



การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็กเมื่อมีการเจาะนำ
BEHAVIOR OF SMALL CONCRETE PILES WITH PRE-BORED



นายธีรพงษ์ เมฆะพันธุ์
MR. TEERAPONG MATAPUNTH

1
๕

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

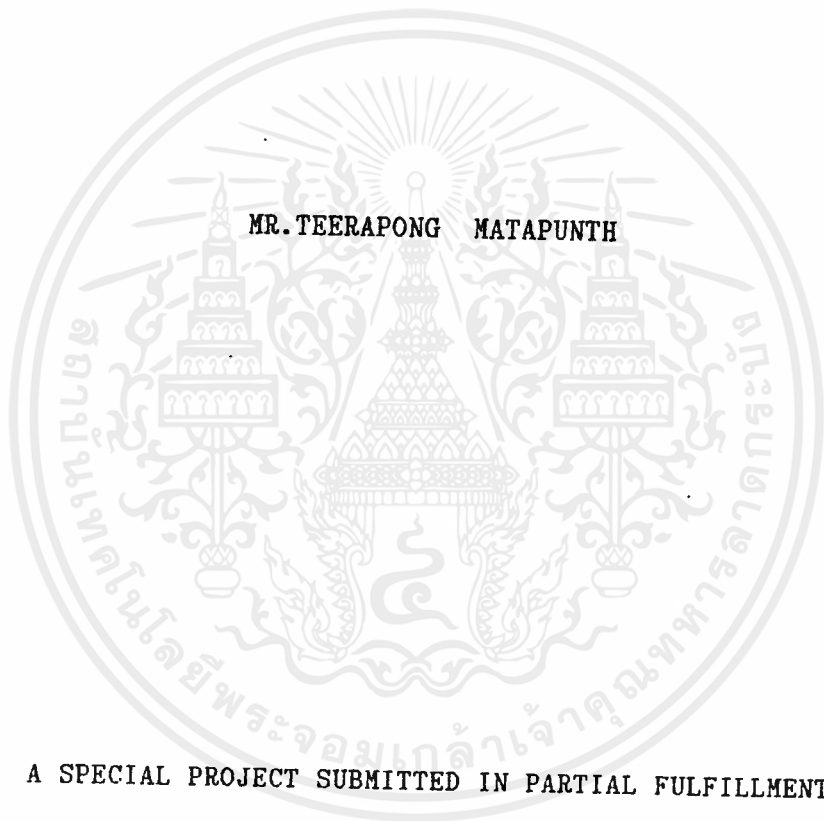
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2535

032494

BEHAVIOR OF SMALL CONCRETE PILES WITH PRE-BORED



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
BACHELOR OF CONSTRUCTION ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1992

032494

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็กเมื่อมีการเจาะนำ
นักศึกษา นายธีรพงษ์ เมฆะพันธ์ รหัสประจำตัว 32.1123
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ศักดิ์ชัย สกานพงษ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
อาจารย์ สุรัตน์ หวังเจริญ
อาจารย์ สุวัฒน์ กิรเศรษฐ์
อาจารย์ อำนวย พานิชกุลพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(นายสุรัตน์ หวังเจริญ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 10 เดือน ม.ค. พ.ศ. 2536

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็กเมื่อมีการเจาะนำ
 นักศึกษา นายธีรพงษ์ เมฆะพันธุ์
 อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ สักดิ์ชัย สกานพงษ์
 ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง
 ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
 พ.ศ. 2535

บทคัดย่อ

สภาพดินอ่อนมักเป็นอันตรายต่อระบบฐานราก และโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง การนำเอาระบบเสาเข็มมาช่วยในการรับน้ำหนัก นับว่าเป็นการแก้ปัญหาได้เป็นอย่างดี การนำเอาเสาเข็มขนาดเล็กมาใช้ในการงานก่อสร้าง ในบางครั้งอาจต้องมีการเจาะนำ ไม่ว่าจะเป็เหตุผลในการก่อสร้าง หรือเพื่อความสะดวกในการทำงานก่อนตาม ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักประลัษของเสาเข็มจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรจึงเป็นกรณีที่น่าทำการศึกษา

ทำการทดสอบโดยการตอกเสาเข็มคอนกรีตรูปตัวไอ ขนาด $0.12 \times 0.12 \times 4.00$ เมตร โดยมี การขุดนำที่ระยะ 0.0, 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตร กลบด้วยทราย ทำการทดสอบโดยวิธี Standard Load Test ตามมาตรฐาน ASTM : D1143-81

จากผลการทดสอบ สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการรับน้ำหนักประลัษของเสาเข็มจะมีค่าลดลง เมื่อมีการเจาะนำในระลัษความลึกที่มากขึ้น

ฉะนั้นในการเจาะนำ หรือขุดนำนั้น ไม่ว่าจะเป็เหตุผลทางการก่อสร้าง หรือเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน ไม่ควรที่จะทำการเจาะนำหรือถ้าจะมีการเจาะนำควรทำการเจาะในระลัษที่น้อยที่สุดที่จะเป็นไปได้ในการปฏิบัติงาน ทั้งนี้เพราะผลจากการเจาะนำจะทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักประลัษของเสาเข็มลดลง

Project Title BEHAVIOR OF SMALL CONCRETE PILES WITH PRE-BORED
Student MR.TEERAPONG MATAPUNTH
Project Advisor ASSIT.SAKCHAI SKANUPONG
Level of Study Bachelor of Engineering in Construction Engineering
Department Civil Engineering Faculty of Engineering King Mongkut
 's Institute of Technology Ladkrabang
Year 1992

ABSTRACT

The soft clay condition affectes foundation system's failure. Pile system is method that can solve this problem. Small pile is brought in construction that is result in construction or needs comfortable in working. Sometime may be pre-bored. How will Pile loading efficiency ? This case should be study.

The purpose of this special project is the comparative of ultimate load between each depth of pre-bored (0.0,1.0,1.5 and 2.0 m.) using standard loading procedure.; ASTM Designation : D1143-81 The size of test piles is I section ;0.12 x 0.12 x 4.00 m.

The results of pile load test can conclude that pile loading efficiency will be decrease when depth of pre-bored is increase.

However. The construction that must use pre-bored method. We should thing about pile loading efficiency that decrease.

กิติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้ผู้เขียนได้รับความช่วยเหลือในหลายด้านจากหลายฝ่าย จนทำให้การทำโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ศักดิ์ชัย สกานพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ รวมถึงได้กรุณาตรวจโครงการพิเศษจนสำเร็จเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้การศึกษอบรมวิชาความรู้ในหลาย ๆ ด้าน แก่ผู้เขียน

ขอขอบพระคุณ บริษัท ผลิตภัณ์ท์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด สาขาลาดกระบัง ที่ได้เลือกเพื่อเสาะเข้ามาในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ร่วมสถาบัน ที่ได้ช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจ จนกระทั่งโครงการพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์ไปด้วยดี

ความดีหรือประโยชน์ทั้งหลายอันพึงได้รับจากโครงการพิเศษนี้ ขอมอบแต่ บิดา มารดา และครู อาจารย์ ทุกท่าน เพื่อน้อมรำลึกถึงพระคุณของท่านทั้งหลายที่มีแก่ผู้เขียน

นายธีรพงษ์ เมธะพันธุ์

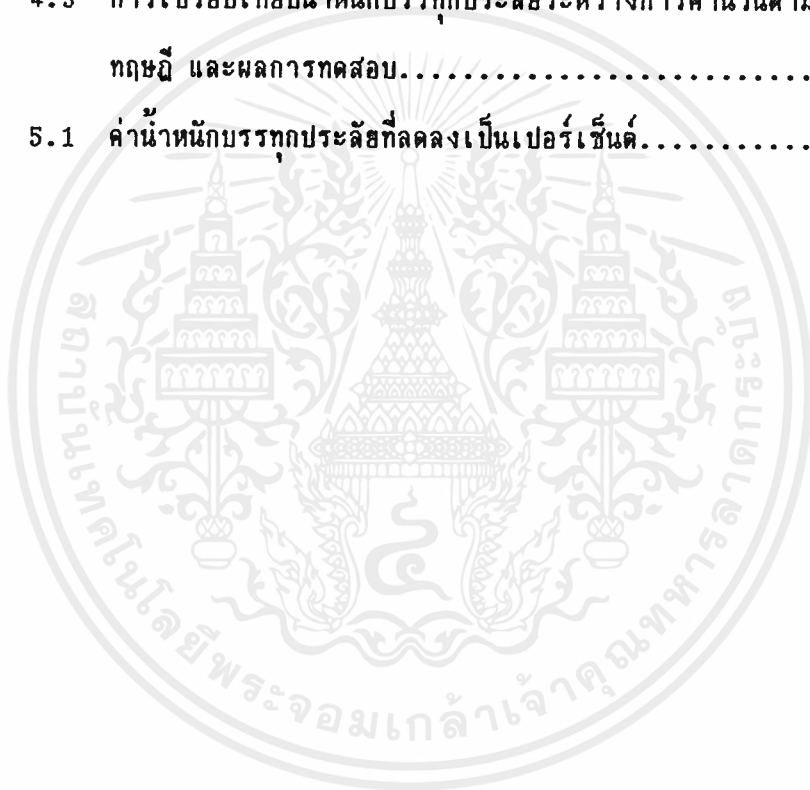
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ทำโครงการพิเศษ.....	2
1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ.....	2
1.5 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ.....	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้าเข็ม.....	4
2.2 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน.....	6
2.3 กำลังรับน้ำหนักของเส้าเข็ม.....	8
2.4 พฤติกรรมของดินโดยรอบเส้าเข็ม.....	15
2.5 พฤติกรรมของเส้าเข็มภายใต้น้ำหนักกระทำ.....	17
2.6 ผลของการตอกเส้าเข็ม.....	19
2.7 การทดสอบเส้าเข็ม.....	24
2.8 รายการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของเส้าเข็ม..	25
บทที่ 3 การดำเนินการ.....	28
3.1 การตอกเส้าเข็ม.....	28
3.1.1 วิธี การตอกเส้าเข็ม.....	28

	หน้า
3.2 การทดสอบเสาเข็ม.....	28
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
3.2.2 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือ.....	29
3.2.3 วิธีการทดสอบเสาเข็ม.....	29
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	31
4.1 สภาพหลุมโดยรวม.....	31
4.2 การเจาะน้ำ.....	32
4.3 การกอบหลุมเสาเข็ม.....	33
4.4 การซ่อมหัวเสาเข็ม.....	33
4.5 ผลการทดสอบเสาเข็ม.....	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ.....	37
5.1 ผลสรุปที่ได้จากการทดสอบ.....	37
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก ก.....	56
ภาคผนวก ข.....	120

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 มุมเสียดทานภายในของดินจำพวกไม่มีแรงยึดเหนี่ยว.....	8
2.2 ค่าของ S_u และ c สำหรับดินบริเวณกรุงเทพมหานคร.....	11
2.3 Permissible Max. Settlement.....	18
4.1 ผลการทดสอบเสาเข็ม.....	34
4.2 แสดงผลของพฤติกรรมก่อนประลัย.....	35
4.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยระหว่างการคำนวณ ทฤษฎี และผลการทดสอบ.....	36
5.1 คำน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์.....	37



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงประเภทต่าง ๆ ของเสาเข็มที่แบ่งตามหน้าที่.....	5
2.2 แสดงหน้าตัดแบบต่าง ๆ ของเสาเข็มคอนกรีต.....	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงกดตั้งฉาก.	7
2.4 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม.....	16
2.5 การถ่ายน้ำหนักของเข็มบนดินหลายชั้น.....	17
2.6 Load-settlement curve for compressive load to failure on pile.....	17
2.7 Shear Strength of Disturbed Clay Close to Pile Shaft.....	21
2.8 Shear Strength of Disturbed Clay Close to Pile Shaft.....	22
2.9 Change in Shear Strength at Different time after Pile Driving.....	23
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และระยะเจาะนำ.....	38
1 เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปตัว I ขนาด 0.12 x 0.12 x 4.00 M.	40
2 แสดงการเจาะนำ และสภาพดินที่ขุดขึ้นมา.....	41
3 แสดงสภาพหลุมหลังจากการขุดเจาะ.....	42
4 แสดงการนำเสาเข็มลงหลุมที่ทำการเจาะนำไว้แล้ว.....	43
5 แสดงการขย่มเสาเข็มในช่วงแรกในการตอกเสาเข็ม.....	44
6 แสดงการตอกเสาเข็มโดยใช้สามเกลอ.....	45
7 แสดงสภาพเสาเข็มหลังการตอกเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....	46
8 Dial Guage พร้อม Stand ใช้วัดการทรุดตัวของเสาเข็ม....	47
9 Proving Ring ใช้เป็นเครื่องวัดน้ำหนักที่ให้แก่เสาเข็ม.....	48

รูปที่	หน้า
10	Hydraulic Jack เป็นเครื่องช่วยถ่าน้ำหนักจาก Load ลงสู่ เสาเข็ม..... 49
11	Load น้ำหนักที่ให้แก่เสาเข็ม..... 50
12	แสดงการติดตั้ง Dial Guage กับ referance Beam แสดงการติดตั้ง Proving Ring ระหว่างคานรับน้ำหนักกับ แกน Hydraulic Jack..... 51
13	แสดงการติดตั้ง แกน Hydraulic Jack กับ Steel plate ที่ใช้รองหัวเสาเข็ม แสดงการติดตั้ง Dial Guage สำหรับวัดการทรุดตัวของเสา เข็ม..... 52
14	แสดงสภาพทั่วไปในการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบเสาเข็ม..... 53
15	แสดงลักษณะการวางคานรับน้ำหนักบน Support และ แสดงลักษณะการวาง Referance Beam..... 54

บทที่ 1

บทนำ

การก่อสร้างในประเทศไทยโดยเฉพาะบริเวณกรุงเทพมหานคร จำเป็นต้องใช้ฐานรากที่มีเสาเข็มช่วยรองรับ ถ้ำน้ำหนักลงสู่ระดับลึกเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เพราะมีชั้นดินตะกอนที่เกิดใหม่อยู่ค่อนข้างมากในภาคกลางใกล้ปากอ่าวไทย ชั้นดินเหล่านี้บางแห่งมีความหนาถึง 20 เมตร ในการออกแบบ ฐานรากของอาคารหรือสิ่งก่อสร้างอื่น ๆ จึงมีความจำเป็นต้องใช้เสาเข็มในการส่งถ้ำน้ำหนักสิ่งก่อสร้างให้กับชั้นดินที่ลึกลงไป ซึ่งขนาดของเสาเข็มก็จะมีขนาดและความยาวที่เหมาะสมในการรับน้ำหนักค่าต่าง ๆ กัน ดังนั้น การคำนวณหรือออกแบบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มให้ได้ค่าใกล้เคียงตามความเป็นจริงจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพราะจะช่วยในการออกแบบฐานรากให้ประหยัดและมีความปลอดภัย (4)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการนำเอาระบบเสาเข็มมาใช้ช่วยในการรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนับว่าเป็นการแก้ปัญหา การทรุดตัวของสิ่งก่อสร้างอันเนื่องมาจากการทรุดตัวของดินได้เป็นอย่างดี ในข้อจำกัดบางประการ เช่น สถานที่ที่จะทำการก่อสร้าง สภาพการทำงาน หรือน้ำหนักของโครงสร้างที่ไม่มากนัก การนำเอาเสาเข็มขนาดเล็กมาใช้จะเหมาะสมกว่าการใช้เสาเข็มขนาดใหญ่

ยังเป็นข้อโต้แย้งกันอยู่เป็นอย่างมากว่า การตอกเสาเข็มขนาดเล็กโดยมีการเจาะนำนั้น ซึ่งไม่ว่าจะเป็นเหตุผลทางการก่อสร้าง หรือเพื่อความสะดวกในการทำงาน ความลึกของการเจาะนำนั้นจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการรับน้ำหนัก ของเสาเข็มมากน้อยอย่างไร

ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับ พฤติกรรมและประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็ก เมื่อมีการเจาะนำซึ่งจะเป็นประโยชน์เพื่อใช้เป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจ ในการปฏิบัติงานของวิศวกรต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

การศึกษาเรื่อง "การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็กเมื่อมีการเจาะนำ" ผู้ศึกษาได้กำหนดวัตถุประสงค์ไว้ เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็ก เมื่อมีการเจาะนำในระยะเวลาอีกค่าต่าง ๆ นั้นทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็มมีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยอย่างไร รวมทั้งการศึกษาถึงคุณสมบัติของดินบริเวณที่ทำการทดสอบ และทรายที่ใช้ในการกลมหลุมที่ทำการเจาะ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงผลการทดสอบที่ได้ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ทำโครงการพิเศษ

เมื่อน้ำหนักบรรทุก เสาเข็มภายใต้น้ำหนักบรรทุกจะเกิดการเคลื่อนที่ แรงต้านการเคลื่อนที่ของเสาเข็มนั้น ก็คือแรงต้านทานที่เกิดจากแรงเสียดทานของมวลดินที่บริเวณผิวของเสาเข็มโดยรอบ (Skin Friction Resistance) ซึ่งแรงเสียดทานของดินที่ผิวเข็มจะมีปริมาณสัมพันธ์โดยตรงกับสภาพของดิน ขนาด และความยาวของเสาเข็ม (7)

การเจาะนำเป็นการทำลายสภาพของชั้นดิน ซึ่งจะทำให้สมบัติความเสียดทานเปลี่ยนไป แต่เมื่อเวลาเปลี่ยนไปประหนึ่ง หรือมีการบดอัดที่เหมาะสม สภาพของดินก็จะคืนสภาพซึ่งคุณสมบัติของแรงเสียดทานจะเป็นเช่นไรนั้น จึงเป็นกรณีที่ควรทำการศึกษาต่อไป

1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

การศึกษาเรื่อง "การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็กเมื่อมีการเจาะนำ" ในครั้งนี้ผู้ศึกษาได้กำหนดขอบเขตการศึกษาไว้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็ก เมื่อมีการเจาะนำในระยะเวลาอีกค่าต่าง ๆ และกลบด้วยทราย เฉพาะคุณสมบัติการรับแรงกดในแนวดิ่ง โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มขนาดเล็กในสภาพดินอ่อนซึ่งได้ทำการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติของดินไว้ด้วยแล้ว ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มขนาดเล็กโดยใช้วิธี Standard Loading Procedure ตามมาตรฐาน ASTM : D1143-81 แล้วดูผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในเชิงทฤษฎี

1.5 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ

วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ แบ่งออกไว้ดังนี้คือ

1.5.1 ทำการทดสอบและวิเคราะห์ เพื่อหาสภาพและคุณสมบัติของดินและทราย เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น และเป็นข้อมูลเปรียบเทียบ ในการคาดคะเนพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็ก และเป็นข้อมูลอ้างอิงในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.5.2 เสาเข็มที่ใช้ทดสอบ ใช้เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัวไอ (I) ขนาด 0.12 x 0.12 เมตร ยาว 4.00 เมตร

ทำการเจาะนำที่ระยะความลึก 0.0, 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตร

ใช้เสาเข็มจำนวน 3 ต้น ในแต่ละระยะความลึกที่เจาะนำ

1.5.3 ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็ก โดยวิธี Standard Loading Procedure ตามมาตรฐาน ASTM:D1143-81 และหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการทรุดตัวของเสาเข็มขนาดเล็กกับน้ำหนักที่กระทำ

1.5.4 จากผลการทดสอบคุณสมบัติของดิน และพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็กในแต่ละกรณี ทำการวิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และวิจารณ์ เพื่อใช้เป็นแนวทางการประกอบการตัดสินใจในการปฏิบัติงานในโอกาสต่อไป

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผู้ศึกษาคาดว่าจะการศึกษาในครั้งนี้ หากบรรลุตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ จะได้รับประโยชน์ดังนี้

1.6.1 ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็มขนาดเล็ก เมื่อมีการเจาะนำที่ระยะต่าง ๆ

1.6.2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจดำเนินการในสภาพการทำงานจริง

1.6.3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น สำหรับการศึกษานในโอกาสต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีแนวความคิด

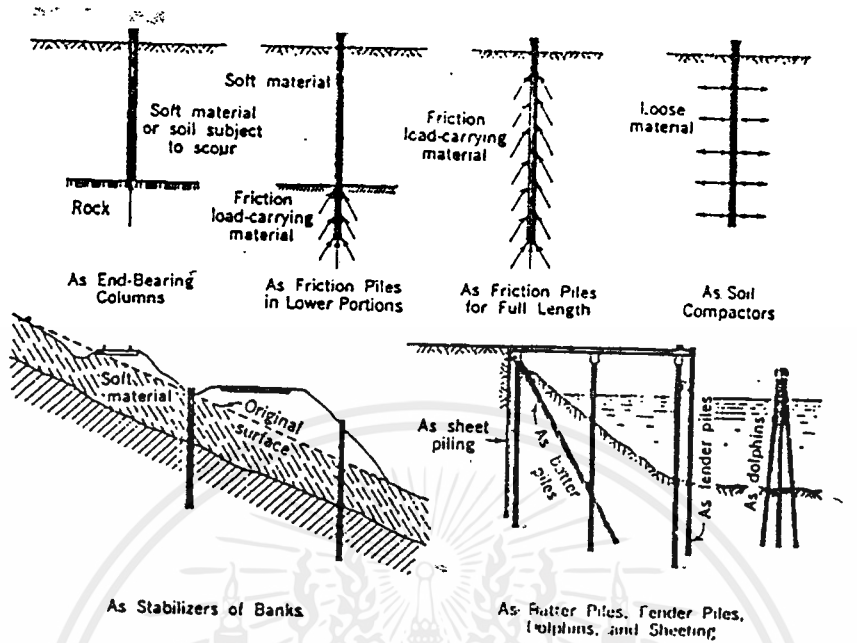
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเสาเข็ม

ในปัจจุบันนี้งานก่อสร้างในประเทศไทยได้เจริญรุดหน้าไปมาก ทั้งในด้านงานอาคารสูง งานสะพาน ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้ส่วนใหญ่มักจะใช้ฐานรากแบบเสาเข็ม เสาเข็มที่ใช้ อาจจะเป็นเสาเข็มไม้, เสาเข็มเหล็ก, เสาเข็มคอนกรีตอัดแรง การเลือกใช้เสาเข็มประเภทไหนก็ขึ้นอยู่กับประเภทของอาคาร สภาพของดิน ตลอดจนเงินทุนที่จะต้องใช้เป็นสำคัญ

ชนิดของเสาเข็มนั้น สามารถแบ่งออกได้หลายวิธี ดังเช่น

ก. แบ่งตามลักษณะการใช้งาน ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

1. เสาเข็มที่ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักผ่านน้ำหรือชั้นดินอ่อนไปยังชั้นดินแข็ง หรือชั้นหิน โดยอาศัยแรงแบกแทนที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) ของเสาเข็ม ซึ่งเรียกว่า Point Bearing Pile หรือเสาเข็มรับแรงที่ปลาย
2. ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักตลอดความลึกของเสาเข็มที่ผ่านชั้นดินโดยอาศัยความฝืดที่ผิว ซึ่งเรียกว่าเสาเข็มรับแรงเสียดทาน (Friction Piles)
3. ทำหน้าที่อัดดินทราย (Granular Soils) ให้แน่นเป็นการเพิ่มกำลังการรับน้ำหนักของดินทราย เรียกว่า Compaction Piles
4. ทำหน้าที่เป็นเข็มรับแรงดึง (Tension Piles) โดยเสาเข็มจะทำหน้าที่รับแรงดึงขึ้น (Uplift Pressure) หรือ แรงหมุนล้น (Overturning Moment)
5. ทำหน้าที่เป็นสมอยึด (Anchorage Piles) ต้านแรงดึงในแนวนอนต่าง ๆ (Horizontal Pull) เรียกว่า เข็มสมอ (Anchorage Piles)
6. ทำหน้าที่เป็นเข็มกันกระแทก และที่ผูกเรือ (Tender Piles and Dolphins หรือ ทำเข็มพีค (Sheet Piles)
7. ทำหน้าที่ต้านทานแรงในแนวเอียง เรียกว่าเข็มเอียง (Batter Piles)



รูปที่ 2.1 แสดงประเภทต่าง ๆ ของเสาเข็มที่แบ่งตามหน้าที่

ข. แบ่งตามชนิดของวัสดุที่ทำเสาเข็ม ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. เสาเข็มไม้ ส่วนมากเป็นเสาเข็มไม้เบญจพรรณ จำพวกไม้สน เพราะมีลำต้นที่ตรงไม่ค่อยคดงอมากนัก ส่วนมากเสาเข็มไม้จะมีความยาวประมาณ 4, 6, 8, 10 และ 12 เมตร ในปัจจุบันเสาเข็มไม้จะมีราคาค่อนข้างแพง และเสี่ยงต่อการหักในระหว่างการตอกเสาเข็ม อีกทั้งยังมีปัญหาด้านการผุร่อนของไม้ อีกทั้งการตอกต้องตอกให้หัวเสาเข็มจมต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินเสมอ จึงไม่เป็นที่นิยมในการก่อสร้าง

2. เสาเข็มเหล็ก จะมีลักษณะเป็นรูปตัว H หรือ รูปท่อน ส่วนใหญ่เป็นเหล็กจำพวก เหล็กเหนียว ซึ่งสามารถที่จะรับแรงกระแทกได้สูงและมีความแข็งแรง เสาเข็มเหล็กสามารถเพิ่มหรือลดความยาวได้ง่าย คือ สะดวกในการต่อและตัดออก สำหรับเรื่องการกัดกร่อน (Corrosion) เราพบว่าถ้าตอกเสาเข็มเหล็กใน Undisturbed natural soil deposits แล้วเรื่องสนิมก็ไม่ใช่อันตรายแต่เนื่องจากเสาเข็มเหล็กมีราคาแพง และต้องมีวิธีการป้องกันสนิมที่ดีพอจึงไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนัก

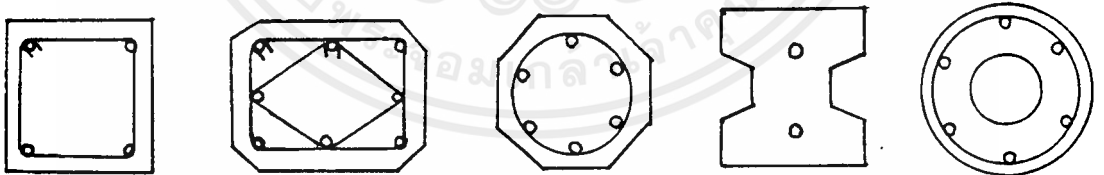
3. เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1 เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูป (Precast Concrete Piles) เสริมเหล็กธรรมดา หรือเสริมเหล็กแบบ Prestressed ลักษณะเป็นเสาเข็มคอนกรีตสี่เหลี่ยม แปดเหลี่ยม รูปตัว I หรือ กกลม ความยาว และขนาดสามารถคำนวณออกแบบและผลิตได้ตามความเหมาะสมของการใช้งาน

3.2 เสาเข็มเจาะ (Bore & Cast In Place Concrete Piles) ลักษณะเป็นการเจาะและคว้านดินเป็นหลุมตามขนาดและความลึกตามที่ออกแบบ และเทคอนกรีตกรอกตลอดหลุมที่เจาะไว้โดยแยกประเภทการทำเป็นระบบแห้ง (Dry Processes) และระบบเปียก (Wet Processes) ขึ้นกับวิธีการดำเนินงาน

4. เสาเข็มประกอบ (Composite Piles)

เสาเข็มประกอบเป็นเสาเข็มที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดประกบกันขึ้นเป็นเสาเข็มต้นเดียว เช่น ไม้กับคอนกรีต หรือเหล็กกับคอนกรีตสิ่งที่สำคัญที่สุดของเสาเข็มประเภทนี้คือข้อต่อจะต้องสัมพันธ์กันแบบสนิทสามารถที่จะถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกได้เต็มที่ และตรงข้อต่อต้องทนทานต่อโมเมนต์คด แรงดึงขึ้น (Uplift force) ได้ดีและข้อต่อต้องสามารถประกบกันในสนามได้สะดวก



รูปที่ 2.2 แสดงหน้าตัดแบบต่าง ๆ ของเสาเข็มคอนกรีต

2.2 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil)

ในงานออกแบบฐานราก จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของดินทางด้านความสามารถของการรับน้ำหนักบรรทุกซึ่งการพิบัติของดินส่วนใหญ่จะเนื่องมาจากแรงเฉือน กำลังต้านทานแรงเฉือน

ของดินส่วนหนึ่งมาจากแรงเสียดทานภายในระหว่างผิวของเม็ดดิน (Internal Friction) อีกส่วนหนึ่งมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion) โดยปริมาณสัดส่วนของกำลังความต้านทานแรงเฉือนของดินดังกล่าว จะแปรผันตรงกับปริมาณร้อยละของเม็ดดินหยาบ และเม็ดดินละเอียดเป็นสำคัญ(1) กล่าวคือ

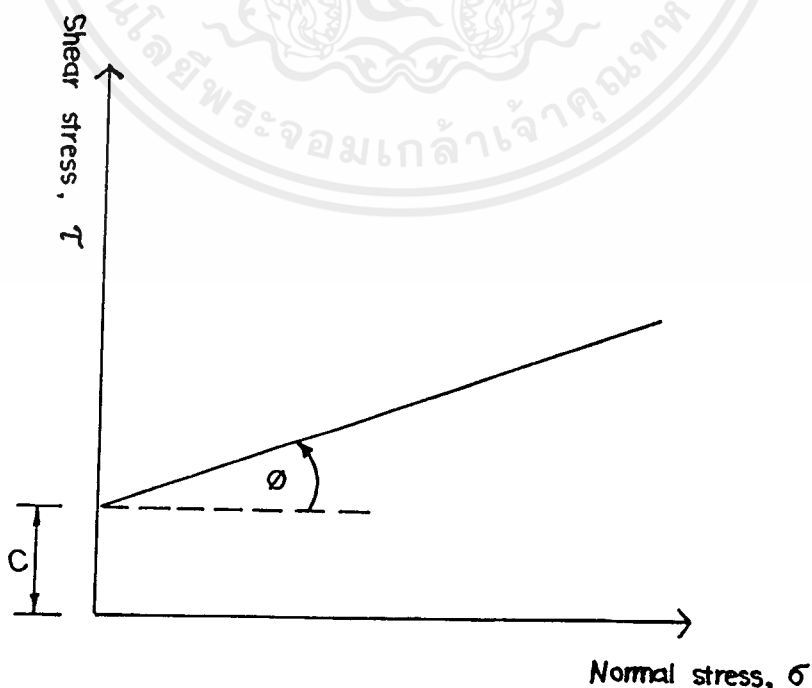
ค่ากำลังความต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีเม็ดหยาบ เช่น กรวดหรือทราย ขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินเป็นส่วนใหญ่ ส่วนค่ากำลังความต้านทานแรงเฉือนของดินที่มีเม็ดละเอียด เช่น ดินเหนียว (Clay) ขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินเป็นส่วนใหญ่

ในปี ค.ศ. 1773 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส C.A. Coulomb ได้ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงกดตั้งฉากบนพื้นผิวสัมผัสที่ระนาบใด ๆ ของมวลดินในรูปของสมการเส้นตรง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

เมื่อ

- τ = หน่วยแรงเฉือน (shear stress)
- C = หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ปรากฏ
= หน่วยแรงกดตั้งฉากกับผิวสัมผัส
- ϕ = มุมเสียดทานภายใน



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงกดตั้งฉาก

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงกดตั้งฉาก สามารถหาได้โดยการทดสอบค่าแรงเฉือนของดิน โดยวิธีต่าง ๆ ค่าของ C และ ϕ ที่ได้จากการทดสอบเป็นค่าคงที่สำหรับดินแต่ละชนิดที่อยู่ภายใต้สภาวะหนึ่ง ซึ่งจะนำไปใช้ได้กับดินชนิดนั้นที่อยู่ภายใต้สภาวะเดียวกันเท่านั้น อนึ่ง เมื่อมีแรงดันน้ำ (Pore Water Pressure) เข้ามาเกี่ยวข้องจะต้องคิดหน่วยแรงแบบ effective เสมอ

ตารางที่ 2-1 มุมเสียดทานภายในของดินจำพวกไม่มีแรงยึดเหนี่ยว

ชนิดดิน	มุมเสียดทานภายใน (ϕ)
ทรายและกรวดบนทราย	40 - 50
ทรายจำพวกเม็ดดินคละกั้นดี	40 - 50
ทรายที่มีขนาดละเอียดจนถึงปานกลาง	32 - 35
ดินตะกอนปนทราย	30 - 33
ดินตะกอน (ความเป็นพลาสติกไม่มี)	30 - 35

2.3 กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม (Bearing Capacity of Piles)

กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ขึ้นอยู่กับตัวเสาเข็ม (คอนกรีตและเหล็กเสริม) ที่จะทานหรือรับน้ำหนักบรรทุกโดยไม่เกิดหน่วยแรงในตัวเสาเข็มเกินกว่าหน่วยแรงปลอดภัย และยังขึ้นอยู่กับความสามารถของเสาเข็มที่จะถ่ายน้ำหนักให้แก่ดินรอบ ๆ เสาเข็มนั้น โดยอาศัยแรงฝืดของผิวรอบเสาเข็ม และการถ่ายน้ำหนักที่ปลายเข็มเมื่อตั้งอยู่ในชั้นดินแข็งหรือชั้นทราย

กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มเป็นค่าน้ำหนักสูงสุดที่เสาเข็มจะรับได้ โดยไม่ทรุดหรือจมลงอย่างรวดเร็วเมื่อรับน้ำหนักกดคงที่ กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มคำนวณได้จากการใช้ส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) หาค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มหรือจากการทรุดตัวที่ยอมรับหรือจากเสถียรภาพต่าง ๆ ของฐานรากเสาเข็มซึ่งยังมีผู้วิจัยตลอดมา(1)



การคาดคะเนโดยวิธีสถิตยศาสตร์ (Static Formula)

สูตรคำนวณทั่วไปที่ใช้คาดคะเนกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม (Q_p) หนึ่งต้นได้จากการรวมค่าความต้านทานจากแรงฝืดของผิวรอบพื้นที่ผิวของตัวเสาเข็มที่สัมผัสกับดิน (Q_u) กับค่าความต้านทานต่อแรงกดอัดที่ปลายเข็ม (Q_c) นั่นคือ

$$Q_p = Q_u + Q_c$$
$$= \Sigma(\Delta L)(a_u)(s_u) + A_p(q_p)$$

โดยที่

- ΔL = ความยาวเสาเข็มในชั้นของดิน เมตร
- a_u = เส้นรอบรูปเสาเข็มที่รับแรงฝืดของผิว เมตร
- s_u = แรงยึดหรือแรงฝืดของผิวระหว่างเสาเข็มกับดิน กก./ม.³
- q_p = ความต้านทานต่อแรงกดอัดประลัย ที่ปลายเสาเข็ม เช่น
 $= cN_c + \gamma dN_q + 0.5 \gamma B N_q$
- A_p = พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม
- c = แรงยึดเหนี่ยวของดิน กก./ม.²

ในที่นี้ตัวกำลังต้านทานของดิน c หรือ ϕ อาจอยู่ในเทอมของหน่วยแรงรวมหรือหน่วยแรงประสิทธิผล ขึ้นอยู่กับว่าเสาเข็มอยู่ในดินชนิดใด เมื่อเสาเข็มอยู่ในดินที่มีความแน่น เช่นดินเหนียวแบบยุบตัวตามปกติหรือเกินปกติก็ใช้แบบหน่วยแรงรวม เพราะเสาเข็มมีกำลังรับน้ำหนักได้น้อยที่สุดขณะที่เพิ่งตกลงไป แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นกำลังรับน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นส่วนเสาเข็มที่อยู่ในดินที่ไม่มีความแน่นหรือในดินที่มีความแน่นชนิด heavily consolidated ก็ใช้แบบหน่วยแรงประสิทธิผล

ถ้าให้ F.S. เป็นอัตราส่วนปลอดภัย (ใช้อย่างน้อยเท่ากับ 2.5) ดังนั้น กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม

$$Q_u = \frac{Q_p}{F.S.} \quad (\text{ยังไม่ได้หักน้ำหนักของเสาเข็ม})$$

สำหรับดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น และ $c' = 0$ เช่นทราย ดินร่วน

$$Q_u = \Sigma(\Delta L)(a_u)(K\gamma d \tan \phi')$$

$$= \Sigma(\Delta L)(a_u)(K\phi' \gamma \tan \phi')$$

$$Q_u = A_u(\gamma d N_q + 0.5 \gamma B N_q)$$

แต่ค่าของ $0.5 \gamma B N_q$ น้อยมากเมื่อเทียบกับค่าของ $\gamma d N_q$ ดังนั้น

$$Q_u = A_u(\gamma d N_q) = A_u \phi' N_q$$

โดยที่ K = สัมประสิทธิ์แรงดันทางข้างของดินมีค่าระหว่าง 1 ถึง 3 ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์

ϕ' = γd = หน่วยแรงในแนวดิ่งที่คิดในเทอมของหน่วยแรงประสิทธิผล

γ = หน่วยน้ำหนักของดิน กก. ต่อ ลบ.เมตร

d = ความลึกของเสาเข็มให้ผิวดิน เมตร

ϕ' = มุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดิน (ประมาณ 30 - 35 องศา สำหรับบริเวณกรุงเทพฯ)

N_q = สัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่อแรงกดอัด ขึ้นอยู่กับมุมเสียดทาน (=35 สำหรับชั้นทรายบริเวณกรุงเทพฯ)

สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น และ $\phi = 0$ เช่นดินเหนียวอ่อน

ดังนั้น $Q_s = \Sigma(\Delta L)(a_u)(s_u)$

$$Q_u = A_u(c N_c + \gamma d) = A_u(c N_c + \phi_v)$$

หรือ $= A_u(c N_c)$ โดยประมาณ

โดยที่ $N_c =$ ตัวคงที่ = 9 (สำหรับดินแข็ง)

$s_u = c$ (สำหรับดินอ่อน) และ $= (0.4 - 0.6)c$ (สำหรับดินแข็ง)

c = หน่วยแรงเฉือนของดิน (undrained shear strength)

$\phi_v = \gamma d$ = หน่วยแรงในแนวดิ่งที่คิดในเทอมของหน่วยแรงรวม

ดังนั้นกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม เมื่อปลายห้อยอยู่ในชั้นดินต่าง ๆ ก็สามารถคำนวณได้ดังนี้

ก. เสาเข็มคอนกรีตปลายห้อยในชั้นดินแข็ง

$$Q_u = \Sigma(\Delta L)(a_u)(s_u) + A_p(cN_u)$$

ข. เสาเข็มคอนกรีตปลายห้อยในชั้นทราย (ผ่านชั้นดินที่มีความเชื่อมแน่น)

$$Q_u = \Sigma(\Delta L)(a_u)(s_u + K\sigma'_v \tan\phi') + A_p(\sigma'_v N_u)$$

ค. เสาเข็มไม้หรือคอนกรีตในชั้นดินอ่อน (เข็มเสียดทาน)

$$Q_u = \Sigma(\Delta L)(a_u)(s_u)$$

ง. เสาเข็มไม้ปลายห้อยในชั้นดินแข็ง

$$Q_u = \Sigma(\Delta L)(a_u)(s_u) + A_p(cN_u)$$

ตารางที่ 2.2 ค่าของ s_u และ c สำหรับดินบริเวณกรุงเทพมหานคร

ชั้นดิน	s_u (กก./ม. ²)		c (กก./ม. ²)	
	เข็มคอนกรีต	เข็มไม้	เข็มคอนกรีต	เข็มไม้
ดินอ่อน (0 ถึง 6 ม.)	1800	1470		
ดินอ่อน (6 ถึง 12 ม.)	1800	1800		
ดินปานกลาง (12 ถึง 14 ม.)	4000	1800		5000
ชั้นดินแข็ง	1800	6000	10000	10000

ข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร

ข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร ได้ให้ข้อกำหนดต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการ
หากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มดังต่อไปนี้

ในกรณีที่ไม่มีเอกสารแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติของดิน

หน่วยแรงผิวดินที่ขอมให้

- ดินที่อยู่ในระดับลึกไม่เกิน 7 เมตร ได้ระดับน้ำทะเลปานกลาง

$$\text{หน่วยแรงผิวดินที่ขอมให้} = 600 \text{ กก./ตารางเมตร}$$

- ดินที่มีความลึกเกินกว่า 7 เมตร ได้ระดับน้ำทะเลปานกลาง

$$\text{หน่วยแรงผิวดินที่ขอมให้} = 800 + 200L \text{ กก./ตารางเมตร}$$

ในกรณีที่มีเอกสารทดสอบคุณสมบัติของดิน หรือมีการทดสอบหาค่าดึงแบกทานของเสาเข็มในบริเวณก่อสร้างหรือข้างเคียง ให้ใช้กำลังแบกทานของเสาเข็มไม่เกินอัตราต่อไปนี้

1. ไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังแบกทานของเสาเข็มที่คำนวณจากการทดสอบ

สมบัติดิน

2. ไม่เกินร้อยละ 40 ของกำลังแบกทานของเสาเข็มที่คำนวณจากสูตรการตอก

เสาเข็ม

3. ไม่เกินร้อยละ 50 ของกำลังแบกทานของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบกำลัง

แบกทานสูงสุด

การคาดคะเนโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Formula)

จากการวิเคราะห์โดยอาศัยสมมติฐานว่า พลังงานเนื่องจากน้ำหนักลูกตุ้มที่ปล่อยกระทบบนหัวเสาเข็ม ต้องเท่ากับพลังงานที่เสาเข็มได้รับเพื่อที่จะดันเสาเข็มให้เคลื่อนที่ลงไปในดิน จะได้สูตรการตอกเสาเข็มซึ่งมีผู้เสนอไว้หลายคน

Engineering News Formula สูตรนี้เสนอโดย A.M. Wellington (1888)

เป็นสูตรง่าย ๆ ไม่ยุ่งยากเหมือนสูตรอื่น ๆ กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม หาได้เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 6

- 1) สำหรับการตอกโดยลูกตุ้มปล่อย (Drop hammer)

$$Q_u = \frac{WH}{6(S + 2.5)}$$

2) สำหรับการตอกโดยปล่อยลูกตุ้มด้วยเครื่องจักร (Single acting steam hammer)

$$Q_u = \frac{WH}{s(s + 0.25)}$$

ในที่นี้

Q_u = กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม, กก.

W = น้ำหนักของลูกตุ้มที่ใช้ตอก, กก.

H = ระยะตกกระแทกของลูกตุ้ม, ซม.

S = ระยะที่เสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง, ซม. (ปกติใช้ค่าเฉลี่ยจากการตอก 5 ครั้งสุดท้าย เมื่อตอกโดยลูกตุ้มปล่อย หรือใช้ค่าเฉลี่ยจากการตอก 20 ครั้งสุดท้าย เมื่อตอกโดยการปล่อยลูกตุ้มด้วยเครื่องจักร)

Hiley's Formula สูตรนี้เสนอโดย Hiley ใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย F เท่ากับ

2 - 2.5

$$Q_u = \frac{EWH}{(s + 0.5C)} \cdot \frac{W + e^2 P}{W + P}$$

ในที่นี้

Q_u = กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม, กก.

W = น้ำหนักของลูกตุ้มที่ใช้ตอก, กก.

H = ระยะตกกระแทกของลูกตุ้ม, ซม.

S = ระยะที่เสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง, ซม.

C = ระยะสูบลูกตุ้ม, ซม. = $C_1 + C_2 + C_3$

C_1 = ระยะสูบลูกตุ้มของหมอนรองหัวเสาเข็มหนา t ซม. = $0.018 Q_u t$ ซม.

= 0.20 - 0.40 ซม. สำหรับเสาเข็มคอนกรีตที่รองด้วยไม้ในหัวครอบเหล็ก

$$C_u = \text{ระยะศูนย์กลางของเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กยาว } L \text{ เมตร}$$

$$= 0.72 \frac{Q_u L}{A} \text{ ซม.}$$

$$C_s = \text{ระยะศูนย์กลางของดินใต้และรอบเสาเข็ม} = 3.60 \frac{Q_u}{A} \text{ ซม. ประมาณ}$$

$$0.25 \text{ ซม.}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม, ซม.}^2$$

$$E = \text{ประสิทธิภาพของลูกตุ้ม}$$

$$= 1.00 \text{ สำหรับลูกตุ้มปล่อยด้วยไก หรือ } = 0.75 \text{ เมื่อปล่อยตัวออก}$$

$$\text{และเครื่องร่อน}$$

$$= 0.75 - 0.85 \text{ สำหรับ single acting steam hammer}$$

$$= 0.85 \text{ สำหรับ Double acting steam hammer}$$

$$= 1.00 \text{ สำหรับ Diesel hammer}$$

$$e = \text{สัมประสิทธิ์ของการรองรับการตอก}$$

$$= 0.25 \text{ สำหรับการตอกเสาเข็มคอนกรีตที่รองด้วยหมอนรองไม้}$$

$$P = \text{น้ำหนักของเสาเข็ม เมื่อปลายเสาเข็มห้อยบนชั้นดินแข็งหรือชั้นทราย}$$

$$= \text{ครึ่งหนึ่งของน้ำหนักของเสาเข็ม เมื่อปลายเสาเข็มห้อยบนชั้นหิน}$$

Janbu's Formula สูตรนี้เสนอโดย Janbu ใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยเท่ากับ 3

$$Q_u = \frac{WH}{K_u S}$$

$$K_u = C_u [1 + \sqrt{1 + (C_u / C_s)}]$$

$$C_u = 0.75 + 0.15 \frac{P}{w}$$

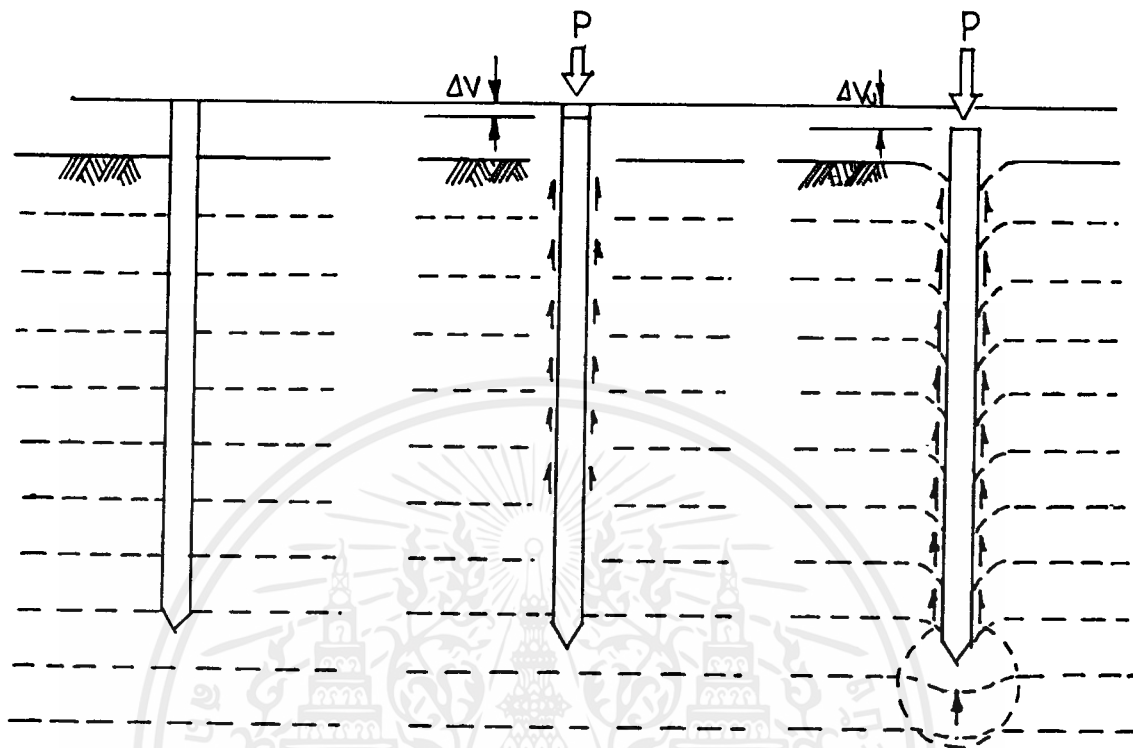
$$\lambda = \frac{WHL}{AE S^2}$$

$$P = \text{น้ำหนักของเสาเข็ม, กก.}$$

- W = น้ำหนักของลูกตุ้ม, กก.
 H = ระยะลูกตุ้มตก, ซม.
 S = ระยะที่เสาเข็มจมต่อการตอกหนึ่งครั้ง, ซม.
 A, E, L = พื้นที่หน้าตัด ซม.², โมดูลัสยืดหยุ่น กก./ซม.², ความยาวของเสาเข็ม ซม. ตามลำดับ

2.4 พฤติกรรมของดินโดยรอบเสาเข็ม

เสาเข็มเมื่อติดตั้งลงในชั้นดินด้วยวิธีใด ๆ แล้วก็ตาม ถ้าไม่พิจารณาถึงการกระทบกระเทือนของชั้นดิน เนื่องจากการตอกหรือเจาะเพื่อติดตั้งเสาเข็มแล้วละก็ ชั้นดินและเสาเข็มก็จะยังไม่มี การเคลื่อนที่ ดังในรูปที่ 2.4 ต่อเมื่อเริ่มบรรทุกน้ำหนักลงบนเสาเข็มก็จะเคลื่อนที่ลงตามทิศทางแรง ในขณะที่เดียวกัน ดินที่เกาะอยู่ข้าง ๆ ผิวเข็มก็พยายามต้านทานไว้ จึงมีการถ่ายแรงจากเข็มลงสู่ชั้นดิน ชั้นดินเองก็จะเคลื่อนตามเสาเข็มลงไปด้วย การเคลื่อนที่จะเกิดมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น และในช่วงหลังจะเกิดการต้านทานที่ปลายเข็มเข้ามาร่วมด้วย ในลักษณะเดียวกับฐานแผ่ที่มีพื้นที่เท่าปลายเข็ม ผลสุดท้ายเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากจนชั้นดินไม่สามารถจะต้านทานได้ ก็จะเป็นแนวเคลื่อนพัง (Shear Plane) โดยรอบผิวเสาเข็ม และที่ปลายเสาเข็ม และมีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่า "น้ำหนักบรรทุกสูงสุด" (Ultimate Pile Capacity) ในกรณีที่เป็นชั้นดินหลายชนิดตลอดความยาวเข็ม จะมีการถ่ายน้ำหนักลงชั้นดินจากผิวเข็ม (Friction Load Transfer) ได้ไม่เท่ากันถึงแม้ว่าการเคลื่อนตัวจะใกล้เคียงกันก็ตาม ดินที่แข็งแรงกว่าจะสามารถถ่ายน้ำหนักได้มากกว่าดินอ่อน ในระดับการเคลื่อนตัวเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาะรับตอม่อสะพานสาทร ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งจากรูปที่ 2.5 คือน้ำหนักที่ถ่ายลงชั้นดิน ส่วนใหญ่เป็นการถ่ายที่ส่งผ่านทางผิวเข็ม (Friction Resistance) ราว 90 % ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ส่วนที่หลายเสาเข็มมีน้ำหนักถ่ายลงชั้นดิน (End หรือ Point Bearing) เพียง 10 % เท่านั้น แต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากการคลายแรงต้านที่ผิวเข็มของดินส่วนบน แต่สัดส่วนของการถ่ายแรงเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะดิน เช่นในกรณีของเข็มที่ยังลงถึงชั้นหินแข็ง การถ่ายน้ำหนักจะเกิดขึ้นที่ปลายเป็นส่วนใหญ่หรือทั้งหมด เพราะเข็มเคลื่อนตัวเพียงเล็กน้อย



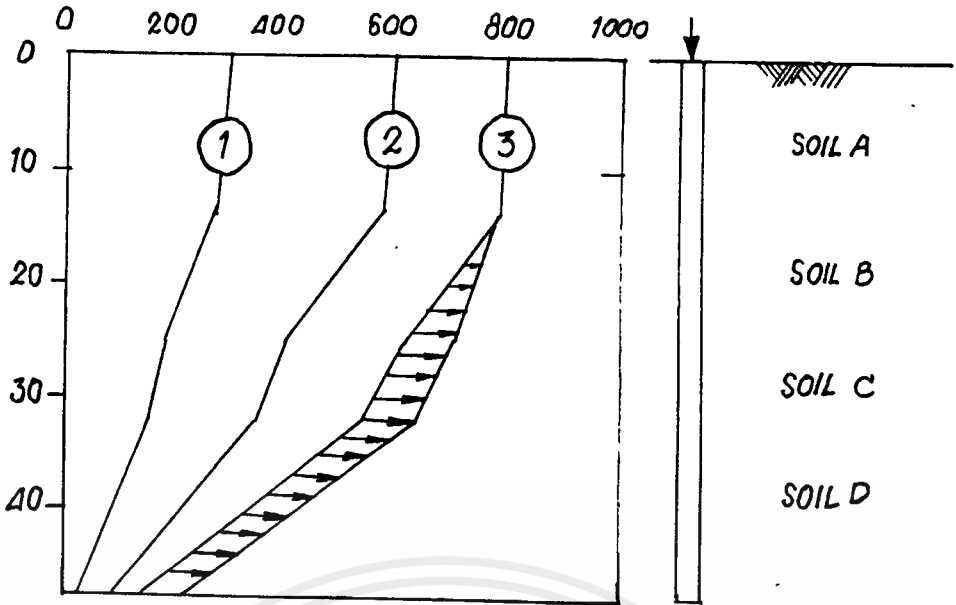
ก. เมื่อไม่มีน้ำหนัก

ข. มีน้ำหนักปานกลาง

ค. มีน้ำหนักสูงสุด

รูปที่ 2.4 การเคลื่อนตัวของดินบริเวณเสาเข็ม

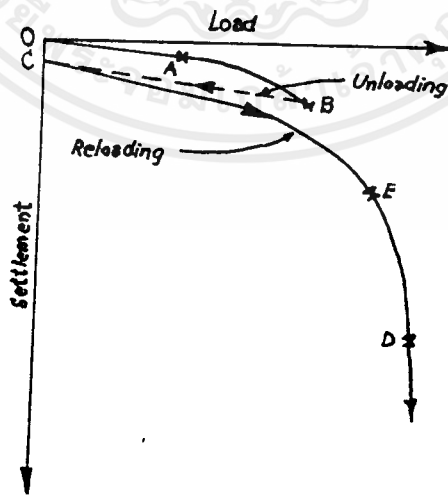
น้อย ชั้นหินก็จะรับน้ำหนักได้มากในขณะที่ดินรอบผิวเข็มยังไม่สามารถถ่ายน้ำหนักได้เลย ดังนั้นในการวิเคราะห์แรงต้านของเสาเข็ม เราจึงมักจะแบ่งแรงต้านออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดที่ผิวของเข็ม และส่วนที่เกิดที่ปลายเสาเข็ม เข็มที่มีแรงต้านส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวเข็ม เรามักจะเรียกว่า "Friction Pile" ส่วนเข็มที่ยึดบนชั้นดินมากหรือชั้นหิน ซึ่งมีการถ่ายเทน้ำหนักที่ปลายเข็มเป็นส่วนใหญ่ ก็จะเรียกว่า "End Bearing Pile"(2)



รูปที่ 2.5 การถ่ายน้ำหนักของเข็มบนดินหลายชั้น

2.5 พฤติกรรมของเสาเข็มภายใต้น้ำหนักกระทำ

เมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างรวดเร็ว หรือในอัตราที่รวดเร็วพอประมาณ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวของเสาเข็ม จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Load-settlement curve for compressive load to failure on pile (After Tomlinson, 1981)

ในตอนเริ่มแรกกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จะอยู่ในสภาวะ elastic จนถึงจุด A คือ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับการทรุดตัวของเสาเข็มจะเป็นเส้นตรง ในช่วงน้ำหนักกดที่ให้กับเสาเข็มจะถูกต้านทานด้วยแรงเสียดทานระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม (Skin Friction) เพียงอย่างเดียว ถ้าทำการถอนน้ำหนักที่กดในช่วงนี้ออก การทรุดตัวของเสาเข็มจะสามารถกลับคืนอยู่ในสภาพเดิมได้

การเพิ่มน้ำหนักกดให้มากกว่าจุด A จนกระทั่งถึงจุด B จะทำให้เกิดการ slip ขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างดินกับเสาเข็ม เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม (Skin Friction) ได้ถึงจุดสูงสุดแล้ว น้ำหนักกดส่วนที่เกินจากนี้ จะถูกถ่ายไปให้แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) รับไว้ ถ้าทำการถอนน้ำหนักที่กดในช่วงนี้ออก การทรุดตัวของเสาเข็มจะกลับคืนไปที่จุด C ซึ่งจะเกิดการทรุดตัวถาวรขึ้นเท่ากับ OC

ตารางที่ 2.3 Permissible Max Settlement

Type of Structure	Max Settlement Allowable (cm.)
1) Build with plain Brick wall on Continuous and Seperate Foundation with wall length L to wall height H L/H > 2.5	7.5
L/H > 1.5	10.0
2) Frame Building	10.0
3) Solid R.C., Concrete and water tower	10.0

ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่จุด Maximum Skin Friction จะมีค่าน้อยมาก คือ ประมาณ 0.3 ถึง 1 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเท่านั้น ส่วนค่าการทรุดตัวที่จุด

Maximum End Bearing จะมีค่าประมาณ 10 ถึง 20 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งที่จุดนี้ (จุด D) เสาเข็มจะจมลงเรื่อย ๆ โดยปราศจากการเพิ่มน้ำหนักกด หรือเพิ่มน้ำหนักกด เพียงเล็กน้อย แต่เกิดการทรุดตัวสูงมาก

2.6 ผลของการตอกเสาเข็ม

ในการก่อสร้างอาคาร จำเป็นต้องมีฐานรากที่ใช้เสาเข็มรองรับ ซึ่งอาจทำได้โดยการตอกเสาเข็มอย่างหนึ่งหรือทำเสาเข็มหล่อกับที่โดยเจาะรูด้วยสว่าน หรือตอกกระบอกเหล็กจนถึงระดับลึก ตักดินออก แล้วเทคอนกรีตลงไปจนเต็มอีกอย่างหนึ่ง

การตอกเสาเข็มย่อมทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในดินเป็นคลื่นแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะในทรายเป็นอันตรายทำให้พื้นดินทรุดได้ มีตัวอย่างในการก่อสร้างแห่งหนึ่ง ตอกเสาเข็ม 100 ต้น ลงไปในชั้นทรายเป็นระยะห่าง 15 เมตร ปรากฏว่าพื้นดินบริเวณที่ตอกเสาเข็มทรุดลงไปถึง 15 ซม. และที่ระยะห่างออกไป 15 เมตร การทรุดเหลือ 3 มม. (6)

การตอกเสาเข็มลงไปในชั้นดินเหนียว ดินอาจดูดขึ้นมาเป็นระยะทางไกลจากอาณาบริเวณที่ตอกเสาเข็มพอสมควร การเลื่อนของดินอาจไปดันสิ่งก่อสร้างข้างเคียง เช่น เขื่อน ทำให้เกิดความดันเพิ่มขึ้นมากกว่าที่คิดไว้ในการออกแบบมาก และเขื่อนอาจเอียงหรือแตกראวได้จึงจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังมาก (6)

มีปัญหว่าการตอกเสาเข็มลงไปในดิน จะทำให้เกิดการกระทบกระเทือนดินที่อยู่ข้างเคียงได้มากนักเพียงใด ได้มีการทดลองโดยใช้ท่อเหล็กมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 ซม. ยาว 12 เมตร ตอกลงไปในดิน และหาคุณสมบัติของดินที่ระยะต่าง ๆ จากท่อเหล็ก และที่เวลาต่าง ๆ กัน คือ 1, 2, 7, 14 และ 28 วัน หลังจากวันตอกท่อเหล็กลงไปในดินผลพอสรุปได้ว่า

1. การสะเทือนจากการตอกเข็ม ทำให้กำลังของดินเสียไปประมาณ 28 %
2. ระยะที่กระทบกระเทือนนั้น ห่างจากผิวเสาเข็มเท่ากับระยะผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม
3. กำลังของดินที่เสียไปนี้จะกลับคืนมาหลังจากการตอกเสาเข็มแล้ว 14 วัน

ดังรายละเอียดในบทสรุป ที่นำเสนอต่อที่ประชุมปฐพีวิศวกรรมในการประชุมครั้งที่ 4 ของสมาคมปฐพีวิศวกรรมเอเชียอาคเนย์ ที่ประเทศมาเลเซีย พ.ศ. 2518 ดังต่อไปนี้

ผลของการตอกเสาเข็มที่มีต่อ ค่าแรงเฉือน

(1) ทำให้ค่าแรงเฉือน ที่ระยะต่าง ๆ จากผิวเสาเข็มลดลง

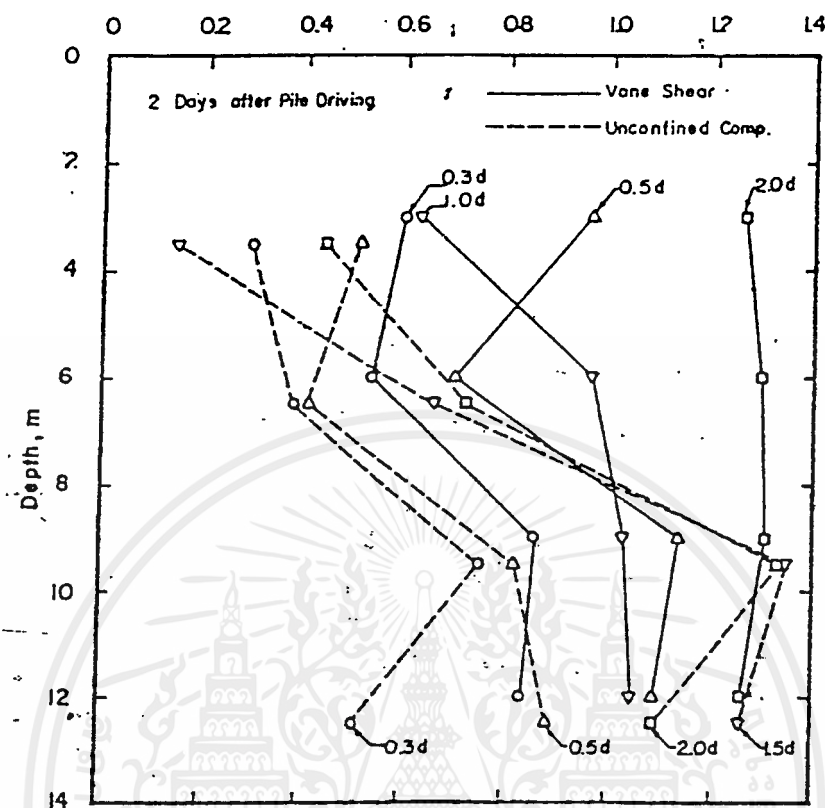
รูปที่ 2.7 แสดงว่า แรงเฉือนของดินรอบ ๆ เข็มที่ความลึกต่าง ๆ เป็นที่น่าสังเกตว่า การตอกเข็มจะรบกวนดินใกล้ ๆ ปลายเข็มเพียงเล็กน้อยและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นกับดินชั้นบน ๆ ซึ่งเป็นไปตามที่คาดเพราะดินชั้นบนไวกว่าดินชั้นล่าง

จากรูปที่ 2.8 จะพบว่าค่าแรงเฉือนที่ใกล้กับเข็ม (0.3d) หลังจากตอกเข็มหนึ่งวันแล้ว มีค่าประมาณ 70 % ของ Undisturbed Strength ที่วัดโดย field vane test แต่ถ้าหาโดย unconfined compression test แล้วจะได้ประมาณ 50 % เท่านั้น และจากรูปที่ 2.8 เช่นเดียวกัน จะสังเกตเห็นได้ว่า ระยะที่กระทบกระเทือน กำลังของดินมีระยะประมาณ 0.6d และ 1.0d จากผิวของเข็มโดยวิธี field vane และ unconfined compression test ตามลำดับ

โดยทั่วไป ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเข็มสำหรับดินกรุงเทพฯ มักจะใช้เท่ากับ 3d และสิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าผลกระทบกระเทือนต่อ กำลังของดินจะมีระยะประมาณ 1d จากผิวของเข็ม ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดสอบในสนาม

การศึกษาเกี่ยวกับการลดลงของกำลังของดินรอบ ๆ เข็ม และการแผ่ขยายการกระทบกระเทือนต่อดินข้างเคียงนั้น ได้เคยมีผู้ศึกษาและค้นคว้ามากมาย การค้นคว้าและวิจัยครั้งนี้ ได้ให้ผลใกล้เคียงกับผลของ Zeevaert ซึ่งได้ทดสอบโดยตอกเข็มลงไป Mexico clay ใน ปี พ.ศ. 2500(6)

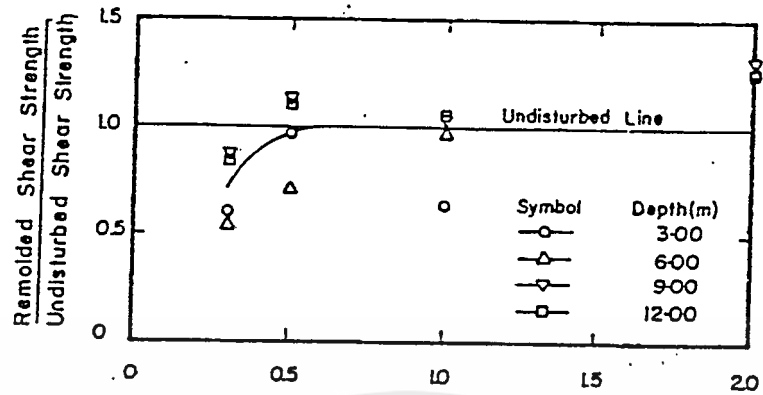
Remolded Shear Strength/Undisturbed Shear Strength



รูปที่ 2.7 Shear Strength of Disturbed Clay Close to Pile Shaft

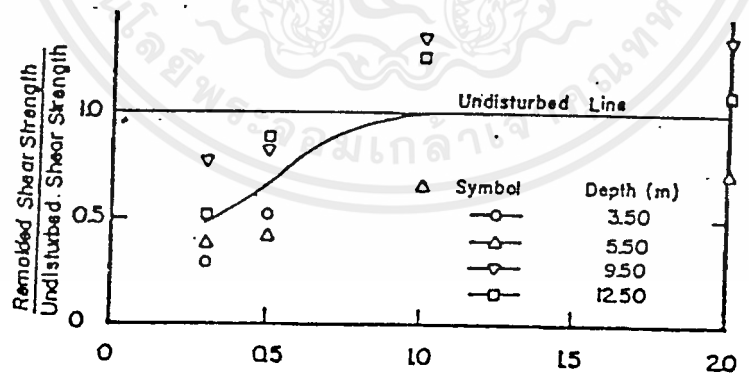
(2) กำลังที่กลับคืนมาหลังจากตอกเข็มแล้ว

รูปที่ 2.9 แสดงค่าแรงเฉือนของดินตามแนวเข็มที่เวลาต่าง ๆ หลังจากการตอกจะเห็นได้ว่าเพียง 4 ชั่วโมงหลังจากการตอก ค่าแรงเฉือนของดินจะลดลงมาก กำลังของดินที่หาจาก field vane test จะมีค่าระหว่าง 60 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของกำลังของดินที่ไม่ถูกรบกวน หรือโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 72 % และถ้าหาโดยวิธี unconfined compression test ค่าจะอยู่ระหว่าง 25 ถึง 38 เปอร์เซ็นต์ หรือโดยเฉลี่ยประมาณ 29 % ส่วนวิธี triaxial (UU) test นั้นจะให้ กำลังต่ำกว่าวิธี unconfined compression test คือมีค่าประมาณ 14 ถึง 28 %



Distance from Pile Surface/Diameter of Pile

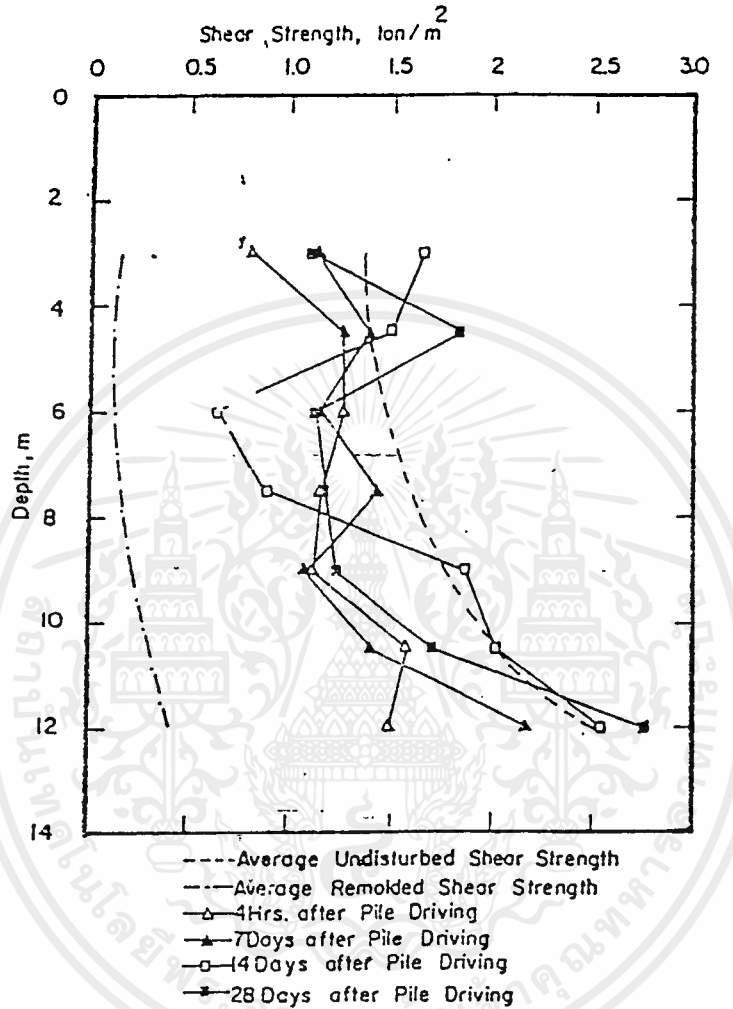
- Shear Strength of Disturbed Clay Close to Pile Shaft
(Vane Test)



Distance from Pile Surface/Diameter of Pile

รูปที่ 2.8 Shear Strength of Disturbed Clay Close to Pile Shaft
(Unconfined Test)

จากการสังเกตพบว่า ดินตัวอย่างที่เก็บมาในวันตอกเข็ม หลังจากที่ได้ทดสอบทั้ง plastic และ semi-plastic failure แล้วแสดงว่าโครงสร้างของดินนั้นมีสภาพแตกกระจาย (diaparse condition) เหมือนกับดินตัวอย่างที่ถูกทำลายโครงสร้างแล้ว



รูปที่ 2.9 Change in Shear Strength of Different Times offer Pile Driving (Vane Test)

(remoldes sample) หลังจากที่ได้ตอกเข็มแล้ว pore pressure จะกระจายออกและดินก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น stress-strain curve ของดินตัวอย่างทั้งหมดที่เก็บ 7 วันหลังจากการตอก จะมีความลาดชันเหมือนดินตัวอย่างที่ไม่ถูกรบกวน (undisturbed sample) ที่เป็นเช่นนี้แสดงให้เห็นว่ากำลังที่สูญเสียไปเนื่องจากการตอกจะกลับคืนมาเนื่องจาก thixotropic hardening process ซึ่งเป็นกรการกระจายของ pore pressure และการยุบตัวของดินเนื่องจากแรงอัดด้านบน

ค่ากำลังของดินที่ 14 วัน ที่ขึ้นดินที่อยู่ใต้ weathered zone (น้อยกว่า 4.50 เมตร จากผิวดิน) จะมีค่าน้อยกว่า กำลังที่ 7 วัน ที่ weathered zone และที่ชั้นลึก ๆ กำลังจะเพิ่มขึ้น และโดยส่วนใหญ่ กำลังที่ 28 วัน จะมีค่าน้อยกว่าที่ 7 วัน ยกเว้นที่ weathered zone และที่ปลายเข็ม เราคาดได้ว่าที่ 14 และ 28 วันกำลังที่สูญเสียไปควรที่จะกลับคืนมา และเข็มก็พร้อมที่จะรับน้ำหนักบรรทุกได้เต็มที่ ทั้งนี้เพราะว่า pore pressure กระจายออกไปเกือบหมดแล้ว

ในปี พ.ศ.2500 SEED และ REESE (6) ได้พบว่าวิธีสามารถรับแรงขารจะสูงสุด (maximum bearing capacity) เมื่อประมาณ 14 วัน หลังจากวันที่ตอก ในปี พ.ศ. 2513 HOLMBERG ได้สรุปผลการทดสอบรับน้ำหนักของเข็มในบริเวณกรุงเทพฯ พบว่าการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเข็มควรจะทำ 1 - 2 สัปดาห์หลังจากวันที่ตอกและในปี พ.ศ. 2515 จุฑา ศิริวงศ์ ได้ค้นพบจากการทดสอบเข็มที่บริเวณลาดพร้าว กรุงเทพฯ ว่า วิธีสามารถรับแรงขารจะสูงสุดประมาณ 20 วันหลังจากวันที่ตอก (6) ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลของการวิจัยและค้นคว้า ของท่านเหล่านี้มิได้ขัดแย้ง อีกทั้งยังสอดคล้องกับรายงานฉบับนี้ด้วย

2.7 การทดสอบเสาเข็ม (Pile Load Test)

เป็นงานที่มีความสำคัญและเป็นประโยชน์ต่อโครงการก่อสร้างมาก โดยที่การทดสอบเสาเข็มควรกระทำขึ้นก่อนหรือในระหว่างที่กำลังออกแบบฐานรากอยู่ ทั้งนี้เพื่อให้วิศวกรผู้ออกแบบฐานรากได้มีโอกาสนำค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้จาก Static Pile Formula มาตรวจสอบกับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกจริงของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มในสนาม ซึ่งจะทำได้ทำให้สามารถปรับปรุงและแก้ไขการออกแบบฐานรากให้ถูกต้อง ประหยัด และเหมาะสมที่สุด รวมทั้งมีความมั่นใจในการตัดสินใจประเมินค่า Factor of Safety ของฐานรากด้วย

วิธีทดสอบเสาเข็ม ตามมาตรฐานของ ASTM DESIGNATION : 1143 - 81 ซึ่งจะขอล่าวเพียง 2 วิธีดังนี้

2.7.1 Standard Loading Procedure

- สำหรับเสาเข็มเดี่ยว ให้น้ำหนักทดสอบจนพินิจ หรือ 200 % ของ

Design Load

- สำหรับเสาเข็มกลุ่ม ให้น้ำหนักทดสอบจนถึง 150 % ของ Design Load

การเพิ่มน้ำหนัก ให้เพิ่มครั้งละ 25 % ของ Design Load และให้คงสภาพน้ำหนัก (Maintain Load) ไว้จนกระทั่งการทรุดตัวไม่มากกว่า 0.25 มม./hr หรือ 2 ชั่วโมง จึงเพิ่มน้ำหนักใหม่ได้ เมื่อทดสอบจนถึง 200 % หรือ 150 % ของ Design Load แล้ว ถ้าเสาเข็มมีการทรุดตัวไม่มากกว่า 0.25 มม./hr ให้ถอนน้ำหนักทั้งหมดหลังจาก 12 ชั่วโมงไปแล้ว หรืออีกวิธีหนึ่งให้คงสภาพน้ำหนักไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นให้ถอนน้ำหนักลงครั้งละ 25 % ของน้ำหนักทั้งหมด ทุก ๆ 1 ชั่วโมง ในกรณีที่เสาเข็มเกิดการพิบัติก่อนให้น้ำหนักแก่เสาเข็มต่อไปอีกจนกระทั่งการทรุดตัวของเสาเข็มเท่ากับ 15 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางหรือเส้นทะแยงมุมของเสาเข็ม

2.7.2 Quick Load Test Procedure

การเพิ่มน้ำหนักเพิ่มครั้งละ 10 - 15 % ของ Design Load โดยมีช่วงเวลาของการเพิ่มน้ำหนักแต่ละครั้งคงที่เท่ากับ 2.5 วินาที และทำการเพิ่มน้ำหนักต่อไปอย่างต่อเนื่อง จนถึงค่าน้ำหนักที่ต้องการทดสอบ

2.8 รายการคำนวณหาน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate load) ของเสาเข็ม

ชนิดของเสาเข็ม	:	เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ (I)
ขนาดของเสาเข็ม	:	0.12 x 0.12 x 4.00 m.
พื้นที่หน้าตัด	:	0.0119 m ² .
เส้นรอบรูป	:	0.48 m.

คุณสมบัติของดิน

ทราย $\phi = 40$ องศา $\phi' = 30$ องศา

$$= 1706 \text{ kg.}$$

$$Q = 1772 \text{ kg.}$$

เสาเข็ม D ทำการเจาะนำที่ระยะ 2.00 เมตร

$$Q = Q_u + Q_p$$

$$Q_u = Q_{uc} + Q_{us}$$

$$= 2 \times 0.48 \times 980 + 2 \times 0.48 \times 1 \times 1700 \times 1 \tan 30$$

$$= 940 + 942$$

$$= 1882 \text{ kg.}$$

$$Q = 1948 \text{ kg.}$$



บทที่ 3

การดำเนินการ

3.1 การตอกเสาเข็ม

วิธีการตอกเสาเข็มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายวิธี นับตั้งแต่ เครื่องมือ อุปกรณ์และวิธีการต่าง ๆ นับเป็นการที่พัฒนามาจากสิ่งแวดล้อมของเราโดยเฉพาะ เช่น ตาม ความจำกัดในเงินทุน ช่างที่มีความรู้ ความสามารถมีน้อย ลักษณะและขนาดของเสาเข็ม และอื่นๆ

3.1.1 วิธีการตอกเสาเข็ม

วิธีการตอกเสาเข็มที่ใช้ในโครงการพิเศษ มีวิธีการดำเนินการดังนี้

1. ทำความสะอาดและปรับพื้นที่ที่จะทำการตอกเสาเข็ม
2. ทำการขุดนำโดยขุดเป็นหลุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25-30 ซม. ความลึก 0,0 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตร วัดจากระดับดินเดิม จำนวน 3 หลุม ในแต่ละ ระยะความลึกที่ทำการขุด
3. นำเสาเข็มลงหลุมที่ทำการขุด
4. ใช้โช้เหล็กรัดเสาเข็มคล้องเข้ากับไม้กระดาน ทำการข่มให้เสาเข็มลง โดยใช้น้ำหนักคนหรือน้ำหนักอื่น ๆ
5. เมื่อข่มเสาเข็มจนลึกถึงระดับหนึ่ง ทำการตอกด้วยสามเกลอต่อจนหัวเสาเข็ม อยู่ในระดับดินเดิม
6. ทำการกลบหลุมด้วยทรายซึ่งทำการหาคุณสมบัติไว้แล้ว

3.2 การทดสอบเสาเข็ม

จุดประสงค์ในการทดสอบเสาเข็ม ก็เพื่อหาว่าเสาเข็มที่ทดสอบนั้นสามารถรับ Static compression ได้มากน้อยเท่าใด เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบทั้งเหมาะสม และ

ประหัต วิธีการทดสอบนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1143-81 ซึ่งจะทอล่าวเพียง วิธีเดียว คือ วิธี Standard Loading

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. Hydraulic Jack
2. Proving Ring
3. C - Beam C150 x 24.0 จำนวน 2 คาน
4. C - Beam C100 x 9.36 จำนวน 2 คาน
5. Reference Beam
6. Dial Gauge พร้อม stand สิด
7. Steel Plate
8. Support
9. Load (น้ำ, ทราย, คอนกรีต หรือ เหล็ก)

3.2.2 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่องมือ

1. จัด Support เพื่อรับ Beam ให้ตรงกับแนวหรือเสาเข็ม
2. นำ Load วางบน Beam ให้มีน้ำหนักเพียงพอที่จะทำการทดสอบเสา-เข็ม
3. ติดตั้ง Reference Beam พร้อมเครื่องมือวัด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 12
4. ติดตั้ง Steel plate, Hydraulic Jack และ Proving Ring ดังแสดงในรูปที่ 13

3.2.3 วิธีการทดสอบเสาเข็ม (Pile Load Test)

วิธีการทดสอบเสาเข็มที่จะกล่าวเป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวรับแรงในแนวตั้ง ซึ่งจะใช้วิธี Standard Loading ตามมาตรฐาน ASTM D1143-81 ซึ่งทำการทดสอบจนถึงแรงพิบัติของเสาเข็ม การให้น้ำหนักกดได้ให้บนหัวเสาเข็มโดยมีแผ่นเหล็ก (Steel plate) เป็นตัวถ่วงน้ำหนัก จาก Hydraulic Jack ไปยังหัวเสาเข็ม ทำการวัดค่าน้ำหนักกดด้วย

Proving Ring ซึ่งไปดันกับคานเหล็กรูปตัวซี (C) ซึ่งรับน้ำหนัก (Load) อยู่ข้างบน วัดระยะการทรุดตัวโดยใช้ Dial Gauge ขนาดยาว 20 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ติดตั้งกับแผ่นเหล็กเนื้อเส้าเข็ม และ Dial Gauge จะยึดติดกับคานอ้างอิง (Reference Beam) ซึ่งวางอยู่บนพื้นดินอย่างมั่นคง

วิธีการทดสอบเส้าเข็ม ตามมาตรฐาน ASTM DESIGNATION : 1143-81 วิธี Standard Loading ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. ทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้เส้าเข็มครั้งละ 25% ของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ (Design Load)
2. อ่านค่าการทรุดตัวจาก Dial Gauge ทันทีที่เพิ่มน้ำหนักและหลังจากนั้นเป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 45 และ 60 นาที
3. ถ้าอัตราการทรุดตัวไม่เกิน 0.25 มม./ชั่วโมง ให้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป ถ้าอัตราการทรุดตัวเกินกว่า 0.25 มม./ชั่วโมง ให้คงน้ำหนักบรรทุกนั้นไว้อีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้น เพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป
4. ให้น้ำหนักบรรทุกจนเส้าเข็มพิบัติ จากนั้นคงน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เส้าเข็มพิบัติได้จนค่าการทรุดตัวมีค่าเท่ากับ 15% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหรือเส้นทะแยงมุมของเส้าเข็ม
5. ทำการถอนน้ำหนักบรรทุกออกครั้งละ 25 % ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในการทำการวิจัย เปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับน้ำหนักในแนวตั้งของเสาเข็มขนาดเล็ก เมื่อมีการเจาะน้ำที่ระยะต่าง ๆ ในครั้งนี้ ได้กระทำที่บริเวณข้างโรงปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เริ่มทำการปรับพื้นที่โดยการขนทราย ซึ่งกองอยู่บริเวณพื้นที่ที่จะทำการทดสอบ หนาประมาณ 15-20 เซนติเมตร ออกจากพื้นที่ เริ่มทำการขุดน้ำ โดยขุดหลุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25-30 ซม. ความลึก ตามกำหนดคือ 0.0, 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตร ระยะละ 3 หลุม โดยขุดเป็นแถว ๆ ละ 4 หลุม จำนวน 3 แถว ระยะห่างแต่ละหลุมเท่ากับ 1.0 เมตร กำหนดสัญลักษณ์ของแต่ละหลุม ดังนี้

หลุมที่ขุดน้ำ ระยะ 0.0 เมตร ใช้สัญลักษณ์ A1, A2 และ A3

หลุมที่ขุดน้ำ ระยะ 1.0 เมตร ใช้สัญลักษณ์ B1, B2 และ B3

หลุมที่ขุดน้ำ ระยะ 1.5 เมตร ใช้สัญลักษณ์ C1, C2 และ C3

หลุมที่ขุดน้ำ ระยะ 2.0 เมตร ใช้สัญลักษณ์ D1, D2 และ D3

โดยระยะที่ขุดวัดเทียบกับระดับดินเดิม ซึ่งทำการปฏิบัติการขุดและตอกเสาเข็ม เมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2536

4.1 สภาพหลุมโดยรวม

มีชั้นดินลูกรัง (สีส้มแดง) หนาประมาณ 15-20 ซม. ซึ่งถือว่าเป็นดินถม ต่อจากนั้นเป็นชั้นดินดำ ซึ่งถือเป็นชั้นดินเดิม เมื่อขุดลึกไปประมาณ 50-60 ซม. จากระดับดินเดิม เจาะเศษไม้ประเภทไม้กระดาน ท่อนไม้ เกือบทุกหลุม หลังจากนั้นเป็นชั้นของเศษหินก้อนเล็ก ๆ หนาไม่มากนักประมาณ 5 ซม. เมื่อขุดไปสักระยะเวลาหนึ่งมีน้ำซึมเข้ามาในหลุม ที่ระดับ 30-40 ซม. จากระดับดินเดิม

สภาพดินที่เจาะขึ้นมา ในช่วงความลึก 0.00-1.00 เมตร วัดจากระดับดินเดิม เป็นดินเหนียวสีดำ ถัดจากนั้นคือที่ระดับ 1.00-2.00 เมตร ดินจะมีลักษณะมีสีดำอมเขียว เนื้อดินค่อนข้างเหลว มีกลิ่นค่อนข้างแรง เก็บด้วยกระบอกบางไม้ติด ที่ความลึกประมาณ 2.00-4.00 เมตร ดินมีสีดำปนเทา เนื้อดินแข็งขึ้นเมื่อเทียบกับช่วง 1.00-2.00 เมตร

นำดินที่ระยะ 2.00 เมตร มาทดสอบหาค่าแรงเฉือนโดยวิธี Direct Shear ได้ค่าแรงเฉือนเท่ากับ 0.98 ตัน/ตารางเมตร ทดสอบหาค่า bulk Unit Weight (γ) มีค่าเท่ากับ 1.4 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

4.2 การเจาะนำ

หลุม D1, D2 และ D3 ขุดหลุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25-30 ซม. ลึก 2.00 เมตร แล้วทำการตอกเสาเข็ม หลุม D2 และ D3 เข็มลงได้ค่อนข้างสะดวก ส่วน D1 เข็มลงค่อนข้างลำบาก แต่ไม่มากนัก

หลุม C1, C2 และ C3 ขุดหลุมขนาด ϕ 25-30 ซม. ลึก 1.50 เมตร ทั้ง 3 หลุม ทำการตอกเสาเข็ม เข็มลงได้ด้วยดีไม่มีอุปสรรคใด ๆ

หลังจากหลุม C เสร็จเรียบร้อยทำการตอกเสาเข็มรหัส A1 ซึ่งไม่ทำการขุดเลย ทำการตอกเสาเข็มจนถึงระดับ 2.00 เมตร เข็มเกิดปัญหาตอกไม่ลง ทำการเพิ่มน้ำหนักกดให้มากขึ้น และ ช่อมลง ปรากฏว่า เข็มร้าวที่ระยะ 1.50 เมตร จากหัวเข็ม จึงทำการใช้สามเกลอต่อต่อไปจนได้ความลึก 3.00 เมตร หัวเข็มพิบัติ จึงเลิกทำการตอก

ทำการแก้ไขในหลุม A2 และ A3 โดยขุดลงไปประมาณ 50-60 ซม. เพื่อนำเอาเศษไม้ออก แล้วทำการเจาะหลุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. ลงไปอีก 70 ซม. เพื่อความสะดวกในการตอกเสาเข็ม

หลุม B1, B2 และ B3 ทำการขุดนำที่ระยะ 1.00 เมตร แล้วทำการเจาะหลุมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. อีก 50 ซม. เช่นเดียวกับหลุม A2 และ A3

4.3 การกลบหลุมเสาเข็ม

หลุมเสาเข็มรหัส B, C และ D ทำการกลบหลุมเสาเข็มหลังจากตอกเสาเข็มแล้ว ด้วยทรายซึ่งทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity) จากวิธี SIEVE ANALYSIS (5) มีค่าเท่ากับ 2.55 ทำการทดสอบหาค่า ϕ โดยวิธี Direct Shear ได้ค่า ϕ ประมาณ 40 องศา ค่า Bulk Unit Weight (γ) เท่ากับ 1.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

หลุมเสาเข็มรหัส A2 และ A3 เมื่อทำการตอกเสาเข็มเรียบร้อยแล้ว จึงทำการอัดดิน โดยใช้ดินเดิมบดเป็นก้อนแล้วกระทุ้งที่ละชั้น โดยที่ไม่หนามากนัก

4.4 การซ่อมหัวเสาเข็ม

เสาเข็มเมื่อทำการตอกทำให้เกิดการแตกร้าวของหัวเสาเข็มเป็นบางต้น คือ เสาเข็มรหัส A1, C3 และ D3 จึงทำการซ่อมหัวเสาเข็มด้วย Epoxy โดยใช้อัตราส่วน Epoxy type A : Epoxy Type B : ทราย เท่ากับ 2 : 1 : 5 เมื่อวันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2536

4.5 ผลการทดสอบเสาเข็ม

ทำการทดสอบเสาเข็มทั้ง 12 ต้นด้วยวิธี Standard Loading ตามมาตรฐาน ASTM D1143-81 ระหว่างวันที่ 21 มีนาคม 2536 - 2 เมษายน 2536 ได้ผลค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลเกี่ยวกับพฤติกรรมก่อนประลัย ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบเสาเข็ม

PILE No.	ค่าการทรุดตัว (มม.)	ค่าการคืบตัว (มม.)	น้ำหนักบรรทุก ประลัย (Kg.)	น้ำหนักบรรทุก ประลัยเฉลี่ย (Kg.)	หมายเหตุ
A1	18.69	1.16	2000		
A2	18.40	0.90	1977	1926	***
A3	18.95	0.74	1800		
B1	18.45	0.73	1750		
B2	19.22	0.82	2000	1833	
B3	18.92	1.42	1750		
C1	19.94	0.66	1750		
C2	18.55	0.85	1410	1553	
C3	18.96	1.01	1500		
D1	18.15	0.88	1300		
D2	19.17	1.05	1600	1467	
D3	18.14	1.02	1500		

หมายเหตุ

*** น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม A คิดเทียบความยาว 4.0 เมตร

ตารางที่ 4.2 แสดงผลเกี่ยวกับพฤติกรรมก่อนประลัย

PILE No.	น้ำหนักบรรทุก ก่อนประลัย (kg.)	น้ำหนักบรรทุก ก่อนประลัยเฉลี่ย (kg.)	ระยะทรุดตัว ก่อนประลัย (มม.)	ระยะทรุดตัว ก่อนประลัยเฉลี่ย (มม.)	หมายเหตุ
A1	2000		3.82		
A2	1765	1843	1.02	2.01	
A3	1765		1.20		
B1	1750		2.10		
B2	1750	1750	0.64	1.78	
B3	1750		2.60		
C1	1750		1.75		
C2	1410	1553	1.50	1.57	
C3	1500		1.45		
D1	1220		1.18		
D2	1410	1377	1.13	1.49	
D3	1500		2.16		

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกประลัยระหว่างการคำนวณตามทฤษฎี
และผลการทดสอบ

ระยะเจาะนำ (ม.)	น้ำหนักบรรทุกประลัยเฉลี่ย (kg.)				หมายเหตุ	
	ผลการคำนวณตามทฤษฎี					ผลการทดสอบ
	ชั้นดินเหนียว	ชั้นทราย	ปลาสีเข้ม	รวม		
0.0	1882	0	66	1948	1926	
1.0	1411	236	66	1713	1833	***
1.5	1176	530	66	1772	1553	***
2.0	940	942	66	1948	1467	***

หมายเหตุ

***การคำนวณแรงต้านทานเนื่องจากทราย ในทางทฤษฎีเป็นการคำนวณตามคุณสมบัติของ
ชั้นทรายเดิม แต่ในทางปฏิบัติชั้นทรายที่สัมผัสเสาเข็มเป็นทรายนวม

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ

5.1 ผลสรุปที่ได้จากการทดสอบ

ในการทดสอบหาประสิทธิภาพ การรับน้ำหนักบรรทุกประลัย ของเสาเข็มที่มีระยะการเจาะนำต่าง ๆ กัน ด้วยวิธี Standard Loading Test ตามมาตรฐาน ASTM : D 1143

-81

จากผลการทดสอบที่ได้ ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดย

เสาเข็มที่ทำการเจาะนำที่ระยะ 0.0 ม. รับน้ำหนักบรรทุกประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 1926 kg.

เสาเข็มที่ทำการเจาะนำที่ระยะ 1.0 ม. รับน้ำหนักบรรทุกประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 1833 kg.

เสาเข็มที่ทำการเจาะนำที่ระยะ 1.5 ม. รับน้ำหนักบรรทุกประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 1553 kg.

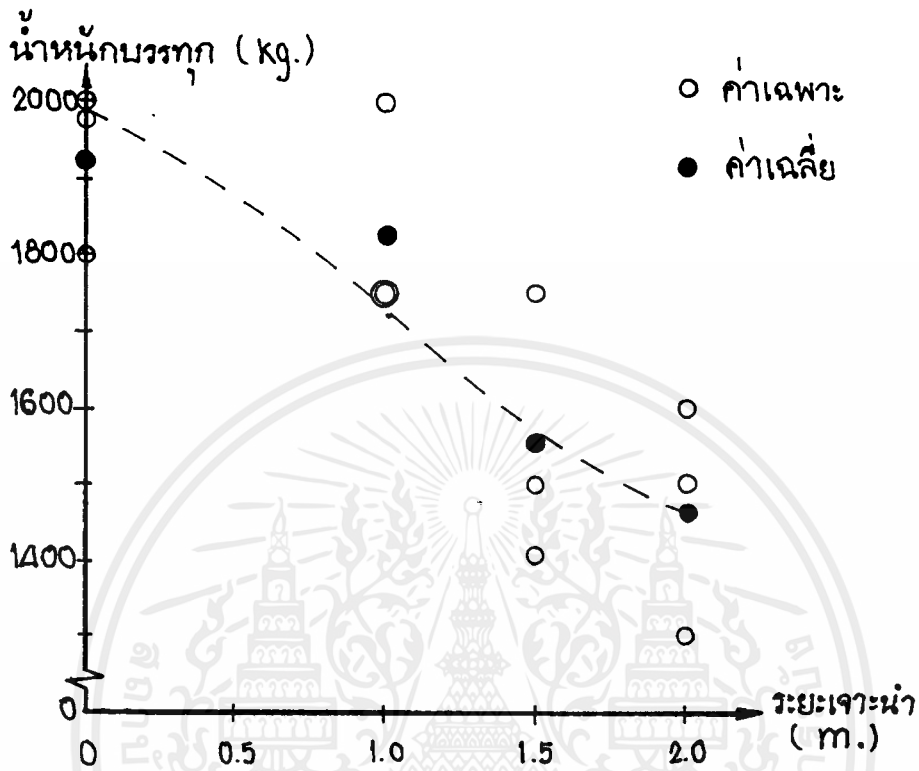
เสาเข็มที่ทำการเจาะนำที่ระยะ 2.0 ม. รับน้ำหนักบรรทุกประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 1467 kg.

เมื่อคิดค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มโดยให้เสาเข็ม A ซึ่งไม่ทำการเจาะนำเป็นมาตรฐาน ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าลดลงเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.1 ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์

PILE No.	ระยะเจาะนำ (ม.)	ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ลดลง (%)
A	0.0	0.00
B	1.0	4.83
C	1.5	19.37
D	2.0	23.83

หรือดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกประลัษกับระยะเจาะน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเจาะน้ำมากขึ้นอันเนื่องมาจากแรงต้านทานของทราย แต่ในทางปฏิบัติทรายที่ใช้กลมหลุมเสาเข็ม ซึ่งมีระดับน้ำใต้ดินอยู่สูง ทำให้ทรายอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง จึงทำให้ค่าความต้านทานในการรับน้ำหนักในทางปฏิบัติมีค่าน้อยกว่าทางทฤษฎี

พิจารณาเสาเข็มรหัส A ซึ่งไม่อาจตอกโคสไม่ทำการเจาะน้ำได้ ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งผลในการรับน้ำหนักประลัษของเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 1605.00 kg. นั้นเป็นผลที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลในทางทฤษฎี อาจนำมาเป็นข้อบ่งชี้ได้ดังนี้

ลักษณะการกลมหลุมเสาเข็มด้วยดินเดิม ปั้นเป็นก้อนแล้วทำการกระทุ้งลงไปเป็นชั้นๆ ในหลุมที่มีระดับน้ำอยู่สูง ทำให้การกลบให้สมบูรณ์นั้นกระทำได้ยาก ดินที่ปั้นแล้วทำการกระทุ้งลงไปนั้น จะแปรสภาพเป็นโคลนเหลว ซึ่งจะไม่มีการตั้งในการรับน้ำหนัก

สภาพการกลบหลุมเสาเข็มนั้น ในกรณีที่ต้องการให้วัสดุที่ทำการกลบรับน้ำหนักบรรทุก ได้สูงตามคุณสมบัติของมัน ต้องรอให้มีการระบายน้ำออกจากหลุมได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนาน ในสภาพการทำงานจริงการรับน้ำหนักสิ่งก่อสร้างสูงสุดจะใช้เวลาไม่นานนัก

ดังนั้นการพิจารณาสภาพการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มควรพิจารณาการรับน้ำหนัก ในระยะเวลาที่เสาเข็มต้องรับน้ำหนักสูงสุด ซึ่งเกี่ยวข้องกับระยะเวลาในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเมื่อมีการเจาะนำ

5.2 ข้อเสนอนะ

ในการเจาะนำหรือขุดนำเพื่อทำการตอกเสาเข็มขนาดเล็กในชั้นดินอ่อนนั้น ไม่ว่าจะ เป็นเหตุผลทางการก่อสร้าง หรือเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน ไม่ควรที่จะทำการเจาะนำ หรือถ้าจะมีการเจาะนำควรทำการเจาะในระยะที่น้อยที่สุดที่จะเป็นไปได้ในการปฏิบัติงาน ทั้งนี้ เพราะผลจากการเจาะนำจะทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มลดลง

ในการกลบหลุมเสาเข็มนั้น การกลบด้วยทรายเป็นวิธีปฏิบัติที่ง่ายกว่าการกลบด้วยดิน เดิม อันเนื่องมาจากทรายมีลักษณะเป็นเม็ดร่วน สามารถกลบลงไปได้ง่ายกว่า ในสภาพหลุมที่มีน้ำ ังอยู่ ส่วนดินเดิมซึ่งมีลักษณะเป็นดินเหนียว การกลบให้ลงหลุมต้องอาศัยการกระทุ้ง ทำให้เกิดการพิบัติในส่วนของเม็ดดิน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของดินลดลง



รูปที่ 1

แสดงเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัว I ขนาด 0.12 x 0.12 x 4.00 ม.



รูปที่ 2

แสดงการเจาะนำ และสภาพดินที่ขุดขึ้นมา



กรมประจําเมืองเก่าเจ้าคุณ

รูปที่ 3

แสดงสภาพหลุมหลังจากการขุดเจาะ



พระจอมเกล้าเจ้าพระยา

รูปที่ 4

แสดงการนำเสาเข็มลงหลุมที่ทำการเจาะนำไว้แล้ว



รูปที่ 5

แสดงการข่มเส้าเข็มในช่วงแรกในการตอกเส้าเข็ม



รูปที่ 6

แสดงการตอกเสาเข็มโดยใช้สามเกลอ



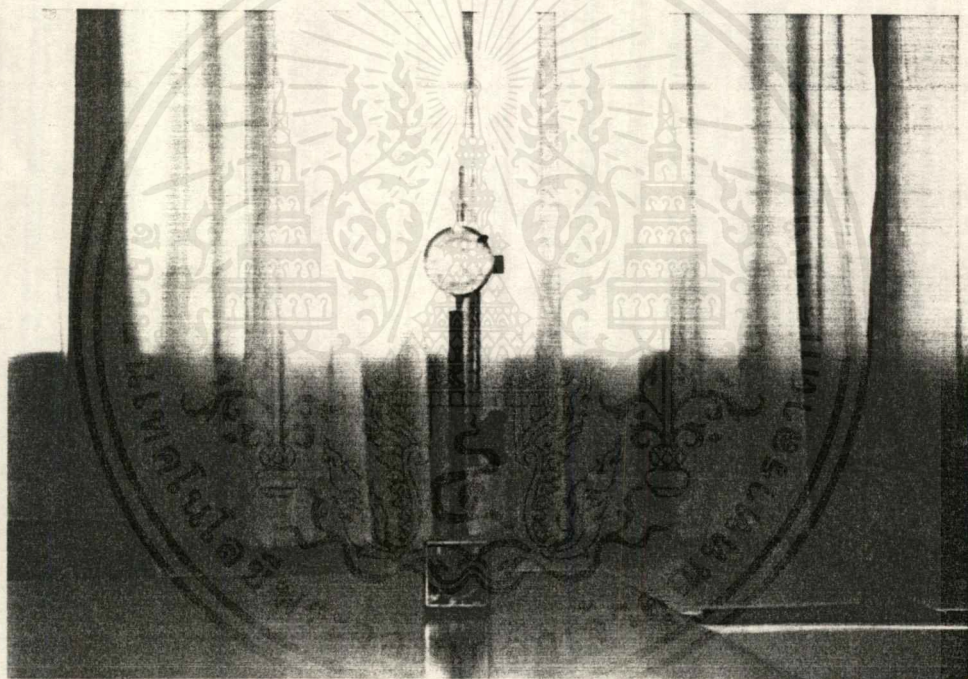
รูปที่ 7

แสดงสภาพเสาเข็มหลังการตอกเสร็จเรียบร้อย



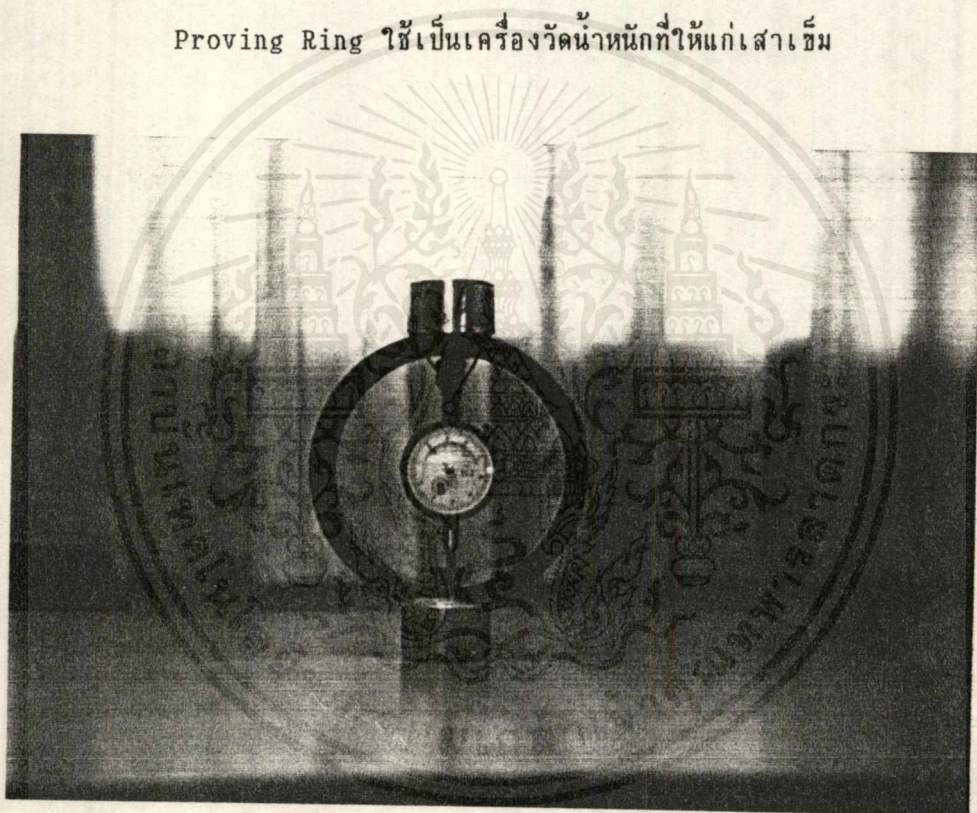
รูปที่ 8

Dial Guage พร้อม Stand ใช้วัดการทรุดตัวของเสาเข็ม



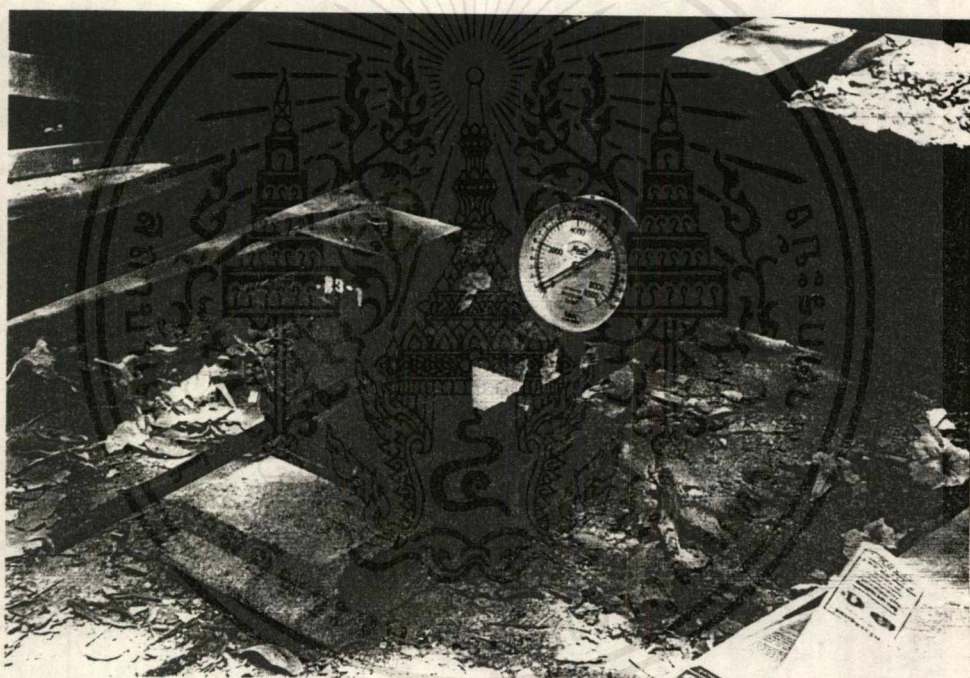
รูปที่ 9

Proving Ring ใช้เป็นเครื่องวัดน้ำหนักที่ให้แก่เสาเข็ม



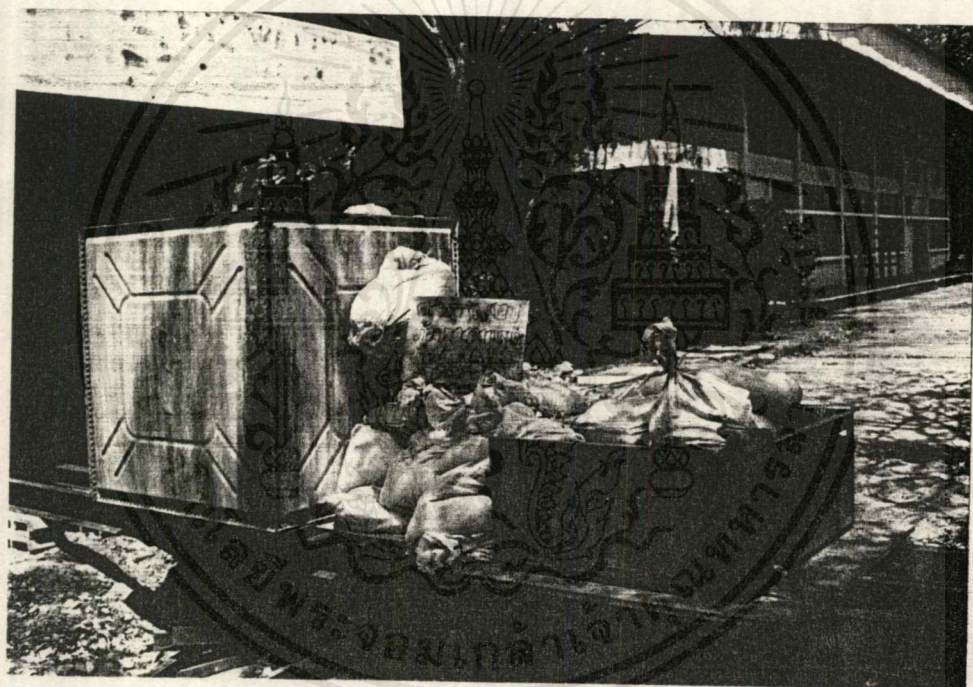
รูปที่ 10 .

Hydraulic Jack เป็นเครื่องช่วยถ่ายน้ำหนักจาก Load ลงสู่เสาเข็ม



รูปที่ 11

Load น้ำหนักที่ให้แก่เสาเข็ม



รูปที่ 12

แสดงการติดตั้ง Dial Guage กับ reference Beam
แสดงการติดตั้ง Proving Ring ระหว่างคานรับน้ำ-
หนักกับ แกน Hydrualic Jack

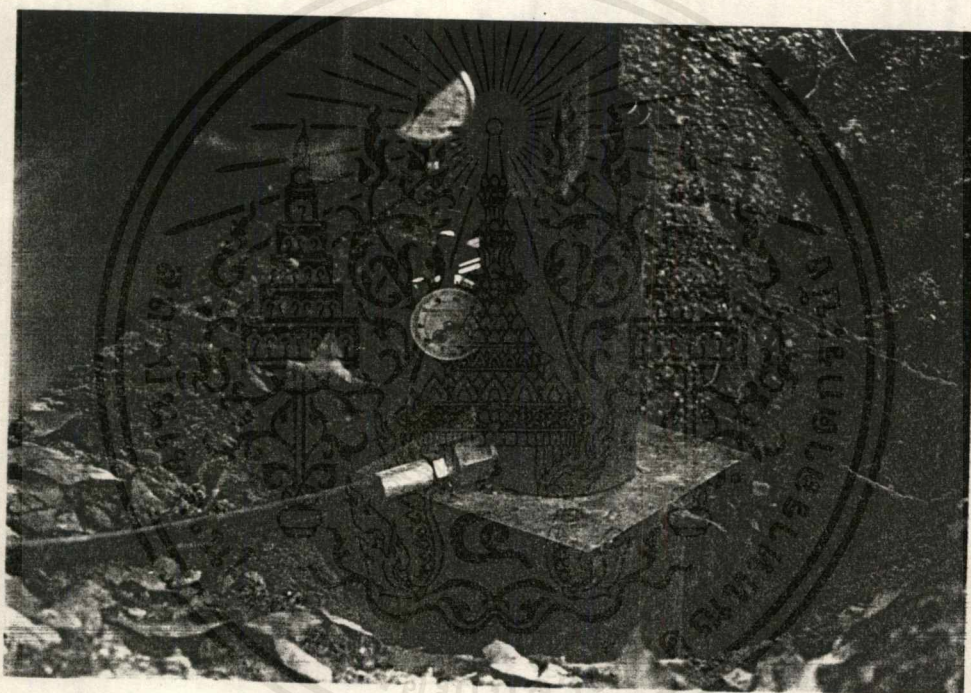


รูปที่ 13

แสดงการติดตั้ง แกน Hydraulic Jack กับ Steel plate ที่

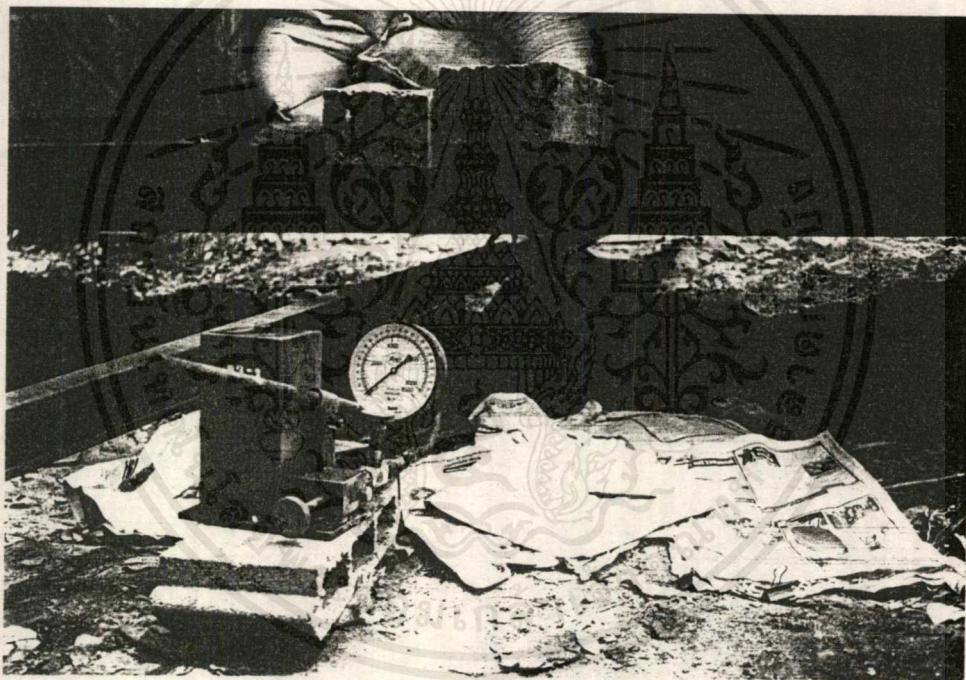
ใช้รองหัวเสาเข็ม

แสดงการติดตั้ง Dial Guage สำหรับวัดการทรุดตัวของเสาเข็ม



รูปที่ 14

แสดงสภาพทั่วไปในการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบเสาเข็ม



รูปที่ 15

แสดงลักษณะการวางคานรับน้ำหนักบน Support

แสดงลักษณะการวาง Reference Beam



บรรณานุกรม

1. วิไลนา ชรรวมงคล, วิไลนา ช่อวิเชียร, ปฐพีกลศาสตร์, ห้างหุ้นส่วนจำกัด, ป.สัมพันธ์พาณิชย์, กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 6, 2532.
2. วรากร ไม้เรียง, วิศวกรรมฐานราก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
3. พีระ นาควิมล และคณะ, การเปรียบเทียบวิธีต่างๆ ของการทดสอบเสาเข็ม, วิทยานิพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2530.
4. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม, ตุลาคม 2521.
5. สาราญ ยอดอุปถัมภ์, ปฐพีกลศาสตร์ (ภาคการทดลอง) เล่มที่ 1, วิชาเขตอุเทนถวาย, กรุงเทพมหานคร.
6. ชมรมวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, เสาเข็ม, ชมรมวิศวกรรมโยธาจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2524.
7. มานะ อภิพัฒน์มนตรี, วิศวกรรมปฐพี และฐานราก, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่ 3, 2533.
8. มณฑิเตอร์ กังสกีเทียม, กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม, สมาคมศิษย์เก่าชลประทาน, พิมพ์ครั้งที่ 3, 2533
9. H.G.Poulos and E.H.Davis, Pile Foundation and Design, The University of Sydney, 1st Edition, 1980.
10. ASTM Designation : D1143-81 (Reapproved 1987)
Standard Test method for Pile Under Static Axial Compressive Load, ANNUAL BOOK OF ASTM
Section 4 Volume 0.4.08

ภาคผนวก ก.

ตารางผลการทดสอบ และกราฟ



PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete
 Pile with Pre-Driving

LOCATION KMIT'L

PILE No. A-1

DATE 2-4-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1130	0	250/75	29	0.29	
1135	5		22	0.22	
1140	10		20	0.2	
1150	20		27	0.27	
1200	30		30	0.3	
1215	45		35	0.35	
1230	60		50	0.5	0.21
1230	0	500/150	58	0.58	
1235	5		56	0.56	
1240	10		55	0.55	
1250	20		56	0.56	
1300	30		57	0.57	
1315	45		40	0.4	
1330	60		35	0.35	-0.23
1330	0	750/220	50	0.5	
1335	5		45	0.45	
1340	10		42	0.42	
1350	20		38	0.38	
1400	30		30	0.3	
1415	45		20	0.2	
1430	60		18	0.18	-0.32
1430	0	1000/290	22	0.22	
1435	5		21	0.21	
1440	10		22	0.22	
1450	20		23	0.23	
1500	30		23	0.23	
1515	45		22	0.22	
1530	60		18	0.18	-0.04
1530	0	1250/365	40	0.4	
1535	5		65	0.65	
1540	10		80	0.8	
1550	20		92	0.92	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete
 Pile with Pre-Driving

LOCATION KMIT'L

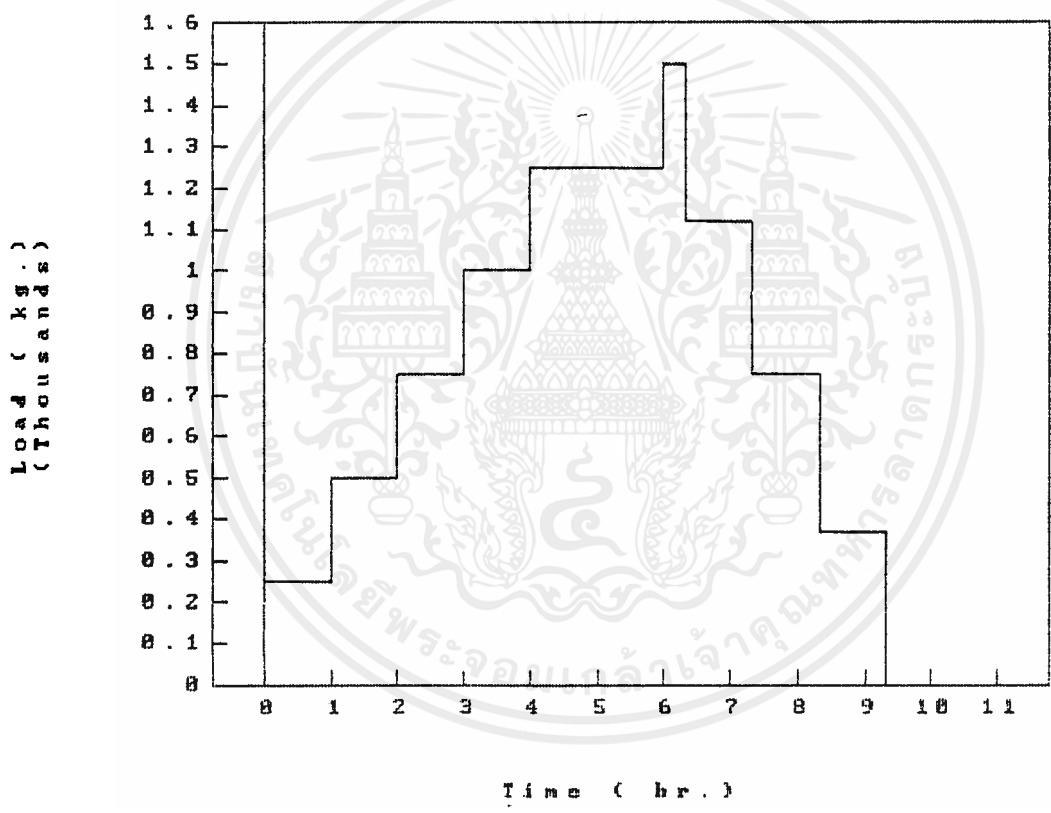
PILE No. A-1

DATE 2-4-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (8.881in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1600	30		100	1	
1615	45		102	1.02	
1630	60		105	1.05	0.65
1645	75		105	1.05	
1700	90		106	1.06	
1715	105		106	1.06	
1730	120		107	1.07	0.02
1730	0	1500/440	302	3.02	
1735	5		505	5.05	
1740	10		770	7.7	
1800	20		1065	10.65	
1800	0	1120/330	1066	10.66	
1830	30		1068	10.68	
1900	60		1069	10.69	
1900	0	750/220	1060	10.6	
1930	30		1055	10.55	
2000	60		1054	10.54	
2000	0	370/110	1030	10.3	
2030	30		1022	10.22	
2100	60		1015	10.15	
2100	0	0/0	1005	10.05	
2130	30		1789	17.89	
2200	60		1780	17.8	

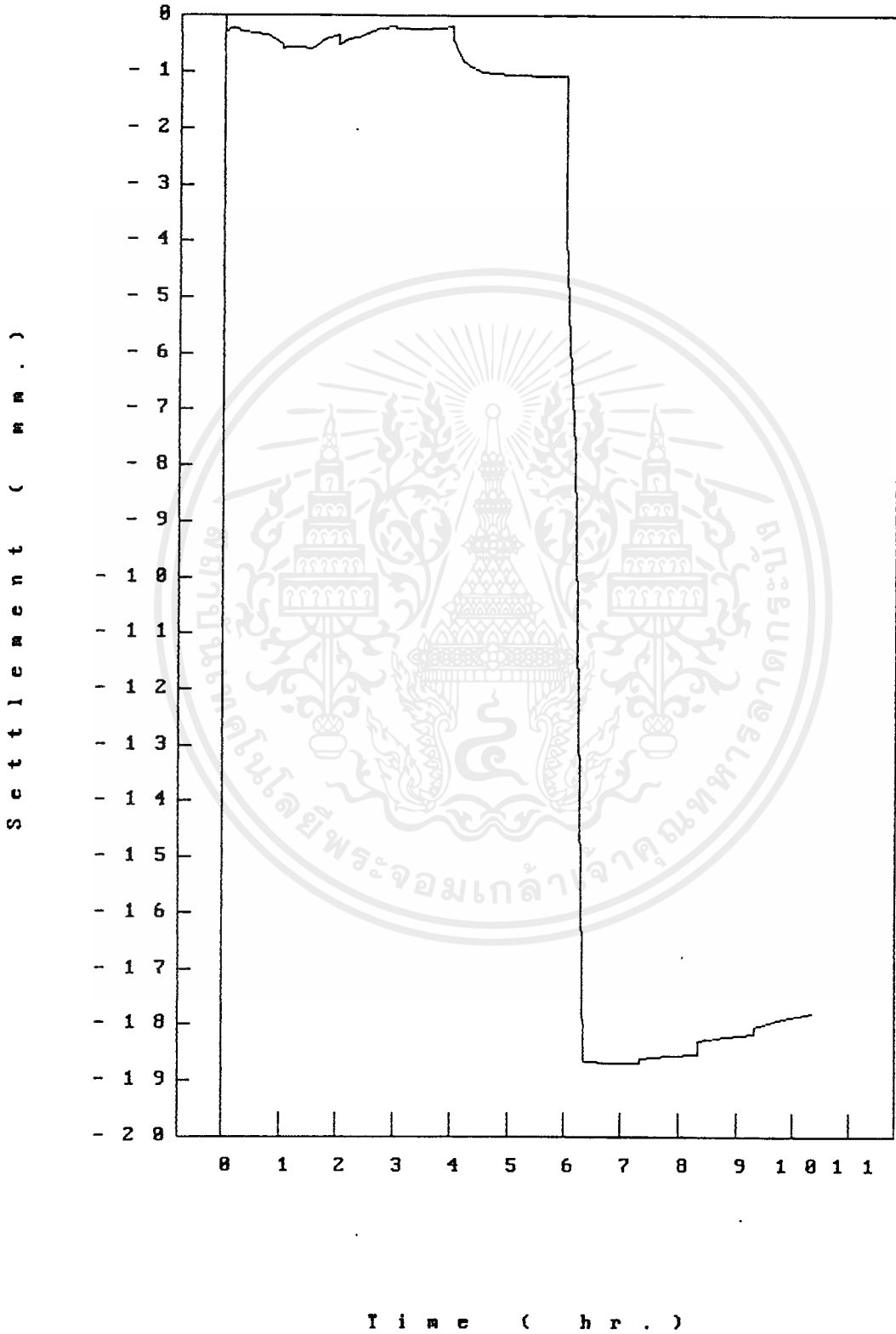
LOAD-TIME CURVE

FILE No. A-1



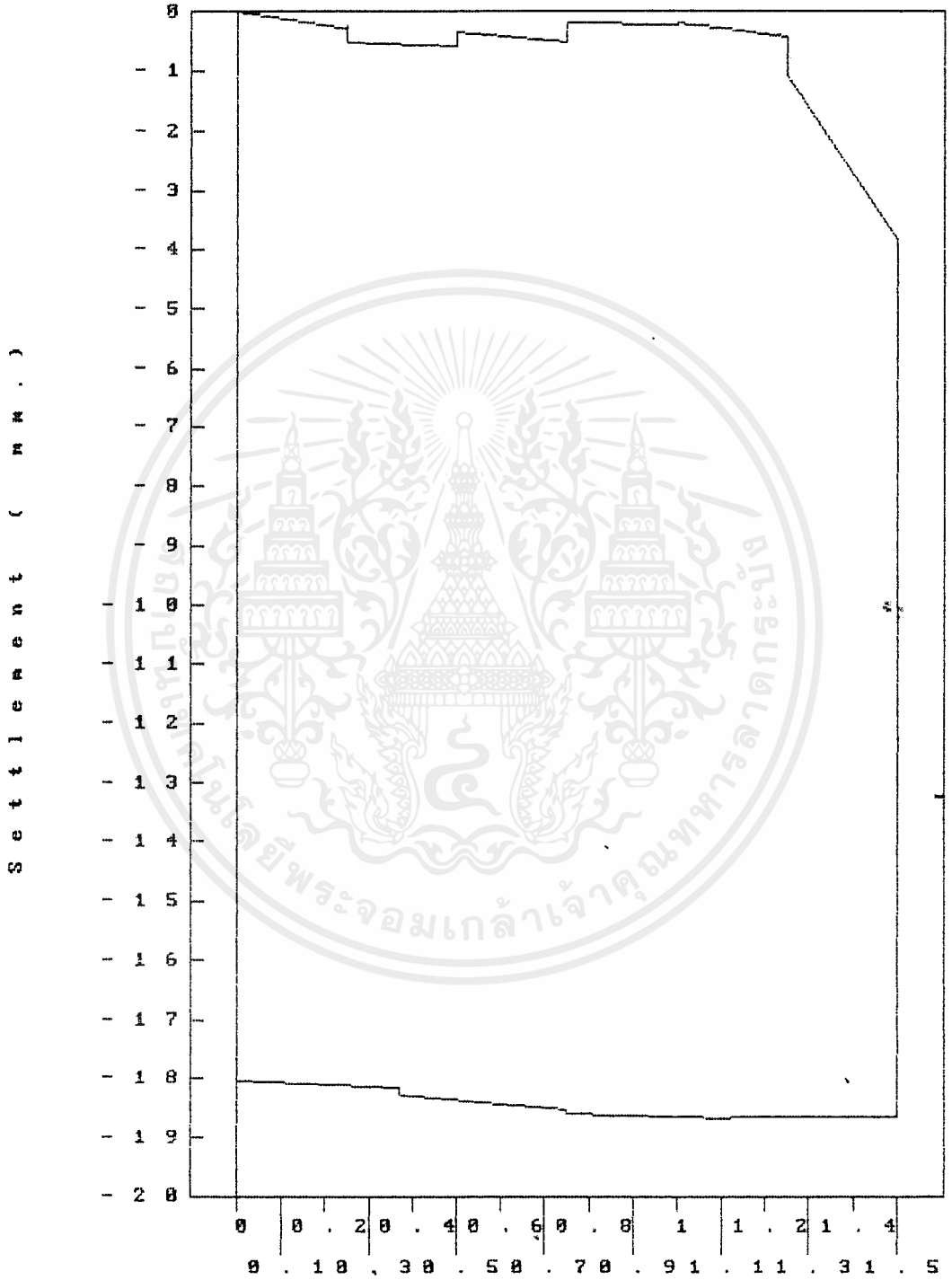
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . A - 1



SETTLEMENT - LOAD CURVE

PILE No. A-1



(Thousands)

Load (kg .)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. A-2

DATE 31-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1200	0	250/75	16	0.16	
1205	5		14	0.14	
1210	10		15	0.15	
1220	20		14	0.14	
1230	30		12	0.12	
1245	45		10	0.1	
1300	60		8	0.08	-0.08
1300	0	500/150	20	0.2	
1305	5		25	0.25	
1310	10		24	0.24	
1320	20		20	0.2	
1330	30		18	0.18	
1345	45		14	0.14	
1400	60		8	0.08	-0.12
1400	0	750/220	20	0.2	
1405	5		25	0.25	
1410	10		25	0.25	
1420	20		25	0.25	
1430	30		25	0.25	
1445	45		25	0.25	
1500	60		27	0.27	0.07
1500	0	1000/290	44	0.44	
1505	5		47	0.47	
1510	10		49	0.49	
1520	20		50	0.5	
1530	30		50	0.5	
1545	45		45	0.45	
1600	60		38	0.38	-0.06
1600	0	1250/365	75	0.75	
1605	5		78	0.78	
1610	10		80	0.8	
1620	20		80	0.8	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete
 Pile with Pre-Driving

LOCATION KMIT'L

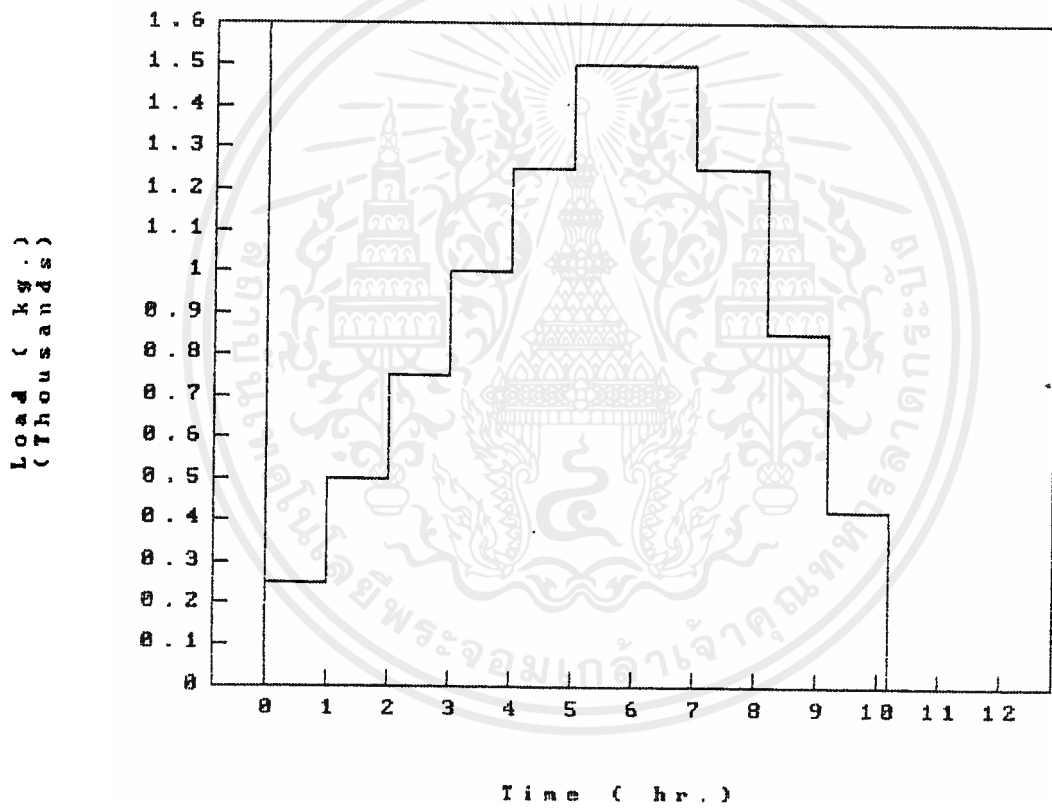
PILE No. A-2

DATE 31-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1630	30		80	0.8	
1645	45		80	0.8	
1700	60		80	0.8	0.05
1700	0	1500/440	102	1.02	
1705	5		110	1.1	
1710	10		120	1.2	
1720	20		130	1.3	
1730	30		140	1.4	
1745	45		145	1.45	
1800	60		150	1.5	0.48
1815	75		160	1.6	
1830	90		172	1.72	
1845	105		178	1.78	
1900	120		180	1.8	0.3
1900	0	1600/490	1840	18.4	
1900	0	1250/360	1802	18.02	
1930	30		1798	17.98	
2000	60		1797	17.97	
2000	0	850/245	1788	17.88	
2030	30		1785	17.85	
2100	60		1780	17.8	
2100	0	425/123	1770	17.7	
2130	30		1767	17.67	
2200	60		1766	17.66	
2200	0	0/0	1762	17.62	
2230	30		1753	17.53	
2300	60		1750	17.5	

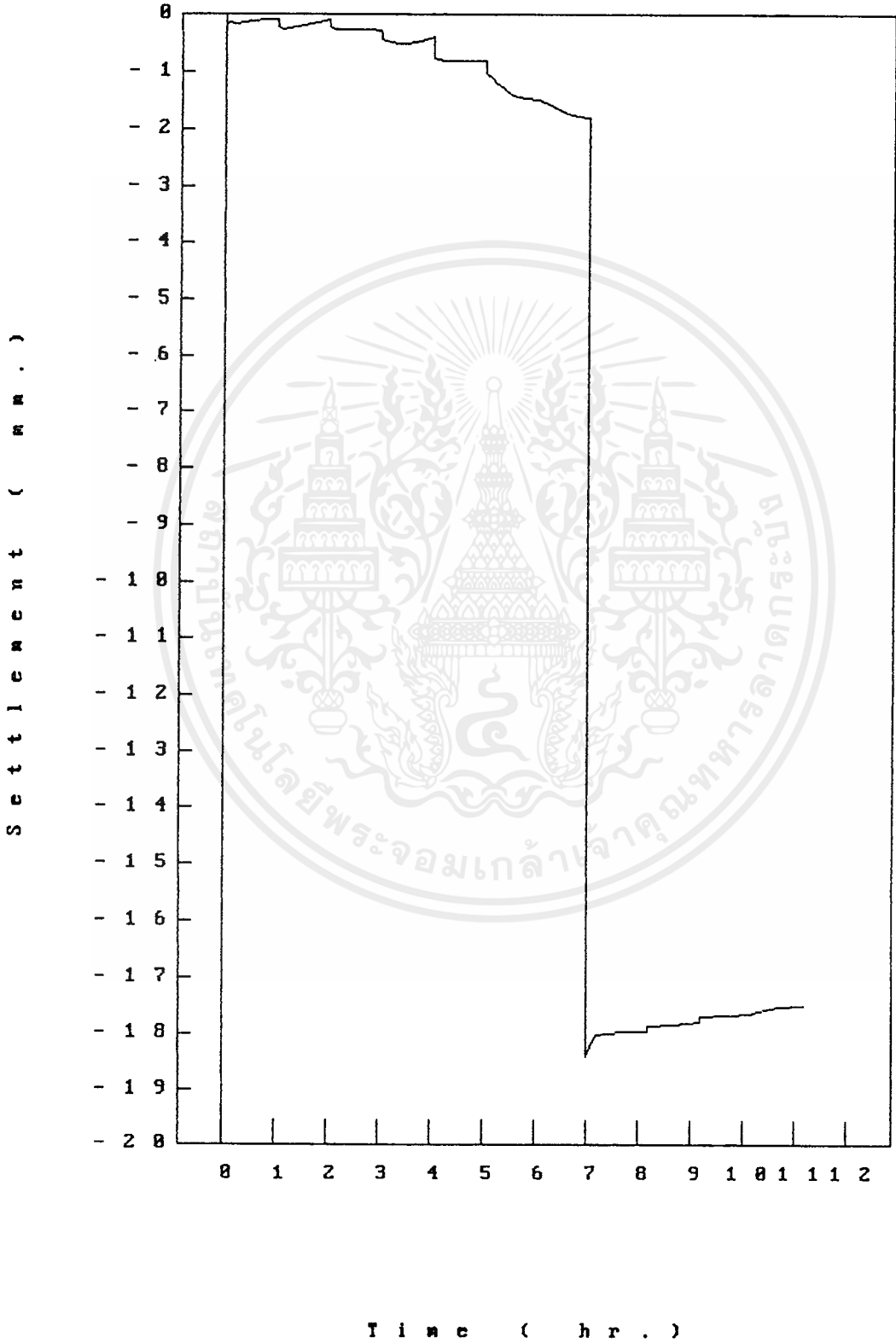
LOAD - TIME CURVE

PILE No. AZ



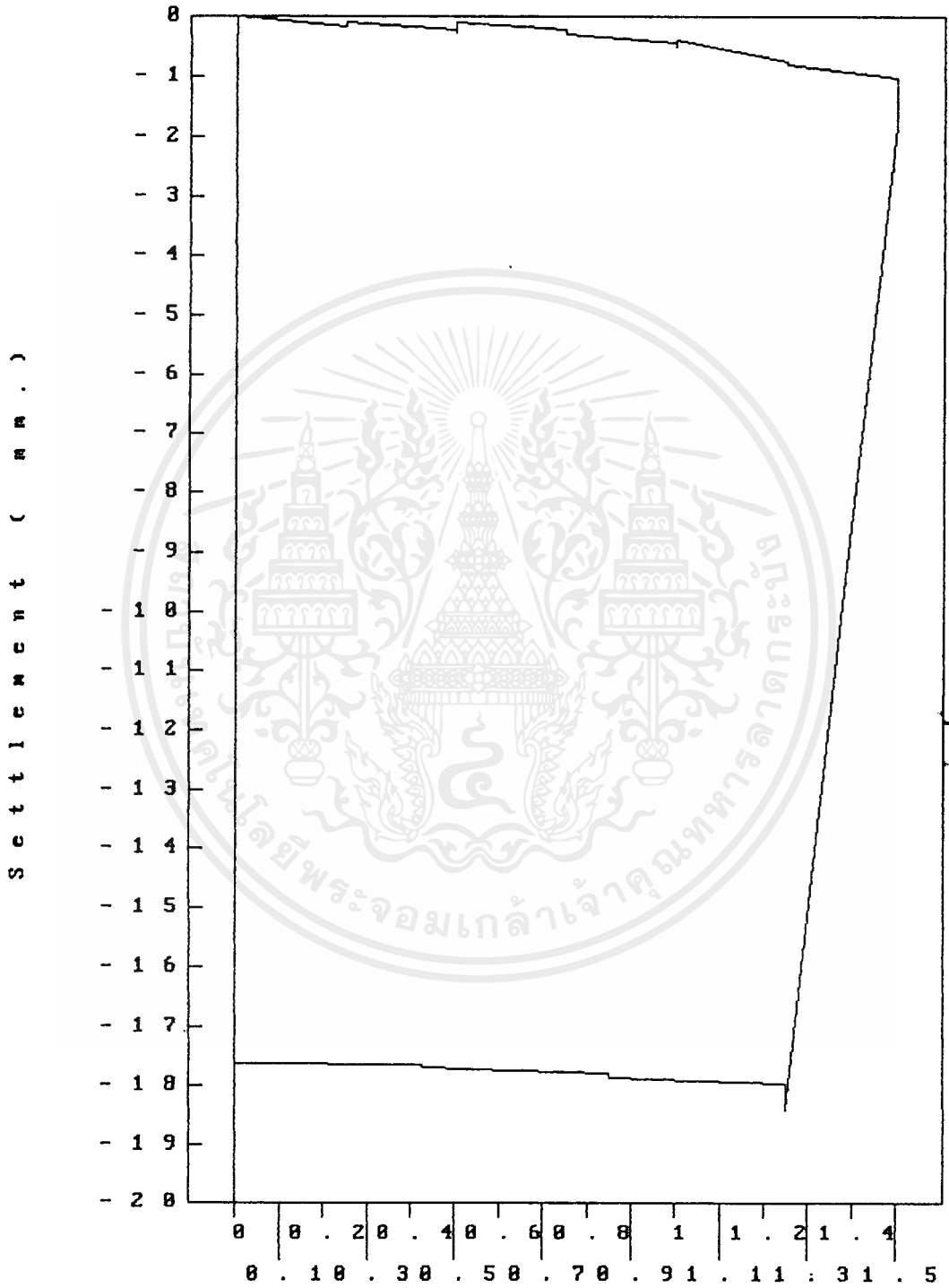
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . A 2



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . A 2



(T h o u s a n d s)

L o a d (k g .)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

File with Pre-Driving

PILE No. A-3

DATE 1-4-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1200	0	250/75	16	0.16	
1205	5		20	0.2	
1210	10		19	0.19	
1220	20		19	0.19	
1230	30		19	0.19	
1245	45		18	0.18	
1300	60		18	0.18	0.02
1300	0	500/150	19	0.19	
1305	5		17	0.17	
1310	10		14	0.14	
1320	20		12	0.12	
1330	30		12	0.12	
1345	45		9	0.09	
1400	60		10	0.1	-0.09
1400	0	750/220	12	0.12	
1405	5		14	0.14	
1410	10		16	0.16	
1420	20		18	0.18	
1430	30		19	0.19	
1445	45		20	0.2	
1500	60		20	0.2	0.08
1500	0	1000/290	26	0.26	
1505	5		27	0.27	
1510	10		28	0.28	
1520	20		28	0.28	
1530	30		28	0.28	
1545	45		28	0.28	
1600	60		28	0.28	0.02
1600	0	1250/365	42	0.42	
1605	5		50	0.5	
1610	10		55	0.55	
1620	20		61	0.61	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

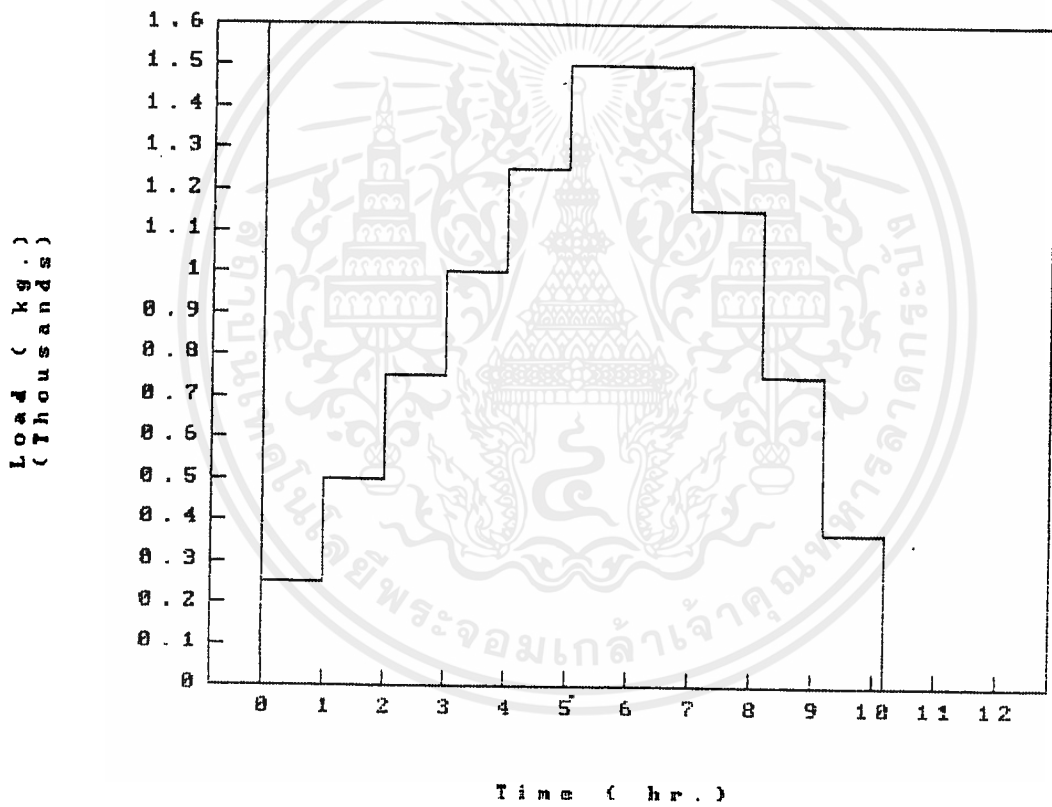
PILE No. A-3

DATE 1-4-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1630	30		64	0.64	
1645	45		65	0.65	
1700	60		66	0.66	0.24
1700	0	1500/440	120	1.2	
1705	5		150	1.5	
1710	10		185	1.85	
1720	20		215	2.15	
1730	30		265	2.65	
1745	45		290	2.9	
1800	60		310	3.1	1.9
1815	75		318	3.18	
1830	90		328	3.28	
1845	105		334	3.34	
1900	120		336	3.36	0.26
1900	0	1530/450	1895	18.95	
1900	0	1150/330	1870	18.7	
1930	30		1863	18.63	
2000	60		1860	18.6	
2000	0	750/225	1855	18.55	
2030	30		1850	18.5	
2100	60		1840	18.40	
2100	0	370/112	1840	18.4	
2130	30		1838	18.38	
2200	60		1837	18.37	
2200	0	0/0	1833	18.33	
2230	30		1826	18.26	
2300	60		1821	18.21	

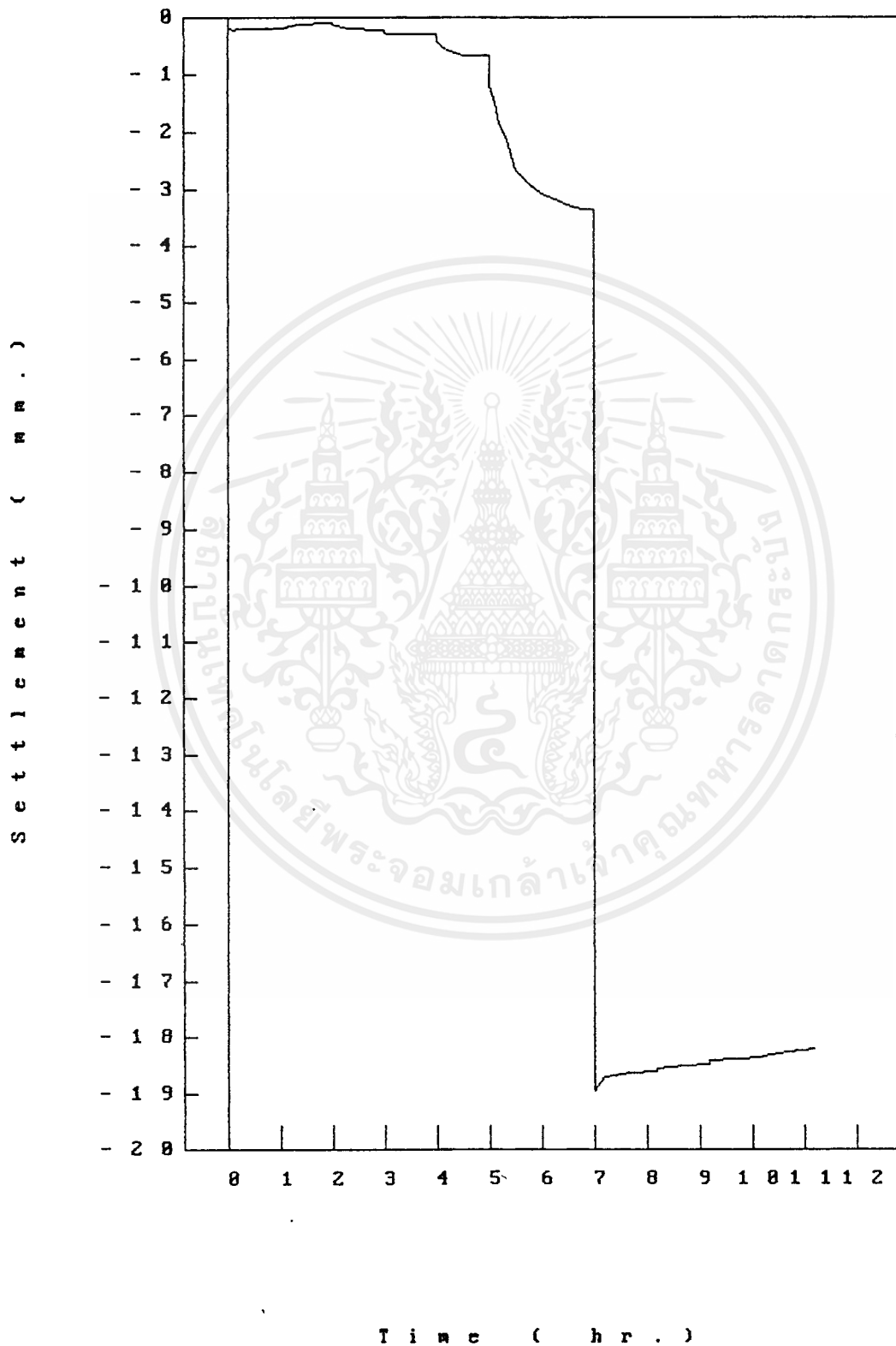
LOAD-TIME CURVE

PILE No. A-3



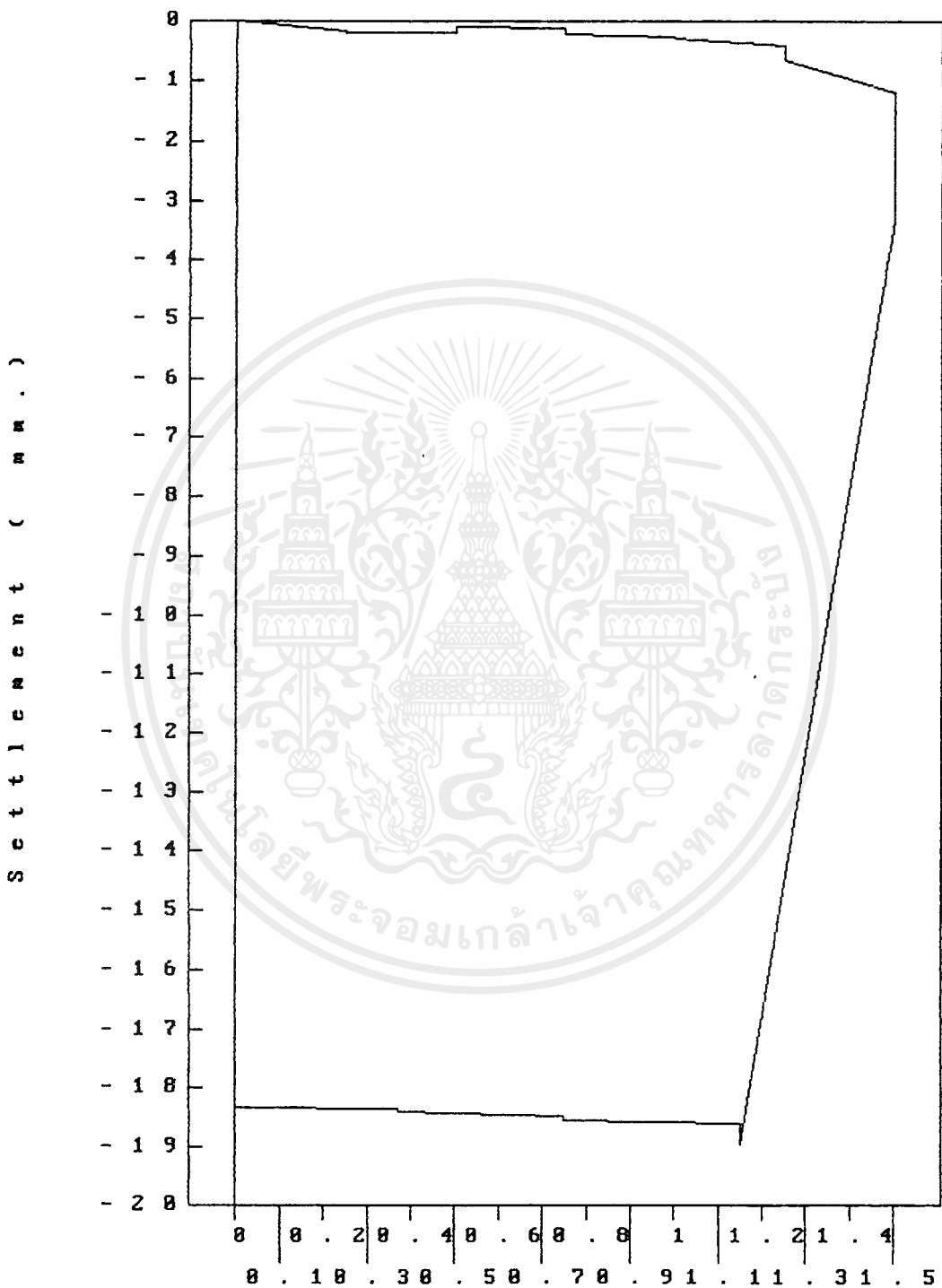
SETTLEMENT - TIME CURVE

PILE No. A-3



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . A - 3



(T h o u s a n d s)
L o a d (k g .)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete
Pile with Pre-Driving

LOCATION KMIT'L

PILE No. B-1

DATE 29-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
2225	0	250/75	8	0.08	
2230	5		9	0.09	
2235	10		9	0.09	
2245	20		9	0.09	
2255	30		9	0.09	
2310	45		9	0.09	
2325	60		9	0.09	0.01
2325	0	500/150	18	0.18	
2330	5		18	0.18	
2335	10		18	0.18	
2345	20		19	0.19	
2355	30		19	0.19	
2410	45		19	0.19	
2425	60		19	0.19	0.01
2425	0	750/220	26	0.26	
2430	5		27	0.27	
2435	10		28	0.28	
2445	20		30	0.3	
2455	30		28	0.28	
0110	45		29	0.29	
0125	60		31	0.31	0.05
0125	0	1000/290	40	0.4	
0130	5		41	0.41	
0135	10		42	0.42	
0145	20		44	0.44	
0155	30		45	0.45	
0210	45		46	0.46	
0225	60		46	0.46	0.06
0225	0	1250/365	62	0.62	
0230	5		67	0.67	
0235	10		70	0.7	
0245	20		73	0.73	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete
Pile with Pre-Driving

LOCATION KMIT'L

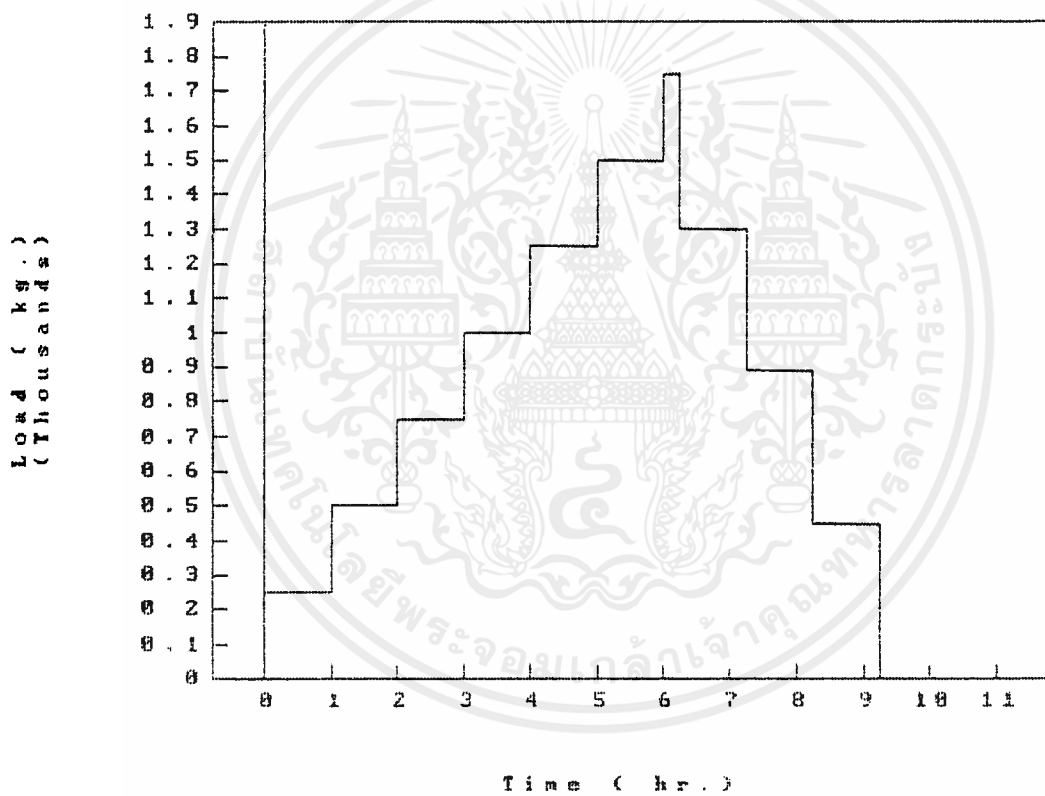
PILE No. B-1

DATE 29-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
0255	30		76	0.76	
0310	45		77	0.77	
0325	60		79	0.79	0.17
0325	0	1500/440	119	1.19	
0330	5		121	1.21	
0335	10		125	1.25	
0345	20		131	1.31	
0355	30		140	1.4	
0410	45		142	1.42	
0425	60		146	1.43	0.24
0425	0	1750/515	210	2.1	
0430	5		212	2.12	
0435	10		257	2.57	
0440	15		1815	18.15	16.05
0440	0	1300/386	1815	18.15	
0510	30		1842	18.42	
0540	60		1845	18.45	
0540	0	890/258	1825	18.25	
0610	30		1822	18.22	
0640	60		1822	18.22	
0640	0	450/128	1808	18.08	
0710	30		1805	18.05	
0740	60		1802	18.02	
0740	0	0/0	1784	17.84	
0810	30		1777	17.77	
0840	60		1772	17.72	

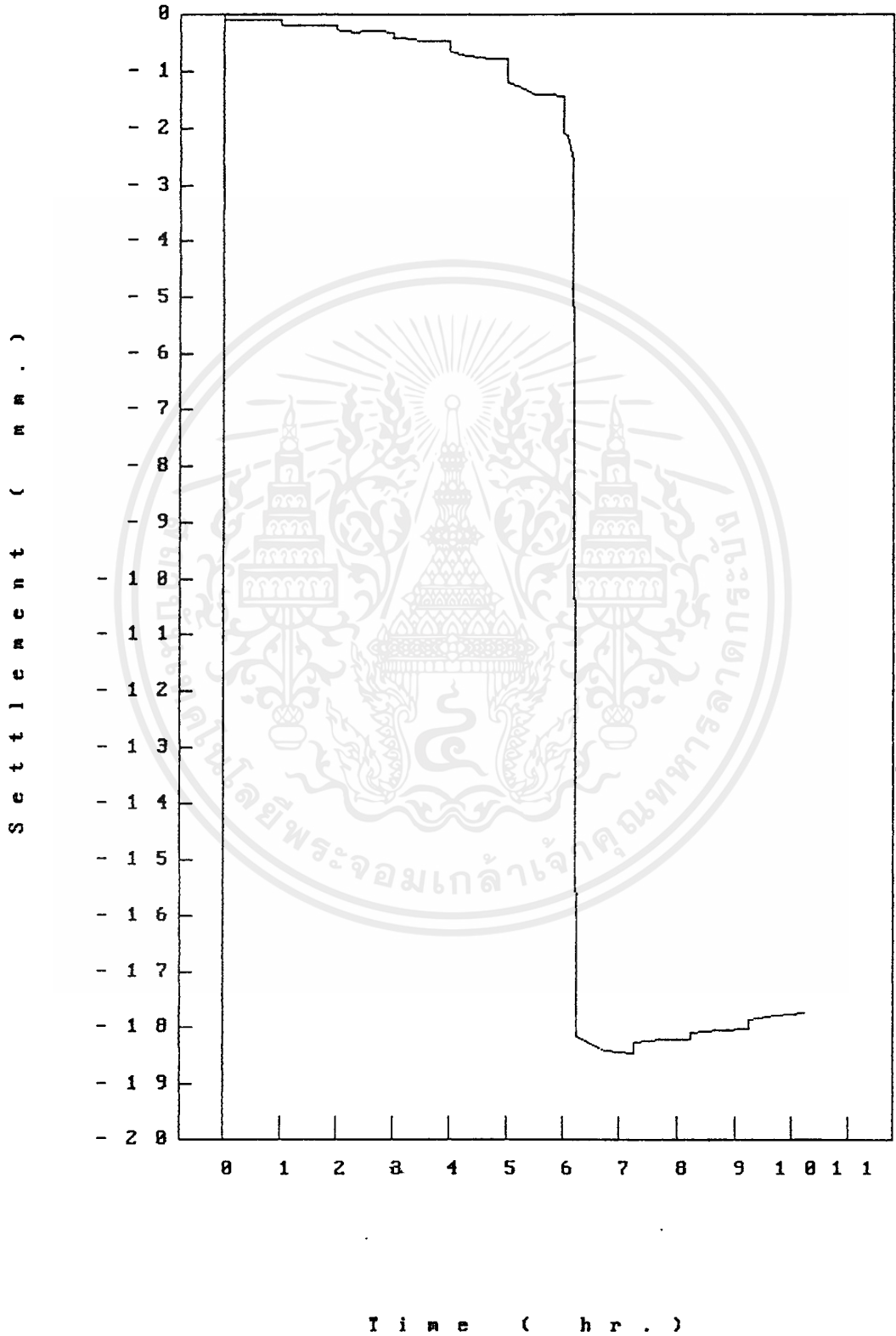
LOAD-TIME CURVE

FILE No. B1



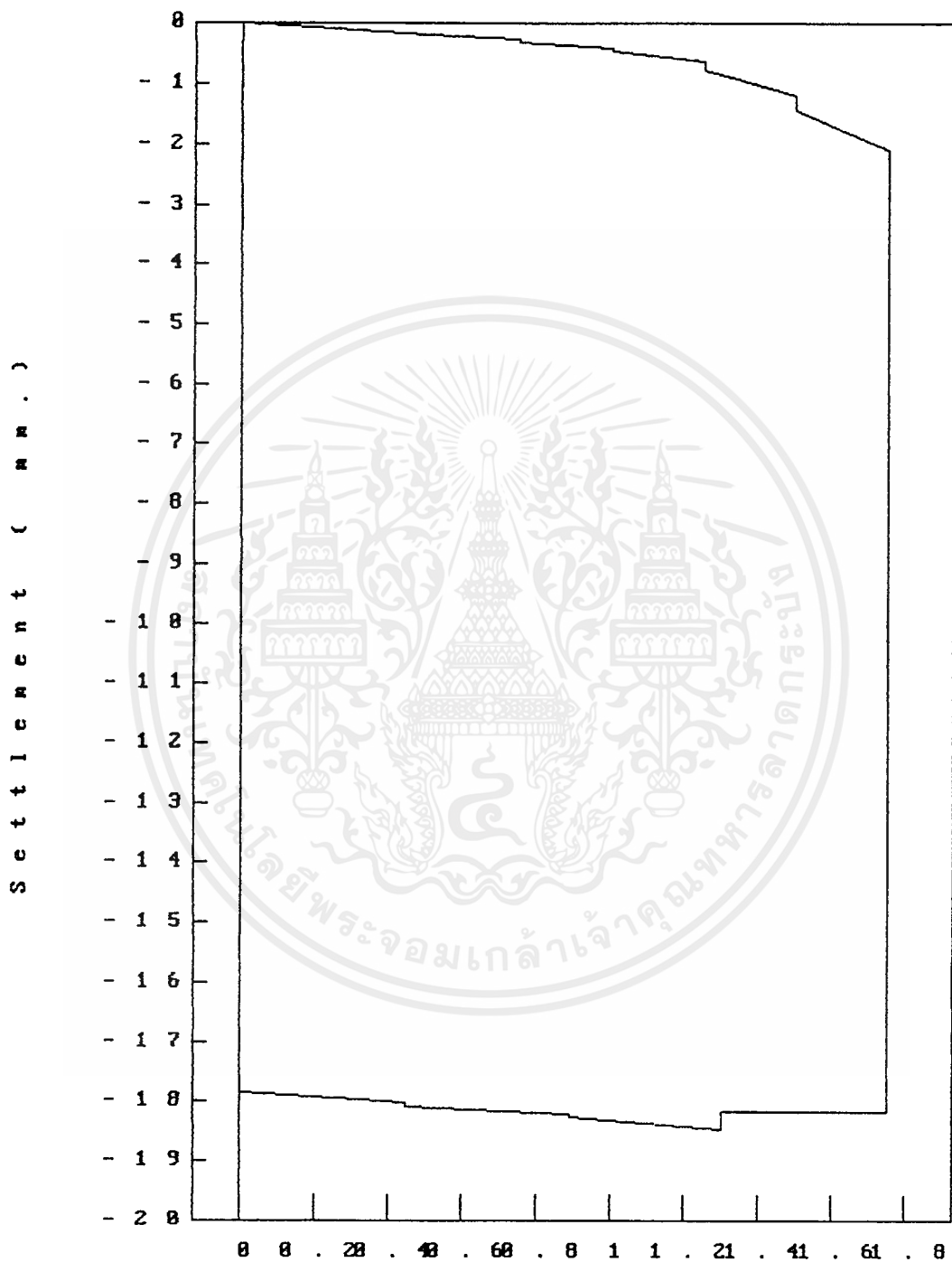
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . B 1



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . B 1



(Thousands)
Load (kg.)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KHIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. B-2

DATE 29-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1000	0	250/75	2	0.02	
1005	5		2	0.02	
1010	10		4	0.04	
1020	20		6	0.06	
1030	30		6	0.06	
1045	45		12	0.12	
1100	60		15	0.15	0.13
1100	0	500/150	25	0.25	
1105	5		22	0.22	
1110	10		24	0.24	
1120	20		25	0.25	
1130	30		25	0.25	
1154	45		18	0.18	
1200	60		15	0.15	0
1200	0	750/220	24	0.24	
1205	5		20	0.2	
1210	10		24	0.24	
1220	20		28	0.28	
1230	30		29	0.29	
1245	45		32	0.32	
1300	60		24	0.24	0
1300	0	1000/290	30	0.3	
1305	5		30	0.3	
1310	10		26	0.26	
1320	20		22	0.22	
1330	30		18	0.18	
1345	45		18	0.18	
1400	60		18	0.18	-0.12
1400	0	1250/365	29	0.29	
1405	5		30	0.3	
1410	10		29	0.29	
1420	20		30	0.3	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KM17'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. B-2

DATE 29-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1430	30		31	0.31	
1445	45		34	0.34	
1500	60		35	0.35	0.06
1500	0	1500/440	46	0.46	
1505	5		48	0.48	
1510	10		51	0.51	
1520	20		51	0.51	
1530	30		50	0.5	
1545	45		51	0.51	
1600	60		49	0.49	0.03
1600	0	1750/515	64	0.64	
1605	5		75	0.75	
1610	10		83	0.83	
1620	20		90	0.9	
1630	30		96	0.96	
1645	45		108	1.08	
1700	60		115	1.15	0.51
1715	75		123	1.23	
1730	90		135	1.35	
1745	105		147	1.47	
1800	120		154	1.54	0.39
1800	0	2000/585	1910	19.1	
1800	0	1500/440	1910	19.1	
1830	30		1912	19.12	
1900	60		1922	19.22	
1900	0	1000/290	1910	19.1	
1930	30		1908	19.08	
2000	60		1907	19.07	
2000	0	500/150	1885	18.85	
2030	30		1870	18.70	
2100	60		1877	18.77	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. B-2

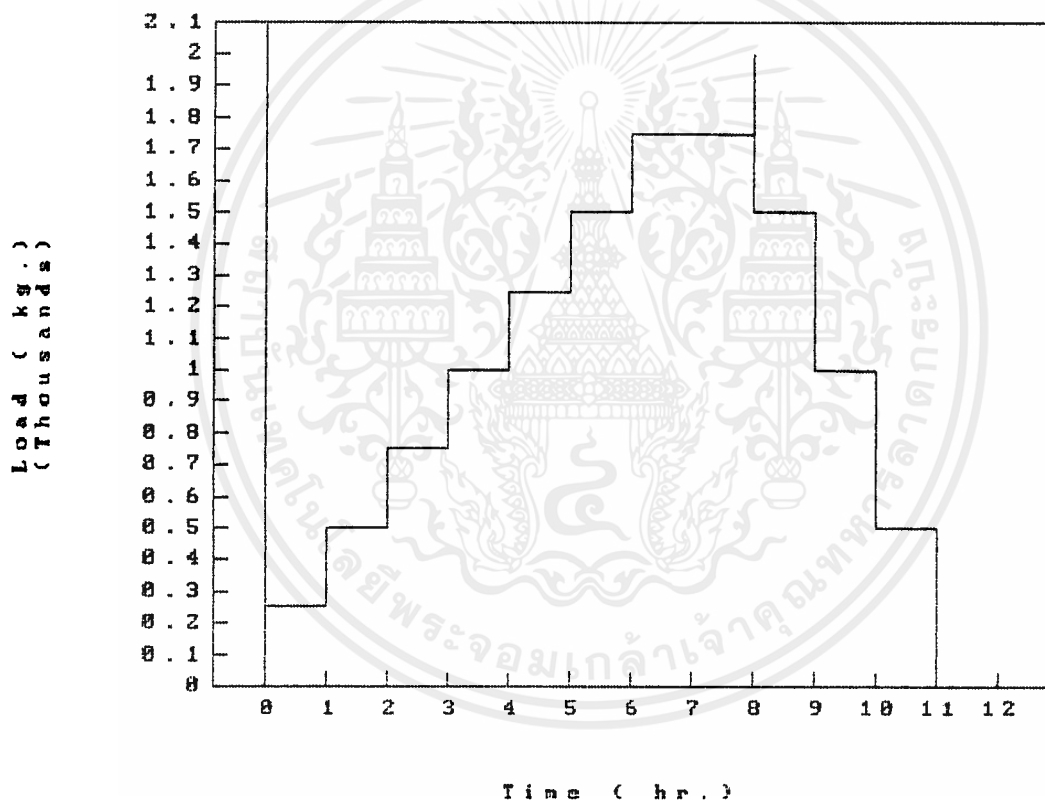
DATE 29-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
2100	0	0/0	1852	18.52	
2130	30		1844	18.44	
2200	60		1840	18.4	



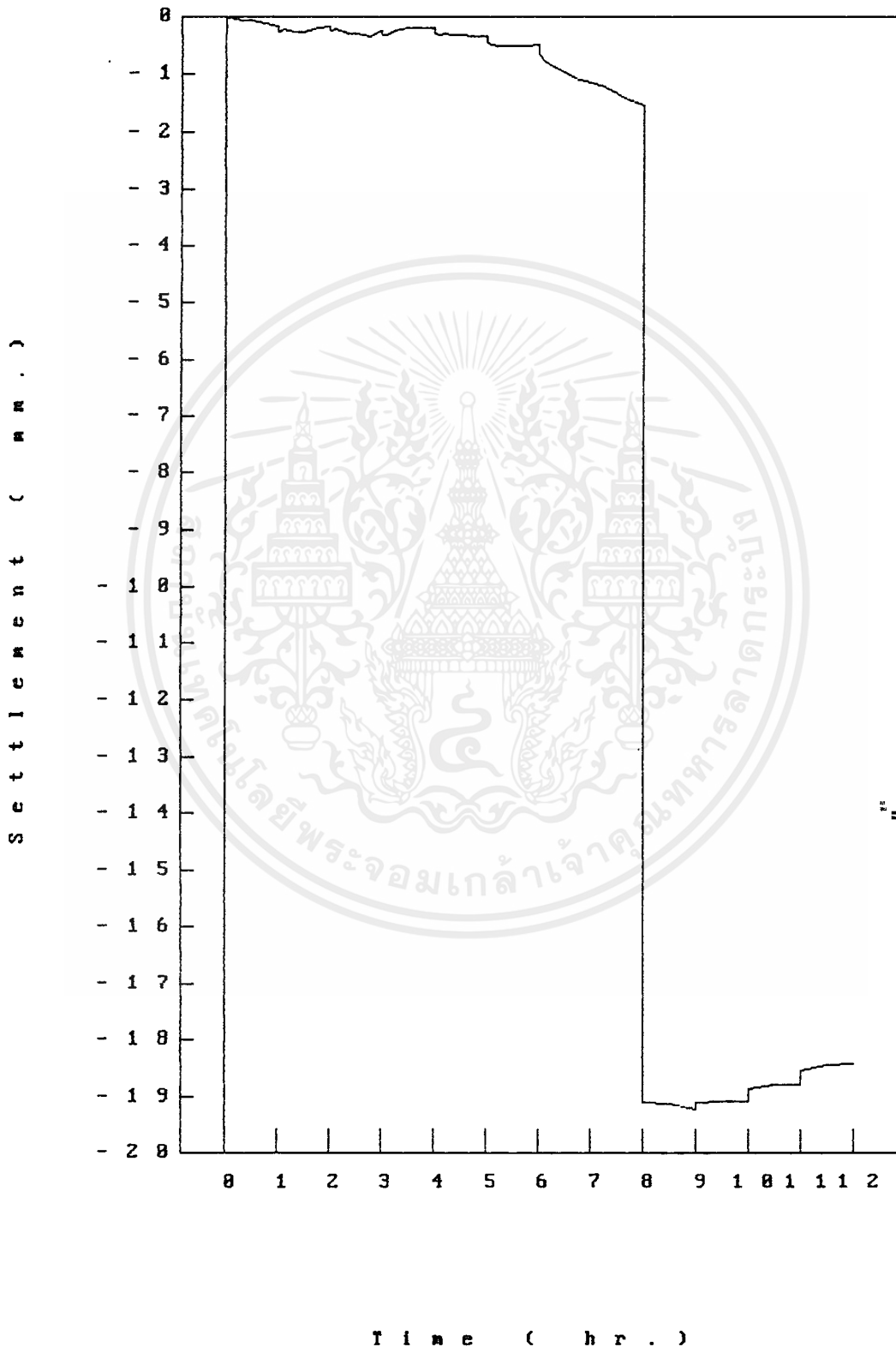
LOAD-TIME CURVE

FILE No. B-2



S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . B - 2



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . B - 2



(T h o u s a n d s)

L o a d (k g .)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. B-3

DATE 28-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1140	0	250/75	17	0.17	
1145	5		17	0.17	
1150	10		15	0.15	
1200	20		16	0.16	
1210	30		18	0.18	
1225	45		19	0.19	
1240	60		27	0.27	0.1
1240	0	500/150	48	0.4	
1245	5		45	0.45	
1250	10		45	0.45	
1300	20		46	0.46	
1310	30		46	0.46	
1325	45		48	0.4	
1340	60		22	0.22	-0.10
1340	0	750/220	38	0.3	
1345	5		34	0.34	
1350	10		37	0.37	
1400	20		37	0.37	
1410	30		38	0.38	
1425	45		40	0.4	
1440	60		32	0.32	0.02
1440	0	1000/290	42	0.42	
1445	5		49	0.49	
1450	10		57	0.57	
1500	20		60	0.6	
1510	30		63	0.63	
1525	45		63	0.63	
1540	60		66	0.66	0.24
1540	0	1250/365	78	0.78	
1545	5		84	0.84	
1550	10		87	0.87	
1600	20		86	0.86	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

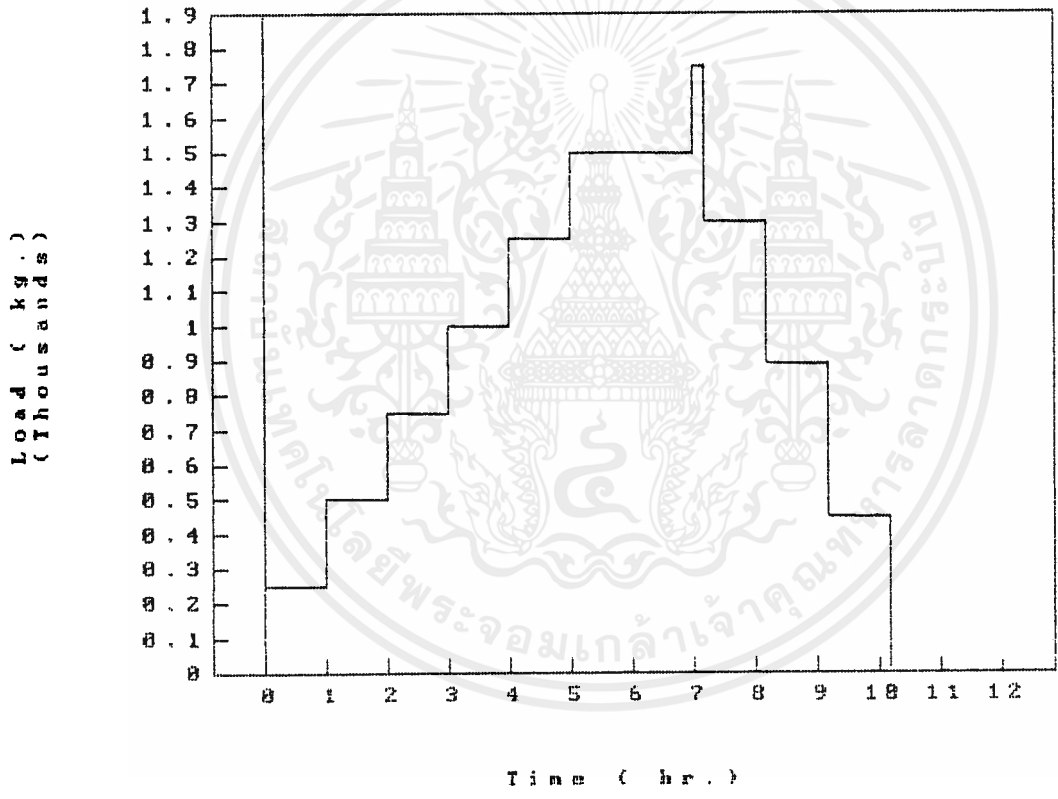
Pile with Pre-Driving

PILE No. B-3

DATE 28-3-1993

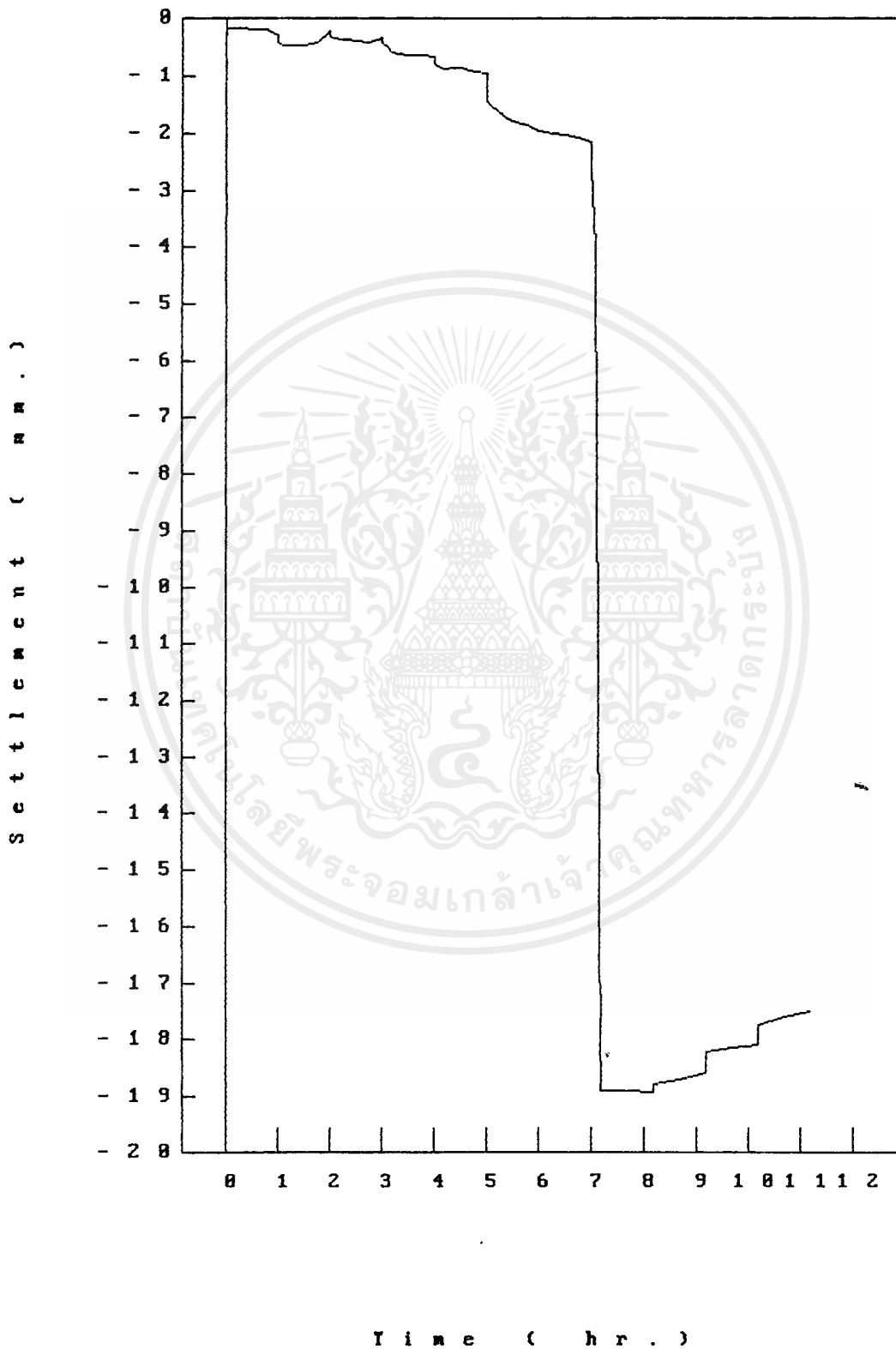
TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.081in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1610	30		85	0.85	
1625	45		93	0.93	
1640	60		94	0.94	0.16
1640	0	1500/440	143	1.43	
1645	5		155	1.55	
1650	10		160	1.6	
1700	20		170	1.7	
1710	30		179	1.79	
1725	45		186	1.86	
1740	60		195	1.95	0.35
1755	75		200	2	
1810	90		204	2.04	
1825	105		200	2.00	
1840	120		215	2.15	0.2
1840	0	1750/515	260	2.6	
1845	5		400	4	
1850	10		1885	18.85	
1850	0	1300/386	1889	18.89	
1920	30		1891	18.91	
1950	60		1892	18.92	
1950	0	890/258	1878	18.78	
2020	30		1870	18.7	
2050	60		1858	18.58	
2050	0	450/128	1820	18.2	
2120	30		1813	18.13	
2150	60		1809	18.09	
2150	0	0/0	1775	17.75	
2220	30		1760	17.6	
2250	60		1750	17.5	

LOAD-TIME CURVE
FILE No. B-3



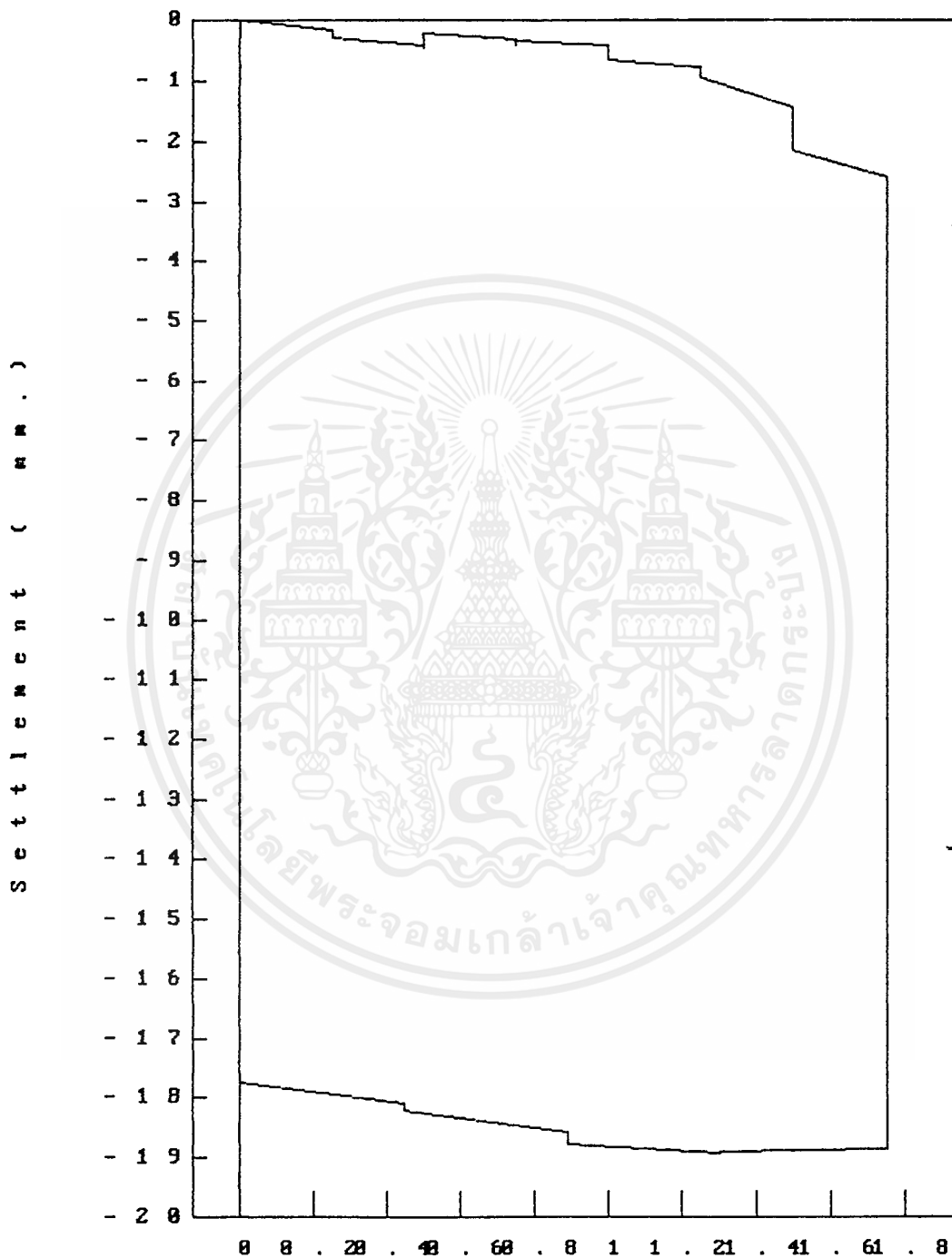
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . B - 3



SETTLEMENT - LOAD CURVE

PILE No . B - 3



(Thousands)
 Load (kg.)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. C-1

DATE 26-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1050	0	250/75	10	0.1	
1055	5		9	0.09	
1100	10		8	0.08	
1110	20		8	0.08	
1120	30		8	0.08	
1135	45		9	0.09	
1150	60		20	0.2	0.1
1150	0	500/150	31	0.31	
1155	5		29	0.29	
1200	10		18	0.18	
1210	20		30	0.3	
1220	30		43	0.43	
1235	45		44	0.44	
1250	60		50	0.5	0.19
1250	0	750/220	60	0.6	
1255	5		60	0.6	
1300	10		58	0.58	
1310	20		50	0.5	
1320	30		50	0.5	
1335	45		51	0.51	
1350	60		49	0.49	-0.11
1350	0	1000/290	50	0.5	
1355	5		50	0.5	
1400	10		40	0.40	
1410	20		40	0.40	
1420	30		41	0.41	
1435	45		42	0.42	
1450	60		46	0.46	-0.01
1450	0	1250/365	49	0.49	
1455	5		51	0.51	
1500	10		55	0.55	
1510	20		60	0.6	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

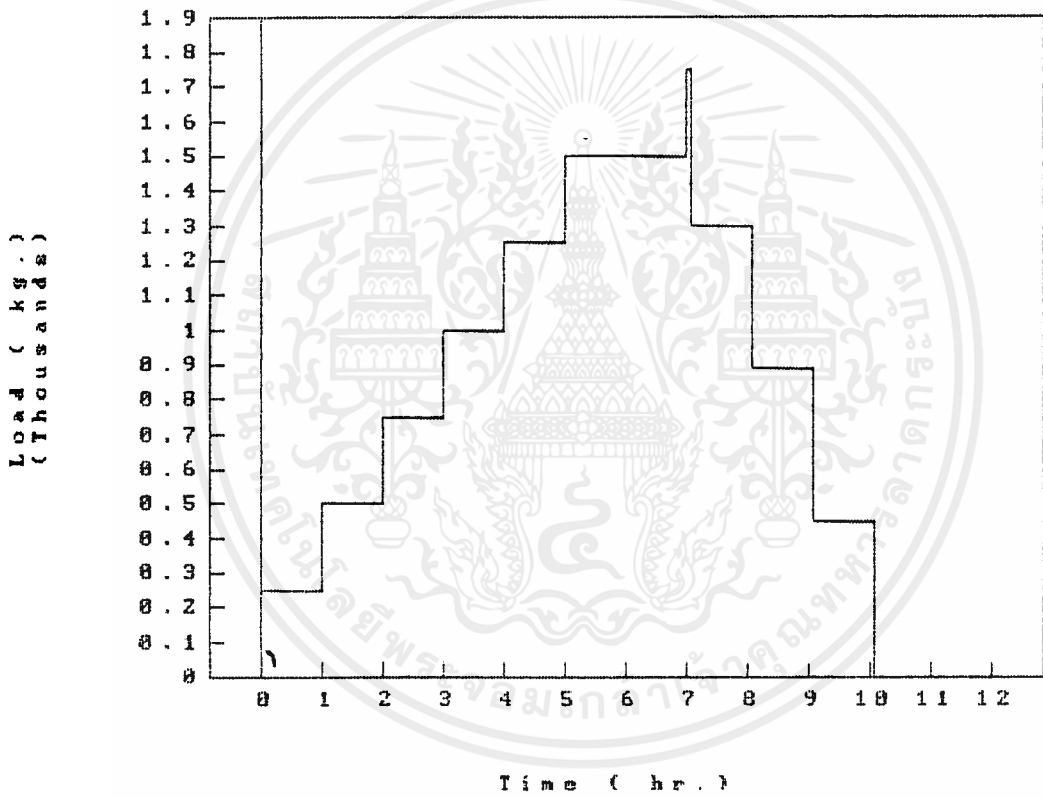
PILE No. C-1

DATE 26-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1520	30		66	0.66	
1535	45		66	0.66	
1550	60		65	0.65	0.16
1550	0	1500/440	80	0.8	
1555	5		98	0.98	
1600	10		110	1.1	
1610	20		118	1.18	
1620	30		125	1.25	
1635	45		130	1.3	
1650	60		135	1.35	0.25
1705	75		135	1.35	
1720	90		136	1.36	
1735	105		142	1.42	
1750	120		148	1.48	0.13
1750	0	1750/515	175	1.75	
1755	5		1900	19	
1755	0	1300/386	1994	19.94	
1825	30		1991	19.91	
1855	60		1989	19.89	
1855	0	890/258	1984	19.84	
1925	30		1980	19.8	
1955	60		1978	19.78	
1955	0	450/128	1978	19.7	
2025	30		1965	19.65	
2055	60		1964	19.64	
2055	0	0/0	1940	19.4	
2125	30		1937	19.37	
2155	60		1928	19.28	

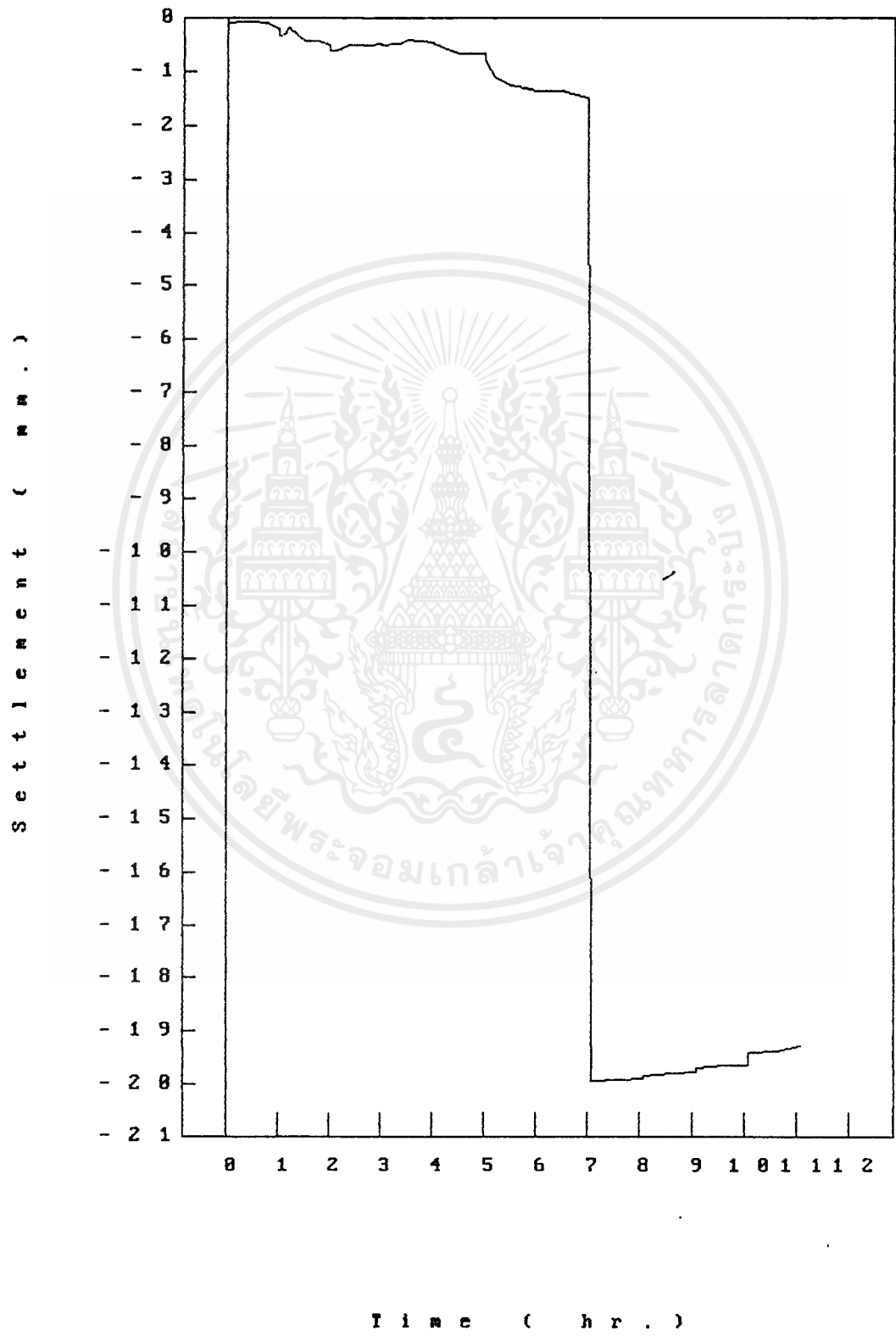
LOAD - TIME CURVE

PILE No. C-1



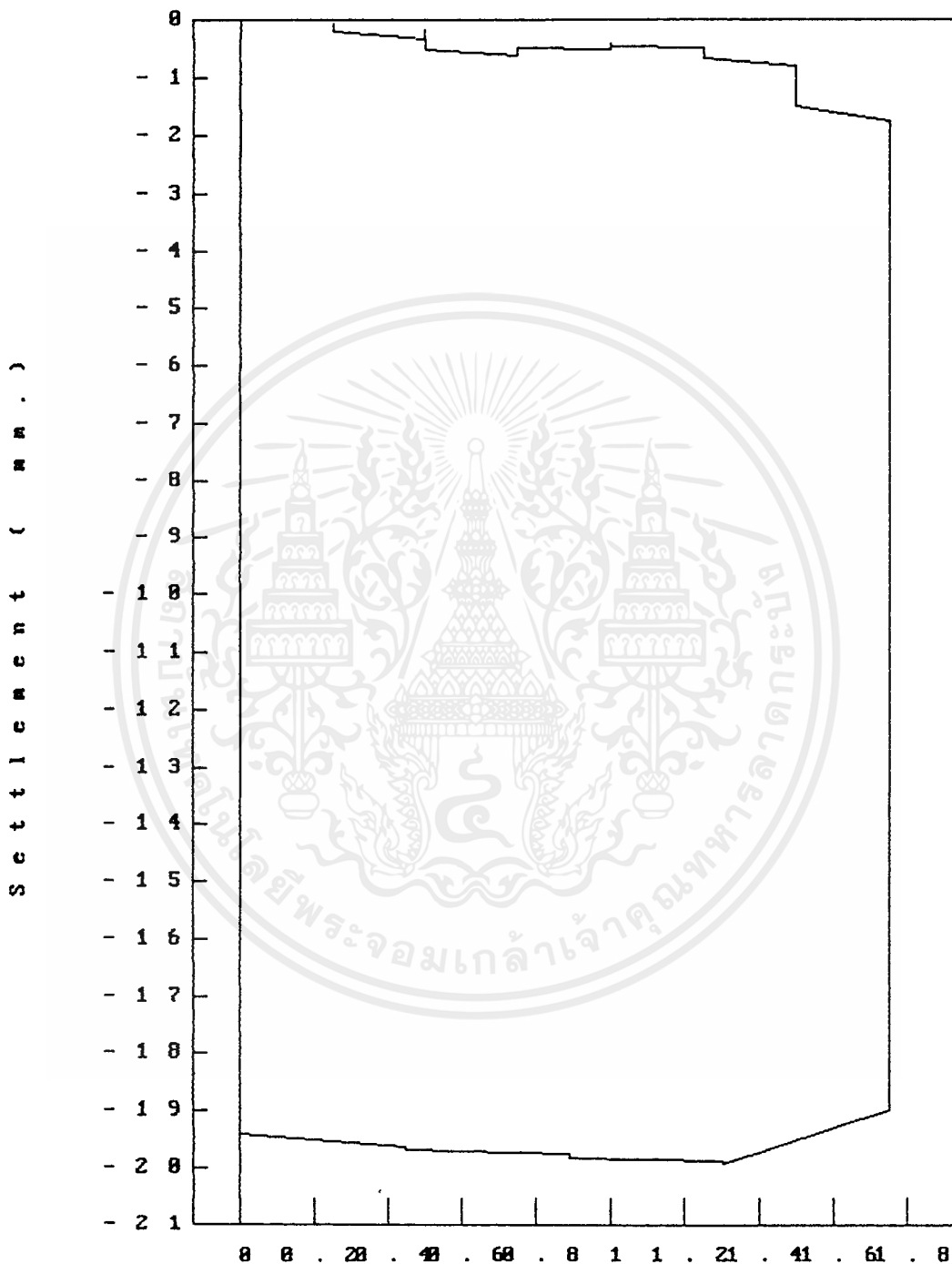
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . C - 1



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . C - 1



(T h o u s a n d s)
L o a d (k g .)

FILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

FILE No. C-2

DATE 23-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.081in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1010	0	110/35	3	0.03	
1015	5		2	0.02	
1020	10		2	0.02	
1030	20		2	0.02	
1040	30		4	0.04	
1055	45		3	0.03	
1110	60		6	0.06	0.03
1110	0	310/90	13	0.13	
1115	5		20	0.2	
1120	10		26	0.26	
1130	20		26	0.26	
1140	30		30	0.3	
1155	45		38	0.3	
1210	60		37	0.37	0.24
1210	0	480/142	44	0.44	
1215	5		44	0.44	
1220	10		45	0.45	
1230	20		45	0.45	
1240	30		45	0.45	
1255	45		48	0.48	
1310	60		48	0.48	0.04
1310	0	680/197	48	0.48	
1315	5		50	0.5	
1320	10		51	0.51	
1330	20		40	0.40	
1340	30		41	0.41	
1355	45		35	0.35	
1410	60		30	0.3	-0.10
1410	0	870/252	30	0.30	
1415	5		41	0.41	
1420	10		42	0.42	
1430	20		44	0.44	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. C-2

DATE 23-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1440	30		44	0.44	
1455	45		44	0.44	
1510	60		44	0.44	0.06
1510	0	1050/306	52	0.52	
1515	5		58	0.58	
1520	10		61	0.61	
1530	20		65	0.65	
1540	30		68	0.68	
1555	45		71	0.71	
1610	60		72	0.72	0.2
1610	0	1220/360	82	0.82	
1615	5		91	0.91	
1620	10		95	0.95	
1630	20		102	1.02	
1640	30		108	1.08	
1655	45		112	1.12	
1710	60		117	1.17	0.35
1725	75		121	1.21	
1740	90		122	1.22	
1755	105		126	1.26	
1810	120		130	1.3	0.13
1810	0	1410/415	150	1.5	
1815	5		170	1.7	
1820	10		185	1.85	
1830	20		212	2.12	
1840	30		238	2.38	
1855	45		1850	18.5	
1855	0	1070/311	1852	18.52	
1925	30		1851	18.51	
1955	60		1855	18.55	
1955	0	700/207	1840	18.4	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

File with Pre-Driving

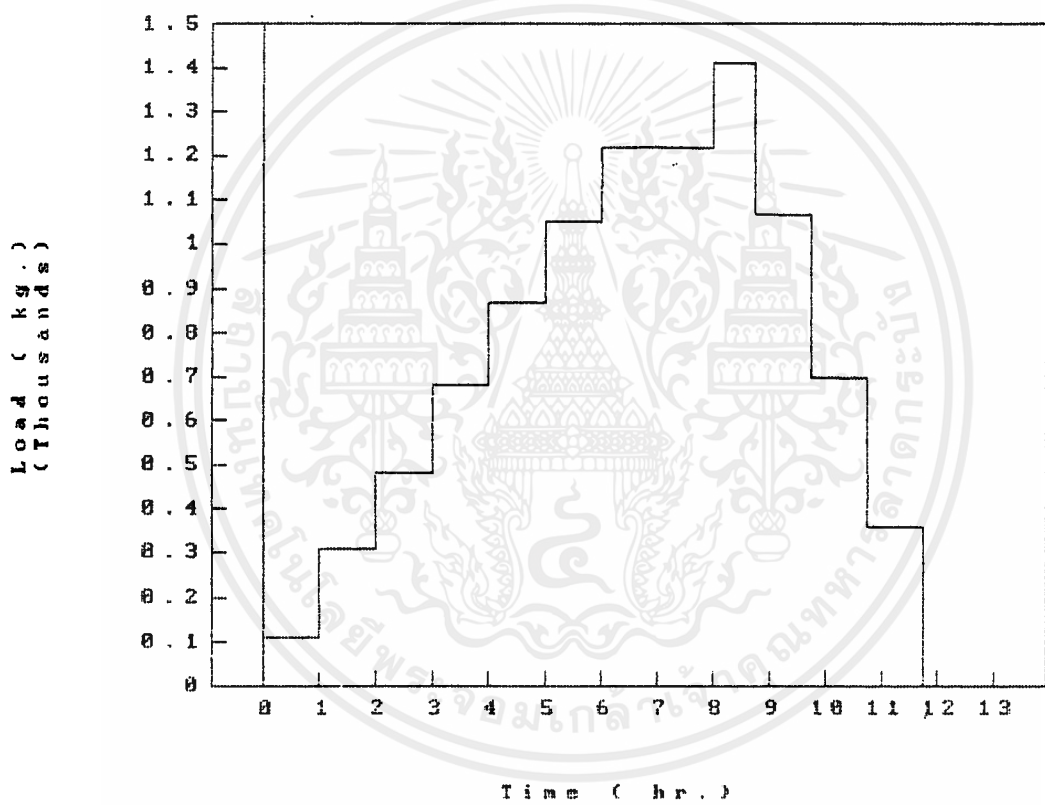
PILE No. C-2

DATE 23-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
2025	30		1835	18.35	
2055	60		1833	18.33	
2055	0	360/104	1821	18.21	
2125	30		1811	18.11	
2155	60		1804	18.04	
2155	0	0/0	1785	17.85	
2225	30		1780	17.8	
2255	60		1770	17.7	

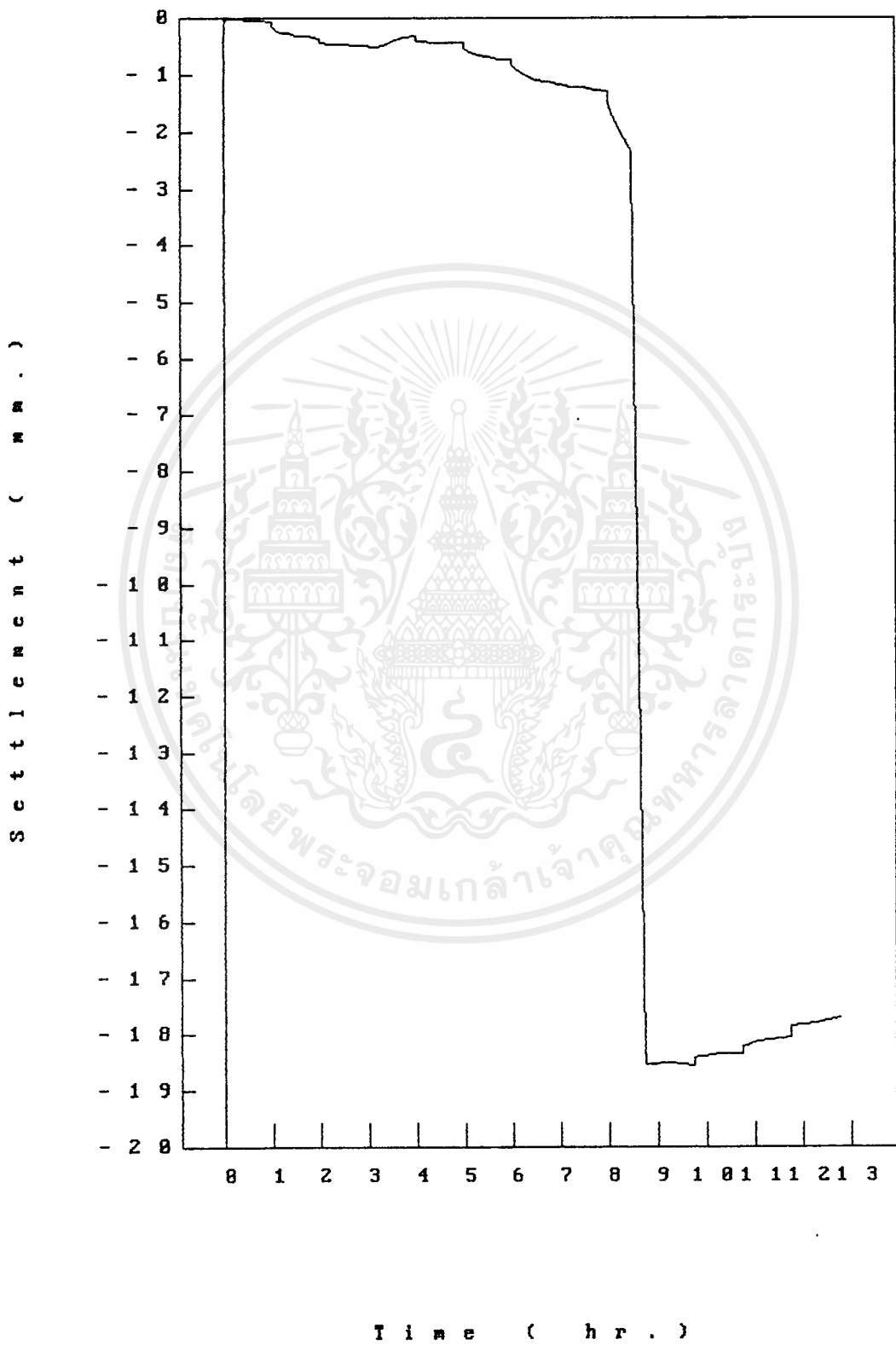
LOAD-TIME CURVE

FILE No. C-Z



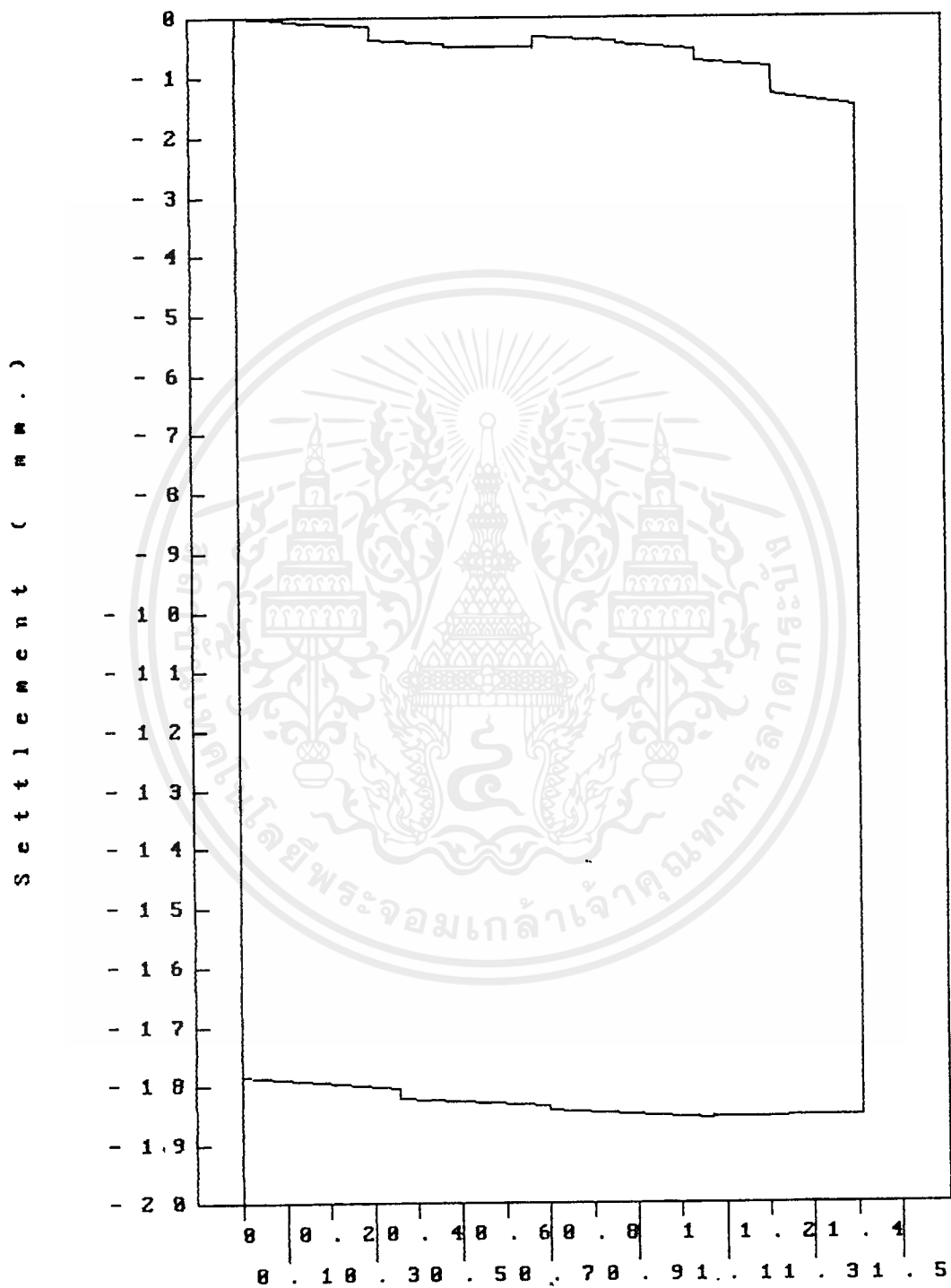
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . C - 2



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . C - 2



(T h o u s a n d s)
L o a d (k g .)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. C-3

DATE 27-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.881in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
0730	0	250/75	0	0.00	
0735	5		10	0.1	
0740	10		11	0.11	
0750	20		15	0.15	
0800	30		16	0.16	
0815	45		20	0.2	
0830	60		22	0.22	0.14
0830	0	500/150	30	0.3	
0835	5		31	0.31	
0840	10		29	0.29	
0850	20		28	0.28	
0900	30		29	0.29	
0915	45		30	0.3	
0930	60		31	0.31	0.01
0930	0	750/220	45	0.45	
0935	5		42	0.42	
0940	10		48	0.48	
0950	20		45	0.45	
1000	30		43	0.43	
1015	45		47	0.47	
1030	60		49	0.49	0.04
1030	0	1000/290	57	0.57	
1035	5		61	0.61	
1040	10		65	0.65	
1050	20		65	0.65	
1100	30		65	0.65	
1115	45		67	0.67	
1130	60		70	0.7	0.13
1130	0	1250/365	85	0.85	
1135	5		97	0.97	
1140	10		96	0.96	
1150	20		100	1	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

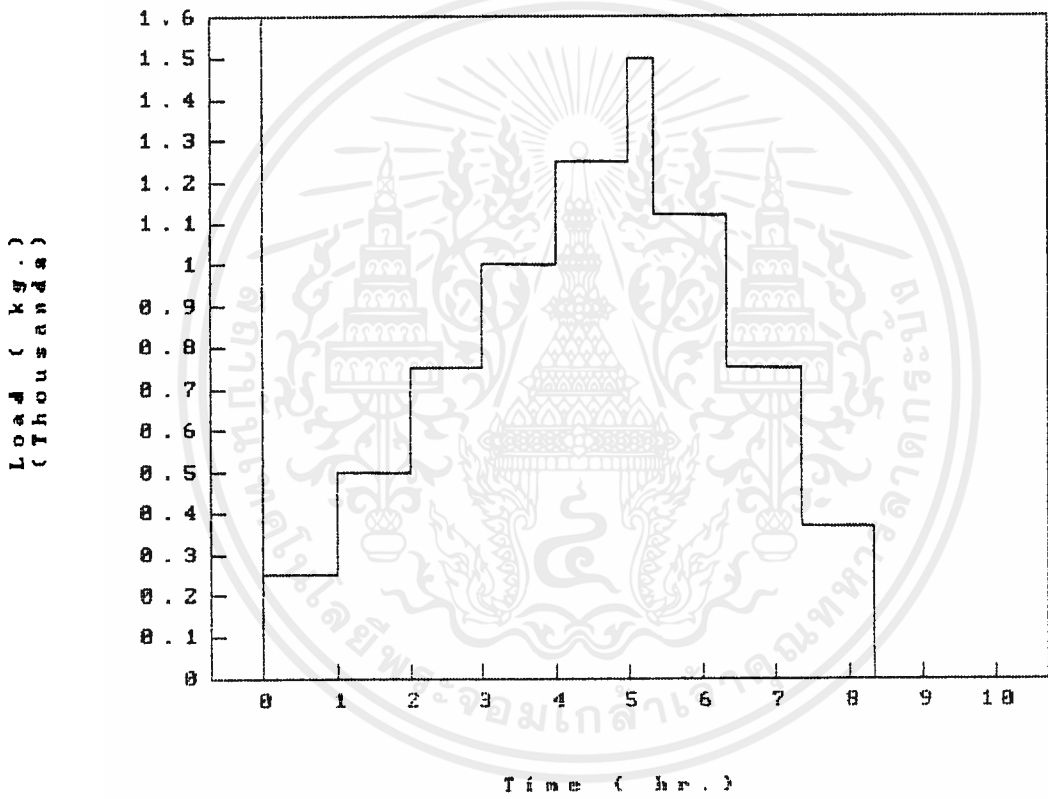
PILE No. C-3

DATE 27-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1200	30		103	1.03	
1215	45		107	1.07	
1230	60		110	1.1	0.25
1230	0	1500/440	145	1.45	
1235	5		161	1.61	
1240	10		195	1.95	
1250	20		1880	18.8	
1250	0	1120/330	1896	18.96	
1320	30		1878	18.78	
1350	60		1865	18.65	
1350	0	750/220	1852	18.52	
1420	30		1849	18.49	
1450	60		1846	18.46	
1450	0	370/110	1828	18.28	
1520	30		1822	18.22	
1550	60		1816	18.16	
1550	0	0/0	1810	18.1	
1620	30		1805	18.05	
1650	60		1795	17.95	

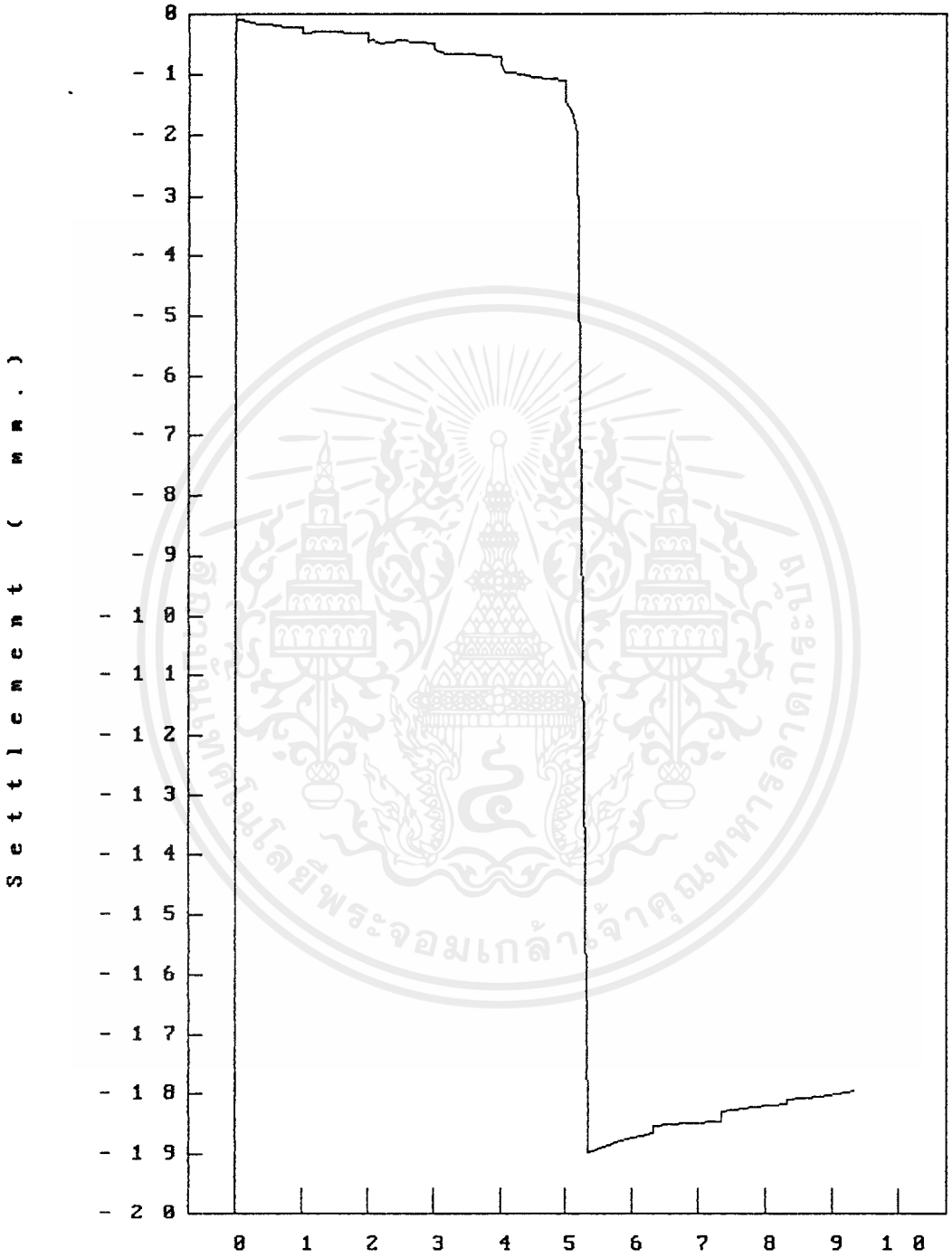
LOAD-TIME CURVE

FILE No. C-3



S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

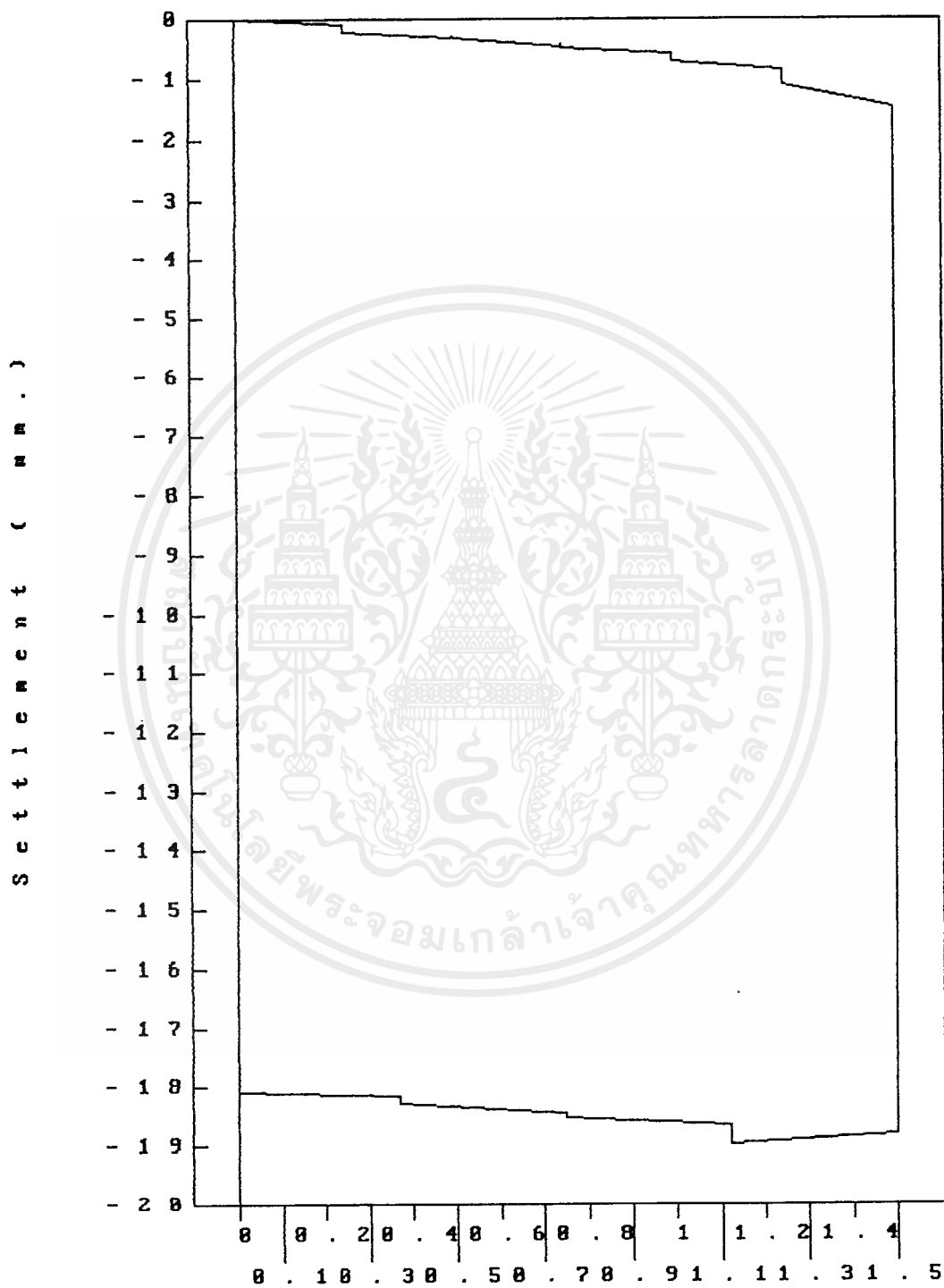
P I L E N o . C - 3



T i m e (h r .)

S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . C - 3



(T h o u s a n d s)

L o a d (k g .)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

File with Pre-Driving

PILE No. D-1

DATE 22-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (8.881in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1415	0	110/35	1	0.01	
1420	5		3	0.03	
1425	10		4	0.04	
1435	20		7	0.07	
1445	30		8	0.08	
1500	45		9	0.09	
1515	60		11	0.11	0.1
1515	0	310/90	14	0.14	
1520	5		8	0.08	
1525	10		8	0.08	
1535	20		8	0.08	
1545	30		10	0.1	
1600	45		14	0.14	
1615	60		14	0.14	0
1615	0	480/142	18	0.18	
1620	5		17	0.17	
1625	10		18	0.18	
1635	20		20	0.2	
1645	30		20	0.2	
1700	45		18	0.18	
1715	60		18	0.18	0
1715	0	680/197	25	0.25	
1720	5		25	0.25	
1725	10		26	0.26	
1735	20		27	0.27	
1745	30		28	0.28	
1800	45		29	0.29	
1815	60		29	0.29	0.04
1815	0	870/252	40	0.4	
1820	5		42	0.42	
1825	10		43	0.43	
1835	20		48	0.48	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. D-1

DATE 22-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1845	30		50	0.5	
1900	45		51	0.51	
1915	60		53	0.53	0.13
1915	0	1050/306	65	0.65	.
1920	5		75	0.75	
1925	10		79	0.79	
1935	20		85	0.85	
1945	30		90	0.9	
2000	45		95	0.95	
2015	60		102	1.02	0.37
2030	75		106	1.06	
2045	90		110	1.1	
2100	105		111	1.11	
2115	120		112	1.12	0.1
2115	0	1220/360	110	1.10	
2120	5		130	1.30	
2125	10		160	1.6	
2135	20		180	1.8	
2145	30		202	2.02	
2200	45		237	2.37	
2215	60		292	2.92	1.74
2230	75		340	3.4	
2245	90		365	3.65	
2300	105		382	3.82	
2315	120		389	3.89	0.97
2315	0	1300/380	1811	18.11	
2315	0	980/285	1813	18.13	
2345	30		1814	18.14	
2415	60		1815	18.15	
2415	0	650/190	1800	18	
2445	30		1792	17.92	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

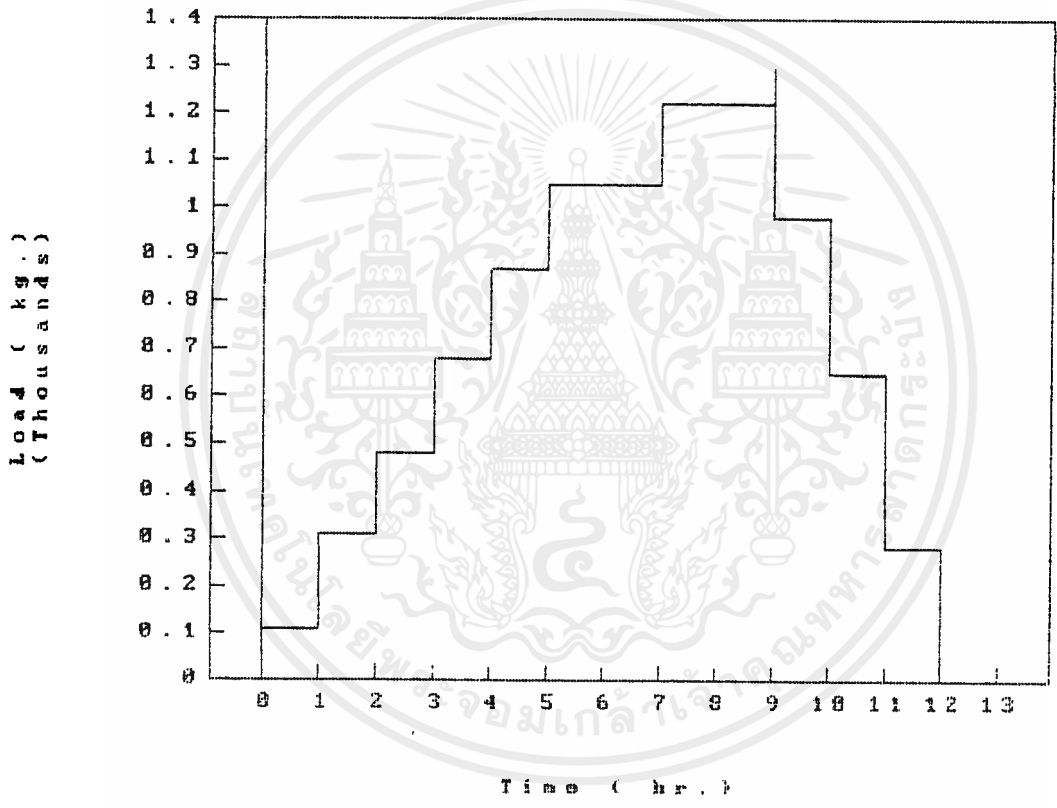
PILE No. D-1

DATE 22-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
0115	60		1785	17.85	
0115	0	280/80	1778	17.7	
0145	30		1762	17.62	
0215	60		1761	17.61	
0215	0	0/0	1738	17.3	
0245	30		1728	17.28	
0315	60		1727	17.27	

LOAD - TIME CURVE

FILE No. D-1



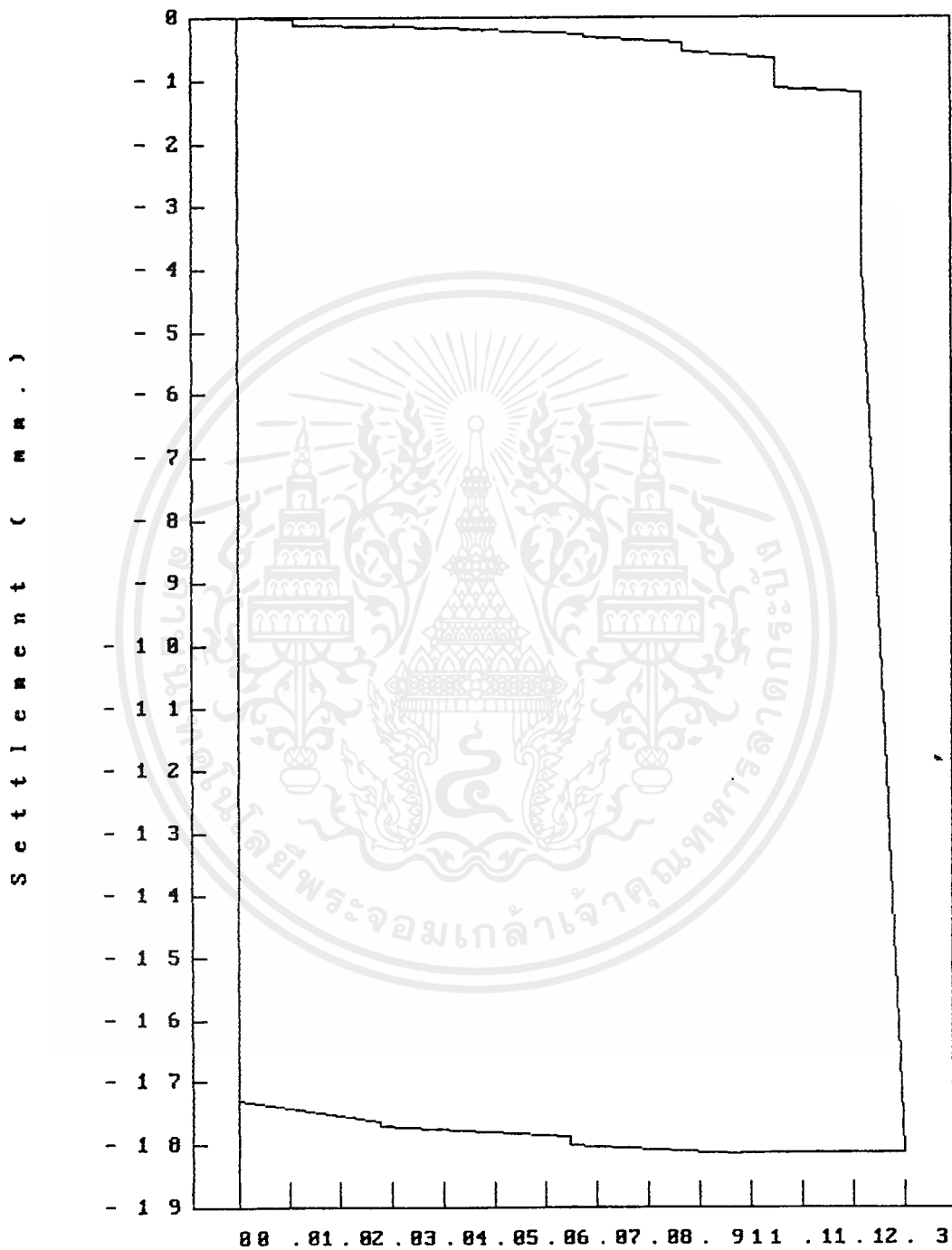
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . D - 1



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . D - 1



(T h o u s a n d s)
L o a d (k g .)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No.D-2

DATE 25-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.801in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1045	0	110/35	7	0.07	
1050	5		8	0.08	
1055	10		8	0.08	
1105	20		7	0.07	
1115	30		8	0.08	
1130	45		9	0.09	
1145	60		10	0.1	0.03
1145	0	310/90	16	0.16	
1150	5		16	0.16	
1155	10		19	0.19	
1205	20		20	0.2	
1215	30		21	0.21	
1230	45		21	0.21	
1245	60		22	0.22	0.06
1245	0	480/142	30	0.3	
1250	5		30	0.3	
1255	10		30	0.3	
1305	20		27	0.27	
1315	30		28	0.28	
1330	45		26	0.26	
1345	60		22	0.22	-0.08
1345	0	680/197	31	0.31	
1350	5		32	0.32	
1355	10		29	0.29	
1405	20		29	0.29	
1415	30		30	0.3	
1430	45		31	0.31	
1445	60		28	0.28	-0.03
1445	0	870/252	35	0.35	
1450	5		40	0.4	
1455	10		42	0.42	
1505	20		50	0.5	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No.D-2

DATE 25-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1515	30		51	0.51	
1530	45		45	0.45	
1545	60		45	0.45	0.1
1545	0	1050/306	55	0.55	
1550	5		60	0.6	
1555	10		65	0.65	
1605	20		66	0.66	
1615	30		66	0.66	
1630	45		68	0.68	
1645	60		69	0.69	0.14
1645	0	1220/360	78	0.78	
1650	5		82	0.82	
1655	10		85	0.85	
1705	20		88	0.88	
1715	30		91	0.91	
1730	45		95	0.95	
1745	60		102	1.02	0.24
1745	0	1410/415	113	1.13	
1750	5		125	1.25	
1755	10		135	1.35	
1805	20		147	1.47	
1815	30		160	1.6	
1830	45		175	1.75	
1845	60		194	1.94	0.81
1900	75		200	2	
1915	90		220	2.2	
1930	105		238	2.38	
1945	120		262	2.62	0.68
1945	0	1600/470	1912	19.12	
1945	0	1200/352	1915	19.15	
2015	30		1916	19.16	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

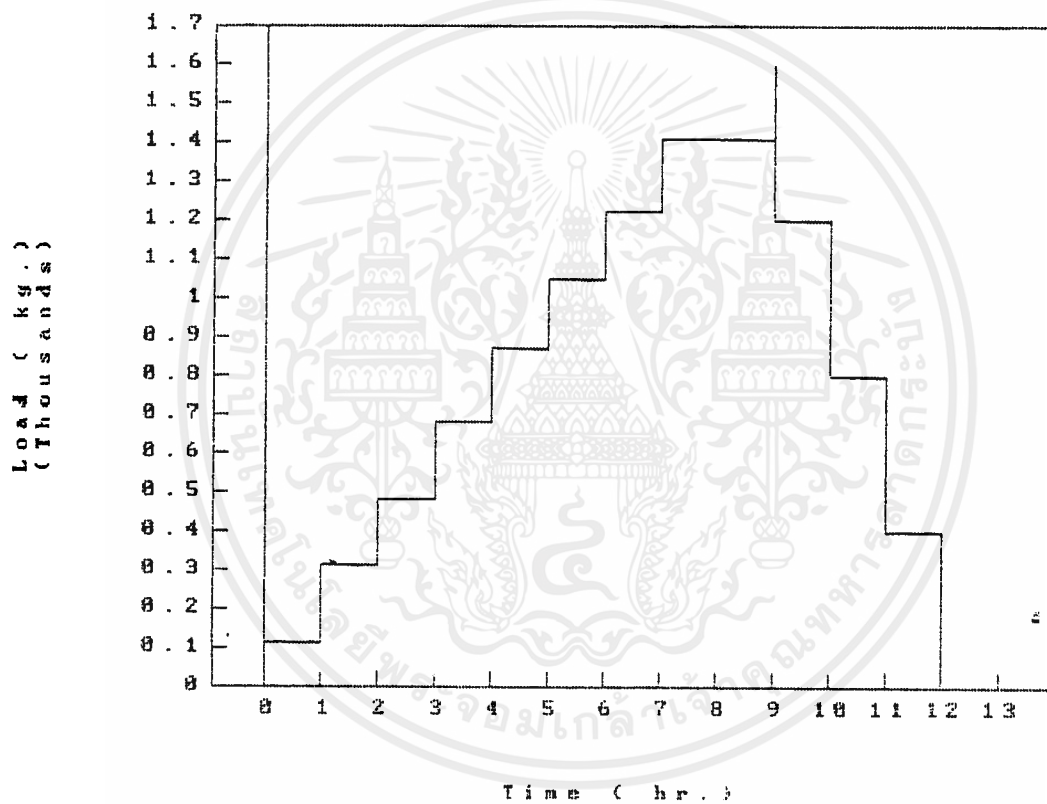
PILE No.D-2

DATE 25-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
2045	60		1917	19.17	
2045	0	800/235	1885	18.85	
2115	30		1880	18.8	
2145	60		1880	18.8	
2145	0	400/117	1866	18.66	
2215	30		1862	18.62	
2245	60		1860	18.6	
2245	0	0/0	1830	18.3	
2315	30		1815	18.15	
2345	60		1812	18.12	

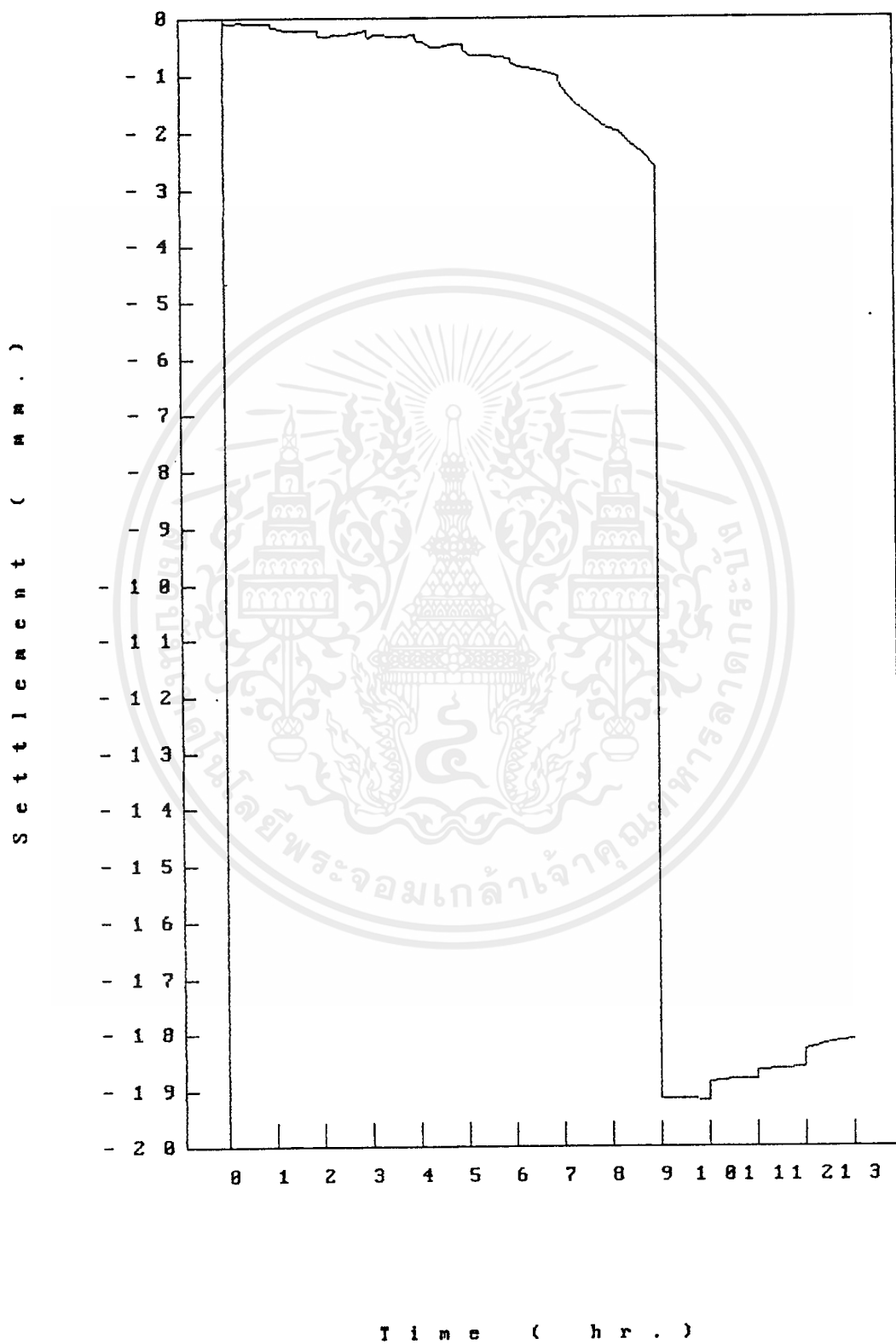
LOAD - TIME CURVE

FILE No. D-2



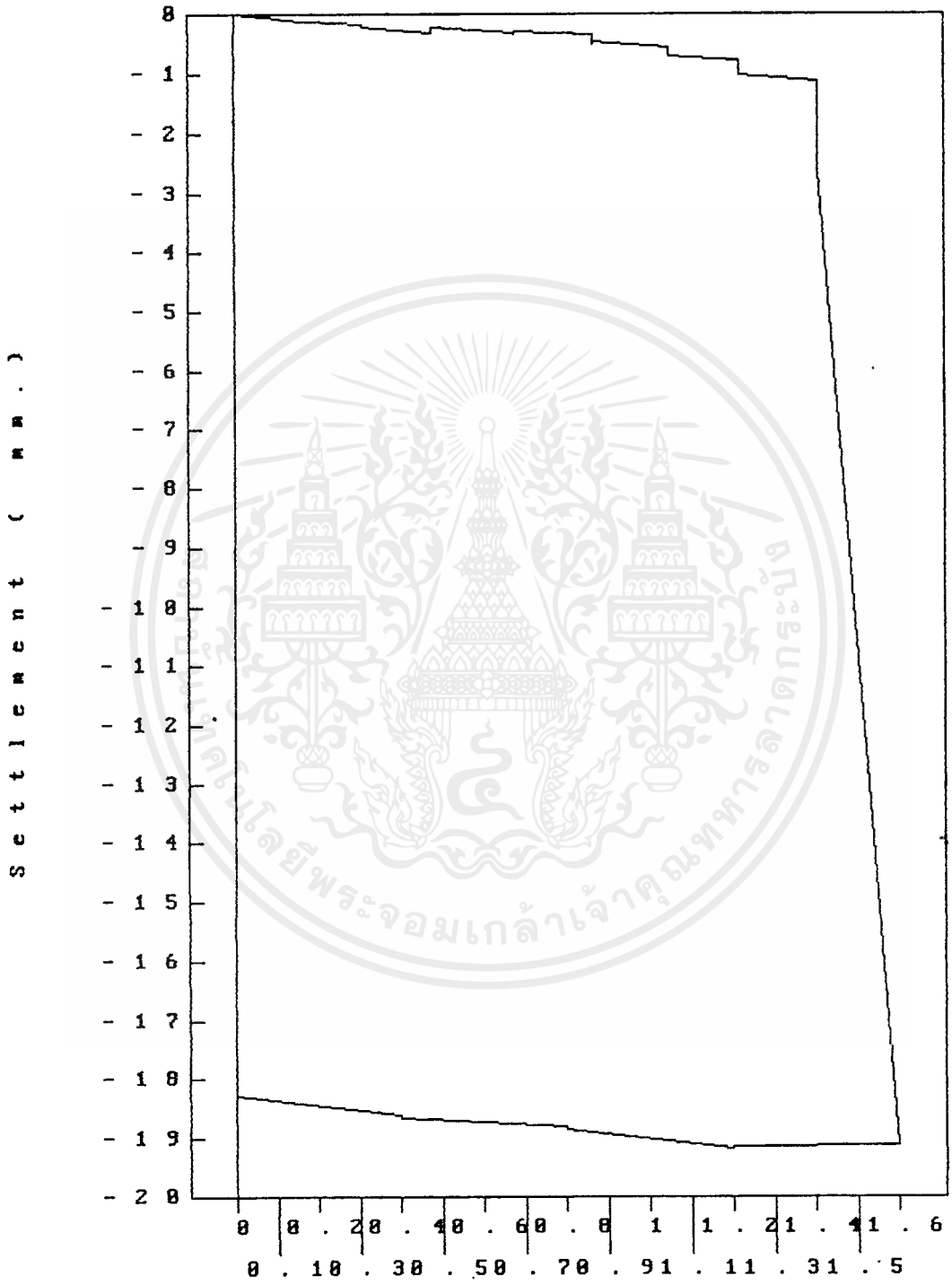
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . D - 2



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . D - 2



(T h o u s a n d s)
L o a d (k g .)

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete
Pile with Pre-Driving

LOCATION KMIT'L

PILE No. D-3

DATE 21-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.081in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
0745	0	500 kg.	14	0.3556	
0750	5		12	0.3048	
0755	10		11	0.2794	
0805	20		12	0.3048	
0815	30		15	0.381	
0830	45		19	0.4826	
0845	60		20	0.508	0.1524
0845	0	1000 kg.	44	1.1176	
0850	5		45	1.143	
0855	10		48	1.2192	
0905	20		49	1.2446	
0915	30		49	1.2446	
0930	45		54	1.3716	
0945	60		55	1.397	0.2794
1000	75		62	1.5748	
1015	90		70	1.778	
1030	105		73	1.8542	
1045	120		75	1.905	0.508
1045	0	1500 kg.	85	2.159	
1050	5		120	3.048	
1055	10		220	5.588	
1105	20		710	18.034	
1105	0	1125 kg.	713	18.1102	
1135	30		714	18.1356	
1205	60		714	18.1356	
1205	0	750 kg.	700	17.9832	
1235	30		700	17.9832	
1305	60		705	17.907	
1305	0	375 kg.	692	17.5768	
1335	30		685	17.399	
1405	60		683	17.3482	
1405	0	0 kg.	678	17.2212	

PILE LOAD TEST DATA

PROJECT Test of Small Concrete

LOCATION KMIT'L

Pile with Pre-Driving

PILE No. D-3

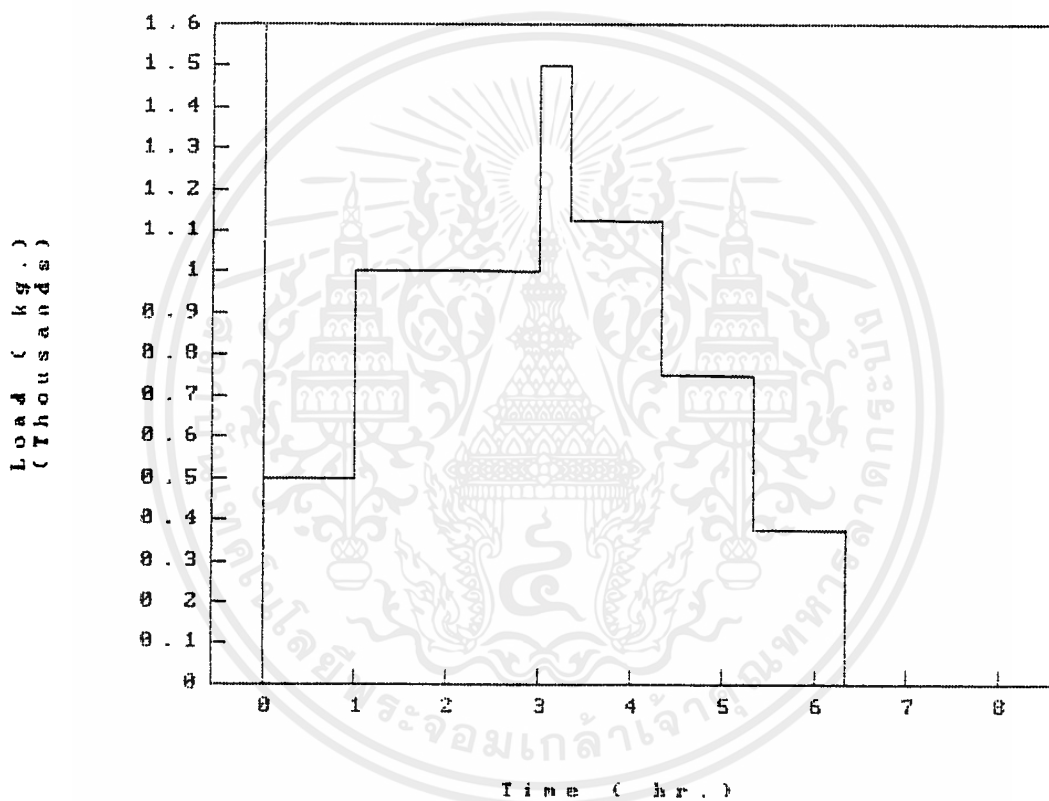
DATE 21-3-1993

TIME	ELAPSED TIME (min.)	LOAD(kg.)/ DEFLECTION (0.001in.)	DIAL READING (Div.)	SETTLEMENT (mm.)	RATE (mm./hr.)
1435	30		675	17.145	
1505	60		674	17.1196	



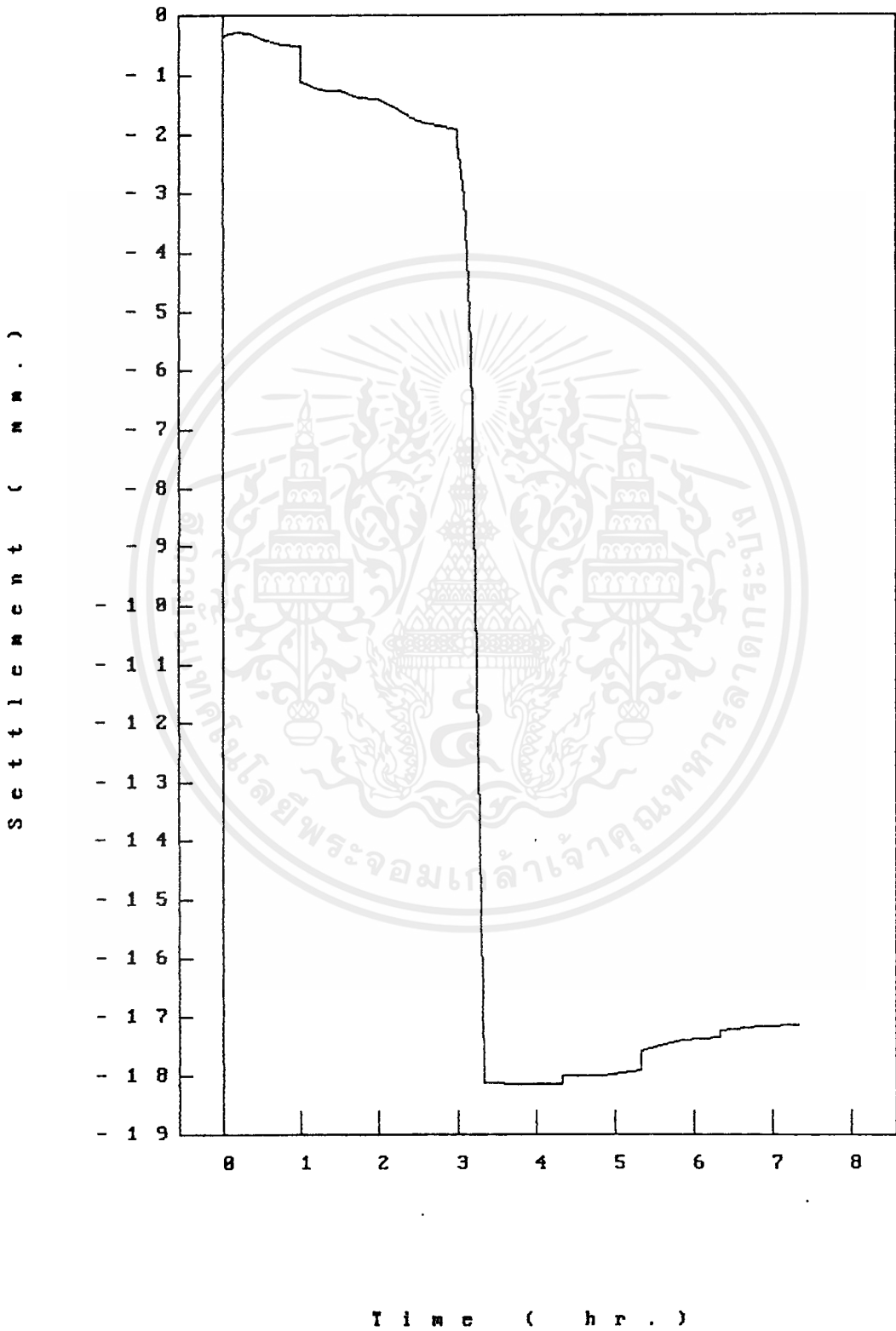
LOAD - TIME CURVE

PILE No. D-3



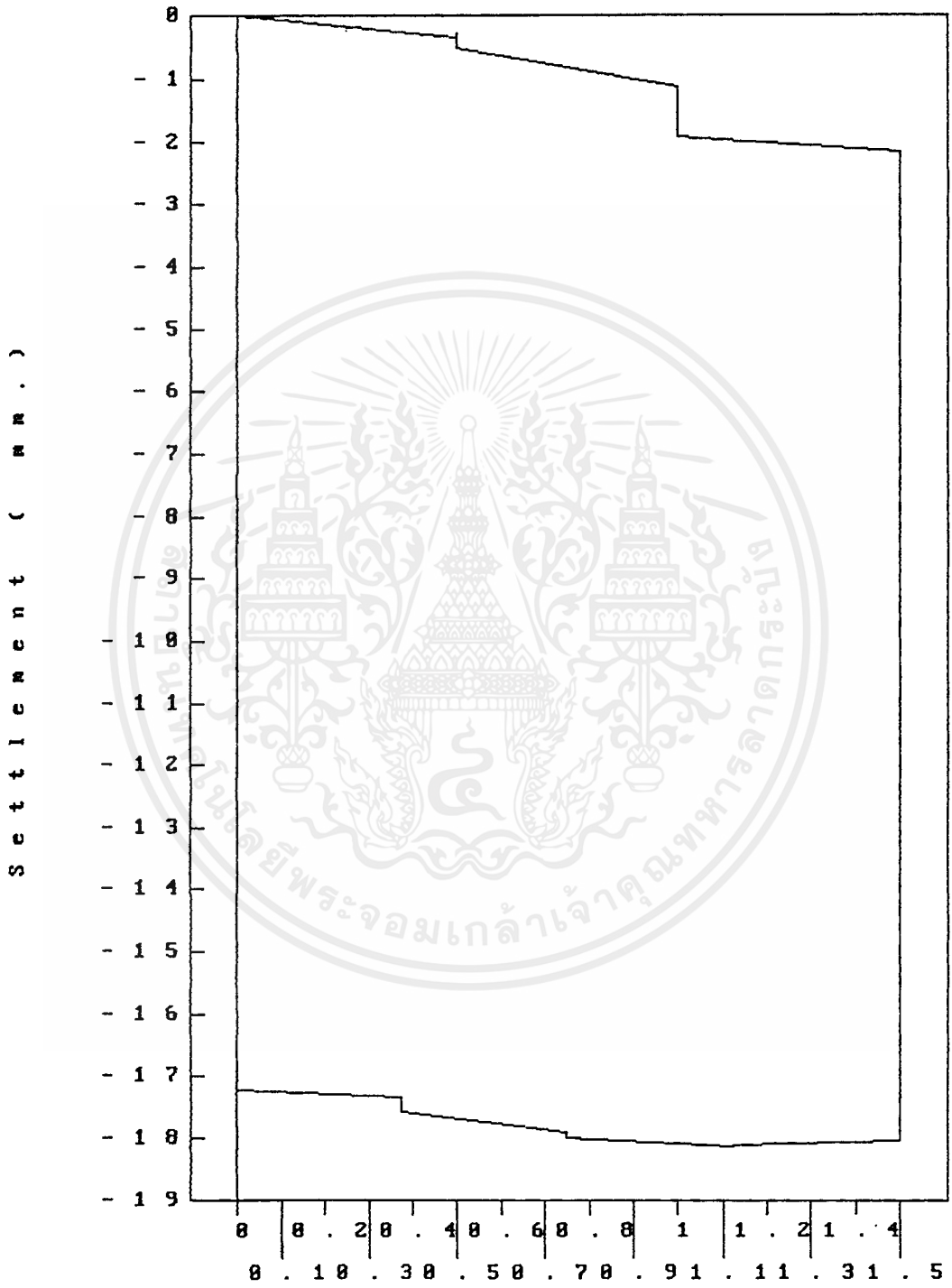
S E T T L E M E N T - T I M E C U R V E

P I L E N o . D - 3



S E T T L E M E N T - L O A D C U R V E

P I L E N o . D - 3



(Thousands)
 Load (kg.)



คุณสมบัติของ Proving Ring

ส่วนราชการ กองวิเคราะห์ และวิจัย

การทดสอบที่ L-729/28 วันที่ 10 กันยายน 2528

การทดสอบ Proving Ring No.6336

เจ้าหน้าที่ทดสอบ สุจินต์ , สมศักดิ์

LOAD (lb.)	DEFLECTION (x 10 ⁻⁴ in.)
500	70
1000	134
1500	199
2000	264
2500	330
3000	395
3500	462
4000	529
4500	595
5000	662

Note. 1. $K\text{-Factor} = \frac{\text{Load}}{\text{Deflection}} = 7.574 \text{ lb./in.} \times 10^{-4}$

2. Gauge Operating Range = 0.0001 in.