

พฤติกรรมของผนังรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งหล่อสำเร็จภายใต้แรงด้านข้าง



พัลลภ ภูริวรางคกุล

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มกราคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

พฤติกรรมของผนังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งหล่อสำเร็จภายใต้แรงดันข้าง



พัลลภ ภูริวราราคกุล

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มกราคม 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

พฤติกรรมของผนังรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งหล่อสำเร็จภายใต้แรงด้านข้าง

ของ พัลลภ ภูริวรางคกุล

ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

.....ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชยานนท์ หารรัชฎิญา)

.....กรรมการกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุกาพ) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ชมภูรัตน์)

.....กรรมการกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ เชื้อยงฉิน)

อนุมัติ

.....

(นายเทอดศักดิ์ โกศัยกานนท์)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

มกราคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่อง พฤติกรรมของผนังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งหล่อสำเร็จภายใต้แรงด้านข้าง ฉบับนี้ สำเร็จด้วยดี โดยได้รับความกรุณา ความช่วยเหลือ การให้คำปรึกษา แนะนำ พร้อมทั้งตรวจสอบปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน อาจารย์ที่ปรึกษา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการดำเนินการทดสอบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง ในห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วม และเกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่คอยสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ ด้วยดีเสมอมา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จจุล่งด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้แต่บิดา มารดา ผู้ให้ชีวิต ตลอดจน คณาจารย์ผู้ให้การศึกษ าอบรมสั่งสอนให้มีความรู้อันทรงคุณค่า ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน

พัลลภ ภูริวารังคกุล

ชื่อเรื่อง: พฤติกรรมของผนังรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งหล่อสำเร็จภายใต้แรงด้านข้าง

ผู้วิจัย: พัลลภ ภูริวารังคกุล, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2560

ประธานที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน **กรรมการที่ปรึกษา:** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ เชียงฉิน

คำสำคัญ: ผนังรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง, ผนังหล่อสำเร็จ, แรงด้านข้าง

บทคัดย่อ

การวิจัยฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของผนังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งหล่อสำเร็จ สำหรับการก่อสร้างอาคารพักอาศัยขนาดเล็ก ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง จากการทดสอบขั้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการจำลองโครงสร้าง วิเคราะห์เปรียบเทียบผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจุดต่อผนังที่ทดสอบ เป็นจุดต่อที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งที่มีในประเทศไทย ขึ้นทดสอบ ประกอบด้วยตัวอย่างผนังคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 3/4 เท่า ของขนาดจริง จำนวน 2 ชั้น คือ ตัวอย่างผนังคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Reinforced Concrete Wall) และตัวอย่างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Wall) ผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำสลับทิศ พบว่า แรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพันธ์ของทั้ง 2 ตัวอย่าง ให้ผลแรงกระทำทางข้างสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน และพฤติกรรมการแตกร้าว คือ ตำแหน่งที่ได้รับความเสียหายของผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ ได้แก่ รอยร้าวบริเวณจุดต่อด้วยเหล็กเดือยเชื่อมกับแผ่นเหล็กส่วนผนังคอนกรีตหล่อในที่ เสียหายบริเวณสูงจากฐาน 0.50 เมตร ยาว 0.50 เมตร ทั้งสองด้านของผนัง

เมื่อใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น WCOMD สร้างแบบจำลองผนังคอนกรีตหล่อในที่ และผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ ทำการวิเคราะห์ทั้งแบบจำลองอิสิเมนต์ขนาด 0.20x0.20 เมตร และอิสิเมนต์ขนาด 0.10x0.10 เมตร สามารถทำนายพฤติกรรมการแตกร้าว รูปแบบการวิบัติ เส้นโค้ง hysteretic loop และรูปแบบการวิบัติ ตรงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ขนาด 0.10x0.10 เมตร แสดงผลการวิเคราะห์ที่มีพฤติกรรมการแอ่นตัว และลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏชัดเจนมากกว่า แบบขนาด 0.20x0.20 เมตร นอกจากนี้ โปรแกรมยังสามารถแสดงการไหลของแรงภายในผนังได้อีกด้วย

Title: PRECAST BEARING WALL BEHAVIOR UNDER LATERAL LOADING

Author: Punlop Phuriwarangkakul **Thesis:** M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2017

Advisor: Assistant Professor Dr. Preeda Chaimahawan **Co–advisor:** Assistant Professor Dr. Nattapong

Damrongwiriyapap, Assistant Professor Dr. Somboon Shaingchin

Keywords: Bearing Wall, Precast Wall Panel, Lateral Loading

ABSTRACT

The objective of this research is to study of Precast Bearing Wall Behavior specially small residential building construction under lateral loading. For the Tested specimen in Laboratory compared with Analyze Model used in Finite Element Program. The tested connection is designed for gravity load in Thailand. The 2 specimen composed of $\frac{3}{4}$ scaled reinforced concrete wall are reinforced concrete wall specimen and precast concrete wall specimen. The tested results under reversed cyclic loading reveal that force–displacement relationship and maximum force for Precast wall panel and Reinforced wall are similar. Crack behavior of Precast concrete wall is occur at dowel connection with plate while crack of Reinforced concrete wall is 0.50 metres long at 0.50 metres high form footing.

The nonlinear finite element analysis was applied to simulate the behavior of the two specimens. The FEM is construction with the 0.20x0.20 metre element size and 0.10x0.10 metre element size. The FEM shows good comparison with test results in terms of Force–displacement relations, hysteretic loops, cracking process and the failure mode of the tested specimens. The 0.10x0.10 metre element size model give more clearly result than the 0.20x0.20 metre element size. The FEM analysis also illustrates the flow of force in wall and footing.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
ขอบเขตของการวิจัย	7
นิยามศัพท์เฉพาะ	7
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย	8
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
แผ่นดินไหว	10
ข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อป้องกันแผ่นดินไหว	17
ระบบชั้นส่วนหล่อสำเร็จผนังรับแรง	29
ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	35
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
3 วิธีดำเนินการวิจัย	61
ตัวอย่างทดสอบ	61
การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	64
การทดสอบระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง	70
ผลการทดสอบ	74
เปรียบเทียบผลการทดสอบชั้นส่วนผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จกับผนังคอนกรีต หล่อในที่	86
ตรวจสอบการหลุดออกของฐานรากของผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) และผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC)	89

สารบัญ

บทที่	หน้า
4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ไร้เชิงเส้น.....	90
แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC)	
และชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC).....	90
ผลการวิเคราะห์	96
5 บทสรุป	106
สรุปผลการวิจัย	106
ข้อเสนอแนะ	107
บรรณานุกรม	108
ประวัติผู้วิจัย	114



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงการคำนวณขนาดแผ่นดินไหวชนิดต่าง ๆ	12
2	แสดงอันดับความรุนแรงแผ่นดินไหวตามมาตรเมอร์แคลลี (MM)	13
3	แสดงตัวคูณเกี่ยวกับการใช้อาคาร (I)	26
4	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ (K)	26
5	แสดงสัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติระหว่างอาคารและชั้นดิน (S) ..	28
6	แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม	64
7	แสดงเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ตัว	73
8	แสดงจำนวนรอบ และขนาดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบ	74
9	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบชิ้นส่วนผนังคอนกรีตหล่อในที่	88
10	แสดงสรุปผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	101



สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 แสดงโครงการบ้านเอื้ออาทร บ้านเดี่ยว 2 ชั้นระบบคาน-เสาสำเร็จ จังหวัดสุรินทร์	2
2 แสดงโครงการบ้านเอื้ออาทร อาคารที่พักอาศัยสูง 5 ชั้น ระบบคานสำเร็จ เสาหล่อในที่ ตาบลหนองหอย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่.....	3
3 แสดงตัวอย่างอาคารระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูปรับแรง (Bearing wall) ในต่างประเทศ.....	4
4 แสดงเทคโนโลยีการก่อสร้างระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับแรงของบริษัท พุกษา เร็ยเอสเตท จำกัด (มหาชน).....	4
5 แสดงโครงการบ้านเอื้ออาทร อาคารที่พักอาศัยสูง 5 ชั้น ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูป ผนังรับแรง เขตบึงกุ่ม กรุงเทพฯ.....	5
6 แสดงการส่งถ่ายแรงของระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง	6
7 แสดงลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวชนิดต่าง ๆ	11
8 แสดงระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว.....	15
9 แสดงกลุ่มรอยเลื่อนมีพลังพาดผ่านประเทศไทย.....	16
10 แสดงระบบแรงรับในแนวราบ	17
11 แสดงระบบโครงข้อแข็ง (Moment resisting frames).....	18
12 แสดงระบบกำแพงรับแรงเฉือน (Shear walls).....	18
13 แสดงระบบโครงแกว่ง (Braced frames).....	19
14 แสดงระบบโครงสร้างคู่ (Dual systems).....	19
15 แสดงระบบกล่อง (Tube)	20
16 แสดงความไม่สม่ำเสมอของผังอาคาร.....	21
17 แสดงความไม่สม่ำเสมอในแนวตั้งของผังอาคาร	22
18 แสดงสมมุติฐานการรับน้ำหนักของผนังคอนกรีตสำเร็จในขณะถอดแบบ	29
19 แสดงสมมุติฐานการรับน้ำหนักของผนังคอนกรีตสำเร็จในขณะยกและขนย้าย	30
20 แสดงสมมุติฐานของผนังในขณะรับน้ำหนักใช้งาน และรายละเอียดการเสริมเหล็ก ภายในในกรณีผนังแถวริม ซึ่งต้องรับพื้นเพียงด้านเดียว ทำให้ผนังดังกล่าว ต้องรับโมเมนต์	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
21	แสดงการออกแบบกำแพงที่รับโมเมนต์และแรงตามแนวแกนพร้อมกัน.....	32
22	แสดงรายละเอียดของจุดต่อระหว่างผนังในแนวตั้งกับพื้น.....	33
23	แสดงแปลนอาคารสูงที่ใช้ระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรับแรง.....	34
24	แสดงแปลนบ้าน 2 ชั้น ที่ใช้ระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูปรับแรงระเบียบวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์.....	34
25	แสดงรูปแบบจุดต่อระหว่างกำแพงต่อกำแพงสำเร็จในแนวตั้ง.....	38
26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของชั้นทดสอบ กำแพง.....	39
27	แสดง Seven-story large panel building and its floor plan.....	40
28	แสดง Hysteresis diagram of the large panel building.....	40
29	แสดง Example Graphic Files Generated by.....	42
30	แสดง Basic Element Unit.....	43
31	แสดง Hysteresis Loops of Single Nail Connection Predicted by LigheFrame 3D Finite-Element Program versus Experimental Result (Eleven Cycles).....	43
32	แสดง Static Stress-strain curve of UHSC.....	44
33	แสดง UHSC Panel 1- Before Explosion.....	45
34	แสดง UHSC Panel 2 After Explosion.....	45
35	แสดง Panel 3 After Explosion.....	46
36	แสดง NSC Panel 4 - After Explosion.....	46
37	แสดง (b) Photograph of Specimen (image courtesy of the authors); and (c) Test Setup.....	47
38	แสดง Analytical Modeling.....	48
39	แสดง Mitigation mechanism of metallic foam as sacrificial layer and Idealized blast pressure and transmitted pressure.....	49
40	แสดง Slab and aluminium foam deformation Event 4, 2009.....	50
41	แสดง 75 mm aluminium foam.....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
42 แสดง Test set up for cyclic loading of partially grouted reinforced masonry wall...	52
43 แสดง Cracking patterns at 0.75% drift in the experiment and the FE model.....	52
44 แสดง Meshing, loading and boundary condition of wall panels and connection.....	53
45 แสดง Prying action of the steel angle anchors flange in experimental testing and analytical modeling (mm).....	54
46 แสดง (a) Shear wall reinforcement detail; (b) Shear wall finite element model; (c) Comparison of wall response with and without anchor.....	55
47 แสดง RC stocky wall detailing model with rebar connector of various size	56
48 แสดง Graph of stress (S_x) versus strain (E_x) of RC stocky wall panel for model 1, 2, 3 and 4.....	56
49 แสดง Details of tested precast specimen.....	57
50 แสดง Failure modes of tested specimens	58
51 แสดง Comparison of the curves.....	58
52 แสดงตัวอย่างชั้นทดสอบชั้นส่วนสำเร็จผนังรับแรง	61
53 แสดงการเตรียมชั้นทดสอบในเหมือนกับการทำงานจริง	62
54 แสดงรายละเอียดจุดต่อระหว่างผนังรับแรงชั้นล่างและชั้นบน โดยใช้การเชื่อมระหว่าง แผ่นเหล็กกับเหล็กเดือย.....	63
55 แสดงลักษณะการเชื่อมแผ่นเหล็กที่ฝังในผนัง	63
56 แสดงการเตรียมเหล็กเสริมในผนังคอนกรีตสำเร็จรูปและผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก ..	65
57 แสดงการเตรียมเหล็กเสริมในฐานผนังคอนกรีตสำเร็จรูป.....	65
58 แสดงการติดตั้งแถวความเครียดที่ผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ	66
59 แสดงการเทคอนกรีตทำตัวอย่างส่วนผนังคอนกรีต	67
60 แสดงการเทคอนกรีตฐาน	68
61 แสดงผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Wall).....	69
62 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	70
63 แสดงภาพถ่ายการติดตั้งชั้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ	71

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
64	แสดงแรงกระทำแบบวัฏจักร ตาม ACI.....	71
65	แสดงเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า.....	72
66	แสดงเริ่มต้นให้แรงกระทำด้านข้าง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.00%.....	75
67	แสดงถึงการไม่เกิดรอยร้าวใด ๆ ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.10% Cycle ที่ 1.....	75
68	แสดงถึงการไม่เกิดรอยร้าวใด ๆ ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.15% Cycle ที่ 6.....	76
69	แสดงถึงการเริ่มเกิดรอยร้าวขึ้นที่ส่วนผนังกับฐาน ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.20% Cycle ที่ 7.....	76
70	แสดงรอยร้าวขึ้นที่ส่วนผนังกับฐานขยายตัวเห็นชัดเจน ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.30% Cycle ที่ 10.....	77
71	แสดงรอยร้าวขึ้นที่ส่วนผนังกับฐานขยายตัวเห็นชัดเจน ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.45% Cycle ที่ 13.....	77
72	แสดงการสังเกตเด่นชัดในแนวนอน บริเวณสูง 0.50 เมตร ยาว 0.50 เมตร ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.65% Cycle ที่ 16.....	78
73	แสดงรอยร้าวเพิ่มจากรอยเดิมอีก 3-4 เซนติเมตร ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.95% Cycle ที่ 19.....	78
74	แสดงในฝั่งตรงกันข้าม บริเวณ 0.50 เมตร ตรงข้ามกับรอยร้าวเดิม กลายเป็น รอยร้าวในแนวทแยงตัดกันทั้ง 2 ด้าน ที่ Drift ratio เท่ากับ 1.35% ด้วยแรง 40.26 KN Cycle ที่ 22.....	79
75	แสดงรูปแบบการวิบัติสุดท้าย (Final) ของขั้นตอนผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก หล่อในที่ (ขยาย Crack)	79
76	แสดงรูปแบบการวิบัติของขั้นตอนผนังคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Final).....	80
77	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Reinforce Concrete Wall).....	81
78	แสดงการเริ่มต้นเริ่มให้แรงกระทำด้านข้าง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.00%.....	82
79	แสดงการเริ่มต้นเริ่มให้แรงกระทำด้านข้าง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.10% Cycle ที่ 1...	82
80	แสดงการเริ่มต้นเริ่มให้แรงกระทำด้านข้าง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.15% Cycle ที่ 4 ..	83

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
81	แสดงการพบรอยแตกร้าวแผ่นเหล็กรอยต่อ ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.20% Cycle ที่ 7..	83
82	แสดงรอยแตกร้าวมีจำนวนเพิ่มบริเวณแผ่นเหล็กรอยต่อ ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.30% Cycle ที่ 10	84
83	แสดงรอยร้าวเกิดในแผ่นเหล็ก ทั้ง 2 ด้านของผนัง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.45% Cycle ที่ 13	84
84	แสดงรอยแตกร้าวที่แผ่นเหล็กยาวเพิ่มขึ้น และมากขึ้น ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.65% Cycle ที่ 18	85
85	แสดงรูปแบบการวิบัติของชิ้นทดสอบผนังคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จ	85
86	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Precast Concrete Wall) กับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์	86
87	แสดงพฤติกรรมการเกิดรอยร้าว	87
88	แสดงการเปรียบเทียบแรงกระทำ และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบผนัง RC และ PC	89
89	แสดงตรวจสอบการหลุดออกจากฐานของผนัง	89
90	แสดงแบบจำลองการรับแรงอัด-แรงดึง สำหรับความเค้นตั้งฉากที่ขนานและตั้งฉากกับรอยร้าว	92
91	แสดงแบบจำลองการถ่ายเทความเค้นเฉือน	93
92	แสดงแบบจำลองเหล็กเสริม	93
93	แสดงความเครียดที่ใช้ในการกำหนดลักษณะการวิบัติ	94
94	แสดงแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับชิ้นทดสอบผนังคอนกรีต 0.20 x 0.20 เมตร .	95
95	แสดงแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับชิ้นทดสอบผนังคอนกรีต 0.10 x 0.10 เมตร.	96
96	แสดงพฤติกรรมการแอ่นตัวสำหรับชิ้นทดสอบ RC	97
97	แสดงลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏสำหรับชิ้นทดสอบ RC	97
98	แสดงเปรียบเทียบพฤติกรรมการแอ่นตัว และลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วย FEM กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผนัง RC...	98
99	แสดงพฤติกรรมการแอ่นตัวสำหรับชิ้นทดสอบ PC	99

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
100	แสดงลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏสำหรับชั้นทดสอบ PC	99
101	เปรียบเทียบพฤติกรรมการแอ่นตัว และลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏระหว่าง ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผนัง PC	100
102	แสดงเปรียบเทียบผลความสัมพันธ์แรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ระหว่างผลการทดสอบ และ FEM ชั้นทดสอบ RC	100
103	แสดงเปรียบเทียบผลความสัมพันธ์แรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ระหว่างผลการทดสอบ และ FEM ชั้นทดสอบ PC	101
104	แสดงความเค้นอัดหลัก (Principle compressive stress) ภายในชั้นทดสอบ ผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) เมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มขึ้น	104
105	แสดงความเค้นอัดหลัก (Principle compressive stress) ภายในชั้นทดสอบ ผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) เมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มขึ้น	105



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการก่อสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast concrete construction) หมายถึง ระบบการก่อสร้างของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีการหล่อชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น คาน เสา ผนัง และอื่น ๆ ขึ้นมาก่อน แล้วค่อยนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างในภายหลัง ซึ่งการหล่อชิ้นส่วนต่าง ๆ นั้น มีทั้งการหล่อในพื้นที่ก่อสร้าง (Site cast) และการหล่อในโรงงาน (Plant cast) ระบบการก่อสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปนี้ ถูกใช้ครั้งแรกในประเทศอังกฤษ เมื่อปี ค.ศ.1878 สำหรับการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยขนาดเล็ก ต่อมาภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ความต้องการที่พักอาศัยมีอย่างมากมาย จึงเป็นที่นิยมและช่วยทำให้การก่อสร้างจำนวนมาก ๆ มีมาตรฐานมากยิ่งขึ้น (เฉลิมชัย วัฒนล้ำเลิศ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, 2551, สืบออนไลน์)

ในประเทศไทย ได้เริ่มใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปครั้งแรก โดยบริษัท ซีคอน จำกัด ได้พัฒนาระบบการก่อสร้างของตนเอง เรียกว่า ระบบซีคอน ในช่วงปี พ.ศ. 2531-2537 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของการก่อสร้างที่อยู่อาศัยจำนวนมาก ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปจึงเริ่มมีบทบาทมากขึ้น ในปี พ.ศ. 2535 มีบริษัทผู้ประกอบการบ้านจัดสรรจำนวนมาก นำเอาระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดผนังรับน้ำหนัก มาใช้ในการพัฒนารูปแบบบ้านของตนเอง เช่น โครงการบ้านสวนธน ของบริษัท แลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ จำกัด และโครงการอื่น ๆ อีกจำนวนมากของบริษัท โรมอนแลนด์ จำกัด บริษัท ควอลิตี้เฮ้าส์ จำกัด บริษัท เอเชียนพร็อพเพอร์ตี้ จำกัด และบริษัท พฤษภา เรยลเอสเตท จำกัด (มหาชน) ในระบบนี้ ผนังจะเป็นโครงสร้างหลักในการรับน้ำหนักของอาคาร โดยไม่มีเสาและคานเป็นส่วนประกอบ ซึ่งผนังดังกล่าวทำหน้าที่กันห้องไปในตัวด้วย ระบบผนังรับน้ำหนัก นอกจากจะช่วยย่นระยะเวลาการก่อสร้างในการหล่อเสา คาน และก่อผนังแล้ว ยังสามารถควบคุมคุณภาพได้ เพราะชิ้นส่วนคอนกรีตสามารถผลิตได้ในโรงงาน (เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย และคณะ, 2551)

ปัจจุบันวงการก่อสร้างในประเทศไทย ส่วนใหญ่ใช้ระบบการก่อสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เพื่อลดต้นทุน และขั้นตอนการทำงาน แรง ระยะเวลาก่อสร้าง งานมีคุณภาพสูง เนื่องจากมีการควบคุมคุณภาพจากโรงงานผลิต และการออกแบบเป็นคอนกรีตอัดแรงจะทำให้สามารถลดขนาดหน้าตัด และจำนวนชิ้นส่วนโครงสร้างได้ การติดตั้งทำงานทำได้รวดเร็ว ใช้เวลาน้อย เช่นเดียวกับธุรกิจการก่อสร้างที่อยู่อาศัย เช่น บ้านพักอาศัย และอาคารพาณิชย์ 2-3 ชั้น

ในระดับภูมิภาค ผู้ประกอบการได้นำระบบการก่อสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ แทนระบบการเทคอนกรีตในที่ (Cast in place) เนื่องจากสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วกว่า ลดค่าใช้จ่าย ใช้แรงงานน้อย สามารถควบคุมคุณภาพงานได้ ส่งงานได้ทันระยะเวลาที่กำหนด ทำให้งานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น โครงการบ้านเอื้ออาทรบ้านเดี่ยว 2 ชั้นระบบคาน-เสาสำเร็จที่จังหวัดสุรินทร์ (ภาพ 1) โครงการบ้านเอื้ออาทร อาคารที่พักอาศัยสูง 5 ชั้น ระบบคานสำเร็จเสาเทในที่ ตำบลหนองหอย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ (ภาพ 2)



ภาพ 1 แสดงโครงการบ้านเอื้ออาทร บ้านเดี่ยว 2 ชั้นระบบคาน-เสาสำเร็จ
จังหวัดสุรินทร์



**ภาพ 2 แสดงโครงการบ้านเอื้ออาทร อาคารที่พักอาศัยสูง 5 ชั้น ระบบคานสำเร็จ
เสาสล่อในที่ ตำบลหนองหอย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่**

การก่อสร้างอาคารด้วยระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับแรง (Bearing wall) มีการพัฒนาอย่างยาวนาน ในต่างประเทศ ดังแสดงในภาพ 3 โดยสามารถใช้สำหรับก่อสร้างอาคารสูงได้ โดยอาคารดังกล่าวถูกออกแบบใช้ตัวผนังเป็นทั้งตัวกันห้อง สามารถต้านทานแรงกระทำในแนวตั้งต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับอาคาร ทั้งจากแรงลม น้ำหนักบรรทุกจร น้ำหนักบรรทุกตายตัว แผ่นดินไหว ฯลฯ ความแตกต่างกันนี้ ทำให้การออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ ตลอดจนขั้นตอนการก่อสร้าง มีความแตกต่างจากระบบโครงสร้างเสาคาน ปัจจุบันมีบริษัทผู้ประกอบการบ้านจัดสรรจำนวนมาก นำเอาเทคโนโลยีการก่อสร้างระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง มาใช้ในการพัฒนารูปแบบบ้านของตนเอง ในระบบนี้ผนังจะเป็นโครงสร้างหลักในการรับน้ำหนักของอาคาร โดยไม่มีเสาและคานเป็นส่วนประกอบ ซึ่งผนังดังกล่าวยังทำหน้าที่กันห้องไปในตัวด้วย ระบบผนังรับแรงนี้ นอกจากช่วยย่นระยะเวลาการก่อสร้างในการหล่อเสา คาน และก่อผนังแล้ว ยังสามารถควบคุมคุณภาพได้ เพราะชั้นส่วนคอนกรีตสามารถผลิตได้ในโรงงาน (เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย และสถาพร โภคา, 2555, สื่อออนไลน์) ปัจจุบัน เช่น บริษัท พฤษภา เรียวเอสเตท จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นผู้นำในระบบการก่อสร้างบ้านพักอาศัย ด้วยระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับแรง ได้ใช้เทคโนโลยีการก่อสร้างสมัยใหม่ ใช้เครื่องจักรคุณภาพสูงจากต่างประเทศ ในการหล่อชั้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น ผนัง ผนังก่อ รื้อบ้าน เป็นต้น ก่อนนำไปติดตั้งในสถานที่ก่อสร้าง (ดังภาพ 4 และภาพ 5)



ภาพ 3 แสดงตัวอย่างอาคารระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูปรับแรง (Bearing wall)
ในต่างประเทศ

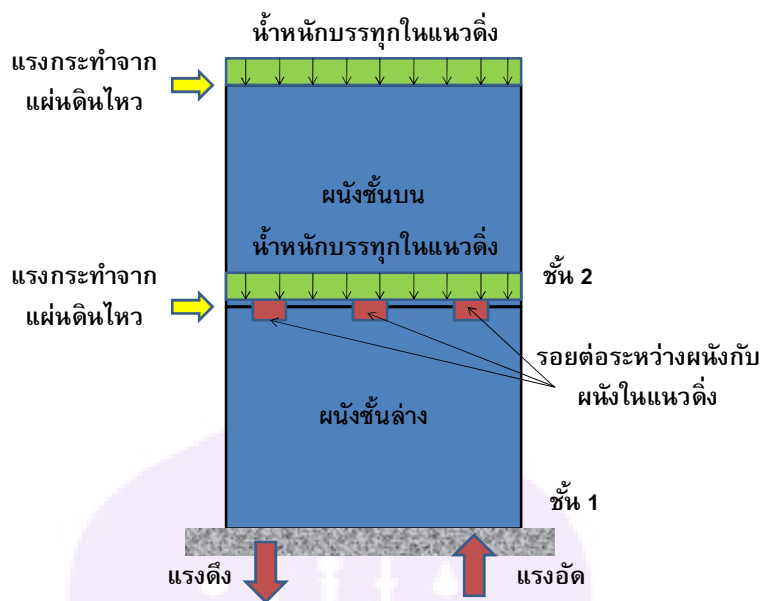


ภาพ 4 แสดงเทคโนโลยีการก่อสร้างระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับแรง
ของบริษัท พุกษา เร็ลเอสเตท จำกัด (มหาชน)



**ภาพ 5 แสดงโครงการบ้านเอื้ออาทรอาคารที่พักอาศัยสูง 5 ชั้น
ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับแรง เขตบึงกุ่ม กรุงเทพฯ**

สำหรับอาคารที่ก่อสร้างด้วยระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับแรง ที่ค้ำเนื่องถึงแรงกระทำทางข้าง จากลม และแผ่นดินไหวในประเทศไทยนั้น ได้นำมาใช้ในการก่อสร้างอาคาร 30 ชั้น โดย บริษัท พฤษภา เรียวเอสเตท จำกัด (มหาชน) โดยใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ และวิศวกรจากต่างประเทศ เป็นผู้ออกแบบ และมีวิศวกรในประเทศไทยเป็นที่ปรึกษาเพื่อเรียนรู้ และถ่ายทอดเทคโนโลยี (ทรงพล จารุวิศิษฏ์ และประยุทธ์ สมานรัตนเสถียร, 2555) จึงทำให้เกิดแนวทางการนำไปพัฒนาและวิจัย สำหรับการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยขนาดเล็ก 2 หรือ 3 ชั้น ที่ต้องการก่อสร้างด้วยระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับแรง ให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอาคารที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ หรือบริเวณที่อยู่ใกล้รอยเลื่อนที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี เชียงราย เชียงใหม่ พะเยาแพร่ น่าน ลำปาง ลำพูน แม่ฮ่องสอน ตาก ซึ่งเป็นจังหวัดที่กระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นที่ที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550 ให้วิศวกรต้องออกแบบอาคารให้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว และจะต้องมีรายละเอียดการเสริมเหล็กเป็นพิเศษ เพื่อให้สามารถต้านทานแรงทางด้านข้างได้ และทำให้โครงสร้างมีความเหนียวอย่างเหมาะสม (ปรีดา ไชยมหาวัน และชยานนท์ ทรรษภิญโญ, 2557)



ภาพ 6 แสดงการส่งถ่ายแรงของระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง

ด้วยเหตุนี้ หากมีการพัฒนาและวิจัยเกี่ยวกับระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง ให้สามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้าง แรงจากแผ่นดินไหว มีพฤติกรรมความเหนียวเพียงพอ ต่อแผ่นดินไหวขนาดเล็ก ถึงขนาดกลาง สามารถสลายพลังงานได้ดี มีจุดต่อระหว่างผนัง ต่อผนังในแนวตั้ง ที่สามารถส่งถ่ายแรงอัด แรงดึง และโมเมนต์ระหว่างผนังชั้นบน และชั้นล่าง ได้อย่างสมบูรณ์ ก่อสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว ช่วยลดต้นทุนการผลิตจากแรงงานที่มีราคาแพงขึ้น ลดระยะเวลาในการก่อสร้าง วัสดุก่อสร้างที่มีคุณภาพได้รับการควบคุมมาจากโรงงานผลิต วัสดุเหลือใช้จากสถานที่ก่อสร้าง ประหยัดทรัพยากร ช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เกิดความปลอดภัย แก่ชีวิตและทรัพย์สินแก่ผู้พักอาศัย ช่วยลดภัยพิบัติจากแผ่นดินไหวได้ จะทำให้ระบบชั้นส่วน คอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง สามารถตอบโจทย์สำหรับการก่อสร้างอาคารพักอาศัย ในปัจจุบันได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาระบบชั้นส่วนหล่อสำเร็จผนังรับแรงต้านทาน แผ่นดินไหว เพื่อศึกษาพฤติกรรมระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง สำหรับการก่อสร้าง อาคารพักอาศัยขนาดเล็ก ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง จากการทดสอบขึ้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ ศึกษารายละเอียดการเสริมเหล็กภายในที่เหมาะสม สำหรับระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ผนังรับแรง และศึกษารายละเอียดของจุดต่อระหว่างผนังชั้นบนกับชั้นล่าง ระบบชั้นส่วนคอนกรีต สำเร็จรูปผนังรับแรงที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย ซึ่งผลการวิจัยที่ได้จะช่วยให้เกิดการพัฒนาระบบก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพ เกิดองค์ความรู้ใหม่เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบ และใช้สำหรับการเรียนการสอนในรายวิชาการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก การออกแบบอาคาร

โครงการทางวิศวกรรมโยธา และใช้สำหรับศึกษา หรือต่อยอดสำหรับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษารายละเอียดการเสริมเหล็กเสริมที่จุดต่อ สำหรับผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ ที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง ที่มีในประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมผนังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งหล่อสำเร็จ สำหรับการก่อสร้างอาคารพักอาศัยขนาดเล็ก ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง จากการทดสอบขึ้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ
3. เพื่อศึกษารายละเอียดการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองโครงสร้างผนังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งหล่อสำเร็จ

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง ที่ใช้สำหรับอาคารบ้านพักอาศัย 2 ชั้น เท่านั้น
2. ทดสอบชั้นส่วนผนังคอนกรีตสำเร็จรูปในห้องปฏิบัติการ โดยจำลองแรงกระทำทางข้าง เน้นแรงแบบวัฏจักร
3. ศึกษาพฤติกรรมรอยร้าว แรงกระทำกับการเคลื่อนตัวของผนังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งหล่อสำเร็จ และผนังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งหล่อในที่
4. ศึกษารายละเอียดการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการจำลองโครงสร้าง เปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

นิยามศัพท์เฉพาะ

ระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง หมายถึง การออกแบบระบบชั้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ สำหรับอาคารบ้านพักอาศัย 2 ชั้น ที่ต้องคำนึงถึงการรับน้ำหนัก 3 ชั้นตอนได้แก่ ขณะถอดแบบ ขณะยกและขนย้าย และขณะรับน้ำหนักจริง

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หมายถึง การนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษารายละเอียดการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่เชิงเส้น WCOMD (Maekawa, 1998) ซึ่งพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยแห่งโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ในการประเมินรูปแบบการวิบัติ ตำแหน่งการวิบัติ และใช้การทำนายกำลังต้านทานแรงแนวราบด้วย

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. ได้ข้อมูลจากผลการทดสอบพฤติกรรมผนังรับน้ำหนักบรทุก ในแนวตั้งหล่อสำเร็จ สำหรับการก่อสร้างอาคารพักอาศัยขนาดเล็ก ภายใต้แรงกระทำทางข้าง เช่น แรงแผ่นดินไหว
2. ได้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จากการจำลองโครงสร้างผนังรับน้ำหนักบรทุกในแนวตั้งหล่อสำเร็จ
3. ผลการวิจัยที่ได้เป็นองค์ความรู้ใหม่ สำหรับการพัฒนาระบบก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบระบบผนังรับน้ำหนักบรทุกในแนวตั้งหล่อสำเร็จ ที่สามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้ และมีความปลอดภัย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่อง ระบบขึ้นส่วนหล่อสำเร็จผนังรับแรงต้านทานแผ่นดินไหว ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำเสนอตามลำดับดังต่อไปนี้

1. แผ่นดินไหว
 - 1.1 การเกิดแผ่นดินไหว
 - 1.2 ลักษณะของแผ่นดินไหว
 - 1.3 มาตรฐานวัดแผ่นดินไหว
 - 1.4 แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว
 - 1.5 โครงสร้างการรับแรงแผ่นดินไหว
2. ข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อป้องกันแผ่นดินไหว
3. ระบบขึ้นส่วนหล่อสำเร็จผนังรับแรง
 - 3.1 แนวทางการออกแบบและเสริมเหล็กในระบบขึ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ
 - 3.2 รอยต่อระหว่างผนังชั้นล่างกับผนังชั้นบน
 - 3.3 พฤติกรรมโครงสร้างอาคารระบบผนังสำเร็จรูป
4. เปรียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
 - 4.1 หลักการของไฟไนต์อีลิเมนต์
 - 4.2 ชนิดของอีลิเมนต์
 - 4.3 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
 - 4.4 การวิเคราะห์โดยกระบวนการไฟไนต์อีลิเมนต์
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แผ่นดินไหว

ปัจจุบันความตื่นตัวในการศึกษาวิชาการแผ่นดินไหว (Seismology) เป็นไปอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศและต่างประเทศ และยังเป็นที่น่าสนใจของบรรดาวิศวกร เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้าง ให้มีความปลอดภัยเพิ่มขึ้น ความรู้พื้นฐานด้านแผ่นดินไหวที่วิศวกรควรทำความเข้าใจ ได้แก่

สาเหตุการเกิดแผ่นดินไหว

ทฤษฎีการเกิดแผ่นดินไหว อาจมีหลายทฤษฎี มีทฤษฎีที่สำคัญ 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีการยืด-หด (The Elastic-rebound theory) ตั้งขึ้นโดยนักธรณีวิทยาชาวอเมริกัน ชื่อ H.F.Reid เมื่อปี พ.ศ. 2453 โดยอธิบายว่า พลังงานที่ทำให้เกิดแผ่นดินไหว เกิดจากพลังงานความเครียด เนื่องจากการยืดหยุ่นของหินซึ่งเปลี่ยนรูปร่างอย่างช้า ๆ คือ หินบริเวณรอยเลื่อน (Fault) จะสะสมความเครียด (Strain) เอาไว้เรื่อย ๆ จนถึงขีดจำกัดของความยืดหยุ่นจะหักโดยทันที และพลังงานจากการยืดหยุ่นที่สะสมอยู่จำนวนมาก ทำให้เกิดแผ่นดินไหว และทฤษฎีแผ่นเปลือกโลกเลื่อน (The Plate tectonic theory) โดย Alfred Wegener นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน โดยกล่าวว่า การเกิดแผ่นดินไหวเป็นผลมาจากการเกิดพื้นมหาสมุทรใหม่ และค่อย ๆ ดันแผ่นพื้นทวีปให้ห่างกัน โดยใช้เวลานับล้าน ๆ ปี จึงสามารถทำให้ทวีปแยกตัวจากกันได้ พลังงานที่เกิดจากการกดดันนี้ จะถูกปลดปล่อยมาในรูปของการสั่นไหว ตามแนวรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกที่เป็นพื้นมหาสมุทร ชนกับขอบของแผ่นเปลือกโลกที่เป็นทวีป (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, ลีออนไลน์) ผลกระทบของอาการสั่นสะเทือน สามารถสรุปสาเหตุการเกิดแผ่นดินไหว ได้ดังนี้ (บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2556)

1. สาเหตุเกิดภายในโลก ได้แก่ แผ่นดินไหวเกิดจากรอยเลื่อน ระเบิดใต้ดิน การไหลหมุนเวียนของน้ำใต้ดิน การเคลื่อนตัวของหินหลอมละลาย การเปลี่ยนแปลงสถานะใต้ดิน การทำเหมือง การยุบตัวใต้ดิน
2. สาเหตุเกิดภายนอกโลก ได้แก่ ลม ความดันบรรยากาศ คลื่นในทะเล น้ำขึ้น หรือลง การชนกันของอุกกาบาต ความสั่นสะเทือนจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น จรวด ระเบิด เป็นต้น
3. สาเหตุเกิดทั้งภายในและภายนอกโลก ได้แก่ การระเบิดของภูเขาไฟ แผ่นดินถล่ม

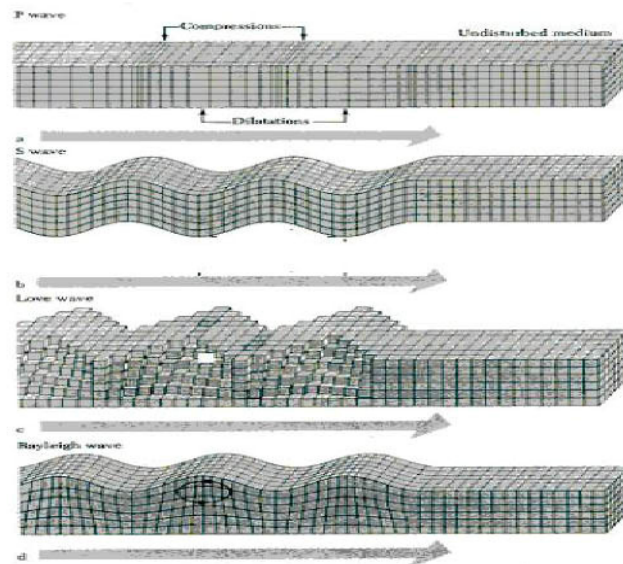
ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว

ความสั่นสะเทือนของพื้นดินนั้น มีลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาคหินหรือดินแบบ 3 มิติ คือ สามารถวัดการเคลื่อนในแนวระนาบของทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก ตะวันตก และแนวตั้ง ทั้งนี้ คลื่นแผ่นดินไหวสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือวัดความสั่นสะเทือน 2 แบบ ได้แก่ แบบวัดความเร็วของอนุภาคดินหรือหิน (Seismograph) ซึ่งสามารถวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวเพื่อกำหนดตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว ขนาดเวลาเกิด ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของโลก ลักษณะของแนวรอยเลื่อน กลไกการเกิดแผ่นดินไหว และแบบวัดอัตราเร่งของพื้นดิน ได้แก่ เครื่องวัดอัตราเร่งของพื้นดิน (Accelerograph) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานด้านวิศวกรรมแผ่นดินไหว ในบริเวณพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว (บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2556)

จากภาพ 7 คลื่นแผ่นดินไหวแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. คลื่นหลัก (Body Wave) เป็นคลื่นที่เดินทางอยู่ภายในโลก ได้แก่ คลื่น P อนุภาคของดินเคลื่อนที่ไปตามแนวแรง และคลื่น S อนุภาคดินเคลื่อนที่ไปตามแนวระนาบ ทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันตก ความยาวช่วงคลื่นหลักอยู่ระหว่าง 0.01–50 วินาที

2. คลื่นผิวพื้น (Surface wave) ได้แก่ คลื่นเลิฟ (Love: LQ) อนุภาคดินเคลื่อนที่ในแนวระนาบ เหมือนการเคลื่อนที่ของงูเสียด และคลื่นเรย์เลห์ (Rayleigh: LR) อนุภาคของดินเคลื่อนที่เหมือนคลื่น P แต่ขณะเดียวกันมีการเคลื่อนตัวแบบย้อนกลับ ความยาวช่วงคลื่นผิวพื้นประมาณ 10–350 วินาที



ภาพ 7 แสดงลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหวชนิดต่าง ๆ

ที่มา: บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2556

มาตรวัดแผ่นดินไหว

มาตราในการวัดแผ่นดินไหว แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. มาตรวัดขนาด (Magnitude) เป็นค่าของพลังงานที่แผ่นดินไหวปลดปล่อยออกมาในแต่ละครั้ง ผู้เสนอแนวคิดเรื่องขนาดของแผ่นดินไหวคนแรก คือ “ริกเตอร์ (C.F. Richter)” ชาวอเมริกัน เมื่อปี พ.ศ. 2473 จึงเรียกว่า “ขนาดแผ่นดินไหวตามมาตรริกเตอร์” มีหลายมาตรา ได้แก่

1.1 มาตรการท้องถิ่น (Local Magnitude: ML) ใช้แสดงขนาดของแผ่นดินไหวในท้องถิ่นที่มีระยะทางไม่เกิน 10 องศา ละติจูด (1200 กิโลเมตร)

1.2 มาตรการคลื่นหลัก (Body-wave Magnitude: MB) ใช้แสดงขนาดของแผ่นดินไหวที่คำนวณจากคลื่นหลัก (คลื่นแรก) โดยทั่วไปใช้กับแผ่นดินไหวไกล ที่มีระยะทางมากกว่า 1200 กิโลเมตร

1.3 มาตรการคลื่นผิวพื้น (Surface-wave Magnitude: MS) ใช้แสดงขนาดของแผ่นดินไหวที่คำนวณจากคลื่นผิวพื้น (คลื่นเลิฟหรือคลื่นเรย์เลห์) โดยทั่วไปใช้กับแผ่นดินไหวไกลที่มีความลึกไม่เกิน 50 กิโลเมตร

1.4 มาตรการขนาดโมเมนต์ (Moment Magnitude: Mw) แสดงถึงปริมาณพลังงานของคลื่นแผ่นดินไหว ได้ดีกว่าขนาดอื่น สามารถวิเคราะห์ได้จากโมเมนต์แผ่นดินไหว (Mo. Seismic Moment) โดยที่ Mo สามารถคำนวณได้หลายวิธี เช่น จากการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหว เพื่อหาผลคูณของการขจัดของรอยเลื่อนเมื่อเกิดแผ่นดินไหว (Fault Displacement) และปริมาณพื้นที่ของรอยเลื่อน (Fault Surface Area) ส่วนใหญ่ขนาดของ Mw ใช้สำหรับกรณีแผ่นดินไหวไกลที่มีขนาดใหญ่

ตาราง 1 แสดงการคำนวณขนาดแผ่นดินไหวชนิดต่าง ๆ

ขนาด	สูตรคำนวณ	คลื่นแผ่นดินไหว	ความยาวช่วงคลื่น (วินาที)	การตรวจวัด
ML	$\log A - \log A_0$	S	0.1-1.0	displacement
MB, mb	$\log (A/T) + Q(h, D)$	p	1.0-5.0	velocity
Ms	$\log A + 1.66 \log D + 2.0$	Surface	20	velocity
Mw	$(2/3 \log M_0) - 10.7$	Surface	> 200	velocity

ที่มา: บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2556

2. มาตรการวัดความรุนแรง (Intensity) วัดได้จากประสบการณ์ที่เกิดขึ้น ขณะเกิดแผ่นดินไหว และหลังเกิดแผ่นดินไหว เช่น ความรู้สึกของผู้คน ลักษณะที่วัตถุสิ่งก่อสร้างสั่นไหว หรือเสียหาย ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่เปลี่ยนแปลง เป็นต้น ความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีด้วยกันหลายมาตรา แต่ที่นิยมใช้ในประเทศไทย ได้แก่ มาตรการเมอร์แคลลี ซึ่งมี 12 อันดับ (MM Scale) เรียงลำดับจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงน้อยที่สุด จนถึงรุนแรงมากที่สุด ดังนี้

ตาราง 2 แสดงอันดับความรุนแรงแผ่นดินไหวตามมาตรเมอร์แคลลี (MM)

อันดับ	ความรุนแรงแผ่นดินไหว
I	ไม่รู้สึกลับไหว ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ
II	รู้สึกบางคน โดยเฉพาะผู้อยู่ชั้นบนของอาคาร สิ่งของแกว่งไกว
III	ผู้อยู่ในอาคารรู้สึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้อยู่ชั้นบนอาคาร แต่ผู้คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึกว่า มีแผ่นดินไหว
IV	ในเวลากลางวัน ผู้คนในอาคารรู้สึกมาก แต่ผู้อยู่นอกอาคารรู้สึกบางคน งาน หน้าต่าง ประตูสั่น ความรู้สึกเหมือนรถบรรทุกชนอาคาร
V	เกือบทุกคนรู้สึก หลายคนตกใจตื่น วัตถุที่ไม่มั่นคงล้มคว่ำ เสา ต้นไม้ แกว่งไกว
VI	ทุกคนรู้สึก เครื่องเรือนเคลื่อน ปล่องไฟแตก เกิดความเสียหายเล็กน้อยกับอาคาร
VII	ทุกคนตกใจวิ่งออกนอกอาคาร อาคารที่ออกแบบดีไม่เสียหาย เสียหายเล็กน้อยถึงปานกลาง กับอาคารสิ่งก่อสร้างธรรมดา เสียหายมากกับอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผู้ชมรู้สึกว่ามี แผ่นดินไหว
VIII	เสียหายเล็กน้อยกับอาคารที่ออกแบบไว้ดี เสียหายมากในอาคารธรรมดา บางส่วนของอาคาร พังทลาย เสียหายอย่างมากในอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผนังอาคารหลุดออกนอกอาคาร ปล่องไฟพัง ดินและทรายพุ่งขึ้นมา
IX	เสียหายมากในอาคารที่ออกแบบไว้ดี โครงสร้างก่อนสร้างบิดเบนจากแนวตั้ง เสียหายอย่างมาก กับอาคาร และบางส่วนพังทลาย ตัวอาคารเคลื่อนจากรูปร่าง พื้นดินแตก ท่อใต้ดินแตกหัก
X	อาคารไม้ที่สร้างไว้อย่างดี เสียหาย โครงสร้างอาคารพังทลาย รางรถไฟบิด พื้นดินแตก แผ่นดินถล่มหลายแห่ง ทรายและโคลนพุ่งจากพื้นดิน
XI	สิ่งก่อสร้างเหลืออยู่เล็กน้อย สะพานถูกทำลาย พื้นดินมีรอยแยกกว้าง ท่อใต้ดินเสียหายหมด รางรถไฟบิดงอมาก
XII	เสียหายทั้งหมด เห็นคลื่นบนพื้นดิน เส้นแนวระดับสายตาศบดเบน วัตถุสิ่งของกระเด็น ในอากาศ

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สื่อออนไลน์; บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2556

3. ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration) เป็นค่าที่มีความสำคัญในการออกแบบเชิงวิศวกรรมของอาคาร ในบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวมีหน่วยเป็นค่าอัตราเร่ง ฟุต/วินาที² หรือเซนติเมตร/วินาที² หรือเป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือแรงโน้มถ่วงของโลก (% ของค่า g) หรือหน่วยเป็น gal (ประมาณ 980 gal เท่ากับ 1 g) ค่า PGA สามารถหาได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือจากการวิเคราะห์ จากคลื่นความสั่นสะเทือนที่ตรวจวัด

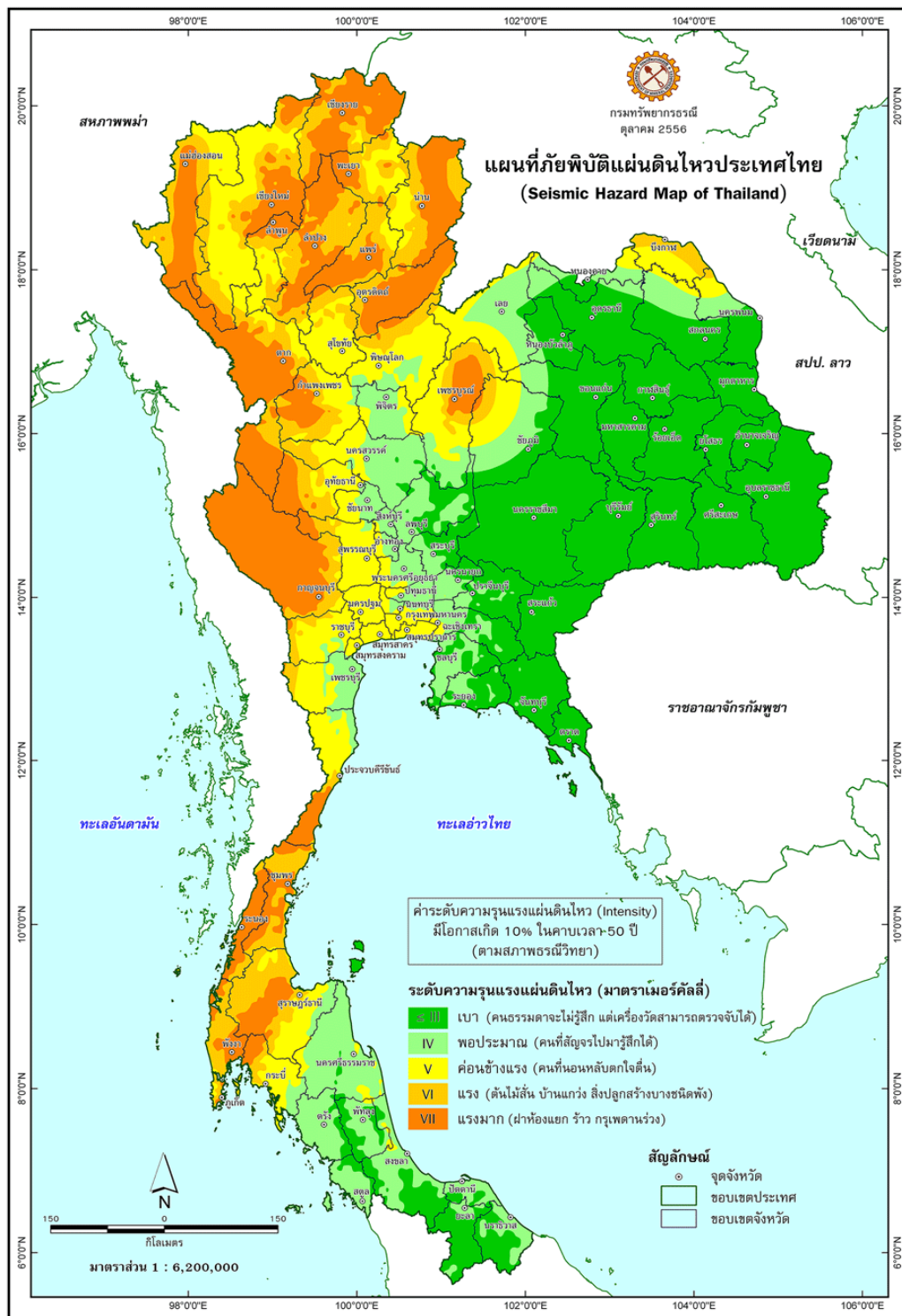
4. พลังงานแผ่นดินไหว (Seismic Energy) สามารถประมาณค่าได้จากขนาด mb และ Ms ด้วยสูตรง่าย ๆ ของ Gutenberg และ Richter ดังนี้

$$\text{Log } E = 5.8 + 2.4 \text{ mb} \text{ หรือ } \text{Log } E = 11.8 + 1.5 \text{ Ms}$$

โดยทั่วไป เมื่อเกิดแผ่นดินไหว ณ ที่แห่งใดแห่งหนึ่ง และส่งพลังงานออกไปรอบทิศทาง พลังงานของความสั่นสะเทือนจะลดทอนลงตามระยะทาง (Attenuation of Ground Motion) ปัจจัยที่ทำให้เกิดการลดทอนของพลังงาน ได้แก่ เส้นทางเดินของคลื่นความสั่นสะเทือน ความลึกของแผ่นดินไหว ทิศทางการวางตัวของรอยเลื่อน และสภาพธรณีวิทยา

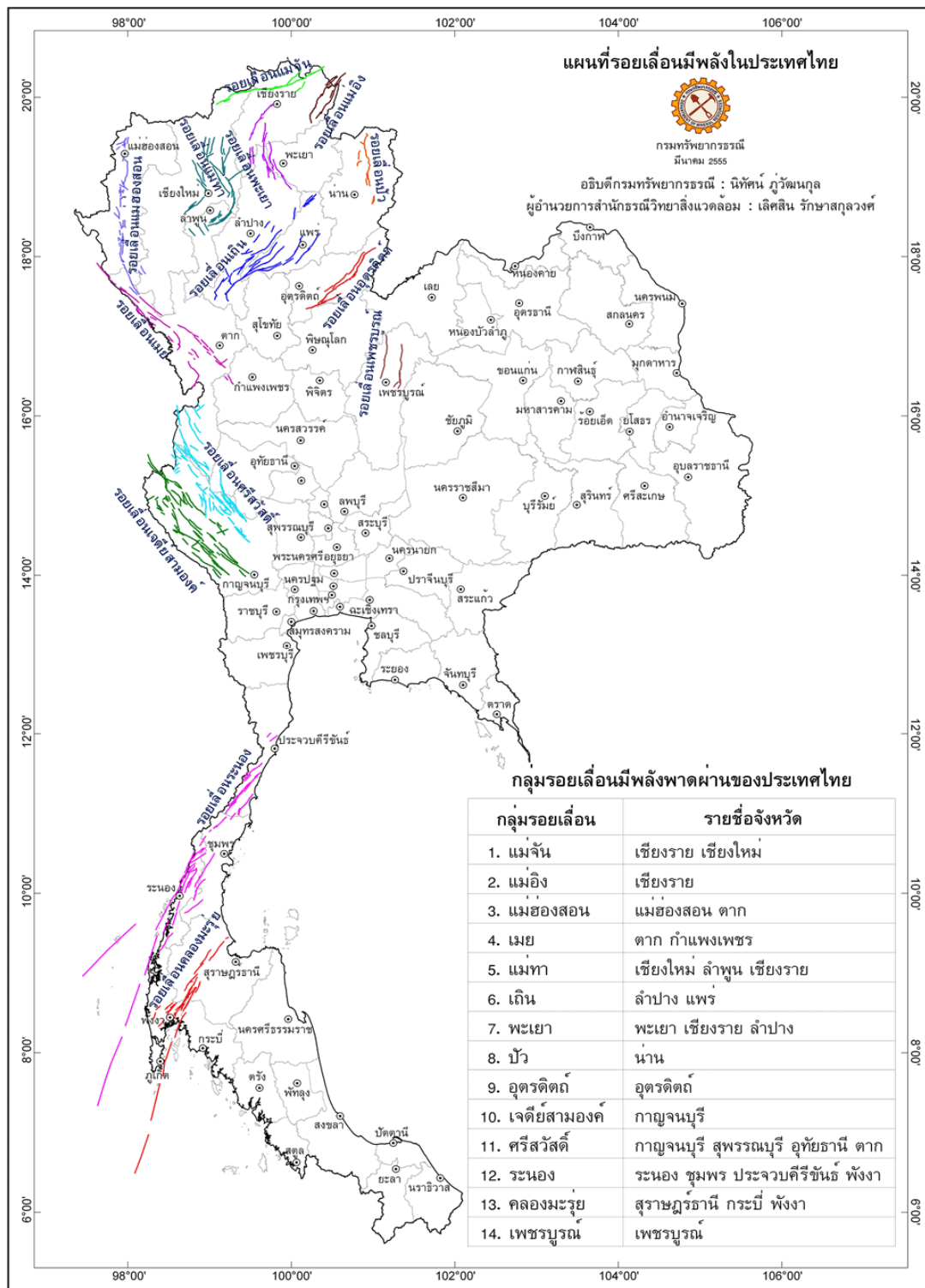
แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว

ประเทศไทยมีความเสี่ยงจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นภายในประเทศเอง และที่เกิดขึ้นจากภายนอกประเทศ แล้วส่งแรงสั่นสะเทือนมาถึงประเทศไทย จากการสำรวจทางธรณีวิทยาพบว่า ประเทศไทยมีกลุ่มรอยเลื่อนที่มีพลังถึง 14 รอยเลื่อน ส่วนใหญ่อยู่ในภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคใต้บางส่วน ส่วนกรุงเทพฯ และปริมณฑล แม้ไม่ได้อยู่ในรอยเลื่อนที่มีพลัง แต่ชั้นใต้ดินกรุงเทพฯ นั้น เป็นดินอ่อน จึงเป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวเช่นกัน นอกจากนี้ บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน อาจจะได้รับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศลาว (ดังภาพ 8 และภาพ 9) (อมร พิมาณมาศ, 2555)



ภาพ 8 แสดงระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว

ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี, 2556



ภาพ 9 แสดงกลุ่มรอยลุ่มน้ำพลังพาดผ่านประเทศไทย

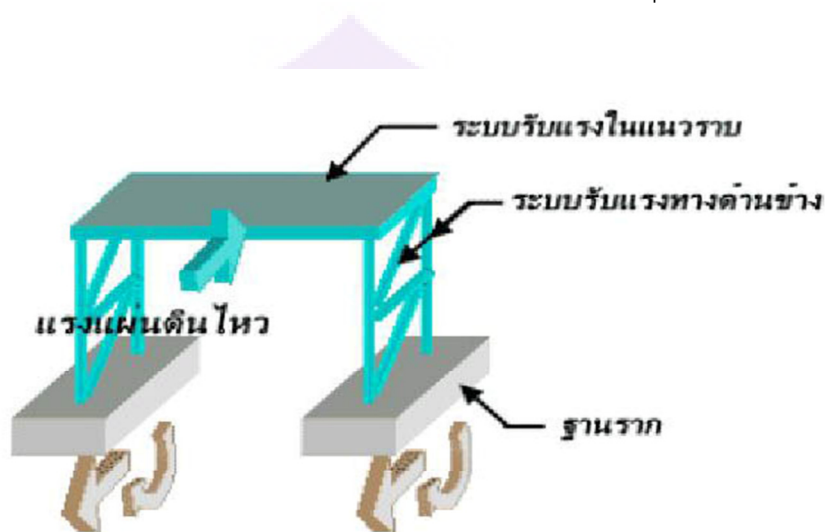
ที่มา: กรมทรัพยากรธรณี, 2555

ข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างอาคารเพื่อป้องกันแผ่นดินไหว

ระบบโครงสร้างการรับแรงแผ่นดินไหว

ระบบโครงสร้างในการรับแรงแผ่นดินไหว สามารถจำแนกออกเป็น 2 ระบบใหญ่ ๆ ดังนี้

1. ระบบรับแรงในแนวราบ (Horizontal resistance system หรือ Diaphragms) เป็นระบบที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงแผ่นดินไหวในแนวราบไปสู่ระบบรับแรงทางด้านข้าง ตัวอย่างของโครงสร้างระบบนี้ ได้แก่ แผ่นพื้น หลังคา และโครงข้อหมุนที่วางตัวในแนวราบ

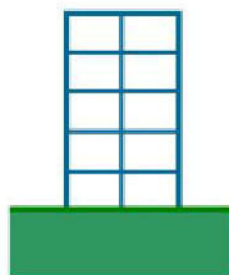


ภาพ 10 แสดงระบบแรงรับในแนวราบ

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สื่่อออนไลน์

2. ระบบรับแรงทางด้านข้าง (Vertical resistance system) เป็นระบบทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงจากระบบรับแรงในแนวราบไปสู่ฐานราก ซึ่งมีอยู่หลายระบบ ได้แก่

2.1 ระบบโครงข้อแข็ง (Moment resisting frames) เป็นระบบรับแรงทางด้านข้างที่อาศัยความแข็งแรงของเสา และคาน ซึ่งมีการยึดติดกันด้วยรอยต่อแบบแข็งแกร่ง (Rigid connections)

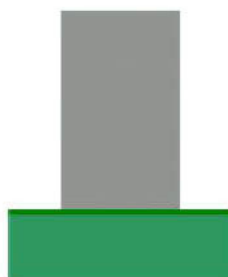


ระบบโครงข้อแข็ง

ภาพ 11 แสดงระบบโครงข้อแข็ง (Moment resisting frames)

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สืบออนไลน์

2.2 ระบบกำแพงรับแรงเฉือน (Shear walls) เป็นระบบที่นำเอาผนัง ปล่องลิฟท์ หรือปล่องบันได มาใช้ในการรับแรงทางด้านข้าง

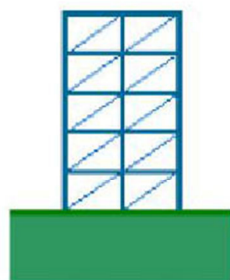


ระบบกำแพงรับแรงเฉือน

ภาพ 12 แสดงระบบกำแพงรับแรงเฉือน (Shear walls)

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สืบออนไลน์

2.3 ระบบโครงแกงแงง (Braced frames) เป็นระบบที่ใช้ค้ำยัน หรือแกงแงงในการรับแรงทางด้านข้าง ซึ่งค้ำยัน หรือแกงแงงที่ใช้มีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น ค้ำยันรูปตัวเอกซ์ ค้ำยันรูปตัววี และค้ำยันรูปตัวเค เป็นต้น

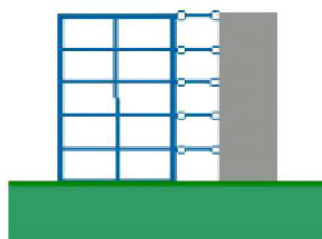


ระบบโครงแกนง

ภาพ 13 แสดงระบบโครงแกนง (Braced frames)

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สื่อบนไลน์

2.4 ระบบโครงสร้างคู่ (Dual systems) เป็นการนำเอาระบบโครงสร้างที่กล่าวข้างต้นมาใช้ร่วมกัน ในการรับแรงทางด้านข้าง เช่น การใช้โครงข้อแข็งร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกนง เป็นต้น

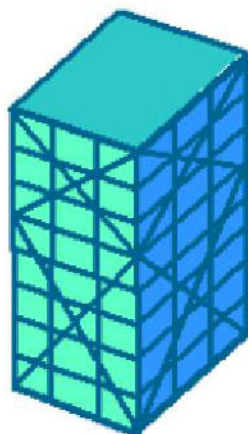


ระบบโครงสร้างคู่

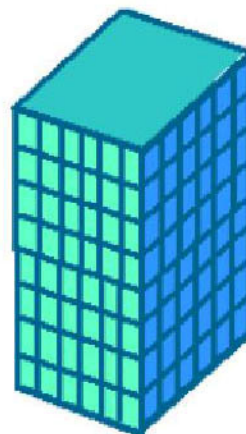
ภาพ 14 แสดงระบบโครงสร้างคู่ (Dual systems)

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สื่อบนไลน์

2.5 ระบบโครงสร้างอื่น ๆ เช่น ระบบกล่อง (Tube) ซึ่งเป็นการออกแบบให้ผนังโดยรอบอาคารมีความแข็ง ทำให้อาคารมีลักษณะคล้ายกับเป็นคานยื่น ที่มีหน้าตัดเป็นท่อกวงหรือกล่องขนาดใหญ่ การทำให้ผนังโดยรอบของอาคารมีความแข็งนี้ สามารถทำได้โดยใช้ตัวยึดทะแยง (Braced tube) หรือวางเสารอบนอกอาคาร ให้เรียงใกล้กัน และเชื่อมด้วยคานขอบที่แข็ง (Framed tube)



ระบบกล่อง (braced tube)



ระบบกล่อง (framed tube)

ภาพ 15 แสดงระบบกล่อง (Tube)

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สื่อออนไลน์

การเลือกรูปแบบโครงสร้าง

โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวที่ดี ควรมีลักษณะต่อไปนี้

1. มีความต่อเนื่อง (Continuity) กล่าวคือ ทางเดินของแรง หรือ Load path จะต้องมีความต่อเนื่อง โดยเริ่มจากตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเนื่อง ลงมาจนถึงดินฐานราก ถ้าทางเดินนี้ถูกตัดขาด หรือมีความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้น โครงสร้างอาจเกิดการวิบัติขึ้นได้

2. มีความสม่ำเสมอ (Regularity) โครงสร้างควรมีความสม่ำเสมอ ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง

2.1 ความสม่ำเสมอในแนวราบ กล่าวคือ ผังของโครงสร้างควรมีความเรียบง่ายและสมมาตร ความไม่สม่ำเสมอในแนวราบทำให้โครงสร้างต้องรับแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเกิดความเข้มข้นของหน่วยแรง (Stress concentration) และแรงบิดกระทำกับโครงสร้าง



ภาพ 16 แสดงความไม่สม่ำเสมอของผังอาคาร

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สืบออนไลน์

2.2 ความสม่ำเสมอในแนวตั้ง โครงสร้างที่ดีควรมีความสม่ำเสมอตลอดความสูง และควรหลีกเลี่ยงความไม่สม่ำเสมอ ดังนี้

- 2.2.1 ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรง
- 2.2.2 ความไม่สม่ำเสมอของความสูงระหว่างชั้น
- 2.2.3 ความไม่สม่ำเสมอของมวล
- 2.2.4 ความไม่สม่ำเสมอของกำลัง หรือสตีเฟนส
- 2.2.5 ความไม่สม่ำเสมอของวัสดุโครงสร้าง





(ก) ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรง

(ข) ความไม่สม่ำเสมอของความสูง
ระหว่างชั้น

(ค) ความไม่สม่ำเสมอของมวล



(ง) ความไม่สม่ำเสมอของสติเฟเนส

(จ) ความไม่สม่ำเสมอของวัสดุ

ภาพ 17 แสดงความไม่สม่ำเสมอในแนวตั้งของผังอาคาร

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2547, สืบออนไลน์

2.3 มีเสถียรภาพส่วนเกินของโครงสร้าง (Structural redundancy) โครงสร้างที่ประกอบด้วย องค์อาคาร หรือระบบรับแรงทางด้านข้างย่อย ๆ เป็นจำนวนมาก รวมทั้ง การที่โครงสร้างมีเส้นทางเดินของแรงหลายเส้นทาง จะแสดงความสามารถในการรับแรง แผ่นดินไหวดีกว่า เนื่องจากจะมีความสามารถในการกระจายหน่วยแรงกลับไปมา (Redistribution) โดยเฉพาะเมื่อโครงสร้างบางแห่งเกิดการวิบัติลง การทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพส่วนเกินนี้ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ระบบโครงสร้างค้ำ หรือการใช้โครงข้อแข็ง หรือกำแพงรับแรงเฉือน หลาย ๆ ชุด

กฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารต้านแผ่นดินไหวในประเทศไทย (ราชกิจจานุเบกษา, 2550; อมร พิมาณมาศ, 2558; อมร พิมาณมาศ, ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลด์ และปรีดา ไชยมหาวัน, 2558)

กฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550 เป็นกฎหมายที่กำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับบริเวณที่ต้องออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว วิธีการออกแบบ และสูตรการคำนวณแรงสถิตเทียบเท่า ซึ่งมีที่มาจากมาตรฐาน UBC ปี 1985 ดังนี้

1. พื้นที่ และบริเวณเฝ้าระวัง ได้แก่

1.1 บริเวณเฝ้าระวัง คือ พื้นที่ หรือบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว ได้แก่ จังหวัดกระบี่ ชุมพร พังงา ภูเก็ต ระนอง สงขลา และสุราษฎร์ธานี

1.2 บริเวณที่ 1 คือ พื้นที่ หรือบริเวณที่เป็นดินอ่อน ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวระยะไกล ได้แก่ จังหวัดกรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ และสมุทรสาคร

1.3 บริเวณที่ 2 คือ พื้นที่ที่อยู่ใกล้รอยเลื่อนที่อาจได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี เชียงราย เชียงใหม่ ตาก น่าน พะเยาแพร่ ลำปาง ลำพูน และแม่ฮ่องสอน

2. บริเวณและอาคารที่บังคับใช้ ได้แก่

2.1 อาคารที่จำเป็นต่อสาธารณชน เช่น สถานพยาบาลที่รับผู้ป่วยไว้ค้างคืน สถานีดับเพลิง อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย อาคารศูนย์สื่อสาร ท่าอากาศยาน โรงไฟฟ้า โรงผลิตและเก็บน้ำประปา

2.2 อาคารเก็บวัตถุอันตราย เช่น วัตถุระเบิด วัตถุไวไฟ วัตถุมีพิษ วัตถุแก๊สอันตรายหรือวัตถุที่ระเบิดได้

2.3 อาคารสาธารณะ เช่น โรงมหรสพ หอประชุม หอศิลป์ พิพิธภัณฑ์สถาน หอสมุด ศาสนสถาน อัฒจันทร์ ตลาด ห้างสรรพสินค้า ศูนย์การค้า สถานีรถ และโรงแรม

2.4 สถานศึกษา

2.5 สถานที่รับเลี้ยงเด็ก

2.6 อาคารที่มีผู้ใช้อาคารได้ตั้งแต่ห้าพันคนขึ้นไป

2.7 อาคารที่มีความสูง ตั้งแต่ 15 เมตร ขึ้นไป

2.8 สะพาน หรือทางยกระดับ ที่มีศูนย์กลางตอม่อ ตั้งแต่ 10 เมตร ขึ้นไป

2.9 เชื้อนกักเก็บน้ำ เชื้อนทตน้ำ หรือฝายทตน้ำ ที่ตัวเชื้อนหรือตัวฝายมีความสูงตั้งแต่ 10 เมตร ขึ้นไป

3. เงื่อนไขในการออกแบบ

3.1 การจัดรูปแบบทางเรขาคณิตให้มีเสถียรภาพในการต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

3.2 รายละเอียดปลีกย่อยชิ้นส่วนโครงสร้าง รวมทั้งบริเวณรอยต่อระหว่างปลายชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ต้องมีความเหนียวเทียบเท่าความเหนียวจำกัด (Limited Ductility)

3.3 ในการออกแบบให้ใช้ค่าหน่วยแรงที่มากกว่าระหว่างแรงจากแผ่นดินไหวและแรงลม ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 (พระราชบัญญัติ พุทธศักราช 2522)

4. การออกแบบโครงสร้างอาคาร

อาคารรูปทรงสม่ำเสมอ (Regular structure) เป็นการออกแบบโครงสร้างอาคารที่มีลักษณะเป็นตึก บ้าน เรือน หรือลักษณะคล้าย ๆ กัน และไม่อยู่ในบริเวณฝ้าระวางให้คำนวณแรงเฉือนทั้งหมดในแนวราบที่ระดับพื้นดิน โดยกำหนดสูตรแรงสถิตเทียบเท่า คือ

$$V = ZIKCSW (1)$$

เมื่อ V คือ แรงเฉือนทั้งหมดในแนวราบที่ระดับพื้นดิน

Z คือ สัมประสิทธิ์ของความเข้มของแผ่นดินไหว

I คือ ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้อาคาร

K คือ สัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ

C คือ สัมประสิทธิ์ของคาบของโครงสร้าง ในการคำนวณแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคาร หรือส่วนต่าง ๆ ของอาคาร

S คือ สัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติระหว่างอาคาร และชั้นดิน

W คือ น้ำหนักของตัวอาคารทั้งหมด รวมทั้งน้ำหนักของวัสดุอุปกรณ์ซึ่งยึดตรึงกับที่ โดยไม่รวมน้ำหนักบรรทุกทุกจรสำหรับอาคารทั่วไป หรือน้ำหนักของตัวอาคารทั้งหมด รวมกับร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกทุกจร สำหรับโกดัง หรือคลังสินค้า

5. การกระจายแรงเฉือน

5.1 ให้แปลงแรงเฉือนในแนวราบที่ระดับพื้นดินออกเป็นแรงในแนวราบที่ชั้นบนสุดของอาคาร ดังนี้

$$F_t = 0.07 TV \quad (1)$$

ค่าของ F_t ที่ได้จากสูตรนี้ไม่ให้ใช้เกิด 0.25 V และถ้าหาก T มีค่าเท่ากับ หรือต่ำกว่า 0.7 วินาที ให้ใช้ค่าของ F_t เท่ากับ 0

5.2 ให้กระจายแรงเฉือนในแนวราบออกเป็นแรงในแนวราบต่อพื้นชั้นต่าง ๆ F_x (รวมชั้นบนสุด) ดังนี้

$$F_x = \frac{(V - F_t)w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (2)$$

เมื่อ

F_t	คือ แรงในแนวนอนที่กระทำต่อพื้นชั้นบนสุดของอาคาร
F_x	คือ แรงในแนวนอนที่กระทำต่อพื้นที่ x ของอาคาร
T	คือ คาบการแกว่งตามธรรมชาติของอาคาร มีหน่วยเป็นวินาที
V	คือ แรงเฉือนทั้งหมดในแนวนอนที่ระดับพื้นดิน
w_x, w_i	คือ น้ำหนักของพื้นอาคารชั้นที่ x และชั้นที่ i ตามลำดับ
h_x, h_i	คือ ความสูงจากระดับพื้นดินถึงพื้นที่ x และชั้นที่ i ตามลำดับ
$l = 1$	สำหรับพื้นที่ชั้นแรกที่อยู่สูงถัดจากพื้นที่กลางของอาคาร
$X = 1$	สำหรับชั้นแรกที่อยู่สูงถัดจากพื้นที่กลางของอาคาร
$\sum_{i=1}^n w_i h_i$	คือ ผลรวมของผลคูณระหว่างน้ำหนักกับความสูงจากพื้นที่ 1

ถึงชั้นที่ n

N คือ จำนวนชั้นทั้งหมดของอาคาร ที่อยู่เหนือระดับพื้นที่กลางของอาคาร
การวิเคราะห์อื่น ๆ สำหรับอาคารรูปทรงสม่ำเสมอ ในการคำนวณออกแบบ

โครงสร้างที่มีรูปทรงตามที่ระบุ ผู้ออกแบบอาจใช้วิธีอื่นได้ โดยที่การคำนวณต้องเป็นไปตามมาตรฐานว่าด้วยการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือน และแผ่นดินไหว ที่สภาวิศวกรรับรองหรือมาตรฐานที่จัดทำโดยส่วนราชการ หรือนิติบุคคล ซึ่งได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ซึ่งมีวุฒิศึกษา สาขาวิศวกรรมโยธา ตามกฎหมายว่าด้วยวิศวกร เป็นผู้ให้คำปรึกษา และลงลายมือชื่อรับรองวิธีการคำนวณนั้น

5.2 อาคารที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอ (Irregular structure) การออกแบบอาคารที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอ และไม่อยู่ในบริเวณฝ้าระวัง ผู้คำนวณต้อง

5.2.1 เป็นผู้ได้รับอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ตั้งแต่ระดับสามัญวิศวกร ขึ้นไป

5.2.2 คำนวณให้อาคารสามารถรับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ หรือวิธีอื่นที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของวิธีเชิงพลศาสตร์

5.2.3 คำนวณตามมาตรฐาน ว่าด้วย การออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือน และแผ่นดินไหว ที่สภาวิศวกรรับรอง หรือมาตรฐานที่จัดทำโดยส่วนราชการ หรือนิติบุคคล ซึ่งได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ซึ่งมีวุฒิศึกษา สาขาวิศวกรรมโยธา ตามกฎหมาย ว่าด้วยวิศวกรเป็นผู้ให้คำปรึกษา และลงลายมือชื่อรับรองวิธีการคำนวณนั้น

5.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ มีดังนี้

- 1) สัมประสิทธิ์ของความเข้มของแผ่นดินไหว (Z) ของบริเวณที่ 1 ให้ใช้เท่ากับ 0.19 หรือมากกว่า และบริเวณที่ 2 ให้ใช้เท่ากับ 0.38 หรือมากกว่า
- 2) ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้อาคาร (I) ให้ใช้ ดังตาราง 3 ดังนี้

ตาราง 3 แสดงตัวคูณเกี่ยวกับการใช้อาคาร (I)

ชนิดของอาคาร	ค่าของ I
1. อาคารที่จำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชน	1.50
2. อาคารที่เป็นที่ชุมนุมคน ครั้งหนึ่ง ๆ ได้มากกว่า 300 คน	1.25
3. อาคารอื่น ๆ	1.00

- 3) สัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ (K) ให้ใช้ดังตาราง 4

ตาราง 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ (K)

ระบบและชนิดโครงสร้างรับแรงในแนวราบ	ค่าของ K
1. โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้กำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) หรือโครงแกนแนง (Braced Frame) ด้านแรงทั้งหมดในแนวราบ	1.33
2. โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียว (Ductile Moment-Resisting Frame) ด้านแรงทั้งหมดในแนวราบ	0.67
3. โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือน หรือโครงแกนแนงด้านแรงในแนวราบ โดยมีข้อกำหนดในการคำนวณออกแบบ ดังนี้	0.80
3.1 โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวต้องสามารถต้านแรงในแนวราบได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของแรงในแนวรายทั้งหมด	
3.2 กำแพงรับแรงเฉือน หรือโครงแกนแนงเมื่อแยกเป็นอิสระจากโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียว ต้องสามารถต้านแรงในแนวรายได้ทั้งหมด	
3.3 โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือน หรือโครงแกนแนง ต้องสามารถต้านแรงในแนวรายได้ทั้งหมด โดยสัดส่วนของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างแต่ละระบบ ให้เป็นไปตามสัดส่วนความคงตัว (Rigidity) โดยคำนึงถึงการถ่ายเทของแรงระหว่างโครงสร้างทั้งสอง	

ตาราง 4 (ต่อ)

ระบบและชนิดโครงสร้างรับแรงในแนวราบ	ค่าของ K
4. หอถังน้ำ รองรับด้วยเสาไม้ไม่น้อยกว่า 4 ต้น และมีแกนเยียด และไม้ได้ตั้งอยู่บนอาคาร (หมายเหตุ ผลคูณระหว่างค่า K กับค่า C ให้ใช้ค่าต่ำสุด เท่ากับ 0.12 และค่าสูงสุด เท่ากับ 0.25)	2.5
5. โครงต้านแรงคัตที่มีความเหนียวจำกัด และโครงอาคารระบบอื่น ๆ นอกจากโครงอาคารตาม (1) (2) (3) หรือ (4)	1.0

ในกรณีที่ไม่สามารถคำนวณคาบการแกว่งตามธรรมชาติของอาคารได้ถูกต้องโดยวิธีอื่น ให้คำนวณตามสูตร ต่อไปนี้

3.1) สำหรับอาคารทั่วไปทุกชนิด ให้คำนวณตามสูตร

$$T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{D}} \quad (3)$$

3.2) สำหรับอาคารที่มีโครงต้านแรงคัตที่มีความเหนียว ให้คำนวณตามสูตร

$$T = 0.10 N$$

เมื่อ

h_n = ความสูงของพื้นอาคารชั้นสูงสุด วัดจากระดับพื้นดิน มีหน่วยเป็นเมตร

D = ความกว้างของโครงสร้างของอาคารในทิศทางขนานกับแรงแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นเมตร

N = จำนวนชั้นของอาคารทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับพื้นดิน

4) สัมประสิทธิ์ของคาบของโครงสร้าง ในการคำนวณแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคาร หรือส่วนต่าง ๆ ของอาคาร (C) ให้คำนวณตามสูตร ดังต่อไปนี้

$$C = \frac{1}{15\sqrt{T}}$$

ถ้าคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ได้มากกว่า 0.12 ให้ใช้เท่ากับ 0.12

5) สัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติ ระหว่างอาคารและชั้นดิน (S) แสดงดังตาราง 5

ตาราง 5 แสดงสัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติระหว่างอาคารและชั้นดิน (S)

ลักษณะของชั้นดิน	ค่าของ S
1. หิน	1.0
2. ดินแข็ง	1.2
3. ดินอ่อน	1.5
4. ดินอ่อนมาก	2.5

หิน หมายถึง หินทุกลักษณะไม่ว่าจะเป็น หินคล้ายหินเชล (Shale) หรือที่เป็นผลึกตามธรรมชาติ หรือหินลักษณะแข็ง ซึ่งมีความลึกของชั้นดินไม่เกิน 60 เมตร ที่ทับอยู่เหนือชั้นหิน และต้องเป็นดินที่มีเสถียรภาพดี เช่น ทราย กรวด หรือดินเหนียวแข็ง

ดินแข็ง หมายถึง ดินลักษณะแข็ง ซึ่งมีความลึกของชั้นดินมากกว่า 60 เมตร ที่ทับอยู่เหนือชั้นหิน และต้องเป็นดินที่มีเสถียรภาพดี เช่น ทราย กรวด หรือดินเหนียวแข็ง

ดินอ่อน หมายถึง ดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง ที่หนา มากกว่า 9 เมตร อาจจะมีชั้นทรายคั่นอยู่หรือไม่ก็ได้

ดินอ่อนมาก หมายถึง ดินเหนียวอ่อนที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ในสภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ไม่มากกว่า 24 กิโลปาสกาล (2,400 กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร) และมีความหนาชั้นดินมากกว่า 9 เมตร เช่น สภาพดินในท้องที่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ และสมุทรสาคร

ถ้าผลคูณระหว่าง C กับค่า S มากกว่า 0.14 ให้ใช้เท่ากับ 0.14 เว้นแต่กรณีดินอ่อนมาก ถ้าผลคูณดังกล่าวมากกว่า 0.26 ให้ใช้เท่ากับ 0.26

การเคลื่อนตัว

1. ในการคำนวณการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ด้านข้าง ระหว่างชั้นที่อยู่ติดกันของอาคาร (Story Drift) ที่เกิดจากแรงในแนวราบ จะต้องไม่เกิน 0.5% ของความสูงระหว่างชั้น

2. มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยพ.1301-50 เป็นมาตรฐานที่ให้รายละเอียดเกี่ยวกับความสม่ำเสมอ และความไม่สม่ำเสมอ ของโครงสร้าง และการกำหนดรายละเอียดการเสริมเหล็ก เพื่อให้อาคารมีความเหนียวปานกลาง (หรือมีความเหนียวจำกัด) (อมร พิมาณมาศ, ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลดี และปรีดา ไชยมหาวัน, 2558; กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2550, สี่ออนไลน์)

3. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยพ 1302-52 เป็นเอกสารการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น มีรายละเอียดต่าง ๆ

ที่ครบถ้วนและทันสมัย และมีที่มาจากมาตรฐาน ASCE7-05 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (อมร พิมาณมาศ, 2558; อมร พิมาณมาศ, ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลดี และปรีดา ไชยมหาวัน, 2558)

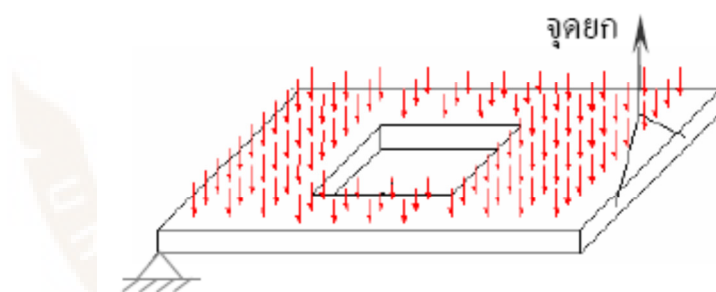
ระบบชั้นส่วนหล่อสำเร็จผนังรับแรง

แนวทางการออกแบบและเสริมเหล็กในระบบชั้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ

ขั้นตอนการออกแบบระบบชั้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ จะต้องคำนึงถึงการรับน้ำหนัก 3 ขั้นตอน ดังนี้ (เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัทธศานานนท์, 2550)

1. ขณะถอดแบบ

ในขั้นตอนนี้ ชั้นส่วนผนังคอนกรีตสำเร็จ จะต้องรับน้ำหนักตัวเอง และแรงคูดระหว่างแบบหล่อ และชั้นส่วนคอนกรีต สมมุติฐานที่ใช้สำหรับคำนวณ ได้แก่ การให้ผนังเป็นเสมือนคานกว้าง มีจุดยกที่หูกึ่ง จุดรองรับอีกปลายที่ไม่ได้ยกเป็นฐานรองรับแบบหมุน (ดังภาพ 18) ซึ่งสมมุติฐานเช่นนี้ เกิดขึ้นกับแบบหล่อที่ไม่สามารถหมุนปรับมุมได้ ดังนั้น คอนกรีตจะต้องออกแบบให้สามารถรับแรงคูด และแรงเฉือนในขณะถอดแบบ และตรวจสอบหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ผิวด้านล่างไม่เกินกว่าค่าโมดูลัสการแตกหัก $\sigma_t \leq 2.0\sqrt{f'_c}$



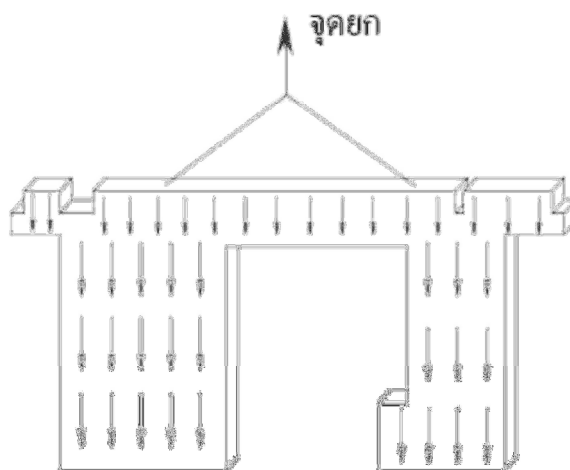
ภาพ 18 แสดงสมมุติฐานการรับน้ำหนักของผนังคอนกรีตสำเร็จในขณะถอดแบบ

ที่มา: เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัทธศานานนท์, 2550

2. ขณะยกและขนย้าย

พฤติกรรมในลักษณะนี้ ผนังจะรับน้ำหนักของตัวเองในแนวดิ่ง และน้ำหนักจากการกระแทกจากการขนย้าย ตำแหน่งที่เป็นจุดยก จึงถือได้ว่าเป็นฐานรองรับของผนังคอนกรีต ดังภาพ 19 หน่วยแรงที่เกิดขึ้น และจะต้องตรวจสอบ ได้แก่ หน่วยแรงดึงในชั้นส่วนผนังจะต้อง

ไม่เกินค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ ซึ่งมีค่าเท่ากับกำลังรับแรงดึงภายใต้แรงดึงตรง (Direct Tensile Strength, $f_t \leq 1.6\sqrt{f'_c}$) เพื่อป้องกันการแตกร้าว และตรวจสอบกำลังของเหล็กเสริมว่าสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นได้ ในกรณีหน้าตัดเกิดรอยร้าวได้หรือไม่



ภาพ 19 แสดงสมมติฐานการรับน้ำหนักของผนังคอนกรีตสำเร็จในขณะยกและขนย้าย

ที่มา: เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัวทัศนานนท์, 2550

3. ขณะรับน้ำหนักจริง ในขณะรับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน กรณีที่เป็นแรงกระทำในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว ได้แก่ น้ำหนักตัวเอง น้ำหนักจากหลังคา น้ำหนักพื้น น้ำหนักผนังชั้นบน และน้ำหนักจากบันได การคำนวณกำลังรับน้ำหนักจากหน้าตัดของผนังคอนกรีต อาจใช้สมการของ ACI318 และ ว.ส.ท. 2548 ได้ ซึ่งแสดงในสมการที่ (4)

$$\phi P_n = \phi 0.55 f'_c A_g \left[1 - \left(\frac{kl_c}{32h} \right)^2 \right] \quad (4)$$

เมื่อ $\phi = 0.70$

P_n เป็นน้ำหนักบรรทุกทุกบนกำแพง

f'_c เป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

A_g เป็นพื้นที่หน้าตัดของกำแพง

k เป็นตัวประกอบความยาวประสิทธิผล

= 0.8 เมื่อกำแพงมีการยึดตั้งด้านทานการหมุนที่ปลายข้างใดข้างหนึ่ง หรือทั้งสองข้าง

= 1.0 เมื่อกำแพงไม่มีการยึดตั้งด้านทานการหมุนที่ปลายทั้งสองข้าง

= 2.0 เมื่อกำแพงไม่มีการยึดรั้งต้านการหมุนที่ปลายทั้งสองข้าง

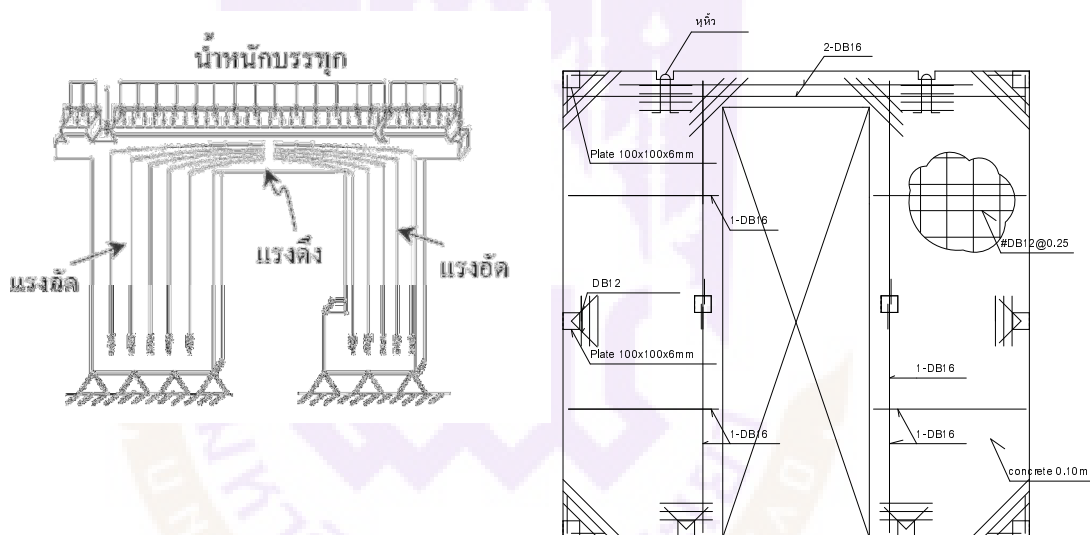
l_c เป็นความสูงของกำแพง

h เป็นความหนาของกำแพง

ปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำ ในแนวตั้งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.12% ของพื้นที่หน้าตัดกำแพง และปริมาณเหล็กเสริมในแนวนอน จะต้องไม่น้อยกว่า 0.2% เมื่อใช้เหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพไม่ต่ำกว่า SD40

เมื่อให้เหล็กเสริมชั้นคุณภาพอื่น ๆ แนวตั้งจะต้องมีปริมาณเหล็กไม่น้อยกว่า 0.15% ของพื้นที่หน้าตัด และปริมาณเหล็กเสริมในแนวนอน จะต้องไม่น้อยกว่า 0.25%

สำหรับกรณีที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ จะต้องพิจารณาผนังเหนือช่องเปิดเป็นคานทับหลัง (ภาพ 20 (a)) และเสริมเหล็กพิเศษเพื่อรับแรงดึงตงภาพ 20 (b)



(a) แรงอัดและแรงดึงในผนังที่มีช่องเปิดจาก
น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

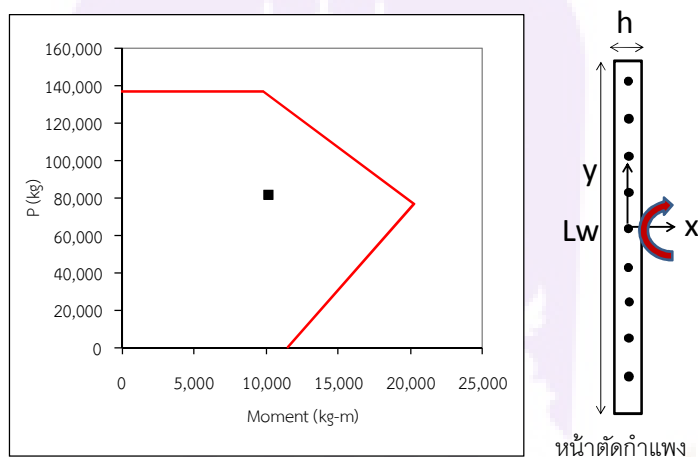
(b) ตัวอย่างการเสริมเหล็กในผนังคอนกรีต
สำเร็จ

ภาพ 20 แสดงสมมุติฐานของผนังในขณะรับน้ำหนักใช้งาน และรายละเอียดการเสริมเหล็กภายในในกรณีที่ผนังแฉกริม ซึ่งต้องรับพื้นเพียงด้านเดียว ทำให้ผนังดังกล่าวต้องรับโมเมนต์

ในแนวนอน (Out of Plane) ซึ่งต้องวิเคราะห์ผนังดังกล่าวด้วยการเขียนแผนภาพปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และแรงอัด (Interaction Diagram)

สำหรับกรณีที่ผนังดังกล่าวต้องรับแรงจากแผ่นดินไหว การออกแบบให้กระทำเช่นเดียวกับผนังรับแรงเฉือน (Shear Wall) โดยตรวจสอบแรงเฉือน และ เขียนแผนภาพปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ และแรงอัด (Interaction Diagram) ในระนาบ (In Plane) ดังภาพ 21

นอกจากการรับแรงกระทำในแนวตั้ง และแรงกระทำด้านข้างแล้ว จะต้องตรวจสอบหน่วยแรงดึงในผนังที่มีช่องเปิด เพื่อไม่ให้เกินค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ ซึ่งบางครั้งอาจต้องเสริมเหล็กกันร้าว เพื่อป้องกันการวิบัติจากแรงดึงทะแยง ดังภาพ 20 (b)



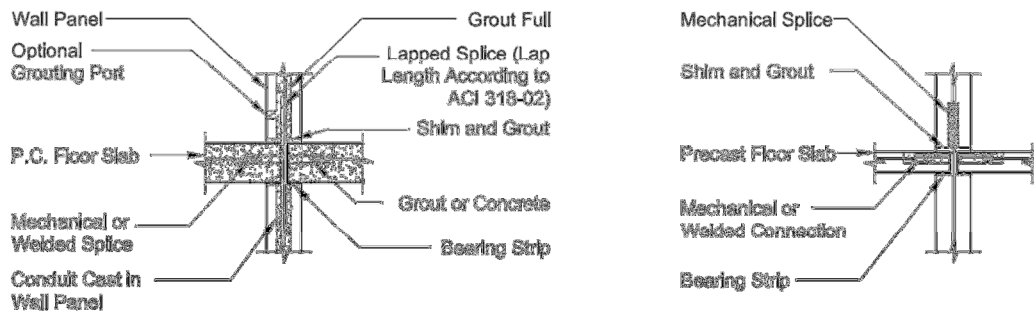
ภาพ 21 แสดงการออกแบบกำแพงที่รับโมเมนต์และแรงตามแนวแกนพร้อมกัน

รอยต่อระหว่างผนังชั้นล่างกับผนังชั้นบน

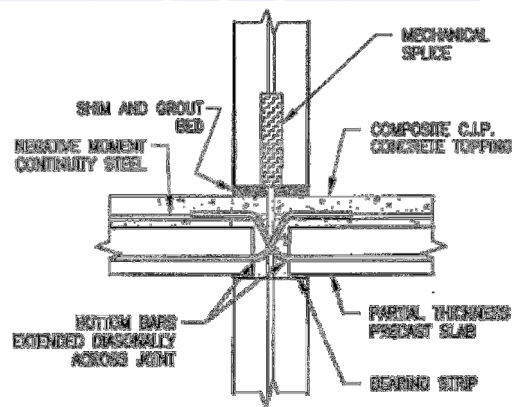
รอยต่อระหว่างแผ่นผนังสำเร็จรูป ระหว่างชั้นมีความสำคัญมาก เนื่องจากอาคารที่ออกแบบให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหว จะเกิดแรงกระทำที่สูงมากที่รอยต่อ ซึ่งรูปแบบของรอยต่อระหว่างชั้นส่วนสำเร็จรูป จึงควรเป็นลักษณะรอยต่อแบบเปียก wet joint (ทรงพล จารุวิศิษฎ์ และประยุทธ์ สมานรัตนเสถียร, 2555) เพื่อให้รอยต่อมีพฤติกรรมเสมือนการเทคอนกรีตแบบหล่อในที่ (RC Emulate)

มาตรฐาน ACI-550.1R และหนังสือ PCI Design Manual (2004) ได้แนะนำรายละเอียดการเสริมเหล็กที่รอยต่อระหว่างชั้นส่วนสำเร็จรูปของผนัง Precast ที่ต่อกันในแนวนอนหรือรอยต่อระหว่างชั้น เพื่อให้รอยต่อมีพฤติกรรมเสมือนคอนกรีตหล่อในที่ ดังแสดงในภาพ 22

จากรูปจะเห็นว่ารายละเอียดการเสริมเหล็กยึดผนังในแนวตั้ง แนะนำให้ใช้การเชื่อมทาบ หรือใช้ข้อต่อทางกล (Mechanical Splice)



(ก) รูปแบบรอยต่อผนังชั้นบนและล่างจาก PCI Design Manual



(ข) รูปแบบรอยต่อผนังชั้นบนและล่างจาก ACI-550.1R

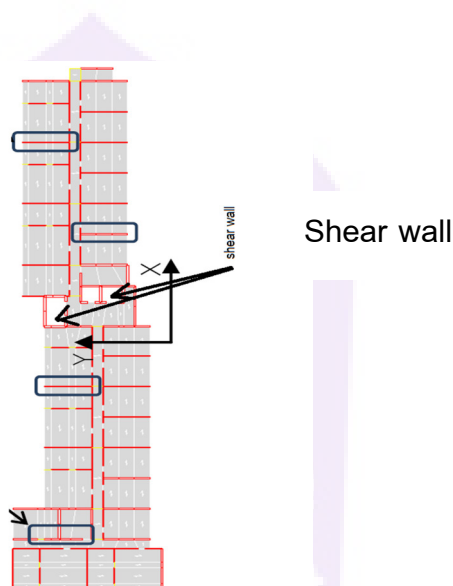
ภาพ 22 แสดงรายละเอียดของจุดต่อระหว่างผนังในแนวตั้งกับพื้น

ดังนั้น หากมีการปรับปรุงรายละเอียดการเสริมเหล็ก หรือหารูปแบบการที่ทำให้จุดต่อระหว่างผนังกับผนังในแนวตั้ง ให้มีความง่ายในการติดตั้ง สามารถใช้วัสดุที่หาได้ง่าย โดยยังสามารถต้านทานแรงกระทำได้เช่นเดิม จะทำให้ระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรับแรงเป็นที่แพร่หลายในการนำไปใช้ในการก่อสร้างต่อไป

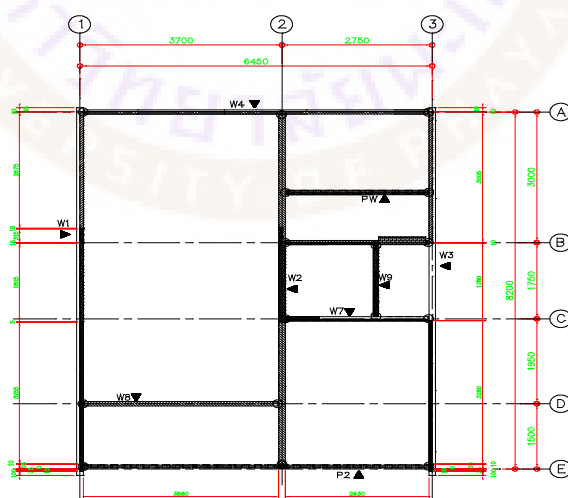
พฤติกรรมโครงสร้างอาคารระบบผนังสำเร็จรูป

จากการพิจารณาแปลนอาคารอาคารสูงที่ใช้ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปรับผนังรับแรง ในการก่อสร้าง ดังภาพ 23 พบว่า อาคารดังกล่าวมีช่องลิฟท์ ซึ่งเป็นกำแพงรับแรงเฉือน ในส่วนหนึ่งแล้ว ทำให้เมื่อวิเคราะห์โครงสร้าง แรงเฉือนที่ฐานส่วนใหญ่จะถ่ายเข้าสู่กำแพงเฉือน อาจประมาณ 40% ของแรงเฉือนทั้งหมด (ทรงพล จารุวิศิษฏ์ และประยุทธ์ สมานรัตน์เสถียร, 2555) ส่วนอีก 60% ที่เหลือจึงถ่ายเข้าสู่ผนังสำเร็จรูป สำหรับอาคารพักอาศัย 2-3 ชั้น ซึ่งไม่มี

กำแพงรับแรงเฉือน เมื่อนำไปก่อสร้างด้วยระบบผนังสำเร็จรูปรับน้ำหนัก ดังแสดงในภาพ 24 แรงเฉือนที่ฐานจากแรงแผ่นดินไหวจะถ่ายเข้าสู่ผนังสำเร็จรูปรับแรงทั้งหมด อย่างไรก็ตาม แรงดังกล่าวมีค่าน้อย เนื่องจากมวลของอาคารเพียงสองชั้นนั้นมีค่าน้อย และจากสมมุติฐานที่เมื่อผนังสำเร็จรูปต่อกันหมดแล้ว จะมีพฤติกรรมเป็นเหมือนกล่อง ทำให้สตีฟเนสสูงขึ้น จึงสามารถต้านทานแรงกระทำทางข้างจากแผ่นดินไหวได้นั่นเอง ทำให้ควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมที่ถูกต้องเกี่ยวกับระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรงให้มากขึ้น



ภาพ 23 แสดงแปลนอาคารสูงที่ใช้ระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูปรับแรง



ภาพ 24 แสดงแปลนบ้าน 2 ชั้น ที่ใช้ระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูปรับแรง

ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

หลักการของไฟไนต์อีลิเมนต์

วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นที่ยอมรับใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน ตัวอาคาร สะพาน และโครงสร้างอื่น ๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ทั้งวัสดุที่มีสภาพยืดหยุ่น (Elastic) และวัสดุในสภาพยืดตัว (Plastic) และยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน การไหลของของไหล การถ่ายเทมวล เป็นต้น เนื่องจากวิธีการคำนวณนี้สามารถกระทำได้โดยไม่มีข้อจำกัด แก่ปัญหาได้หลายลักษณะ และสามารถนำไปใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ปัจจุบันมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

หลักการของไฟไนต์อีลิเมนต์ คือ การแบ่งสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ (Domain) ออกเป็นส่วนย่อยเล็ก ๆ เรียกว่า อีลิเมนต์ (Element) ซึ่งมักจะมีอยู่ในรูปสี่เหลี่ยม หรือสามเหลี่ยม จุดตัดของเส้นกรอบอีลิเมนต์ เรียกว่า “จุดต่อ (Node)” ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จะมีการสร้างฟังก์ชันของคณิตศาสตร์ เพื่อหาคำตอบ (อุณหภูมิ ความเค้น ความเร็ว ฯลฯ) ที่จุดต่อเหล่านั้นพร้อม ๆ กัน โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความสะดวก รวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำ และเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก

ชนิดของอีลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้าง หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้าง หรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนเล็ก ๆ และเลือกใช้ชนิดของอีลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงาน และการกระทำของไหลชนิดของอีลิเมนต์ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

1. อีลิเมนต์มิติเดียว เป็นอีลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโก่งของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียวกัน เป็นต้น

2. อีลิเมนต์สองมิติ มักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดระนาบ โดยทั่วไปอีลิเมนต์สองมิติ จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

3. อีลิเมนต์สามมิติ จะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่ว ๆ ไป ลักษณะของอีลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึม รูปกรวยสามเหลี่ยม รูปทรงกระบอก

ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายใต้สภาวะต่าง ๆ ของโหลด มีขั้นตอนทั่ว ๆ ไปคล้ายกัน ดังนั้นเพื่อให้มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้น จึงมีการแบ่งรูปแบบวิธีการไฟไนต์อีลีเมนต์ ออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555)

1. ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์นั้น ออกเป็น อีลีเมนต์ย่อย ๆ เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับ อุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของไหล (Fluid Problem)
2. ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในอีลีเมนต์ (Element Interpolation Functions)
3. ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการอีลีเมนต์ (Element Equation) สามารถทำได้โดยวิธีการตรง (Direct Approach) วิธีการแปรผัน (Validation Approach) และวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals)
4. ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละอีลีเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น
5. ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ลงในสมการ แล้วจึงแก้ระบบสมการเพื่อหาค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อ
6. ขั้นตอนที่ 6 เมื่อดำเนินการต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการทราบต่อไป

ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เป็นวิธีที่มีระเบียบแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน ดังนั้น ในการสร้างสมการของอีลีเมนต์ ควรศึกษารายละเอียดทางคณิตศาสตร์ เพื่อความเข้าใจมากขึ้น

การวิเคราะห์โดยกระบวนการวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูง นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ในหลากหลายสาขา โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลศาสตร์วัสดุ เนื่องจากวิธีการคำนวณนี้สามารถกระทำได้ โดยไม่มีข้อจำกัด แก้ปัญหาได้หลายลักษณะ และสามารถนำไปใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่ปัจจุบันมีสิทธิภาพในการทำงานสูง (ชยานนท์ ทรธิบุญ, 2547)

ในการนำวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์มาใช้ ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษารายละเอียด การวิเคราะห์ โครงสร้าง ด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ โดยจำลองโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรงนั้น นอกจากจะประหยัดค่าใช้จ่ายที่จะต้องใช้ แทนที่การสร้างตัวอย่างทดสอบจริงแล้ว ยังทำให้การศึกษานั้นใช้เวลาน้อย ในระเบียบวิธีคำนวณในการวิเคราะห์โครงสร้างชิ้นส่วน คอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง จะทำการแบ่งย่อยขอบเขตเป็นชิ้นส่วนย่อยเล็ก ๆ เรียกว่า “อีลีเมนต์”

ในแต่ละอิเลิเมนต์ เชื่อมต่อกันด้วยจุดที่เรียกว่า “โหนด” ขั้นตอนในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์อิเลิเมนต์ โดยจำลองโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง แสดงได้ดังนี้

1. แบ่งย่อยโครงสร้างชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง ออกเป็นอิเลิเมนต์ย่อย
2. ระบุคุณสมบัติของแต่ละอิเลิเมนต์ และลักษณะขอบเขต หรือจุดรองรับ
3. ใส่แรงที่กระทำ
4. แก่ระบบสมการเชิงเส้น จะได้การเปลี่ยนตำแหน่งของโหนดต่าง ๆ
5. คำนวณหาความเครียด และความเค้น ที่เกิดขึ้นบนอิเลิเมนต์

เมื่อทราบผลของแรงกระทำบนอิเลิเมนต์ย่อยทุกอิเลิเมนต์แล้ว ก็จะสามารถทราบผลตอบสนองของทั้งโครงสร้างได้ โดยนำผลแต่ละอิเลิเมนต์เข้ามารวมกัน การวิเคราะห์ไฟไนต์อิเลิเมนต์ นี้ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์อิเลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่เชิงเส้น WCOMD (Maekawa, 1998) ซึ่งพัฒนาโดยมหาวิทยาลัยแห่งโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ในการประเมินรูปแบบการวิบัติ ตำแหน่งการวิบัติ และใช้การทำนายกำลังต้านทานแรงแนวราบด้วย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

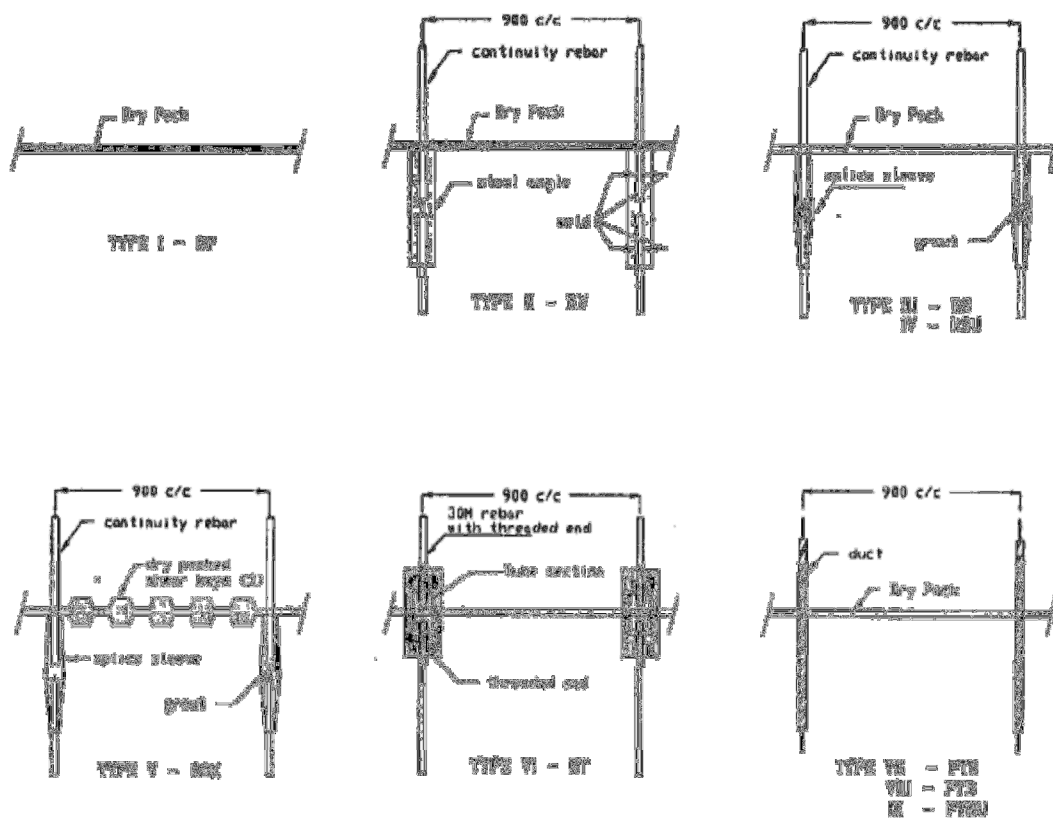
Soudk, Rizkalla and Daikiw (1995) ทำการทดสอบจุดต่อในแนวตั้งของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง จำนวน 15 รูปแบบ ดังภาพ 25 ภายใต้แรงกระทำทางข้างในทิศทางเดียว และแรงกระทำสลับทิศ ซึ่งใช้เวลาวิจัยถึง 6 ปี รูปแบบของจุดต่อ ประกอบไปด้วย

1. รอยต่อผิวสัมผัสแบบธรรมดา (Dry-packed Plain Surface)
2. รอยต่อผิวสัมผัสแบบธรรมดาที่มีเหล็กเสริมต่อเนื่อง (Dry-packed plain surface with continuity reinforcement)
3. รอยต่อผิวสัมผัสแบบธรรมดาพร้อมด้วยข้อต่อรับแรงเฉือนทางกล (Dry-packed with two types of mechanical shear connector)
4. รอยต่อที่มีการดึงลวดอัดแรงภายหลัง (Dry-packed with post tension)
5. รอยต่อที่มี shear key หลายอัน (Dry-packed multiple shear keys)
6. รอยต่อที่มีแผ่นพื้นกลวงชนิดดึง และไม่ดึงลวดอัดแรงภายหลัง (Hollow core slab with and without post-tensioning)

รอยต่อแบบใหม่ที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษารอยต่อที่เหล็กเสริมที่ต่อเนื่องในรอยต่อที่มีแรงยึดเหนี่ยวบางส่วน และปราศจากแรงยึดเหนี่ยว และได้ศึกษาการใช้จุดต่อทางกลที่สามารถสลายพลังงานได้ (Energy dissipating mechanical connections) โดยได้จำลองแรงกระทำ

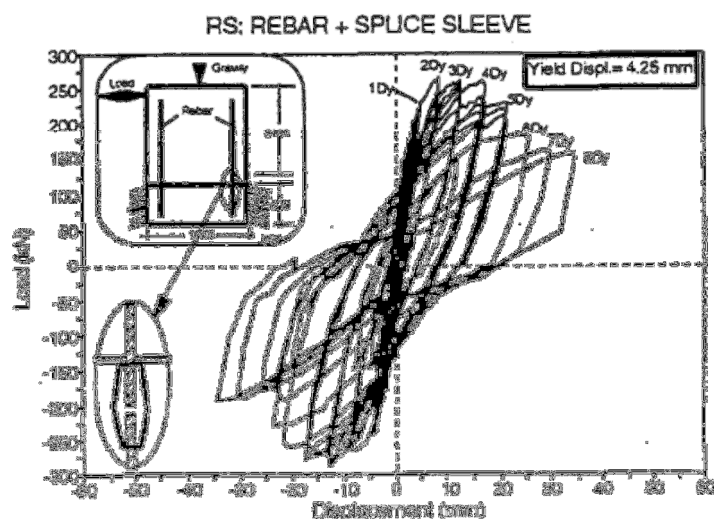
ในแนวตั้ง ในกำแพงถึงสามระดับด้วยกัน โดยจุดต่อที่ดีศึกษา พบว่า เมื่อนำไปใช้กับโครงการก่อสร้างจริง สามารถลดระยะเวลา และราคาได้

ผลการทดสอบ พบว่า จุดต่อทุกรูปแบบที่ได้ทดสอบ สามารถต้านทานแรงกระทำ ด้วยพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของช่วงยึดหยุ่นได้ดี และสลายพลังงานภายหลังจากจุดครากได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นทดสอบที่มีความต่อเนื่องของเหล็กเสริม สามารถต้านทานแรงกระทำได้ ความเหนียวถึง 5 และดงภาพ 26 ในขณะที่ชั้นทดสอบที่มีการดึงลวดอัดแรงให้ความเหนียวถึง 6 ชั้นทดสอบที่มี Shear Key ช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนให้กับกำแพง ทำให้เห็นว่า กำแพงสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวระดับต่ำถึงปานกลางได้อย่างปลอดภัย



ภาพ 25 แสดงรูปแบบจุดต่อระหว่างกำแพงต่อกำแพงสำเร็จในแนวตั้ง

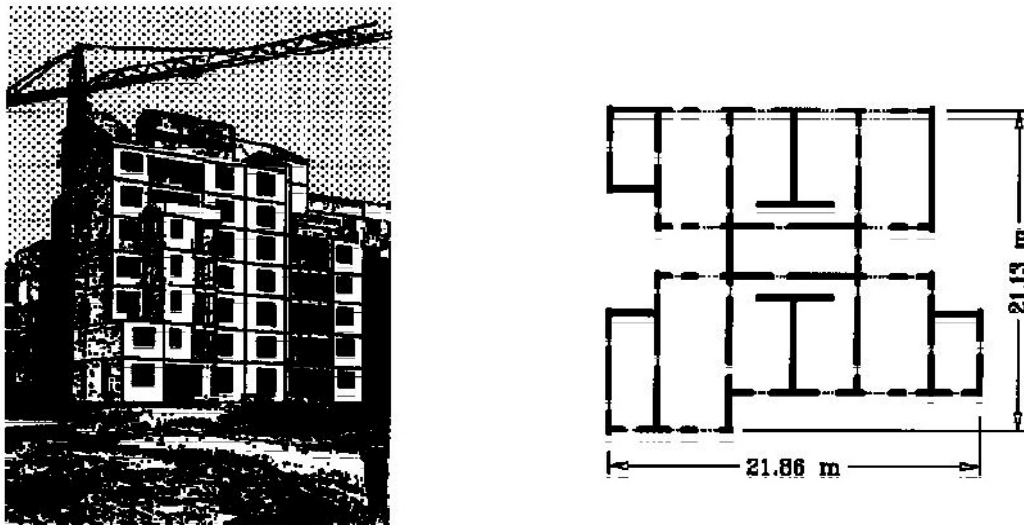
ที่มา: Soudk, Rizkalla and Daikiw, 1995



ภาพ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนตัวของชิ้นทดสอบกำแพง

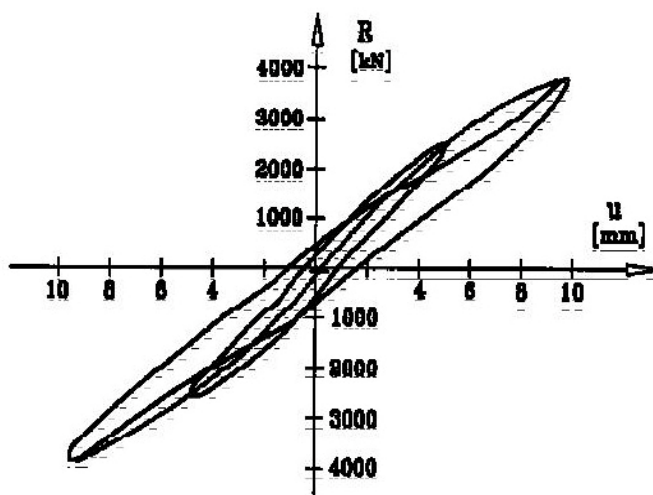
ที่มา: Soudk, Rizkalla and Daikiw, 1995

Miodrag, et al. (1996, Online) ได้ศึกษาการทดลอง และผลตอบสนองของแผ่นดินไหวเชิงคณิตศาสตร์ ของระบบผนังขนาดใหญ่หล่อใน ที่ซึ่งพัฒนาโดย JIMPROS-Yugoslavia เป็นการสำรวจเกี่ยวกับปฏิกิริยาของชิ้นส่วนจุดต่อ ระหว่างผนังรับน้ำหนักหล่อสำเร็จของอาคาร 7 ชั้น กับแปลนพื้นที่ไม่สมมาตรบนดินเหลืองบน ในเมืองเบลเกรด (Belgrade) ดังภาพ 27 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบผนังขนาดใหญ่ JIMPROS ภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวที่กำหนดตามผลการทดลอง การวิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมดด้วย 3D โดยการใช้การวิเคราะห์โครงสร้างแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีการทดลองเพิ่มเติม และวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น บนผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับการสำรวจผลกระทบจุดต่อของผนังเฉพาะจุด สำหรับการสร้างแบบจำลองผนังคอนกรีตเสริมสำเร็จ ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสองมิติ ให้ผลพฤติกรรมของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) สอดคล้องกันอีลิเมนต์ สามารถอธิบายได้ทั้งผลตอบสนองแรงดัด และแรงเฉือน เนื่องจากแผ่นดินไหว กราฟฮิสเทอรีซิส แสดงถึงการลดลงของความแข็งแรง และกำลังในลักษณะการยืดหยุ่น และแคบลง ดังภาพ 28 ดังนั้นสรุปได้ว่า จากการวิเคราะห์ทฤษฎี และการทดลองมีผลทางปฏิบัติ ในการวิเคราะห์และออกแบบอีลิเมนต์ และจุดต่อในระบบผนังขนาดใหญ่สำหรับอาคารที่ก่อสร้างด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูป



ภาพ 27 แสดง Seven-story large panel building and its floor plan

ที่มา: Miodrag, et al., 1996

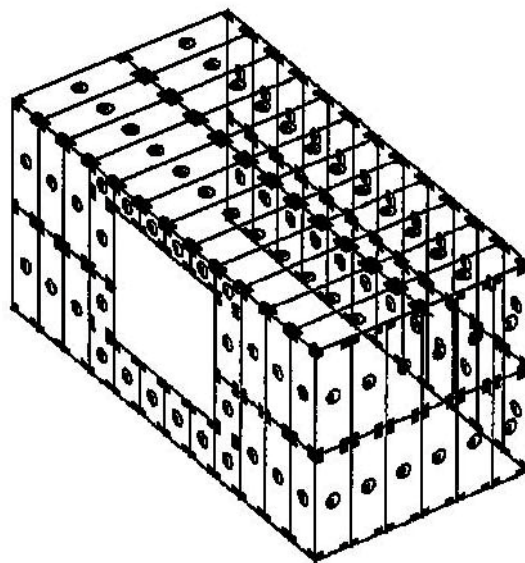


ภาพ 28 แสดง Hysteresis diagram of the large panel building

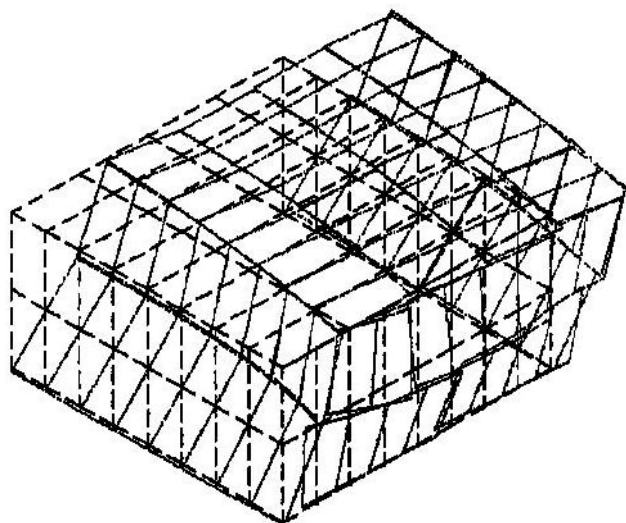
ที่มา: Miodrag, et al., 1996

He, Lam and Foschi (2001) ได้วิจัยการสร้างแบบจำลองสามมิติของอาคารโครงสร้างไม้แบบเบา ซึ่งการศึกษาแบบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ไม่เชิงเส้น (LightFrame 3D) นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของอาคารโครงสร้างไม้แบบเบา ภายใต้สภาพการรับน้ำหนักแบบไม่เคลื่อนที่ ความเป็นเอกลักษณ์ของแบบจำลองนี้ คือ การนำไปใช้ของระบบไดอะแฟรม ซึ่งเป็นตัวแทนด้านเครื่องกลของรูปแบบการเสีรูปจากการรับน้ำหนัก จากการเชื่อมต่อจากแผ่นไปยังโครงในแต่ละจุด วิธีนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลด้านคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ และลักษณะการเสีรูปของตัวยึด เนื่องจากการรับน้ำหนักแบบไม่เคลื่อนที่ (สถิตศาสตร์) แบบจำลองสามารถวิเคราะห์อาคารโครงสร้างเบาของหลากหลายวัสดุ ส่วนประกอบโครงสร้าง และสภาพการรับน้ำหนัก ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมการรับน้ำหนัก หรือการควบคุมการเคลื่อนหลุดก็สามารถนำมาใช้เป็นประวัติข้อมูลที่ถูกต้องได้ แบบจำลองได้รับการพิสูจน์ และทดสอบตามทฤษฎี และการทดลอง ซึ่งประสบความสำเร็จมาแล้ว แบบจำลองนี้สามารถให้ข้อมูลด้านพฤติกรรม Hysteresis ของโครงสร้างภายใต้การรับน้ำหนักแบบสลับทิศ และการตอบสนองต่อแรงบิดเยื้องศูนย์ของอาคารสามมิติ





(a)



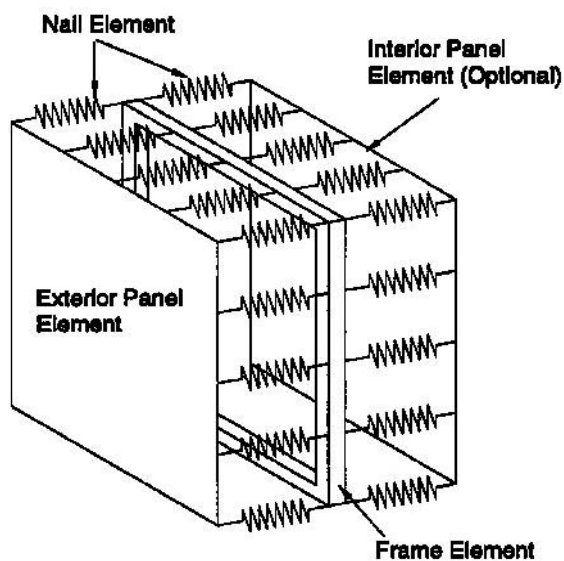
(b)

ภาพ 29 แสดง Example Graphic Files Generated by

หมายเหตุ: (a) Preprocessors

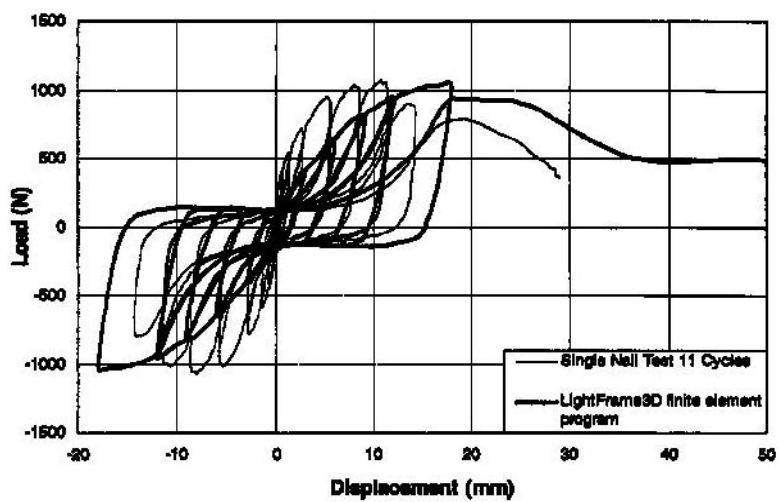
(b) Postprocessors

ที่มา: He, Lam and Foschi, 2001



ภาพ 30 แสดง Basic Element Unit

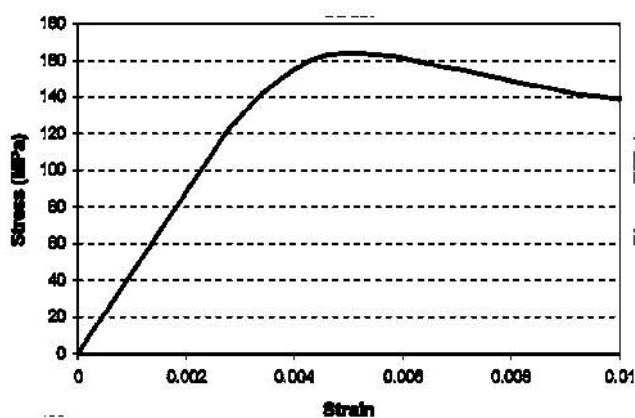
ที่มา: He, Lam and Foschi, 2001



ภาพ 31 แสดง Hysteresis Loops of Single Nail Connection Predicted by LightFrame3D Finite-Element Program versus Experimental Result (Eleven Cycles)

ที่มา: He, Lam and Foschi, 2001

Ngo, Mendis and Krauthammer (2007) ได้ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นคอนกรีต Ultrahigh-Strength Concrete (UHSC) ภายใต้แรงระเบิด โดยการทำการวิจัยเชิงทดลองสืบสวน โดยการออกแบบแผ่นคอนกรีตที่ทำมาจากวัสดุ UHSC ขนาด 2 x 1 เมตร จำนวน 4 แผ่น ที่มีความหนา และรายละเอียดแรงกระทำแตกต่างกัน และทำการทดสอบภายใต้แรงระเบิด เทียบเท่ากับระเบิด TNT 6 ลูก ที่ระยะห่าง 30 และ 40 เมตร ในเมืองวูเมอรา (Woomera) ทางตอนใต้ของประเทศออสเตรเลีย ในเดือนพฤษภาคม 2004 เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบ คักยภาพการทนแรงระเบิดของแผ่นคอนกรีต UHSC และแผ่นคอนกรีตแบบทั่วไป (NSC) ผลการทดสอบ และการสังเกตการณ์ พบว่า แผ่นคอนกรีต UHSC ที่มีความหนา 100 มิลลิเมตร สามารถทนต่อแรงระเบิดได้ดีมาก มีเพียงรอยแตกที่เล็กน้อย แผ่นคอนกรีต UHSC ที่มีความหนา 75 มิลลิเมตร มีความเสียหายปานกลาง ในขณะที่แผ่นคอนกรีตแบบทั่วไป Normal Strength Concrete (NSC) ที่มีความหนา 100 มิลลิเมตร แตกเสียหายทั้งหมด ผลจากการทดสอบในครั้งนี้ ถูกนำมาใช้ในการทำ Computer Code ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีต ที่อยู่ภายใต้แรงระเบิด หรือการรับน้ำหนักกระทำ



ภาพ 32 แสดง Static Stress-strain curve of UHSC

ที่มา: Ngo, Mendis and Krauthammer, 2007



a) Before the blast

ภาพ 33 แสดง UHSC Panel 1- Before Explosion

ที่มา: Ngo, Mendis and Krauthammer, 2007



ภาพ 34 แสดง UHSC Panel 2 After Explosion

ที่มา: Ngo, Mendis and Krauthammer, 2007



ภาพ 35 แสดง Panel 3 After Explosion

ที่มา: Ngo, Mendis and Krauthammer, 2007

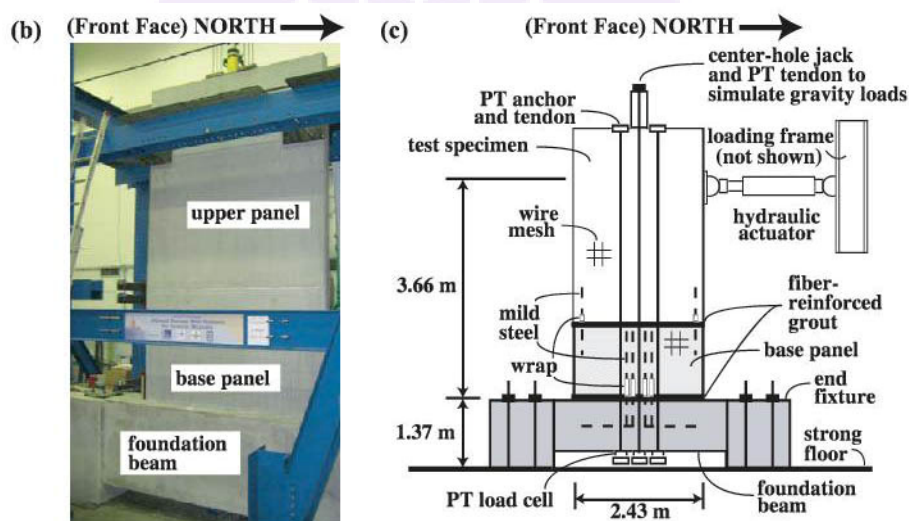


ภาพ 36 แสดง NSC Panel 4 – After Explosion

ที่มา: Ngo, Mendis and Krauthammer, 2007

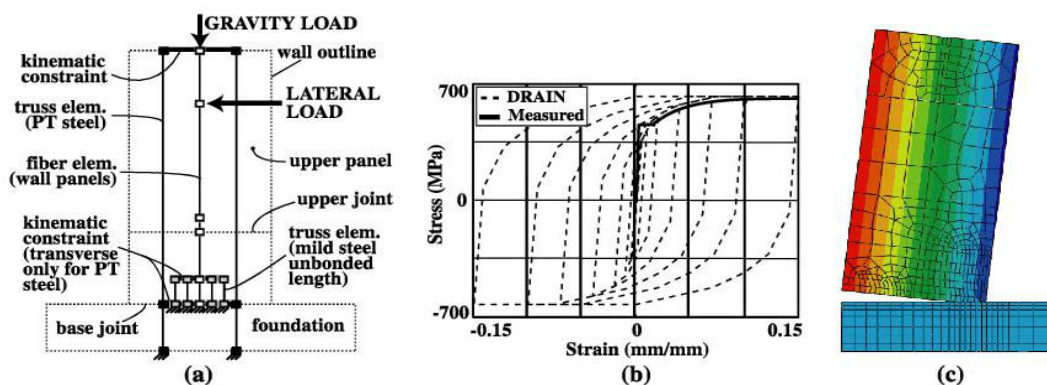
Smith, Kurama and McGinnis (2011) ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง การออกแบบ และวัดพฤติกรรมของผนังคอนกรีตกึ่งอัดแรงกิ่งสำเร็จรูป (Hybrid) สำหรับพื้นที่แผ่นดินไหว โดยอธิบายถึงการวัดพฤติกรรมของผนังคอนกรีตผสมสำเร็จกิ่งอัดแรงกิ่งสำเร็จรูป (Hybrid) จากการทดสอบการปรับขนาดสเกล 0.4 ภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร และประเมินการออกแบบและวิเคราะห์การลั่นสะเทือนของผนังคอนกรีตผสมสำเร็จรูป (Hybrid) โดยใช้ผลลัพธ์ของการทดลองและใช้ประโยชน์จากการผสมของเหล็กอ่อน (เช่น เกรด 400) และเหล็กที่มีความทนทานสูง (PT) สำหรับความต้านทานระหว่างด้านข้างที่ข้อต่อแวนอนนได้ ขั้นตอนการออกแบบแผ่นดินไหวเป็นไปตามมาตรฐาน ACI318 และใช้ ACI ITG-5.2 สำหรับออกแบบตัวอย่างสำหรับทดสอบ

ตาม ACI ITG-5.1 พฤติกรรมของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ได้จากการวัดด้วยเทคนิคการเก็บข้อมูลแบบทั่วไป และข้อมูลภาพดิจิทัลของความสัมพันธ์ของฐานข้อต่อที่สำคัญต่อแผงควบคุม และระหว่างแผงควบคุม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพของผนังคอนกรีตผสมสำเร็จรูป การเปรียบเทียบการออกแบบ และการวิเคราะห์คาดการณ์ โดยให้ความสำคัญกับการนำไปใช้กับแรงกระทำด้านข้าง การสลายพลังงาน พฤติกรรมของการเสริมเหล็ก และพฤติกรรมของข้อต่อแนวอนนอน ผลการทดสอบไม่พบตัวอย่างที่สามารถเข้าถึงระดับเคลื่อนตัวที่คาดไว้ เนื่องจากความไม่แข็งแรงกำลังอัดคอนกรีต และการโอบรัดเหล็กเสริมที่ฐานด้านหน้ายังไม่ดีพอ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของผนังไปถึงจุดวิบัติ สอดคล้องกับพฤติกรรมของของผนังที่คาดการณ์ไว้ในขั้นตอนการออกแบบ และโมเดลวิเคราะห์



ภาพ 37 แสดง (b) Photograph of Specimen (image courtesy of the authors);
And (c) Test Setup

ที่มา: Smith, Kurama and McGinnis, 2011



ภาพ 38 แสดง Analytical Modeling

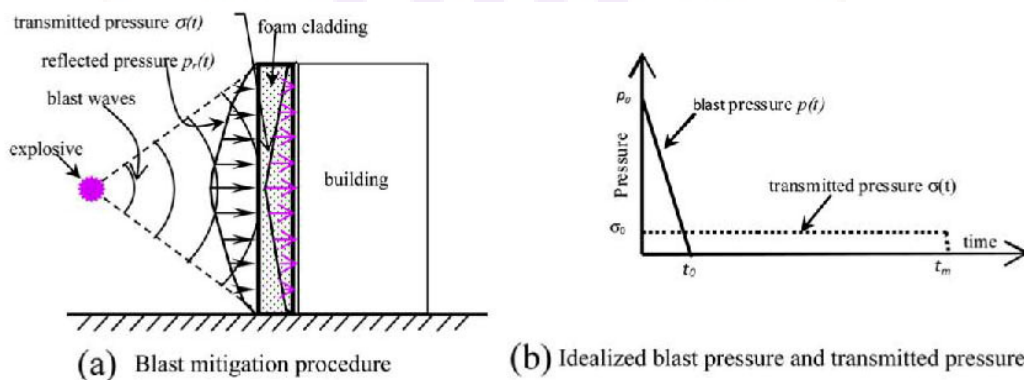
หมายเหตุ: (a) Fiber–element (DRAIN) model; (b) Mild Steel Stress–strain Behavior and (c) Finite–element (ABAQUS) model

ที่มา: Smith, Kurama and McGinnis, 2011

Hwang and Lee (2012, online) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบ 3D Solid ของผนังรับแรงเฉือนระดับส่วนจำลองโครงสร้าง (Sub-assembly) ภายใต้แรงด้านข้างของอาคาร 2 ชั้น 3 ชั้น 5 ชั้น และ 10 ชั้น ผลของจำนวนชั้นและพื้นที่เพิ่ม และคานาคู่ควบ โดยการสำรวจความแข็งแรง กำลัง ความเหนียว และรูปแบบการวิบัติ ผลการศึกษา พบว่า 1) เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นมากขึ้น แบบจำลองมีความแข็งแรง และความเหนียวน้อยลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อจำนวนชั้นมากขึ้น กำลังก็จะลดลง รูปแบบการวิบัติและความเสียหายของแบบจำลองทุกรูปแบบ ปรากฏในรูปแบบผสมของการวิบัติด้วยแรงดัด และแรงเฉือน 2) ผลการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ทำให้ผนังมีรอยแตก และความเสียหายทั้งแผ่น 3) คานาคู่ควบ มีผลในการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรง และกำลังเริ่มต้นของแบบจำลอง แต่ไม่ได้เพิ่มความเหนียวของแบบจำลอง ดังนั้นความสามารถในการต้านทานโมเมนต์การพลิกคว่ำ จึงขึ้นอยู่กับแรงคู่ควบของแรงดัด แรงกดที่ฐาน ประมาณ 30–40% ของความสามารถในการต้านทานโมเมนต์การพลิกคว่ำทั้งหมด อัตราส่วนนี้ไม่สามารถเปลี่ยนอย่างมีนัยสำคัญของการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้น

Wu and Sheikh (2013) ได้ศึกษาวิจัย แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ที่บรรเทาแรงระเบิด ด้วยการห่อหุ้มด้วยวัสดุโฟม ซึ่งสรุปได้ว่า การป้องกันโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญต่อระเบิดที่โจมตีจากผู้ก่อการร้าย จำเป็นต้องให้ความสนใจมากขึ้น วิธีแก้ไขที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการบรรเทาแรงระเบิด คือ การป้องกันด้วยการห่อหุ้มด้วยวัสดุโฟม งานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบ

ความสามารถของโฟมโลหะที่ใช้หุ้ม ซึ่งเป็นของแข็ง และสามารถดูดซับพลังงานระเบิดได้สูงมาก เพื่อนำมาใช้ป้องกันแรงระเบิดอีกชั้นก่อนถึงคอนกรีตเสริมเหล็ก แบบจำลองโครงสร้างคู่ของการห่อหุ้ม มีรากฐานจากเทคนิคไฟโนอีลิเมนต์ ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแสดงปริมาณการปฏิสัมพันธ์ระหว่างการห่อหุ้ม RC ที่มีต่อแรงระเบิด ปัจจุบันการตรวจสอบแผ่น RC เป็นตัวสนับสนุนขอบที่ตรงข้ามกันทั้งสองข้าง และขอบด้านที่เหลื่อมล้อย่างเป็นอิสระ แผ่นหนาทำหน้าที่เป็นคานในแบบจำลองที่ถูกนำเสนอ ซึ่งบริเวณขนาดเล็กมีแรงกดสูง เรียกว่า พื้นที่บานพับที่เชื่อมต่อกับบริเวณขนาดใหญ่ ส่วนที่เหลือของโครงสร้าง เรียกว่า พื้นที่ส่วนไม่ใช่บานพับ ชั้นโฟมที่ห่อหุ้มบนแผ่น RC จำลองแบบเป็นระบบก้อนสปริงขนาดใหญ่ ที่ถูกพิจารณาทิศทางน้ำหนักของชั้นโฟมที่เปลี่ยนรูป บริเวณบานพับของคานถูกจำลองกับองค์ประกอบของส่วนประสานมีความแข็งแรงที่หมุนได้ซึ่งได้รับมาจากแบบจำลองการหมุน โฟมเป็นแบบจำลองตามลำดับของก้อนขนาดใหญ่เหนือข้อต่อคานแต่ละอันซึ่งเชื่อมต่อกัน โดยสปริงที่ไม่มีความยืดหยุ่นจำนวนมากในทิศทางที่มีน้ำหนักซึ่งช่วยให้แบบจำลองมีชั้นโฟมที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ในขณะที่ชุดการทดสอบระเบิดถูกทดลองโดย DSTO (Defence Science and Technology Organisation, Australia) ที่พื้นที่การทดลองระเบิดใน Port Wakefield, South Australia เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของโฟมในการป้องกันแผ่น RC เมื่อโดนระเบิด ข้อมูลที่ถูกบันทึกจากการทดสอบระเบิดถูกนำมาสร้างแบบจำลองโครงสร้างปฏิสัมพันธ์การห่อหุ้มแบบคู่อีกด้วย



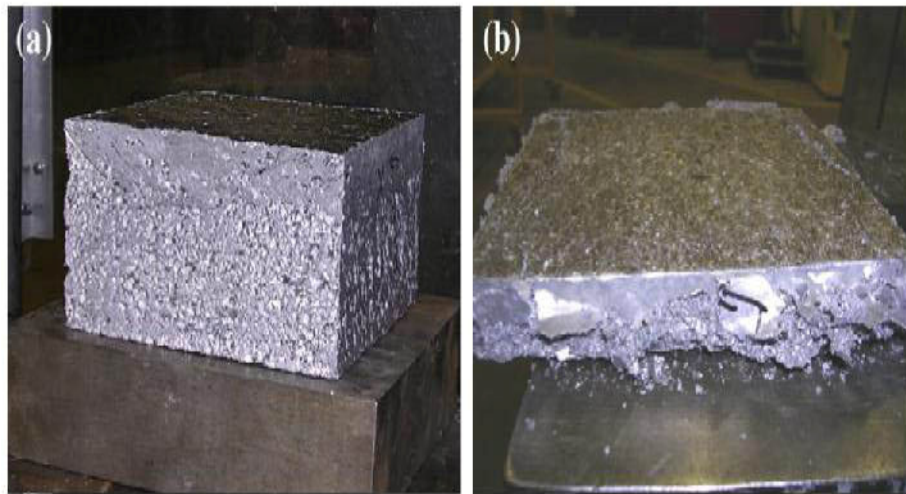
ภาพ 39 แสดง Mitigation mechanism of metallic foam as sacrificial layer and idealized blast pressure and transmitted pressure

ที่มา: Wu and Sheikh, 2013



ภาพ 40 แสดง Slab and aluminium foam deformation Event 4, 2009

ที่มา: Wu and Sheikh, 2013



ภาพ 41 แสดง 75 mm aluminium foam

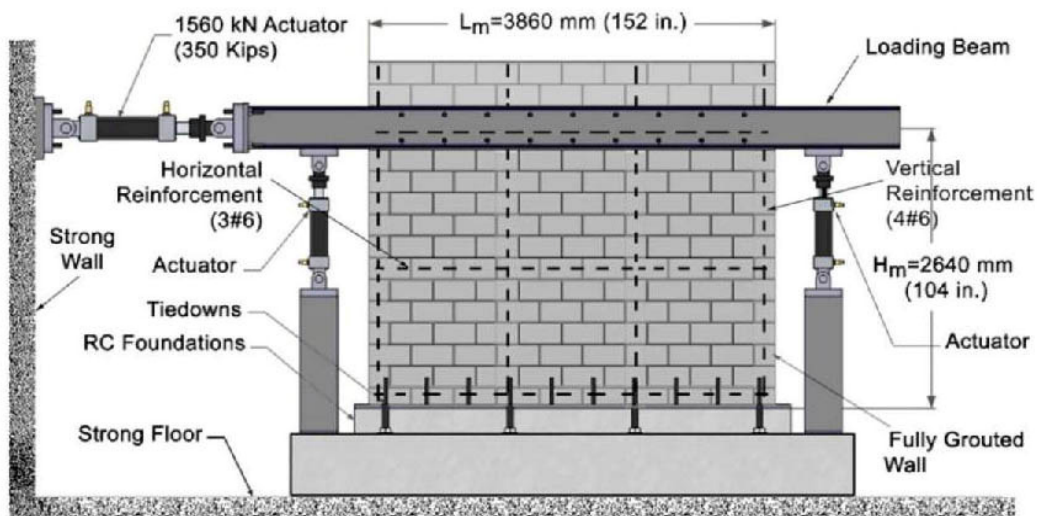
หมายเหตุ: (a) before compression test

(b) after compression test

ที่มา: Wu and Sheikh, 2013

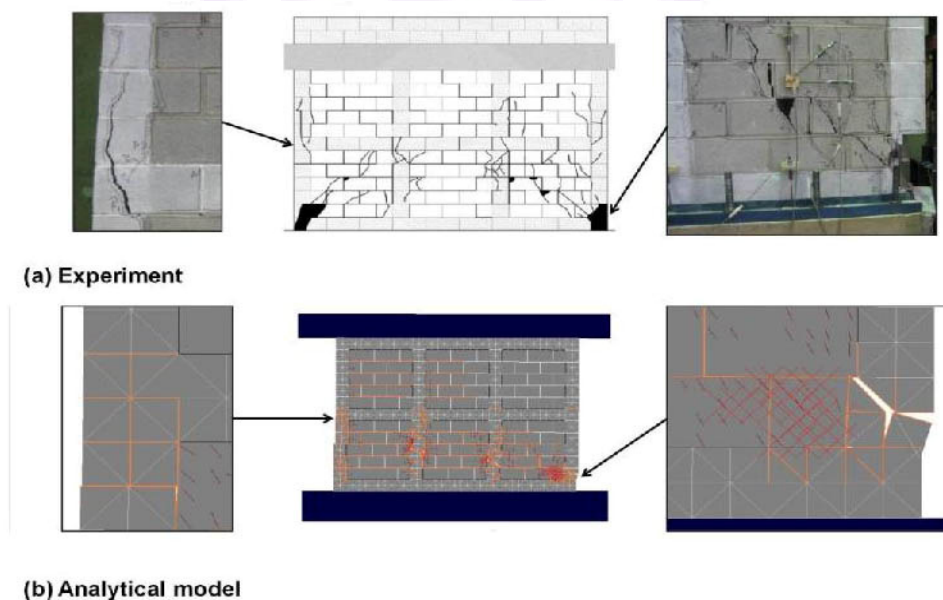
Xu and Wang (2013, Online) ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีทางคณิตศาสตร์ของผนังคอนกรีตหล่อในที่ กับชิ้นส่วนเหล็กฉากขอบด้านข้าง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพฤติกรรมแผ่นดินไหวผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จ กับชิ้นส่วนที่มีเหล็กเป็นขอบด้านข้าง โดยการทดสอบภาระแบบกึ่งสถิตยศาสตร์ (quasi-statically) ภายใต้ภาระแรงกระทำที่มีความแตกต่างของแรงกดในแนวตั้งของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น คือ ชิ้นส่วนผนังคอนกรีตเสริมแบบธรรมดา และชิ้นส่วนผนังคอนกรีตเหล็กฉากขอบด้านข้าง ซึ่งมีพฤติกรรมความเหนียวมากกว่ามาตรฐานรับแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในปัจจุบัน แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นเพื่อสำรวจหน้าที่ของชิ้นส่วนเหล็กฉากขอบด้านข้าง แบบจำลองแรกได้ปรับแก้ตามผลการทดลอง ซึ่งกำลัง ความแข็งแรง และการพัฒนารอยแตกร้าวสอดคล้องกับผลการทดลอง จากนั้นบริเวณที่เป็นเหล็กฉากเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการต้านทานแผ่นดินไหว ของผนังคอนกรีตหล่อในที่ สังเกตได้ว่า กำลังและความเหนียวของผนังชิ้นส่วนเหล็กฉากขอบด้านข้าง ให้ผลดีกว่าชิ้นส่วนเสริมเหล็กธรรมดา

Redmond, Stavridis and DesRoches (2014) ได้ศึกษา การพัฒนารูปแบบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับกำแพงคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็ก ซึ่งสรุปว่า ในแคริบเบียน การออกแบบอาคารแบบดั้งเดิม ประกอบด้วย โครงคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) ที่ใส่โครงคอนกรีตบล็อก (CMU) อันเป็นผลมาจากตระหนักถึงความเสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหวในแคริบเบียน วิศวกรจำนวนมากเริ่มส่งเสริมการใช้การเสริมเหล็ก และฉาบปูนกำแพงคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กก่อเป็นส่วน ๆ เพื่อเชื่อมต่อไปยังโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อป้องกันการพังถล่มเมื่อเกิดแผ่นดินไหว สิ่งนี้ได้สร้างขึ้นมาเป็นโครงสร้างอิฐคอนกรีตแบบผสม ถึงแม้ว่าจะมีคำแนะนำ การประมวลผลเพื่อใช้ในการประเมินโครงสร้างที่มีอยู่ แบบที่ไม่มีเสริมเหล็กที่ก่ออิฐ แต่ก็ไม่มีมาตรฐานกระบวนการเสริมเหล็กถึงปัจจุบัน วิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบ หรือเลียนแบบพฤติกรรมของแผ่นเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำด้านข้าง คือ การใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FE) งานวิจัยนี้นำเสนอแผนจำลองวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ สำหรับการฉาบปูนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในโครงสร้างคอนกรีตก่ออิฐแบบผสม แผนแบบจำลองด้วยการทดสอบแบบสลับทิศบนกำแพงก่ออิฐเสริมเหล็กบริเวณที่ถูกฉาบปูน และผลการทดลองจากตัวอย่างทดสอบหนึ่ง คือ รูปแบบรอยแตกร้าวในแบบจำลองมีความคงที่ จากการสังเกตการทดลองรูปแบบความล้มเหลว ความแข็งแรง ในระดับเริ่มต้น ความแข็งแรงในระดับสูงสุด และพฤติกรรมหลังจุดสูงสุดของแบบจำลองวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ผลลัพธ์จากการศึกษานี้บ่งชี้ว่าแบบจำลองสามารถจับลักษณะหลักของการตอบสนอง ซึ่งรวมไปถึงรูปแบบรอยแตกร้าว และช่วงเวลาของความเสียหายได้อย่างประสบความสำเร็จ



ภาพ 42 แสดง Test set up for cyclic loading of partially grouted reinforced masonry wall

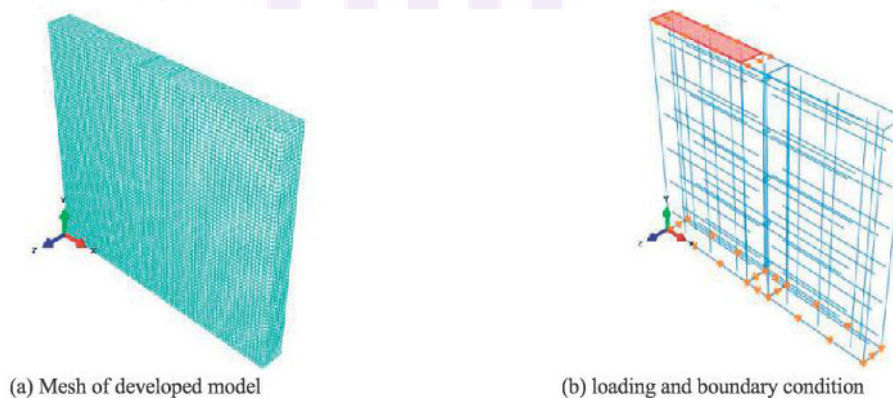
ที่มา: Minaie, 2009; Redmond, Stavridis and DesRoches, 2014



ภาพ 43 แสดง Cracking patterns at 0.75% drift in the experiment and the FE model

ที่มา: Minaie, 2009; Redmond, Stavridis and DesRoches, 2014

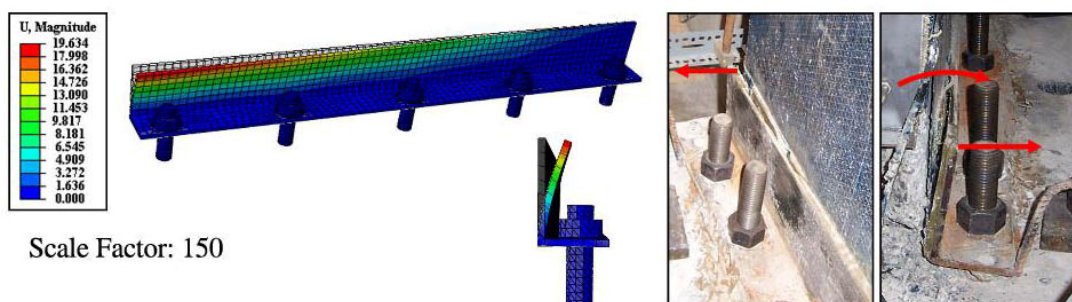
Vaghei, et al. (2014) ได้ศึกษาการประเมินพฤติกรรมของผนังหล่อสำเร็จกับจุดต่อผนัง ซึ่งชั้นส่วนประกอบที่ผลิตในระบบการก่อสร้างอุตสาหกรรม (IBS) ประกอบด้วย ผนัง เสา คาน และหลังคา ซึ่งในการก่อสร้างแต่ละพื้นที่ ได้นำชิ้นส่วนประกอบแต่ละอันมาประกอบ เป็นผลสำเร็จในสถานที่ก่อสร้าง การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาการใช้แบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3D ของผนังหล่อสำเร็จ และจุดต่อสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังภาพ 44 ซึ่งเป็นพฤติกรรมระหว่างคอนกรีตหล่อในที่ และคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบการเสริมเหล็ก และคอนกรีต โดยได้จำลองพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดไม่เชิงเส้น เพื่อพิจารณาความคราก ของเหล็กและคอนกรีต เป็นการประเมินประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ภายใต้แรงกระทำด้านข้าง และจุดต่อ ในลักษณะความเค้น การเสียรูป และความเครียดแบบคงรูปสมบูรณ์ ผลการศึกษา สรุปว่า พฤติกรรมของผนังหล่อสำเร็จ มีการเชื่อมต่อระหว่างการรับแรงด้านข้างเพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของผนัง 2 ผนัง มีการเชื่อมต่อภายใต้แรงกระทำด้านข้าง เมื่อพิจารณาการรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นในผนังที่ผลิตในระบบการก่อสร้างอุตสาหกรรม สามารถ กล่าวได้ว่า รอยแตกในผนัง และจุดต่อส่วนใหญ่ เกิดขึ้นที่ด้านล่างของผนัง ผลการทดลอง ชี้ให้เห็นว่า การเชื่อมต่อทั่วไปมีรอยแตกเล็กน้อยระหว่างผนังในระบบการก่อสร้างอุตสาหกรรม และจุดต่อ ซึ่งจุดต่อทั่วไปมีประสิทธิภาพต่ำในแง่ของการรับแรงด้านข้างในแนวระนาบ กล่าวได้ว่า การเชื่อมต่อทั่วไปไม่สามารถรับแรงด้านข้างได้



ภาพ 44 แสดง Meshing, loading and boundary condition of wall panels and connection

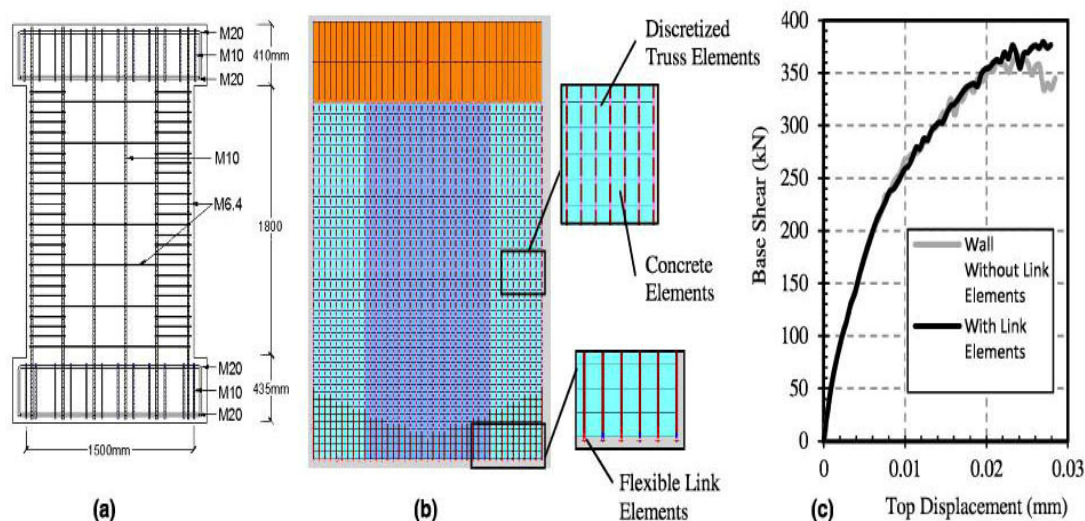
ที่มา: Vaghei, et al., 2014, p. 287

Woods, Cruz–Noguez and Lau (2014) ได้ศึกษานวัตกรรมระบบท่อนยึดในกำแพงโพลีเมอร์เสริมเส้นใยเสริมเหล็กสำหรับวิธีเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหว ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการศึกษาจำนวนมากได้แสดงให้เห็นถึงการใช้แผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) เชื่อมภายนอกในการตัดแปลงผนังรับเหือนคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) สำหรับแผ่นดินไหวนั้นมีประสิทธิภาพในการลดความล้มเหลวจากแรงเหวี่ยงก่อนเวลาอันควร เพิ่มความสามารถในการสลายตัวของพลังงาน และเพิ่มทั้งความแข็งแรงรับแรงดัด และความแข็งแรงก้ำกึ่งในการใช้งาน ทั้งการซ่อมแซม และการทำให้แข็งแรง แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของแผนการตัดแปลงโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ส่วนมากถูกจำกัดโดยพฤติกรรมไม่ยึดเหนี่ยวหรือการลื่นไถลระหว่างวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย และสารตั้งต้นของคอนกรีต จากการศึกษาตัวแทนการดัดแปลงกำแพงตัดเหือนของแผ่นดินไหว ทั้งการออกแบบปัจจุบัน และการออกแบบดั้งเดิมโดยใช้แผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีการเชื่อมต่อภายนอก ณ Carleton University องค์ประกอบสำคัญของระบบการตัดแปลงโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน คือ นวัตกรรมระบบท่อนยึด จุดประสงค์ด้านประสิทธิภาพของระบบยึดนี้ เพื่อทำให้มั่นใจว่า น้ำหนักที่ขนส่งโดยแผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแนวตั้ง จะสามารถส่งต่ออย่างมีประสิทธิภาพไปยังองค์ประกอบของโครงสร้างที่อยู่ติดกัน และความล้มเหลวที่อาจเกิดก่อนเวลาของระบบโพลีเมอร์เสริมเส้นใย อันเนื่องมาจากการลุดตัวเชื่อมของคอนกรีตโพลีเมอร์เสริมเส้นใยถูกป้องกันอีกด้วย งานวิจัยนี้แสดงถึงการศึกษาวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อสำรวจลักษณะของประสิทธิภาพระบบท่อนยึด และเพื่อพัฒนาระบบการออกแบบที่เหมาะสม ตัวอย่างการออกแบบ แผ่นผังการออกแบบ และวิธีการเบื้องต้นสำหรับการออกแบบ และการใช้งานของระบบท่อนยึดในกำแพงโพลีเมอร์เสริมเส้นใยเสริมเหล็ก



ภาพ 45 แสดง Prying action of the steel angle anchors flange in experimental testing and analytical modeling (mm)

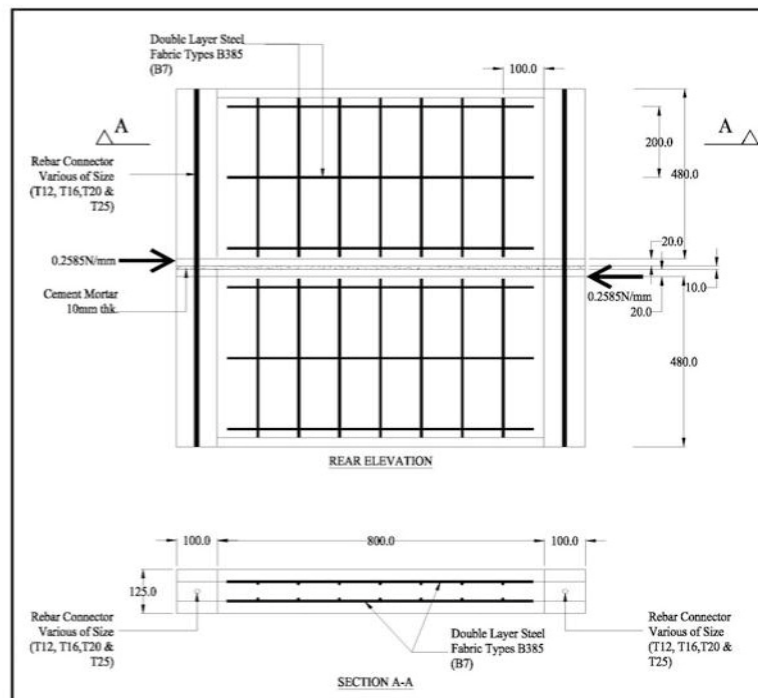
ที่มา: Lambard, et al., 2000; Woods, Cruz–Noguez and Lau, 2014



ภาพ 46 แสดง (a) Shear wall reinforcement detail; (b) Shear wall finite element model; (c) Comparison of wall response with and without anchor

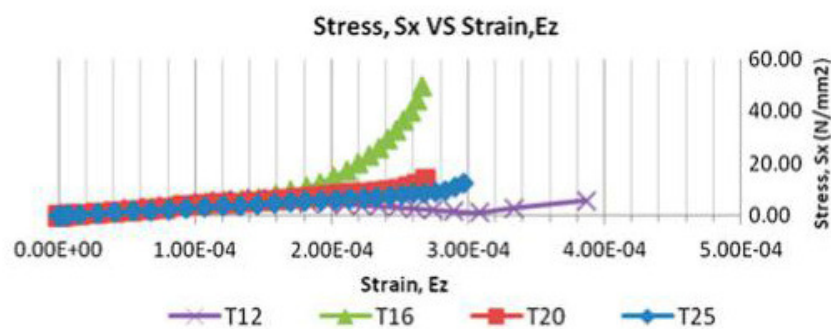
ที่มา: Wong and Vecchio, 2002; Woods, Cruz-Noguez and Lau, 2014

Abdullah, Sobri and Hamzah (2015) ได้ศึกษาวิเคราะห์ความสามารถด้านทานแรงเฉือนของจุดต่อในผนังเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้แบบจำลอง Luscas 3D กล่าวคือ ผนังเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นนวัตกรรมใหม่ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาความก้าวหน้าของผนังเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็ก (ภาพ 47) โดยใช้แบบจำลอง จำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ T12, T16, T20 และ T25 ซึ่งของผนังเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็กที่สร้างขึ้น มีขนาด 123 มม. x 1,000 มม. x 500 มม. (ความหนา: ความยาว: ความสูง) การวิจัยนี้เกี่ยวกับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ที่พิจารณาการโก่งตัวมากที่สุดของผนังเดี่ยคอนกรีตเสริมเหล็กที่ด้านทานแรงด้านข้าง ดังนั้นแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบนี้ ถูกวิเคราะห์โดยการสังเกตการณ์โก่งตัว ความเค้น และความเครียด ผลการศึกษาในกราฟ (ภาพ 48) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด แรงกระทำ และการโก่งตัว ขนาดของจุดต่อเสริมเหล็กมีผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงเฉือน ในรูปแบบการโก่งตัวทางด้านข้าง ความเค้นและความเครียด จากการศึกษาสรุปได้ว่า เส้นผ่าศูนย์กลางจุดต่อเสริมเหล็กที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้การโก่งตัวทางด้านข้างน้อยลง



ภาพ 47 แสดง RC stocky wall detailing model with rebar connector of various size

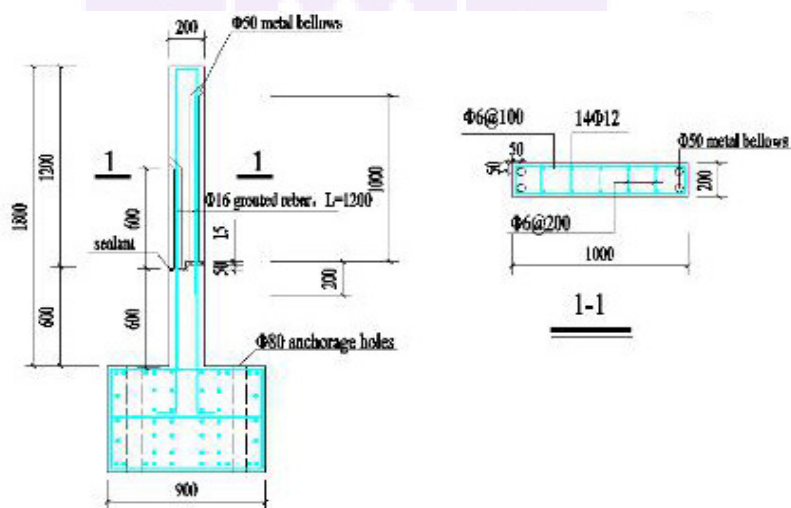
ที่มา: Abdullah, Sobri and Hamzah, 2015, Online



ภาพ 48 แสดง Graph of stress (S_x) versus strain (E_x) of RC stocky wall panel for model 1, 2, 3 and 4

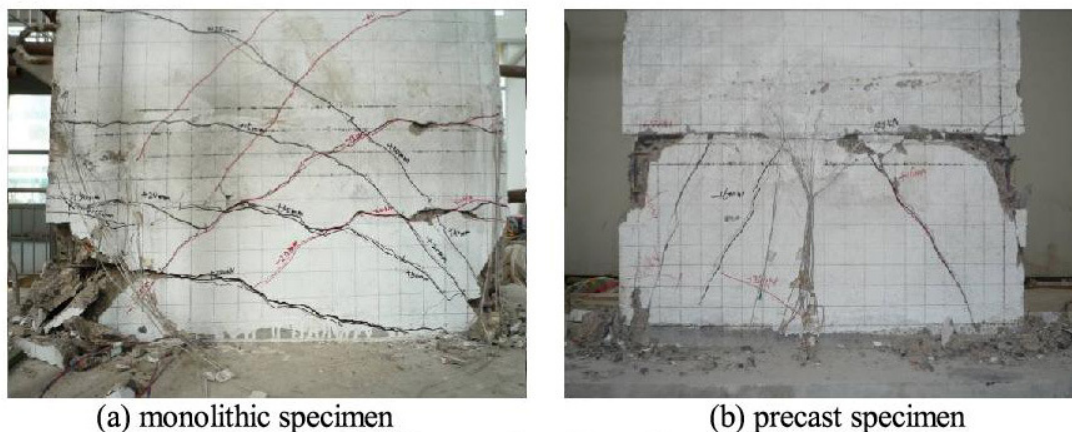
ที่มา: Abdullah, Sobri and Hamzah, 2015, Online

Lei (2015, Online) ได้ศึกษาวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นของผนังรับแรงเฉือนหล่อในที่แบบใหม่ ซึ่งผนังรับแรงเฉือนตัวใหม่ มีแท่นเหล็กก่อนโผล่ออกมาจากผนังด้านล่าง และยึดกับผนังด้านบน ที่นำมาสวมท่อเหล็กด้านบน และทำการแก้สคอนกรีตเพื่อความสมบูรณ์ของผนังทั้งหมด (ภาพ 49) จุดต่อในแนวระนาบของผนังรับแรงเฉือนหล่อในที่ ได้ถูกกำหนดไว้สูงกว่าพื้นชั้นนั้น ดังนั้น กลไกแรงของผนังรับแรงเฉือนตัวใหม่ อาจจะแตกต่างจากกลไกแรงผนังรับแรงเฉือนรูปแบบเดิม (ภาพ 50) ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาทดลองผนังรับแรงเฉือนรูปแบบใหม่ โดยใช้การทดลองรับแรงแผ่นดินไหว และใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นทำการทดสอบพฤติกรรมของชิ้นทดสอบทางด้านข้างของชิ้นส่วนในห้องทดสอบ ผลการประเมินเปรียบเทียบแรงต้านข้าง และการโก่งตัวทางด้านข้างด้วยกราฟเส้นโค้งของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น พบว่า มีความสอดคล้องกับชิ้นทดสอบ (ภาพ 51)



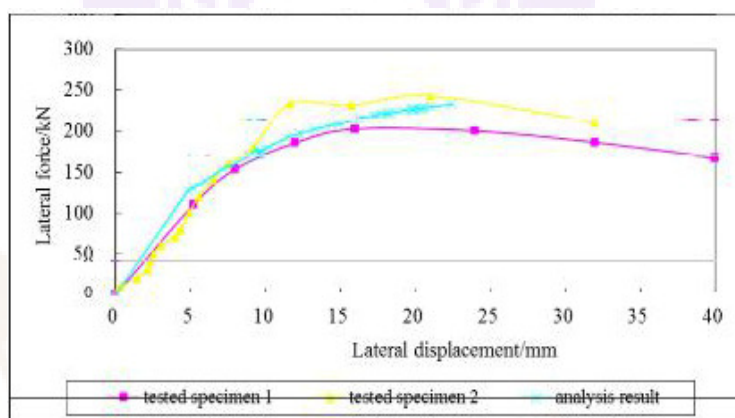
ภาพ 49 แสดง Details of tested precast specimen

ที่มา: Lei, 2015, Online



ภาพ 50 แสดง Failure modes of tested specimens

ที่มา: Lei, 2015, Online



ภาพ 51 แสดง Comparison of the curves

ที่มา: Lei, 2015, Online

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

ทรงพล จารุวิศิษฎ์ และประยุทธ์ สมานรัตนเสถียร (2555) ได้เสนอแนวทางปฏิบัติจริงในการออกแบบและก่อสร้างอาคารสูงประมาณ 30 ชั้น ด้วยระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปจากโครงการจริงในประเทศไทย โดยนำเสนอผลการวิเคราะห์ห้ออกแบบ เปรียบเทียบผลกับอาคารรูปแบบเสาและพื้น post-tension ที่นิยมใช้กัน ผลการเปรียบเทียบ พบว่า ระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป

สามารถจัดรูปแบบโครงสร้างให้มีจำนวนผนังคอนกรีตจำนวนมาก ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์เป็นโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนของอาคาร ในขณะที่อาคารรูปแบบเสา และพื้น post-tension จะมีจำนวนผนังรับแรงเฉือนที่น้อยกว่า ทำให้พฤติกรรมของอาคารมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของแรงในแนวด้านข้างที่กระจายเข้าสู่ผนังรับแรงเฉือนหลักนั้น พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันในด้านความแข็งแรงของโครงสร้างอาคารระบบชั้นส่วนสำเร็จรูป สามารถออกแบบให้แข็งแรงถูกต้องได้ตามหลักวิศวกรรม นอกจากนี้ ในบทความยังนำเสนอเทคนิคในการออกแบบโครงสร้างผนังสำเร็จรูปรับแรง การเสริมเหล็ก การติดตั้งชิ้นส่วน และรูปแบบรอยต่อผนังที่ใช้ในโครงการก่อสร้างจริง

โชติพงษ์ จันทรมิ และสันติ ชินานูวัตินวงศ์ (2553) ได้ศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้างอาคาร ระหว่างโครงสร้างระบบผนังรับน้ำหนักกับโครงสร้างระบบเสา คาน โดยใช้แบบอาคารพักอาศัย ของกรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 28 แบบ ที่มีความแตกต่างกัน การออกแบบโครงสร้างผนังรับน้ำหนัก ใช้มาตรฐานของ ว.ส.ท. การคำนวณต้นทุนการก่อสร้าง ราคาวัสดุใช้ราคากลางของสำนักดัชนีเศรษฐกิจและพาณิชย์ ค่าแรงใช้ของกรมบัญชีกลาง ระยะเวลาการก่อสร้าง ใช้หลักการประมาณจากอัตราการทำงานต่อวัน และจากการเก็บข้อมูลจากสถานที่ก่อสร้างจริง ผลการศึกษา พบว่า อาคารพักอาศัย ขนาดตั้งแต่ 250 ตร.ม. ขึ้นไป ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับน้ำหนักราคาต่อก่อสร้างถูกที่สุด รองลงมา คือ ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปเสา คาน ระบบผนังรับน้ำหนักหล่อในที่ และระบบเสา คานหล่อในที่ ตามลำดับ และพบว่า อาคารพักอาศัย ขนาดตั้งแต่ 125 ตร.ม. ขึ้นไป ระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปผนังรับน้ำหนักให้ระยะเวลาการก่อสร้างน้อยที่สุด รองลงมาเป็นระบบชั้นส่วนสำเร็จรูปเสา คาน ระบบผนังรับน้ำหนักหล่อในที่ และระบบเสาคานหล่อในที่ ตามลำดับ

วรวิทย์ ตีระนะวาณิช และแหลมทอง เหล่าคงถาวร (2553) ได้ศึกษารูปแบบของรอยต่อระบบผนังบ้านสำเร็จรูป เพื่อแก้ปัญหาการรั่วซึมของน้ำฝน จากการศึกษา พบว่า รอยต่อแบบบังใบสามารถต้านทานต่อแรงดันน้ำ และปริมาณน้ำฝนได้มากกว่ารอยต่อแบบเข้าลิ้น โดยมีประสิทธิภาพในการต้านทานการรั่วซึมได้ดีกว่า 15-30 เปอร์เซ็นต์ โดยความกว้างของรอยต่อแบบบังใบที่เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการรั่วซึมของน้ำฝนได้ โดยให้ด้านที่แคบกว่าอยู่ด้านนอกของบ้าน และด้านที่กว้างกว่าอยู่ด้านในของบ้านเสมอ และรอยต่อแบบเข้าลิ้นระยะของร่องลิ้นที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการรั่วซึมของน้ำฝนได้ การออกแบบให้รูปร่างรอยต่อทำมุมกับแนวการรั่วซึมของน้ำฝนมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการต้านทานการรั่วซึมของน้ำฝนได้ดีขึ้น จากการศึกษายังพบอีกว่า รูปแบบของรอยต่อที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นแบบเข้าลิ้น และบังใบ สามารถต้านทานการรั่วซึมได้ 2.5 และ 3.5 เท่า

ของค่ามาตรฐาน ASTM E-311 ถึงแม้วัสดุยูเรียแวน เช่น non-shrink หรือ PU จะเสื่อมสภาพไปแล้วก็ตาม

บุญชัย เชิญเกียรติประดับ และอโณทัย เทพหัสติน ณ อยุธยา (2550) ได้ศึกษาการก่อสร้างอาคารระบบกึ่งสำเร็จรูป โดยมีระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่ ผสานกับชิ้นส่วนสำเร็จรูป โดยมีคาน และเสาเป็นโครงสร้างรับน้ำหนัก และตั้งชื่อว่า ระบบ SKD ซึ่งเป็นระบบที่พัฒนาขึ้นโดยคนไทย และมีการจดสิทธิบัตรเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากการศึกษาเปรียบเทียบราคาการก่อสร้างบ้านพักอาศัย พื้นที่ 170 ตารางเมตร ระหว่างระบบเอสเคดี กับการก่อสร้างแบบก่ออิฐฉาบปูนแบบเดิม พบว่า จุดคุ้มทุนของการก่อสร้างด้วยระบบเอสเคดี อยู่ที่ 20 หลัง

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัทธศานนท์ (2550) ได้ศึกษาแนวทางการออกแบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตหล่อสำเร็จ ซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรม และแนวทางการออกแบบชิ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบผนังรับน้ำหนักของบ้านพักอาศัย โดยใช้แบบมาตรฐานบ้านเดี่ยว 2 ชั้น โครงการบ้านเอื้ออาทร การเคหะแห่งชาติ เป็นกรณีศึกษา ซึ่งการศึกษานี้ได้แนะนำขั้นตอนการออกแบบตามพฤติกรรมการรับน้ำหนักของแผ่นผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ พฤติกรรมขณะถอดแบบ ขณะยกขนย้าย และขณะใช้งาน ในขณะถอดแบบ จะวิเคราะห์หน่วยแรง และออกแบบ เพื่อป้องกันการแตกร้าว รวมถึงไปถึงการออกแบบด้านกำลังเพื่อรับแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักตัวเอง ในขณะยก และขนย้ายน้ำหนักตัวเอง จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวที่หน้าตัดวิกฤตได้ ส่วนในขั้นตอนการใช้งาน จะพิจารณากำลังรับแรงอัดของแผ่นผนัง ซึ่งต้องรับน้ำหนักบรรทุกตายตัว และน้ำหนักบรรทุกจร จากการศึกษา พบว่า ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์แรงในขณะถอดแบบ มีกำลังเพียงพอที่จะรองรับหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นผนังในขณะยกขนย้าย และหน่วยแรงอัดในขณะใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยที่ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการมีค่าเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดให้เท่านั้น

จากแนวคิด ทฤษฎีเกี่ยวกับแผ่นดินไหว ข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้างอาคาร เพื่อป้องกันแผ่นดินไหว แรงกระทำด้านข้าง ระบบชิ้นส่วนหล่อสำเร็จผนังรับแรง ระเบียงวิธี-ไฟไนต์อีลิเมนต์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น นำมาเป็นแนวทางในการจัดทำวิจัย “พฤติกรรมของผนังรับน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งหล่อสำเร็จภายใต้แรงด้านข้าง” ซึ่งจะนำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัย และผลการวิจัยในบทต่อไป

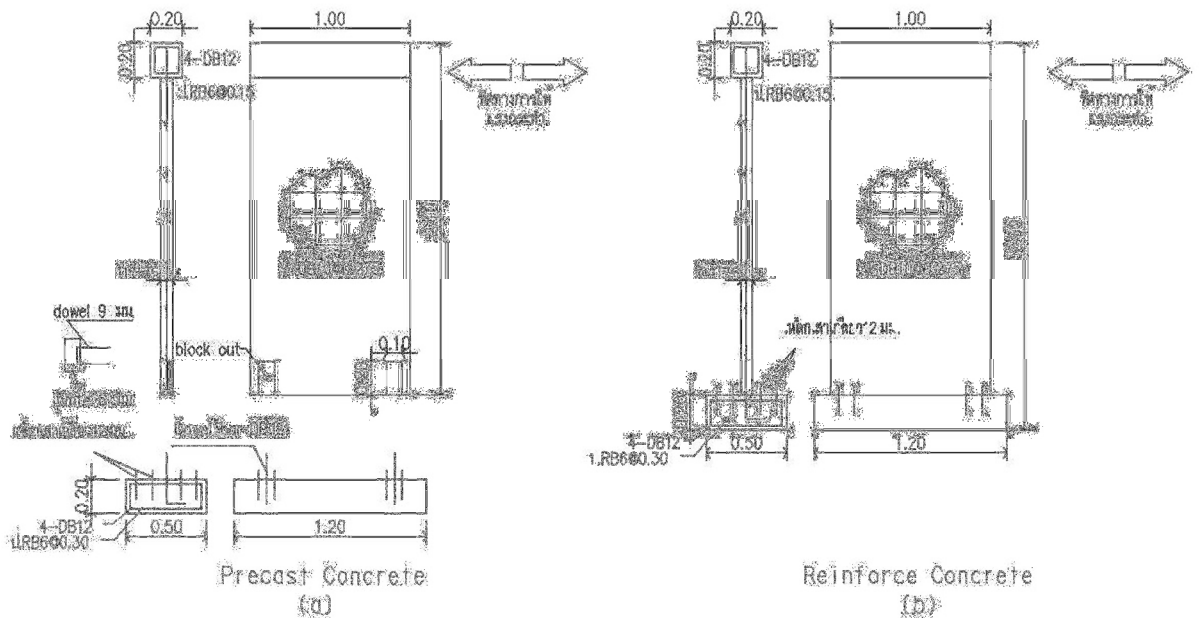
บทที่ 3

ผลการทดสอบและวิเคราะห์

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะของตัวอย่างทดสอบ การเตรียมตัวอย่างทดสอบ วิธีดำเนินการวิจัยในส่วนของทดสอบระบบชิ้นส่วนคอนกรีตหล่อในที่ (Reinforce Concrete Wall) และชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรับแรง (Precast Concrete Wall) ในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบแรงด้านข้างแบบสลับทิศตามข้อกำหนดมาตรฐาน ACI T1.1-01 (American Concrete Institute, 2001)

ตัวอย่างทดสอบ

1. สร้างชิ้นทดสอบขนาด 3/4 เท่า ของขนาดจริง เพื่อใช้เป็นตัวแทนของระบบชิ้นส่วนสำเร็จผนังคอนกรีตสำเร็จรูป จำนวน 1 ชั้น ที่จะศึกษา โดยพิจารณาผนังที่ไม่มีช่องเปิด เพื่อตัดตัวแปรที่เป็นช่องเปิดออกไปก่อน ตัวอย่างชิ้นทดสอบผนังสำเร็จรูป (Precast Concrete Wall) ที่คาดว่าจะทดสอบ แสดงดังภาพ 52 (a)



ภาพ 52 แสดงตัวอย่างชิ้นทดสอบชิ้นส่วนสำเร็จผนังรับแรง

2. สร้างชิ้นทดสอบขนาด 3/4 เท่า ของขนาดจริง เพื่อใช้เป็นตัวแทนของระบบชิ้นส่วนสำเร็จผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 1 ชั้น ที่จะศึกษา โดยพิจารณาผนังที่ไม่มีช่องเปิด

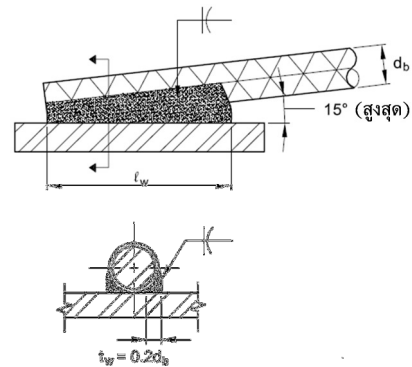
เพื่อตัดตัวแปรที่เป็นช่องเปิดออกไปก่อน ตัวอย่างชิ้นทดสอบผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Wall) ที่คาดว่าจะทดสอบ แสดงดังภาพ 52 (b)

ชิ้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ มีความสูง 2,300 มม. ตั้งแต่บนจนถึงฐานราก ผนังมีความกว้าง 1,000 มม. และหนา 75 มม. ภายในเสริมเหล็กตะแกรง DB10@275 มม. (ภาพ 52) เพื่อให้อัตราส่วนเหล็กเสริมในแนวนอน และแนวตั้งเป็นเช่นเดียวกับปริมาณเหล็กเสริมในผนังที่มีการใช้งานในอาคารบ้านพัก 2 ชั้น ในประเทศไทย ซึ่งนิยมใช้ DB12@250 มม. และมีผนังหนา 100 มม. ที่ด้านบนมีท่อนคอนกรีต ความหนา 200 x 200 มม. เพื่อยึดกับหัวสลักไฮดรอลิก ส่วนด้านล่างเป็นฐานสำหรับยึดกับพื้นห้องทดสอบ ชิ้นทดสอบมีการหล่อขึ้นส่วนแยกจากฐานราก เพื่อจำลองพฤติกรรมให้คล้ายคลึงกับผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ แล้วนำมาติดตั้งยึดกับฐานราก ด้วยการเชื่อม ยึดกับเหล็กเดือย 12 มม. ในฐานราก และแผ่นเหล็กหนา 6 มม. ที่ฝังในผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (ภาพ 53)



ภาพ 53 แสดงการเตรียมชิ้นทดสอบในเหมือนกับการทำงานจริง

งานวิจัยนี้ได้นำรูปแบบรายละเอียดจุดต่อระหว่างผนังรับแรงชั้นล่าง และชั้นบน โดยการใช้การเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กกับเหล็กเดือย มาทดสอบเพื่อหาความสามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้าง



ภาพ 54 แสดงรายละเอียดจุดต่อระหว่างผนังรับแรงชั้นล่างและชั้นบน
โดยใช้การเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กกับเหล็กเดือย

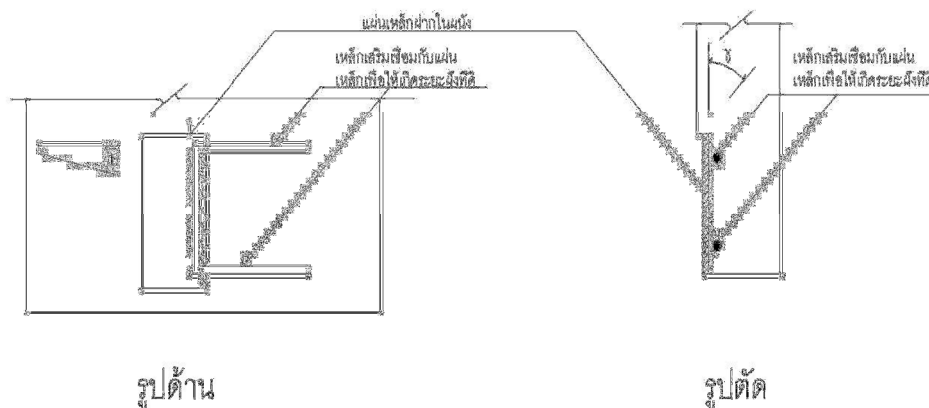
ลักษณะของรายละเอียดของแผ่นเหล็กที่ฝังในผนัง แสดงในภาพ 55 แผ่นเหล็กดังกล่าว จะใช้เหล็กเดือย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. จำนวน 2 เส้น มีความยาวเพียงพอให้เกิดระยะ ฝังที่ดี และเชื่อมกับแผ่นเหล็กหนา 6 มม. ความสามารถต้านทานแรงดึง (T) สามารถคำนวณจาก (5)

$$T = 0.95A_s(0.5f_y)\cos\beta\cos\gamma \quad (5)$$

A_s เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเดือย

f_y เป็นกำลังดึงครากของเหล็กเดือย

β และ γ มุมเอียงของเหล็กเดือยเทียบกับแนวราบและแนวตั้งตามลำดับ ปกติมีค่า ประมาณ 20–30 องศา



ภาพ 55 แสดงลักษณะการเชื่อมแผ่นเหล็กที่ฝังในผนัง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการเตรียมเหล็กตะแกรง และเหล็กเสริม ในฐานให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ การเตรียมตัวอย่างจะแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นตัวอย่างผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforce Concrete Wall) และส่วนที่เป็นตัวอย่างผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Wall) คือ ชั้นทดสอบแบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Wall) ในการเตรียมตัวอย่างผนังคอนกรีตสำเร็จรูป จะทำโดยเริ่มทำการผูกเหล็กที่ใช้เป็นผนัง และฐานแยกจากกัน (ตามแบบ) แล้วติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauges) ที่เหล็กเสริม จากนั้นทำการประกอบแบบหล่อแล้วเทคอนกรีต

ส่วนที่เป็นชั้นทดสอบแบบ ผนังคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Reinforce Concrete Wall) ทำการผูกเหล็กที่ใช้เป็นฐานพร้อมผนัง ติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauges) เทคอนกรีตในแบบหล่อเตรียมทดสอบ

รายละเอียดในการหล่อตัวอย่าง ได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม.จำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง คอนกรีตที่ใช้มีกำลังอัดเฉลี่ย 23.5 Mpa โดยในระหว่างเทคอนกรีตลงในตัวอย่างนั้น จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ ทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม ดังตาราง 6 เนื่องจากได้ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด และจะต้องทำการจี้คอนกรีตในแบบหล่อ เพื่อให้คอนกรีตในแบบหล่อมีเนื้อแน่นปราศจากรูโพรง และเมื่อเทคอนกรีตจนได้ระดับที่ต้องการแล้ว จึงทำการปาดหน้าให้เรียบร้อย

ตาราง 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

ชนิดของเหล็กเสริม	DB12	DB10	RB9
กำลังดึงคราก (MPa)	420	425	350
กำลังดึงประลัย (MPa)	530	562	486



ภาพ 56 แสดงการเตรียมเหล็กเสริมในผนังคอนกรีตสำเร็จรูปและผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก



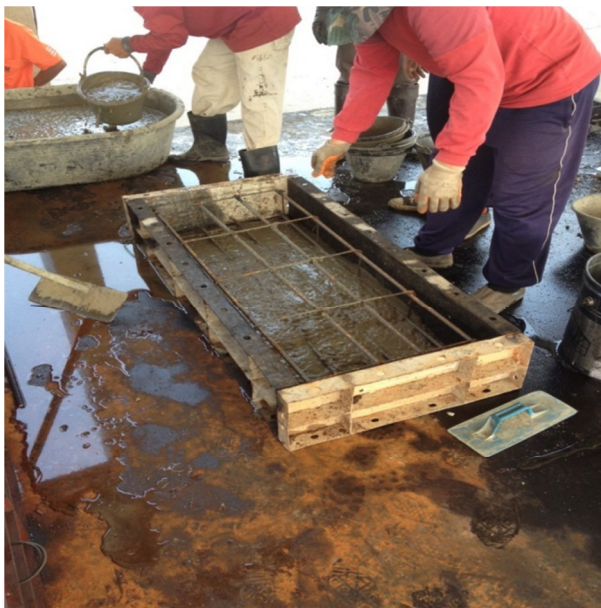
ภาพ 57 แสดงการเตรียมเหล็กเสริมในฐานผนังคอนกรีตสำเร็จรูป



ภาพ 58 แสดงการติดตั้งแถววัดความเครียดที่ผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ



ภาพ 59 แสดงการเทคอนกรีตทำตัวอย่างส่วนผนังังคอนกรีต



ภาพ 60 แสดงการเทคอนกรีตฐาน



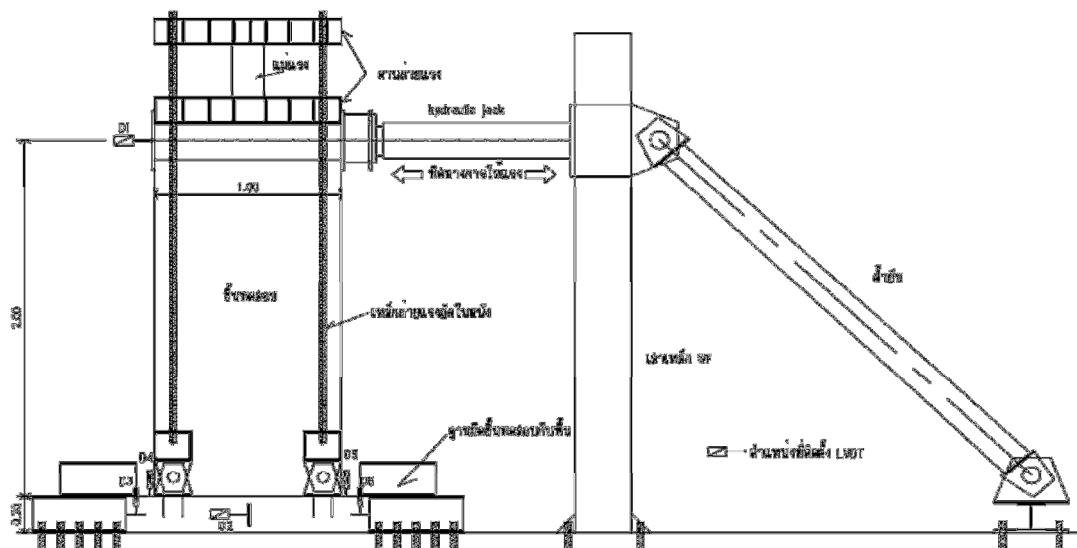
ภาพ 61 แสดงผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Wall)

การทดสอบระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปผนังรับแรง

การติดตั้งตัวอย่างชิ้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ จะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete Wall) และผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Wall)

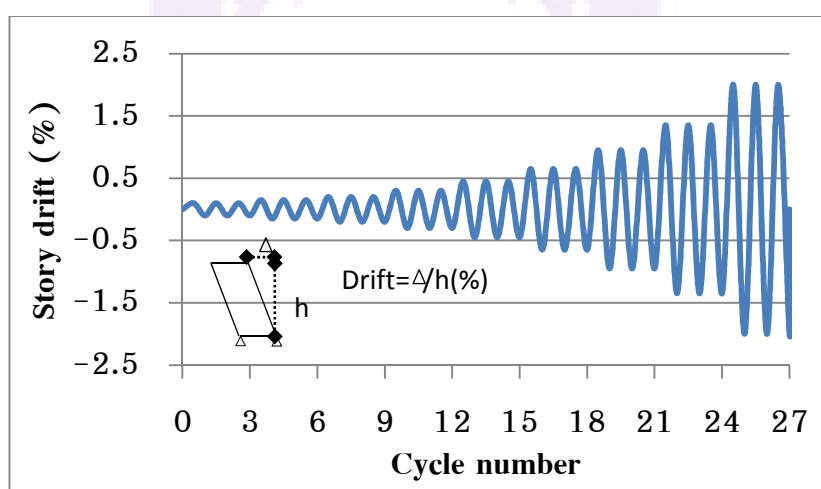
การติดตั้งชิ้นทดสอบ แสดงดังภาพ 62 ไฮดรอลิก ขนาด 300 กิโลนิวตัน ยึดกับชิ้นทดสอบและโครงเหล็ก มีค้ำยันแนวทแยง ซึ่งยึดอยู่กับพื้นห้องปฏิบัติการ น้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งที่จำลองน้ำหนักจากชั้นบน ถูกถ่ายลงผนังในอัตราส่วน $0.05f'_cA_g$ ผ่านแม่แรง และท่อนเหล็กรับแรงดึงที่ยึดกับฐาน และคานถ่ายแรงด้านบน ท่อนเหล็กถูกยึดด้วยจุดยึดหมุน เพื่อให้สามารถถ่ายแรงอัดในแนวตั้ง และแรงกระทำทางข้างได้พร้อมกัน ชิ้นทดสอบถูกยึดเข้ากับพื้นห้องปฏิบัติการผ่านสลักเกลียว และฐานยึดชิ้นทดสอบ แรงกระทำแบบวัฏจักร ตาม ACI T1.1-01 (American Concrete Institute, 2001) ถูกกระทำ ดังภาพ 63 เพื่อตรวจสอบความสามารถด้านทานแรงแผ่นดินไหว และพฤติกรรมรอยร้าวที่เกิดขึ้น ทาสีขาวที่ตัวอย่างผนังทดสอบเพื่อช่วยให้สามารถสังเกตรอยร้าวได้อย่างชัดเจน ภาพถ่ายการติดตั้งเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ ก่อนการทดสอบ แสดงดังภาพ 63 คอนกรีตที่ใช้มีกำลังอัด เฉลี่ยเท่ากับ 23.5 MPa และกำลังดึงของเหล็กเสริม แสดงดังตาราง 6



ภาพ 62 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการ



ภาพ 63 แสดงภาพถ่ายการติดตั้งชิ้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ



ภาพ 64 แสดงแรงกระทำแบบวัฏจักร ตาม ACI

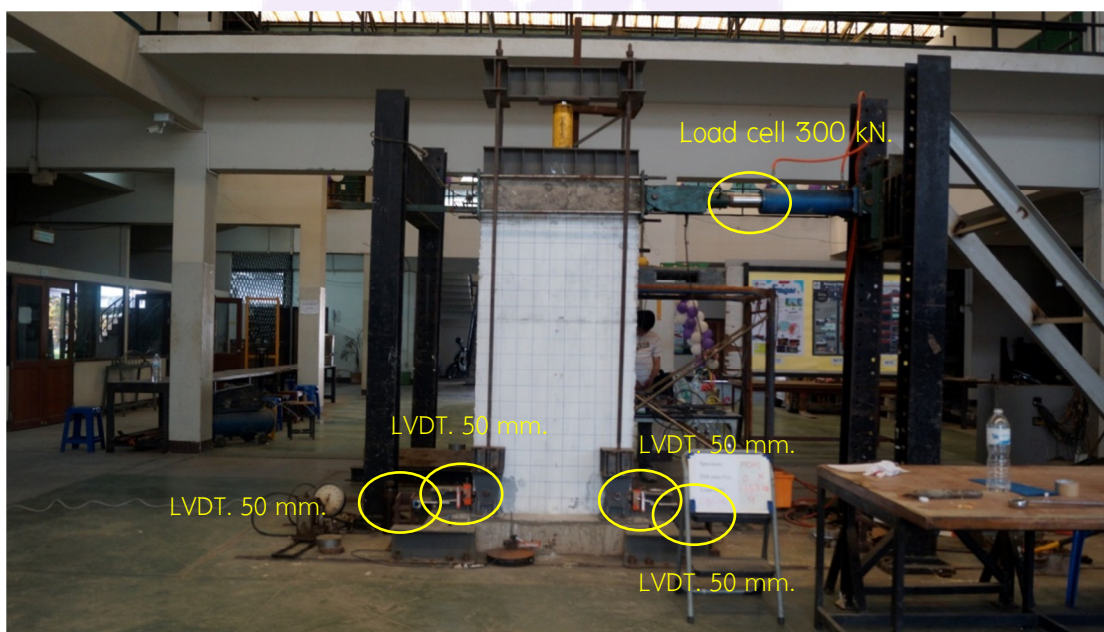
ก่อนทำการทดสอบตัวอย่างนั้นได้ทาสีขาวที่ตัวอย่างผนังทดสอบ เพื่อช่วยให้สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวได้อย่างชัดเจนในขณะทำการทดสอบ นอกจากนี้ จะทำการตีเส้นอ้างอิงตั้งแต่วันที่โค่นด้านล่างผนังระดับต่าง ๆ โดยแต่ละระดับจะห่างกัน 5 ซม. เพื่อเป็นการสะดวกในการบันทึกรอยแตกร้าวบนตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้น ติดตั้งเครื่องให้แรง (Hydraulic Jack) ให้อยู่ในแนวระดับที่ต้องการให้แรงกับตัวอย่างทดสอบ

การวัดค่าการเสียรูป

ติดตั้งตัวอย่างที่จะทดสอบ และติดตั้งอุปกรณ์วัด (LVDT) ดังตาราง 7 และการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า แสดงในภาพ 65 โดยที่การทดสอบเครื่องวัดแบบไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 5 ลักษณะ ได้แก่

1. เครื่องวัดระดับแรงที่กระทำจากจากเครื่องให้แรง (Hydraulic jack) Load cell คือ Load cell, TML, CLC-200KNA, capacity 300 kN.

2. เครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ ใช้วัดการเคลื่อนที่ของผนัง 1 ตัว ซึ่งตัววัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า จะทำการติดตั้งอยู่กับกึ่งกลางท่อนคอนกรีต 0.20 x 0.20 ด้านบน D1 คือ LVDT, TML, SDP-100C, capacity 100 mm.



ภาพ 65 แสดงเครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า

3. เครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ ใช้วัดการเคลื่อนที่ของผนัง 1 ตัว ซึ่งตัววัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า จะทำการติดตั้งอยู่กับกึ่งกลางฐานรากคอนกรีต ด้านหน้าและหลัง D2 และ D7 คือ LVDT, TML, SDP-50C, capacity 50 mm.

4. เครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ ใช้วัดการเคลื่อนที่ของผนัง 1 ตัว ซึ่งตัววัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า จะทำการติดตั้งอยู่กับด้านซ้ายผนังคอนกรีต D3 และ D4 คือ LVDT, TML, SDP-50C, capacity 50 mm.

5. เครื่องวัดระยะการเคลื่อนที่ใช้วัดการเคลื่อนที่ของผนัง 1 ตัว ซึ่งตัววัดการเคลื่อนที่แบบไฟฟ้า จะทำการติดตั้งอยู่กับด้านขวาผนังคอนกรีต D5 และ D6 คือ LVDT, TML, SDP-50C, capacity 50 mm.

ตาราง 7 แสดงเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ตัว

รายการ	จำนวน (ตัว)
Load cell, TML, CLC-200KNA, capacity 300 kN.	1
LVDT, TML, SDP-100C, capacity 100 mm.	1
LVDT, TML, SDP-50C, capacity 50 mm.	6

การทดสอบให้แรงแบบวัฏจักร

การให้แรงกระทำกับตัวอย่างทดสอบ จะเป็นแบบวัฏจักรในแนวราบที่ปลายด้านบนผนังขนาดของแรงจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยการทดสอบนั้นจะทำการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ (Displacement control) ที่ปลายด้านบนของผนังที่คำนวณย้อนกลับ เพื่อเทียบกับค่าระยะโยกระหว่างชั้น (Story drift) ตามข้อกำหนดวิธีการทดสอบที่แนะนำโดย ACI T1.1-01 (American Concrete Institute, 2001) ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นี้ สามารถคำนวณได้จากค่าการเคลื่อนที่ตัวแนวราบที่ปลายบนของผนังหารด้วยความสูงผนังวัดจากปลายล่างสุด ถึงกึ่งกลางท่อนคอนกรีตด้านบนของชั้นทดสอบ โดยจะกระทำกับตัวอย่าง เป็นจำนวน 3 รอบซ้ำกัน พร้อมกับวัดการตอบสนองของตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ หรือจนสุดความยาวของกระบอกไฮโดรลิกซ์ ดังแสดงในตาราง 8 และภาพ 64 แรงกระทำแบบวัฏจักร ตาม ACI

แรงกระทำด้านข้าง และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างนั้น ถูกกำหนดโดยเครื่องหมายบวก หมายถึง แรงทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบด้านที่มีด้านข้างเป็นฝั่งที่มีเครื่องกดไฮโดรลิกซ์เกิดแรงดึง และเครื่องหมายลบ หมายถึง แรงทางด้านข้างที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบด้านที่มีด้านข้างเป็นฝั่งที่มีเครื่องกดไฮโดรลิกซ์เกิดแรงอัด โดยค่าสูงสุดต่าง ๆ นั้น เช่น ค่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุด ค่าระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง เนื่องจากแรงกระทำสูงสุด

$$Drift Ratio = \frac{\Delta}{h} \times 100(\%) \quad (6)$$

Δ เป็นการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง

h เป็นความสูงผนังวัดจากปลายล่างสุด ถึงกึ่งกลางท่อนคอนกรีตด้านบนของชั้นทดสอบ เท่ากับ 2000 mm.

ตาราง 8 แสดงจำนวนรอบ และขนาดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนรอบ (Cycle, N)	อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (Drift Ratio, %)
1-3	± 0.10
4-6	± 0.15
7-9	± 0.20
10-12	± 0.30
13-15	± 0.45
16-18	± 0.65
19-21	± 0.95
22-24	± 1.35
25-27	± 2.00

ผลการทดสอบ

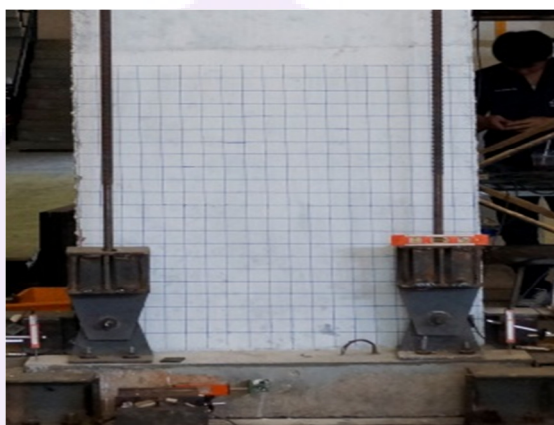
ผลการทดสอบแบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ พฤติกรรมการเกิดรอยร้าว และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของชั้นทดสอบผนังหล่อคอนกรีตหล่อในที่ (Reinforce Concrete Wall) และพฤติกรรมการเกิดรอยร้าว และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ของชั้นทดสอบผนังหล่อคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Wall)

1. พฤติกรรมการเกิดรอยร้าว และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ของชั้นทดสอบผนังหล่อคอนกรีตหล่อในที่ (Reinforce Concrete Wall)

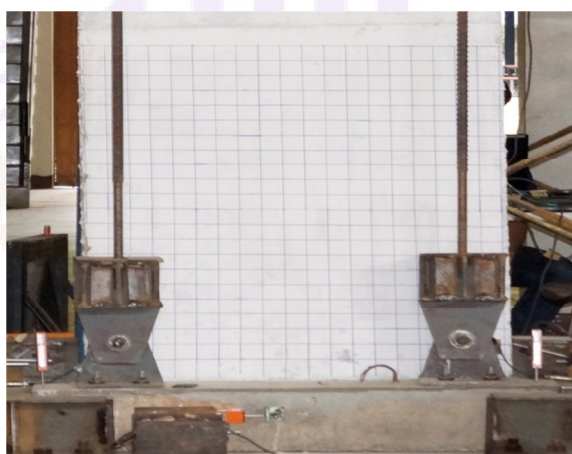
1.1 พฤติกรรมการเกิดรอยร้าวชั้นทดสอบผนังหล่อคอนกรีตหล่อในที่ (RC)

จากการทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ พฤติกรรมการเกิดรอยร้าวผนังคอนกรีตหล่อในที่ RC ตั้งแต่ภาพ 66 ถึงภาพ 76 พบรอยร้าวแรกเมื่อการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ที่ $\pm 0.20\%$ ในรอบที่ 7 (ภาพ 69) ลักษณะรอยร้าวอยู่ระหว่างผนังและฐานราก เมื่อการโยกตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$ ในรอบที่ 7 (ภาพ 69) ถึง $\pm 0.45\%$ ในรอบที่ 13 (ภาพ 71) พบรอยร้าวที่ผนังใกล้ฐาน และรอยร้าวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ คาดว่าน่าจะเกิดจากรอยร้าวจากแรงดัด (Bending Mode) และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.65\%$ ในรอบที่ 16 (ภาพ 72) พบรอยร้าวที่สังเกตเห็นชัดในแนวนอน บริเวณสูง 0.50 เมตร ยาว 0.50 เมตร คาดว่าจะเกิดจากความเสียหายจากแรงดัด (Bending Mode) จนถึงเมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ $\pm 0.95\%$ ในรอบที่ 19 (ภาพ 73) ให้แรงกระทำไปเรื่อย ๆ รอยร้าวการดัดเริ่มปรากฏมากขึ้น แต่เป็นรอยร้าวที่เกิดต่อเนื่องจากรอยเดิม ความยาวรอยร้าวจากเดิมเพิ่มขึ้นอีก 3-4 เซนติเมตร คาดว่าเสียหายจากแรงดัดผสมกับแรงเฉือน

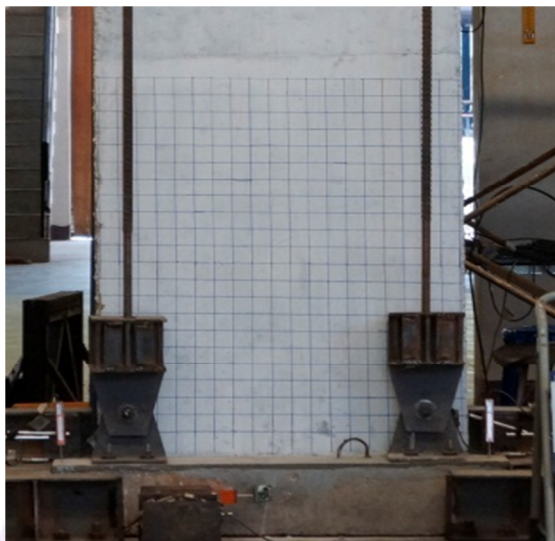
(Shear Mode+Bending Mode) และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.35\%$ ในรอบที่ 22 (ภาพ 74) ให้แรงกระทำต่อเนื่องในแนวนอน ในฝั่งตรงกันข้าม บริเวณ 0.50 เมตร ตรงข้ามกับรอยร้าวเดิม กลายเป็นรอยร้าวในแนวทแยงตัดกันทั้ง 2 ด้านของผนัง ดังภาพการทดสอบสิ้นสุดที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 1.35\%$ ในรอบที่ 22 (ภาพ 75) ในตอนสุดท้าย เกิดจากแรงเฉือนที่ฐานราก เสียก่อนที่ผนังหล่อในที่จะเกิดการวิบัติ การออกแบบฐานรากกับพื้นในห้องปฏิบัติการ ยังไม่ได้พอ ทำให้เกิดการวิบัติของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแรงเฉือนเสียก่อนที่จะเกิดการวิบัติที่ผนัง



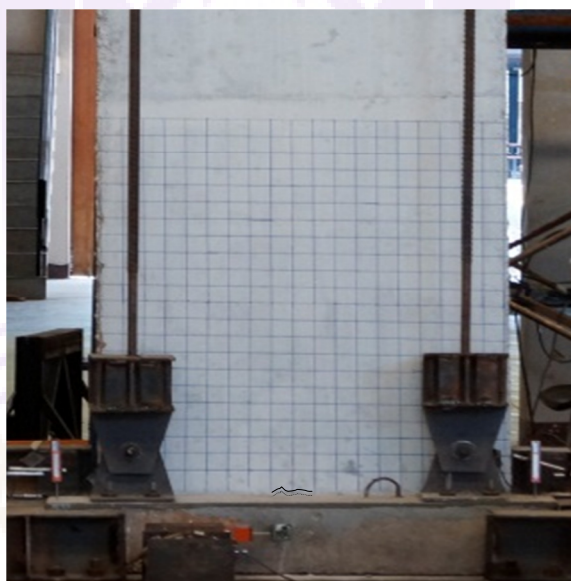
ภาพ 66 แสดงเริ่มต้นให้แรงกระทำด้านข้าง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.00%



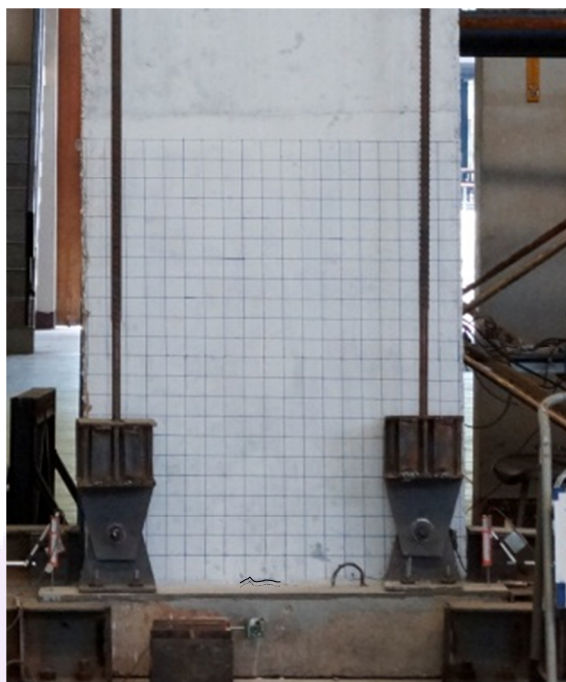
ภาพ 67 แสดงถึงการไม่เกิดรอยร้าวใด ๆ ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.10% Cycle ที่ 1



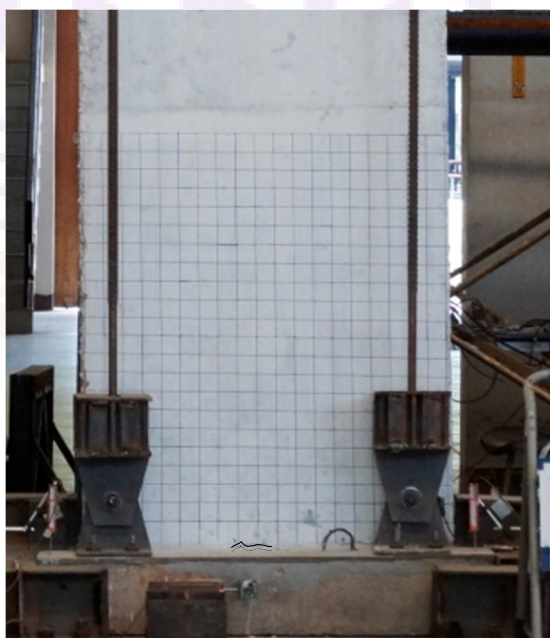
ภาพ 68 แสดงถึงการไม่เกิดรอยร้าวใด ๆ ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.15% Cycle ที่ 6



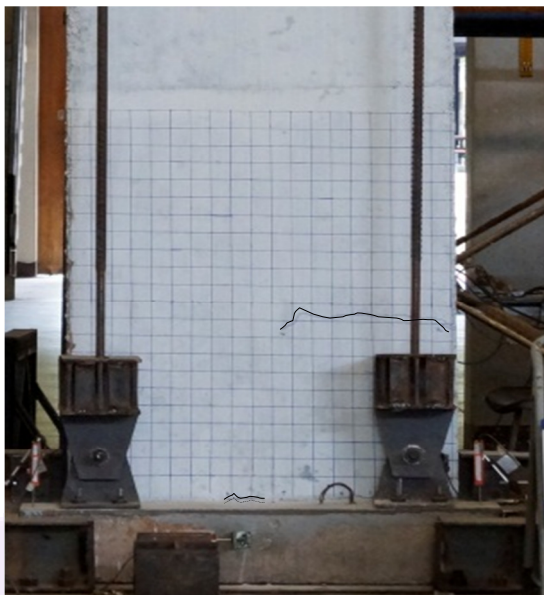
ภาพ 69 แสดงถึงการเริ่มเกิดรอยร้าวขึ้นที่ส่วนผนังกับฐาน ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.20%
Cycle ที่ 7



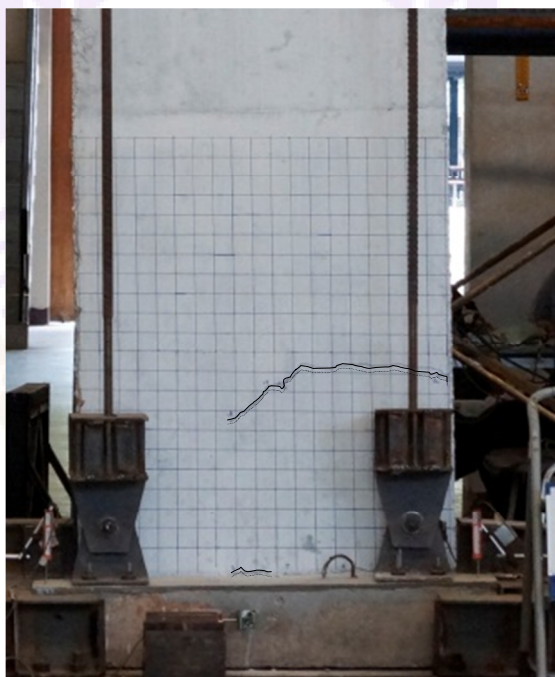
ภาพ 70 แสดงรอยร้าวขึ้นที่ส่วนผนังกับฐานขยายตัวเห็นชัดเจน ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.30% Cycle ที่ 10



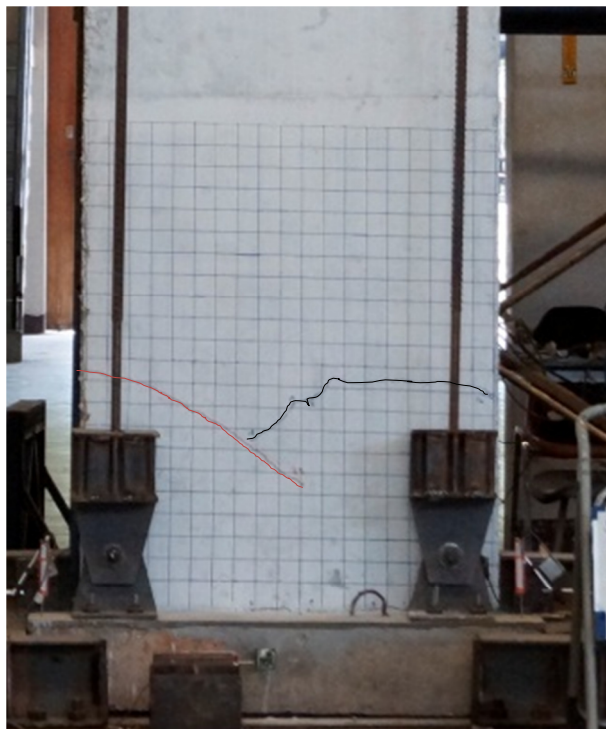
ภาพ 71 แสดงรอยร้าวขึ้นที่ส่วนผนังกับฐานขยายตัวเห็นชัดเจน ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.45% Cycle ที่ 13



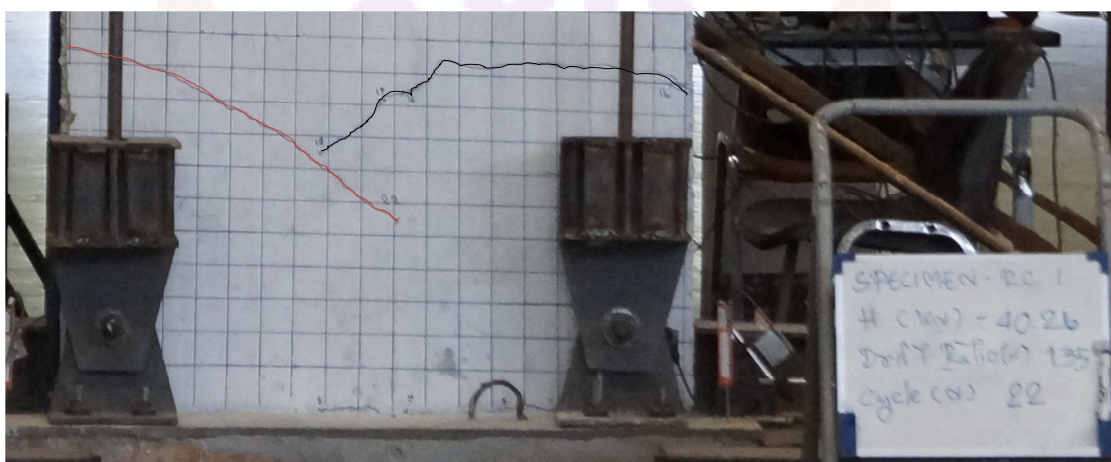
ภาพ 72 แสดงการสังเกตเห็นจุดในแนวนอน บริเวณสูง 0.50 เมตร ยาว 0.50 เมตร
ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.65% Cycle ที่ 16



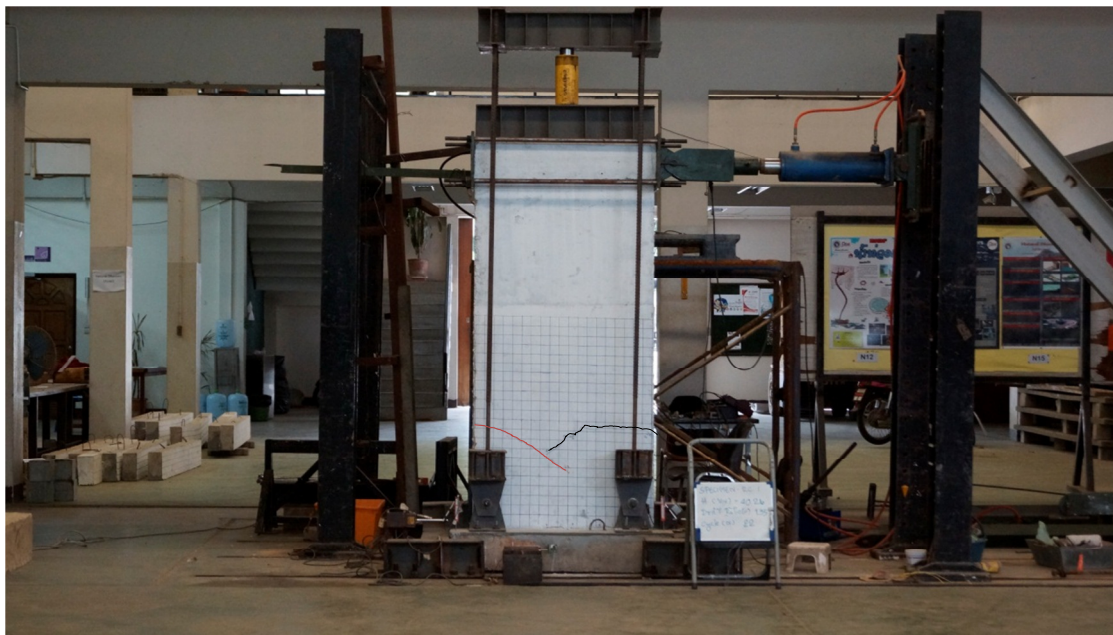
ภาพ 73 แสดงรอยร้าวเพิ่มจากรอยเดิมอีก 3-4 เซนติเมตร ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.95%
Cycle ที่ 19



ภาพ 74 แสดงในผังตรงกันข้าม บริเวณ 0.50 เมตร ตรงข้ามกับรอยร้าวเดิม กลายเป็นรอยร้าวในแนวทแยงตัดกันทั้ง 2 ด้าน ที่ Drift ratio เท่ากับ 1.35% ด้วยแรง 40.26 KN Cycle ที่ 22



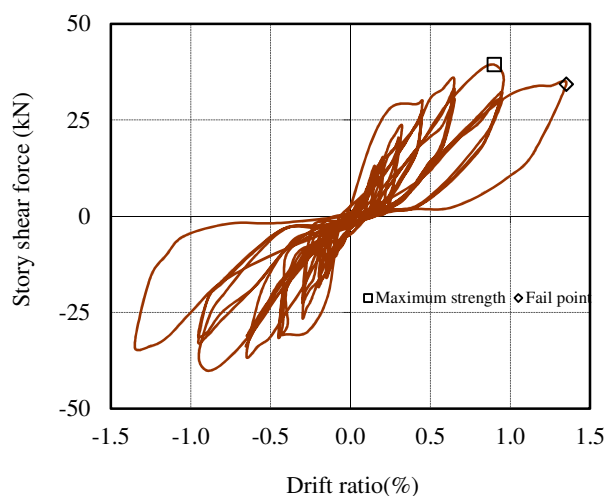
ภาพ 75 แสดงรูปแบบการวิบัติสุดท้าย (Final) ของชิ้นทดสอบผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก หล่อในที่ (ขยาย Crack)



ภาพ 76 แสดงรูปแบบการวิบัติของชิ้นทดสอบผนังคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Final)

1.2 แรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของชิ้นทดสอบผนังหล่อคอนกรีตหล่อในที่ (RC)

ระยะการเคลื่อนที่ นำมาใช้วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างได้ถูกปรับ โดยหักลบการเคลื่อนที่ฐานเรียบร้อยแล้ว จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ เมื่อให้แรงกระทำไปเรื่อย ๆ จะเห็นว่า เส้นกราฟมีการวนโค้งในลักษณะแคบช่วงแรกแนบเข้าหาจุดศูนย์กลาง และมีรอบกว้างภายหลังจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 0.65% ในรอบที่ 16 ชิ้นทดสอบสามารถต้านทานแรงกระทำสูงสุด (Maximum Strength) ที่ 40.0 kN ที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 0.90% จนสุดท้ายชิ้นทดสอบ RC เกิดการวิบัติ 34.33 kN ที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1.351% (ภาพ 77)

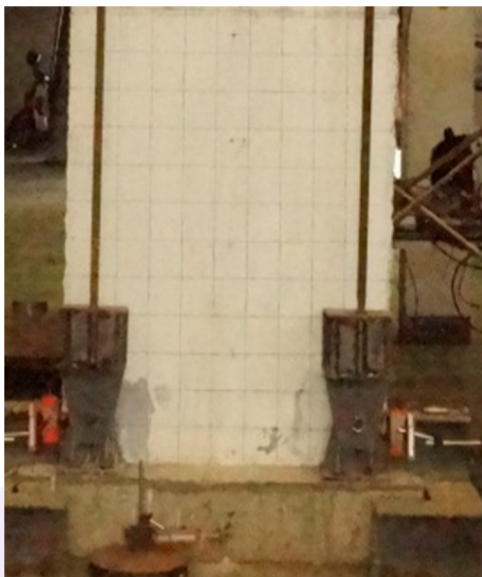


ภาพ 77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์
(Reinforce Concrete Wall)

2. พฤติกรรมการเกิดรอยร้าว และแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ของชิ้นทดสอบผนังหล่อคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Wall)

2.1 พฤติกรรมการเกิดรอยร้าวของชิ้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC)

พฤติกรรมการเกิดรอยร้าวผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) เมื่อชิ้นทดสอบเกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.10\%$ ในรอบที่ 1 (ภาพ 78) ถึง $\pm 0.15\%$ ในรอบที่ 4 (ภาพ 80) ผนังยังไม่เกิดรอยร้าวใด ๆ เมื่อผนังเริ่มถูกผลัดที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.20\%$ ในรอบที่ 7 (ภาพ 81) สังเกตเห็นรอยร้าวที่พบเป็นรอยร้าวแรก ได้แก่ ที่บริเวณแผ่นเหล็กรอยต่อระหว่างฐานกับผนัง ต่อจากนั้น ที่ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.30\%$ ในรอบที่ 10 (ภาพ 82) จะพบรอยร้าวบริเวณปูนกรอกปิดเอาไว้บดอัดจนคอนกรีตเสียหาย และเมื่อดึงกลับรอยร้าวจะเกิดในแผ่นเหล็กผนังกับฐานในทิศทางตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.45\%$ ในรอบที่ 13 (ภาพ 83) เมื่อเพิ่มแรงกระทำไปเรื่อย ๆ ถึงระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.65\%$ ในรอบที่ 18 (ภาพ 84) พบว่า รอยร้าวมีความยาวเพิ่มขึ้น และมีจำนวนมากขึ้น รูปแบบการวิบัติในตอนสุดท้าย พบว่าเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนที่ฐาน การทดสอบเสร็จสิ้นที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ $\pm 0.65\%$ (ภาพ 84) รูปแบบการวิบัติในตอนสุดท้าย เกิดจากแรงเฉือนที่ฐานรากล่อนก่อนที่ผนังสำเร็จจะเกิดการวิบัติ ทั้งนี้ เนื่องจากผนังสำเร็จที่หล่อแล้วนำมาติดตั้งมีลักษณะแข็งแรง ประกอบกับการออกแบบฐานรากกับพื้นห้องปฏิบัติการที่ยังไม่ดีพอ ทำให้เกิดการวิบัติของฐานรากคอนกรีตด้วยแรงเฉือนล่อนก่อนที่จะเกิดการวิบัติที่ผนัง



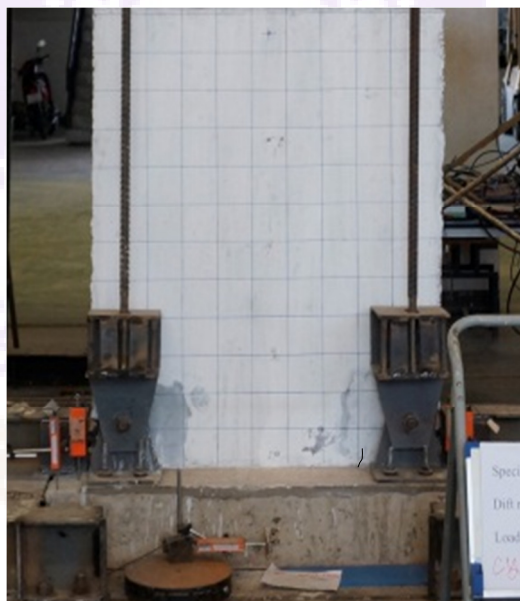
ภาพ 78 แสดงการเริ่มต้นเริ่มให้แรงกระทำด้านข้าง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.00%



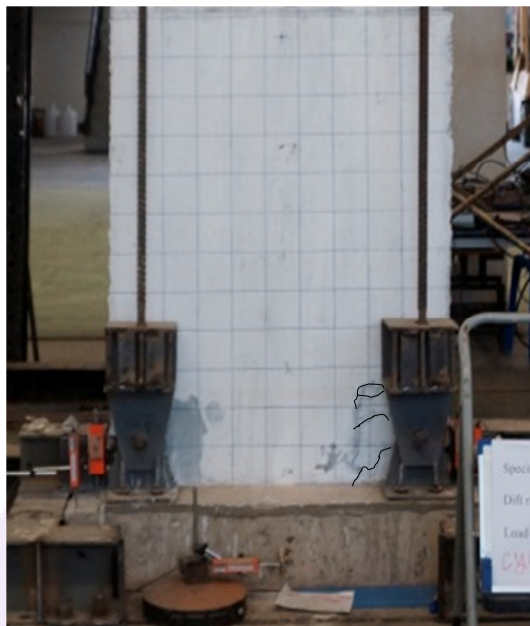
ภาพ 79 แสดงการเริ่มต้นเริ่มให้แรงกระทำด้านข้าง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.10% Cycle ที่ 1



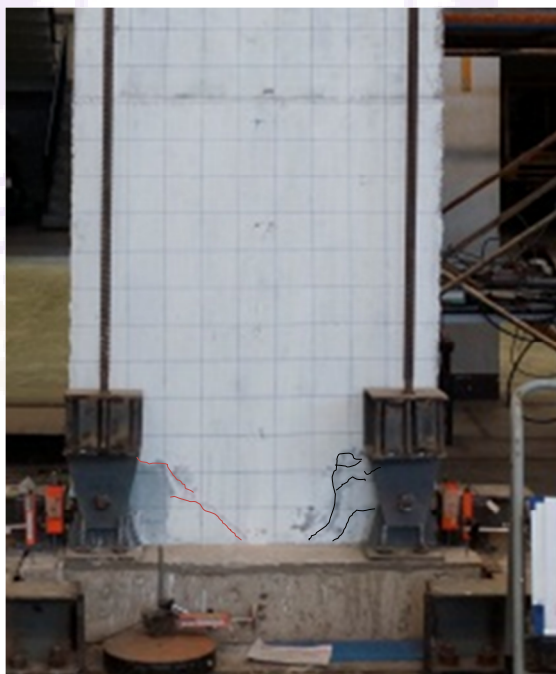
ภาพ 80 แสดงการเริ่มต้นเริ่มให้แรงกระทำด้านข้าง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.15% Cycle ที่ 4



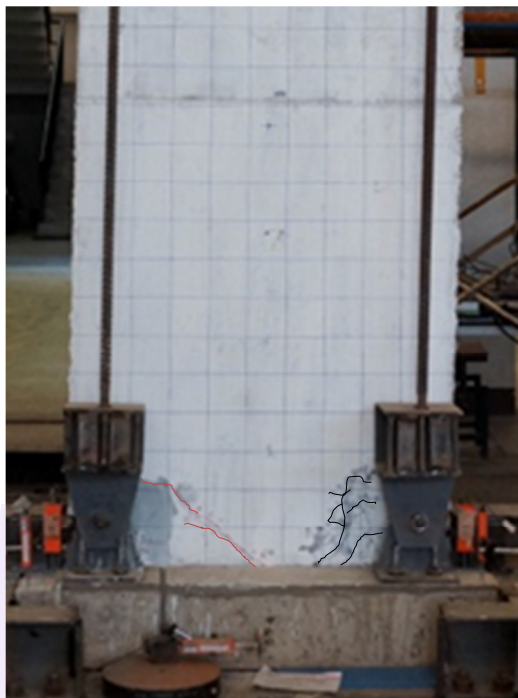
ภาพ 81 แสดงการพบรอยแตกกร้าวแผ่นเหล็กรอยต่อ ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.20% Cycle ที่ 7



ภาพ 82 แสดงรอยแตกร้าวมีจำนวนเพิ่มบริเวณแผ่นเหล็กรอยต่อ ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.30% Cycle ที่ 10



ภาพ 83 แสดงรอยร้าวเกิดในแผ่นเหล็ก ทั้ง 2 ด้านของผนัง ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.45% Cycle ที่ 13



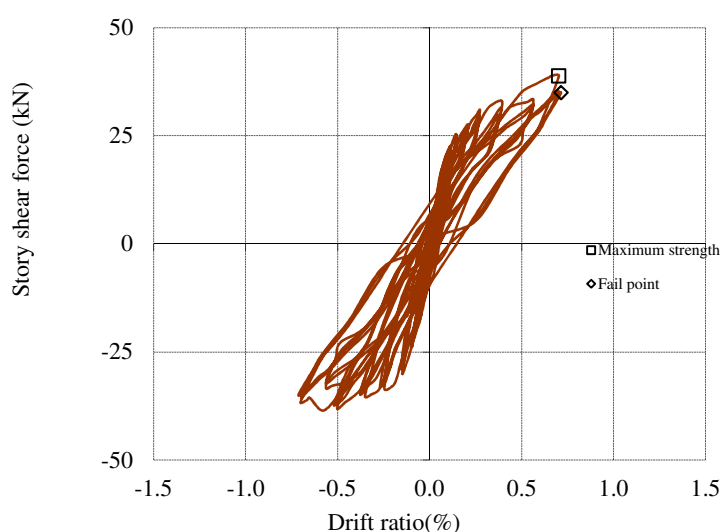
ภาพ 84 แสดงรอยแตกร้าวที่แผ่นเหล็กยาวเพิ่มขึ้น และมากขึ้น ที่ Drift ratio เท่ากับ 0.65% Cycle ที่ 18



ภาพ 85 แสดงรูปแบบการวิบัติของชิ้นทดสอบผนังคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จ

2.2 แรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC)

ระยะการเคลื่อนที่ นำมาใช้วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่ด้านข้างได้ถูกปรับ โดยห้กลับการเคลื่อนที่ฐานเรียบร้อยแล้ว จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ จะเห็นว่า ชั้นทดสอบสามารถต้านทานแรงกระทำสูงสุดที่ 38.8 kN ที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 0.70 % (ภาพ 86) การวิบัติที่ 34.90 kN ที่การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 0.71 %



ภาพ 86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Precast Concrete Wall) กับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

เปรียบเทียบผลการทดสอบชิ้นส่วนผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จกับผนังคอนกรีตหล่อในที่

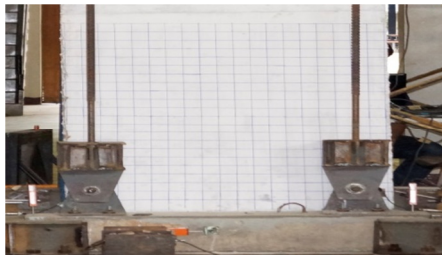
ภาพ 87 พฤติกรรมการเกิดรอยร้าว เปรียบเทียบผลการทดสอบชิ้นส่วนผนังคอนกรีตหล่อในที่ รอยร้าวที่เกิดอยู่สูงจากฐาน 0.50 เมตร แต่รอยร้าวที่ผนังคอนกรีตสำเร็จรูปเกิดรอยร้าวบริเวณจุดต่อด้วยเหล็กเดือยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก เกิดการครากด้วยแรงกระทำที่มากกว่า และต้านทานแรงกระทำสูงสุดได้มากกว่า ประกอบกับรูปกราฟมีการวนที่กว้างกว่า แสดงว่าผนังคอนกรีตหล่อในที่มีความแข็งแกร่งต้านทานแรงกระทำด้านข้าง และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างได้มากกว่าผนังคอนกรีตสำเร็จรูป



Drift ratio 0.00%



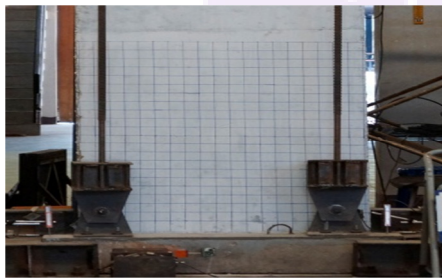
Drift ratio 0.00%



Drift ratio 0.10%



Drift ratio 0.10%



Drift ratio 0.15%



Drift ratio 0.15%



Drift ratio 0.20%



Drift ratio 0.20%

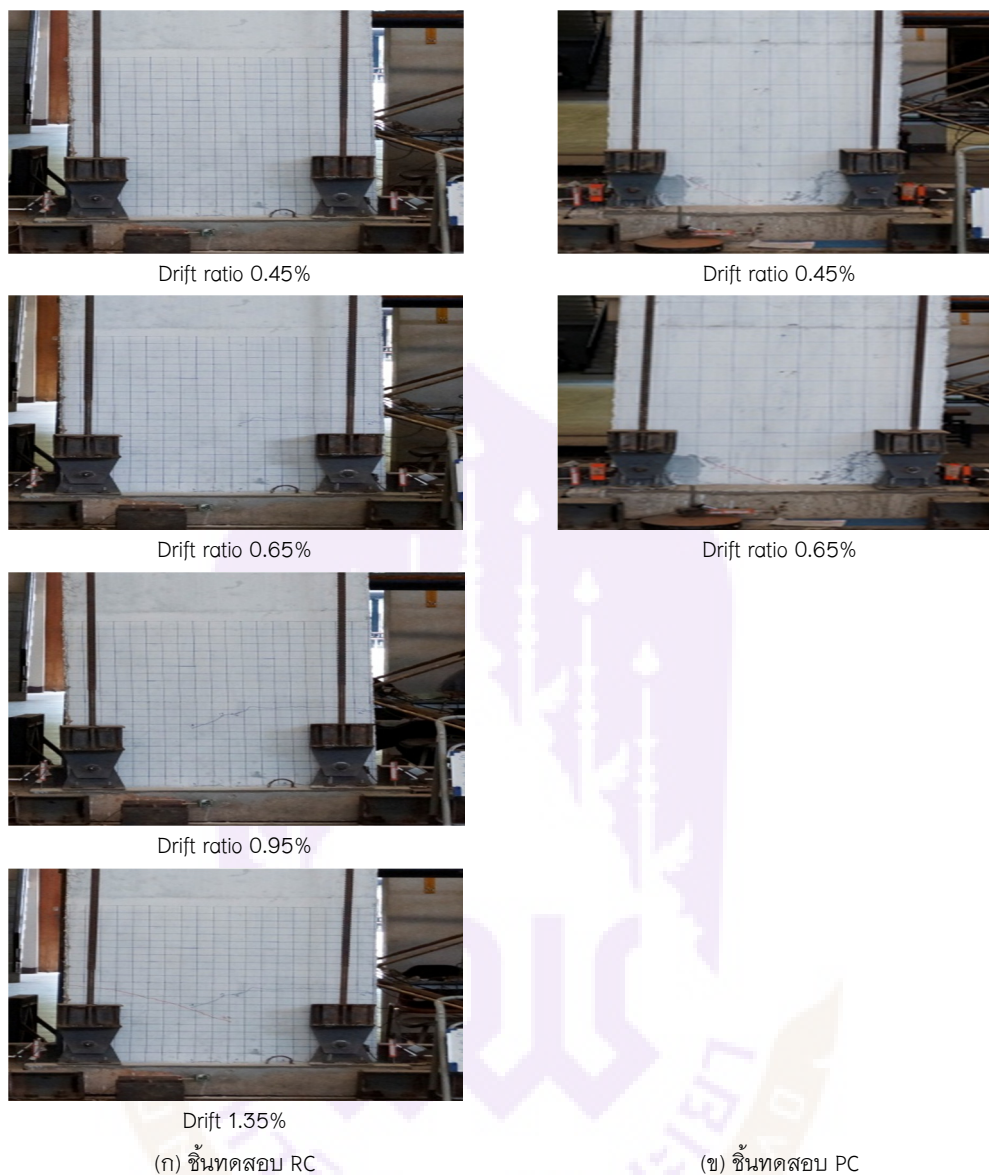


Drift ratio 0.30%



Drift ratio 0.30%

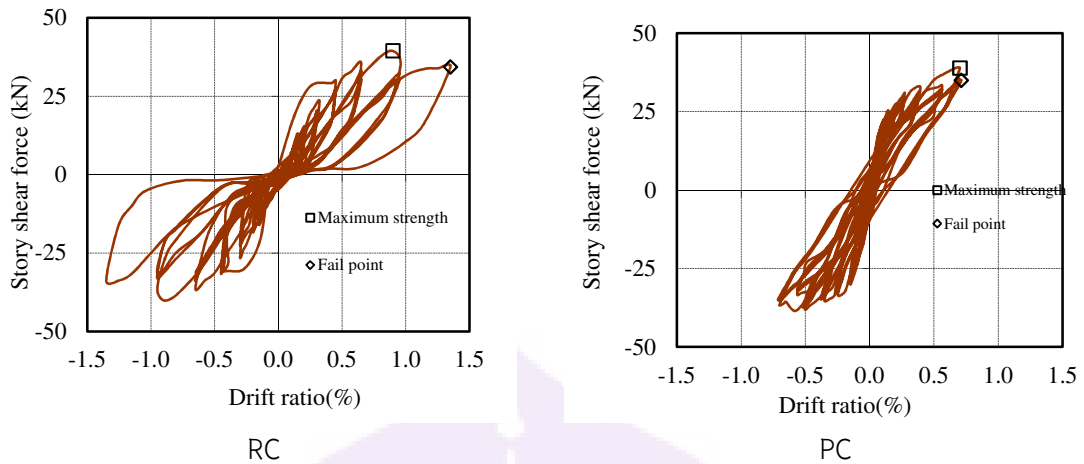
ภาพ 87 แสดงพฤติกรรมการเกิดรอยร้าว



ภาพ 87 (ต่อ)

ตาราง 9 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบชั้นส่วนผนังคอนกรีตหล่อในที่

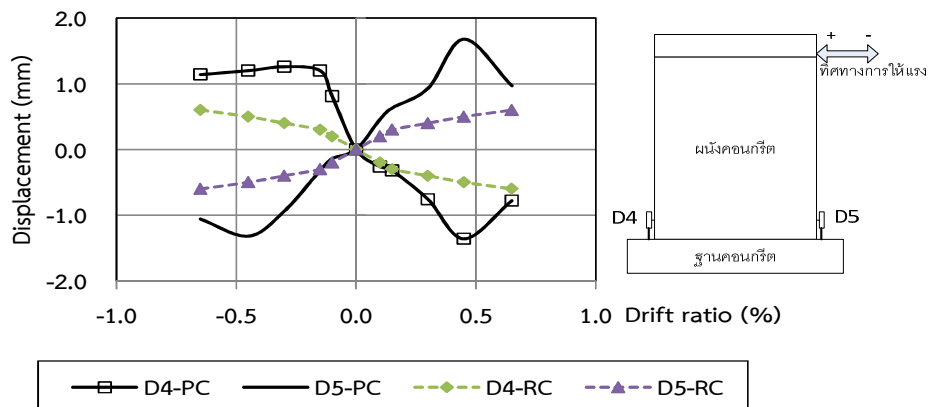
ชั้นส่วนผนังคอนกรีต	แรงกระทำสูงสุด	
	kN	Drift ratio%
หล่อในที่	40.0	0.90
สำเร็จรูป	38.8	0.70



ภาพ 88 แสดงการเปรียบเทียบแรงกระทำ และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของชั้นทดสอบผนัง RC และ PC

ตรวจสอบการหลุดออกของฐานรากของผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) และผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC)

เมื่อตรวจสอบการหลุดออกจากฐาน โดยใช้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัว (LVDT) ติดตั้งระหว่างผนังกับฐานราก (D4 และ D5) ดังภาพ 65 จะเห็นว่า การหลุดออกจากฐานของชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) มีค่าสูงสุด 1.6 มม. ในขณะที่ชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) มีการหลุดออกเพียง 0.8 มม. แสดงให้เห็นว่า ชั้นทดสอบผนังหล่อสำเร็จ (PC) หลุดออกได้มากกว่าชั้นทดสอบคอนกรีตหล่อในที่ (RC) ทั้งนี้ เนื่องจากความต่อเนื่องของเหล็กเสริมระหว่างผนัง และฐานรากที่มีมากกว่า ทำให้หลุดได้ยากกว่านั่นเอง



ภาพ 89 แสดงตรวจสอบการหลุดออกจากฐานของผนัง

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ไร้เชิงเส้น

จากการทดสอบชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) และชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) ในห้องปฏิบัติการ สามารถนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ขนาด 0.20×0.20 เมตรและ ไฟไนต์อีลีเมนต์ขนาด 0.10×0.10 เมตรทั้งนี้เพื่อยืนยันผลการทดสอบและสร้างแบบจำลองเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของผนังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งหล่อสำเร็จภายใต้แรงด้านข้างที่มีรายละเอียดของมิติและเหล็กเสริมที่แตกต่างออกไปได้ โดยตัวแปรที่นำเข้ามาคุณสมบัติของวัสดุได้แก่ กำลังอัดของคอนกรีต กำลังดึงครากของเหล็กเสริม กำลังดึงครากของแผ่นเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวระยะฝังของเหล็กเดือยที่ฝังในฐานรากกับผนังหล่อสำเร็จ

แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) และชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC)

แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ในวิเคราะห์เพื่อศึกษารายละเอียดโครงสร้างชั้นส่วนคอนกรีตหล่อในที่ (RC) และชั้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) เป็นแบบจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรม WCOMD (Maekawa, K., 1998) เป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งพัฒนาโดย Prof. Hajime OKAMURA and Dr. Koichi MAEKAWA ที่มหาวิทยาลัยแห่งโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ในการประเมินรูปแบบการวิบัติ ตำแหน่งการวิบัติ และใช้การทำนายกำลังต้านทานแรงแนวราบด้วยอีลีเมนต์ที่ใช้เป็นแบบ 8-node แบบ 2 มิติ RC plate element โดยที่อีลีเมนต์ของคอนกรีตเสริมเหล็กจะพิจารณาถึงผลของคอนกรีตที่แตกร้าวและเหล็กเสริมให้กระจายทั่วทั้งอีลีเมนต์ ซึ่งสมมุติฐานไว้ว่าทั้งคอนกรีตที่ร้าวและเหล็กเสริมนั้นมีการเปลี่ยนรูปเท่าๆ กัน โดยที่คอนกรีตร้าวนั้นจะใช้แบบจำลอง four-way fixed crack ที่พัฒนาขึ้นมาจาก Okamura และ Maekawa (1991) และ Fukuura และ Maekawa (1999) โดยที่แบบจำลองนี้สามารถรองรับรอยร้าวที่จะเกิดขึ้นในอีลีเมนต์นั้น ๆ จะคำนวณจากรอยร้าวที่มีขนาดใหญ่ที่สุด (ความเครียดมากที่สุด) ในอีลีเมนต์ ในการคำนวณในแต่ละรอบ และเวกเตอร์ของความเค้นของอีลีเมนต์แบบ 2 มิติจะเท่ากับเวกเตอร์ความเค้นของคอนกรีตรวมกับเวกเตอร์ความเค้นของเหล็กเสริม ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$\{\sigma\}_{rc} = \{\sigma\}_c + \{\sigma\}_r \quad (6)$$

โดยที่ $\{\sigma\}_{rc}$, $\{\sigma\}_c$ และ $\{\sigma\}_r$ คือ ความเค้นในคอนกรีตเสริมเหล็ก, คอนกรีต และเหล็กเสริมตามลำดับ

สำหรับรอยต่อระหว่างผนัง และฐานของทั้ง 2 ชั้นทดสอบ ได้ใช้อิสิเมนต์ 6-node 1-D discrete joint element เพื่อจำลองตำแหน่งที่อาจเกิดการหลุดของเหล็กยึดระหว่างผนังและฐาน และตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงสตีฟเนสของหน้าตัดกระทันหัน ความกว้างอิสิเมนต์เท่ากับความกว้างของผนัง แต่ไม่มีความหนา นอกจากนี้แล้ว ยังได้จำลองอิสิเมนต์ที่เป็นแผ่นเหล็กฝังในผนังซ้อนทับไปอีกชั้นหนึ่ง โดยเชื่อมต่อกับเหล็กเดียวในฐาน เพื่อจำลองพฤติกรรม การเชื่อมต่อระหว่างผนังบนและล่างสำหรับชั้นทดสอบ PC อีกด้วย

แบบจำลองคอนกรีตร้าว

อิสิเมนต์ของคอนกรีตเสริมเหล็กจะพิจารณาถึงผลของคอนกรีตที่แตกร้าว เวกเตอร์ ความเครียดของคอนกรีตร้าวที่มีพิกัดเทียบกับแกนของรอยร้าว ประกอบไปด้วยความเครียดตั้งฉากรอยร้าว (ε_n) ความเครียดขนานรอยร้าว (ε_t) และความเครียดเฉือนตามแนวรอยร้าว (γ_{cr}) พฤติกรรมของวัสดุ (constitutive laws) หรือความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองหน่วยแรงดึงตั้งฉากกับรอยร้าว (tension stiffening และ tension softening) แบบจำลองหน่วยแรงอัดขนานรอยร้าว และแบบจำลองการถ่ายแรงเฉือนตามแนวรอยร้าว

1. แบบจำลองการรับแรงอัด-แรงดึงสำหรับความเค้นตั้งฉากที่ขนานและตั้งฉากกับรอยร้าว

Constitutive laws สำหรับคำนวณความเค้นตั้งฉาก ทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัด แสดงไว้ในภาพ 92 สำหรับคอนกรีตที่รับแรงดึงนั้น แบบจำลองได้ครอบคลุมถึงทั้งในกรณี ที่คอนกรีต softening เนื่องจาก aggregate bridging ที่ระนาบของรอยร้าว และ stiffening จากผลของความเค้นยึดเหนี่ยวที่ถ่ายเทระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยพฤติกรรมแบบจำลองได้แสดงดังสมการที่ 7

$$\sigma_t = f_t \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (7)$$

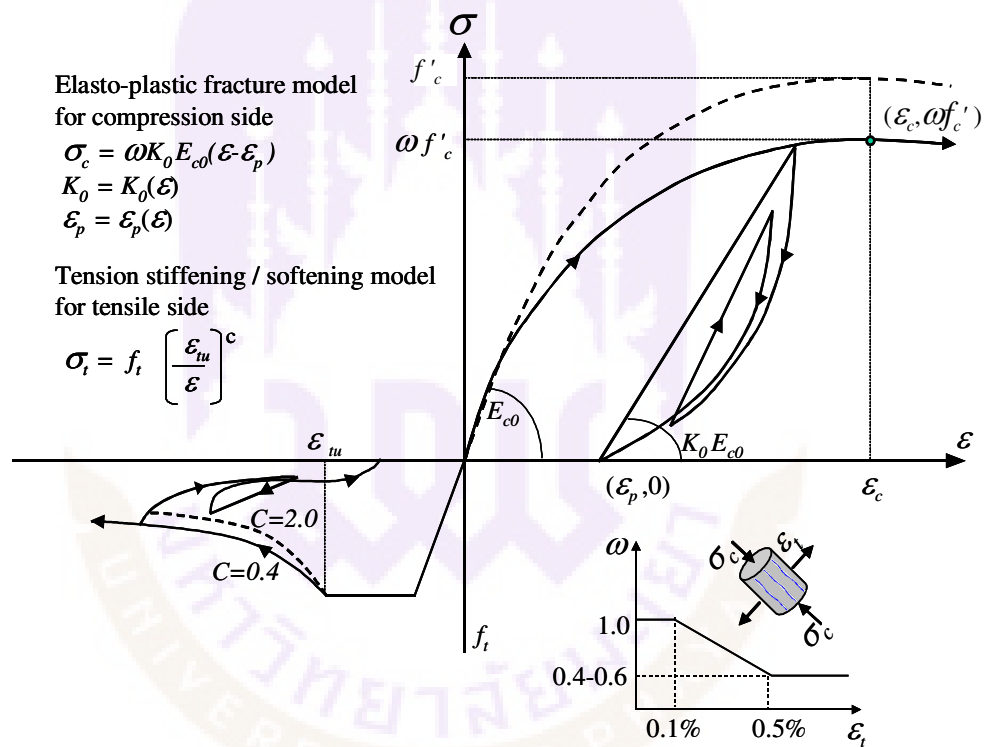
โดยที่ σ คือ ความเค้นดึงที่ถ่ายเทตั้งฉากกับรอยร้าว, ε_{tu} คือ ความเครียดของรอยร้าว และ c คือ ค่าพารามิเตอร์ที่คอนกรีต softening และ stiffening

สำหรับคอนกรีตที่รับแรงอัดขนานกับรอยร้าว สามารถคำนวณได้จาก continuum deformation โดยมีขอบเขตของแบบจำลอง elasto-plastic fracture แสดงดังสมการที่ (8)

$$\sigma_c = K_0 E_{c0} (\varepsilon_c - \varepsilon_p) \tag{8}$$

โดย K_0 คือค่าพารามิเตอร์การแตก, E_{c0} คือความแข็งเกร็งเบื้องต้น และ ε_p คือความเครียดอัดพลาสติก ซึ่งแบบจำลองนี้จะรวมผลของความไม่เชิงเส้นของคุณสมบัติแบบพลาสติก และความเสียหายจากการแตก เพื่อที่จะพิจารณาถึงระยะเคลื่อนตัวถาวรและการสูญเสียไปของพลังงานความเครียดอีลาสติก และความสามารถในการถ่ายเทความเค้นอัดที่ลดลงเนื่องมาจากความเครียดดึงทางขวางนั้นสามารถนำมาพิจารณาให้เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นได้จากการใช้ตัวคูณ ω ดังแสดงในสมการที่ (9)

$$\sigma_c = \omega K_0 E_{c0} (\varepsilon_c - \varepsilon_p) \tag{9}$$



ภาพ 90 แสดงแบบจำลองการรับแรงอัด-แรงดึง สำหรับความเค้นตั้งฉากที่ขนานและตั้งฉากกับรอยร้าว

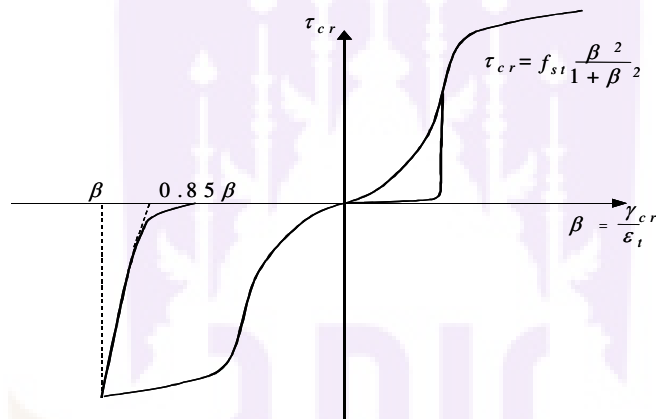
2. แบบจำลองการถ่ายเทความเค้นเฉือน

แบบจำลองหน่วยแรงเฉือนตามแนวรอยร้าว แสดงในภาพ 90 ความแข็งแรงเกร็งการเฉือนของรอยร้าว นั้น ได้มาจากแบบจำลอง contact density model (Maekawa and Okamura, 1991) ดังแสดงในสมการที่ 10 และสมการที่ 11

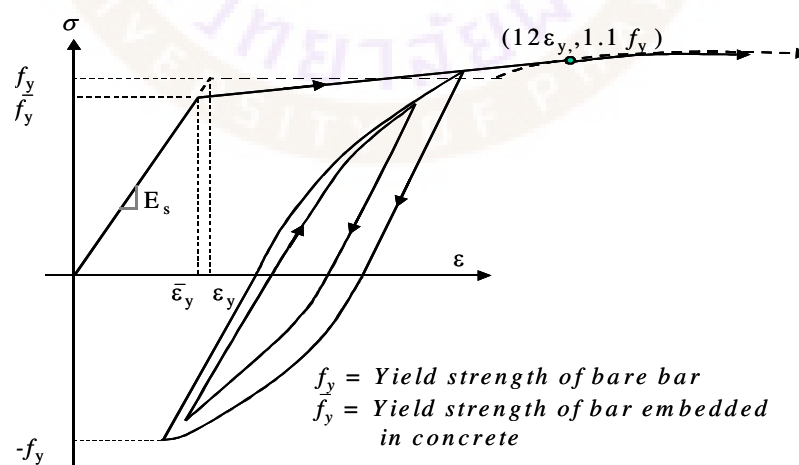
$$\tau = f_{st} \frac{\beta^2}{1 + \beta^2} \quad (10)$$

$$G_{cr} = \frac{\tau\beta}{\gamma_{cr}} \quad (11)$$

โดยที่ f_{st} คือ ความสามารถในการต้านทานการเฉือนตามแนวรอยร้าว และ β คือ อัตราส่วนระหว่างความเครียดเฉือนตามแนวรอยร้าว กับความเครียดตั้งฉากรอยร้าว



ภาพ 91 แสดงแบบจำลองการถ่ายเทความเค้นเฉือน



ภาพ 92 แสดงแบบจำลองเหล็กเสริม

แบบจำลองเหล็กเสริม

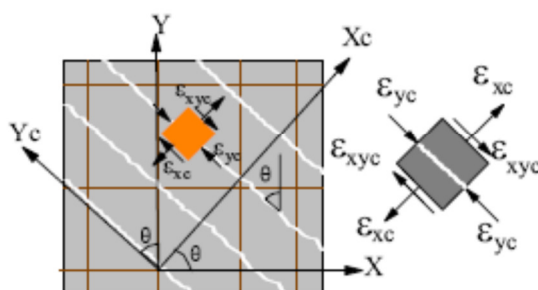
แบบจำลองของเหล็กเสริม (ภาพ 92) เมื่อรับแรงดึงจะมีพฤติกรรมแตกต่างกับแบบจำลองของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงอัด สำหรับการรับแรงอัดนั้น แบบจำลอง bilinear ของเหล็กเส้นเป็ลื่อย ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ และสำหรับแบบจำลองของเหล็กเสริมเมื่อรับแรงดึงนั้น จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความเค้น และความเครียด ที่พิจารณาถึงผลของความเป็นพลาสติกเฉพาะจุด เมื่อพิจารณาถึงความเครียดพลาสติกที่มีค่ามาก

เกณฑ์กำหนดการวิบัติ

เกณฑ์ที่จะกำหนดการวิบัติของโครงสร้างนั้น ก็คือ ค่าความเครียดในรูปแบบต่าง ๆ ลักษณะการวิบัติหลัก (ภาพ 93) จึงมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ การวิบัติดึง การวิบัติอัด และการวิบัติเฉือน แต่การวิบัติของโครงสร้างก็อาจจะเกิดจากการรวมกันของการวิบัติหลักได้ ขึ้นอยู่กับว่าส่วนประกอบความเครียดส่วนใด ที่มีค่าเกินกว่าค่าใดค่าหนึ่งที่กำหนดไว้ ดังนี้

1. การวิบัติดึง จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดดึงประลัยตั้งฉากรอยร้าว มีค่าเท่ากับ 0.03
2. การวิบัติอัด จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดอัดประลัยขนานรอยร้าว มีค่าเท่ากับ -0.01
3. การวิบัติเฉือน จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดเฉือนประลัยตามแนวรอยร้าว มีค่าเท่ากับ

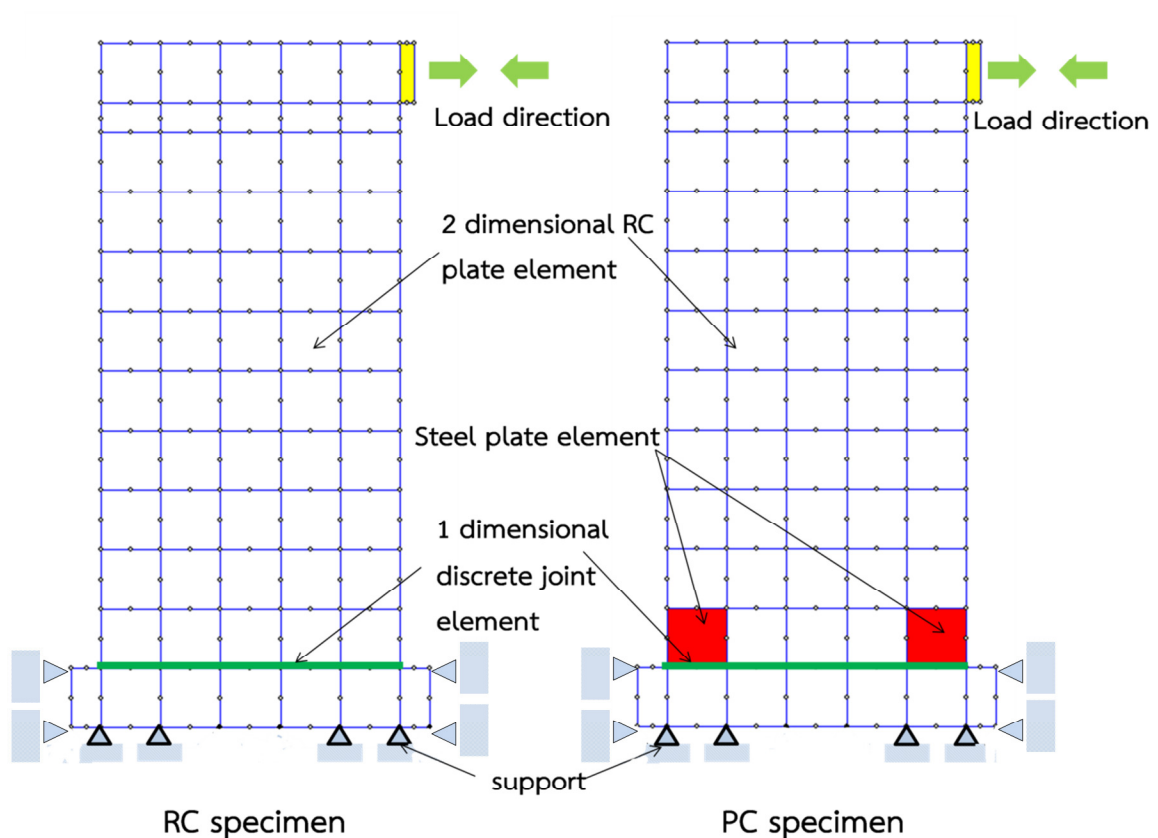
± 0.02



ภาพ 93 แสดงความเครียดที่ใช้ในการกำหนดลักษณะการวิบัติ

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 0.20 x 0.20 เมตร

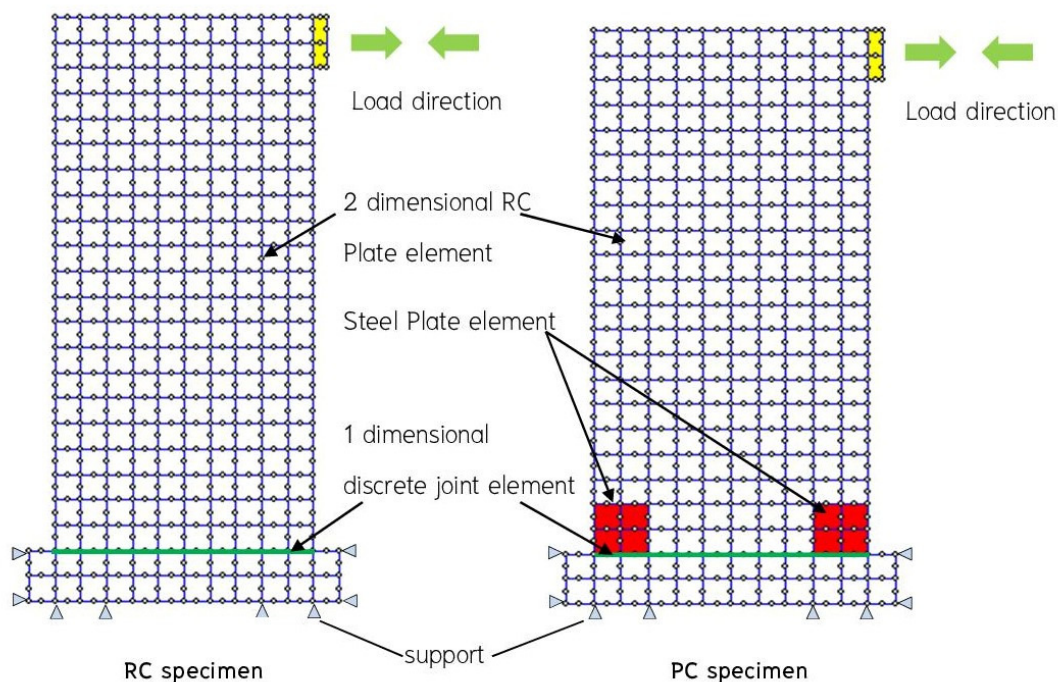
แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา เป็นแบบจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรม WCOMD (1998) เป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น ขึ้นทดสอบผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) ประกอบด้วย อีลิเมนต์จำนวน 68 อีลิเมนต์ และจุดต่อ จำนวน 241 จุด ส่วนแบบจำลองผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (PC) ประกอบด้วย อีลิเมนต์ จำนวน 70 อีลิเมนต์ และจุดต่อ จำนวน 241 จุด (ภาพ 94)



ภาพ 94 แสดงแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับชิ้นทดสอบผนังคอนกรีต 0.20 x 0.20 เมตร

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ 0.10 x 0.10 เมตร

แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา เป็นแบบจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรม WCOMD (1998) เป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น ชิ้นทดสอบผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) ประกอบด้วย อีลีเมนต์ จำนวน 246 อีลีเมนต์ และจุดต่อ จำนวน 802 จุด ส่วนแบบจำลองผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (PC) ประกอบด้วย อีลีเมนต์ จำนวน 254 อีลีเมนต์ และจุดต่อ จำนวน 802 จุด (ภาพ 95)

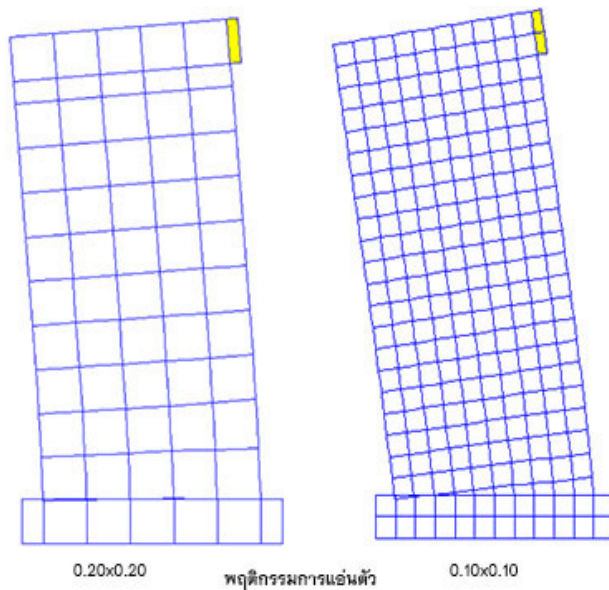


ภาพ 95 แสดงแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์สำหรับชิ้นทดสอบผนังคอนกรีต 0.10 x 0.10 เมตร

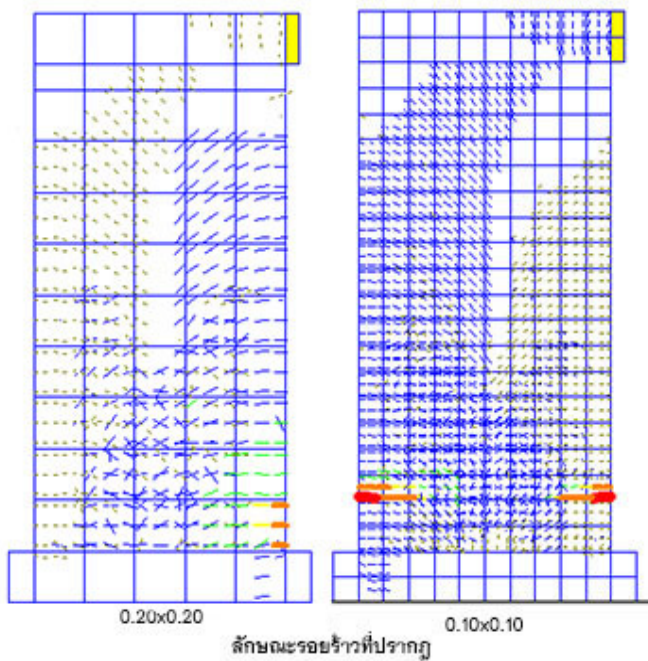
ผลการวิเคราะห์

1. การเสียรูปและการพัฒนารอยร้าวผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC)

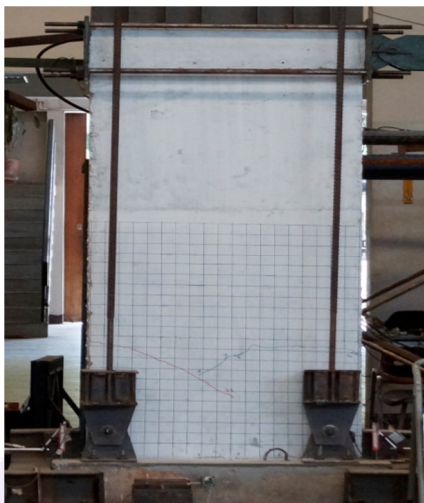
ทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) ในห้องปฏิบัติการ สามารถนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20 x 0.20 เมตร และขนาด 0.10 x 0.10 เมตร ผลการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ พบว่า ทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) มีลักษณะการแอ่นตัวเหมือนคานยื่นออกจากฐาน อีลีเมนต์ในผนังด้านที่รับแรงดึงจะยัด และด้านรับแรงอัดจะหดตัว โดยผลการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ขนาด 0.10 x 0.10 เมตร จะละเอียดและโค้งแอ่นตัวแบบคานยื่นจากฐานได้ชัดเจนกว่าไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20 x 0.20 เมตร สำหรับรูปแบบการวิบัติ พบว่า ทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) เกิดรอยร้าว และเสียหาย เริ่มตั้งแต่ส่วนผนังยึดกับฐาน ติดตามรอยร้าวที่กระจุกตัวทั้งสองด้านของความสูงผนังเป็นรอยร้าวเล็ก และเมื่อเพิ่มแรงกระทำมากจํานวนรอบมากขึ้น เกิดการแตกร้าวอย่างมากด้านข้าง สูงประมาณ 0.50 เมตร โดยเสียหายมากบริเวณ 1 ใน 4 ของความสูงผนังทั้งสองด้านอย่างชัดเจน พิสูจน์ให้เห็นว่า แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ให้ผลวิเคราะห์ตรงกับผลการทดสอบให้ห้องปฏิบัติการ



ภาพ 96 แสดงพฤติกรรมการณ์แอ่นตัวสำหรับชั้นทดสอบ RC



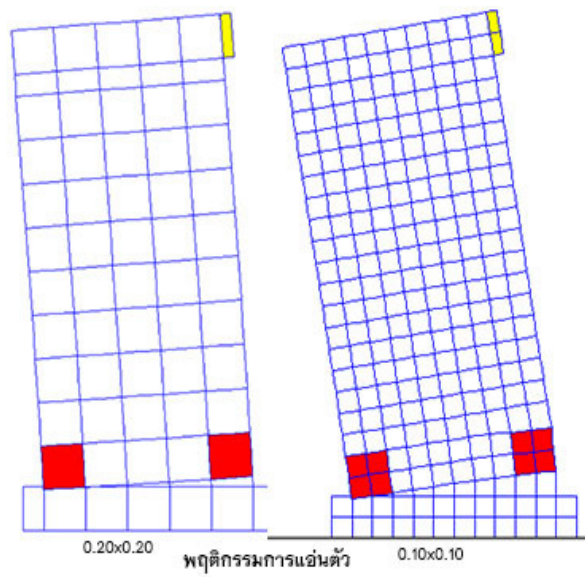
ภาพ 97 แสดงลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏสำหรับชั้นทดสอบ RC



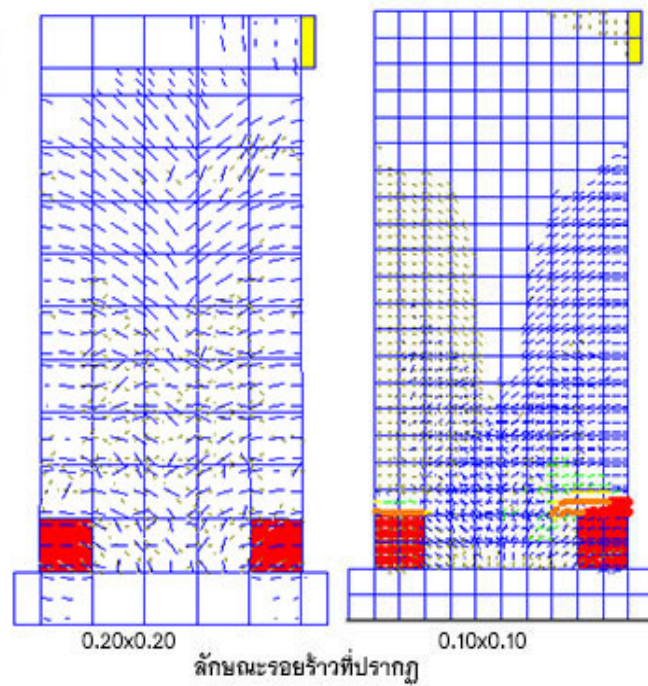
ภาพ 98 แสดงเปรียบเทียบพฤติกรรมกรรมการแอ่นตัว และลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏ ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วย FEM กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผนัง RC

2. การเสียรูปและการพัฒนารอยร้าวผนังคอนกรีตหล่อในที่ (PC)

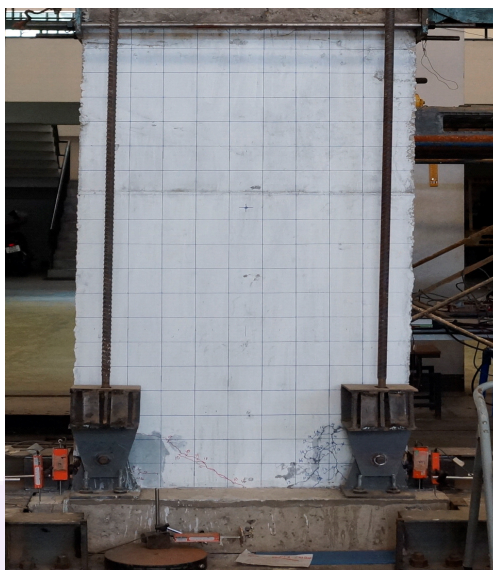
ชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) ในห้องปฏิบัติการ สามารถนำมาสร้างแบบจำลอง เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร และขนาด 0.10×0.10 เมตร พบว่า ชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) อีลีเมนต์ในผนัง ยังคงรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม มีการเสียรูปน้อย มีเฉพาะอีลีเมนต์ที่จุดต่อฐานที่ยึดตัวแทน ซึ่งทำให้เห็นว่า แบบจำลอง FEM นี้ สามารถอธิบายพฤติกรรมผนังได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะเห็นว่า สำหรับรูปแบบการวิบัติ พบว่า ชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) จะเกิดรอยร้าวบริเวณแผ่นเหล็กยึดผนังกับฐานทั้งสองด้านก่อน แล้วค่อยแตกลามไล่ขึ้นมาจากล่างขึ้นส่วนกลางทั้ง 2 ด้าน จากนั้นเมื่อเพิ่มแรงกระทำ และจำนวนรอบมากขึ้น เกิดความเสียหายอย่างมากบริเวณแผ่นเหล็กที่ยึดผนังกับฐานราก ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร และขนาด 0.20×0.20 เมตร ตรงกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ



ภาพ 99 แสดงพฤติกรรมการณ์แอ่นตัวสำหรับชั้นทดสอบ PC



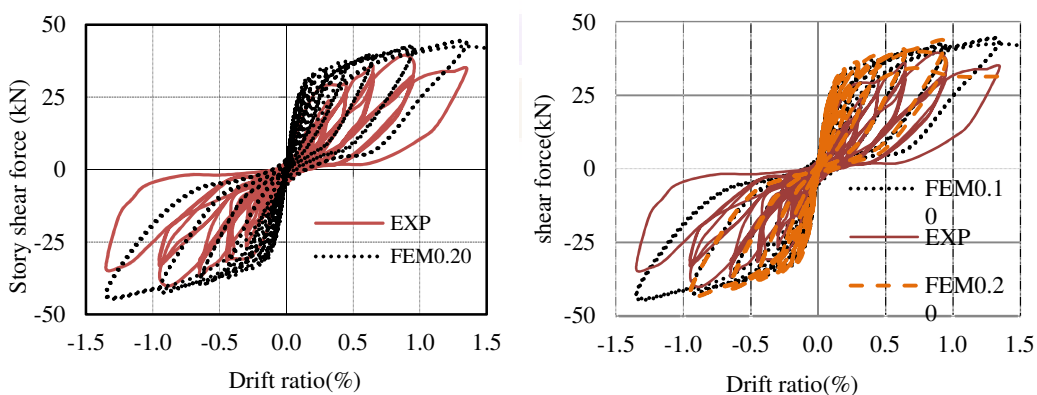
ภาพ 100 แสดงลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏสำหรับชั้นทดสอบ PC



ภาพ 101 เปรียบเทียบพฤติกรรมการณ์การแอ่นตัว และลักษณะรอยร้าวที่ปรากฏระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วย FEM กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผนัง PC

3. ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับแรงกระทำทางข้าง

เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่สัมพันธ์ กับแรงกระทำทางข้าง พบว่า FEM สามารถทำนายกำลังต้านทานกับการเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (ตาราง 10) เส้นกราฟมีสตีเฟนส ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยแรงต้านทานสูงสุดที่ได้จาก FEM มีค่าสูงกว่าผลการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากในแบบจำลอง FEM มีการยึดฐานรองรับที่ตึกกว่าในห้องปฏิบัติการ ผนังจึงสามารถพัฒนาไปถึงกำลังต้านทานสูงสุดได้



ภาพ 102 แสดงเปรียบเทียบผลความสัมพันธ์แรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบ และ FEM ชิ้นทดสอบ RC

เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร และขนาด 0.10×0.10 เมตร

การเสียรูปและพัฒนารอยร้าว

ผลการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร ของผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) จะโค้งแอ่นตัวแบบคานยื่นจากฐานได้ชัดเจนกว่าไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร สำหรับรูปแบบการวิบัติผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร เกิดรอยร้าวที่ผนังทั้งสองด้าน และการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร เกิดรอยร้าวเสียหายหนัก สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (ตามภาพ 100) สำหรับผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) ผลการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร ลักษณะแผ่นผนังยังคงเป็นรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม มีการเสียรูปน้อย มีเฉพาะอีลีเมนต์ที่จุดต่อฐานยึดตัวแทนไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร เอียงตัวชัดเจนกว่า สำหรับรูปแบบการวิบัติผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร จะเกิดรอยร้าวที่แผ่นเหล็กยึดผนังทั้งสองด้านจะเห็นรอยร้าว และพฤติกรรมชัดเจนมากกว่าไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร

ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับแรงกระทำทางข้าง

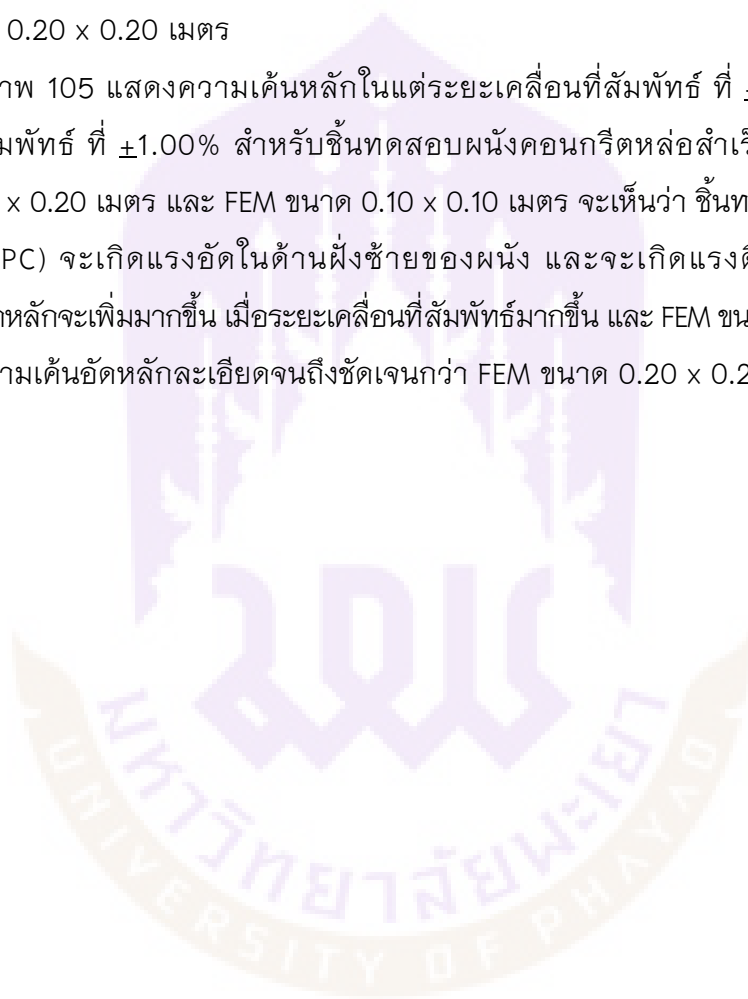
ผลการวิเคราะห์การเสียรูปด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร มีเส้นโค้ง Hysteretic Loop มีความกว้างใกล้เคียงผลการทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) มากกว่าไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร และสำหรับผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) รูปแบบกราฟไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร มีเส้นโค้ง Hysteretic Loop มีความกว้างเช่นเดียวกับไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร โดยผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ ทั้ง 2 ขนาด ให้แรงกระทำที่จุดคราก แรงต้านทานสูงสุด และแรงกระทำที่จุดวิบัติใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกับผลการทดสอบ (ตาราง 10) จึงสามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์ ที่ได้ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร ใกล้เคียงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ มากกว่าแบบจำลองไฟไนต์-อีลีเมนต์ ขนาด 0.20×0.20 เมตร

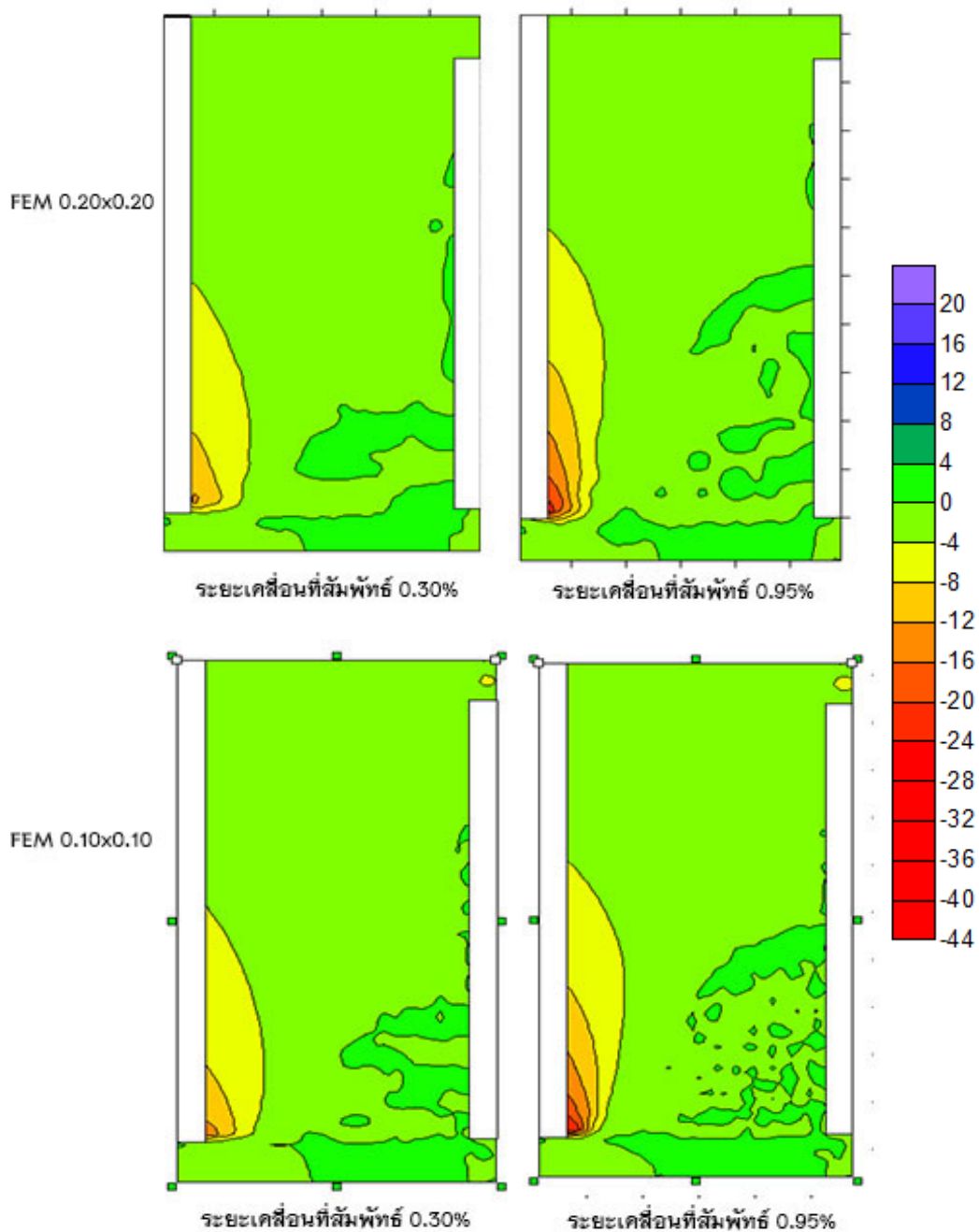
ความเค้นอัดหลัก (Principle compressive stress)

เมื่อนำความเค้นอัดหลัก (principle compressive stress) ภายในจุดต่อ จากการวิเคราะห์ด้วย FEM ขนาด 0.20×0.20 และ FEM ขนาด 0.10×0.10 ของแต่ละชั้นทดสอบมา plot เพื่อแสดงการกลไกภายในจุดต่อในแต่ละระยะเคลื่อนที่สัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้น และทำให้ทราบทิศทางของความเค้นที่ส่งภายในจุดต่อ

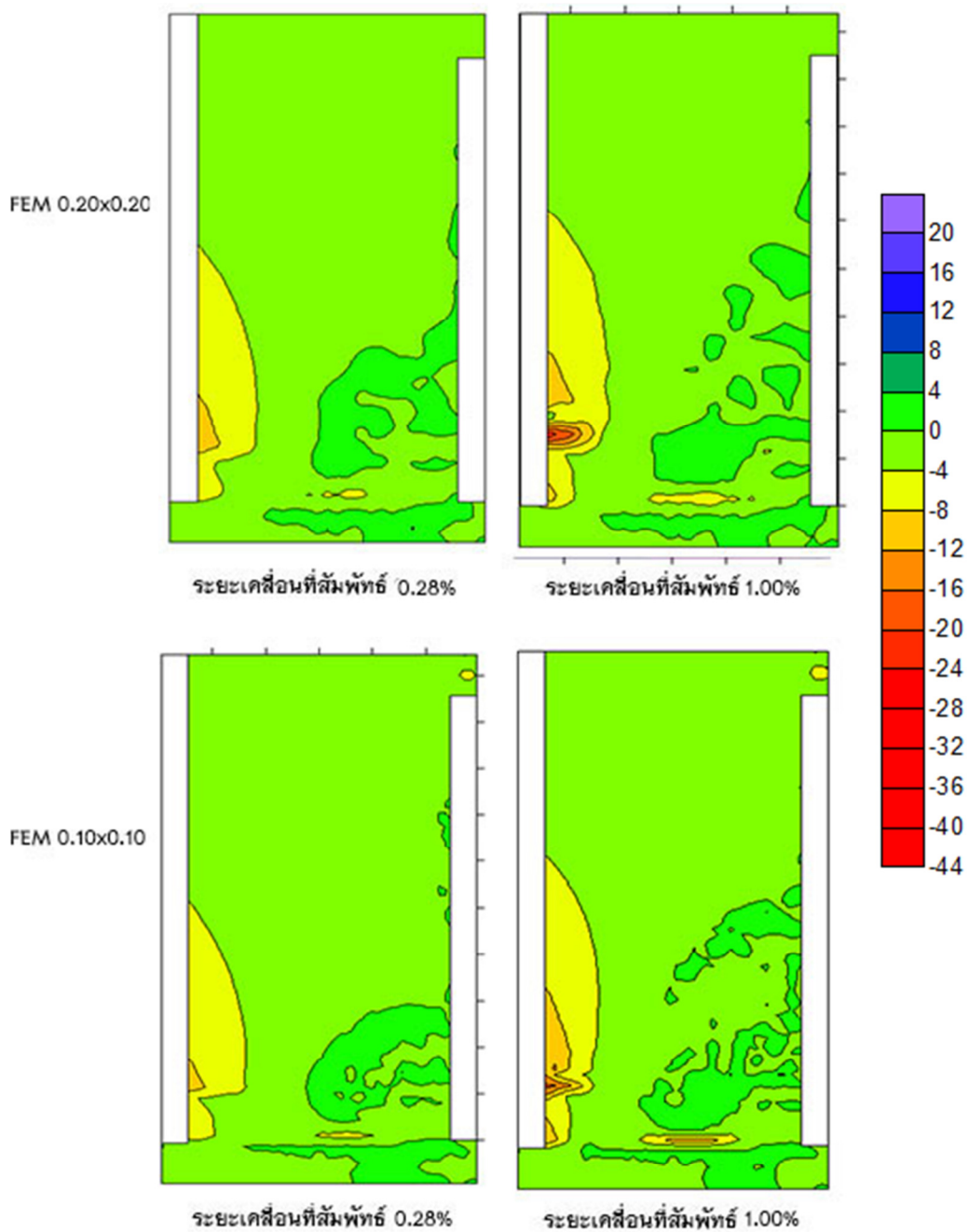
ภาพ 104 แสดงความเค้นหลักในแต่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ที่ $\pm 0.30\%$ และระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ที่ $\pm 0.95\%$ สำหรับชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) ด้วย FEM ขนาด 0.20×0.20 เมตร และ FEM ขนาด 0.10×0.10 เมตร จะเห็นว่า ชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) จะเกิดแรงอัดในด้านฝั่งซ้ายของผนัง และจะเกิดแรงดึงในส่วนที่ฝั่งขวา ความเค้นอัดหลักที่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ที่ ± 0.95 สูงกว่าระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ ± 0.30 และ FEM ขนาด 0.10×0.10 เมตร จะแสดงความเค้นอัดหลักละเอียดจนถึงชัดเจนกว่า FEM ขนาด 0.20×0.20 เมตร

ภาพ 105 แสดงความเค้นหลักในแต่ระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ที่ $\pm 0.28\%$ และระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ที่ $\pm 1.00\%$ สำหรับชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) ด้วย FEM ขนาด 0.20×0.20 เมตร และ FEM ขนาด 0.10×0.10 เมตร จะเห็นว่า ชั้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (PC) จะเกิดแรงอัดในด้านฝั่งซ้ายของผนัง และจะเกิดแรงดึงในส่วนที่ฝั่งขวา ความเค้นอัดหลักจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้น และ FEM ขนาด 0.10×0.10 เมตร จะแสดงความเค้นอัดหลักละเอียดจนถึงชัดเจนกว่า FEM ขนาด 0.20×0.20 เมตร เช่นกัน





ภาพ 104 แสดงความเค้นอัดหลัก (Principle compressive stress) ภายในชั้นทดสอบ
ผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) เมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มขึ้น



ภาพ 105 แสดงความเค้นอัดหลัก (Principle compressive stress) ภายในชั้นทดสอบ
ผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) เมื่อระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์เพิ่มขึ้น

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาพฤติกรรมการผนังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งหล่อสำเร็จ สำหรับการก่อสร้างอาคารพักอาศัยขนาดเล็ก ภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง จากการทดสอบ ชั้นทดสอบในห้องปฏิบัติการ รายละเอียดการเสริมเหล็กเสริมที่จุดต่อ สำหรับผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ ที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งที่มีในประเทศไทย และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองโครงสร้างผนังรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งหล่อสำเร็จ โดยนำเสนอพฤติกรรมการเกิดรอยร้าว และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

1. จากผลการทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ ที่ใช้ก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น โดยใช้ชั้นทดสอบ ขนาด 3/4 เท่าของขนาดจริง มีรายละเอียดการเสริมเหล็ก และรายละเอียดของจุดต่อด้วยเหล็กเดือยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังในผนัง ซึ่งเป็นจุดต่อที่มีใช้ในประเทศไทย ภายใต้แรงกระทำทางข้างสลับทิศในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ ที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว แต่ผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จดังกล่าว สามารถต้านทานแรงกระทำทางข้างได้สูงสุด ได้ใกล้เคียงกับผนังคอนกรีตหล่อในที่ ตำแหน่งที่ได้รับความเสียหาย ได้แก่ รอยร้าวบริเวณจุดต่อด้วยเหล็กเดือยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และบริเวณจุดต่อที่ใช้ปูนกรอกปิดไว้ โดยผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จสามารถสลายพลังงานจากรอยร้าวได้น้อยกว่าผนังคอนกรีตหล่อในที่ ซึ่งหากนำรูปแบบจุดตอดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในบริเวณที่ต้องออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวอย่างเข้มงวด จะต้องปรับปรุงรายละเอียดให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งาน

2. ชั้นทดสอบคอนกรีตหล่อในที่ (RC) หลุดออกจากฐานได้ยากกว่าชั้นทดสอบผนังหล่อสำเร็จ (PC) ทั้งนี้เนื่องจากความต่อเนื่องของเหล็กเสริมระหว่างผนัง และฐานรากที่มีมากกว่า ทำให้หลุดได้ยากกว่า

3. ผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) โดยใช้ชั้นทดสอบ ขนาด 3/4 เท่าของขนาดจริง ภายใต้แรงกระทำทางข้างสลับทิศในห้องปฏิบัติการ พบว่า มีการเสียรูปด้วยลักษณะการแอ่นตัวเหมือนคานยื่นออกจากฐาน อิฐเมนต์ในผนังที่รับแรงดึงจะยัด และด้านรับแรงอัดจะหดตัว

และรูปแบบการวิบัติเกิดรอยร้าวแนวยาว สูงจากฐานประมาณ 0.50 เมตร ของผนังทางด้านข้าง ทั้งสองด้าน คาดว่าเสียหายด้วยแรงดัดผสมกับแรงเฉือน

4. ขึ้นทดสอบผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) อิฐินเมนต์ในผนัง ยังคงรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม มีการเสียรูปน้อย มีเฉพาะอิฐินเมนต์ที่จุดต่อฐานที่ยึดตัวแทน เมื่อให้แรงกระทำไปเรื่อย ๆ และจำนวนรอบมากขึ้น พบว่า รูปแบบการวิบัติจะเกิดรอยร้าวบริเวณแผ่นเหล็กยึดผนัง กับฐานทั้งสอง คาดว่าเกิดจากแรงที่กดจากผนังทั้งแผ่นมากด และดิ่งที่จุดต่อ (Bearing Mode)

5. เมื่อใช้ไฟไนต์อิฐินเมนต์แบบไร้เชิงเส้น WCOMD ซึ่งมีแบบจำลองคอนกรีตร้าว และแบบจำลองเหล็กเสริมผนวกในโปรแกรม สร้างแบบจำลองผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) และผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) พบว่า สามารถทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ การพัฒนารอยร้าว รูปแบบการวิบัติ เส้นโค้ง hysteretic loop ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

6. เมื่อวิเคราะห์ความเค้นหลัก (principle compressive stress) ภายในจุดต่อ พบว่า ตัวอย่างทดสอบผนังหล่อในที่ และผนังหล่อสำเร็จ มีการสร้างความเค้นอัดหลักด้านหนึ่ง และเกิดแรงดึงอีกด้านหนึ่ง มีค่ามากขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากขึ้น แบบจำลองไฟไนต์อิฐินเมนต์ ขนาด 0.10×0.10 เมตร แสดงผลการวิเคราะห์มีความชัดเจนมากกว่าแบบจำลอง ขนาด 0.20×0.20 เมตร

ข้อเสนอแนะ

1. ขึ้นทดสอบมีการหล่อขึ้นส่วนแยกจากฐานราก เพื่อจำลองพฤติกรรมให้คล้ายคลึงกับ ผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ แล้วนำมาติดตั้งยึดกับฐานรากด้วยการเชื่อม ยึดกับเหล็กเดือย 12 มม. ในฐานราก และแผ่นเหล็กหนา 6 มม. ที่ฝังในผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จซึ่งเป็นจุดต่อ ด้วยเหล็กเดือย เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังในผนัง ซึ่งเป็นจุดต่อที่มีใช้ในประเทศไทย ภายใต้แรงกระทำ ทางข้างสลับทิศในห้องปฏิบัติการ ในการวิจัยครั้งต่อไปสามารถนำมาปรับปรุงรอยต่อให้เหมาะสม จุดต่อ และติดตั้งผนังคอนกรีตสำเร็จรูป ที่สามารถรับแรงกระทำทางด้านข้างมากขึ้น

2. การทำการวิจัยครั้งนี้ ทดสอบผนังคอนกรีตหล่อในที่ (RC) และผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ (PC) เสนอแนะให้มีการทดสอบผนังคอนกรีตที่มีช่องเปิด (Opening) คล้ายช่องหน้าต่าง ในสภาพบ้านพักอาศัยจริง



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

กฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารต้านแผ่นดินไหวในประเทศไทย.

(30 พฤศจิกายน 2550). **ราชกิจจานุเบกษา**. 124(86). หน้า 17-25.

กรมทรัพยากรธรณี. (2555). **แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย**. กรุงเทพฯ:

กรมทรัพยากรธรณี.

กรมทรัพยากรธรณี. (2556). **แผนที่ภัยพิบัติแผ่นดินไหวประเทศไทย**. กรุงเทพฯ:

กรมทรัพยากรธรณี.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2547). **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแผ่นดินไหวและการออกแบบ**

โครงสร้างเพื่อป้องกันแผ่นดินไหว. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2558,

จาก http://eservices.dpt.go.th/edocument/data/work/Earthquake_total.pdf

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2550). **มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทาน**

การสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2558,

จาก http://services.dpt.go.th/dpt_rsbgd/modules/standard/data_standard/std_bldg/Standard_bldg_pdf.pdf

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา และวิวัฒน์ พัทธศานนท์ (ผู้บรรยาย). (2-4 พฤษภาคม 2550).

แนวทางการออกแบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตหล่อสำเร็จ: กรณีศึกษา โครงการ

บ้านเอื้ออาทร. ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12**

(หน้า 224). พิษณุโลก: สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

ในพระบรมราชูปถัมภ์.

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, สถาพร โภคา, วิวัฒน์ พัทธศานนท์ และอิทธิพงศ์ พันธุ์นิกุล. (2551).

การออกแบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป: กรณีศึกษา. **วารสารวิชาการ**

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 1(1), 62-76.

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย และสถาพร โภคา. (2555). ผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป

วารสารคอนกรีต, 17 (2). สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2558,

จาก [http://www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=](http://www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=148:2013-01-09-03-34-46&catid=60:journal-17&Itemid=55)

148:2013-01-09-03-34-46&catid=60:journal-17&Itemid=55

- เฉลิมชัย วัฒนล้ำเลิศ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2551). Self-compacting Concrete และการใช้งานในอุตสาหกรรมการก่อสร้างด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูป Precast Concrete. **โยธาสาร**, 20(4). สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2558, จาก <http://thaitca.or.th/images/journal/journal12/journal12-1>.
- ชยานนท์ หารัชภิญโญ. (2547). **โครงการการศึกษาการแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยกระบวนการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- โชติพงษ์ จันทรมณี และสันติ ชินานูวัตินวงศ์ (ผู้บรรยาย). (12-14 พฤษภาคม 2553). การศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนการก่อสร้างอาคารระหว่างโครงสร้างระบบผนังรับน้ำหนักกับโครงสร้างระบบเสา-คาน. ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15** (หน้า 151-167). อุบลราชธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- ทรงพล จารุวิศิษฏ์ และประยุทธ์ สมานรัตน์เสถียร (ผู้บรรยาย). (9-11 พฤษภาคม 2555). การก่อสร้างอาคารสูงด้วยระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในประเทศไทย. ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17** (หน้า 16). อุตรดิตถ์: มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์.
- บุญชัย เชิญเกียรติประดับ และอโณทัย เทพหัสดิน ณ. อยุธยา (ผู้บรรยาย). (2-4 พฤษภาคม 2550). การก่อสร้างอาคารกึ่งสำเร็จรูปด้วยระบบเอสเคดี. ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12** (หน้า 32). พิษณุโลก: สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- บุรินทร์ เวชบรรเทิง. (2556). **ความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับแผ่นดินไหว**. กรุงเทพฯ: กรมอุตุนิยมวิทยา.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2555). **การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย SolidWorks Simulation**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- ปรีดา ไชยมหาวัน และชยานนท์ หารัชภิญโญ. (2557). พฤติกรรมของกำแพงคอนกรีตหล่อสำเร็จ ภายใต้แรงแผ่นดินไหว. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 5(2), 131-146.
- วรวิทย์ ตีระณวาณิช และแหลมทอง เหล่าคงถาวร (ผู้บรรยาย). (12-14 พฤษภาคม 2553). การศึกษารูปแบบรอยต่อระหว่างผนังบ้านสำเร็จรูปเพื่อแก้ปัญหาการรั่วซึมของน้ำฝน. ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15** (หน้า 201-216). อุบลราชธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

- อมร พิมาณมาศ. (2555). **ประเทศไทยเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวและสึนามิแค่ไหนและจะรับมืออย่างไร**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีจีนานาชาตีสิรินคร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- อมร พิมาณมาศ. (2558). **มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวตัวใหม่ มยผ. 1302-52 ตอนที่ 1**. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2558, จาก <http://www.coe.or.th/download/Articles/Amorn/13-01-2015/DT25.pdf>
- อมร พิมาณมาศ, ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลดี และปรีดา ไชยมหาวัน. (2558). **การรับน้ำหนักความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารต้านแผ่นดินไหว กฎกระทรวง พ.ศ. 2550: SESSION 1-3.1**. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2558, จาก <http://old.eit.or.th/ejournal/detail.php?id=2111>.
- อมร พิมาณมาศ, ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลดี และปรีดา ไชยมหาวัน. (2558). **มาตรฐานประกอบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว มยผ. 1301-50: SESSION 1-4**. สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2558, จาก <http://old.eit.or.th/ejournal/detail.php?id=2112>.
- ACI550.1R. (2009). **Guide to Emulating Cast-in Place Detailing in Precast Concrete Structure**. Michigan: Farmington Hills.
- Abdullah, H., Sobri, M. S. and Hamzah, S. H. (2015). **Shear Resistance Analysis of Rebar Connector in RC Stocky Wall Panel Using Lusas 3D Modelling**, Retrieved December 3, 2016, from http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9789812872890-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1506922-p177069645
- American Concrete Institute. (2001). **ACI Innovation Task Group1 and Collaborators, Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing (ACI T1.1-01)**. Michigan: Farmington Hills.
- Arturo, E. S., Maher K. T., Xiao, M. H. and Rafael, A. M. (1994). Seismic resistance of vertical joints in precast shear walls, Federation Internationale de la Precontrainte (FIP). **Congress**, 1(1), 225-241.
- He, M., Lam, F. and Foschi, R. O. (2001). Modelling Three-Dimensional Timber Light-Frame Buildings. **Journal of Structural Engineering**, 2, 901-913.

- Hwang, K. R. and Lee, H. S. (2012). **Nonlinear 3D Solid Finite Element Analysis of RC Shear Wall Subassemblages Under Lateral Loads**. Retrieved December 3, 2016, from <http://dianafea.com/node/1111>
- Lambard, D. B., Beard, C., Johnson, B., Marciniak, R.A., Dausman, J., Bronson, R., et al. (2000). Mutations in the WRN gene in mice accelerate mortality in a p53-null background. **Mol. Cell Biol**, 20, 3286–3291.
- Lei, T. (2015). **Nonlinear Finite Element Analysis of New Precast Concrete Shear Wall**. Retrieved December 3, 2016, from http://www.atlantis–press.com/php/download_paper.php?id=25845210
- Maekawa, K. (1998). **User guide for WCOMD–SJ**. Tokyo: University of Tokyo.
- Minaie, E. (2009). **Behaviour and Vulnerability of Reinforced Masonry Shear Walls**. Pennsylvania: Drexel University.
- Miodrag, S., Gligorie, A. N., Branislav, P. S. and Ratko, S. M. (1996). **Contribution to Theoretical and Experimental Analysis of large Panel Structures Subjected to Earthquake**. Retrieved December 3, 2016, from http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_170.PDF
- Neil, M. H. and Ghosh, S. K. (2004). Acceptance Criteria for Special Precast Concrete Structural Walls Based on Validation Testing. **PCI Journal**, 2, 1517–1571.
- Ngo, T. D., Mendis, P. and Krauthammer, T. (2007). Behavior of Ultrahigh-Strength Prestressed Concrete Panels Subjected to Blast Loading. **Journal of Structural Engineering**, 3, 1581–1590.
- Redmond, L., Stavridis, A. and DesRoches, R. (2014). Development of a finite element model for partially grouted reinforced masonry. In **NCEE 2014 – 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering** (pp. 1451–1467). Anchorage: Earthquake Engineering Research Institute.
- Saimon, D. C., Einea, A., Tadros, M. K. and Culp, T. D. (1997). Full Scale Testing of Precast Concrete Sandwich Panels. **ACI Structural Journal**, 2, 354–362.

- Smith, B. J., Kurama, Y. C. and McGinnis, M. J. (2011). Design and Measured Behavior of a Hybrid Precast Concrete Wall Specimen for Seismic Regions. **Journal of Structural Engineering@ASCE**, 3, 1052–1062.
- Soudki, K. A., Rizkalla, S. H. and Dawid, R. W. (1995). Horizontal Connections for Precast Concrete Shear Walls Subjected to Cyclic Deformations Part2: Prestressed Connections. **PCI Journal**, 2, 1865–1877.
- Wong, P. S. and Vecchio, F. J. (2002). **VecTor 2 & Formuworks User's Manual**. Toronto: University of Toronto.
- Woods, J., Cruz-Noguez, C. and Lau, D. T. (2014). An Innovative ERP Anchor System for the Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Shear Walls. **Proceeding of the 10th National Conference in Earthquake Engineering** (pp. 1–11). Anchorage: Earthquake Engineering Research Institute.
- Wu, C. and Sheikh, H. (2013). A finite element modelling to Investigate the mitigation of blast effects on reinforced concrete panel using foam cladding. **International Journal of Impact Engineering**, 24–33.
- Vaghei, R., Hejazi, F., Taheri, H., Mohd, S. J. and Abdullah, A. (2014). **Evaluate Performance of Precast Concrete Wall to Wall Connection**. Retrieved December 3, 2016, from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212670814000529>
- Xu, F. and Wang, T. (2013). Numerical Study on Precast RC Wall Panels with Angle Steel Boundary Components. **Applied Mechanics and Material**, 351, 578–582. Retrieved December 3, 2016, from 10.4028/www.scientific.net/AMM.351-352.578



ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	พัลลภ ภูริวรางคกุล
วัน เดือน ปี เกิด	16 ธันวาคม 2517
ที่อยู่ปัจจุบัน	240/1 หมู่ 4 ตำบลท่าสุต อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย
ที่ทำงานปัจจุบัน	เทศบาลตำบลเวียงพางคำ อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	วิศวกรโยธา ระดับชำนาญการ
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2559	วิศวกรโยธา ระดับชำนาญการ เทศบาลตำบลเวียงพางคำ อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย
พ.ศ. 2552-2559	วิศวกรโยธา ระดับปฏิบัติการ เทศบาลตำบลเวียงพางคำ อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย
พ.ศ. 2551-2552	วิศวกรโยธา องค์การบริหารส่วนจังหวัดสุรินทร์
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2554	วศ.ม. (สาขาบริหารงานก่อสร้าง), มหาวิทยาลัยนเรศวร, จังหวัดพิษณุโลก
พ.ศ. 2539	วศ.บ. (สาขาวิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, จังหวัดเชียงใหม่
ผลงานตีพิมพ์	
ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์	
พัลลภ ภูริวรางคกุล (ผู้บรรยาย). (28-30 มิถุนายน 2559). พฤติกรรมของผนังรับ น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งหล่อสำเร็จภายใต้แรงดันข้าง. ใน การประชุม วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 (หน้า 298-302). สงขลา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.	
ผลงานตีพิมพ์อื่น ๆ	-