รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๗

ชื่อโครงการวิจัย

การศึกษาพลังงานประสิทธิผลในการทดสอบ
Standard Penetration Test ตามแนวทางการทดสอบที่ดำเนินการ
ในประเทศไทย

เลขที่ ๑๐๓/๒๕๕๗

โดย
สยาม ยิ้มศิริ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ตุลาคม ๒๕๕๗

บทคัดย่อ

ลักษณะการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานในประเทศไทยจากการสำรวจพบว่าใช้ตุ้มตอก 3 ชนิด คือโดนัท, เซฟตี้, และทริป โดยแบบโดนัทได้รับความนิยมที่สุด ก้านเจาะที่ใช้เป็นแบบ AW ขนาดของหลุมเจาะมีขนาด 0.08–0.12 เมตร และทิศทางการหมุนของกว้านมี 2 แบบแต่แบบหมุนทวนเข็มนาฬิกาได้รับความนิยมกว่าแบบหมุนตามเข็มนาฬิกา 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

พลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกโดนัท, เซฟตี้, และทริป มีค่าเท่ากับ 45%, 81%, 89% โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการทดสอบเท่ากับ 27, 12, และ 7% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการปรับแก้พลังงานที่ส่งไปที่ก้านเจาะจากระบบของตุ้มตอกนั้นจำเป็นต้องปรับไปที่ 60% ด้วย ดังนั้นจึงนำเสนอค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรับไปที่ 60% แล้วของตุ้มตอกทั้ง 3 ชนิดซึ่งมีค่าดังนี้ 0.75, 1.35, 1.48 และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการทดสอบเท่ากับ 27, 12, และ 7% ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวจะทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งานมากขึ้นและเมื่อปรับแก้จะทำให้ข้อมูลที่ทดสอบโดยผู้ทดสอบต่างๆมีค่าตรงกันทำให้มีการแปลผลไปสู่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกต้องต่อไป

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. 2557 (เลขที่ 103/2557) จากมหาวิทยาลัยบูรพา โดยส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยนี้ได้ตีพิมพ์เป็นบทความวิจัยในเอกสารการประชุมสัมมนาทางวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 บทความ ดังนี้

Yimsiri, S. (2014), " Correlation between SPT N-value and friction angle of local sands in Eastern of Thailand", Proc. 7th ASEAN Civil Engineering Conference, 7ACEC, Indonesia

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	การปฏิบัติการ (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 ชนิดของตุ้มตอกและความสูงของตุ้มตอกที่ตกกระทบ 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 การเทียบสอบโหลดเซล 4-4
4.4 การทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน 4-6
4.5 การวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน 4-7

บทที่ 5 ผลทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน
5.1 ผลทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานแบ่งตามบริษัทที่ได้ทดสอบในสนาม 5-1
5.1.1 บริษัท A 5-1
5.1.2 บริษัท B 5-2
5.1.3 บริษัท C 5-2
5.1.4 บริษัท D 5-4
5.1.5 บริษัท E 5-5
5.1.6 บริษัท F 5-6
5.1.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง 5-7
5.2 ผลทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานแบ่งตามชนิดของตุ้มตอก 5-8
5.2.1 ตุ้มตอกแบบโดนัท 5-9

5.2.2 ตุ้มตอกแบบเซฟตี้ 5-9
5.2.3 ต้มตอกแบบทริป 5-10
5.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง 5-11
5.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานโดยวิธี FV และ F2 5-14

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง R-1

ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย

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

การทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานมีความแปรปรวนและความแตกต่างของผลการทดสอบ ทั้งนี้เป็นเพราะค่าที่ทดสอบได้แปรผกผันกับพลังงานที่ส่งถ่ายไปยังกระบอกผ่า ฉะนั้นจึงได้เริ่มมีการศึกษาถึงปัจจัยที่ควบคุมปริมาณพลังงานนี้ ซึ่งการศึกษาในช่วงแรกจะศึกษาเรื่องความเร็วของตุ้มตอกก่อนการตกกระทบ การวัดความสัมพันธ์ของแรงกระแทกต่อเวลาในก้านเจาะที่อยู่ใต้ฐานรองตอกและในตำแหน่งเหนือกระบอกผ่า จากผลการศึกษาพบว่ามีการแปรผันของพลังงานในการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน อย่างมากระหว่าง 36-82% โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 56% ภายใต้การทดสอบปกติ โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลกระทบต่อผลการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานคือปริมาณของพลังงานที่ส่งไปที่ก้านเจาะจากระบบตุ้มตอก อย่างไรก็ตามยังไม่เคยมีการวัดพลังงานของการทดสอบ SPT สำหรับการปฏิบัติในประเทศไทย ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค่าพลังงานในการทดสอบ SPT ของเครื่องมือและวิธีการทดสอบที่ใช้ในประเทศไทยโดยเน้นความสนใจไปที่ชนิดของตุ้มตอกแบบต่างๆ ดังนี้ ตุ้มตอกโดนัท, ตุ้มตอกเซฟตี้, และตุ้มตอกทริป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์สำคัญของโครงการวิจัยนี้คือ

- จัดทำรูปแบบฐานข้อมูลของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน เช่น ชนิดของเครื่องมือ, การประกอบเครื่องมือ, และวิธีการปฏิบัติการทดสอบ
- ออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือต้นแบบที่ใช้วัดพลังงานในการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานตามมาตรฐานที่มีอยู่
- ตรวจวัดพลังงานของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานจากตุ้มตอกโดนัท, 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_i)
- แนะนำแนวทางในการทดสอบ SPT ให้ได้ค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- สามารถนำไปเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานสำหรับการทดสอบ SPT ได้ต่อไป

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม

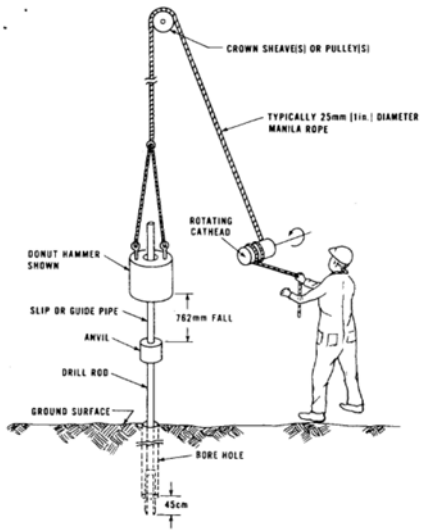
2.1 การทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน

การทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test) หรือเรียกย่อๆว่า SPT ถือกำเนิดขึ้นที่ประเทศสหรัฐอเมริกาจากข้อมูลการตอกเสาเข็มที่เมื่อตอกเสาเข็มลงไปในดินแล้วมีการตอกยากก็สามารถสันนิษฐานได้ว่าเสาเข็มนั้นจะสามารถรับค่าน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้นซึ่งจะควบคุมและตรวจสอบด้วยการวัดค่ายุบตัวหัวเสาเข็มต่อจำนวนครั้งถูกตุ้มตอก ต่อมาจึงมีการพัฒนาให้ใช้กระบอกผ่า, ขนาดน้ำหนักตุ้มตอก, และวิธีการทดสอบที่เป็นเป็นมาตรฐานขึ้นซึ่งในที่นี้มาตรฐานการทดสอบที่ได้รับความนิยมมีอยู่ด้วยกัน 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

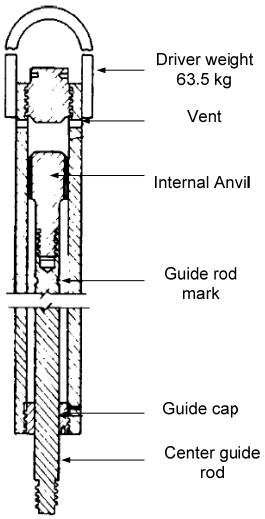
2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ SPT

SPT ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ (ดังแสดงในรูปที่ 2-1)

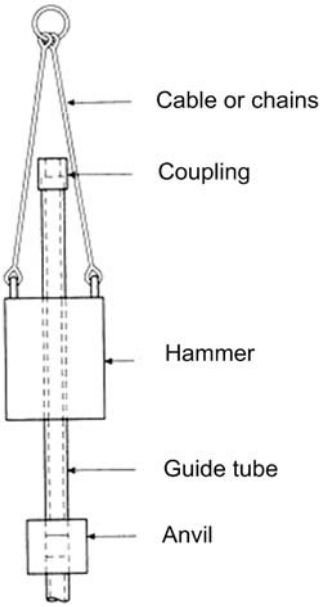
- ตุ้มตอก: น้ำหนัก 63.5 กิโลกรัม (140. 62 ปอนด์) สำหรับประเทศไทยที่นิยมใช้ใน ตุ้มตอกเซฟตี้ แสดงดังในรูปที่ 2-2 และ ตุ้มตอกโดนัท ดังแสดงในรูปที่ 2-3



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



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



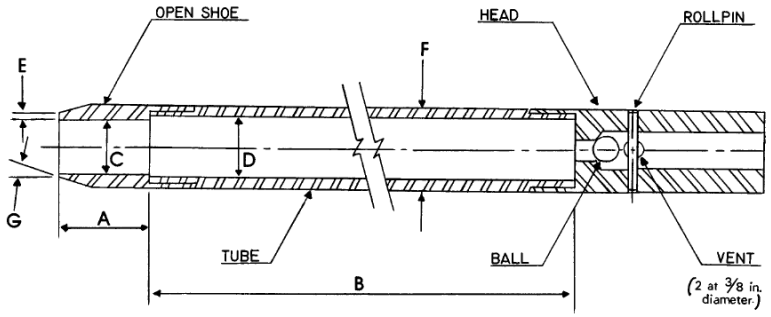
รูปที่ 2-3 ตุ้มตอกโดนัท (Donut Hammer) (สถาพร, 2544)

- ฐานรองตอก (anvil): เป็นอุปกรณ์ที่เป็นตัวรองรับการกระแทกของตุ้มตอกและส่งผ่านพลังงานไปยังก้านเจาะ ซึ่งที่นิยมใช้กันในประเทศไทย มีอยู่ 2 แบบ คือ
  - ชุดฐานรองตอกชนิดน็อคบล็อก (Knock Block) เป็นอุปกรณ์ง่ายๆชิ้นเดียวที่สามารถต่อเข้ากับก้านเจาะทำหน้าที่รองรับการกระแทกจากตุ้มตอก
  - ชุดฐานรองตอกชนิดไดรไพพ (Drive Pipe Assembly) เหมาะกับการใช้งานหนัก (Heavy Duty) ประกอบด้วยท่อนำ ที่ส่วนกลางและส่วนบนมีเกลียวสำหรับต่อก้านเจาะทำด้วยท่อเหล็กหนา ทำให้มีน้ำหนักสูงเป็นภาระในการขนย้าย
- หัวกว้าน (Cat head): เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการยกและปล่อยตัวของตุ้มตอกให้กระแทกกับฐานรองตอก

- ก้านเจาะ: มีลักษณะคล้ายกับหลอดหรือท่อเปลือกบางแต่ว่ามีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ซึ่งก้านเจาะจะมีความยาวมาตรฐาน ที่ 3.0 เมตร ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนกำลังสูง โดยสามารถแสดงชนิดก้านเจาะต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2-1
- กระบอกผ่า โดยกระบอกผ่านี้จะแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วนซึ่งขนาดส่วนต่างๆแสดงไว้ในรูปที่ 2-4 โดยกระบอกผ่านี้จะทำจากเหล็กที่แข็งแรง เพื่อทนต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้น
- ท่อเหล็กกันดิน (Casing) ทำหน้าที่ค้ำยันผนังของหลุมเจาะไม่ให้พังทลาย มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 75–100 มิลลิเมตรยาวท่อนละ1.0 – 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 ภาพตัดแนวขวางของกระบอกเก็บตัวอย่าง (ASTM D1586, 1999)

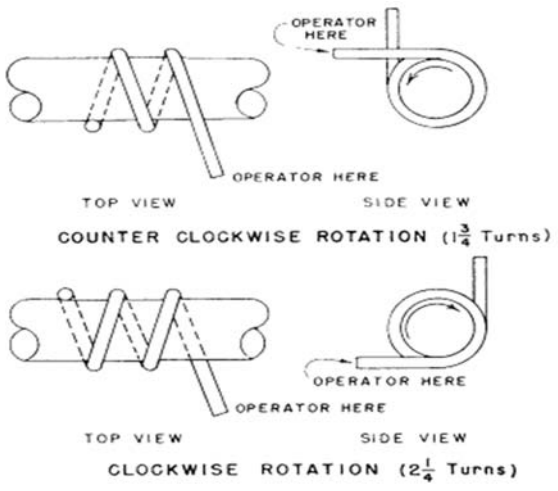
การตรวจเช็คอุปกรณ์ ก่อนที่จะทำการทดสอบ กระบอกเก็บตัวอย่างและก้านเจาะจะต้องได้รับการตรวจสภาพก่อนทุกครั้งและหลังจากการทำการทดสอบผ่านไปประมาณ 20 ครั้งและเครื่องมือในการวัดพลังงานจะต้องตรวจสอบทุกๆครั้งหรืออย่างน้อยทุกๆ 6 เดือนเพื่อให้มีความมั่นใจในการวัดค่าต่างๆในการทดสอบจะได้ไม่มีปัญหา

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 แต่ถ้าเจอชั้นที่แข็งอาจจะต้องใช้หัวเจาะหินหรือหัวเจาะแบบดแร็กแทน เมื่อเจาะจนถึงระดับที่ต้องการจะทดสอบ SPT ให้ค่อยๆดึงก้านเจาะขึ้นมาเพื่อเปลี่ยนหัวเจาะที่ใช้เป็นกระบอกเก็บตัวอย่างลงไปเพื่อจะทำการทดสอบ SPT โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- หลังจากเจาะเตรียมหลุมจนถึงระดับที่ต้องการที่จะทดสอบ SPT ให้ประกอบกระบอกเก็บตัวอย่างเข้ากับก้านเจาะแล้วขันให้แน่นหลังจากนั้นค่อยๆปล่อยลงสู่ก้นหลุมอย่างช้าๆ
- ประกอบฐานรองตอกเข้ากับก้านเจาะและวัดระยะที่ก้านเจาะพร้อมทำสัญลักษณ์ไว้ 3 ตำแหน่งตำแหน่งละ 15 ซม. (0.5 ฟุต) แล้วกระแทกตุ้มตอกกับฐานรองตอกที่ความสูง 76 ซม. (30 นิ้ว) โดยให้ตกลงไปอย่างอิสระที่สุด และในการยกตุ้มตอกนั้นจะใช้วิธีการพันเชือกกับหัวกว้านซึ่งวิธีการพันเชือกจะมีอยู่สองลักษณะคือ อยู่ข้างล่างหัวกว้าน ($2^1/_4$รอบ)กับอยู่ข้างบนหัวกว้าน ($1^3/_4$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
- จะต้องมีการเข้มงวดกับผู้ที่ดึงเชือกทดสอบว่ามีการปล่อยตุ้มตอกด้วยกว้านเชือกในลักษณะการปล่อยตกโดยอิสระ เพื่อไม่ให้ ค่า N สูงกว่าความเป็นจริง
- ถ้าตรวจสอบได้ว่าหลุมเจาะเกิดการถล่มก่อนการทดสอบ Standard Penetration Test จะต้องทำการล้างหลุมเจาะใหม่ให้ได้ความลึกที่ต้องการ เพราะถ้าไม่ล้างหลุมเจาะใหม่ จะทำให้ปลายกระบอกผ่าตั้งอยู่บนดินทรายที่ถล่มลงมาซึ่งปกติแล้วทรายที่ถล่มจะเป็นทรายที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่าทรายเดิมในธรรมชาติที่ความลึกนั้นอาจจะส่งผลให้ค่าการทดสอบคลาดเคลื่อน
- หมั่นตรวจสอบสภาพของกระบอกผ่า ว่าอยู่ในสภาพใช้งานได้ โดยสภาพการประกบตามแนวยาวของกระบอกผ่าต้องชิดสนิท ถ้ากระบอกผ่าไม่ประกบสนิทตามแนวยาวต้องซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใหม่

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
- $Ø_{ใน}$	38.1 ± 1.3 mm	35 mm	35 ± 1 mm	35 ± 1 mm
- $Ø_{นอก}$	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 (ไม่รวมการปรับแก้ความดันกดทับ) คือ การปรับแก้ผลกระทบจากปริมาณพลังงาน การปรับแก้ผลกระทบเนื่องจากความยาวก้านเจาะ การปรับแก้ผลกระทบจากกระบอกตัวอย่างและการปรับแก้ผลกระทบจากขนาดหลุมเจาะ แต่อย่างไรก็ตามหลังจากปรับแก้ผลกระทบต่างๆที่ได้กล่าวมาในที่นี้ ก็ต้องปรับแก้ค่า N ไปที่ 60 % ซึ่งสามารถแสดงการปรับแก้ N'_{60} คำนวณได้ดังสมการที่ (2-1)

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

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				
	Donut		Safety		
Country	R - P	Trip	R - P	Trip/Auto	R-P = Rope-pulley or cathead
US /North America	45	-	70-80	80– 100	$\eta_1 = E_r/E_{rb}$
Japan	67	78	-	-	For U.S. Trip/Auto
UK	-	-	50	60	w/E_r = 80
China	50	60	-	-	η_1 = 80/60 = 1.14

	Rod length η_2		
	Length	> 10 m	η_2 = 1.00
		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		
	Ø Hole (mm)	60-120	1.00
		150	1.05
		200	1.15

oversize hole

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 Palicios (1979) ค้นพบวิธี EF^2 ในปี 1977 โดยใช้หลักการในการรวมแรงเข้าด้วยกัน ซึ่งเขาใช้มาตรวัดความเครียดติดในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของก้านเจาะเพื่อวัดแรงที่ส่งถ่ายจากตุ้มตอกไปสู่ก้านเจาะ ซึ่งหลังจากศึกษาผลสรุปออกมาว่า สามารถหาพลังงานที่ส่งถ่ายจากตุ้มตอกไปสู่ก้านเจาะ โดยใช้สมการการคำนวณดังแสดงได้ในสมการที่ (2-2)

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

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 โดนัท ในการทำการวิจัยครั้งนี้รวมทั้งการหาความสัมพันธ์ของจำนวนรอบที่พันกับหัวกว้านที่จะเหมาะสมกับการทดสอบ SPT มากที่สุดซึ่งผลจากงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปใจความสำคัญได้ว่า ตุ้มตอกเซฟตี้ จะมีประสิทธิภาพมากกว่าในการถ่ายทอดพลังงานจากตุ้มตอกไปสู่ก้านเจาะเนื่องมาจากสาเหตุที่ตุ้มตอกชนิดนี้มีการควบคุมระยะการตกกระทบได้แน่นอนกว่าต่างกับตุ้มตอกโดนัทที่การควบคุมการตกกระทบขึ้นอยู่กับการความชำนาญของผู้ทดสอบ SPT เสียเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพของตุ้มตอกเซฟตี้นั้นดีกว่าตุ้มตอกโดนัท และจำนวน 2 รอบ คือคำแนะนำที่ดีที่สุดที่ในการพันเชือกกับหัวกว้านเพราะมีการส่งถ่ายพลังงานได้ดีที่สุด

(b) Force Velocity Method (EFV)

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

$$EFV = \int_{0}^{max} F(t)v(t)dt \qquad (2\text{-}3)$$

โดยที่ EFV = พลังงานที่เปลี่ยนแปลงของก้านเจาะ

F(t) = แรงในก้านเจาะ

Max = เวลาที่พิจารณามาจากช่วงเวลา $2^{L}/_{C}$

V(t) = ความเร็วที่วัดได้ในก้านเจาะ

(c) การเปรียบเทียบระหว่างวิธี EF^2 กับวิธี EFV

Abou–matar and Goble (1997) ได้ศึกษาเรื่องการวัดและการวิเคราะห์พลวัตของการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐาน โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ทดลองในสนามเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยสมการคลื่นจากคอมพิวเตอร์ และการศึกษาในครั้งนี้ใช้สมการในการวัดพลังงานแบบ EF^2 และ EFV โดยหลังจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ ถ้าใช้การวัดพลังแบบ EF^2 ค่าที่ได้จะผิดพลาดประมาณ 10% แต่ถ้าใช้ ระบบการวัดแบบ 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 EF^2 (Farrar, 1998)

Date /Author/Agency	Series	Hammer Type	Rod Type	N Blow count	Avg EFV	Avg 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 / Oregon DOT	C - R5 - 1	Mobile Auto	BW	49	62	60
1995 / GRL / Oregon DOT	D - R6 - 1	CME Auto	BW	58	82	95
1995 / GRL / Oregon DOT	B - R4 - 1	CME Auto	BW	54	78	93
1995 / GRL / Oregon DOT	A - R2 - 1	CME Auto	BW	56	78	118
1995 / GRL / Oregon DOT	A - R1 - 1	CME Auto	BW	56	82	102
1997 / Lamb / Minn. DOT		CME Auto	N	> 58	66	
1997 / Lamb / Minn. DOT		CME Auto	N	55	78	

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 จะอธิบายตั้งแต่อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพลังงานจนไปถึงวิธีปฏิบัติทดสอบการวัดพลังงาน

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 แต่เมื่อก้านเจาะที่ยาวน้อยกว่า 15 เมตร การเปลี่ยนแปลงพลังงานก็จะลดลง จนไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า การส่งถ่ายพลังงานของการทดสอบ SPT เมื่อขนาดของก้านเจาะสั้นกว่า 15 เมตร จะมีแนวโน้มลดลง

ต่อมา Daniel *et al.*(2005) ได้ตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากก้านเจาะโดยได้รวบรวมงานวิจัยที่ได้เคยตรวจสอบผลกระทบของก้านเจาะ ซึ่งผลของงานวิจัยต่างๆนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 2-6 และเขาได้ทำการศึกษาอิทธิพลของก้านเจาะด้วยเช่นกัน แต่งานวิจัยของเขาได้ใช้วิธีการวัดพลังงานแบบ EFV ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยเมื่อครั้งอดีตที่ส่วนใหญ่มักใช้วิธีการวัดพลังงานแบบ EF^2 โดยความยาวของก้านเจาะที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้นั้นมีอยู่สองความยาวคือ 3.49 เมตร และ 6.49 เมตร ซึ่งสรุปได้ว่า ที่ความยาว 3.49 เมตรมีค่าปรับแก้จากขนาดความยาวของก้านเจาะเท่ากับ 0.71 และที่ความยาว 6.49 มีค่าปรับแก้จากขนาดความยาวของก้านเจาะเท่ากับ 0.97

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

Rod length correction factor

Rod length	Seed *et al* (1985)	Skempton (1986)	Morgano and Liang (1992)	Youd *et al* (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

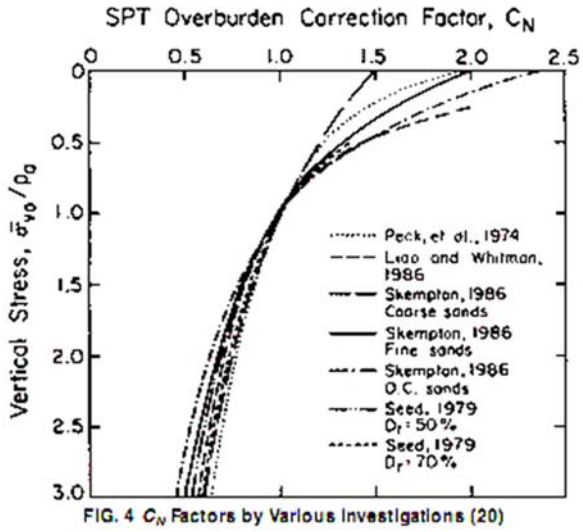


FIG. 4 C_N Factors by Various Investigations (20)

รูปที่ 2-6 ตัวปรับแก้ค่า C_N ที่ได้จากงานวิจัยต่างๆ (ASTM D6066)

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

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

โดยที่ σ_v' มีหน่วยเป็น kN /m^2

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

สำหรับ ทรายละเอียด $C_N = \frac{2}{1 + \sigma v'}$ (2-6)

สำหรับทรายหยาบ $C_N = \frac{3}{2 + \sigma v'}$ (2-7)

โดยที่ σ_v' มีหน่วยเป็น kN /m^2

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

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

โดยที่ σ_v' มีหน่วยเป็น kN /m^2

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

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

Type of Sand	Density index Id (%)	C_N
Normally Consolidation	40 to 60	$\frac{2}{1+\sigma v'}$
	60 to 80	$\frac{3}{2+\sigma v'}$
Over Consolidation ($\sigma v'$, in kPa $\times 10^{-2}$)		$\frac{1.7}{0.7+\sigma v'}$

2.2.4 การปรับแก้เนื่องจากระดับน้ำใต้ดิน

สำหรับดินที่มีขนาดละเอียดมากหรือดินทรายตะกอนที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน ค่าทะลุทะลวงมาตรฐานที่ได้จากการทดสอบต้องปรับแก้ โดยสามารถปรับแก้ได้จากสมการที่ (2-9)

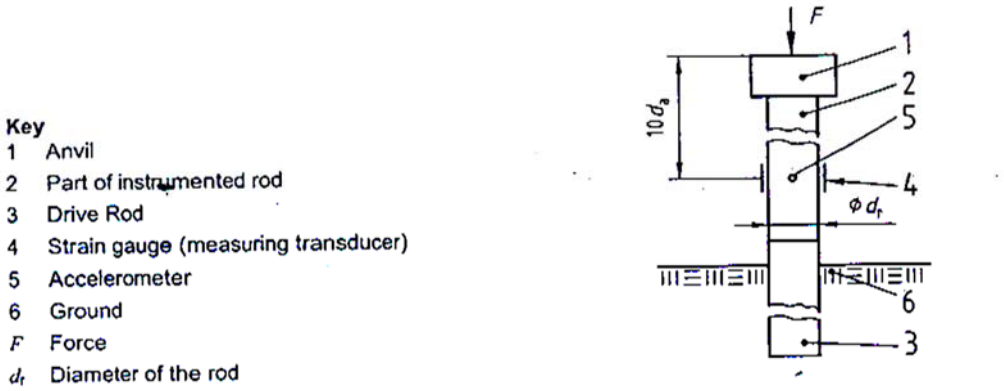
$$N_{corrected} = 15 + 0.5(N_{measured} - 15) \quad (2\text{-}9)$$

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) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเร่งเกิดขึ้นจากการทำการทดสอบ SPT โดยจะทำการติดบริเวณก้านเจาะ เพื่อวัดความเร่งต่อเวลาที่เกิดขึ้นกับก้านเจาะเวลาตุ้มตอกกระทบฐานรองตอก



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

2.3.2 อุปกรณ์สำหรับการวัด การจัดการ และ การแสดงข้อมูล

โดยทั่วไปแล้ว การจัดการเกี่ยวกับการบันทึก แรงและความเร่งที่ส่งถ่ายเมื่อค้อนเกิดการกระทบกับฐานรองตอก จะสามารถกระทำได้ตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

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

2.3.3 การเทียบสอบ (Calibration)

- อุปกรณ์สำหรับวัดแรง (Force transducer) ในการเทียบสอบอุปกรณ์วัดแรงจะต้องมีความผิดพลาดไม่เกิน ± 2 % อุปกรณ์ต้องรับแรงอย่างน้อย 70 % ของแรงทั้งหมด การเทียบสอบเมื่อคำนวณค่าหน้าตัดประสิทธิผล (A_c) ค่าที่ได้จะต้องมากกว่า 5 % ของ ก้านเจาะเดิม โดยที่ $A_c = F/E\varepsilon$ เมื่อ F คือแรงที่จากการวัด E โมดูลัสของเหล็กมีค่าเท่ากับ 20600 MPa ε คือค่า ความเค้นที่วัดได้จากการเทียบสอบ
- อุปกรณ์สำหรับวัดความเร่ง (Acceleration transducer) การปรับแก้ต้องมีค่าความผิดพลาดที่ยอมให้ได้ต้องไม่เกิน ± 3 % การปรับแก้ทำได้โดยใช้ฮอบกิ้นบาร์ Hopkins in ' s Bar
- ความถี่ในการปรับแก้ ต้องกระทำอย่างสม่ำเสมอหรือกระทำเป็นช่วงเวลาที่เป็นข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิตหรือทุกๆ 3 ปี เป็นอย่างน้อย

2.3.4 การปฏิบัติการ (Procedure)

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

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

โดยที่ EFV = ปริมาณพลังงานจากการทดสอบวัดพลังงาน (J)

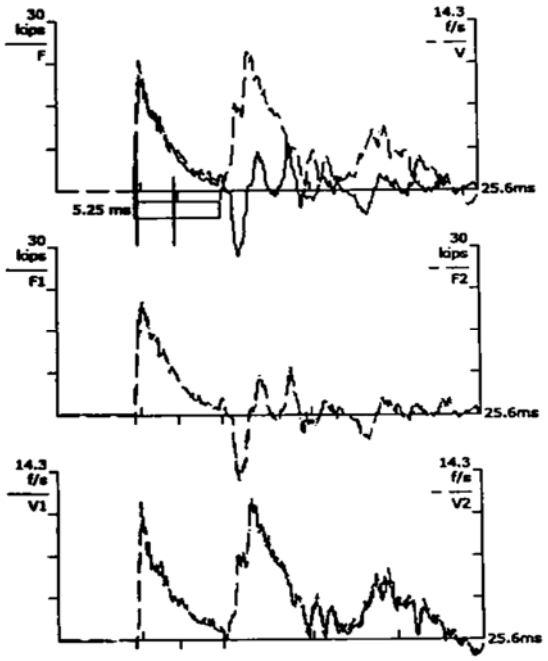
E_{in} = input energy =Wgh (475 J)

W = น้ำหนักของตุ้มตอก (kg)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

h = ความสูงของการยกตุ้มตอก (m)

การวัดพลังงานจากการทดสอบ SPT ที่กล่าวมาทั้งหมด 2 มาตรฐานนั้นอาจยังจะไม่เข้าใจถึงความแตกต่างอยู่บ้างจึงทำการสรุปเพื่อให้เข้าใจได้ดีขึ้น 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_a
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 ± 3%	ไม่ระบุ

2.4 การใช้ค่าจำนวนครั้งของการตอกทะลุทะลวงมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของดิน

ค่าจำนวนนับในการตอก(N- Blow count) ถูกนำมาใช้ในการหาค่าคุณสมบัติต่างๆของดินเสมอ ซึ่งคุณสมบัติต่างที่สามารถใช้ค่าทะลุทะลวงมาตรฐานหาได้นั้น จะประกอบด้วย การจำแนกประเภทดิน การหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Undrained ของดินเหนียว การหาค่าความแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย การหาค่ามุมเสียดทานของดินทราย และโมดูลัสยืดหยุ่นของดินทราย

2.4.1 การจำแนกประเภทของดิน

การจำแนกประเภทของดินเหนียวหรือดินทราย โดยใช้ค่าจำนวนครั้งของการตอกทะลุทะลวงมาตรฐานแบ่งชั้นดินออกเป็นชั้นต่างๆ 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) แนะนำการหากำลังของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength Su) โดยใช้ค่า N ที่ทดสอบได้จากการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-11)

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

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

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

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

2.4.3 การหาค่าความแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย

Meyerhof (1957) แนะนำการหาค่าความแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย โดยแบ่งออกเป็น2แบบ คือ ทรายแบบ NC และ ทรายแบบ OC ซึ่งค่าความแน่นสัมพัทธ์ หาได้จากสมการ (2-14) และ (2-15)

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

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

โดยที่ D_r (%)= ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์

σ'_v = Effective vertical stress kN/m^2

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

$$Dr = \sqrt{\frac{N'_{60}}{C_P C_A C_{OCR}}} \qquad (2\text{-}16)$$

โดยที่ D_r = ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์

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

C_A = 1.2 + 0.05log(t/100)

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

2.4.4 การหาค่ามุมต้านทานของดินทราย

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

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

Meyerhof (1959) นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายในกับค่า N ดังสมการที่ (2-18) และ (2-19)

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

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

โดยที่ ϕ = มุมต้านทานของดินทราย

σ'_v = หน่วย kN/m^2

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

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

Schmertmann (1975) แนะนำวิธีสำหรับหาค่ามุมต้านทานของดินทรายโดยแสดงได้ดังสมการที่ (2-21)

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

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)

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

ทราย NC E = 10 σ_{v0} N'_{60} (2-23)

ทราย OC E = 15 σ_{v0} N'_{60} (2-24)

โดยที่ E = โมดูลัสยืดหยุ่น

σ_{v0} = 100 kN/m^2

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 ชนิดของตุ้มตอกและความสูงของตุ้มตอกที่ตกกระทบ

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

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

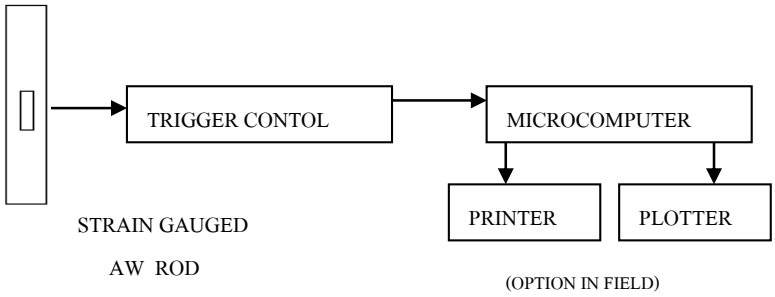
Tsai *et al* (2004) ได้ทำการศึกษาเรื่องผลกระทบจากชนิดของตุ้มตอก SPT แบบต่างๆโดยในการศึกษาเขาใช้ค้อน 4 รูปแบบคือจะประกอบด้วยโดนัท 3 รูปแบบและอีกหนึ่งเซฟตี้ ซึ่งมีวิธีการศึกษาโดยการติด Force Transducer บนแท่นรองตอก และติด Load cell กับก้านเจาะเพื่อวัดการส่งถ่ายพลังงานระหว่างตุ้มตอกกับก้านเจาะ แต่ผลปรากฏว่าผลกระทบจากตุ้มตอกทั้ง 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 การใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัยอัลเบอร์ต้า ที่โครงการเขื่อนเทลลิ้งในประเทศจีน โดยในการวัดพลังงานครั้งนี้ใช้วิธีการวัดพลังงานแบบ EF^2 แต่ก็สามารถที่จะใช้วิธี EFV ได้เช่นกันถ้ามีการพัฒนาต่อไป

ต่อมา Robertson *et al.* (1992) ได้นำคอมพิวเตอร์มาเป็นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณเช่นกันในงานวิจัยโดยระบบการวัดพลังงานนั้นสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2-9 ซึ่งอุปกรณ์วัดพลังจะประกอบด้วยเครื่องมือดังนี้คือ ก้านเจาะชนิด AW ยาว 0.5 เมตร มาตรวัดความเครียด จำนวน 8 ตัว กล่องควบคุมสัญญาณ (Trigger Control) และ คอมพิวเตอร์ ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ได้ทำขึ้นในประเทศจีนโดยเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเกี่ยวกับความมั่นคงแข็งแรงของเขื่อนเทลลิ้งเนื่องจากแผ่นดินไหว และหลังจากการทดสอบผลก็ออกมาว่าค่าพลังงานที่วัดมาได้มีผลเป็นที่หน้าพอใจที่จะใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์วัดพลังงานของการทดสอบ SPT



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

บทที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง, แผนการทดลอง, และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

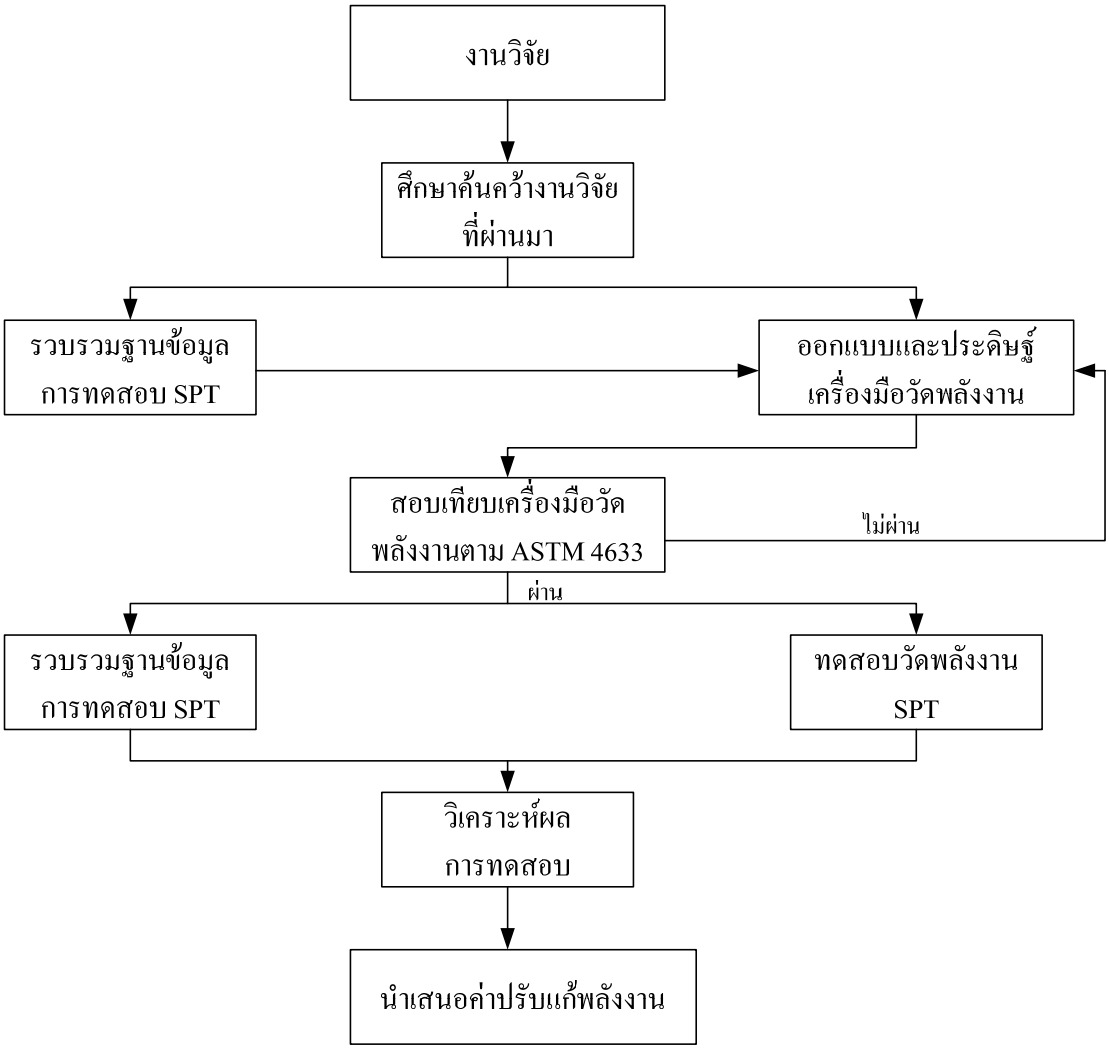
- ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ SPT ตามมาตรฐาน การทดสอบ ASTM D1586 (1999)
- ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพลังงาน ตามมาตรฐาน การทดสอบ ASTM D4633 (2005) ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ (แสดงได้ดังรูปที่ 3-1)

  - ก้านเจาะชนิด AW ยาว 0.83 เมตร
  - โลดเซล จำนวน 2 ชุด (Load cell 1 ชุดทำจาก Strain gage 350 Ω 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



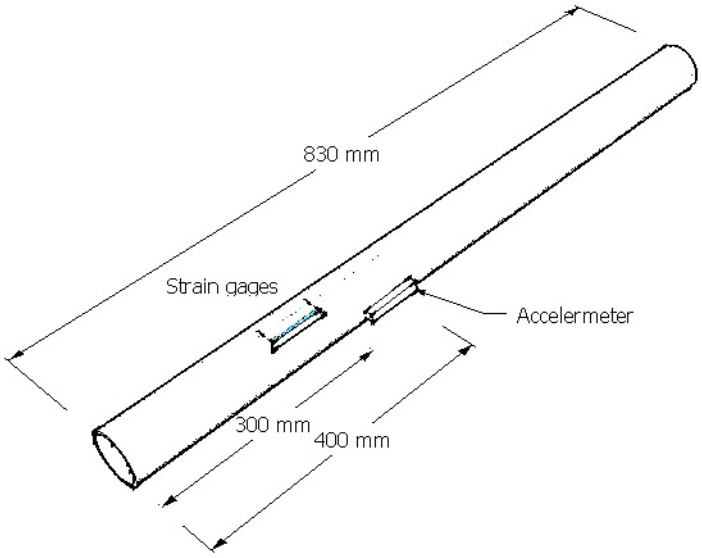
รูปที่ 3-2 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

3.3 วิธีการทดลอง

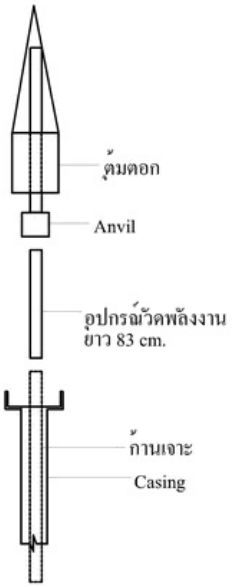
- ทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวัดพลังงาน SPT เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัย
- ทำการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบ SPT ประเภทต่างๆ เช่น ชนิดของเครื่องมือ วิธีการทดสอบ และวิธีการในการประกอบเครื่องมือในการทดสอบ SPT จากบริษัทต่างๆที่รับทดสอบเจาะสำรวจ SPT
- ออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้วัดพลังงาน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

พื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์วัดพลังงานที่ได้จากการวัด ซึ่งในการสอบเทียบทำโดยใช้เครื่อง UTM กดและดึงก้านเจาะพร้อมทั้งวัดโวลต์ 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 โดยใช้วิธีการอินติเกรตแรงและความเร็วซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของเวลา(EFV), ปริมาณพลังงานประสิทธิผล(ETR) และศึกษาลักษณะความแปรปรวนของพลังงานการทดสอบ SPT
- สรุปผลการทดสอบพร้อมทั้งนำเสนอมาตรฐานการปรับแก้ต่างๆ นี้
  - ค่าปริมาณพลังงานประสิทธิผล(ER_i) เนื่องจากลักษณะต่างๆการทดสอบ SPT อาทิ ลักษณะของตุ้มตอก(โดนัท เซฟตี้ และ ทริป) และ ลักษณะตำแหน่งของปลายเชือก (ด้านบนหัวกว้าน ด้านล่างหัวกว้าน)
  - ค่าความแปรปรวนจากการทดสอบวัดพลังงาน SPT เพื่อความมั่นใจในการนำค่าที่ได้ไปใช้งาน
  - เปรียบเทียบปริมาณพลังงานประสิทธิผลจากการทดสอบ SPT สำหรับประเทศไทยกับมาตรฐานทดสอบวัดพลังงานของต่างประเทศ



รูปที่ 3-3 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดพลังงาน



รูปที่ 3-4 การประกอบอุปกรณ์วัดพลังงาน

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์วัดพลังงาน

รายละเอียด	เอกสารเผยแพร่ของบริษัท		มาตรฐานทดสอบวัดพลังงาน		อุปกรณ์วัดพลังงาน
	Test consult	Pile dynamic	ASTM D 4633	ISO 22476 – 3	สำหรับงานวิจัยนี้
Instrument Rod					
ความยาว	1000 mm	600 mm	ไม่น้อยกว่า 600 mm	ไม่ระบุ	830 mm
ขนาด	54 มม. (OD)	AW , NW	ขนาดเดียวกับก้านเจาะ	ไม่ระบุ	AW,44.3 mm (OD)
Stain gauge					
จำนวน	2 ชุด	2 ชุด (350 Ω)	2 ชุด	ไม่ระบุ	2 ชุด (350 Ω) ชุดละ 4 ตัว
วงจร	Full bridge	Full bridge	Full bridge	ไม่ระบุ	Full bridge
ตำแหน่งติดตั้ง	ไม่	ไม่	ไม่น้อย	10 d_a	300

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

บทที่ 4 การประดิษฐ์อุปกรณ์วัดพลังงาน

4.1 การรวบรวมลักษณะการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน

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
ชนิดเครื่องเจาะ	สามขา	แท่นเจาะ	แท่นเจาะ	แท่นเจาะ		แท่นเจาะ	สามขา	แท่นเจาะ
จำนวนรอก	1 ตัว	2 ตัว	2 ตัว	2 ตัว		2 ตัว	1 ตัว	2 ตัว
ตุ้มตอก								
ชนิด	โดนัท	โดนัท	โดนัท	โดนัท	เซฟตี้	ทริป	โดนัท	โดนัท	เซฟตี้
Ø (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
ฐานตอก	Knock Block	Knock Block	Knock Block	Knock Block	-	-	Knock Block	Knock Block	-
Ø (ม.)	0.13	0.10	0.13	0.10	-	-	0.11	0.10	-
หัวกว้าน Ø (ม.)	0.14	0.13	0.12	0.15		0.14	0.12	0.15
ทิศทางการหมุน	ทวนเข็ม	ทวนเข็ม	ทวนเข็ม	ทวนเข็ม		ทวนเข็ม	ตามเข็ม	ทวนเข็ม
ก้านเจาะ	AW	AW	AW	AW		AW	AW	AW
Øนอก (ม.)	0.045	0.044	0.043	0.044		0.034	0.044	0.045

Øใน (ม.)	0.035	0.033	0.032	0.034	0.044	0.033	0.035
ตำแหน่งปลายเชือก	บนหัวกว้าน	บนหัวกว้าน	บนหัวกว้าน	บนหัวกว้าน	บนหัวกว้าน	ล่างหัวกว้าน	บนหัวกว้าน
จำนวนรอบ	**ขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงานหน้าสนามเป็นผู้กำหนดตามความเหมาะสม**						
Ø เชือก (ม.)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
กระบอกผ่ายาว(ม.)	0.535	0.669	0.545	0.724	0.653	0.597	0.623
Øนอก (ม.)	0.05	0.05	0.05	0.051	0.05	0.058	0.05
Øใน (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

รายละเอียดของข้อมูลการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานเกี่ยวกับเครื่องมือและวิธีการปฏิบัติงานจากตารางที่ 4-1 สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในการทดสอบนิยมใช้แท่นเจาะมากกว่าสามขาซึ่งเครื่องเจาะมีรอกจำนวน 2 ตัว ดังนั้นจึงสอดคล้องกับข้อมูลของ Kovacs (1980) ที่ได้สำรวจข้อมูลการทดสอบในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งได้ระบุว่าจำนวนรอกที่ใช้มีจำนวน 2 ตัวเช่นกัน

ตุ้มตอกที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิด แต่แบบโดนัทเป็นแบบที่ใช้แพร่หลายมากที่สุด โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.15 – 0.22 ม. และมีความสูงของตุ้มตอกประมาณ 0.11 – 0.44 ม.ซึ่งพบว่าเหมือนกับประเทศญี่ปุ่นที่ Yoshiaki and Tokimatsu (1984) ได้สำรวจว่ามีการใช้ตุ้มตอกโดนัททดสอบเช่นกันโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 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 แบบตามเข็ม(ตำแหน่งปลายเชือกจะอยู่ด้านล่างหัวกว้าน) และแบบทวนเข็ม (ตำแหน่งปลายเชือกจะอยู่ด้านบนหัวกว้าน)แต่ในข้อมูลที่สำรวจส่วนมากเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกาที่ Kovacs (1980) ได้สำรวจและกล่าวว่า ในประเทศ

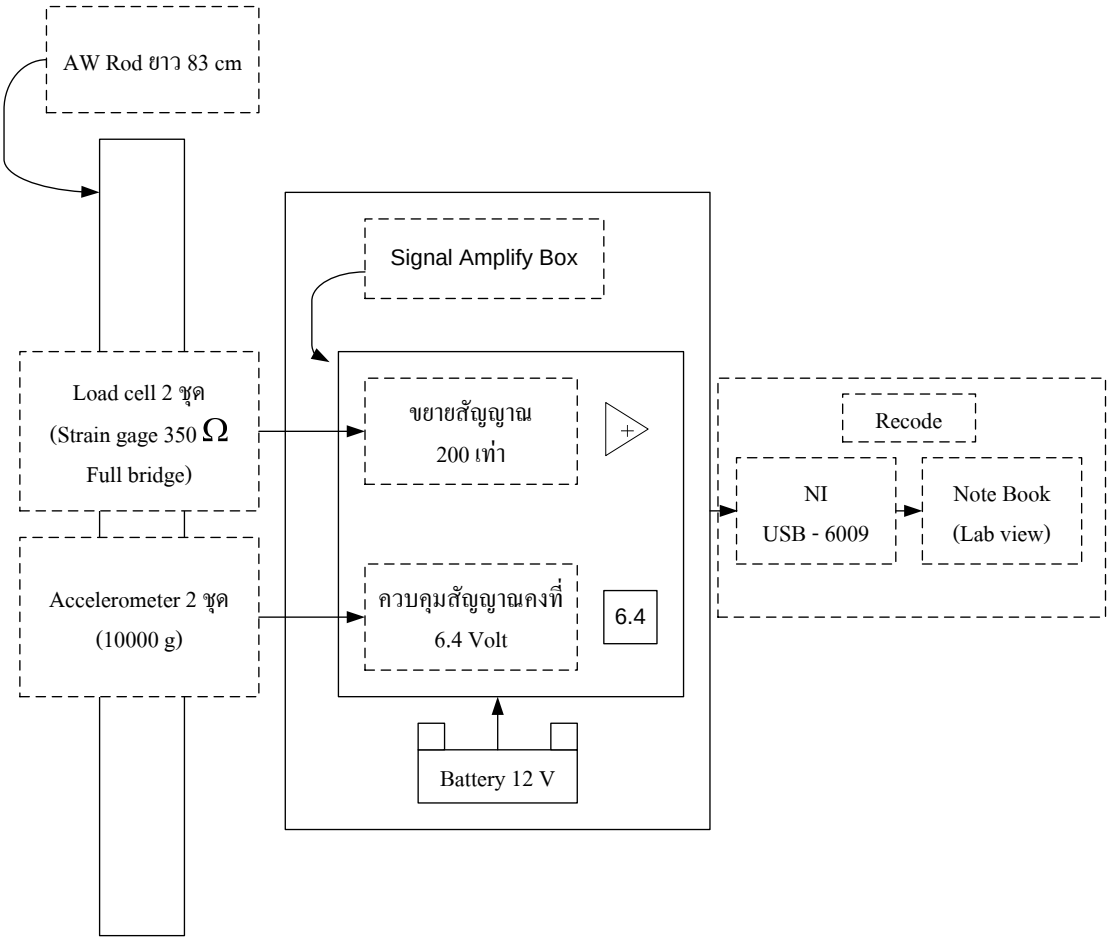
สหรัฐอเมริกา การหมุนของหัวกว้านที่ได้รับความนิยมมีทั้ง 2 แบบใกล้เคียงกันแต่ไม่มีวิธีใดได้รับความนิยมเป็นพิเศษ

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) ต่อวงจรแบบ full bridges ส่วน Accelerometers มีการตอบสนอง 10000 g

4.2.2 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ชุดขยายสัญญาณของ load cell และ ชุดควบคุมสัญญาณของ Accelerometers ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

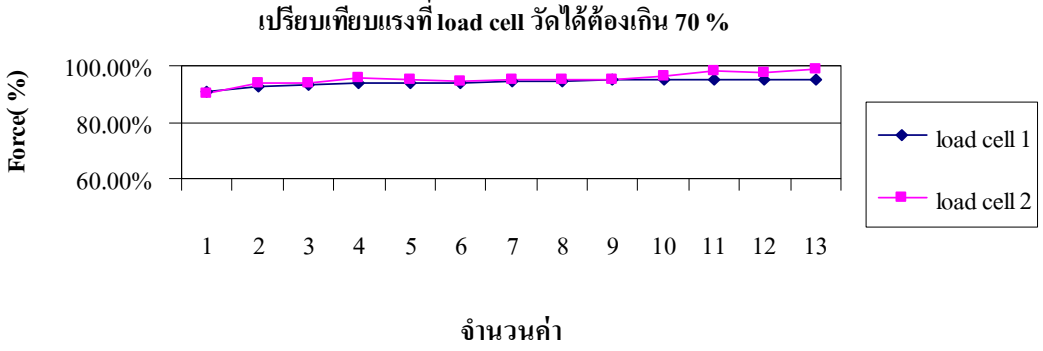
- ชุดขยายสัญญาณจาก Strain gage จำเป็นจะต้องใช้ชุดขยายสัญญาณเพื่อให้สามารถอ่านและบันทึกค่าได้ เพราะฉะนั้นในงานวิจัยครั้งจำเป็นที่ต้องใช้ชุดขยายสัญญาณโดยเลือกใช้ค่าการขยาย 200 เท่า และชุดขยายสัญญาณมี V_{in} เท่ากับ 5 V
- ชุดควบคุมสัญญาณ Accelerometers ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีความจำเป็นต้องควบคุมให้มี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

4.2.3 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ

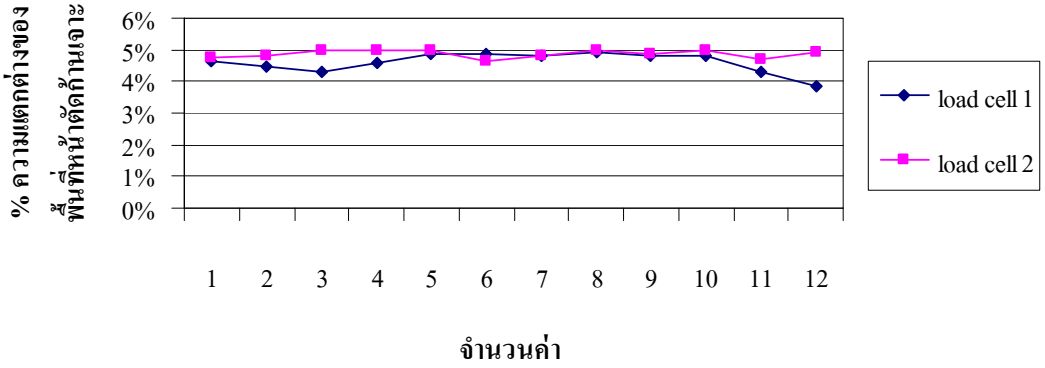
สำหรับ load cell และ Accelerometers นั้น ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ NI USB – 6009 ซึ่งมี 14 Bit และมีช่องสำหรับต่อ load cell และ Accelerometers ทั้งหมด 4 ช่อง โดยเลือก V_{in} ของช่อง load cell เท่ากับ ±2.5 V และ V_{in} ของช่อง Accelerometers เท่ากับ ±1 V ซึ่งสัญญาณทั้งหมดจะถูกบันทึกลง Note book โดยใช้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

4.3 การเทียบสอบโหลดเซล

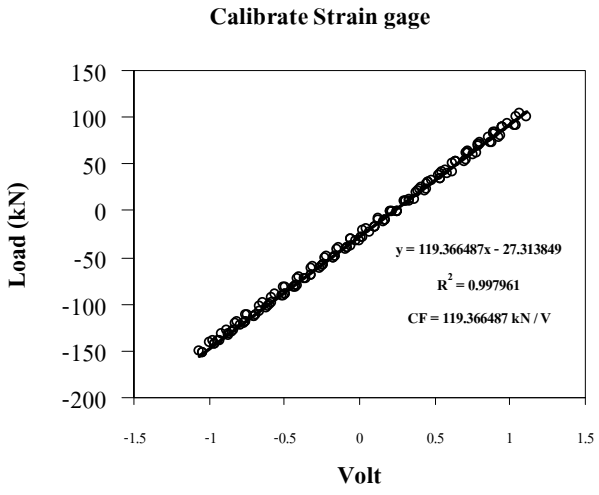
การเทียบสอบโหลดเซล (load cell) ตามมาตรฐาน ASTM D4633 กำหนดว่าในการสอบเทียบนั้นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข 2 ข้อ คือ โหลดเซลต้องสามารถวัดแรงได้อย่างน้อย 70 % ของแรงทั้งหมด และพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์วัดพลังงานที่ได้จากการคำนวณจะต้องมีความแตกต่างไม่เกิน 5% กับพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์วัดพลังงานที่ได้จากการวัด โดยในการเทียบสอบโหลดเซล ในงานวิจัยนี้ทำโดยใช้เครื่อง UTM กดและดึงก้านเจาะพร้อมทั้งวัด Volt ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม load ที่เพิ่มขึ้น-ลดลง จำนวน 3 รอบการทดสอบ (กำหนดให้แรงดึงเท่ากับ 150 kN, แรงอัดเท่ากับ 100 kN) หลังจากสอบเทียบเสร็จสิ้นต้องทำการตรวจเช็คเพื่อตรวจสอบว่าการเทียบสอบนี้ผ่านเงื่อนไขทั้งสองข้อที่กล่าวถึงหรือไม่ซึ่งการตรวจสอบนั้นทำได้โดยการคำนวณเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดที่วัดได้จริง โดยพื้นที่หน้าตัดที่วัดจริงเท่ากับ 0.00072 m ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบก็ผ่านทั้ง 2 เงื่อนไข และได้แสดงผลของการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4-2 และ 4-3 และเมื่อตรวจสอบว่าได้ผ่านเงื่อนไขที่กำหนดไว้ก็จะหาสัมพันธ์ระหว่าง โหลด กับ โวลต์ เพื่อเป็นสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่าของโหลดเซลซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-2 ความสามารถของโหลดเซลต้องสามารถวัดแรงได้ไม่น้อยกว่า 70 %



รูปที่ 4-3 ความแตกต่างของพื้นที่หน้าตัดที่คำนวณกับการวัดต้องแตกต่างไม่เกิน 5%



รูปที่ 4-4 สัมประสิทธิ์ปรับแก้จากการเทียบสอบ

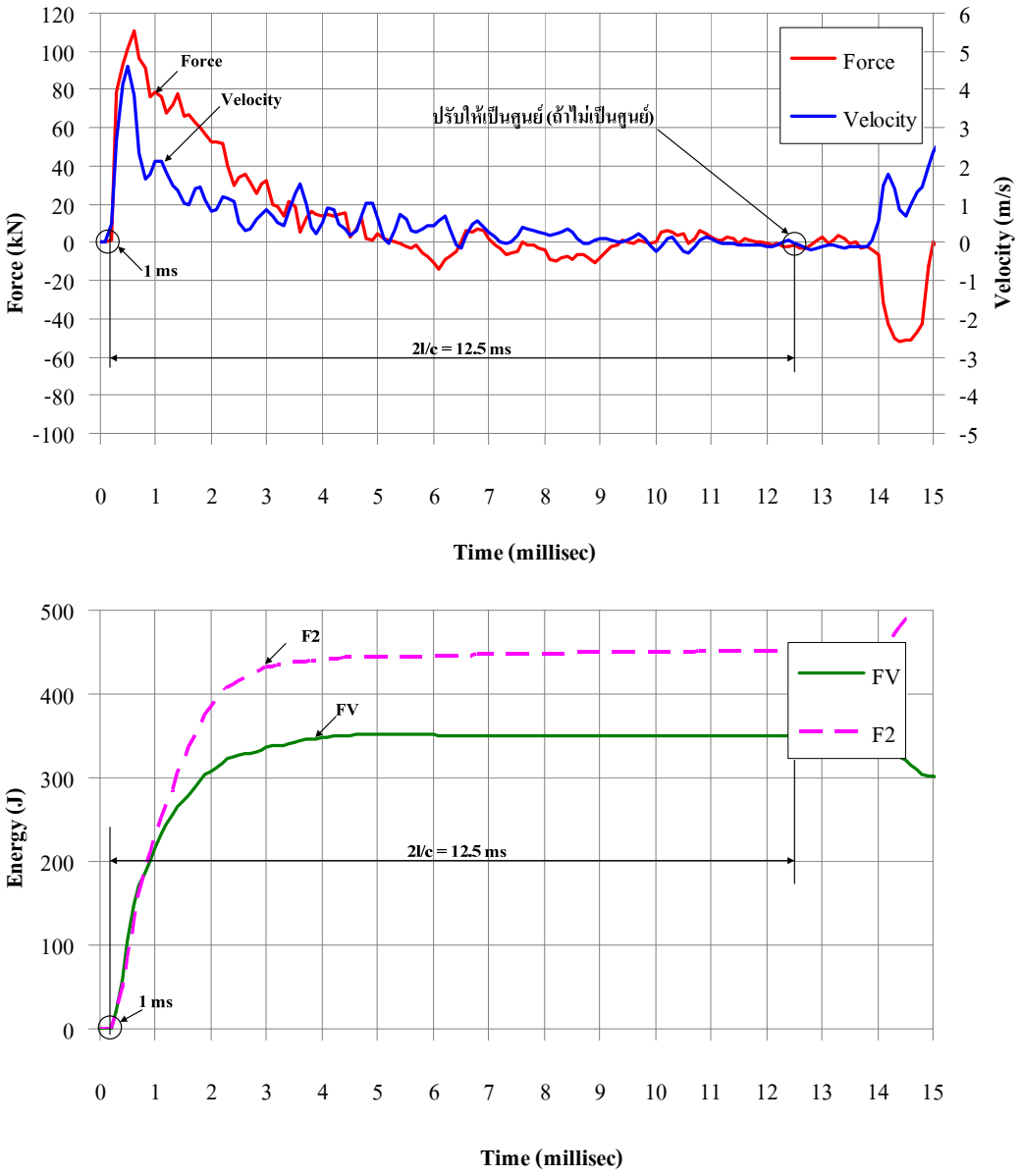
4.4 การทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน

การทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานได้ทดสอบในบริเวณพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล โดยการทดสอบจะนำชุดอุปกรณ์วัดพลังงานไปติดตั้งระหว่างก้านเจาะอันบนสุดกับชุดตุ้มตอกระหว่างการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน และเก็บข้อมูลของแรง (F) และความเร่ง (a) ด้วยความถี่ 10000 เฮิร์ทซ์ เป็นระยะเวลา 5 วินาที ส่วนการนำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์จะสนใจข้อมูลในระยะเวลาก่อนคลื่นจะสะท้อนจากก้นหลุมผ่านอุปกรณ์วัดพลังงาน (เวลา 0 ถึง 2l/c โดยที่ l คือความยาวของก้านเจาะ)

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

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

การวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (E_i) จากการทดสอบ ใช้วิธีคำนวณตามสมการ Fv โดยมีข้อกำหนด คือ คลื่นกระแทกต้องอยู่ภายใน 1 ms หลังจากจุดเริ่มต้นการวิเคราะห์ และจะทำการปรับแก้ค่าแรง (F) และความเร็ว(v) ที่เวลา 2l/c ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ด้วยค่าคงที่ของการอินทิเกรต ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ข้อกำหนดของการวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ได้จากการทดสอบ

ค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผล (ER_i) ของการทดสอบ SPT เป็นสัดส่วนของค่าพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (E_i) กับ ค่าพลังงานมาตรฐานของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน (E*) โดยที่ค่าพลังงานมาตรฐานของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 475 J

4.5 การวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน

การวิเคราะห์ข้อมูลผลทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานใช้วิธีทางสถิติโดยมีสมมุติฐานว่าข้อมูลพลังงานประสิทธิผลของบริษัทต่างๆที่ทดสอบและข้อมูลพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกทั้ง 3 ชนิดที่นำมาวิเคราะห์มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ซึ่งมีวิธีการคำนวณโดยใช้หลักการสถิติทั่วไปดังนี้

- ค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผล คำนวณได้จากสมการที่ (4-2)

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \qquad (4\text{-}2)$$

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานประสิทธิผล คำนวณได้จากสมการที่ (4-3)

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

- สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของพลังงานประสิทธิผล คำนวณได้จากสมการที่ (4-4)

$$COV = \frac{SD}{\overline{X}} \times 100\% \qquad (4\text{-}4)$$

โดยที่ $\overline{X}$ = ค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผล

SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานประสิทธิผล

COV = สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของพลังงานประสิทธิผล

X_i = ข้อมูลข้อมูลพลังงานประสิทธิผล

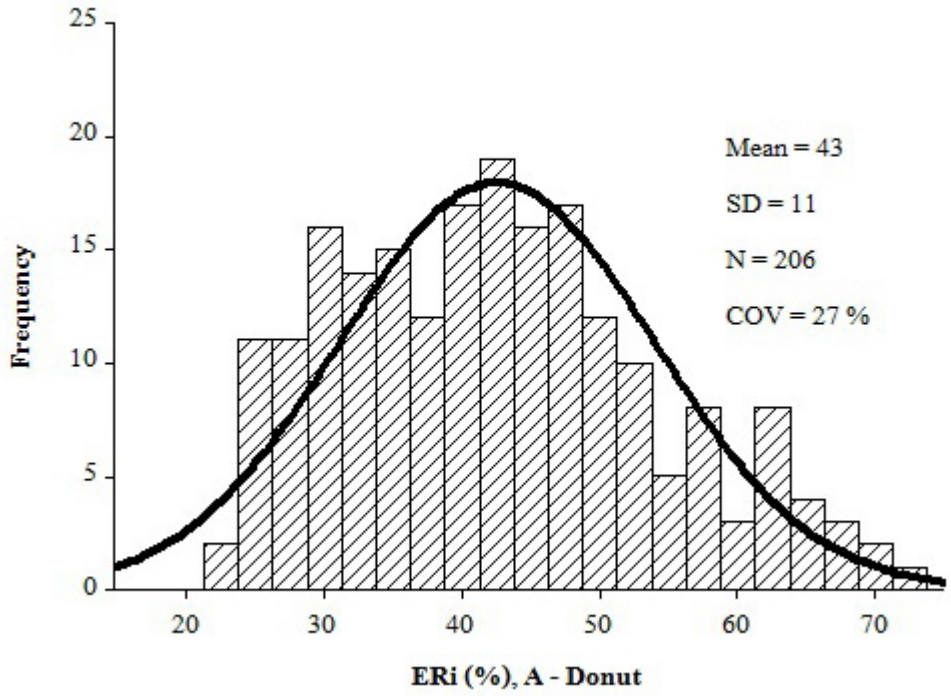
n = จำนวนข้อมูลพลังงานประสิทธิผล

บทที่ 5 ผลทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน

5.1 ผลทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานแบ่งตามบริษัทที่ได้ทดสอบในสนาม

5.1.1 บริษัท A

บริษัท A วัดพลังงานทดสอบทั้งหมด 5 หลุมเจาะ (ทั้ง 5 ใช้ตุ้มตอกโดนัททดสอบ SPT) โดยมีรายละเอียดดังนี้ หลุม BH–1 ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 19.50–19.95, 24.00–24.45, และ 25.50–25.95 เมตร หลุม BH–2 ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 19.50–19.95, 21.00–21.45, 22.50–22.95, 24.00–24.45, และ 25.50 – 25.95 เมตร หลุม BH–3 ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 16.50–16.95, 18.00–18.45, 19.50–19.95, 21.00–21.45, และ 22.50–22.95 เมตร หลุม BH–4 ทดสอบวัดพลังงานทั้งหมด 5 ชั้นที่ระดับความลึก 19.50–19.95, 21.00–21.45, 22.50–22.95, 24.00–24.45, และ 25.50–25.95 เมตร หลุม BH–5 ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 16.50–16.95, 18.00–18.45, 19.50–19.95, 21.00–21.45, และ 22.50–22.95 เมตร เมื่อนำพลังงานประสิทธิผล(ER_i) มา Plot เป็นกราฟแท่งเฉพาะ (Histogram) สามารถแสดงได้ดัง**รูป**ที่ 5-1

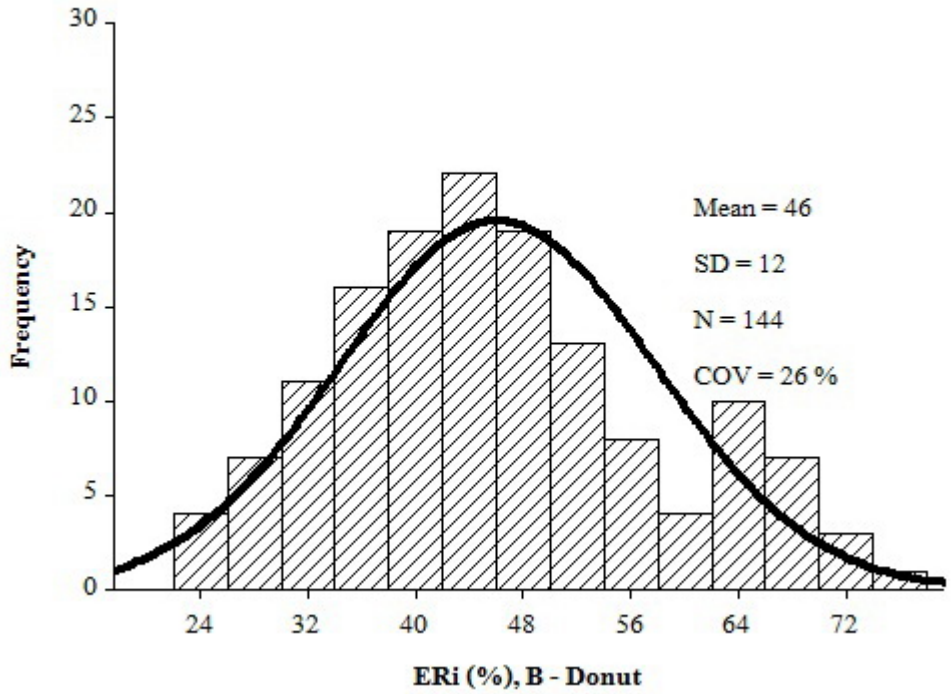


รูปที่ 5-1 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของบริษัท A (ตุ้มตอกโดนัท)

จาก**รูป**ที่ 5-1 พลังงานประสิทธิผลที่คำนวณได้จากการวัดพลังงานของบริษัท A เห็นได้ว่าพลังงานประสิทธิผลที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 30-50 % โดยมีค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 43% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 11% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 27% จากจำนวนของข้อมูลพลังงานพลังงานประสิทธิผล 206 ข้อมูล

5.1.2 บริษัท B

บริษัท B การวัดพลังงานทดสอบทั้งหมด 3 หลุมเจาะ (ทั้ง 3 หลุมเจาะใช้ตุ้มตอกโดนัททดสอบ SPT) บริเวณพื้นที่ปากซอยนวลจันทร์ 14 มีรายละเอียดดังนี้ หลุม BH–6 ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 19.50–19.95, 21.00–21.45, 22.50–22.95, 24.00–24.45, และ 25.50–25.95 เมตร หลุม BH–7 ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 15.00–15.45, 16.50–16.95, 18.00–18.45, 19.50–19.95, และ 21.00–21.45 เมตร หลุม BH–8 ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 15.00–15.45, 16.50–16.95, 19.50–19.95, และ 21.00–21.45 เมตร เมื่อนำพลังงานประสิทธิผล(ER_i) ที่ได้ทดสอบกับบริษัท B มา Plot เป็นกราฟแท่งเฉพาะ (Histogram) เพื่อหาลักษณะการกระจายตัวของชุดข้อมูลได้ดัง**รูป**ที่ 5-2



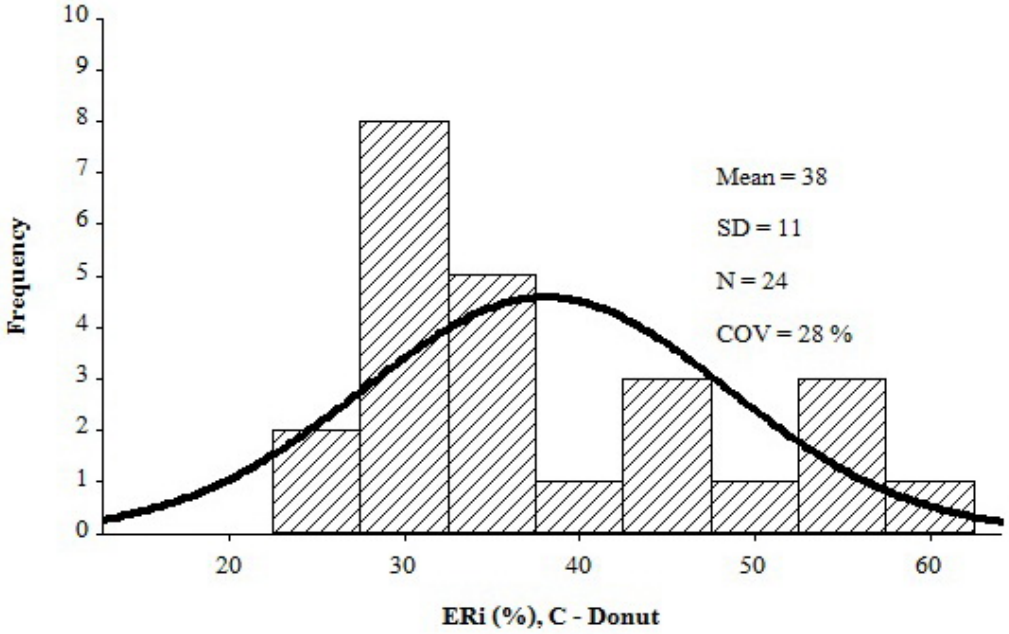
รูปที่ 5-2 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของบริษัท B (ตุ้มตอกโดนัท)

จาก**รูป**ที่ 5-2 มีข้อมูลพลังงานประสิทธิผลของบริษัท B 144 ข้อมูล โดยมีค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิ์ผลเท่ากับ 46% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 63% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 26%

5.1.3 บริษัท C

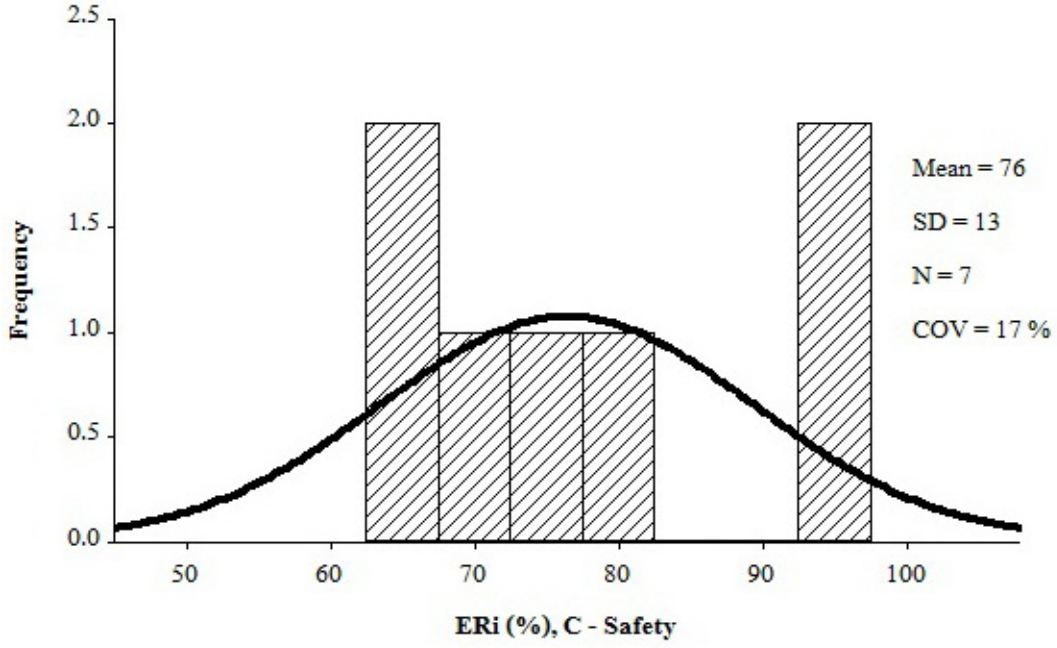
บริษัท C การวัดพลังงานทดสอบทั้งหมด 3 หลุมเจาะ (ใช้ตุ้มตอก 3 ชนิดในการทดสอบ SPT คือ โดนัท, เซฟตี้, และ ทริป) ทดสอบบริเวณพื้นที่เขตห้วยขวาง โดยมีรายละเอียดดังนี้ หลุม BH–9 (ใช้โดนัททดสอบ SPT) ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 22.50–22.95, 24.00–24.45, และ 25.50–25.95 เมตร หลุม BH–10 (ใช้เซฟตี้ทดสอบ SPT) ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 28.50–28.95, 30.00–30.45, และ 31.50–31.95 เมตร หลุม BH–11 (ใช้เซฟตี้ทดสอบ SPT) ทดสอบวัดพลังงานที่ระดับความลึก 49.50–49.95,

51.00–51.45, และ 52.50–52.95 เมตร เมื่อนำพลังงานประสิทธิผลที่ทดสอบกับบริษัท C ทั้ง 3 หลุมเจาะ Plot เป็นกราฟแท่งเฉพาะเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลได้ดัง**รูป**ที่ 5-3 (ตุ้มตอกโดนัท) **รูป**ที่ 5-4 (ตุ้มตอกเซฟตี้) และ **รูป**ที่ 5-5 (ตุ้มตอกทริป) ตามลำดับ



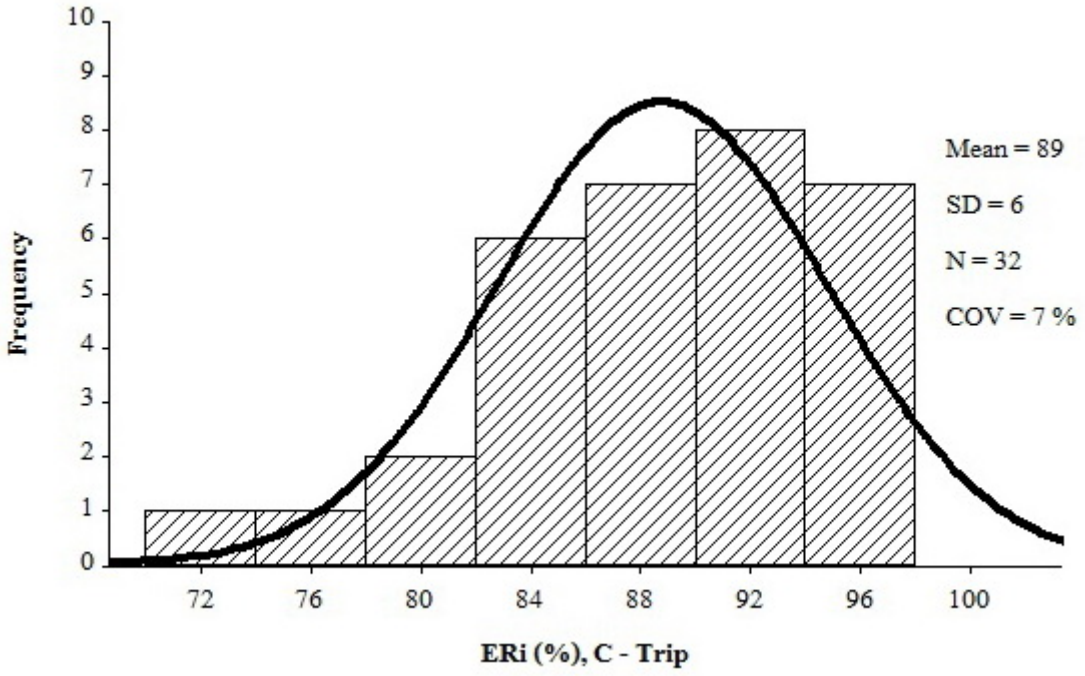
รูปที่ 5-3 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของบริษัท C (ตุ้มตอกโดนัท)

จาก**รูป**ที่ 5-3 การกระจายตัวของข้อมูลพลังงานประสิทธิผลส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 30–50 % โดยมีค่าเฉลี่ยของพลังงานเท่ากับ 38%, มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 11% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 26% แต่เนื่องจากมีจำนวนข้อมูลทั้งหมดเพียง 24 ข้อมูล จึงทำให้มีความเชื่อมั่นค่อนข้างน้อย



รูปที่ 5-4 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของบริษัท C (ตุ้มตอกเซฟตี้)

จากรูปที่ 5-4 เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีจำนวนของข้อมูลน้อยเกินไปเพียงแค่ 7 ข้อมูล จึงทำให้มีความเชื่อมั่นค่อนข้างน้อย โดยค่าพลังงานประสิทธิผลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 76% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 29% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 17%

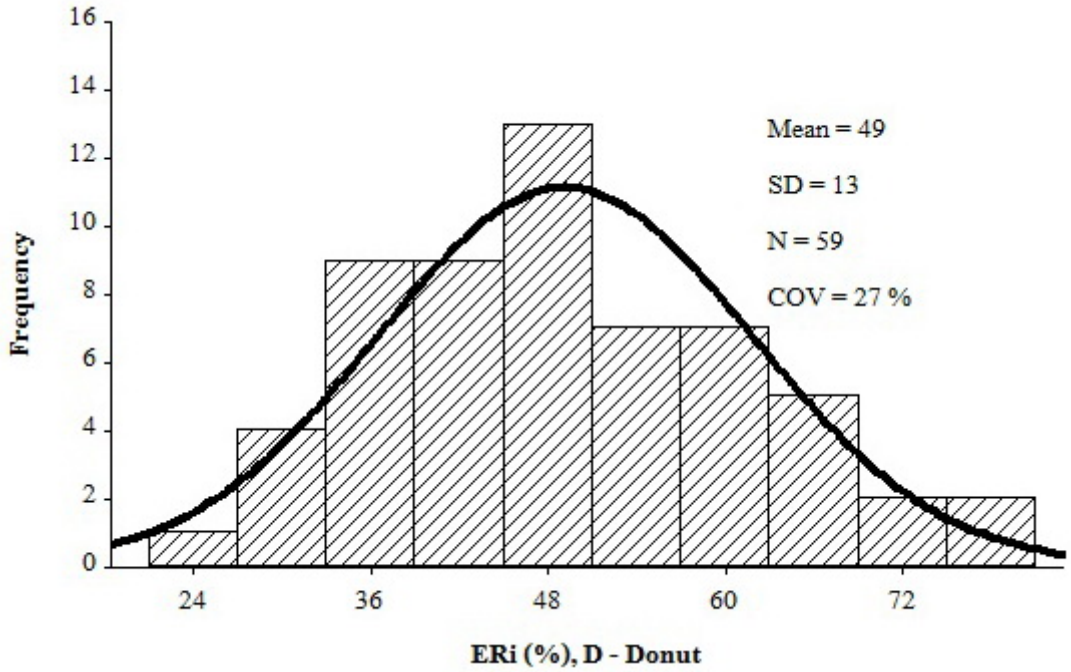


รูปที่ 5-5 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของบริษัท C (ตุ้มตอกทริป)

จากรูปที่ 5-5 อธิบายการกระจายตัวของพลังงานประสิทธิผลของบริษัท C (ตุ้มตอกทริป) ได้ว่า พลังงานประสิทธิผลส่วนใหญ่ที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 84-96% โดยมีค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 89% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 17%

5.1.4 บริษัท D

บริษัท D ทดสอบโดยใช้ตุ้มตอกโดนัททดสอบ SPTทั้งหมด 2 หลุมเจาะ โดยมีรายละเอียดของหลุมทดสอบวัดพลังงานดังนี้ หลุม BH–12 ที่ตำแหน่งความลึก 18.00–18.45, 19.50–19.95, 21.00–21.45, 22.50–22.95, และ 24.00–24.45 เมตร หลุม BH–13 ที่ตำแหน่งความลึก 18.00–18.45, 19.50–19.95, และ 21.00–21.45 เมตร เมื่อ Plot กราฟแท่งเฉพาะจากค่าพลังงานที่ทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5-6

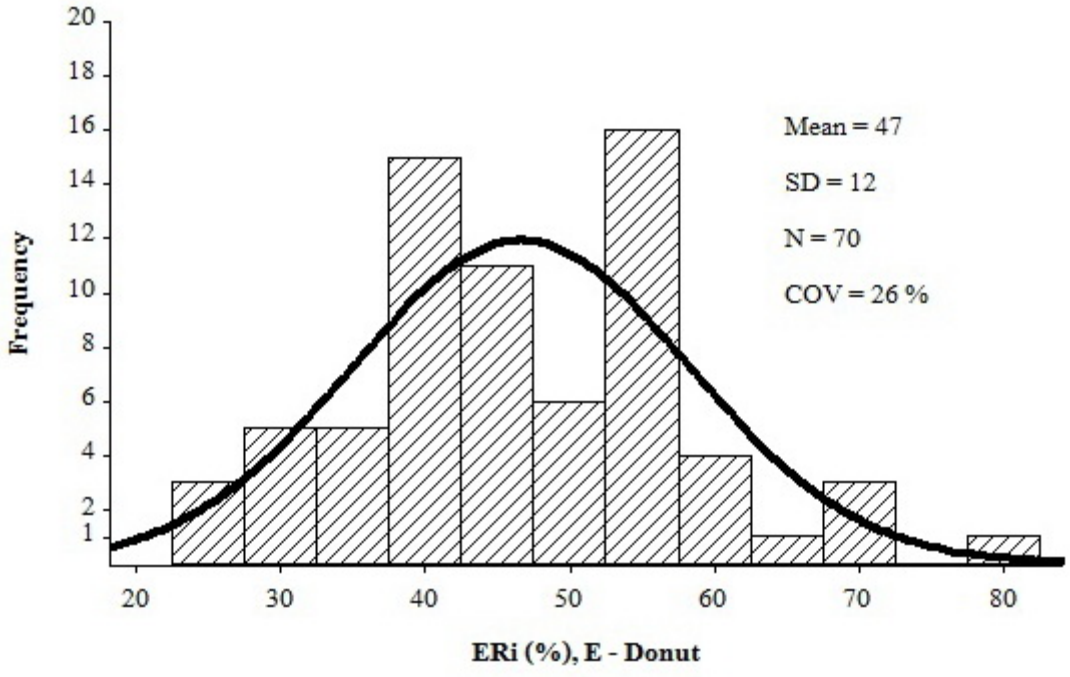


รูปที่ 5-6 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของบริษัท D (ตุ้มตอกโดนัท)

จากรูปที่ 5-6 สามารถอธิบายการกระจายตัวของข้อมูลปริมาณพลังงานประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 36–60% โดยพลังงานประสิทธิผลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 49% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 13% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 27%

5.1.5 บริษัท E

บริษัท E การวัดพลังงานทดสอบทั้งหมด 2 หลุมเจาะ (ทั้ง 2 หลุมเจาะใช้ตุ้มตอกโดนัททดสอบ SPT) ในบริเวณ โรงเรียนอัสสัมชัญพระราม 2 โดยมีรายละเอียดของหลุมทดสอบวัดพลังงานดังนี้ หลุม BH–14 ทดสอบวัดพลังงาน 5 ระดับ ที่ตำแหน่งความลึก 24.00–24.45, 25.50–25.95, 27.00–27.45, 28.50–28.95, และ 30.00–30.45 เมตร หลุม BH–15 ทดสอบวัดพลังงาน 5 ระดับที่ตำแหน่งความลึก 24.00–24.45, 25.50–25.95, 27.00–27.45, 28.50–28.95, และ 30.00–30.45 เมื่อนำพลังงานประสิทธิผล Plot เป็นกราฟแท่งเฉพาะเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้ทดสอบวัดพลังงานสามารถแสดงกราฟแท่งเฉพาะของพลังงานประสิทธิผลได้ดังรูปที่ 5-7

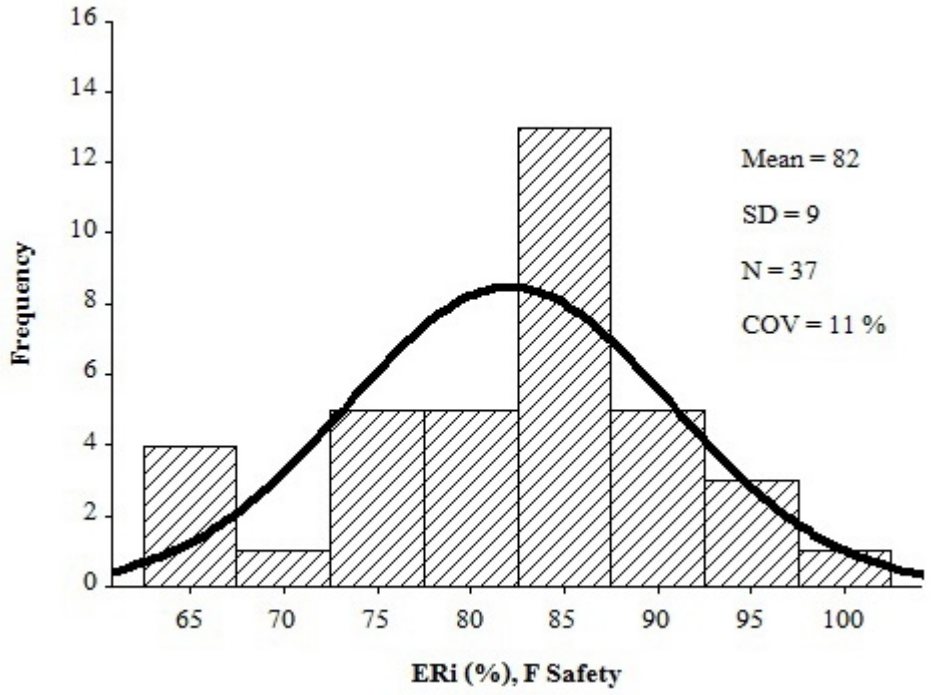


รูปที่ 5-7 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของบริษัท E (ตุ้มตอกโดนัท)

จากรูปที่ 5-7 สามารถอธิบายได้ว่าการกระจายตัวของชุดข้อมูลพลังงานประสิทธิผลมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยของการทดสอบวัดพลังงานเท่ากับ 47% มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 12% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 27%

5.1.6 บริษัท F

บริษัท F การวัดพลังงานทดสอบทั้งหมด 1 หลุมเจาะ (หลุมเจาะใช้ตุ้มตอกเซฟตี้ทดสอบ SPT) ในบริเวณ คณะสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บางเขน โดยมีรายละเอียดของหลุมทดสอบวัดพลังงานดังนี้ หลุม BH–14 ทดสอบวัดพลังงาน 3 ระดับ ที่ตำแหน่งความลึก 31.50–31.95, 33.00–33.45, และ 34.50–34.95 เมตร เมื่อนำพลังงานประสิทธิผล Plot เป็นกราฟแท่งเฉพาะเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลสามารถแสดงกราฟแท่งเฉพาะพลังงานประสิทธิผลได้ดังรูปที่ 5-8



รูปที่ 5-8 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของบริษัท F (ตุ้มตอกเซฟตี้)

รูปที่ 5-8 สามารถอธิบายการกระจายตัวของข้อมูลการวัดพลังงานโดยใช้ตุ้มตอกเซฟตี้ทดสอบ SPT ของบริษัท F ว่าเป็นการกระจายตัวของข้อมูลในลักษณะปกติ โดยชุดข้อมูลพลังงานประสิทธิผลครั้งนี้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82% มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 54% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 27%

5.1.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากข้อมูลการทดสอบ SPT และข้อมูลการวัดพลังงาน SPT ที่ได้นำเสนอไปข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่ามีเพียงตำแหน่งของปลายเชือกบนหัวกว้านและขนาดหลุมเจาะเท่านั้นที่มีความแตกต่างในช่วงการทดสอบ SPT ซึ่งข้อแตกต่างดังกล่าวนี้อาจทำให้เกิดผลกระทบกับพลังงานที่ทดสอบได้ ดังนั้นจึงสรุปค่าเฉลี่ย E_i ($\bar{x}$ E_i) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน E_i (SD E_i) ค่าเฉลี่ย ER_i ($\bar{x}$ ER_i) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ER_i (SD ER_i) แสดงได้ดังตารางที่ 5-1 ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบการวัดพลังงาน SPT และเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจอีกด้วย

ตารางที่ 5-1 ผลสรุปค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของบริษัทต่างๆ

บริษัท	ชนิดตุ้ม	ตำแหน่งปลายเชือก	ขนาด Ø หลุมเจาะ (m)	N	ER_i (%)	SD_{ERi} (%)	COV_{ERi} %
A	โดนัท	บนหัวกว้าน	0.114 (4.5นิ้ว)	206	43	11	27
B	โดนัท	บนหัวกว้าน	0.102 (4นิ้ว)	144	46	12	26
C	โดนัท	บนหัวกว้าน	0.089 (3.5 นิ้ว)	24	38	11	28
D	โดนัท	บนหัวกว้าน	0.11 (4.5นิ้ว)	59	49	13	27
E	โดนัท	ล่างหัวกว้าน	0.118 (4.5นิ้ว)	70	47	12	26
F	เซฟตี้	บนหัวกว้าน	0.08 (3.5 นิ้ว)	37	82	9	11
C	เซฟตี้	บนหัวกว้าน	0.089 (3.5 นิ้ว)	7	76	13	17
C	ทริป	บนหัวกว้าน	0.089 (3.5 นิ้ว)	32	89	6	7

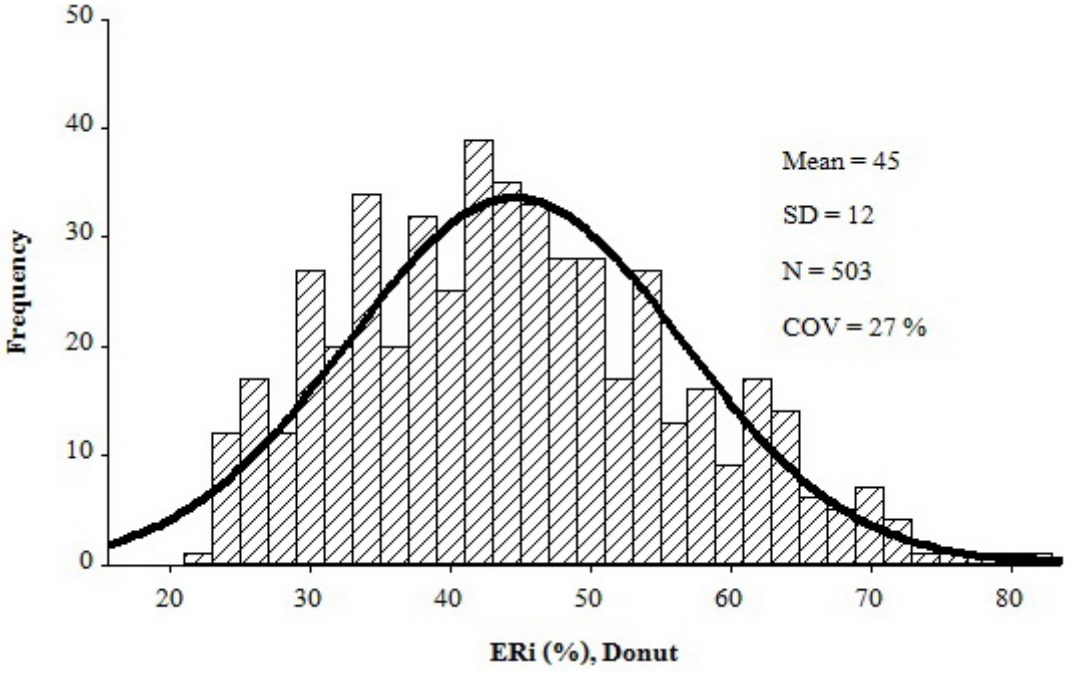
จากตารางที่ 5-1 เห็นได้ว่าลักษณะของตำแหน่งปลายเชือก, จำนวนรอบของการพันเชือก, และขนาดของหลุมเจาะที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อพลังงานที่ทดสอบได้มากนัก ดังนั้นจึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kovacs (1980) และ Kovacs & Salomone (1982) ที่กล่าวไว้ว่าลักษณะของตำแหน่งปลายเชือก, จำนวนรอบของการพันเชือกถ้าไม่เกิน 2 รอบ, และขนาดของหลุมเจาะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 60 -120 มม ไม่ส่งผลต่อพลังงานประสิทธิผล เมื่อเป็นเช่นนั้นจึงสรุปได้ว่าลักษณะปลายเชือกที่ต่างกันและจำนวนรอบของการพันเชือกสำหรับข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้ไม่ส่งผลต่อพลังงานประสิทธิผล ต่างแค่เพียงวิธีการปฏิบัติงานเท่านั้น ส่วนขนาดของหลุมเจาะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 60 -120 มม ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อพลังงานประสิทธิผลเช่นกัน และที่ขนาดหลุมเจาะไม่ส่งผลต่อพลังงานประสิทธิผลอีกข้อหนึ่ง เนื่องจากขนาดหลุมเจาะของบริษัทต่างๆที่เก็บข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้มีค่าไม่เกินมาตรฐานของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน ที่ระบุไว้ใน ASTM D1586 (1999) จึงทำให้พลังงานประสิทธิผลไม่ได้รับผลกระทบจากขนาดหลุมเจาะ

5.2 ผลทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานแบ่งตามชนิดของตุ้มตอก

การทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานในงานวิจัยครั้งนี้ ทำการทดสอบทั้งหมด 16 หลุมเจาะกับบริษัทต่างๆทั้งหมด 6 บริษัทดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยในการทดสอบ SPT จะใช้ตุ้มตอกทั้งหมด 3 ชนิด คือ โดนัท เซฟตี้ และ ทริป ซึ่งเมื่อทดสอบวัดพลังงานจะได้ข้อมูลพลังที่วัดได้ดังนี้ ทดสอบวัดพลังงานโดยใช้ตุ้มตอกโดนัท ได้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 503 ข้อมูล ตุ้มตอกเซฟตี้ 44 ข้อมูล ตุ้มตอกทริป 32 ข้อมูล ซึ่งข้อมูลของพลังงานที่วัดได้แสดงไว้ในหัวข้อการวัดพลังงานแบ่งตามบริษัท โดยในหัวข้อข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานและพลังงานประสิทธิผลโดยจะแสดงผลเป็นกราฟแท่งเฉพาะตามชนิดของตุ้มตอกดังต่อไปนี้

5.2.1 ตุ้มตอกแบบโดนัท

ตุ้มตอกโดนัทมีการทดสอบวัดพลังงานทั้งหมด 13 หลุมเจาะ มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 503 ข้อมูล เมื่อนำข้อมูลทั้งหมด plot กราฟแท่งเฉพาะเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลพลังงานประสิทธิผลได้ดังรูปที่ 5-9

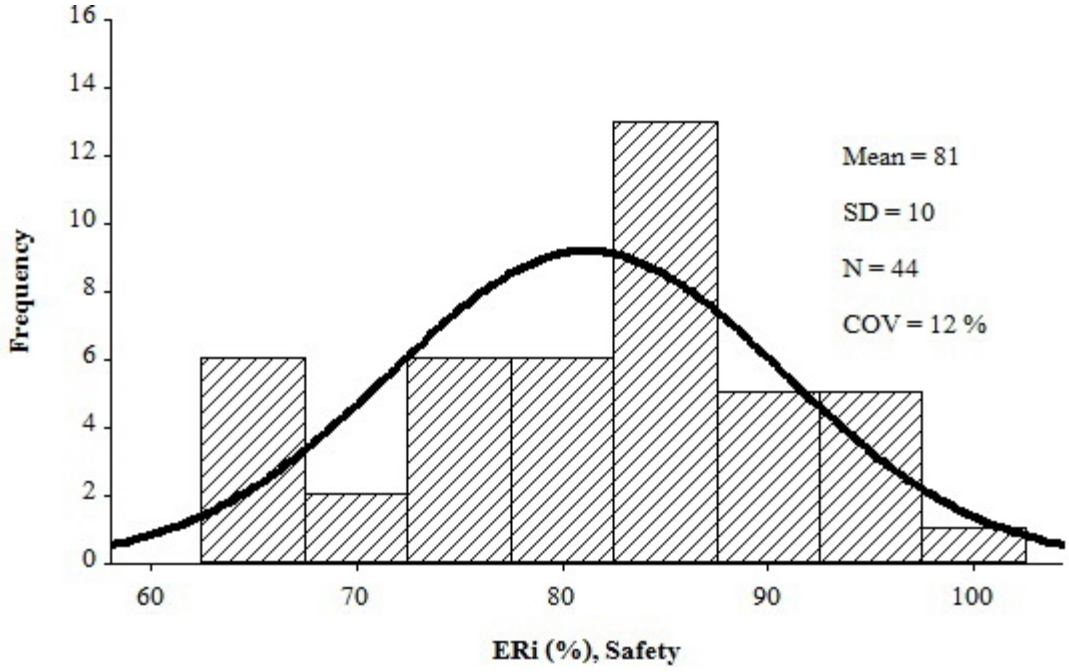


รูปที่ 5-9 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกโดนัท

จากรูปที่ 5-9 สังเกตการกระจายตัวของพลังงานพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกโดนัทเป็นการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยของพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 45% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 12% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 27%

5.2.2 ตุ้มตอกแบบเซฟตี้

ตุ้มตอกเซฟตี้ การทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานของตุ้มตอกชนิดนี้มีจำนวนข้อมูลที่ทดสอบค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับจำนวนข้อมูลของตุ้มตอกโดนัท เนื่องจากเพราะว่าการทดสอบที่ใช้ตุ้มตอกเซฟตี้ทดสอบ SPT ค่อนข้างมีน้อยจึงทำให้งานวิจัยครั้งนี้ได้ข้อมูลการทดสอบที่น้อยตามไปด้วย โดยในที่นี้มีการทดสอบวัดพลังงานทั้งหมด 2 หลุมเจาะ มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 44 ข้อมูล เมื่อ plot กราฟแท่งเฉพาะเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลพลังงานประสิทธิผลซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-10

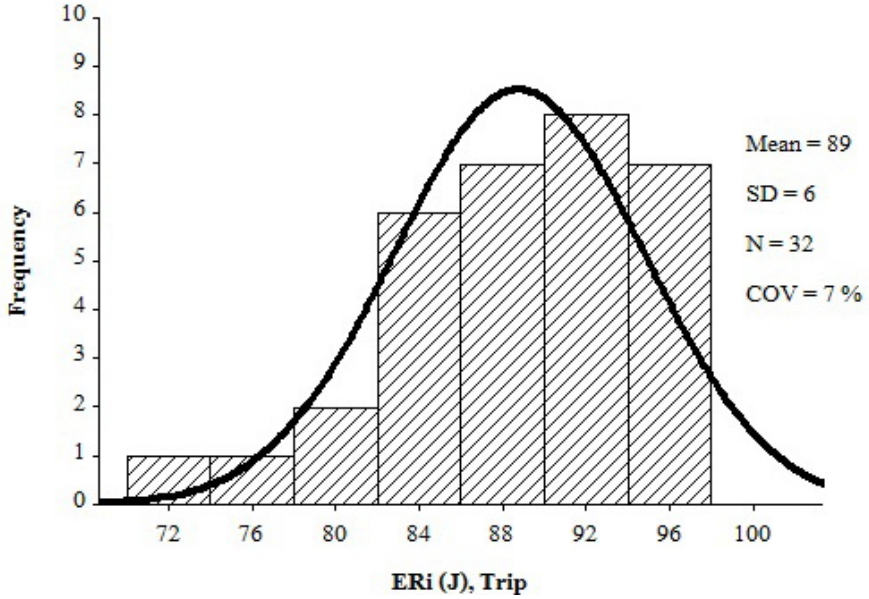


รูปที่ 5-10 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกเซฟตี้

จากรูปที่ 5-10 อธิบายได้ว่าค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกเซฟตี้มีการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยของการทดสอบเท่ากับ 81% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 12%

5.2.3 ต้มตอกแบบทริป

ตุ้มตอกทริป มีการทดสอบวัดพลังงาน 1 หลุมเจาะ และมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 32 ข้อมูล เมื่อ plot กราฟแท่งเฉพาะดูการกระจายตัวของข้อมูลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-11

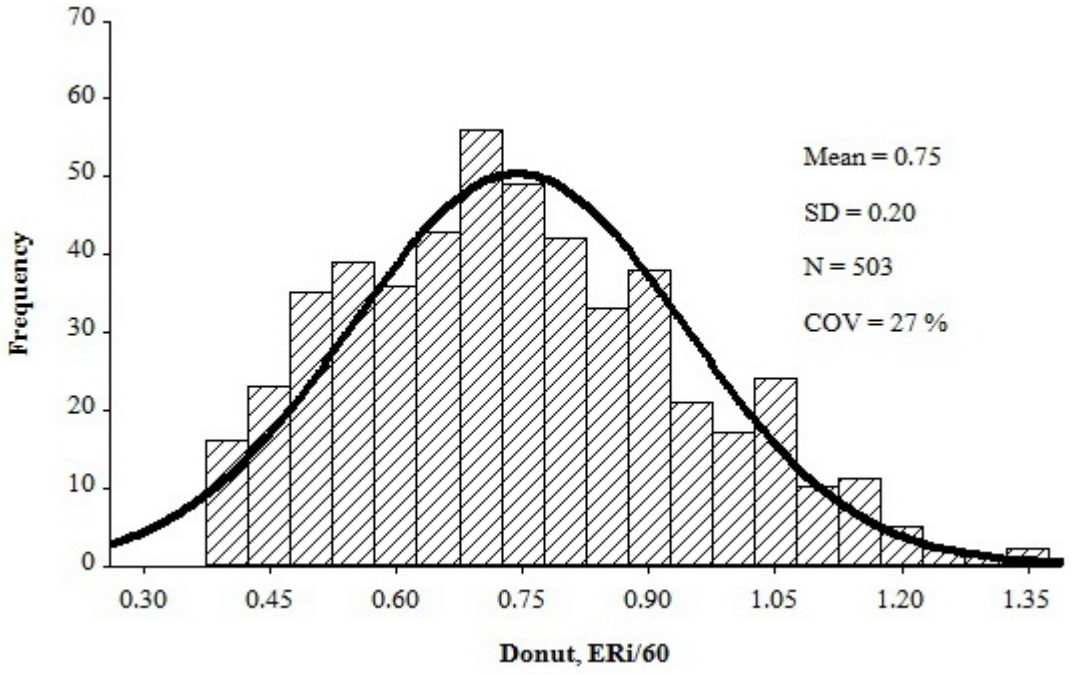


รูปที่ 5-11 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกทริป

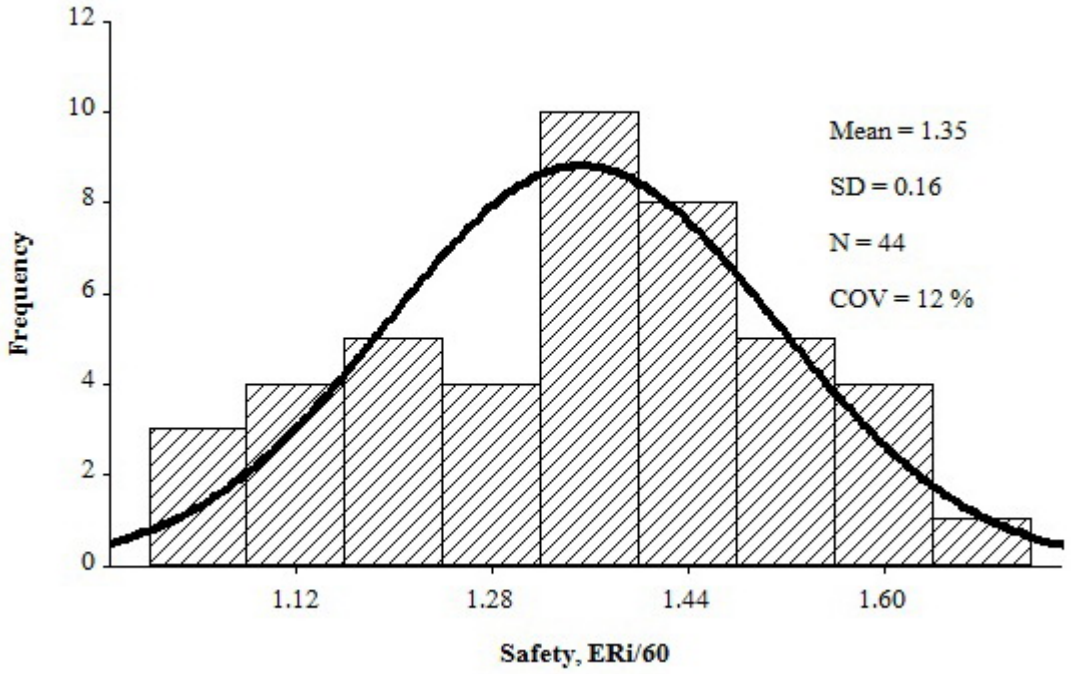
รูปที่ 5-11 ค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกทริปมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 89% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 38% และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 7%

5.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

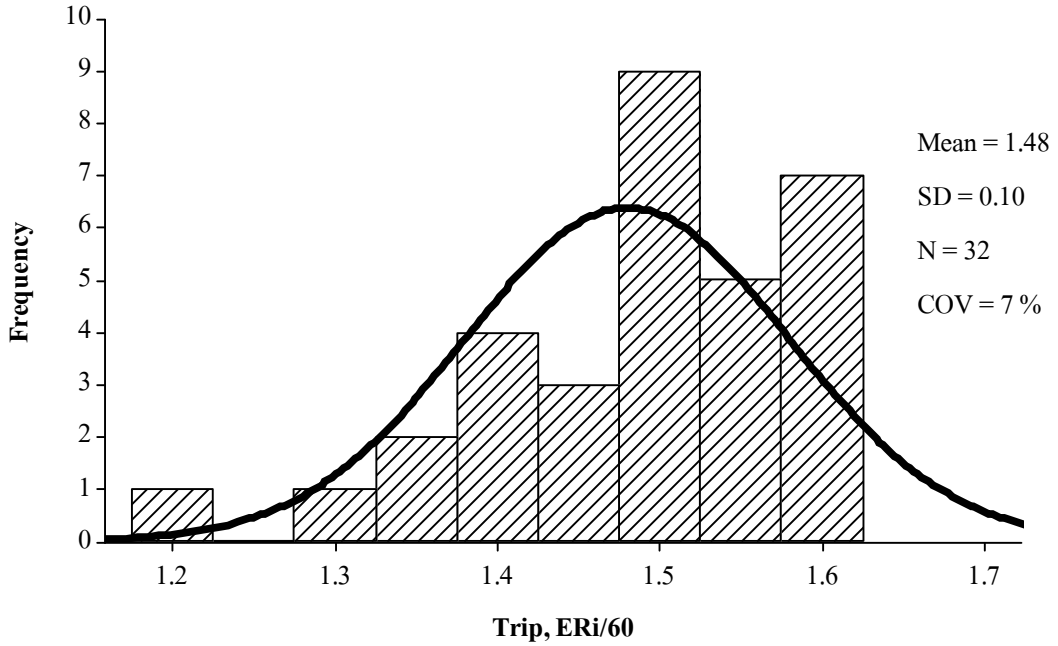
จากข้อมูลพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกต่างๆทั้ง 3 คือ โดนัท, เซฟตี้, และทริป ผลการทดสอบค่าปริมาณพลังงานของโดนัท, เซฟตี้, และทริป มีค่าดังนี้ 45%, 81%, และ 89% ตามลำดับ แต่ในการปรับแก้นั้นต้องปรับแก้พลังงานไปที่ 60% ด้วย ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้ในการปรับแก้ค่า SPT ที่ได้จากการทดสอบในสนาม ในงานวิจัยครั้งนี้จึงปรับแก้พลังงานไปที่ 60% ($ER_i/60$) ทั้ง 3 ตุ้มตอกดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-12 ถึง 5-14



รูปที่ 5-12 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกโดนัทที่ปรับแก้ไปที่ 60 %



รูปที่ 5-13 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกเซฟตี้ที่ปรับแก้ไปที่ 60 %



รูปที่ 5-14 กราฟแท่งเฉพาะค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกทริปที่ปรับแก้ไปที่ 60 %

ตารางที่ 5-2 ผลสรุปค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกชนิดต่างๆ

Hammer type	N	ERi (%)	SD_{ERi} (%)	COV_{ERi} (%)	ERi/60	$SD_{ERi/60}$	$COV_{ERi/60}$ (%)
Donut	503	45	12	27	0.75	0.20	27
Safety	44	81	10	12	1.35	0.16	12
Trip	32	89	6	7	1.48	0.10	7

ตารางที่ 5-2 แสดงผลสรุปค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกทั้ง 3 ชนิด คือตุ้มตอกโดนัท, เซฟตี้, และทริป ซึ่งมีค่าดังนี้ 45, 81, และ 89% โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการทดสอบเท่ากับ 27, 12, และ 7% ตามลำดับ แต่ในการปรับแก้เนื่องจากพลังงานของการทดสอบ SPT จำเป็นต้องปรับแก้ไปที่ 60% ด้วย ดังนั้นค่าต่อไปนี้เป็นพลังงานประสิทธิ์ผลที่ปรับแก้ไปที่ 60% แล้วซึ่งมีค่าดังนี้ 0.75, 1.35, และ 1.48 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการทดสอบเท่ากับ 27, 12, และ 7% ตามลำดับ ซึ่งค่าพลังงานประสิทธิ์ผลที่ปรับแก้ไปที่ 60% แล้วจะช่วยให้ผู้ใช้ได้รับความสะดวกมากยิ่งขึ้นในการปรับแก้ค่า SPT จากการทดสอบในสนาม

พลังงานประสิทธิผลจากตุ้มตอกทั้ง 3 ชนิดของงานวิจัยครั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยต่างๆดังตารางที่ 5-3 เห็นได้ว่าพลังงานประสิทธิของงานวิจัยต่างๆที่ได้กล่าวถึงบางงานวิจัยก็มีความสอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้และบางงานวิจัยก็มีค่าไม่สอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้ดังนั้นในที่นี้จะเปรียบเทียบพลังงานประสิทธิผลของงานวิจัยต่างๆกับงานวิจัยครั้งนี้โดยจะเปรียบเทียบตามชนิดของแต่ละตุ้มตอกได้ดังต่อไปนี้

ตุ้มตอกโดนัทสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ซึ่งมีพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 45% โดยค่าพลังงานประสิทธิผลที่มีทดสอบได้จากการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Seed *et al.* (1985) ที่ทดสอบในประเทศสหรัฐอเมริกากับประเทศอาร์เจนตินา และ Bowles (1988) ที่นำเสนอค่าพลังงานประสิทธิผลที่ทดสอบในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมีค่าพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 45% เช่นกัน ดังนั้นค่าที่ทดสอบได้จึงมีความสอดคล้องกันมาก ส่วนงานวิจัยอื่นๆพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกโดนัทมีค่าระหว่าง 55–67 % ซึ่งมีค่าสูงกว่างานวิจัยครั้งนี้

ตุ้มตอกเซฟตี้สำหรับงานวิจัยนี้มีค่าพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 81% ซึ่งจะมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Robertson *et al.* (1992) ที่เสนอค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกเซฟตี้เท่ากับ 82%และ Bowles (1988) ซึ่งมีค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกเซฟตี้ที่ทดสอบในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 70–80 % ส่วนงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้กล่าวถึงสำหรับตุ้มตอกเซฟตี้มีค่าพลังงานประสิทธิผลอยู่ในช่วง 50–71 % ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยครั้งนี้

ตุ้มตอกทริปสำหรับงานวิจัยครั้งนี้มีพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 89% โดยจะมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leslie *et al.* (2008) ที่ได้เสนอค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกทริปเท่ากับ 89% ซึ่งเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันมาก และ Bowles (1988) ที่กล่าวว่าการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานโดยใช้ตุ้มตอกทริปที่ทดสอบในประเทศสหรัฐอเมริกามีค่าพลังงานประสิทธิผลอยู่ในช่วง 80–100 % ซึ่งค่าจากการ

ทดสอบโดยตุ้มตอกทริปของงานวิจัยครั้งนี้ก็อยู่ในช่วงที่ Bowles ได้กล่าวถึงเช่นกัน ส่วนงานวิจัยอื่นๆ มีพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกชนิดนี้อยู่ในช่วง 70–82 %ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยครั้งนี้

ตารางที่ 5-3 เปรียบเทียบพลังงานประสิทธิผลของงานวิจัยครั้งนี้กับงานวิจัยต่างๆ

Reference	Energy efficiency (%)		
	Donut	Safety	Trip
This research	**45**	**81**	**89**
Schmertmann & Palacios (1979)	60	63	-
Kovacs & Salomone (1982)	55	71	-
Seed *et al.* (1985)			
Japan	67		-
United States	45	60	-
Argentina	45	-	-
China	50	-	-
Robertson *et al.* (1992)	59	82	70
Tsai Jiin Song *et al.* (2004)	59	59	-
Biringen1 & Davie (2008)	-	-	82
Leslie *et al.* (2008)	-	-	89
Foundation ,Bowles (1988)			
US/North America	45	70-80	80-100
Japan	67	-	-
UK	-	50	60
China	50	-	-

5.3 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานโดยวิธี FV และ F^2

การวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานมีวิธีการวัดอยู่ 2 วิธี คือ วิธี F^2 วิธีนี้เป็นการอินติเกรตกำลังสองของแรงในก้านเจาะและวิธี FV ซึ่งวิธีนี้เป็นการอินติเกรตผลของแรงคูณกับความเร็ว โดยวิธีการนี้ได้ถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานใน ASTM D4633 สำหรับการทดสอบวัดพลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานในปัจจุบัน

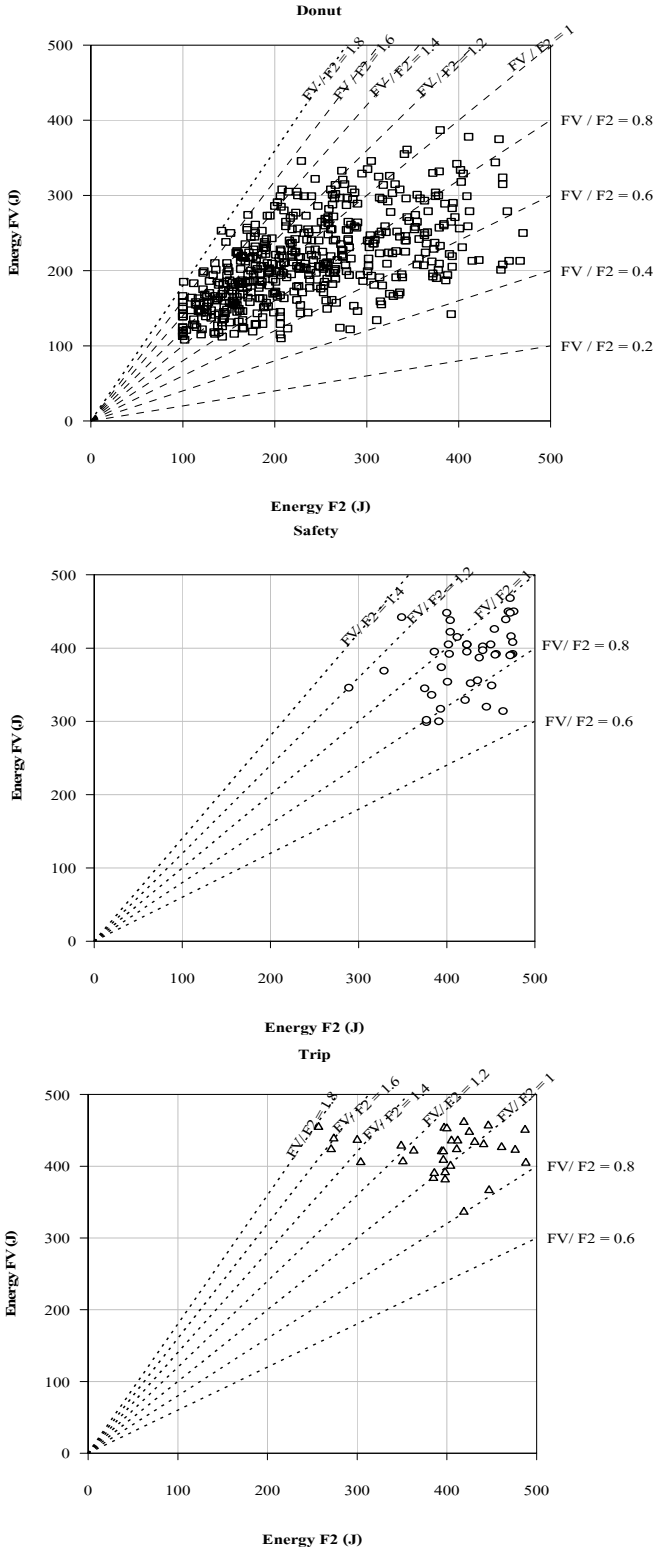
ปัจจุบันการวิเคราะห์ด้วยวิธี F^2 ไม่เป็นที่นิยมใช้แล้วในการวัดพลังงาน แต่ในที่นี้จะแสดงเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบ FV เท่านั้น ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 5-4 และรูปที่ 5-15

ตารางที่ 5-4 ผลเปรียบเทียบระหว่างวิธี FV และ วิธี F^2

Hammer Type	Method	Mean	COV (%)	%difference
Donut	FV	45	27	11
	F^2	50	37	
Safety	FV	81	12	10
	F^2	89	10	
Trip	FV	89	7	7
	F^2	83	15	

จากตารางที่ 5-4 และรูปที่ 5-15 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานโดยวิธี FV และ F^2 ซึ่งผลของการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้

- ตุ้มตอกโดนัทมีสัดส่วนระหว่าง FV และ F^2 อยู่ประมาณ 0.4–1.8 และมีความแตกต่างของพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 11% ซึ่งก็มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Butler *et al.* (1998) และ Farrar (1998) ที่กล่าวไว้ว่ามีความแตกต่างของพลังงานประสิทธิผลที่วัดด้วยวิธี FV และ F^2 เท่ากับ 10 % และ 15% ตามลำดับ
- ตุ้มตอกเซฟตี้มีสัดส่วนอยู่ประมาณ 0.7–1.3 และมีความแตกต่างของพลังงานประสิทธิผลเท่ากับ 10%
- ส่วนตุ้มตอกทริปมีสัดส่วนอยู่ประมาณ 0.8–1.8 และพลังงานประสิทธิผลแบบ FV มีค่ามากกว่าพลังงานประสิทธิผลแบบ F^2 เท่ากับ 7%



รูปที่ 5-15 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พลังงานเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานโดยวิธี FV และ F^2

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- พลังงานประสิทธิผลที่ทดสอบได้จากตุ้มตอกโดนัทจำนวน 503 ข้อมูล ตุ้มตอกเซฟตี้ 44 ข้อมูล และ ตุ้มตอกทริป 32 ข้อมูล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 45%, 81%, 89 % ซึ่งเห็นได้ว่าตุ้มตอกโดนัทสูญเสียพลังงานมากที่สุด เป็นการยืนยันถึงความสำคัญในการปรับแก้ค่าพลังงานประสิทธิผลสำหรับตุ้มตอกโดนัทในประเทศไทยเพื่อนำค่า N ไปใช้ในการออกแบบ นอกจากนั้นยังพบว่าพลังงานประสิทธิผลที่ได้จากการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานที่ได้ปฏิบัติในครั้งนี้ตรงกับขอบเขตของค่าที่เสนอสำหรับ US/North America (1988)
- ค่าพลังงานประสิทธิผลที่ปรับแก้ไปที่ 60% ของตุ้มตอกโดนัท, เซฟตี้, และทริป แสดงได้ดังตารางที่ 6-1 โดยสำหรับตุ้มตอกโดนัท มีค่า 0.75 ซึ่งเท่ากับงานวิจัยของ Seed (1985) ที่ทดสอบในประเทศสหรัฐอเมริกาและอาเจนตินา ส่วนงานวิจัยอื่นๆมีค่าสูงกว่างานวิจัยครั้งนี้ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.83–1.12 ส่วนตุ้มตอกเซฟตี้ มีค่า 1.35 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Robertson (1992) แต่สำหรับงานวิจัยอื่นๆได้ค่าน้อยกว่างานวิจัยครั้งนี้ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.98–1.18 และตุ้มตอกทริป มีค่า 1.48 ซึ่งเท่ากับงานวิจัยของ Leslie (2008) ส่วนงานวิจัยอื่นๆมีค่าน้อยกว่างานวิจัยครั้งนี้โดยมีค่าระหว่าง 1.17–1.37
- ค่าสัมประสิทธิความแปรปรวนของพลังงานประสิทธิผลที่ปรับแก้ไปที่ 60% ของตุ้มตอกโดนัท, เซฟตี้, และทริป มีค่าเท่ากับ 27%, 12%, 7% โดยค่าดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแปรปรวนจากการทดสอบของตุ้มตอกทั้ง 3 ชนิด ซึ่งเห็นตุ้มตอกโดนัทดังนั้นมีค่าสูงที่สุด ดังนั้นตุ้มตอกโดนัทจึงมีความแปรปรวนของการทดสอบมากที่สุด
- จากการวิเคราะห์การกระจายตัวค่าพลังงานประสิทธิผลของตุ้มตอกโดนัทพบว่ามีการกระจายตัวแบบปกติ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะตุ้มตอกโดนัทไม่สามารถควบคุมการยกให้เท่ากันทุกครั้งได้ดังนั้นพลังงานประสิทธิผลที่ทดสอบได้จึงมีโอกาสที่จะได้ค่าสูงหรือต่ำผสมกันไป โดยพลังงานประสิทธิผลที่ทดสอบได้มีค่าอยู่ระหว่าง 30–70% ส่วนตุ้มตอกเซฟตี้พบว่าการกระจายตัวของพลังงานประสิทธิผลมีการกระจายในช่วงแคบๆมีลักษณะสม่ำเสมอ เนื่องจากตุ้มเซฟตี้สามารถควบคุมระยะยกในการทดสอบได้ดีดังนั้นจึงทำให้พลังงานประสิทธิผลที่ทดสอบได้มีค่าสูงและมีความสม่ำเสมอซึ่งพลังงานประสิทธิผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าระหว่าง 70–90% และสุดท้ายตุ้มตอกแบบทริปพบว่าพลังงานประสิทธิผลมีการกระจายตัวแบบเบ้ซ้ายคือพลังงานประสิทธิผลที่ทดสอบได้ส่วนมากมีค่าสูงเนื่องจากตุ้มตอกทริปใช้กลไกในการควบคุมการยกดังนั้นจึงทำให้สูญเสียพลังงานน้อย ซึ่งพลังงานประสิทธิผลที่ทดสอบได้มีค่าระหว่าง 80-96%
- ผลของการวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการปรับแก้ค่า N ของการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐาน ซึ่งเมื่อปรับแก้จะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโดยผู้ทดสอบต่างๆ มีความตรงกัน ทำให้มีการแปลผลไปสู่คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ถูกต้องต่อไปและเนื่องจากในประเทศไทยนิยมใช้ตุ้มตอกโดนัทอย่างแพร่หลาย ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่ามีประสิทธิภาพเพียง 45% ดังนั้นค่า N ที่ทดสอบได้ในสนามจะมีค่ามาก

เกินไป (เทียบกับประสิทธิภาพที่ 60%) ทำให้คุณสมบัติของดินที่แปลผลมีค่ามากกว่าความเป็นจริง ซึ่งทำให้การออกแบบมีความไม่ปลอดภัย

- ผลการวัดพลังงานระหว่างวิธี FV และ F^2 สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ จะแบ่งเป็น 3 ชนิดตุ้มตอกโดยตุ้มตอกโดนัทมีความแตกต่างของพลังงานประสิทธิผลเฉลี่ยเท่ากับ 11% ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Butler *et al.* (1998) และ Farrar (1998) ที่กล่าวไว้ว่ามีความแตกต่างของพลังงานประสิทธิผลที่วัดด้วยวิธี FV และ F^2 เท่ากับ 10 % และ 15% ตามลำดับ ส่วนตุ้มตอกเซฟตี้มีความแตกต่างพลังงานประสิทธิผลที่วัดด้วยวิธี FV และ F^2 เท่ากับ 10 % และตุ้มตอกทริปมีพลังงานประสิทธิผลแบบ FV มีค่ามากกว่าพลังงานประสิทธิผลแบบ F^2 เท่ากับ 7 %

ตารางที่ 6-1 เปรียบเทียบค่า $ER_i/60$

Reference	ER_i /60 Donut	Safety	Trip
This research	**0.75 (27)**	**1.35 (12)**	**1.48 (7)**
Schmertmann & Palacios (1979)	1.00	1.05	-
Kovacs & Salomone (1982)	0.92	1.18	-
Seed *et al.* (1985)			
Japan	1.12		-
United States	0.75	1.00	-
Argentina	0.75	-	-
China	0.83	-	-
Robertson *et al.* (1992)	0.98	1.37	1.17
Tsai Jiin Song *et al.* (2004)	0.98	0.98	-
Biringen1 & Davie (2008)	-	-	1.37
Leslie *et al.* (2008)	-	-	1.48

หมายเหตุ วงเล็บแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าปรับแก้พลังงาน (COV %)

เอกสารอ้างอิง

กิจไพบูลย์ ชีวพันธุศรี (2550), การออกแบบแอพพลิเคชันในระบบกราฟิกด้วย Labview, ซีเอ็ดยูเคชั่น

ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และ บุญสม เลิศหิรัญวงค์ (2538), ปฐพีวิศวกรรมในงานก่อสร้าง, Library–Nine Publishing

มณเฑียร กังศศิเทียม (2545), กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม, สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน

มานะ อภิพัฒนะมนตรี (2546), วิศวกรรมปฐพีและฐานราก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

วีระนันท์ ปิตุปกรณ์ (2526), การคาดคะเนการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยการทดสอบเจาะทะลุทะลวงมาตรฐานในชั้นดินกรุงเทพมหานคร, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาพร คูวิจิตรจารุ (2544), การเจาะสำรวจดินทางวิศวกรรม การเจาะสำรวจเก็บตัวอย่างและการทดสอบในสนาม, 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

Biringen, 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., Pfingsten, 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 Mechanic: 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 Grotechnical 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

Correlation between SPT N-value and friction angle of local sands in Eastern of Thailand

Siam Yimsiri
Department of Civil Engineering
Burapha University
Chonburi, Thailand

***Abstract*—This research investigates the correlation between SPT N-value and friction angle of 2 local sands from the Eastern of Thailand. The research involves experimental study by a consolidated drained direct shear test. The obtained results are compared with published correlations recommended in the literatures to verify their applicability with these local sands. The suitable correlations are recommended for use in the analysis and design of geotechnical structures in the studied areas.**

Keywords—SPT N-value, friction angle, sand, direct shear test, empirical correlation

I. INTRODUCTION

The subsoil in the Eastern of Thailand is usually sandy soil which is different from that of Bangkok where soft clay is normally encountered. Sandy soil layer is typically located down to 15-30 m BGL before the weathered rock is found. Some areas near the coast have more variable subsoil condition where alternating layers of sand and clay are encountered before the weathered rock is found at large depth. The design of geotechnical structures, e.g. foundation, slope, and excavation, on sand requires effective-stress strength parameters (drained analysis), which are cohesion (c') and friction angle (ϕ'). A routine site characterization program, which usually involves SPT, does not directly provide these parameters. The friction angle has to be estimated from SPT results using empirical correlations which are abundant from published literatures. However, these correlations are empirical in nature and derived for specific sands which may not be applicable to local sands. Therefore, this research investigates the correlation between SPT N-value and friction angle of local sands in the Eastern of Thailand.

It is noted that the soil properties obtained from correlations with SPT N-value should be used only in the analysis and design of small geotechnical structures due to their low reliability. For large geotechnical structures, which require accurate soil properties, the soil properties should be obtained from in-situ and/or laboratory tests which simulate stress conditions consistent with those occur in the fields.

II. STANDARD PENETRATION TEST AND ITS CORRELATIONS

A. Standard penetration test

Standard Penetration Test (SPT) has been developed in USA since 1927 and has become the most widely used in-situ test. The advantages of SPT are that: (i) testing apparatus is simple and robust, (ii) test procedure is simple, (iii) disturbed soil specimens can be obtained during test, (iv) it can be used with almost all soil types, and (iv) there are many available correlations. SPT is performed by dropping a hammer of 63.5 kg (140 lb) from a height of 760 mm (30 in) freely on the anvil, which is attached to the top of the drill rod. The number of drop used to penetrate the SPT sampler, which is attached to the lower end of the drill rod, into soil by 300 mm (after initial seating drive of 150 mm) is called "penetration resistance" or "SPT N-value". The detailed of SPT procedure and standard SPT sampler are described in [1]. The obtained SPT results have to be corrected for energy ratio, overburden stress, water table, rod length, sampler type, borehole size, and liner in SPT sampler, before they can be used in the empirical correlations.

B. Correlations between SPT N-value and friction angle

Correlations between SPT N-value and friction angle of sand have been widely studied. Some well-known empirical correlations between SPT N-value and ϕ_{tc}' are described as follow.

Correlation by Meyerhof (1959) [2] (see Eq. 1):

$$\phi' = 25 + 28\left(\frac{N_{55}}{\sigma_{vo}'}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (\sigma_{vo}' \text{ in kPa}) \qquad (1)$$

Correlation by Peck et al. (1974) [3] (see Eq. 2 and Fig. 1):

$$\phi' \text{ (degree)} = 27.1 + 0.3N_{cor} - 0.00054N_{cor}^2 \qquad (2)$$

Correlation by De Mello (1971) [4] (see Fig. 2):

Correlation by Schmertmann (1975) [5] (see Eq. 3 and Fig. 3):

$$\phi' = \tan^{-1}\left[\frac{N_F}{12.2 + 20.3\left(\frac{\sigma_v'}{p_a}\right)}\right]^{0.34} \quad (3)$$

where N_F = field standard penetration number, σ_v' = effective overburden pressure, and p_a = atmospheric pressure in the same unit as σ_v' (e.g. 100 kPa)

Correlation by Shioi & Fukui (1982) [6] (see Eq. 4):

$$\phi' = \sqrt{18N_{70}'} + 15 \quad (4)$$

Correlation by Hatanaka & Uchida (1996) [7] (see Eq. 5):

$$\phi' = \sqrt{20N_{cor}} + 20 \quad (5)$$

C. Comparison of various correlations between SPT N-value and friction angle

Fig. 4 compares all aforementioned correlations between SPT N-value and friction angle (by using reference confining stress of 100 kPa). For typical friction angle of sand (25°-45°), it is found that the correlations by [4], [5], and [6] give largest values of friction angle, whereas the correlation by [3] gives smallest value. The difference between the largest and smallest estimated friction angle is approximately 10°.

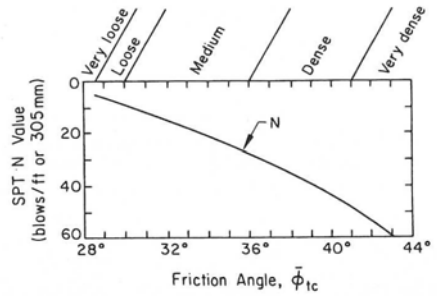


Fig. 1. Correlation between SPT N-value and friction angle [3].

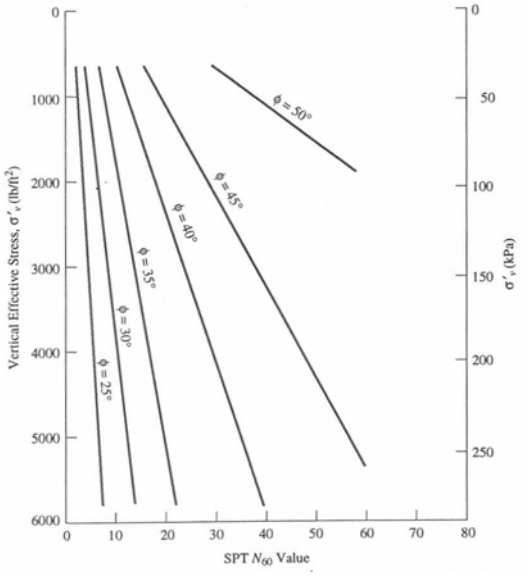


Fig. 2. Correlation between SPT N-value and friction angle [4].

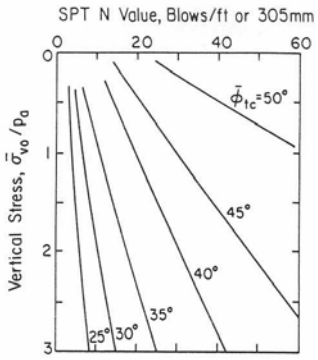


Fig. 3. Correlation between SPT N-value and friction angle [5].

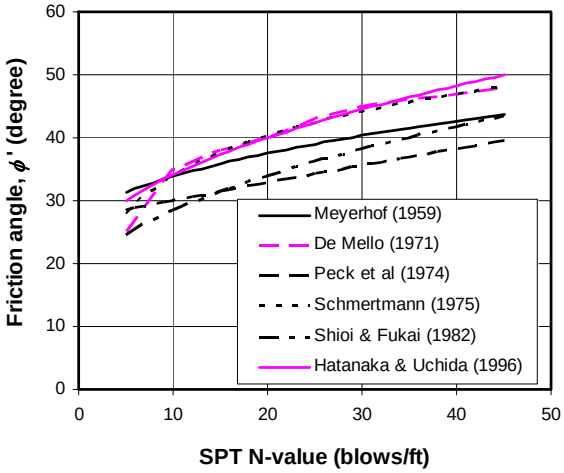


Fig. 4. Comparison of correlations between SPT N-value and friction angle.

III. Laboratory Experiment

A. Studied sands

Rayong sand is taken from the site at Pluog-dang district, Rayong province. The soil profile at the site consists of dense sand between 0-11 m BGL and very dense sand until the end of soil boring at 15 m BGL. The water table is found at 2.0 m BGL. The sand samples are taken by split-spoon sampler at 3-6 m BGL. The sand samples are homogeneous and the sieve analysis gives D_{10} = 0.06 mm, D_{30} = 0.15 mm, D_{60} = 0.37 mm, C_u = 6.2, C_c = 1.0, and %fine (<#200 sieve) = 12%. The sand can be classified as silty sand (SM) according to Unified Soil Classification System (USCS).

Chonburi sand is taken from the site at Jom Thien Beach, Chonburi province. The soil profile at the site consists of loose to medium dense sand between 0-15 m BGL, stiff clay between 15-20 m BGL, very dense sand between 20-32 m BGL, and weathered rock. The water table is found at 2.0 m BGL. The sand samples are taken from test pit at a depth of 3 m BGL. The sand samples are homogeneous and the sieve analysis gives D_{10} = 0.40 mm, D_{30} = 0.56 mm, D_{60} = 0.75 mm, C_u = 2.1, C_c = 0.93, and %fine (<#200 sieve) = 1%. The sand can be classified as poorly graded sand (SP) according to Unified Soil Classification System (USCS).

B. Specimen preparation

The reconstituted specimens for direct shear test are prepared by compacting the sand samples to the required unit weights by static compaction. The specimen size for direct shear test is 6 × 6 cm^2 square and 2.5 cm height with volume of 90 cm^3. During compaction the degrees of saturation of sand specimens are 71-87% for Rayong sand and 90% for Chonburi sand. Three identical specimens, at various unit weights, are prepared for each direct shear test. First, the corrected SPT-N values are chosen to cover its typical range in the field.. Next, the relative density for corrected SPT N-values are estimated by correlation proposed by [8] (using σ_v' = 100 kPa). Finally, the unit weight of the sand specimen for direct shear test is obtained by using values of $\gamma_{dry,max}$ and $\gamma_{dry,min}$ recommended by [9]. The details of calculation are summarized in Tables 1 and 2.

TABLE 1. Unit weight calculation of Rayong sand.

Specimens	Corrected SPT	Relative density (%) [8]	Dry unit weight (kN/m^3)[1]	Moisture content (%)[2]
Rayong 1	16	58	17.5	13.9
Rayong 2	23	66	18.2	13.2
Rayong 3	52	95	21.4	7.8

[1] because soil is classified as well-graded granular soil, clean fine to course sand which has $\gamma_{dry,min}$ = 13.6 kN/m^3 and $\gamma_{dry,max}$ = 22.1 kN/m^3 [9] and

$$D_r = \left(\frac{\gamma_{dry} - \gamma_{dry,\min}}{\gamma_{dry,\max} - \gamma_{dry,\min}} \right) \frac{\gamma_{dry,\max}}{\gamma_{dry}} \times 100\%$$

[2] at 71-87% degree of saturation

TABLE 2. Unit weight calculation for Chonburi sand.

Samples	Corrected SPT	Relative density (%) [8]	Dry unit weight (kN/m^3)[1]	Moisture content (%)[2]
Chonburi 1	10	50	15.6	24
Chonburi 2	20	70	16.8	20
Chonburi 3	40	95	18.5	15

[1] because soil is classified as clean uniform sand which has $\gamma_{dry,min}$ = 13.3 kN/m^3 and $\gamma_{dry,max}$ = 18.9 kN/m^3 [9] and

$$D_r = \left(\frac{\gamma_{dry} - \gamma_{dry,\min}}{\gamma_{dry,\max} - \gamma_{dry,\min}} \right) \frac{\gamma_{dry,\max}}{\gamma_{dry}} \times 100\%$$

[2] at 90% degree of saturation

C. Direct shear test

The consolidated drained direct shear tests are performed to evaluate the effective-stress strength parameters for Mohr-Coulomb failure criterion (c', ϕ'). The direct shear test is performed at normal effective stresses between 30 and 110 kPa and with a speed of 0.5 mm/min to ensure fully drainage.

IV. Experimental Results

A. Direct shear test results

The direct shear test results of Rayong sand are summarized in Table 3. Rayong sand has both cohesion and friction angle and they have a tendency to increase with increasing SPT N-value. The correlations between corrected SPT N-value and c', ϕ' of Rayong sand are shown in Fig. 5. If the correlation is assumed as a straight line, the relationships can be obtained as shown in Eqs. (6) and (7).

$$c' = (0.57)(\text{Corrected SPT}) - 0.10 \quad \text{(kPa)} \quad (6)$$

$$\phi' = (0.13)(\text{Corrected SPT}) + 31.67 \quad \text{(degree)} \quad (7)$$

TABLE 3. Direct shear test results of Rayong sand.

Specimens	Corrected SPT	c' (kPa)	ϕ' (degree)
Rayong 1	16	10	33.7
Rayong 2	23	12	34.7
Rayong 3	52	30	38.4

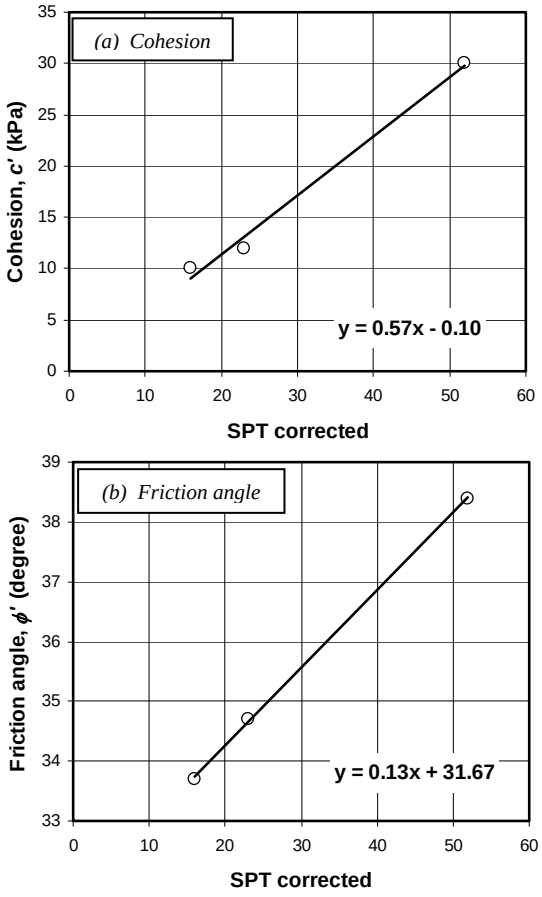


Fig. 5. Relationships between SPT N-value and strength parameters of Rayong sand.

The direct shear test results of Chonburi sand are summarized in Table 4. Chonburi sand does not have cohesion and its friction angle has a tendency to increase with increasing SPT N-value. The correlation between corrected SPT N-value and ϕ' of Chonburi sand is shown in Fig. 6. If the correlation is assumed as a straight line, the relationship can be obtained as shown in Eq. (8).

$$\phi' = (0.34)(\text{Corrected SPT}) + 31.8 \quad \text{(degree)} \quad (8)$$

TABLE 4. Direct shear test results of Chonburi sand.

Specimens	Corrected SPT	c' (kPa)	ϕ' (degree)
Chonburi 1	10	0	34.1
Chonburi 2	20	0	40.5
Chonburi 3	40	0	45.1

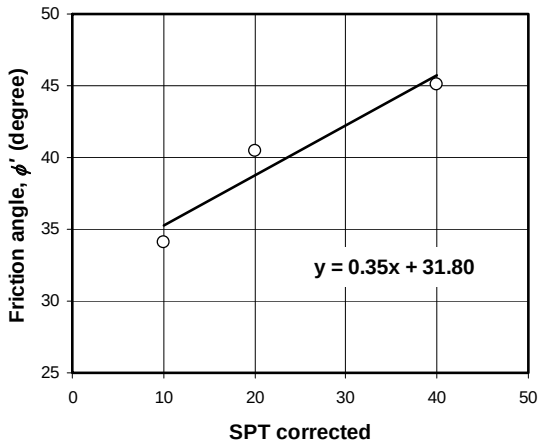


Fig. 6. Relationship between SPT N-value and friction angle of Chonburi sand.

B. *Comparison of relationships between SPT N-value and friction angle of studied sands*

Fig. 7 compare the relationships between SPT N-value and friction angle of Rayong sand (Fig. 5(a)) and Chonburi sand (Fig. 6) with publishes empirical correlations (Fig. 4). It is shown that, at similar SPT N-value, the friction angle of Chonburi sand is larger than that of Rayong sand. This may be due to the fact that Rayong sand has more silt resulting in the existence of both c' and ϕ' for its strength parameters. The relationship between SPT N-value and ϕ' of Rayong sand can be estimated by empirical correlation of [3], whereas that of Chonburi sand can be estimated by correlations of [4] and [5]. This indicates that there is no universal empirical correlation in literatures that can be used for both Rayong and Chonburi sands.

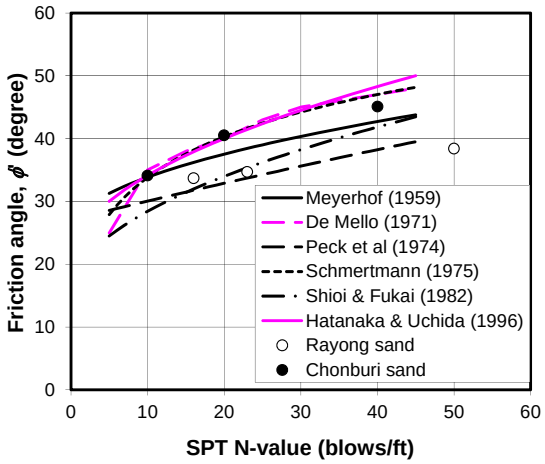


Fig. 7. Comparison of relationships between SPT N-value and friction angle.

V. Conclusions

Consider the relationship between SPT N-value and c', it is found that Rayong sand has this relationship as a straight line (Eq. 6), whereas Chonburi sand does not have c' value. Considering the relationship between SPT N-value and ϕ', it is found that the relationship of Rayong sand can be estimated by correlation of [3], whereas that of Chonburi sand can be estimated by correlations of [4] and [5]. The difference of the empirical correlations for Rayong and Chonburi sands may be due to the difference in sand properties. Rayong sand is classified as SM and direct shear test shows the existence of cohesion, whereas Chonburi is classified as SP and direct shear test does not show any cohesion. This indicates that there is no universal empirical correlation in literatures that can be used for both Rayong and Chonburi sands. Therefore, preliminary study should be undertaken to evaluate the suitability for the empirical correlation chosen for specific sand.

It is noted, however, that the determination of relationships between SPT-N value and ϕ' in this study may have some uncertainty due to: (i) the use of ϕ_{ds}' from direct shear test compared with ϕ_{tc}' in the correlation (it is well known that ϕ_{ds}' is larger than ϕ_{tc}' by a few degrees), (ii) the uncertainty of the use of the relationship between SPT-N value and D_r of [8], and (iii) the uncertainty of the use of relationship between soil types and $\gamma_{dry,min}$, $\gamma_{dry,max}$ of [9].

Acknowledgments

This research is supported by the Faculty of Engineering, Burapha University (WJP 10/2557) and Burapha University (NRCT 103/2557).

References

[1] ASTM D1586 Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils, 2005.

[2] G.G. Meyerhof, "Compaction of Sands and the Bearing Capacity of Piles", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 58, No. SM6, 1959, pp. 1-29.

[3] R.B. Peck, W.E. Hansen, and T.H. Thornburn, Foundation Engineering. 2nd Ed., John Wiley, 1974.

[4] V.F. De Mello, "The Standard Penetration Test", Proc. 4th Pan-American Conf. on SMFE, San Juan, Puerto Rico, Vol. 1, 1971, pp. 1-86.

[5] J.H. Schmertmann, "Measurement of In Situ Shear Strength", Proc. of the Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Vol. 2, 1975, pp. 57-138.

[6] Y. Shioi and J. Fukui, "Application of N-Value to Design of Foundations in Japan", Proc. 2nd ESOPT, Vol. 1, 1982, pp. 159-164.

[7] M. Hatanaka and A. Uchida, "Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils", Soils and Foundations, Vol. 36, No. 4, 1996, pp. 1-9.

[8] W.G. Holtz and H.J. Gibbs, Discussion of "SPT and Relative Density in Course Sand", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT3, 1979, pp. 439-441.

[9] B.K. Hough, Basic Soil Engineering. 2nd Ed., Ronald Press, 1969.

Correlation between SPT N-value and friction angle of local sands in Eastern of Thailand

Siam Yimsiri
Department of Civil Engineering
Burapha University
Chonburi, Thailand

***Abstract*—This research investigates the correlation between SPT N-value and friction angle of 2 local sands from the Eastern of Thailand. The research involves experimental study by a consolidated drained direct shear test. The obtained results are compared with published correlations recommended in the literatures to verify their applicability with these local sands. The suitable correlations are recommended for use in the analysis and design of geotechnical structures in the studied areas.**

Keywords—SPT N-value, friction angle, sand, direct shear test, empirical correlation

I. INTRODUCTION

The subsoil in the Eastern of Thailand is usually sandy soil which is different from that of Bangkok where soft clay is normally encountered. Sandy soil layer is typically located down to 15-30 m BGL before the weathered rock is found. Some areas near the coast have more variable subsoil condition where alternating layers of sand and clay are encountered before the weathered rock is found at large depth. The design of geotechnical structures, e.g. foundation, slope, and excavation, on sand requires effective-stress strength parameters (drained analysis), which are cohesion (c') and friction angle (ϕ'). A routine site characterization program, which usually involves SPT, does not directly provide these parameters. The friction angle has to be estimated from SPT results using empirical correlations which are abundant from published literatures. However, these correlations are empirical in nature and derived for specific sands which may not be applicable to local sands. Therefore, this research investigates the correlation between SPT N-value and friction angle of local sands in the Eastern of Thailand.

It is noted that the soil properties obtained from correlations with SPT N-value should be used only in the analysis and design of small geotechnical structures due to their low reliability. For large geotechnical structures, which require accurate soil properties, the soil properties should be obtained from in-situ and/or laboratory tests which simulate stress conditions consistent with those occur in the fields.

II. STANDARD PENETRATION TEST AND ITS CORRELATIONS

A. Standard penetration test

Standard Penetration Test (SPT) has been developed in USA since 1927 and has become the most widely used in-situ test. The advantages of SPT are that: (i) testing apparatus is simple and robust, (ii) test procedure is simple, (iii) disturbed soil specimens can be obtained during test, (iv) it can be used with almost all soil types, and (iv) there are many available correlations. SPT is performed by dropping a hammer of 63.5 kg (140 lb) from a height of 760 mm (30 in) freely on the anvil, which is attached to the top of the drill rod. The number of drop used to penetrate the SPT sampler, which is attached to the lower end of the drill rod, into soil by 300 mm (after initial seating drive of 150 mm) is called "penetration resistance" or "SPT N-value". The detailed of SPT procedure and standard SPT sampler are described in [1]. The obtained SPT results have to be corrected for energy ratio, overburden stress, water table, rod length, sampler type, borehole size, and liner in SPT sampler, before they can be used in the empirical correlations.

B. Correlations between SPT N-value and friction angle

Correlations between SPT N-value and friction angle of sand have been widely studied. Some well-known empirical correlations between SPT N-value and ϕ_{tc}' are described as follow.

Correlation by Meyerhof (1959) [2] (see Eq. 1):

$$\phi' = 25 + 28\left(\frac{N_{55}}{\sigma_{vo}'}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (\sigma_{vo}' \text{ in kPa}) \qquad (1)$$

Correlation by Peck et al. (1974) [3] (see Eq. 2 and Fig. 1):

$$\phi' \text{ (degree)} = 27.1 + 0.3N_{cor} - 0.00054N_{cor}^2 \qquad (2)$$

Correlation by De Mello (1971) [4] (see Fig. 2):

Correlation by Schmertmann (1975) [5] (see Eq. 3 and Fig. 3):

$$\phi' = \tan^{-1}\left[\frac{N_F}{12.2 + 20.3\left(\frac{\sigma_v'}{p_a}\right)}\right]^{0.34} \quad (3)$$

where N_F = field standard penetration number, σ_v' = effective overburden pressure, and p_a = atmospheric pressure in the same unit as σ_v' (e.g. 100 kPa)

Correlation by Shioi & Fukui (1982) [6] (see Eq. 4):

$$\phi' = \sqrt{18N_{70}'} + 15 \quad (4)$$

Correlation by Hatanaka & Uchida (1996) [7] (see Eq. 5):

$$\phi' = \sqrt{20N_{cor}} + 20 \quad (5)$$

C. Comparison of various correlations between SPT N-value and friction angle

Fig. 4 compares all aforementioned correlations between SPT N-value and friction angle (by using reference confining stress of 100 kPa). For typical friction angle of sand (25°-45°), it is found that the correlations by [4], [5], and [6] give largest values of friction angle, whereas the correlation by [3] gives smallest value. The difference between the largest and smallest estimated friction angle is approximately 10°.

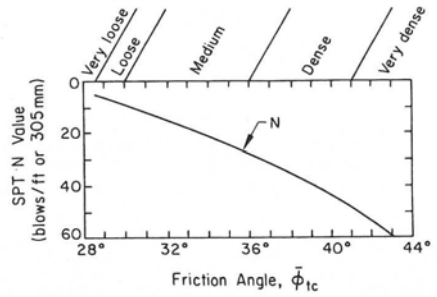


Fig. 1. Correlation between SPT N-value and friction angle [3].

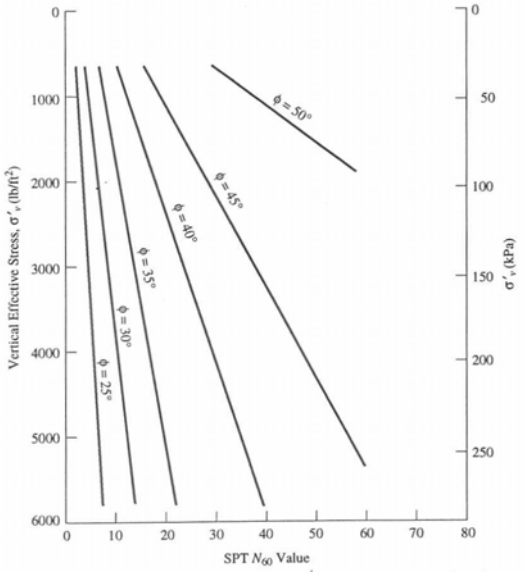


Fig. 2. Correlation between SPT N-value and friction angle [4].

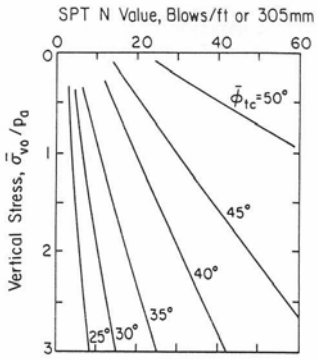


Fig. 3. Correlation between SPT N-value and friction angle [5].

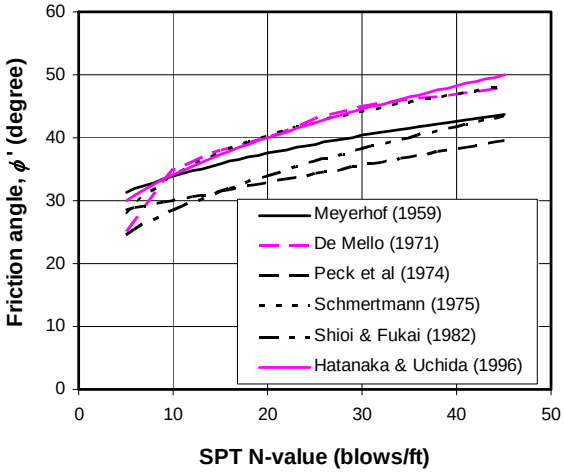


Fig. 4. Comparison of correlations between SPT N-value and friction angle.

III. Laboratory Experiment

A. Studied sands

Rayong sand is taken from the site at Pluog-dang district, Rayong province. The soil profile at the site consists of dense sand between 0-11 m BGL and very dense sand until the end of soil boring at 15 m BGL. The water table is found at 2.0 m BGL. The sand samples are taken by split-spoon sampler at 3-6 m BGL. The sand samples are homogeneous and the sieve analysis gives D_{10} = 0.06 mm, D_{30} = 0.15 mm, D_{60} = 0.37 mm, C_u = 6.2, C_c = 1.0, and %fine (<#200 sieve) = 12%. The sand can be classified as silty sand (SM) according to Unified Soil Classification System (USCS).

Chonburi sand is taken from the site at Jom Thien Beach, Chonburi province. The soil profile at the site consists of loose to medium dense sand between 0-15 m BGL, stiff clay between 15-20 m BGL, very dense sand between 20-32 m BGL, and weathered rock. The water table is found at 2.0 m BGL. The sand samples are taken from test pit at a depth of 3 m BGL. The sand samples are homogeneous and the sieve analysis gives D_{10} = 0.40 mm, D_{30} = 0.56 mm, D_{60} = 0.75 mm, C_u = 2.1, C_c = 0.93, and %fine (<#200 sieve) = 1%. The sand can be classified as poorly graded sand (SP) according to Unified Soil Classification System (USCS).

B. Specimen preparation

The reconstituted specimens for direct shear test are prepared by compacting the sand samples to the required unit weights by static compaction. The specimen size for direct shear test is 6 × 6 cm^2 square and 2.5 cm height with volume of 90 cm^3. During compaction the degrees of saturation of sand specimens are 71-87% for Rayong sand and 90% for Chonburi sand. Three identical specimens, at various unit weights, are prepared for each direct shear test. First, the corrected SPT-N values are chosen to cover its typical range in the field.. Next, the relative density for corrected SPT N-values are estimated by correlation proposed by [8] (using σ_v' = 100 kPa). Finally, the unit weight of the sand specimen for direct shear test is obtained by using values of $\gamma_{dry,max}$ and $\gamma_{dry,min}$ recommended by [9]. The details of calculation are summarized in Tables 1 and 2.

TABLE 1. Unit weight calculation of Rayong sand.

Specimens	Corrected SPT	Relative density (%) [8]	Dry unit weight (kN/m^3)[1]	Moisture content (%)[2]
Rayong 1	16	58	17.5	13.9
Rayong 2	23	66	18.2	13.2
Rayong 3	52	95	21.4	7.8

[1] because soil is classified as well-graded granular soil, clean fine to course sand which has $\gamma_{dry,min}$ = 13.6 kN/m^3 and $\gamma_{dry,max}$ = 22.1 kN/m^3 [9] and

$$D_r = \left(\frac{\gamma_{dry} - \gamma_{dry,\min}}{\gamma_{dry,\max} - \gamma_{dry,\min}} \right) \frac{\gamma_{dry,\max}}{\gamma_{dry}} \times 100\%$$

[2] at 71-87% degree of saturation

TABLE 2. Unit weight calculation for Chonburi sand.

Samples	Corrected SPT	Relative density (%) [8]	Dry unit weight (kN/m^3)[1]	Moisture content (%)[2]
Chonburi 1	10	50	15.6	24
Chonburi 2	20	70	16.8	20
Chonburi 3	40	95	18.5	15

[1] because soil is classified as clean uniform sand which has $\gamma_{dry,min}$ = 13.3 kN/m^3 and $\gamma_{dry,max}$ = 18.9 kN/m^3 [9] and

$$D_r = \left(\frac{\gamma_{dry} - \gamma_{dry,\min}}{\gamma_{dry,\max} - \gamma_{dry,\min}} \right) \frac{\gamma_{dry,\max}}{\gamma_{dry}} \times 100\%$$

[2] at 90% degree of saturation

C. Direct shear test

The consolidated drained direct shear tests are performed to evaluate the effective-stress strength parameters for Mohr-Coulomb failure criterion (c', ϕ'). The direct shear test is performed at normal effective stresses between 30 and 110 kPa and with a speed of 0.5 mm/min to ensure fully drainage.

IV. Experimental Results

A. Direct shear test results

The direct shear test results of Rayong sand are summarized in Table 3. Rayong sand has both cohesion and friction angle and they have a tendency to increase with increasing SPT N-value. The correlations between corrected SPT N-value and c', ϕ' of Rayong sand are shown in Fig. 5. If the correlation is assumed as a straight line, the relationships can be obtained as shown in Eqs. (6) and (7).

$$c' = (0.57)(\text{Corrected SPT}) - 0.10 \quad \text{(kPa)} \quad (6)$$

$$\phi' = (0.13)(\text{Corrected SPT}) + 31.67 \quad \text{(degree)} \quad (7)$$

TABLE 3. Direct shear test results of Rayong sand.

Specimens	Corrected SPT	c' (kPa)	ϕ' (degree)
Rayong 1	16	10	33.7
Rayong 2	23	12	34.7
Rayong 3	52	30	38.4

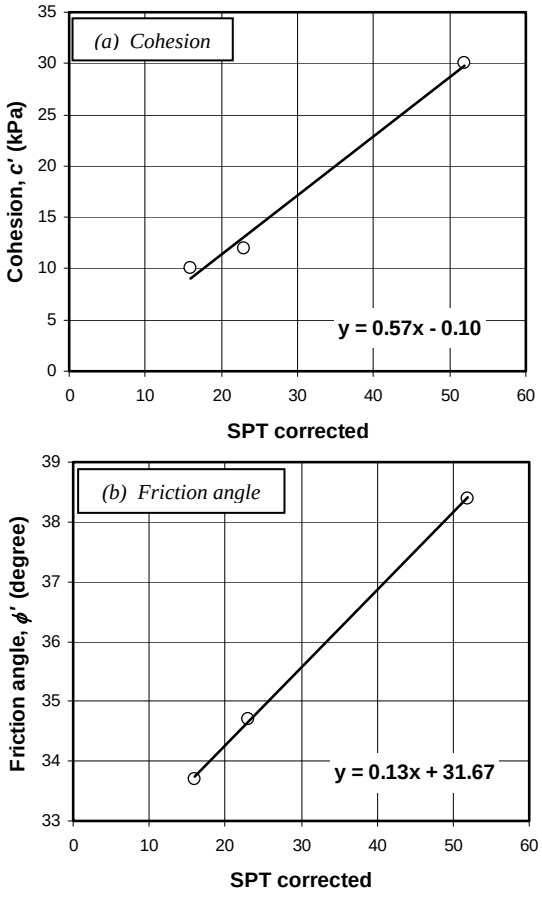


Fig. 5. Relationships between SPT N-value and strength parameters of Rayong sand.

The direct shear test results of Chonburi sand are summarized in Table 4. Chonburi sand does not have cohesion and its friction angle has a tendency to increase with increasing SPT N-value. The correlation between corrected SPT N-value and ϕ' of Chonburi sand is shown in Fig. 6. If the correlation is assumed as a straight line, the relationship can be obtained as shown in Eq. (8).

$$\phi' = (0.34)(\text{Corrected SPT}) + 31.8 \quad \text{(degree)} \quad (8)$$

TABLE 4. Direct shear test results of Chonburi sand.

Specimens	Corrected SPT	c' (kPa)	ϕ' (degree)
Chonburi 1	10	0	34.1
Chonburi 2	20	0	40.5
Chonburi 3	40	0	45.1

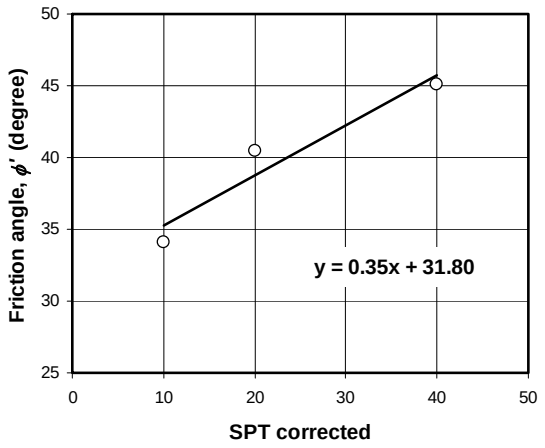


Fig. 6. Relationship between SPT N-value and friction angle of Chonburi sand.

B. *Comparison of relationships between SPT N-value and friction angle of studied sands*

Fig. 7 compare the relationships between SPT N-value and friction angle of Rayong sand (Fig. 5(a)) and Chonburi sand (Fig. 6) with publishes empirical correlations (Fig. 4). It is shown that, at similar SPT N-value, the friction angle of Chonburi sand is larger than that of Rayong sand. This may be due to the fact that Rayong sand has more silt resulting in the existence of both c' and ϕ' for its strength parameters. The relationship between SPT N-value and ϕ' of Rayong sand can be estimated by empirical correlation of [3], whereas that of Chonburi sand can be estimated by correlations of [4] and [5]. This indicates that there is no universal empirical correlation in literatures that can be used for both Rayong and Chonburi sands.

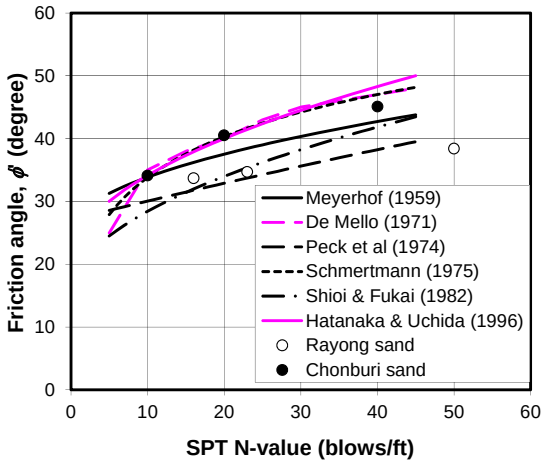


Fig. 7. Comparison of relationships between SPT N-value and friction angle.

V. Conclusions

Consider the relationship between SPT N-value and c', it is found that Rayong sand has this relationship as a straight line (Eq. 6), whereas Chonburi sand does not have c' value. Considering the relationship between SPT N-value and ϕ', it is found that the relationship of Rayong sand can be estimated by correlation of [3], whereas that of Chonburi sand can be estimated by correlations of [4] and [5]. The difference of the empirical correlations for Rayong and Chonburi sands may be due to the difference in sand properties. Rayong sand is classified as SM and direct shear test shows the existence of cohesion, whereas Chonburi is classified as SP and direct shear test does not show any cohesion. This indicates that there is no universal empirical correlation in literatures that can be used for both Rayong and Chonburi sands. Therefore, preliminary study should be undertaken to evaluate the suitability for the empirical correlation chosen for specific sand.

It is noted, however, that the determination of relationships between SPT-N value and ϕ' in this study may have some uncertainty due to: (i) the use of ϕ_{ds}' from direct shear test compared with ϕ_{tc}' in the correlation (it is well known that ϕ_{ds}' is larger than ϕ_{tc}' by a few degrees), (ii) the uncertainty of the use of the relationship between SPT-N value and D_r of [8], and (iii) the uncertainty of the use of relationship between soil types and $\gamma_{dry,min}$, $\gamma_{dry,max}$ of [9].

Acknowledgments

This research is supported by the Faculty of Engineering, Burapha University (WJP 10/2557) and Burapha University (NRCT 103/2557).

References

[1] ASTM D1586 Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils, 2005.

[2] G.G. Meyerhof, "Compaction of Sands and the Bearing Capacity of Piles", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 58, No. SM6, 1959, pp. 1-29.

[3] R.B. Peck, W.E. Hansen, and T.H. Thornburn, Foundation Engineering. 2nd Ed., John Wiley, 1974.

[4] V.F. De Mello, "The Standard Penetration Test", Proc. 4th Pan-American Conf. on SMFE, San Juan, Puerto Rico, Vol. 1, 1971, pp. 1-86.

[5] J.H. Schmertmann, "Measurement of In Situ Shear Strength", Proc. of the Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Vol. 2, 1975, pp. 57-138.

[6] Y. Shioi and J. Fukui, "Application of N-Value to Design of Foundations in Japan", Proc. 2nd ESOPT, Vol. 1, 1982, pp. 159-164.

[7] M. Hatanaka and A. Uchida, "Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils", Soils and Foundations, Vol. 36, No. 4, 1996, pp. 1-9.

[8] W.G. Holtz and H.J. Gibbs, Discussion of "SPT and Relative Density in Course Sand", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT3, 1979, pp. 439-441.

[9] B.K. Hough, Basic Soil Engineering. 2nd Ed., Ronald Press, 1969.