



การศึกษายิปซัมปลาสเตอร์สำหรับแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีต

STUDY OF GYPSUM PLASTER FOR CONCRETE STRUCTURE MODELS



โดย

นาย ก้องเกียรติ พันธุ์สถิตย์วงศ์

นาย ประจักษ์ ประภามณฑล

นาย ธรรมนัย เอี่ยมสำอางค์

วัน เดือน ปี.....	๒๓ ๑๑ ๒๕๖๑
เลขทะเบียน.....	๓ ๐๓๘๔๕๖
เลขเรียกหนังสือ.....	๓๐๓๕๖ กงม.๖๓

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๖๑

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๓๐๓๕๖

STUDY OF GYPSUM PLASTER FOR CONCRETE STRUCTURE MODELS

BY

Mr. KONGKIAT PANSATHITHWONG

Mr. THAMANAI AIEMSAMANG

Mr. PRAJRAK PRAPAMONTHON



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
BACHELOR OF CONSTRUCTION ENGINEERING
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

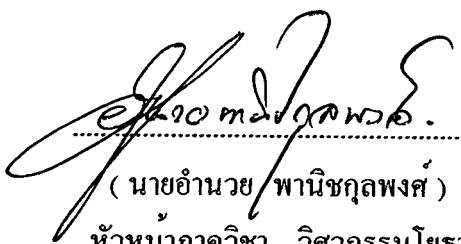
หัวข้อทำโครงการพิเศษ การศึกษาอิทธิพลของพลาสติกสำหรับแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีต
STUDY OF GYPSUM PLASTER FOR CONCRETE
STRUCTURE MODELS

นักศึกษา นาย ก้องเกียรติ พันธุ์ถิตยวงศ์ รหัส 36014020
นาย ธรรมนัย เอี่ยมสำอางค์ รหัส 36014183
นาย ประจักษ์ ประภามณฑล รหัส 36014245

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
1. ผศ. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ	
2. อาจารย์ อำนวย พานิชกุลพงศ์	
3. อาจารย์ ศิลป์ชัย จารสุวรรณ	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว


.....
(นายอำนวย พานิชกุลพงศ์)
หัวหน้าภาควิชา วิศวกรรมโยธา
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาวิจัยยิปซัมปลาสเตอร์สำหรับแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีต

STUDY OF GYPSUM PLASTER FOR CONCRETE STRUCTURE MODELS

โดย นาย ก้องเกียรติ พันธุ์สถิตย์วงศ์

นาย ธรรมนัย เอี่ยมสำอางค์

นาย ประจักษ์ ประภามณฑล

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของยิปซัมปลาสเตอร์ เพื่อเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ทำแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งจะใช้ยิปซัมปลาสเตอร์ที่ผลิตในประเทศไทยมาใช้ในการศึกษาโดย ตรวจสอบกราฟความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียด คุณสมบัติด้านกำลังคือ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง โมดูลัสการแตกร้าวและอัตราส่วนปัวซอง เปรียบเทียบกับของคอนกรีต ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการพังทลายของโครงสร้าง จากคุณสมบัติด้านกำลังของยิปซัมปลาสเตอร์ เมื่อนำไปพิจารณาตามทฤษฎีการทำแบบจำลองเพื่อตัดสินใจว่า ยิปซัมปลาสเตอร์นี้จะมีความเหมาะสมกับการทำแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีต

ABSTRACT

This special project is studies about the qualification of Gypsum plaster for use as the concrete structure models. The Gypsum plaster is produce in Thailand and studied about relationship between stress-strain curve , the qualified strength , compressive strength and tensile strength , modulus of rupture and poisson's ratio , that are compared with concrete. All this qualification are important about the behavior of structure failure. From the strength qualification of Gypsum plaster then consider structure model theory , for decide Gypsum plaster are suitable for concrete structure modeling.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีต้องขอบคุณผู้มีพระคุณมากมายที่มีส่วนช่วยเหลือในครั้งนี บุคคลแรกที่ต้องขอบพระคุณคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ ไชยชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่เป็นผู้คอยให้คำแนะนำ ปรึกษา โครงการเป็นอย่างดีตลอดมาและขอบพระคุณบริษัท ศรีอยุธยาผลิตภัณฑ์ จำกัด รวมทั้งคุณ ปราโมทย์ เมฆากุล ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุและความรู้เกี่ยวกับยิปซัมพลาสติก

ขอบคุณ คุณ ไพบุลย์ ศิระพัฒน์ จากบริษัท ไฟฟ้าอุตสาหกรรม จำกัด ที่แนะนำการใช้เครื่อง Electrical Strain Gauge

ขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่อนุญาตให้ใช้เครื่อง Universal Testing Machine รวมทั้งคุณ มณฑา เทียมเมือง เจ้าหน้าที่ Shop ที่แนะนำการใช้เครื่อง

ขอบคุณ เจ้าหน้าที่ Shop ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกคนที่แนะนำการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอบคุณ เพื่อนๆที่ช่วยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาในการทำโครงการ

ขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่รวมทั้งพี่ๆที่กรุณาให้ทุนทรัพย์ในการทำโครงการครั้งนี้

นาย ก้องเกียรติ พันธุ์ถิตยวงศ์

นาย ธรรมนัย เอี่ยมสำอางค์

นาย ประจักษ์ ประภามณฑล

คณะผู้จัดทำโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

รายงานการศึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในรายวิชา SPECIAL PROJECT ตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2539 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขั้นตอนการก่อสร้างคอนกรีต ทั้งนี้อาศัย การทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆที่ได้จากผลการทดสอบและจากบทความทางวิชา

ผู้จัดทำหวังว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์และสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษา ขั้นตอนการก่อสร้างที่เหมาะสมในการทำแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตแก่ผู้ที่สนใจได้บ้าง

นาย ก้องเกียรติ พันธุ์สถิตย์วงศ์
นาย ธรรมนัย เอี่ยมสำอางค์
นาย ประจักษ์ ประภาณพทล

คณะผู้จัดทำโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย	I
บทคัดย่ออังกฤษ	I
กิตติกรรมประกาศ	II
คำนำ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความนำ	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	2
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา	3
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	4
1.5 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแบบจำลอง	6
2.1 คำจำกัดความและประเภทแบบจำลองโครงสร้าง	6
2.2 ชนิดของโครงสร้างที่เหมาะสมในการทำแบบจำลอง	8
2.3 การเลือกมาตราส่วนของรูปร่าง	8
2.4 กระบวนการสร้างแบบจำลอง	9
3. ทฤษฎีของแบบจำลองโครงสร้าง	10
3.1 บทนำ	10
3.2 ความสอดคล้องของมิติ	10
3.3 การวิเคราะห์มิติ	11
3.4 แบบจำลองโครงสร้าง	16
3.5 ความต้องการความคล้ายคลึง	20
4. การทดลองโครงการวิจัย	24
4.1 การทดลองคุณสมบัติเฉพาะตัวของยิปซัมพลาสติกอร์	24
4.2 การทดลองคุณสมบัติทางกลของยิปซัมพลาสติกอร์	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
5. ผลการทดลอง	28
5.1 ผลการทดลองคุณสมบัติเฉพาะตัวของยิปซัมปลาสเตอร์	28
5.2 การทดลองคุณสมบัติทางกลของยิปซัมปลาสเตอร์	28
6. สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์	53
6.1 สรุปผลการทดลอง	53
6.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	53
6.3 ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติของยิปซัมปลาสเตอร์	60
ภาคผนวก ข. รูปภาพประกอบโครงงานวิจัย	88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.1 วัสดุแบบจำลองที่มีความคล้ายคลึงสมบูรณ์	19
รูปที่ 3.2 วัสดุแบบจำลองที่มีความบิดเบือน	19
รูปที่ 3.3 ความต้องการความคล้ายคลึง	21
รูปที่ 3.4 กรณี 1 : การบิดเบือนในความต้องการความคล้ายคลึง	23
รูปที่ 3.5 กรณี 2 : แบบจำลองที่บิดเบือน	23
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่ม สำหรับ $W/P = 0.55$	32
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.55$ ที่สถานะขึ้น (2 ชม.หลังการ หล่อ)	33
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.55$ ที่สถานะแห้งสนิท	34
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วน W/P ที่ต่าง ๆ กัน	35
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงแบบ Splitting กับอัตราส่วน W/P ที่ต่าง ๆ กัน	36
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของโมดูลัสการแตกร้าวกับอัตราส่วน W/P ที่ต่าง ๆ กัน	37
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงกับอัตราส่วน W/P ที่ต่าง ๆ กัน	38
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงต่อกำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน W/P ต่าง ๆ กัน	39
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.45$	40
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.50$	41
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.55$	42
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.60$	43
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.65$	44
รูปที่ 5.14 Poisson's Ratio ของยิปซัมพลาสติกที่มี $W/P = 0.45$	45
รูปที่ 5.15 Poisson's Ratio ของยิปซัมพลาสติกที่มี $W/P = 0.50$	46
รูปที่ 5.16 Poisson's Ratio ของยิปซัมพลาสติกที่มี $W/P = 0.55$	47
รูปที่ 5.17 Poisson's Ratio ของยิปซัมพลาสติกที่มี $W/P = 0.60$	48
รูปที่ 5.18 Poisson's Ratio ของยิปซัมพลาสติกที่มี $W/P = 0.65$	49
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ของ Poisson's Ratio กับอัตราส่วน W/P ที่ต่าง ๆ กัน	50
รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของ Young's Modulus กับอัตราส่วน W/P ที่ต่าง ๆ กัน	51
รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ของ Density กับอัตราส่วน W/P ที่ต่าง ๆ กัน	52
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วน W/P ที่ต่าง ๆ กันของ Plaster Mortar	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 6.2	อัตราส่วน Modulus of Rupture ต่อ Cube Strength เปรียบเทียบระหว่าง Gypsum Plaster กับ Plaster Mortar	57
รูปที่ 6.3	อัตราส่วน Tensile Strength กับ Cube Strength ของ Plaster Mortar	58
รูปที่ 6.4	ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่ม ของ Plaster Mortar	58
รูปที่ 6.5	ความสัมพันธ์ Stress-Strain ของ Plaster Mortar	58
รูปที่ ข-1	เครื่องชั่งน้ำหนัก	89
รูปที่ ข-2	เครื่องมือที่ใช้ผสมยิปซัมปลาสเตอร์กับน้ำ	89
รูปที่ ข-3	แบบหล่อก่อนตัวอย่างรูปทรงต่างๆ	90
รูปที่ ข-4	ยิปซัมปลาสเตอร์ขณะอยู่ในแบบหล่อกาน	90
รูปที่ ข-5	ยิปซัมปลาสเตอร์ขณะอยู่ในแบบหล่อทรงกระบอก	91
รูปที่ ข-6	การทดสอบ Compressive Strength	91
รูปที่ ข-7	สภาพก่อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบ Compressive Strength	92
รูปที่ ข-8	การทดสอบ Splitting Test	92
รูปที่ ข-9	สภาพก่อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบ Splitting Test	93
รูปที่ ข-10	การทดสอบ Modulus of Rupture	93
รูปที่ ข-11	สภาพก่อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบ Modulus of Rupture	94
รูปที่ ข-12	การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress- Strain	94
รูปที่ ข-13	สภาพก่อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress- Strain	95
รูปที่ ข-14	การทดสอบหาค่า Poisson's Ratio	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของตัวประกอบมาตรฐานสำหรับแบบจำลองโครงสร้างต่างๆ	8
ตารางที่ 3.1 ชนิดของปริมาณกายภาพ	13
ตารางที่ 3.2 ความต้องการความคล้ายคลึงสำหรับแบบจำลองยืดหยุ่น	20
ตารางที่ 3.3 สรุปตัวประกอบมาตรฐานสำหรับแบบจำลองคอนกรีตเสริมเหล็ก	22
ตารางที่ 3.4 การบิดเบือนที่เป็นไปได้ในแบบจำลองคอนกรีตเสริมเหล็ก	22
ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่ม สำหรับ $W/P = 0.55$ (ทรงลูกบาศก์ 2")	61
ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.55$ ที่สภาวะชื้น ณ 2 ชม. หลังหล่อ (ทรงกระบอก 2" x 4")	62
ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress - Strain สำหรับ $W/P = 0.55$ ที่สภาวะแห้งสนิท (ทรงกระบอก 2" x 4")	64
ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน $W/P = 0.45$ (ทรงลูกบาศก์ 2")	69
ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน $W/P = 0.50$ (ทรงลูกบาศก์ 2")	69
ตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน $W/P = 0.55$ (ทรงลูกบาศก์ 2")	70
ตารางที่ ก-7 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน $W/P = 0.60$ (ทรงลูกบาศก์ 2")	70
ตารางที่ ก-8 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน $W/P = 0.65$ (ทรงลูกบาศก์ 2")	71
ตารางที่ ก-9 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน $W/P = 0.45$ (ทรงกระบอก 2" x 4")	72
ตารางที่ ก-10 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน $W/P = 0.50$ (ทรงกระบอก 2" x 4")	72
ตารางที่ ก-11 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน $W/P = 0.55$ (ทรงกระบอก 2" x 4")	73
ตารางที่ ก-12 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน $W/P = 0.60$ (ทรงกระบอก 2" x 4")	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ ก-13 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน W/P = 0.65 (ทรงกระบอก 2" x 4")	74
ตารางที่ ก-14 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.45 (ทรงคาน 2" x 2" x 12")	75
ตารางที่ ก-15 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.50 (ทรงคาน 2" x 2" x 12")	76
ตารางที่ ก-16 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.55 (ทรงคาน 2" x 2" x 12")	77
ตารางที่ ก-17 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.60 (ทรงคาน 2" x 2" x 12")	78
ตารางที่ ก-18 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.65 (ทรงคาน 2" x 2" x 12")	79
ตารางที่ ก-19 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress - Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.45 (ทรงกระบอก 2" x 4")	80
ตารางที่ ก-20 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress - Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.50 (ทรงกระบอก 2" x 4")	82
ตารางที่ ก-21 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress - Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.55 (ทรงกระบอก 2" x 4")	84
ตารางที่ ก-22 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress - Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.60 (ทรงกระบอก 2" x 4")	85
ตารางที่ ก-23 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress - Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.65 (ทรงกระบอก 2" x 4")	86
ตารางที่ ก-24 ผลการทดสอบหาค่า Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P ต่างๆกัน	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความนำ

สารยิปซัมพลาสติก (Gypsum plaster) เป็นสารที่ได้มาจากแร่ยิปซัม ซึ่งแร่ยิปซัมเกิดขึ้นจากผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (Calcium sulfate dihydrate) โดยมีสูตรทางเคมีคือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เมื่อนำเอาแร่ยิปซัมมาผ่านกระบวนการความร้อนที่มีอุณหภูมิมากกว่า 212°F แต่ไม่เกิน 374°F ผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตจะขับน้ำออกประมาณ 75% เป็นผลให้ได้สารแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (Calcium sulfate hemihydrate) ซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ มีลักษณะเป็นผงมีสีขาว และสารแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรตก็คือ สารยิปซัมพลาสติก ซึ่งอาจเรียกเป็นคัลไคลด์ ยิปซัม (Calcined gypsum) หรือเมื่อนำเอาสารยิปซัมพลาสติกมาหล่อก็เรียกว่า พลาสติกของปารีส (Plaster of paris)

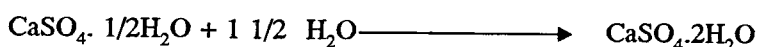
คัลไคลด์ ยิปซัมมีอยู่ 2 ประเภทคือ

1. Alpha gypsum plaster (α - Plaster) ได้จากนำแร่ยิปซัมมาไล่น้ำออกด้วยกระบวนการใช้ไอน้ำร้อนจากหม้ออบ ทำให้มีรูปผลึกเป็นแบบชั้นจึงมีความแข็งแรงกว่าแบบ Beta gypsum plaster

2. Beta gypsum plaster (β - Plaster) ได้จากนำแร่ยิปซัมมาไล่น้ำออกด้วยกระบวนการให้ความร้อนทำให้มีรูปผลึกเป็นแบบเข็ม

สารยิปซัมพลาสติกจะถูกนำมาใช้กับงานตกแต่งอาคาร, งาน Wall board งานแบบหล่อ เป็นต้น ซึ่งจะต้องมีการนำมาผสมกับวัสดุผสมบางอย่างเพื่อให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท สารยิปซัมพลาสติกเมื่อผสมเข้ากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเรียกว่า ไฮเดรชัน (hydration) ยังผลให้เกิดความเหนียวและในระหว่างทำปฏิกิริยานั้นจะค่อยๆ แข็งตัวขึ้นอย่างต่อเนื่องตามเวลา เพราะว่าผลึกเกิดการขัดตัวซึ่งกันและกัน พร้อมทั้งเกิดการคายความร้อนออกมาด้วย ซึ่งจะคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) กับน้ำของคอนกรีต

สารยิปซัมพลาสติกเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการคืนรูปเป็นคัลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ซึ่งสามารถเขียนสมการการทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดังนี้



ความถ่วงจำเพาะของสารยิปซัมพลาสติก จะมีค่าประมาณ 2.32 - 2.76 ซึ่งผู้ผลิตแต่ละรายจะมีค่าความถ่วงจำเพาะไม่เท่ากัน และคุณสมบัติทางกายภาพก็ไม่เท่ากัน แต่จะใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน โครงสร้างคอนกรีตได้รับการออกแบบพัฒนาให้มีรูปทรงที่แตกต่างซับซ้อนมากกว่าในอดีต จึงทำให้ยากต่อการวิเคราะห์และคาดเดาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงกับโครงสร้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำ แรงลม แรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว เป็นต้น ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้าง โดยทำแบบจำลองโครงสร้าง (Structure Modeling) เพื่อคาดเดาและศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงกับโครงสร้างจริงได้ล่วงหน้า โดยนำแบบจำลองที่สร้างมาทดสอบภายใต้การควบคุมแรงต่าง ๆ ที่มากระทำกับโครงสร้าง เช่น การทำสอบการรับน้ำหนักของคานคอนกรีต การทดสอบการรับแรงกระแทกของพื้นคอนกรีตอัดแรง การทดสอบแรงลมที่มีผลกระทบต่ออาคารสูง

โครงสร้างคอนกรีตที่อาศัยวิธีการทำแบบจำลองมาช่วยในการออกแบบและคาดเดาพฤติกรรม เช่น โครงสร้างเปลือกบาง (Shell structure) โครงสร้างสูงที่แรงลมมีผลกระทบต่อโครงสร้าง (Tall structure or wind - sensitive structure) โครงสร้างพื้นคาน (structural slab and girder) โครงสร้างอาคารแบบใหม่ (New building structure) เขื่อน (Dam) เป็นต้น

การที่แบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตจะมีพฤติกรรมเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกคล้ายกับโครงสร้างจริงก็ต่อเมื่อแบบจำลองนั้นเป็นไปตามหลัก “ความต้องการความคล้ายคลึง” (Similitude Requirement) ระหว่างแบบจำลองกับโครงสร้างจริง โดยคล้ายคลึงกันในด้าน รูปร่าง-รูปทรง คุณสมบัติวัสดุ การให้น้ำหนักกระทำ และผลของการตอบสนองต่อน้ำหนักกระทำ

ในความคล้ายคลึงด้านคุณสมบัติวัสดุนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะถ้าถ้าเอาวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติคล้ายคอนกรีตมาทำแบบจำลองจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองไม่ตรงกับความเป็นจริงของโครงสร้างคอนกรีต

ในการทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างจะแยกไว้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่น (Behavior in the elastic range) และช่วงพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่น (Behavior in the nonelastic range) ซึ่งจะเป็นช่วงที่เลขช่วงยืดหยุ่นขึ้นไปจนถึงจุดพังทลาย ซึ่งพฤติกรรมของโครงสร้างนี้ ทำให้แบ่งชนิดของแบบจำลองในแง่ของพฤติกรรมที่ต้องการพิจารณาได้ คือ

1. แบบจำลองยืดหยุ่น (Elastic Model)

ใช้พิจารณาพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่นเท่านั้น ไม่สามารถพิจารณาพฤติกรรมหลังจากการพังทลายของโครงสร้างได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นและเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) มาใช้ทำแบบจำลอง ซึ่งส่วนใหญ่ใช้วัสดุประเภทพลาสติก เช่น เมทิลเมทิลไซเลต และโพลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบจำลองไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Model)

แบบจำลองประเภทนี้อาจเรียกเป็นแบบจำลองกำลังประลัย (Ultimate Strength Model) ใช้พิจารณาพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่นจนถึงจุดพังทลายของโครงสร้าง ดังนั้นคุณสมบัติทางกลของวัสดุจะต้องคล้ายกับคอนกรีต ณ จุดพังทลาย

ซึ่งในโครงสร้างคอนกรีตส่วนใหญ่จะมีการทดสอบจนถึงจุดพังทลาย ซึ่งการพิจารณาวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแบบจำลองนั้น เป็นเรื่องที่ลำบากในการจะทำให้คุณสมบัติของวัสดุมีความคล้ายคลึงกับของคอนกรีต ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้เป็นการพิจารณาคุณสมบัติของยิปซัมพลาสติกที่ผลิตในประเทศไทยว่า มีลักษณะเป็นอย่างไรบ้าง เมื่อเทียบกับคุณสมบัติของคอนกรีต

1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา

ภายใต้เงื่อนไขความต้องการความคล้ายคลึงของวัสดุ ระหว่างแบบจำลองกับโครงสร้างคอนกรีตจริง นั่นคือ วัสดุที่ใช้ทำต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลที่มีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตซึ่ง วัสดุจำพวกประเภทซีเมนต์จะต้องมีกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) จนถึงจุดประลัยคล้ายกับคอนกรีตและค่าอัตราส่วนนิวของ รวมทั้งอัตราส่วน กำลังรับแรงดึงต่อแรงอัดเท่ากับคอนกรีต จึงได้มีการศึกษามอร์ตาร์ (Mortar) หรือไมโครคอนกรีต (Micro concrete) ซึ่งพบว่าวัสดุมวลรวมละเอียดที่ผสมต้องมีการกระจายส่วนละเอียดเหมือนกับการกระจายส่วนละเอียดของวัสดุมวลรวมในคอนกรีตเพียงแต่มีการลดขนาดวัสดุมวลรวมลงด้วย ตั้งประกอบมาตราส่วนด้านรูปร่าง (Geometric scale factor) ผลการศึกษา (11) พบว่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและโมดูลัสการแตกร้าวระหว่างไมโครคอนกรีต และคอนกรีตปกติมีความใกล้เคียงกันมาก ค่าอัตราส่วนนิวของไม่มีความแตกต่างกัน หน่วยน้ำหนักของไมโครคอนกรีตมีค่าประมาณ 90% ของหน่วยน้ำหนักคอนกรีตปกติ กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-เครียด เหมือนกันทุกประการแต่มีข้อเสียที่ว่ามีความต้องการการบ่มยาวนาน เป็นผลทำให้ต้องเสียเวลาในการบ่มแบบจำลอง และการทำโครงสร้างเปลือกบาง (Shell structure) ทำได้ยากในกรณีของแบบจำลองเช่นวัสดุที่ใช้ทำยังต้องเทไหลเข้าแบบได้ง่าย

จากข้อเสียเปรียบของไมโครคอนกรีตนี้ได้นำไปสู่การพิจารณายิปซัมพลาสติกมาใช้เป็นวัสดุในการทำแบบจำลอง ซึ่งยิปซัมพลาสติกเมื่อผสมกับน้ำจะมีเวลาก่อตัวเริ่มต้นประมาณ 10-20 นาที (โดยทั่วไปสามารถหน่วงเวลาก่อตัวได้) และแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปเมื่อนำไปทำแบบจำลองสามารถทดสอบได้ภายในไม่กี่ชม. หลังการหล่อและสามารถไหลเข้าแบบหล่อที่ซับซ้อนได้ง่าย จากการศึกษา (14,15) พบว่ากำลังจะคงที่ภายใน 24 ชม. แรกของการก่อตัวแล้ว เมื่อเลยเวลานี้ไปกำลังจะเพิ่มสูงกว่าขณะที่ยังขึ้นอยู่ ซึ่งกราฟ stress-strain ขึ้น เมื่อยิปซัมไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกแห่งสนิทพบว่า จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงจุดพังทลาย และจัดว่าเป็นวัสดุเปราะมากในขณะที่กราฟ stress-strain เมื่อขึ้นอยู่ภายใน 24 ชม. หลังการก่อตัวจะมีลักษณะกราฟคล้ายกับของคอนกรีต เพียงแต่เกิดการหักเหออกเล็กน้อย จากช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ stress ต่ำ ๆ

จากคุณสมบัติพื้นฐาน 2 อย่าง ที่กล่าวมาจึงเป็นไปได้ที่จะนำเอายิปซัมพลาสติกอร์มาพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีต

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะตัวพื้นฐานของยิปซัมพลาสติกอร์ที่ผลิตในประเทศไทย
2. ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังของยิปซัมพลาสติกอร์ที่อัตราส่วนการผสมกับน้ำที่ปริมาณต่าง ๆ กัน
3. ทำการเปรียบเทียบด้านกำลังและความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียด ของยิปซัมพลาสติกอร์กับคอนกรีตปกติ
4. เพื่อพิจารณาว่าวัสดุยิปซัมพลาสติกอร์ที่ผลิตในประเทศไทยว่ามีความเหมาะสมในการทำแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตหรือไม่

1.5 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาหลักความต้องการคล้ายคลึงของวัสดุที่เหมาะสมในการทำแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีต
2. ทดสอบคุณสมบัติเฉพาะตัวพื้นฐานของยิปซัมพลาสติกอร์ที่นำมาใช้ในโครงการพิเศษ ว่าเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.ปูนยิปซัมสำหรับการก่อสร้าง ซึ่งทำการทดสอบหา Normal Consistency, Setting Time, Fineness Modulus, Compressive Strength
3. ทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ที่อัตรา Water-Plaster ratio 5 ค่า คือ 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65 ที่เวลา 2 ชม. หลังการหล่อของก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ $2'' \times 2'' \times 2''$
4. ทดสอบกำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) ที่อัตรา Water-Plaster ratio 5 ค่า คือ 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65 ที่เวลา 2 ชม. หลังการหล่อของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก $2'' \times 4''$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทดสอบค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) ที่อัตรา Water-Plaster ratio 5 ค่า คือ 0.45 0.50 0.55 0.60 0.65 ที่เวลา 2 ชม. หลังการหล่อของก้อนตัวอย่าง กาน $2'' \times 2'' \times 12''$
6. ทดสอบหาความสัมพันธ์ stress-strain และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ที่อัตราส่วน Water-Plaster ratio 5 ค่า คือ 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65 ที่เวลา 2 ชม. หลังการหล่อของก้อนตัวอย่างทรงกระบอก $2'' \times 4''$
7. ศึกษาผลการทดสอบกำลัง และกราฟความสัมพันธ์ stress-strain รวมทั้งอัตราส่วน ปัวซอง มาเปรียบเทียบกับของคอนกรีต

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบว่ายิปซัมพลาสติกที่ผลิตในประเทศไทยมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุ ทำแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตหรือไม่และควรมีการพัฒนาคุณสมบัติอย่างไรจึงจะเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้าง

2.1 คำจำกัดความและประเภทแบบจำลองโครงสร้าง

2.1.1 คำจำกัดความ

ในปี 1970 Janney ได้ให้คำจำกัดความว่า

“แบบจำลองโครงสร้างเป็นส่วนประกอบโครงสร้างหนึ่ง หรือ ส่วนประกอบของโครงสร้างทั้งหมดที่สร้างโดยลดขนาดลง (เทียบกับโครงสร้างจริงเต็มขนาด) และมีการใช้กฎของความคล้ายคลึงมาวิเคราะห์ผลการทดสอบ”

ของเขตของคำจำกัดความทั้งสองครอบคลุมการศึกษาการทำแบบจำลองโครงสร้างจริง เช่น โครงสร้างสะพาน, อาคาร, เขื่อน, อาคารสูง, แผ่น shell, โครงสร้างไดน้ำ เป็นต้น โดยการให้น้ำหนักกระทำอาจเป็นแบบสถิตศาสตร์ (static) แบบพลศาสตร์ (dynamic) และแบบให้แรงลมกระทำต่อโครงสร้าง

2.1.2 ประเภทแบบจำลองโครงสร้าง

แบบจำลองโครงสร้างสามารถกำหนดประเภทได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์กับรูปแบบของแบบจำลอง นั่นคือ เราคาดหวังว่าจะได้อะไรจากการทดสอบ? เช่น เราต้องการผลตอบสนองยืดหยุ่นเท่านั้นหรือเราคาดหวังน้ำหนักกระทำที่ทำให้แบบจำลองพังทลายรวมทั้งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของมันซึ่งมันจะอยู่ในรูปแบบการพังทลายและความสามารถรับน้ำหนักกระทำเป็นอย่างใด โดยทั่วไปจะแบ่งตามวิธีให้น้ำหนักกระทำและพฤติกรรมที่ต้องการพิจารณา

กรณีแบ่งตามวิธีให้น้ำหนักกระทำ

1. แบบจำลองทางอ้อม (Indirect model)

เป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบพิเศษโดยเป็นแบบจำลองประเภท elastic ด้วยและใช้แผนผังอิทธิพล (Influence Diagrams) หาแรงปฏิกิริยา และ หน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้น เช่น แรงเฉือน, โมเมนต์ดัด, แรงในแนวแกน การให้น้ำหนักกระทำต่อแบบจำลอง indirect นี้จะไม่สัมพันธ์กับการให้น้ำหนักกระทำบนโครงสร้างจริงซึ่งผลของน้ำหนักกระทำจะหาได้จากหลักการ superposition ของค่าอิทธิพล (Influence value) แต่ปัจจุบันนี้แบบจำลอง indirect จะพบบได้น้อยมาก เพราะว่าการคำนวณพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่นจะใช้คอมพิวเตอร์มาคำนวณแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบจำลองทางตรง (Direct model)

เป็นแบบจำลองที่มีรูปร่างคล้ายกับต้นแบบทุกอย่าง และการให้นำหนักกระทำต่อแบบจำลองจะเป็นวิธีการเดียวกับแบบโครงสร้างต้นแบบ ความเครียด (strain) การผิดรูป (deformation) และหน่วยแรงเค้น (stress) ที่เกิดขึ้นในแบบจำลองสำหรับเงื่อนไขการให้นำหนักกระทำจะแทนด้วยปริมาณที่เหมือนกันกับในต้นแบบสำหรับเงื่อนไขการให้นำหนักที่สัมพันธ์กัน ดังนั้น แบบจำลอง elastic ก็จัดว่าเป็นแบบจำลอง direct ด้วย

กรณีแบ่งตามพฤติกรรมที่พิจารณา

1. แบบจำลองยืดหยุ่น (Elastic model)

แบบจำลองประเภทนี้จะมีรูปทรงที่เหมือนกับต้นแบบ แต่ทำจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นและเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) โดยไม่จำเป็นต้องเป็นวัสดุที่เหมือนวัสดุต้นแบบ ข้อจำกัดของแบบจำลองยืดหยุ่นคือ ดูพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่นของโครงสร้างต้นแบบ และไม่สามารถคาดเดาพฤติกรรมหลังการแตกร้าวของคอนกรีต พฤติกรรมหลังจุดคลากของเหล็ก หรือพฤติกรรมในช่วงไม่ยืดหยุ่น ส่วนใหญ่แล้ววัสดุที่ใช้ทำแบบจำลองชนิดนี้จะเป็นพวกพลาสติก เช่น เมทิลเมทิลไซเลต และ โพลีไวนิลคลอไรด์(PVC)

2. แบบจำลองกำลัง (Strength model)

แบบจำลองชนิดนี้บางครั้งเรียกว่า แบบจำลองกำลังประลัย (Ultimate strength model) หรือ แบบจำลองที่เป็นจริง (Realistic model) และเป็นแบบจำลอง Direct ด้วยนั่นคือทำจากวัสดุที่มีความเหมือนกับวัสดุต้นแบบ ทำให้สามารถคาดเดาพฤติกรรมของโครงสร้างต้นแบบจนถึงจุดพังทะลายได้ เพราะฉะนั้นแบบจำลองชนิดนี้อาจเรียกเป็นแบบจำลอง Inelastic ได้ แบบจำลอง strength สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือทั้งโครงสร้างจะทำจากวัสดุที่เป็นไปตามเงื่อนไขความคล้ายคลึงกับวัสดุต้นแบบ ซึ่งในเรื่องของวัสดุที่ใช้ทำแบบจำลองจัดว่าเป็นปัญหาที่ยากมากในแบบจำลอง strength สำหรับโครงสร้างคอนกรีต รวมทั้งเทคนิคการสร้างก็จัดว่าเป็นปัญหาหลักด้วย

3. แบบจำลองผลกระทบแรงลม (Wind effect model)

เป็นแบบจำลองชนิดพิเศษซึ่งจะศึกษาถึงรูปร่าง (shape) ของแบบจำลองโดยจะวัดผลของแรงดันลมที่กระทำบนโครงสร้างออกมาโดยทั้ง shape และคุณสมบัติค่าความแข็งแกร่ง (stiffness) ของโครงสร้างต้นแบบจะถูกจำลองออกมาแล้ววัดหน่วยแรงเค้นที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นจากผลของแรงลม และ การผิดรูปปร่าง รวมทั้ง ผลการสั่นสะเทือนที่มีต่อโครงสร้างภายใน เนื่องมาจากแรงลม

2.2 ชนิดของโครงสร้างที่เหมาะสมในการศึกษาด้วยแบบจำลอง

1. หลังคาเปลือกบาง (shell roof)
2. โครงสร้างสูงที่มีแรงลมกระทบ (Tall structure or wind - sensitive structure)
3. ระบบโครงสร้างอาคารแบบใหม่ (New buliding structure systems)
4. โครงสร้างสะพานที่ซับซ้อน (Complex bridge)
5. ผนังกันสารกัมมันตรังสี (Nuclear reactor vessel)
6. โครงสร้างทั่วไปแบบดั้งเดิม (Ordinary framed structure)
7. โครงสร้างพื้น (Structural slab)
8. เขื่อน (Dam)
9. โครงสร้างใต้น้ำ (Undersea structure)

2.3 การเลือกมาตราส่วนของรูปร่าง (Choice of gcometric scale)

เวลาสร้างแบบจำลองเราต้องเลือกใช้ scale ด้านรูปร่างให้เหมาะสมโดยถ้า model มีขนาดเล็กมาก ก็ต้องการน้ำหนักกระทำเบา ทำให้ยากในการสร้าง และติดตั้งเครื่องมือทดสอบ แต่ถ้าแบบจำลอง มีขนาดใหญ่ก็จะสร้างง่ายแต่ต้องการน้ำหนักกระทำที่มาก แต่แบบจำลองขนาดใหญ่จะไม่มีปัญหากรณี ห้องทดสอบนั้นมีเครื่องมือครบสมบูรณ์

ชนิดของ scale factor สามารถแบ่งได้ตามประเภทของโครงสร้างและแบบจำลองดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของตัวประกอบมาตราส่วนสำหรับแบบจำลองโครงสร้างต่างๆ

Type of Structure	Elastic Models	Strength Models
Shell roof	$\frac{1}{60}$ to $\frac{1}{30}$	$\frac{1}{30}$ to $\frac{1}{15}$
Highway bridge	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{30}$ to $\frac{1}{15}$
Reactor vessel	$\frac{1}{60}$ to $\frac{1}{30}$	$\frac{1}{30}$ to $\frac{1}{15}$
Slab structures	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{30}$ to $\frac{1}{15}$
Dams	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{30}$
Wind effects	$\frac{1}{30}$ to $\frac{1}{15}$	Not applicable

สำหรับกรณีแบบจำลองเป็นแบบ Strength Model ของโครงสร้างคอนกรีตต้นแบบ ค่า scale factor มีข้อจำกัดในเรื่องของ ความหนาต่ำสุดที่ยอมให้ , ระยะห่างเหล็กเสริม , ระยะหุ้มของคอนกรีตด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กระบวนการสร้างแบบจำลอง (The Modeling Process)

ลำดับขั้นตอนการทำแบบจำลองสามารถสรุปได้โดยย่อดังนี้

1. กำหนด Scope ของปัญหาที่ต้องการพิจารณา
2. กำหนดระดับ Reliability หรือ Accuracy ของแบบจำลอง
3. ศึกษาขั้นตอนของ Similitude Requirement สำหรับ geometry, material , loading และ interpretation of result
4. เลือกวัสดุที่ใช้ทำ (material) แบบจำลอง ให้สอดคล้องกับข้อ 1 , 2 , 3
5. วางแผนการสร้าง (Planing Fabrication)
6. ออกแบบและเตรียมการอุปกรณ์ วิธีให้นำหนักกระทำ (Loading equipment)
7. เลือกใช้เครื่องมือวัดผลการทดลองให้เหมาะสม (Instrumentation)
8. พิจารณาพฤติกรรมการตอบสนอง (Response) ในระหว่างการให้นำหนักกระทำแบบจำลอง และ บันทึกผลทดสอบ
9. การวิเคราะห์ข้อมูล และเขียนรายงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีของแบบจำลองโครงสร้าง

3.1 บทนำ

แบบจำลองโครงสร้างจะถูกออกแบบ ให้นำหน้ากระทำและวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยอาศัยหลักความต้องการความคล้ายคลึง (Similitude Requirments) ที่สัมพันธ์กันระหว่างโครงสร้างจริงกับแบบจำลอง

หลักความต้องการความคล้ายคลึง (Similitude Requirments) เป็นทฤษฎีพื้นฐานในการทำแบบจำลอง ได้จากการวิเคราะห์มิติ ของปรากฏการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของโครงสร้าง โดยในบทนี้จะกล่าวถึง 2 หัวข้อที่สำคัญ

1. การวิเคราะห์มิติ และ ทฤษฎีความคล้ายคลึง
2. หลักความต้องการความคล้ายคลึงที่แท้จริงสำหรับแบบจำลองโครงสร้างประเภทต่าง ๆ กัน

3.2 ความสอดคล้องของมิติ (Dimensional Homogeneity)

เราสามารถแบ่งลักษณะปัญหาทางวิศวกรรมได้ 3 แบบคือ

1. Mechanical (Static + Dymamic)
2. Thermodynamic
3. Electrical

โดยคุณภาพ (Qualitative) ของมันจะแสดงในเทอมของหน่วยการวัดพื้นฐาน (Fundamental Mesures) ซึ่งปกติจะอ้างอิงเป็นมิติ (Dimention) คือ ความยาว(L) , แรง(F) , เวลา(t), อุณหภูมิ(T) , ประจุไฟฟ้า(Q) ลักษณะปริมาณ (Quantitative) จะประกอบไปด้วยจำนวน (Number) และ มาตรฐานของการเปรียบเทียบซึ่งมักเรียก มาตรฐานการเปรียบเทียบว่า หน่วย (Unit) ดังนั้นมิติจะมีมาตรฐาน ของหน่วยแตกต่างกันไปแล้วแต่ระบบที่ใช้ เช่นระบบ SI , MATRIC เป็นต้น

ทฤษฎีของมิติสามารถสรุปเป็นหลักใหญ่ ๆ คือ

1. การแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรกายภาพ (Physical variable) ต่าง ๆ จะแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตัวแปรกายภาพต่างๆ ในสมการจะต้องเลือกใช้ระบบหน่วยมิติที่เป็นระบบเดียวกัน เช่น สมการหาความเค้นคัต $\sigma = Mc/I$ หากใช้หน่วยของโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น Kg.m ซึ่งเป็นระบบ SI ดังนั้นหน่วยของค่า Moment Inertial จะต้องเป็น m^4 จะเป็น in^4 ไม่ได้

2. จากผลของข้อ 1. จะทำให้ Governing Equation มีระบบหน่วยที่สอดคล้องด้วย ตัวแปรกายภาพที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่พิจารณา สามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มของฟังก์ชัน ซึ่งมีรูปแบบดังนี้ คือ

$$F = (X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1)$$

และสามารถแสดงในอีกรูปแบบหนึ่งได้คือ

$$G = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad (2)$$

ในขณะที่เทอมของ π ก็คือผลคูณไร้มิติ (Dimensionless Product) ของตัวแปรกายภาพ n ตัว (X_1, X_2, \dots, X_n) และ $m = n-r$ ซึ่ง r คือ จำนวนของมิติที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรกายภาพทั้งหมด

จากรูปแบบสมการ $F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ และ $G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0$ สามารถแสดงในรูปแบบสมการโดยใช้ทฤษฎีที่สำคัญดังนี้

1. การแปลงฟังก์ชันของ $F(X)$ ไปสู่ฟังก์ชัน $G(\pi)$ จะใช้หลักการวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis)

2. ฟังก์ชัน $G(\pi)$ จะเป็นตัวสร้างความสัมพันธ์ของ Model และ Prototype ซึ่งเทอมของ π จะเป็นตัวเชื่อมความเท่ากันของ Model และ Prototype ก่อให้เกิดหลักความต้องการความคล้ายคลึง (Similitude Requirement)

3.3 การวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis)

การวิเคราะห์มิติจะเป็นการจัดตัวแปรกายภาพทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่พิจารณาโดยการรวมตัวแปรกายภาพแต่ละตัว ให้เป็นกลุ่มของตัวแปรที่ไร้มิติ ซึ่งกลุ่มของตัวแปรนี้จะแสดงถึงเทอมของ π เช่น

ตัวอย่างที่ 1 การทดสอบหา Maximum Stress ที่หน้าตัดของคานหลายช่วง ซึ่งรูปร่างหน้าตัดกระจายต่อความยาว (w), ความยาวช่วงคาน (l) ซึ่งสมการวิเคราะห์ Stress สามารถแสดงในรูปของสมการ (1) และจะเห็นได้ว่า Stress เป็นฟังก์ชันของน้ำหนัก w และความยาว l

$$F(q, l, \sigma) = 0 \quad (3)$$

Buckingham ได้พิสูจน์ว่า สมการข้างต้นนี้สามารถแสดงในรูปของผลคูณของกำลังได้ดังนี้

$$\sigma = Kql^a \quad (4)$$

ค่า K คือพารามิเตอร์ไร้มิติ (Dimensionless Parameter) ซึ่งมันจะเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับตัวแปรกายภาพ จากสมการ (4) สามารถแสดงในสมการความเท่ากันของมิติได้ดังนี้

$$\begin{aligned} F/L^2 &= (F/L)^a L^b \\ FL^{-2} &= F^a L^{-a+b} \end{aligned} \quad (5)$$

ซึ่งเครื่องหมาย = แสดงถึงความเท่ากันของมิติ และเครื่องหมาย = แสดงถึงการเท่ากันของปริมาณ จากสมการ (5) จะได้ว่า กำลังของหน่วยวัดพื้นฐานในแต่ละด้านของสมการต้องเท่ากัน ทำให้เขียนความเท่ากันของกำลัง F และ L ได้

$$\begin{aligned} F &: 1 = a \\ L &: -2 = -a + b \end{aligned} \quad (6)$$

จากสมการ (6)

$$a = 1$$

$$b = -1$$

ดังนั้น

$$\sigma = K (q/l) \quad (7.a)$$

และ K สามารถหาได้จากการทดลอง จากการวิเคราะห์มิติเพียงอย่างเดียวแสดงให้เห็นว่า b มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่า (q/l)

สมการ (7.a) สามารถแสดงในรูปสมการ (2)

$$G(\sigma/q) = 0 \quad (7.b)$$

ซึ่งภายในฟังก์ชัน G จะแสดงถึงเทอมของผลคูณไร้มิติ

จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหานี้จะได้ว่า

$$\sigma = Mc/I = a_1 q l^2 (a_2 l) / (a_3 l^4) = (a_1 a_2 / a_3) \cdot (q/l) \quad (8)$$

ขณะที่ $a_1, a_2,$ และ a_3 คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่าง (geometry) ของคาน ทำให้ได้ค่าคงที่ K ในสมการ 7.a ซึ่งการวิเคราะห์มิติของปัญหาไม่สามารถหาค่าคงที่ $(a_1 a_2) / a_3$

3.3.1 ทฤษฎี บักกิงแฮมไพร์ (Buckingham's Pi Theorem)

จากตัวอย่างที่ 1 ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์มิติจะได้

$$\begin{array}{l} F(q, l, \sigma) = 0 \\ \text{To} \\ G(l, \sigma/q) = 0 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} F(q, l, \sigma) = 0 \\ G(l, \sigma/q) = 0 \end{array}} \right\} \quad (9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างแสดงถึงทฤษฎีของ Buckingham (1914) ซึ่งกล่าวไว้ว่า “ ตัวแปรกายภาพที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในปัญหาที่พิจารณาสามารถลดรูปให้เป็นสมการซึ่งประกอบด้วยกลุ่มของผลคูณไร้มิติ (Dimensionless Product) โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นถึงปริมาณกายภาพที่พิจารณา ” เช่น

$$F (X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (10)$$

สมการแสดงในรูปแบบที่เทียบเท่า

$$G (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_r) = 0 \quad (11)$$

เทอมของ π (Pi) คือผลคูณไร้มิติของปริมาณกายภาพ X_1, X_2, \dots, X_n ซึ่งกลุ่มของผลคูณไร้มิตินี้จำนวนเท่ากับ $m=n-r$ โดยที่ m คือจำนวนของผลคูณไร้มิติ ซึ่งเท่ากับผลต่างระหว่างจำนวนของตัวแปรกายภาพ (n) กับจำนวนของหน่วยวัดพื้นฐาน (r) จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่า $m = n-r = 3-2 = 1$

3.3.2 มิติอิสระ(Dimensional Independence)

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างปริมาณกายภาพที่มักจะเกี่ยวข้องในปัญหาโครงสร้างและหน่วยมิติของแต่ละปริมาณ

ตารางที่ 3.1 ชนิดของปริมาณกายภาพ

Quantity	Units
l Length	L
F Force	F
M Mass	$FL^{-1}T^2$
σ Stress	FL^{-2}
ϵ Strain	—
a Acceleration	LT^{-2}
δ Displacement	L
ν Poisson's ratio	—
E Modulus of elasticity	FL^{-2}

จากปริมาณกายภาพทั้งหมดที่ปรากฏอยู่ในปัญหาที่พิจารณาจะมีปริมาณกายภาพจำนวนหนึ่งที่สามารถปรากฏอยู่ในเทอมของผลคูณไร้มิติได้มากกว่าหนึ่งเทอมเราเรียกว่า ปริมาณกายภาพมิติอิสระ (Dimensional Independent Physical quantities) ซึ่งปริมาณกายภาพมิติอิสระจะเป็นตัวสร้างสัมพันธ์กับปริมาณกายภาพตัวอื่นๆ ในระหว่างขั้นตอนการหาผลคูณไร้มิติ (Dimensionless product)

การเลือกปริมาณกายภาพอิสระ นั้นต้องเลือกตัวแปรกายภาพจำนวน r ตัว (เท่าจำนวนของมิติที่เกี่ยวข้องของตัวแปรกายภาพทั้งหมด) ซึ่งตัวแปรนี้ต้องมีมิติที่ครอบคลุมมิติทั้งหมดที่เกี่ยวข้องไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับทุกตัวแปรและตัวแปรนั้นต้องปรากฏในเทอมของผลคูณไร้มิติอย่างน้อย 1 เทอม สมมติถ้าต้องเลือกตัวแปรกายภาพ 2 ค่า ค่าแรกต้องมีมิติครบทุกมิติ ค่าที่สองต้องมีมิติที่ไม่เหมือนกับตัวแรก และ ถ้าตัวแปรกายภาพใดที่ไม่มีมิติ (เช่น Strain, Poisson's ratio, angle) ไม่สามารถเลือกเป็นค่าปริมาณกายภาพมิติอิสระได้

วิธีการ เมื่อพิจารณาปริมาณกายภาพต่างๆจากปัญหาได้แล้วจากนั้นก็หาผลคูณไร้มิติจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกายภาพกับมิติของปริมาณกายภาพนั้น

ตัวอย่างที่ 2 กำหนดปริมาณกายภาพที่มีความสัมพันธ์ในปัญหาที่พิจารณาดังนี้คือ

	l	Q	M	σ	ϵ	a	δ	v	E
F	0	1	1	1	0	0	0	0	1
L	1	0	-1	-2	0	1	1	0	-2
T	0	0	2	0	0	-2	0	0	0

จงหาค่า π จากทฤษฎี Buckingham Pi

จากโจทย์ เราสามารถจัดสมการได้ดังนี้ $F(x) = F(l, Q, M, \sigma, \epsilon, a, \delta, v, E) = 0$

พิจารณามิติของปริมาณกายภาพทั้งหมดคือ F L และ T จากนั้นก็พิจารณาความสัมพันธ์ดังนี้ (y คือ ตัวแปรเชิงสัมพันธ์ของกำลังมิติ)

		l	Q	M	σ	ϵ	a	δ	v	E
		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9
F	z_1	0	1	1	1	0	0	0	0	1
L	z_2	1	0	-1	-2	0	1	1	0	-2
T	z_3	0	0	2	0	0	-2	0	0	0

จัดสมการใหม่ได้ดังนี้

- $y_1 = z_2$ 1
- $y_2 = z_1$ 2
- $y_3 = z_1 - z_2 + 2z_3$ 3
- $y_4 = z_1 - z_2$ 4
- $y_5 = 0$ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 y_6 &= z_2 - 2z_3 && \dots\dots\dots 6 \\
 y_7 &= z_2 && \dots\dots\dots 7 \\
 y_8 &= 0 && \dots\dots\dots 8 \\
 y_9 &= z_1 - 2z_2 && \dots\dots\dots 9
 \end{aligned}$$

พิจารณาเลือกปริมาณกายภาพ n จำนวนซึ่งเท่ากับจำนวนมิติทั้งหมดของปัญหา (n) ซึ่งปริมาณกายภาพที่เลือกนั้นจะต้องมีความสำคัญต่อปัญหาและควรมีจำนวนของมิติ n จำนวน โดยตัวอย่างนี้เลือกปริมาณกายภาพ E และ L เพราะมีความสำคัญกับปัญหามากที่สุด

แสดงว่าสมการ 1, 6 และ 9 เป็นสมการหลักแล้วให้สมการที่เหลือจัดรูปใหม่ในลักษณะ $f(y) = 0$ โดยให้สมการที่เหลืออยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสมการ 1, 6 และ 9 ดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 -2y_1 + y_2 - y_9 &= 0 && \dots\dots\dots 10 \\
 -2y_1 + y_3 + y_6 - y_9 &= 0 && \dots\dots\dots 11 \\
 y_4 - y_9 &= 0 && \dots\dots\dots 12 \\
 y_5 &= 0 && \dots\dots\dots 13 \\
 y_7 - y_1 &= 0 && \dots\dots\dots 14 \\
 y_8 &= 0 && \dots\dots\dots 15 \\
 -2\ln(y_1) + \ln(y_2) - \ln(y_9) &= 0 && \dots\dots\dots 16 \\
 -2\ln(y_1) + \ln(y_3) + \ln(y_6) - \ln(y_9) &= 0 && \dots\dots\dots 17 \\
 \ln(y_4) - \ln(y_9) &= 0 && \dots\dots\dots 18 \\
 \ln(y_5) &= 0 && \dots\dots\dots 19 \\
 \ln(y_7) - \ln(y_1) &= 0 && \dots\dots\dots 20 \\
 \ln(y_8) &= 0 && \dots\dots\dots 21
 \end{aligned}$$

take ln;

จากสมการที่ 16 - 21 เปลี่ยนตัวแปร y ให้กลับเป็นปริมาณกายภาพซึ่งจะหาค่า π จาก

ทฤษฎี π ได้ในความสัมพันธ์ดังนี้คือ $\ln(y) = \ln(\pi) = 0$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= Q/EI^2 \\
 \pi_2 &= Ma/EI^2 \\
 \pi_3 &= \sigma/E \\
 \pi_4 &= \epsilon \\
 \pi_5 &= \delta/l \\
 \pi_6 &= v
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 แบบจำลองโครงสร้าง (STRUCTURAL MODELS)

จากหลักการวิเคราะห์มิติทำให้ได้เงื่อนไขความคล้ายคลึงของ model และ prototype ซึ่งความคล้ายคลึงนี้ทำให้แบ่งประเภทของ model โครงสร้างได้ 3 ประเภท คือ

1. True model มีความคล้ายคลึงที่สมบูรณ์แบบ (Complete similarity) นั่นคือ เงื่อนไขความคล้ายคลึงทุกอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์มิติมีความคล้ายอย่างสมบูรณ์

2. Adequate model มีความคล้ายคลึงระดับหนึ่ง ("first - order" similarity) นั่นคือ เงื่อนไขความคล้ายคลึงทุกอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์มิติมีความคล้ายเฉพาะบางอย่างที่จำเป็นในการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้าง ตัวอย่าง ปัญหาในโครงข้อแข็ง (rigid frame) เรารู้กันดีว่าแรงภายในแนวแกนและแรงเฉือนมีความสำคัญรองลงไป เมื่อเทียบกับโมเมนต์ดัดและการผิดรูปร่าง (deformation) ถ้าเราสร้างแบบจำลองโดยพิจารณาแต่โมเมนต์ดัดและผิดรูปร่างแบบจำลองนั้นจะมีความพอเพียงต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับค่าโมเมนต์อินเนเชีย (moment of inertia) แต่ไม่พอต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่หน้าตัดขององค์อาคาร เป็นผลทำให้แบบจำลองนี้มีความคล้ายคลึงระดับหนึ่งเท่านั้น

3. Distorted Model เป็นแบบจำลองที่ไม่มีความคล้ายคลึงคือใช้ไม่ได้จนถึงคล้ายคลึงในระดับหนึ่ง (first-order) จากการวิเคราะห์มิติ

ความคล้ายคลึงที่สมบูรณ์เป็นที่ต้องการของการทำแบบจำลอง แต่เป็นไปได้ยากเพราะว่าจะเกิดปัญหาในด้านการเงินและด้านเทคนิค ทำให้มีการทำแบบจำลองแบบ Adequate ซึ่งก็พอเพียงที่จะศึกษาผลของพฤติกรรมของโครงสร้างได้

3.4.1 Model ที่มีความคล้ายคลึงสมบูรณ์แบบ (Models with Complete Similarity)

จากทฤษฎี Buckingham การแปลงปริมาณกายภาพที่มีผลต่อพฤติกรรมโครงสร้างให้เป็นสูตรทางคณิตศาสตร์ สามารถลดให้อยู่ในรูปสมการของผลคูณไร้มิติ

$$\pi_1 = \phi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) \quad (12)$$

ถ้าสมการ (12) เขียนเป็นของ prototype และ model แล้วนำมาหารกันจะได้

$$\frac{\pi_{1p}}{\pi_{1m}} = \frac{\phi(\pi_{2p}, \pi_{3p}, \dots, \pi_{np})}{\phi(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \dots, \pi_{nm})} \quad (13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ π_{1m} คือ π_1 ของ model และ π_{1p} คือ π_1 ของ prototype เป็นต้น ความคล้ายคลึงที่สมบูรณ์จะกำหนดด้วยเงื่อนไขของผลคูณไร้มิติทั้งหมดที่เท่ากันทั้ง model และ prototype นั้น

$$\left. \begin{aligned} \pi_{2m} &= \pi_{2p} \\ \pi_{3m} &= \pi_{3p} \\ \dots &= \dots \\ \pi_{nm} &= \pi_{np} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ดังนั้นจากสมการ (14) อาจเขียนเป็น

$$\frac{\pi_{1p}}{\pi_{1m}} = \frac{\mathcal{O}(\pi_{2p}, \pi_{3p}, \dots, \pi_{np})}{\mathcal{O}(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \dots, \pi_{nm})} = 1 \quad (15)$$

หรือ

$$\pi_{1p} = \pi_{1m} \quad (16)$$

สมการ (14) และ (16) เป็นสมการพื้นฐานสำหรับวิธีจำลอง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ model และ prototype ในสมการ (14) คือ เงื่อนไขการออกแบบและดำเนินการ (*Design and operating conditions*) ส่วนสมการ (16) คือ สมการคาดเดา (*prediction equation*) สำหรับตัวแปรที่ต้องการพิจารณาของปัญหา

ในตัวอย่าง 2 จะได้ สมการคาดเดา คือ

$$\pi_1 = Q/EI^2 \longrightarrow Q_p/(E_p I_p^2) = Q_M/(E_M I_M^2)$$

$$\pi_2 = Ma/EI^2 \longrightarrow M_p a_p/(E_p I_p^2) = M_M a_M/(E_M I_M^2)$$

ในตัวอย่าง 2 จะได้ เงื่อนไขการออกแบบและดำเนินการ คือ

$$\pi_3 = \sigma/E \longrightarrow \sigma_p/E_p = \sigma_M/E_M$$

$$\pi_4 = \varepsilon \longrightarrow \varepsilon_p = \varepsilon_M$$

$$\pi_5 = \delta/l \longrightarrow \delta_p/l_p = \delta_M/l_M$$

$$\pi_6 = v \longrightarrow v_p = v_M$$

ความคล้ายคลึงที่สัมพันธ์กันของเทอม π_i ในตัวอย่างที่ 2 สามารถหาได้จาก $\pi_p = \pi_M$ ของแต่ละเทอม และจะได้ scale factor $S_i = \frac{i_p}{i_M}$ S_i คือ scale factor สำหรับปริมาณ i

และ p กับ M แทน Prototype และ Model ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณมิติอิสระ (λ , E , และ a) ปรากฏในเทอม P_i ทั้ง 6 เทอม ของตัวอย่าง 2, ทำให้ได้ scale factor สำหรับปริมาณทั้งสามนั้น คือ S_λ , S_E , และ S_a ดังนั้น scale factor ที่เหลืออยู่

$$\begin{aligned} S_Q &= S_\lambda^2 S_E & S_r &= 1 \\ S_E &= \frac{S_\lambda^2 S_E}{S_a} & S_s &= S_\lambda \\ S_6 &= S_E & S_r &= 1 \end{aligned} \quad (17)$$

จะเห็นว่า model จะเป็นแบบ true model เมื่อ strain และ poisson ratio เท่ากัน ทั้ง model และ prototype ถ้า $S_r = 1$ จะทำให้ stress มีความเหมือนกันทุกประการ นั่นคือ ต้องใช้วัสดุเหมือนกันทั้งใน model และ prototype

3.4.2 Model ที่มีความคล้ายคลึงระดับหนึ่ง (Model with First - Order Similarity)

การทำให้ model มีความคล้ายสมบูรณ์เป็นสิ่งที่ยากดังที่ได้อธิบายไว้แล้ว ถ้าวิธีที่ได้มาจากการทดลองนำมาใช้ทั้งวิเคราะห์และออกแบบ อัตราส่วนของฟังก์ชัน ϕ ในสมการ (15) อาจไม่เท่ากับ 1 ซึ่ง First - order similarity ในที่นี้ กำหนดด้วยดัชนีความคล้ายคลึงของ model ต่อ prototype นั่นคือวิศวกรที่ทำแบบจำลองจะไม่สนใจความแตกต่างระหว่างค่าที่แท้จริงของอัตราส่วน ϕ_p / ϕ_m หรือไม่สนใจการผิดพลาดเบื้องต้นในความคล้ายคลึงที่สมบูรณ์ของปริมาณภายนอก ฟังก์ชัน ϕ เช่น ความแตกต่างระหว่าง load กระทำสม่ำเสมอ และ load กระทำแบบแยกกัน สามารถตัดทิ้งไปได้

3.4.3 Model ที่มีความบิดเบือน (Distorted Models)

Model ที่เกิดการบิดเบือน สามารถเกิดขึ้นเมื่อเกิดความแตกต่างใน boundary และใน condition ของรูปร่าง หรือคุณสมบัติวัสดุ ในปัญหาการบิดเบือนโครงสร้างเนื่องจาก boundary และ condition ด้านรูปร่างไม่ค่อยจะเกิดขึ้น แต่มักจะเกิดการบิดเบือนในด้านคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำ ซึ่งความคล้ายคลึงที่สมบูรณ์ เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ stress - strain เมื่อรับแรงอัดของวัสดุ ทำ model ต้องมีลักษณะเป็นไปตามรูป 3.1 แต่วัสดุทำ model ที่มีลักษณะดังกล่าว มักไม่ค่อยพบ แต่จะพบวัสดุที่มีกราฟ stress - strain ดังในรูป 3.2 ถ้ามีการนำเอาวัสดุดังในรูปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.2b มาใช้ทำ model ค่า strain ใน model จะยังคงอยู่ใน prototype เป็นผลให้เกิดพฤติกรรม การทรุดตัว (displacements) ใน model จะไม่เหมือนกับการทรุดตัวของ prototype ถ้าพฤติกรรม โครงสร้างขึ้นกับการทรุดตัว (เช่น stress ในคาน - เสา หรือความดันโค้งวิกฤต (critical buckling pressure) ในหลังคาเปลือกบาง) การบิดเบือนดังกล่าวก็ไม่สามารถยอมรับได้ แต่ถ้า การทรุดตัวมีเพียงน้อยมากหรือไม่เกี่ยวข้องในเงื่อนไขของสมมูลการบิดเบือนดังกล่าวก็สามารถ ยอมรับได้ เช่นเดียวกับค่า strain, displacement, velocities, accelerations ใน model จะไม่ เหมือนกับใน prototype แต่จะรู้ว่ามี ความคลาดเคลื่อนโดยมีตัวประกอบ (factor) ซึ่งให้เห็นถึง จำนวนของ strain ที่บิดเบือน (a_1 และ a_2 ในรูป 3.2) ซึ่ง Beaujoint (1960) ได้อธิบายการ บิดเบือนของ strain ดังที่กล่าวมา

รูปที่ 3.1 วัสดุแบบจำลองที่มีความคล้ายคลึงสมบูรณ์



รูปที่ 3.2 วัสดุแบบจำลองที่มีความบิดเบือน

การบิดเบือนของวัสดุอาจเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนบัพของของวัสดุทำ model ไม่เท่ากับวัสดุ prototype ถ้าพฤติกรรมโครงสร้างเป็นลักษณะเกิดหน่วยแรงเค้น (stress) ขึ้นในระนาบ เช่นพฤติ กรรมการค้ำของคานทั่วไป ดังนั้นการบิดเบือนของอัตราส่วนบัพของ จะทำให้เกิดการบิดเบือน ของ strain ใน model แต่ไม่มีผลต่อ stress, reactions, bending moments เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ความต้องการความคล้ายคลึง (Similitude Requirements)

ความต้องการความคล้ายคลึงสำหรับแบบจำลอง elastic สรุปได้ดังในตารางที่ 3.2 ในตารางที่ 3.2 ตัวประกอบมาตราส่วนอิสระ (independent scale factors) เลือกจากโมดูลัสความยืดหยุ่น และความยาว ในขณะที่ตัวประกอบมาตราส่วนที่เหลือจะเป็น 1 หรือไม่ ก็อยู่ในรูปฟังก์ชันของ S_E และ S_L วัสดุสำหรับแบบจำลอง elastic จะมีความยืดหยุ่นในช่วงการให้น้ำหนักกระทำ และมีอัตราส่วนปัวซองเท่ากับวัสดุของ prototype ซึ่งจะทำให้เกิดการผิดรูปร่างเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักที่กระทำ สมมติน้ำหนักกระทำ (Loading) ถูกย่อส่วนลงด้วยตัวประกอบมาตราส่วน (scale factor) ที่ให้มาในตารางที่ 3.2 หน่วยแรงเค้น (stress) ของวัสดุแบบจำลองจะเป็น S_E เท่าใน prototype ขณะที่ความเครียด (strain) ของวัสดุแบบจำลองเท่ากับความเครียด prototype ชนิดของความคล้ายคลึงลักษณะนี้จะรักษาความถูกต้องของค่าความเครียดสำหรับพฤติกรรมคาน - เสา (beam-column) และปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับรูปร่าง

ตารางที่ 3.2 ความต้องการความคล้ายคลึงสำหรับแบบจำลองยืดหยุ่น

Quantities	Dimensions	Scale Factor
Material-related properties		
Stress	FL^{-2}	S_E
Modulus of elasticity	FL^{-2}	S_E
Poisson's ratio	—	1
Mass density	FL^{-3}	S_E/S_L
Strain	—	1
Geometry		
Linear dimension	L	S_L
Linear displacement	L	S_L
Angular displacement	—	1
Area	L^2	S_L^2
Moment of inertia	L^4	S_L^4
Loading		
Concentrated load Q	F	$S_E S_L^3$
Line load w	FL^{-1}	$S_E S_L$
Pressure or uniformly distributed load q	FL^{-2}	S_E
Moment M or torque T	FL	$S_E S_L^3$
Shear force V	F	$S_E S_L^3$

ความต้องการความคล้ายคลึงของน้ำหนักกระทำแบบจำลองได้จากการลดน้ำหนักที่กระทำบนโครงสร้างจริงด้วยค่าตัวประกอบ $S_E S_L^2$ ถ้าโครงสร้างแบบจำลองทำด้วยพลาสติกโดยโครงสร้างต้นแบบเป็นเหล็กหรือคอนกรีต ซึ่งค่า E ของพลาสติกมีค่าประมาณ 400,000 psi ดังนั้น S_E ประมาณ 8 สำหรับต้นแบบคอนกรีต และมีค่าประมาณ 75 สำหรับต้นแบบเหล็ก เป็นผลให้เทอม $S_E S_L^2$ มีค่ามาก ดังนั้นน้ำหนักกระทำแบบจำลองมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับน้ำหนักกระทำโครงสร้างต้นแบบ

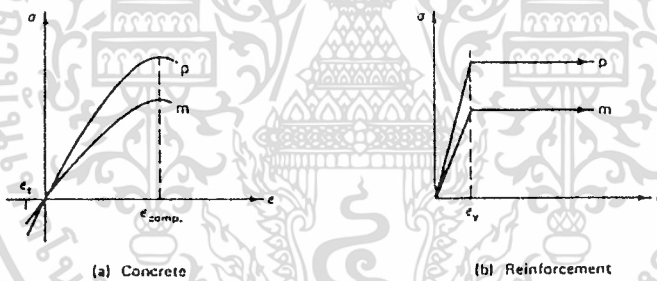
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 แบบจำลองคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Models)

การทำแบบจำลองให้มีพฤติกรรมแบบ inelastic อย่างสมบูรณ์แบบทั้งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตอัดแรงไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะต้องรวมถึงรูปแบบการพังทลายและความสามารถรับกำลังด้วย สิ่งที่ยากอีกอย่างคือ การเสริมกำลังของวัสดุทั้งสอง คุณสมบัติด้านกำลังและลักษณะพื้นผิว (แรงยึดเหนี่ยวของการเสริมกำลังแบบเดิมจะต้องระวังมากถ้าแบบจำลองเป็นแบบเหมือนจริง)

การทำแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตอัดแรงปกติให้น้ำหนักกระทำจนพังทลาย หลักการพังทลายสำหรับแบบจำลองคอนกรีตที่มีหน่วยแรงดันหลายแกนควรเหมือนกับโครงสร้างคอนกรีตต้นแบบ สรุปรูปที่ true model

1. กราฟ stress - strain จะต้องมียุ่ปร่างคล้ายกันในแบบจำลองและต้นแบบคอนกรีตทั้งการดึงและอัดแกนเดียว
2. $\epsilon_m = \epsilon_p$ ที่ประลัยภายใต้ การดึงและการอัดแกนเดียว ความต้องการเหล่านี้สรุปในรูป 3.3 ความต้องการความคล้ายคลึงตรงกับในคอลัมน์ (4) ของตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความต้องการความคล้ายคลึง

Stress scale factor (S_σ) ที่ใช้ใน True model ซึ่งมีค่าไม่เท่ากับหนึ่งพิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์มิติ ถ้า $S_\sigma \neq 1$ นำมาใช้กับแบบจำลองคอนกรีต ค่า S_σ ในลักษณะเดียวกันนี้จะนำมาใช้เหล็กเสริมกำลัง (reinforcing steel) ในแบบจำลองด้วยหรือ $S_\sigma = S'_\sigma$ เมื่อ S'_σ เป็นของเหล็กเสริมกำลัง ปัญหาที่มีการไขว่คว้าส่วน (scale) ประเภทนี้เกิดจากข้อเท็จจริงที่ว่า S_E จะต้องเท่ากับ S_σ และเหล็กเสริมในแบบจำลองจะต้องมีค่าโมดูลัสแตกต่างจากเหล็กเสริมในโครงสร้างจริงโดย scale factor $S'_E = S_E = S_\sigma$ ดังนั้นข้อสรุปในการทำแบบจำลองแบบ true model ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ $S_\sigma = S_E = 1$ ซึ่งจะสอดคล้องความต้องการความคล้ายคลึงที่ใหม่ในคอลัมน์ (5) ของตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สรุปตัวประกอบมาตรฐานสำหรับแบบจำลองคอนกรีตเสริมเหล็ก

(1)	Quantity (2)	Dimension (3)	True Model (4)	Practical True Model (5)	Distorted Model, Case 1 (Fig. 2.7) (6)	Distorted Model, Case 3 (Fig. 2.8) (7)
Material Related Property	Concrete stress, σ_c	FL^{-2}	S_c	1	S_c	S_c
	Concrete strain, ϵ_c	—	1	1	S_c	S_c
	Modulus of concrete, E_c	FL^{-2}	S_c	1	S_c/S_c	S_c/S_c
	Poisson's ratio, ν_c	—	1	1	1	1
	Mass density, ρ_c	FL^{-3}	S_c/S_1	$1/S_1$	S_c/S_1	S_c/S_1
	Reinforcing stress, σ_r	FL^{-2}	S_r	1	S_r	S_r
	Reinforcing strain, ϵ_r	—	1	1	S_r	S_r
	Modulus of reinforcing, E_r	FL^{-2}	S_r	1	1	1
	Bond stress, u	FL^{-2}	S_r	1	S_r	•
Geometry	Linear dimension, l	L	S_l	S_l	S_l	S_l
	Displacement, δ	L	S_l	S_l	$S_c S_l$	$S_c S_l$
	Angular displacement, β	—	1	1	S_c	S_c
	Area of reinforcement, A_r	L^2	S_l^2	S_l^2	S_l^2	$S_c S_l^2/S_c$
Loading	Concentrated load, Q	F	$S_c S_l^2$	S_l^2	$S_c S_l^2$	$S_c S_l^2$
	Line load, w	FL^{-1}	$S_c S_l$	S_l	$S_c S_l$	$S_c S_l$
	Pressure, q	FL^{-2}	S_c	1	S_c	S_c
	Moment, M	FL	$S_c S_l^3$	S_l^3	$S_c S_l^3$	$S_c S_l^3$

*Function of choice of distorted reinforcing area.

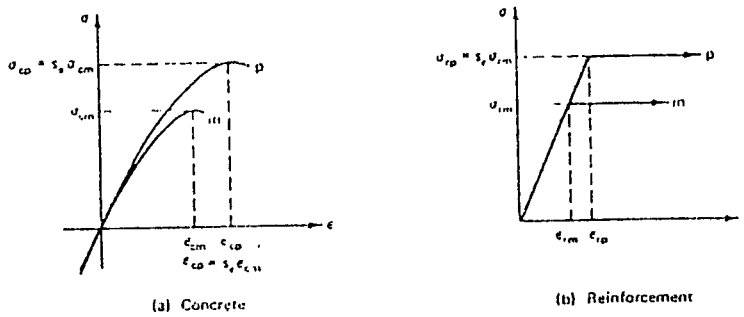
แบบจำลองแบบบิดเบือนหรือ Distort model ถ้าจำเป็นต้องใช้ในกรณีที่เป็นแบบจำลองคอนกรีตที่มี $S_c = S_\sigma = 1$ ไม่สามารถหาได้ ดังนั้นแบบจำลองจึงอาจเกิดกรณีการบิดเบือนที่เป็นไปได้ของวัสดุทำแบบจำลอง ซึ่งอธิบายโดย Zia , white , และ Van horn (1970)สรุปได้ดังในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การบิดเบือนที่เป็นไปได้ในแบบจำลองคอนกรีตเสริมเหล็ก

Case	Concrete			Reinforcement		
	S_c	S_σ	S_ϵ	S'_c	S'_σ	S'_ϵ
1	$\neq 1$	S_c	1	S_c	S_c	1
2	$\neq 1$	1	$1/S_c$	S_c	1	$1/S_c$
3	$\neq 1$	$\neq 1$	$\neq 1$	S_c	S_c	1
4	$\neq 1$	$\neq 1$	$\neq 1$	S_c	S_σ	$\neq S_\epsilon$

กรณี 1 และ 3 เป็นกรณีที่น่าสนใจเพราะว่าเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองทำจากวัสดุที่แตกต่างเหล็กที่ใช้ในโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งทั้ง 2 กรณีเกิดการบิดเบือนใน strain ดังนั้นไม่ควรนำมาใช้กับพฤติกรรมที่มีผลตอบสนองโครงสร้างที่ไวต่อขนาดของความเครียด (Absolute magnitude of strain) เช่นในเสา-คาน การบิดเบือนในกรณี 1 ของคุณสมบัติวัสดุแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



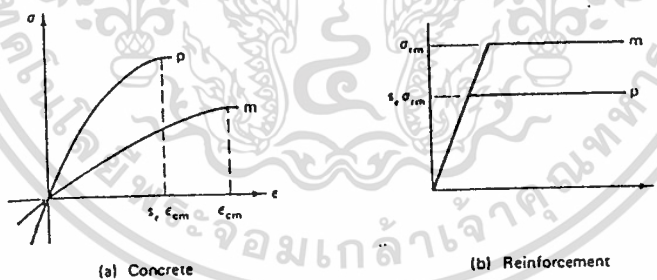
รูปที่ 3.4 กรณี 1 : การบิดเบือนในความต้องการความคล้อยคลึง

ผลของการบิดเบือน strain ได้ scale factor ดังในคอลัมน์(6)ของตารางที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นว่า การบิดเบือน strain ไม่มีผลต่อความคล้อยคลึงในการให้น้ำหนักกระทำแต่ความคล้อยคลึงของแบบจำลองที่มีการบิดเบือน strain ก็ยังต้องการกราฟ stress-strain คล้ายกับของคอนกรีตโดยไม่จำเป็นที่ $S_\epsilon = S_\sigma = 1$

การบิดเบือนกรณี 3 $S'_\epsilon = 1$ และ $S_\epsilon \neq 1$ (รูปที่ 3.5) มีการบิดเบือน strain ของเหล็กเสริมซึ่งเหมือนกับการบิดเบือน strain ของคอนกรีต $S'_\epsilon = S_\epsilon$ และที่ $S'_\epsilon = 1$, S'_σ จะเท่ากับ S'_ϵ นั่นคือ กำลังจุดคลาก (yield strength) ของเหล็กเสริมแบบจำลองจะเป็นไปตามความต้องการ ($\sigma_{yp} = S_\epsilon \sigma_{ym}$) โดยย่อส่วนแรงในเหล็กเสริมแบบจำลองต่อเหล็กเสริมของจริง ($F_p = S_\sigma S^2_\lambda F_m$) และจากความสัมพันธ์ $F = A\sigma$ สำหรับแบบจำลองและต้นแบบ จึงได้

$$A_p/A_m = S_A = S_\sigma S^2_\lambda / S_\epsilon$$

ซึ่งเป็น Scale factor สำหรับพื้นที่เหล็กเสริมในแบบจำลอง



รูปที่ 3.5 กรณี 2 : แบบจำลองที่บิดเบือน

บทที่ 4

การทดลองโครงงานวิจัย

4.1 การทดลองหาคุณสมบัติเฉพาะตัวของ Gypsum Plaster

4.1.1 วัสดุ

ใช้ Gypsum Plaster Type A ของบริษัท ศรีอยุธยา ผลิตภัณฑ์ จำกัด

4.1.2 อัตราส่วนการผสม

ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับ Gypsum Plaster (w/p) ที่ Normal Consistency คือ 0.55
โดยน้ำหนัก

4.1.3 การผสมและหลอก่อนตัวอย่าง

Mould ที่ใช้ในการหล่อ Cube ขนาด $2'' \times 2'' \times 2''$ เป็น mould ที่ทำจากเหล็กขนาด และรูปร่างตามภาคผนวก ก. ของร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ./กว126) ส่วน mould ที่ใช้ในการหล่อ cylinder $\varnothing 2'' \times 4''$ ใช้ท่อ PVC. \varnothing ภายใน $2''$ ชนิดหนา ตัดแบ่งท่อนละ $4''$ เศษ จากนั้นนำไปเจียรหัวท้ายเพื่อให้ได้ระดับและยาวท่อนละ $4''$ พอดี

4.1.4 การบ่มก่อนตัวอย่าง

การทดลองเพื่อหาความแตกต่างของกราฟ Stress-Strain เมื่อ Gypsum Plaster อยู่ในสถานะเปียกกับแห้งสนิท ก่อนตัวอย่างชุดสำหรับทดลองที่สถานะเปียกทำการบ่มโดยทิ้งไว้ใน อุณหภูมิห้องแล้วทำการทดลองที่ 2 ชม.ภายหลังการหล่อ และก่อนตัวอย่างชุดสำหรับทดลองที่ สถานะแห้งสนิททำการบ่มโดยทิ้งไว้ในเตาอบจนกระทั่งน้ำหนักก่อนตัวอย่างคงที่ จึงค่อยนำไป ทดลอง

สำหรับการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของ กำลังกับเวลาที่ใช้ในการบ่ม ทำการบ่มโดยทิ้ง

ก่อนตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การ setup อุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงอัดของวัสดุ ได้จัดเตรียมตามข้อกำหนดของ ASTM C 472 - 92

4.1.6 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองเพื่อหาความแตกต่างของกราฟ Stress-Strain เมื่อ Gypsum Plaster อยู่ในสถานะเปียกกับแห้งสนิททำโดยนำชุดก่อนตัวอย่าง (ชุดละ 3 ก้อน) ไปกดกับ UTM แล้วอ่านค่า Longitude Strain ทุกๆ Load 100 kg. จากนั้นนำไปวาด กราฟ Stress-Strain เพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป

สำหรับการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของ กำลังกับเวลาที่ใช้ในการบ่ม ทำโดยนำชุดก่อนตัวอย่าง (ชุดละ 3 ก้อน) ไปกด กับ UTM แล้วอ่านค่า Ultimate Load ทุกๆ 2 ชม. ภายหลังหล่อเสร็จครบ 48 ชม.จากนั้นกดที่ 3, 5, 7, 14, 21, 28 วัน

4.2 การทดลองหาคุณสมบัติทางกลของ Gypsum Plaster

4.2.1 วัสดุ

ใช้ Gypsum Plaster Type A ของบริษัท ศรีอยุธยา ผลิตภัณฑ์ จำกัด

4.2.2 อัตราส่วนการผสม

ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับ Gypsum Plaster (w/p) 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65 โดยน้ำหนัก

4.2.3 การผสมและหล่อก่อนตัวอย่าง

Mould ที่ใช้ในการหล่อ Cube ขนาด 2"×2"×2" เป็น mould ที่ทำจากเหล็กขนาด และรูปร่างตามภาคผนวก จ. ของร่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ./กว126) ส่วน mould ที่ใช้ในการหล่อ cylinder Ø 2"×4" ใช้ท่อ PVC. Ø ภายใน 2" ชนิดหนา ตัดแบ่งท่อนละ 4" เศษ จากนั้นนำไปเจียรหัวท้ายเพื่อให้ได้ระดับและยาวท่อนละ 4" พอดี ส่วน mould ขนาด 2" ×2"×12" ที่ประกอบขึ้นจากไม้อัดสำหรับทดลอง Modulus of Rupture และ mould ทั้งหมดควรทาน้ำมันให้ทั่วก่อนหล่อก่อนตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการผสมใช้วิธีเติมน้ำลงใน Gypsum Plaster จากนั้นผสมในเครื่องผสม (Mechanical mixer) ประมาณ 1 - 1.5 นาที จนกระทั่งน้ำและ Gypsum Plaster ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นลักษณะครีมขาวข้นไม่มีตะกอน จากนั้นเทลงแบบที่เตรียมไว้ โดยใช้เหล็ก \varnothing 6 mm กระทุ้งเพื่อไล่อากาศที่เกิดขณะผสมออกให้หมด

4.2.4 การบ่มก้อนตัวอย่าง

ถอดแบบหลังจาก Final setting Time หากก้อนตัวอย่าง รอ Test ไม่เกิน 24 ชม. หลังการหล่อให้บ่มโดยตั้งก้อนตัวอย่างไว้ในห้องที่มีความชื้นและอุณหภูมิปกติ แต่หากบ่มก้อนตัวอย่างที่รอการทดสอบนานเกินกว่า 24 ชม. หลังการหล่อให้ทำผิวของก้อนตัวอย่างด้วย Shallac ให้ทั่วเพื่อเป็นผนังป้องกันปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในก้อนตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นก็สามารถเก็บในห้องที่มีความชื้นและอุณหภูมิปกติได้

4.2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

การ setup อุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงอัดของวัสดุ ได้จัดเตรียมตามข้อกำหนดของ ASTM C 78 - 84 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบ third point loading และใส่ load ผ่าน CBR ที่มี proving ring ขนาด 2 Ton ซึ่ง Apply เข้ากับ UTM ดังรูป

ส่วน Cylinder \varnothing 2" x 4" เพื่อทดสอบ indirect tensile ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C416-86 และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 39-86 เพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง stress - strain และใช้มาตรฐาน ASTM C 472-93 สำหรับทดสอบ compressive strength ของก้อนตัวอย่าง cube 2" x 2" x 2"

electrical - resistance strain gauge รุ่น SR - 4 ซึ่งมี effective gauges length ยาว 1 cm ส่งสัญญาณ OUTPUT ไปยัง Digital Strain Indicator รุ่น SMD - 10A ของ KYOWA ถูกแปะติดกับก้อนตัวอย่าง Cylinder \varnothing 2" x 4" ที่ระยะกึ่งกลางความสูงโดยคิดในแนวระดับเพื่อวัด lateral strain เพื่อหาค่า poisson's ratio ต่อไป

4.2.6 ขั้นตอนการทดลอง

การทดสอบ Compressive Strength, Indirect Tensile Strength, Modulus of Rupture, Relation of Stress-Strain and Poisson's Ratio จะเริ่มหลังการหล่อ 2 ชม. สำหรับทุกก้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง โดยมีการบันทึกค่าน้ำหนักก่อนการทดสอบ ผิวบนและล่างของก้อนตัวอย่าง Cylinder ควรทำการตกแต่งให้ได้ระดับ

พื้นผิวที่ติด electrical - resistance strain gauge บริเวณนั้นควรทำความสะอาดและขัดให้เรียบร้อยโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 0 เสียก่อน และขณะทดสอบต้องระวังอย่าให้สายนำสัญญาณ 2 เส้น จาก gauge ไปยัง indicator สัมผัสกัน อีกทั้งควรตรวจสอบสภาพของ gauge ด้วย indicator ก่อนการใช้งานว่าค่า strain ที่อ่านยังคงถูกต้องอยู่

สำหรับการทดสอบ Brazilian Tensile Test ใช้แกนไม้อัดขนาด $4'' \times 3/8'' \times 1/8''$ 2 แถบ รองรับก้อนตัวอย่างกับหัวกดของ UTM เพื่อให้มั่นใจว่าจะเกิด line load ตามแนวระนาบของเส้นผ่านศูนย์กลางพอดี

บันทึก Ultimate load ทุกครั้งของการ Test สำหรับการทดสอบหา stress - strain curve และ poisson's ratio ส่วนค่า lateral และ longitudinal strains มีการบันทึกทุก ๆ ครั้งที่ load เพิ่มขึ้น 100 kg. จนกระทั่ง failure



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองโครงงานวิจัย

5.1 ผลการทดลองคุณสมบัติเฉพาะตัวของยิปซัมพลาสติกอร์

5.1.1 ผลการทดลองคุณสมบัติด้านกายภาพอาศัยข้อมูลผลการทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีซึ่งจะมีการทดสอบ ความละเอียด ความอยู่ตัว ความชื้นเหลวปกติ เวลาก่อตัว และการต้านแรงอัด แสดงผลการทดลองในหน้าที่ 30 , 31

5.1.2 ผลการทดลองผลกระทบของเวลาหลังการก่อตัวที่มีต่อกำลังอัดของยิปซัมพลาสติกอร์ ที่อัตราส่วน $W/P = 0.55$ แสดงผลการทดสอบในตารางที่ ก-1 และ รูปที่ 5.1

5.1.3 ผลการทดลองช่วงกำลังอัดคงที่ที่มีต่อลักษณะกราฟ Stress-Strain ของยิปซัมพลาสติกอร์ที่อัตราส่วน $W/P = 0.55$ โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ ก-2 , ก-3 และ รูปที่ 5.2 , 5.3

5.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางกลของยิปซัมพลาสติกอร์

5.2.1 ผลการทดลองผลกระทบของอัตราส่วน W/P ต่างๆกันที่มีผลต่อกำลังอัด กำลังดึงของยิปซัมพลาสติกอร์ แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 5.2 และ รูปที่ 5.4 - 5.7

5.2.2 ผลการทดลองการเปรียบเทียบกำลังดึงต่อกำลังอัดที่อัตราส่วน W/P ต่างๆกันของยิปซัมพลาสติกอร์แสดงผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 5.8

5.2.3 ผลการทดลองผลกระทบของอัตราส่วน W/P ต่างๆกันที่มีผลต่อลักษณะกราฟ Stress-Strain ของยิปซัมพลาสติกอร์ แสดงลักษณะกราฟในรูปที่ 5.9 -5.13

5.2.4 ผลการทดลองผลกระทบของอัตราส่วน W/P ต่างๆกันที่มีผลค่า Poisson's Ratio ของยิปซัมพลาสติกอร์ แสดงผลการทดลองในตารางที่ ก-24 และ รูปที่ 5.14 - 5.19

5.2.5 ผลการทดลองผลกระทบบของอัตราส่วน W/P ต่างๆกันที่มีผลค่า Young's Modulus กับ Density ของซีเมนต์พลาสติกอร์ แสดงผลการทดลองในรูปแบบที่ 5.20 , 5.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วท.

คำขอมริการที่ ท 503 / 39

ที่ สว. /

ที่ ทน. วล. -0025 / 39

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ให้แก่

บริษัท ศรีอยุธยาผลิตภัณฑ์ จำกัด

การทดสอบ / วิเคราะห์ ปูนยิปซัมพลาสเตอร์ (Type A)

วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ มอก.188-2527

ภาวะการทดสอบ / วิเคราะห์ : อุณหภูมิ 28⁰ ซ.

ความชื้นสัมพัทธ์ 66..... %


ผลการทดสอบ / วิเคราะห์ ปูนยิปซัมพลาสเตอร์ (Type A)

รายการตรวจสอบ	หน่วย	ผลการตรวจสอบ
1. ความละเอียด (ค้ำบนแรงขนาด 600 ไมโครเมตร)	%	0.0
2. ความมอด้ตัว	-	ไม่ปรากฏรอยแยก, รอยประทุ
3. เวลาก่อตัว (Vicat test)	นาที	14.
4. เวลาก่อตัวระยะต้น (Knife test)	นาที	8
5. การต้านแรงอัด	นิวตัน/ตร.มม.	14.01

ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์

1. วิไลดา นิ่มนงปณ.
2. ศรัทธา น้อย
3.

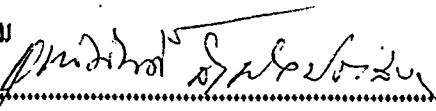
ผู้รับรอง


 (นายสุวิทย์ นิ่มนงปณ.)

ตำแหน่ง

ฝ่ายวิจัยวัสดุอุตสาหกรรม

ผู้ตรวจสอบ


 (นายสุวิทย์ นิ่มนงปณ.)

ผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการ วัสดุวิศวกรรม

วันที่ 11 กันยายน 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ / วิเคราะห์เท่านั้น
 ห้ามนำผลการทดสอบ / วิเคราะห์ไปโฆษณาโดยไม่ขออนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจาก วท.



วท.

คำขอมริการที่ม.503.../...39...

ที่ สว. /

ที่ ทป. ...ล.:-0026.../39.....

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์ ให้แก่

บริษัท ศรีอยุธยาผลิตภัณฑ์ จำกัด

การทดสอบ / วิเคราะห์ปูนซีเมนต์พลาสเตอร์ (Type B).....

วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ มอก.188-2527.....

ภาวะการทดสอบ / วิเคราะห์ : อุณหภูมิ 28⁰ซ ความชื้นสัมพัทธ์ 66 %

ผลการทดสอบ / วิเคราะห์ปูนซีเมนต์พลาสเตอร์ (Type B).....

รายการตรวจสอบ	หน่วย	ผลการตรวจสอบ
1. ความละเอียด (ค่าขบนแรงขนาด 600 ไมโครเมตร)	%	0.003
2. ความมอดูตัว	-	ไม่ปรากฏรอยแยก, รอยประทุ
3. เวลาก่อตัว (Vicat test)	นาที	27
4. เวลาก่อตัวระยะต้น (Knife test)	นาที	16
5. การต้านแรงอัด	นิวตัน/ตร.มม.	11.25

ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์

1. วิไลวรรณ วัฒนประภา
2. กัญจน์ชัช ทอนน้อย
3.

ผู้รับรอง

(นายสุภรศักดิ์ ห้วยสิงห์เกิด)

วท.
ฝ่ายวิจัยวัสดุอุตสาหกรรม

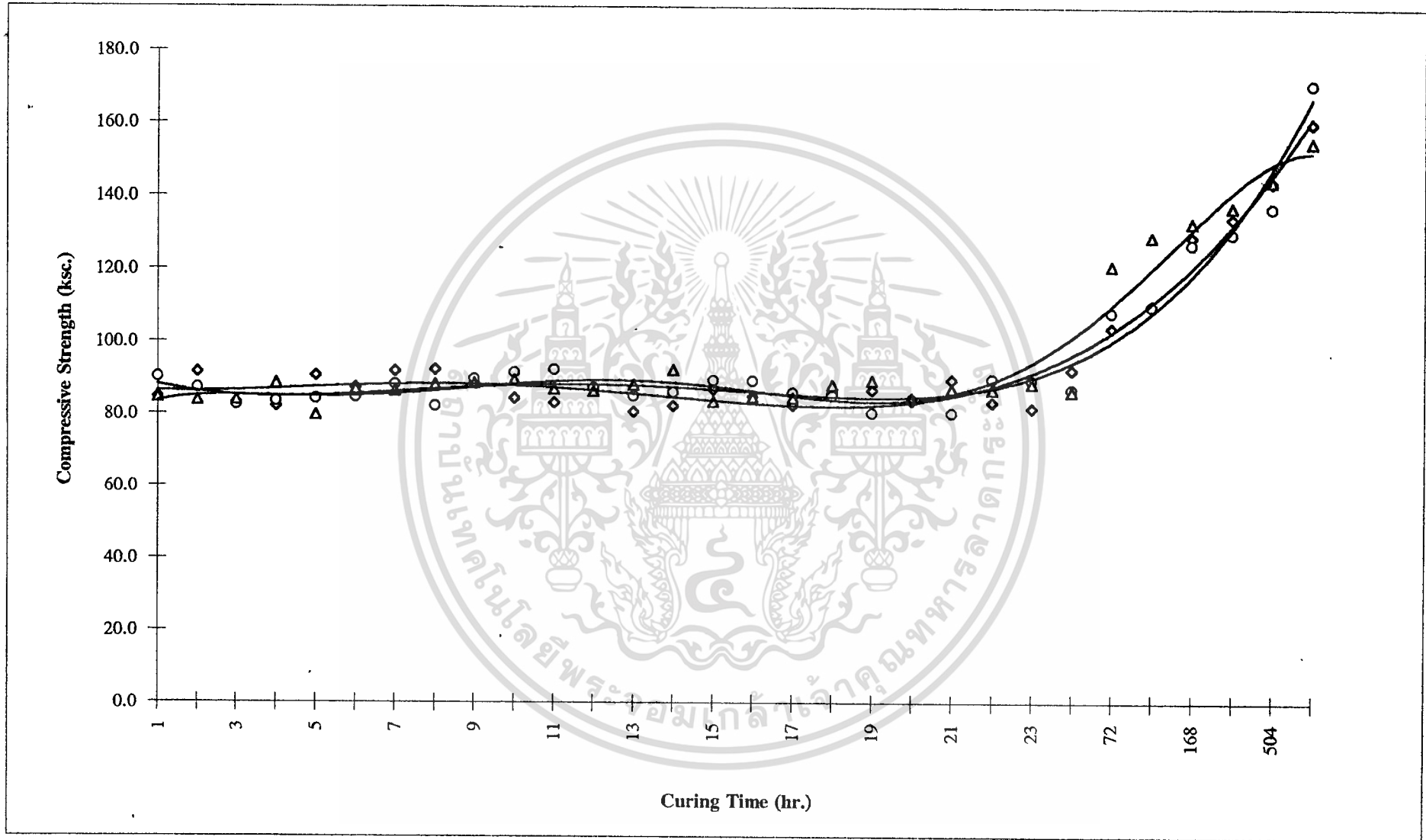
ผู้ตรวจสอบ

นายสุภรศักดิ์ สำเร็จประสงค์

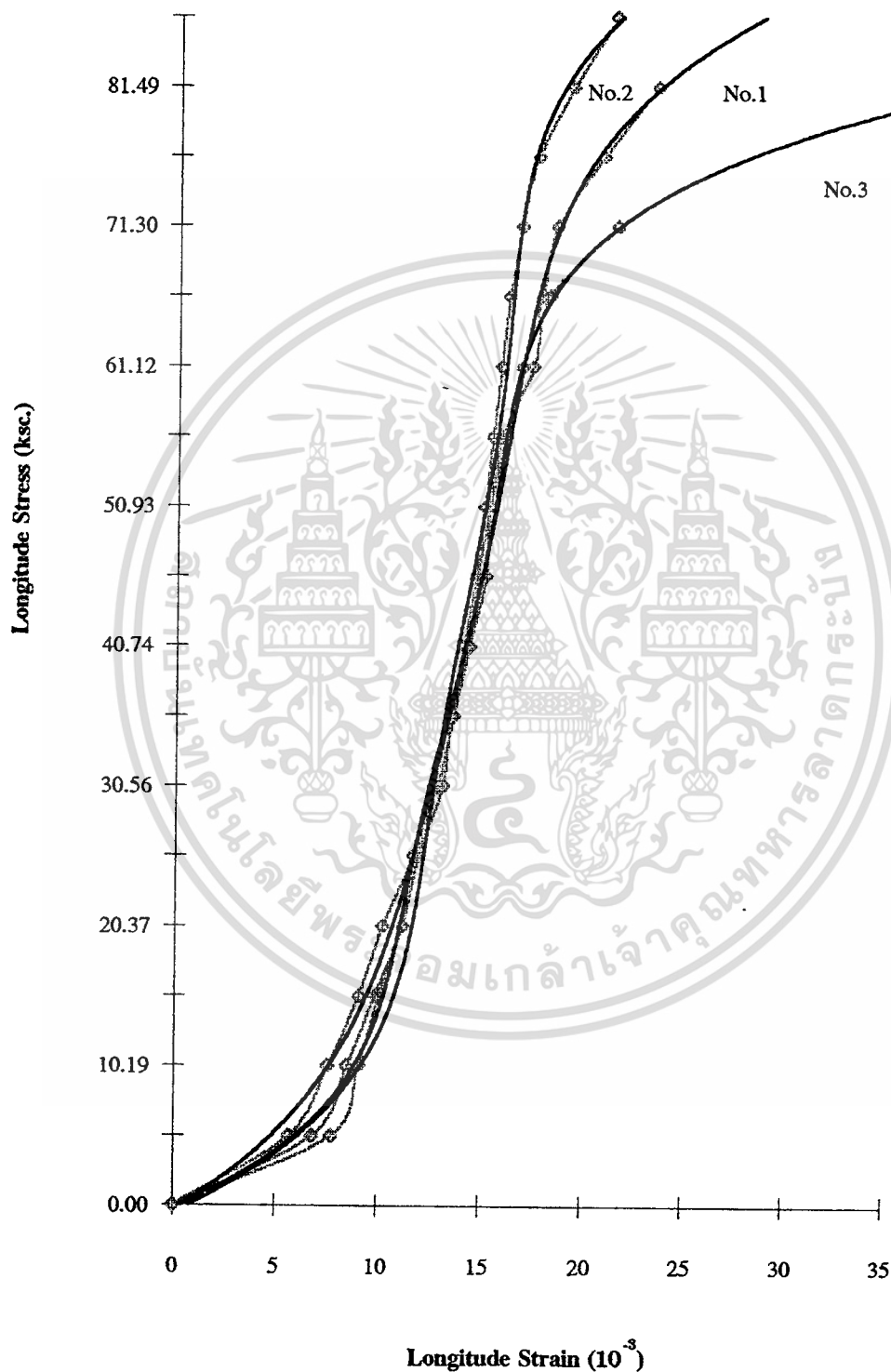
(นายสุภรศักดิ์ สำเร็จประสงค์)

ผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการ วัสดุวิศวกรรม วันที่ 11 กันยายน 2539

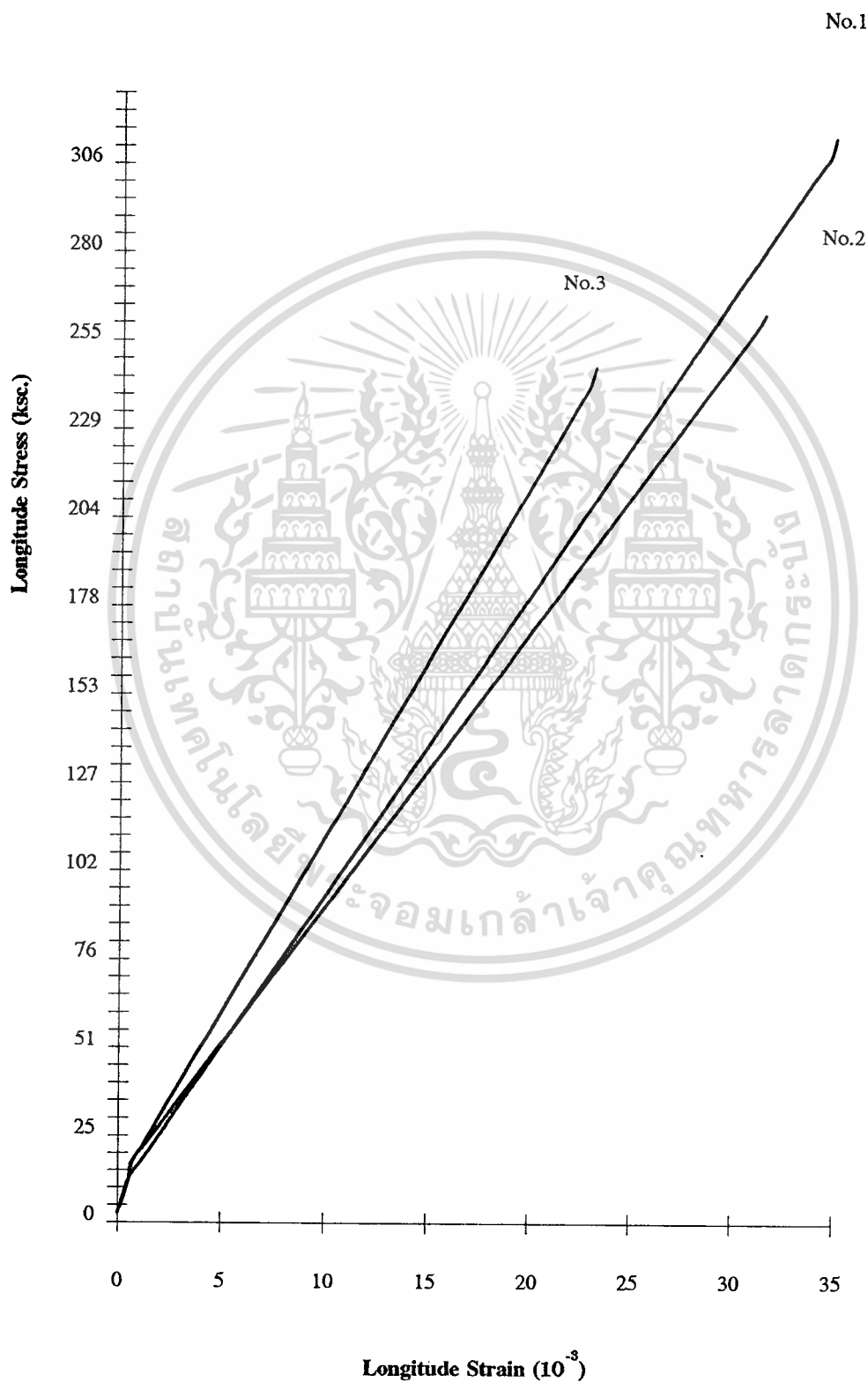
ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ / วิเคราะห์เท่านั้น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ห้ามนำผลการทดสอบ / วิเคราะห์ไปโฆษณาโดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจาก วท.



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่ม สำหรับ W/P = 0.55



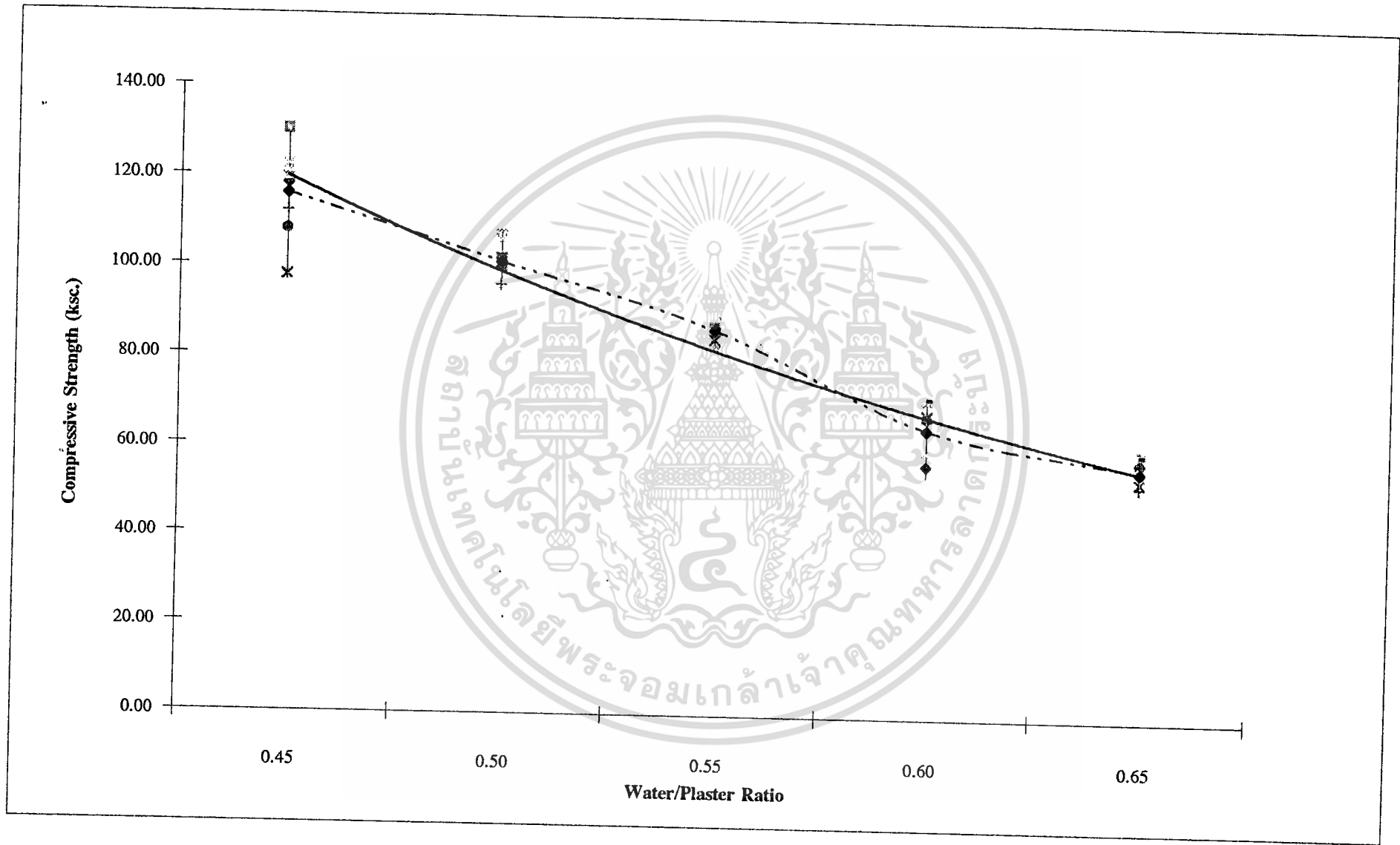
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55 ที่สภาวะขึ้น (2 ช.ม. หลังการหลอ)



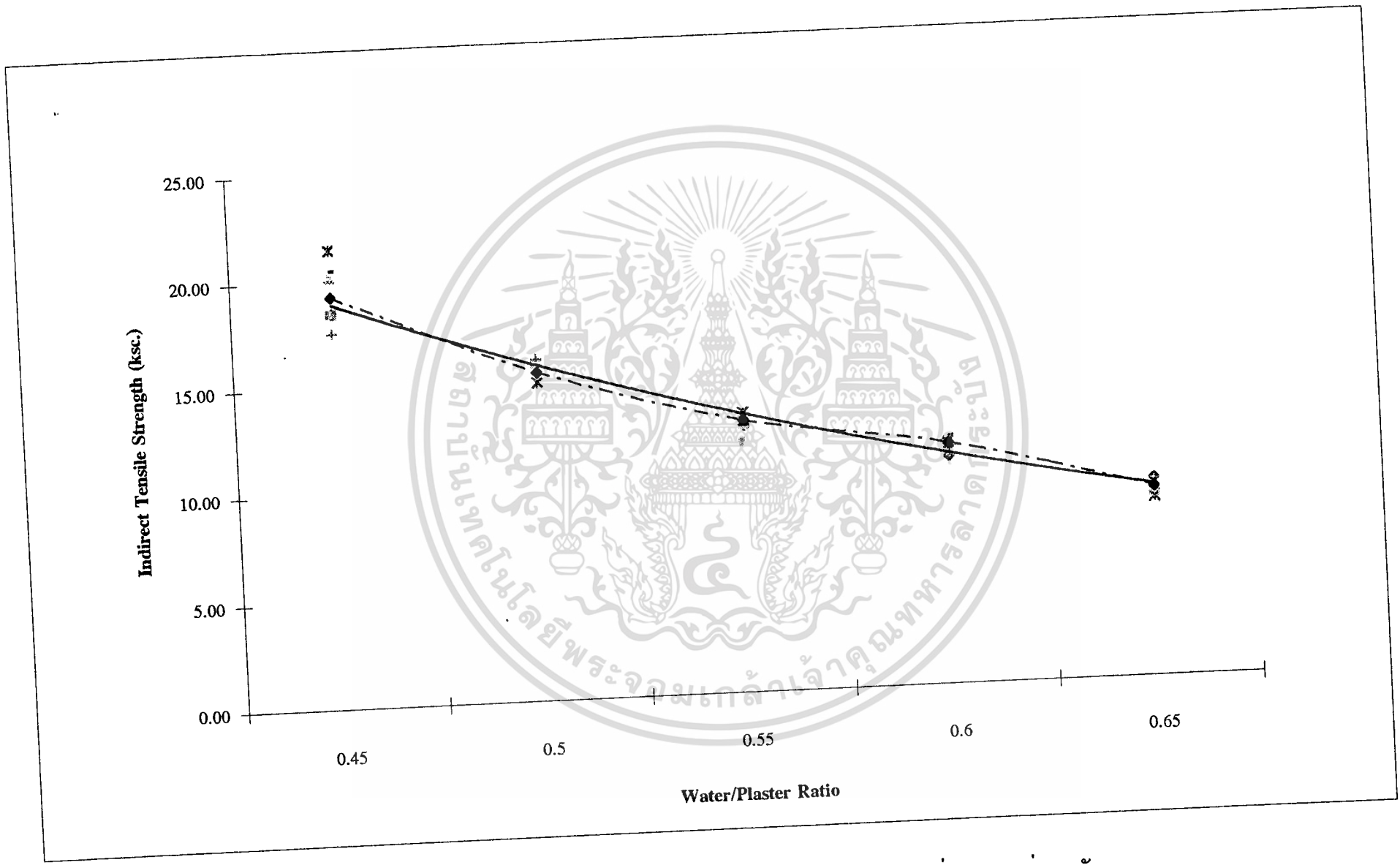
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม ลิขสิทธิ์จะ归于ผู้จัดพิมพ์ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่นำมาไปใช้

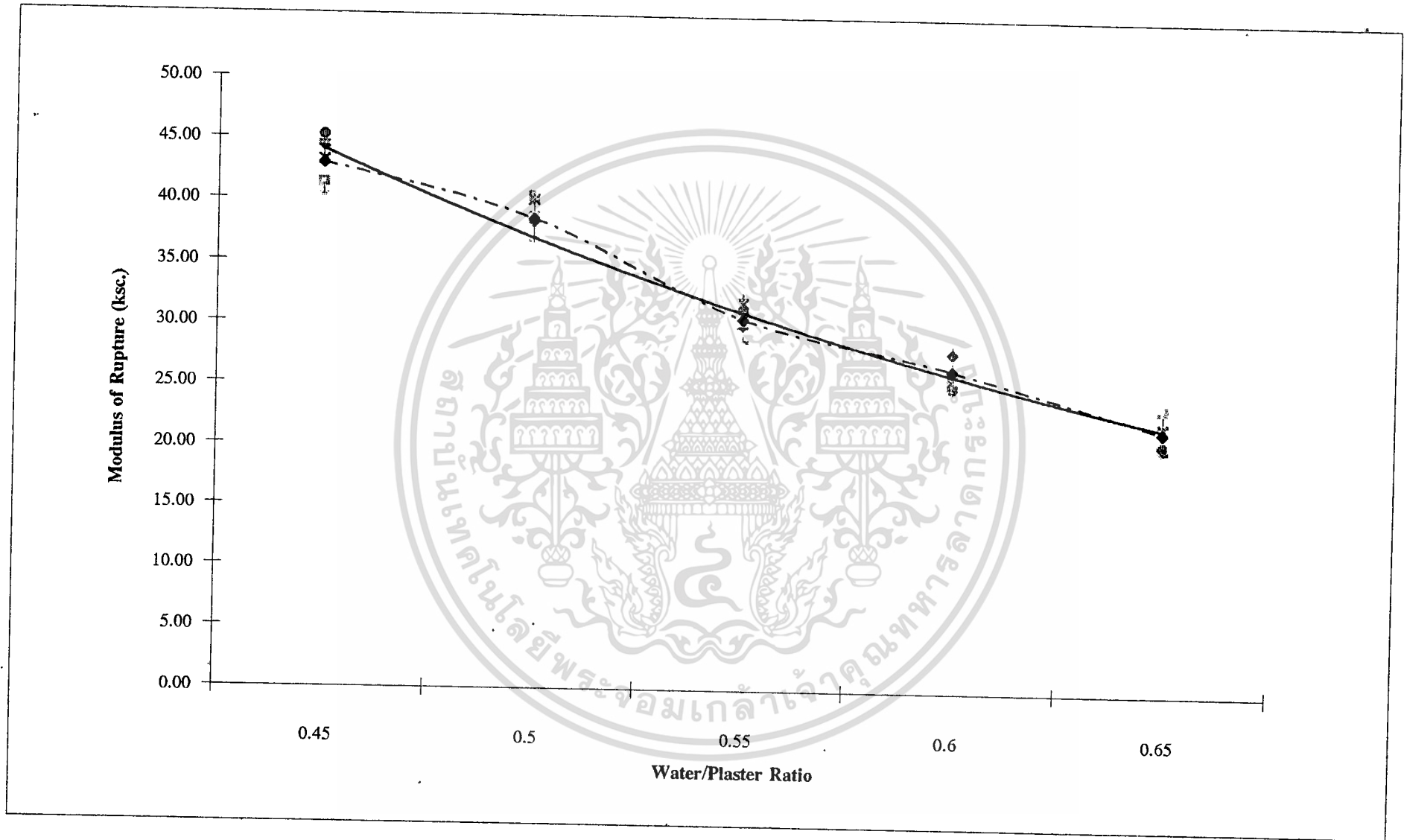
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ $W/P = 0.55$ ที่สถานะแห่งสถิต



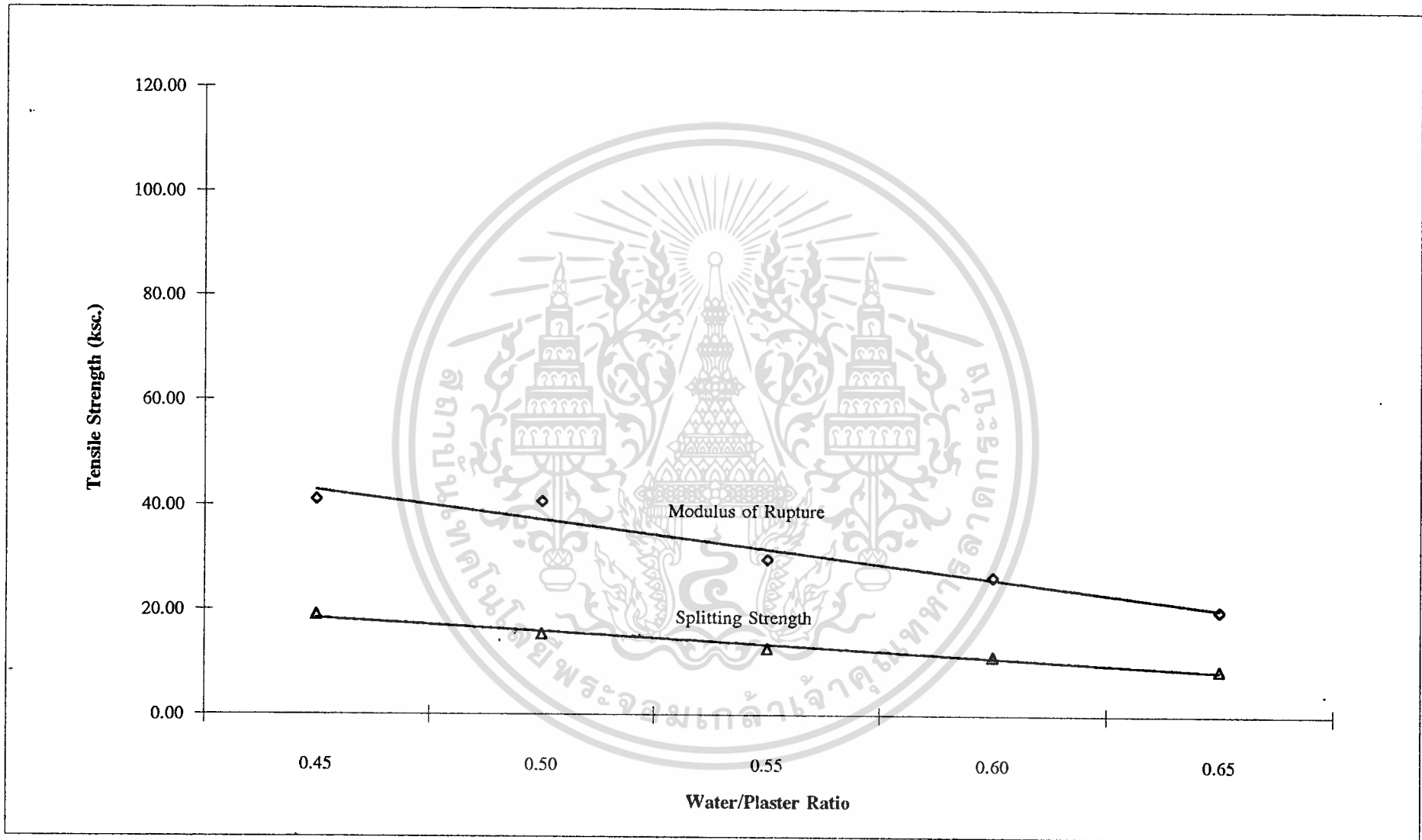
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน



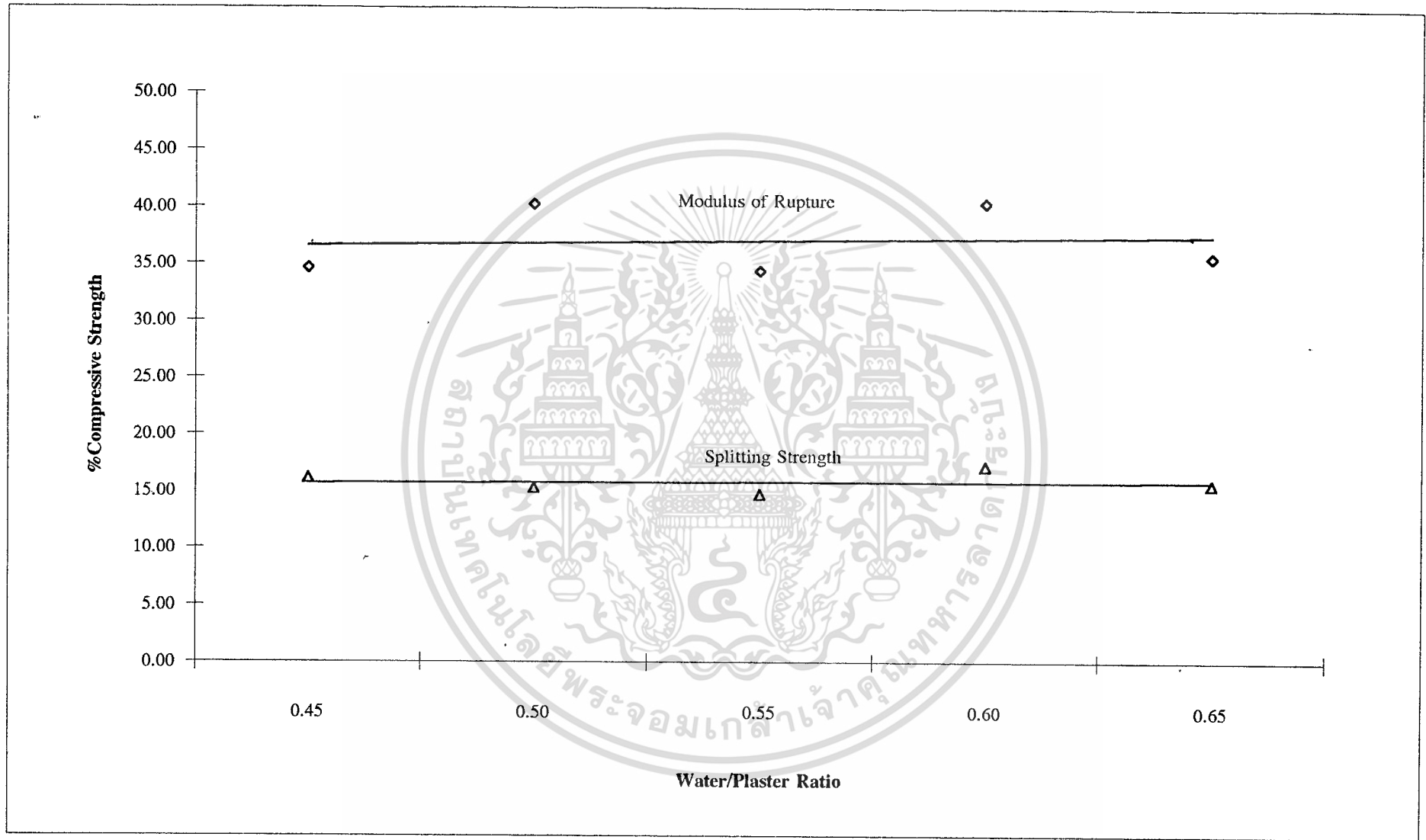
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงแบบ Splitting Test กับอัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน



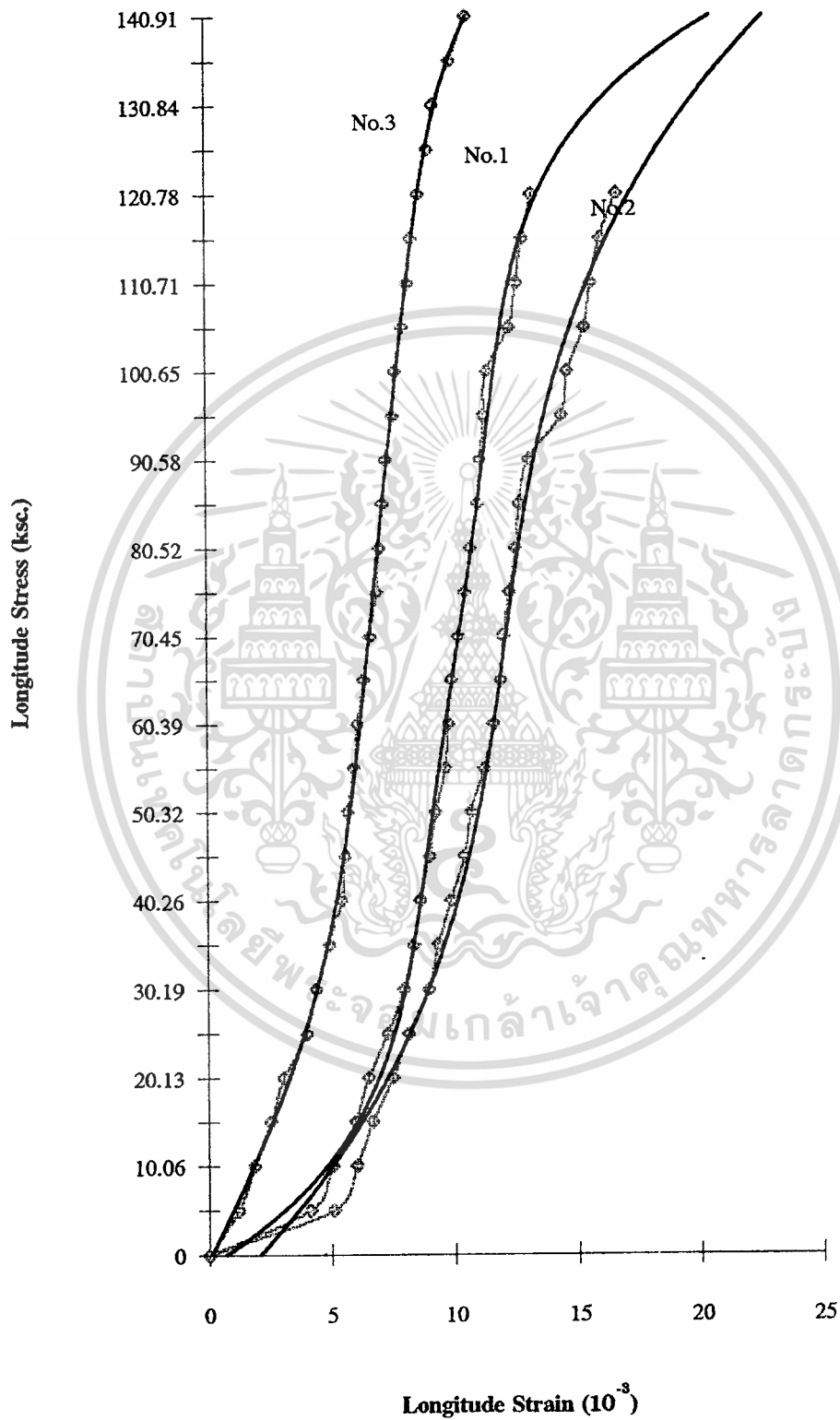
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของ โมดูลัสการแตกร้าวกับอัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงกับอัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน



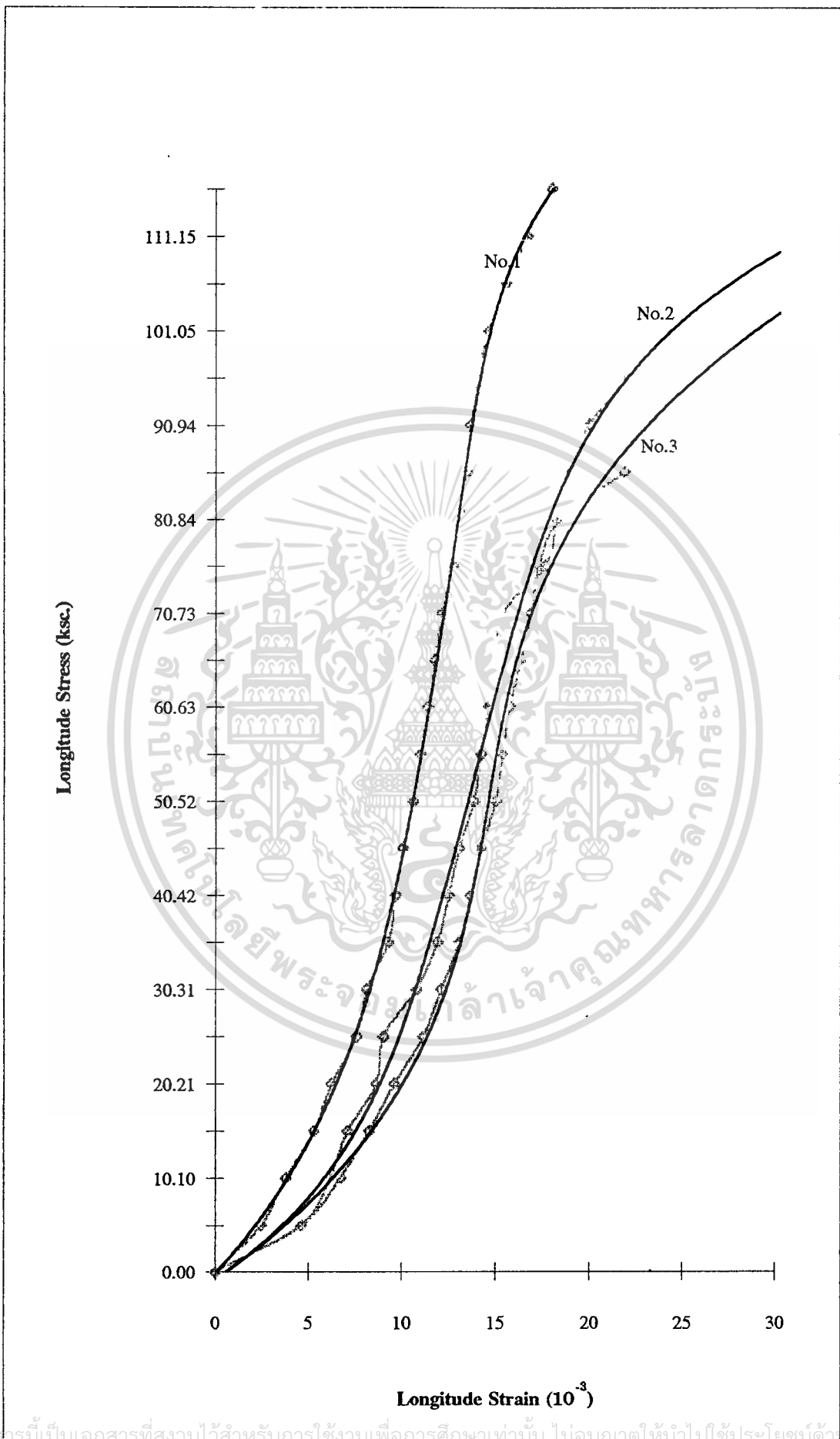
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึงต่อกำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ทั้งห้าฉบับให้ข้อมูลไปเพื่อหา และต่อจากจึงถึงอำนาจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

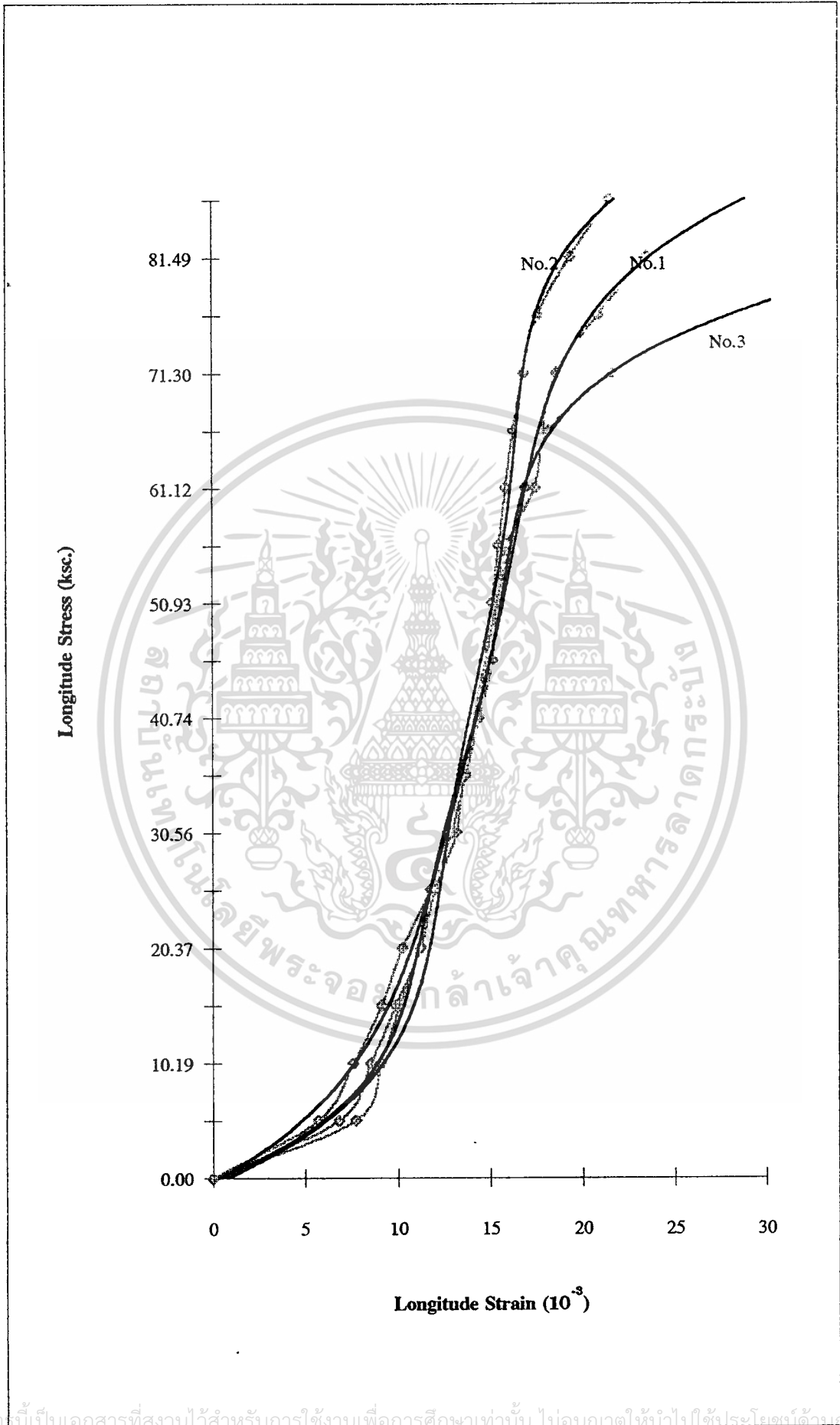
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

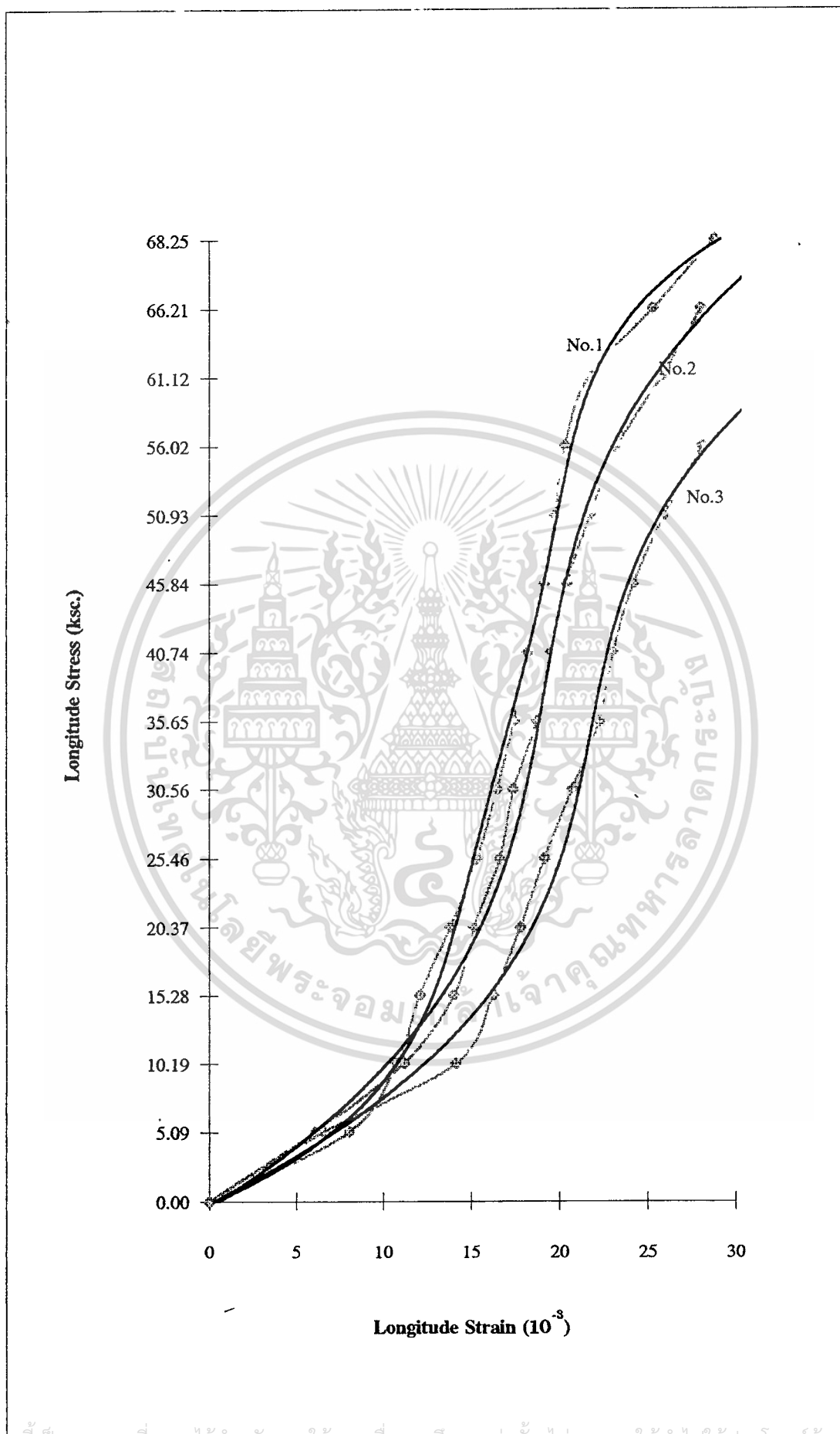
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำขอยกเว้นความรับผิดชอบ และค่าจ้างบริการเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.50



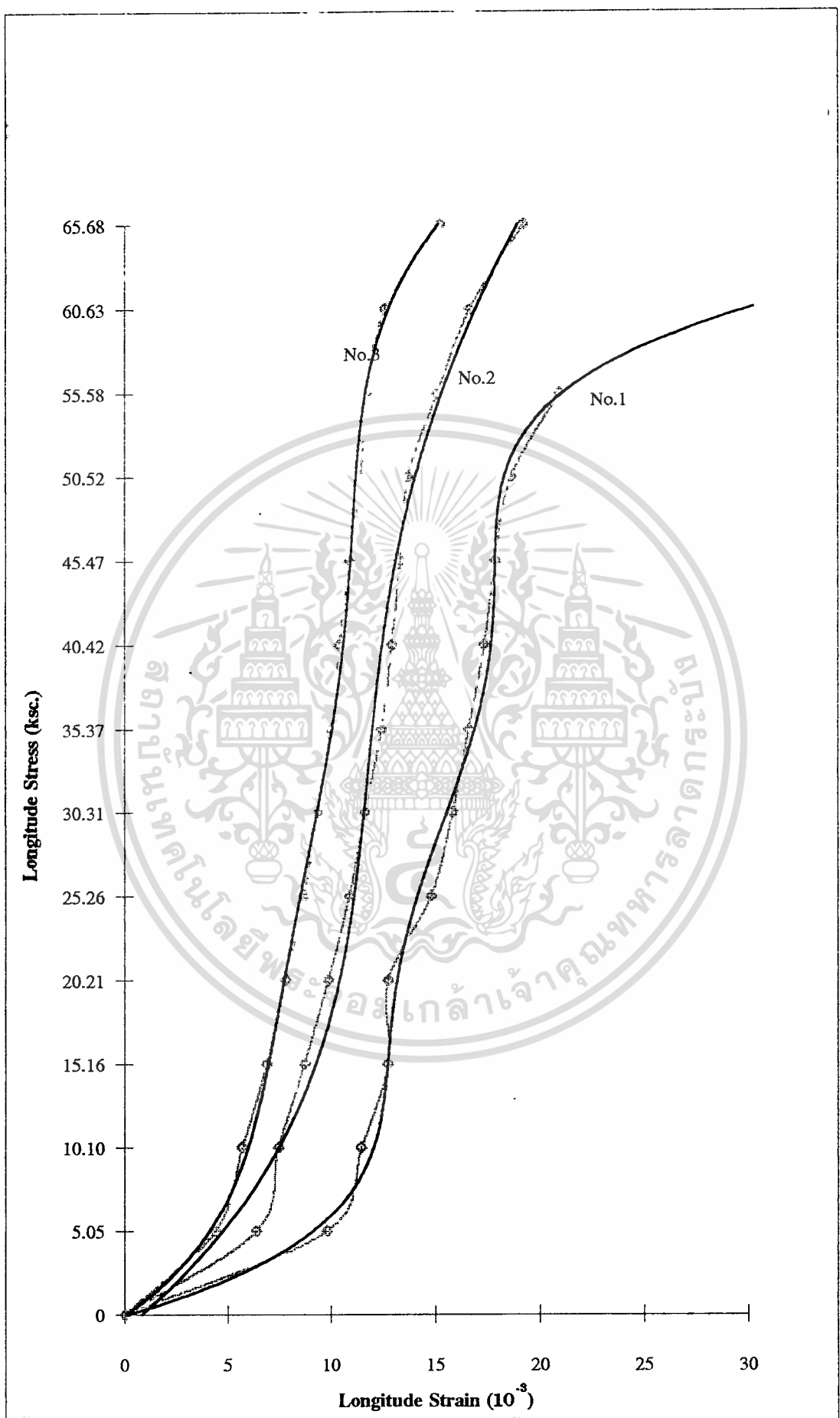
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลืมที่จะหาวิธีให้ข้อมูลอ้างอิง และต้องแจ้งวิธีรับข้อมูลทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55

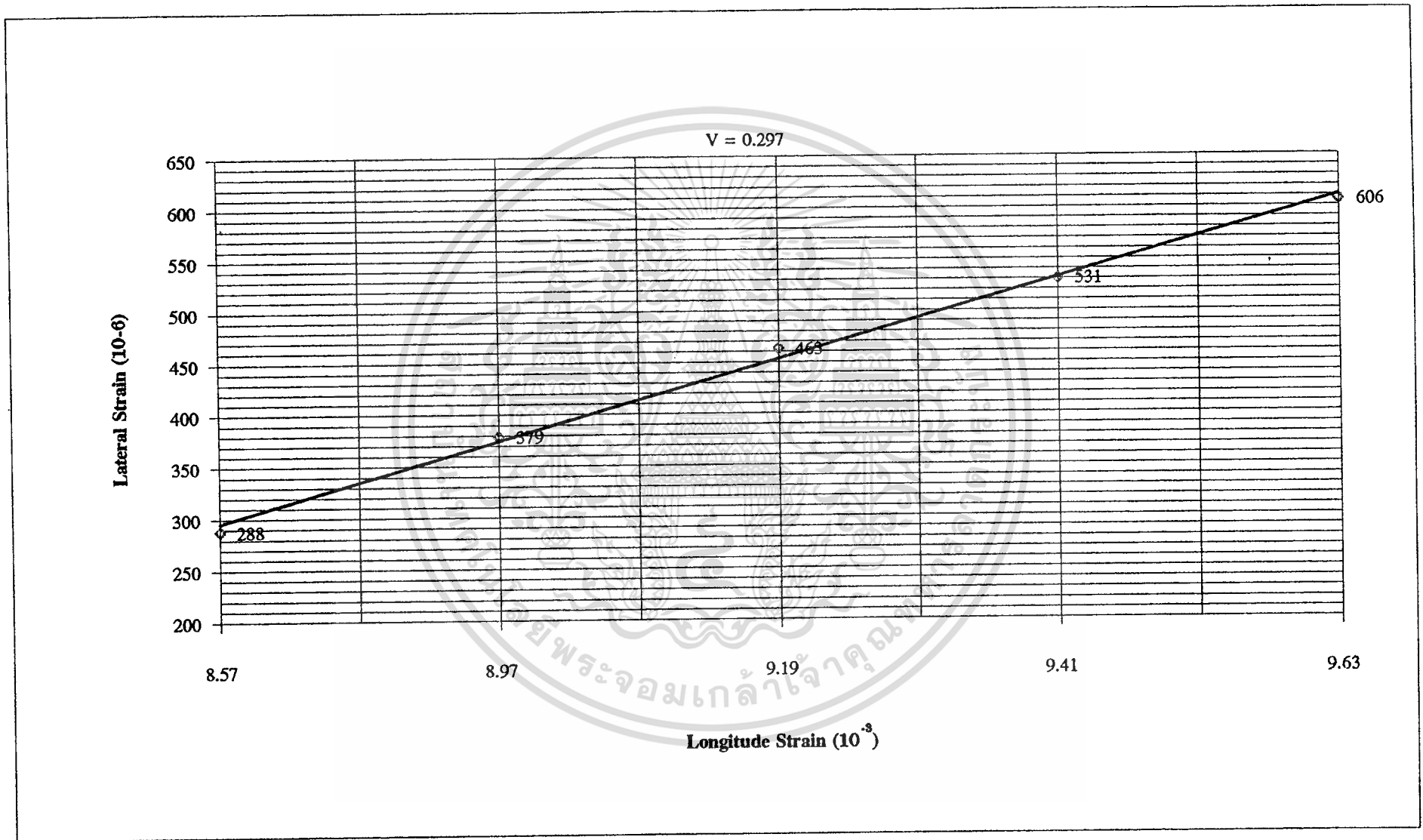


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

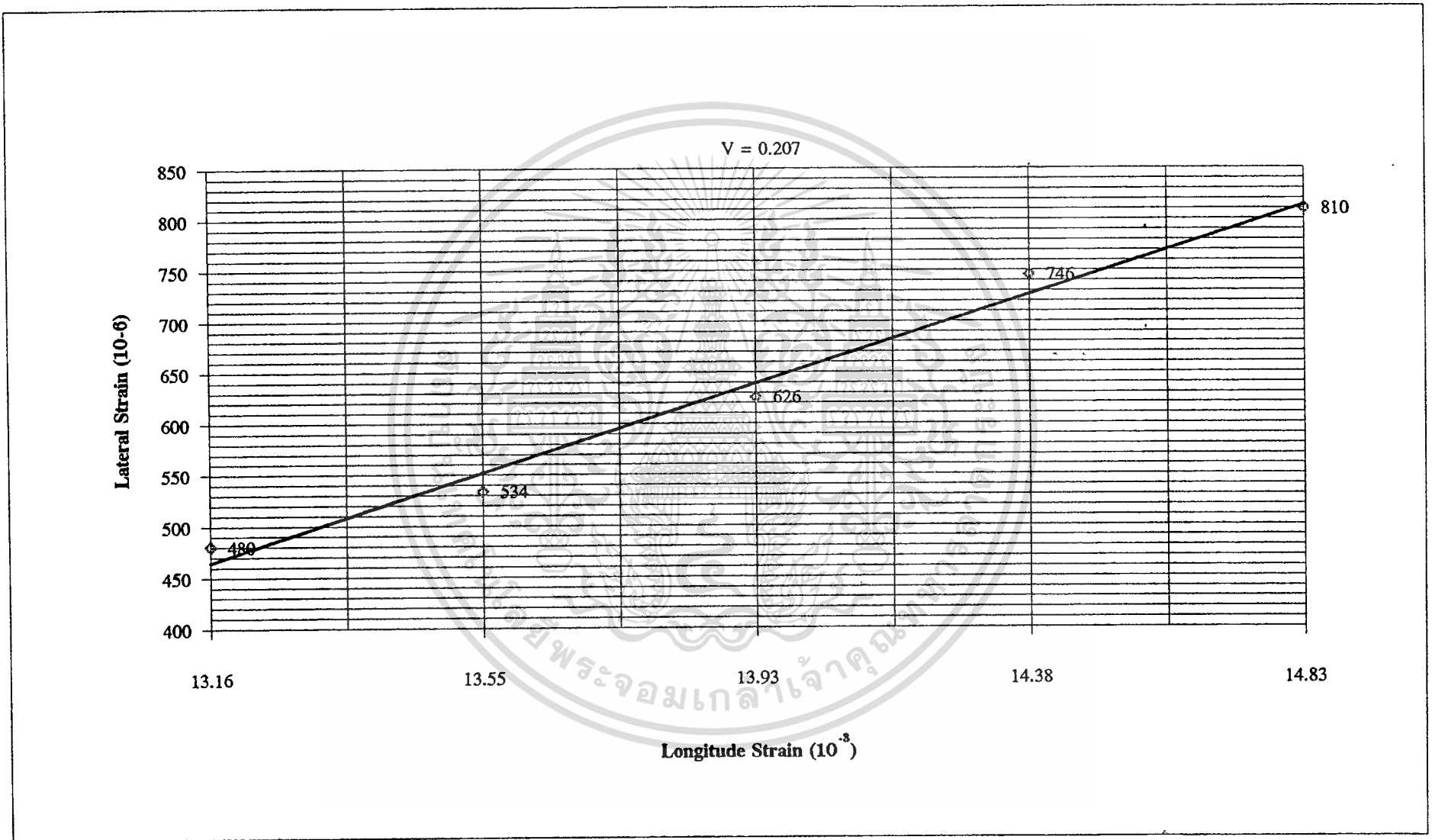
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.60



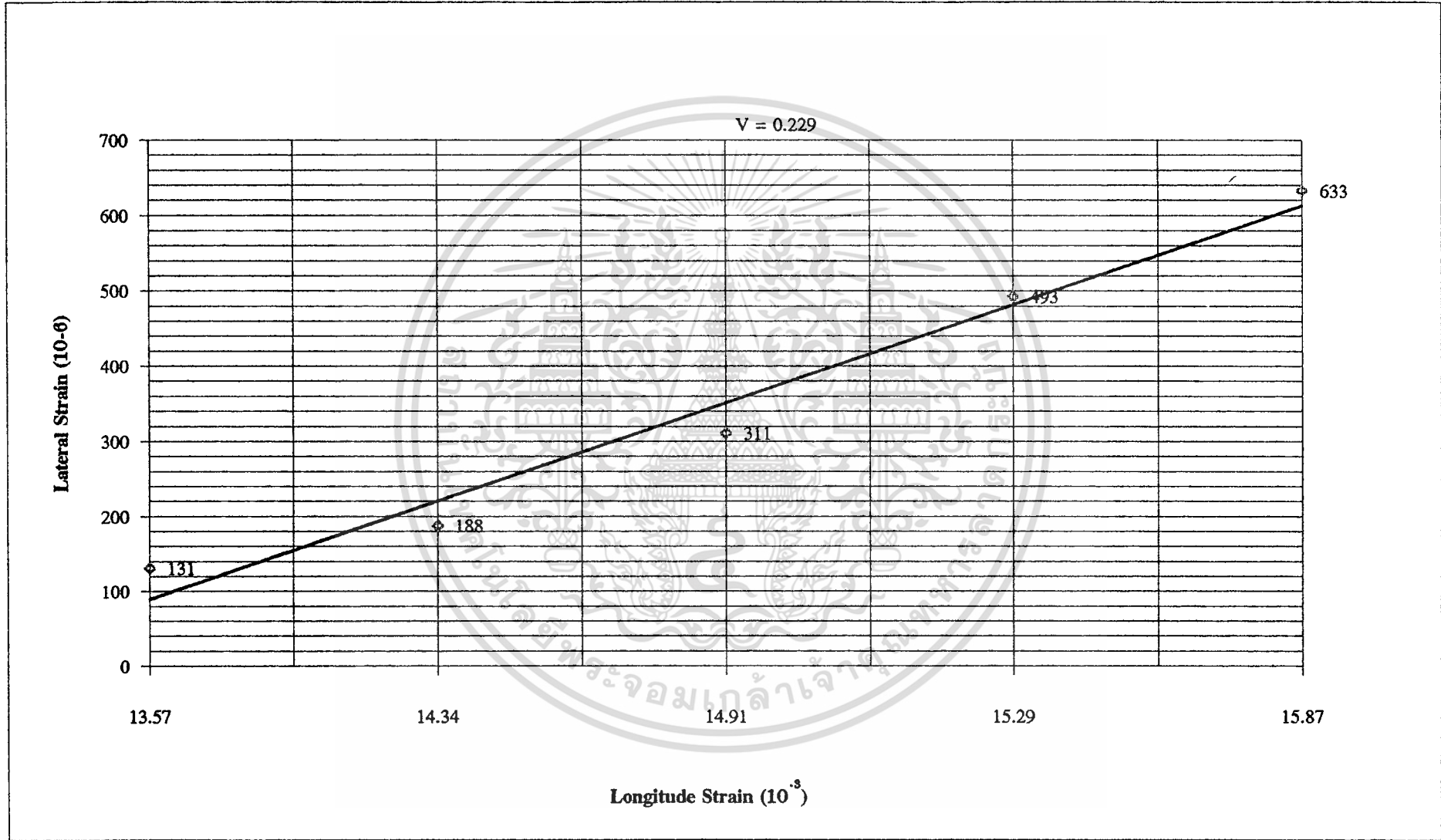
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับกรณีการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.65



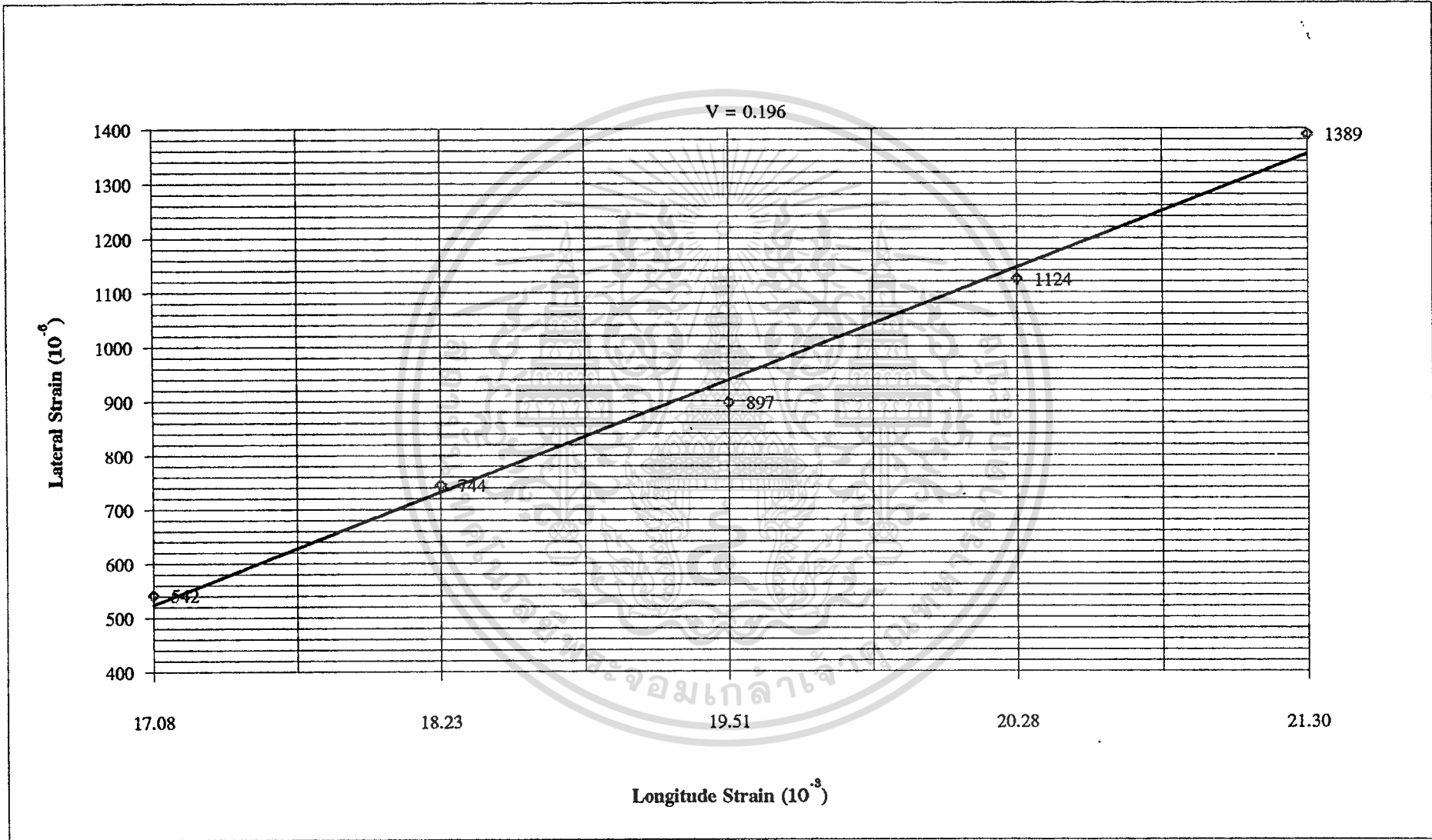
รูปที่ 5.14 Poisson's Ratio ของ Gypsum Plaster ที่ W/P = 0.45



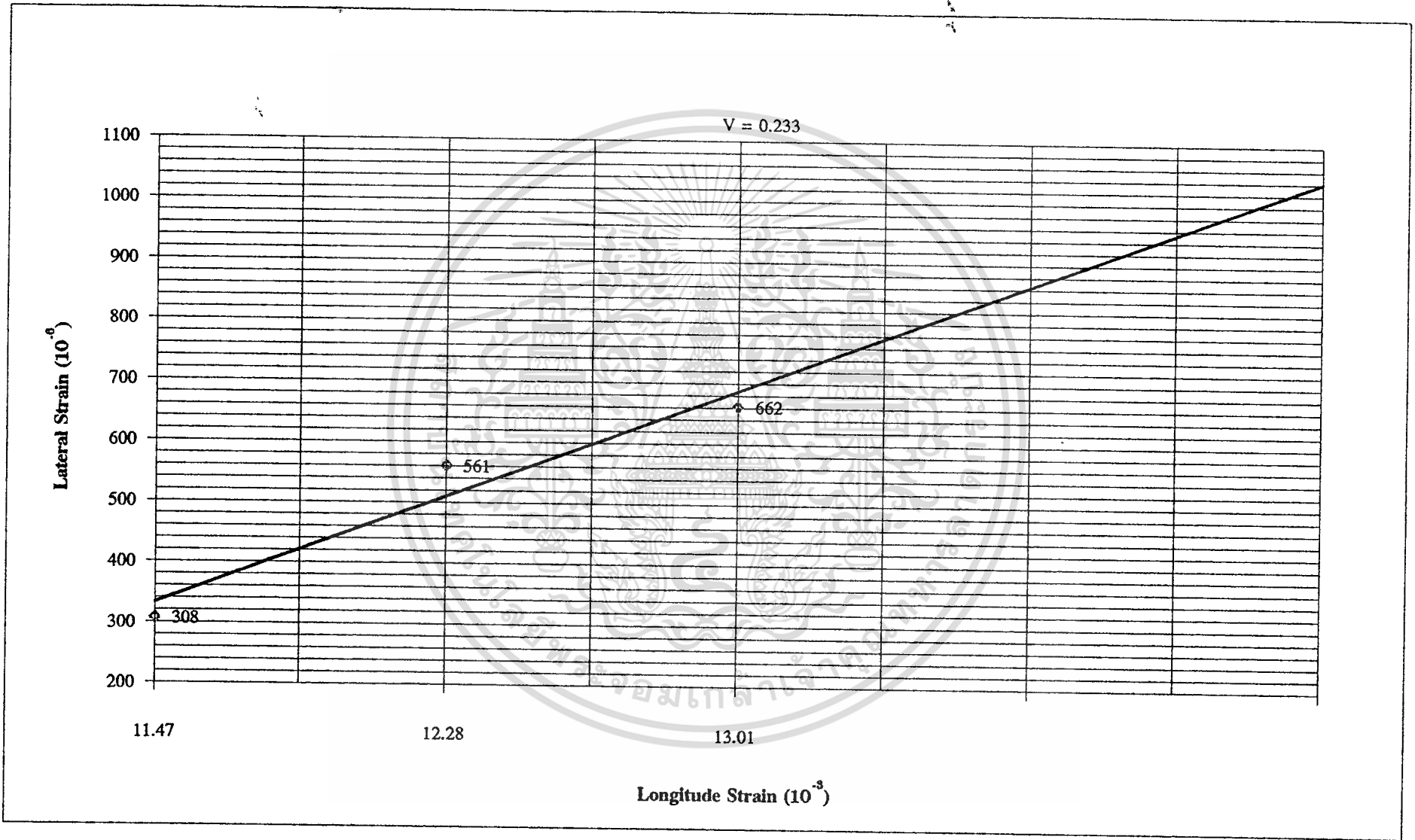
รูปที่ 5.15 Poisson's Ratio ของ Gypsum Plaster ที่ W/P = 0.50



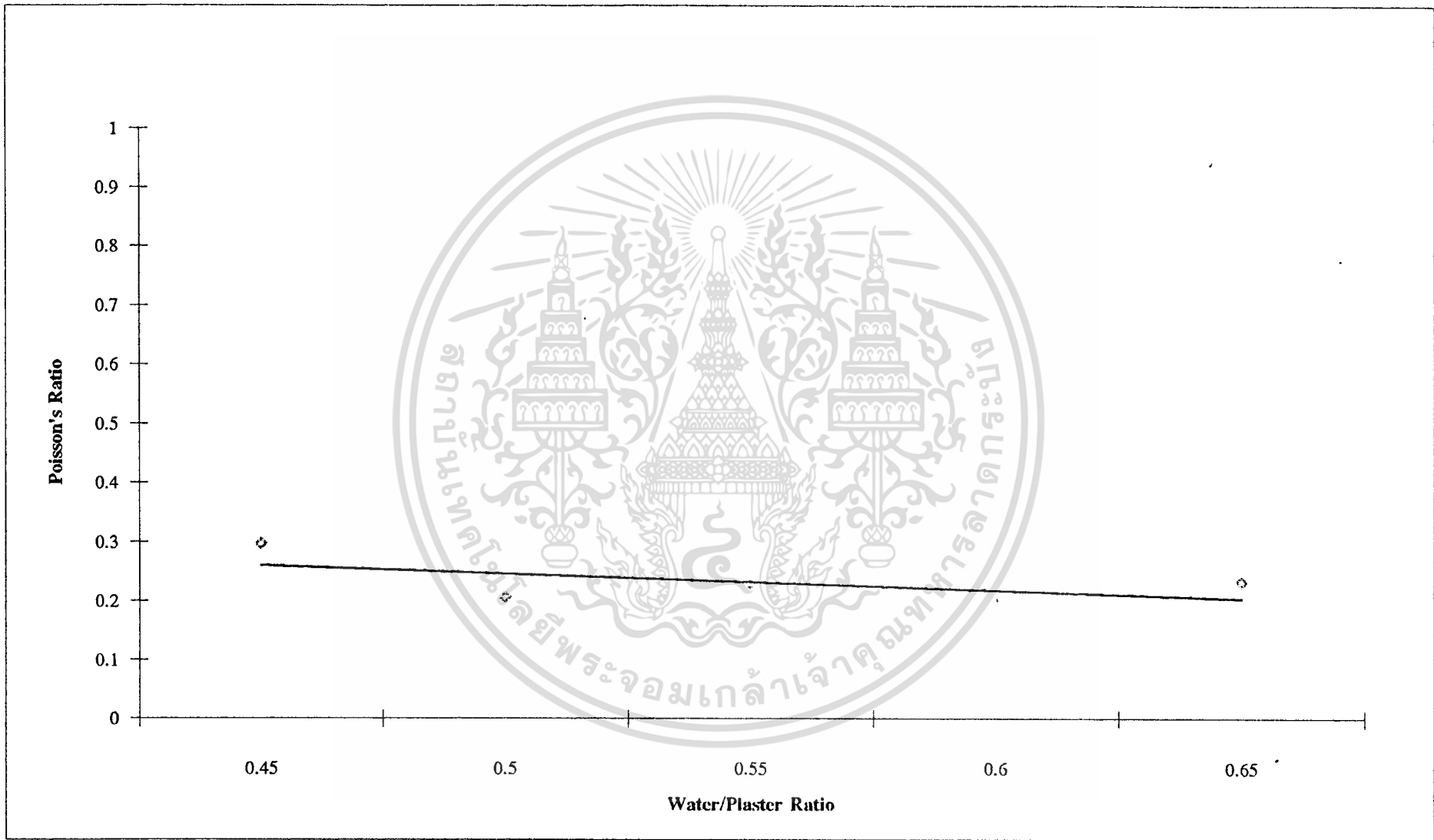
รูปที่ 5.16 Poisson's Ratio ของ Gypsum Plaster ที่ W/P = 0.55



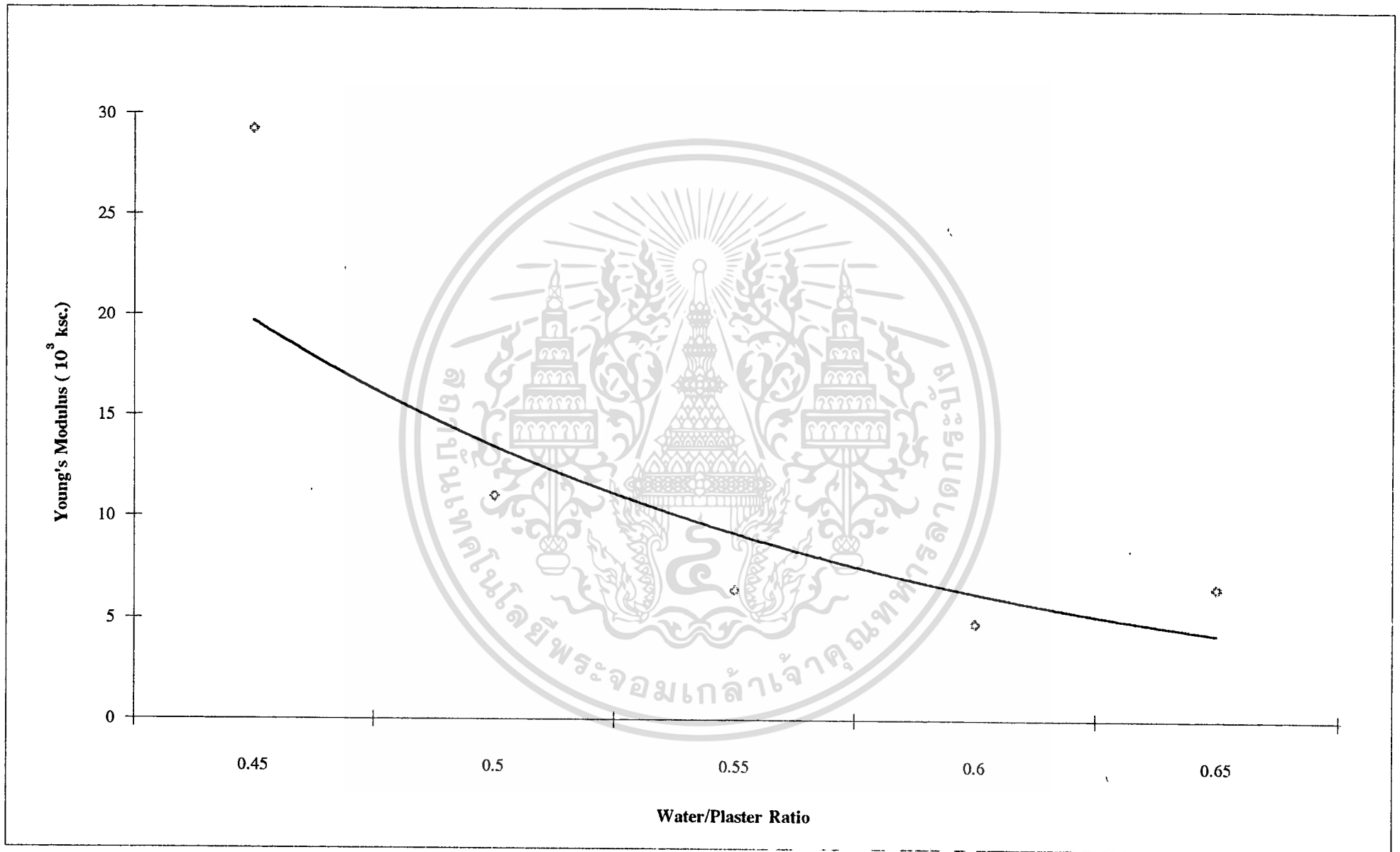
รูปที่ 5.17 Poisson's Ratio ของ Gypsum Plaster ที่ W/P = 0.60



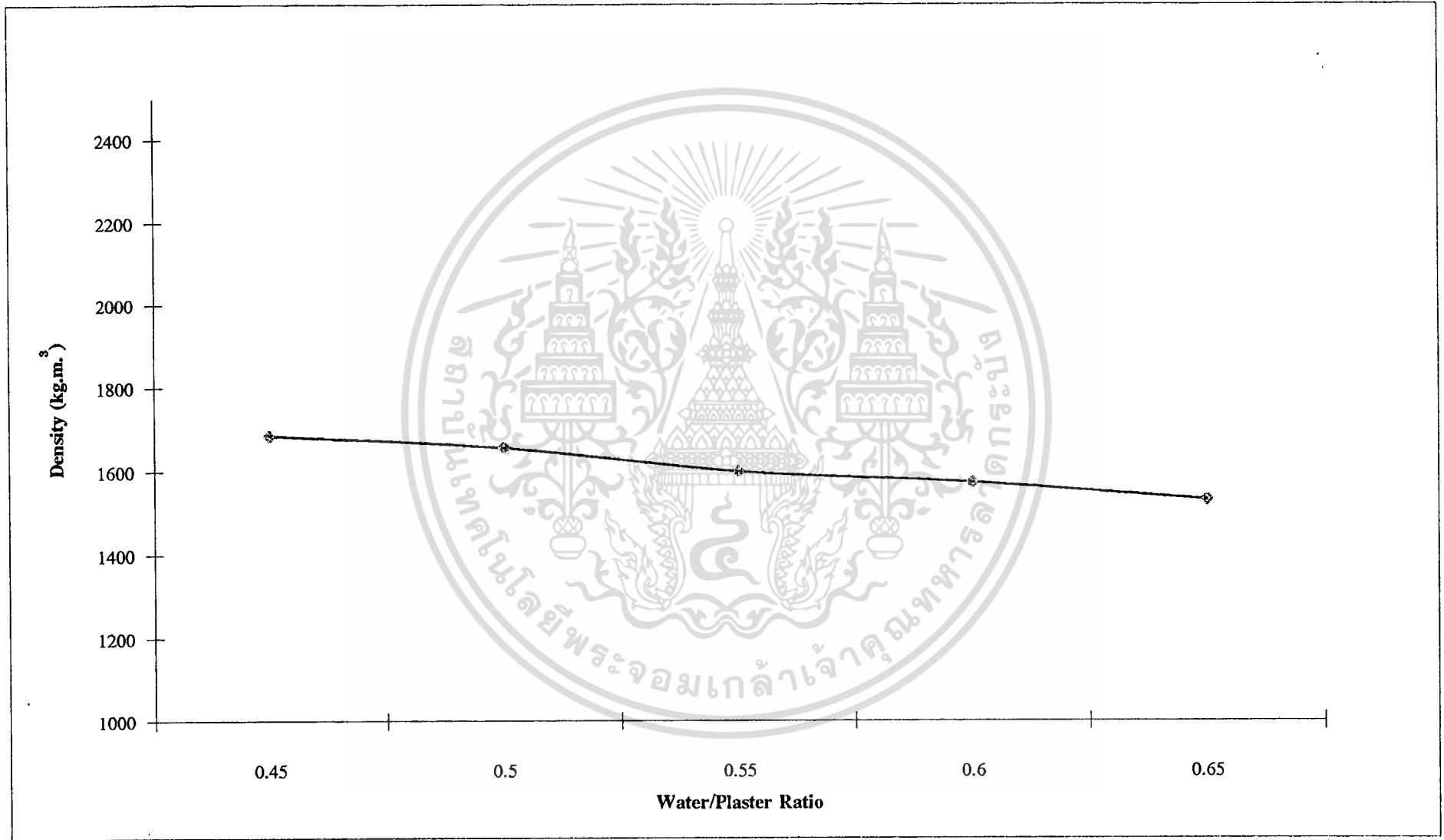
รูปที่ 5.18 Poisson's Ratio ของ Gypsum Plaster ที่ $W/P = 0.65$



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ของ Poisson's Ratio กับ อัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ของ Young's Modulus กับอัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ของ Density กับอัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 การทดสอบคุณสมบัติเฉพาะตัวของยิปซัมปลาสเตอร์

1. จากการทดสอบยิปซัมปลาสเตอร์ที่สภาวะความชื้นแตกต่างกันดังในรูปที่ 5.1 จะพบว่าที่ 24 ชม.แรก หลังจากที่ยิปซัมปลาสเตอร์ก่อตัวจะมีกำลังรับแรงอัดคงที่ หลังจากนั้นกำลังจะเพิ่มขึ้นไม่แน่นอนคาดเดาได้ยากและจะมีกำลังรับแรงอัดคงที่อีกครั้ง เมื่ออยู่ในสภาวะแห้งสนิท(น้ำหนักคงที่)ซึ่งจะมีกำลังที่สูงกว่าช่วงที่อยู่ในสภาวะชื้นที่มีกำลังคงที่

2. จากการทดสอบยิปซัมปลาสเตอร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกราฟ Stress-Strain ที่สภาวะที่มีกำลังคงที่คือ ช่วงชื้น 24 ชม.แรกและช่วงแห้งสนิท จะพบว่า ช่วงชื้นมีลักษณะกราฟ Stress-Strain เบี่ยงเบนเล็กน้อยช่วงที่มี Stress ต่ำๆจากนั้นจะมีลักษณะคล้ายกราฟ Stress-Strain ของคอนกรีตดังในรูปที่ 5.2 ช่วงแห้งสนิทมีลักษณะกราฟ Stress-Strain ที่เป็นเส้นตรงตั้งแต่เริ่มต้น ไปจนถึงจุดพังทลายซึ่งจะมีลักษณะที่เปราะมากดังในรูปที่ 5.3

3. จากลักษณะของกราฟ Stress-Strain ทั้ง 2 แบบ ทำให้พอสรุปได้ว่าที่ ช่วงสภาวะชื้นเหมาะสมที่พิจารณาพฤติกรรมโครงสร้างตั้งแต่เลยช่วงที่เป็นเส้นตรงจนถึงจุดพังทลาย ส่วนช่วงสภาวะแห้งสนิทเหมาะสมที่จะพิจารณาพฤติกรรมโครงสร้างภายในช่วงยืดหยุ่นที่ยังเป็นเส้นตรง

6.1.2 คุณสมบัติทางกลของยิปซัมปลาสเตอร์

คุณสมบัติทางกลสำหรับ Water/Plaster Ratio = 0.45-0.65	Gypsum Plaster	Concrete
Compressive Strength (ksc.)	85	design
% Splitting Tensile Strength/Cube Strength	16 %	10 %
% Modulus of Rupture/Cube Strength	37 %	11 - 23 %
Poisson's Ratio	0.2	0.15 - 0.25
Young's Modulus (10^3 ksc.)	8 - 20	210

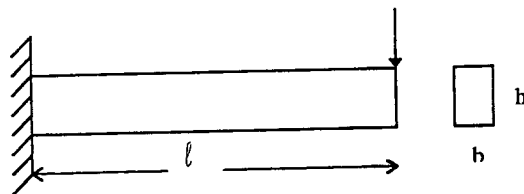
6.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ค่าของ Compressive Strength, Indirect Tensile Strength, Modulus of Rupture ของ Gypsum Plaster จะแปรผกผันกับ Water/Plaster Ratio ส่วนค่า Poisson's Ratio มีค่าประมาณ 0.2 สำหรับทุกๆ Water/Plaster Ratio และค่า Young's Modulus มีค่าประมาณ 8 ถึง 20×10^3 ksc

เนื่องจากค่า Compressive, Modulus of Rupture, Splitting Strength และค่า Poisson's Ratio เป็นคุณสมบัติสำคัญของวัสดุสำหรับ Structural Model Analysis ที่จำเป็นจะต้องมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงจากการทดลองจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทางกลของยิปซัมปลาสเตอร์ที่คล้ายคลึงกับคอนกรีตมากที่สุดคือค่า Poisson's Ratio แสดงให้เห็นว่ายิปซัมปลาสเตอร์ที่นำมาทดสอบมีความเหมาะสมในการทำแบบจำลองนั้นควรนำมาใช้กับพฤติกรรมโครงสร้างที่มี ค่า Poisson's Ratio เป็นเงื่อนไขในการออกแบบและดำเนินการเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง จงหาความสัมพันธ์ของ แรงต่อระยะทรุดตัว (Stiffness) ในคานยื่น กว้าง (b) ลึก (h) ยาว (l) เมื่อมีแรงกระทำเป็นจุดที่ปลายคาน



กำหนด ปริมาณกายภาพ (ตัวแปรในปัญหา) ที่มีความสัมพันธ์ในปัญหาที่พิจารณาดังนี้คือ

	S	l	b	h	E*	v**
F	1	0	0	0	1	0
L	-1	1	1	1	-2	0

*Young's Modulus

**Poisson's Ratio

เราสามารถจัดสมการได้ดังนี้ $F(x) = F(S, l, b, h, E, v) = 0$

พิจารณา มิติ (หน่วยพื้นฐาน) ของปริมาณกายภาพทั้งหมดคือ F และ L จากนั้นก็พิจารณาความสัมพันธ์ดังนี้ (y คือ ตัวแปรเชิงสัมพันธ์ของปริมาณกายภาพ , z คือ ตัวแปรเชิงสัมพันธ์ของกำลังมิติ)

		S	l	b	h	E	v
		y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆
F	z ₁	1	0	0	0	1	0
L	z ₂	-1	1	1	1	-2	0

จัดสมการความสัมพันธ์ในรูปของ y และ z ได้ดังนี้

- y₁ = z₁ - z₂1
- y₂ = z₂2
- y₃ = z₂3
- y₄ = z₂4
- y₅ = z₁ - 2z₂5
- y₆ = 06

พิจารณาเลือกปริมาณกายภาพ n จำนวนซึ่งเท่ากับจำนวนมิติทั้งหมดของปัญหา (2) ซึ่งปริมาณกายภาพที่เลือกนั้นจะต้องมีความสำคัญต่อปัญหาและหนึ่งในปริมาณกายภาพที่เลือกนั้นควรมีมิติครบทุกรูปแบบของมิติในปัญหา โดยตัวอย่างนี้เลือกปริมาณกายภาพ E และ L เพราะมีความสำคัญกับปัญหามากที่สุด ดังนั้นแสดงว่าสมการ 2 และ 5 เป็นสมการหลักแล้วให้สมการที่เหลือจัดรูปใหม่ในลักษณะ $f(y) = 0$ ได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 y_3 - y_2 &= 0 && \dots\dots\dots 7 \\
 y_4 - y_2 &= 0 && \dots\dots\dots 8 \\
 y_6 &= 0 && \dots\dots\dots 9 \\
 y_1 - y_2 - y_5 &= 0 && \dots\dots\dots 11
 \end{aligned}$$

take ln;

$$\begin{aligned}
 \ln(y_3) - \ln(y_2) &= \ln(y_3/y_2) = 0 && \dots\dots\dots 12 \\
 \ln(y_4) - \ln(y_2) &= \ln(y_4/y_2) = 0 && \dots\dots\dots 13 \\
 \ln(y_6) &= 0 && \dots\dots\dots 14 \\
 \ln(y_1) - \ln(y_2) - \ln(y_5) &= \ln(y_1/(y_2*y_5)) = 0 && \dots\dots\dots 15
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 12 - 15 เปลี่ยนตัวแปร y ให้กลับเป็นปริมาณกายภาพซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ $\ln(y) = \ln(\pi) = 0$ โดยที่ค่า π คือความสัมพันธ์ระหว่าง Prototype (โครงสร้างจริง) และ Model (แบบจำลองโครงสร้าง) ซึ่งค่า π จะเรียกว่า Dimensionless Product (ผลคูณไร้มิติ หรือ ไร้นูนูนั่นเอง)

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= b/l && \dots\dots\dots 16 \\
 \pi_2 &= h/l && \dots\dots\dots 17 \\
 \pi_3 &= v && \dots\dots\dots 18 \\
 \pi_4 &= S/EI && \dots\dots\dots 19
 \end{aligned}$$

เนื่องจากค่า π เป็นตัวที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่าง Prototype-Model ตามทฤษฎี Buckingham's π ที่กล่าวไว้ว่า

$$\pi_p = \pi_M \dots\dots\dots 20$$

จะเห็นว่า ปริมาณกายภาพที่กำลังพิจารณา (S) จะปรากฏในค่า π เพียงค่าเดียวซึ่งเรียกสมการนี้ (19) ว่า สมการคาดเดา และสมการที่เหลือทั้งหมด (16 - 18) จะเป็นเงื่อนไขในการออกแบบและดำเนินการ จากสมการที่ 20 มีความหมายว่า ปริมาณ S สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{S_P}{E_P I_P} = \frac{S_M}{E_M I_M}$$

โดยที่มีเงื่อนไขดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 b_P/l_P &= b_M/l_M \\
 h_P/l_P &= h_M/l_M \\
 v_P &= v_M
 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขในแง่วัสดุสำหรับปัญหาข้อนี้มีความสอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทดสอบแต่ไม่ควรลืมว่าในแต่ละปัญหาจะมีความต้องการความคล้ายคลึงของคุณสมบัติวัสดุในการทำ Model แตกต่าง

กัน
ในแง่ปฏิบัติพบว่ามีหลายๆเงื่อนไขที่ไม่สามารถทำได้ในกรณีที่วัสดุในการทำ Model เป็นคนละชนิดกับวัสดุของ Prototype เช่น ในตัวอย่างนี้ สมมติว่า $v_M = 0.87v_p$ การที่จะรู้ว่าวัสดุชนิดนี้เหมาะสมในการทำ Model หรือไม่จะต้องพิจารณา ดังนี้

1. วัดปริมาณ S_M จากการทดสอบโดยให้ Load แก่ Model
2. คำนวณปริมาณ S_M จากสมการทางทฤษฎีโครงสร้างปกติคือ l/EI โดยใช้ค่า l, E, I ของ Model
3. นำค่า S_M จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบความแตกต่างหากมากกว่าค่าที่ยอมให้ก็แสดงว่าวัสดุชนิดนั้นไม่

เหมาะสมในการทดสอบคาบเดาพฤติกรรมของโครงสร้างจริง

โดยปกติค่า error ที่ยอมให้ซึ่งกำหนดโดย ACI Committee 444 คือ 30% หรืออาจน้อยกว่าเพื่อผลการทดสอบที่ถูกต้องมากขึ้นแต่ทั้งนี้ก็ไม่ควรลืมข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่อต้องการความถูกต้องมากขึ้นนั้นย่อมหมายถึงต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลามากขึ้นด้วย

ในกรณีที่วัดค่า S_M จากทั้งสองวิธีแล้วเกิดความแตกต่างอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เราก็สามารถคาดเดาปริมาณ S_p ได้ดังนี้คือ

$$S_p = S_M \cdot \frac{E_{pp}}{E_{Mm}}$$

ค่า S_M ที่แทนในสมการข้างต้นนี้คือค่า S_M ที่ได้จากการทดสอบ Model

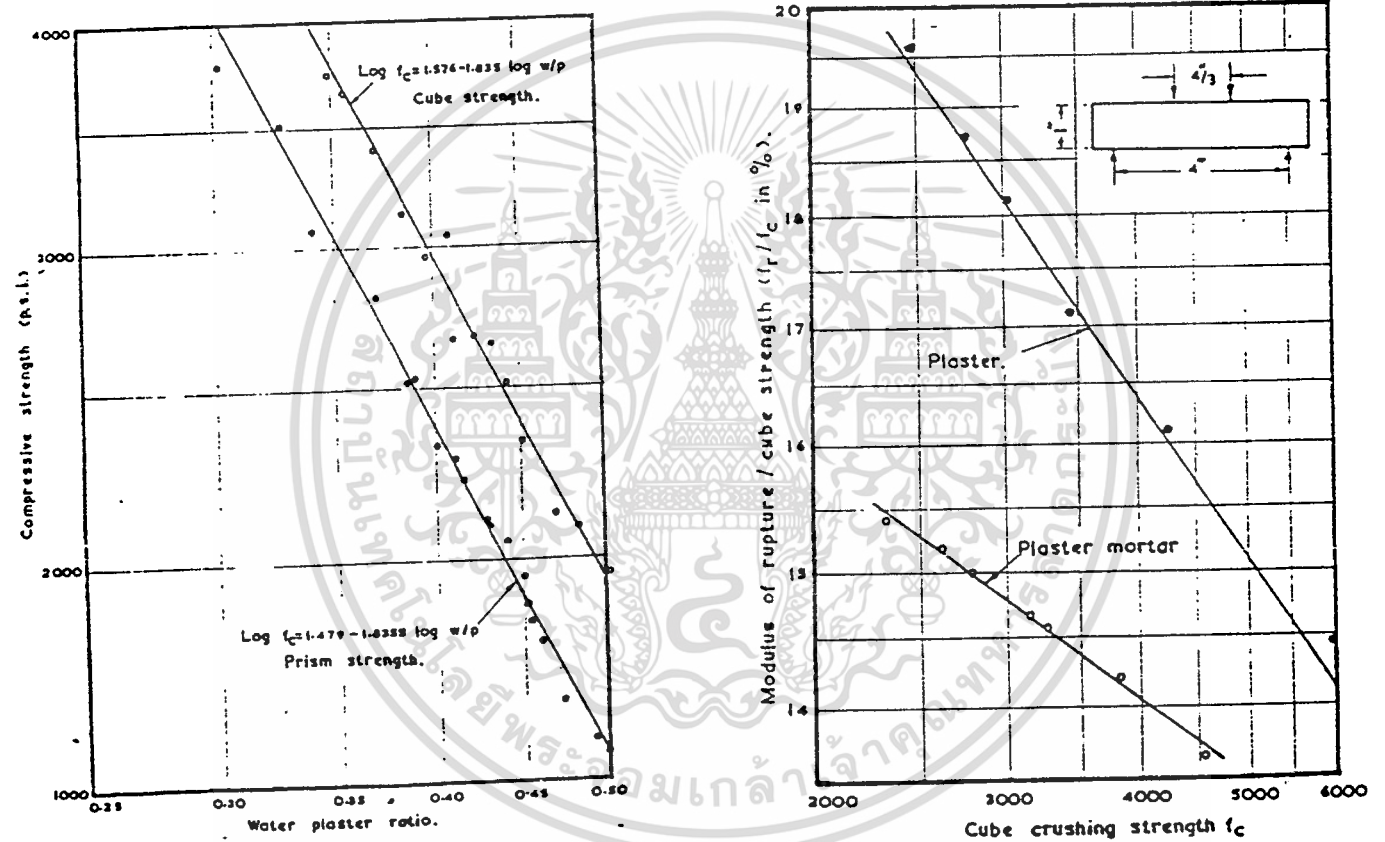
เนื่องจากขาดอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความละเอียดในการวัดปริมาณต่างๆในการทดสอบปัญหาตัวอย่างดังกล่าวจึงไม่สามารถนำเอาวัสดุที่ใช้นี้ในโครงงานมาทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดสอบแบบจำลองกับผลทางทฤษฎีได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

การใช้ Gypsum Plaster ผสมกับน้ำตามปกติ แม้ยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับทำ Model ทดสอบโครงสร้างคอนกรีต แต่จากการศึกษาพบว่าวิธีในการลดค่า Tension ของ Gypsum Plaster ได้โดยการผสมสาร Admixture (เช่น ทราซ) ที่มีคุณสมบัติไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ Gypsum Plaster และน้ำ ซึ่งสาร Admixture นี้ควรกระจายตัวทั่วโครงสร้าง Model โดยหากจุดใดที่โครงสร้างของ Model รับแรงดึง จากเคมีที่มีเพียงโมเลกุลของ Gypsum Plaster ยึดจับกันแน่น เมื่อมีการใส่สารผสมเพิ่มทำให้สารนี้แทรกตัวระหว่างโมเลกุลของ Gypsum Plaster มีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง ซึ่งค่า Tension ของ Model จาก Gypsum Plaster ควรจะลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

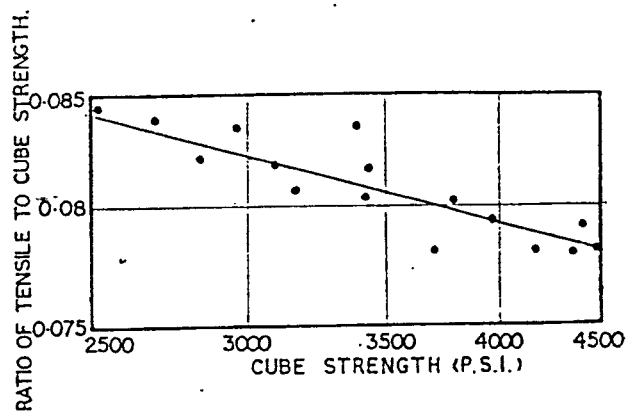
เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านเวลาทำให้คณะผู้ศึกษาไม่อาจศึกษาถึงผลกระทบต่างๆที่เกิดจากการใส่สารผสมเพิ่มได้ แต่จาก B.V. RANGANATHAM, Plaster Mortar for Small Scale Tests , ACI JOURNAL, 1967 ได้แสดงถึง การกระจายส่วนคละที่เหมาะสมของ Aggregate ซึ่งใช้ทำ Model ที่มีส่วนแคบสุดของโครงสร้างไม่เกิน 3 นิ้ว คือใช้ Gypsum Plaster 1 ส่วน ต่อ ทรายซึ่งผ่านตะแกรง No.25 ค้างบนตะแกรง No.36 ในปริมาณ 1 ส่วนเท่ากันโดยน้ำหนัก ส่วนผลจากปริมาณน้ำโดยน้ำหนักที่มีผลต่อกำลังต้านต่างๆได้แสดงดังนี้



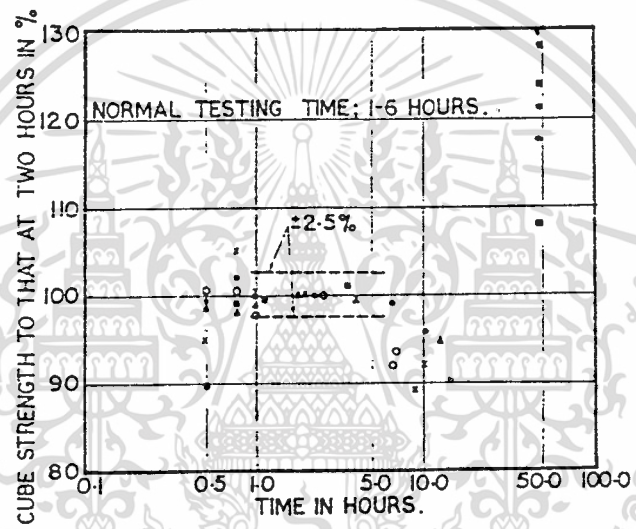
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วน W/P ที่ต่างกันของ Plaster Mortar

รูปที่ 6.2 อัตราส่วน Modulus of Rupture ต่อ Cube Strength เปรียบเทียบระหว่าง Gypsum Plaster กับ Plaster Mortar

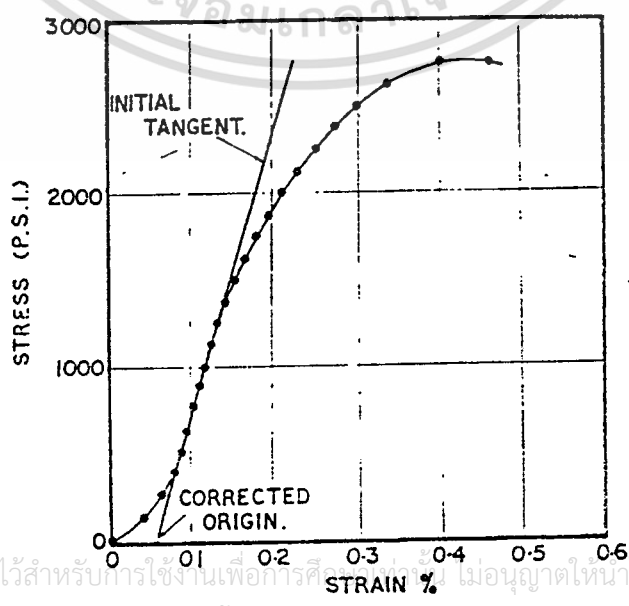
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 อัตราส่วน Tensile Strength กับ Cube Strength ของ Plaster Mortar



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาบ่ม ของ Plaster Mortar



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ Stress-Strain ของ Plaster Mortar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ASTM C 28 - 92 : Standard Specification for Gypsum Plaster
2. ASTM C 472 - 93 : Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum, Gypsum Plaster and Gypsum Concrete
3. ASTM C 59 - 91 : Standard Specification for Gypsum casting and Molding Plaster
4. ASTM C 35 - 89a : Standard Specification for Inorganic Aggregates for Use in Gypsum Plaster
5. ASTM C 78 - 84 : Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete
6. ASTM C 496 - 86 : Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
7. ASTM C 39 - 86 : Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
8. ASTM C 469 - 94 : Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
9. Australian Standard 2592-1983 : Gypsum plaster for Building Purposes
10. Patent Specification : Gypsum Plaster Products, Application No. 34577 / 73, The Patent Office, London
11. VICHA SAPPANUKRAU (1966) : Study of Micro-Concrete for Models, SEATO
12. RANGANATHAM, K. S. SUBBA RAO and A. W. HENDRY : Plaster Mortar for Small Scale Tests, ACI Journal, No.64-52 / September 1967
13. ACI Committee 444 : Models of Concrete Structure State of the Art, Concrete International, No. ACI 444R-79 / January 1979
14. FREDERIC ROLL, M. ASCE : Material for Structural Models, Structural Division, pp. 1353 / June 1968
15. PREECE AND J.D. DAVIES (1964) : Models for Structural Concrete, CR BOOKS LIMITED
16. GAJANAN M. SABNIS, HARRY G. HARRIS, RICHARD N. WHITE and M. SAEED MIRZA (1983) : Structural Modeling and Experimental Techniques, PRENTICE-HALL, INC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองคุณสมบัติยิปซัมพลาสติกอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบหาค่ารับแรงอัดกับระยะเวลาบ่มสำหรับ W/P = 0.55 (ทรงลูกบาศก์ 2")

Curing Time (hr.)	Load (kg.)			Compressive Strength (ksc.)		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
1	2120	2255	2115	84.8	90.2	84.6
2	2290	2180	2095	91.6	87.2	83.8
3	2080	2065	2100	83.2	82.6	84.0
4	2055	2090	2215	82.2	83.6	88.6
5	2265	2105	1995	90.6	84.2	79.8
6	2185	2115	2175	87.4	84.6	87.0
7	2295	2205	2160	91.8	88.2	86.4
8	2305	2055	2205	92.2	82.2	88.2
9	2215	2240	2215	88.6	89.6	88.6
10	2110	2285	2235	84.4	91.4	89.4
11	2080	2305	2175	83.2	92.2	87.0
12	2190	2180	2160	87.6	87.2	86.4
13	2020	2125	2205	80.8	85.0	88.2
14	2060	2155	2305	82.4	86.2	92.2
15	2175	2235	2090	87.0	89.4	83.6
16	2125	2230	2120	85.0	89.2	84.8
17	2065	2150	2115	82.6	86.0	84.6
18	2150	2130	2205	86.0	85.2	88.2
19	2170	2010	2235	86.8	80.4	89.4
20	2095	2105	2115	83.8	84.2	84.6
21	2240	2010	2180	89.6	80.4	87.2
22	2085	2245	2175	83.4	89.8	87.0
23	2045	2235	2215	81.8	89.4	88.6
24	2310	2175	2160	92.4	87.0	86.4
72	2600	2705	3025	104.0	108.2	121.0
120	2755	2750	3225	110.2	110.0	129.0
168	3225	3175	3325	129.0	127.0	133.0
336	3355	3250	3430	134.2	130.0	137.2
504	3600	3425	3610	144.0	137.0	144.4
672	4005	4275	3875	160.2	171.0	155.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55 ที่สถานะชื้น ณ 2 ซม. หลังหล่อ (ทรงกระบอก 2"x4")

Stress-Strain for W/P = 0.55 at Moist State								
No.1			No.2			No.3		
Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)
100	5.03	5.700	100	5.09	7.750	100	5.093	6.833
200	10.06	7.600	200	10.19	9.107	200	10.186	8.542
300	15.10	9.120	300	15.28	10.076	300	15.279	9.870
400	20.13	10.260	400	20.37	11.238	400	20.372	11.199
500	25.16	11.780	500	25.46	12.013	500	25.465	11.769
600	30.19	12.920	600	30.56	13.176	600	30.558	12.718
700	35.23	13.680	700	35.65	13.563	700	35.651	13.477
800	40.26	14.440	800	40.74	14.145	800	40.744	14.426
900	45.29	15.200	900	45.84	14.726	900	45.837	14.806
1000	50.32	15.390	1000	50.93	15.113	1000	50.930	15.375
1100	55.36	16.150	1100	56.02	15.501	1100	56.023	15.945
1200	60.39	16.910	1200	61.12	15.889	1200	61.115	17.463
1300	65.42	17.860	1300	66.21	16.276	1300	66.208	18.222
1400	70.45	18.620	1400	71.30	16.857	1400	71.301	21.639
1500	75.49	20.900	1500	76.39	17.632			

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55 ที่สถานะชื้น ณ 2 ซม. หลังหล่อ (ทรงกระบอก 2"x4") (ต่อ)

Stress-Strain for W/P = 0.55 at Moist State								
No.1			No.2			No.3		
Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)
1580	79.51	23.560	1600	81.49	19.376			
			1700	86.58	21.508			



ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55 ที่สภาวะแห้งสนิท (ทรงกระบอก 2"x4")

Stress-Strain for W/P = 0.55 at Dry Out State								
No.1			No.2			No.3		
Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10^{-3})	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10^{-3})	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10^{-3})
0	0.00	0.000	0	0.00	0.000	0	0.00	0.000
100	5.09	0.270	100	5.09	0.239	100	4.90	0.318
200	10.19	0.540	200	10.19	0.518	200	9.79	0.557
300	15.28	1.130	300	15.28	0.697	300	14.69	0.736
400	20.37	1.720	400	1.00	1.343	400	19.58	1.240
500	25.46	2.309	500	25.46	1.989	500	24.48	1.745
600	30.56	2.899	600	30.56	2.635	600	29.37	2.250
700	35.65	3.489	700	35.65	3.281	700	34.27	2.755
800	40.74	4.079	800	2.00	3.927	800	39.16	3.260
900	45.84	4.668	900	45.84	4.573	900	44.06	3.765
1000	50.93	5.258	1000	50.93	5.219	1000	48.95	4.269
1100	56.02	5.848	1100	56.02	5.865	1100	53.85	4.774
1200	61.12	6.438	1200	3.00	6.511	1200	58.74	5.279
1300	66.21	7.027	1300	66.21	7.157	1300	63.64	5.784
1400	71.30	7.617	1400	71.30	7.803	1400	68.53	6.289

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55 ที่สถานะแห้งสนิท (ทรงกระบอก 2"x4") (ต่อ)

Stress-Strain for W/P = 0.55 at Dry Out State									
No.1			No.2			No.3			
Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10^{-3})	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10^{-3})	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain	Load (kg.)
1500	76.39	8.207	1500	76.39	8.449	1500	73.43	6.794	
1600	81.49	8.797	1600	4.00	9.095	1600	78.32	7.298	
1700	86.58	9.386	1700	86.58	9.741	1700	83.22	7.803	
1800	91.67	9.976	1800	91.67	10.386	1800	88.11	8.308	
1900	96.77	10.566	1900	96.77	11.032	1900	93.01	8.813	
2000	101.86	11.156	2000	5.00	11.678	2000	97.90	9.318	
2100	106.95	11.746	2100	106.95	12.324	2100	102.80	9.823	
2200	112.05	12.335	2200	112.05	12.970	2200	107.69	10.327	
2300	117.14	12.925	2300	117.14	13.616	2300	112.59	10.832	
2400	122.23	13.515	2400	6.00	14.262	2400	117.48	11.337	
2500	127.32	14.105	2500	127.32	14.908	2500	122.38	11.842	
2600	132.42	14.694	2600	132.42	15.554	2600	127.28	12.347	
2700	137.51	15.284	2700	137.51	16.200	2700	132.17	12.852	
2800	142.60	15.874	2800	7.00	16.846	2800	137.07	13.356	
2900	147.70	16.464	2900	147.70	17.492	2900	141.96	13.861	

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55 ที่สถานะแห้งสนิท (ทรงกระบอก 2"x4") (ต่อ)

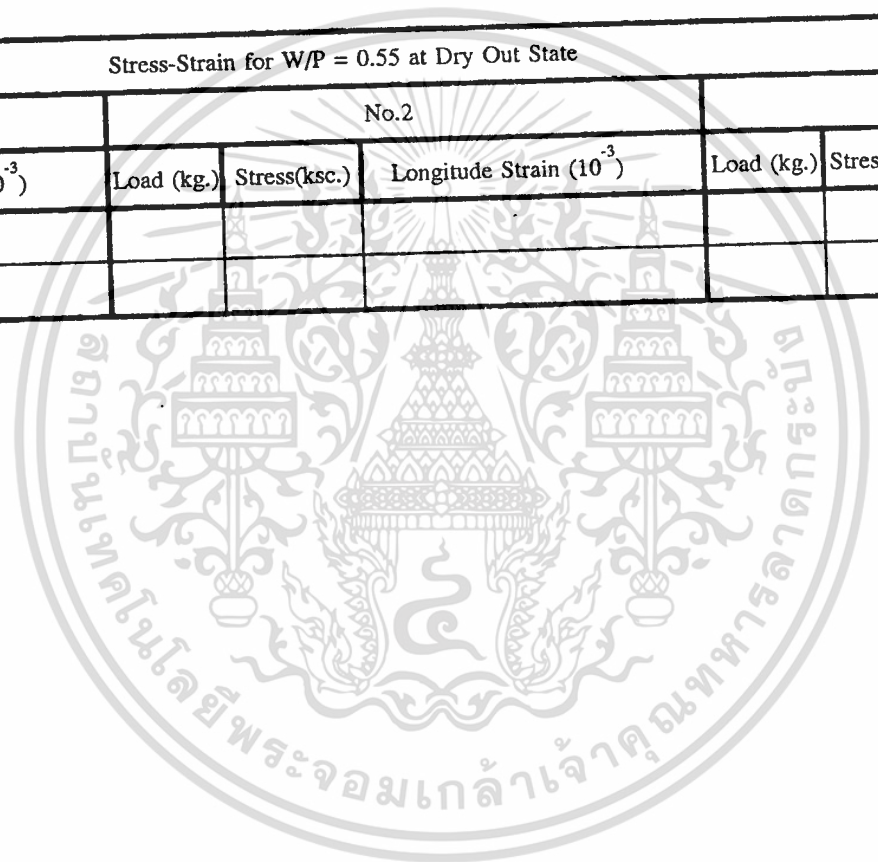
Stress-Strain for W/P = 0.55 at Dry Out State								
No.1			No.2			No.3		
Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10^{-3})	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10^{-3})	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10^{-3})
3000	152.79	17.053	3000	152.79	18.138	3000	146.86	14.366
3100	157.88	17.643	3100	157.88	18.784	3100	151.75	14.871
3200	162.97	18.233	3200	8.00	19.430	3200	156.65	15.376
3300	168.07	18.823	3300	168.07	20.076	3300	161.54	15.881
3400	173.16	19.412	3400	173.16	20.722	3400	166.44	16.386
3500	178.25	20.002	3500	178.25	21.368	3500	171.33	16.890
3600	183.35	20.592	3600	9.00	22.014	3600	176.23	17.395
3700	188.44	21.182	3700	188.44	22.660	3700	181.12	17.900
3800	193.53	21.772	3800	193.53	23.306	3800	186.02	18.405
3900	198.63	22.361	3900	198.63	23.951	3900	190.91	18.910
4000	203.72	22.951	4000	10.00	24.597	4000	195.81	19.415
4100	208.81	23.541	4100	208.81	25.243	4100	200.70	19.919
4200	213.90	24.131	4200	213.90	25.889	4200	205.60	20.424
4300	219.00	24.720	4300	219.00	26.535	4300	210.49	20.929
4400	224.09	25.310	4400	11.00	27.181	4400	215.39	21.434

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55 ที่สถานะแห้งสนิท (ทรงกระบอกล 2"x4") (ต่อ)

Stress-Strain for W/P = 0.55 at Dry Out State								
No.1			No.2			No.3		
Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)
4500	229.18	25.900	4500	229.18	27.827	4500	220.28	21.939
4600	234.28	26.490	4600	234.28	28.473	4600	225.18	22.444
4700	239.37	27.079	4700	239.37	29.119	4700	230.07	22.948
4800	244.46	27.669	4800	12.00	29.765	4750	232.52	23.201
4900	249.55	28.259	4900	249.55	30.411			
5000	254.65	28.849	5000	254.65	31.057			
5100	259.74	29.439	5080	258.72	31.574			
5200	264.83	30.028						
5300	269.93	30.618						
5400	275.02	31.208						
5500	280.11	31.798						
5600	285.21	32.387						
5700	290.30	32.977						
5800	295.39	33.567						
5900	300.48	34.157						

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ Stress-Strain สำหรับ W/P = 0.55 ที่สถานะแห้งสนิท (ทรงกระบอก 2"x4") (ต่อ)

Stress-Strain for W/P = 0.55 at Dry Out State								
No.1			No.2			No.3		
Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Load (kg.)	Stress(ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)
6000	305.58	34.746						
6043	307.77	35.000						



ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน W/P = 0.45 (ทรงลูกบาศก์ 2")

Specimen No.	Weight g.	Ultimate Load kg.	Compressive Strength ksc.	%Error
1	230.00	2955.00	118.20	1.60
2	233.00	3255.00	130.20	11.92
3	236.00	3000.00	120.00	3.15
4	228.00	3060.00	122.40	5.21
5	233.00	2445.00	97.80	15.93
6	233.00	2700.00	108.00	7.16
7	229.00	2805.00	112.20	3.55
8	230.00	2955.00	118.20	1.60
9	231.00	3000.00	120.00	3.15
Average 0.45	231.44	2908.33	116.33	
			Correction = 118.65	

ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน W/P = 0.50 (ทรงลูกบาศก์ 2")

Specimen No.	Weight g.	Ultimate Load kg.	Compressive Strength ksc.	%Error
1	225.00	2505.00	100.20	1.03
2	220.00	2550.00	102.00	0.75
3	224.00	2400.00	96.00	5.18
4	221.00	2655.00	106.20	4.89
5	225.00	2550.00	102.00	0.75
6	223.00	2545.00	101.80	0.55
7	222.00	2400.00	96.00	5.18
8	221.00	2475.00	99.00	2.22
9	221.00	2700.00	108.00	6.67
Average 0.50	222.44	2531.11	101.24	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบหาค่ารับแรงอัดที่อัตราส่วน W/P = 0.55 (ทรงลูกบาศก์ 2")

Specimen No.	Weight g.	Ultimate Load kg.	Compressive Strength ksc.	%Error
1	216.00	2235.00	89.40	5.18
2	215.00	2205.00	88.20	3.76
3	215.00	2250.00	90.00	5.88
4	217.00	2100.00	84.00	1.18
5	214.00	2115.00	84.60	0.47
6	217.00	1800.00	72.00	15.29
7	215.00	2175.00	87.00	2.35
8	215.00	2175.00	87.00	2.35
9	214.00	2070.00	82.80	2.59
Average 0.55	215.33	2125.00	85.00	
			Correction = 86.63	

ตารางที่ ก-7 ผลการทดสอบหาค่ารับแรงอัดที่อัตราส่วน W/P = 0.60 (ทรงลูกบาศก์ 2")

Specimen No.	Weight g.	Ultimate Load kg.	Compressive Strength ksc.	%Error
1	215.00	1425.00	57.00	12.87
2	211.00	1325.00	53.00	18.99
3	208.00	1815.00	72.60	10.97
4	208.00	1500.00	60.00	8.29
5	209.00	1710.00	68.40	4.55
6	210.00	1695.00	67.80	3.63
7	209.00	1680.00	67.20	2.72
8	210.00	1800.00	72.00	10.05
9	207.00	1770.00	70.80	8.22
Average 0.60	209.67	1635.56	65.42	
			Correction = 65.58	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น กรุณาอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-8 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วน W/P = 0.65 (ทรงลูกบาศก์ 2")

Specimen No.	Weight g.	Ultimate Load kg.	Compressive Strength ksc.	%Error
1	202.00	1455.00	58.20	3.31
2	200.00	1500.00	60.00	6.51
3	202.00	1395.00	55.80	0.95
4	205.00	1275.00	51.00	9.47
5	204.00	1350.00	54.00	4.14
6	204.00	1455.00	58.20	3.31
7	204.00	1320.00	52.80	6.27
8	203.00	1500.00	60.00	6.51
9	203.00	1425.00	57.00	1.18
Average 0.65	203.00	1408.33	56.33	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-9 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน W/P = 0.45

(ทรงกระบอก 2"x4")

Specimen No.	Height cm.	Weight g	Diameter cm.	Density g./cm. ³	Ultimate Load kg.	Splitting strength ksc.	%Error
1	10.27	342.00	5.02	1.68	1500.00	18.52	3.22
2	10.35	346.00	5.00	1.70	1500.00	18.45	3.58
3	10.33	343.00	5.00	1.69	1425.00	17.56	8.23
4	10.33	344.00	5.03	1.68	1650.00	20.22	5.63
5	10.17	329.00	5.02	1.63	1725.00	21.51	12.39
6	10.30	344.00	5.01	1.69	1455.00	17.95	6.21
7	10.27	345.00	5.03	1.69	1425.00	17.56	8.24
8	10.21	342.00	5.02	1.69	1650.00	20.49	7.08
9	10.23	344.00	5.00	1.71	1605.00	19.98	4.38
Average 0.45	10.27	342.11	5.01	1.69	1548.33	19.14	

ตารางที่ ก-10 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน W/P = 0.50

(ทรงกระบอก 2"x4")

Specimen No.	Height cm.	Weight g	Diameter cm.	Density g./cm. ³	Ultimate Load kg.	Splitting strength ksc.	%Error
1	10.35	335.00	5.00	1.65	1275.00	15.68	1.35
2	10.32	338.00	4.99	1.67	1275.00	15.76	1.84
3	10.30	334.00	5.02	1.64	1245.00	15.33	0.95
4	10.20	331.00	5.01	1.65	1155.00	14.39	7.03
5	10.24	336.00	5.01	1.66	1200.00	14.89	3.78
6	10.24	335.00	4.99	1.67	1305.00	16.26	5.06
7	10.26	330.00	5.01	1.63	1290.00	15.98	3.23
8	10.28	337.00	4.98	1.68	1260.00	15.67	1.24
9	10.30	336.00	5.02	1.65	1245.00	15.33	0.95
Average 0.50	10.28	334.67	5.00	1.66	1250.00	15.48	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-11 ผลการทดสอบหาค่ารับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน W/P = 0.55

(ทรงกระบอก 2"x4")

Specimen No.	Height cm.	Weight g	Diameter cm.	Density g./cm. ³	Ultimate Load kg.	Splitting strength ksc.	%Error
1	10.24	322.00	5.00	1.60	1005.00	12.50	1.97
2	10.20	320.00	4.96	1.62	930.00	11.70	8.20
3	10.22	323.00	5.03	1.59	1050.00	13.00	2.01
4	10.33	326.00	5.00	1.61	1125.00	13.87	8.78
5	10.20	322.00	5.00	1.61	1050.00	13.11	2.82
6	10.27	321.00	5.01	1.59	1050.00	12.99	1.91
7	10.25	320.00	5.02	1.58	1035.00	12.81	0.45
8	10.24	323.00	5.03	1.59	1005.00	12.42	2.56
9	10.22	324.00	5.00	1.61	990.00	12.33	3.25
Average 0.55	10.24	322.33	5.01	1.60	1026.67	12.75	

ตารางที่ ก-12 ผลการทดสอบหาค่ารับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน W/P = 0.60

(ทรงกระบอก 2"x4")

Specimen No.	Height cm.	Weight g	Diameter cm.	Density g./cm. ³	Ultimate Load kg.	Splitting strength ksc.	%Error
1	10.29	313.00	4.96	1.57	855.00	10.66	5.56
2	10.27	315.00	5.00	1.56	930.00	11.53	2.11
3	10.27	315.00	4.97	1.58	900.00	11.23	0.59
4	10.17	312.00	5.00	1.56	930.00	11.64	3.11
5	10.37	320.00	5.00	1.57	885.00	10.87	3.77
6	10.18	313.00	4.98	1.58	915.00	11.49	1.75
7	10.20	316.00	4.99	1.58	915.00	11.44	1.35
8	10.24	314.00	5.00	1.56	930.00	11.56	2.40
9	10.23	318.00	5.00	1.58	900.00	11.20	0.80
Average 0.60	10.25	315.11	4.99	1.57	906.67	11.29	

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยฯ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-13 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดึงแบบ Splitting ที่อัตราส่วน W/P = 0.65

(ทรงกระบอก 2"x4")

Specimen No.	Height cm.	Weight g	Diameter cm.	Density g./cm. ³	Ultimate Load kg.	Splitting strength ksc.	%Error
1	10.23	317.00	5.04	1.55	750.00	9.26	5.09
2	10.27	312.00	5.11	1.48	705.00	8.55	2.95
3	10.33	315.00	5.05	1.52	825.00	10.07	14.26
4	10.15	308.00	5.09	1.49	675.00	8.32	5.61
5	10.24	313.00	5.02	1.54	675.00	8.36	5.13
6	10.27	315.00	5.00	1.56	675.00	8.37	5.03
7	10.16	316.00	4.98	1.60	735.00	9.25	4.95
8	10.26	315.00	5.10	1.50	705.00	8.58	2.66
9	10.27	311.00	5.00	1.54	690.00	8.55	2.92
Average 0.65	10.24	313.56	5.04	1.53	715.00	8.81	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-14 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.45 (ทรงคาน 2"x2"x12")

Specimen No.	Height cm.	Weight g.	B			B av. cm.	H			H av. cm.	Ult. Load div.	Ult. Load kg.	Modulus of Rupture ksc.	%Error
			No. 1	No. 2	No. 3		No. 1	No. 2	No. 3					
1	30.60	1403.00	5.11	5.15	5.21	5.16	5.17	5.18	5.16	5.17	58.00	199.68	44.33	3.19
2	30.70	1390.00	5.16	5.20	5.22	5.19	5.21	5.20	5.21	5.21	55.00	189.35	41.29	3.89
3	30.80	1403.00	5.22	5.16	5.18	5.19	5.23	5.16	5.23	5.21	56.00	192.79	42.23	1.69
4	30.80	1408.00	5.17	5.16	5.15	5.16	5.24	5.22	5.16	5.21	53.00	182.46	40.18	6.48
5	30.70	1400.00	5.23	5.25	5.18	5.22	5.20	5.17	5.14	5.17	57.00	196.24	43.18	0.51
6	30.70	1394.00	5.12	5.10	5.13	5.12	5.18	5.17	5.22	5.19	59.00	203.12	45.25	5.32
7	30.80	1409.00	5.20	5.20	5.22	5.21	5.26	5.23	5.20	5.23	60.00	206.56	44.67	3.99
8	30.70	1383.00	5.15	5.15	5.17	5.16	5.16	5.15	5.12	5.14	53.00	182.46	41.06	4.41
9	30.70	1394.00	5.16	5.14	5.12	5.14	5.19	5.17	5.18	5.18	58.00	199.68	44.45	3.46
Average 0.45	30.72	1398.22	5.17	5.17	5.18	5.17	5.20	5.18	5.18	5.19	56.56	194.71	42.96	

ตารางที่ ก-15 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.50 (ทรงกาน 2"x2"x12")

Specimen No.	Height cm.	Weight g.	B			B av. cm.	H			H av. cm.	Ult. Load div.	Ult. Load kg.	Modulus of Rupture ksc.	%Error
			No. 1	No. 2	No. 3		No. 1	No. 2	No. 3					
1	30.80	1371.00	5.26	5.25	5.23	5.25	5.13	5.12	5.15	5.13	50.00	172.14	38.35	5.79
2	30.90	1375.00	5.20	5.18	5.19	5.19	5.19	5.25	5.26	5.23	54.00	185.91	40.41	0.72
3	30.90	1430.00	5.27	5.30	5.34	5.30	5.30	5.24	5.15	5.23	62.00	213.45	45.47	11.70
4	30.80	1345.00	5.05	5.05	5.06	5.05	5.11	5.13	5.19	5.14	46.00	158.37	36.49	10.36
5	31.00	1397.00	5.16	5.15	5.16	5.16	5.30	5.26	5.27	5.28	54.00	185.91	40.14	1.39
6	30.90	1406.00	5.26	5.25	5.25	5.25	5.18	5.21	5.22	5.20	60.00	206.56	44.88	10.25
7	30.80	1372.00	5.11	5.20	5.30	5.20	5.16	5.13	5.15	5.15	58.00	199.68	44.62	9.62
8	30.80	1344.00	5.16	5.10	5.16	5.14	5.20	5.18	5.15	5.18	48.00	165.25	36.95	9.22
9	31.00	1386.00	5.22	5.16	5.19	5.19	5.24	5.21	5.25	5.23	52.00	179.02	39.04	4.08
Average 0.50	30.88	1380.67	5.19	5.18	5.21	5.19	5.20	5.19	5.20	5.20	53.78	185.14	40.71	

ตารางที่ ก-16 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.55 (ทรงคาน 2"x2"x12")

Specimen No.	Height cm.	Weight g.	B			B av. cm.	H			H av. cm.	Ult. Load div.	Ult. Load kg.	Modulus of Rupture ksc.	%Error
			No. 1	No. 2	No. 3		No. 1	No. 2	No. 3					
1	30.80	1276.00	5.20	5.20	5.20	5.20	5.23	5.26	5.19	5.23	40.00	137.71	29.86	0.20
2	30.70	1233.00	5.00	5.04	5.06	5.03	5.14	5.13	5.16	5.14	34.00	117.05	26.99	9.43
3	30.70	1287.00	5.17	5.17	5.18	5.17	5.27	5.24	5.21	5.24	41.00	141.15	30.51	2.38
4	30.70	1244.00	5.17	5.22	5.12	5.17	5.08	5.18	5.16	5.14	38.00	130.82	29.40	1.32
5	30.80	1271.00	5.19	5.16	5.18	5.18	5.16	5.07	5.15	5.13	41.00	141.15	31.95	7.24
6	30.80	1295.00	5.15	5.18	5.19	5.17	5.17	5.20	5.20	5.19	41.00	141.15	31.20	4.70
7	30.70	1246.00	5.12	5.14	5.16	5.14	5.04	5.05	5.04	5.04	40.00	137.71	32.34	8.52
8	30.70	1267.00	5.16	5.13	5.10	5.13	5.14	5.15	5.16	5.15	37.00	127.38	28.74	3.54
9	30.70	1282.00	5.21	5.10	5.16	5.16	5.17	5.11	5.13	5.14	35.00	120.50	27.19	8.76
Average 0.55	30.73	1266.78	5.15	5.15	5.15	5.15	5.16	5.15	5.16	5.16	38.56	132.74	29.80	

ตารางที่ ก-17 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.60 (ทรงคาน 2"x2"x12")

Specimen No.	Height cm.	Weight g.	B			B av. cm.	H			H av. cm.	Ult. Load div.	Ult. Load kg.	Modulus of Rupture ksc.	%Error
			No. 1	No. 2	No. 3		No. 1	No. 2	No. 3					
1	30.70	1223.00	5.16	5.12	5.19	5.16	5.11	5.22	5.08	5.14	36.00	123.94	27.96	5.49
2	30.80	1235.00	5.18	5.16	5.15	5.16	5.14	5.19	5.16	5.16	33.00	113.61	25.42	4.11
3	30.70	1241.00	5.20	5.17	5.15	5.17	5.21	5.15	5.18	5.18	35.00	120.50	26.65	0.53
4	30.90	1253.00	5.14	5.10	5.17	5.14	5.10	5.19	5.17	5.15	37.00	127.38	28.85	8.85
5	30.90	1220.00	5.18	5.04	5.14	5.12	5.16	5.16	5.15	5.16	33.00	113.61	25.78	2.73
6	30.80	1252.00	5.14	5.09	5.12	5.12	5.15	5.15	5.12	5.14	32.00	110.17	25.10	5.31
7	30.80	1262.00	5.13	5.14	5.19	5.15	5.21	5.23	5.20	5.21	33.00	113.61	24.98	5.76
8	30.80	1260.00	5.12	5.12	5.16	5.13	5.16	5.15	5.14	5.15	34.00	117.05	26.48	0.11
9	30.80	1240.00	5.19	5.17	5.19	5.18	5.04	5.04	5.05	5.04	34.00	117.05	27.35	3.16
Average 0.60	30.80	1242.89	5.16	5.12	5.16	5.15	5.14	5.16	5.14	5.15	34.11	123.94	26.51	

ตารางที่ ก-18 ผลการทดสอบหาโมดูลัสการแตกร้าวที่อัตราส่วน W/P = 0.65 (ทรงคาน 2"x2"x12")

Specimen No.	Height cm.	Weight g.	B			B av. cm.	H			H av. cm.	Ult. Load div.	Ult. Load kg.	Modulus of Rupture ksc.	%Error
			No. 1	No. 2	No. 3		No. 1	No. 2	No. 3					
1	30.70	1221.00	5.15	5.18	5.17	5.17	5.17	5.20	5.17	5.18	31.00	106.72	23.63	9.06
2	30.70	1220.00	5.11	5.16	5.16	5.14	5.09	5.11	5.13	5.11	30.00	103.28	23.61	8.95
3	30.70	1230.00	5.12	5.13	5.14	5.13	5.14	5.20	5.16	5.17	27.00	92.95	20.84	3.84
4	30.60	1225.00	5.18	5.15	5.17	5.17	5.16	5.16	5.15	5.16	26.00	89.51	19.94	8.00
5	30.60	1218.00	5.18	5.15	5.16	5.16	5.18	5.16	5.17	5.17	29.00	99.84	22.14	2.15
6	30.60	1227.00	5.10	5.13	5.21	5.15	5.07	5.08	5.08	5.08	26.00	89.51	20.65	4.71
7	30.70	1237.00	5.18	5.18	5.20	5.19	5.13	5.16	5.13	5.14	29.00	99.84	22.37	3.22
8	30.70	1238.00	5.18	5.14	5.20	5.17	5.26	5.24	5.22	5.24	27.00	92.95	20.09	7.29
9	30.60	1248.00	5.25	5.26	5.26	5.26	5.15	5.10	5.25	5.17	29.00	99.84	21.77	0.47
Average 0.65	30.66	1229.33	5.16	5.16	5.19	5.17	5.15	5.16	5.16	5.16	28.22	106.72	21.67	

W/P=0.45	No.1	No.2	No.3
dia. (mm.)	50.10	50.00	50.30
height (mm.)	103.20	102.40	102.90
area (cm. ²)	19.71	19.63	19.87

ตารางที่ ก-19 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.45 (ทรงกระบอก 2x4")

Stress-Strain & Poisson's Ratio											
No.1				No.2				No.3			
Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)
100	5.07	4.112	13	100	5.09	5.080	25	100	5.03	1.197	19
200	10.15	5.041	42	200	10.19	6.016	64	200	10.06	1.863	58
300	15.22	5.969	95	300	15.28	6.685	120	300	15.10	2.528	116
400	20.29	6.500	165	400	20.37	7.487	224	400	20.13	3.060	218
500	25.36	7.296	272	500	25.46	8.155	300	500	25.16	3.991	292
600	30.44	7.959	400	600	30.56	8.957	385	600	30.19	4.390	352
700	35.51	8.357	480	700	35.65	9.358	496	700	35.23	4.923	413
800	40.58	8.623	550	800	40.74	9.893	575	800	40.26	5.455	468
900	45.65	9.021	595	900	45.84	10.428	622	900	45.29	5.588	601
1000	50.73	9.286	660	1000	50.93	10.695	690	1000	50.32	5.721	682
1100	55.80	9.684	748	1100	56.02	11.230	720	1100	55.36	5.987	740
1200	60.87	9.816	803	1200	61.12	11.631	795	1200	60.39	6.120	805
1300	65.94	9.949	848	1300	66.21	11.899	840	1300	65.42	6.386	876
1400	71.02	10.214	893	1400	71.30	12.032	932	1400	70.45	6.652	960
1500	76.09	10.480	938	1500	76.39	12.300	1120	1500	75.49	6.918	1090
1600	81.16	10.745	980	1600	81.49	12.567	1284	1600	80.52	7.051	1168
1700	86.24	11.010	1094	1700	86.58	12.701	1445	1700	85.55	7.184	1332

W/P=0.45	No.1	No.2	No.3
dia. (mm.)	50.10	50.00	50.30
hight (mm.)	103.20	102.40	102.90
area (cm. ²)	19.71	19.63	19.87

ตารางที่ ก-19 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.45 (ทรงกระบอก 2:x4") (ต่อ)

Stress-Strain & Poisson's Ratio											
No.1				No.2				No.3			
Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)
1800	91.31	11.143	1255	1800	91.67	13.102	1597	1800	90.58	7.317	1455
1900	96.38	11.276	1297	1900	96.77	14.439	1663	1900	95.62	7.583	1504
2000	101.45	11.408	1416	2000	101.86	14.706	1774	2000	100.65	7.716	1591
2100	106.53	12.337	1507	2100	106.95	15.375	1803	2100	105.68	7.983	1662
2200	111.60	12.602	1667	2200	112.05	15.642	1947	2200	110.71	8.249	1768
2300	116.67	12.868	1867	2300	117.14	16.043	2087	2300	115.74	8.382	1833
2400	121.74	13.266	1946	2400	122.23	16.711	2198	2400	120.78	8.648	1922

W/P=0.50	No.1	No.2	No.3
dia. (mm.)	50.20	50.00	49.90
hight (mm.)	103.10	101.70	101.70
area (cm. ²)	19.79	19.63	19.56

ตารางที่ ก-20 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.50 (ทรงกระบอก 2:x4")

Stress-Strain & Poisson's Ratio											
No.1				No.2				No.3			
Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)
100	5.05	2.468	34	100	5.09	4.618	22	100	5.11	4.618	28
200	10.10	3.796	72	200	10.19	6.158	65	200	10.23	6.735	75
300	15.16	5.315	146	300	15.28	7.120	161	300	15.34	8.274	152
400	20.21	6.264	320	400	20.37	8.659	290	400	20.45	9.621	350
500	25.26	7.593	445	500	25.46	9.044	495	500	25.57	11.161	500
600	30.31	8.162	512	600	30.56	10.776	550	600	30.68	12.123	540
700	35.37	9.301	595	700	35.65	11.931	645	700	35.79	13.085	638
800	40.42	9.681	730	800	40.74	12.508	792	800	40.91	13.662	716
900	45.47	10.060	775	900	45.84	13.085	845	900	46.02	14.240	810
1000	50.52	10.630	800	1000	50.93	13.855	898	1000	51.13	15.009	935
1100	55.58	11.009	845	1100	56.02	14.240	910	1100	56.25	15.394	990
1200	60.63	11.389	889	1200	61.12	14.625	980	1200	61.36	15.779	1180
1300	65.68	11.769	922	1300	66.21	15.009	1142	1300	66.47	16.356	1285
1400	70.73	12.148	968	1400	71.30	15.394	1212	1400	71.59	16.934	1410
1500	75.79	12.718	1088	1500	76.39	17.703	1365	1500	76.70	17.319	1620
1600	80.84	13.287	1167	1600	81.49	18.281	1448	1600	81.81	18.473	1780
1700	85.89	13.477	1244	1700	86.58	19.050	1700	1700	86.93	21.937	1860

W/P=0.50	No.1	No.2	No.3
dia. (mm.)	50.20	50.00	49.90
hight (mm.)	103.10	101.70	101.70
area (cm. ²)	19.79	19.63	19.56

ตารางที่ ก-20 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.50 (ทรงกระบอก 2:x4") (ต่อ)

Stress-Strain & Poisson's Ratio											
No.1				No.2				No.3			
Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)
1800	90.94	13.667	1295	1800	91.67	20.013	1920				
1900	96.00	14.046	1362	1870	95.24	22.129	2010				
2000	101.05	14.616	1479								
2100	106.10	15.565	1605								
2200	111.15	16.704	1694								
2250	113.68	18.032	1769								

W/P=0.55	No.1	No.2	No.3
dia. (mm.)	50.30	50.00	50.00
hight (mm.)	103.00	101.00	103.10
area (cm. ²)	19.87	19.63	19.63

ตารางที่ ก-21 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.55 (ทรงกระบอก 2:x4")

Stress-Strain & Poisson's Ratio											
No.1				No.2				No.3			
Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)
100	5.03	5.700	12	100	5.09	7.750	18	100	5.09	6.833	9
200	10.06	7.600	26	200	10.19	9.107	35	200	10.19	8.542	25
300	15.10	9.120	51	300	15.28	10.076	60	300	15.28	9.870	42
400	20.13	10.260	82	400	20.37	11.238	120	400	20.37	11.199	95
500	25.16	11.780	110	500	25.46	12.013	152	500	25.46	11.769	131
600	30.19	12.920	175	600	30.56	13.176	204	600	30.56	12.718	185
700	35.23	13.680	294	700	35.65	13.563	320	700	35.65	13.477	319
800	40.26	14.440	472	800	40.74	14.145	520	800	40.74	14.426	487
900	45.29	15.200	598	900	45.84	14.726	652	900	45.84	14.806	649
1000	50.32	15.390	710	1000	50.93	15.113	770	1000	50.93	15.375	710
1100	55.36	16.150	852	1100	56.02	15.501	820	1100	56.02	15.945	895
1200	60.39	16.910	976	1200	61.12	15.889	944	1200	61.12	17.463	960
1300	65.42	17.860	1104	1300	66.21	16.276	1160	1300	66.21	18.222	1120
1400	70.45	18.620	1226	1400	71.30	16.857	1305	1400	71.30	21.639	1445
1500	75.49	20.900	1500	1500	76.39	17.632	1420				
1580	79.51	23.560	1610	1600	81.49	19.376	1580				
				1700	86.58	21.508	1770				

W/P=0.60	No.1	No.2	No.3
dia. (mm.)	50.00	50.05	49.70
hight (mm.)	102.00	103.30	101.00
area (cm. ²)	19.63	19.67	19.40

ตารางที่ ก-22 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.60 (ทรงกระบอก 2:x4")

Stress-Strain & Poisson's Ratio											
No.1				No.2				No.3			
Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)
100	5.09	8.062	30	100	5.08	6.065	45	100	5.15	6.591	38
200	10.19	10.750	92	200	10.17	11.183	110	200	10.31	14.152	142
300	15.28	12.094	186	300	15.25	14.026	165	300	15.46	16.284	180
400	20.37	13.821	380	400	20.33	15.164	440	400	20.62	17.835	341
500	25.46	15.357	570	500	25.41	16.680	554	500	25.77	19.192	502
600	30.56	16.509	710	600	30.50	17.438	775	600	30.93	20.743	737
700	35.65	17.468	920	700	35.58	18.765	808	700	36.08	22.294	903
800	40.74	18.236	1250	800	40.66	19.523	1023	800	41.24	23.070	1099
900	45.84	19.196	1452	900	45.75	20.471	1386	900	46.39	24.233	1329
1000	50.93	19.772	1580	1000	50.83	21.798	1480	1000	51.55	25.977	1440
1100	56.02	20.348	1720	1100	55.91	23.314	1550	1080	55.67	28.110	1506
1200	61.12	21.692	1850	1200	60.99	25.778	1720				
1300	66.21	25.339	1990	1270	64.55	28.053	1770				
1340	68.25	28.794	2010								

W/P=0.65	No.1	No.2	No.3
dia. (mm.)	50.20	50.20	50.20
hight (mm.)	101.80	101.50	100.10
area (cm. ²)	19.79	19.79	19.79

ตารางที่ ก-23 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ Stress-Strain และ Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P = 0.65 (ทรงกระบอก 2:x4")

Stress-Strain & Poisson's Ratio											
No.1				No.2				No.3			
Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)	Load (kg.)	Stress (ksc.)	Longitude Strain (10 ⁻³)	Lateral Strain (10 ⁻⁶)
100	5.05	9.833	36	100	5.05	6.404	18	100	5.05	4.416	24
200	10.10	11.493	103	200	10.10	7.429	88	200	10.10	5.714	96
300	15.16	12.770	225	300	15.16	8.709	110	300	15.16	6.883	123
400	20.21	12.770	310	400	20.21	9.862	270	400	20.21	7.792	260
500	25.26	14.813	470	500	25.26	10.887	310	500	25.26	8.701	304
600	30.31	15.835	700	600	30.31	11.655	550	600	30.31	9.351	574
700	35.37	16.601	880	700	35.37	12.424	645	700	35.37	10.000	679
800	40.42	17.367	995	800	40.42	12.936	688	800	40.42	10.390	700
900	45.47	17.878	1100	900	45.47	13.320	726	900	45.47	10.909	755
1000	50.52	18.644	1226	1000	50.52	13.704	822	1000	50.52	11.429	845
1080	54.57	20.943	1335	1100	55.58	15.113	895	1100	55.58	11.688	900
				1200	60.63	16.650	960	1200	60.63	12.597	985
				1260	63.66	19.212	1002	1300	65.68	15.195	1010

ตารางที่ ก-24 ผลการทดสอบหาค่า Poisson's Ratio ที่อัตราส่วน W/P ต่างๆ กัน

W/P = 0.45			W/P = 0.50		
Load (kg.)	Longitude Strain (10^{-3})	Lateral Strain (10^{-6})	Load (kg.)	Longitude Strain (10^{-3})	Lateral Strain (10^{-6})
500	8.567	288	500	13.165	480
600	8.967	379	600	13.548	534
700	9.189	463	700	13.931	626
800	9.411	531	800	14.378	746
900	9.633	606	900	14.825	810
W/P = 0.55			W/P = 0.60		
Load (kg.)	Longitude Strain (10^{-3})	Lateral Strain (10^{-6})	Load (kg.)	Longitude Strain (10^{-3})	Lateral Strain (10^{-6})
500	13.573	131	500	17.076	542
600	14.337	188	600	18.230	744
700	14.911	311	700	19.509	897
800	15.293	493	800	20.276	1124
900	15.865	633	900	21.300	1389
W/P = 0.65					
Load (kg.)	Longitude Strain (10^{-3})	Lateral Strain (10^{-6})			
500	11.467	308			
600	12.280	561			
700	13.008	662			

ภาคผนวก ข.

รูปภาพประกอบโครงการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

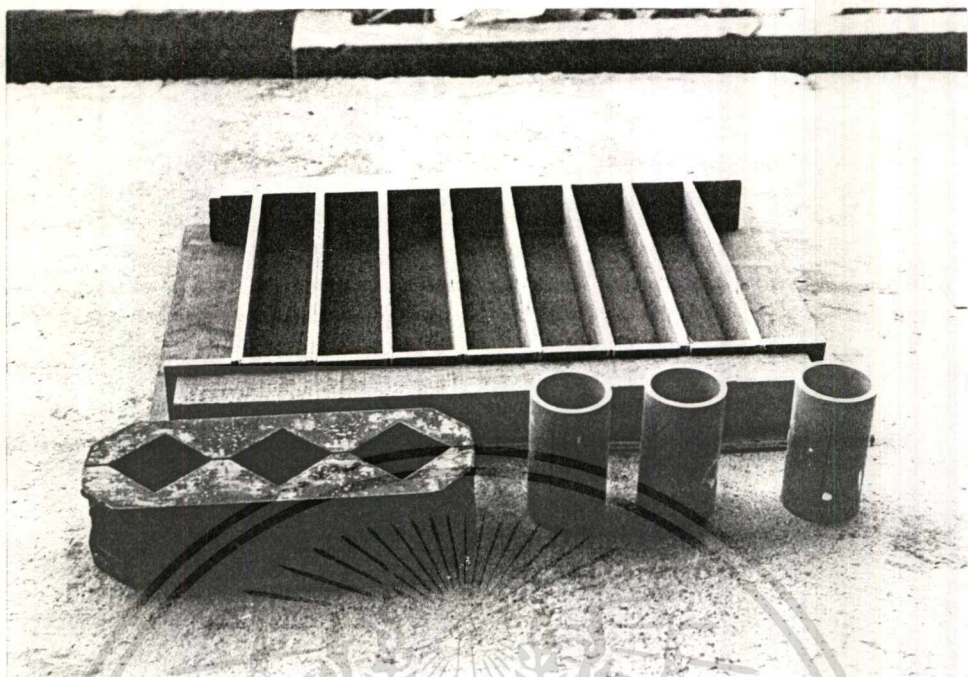


รูปที่ ๑ - 1 เครื่องชั่งน้ำหนัก



รูปที่ ๑ - 2 เครื่องมือที่ใช้ผสมยิปซัมพลาสติกกับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่มีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องยังสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

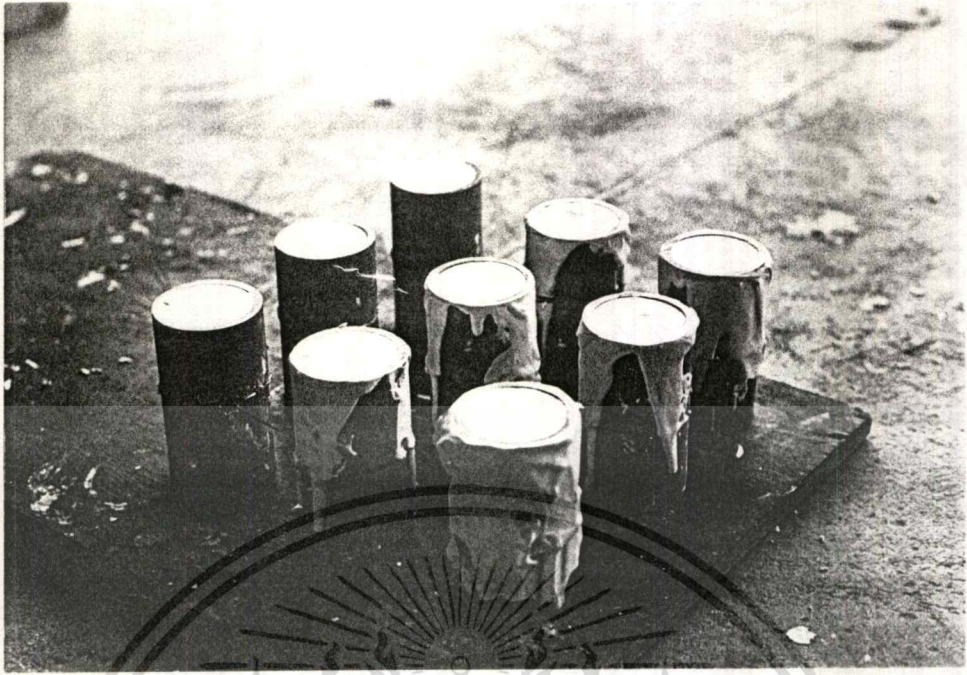


รูปที่ ๓ -3 แบบหล่อก่อนตัวอย่างรูปทรงต่างๆ

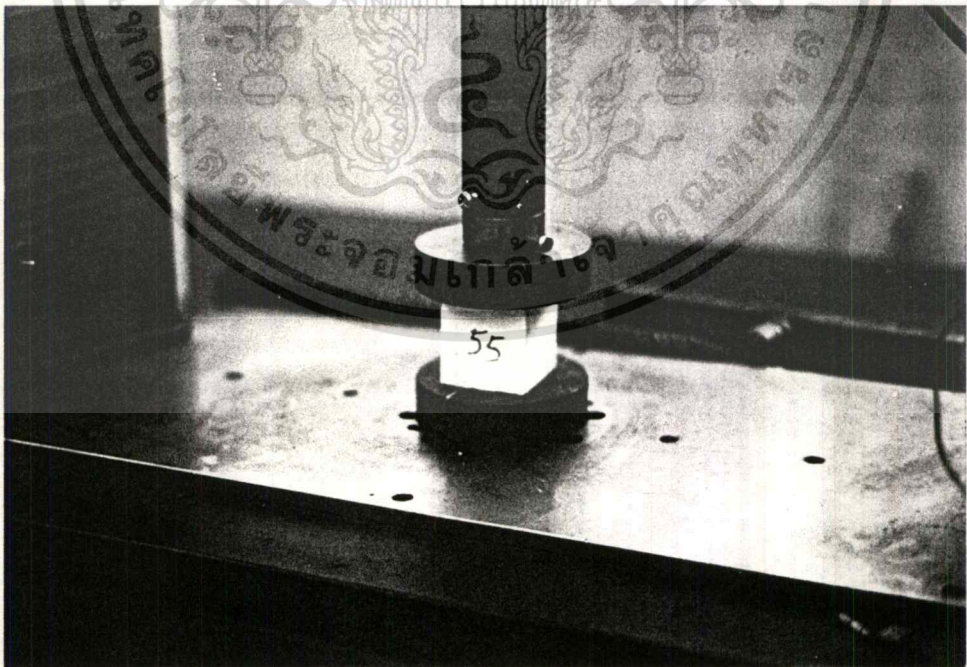


รูปที่ ๔ - 4 ยิปซัมพลาสติกอร์ขณะอยู่ในแบบหล่อคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

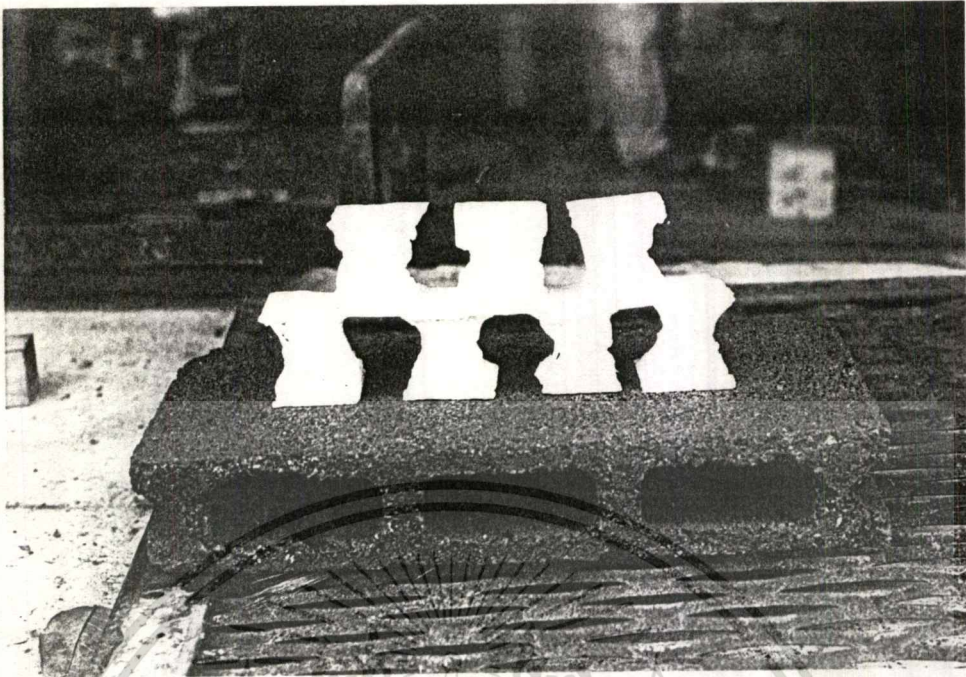


รูปที่ ๕ - 57 ยิปซัมปลาสเตอร์ขณะอยู่ในแบบหล่อทรงกระบอก



รูปที่ ๕ - 6 การทดสอบ Compressive Strength

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

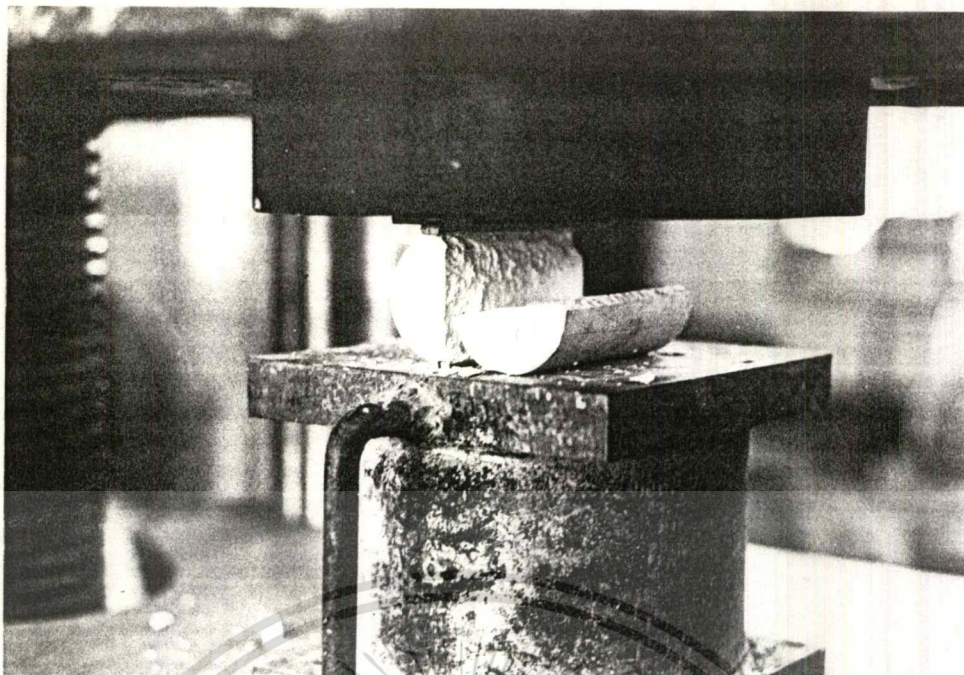


รูปที่ ๗ - 7 สภาพก้อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบ Compressive Strength



รูปที่ ๗ - 8 การทดสอบ Splitting Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๙ - 9 สภาพก้อนตัวอย่างภายหลังจากการทดสอบ Splitting Test

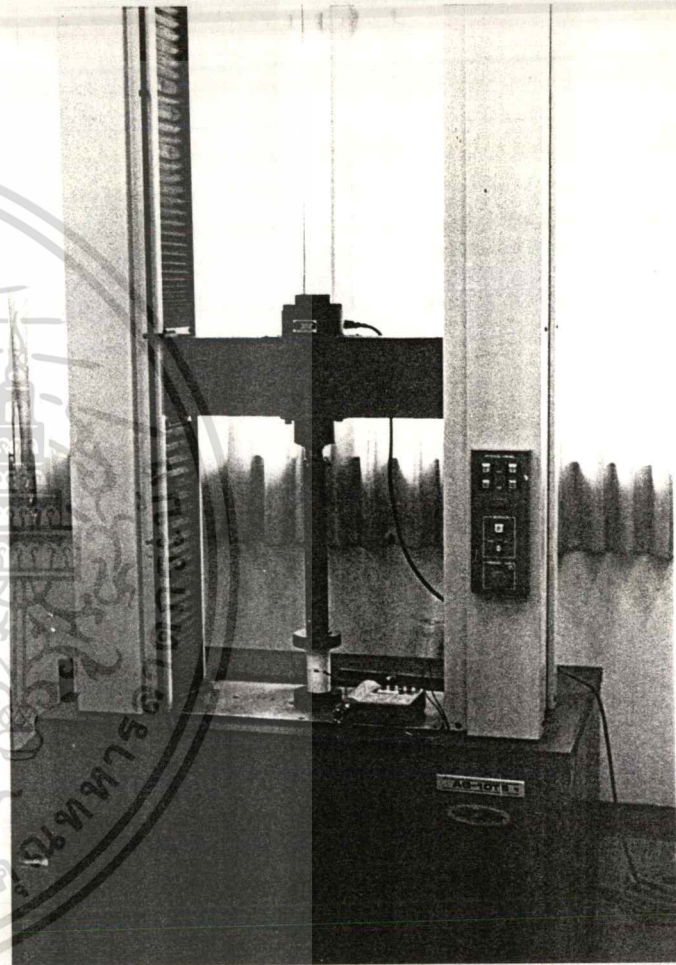


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

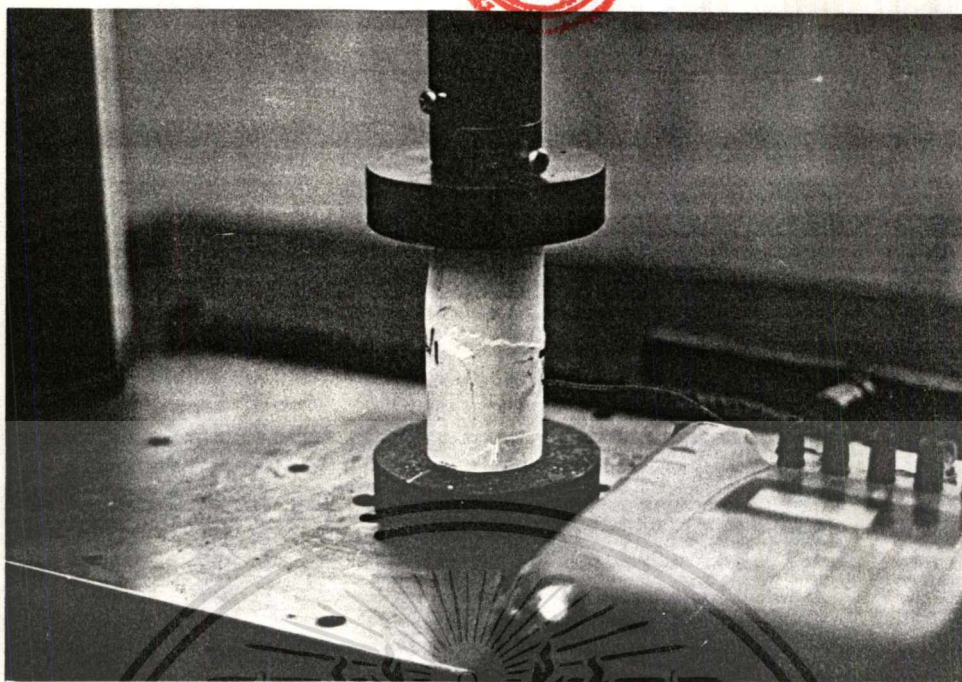
รูปที่ ๑๐ - 10 การทดสอบ Modulus of Rupture



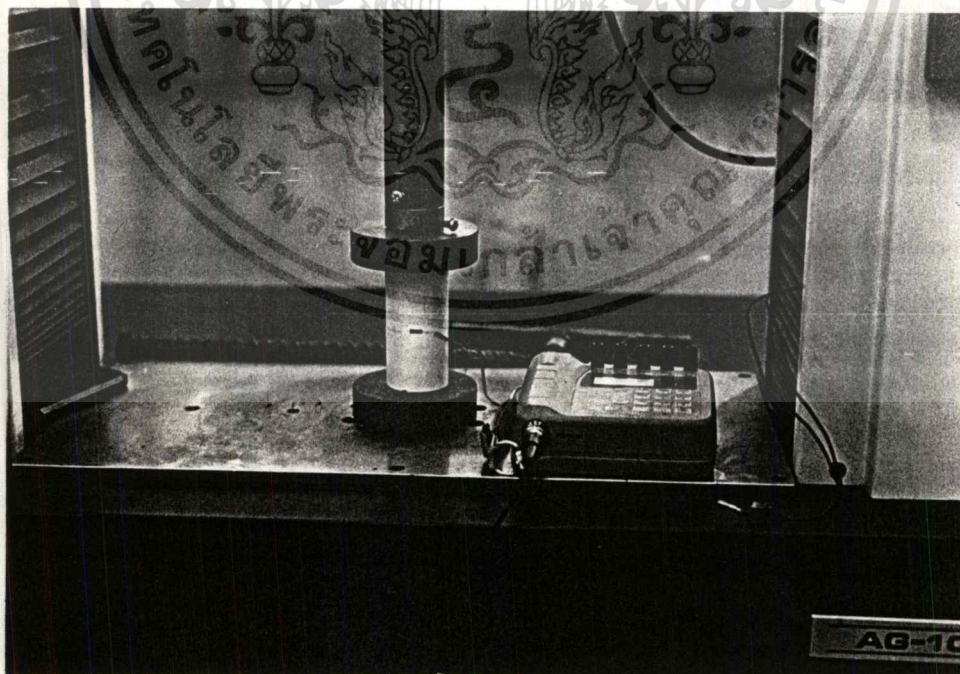
รูปที่ ๑ - 11 สภาพก่อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบ Modulus of Rupture



รูปที่ ๑ - 12 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain



รูปที่ ๑ - 13 สภาพก่อนตัวอย่างภายหลังการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain



รูปที่ ๑ - 14 การทดสอบหาค่า Poisson's Ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้