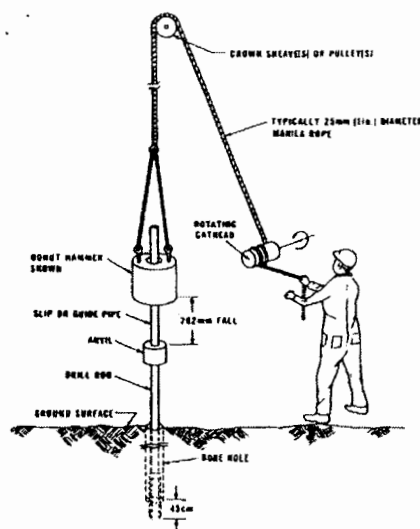
2.1 การทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน

การทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test) หรือเรียกย่อๆว่า SPT ถือกำเนิดขึ้นที่ประเทศสหรัฐอเมริกาจากข้อมูลการตอกเสาเข็มที่เมื่อตอกเสาเข็มลงไปดินแล้วมีการตอกยากก็สามารถสันนิษฐานได้ว่าเสาเข็มนั้นจะสามารถรับค่าน้ำหนักบรรทุกทุกสูงชันซึ่งจะควบคุมและตรวจสอบด้วยการวัดค่ายุบตัวหัวเสาเข็มต่อจำนวนครั้งถูกตัมตอก ต่อมาจึงมีการพัฒนาให้ใช้กระบอผ้า, ขนาดน้ำหนักตัมตอก, และวิธีการทดสอบที่เป็นเป็นมาตรฐานขึ้นซึ่งในที่นี้มาตรฐานการทดสอบที่ได้รับความนิยมอยู่ด้วยกัน 4 มาตรฐาน คือ ASTM D1586 Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils, BS 1377 Method of test for Soils for civil engineering purposes test: 19 Determination of the penetration resistance using the split – barrel sampler, ENV 1997 -3:1999 Eurocode 7 Geotechnical design Part 3: Design assisted by field testing Standard Penetration Test, และ ISO 22476-3:2005 Geotechnical investigation and testing – field testing Part 3 โดยในแต่ละมาตรฐานก็จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ วิธีเตรียมหลุมทดสอบตลอดจนไปถึงการทดสอบ

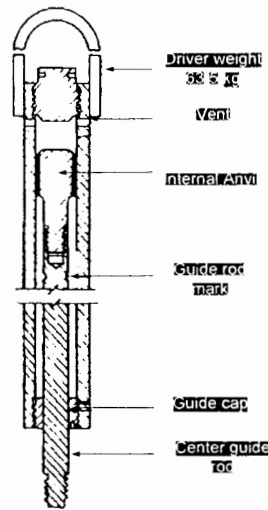
2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ SPT

SPT ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ (ดังแสดงในรูปที่ 2-1)

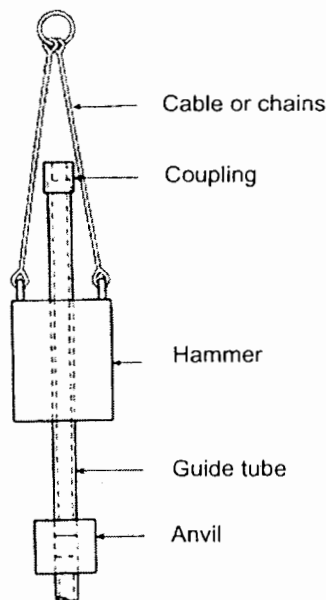
- ตัมตอก: น้ำหนัก 63.5 กิโลกรัม (140. 62 ปอนด์) สำหรับประเทศไทยที่นิยมใช้ใน ตัมตอกเซฟตี้ แสดงดังในรูปที่ 2-2 และ ตัมตอกโดนัท ดังแสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-1 การทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (Robertson *et al.*, 1992)



รูปที่ 2-2 ต้มตอกเซฟตี้ (Safety Hammer) (ASTM D6066, 1996)



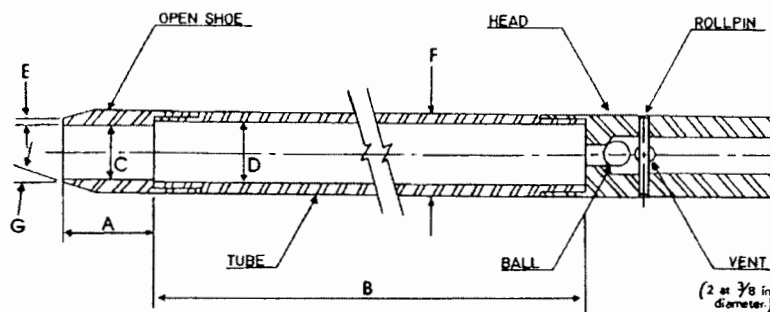
รูปที่ 2-3 ต้มตอกโดนัท (Donut Hammer) (สถาพร, 2544)

- ฐานรองตอก (anvil): เป็นอุปกรณ์ที่เป็นตัวรองรับการกระแทกของต้มตอกและส่งผ่านพลังงานไปยังก้านเจาะ ซึ่งที่นิยมใช้กันในประเทศไทย มีอยู่ 2 แบบ คือ
 - ชุดฐานรองตอกชนิดน็อคบล็อก (Knock Block) เป็นอุปกรณ์ง่ายๆขึ้นเดียวที่สามารถต่อเข้ากับก้านเจาะ ทำหน้าที่รองรับการกระแทกจากต้มตอก
 - ชุดฐานรองตอกชนิดไดรฟ์ไพพ์ (Drive Pipe Assembly) เหมาะกับการใช้งานหนัก (Heavy Duty) ประกอบด้วยท่อนำ ที่ส่วนกลางและส่วนบนมีเกลียวสำหรับต่อก้านเจาะทำด้วยท่อเหล็กหนา ทำให้มีน้ำหนักสูงเป็นภาระในการขนย้าย
- หัวควั่น (Cat head): เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการยกและปล่อยตัวของต้มตอกให้กระแทกกับฐานรองตอก

- ก้านเจาะ: มีลักษณะคล้ายกับหลอดหรือท่อเปลือกบางแต่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ซึ่งก้านเจาะจะมีความยาวมาตรฐาน ที่ 3.0 เมตร ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนกำลังสูง โดยสามารถแสดงชนิดก้านเจาะต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2-1
- ครอบงั่ว โดยครอบงั่วนี้จะแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วนซึ่งขนาดส่วนต่างๆแสดงไว้ในรูปที่ 2-4 โดยครอบงั่วนี้จะทำจากเหล็กที่แข็งแรง เพื่อทนต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้น
- ท่อเหล็กกันดิน (Casing) ทำหน้าที่ค้ำยันผนังของหลุมเจาะไม่ให้พังทลาย มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 75-100 มิลลิเมตรยาวท่อนละ 1.0 - 1.5 เมตร

ตารางที่ 2-1 ชนิดและขนาดต่างๆของก้านเจาะ (Archwey Engineering, 2008)

| Rod Type | Rod O.D. (mm) | Rod I.D. (mm) | Coupling I.D. (mm) | Threads (mm) |
|----------|---------------|---------------|--------------------|--------------|
| EW | 34.9 | 22.2 | 11.1 | 76 |
| AW | 44.4 | 31.7 | 15.9 | 76 |
| BW | 54 | 38 | 17.5 | 76 |
| NW | 66.7 | 50.8 | 35 | 76 |
| HW | 88.9 | 72 | 60.3 | 76 |
| 42 mm | 42 | 32.2 | 22 | 102 |
| 52 mm | 50 | 37 | 22 | 76 |



A = 25 to 50 mm B = 0.457 to 0.762 m C = 34.93 ± 0.13 mm D = 38.01 ± 1.3 mm
 E = 2.54 ± 0.25 mm F = 50.8 ± 1.3 mm G = 16" to 23"

รูปที่ 2-4 ภาพตัดแนวขวางของครอบงั่วตัวอย่าง (ASTM D1586, 1999)

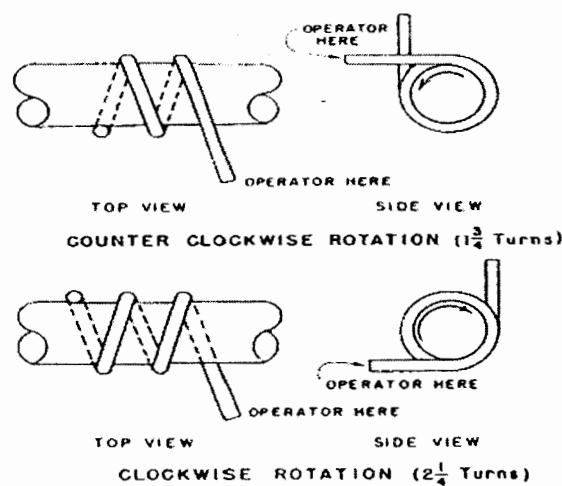
การตรวจเช็คอุปกรณ์ ก่อนที่จะทำการทดสอบ ครอบงั่วตัวอย่างและก้านเจาะจะต้องได้รับการตรวจสอบสภาพก่อนทุกครั้งและหลังจากการทำการทดสอบผ่านไปประมาณ 20 ครั้งและเครื่องมือในการวัดพลังงานจะต้องตรวจสอบทุกๆครั้งหรืออย่างน้อยทุกๆ 6 เดือนเพื่อให้มีความมั่นใจในการวัดค่าต่างๆในการทดสอบจะได้ไม่มีปัญหา

2.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ SPT

การทดสอบ SPT โดยทั่วไปแล้วมักจะทดสอบเมื่อเจาะลึกลงไปแล้ว 45 เซนติเมตร (1.5 ฟุต) หรือเมื่อมีสัญญาณบอกว่าได้เปลี่ยนเป็นชนิดของดินที่มีความแข็งเกินที่จะเก็บกับกระบอกบางได้ ขนาดภายในของหลุมเจาะต้องมีขนาดอยู่ระหว่าง 75-125 มิลลิเมตร (3-5 นิ้ว) ถ้าในระหว่างการเจาะบังเอิญเจอสิ่งกีดขวางให้ทำการเจาะผ่านให้ทะลุลงไปแต่ต้องทำการจดบันทึกหมายเหตุเอาไว้ด้วยว่าเจอที่ระยะเท่าไร

ท่อเหล็กกันดินจะเป็นอุปกรณ์ช่วยป้องกันการรบกวนภายในหลุมเจาะและจะช่วยให้การเจาะสามารถดำเนินการไปได้ดี ระดับของเหลวในการเจาะโดยใช้ของเหลวนั้นจะต้องควบคุมดูแลให้ระดับภายในหลุมเจาะอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินตลอดเวลา หัวสว่านเจาะ หัวเจาะแบบหางปลาจะเจาะได้ดีที่สุดในดินทราย แต่ถ้าเจอชั้นที่แข็งอาจจะต้องใช้หัวเจาะหินหรือหัวเจาะแบบดแรกแทน เมื่อเจาะจนถึงระดับที่ต้องการจะทดสอบ SPT ให้ค่อยๆดึงก้านเจาะขึ้นมาเพื่อเปลี่ยนหัวเจาะที่ใช้เป็นกระบอกเก็บตัวอย่างลงไปเพื่อจะทำการทดสอบ SPT โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- หลังจากเจาะเตรียมหลุมจนถึงระดับที่ต้องการที่จะทดสอบ SPT ให้ประกอบกระบอกเก็บตัวอย่างเข้ากับก้านเจาะแล้วขันให้แน่นหลังจากนั้นค่อยๆปล่อยลงสู่ก้นหลุมอย่างช้าๆ
- ประกอบฐานรองตอกเข้ากับก้านเจาะและวัดระยะที่ก้านเจาะพร้อมทำสัญลักษณ์ไว้ 3 ตำแหน่งตำแหน่งละ 15 ซม. (0.5 ฟุต) แล้วกระแทกตุ้มตอกกับฐานรองตอกที่ความสูง 76 ซม. (30 นิ้ว) โดยให้ตกลงไปอย่างอิสระที่สุด และในการยกตุ้มตอกนั้นจะใช้วิธีการพันเชือกกับหัวก้านซึ่งวิธีการพันเชือกจะมีอยู่สองลักษณะคือ อยู่ข้างล่างหัวก้าน ($2\frac{1}{4}$ รอบ)กับอยู่ข้างบนหัวก้าน ($1\frac{3}{4}$ รอบ) ตามรูปที่ 2-5
- เมื่อกระแทกจนหมดระยะ 45 ซม. (1.5 ฟุต) และระหว่างนั้นก็นับจำนวนครั้งที่กระแทก บันทึกค่า N ที่ได้จากการทดสอบ โดยในการบันทึกค่า N นั้น จะบันทึกค่าที่กระแทกในช่วง 30 ซม. (1 ฟุต) หลังเท่านั้น เพราะว่าในช่วง 15 ซม. (0.5 ฟุต) แรกนั้นค่า N ที่นับได้จะมีผลกระทบจากของเหลวที่ใช้เจาะทำให้ดินบริเวณช่วง 15 ซม. (0.5 ฟุต) แรกลดความแข็งแรงลง จึงไม่นำค่า N ในช่วงนี้มารวมด้วย



รูปที่ 2-5 ลักษณะการพันของเชือกเมื่อทำการทดสอบ SPT (ASTM D6066, 1996)

2.1.3 การรายงานผลการทดสอบ SPT

ในการทดสอบ SPT ต้องมีการรายงานผลการทดสอบดังนี้

- ชื่อและสถานที่เจาะสำรวจ
- ชื่อของผู้ทดสอบ
- วันเวลาที่เริ่มและเสร็จของการเจาะสำรวจ
- ระดับน้ำใต้ดิน
- ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นดิน
- ความยาวของตัวอย่างที่เจาะสำรวจ
- ความลึกของตัวอย่าง
- ความยาวของตัวอย่างที่เก็บได้
- จำนวนนับในการตอก (Blow count)

2.1.4 ข้อควรระมัดระวังในการทดสอบ SPT

ในการทดสอบ SPT มีข้อควรระวังดังนี้

- ระดับน้ำในหลุมเจาะ ต้องมีระดับใกล้เคียงกับระดับน้ำใต้ดินในธรรมชาติเพื่อให้น้ำหนักกดทับ ที่ก้นหลุมใกล้เคียงในสภาพเดิม
- ขนาดก้านเจาะ (Drill Rod) ที่ใช้ต้องไม่เล็กเกินไป (เส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 4.125 เซนติเมตร) มิฉะนั้นก้านเจาะอาจเกิดการโก่งงอในหลุมเจาะระหว่างการตอกลูกตุ้มน้ำหนัก
- จะต้องมีการเข้มงวดกับผู้ที่ตั้งเชือกทดสอบว่ามีการปล่อยตุ้มตอกด้วยก้านเชือกในลักษณะการปล่อยตกโดยอิสระ เพื่อไม่ให้ ค่า N สูงกว่าความเป็นจริง
- ถ้าตรวจสอบได้ว่าหลุมเจาะเกิดการถล่มก่อนการทดสอบ Standard Penetration Test จะต้องทำการล้างหลุมเจาะใหม่ให้ได้ความลึกที่ต้องการ เพราะถ้าไม่ล้างหลุมเจาะใหม่ จะทำให้ปลายกระบอกลูกตุ้มตั้งอยู่บนดินทรายที่ถล่มลงมาซึ่งปกติแล้วทรายที่ถล่มจะเป็นทรายที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าทรายเดิมในธรรมชาติ ที่ความลึกนั้นอาจส่งผลให้ค่าการทดสอบคลาดเคลื่อน
- หมั่นตรวจสอบสภาพของกระบอกลูกตุ้ม ว่าอยู่ในสภาพใช้งานได้ โดยสภาพการประกบตามแนวยาวของกระบอกลูกตุ้มต้องชิดสนิท ถ้ากระบอกลูกตุ้มไม่ประกบสนิทตามแนวยาวต้องซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใหม่

2.1.5 มาตรฐานต่างๆในการทดสอบ SPT

ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดในที่นี้เป็นการสรุปถึงใจความสำคัญของวิธีการทดสอบ SPT จากมาตรฐานต่างๆ และเพื่อที่จะความเข้าใจถึงความแตกต่างของแต่ละมาตรฐานจึงได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 รายละเอียดต่างๆของมาตรฐานการทดสอบ SPT

| มาตรฐาน | ASTM | BS | ENV | ISO |
|-----------------------|----------------------|-------------|-------------------|-------------------|
| | D1586 - 99 | 1377 : 1975 | 1997 - 3 : 1999 | 22476 - 3 :2005 |
| ตุ้มตอก (น้ำหนัก) | 63.4 ± 1 kg | 65 kg | 63.5 kg | 63.5 kg |
| ระยะยก ของตุ้มตอก | 0.76 m ± 25 mm | 0.76 m | 0.76 m ± 10 mm | 0.76 m ± 10 mm |
| ลักษณะ การพันเชือก | ตามเข็ม , ทวนเข็ม | ไม่ ระบุ | ไม่ ระบุ | ไม่ ระบุ |
| จำนวน รอบ | 2 ¼ , 1 ¾ | ไม่ ระบุ | ไม่ ระบุ | ไม่ ระบุ |
| กระบอกเก็บตัวอย่าง | | | | |
| ส่วนหัว (ยาว) | 25 - 50 mm | 76 mm | ≤ 75 mm | 25 - 75 mm |
| ส่วนกลาง (ยาว) | 457 - 762 mm | 457 mm | ≥ 450 mm | ≥ 450 mm |
| ส่วนท้าย (ยาว) | ไม่ ระบุ | 152 mm | ≥ 75 mm | ไม่ ระบุ |
| - ϕ_{in} | 38.1 ± 1.3 mm | 35 mm | 35 ± 1 mm | 35 ± 1 mm |
| - $\phi_{นอก}$ | 50.8 ± 1.3 mm | 50 mm | 51 ± 1 mm | 51 ± 1 mm |
| $N_{correct}$ | ไม่ ระบุ | ไม่ ระบุ | N_{60} | N_{60} |

2.2 การปรับแก้ผล SPT

การทดสอบ SPT เมื่อนำค่า N มาใช้ต้องมีการปรับแก้ค่าเหล่านั้นก่อนเนื่องจากค่าที่ได้มาจากการทดสอบนั้นยังมีความผิดพลาดอยู่ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ค่าจากการทดสอบมีความผิดพลาดมี 4 หัวข้อหลัก (ไม่รวมการปรับแก้ความดันกตทับ) คือ การปรับแก้ผลกระทบจากปริมาณพลังงาน การปรับแก้ผลกระทบจากความยาวก้านเจาะ การปรับแก้ผลกระทบจากกระบอกตัวอย่างและการปรับแก้ผลกระทบจากขนาดหลุมเจาะ แต่อย่างไรก็ตามหลังจากปรับแก้ผลกระทบต่างๆที่ได้กล่าวมาในที่นี่ ก็ต้องปรับแก้ค่า N ไปที่ 60 % ซึ่งสามารถแสดงการปรับแก้ N'_{60} คำนวณได้ดังสมการที่ (2-1)

$$N'_{60} = C_N (N_F)(\eta_1) (\eta_2) (\eta_3) (\eta_4) \quad (2-1)$$

- โดยที่ N_{60}' = ค่าจำนวนนับในการตอกที่ทำปรับแก้พลังงาน 60%
 C_N = ค่าปรับแก้เนื่องจากความดันกดทับ (Overburden pressure)
 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ = สัมประสิทธิ์ปรับแก้ผลกระทบต่างๆแสดงได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ (η) (Bowles, 1988)

| Hammer for η_1 | | | | | Remarks |
|----------------------------|-------------------------|-----------------|----------|-----------|-------------------------------------|
| Average energy ratio | | | | | |
| E_r | | | | | |
| Country | Donut | | Safety | | |
| | R - P | Trip | R - P | Trip/Auto | |
| US | | | | | R-P = Rope-pulley |
| /North America | 45 | - | 70-80 | 80- 100 | or cathead $\eta_1 = E_r/E_{rb}$ |
| Japan | 67 | 78 | - | - | For U.S. Trip/Auto |
| UK | - | - | 50 | 60 | w/ $E_r = 80$ |
| China | 50 | 60 | - | - | $\eta_1 = 80/60 = 1.14$ |
| Rod length η_2 | | | | | |
| | Length | > 10 m | η_2 | 1.00 | N is too high for L <10 m |
| | | 6 - 10 | | 0.95 | |
| | | 4 - 6 | | 0.85 | |
| | | 0 - 4 | | 0.75 | |
| | | | | | |
| Sampler η_3 | | | | | |
| | Without liner | | | 1.00 | Base value |
| | With liner | Denes sand clay | | 0.80 | N is too high with liner |
| | Loose sand | | | 0.90 | |
| Borehole diameter η_4 | | | | | |
| | \varnothing Hole (mm) | 60-120 | | 1.00 | oversize hole |
| | | 150 | | 1.05 | |
| | | 200 | | 1.15 | |

2.2.1 การปรับแก้ผลกระทบจากปริมาณพลังงาน

ในการปรับแก้ปริมาณพลังงานนั้นจะต้องมีการวัดพลังงานจากการทดสอบ SPT ก่อน ซึ่งในการวัดพลังงานของการทดสอบ SPT นั้น มีวิธีการทดสอบอยู่สองแบบ คือ คือ EF^2 และ EFV ซึ่งแต่เดิมนั้นจะมีการทดสอบแค่เพียง EF^2 เท่านั้นเนื่องจากสมัยก่อนนั้น วิธี EFV สามารถทำได้ยากจึงไม่ค่อยมีการทดสอบมากนัก แต่ปัจจุบันวิธี EFV ได้รับการพัฒนาให้มีการใช้งานที่ง่ายขึ้นโดยระบุไว้ในมาตรฐานการทดสอบวัดพลังงาน (ASTM D 4633-05) ให้เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบวัดพลังงานของการเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน

(a) Force Squared Method (EF^2)

Schmertmann and Palacios (1979) ค้นพบวิธี EF^2 ในปี 1977 โดยใช้หลักการในการรวมแรงเข้าด้วยกัน ซึ่งเขาใช้มาตรวัดความเครียดติดในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของก้านเจาะเพื่อวัดแรงที่ส่งถ่ายจากตุ้มตอกไปสู่ก้านเจาะ ซึ่งหลังจากศึกษาผลสรุปออกมาว่า สามารถหาพลังงานที่ส่งถ่ายจากตุ้มตอกไปสู่ก้านเจาะ โดยใช้สมการการคำนวณดังแสดงได้ในสมการที่ (2-2)

$$EF^2 = \frac{c}{AE} \int_0^{\Delta t} [F(t)]^2 dt \quad (2-2)$$

- โดยที่
- A = พื้นที่ของก้านเจาะ
 - C = ประมาณ 5120 m/s
 - E = โมดูลัสยืดหยุ่นของก้านเจาะ (modulus of elasticity)
 - EF^2 = ปริมาณพลังงานที่คำนวณได้จากการทดสอบ
 - F(t) = แรงในก้านเจาะ

การวัดพลังงานที่ส่งถ่ายจากตุ้มตอกไปสู่ก้านเจาะโดยวิธี EF^2 ได้มีการทดสอบเรื่อยมา โดยเริ่มตั้งแต่ปี 1980 ซึ่ง Kovacs (1982) ได้ทำการทดสอบการวัดพลังงานของ SPT โดยได้ใช้ตุ้มตอกเซฟตี้ และ โดนต์ ในการทำการวิจัยครั้งนี้รวมทั้งการหาความสัมพันธ์ของจำนวนรอบที่พันกับหัวขวานที่จะเหมาะสมกับการทดสอบ SPT มากที่สุดซึ่งผลจากงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปใจความสำคัญได้ว่า ตุ้มตอกเซฟตี้ จะมีประสิทธิภาพมากกว่าในการถ่ายทอดพลังงานจากตุ้มตอกไปสู่ก้านเจาะเนื่องมาจากสาเหตุที่ตุ้มตอกชนิดนี้มีการควบคุมระยะการตกกระทบได้แน่นอนกว่าต่างกับตุ้มตอกโดนต์ที่การควบคุมการตกกระทบขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ทดสอบ SPT เสียเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพของตุ้มตอกเซฟตี้ชนิดนี้ดีกว่าตุ้มตอกโดนต์ และ จำนวน 2 รอบ คือค่าแนะนำที่ดีที่สุดที่ในการพันเชือกกับหัวขวานเพราะมีการส่งถ่ายพลังงานได้ดีที่สุด

(b) Force Velocity Method (EFV)

Abou - matar and Goble (1997) ใช้แรงและความเร็วคำนวณค่าพลังงานที่ส่งถ่ายจากตุ้มตอกไปสู่ก้านเจาะ ซึ่งเขาใช้มาตรวัดความเครียด (Strain gage) และ เครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer) อย่างละ 2 ชุดติดที่ก้านเจาะเป็นอุปกรณ์วัดพลังงานและนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวณจากสมการที่ (2-3)

$$EFV = \int_0^{\max} F(t)v(t)dt \quad (2-3)$$

โดยที่ EFV = พลังงานที่เปลี่ยนแปลงของก้านเจาะ
 F(t) = แรงในก้านเจาะ
 Max = เวลาที่พิจารณาจากช่วงเวลา $2^L/c$
 V(t) = ความเร็วที่วัดได้ในก้านเจาะ

(c) การเปรียบเทียบระหว่างวิธี EF^2 กับวิธี EFV

Abou-matar and Goble (1997) ได้ศึกษาเรื่องการวัดและการวิเคราะห์ผลวัดของการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ทดลองในสนามเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยสมการคลื่นจากคอมพิวเตอร์ และการศึกษาในครั้งนี้ใช้สมการในการวัดพลังงานแบบ EF^2 และ EFV โดยหลังจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ ถ้าใช้การวัดพลังงานแบบ EF^2 ค่าที่ได้จะผิดพลาดประมาณ 10% แต่ถ้าใช้ระบบการวัดแบบ EFV ค่าที่ได้จะออกมาค่อนข้างดี

ต่อมา Farrar (1998) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับความการวัดพลังงาน SPT ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการรวบรวมวิธีการวัดพลังงาน SPT ทั้งสองวิธีก็คือ วิธี EF^2 และ EFV ซึ่งข้อมูลที่ได้แสดงในตารางที่ 2-4 โดยข้อมูลส่วนใหญ่ที่รวบรวมมานั้นส่วนใหญ่ได้มาจาก GRL(1993 - 1995), Jackson (1995) และ Lamb (1997) โดยเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาข้อแตกต่างของวิธีการวัดพลังงานทั้ง 2 จะเห็นได้ว่าข้อมูลของ GRL กับ Jackson นั้นมีความขัดแย้งกันอยู่ คือ ข้อมูลของ GRL จะสรุปได้ว่าถ้าวัดด้วยวิธี EF^2 จะได้ค่าสูงกว่าวิธี EFV เนื่องมาจากจุดต่อของก้านเจาะที่ต่อเกิดการหลวม ส่วนของ Jackson ค่าที่วัดด้วยวิธี EFV จะมีค่าสูงกว่าเนื่องมาจากความยาวของก้านเจาะและใช้ก้านเจาะแบบ AW

หลังจากนั้นไม่นาน Butler *et al.* (1998) ได้เปรียบเทียบการวัดพลังงานของ SPT โดยในเปรียบเทียบครั้งนี้ เป็นการเปรียบเทียบวิธีการวัดพลังงาน 2 วิธี คือ EF^2 และ EFV โดยข้อมูลได้ทำการรวบรวมมาจาก GRL เช่นกันโดยผลเปรียบเทียบครั้งนี้สรุปได้ว่า ค่าที่วัดพลังงานด้วยวิธี EF^2 จะมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดพลังงานด้วยวิธี EFV อยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และถ้าค่า N ที่มากกว่า 50 วิธีการวัดพลังงานด้วยวิธี EF^2 ไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางที่ 2-4 ข้อมูลการวัดพลังงาน SPT ด้วยวิธี EFV และ EF² (Farrar, 1998)

| Date | Series | Hammer | Rod | N | Avg | Avg |
|----------------------------------|---------------|---------------------------------|------|------------|-----|-----------------|
| /Author/Agency | | Type | Type | Blow count | EFV | EF ² |
| 1990/ CDOT – USBR | | CME Automatic | AW | | 86 | 86 |
| 1991 / Sy / UBC study | | Safety Hammer NW guide | AW | | 60 | 54 |
| 1992 / Frost / Diedrich Drill | | Diedrich Automatic | NWJ | 14 | 89 | 100 + * |
| 1992 / Frost / Diedrich Drill | | Diedrich Automatic | AW | 14 | 64 | 85 |
| 1993 / GRL / Texas A & M | | Safety Hammer | N | 48 | 50 | 51 |
| 1994 / GRL / ASCE Seattle | | BK – 81 Auto | AWJ | 59 | 66 | 67 |
| 1994 / GRL / ASCE Seattle | A - 2 | Safety Hammer | BW | 53 | 51 | 56 |
| 1994 / GRL / ASCE Seattle | A - 3 | CME Auto | AWJ | 51 | 81 | 81 |
| 1994 / GRL / ASCE Seattle | B - 3 | Safety Hammer Spooling Winch | NWJ | 45 | 23 | 21 |
| 1994 / GRL / ASCE Seattle | B - 6 | CME Auto | AWJ | 58 | 73 | 74 |
| 1995 / GRL / Oregon DOT | E - R9 -1 | Safety | AW | 21 | 82 | 61 |
| 1995 / GRL / Oregon DOT | B - R3 - 1 | Safety | BW | 37 | 61 | 61 |
| 1995 / GRL / Oregon DOT | A - R8 -1 | Safety | BW | 27 | 78 | 82 |
| 1995 / GRL / Oregon DOT | B - R3 - 2 | Safety | BW | 39 | 65 | 65 |
| 1995 / GRL / Oregon DOT | A - R7 - 1 | Safety Spooling Winch | BW | 27 | 48 | 54 |
| 1995 / Jackson / B.C. Hydro | | Safety | AW | | 67 | 58 |
| 1995/ Jackson / B.C. Hydro | | Unknown Automatic | AW | | 95 | 89 |

| | | | | | | |
|--------------|----------|--------|----|------|----|-----|
| 1995 / GRL | C - R5 - | Mobile | | 49 | 62 | 60 |
| / Oregon DOT | 1 | Auto | BW | | | |
| 1995 / GRL | D - R6 - | CME | | 58 | 82 | 95 |
| / Oregon DOT | 1 | Auto | BW | | | |
| 1995 / GRL | B - R4 - | CME | | 54 | 78 | 93 |
| / Oregon DOT | 1 | Auto | BW | | | |
| 1995 / GRL | A - R2 - | CME | | 56 | 78 | 118 |
| / Oregon DOT | 1 | Auto | BW | | | |
| 1995 / GRL | A - R1 - | CME | | 56 | 82 | 102 |
| / Oregon DOT | 1 | Auto | BW | | | |
| 1997 / Lamb | | CME | | > 58 | 66 | |
| / Minn. DOT | | Auto | N | | | |
| 1997 / Lamb | | CME | | 55 | 78 | |
| / Minn. DOT | | Auto | N | | | |

หมายเหตุ * area probably wrong

ซึ่งจากการศึกษาหลายๆครั้งที่ผ่านมาของผู้เชี่ยวชาญต่างๆที่ได้อ้างอิงถึง ทำให้เกิดมาตรฐานสำหรับการทดสอบการวัดพลังงาน SPT คือมาตรฐาน Standard Test Method for Dynamic Penetration (ASTM D 4633) และ Geotechnical investigation and testing – field testing Part 3 (ISO 22476 – 3) โดยทั้ง 2 มาตรฐานอธิบายถึงการวัดพลังงานในการทดสอบ SPT แบบวิธี EFV ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้การรวมแรงและความเร็วต่อเวลา โดยมาตรฐานทั้ง 2 ที่กล่าวข้างต้น จะอธิบายตั้งแต่อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพลังงานจนถึงวิธีปฏิบัติทดสอบการวัดพลังงาน

แต่อย่างไรก็ตามก็มีผู้เชี่ยวชาญหลายท่านได้ให้คำแนะนำให้ใช้ค่าปรับแก้ปริมาณพลังงาน ดังต่อไปนี้ โดยแสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ค่าการแนะนำสำหรับการปรับแก้ไปที่ปริมาณพลังงานต่างๆ (Bowles, 1988)

| ER _b | Reference |
|---------------------|-----------------------------------|
| 50 to 55 (use 55) | Schmertmann (1979) |
| 60 | Seed et al (1985) Skempton (1986) |
| 70 to 80 (use 70) | Riggs (1986) |

2.2.2 การปรับแก้ผลกระทบจากความยาวก้านเจาะ (Rod length)

Morgano and Liang (1992) ได้ศึกษาเรื่องผลกระทบจากความยาวของก้านเจาะต่อการส่งถ่ายพลังงานของการทดสอบ SPT โดยในการทดสอบจะเปลี่ยนแปลงความยาวของก้านเจาะ ดังนี้ 3 ,6,15,และ 30 เมตร ซึ่งเมื่อทำการทดลองพบว่าก้านเจาะที่มีความยาวมากกว่า 15 เมตร การเปลี่ยนแปลงพลังงานจะเป็น

อิสระไม่เพิ่มมากนัก แต่เมื่อกำเจาะที่ยาวน้อยกว่า 15 เมตร การเปลี่ยนแปลงพลังงานก็จะลดลง จนไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า การส่งถ่ายพลังงานของการทดสอบ SPT เมื่อขนาดของกำเจาะสั้นกว่า 15 เมตร จะมีแนวโน้มลดลง

ต่อมา Daniel *et al.* (2005) ได้ตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกำเจาะโดยได้รวบรวมงานวิจัยที่ได้เคยตรวจสอบผลกระทบของกำเจาะ ซึ่งผลของงานวิจัยต่าง ๆ นั้นแสดงได้ดังตารางที่ 2-6 และเขาได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกำเจาะด้วยเช่นกัน แต่งานวิจัยของเขาได้ใช้วิธีการวัดพลังงานแบบ EFV ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยเมื่อครั้งอดีตที่ส่วนใหญ่มักใช้วิธีการวัดพลังงานแบบ EF² โดยความยาวของกำเจาะที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้นั้นมีอยู่สองความยาวคือ 3.49 เมตร และ 6.49 เมตร ซึ่งสรุปได้ว่า ที่ความยาว 3.49 เมตรมีค่าปรับแก้จากขนาดความยาวของกำเจาะเท่ากับ 0.71 และที่ความยาว 6.49 มีค่าปรับแก้จากขนาดความยาวของกำเจาะเท่ากับ 0.97

ตารางที่ 2-6 สรุปค่าปรับแก้จากขนาดความยาวของกำเจาะจากงานวิจัยต่างๆ (Daniel *et al.*, 2005)

| Rod length correction factor | | | | | | |
|------------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|
| Rod length | Seed <i>et al</i> (1985) | Skempton (1986) | Morgano and Liang (1992) | Youd <i>et al</i> (2008) | ASTM (1986) ^a | ENV 1997-3 |
| >10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.98-1.00 | 1 |
| 6-10 | 1 | 0.95 | 0.96-0.99 | 0.95 | 0.89-0.98 | 0.95 |
| 4-6 | 1 | 0.85 | 0.9-0.96 | 0.85 | 0.76-0.89 | 0.85 |
| 3-4 | 1 | 0.75 | 0.86-0.90 | 0.8 | 0.69-0.76 | 0.75 |
| <3 | 0.75 | 0.75 | 0.86 | 0.75 | 0.69 | 0.75 |

2.2.3 การปรับแก้ผลกระทบจากความดันกดทับ (Overburden pressure)

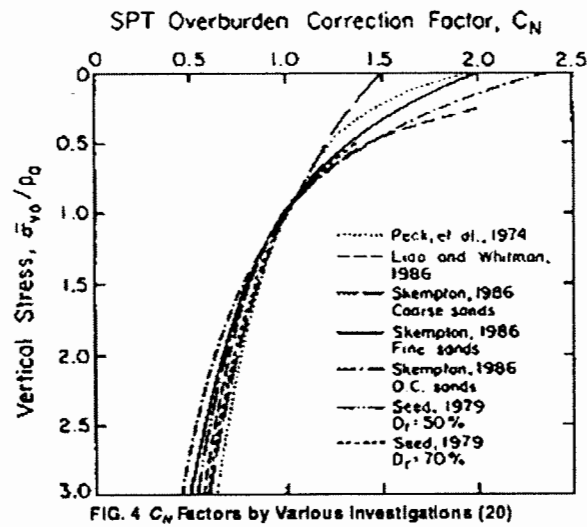
Skempton (1986) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องผลกระทบจากความดันกดทับทั้งในสนามและทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเขาพบว่าค่า N ที่ได้จากการทดสอบในสนามมีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง ดังนั้นต้องมีการปรับแก้ค่า N โดยสามารถปรับแก้ได้จากสมการต่อไปนี้

$$N_1 = C_N N \tag{2-4}$$

โดยที่ N_1 = ค่า N ที่ปรับแก้เนื่องจากความดันกดทับ (Overburden pressure)

C_N = ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากความดันกดทับ

ตัวปรับแก้ค่า C_N จะเป็นค่าปรับแก้เนื่องจากความดันกดทับซึ่งในรูปที่ 2-6 จะเป็นแนวความคิดเรื่อง ตัวปรับแก้ค่า C_N ที่ได้มีการทดสอบเมื่อครั้งในอดีตที่ผ่านมา



รูปที่ 2-6 ตัวปรับแก้ค่า C_N ที่ได้จากงานวิจัยต่างๆ (ASTM D6066)

Peck *et al.* (1974) นำเสนอค่า C_N โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-5)

$$C_N = 0.77 \log \left(\frac{20}{\sigma_v'} \right) \quad (2-5)$$

โดยที่ σ_v' มีหน่วยเป็น kN/m^2

Skempton (1986) ได้ค่า C_N มาจากการทดสอบ SPT ของทรายละเอียดและทรายหยาบซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-6) และ (2-7)

$$\text{สำหรับ ทรายละเอียด} \quad C_N = \frac{2}{1 + \sigma_v'} \quad (2-6)$$

$$\text{สำหรับ ทรายหยาบ} \quad C_N = \frac{3}{2 + \sigma_v'} \quad (2-7)$$

โดยที่ σ_v' มีหน่วยเป็น kN/m^2

Liao and Whitman (1986) ได้กำหนดค่าปรับแก้ C_N ตามสมการที่ (2-8) ดังต่อไปนี้

$$C_N = \left(\frac{95.76}{\sigma_v'} \right)^{0.5} \quad (2-8)$$

โดยที่ σ_v' มีหน่วยเป็น kN/m^2

ผลกระทบจากความดันกดทับ (Overburden pressure) จะเกิดขึ้นในดินทรายโดยจะมีการอ้างถึงดัชนีความหนาแน่นโดยจะมีการสร้างตัวแปร C_N ขึ้นมาเป็นตัวปรับแก้ค่าจากผลกระทบนี้ ซึ่งค่า C_N นั้นจะแสดงได้ดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 ค่าปรับแก้ C_N ที่เกิดผลกระทบจากแรงกดทับ (ENV – 3:199, 1997)

| Type of Sand | Density index I_d (%) | C_N |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Normally Consolidation | 40 to 60 | $\frac{2}{1 + \sigma_v'}$ |
| | 60 to 80 | $\frac{3}{2 + \sigma_v'}$ |
| Over Consolidation | | $\frac{1.7}{0.7 + \sigma_v'}$ |

(σ_v' , in kPa $\times 10^{-3}$)

2.2.4 การปรับแก้เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน

สำหรับดินที่มีขนาดละเอียดมากหรือดินทรายตะกอนที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน ค่าทะลุทะลวงมาตรฐานที่ได้จากการทดสอบต้องปรับแก้ โดยสามารถปรับแก้ได้จากสมการที่ (2-9)

$$N_{\text{corrected}} = 15 + 0.5(N_{\text{measured}} - 15) \quad (2-9)$$

2.3 การทดสอบวัดพลังงานจาก SPT

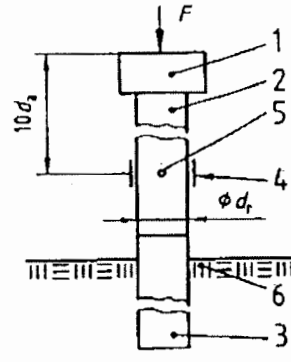
2.3.1 อุปกรณ์สำหรับการวัดพลังงาน (Apparatus for Measurement)

อุปกรณ์ชิ้นนี้จะเป็นส่วนของการวัดพลังงานซึ่งสามารถวัดได้ทั้งแรงและความเร่งแสดงดังรูปที่ 2-7 โดยจะทำมาจากเหล็กชนิดเดียวกันกับก้านเจาะซึ่งจะมีความยาวไม่น้อยกว่า 600 มม. ส่วนตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดนั้นจะต้องติดตั้งต่ำลงมาจากด้านบนสุดของอุปกรณ์ชิ้นดังกล่าวนี้ไม่น้อยกว่า 300 มม.

- อุปกรณ์สำหรับวัดแรง (Apparatus to Measure Force) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงที่เกิดขึ้นต่อระยะเวลาเพื่อวัดแรงเมื่อค้อนเกิดการกระทบ โดยจะใช้ foil strain gages อย่างน้อย 2 ตัว ต่อวงจรแบบ full bridge
- อุปกรณ์สำหรับวัดความเร่ง (Apparatus to Measure Acceleration) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเร่งที่เกิดขึ้นจากการทำการทดสอบ SPT โดยจะทำการติดบริเวณก้านเจาะ เพื่อวัดความเร่งต่อเวลาที่เกิดขึ้นกับก้านเจาะเวลาตัมตอกกระทบฐานรองตอก

Key

- 1 Anvil
- 2 Part of instrumented rod
- 3 Drive Rod
- 4 Strain gauge (measuring transducer)
- 5 Accelerometer
- 6 Ground
- F Force
- d_r Diameter of the rod



รูปที่ 2-7 อุปกรณ์ที่ใช้วัดพลังงานจากการทดสอบ SPT (ISO 22476 – 3, 2005)

2.3.2 อุปกรณ์สำหรับการวัด การจัดการ และการแสดงข้อมูล

โดยทั่วไปแล้ว การจัดการเกี่ยวกับการบันทึก แรงและความเร่งที่ส่งถ่ายเมื่อค้อนเกิดการกระทบกับฐานรองตอก จะสามารถกระทำได้ตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ระบบอนาล็อก (Analog Systems) ความถี่ของสัญญาณจะต้องซ้ำ อยู่ระหว่าง 2 kHz หรือไม่เกิน 5 kHz
- ระบบดิจิทัล (Digital Systems) ความถี่ของสัญญาณจะต้องซ้ำ อยู่ระหว่าง 5 kHz หรือไม่เกิน 25 kHz
- อุปกรณ์สำหรับบันทึกค่า จะเป็นอุปกรณ์ที่บันทึกสัญญาณที่ส่งถ่ายมา ต่อเวลา โดยที่เครื่องมือวัด (sensor) จะต้องมีความสามารถอย่างน้อยที่สุด 12 บิต และสัญญาณที่ส่งถ่ายมาจากตัววัดสัญญาณแต่ละตัวต้องอยู่ในช่วง 50 มิลลิวินาที
- อุปกรณ์สำหรับการจัดการ คือ ดิจิตอลคอมพิวเตอร์ ที่จะใช้วิเคราะห์ผลของข้อมูล โดยจะเป็นการรวมค่าแรงและความเร่งที่ได้มาจากการทดสอบ
- อุปกรณ์ในการแสดงข้อมูล เป็นอุปกรณ์ที่จะแสดงสัญญาณจาก แรงและความเร่งออกมาในรูปของกราฟฟิค

2.3.3 การเทียบสอบ (Calibration)

- อุปกรณ์สำหรับวัดแรง (Force transducer) ในการเทียบสอบอุปกรณ์วัดแรงจะต้องมีความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 2\%$ อุปกรณ์ต้องรับแรงอย่างน้อย 70 % ของแรงทั้งหมด การเทียบสอบเมื่อคำนวณค่าหน้าตัดประสิทธิภาพ (A_c) ค่าที่ได้จะต้องมากกว่า 5 % ของ ก้านเจาะเดิม โดยที่ $A_c = F/EE$ เมื่อ F คือแรงที่จากการวัด E โมดูลัสของเหล็กมีค่าเท่ากับ 20600 MPa E คือค่า ความเค้นที่วัดได้จากการเทียบสอบ
- อุปกรณ์สำหรับวัดความเร่ง (Acceleration transducer) การปรับแก้ต้องมีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับให้ได้ ต้องไม่เกิน $\pm 3\%$ การปรับแก้ทำได้โดยใช้ชอปกินบาร์ Hopkins in 's Bar
- ความถี่ในการปรับแก้ ต้องกระทำอย่างสม่ำเสมอหรือกระทำเป็นช่วงเวลาที่ เป็นข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต หรือทุกๆ 3 ปี เป็นอย่างน้อย

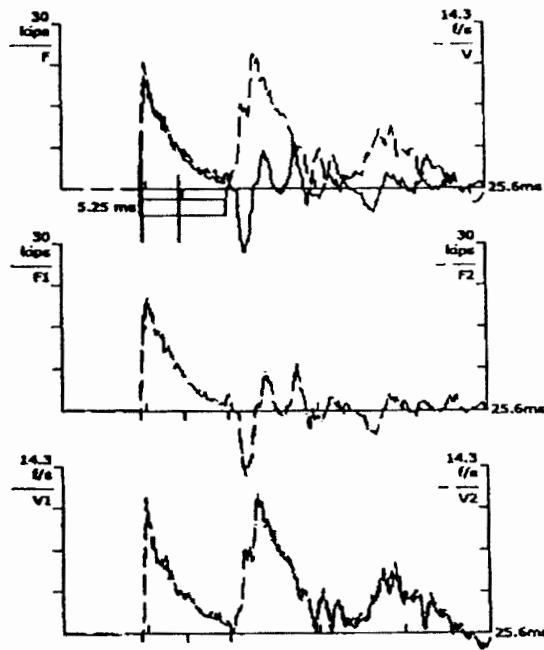
2.3.4 การปฏิบัติการ (Procedure)

- สังเกตการทดสอบการเจาะหยั่งทุกขั้นตอน บันทึกข้อมูลต่างๆรวมถึง ชนิดของก้านเจาะ ชนิดของค้อน จำนวนรอบของการพันเชือก ความสูงของการตกกระทบของตุ้มตอก และ ชนิดของเครื่องเจาะ เป็นต้น
- จดรายละเอียดของสถานที่ที่จะทำการทดสอบ ว่ามีปัญหาหรืออุปสรรคหรือไม่อย่างไร
- บันทึกข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆ เช่นก้านเจาะว่าเป็นชนิดไหน ขนาดหน้าตัดเท่าไร และรวมทั้งความยาวจาก อุปกรณ์วัดแรงไปยังจุดล่างสุดของการเจาะหยั่ง
- ติดชุดวัดแรงและความเร่งที่ด้านบนของก้านเจาะ
- ติดเครื่องมือวัด (sensor) ต่างๆเพื่อในการบันทึกค่า จัดการค่า รวมทั้งตรวจสอบค่าที่ทดสอบ และต้องแน่ใจว่าอุปกรณ์ทุกตัวอยู่ในสภาพใช้งานได้
- ในระหว่างการทดสอบผู้ทดสอบต้องตรวจสอบถึงคุณภาพของการบันทึกผลอยู่เสมอ
- สังเกตดูความสัมพันธ์ระหว่างแรง และ ความเร็วถ้าเป็นค่าที่มีคุณภาพดีจะต้องมีความคล้ายกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2-8
- วัดค่าน้อย 3 ระดับหรือถ้าให้ดีที่สุดต้องเป็น 5 ระดับ
- คำนวณปริมาณพลังงานจากสมการที่ (2-10)

$$ETR = \frac{EFV}{\text{input energy, } E_{in}} \quad (2-10)$$

- โดยที่
- EFV = ปริมาณพลังงานจากการทดสอบวัดพลังงาน (J)
 - E_{in} = input energy = Wgh (475 J)
 - W = น้ำหนักของตุ้มตอก (kg)
 - g = แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
 - h = ความสูงของการยกตุ้มตอก (m)

การวัดพลังงานจากการทดสอบ SPT ที่กล่าวมาทั้งหมด 2 มาตรฐานนั้นอาจยังไม่เข้าใจถึงความแตกต่างอยู่บ้างจึงทำการสรุปเพื่อให้เข้าใจได้ดีขึ้น ดังตารางที่ 2-8



รูปที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และ ความเร็ว ต่อ เวลา จากการทดสอบ SPT (ASTM D4633, 2005)

ตารางที่ 2-8 รายละเอียดต่างๆของมาตรฐานการวัดพลังงาน SPT

| มาตรฐาน | ASTM D 4633 (2005) | ISO 22476 – 3 (2005) |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Apparatus for measurement | | |
| ความยาว | ไม่น้อยกว่า 600 mm | ไม่ระบุ |
| ขนาด | ขนาดเดียวกับก้านเจาะ | ไม่ระบุ |
| ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ | ไม่น้อยกว่า 300 mm | 10 d _s |
| จำนวนความลึกที่วัด | ไม่น้อยกว่า 3 ความลึก | ไม่น้อยกว่า 5 ความลึก |
| Apparatus to measurement Force | | |
| Strain gauge | | |
| จำนวน | 4 ตัว | ไม่ระบุ |
| วงจร | Full bridge | ไม่ระบุ |
| การ Calibration | accuracy with in ± 2% | ไม่ระบุ |
| Apparatus to measurement Acceleration | | |
| Accelerometer | | |

| | | |
|-----------------|----------------------------|---------------|
| จำนวน | อย่างน้อย 2 ตัว | ไม่ระบุ |
| การตอบสนอง | ไม่น้อยกว่า 10000 g | 5000 g ขึ้นไป |
| การ Calibration | accuracy with in $\pm 3\%$ | ไม่ระบุ |

2.4 การใช้ค่าจำนวนครั้งของการตอกทะลุทะลวงมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของดิน
 ค่าจำนวนนับในการตอก(N- Blow count) ถูกนำมาใช้ในการหาค่าคุณสมบัติต่างๆของดินเสมอ ซึ่ง
 คุณสมบัติต่างๆที่สามารถใช้ค่าทะลุทะลวงมาตรฐานหาได้นั้น จะประกอบด้วย การจำแนกประเภทดิน การหาค่า
 กำลังรับแรงเฉือนแบบ Undrained ของดินเหนียว การหาค่าความแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย การหาค่ามุม
 เสียดทานของดินทราย และโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทราย

2.4.1 การจำแนกประเภทของดิน

การจำแนกประเภทของดินเหนียวหรือดินทราย โดยใช้ค่าจำนวนครั้งของการตอกทะลุทะลวงมาตรฐาน
 แบ่งชั้นดินออกเป็นชั้นต่างๆ แสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2-9 และ 2-10

ตารางที่ 2-9 การจำแนกความแข็งของดินเหนียว (Terzaghi and Peck, 1948)

| การจำแนก | ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Undrained (t/m^2) | ค่า SPT N, ครั้ง/ฟุต |
|---------------------------------------|---|-------------------------|
| ดินเหนียวอ่อนมาก (Very Soft Clay) | 0 - 1.25 | 0 - 2 |
| ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) | 1.25 - 2.50 | 2 - 4 |
| ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) | 2.50 - 5.00 | 4 - 8 |
| ดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) | 5.00 - 10.00 | 8- 15 |
| ดินเหนียวแข็งมาก (Very Stiff Clay) | 10.00 - 20.00 | 15 -30 |
| ดินดานแข็งมาก (Hard Clay) | มากกว่า 20.00 | มากกว่า 30 |

ตารางที่ 2-10 การจำแนกความแน่นของดินทราย (Terzaghi and Peck, 1948)

| การจำแนก | ค่า SPT N, ครั้ง/ฟุต |
|--------------------------------|----------------------|
| ทรายหลวมมาก (Very Loose) | 0 - 4 |
| ทรายหลวม (Loose) | 4- 10 |
| ทรายแน่นปานกลาง (Medium Dense) | 10 - 30 |
| ทรายแน่น (Dense) | 30 - 50 |
| ทรายแน่นมาก (Very Dense) | มากกว่า 50 |

2.4.2 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว

Terzaghi and Peck (1948) แนะนำการหาค่ากำลังของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength S_u) โดยใช้ค่า N ที่ทดสอบได้จากการทดสอบเจาะทะลุหูลงมาตรฐาน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-11)

$$S_u = N/14.71 \text{ (kN / m}^2\text{)} \quad (2-11)$$

วีระนันท์ (2526) แนะนำความสัมพันธ์ระหว่างค่า S_u กับ ค่า N ของดินเหนียวแข็งชั้นแรกของกรุงเทพฯ โดยความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการที่ (2-12) และ (2-13)

$$\text{สำหรับดินเหนียวชนิด CH} \quad S_u = 6.72N \text{ (kN / m}^2\text{)} \quad (2-12)$$

$$\text{สำหรับดินเหนียวชนิด CL} \quad S_u = 5.10N \text{ (kN / m}^2\text{)} \quad (2-13)$$

2.4.3 การหาค่าความแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย

Meyerhof (1957) แนะนำการหาค่าความแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ทรายแบบ NC และ ทรายแบบ OC ซึ่งค่าความแน่นสัมพัทธ์ หาได้จากสมการ (2-14) และ (2-15)

$$\text{สำหรับทรายแบบ NC} \quad D_r(\%) = \sqrt{\frac{N'_{70}}{32 + 0.288\sigma'_v}} \times 100 \quad (2-14)$$

$$\text{สำหรับทรายแบบ OC} \quad D_r(\%) = \sqrt{\frac{N'_{70}}{32 + 0.288C_{\infty}\sigma'_v}} \times 100 \quad (2-15)$$

โดยที่ $D_r(\%) =$ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์

$\sigma'_v =$ Effective vertical stress kN/m^2

Kulhawy and Mayne (1990) เสนอการหาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์จากค่า N โดยใช้สมการที่ (2-16)

$$D_r = \sqrt{\frac{N'_{\omega}}{C_p C_A C_{\alpha R}}} \quad (2-16)$$

โดยที่ $D_r =$ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์

$C_p = 60 + 25\log D_{50}$

$$C_A = 1.2 + 0.05 \log(t/100)$$

$$C_{OCR} = OCR^{0.18}$$

2.4.4 การหาค่ามุมต้านทานของดินทราย

Terzaghi and Peck (1948) แนะนำการหาค่ามุมเสียดทานภายในจากค่า $(N_1)_{60}$ ดังสมการที่ (2-17)

$$\phi' = 27.1 + 0.3(N_1)_{60} - 0.00054(N_1)_{60}^2 \quad (2-17)$$

Meyerhof (1959) นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายในกับค่า N ดังสมการที่ (2-18)

และ (2-19)

$$\phi' = 28 + 0.15 Dr(\%) \quad (2-18)$$

$$\phi' = 25 + 28 \sqrt{\left(\frac{N_{55}}{\sigma'_v}\right)} \quad (2-19)$$

โดยที่ ϕ = มุมต้านทานของดินทราย

σ'_v = หน่วย kN/m^2

Peck *et al.* (1974) แนะนำวิธีสำหรับหาค่ามุมต้านทานของดินทรายโดยใช้ค่า N ซึ่งความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการที่ (2-20)

$$\phi = 27.1 + 0.3N_{cor} - 0.00054N_{cor}^2 \quad (2-20)$$

Schmertmann (1975) แนะนำวิธีสำหรับหาค่ามุมต้านทานของดินทรายโดยแสดงได้ดังสมการที่ (2-21)

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{N}{12.2 + 20.3 \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_{v0}} \right)} \right] \quad (2-21)$$

โดยที่ σ_{v0} = ประมาณ 100 kN/m^2

2.4.5 การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทราย

Kulhawy and Mayne (1990) แนะนำวิธีหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทรายโดยการแบ่งดินทรายออกเป็น 3 ชนิด คือ ทรายละเอียด ทราย NC และ ทราย OC ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-22) ถึง (2-24)

$$\text{ทรายละเอียด} \quad E = 50 \sigma_{v0} N'_{60} \quad (2-22)$$

$$\text{ทราย NC} \quad E = 10 \sigma_{v0} N'_{60} \quad (2-23)$$

$$\text{ทราย OC} \quad E = 15 \sigma_{v0} N'_{60} \quad (2-24)$$

โดยที่ E = โมดูลัสยืดหยุ่น

σ_{v0} = 100 kN/m^2

ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ชนิดของตุ้มตอกและความสูงของตุ้มตอกที่ตกกระทบ

Kovacs (1982) ได้ศึกษาเรื่องความสูงที่ตกกระทบของตุ้มตอก โดยวิธีการทำเครื่องหมายเป็นแถบสีขาวและสีดำไว้รอบๆตุ้มตอกและติดเครื่องมือวัดไว้ 2 ตำแหน่งที่ด้านข้างของการทดสอบซึ่งเครื่องมือวัดที่ติดไว้นั้นจะห่างกันอยู่ที่ระยะ 76 เซนติเมตร(30 นิ้ว) เมื่อเริ่มการทดสอบเซ็นเซอร์ที่ติดไว้จะทำงานร่วมกับเครื่องหมายที่ตุ้มตอก ดังนั้นจึงทำให้สามารถรู้ถึงความสูงของตุ้มตอกมีระยะเท่าไร และการทดสอบในครั้งนี้จะใช้วิธีการวัดพลังงานแบบ EF^2

Drumright *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาเรื่องชนิดของตุ้มตอกทดสอบ ต่อพลังงานประสิทธิผลของ SPT โดยในการศึกษาครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างตุ้มตอกเซฟตี้ และแบบออโตเมติก ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ตุ้มตอกแบบออโตเมติกมีประสิทธิภาพในการส่งถ่ายพลังงานดีกว่าตุ้มตอกแบบเซฟตี้

Tsai *et al* (2004) ได้ทำการศึกษาเรื่องผลกระทบจากชนิดของตุ้มตอก SPT แบบต่างๆโดยในการศึกษาเขาใช้คอน 4 รูปแบบคือจะประกอบด้วยโดนัท 3 รูปแบบและอีกหนึ่งเซฟตี้ ซึ่งมีวิธีการศึกษาโดยการติด Force Transducer บนแท่นรองตอก และติด Load cell กับก้านเจาะเพื่อวัดการส่งถ่ายพลังงานระหว่างตุ้มตอกกับก้านเจาะ แต่ผลปรากฏว่าผลกระทบจากตุ้มตอกทั้ง 4 แบบมีผลกระทบน้อยมาก ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความใกล้เคียงกัน

Youd *et al* (2008) ได้ทำการศึกษาเรื่องพลังงาน SPT ต่อความสูงของตุ้มตอกที่ตกกระทบ โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีวัดพลังงานแบบEFV และแปรผันความสูงของระยะกระทบดังนี้ 58 63 71 และ 76 เซนติเมตร(23 25 28 และ 30 นิ้ว)ซึ่งจากผลการทดสอบนั้นให้ผลออกมาดังนี้คือ ที่ระยะตกกระทบที่ 23 นิ้ว จะให้ค่าสัดส่วนของพลังงานเท่ากับ 43%, ที่ระยะตกกระทบ 25 นิ้ว จะให้ค่าสัดส่วนของพลังงานเท่ากับ 60% ที่ระยะตกกระทบ 71 เซนติเมตร(28 นิ้ว) จะให้ค่าพลังงานเท่ากับ 84% และที่ระยะตกกระทบ 76 เซนติเมตร (30 นิ้ว) จะให้ค่าพลังงานเท่ากับ 89%

2.5.2 การใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณในการวัดพลังงานการทดสอบ SPT

ในช่วงปี 1990 การใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัยอัลเบอร์ตา ที่โครงการเขื่อนเทลลิ่งในประเทศจีน โดยในการวัดพลังงานครั้งนี้ใช้วิธีการวัดพลังงานแบบ EF^2 แต่ก็สามารถที่จะใช้วิธี EFV ได้เช่นกันถ้ามีการพัฒนาต่อไป

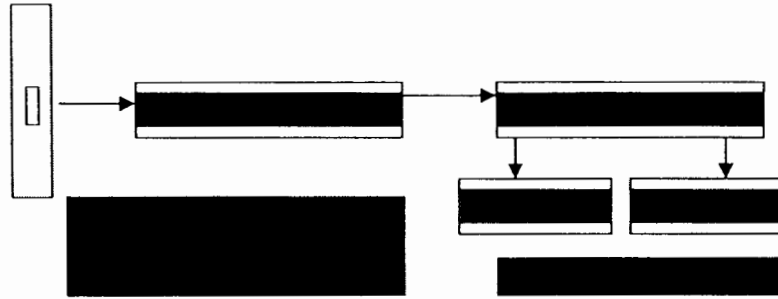
ต่อมา Robertson *et al.* (1992) ได้นำคอมพิวเตอร์มาเป็นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณเช่นกันในงานวิจัย โดยระบบการวัดพลังงานนั้นสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2-9 ซึ่งอุปกรณ์วัดพลังจะประกอบด้วยเครื่องมือดังนี้คือ ก้านเจาะชนิด AW ยาว 0.5 เมตร มาตรวัดความเครียด จำนวน 8 ตัว กล้องควบคุมสัญญาณ (Trigger Control) และ คอมพิวเตอร์ ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ได้ทำขึ้นในประเทศจีนโดยเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเกี่ยวกับความมั่นคงแข็งแรงของเขื่อนเทลลิ่งเนื่องจากแผ่นดินไหว และหลังจากการทดสอบผลก็ออกมาว่าค่าพลังงานที่วัดมาได้มีผลเป็นที่น่าพอใจที่จะใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดพลังงานของการทดสอบ SPT

๒๓๑.๕

ส.ศ.ค.

๒.๕

354939

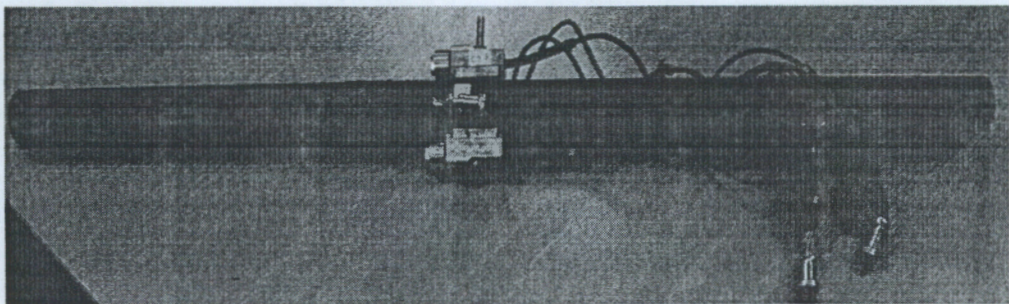


รูปที่ 2-9 ระบบการวัดพลังงานโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Robertson *et al.*, 1992)

บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง, แผนการทดลอง, และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

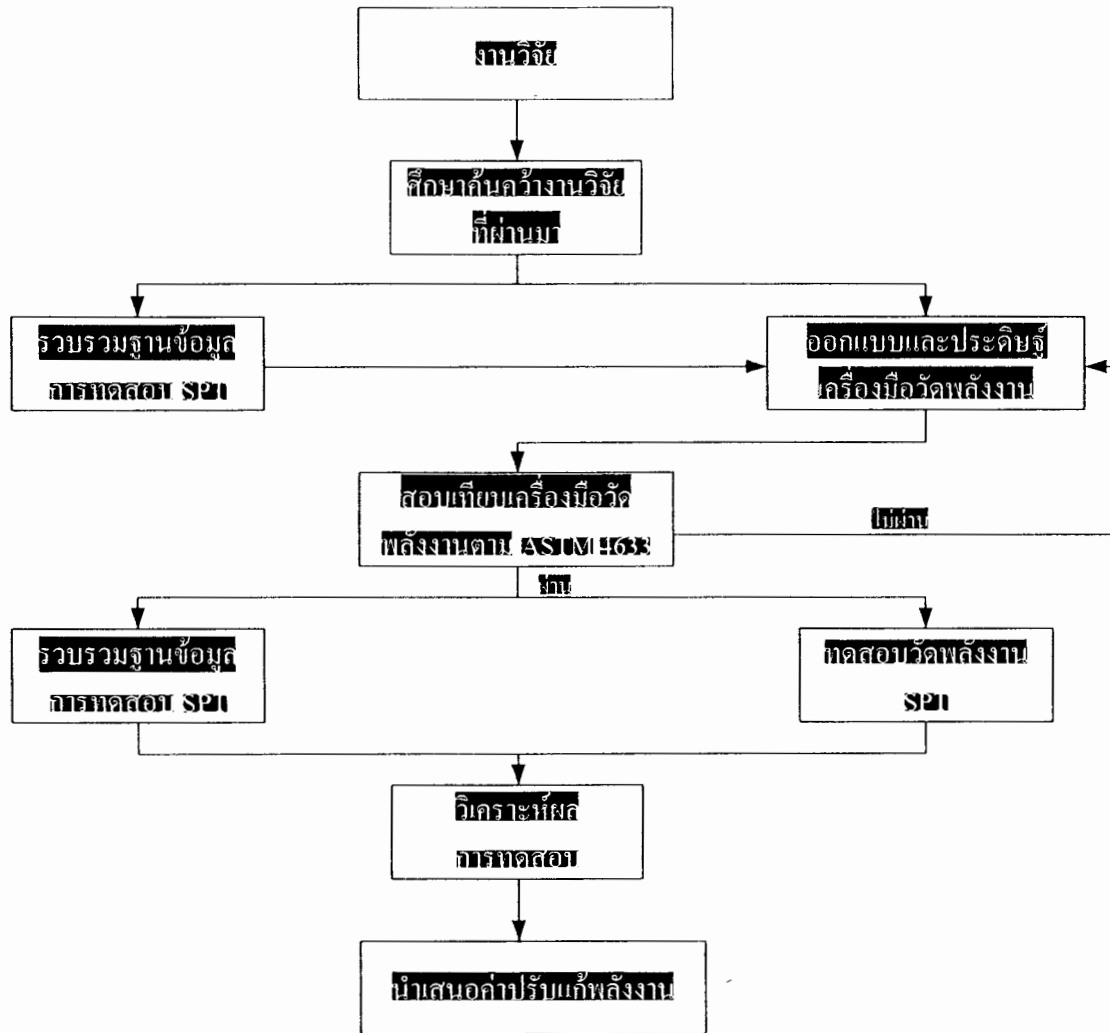
- ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ SPT ตามมาตรฐาน การทดสอบ ASTM D1586 (1999)
- ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพลังงาน ตามมาตรฐาน การทดสอบ ASTM D4633 (2005) ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ (แสดงได้ดังรูปที่ 3-1)
 - ก้านเจาะชนิด AW ยาว 0.83 เมตร
 - โหลดเซล จำนวน 2 ชุด (Load cell 1 ชุดทำจาก Strain gage 350Ω แบบ Biaxial จำนวน 2 ตัว ต่อวงจรแบบ full bridge) และ Accelerometers ชนิด 20000 g จำนวน 2 ชุด
 - อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ DAQ ,NI USB – 6009 และกล่องขยายสัญญาณ
 - คอมพิวเตอร์และโปรแกรม Lab View
 - แบตเตอรี่ 12 volt จำนวน 1 ก้อน



รูปที่ 3-1 ชุดเครื่องมือวัดพลังงาน ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4633 (2005)

3.2 แผนการทดลอง

แนวทางในการดำเนินงานวิจัยศึกษาการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน ในด้านพลังงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-2



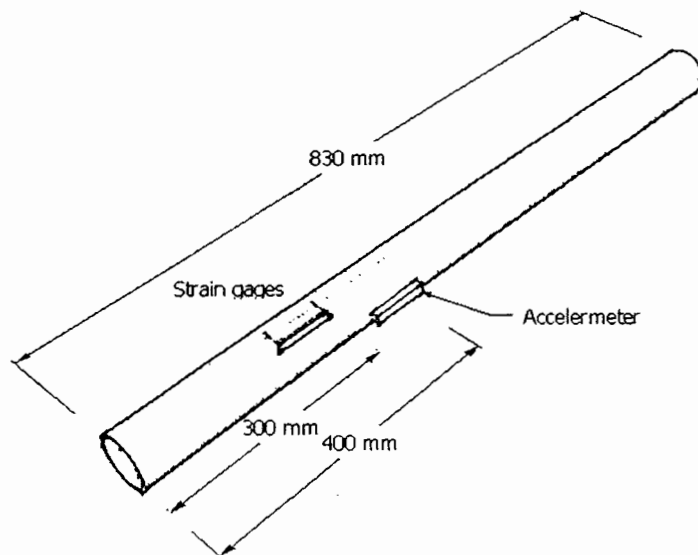
รูปที่ 3-2 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

3.3 วิธีการทดสอบ

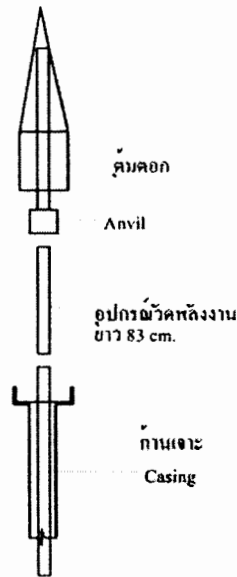
- ทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวัดพลังงาน SPT เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัย
- ทำการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบ SPT ประเภทต่างๆ เช่น ชนิดของเครื่องมือ วิธีการทดสอบ และวิธีการในการประกอบเครื่องมือในการทดสอบ SPT จากบริษัทต่างๆที่รับทดสอบเจาะสำรวจ SPT
- ออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้วัดพลังงาน SPT โดยใช้แนวทางจากงานวิจัยที่ผ่านมาและมาตรฐานทดสอบวัดพลังงานมาประยุกต์ให้มีความสอดคล้องกับการทำงานในปัจจุบันรวมทั้งให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์วัดพลังงานและลักษณะรูปร่างของอุปกรณ์วัดพลังงานแสดงได้ดังตารางที่ 3-1 และรูปที่ 3-3
- สอบเทียบโพลดเซลตามมาตรฐาน ASTM 4633 (2005) โดยมาตรฐานจะกำหนดว่าในการสอบเทียบโพลดเซลนั้นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข 2 ข้อ คือ โพลดเซลต้องสามารถวัดแรงได้อย่างน้อย 70% ของแรงทั้งหมด และพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์วัดพลังงานที่ได้จากการคำนวณจะต้องมีความแตกต่างไม่เกิน 5% กับ

พื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์วัดพลังงานที่ได้จากการวัด ซึ่งในการสอบเทียบทำโดยใช้เครื่อง UTM กดและดึง ก้านเจาะพร้อมทั้งวัดโวลต์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามโหลด ที่เพิ่มขึ้น-ลดลง จำนวน 3 รอบการทดสอบ (กำหนดให้แรงดึงเท่ากับ 150 kN, แรงอัดเท่ากับ 100 kN)

- ทดสอบเครื่องมือวัดพลังงานในห้องปฏิบัติการโดยจำลองวิธีการให้เหมือนการทดสอบจริงในสนาม ซึ่งภาพการประกอบอุปกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3-4 ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจและปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆเพื่อให้เครื่องมือวัดพลังงานมีความแม่นยำและมีค่าถูกต้องพร้อมที่จะใช้งานในภาคสนามต่อไป
- ทดสอบภาคสนามเพื่อวัดพลังงานการทดสอบ SPT ที่ส่งถ่ายจากการกระแทกของตุ้มตอกลงไปสู่ก้านเจาะกับบริษัทที่ได้ทำการรวบรวมฐานข้อมูลการทดสอบ SPTไว้ข้างต้นโดยการทดสอบวัดพลังงานจะทดสอบอย่างน้อย 5 ชั้นความลึกของหลุมเจาะและต้องอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งและดินทรายเท่านั้น ส่วนสถานที่ทดสอบจะต้องอยู่ในกรุงเทพฯและปริมณฑลเพื่อให้อยู่ในขอบเขตของดินเหนียวกรุงเทพฯ
- คำนวณพลังงานจากการทดสอบในภาคสนาม โดยใช้วิธีการอินทิเกรตแรงและความเร็วซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา(EFV), ปริมาณพลังงานประสิทธิผล(ETR) และศึกษาลักษณะความแปรปรวนของพลังงานการทดสอบ SPT
- สรุปผลการทดสอบพร้อมทั้งนำเสนอมาตรฐานการปรับแก้ต่างๆ นี้
 - ค่าปริมาณพลังงานประสิทธิผล(ER_i) เนื่องจากลักษณะต่างๆการทดสอบ SPT อาทิ ลักษณะของตุ้มตอ(โดนัท เซฟตี้ และ ทริป) และ ลักษณะตำแหน่งของปลายเชือก (ด้านบนหัวก้าน ด้านล่างหัวก้าน)
 - ค่าความแปรปรวนจากการทดสอบวัดพลังงาน SPT เพื่อความมั่นใจในการนำค่าที่ได้ไปใช้งาน
 - เปรียบเทียบปริมาณพลังงานประสิทธิผลจากการทดสอบ SPT สำหรับประเทศไทยกับมาตรฐานทดสอบวัดพลังงานของต่างประเทศ



รูปที่ 3-3 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดพลังงาน



รูปที่ 3-4 การประกอบอุปกรณ์วัดพลังงาน

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์วัดพลังงาน

| รายละเอียด | เอกสารเผยแพร่ ของบริษัท | | มาตรฐานทดสอบ วัดพลังงาน | | อุปกรณ์วัด พลังงาน |
|----------------|----------------------------|------------------|----------------------------|-------------------|---------------------------------|
| | Test consult | Pile dynamic | ASTM D 4633 | ISO 22476 - 3 | |
| ความยาว | 1000 mm | 600 mm | ไม่น้อยกว่า 600 mm | ไม่ ระบุ | 830 mm |
| ขนาด | 54 มม. (OD) | AW , NW | ขนาดเดียว กับก้านเจาะ | ไม่ ระบุ | AW, 44.3- mm (OD) |
| Stain gauge | | | | | |
| จำนวน | 2 ชุด | 2 ชุด (350 Ω) | 2 ชุด | ไม่ ระบุ | 2 ชุด (350 Ω) ชุดละ 4 ตัว |
| วงจร | Full bridge | Full bridge | Full bridge | ไม่ ระบุ | Full bridge |
| ตำแหน่งติดตั้ง | ไม่ | ไม่ | ไม่น้อย | 10 d _a | 300 |

| | | | | | |
|-------------------|---------|-----------|------------------|---------|-----------|
| | ระบุ | ระบุ | กว่า 300 mm | | mm |
| Accelerometer | | | | | |
| จำนวน | 2 | 2 ชุด | ไม่น้อย | 5000 g | 2 ชุด |
| | ชุด | (10000 g) | กว่า 10000 g | ขึ้นไป | (10000 g) |
| ตำแหน่งติดตั้ง | ไม่ | ไม่ | ห่าง Strain gage | ไม่ | 400 |
| | ระบุ | ระบุ | 100 mm | ระบุ | mm |
| Sampling rate | ไม่ระบุ | ไม่ระบุ | 10000Hz | ไม่ระบุ | 10000 Hz |
| Sampling Duration | ไม่ | ไม่ระบุ | 50 | ไม่ | 50 |
| | ระบุ | | ms | ระบุ | ms |

บทที่ 4 การประดิษฐ์อุปกรณ์วัดพลังงาน

4.1 การรวบรวมลักษณะการทดสอบเจาะทะลุหะลวงมาตรฐาน

จากการรวบรวมข้อมูลการทดสอบ SPT ในภาคสนามทางด้านชนิดของเครื่องมือ, การ Set-up เครื่องมือ, และวิธีการปฏิบัติการทดสอบจากบริษัทต่างๆที่รับทดสอบ SPT ทำให้สามารถจำแนกลักษณะการทดสอบ SPT ได้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลการทดสอบ SPT ในภาคสนาม

| บริษัท | SPTGeo | Ten | GTC | Geo Physis | | JLP | Sercon | STS | |
|---------------|--------|-------|----------|------------|--------|------|---------|-------|--------|
| ชนิด | | | | | | | | | |
| เครื่อง | สาม | แท่น | | | แท่น | แท่น | สาม | แท่น | |
| เจาะ | ขา | เจาะ | แท่นเจาะ | | เจาะ | เจาะ | ขา | เจาะ | |
| จำนวน | 1 | 2 | 2 | | 2 | 2 | 1 | 2 | |
| รอก | ตัว | ตัว | ตัว | | ตัว | ตัว | ตัว | ตัว | |
| ตุ้มตอก | | | | | | | | | |
| ชนิด | โดนัท | โดนัท | โดนัท | โดนัท | เซฟตี้ | ทริบ | โดนัท | โดนัท | เซฟตี้ |
| ∅ | | | | | | | | | |
| (ม.) | 0.15 | 0.16 | 0.19 | 0.19 | 0.12 | 0.2 | 0.2 | 0.22 | 0.12 |
| สูง | | | | | | | | | |
| (ม.) | 0.44 | 0.43 | 0.31 | 0.41 | 1.15 | 0.9 | 0.11 | 0.22 | 0.98 |
| น้ำหนัก | | | | | | | | | |
| (กก.) | 63.5 | 63.5 | 63.5 | | 63.5 | | 63.5 | 63.5 | 63.5 |
| ระยะยก | | | | | | | | | |
| (ม.) | 76 | 76 | 76 | | 76 | | 76 | 76 | 76 |
| ฐาน | Knock | Knock | Knock | Knock | | | Knock | Knock | |
| ตอก | Block | Block | Block | Block | - | - | Block | Block | - |
| ∅ (ม.) | 0.13 | 0.10 | 0.13 | 0.10 | - | - | 0.11 | 0.10 | - |
| หัวกว้าน | | | | | | | | | |
| ∅ (ม.) | 0.14 | 0.13 | 0.12 | | 0.15 | | 0.14 | 0.12 | 0.15 |
| ทิศทางการหมุน | ทวน | ทวน | ทวน | | ทวน | | | ตาม | ทวน |
| | เข็ม | เข็ม | เข็ม | | เข็ม | | ทวนเข็ม | เข็ม | เข็ม |
| ก้านเจาะ | AW | AW | AW | | AW | | AW | AW | AW |
| ∅นอก | | | | | | | | | |
| (ม.) | 0.045 | 0.044 | 0.043 | | 0.044 | | 0.034 | 0.044 | 0.045 |

| | | | | | | | |
|-------------------|--|-------|-------|-------|----------|----------|-------|
| Ø ใน (ม.) | 0.035 | 0.033 | 0.032 | 0.034 | 0.044 | 0.033 | 0.035 |
| ตำแหน่ง | บน | บน | บน | บน | | | |
| ปลาย | หัว | หัว | หัว | หัว | บน | ล่าง | บนหัว |
| เชือก | กว้าง | กว้าง | กว้าง | กว้าง | หัวกว้าง | หัวกว้าง | กว้าง |
| จำนวนรอบ | ขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงานหน้าสนามเป็นผู้กำหนดตามความเหมาะสม | | | | | | |
| Ø เชือก (ม.) | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |
| กระบอกฝ้ายยาว(ม.) | 0.535 | 0.669 | 0.545 | 0.724 | 0.653 | 0.597 | 0.623 |
| Ø นอก (ม.) | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.051 | 0.05 | 0.058 | 0.05 |
| Ø ใน (ม.) | 0.035 | 0.034 | 0.035 | 0.034 | 0.036 | 0.034 | 0.034 |
| หลุมเจาะ Ø (ม.) | 0.114 | 0.102 | 0.11 | 0.089 | 0.102 | 0.118 | 0.08 |

รายละเอียดของข้อมูลการทดสอบเจาะทะลุทะเลงมาตรฐานเกี่ยวกับเครื่องมือและวิธีการปฏิบัติงานจากตารางที่ 4-1 สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในการทดสอบนิยมใช้แทนเจาะมากกว่าสามขาซึ่งเครื่องเจาะมีรอกจำนวน 2 ตัว ดังนั้นจึงสอดคล้องกับข้อมูลของ Kovacs (1980) ที่ได้สำรวจข้อมูลการทดสอบในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งได้ระบุว่าจำนวนรอกที่ใช้มีจำนวน 2 ตัวเช่นกัน

ดัมตอกที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิด แต่แบบโดนัทเป็นแบบที่ใช้แพร่หลายมากที่สุด โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.15 – 0.22 ม. และมีความสูงของดัมตอกประมาณ 0.11 – 0.44 ม. ซึ่งพบว่าเหมือนกับประเทศญี่ปุ่นที่ Yoshiaki and Tokimatsu (1984) ได้สำรวจว่ามีการใช้ดัมตอกโดนัททดสอบเช่นกันโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.15 – 0.22 ม. และมีความสูงประมาณ 0.24 – 0.41 ม.

ฐานรองตอกนิยมใช้แบบ Knock Block และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.10 – 0.13 ม. ซึ่งก็เหมือนกับประเทศญี่ปุ่นเช่นกันที่ Yoshiaki and Tokimatsu (1984) ได้สำรวจไว้แต่ขนาดของฐานรองตอกมีความแตกต่างกัน โดยที่ญี่ปุ่นใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.07 – 0.10 ม.

หัวกว้านที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.12 – 0.15 ม. ซึ่งก็มีความใกล้เคียงกับการทดสอบในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ Kovacs (1980) และการทดสอบในประเทศญี่ปุ่นที่ Yoshiaki and Tokimatsu (1984) ได้สำรวจไว้ โดยของประเทศสหรัฐอเมริกามีขนาด 0.11 – 0.20 ม. และของประเทศญี่ปุ่นมีขนาด 0.10 – 0.21 ม.

ลักษณะการหมุนของหัวกว้านมีการหมุน 2 ลักษณะ คือ แบบตามเข็มนาฬิกา(ตำแหน่งปลายเชือกจะอยู่ด้านล่างหัวกว้าน) และแบบทวนเข็มนาฬิกา (ตำแหน่งปลายเชือกจะอยู่ด้านบนหัวกว้าน) แต่ในข้อมูลที่สำรวจส่วนมากเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ Kovacs (1980) ได้สำรวจและกล่าวว่า ในประเทศ

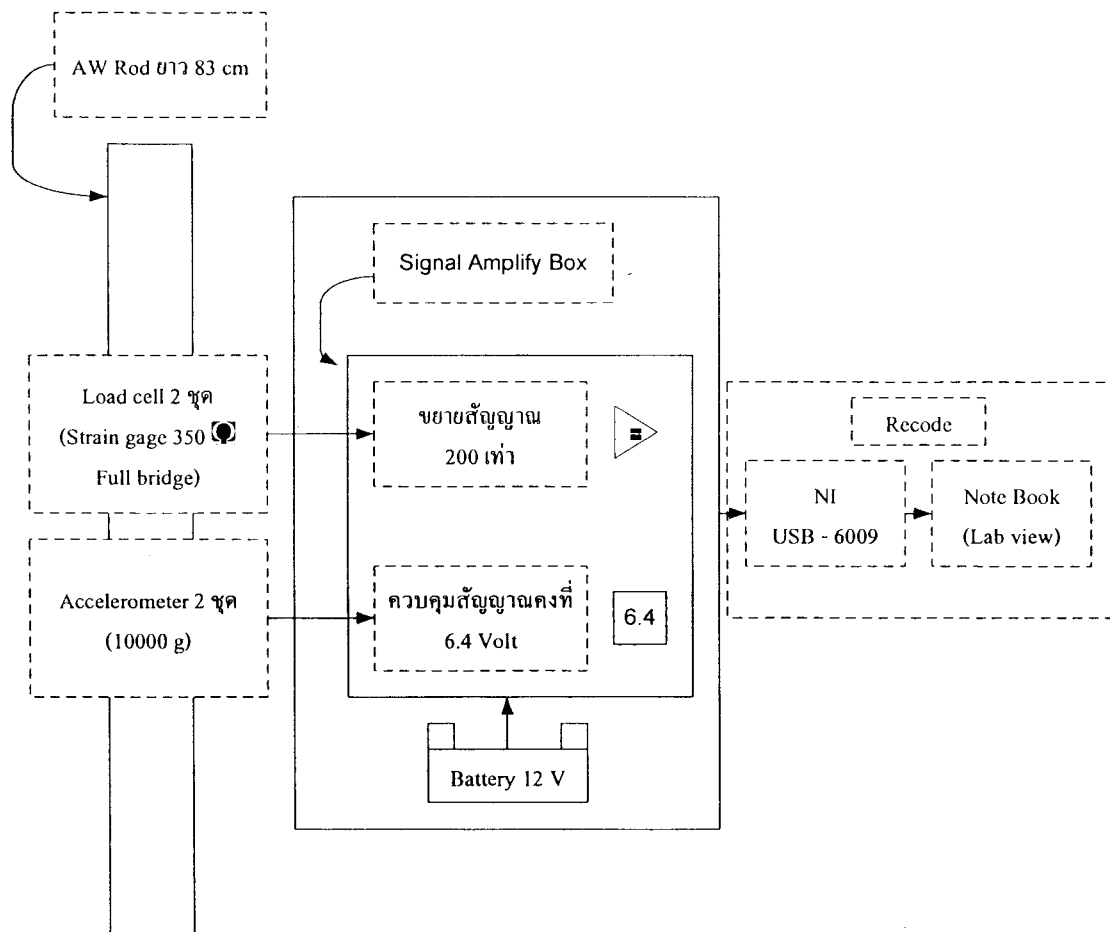
สหรัฐอเมริกา การหมุนของหัวควานที่ได้รับความนิยมมีทั้ง 2 แบบใกล้เคียงกันแต่ไม่มีวิธีใดได้รับความนิยมเป็นพิเศษ

ขนาดของเชือกที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 0.025 ม. ซึ่งก็ตรงกับประเทศสหรัฐอเมริกาที่ Kovacs (1980) ได้สำรวจว่ามีการใช้ขนาดเชือกขนาด 0.025 ม. เช่นกัน แต่ Yoshiaki and Tokimatsu (1984) ได้ระบุไว้สำหรับประเทศญี่ปุ่นใช้เชือกขนาด 0.009 – 0.030 ม.ในการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน

ขนาดของหลุมเจาะสำหรับงานวิจัยครั้งนี้มีขนาดประมาณ 0.08 – 0.12 ม. ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดหลุมเจาะของประเทศญี่ปุ่นที่ Yoshiaki and Tokimatsu (1984) ได้กล่าวไว้ โดยหลุมเจาะที่ประเทศญี่ปุ่นมีขนาด 0.06 – 0.15 ม.ซึ่งก็ตรงกับมาตรฐาน ASTM D1586 (1999) ที่ระบุไว้เช่นกัน

4.2 การประดิษฐ์อุปกรณ์วัดพลังงาน

การประดิษฐ์อุปกรณ์วัดพลังงานเพื่อใช้สำหรับวัดพลังงานในการทดสอบ SPT สามารถดูภาพโดยรวมทั้งหมดได้ดังภาพที่ 14 ซึ่งอุปกรณ์วัดพลังงานนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ อุปกรณ์วัดสัญญาณ, อุปกรณ์ขยายสัญญาณ, และ อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ



รูปที่ 4-1 ลักษณะโดยรวมของอุปกรณ์วัดพลังงาน

4.2.1 อุปกรณ์วัดสัญญาณ

เป็นก้านเจาะชนิด AW ยาว 83 เซนติเมตร โดยจะติดตั้ง load cell และ Accelerometers อย่างละ 2 ชุด โดย load cell นั้นทำมาจาก Strain gage 350 Ω แบบ Biaxial ซึ่งอ้างอิงจาก Odebrecht *et al.* (2005) ต่ອງจรแบบ full bridges ส่วน Accelerometers มีการตอบสนอง 10000 g

4.2.2 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ชุดขยายสัญญาณของ load cell และ ชุดควบคุมสัญญาณของ Accelerometers ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

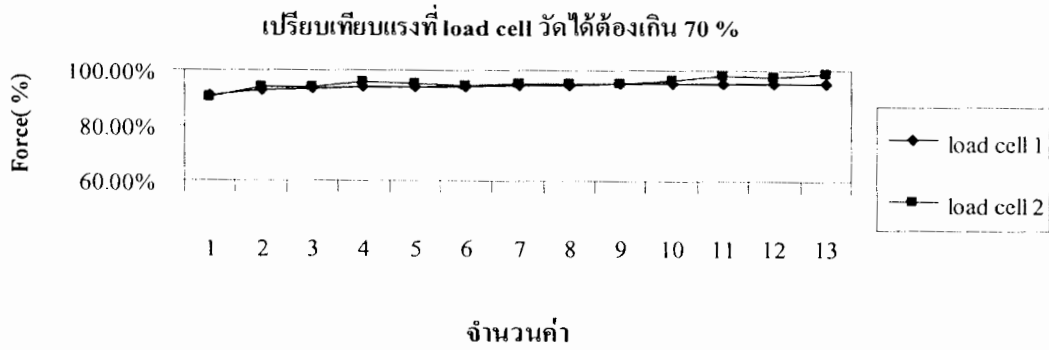
- ชุดขยายสัญญาณจาก Strain gage จำเป็นจะต้องใช้ชุดขยายสัญญาณเพื่อให้สามารถอ่านและบันทึกค่าได้ เพราะฉะนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จำเป็นต้องใช้ชุดขยายสัญญาณโดยเลือกใช้ค่าการขยาย 200 เท่า และชุดขยายสัญญาณมี V_{in} เท่ากับ 5 V
- ชุดควบคุมสัญญาณ Accelerometers ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีความจำเป็นต้องควบคุมให้มี V_{in} เท่ากับ 6.4 V เพราะว่าเป็นข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิตที่ระบุมาว่าจะต้องมี V_{in} เท่ากับ 6.4 V จึงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ตามเอกสารสอบเทียบของบริษัทผู้ผลิต

4.2.3 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ

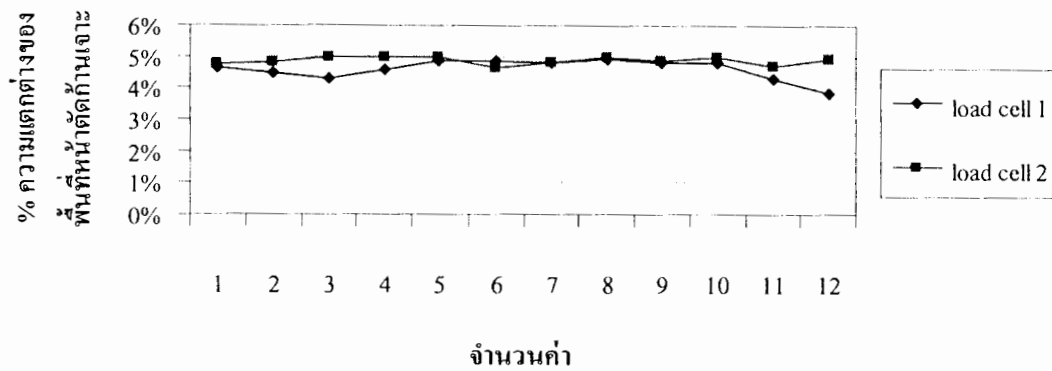
สำหรับ load cell และ Accelerometers นั้น ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ NI USB – 6009 ซึ่งมี 14 Bit และมีช่องสำหรับต่อ load cell และ Accelerometers ทั้งหมด 4 ช่อง โดยเลือก V_{in} ของช่อง load cell เท่ากับ ± 2.5 V และ V_{in} ของช่อง Accelerometers เท่ากับ ± 1 V ซึ่งสัญญาณทั้งหมดจะถูกบันทึกลง Note book โดยใช้ โปรแกรม lab view ควบคุม

4.3 การเทียบสอบโหลดเซลล์

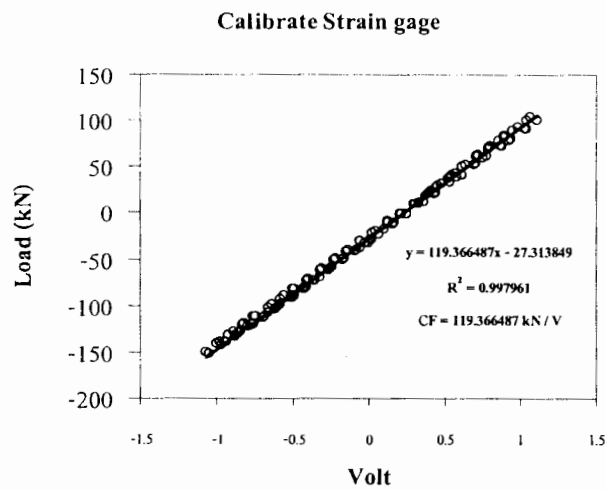
การเทียบสอบโหลดเซลล์ (load cell) ตามมาตรฐาน ASTM D4633 กำหนดว่าในการสอบเทียบนั้นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข 2 ข้อ คือ โหลดเซลล์ต้องสามารถวัดแรงได้อย่างน้อย 70 % ของแรงทั้งหมด และพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์วัดพลังงานที่ได้จากการคำนวณจะต้องมีความแตกต่างไม่เกิน 5% กับพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์วัดพลังงานที่ได้จากการวัด โดยในการเทียบสอบโหลดเซลล์ ในงานวิจัยนี้ทำโดยใช้เครื่อง UTM กดและดึงก้านเจาะพร้อมทั้งวัด Volt ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม load ที่เพิ่มขึ้น-ลดลง จำนวน 3 รอบการทดสอบ (กำหนดให้แรงดึงเท่ากับ 150 kN, แรงอัดเท่ากับ 100 kN) หลังจากสอบเทียบเสร็จสิ้นต้องทำการตรวจเช็คเพื่อตรวจสอบว่าการเทียบสอบนี้ผ่านเงื่อนไขทั้งสองข้อที่กล่าวถึงหรือไม่ซึ่งการตรวจสอบนั้นทำได้โดยการคำนวณเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดที่วัดได้จริง โดยพื้นที่หน้าตัดที่วัดจริงเท่ากับ 0.00072 m² ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 2 เงื่อนไข และได้แสดงผลของการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4-2 และ 4-3 และเมื่อตรวจสอบว่าได้ผ่านเงื่อนไขที่กำหนดไว้ก็จะหาสัมพันธะระหว่าง โหลด กับ โวลต์ เพื่อเป็นสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่าของโหลดเซลล์ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-2 ความสามารถของโหลดเซลล์ต้องสามารถวัดแรงได้ไม่น้อยกว่า 70 %



รูปที่ 4-3 ความแตกต่างของพื้นที่หน้าตัดที่คำนวณกับการวัดต้องแตกต่างกันไม่เกิน 5%



รูปที่ 4-4 สัมประสิทธิ์ปรับแก้จากการเทียบสอบ

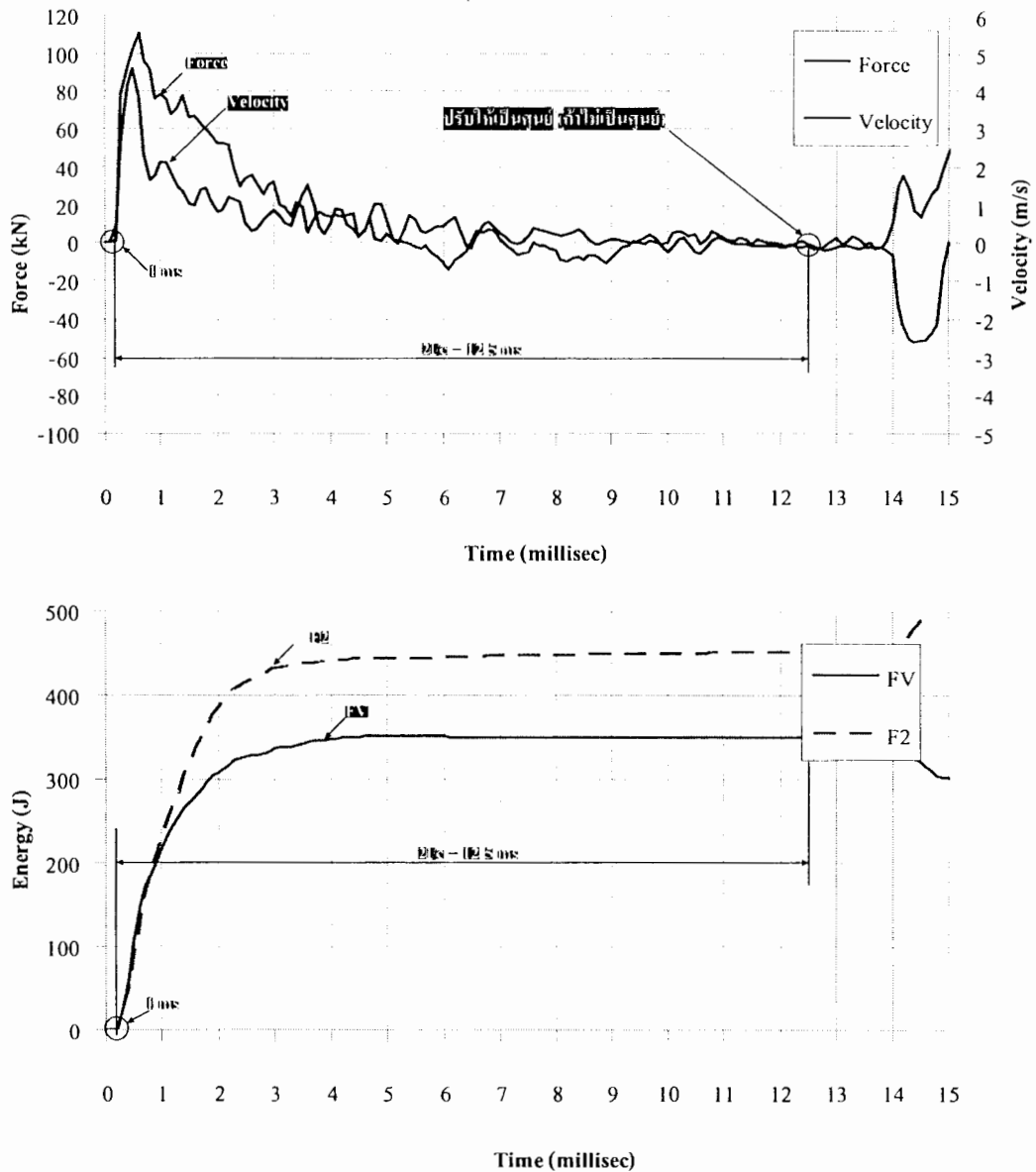
4.4 การทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน

การทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานได้ทดสอบในบริเวณพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล โดยการทดสอบจะนำชุดอุปกรณ์วัดพลังงานไปติดตั้งระหว่างก้านเจาะอันบนสุดกับชุดดัมตอระหว่างการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน และเก็บข้อมูลของแรง (F) และความเร่ง (a) ด้วยความถี่ 10000 เฮิรตซ์ เป็นระยะเวลา 5 วินาที ส่วนการนำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์จะสนใจข้อมูลในระยะเวลาก่อนคลื่นจะสะท้อนจากกันหลุมผ่านอุปกรณ์วัดพลังงาน (เวลา 0 ถึง $2L/c$ โดยที่ L คือความยาวของก้านเจาะ)

การวิเคราะห์ความเร็ว (v) จากข้อมูลความเร่ง (a) ที่วัดได้ ใช้วิธีคำนวณตาม กฎของซิมป์สัน (Simpson's rule) ดังแสดงในสมการที่ (4-1) ที่จะให้น้ำหนักมากกว่ากับค่าความเร่งตรงกลาง

$$\Delta v(t) = \left(\frac{a(t-1) + 4a(t) + a(t+1)}{6} \right) [t - (t-1)] \quad (4-1)$$

การวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (E) จากการทดสอบ ใช้วิธีคำนวณตามสมการ Fv โดยมีข้อกำหนด คือ คลื่นกระทบต้องอยู่ภายใน 1 ms หลังจากจุดเริ่มต้นการวิเคราะห์ และจะทำการปรับแก้ค่าแรง (F) และความเร็ว(v) ที่เวลา $2L/c$ ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ด้วยค่าคงที่ของการอินทิเกรต ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ข้อกำหนดของการวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ได้จากการทดสอบ

ค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผล (ER) ของการทดสอบ SPT เป็นสัดส่วนของค่าพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (E_p) กับ ค่าพลังงานมาตรฐานของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (E^*) โดยที่ค่าพลังงานมาตรฐานของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 475 J

4.5 การวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน

การวิเคราะห์ข้อมูลผลทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานใช้วิธีทางสถิติโดยมีสมมุติฐานว่า ข้อมูลพลังงานประสิทธิผลของบริษัทต่างๆ ที่ทดสอบและข้อมูลพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกทั้ง 3 ชนิดที่นำมาวิเคราะห์มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ซึ่งมีวิธีการคำนวณโดยใช้หลักการสถิติทั่วไป ดังนี้

- ค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผล คำนวณได้จากสมการที่ (4-2)

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4-2)$$

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานประสิทธิผล คำนวณได้จากสมการที่ (4-3)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4-3)$$

- สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของพลังงานประสิทธิผล คำนวณได้จากสมการที่ (4-4)

$$COV = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100\% \quad (4-4)$$

| | | | |
|--------|-----------|---|---|
| โดยที่ | \bar{X} | = | ค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผล |
| | SD | = | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานประสิทธิผล |
| | COV | = | สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของพลังงานประสิทธิผล |
| | X_i | = | ข้อมูลข้อมูลพลังงานประสิทธิผล |
| | n | = | จำนวนข้อมูลพลังงานประสิทธิผล |

เอกสารอ้างอิง

- กิจไพบูลย์ ชิวพันธ์ศรี (2550), การออกแบบแอปพลิเคชันในระบบกราฟิกด้วย Labview, ซีเอ็ดยูเคชั่น ดิเรก ลาวินัยศิริ และ บุญสม เลิศหิรัญวงศ์ (2538), ปฐพีวิศวกรรมในงานก่อสร้าง, Library-Nine Publishing มณฑลเชียร กังศศิเทียม (2545), กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม, สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน มานะ อภิพัฒนะมนตรี (2546), วิศวกรรมปฐพีและฐานราก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) วีระนันท์ ปิตุปรกรณ์ (2526), การคาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยการทดสอบเจาะทะลุทะลวง มาตรฐานในชั้นดินกรุงเทพมหานคร, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สภาพร คูวิจิตรจาร์ (2544), การเจาะสำรวจดินทางวิศวกรรม การเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างและการทดสอบใน สนาม, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- Abou-matar, H. and Goble, G. G., (1997), "SPT Dynamic Analysis and Measurements", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 921 – 927
- Archway Engineering (2008), Rotary Drill Rods, http://www.archway-engineering.com/products/drill_rods.html
- ASTM D1586 Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils
- ASTM D4633 Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers
- ASTM D6066 Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential
- Biringer, E. and Davie, J. (2008), Assessment of Energy Transfer Ratio in SPT using Automatic Hammers, Maryland, USA
- Bowles, J. E. (1998), Foundation Analysis and Design, 4 Ed., McGraw-Hill
- BS 1377 Determination of the Penetration Resistance using the split - barrel sampler
- Butler, J. J., Caliendo, J. A., and Goble, G. G. (1998), Comparison of SPT energy measurement methods. Portland, USA.
- Daniel, R. C., Howie, J. A., Jackson, R. S., and Walker, B. (2005), "Review of Standard Penetration Test Short Rod Corrections", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 489 – 497
- Drumright, E. E., Pflingsten, P. W., and Lukas, R. G. (1996), "Influence of Hammer Type on SPT Results", Journal of Geotechnical Engineering, pp. 598 – 599
- Eurocode 7: Geotechnical design - Part 3: Design assisted by field testing
- Farrar, A. J. (1998), Summary of Standard Penetration Test (SPT) Energy Measurement Experience, Denver, Colo, USA.

- ISO 22476-3 Geotechnical investigation and testing Field testing - Part 3: Standard penetration test
- Jackson, S. (1995), SPT Energy Calibration – Keenleyside Dam, Report for B.C. Hydro. Canada
- Kovacs, D. W. (1980), “What Constitutes a turn”, *Geotechnical Testing Journal*, pp. 127-130
- Kovacs, D. W. and Salomone, A. L. (1982), “SPT Hammer Energy Measurement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 599–619
- Kulhawy, F. H. and Mayne, P. W. (1990), *Manual Estimating Soil Properties for Foundation Design*, Cornell, University, New York
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), *Soil Mechanics: SI Version*, John Wiley
- Lamb R. (1997), “SPT Energy Measurement with the PDA”, *Annual Geotechnical Engineering Conference*, University of Minnesota, USA
- Liao and Whitman (1986), “Overburden Correction Factors for SPT in Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, No. 3, pp. 373-377
- Meyerhof, G. G. (1957), *Discussion on Research on Determining the Density of Sands by Penetration Testing*, ICSMFE, London, UK.
- Meyerhof, G. G. (1959), “Compaction of Sands and the Bearing Capacity of Piles”, *Journal Geotechnical Engineering*, pp. 1-29
- Morgano, C. M. and Liang, R. (1992), *Energy transfer in SPT – Rod length effect*, Akron University, Ohio, USA
- Odebrecht, E., Schnaid, F., Rocha, M. M., and de Paula Bernardes, G. (2005), “Energy Efficiency for Standard Penetration Tests”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1252 – 1263
- Peck, R. B., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H. (1974), *Foundation Engineering*, 2 Ed., John Wiley
- Riggs O. C. (1986), “North American Standard Penetration Test Practice”, *Use of Insitu Tests in Geotechnical Engineering*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 6
- Robertson, P. K., Wheller, J. D., and Oddo, K. O. (1992), “Standard Penetration Test Energy Measurement Using a System based on the Personal Computer”, *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 551 – 557
- Schmertmann, J. H. and Palacios, A. (1979), “Energy Dynamic of SPT”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp. 909-924

- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Hader, L. F., and Chung, R. M. (1985), "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", *Journal of Geotech Eng*, Vol. 111, pp. 1425-1445
- Skempton, A. W. (1986), "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sand of Overburden Pressure Relative Density Particle Size Ageing and Overconsolidation", *Geotechnique*, Vol. 36, No. 3, pp. 425 - 447
- Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley
- Tsai, J.-S., Liou, Y.-J., Liu, F.-C., and Chen, C.-H. (2004), *Effect of Hammer Shape on Energy Transfer Measurement in the SPT*, Cheng Kung University, Tainan, Taiwan
- Yoshimi, Y. and Tokimatsu, K. (1984), "SPT Practice Survey and Comparative Test", *Soils and Foundations*, pp. 105-111
- Youd, T. L., Bartholomew, H. W., and Steidl, J. H. (2008), "SPT Hammer Energy Ratio versus Drop Height", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 397-400

ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์

Energy ratio of SPT practice performed in Thailand

S. Yimsiri

Department of Civil Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

ABSTRACT: This study aims to measure the energy ratio of the Standard Penetration Test (SPT) by the practice performed in Thailand. The study consists of 2 main parts: (i) development of SPT energy measurement system and (ii) measurement of energy ratio of SPT practice performed in Thailand with different types of hammer. The energy ratios are determined by both FV and F^2 methods and the comparison is made. The energy ratios obtained from this study are also compared with other published data. The results from this study are useful for energy correction of the SPT results obtained by practice performed in Thailand to the standard energy ratio for subsequent correlations to other engineering properties of soils.

1 INTRODUCTION

The Standard Penetration Test (SPT) was developed in the United States in 1927 and has become the most common in-situ test employed for foundation and stability analyses worldwide. Up to 80–90% of the conventional foundation design is accomplished by using SPT results (Kovacs & Salomone 1982). The SPT has several significant advantages as follow: (i) the equipment is relatively simple and robust, (ii) the procedure is easy to carry out and permits frequent tests, (iii) soil samples can be obtained, (iv) tests can be carried out in most soil types, and (v) many useful correlations are available. However, SPT possess an appreciable amount of variability and frequent lack of repeatability. Considerable differences in SPT results from different hammer-drill rig systems at expected uniform sites have been reported (e.g. Youd & Bennett 1981). The Engineering Institute of Thailand (EIT) gathered the SPT data in Bangkok area, which is of relatively uniform condition, from various testing agencies and also found large variability as shown in Fig. 1. This large variability is because the actual energy delivered to the drill rods in performing this test for different hammer-drill rig systems may vary considerably.

Various studies have been performed to measure the factors that control the energy delivered by the SPT systems. The earlier studies consisted of measuring the velocity of the SPT hammer just before impact (e.g. Kovacs et al. 1978) and measuring the dynamic force-time relationships in the drill rod obtained just below the anvil and immediately above the sampler (e.g. Schmertmann 1978). At the same time, theoretical studies were also being undertaken (e.g. McLean et al. 1975). A primary reason for the variability of SPT results is due to

the use of different methods for raising and dropping the hammer. Therefore, before the SPT result can be used in any correlations, its energy should be normalized to a standard energy so that its use is consistent everywhere. Unfortunately, there is no study about the energy ratio of the SPT practice performed in Thailand.

2 STANDARD PENETRATION TEST

Fig. 2 shows a sketch of the basic Standard Penetration Test set-up using a cathead and rope system along with a donut hammer. The SPT is performed by driving a split-spoon sampler into the soil by

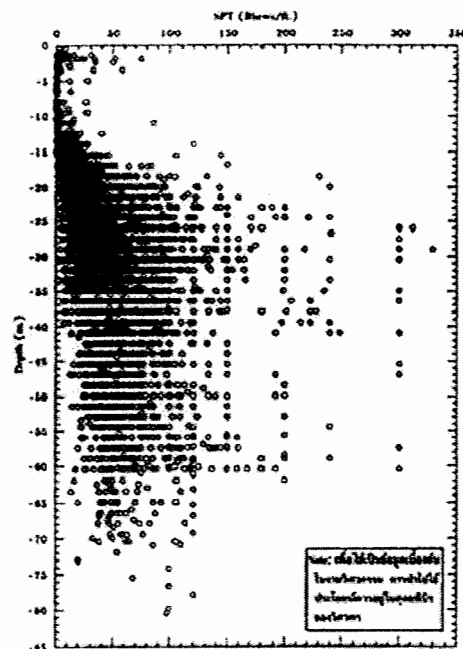


Figure 1. SPT results in Bangkok area (EIT 2005).

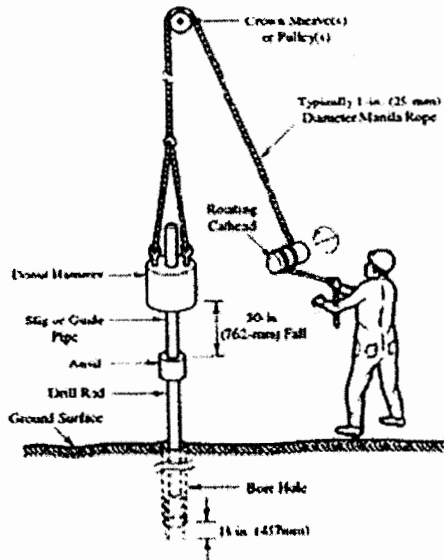


Figure 2. Typical SPT set-up (Kovacs & Salomone 1982).

hammer blows to the top of the drill rod. The standard weight of the hammer is 62.3 kg (140 lb) and for each blow the hammer drops a distance of 76.2 cm (30 in.). The numbers of blow required for sampler penetration of three 15.2 cm (6 in.) intervals are recorded. The numbers of blow required for the last two intervals are added to give the standard penetration number at that depth. This number is generally referred to as the SPT N -value. The SPT testing procedure has been specified in several standards (e.g. ASTM D1586, BS 1377-9, ENV1997, and ISO 22476-3).

Although, this test is supposed to have a standardized test procedure, there is a wide variability in equipment and test procedures encountered in practice throughout the world. It has been shown that, in different parts of the world, the standard penetration resistance is conventionally measured using different kinds of hammers, different energy delivery systems with different degrees of efficiency, different borehole fluids, and different kinds of sampling tubes. The researches on energy measurements have shown that the energy delivered to the rods during SPT test can vary from about 30–90% of the theoretical free-fall energy intended to be delivered by the falling hammer (Kovacs & Salomone 1982; Robertson et al. 1983). The energy delivered to the drill rod varies with the releasing system, hammer, anvil, and operator characteristics. The types of hammer and anvil appear to most influence the energy-transfer mechanism. In Thailand, the typically used hammers are donut, safety, and trip with donut hammer being the most popular (see Fig. 3).

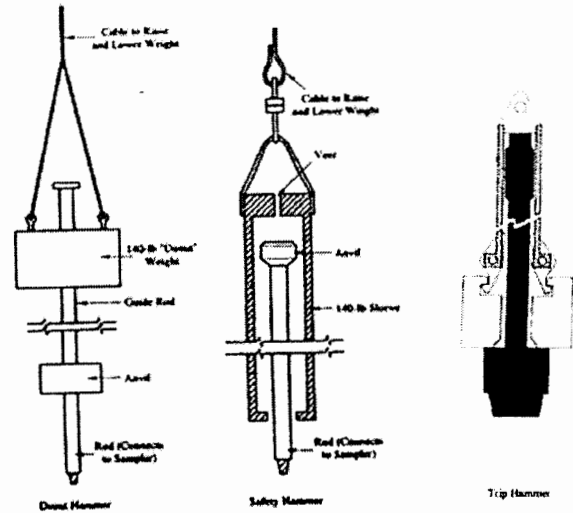


Figure 3. Typical hammers used in Thailand (after Bowles 1996; Serota & Lowther 1973).

Kovacs et al. (1984), Seed et al. (1985) and Robertson et al. (1983) suggested that an energy level of 60% appears to represent a reasonable historical average for most SPT-based empirical correlations. Seed et al. (1985) also suggested that, for liquefaction analysis, the SPT N -value must be corrected to an energy level of 60%. SPT N -value measured with a known energy ratio (ER_t) can be normalized to an energy level of 60% by the conversion in Eq. (1)

$$N_{60} = N \frac{ER_t(\%)}{60} \quad (1)$$

Based on the data summarized by Skempton (1986) and Seed et al. (1985), the recommended generalized energy ratios for various SPT practices are shown in Table 1. Further adjustments are also needed for the effects of rod length, sampler type, and borehole diameter.

3 MEASUREMENT OF SPT ENERGY

The measurement of SPT energy has started since 1970s and based on the force-measurement concept (F^2 method) developed by Palacios (1977). The energy is obtained by integration of square of force in the drill rod. The method consists of attaching a load cell near the top of the drill rod and below an anvil and measuring the force-time history of the stress wave during hammer impact. The stress-wave force integration method to determine the energy uses the formula in Eq. (2). This expression holds where the wave is propagating in the positive direction only (downward). Since the

Table 1. SPT correction (Bowles 1996).

| Hammer for q_p | | | | Remarks | |
|----------------------------|--------|------|--------|------------|---|
| Average energy ratio E_i | | | | | |
| Country | Downer | | Safety | | |
| | R-F | Temp | R-F | Temp/Anvil | |
| United States ^a | 45 | 75 | 50/30 | 50/100 | R-F = Repeatability coefficient $q_p = E_i A_c L / 70$ |
| North America | 45 | 75 | 50/30 | 50/100 | For US, $q_p = E_i A_c L / 70$ |
| Japan | 67 | 75 | 50 | 60 | $q_p = M V^2 / 1.14$ |
| United Kingdom | 50 | 60 | 50 | 60 | |
| China | 50 | 60 | 50 | 60 | |

| Rod length correction q_p | | | | |
|-----------------------------|------|-------|------|---|
| Length | 10 m | q_p | 1.00 | Base value. Not to be used for $L < 10$ m |
| | 6-10 | | 0.95 | |
| | 3-6 | | 0.85 | |
| | 0-3 | | 0.75 | |

| Sampler correction q_p | | | | |
|--------------------------|-----------------|-------|------|--------------------------------------|
| | Without float | q_p | 1.00 | Base value. Not to be used with Base |
| With liner | Dense sand/clay | | 0.80 | |
| | Loose sand | | 0.90 | |

| Bore hole diameter correction q_p | | | | |
|-------------------------------------|-----------|-------|------|--|
| Bore diameter | 90-120 mm | q_p | 1.00 | Base value. Not to be used when there is an average hole |
| | 150 mm | | 1.05 | |
| | 200 mm | | 1.15 | |

^a Data tabulated from Rogers (1990), Shingleton (1986), Schlemmer (1976) and Dool et al. (1985).
^b $q_p = 1.00$ for all diameter L when using energy based SPT calculation through the data.

end of the rod causes a large reflection, Eq. (2) is integrated to the time of the arrival of the rod tip reflection ($2L/c$). If the drill rod is of sufficient length, then the energy in the rod will have been transferred in the initial wave cycle. However, for shorter rod lengths, energy transmission is not complete at the $2L/c$ time.

$$E_i = \frac{c}{AE} \int_0^{2L/c} [F(t)]^2 dt \quad (2)$$

where

- A = cross-sectional area of drill rod (above and below force transducer)
- c = velocity of compression wave in drill rod (≈ 5120 m/sec for steel)
- E = Young's modulus of drill rod
- E_i = maximum energy transmitted to drill rod during impact event
- $F(t)$ = dynamic force in drill rod as function of time
- t = time
- L = drill rod length

In 1990s, due to the advent of accurate accelerometer, the force-velocity integration method (FV method) is suggested to analyze for the SPT energy. The energy is defined as shown in Eq. (3). This method avoids the need to determine the integration time ($2L/c$) and select the appropriate cross-sectional area of the drill rod. This method is currently a sole method for SPT energy measurement specified in ASTM D4633.

$$E_i = \int_0^{\max} F(t)v(t)dt \quad (3)$$

where

- max = time of maximum energy transmitted to drill rod during impact event
- $v(t)$ = particle velocity measured in instrumented drill rod as a function of time

Once the SPT energy is obtained, the energy ratio ER_i is defined as the ratio of E_i over E^* as shown in Eq. (4), where E^* is the theoretical energy of SPT test (475 J).

$$ER_i(\%) = \frac{E_i}{E^*} \times 100\% \quad (4)$$

4 DEVELOPMENT OF SPT ENERGY MEASUREMENT SYSTEM

The SPT energy measurement system was developed in this study using similar approach as Robertson et al. (1992). The system was designed according to the available standards and specifications of commercially available systems (see Table 2). The system consists of 3 parts: (i) signal measurement, (ii) signal amplification and conditioning, and (iii) data acquisition, as shown in Fig. 4.

The signal measurement part is an AW drill rod (830 mm length) equipped with strain-gauged load cells and accelerometers (two sets each) to measure axial force and acceleration. The load cell is made of 350 Ω biaxial strain gages connected in full bridge. Accelerometers of 10000 g capacity are used. The photo of the signal measurement system is shown in Fig. 5. Signal amplification and conditioning part has 2 functions: (i) supplies input voltages to both the load cells and accelerometers and (ii) amplifies the output signal from load cell. The data acquisition part uses NI USB-6009 (14 bits) with 4 input channels (2 for load cells and 2 for accelerometers). The input voltages for load cells and accelerometers are ± 2.5 V and ± 1 V, respectively. All data are recorded to the laptop at a frequency of 10,000 Hz (controlled by LabVIEW).

The load cells (strain-gauged drill rod) were statically calibrated by using Universal Testing Machine (UTM). The compressive and tensile loads were applied in 3 cycles and the output voltage was measured. The maximum tensile force was -150 kN and maximum compressive force was +100 kN. The calibration relationship between load and output voltage is shown in Fig. 6. The calibration factor can be calculated as 122.198294 kN/V.

The system is installed just below the anvil and above the first drill rod to measure the energy transferred from hammer to the drill rod during the SPT test as shown in Fig. 7.

Table 2. Comparison of design of SPT measurement system.

| Characteristics | Commercial | | Standard | | |
|-------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| | Test consult (2010) | Pile dynamic (2008) | ASTM D 4633 | ISO 22476 - 3 | This study |
| Instrumented Rod | | | | | |
| Length | 1000 mm | 600 mm | Not less than 600 mm | N.A. | 830 mm |
| Size | 54 mm. (OD) | AW, NW | Same as drill rod | N.A. | AW, 44.3 mm (OD) |
| Stain gauge | | | | | |
| Number | 2 sets | 2 sets (350 Ω) | 2 sets | N.A. | 2 sets (350 Ω) @ 4 strain gauges |
| Circuit | Full bridge | Full bridge | Full bridge | N.A. | Full bridge |
| Installation location | N.A. | N.A. | Not less than 300 mm | 10 d _a | 300 mm from tip |
| Accelerometer | | | | | |
| Number | 2 sets | 2 sets (10000 g) | Not less than 10000 g | more than 5000 g | 2 sets (10000 g) |
| Installation location | N.A. | N.A. | Away from strain gauge 100 mm | N.A. | 400 mm from tip |
| Sampling rate | N.A. | N.A. | 10,000 Hz | N.A. | 10,000 Hz |
| Sampling duration | N.A. | N.A. | 50 msec | N.A. | 5 sec |

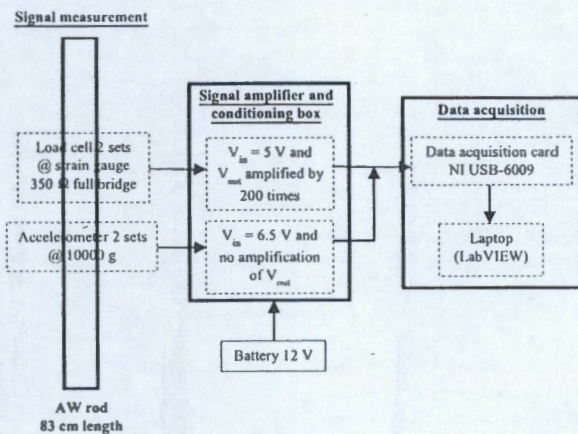


Figure 4. SPT energy measurement system.



Figure 5. Developed instrumented drill rod.

5 SPT ENERGY MEASUREMENT RESULTS

The SPT energy measurement was carried out at the site in Huay Kwang area of Bangkok. The typical SPT machine with 3 typical hammers were used which are donut, safety, and trip (see Fig. 3). The

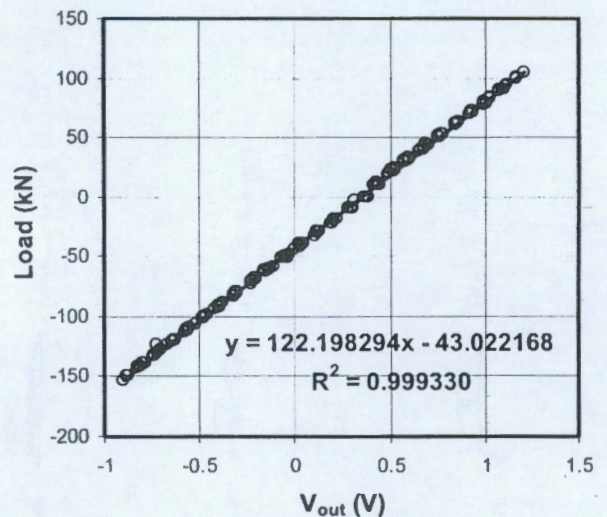


Figure 6. Calibration of load cell.

tests were undertaken at 3 depths which are in stiff clay and dense sand layers. The data of force and acceleration are recorded at frequency of 10,000 Hz for 5 sec duration. The integration for velocity (v) uses Simpson's rule as shown in Eq. (5) which gives more weight to the acceleration at middle time data. The constants obtained from the integration were corrected to yield the force and velocity of equal to 0 at time of $2L/c$. The examples of force-time and velocity-time data from donut, safety, and trip hammers are shown in Figs. 8a, 9a, and 10a, respectively. These data were used to analyze the energy according to Eq. (2) (F^2 method) and Eq. (3) (FV method). The examples of energy-time

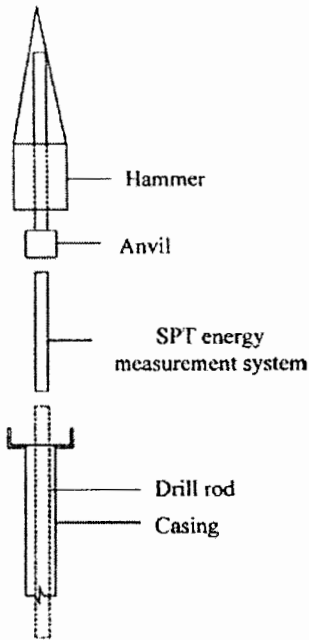
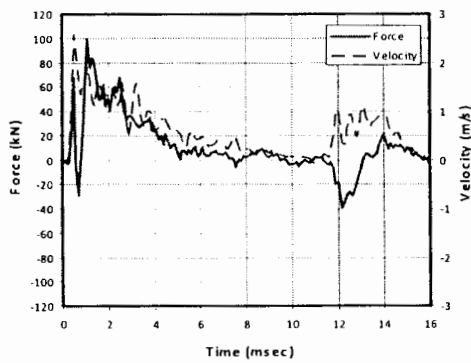
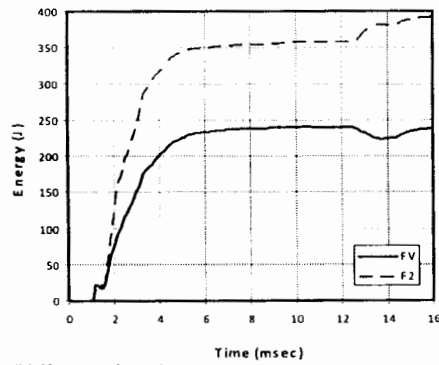


Figure 7. Location of SPT energy measurement system.



(a) Force- and velocity-time data

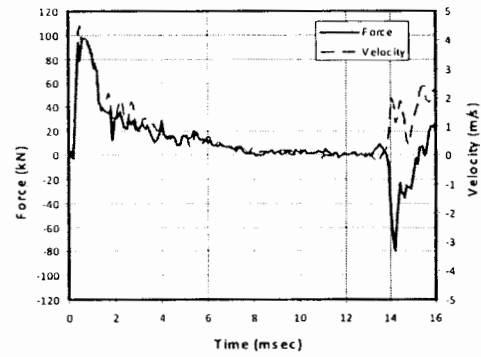


(b) Energy-time data

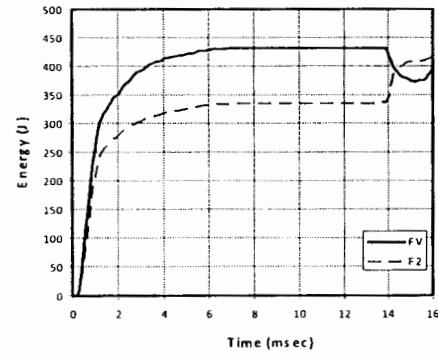
Figure 8. Results from donut hammer (depth 26.0 m).

analysis from donut, safety, and trip hammers are shown in Figs. 8b, 9b, and 10b, respectively. All results are summarized in Table 3.

$$\Delta v(t) = \left(\frac{a(t-1) + 4a(t) + a(t+1)}{6} \right) [t - (t-1)] \quad (5)$$

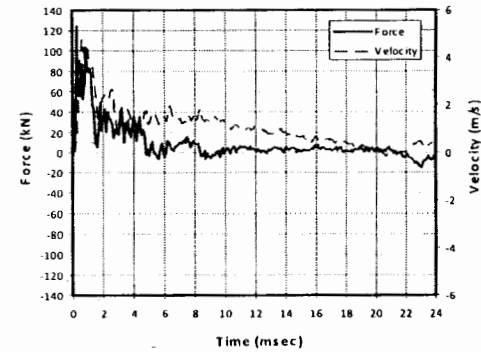


(a) Force- and velocity-time data

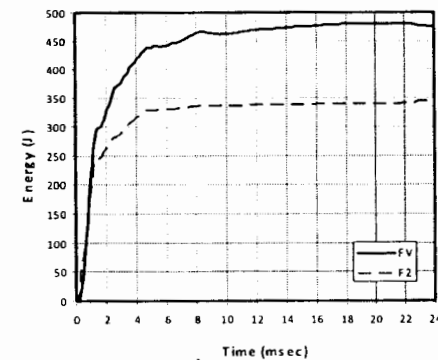


(b) Energy-time data

Figure 9. Results from safety hammer (depth 32.0 m).



(a) Force- and velocity-time data



(b) Energy-time data

Figure 10. Results from trip hammer (depth 50.0 m).

Table 3. SPT energy measurement results.

| Hammer | Depth (m) | 2L/c (m sec) | Energy type | E _i (J) | ER _i (%) |
|--------|-----------|----------------|----------------|--------------------|---------------------|
| Hammer | 23.0 | 9.2 | FV | 258 | 54 |
| | | | F ² | 912 | 192 |
| Donut | 24.5 | 9.6 | FV | 206 | 43 |
| | | | F ² | 643 | 136 |
| | 26.0 | 10.3 | FV | 229 | 48 |
| | | | F ² | 331 | 70 |
| Safety | 29.0 | 11.6 | FV | 342 | 72 |
| | | | F ² | 401 | 84 |
| | 30.5 | 12.2 | FV | 304 | 64 |
| | | | F ² | 397 | 84 |
| 32.0 | 12.8 | FV | 320 | 67 | |
| | | F ² | 336 | 71 | |
| Trip | 50.0 | 19.8 | FV | 481 | 101 |
| | | | F ² | 341 | 72 |
| | 51.5 | 20.4 | FV | 400 | 84 |
| | | | F ² | 400 | 84 |
| 53.0 | 21.0 | FV | 467 | 98 | |
| | | F ² | 407 | 86 | |

6 ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESULTS

The average values of resulting SPT energy ratios (by FV method) from various hammers are summarized in Table 4. The results are compared with other reported data (from Table 1). It is shown that the energy ratios of SPT practice in Thailand are relatively similar to the results of US/North America.

Fig. 11 compares % standard deviation of energy ratios from various hammers analyzed with FV and F² methods. The % standard deviation is defined according to ASTM E691 as shown in Eq. (6). ASTM E456 defines precision as the closeness of agreement between independent test results obtained under stipulated condition. Therefore, large % standard deviation means less precision. The results show that energy ratio of donut hammer analyzed by F² method gives lowest precision, whereas energy ratios from donut hammer analyzed by FV method and of other hammers give better precision.

$$\% \text{ standard deviation} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} / \bar{x} \quad (6)$$

where \bar{x} = average = $\sum_{i=1}^n x_i / n$
 x = individual test result
 n = number of test results

Table 4. Average energy ratios.

| Energy ratio (%) | Donut | Safety | Trip |
|------------------|-------|--------|--------|
| This research | 49 | 68 | 95 |
| US/North America | 45 | 70-80 | 80-100 |
| Japan | 67 | - | - |
| UK | - | 50 | 60 |
| China | 50 | - | - |

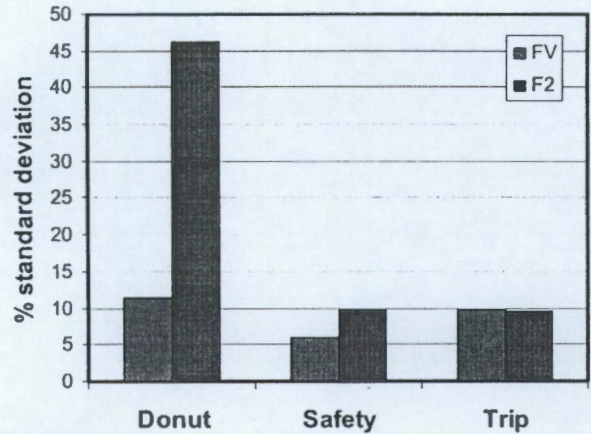


Figure 11. % standard deviation of various hammers and analyses.

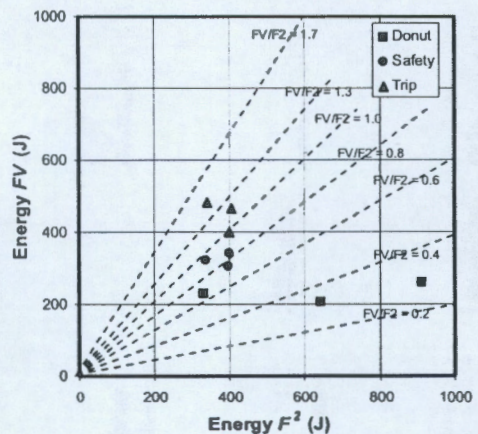


Figure 12. Comparison of analysis by FV and F².

Fig. 12 shows the comparison of SPT energy obtained by FV and F² methods. The results of donut hammer give large difference because of low precision of the obtained energy of donut hammer analyzed by F² method (as discussed earlier). Safety and trip hammers give the ratio of energy (FV/F²) of 0.8-1.4. This reasonably agrees with the range reported by Sy & Campanella (1991) who showed that the energy determined from FV method was generally 5-15% larger than that determined from F² method.

7 CONCLUSIONS

This study measures the SPT energy ratio by the practice performed in Thailand which has never been carried out before. The SPT energy measurement system has been developed. The energy ratios have been measured for three typical hammer types. The study reveals that the energy ratios are 49%, 68%, and 95% for donut, safety, and trip hammers, respectively. The energy ratios found for Thailand's practice are similar to those of US/North America. The results from this study are useful for the correction of SPT test results performed by practice in Thailand to the standard energy ratio for further correlations to other engineering properties of soils. It is noted, however, that this study only gives preliminary results because of limited number of tests (only 9 tests for each hammer type). Therefore, the results should be used with caution and more tests should be done to yield more confident conclusions.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is partly supported by the Faculty of Engineering, Burapha University (#18/2555). The Author gratefully acknowledges Geophysics Co. Ltd. for participating in this study, Mr. T. Tengchu for performing most of the experiment, and Dr. S. Soralump for suggestion on the manuscript.

REFERENCES

- ASTM D1586—Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils.
 ASTM D4633—Standard Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers.
 ASTM E456—Standard Terminology Relating to Quality and Statistics.
 ASTM E691—Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method.
 Bowles, J.E. 1996. *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill.
 BS 1377-9: Methods of test for soils for civil engineering purposes. In-situ tests.
 Engineering Institute of Thailand (EIT). 2005. *Soil characteristics of lower Chao Praya river basin*.
 ENV1997: Eurocode 7: Geotechnical design—Part 3: Design assisted by field testing.
 ISO 22476-3: Geotechnical investigation and testing—Field testing—Part 3: Standard penetration test.
 Kovacs, W.D., Griffith, A.H. & Evans, J. C. 1978. An Alternative to the Cathead and Rope for the Standard Penetration Test. *Geot Testing J*, ASTM, 1(2): 72-89.
 Kovacs, W.D. & Salomone, L.A. 1982. SPT hammer energy measurement. *J of Geotech Eng Div*, ASCE, 108(GT4): 599-620.
 Kovacs, W.D., Yokel, F.Y., Salomone, L.A. & Holtz, R.D. 1984. Liquefaction potential and the international SPT. *Proc. 8th World Conf on Earthquake Eng*, San Francisco, 3: 263-268.
 McLean, F.G., Franklin, A.G. & Dahlstrand, T.K. 1975. Influence of Mechanical Variables on the SPT. *Proc. of Specialty Conf on In Situ Measure of Soil Prop*, ASCE, 1: 287-318.
 Palacios, A. 1977. *The theory and measurement of energy transfer during standard penetration test sampling*. Ph.D. thesis, University of Florida at Gainesville.
 Pile Dynamics, Inc. 2008. *SPT Analyzer*.
 Robertson, P.K., Campanella, R.G. & Wightman, A. 1983. SPT-CPT correlations. *J of Geotech Eng*, ASCE, 109(GT x): 1449-1459.
 Robertson, P.K., Woeller, D.J. & Addo, K.O. 1992. Standard penetration test energy measurements using a system based on the personal computer. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 551-557.
 Schmertmann, J.H. 1978. Use the SPT to Measure Dynamic Soil Properties?—Yes, But ...!. *Dynamic Geotech Testing*, ASTM STP 654: 341-355.
 Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. & Chung, R.M. 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *J of Geotech Eng*, ASCE, 111(12): 1425-1445.
 Serota, S. & Lowther, G. 1973. SPT practice meets critical review. *Ground Engineering*, 6: 20-22.
 Skempton, A.W. 1986. Standard penetration test procedures and effects in sand of overburden, relative density, particle size, aging, and over-consolidation. *Geotechnique* 36(x): 425-447.
 Sy, A. & Campanella, R.G. 1991. An alternative method of measuring SPT energy. *Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1: 499-505.
 Testconsult Limited 2010. *SPT Hammer Energy Analyzer*.
 Youd, T.L. & Bennett, M.J. 1981. Liquefaction Site Studies Following the 1979 Imperial Valley Earthquake. *ASCE Annual Convention and Exposition*, St. Louis, Mo.