

โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุก
ของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง

รายงานฉบับสุดท้าย (Final Report)



1



สำนักวิจัยและพัฒนาทาง

กรมทางหลวง

พ.ศ. ๒๕๕๕



รายงานฉบับสุดท้าย

(Final Report)

สำนักงานวิจัยและพัฒนางานทาง

กรมทางหลวง

พ.ศ. ๒๕๕๕

สารบัญ

บทที่ 1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.1 ที่มาของการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังต่อไปนี้.....	1
1.3 รายละเอียดและขั้นตอนของการศึกษา	2
1.4 รายละเอียดของการดำเนินการและผลที่ได้	3
บทที่ 2 งานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิต (Static equilibrium method)	5
2.2 สูตรตอกเสาเข็ม (Pile driving formula)	6
2.3 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test).....	12
2.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test).....	13
2.5 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบกึ่งสถิต (Rapid pile load test).....	13
2.6 การรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินและผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบ สถิตยศาสตร์และแบบพลศาสตร์	15
2.7 การจัดทำคู่มือที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์	15
บทที่ 3 งานทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในแปลงทดสอบ.....	17
3.1 การเจาะสำรวจและทดสอบชั้นดินภายในบริเวณแปลงทดสอบ.....	17
3.2 การหล่อเสาเข็มและการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instrumentation) ในแปลงทดสอบ	20
3.3 การตอกเสาเข็มในแปลงทดสอบ	26
3.4 ผลการศึกษา.....	30
3.5 สรุปผลการศึกษาและข้อแนะนำ.....	59
บทที่ 4 งานประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยเครื่องมือ Pile Driving Analyzer (PDA)	62
4.1 การประเมินค่าประสิทธิภาพการตอก.....	63
4.2 การเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงกับค่าที่คำนวณได้ด้วยโปรแกรม GRLWEAP	63
4.3 การศึกษาอิทธิพลและเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP	66
4.4 การวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการออกแบบการตอกโดยใช้โปรแกรม GRLWEAP	66
4.5 สรุปผลการศึกษาและข้อแนะนำในการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบการตอกเสาเข็ม	67
บทที่ 5 งานศึกษาสังเกตการณ์และเก็บข้อมูลการดำเนินการควบคุม ตรวจสอบและทดสอบเสาเข็ม	70
บทที่ 6 งานพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ใช้ในงานของกรมทางหลวง	71

6.1 การเก็บข้อมูล	72
6.2 การประมวลผลข้อมูล	72
6.3 ความเที่ยงตรงของวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต่างๆ	73
6.4 ความแม่นยำของวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต่างๆ	74
6.5 ตัวคูณลดค่าแรงต้านทาน (Resistance factor).....	74
6.6 ผลการวิเคราะห์	77
6.7 สรุปผลการศึกษาและคำแนะนำ.....	83
บทที่ 7 งานจัดทำร่างคู่มือมาตรฐานและฐานข้อมูลการทดสอบ	86
บทที่ 8 งานจัดอบรม	88

บทที่ 1 ความเป็นมาของโครงการ

1.1 ที่มาของการศึกษา

ปัจจุบันการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในกรมทางหลวงยังนิยมใช้สูตรตอกเสาเข็ม (Pile driving formula) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มได้อย่างรวดเร็วกว่าการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบมาตรฐาน (Pile load tests) เช่นการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load tests) หรือแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load tests) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงและต้องใช้เวลาในการวางแผน และจัดเตรียมงานที่เกี่ยวข้องก่อนเริ่มการทดสอบเช่น การสร้างเสาเข็มสมอ หรือ การเสริมเหล็กเพิ่มเติมที่หัวเสาเข็มเพื่อให้สามารถรับแรงกระทำระหว่างทดสอบได้อย่างปลอดภัย เป็นต้น

สูตรการตอกเสาเข็มที่กรมทางหลวงใช้คือ Hiley formula ตามแบบมาตรฐานฉบับ พ.ศ. 2537 ในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกโดยใช้วิธีนี้กับเสาเข็มตอกทั่วประเทศแต่ก็มักประสบปัญหาเมื่อใช้สูตรการตอกเสาเข็มในการประเมินกำลังรับน้ำหนักเช่น การประมาณความยาวของเสาเข็มผิดพลาดทำให้ต้องทำการตัดหัวเสาเข็มเนื่องจากไม่สามารถตอกเสาเข็มต่อไปได้ หรือในบางครั้งก็ต้องทำการต่อเสาเข็มเพื่อให้สามารถตอกเสาเข็มได้ค่า blow ตามข้อกำหนด นอกจากนี้วิธีดังกล่าวก็ได้รับการวิจารณ์จากนักวิจัยหลายๆ ท่านว่าไม่น่าเชื่อถือเนื่องจากมีปัจจัยและองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย

ด้วยสาเหตุดังกล่าวข้างต้น กรมทางหลวงจึงเห็นว่าควรดำเนินการศึกษาวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวงและปรับปรุงวิธีการประเมินกำลังฯ ให้ถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังต่อไปนี้

1. เพื่อทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในประเทศไทยและต่างประเทศ รวมถึงปัญหาอุปสรรคต่างๆ ในการใช้งาน
2. เพื่อประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มและศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องมือตอกเสาเข็มประเภทต่างๆ ที่ใช้ในประเทศไทยด้วยเครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม (Pile driving analyzer, PDA)

3. เพื่อเปรียบเทียบการทดสอบและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test) และแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test)
4. เพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ใช้งานของกรมทางหลวง
5. เพื่อจัดทำร่างคู่มือมาตรฐานการควบคุมตรวจสอบเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง

1.3 รายละเอียดและขั้นตอนของการศึกษา

รวบรวมข้อมูลเกี่ยวข้องกับเสาเข็มตอกในประเทศไทย และใช้เครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม (Pile driving analyzer, PDA) ตรวจวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม ในระหว่างการก่อสร้างกับโครงการต่างๆที่ได้นำเสนอขออนุมัติ รวมทั้งประเมินกำลังของเสาเข็มที่ถูกตรวจวัด เพื่อใช้ในการศึกษาของกรมทางหลวง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบเสาเข็มในแปลงทดสอบกับเสาเข็มตอกในพื้นที่แปลงทดสอบของโครงการศึกษา จำนวน 2 แปลง โดยเลือกจากพื้นที่ที่เป็นตัวแทนของชั้นดินเหนียวและชั้นดินทรายอย่างละแปลง รวมไปถึงการรวบรวมข้อมูลเสาเข็มจากโครงการที่มีการประเมินกำลังฯ ทั้งแบบสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ รวมทั้งมีข้อมูลเจาะสำรวจดิน ข้อมูลอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม และระเบียนตอกเสาเข็มที่สมบูรณ์ โดยจำนวนเสาเข็มที่รวบรวมได้จากการศึกษาในโครงการนี้มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 37 ต้น เพื่อจัดทำเป็นฐานข้อมูล สำหรับใช้ในการศึกษาของกรมทางหลวงต่อไป

สำหรับเสาเข็มที่ก่อสร้างในแปลงทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 5 ต้น โดยมีการติดตั้งมาตรวัดความเครียดในเสาเข็มทุกต้นที่ตำแหน่งต่างๆ 3 ระดับและติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำในดินจำนวน 4 ตัวต่อแปลงทดสอบ การทดสอบที่ทำในแปลงทดสอบประกอบด้วยการประเมินกำลังฯ แบบพลศาสตร์ซึ่งทดสอบในระหว่างการก่อสร้างและหลังจากที่ตอกเสาเข็มเสร็จสิ้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 3, 7 และ 14 วัน และการประเมินกำลังฯ แบบสถิตยศาสตร์เมื่อเสาเข็มมีอายุไม่น้อยกว่า 21 วัน

ที่ปรึกษาได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม รวมทั้งเปรียบเทียบการทดสอบและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยสูตรตอกเสาเข็ม กับการทดสอบฯ แบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load tests) และแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load tests) แล้วจัดทำเป็นรายงานซึ่งแสดงถึงความแม่นยำและเที่ยงตรงของการประเมินกำลังฯ แบบต่างๆ ตามหลักสถิติ โดยใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลการตรวจวัดที่ได้ดำเนินการในโครงการศึกษานี้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงวิธีการประเมินกำลังฯ ของกรมทางหลวงต่อไป

สำหรับแนวทางในการออกแบบการตอกเสาเข็ม เช่น การกำหนดน้ำหนักดัมตอก ระยะยก และ การหยุดตัวที่การตอกสิบครั้งสุดท้าย (Last ten blows) ที่ปรึกษาได้เปรียบเทียบพฤติกรรมของเสาเข็มที่ตรวจวัดได้กับผลการคำนวณจากโปรแกรม GRLWEAP ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด และทำการศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ดี แล้วใช้ค่าดังกล่าวในการศึกษาหน่วยแรง และค่า blow ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ดัมตอก และ ระยะยกต่างๆ แล้วสรุปเป็นคำแนะนำในการออกแบบการตอกเสาเข็ม

นอกจากการศึกษาและตรวจวัดที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ที่ปรึกษา ยังได้ดำเนินการจัดทำคู่มือและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการประเมินกำลังฯ จำนวน 5 ฉบับ และสื่อการสอนเกี่ยวกับการควบคุม ตรวจสอบ และทดสอบเสาเข็มจำนวน 1 ชุด เพื่อใช้ในการดำเนินการของกรมทางหลวง ซึ่งได้แก่

1. คู่มือวิธีการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic load test)
2. คู่มือการวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม GRLWEAP
3. คู่มือการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยโปรแกรม CAPWAP
4. ร่างคู่มือมาตรฐานการควบคุมและตรวจสอบเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
5. ร่างคู่มือมาตรฐานการทดสอบเสาเข็มโดยใช้เครื่องมือ PDA
6. สื่อการสอนเกี่ยวกับการควบคุม ตรวจสอบ และ ทดสอบเสาเข็ม

หลังจากดำเนินการศึกษาและจัดทำเอกสารที่เกี่ยวข้องจนเสร็จสิ้น ที่ปรึกษาได้ดำเนินการจัดอบรมเพื่อถ่ายทอดความรู้ที่ได้จากการศึกษาในโครงการนี้ให้แก่เจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวงจำนวน 110 ท่าน (เข้าอบรม 94 ท่าน และติดตาม 16 ท่าน) ที่โรงแรมทวิน ทาวเวอร์ ในวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2555 ซึ่งได้รับความสนใจจากผู้เข้าร่วมประชุมและมีการถาม ตอบในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับวิธีการประเมินกำลังฯ และปัญหาที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานจริงในแง่มุมต่างๆ ที่น่าสนใจเป็นจำนวนมาก

1.4 รายละเอียดของการดำเนินการและผลที่ได้

เนื่องจากหัวข้อต่างๆ ของการดำเนินงานตามข้อกำหนดของโครงการมีความเชื่อมโยงกันและมีเนื้อหา มากจึงได้จัดรายงานออกเป็นฉบับย่อยๆ จำนวน 7 ฉบับ โดยเนื้อหาแต่ละฉบับมีความสัมพันธ์กับหัวข้อ ต่างๆ ตามข้อกำหนดของโครงการดัง สำหรับรายละเอียดของการดำเนินการและผลที่ได้เมื่อเรียงตาม รายการข้อกำหนดของโครงการฯ ได้แสดงไว้ในบทถัดๆ ไป

ตารางที่ 1-1 รายการตามข้อกำหนดของโครงการและเนื้อหาของรายงานฉบับต่างๆ

หัวข้อ	รายละเอียด	รายงานเล่มที่
3.1	งานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	2, 3
3.2	งานทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในแปลงทดสอบ	4
3.3	งานประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยเครื่องมือ Pile Driving Analyzer (PDA)	5
3.4	งานศึกษาสังเกตการณ์และเก็บข้อมูลการดำเนินการควบคุม ตรวจสอบและทดสอบเสาเข็ม	7
3.5	งานพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ใช้ในงานของกรมทางหลวง	2
3.6	งานจัดทำร่างคู่มือมาตรฐานและฐานข้อมูลการทดสอบ	6
3.7	งานจัดอบรม	1

บทที่ 2 งานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ที่ปรึกษาได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและรวบรวมวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในประเทศไทยและต่างประเทศ รวมทั้งปัญหาอุปสรรคต่างๆ ในการใช้งาน โดยวรรณกรรมในประเทศที่ได้ทบทวนประกอบด้วย มาตรฐานของกรมทางหลวง มาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท มาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย และ บทความวิชาการจากการประชุมต่างๆ สำหรับวรรณกรรมของต่างประเทศประกอบด้วย มาตรฐานของสำนักงานบริหารทางหลวงแห่งสหพันธรัฐอเมริกา (Federal Highway Administration, FHWA) มาตรฐานของสมาคมทดสอบและวัสดุแห่งประเทศอเมริกา (American Society for Testing and Materials, ASTM) มาตรฐานของสมาคมวิศวกรรมโยธาแห่งประเทศไทย (Japanese Society of Civil Engineerings, JSCE) มาตรฐานของประเทศอังกฤษ (British standards) เอกสารของสหพันธ์ผู้เชี่ยวชาญงานเสาเข็ม (Federation of Piling Specialists, FPS) และบทความวิชาการอื่นๆ ที่จะหาได้

วิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่รวบรวมได้มี 5 วิธีได้แก่ การวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิต (Static equilibrium method), สูตรตอกเสาเข็ม (Pile driving formula), การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test), การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test), การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบกึ่งสถิต (Pseudo static pile load test)

2.1 การวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิต (Static equilibrium method)

การวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิต (Static equilibrium method) ประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากผลรวมของแรงต้านทานของดินโดยรอบผิวเสาเข็มและแรงต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็ม โดยแรงต้านทานของดินคำนวณได้จากสูตรทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับข้อมูลการเจาะสำรวจดินและคุณสมบัติของดินในบริเวณที่ก่อสร้างเสาเข็ม

สำหรับอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety; FS) ที่นิยมใช้อยู่ในช่วง 2 ถึง 4 ขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้แก่

- ชนิดและวิธีการทดสอบในสนามและห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ
- ความแปรปรวนของชั้นดิน
- ความน่าเชื่อถือของสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาแรงต้านทานของดิน
- ผลกระทบจากการก่อสร้างเสาเข็มที่มีต่อกำลังของดิน
- คุณภาพของการควบคุมการก่อสร้าง เช่น มีการตรวจสอบกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม จำนวนการทดสอบเพื่อพิสูจน์กำลังรับน้ำหนัก เป็นต้น

วิธีการนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งในการวางแผนและประเมินราคาก่อสร้างเบื้องต้นเพราะทำให้สามารถกำหนดชนิด จำนวน และความยาวของเสาเข็มได้จากข้อมูลการเจาะสำรวจดิน แต่ผู้ใช้งานต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของดินและทราบเงื่อนไขการใช้งานของสูตรต่างๆ ที่ผู้เสนอได้กำหนดไว้ และควรตรวจสอบด้วยการประเมินกำลังฯ แบบอื่นๆ ประกอบกันด้วย

2.2 สูตรตอกเสาเข็ม (Pile driving formula)

สูตรตอกเสาเข็ม (Pile driving formula) ใช้ในการหาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยอาศัยเพียงคุณสมบัติของเสาเข็มและข้อมูลการตอก เช่น น้ำหนักตุ้มตอก น้ำหนักเสาเข็ม ระยะยกของตุ้ม ชนิด ขนาด และความยาวเสาเข็มในการแทนค่าลงในสูตร โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลทางวิศวกรรมของชั้นดิน จึงเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการคำนวณ

สูตรตอกเสาเข็มสร้างขึ้นโดยใช้หลักโมเมนตัมและการอนุรักษ์พลังงาน แต่มีผู้ศึกษาและเสนอสูตรตอกเสาเข็มไว้หลายสูตรเนื่องจากการตั้งสมมุติฐานต่างๆ แตกต่างกัน สมการที่เป็นรูปแบบรวมของสูตรตอกเสาเข็มต่างๆ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{\left(S + \frac{C}{2}\right)} \frac{(W_r + n^2 W_p)}{(W_r + W_p)} \quad (2.1)$$

โดย Q_u คือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

e_h คือ ประสิทธิภาพในการถ่ายทอดพลังงานการตอกของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม

E_h คือ พลังงานการตอกเสาเข็มซึ่งมีค่าเท่ากับ $W_r h$

W_r คือ น้ำหนักของตุ้มตอกเสาเข็ม

h คือ ระยะยกของตุ้มตอกเสาเข็ม

W_p คือ น้ำหนักของเสาเข็ม หมวกครอบเสาเข็ม และหมอนรอง

n คือ สัมประสิทธิ์การคงรูปของหมอนรอง (Coefficient of restitution)

S คือ ระยะที่เสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง(เมตร)

C คือ การยุบตัวแบบอิลาสติกของเสาเข็ม ชั้นดิน และ หมอนรอง รวมกัน

สำหรับกรมทางหลวงได้กำหนดให้ใช้สูตรตอกเสาเข็มของ Hiley โดยระบุไว้ในหน้า 177 ของแบบ
มาตรฐานกรมทางหลวงพ.ศ. 2537 ซึ่งมีรูปแบบเดียวกับสูตรตอกเสาเข็มของ Hiley ที่อยู่ในมาตรฐาน
ของว.ส.ท. แต่แตกต่างกันเพียงที่วิธีการคำนวณการยุบตัวแบบอิลาสติกของหมอนรองหัวเสาเข็มเท่านั้น
โดยวสท.(2521) ได้ระบุวิธีการคำนวณการยุบตัวแบบอิลาสติกของหมอนรองหัวเสาเข็มไว้ตามสมการ

$$\begin{aligned} C_2 &= 1.8Q_u L_2 / A && \text{เมื่อใช้กระสอบเป็นหมอนรอง} \\ &= 1.25Q_u L_2 / A && \text{เมื่อใช้ไม้อัดเป็นหมอนรอง} \end{aligned}$$

แต่แบบมาตรฐานของกรมทางหลวงระบุวิธีการคำนวณการยุบตัวแบบอิลาสติกของหมอนรองหัวเสาเข็มไว้
ตามสมการ

$$C_2 = 1.1Q_u L_2 / A \quad \text{โดยไม่ระบุชนิดของหมอนรอง}$$

สูตรตอกเสาเข็มที่รวบรวมได้ในการโครงการนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 10 สูตรซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่
2-1 ซึ่งมีข้อสังเกตว่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ผู้เสนอสูตรตอกเสาเข็มต่างๆได้แนะนำไว้นั้นมีค่าไม่เท่ากันซึ่ง
สะท้อนถึงความไม่แน่นอนในการทำนายและหรือแนวโน้มที่สูตรตอกเสาเข็มแต่ละสูตรจะให้ค่าทำนายที่
ใกล้เคียงความเป็นจริงไม่เท่ากัน

จากบทความทางวิชาการซึ่งได้ทำการศึกษาในประเทศไทยพบว่า เมื่อเสาเข็มมีขนาดเล็กและม
ความยาวไม่เกิน 25 เมตร สูตรตอกเสาเข็มของ Hiley จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการประเมินกำลังข
แบบ
สถิตยศาสตร์ แต่เมื่อเสาเข็มมีขนาดใหญ่ขึ้นและยาวมากกว่า 28 เมตร สูตรตอกเสาเข็มของ Hiley จะให้
ค่าที่สูงกว่าการประเมินกำลังข แบบสถิตยศาสตร์เมื่อปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นดินเหนียวแข็ง และจะให้ค่าที่
ต่ำกว่าการประเมินกำลังข แบบสถิตยศาสตร์เมื่อปลายเสาเข็มหยั่งในชั้นดินทราย

ตารางที่ 2-1 ตารางเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยสูตรดอกเส้าสี่เหลี่ยมต่างๆ

Formula	Basic formula	Alternative	Parameter values	Recommend
Hiley	$Q_u = \frac{e_h W_r h}{\left(S + \frac{C}{2}\right)} \frac{(W_r + n^2 W_p)}{(W_r + W_p)}$	กรมทางหลวง	$C_1 = 0.72 Q_u L / A \text{ (cm)}$ $C_2 = 1.1 Q_u L_2 / A \text{ (cm)}$ $C_3 = 3.6 Q_u / A \text{ (cm)}$	$e_h = 0.8$ (Drop hammer with friction winch) $e_h = 1.0$ (Free fall hammer)
		วสท. (2521)	$C_1 = 0.72 Q_u L / A \text{ (cm)}$ $C_2 = 1.8 Q_u L_2 / A \text{ (cm)}$ กระสอบ $C_2 = 1.25 Q_u L_2 / A \text{ (cm)}$ ไม้ดีด $C_3 = 3.6 Q_u / A \text{ (cm)}$	$e_h = 0.8$ (Drop hammer with friction winch) $e_h = 1.0$ (Free fall hammer)

โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนัก
ในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง

Formula	Basic formula	Alternative	Parameter values	Recommend FS.
Redtenbacher	$Q_u = \frac{AE_L}{L} \left[-S + \sqrt{S^2 + e_h \frac{W_r^2 h}{(W_r + W_p)} \cdot \frac{2L}{AE_L}} \right]$	กรมทางหลวง	e_h ขึ้นกับชนิดของเครื่องจักร	N/A
		สนท(2523)	$e_h = 1.0$	
Pacific Coast Uniform Building Code	$Q_u = \frac{e_h W_r h \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}}{S + \frac{Q_u L}{AE}}$	Bowles(1996)	$n = 0.5$ (Steel pile) $n = 0.32$ (All other pile)	3.0
		สนท(2523)	n ขึ้นกับชนิดของวัสดุ $e_h = 1.0$	N/A
		กรมทางหลวง สนท(2523)	$C = 1$ $C = 0$	N/A N/A
Eytwein	$Q_u = a \left(\frac{W_r h}{S + (0.0254C)} \right) \cdot \frac{W_r}{W_r + W_p}$ $Q_u = \frac{e_h W_r h}{S + 0.0254C \left(\frac{W_p}{W_r} \right)}$	Chellis (1961)	$C = 0.1$ นิ้ว	6.0
Navy Mckay	$Q_u = \frac{e_h W_r h}{S \left(1 + 0.3 \frac{W_p}{W_r} \right)}$	Bowles(1996)	e_h ขึ้นกับชนิดของเครื่องจักร	5.0
		สนท(2523)	$e_h = 1.0$	N/A
Engineering News	$Q_u = \frac{W_r h}{(S + 0.0254C)}$	วสท.(2521)	$C = 0.9$ นิ้ว (drop hammer) $C = 0.1$ นิ้ว (ลูกตุ้มอื่นๆ)	4.0

Formula	Basic formula	Alternative	Parameter values	Recommend
Modified Engineering News	$Q_u = \frac{ae_h W_r h}{S + 0.0254C} \cdot \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$	วสท.(2521)	$a = 1.25$ e_h ขึ้นกับชนิดของเครื่องจักร	FS.
		สนิท(2523)	$a = 1.0$ $e_h = 1.0$	N/A
Janbu	$Q_u = \frac{W_r h}{K_u S}$	วสท.(2521)	$K_u = C_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{c_d}} \right)$ $\lambda = W_r h L / AE_L S^2$ $C_d = 0.75 + 0.15 W_p / W_r$	4.0
Load Bearing Capacity / Danish	$Q_u = \frac{e_h W_r h}{S + \frac{1}{2} \sqrt{2(e_h W_r h) \frac{L}{AE_L}}}$	วสท.(2521)	$e_h = 1$ falling hammer $e_h = 0.8$ drop hammer with friction winch	5.0
Gates	$P_u = a \sqrt{e_h W_r h} (b - \log S)$	Bowles(1996)	S : a : b in : 27 : 1.0 mm : 104.5 : 2.4	3.0
WSDOT	$Q_u = 6.6 e_h W_r h \ln 10N$	Tony M. Allen (2005)	Q_u (kips), W_r (kips), h (feet) N คือ จำนวนครั้งการตอกต่อนิว (การตอก 4 นิวสุดท้าย)	N/A

โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนัก
ในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง

Formula	Basic formula	Alternative	Parameter values	Recommend FS.
AASHTO	$Q_u = \frac{2h(W_r + A_p)}{S + 0.0254C}$	Bowles(1996)	$A_p \neq 0$ (Double-acting steam hammer) $A_p = 0$ (Single-acting และ gravity) $C = 0.1$ นิ้ว และ $e_h \approx 1.0$	6.0

Q_u คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม(ตัน)

W_r คือ น้ำหนักของลูกตุ้ม(ตัน)

W_p คือ น้ำหนักของเสาเข็ม รวมน้ำหนักของที่รองหัวเสาเข็ม(ตัน)

h คือ ระยะยกของลูกตุ้ม(เมตร)

S คือ ระยะที่เสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง(เมตร)

n คือ สัมประสิทธิ์การคืนตัว(Coefficient of Restitution)

e_h คือ ประสิทธิภาพของเครื่องตอกเสาเข็ม

E_p คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม

L คือ ความยาวเสาเข็ม(เมตร)

L_2 คือ ความหนากระสอบรองหัวเสาเข็ม(เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม(ตารางเมตร) ;Hiley(ตารางเซนติเมตร)

A_r คือ พื้นที่หน้าตัดของลูกตุ้ม(ตารางเมตร)

p คือ ความดันไอน้ำ หรืออากาศ(ตัน/ตารางเมตร)

C คือ การยุบตัวโดย $C = C_1 + C_2 + C_3$

C_1 คือ การยุบตัวของเสาเข็ม

C_2 คือ การยุบตัวของหมอนรองหัวเสาเข็ม

C_3 คือ การยุบตัวของดินใต้และรอบเสาเข็ม

N/A คือ ไม่มีข้อมูลอ้างอิง

2.3 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test)

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) เป็นวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เชื่อถือได้มากที่สุด ซึ่งมักใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบอื่นๆ แต่ก็มีค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงมากและใช้เวลาทดสอบนานจึงทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบได้ในทุกโครงการ มาตรฐานการทดสอบที่นิยมใช้ได้แก่ มาตรฐาน ASTM D1143

วิธีการทดสอบแบ่งตามลักษณะของการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็นสามแบบได้แก่ การให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็นขั้นบันได (Maintained load test, MLT) การให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ (Constant rate of penetration test) และการให้น้ำหนักเป็นวงรอบ (Cyclic test)

ระบบการให้แรงที่ใช้ในการทดสอบแบ่งได้สามชนิดได้แก่ การใช้สมอยึด (Anchorage) การใช้แท่งน้ำหนักกดทับ (Kentledge) และการใช้เสาเข็มสมอ (Reaction pile) ระบบการให้แรงสองแบบแรกมักใช้เมื่อมีชั้นดินหรือหินแข็งอยู่ในระดับตื้นทำให้ไม่สามารถก่อสร้างเสาเข็มสมอที่มีความยาวเพียงพอต่อการทดสอบได้

ประเด็นพิจารณาของการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบนี้คือ วิธีการที่ใช้ในการกำหนดค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากผลการทดสอบซึ่งมีผู้นิยามไว้หลายแบบ และค่าที่ได้จากนิยามต่างๆ นั้นมีค่าแตกต่างกันมาก หากผู้ออกแบบไม่ได้ระบุไว้ให้ชัดเจนก็จะเกิดปัญหาในการดำเนินการภายหลังได้

สำหรับวิธีการที่นิยมใช้ในประเทศไทยได้แก่วิธีของเดวิสสันและวิธีของมาเซอร์คิววิตซ์ ซึ่งมีแนวคิดในการกำหนดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มไม่เหมือนกัน โดยกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตามวิธีของเดวิสสันจะคล้ายกับนิยามของจุดคราก แต่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตามวิธีของมาเซอร์คิววิตซ์จะคล้ายกับนิยามของจุดวิบัติ ในการนำไปใช้งานจึงควรทำความเข้าใจและกำหนดวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากผลการทดสอบให้ชัดเจนด้วยเพื่อให้ได้ค่าตามสมมุติฐานของการออกแบบ

ในการดำเนินการครั้งนี้ได้รวบรวมวิธีการกำหนดค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มไว้ 9 วิธี ซึ่งได้แก่ วิธีของเทอร์ซากิ วิธีของเดวิสสัน วิธีของชิน วิธีของฟูลเลอร์และฮอย วิธีของบัดเลอร์และฮอย วิธีของเดอเปียร์ วิธีของบรินซ์เฮนเซน วิธีของมาเซอร์คิววิตซ์ โดยได้แสดงข้อควรระวังในการใช้งานวิธีการต่างๆ ไว้ในรายงานเพื่อให้สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม

2.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test)

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test) เป็นการทดสอบโดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักให้ตกลงบนหัวเสาเข็มแล้วใช้ผลตอบสนองของเสาเข็มที่วัดได้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์เพื่อประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเชิงสถิติของเสาเข็ม มาตรฐานการทดสอบที่นิยมใช้อ้างอิงในการประเมินกำลังฯ แบบนี้ได้แก่ มาตรฐาน ASTM D4954

การวิเคราะห์ผลการทดสอบแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มคือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Methods) และวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Methods) วิธีเชิงวิเคราะห์จำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มด้วยแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนแล้วหาผลเฉลยรูปแบบปิด (Closed Form Solution) วิธีเชิงวิเคราะห์ที่มีข้อดีคือสามารถให้ผลลัพธ์ในการทดสอบได้ทันทีแต่มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการวิธีเชิงตัวเลข ตัวอย่างของวิธีเชิงวิเคราะห์ได้แก่ วิธีของเคส วิธีอิมพีแดนซ์ และ วิธีของTNO เป็นต้น แบบจำลองที่ใช้ในวิธีเชิงตัวเลขจะมีความซับซ้อนมากกว่าจึงไม่สามารถหาผลเฉลยรูปแบบปิดได้โดยง่ายและจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ วิธีเชิงตัวเลขที่ได้พัฒนาขึ้นภายหลังนี้เมื่อแบ่งออกเป็นกลุ่มจะแยกเป็น วิธีสมการคลื่น วิธีจับคู่สัญญาณ และ วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เนื่องจากกระบวนการคำนวณและแบบจำลองตามวิธีเชิงตัวเลขมีความซับซ้อน ในการทำงานจริงจึงใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน เช่น TTI, WEAP, TNOWAVE หรือ CAPWAP เป็นต้น

เนื่องจากการวิเคราะห์ผลมีความซับซ้อนมาก ถึงแม้ว่าจะมีการจัดทำเป็นโปรแกรมสำหรับรูปเพื่อช่วยในการคำนวณแล้วก็ตาม ผลการวิเคราะห์ก็ยังคงขึ้นอยู่ความสามารถของผู้ทำการวิเคราะห์ว่ามีความเข้าใจในการใช้งานโปรแกรมและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหรือไม่ รวมทั้งการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการทดสอบ ที่ปรึกษาจึงได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่แสดงถึงพัฒนาการของการทดสอบและผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อการคำนวณไว้ในรายงานการศึกษาดังนี้

2.5 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบกึ่งสถิต (Rapid pile load test)

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบกึ่งสถิต (Rapid pile load test) เป็นการทดสอบที่คล้ายกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์แต่ใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อยึด

ระยะเวลาของแรงกระทำต่อหัวเสาเข็มให้นานขึ้น ผลที่ได้จากความแตกต่างดังกล่าวคือการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มจะทำได้ง่ายขึ้น

Middendorp (1998) ได้เสนอว่าการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบกึ่งสถิตได้แก่การทดสอบที่มีเลขคลื่นหน่วยแรง (stress wave number) มากกว่า 12 โดยเลขคลื่นหน่วยแรงนิยามจาก

$$N_w = \frac{t}{L/c} \quad (2.2)$$

เมื่อ	N_w	คือ	เลขคลื่นหน่วยแรง
	t	คือ	ระยะเวลาของแรงกระทำ
	L	คือ	ความยาวของเสาเข็ม
	c	คือ	ความเร็วของคลื่นหน่วยแรงในเสาเข็ม

จากการศึกษา Middendorp ได้ระบุว่า การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์โดยทั่วไปจะมีค่า N_w มากกว่า 1000 และการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์จะมีค่า N_w น้อยกว่า 6 สำหรับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบกึ่งสถิตจะมีค่า N_w อยู่ระหว่าง 6 ถึง 1000 โดยการวิเคราะห์จะทำได้ง่ายเมื่อ N_w มีค่ามากกว่า 12

ภายใต้ินิยามดังกล่าวพบว่ามีผู้พัฒนาการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบกึ่งสถิตไว้หลายระบบ เช่น วิธี Dynatest (Gonin et al., 1984), วิธี Pseudo Static (Schellingerhout & Revooort, 1999), วิธี Spring hammer (Matsuzawa, Nakashima, et al., 2008), วิธี Hybridnamic (Miyasaka, Kuwabara, et al., 2008) ซึ่งใช้สปริงหรือแผ่นยางในการหน่วงระยะเวลาการตกกระทบของตุ้มน้ำหนักให้นานขึ้น และ วิธี Statnamic (Bermingham & Janes, 1989) ซึ่งใช้แรงดันก๊าซในการสร้างแรงกระทำต่อหัวเสาเข็ม เป็นต้น

สำหรับการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบประเภทนี้ส่วนใหญ่มีพื้นฐานมาจากวิธีจุดคืนตัว (Unloading point method, UPM) ซึ่งถูกเสนอโดย Middendorp (1993) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลทดสอบแบบ Statnamic แต่พบว่าสามารถนำไปใช้กับการวิเคราะห์ผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบกึ่งสถิตวิธีอื่นๆ ได้เช่นกัน วิธี UPM สามารถใช้งานได้ดีเมื่อเสาเข็มมีสภาพแข็งแรง (Rigid body) เช่นเมื่อเสาเข็มมีความยาวไม่มากและอยู่ในชั้นดินอ่อน ในทางตรงกันข้ามผลจากการวิเคราะห์ตาม

วิธีดังกล่าวจะคลาดเคลื่อนได้เมื่อการเคลื่อนตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ในเสาเข็มไม่เท่ากันเช่นเมื่อเสาเข็มมีความยาวมากหรือเมื่อปลายเสาเข็มวางอยู่บนชั้นดินแข็งซึ่งทำให้เกิดสภาพที่แตกต่างจากสมมุติฐานของการวิเคราะห์ ในกรณีดังกล่าวจะต้องใช้วิธีการคำนวณที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

2.6 การรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะสำรวจชั้นดินและผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์และแบบพลศาสตร์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลรายงานการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์จากเสาเข็มที่ตอกในประเทศไทยจำนวนทั้งสิ้น 37 ต้น ซึ่งแบ่งเป็นการตอกในพื้นที่ดินเหนียวจำนวน 24 ต้น และการตอกในพื้นที่ดินทรายจำนวน 13 ต้น โดยเสาเข็มทั้งหมดนี้มีระยะเบียดตอกเสาเข็ม (pile driving record) และมีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์อยู่ด้วย

สำหรับเสาเข็มจำนวน 24 ต้น ซึ่งตอกในพื้นที่ดินเหนียวแบ่งเป็นเสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน 19 ต้น หน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง 1 ต้น หน้าตัดกลมกลวง 3 ต้น และหน้าตัดรูปไข่ 1 ต้น สำหรับเสาเข็มจำนวน 13 ต้น ซึ่งตอกในพื้นที่ดินทรายแบ่งเป็นเสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน 1 ต้น หน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง 1 ต้น และหน้าตัดกลมกลวง 11 ต้น

ข้อมูลรายงานการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ได้ถูกนำมาคำนวณหา กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยใช้วิธีของเดวิสสันและวิธีของมาเซอร์คิววิคซ์ เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง สำหรับผลการประเมินด้วยวิธีการอื่นๆ

ข้อมูลที่รวบรวมได้นี้ถูกใช้ในการศึกษาความแม่นยำและเที่ยงตรงของการประเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มวิธีอื่นๆ ซึ่งจะถูกอธิบายไว้รวมกันในบทที่ 6 ต่อไป

2.7 การจัดทำคู่มือที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์

หลังจากที่ได้บทวนการศึกษาและพัฒนารายงานการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic load test) ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้าแล้ว ที่ปรึกษาได้จัดทำคู่มือวิธีการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ คู่มือการวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม GRLWEAP และคู่มือการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยโปรแกรม CAPWAP พร้อมทั้งจัดทำแบบฟอร์มการบันทึกผลและตัวอย่างการวิเคราะห์ผลทดสอบ ซึ่งได้รวบรวมไว้ในรายงานเล่มที่ 3

สำหรับคู่มือวิธีการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์จะอธิบายถึงขอบเขตของการใช้งาน นิยาม การวางแผนการทดสอบ แผนปฏิบัติการ อุปกรณ์การทดสอบ กระบวนการทดสอบ การประมวลผลและรายงานผล รวมทั้งตัวอย่างของผลการทดสอบที่ควรใช้และไม่ควรใช้

คู่มือการวิเคราะห์การตอกเสาเข็มด้วยโปรแกรม GRLWEAP จะอธิบายถึงข้อมูลเบื้องต้น หลักการพื้นฐานและการประยุกต์ใช้ทฤษฎีคลื่นหน่วยแรง แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ วิธีวิเคราะห์และตัวอย่างการทำงาน รวมทั้งข้อจำกัดและคำแนะนำในการใช้งาน

คู่มือการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยโปรแกรม CAPWAP จะอธิบายถึงข้อมูลพื้นฐาน แบบจำลองของเสาเข็มและดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ วิธีการวิเคราะห์ อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อการวิเคราะห์ ขั้นตอนและตัวอย่างการทำงาน รวมทั้งข้อจำกัดและคำแนะนำในการวิเคราะห์

บทที่ 3 งานทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในแปลงทดสอบ

ที่ปรึกษาได้คัดเลือกและจัดเตรียมแปลงทดสอบจำนวน 2 แปลงทดสอบซึ่งครอบคลุมงานทดสอบเสาเข็มในกลุ่มชั้นดิน 2 ชนิดได้แก่ เสาเข็มแบกทานที่ตอกในชั้นดินทราย และ เสาเข็มเสียดทานที่ตอกผ่านชั้นดินเหนียวโดยปลายเสาเข็มวางในชั้นดินทราย ในแปลงทดสอบแต่ละแปลงได้เตรียมไว้สำหรับการทดสอบเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.40×0.40 เมตร และ 0.65×0.65 เมตรอย่างละ 1 ต้น โดยเสาเข็มทดสอบทุกต้นได้ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain gauge) 4 ชุดต่อระดับความลึก และติดตั้ง 3 ระดับความลึกต่อดัน

สำหรับเสาเข็มแต่ละต้นได้ดำเนินการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test), ทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็ม (Sonic integrity test) และทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ (Static pile load test) โดยมีลำดับขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) คัดเลือกพื้นที่และเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log)
- 2) กำหนดตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจวัด
- 3) หล่อเสาเข็มพร้อมติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain Gauge)
- 4) ติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำ (Piezometer) ในแปลงทดสอบ
- 5) ตอกเสาเข็มทดสอบหลังจากติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำแล้วอย่างน้อย 2 สัปดาห์
- 6) วัดความเครียดที่เกิดขึ้นก่อนและภายหลังการตอกเสาเข็มเสร็จสิ้น
- 7) วัดแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นก่อนและภายหลังการตอกเสาเข็มเสร็จสิ้น
- 8) ทดสอบ Dynamic pile load test และ Sonic integrity test ที่ระยะเวลาประมาณ 3, 7 และ 14 วัน
- 9) ทดสอบ Static pile load test เมื่อตอกเสาเข็มทดสอบแล้วเสร็จประมาณ 21 วัน

3.1 การเจาะสำรวจและทดสอบชั้นดินภายในบริเวณแปลงทดสอบ

ที่ปรึกษาได้ทำการเจาะหลุมสำรวจในแปลงทดสอบแปลงละ 1 หลุม เพื่อกำหนดความลึกในการติดตั้งมาตรวัดในเสาเข็มและในชั้นดิน แปลงทดสอบที่ 1 เป็นแปลงทดสอบสำหรับเสาเข็มแบกทานที่ตอกในชั้นดินทราย พื้นที่ที่ศึกษาเป็นที่โล่งบริเวณริมสายทางของทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 บริเวณกิโลเมตรที่ 65

ฝั่งขาเข้าซึ่งอยู่ในความดูแลของหมวดการทางพานทอง แปลงทดสอบที่ 2 เป็นแปลงทดสอบสำหรับเสาเข็มเสียดทานที่ตอกผ่านชั้นดินเหนียวโดยปลายเสาเข็มวางในชั้นดินทราย พื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณลานหินดินถมหน้าแฟลต สน.ทร.(ตึกสี่สั้ม) บริเวณกิโลเมตรที่ 20 ของทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่ในความดูแลของหมวดการทางลาดกระบัง

การเจาะสำรวจทำด้วยเครื่องเจาะชนิด Rotary โดยในช่วง 1-2 เมตรแรกใช้วิธีการเจาะแบบ Auger และที่ระดับลึกลงไปใช้วิธีการเจาะแบบ Wash Boring และ Rotary Drilling จนกระทั่งสิ้นสุดการเจาะสำรวจ ขณะทำการเจาะได้ใช้ปลอกเหล็ก (Casing) และน้ำผสม Bentonite ใส่เพื่อป้องกันหลุมพัง

3.1.1 แปลงทดสอบที่ 1

การเก็บตัวอย่างดินในแปลงทดสอบที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ดินทราย ได้เก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed sample) โดยใช้กระบอกผ่าซีกมาตรฐานที่ระดับความลึก 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 เมตร และทุกๆ ระดับความลึก 1.5 เมตร จนสิ้นสุดการเจาะสำรวจ พร้อมทั้งทำการทดสอบ Standard Penetration Test (SPT) ตามมาตรฐาน ASTM D 1586 โดยความลึกในการเจาะสำรวจเท่ากับ 15.45 เมตร

จากผลการเจาะสำรวจดินพบว่า ลักษณะชั้นดินเป็นดินทราย โดยในช่วง 3-4 เมตรแรก จะเป็นชั้นทรายหลวมถึงแน่นปานกลางและเปลี่ยนเป็นชั้นทรายแน่นถึงแน่นมากที่มีค่า SPT มากกว่า 50-60 ครั้ง/ฟุต ที่ประมาณ 5-6 เมตร ลักษณะชั้นดินโดยทั่วไป (Typical subsoil) สามารถสรุปโดยเทียบกับความลึกได้ดังนี้

ตารางที่ 3-1 ลักษณะชั้นดินในแปลงทดสอบที่ 1 (กม. 65, พื้นที่ดินทราย)

ความลึก, เมตร	ชนิดของดิน	SPT (ครั้ง/ฟุต)
0.0-0.5	หินคลุก	-
0.5-0.8	ดินลูกรังถม	-
0.8-1.5	ทรายแน่นปานกลาง	25
1.5-2.0	ทรายปนดินเหนียวแน่นปานกลาง	14
2.0-4.5	ทรายปนดินเหนียวหลวม	5-6
4.5-6.0	ทรายปนดินเหนียวแน่นปานกลาง	18
6.0-7.0	ทรายปนดินเหนียวแน่นมาก	63
7.0-12.0	ทรายปนดินเหนียวแน่น	30-43
12.0-13.5	ทรายปนดินเหนียวแน่นมาก	57
13.5-15.45	ซิลต์ปนดินเหนียวและทรายดานแข็งมาก	60-63



รูปที่ 3-1 พื้นที่แปลงทดสอบที่ 1 (ชั้นดินทราย)

3.1.2 แปลงทดสอบที่ 2

การเก็บตัวอย่างดินในแปลงทดสอบที่ 2 ซึ่งเป็นพื้นที่ดินเหนียว ได้เก็บตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed sample) ในชั้นดินเหนียวอ่อนโดยใช้กระบอกบาง (Thin wall tube sampler) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้วต่อเนื่องจนถึงระดับความลึก 18 เมตรตามมาตรฐาน ASTM D 1587 หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็นเก็บตัวอย่างแบบเปลี่ยนสภาพ (Disturbed sample) ในชั้นดินเหนียวแข็งและทรายระหว่างการทดสอบ Standard Penetration Test ทุกระดับความลึก 1.5 เมตรจนถึงระดับความลึก 30.45 เมตร จากผลการเจาะสำรวจดินสามารถสรุปลักษณะชั้นดินโดยเทียบกับความลึกได้ดังนี้

ตารางที่ 3-2 ลักษณะชั้นดินในแปลงทดสอบที่ 2 (กม. 20, พื้นที่ดินเหนียว)

ความลึก, เมตร	ชนิดของดิน	SPT (ครั้ง/ฟุต)
0.0-1.0	ดินลูกรังถม	-
1.0-3.0	ดินเหนียวอ่อนสีเทาปนน้ำตาล	-
3.0-18.0	ดินเหนียวอ่อนสีเทาเข้ม	-
18.0-21.0	ดินเหนียวแข็งมาก	16-23
21.0-21.3	ทรายปนดินเหนียวแน่นมาก	58
21.3-22.5	ดินเหนียวดานแข็งมาก	58
22.5-24.0	ทรายปนดินเหนียวแน่น	31
24.0-30.45	ทรายแน่นถึงแน่นมาก	31-56



รูปที่ 3-2 พื้นที่แปลงทดสอบที่ 2 (ชั้นดินเหนียว)

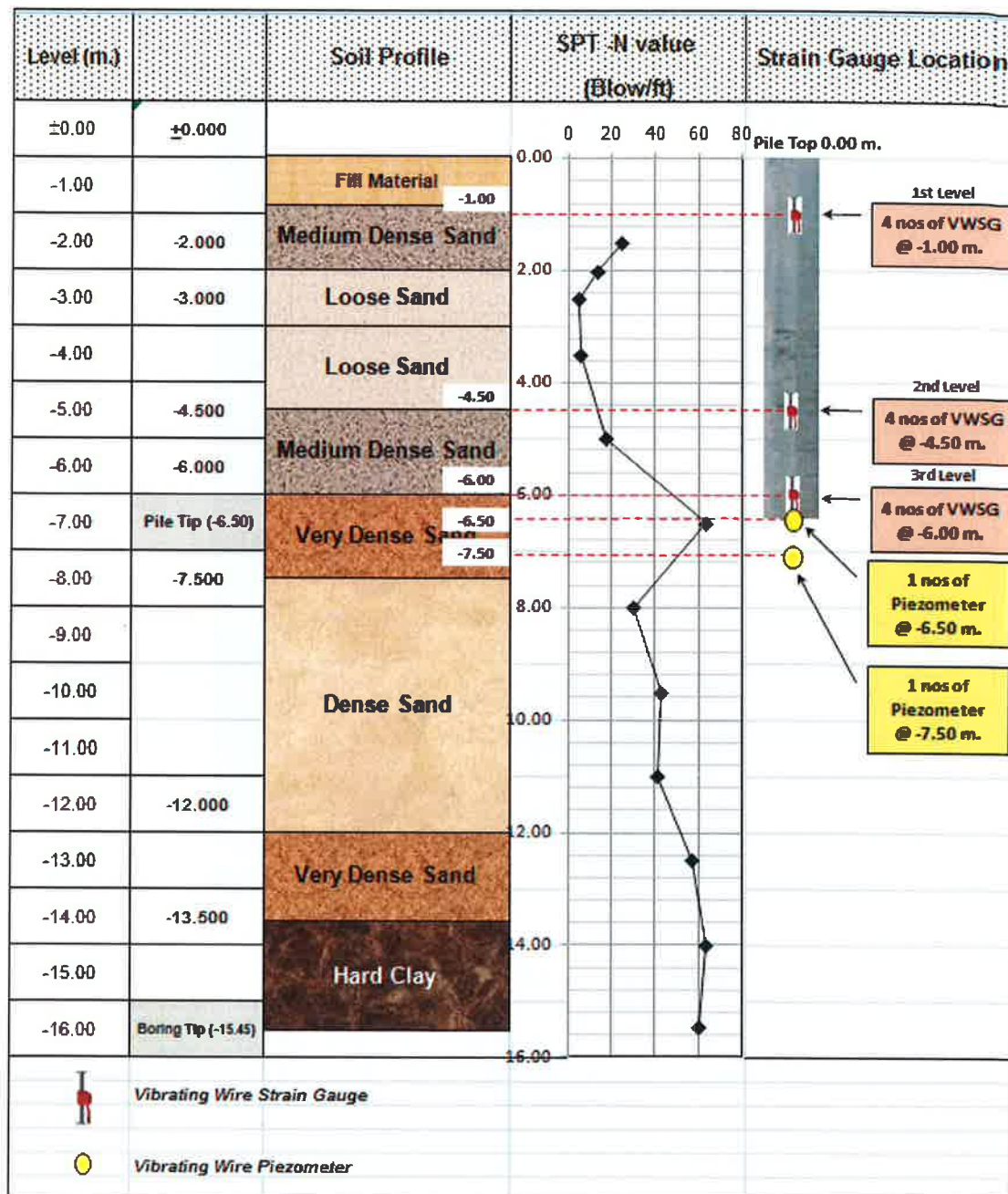
3.2 การหล่อเสาเข็มและการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instrumentation) ในแปลงทดสอบ

เครื่องมือวัด (Instrumentation) ที่ใช้ในโครงการประกอบไปด้วยเครื่องมือวัด 2 ชนิด ได้แก่ มาตรวัดความเครียดชนิดขดลวดลั่นสะเทือน (Vibrating Wire Strain Gauge, VWSG) และมาตรวัดแรงดันน้ำ (Piezometer) ที่ระดับต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-3 และ รูปที่ 3-4 โดยมีรายละเอียดในการติดตั้งดังนี้

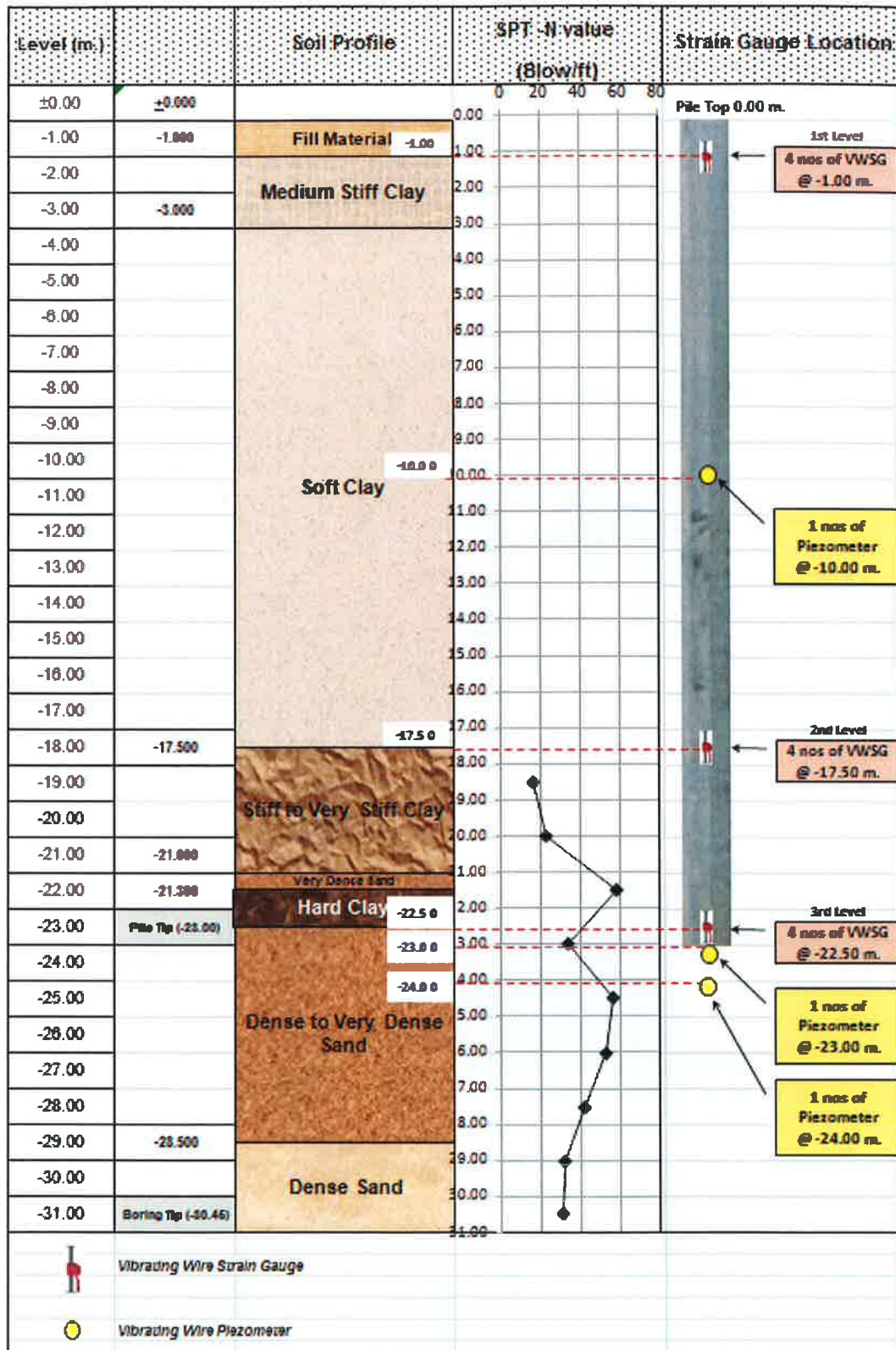
1) มาตรวัดความเครียด (Strain gauge)

มาตรวัดความเครียดที่ใช้เป็นมาตรวัดความเครียดชนิดขดลวดลั่นสะเทือน (Vibrating Wire Strain Gauge, VWSG) รุ่น Embedment Type : OVK4200VC00 ของบริษัท SISGEO จากประเทศอิตาลี มาตรวัดความเครียดดังกล่าวถูกติดตั้งในเสาเข็มทดสอบก่อนการหล่อเสาเข็ม โดยติดตั้งไว้ 3 ระดับความลึกต่อดัน และในแต่ละระดับความลึกจะประกอบไปด้วยจำนวนมาตรวัด 4 ตัว เมื่อได้พิจารณาจากข้อมูลสำรวจดินสามารถคำนวณได้ว่าเสาเข็มที่ตอกในแปลงทดสอบที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ดินทรายจะตอกได้ถึงความลึกประมาณ 6.5 เมตร หากตอกลึกเกินกว่านั้นจะทำให้โครงสร้างเสาเข็มเกิดความเสียหายได้เนื่องจากดินแข็ง จึงดำเนินการสั่งหล่อเสาเข็มของแปลงทดสอบที่ 1 (ดินทราย กม.65) ที่ความยาว 15.00 เมตรตามที่กำหนดไว้ในรายการข้อกำหนด แต่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดไว้ที่ระดับความลึกดังแสดงในตารางที่ 3-4 เนื่องจากการคาดการณ์ว่าจะตอกเสาเข็ม

ลงได้เพียง 6.5 เมตรเท่านั้น สำหรับแปลงทดสอบที่ 2 (ดินทราย กม.20) ได้สั่งหล่อเสาเข็มที่มีความยาว 23.00 เมตร



รูปที่ 3-3 ตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดในแปลงทดสอบที่ 1 (กม. 65, ดินทราย)



รูปที่ 3-4 ตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดในแปลงทดสอบที่ 2 (กม. 20, ดินเหนียว)

ตารางที่ 3-3 สรุปรายละเอียดของเสาเข็มทดสอบในโครงการวิจัย

รายละเอียด	แปลงทดสอบที่ 1 กม.65 (ดินทราย)		แปลงทดสอบที่ 2 กม.20 (ดินเหนียว)	
	เสาเข็มขนาด 0.40x0.40 ม.	เสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.	เสาเข็มขนาด 0.40x0.40 ม.	เสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.
หน้าตัดเสาเข็ม	สี่เหลี่ยมตัน	สี่เหลี่ยมกลวงกลาง	สี่เหลี่ยมตัน	สี่เหลี่ยมกลวงกลาง
ความยาวเสาเข็มสั่งผลิต	15.00 ม.	15.00 ม.	23.00 ม.	23.00 ม.
ระดับปลายเสาเข็ม คาดการณ์	-6.50 ม.	-6.50 ม.	-23.00 ม.	-23.00 ม.

หมายเหตุ ระดับที่ระบุในตารางอ้างอิงจากระดับปากหลุมเจาะสำรวจ

ตารางที่ 3-4 สรุปตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียดในเสาเข็มทดสอบ

ระดับติดตั้งมาตรวัด	แปลงทดสอบที่ 1 กม.65 (ดินทราย)		แปลงทดสอบที่ 2 กม.20 (ดินเหนียว)	
	เสาเข็มขนาด 0.40x0.40 ม.	เสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.	เสาเข็มขนาด 0.40x0.40 ม.	เสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.
ระดับที่ 1	-1.00 ม.	-1.00 ม.	-1.00 ม.	-1.00 ม.
ระดับที่ 2	-4.50 ม.	-4.50 ม.	-17.50 ม.	-17.50 ม.
ระดับที่ 3	-6.00 ม.	-6.00 ม.	-22.50 ม.	-22.50 ม.
ระดับปลายเสาเข็มคาดการณ์	-6.50 ม.	-6.50 ม.	-23.00 ม.	-23.00 ม.

หมายเหตุ ระดับที่ระบุในตารางอ้างอิงจากระดับปากหลุมเจาะสำรวจ

2) มาตรวัดแรงดันน้ำ (Piezometer)

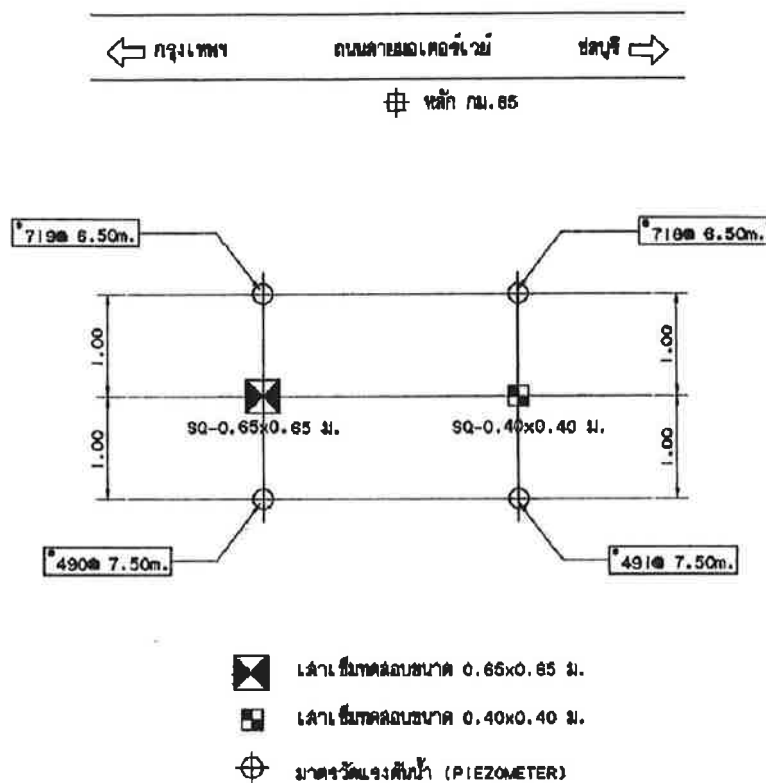
มาตรวัดแรงดันน้ำที่ใช้เป็นมาตรวัดแรงดันน้ำแบบขดลวดสั่นสะเทือน (Vibrating Wire Piezometer) รุ่น Vibrating Wire PK45S (700kPa) ของบริษัท SISGEO จากประเทศอิตาลี มาตรวัดแรงดันน้ำดังกล่าวถูกติดตั้งในแปลงทดสอบแต่ละแปลงห่างจากตำแหน่งตอกเสาเข็มทดสอบแต่ละต้นประมาณ 1.00 เมตร โดยติดตั้งที่ 2 ระดับความลึกคือ ระดับปลายเสาเข็มและที่ระดับต่ำกว่าปลายเสาเข็มประมาณ 1.00 เมตร นอกจากนี้ในแปลงทดสอบที่ 2 บริเวณถนนสายมอเตอร์เวย์ กม.20 ซึ่งชั้นดินหลักเป็นดินเหนียว ได้ทำการติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำที่ระดับความลึกประมาณ 10.00 เมตรเพิ่มขึ้นอีก 1 จุดต่อเสาเข็มแต่ละต้น เพื่อศึกษาและตรวจวัดค่าแรงดันน้ำในชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มเติมด้วย

การติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำนั้นได้ดำเนินการติดตั้งใกล้กับบริเวณที่จะทำการตอกเสาเข็มโดยห่างจากตัวเสาเข็มทดสอบประมาณ 1.00 เมตร สำหรับระดับความลึกในการติดตั้งนั้นได้ติดตั้งตามรายการข้อกำหนดและขอบเขตของโครงการวิจัย โดยได้ทำการคำนวณหาระดับของปลายเสาเข็มก่อนเริ่มตอกเสาเข็มโดยใช้ข้อมูลดินที่ได้เจาะสำรวจไว้แล้วดำเนินการติดตั้งจนแล้วเสร็จก่อนการตอกเสาเข็มและเสาเข็มสมอ ตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3-5 โดยผังแสดงตำแหน่งติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำเทียบกับเสาเข็มทดสอบได้แสดงในรูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6

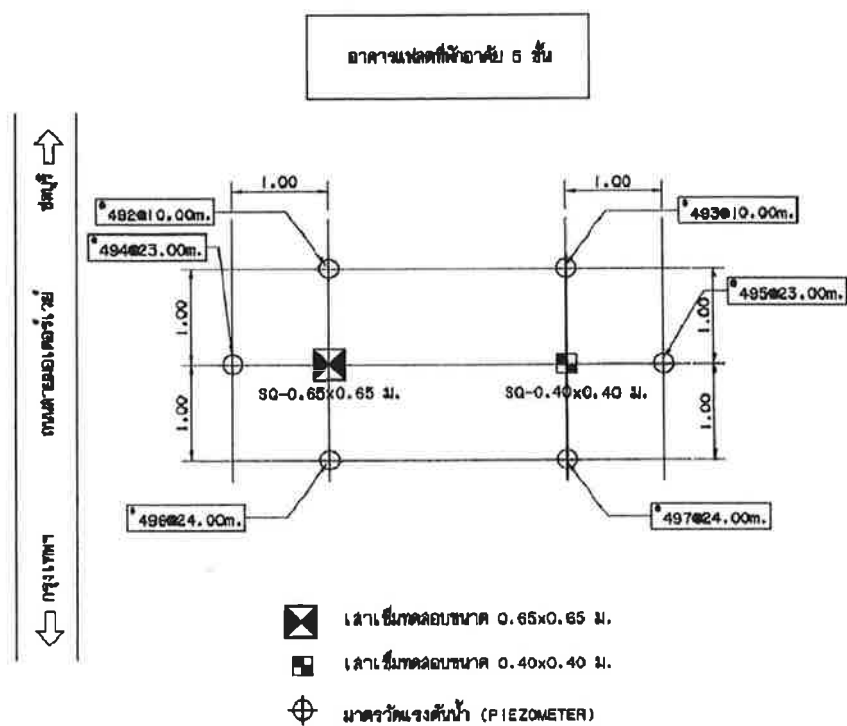
ตารางที่ 3-5 สรุปตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำในเสาเข็มทดสอบ

ระดับติดมาตรวัด	แปลงทดสอบที่ 1 กม.65 (ดินทราย)		แปลงทดสอบที่ 2 กม.20 (ดินเหนียว)	
	เสาเข็มขนาด 0.40x0.40 ม.	เสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.	เสาเข็มขนาด 0.40x0.40 ม.	เสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.
ระดับที่ 1	-	-	-10.00 ม.	-10.00 ม.
ระดับที่ 2 (ปลายเสาเข็มคาคกรณ)	-6.50 ม.	-6.50 ม.	-23.00 ม.	-23.00 ม.
ระดับที่ 3 (ต่ำกว่าปลายเสาเข็ม1.00 ม.)	-7.50 ม.	-7.50 ม.	-24.00 ม.	-24.00 ม.

หมายเหตุ ระดับที่ระบุในตารางอ้างอิงจากระดับปากหลุมเจาะสำรวจ



รูปที่ 3-5 แสดงตำแหน่งมาตรวัดแรงดันน้ำในแปลงทดสอบที่ 1 (ดินทราย กม.65)



รูปที่ 3-6 แสดงตำแหน่งมาตรวัดแรงดันน้ำในแปลงทดสอบที่ 2 (ดินเหนียว กม.20)

3.3 การตอกเสาเข็มในแปลงทดสอบ

การตอกเสาเข็มในแปลงทดสอบได้ดำเนินการดังรายละเอียดในตารางที่ 3-6 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีเสาเข็มในแปลงทดสอบที่ 1 เพิ่มขึ้นจากข้อกำหนดอีก 1 ต้น ทั้งนี้เนื่องจากกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ของเสาเข็มขนาด 0.65 ม. (TP2) ในแปลงทดสอบที่ 1 มีค่ามากกว่าที่คาดการณ์ไว้จึงทำให้อุปกรณ์ทดสอบที่เตรียมไว้ไม่สามารถให้แรงกระทำจนถึงกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มได้ ที่ปรึกษาจึงดำเนินการก่อสร้างเสาเข็มทดสอบเพิ่มขึ้นอีก 1 ต้น (TP5) และทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ใหม่จนเสร็จสิ้น รูปแบบการตอกติดตั้งเสาเข็มทดสอบ, หลุมเจาะสำรวจชั้นดิน, ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด ในแต่ละแปลงทดสอบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-7 และรูปที่ 3-8

ตารางที่ 3-6 รายละเอียดการตอกเสาเข็มทดสอบในแปลงทดสอบ

รายการ	แปลงทดสอบที่ 1 กม.65 (ดินทราย)			แปลงทดสอบที่ 2 กม.20 (ดินเหนียว)	
	TP1 (SQ.0.40 ม.)	TP2 (SQ.0.65 ม.)	TP5 (SQ.0.65 ม.)	TP3 (SQ.0.65 ม.)	TP4 (SQ.0.40 ม.)
วันที่ตอก	22/08/2554	23/08/2554 - 24/08/2554	30/09/2554	07/09/2554	06/09/2554
ช่วงเวลาตอก	11.00 น. - 18.50 น.	11.00 น. (23/08/2554) ถึง 16.00 น. (24/08/2554)	13.00 น.- 16.00 น.	16.00 น.- 17.30 น.	16.00 น.- 17.30 น.
ความยาวเสาเข็ม (ม.)	15.0	15.0	7.0	23.0	23.0
ระยะผิวดิน (ม.)	6.5	6.5	6.5	22.4	22.4
น้ำหนักตุ้มตอก(ตัน)	8.7	8.7/12.0	12.0	8.7	12.0
ระยะตอกสูงสุด(ม.)	0.8	1.6 ม. (8.7 ตัน) 1.3 ม. (12.0 ตัน)	1.6	0.6	1.2
จำนวน Blow Count	27 Blows/30 ชม.	24 Blows/20 ชม.	78 Blows/30 ชม.	49 Blows/30 ชม.	52 Blows/30 ชม.
Last 10 Blows(ชม.)	9.3	13.4	5.0	4.4	6.3

หมายเหตุ เสาเข็มทดสอบต้น TP5 เป็นเสาเข็มที่ทำการหล่อ, ติดตั้งเครื่องมือวัด (Strain gauge) และตอกเพื่อทดสอบทดแทนต้น TP2 ซึ่งไม่สามารถทดสอบเสาเข็มจนบรรลุเป้าหมายของงานโครงการวิจัย





3.4 ผลการศึกษา

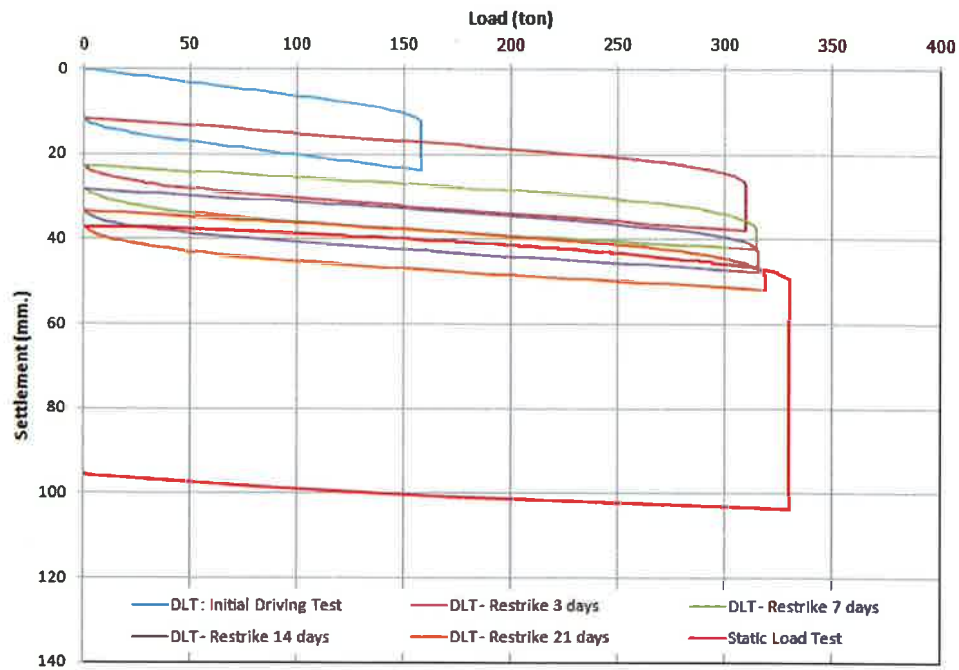
3.4.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกฯ แบบพลศาสตร์และแบบสถิตยศาสตร์

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ (Dynamic pile load test) ระหว่างการตอกเสาเข็มและที่เวลาต่างๆ หลังจากตอกเสาเข็มแล้วเสร็จเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 3, 7, และ 14 วัน โดยใช้เครื่องมือ Pile Driving Analyzer (PDA) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4945 และได้ดำเนินการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ภายหลังจากการตอกเสาเข็มอย่างน้อย 21 วัน ตามมาตรฐาน ASTM D 1143/D 1143M-07 หัวข้อ 8.1.3 Procedure B (Maintained Test) และ 8.14 Procedure C (Loading in Excess of Maintained Test) ภายหลังจากการทดสอบ Dynamic pile load test เสาเข็มทดสอบทุกต้นได้ถูกประเมินสภาพความสมบูรณ์โดยวิธี Sonic integrity test ซึ่งพบว่ามีความสมบูรณ์ดีทุกต้น

เมื่อนำเอาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทั้งแบบสถิตยศาสตร์และแบบพลศาสตร์มาพล็อตรวมกันจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3-9 ถึงรูปที่ 3-13 โดยผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ และผลการทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มได้แสดงไว้ใน

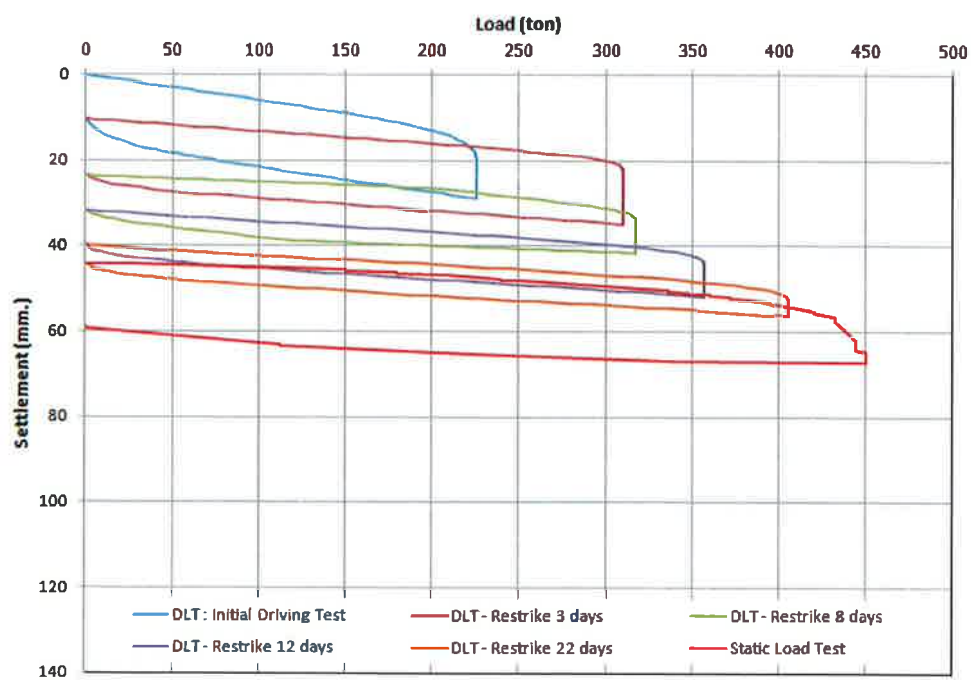
ตารางที่ 3-7 ถึงตารางที่ 3-9

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบฯ แบบพลศาสตร์และแบบสถิตยศาสตร์พบว่าผลการทดสอบฯ แบบพลศาสตร์ในขณะก่อสร้าง (Initial driving test) จะให้ค่าที่ต่ำกว่าผลการทดสอบฯ แบบสถิตยศาสตร์โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 50 และเมื่อถึงระยะเวลาหลังจากการก่อสร้างให้มากขึ้นในช่วง 1 ถึง 3 สัปดาห์พบว่ากำลังที่ประเมินได้จากการทดสอบฯ แบบพลศาสตร์จะยังมีค่าต่ำกว่าผลทดสอบฯ แบบสถิตยศาสตร์แต่ความแตกต่างจะมีค่าน้อยลงโดยมีความแตกต่างประมาณร้อยละ 21 เมื่อทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ และลดลงเหลือร้อยละ 12 เมื่อทิ้งไว้ 3 สัปดาห์ เมื่ออ้างอิงกับกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ตามวิธี Mazurkiewicz และเมื่ออ้างอิงกับกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ตามวิธี Davisson ความแตกต่างดังกล่าวจะมีค่าประมาณร้อยละ 14 เมื่อทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ และลดลงเหลือร้อยละ 5 เมื่อทิ้งไว้ 3 สัปดาห์



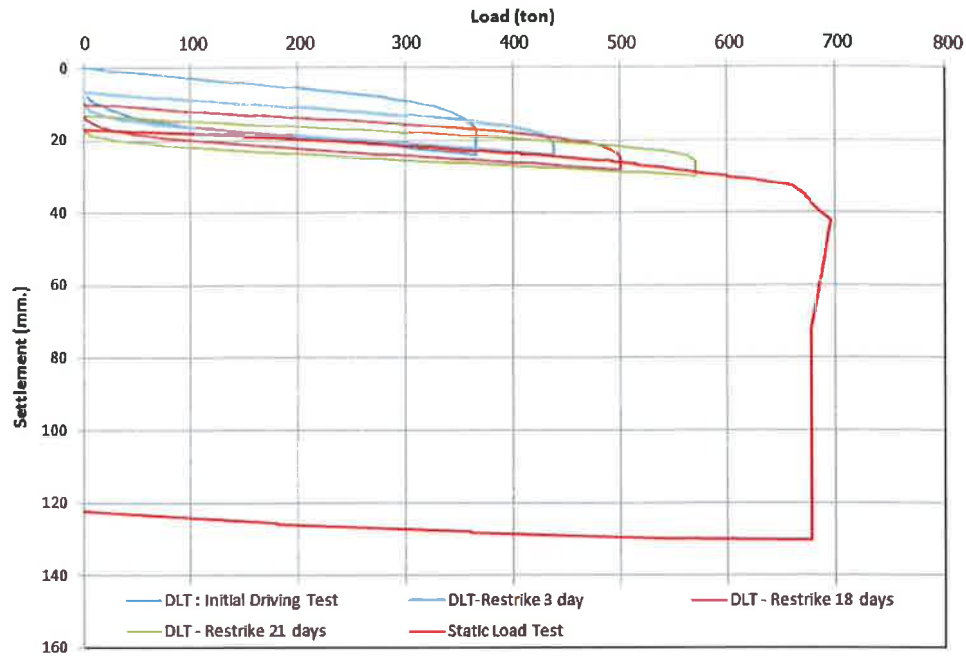
รูปที่ 3-9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มขนาด 0.40x0.40 ม.

ในแปลงทดสอบที่ 1 (TP1, กม.65, ดินทราย)



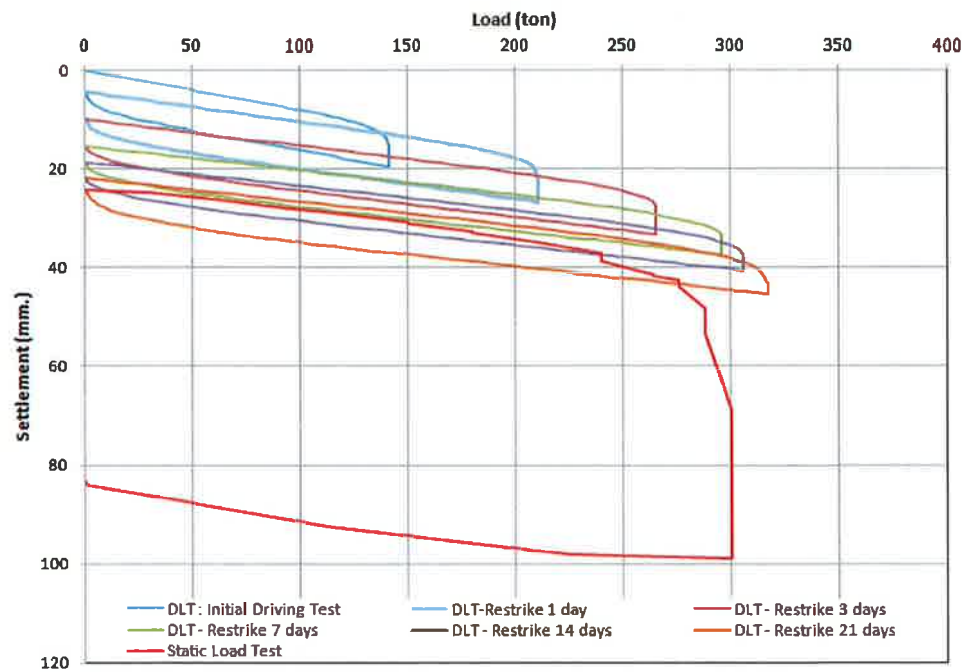
รูปที่ 3-10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.

ในแปลงทดสอบที่ 1 (TP2, กม.65, ดินทราย)



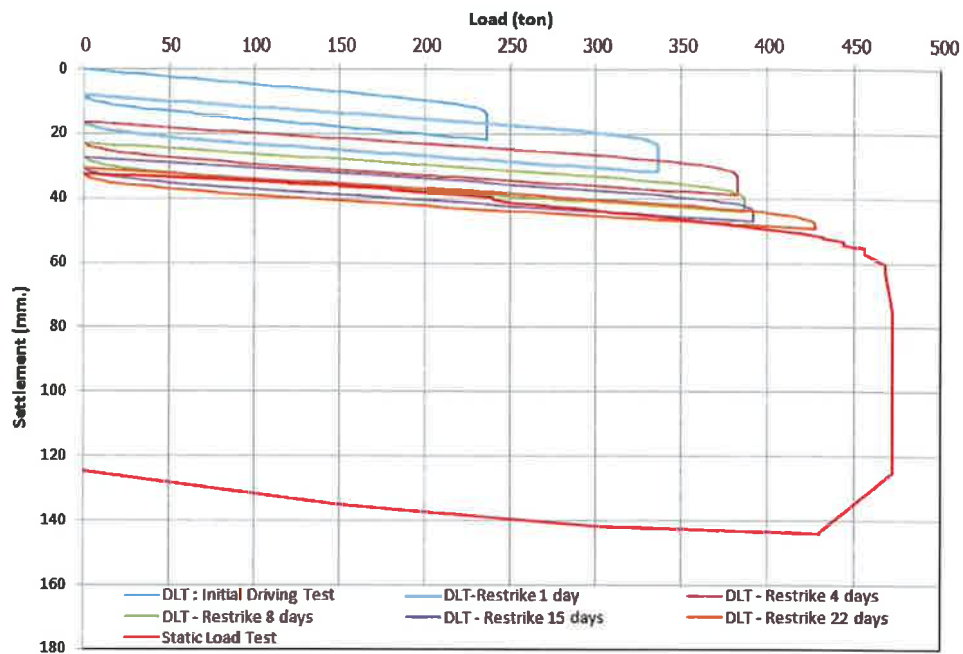
รูปที่ 3-11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.

ในแปลงทดสอบที่ 1 (TP5, กม.65, ดินทราย)



รูปที่ 3-12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มขนาด 0.40x0.40 ม.

ในแปลงทดสอบที่ 2 (TP4, กม.20, ดินเหนียว)



รูปที่ 3-13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มขนาด 0.65x0.65 ม.

ในแปลงทดสอบที่ 2 (TP3, กม.20, ดินเหนียว)

ตารางที่ 3-7 รายละเอียดและผลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ในแปลงทดสอบ

แปลง ทดสอบที่	หมายเลข เสาเข็ม	วันที่ทดสอบ	ความยาว เสาเข็ม จมดิน (ม.)	ระยะเวลา ทดสอบ (วิน)	น้ำหนัก ตุ้มน้ทดสอบ (ตัน)	ระยะยก (เมตร)	ระยะ ทรุดตัว (มม.)	แรง เสียดทานผิว (Skin Friction) (ตัน)	แรง ต้านทานที่ปลาย (Toe Resistance) (ตัน)	แรง ต้านทานรวม (Activated Capacity) (ตัน)
1 (ดินทราย กม.65)	#TP1 (SQ.0.40)	22/08/2554	6.5	Initial	8.7	0.8	11.0	73.0	84.7	157.7
		25/08/2554		3	8.7	0.8	11.0	164.9	144.6	309.5
		29/08/2554		7	12.0	0.6	5.0	169.3	145.2	314.5
		05/09/2554		14	12.0	0.6	5.0	168.9	146.3	315.2
		12/09/2554		21	12.0	0.6	3.5	169.3	148.9	318.2
1 (ดินทราย กม.65)	#TP2 (SQ.0.65)	24/08/2554	6.5	Initial	12.0	1.6	10.0	73.7	151.7	225.3
		27/08/2554		3	12.0	1.5	13.0	149.5	160.7	310.2
		01/09/2554		8	12.0	1.5	8.0	148.3	169.2	317.4
		05/09/2554		12	12.0	1.5	8.0	181.3	175.9	357.2
		15/09/2554		22	12.0	1.5	4.0	207.8	197.5	405.3
1 (ดินทราย กม.65)	#TP5 (SQ.0.65)	30/09/2554	6.5	Initial	12.0	1.6	6.0	201.5	164.5	366.0
		03/10/2554		3	12.0	1.6	3.0	254.2	183.9	438.1
		18/10/2554		18	12.0	1.6	3.0	307.4	193.9	501.3
		21/10/2554		21	12.0	2.0	4.0	356.5	213.7	570.2

โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการทำงานประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม
ในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง

แปลงทดสอบที่	หมายเลขเสาเข็ม	วันที่ทดสอบ	ความยาวเสาเข็ม จมดิน (ม.)	ระยะเวลาทดสอบ (วินาที)	น้ำหนักตุ้มทดสอบ (ตัน)	ระยะยก (เมตร)	ระยะทรุดตัว (มม.)	แรงเสียดทานผิว (Skin Friction) (ตัน)	แรงต้านทานที่ปลาย (Toe Resistance) (ตัน)	แรงต้านทานรวม (Activated Capacity) (ตัน)
2 (ดินเหนียว กม. 20)	#TP3 (SQ.0.65)	06/09/2554	22.4	Initial	12.0	1.2	8.0	134.6	102.0	236.5
		07/09/2554		1	12.0	1.2	8.0	218.5	118.0	336.5
		10/09/2554		4	12.0	1.2	6.0	259.7	122.8	382.5
		14/09/2554		8	12.0	1.2	4.0	260.4	126.7	387.1
		21/09/2554		15	12.0	1.2	3.0	262.4	129.7	392.1
		28/09/2554		22	12.0	1.2	1.5	294.6	132.9	427.5
2 (ดินเหนียว กม. 20)	#TP4 (SQ.0.40)	07/09/2554	22.4	Initial	8.7	0.6	4.0	102.7	38.4	141.1
		08/09/2554		1	8.7	0.8	5.0	166.8	43.4	210.2
		10/09/2554		3	12.0	0.5	5.0	220.9	44.7	265.5
		14/09/2554		7	12.0	0.7	3.0	248.6	47.2	295.8
		21/09/2554		14	12.0	0.7	3.0	251.7	54.0	305.6
		28/09/2554		21	12.0	0.7	2.0	259.7	57.3	317.0

หมายเหตุ เสาเข็มทดสอบหมายเลข TP5 เป็นเสาเข็มที่ทำการหล่อและตอกเพื่อทดสอบทดแทนในเสาเข็มต้น TP2 ซึ่งดำเนินการทดสอบไปไม่ถึงจุดที่บรรลุน้ำหมายของงานโครงการวิจัยในครั้งนี้

ตารางที่ 3-8 สรุปผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ในเสาเข็มทดสอบ

แปลง ทดสอบที่	หมายเลข เสาเข็ม	ขนาดเสาเข็ม ทดสอบ	ความยาว เสาเข็มจริงใน (ม.)	วันที่ ทดสอบ	ระยะเวลาทดสอบ หลังจากตอกเสาเข็ม แล้วเสร็จ	ค่าน้ำหนักทดสอบ สูงสุดที่ทดสอบได้ ในสนาม (ตัน)	การทรุดตัว สูงสุด (มม.)	กำลังรับน้ำหนักบรรทุก สูงสุดที่ประเมินได้ (ตัน)	
								(1)	(2)
1 (ดินทราย กม.65)	#TP1	SQ.0.40x0.40 ม.	6.50	26/08/2554	35	324	66.49	330.0	346.2
1 (ดินทราย กม.65)	#TP2	SQ.0.65x0.65 ม.	6.50	04/10/2554	42	450*	23.10	430.0	466.5
1 (ดินทราย กม.65)	#TP5**	SQ.0.65x0.65 ม.	6.50	06/12/2554	67	696	113.11	680.0	718.8
2 (ดินเหนียว กม.20)	#TP3	SQ.0.65x0.65 ม.	22.40	17/11/2554	72	472	111.42	463.0	490.6
2 (ดินเหนียว กม.20)	#TP4	SQ.0.40x0.40 ม.	22.40	04/11/2554	58	300	74.60	280.0	299.6

หมายเหตุ

* เสาเข็มยังพัฒนาค่ากำลังรับน้ำหนักไม่เต็มที่แต่ยุติการทดสอบเนื่องจากขีดจำกัดของระบบทดสอบ

**

เสาเข็มทดสอบหมายเลข TP5 เป็นเสาเข็มที่ทำการหล่อและตอกเพื่อทดสอบทดแทนในเสาเข็มต้น TP2 ซึ่งดำเนินการทดสอบไปไม่ถึงจุดที่บรรลุเป้าหมายของงานโครงการวิจัยในครั้งนี้

(1) ประเมินโดยวิธี Davisson

(2) ประเมินโดยวิธี Mazurkiewicz

ตารางที่ 3-9 รายละเอียดและผลการทดสอบ Sonic Integrity Test

แปลง ทดสอบที่	หมายเลข เสาเข็ม	ขนาดเสาเข็มทดสอบ	วันที่ ทดสอบ	สภาพความสมบูรณ์
1 (ดินทราย กม.65)	#TP1	SQ.0.40x6.50 ม.	12/09/2554	สภาพเสาเข็มสมบูรณ์ ($\beta=0.98$; ทุกระดับความลึก 2.10 ม.)
1 (ดินทราย กม.65)	#TP2	SQ.0.65x6.50 ม.	05/09/2554	สภาพเสาเข็มสมบูรณ์ ($\beta=0.97$; ทุกระดับความลึก 1.90 ม.)
1 (ดินทราย กม.65)	#TP5	SQ.0.65x6.50 ม.	21/10/2554	สภาพเสาเข็มสมบูรณ์ ($\beta=0.92$; ทุกระดับความลึก 2.00 ม.)
2 (ดินเหนียว กม.20)	#TP3	SQ.0.65x22.40 ม.	28/09/2554	สภาพเสาเข็มสมบูรณ์ ($\beta=0.94$; ทุกระดับความลึก 2.20 ม.)
2 (ดินเหนียว กม.20)	#TP4	SQ.0.40x22.40 ม.	28/09/2554	สภาพเสาเข็มสมบูรณ์ ($\beta=0.94$; ทุกระดับความลึก 3.20 ม.)

หมายเหตุ ค่า β คือค่าดัชนีที่ใช้ประเมินระดับความเสียหายของเสาเข็ม (Degree of damage)

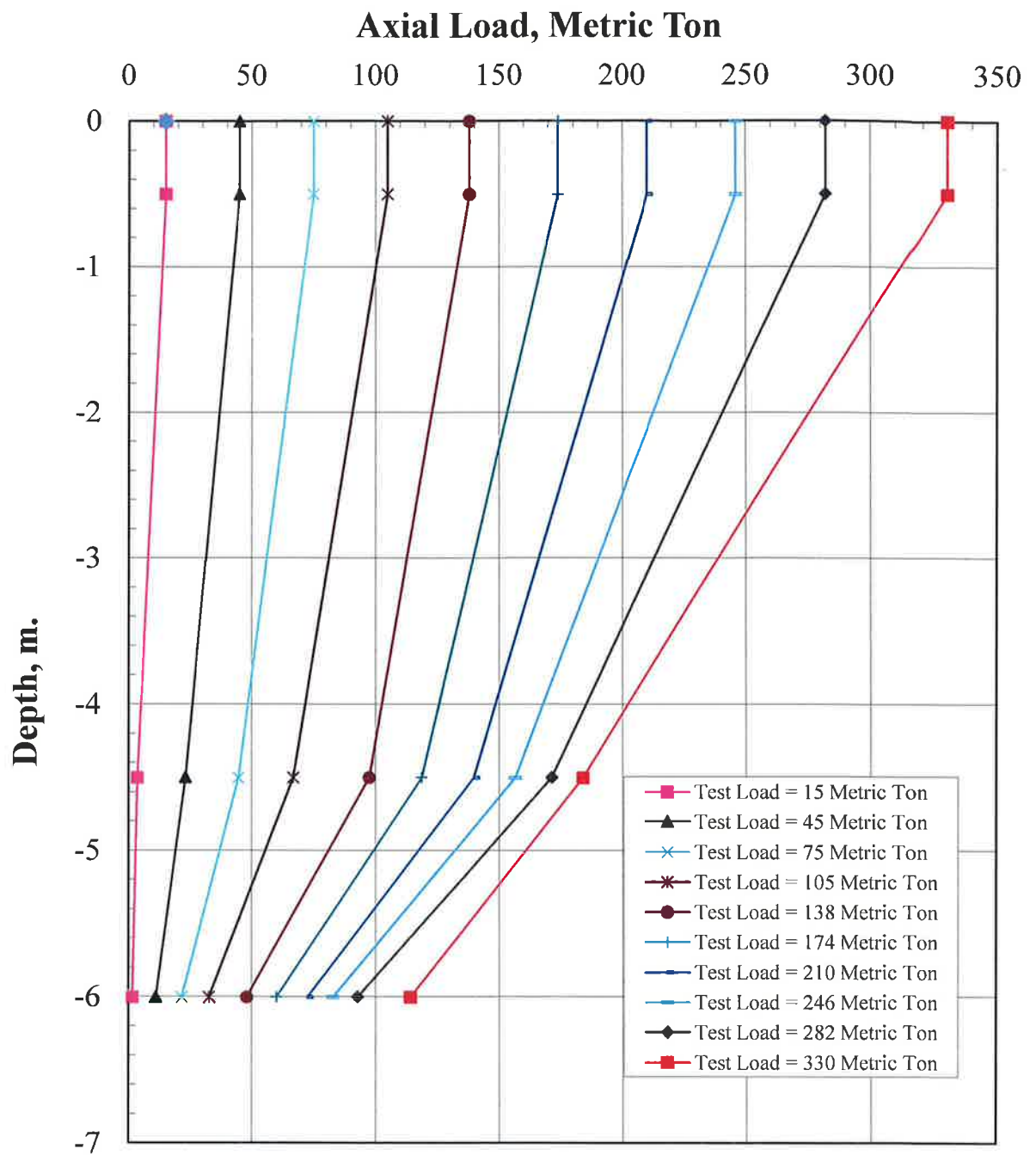
ค่า β ที่แสดงในตาราง เป็นค่าที่ต่ำที่สุดที่วัดได้ตามความยาวของเสาเข็มทดสอบ

การพิจารณาความสมบูรณ์ของเสาเข็มจากค่า β เป็นดังนี้

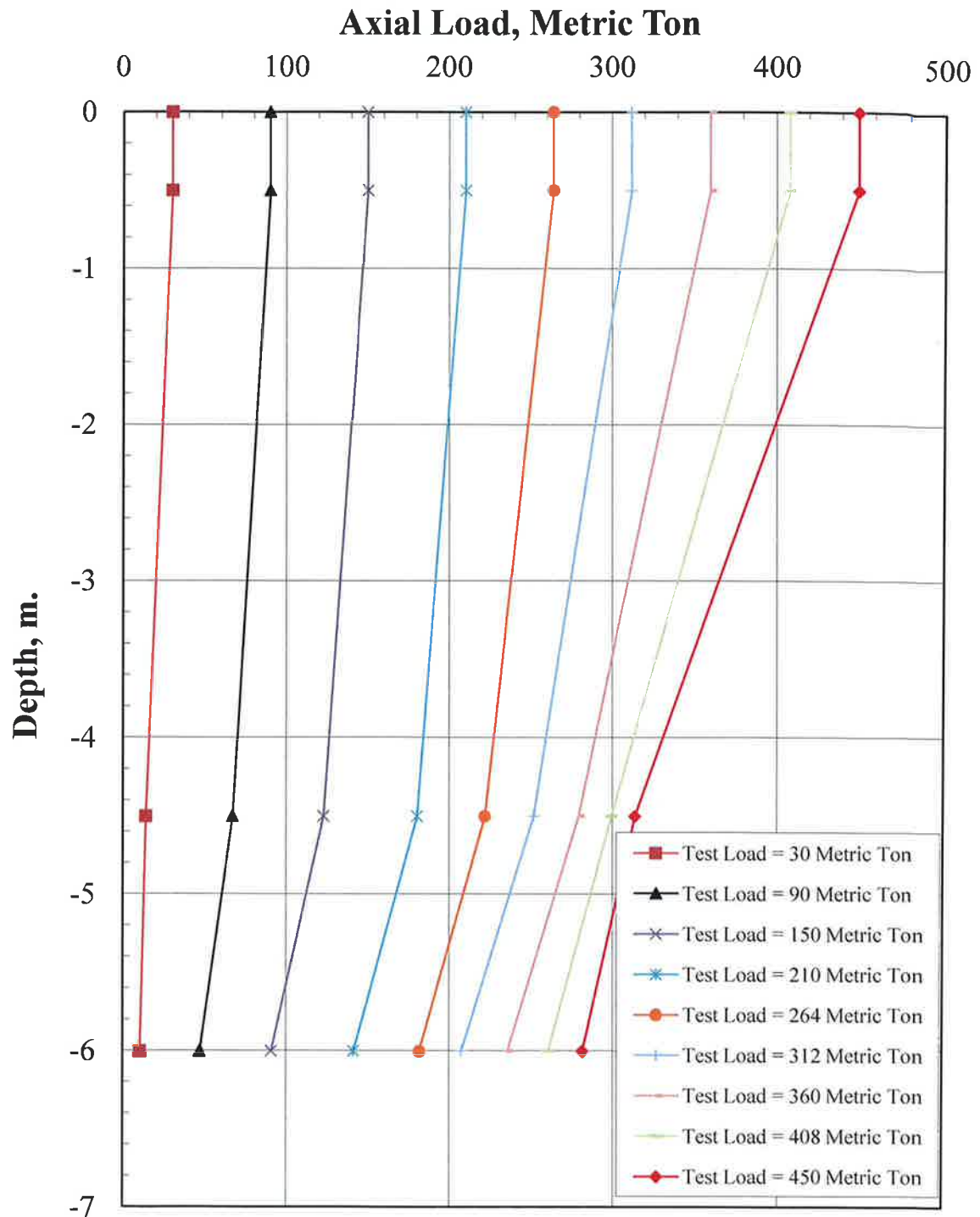
ค่า β มากกว่า 0.90	:	เสาเข็มสมบูรณ์
ค่า β ระหว่าง 0.80-0.90	:	พบข้อบกพร่องเล็กน้อย
ค่า β ระหว่าง 0.60-0.79	:	เสาเข็มมีข้อบกพร่อง
ค่า β ต่ำกว่า 0.60	:	เสาเข็มหัก

3.4.2 ผลการตรวจวัดความเครียดในเสาเข็มทดสอบระหว่างการทดสอบฯ แบบสถิตยศาสตร์

เมื่อนำผลการตรวจวัดของมาตรวัดความเครียดมาวิเคราะห์จะได้กราฟแสดงแรงกดตามแกนภายในโครงสร้างเสาเข็ม ณ ระดับความลึกต่างๆ ในขณะที่ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ ดังรูปที่ 3-14 ถึงรูปที่ 3-18 และมีค่าดังตารางที่ 3-10 และตารางที่ 3-11 สำหรับหน่วยแรงเฉียดทานและหน่วยแรงแบกทานในขณะทดสอบที่คำนวณได้จากเสาเข็มในแปลงทดสอบต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 3-12 ถึงตารางที่ 3-14 เมื่อนำเอาค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นมาสรุปเป็นตารางจะได้เป็นตารางของหน่วยแรงต้านทานสูงสุดที่เกิดขึ้นตามตารางที่ 3-15 และตารางที่ 3-16

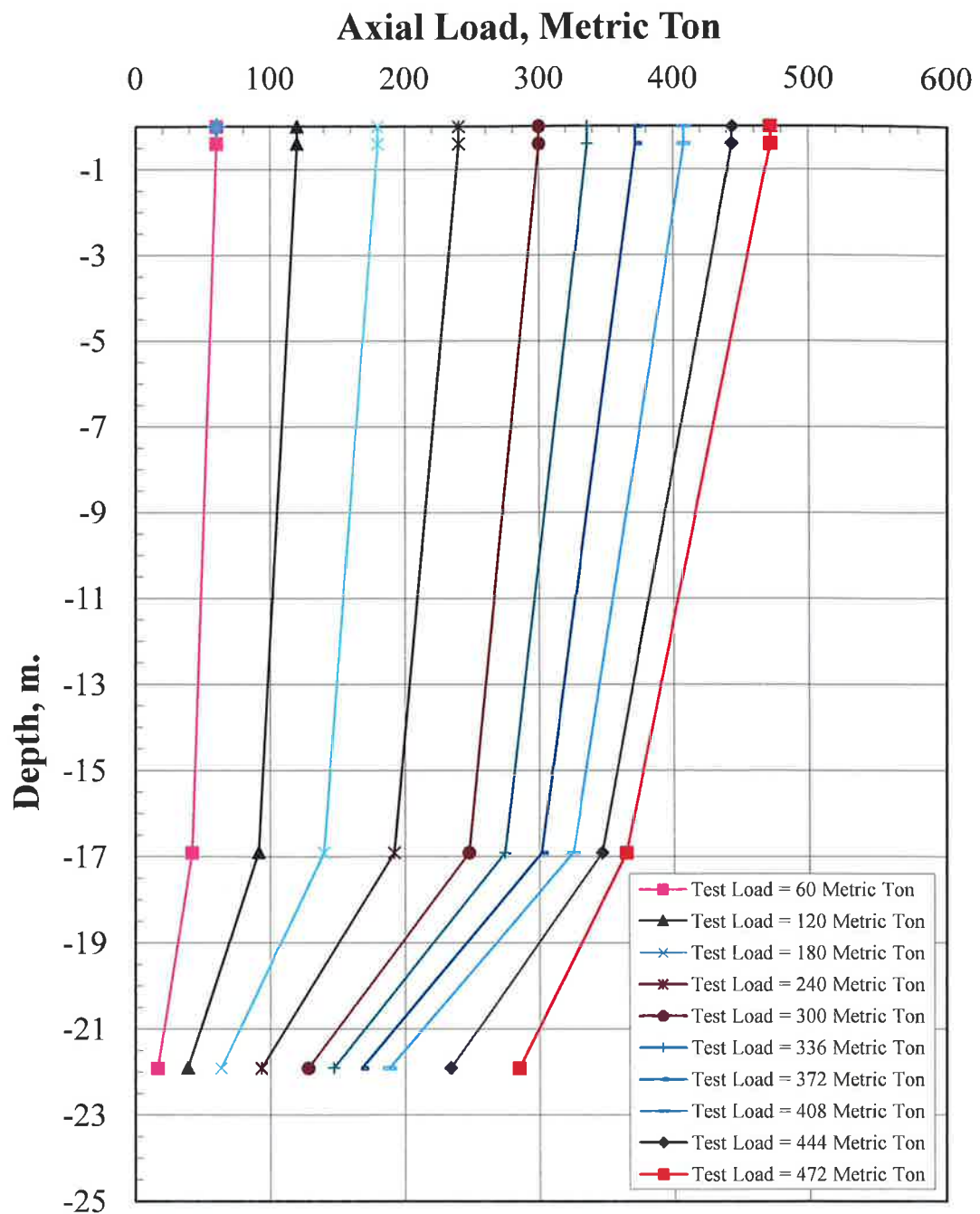


รูปที่ 3-14 แรงกดตามแกนในเสาเข็มขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิติศาสตร์
(TP1, ดินทราย, กม.65)

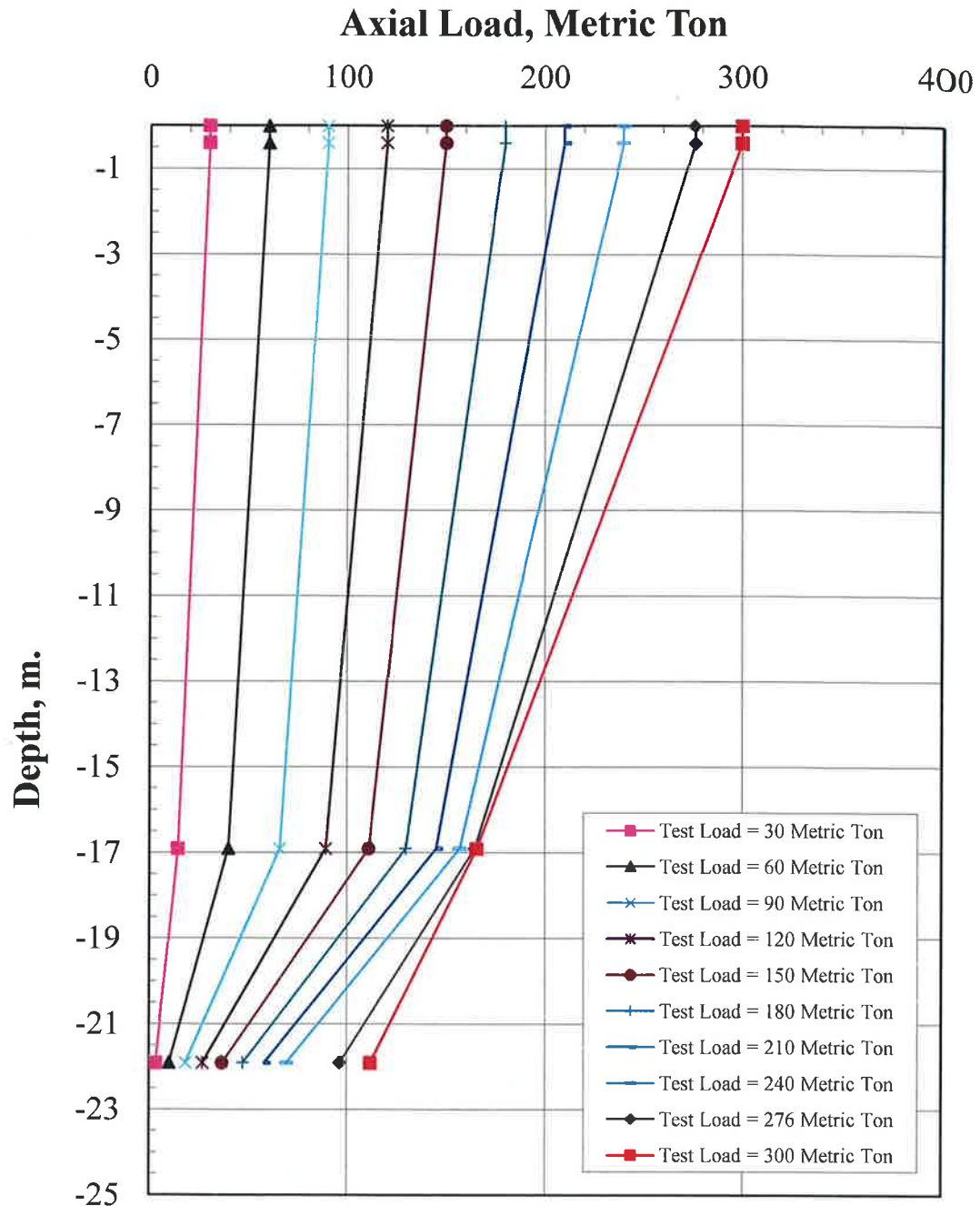


รูปที่ 3-15 แรงกดตามแกนในเสาเข็มขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิติศาสตร์

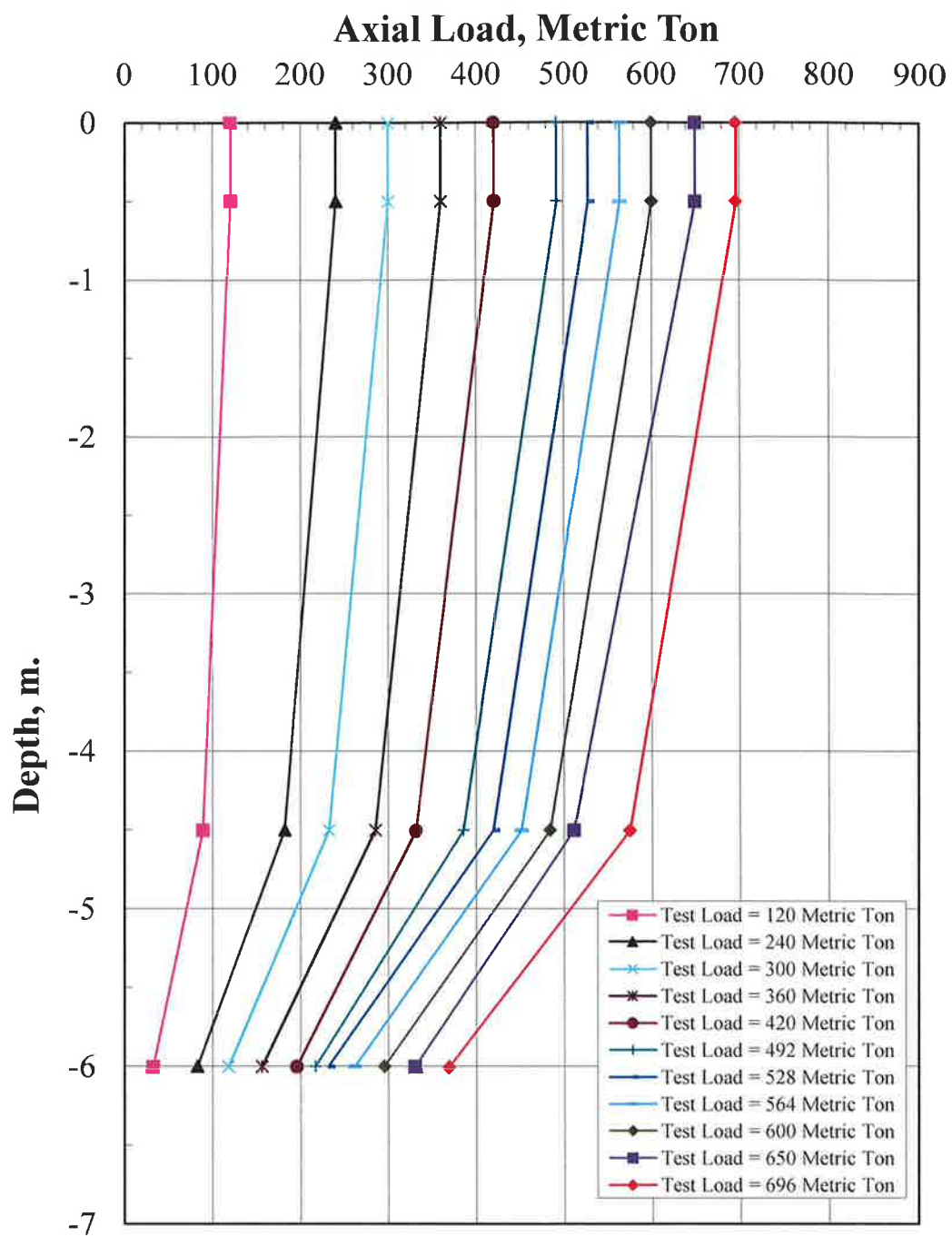
(TP2, ดินทราย, กม.65)



รูปที่ 3-16 แรงกดตามแกนในเสาเข็มขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์
(TP3, ดินเหนียว, กม.20)



รูปที่ 3-17 แรงกดตามแกนในเสาเข็มขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิติศาสตร์
(TP4, ดินเหนียว, กม.20)



รูปที่ 3-18 แรงกดตามแกนในเสาเข็มขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิติศาสตร์

(TP5, ดินทราย, ก.ม. 65)

ตารางที่ 3-10 แรกกดตามแกนของเสาเข็มขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ (ดินทราย, ก.ม. 65)

#TP1 (0.40x0.40)				#TP2 (0.65x0.65)				#TP5 (0.65x0.65)			
Load (ton)	Elevation (m)			Load (ton)	Elevation (m)			Load (ton)	Elevation (m)		
	-0.5	-4.5	-6.0		-0.5	-4.5	-6.0		-0.5	-4.5	-6.0
15	15.0	3.5	1.6	30	30.0	14.0	10.5	120	120.0	89.1	32.5
45	45.0	23.1	11.1	90	90.0	67.3	47.2	240	240.0	181.9	82.9
75	75.0	44.5	21.5	150	150.0	122.9	90.9	300	300.0	232.3	117.8
105	105.0	66.8	32.5	210	210.0	180.4	141.2	360	360.0	285.2	156.1
138	138.0	97.5	47.9	264	264.0	221.8	181.7	420	420.0	331.3	195.3
174	174.0	118.7	60.0	312	312.0	251.6	207.3	492	492.0	385.5	216.7
210	210.0	139.6	72.4	360	360.0	279.3	235.6	528	528.0	419.3	231.5
246	246.0	156.5	82.7	408	408.0	299.3	260.5	564	564.0	451.3	261.6
282	282.0	171.3	92.8	450	450.0	313.9	281.4	600	600.0	483.9	295.3
330	330.0	183.9	114.1					650	650.0	510.9	330.2
								696	696.0	575.0	369.2

ตารางที่ 3-11 แรงกดตามแกนของเสาเข็มขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ (ดินเหนียว, กม. 20)

#TP4 (0.40x0.40)				#TP3 (0.65x0.65)			
Load (ton)	Elevation (m)			Load (ton)	Elevation (m)		
	-0.4	-16.9	-21.9		-0.4	-16.9	-21.9
30	30.0	14.4	3.4	60	60.0	41.9	16.6
60	60.0	39.9	10.1	120	120.0	91.3	38.8
90	90.0	65.8	18.2	180	180.0	139.7	63.3
120	120.0	89.1	27.0	240	240.0	191.7	93.3
150	150.0	110.9	36.9	300	300.0	247.4	128.1
180	180.0	129.7	47.3	336	336.0	274.1	146.9
210	210.0	145.3	58.0	372	372.0	301.5	167.6
240	240.0	157.0	69.3	408	408.0	324.6	188.1
276	276.0	164.8	96.4	444	444.0	346.5	234.0
300	300.0	165.7	111.8	472	472.0	364.6	284.6

เนื่องจากปลายของเสาเข็มในแปลงทดสอบทั้งสองแปลงยังลงบนชั้นทรายจึงทำการวิเคราะห์หาค่า N_q จากหน่วยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงของกราฟที่เสนอโดย Berezontzev และ Terzaghi สำหรับหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวพบว่าค่า α ของชั้นดินเหนียวระดับตื้นที่คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบของเสาเข็ม #TP3 มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไปอยู่ประมาณสองเท่า ในขณะที่ค่า α ที่คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบของเสาเข็ม TP4 มีค่าอยู่ในช่วงที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไป ความผิดปกติที่พบนี้สันนิษฐานว่าเป็นเพราะหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มครั้งก่อนหน้า ทำให้ความเครียดที่วัดได้คลาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริง และความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะมีค่ามากในเสาเข็มขนาดเล็กที่มีการหดตัวเมื่อโดนตอกมากกว่าเสาเข็มขนาดใหญ่

สำหรับหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินทรายพบว่าค่า β ที่คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบของเสาเข็ม ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไปประมาณ 1.3 ถึง 6.5 เท่า ความผิดปกติที่พบนี้สันนิษฐานว่าเป็นเพราะหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มครั้งก่อนหน้าเช่นกัน

เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ทำการตรวจวัดความเครียดก่อนตอกและหลังตอกเสาเข็มแต่ละครั้ง จึงไม่สามารถประเมินหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นได้ ในการศึกษารั้งต่อไปจึงควรทำการตรวจวัดความเครียดก่อนและหลังทำการตอกเสาเข็มเพื่อทำให้การประเมินค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบมีค่าถูกต้องยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3-12 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในแปลงทดสอบที่ 1 (ดินทราย, ก.ม. 65)

#TP1 (0.40x0.40)			#TP2 (0.65x0.65)			#TP5 (0.65x0.65)		
Load (ton)	Skin resistance (t/m2)		Load (ton)	Skin resistance (t/m2)		Load (ton)	Skin resistance (t/m2)	
	0.5-4.5	4.5-6.0		0.5-4.5	4.5-6.0		0.5-4.5	4.5-6.0
15	1.79	0.81	30	1.54	0.90	120	2.97	14.52
45	3.43	4.99	90	2.18	5.15	240	5.59	25.38
75	4.77	9.57	150	2.60	8.21	300	6.51	29.36
105	5.97	14.29	210	2.85	10.03	360	7.19	33.10
138	6.34	20.64	264	4.06	10.28	420	8.53	34.85
174	8.65	24.45	312	5.81	11.35	492	10.24	43.27
210	11.00	27.99	360	7.76	11.21	528	10.45	48.15
246	13.98	30.76	408	10.45	9.96	564	10.84	48.65
282	17.30	32.70	450	13.09	8.31	600	11.17	48.34
330	22.83	29.09				650	13.37	46.34
						696	11.64	52.75

ตารางที่ 3-13 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในแปลงทดสอบที่ 2 (ดินเหนียว, ก.ม. 20)

#TP4 (0.40x0.40)			#TP3 (0.65x0.65)		
Load (ton)	Skin resistance (t/m2)		Load (ton)	Skin resistance (t/m2)	
	0.4-16.9	16.9-21.9		0.4-16.9	16.9-21.9
30	0.59	1.38	60	0.42	1.95
60	0.76	3.74	120	0.67	4.04
90	0.92	5.95	180	0.94	5.87
120	1.17	7.77	240	1.13	7.57
150	1.48	9.26	300	1.23	9.18
180	1.91	10.30	336	1.44	9.79
210	2.45	10.90	372	1.64	10.30
240	3.14	10.96	408	1.94	10.50
276	4.21	8.55	444	2.27	8.66
300	5.09	6.73	472	2.50	6.15

ตารางที่ 3-14 หน่วยแบกทานของเสาเข็มในแปลงทดสอบขณะทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์

#TP1 (0.40x0.40)		#TP2 (0.65x0.65)		#TP5 (0.65x0.65)		#TP4 (0.40x0.40)		#TP3 (0.65x0.65)	
Load (ton)	Tip resist (t/m2)	Load (ton)	Tip resist (t/m2)	Load (ton)	Tip resist (t/m2)	Load (ton)	Tip resist (t/m2)	Load (ton)	Tip resist (t/m2)
15	10.00	30	24.85	120	76.92	30	21.28	60	39.17
45	69.38	90	111.72	240	196.21	60	62.84	120	91.89
75	134.38	150	215.15	300	278.82	90	113.76	180	149.94
105	203.13	210	334.20	360	369.47	120	168.45	240	220.84
138	299.38	264	430.06	420	462.25	150	230.38	300	303.22
174	375.00	312	490.65	492	512.90	180	295.33	336	347.72
210	452.50	360	557.63	528	547.93				
246	516.88	408	616.57	564	619.17				
282	580.00	450	666.04	600	698.93				
330	713.13			650	781.54				
				696	873.85				

ตารางที่ 3-15 หน่วยแรงต้านทานสูงสุดที่เกิดขึ้นในแปลงทดสอบที่ 1 (กม. 65, ดินทราย)

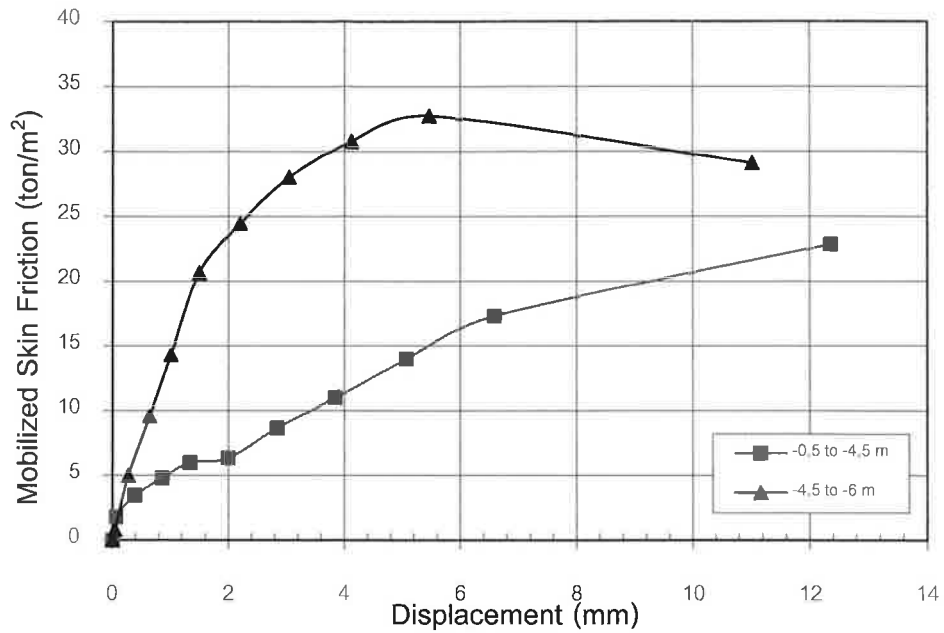
	Range		Mobilized value (t/m2)			σ_{v0}' (t/m2)	β		
	From	To	#TP1	#TP2	#TP5		#TP1	#TP2	#TP5
Skin resistance #1	-0.5	-4.5	22.83	13.09	13.37	8.50	2.69	1.54	1.57
Skin resistance #2	-4.5	-6.0	32.70	11.35	52.75	10.95	2.99	1.04	4.82

	Range		Mobilized value (t/m2)			σ_{v0}' (t/m2)	N_q		
	From	To	#TP1	#TP2	#TP5		#TP1	#TP2	#TP5
Tip resistance	-6.5	-6.5	713	666	874	11.70	61	57	75

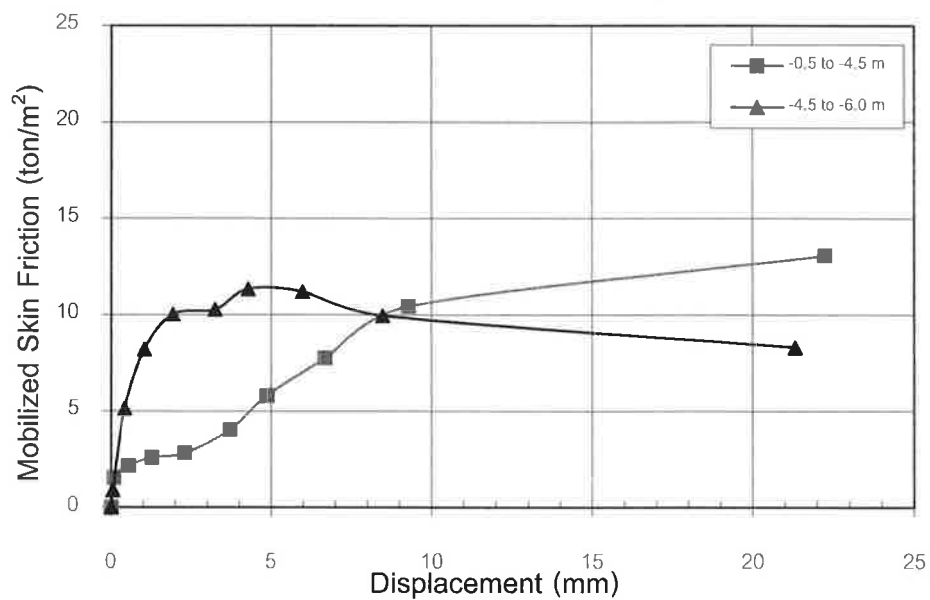
ตารางที่ 3-16 หน่วยแรงต้านทานสูงสุดที่เกิดขึ้นในแปลงทดสอบที่ 2 (กม. 20, ดินเหนียว)

	Range		Mobilized value (t/m2)		S_u (t/m2)	α	
	From	To	#TP3	#TP4		#TP3	#TP4
Skin resistance #1	-0.4	-16.9	5.09	2.50	2.50	2.03	1.00
Skin resistance #2	-16.9	-21.9	10.96	10.50	18.75	0.58	0.56

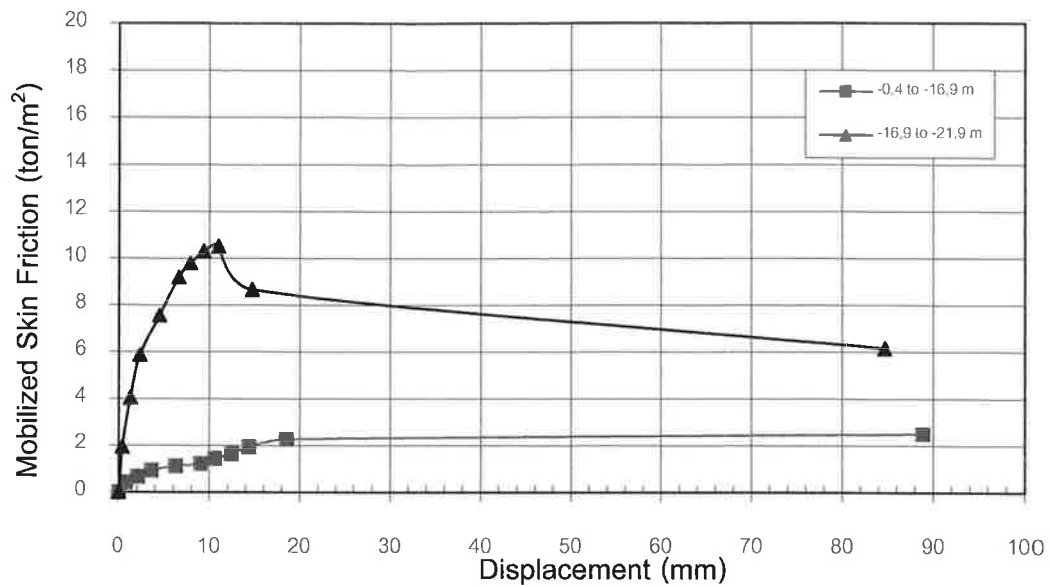
	Range		Mobilized value (t/m2)		σ_{v0}' (t/m2)	N_q	
	From	To	#TP3	#TP4		#TP3	#TP4
Tip resistance	-22.4	-22.4	699	674	11.70	60	58



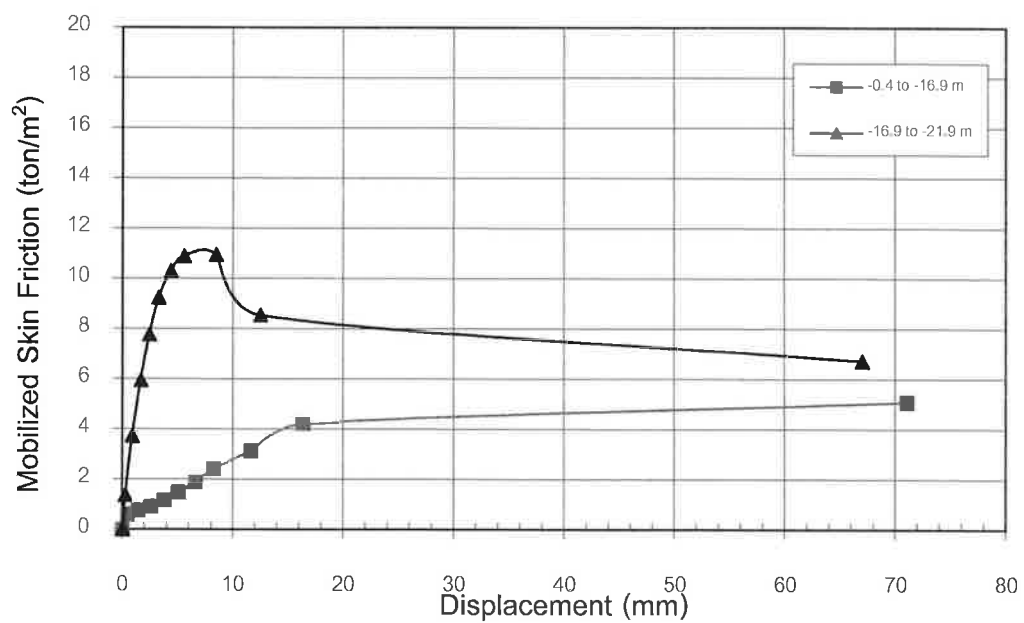
รูปที่ 3-19 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์
(TP1, ดินทราย, กม.65)



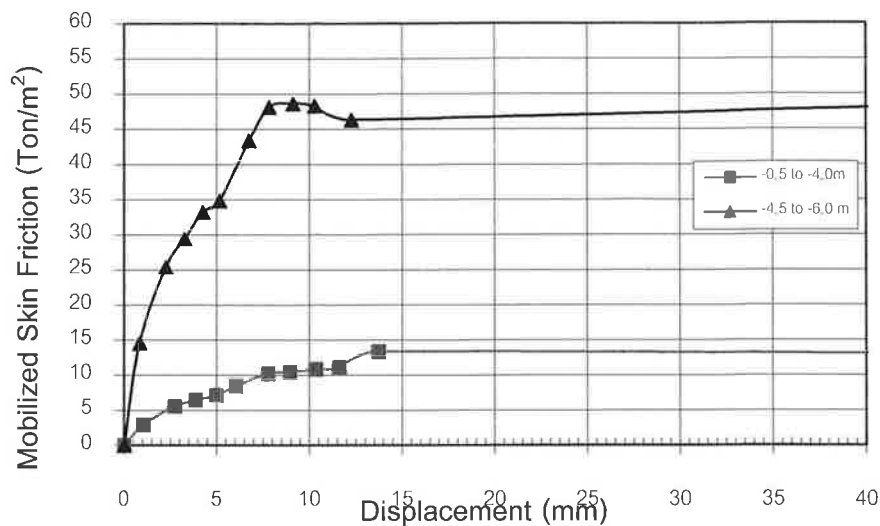
รูปที่ 3-20 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์
(TP2, ดินทราย, กม.65)



รูปที่ 3-21 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์
(TP3, ดินเหนียว, กม.20)



รูปที่ 3-22 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์
(TP4, ดินเหนียว, กม.20)



รูปที่ 3-23 หน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์
(TP5, ดินทราย, กม.65)

3.4.3 ผลการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำที่ติดตั้งในแปลงทดสอบ

การตรวจวัดค่าแรงดันน้ำประกอบด้วยการวัดค่าเริ่มต้นก่อนการทดสอบเสาเข็ม การวัดแรงดันน้ำในระหว่างการตอกเสาเข็ม การวัดแรงดันน้ำก่อนและหลังการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบพลศาสตร์ทุกครั้ง และการวัดแรงดันน้ำก่อนการทดสอบ ระหว่างการทดสอบและหลังการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์ เมื่อพิจารณาแรงดันน้ำที่อ่านได้จากมาตรวัดน้ำซึ่งติดตั้งอยู่ใกล้กับเสาเข็มทดสอบพบการเปลี่ยนแปลงแรงดันระหว่างการทดสอบดังนี้

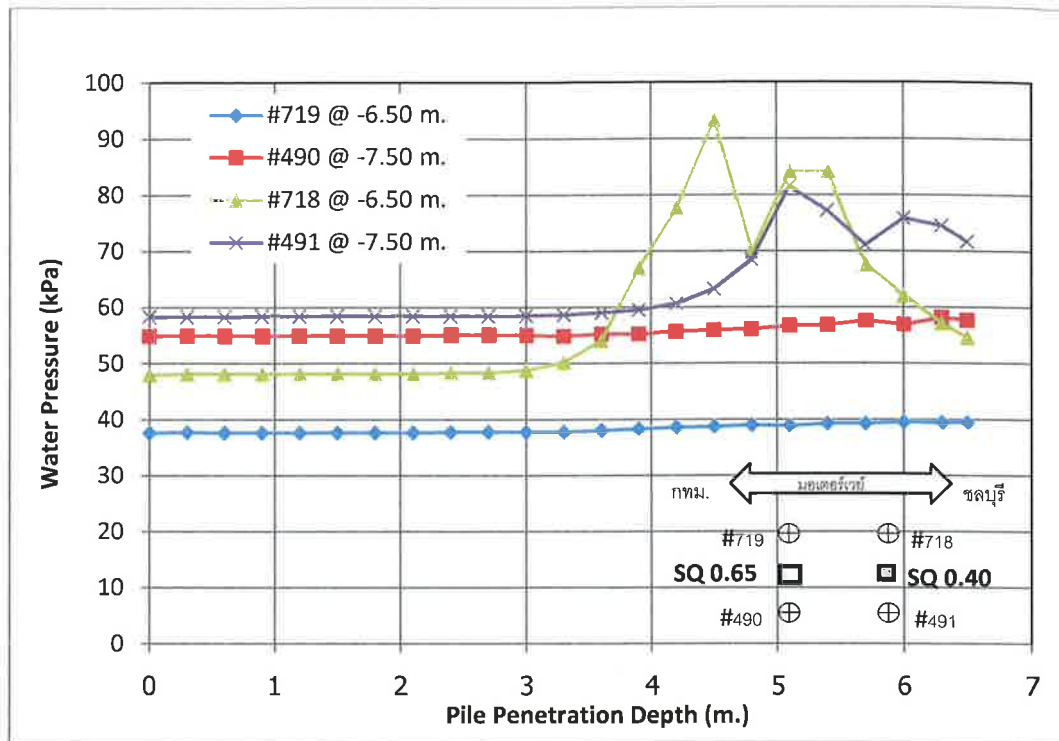
3.4.3.1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในแปลงทดสอบที่ 1 (กม. 65, พื้นที่ดินทราย)

เมื่อนำแรงดันน้ำที่วัดได้ในขณะก่อสร้างเสาเข็มตอกในพื้นที่ดินทรายมาพล็อตจะได้ผลดังรูปที่ 3-24 และรูปที่ 3-25 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันน้ำในช่วงเริ่มต้นพบว่าค่าที่วัดได้ ณ ระดับ -6.5 เมตรและ -7.5 เมตรจากมาตรวัด #718 และ #491 มีความแตกต่างกันประมาณ 10 kPa ซึ่งใกล้เคียงกับแรงดันน้ำที่จะเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก แต่เมื่อเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่วัดได้ที่ระดับ -6.5 เมตรและ -7.5 เมตรจากมาตรวัด #719 และ #490 พบว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -6.5 เมตรมีค่าต่ำกว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -7.5 เมตรมากกว่า 10 kPa ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจจะเกิดจากความเบี่ยงเบนเริ่มต้นของมาตรวัด เนื่องจากมาตรวัด #490 และ #491 ติดตั้งที่ระดับเดียวกันและมีค่าแรงดันน้ำใกล้เคียงกันจึงสันนิษฐานว่าให้ค่าที่ถูกต้องและมาตรวัด #719 ให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงไปประมาณ 7 kPa

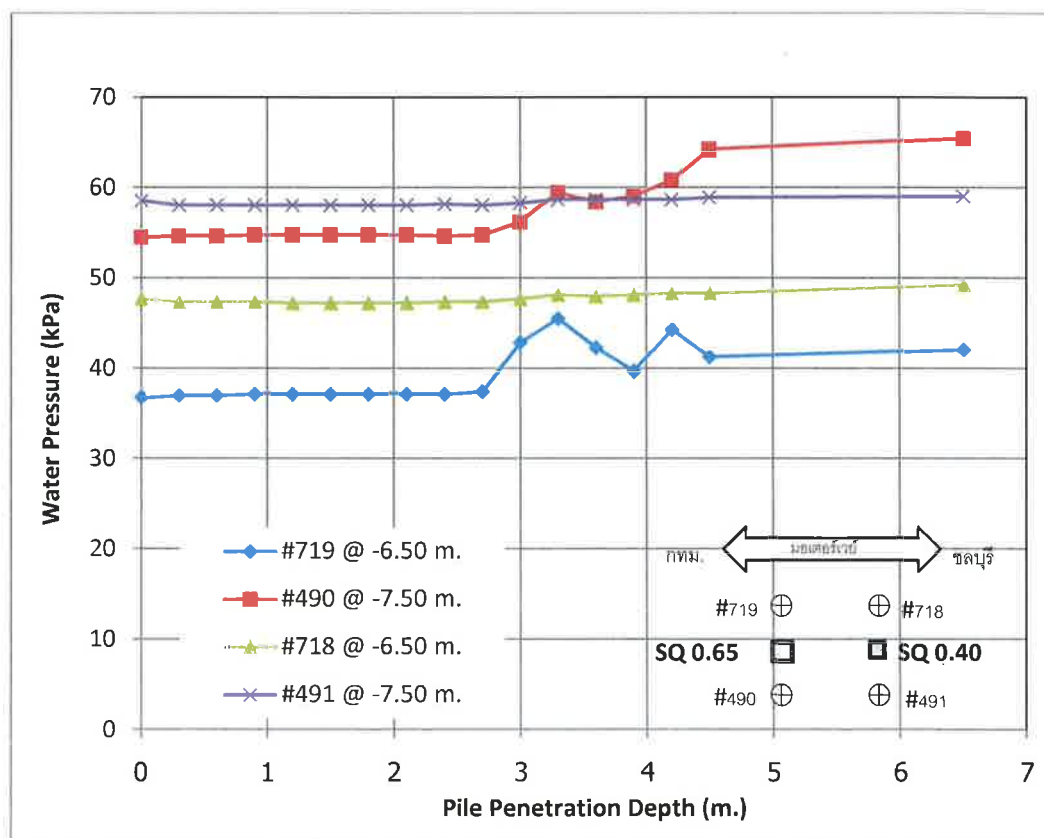
เมื่อพิจารณาจากการตอกเสาเข็ม TP1 (0.4 x 0.4 m) พบว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -6.5 เมตรจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อตอกเสาเข็มจนปลายเสาเข็มจมตัวลงที่ระดับ -3 เมตร และแรงดันน้ำที่ระดับ -7.5 เมตรจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มจมตัวลงที่ระดับ -4 เมตร หรือเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากจุดตรวจวัดในแนวตั้งประมาณ 3.5 เมตร และแรงดันน้ำมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากจุดตรวจวัดประมาณ 2 เมตร หลังจากนั้นจะมีค่าลดน้อยลง เนื่องจากจุดตรวจวัดอยู่ห่างจากศูนย์กลางของเสาเข็มในแนวราบเท่ากับ 1 เมตร เมื่อคิดเป็นระยะทางขจัดจะสรุปได้ว่า แรงดันน้ำจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากมาตรวัดเป็นระยะเท่ากับ 9D และจะมีค่าสูงสุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากมาตรวัดเป็นระยะเท่ากับ 5.5D เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

เมื่อพิจารณาจากการตอกเสาเข็ม TP2 (0.65 x 0.65 m) พบว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -6.5 เมตรและระดับ 7.5 เมตรจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ -2.7 เมตร หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงขณะที่ตอกเสร็จ เมื่อคิดเป็นระยะทางขจัดจะสรุปได้ว่า แรงดันน้ำจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากมาตรวัดเป็นระยะเท่ากับ 6.5D ถึง 7D เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

สำหรับแรงดันที่ตรวจวัดได้ก่อนและหลังการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์และแบบพลศาสตร์เป็นไปดังตารางที่ 3-17 ถึงตารางที่ 3-20 ซึ่งพบว่าแรงดันน้ำที่ระดับปลายเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการตอกทดสอบไม่มากและมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นที่ตรวจวัดไว้ก่อนเริ่มก่อสร้างเสาเข็ม



รูปที่ 3-24 การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำขณะตอกเสาเข็ม (TP1, ดินทราย, กม.65)



รูปที่ 3-25 การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำขณะตอกเสาเข็ม (TP2, ดินทราย, กม.65)

ตารางที่ 3-17 แรงดันน้ำขณะทดสอบ DLT เสาเข็ม (TP1, ดินทราย, กม.65)

← มอเตอร์ไฮดรอลิก → ชลบุรี #719 ⊕ ⊕ #718 SQ 0.65 ⊕ #490 ⊕ #491 SQ 0.40	Pile Size	@ SQ 0.65 x 0.65 m.		@ SQ 0.40 x 0.40 m.	
	S/N	#719	#490	#718	#491
	Depth (m.)	-6.50	-7.50	-6.50	-7.50
Restrike Test after 7 days (12.00 tons Hammer Weight)					
Initial Reading (Hz) : 29/8/2011	(kPa)	37.54	56.84	49.46	60.44
Driving SQ 0.40 @ 0.40 Drop Height	6.5	37.68	56.97	49.46	60.44
Driving SQ 0.40 @ 0.60 Drop Height	6.5	37.68	56.72	49.15	60.32
Driving SQ 0.40 @ 0.80 Drop Height	6.5	37.54	56.59	49.30	61.43
Restrike Test after 14 days (12.00 tons Hammer Weight)					
Initial Reading (Hz) : 5/9/2011	(kPa)	36.70	58.75	49.93	60.93
Driving SQ 0.40 @ 0.40 Drop Height	6.5	37.12	58.11	49.77	62.04
Driving SQ 0.40 @ 0.60 Drop Height	6.5	36.98	57.98	49.93	60.93
Driving SQ 0.40 @ 0.80 Drop Height	6.5	36.84	57.60	49.77	61.92
Restrike Test after 21 days (12.00 tons Hammer Weight)					
Initial Reading (Hz) : 12/9/2011	(kPa)	35.43	57.73	50.08	61.06
Driving SQ 0.40 @ 0.40 Drop Height	6.5	35.85	57.86	50.08	61.18
Driving SQ 0.40 @ 0.60 Drop Height	6.5	35.57	57.98	50.71	62.04
Driving SQ 0.40 @ 0.80 Drop Height	6.5	35.29	57.73	49.93	61.55

ตารางที่ 3-18 แรงดันน้ำขณะทดสอบ DLT เสาเข็ม (TP2, ดินทราย, กม.65)

← มอเตอร์ไฮดรอลิก → ชลบุรี #719 ⊕ ⊕ #718 SQ 0.65 ⊕ #490 ⊕ #491 SQ 0.40	Pile Size	@ SQ 0.65 x 0.65 m.		@ SQ 0.40 x 0.40 m.	
	S/N	#719	#490	#718	#491
	Depth (m.)	-6.50	-7.50	-6.50	-7.50
Restrike Test after 8 days (12.00 tons Hammer Weight)					
Initial Reading (Hz) : 1/9/2011	(kPa)	37.54	57.48	49.93	60.93
Driving SQ 0.65 @ 0.50 Drop Height	6.5	36.84	58.11	49.93	61.06
Driving SQ 0.65 @ 1.00 Drop Height	6.5	36.70	60.39	49.93	60.93
Driving SQ 0.65 @ 1.50 Drop Height	6.5	36.84	62.42	49.93	61.06
Restrike Test after 12 days (12.00 tons Hammer Weight)					
Initial Reading (Hz) : 5/9/2011	(kPa)	36.70	57.48	49.93	60.93
Driving SQ 0.65 @ 0.50 Drop Height	6.5	36.27	58.24	50.24	60.93
Driving SQ 0.65 @ 1.00 Drop Height	6.5	36.13	60.77	49.93	60.93
Driving SQ 0.65 @ 1.50 Drop Height	6.5	36.13	62.42	49.93	60.93
Restrike Test after 19 days (12.00 tons Hammer Weight)					
Initial Reading (Hz) : 12/9/2011	(kPa)	36.13	62.42	49.93	60.93
Driving SQ 0.65 @ 0.50 Drop Height	6.5	35.15	58.37	49.93	60.93
Driving SQ 0.65 @ 1.00 Drop Height	6.5	-	-	-	-
Driving SQ 0.65 @ 1.50 Drop Height	6.5	-	-	-	-

ตารางที่ 3-19 แรงดันน้ำขณะทดสอบSLT เสาเข็ม (TP1, ดินทราย, กม.65)

กทม. ← มอเตอร์เวย์ → ชลบุรี #719 ⊕ ⊕ #718 SQ 0.65 SQ 0.40 #490 ⊕ ⊕ #491	Pile Size	@ SQ 0.65 x 0.65 m.		@ SQ 0.40 x 0.40 m.	
	S/N	#719	#490	#718	#491
	Depth (m.)	-6.50	-7.50	-6.50	-7.50
Static Load Test after 35 days					
Initial Reading (Hz) : 26/9/2011	(kPa)	35.71	57.98	49.93	61.18
@ 120 ton, max load cycle 1	6.5	35.99	58.24	50.40	61.30
@ 0 ton, cycle 1	6.5	35.99	58.24	50.40	61.30
@ 330 ton, max load cycle 2	6.5	36.13	58.24	50.71	61.67
@ 0 ton, cycle 2	6.5	36.41	58.37	50.55	61.43

ตารางที่ 3-20 แรงดันน้ำขณะทดสอบSLT เสาเข็ม (TP2, ดินทราย, กม.65)

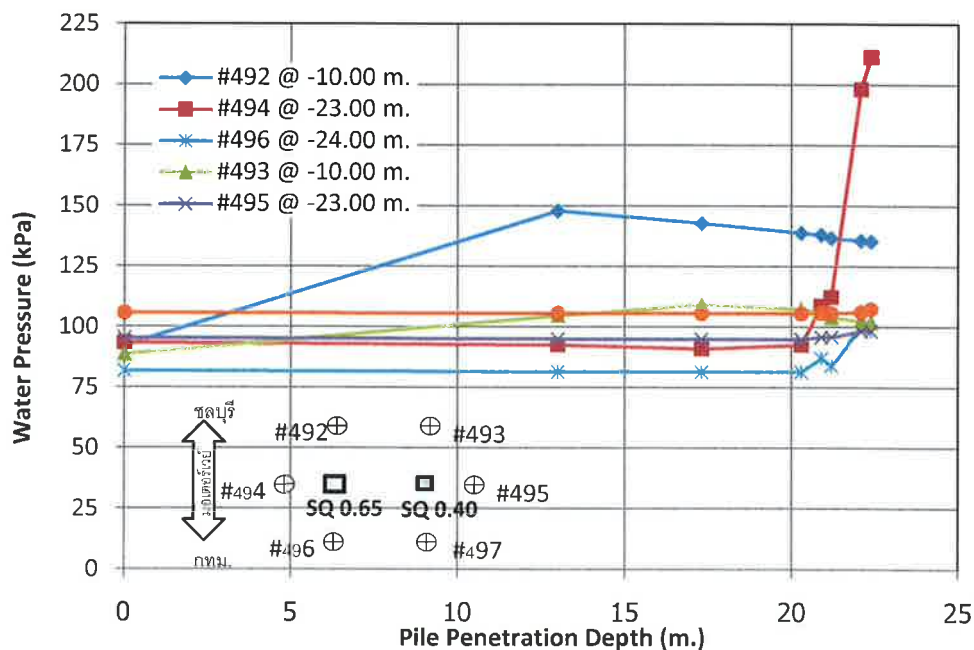
กทม. ← มอเตอร์เวย์ → ชลบุรี #719 ⊕ ⊕ #718 SQ 0.65 SQ 0.40 #490 ⊕ ⊕ #491	Pile Size	@ SQ 0.65 x 0.65 m.		@ SQ 0.40 x 0.40 m.	
	S/N	#719	#490	#718	#491
	Depth (m.)	-6.50	-7.50	-6.50	-7.50
Static Load Test after 42 days					
Initial Reading (Hz) : 4/10/2011	(kPa)	35.43	57.60	49.77	60.56
@ 240 ton, max load cycle 1	6.5	35.85	57.98	49.77	60.69
@ 0 ton, cycle 1	6.5	35.85	57.86	49.93	60.81
@ 450 ton, max load cycle 2	6.5	35.43	61.66	49.93	60.81
@ 0 ton, cycle 2	6.5	36.70	55.96	50.08	60.93

3.4.3.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในแปลงทดสอบที่ 2 (กม. 20, พื้นที่ดินเหนียว)

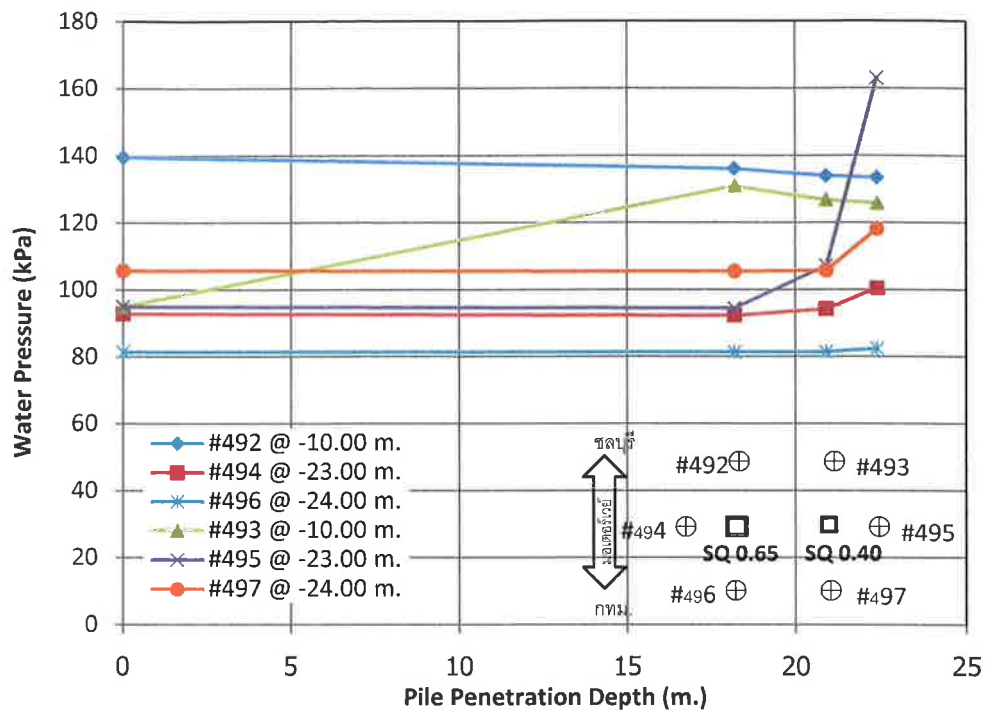
เมื่อนำแรงดันน้ำที่วัดได้ในขณะก่อสร้างเสาเข็มตอกในพื้นที่ดินทรายมาพล็อตจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3-26 และรูปที่ 3-27 เมื่อเปรียบเทียบแรงดันน้ำในช่วงเริ่มต้นพบว่าค่าที่วัดได้ ณ ระดับ -23 เมตรและ -24 เมตร จากมาตรวัด #494 และ #496 พบว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -23 เมตรมีค่าสูงกว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -24 เมตร ซึ่งอาจจะเกิดจากความเบี่ยงเบนเริ่มต้นของมาตรวัดหรือเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในบริเวณพื้นที่กรุงเทพที่ทำให้แรงดันน้ำในชั้นดินทรายที่ระดับ -24 ม. มีค่าต่ำกว่าปกติ แต่เมื่อเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่วัดได้จากมาตรวัด #495 และ #497 พบว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -23 เมตรและ -24 เมตรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมาตรวัด #494 และ #495 ติดตั้งที่ระดับเดียวกันและมีค่าแรงดันน้ำใกล้เคียงกันจึงสันนิษฐานว่าให้ค่าที่ถูกต้องและมาตรวัด #496 ให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงไปประมาณ 22 kPa

เมื่อพิจารณาจากการตอกเสาเข็ม TP3 (0.65 x 0.65 m) พบว่าแรงดันน้ำ ณ กึ่งกลางของชั้นดินเหนียวที่ระดับ -10 เมตร ที่ตรวจวัดได้จากมาตรวัด #492 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นมาก โดยเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นประมาณ 43 kPa และพบว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -23 และ -24 เมตรซึ่งวัดได้จากมาตรวัด #494 และ #496 จะเริ่มสูงขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ -22 เมตรหรือเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากจุดตรวจวัดในแนวตั้งประมาณ 2 เมตร เนื่องจากจุดตรวจวัดอยู่ห่างจากศูนย์กลางของเสาเข็มในแนวราบเท่ากับ 1 เมตร เมื่อคิดเป็นระยะทางขจัดจะสรุปได้ว่าแรงดันน้ำจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากมาตรวัดเป็นระยะเท่ากับ 3.5D เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

เมื่อพิจารณาแรงดันน้ำที่วัดก่อนการตอกเสาเข็ม TP4 (0.4 x 0.4 m) ซึ่งทำหลังจากการตอกเสาเข็ม TP3 หนึ่งวัน พบว่าแรงดันน้ำที่ ณ ระดับ -23 และ -24 เมตรที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการตอกเสาเข็มต้นแรก (TP3) ได้ลดลงสู่ค่าเริ่มต้นแล้ว แต่แรงดันน้ำในชั้นดินเหนียวที่ระดับ -10 ม. ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการตอกเสาเข็มต้นแรก ยังคงมีค่าสูงอยู่และค่อนข้างคงที่ เมื่อตอกเสาเข็ม TP4 พบว่าแรงดันน้ำที่วัดได้จากมาตรวัด #493 (ซึ่งติดตั้ง ณ กึ่งกลางชั้นดินเหนียวที่ระดับ -10 เมตร และอยู่ใกล้กับเสาเข็ม #TP4) มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 31 kPa ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจพบจากการตอกเสาเข็มต้นแรก (TP3) และพบว่าแรงดันน้ำที่ระดับ -23 และ -24 เมตรจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ -22 เมตรเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3-26 การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำขณะตอกเสาเข็ม (TP3, ดินเหนียว, กม.20)



รูปที่ 3-27 การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำขณะตอกเสาเข็ม (TP4, ดินเหนียว, กม.20)

การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำขณะทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์เป็นไปดังตารางที่ 3-21 ถึงตารางที่ 3-24 ซึ่งพบว่าแรงดันน้ำที่ระดับปลายเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการตอกทดสอบไม่มากและมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นที่ตรวจวัดไว้ก่อนเริ่มก่อสร้างเสาเข็ม

สำหรับในแปลงทดสอบกม.20 นี้ได้มีการติดตั้งมาตรวัดแรงดันน้ำที่กึ่งกลางชั้นดินเหนียว (ระดับ -10 ม.) เพิ่มขึ้นเป็นพิเศษ ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มเป็นดังรูปที่ 3-28 และรูปที่ 3-29 จากกราฟดังกล่าวสังเกตได้ว่าแรงดันน้ำที่วัดได้ในชั้นดินเหนียวมีค่าเพิ่มสูงมากเนื่องจากการแทนที่ดินในระหว่างการก่อสร้างแต่แรงดันน้ำที่สะสมไว้จะค่อยๆ ลดลงตามเวลา สำหรับแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่เวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์พบว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการตอกทดสอบมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะว่าชั้นดินได้ปรับตัวจนเข้าสู่สภาพแน่นในระดับหนึ่งแล้ว เมื่อมีการตอกทดสอบซ้ำอีกจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในปริมาณที่ไม่สูงเท่ากับในระหว่างการก่อสร้าง

ตารางที่ 3-21 แรงดันน้ำขณะทดสอบ DLT เสาเข็ม (TP3, ดินเหนียว, กม.20)

	#492 ⊕ ⊕ #493	Pile Size	@ SQ 0.65 x 0.65 m.			@ SQ 0.40 x 0.40 m.		
	#494 ⊕ ⊕ #495	S/N	#492	#494	#496	#493	#495	#497
	#496 ⊕ ⊕ #497	Depth (m.)	-10.00	-23.00	-24.00	-10.00	-23.00	-24.00
Restrike Test after 8 days (12.00 tons Hammer Weight)								
Initial Reading (Hz) : 14/9/2011	(kPa)	130.61	94.00	82.51	112.18	95.80	106.50	
Driving SQ 0.65 @ 0.60 Drop Height	22.4	130.98	94.26	82.64	112.56	95.69	106.75	
Driving SQ 0.65 @ 0.80 Drop Height	22.4	132.07	95.17	82.64	112.56	95.90	106.50	
Driving SQ 0.65 @ 1.20 Drop Height	22.4	131.46	94.65	82.64	112.69	95.90	107.25	
Restrike Test after 15 days (12.00 tons Hammer Weight)								
Initial Reading (Hz) : 21/9/2011	(kPa)	122.21	93.74	82.77	107.76	95.69	106.62	
Driving SQ 0.65 @ 0.60 Drop Height	22.4	122.82	94.00	82.90	107.89	95.69	106.62	
Driving SQ 0.65 @ 0.80 Drop Height	22.4	122.82	94.00	82.90	108.14	95.80	106.87	
Driving SQ 0.65 @ 1.20 Drop Height	22.4	123.06	94.00	82.90	108.14	95.69	106.62	
Restrike Test after 22 days (12.00 tons Hammer Weight)								
Initial Reading (Hz) : 28/9/2011	(kPa)	119.40	93.74	83.30	106.12	95.80	106.75	
Driving SQ 0.65 @ 0.60 Drop Height	22.4	120.01	93.61	83.30	106.50	95.80	106.75	
Driving SQ 0.65 @ 0.80 Drop Height	22.4	120.62	94.13	83.30	106.62	95.80	106.75	
Driving SQ 0.65 @ 1.20 Drop Height	22.4	120.50	93.74	83.30	106.88	95.90	106.87	
Driving SQ 0.65 @ 1.50 Drop Height	22.4	121.11	94.13	83.30	106.75	95.80	106.75	

ตารางที่ 3-22 แรงดันน้ำขณะทดสอบ DLT เสาเข็ม (TP4, ดินเหนียว, กม.20)

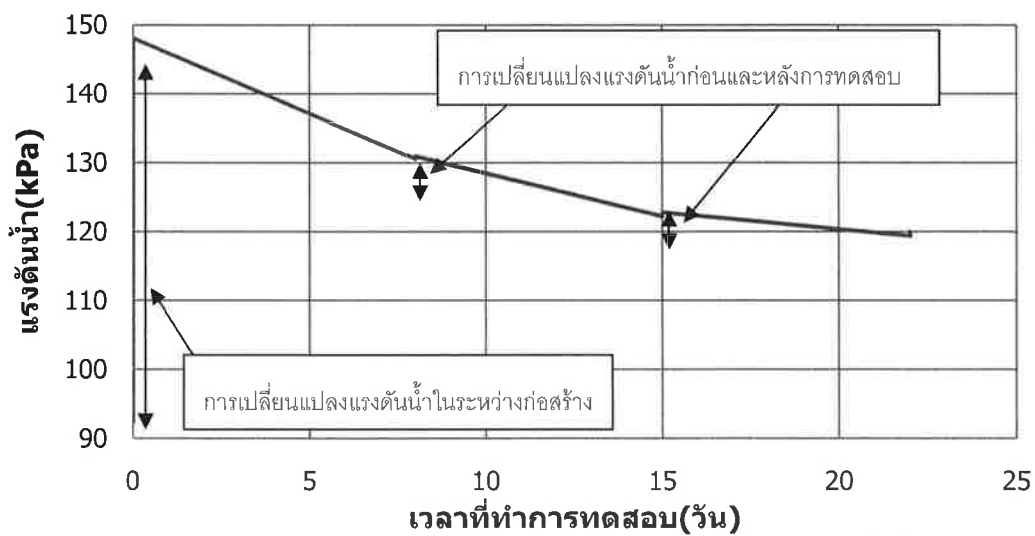
	#492 ⊕ ⊕ #493	Pile Size	@ SQ 0.65 x 0.65 m.			@ SQ 0.40 x 0.40 m.		
	#494 ⊕ ⊕ #495	S/N	#492	#494	#496	#493	#495	#497
	#496 ⊕ ⊕ #497	Depth (m.)	-10.00	-23.00	-24.00	-10.00	-23.00	-24.00
Restrike Test after 7 days (12.00 tons Hammer Weight)								
Initial Reading (Hz) : 14/9/2011	(kPa)	130.61	94.00	82.64	112.05	95.80	106.62	
Driving SQ 0.40 @ 0.30 Drop Height	22.4	130.25	94.13	82.51	112.69	97.15	106.75	
Driving SQ 0.40 @ 0.50 Drop Height	22.4	130.49	94.26	82.64	112.69	97.36	106.87	
Driving SQ 0.40 @ 0.70 Drop Height	22.4	130.49	94.26	82.51	113.19	98.92	109.25	
Restrike Test after 14 days (12.00 tons Hammer Weight)								
Initial Reading (Hz) : 21/9/2011	(kPa)	123.06	94.00	82.90	108.14	95.69	107.75	
Driving SQ 0.40 @ 0.30 Drop Height	22.4	122.57	93.87	82.77	108.39	96.11	106.75	
Driving SQ 0.40 @ 0.50 Drop Height	22.4	122.69	93.87	82.90	108.77	96.21	106.62	
Driving SQ 0.40 @ 0.70 Drop Height	22.4	122.69	93.87	82.77	108.90	97.46	107.62	
Restrike Test after 21 days (12.00 tons Hammer Weight)								
Initial Reading (Hz) : 28/9/2011	(kPa)	121.11	94.13	83.30	106.75	95.80	106.75	
Driving SQ 0.40 @ 0.30 Drop Height	22.4	120.13	93.61	83.17	107.00	95.80	106.75	
Driving SQ 0.40 @ 0.50 Drop Height	22.4	120.13	93.61	83.17	106.88	95.90	106.50	
Driving SQ 0.40 @ 0.70 Drop Height	22.4	120.13	93.61	83.17	107.38	97.04	106.87	
Driving SQ 0.40 @ 0.90 Drop Height	22.4	120.13	93.61	83.17	107.64	97.04	107.12	

ตารางที่ 3-23 แรงดันน้ำขณะทดสอบSLT เสาเข็ม (TP3, ดินเหนียว, กม.20)

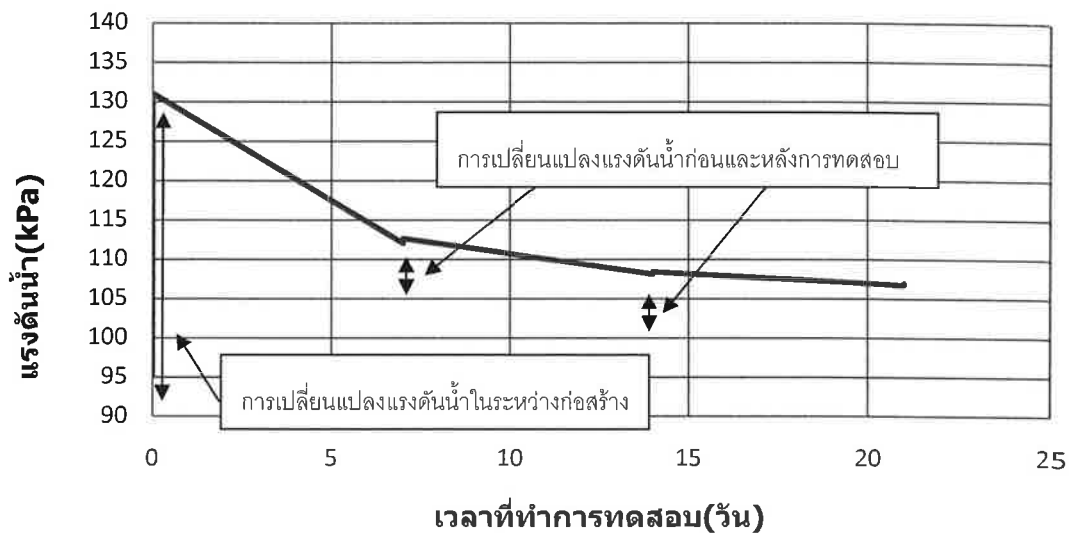
ขลบุรี #492 #493 #494 #495 SQ 0.65 SQ 0.40 กทม. #496 #497	Pile Size	@ SQ 0.65 x 0.65 m.			@ SQ 0.40 x 0.40 m.		
	S/N	#492	#494	#496	#493	#495	#497
	Depth (m.)	-10.00	-23.00	-24.00	-10.00	-23.00	-24.00
Static Load Test after 72 days							
Initial Reading (Hz) : 17/11/2011	(kPa)	122.69	94.39	87.41	111.05	97.25	108.62
@ 240 ton, max load cycle 1		22.4	120.99	94.52	87.67	109.53	97.56
@ 0 ton, cycle 1		22.4	120.99	94.00	86.48	110.41	97.15
@ 472 ton, max load cycle 2		22.4	119.16	94.13	87.41	108.14	97.25
@ 0 ton, cycle 2		22.4	121.84	94.00	87.54	110.67	97.25

ตารางที่ 3-24 แรงดันน้ำขณะทดสอบSLT เสาเข็ม (TP4, ดินเหนียว, กม.20)

ขลบุรี #492 #493 #494 #495 SQ 0.65 SQ 0.40 กทม. #496 #497	Pile Size	@ SQ 0.65 x 0.65 m.			@ SQ 0.40 x 0.40 m.		
	S/N	#492	#494	#496	#493	#495	#497
	Depth (m.)	-10.00	-23.00	-24.00	-10.00	-23.00	-24.00
Static Load Test after 58 days							
Initial Reading (Hz) : 4/11/2011	(kPa)	117.69	93.74	85.82	111.55	96.52	107.87
@ 240 ton, max load cycle 1		22.4	117.08	94.13	86.35	109.78	96.84
@ 0 ton, cycle 1		22.4	117.57	94.00	86.21	110.79	96.63
@ 300 ton, max load cycle 2		22.4	116.71	94.13	86.48	109.02	97.67
@ 0 ton, cycle 2		22.4	117.69	94.13	86.35	111.05	96.32



รูปที่ 3-28 แรงดันน้ำที่เวลาการทดสอบต่างๆ ซึ่งตรวจวัดจากมาตรวัดแรงดันน้ำติดตั้งที่ระดับ -10.00 เมตร (TP3, ดินเหนียว, กม.20)



รูปที่ 3-29 แรงดันน้ำที่เวลาการทดสอบต่างๆซึ่งตรวจวัดจากมาตรวัดแรงดันน้ำติดตั้งที่ระดับ -10.00 เมตร
(TP4, ดินเหนียว, กม.20)

3.5 สรุปผลการศึกษาและข้อแนะนำ

3.5.1 การพัฒนากำลังรับน้ำหนักบรรทุกตามเวลาของเสาเข็ม

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ของเสาเข็มกับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์พบว่า ผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ของเสาเข็มในขณะก่อสร้าง (Initial driving test) จะให้ค่าที่ต่ำกว่าผลการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์โดยเฉลี่ยประมาณ 2 เท่า และเมื่อทิ้งระยะเวลาหลังจากการก่อสร้างให้มากขึ้นในช่วง 1 ถึง 3 สัปดาห์พบว่า กำลังที่ประเมินได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์จะยังมีค่าต่ำกว่าผลทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ แต่ความแตกต่างจะมีค่าน้อยลงโดยมีความแตกต่างประมาณร้อยละ 21 เมื่อทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ และลดลงเหลือร้อยละ 12 เมื่อทิ้งไว้ 3 สัปดาห์ เมื่ออ้างอิงกับกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ตามวิธี Mazurkiewicz และเมื่ออ้างอิงกับกำลังรับน้ำหนักแบบสถิตยศาสตร์ตามวิธี Davisson ความแตกต่างดังกล่าวจะมีค่าประมาณร้อยละ 14 เมื่อทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ และลดลงเหลือร้อยละ 5 เมื่อทิ้งไว้ 3 สัปดาห์

3.5.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำระหว่างการทดสอบ

เมื่อพิจารณาจากการตรวจวัดระหว่างตอกเสาเข็มในพื้นที่ดินทรายพบว่าแรงดันน้ำจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากมาตรวัดเป็นระยะเท่ากับ 6.5D ถึง 9D เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม และเมื่อตรวจวัดก่อนการทดสอบครั้งต่อไปเมื่อเสาเข็มมีอายุได้ประมาณ 3 วันพบว่าแรงดันน้ำที่ระดับปลายเสาเข็ม

ได้ปรับตัวจนมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นที่ตรวจวัดไว้ก่อนเริ่มก่อสร้างเสาเข็ม นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบแรงดันน้ำที่ตรวจวัดได้ก่อนและหลังการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ครั้งต่อไป และระหว่างการทดสอบฯ แบบสถิตยศาสตร์พบว่าแรงดันน้ำมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการตอกทดสอบไม่มากนัก

เมื่อพิจารณาจากการตรวจวัดระหว่างตอกเสาเข็มในพื้นที่ดินเหนียวพบว่าแรงดันน้ำจะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ห่างจากมาตรวัดเป็นระยะประมาณ 3.5D เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม สำหรับแรงดันน้ำที่วัดได้ในชั้นดินเหนียวที่ระยะห่าง 1 เมตรจากผิวด้านข้างของเสาเข็มพบมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 30 ถึง 45 kPa เนื่องจากการแทนที่ดินในระหว่างการก่อสร้างแต่แรงดันน้ำที่สะสมไว้จะค่อยๆ ลดลงตามเวลา และยังมีค่าคงค้างอยู่ประมาณร้อยละ 50 หลังจากที่ได้ทิ้งไว้ 72 วัน เมื่อทำการทดสอบแบบพลศาสตร์แบบตอกซ้ำ (Restrike test) ที่เวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์หลังจากก่อสร้างเสร็จพบว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการตอกทดสอบมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะว่าชั้นดินได้ปรับตัวจนเข้าสู่สภาพแน่นในระดับหนึ่งแล้ว เมื่อมีการตอกทดสอบซ้ำอีกจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในปริมาณที่ไม่สูงเท่ากับในระหว่างการก่อสร้าง

3.5.3 หน่วยแรงเสียดทานและหน่วยแรงแบกทานของเสาเข็มในแปลงทดสอบ

จากการวิเคราะห์ผลจากมาตรวัดความเครียดพบว่าค่า N_q สำหรับการคำนวณหน่วยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าอยู่ในช่วงของกราฟที่เสนอโดย Berezontzev และ Terzaghi สำหรับหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวพบว่าค่า α ของชั้นดินเหนียวที่คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบเสาเข็มขนาดเล็ก (0.4x0.4) มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไปอยู่ประมาณสองเท่า ในขณะที่ค่า α ที่คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบของเสาเข็มขนาดใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไป ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเป็นเพราะหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มครั้งก่อนหน้าทำให้ความเครียดที่วัดได้คลาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริงและความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะมีค่ามากในเสาเข็มขนาดเล็กที่มีการหดตัวเมื่อโดนตอกมากกว่าเสาเข็มขนาดใหญ่

สำหรับหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินทรายพบว่าค่า β ที่คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบของเสาเข็ม ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไปประมาณ 1.3 ถึง 6.5 เท่า ความผิดปกติที่พบนี้สันนิษฐานว่าเป็นเพราะหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มครั้งก่อนหน้าเช่นกัน

3.5.4 ข้อแนะนำ

จากการศึกษานี้ครั้งนี้พบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ประเมินได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอายุของเสาเข็ม ลักษณะเช่นนี้พบได้ทั้งเสาเข็มที่ตอกในพื้นที่ดินเหนียว และในพื้นที่ดินทราย โดยกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ประเมินได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์ ในขณะที่ก่อสร้างจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ประเมินได้จากการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์เมื่อเสาเข็มมีอายุไม่น้อยกว่า 21 วัน ดังนั้นในการกำหนดวิธีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจะต้องคำนึงถึงการพัฒนากำลังตามอายุของเสาเข็มด้วย

เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำระหว่างก่อสร้างพบว่าขอบเขตอิทธิพลจะมีระยะประมาณ 6.5D ถึง 9D ในดินทราย และประมาณ 3.5D ในดินเหนียว เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังนั้นเมื่อตอกเสาเข็มใกล้กันเกินกว่าระยะดังกล่าวจึงควรจะต้องคำนึงถึงผลของการซ้อนทับกันของหน่วยแรงด้วย

จากการวิเคราะห์ผลจากมาตรวัดความเครียดพบว่าค่า N_q สำหรับการคำนวณหน่วยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าอยู่ในช่วงของกราฟที่เสนอโดย Berezontzev และ Terzaghi สำหรับหน่วยแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวพบว่าค่า α ของชั้นดินเหนียวที่คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบเสาเข็มขนาดเล็ก (0.4x0.4) มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไปอยู่ประมาณสองเท่า ในขณะที่ค่า α ที่คำนวณย้อนกลับจากผลทดสอบของเสาเข็มขนาดใหญ่มีค่าอยู่ในช่วงที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไป ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเป็นเพราะหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นจากการตอกเสาเข็มครั้งก่อนหน้าทำให้ความเครียดที่วัดได้คลาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริงและความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะมีค่ามากในเสาเข็มขนาดเล็กที่มีการหดตัวเมื่อโดนตอกมากกว่าเสาเข็มขนาดใหญ่ ในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรทำการตรวจวัดจากมาตรวัดความเครียดตั้งแต่เริ่มก่อสร้างเสาเข็มเพื่อที่จะได้นำผลของหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อสร้างมาพิจารณาได้

บทที่ 4 งานประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยเครื่องมือ

Pile Driving Analyzer (PDA)

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในหัวข้อนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ 1) การรวบรวมข้อมูลการตอกด้วยเครื่องมือ PDA เพื่อนำมาศึกษาและเป็นแนวทางการออกแบบการตอกเสาเข็มโดยใช้โปรแกรม GRLWEAP และ 2) การตรวจวัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตอกเสาเข็มและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มขณะก่อสร้างเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับโปรแกรม GRLWEAP

ในการศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลการตอกเสาเข็มทั้งหมด 35 ต้นจาก 8 โครงการคือ โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง, การก่อสร้างทางหลวงสายพระประโทน-บรรจบทางหลวงหมายเลข 35, การก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 108 (เชียงใหม่ – จอมทอง), โครงการก่อสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในทางหลวงหมายเลข 324, โครงการ The Idol, โครงการ Cerebos factory, โครงการ Impress ethanal park plant และโครงการสนามกีฬาในร่ม(ฟุตบอลนานาชาติ)

ข้อมูลที่รวบรวมมาได้ประกอบด้วยผลการเจาะสำรวจดิน, คุณสมบัติของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม, ผลตรวจวัดประสิทธิภาพการตอก และ ค่าตรวจวัดระหว่างการตอกเสาเข็มโดยใช้เครื่อง PDA

เนื่องจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตอกเสาเข็มเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์ด้วยสมการคลื่นหน่วยแรง การศึกษาจึงเริ่มจากการตรวจวัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม หลังจากที่ได้ทราบค่าประสิทธิภาพจากการตรวจวัดแล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาปรับปรุงฐานข้อมูลของอุปกรณ์ตอกเสาเข็มก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ต่อไป

การศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนย่อยต่างๆ ดังนี้

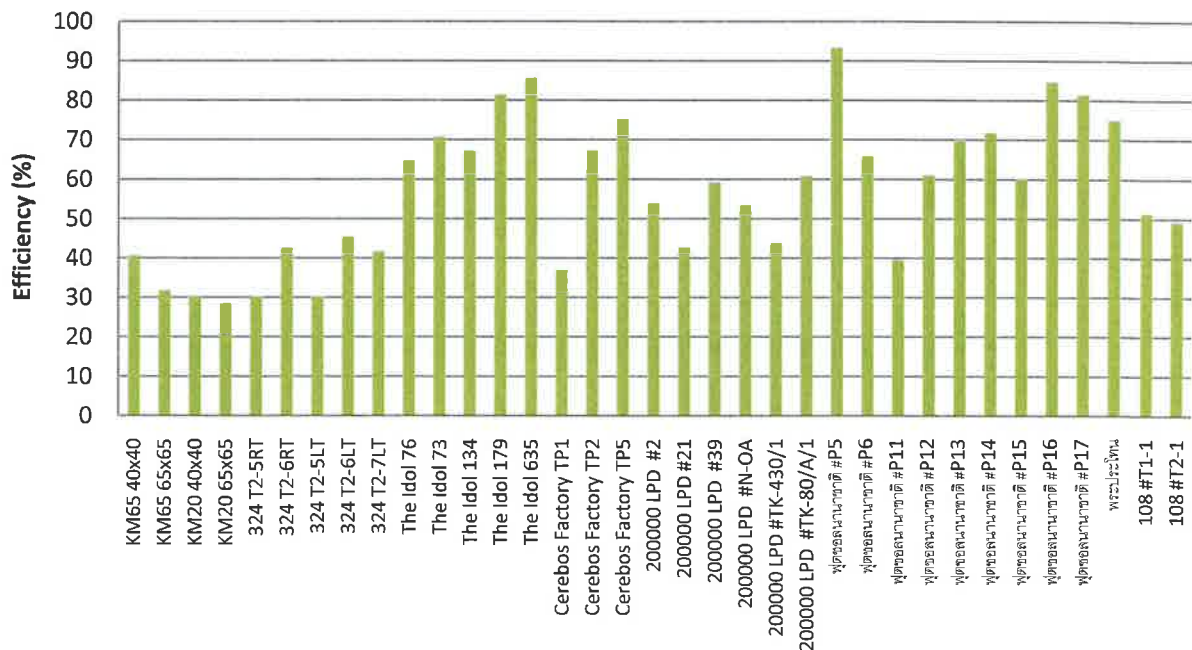
- 1) การรวบรวมข้อมูลที่เป็นต่อการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP และการรวบรวมผลตรวจวัดด้วยเครื่อง PDA เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของการวิเคราะห์
- 2) การตรวจวัดค่าประสิทธิภาพการตอกของตัมตอกเสาเข็ม
- 3) การศึกษาอิทธิพลและสอบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP
- 4) การวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการออกแบบการตอกด้วยโปรแกรม GRLWEAP

4.1 การประเมินค่าประสิทธิภาพการตอก

ประสิทธิภาพในการตอกเสาเข็มจะขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการตอก เช่น หมอนรองหัวเสาเข็ม หมอนรองด้ามตอกเสาเข็ม ชนิดของด้ามตอกเสาเข็ม เป็นต้น ค่าประสิทธิภาพมีนิยามตามสมการ(4.1) โดยพลังงานที่เสาเข็มได้รับจริงนั้นวัดได้จากเครื่อง PDA และพลังงานการตอกของด้ามเสาเข็มคำนวณจากน้ำหนักด้ามตอกเสาเข็มคูณด้วยระยะยก

$$Efficiency = \frac{\text{พลังงานที่เสาเข็มได้รับจริง}}{\text{พลังงานการตอกของด้ามเสาเข็ม}} \quad (4.1)$$

จากผลการตรวจวัดพลังงานการตอกที่เสาเข็มได้รับจริงในขณะที่ถูกตอกด้วยด้ามเสาเข็มด้วยเครื่อง PDA พบว่าประสิทธิภาพการตอกมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามโครงการต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-1 จากข้อมูลที่รวบรวมได้พบว่าประสิทธิภาพการตอกมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 29 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์ซึ่งจะเป็นค่าที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP



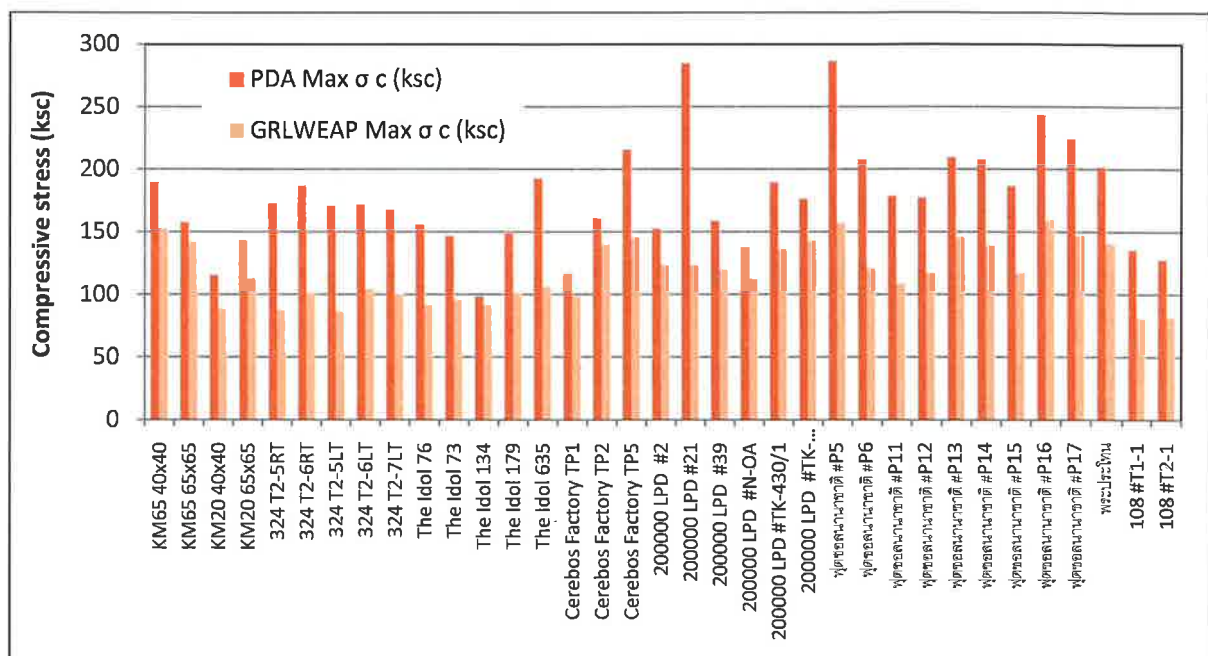
รูปที่ 4-1 ประสิทธิภาพการตอกที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง PDA

4.2 การเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงกับค่าที่คำนวณได้ด้วยโปรแกรม GRLWEAP

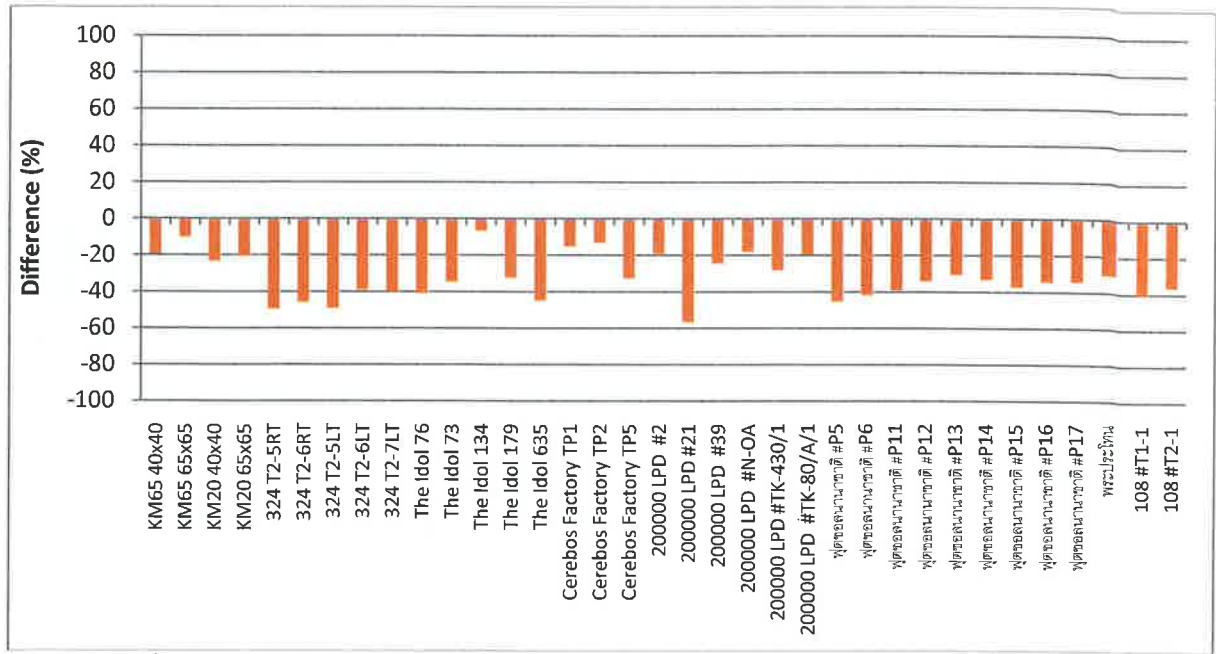
ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุดที่คำนวณได้จากโปรแกรม GRLWEAP กับค่าที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง PDA ในระหว่างการตอกเสาเข็มโดยแสดงในรูปของหน่วยแรงและใน

รูปของร้อยละโดยเทียบกับค่าที่เกิดขึ้นจริง โดยค่าร้อยละจะติดลบเมื่อค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม GRLWEAP น้อยกว่าค่าตรวจวัดจากเครื่อง PDA และจะมีค่าเป็นบวกเมื่อค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม GRLWEAP สูงกว่าค่าตรวจวัดจากเครื่อง PDA

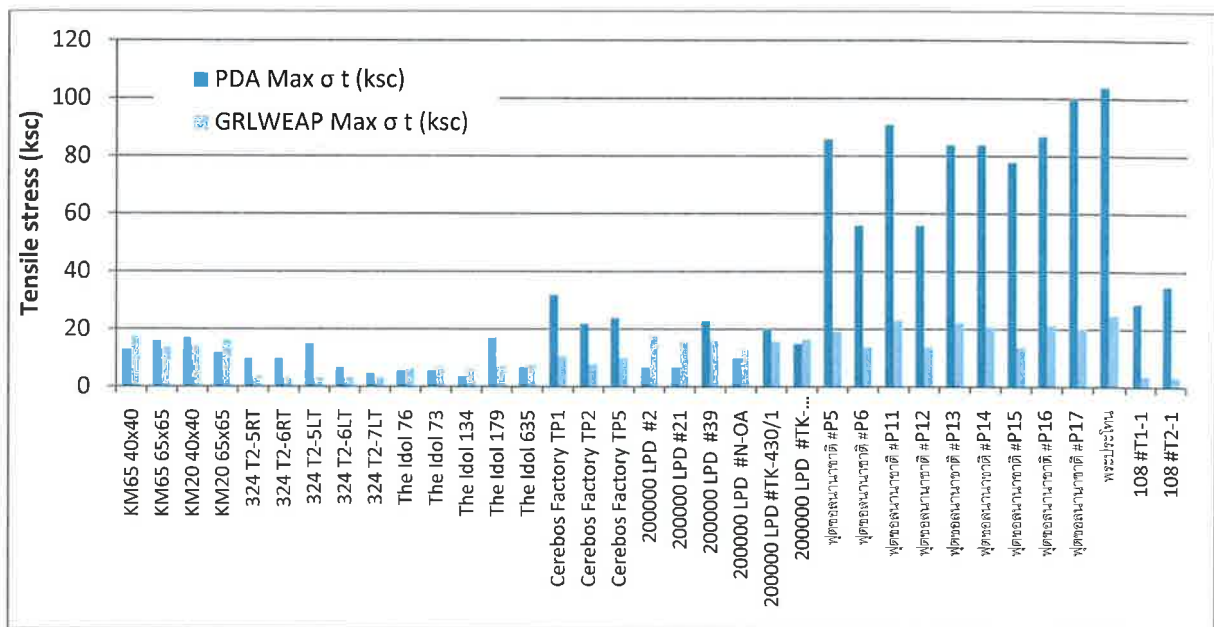
เมื่อทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงกับหน่วยแรงที่ได้จาก GRLWEAP พบว่าหน่วยแรงอัดที่คำนวณได้จากโปรแกรม GRLWEAP น้อยกว่าค่าที่ตรวจวัดจากเครื่อง PDA โดยเฉลี่ย 38 เปอร์เซ็นต์ และหน่วยแรงดึงที่คำนวณได้จากโปรแกรม GRLWEAP น้อยกว่าค่าที่ตรวจวัดจากเครื่อง PDA โดยเฉลี่ย 76 เปอร์เซ็นต์



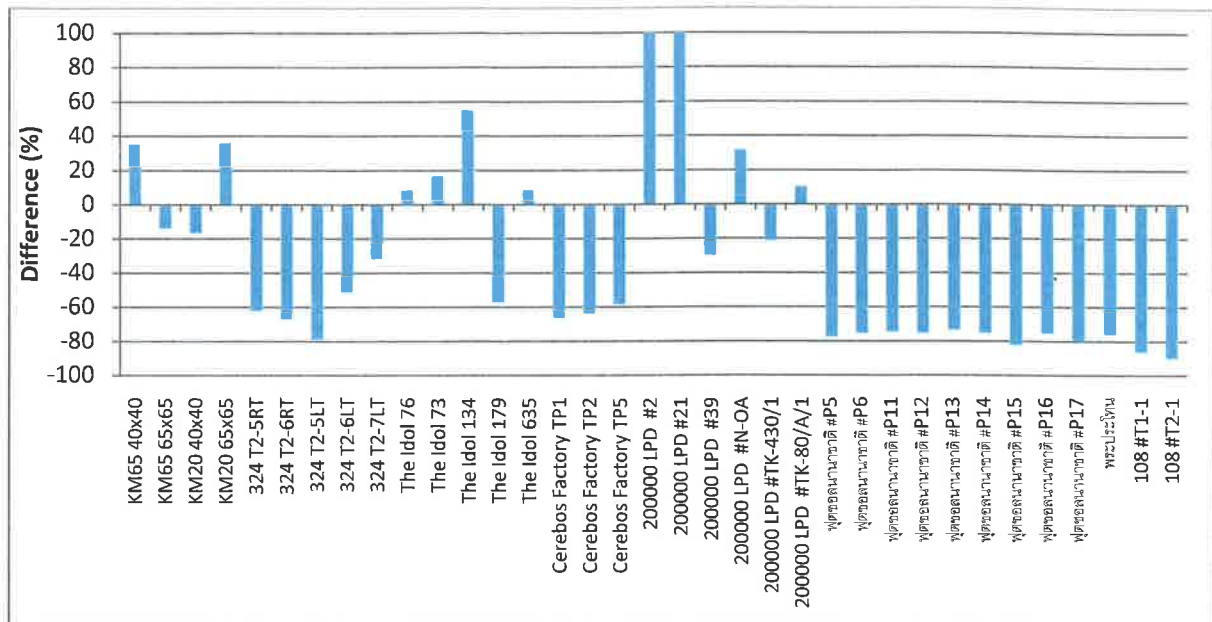
รูปที่ 4-2 ความแตกต่างของหน่วยแรงอัดระหว่างผลตรวจวัดกับการคำนวณ



รูปที่ 4-3 ความแตกต่างของหน่วยแรงอัดระหว่างผลตรวจวัดกับการคำนวณในรูปร้อยละ



รูปที่ 4-4 ความแตกต่างของหน่วยแรงดึงระหว่างผลตรวจวัดกับการคำนวณ



รูปที่ 4-5 ความแตกต่างของหน่วยแรงดึงระหว่างผลตรวจวัดกับการคำนวณในรูปร้อยละ

4.3 การศึกษาอิทธิพลและเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP

เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP ที่มีต่อความแม่นยำในการทำนายหน่วยแรงอัด หน่วยแรงดึง และค่าระยะจมตัวจากการตอกสลิบครั้งสุดท้าย จึงได้ทำการศึกษาเชิงพารามิเตอร์ (Parametric study) โดยปรับเปลี่ยนค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นจากค่าเริ่มต้นที่โปรแกรม GRLWEAP ได้แนะนำไว้สำหรับหมอนรองเสาเข็มไม้อัดซึ่งมีค่าเท่ากับ 210 MPa เป็น 0.5, 0.75, 2.0 และ 3.0 เท่าของค่าเริ่มต้น นอกจากนี้ยังทดลองปรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหมอนรองเสาเข็มเป็น 300 MPa และปรับลดความหนาของหมอนรองเสาเข็มเป็น 2/3 เท่าของค่าเริ่มต้นเพื่อจำลองผลจากการยุบตัวจากการใช้งานตามคำแนะนำของ Rausche et al. (2004) แล้วเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้กับค่าที่ตรวจวัดได้จริง

จากการวิเคราะห์พบว่า การปรับค่าตามคำแนะนำของ Rausche ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุด โดยหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นจริงมีค่ามากกว่าหน่วยแรงอัดที่ได้จากการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 24 เปอร์เซ็นต์ และหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นสูงกว่าหน่วยแรงดึงที่ได้จากการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 69 เปอร์เซ็นต์

4.4 การวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการออกแบบการตอกโดยใช้โปรแกรม GRLWEAP

การวิเคราะห์ในการศึกษานี้กระทำโดยใช้ข้อมูลชั้นดินจริงของแต่ละโครงการเพื่อวิเคราะห์หาค่า blow และหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้น เมื่อปรับเปลี่ยนน้ำหนักของตุ้มตอกเสาเข็ม และระยะยกตอกในช่วงที่มาตรฐานของ

หน่วยงานต่างๆ ได้นำเสนอไว้ ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์โดยใช้ดัมตอกเสาเข็มที่หนักเป็น 0.5, 0.75, 1.0 และ 2.0 เท่า ของน้ำหนักเสาเข็ม และระยะยกตอกตั้งแต่ 0.2 เมตรจนถึง 2.0 เมตร โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 เมตร

ค่าที่ใช้ในการพิจารณาในการออกแบบการตอกเสาเข็มได้แก่ หน่วยแรงที่จะต้องไม่เกิดกำลังของคอนกรีต ($\sigma_c = 0.6 f'_c = 210 \text{ ksc}$, $\sigma_t = 1.19 \sqrt{f'_c} = 22.2 \text{ ksc}$) และ ค่า blow ซึ่งจะต้องมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถควบคุมงานได้ง่าย (ไม่น้อยจนเกินไป) และไม่มากจนทำให้เสาเข็มชำรุด (มีค่า blow สูงจนเกินไป) ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดค่า blow ที่เหมาะสมให้อยู่ในช่วง 24 – 100 ครั้งต่อ 30 เซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามคำแนะนำของโปรแกรม GRLWEAP และสอดคล้องกับค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานอื่นๆ

เมื่อรวบรวมผลจากการวิเคราะห์ทุกโครงการโดยแยกเป็นโครงการที่อยู่ในพื้นที่ดินทรายและโครงการที่อยู่ในพื้นที่ดินเหนียวสามารถสรุปช่วงของระยะยกดัมตอกเสาเข็มและน้ำหนักของดัมตอกเสาเข็มที่ทำให้ค่า blow อยู่ในช่วงที่ควบคุมงานได้ง่ายและมีหน่วยแรงไม่เกินค่าที่ยอมให้ของเสาเข็มได้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ระยะยกดัมตอกเสาเข็มสำหรับดัมตอกเสาเข็มขนาดต่างๆ ในพื้นที่ดินทรายและดินเหนียว

น้ำหนักดัมตอกเสาเข็ม	ช่วงของระยะยกดัมตอกเสาเข็ม	
	โครงการที่เป็นดินทราย	โครงการที่เป็นดินเหนียว
0.7 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม	1.2-2.0 m	1.2-1.6 m
1.0 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม	0.8-1.8 m	0.8-1.2 m
1.5 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม	0.6-1.4 m	0.6-1.2 m
2.0 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม	0.4-1 m	0.4-0.8 m

4.5 สรุปผลการศึกษาและข้อแนะนำในการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบการตอกเสาเข็ม

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากการวิเคราะห์ที่ได้ดำเนินการในครั้งนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

4.5.1 ประสิทธิภาพของการตอก

จากการตรวจวัดค่าพลังงานการตอกจากเครื่อง PDA พบว่าประสิทธิภาพการตอกของอุปกรณ์ตอกเสาเข็มแปรเปลี่ยนไปตามโครงการ โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 29 เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดเท่ากับ 94 เปอร์เซ็นต์ โดยมีประสิทธิภาพการตอกโดยเฉลี่ยเท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์

4.5.2 การเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงกับหน่วยแรงที่คำนวณได้จากโปรแกรม GRLWEAP

เมื่อทำการเปรียบเทียบหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงกับหน่วยแรงที่คำนวณได้จาก GRLWEAP ในกรณีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามคำแนะนำของโปรแกรมพบว่า หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นจริงมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงอัดที่คำนวณได้จาก GRLWEAP โดยเฉลี่ยเท่ากับ 38 เปอร์เซ็นต์ และหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นจริงมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงดึงที่คำนวณได้จาก GRLWEAP โดยเฉลี่ยเท่ากับ 76 เปอร์เซ็นต์

4.5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่แนะนำสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GRLWEAP

เมื่อวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการตรวจวัดในสนามโดยปรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหมอนรองเสาเข็มเป็น 0.5, 0.75, 2 และ 3 เท่าของค่าที่ GRLWEAP แนะนำไว้สำหรับไม้อัด (Elastic modulus = 210 MPa) รวมทั้งเมื่อวิเคราะห์โดยการลดความหนาของหมอนรองเสาเข็มเป็น 2/3 ของความหนาเริ่มต้นและปรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหมอนรองเสาเข็มเป็น 300 MPa เพื่อแสดงถึงการอัดตัวแน่นหลังจากถูกตอกตามคำแนะนำของ Rausche et al. (2004) พบว่าการปรับค่าตามคำแนะนำของ Rausche ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุดโดยหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นจริงมีค่ามากกว่าหน่วยแรงอัดที่ได้จากการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 24 เปอร์เซ็นต์ และหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นสูงกว่าหน่วยแรงดึงที่ได้จากการคำนวณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 69 เปอร์เซ็นต์ สำหรับระยะจมน้ำจากการตอก 10 ครั้งสุดท้ายพบว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงต่างจากค่าที่คำนวณได้โดยเฉลี่ยเท่ากับ 76 เปอร์เซ็นต์

4.5.4 แนวทางในการออกแบบการตอกด้วยโปรแกรม GRLWEAP

จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปเป็นข้อแนะนำในการวิเคราะห์เพื่อการออกแบบการตอกเสาเข็มได้ดังนี้

- 1) ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหมอนรองเสาเข็มไม้อัดเท่ากับ 300 MPa โดยกำหนดความหนาของหมอนรองเท่ากับ 2/3 ของความหนาเริ่มต้นเพื่อจำลองพฤติกรรมของหมอนรองที่ยุบตัวหลังจากการใช้งานและเริ่มต้นวิเคราะห์การตอกโดยใช้ค่าที่แนะนำในตารางต่อไปนี้

น้ำหนักดัดตอกเสาเข็ม	ช่วงของระยะยกดัดตอกเสาเข็ม	
	โครงการที่เป็นดินทราย	โครงการที่เป็นดินเหนียว
0.7 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม	1.2-2.0 m	1.2-1.6 m
1.0 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม	0.8-1.8 m	0.8-1.2 m
1.5 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม	0.6-1.4 m	0.6-1.2 m
2.0 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม	0.4-1 m	0.4-0.8 m

2) ปรับแต่งพารามิเตอร์ตามความเหมาะสมตามคำแนะนำต่อไปนี้

- หากค่าblowมีค่าสูงมาก ณ กำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ต้องการ แสดงว่าดัดเสาเข็มอาจมีขนาดเล็กไป ให้ทดลองวิเคราะห์ใหม่โดยใช้ดัดเสาเข็มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยทั่วไปค่าblowที่เหมาะสมสำหรับเสาเข็มแบบเสียดทานและเสาเข็มแบบแบกทานควรมีค่าต่ำกว่า 100 ครั้งต่อ 30 ซม หรือ 240 ครั้งต่อเมตร ตามลำดับ
- หากค่าblowมีค่าต่ำมาก ณ กำลังรับน้ำหนักสูงสุดที่ต้องการ จะทำให้การตรวจสอบคุณภาพในขณะก่อสร้างทำได้ยาก ควรปรับเปลี่ยนไปใช้ดัดเสาเข็มที่มีขนาดเล็กลงและวิเคราะห์ใหม่ โดยทั่วไปจำนวนดัดที่เหมาะสมควรมีค่าสูงกว่า 24 ครั้งต่อ 30 เซนติเมตร
- หากค่าblowอยู่ในช่วงที่เหมาะสมแต่หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเกินไป ให้ทดลองวิเคราะห์ใหม่โดยใช้วิธีการต่างๆ ที่ทำให้พลังงานการตอกต่ำลง เช่น ใช้ดัดเสาเข็มที่มีขนาดเล็กลง เปลี่ยนระยะยกดัดให้น้อยลง ใช้ดัดเสาเข็มที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีระยะปล่อยตกน้อยลง หรือ ใช้หมอนรองที่หนาขึ้นหรือนิ่มขึ้น เป็นต้น
- ในกรณีที่ค่าblowมีค่าต่ำแต่มีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นสูงมาก เสาเข็มคอนกรีตอาจเกิดความเสียหายขณะตอกได้ ในกรณีนี้ให้ทดลองวิเคราะห์ใหม่โดยปรับหมอนรองเสาเข็มให้หนาขึ้น ลดระยะปล่อยตกลง หรือ ใช้ดัดเสาเข็มที่หนักขึ้น เป็นต้น
- ในกรณีที่ค่าblowสูงและมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นสูงมาก เสาเข็มคอนกรีตก็อาจจะเสียหายในขณะตอกได้เช่นกัน ในกรณีนี้ให้ทดลองวิเคราะห์ใหม่โดยใช้ดัดเสาเข็มที่หนักขึ้น
- หากค่าblowและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมาก ควรปรับขนาดของเสาเข็มให้ใหญ่ขึ้น หรือ ใช้เสาเข็มที่ทำด้วยวัสดุที่มีกำลังสูงขึ้น

บทที่ 5 งานศึกษาสังเกตการณ์และเก็บข้อมูลการดำเนินการควบคุม ตรวจสอบและทดสอบเสาเข็ม

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการศึกษาและสังเกตการณ์การดำเนินการควบคุม ตรวจสอบ และทดสอบเสาเข็ม โดยรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลต่างๆ และจากการปฏิบัติงานในพื้นที่ก่อสร้างต่างๆ และโรงงานผลิตเสาเข็ม แหล่งข้อมูลที่ได้รวบรวมประกอบด้วยหนังสือ เอกสารเผยแพร่ และมาตรฐานของหน่วยงานต่างๆ เช่น เอกสารเผยแพร่ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (เสาเข็ม และการคำนวณการรับน้ำหนักของเสาเข็ม, พ.ศ.2547), มาตรฐานงานเสาเข็ม มทข.106-2545 กรมโยธาธิการและผังเมือง, มาตรฐานงานเสาเข็ม มยผ. 1106-52, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.396-2549 เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จ, เสาเข็ม; ชมรมวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คู่มือควบคุมงานก่อสร้างสะพาน และท่อเหลี่ยม คอนกรีตเสริมเหล็กของสำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวง, รายงานผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก และการทดสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มจากหน่วยงานต่างๆ เป็นต้น

นอกจากการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ข้างต้นแล้ว ที่ปรึกษายังได้ออกเก็บข้อมูลการผลิตเสาเข็มจากโรงงานผลิตเสาเข็มและการตอกเสาเข็มในสถานที่ก่อสร้างจริงเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลในรูปของภาพถ่ายและวิดีโอ พร้อมจัดทำสื่อการสอนเป็นไฟล์ PowerPoint โดยแทรกรูปภาพและวิดีโอจากการสังเกตการณ์เข้าไปในสื่อการสอนด้วย

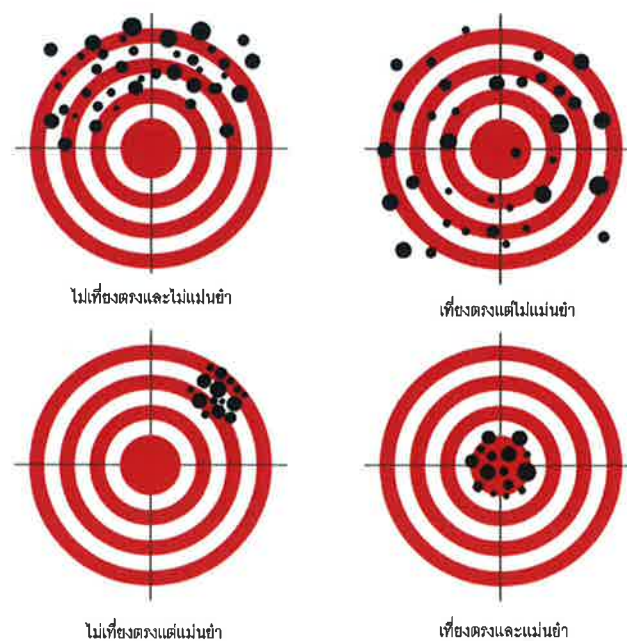
สำหรับสื่อการสอนที่ได้จัดทำขึ้นประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

- คำจำกัดความของฐานรากเสาเข็ม
- ประเภทของเสาเข็มตอก
- การออกแบบเสาเข็ม
- กระบวนการผลิตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จ
- การตรวจสอบและทดสอบเสาเข็ม
- การขนส่งเสาเข็มในประเทศไทย
- การควบคุมงานก่อสร้างเสาเข็มตอก และการตอกเสาเข็ม
- ขั้นตอนและวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม
- ปัญหา และอุปสรรคของการควบคุมงานตอกเสาเข็มในงานก่อสร้าง

บทที่ 6 งานพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ใช้ใน งานของกรมทางหลวง

ที่ปรึกษาได้ดำเนินการศึกษาและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธี Static method และสูตรตอกเสาเข็ม (Pile driving formula) เช่น Engineering News formula, Hiley's formula, Janbu's formula, Gate's formula เป็นต้น และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มแบบ Dynamic load test ด้วยเครื่องมือ PDA และวิธี Static pile load test และศึกษาหาความสัมพันธ์จากข้อมูลที่ได้และให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแนวทางการกำหนดวิธีการตอกเสาเข็มและวิธีประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่เหมาะสมต่อการใช้งานของกรมทางหลวง

แนวทางที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงและแม่นยำของวิธีการต่างๆ โดยความเที่ยงตรงในที่นี้หมายถึงความสามารถในการทำนายโดยเฉลี่ยมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิติศาสตร์ซึ่งอาจมีการแกว่งตัวของการทำนายสูง (scattering) ในทางกลับกันความแม่นยำในที่นี้หมายถึงว่าผลการทำนายจากวิธีการนั้นๆ เกาะกลุ่มกัน (repeatability) ถึงแม้ว่าผลเฉลี่ยของการทำนายนั้นจะไม่ตรงกับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิติศาสตร์ เมื่อแจกแจงความสามารถในการทำนายออกเป็นกรณีต่างๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 ความสามารถในการทำนายแบบต่างๆ

นอกจากการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงและแม่นยำแล้วยังได้วิเคราะห์หาค่าตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานของวิธีการประเมินกำลังฯ ต่างๆ ด้วย ซึ่งค่าตัวคูณลดดังกล่าวจำเป็นสำหรับการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load resistance factor design, LRFD) ของ AASHTO ในการดำเนินการดังกล่าวจำเป็นจะต้องทราบลักษณะการกระจายตัวของผลการทำนายด้วยวิธีการประเมินกำลังฯ ต่างๆ ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยวิธีการทางสถิติพบว่าเป็นแบบลิค-นอร์มอล ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของนักวิจัยอื่นๆ ที่ได้ศึกษาไว้เช่นกัน

ผลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้สรุปเป็นตารางที่แสดงถึงความเที่ยงตรงและแม่นยำของวิธีการประเมินกำลังฯ ต่างๆ รวมทั้งค่าตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทาน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเลือกใช้อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมต่อไปได้

6.1 การเก็บข้อมูล

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลรายงานการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์จากเสาเข็มที่ตอกในประเทศไทยจำนวนทั้งสิ้น 37 ต้น ซึ่งแบ่งเป็นการตอกในพื้นที่ดินเหนียวจำนวน 24 ต้น และการตอกในพื้นที่ดินทรายจำนวน 13 ต้น โดยเสาเข็มทั้งหมดนี้มีการบันทึก รายงานการตอกเสาเข็ม (pile driving record) และมีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์อยู่ด้วย

สำหรับเสาเข็มจำนวน 24 ต้น ซึ่งตอกในพื้นที่ดินเหนียวแบ่งเป็นเสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน 19 ต้น หน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง 1 ต้น หน้าตัดกลมกลวง 3 ต้น และหน้าตัดรูปไข่ 1 ต้น สำหรับเสาเข็มจำนวน 13 ต้น ซึ่งตอกในพื้นที่ดินทรายแบ่งเป็นเสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมตัน 1 ต้น หน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง 1 ต้น และหน้าตัดกลมกลวง 11 ต้น

6.2 การประมวลผลข้อมูล

ข้อมูลรายงานการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ถูกนำมาคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยใช้วิธี Mazurkiewicz และ Davisson เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับผลการประเมินด้วยวิธีการอื่นๆ หลังจากนั้นได้นำเอาระเบียบการตอกของเสาเข็มต้นดังกล่าวมาคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยใช้สูตรตอกเสาเข็มแต่ละสูตร แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ข้างต้นและผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์

6.3 ความเที่ยงตรงของวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต่างๆ

การเปรียบเทียบความเที่ยงตรงทำได้จากการหาค่าเอนเอียงในการทำนายกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแต่ละต้น (λ_{R_i}) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าทำนายจากการทดสอบแบบสถิติศาสตร์กับค่าทำนายจากวิธีการประเมินกำลังฯ ต่างๆ เมื่อนำค่าเอนเอียงที่คำนวณได้จากเสาเข็มแต่ละต้นมาหาค่าเฉลี่ยจะได้เป็นค่าเอนเอียงเฉลี่ย (λ_R) ซึ่งจะถูกนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลต่อไป

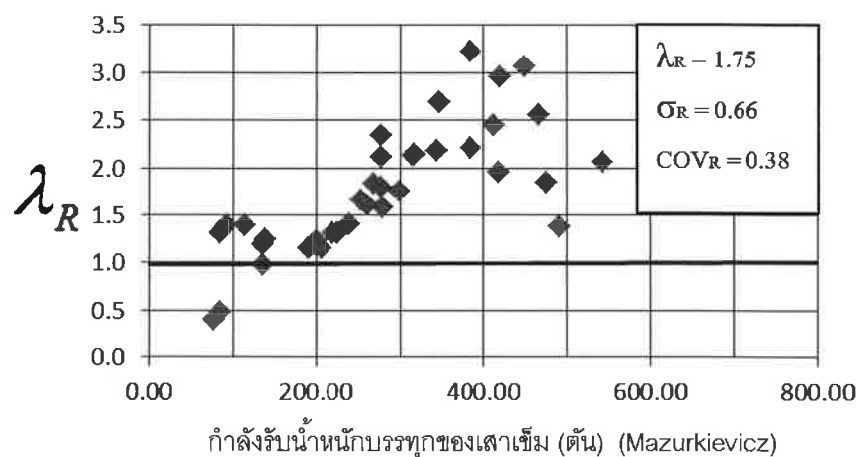
$$\lambda_{R_i} = \frac{R_m}{R_n} \quad (6-1)$$

$$\lambda_R = \frac{1}{N} \cdot \sum \lambda_{R_i} \quad (6-2)$$

เมื่อ R_m คือ ผลการทดสอบฯ แบบสถิติศาสตร์ที่ประเมินด้วยวิธี Mazurkiewicz หรือ Davisson

R_n คือ ค่าทำนายจากวิธีการประเมินกำลังฯ ต่างๆ

N คือ จำนวนของเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์



รูปที่ 6-2 ค่าเอนเอียงของสูตร Hiley เทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ประเมินด้วยวิธี Mazurkiewicz

ตัวอย่างของค่าเอนเอียงของสูตรตอกเสาเข็ม Hiley เทียบกับผลการทดสอบฯ แบบสถิติที่ประเมินด้วยวิธี Mazurkiewicz แสดงได้ดังรูปที่ 6-2 โดยแกน X คือกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิติศาสตร์ และแกน Y คือค่าเอนเอียง จากกราฟจะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่อยู่เหนือเส้นตรง $Y = 1$ ซึ่งหมายความว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุก

ของเสาเข็มที่คำนวณจากสูตรตอกเข็ม Hiley มีค่าน้อยกว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.75 เท่า

6.4 ความแม่นยำของวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มต่างๆ

การประเมินกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่มีค่าเอนเอียงสูงไม่ได้หมายความว่าวิธีการนั้นไม่เหมาะสมกับการใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากหากสามารถปรับแก้ผลการคำนวณโดยการคูณด้วยค่าเอนเอียงแล้วจะทำให้ผลการคำนวณโดยเฉลี่ยดีขึ้น ดังนั้นค่าเอนเอียงจึงเป็นเพียงส่วนประกอบหนึ่งในการพิจารณาเท่านั้น ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญในการตัดสินใจว่าจะเลือกสูตรตอกเสาเข็มใดมาใช้คือสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของข้อมูลซึ่งเป็นดัชนีที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูล ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของวิธีการประเมินใดยิ่งมีค่ามากจะแสดงว่าวิธีการประเมินนั้นมีการกระจายตัวสูงหรือมีความแม่นยำต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนคำนวณได้จากการหารค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วยค่าเฉลี่ยดังนี้

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum(\lambda_{R_i} - \lambda_R)^2}{N-1}} \quad (6-3)$$

$$COV_R = \frac{\sigma_R}{\lambda_R} \quad (6-4)$$

เมื่อ σ_R คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเอนเอียง

COV_R คือ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าเอนเอียง

6.5 ตัวคูณลดค่าแรงต้านทาน (Resistance factor)

นอกจากการหาค่าเบี่ยงเบนและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนข้างต้นแล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ยังได้วิเคราะห์หาค่าตัวคูณลดค่าของวิธีการประเมินฯ ต่างๆ ตามมาตรฐานการออกแบบโดยวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุกหรือ Load resistance factor design (LRFD) ของ AASHTO ซึ่งได้เริ่มใช้ในปี 1994 ในการออกแบบตามวิธีดังกล่าวจะใช้ตัวคูณเพิ่มกับแรงกระทำและใช้ตัวคูณลดกับแรงต้านทานเพื่อคำนึงถึงความไม่แน่นอนที่อาจจะเกิดขึ้นซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\phi R_n \geq \eta \sum \gamma_i Q_i \quad (6.1)$$

เมื่อ ϕ คือค่าตัวคูณลดค่าของแรงต้านทาน

R_n คือกำลังของแรงต้านทานหรือกำลังรับน้ำหนัก

η คือค่าปรับของน้ำหนักเกี่ยวกับความยืดหยุ่น

γ_i คือค่าตัวคูณเพิ่มค่าของแรงกระทำ

Q_i คือแรงกระทำประเภทต่างๆ

เมื่อจัดสมการ(6.1) ใหม่ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด (Limit state function, Z) จะเขียนได้ดังสมการ(6.2) โดยโครงสร้างที่ออกแบบจะอยู่ในสถานะไม่ปลอดภัยเมื่อค่าของฟังก์ชันน้อยกว่าศูนย์และอยู่ในสถานะปลอดภัยเมื่อค่าของฟังก์ชันมากกว่าศูนย์

$$Z = \phi R_n - \eta \sum \gamma_i Q_i \quad (6.2)$$

ตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO จะสามารถคำนวณได้จากสมการ(6.3)

$$\phi = \frac{\lambda_R (\gamma_D \frac{Q_D}{Q_L} + \gamma_L) \sqrt{\frac{1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2}{1 + COV_R^2}}}{(\lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{QL}) \exp(\beta_T \sqrt{\ln(1 + COV_R^2)(1 + COV_{QD}^2 + COV_{QL}^2)})} \quad (6.3)$$

เมื่อ ϕ คือค่าตัวคูณลดค่าของแรงต้านทาน

λ_R คือค่าเอนเอียงของแรงต้านทาน (Bias)

γ_D คือค่าตัวคูณลดค่าของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ใช้ 1.25

γ_L คือค่าตัวคูณลดค่าของน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ใช้ 1.75

$\frac{Q_D}{Q_L}$ คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุกคงที่กับน้ำหนักบรรทุกจร ใช้ 2.0

COV_{QD} คือค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวนของน้ำหนักบรรทุกคงที่ ใช้ 0.1

COV_{QL} คือค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวนของน้ำหนักบรรทุกจร ใช้ 0.2

COV_R คือค่าสัมประสิทธิ์แปรปรวนของแรงต้านทาน (ค่าจากสูตรตอกเสาเข็ม)

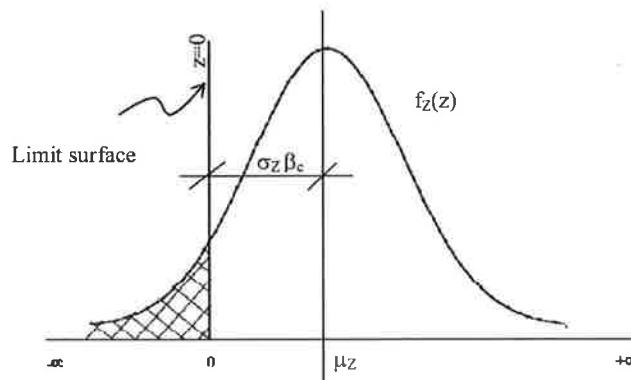
λ_{QD} คือ ค่าเอนเอียงของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Bias) ใช้ 1.05

λ_{QL} คือ ค่าเอนเอียงของน้ำหนักบรรทุกจร (Bias) ใช้ 1.15

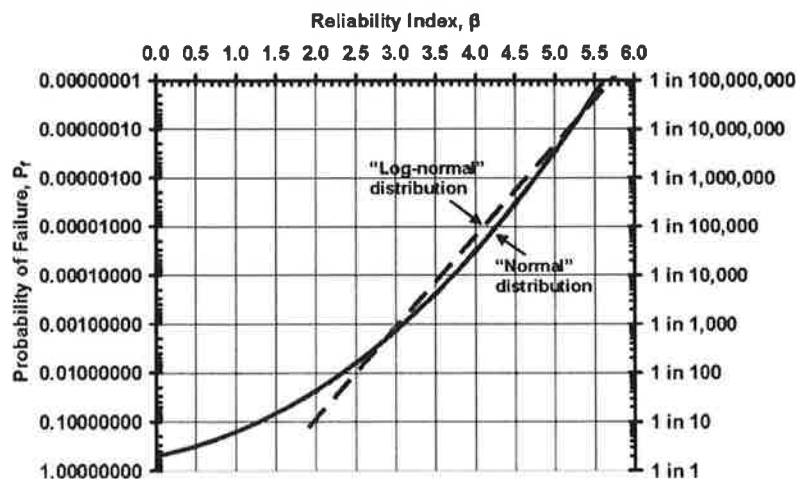
β_T คือ ดัชนีความเชื่อมั่นที่ต้องการ

ตัวแปรบางส่วนในสมการ(6.3)จะเกี่ยวข้องกับค่าสถิติของแรงกระทำซึ่งไม่ได้อยู่ในขอบเขตของการศึกษา
นี้จึงได้ใช้ค่าตามผลการศึกษาของ AASHTO ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้มี 3 ค่าคือ λ_R และ
 COV_R ซึ่งเป็นค่าเอนเอียงและค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของแรงต้านทานที่คำนวณจากวิธีต่างๆ และดัชนี
ความเชื่อมั่น (β_T) ซึ่งเป็นดัชนีที่คล้ายกับอัตราส่วนความปลอดภัยตามการออกแบบวิธีหน่วยแรงใช้งาน

Cornell (1969) ได้นิยามดัชนีความเชื่อมั่นว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าคาดหวังกับส่วนเบี่ยงเบน
มาตรฐานของฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเชื่อมั่นกับค่าต่างๆ ของฟังก์ชันสถานะ
ขีดจำกัดแสดงได้ดังรูปที่ 6-3 เมื่อกำหนดค่าของดัชนีความเชื่อมั่นที่ต้องการแล้วความน่าจะเป็นที่จะเกิดการ
วิบัติสามารถประมาณได้จากสมการที่เสนอโดย Rosenblueth and Esteva (1972) ซึ่งใช้ได้เมื่อดัชนีความ
เชื่อมั่นมีค่าระหว่าง 2 ถึง 6



รูปที่ 6-3 ดัชนีความเชื่อมั่นกับค่าคาดหวังและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันสถานะขีดจำกัด



รูปที่ 6-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นของการวิบัติกับ β_T (Rosenblueth & Esteva, 1972)

6.6 ผลการวิเคราะห์

6.6.1 ค่าเอนเอียงและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของวิธีการประเมินฯ ต่างๆ

6.6.1.1 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตที่ประเมินโดยวิธี Mazurkiewicz

ค่าเอนเอียงและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มวิธีการต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตที่ประเมินโดยวิธี Mazurkiewicz สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6-1 เมื่อพิจารณาโดยไม่แยกชนิดของดิน พบว่าค่าทำนายจากวิธีต่างๆ ที่นำมาวิเคราะห์ส่วนใหญ่มีค่าเอนเอียงมากกว่า 1 ซึ่งหมายถึงค่าทำนายจากวิธีต่างๆ นั้นต่ำกว่าค่าจากการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ ยกเว้นสูตรตอกเสาเข็ม Eytelwein, Load bearing capacity และ Danish ซึ่งให้ค่าทำนายมากกว่าค่าจากการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ซึ่งเป็นด้านที่ไม่ปลอดภัย

เมื่อพิจารณาจากค่าเอนเอียงพบว่าวิธีการประเมินที่ทำนายได้ใกล้เคียงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตคือ การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์, สูตรตอกเสาเข็มของ Janbu และ สูตรตอกเสาเข็มของ Danish ตามลำดับ สำหรับสูตรตอกเสาเข็ม Hiley และ ENR นั้นให้ค่าในเชิงอนุรักษ์ และมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณจากการวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิต โดยมีค่าเอนเอียงเท่ากับ 1.75

สำหรับความแปรปรวนของผลการทำนายนั้นพบว่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของแต่ละวิธีต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 0.30-0.50 ยกเว้นสูตรตอกเสาเข็ม Redtenbacher, Eytelwein และวิธีคำนวณจากการวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิต (Static equilibrium method) ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่วงดังกล่าว ส่วน 3 วิธีที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนต่ำที่สุด คือ การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์, สูตรตอกเสาเข็ม ENR และ สูตรตอกเสาเข็ม Modified ENR

จากข้อมูลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์เป็นวิธีการที่ให้ค่าเที่ยงตรงและแม่นยำกว่าสูตรตอกเสาเข็มหรือวิธีคำนวณจากการวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิต ในกรณีที่ใช้สูตรตอกเสาเข็มควรใช้สูตรตอกเสาเข็มแบบ ENR ที่ปรับด้วยค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 1.83 ซึ่งจะทำให้ได้ผลการทำนายที่มีความแปรปรวนต่ำและให้ค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์มากที่สุด สำหรับการวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิตมีแนวโน้มที่จะให้ค่าเชิงอนุรักษ์และมีการแปรปรวนค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลจากชนิดของชั้นดินที่มีต่อความสามารถในการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม พบว่า ชนิดของดินทำให้ค่าเอนเอียงของการทำนายเปลี่ยนแปลงไปบ้างแต่ก็ไม่ได้ทำให้ลำดับความเที่ยงตรงเปลี่ยนแปลงไปมากนัก เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นเมื่อตอกเสาเข็มในพื้นที่ดินเหนียวและดินทรายพบว่าการวิเคราะห์สมมูลของแรงเชิงสถิติมีความแตกต่างกันมากที่สุด โดยพบว่าให้ผลทำนายสำหรับชั้นดินเหนียวดีแต่ค่าเอนเอียงจะสูงขึ้นเมื่อใช้สำหรับเสาเข็มที่ตอกในชั้นดินทราย

สำหรับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์และสูตรตอกเสาเข็มส่วนใหญ่พบว่า อิทธิพลจากชนิดของชั้นดินมีค่าไม่มาก โดยสูตรตอกเสาเข็มแบบ Dutch, ENR, Gates, Pacific coast และ Redtenbacher เป็นสูตรที่มีความแตกต่างของค่าเอนเอียงปานกลาง และสูตร Hiley, Janbu, Danish Eytelwein และ Modified ENR เป็นสูตรที่มีความแตกต่างของค่าเอนเอียงน้อย

ตารางที่ 6-1 ค่าเอนเอียงและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของแต่ละวิธีเมื่อเทียบกับวิธี Mazurkiewicz

Methods	Bias (λ_R)			Coefficient of Variation (COV_R)		
	All	Clay	Sand	All	Clay	Sand
Hiley	1.75	1.77	1.71	0.38	0.42	0.29
Redtenbacher	1.29	1.38	1.14	0.52	0.50	0.56
Pacific coast	1.54	1.64	1.34	0.47	0.47	0.43
Dutch	4.85	5.14	4.33	0.39	0.42	0.30
Eytelwein	0.53	0.52	0.53	0.59	0.51	0.73
ENR	1.83	1.68	2.12	0.28	0.30	0.21
Modified ENR	2.89	2.90	2.89	0.32	0.35	0.27
Janbu	1.03	1.05	0.99	0.44	0.45	0.44
Gates	2.53	2.38	2.81	0.40	0.43	0.33
Danish	0.93	0.92	0.96	0.42	0.44	0.41
Dynamic pile load test	1.00	0.96	1.08	0.22	0.26	0.13
Static equilibrium method	1.69	1.35	2.31	0.57	0.49	0.49

6.6.1.2 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตที่ประเมินโดยวิธี Davisson

ค่าเอนเอียงและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มวิธีการต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตที่ประเมินโดยวิธี Davisson สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับหัวข้อก่อนหน้านี้

เนื่องจากกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ประเมินโดยวิธี Davisson ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ประเมินโดยวิธี Mazurkiewicz ดังนั้นวิธีการประเมินกำลังที่มีค่าเบี่ยงเบนใกล้กับ 1 ในหัวข้อก่อนหน้านี้ก็จะมีค่าเบี่ยงเบนต่ำกว่า 1 เมื่อประเมินโดยวิธี Davisson

เมื่อพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนพบว่าวิธีการประเมินที่ทำนายได้ใกล้เคียงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตคือ สูตรตอกเสาเข็มของ Janbu, การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ และสูตรตอกเสาเข็มของ Danish ตามลำดับ โดยวิธีการประเมินกำลังทั้งสามนี้ให้ค่าเบี่ยงเบนที่ต่ำกว่า 1 ทั้งสิ้นหรือกล่าวได้ว่าผลการประเมินกำลังด้วยวิธีทั้งสามจะให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ นอกจากวิธีการประเมินกำลังทั้งสามวิธีข้างต้นแล้วพบว่าสูตรตอกเสาเข็มแบบ Eytelwein ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์โดยมีค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.47 ซึ่งแตกต่างจาก 1 ค่อนข้างมาก สำหรับวิธีการประเมินกำลังอื่นๆ พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมากกว่า 1 ทั้งสิ้นหรือให้ค่าในด้านที่ปลอดภัย

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นเมื่อตอกเสาเข็มในพื้นที่ดินเหนียวและดินทรายพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ โดยการวิเคราะห์สมมูลของแรงเชิงสถิตยังคงเป็นวิธีที่ให้ค่าที่แตกต่างกันมากที่สุดโดยให้ค่าที่อนุรักษ์มากขึ้นเมื่อเสาเข็มตอกในดินทราย สำหรับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์และสูตรตอกเสาเข็มส่วนใหญ่พบว่าความแตกต่างเนื่องจากชั้นดินมีค่าไม่มาก โดยสูตรตอกเสาเข็มแบบ Dutch, ENR, Gates, Pacific coast และ Redtenbacher เป็นสูตรที่มีความแตกต่างปานกลาง และสูตร Hiley, Janbu, Danish Eytelwein และ Modified ENR เป็นสูตรที่มีความแตกต่างน้อย

ตารางที่ 6-2 ค่าเอนเอียงและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของแต่ละวิธีเมื่อเทียบกับวิธี Davisson

Methods	Bias (λ_R)			Coefficient of Variation (COV_R)		
	All	Clay	Sand	All	Clay	Sand
Hiley	1.57	1.59	1.54	0.43	0.48	0.31
Redtenbacher	1.17	1.24	1.03	0.57	0.56	0.59
Pacific coast	1.39	1.48	1.17	0.52	0.53	0.46
Dutch	4.35	4.59	3.91	0.44	0.48	0.33
Eytelwein	0.47	0.47	0.48	0.64	0.57	0.76
ENR	1.64	1.49	1.91	0.33	0.36	0.24
Modified ENR	2.59	2.58	2.60	0.37	0.41	0.30
Janbu	0.93	0.94	0.90	0.49	0.51	0.47
Gates	2.27	2.13	2.53	0.45	0.50	0.36
Danish	0.84	0.83	0.86	0.47	0.50	0.44
Dynamic pile load test	0.89	0.85	0.97	0.27	0.32	0.13
Static equilibrium method	1.52	1.21	2.09	0.61	0.54	0.52

6.6.2 ตัวคูณลดค่าสำหรับแรงต้านทาน

ถึงแม้ว่าการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์และสูตรตอกเสาเข็มต่างๆ ที่ปรับแก้ด้วยค่าเบี่ยงเบนแล้วจะสามารถให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์ แต่ก็ยังมีความหมายเชิงสถิติว่าโอกาสที่ผลการคำนวณจะให้ค่าในด้านที่ไม่ปลอดภัยมีมากพอๆ กับด้านที่ปลอดภัย ดังนั้นในการใช้งานจึงควรจะต้องต้องปรับลดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ประเมินได้ลงอีกเพื่อให้โอกาสที่จะเกิดผลในด้านที่ไม่ปลอดภัยลดลงจนอยู่เหลือน้อยมากและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ค่าที่ปรับลดในตอนท้ายนี้อาจจะเรียกว่าอัตราส่วนปลอดภัยเสริม ในขณะที่ค่าเบี่ยงเบนที่ได้จากการวิเคราะห์ในขั้นแรกอาจจะเรียกได้ว่าอัตราส่วนปลอดภัยแฝง และเมื่อรวมผลจากการปรับแก้ทั้งสองเข้าด้วยกันก็จะได้อัตราส่วนปลอดภัยที่เหมาะสมกับวิธีการต่างๆ ต่อไป

ในการที่จะปรับลดผลการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากวิธีต่างๆ ด้วยอัตราส่วนปลอดภัยเสริมนั้น จำเป็นจะต้องทราบลักษณะการกระจายตัวของผลการทำนาย เช่น เมื่อผลทำนายมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ

(Normal distribution) โอกาสที่ผลทำนายจะอยู่ในช่วง ± 1 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะเท่ากับร้อยละ 68 ความสัมพันธ์เชิงสถิติเช่นนี้ทำให้ทราบโอกาสที่จะเกิดผลในด้านที่ไม่ปลอดภัยเมื่อปรับลดผลลงที่ระดับต่างๆ

จากการศึกษาของนักวิจัยอื่นๆ พบว่าผลการประเมินกำลังฯ จากวิธีต่างๆ มีลักษณะการกระจายตัวต่างจากการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) โดยพบว่าลักษณะการกระจายตัวของผลการทำนายเป็นแบบลอค-นอร์มอล ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบทางสถิติแล้วพบว่าลักษณะการกระจายตัวของผลการประเมินกำลังฯ จากวิธีต่างๆ เป็นแบบลอค-นอร์มอล ดังที่ได้มีการรายงานไว้จริง

เมื่อได้ทำการประเมินโดยใช้ความสัมพันธ์ทางสถิติและสมมุติฐานของแรงกระทำตามคำแนะนำของ AASHTO จะสามารถคำนวณหาค่าของตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทาน (ϕ) ได้ดังตารางที่ 6-3 และตารางที่ 6-4 ค่าตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานนี้สามารถนำไปคูณกับผลที่ได้จากการประเมินกำลังฯ ต่างๆ ได้โดยตรงโดยไม่ต้องปรับแก้ค่าเอนเอียงไว้ก่อน เนื่องจากในสมการ(6.3) ได้คำนึงถึงผลจากค่าเอนเอียงไว้แล้ว

ตารางที่ 6-3 ตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานของวิธีการต่างๆ เมื่อเทียบกับวิธี Mazurkiewicz

Methods	$\beta_T = 2.0$						$\beta_T = 2.5$					
	All		Clay		Sand		All		Clay		Sand	
	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc
Hiley	0.93	90	0.87	90	1.08	95	0.75	97	0.69	95	0.90	99
Redtenbacher	0.52	92	0.58	90	0.43	97	0.40	97	0.45	95	0.32	99
Pacificcost	0.69	92	0.73	90	0.65	95	0.54	97	0.57	95	0.51	99
Dutch	2.52	92	2.55	92	2.66	95	2.02	97	2.03	97	2.21	99
Eytelwein	0.19	95	0.22	92	0.15	97	0.14	97	0.17	95	0.10	99
ENR	1.16	90	1.04	90	1.52	95	0.98	97	0.87	95	1.30	99
Modified ENR	1.73	90	1.64	90	1.88	95	1.43	97	1.34	95	1.58	99
Janbu	0.48	92	0.49	90	0.47	95	0.38	97	0.38	95	0.37	99
Gates	1.30	90	1.14	90	1.64	95	1.04	97	0.90	95	1.35	99
Danish	0.46	92	0.44	90	0.48	95	0.36	97	0.34	95	0.38	99
Dynamic load test	0.71	85	0.64	85	0.86	95	0.60	95	0.54	95	0.76	99
Static equilibrium	0.63	95	0.59	92	0.99	95	0.47	97	0.46	97	0.77	99

*pc หมายถึงระดับความเชื่อมั่นในหน่วยร้อยละ

ตารางที่ 6-4 ตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานของวิธีการต่างๆ เมื่อเทียบกับวิธี Davisson

Methods	$\beta_T = 2.0$						$\beta_T = 2.5$					
	All		Clay		Sand		All		Clay		Sand	
	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc
Hiley	0.76	85	0.69	85	0.93	95	0.60	95	0.54	92	0.77	99
Redtenbacher	0.43	90	0.47	85	0.36	97	0.32	95	0.35	92	0.27	99
Pacificcost	0.57	88	0.59	85	0.53	95	0.43	92	0.45	92	0.42	99
Dutch	2.05	90	2.02	85	2.28	95	1.61	95	1.57	92	1.88	99
Eytelwein	0.15	92	0.17	90	0.12	97	0.11	97	0.13	95	0.09	99
ENR	0.95	85	0.82	85	1.31	95	0.79	92	0.67	92	1.12	99
Modified ENR	1.40	85	1.29	85	1.62	95	1.14	92	1.03	92	1.35	99
Janbu	0.40	88	0.39	85	0.40	95	0.31	95	0.30	92	0.31	99
Gates	1.06	85	0.90	85	1.41	95	0.83	95	0.69	92	1.15	99
Danish	0.37	88	0.35	85	0.41	95	0.29	95	0.27	92	0.32	99
Dynamic load test	0.58	80	0.51	80	0.77	95	0.49	90	0.42	90	0.68	99
Static equilibrium	0.52	92	0.47	90	0.85	95	0.38	97	0.35	95	0.65	99

*pc หมายถึงระดับความเชื่อมั่นในหน่วยร้อยละ

6.6.3 อัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor)

เมื่อต้องการหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยเพื่อนำไปใช้กับวิธีการประเมินฯ แบบเดิมจะสามารถคำนวณได้จากส่วนกลับของตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานที่หาได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ อัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณจากส่วนกลับของตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานที่ค่า $\beta_T = 2.0$ หมายถึงอัตราส่วนปลอดภัยที่ทำให้ผลทำนายมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบฯ แบบสถิติศาสตร์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.0 เท่า ในลักษณะเดียวกันอัตราส่วนปลอดภัยที่คำนวณจากส่วนกลับของตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานที่ค่า $\beta_T = 2.5$ หมายถึงอัตราส่วนปลอดภัยที่ทำให้ผลทำนายมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบฯ แบบสถิติศาสตร์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.5 เท่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัยดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 6-5 และตารางที่ 6-6

ตารางที่ 6-5 อัตราส่วนปลอดภัยของวิธีการต่างๆ เมื่อเทียบกับวิธี Mazurkiewicz

Methods	$\beta_T = 2.0$						$\beta_T = 2.5$					
	All		Clay		Sand		All		Clay		Sand	
	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc
Hiley	1.1	90	1.1	90	0.9	95	1.3	97	1.4	95	1.1	99
Redtenbacher	1.9	92	1.7	90	2.3	97	2.5	97	2.2	95	3.1	99
Pacificcost	1.4	92	1.4	90	1.5	95	1.9	97	1.8	95	2.0	99
Dutch	0.4	92	0.4	92	0.4	95	0.5	97	0.5	97	0.5	99
Eytelwein	5.3	95	4.5	92	6.7	97	7.1	97	5.9	95	10.0	99
ENR	0.9	90	1.0	90	0.7	95	1.0	97	1.1	95	0.8	99
Modified ENR	0.6	90	0.6	90	0.5	95	0.7	97	0.7	95	0.6	99
Janbu	2.1	92	2.0	90	2.1	95	2.6	97	2.6	95	2.7	99
Gates	0.8	90	0.9	90	0.6	95	1.0	97	1.1	95	0.7	99
Danish	2.2	92	2.3	90	2.1	95	2.8	97	2.9	95	2.6	99
Dynamic load test	1.4	85	1.6	85	1.2	95	1.7	95	1.9	95	1.3	99
Static equilibrium	1.6	95	1.7	92	1.0	95	2.1	97	2.2	97	1.3	99

*pc หมายถึงระดับความเชื่อมั่นในหน่วยร้อยละ

6.7 สรุปผลการศึกษาและคำแนะนำ

ในรายงานส่วนนี้ได้ศึกษาความเที่ยงตรงและแม่นยำของวิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิต (Static equilibrium method) สูตรตอกเสาเข็มจำนวน 10 สูตรและการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์ โดยเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิต สามารถสรุปผลการศึกษาและให้ข้อแนะนำได้ดังนี้

1. เนื่องจากมาตรฐานในการกำหนดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มมีหลายวิธี กรมทางหลวงจึงควรระบุวิธีการกำหนดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มให้ชัดเจนเพื่อลดความผิดพลาดในการออกแบบและควบคุมงาน

ตารางที่ 6-6 อัตราส่วนปลอดภัยของวิธีการต่างๆ เมื่อเทียบกับวิธี Davisson

Methods	$\beta_T = 2.0$						$\beta_T = 2.5$					
	All		Clay		Sand		All		Clay		Sand	
	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc	ϕ	pc
Hiley	1.3	90	1.4	90	1.1	95	1.7	97	1.9	95	1.3	99
Redtenbacher	2.3	92	2.1	90	2.8	97	3.1	97	2.9	95	3.7	99
Pacificcost	1.8	92	1.7	90	1.9	95	2.3	97	2.2	95	2.4	99
Dutch	0.5	92	0.5	92	0.4	95	0.6	97	0.6	97	0.5	99
Eytelwein	6.7	95	5.9	92	8.3	97	9.1	97	7.7	95	11.1	99
ENR	1.1	90	1.2	90	0.8	95	1.3	97	1.5	95	0.9	99
Modified ENR	0.7	90	0.8	90	0.6	95	0.9	97	1.0	95	0.7	99
Janbu	2.5	92	2.6	90	2.5	95	3.2	97	3.3	95	3.2	99
Gates	0.9	90	1.1	90	0.7	95	1.2	97	1.4	95	0.9	99
Danish	2.7	92	2.9	90	2.4	95	3.4	97	3.7	95	3.1	99
Dynamic load test	1.7	85	2.0	85	1.3	95	2.0	95	2.4	95	1.5	99
Static equilibrium	1.9	95	2.1	92	1.2	95	2.6	97	2.9	97	1.5	99

*pc หมายถึงระดับความเชื่อมั่นในหน่วยร้อยละ

ในกรณีที่การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มสามารถให้แรงกระทำจนเสาเข็มใกล้วิบัติได้ (หรือแสดงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากแบบอิลาสติกไปเป็นแบบพลาสติกได้) ควรกำหนดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบ Mazurkiewicz แต่ถ้าวการทดสอบ ไม่สามารถให้แรงกระทำจนเสาเข็มเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากแบบอิลาสติกไปเป็นแบบพลาสติก ควรใช้วิธีการอื่นๆ ที่เหมาะสมในการกำหนดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเช่น ใช้วิธีแบบ Davisson หรือการกำหนดน้ำหนักบรรทุกพิสูจน์ (Proof load) ให้เป็นจำนวนเท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน เป็นต้น ซึ่งในกรณีเหล่านี้มักจะปรับลดอัตราส่วนปลอดภัยลงตามความเหมาะสมได้ เพราะกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดตามเกณฑ์เหล่านี้มักจะมีค่าต่ำกว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ทำให้เสาเข็มวิบัติ

2. สูตรตอกเสาเข็มแบบ Hiley ของกรมทางหลวงนั้นให้ค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณจากการวิเคราะห์สมดุลของแรงเชิงสถิตที่ใช้ข้อมูลเจาะสำรวจดิน เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตตามวิธี Mazurkiewicz แล้วพบว่าผลทำนายด้วยสูตรตอกเสาเข็มของกรมทางหลวงจะมีค่าต่ำกว่า 1.75

เท่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสูตรตอกเสาเข็มของกรมทางหลวงให้ค่าเชิงอนุรักษ์ซึ่งน่าจะปลอดภัยต่อการใช้งาน แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้เกิดปัญหาการตอกเสาเข็มไม่ลงเนื่องจากกำลังของเสาเข็มที่แท้จริงมีโอกาสที่จะสูงกว่าผลการคำนวณได้ง่าย

3. เนื่องจากวิธีการประเมินฯ ต่างๆ มีแนวโน้มที่จะให้ค่าสูงหรือต่ำกว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิติไม่เท่ากัน จึงได้คำนวณหาค่าอัตราส่วนปลอดภัยชุดใหม่จากส่วนกลับของตัวคูณลดสำหรับแรงต้านทานที่ค่า $\beta_r = 2.5$ (ผลทำนายมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบฯ แบบสถิติศาสตร์ที่ประเมินโดยวิธี Mazurkiewicz โดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.5 เท่า) ซึ่งจะทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้จากวิธีการต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันและเทียบเคียงได้กับการออกแบบตามวิธีหน่วยแรงใช้งานที่มีอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2.5 โดยมีโอกาสที่จะผลทำนายจะสูงกว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิติที่ประเมินโดยวิธี Mazurkiewicz มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 95 ถึงร้อยละ 97 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยดังกล่าวแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

Methods	All		Clay		Sand	
	FS	pc	FS	pc	FS	pc
Hiley	1.3	97	1.4	95	1.1	99
Redtenbacher	2.5	97	2.2	95	3.1	99
Pacificcost	1.9	97	1.8	95	2.0	99
Dutch	0.5	97	0.5	97	0.5	99
Eytelwein	7.1	97	5.9	95	10.0	99
ENR	1.0	97	1.1	95	0.8	99
Modified ENR	0.7	97	0.7	95	0.6	99
Janbu	2.6	97	2.6	95	2.7	99
Gates	1.0	97	1.1	95	0.7	99
Danish	2.8	97	2.9	95	2.6	99
Dynamic load test	1.7	95	1.9	95	1.3	99
Static equilibrium	2.1	97	2.2	97	1.3	99

FS หมายถึงอัตราส่วนปลอดภัย / pc หมายถึงระดับความเชื่อมั่นในหน่วยร้อยละ

บทที่ 7 งานจัดทำร่างคู่มือมาตรฐานและฐานข้อมูลการทดสอบ

ที่ปรึกษาได้จัดทำร่างคู่มือมาตรฐานการควบคุมและตรวจสอบเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง และร่างคู่มือมาตรฐานการทดสอบเสาเข็มโดยใช้เครื่องมือ PDA และจัดทำฐานข้อมูลผลการทดสอบที่ได้จากสภาพชั้นดินในพื้นที่ก่อสร้างต่างๆ และจัดเก็บในระบบสารสนเทศของสำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

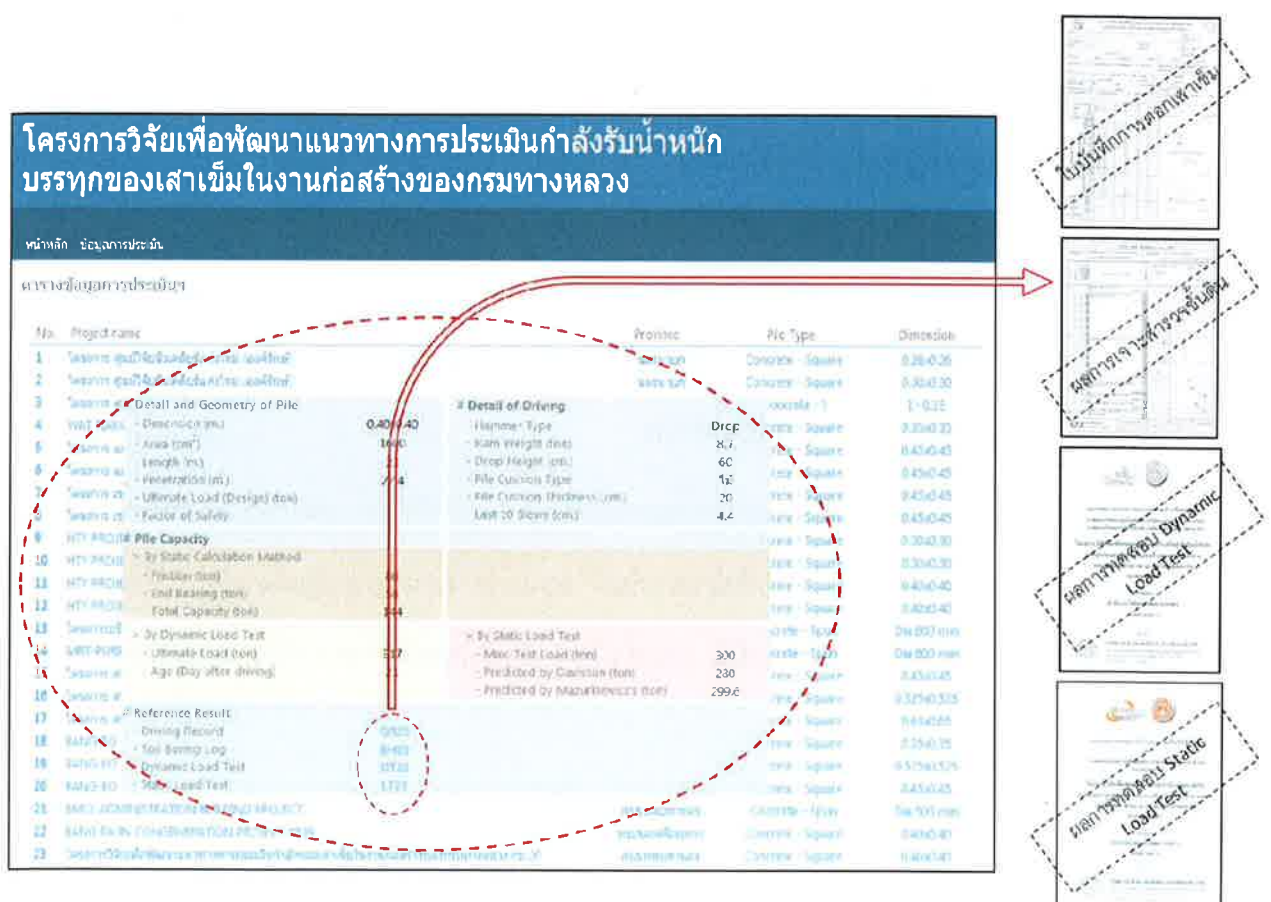
ร่างคู่มือมาตรฐานการควบคุมและตรวจสอบเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวงมีเนื้อหาครอบคลุมหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1 บทบาทและหน้าที่ของวิศวกรควบคุมงาน
- 2 ความปลอดภัยในการทำงาน
- 3 ลำดับขั้นตอนของการควบคุมคุณภาพการก่อสร้างเสาเข็มตอก
- 4 การศึกษาเอกสารและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง
- 5 การเตรียมการก่อนตอกเสาเข็ม
- 6 การตรวจสอบอุปกรณ์ตอกเสาเข็ม
- 7 การตรวจสอบเสาเข็มก่อนตอก
- 8 การทดสอบเสาเข็ม
- 9 การตรวจสอบในขณะที่ก่อสร้าง
- 10 การลำดับการตอกเสาเข็ม
- 11 การตรวจสอบตำแหน่งและความเอียงของเสาเข็ม
- 12 การตรวจสอบขณะตอกเสาเข็ม
- 13 การต่อเสาเข็ม
- 14 การตรวจสอบกับเกณฑ์การหยุดตอกเสาเข็ม
- 15 การตัดหัวเสาเข็ม
- 16 ระเบียบการตอกและรายงานการทำงานประจำวัน
- 17 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการตอกเสาเข็ม

ร่างคู่มือมาตรฐานการทดสอบเสาเข็มโดยใช้เครื่องมือ PDA มีเนื้อหาครอบคลุมหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1 ข้อกำหนดทั่วไป
- 2 เอกสารนำส่งเพื่อขออนุมัติ
- 3 คุณสมบัติเบื้องต้น และประสบการณ์การทำงานที่ต้องการ
- 4 การเตรียมงานเพื่อการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ PDA
- 5 การทดสอบโดยใช้เครื่องมือ PDA
- 6 การรายงานและวิเคราะห์ผล

สำหรับฐานข้อมูลผลการทดสอบที่ได้จากสภาพชั้นดินในพื้นที่ก่อสร้างต่างๆ นั้นได้จัดทำเป็นไฟล์ HTML ซึ่งสามารถดูได้จากเว็บเบราว์เซอร์โดยมีลิงค์ที่สามารถกดเพื่อดูผลเจาะสำรวจชั้นดิน ผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิตยศาสตร์และแบบพลศาสตร์ได้ โดยมีลักษณะดังรูป 7-1



รูปที่ 7-1 ฐานข้อมูลผลการทดสอบที่ได้จากสภาพชั้นดินในพื้นที่ก่อสร้างต่างๆ

บทที่ 8 งานจัดอบรม

ที่ปรึกษาได้จัดสัมมนาถ่ายทอดความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้ ในหัวข้อ “การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวงให้กับเจ้าหน้าที่กรมทางหลวง ในศุกร์ที่ 10 กุมภาพันธ์ 2555 ที่ ห้องกษัตริย์ศึก 2 โรงแรมทวินทาวเวอร์ โดยมีผู้เข้าร่วมสัมมนารวม 94 ท่าน (ติดภาระกิจ 16 ท่าน)

หัวข้อในการสัมมนาประกอบด้วย

- 1) เทคนิคการก่อสร้างและควบคุมคุณภาพเสาเข็มตอก โดยคุณณัฐมนต์ กัมปนานนท์ บริษัท เอส ที เอส เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด
- 2) งานก่อสร้างฐานรากเสาเข็มตอก โดย คุณมนูญ อารยะศิริ วิศวกรอาวุโส, ว.ย.856
- 3) การศึกษาและประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธี Static Method และสูตรการตอกเสาเข็ม และการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์และแบบสถิตศาสตร์ โดย รศ.ดร.จิรวัตร บุญญะฐิติ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาปฐพีกลศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 4) การทดสอบประเมินกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มตอกด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) โดย คุณธนบัตร เอื้อวรกุลชัย บริษัท เอส ที เอส เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด
- 5) ประสิทธิภาพงานก่อสร้างเสาเข็มตอก (ซัก-ถามปัญหา) โดย คุณสมชัย อวยพรประเสริฐ ผู้จัดการฝ่ายเทคนิค บริษัท เอเชีย กรู๊ป จำกัด 1999 และคุณณัฐมนต์ กัมปนานนท์ บริษัท เอส ที เอส เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ จำกัด

โดยสรุปวิทยากรได้นำเสนอเทคนิคขั้นตอนและวิธีการปฏิบัติในการควบคุมการก่อสร้างเสาเข็มตอก และแนวทางในการประเมินกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มด้วยสูตรตอกเสาเข็ม ภายหลังปรับแก้เทียบกับวิธีทดสอบแบบสถิต โดยอาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็น รวมทั้งปัญหาที่พบในระหว่างการก่อสร้างและเทคนิคการแก้ไขที่เหมาะสม

ผู้เข้าร่วมสัมมนาให้ความสนใจในการบรรยายหัวข้อต่าง ๆ เป็นอย่างมาก และได้สอบถามปัญหาต่างๆ อาทิ ปัญหาเสาเข็มเสียหายจากการตอก ปัญหาการจัดลำดับการตอกเสาเข็มในพื้นที่จำกัดลักษณะต่างๆ การเลือกใช้สูตรตอกเสาเข็มและเทคนิคการกำหนดตำแหน่งปลายเสาเข็มที่เหมาะสม เป็นต้น

ที่ปรึกษาคาดว่าการสัมมนาในครั้งนี้ เจ้าหน้าที่ของกรมทางหลวงที่เข้าร่วมสัมมนาจะได้ประโยชน์ต่างๆ
ดังนี้

- 1) มีความรู้ความเข้าใจเพิ่มขึ้นในขั้นตอนและวิธีการก่อสร้างและควบคุมงานก่อสร้างเสาเข็มตอก
- 2) เรียนรู้เทคนิคและวิธีการแก้ไขปัญหาที่มักเกิดขึ้นในการก่อสร้างเสาเข็มตอก
- 3) สามารถนำวิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์ มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมคุณภาพเสาเข็ม
- 4) รับทราบการพัฒนาสูตรเสาเข็มที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือกว่าสูตรตอกเสาเข็มที่ใช้อยู่ปัจจุบัน
- 5) แลกเปลี่ยนความคิดเห็นและประสบการณ์ต่าง ๆ ที่ได้เคยประสบมาในงานก่อสร้างเสาเข็มตอก

การประชุมสัมมนาในครั้งนี้ถือได้ว่าประสบความสำเร็จและบรรลุตามวัตถุประสงค์ของกรมทางหลวง
เป็นอย่างดี การสัมมนาได้ยุติลง เมื่อเวลา 16.30 น.



รูปที่ 8-1 ภาพถ่ายระหว่างการสัมมนาเพื่อถ่ายทอดความรู้ในวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2555

รายชื่อผู้เข้ารับการฝึกอบรมสัมมนา ดังแสดงไว้ในรายการภาคผนวก

รายการภาคผนวก

รายชื่อผู้เข้ารับการฝึกอบรมหัวข้อ การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
ณ โรงแรมทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ

วันศุกร์ที่ ๑๐ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๕ เวลา ๐๘.๓๐-๑๕.๓๐ น.

ลำดับที่	ชื่อ-สกุล	ตำแหน่ง	ลายเซ็น
	สำนักบริหารบำรุงทาง		
๑	นายจักรพันธ์ พัฒนเกรียงไกร	วิศวกรโยธาชำนานุกรการพิเศษ	
๒	นายทวีศักดิ์ ตั้งวรภัทร์	วิศวกรโยธาชำนานุกรการพิเศษ	
๓	นายพนพล ยิ้มประเสริฐ	วิศวกรโยธาชำนานุกรการพิเศษ	
๔	นายอิทธิศักดิ์ นวกิจวัฒนา	วิศวกรโยธาชำนานุกรการพิเศษ	อิทธิศักดิ์
	สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ		
๕	นางสาวราดา ดวงแคว้นศิริแสง	วิศวกรโยธาชำนานุกรการพิเศษ	ราดา
๖	นายทัญญูพิสิษฐ์ ชินสมพงษ์	วิศวกรโยธาชำนานุกรการ	ทัญญู
๗	นายอารมณ ประสานสุขทวี	นักธรณีวิทยาชำนาญการ	อารมณ
๘	นายชัยรัตน์ ศุภชวโรจน์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	ชัยรัตน์
๙	นายวรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิน	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	วรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิน
๑๐	นายสุวิชัย รอดภัย	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	สุวิชัย
๑๑	นายฉัตรชัย จันท	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	ฉัตรชัย
๑๒	นายภิรมย์ ภู่งาม	นายช่างโยธาชำนานุกรงาน	ภิรมย์
๑๓	นายกิตติ บุญเกิดแก้ว	นายช่างโยธาชำนานุกรงาน	กิตติ บุญเกิดแก้ว
๑๔	นายสมคิด อยู่สนอง	นายช่างโยธาชำนานุกรงาน	สมคิด
๑๕	นายวิรัชศักดิ์ สงสุข	นายช่างโยธาปฏิบัติการ	วิรัชศักดิ์ สงสุข
	สำนักสำรวจและออกแบบ		
๑๖	นายทินกร แพทย์รักษ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	ทินกร
๑๗	นายสุพรรณ วรรณบวร	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	สุพรรณ
๑๘	นายกิตติพล ดั่งเจีย	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	กิตติพล
๑๙	นายประเสริฐ ประสาทงามเลิศ	นายช่างโยธาชำนานุกรงาน	ประเสริฐ
	สำนักมาตรฐานและประเมินผล		
๒๐	นายณะปีย์ เจ๊ะแฉ	วิศวกรโยธาชำนานุกรการ	
๒๑	นายสุรเดช อุมาร	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๒๒	นายศรัณย์ จันทร์ประเสริฐ	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	ศรัณย์
๒๓	นายปิยะศักดิ์ เทียนดี	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๒๔	นายปณิธาน ไชยรักษ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	

รายชื่อผู้เข้ารับการฝึกอบรมหัวข้อ การประเมินกำลังรับน้ำหนักรรทุกเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
ณ โรงแรมทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ

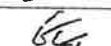
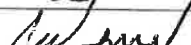
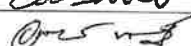
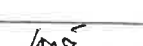
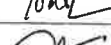
วันศุกร์ที่ ๑๐ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๕ เวลา ๐๘.๓๐-๑๕.๓๐ น.

ลำดับที่	ชื่อ-สกุล	ตำแหน่ง	ลายเซ็น
	สำนักวิจัยและพัฒนาทาง		
๒๕	นายเศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ	วิศวกรโยธาชำนานการพิเศษ	1๐กพ
๒๖	นายอัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์	วิศวกรโยธาชำนานการ	อ.พ.
๒๗	นายจิรโรจน์ ศุกลรัตน์	วิศวกรโยธาชำนานการ	อ.พ.
๒๘	นายกิตติศักดิ์ ทองมาก	วิศวกรโยธาชำนานการ	
๒๙	นายบรรพต อ่องสุขสันต์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	ม.พ.
๓๐	นายราชวัลลภ กัมพูพงศ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๓๑	นายอภิสิทธิ์ กล้าเหม็ง	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	อ.พ.
๓๒	นายอภิชัย อีสริยานุกูล	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	อ.พ.
๓๓	นายปริญญา เหมือนสีเลา	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	อ.พ.
๓๔	นายสาธิต อินนามเพ็ง	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	อ.พ.
๓๕	นางสาวธัญรัตน์ ก่อตั้งสัมพันธ์	นายช่างโยธาปฏิบัติงาน	
๓๖	นายพิรุณ คำหงษา	นายช่างโยธาปฏิบัติงาน	
	สำนักแผนงาน		
๓๗	นายโสภณ วีระวัฒนยังยง	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	อ.พ.
๓๘	นายชนินทร์ กิตตินันทวรกุล	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	อ.พ.
๓๙	นายกริธา เดชพิณ	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๔๐	นายสุรัชย์ อัมภวาสวรรณ	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๔๑	นายสุรัชย์ สิลาลิเสถ	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	อ.พ.
	สำนักก่อสร้างสะพาน		
๔๒	นายอิทธิวัตร กฤษณาวณิช	วิศวกรโยธาชำนานการพิเศษ	อ.พ.
๔๓	นายปรเมศวร์ ตันมณีวัฒนา	วิศวกรโยธาชำนานการ	อ.พ.
๔๔	นายราชนันท์ วงษ์อนุ	นายช่างโยธาอาวุโส	อ.พ.
๔๕	นายพนรัตน์ เอี่ยมพานิช	นายช่างโยธาอาวุโส	อ.พ.
	สำนักก่อสร้างทางที่ ๑		
๔๖	นายประพจน์ สมัครการไธ	วิศวกรโยธาชำนานการ	อ.พ.
๔๗	นายรัตน์ ปัญญาดี	นายช่างโยธาชำนานการ	อ.พ.
๔๘	นายวิชาญ พันธุ์เรือน	นายช่างโยธาอาวุโส	อ.พ.
๔๙	นายวรวัฒน์ ยงสมบูรณ์	นายช่างโยธาอาวุโส	อ.พ.

รายชื่อผู้เข้ารับการฝึกอบรมหัวข้อ การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง

ณ โรงแรมทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ

วันศุกร์ที่ ๑๐ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๕ เวลา ๐๘.๓๐-๑๕.๓๐ น.

ลำดับที่	ชื่อ-สกุล	ตำแหน่ง	ลายเซ็น
สำนักก่อสร้างทางที่ ๒			
๕๐	นายเลกศักดิ์ พรหมมี	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
๕๑	นายสุขใจ แสงสกุล	นายช่างโยธาอาวุโส	
๕๒	นายปรีชา มั่งคั่ง	นายช่างโยธาอาวุโส	
๕๓	นายไชยยา ศิริพันธ์	นายช่างโยธาอาวุโส	
สำนักก่อสร้างทางที่ ๓			
๕๔	นายปริญญ์ เตชะนรรราช	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
๕๕	นายคมกฤต ดีจิงวิภาค	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๕๖	นายจำรัส ดำรงค์พานิช	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๕๗	นายชัชวาล รุ่งเรือง	นายช่างโยธาอาวุโส	
๕๘	นายชาติชาย พิบูลย์ศักดิ์	นายช่างโยธาอาวุโส	
สำนักอำนวยความปลอดภัย			
๕๙	นายสมยศค์ อันทามา	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๖๐	นายช่อฉัตร ชุมศรี	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๖๑	นายวินัย มณีวัฒน์	นายช่างโยธาอาวุโส	
๖๒	นายจุฬพงษ์ นุชนาฏ	นายช่างโยธาอาวุโส	
สำนักทางหลวงที่ ๑ (เชียงใหม่)			
๖๓	นายสุรศักดิ์ แก้วดี	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๖๔	นายอนุฤทธิ์ อุดมสม	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
สำนักทางหลวงที่ ๒ (แพร่)			
๖๕	นายคงเดช ศรีคำยอด	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๖๖	นายปรัชญ์ บุญนิษฐ	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
สำนักทางหลวงที่ ๓ (สกลนคร)			
๖๗	นายเอกชัย แสนสงค์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๖๘	นายวิชัย วงศ์วิศิษฐ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
สำนักทางหลวงที่ ๔ (พิษณุโลก)			
๖๙	นายเอกสิทธิ์ บัวบาน	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๗๐	นายพัฒนา เพชรสุริยา	นายช่างโยธาชำนาญงาน	

รายชื่อผู้เข้ารับการฝึกอบรมหัวข้อ การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
ณ โรงแรมทวิน ทาวน์เวอร์ กรุงเทพฯ

วันศุกร์ที่ ๑๐ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๕ เวลา ๐๘.๓๐-๑๕.๓๐ น.

ลำดับที่	ชื่อ-สกุล	ตำแหน่ง	ลายเซ็น
สำนักทางหลวงที่ ๕ (ขอนแก่น)			
๗๑	นายเอนก สุวรรณภูเต	ผู้อำนวยการส่วนสำรวจและออกแบบ	
๗๒	นายอนุชาย แซ่เอี้ย	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
สำนักทางหลวงที่ ๖ (เพชรบูรณ์)			
๗๓	นายวรุดิ วิทยาพาสุข	รอ.ขท. (ว) เพชรบูรณ์ ๑	
๗๔	นายวิธาน บุญประกอบ	รอ.ขท. (ว) เลย ๒ (ด้านซ้าย)	
สำนักทางหลวงที่ ๗ (อุบลราชธานี)			
๗๕	นายภูวนารถ นาคราชา	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๗๖	นายปฤษฎางค์กุล แสนมาตย์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
สำนักทางหลวงที่ ๘ (นครราชสีมา)			
๗๗	นางสาวจิราพร โพธิ์ชัย	วิศวกรโยธาชำนานการพิเศษ	
๗๘	นายนิรันดร์ สุขรักขินี	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
สำนักทางหลวงที่ ๙ (ลพบุรี)			
๗๙	นายธนากร จุลอักษร	วบ.ทล.๙	
๘๐	นายสุทธิชัย แจ่มเชื้อ	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
สำนักทางหลวงที่ ๑๐ (สุพรรณบุรี)			
๘๑	นายจตุพล เทพมังกร	วิศวกรโยธาชำนานการพิเศษ	
๘๒	นายพนันต์ หนูบรรจง	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
สำนักทางหลวงที่ ๑๑ (กรุงเทพฯ)			
๘๓	นายนรภัทร ตริศิริโชติ	วิศวกรโยธาชำนานการพิเศษ	
๘๔	นายเชษฐา สุโพธิ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๘๕	นายสุปรีชา พึ่งศิริติ	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๘๖	นายสมชัย คงทอง	นายช่างโยธาชำนานงาน	
สำนักทางหลวงที่ ๑๒ (ชลบุรี)			
๘๗	นายสมเดช โสภณดิเรกรัตน์	วบ.ทล.๑๒	
๘๘	นายกรวุฒิ จันทรเพ็ญ	ขก.ทล.๑๒	

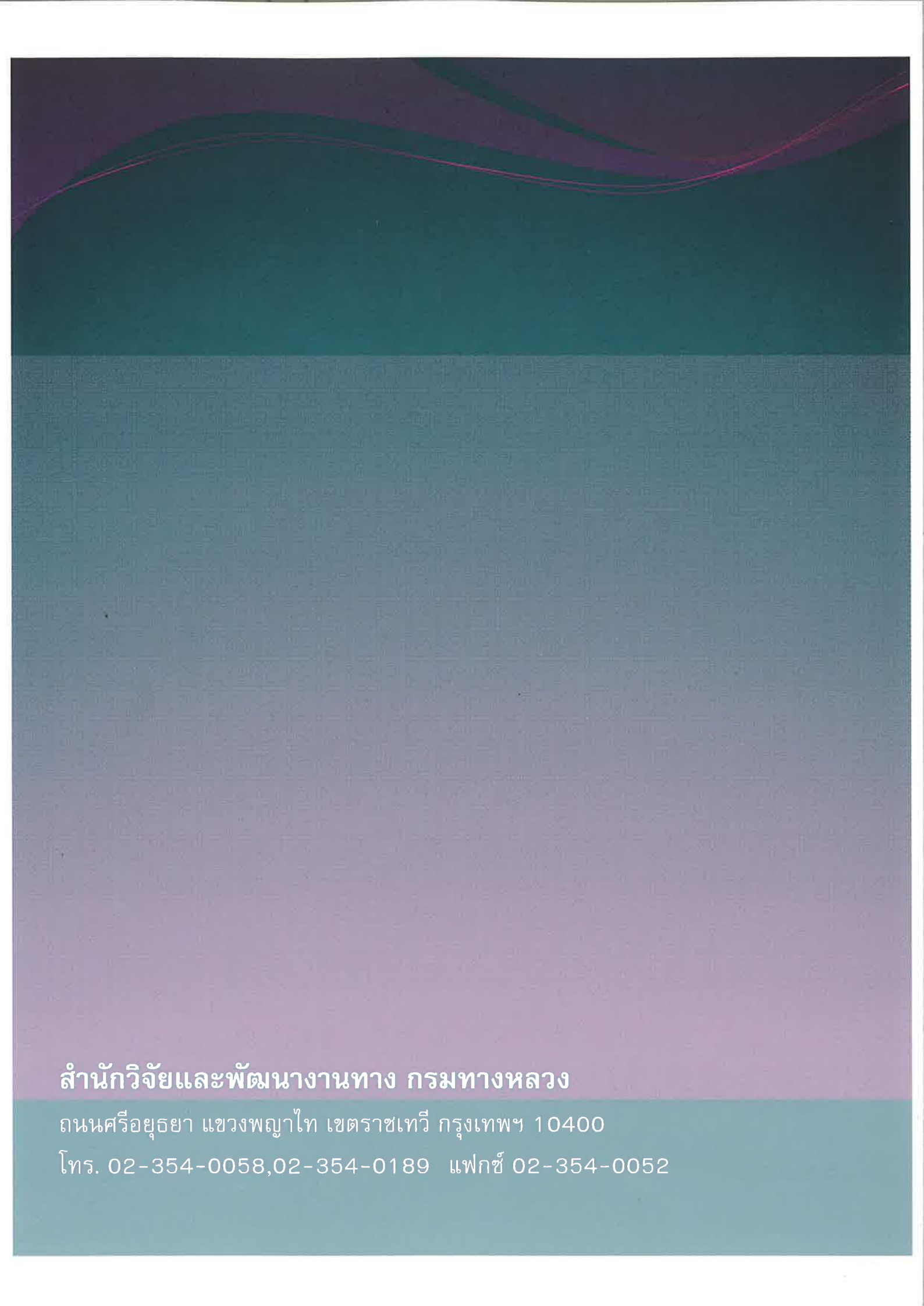
วันศุกร์ที่ ๑๐ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๕ เวลา ๐๘.๓๐-๑๕.๓๐ น.

95

รายชื่อผู้เข้ารับการฝึกอบรมหัวข้อ การประเมินกำลังรับน้ำหนักรรทุกเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินกำลังรับน้ำหนักรรทุกของเสาเข็มในงานก่อสร้างของกรมทางหลวง
ณ โรงแรมทวิน ทาวน์เวอร์ กรุงเทพฯ

วันศุกร์ที่ ๑๐ กุมภาพันธ์ ๒๕๕๕ เวลา ๐๘.๓๐-๑๕.๓๐ น.

ลำดับที่	ชื่อ-สกุล	ตำแหน่ง	ลายเซ็น
	สำนักงานทางหลวงที่ ๑๓ (ประจวบคีรีขันธ์)		
๘๙	นายภานุพันธ์ บุญจันทร์	นายช่างโยธาชำนาญงาน	
๙๐	นายทอง สมทรง	นายช่างโยธาชำนาญงาน	
	สำนักงานทางหลวงที่ ๑๔ (นครศรีธรรมราช)		
๙๑	นายสรายุทธ อินทวิเชียร	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
๙๒	นายอภิชาติ เพชรศรีจันทร์	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
	สำนักงานทางหลวงที่ ๑๕ (สงขลา)		
๙๓	นายชาติพงษ์ รตโนภาส	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
๙๔	นายสุธี มณีอ่อน	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	
	สำนักงานทางหลวงมหาสารคาม		
๙๕	นายเพ็ญฉกาจ จันทรโคตร	วิศวกรโยธาชำนาญการ	
๙๖	นายประสิทธิ์ จะดี	นายช่างโยธาชำนาญงาน	
	สำนักงานทางหลวงตาก		
๙๗	นายอเนก สัมภวามาน	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
๙๘	นายสุรสิทธิ์ บัวบาน	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	
	สำนักงานทางหลวงกระบี่ (สุราษฎร์ธานี)		
๙๙	นายวิลาศ เมืองทอง	ผู้อำนวยการแขวงการทางกระบี่	
๑๐๐	นายเมธี สมเศรษฐ์	วิศวกรโยธาปฏิบัติการ	



สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

ถนนศรีอยุธยา แขวงพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

โทร. 02-354-0058, 02-354-0189 แฟกซ์ 02-354-0052