

การพัฒนาวัสดุโฟมซีเมนต์จากวัสดุเหลือใช้สำหรับโครงสร้างอาคารประหยัดพลังงาน



นาย ณัฐพร พรหมสุทธิ

ศูนย์วิทยพัทยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

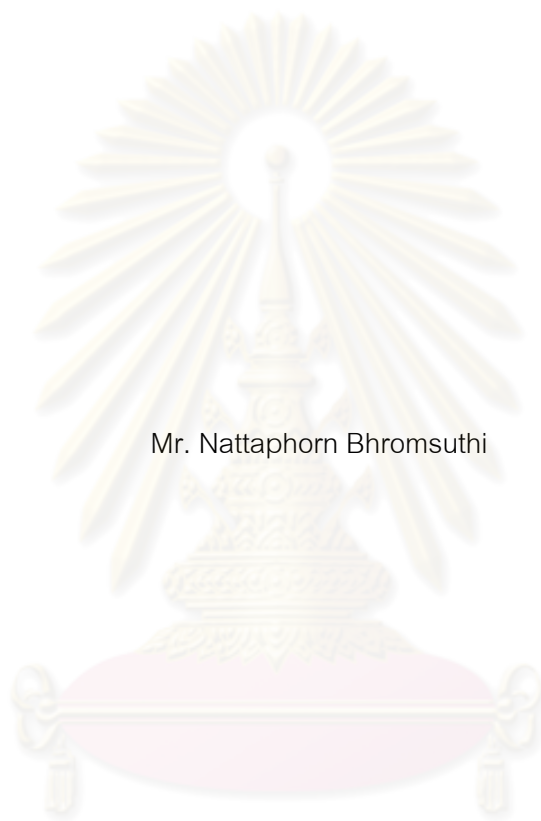
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF RECYCLED EPS FOAM CEMENT FOR ENERGY EFFICIENT
STRUCTURAL COMPONENTS



Mr. Nattaphorn Bhromsuthi

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาวัสดุโพลีเมรีซีเมนต์จากวัสดุเหลือใช้สำหรับ

โครงสร้างอาคาร ประหยัดพลังงาน

โดย

นาย ณ์จุพร พรหมสุทธิ

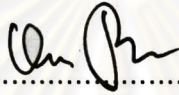
สาขาวิชา

สถาปัตยกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.สุนทร บุญญาธิการ

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต



..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต จุลาลักษณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.สุนทร บุญญาธิการ)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรสันต์ บูรณากาญจน์)



..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ นพรัตน์ รุ่งอุทัยศิริ)

ณัฐพร พรหมสุทธิ: การพัฒนาวัสดุโฟมซีเมนต์จากวัสดุเหลือใช้สำหรับโครงสร้างอาคาร
ประหยัดพลังงาน. (DEVELOPMENT OF RECYCLED EPS FOAM CEMENT FOR
ENERGY EFFICIENT STRUCTURAL COMPONENTS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ศ.ดร.สุนทร บุญญาธิการ, 153 หน้า.

การออกแบบบ้านพักอาศัยในเขตอากาศร้อนชื้นให้ได้ผลดีนั้น มีข้อควรพิจารณาหลายประการ
เช่น ความปลอดภัย, ความคงทน, ความต้านทานความร้อน และความชื้น บ้านพักอาศัยเหล่านี้ ต้อง
สามารถสร้างได้ง่าย และในขณะเดียวกันมีประสิทธิภาพด้านต้นทุน และพลังงาน วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ที่
มีการถ่ายน้ำหนักที่เหมาะสมอาจเป็นคำตอบที่เป็นไปได้คำตอบหนึ่ง

การศึกษานี้ได้พิจารณาใช้โฟมอีพีเอส (EPS foam) เป็นวัสดุหลัก เสริมความแข็งแรงด้วยการ
รวมเข้ากับซีเมนต์ และโลหะอื่น เพื่อให้เข้ากับความต้องการของเกณฑ์การออกแบบ ขนาด และมิติต่างๆ
ของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อรับน้ำหนักที่ออกแบบ และทำให้เกิดการก่อสร้างสะดวก
และรวดเร็ว

ข้อดีของวัสดุที่มีน้ำหนักเบาคือ ช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างเอง เพิ่มประสิทธิภาพในการรับ
น้ำหนัก และยังคงมีคุณภาพในการเป็นฉนวนที่จะเป็นปัจจัยในการรักษาสมดุลของพลังงานที่ใช้เพื่อให้
เกิดความสบายในอาคาร และเป็นการประหยัดพลังงาน

การศึกษานี้ได้พัฒนาหาส่วนผสมของโฟมอีพีเอส กับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ททราย และน้ำ เพื่อเป็น
วัสดุประเภทโฟมซีเมนต์ ที่มีกำลังรับแรงได้พอสมควร และนำมาออกแบบเป็นหน้าตัดประกอบที่ทำงาน
ร่วมกับวัสดุเสริมความแข็งแรงคือเหล็กเส้น ออกแบบชิ้นส่วนรับน้ำหนักตัวอย่าง เป็นคานรับน้ำหนักช่วง
5000 มิลลิเมตร หน้ากว้าง 600 มิลลิเมตร โดยมีความลึกที่ 225 และ 275 มม. และหน้าตัดคานทั้งแบบ
ตันและแบบสอดใส่แท่งอีพีเอส เพื่อนำมาทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย 250 และ 350 กิโลกรัม
ต่อตารางเมตร และสังเกตพฤติกรรม การรับน้ำหนัก การแอ่นตัว และการคืนตัวตลอดจนลักษณะการ
แตกร้าวและพังทลาย รวม 4 หน้าตัด จำนวนตัวอย่าง 7 ตัวอย่าง ผลการทดสอบทำให้เห็นศักยภาพของ
การรับน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่ดีในบางหน้าตัด นอกจากนี้ยังได้ใช้วัสดุปูนฉาบเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหน้าตัด
อีก 2 หน้าตัด และทำการทดสอบโดยใช้แท่งอีพีเอสเป็นแกนกลางอีกจำนวน 4 ตัวอย่างได้ความแข็งแรง
ของการรับน้ำหนักที่มีศักยภาพดี

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการปรับปรุงความแข็งแรงของ อีพีเอส ทำให้ผู้ออกแบบสามารถ
ออกแบบได้เฉพาะที่อยู่อาศัยขนาดเล็ก และดังนั้น อีพีเอส ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วจึงเป็นทางเลือกอีก
ทางหนึ่งที่ยังคงต้องการการพัฒนาปรับปรุงต่อไปอีกในอนาคต

ภาควิชา.....สถาปัตยกรรมศาสตร์.....

สาขาวิชา.....สถาปัตยกรรม.....

ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5074181525 : MAJOR ARCHITECTURE

KEY WORDS : EPS FOAM / CEMENT / STRUCTURAL COMPONENTS

NATTAPHORN BHROMSUTHI: DEVELOPMENT OF RECYCLED EPS FOAM

CEMENT FOR ENERGY EFFICIENT STRUCTURAL COMPONENTS.

ADVISOR: PROF. SOONTORN BOONYATIKARN Ph.D., 153 pp.

In order to efficiently design housing for a hot-humid climate, there are several factors to consider such as safety, durability, and resistance to heat and humidity. This type of building must be easily built and cost/energy efficient. Lightweight materials may be beneficial in this type of construction.

This thesis explores the use of EPS foam as a composite structure. It is reinforced by combining cement and metals to bear the design load. Moreover, the size and dimension of each piece can be adjusted to meet the design loading conditions and for fast and easy construction.

The advantages of lightweight materials are the reduction of the weight of the structure, the increased efficiency of the load bearing capacity and the insulation capacity that helps preserve the balance of energy which creates comfortable living conditions and energy conservation.

This study focuses on identifying the appropriate mixture of EPS foam, Portland cement, sand and water to produce a foam cement material which is strong enough to bear certain loads. It is then made into a composite section which is reinforced by reinforcing steel. The sample structural pieces were produced in the form of beams with a span length of 5000 mm and width of 600 mm. The depth of the beams was 225 and 275 mm and both solid and EPS-bar inserted sections were studied and underwent load tests with designed safe loads of 250 and 350 kilograms per square meter. Careful observation of loading, deflection, rebound, cracks and failure of the 7 sample beams (4 sections) of the test specimens were documented. The results show good loading potential in some types of sections. Moreover, more tests on the two EPS-bar inserted sections with masonry mortar replacing EPS foam cement were done and they have also yielded good loading potential.

However, the limitation of strength improvement of EPS allows designers to design only short-span houses. Thus, EPS foam is still an alternative that needs more improvement in the future.

Department of : Architecture

Student's Signature.....*Nattaporn Bhromsuthi*.....

Field of study : Architecture

Advisor's Signature.....*Soontorn Boonyatikarn*.....

Academic year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาของ ศ.ดร.สุนทร บุญญาธิการ และ รศ.ดร.วรสิทธิ์ บุรณากาญจน์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และชี้แนะในสิ่งที่เป็นประโยชน์สำคัญตลอดการดำเนินการศึกษาวิจัย

ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา ขอขอบคุณสมาชิกครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจ และขอบคุณผู้ที่ได้มีส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฑ
สารบัญแผนภูมิ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวความคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	3
2.2 การจัดประเภทของวัสดุก่อสร้าง.....	3
2.3 วัสดุก่อสร้างที่มีตัวประสานเป็นสินแร่.....	4
2.3.1 ลักษณะสำคัญ.....	4
2.3.2 ตัวประสานที่เป็นสินแร่.....	4
2.3.3 ซีเมนต์.....	5
2.3.4 มวลรวม.....	5
2.3.5 สารเพิ่มเติม.....	6

2.3.6 มอริตารี.....	6
2.4 คอนกรีต.....	6
2.4.1 ทัวไป.....	6
2.4.2 นิยามเกี่ยวกับคอนกรีต.....	7
2.4.3 กรอบการศึกษาคอนกรีตในด้านวัสดุทางวิศวกรรมโยธา.....	8
2.4.4 ชนิดของคอนกรีต.....	9
2.5 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งแล้วและนัยสำคัญ.....	10
2.6 คอนกรีตน้ำหนักเบา.....	13
2.6.1 คุณสมบัติสำคัญ โดยสังเขป.....	13
2.6.2 การแบ่งชั้นของคอนกรีตเบา.....	13
2.6.3 วิธีการผลิตคอนกรีตน้ำหนักเบา.....	14
2.6.4 คอนกรีตชนิดที่ประกอบด้วยกาเกิดอากาศและฟอง.....	14
2.7 แนวความคิดเกี่ยวกับ การประยุกต์ใช้ เอเอซี ในงานโครงสร้างบ้านพักอาศัย.....	16
2.7.1 การค้นพบและการใช้งาน.....	16
2.7.2 ลักษณะของ เอเอซี.....	16
2.7.3 การใช้ เอเอซี เป็นชั้นส่วนผนัง.....	16
2.7.4 การใช้ เอเอซี เป็นชั้นส่วนพื้นและหลังคา.....	18
2.7.5 ข้อกำหนดการออกแบบ.....	20
2.8 วัสดุสังเคราะห์.....	21
2.8.1 ความนำ.....	21
2.8.2 โครงสร้างทางเคมีของวัสดุสังเคราะห์.....	22
2.8.3 ขบวนการ.....	24
2.8.4 วัสดุสังเคราะห์ในงานอาคาร.....	24
2.8.5 โฟม อีพีเอส.....	26
2.8.6 การใช้ อีพีเอส ในการก่อสร้างแบบแซนวิช.....	28
2.9 ความเป็นฉนวนกันความร้อน.....	28
2.9.1 ปฏิกิริยาการนำความร้อนที่สำคัญในอาคาร.....	28
2.9.2 ผลของความร้อนในอาคาร.....	33

2.9.3 หลักการความเป็นฉนวน.....	36
2.9.4 การแบ่งประเภทฉนวน.....	36
2.10 การประยุกต์ใช้โฟม EPS ในงานก่อสร้างในรูปแบบโฟมซีเมนต์.....	37
2.10.1 ชนิดโฟมเม็ดและการนำมาใช้งานก่อสร้างในรูปแบบโฟมซีเมนต์.....	37
2.10.2 ข้อมูลการแนะนำส่วนผสมโฟมซีเมนต์.....	37
2.10.3 คุณสมบัติการนำความร้อนและกำลังรับแรงอัด.....	37
2.10.4 วิธีการผสม.....	38
2.11 แนวความคิดทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้าง.....	38
2.11.1 นิยามความหมายของโครงสร้าง.....	38
2.11.2 หน้าที่ของโครงสร้าง.....	38
2.12 การออกแบบโครงสร้างและลักษณะความล้มเหลว.....	38
2.12.1 การออกแบบระบบโครงสร้าง.....	38
2.12.2 การพังทลายของโครงสร้าง.....	39
2.13 โครงสร้างอาคาร.....	39
2.13.1 ลักษณะโครงสร้างที่ก่อให้เกิดปริมาตร.....	39
2.13.2 ระบบการรับน้ำหนักของโครงสร้างโดยทั่วไป.....	40
2.13.3 ระบบความสัมพันธ์การส่งถ่ายแรงภายใน ระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้าง.....	40
2.14 แรงและความเค้นในชิ้นส่วน.....	41
2.14.1 แรงดึง.....	41
2.14.2 แรงอัด.....	41
2.14.3 การดัด.....	42
2.14.4 การเฉือน.....	43
2.14.5 การบิด.....	43
2.14.6 การกดทับ.....	43
2.15 การโก่งตัวหรือการแอ่นตัว.....	43
2.15.1 กรณีการออกแบบคาน.....	43
2.15.2 ข้อกำหนดการแอ่นตัว.....	44
2.16 น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง.....	45

2.16.1 การจำแนกประเภทน้ำหนักรรทุก.....	45
2.16.2 แรงสถิต.....	45
2.16.3 แรงไดนามิก.....	46
2.16.4 น้ำหนักรรทุกในการออกแบบพื้นอาคาร.....	46
2.17 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	47
2.18 ทฤษฎีการออกแบบ เอเอซี เสริมเหล็ก.....	48
บทที่ 3 การดำเนินการศึกษา	49
3.1 สาระสำคัญในการดำเนินการศึกษา.....	49
3.1.1 คุณสมบัติที่สำคัญและการประยุกต์ใช้.....	49
3.1.2 การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างประกอบ.....	50
3.1.3 การประยุกต์หลักการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ.....	50
3.1.4 การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง.....	52
3.2 วิธีการวิจัย.....	53
3.2.1 การทดสอบตัวอย่างเป็นชุด.....	53
3.2.2 จำนวนชิ้นตัวอย่างส่วนโครงสร้าง.....	53
3.2.3 การศึกษาด้วยการทดลอง.....	54
3.3 ตัวแปรในการทดสอบการรับน้ำหนักของแผ่นพื้น.....	54
3.4 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ประกอบในการวิจัย.....	54
3.4.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	54
3.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	54
3.5 การรวบรวมข้อมูลจากการทดสอบ.....	55
3.5.1 แท่งตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	55
3.5.2 การทดสอบการรับน้ำหนักรรทุกของตัวอย่างแผ่นพื้นหล่อสำเร็จ.....	55
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	56
3.7 การสรุปผลการดำเนินการ อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	56

บทที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	57
4.1 การพัฒนาวัสดุโพลีเมอร์.....	57
4.1.1 เป้าหมายการใช้วัสดุตามที่ได้ออกแบบไว้.....	57
4.2 การพัฒนาแผ่นพื้นรับน้ำหนักโดยการประยุกต์ใช้วัสดุโพลีเมอร์.....	62
4.2.1 เป้าหมายพฤติกรรมกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของแผ่นพื้นคอมโพสิตโพลีเมอร์.....	62
4.2.2 ชนิดหน้าตัดของแผ่นพื้นที่เหลือด้วยเนื้อวัสดุโพลีเมอร์.....	63
4.2.3 ชนิดหน้าตัดของแผ่นพื้นที่เหลือด้วยปูนฉาบ.....	63
4.3 การบันทึกการดำเนินการ.....	64
4.3.1 การบันทึกภาพการผสมโพลีเมอร์.....	64
4.3.2 การบันทึกภาพการทดสอบน้ำหนักบรรทุก.....	64
4.3.3 การบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการแอ่นตัว.....	70
4.4 ผลการพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแผ่นพื้น.....	84
4.4.1 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 1.....	84
4.4.2 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 2.....	86
4.4.3 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 3.1.....	87
4.4.4 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 3.2.....	88
4.4.5 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 4.1.....	89
4.4.6 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 4.2.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	93
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	93
5.1.1 แนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการเป็นโครงสร้าง.....	93
5.1.2 แนวทางในการจัดลักษณะรูปร่าง และขนาดชิ้นส่วน.....	93
5.1.3 การออกแบบและพฤติกรรมเบื้องต้นของชิ้นส่วนโครงสร้าง.....	94
5.2 อภิปรายผล.....	95
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	96

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก การผสมโฟมซีเมนต์.....	100
ภาคผนวก ข การผสมปูนฉาบ.....	103
ภาคผนวก ค วิธีการออกแบบแผ่นพื้นโฟมซีเมนต์.....	106
ภาคผนวก ง การออกแบบเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและโฟม คอนกรีต.....	114
ภาคผนวก จ รายการคำนวณการออกแบบตัวอย่างแผ่นพื้น.....	122
ภาคผนวก ฉ ภาพแบบตัวอย่างแผ่นพื้น.....	131
ภาคผนวก ช ภาพการดำเนินการเก็บตัวอย่างแท่งตัวอย่างโฟมซีเมนต์รับแรงอัด และการหล่อแผ่นพื้นสำเร็จรูป ชุดที่ 1.....	138
ภาคผนวก ซ วิธีการทดสอบแผ่นพื้น.....	150
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	153

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	การจำแนกประเภทคอนกรีตน้ำหนักเบา.....	14
2-2	คุณสมบัติทั่วไปของ เอเอซี.....	15
2-3	การประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์แยกตามการบริโภค.....	25
2-4	ค่าทางกายภาพของวัสดุสังเคราะห์บางชนิด.....	26
2-5	คุณสมบัติสำคัญทางกายภาพของอีพีเอส.....	27
2-6	ค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยทั่วไปของงานอาคาร.....	32
2-7	น้ำหนักบรรทุกที่กระทำเพิ่มบนพื้น.....	47
4-1	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโฟมซีเมนต์ตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.....	58
4-2	การทดสอบการรับแรงรวมทุกหน้าตัดและทุกตัวอย่าง.....	71
4-3	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 1.....	73
4-4	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 2.....	74
4-5	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 1.....	75
4-6	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 2.....	76
4-7	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.1 ตัวอย่างที่ 1.....	77
4-8	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.1 ตัวอย่างที่ 2.....	78
4-9	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.2 ตัวอย่างที่ 1.....	79
4-10	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 ตัวอย่างที่ 1.....	80
4-11	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 ตัวอย่างที่ 2.....	81
4-12	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.2 ตัวอย่างที่ 1.....	82
4-13	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.2 ตัวอย่างที่ 2.....	83
4-14	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตตัวอย่างปูนฉาบลูกบาศก์ 50 มม. (เทียบเป็นกำลังแท่งตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.).....	90

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	องค์ประกอบตัวประสานที่เป็นเส้นแร่.....	5
2-2	ระบบการจัดประเภทของวัสดุสังเคราะห์ตามโครงสร้างแมคโครโมเลกุลและ วิธีการของการสังเคราะห์.....	24
2-3	เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกชนิดต่าง ๆ โดยทั่วไป.....	46
4-1	การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่าง.....	65
4-2	การจัดเตรียมการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแผ่นพื้น วันที่ 25 เม.ย. 52.....	65
4-3	การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุก ที่ 25% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ.....	66
4-4	การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุก ที่ 50% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ.....	66
4-5	การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุก ที่ 75% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ.....	67
4-6	การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุก ที่ 100% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ.....	67
4-7	การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุก ที่ 120% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ.....	68
4-8	การจัดเรียงน้ำหนักบรรทุก ที่ 150% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ.....	68
4-9	รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางคาน ด้านหลัง.....	69
4-10	รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางคาน ด้านหน้า.....	69
6-1	ระยะต่าง ๆ ของหน้าตัดพื้นที่ใช้คำนวณโมเมนต์อินเนอร์เทียของหน้าตัดแปลง...	108
6-2	แสดงขั้นตอนการออกแบบแผ่นพื้นโพลีซีเมนต์.....	113
7-1	แบบพื้นโพลีซีเมนต์ตัน ความหนา 275 มิลลิเมตร.....	132
7-2	แบบพื้นโพลีซีเมนต์ตัน ความหนา 225 มิลลิเมตร.....	133
7-3	แบบพื้นโพลีซีเมนต์ 2 เซล ความหนา 225 มิลลิเมตร.....	134
7-4	แบบพื้นโพลีซีเมนต์ 1 เซล ความหนา 225 มิลลิเมตร.....	135
7-5	แบบพื้นปูนฉาบ 1 เซล ความหนา 225 มิลลิเมตร ความหนาแน่นได้โพลี 1ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต.....	136
7-6	แบบพื้นปูนฉาบ 1 เซล ความหนา 225 มิลลิเมตร ความหนาแน่นได้โพลี 2ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต.....	137
8-1	เครื่องผสม.....	139
8-2	การประยุกต์เครื่องผสมคอนกรีตให้เหมาะสมกับโพลีซีเมนต์.....	139
8-3	เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	140

ภาพที่		หน้า
8-4	อุปกรณ์การเก็บตัวอย่างทดสอบกำลัง.....	140
8-5	อุปกรณ์การทดสอบการยุบตัว.....	141
8-6	การเตรียมแบบหล่อแผ่นพื้น (1).....	141
8-7	การเตรียมแบบหล่อแผ่นพื้น (2).....	142
8-8	การตวงวัสดุ.....	142
8-9	การผสมวัสดุ.....	143
8-10	การผสมระหว่างน้ำกับโฟม.....	143
8-11	การผสมระหว่างน้ำ โฟม และทราย.....	144
8-12	การผสมระหว่างน้ำ โฟม ทราย และซีเมนต์.....	144
8-13	โฟมซีเมนต์ที่ผสมเสร็จแล้ว (1).....	145
8-14	โฟมซีเมนต์ที่ผสมเสร็จแล้ว (2).....	145
8-15	การทดสอบการยุบตัวของโฟมซีเมนต์ (1)	146
8-16	การทดสอบการยุบตัวของโฟมซีเมนต์ (2)	146
8-17	การเทโฟมซีเมนต์ในแบบแผ่นพื้น (1)	147
8-18	การเทโฟมซีเมนต์ในแบบแผ่นพื้น (2)	147
8-19	การเทโฟมซีเมนต์ในแบบแผ่นพื้น (3)	148
8-20	การเทโฟมซีเมนต์ในแบบแผ่นพื้น (4)	148
8-21	การเทโฟมซีเมนต์ในแบบเสร็จเรียบร้อยและกำลังแต่งผิวหน้า.....	149

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่		หน้า
4-1	ผลการทดสอบกำลังอัดของโพนซีเมนต์.....	61
4-2	การทดสอบการรับแรงรวมทุกหน้าตัดและทุกตัวอย่าง.....	72
4-3	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 1.....	73
4-4	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 2.....	74
4-5	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 1.....	75
4-6	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 2.....	76
4-7	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.1 ตัวอย่างที่ 1.....	77
4-8	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.1 ตัวอย่างที่ 2.....	78
4-9	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.2 ตัวอย่างที่ 1.....	79
4-10	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 ตัวอย่างที่ 1.....	80
4-11	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 ตัวอย่างที่ 2.....	81
4-12	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.2 ตัวอย่างที่ 1.....	82
4-13	การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.2 ตัวอย่างที่ 2.....	83
4-14	ผลการทดสอบกำลังอัดแท่งตัวอย่างปูนฉาบ.....	91

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

บ้านพักอาศัยควรมีคุณสมบัติที่ดี ในเรื่อง ประโยชน์ใช้สอย สะดวก อยู่สบาย ป้องกัน ความร้อน ความชื้น เสียง ไฟ มีความสวยงาม ปลอดภัย ความแข็งแรง ทนทาน ก่อสร้างได้สะดวก รวดเร็ว และประหยัด เป็นต้น

โครงสร้าง ที่มีน้ำหนักเบา และทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อน สามารถลดภาระในการรับน้ำหนักตายตัวของโครงสร้างเอง เพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักในสภาวะใช้งานได้เต็มที่ ส่วนความเป็นฉนวน เป็นผลดีต่อการประหยัดพลังงาน และทำให้เกิดความสบายในการอยู่อาศัย ดังนั้นจึงควรหาแนวทางที่จะปรับปรุงคุณภาพของวัสดุฉนวนซึ่งมีน้ำหนักเบา ให้มีคุณสมบัติทางด้านการรับแรงให้ดีขึ้น เพื่อให้มีคุณสมบัติใช้เป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง และพร้อมกับทำหน้าที่เป็นฉนวนภายในอาคารหรือเปลือกอาคารได้

กรณีของบ้านพักอาศัยโดยทั่วไป ประกอบด้วยลักษณะของโครงสร้างขนาดเล็ก มีระยะช่วงของช่องว่างโครงสร้างไม่มากนัก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงคุณภาพของเนื้อวัสดุที่เป็นฉนวนและมีน้ำหนักเบา ให้มีคุณสมบัติที่นำมาใช้เป็นชิ้นส่วนรับน้ำหนัก มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับน้ำหนัก การใช้งานของอาคาร และแรงกระทำต่าง ๆ ที่มีต่อโครงสร้าง รวมทั้งน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้างเองด้วย

แนวความคิดสำคัญของการศึกษามุ่งพิจารณาในเรื่องการหมุนเวียนนำวัสดุเหลือใช้ มีความเป็นฉนวน น้ำหนักพอเหมาะกับโครงสร้างขนาดเล็ก ลดการใช้วัสดุอื่น และนำมาประกอบกับวัสดุอื่นเพื่อให้เกิดคุณสมบัติที่มีประสิทธิภาพทางด้านความเป็นฉนวนและการเป็นโครงสร้าง

โฟมเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีน้ำหนักเบา มีความเป็นฉนวน แต่มีข้อด้อยในเรื่องการรับน้ำหนักและแรงกระทำ อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาปรับปรุงหรือเสริมแต่งเข้ากับกระบวนการออกแบบระบบโครงสร้างรับน้ำหนัก รูปร่าง ขนาด หน้าตัด และรายละเอียดให้เป็นชิ้นโครงสร้างรับน้ำหนัก ผลที่ได้รับจากกระบวนการนี้อาจเป็นคำตอบหนึ่งของการใช้วัสดุที่เหมาะสม ที่อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการก่อสร้าง มีประสิทธิภาพดีในการรับแรง พร้อมด้วยคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน ดังนั้นจึงเป็นหนทางของนวัตกรรม ในการเป็นโครงสร้างบ้านพักอาศัยประหยัดพลังงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงของโครงสร้างที่ทำจากวัสดุโฟมซีเมนต์
- 2) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบโครงสร้างรับน้ำหนักของบ้านพักอาศัย
- 3) ออกแบบ และทดสอบความแข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุโฟมซีเมนต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) เลือกใช้ เอกซ์แพน โพลิสไตรีน หรือที่เรียกว่า อีพีเอส (Expanded Polystyrene, EPS) เป็นโฟมในการนำมาปรับปรุง และเสริมความแข็งแรง เพื่อทดลองใช้เป็นวัสดุในการผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงหรือน้ำหนักบรรทุกทุกตามที่ได้กำหนดไว้
- 2) ใช้ช่วงระยะของขนาด และมิติของที่บ้านอยู่อาศัยหนึ่ง เป็นสิ่งกำหนดชิ้นส่วนโครงสร้าง เพื่อให้เป็นโครงสร้างในส่วนนั้น ในที่นี้เป็นส่วนของพื้นซึ่งพาดช่วงขนาด 5.0 เมตร
- 3) ทดสอบการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้าง เพื่อสังเกตพฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุก

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1) ศึกษาข้อมูลในการประยุกต์เพื่อนำโฟมมาปรับปรุงใช้เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างอาคารที่อยู่อาศัย
- 2) ศึกษา และรวบรวมขีดจำกัดของสิ่งที่มีอิทธิพลในการรับแรงในด้านระบบโครงสร้าง และขนาดของชิ้นส่วนโครงสร้าง
- 3) จำลองสภาพใช้งานรับน้ำหนักของโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะหน้าตัดที่แตกต่างกันไป และทำการทดลองสังเกตพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อให้ทราบถึงแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุโฟมซีเมนต์ทางการเป็นโครงสร้างในการรับแรง
- 2) เพื่อเป็นแนวทางในการจัดลักษณะรูปร่าง และขนาดชิ้นส่วนที่เหมาะสมในการรับแรง และในการประกอบติดตั้ง ชิ้นส่วนของโครงสร้างอาคาร
- 3) เพื่อให้ทราบพฤติกรรมเบื้องต้นของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้จัดทดลองขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

สิ่งที่สำคัญประการหนึ่งในขั้นตอนการออกแบบและก่อสร้างของโครงการก่อสร้างอาคารหรืองานทางวิศวกรรมโยธา เพื่อให้ได้งานที่สำเร็จเป็นที่น่าพอใจ คือ ความเข้าใจในเรื่องคุณสมบัติของวัสดุ

การพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้ในชั้นโครงสร้างแต่ละส่วน ควรต้องนำมาพิจารณาร่วมกับข้อกำหนดหรือความต้องการทางด้านการออกแบบทางสถาปัตยกรรม

การตัดสินใจเลือกรูปแบบโครงสร้างและชนิดของวัสดุขึ้นกับปัจจัยหลายประการ (Jackson and Dhir, 1996 : 1-2) รวมถึง ต้นทุนคุณสมบัติทางกายภาพ ความคงทน การหาวัสดุ นั้นได้ และความง่ายและความเร็วในการก่อสร้างสิ่งเหล่านี้มีผลต่อเงินลงทุน การซ่อมบำรุง และการใช้งาน ซึ่งรวมถึงค่าพลังงานต่าง ๆ ระหว่างช่วงอายุของอาคารที่ได้ออกแบบไว้

วัสดุก่อสร้าง เช่น ไม้ โลหะ คอนกรีต วัสดุพอลิเมอร์ โพลีเมอร์ อีฐ และบลอค พบเห็นได้ในงานอาคาร บางประเภทใช้เพียงในชั้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ในขณะที่ประเภทอื่นอาจใช้หรือใช้ร่วม ประกอบกับประเภทอื่นในชั้นส่วนโครงสร้าง วัสดุประเภทที่ใช้ในชั้นส่วนโครงสร้างจะขึ้นกับทั้งรูปลักษณะของโครงสร้าง และปัจจัยอื่น ๆ ที่ได้กล่าวข้างต้น

ในบทนี้จะได้กล่าวถึง คุณสมบัติของวัสดุ 2 ชนิด คือ โฟม และซีเมนต์ และแนวทางการใช้วัสดุทั้งสองในการประกอบเป็นโครงสร้างในส่วนแรก สำหรับในส่วนต่อมาจะได้กล่าวถึงการออกแบบชั้นส่วนโครงสร้าง

2.2 การจัดประเภทของวัสดุก่อสร้าง

การจัดประเภทของวัสดุก่อสร้างสามารถจัดแบ่งได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่ง (Hegger et al., 2006) คือแบ่งตามแหล่งกำเนิด (Origins) และขบวนการผลิต (Production processes) ได้แบ่งโดยทั่วไป เป็น 9 ประเภท ได้แก่

- 1) หิน (Stone)
- 2) ดิน (Loam)
- 3) วัสดุเซรามิก (Ceramic materials)
- 4) วัสดุก่อสร้างที่มีตัวประสานเป็นสินแร่ (Building materials with mineral binders)
- 5) วัสดุบิทูมินัส (Bituminous material)

- 6) ไม้และผลิตภัณฑ์ที่มีฐานจากไม้ (Wood and wood-based products)
- 7) โลหะ (Metal)
- 8) กระจก (Glass)
- 9) วัสดุสังเคราะห์ (Synthetic materials)

ในการศึกษานี้ เกี่ยวข้องกับวัสดุก่อสร้าง 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ประเภทวัสดุก่อสร้างที่มีตัวประสานเป็นสินแร่ และประเภทวัสดุสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามจะมีการใช้โลหะเข้ามาประกอบเพื่อเสริมความแข็งแรงตามความจำเป็น ทำให้มีลักษณะรวมที่เหมาะสมในการประกอบเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างต่อไป

2.3 วัสดุก่อสร้างที่มีตัวประสานเป็นสินแร่ (Building materials with mineral binders)

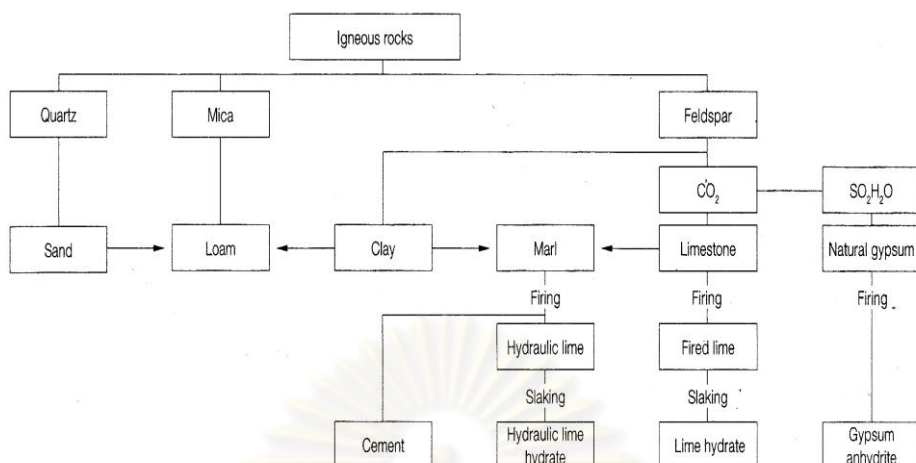
2.3.1 ลักษณะสำคัญ

วัสดุประเภทนี้มีลักษณะสำคัญคือการ มีตัวประสาน (Binders) เป็นตัวยึดเหนี่ยว ส่วนผสมประเภทที่เป็นเม็ด (Grain-type constituents) เช่น ทรายหรือกรวด ของผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า มอร์ตาร์ (Mortar) หรือคอนกรีต ซึ่งชุดของคุณสมบัติ ได้แก่ กำลังรับน้ำหนัก (Strength) , ความที่บดอไอ (Vapour permeability) กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) และอิลาสติกซิตี (Elasticity) เป็นต้น จะถูกคุมไว้ด้วยขบวนการการบ่มตัวทางเคมี (Chemical curing process)

2.3.2 ตัวประสานที่เป็นสินแร่ (Mineral binder)

ตัวประสานดังกล่าว สามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่ ยิปซั่ม (Gypsum), ไลม์ (Lime) , แมกนีเซีย ซีเมนต์ (Magnesia cement) และซีเมนต์ (Cement) ภาพที่ 2-1 (Hegger et al., 2006 : 55) แสดงองค์ประกอบของตัวประสานที่เป็นสินแร่ (Composition of mineral binders)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



B 4.4

ภาพที่ 2-1 องค์ประกอบตัวประสานที่เป็นสินแร่ (Hegger et al., 2006)

2.3.3 ซีเมนต์ (Cement)

ซีเมนต์เป็นตัวประสานไฮดรอลิก (Hydraulic binders) สำหรับมอร์ตาร์ และคอนกรีต ซีเมนต์ ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์ (Oxides) ของ แคลเซียม (Calcium) , ซิลิคอน (Silicon) , อลูมิเนียม (Aluminium) และเหล็ก (Iron) , ส่วนประกอบออกไซด์จะมีจำนวนแปรเปลี่ยนไปขึ้นกับชนิดของซีเมนต์

มาตรฐานเยอรมัน DIN EN 197 แบ่งชนิดของซีเมนต์ เป็น 5 ชนิด ได้แก่ Portland cement , Portland composite cement , Blast-furnance cement , Pozzolanic cement และ Composite cement

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) เป็นชนิดที่ใช้กว้างขวางมากที่สุด จะทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) ซึ่งถือเป็นปฏิกิริยา ขบวนการเคมี-ฟิสิกส์ จนกระทั่งได้ผลผลิตเป็นของแข็ง ตามกระบวนการซึ่งต้องอาศัยน้ำผสมที่มีจำนวนมากพอทำให้เปียกและเกิดไฮเดรชัน นอกจากนี้ยังต้องการ ความชื้นสูงตลอดจน การป้องกันไม่ให้แห้งไป ในบางกรณีอาจต้องรดน้ำด้วย ปฏิกิริยาดังกล่าวต้องการอุณหภูมิที่มากกว่า 5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยเร่งขบวนการแข็งตัว

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีส่วนสำคัญต่อความสมบูรณ์ของไฮเดรชัน

2.3.4 มวลรวม (Aggregates)

ธรรมชาติและขนาดของเม็ด (Grain) ที่รวมเข้ากับตัวประสานที่เป็นสินแร่ จะก่อให้เกิด ส่วนประกอบ (Constituent) หลักที่มีปริมาตรร้อยละ 65 ถึง 80 มวลรวมนี้จะเป็นสิ่งที่กำหนดคุณสมบัติของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

ประเภทของมวลรวมที่แบ่งตามน้ำหนัก ได้แก่ มวลรวมอย่างเบา (Light weight aggregate) มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normal weight aggregate) และมวลรวมหนัก (Heavy aggregate)

สัดส่วนของขนาดเม็ดในมวลรวมมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของวัสดุ เช่นในเรื่อง การทำงานได้ (Workability) และการอัดตัวได้ (Compactability) นอกจากนี้ยังมีผลต่อปริมาณน้ำและปริมาณตัวประสาน (Binders) ด้วย

อเนียง มอร์ตาร์และคอนกรีตที่มีมวลรวมอนินทรีย์น้ำหนักเบา (Lightweight inorganic aggregates) แสดงคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนได้ดีขึ้น และมีพฤติกรรมที่ดีในไฟ วัสดุธรรมชาติ เช่น Tuff Pumices Scoria วัสดุที่มนุษย์ทำขึ้น เช่น Expanded clay , Expanded shale , Foamed slag , Clay brick chippings ในการประยุกต์บางอย่าง อาจพบ Wood wool , Wood chips และพลาสติก เช่น เม็ดกลมของโพลิสไตรีน (Polystyrene beads)

2.3.5 สารเพิ่มเติม / สารผสมเพิ่ม (Additives / Admixtures)

อาจมีการเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตระหว่างการทำงาน หรือในสถานะเมื่อเสร็จแล้ว หนึ่งอาจมีการเติมเม็ดสี เพื่อทำให้เกิดสีในผลิตภัณฑ์คอนกรีตด้วย

2.3.6 มอร์ตาร์ (Mortar)

มอร์ตาร์เป็นส่วนผสม (Mixture) ของตัวประสาน น้ำ และทราย อาจมีสารเพิ่มเติมหรือสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ด้วย

2.4 คอนกรีต (Concrete)

2.4.1 ทั่วไป

ในปัจจุบันนี้ มีการผลิตคอนกรีตด้วยคุณภาพสูง และมีการประยุกต์ใช้หลายลักษณะ ส่วนผสมของคอนกรีตที่สำคัญ ได้แก่ ซีเมนต์ (Cement) มวลรวม (Aggregates) และน้ำ เมื่อแข็งแล้วมีลักษณะแข็งคล้ายหิน

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดในด้านงานวิศวกรรม มีการประมาณกันว่าการบริโภคคอนกรีตในปัจจุบันในโลกอยู่ในปริมาณ 11 พันล้านเมตริกตันทุกปี ด้วยเหตุผลอย่างน้อย 3 ประการ (Mehta and Monteiro, 2006 : 1-9) คือ

- 1) คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ต้านทานต่อน้ำได้อย่างดีเยี่ยม คอนกรีตใช้งานสำหรับเขื่อน, ลาดฝิวคลอง, ฝิวจราจร ชั้นส่วนโครงสร้างที่เปิดรับต่อความชื้น (Moisture) เช่น เสาเข็มฐานราก พื้น คาน เสา หลังคา กำแพงภายนอก และท่อ อาจสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กหรือ

คอนกรีตอัดแรง ความคงทน (Durability) ของคอนกรีตต่อน้ำเป็นบทบาทสำคัญ ที่ใช้ในเรื่องที่มีสภาวะแวดล้อมรุนแรงของอุตสาหกรรมและธรรมชาติ

2) ความง่ายในการทำรูปร่างและขนาดของชิ้นส่วนคอนกรีตโครงสร้าง ที่ทำให้ทำได้หลายรูปร่างและขนาดที่ต่าง ๆ ไป ทั้งนี้เพราะคอนกรีตที่ทำขึ้นสด ๆ นั้น มีความสม่ำเสมออ่อนตัว (Plastic consistency) ซึ่งทำให้วัสดุไหลเข้าไปในแบบหล่อที่เตรียมไว้ก่อนได้ หลังจากเวลาหลายชั่วโมงผ่านไปเมื่อคอนกรีตเป็นของแข็ง และแข็งตัวเป็นมวลที่แข็งแรงแล้วก็สามารถถอดแบบไปใช้ได้

3) การมีราคาที่ถูกที่สุด และเป็นวัสดุที่มีพร้อมและหามาใช้งานได้ ส่วนประกอบสำคัญในการทำคอนกรีต คือ มวลรวม น้ำ และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ค่อนข้างราคาไม่แพงและหาได้เป็นปกติในเกือบทุกส่วนของโลก

2.4.2 นิยามเกี่ยวกับคอนกรีต

นิยามเกี่ยวกับคอนกรีต ได้อ้างอิงกับมาตรฐาน ASTM C125 (Standard Definition of Terms Relating to Concrete and Concrete Aggregates) และ ACI Committee 116 (A Glossary of Terms in the Field of Cement and Concrete Technology) ดังนี้ (Mehta and Monteiro, 2006 : 10-14)

1) คอนกรีต (Concrete) คือ วัสดุประกอบ (Composite material) ที่ประกอบด้วยสิ่งสำคัญ คือ ตัวกลางซึ่งเป็นตัวประสาน (Binding medium) ซึ่งจะมีเม็ด (Particles) หรือ มวลรวม (Aggregate) ที่จมอยู่ สำหรับในประเภทไฮดรอลิกซีเมนต์คอนกรีตนั้นตัวประสานได้เกิดขึ้นจากส่วนผสม (Mixture) ของไฮดรอลิกซีเมนต์ (Hydraulic cement) กับน้ำ

2) มวลรวม (Aggregate) คือวัสดุที่เป็นเม็ด (Granular material) เช่น ททราย, กรวด, หินโม่ หรือของเหลือทิ้งที่เป็นสิ่งก่อสร้างหรือถูกทุบทำลาย จะถูกนำมาใช้กับตัวกลางที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (Cementing medium) เพื่อผลิตคอนกรีต หรือมอร์ตาร์ (Mortar)

มวลอย่างหยาบ (Coarse aggregate) หมายถึง เม็ดมวลรวมที่ใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือตะแกรงเบอร์ 4 และมวลรวมอย่างละเอียด (Fine aggregate) หมายถึงเม็ดมวลรวมที่เล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร แต่ใหญ่กว่า 75 ไมโครเมตร (μm) หรือตะแกรงเบอร์ 200

3) มอร์ตาร์ (Mortar) คือส่วนผสม (Mixture) ของทราย ซีเมนต์ และน้ำ ซึ่งเป็นส่วนผสมที่คล้ายคอนกรีตแต่ไม่มีมวลรวมหยาบ

4) ซีเมนต์ (Cement) คือวัสดุที่ถูกบดอย่างละเอียด (Finely pulverized) แห้งและด้วยตัวเองแล้วไม่เป็นตัวประสาน (Binder) แต่จะมีคุณสมบัติการประสานอันเป็นผลมาจากไฮ

เดรชัน (Hydration) นั้นคือจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสินแร่ซีเมนต์ (Cement minerals) กับน้ำ เรียกซีเมนต์ว่าเป็นไฮดรอลิก (Hydraulic) เมื่อผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันมีความเสถียร (Stable) ในภาวะแวดล้อมที่ประกอบด้วยน้ำ

ซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ใช้โดยปกติสำหรับการทำคอนกรีต คือ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) ซึ่งประกอบด้วยสิ่งสำคัญคือ แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicates) ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยา ซึ่งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrates) ที่เกิดขึ้นระหว่างไฮเดรชันของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะเป็นตัวที่มีบทบาทหลัก สำหรับคุณลักษณะการยึดติด (Adhesive characteristic) และเสถียรในสภาวะแวดล้อมที่ประกอบด้วยน้ำ

5) สารผสมเพิ่ม (Admixtures) คือวัสดุที่นอกเหนือไปจาก มวลรวม, ซีเมนต์ และน้ำ ซึ่งเพิ่มเติมเข้าไปในส่วนผสมคอนกรีต ก่อนหรือหลังการผสม เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะบางประการของคอนกรีต เช่น การก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) โดยมีอิทธิพลต่ออัตราของไฮเดรชันของซีเมนต์, บางประเภททำให้เกิดการลื่นไหลของส่วนผสมคอนกรีตสด, เพิ่มความคงทน หรือลดรอยแตกเนื่องจากความร้อน เป็นต้น

2.4.3 กรอบการศึกษาคอนกรีตในด้านวัสดุทางวิศวกรรมโยธา

กรอบการศึกษาคอนกรีตในด้านวัสดุทางวิศวกรรมโยธา สามารถจำแนกได้คือ

- 1) วัสดุที่เป็นองค์ประกอบ (Constituent materials)
ได้แก่ ซีเมนต์, มวลรวม, น้ำ และสารเพิ่มเติม
- 2) คุณสมบัติของคอนกรีตสด (Properties of fresh concrete)
ได้แก่ ความสามารถในการทำงานได้ (Workability), การวัดความสามารถในการทำงานได้ ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการทำงานได้ และความเสถียร (Stability)
- 3) คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Properties of hardened concrete)
ได้แก่ กำลัง (Strength), ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลัง และการเปลี่ยนรูป (Deformation)
- 4) ความคงทนของคอนกรีต (Concrete durability)
ได้แก่ คุณสมบัติต้านการซึมของคอนกรีต (Permeation properties of concrete) กลไกการเสื่อมสลาย (Mechanism of deterioration), การคุกคามทางเคมี (Chemical attack), การคุกคามทางกายภาพ (Physical attack), การผลิตโครงสร้างคอนกรีตที่มีความคงทน

5) การประเมินคุณภาพของคอนกรีตที่ทำในที่ (Assessment of in situ concrete quality)

ได้แก่ การวางแผนโปรแกรมการทดสอบ, วิธีการทดสอบ, การทดสอบกำลัง, การทดสอบเปรียบเทียบคุณภาพคอนกรีต การทดสอบความคงทน (Durability) การตีความของผลลัพธ์และรายงาน

6) การออกแบบคอนกรีตและการควบคุมคุณภาพ

ได้แก่ คุณสมบัติคอนกรีตที่ต้องการ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต และการควบคุมคุณภาพด้วยวิธีทางสถิติ

2.4.4 ชนิดของคอนกรีต

ชนิดของคอนกรีต (Types of concrete) (Mehta and Monteiro, 2006 : 14-15)

เมื่อพิจารณาในแง่ของหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) หรือความหนาแน่น (Density) อาจจัดประเภทของคอนกรีตอย่างกว้าง ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

1) คอนกรีตน้ำหนักปกติ (Normal-weight concrete) คอนกรีต ที่ประกอบด้วยมวลรวมต่าง ๆ ที่เป็นวัสดุธรรมชาติ เช่น หินทราย, กรวด หรือหินโม่ โดยทั่วไปแล้วมีน้ำหนักประมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และนี่เป็นชนิดที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับวัตถุประสงค์การเป็นโครงสร้าง

2) คอนกรีตน้ำหนักเบา (Lightweight concrete)

คอนกรีตที่มีน้ำหนักน้อยกว่า 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3) คอนกรีตหนัก (Heavyweight concrete)

คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมที่มีความหนาแน่นสูง (High density) และโดยทั่วไปมีน้ำหนักกว่า 3,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลักษณะการใช้งาน เช่น ใช้สำหรับเป็นโล่กันรังสี (Radiation shielding)

เมื่อพิจารณาในแง่กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) อาจจัดได้ 3 ประเภท คือ

1) คอนกรีตกำลังต่ำ (Low-strength concrete)

มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่า 20 MPa (200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ,ksc.)

2) คอนกรีตกำลังปานกลาง (Moderate-strength concrete)

มีกำลังรับแรงอัด 20 ถึง 40 MPa (200 ถึง 400 ksc)

3) คอนกรีตกำลังสูง (High-strength concrete)

มีกำลังรับแรงอัด มากกว่า 40 MPa (400 ksc)

2.5 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งแล้วและนัยสำคัญ

คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งแล้ว และนัยสำคัญ (Properties of hardened concrete and their significance)

การคัดเลือก วัสดุทางวิศวกรรมสำหรับการประยุกต์ใช้เฉพาะกรณี ต้องพิจารณาความสามารถในการทนทานต่อแรงที่มากระทำ โดยปกติแล้วจะพิจารณาเรื่องสำคัญ คือ

1) ความเครียด (Strain)

การเปลี่ยนรูป (Deformation) ที่เกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ อธิบายในรูปของ ความเครียด (Strain) ซึ่งนิยามว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงในด้านความยาวต่อหน่วยความยาว

2) ความเค้น (Stress)

น้ำหนักบรรทุก (Load) อธิบายในรูปของความเค้น (Stress) ซึ่งนิยามว่าเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งขึ้นกับว่าความเค้นนั้นเกิดขึ้นบนวัสดุนั้นอย่างไร เช่น การอัด (Compression), การดึง (Tension), การดัด (Flexural), การเฉือน (Shear), และการบิด (Torsion) เป็นต้น

อันึงความสัมพันธ์ ความเค้น-ความเครียด อธิบายได้เป็นการทั่วไปในความหมายของกำลัง (Strength), อีลาสติกโมดูลัส (Elastic modulus), ความเหนียวการยืดตัว (Ductility) และความแกร่ง (Toughness)

3) กำลัง (Strength)

คือ การวัดปริมาณของความเค้นที่ต้องการ เพื่อที่จะทำให้วัสดุหนึ่งพัง (Fail)

เนื่องจากกำลังของคอนกรีต มีความสัมพันธ์กับขบวนการไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งค่อนข้างช้า ดังนั้น ข้อกำหนดและการทดสอบกำลังของคอนกรีต จึงอยู่บนพื้นฐานของตัวอย่างที่ได้บ่มภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ และความชื้นมาตรฐานเป็นเวลา 28 วัน โดยทั่วไปแล้วกำลังทางด้านแรงดึง (Tension) และแรงดัด (Flexural) ของคอนกรีตอยู่ในขนาดประมาณร้อยละ 10 และ 15 ตามลำดับ ของกำลังด้านแรงอัด (Compressive strength) เหตุผลของความแตกต่างอย่างมากระหว่างกันนี้ เกิดขึ้นเนื่องจาก คอนกรีตประกอบด้วยสิ่งที่แตกต่างกันหลายสิ่ง และมีองค์ประกอบในระดับโครงสร้างเล็ก ๆ ที่เรียกว่าไมโครสตรักเจอร์ (Microstructure)

4) โมดูลัสของอีลาสติกซิตี (Modulus of elasticity)

มีนิยามว่าเป็นอัตราส่วน (Ratio) ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียดที่ย้อนกลับได้ (Reversible strain) ในวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) อีลาสติกโมดูลัส เป็นการวัดแรงยืดเหนียวระหว่างอะตอม และไม่มีผลโดยการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างระดับไม

โคโร แต่คอนกรีตเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดย่อย ๆ อิลาสติกโมดูลัสของคอนกรีตในทางด้านแรงอัด แปรค่าจาก 14,000 ถึง 40,000 เมกะปาสคาล (Mega Pascal, MPa) หรือ ประมาณ 140,000 ถึง 400,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kilogram per square centimeter, ksc) นัยสำคัญของขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Elastic limit) ในการออกแบบโครงสร้างอยู่ในความจริงที่ว่า ค่านี้เป็นการแทน ความเค้นสูงสุดที่ยอมให้เกิด ก่อนที่วัสดุนั้นจะมีการแปรรูปไปโดยถาวร ดังนั้นวิศวกรจึงต้องรู้จัก อิลาสติกออฟโมดูลัส เนื่องจากมันมีอิทธิพลต่อความแข็งแกร่ง (Rigidity) ของการออกแบบหนึ่ง ๆ

5) ความเครียดพลาสติกหรืออินอิลาสติก (Plastic or inelastic strain) ความเหนียวหรือการยืดตัว (Ductility) และความแกร่ง (Toughness)

ที่ระดับความสูง ความเครียดจะไม่เป็นสัดส่วนกับความเค้นที่ให้ และกลายเป็นเรื่องถาวร (Permanent) ความเครียดนี้ เรียกว่าความเครียดพลาสติก (Plastic strain) หรือ ความเครียดอินอิลาสติก (Inelastic strain) ปริมาณของความเครียดอินอิลาสติกที่สามารถเกิดขึ้นก่อนการพัง (Failure) เป็นการวัดความเหนียว หรือยืดตัว (Ductility) ของวัสดุนั้น พลังงานที่ต้องการเพื่อที่จะทำให้วัสดุนั้นแตกหักเสียหายไป คือผลคูณของแรงกับระยะทางนั้น แสดงได้โดยพื้นที่ใต้เส้นโค้งของความเค้น-ความเครียด คำว่าความแกร่ง (Toughness) ใช้เป็นการวัดพลังงานนี้

ความไม่เหมือนกันระหว่างความแกร่ง (Toughness) กับกำลัง (Strength) ที่ควรพิจารณา คือ ความแกร่งเป็นการวัดพลังงาน ส่วนกำลังเป็นการวัดความเค้นที่ต้องการเพื่อให้วัสดุเกิดแตกหักไป ดังนั้นวัสดุสองอย่างอาจมีกำลังเหมือนกัน แต่มีความแกร่งต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อกำลังของวัสดุหนึ่งสูงขึ้น ความเหนียวหรือยืดตัว และความแกร่งจะลดลง เช่นเดียวกับวัสดุที่มีกำลังสูงมักพังด้วยการเปราะ (Brittle manner) นั่นคือ ปราศจากการเกิดความเครียดพลาสติกที่มีนัยสำคัญ

ภายใต้แรงอัด คอนกรีตอาจแสดงให้เห็นถึงความเครียดอินอิลาสติกอยู่บ้าง ก่อนการพัง แต่ความเครียดเมื่อแตกหักก็จะมีค่าประมาณ 2000 ในล้าน หรือ 0.002 เท่านั้น ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ ความเครียดเมื่อพังของโลหะโครงสร้าง ดังนั้นสำหรับวัตถุประสงค์ทางปฏิบัติแล้ว ผู้ออกแบบจะไม่คิดว่า คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความเหนียว (Ductile) และไม่ใช้สำหรับโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระแทกขนาดใหญ่ เว้นแต่จะมีการเสริมกำลัง (Reinforce) ด้วยเหล็ก

6) คอนกรีต และกฎของของผสม (Laws of mixture)

คอนกรีต เป็นวัสดุประกอบ (Composite material) อย่างไรก็ตามคุณลักษณะหลายประการของคอนกรีตก็ไม่ได้เป็นไปตามกฎของของผสม (Laws of mixtures) ตัวอย่างเช่น ภายใต้ได้น้ำหนักบรรทุกแบบอัด (Compressive loading) ทั้งมวลรวม และส่วนไฮเดรตซีเมนต์เพสต์ (Hydrated cement paste) หากนำมาทดสอบแยกกัน จะพังลงในอย่างยืดหยุ่น (Elastically) ในขณะที่คอนกรีตเองแสดงให้เห็นพฤติกรรม อินยืดหยุ่น ก่อนแตกหักและเช่นกันที่ กำลังของคอนกรีต ที่โดยทั่วไปแล้วจะต่ำมากกว่ากำลังแต่ละส่วนขององค์ประกอบทั้งสองนั้น

ความที่ดูเหมือนแปลกไป (Anomalies) เหล่านี้ในพฤติกรรมของคอนกรีต อาจอธิบายได้บนพื้นฐานของโครงสร้างขนาดย่อย (Microstructure) ของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บทบาทสำคัญของบริเวณการถ่ายเทระหว่างผิว (Interfacial transition zone) ระหว่างมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) และซีเมนต์เพสต์ (Cement paste)

7) การคืบ (Creep) และการหดตัว (Shrinkage)

สำหรับวัสดุบางอย่างแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการให้น้ำหนักบรรทุก (Loading time) แต่สำหรับคอนกรีตนั้นมีลักษณะสิ่งดังกล่าวที่ขึ้นกับระยะเวลา กล่าวคือ ถ้าตัวอย่างคอนกรีตถูกคงความเค้นที่คงที่หนึ่งไว้ เช่น ที่ร้อยละ 50 ของกำลังประลัย (Ultimate strength) คอนกรีตแสดงให้เห็นถึงความเครียดพลาสติก (Plastic strain) ปรากฏการณ์ของการคืบ ๆ เพิ่มขึ้นในด้านความเครียดไปกับเวลาภายใต้ความเค้นที่คงอยู่นั้น เรียกว่า การคืบ (Creep)

ความเครียด (Strain) อาจเพิ่มขึ้นได้แม้คอนกรีตนั้น จะไม่ได้น้ำหนักบรรทุก แต่เป็นด้วยผลในเรื่องความเปลี่ยนแปลงของ ความชื้น และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เกิดการหดตัว (Shrinkage) ในเนื้อคอนกรีต และคอนกรีตโครงสร้างมักจะเกิดการแตกร้าวขึ้น

8) ข้อพิจารณาในการเลือกวัสดุ

การเลือกวัสดุควรพิจารณาไม่แต่เพียง กำลัง (Strength), ความเสถียรทางด้านมิติ (Dimensional stability) และคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic properties) เท่านั้น แต่ควรคำนึงถึงความคงทน (Durability) ด้วย ซึ่งมีนัยสำคัญสำหรับต้นทุนรอบอายุ (Life-cycle cost) ของโครงสร้างหนึ่ง ๆ

มีความสัมพันธ์ระหว่าง กำลัง (Strength) และความคงทน (Durability) เมื่อกำลังต่ำจะมากับความพรุนสูง (High porosity) และการยอมให้ซึมผ่านได้สูง (High permeability) คอนกรีตที่มีคุณสมบัติดังกล่าวจะมีความคงทนลดน้อยลง การซึมผ่านได้ของคอนกรีตขึ้นอยู่กับไม่แต่

เพียงสัดส่วนที่ผสม การอัดตัว หรือการบ่มตัวเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับรอยแตกเล็ก ๆ (Microcracks) ที่เกิดขึ้นโดยอุณหภูมิโดยรอบ (Ambient temperature) และรอบของความชื้น (Humidity cycles) ด้วย

2.6 คอนกรีตน้ำหนักเบา (Light-weight concrete)

2.6.1 คุณสมบัติสำคัญ โดยสังเขป

คุณสมบัติของคอนกรีต เมื่อเทียบระหว่างชนิด น้ำหนักปกติ กับ น้ำหนักเบา ในเรื่อง ความหนาแน่น (Density) , กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) และค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) โดยสังเขป เป็นดังต่อไปนี้

1) ความหนาแน่นของคอนกรีตปกติมีค่าประมาณ 2,100 ถึง 2,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนของคอนกรีตน้ำหนักเบามีค่าประมาณ 500 ถึง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติ มีค่าประมาณ 15 ถึง 100 MPa ส่วนของคอนกรีตน้ำหนักเบามีค่าประมาณตั้งแต่ 1 MPa

3) ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตปกติมีค่าประมาณ 1.4 ถึง 1.9 W/mK ส่วนของคอนกรีตน้ำหนักเบามีค่าประมาณ 0.2 ถึง 1.0 W/mK

2.6.2 การแบ่งชั้นของคอนกรีตเบา (Classification of lightweight concretes)

คุณสมบัติของคอนกรีต คือ กำลังรับแรงอัด ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่น มีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตรงต่อกัน ในชนิดของคอนกรีตเบา มีแนวทางการจัดแบ่งชั้นของคอนกรีตเป็นชนิดโครงสร้าง (Structural) ชนิดโครงสร้าง / ฉนวน (Structural / Insulating) และชนิดฉนวน (Insulation) ตามตารางที่ 2-1 (Newman and Choo, 2003 : 2/9) การแบ่งชั้นของคอนกรีตเบา มีข้อพิจารณาว่า

1) เมื่อมีกำลังรับแรงอัด มากกว่า 15.0 MPa ถือเป็นชนิดโครงสร้าง และเมื่อน้อยกว่า 0.5 MPa ถือเป็นชนิดฉนวน

2) เมื่อมีค่าการนำความร้อน ที่น้อยกว่า 0.30 W/mK ถือเป็นชนิดฉนวน

3) เมื่อมีความหนาแน่น 1,600 ถึง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถือเป็นชนิดโครงสร้างและที่ต่ำกว่า 1,450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถือเป็นฉนวน เป็นต้น

4) ชนิดโครงสร้าง / ฉนวน คือที่ประมาณระหว่าง โครงสร้างและฉนวน รายละเอียดดังในตารางที่กล่าวถึงข้างต้น

2.6.3 วิธีการผลิตคอนกรีตน้ำหนักเบา

การจัดองค์ประกอบของส่วนผสมเพื่อให้ได้คอนกรีตน้ำหนักเบามีดังต่อไปนี้ คือ

- 1) คอนกรีตชนิดไม่มีส่วนผสมเม็ดละเอียด (No fines concrete, NFC)
- 2) คอนกรีตชนิดที่ประกอบด้วย การเกิดอากาศ และฟอง (Aerated and foamed concrete)
- 3) คอนกรีตชนิดที่ประกอบด้วยมวลรวมที่มีน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete)

ตารางที่ 2-1 การจำแนกประเภทคอนกรีตน้ำหนักเบา (Classification of lightweight concretes) (Newman and Choo, 2003 : 2/9)

Property	Class and type		
	I Structural	II Structural/ insulating	III Insulating
Compressive strength (MPa)	>15.0	>3.5	>0.5
Coefficient of thermal conductivity (W/mK)	–	<0.75	<0.30
Approximate density range (kg/m ³)	1600–2000	<1600	<<1450

2.6.4 คอนกรีตชนิดที่ประกอบด้วยอากาศและฟอง (Aerated and foamed concrete)

หลักการของคอนกรีตประเภทนี้ คือ เทคนิคการทำให้เกิดช่องว่างที่ถูกกักไว้ (Entrained void) ให้อยู่ในเนื้อซีเมนต์ที่แข็งตัวขึ้น (Harden cement paste) หรือในเนื้อซีเมนต์-ทราย ที่เรียกว่ามอร์ตาร์แมทริกซ์ (Mortar matrix) ก็ตาม ดังนั้นโครงสร้างของเนื้อคอนกรีต จึงเป็นโครงสร้างเป็นช่องเซลล์ (Cellular structure) ซึ่งทำให้เนื้อคอนกรีตโดยรวมมีความหนาแน่นต่ำ

สำหรับคอนกรีตที่ประกอบด้วยอากาศ (Aerated concrete) นั้น การทำให้เกิดโครงสร้างให้มีเป็นโพรงเล็ก ๆ ขึ้นตามประสงค์ คือการทำให้เกิดอากาศ (Aerated) ขึ้น มีหลักการสำคัญ คือ การใช้ผงอลูมิเนียม (Aluminium) ผสมเข้าไปด้วยประมาณร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักซีเมนต์ ซึ่งปกติเป็นชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เกิดปฏิกิริยาเคมีมีฟองก๊าซไฮโดรเจนแทรกเข้าไปในซีเมนต์เหลว หรือมอร์ตาร์ ฟองก๊าซขยายตัวทำให้ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นที่ต้องการ บ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 160 ถึง 200 เซลเซียสภายใต้ความดันในห้องอบ

(Autoclave) เหล็กเสริมเตรียมให้อยู่ในเนื้อของคอนกรีตที่เป็นชั้นงานต่อมา ชั้นงานจะถูกตัดชอยให้เป็นชั้นเล็กลงตามความประสงค์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงมีกำลังทางโครงสร้างอยู่พอสมควร

คอนกรีตดังกล่าวรู้จักกันในชื่อ คอนกรีตที่ทำให้เกิดมีฟองอากาศและใช้การอบความดันและอุณหภูมิ เรียกเป็นคอนกรีตเกิดฟองอากาศอบไอน้ำและความดัน (Autoclaved Aerated Concrete) ย่อว่า เอเอซี (AAC) มีคุณสมบัติที่สำคัญโดยสรุป จากตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของ เอเอซี ได้แก่ (Newman and Choo, 2003 : 2/8)

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทั่วไปของ เอเอซี (Typical properties of autoclaved aerated Concrete) (Newman and Choo, 2003 : 2/8)

Dry density (kg/m ³)	Compressive strength (wet) (MPa)	Flexural strength (MPa)	E-value (GPa)	Thermal conductivity (3% moisture) (W/mK)
450	3.2	0.65	1.6	0.12
525	4.0	0.75	2.0	0.14
600	4.5	0.85	2.4	0.16
675	6.3	1.00	2.5	0.18
750	7.5	1.25	2.7	0.20

(Newman and Choo, 2003)

- 1) ความหนาแน่นแห้ง (dry density) 450 ถึง 750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³)
- 2) กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) 3.2 ถึง 7.5 เมกะปาสคาล (MPa) ประมาณ 32 ถึง 75 kg/cm² (ksc)
- 3) กำลังรับแรงดัด (Bending strength) 0.65 ถึง 1.25 เมกะปาสคาล (MPa) ประมาณ 6 ถึง 12 kg/cm² (ksc)
- 4) ค่าโมดูลัสของพลศาสตร์ (Modulus of elasticity) หรือเรียกว่า ค่าอี (E-Value) 1.6 ถึง 2.7 กิกะปาสคาล (GPa) ประมาณ 16000 ถึง 27000 kg/cm² (ksc)
- 5) ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) 0.12 ถึง 0.20 วัตต์/เมตร·เคลวิน (W/m·K)

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติข้างต้นในข้อ 1) , 2) และ 5) เทียบกับตารางที่ 2-1 ตามข้อ 2.6.3 แล้วเห็นได้ว่า ด้านกำลังรับแรงอัด อยู่ในระหว่างประเภท โครงสร้างกับประเภท โครงสร้าง / ฉนวน ด้านค่าการนำความร้อนอยู่ประมาณ ฉนวน และความหนาแน่น อยู่ประมาณ ฉนวน จึงสรุปได้ว่าวัสดุเอเอซี มีความเป็นฉนวนที่ชัดเจน และมีคุณสมบัติทั้งโครงสร้างกึ่งฉนวน

2.7 การประยุกต์ใช้ เอเอซี (AAC) ในงานโครงสร้างบ้านพักอาศัย

2.7.1 การค้นพบและการใช้งาน

นักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนได้ค้นพบขบวนการสร้างสรรคอนกรีตที่มีช่องเซล (Cellular concrete) ในปี ค.ศ.1923 โดยการเติมผงอลูมิเนียม (Aluminium powder) เข้ากับซีเมนต์ (Cement) ไลม์ (Lime) น้ำและทรายที่บดละเอียด ทำให้ส่วนผสมเกิดฟองอากาศขึ้นและเกิดการขยายตัวของปริมาตรคอนกรีตอย่างมากมาย ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังมีกำลังทางโครงสร้างอยู่พอสมควร และมีน้ำหนักเบา สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยวัตถุดิบที่น้อยลงในการที่จะได้ปริมาตรเดียวกับคอนกรีตแบบดั้งเดิม ผลิตภัณฑ์นี้ได้แพร่หลายอย่างกว้างขวางเป็นครั้งแรกในประเทศเยอรมันหลังสงครามโลกครั้งที่สอง ในปัจจุบันเป็นเรื่องธรรมดาในสวนมากของทวีปยุโรป แต่ตลาดในทวีปอเมริกาเหนือเริ่มขึ้นเมื่อประมาณปี ค.ศ.1998 โดยเริ่มที่ส่วนกำแพงก่อน ต่อมาตามด้วยส่วนพื้น และหลังคา เมื่อปี ค.ศ. 2006 มีสถิติระบุจำนวนการใช้จำนวนประมาณ 6 ล้านตารางฟุตต่อปี ส่วนใหญ่แล้วจะใช้ในการก่อสร้างผนัง ในปัจจุบันใช้ เอเอซี กันมากในโครงการสำหรับอาคารพาณิชย์ ส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ของสหรัฐอเมริกา และมีการขยายตัวเข้าไปในตลาดที่อยู่อาศัยและเพิ่มมากขึ้นในบริเวณภาคเหนือ มีโรงงานในปัจจุบันเมื่อปี ค.ศ. 2006 จำนวน 3 โรงตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ตะวันออกเฉียงใต้ และตะวันตกเฉียงใต้ ของสหรัฐอเมริกา (Vanderwerf, 2006 : 175-190, 261-271)

2.7.2 ลักษณะของ เอเอซี (AAC)

ลักษณะสำคัญของ เอเอซี คือ มีฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ กระจายอยู่ในเนื้อคอนกรีต ผลิตในโรงงาน ประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรเป็นอากาศ ที่เหลือเป็นคอนกรีตที่มีมวลรวมทรายละเอียด และไม่มีหิน ฟองอากาศเหล่านี้ทำให้ เอเอซี มีน้ำหนักค่อนข้างเบาเป็นฉนวนที่ดี พร้อมกับมีความแข็งแรงในการเป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง

2.7.3 การใช้ เอเอซี (AAC) เป็นชิ้นส่วนผนัง

มีการศึกษาและรวบรวมข้อมูล (Vanderwerf, 2006 : 175-190) สรุปได้ดังต่อไปนี้

1) รูปร่างและการผลิต

ชิ้นส่วนมี 2 ลักษณะ ได้แก่ บล็อก (Block) และแผ่นแนวตั้ง (Panel) โดยการผลิตเป็นแท่งยาว (Billet) แล้วใช้ลวดตัดเป็นชิ้นตามต้องการ

2) การประกอบและติดตั้ง

เอเอซีบล็อกประกอบและติดตั้งด้วยวิธีเดียวกับคอนกรีตบล็อก

สำหรับการประกอบและติดตั้งแผ่นแนวตั้ง ใช้วิธีเช่นเดียวกับแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป มีการอุดช่องรอยต่อระหว่างแผ่น แผ่นมีน้ำหนักเบา ทำให้ง่ายต่อการหิบบยก

3) คุณสมบัติและหน้าที่ของผนังเอเอซี (AAC)

ข้อพิจารณาสำคัญในด้านคุณสมบัติและหน้าที่ของผนัง เอเอซี คือคุณภาพของวัสดุ เอเอซี ที่รวมเอาคุณสมบัติที่ทำหน้าที่หลายประการไว้ โดยทำหน้าที่ฉนวน และส่วนของโครงสร้างผนัง ผิวหน้าของวัสดุสามารถทำเป็นช่องทางสำหรับสายไฟฟ้า การตกแต่งผิวอาจทำได้โดยฉาบลงโดยตรงบนผิวหน้านั้น เอเอซี มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับคอนกรีตในด้านความคงทน (Durability) และความเสถียรอยู่ตัว (Stability) แต่มีความอ่อนนุ่มของเนื้อวัสดุที่นำมาตัดได้ดีกว่าคอนกรีตดั้งเดิม และสามารถใช้ตะปู และตะปูเกลียวได้ อนึ่งวัสดุมีน้ำหนักค่อนข้างเบา และง่ายในการทำรูปร่าง ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงสามารถนำมาใช้ก่อสร้างกำแพงภายในได้ด้วย

ข้อพิจารณาสำคัญในด้านประโยชน์ต่อผู้ใช้งานอาคาร คือ ผนังเอเอซี มีสิ่งที่ดีเกือบทั้งหมดจากผนังคอนกรีต ในบางกรณีจะมีคุณสมบัติที่ดื่นอกเหนือขอบเขตคอนกรีตดั้งเดิมออกไปอีก เช่นการยอมให้เสียงผ่านน้อย ความต้านทานต่อไฟมาก การถูกตัดและทำเป็นรูปได้ง่าย มีประสิทธิภาพทางพลังงานที่ดี มีความต้านทานต่อน้ำ การเสื่อมสภาพ เชื้อรา และแมลง เช่นเดียวกับวัสดุแบบซีเมนต์ (cementitious) แม้ว่า เอเอซี มีความแข็งแรงต่ำกว่าคอนกรีตดั้งเดิม แต่มีวิธีการเพิ่มกำลังการรับน้ำหนักให้ได้ตามที่ต้องการโดยการสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และคานอยู่ภายในด้วยวิธีการอุดช่อง (grout) และใส่เหล็ก (rebar) อย่างไรก็ตามอาจต้องพิจารณาเรื่องวัสดุตกแต่งที่ดีเพื่อ และการป้องกันผิวเนื่องจากผิวของเอเอซีมีความแข็งแรงน้อยกว่าคอนกรีตดั้งเดิม

4) ขนาดของชิ้นส่วน เอเอซี ชนิดบล็อกและแผ่นผนัง

ขนาดของรูปร่างของชิ้นบล็อก บล็อก เอเอซี มาตรฐานโดยปกติจะมีขนาดสูง 8 นิ้ว และยาว 24 นิ้ว มีความหนา 4 , 6 , 8 , 10 , และ 12 นิ้ว ไม่มีช่องกลวง บล็อก เอเอซี มาตรฐานขนาด 8 นิ้ว x 8 นิ้ว x 24 นิ้ว มีน้ำหนักประมาณ 33 ปอนด์ หรือประมาณ 15 กิโลกรัม มีบล็กรูปพิเศษ เช่น เป็นตัวยู (U) เพื่อไว้สร้าง คานเชื่อมยึดภายในโครงสร้างของผนัง มีรูปแบบบล็อกที่ทำแกน (Cored block) เพื่อสร้างเซลล์ที่ใช้กรอกและเสริมเหล็ก (Reinforced grouted cell) เป็นช่องแนวตั้งทรงกระบอก (Cylindrical vertical cavities)

การออกแบบขนาดและรูปร่างของแผ่นผนัง เพื่อติดตั้งในแนวตั้ง (ตั้ง) มีขนาดมาตรฐานคือ กว้าง 24 นิ้ว และสูงได้ถึง 20 ฟุต มีความหนา 6 , 8 , 10 , และ 12 นิ้ว สามารถมีการเว้าเข้าด้านใน (Concave depression) ไปตามขอบด้านข้าง ดังนั้นเมื่อแผ่นสองแผ่นมาวางเคียง

ชิดติดกัน (Side-by-side) ช่องว่างรูปทรงกระบอก (Cylindrical cavity) จะเกิดขึ้นระหว่างแผ่นต่อแผ่น ช่องดังกล่าวนี้เป็นช่องไว้ใช้เพื่อเทกรอกคอนกรีตหรือเสริมเหล็กด้วยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงต่อระบบผนัง ผนังที่มีความหนา 4 นิ้ว จะมีเพื่อใช้เป็นผนังไม่รับน้ำหนักภายใน

5) การประกอบชิ้นส่วนและการยึดโยง เสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง

หลักสำคัญของการประกอบผนัง คือ ไม่ว่าผนังจะสร้างด้วย บล็อก (Blocks) หรือแผ่น (Panels) ก็ตาม จะประกอบด้วยช่องที่มีการเสริมเหล็กและอุดไว้ (Reinforced grouted cells) และคาน (Beam) ในตำแหน่งต่าง ๆ ที่จะพิจารณาตามความจำเป็นที่ผนังจะต้องมีไว้เพื่อเป็นกำลังทางด้านโครงสร้าง (Structural strength) โดยทั่วไปแล้วจะมีช่องที่เทอุดตามแนวตั้ง (Vertical grouted cell) หนึ่งช่องที่แต่ละมุม หนึ่งช่องที่แต่ละด้านของช่องเปิด และหนึ่งในแผง (Field) ของผนังทุก 6 ถึง 8 ฟุต มีคานยึด (Bond beam) ที่ล้อมรอบด้านบนของกำแพงอย่างครบสมบูรณ์ นอกจากนี้อาจมีคานสั้น (Shorter beam) เหนือช่องเปิดเพิ่มเติมอีกด้วย

6) สายไฟฟ้า และผนังชนิดไม่เป็นโครงสร้าง

การฝังสายไฟฟ้า และกล่องต่าง ๆ ในวัสดุ เอเอซี จะทำโดยใช้วิธีตัดผิวและฝังท่อร้อยสายในรอยตัด และดึงสายไฟร้อยเข้าท่อต่อไปในภายหลัง

ในกรณีที่ผนังไม่เป็นโครงสร้าง (Non-structural) เช่นผนังภายในที่ไม่รับน้ำหนัก จะเป็น วัสดุเอเอซี ล้วน ไม่มีเสาหรือคานอยู่ภายใน แผ่นผนังเหล่านี้ติดกันด้วยมอร์ตาร์ประสาน (Adhesive mortar) เพื่อเชื่อมกับฐานราก หรือพื้นด้านล่าง หรือกับแผ่นอื่น ๆ ตามแนวด้านข้าง

2.7.4 การใช้ เอเอซี เป็นชิ้นส่วนพื้นและหลังคา

พื้นและหลังคา มีลักษณะพฤติกรรมทางโครงสร้างเป็นคานรับแรงดัด ต่อไปนี้จะกล่าวถึงชิ้นส่วนพื้นเป็นหลัก มีประวัติการเริ่มใช้แผ่นพื้น (Deck plank) ทำจากวัสดุ เอเอซี ในทวีปอเมริกาเหนือประมาณปี ค.ศ. 2000

มีการศึกษาและรวบรวมข้อมูลไว้ (Vanderwerf, 2006 : 261-271) สรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การผลิต

การผลิตเป็นแผ่นแนวนอน (Plank) มีกรรมวิธีเช่นเดียวกับแผ่นแนวตั้ง (Panel) ของงานผนัง มีความเป็นฉนวนที่ดี มีประสิทธิภาพทางพลังงานที่ดีเมื่อเป็นหลังคา สำหรับกรณีที่เป็นพื้น ก็ยังคงมีประสิทธิภาพ สำหรับการแบ่งแยกชั้นของอาคารไปเป็นโซนที่มีความแตกต่างกับการให้ความร้อนและความเย็น

2) ข้อได้เปรียบในการใช้ เอเอซี เป็นส่วนพื้นและหลังคา

ข้อได้เปรียบของ แผ่นพื้น เอเอซี คล้ายคลึงกับข้อได้เปรียบของพื้นคอนกรีต เช่น ความต้านทานของโครงสร้างต่อไฟไหม้ ความต้านทานต่อ น้ำ-การเสื่อมสภาพ มีกำลังรับแรง ความต้านทานต่อการสั่นสะเทือน (Vibration) และการทรุดตัว (Settling) การรวมตัวเป็นการบูรณาการทางด้านโครงสร้าง (Structural integrity) มีความทนทาน (Durability) เป็นต้น

ข้อได้เปรียบในงานพื้น เช่น ลดการส่งผ่านของเสียงระหว่างชั้นต่าง ๆ มวลทางความร้อน (Thermal mass) ความแข็งแรง (Rigidity) ด้านทานการสั่นสะเทือน และการกระดอนกลับ (Bounce) สามารถสร้างสรรค์ ผิวหน้าที่เป็นคอนกรีตประดับ เป็นต้น

ข้อได้เปรียบในงานหลังคา เช่น มวลทางด้านความร้อนสูงและทึบอากาศ (Air tightness) ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน และความสบาย (Comfort) ความต้านทานการส่งผ่านของเสียงจากด้านนอก และความต้านทานความเสียหายที่เกิดจากลม เป็นต้น

ข้อได้เปรียบสำหรับผู้ก่อสร้าง เช่น การติดตั้งทำได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับแผ่นพื้นหล่อสำเร็จ (Precast plank) โดยมีตัวอย่างคือเวลาครึ่งวันเพียงพอสำหรับการติดตั้งพื้นหรือหลังคาของอาคารขนาดเล็กหลังหนึ่ง ทั้งนี้เพราะการติดตั้งใช้วัสดุเปียกอย่างจำกัด ดังนั้นงานจึงดำเนินไปได้ในภาวะอากาศต่าง ๆ ได้โดยไม่ต้องการใช้เครื่องมือย่อยสองสามรายการ กับ ชูตทำงาน 1-2 คน ที่มีความชำนาญสูง นอกจากนี้ เอเอซี มีคุณสมบัติที่สามารถตัดได้ด้วยเลื่อยไม้ ดังนั้นจึงสามารถปรับแต่งแผ่นพื้น เอเอซี ในสนามได้บ้าง ส่วนเครื่องมือ เช่น เครื่องยกยังคงเป็นสิ่งที่จำเป็นในการติดตั้ง อย่างไรก็ตามแผ่นพื้น เอเอซี มีน้ำหนักค่อนข้างเบาจึงสามารถยกได้ด้วยเครื่องขนาดเล็ก การออกแบบ และการทำผังของพื้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องดำเนินไว้ล่วงหน้า เพื่อใช้ในการสั่งจัดหาพื้น เอเอซี ได้ตรงตามความต้องการ

3) การประกอบและติดตั้ง

การประกอบให้เป็นพื้นพื้นนั้นใช้จัดเรียงแผ่นพื้นเคียงข้างกันไป ปลายสุดของแผ่นวางไว้บนผนังที่อยู่ด้านล่าง มีระยะวางกดทับ (Bearing) ประมาณ 4 นิ้ว มีช่องรอยต่อระหว่างแผ่นพื้น ที่วางเคียงกัน 2 ชั้น ซึ่งคือร่องยาว (Groove) ที่ตัดลง (Notch) บนขอบของ แผ่นพื้น ที่ชนกัน จากนั้นพื้นจะถูกเททับด้วยคอนกรีตหนา 1 ถึง 2 นิ้ว คอนกรีตนี้จะเต็มร่องที่ไปตามรอยต่อของแผ่นพื้น โดยมีแท่งเหล็กเสริมจมอยู่แท่งหนึ่งในร่องคอนกรีต ซึ่งจะวิ่งตลอดความยาวของพื้น (Deck) และต่อเลยไปในผนังที่สองปลายแผ่นพื้นทั้งหลาย ซึ่งจะทำให้เป็น คานยึดคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete bond beam) เชื่อมโยงแผ่นพื้นและผนังรับน้ำหนักเข้าด้วยกัน สำหรับส่วนเสริมเหล็กของคานยึด (Bond beam) นั้น จะประกอบด้วยเหล็กสองเส้นซึ่งล้อมรอบเส้นรอบรูปทั้งหมดของพื้นอาคารนั้นไว้

4) ขนาดของชิ้นส่วน

ข้อพิจารณาด้านมิติและขนาดรูปร่างของแผ่นพื้น เอเอซี คือ การตัดแผ่นพื้น เอเอซี ในโรงงาน ให้มีความยาวซึ่งจะมากที่สุดถึง 20 ฟุตหรือประมาณ 6 เมตร ส่วนการหล่อแผ่นจะมีขนาดกว้าง 2 ฟุต หนา 8 , 10 หรือ 12 นิ้ว ตามต้องการ แผ่นที่มีความหนามากเพื่อที่จะมีกำลังรับน้ำหนักได้มากขึ้น และจะเป็นช่วงพาดที่ยาวมากขึ้น ลักษณะแผ่นพื้น แต่ละแผ่นจะมีร่องที่ตัดลง (Notch) ไปตามมุมของขอบตามแนวยาว ดังนั้น เมื่อนำแผ่นพื้น สองแผ่นมาวางเคียงกันจะเกิดเป็นร่อง (Groove) ไปตามรอยต่อ เมื่อนำไปติดตั้งจะกดแท่งเหล็กให้จมลงในร่องเพื่อให้เกิดกำลังรับแรงดึงตามที่ต้องการ โดยแท่งเหล็กดังกล่าวจะยึดไปตลอดความยาวของแผ่นพื้น และเทคนิคการติดตั้งเดิมทับหน้าและอุดร่องดังกล่าว

2.7.5 ข้อกำหนดการออกแบบ

การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับข้อกำหนดการออกแบบ (Vanderwarf, 2006 : 181-182) มีสรุปได้คือ

การก่อสร้างด้วยวัสดุ เอเอซี ไม่ถูกรอบคลุมไว้ด้วยโคต (Code) และข้อบังคับ (Regulatory) เช่น International Building Code, International Residential Code หรือ National Building Code of Canada ดังนั้นอาคารที่สร้างด้วย เอเอซี เกือบทั้งหมดในทวีปอเมริกาเหนือ จะมีการคำนวณวิศวกรรมเป็นกรณีไป โดยวิศวกรผู้ออกแบบจะส่งเอกสารทั้งหมดไปยังหน่วยงานด้านอาคาร (building department)

กลุ่มผู้ผลิต เอเอซี ได้จัดตั้งสมาคมขึ้นตั้งแต่ปลายทศวรรษ 1990 ชื่อว่า Autoclaved Aerated Concrete Product Association (AACPA) สมาคมนี้ได้ทำงานเพื่อประชาสัมพันธ์ผลิตภัณฑ์ เอเอซี สู่อุตสาหกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อ ทำให้ผลิตภัณฑ์นี้ได้เข้าไปอยู่ในมาตรฐาน (standards) และโคต (Codes) ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง AACPA กำลังทำงานกับ American Concrete Institute (ACI) เพื่อพัฒนา แนวทางโคตการก่อสร้างอาคาร (building code guidelines) สำหรับการก่อสร้างด้วย เอเอซี โดยมีความก้าวหน้าเมื่อ การพิมพ์ปี ค.ศ. 2005 ของ ACI 530 ได้รวมเอาภาคผนวก (Appendix) ที่เป็นเรื่อง เฉพาะสำหรับงานก่อ เอเอซี (AAC masonry) ไว้ด้วย นอกจากนี้ ACI Subcommittee 523A กำลังพัฒนาเอกสารชื่อ Guide for using Autoclaved Aerated Concrete Panels ที่จะใช้ร่วมกับ ACI 318 สำหรับในขั้นตอนต่อไป จะเป็นการทำให้เรื่องของ เอเอซี เป็นที่ยอมรับให้เป็นส่วนของโคตหลักของงานอาคาร ในโคต ACI 318

2.8 วัสดุสังเคราะห์ (Synthetic materials)

2.8.1 ความนำ

ประวัติความเป็นมาโดยสังเขป และพื้นฐานในการผลิต (Hegger et al., 2006 : 90) สรุปโดยย่อได้ คือ

การผลิตวัสดุสังเคราะห์ได้เริ่มต้นในตอนกลางคริสต์ศตวรรษที่ 19 ด้วยการเปลี่ยนทางเคมี (Chemical conversion) ของวัตถุดิบอินทรีย์ทางธรรมชาติ การทดลองในตอนต่อมามีความเป็นไปได้ในเรื่องที่จะปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ เฉพาะของวัสดุในทางที่ค่อย ๆ เป็นไปได้ในการเข้าไปแทนที่ผลิตภัณฑ์ดั้งเดิม (Traditional products) จนกระทั่งสิ้นศตวรรษที่ 19 การวิเคราะห์ทางเคมีได้เปิดเผยให้เห็นอะตอมของคาร์บอน (Carbon atom) ในโมเลกุลที่ใช้เป็นศูนย์กลางร่วม และรวมเข้าด้วยกัน เกิดห่วงโซ่อย่างยาว (Long chains) ที่ก่อให้เกิดเป็นพื้นฐานของโครงสร้างของผลิตภัณฑ์อินทรีย์ (Organic products)

สิ่งที่เป็นพื้นฐานในการผลิตพลาสติก (Plastics) คือ การที่โมโนเมอร์ (Monomers) ซึ่งเป็นหน่วยโมเลกุลจำนวนต่ำ (Individual low-molecular units) รวมตัว (Combine) ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมเกิดรูปโพลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecules) ในปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction) ที่รู้จักกันว่า การสังเคราะห์ (Synthesis)

การพัฒนาโพลิเมอร์ และการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์จากโพลิเมอร์ได้มีการบรรยายไว้ (Jackson and Dhir, 1996) สรุปได้ดังต่อไปนี้คือ

ในปัจจุบันโพลิเมอร์ได้รับการพัฒนาไปอย่างดีเคียงคู่กับโลหะและเซรามิกจนเป็นหนึ่งในประเภทสำคัญของวัสดุที่ได้ผลิตขึ้นในรอบเวลากว่า 30 ปี ที่ผ่านมา ความหลากหลายของวัสดุนี้ได้รับการพัฒนาไปอย่างหลากหลาย บนพื้นฐานของประมาณ 50 อย่างของโพลิเมอร์สังเคราะห์ และได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายไปทั่วอุตสาหกรรมและงานวิศวกรรม วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่กว้างขวาง แตกต่างหลากหลาย จากวัสดุจำพวกโลหะและเซรามิก มีเทคโนโลยีของขบวนการ และการผลิตที่เป็นแบบ Moulding, Extrusion และ Fibre forming เป็นส่วนใหญ่ มี อีลาสติกโมดูลัส (Elastic modulus) ค่อนข้างต่ำ และการมีความเครียดที่ยอมเกิดได้มาก (High permissible strains) จึงได้ทำให้เกิดหนทางที่นุ่มกว่า (Softer) ในการออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามในอีกปลายหนึ่ง ไฟเบอร์โพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติสูง (High-performance polymer fibres) ซึ่งมีความเหนียวกว่า (Stiffer) และแข็งแรงกว่า (Stronger) ลวดเหล็ก (Steel wire)

การศึกษาเกี่ยวกับวัสดุในการก่อสร้างอาคาร เป็นตลาดที่มีปริมาณสำคัญสำหรับโพลีเมอร์ ในสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตกใช้ปริมาณวัสดุคิดเป็น 1 ใน 5 ของการผลิต อย่างไรก็ตามการใช้โพลีเมอร์ในงานวิศวกรรมโยธาก็ยังไม่เห็นชัดเจนนัก เพราะวัสดุเหล่านี้โดยทั่วไปแล้ว ไม่ได้แข่งขันโดยตรงกับวัสดุที่ใช้น้ำหนักแบบดั้งเดิม (Traditional load-bearing materials) เช่น งานโครงสร้างที่ทำด้วยโลหะ, คอนกรีต และงานก่อ (Masonry) แม้กระนั้นก็ตามโพลีเมอร์จำนวนหนึ่งได้มีบทบาทความสำคัญในการใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น ในงานท่อ (Pipework) และในบทบาทที่สนับสนุนสำคัญ เช่น เป็นการเคลือบผิว (Surface coatings), แผ่นเยื่อ (Membranes), สารผนึกและเชื่อมต่อน (Adhesives and jointing compounds), วัสดุหลังคา (Roofing materials), วัสดุหุ้มอาคาร (Claddings) และ ตัวฉนวนกันความร้อน (Thermal insulants) สำหรับพลาสติกที่เสริมด้วยไฟเบอร์ (Fibre-reinforced plastics) มีบทบาทจำกัดในโครงสร้างอย่างเบา (Light structures) นอกเหนือจากที่กล่าวแล้ว การใช้ข้ออย่างใหม่ก็มีเกิดขึ้น เช่น คอนกรีตโพลีเมอร์ (Polymer concrete) และสำหรับงานถักทอ (Textiles) ทั้งในโครงสร้างแบบผืนผ้า (Fabric structures) และในวิศวกรรมพื้นดิน (Ground engineering) เส้นใยโพลีเมอร์ (Polymer fibres) ได้มีการใช้ป็นสิ่งเสริมความแข็งแรง (Reinforcement) สำหรับวัสดุที่มีพื้นฐานของซีเมนต์ (Cement-based materials)

2.8.2 โครงสร้างทางเคมีของวัสดุสังเคราะห์ (Chemical structure of synthetic materials)

สิ่งที่ควรพิจารณาเกี่ยวกับเรื่องวัสดุสังเคราะห์ ได้แก่ ลักษณะคุณสมบัติของวัสดุสังเคราะห์ โดยทั่วไป และการจัดประเภทของวัสดุสังเคราะห์ ซึ่งสรุปได้ (Hegger et al, 2006 : 91-93) ดังต่อไปนี้คือ

1) ลักษณะ (Characteristics)

สิ่งที่ป็นลักษณะของ วัสดุสังเคราะห์ส่วนใหญ่ สามารถสรุปได้โดยสังเขป คือ

- ความหนาแน่นต่ำ (Low density)
- การนำความร้อนต่ำ (Low thermal conductivity)
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางด้านความร้อนสูง (High coefficient of Thermal expansion)
- กำลังรับแรงดึงสูง (High tensile strength)
- โมดูลัสของยืดหยุ่นต่ำ (Low modulus of elasticity)

- ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานอย่างต่อเนื่องแคบ (Narrow continuous service temperature range)
- ความสามารถด้านความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี (Good electrical insulation capability)
- ต้านทานต่อน้ำและสารเคมีจำนวนมาก (Resistance to water and many chemicals)
- ไม่ติดไฟ (Inflammability)
- เสื่อมสภาพโดยรังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ageing caused by ultraviolet radiation)
- เปราะที่อุณหภูมิต่ำ (Brittleness at low temperatures)

2) การจัดประเภท (Classification)

วัสดุสังเคราะห์ที่แตกต่างกันไปสามารถนำมาจัดประเภทได้ตามวิธีการของการสังเคราะห์ (Method of synthesis) หรือตามโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ (Macro molecular structure)

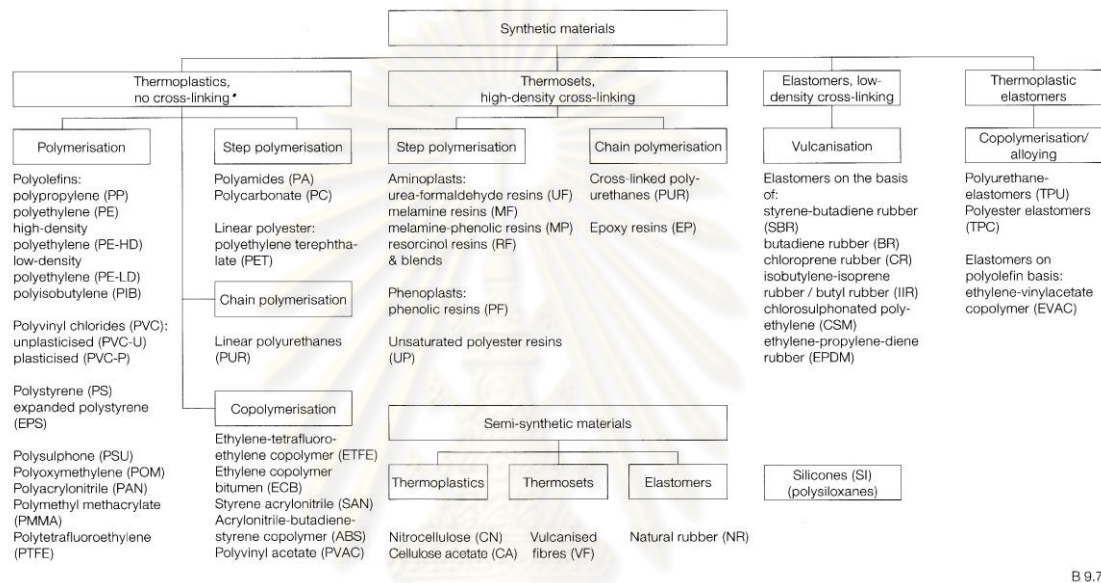
วิธีการของการสังเคราะห์จัดประเภทวัสดุสังเคราะห์ เป็น 3 ประเภท ได้แก่ โพลีเมอไรเซชัน (Polymerization) สเตปโพลีเมอไรเซชัน (Step polymerization) และเชนโพลีเมอไรเซชัน (Chain polymerisation)

การจัดประเภทตามโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ (Macromolecular structure) จัดเป็น 3 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) และเทอร์โมเซท (Thermosets) หลักการสำคัญ คือ ดีกรีของการต่อไขว้ (Degree of cross-linking) ระหว่างแมคโครโมเลกุล ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุสังเคราะห์

โพลิสไตรีน (Polystyrene) จัดอยู่ในประเภท เทอร์โมพลาสติก ซึ่งโครงสร้างโมเลกุล ประกอบด้วย โซโมเลกุลแบบเส้นตรง (Linear molecular chains) ที่ขดรอบตัวเองแต่ไม่ก่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันกับกลุ่มอื่น ๆ ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้แรงยึด (Bonding forces) ลดลง และความยืดหยุ่น (Flexibility) ของโซ่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกค่อย ๆ เปลี่ยนจากแข็ง (Hard) ไปเป็น เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ขบวนการเช่นนี้ (คือการหลอมเหลว) ย้อนกลับ (Reversible) ได้ และสามารถเป็นไปได้ด้วยสารทำละลาย (Solvents) เช่นเดียวกัน นี่คือนิยามของวัสดุที่ยอมให้เทอร์โมพลาสติกนั้น (Moulded) ตัด

(Machined) และรีไซเคิล (Recycled) ได้ ด้วยเหตุนี้โฟมอีพีเอสซึ่งผลิตจากโพลิสไตรีนจึงผลิตได้ทั้งแบบผลิตขึ้นใหม่และแบบรีไซเคิล (Recycle)

ภาพที่ 2-2 (Hegger et al., 2006 : 93) แสดงให้เห็นระบบการจัดประเภทของวัสดุสังเคราะห์ตามโครงสร้างแมโครโมเลกุลและวิธีการของการสังเคราะห์



B 9.7

ภาพที่ 2-2 ระบบการจัดประเภทของวัสดุสังเคราะห์ตามโครงสร้างแมโครโมเลกุล และวิธีการของการสังเคราะห์ (Hegger et al., 2006 : 93)

2.8.3 ขบวนการ (Processing)

สาระสำคัญขบวนการผลิตได้สรุปจากข้อมูล (Hegger et al., 2006 : 92) มีความว่าการผลิตโมโนเมอร์ (Monomers) และขบวนการต่อมาเพื่อให้เกิดรูปโพลิเมอร์ (Polymer) นั้น กระทำบนขนาดอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมนี้ส่งวัสดุสังเคราะห์บริสุทธิ์ในรูปแบบของวัสดุเม็ด (Granular) เรียกว่า เพลเล็ต (Pellets) ไปยังผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ แล้วเป็นขั้นตอนการผสมสารเพิ่ม (Additives) ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันไปในวัสดุสังเคราะห์ ในขบวนการประกอบ (Compounding process) หลังจากนั้นจึงเป็นขบวนการขึ้นรูป (Forming process) เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จ (Semi-finished) หรือสำเร็จ (Final)

2.8.4 วัสดุสังเคราะห์ในงานอาคาร (Synthetic materials in building)

อุตสาหกรรมก่อสร้างได้ใช้ผลิตภัณฑ์จากวัสดุสังเคราะห์ประมาณร้อยละ 20 ของผลผลิตของอุตสาหกรรมพลาสติก (Hegger et al., 2006 : 94) ควบคู่ไปกับอุตสาหกรรมหีบห่อ

ตารางที่ 2-3 แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์แยกตามการบริโภค คุณสมบัติเฉพาะหลายอย่างที่ต้องการนั้นสามารถทำขึ้นมาได้เป็นการเฉพาะ (Tailor-made)

ส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานอาคาร มีการประยุกต์ใช้หลายกรณีและสามารถสรุปได้ เช่น

- 1) ชิ้นส่วนรับน้ำหนัก (Loadbearing components)
- 2) สิ่งติดตั้งภายในและเฟอร์นิเจอร์ (Internal fitting-out ,furniture)
- 3) เปลือกอาคาร (Building envelope)
- 4) ส่วนบริการอาคาร (Building services)
- 5) วัสดุเชื่อมต่อ (Adhesives)
- 6) ตัวประสานสำหรับ วัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ ,การเคลือบผิว (Binders for Organic and inorganic substance ,coatings)

Organic and inorganic substance ,coatings)

- 7) ฉนวนความร้อนและเสียง (Thermal and sound insulation)
- 8) ตัวเก็บแสงอาทิตย์ (Solar collectors)

ตารางที่ 2-3 การประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์แยกตามการบริโภค (Hegger et.at., 2006 : 94)

Applications of synthetic materials according to consumption	Loadbearing sections	Foamed plastics	Pipes & tubes	Boards & panels	Waterproofing sheeting & film	Floor & wall finishes	Sections in general (e.g. joint seats)	Coatings	Sealing compounds	Adhesives
Polyethylene (PE)			•		◦	•				
Polypropylene (PP)			•	•	•	•				
Polyvinyl chloride (PVC)	•		•	◦	•	•	•			
Polystyrene (PS)		•		◦		•				
Polymethyl methacrylate (PMMA)				•				•		•
Polycarbonate (PC)				•						
Polytetrafluoroethylene (PTFE)					•			◦		
Polyurethane (PUR)		◦				•		•	◦	•
Polyester resins (UP)			• ¹	• ¹		•	•	•		•
Epoxy resins (EP)			•			•		◦		◦
Styrene-butadiene rubber (SBR)						•	•			
Chloroprene rubber (CR)					•		◦	•		•
Ethylene-propylene-diene rubber (EPDM)					•	•	◦			
Silicone (SI)							◦	•	•	•

• high consumption ◦ moderate consumption • low consumption ¹ reinforced with glass fibre

ตารางที่ 2-4 ค่าทางกายภาพของวัสดุสังเคราะห์บางชนิด(Physical parameters of selected materials) (Hegger et al., 2006 : 97)

Synthetic material		Density [kg/m ³]	Tensile strength [N/mm ²]	Modulus of elasticity [N/mm ²]	Elongation at tear [%]	Thermal conductivity [W/mK]	Thermal expansion [mm/mK]	Service & maximum temperature [°C]
Thermoplastics								
Polyethylene	PE							
	PE-LD	910-930	8-23	200-500	300-1000	0.32	200-250	75/90
	PE-HD	940-960	18-35	700-1400	100-1000	0.4	150-180	80/110
Polypropylene	PP	900-910	21-37	1100-1300	20-800	0.22	110-170	100/140
Polyvinyl chloride	PVC							
	PVC-P	1160-1350	20-25	25-1600	170-400	0.15	150-210	55/65
	PVC-U	1380-1550	50-75	1000-3500	10-50	0.16	70-80	85/100
Polystyrene	PS	1050	45-65	3200	3-4	0.16	70	70/80
Polymethyl metacrylate (Perspex)	PMMA	1170-1200	50-77	2700-3200	2-10	0.18	70-80	90/100
Polycarbonate	PC	1200	56-67	2100-2400	100-130	0.18	60-70	135/160
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	PTFE	2150-2200	25-36	410	350-550	0.23	100-200	150/200
Polyurethane	PUR	1050	70-80	4000	3-6	0.58	10-20	100/130
Thermosets								
Epoxy resins	EP	1300	40-80	4000	2-10	0.23	75	80/130 to 200
Polyester resins	UP	1200	35-75	4000	1-6	0.6	140	80/120
Glass fibre-reinforced								
polyester resins; glass fleece (GF) 30% by mass		1400	90	7000	≤ 1	n.a.	50	n.a.
polyester resins; glass cloth 40% by mass		1500	130	9000	≤ 1	n.a.	70	n.a.
polyester resins; glass cloth 60% by mass		1700	320	19000	≤ 1	n.a.	110	n.a.
Elastomers								
Styrene-butadiene rubber	SBR	900-1200	5-30	-	300-800	n.a.	n.a.	to 100
Chloroprene rubber (Neoprene)	CR	1420	5-25	-	400-900	n.a.	n.a.	100/120
Ethylene-propylene-diene rubber	EPDM	930-980	7-20	-	300-600	n.a.	n.a.	120/150
Silicones								
Silicone	SI	1250-1900	4-10	-	100-500	0.3-0.4	20-50	180/230

B 9.16

2.8.5 โฟมอีพีเอส (Expanded polystyrene, EPS)

การใช้โพลีสไตรีนโดยอุตสาหกรรมก่อสร้างในเยอรมันตั้งแต่ทศวรรษ 1950 ลักษณะของโพลีสไตรีน อันเป็นวัสดุพื้นฐานของ อีพีเอส (Hegger et al., 2006 : 94) การผลิต อีพีเอส (Hegger et al., 2006 : 137) และคุณสมบัติบางประการของ อีพีเอส (Pfundstien et al., 2008 : 35) มีสาระสำคัญสรุปได้ดังนี้ โพลีสไตรีน (Polystyrene ,PS) ซึ่งจัดเป็นประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) มีลักษณะใสคล้ายแก้ว มีความมันวาว (Gloss) ที่ผิวสูง และค่อนข้างเปราะ (Brittle) เมื่อเติมตัวเสถียร (Stabilizer) จะต้านรังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV)

การผลิต อีพีเอส (EPS) มีข้อพิจารณาสำคัญเกี่ยวกับอีพีเอสดังต่อไปนี้

1) มีการโพลิเมอไลเซชัน (Polymerization) ซึ่งทำให้ได้เม็ดลูกบดอีพีเอส (EPS beads) ขนาด 0.1 ถึง 2.0 มิลลิเมตร จากวัตถุดิบ คือ สไตรีน (Styrene) ซึ่งได้จากปิโตรเลียม (Petroleum) หรือก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) โดยการใส่สารเพนเทน (Pentane)

2) หลังจากแห้งและเก็บไว้ชั่วคราว (Intermediate storage) เม็ดนี้จะถูกทำให้ร้อนด้วยไอน้ำด้วยวิธีการที่ใช้อุณหภูมิ 100 เซลเซียส ซึ่งจะทำให้เม็ดยังเกิดการขยายตัวไปอีก 20-50 เท่าของปริมาตรเริ่มแรกก่อนจะทำให้อยู่ในรูปของเม็ดหรือแผ่น (Boards) ที่ใช้สายการผลิต

3) โฟมอีพีเอสจะไม่เสื่อมสลาย (Rot) แต่จะเปราะ (Brittle) เมื่อถูกแสงอาทิตย์โดยตรง (direct sunlight) กล่าวคือ ไม่มีความทนทานต่อการแผ่รังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation) และไม่มี ความต้านทานต่อสารทำละลาย (Solvents)

4) มีความไว (Sensitive) ต่ออุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานอยู่ไม่เกิน 75 ถึง 80 เซลเซียส

5) วัสดุนี้ไม่สามารถผนึก (Bonded) กับบิตูเมน (Hot bitumen) หรือใช้กับวัสดุ มาสติกแอสฟัลท์ (Mastic asphalt)

6) การประยุกต์ใช้โดยปกติ ได้แก่ ฉนวนกันความร้อน (Thermal insulation) และการเป็นฉนวนกันเสียงแบบกระแทก (Impact sound insulation)

7) คุณสมบัติสำคัญทางกายภาพของอีพีเอส (EPS) โดยที่มีความหนาแน่น (Density) 15-30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ประมาณ 0.032 ถึง 0.040 วัตต์/เมตร·เคลวิน ($W/m \cdot K$) เป็นต้น

ตารางที่ 2-5 (Pfundstein et al., 2008 : 35) แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของอีพีเอส

ตารางที่ 2-5 คุณสมบัติทางกายภาพของ อีพีเอส (Pfundstein et al, 2008 : 35)

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติสำคัญทางกายภาพของอีพีเอส (EPS)

Physical properties-EPS		
Property	Unit	Values
Density	Kg/m ³	15-30
Thermal conductivity	W/mK	0.032-0.040
Specific heat capacity	J/kgK	1500
Coefficient of thermal expansion	K ⁻¹	5x10 ⁻⁶ -7x10 ⁻⁶
Reaction to fire		
Euroclass	E	
Bldg. materials class	B1 (not readily flammable)	
Water vapour diffusion resistance index	-	20-100
Long-term water absorption	% by vol.	1-5
Maximum service temperature, long-term	°C	80-85
Compressive stress		
at 10% deformation or compressive strength	kPa	60-200
Constant compr. stress	kPa	20-60
Tenstant strength porpen-discular to plane of board	kPa	> 100
Bending strength	kPa	≥ 50
Dynamic stiffness	MN/m ³	10-40

(Pfundstein et al., 2008: 35)

2.8.6 การใช้ อีพีเอส ในการก่อสร้างแบบแซนวิช (Davies, 2001)

1) รูปแบบของการก่อสร้างแบบแซนวิช (Sandwich construction) ใช้เป็นแผงแบบแซนวิช (Sandwich panels) ซึ่งประกอบด้วยส่วนหน้า (Facings) อาจเป็น เหล็ก อลูมิเนียม ไม้ พลาสติกเสริมด้วยไฟเบอร์ (Fibre-reinforced plastics) หรือแม้แต่คอนกรีต แกนกลาง (Core) อาจทำด้วย คอร์ก (Cork), ยาง, วัสดุพลาสติกแข็ง เช่น โพลีเอทิลีน (Polyethylene), วัสดุโฟมแข็ง เช่น โพลียูรีเทน (Polyurethane), โพลิสไตรีน (Polystyrene) และฟีนอลิก (Phenolic) ใยหินแร่ (Mineral wool) หรือจากลักษณะรวงผึ้ง (Honey combs) ของโลหะหรือแม้แต่กระดาษ

2) หลักการรวมเอาวัสดุเพื่อให้เกิดแผ่นประกอบ (Composite panels) ทำให้เกิดการออกแบบที่ได้ผลสูงสุด (Optimum) เพื่อเหมาะกับการประยุกต์ใช้เฉพาะกรณีความประสงค์นั้น ในแผ่นประกอบนี้ คุณสมบัติที่ดีของวัสดุ อาจนำมารวมกันและคุณสมบัติในทางไม่ดีถูกกำจัดไปด้วย ตัวอย่างเช่น คุณสมบัติที่ดีในเรื่องการเป็นฉนวนกันความร้อนของวัสดุพลาสติกโฟมหรือใยหินแร่ จะใช้ได้หากมันถูกป้องกันต่อความร้อนโดยการกันฝน (Raintight) และมีพื้นผิวที่กันการแพร่ (Diffusion-proof facings) กำลัง (Strength) และความแข็งแรงแรง (Stiffness) ของผนังบางที่ทำ

ด้วยโลหะที่ห่อหุ้มอยู่นั้นจะใช้ประโยชน์ได้เต็มที่ก็ต่อเมื่อมันถูกทำให้แข็งแกร่งต่อการโก่งเดาะ (Buckling) ภายใต้แรงอัด (Compressive force) ด้วยการมีวัสดุแกนกลาง (Core material)

3) ตัวอย่างการใช้หลักการข้างต้น แผลงแขนวิชที่มีเหล็กหรืออลูมิเนียมบางเป็นผิวหน้ากับพลาสติกความหนาแน่นต่ำ หรือใยลินแร่ เป็นแกนกลาง ทำให้ได้คุณสมบัติสำหรับใช้เป็นกำแพง (Walls) และหลังคา (Roofs) เป็นต้น

4) การศึกษาการใช้วัสดุในการก่อสร้างแบบแขนวิชนี้ มีขอบเขตการพัฒนาหลายประการ เช่น วัสดุ (Materials) การใช้งานด้านความร้อนและความทึบน้ำ (Thermal performance and water-tightness) เสียง (Acoustics) ไฟ (Fire) ความคงทน (Durability), การใช้ในรูปแบบของโรงแช่แข็ง (Refrigerated warehouses, cold stores and chill rooms) การประยุกต์ใช้ทางสถาปัตยกรรมพิเศษ (Special architectural applications) หลักการของพฤติกรรมทางด้านโครงสร้าง (Principles of structural behaviour) กำลังรับน้ำหนัก (Load-bearing capacity) และวิธีการออกแบบและการทดสอบ (Design procedure and Testing) เป็นต้น การศึกษามีหัวข้อกว้างขวางที่ต้องดำเนินการและพิจารณาเพื่อให้ได้โครงสร้างที่ใช้การได้ดี

2.9 ความเป็นฉนวนกันความร้อน (Thermal insulation)

2.9.1 ปรัชญาการณ์ทางความร้อนที่สำคัญในอาคาร

การบรรยายถึงปรัชญาการณ์ทางความร้อนที่สำคัญในอาคาร (Burberry, 1997 : 77-81) มีสาระสำคัญบางประการโดยย่อคือ

1) การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

ความร้อนจะไหลในวัตถุของแข็ง (Solid) ของเหลว (Liquid) หรือก๊าซ (Gas) หรือระหว่างกันจนกระทั่งอุณหภูมิของแต่ละอย่างเท่ากัน การถ่ายเทความร้อนอาจเป็นไปโดย การนำ (Conduction) การพา (Convection) หรือการแผ่รังสี (Radiation)

2) การนำ (Conduction)

การนำเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยตรงผ่านวัสดุ อัตราของการนำ (Rate of conduction) ได้แก่ ความสามารถในการนำ (Conductivity) มีความสัมพันธ์อยู่บ้างบางส่วนกับความหนาแน่นของวัสดุ (Density of material) ตัวอย่างเช่น โลหะ (Metals) มีค่าการนำสูง, ไม้ (Wood) มีค่าการนำต่ำและก๊าซต่าง ๆ มีค่าการนำต่ำลงอีก

ความสามารถในการนำ (Conductivity) เรียกว่า เค (k) คือปริมาณความร้อนที่ผ่านวัสดุ 1 ตารางเมตร ที่มีความหนา 1 เมตร สำหรับความแตกต่างอุณหภูมิ 1 เคลวิน (Kelvin) ของผิวด้านในและด้านนอก

3) การพา (Convection)

การพา เป็นการถ่ายเทความร้อนในของไหล (Fluids) และก๊าซ (Gases) โดยการไหลเวียน (Circulation) ของเมื่อส่วนของเหลว (Liquid) หรือก๊าซ (Gas) ถูกทำให้ร้อนขึ้น ส่วนนั้นจะถูกแทนที่โดยของเหลวหรือก๊าซที่เย็นกว่าที่ล้อมรอบอยู่ และส่วนนั้นมีความโน้มเอียงที่จะลอยตัวสูงขึ้น เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนบางส่วนของส่วนนั้นไปยังบริเวณในเส้นทางที่ส่วนนั้นไหลไป

4) การแผ่รังสี (Radiation)

การแผ่รังสีเป็นการปลดปล่อย (Emit) รังสีจากผิว และสามารถส่งผ่าน (Transmit) พลังงานความร้อนผ่าน อวกาศ-หรือช่องว่าง (Space) ความร้อนที่ถ่ายเทที่ผิวหนึ่งโดยเฉพาะนั้นจะขึ้นกับความสมดุลของการเสียและได้นั้นคือ การแลกเปลี่ยนการแผ่รังสีสุทธิ (Net radiation exchange) อัตราที่การแผ่รังสีจะถูกส่งออกมาจากผิวหนึ่ง ขึ้นกับอุณหภูมิ และธรรมชาติของพื้นผิวนั้น

5) การส่งผ่านความร้อน (Thermal transmittance)

ความร้อนผ่านเข้าออกจากอาคาร ได้ด้วยวิธีทั้งสามดังที่กล่าวมาข้างต้น ความร้อนถูกนำผ่านส่วนที่เป็นของแข็งของผนังหรือพื้นหรือหลังคา มีการแผ่รังสีผ่านช่องว่าง (Cavities) และจากพื้นผิว นอกจากนี้มีการพาโดยลมที่พัดผ่านพื้นผิว

อัตราการส่งผ่านความร้อนโดยรวม รู้จักกันว่าเป็น การส่งผ่านความร้อน (Thermal transmittance) นั่นคือความร้อนในหน่วยวัตต์ (Watts) ที่จะผ่านพื้นที่ 1 ตารางเมตร (m^2) ของสิ่งก่อสร้างเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ 1 เคลวิน (K) ระหว่างอุณหภูมิของอากาศภายในและอุณหภูมิของอากาศภายนอก สิ่งนี้เรียกว่า ค่า-ยู (U-value) หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศถึงอากาศ (Air-to-air heat transmittance coefficient) มีหน่วยเป็นวัตต์ ต่อ ตารางเมตร·เคลวิน ($W/m^2 \cdot K$) สัมประสิทธิ์นี้คำนวณจากความสามารถในการนำความร้อน (Conductivity) ของวัสดุแต่ละอย่าง และความต้านทานที่ผิว (Surface resistance) ของวัสดุแต่ละอย่าง

6) ความต้านทานต่อความร้อน (Thermal resistance)

วัสดุก่อสร้างมีความต้านทานต่อการไหลของความร้อน

ค่าส่วนกลับของความสามารถในการนำ (Conductivity) คือ $1/k$ เรียกว่าเป็น ความสามารถในการต้านทาน (Resistivity)

ความต้านทาน (Resistance) เรียกว่าเป็นค่าอาร์ (R-value) มีหน่วยเป็นตารางเมตร·เคลวิน ต่อวัตต์ (m^2K/W) ของความหนาหนึ่งของวัสดุ นั่นคือ ผลคูณของความสามารถในการต้านทาน (Resistivity) กับความหนา (Thickness) ที่มีหน่วยเป็นเมตร

ความต้านทานโดยรวม (Overall resistance) ของชิ้นส่วนของอาคารก่อสร้าง (Element of construction) ประกอบขึ้นไม่แต่เพียง ผลรวมของความต้านทานของวัสดุต่าง ๆ เท่านั้น แต่ยังรวมถึงความต้านทานต่อการไหลของความร้อนของพื้นผิวภายนอกและภายใน และ ช่องว่าง (Cavities) ไต ๆ ในการก่อสร้างด้วย

7) การพิจารณาคำนวณ การส่งผ่านความร้อน (Thermal transmittance)

การพิจารณาการส่งผ่านความร้อนของการก่อสร้างใช้การคำนวณส่วนกลับ (Reciprocal) ของความต้านทานรวม (Total resistance)

การส่งผ่านความร้อน = $1 /$ ผลรวมความต้านทานของผิวและชั้นของวัสดุ
หรือ Thermal transmittance = $1 /$ Sum of resistances of surfaces and layers of material
โดยที่ การส่งผ่านความร้อน (Thermal transmittance) มีหน่วยเป็น วัตต์ / ตารางเมตร·เคลวิน ($W/m^2 \cdot K$) ความต้านทาน (Resistances) มีหน่วยเป็น ตารางเมตร·เคลวิน/วัตต์ ($m^2 \cdot K/W$)

8) ข้อมูลพื้นฐานด้านคุณสมบัติทางด้านความร้อนของวัสดุก่อสร้าง

ข้อมูลพื้นฐานด้านคุณสมบัติทางด้านความร้อนของวัสดุก่อสร้างได้มีให้ไว้ในรูป ของ การนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่เรียกว่าค่าเค (k-value)

ตารางที่ 2-6 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยทั่วไปของงานอาคาร (McMullan, 2007 : 17)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-6 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยทั่วไปของงานอาคาร

(McMullan, 2007 : 17)

Thermal conductivity of typical building materials

	Density (kg/m ³)	Thermal Conductivity k (W/m K)
Aluminium alloy, typical	2700	190
Asphalt roofing	2100	0.70
Bitumen/felt layers	1100	0.23
Brickwork, exposed	1700	0.77
Brickwork, internal	1700	0.56
Concrete, reinforced 1% steel	2300	2.3
Concrete, high density	2400	1.93
Concrete, medium density	1800	1.13
Concrete block, lightweight aggregate	1400	0.57
Concrete block, aerated	600	0.18
Copper, commercial	9840	160
Fibreboard	400	0.1
Glass, window pane	2560	1.022
Mortar, exposed	1750	0.94
Mortar, protected	1750	0.88
Plaster, dense	1300	0.57
Plaster, lightweight	600	0.18
Insulation, expanded polystyrene (EPS) board	15	0.04
Insulation, mineral wool batt	25	0.038
Insulation, mineral wool quilt	12	0.042
Insulation, phenolic foam board	30	0.025
Insulation, polyurethane board	30	0.025
Rendering, external	1300	0.57
Screed, floor	1200	0.41
Steel, mild structural	7900	60
Stone, chippings	2000	2.0
Stone, sandstone	2600	2.6
Stone, soft limestone	1800	1.1
Timber, softwood	500	0.13
Timber, hardwood	700	0.18
Timber, plywood, chipboard	500	0.13
Tiles, ceramic wall	7900	17.0
Tiles, clay roof	2000	1.0
Tiles, concrete roof	2100	1.5

2.9.2 ผลของความร้อนในอาคาร (Thermal Effects in Buildings)

การบรรยายผลของความร้อนในอาคาร (McMullan, 2007) ได้ให้สาระสำคัญเกี่ยวกับข้อพิจารณาทั่วไป วัสดุฉนวน ชนิด และคุณสมบัติ

มนุษย์ต้องการ สิ่งแวดล้อมที่มีความสบาย จึงพิจารณาปฏิกิริยาของอาคารกับสิ่งแวดล้อม กล่าวได้ว่า พลังงานความร้อนและคุณสมบัติทางด้านความร้อน คือของวัสดุที่ใช้เป็นอาคาร ปัจจัยหลักในการรักษาความสบายของร่างกายมนุษย์

การส่งผ่านพลังงานความร้อนผ่านอาคารเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาเพื่อรักษาความสบายของผู้อยู่อาศัยและประหยัดการใช้พลังงาน

ฉนวนความร้อนของอาคารเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมการถ่ายเทความร้อน ดังนั้น ฉนวนความร้อนที่เพียงพอจึงเป็นคุณลักษณะที่ดีของการออกแบบตั้งแต่ต้น ต้นทุนที่น้อยของ ฉนวนที่เพิ่มขึ้นนั้นจะได้ตอบแทนมาโดยการลดขนาดของโรงทำความร้อน และลดหรือประหยัด ปริมาณเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ซึ่งสิ่งที่ตามมาคือลด การปลดปล่อยคาร์บอนซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่จะ ต่อเนื่องไปตลอดอายุของอาคาร

1) วัสดุฉนวน (Insulating materials)

ฉนวนความร้อน (Thermal insulator)(McMullan, 2007 : 14-15) คือ วัสดุที่สกัด กัน (Oppose) การส่งผ่านความร้อนระหว่างพื้นที่ต่าง ๆ (Areas) ที่มีอุณหภูมิต่างกัน วิธีการหลัก ของการถ่ายเทความร้อนในอาคารปัจจุบันนี้เป็นไปโดยการนำ (Conduction) อย่างไรก็ตามกลไก ของการพา (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ยังคงมีความสำคัญ ในกรณีมีส่วนการ ส่งผ่านความร้อนสมทบเข้ามาจากขบวนการควบแน่น (Condensation) ซึ่งจะปลดปล่อยพลังงาน ความร้อนออกมาเมื่อ ไอน้ำ (Water vapor) เปลี่ยนเป็นของเหลว (Water liquid)

สูญญากาศเป็นฉนวนที่สมบูรณ์แบบที่ต้านทานต่อการนำ อย่างไรก็ตาม การใช้งานจริงคือ การหาวัสดุที่มีอะตอม ที่มีช่องว่างระหว่างกันซึ่งทำให้วัสดุมีความหนาแน่นต่ำ ตัวอย่างเช่น สสารประเภทก๊าซมีอะตอมที่ อยู่ห่างกันจะให้ความเป็นฉนวนที่ดีในการต้านทานต่อการนำ อากาศซึ่งก็คือส่วนผสมของก๊าซต่าง ๆ เป็นส่วนผสมที่มีกิริยา (Active ingredient) เพื่อการเป็นฉนวน เช่น กระจกไฟเบอร์ (Glass fibre) และคอนกรีตที่มีอากาศ (Aerated concrete) อย่างไรก็ตาม วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนความร้อน ในอาคาร มีข้อพิจารณาอื่น ๆ ด้วย เช่น กำลัง (Strength) ในการรับน้ำหนักและความเกร็ง (Rigidity) ไม่อ่อนตัวหรือเสียรูป เมื่อมีการรับน้ำหนัก

อากาศที่จะทำหน้าที่เป็นฉนวนจะต้องอยู่นิ่ง หากยอมให้เคลื่อนไหวได้จะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convection) วัตถุประสงค์ขั้นต้นของไฟเบอร์กลาสหรือพลาสติกที่ถูกทำให้ขยายตัว (Expanded plastic) คือ การจับ และคุมให้อากาศอยู่นิ่ง ตัวอย่างของผิวอื่น ๆ เช่น ผนังอาคารหรือผิวของมนุษย์ จับชั้นขอบเขต (Boundary layer) ของอากาศที่อยู่นิ่ง (Stationary air) ทำให้มีความเป็นฉนวนความร้อนจำนวนหนึ่งที่ต้านทานต่อการนำ

วิธีการจำกัดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation) คือการใช้พื้นผิว (Surfaces) ที่ไม่ดูดซับ (Absorb) หรือ ปล่อย (Emit) ความร้อนที่แผ่ (Radiant heat) เข้ามา โดยใช้ความมันเงา (Shiny) สะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) ของการแผ่รังสีความร้อน กระบวนการต่อต้านความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับผิวที่ปรากฏอยู่ (Surface appearance) ดังนั้นเมื่อใช้แผ่นบางของอลูมิเนียม (Aluminium foil) เป็นฉนวน จึงใช้ส่วนผิวมันเงา เป็นเครื่องมือสำคัญ หนึ่งอลูมิเนียมเป็นตัวนำความร้อนที่ดี แต่เนื่องจากแผ่นมีลักษณะบางดังนั้นผลทางด้านการนำความร้อนจึงมีน้อย

2) ชนิดของฉนวนกันความร้อน (Types of thermal insulator)

ฉนวนความร้อนที่ใช้ในการก่อสร้าง ทำขึ้นจากความหลากหลายของวัสดุ และใช้ชื่อการค้าจำนวนมาก ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นฉนวนเหล่านี้สามารถรวมเป็นกลุ่ม (McMullan, 2007 : 15) คือ

- วัสดุที่เป็นของแข็ง (Rigid performed materials) เช่น บล็อกคอนกรีตมีอากาศ (Aerated concrete blocks)
- วัสดุที่มีความอ่อนตัว (Flexible materials)
 - วัสดุถมหลวม (Loose fill materials) เช่น เม็ดเอกซแพนโพลิสไตรีน (Expanded polystyrene granules)
 - วัสดุที่ขึ้นรูปที่หน่วยงาน (Materials formed on site) เช่น โฟมโพลียูรีเทน (Foamed polyurethane)
 - วัสดุสะท้อน (Reflective materials) เช่น แผ่นอลูมิเนียมบาง (Aluminium foil)

การออกแบบวัสดุข้างต้น มีความประสงค์เพื่อเป็นฉนวนต่อการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะอากาศที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ เพื่อความสบายของมนุษย์ (Human comfort) นอกจากนี้วัสดุดังกล่าวแล้วยังมีวัสดุพิเศษอื่นสำหรับเป็นฉนวนต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิสูง เช่น สำหรับหม้อน้ำ (Boiler) หรือ เตา (Furnances) เป็นต้น

3) คุณสมบัติของตัวฉนวนกันความร้อน (Properties of thermal insulators)

การเลือกสรรวัสดุสำหรับการเป็นฉนวนกันความร้อนของอาคาร ควรพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของวัสดุนั้น เพื่อทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของอาคารได้อย่างเหมาะสมด้วย ตัวอย่างเช่น บล็อกคอนกรีตที่มีอากาศ (Aerated concrete block) อาจต้องมีความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกในกรณีที่รับน้ำหนักบล็อกที่อยู่เหนือขึ้นไป

คุณสมบัติตามรายการต่อไปนี้ (McMullan, 2007) มีความสำคัญต่อกรณีสถานะการณ์ต่าง ๆ เพื่อความสมดุลในเรื่อง ความประสงค์ที่ต่างกันไป เช่น

- ความเป็นฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสมกับความประสงค์
- กำลังรับน้ำหนัก (Strength) หรือความแข็งแรง (Rigidity) ที่เหมาะสมกับความประสงค์
- ความต้านทานต่อความชื้น (Moisture resistance)
- ความต้านทานต่อไฟ (Fire resistance)
- ความต้านทานต่อสัตว์และรา (Resistance to pests and fungi)
- การเข้ากันได้กับวัสดุที่อยู่ข้างเคียง (Compatibility with adjacent materials)
- ปราศจากอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม (Being harmless to humans and the environment)

การวัดความเป็นฉนวนกันความร้อนเป็นเรื่องสำคัญ เช่นเดียวกับความต้านทานต่อการผ่าน (Passage) เข้าของความชื้น (Moisture) การคืนกลับมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนได้อีกหลังจากถูกทำให้เปียก ข้อแนะนำของผู้ผลิตเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำตามอย่างเคร่งครัด วัสดุบางอย่างไม่สามารถไปด้วยกันได้ และต้องระวังในเมื่อทำการติดตั้ง ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์บิทูมินัส (Bituminous) อาจทำลายวัสดุที่มีฐานเป็นพลาสติก (Plastic-based materials) เป็นต้น

4) ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) หรือค่าเค (k-value)

ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) เรียกว่าค่าเค (k-value) เป็นการวัดอัตราที่ความร้อนถูกนำผ่าน วัสดุเฉพาะอย่างหนึ่งภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร·เคลวิน

มีประโยชน์เพื่อที่ใช้คำนวณการถ่ายเทความร้อน และเพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่แตกต่างกัน โดยแสดงปริมาณ (Quantify) การนำความร้อนของวัสดุ

การใช้ค่าที่เลือกมาเพื่อใช้ในการคำนวณตามมาตรฐาน ได้แก่ค่าการนำความร้อนหรือค่าเค ของวัสดุอาคารโดยทั่วไป เมื่อนำมาใช้ในทางปฏิบัตินั้นอาจแปรปรวนไปด้วยเหตุผล คือ

- ความแปรปรวนในการผลิต ในเรื่องความหนาแน่น (Density) และความหนา (Thickness)
- ความเปลี่ยนแปลงในเรื่องปริมาณความชื้น (Moisture content)
- ผลของเวลา (Effects of time) ต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวน

2.9.3 หลักการความเป็นฉนวน (Insulation principles)

การบรรยายหลักการความเป็นฉนวน เกณฑ์การพัฒนาความเป็นวัสดุฉนวนและข้อพิจารณา การใช้วัสดุฉนวนเป็นส่วนของอาคารได้แสดงโดยสังเขป (Hegger et al., 2006 : 132) ดังนี้

โพรงอากาศ (Air pores) ที่มีขนาดเล็กลง, จำนวนมากขึ้น และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นผลให้ความเป็นฉนวนของวัสดุนั้นดีขึ้น อากาศที่อยู่นิ่ง (Stationary air) ในรูโพรงนั้นจะนำความร้อนได้น้อยกว่าวัสดุของแข็งที่อยู่รอบ ๆ

ตามมาตรฐาน DIN 4108 ได้มีการแบ่งประเภทว่าวัสดุอาคารที่มี การนำความร้อน (Thermal conductivity) หรือเรียกว่า เค (k) ที่น้อยกว่า 0.1 วัตต์ / เมตร·เคลวิน (W/mK) แล้วก็นจัดเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน

อุตสาหกรรมวัสดุอาคารสามารถจัดหาผลิตภัณฑ์จำนวนมากสำหรับฉนวนกันความร้อนสำหรับกำแพงภายนอก (External walls) ที่เป็นทั้งที่แบกรับน้ำหนัก (Loadbearing) และการเป็นฉนวน (Insulating) ตัวอย่างเช่น อิฐดินเหนียวน้ำหนักเบาที่มีโพรงตามแนวตั้ง (Lightweight vertically perforated clay bricks) แต่หน้าที่การเป็นฉนวน (Insulating function) ได้ลดทอนกำลังการแบกรับน้ำหนัก (Loadbearing capacity) ของวัสดุนั้น

2.9.4 การแบ่งประเภทฉนวน

การแบ่งประเภทวัสดุฉนวน (Insulating materials) สามารถแบ่งได้ตามประเภทวัสดุที่นำมาผลิตวัสดุฉนวน (Hegger et al, 2006 : 132-133) ซึ่งแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

- 1) วัสดุฉนวนจาก อนินทรีย์ สิ้นแร่ (Inorganic , Mineral insulating materials)
- 2) วัสดุฉนวนอินทรีย์ (Organic insulating materials)

วัสดุฉนวน อินทรีย์ และอนินทรีย์สามารถทำได้จากวัสดุธรรมชาติ หรือวัสดุที่สังเคราะห์

อนึ่ง อีพีเอส จัดอยู่ในวัสดุที่ผลิตจากวัสดุประเภทอินทรีย์ (Organic) ทำจากวัสดุสังเคราะห์ (Synthetic materials)

2.10 การประยุกต์ใช้โฟม อีพีเอส ในงานก่อสร้างในรูปแบบโฟมซีเมนต์

2.10.1 ชนิดโฟมเม็ด และการนำมาใช้งานในงานก่อสร้างบางประเภท

โฟม อีพีเอส ในลักษณะเป็นเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 ถึง 5.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีทั้งแบบผลิตขึ้นใหม่หรือใช้รีไซเคิล (Recycle) จากโฟมอีพีเอสใช้แล้ว ผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และน้ำหรือผสมทรายด้วยใช้เทปรับระดับเพื่อปูกระเบื้อง ลดน้ำหนักของการเสริมพื้น หรือใช้เป็นฉนวนกันความร้อนโดยเทเป็นชั้นบนพื้นหลังคา เป็นต้น

2.10.2 ข้อมูลการแนะนำส่วนผสมโฟมซีเมนต์

ส่วนผสม คือ เม็ดโฟม อีพีเอส กับซีเมนต์ น้ำ อาจผสมทรายเพิ่มด้วย ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งาน และคุณสมบัติที่ต้องการมีข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

1) กรณีความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ 200 ถึง 350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรใช้ส่วนผสมปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประมาณ 200-350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร น้ำประมาณ 100 ถึง 175 ลิตร โดยใช้เม็ดโฟม อีพีเอส ชื่อการค้า โพลิเทอม (Politerm) 2 ถุง ซึ่งมีปริมาตรหลวมเท่ากับ 840 ลิตร

2) กรณีความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ 400 ถึง 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้ส่วนผสมปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประมาณ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร น้ำประมาณ 100 ถึง 120 ลิตร ใช้โฟม 2 ถุง (840 ลิตร) หรือลดลงเหลือ 1.6 ถุง (672 ลิตร) โดยใช้ใส่ทรายเพิ่มแทนจาก 125 กิโลกรัม เป็น 590 กิโลกรัม

2.10.3 คุณสมบัติการนำความร้อนและกำลังรับแรงอัด

ข้อมูลแนะนำการใช้โพลิเทอม แสดงให้เห็นว่า สิ่งที่แปรไปกับปริมาณซีเมนต์ 200-350 กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร คือ

1) การนำความร้อน (Thermal conductivity) 0.065-0.103 วัตต์/เมตร•เคลวิน (W/mK)

2) ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) 0.69-1.69 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร (N/mm^2) หรือเทียบเท่ากับ 6.9-16.9 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร (kg/cm^2 , ksc)

ค่าการนำความร้อนของคอนกรีต 3 ประเภท (Baden-Powell, Hetreed and Ross, 2008) คือ พื้นคอนกรีตฟองอากาศ (Aerated slab) , คอนกรีตน้ำหนักเบา (Lightweight concrete) และคอนกรีตทึบ (Dense concrete) ที่มีความหนาแน่น 500, 1200 และ 2100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าการนำความร้อน 0.16 , 0.38 และ 1.40 วัตต์/เมตร•เคลวิน (W/mK) ตามลำดับ

2.10.4 วิธีการผสม

กรณีใช้ส่วนผสม เม็ดโฟม ทราาย ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และน้ำ ผสมด้วยรถบรรทุกไม่ปูน โดยใส่ส่วนผสมน้ำและเม็ดโฟมตามลำดับ ผสม 10 นาที จากนั้นใส่ส่วนผสมทราายและซีเมนต์ตามลำดับ ใช้เวลา ผสมอีก 10 นาที

2.11 แนวความคิดทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้าง

2.11.1 นิยามความหมายของโครงสร้าง

ความหมายของโครงสร้างในบริบทของอาคาร คือเครื่องมือในการเป็นเส้นทางของน้ำหนักบรรทุกที่เป็นผลมาจากการใช้หรือการปรากฏของสิ่งก่อสร้างนั้นลงสู่พื้นดิน (Schodek and Bechthold , 2008 : 3)

ส่วนขยายความของนิยามกล่าว ว่าโครงสร้างเป็นองค์ทางกายภาพที่มีคุณลักษณะรวมเป็นหนึ่งคือเป็นองค์รวมของส่วนประกอบย่อยในช่องว่าง (Space) มีคุณสมบัติรวมความสัมพันธ์ระหว่างกัน ของส่วนทั้งหลาย

การศึกษาเรื่องโครงสร้างเกี่ยวข้องกับความเข้าใจพฤติกรรมของวัตถุทางกายภาพ ภายใต้การกระทำของแรงต่าง ๆ และเกี่ยวข้องกับช่องว่าง มิติ ขนาด ความใหญ่โต รูปร่าง สัดส่วนของโครงสร้างที่ต้องจัดให้เหมาะเพื่อให้เกิดประโยชน์ใช้สอยของอาคารในเงื่อนไขตามความประสงค์

2.11.2 หน้าที่ของโครงสร้าง

การที่โครงสร้างทำหน้าที่เป็นองค์รวมทั้งหมด (Whole) ในการรับทั้งน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง และราบไปสู่พื้นดินได้

การออกแบบโครงสร้าง คือ การกำหนดให้โครงสร้างนั้นตอบสนองต่อชุดเงื่อนไขของน้ำหนักบรรทุกที่กำหนด

โดยการออกแบบชิ้นส่วนองค์ประกอบย่อย และการให้มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกัน เป็นองค์รวมของโครงสร้าง

2.12 การออกแบบโครงสร้างและลักษณะความล้มเหลว

2.12.1 การออกแบบระบบโครงสร้าง

มีสิ่งที่พิจารณาสำคัญได้แก่

1) พฤติกรรมทางด้านโครงสร้างภายในองค์รวมของโครงสร้างนั้น (Internal structural behavior)

- 2) เงื่อนไขที่เกิดขึ้นที่ขอบของระบบโครงสร้าง (Boundary conditions) และ
- 3) ธรรมชาติของน้ำหนักบรรทุก (Natures of the loading)

2.12.2 การพังทลายของโครงสร้าง ชนิดของการพังทลายทางด้านโครงสร้าง (General modes of structural failure)

การพังทลาย มีสาระสำคัญที่ควรพิจารณา (Wahl, 2007 : 29) คือการพังทลายจาก

1) ด้านความเสถียร (Stability failures) การพังทลายจากด้านความเสถียร รวมถึงการไถล (Sliding) การหมุน (Rotating) การจมลง (Sinking), การโก่งเดาะ (Buckling) หรือ การเคลื่อน (Movement) ชนิดอื่น ๆ

2) การพังทลายจากด้านกำลังรับน้ำหนัก (Strength failures) รวมถึง การบดอัด (Crushing) การแตกหัก (Breaking) และการฉีกขาด (Tearing) สาเหตุ สองประการที่ทำให้ชิ้นโครงสร้าง (Structural member) หรือจุดต่อ (Joint) มีความสามารถต้านทานต่อแรงกระทำต่าง ๆ คือ คุณสมบัติของวัสดุ (Material properties) และคุณสมบัติทางด้านหน้าตัด (Sectional properties) อันเป็นรากฐานในเรื่องขนาด และรูปร่างของชิ้นส่วนต่าง ๆ (Members) และจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ (Joints)

3) การพังทลายจากด้านความแข็งแกร็ง (Stiffness failure) ความล้มเหลวจากด้านความแข็งแกร็ง อาจทำให้ลักษณะการรับน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไป และเกิดการพังทลายจากด้านอื่น ๆ ติดตามมาได้ หรืออาจทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือแอ่นตัว จนเกิดความเสียหายต่องานตกแต่ง หรือความสะดวกสบายในการใช้งานจากโครงสร้างนั้น ๆ

อนึ่งการพังทลายอาจเกิดที่จุดเฉพาะบริเวณ (Local failure) ทั้งที่ ชิ้นส่วนทางด้านโครงสร้างชิ้นเดียว (Single structural member) หรือที่จุดเชื่อม (Joint) ในระบบโครงสร้างนั้น ส่วนความพังทลายรวม (Global failure) หมายถึง การพังทลายของระบบโครงสร้างโดยรวม (Total structural system) กรณีทั้งสองอาจเป็นผลมาจากสาเหตุด้านความเสถียร (Stability), ความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร็ง (Stiffness)

2.13 โครงสร้างอาคาร

2.13.1 ลักษณะโครงสร้างที่ก่อให้เกิดปริมาตร

โครงสร้างที่ใช้เป็นอาคารมีข้อแตกต่างจากโครงสร้างชนิดที่ใช้สำหรับวัตถุประสงค์อื่น (Schodek and Bechthold, 2007 : 13) เนื่องจากโครงสร้างอาคาร (Building structures)

โดยทั่วไป จะต้องก่อให้เกิดปริมาตร (Volume forming) และมีมิติของหน่วย (Dimensions of a unit) ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับข้อกำหนดความต้องการใช้พื้นที่ของอาคารด้วย

ในกรณีของบ้านพักอาศัย มิติของชิ้นโครงสร้างย่อย ควรมีความสัมพันธ์กับมิติที่ใช้งาน (Functional dimensions) ของหน่วยของบ้าน (Housing units)

2.13.2 ระบบการรับน้ำหนักของโครงสร้างโดยทั่วไป

หน่วยด้านโครงสร้างขั้นพื้นฐานอาจสร้างขึ้นด้วยการใช้หน่วยหรือการรวม (Combinations) ของชิ้นส่วนย่อยต่าง ๆ (Allen and Iano, 2007 : 35-52) ที่สามารถจำแนกประเภท

- 1) เป็นระบบช่วงตามแนวราบ (Horizontal spanning system)
- 2) ระบบรองรับตามแนวตั้ง (vertical support system) และ
- 3) ระบบรองรับด้านข้าง (Lateral support system)

2.13.3 ระบบความสัมพันธ์การส่งถ่ายแรงภายใน ระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้าง

ความสัมพันธ์ของชิ้นโครงสร้างนั้น ๆ ต่อจุดที่รองรับชิ้นโครงสร้างนั่นเองมีกรณีพื้นฐานสำคัญ (Schodek and Bechthold, 2007 : 7) คือ ระบบทางเดียว และสองทาง (One-and two-way system)

1) ในระบบทางเดียว (One-way system) กลไกการถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างสำหรับช่องทางที่รวบรวมน้ำหนักบรรทุกภายนอกไปสู่พื้นดินนั้น กระทำในทิศทางเดียว (One direction) เท่านั้น ตัวอย่างเช่น คานเส้นตรง (Linear beam) ที่พาดระหว่างจุดรองรับสองจุด เป็นต้น

2) ในระบบสองทาง (Two-way system) ทิศทางของกลไก การถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกจะซับซ้อนมากขึ้น แต่จะเกี่ยวข้องกับอย่างน้อยสองทิศทางเสมอ ระบบของชิ้นส่วนที่ไขว้ขวางกัน (Crossed elements) วางพักอยู่บนจุดรองรับสองชุดที่ไม่ได้อยู่บนเส้นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น แผ่นแข็งเกร็งเรียบจัตุรัส วางอยู่บนขอบรองรับสี่ขอบที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งน้ำหนักบรรทุกภายนอกไม่สามารถเดินทางไปยังการรองรับคู่เดียวในทิศทางหนึ่งเท่านั้น

อนึ่งกรณีพื้นผิวที่เป็นระนาบ (Planar surfaces) ระบบพาดช่วงตามแนวราบ (Horizontal spanning systems) อาจสร้างขึ้นด้วยชิ้นส่วนในระบบทางเดียวหรือระบบสองทางก็ได้ ระบบที่ทำด้วยชิ้นส่วนพาดช่วงแบบทางเดียวก็มักจะมีเงื่อนไขบางอย่างเป็นตัวนำ เช่น มีช่วงสั้น (Short-span) เป็นต้น

2.14 แรง และความเค้นในชิ้นส่วน

กิริยาของแรงภายนอก (External force) บนโครงสร้างเกิดจากภาวะที่แวดล้อม โครงสร้าง หรือการใช้งานโครงสร้าง มีผลก่อให้เกิดแรงภายในในโครงสร้าง (Schodek and Bechthold, 2007 : 19-22) ลักษณะของแรงภายนอกทั่วไป คือ ดึง อัด ดัด เชื้อน บิด และกดทับ ทำให้เกิดความเค้น และความเครียดภายในโครงสร้างนั้น

ความเค้น (Stress) คือ การวัดความเข้มของแรงภายใน (Internal force intensity) ต่อหน่วยพื้นที่ ปกติระบุเป็นแรงต่อพื้นที่ เช่น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ($\text{lb}/\text{in.}^2$) หรือนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2) หรือ เมกกะปาสคาล (MPa)

ความเครียด (Strain) คือการวัดการเสียรูป ปกติระบุเป็นความยาวที่เสียรูปต่อความยาวเริ่มแรก เช่น นิ้วต่อนิ้ว ($\text{in.}/\text{in.}$) หรือมิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร (mm/mm)

2.14.1 แรงดึง (Tension forces)

การดึงชิ้นส่วนออกจากกันมีคุณสมบัติพิจารณา คือ

- 1) กำลังรับแรงของชิ้นส่วนรับแรงดึงขึ้นอยู่กับพื้นที่ตัดขวางของชิ้นส่วน และวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนนั้น
- 2) ชิ้นส่วนรับแรงดึงอาจแข็งแรงมากอย่างที่เห็นเป็นเคเบิลในโครงสร้างพาดข้ามช่วงยาว
- 3) กำลังรับแรงของชิ้นส่วนรับแรงดึงมักไม่ขึ้นกับความยาว
- 4) ความเค้นดึงจะกระจายอย่างสม่ำเสมอไปบนหน้าตัดขวางของชิ้นส่วนนั้น
- 5) ความเค้นเท่ากับแรงต่อพื้นที่ ถ้าความเค้นภายในที่เกิดขึ้นมีมากกว่าความเค้นที่ทดสอบได้ ชิ้นส่วนนั้นก็จะพังทลาย
- 6) นิยมใช้ค่าส่วนความปลอดภัยเพื่อจำกัดความเค้นที่เกิดขึ้นไว้ที่ระดับที่ยอมรับได้

2.14.2 แรงอัด (Compression force)

การบด (Crush) อาจเกิดการเดาะ (Buckle) ขึ้นด้วยมีข้อควรพิจารณา คือ

- 1) ชิ้นส่วนหนึ่งๆ ชิ้นส่วนสั้น (Short members) มีแนวโน้มที่จะถูกบด และมีกำลังสูงในการรับแรงอัดเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนในเรื่องการรับแรงดึง
- 2) กำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนรับแรงอัดที่มีรูปร่างยาวมีแนวโน้มลดลงตามความยาวที่เพิ่มขึ้น ชิ้นส่วนรับแรงดึงรูปร่างยาวอาจไม่เสถียร และอาจเกิดการพังลงอย่างทันทีทันใดภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกที่ระดับวิกฤตหนึ่ง

3) การที่ไม่สามารถจะรับน้ำหนักอย่างทันทีทันใดต่อไปนั้นมักเกิดขึ้นโดยไม่มีที่ท่าว่าจะเกิดความเค้นมากเกินไป (Material distress) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การโก่งเดาะ (Buckling) ในกรณีเช่นนี้ ชิ้นส่วนยาวที่รับแรงอัดจึงไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่สูงๆ ได้

4) ความเค้นที่เหนียวนำโดยแรงอัดนั้นเกิดขึ้นโดยสม่ำเสมอไปบนพื้นที่ตัดขวางของชิ้นส่วนนั้นไม่ว่าชิ้นส่วนจะสั้น หรือยาวก็ตาม

5) ชิ้นส่วนสั้นที่รับการอัดสามารถรับความเค้นได้สูงก่อนเกิดการบดอัดให้พังทลายไป

6) ชิ้นส่วนยาวที่รับการอัดจะเกิดการโก่งเดาะ และสามารถพังได้ที่ระดับความเค้นต่ำ ๆ

7) แรงดึง หรือแรงอัด อาจเกิดขึ้นได้ในพื้นผิวที่เป็นโครงสร้าง (Structure surface)

2.14.3 การดัด (Bending)

การดัดเป็นสถานะที่ซับซ้อนของแรงที่ควบคุมกับการแอ่น (Bowling) ของชิ้นส่วนเช่น คาน มีข้อพิจารณา คือ

1) การดัดมักมีผลจากน้ำหนักบรรทุก หรือแรงที่กระทำตามทางขวางต่อแกนยาวของชิ้นส่วนนั้น แรงภายนอกเหล่านี้ก่อให้เกิดโมเมนต์ดัดขึ้นภายในที่มีทิศทางในทางหมุนต่อพวกมัน และทำให้เกิดการดัด (Bending) หรือแอ่น (Bowling)

2) ผลเช่นเดียวกันนี้ อาจแปรไปตามความยาวของคานนั้น ขึ้นอยู่กับเรขาคณิตของโครงสร้างนั้น

3) น้ำหนักบรรทุก หรือแรงภายนอกที่ได้มากระทำ กิริยาการดัดตัวทำให้เส้นผิว (Fibers) บนผิวหน้า (Face) ของชิ้นส่วนนั้นยืดตัว (Elongate) ดังนั้น จึงอยู่ในการดึง และเส้นผิวบนผิวตรงข้ามเป็นการอัด ดังนั้น ทั้งความเค้นดึง และอัดจึงเกิดมีขึ้นที่หน้าตัดขวางเดียวกัน สถานะแรงที่ซับซ้อนนี้ไม่ได้ให้สูตรความเค้นอย่างง่ายคือ ความเค้นเท่ากับแรงต่อพื้นที่อีกต่อไป ความเค้นเหล่านี้กระทำอย่างตั้งฉากกับหน้าของส่วนตัดขวางนั้น

4) ชิ้นส่วนที่รับต่อการดัดสามารถรับขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่ต่ำเมื่อเทียบกับขนาด และเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนที่รับแรงดึงอย่างเดียว

5) กำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนในด้านการดัดขึ้นอย่างมากกับปริมาณ และการกระจายตัวของวัสดุในหน้าตัดขวางหนึ่งๆ และชนิดของวัสดุ

6) การตอบสนองที่พิเศษต่อการรับแรงดัด ได้แก่ รูปไวแฟลน (Wide-flange) ในเหล็ก หรือคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป (เมื่อใช้เหล็กรับแรงดึง)

7) การดัดอาจเกิดขึ้นในพื้นที่ผิวเรียบที่แข็งเกร็ง (Rigid plate surface) ในกรณีเช่นนี้ โมเมนต์ดัดอาจเป็นแบบสองแกน

2.14.4 การเฉือน (Shear) คือสถานะหนึ่งของแรงที่มาทับกับทิศทางของแรงในทางตรงข้ามที่พยายามทำให้ส่วนหนึ่งของโครงสร้างไหลไปเมื่อเทียบกับส่วนที่อยู่ข้างเคียงกันมีข้อควรพิจารณาดังนี้

1) ความเค้นที่กระทำ เกิดขนานไปกับผิวที่ไหลนั้น

2) ความเค้นเฉือนเกิดขึ้นทั้งในระนาบแนวดิ่ง และแนวราบในชิ้นส่วนคาน โดยทั่วไปความเค้นสูงสุดเป็นที่ยกกลางของหน้าตัดขวางนั้น และเล็กลงเมื่อเข้าสู่ด้านบน และล่างของผิวชิ้นส่วน

3) แรงเฉือนที่ทำให้ความเค้นเฉือนนั้นอาจแปรไปตามความยาวของคาน

2.14.5 การบิด (Torsion) คือการหมุนตัว (Twisting) ทั้งความเค้นดัดและอัด มักเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่รับต่อการบิด

2.14.6 การกดทับ (Bearing) เกิดขึ้นที่ผิวที่ติดประกบกัน ระหว่างชิ้นส่วนสองชิ้น เมื่อมีการถ่ายเทแรงจากชิ้นส่วนหนึ่งไปยังอีกชิ้นส่วนหนึ่ง ความเค้นกดทับเกิดขึ้นเช่นที่ปลายสุดของคานที่วางอยู่บนกำแพง หรือบนเสา ความเค้นนี้กระทำตั้งฉากกับผิวของชิ้นส่วนนั้น

2.15 การโก่งตัวหรือการแอ่นตัว (Deflections)

การโก่งตัวหรือการแอ่นตัว (Deflections) ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่เกิดขึ้นโดยน้ำหนักบรรทุกต่างๆ จะต้องจำกัดไว้ที่ค่าที่ยอมรับได้ นอกจากนั้น เมื่อมีการโก่งตัวเกิดขึ้นแล้วความเค้นที่ซับซ้อน และปฏิริยาระหว่างกันของความเค้นจะเกิดขึ้นด้วย

2.15.1 กรณีการออกแบบคาน

การควบคุมขนาดของการแอ่นโก่งตัวเป็นปัญหาสำคัญในการออกแบบคาน สิ่งที่ต้องชี้แจงถึงเกณฑ์ในเรื่องการพิจารณาการแอ่นตัว (Schodek and Bechthold, 2007 : 282-283) มีดังนี้

1) ถ้าคานแอ่นตัวจนรบกวนหน้าที่ขององค์ประกอบอาคารอื่น ๆ เช่น การแอ่นตัวที่ยอมรับได้บนพื้นฐานของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สำหรับระบบอื่น ๆ ที่ยึดติดหรืออยู่ใกล้กับคานนั้น

2) ในเรื่องความคิดเห็น เช่น คานนั้นปลอดภัยเป็นอย่างดีในมุมมองของกำลังรับน้ำหนัก แต่มีลักษณะเห็นตกท้องช้าง (Sag) ได้อย่างชัดเจนมากเกินไป

3) ผู้ใช้งานรู้สึกการกระเดิง (Bouncy) หรือมีสปริง (Springy) จะกล่าวว่าคานที่รองรับนั้นแอ่นตัวมากเกินไป ดังนั้นต้องจำกัดการกระเดิงนั้นโดยการจำกัดการแอ่นตัว

2.15.2 ข้อกำหนดการแอ่นตัว

มีแนวแนะนำ (Schodek and Bechthold, 2007 : 283) โดยทางปฏิบัติ (Empirical guidelines) เป็นสิ่งที่นำมาใช้กัน เกณฑ์ทั่วไปที่ใช้ควบคุมการตกท้องช้างจนมองเห็นได้ (Visual sag) และการกระเดิง (Bounce) คือ

1) การแอ่นตัวของพื้นไม่ควรมากกว่า $L/360$ ของช่วงพาด (Span) (เมื่อ L คือช่วงพาด) โดยปกติแล้ว เกณฑ์ $L/360$ สำหรับพื้นนำมาใช้กับการแอ่นตัวที่เกิดโดยน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) เท่านั้น

2) กรณีสำหรับน้ำหนักบรรทุกตายตัวรวมน้ำหนักบรรทุกจรจะจำกัดไว้โดยทั่วไป $L/240$

3) ในกรณีคานเหล็กจะทำประกอบการแอ่นตัวรับไว้ล่วงหน้าเท่ากับการแอ่นตัวจากน้ำหนักบรรทุกตายตัว ดังนั้น การแอ่นตัวจากน้ำหนักบรรทุกจรจึงเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับแนวราบของชิ้นส่วน

4) ในกรณีการแอ่นตัวของหลังคาจะกำหนดไว้โดยปกติที่ $L/240$ สำหรับน้ำหนักบรรทุกจร และ $L/180$ สำหรับน้ำหนักบรรทุกรวมน้ำหนักบรรทุกตายตัว

ในมุมมองของจุดเริ่มต้นเรื่องจำกัดการแอ่นตัวนี้ เกณฑ์ที่ว่า ทั้ง $L/240$ และ $L/360$ เหล่านี้ นักออกแบบหลายคนมองว่าเป็นการอนุรักษ์นิยมมากเกินไป เกณฑ์ได้มีข้อพิจารณาพื้นฐานในอาคารเก่าๆ ที่กฎเหล่านี้ใช้อย่างกว้างขวาง เพราะเป็นมาตรการที่จะป้องกัน พลาสติกที่ติดกับด้านใต้ท้องของพื้น (หรือคือเพดานของห้องที่อยู่ด้านล่าง) ไม่ให้แตกร้าว ตั้งแต่นั้นมา เกณฑ์นี้ได้ใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการประยุกต์ใช้อื่นๆ อีกมาก

การแอ่นตัวที่มีสาเหตุมาจากน้ำหนักบรรทุกบนชิ้นส่วนนั้นจะต้องถูกจำกัดไว้ที่ค่าที่ยอมให้ได้ มิฉะนั้นความเค้นที่ซับซ้อน และความเค้นที่ส่งผลแก่กันจะเกิดขึ้นด้วยในชิ้นส่วน

2.16 น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง (Loads on structures)

น้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้าง (Loads on structures) ในการวิเคราะห์หรือออกแบบโครงสร้างหนึ่ง มีความสำคัญที่ต้องได้สภาพที่ชัดเจน (Schodek and Bechthold, 2007 : 107-122) เกี่ยวกับธรรมชาติ (Nature) และขนาด (Magnitude) ของน้ำหนักบรรทุก (Loads) ที่กระทำต่อโครงสร้าง

2.16.1 การจำแนกประเภทน้ำหนักบรรทุก

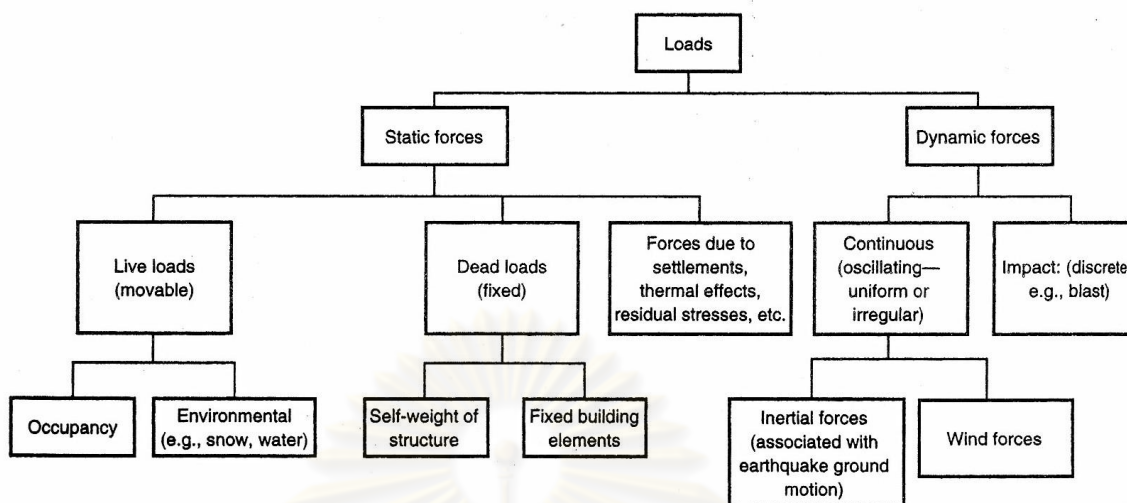
ภาพที่ 2-3 แสดงเงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกชนิดต่าง ๆ โดยทั่วไป (Typical types of loading conditions) โดยสรุบน้ำหนักบรรทุกแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ได้แก่ แรงสถิต (Static forces) และแรงไดนามิก (Dynamic forces)

2.16.2 แรงสถิต (Static forces)

แรงสถิต (Static forces) แบ่งย่อยเป็น น้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead loads) น้ำหนักบรรทุกจร (Live loads) และแรงเกี่ยวกับการทรุดตัว (Settlement) หรือผลทางด้านความร้อน (Thermal) มีลักษณะองค์ประกอบย่อยดังนี้

1) น้ำหนักบรรทุกตายตัว เป็นแรงต่าง ๆ ที่กระทำในแนวดิ่งลงบนโครงสร้างและเทียบแล้วมีลักษณะค่อนข้างคงตัว (Fixed) แบ่งเป็นน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง (Self-weight of structure) และชิ้นส่วนอาคารที่คงตัว (Fixed building elements)

2) ส่วนน้ำหนักบรรทุกจร คือแรงต่าง ๆ ที่อาจมีหรือไม่มีก็ได้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ถึงแม้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่น้ำหนักบรรทุกจรรู้สึกยังกระทำต่อโครงสร้างอย่างซ้ำ ๆ น้ำหนักบรรทุกจรถูกจำแนกไว้ด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ได้ (Moveability) ตามปกติกระทำแนวดิ่งลง แต่บางครั้งอาจกระทำตามแนวราบได้ด้วย ในการจำแนกนี้ น้ำหนักบรรทุกโดยลม (Wind load) และแรงแผ่นดินไหว (Earth quake forces) ไม่ได้รวมอยู่ในประเภทน้ำหนักจรด้วย



ภาพที่ 2-3 เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกทุกชนิดต่าง ๆ โดยทั่วไป (Schodek and Bechthold, 2007 : 108)

2.16.3 แรงไดนามิก แบ่งเป็น ประเภทกระแทก (Impact) และต่อเนื่อง (Continuous) ซึ่งแบ่งเป็นประเภทย่อยได้แก่

- 1) แรงเฉื่อย (Inertial forces) เช่นมากับแผ่นดินไหว
- 2) แรงลม (Wind forces)
- 3) น้ำหนักบรรทุกจากการอยู่อาศัย (Occupancy)
- 4) น้ำหนักบรรทุกเกิดจากสิ่งแวดล้อม (Environmental) เช่น น้ำ (หรือหิมะในประเทศเขตอบอุ่น)

2.16.4 น้ำหนักบรรทุกในการออกแบบพื้นอาคาร

ตามมาตรฐานบริติช (British standard)(Baden-Powell, 2008 : 108) สำหรับที่อยู่อาศัยน้ำหนักแผ่ (Distributed load) มีขนาด 1.5 kN/m^2 หรือ 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ตารางที่ 2-7 แสดงน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเพิ่มบนพื้น (Baden-Powell, 2008 : 106)

Imposed loads

Imposed floor loads (for further information, see BS 6399 Part 1)

Floor type	Distributed load kN/m ² *	Concentrated load kN*
Houses and blocks of flats not more than three storeys, no more than four self-contained units per floor	1.5	1.4
Bedrooms and dormitories except for those in single family dwelling units and in hotels and motels	1.5	1.8
Hotels bedrooms, hospital wards, toilet areas	2.0	1.8
Public, institutional and communal dining rooms, lounges, cafes and restaurants, billiard rooms	2.0	2.7
Operating theatres, X-ray rooms, utility rooms, reading rooms with no book storage	2.0	4.5
Offices for general use	2.5	2.7
Garages for vehicles under 2500 kg	2.5	9.0
Classrooms, chapels, banking halls	3.0	2.7
Hotel kitchens and laundries, laboratories	3.0	4.5
Offices with fixed computing equipment	3.5	4.5
Assembly buildings with fixed seating	4.0	3.6
Shop floors for retailing	4.0	3.6
Hotel bars	5.0	3.6
Assembly buildings without fixed seating, gymnasias, dance halls	5.0	3.6
Factories, workshops and similar buildings	5.0	4.5
Garages, parking and workshops for vehicles exceeding 2500 kg	To be determined for specific use	
Boiler rooms, plant rooms including weight of machinery	7.5	4.5
Bookstores, warehouses (per metre of storage height)	2.4	7.0
Stationery stores (per metre of storage height)	4.0	9.0

2.17 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คอนกรีตสามารถรับความเค้นอัด (Compressive stresses) ได้สูง แต่การแตกร้าวจะเกิดขึ้นได้ แม้จะมีความเค้นดิ่งที่ระดับต่ำ ดังนั้นเพื่อให้คานคอนกรีตใช้ได้อย่างคุ้มค่าจึงจำเป็นต้องวางวัสดุเสริมแรง (Reinforcing material) ตามปกติจะใช้เหล็กช่วยรับแรงดิ่งในบริเวณแรงดิ่ง (Tension zone) เพื่อที่จะหยุดยั้ง รอยร้าวใด ๆ ที่กำลังเริ่มเกิดขึ้นและจะแผ่ขยายเข้าไปในตัวคาน มีการถ่ายเท แรงเค้นดิ่งที่เกิดขึ้นกับการแผ่ขยายของรอยแตกไปยังเหล็กเสริม (Reinforcing steel) ซึ่งจะเกิดแรงดิ่งสูงขึ้น ดังนั้นต้องใช้เหล็กที่มีจำนวนเพียงพอ มิฉะนั้นจะถูกดึงฉีกจากกันได้

รอยแตกต่าง ๆ อาจเป็นผลมาจากความเค้นดัด ความเค้นเฉือนหรือร่วมกัน ทั้งสองอย่าง ความเค้นเหล่านี้เกิดขึ้นตลอดตัวคาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจัดรูปแบบของเหล็กหลายรูปแบบเพื่อรับกับแรงที่เกิดขึ้น

ต้องมีความแม่นยำในการออกแบบเหล็กเสริม เหล็กที่มีจำนวนน้อยเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการแบกรับแรงภายในที่เกิดขึ้น คานนั้นจะเริ่มยานตัว (Yielding) เร็วเกินไป และไม่สามารถแบกรับน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการได้ แต่ถ้าใช้เหล็กมากเกินไป จะเกิดอันตรายที่คอนกรีตจะพัง (Fail) ก่อนที่เหล็กจะเริ่มยานตัว เป็นการพังแบบการอัด (Compression failure) ซึ่งเป็นลักษณะที่อันตรายเนื่องจากเกิดขึ้นโดยไม่มีการเตือนที่เห็นได้ (Visual warning) ในกรณีเช่นนี้คอนกรีตจะแตกระเบิดออกอย่างทันทีทันใด (Suddenly burst) ฉะนั้นโดยหลักการแล้ว ควรมีให้ปริมาณเหล็กเพียงพอที่จะแบกรับน้ำหนักบรรทุกที่ได้ออกแบบไว้ ต้องแสดงอาการให้เห็นการยืดตัวอย่างมาก (Significant ductility) ในลักษณะแบบยืดตัว (Ductile fashion) และประกอบกับการแอ่นตัวที่มองเห็นได้ (Visual deflections) ก่อนที่จะเกิดการพังทลายจริง

2.18 ทฤษฎีการออกแบบ เอเอซี (AAC) เสริมเหล็ก

ทฤษฎีการออกแบบคอนกรีตกำลังต่ำ (Argudo, 2003) คือ เอเอซี (AAC) ที่เสริมเหล็กซึ่งมีพฤติกรรมที่ต่างไปจากคอนกรีตกำลังปกติ กล่าวคือ คอนกรีตโครงสร้างทั่วไปมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 280-320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่คอนกรีตเอเอซีมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงมีการปรับการออกแบบที่แตกต่างจากคอนกรีตปกติในด้านแรงเฉือนและการจัดเหล็กตามขวางกับความยาวของชิ้นส่วนเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะให้กับเหล็กตามยาว

กรณีการออกแบบเอเอซีเสริมเหล็กนั้น วัสดุเอเอซี (AAC) มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และคาดว่าส่วนผสม อีพีเอส โฟมซีเมนต์จะมีกำลังรับแรงอัดที่ประมาณ 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงได้ทดลองนำทฤษฎีการออกแบบ เอเอซี เสริมเหล็กมาเป็นหลักในการออกแบบชิ้นส่วนคานรับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้โฟมอีพีเอสซีเมนต์เสริมเหล็กที่ทำเป็นชิ้นส่วนคานที่ทำการศึกษาคำนี้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารสำคัญในการดำเนินการศึกษา

3.1.1 คุณสมบัติวัสดุก่อสร้าง

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร และการประยุกต์ใช้ในของชนิดวัสดุงานก่อสร้างอาคารที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษานี้ คือ

(1) วัสดุอาคารชนิดที่มีตัวประสานลิ้นแร่ (Building materials with mineral binders)

(2) วัสดุสังเคราะห์ (Synthetic materials)

วัสดุอาคารที่มีตัวประสานเป็นลิ้นแร่ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือตัวประสาน เม็ดของมวลที่เรียกเป็นมวลรวม และปฏิกิริยาทางเคมี ฟิสิกส์ที่ทำให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ยังสด และยังไม่แข็งตัวนั้นต้องมีคุณสมบัติเพื่อใช้ทำงานโดยทะลุเข้าแบบหล่อและมีการอัดตัวแน่นได้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง ตามวัตถุประสงค์ของการทำงาน คุณสมบัติขององค์ประกอบและเทคนิคการดำเนินการมีผลต่อคุณสมบัติทั้งในขณะที่ยังสดและแข็งแล้ว คุณสมบัติที่ผสมผสานในที่สุดเมื่อเป็นผลิตภัณฑ์ของการศึกษานี้ คือ การทำเป็นรูปร่างขึ้นส่วนได้ตามต้องการ มีความแข็งแรงเพื่อใช้เป็นโครงสร้างได้ในชนิดโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น ที่อยู่อาศัย บ้านเดี่ยว และมีความเป็นฉนวนด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ คือ ความเบา ซึ่งเกิดจากวัสดุมีความหนาแน่นต่ำ

แนวทางในการทำวัสดุอาคารในเชิงส่วนผสมของคอนกรีต ที่ไม่มีมวลรวมหยาบ เช่น ไม่มีหิน หรือกรวด และนำเอาวัสดุสังเคราะห์มาผสมเพื่อให้เกิดปริมาตรของส่วนผสมขึ้นโดยรวม ใช้วัสดุ คือ เม็ดโฟม อีพีเอส (EPS) มาเป็นมวลรวมที่สำคัญร่วมกับทรายหยาบทำให้วัสดุที่ได้มีส่วนประกอบเบาและมีโพรงอากาศในเนื้อของเม็ดอีพีเอสมาก คุณสมบัติที่ศึกษานี้เป็นคุณสมบัติความแข็งแรงในเชิงโครงสร้างเท่านั้น

การศึกษาตัวอย่างการใช้วัสดุเบาในเชิงวัสดุอาคารที่มีตัวประสานเป็นลิ้นแร่ เช่นในกรณีของคอนกรีตที่มีฟองอากาศ (Autoclaved aerated concrete) เรียกว่า เอเอซี (AAC) มีข้อดีในการนำมาใช้งานหลายประการ ทฤษฎีการออกแบบ เอเอซีเสริมเหล็กมีส่วนคล้ายกับ การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มีการปรับแก้ข้อกำหนด และวิธีการเสริมเหล็กบางประการ ซึ่งอาจนำมาใช้ได้กรณีโฟมซีเมนต์ ของการศึกษาคั้งนี้

3.1.2 การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างประกอบ

หลักการสำคัญ ในการออกแบบ ชิ้นส่วนโครงสร้าง ประกอบ หรือคอมโพสิต (Composite) โดยนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีโฟมซีเมนต์ โดยข้อพิจารณาสำคัญคือ

- 1) ลักษณะสำคัญของโครงสร้าง
- 2) หลักการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยสังเขป สำหรับชิ้นส่วนรับแรงดัด
- 3) หลักการออกแบบคอนกรีตกำลังต่ำเสริมเหล็กโดยสังเขป ในที่นี้คือ สำหรับชิ้นส่วนรับแรงดัด

โครงสร้างของอาคารบ้านพักอาศัยเป็นโครงสร้างขนาดเล็ก กำหนดให้มีช่วงรับน้ำหนักไม่เกิน 5.00 เมตร

วัสดุอาคารที่ตัวประสานเป็นสินแร่ เช่นคอนกรีต หรือมอร์ตาร์ ที่มีองค์ประกอบตามปกติ มีกำลังรับแรงอัดได้ดีกว่ากำลังรับแรงดึง ดังนั้น เมื่อนำมาเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้าง ที่มีแรงภายในหลายประเภท อันเกิดจากกิริยาของแรงภายนอก จึงต้องมีการเสริมความแข็งแรงในบางบริเวณของชิ้นโครงสร้าง เพื่อรับต่ออิทธิพลของน้ำหนักบรรทุก สิ่งแวดล้อม และที่เกิดจากการใช้งาน โครงสร้างนั้นได้หลักการออกแบบด้วยการใช้วัสดุหลายอย่างประกอบกันเพื่อเสริมสร้างคุณสมบัติของวัสดุอื่นในหน้าตัดชิ้นส่วนรับน้ำหนักและให้วัสดุต่าง ๆ นั้นทำงานรับน้ำหนักไปด้วยกัน เรียกว่าหลักการของการออกแบบวัสดุประกอบหรือคอมโพสิต (Composite) การประยุกต์ใช้ทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก และทฤษฎีคอนกรีตมีฟองอากาศ เอเอซี จึงเป็นเรื่องที่จะนำมาพิจารณาในการออกแบบชิ้นส่วน ที่ใช้วัสดุของการศึกษานี้ต่อไป

3.1.3 การประยุกต์หลักการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ

ขั้นตอนสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุโฟมซีเมนต์ ได้แก่

- 1) จัดส่วนผสมโฟมซีเมนต์
- 2) ผสมโฟมซีเมนต์ สังเกตลักษณะส่วนผสม และทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่อแข็งตัวที่อายุต่าง ๆ

การทบทวนการใช้เม็ดโฟมผสมเข้ากับซีเมนต์กับน้ำและทรายในบางกรณีเพื่อเป็นวัสดุแต่งระดับเททับหน้าซึ่งไม่ใช่เพื่อวัตถุประสงค์ในการเป็นโครงสร้างรับน้ำหนัก ทำให้เห็นถึงสัดส่วน และวิธีการผสมโดยสังเขป ส่วนผสมที่ดีจะต้องเป็นเนื้อสม่ำเสมอ เหมาะสำหรับการเทเข้าแบบหล่อ ให้มีการอัดตัวได้แน่น ได้ชิ้นส่วนตามความประสงค์ แต่กำลังรับน้ำหนัก เช่น กำลังรับแรงอัดน่าจะเป็นไปในทางต่ำ เนื่องจาก เนื้อวัสดุคือ โฟมมิได้มีกำลังในการรับน้ำหนักในฐานะเป็นโครงสร้างโดยตรง ดังนั้น จึงต้องมีการปรับปรุงส่วนผสม และการกวน การผสมส่วนผสมหลายชนิด ให้

สม้าเสมอ มีคุณสมบัติวัสดุที่ดี สามารถใช้ทำงานในขั้นตอนการเทและการอัดตัวให้แน่นได้ดี มีกำลังรับแรงอัดที่อยู่ในขั้นรับน้ำหนักได้พอสมควร

ขั้นตอนสำคัญในการศึกษานี้จึงเป็น การจัดส่วนผสม และการทดสอบผสมเพื่อสังเกตพฤติกรรม การผสม การทำงาน และความแข็งแรงเรียบร้อยที่ได้

การทดลองเพื่อจัดส่วนผสม วิธีผสม คุณสมบัติของส่วนผสมสด ตลอดจนผลการทดสอบกำลังอัดได้นำมารวบรวมแสดงไว้ในภาคผนวก ก ผลการทดลองการผสมโฟมคอนกรีต ได้ส่วนผสมและวิธีการผสมที่ทำให้ได้เนื้อวัสดุที่ทำงานได้ และให้กำลังรับแรงอัดของเนื้อวัสดุซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างแบบคอมโพสิต (Composite section) ซึ่งประกอบเสริมเพิ่มเติมด้วย เหล็กเส้นก่อสร้างเกรด 30

โฟมที่ใช้เป็น อีพีเอส (EPS, Expanded polystyrene) มีเม็ดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร มีชื่อทางการค้าว่า โพลีเทอม (Politerm) มีการทดลองผสมเป็นขั้นตอนโดยสรุปตามภาคผนวก ก เป็นการจัดส่วนผสม และทดสอบการผสม โฟม ซีเมนต์ ททราย และน้ำ เรียกเป็นโฟมซีเมนต์ โดยที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุมวลหายาบเช่นหิน

ส่วนผสมของปริมาตรผลิตภัณฑ์ 1 ลูกบาศก์เมตร เป็นไปตามข้อมูลในภาคผนวก ก ซึ่งประกอบด้วย ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ I (Portland cement type I) 405 กิโลกรัม, โพลีเทอม (Politerm) 840 ลิตร หรือ 13 กิโลกรัม, ททรายหายาบ 130 กิโลกรัม และน้ำ 189 ลิตร รวมน้ำหนัก 737 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ผสมในโม้ผสมขนาด 0.3 ลูกบาศก์เมตร โดยจัดส่วนผสมปริมาตร 0.25 ลูกบาศก์เมตร อัตราการหมุนของโม้ 31-32 รอบต่อนาที แกนเอียงทำมุมประมาณ 16 องศากับแนวราบ การผสมแบ่งเป็น 6 ขั้นตอนตามรายละเอียดในภาคผนวก ก ใช้เวลาทั้งสิ้นในการผสมประมาณ 25 นาที โดยใส่ น้ำ , โฟม , ททราย ตามลำดับ และใส่ซีเมนต์ในช่วงสุดท้าย ก่อนหมุนให้เข้ากันดีโดยใช้เวลาประมาณ 10 นาทีสุดท้ายของกระบวนการ

การดำเนินการผสม ทำทั้งสิ้น 5 ชุด เริ่มครั้งแรก เมื่อวันที่ 23 มีนาคม 2552 มีข้อต้องปรับปรุง คือ เนื้อผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เข้ากันดี มีการแยกตัว ของเม็ดโฟมจากส่วนผสมอื่น มีการปรับแก้ใบกวนในโม้ผสม ในคราวต่อมาได้ผลดีอีก 4 ชุด คือ ในวันที่ 1 เมษายน 2552 , 25 พฤษภาคม 2552 , 30 กรกฎาคม 2552 และ 3 สิงหาคม 2552

การทดสอบกำลังการรับแรงอัดกระทำโดย การเก็บตัวอย่างด้วยแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ส่งทดสอบเมื่อมีอายุที่ 1 , 3 , 7 , 28 วัน ที่ห้องทดสอบกำลังวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การใช้งานคุณสมบัติส่วนผสมที่เสิร์จจากไม่ผสมพบว่าการยุบตัว โดยการทดสอบการยุบตัว (Slump test) ที่ 150-180 มิลลิเมตร มีการเทลงแบบหล่อแผ่นตัวอย่างได้ดี และสามารถทำให้เนื้อวัสดุนี้หล่อแผ่นพื้นตัวอย่างแน่นตัวได้ดี

ผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดได้มีการรวบรวมไว้ในตารางที่ 4-1 และแผนภูมิที่ 4-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีต ตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร การทดสอบผสมครั้งที่ 2 คือตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน 2552 เป็นต้นไป ได้กำลังรับแรงอัดที่ประมาณ 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kilogram per square centimeter , ksc)

วัสดุโฟมซีเมนต์ที่ได้ดำเนินการ ได้เทลงหล่อแผ่นพื้นสำเร็จรูป ในชุดที่ 1 , 2 , 3.1 และ 3.2 รวม 4 ชุด

3.1.4 การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง

ขั้นตอนการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง คือ

1) เลือกชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงดัด เพื่อออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างสำหรับที่อยู่อาศัยแบบบ้านเดี่ยว

2) ออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงดัด

3) สร้างชิ้นส่วนตามที่ได้ออกแบบเพื่อนำมาทดสอบ และสังเกตพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกและสรุปผล

ชิ้นส่วนของโครงสร้าง ที่นำมาศึกษาได้แก่ พื้นขนาดช่วง 5.00 เมตร ซึ่งเป็นช่วงที่กำหนดขึ้นสำหรับที่อยู่อาศัย แบบบ้านเดี่ยว โดยการจำลองในการออกแบบ และทดสอบ จะพิจารณาเป็นพื้นทางเดียว (One-way slab) คล้ายเป็นคานรับน้ำหนักบรรทุก ประมาณน้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติม (Superimposed dead loads) แบ่งเป็นสองกรณี คือ 100 และ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนักบรรทุกจรหนึ่งกรณี (Live load) 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร รวมเป็นน้ำหนักบรรทุกออกแบบรวมสองกรณี คือ 250 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

คานดังกล่าว มีความยาวของชิ้นส่วน 5.00 เมตร หรือ 5000 มิลลิเมตร ตัดเป็นพื้นทางเดียว เสมือนเป็นความกว้างของคาน 0.60 เมตร หรือ 600 มิลลิเมตร สำหรับความกว้างนี้มีข้อพิจารณาเพื่อกว้างพอที่จะใส่แท่งน้ำหนักบรรทุกได้โดยสะดวก จำนวนแท่งที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ คือที่ 1.5 เท่าของ 250 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร คือที่ 375 และ 525 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้น ขนาดดังกล่าว คือ 3 ตารางเมตร เท่ากับ 1125 และ 1575 กิโลกรัม การประมาณขนาดหน้ากว้าง และน้ำหนักบรรทุก

ทดสอบที่จะทำเป็นขั้นตอนโดยการเติมน้ำหนักด้วยแท่งเหล็กขึ้นละ 20 กิโลกรัม สามารถมีขนาดความกว้างและยาวของพื้นที่หลังคานในการใส่น้ำหนักได้อย่างพอเหมาะ

มิติด้านความลึก (ความหนา) ของคานในเบื้องต้นคาดว่า อาจอยู่ในช่วงประมาณ 1 ใน 20 ของช่วงพาด คือ 5.0 เมตร ดังนั้นความลึกจึงเท่ากับประมาณ 0.25 เมตร (25 เซนติเมตร หรือ 250 มิลลิเมตร) หากน้ำหนักส่วนผสมและชิ้นงานมีความหนาแน่นประมาณ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คานหนึ่งชิ้นขนาดพื้นที่รับน้ำหนักประมาณ 3 ตารางเมตร จะหนักขึ้นละประมาณ 600 กิโลกรัม

อนึ่ง ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้หน้าตัดใส่แผ่น อีพีเอส เป็นแกนกลาง และใช้ส่วนผสมปูนฉาบเป็นเนื้อหน้าตัดตามที่ได้แสดงคุณสมบัติและการผสมวัสดุปูนฉาบไว้ในภาคผนวก ข ผลการทดสอบการรับกำลังอัดแสดงไว้ในตารางที่ 4-14 และแผนภูมิที่ 4-14 เนื้อส่วนผสมที่ได้ ได้เทหล่อพื้นสำเร็จรูป ชุดที่ 4.1 และ 4.2 รวม 2 ชุด

โดยสรุปได้มีการออกแบบแผ่นพื้น

- 1) ชุดที่ 1 ที่ความหนา 275 มิลลิเมตร หน้าตัดตัน
- 2) ชุดที่ 2 ที่ความหนา 225 มิลลิเมตร หน้าตัดตัน
- 3) ชุดที่ 3.1 ที่ความหนา 225 มิลลิเมตร หน้าตัดสองเซลล์ ส่วนที่เป็นเซลล์ใช้แท่งโพลี อีพีเอส เป็นเนื้อแกนของเซลล์
- 4) ชุดที่ 3.2 ที่ความหนา 225 มิลลิเมตร หน้าตัดเซลล์เดียว ส่วนที่เป็นเซลล์ใช้แท่งโพลี อีพีเอส เป็นแกนเต็มเซลล์
- 5) ชุดที่ 4.1 และ 4.2 ใช้หน้าตัดเซลล์เดียวเช่นเดียวกับ 3.2 แต่ใช้วัสดุปูนฉาบเป็นเนื้อแผ่นพื้น แกนเต็มเซลล์ทำด้วยแท่งโพลี อีพีเอส ขนาดความหนาแน่น 1 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต และ 2 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต ตามลำดับ

3.2 วิธีการวิจัย

3.2.1 การทดสอบตัวอย่างเป็นชุด เพื่อกำกำลังวัสดุ การสังเกตคุณสมบัติสด และพฤติกรรมการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนคานรับน้ำหนักบรรทุกและมีการปรับแก้ลักษณะของชิ้นส่วนในการออกแบบชุดต่อไป เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติใหม่ที่ได้ในด้านการรับแรง

3.2.2 จำนวนชิ้นตัวอย่างส่วนโครงสร้างที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบมีจำกัดโดยใช้หล่อตัวอย่างแผ่นพื้นหน้าตัดละ 2 ตัวอย่างเป็นหลัก นำผลการทดสอบที่ได้ นำแนวทางในการหาข้อสรุปผล

3.2.3 การศึกษาด้วยการทดลอง มีการกำหนด เงื่อนไขสภาวะต่าง ๆ และเก็บค่าจากการทดลองเพื่อวิเคราะห์และสรุปผล

3.3 ตัวแปรในการทดสอบการรับน้ำหนักของแผ่นพื้น

3.3.1 คุณสมบัติของเนื้อซีเมนต์ 2 ชนิด ได้แก่ โฟมซีเมนต์ และ ปูนฉาบ

3.3.2 น้ำหนักบรรทุก มี 2 ชนิด ได้แก่

(1) ขนาด น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนักบรรทุกจร 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

(2) ขนาดน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนักบรรทุกจร 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

3.3.3 ความกว้างและยาวของชิ้นส่วน มีค่าคงที่

3.3.4 ความลึกของหน้าตัด และรูปร่างของหน้าตัด แปรเปลี่ยนไป

3.3.5 ทดสอบพฤติกรรม สังเกต การแอ่นตัวในช่วงกึ่งกลางความหนาของแผ่นพื้น รอยแตกร้าว การคืบตัว หรือการพังทลาย

3.4 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ประกอบในการวิจัย

3.4.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1) โฟมอีพีเอส (EPS, Expanded Polystyrene) ขนาดเม็ดกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-5 มิลลิเมตร

2) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ชนิดที่ I (Portland cement type I)

3) ทราบายาบผสมคอนกรีต

4) น้ำสะอาด

5) เหล็กเส้นเกรด 24 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 และ 9 มิลลิเมตร

6) ลวดผูกเหล็ก

7) โฟมแท่งชนิดความหนาแน่น 1 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต และ 2 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต

3.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) เครื่องผสมคอนกรีต เพื่อทดสอบ ขนาด 0.30 ลูกบาศก์เมตร

2) เครื่องทดสอบการยุบตัว (Slump test)

3) แบบหล่อคอนกรีตตามขนาดของแผ่นพื้น ประมาณสูง 225 ถึง 275 มิลลิเมตร

กว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 5000 มิลลิเมตร

4) แบบแท่งตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างส่วนผสมโฟมซีเมนต์ และขนาดลูกบาศก์ 50 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างส่วนผสมปูนฉาบ

5) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่าง (ของห้องทดสอบกำลังวัสดุ)

6) แท่นทดสอบเพื่อวางขึ้นตัวอย่างแผ่นพื้น ทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุก

7) คานอ้างอิงเพื่อวางเกจวัดการแอ่นตัว

8) เกจวัดค่าการเคลื่อนที่ (แอ่นตัว) ของขึ้นตัวอย่าง อ่านความละเอียดได้ถึง 0.01

มิลลิเมตร

9) แท่งโลหะน้ำหนักบรรทุก เพื่อเป็นน้ำหนักบรรทุกทดสอบ แท่งละ 20 กิโลกรัม ตามจำนวนน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

10) สเกลวัด ความกว้างรอยแตกร้าวของตัวอย่างแผ่นพื้นนำมาทดสอบ

11) นาฬิกาแสดงเวลาในการทดสอบ

3.5 การรวบรวมข้อมูลจากการทดสอบ

3.5.1 แท่งตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุ 3 , 7 , 14 , 21 และ 28 วัน

1) แท่งตัวอย่างที่ใช้ในการเก็บสำหรับตัวอย่างกำลังรับแรงอัดวัสดุโฟมซีเมนต์ เป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร

2) แท่งตัวอย่างที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างกำลังรับแรงอัดวัสดุปูนฉาบ เป็นแท่งลูกบาศก์ มีความยาวด้านละ 50 มิลลิเมตร

อนึ่งทั้งสองชนิดส่งทดสอบที่ห้อง ทดสอบกำลังวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

3) รวบรวมข้อมูลผลกำลังการรับน้ำหนักของแท่งตัวอย่าง เพื่อเฉลี่ยเป็นค่ากำลังการรับแรงอัด

3.5.2 การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างแผ่นพื้นหล่อสำเร็จ

1) กำหนดกรอบขั้นตอนการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก โดยมีการใส่เพิ่ม / ลด หรือน้ำหนักบรรทุกทดสอบบนตัวอย่างแผ่นพื้นและเกณฑ์การพิจารณาผลการทดสอบ รายละเอียดตามภาคผนวก ซ

2) บันทึกการแอ่นตัวหรือคืบตัวจากเกจที่ตั้งไว้ที่จุดต่าง ๆ บนชิ้นตัวอย่างแผ่นพื้นที่ทำการทดสอบ การแตกร้าว ขนาดรอยแตกร้าว หรือการพังทลายในแต่ละขั้นตอนการทดสอบน้ำหนักบรรทุก

3) ทำการคำนวณค่าการแอ่นตัวหรือคืบตัว จากข้อมูลที่ได้ และคำนวณค่าการคืบตัวของชิ้นตัวอย่าง เมื่อมีการลดน้ำหนักบรรทุกลงตามขั้นตอน

4) นำเฉพาะค่าการแอ่นตัวที่บริเวณกึ่งกลางของช่วง ซึ่งกรณีการทดสอบนี้เป็นช่วงพาดบนที่รองรับตรงปลายข้างละหนึ่งที่รองรับ (Simple span) โดยนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และค่าการแอ่นตัว

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.6.1 ใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของแท่งตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดในแต่ละคราว บันทึกข้อสังเกตการณ์ที่มีความปกติของแท่งตัวอย่างหรือผลการทดสอบ จัดรวบรวมเป็น ตารางแสดงผล พิจารณาแนวโน้มของผลค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุต่าง ๆ และอธิบายหากมีความเบี่ยงเบนของค่ากำลังรับแรงอัด

3.6.2 ทดสอบพฤติการณ์รับน้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างแผ่นพื้นสำเร็จรูป พิจารณาค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ที่กึ่งกลางความยาวของแผ่น และรอยแตกร้าวต่าง ๆ มีบันทึกในรูปตาราง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการแอ่นตัว ข้อสังเกตความสามารถของ ตัวอย่างในการรับน้ำหนัก

3.7 การสรุปผลการดำเนินการ อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การสรุปผลการทดลอง และขีดจำกัดของการศึกษาวิจัย เพื่ออภิปรายผลและทำข้อเสนอแนะเพื่อเป็นข้อพิจารณาสำหรับการดำเนินการต่อไปในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การพัฒนาวัสดุโฟมซีเมนต์

ได้มีการดำเนินการทดสอบผสมโฟมซีเมนต์ซึ่งต่อไปอาจเรียกแทนว่าโฟมคอนกรีต ด้วยส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ I (Portland cement type I) ทราย (Sand) โฟม อีพีเอส (EPS foam) และน้ำตามส่วนผสมและวิธีการตามที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก การผสมโฟมซีเมนต์ จำนวน 5 ครั้ง และมีการเก็บตัวอย่างด้วยแท่งตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ตามตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบกำลังอัดของโฟมซีเมนต์ และแผนภูมิ 4-1 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัดซึ่งสรุปสาระสำคัญและผลการวิเคราะห์ การดำเนินการพัฒนาวัสดุโฟมซีเมนต์ ดังนี้

4.1.1 เป้าหมายการใช้วัสดุตามที่ได้ออกแบบไว้

เป้าหมายเบื้องต้นในการใช้วัสดุผสม เมื่อเป็นส่วนผสมสด คือ มีเนื้อสม่ำเสมอไม่แยกตัว (Segregation) มีความสามารถในการทำงานได้ (Workability) มีการเทเข้าที่และอัดตัวที่ดี (Placing and compactability)

1) ผลคุณสมบัติส่วนผสมสด

ในการทดสอบผสมครั้งที่ 1 เนื้อส่วนผสมยังไม่เข้ากันดี มีการแยกตัวของเม็ดโฟม อีพีเอส จากส่วนผสมอื่น (Segregation) , การตรวจสอบการทำงานได้ (Workability) ด้วยการทดสอบการยุบตัว (Slump test) พบการยุบตัวแยกส่วนพังทลาย การเทเข้าที่และการอัดตัวทำได้ไม่ดี เม็ดโฟม อีพีเอส ลอยขึ้นผิวหน้า

ในการทดสอบผสมครั้งที่ 2 ถึง 5 ยังคงใช้เนื้อส่วนผสมเดิมแต่มีการปรับปรุงใบกวนไม่ผสมคอนกรีต ทำให้ได้เนื้อส่วนผสมเข้ากันดี ไม่มีการแยกส่วนของเม็ดโฟม อีพีเอส การตรวจสอบการทำงานได้ (Workability) ด้วยการทดสอบการยุบตัว (Slump test) มีค่าการยุบตัวประมาณ 150 ถึง 180 มิลลิเมตร การเทเข้าที่และการอัดตัวทำได้ดี ยังคงมีเม็ดโฟม อีพีเอส ลอยขึ้นผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างที่เป็นแผ่นพื้นอยู่บ้าง

2) คุณสมบัติกำลังรับแรงอัด

เป้าหมายเบื้องต้นเมื่อแข็งตัวแล้วมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

การทดสอบผสมครั้งที่ 1 ผลการทดสอบการรับกำลังอัด มีการพัฒนากำลังอัดจากอายุ 3 , 14 , และ 28 วัน โดยมีค่าการรับแรงอัดเฉลี่ย 20.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ซึ่งต่ำกว่า เป้าหมายที่ 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโม่ซีเมนต์ตัวอย่างทรงกระบอก

เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.

ลำดับ	วันที่หล่อ	วันที่ทดสอบ	อายุ วัน	กำลังรับแรงอัด		ค่าเฉลี่ย ksc	หมายเหตุ	
				MPa	ksc			
1	23 มี.ค. 52	26 มี.ค. 52	3	1.50	15.29	15.97	ทดลองผสมโม่ ซีเมนต์	
2	23 มี.ค. 52	26 มี.ค. 52	3	1.50	15.29			
3	23 มี.ค. 52	26 มี.ค. 52	3	1.70	17.33			
4	23 มี.ค. 52	26 มี.ค. 52	3	1.70	17.33			
5	23 มี.ค. 52	26 มี.ค. 52	3	1.50	15.29			16.99
6	23 มี.ค. 52	26 มี.ค. 52	3	1.80	18.35			
7	23 มี.ค. 52	6 เม.ย. 52	14	1.90	19.37	19.03		
8	23 มี.ค. 52	6 เม.ย. 52	14	1.80	18.35			
9	23 มี.ค. 52	6 เม.ย. 52	14	1.90	19.37			
10	23 มี.ค. 52	20 เม.ย. 52	28	2.00	20.39	20.05		
11	23 มี.ค. 52	20 เม.ย. 52	28	2.00	20.39			
12	23 มี.ค. 52	20 เม.ย. 52	28	1.70	17.33			
13	23 มี.ค. 52	20 เม.ย. 52	28	2.10	21.41			
14	23 มี.ค. 52	20 เม.ย. 52	28	2.10	21.41			
15	23 มี.ค. 52	20 เม.ย. 52	28	1.90	19.37			
16	1 เม.ย. 52	8 เม.ย. 52	7	2.60	26.50	28.54		
17	1 เม.ย. 52	8 เม.ย. 52	7	2.90	29.56			
18	1 เม.ย. 52	8 เม.ย. 52	7	2.90	29.56			
19	1 เม.ย. 52	22 เม.ย. 52	21	2.90	29.56	31.26		เก็บตัวอย่างจากการหล่อแผ่นพื้น ชุดที่ 1 275 มม. โม่ซีเมนต์ต้น
20	1 เม.ย. 52	22 เม.ย. 52	21	3.20	32.62			
21	1 เม.ย. 52	22 เม.ย. 52	21	3.10	31.60			
22	1 เม.ย. 52	29 เม.ย. 52	28	3.40	34.66	34.32		
23	1 เม.ย. 52	29 เม.ย. 52	28	3.30	33.64			
24	1 เม.ย. 52	29 เม.ย. 52	28	3.40	34.66			

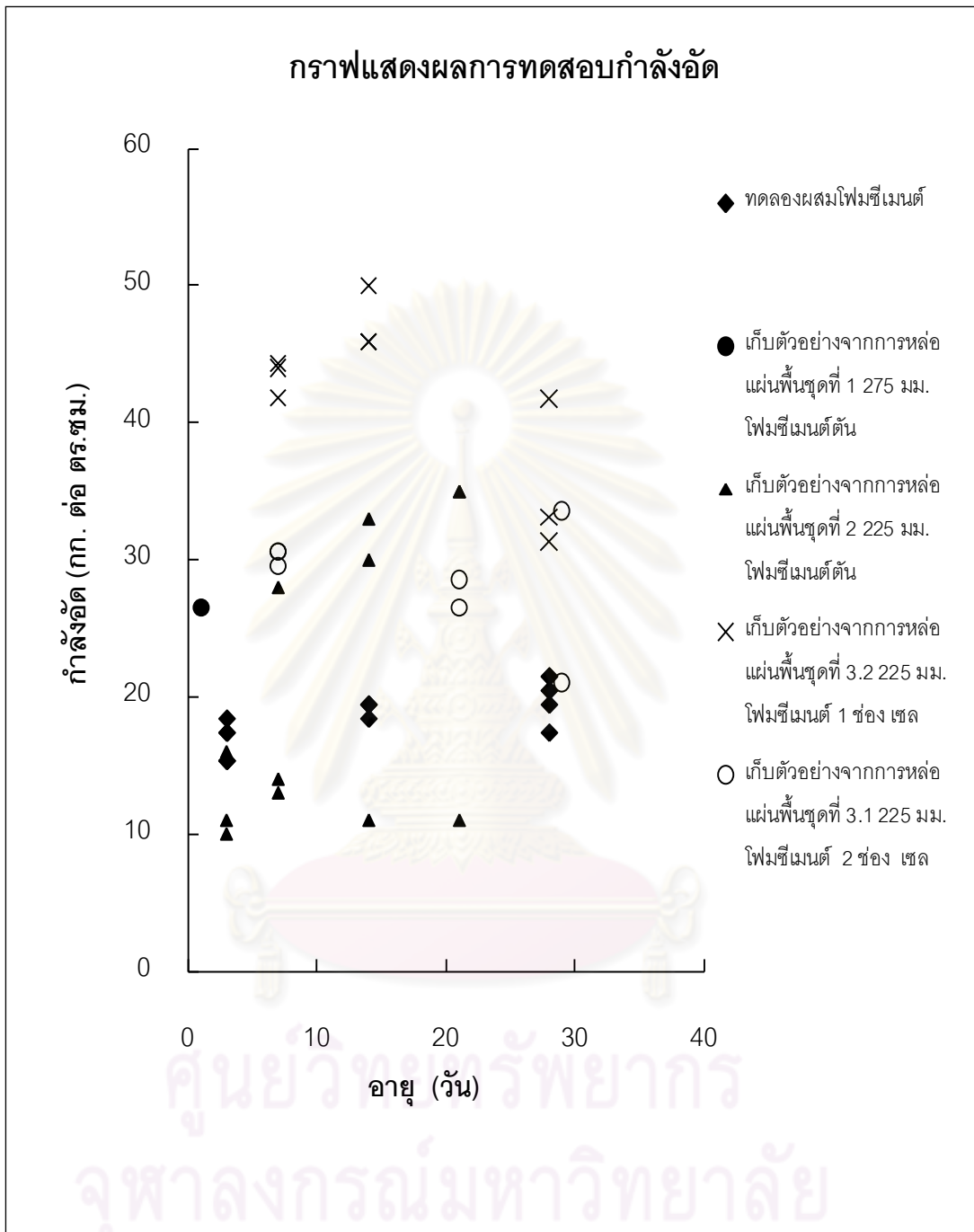
ตารางที่ 4-1 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโฟมซีเมนต์ตัวอย่างทรงกระบอก

เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.

ลำดับ	วันที่หล่อ	วันที่ทดสอบ	อายุ วัน	กำลังรับแรงอัด		ค่าเฉลี่ย ksc	หมายเหตุ
				MPa	ksc		
16	1 เม.ย. 52	8 เม.ย. 52	7	2.60	26.50	28.54	เก็บตัวอย่างจากการหล่อแผ่นพื้น ชุดที่ 1 275 มม. โฟมซีเมนต์ตัน
17	1 เม.ย. 52	8 เม.ย. 52	7	2.90	29.56		
18	1 เม.ย. 52	8 เม.ย. 52	7	2.90	29.56		
19	1 เม.ย. 52	22 เม.ย. 52	21	2.90	29.56	31.26	
20	1 เม.ย. 52	22 เม.ย. 52	21	3.20	32.62		
21	1 เม.ย. 52	22 เม.ย. 52	21	3.10	31.60		
22	1 เม.ย. 52	29 เม.ย. 52	28	3.40	34.66	34.32	
23	1 เม.ย. 52	29 เม.ย. 52	28	3.30	33.64		
24	1 เม.ย. 52	29 เม.ย. 52	28	3.40	34.66		
25	25 พ.ค. 52	28 พ.ค. 52	3	1.00	10.00	12.33	
26	25 พ.ค. 52	28 พ.ค. 52	3	1.60	16.00		
27	25 พ.ค. 52	28 พ.ค. 52	3	1.10	11.00		
28	25 พ.ค. 52	1 มิ.ย. 52	7	1.40	14.00	18.33	
29	25 พ.ค. 52	1 มิ.ย. 52	7	1.30	13.00		
30	25 พ.ค. 52	1 มิ.ย. 52	7	2.80	28.00		
31	25 พ.ค. 52	8 มิ.ย. 52	14	3.00	30.00	24.67	
32	25 พ.ค. 52	8 มิ.ย. 52	14	3.30	33.00		
33	25 พ.ค. 52	8 มิ.ย. 52	14	1.10	11.00		
34	25 พ.ค. 52	15 มิ.ย. 52	21	3.50	35.00	27.00	
35	25 พ.ค. 52	15 มิ.ย. 52	21	3.50	35.00		
36	25 พ.ค. 52	15 มิ.ย. 52	21	3.50	11.00		
37	30 ก.ค. 52	6 ส.ค. 52	7	4.10	41.80	43.37	เก็บตัวอย่างจากการหล่อแผ่นพื้น ชุดที่ 3.2 225 มม. โฟมซีเมนต์ 1 ช่องเซล
38	30 ก.ค. 52	6 ส.ค. 52	7	4.35	44.30		
39	30 ก.ค. 52	6 ส.ค. 52	7	4.32	44.00		
40	30 ก.ค. 52	13 ส.ค. 52	14	4.90	49.95	47.23	
41	30 ก.ค. 52	13 ส.ค. 52	14	4.50	45.87		
42	30 ก.ค. 52	13 ส.ค. 52	14	4.50	45.87		

ตารางที่ 4-1 (ต่อ) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโฟมซีเมนต์ตัวอย่างทรงกระบอก
เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.

ลำดับ	วันที่หล่อ	วันที่ทดสอบ	อายุ วัน	กำลังรับแรงอัด		ค่าเฉลี่ย ksc	หมายเหตุ
				MPa	ksc		
37	30 ก.ค. 52	6 ส.ค. 52	7	4.10	41.80	43.37	เก็บตัวอย่างจากการหล่อแผ่นพื้น ชุดที่ 3.2 225 มม. โฟมซีเมนต์ 1 ช่องเซลล์
38	30 ก.ค. 52	6 ส.ค. 52	7	4.35	44.30		
39	30 ก.ค. 52	6 ส.ค. 52	7	4.32	44.00		
40	30 ก.ค. 52	13 ส.ค. 52	14	4.90	49.95	47.23	
41	30 ก.ค. 52	13 ส.ค. 52	14	4.50	45.87		
42	30 ก.ค. 52	13 ส.ค. 52	14	4.50	45.87		
43	30 ก.ค. 52	27 ส.ค. 52	28	4.10	41.75	35.39	
44	30 ก.ค. 52	27 ส.ค. 52	28	3.25	33.09		
45	30 ก.ค. 52	27 ส.ค. 52	28	3.07	31.34		
46	3 ส.ค. 52	10 ส.ค. 52	7	3.00	30.58	30.24	
47	3 ส.ค. 52	10 ส.ค. 52	7	2.90	29.56		
48	3 ส.ค. 52	10 ส.ค. 52	7	3.00	30.58		
50	3 ส.ค. 52	24 ส.ค. 52	21	2.60	26.50	27.52	
51	3 ส.ค. 52	24 ส.ค. 52	21	2.80	28.54		
52	3 ส.ค. 52	1 ก.ย. 52	29	2.06	21.04	27.29	
53	3 ส.ค. 52	1 ก.ย. 52	29	3.29	33.54		



แผนภูมิที่ 4-1 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของโฟมซีเมนต์ ตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม.

การทดสอบผสมครั้งที่ 2 ถึง 5 ดำเนินการทดสอบในลักษณะทำนองเดิม กำลังรับแรงอัดที่อายุแก่ตัวอย่างที่ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 30-35 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยรายละเอียดค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัด ของแก่ตัวอย่างจากการทดสอบที่อายุประมาณ 21-29 วันตามลำดับครั้งที่ 2 ถึง 5 คือ 34.32 , 35.00 , 35.39 , และ 33.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

พบว่าในการผสมส่วนผสมโฟมซีเมนต์ในครั้งที่ 3 และ 5 มีความไม่สม่ำเสมอในบางไม่ สำหรับการทดสอบผสมครั้งที่ 3 ได้ค่ากำลังอัดของแท่งตัวอย่าง ที่ 21 วัน ได้กำลังรับแรงอัดที่ผิผิวขึ้นไปเป็นประมาณ 11 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งได้ทำการตัดค่าตัวอย่างนี้ออก ไม่นำมาเฉลี่ยด้วย

ในการทำงานเดียวกัน พบว่าสำหรับการทดสอบผสมครั้งที่ 5 ได้ค่ากำลังอัดของแท่งตัวอย่าง ตัวอย่างที่ 29 วัน ได้กำลังทดสอบกำลังอัดที่ผิผิวขึ้นไปเป็นประมาณ 21.04 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จึงได้ทำการตัดค่าตัวอย่างนี้ออกไปเช่นกัน และไม่นำมาเฉลี่ยด้วย

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโฟม EPS ซีเมนต์ที่บรรยายไว้ข้างต้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโฟมซีเมนต์

อนึ่ง ในการผสมครั้งที่ 2 ถึง 5 รวม 4 ครั้งนั้นได้มี การนำส่วนผสมไปหล่อขึ้นตัวอย่าง แผ่นพื้นชุดต่าง ๆ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป ความไม่สม่ำเสมอของการผสมดังที่ได้เกิดขึ้นในการเก็บตัวอย่างของการผสมในครั้งที่ 3 และ 5 ข้างต้น ได้มีผลต่อเนื้อของแผ่นพื้นตัวอย่าง และกำลังรับแรงอัดตลอดจนการแอ่นตัว ในกระบวนการทดสอบพฤติกรรมของชิ้นส่วนแผ่นพื้นโครงสร้าง อันเป็นเหตุผลให้แผ่นพื้นแผ่นที่ได้รับโฟมซีเมนต์ ที่ไม่ได้กำลังตามออกแบบนั้น ไม่สามารถผ่านเกณฑ์การทดสอบได้ ซึ่งจะบรรยายต่อไปในหัวข้อ 4.4 ผลการพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแผ่นพื้นชนิดต่าง ๆ

อนึ่งได้มีการพิจารณากำลังของวัสดุปูนฉาบ และทำการทดสอบแท่งตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร และได้ส่งทดสอบการรับกำลังอัด และแปลงค่าเทียบเท่าทรงกระบอก 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป ในหัวข้อ 4.4.5 และ 4.4.6

4.2 การพัฒนาแผ่นพื้นรับน้ำหนักโดยการประยุกต์ใช้วัสดุโฟมซีเมนต์

4.2.1 เป้าหมายพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นคอมโพสิตโฟมซีเมนต์ การบรรยายบทที่ 2 ได้แสดงเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบกล่าวโดยสังเขป คือ

1) คุณสมบัติของเนื้อโฟมซีเมนต์เมื่อแข็งตัวแล้ว โดยมีน้ำหนักหรือความหนาแน่นของเนื้อโฟมซีเมนต์ และกำลังรับแรงอัดเป็นสำคัญ

2) สมมุติฐานเงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกตายตัวที่เพิ่มเติม (Superimposed dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live loads)

3) มีระยะช่วง (Span length)

- 4) การรับน้ำหนักของแผ่นพื้นอยู่ในพฤติกรรมแบบพื้นทางเดียว (One-way slab)
- 5) แผ่นพื้นแบ่งเป็นชั้นสำเร็จรูป ที่มีความกว้างของแผ่น 600 มิลลิเมตร (0.60 เมตร) และพาดช่วงโดยมีความยาวแผ่น 5000 มิลลิเมตร (5.0 เมตร)
- 6) ตัวแปรที่เหลือ คือ ค่าความลึกของหน้าตัดชั้นส่วนคอมโพสิต เรียกว่าค่า เอช (h) และการวางปริมาณและจำนวนแท่งเหล็กเสริม (Reinforcing steel bars) ในชั้นส่วนแผ่นพื้นโครงสร้าง

เกณฑ์ในการทดสอบว่าแผ่นพื้นที่ได้ออกแบบไว้ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้ได้ หรือไม่นั้นใช้แนวทางเกณฑ์การทดสอบมาตรฐานอุตสาหกรรมของไทย คือ มอก.557-2531 อย่างไรก็ตาม มาตรฐานดังกล่าวเป็นมาตรฐานสำหรับพื้นคอนกรีตปกติ แต่โฟมซีเมนต์มีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตปกติมาก จึงได้เปลี่ยนแปลงเกณฑ์ในเรื่องค่าการแอ่นตัวให้มีค่าที่ยอมให้เป็น L/360 ซึ่งเป็นเกณฑ์ของการออกแบบ เป็นต้น รายละเอียดสาระสำคัญของที่ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ซ คือ น้ำหนักในการทดสอบ ส่วนขั้นตอนในการแบ่งน้ำหนักบรรทุก ในการเพิ่มน้ำหนักรวมถึงการ คงน้ำหนักบรรทุกเพื่อสังเกตพฤติกรรมการแอ่นตัว และการลดน้ำหนักบรรทุก จนถึงไม่มีน้ำหนักบรรทุก และการเฝ้าดูในระยะหลัง ลดน้ำหนักบรรทุกจนเป็นศูนย์ เพื่อบันทึกค่าการคืนตัวสุดท้าย

4.2.2 ชนิดหน้าตัดของแผ่นพื้นที่หล่อด้วยเนื้อวัสดุโฟมซีเมนต์

ได้มีการหล่อแผ่นพื้นด้วยเนื้อวัสดุโฟมซีเมนต์ ทั้งสิ้นด้วยขนาด ความกว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 5000 มิลลิเมตร มีการแปรค่าความลึกของหน้าตัด และรูปร่างของหน้าตัด คือ

- 1) ความลึก เอช (h) 275 มิลลิเมตร หน้าตัดตัน (เรียกว่าชุดที่ 1)
- 2) ความลึก เอช (h) 225 มิลลิเมตร หน้าตัดตัน (เรียกว่าชุดที่ 2)
- 3) ความลึก เอช (h) 225 มิลลิเมตร หน้าตัดได้แกน สองเซลล์ (เรียกว่าชุดที่ 3.1)
- 4) ความลึก เอช (h) 225 มิลลิเมตร หน้าตัดได้แกน เซลเดียว (เรียกว่าชุดที่ 3.2)

4.2.3 ชนิดหน้าตัดของแผ่นพื้นที่หล่อด้วย ปูนฉาบ

ได้มีการหล่อแผ่นพื้นด้วยเนื้อวัสดุปูนฉาบ ด้วยขนาดความกว้าง 600 มิลลิเมตร และยาว 5000 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับตามข้อ 4.2.2 มีการใช้ รูปร่างหน้าตัด คือ

- 1) ความลึก เอช (h) 225 มิลลิเมตร หน้าตัด เซลเดียว โดยใช้แผ่นโฟม EPS หน้าตัดเซลเดียว โดยใช้แผ่น EPS แบบ 2 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต เป็นตัวแกนของเซล (เรียกว่าชุดที่ 4.1)
- 2) เหมือนชุดที่ 4.1 แต่ใช้ความหนาแน่นของ อีพีเอส แบบ 1 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (เรียกว่าชุดที่ 4.2)

อนึ่งแบบวาด (Drawings) ของหน้าตัดต่าง ๆ ในข้อ 4.2.2 และ 4.2.3 ได้รวบรวมไว้ในภาพที่ 7-1 ถึง ภาพที่ 7-6 ในภาคผนวก ข

4.3 การบันทึกการดำเนินการ

4.3.1 การบันทึกภาพนิ่งแสดงการผสมโม่ซีเมนต์ และการหล่อชิ้นส่วนพื้นขนาดลึก 275 มิลลิเมตร กว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 5000 มิลลิเมตร

การดำเนินการดังกล่าวได้ทำเมื่อวันที่ 1 เมษายน 2552 ภาพถ่ายในชุดดังกล่าวมี 21 ภาพ คือภาพที่ 8-1 ถึงภาพที่ 8-21 ในภาคผนวก ข การดำเนินการเก็บแท่งตัวอย่างโม่ซีเมนต์เพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและการหล่อพื้นสำเร็จรูปเพื่อนำไปทดสอบกำลังและพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกที่ได้ออกแบบไว้ ณ โรงงานคอนกรีตของบริษัทนครหลวงวัสดุภัณฑ์จำกัด เลขที่ 228 หมู่ที่ 9 ถนนพหลโยธิน กม.26.5 แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กรุงเทพมหานคร 10210

ภาพถ่ายแสดง เครื่องมืออุปกรณ์ ในการผสม ชั่งน้ำหนัก อุปกรณ์การเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัด เครื่องทดสอบการยุบตัว การเตรียมหล่อแผ่นพื้น ขั้นตอนการผสมและลักษณะของเนื้อโม่ซีเมนต์ที่ผสมได้ที่แล้ว แสดงความหยุ่นตัวการไหล และการทดสอบค่าการยุบตัว การเทโม่ซีเมนต์สั่นลงในแบบหล่อแผ่นพื้น และการปาดแต่งผิวหน้าเมื่อแล้วเสร็จ รูปถ่ายชุดดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นลักษณะของโม่ซีเมนต์ที่ได้ เป็นการผสมครั้งที่ 2 การดำเนินการเช่นนี้เป็นไปในทำนองเดียวกัน สำหรับการผสมคอนกรีตครั้งที่ 3 , 4 และ 5

4.3.2 การบันทึกภาพถ่ายแสดงการทดสอบน้ำหนักบรรทุก ของชิ้นส่วนพื้นขนาดลึก 275 มิลลิเมตร กว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 5000 มิลลิเมตร ชั้นที่ 1

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างได้ดำเนินการที่ห้องทดสอบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

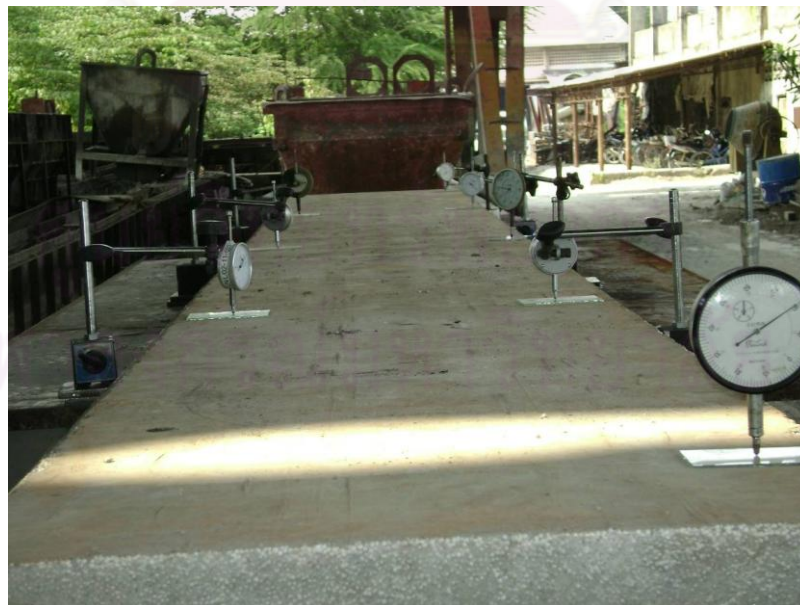
การดำเนินการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของชิ้นส่วนพื้น ได้ทำเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2552 ภาพถ่ายในชุดนี้มีจำนวน 10 ภาพ คือภาพที่ 4-1 ถึงภาพที่ 4-10

ภาพถ่ายแสดงให้เห็นถึงการทดสอบกำลังการรับแรงอัดของแท่งตัวอย่าง ในห้องทดสอบกำลังวัสดุ ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อวันที่ 23 เมษายน 2552 เมื่อแท่งตัวอย่างของการผสมชุดที่ 2 มีอายุครบ 21 วัน

ภาพถ่ายแสดงการจัดเตรียมการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้น เมื่อวันที่ 25 เมษายน 2552 แสดงถึงการติดตั้งเกจวัดค่าการแอ่นตัว แท่นวางตัวอย่าง และการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ แสดงรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางคาน และการวัดขนาดของรอยร้าว



ภาพที่ 4-1 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างโฟมซีเมนต์



ภาพที่ 4-2 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบกำลังรับน้ำหนักแผ่นพื้น วันที่ 25

เม.ย. 52



ภาพที่ 4-3 แสดงการจัดเรียงน้ำหนักรรทุก ที่ 25% ของน้ำหนักรรทุกออกแบบ



ภาพที่ 4 -4 แสดงการจัดเรียงน้ำหนักรรทุก ที่ 50% ของน้ำหนักรรทุกออกแบบ



ภาพที่ 4-5 แสดงการจัดเรียงน้ำหนักรรทุก ที่ 75% ของน้ำหนักรรทุกออกแบบ



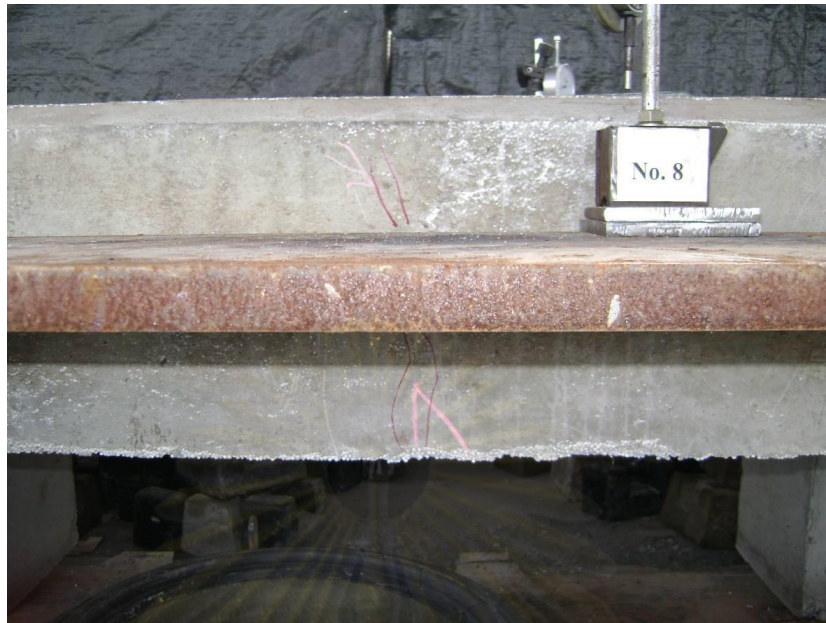
ภาพที่ 4-6 แสดงการจัดเรียงน้ำหนักรรทุก ที่ 100% ของน้ำหนักรรทุกออกแบบ



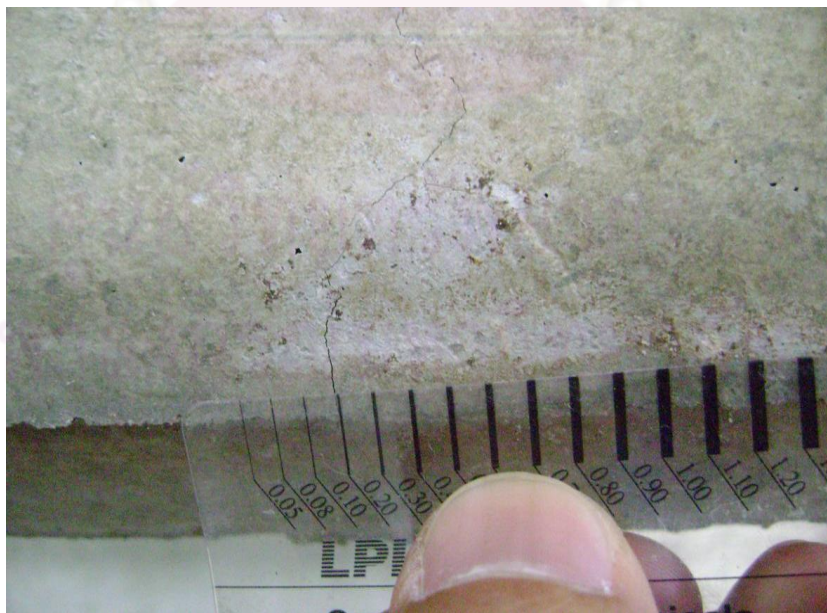
ภาพที่ 4-7 แสดงการจัดเรียงน้ำหนักบรรทุก ที่ 120% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ



ภาพที่ 4-8 แสดงการจัดเรียงน้ำหนักบรรทุก ที่ 150% ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ



ภาพที่ 4-9 แสดงการรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางคาน ด้านหลัง



ภาพที่ 4- 10 แสดงการรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางคาน ด้านหน้า

4.3.3 การบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับค่าการแอ่นตัว ในการทดสอบ การรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้นตัวอย่าง

ตัวอย่างแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่ได้ออกแบบ มีความกว้าง 600 มิลลิเมตร และยาว 5000 มิลลิเมตร เฉพาะชุดที่ 1 มีความลึก 275 มิลลิเมตร แต่ชุดที่ 2 ถึง 4.2 มีความลึก 225 มิลลิเมตร ทั้งสิ้น กล่าวถึงเนื้อวัสดุที่ใช้วัสดุโพลีเมอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุตั้งแต่ชุดที่ 1 ถึงชุดที่ 3.2 ส่วนชุดที่ 4.1 และ 4.2 ใช้เซลเดียว ใช้แผ่น EPS 1 ปอนด์ และ 2 ปอนด์ตามลำดับ

กล่าวถึง ชุดที่ 1 ถึง 4 ที่ใช้วัสดุโพลีเมอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุนั้น ชุดที่ 1 และ 2 เป็นหน้าตัดต้น สำหรับชุดที่ 3.1 และ 3.2 เป็นแบบ 2 เซล และ 1 เซลตามลำดับในเซลใช้แท่งอีพีเอส ความหนาแน่น 1 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต ใส่เต็มเซล

การทดสอบแต่ละชุดของ 6 ชุด ทดสอบชุดละ 2 ตัวอย่าง ยกเว้นชุดที่ 3.2 ทดสอบ ตัวอย่างเดียวดังนั้นจึงมีการทดสอบทั้งหมด 11 ตัวอย่าง

(1) บันทึกผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น แต่ละตัวอย่างรวม 11 ตัวอย่างใน ลักษณะตารางข้อมูล กำกับด้วย ชนิดของหน้าตัด หมายเลขตัวอย่าง วันที่ผลิต วันที่ทดสอบ และ อายุ ของชิ้นส่วนขั้นตอนการเพิ่มหรือลดน้ำหนัก หรือทั้งน้ำหนักบรรทุกค้างไว้ บันทึกเวลาที่ดำเนิน ในแต่ละชั้น และแสดงน้ำหนักบรรทุกในแต่ละขั้นตอน มีแผนผังการวางเกจ (Gauge) วัดค่าการ แอ่นตัว และค่าการแอ่นตัวในแต่ละขั้นตอน ซึ่งในตารางนี้ได้แปลงจากค่าการอ่านเกจ (Gauge reading) ในการทดลองเป็นค่าการแอ่นตัว เป็นมิลลิเมตร เรียบร้อยแล้ว เพื่อสะดวกในการ พิจารณาผลการแอ่นตัว ข้อมูลดังกล่าว คือ ตารางที่ 4-3 ถึง ตารางที่ 4-13 และ แผนภูมิที่ 4-3 ถึง แผนภูมิ 4-13

อนึ่งมีการบันทึกเพิ่มเติมในตารางดังกล่าว กรณีมีรอยแตกร้าว หรือการพังทลายเกิดขึ้น ด้วย

ผลการทดสอบในตารางที่ 4.2 สรุปผลการศึกษา ซึ่งเป็นการสรุปข้อมูลที่เป็น สาระสำคัญ 21 ประการ สำหรับหน้าตัดที่ศึกษา จำนวน 6 ชนิด หรือ 11 ตัวอย่างที่ได้ทำการ ทดสอบน้ำหนักบรรทุก

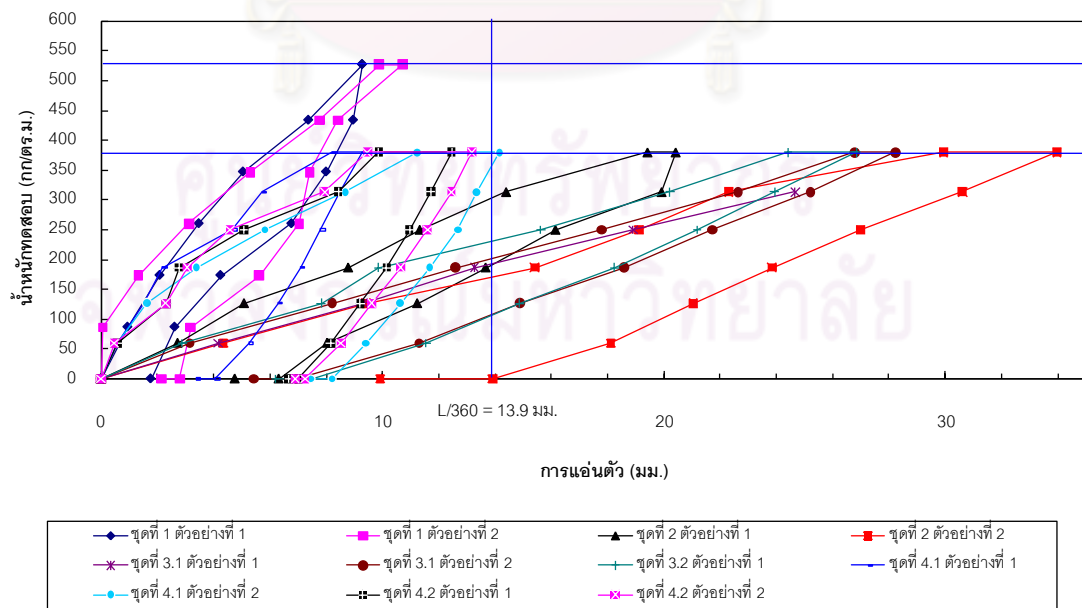
(2) การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วง แผ่นพื้นแต่ละตัวอย่างรวม 11 ตัวอย่าง

ผลของการแอ่นตัวโดยรวมของ 11 ตัวอย่างได้นำมาเขียนรวมกันในรูปเดียวตามที่ แสดงไว้ในแผนภูมิที่ 4-2 แสดงการโก่งตัว เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก

ตารางที่ 4-2 (ต่อ) การทดสอบการรับแรงรวมทุกหน้าตัด และทุกตัวอย่าง

ลำดับ	รายการ	หน่วย	จุดที่ 1 275 มม. โฟมคอนกรีตตัน		จุดที่ 2 225 มม. โฟมคอนกรีตตัน		จุดที่ 3.1 225 มม. โฟมคอนกรีต กว้าง 2 ช่อง		จุดที่ 3.2 225 มม. โฟมคอนกรีต กว้าง 1 ช่อง		จุดที่ 4.1 225 มม. ปูนฉาบโพน กว้าง 1 ช่อง ความหนาแน่น 1 ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต		จุดที่ 4.2 225 มม. ปูนฉาบโพน กว้าง 1 ช่อง ความหนาแน่น 2 ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต	
			หนา 275 มม. ตัวอย่างที่ 1	หนา 275 มม. ตัวอย่างที่ 2	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 1	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 2	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 1	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 2	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 1	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 2	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 1	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 2	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 1	หนา 225 มม. ตัวอย่างที่ 2
16	การแตกร้าวตามข้อกำหนด (I360)	มม.	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	
17	การแตกร้าวตามรายการออกแบบ (LL+SDL)	มม.	10.4	10.4	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	18.8	18.8	18.8	18.8	
18	ผลการทดสอบ													
	การแตกร้าว	มม.	5.1	5.3	11.3	19.3	Crack	17.8	15.6	4.7	5.8	5.1	4.6	
	การคืนตัว	เปอร์เซ็นต์	80.65%	78.79%	75.88%	65.89%	Crack	81.41%	74.59%	63.55%	47.60%	46.51%	47.65%	
19	ความกว้างรอยร้าว	มม.	0.20	-	-	0.20	Crack	0.20	-	0.05	0.08	0.08	0.05	
20	สรุปการทดสอบ		Pass	Pass	Pass	Fail	Fail	Fail	Fail	Pass	Pass	Pass	Pass	
21	สาเหตุที่ผ่าน/ไม่ผ่าน		การแตกร้าวไม่เกิด	การแตกร้าวไม่เกิด	การแตกร้าวไม่เกิด	การแตกร้าวเกิน	ตัวอย่างหัก	การแตกร้าวเกิน	การแตกร้าวเกิน	การแตกร้าวไม่เกิน	การแตกร้าวไม่เกิน	การแตกร้าวไม่เกิน	การแตกร้าวไม่เกิน	
			คืนสูงกว่าเกณฑ์	คืนสูงกว่าเกณฑ์	คืนสูงกว่าเกณฑ์	คืนต่ำกว่าเกณฑ์				ทำไม่ได้พิจารณาการ	ทำไม่ได้พิจารณาการ	ทำไม่ได้พิจารณาการ	ทำไม่ได้พิจารณาการ	
			คืนดี	คืนดี	คืนดี	คืนดี	คืนดี	คืนดี	คืนดี	คืนดี	คืนดี	คืนดี	คืนดี	

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและการแตกร้าวของแผ่นพื้น

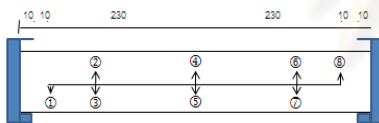


แผนภูมิที่ 4-2 การทดสอบการรับแรงรวมทุกหน้าตัด และทุกตัวอย่าง

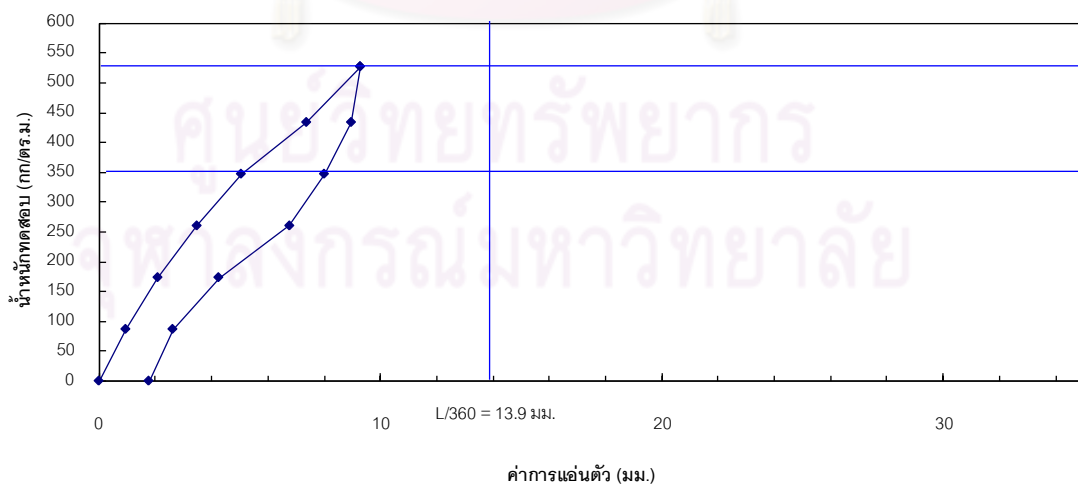
ตารางที่ 4-3 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 1

ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มนวม	Deflection (mm.)								Deflection		
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)	
1	11.55	12.04	0%		0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2	12.04	12.11	25%		260	+13 ลูก	13 ลูก	0.0	0.7	0.8	1.1	1.0	-0.7	1.1	0.0			
3	12.11	12.15	50%		520	+13 ลูก	26 ลูก	0.0	1.6	1.3	1.4	2.1	-1.7	2.1	0.0			
4	12.15	12.20	75%		780	+13 ลูก	39 ลูก	0.0	1.9	2.9	2.2	3.5	-3.1	4.7	0.0			
5	12.20	12.25	100%		1040	+13 ลูก	52 ลูก	0.0	3.8	4.8	3.6	5.1	-4.2	6.6	0.0			
6	12.25	12.30	125%		1300	+13 ลูก	65 ลูก	0.0	4.8	5.8	5.1	7.4	-5.3	7.6	0.0			
7	12.30	12.45	150%		1580	+13 ลูก	79 ลูก	0.0	6.2	6.2	7.8	9.3	-7.8	8.1	0.0			
ไม่มีการค้ำ LOAD																		
8				150%	1580		79 ลูก											
9	12.45	12.51		125%	1300	-10 ลูก	65 ลูก	0.0	5.8	6.8	7.7	9.0	-6.2	7.7	0.0			
10	12.51	12.55		100%	1040	-9 ลูก	52 ลูก	0.0	4.6	5.6	6.8	8.0	-5.5	7.3	0.0			
11	12.55	12.58		75%	780	-10 ลูก	39 ลูก	0.0	3.6	6.5	4.1	6.8	-4.6	6.2	0.0			
12	12.58	13.00		50%	520	-9 ลูก	26 ลูก	0.0	2.7	3.6	3.7	4.3	-3.4	5.2	0.0			
13	13.00	13.03		25%	260	-10 ลูก	13 ลูก	0.0	1.6	2.3	1.9	7.1	-2.6	4.9	0.0			
14	13.03	13.06		0%	0	-9 ลูก	0	0.0	0.6	1.3	0.4	1.8	-1.4	3.9	0.0			
15			-	-	-	-	-											



ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น ชุดที่ 1 275 มม. โฟมคอนกรีตตัน ตัวอย่างที่ 1



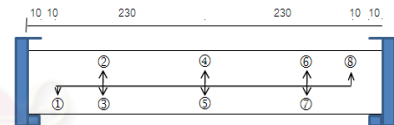
แผนภูมิที่ 4-3 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 4.4 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 2

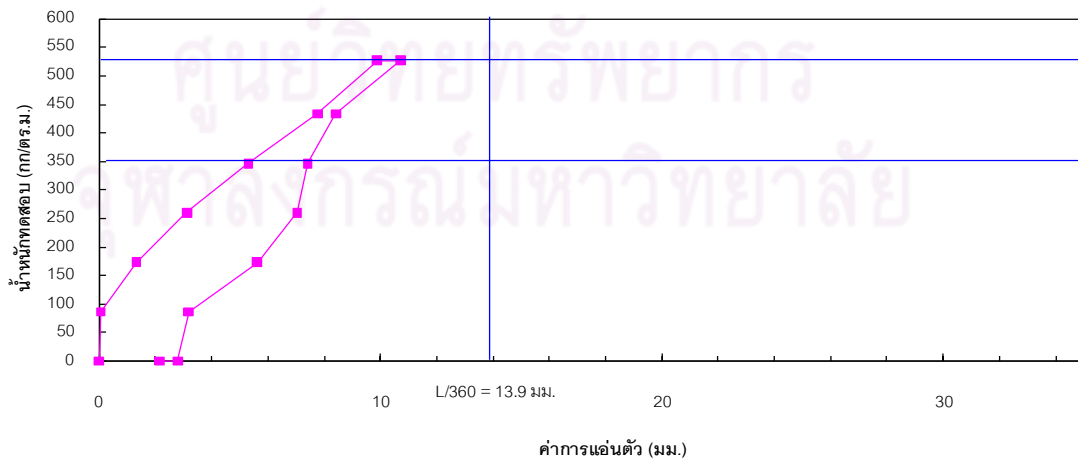
ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

ชุดที่ 1 275 มม. โฟมคอนกรีตตัน หมายเลขตัวอย่าง 2 วันที่ผลิต 02/04/52 วันที่ทดสอบ 27/04/52 อายุ 25 วัน

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มน้ำหนัก	Deflection (mm.)								Deflection		
	Start	Finish						1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	(mm.)	% (Max)	
1	11.55	12.04	0%		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	12.04	12.11	25%		260.0	+13 ลูก	13 ลูก	0.2	0.8	0.7	0.1	0.1	0.4	0.8	0.1			
3	12.11	12.15	50%		520.0	+13 ลูก	26 ลูก	0.3	1.8	1.6	0.4	1.3	0.8	1.7	0.3			
4	12.15	12.20	75%		780.0	+13 ลูก	39 ลูก	0.6	3.0	3.8	3.2	3.1	2.1	5.7	0.6			
5	12.20	12.25	100%		1,040.0	+13 ลูก	52 ลูก	0.8	4.5	4.5	3.5	5.3	4.6	3.6	0.9			
6	12.25	12.30	125%		1,300.0	+13 ลูก	65 ลูก	1.1	4.4	5.4	6.9	7.8	5.6	4.5	1.1			
7	12.30	12.45	150%		1,580.0	+13 ลูก	79 ลูก	1.3	7.1	7.9	9.0	9.9	7.2	7.1	1.4			
ทิ้ง LOAD ให้ 24 ชม.																		
8				150%	1,580.0		79 ลูก											
9	12.45	12.51		125%	1,300.0	-10 ลูก	65 ลูก	1.2	6.8	6.6	8.6	8.4	7.0	6.8	1.3			
10	12.51	12.55		100%	1,040.0	-9 ลูก	52 ลูก	1.1	6.1	6.9	6.6	7.4	6.3	5.1	1.2			
11	12.55	12.58		75%	780.0	-10 ลูก	39 ลูก	0.9	5.1	5.9	6.2	7.0	5.3	5.0	1.0			
12	12.58	13.00		50%	520.0	-9 ลูก	26 ลูก	0.7	4.2	4.0	4.8	5.6	4.3	4.0	0.8			
13	13.00	13.03		25%	260.0	-10 ลูก	13 ลูก	0.5	3.1	3.9	2.4	3.2	2.2	3.0	0.6			
14	13.03	13.06		0%	-	-9 ลูก	-	0.3	2.0	2.8	1.8	2.8	2.0	1.9	0.3			
ทิ้งให้ 24 ชม.																		
15		13.06			-	-	-	0.2	1.5	1.3	1.3	2.1	0.6	0.4	0.2			



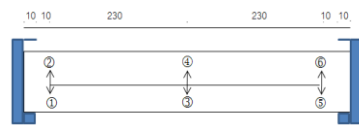
ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น ชุดที่ 1 275 มม. โฟมคอนกรีตตัน ตัวอย่างที่ 2



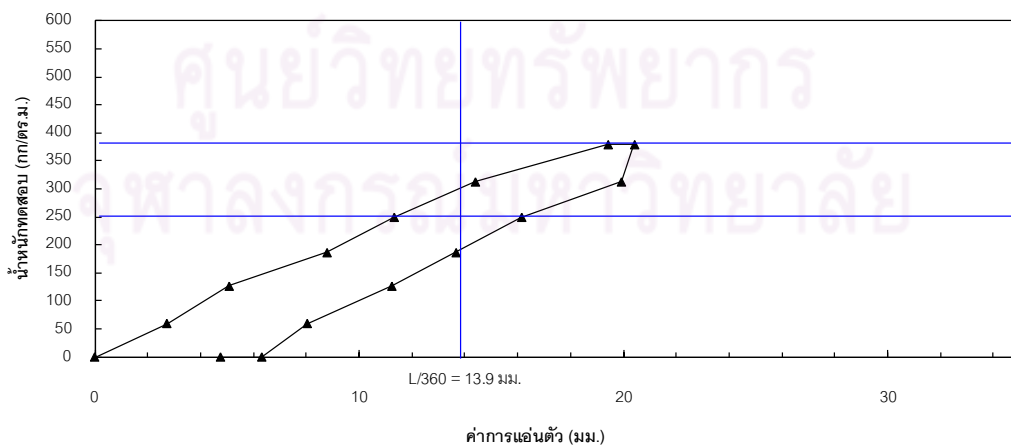
แผนภูมิที่ 4.4 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 2
ตารางที่ 4-5 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 1

ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มน้ำหนัก	Deflection (mm.)								Deflection		
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)	
1		15:21	0%		0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	15:25	15:40	25%		180	9 ลูก	9 ลูก	0.2	0.2	2.6	2.7	0.2	0.2					
3	15:42	15:57	50%		380	+10 ลูก	19 ลูก	0.7	0.5	5.9	5.1	0.5	0.5					
4	16:00	16:15	75%		560	+9 ลูก	28 ลูก	1.1	0.8	8.6	8.8	0.7	0.8					
5	16:17	16:32	100%		750	+10 ลูก	38 ลูก	1.5	1.2	11.0	11.3	1.0	1.1					
6	16:34	16:49	125%		940	+9 ลูก	47 ลูก	1.9	1.5	14.8	14.4	1.3	1.4					
7	16:52	17:07	150%		1140	+10 ลูก	57 ลูก	2.3	2.0	19.9	19.4	1.7	1.8					
ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.																		
8		17:07		150%	1140		57 ลูก	2.6	2.2	21.1	20.4	1.9	2.0					
9	17:07	17:22		125%	940	-10 ลูก	47 ลูก	2.6	2.1	19.5	19.9	1.8	1.8					
10	17:22	17:37		100%	750	-9 ลูก	38 ลูก	2.4	1.9	16.8	16.2	1.6	1.5					
11	17:37	17:52		75%	560	-10 ลูก	28 ลูก	2.3	1.6	14.3	13.7	1.4	1.3					
12	17:52	18:09		50%	380	-9 ลูก	19 ลูก	2.1	1.4	12.0	11.2	1.2	1.0					
13	18:09	18:24		25%	180	-10 ลูก	9 ลูก	1.8	1.0	8.9	8.0	0.9	0.7					
14	18:24	18:39		0%	0	-9 ลูก	0	1.3	0.7	6.4	6.3	0.6	0.3					
ทิ้งไว้ 24 ชม.																		
15		18:39	-	-	-	-	-	1.2	0.6	4.8	4.8	0.5	0.2					



ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น ชุดที่ 2 225 มม. โฟมคอนกรีตตัน ตัวอย่างที่ 1



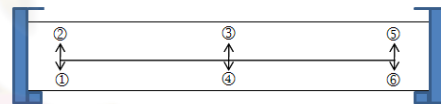
แผนภูมิที่ 4-5 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 4-6 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 2

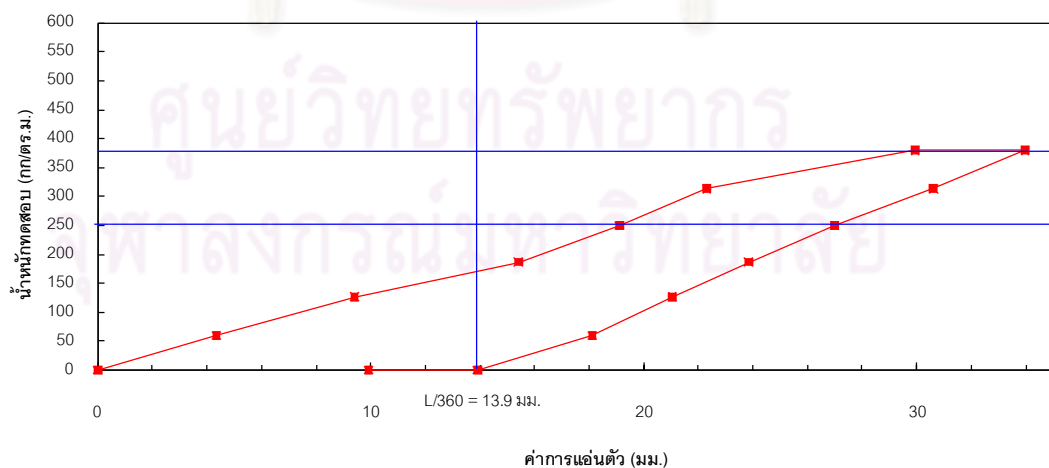
ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

ชุดที่ 2 225 มม. โฟมคอนกรีตตัน หมายเลขตัวอย่าง 2 วันที่ผลิต 25/05/52 วันที่ทดสอบ 1-3/07/52 อายุ 37-39 วัน

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มนวม	Deflection (mm.)								Deflection	
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)
1		13:55	0%		0	0	0	-	-	-	-	-	-				
2	13:57	14:12	25%		180	9 ลูก	9 ลูก	0.1	0.1	3.2	4.3	0.2	0.1				
3	14:15	14:30	50%		380	+10 ลูก	19 ลูก	0.3	0.6	9.2	9.4	0.8	0.6				
4	14:34	14:49	75%		560	+9 ลูก	28 ลูก	0.6	0.9	15.0	15.4	1.3	1.7				
5	14:51	14:56	100%		750	+10 ลูก	38 ลูก	0.9	1.5	19.3	19.1	1.8	2.1				
6	15:00	15:15	125%		940	+9 ลูก	47 ลูก	1.1	1.7	22.0	22.3	2.2	2.5				
7	15:18	15:33	150%		1140	+10 ลูก	57 ลูก	1.6	2.4	30.2	29.9	2.9	2.9				
ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.																	
8		15:33		150%	1140		57 ลูก	1.5	3.5	33.3	34.0	3.2	4.4				
9	15:35	15:50		125%	940	-10 ลูก	47 ลูก	1.4	2.6	30.2	30.6	3.0	3.6				
10	15:52	16:07		100%	750	-9 ลูก	38 ลูก	1.3	2.4	27.3	27.0	2.8	3.4				
11	16:10	16:25		75%	560	-10 ลูก	28 ลูก	1.3	2.1	24.1	23.8	2.5	3.2				
12	16:28	16:45		50%	380	-9 ลูก	19 ลูก	1.1	2.0	19.3	21.0	2.2	2.6				
13	16:47	17:02		25%	180	-10 ลูก	9 ลูก	1.0	1.8	17.4	18.1	2.0	2.0				
14	17:04	17:19		0%	0	-9 ลูก	0	0.8	1.7	13.3	13.9	1.6	1.9				
ทิ้งไว้ 24 ชม.																	
15		17:19		-	-	-	-	0.5	1.4	10.3	9.9	1.5	1.8				



ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น
ชุดที่ 2 225 มม. โฟมคอนกรีตตัน ตัวอย่างที่ 2



แผนภูมิที่ 4-6 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 4-7 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 3.1 ตัวอย่างที่ 1

ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

ชุดที่ 3.1 225 มม. โฟมคอนกรีตกลวง 2 ช่อง หมายเลขตัวอย่าง 1 วันที่ผลิต 03/08/52 วันที่ทดสอบ 22-24/08/52 อายุ 19 วัน

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มรวม	Deflection (mm.)								Deflection	
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)
1		13:48	0%		0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	13:49	14:04	25%		180	9 ลูก	9 ลูก	-0.1	0.1	4.0	4.2	0.2	0.1				
3	14:10	14:25	50%		380	+10 ลูก	19 ลูก	-0.2	0.3	9.7	9.3	0.4	0.3				
4	14:31	14:46	75%		560	+9 ลูก	28 ลูก	-0.3	0.4	12.9	13.3	0.6	0.5				
5	14:52	15:07	100%		750	+10 ลูก	38 ลูก	-0.3	0.5	17.5	18.9	0.9	0.7				
6	15:13	15:28	125%		940	+9 ลูก	47 ลูก	-0.4	0.6	23.3	24.7	1.2	0.8				
7	15:34		150%		1140	+10 ลูก	57 ลูก										
								ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.									
8				150%	1140		57 ลูก										
9				125%	940	-10 ลูก	47 ลูก										
10				100%	750	-9 ลูก	38 ลูก										
11				75%	560	-10 ลูก	28 ลูก										
12				50%	380	-9 ลูก	19 ลูก										
13				25%	180	-10 ลูก	9 ลูก										
14				0%	0	-9 ลูก	0										
								ทิ้งไว้ 24 ชม.									
15			-	-	-	-	-										

หมายเหตุ : การอ่านค่าแต่ละช่วงเริ่มจากใส่ลูกตุ้มเสร็จแล้วทิ้งไว้ 15 นาที

: ชนิด 2 Cell แผ่น #1 หนัก 410 Kg., #2 หนัก 330 Kg., #3 หนัก 380 Kg.

: ใส่ Load 25% พบรอยร้าว 4 แนว ทั้ง 2 ข้าง ขนาด 0.08 mm.

: ใส่ Load 50% พบรอยร้าวเพิ่มขึ้นเป็น 14 แนว ทั้ง 2 ข้าง ขนาด 0.08 mm.

: ใส่ Load 75% พบรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีก 1-2 แนว ทั้ง 2 ข้าง ขนาด 0.08 mm.

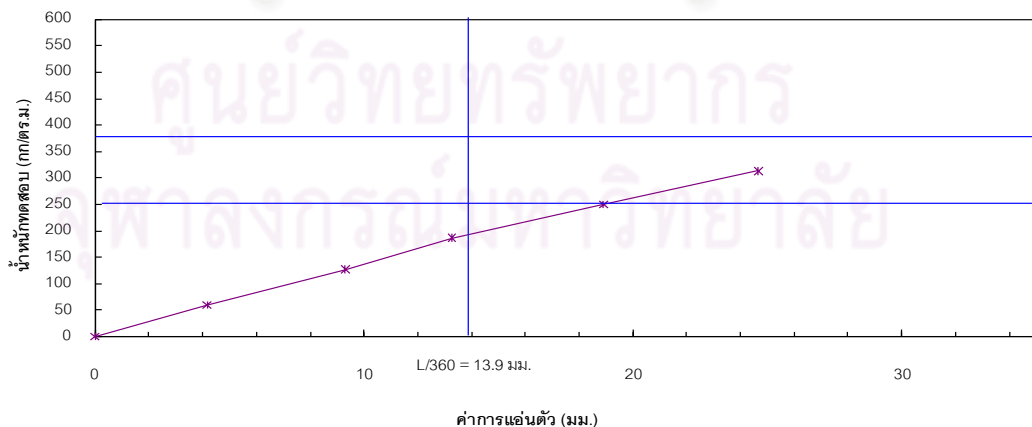
: ใส่ Load 100% รอยร้าวไม่เพิ่มขึ้น แต่ขนาดรอยร้าวกว้างเป็น 0.10 mm.

: ใส่ Load 125% รอยร้าวไม่เพิ่มขึ้น แต่ขนาดรอยร้าวกว้างเป็น 0.20 mm.

: ใส่ Load 150% ไม่นานก็ Fail

10	10	230	230	10	10
⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
①	④	⑥			

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น ชุดที่ 3.1 225 มม. โฟมคอนกรีตกลวง 2 ช่อง ตัวอย่างที่ 1



แผนภูมิที่ 4-7 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.1 ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 4-8 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 3.1 ตัวอย่างที่ 2

ชุดที่ 3.1 225 มม. โฟมคอนกรีตกลวง 2 ช่อง หมายเลขตัวอย่าง 2 วันที่ผลิต 3/8/2552 วันที่ทดสอบ 26-28/08/52 อายุ

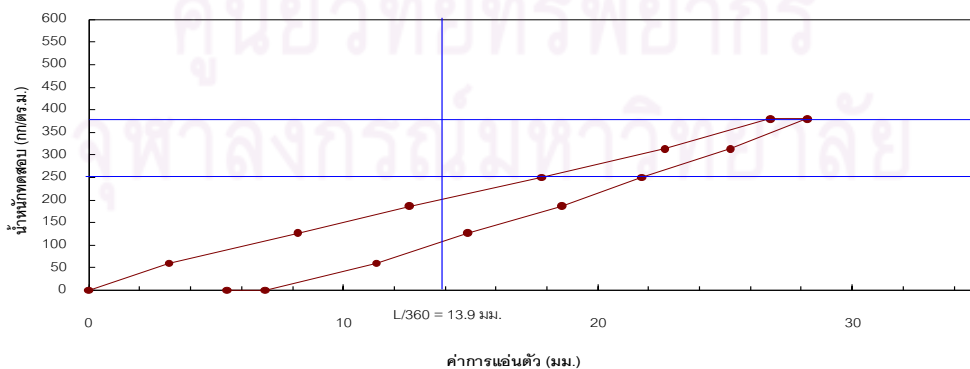
Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มน้ำหนัก	Deflection (mm.)									
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8		
1		13:50	0%		0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	13:51	14:07	25%		180	9 ลูก	9 ลูก	0.2	0.2	3.2	3.4	0.4	0.4				
3	14:51	14:30	50%		380	+10 ลูก	19 ลูก	0.8	0.4	8.2	8.3	1.3	1.1				
4	14:38	14:53	75%		560	+9 ลูก	28 ลูก	1.3	0.7	12.6	12.3	2.2	1.8				
5	15:00	15:15	100%		750	+10 ลูก	38 ลูก	1.8	1.0	17.8	16.3	3.0	2.3				
6	15:21	15:36	125%		940	+9 ลูก	47 ลูก	2.3	1.2	22.6	21.0	3.7	2.8				
7	15:42	15:57	150%		1140	+10 ลูก	57 ลูก	2.7	1.5	26.8	26.9	4.3	3.0				
								ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.									
8		16:00		150%	1140		57 ลูก	2.9	1.6	28.2	27.1	4.5	3.1				
9	16:04	16:19		125%	940	-10 ลูก	47 ลูก	2.7	1.4	25.2	24.2	4.2	2.9				
10	16:21	16:36		100%	750	-9 ลูก	38 ลูก	2.5	1.1	21.7	20.7	3.8	2.6				
11	16:40	16:55		75%	560	-10 ลูก	28 ลูก	2.2	0.9	18.6	17.6	3.3	2.4				
12	16:57	17:12		50%	380	-9 ลูก	19 ลูก	1.9	0.6	14.9	13.9	2.9	2.0				
13	17:14	17:29		25%	180	-10 ลูก	9 ลูก	1.5	0.4	11.3	10.5	2.3	1.5				
14	17:33	17:48		0%	0	-9 ลูก	0	1.1	0.1	6.9	6.2	1.7	1.1				
								ทิ้งไว้ 24 ชม.									
15		17:48	-	-	-	-	-	1.0	-0.1	5.4	5.0	1.6	1.1				

หมายเหตุ : การอ่านค่าแต่ละช่วงเริ่มจากใส่ลูกตุ้มเสร็จแล้วทิ้งไว้ 15 นาที

- : ชนิด 2 Cell แผ่น #1 หนัก 410 Kg., #2 หนัก 330 Kg., #3 หนัก 380 Kg.
- : ใส่ Load 25% มีรอยร้าว 14 รอย (2 ผัง) ขนาด 0.08 mm.
- : ใส่ Load 50% มีรอยร้าวเพิ่มอีก 9 รอย (2 ผัง) ขนาด 0.1 mm.
- : ใส่ Load 75% มีรอยร้าวเพิ่มอีก 2 รอย (2 ผัง) ขนาด 0.2 mm.
- : ใส่ Load 100% มีรอยร้าวเพิ่มอีก 2 รอย (2 ผัง) ขนาด 0.2 mm.
- : ใส่ Load 125% มีรอยร้าวเพิ่มอีก 3 รอย (2 ผัง) ขนาด 0.2 mm. รอยร้าวบรรจบกันแล้ว
- : ใส่ Load 150% มีรอยร้าวเพิ่มอีก 6 รอย (2 ผัง) ขนาด 0.2 mm.
- : เอา Load ออกหมด รอยร้าวมีความกว้างลดลงเหลือขนาด 0.08 mm.

10	10	230	230	10	10
๑	๑	๑	๑	๑	๑
๑	๑	๑	๑	๑	๑

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น ชุดที่ 3.1 225 มม. โฟมคอนกรีตกลวง 2 ช่อง ตัวอย่างที่ 2



แผนภูมิที่ 4-8 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.1 ตัวอย่างที่ 2
 ตารางที่ 4-9 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 3.2 ตัวอย่างที่ 1

ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

ชุดที่ 3.2 225 มม. โฟมคอนกรีตกลวง 1 ช่อง

หมายเลขตัวอย่าง 1

วันที่ผลิต

30/07/52

วันที่ทดสอบ

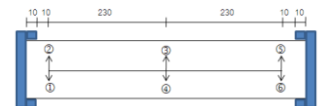
3-5/09/52

อายุ

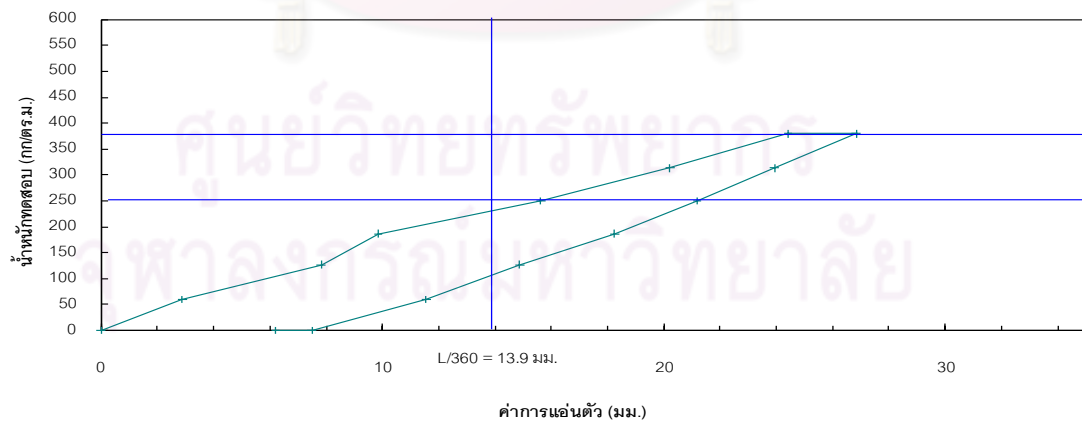
35-37

วัน

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มรวม	Deflection (mm.)								Deflection	
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)
1		13:17		0%	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	13:24	13:39		25%	180	9 ลูก	9 ลูก	0.3	0.2	2.9	0.1	0.5	0.4				
3	13:45	14:00		50%	380	+10 ลูก	19 ลูก	0.7	0.5	7.8	7.5	1.3	1.0				
4	14:05	14:20		75%	560	+9 ลูก	28 ลูก	1.2	0.9	9.9	11.3	2.1	1.5				
5	14:25	14:40		100%	750	+10 ลูก	38 ลูก	1.4	1.2	15.6	14.9	2.7	1.8				
6	14:43	14:58		125%	940	+9 ลูก	47 ลูก	1.7	1.6	20.2	19.3	3.2	2.1				
7	15:00	15:15		150%	1140	+10 ลูก	57 ลูก	3.1	2.1	24.4	23.6	3.6	2.4				
								ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.									
8		15:15		150%	1140		57 ลูก	3.3	2.5	26.8	26.0	3.8	2.6				
9	15:17	15:32		125%	940	-10 ลูก	47 ลูก	3.1	2.2	23.9	22.9	3.7	2.2				
10	15:34	15:49		100%	750	-9 ลูก	38 ลูก	3.0	2.0	21.2	20.1	3.7	1.0				
11	15:54	16:09		75%	560	-10 ลูก	28 ลูก	1.7	1.7	18.3	17.3	3.3	0.8				
12	16:11	16:26		50%	380	-9 ลูก	19 ลูก	1.4	1.4	14.9	15.1	2.8	0.5				
13	16:28	16:43		25%	180	-10 ลูก	9 ลูก	1.1	1.1	11.6	10.8	2.2	0.2				
14	16:45	17:00		0%	0	-9 ลูก	0	0.7	0.8	7.5	7.0	1.5	0.1				
								ทิ้งไว้ 24 ชม.									
15		17:00	-	-	-	-	-	0.6	0.7	6.2	5.9	1.5	-0.4				



ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น
ชุดที่ 3.2 225 มม. โฟมคอนกรีตกลวง 1 ช่อง ตัวอย่างที่ 1



แผนภูมิที่ 4-9 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 3.2 ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 4-10 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 ตัวอย่างที่ 1

ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

ชุดที่ 4.1 225 มม. ปูนฉาบโป๊ปกว้ง 1 ช่อง ความ

หนาแน่น 1 ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต หมายเลขตัวอย่าง 1 วันที่ผลิต 6/10/2552 วันที่ทดสอบ 21-23/10/52 อายุ 15-17 วัน

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มรวม	Deflection (mm.)								Deflection	
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)
1		9:44	0%		0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	9:45	10:00	25%		180	9 ลูก	9 ลูก	0.0	0.0	0.6	0.5	0.1	0.0				
3	10:02	10:17	50%		380	+10 ลูก	19 ลูก	0.0	0.0	1.5	1.5	0.1	0.1				
4	10:20	10:35	75%		560	+9 ลูก	28 ลูก	0.1	0.0	2.2	1.9	0.2	0.1				
5	10:37	10:52	100%		750	+10 ลูก	38 ลูก	0.2	0.1	4.7	2.3	0.3	0.2				
6	10:54	11:09	125%		940	+9 ลูก	47 ลูก	0.2	0.1	5.7	5.3	0.4	0.2				
7	11:11	11:26	150%		1140	+10 ลูก	57 ลูก	0.3	0.1	8.2	7.9	0.5	0.4				
ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.																	
8		11:26		150%	1140		57 ลูก	0.3	0.1	9.3	9.0	0.5	0.5				
9	11:30	11:45		125%	940	-10 ลูก	47 ลูก	0.3	0.1	8.5	8.2	0.5	0.5				
10	11:47	12:02		100%	750	-9 ลูก	38 ลูก	0.3	0.1	7.8	7.5	0.5	0.4				
11	12:04	12:19		75%	560	-10 ลูก	28 ลูก	0.3	0.1	7.1	6.8	0.5	0.3				
12	12:21	12:36		50%	380	-9 ลูก	19 ลูก	0.2	0.1	6.3	6.0	0.4	0.3				
13	12:38	12:53		25%	180	-10 ลูก	9 ลูก	0.2	0.1	5.3	5.0	0.3	0.2				
14	12:55	13:10		0%	0	-9 ลูก	0	0.1	0.1	4.1	3.8	0.2	0.1				
ทิ้งไว้ 24 ชม.																	
15				-	-	-	-	0.1	0.0	3.4	2.2	0.2	0.0				

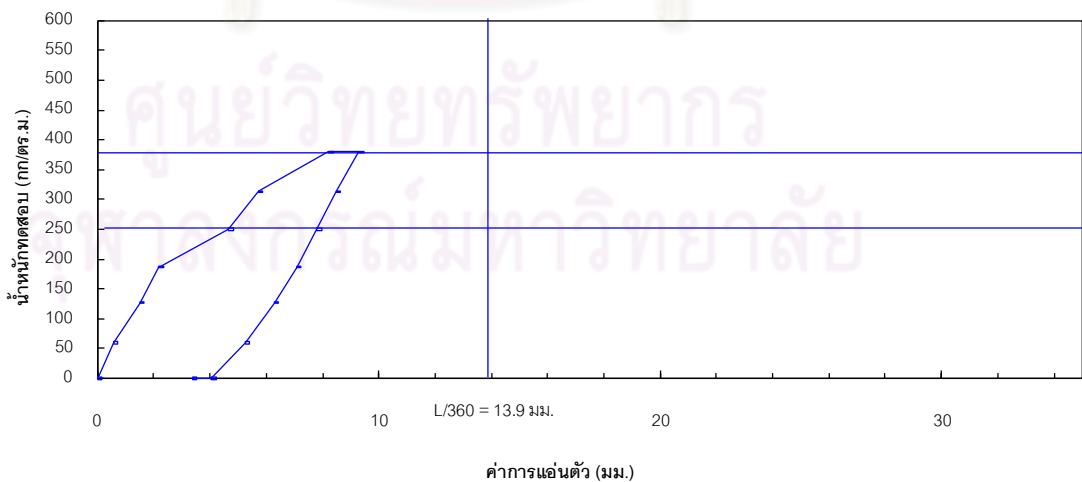
หมายเหตุ : การอ่านค่าแต่ละช่วงเริ่มจากใส่ลูกตุ้มเสร็จแล้วทิ้งไว้ 15 นาที

: โฟมชนิดเนื้อ 1 ปอนด์ 1 Cell แผ่น 1&2 หนัก 840 Kg.

: หลังจากใส่ Load 100% พบมีรอยร้าว 3 รอยบริเวณกลางคาน โดยร้าวรอบจากด้านล่างขึ้นมาด้านข้าง กว้างประมาณ 0.05 mm.

: หลังจากใส่ Load 150% พบมีรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีก 1 รอย และรอยร้าวเก่ากว้างเพิ่มเป็น 0.08 mm.

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น ชุดที่ 4.1 225 มม. ปูนฉาบโป๊ปกว้ง 1 ช่อง ความหนาแน่น 1 ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต ตัวอย่างที่ 1



แผนภูมิที่ 4-10 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 4-11 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 ตัวอย่างที่ 2

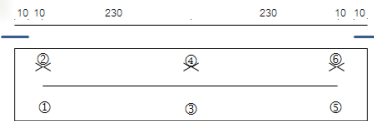
ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

ชุดที่ 4.1 225 มม. ปูนฉาบโป๊ปกว้าง 1 ช่อง ความ

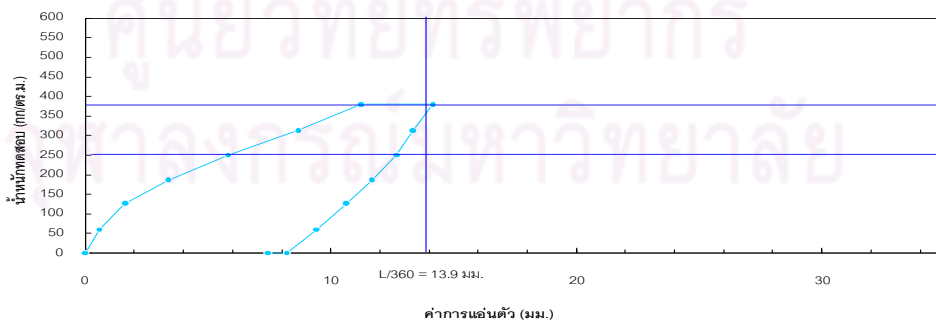
หนาแน่น 1 ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต หมายเลขตัวอย่าง 2 วันที่ผลิต 6/10/2552 วันที่ทดสอบ 26-28/10/52 อายุ 20-22 วัน

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ตุ้มน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ตุ้มรวม	Deflection (mm.)								Deflection	
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)
1		10:34	0%		0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	10:35	10:50	25%		180	9 ลูก	9 ลูก	0.0	0.1	0.6	0.6	0.1	0.1				
3	10:52	11:07	50%		380	+10 ลูก	19 ลูก	0.0	0.2	1.6	1.6	0.1	0.2				
4	11:09	11:24	75%		560	+9 ลูก	28 ลูก	0.0	0.2	3.3	3.4	0.3	0.3				
5	11:26	11:41	100%		750	+10 ลูก	38 ลูก	0.1	0.3	5.8	5.8	0.4	0.4				
6	11:43	11:58	125%		940	+9 ลูก	47 ลูก	0.1	0.4	8.5	8.7	0.5	0.6				
7	12:00	12:15	150%		1140	+10 ลูก	57 ลูก	0.1	0.5	11.2	11.2	0.6	0.7				
ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.																	
8		12:15		150%	1140		57 ลูก	0.1	0.5	13.9	14.2	0.8	0.8				
9	12:17	12:32		125%	940	-10 ลูก	47 ลูก	0.1	0.5	13.1	13.4	0.7	0.8				
10	12:35	12:50		100%	750	-9 ลูก	38 ลูก	0.1	0.5	12.4	12.7	0.7	0.7				
11	12:51	13:06		75%	560	-10 ลูก	28 ลูก	0.1	0.5	10.4	11.7	0.6	0.6				
12	13:07	13:22		50%	380	-9 ลูก	19 ลูก	0.1	0.5	10.2	10.6	0.4	0.6				
13	13:24	13:39		25%	180	-10 ลูก	9 ลูก	0.1	0.5	8.9	9.4	0.3	0.5				
14	13:40	13:55		0%	0	-9 ลูก	0	0.1	0.5	7.7	8.2	0.2	0.4				
ทิ้งไว้ 24 ชม.																	
15		13:55		-	-	-	-	0.1	0.5	7.1	7.4	0.2	0.4				

- หมายเหตุ : การอ่านค่าแต่ละช่วงเริ่มจากใส่ลูกตุ้มเสร็จแล้วทิ้งไว้ 15 นาที
 : โม่ชนิดเนื้อ 1 ปอนด์ 1 Cell แผ่น 1&2 หน้า 840 Kg.
 : หลังจากใส่ Load 75% พบมีรอยร้าว 1 รอยบริเวณกลางคาน โดยร้าวรอบจากด้านล่างขึ้นมาด้านข้างกว้างประมาณ 0.05 mm.
 : หลังจากใส่ Load 100% พบมีรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีก 1 รอย
 : หลังจากใส่ Load 125% พบมีรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีก 2 รอย
 : หลังจากใส่ Load 150% พบมีรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีก 1 รอย



ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น ชุดที่ 4.1 225 มม. ปูนฉาบโป๊ปกว้าง 1 ช่อง ความหนาแน่น 1 ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต ตัวอย่างที่ 2



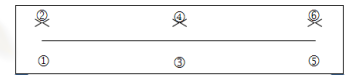
แผนภูมิที่ 4-11 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 ตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 4-12 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 4.2 ตัวอย่างที่ 1

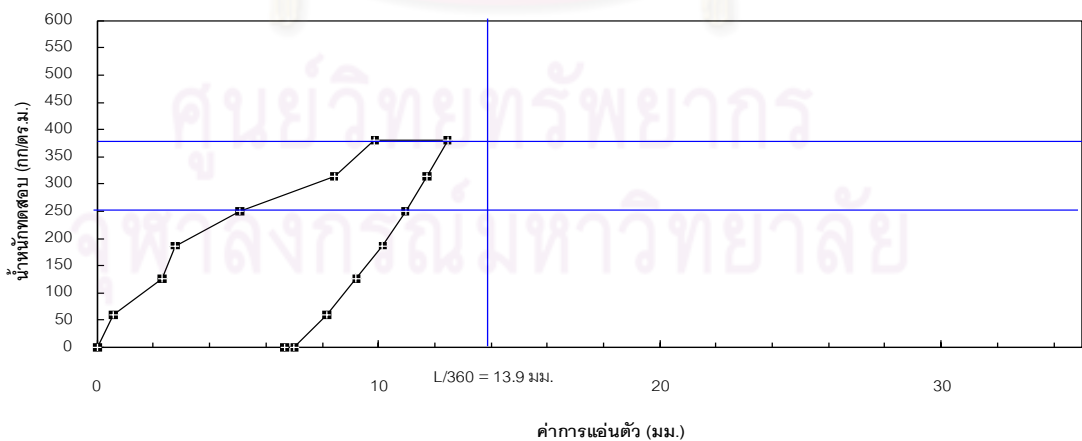
ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.
 ชุดที่ 4.2 225 มม. ปูนฉาบโป๊ปกกลาง 1 ช่อง ความหนาแน่น 2 ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ใส่ค้ำน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ค้ำรวม	Deflection (mm.)								Deflection (mm.) % (Max)	
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)
1		9:04	0%		0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	9:05	9:20	25%		180	9 ลูก	9 ลูก	0.0	0.0	0.6	0.5	0.1	0.1				
3	9:25	9:40	50%		380	+10 ลูก	19 ลูก	0.0	0.0	2.3	1.1	0.2	0.2				
4	9:43	9:58	75%		560	+9 ลูก	28 ลูก	0.0	0.1	2.8	2.4	0.3	0.2				
5	10:00	10:15	100%		750	+10 ลูก	38 ลูก	0.1	0.1	5.1	3.7	0.5	0.3				
6	10:20	10:35	125%		940	+9 ลูก	47 ลูก	0.2	0.1	8.4	6.9	0.7	0.4				
7	10:40	10:55	150%		1140	+10 ลูก	57 ลูก	0.2	0.2	9.9	8.4	0.7	0.5				
ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.																	
8		10:55		150%	1140		57 ลูก	0.2	0.2	12.5	11.0	0.8	0.6				
9	11:00	11:15		125%	940	-10 ลูก	47 ลูก	0.1	0.2	11.7	10.3	0.8	0.5				
10	11:16	11:31		100%	750	-9 ลูก	38 ลูก	0.1	0.2	11.0	9.6	0.8	0.5				
11	11:33	11:48		75%	560	-10 ลูก	28 ลูก	0.1	0.2	10.2	8.8	0.7	0.5				
12	11:49	12:04		50%	380	-9 ลูก	19 ลูก	0.0	0.2	9.2	7.9	0.7	0.4				
13	12:06	12:21		25%	180	-10 ลูก	9 ลูก	0.0	0.2	8.2	6.9	0.6	0.4				
14	12:23	12:38		0%	0	-9 ลูก	0	0.0	0.2	7.0	5.8	0.5	0.3				
ทิ้งไว้ 24 ชม.																	
15		12:38	-	-	-	-	-	0.0	0.2	6.7	5.5	0.5	0.3				

หมายเหตุ : การอ่านค่าแต่ละช่วงเริ่มจากใส่ลูกค้ำเสร็จแล้วทิ้งไว้ 15 นาที
 : โฟมชนิดเนื้อ 2 ปอนด์ 1 Cell แผ่น 1&2 หน้า 840 Kg.
 : หลังจากใส่ Load 100% พรมีรอยร้าว 2 รอยบริเวณกลางคาน โดยร้าวรอบจากด้านล่างขึ้นมาด้านข้างกว้างประมาณ 0.05 mm.
 : หลังจากใส่ Load 125% พรมีรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีก 4 รอย
 : หลังจากใส่ Load 150% พรมีรอยร้าวเพิ่มขึ้นอีก 1 รอย



ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น ชุดที่ 4.2 225 มม. ปูนฉาบโป๊ปกกลาง 1 ช่อง ความหนาแน่น 2 ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต ตัวอย่างที่ 1



แผนภูมิที่ 4-12 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.2 ตัวอย่างที่ 1
 ตารางที่ 4-13 การทดสอบการรับแรงของแผ่นพื้นชุดที่ 4.2 ตัวอย่างที่ 2

ตารางผลการทดสอบรับแรงของแผ่นพื้น กว้าง 0.60 ม. ยาว 5.00 ม.

ชุดที่ 4.2 225 มม. ปูนฉาบโป๊ปกว้าง 1 ช่อง ความ

หนาแน่น 2 ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต หมายเลขตัวอย่าง 2 วันที่ผลิต 22/10/2552 วันที่ทดสอบ 9-11/11/52 อายุ 18-20 วัน

Step	Time		เพิ่ม Load	ลด Load	Test Load Kg	ได้ค้ำน้ำหนัก (ลูก)	จำนวน ค้ำรวม	Deflection (mm.)								Deflection	
	Start	Finish						1	2	3	4	5	6	7	8	(mm.)	% (Max)
1		10:03	0%		0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
2	10:05	10:20	25%		180	9 ลูก	9 ลูก	0.0	0.0	0.5	0.4	0.1	0.1				
3	10:23	10:38	50%		380	+10 ลูก	19 ลูก	0.1	0.0	2.3	1.2	0.2	0.1				
4	10:40	10:55	75%		560	+9 ลูก	28 ลูก	0.1	0.0	3.1	1.9	0.3	0.2				
5	10:57	11:12	100%		750	+10 ลูก	38 ลูก	0.1	0.1	4.6	3.4	0.4	0.4				
6	11:14	11:29	125%		940	+9 ลูก	47 ลูก	0.1	0.1	7.9	6.9	0.6	0.7				
7	11:31	11:46	150%		1140	+10 ลูก	57 ลูก	0.2	0.2	9.5	8.5	0.7	0.9				
ทิ้ง Load ค้างไว้ 24 ชม.																	
8		11:46		150%	1140		57 ลูก	0.2	0.3	13.2	12.5	0.9	1.4				
9	11:54	12:09		125%	940	-10 ลูก	47 ลูก	0.2	0.3	12.5	11.8	0.9	1.4				
10	12:13	12:28		100%	750	-9 ลูก	38 ลูก	0.2	0.3	11.6	10.9	0.9	1.3				
11	12:30	12:45		75%	560	-10 ลูก	28 ลูก	0.2	0.3	10.7	10.0	0.9	1.2				
12	12:47	13:02		50%	380	-9 ลูก	19 ลูก	0.1	0.3	9.6	9.0	0.8	1.2				
13	13:05	13:20		25%	180	-10 ลูก	9 ลูก	0.1	0.2	8.5	7.9	0.7	1.1				
14	13:23	13:38		0%	0	-9 ลูก	0	0.0	0.2	7.2	6.7	0.6	1.0				
ทิ้งไว้ 24 ชม.																	
15		13:38		-	-	-	-	0.0	0.2	6.9	6.3	0.6	1.0				

หมายเหตุ : การอ่านค่าแต่ละช่วงเริ่มจากใส่ลูกค้ำเสร็จแล้ว

: โฟมชนิดเนื้อ 2 ปอนด์ 1 Cell แผ่น 1&2 หน้า

: หลังจากใส่ Load 50% พบมีรอยร้าวขนาด 0.05 mm. 1 รอย (ร้าว

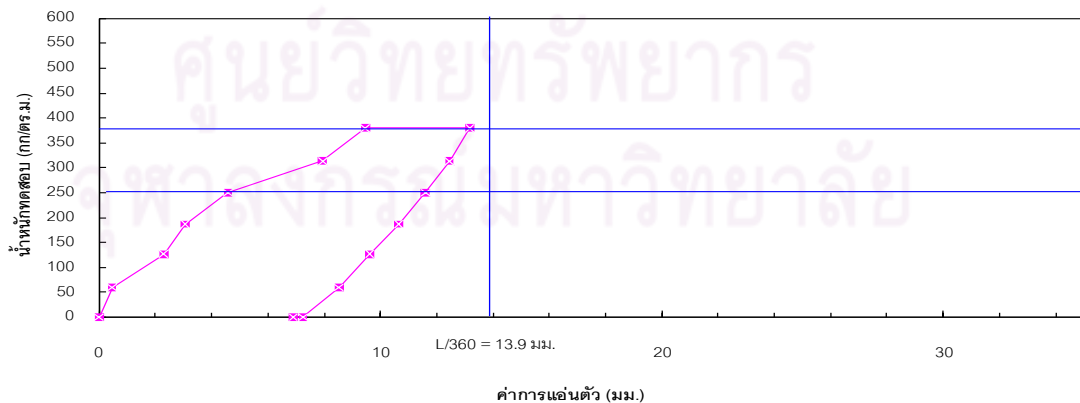
ช่วงกลางแผ่นจากด้านข้างถึงด้านล่าง (ไม่รอบ)

รอบ) : หลังจากใส่ Load 100% พบมีรอยร้าวเพิ่มขนาด 0.05 mm. 1 รอย (ร้าว

: หลังจากใส่ Load 125% พบมีรอยร้าวเพิ่มขนาด 0.08 mm. 3 รอย และรอยเก่ามีขนาดกว้างขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น

ชุดที่ 4.2 225 มม. ปูนฉาบโป๊ปกว้าง 1 ช่อง ความหนาแน่น 2 ปอนด์ ต่อ ลบ.ฟุต ตัวอย่างที่ 2



แผนภูมิที่ 4-13 การทดสอบการรับแรงแผ่นพื้นชุดที่ 4.2 ตัวอย่างที่ 2

4.4 ผลการพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแผ่นพื้น

ตารางที่ 4-2 และแผนภูมิที่ 4-2 แสดงผลสรุปการศึกษา ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 1

แผ่นพื้นชุดที่ 1 มีขนาดความลึก 275 มิลลิเมตร กว้าง 600 มิลลิเมตร ยาว 5000 มิลลิเมตร หน้าตัดต้นตามภาพที่ 7-1 ที่มีรายละเอียดมีการทดสอบสองตัวอย่าง

1) การทดสอบตัวอย่างที่ 1

ทดสอบเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2553 ขึ้นตัวอย่างมีอายุ 23 วัน

ขนาดความลึก (หนา) ตัวอย่าง ได้จากการกำหนดความลึกของหน้าตัดที่ $L/20$ (เมื่อ L คือ ช่วงความยาวช่วง) ซึ่งคิดเป็นความลึก (h) เท่ากับประมาณ 275 มิลลิเมตร หน้าตัดดังกล่าวรับน้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติม (Superimposed dead load) ขนาด 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร รวมเป็นน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

การคำนวณเบื้องต้นของหน้าตัดคอมโพสิต (Composite) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเป็นร้อยละ 100 คือที่ 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร คาดว่าจะเกิดการแอ่นตัว (Deflection) ที่กึ่งกลางช่วงของคานมีขนาด 10.4 มิลลิเมตร ในขณะที่ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้เกิดขึ้นได้มีขนาด $L/360$ คือ 13.9 มิลลิเมตร

ทดสอบตัวอย่างของหน้าตัดนี้ 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างแรกไม่ได้ทดสอบการทิ้งน้ำหนักบรรทุกที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 ไว้ 24 ชั่วโมง และไม่มีขั้นตอนการสังเกตค่าการแอ่นตัว เมื่อนำเอาน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก และสังเกตหลังจากนั้น 24 ชั่วโมง

การทดสอบของตัวอย่างแรก ให้แนวทางว่า การแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพื้น ที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 100 ของการออกแบบ คือ ที่น้ำหนักบรรทุก 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตรนั้น มีค่า 5.1 มิลลิเมตร จากที่คำนวณไว้ว่าน่าจะเป็นที่ 10.4 มิลลิเมตร และค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ คือ 13.9 มิลลิเมตร นอกจากนี้ค่าการแอ่นตัวที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 มีขนาด 9.0 มิลลิเมตร ค่าการแอ่นตัว ทันทีที่นำน้ำหนักบรรทุกออกทั้งหมดคงเหลืออยู่ที่ 1.8 มิลลิเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงแผ่น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-3 และแผนภูมิที่ 4-3 มีรอยแตกขนาดความกว้างรอยแตก 0.20 มิลลิเมตรในขั้นตอนที่ 7 คือที่น้ำหนักทดสอบร้อยละ 150 ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบ

ผลการทดสอบของตัวอย่างแรกสรุปได้ว่า แผ่นพื้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ และค่าการแอ่นตัวน้อยกว่าที่ยอมให้ และมีข้อสังเกตว่ามีค่าการแอ่นตัวน้อยกว่าที่คำนวณไว้ หรือแม้ที่

น้ำหนักบรรทุกที่ร้อยละ 150 ก็ยังเกิดค่าการแอ่นตัว น้อยกว่าที่คำนวณไว้ สำหรับที่น้ำหนักบรรทุก ร้อยละ 100 สำหรับค่าการคืบตัว ที่คิดจากค่าการแอ่นตัวสูงสุด ที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 จน คงเหลือเมื่อนำน้ำหนักบรรทุกออกหมด คิดเป็นร้อยละ 80.65 ซึ่งดีกว่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน มอก. ที่ร้อยละ 76

อนึ่งการทดสอบข้างต้นยังไม่ได้มีการทิ้งน้ำหนักที่ร้อยละ 150 ไว้ 24 ชั่วโมง และไม่ได้ สังเกตค่าการแอ่นตัว เมื่อนำน้ำหนักบรรทุกออกหมดและเวลาผ่านไปอีก 24 ชั่วโมง ตามขั้นตอน สมบูรณ์ที่กำหนดไว้ใน มอก.

2) การทดสอบตัวอย่างที่ 2

ทดสอบเมื่อวันที่ 27 เมษายน 2552 ขึ้นตัวอย่างมีอายุ 25 วัน

การทดสอบเพิ่มขึ้นขั้นตอนการทิ้งน้ำหนักที่ร้อยละ 150 และบันทึกผลค่าการแอ่นตัวที่ 24 ชั่วโมง หลังแช่น้ำหนักบรรทุกนั้นไว้ และเพิ่มขึ้นขั้นตอนการสังเกตบันทึกผลค่าการแอ่นตัวที่ 24 ชั่วโมงหลังจากนำน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออกแล้ว

อนึ่งจะใช้ขั้นตอนเช่นนี้ ซึ่งรวมเป็นขั้นตอนในการอ่านค่า 15 ขั้นตอน สำหรับทดลองต่อไป ทุกการทดลอง

การบันทึกผลเป็นไปตามตารางที่ 4-4 และแผนภูมิที่ 4-4 และอยู่ในผลสรุปการศึกษา ตารางที่ 4-2 ซึ่งมีสาระสำคัญของข้อมูลคือ การแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพื้นที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 100 มีค่า 5.3 มิลลิเมตร (ตัวอย่างแรกมีค่า 5.1 มิลลิเมตร) การแอ่นตัวที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 มีขนาด 9.9 มิลลิเมตร เมื่อใส่น้ำหนักบรรทุกเสร็จ (ตัวอย่างที่ 1 มีขนาด 9.0 มิลลิเมตร) และ 10.8 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าการแอ่นตัวทันทีที่เอาน้ำหนักบรรทุกออกหมด เหลือ ที่ 2.8 มิลลิเมตร (ตัวอย่างที่แรกมีค่า 1.8 มิลลิเมตร) และ 2.1 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ไม่มีรอยแตก

ผลการทดสอบ ย้ำให้เห็นว่า แผ่นพื้นคอมโพสิต ที่ได้ออกแบบ โดยใช้วัสดุโฟม อีพีเอส ซีเมนต์นี้สามารถรับน้ำหนัก บรรทุกออกแบบขนาด 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตรได้ ตามแนว มาตรฐานและเกณฑ์ตามที่ปรับปรุงไว้ตามภาคผนวก ข สำหรับข้อมูลที่ได้ในกรณีพาดช่วง 5000 มิลลิเมตร มีค่าการแอ่นตัวประมาณ 5.1 ถึง 5.3 มิลลิเมตร หรือ ประมาณ L/900 ที่น้ำหนักบรรทุก ร้อยละ 100 และมีค่าการแอ่นตัวประมาณ 10 มิลลิเมตร หรือประมาณ L/500 ที่น้ำหนักบรรทุก ร้อยละ 150 และมีการแช่น้ำหนักบรรทุกครบ 24 ชั่วโมงแล้ว อัตราการคืบตัวอยู่ในระหว่างช่วง ประมาณร้อยละ 79-80 ซึ่งดีกว่าที่จะต้องมียังน้อยร้อยละ 76 ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้อยู่ที่

L/360 ซึ่งแผ่นพื้นตัวอย่างมีความแข็งแรงในแง่การแอ่นตัว กล่าวคือ ที่ L/900 และ L/500 ที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 100 และร้อยละ 150 พร้อมแต่น้ำหนัก 24 ซม. ตามรายละเอียดข้างต้น

อนึ่ง การทดสอบพื้นในแต่ละตัวอย่างตามมาตรฐานของ มอก. กำหนดไว้ให้เป็น 3 ชั้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านเงินทุน และเป็นการเพื่อหาแนวทางพฤติกรรมของชิ้นโครงสร้างเท่านั้น จึงได้มีการทดสอบโดยหลักการเพียง 2 ชั้นต่อหนึ่งหน้าตัดเท่านั้น

4.4.2 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 2

แผ่นพื้นชุดที่ 2 มีขนาดความลึก 225 มิลลิเมตร กว้างและยาวเท่ากับชุดที่ 1 คือ 600 และ 5000 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดตามภาพที่ 7-2 มีการทดลองสองตัวอย่าง

แนวความคิดในการปรับเปลี่ยนในการออกแบบ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติมขนาด 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนักจร 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร รวมเป็น 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในการออกแบบชุดที่ 1 นั้น อาจมากเกินไปจนความจำเป็นสำหรับกรณีที่อยู่อาศัย จึงได้ลดน้ำหนักตายตัวเพิ่มเติมลงเหลือขนาด 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนักจรคงเท่าเดิม รวมเป็นน้ำหนักบรรทุกออกแบบเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อตารางเมตร พร้อมกับออกแบบลดความลึกของหน้าตัดลง 50 มิลลิเมตรจากเดิม 275 มิลลิเมตร เหลือเป็น 225 มิลลิเมตร พร้อมกับลดน้ำหนักของเหล็กตะแกรงบนลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งตามหลักการออกแบบเดิมใช้เท่าตะแกรงล่าง จากนั้นจึงนำมาทดสอบตามขั้นตอนร้อยละของน้ำหนักบรรทุกทดสอบ ตามขั้นตอน 15 ขั้นตอน

1) แผ่นตัวอย่างที่ 1

การบันทึกผลการทดสอบพฤติกรรมการรับน้ำหนักเป็นไปตามตารางที่ 4-5 และแผนภูมิที่ 4-5 และอยู่ในผลสรุปการศึกษาตารางที่ 4-2สาระสำคัญของข้อมูล คือการแอ่นตัวที่กึ่งกลางที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 100 , ร้อยละ 150 ทันที และร้อยละ 150 จากการแต่น้ำหนัก 24 ชั่วโมง มีขนาด 11.3 , 19.4 และ 20.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าการแอ่นตัวเมื่อนำน้ำหนักบรรทุกออกทั้งหมด และทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มีขนาด 6.3 และ 4.8 มิลลิเมตรตามลำดับ การคืนตัวประมาณร้อยละ 76

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แม้จะมีการลดน้ำหนักบรรทุกทดสอบลงไป 100 จาก 250 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือลดไปกว่าร้อยละ 40 และความลึกลดไปประมาณร้อยละ 17 ก็ตามการรับน้ำหนักยังคงสามารถรับได้ แต่การแอ่นตัวมิได้ผ่านเกณฑ์ที่ร้อยละ 100 เป็นอย่างดี เหมือนเช่นในกรณีของพื้นขนาด 275 มิลลิเมตรที่รับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ทั้งนี้การคาดการณ์การแอ่นตัว มีขนาด 20.8 มิลลิเมตร และที่เกิดขึ้นจริง 11.3 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ใน

เกณฑ์ของชุดที่ 1 คือประมาณร้อยละ 50-60 ของที่คำนวณคาดการณ์ไว้ และเข้าใกล้ค่าที่ยอมให้ คือ 13.9 มิลลิเมตร

พื้นดังกล่าว ยังคงผ่านเกณฑ์ การทดสอบน้ำหนักบรรทุก ที่ปรับปรุงจากมาตรฐาน มอก. และไม่มีรอยแตกร้าวใดที่สังเกตเห็นได้

2) แผ่นตัวอย่างที่ 2

การบันทึกผลเป็นไปตามตารางที่ 4-6 และแผนภูมิที่ 4-6 และอยู่ในผลสรุปการศึกษา ตารางที่ 4-2 และแผนภูมิที่ 4-2

ผลการทดสอบในขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ ขั้นตอนนี้น้ำหนักบรรทุกทดสอบร้อยละ 100 (ทุกกรณี คือ 250 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ยกเว้นกรณี ความหนา 275 มิลลิเมตร ที่ออกแบบไว้ที่ 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร) จะต้องมีการแอ่นตัวไม่เกิน $L/360$ หรือกรณีความยาวช่วงพาด 5000 มิลลิเมตร ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้คือ 13.9 มิลลิเมตร ในขาขึ้นคือการเพิ่มน้ำหนักที่ 250 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ที่พิกัด (13.9, 250) แต่แผ่นตัวอย่างนี้ที่จุดพิจารณาอยู่ที่พิกัด (19.3, 250) ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ เกิดรอยร้าวขนาด 0.20 มิลลิเมตร และมีการคืบตัวเพียงร้อยละ 65.89

อนึ่งแผ่นตัวอย่างดังกล่าวมีค่าการแอ่นตัวเมื่อแช่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 ครบ 24 ชั่วโมง มีขนาด 34.0 มิลลิเมตร และการแอ่นตัวหลังนำน้ำหนักบรรทุกออกแล้ว 24 ชั่วโมง มีค่า 9.9 มิลลิเมตร

ตัวอย่างดังกล่าวมีแท่งคอนกรีตที่นำไปทดสอบการรับน้ำหนักของวัสดุโฟม EPS ซีเมนต์ แสดงให้เห็นถึงค่าการรับกำลังอัดที่ต่ำ ในตัวอย่างที่ 36 ในตารางที่ 4-1 ที่แสดงผลการทดสอบ กำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตตัวอย่างนั้นมีค่าการรับกำลังอัดที่อายุ 28 วันเพียง 11 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยออกแบบไว้ที่ 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4.4.3 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 3.1

แผ่นพื้นชุดที่ 3.1 มีความลึก กว้าง และยาว เท่ากับ 225, 600 และ 5000 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่มีหน้าตัดแบบ 2 ช่อง (double cells) ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในภาพที่ 7-3 ซึ่งใช้เนื้อปริมาตรคอนกรีตประมาณ 0.53 ลูกบาศก์เมตร สำหรับแผ่นพื้นที่มีขนาดพื้นที่รับน้ำหนัก 3 ตารางเมตร เมื่อเทียบกับชุดที่ 2 ที่เป็นหน้าตัดตัน ใช้เนื้อปริมาตรโฟมซีเมนต์ 0.68 ลูกบาศก์เมตร ในแผ่นพื้นรับน้ำหนัก 3 ตารางเมตร เช่นกัน คือมีความตันประมาณ 0.53/0.68 เท่ากับ ร้อยละ 78 หรือกลวงประมาณร้อยละ 22 การเสริมเหล็กโดยรวม แผ่นพื้นชุดที่ 3 เสริมเหล็ก 30.91 กิโลกรัมต่อแผ่น ในขณะที่ชุดที่ 2 เสริมเหล็ก 23.42 กิโลกรัมต่อแผ่น เหล็กเสริมส่วนใหญ่ในชุดที่ 3 เพิ่มขึ้น

เนื่องจากจัดไว้รับแรงเฉือน เนื่องจากเนื้อหน้าตัดโฟม อีพีเอส ซีเมนต์ หายไปเพราะเป็นช่องซึ่งใส่แท่งแผ่นอีพีเอสเข้าไปแทนเนื้อโฟมอีพีเอสซีเมนต์

การทดสอบตัวอย่างแผ่นพื้นชนิดนี้ 2 แผ่นพบว่า ทั้งสองตัวอย่างไม่สามารถผ่านเกณฑ์การทดสอบตามแนวทางที่ปรับปรุงจาก มอก. ข้อมูลการทดสอบการรับน้ำหนักของแผ่นพื้นแสดงไว้ใน ตารางที่ 4-7 และตารางที่ 4-8 และ แผนภูมิที่ 4-7 และแผนภูมิที่ 4-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว โดยที่มีการแอ่นตัว ที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 100 มีขนาด 18.9 และ 17.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีรอยร้าวจำนวนนับสิบแนว มีขนาดเริ่มตั้งแต่ 0.08 มิลลิเมตรตั้งแต่ น้ำหนักบรรทุกเพียงร้อยละ 25 ของน้ำหนักทดสอบ จำนวนมากขึ้นและเพิ่มความกว้างเป็นถึง 0.2 มิลลิเมตร ตามรายละเอียดที่บันทึกไว้ในตารางบันทึกผลการทดสอบตารางที่ 4-7 และ 4-8 สำหรับตัวอย่างที่ 1 เกิดพังทลายที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 ก่อนพังทลายที่ร้อยละ 125 มีค่าการแอ่นตัวถึง 24.7 มิลลิเมตรแล้ว ตัวอย่างที่ 2 ไม่พังทลาย ค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 มีขนาด 26.8 มิลลิเมตร และเมื่อทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพิ่มเป็น 28.2 มิลลิเมตร การคืนตัวกลับเมื่อนำน้ำหนักบรรทุกออกหมด เป็น 6.9 มิลลิเมตร และเมื่อทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ค่าการแอ่นตัวสุดท้ายเป็น 5.4 มิลลิเมตร มีค่าการคืนตัวร้อยละ 81.41

น่าสังเกตว่าในเรื่องค่าการแอ่นตัวเมื่อนำน้ำหนักบรรทุกทดสอบเป็นร้อยละ 100 ของน้ำหนักบรรทุกออกแบบนั้น ค่าการแอ่นตัวของตัวอย่างที่ 1 และ 2 เป็น 18.9 และ 17.8 มิลลิเมตร เทียบกับที่ยอมให้ที่ L/360 คือ 13.9 มิลลิเมตรเท่านั้น อนึ่ง การคำนวณค่าการแอ่นตัวทางทฤษฎีมีขนาดที่คำนวณไว้ 20.8 มิลลิเมตร

4.4.4 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 3.2

แผ่นพื้นชุดที่ 3.2 มีความลึก กว้างและยาว ขนาด 225 , 600 และ 5000 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่มีหน้าตัดแบบเซลล์เดี่ยว (single cell) ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในภาพที่ 7-4 (drawing) ซึ่งใช้เพื่อปริมาตรโฟมซีเมนต์ 0.48 ลูกบาศก์เมตร มีความตันประมาณ 0.48/0.68 เท่ากับ ร้อยละ 71 หรือกลวงประมาณร้อยละ 29 การเสริมเหล็กโดยรวม แผ่นพื้นชุดที่ 4 เสริมเหล็ก 34.92 กิโลกรัมต่อแผ่น ในขณะที่ชุดที่ 2 และ 3.1 เสริมเหล็ก 23.42 และ 30.91 กิโลกรัมต่อแผ่นตามลำดับ เหล็กเสริมส่วนใหญ่ในชุดที่ 4 เพิ่มขึ้นจากชุดที่ 2 และ 3.1 ด้วยเหตุผลเดิมที่เคยแสดงไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาคือ เป็นการจัดไว้รับแรงเฉือนเนื่องจากเนื้อหน้าตัดโฟม อีพีเอส ซีเมนต์ ลดน้อยลงไปอีกชั้นหนึ่ง

การทดสอบตัวอย่างแผ่นพื้นชนิดนี้ เพียงชิ้นเดียว พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์เช่นกัน ผลการทดสอบได้บันทึกไว้ในตารางที่ 4-9 แผนภูมิที่ 4-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก และ

การแอ่นตัว โดยมีการแอ่นตัวที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 100 มีขนาด 15.6 มิลลิเมตร เกินจากค่าที่ยอมให้ด้วยเกณฑ์ L/360 ซึ่งต้องไม่เกิน 13.9 มิลลิเมตร ที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 150 บันทึกทันทีเมื่อวางน้ำหนักเสร็จ และ 24 ชม.หลังจากนั้นได้ค่าการแอ่นตัว 24.4 และ 26.8 มิลลิเมตรตามลำดับ เมื่อลดน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ทันทีและเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ได้ค่าการแอ่นตัว 7.5 และ 6.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าการคืบตัวคิดเป็นร้อยละ 74.59 สังเกตไม่เห็นการแตกร้าวของชิ้นส่วนในระหว่างการทดสอบ

4.4.5 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 4.1

แผ่นพื้นชุดที่ 4.1 และ 4.2 ใช้เนื้อวัสดุ ของหน้าตัดที่แตกต่างไปจากชุดที่ 1 ถึง 3.2 กล่าวคือ เนื้อขอบนอกของหน้าตัดในชุดที่ 4.1 และ 4.2 จะใช้ส่วนผสมของปูนฉาบ และแกนที่เป็นเซลเดียว จะใช้แท่งโฟม EPS ขนาด 1 ปอนด์ในชุดที่ 4.1 และ 2 ปอนด์ในชุดที่ 4.2 ทำตัวอย่างเพื่อทดสอบชุดละ 2 ตัวอย่าง

กำลังรับแรงอัดของปูนทรายที่ใช้มีการทดสอบด้วยการเก็บตัวอย่างขนาดลูกบาศก์ 50x50x50 มิลลิเมตร และได้แปลงค่าเทียบเท่าเป็นของรูปร่างแท่งตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ซึ่งมีการผสมส่วนผสมดังกล่าว ตามตารางที่รวบรวมผลการทดสอบไว้ คือ ตารางที่ 4-14 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างปูนฉาบลูกบาศก์ 50 มม. และแผนภูมิที่ 4-14 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของแท่งตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

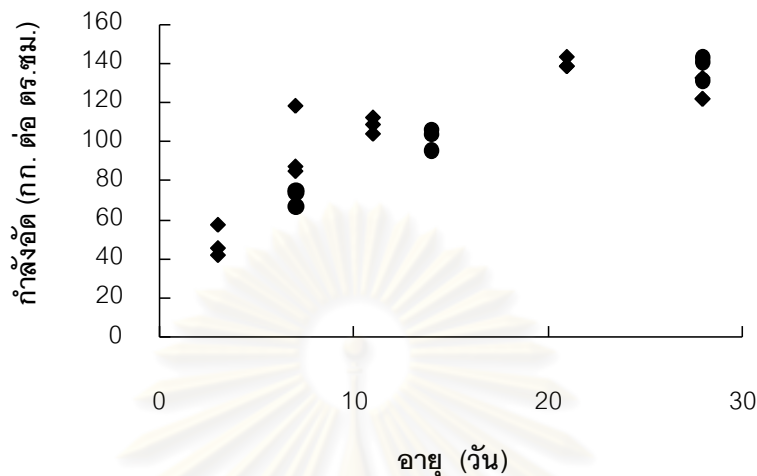
ตารางที่ 4-14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างปูนฉาบลูกบาศก์ 50 มม.

(เทียบเป็นกำลังแท่งตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม.

สูง 300 มม.)

ลำดับ	วันที่หล่อ	วันที่ทดสอบ	อายุ	กำลังรับแรงอัด			ค่าเฉลี่ย	หมายเหตุ
				MPa	MPa	ksc		
			วัน	MPa	MPa	ksc	ksc	
1	11 ก.ย. 52	14 ก.ย. 52	3	4.8	5.61	57.16	48.03	เก็บตัวอย่างจากการหล่อแผ่นพื้นที่ 4.1 225 มม. ปูนฉาบโม่ กลวง 1 ช้อง ความหนาแน่น 1 ปอนด์ต่อลบ.ฟุต
2	11 ก.ย. 52	14 ก.ย. 52	3	3.8	4.44	45.25		
3	11 ก.ย. 52	14 ก.ย. 52	3	3.5	4.09	41.68		
4	11 ก.ย. 52	18 ก.ย. 52	7	9.9	11.57	117.89	96.46	
5	11 ก.ย. 52	18 ก.ย. 52	7	7.3	8.53	86.93		
6	11 ก.ย. 52	18 ก.ย. 52	7	7.1	8.29	84.55		
7	11 ก.ย. 52	22 ก.ย. 52	11	9.1	10.63	108.37	107.97	
8	11 ก.ย. 52	22 ก.ย. 52	11	8.7	10.16	103.60		
9	11 ก.ย. 52	22 ก.ย. 52	11	9.4	10.98	111.94		
10	11 ก.ย. 52	2 ต.ค. 52	21	12	14.02	142.90	132.38	
11	11 ก.ย. 52	2 ต.ค. 52	21	11.6	13.55	138.14		
12	11 ก.ย. 52	2 ต.ค. 52	21	11.6	13.55	138.14		
13	11 ก.ย. 52	9 ต.ค. 52	28	11.1	12.97	132.18		
14	11 ก.ย. 52	9 ต.ค. 52	28	10.2	11.92	121.47		
15	11 ก.ย. 52	9 ต.ค. 52	28	10.2	11.92	121.47		
16	6 ต.ค. 52	13 ต.ค. 52	7	5.6	6.54	66.69	71.85	
17	6 ต.ค. 52	13 ต.ค. 52	7	6.2	7.24	73.83		
18	6 ต.ค. 52	13 ต.ค. 52	7	6.3	7.36	75.02		
19	6 ต.ค. 52	20 ต.ค. 52	14	8.7	10.16	103.60	101.62	
20	6 ต.ค. 52	20 ต.ค. 52	14	8	9.35	95.27		
21	6 ต.ค. 52	20 ต.ค. 52	14	8.9	10.40	105.99		
22	6 ต.ค. 52	3 พ.ย. 52	28	5.5	6.43	130.99	138.14	
23	6 ต.ค. 52	3 พ.ย. 52	28	5.9	6.89	140.52		
24	6 ต.ค. 52	3 พ.ย. 52	28	6	7.01	142.90		

ความสัมพันธ์ระหว่างอายุ และกำลังอัดของแท่งตัวอย่างปูนฉาบ



- ◆ เก็บตัวอย่างจากการหล่อแผ่นพื้นที่ 4.1 225 มม. ปูนฉาบ
โฟม กลวง 1 ช่อง ความหนาแน่น 1 ปอนด์ต่อลบ.ฟุต
- เก็บตัวอย่างจากการหล่อแผ่นพื้นที่ 4.2 225 มม. ปูนฉาบ
โฟม กลวง 1 ช่อง ความหนาแน่น 2 ปอนด์ต่อลบ.ฟุต

แผนภูมิที่ 4-14 ผลการทดสอบกำลังอัดแท่งตัวอย่างปูนฉาบ

วัสดุที่ใช้คือ ปูนฉาบที่เทเป็นส่วนรับแรงเป็นแนวเส้นรอบรูปของหน้าตัดและส่วนตรงกลาง ใส่เป็นเซลล์ด้วย อีพียูเอส (EPS) แบบบอร์ด (Board) มีความหนาแน่นชนิด 1 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต และ 2 ชนิด 2 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต

ปูนฉาบมีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่า ตัวอย่างทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ประมาณ มากกว่า 130 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

รูปแบบของหน้าตัดพื้นที่ชนิดนี้ มีแสดงไว้ในภาพที่ 7-5 ที่น่าสังเกต คือ หน้าตัดเป็นแบบเซลล์เดี่ยว (Single cell) ที่มีขนาดของพื้นที่กลวง ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด เช่นเดียวกับแบบเซลล์เดี่ยว ที่ใช้วัสดุอีพียูเอสโฟมซีเมนต์ ในชุดที่ 3.2 แต่จะมีความหนักของแผ่นมากกว่าเนื่องจากความหนาแน่น

ของมอร์ตาร์ (ปูนฉาบ) มีถึง 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่วัสดุโพลีเมอร์ EPS ซีเมนต์ มีน้ำหนักประมาณ 740 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเท่านั้น

สำหรับการเสริมเหล็กเป็นแบบตะแกรงบนและตะแกรงล่าง เช่นเดียวกับกรณีของชุดที่ 3.2 เมื่อพิจารณาปริมาณเหล็กเสริมแล้ว จากภาพที่ 7-5 ในตาราง การถอดวัสดุที่ใช้ (Quantity take off) หรือข้อมูลเดียวกันที่แสดงไว้ในตารางที่ 4-2 สรุปผลการศึกษา จะใส่เหล็กตะแกรงตามยาวมากกว่า ชุดที่ 3.2 แต่ตามขวางใส่เท่ากัน น้ำหนักเหล็กในกรณี ชุดที่ 4.1 นี้เฉลี่ย 14.05 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในขณะที่ ชุดที่ 3.2 มีจำนวน 11.64 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก สำหรับการทดสอบ 2 ตัวอย่าง ถือว่าผ่านเกณฑ์ โดยมีการแอนตัวที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 10 ของการออกแบบมีขนาด 4.7 และ 5.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดตารางผลการทดสอบ ในตารางที่ 4-10 และตารางที่ 4-11 สำหรับตัวอย่างที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก กับการแอนตัว เป็นไปในแผนภูมิที่ 4-10 และแผนภูมิที่ 4-11 ตามลำดับ ค่าการแอนตัวที่ควรพิจารณาด้วย คือ การแอนตัวสูงสุดที่น้ำหนักบรรทุกทดสอบร้อยละ 150 ของการออกแบบ มีขนาด 9.3 และ 14.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และการแอนตัวสุดท้ายหลังปลดน้ำหนักบรรทุกทดสอบออกหมดทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ได้ค่าการแอนตัวเท่ากับ 3.4 และ 7.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังนั้นการคืบตัวจึงมีค่าร้อยละ 63.55 และ 47.60 ตามลำดับ ซึ่งการคืบตัวที่ดีควรมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้ ค่าการแอนตัวที่ร้อยละ 100 มีค่าต่ำและไม่เกิน 13.1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ จึงไม่ถือว่าค่าการคืบตัวที่น้อยดังกล่าวมีผลที่น่าห่วงใยสำหรับพฤติกรรมการรับน้ำหนักของตัวอย่าง แผ่นพื้นดังกล่าว

ข้อสังเกตเกี่ยวกับการแตกร้าว มีบันทึกไว้ในตารางที่ 4-10 และตารางที่ 4-11 โดยมีรอยแตกร้าวขนาด 0.05 และ 0.08 มิลลิเมตรเกิดขึ้น ตั้งแต่ประมาณน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 75 จนถึงสูงสุดร้อยละ 150 ตัวอย่างละประมาณ 4-5 รอย แต่รอยแตกมีลักษณะไม่กว้าง

4.4.6 ผลการทดสอบแผ่นพื้นชุดที่ 4.2

รูปแบบลักษณะแผ่นตัวอย่างแผ่นพื้นชุดที่ 4.1 และ 4.2 มีความคล้ายคลึงกันมาก เนื่องจากต่างกันที่ความหนาแน่นของแผ่น EPS ที่ใช้เป็นไส้ของแผ่นพื้นตัวอย่างเท่านั้น โดยที่ในกรณีของชุดที่ 4.2 ซึ่งมีรายละเอียดตามภาพที่ 7-6 มีความหนาแน่นของแท่งอีพีเอส แกนกลาง 2 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต มีการทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่าง จำนวน 2 ตัวอย่าง ผลการทดสอบการรับน้ำหนักที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-12 , ตารางที่ 4-13 และแผนภูมิที่ 4-12 , แผนภูมิที่ 4-13 และผลสรุปในตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบเป็นไปในแนวคล้ายคลึงกับตัวอย่างชุดที่ 4.1

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 แนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติทางการเป็นโครงสร้าง

เนื้อวัสดุโฟมซีเมนต์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีตัวประสานเป็นลिनแร่ มีส่วนประกอบสำคัญ คือ เม็ดโฟมอีพีเอส (EPS foam) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ I (Portland cement type I) ทราฮายาบ และ น้ำ เมื่อผสมเสร็จที่ต้องมีส่วนผสมที่เข้ากันดี และไม่เกิดการแยกตัวของส่วนประกอบต่าง ๆ สามารถนำไปเทลงในชิ้นส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์ได้ และมีการอัดตัวแน่นได้ มีการก่อตัว (Setting) ที่ดี เมื่อแข็งแล้วมีกำลังรับแรง แรงอัดที่มากพอ และเสริมด้วยเหล็กเป็นหน้าตัดประกอบ (Composite section) การเสริมความแข็งแรงด้วยเหล็กอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อรองรับต่อลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนโครงสร้างนั้นได้ โดยไม่มีการแตกร้าวเกินควร และเกิดการแอ่นตัวหรือเคลื่อนที่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

การศึกษานี้มีการทดลองจัดส่วนผสม และเทคนิคในการผสมส่วนประกอบต่าง ๆ ให้เข้ากันจนได้ส่วนผสมที่เข้ากันได้ดีในไม่ผสมขนาด 0.3 ลูกบาศก์เมตร มีการปรับปรุงใบกวนให้มีความยาวเพิ่มเติมจากใบกวนปกติที่ใช้ผสมคอนกรีตธรรมดา โดยให้มีความยาวเพิ่มจนถึงผนังด้านล่างของไม้จัดลำดับการใส่ส่วนประกอบ รอบการหมุน และแกนความเอียงของไม้ ที่เหมาะสม และเวลาในการดำเนินการใส่ส่วนผสมอย่างเป็นขั้นตอน เมื่อทำอย่างถูกต้อง จะได้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติไม่แยกตัว เทลงแบบหล่อได้ และมีการอัดตัวที่ดี และได้ค่ากำลังรับแรงอัด จากการทดสอบแท่งตัวอย่างทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร มีค่าประมาณ 30-35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อตัวอย่างมีอายุประมาณ 28 วัน

5.1.2 แนวทางในการจัดลักษณะรูปร่าง และขนาดชิ้นส่วน

1) สำหรับโครงสร้างบ้านอาศัยเดี่ยวที่ศึกษานี้ ได้พิจารณาชิ้นส่วนรับแรง เป็นพื้นพาดช่วง 5000 มิลลิเมตร (5.00 เมตร) เป็นชิ้นโครงสร้างที่จะออกแบบ และสังเกตพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก โดยพิจารณาเป็นระบบพื้นทางเดี่ยว (One-way slab) เป็นชิ้นที่มีความกว้าง 600 มิลลิเมตร โดยในขั้นต้นจะพิจารณาออกแบบเป็นหน้าตัดประกอบหรือหน้าตัดคอมโพสิต (Composite section) อันประกอบด้วยโฟมซีเมนต์ และเหล็กเสริม ซึ่งใช้เหล็กเส้นก่อสร้าง เกรด 24

2) น้ำหนักบรรทุกที่ใช้เบื้องต้น เป็น 350 กิโลกรัมต่อตารางเมตร การออกแบบศึกษา ประยุกต์จากวิธีการออกแบบของหน้าตัดคอมโพสิตที่ใช้ คอนกรีตที่ทำให้เกิดฟองอากาศ เรียกว่า คอนกรีตชนิด เอเอซี (AAC, Autoclaved aerated concrete) มีส่วนคล้ายกับทฤษฎีการออกแบบ คอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มีรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการคำนวณแรงเฉือนที่ยอมให้ การเสริมเหล็กกับ แรงเฉือน และการตรวจสอบการยึดเกาะของเหล็กที่ใช้ในโครงสร้าง

5.1.3 การออกแบบและพฤติกรรมเบื้องต้นของชิ้นส่วนโครงสร้าง

1) ได้มีออกแบบแผ่นพื้นโดยทฤษฎีและน้ำหนักบรรทุกดังกล่าว เป็นชุดที่ 1 โดยความหนาของแผ่นพื้น ที่เพื่อความแข็งแรงด้านการแอ่นตัวไว้มาก ได้แผ่นพื้นต้นความลึก (หนา) ที่ 275 มิลลิเมตร มีการเสริมเหล็กปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร การทดสอบการรับน้ำหนักตัวอย่าง 2 ชั้น ซึ่งน้อยกว่าที่แนะนำไว้ในมาตรฐาน มอก. ที่แนะนำไว้ให้ทำตัวอย่างจำนวน 3 ชั้นต่อหนึ่งการ ทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านทุนในการวิจัย โดยเทียบกับมาตรฐาน ที่นำมาเป็นแนวทาง เกณฑ์การทดสอบพฤติกรรมการรับแรงตามภาคผนวก ซ สรุปว่าพื้นมีความแข็งแรง และแอ่นตัวน้อย มีรอยแตกร้าวในการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้

2) เมื่อได้ผลดังกล่าวข้างต้น เห็นว่าควรลดความลึกของหน้าตัด เนื่องจากพื้นที่ขนาด ความลึก 275 มิลลิเมตร มีความแข็งแรงมากเกินความจำเป็น พร้อมกับลดน้ำหนักออกแบบลงเหลือ รวม 250 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ความลึกขนาด 225 มิลลิเมตร จึงเป็นความลึกที่ใช้ในการออกแบบ ตัวอย่างชุดที่ 2 ซึ่งเป็นหน้าตัดต้น นอกจากนี้ยังได้ออกแบบตัวอย่าง ชุดที่ 3.1 ซึ่งเป็นหน้าตัดลักษณะ ภายนอกคล้ายเดิมแต่มีช่องกลางแบบช่องคู่ (Double cells) ที่มีไส้แกนด้วยแท่ง EPS 2 แท่งคู่และ ออกแบบเพิ่มเติมอีก ชุดที่ 3.2 ที่ช่องกลางแบบช่องเดี่ยว (Single cell) และมีไส้ไส้แกนด้วยแท่ง EPS แท่งเดี่ยว

3) ผลการทดสอบ ชุดที่ 2 ที่เป็นหน้าตัดต้นลึก 225 มิลลิเมตรนั้น กล่าวได้ว่าสามารถ รับน้ำหนัก และพฤติกรรมผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ที่นำมาใช้เป็นเกณฑ์การทดสอบ การทดสอบชุดที่ 3.1 ที่เป็นหน้าตัดใส่เซลล์คู่ และการทดสอบชุดที่ 3.2 ที่เป็นหน้าตัดเซลล์เดี่ยวมีการแอ่นตัวมากเกินเกณฑ์ ที่กำหนด และตัวอย่างบางชิ้นพังทลายเมื่อทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกที่ร้อยละ 150 ของน้ำหนัก บรรทุกออกแบบ

4) สรุปผลการจัดลักษณะรูปร่าง และขนาดชิ้นส่วน ที่พอเหมาะกับช่วง 5000 มิลลิเมตร โดยใช้แผ่นหล่อสำเร็จด้วยเนื้อวัสดุที่มีส่วนผสมของเม็ดโฟม (EPS) , ซีเมนต์ , ทรายด้วยและ น้ำ ด้วยขนาดแผ่นกว้าง 600 มิลลิเมตร ทำหน้าที่คล้ายคาน คือเป็นพื้นทางเดียว (One-way slab)

ใช้เหล็กตะแกรงบนและล่าง น้ำหนักเหล็กประมาณ 7.81 กิโลกรัมต่อตารางเมตรของแผ่น พื้น ควรใช้ความลึก (หนา) ที่ 225 มิลลิเมตรและมีหน้าตัดตัน

5) อนึ่ง เพื่อเป็นแนวทาง เกี่ยวกับการใช้ อีพีเอส ในรูปแบบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โฟมซีเมนต์ ได้มีการทดลองใช้ อีพีเอส เป็นไส้กลวงเช่นเดียวกับตัวอย่างชุดที่ 3.2 แบบเซลล์เดี่ยว และใช้ส่วนผสมปูนฉาบเทพื้นเปลือกแทนโฟมซีเมนต์ โดยที่ปูนฉาบดังกล่าวมีกำลังอัดสูงกว่าโฟมซีเมนต์ คือปูนฉาบมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 130 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่โฟมซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 30-35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ได้จัดทำตัวอย่าง ชุดที่ 4.1 โดยเป็นแบบเซลล์เดี่ยวรูปร่างคล้าย ชุดที่ 3 3.2 ใช้โฟมชนิด 1 ปอนด์เป็นไส้แทนที่บริเวณช่องเซลล์เดี่ยว และชุดที่ 4.2 ใช้โฟมชนิด 2 ปอนด์

ผลการทดสอบปรากฏว่า จากตัวอย่างทดสอบ ชุดละ 2 ตัวอย่างได้ผลบ่งชี้ว่า แผ่นพื้นชุดที่ 4.1 และชุดที่ 4.2 สามารถรับน้ำหนักได้ตามเกณฑ์ของการทดสอบ

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 การทดสอบการรับน้ำหนักระยะสั้น ตามเกณฑ์ที่ปรับปรุงจากมาตรฐาน มอก. แสดงให้เห็นว่าโฟมซีเมนต์ตามส่วนผสมที่ได้จัดเตรียมขึ้นนี้ มีศักยภาพในการใช้ มีลักษณะคล้ายมอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดที่จะพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับน้ำหนักในอาคารบ้านที่อยู่อาศัยได้

5.2.2 อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการรับน้ำหนัก ของชิ้นโครงสร้างตัวอย่างทดลองนี้เป็นการทดสอบระยะสั้น (Short term) เท่านั้น คุณสมบัติการรับน้ำหนักและพฤติกรรมสำคัญในระยะยาว บางอย่างมิได้อยู่ในการศึกษา เช่น การคืบ (Creep) การหดตัว (Shrinkage) การล้า (Fatigue) เป็นต้น

5.2.3 พื้นดังกล่าวสามารถใช้เป็นพื้นที่กั้นระหว่างชั้น (Intermediate floor) เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนในแต่ละบริเวณที่อาจมีการใช้งานปรับอากาศและต้องการอุณหภูมิของห้องที่แตกต่างกัน หรือระหว่างห้องที่มีอุณหภูมิใช้งานต่างกัน

5.2.4 คุณสมบัติด้านการรับแรงดัด และแรงเฉือน ของโฟมซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุรับแรงอัดได้ต่ำกว่าวัสดุคอนกรีตปกติ มีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัสดุคอมโพสิต คือใช้ร่วมทำงานกับวัสดุอื่น ๆ ในการรับแรง

5.2.5 เมื่อพิจารณาในเชิงพาณิชย์ ทำให้เห็นว่าต้นทุนทางตรงของวัสดุและการติดตั้งต่อตารางเมตร สำหรับพื้นที่ช่วง 5000 มิลลิเมตร (5.00 เมตร) ใช้แผ่นโฟมซีเมนต์หนา 225 มิลลิเมตร จะสูงกว่าการใช้พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือแผ่นคอนกรีตอัดแรงหนา 125 มิลลิเมตร เททับหน้า 50 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 38 และร้อยละ 51 ตามลำดับ

5.2.6 ลักษณะผิว ประกอบด้วยส่วนของเม็ดโพลีเมอร์ ที่ต้องมีการเคลือบหรือทาบหน้าด้วยวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป เช่นในกรณีที่มีการเสียดสี เช่นกรณีพื้น , หรือส่วนที่อาจถูกแสงแดด หรือ Ultraviolet อาจทำให้เกิดการเสื่อมของวัสดุ อีพีเอส อันเป็นองค์ประกอบในส่วนผสม ซึ่งต้องมีการป้องกัน หรือความเหมาะสมในการใช้ร่วมกับวัสดุอื่น เช่น วัสดุบิทูมินัส (Bituminous materials) เป็นต้น

5.2.7 คุณสมบัติต่าง ๆ ในการใช้งาน เช่น การซึมน้ำ ความต้านทานต่อไฟ และปฏิกิริยาพฤติกรรมต่อไฟ เป็นต้น

5.2.8 ในการศึกษาที่ไม่ได้มีการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) วัสดุโพลีเมอร์ แต่คาดว่าน่าจะอยู่ระหว่าง วัสดุที่ใช้เม็ด โพลีอีพีเอส (EPS) ผสมมอร์ตาร์ในการเทปรับระดับพื้น คือที่ประมาณ 0.103 W/mK มีชื่อการค้าโพลีเทอม (Politem) ผลิตภัณฑ์ของซีเบา (Cebau) และค่าการนำความร้อนของเอเอซี คือที่ประมาณ 0.20 W/mK คอนกรีตโครงสร้างปกติที่ความหนาแน่น 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าการนำความร้อนประมาณ 1.8-2.0 W/mK

5.2.9 น้ำหนักของพื้นโพลีเมอร์ตันหนา 225 มิลลิเมตร อาจรับน้ำหนักบรรทุกได้เทียบเท่ากับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 120 มิลลิเมตร คิดเป็นน้ำหนักพื้นโพลีเมอร์ ประมาณ 174 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือแผ่นขนาด 3 ตารางเมตรหนักประมาณ 522 กิโลกรัม มีน้ำหนักเหล็กเสริมประมาณ 7.81 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็กหนา 120 มิลลิเมตร หนักประมาณ 288 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือแผ่น 3 ตารางเมตร หนักประมาณ 864 กิโลกรัม มีน้ำหนักเหล็กเสริมประมาณเท่า ๆ กับเหล็กเสริมพื้นโพลีเมอร์ต่อตารางเมตร

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การออกแบบโดยใช้ส่วนผสมของโพลีเมอร์ขึ้นส่วนโครงสร้างอาคารอื่น ๆ เช่น ผนัง , หลังคา อาจนำทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็กหรือ เอเอซีเสริมเหล็ก มาประยุกต์ในการออกแบบ และมีการทดสอบ เพื่อสังเกตพฤติกรรมและปรับแก้เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่เหมาะสมต่อไป

5.3.2 การเชื่อมโยงชิ้นส่วนโครงสร้าง ด้วยรอยต่อต่าง ๆ เป็นสิ่งสำคัญที่ควรต้องพิจารณาต่อไป ในกรณีที่จะใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปประกอบจนเป็นโครงสร้างรวม ทั้งนี้เพื่อให้ได้องค์รวมของโครงสร้างที่สามารถต้านทานต่อพฤติกรรมน้ำหนักบรรทุกที่นำมาใช้ออกแบบ

5.3.3 การศึกษาต้นทุนของโครงสร้างโดยรวม รวมถึงขนาดของฐานราก ที่อาจมีขนาดเล็กลงได้ด้วยน้ำหนักของโครงสร้างที่ลดลง

5.3.4 การพิจารณาต้นทุนตามอายุโครงสร้าง (Life cycle cost) ซึ่งควรพิจารณาต้นทุนรวมของอาคาร เนื่องจากการใช้วัสดุฉนวน อาจดูเหมือนลงทุนสูงในเบื้องต้น แต่อาจประหยัดพลังงาน เช่น การปรับอากาศเพื่อการใช้งานของผู้อยู่อาศัยที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานของอาคาร



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาอังกฤษ

- Allen, E., and Iano, J. The architect's studio companion. 4th ed. New Jersey : John Wiley & Sons, 2007.
- Argudo, J.E. Evaluation and synthesis of experimental data for autoclaved aerated concrete. Master's Thesis. Faculty of the Graduate School : The University of Texas at Austin, 2003.
- Baden - Powell, C. Architect 's pocket book. 3rd ed. Oxford : Elsevier, 2008.
- Burberry, P. Environment and services. 8th ed. Essex : Pearson, 1997.
- Davies, J.M. Lightweight sandwich construction. Oxford : Blackwell, 2001.
- Hegger, M., Auch-Schwelk V., Fuchs M., and Rosenkranz T. Construction materials manual. Munich : Birkhauser, 2006.
- Jackson, N., and Dhir, R.K. Civil engineering materials. 5th ed. New York : Palgrave, 1996.
- McMullan, R. Environmental science in building. 6th ed. New York : Palgrave, 2007.
- Mehta, P.K., and Monteiro, P. Concrete : microstructure, properties and materials. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2006.
- Newman, J., and Choo, B. S. Advanced concrete technology : Process. Oxford : Elsevier, 2003.
- Pfundstein, M., Gellert, R., Spitzner, M., H., and Rudolphi, A. Insulating materials. Munich : Birkhauser, 2008.
- Schodek, D.L., and Bechthold, M. Structures. 6th ed. New Jersey : Prentice Hall, 2007.
- Schunck, E., Oster, H.J., Barthel, R., Kiessl, K. Roof construction manual : pitched roofs. 4th ed. Munich : Birkhauser, 2002.
- Vanderwerf, P., A., Panushev, I., S., Nicholson, M, and Koronowski, D. Concrete systems for homes and low – rise construction. New York : McGraw - Hill, 2006.
- Wahl, I. Building anatomy : an illustrated guide to how structures work. New York : McGraw – Hill, 2007.



ภาคผนวก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
การผสมไฟมซีเมนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การผสมโม่ซีเมนต์

1. ตารางส่วนผสมโม่ซีเมนต์ปริมาณ 1 ลบ.ม.

Density (Kg./M. ³)	Water (Litre)	Cement (Kg.)	Politerm (Litre / Kg.)	Sand (Kg.)
737	189	405	840 / 13	130

2. วัสดุ & อุปกรณ์ (ออกแบบผสม 0.25 ลบ.ม./ชุด)

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Type 1) จำนวน 101.25 ก.ก./ชุด

2.2 ทราย จำนวน 32.5 ก.ก./ชุด

2.3 เม็ดโม่ โพลีเทอม (Politerm) ของซีเบา (CEBAU) รุ่นเอเนอร์จี (Energy) ขนาด 3.5 มม.
จำนวน 210 ลิตร/ชุด

2.4 น้ำ จำนวน 47.25 ลิตร/ชุด

2.5 เครื่องชั่งพิกัด 60 ก.ก. จำนวน 1 เครื่อง

2.6 เครื่องโม่ปูนขนาด 0.3 ลบ.ม. อัตราการหมุนไม่ 31-32 รอบ/นาที โดยใบกวนมีการปรับปรุง โดยการเชื่อมเพิ่มพื้นที่ จากผนังไม่จนถึงแกนไม่ให้มีลักษณะเหมือนรถมิกเซอร์ (เจาะรูเล็กน้อย) เพื่อไม่ให้วัสดุควมวนหนักตกอยู่ที่ก้นไม่

3. ขั้นตอนการผสม

ส่วนผสม 0.25 ลบ.ม./ชุด

ขั้นตอนที่	นาทีที่	รายการ
1	1	เปิดเครื่องโม่ปูน
2	2	ใส่น้ำจำนวน 47.25 ลิตร
3	3	ใส่โม่ Politerm จำนวน 210 ลิตร โดยวิธีการทยอยใส่ครั้งละ 1/4 ให้ผสมนาน 10 นาที
4	13	ใส่ทรายจำนวน 32.5 ก.ก. โดยวิธีการทยอยใส่ครั้งละ 1/4
5	15	ใส่ปูนจำนวน 101.25 ก.ก. โดยวิธีการทยอยใส่ครั้งละ 1/4 ให้ผสมอีก 10 นาที โดยใช้ความเร็วสูงสุดของโม่ปูน อัตราการหมุนไม่ 31 - 32 รอบต่อนาที โม่ผสมเอียงทำมุม 16.67 องศาปรับระดับพื้น
6	25	เสร็จสิ้นการผสม

4. การทดสอบผสมลงแบบแผ่นพื้นและเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด

คอนกรีตมวลเบาที่ผสมได้มีลักษณะเข้ากันดี แต่ค่อนข้างเหลวทำการทดสอบค่าการยุบตัว (Slump) = 18 ซม. นำไปเทลงในแบบหล่อแผ่นพื้น เมื่อเทลงแบบและใช้สายจี้พบว่าคอนกรีตมวลเบามีการไหลตัวได้ดี ต้องระมัดระวังในการตั้งหน้าแผ่นพื้นเนื่องจากเม็ดโฟมจะลอยตัวขึ้นที่ผิวหน้า เม็ดโฟมอ่อนนุ่ม เก็บตัวอย่างก่อนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่อตัวอย่างมีอายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข
การผสมผสาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การผสมปูนฉาบ

1. วัสดุปูนฉาบ

ปูนฉาบที่ใช้คือปูนฉาบสำเร็จรูปของทีพีไอ (TPI) รุ่นเอ็ม 200 (M200) ซึ่งเป็นปูนฉาบสำเร็จรูปสำหรับงานทั่วไป ทั้งนี้มีสารผสมกักกระจายฟองอากาศ (Air entrainer) และน้ำยาเพิ่มการลื่นไหล (Plasticizer)

2. ตารางส่วนผสมปริมาณ 1 ลบ.ม.

ปูนฉาบ	Water
(Kg.)	(Litre)
1362.5	300

3. วัสดุ & อุปกรณ์

- 3.1 ปูนฉาบสำเร็จรูป จำนวน 340 ก.ก./ชุด
- 3.2 น้ำ จำนวน 75 ลิตร/ชุด
- 3.3 เครื่องชั่งพิกัด 60 ก.ก. จำนวน 1 เครื่อง
- 3.4 เครื่องมือปูนขนาด 0.3 ลบ.ม. อัตราการหมุนไม้ 31-32 รอบ/นาที

4. ขั้นตอนการผสม (ออกแบบผสม 0.25 ลบ.ม./ชุด)

ขั้นตอนที่	นาทีที่	รายการ
1	1	เปิดเครื่องมือปูน
2	2	ใส่ปูนฉาบสำเร็จรูป 340 กก.
3	3	ใส่น้ำ 75 ลิตร
4	25	ไม่จนสวนผสมเข้ากันดี เสร็จสิ้นการผสม

5. การทดสอบผลสมลงแบบแผ่นพื้น และเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด

นำส่วนผสมเทลงในแบบหล่อแผ่นพื้น ที่มีการพ่นน้ำยาประสานระหว่างแผ่นโฟมและปูนฉาบ ทั้งนี้ต้องการพ่นน้ำยาประสานต้องระวังไม่ให้น้ำยาประสานแห้งก่อนที่จะเทปูนการทดสอบเก็บตัวอย่างก้อนลูกบาศก์ ขนาด 50 มิลลิเมตรเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค
วิธีการออกแบบแผ่นพื้นโพลีเมอร์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการออกแบบแผ่นพื้นโฟมคอนกรีต

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบแผ่นพื้นโฟมคอนกรีต โดยที่มาของวิธีการออกแบบมาจากการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดอากาศ (AAC Concrete) ซึ่งมีการศึกษา และทำการวิจัยในสหรัฐอเมริกา ที่มหาวิทยาลัยเทกซัส ออสติน (University of Texas at Austin)

การพิจารณาออกแบบด้วยวิธีที่ใช้กับคอนกรีตเอเอซี เป็นเพราะเหตุที่คุณสมบัติที่คล้ายกันของคอนกรีตเอเอซี กับโฟมซีเมนต์ คือ ไม่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบ และมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ และมีช่องว่างในเนื้อคอนกรีตคล้ายกัน การผลิตเอเอซี (AAC) จะใช้สารเคมีที่ทำให้เกิดช่องว่าง ส่วนการผลิตโฟมซีเมนต์จะใช้โฟมในการทำให้เกิดช่องว่าง

ขั้นตอนในการออกแบบสามารถดำเนินการได้ดังนี้

1. การกำหนดความหนาของแผ่นพื้น

โดยมีค่าการแอ่นตัวแบบ Short Term เป็นตัวกำหนด ทั้งนี้ ข้อกำหนดได้กำหนดความหนาที่ไม่ต้องตรวจสอบการแอ่นตัว ได้ตามสมการ ดังนี้

$$h = \frac{l_n}{20} (1.65 - 0.005 \cdot W_c) \quad (1)$$

โดยที่ l_n = CLEAR SPAN (in)

W_c = UNIT WEIGHT ของคอนกรีต (lb / ft³)

เมื่อเทียบกับการออกแบบ คสล.

$$h = \frac{l}{20} \quad (2)$$

โดยที่ l = SPAN LENGTH

จะพบว่า ความหนาจะขึ้นกับ UNIT WEIGHT ของโฟมคอนกรีตที่ใช้ ซึ่งเมื่อมี UNIT WEIGHT ต่ำ ก็ต้องการความหนามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกำลังรับแรง ซึ่งจะมากขึ้นเมื่อ UNIT WEIGHT สูงขึ้น

ต่อไป หากต้องการลดความหนาของแผ่นพื้นให้ต่ำกว่าที่กำหนดในสมการ (1) จะต้องทำการตรวจสอบการแอ่นตัวที่ SHORT TERM ว่าผ่านตามข้อกำหนด $l / 240$ หรือไม่ โดยเริ่มจากการหาตัวแปรต่างๆ ดังนี้

$$- E_{\text{eps}} = 6.5 (f'_{\text{eps}})^{0.6} \quad (3)$$

$$- E'_{\text{eps}} = \text{REDUCED MODULUS OF ELASTICITY} \\ = \frac{E_{\text{eps}}}{1.5} \quad (4)$$

$$- \eta = \text{MODULAR RATIO} \\ = \frac{E_s}{E'_{\text{eps}}} \quad (5)$$

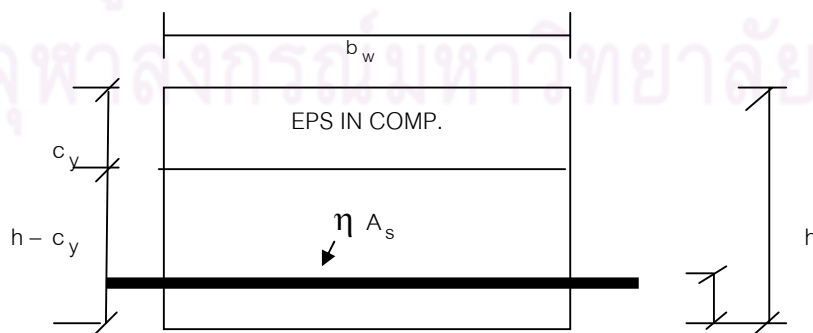
$$- f_t = \text{SPLITTING TENSILE STRENGTH OF EPS} \\ = 2.4 \cdot \sqrt{f'_{\text{eps}}} \quad (6)$$

$$- f_r = \text{MODULUS OF RUPTURE OF EPS} \\ = 2 \cdot f_t \quad (7)$$

ทั้งนี้ ต้องลองเลือกความหนา และขนาดเหล็กเสริม จากนั้นหาค่า TRANSFORMED SECTION MOMENT OF INERTIA ดังนี้

$$I_t = \frac{b_w \cdot h^3}{12} + 2 \cdot A_{\text{st}} \left(\frac{h}{2} - r - \frac{d_b}{2} \right)^2 \quad (8)$$

$$A_{\text{st}} = \eta \cdot A_s \quad (9)$$



ภาพที่ 6-1 ระยะต่าง ๆ ของหน้าตัดพื้นที่ใช้คำนวณโมเมนต์อินเนอร์เทียของหน้าตัดแปลง (Transformed section moment of inertia)

จากนั้นพิจารณา ค่า โมเมนต์ใช้งานสูงสุด (M_a)

$$M_a = \frac{W_a \cdot l_n^2}{8} \quad (11)$$

จากนั้นเปรียบเทียบ M_a กับ M_{cr} หาก M_a มากกว่า M_{cr} ให้พิจารณาใช้คุณสมบัติของหน้าตัดที่สภาวะแตกร้าวในการตรวจสอบการแอ่นตัว

I_{cr} = MOMENT OF INERTIA OF CRACK SECTION พิจารณาจากภาพที่ 6-1 โดยเริ่มจากการหาค่า c_y จากสมการสมดุลย์ของแรงอัด และแรงดึง

เมื่อทราบค่า c_y จะสามารถพิจารณา I_{cr} ได้จาก

$$I_{cr} = \frac{b \cdot c_y^3}{3} + A_{st} \cdot (h - c_y)^2 \quad (12)$$

จากนั้นพิจารณาหาค่าแรงดัดที่ทำให้เหล็กเสริมความยาวคลาก (M_y) จากสมการ

$$M_y = E'_{eps} \cdot I_{cr} \cdot \left[\frac{F_y}{E_s} \cdot \frac{d - c_y}{d - c_y} \right] \quad (13)$$

จากนั้น หาค่า CURVATURE AT CRACKING (ϕ_{cr}) จาก

$$\phi_{cr} = \frac{M_{cr}}{E'_{eps} \cdot I_t} \quad (14)$$

และค่า CURVATURE AT YIELDING OF WIRE (ϕ_y)

$$\phi_y = \frac{M_y}{E'_{eps} \cdot I_{cr}} \quad (15)$$

เมื่อทราบ M_{cr} , ϕ_{cr} , M_y , ϕ_y แล้ว จากนั้นทำการ INTERPOLATION เพื่อหาค่า CURVATURE AT WORKING ϕ_a เพื่อที่จะใช้ในการหาค่าการแอ่นตัวต่อไป

$$\therefore \phi_a = \phi_{cr} + \left[\frac{M_a - M_{cr}}{M_y - M_{cr}} \right] (\phi_a - \phi_{cr}) \quad (16)$$

เมื่อทราบ ϕ_a และ M_a จะสามารถหาค่า EQUIVALENT STIFFNESS AT SERVICE CONDITION

$$E'_{eps} \cdot I_e = \frac{M_a}{\phi_a} \quad (17)$$

จากนั้นนำค่า $E'_{eps} \cdot I_e$ แทนลงในสมการ

$$\delta_{short-term} = 1.425 \left[\frac{5 \cdot W_a \cdot l_n^4}{384 \cdot E'_{eps} \cdot I_e} \right] \quad (18)$$

จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับ

$$\delta_{allow} = \frac{l}{240} \quad (19)$$

หาก $\delta_{short-term} > \delta_{allow}$ ให้เพิ่มความหนา และตรวจสอบจนกว่าจะผ่าน

2. การออกแบบรับแรงเฉือน

โดยทำการคำนวณหา

$$V_u = \frac{b \cdot w_u \cdot L}{2} \quad (20)$$

$$w_u = \text{FACTORED TOTAL LOAD}$$

$$b = \text{ความกว้างแผ่นพื้น}$$

$$L = \text{ความยาว SPAN}$$

โดยกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นพื้นพิจารณาได้จาก

$$\phi \cdot V_{\text{eps}} = \square \cdot 0.8 \cdot \sqrt{f'_{\text{eps}}} \cdot b \cdot d \quad (21)$$

$$\square = 0.75 \text{ (STRENGTH REDUTION FACTOR)}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับ RC CONCRETE

$$\square \cdot V_c = \square \cdot 2 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (22)$$

จะพบว่ามีกำลังการรับแรงเฉือนลงมากกว่า RC มากกว่า 50% ที่กำลังรับแรงอัดเท่ากัน

3. ออกแบบสมอยึด

ออกแบบเหล็กเสริมทางขวางในช่วง L/6 จากปลายเพื่อเป็นตัวยึดปลายของเหล็กเสริมตามแนวยาวไม่ให้เลื่อนหลุดจากคอกกรีต

โดยจำนวนเหล็กเสริมทางขวาง

$$\eta_{\text{cross,min}} = \frac{V_{\text{max}} \cdot L}{5.1 \cdot d \cdot d_{\text{cross}} \cdot l_{\text{cross}} \cdot f'_{\text{eps}}} \quad (23)$$

$$V_{\text{max}} = \frac{V_u}{\phi} \quad (24)$$

4. การออกแบบเหล็กเสริมรับแรงดัด

$$\text{หาค่า } M_u = \frac{b \cdot w_u \cdot L^2}{8} \quad (25)$$

$$\text{หาค่า } \rho_{\text{min}} = 4 \cdot \frac{\sqrt{f'_{\text{eps}}}}{f_y} \quad (26)$$

ทั้งนี้ ρ_{min} จะเป็นค่าการเสริมที่ทำให้หน้าตัดมีความแข็งแรงเป็น 2 เท่า ของ M_{cr}

จากนั้นตรวจสอบ f_s ว่ามีค่ามากกว่า f_y หรือไม่

$$f_s > f_y = \text{DUCTILE FAILURE}$$

$$\square = 0.90$$

$$f_s < f_y = \text{BRITTLE FAILURE}$$

$$\square = 0.65$$

โดยใช้สมการ

$$f_s = \frac{\eta_{\text{cross}} \cdot l_{\text{cross}} \cdot f'_c \cdot d_{\text{cross}}}{A_s} \quad (27)$$

จากนั้นตรวจสอบว่า STRAINS ในเหล็กเกินค่า STRAINS ที่ YIELDS

$$\text{จาก } T = A_s \cdot f_y = C = 0.85 \cdot f'_{\text{eps}} \cdot a \cdot b_w \quad (28)$$

จากนั้นจะได้ a เพื่อหาค่า ϵ_s

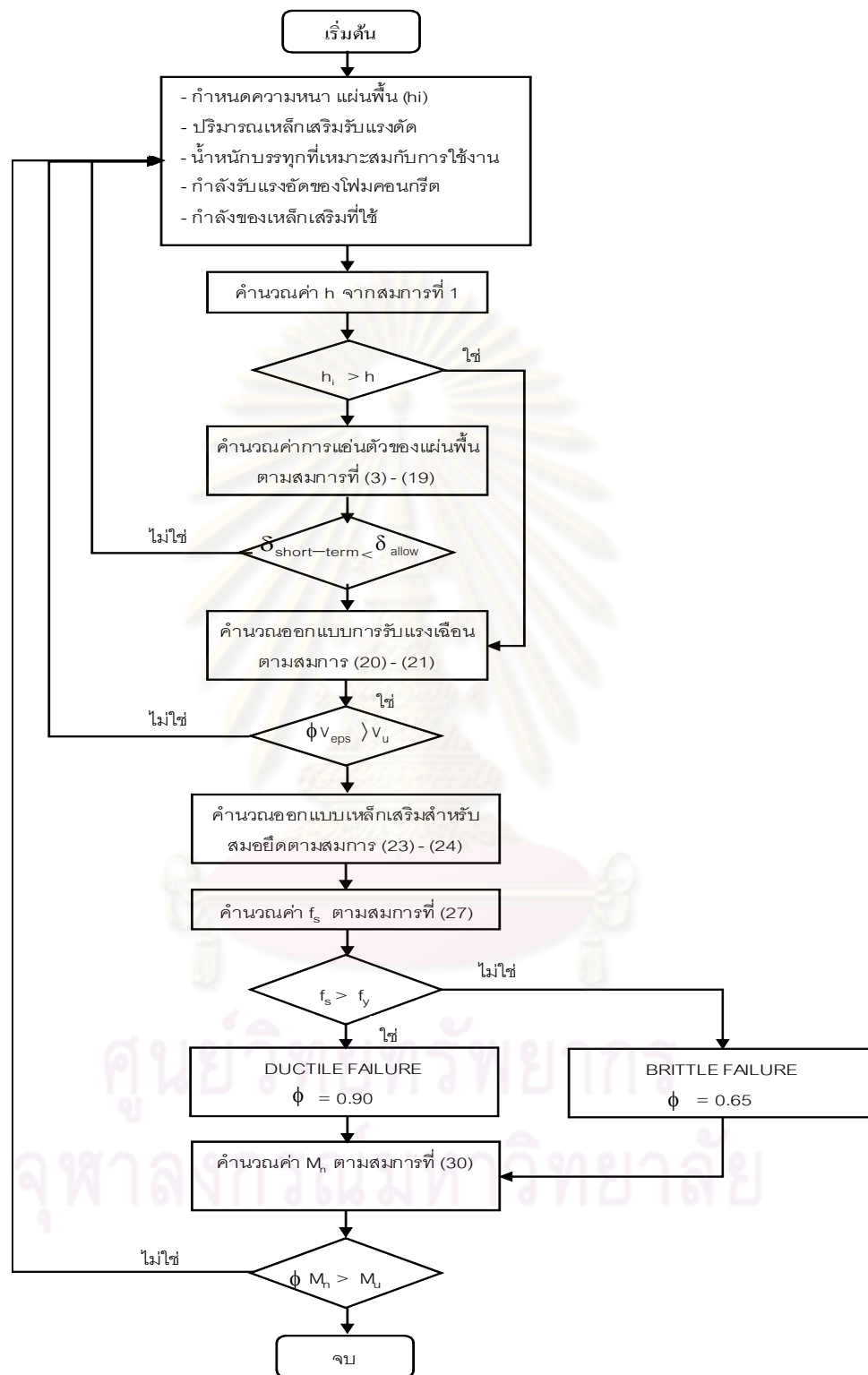
$$\epsilon_s = 0.003 \cdot \frac{d-c}{c} \quad (29)$$

หาค่า M_n จาก

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (30)$$

จากนั้นหาก $M_n > M_u$ โครงสร้างสามารถรับแรงได้ หากไม่ได้ให้เพิ่มเหล็กเสริม และ
ตรวจสอบใหม่อีกครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 6-2 แสดงขั้นตอนการออกแบบแผ่นพื้นโฟมซีเมนต์



ภาคผนวก ง

การออกแบบเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและโพนคอนกรีต

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การออกแบบเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและโพลีคอนกรีต

โดยสรุปโพลีซีเมนต์ จะมีหลักการตามคอนกรีตอัดอากาศ โดยมีหลักสำคัญที่แตกต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กที่สำคัญดังนี้

1. การออกแบบกำลังรับแรงเฉือน

มีหลักการในการออกแบบเหมือนกัน โดยให้กำลังของคอนกรีตทำการรับแรงเฉือนทั้งหมด โดยสามารถพิจารณาได้จาก

$$\phi V_c = \phi \cdot 2 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (\text{US unit})$$

$$\phi V_c = \phi \cdot 0.8 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (\text{US unit})$$

เมื่อเปรียบเทียบที่กำลังเท่ากันกำลังรับแรงเฉือนของ โพลีคอนกรีตจะลดต่ำกว่า คอนกรีตเสริมเหล็ก เท่ากับ 60%

2. การออกแบบกำลังรับแรงดัด

2.1 การยึดเกาะของเหล็กเสริม

เนื่องจากโพลีคอนกรีตมีกำลังต่ำการยึดเกาะกันระหว่างเหล็กเสริมกับโพลีคอนกรีตจึงมีน้อยกว่าทำให้ต้องมีการออกแบบหัวยึดด้วยเหล็กตามแนวขวางในช่วง $L/6$

ตามสมการ

$$\eta_{\text{cross,min}} = \frac{V_{\text{max}} \cdot L}{5.1 \cdot d \cdot d_{\text{cross,min}} \cdot l_{\text{cross}} \cdot f'_c}$$

2.2 ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด

สำหรับโพลีคอนกรีตปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดถูกออกแบบเพื่อให้สามารถรับแรงได้ 2 เท่าของโมเมนต์ที่ทำให้หน้าตัดแตกเร็ว (M_{cr}) ส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กจะเป็นค่าที่ทำให้คอนกรีตไม่แตกเนื่องจากอุณหภูมิและการหดตัว

2.3 การตรวจสอบความเหนียวของโครงสร้าง (DUCTILITY)

โพลีคอนกรีตจะตรวจสอบว่าหัวยึดที่เป็นเหล็กเสริมทางขวาง สามารถทำให้ความเค้น ในเหล็กเสริมรับแรงดัดสามารถพัฒนาขึ้นถึง f_y ได้หรือไม่ แต่คอนกรีตเสริมเหล็กกำหนดให้การเสริมเหล็กไม่เกิด 75% ของ f_b

2.4 ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในการรับแรงดัด ทั้ง 2 ชนิดจะมีวิธีการออกแบบหน้าตัดเหมือนกัน

ORIGINAL RC DESIGN METHOD

DESIGN PARAMETER

$$W_c = 150 \text{ lb/ft}^2$$

$$LL+SDL = 71.71 \text{ lb/ft}^2$$

$$f'_c = 3,635 \text{ psi (250 ksc)}$$

$$f_y = 34,800 \text{ psi (2400 ksc)}$$

SPAN LENGTH = 16.40 ft

1) พิจารณาหาความหนาที่ไม่ต้อง

ตรวจสอบการแอ่นตัว

$$H = \frac{l}{20} = \frac{16.40 \cdot 12}{20} = 9.84 \text{ in}$$

ใช้ = 10 in

2) ตรวจสอบแรงเฉือน สำหรับพื้นที่กว้าง

2 ฟุต

$$W_u = 1.4 \cdot D.L. + 1.7 \cdot (LL + SWD)$$

$$W_u = \frac{1.4 \cdot (150 \cdot 10) + 1.7 \cdot (71.71)}{12}$$

$$W_u = 175 + 121.91$$

$$W_u = 296.91 \text{ lb/ft}^2$$

$$V_u = \frac{b \cdot l \cdot W_u}{2} = \frac{2 \cdot 16.4 \cdot 296.91}{2}$$

$$V_u = 4869.31 \text{ lbs}$$

V_u = Design Shear Force

กำลังรับแรงเฉือน

$$\phi V_c = \phi \cdot 2 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$$

$$= 0.85 \cdot 2 \cdot \sqrt{3625} \cdot 24 \cdot (10 - 1.5)$$

AAC DESIGN METHOD

DESIGN PARAMETER

$$W_c = 43.71 \text{ lb/ft}^2$$

$$LL+SDL = 71.71 \text{ lb/ft}^2$$

$$f'_c = 580.15 \text{ psi (40 ksc)}$$

$$f_y = 34,800 \text{ psi (2400 ksc)}$$

SPAN LENGTH = 16.40 ft

1) พิจารณาหาความหนาที่ไม่ต้อง
ตรวจสอบการแอ่นตัว

$$H = \frac{l_n}{20} = \frac{16.40 \cdot 12 - 2 \cdot 4}{20} (1.65 - 0.005 \cdot W_c)$$

$$= 9.44 \cdot 1.43$$

$$= 13.5 \text{ in}$$

ใช้ = 14 in

2) ตรวจสอบแรงเฉือนสำหรับพื้นที่กว้าง 2

ฟุต

$$W_u = 1.4 \cdot D.L. + 1.7 \cdot (LL + SWD)$$

$$W_u = \frac{1.4 \cdot (43.71 \cdot 14) + 1.7 \cdot (71.71)}{12}$$

$$W_u = 71.393 + 121.91$$

$$W_u = 193.3 \text{ lb/ft}^2$$

$$V_u = \frac{b \cdot l \cdot W_u}{2} = \frac{2 \cdot 16.4 \cdot 193.3}{2}$$

$$V_u = 3170.2 \text{ lbs}$$

V_u = Design Shear Force

กำลังรับแรงเฉือน

$$\phi V_c = \phi \cdot 0.8 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$$

$$= 20,880 \text{ lbs}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{OK}$$

3) สมอยึด

ไม่มีการพิจารณา

4) กำลังรับแรงดัด

Design bending moment

$$M_u = \frac{b \cdot w_u \cdot l^2}{12 \cdot 8}$$

$$= \frac{2 \cdot 296.91 \cdot (16.4 \cdot 12)^2}{12 \cdot 8}$$

$$= 0.75 \cdot 0.8 \cdot \sqrt{580.15} \cdot 24 \cdot 13$$

$$= 4,509 \text{ lbs}$$

$$\phi V_c > V_u \quad \text{OK}$$

3) สมอยึด

พิจารณาหาเหล็กเสริมแนวขวางเพื่อยึด

เหล็กเสริมตามแนวยาว โดยพิจารณาในช่วง

ปลายของแผ่นพื้น ($\frac{L}{6}$)

$$\frac{L}{6} = \frac{16.4 \cdot 12}{6} = 32.8 \text{ in}$$

$$V_{\max} = \frac{V_u}{\phi} = \frac{3170.2}{0.75} = 4227 \text{ lbs}$$

$$\eta_{\text{cross,min}} = \frac{V_{\max} L}{5.1 \cdot d \cdot d_{\text{cross,min}} \cdot l_{\text{cross}} \cdot f'_c}$$

$$5.1 \cdot d \cdot d_{\text{cross,min}} \cdot l_{\text{cross}} \cdot f'_c$$

$$d_{\text{cross}} = \text{เส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเสริม}$$

แนวขวาง

$$l_{\text{cross}} = \text{ความยาวเหล็กเสริมแนวขวาง}$$

$$\eta_{\text{cross,min}} =$$

$$\frac{4227 \cdot (16.4 \cdot 12)}{5.1 \cdot 13 \cdot \frac{6}{10 \cdot 2.54} \cdot 22 \cdot 580.15}$$

$$= \frac{831874}{199891}$$

$$= 4.16 \text{ in. ใช้ } 5 \text{ in.}$$

$$\text{ดังนั้น } S_{\min} = \frac{32.8}{5} = 6.56 \text{ in. ใช้ } 5 \text{ in.}$$

ดังนั้นใช้เหล็กเสริมแนวขวางขนาด 6 มม. จำนวน 6 เส้น ทุกระยะ 5 นิ้ว จากปลาย

ในช่วงกลางของแผ่นพื้น (2/3 ของความยาวแผ่น) ใช้เหล็กเสริมแนวขวางขนาด 6 มม. ทุกระยะ 10 นิ้ว

4) กำลังรับแรงดัด

$$= 239,570 \text{ lb in}$$

$$\rho_{\min} = \frac{0.0018 \cdot 60,000}{f_y}$$

- BASE ON TEMP.

$$\text{ดังนั้น } A_{s,\min} = \frac{0.0018 \cdot 60,000 \cdot b \cdot d}{f_y}$$

$$A_{s,\min} = 0.0031 \cdot 24 \cdot (14 - 1)$$

$$A_{s,\min} = 0.968 \text{ in}^2$$

- CHECK FOR DUCTILE

FAILURE

$$\rho_{\max} = \frac{3}{4} \rho_b$$

$$= 0.75 \cdot \frac{0.85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c \cdot 87000}{f_y \cdot 87000 + f_y}$$

$$= 0.75 \cdot \frac{0.85 \cdot 0.85 \cdot 3625 \cdot 87000}{34800 \cdot 87000 + 34800}$$

$$= 0.0403$$

$$\text{ดังนั้น } A_{s,\max} = 0.0403 \cdot b \cdot d =$$

$$12.58 \text{ in}^2$$

- DETERMINE BENDING

REINFORCEMENT

$$T = C$$

$$A_s \cdot f_y = 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot b}$$

$$a = \frac{A_s \cdot 34800}{0.85 \cdot 3625 \cdot 24}$$

$$a = 0.47 \cdot A_s$$

Design bending moment

$$M_u = \frac{b \cdot w_u \cdot l^2}{12 \cdot 8}$$

$$= \frac{2 \cdot 193.3 \cdot (16.4 \cdot 12)^2}{12 \cdot 8}$$

$$= 155,970 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

$$\rho_{\min} = \frac{4 \cdot \sqrt{f'_c}}{34800} = 0.00277$$

- BASE ON THE OBJECTIVE

THAT THE NOMINAL FLEXURAL CAPACITY

(M_u) BE EQUAL TO AT LEAST TWICE THE

CRACKING MOMENT (M_{cr})

- TRY 9 NO. OF ($\phi 9$ mm)

$$\text{ดังนั้น } A_s = 0.10 \cdot 9 \text{ sq.in}$$

$$\rho = \frac{0.9}{(14 - 1) \cdot 24} = 0.00288$$

$$\rho > \rho_{\min}$$

- CHECK FOR DUCTILE

FAILURE

$$f_s = \frac{\eta_{\text{cross}} \cdot l_{\text{cross}} \cdot f'_c \cdot d_{\text{cross}}}{A_s}$$

$$= \frac{11 \cdot 22 \cdot 580.15 \cdot 0.6}{0.9 \cdot 2.54}$$

$$= 36849 \text{ psi} > f_y$$

- DETERMINE FLEXURAL

CAPACITY OF FLOOR PANEL AT YIELDING

LONG BAR

$$T = A_s \cdot f_y = 0.9 \cdot 34,800$$

$$\phi M_n = \phi A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 0.9 \cdot 34800 \cdot A_s \left(13 - \frac{0.47 \cdot A_s}{2} \right)$$

$$\frac{239570}{0.9 \cdot 34800} = 13 \cdot A_s - 0.235 \cdot A_s^2$$

$$7.65 = 13 \cdot A_s - 0.235 \cdot A_s^2$$

$$A_s = 0.595 \text{ in}^2$$

$$< A_{s,\min} = 0.968 \text{ in}^2$$

ดังนั้น 10 NO. $\phi 9$ mm.

$$A_s = 1 \text{ in}^2$$

$$= 31.32 \text{ kips}$$

$$T = C = 0.85 f'_c \cdot b_w \cdot a$$

$$31.32 = 0.85 \cdot 0.58 \cdot 24 \cdot a$$

$$a = 2.647$$

CHECK STRAINS IN TENSILE

REINFORCEMENT

$$C = \frac{a}{0.67} = \frac{2.647}{0.67} = 3.95 \text{ in}$$

$$\epsilon_s = 0.003 \cdot \frac{d-c}{c}$$

$$= 0.003 \cdot \frac{13 - 3.95}{3.95} = 0.00687$$

THIS SECTION IN TENSION

CONTROLLED

USE $\phi = 0.9$ (IF NOT USE $\phi = 0.65$)

$$\phi M_n = \phi \cdot T \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 0.9 \cdot 31.32 \cdot \left(13 - \frac{2.647}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 329.14 \text{ kip-in}$$

$$> M_u = 155.97 \text{ kip-in} \quad \text{ok}$$

ศูนย์วิทยพัรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตัวแปร

A_s	=	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึง
A_{st}	=	พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีการแปลงพื้นที่หน้าตัด
b_w	=	ความกว้างของแผ่นพื้น
E_{eps}	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโพลีเอทิลีนที่มีการปรับลด
E'_{eps}	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
EPS	=	โพลีเอทิลีน
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
f'_c	=	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
f'_{eps}	=	กำลังรับแรงอัดของโพลีเอทิลีน
f_r	=	โมดูลัสแตกร้าวของโพลีเอทิลีน
f_s	=	หน่วยแรงในเหล็กเสริม
f_t	=	กำลังต้านทานแรงดึงของโพลีเอทิลีน
f_y	=	กำลังที่จุดคานงของเหล็กเสริม
h	=	ความหนาของแผ่นพื้น
l_{cr}	=	โมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าว
l_t	=	โมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัดแปลง
l	=	ความยาวช่วง
l_{cross}	=	ความยาวของเหล็กเสริมทางขวาง
l_e	=	ความยาวประสิทธิผล
l_n	=	ความยาวช่วงจากขอบของที่รองรับถึงขอบของที่รองรับ
M_a	=	โมเมนต์ที่เกิดกับหน้าตัด
M_{cr}	=	โมเมนต์ที่กระทำให้น้ำตัดแตกร้าว
M_y	=	โมเมนต์ที่เหล็กเสริมในหน้าตัดถึงจุดคานง
V_c	=	กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตปกติที่สถานะปะลัย
V_{eps}	=	กำลังรับแรงเฉือนของโพลีเอทิลีนที่สถานะปะลัย
V_{max}	=	ค่าแรงเฉือนออกแบบสูงสุดที่สถานะปะลัย
V_u	=	แรงเฉือนออกแบบที่สถานะปะลัย
W_a	=	น้ำหนักบรรทุกทุกของแผ่นพื้น

สารบัญตัวแปร (ต่อ)

W_c	= น้ำหนักต่อหน่วยของคอนกรีต
W_u	= น้ำหนักบรรทุกที่สถานะปะลัย
δ_{allow}	= การแอ่นตัวที่ยอมให้
$\delta_{short-term}$	= การแอ่นตัวที่เกิดจากรับแรง
ϵ_s	= การยืดตัวของเหล็กเสริม
ϕ	= ตัวคูณลดกำลัง
ϕ_a	= ความโค้งที่น้ำหนักใช้งาน
ϕ_{cr}	= ความโค้งที่เหล็กเสริมถึงจุดคดง
ϕ_y	= ความโค้งที่เหล็กเสริมถึงจุดคดง
η	= ค่าสัดส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของ โพลีคอนกรีต
$\eta_{cross,min}$	= จำนวนเหล็กเสริมทางขวางเพื่อยึดเหล็กเสริมความยาว
ρ_{min}	= สัดส่วนน้อยสุดของหน้าตัดเหล็กเสริมต่อหน้าตัดทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

รายการคำนวณการออกแบบตัวอย่างแผ่นพื้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design Criterion		แผ่นพื้นชนิดที่ 1 275 มม. โฟมคอนกรีตตัน					
Wc	737.00 kg/cu.m.	=	7,229.97 N/cu.m.	=	46.03 lb/cu.ft		
LL+SWD	350.00 kg/sq.m.	=	3,433.50 N/sq.m.	=	71.71 lb/sq.ft		
f _{eps}	3.00 MPa	=	3.00 MPa	=	435.11 psi		
Flexural Strength	0.60 MPa	=	0.60 MPa	=	87.02 psi		
f _y	2,400.00 kg/sq.cm.	=	2,354,400.00 N/sq.m.	=	34,800.00 psi		
E _s				=	29,000.00 ksi		
E _{eps} Elastic modulus				=	248.93 ksi	Equation (3)	
E' _{eps} Reduced Elastic modulus				=	165.95 ksi	Equation (4)	
f _t Spitting Tensile Strength				=	50.06 psi	Equation (6)	
f _r Modulus of Rupture		=	2*ft	=	100.13 psi	Equation (7)	
η Modular Ratio		=	E _s /E' _{eps}	=	174.75	Equation (5)	
Span Length	5.00 m.	=	5.00 m.	=	16.40 ft		
Longitudinal Wire							
Diameter	9.00 mm.		Use	7.00	No.		
Area	0.10 in ²	A _{st} =		122.324	in ²		
Cross Wire							
Diameter	6.00 mm.						
Area	0.04 in ²						
Control of Deflection							
minimum thickness (h)		=	13.27 in	=	33.69 cm	Equation (1)	
try if h		=	11.00 in	=	27.50 cm		
A _{st}		=	122.32 in ²			Equation (9)	
I _t		=	4,483.13 in ⁴			Equation (8)	
M _{cr}		=	81,613.40 lb-in			Equation (10)	
W _a		=	113.90 lb/sq.ft				
W _a		=	18.98 lb/in				
M _a		=	91,950.58 lb-in			Equation (11)	
since M _a > M _{cr} , Section will crack.							
Determine C _y from Equilibrium T=C							
$A_{st}(h-cover-Db/2-C_y) = (b \cdot C_y^2)/2$							
C _y		=	6.13 in				
d=h-cover-Db/2		=	9.82 in				
I _{cr}		=	3,510.91 in ⁴			Equation (12)	
M _y		=	189,484.55 lb-in			Equation (13)	
ϕ_{cr}		=	0.000110 1/in			Equation (14)	
ϕ_y		=	0.000325 1/in			Equation (15)	
ϕ_a		=	0.000130 1/in			Equation (16)	
E' _{eps} le=M _a / f _a		=	705,411,961.98 lb-in ²			Equation (17)	
δ short-term		=	0.75 in			Equation (18)	
δ all		=	0.82 in	Ok		Equation (19)	
Check Shear							
W _u		=	180.97 lb/sq.ft				
V _u		=	2,968.71 lb			Equation (20)	
Determine Shear Capacity		=	3,003.75 lb	OK		Equation (21)	

Anchorage							
L/6			=	32.81	in		
Vmax	Vu/φ		=	3,958.29	lb	Equation	(24)
η _{cross,min}			=	6.76	no.	Equation	(23)
Use η _{cross,min}			=	7.00	no.		
Smin			=	4.69	in		
Use Smin			=	4.00	in	For L/6	
Use Smin			=	8.00	in	For L/6 to L/3	
Flexural Capacity							
Mu			=	146,098.12	lb.in	Equation	(25)
Minimum Reinforcement Ratio			=	0.0023976		Equation	(26)
Used Reinforcement Ratio			=	0.0029167		OK	
fs			=	45.22		tension control	Equation (27)
T = As*fy			=	24.36	kip	Equation	(28)
T=C= 0.85f _{eps} *a*bw							
		a	=	2.74	in		
c=a/0.67		c	=	4.10	in		
steel stain		ε _s	=	0.0058		Equation	(29)
tension control	use	φ	=	0.9			
		Strength factor					
Mn = T(d-a/2)			=	210.17	kip-in		
φMn			=	189.16	kip-in		
Mu			=	146.10	kip-in	OK	



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design Criterion		แผ่นพื้นชนิดที่ 2 225 มม. โฟมคอนกรีตตัน					
Wc	737.00 kg/Cu.m.	=	7,229.97 N/cu.m.	=	46.03 lb/cu.ft		
LL+SWD	250.00 kg/sq.m.	=	2,452.50 N/sq.m.	=	51.22 lb/sq.ft		
f _{eps}	3.00 MPa	=	3.00 MPa	=	435.11 psi		
Flexural Strength	0.60 MPa	=	0.60 MPa	=	87.02 psi		
f _y	2,400.00 kg/sq.cm.	=	2,354,400.00 N/sq.m.	=	34,800.00 psi		
E _s				=	29,000.00 ksi		
E _{eps} Elastic modulus				=	248.93 ksi	Equation	(3)
E' _{eps} Reduced Elastic modulus				=	165.95 ksi	Equation	(4)
f _t Spitting Tensile Strength				=	50.06 psi	Equation	(6)
f _r Modulus of Rupture		=	2*ft	=	100.13 psi	Equation	(7)
η Modular Ratio		=	E _s /E' _{eps}	=	174.75	Equation	(5)
Span Length	5.00 m.	=	5.00 m.	=	16.40 ft		
Longitudinal Wire							
Diameter	9.00 mm.		Use	5.00	No.		
Area	0.10 in ²	A _{st} =		87.3744	in ²		
Cross Wire							
Diameter	6.00 mm.						
Area	0.04 in ²						
Control of Deflection							
minimum thickness (h)		=	13.27 in	=	33.69 cm	Equation	(1)
try if h		=	9.00 in	=	22.50 cm		
A _{st}		=	87.37 in ²			Equation	(9)
I _t		=	1,980.01 in ⁴			Equation	(8)
M _{cr}		=	44,055.16 lb-in			Equation	(10)
W _a		=	85.74 lb/sq.ft				
W _a		=	14.29 lb/in				
M _a		=	69,217.64 lb-in			Equation	(11)
since M _a >M _{cr} , Section will crack.							
Determine C _y from Equilibrium T=C							
$A_{st}(h-cover-Db/2-C_y) = (b \cdot C_y^2)/2$							
C _y		=	4.74 in				
d=h-cover-Db/2		=	7.82 in				
I _{cr}		=	1,682.37 in ⁴			Equation	(12)
M _y		=	108,632.55 lb-in			Equation	(13)
ϕ_{cr}		=	0.000134 1/in			Equation	(14)
ϕ_y		=	0.000389 1/in			Equation	(15)
ϕ_a		=	0.000233 1/in			Equation	(16)
E' _{eps} le=M _a / f _a		=	296,507,848.40 lb-in ²			Equation	(17)
δ short-term		=	1.34 in			Equation	(18)
δ all		=	0.82 in	Revised		Equation	(19)
Check Shear							
W _u		=	135.40 lb/sq.ft				
V _u		=	2,221.18 lb			Equation	(20)
Determine Shear Capacity		=	2,403.00 lb	OK		Equation	(21)

Anchorage							
L/6			=	32.81	in		
Vmax	Vu/φ		=	2,961.57	lb	Equation	(24)
η _{cross,min}			=	5.06	no.	Equation	(23)
Use η _{cross,min}			=	6.00	no.		
Smin			=	5.47	in		
Use Smin			=	5.00	in	For L/6	
Use Smin			=	10.00	in	For L/6 to L/3	
Flexural Capacity							
Mu			=	109,309.92	lb.in	Equation	(25)
Minimum Reinforcement Ratio			=	0.0023976		Equation	(26)
Used Reinforcement Ratio			=	0.0026042		OK	
fs			=	54.27		tension control	Equation (27)
T = As*fy			=	17.40	kip	Equation	(28)
T=C= 0.85f _{eps} *a*bw							
		a	=	1.96	in		
c=a/0.67		c	=	2.93	in		
steel stain		ε _s	=	0.0093		Equation	(29)
tension control	use	φ	=	0.9			
		Strength factor					
Mn = T(d-a/2)			=	122.15	kip-in		
φMn			=	109.93	kip-in		
Mu			=	109.31	kip-in	OK	



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design Criterion	แผ่นพื้นขูดที่ 3.1 225มม. โฟมคอนกรีต กลวง 2 ช่อง และ ขูดที่ 3.2 225มม. โฟมคอนกรีต กลวง 1 ช่อง					
Wc	737.00	kg/Cu.m.	=	7,229.97	N/cu.m.	= 46.03 lb/cu.ft
LL+SWD	250.00	kg/sq.m.	=	2,452.50	N/sq.m.	= 51.22 lb/sq.ft
f _{eps}	3.00	MPa	=	3.00	MPa	= 435.11 psi
Flexural Strength	0.60	MPa	=	0.60	MPa	= 87.02 psi
f _y	2,400.00	kg/sq.cm.	=	2,354,400.00	N/sq.m.	= 34,800.00 psi
E _s						= 29,000.00 ksi
E _{eps} Elastic modulus						= 248.93 ksi Equation (3)
E' _{eps} Reduced Elastic modulus						= 165.95 ksi Equation (4)
f _t Spitting Tensile Strength						= 50.06 psi Equation (6)
f _r Modulus of Rupture			=	2*ft		= 100.13 psi Equation (7)
η Modular Ratio			=	E _s /E' _{eps}		= 174.75 Equation (5)
Span Length	5.00	m.	=	5.00	m.	= 16.40 ft
Longitudinal Wire						
Diameter	9.00	mm.		Use	5.00	No.
Area	0.10	in ²		A _{st} =	87.3744	in ²
Cross Wire						
Diameter	6.00	mm.				
Area	0.04	in ²				
Control of Deflection						
minimum thickness (h)			=	13.27	in	= 33.69 cm Equation (1)
try if h			=	9.00	in	= 22.50 cm
A _{st}			=	87.37	in ²	Equation (9)
I _t			=	1,980.01	in ⁴	Equation (8)
M _{cr}			=	44,055.16	lb-in	Equation (10)
W _a			=	85.74	lb/sq.ft	
W _a			=	14.29	lb/in	
M _a			=	69,217.64	lb-in	Equation (11)
				since M _a >M _{cr} , Section will crack.		
Determine C _y from Equilibrium T=C						
				A _{st} (h-cover-Db/2-C _y) = (b*C _y ² /2)		
C _y			=	4.74	in	
d=h-cover-Db/2			=	7.82	in	
I _{cr}			=	1,682.37	in ⁴	Equation (12)
M _y			=	108,632.55	lb-in	Equation (13)
ϕ_{cr}			=	0.000134	1/in	Equation (14)
ϕ_y			=	0.000389	1/in	Equation (15)
ϕ_a			=	0.000233	1/in	Equation (16)
E' _{eps} *I _e =M _a / ϕ_a			=	296,507,848.40	lb-in ²	Equation (17)
δ short-term			=	1.34	in	Equation (18)
δ all			=	0.82	in	Revised Equation (19)
Check Shear						
W _u			=	135.40	lb/sq.ft	
V _u			=	2,221.18	lb	Equation (20)
Determine Shear Capacity			=	2,403.00	lb	OK Equation (21)

Anchorage									
L/6			=	32.81	in				
Vmax	V_u/ϕ		=	2,961.57	lb			Equation	(24)
$\eta_{cross,min}$			=	5.06	no.			Equation	(23)
Use $\eta_{cross,min}$			=	6.00	no.				
Smin			=	5.47	in				
Use Smin			=	5.00	in	For L/6			
Use Smin			=	10.00	in	For L/6 to L/3			
Flexural Capacity									
Mu			=	109,309.92	lb.in			Equation	(25)
Minimum Reinforcement Ratio			=	0.0023976				Equation	(26)
Used Reinforcement Ratio			=	0.0026042		OK			
fs			=	54.27		tension control		Equation	(27)
T = As*fy			=	17.40	kip			Equation	(28)
T=C= 0.85feps*a*bw									
		a	=	1.96	in				
c=a/0.67		c	=	2.93	in				
steel stain		ϵ_s	=	0.0093				Equation	(29)
tension control	use	ϕ	=	0.9					
		Strength factor			kip-in				
Mn = T(d-a/2)			=	122.15	kip-in				
ϕM_n			=	109.93	kip-in				
Mu			=	109.31	kip-in	OK		Equation	(30)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

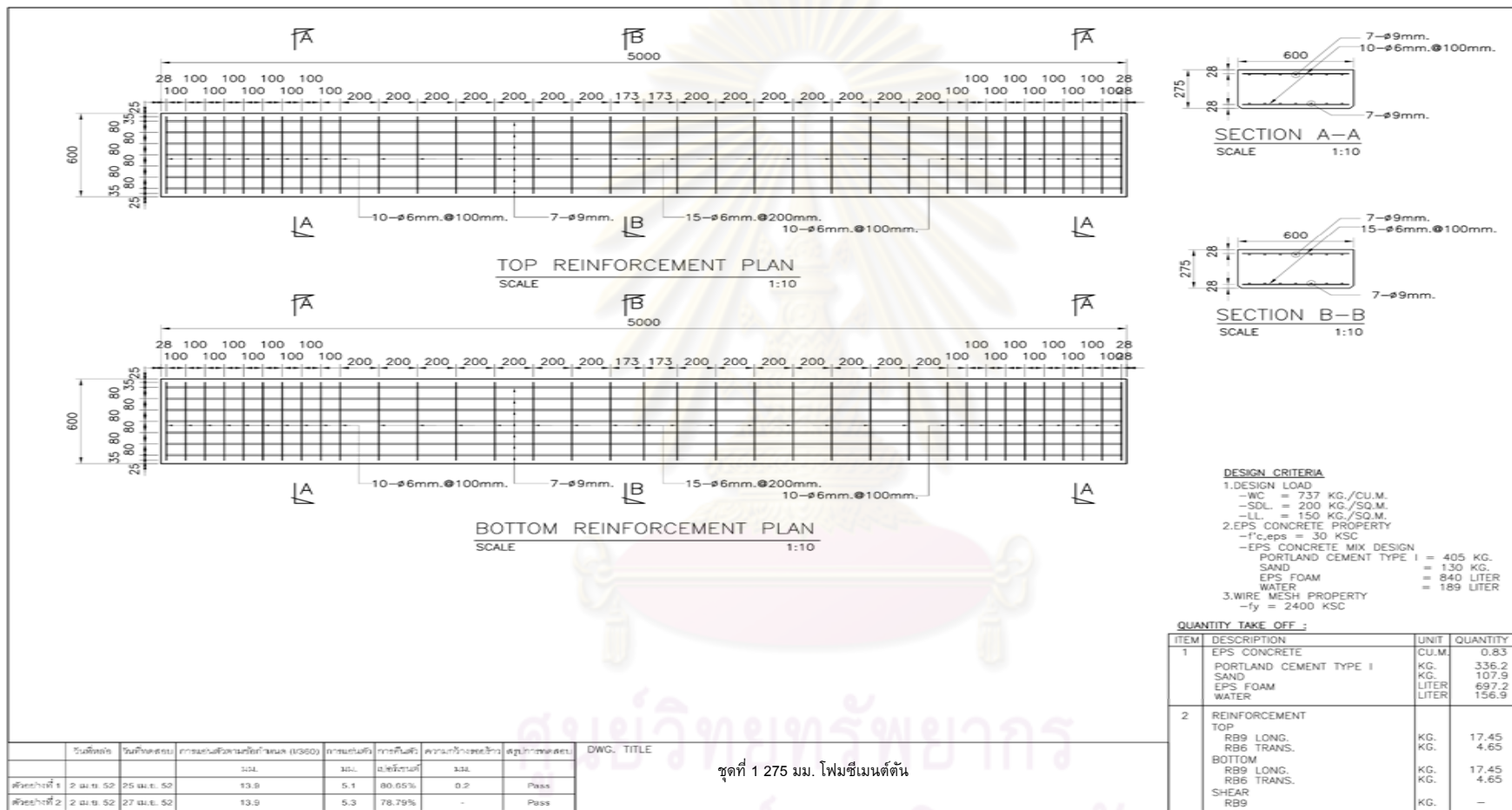
Design Criterion	แผ่นพื้นชนิดที่ 4.1 225 มม. ปูนฉาบผิว กลวง 1 ช่อง ความหนาแน่น 1 ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต และ					
	ชนิดที่ 4.2 225 มม. ปูนฉาบผิว กลวง 1 ช่อง ความหนาแน่น 2 ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต					
Wc	1,261.00	kg/Cu.m.	=	12,370.41	N/Cu.m.	= 78.75 lb/cu.ft
LL+SWD	250.00	kg/sq.m.	=	2,452.50	N/sq.m.	= 51.22 lb/sq.ft
f'eps	3.00	MPa	=	3.00	MPa	= 435.11 psi
Flexural Strength	0.60	MPa	=	0.60	MPa	= 87.02 psi
fy	2,400.00	kg/sq.cm.	=	2,354,400.00	N/sq.m.	= 34,800.00 psi
Es						= 29,000.00 ksi
Eeps Elastic modulus						= 248.93 ksi Equation (3)
E'eps Reduced Elastic modulus						= 165.95 ksi Equation (4)
ft Spitting Tensile Strength						= 50.06 psi Equation (6)
fr Modulus of Rupture			=	2*ft		= 100.13 psi Equation (7)
η Modular Ratio			=	Es/E'eps		= 174.75 Equation (5)
Span Length	5.00	m.	=	5.00	m.	= 16.40 ft
Longitudinal Wire						
Diameter	9.00	mm.		Use	7.00	No.
Area	0.10	in ²	Ast =		122.324	in ²
Cross Wire						
Diameter	6.00	mm.				
Area	0.04	in ²				
Control of Deflection						
minimum thickness (h)			=	11.74	in	= 29.81 cm Equation (1)
try if h			=	9.00	in	= 22.50 cm
Ast			=	122.32	in ²	Equation (9)
It			=	2,188.81	in ⁴	Equation (8)
Mcr			=	48,701.02	lb-in	Equation (10)
Wa			=	110.28	lb/sq.ft	
Wa			=	18.38	lb/in	
Ma			=	89,030.76	lb-in	Equation (11)
	since Ma > Mcr, Section will crack.					
Determine Cy from Equilibrium T=C						
	$Ast*(h-cover-Db/2-Cy) = (b*Cy^2)$					
Cy			=	5.19	in	
d=h-cover-Db/2			=	7.82	in	
Icr			=	1,966.31	in ⁴	Equation (12)
My			=	148,460.07	lb-in	Equation (13)
ϕ_{cr}			=	0.000134	1/in	Equation (14)
ϕ_y			=	0.000455	1/in	Equation (15)
ϕ_a			=	0.000264	1/in	Equation (16)
E'eps*le=Ma/ fa			=	337,493,892.90	lb-in ²	Equation (17)
δ short-term			=	1.34	in	Equation (18)
δ all			=	0.82	in	Revised Equation (19)

Check Shear										
	Wu		=	169.76	lb/sq.ft					
	Vu		=	2,784.82	lb			Equation	(20)	
	Determine Shear Capacity		=	2,403.00	lb	Revise		Equation	(21)	
				Prepared shear stirrup for shear						
Anchorage										
	L/6		=	32.81	in					
	Vmax	Vu/φ	=	3,713.09	lb			Equation	(24)	
	η _{cross,min}		=	6.34	no.			Equation	(23)	
	Use η _{cross,min}		=	7.00	no.					
	Smin		=	4.69	in					
	Use Smin		=	4.00	in	For L/6				
	Use Smin		=	8.00	in	For L/6 to L/3				
Flexural Capacity										
	Mu		=	137,048.28	lb.in			Equation	(25)	
	Minimum Reinforcement Ratio		=	0.0023976				Equation	(26)	
	Used Reinforcement Ratio		=	0.0036458		OK				
	fs		=	45.22	kip	tension control		Equation	(27)	
	T = As*fy		=	24.36	Kips			Equation	(28)	
	T=C= 0.85feps*a*bw									
		a	=	2.74	in					
	c=a/0.67	c	=	4.10	in					
	steel stain	εs	=	0.0058				Equation	(29)	
	tension control	use φ	=	0.9						
		Strength factor			kip-in					
	Mn = T(d-a/2)		=	161.45	kip-in					
	φ Mn		=	145.31	kip-in					
	Mu		=	137.05	kips-in	OK		Equation	(30)	

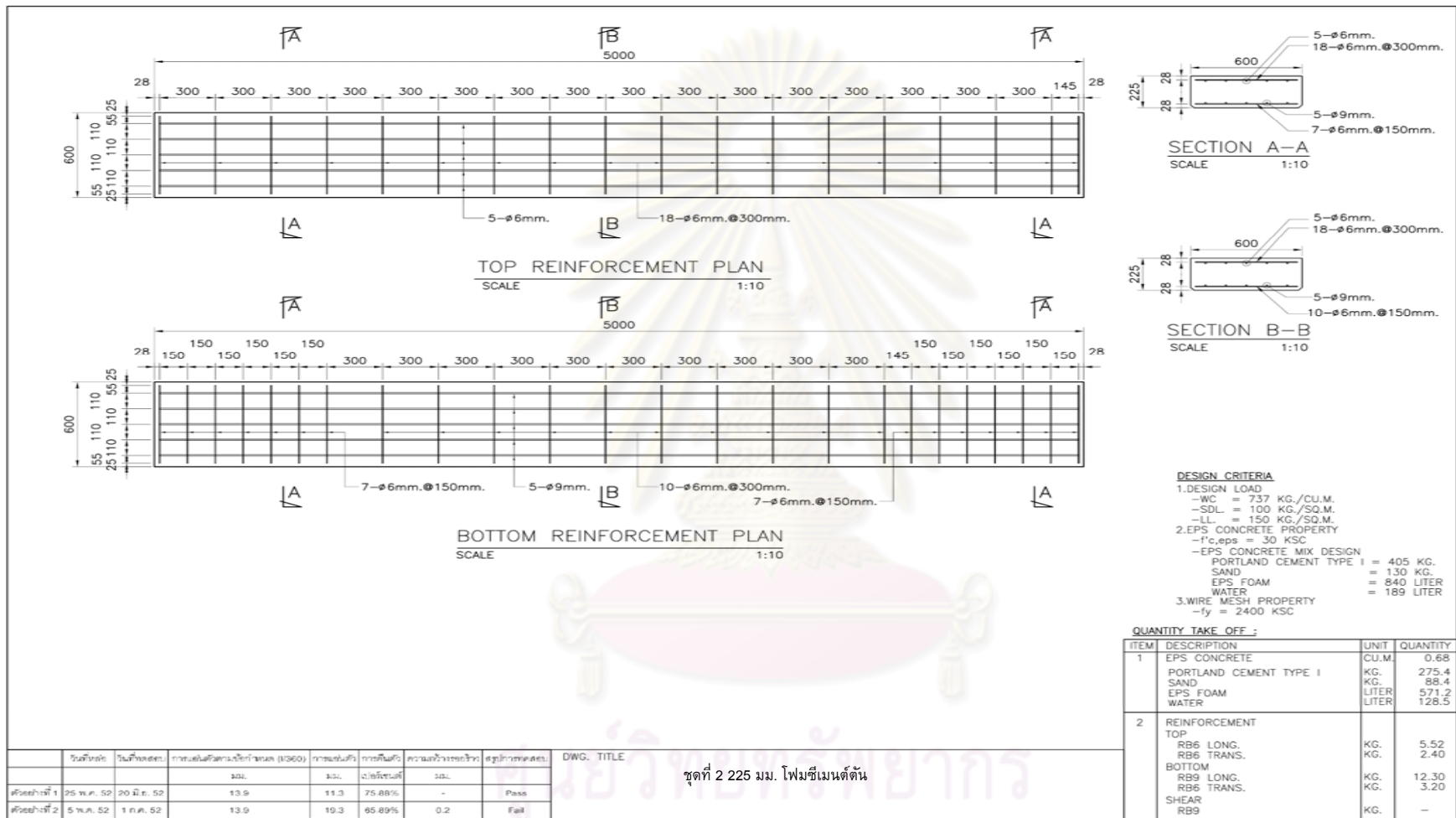
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
ภาคผนวก จ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาพแบบตัวอย่างแผ่นพื้น

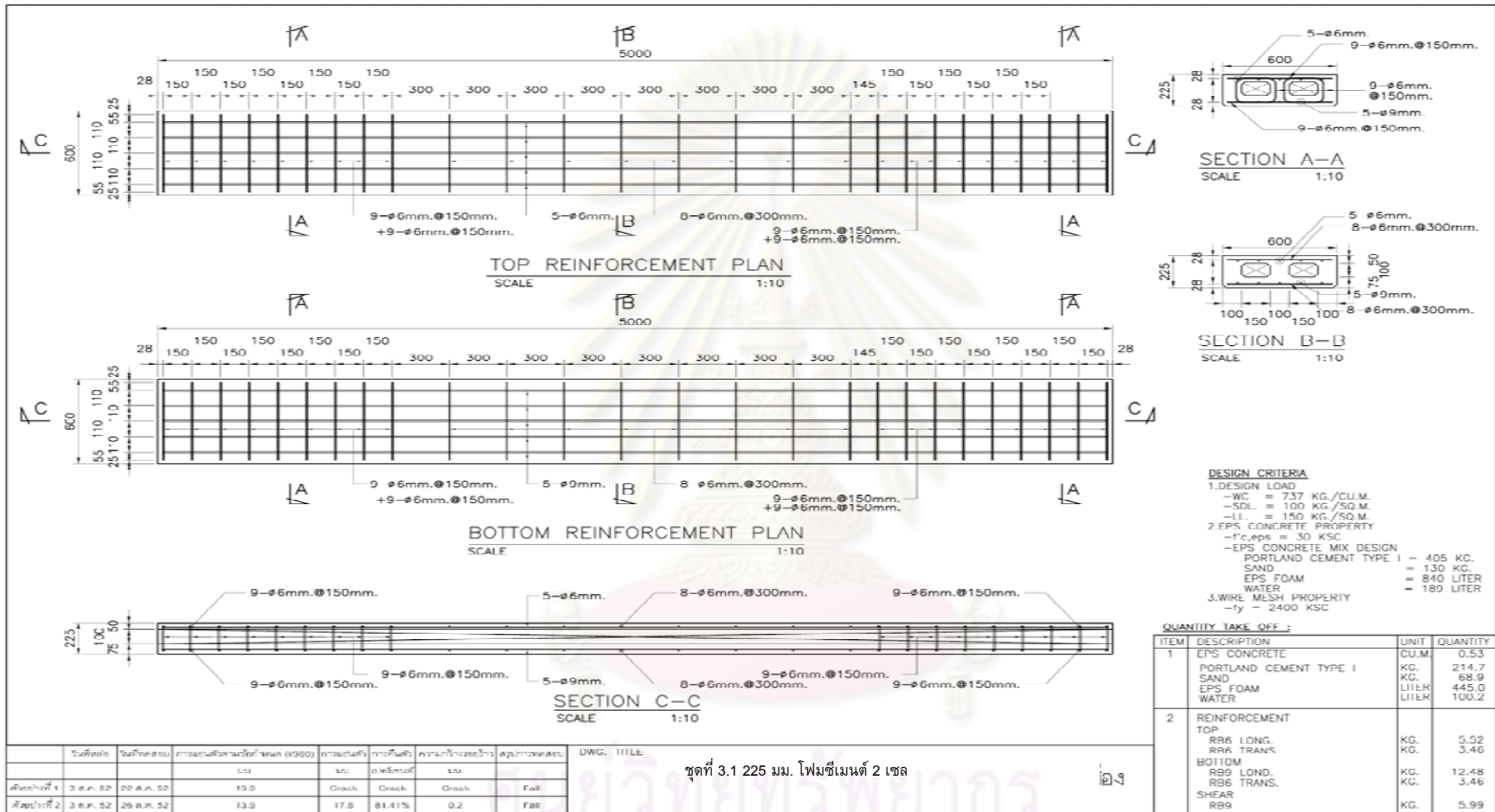


ภาพที่ 7-1 แบบพื้นโฟมซีเมนต์ตัน ความหนา 275 มิลลิเมตร



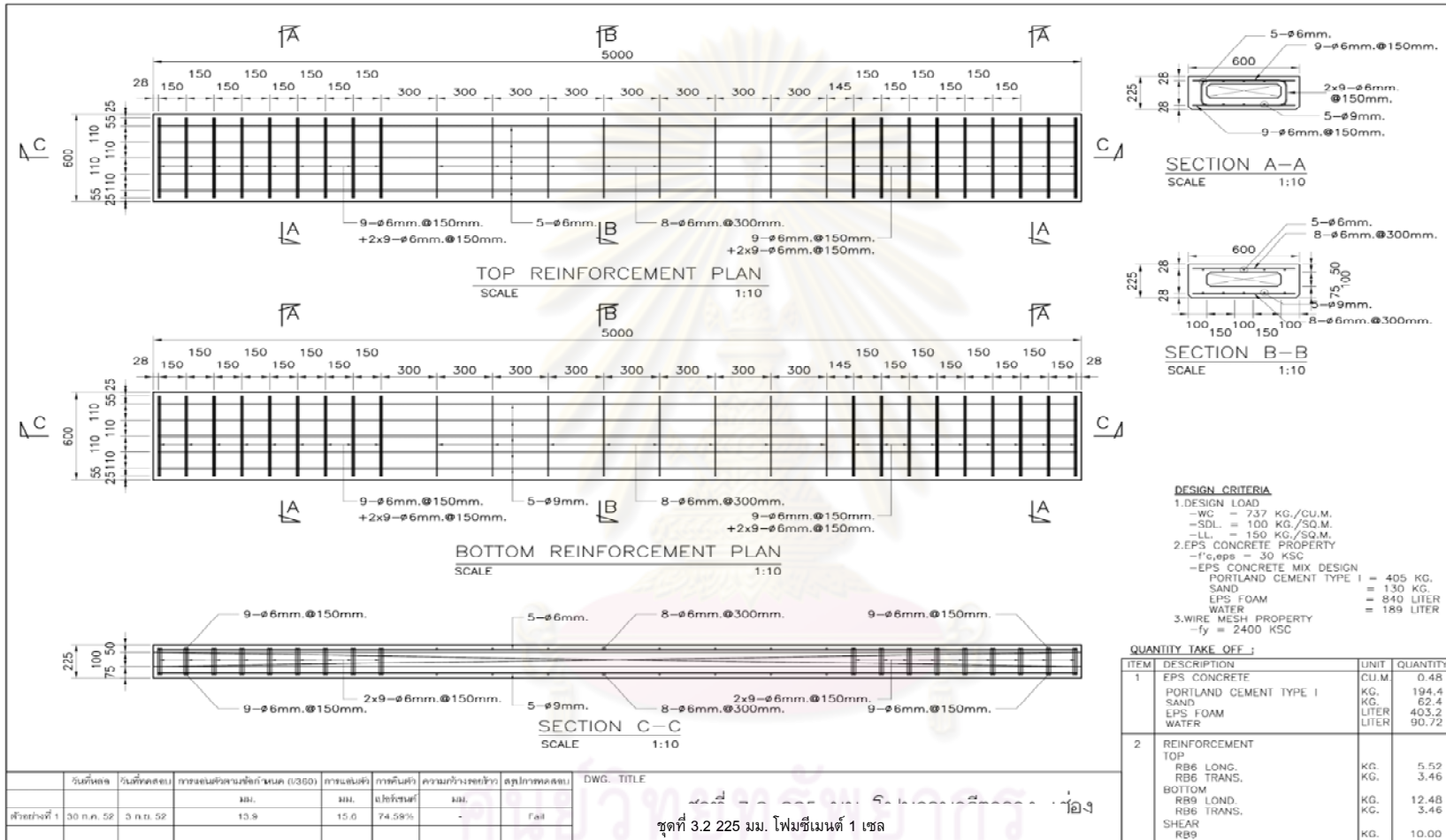
ภาพที่ 7-2 แบบพื้นโฟมซีเมนต์ตัน ความหนา 225 มิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



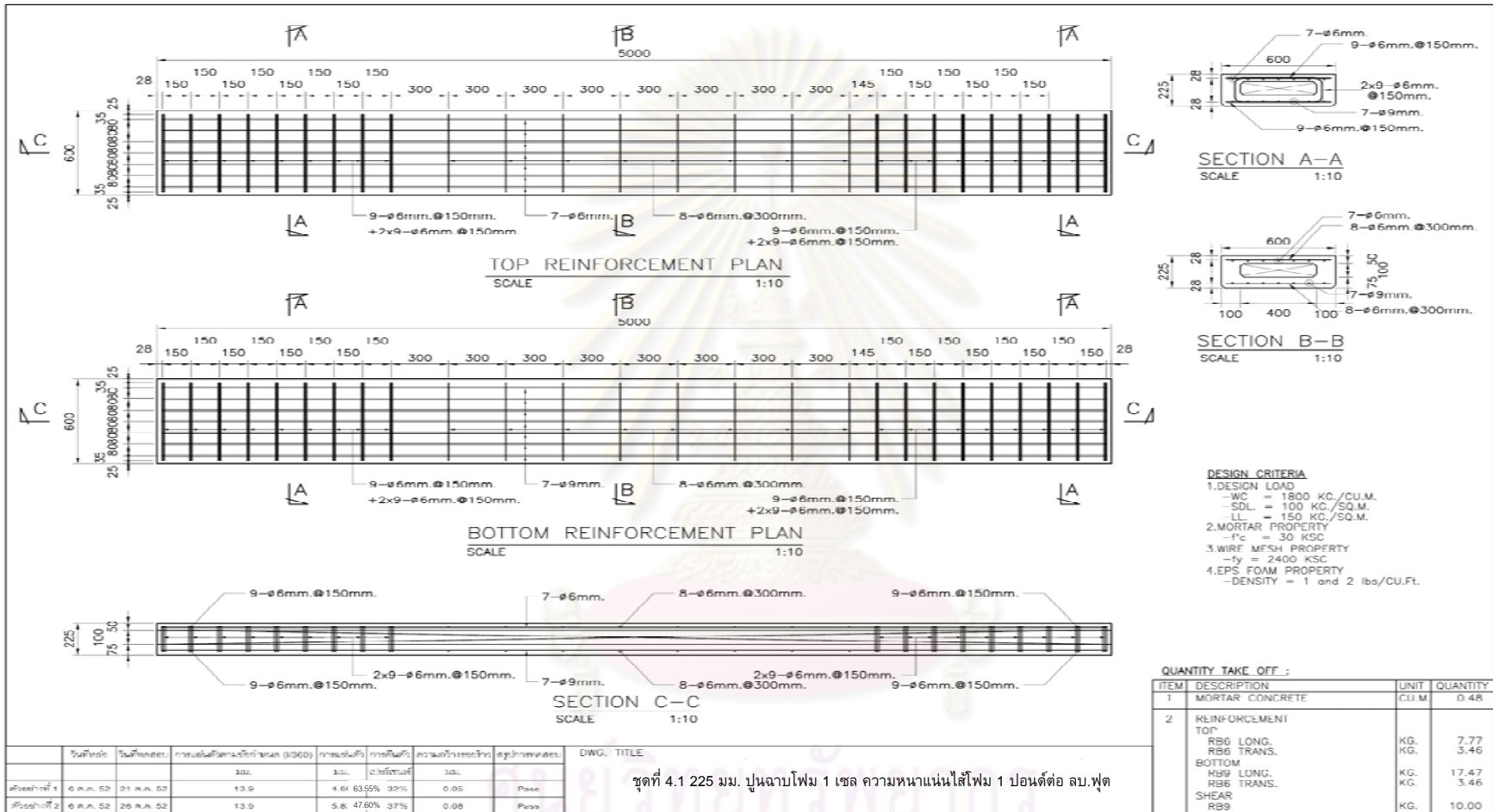
ภาพที่ 7-3 แบบพื้นโฟมซีเมนต์ 2 เซล ความหนา 225 มิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

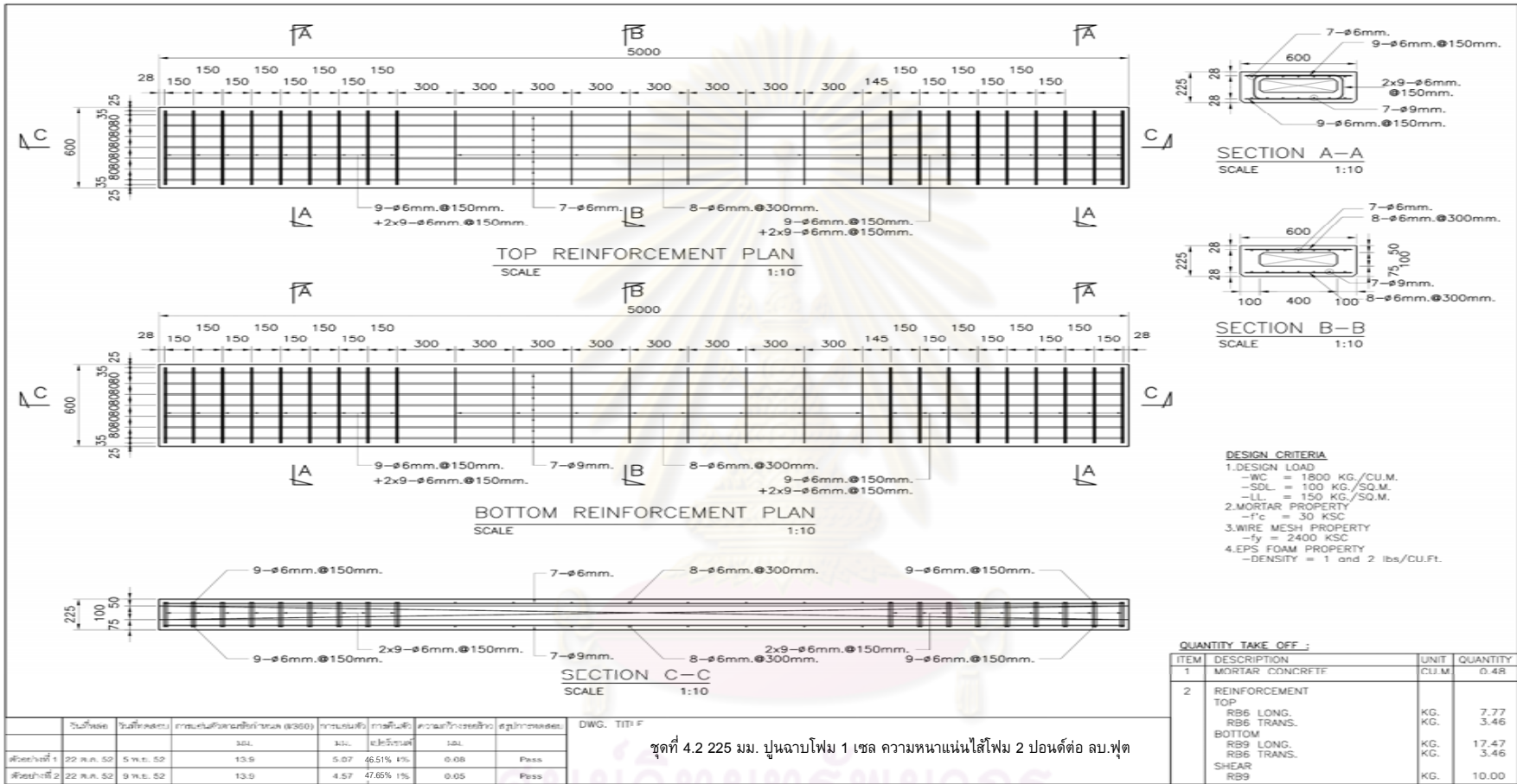


ภาพที่ 7-4 แบบพื้นโฟมซีเมนต์ 1 เซล ความหนา 225 มิลลิเมตร

ชุดที่ 3.2 225 มม. โฟมซีเมนต์ 1 เซล



ภาพที่ 7-5 แบบพื้นปูนฉาบ 1 เซล ความหนา 225 มิลลิเมตร ความหนาแน่นไส้โฟม 1 ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต



ภาพที่ 7-6 แบบพื้นปูนฉาบ 1 เซล ความหนา 225 มิลลิเมตร ความหนาแน่นไส้โฟม 2 ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต



ภาคผนวก ช

ภาพการดำเนินการเก็บตัวอย่างแท่งตัวอย่างโฟมซีเมนต์รับแรงอัดและการหล่อ
แผ่นพื้นสำเร็จรูป ชุดที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 8-1 เครื่องผสม



ภาพที่ 8-2 การประยุกต์เครื่องผสมคอนกรีตให้เหมาะสมกับโฟมซีเมนต์



ภาพที่ 8-3 เครื่องชั่งน้ำหนัก



ภาพที่ 8-4 อุปกรณ์การเก็บตัวอย่างทดสอบกำลัง



ภาพที่ 8-5 อุปกรณ์การทดสอบการยุบตัว



ภาพที่ 8-6 การเตรียมแบบหล่อแผ่นพื้น (1)



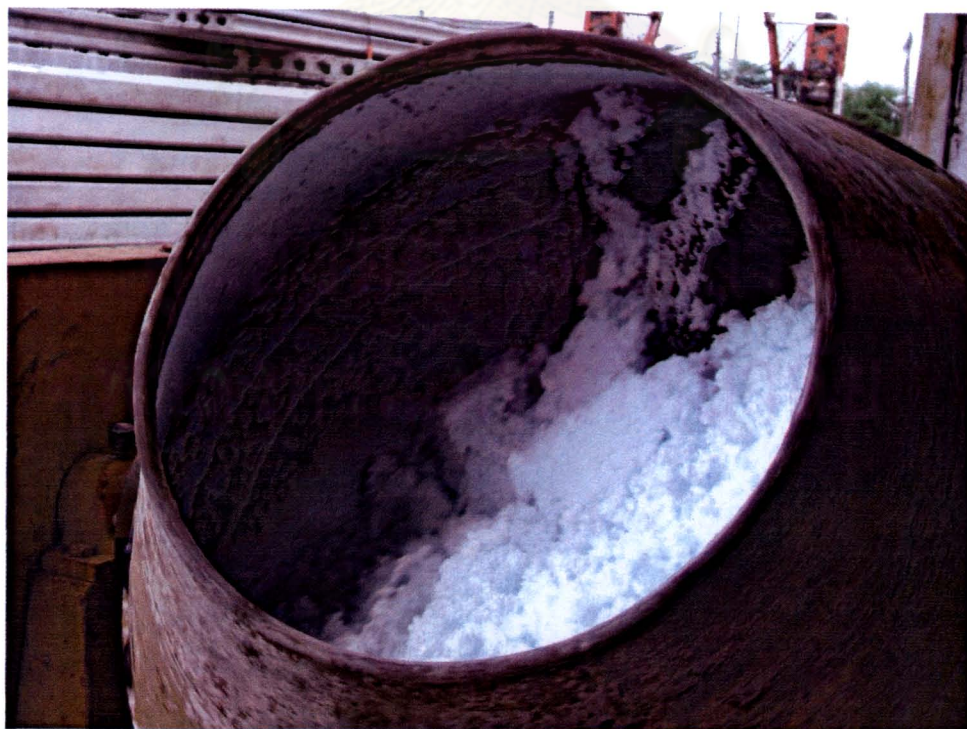
ภาพที่ 8-7 การเตรียมแบบหล่อแผ่นพื้น (2)



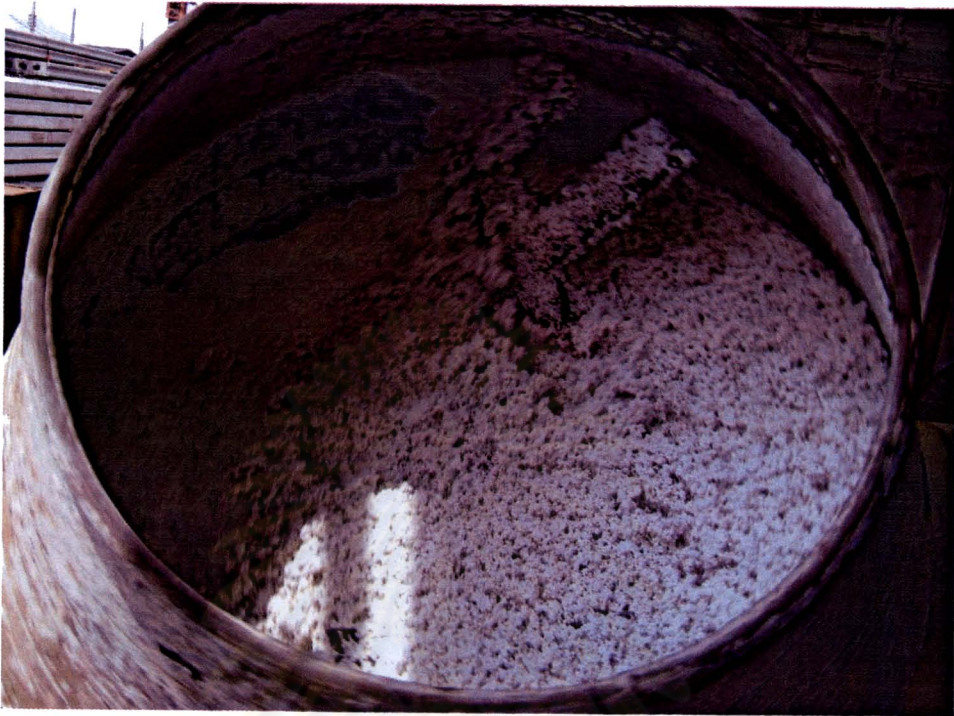
ภาพที่ 8-8 การตวงวัสดุ



ภาพที่ 8-9 การผสมวัสดุ



ภาพที่ 8-10 การผสมระหว่างน้ำกับโฟม



ภาพที่ 8-11 การผสมระหว่างน้ำ โฟม และทราย



ภาพที่ 8-12 การผสมระหว่างน้ำ โฟม ทราย และ ซีเมนต์



ภาพที่ 8-13 โฟมซีเมนต์ที่ผสมเสร็จแล้ว (1)



ภาพที่ 8-14 โฟมซีเมนต์ที่ผสมเสร็จแล้ว (2)



ภาพที่ 8-15 การทดสอบการยุบตัวของโฟมซีเมนต์ (1)



ภาพที่ 8-16 การทดสอบการยุบตัวของโฟมซีเมนต์ (2)



ภาพที่ 8-17 การเทโฟมซีเมนต์ลงในแบบแผ่นพื้น (1)



ภาพที่ 8-18 การเทโฟมซีเมนต์ลงในแบบแผ่นพื้น (2)



ภาพที่ 8-19 การเทโฟมคอนกรีตลงในแบบแผ่นพื้น (3)



ภาพที่ 8-20 การเทโฟมคอนกรีตลงในแบบแผ่นพื้น (4)



ภาพที่ 8-21 การเทโฟมซีเมนต์ในแบบเสร็จเรียบร้อยและกำลังแต่งผิวหน้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ช
วิธีการทดสอบแผ่นพื้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการทดสอบแผ่นพื้น

1. ขั้นตอนการทดสอบแผ่นพื้น

เป็นไปตามวิธีการทดสอบแผ่นพื้น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ 577-2531 (วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จและระบบพื้นคอนกรีต) ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งมาตรความแอ่นตัวที่กึ่งกลางแผ่นคอนกรีต และที่แท่นธารทั้งสอง เพื่อใช้เปรียบเทียบความแอ่นตัว
2. เริ่มใส่น้ำหนักบนแผ่นคอนกรีตเป็นช่วงดังนี้ คือ ร้อยละ 25 ร้อยละ 50 ร้อยละ 75 ร้อยละ 100 ร้อยละ 125 และร้อยละ 150 ของน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดไว้สำหรับแผ่นคอนกรีตแต่ละชั้นคุณภาพ หลังจากใส่น้ำหนักบรรทุกแต่ละค่าแล้วให้อ่านค่าความแอ่นตัวหลังจากเวลาผ่านไปแล้ว 15 นาที แล้วจึงเริ่มเพิ่มน้ำหนักบรรทุกช่วงต่อไปทำเช่นนี้เรื่อยไปจนครบช่วงการเพิ่มน้ำหนัก การใส่น้ำหนักบรรทุกนี้ต้องค่อย ๆ ใส พยายามไม่ให้เกิดการกระแทกกับพื้นที่ทดสอบและต้องให้น้ำหนักแผ่สม่ำเสมอตลอดช่วงด้วย
3. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกและอ่านค่าจนถึงร้อยละ 150 ของน้ำหนักบรรทุกแล้ว ให้ปล่อยไว้ 24 ชั่วโมง แล้วอ่านค่าความแอ่นตัวอีกครั้งหนึ่ง
4. เริ่มลดน้ำหนักบรรทุกลงเหลือร้อยละ 125 ร้อยละ 100 ร้อยละ 75 ร้อยละ 50 ร้อยละ 25 และ 0 แล้วให้อ่านค่าความแอ่นตัวหลังจากเวลาผ่านไปแล้ว 15 นาที
5. อ่านค่าการคืนตัว (Recovery of deflection) อีกครั้งหนึ่ง หลังจากปลดน้ำหนักบรรทุกออกหมดแล้ว 24 ชั่วโมง

หลังจากดำเนินการครบแล้ว จะได้ค่าการแอ่นตัวทั้งหมด 15 ค่า สำหรับการทดสอบ 1 ตัวอย่าง

2. การพิจารณาผลการทดสอบ

เปรียบเทียบกับ มอก. 577-2531 นั้น มีเกณฑ์การพิจารณา 2 ส่วนดังนี้

- 1) ในช่วงน้ำหนักบรรทุกใดๆ ต้องไม่ปรากฏรอยร้าวกว้างเกิน 0.2 มม. ใต้ท้องแผ่นพื้นหรือชั้นส่วนคอนกรีต
- 2) ความแอ่นตัว

$$2.1 \text{ ต้องไม่เกิน } \frac{l^2}{20000 \cdot t}$$

$$2.2 \text{ แต่ถ้าแอ่นตัวเกิน } \frac{l^2}{20000 \cdot t} \text{ ต้องคืนตัวไม่น้อยกว่า ร้อยละ 75}$$

เมื่อ l หมายถึง ความยาวช่วงของแผ่นพื้น

t หมายถึง ความหนาของแผ่นพื้น

3. การพิจารณาการแอ่นตัว

เนื่องจากค่าที่กำหนดข้างต้นเป็นค่าที่ใช้กับคอนกรีตธรรมดา ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าโฟมคอนกรีตมาก จึงปรับการพิจารณาเพื่อให้เหมาะสม โดยใช้ค่า $l/360$ เป็นเกณฑ์พิจารณาแทน ซึ่งค่า $l/360$ เป็นข้อกำหนดการแอ่นตัวของกรอบแบบแผ่นพื้นของ วสท. ที่พิจารณาเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจร (LL) และน้ำหนักบรรทุกคงที่ (SDL) ไม่รวมน้ำหนักแผ่นพื้น ค่านี้จะใช้พิจารณาเป็นค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ได้เมื่อทดสอบน้ำหนักบรรทุกที่ร้อยละ 100 ของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบไว้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพร พรหมสุทธิ เกิดเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ.2502 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2523 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2528 และสำเร็จการศึกษา Master of Science โปรแกรมวิศวกรรมการก่อสร้างและการบริหารจัดการ (Construction engineering and management program) จากคณะวิศวกรรมโยธา (Civil engineering department) , Illinois Institute of Technology สหรัฐอเมริกา เมื่อปี พ.ศ.2532

เข้าศึกษาหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2550



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย