

การศึกษาการออกแบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

A Study of Designing of Cold-Formed Steel Structure for Resisting Seismic Force

ณัฐจรรย์นันท์ รอดคลองตัน¹ ไววิทย์ วันเดช² และ ผศ.ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

สำหรับการใช้งานโครงสร้างอาคารด้วยโครงสร้างเหล็กรีดเย็นนั้น มีความแพร่หลายและเป็นที่ต้องการของตลาดมากขึ้นในต่างประเทศ รวมถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมเป็นประเด็นส่งเสริมให้การใช้งานโครงสร้างเหล็กรีดเย็นสำหรับอาคารนั้นถูกกล่าวถึงอย่างเป็นวงกว้างมากขึ้น เพราะชิ้นส่วนโครงสร้างส่วนมากจะสามารถนำมาใช้ใหม่หรือเข้ากระบวนการรีไซเคิลได้ เหล็กรีดเย็นนั้นมีลักษณะเป็นชิ้นส่วนบาง (thin wall member) ซึ่งมีคุณสมบัติหน้าตัดที่ค่อนข้างแตกต่างกับเหล็กรีดร้อนโดยในการออกแบบมีการพิจารณาผลของแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างเพื่อใช้ในการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือนในระบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว (seismic-resisting structural systems) ร่วมกับการออกแบบส่วนของชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อให้สอดคล้องและมีกำลังเพียงพอต่อการต้านทานผลของแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคาร ปรินญานิพนธ์ฉบับนี้จึงดำเนินการศึกษาการออกแบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวจากมาตรฐานต่างๆ ที่ใช้อย่างในต่างประเทศ ทั้งนี้เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประเด็นที่มีความสอดคล้องและแตกต่างกันของแต่ละมาตรฐานการออกแบบ โดยทั่วไปสำหรับส่วนโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเป็นโครงสร้างหลักในการใช้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว จะมีค่าตัวแปรปรับแก้สำหรับแผ่นดินไหวที่เฉพาะ รวมถึงข้อกำหนดของชิ้นส่วนที่อยู่ในระบบโครงสร้างที่ต่างกัน โดยจะเป็นการอ้างอิงจากผลการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: เหล็กรีดเย็น , โครงสร้างเหล็กรีดเย็น , Seismic-resisting structural systems

Abstract

The usage of Cold-formed steel structure has more demanding in construction market because of its advantage compared to the conventional construction building. The environment factor is also supportive for the using of cold-formed steel structure because most of the member of CFS can be reused and be recycled. For Cold-formed steel mostly are thin wall member which it has ostensibly section properties different compare to the Hot-rolled steel .So that, In the design for seismic resisting structure ,need to consider the effect of the seismic combination on each element of the structure to be used to design for CFS shear wall and another structure member which has adequate strength to withstand the effect of the seismic force that act on the structure. In this thesis, our study focus on the design of Cold-formed steel structure for seismic resisting systems in each standard that provided and compare correspond issue and different issue of each standard . In generally, for using of cold-formed structure as primary seismic resisting structure systems. It has individual modification factor for seismic force and also including with the individual requirement for each structure member which refer to the laboratory testing result.

Keywords: Cold-formed steel, Cold-Formed Steel Structure , Seismic-resisting structural systems

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องด้วยความต้องการของ high performance housing มีแนวโน้มเพิ่มความสนใจระบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็น (Cold-formed steel structure) ซึ่งเป็นระบบโครงสร้างที่ใช้การก่อสร้างวัสดุที่เรียกว่า light gauge cold-rolled steel profile เป็นหลักสำหรับการออกแบบระบบโครงสร้างรีดเย็นนั้นจะมีส่วนที่ต้องคำนึงออกแบบในเชิงกำลังอยู่หลายส่วน ไม่ว่าจะเป็นแผ่นปิดของกำแพงรับแรงเฉือน (shear wall sheathing sheet) ซึ่งแต่ละวัสดุที่ใช้ปิดนั้นก็จะมี stiffness ที่แตกต่างกัน อันเป็นผลทำให้ผลการตอบสนองของกำแพงรับแรงเฉือนต่อผลของแรงกระทำด้านข้างหรือแรงแผ่นดินไหวนั้นมีค่าที่แตกต่างกันเป็นต้น สำหรับกรณีระบบโครงสร้างนั้นเป็นแบบกำแพงรับแรงเฉือนที่ปิดด้วยวัสดุปิดชนิดต่างๆ นอกจากนี้ผลของแรงกระทำที่ได้จากแรงแผ่นดินไหวจากการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีต่างๆ ตามที่มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวของแต่ละประเทศนั้นระบุ ย่อมจะมีผลและถูกใช้ในการพิจารณาออกแบบทั้งส่วนกำแพงรับแรงเฉือนของโครงสร้าง และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่อยู่ในระบบโครงสร้างเพื่อให้สามารถทนต่อแรงกระทำจากแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยสำหรับการใช้งาน จึงนำมาซึ่งการศึกษาการออกแบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการออกแบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวจากมาตรฐานออกแบบของแต่ละประเทศ

1.3 ขอบเขตและวิธีการศึกษา

โครงการนี้เป็นการศึกษาการออกแบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยวิธีการศึกษาจากมาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิงการออกแบบสำหรับโครงสร้างเหล็กรีดเย็นของ AISI (American Iron and Steel Institute) , AS (Australia Standard) , มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง ตลอดจนศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเหล็กรีดเย็นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

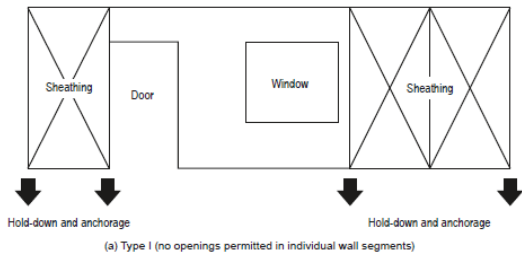
2.1 Cold-Formed Steel Structural Systems

สำหรับการใช้งานเหล็กรีดเย็นนั้นเริ่มต้นในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 ถึงช่วงต้นศตวรรษที่ 20 (ภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2) เนื่องจากมีความต้องการที่จะใช้งานโครงสร้างเหล็กที่มีความเบาและความหนาหน้าตัดบางสุดเท่าที่เป็นไปได้ ทั้งนี้การนำเหล็กรีดเย็นมาใช้ในงานก่อสร้าง จะพบว่าเมื่อชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเมื่อได้รับแรงกระทำแบบแรงอัดจะเป็นความเสียหายที่เรียกว่า Buckling แบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น local buckling , distortional buckling และ global buckling ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของกลุ่มเหล็กที่มีลักษณะเป็นแบบ thin member profile นอกจากนี้เมื่อ

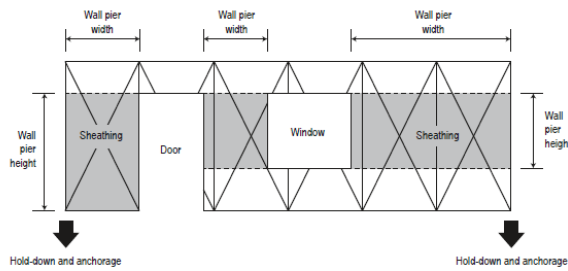
มีการใช้งานโครงสร้างเหล็กรีดเย็นที่มีความสูงมากขึ้น ระบบ lateral force-resisting systems จึงถูกพัฒนาขึ้น เนื่องจากสำหรับการก่อสร้างโดยใช้โครงสร้างเหล็กรีดเย็นแบบดั้งเดิม จะมีลักษณะเป็นโครงเฟรมสี่เหลี่ยม ซึ่งเมื่อได้รับผลของแรงกระทำด้านข้างจะทำให้โครงสร้างเหล่านี้นเกิดการเคลื่อนตัวทางข้างและมีเสถียรโครงสร้างที่ต่ำลง ทั้งนี้ทั้งนั้นระบบต้านทานแรงทางข้าง ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานไม่ว่าจะเป็น กำแพงรับแรงเฉือน (Shear wall) แบบต่างๆ เป็นต้น

2.2 Seismic Force-Resisting Systems

งานวิจัย [1] กล่าวว่า สำหรับการออกแบบระบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว จะมีลักษณะชิ้นตอนที่คล้ายคลึงออกแบบโครงสร้างประเภทอื่นๆ โดยจะต้องมีการระบุแรงเฉือนที่ระดับต่างๆ ในโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างด้วยวิธีต่างๆ ตามที่มาตรฐานการออกแบบนั้นอนุญาตให้ใช้ รวมถึงในส่วนของ การออกแบบระบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวจะต้องมีการคำนึงถึงการจัดวางตำแหน่งระบบต้านทานแรงด้านข้างหรือระบบของกำแพงรับแรงเฉือนด้วย ซึ่งกำแพงรับแรงเฉือนในระบบโครงเฟรมเบาเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว ที่งานวิจัย [1] ได้ระบุไว้ซึ่งได้แก่ Shear walls sheathed with structural wood panels จะมีลักษณะเป็นโครงเฟรมเบาแบบ blocked ซึ่งจะถูกปิดด้วยแผ่นไม้ชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกันโดยแผ่นไม้จะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้กำแพงรับแรงเฉือนประเภทนี้สามารถทนต่อแรงกระทำด้านข้างได้ , Shear walls sheathed with steel sheet sheathing จะมีลักษณะเป็นโครงเฟรมที่ปิดด้วยแผ่นเหล็ก ซึ่งมีลักษณะพฤติกรรมที่ค่อนข้างคล้ายกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบแรกแต่กรณีนี้เป็นแบบแผ่นโลหะ ซึ่งจะเกิดการเสียสภาพจาก tension field ที่เกิดขึ้นในแผ่นเหล็กปิดกำแพงรับแรงเฉือนใน effective strip และ Strap-Braced Shear wall จะมีลักษณะเป็นแบบโครงเฟรมที่มีการแยงของแกนด้านข้าง โดยสำหรับระบบนี้ ชิ้นส่วนที่เป็น Strap-Braced จะมีปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนแบบ Strap-Braced ซึ่งในการพิจารณาด้านกำลังจะต้องพิจารณาถึงความยึดตรึงที่ตำแหน่งของจุดต่อ เพราะจะมีการเสียรูปของกำแพงรับแรงเฉือนชนิดดังกล่าว นอกจากนี้มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรีดเย็นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว (AISI S400-20) [2] ได้จำแนกกำแพงรับแรงเฉือนออกเป็นสองประเภทหลัก ตามวิธีการ Sheathing โดยที่กำแพงรับแรงเฉือนประเภท I นั้นจะมีการปิดด้วย Sheet sheath ตั้งแต่วางของกำแพงรับแรงเฉือนไปยังส่วนบนสุดของกำแพงรับแรงเฉือน โดยอนุญาตมีช่องเปิดสำหรับกำแพงรับแรงเฉือนได้ แต่จะต้องมีการออกแบบสำหรับการส่งผ่านแรงกระทำบริเวณช่องเปิดๆ นั้น สำหรับกำแพงรับแรงเฉือนประเภท II นั้นจะมีลักษณะแตกต่างจากประเภท I คือ สัดส่วนของการ Sheathing จะมีได้หลายระดับ ทั้งนี้สัดส่วนดังกล่าวจะมีผลต่อการพิจารณาด้านกำลังรับแรงเฉือนของกำแพงรับแรงเฉือนนี้ โดยกำแพงรับแรงเฉือนประเภท II อนุญาตให้มีการใช้ช่องเปิดได้โดยไม่ต้องมีการพิจารณาออกแบบส่วนที่ส่งผ่านแรงกระทำบริเวณช่องเปิด



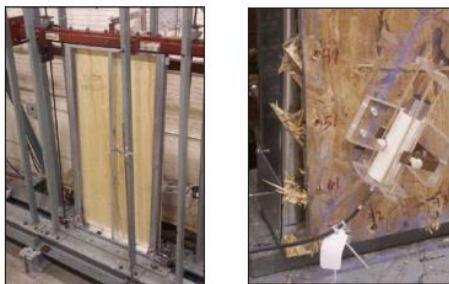
รูปที่ 1 กำแพงรับแรงเฉือนประเภท I (กรณีไม่มีช่องเปิด)



รูปที่ 2 กำแพงรับแรงเฉือนประเภท II

2.3 Cyclic Performance of CFS Seismic Force-Resisting Systems

งานวิจัย [1] ระบุเกี่ยวกับการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนภายใต้แรงเฉือนที่กระทำ โดยใช้การทดสอบ Hysteretic behavior of shear wall ซึ่งเป็นการให้แรงเฉือนที่เกิดจาก Pushover นั้นกระทำซ้ำต่อโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนเพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวรวมถึงการเสียรูป (failure) ของระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนนั้นๆ ซึ่งจากผลวิจัยที่อ้างอิงมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ สำหรับแต่ละรูปแบบของโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือนที่ได้รับผลของแรงเฉือนกระทำต่อโครงสร้างที่คล้ายคลึง กำแพงรับแรงเฉือนแต่ละแบบจะให้พฤติกรรมภายใต้ cyclic testing และ mode of failure ที่แตกต่างกัน สำหรับ Wood structural panel shear wall: WSP Shear wall นั้นพบว่าจะเกิดความเสียหายแบบ bearing failure ของตัวยึด (fastener) กับแผ่นไม้ที่ใช้ปิด รวมถึงการเกิด pull-through และ edge tear ของแผ่นไม้ปิดด้วย ซึ่งเมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำไปมา จะทำให้แผ่นไม้ไม่ได้ยึดติดกับโครงเฟรมหลักอีกต่อไป



รูปที่ 3 WSP Shear wall ในการทดสอบ cyclic performance (ซ้าย) และ การเกิด pull-through ,edge tear ที่ fastener (ขวา)

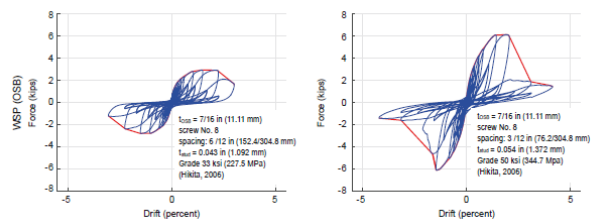
สำหรับกำแพงรับแรงเฉือนแบบ Steel sheet sheathing ส่วนใหญ่จะเกิดความเสียหายแบบ Shear buckling ที่เกิดขึ้นในแผ่นเหล็กที่ใช้ปิดดังแสดงในรูปที่ 4 และสำหรับกำแพงรับแรงเฉือนแบบ Strap-Braced Shear wall นั้นจะเกิดความเสียหายเกิดขึ้นที่ชิ้นส่วน Strap-Braced รวมกับการเกิด Bearing failure ที่ fastener ด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5



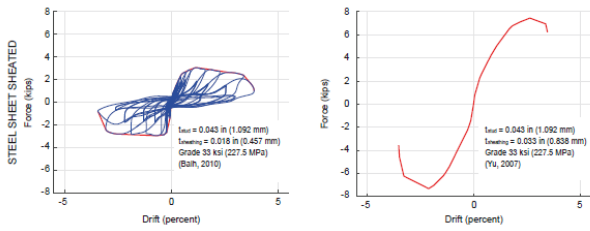
รูปที่ 4 Steel sheet Sheathing Shear wall ในการทดสอบ cyclic performance (ซ้าย) และ การเกิดความเสียหายแบบ Shear buckling ในระหว่างการทดสอบ (ขวา)



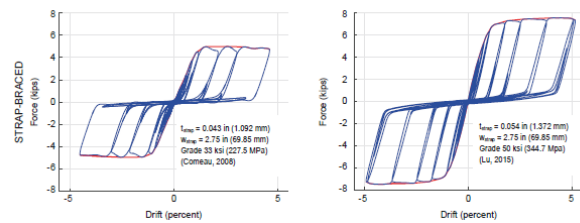
รูปที่ 5 typical strap-braced wall specimen ติดตั้งบน rig สำหรับการทดสอบ cyclic performance (ซ้าย) และ การเกิด yielding ใน strap-braced หลังจากการทดสอบ (ขวา)



รูปที่ 6 hysteretic response recorded ของ typical WSP shear walls



รูปที่ 7 hysteretic response recorded ของ typical steel sheet sheathing shear walls



รูปที่ 8 hysteretic response recorded ของ typical strap-braced shear walls

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว (พฤติกรรมโครงสร้างเหล็กกรีดยึดภายใต้แรงกระทำทางข้าง)

ชื่อผู้วิจัย	วัตถุประสงค์
Robert L., Thomas A., and Benjamin W (2016)	แนวทางการใช้งานระบบต้านทานแรงด้านข้างของโครงสร้างเหล็กกรีดยึด
American Iron and Steel Institute (2020)	มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวจากมาตรฐานการออกแบบของแต่ละประเทศ และเปรียบเทียบมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวระหว่างประเทศที่ศึกษา โดยแบ่งขั้นตอนในการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ ขั้นตอนการศึกษามูลการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวจากมาตรฐานการออกแบบของแต่ละประเทศ ขั้นตอนการนำข้อมูลที่ศึกษามาวิเคราะห์และเชื่อมโยงตามหมวดหมู่หัวข้อของแต่ละมาตรฐานการออกแบบ และขั้นตอนการเปรียบเทียบข้อมูลที่ศึกษาระหว่างประเทศที่ศึกษา

3.1 การศึกษามาตรฐานการออกแบบที่ใช้อ้างอิงในประเทศสหรัฐอเมริกา

ได้ทำการศึกษาเอกสาร Seismic Design of Cold-Formed Steel Lateral Load-Resisting Systems A Guide for Practicing Engineers และคลิปวิดีโอ NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 12 ซึ่งเป็นการบรรยายทางเทคนิคภาพรวมของการใช้โครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว และนำไปสู่การศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว AISI S400-20 ของ American Iron and Steel Institute และ ASCE 7-10 Minimum design load for building and other structures จากการศึกษามาตรฐาน AISI S400-20 ในส่วนหัวข้อ A1.2.2 และบท C จะมีการอ้างอิงการออกแบบไปยังมาตรฐานอื่นซึ่งรวมถึงมาตรฐาน ASCE 7-10 และมีการกล่าวถึงการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหว จึงได้มีการศึกษาต่อมายังมาตรฐาน ASCE 7-10 เป็นมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างจากแรงออกแบบของ American Society of Civil Engineers

3.2 การศึกษามาตรฐานการออกแบบที่ใช้อ้างอิงในประเทศออสเตรเลีย

การศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวของออสเตรเลียได้แก่ มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึด AS 4600 ของ Standards Australia และ AS 1170.4 Structural design actions Part 4 : Earthquake actions in Australia ของ Standards Australia

มาตรฐาน AS/NZS 4600:2018 เป็นมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดของ Standards Australia ซึ่งระบุไว้ว่า ถ้าโครงสร้างเหล็กกรีดยึดถูกใช้เป็นโครงสร้างหลักที่ใช้ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ค่า Structural ductility factor (μ) และ Structural performance factor (S_p) จะต้องเป็นที่มาตรฐานได้ระบุไว้ และการพิจารณาแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างจะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน AS1170.4 ทั้งวิธีการวิเคราะห์แบบ Equivalent static analysis และ dynamics analysis

มาตรฐาน AS 1170 เป็นมาตรฐานการออกแบบโครงสร้าง และ AS 1170.4 เป็นมาตรฐานในหัวข้อการออกแบบเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวของ Standards Australia

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ระบบกำแพงรับแรงเฉือนเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว (Seismic force-resisting structural shear wall systems)

4.1.1 Shear strength ของ Shear walls สำหรับกำแพงรับแรงเฉือนประเภท I

เมื่อ $h/w \leq 2$

$$V_n = v_n w$$

เมื่อ $2 < h/w \leq 4$

$$V_n = v_n w (2w/h)$$

สำหรับกำแพงรับแรงเฉือนประเภท II

$$V_n = C_a v_n \Sigma L_i$$

ซึ่งค่า v_n ในสมการข้างต้นสำหรับกรณีกำแพงรับแรงเฉือนประเภท I และ II จะเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนเชิงทฤษฎี ต่อหนึ่งหน่วยความยาว โดยจะเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของกำแพงรับแรงเฉือนประเภทต่างๆ ดังแสดงต่อไปนี้

Table E1.3-1
Nominal Shear Strength (Resistance) (v_n) per Unit Length for Seismic and Other In-Plane Loads^{1,4}
For Shear Walls Sheathed With Wood Structural Panels on One Side of Wall

United States and Mexico (lb/ft)							
Assembly Description	Max. Aspect Ratio (h/w)	Fastener Spacing at Panel Edges ² (in.)				Designation Thickness ² of Stud and Track (mils)	Minimum Sheathing Screw Size
		6	4	3	2		
15/32" Structural 1 Sheathing (4-ply)	2:1 ³	780	990	-	-	33 or 43	8
	2:1	890	1330	1775	2190	43 or 54 68	8 10
7/16" OSB	2:1 ³	700	915	-	-	33	8
	2:1 ³	825	1235	1545	2060	43 or 54	8
	2:1	940	1410	1760	2350	54	8
	2:1	1230	1850	2310	3080	68	10
Canada (kN/m)							
Assembly Description	Max. Aspect Ratio (h/w)	Fastener Spacing at Panel Edges ² (mm)			Designation Thickness ² of Stud and Track (mils)	Required Sheathing Screw Size	
		150	100	75			
9.5 mm CSP Sheathing	2:1 ³	8.5	11.8	14.2	43 (min.)	8	
12.5 mm CSP Sheathing	2:1 ³	9.5	13.0	19.4	43 (min.)	8	
12.5 mm DFP Sheathing	2:1 ³	11.6	17.2	22.1	43 (min.)	8	
9 mm OSB 2R24/W24	2:1 ³	9.6	14.3	18.2	43 (min.)	8	
11 mm OSB 1R24/2F16/W24	2:1 ³	9.9	14.6	18.5	43 (min.)	8	

รูปที่ 9 ตารางกำลังรับแรงเฉือนเชิงทฤษฎี ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (V_n)

ของกำแพงรับแรงเฉือนโครงเฟรมเบาเหล็กกรีตยื่นปิดด้วยแผ่นไม้

Table E2.3-1
Nominal Shear Strength (Resistance) (v_n) per Unit Length for Seismic and Other In-Plane Loads^{1,4}
for Shear Walls With Steel Sheet Sheathing on One Side of Wall

United States and Mexico (lb/ft)							
Assembly Description	Max. Aspect Ratio (h/w)	Fastener Spacing at Panel Edges ² (in.)				Designation Thickness ² of Stud, Track and Stud Blocking (mils)	Minimum Sheathing Screw Size
		6	4	3	2		
0.018" steel sheet	2:1	390	-	-	-	No	33 (min.)
	2:1 ³	-	1000	1085	1170	No	43 (min.)
0.027" steel sheet	2:1 ³	647	710	778	845	No	33 (min.)
	2:1 ³	910	1015	1040	1070	No	43 (min.)
0.030" steel sheet	2:1 ³	-	-	-	1355	Yes	43 (min.)
	2:1 ³	1055	1170	1235	1305	No	43 (min.)
0.033" steel sheet	2:1 ³	-	-	-	1505	Yes	43 (min.)
	2:1 ³	-	-	-	1870	No	54 (min.)
	2:1 ³	-	-	-	2085	Yes	54 (min.)
Canada (kN/m)							
Assembly Description	Max. Aspect Ratio (h/w)	Fastener Spacing at Panel Edges ² (mm)				Designation Thickness ² of Stud, Track and Stud Blocking (mils)	Required Sheathing Screw Size
		150	100	75	50		
0.46 mm steel sheet	2:1	4.1	-	-	-	No	33 (min.)
0.46 mm steel sheet	2:1	4.5	6.0	6.8	7.5	No	43 (min.)
0.68 mm steel sheet	2:1	6.5	7.2	7.9	8.7	No	33 (min.)
0.76 mm steel sheet	4:1	8.9	10.6	11.6	12.5	No	43 (min.)
0.84 mm steel sheet	4:1	10.7	12.0	13.0	14.0	No	43 (min.)
0.46 mm steel sheet	2:1	7.4	9.7	11.6	13.5	Yes	43 (min.)
0.76 mm steel sheet	2:1	11.7	14.3	-	-	Yes	43 (min.)
0.76 mm steel sheet	2:1	-	-	19.9	23.3	Yes	54 (min.)

รูปที่ 10 ตารางกำลังรับแรงเฉือนเชิงทฤษฎี ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (V_n)

ของกำแพงรับแรงเฉือนโครงเฟรมเบาเหล็กกรีตยื่นปิดด้วยแผ่นเหล็ก

Table E5.3-1
Canada
Nominal Shear Resistance (v_n) per Unit Length for Seismic Loads for Shear Walls Sheathed With Gypsum Board on One Side of Wall^{1,2,3} (kN/m)

Assembly Description	Maximum Aspect Ratio (h/w)	Fastener Spacing at Panel Edges/Field (mm)			Designation Thickness of Stud and Track (mils)	Required Sheathing Screw Size
		100/300	150/300	200/300		
12.5 mm gypsum board; studs max. 600 mm o.c.	2:1	3.4	3.1	2.7	33 (min.)	6

รูปที่ 11 ตารางกำลังรับแรงเฉือนเชิงทฤษฎี ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (V_n)

ของกำแพงรับแรงเฉือนโครงเฟรมเบาเหล็กกรีตยื่นปิดด้วยแผ่นยิปซัมด้านเดียว

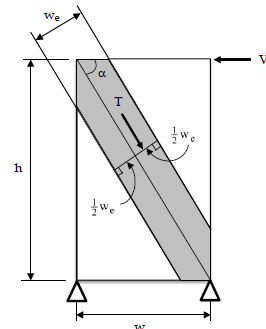
Table E6.3-1
United States and Mexico
Nominal Shear Strength (v_n) per Unit Length for Seismic Loads for Shear Walls Sheathed With Gypsum Board Panels or Fiberboard Panels on One Side of Wall^{1,2,3} (lb/ft)

Assembly Description	Maximum Aspect Ratio (h/w)	Fastener Spacing at Panel Edges/Field (in.)							Designation Thickness of Stud and Track (mils)	Required Sheathing Screw Size
		7/7	4/4	4/12	8/12	4/6	3/6	2/6		
5/8" gypsum board; studs max. 24" o.c.	2:1	290	425	295	230	-	-	-	33	6
5/8" fiberboard; studs max. 24" o.c.	1:1	-	-	-	-	425	615	670	33	8

รูปที่ 12 ตารางกำลังรับแรงเฉือนเชิงทฤษฎี ต่อหนึ่งหน่วยความยาว (V_n)

ของกำแพงรับแรงเฉือนโครงเฟรมเบาเหล็กกรีตยื่นปิดด้วยแผ่นยิปซัมหรือไฟเบอร์บอร์ดด้านเดียว

นอกจากนี้ยังมีวิธีการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในระบบกำแพงรับแรงเฉือนปิดด้วยแผ่นเหล็ก ด้วยวิธีที่เรียกว่า effective strip method สำหรับวิธีดังกล่าวนั้นสมมติว่าแถบของแผ่นปิด (Sheathing strip) นั้นเป็นส่วนที่รับแรง lateral ซึ่งเกิดจาก tension field ในแผ่นเหล็กที่ปิดกำแพงรับแรงเฉือน เพื่อใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อไป



รูปที่ 13 Effective Strip Model สำหรับ Steel Sheet Sheathing

4.2 การออกแบบการโก่งตัวของกำแพงรับแรงเฉือน (Design Deflection)

จากการศึกษาตามมาตรฐานที่อ้างอิงสำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีตยื่นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว [2] นั้นพบว่า การออกแบบการโก่งตัวของกำแพงรับแรงเฉือนนั้นจะถูกจำกัดขอบเขตการใช้งานสมการสำหรับการออกแบบคือ แรงที่กระทำจะต้องมีค่าไม่เกิน nominal shear strength ของระบบ ทั้งนี้สมการดังกล่าวได้พิจารณาพฤติกรรมของกำแพงรับแรงเฉือนภายใต้แรงกระทำที่ก่อให้เกิดการโก่งตัวของโครงสร้าง โดยพิจารณาผลของ linear elastic cantilever bending , linear elastic sheathing shear , contribution for overall nonlinear effects และผลของการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวยึดโครงสร้าง : lateral contribution from hold-down and

anchorage deformation ซึ่งสมการสรุปเป็นสมการได้ดังแสดงต่อไปนี้

$$\delta = \frac{2vh^3}{3E_s A_c b} + \omega_1 \omega_2 \frac{vh}{\rho G t_{\text{sheathing}}} + \omega_1^{5/4} \omega_2 \omega_3 \omega_4 \left(\frac{v}{\beta}\right)^2 + \frac{h}{b} \delta_v$$

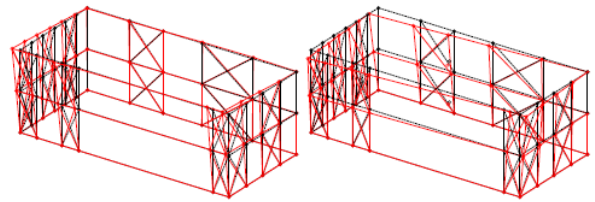
ทั้งนี้ lateral contribution from hold-down และ anchorage deformation นั้นจะขึ้นอยู่กับ aspect ratio ของกำแพงรับแรงเฉือน นอกจากนี้ตัวแปร ρ ที่ปรากฏในสมการดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความแข็งเกร็งของวัสดุที่ใช้ปิดกำแพงรับแรงเฉือน ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าที่ได้ออกมามีความแตกต่างกันออกไปตามแต่ละวัสดุที่ใช้ในระบบโครงสร้างดังกล่าว สำหรับข้อจำกัดในการใช้งานสมการดังกล่าว เนื่องด้วยเป็นการพิจารณาเฉพาะการโก่งตัวของกำแพงรับแรงเฉือนประเภท I ที่ไม่มีช่องเปิดเท่านั้น

นอกจากนี้สำหรับกำแพงรับแรงเฉือนแบบ Strap-Braced นั้นสามารถทำการขึ้นโมเดลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างและการออกแบบการโก่งตัวของโครงสร้างดังกล่าว โดยพิจารณาส่วนของ axial deformation of studs , การยึดตรึงของ strap รวมถึง lateral deflection ที่เกิดขึ้นที่ตัวยึดโครงสร้าง (hold-down และ anchorage)

4.3 แรงแผ่นดินไหวและการใช้งานการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

จากการศึกษามาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในการออกแบบไม่ว่าจะเป็น ASCE 7-10 Minimum design load for building and other structure , AS1170.4 Earthquake actions in Australia รวมถึง มาตรฐานการการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1301-1302/61) ซึ่งพบว่า [2] สำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีดยึดตามมาตรฐานระบุไว้ให้ทำการออกแบบด้วยวิธี simplified โดยการใช้อิทธิกรวิเคราะห์แบบ Equivalent static สำหรับการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้าง เพื่อใช้ในการแรงที่กระทำต่อโครงสร้างในส่วนต่างๆ เพื่อนำไปทำการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างให้มีกำลังที่เพียงพอต่อการต้านทานแรงกระทำนั้นต่อไป โดยเนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างกรีดยึด ในส่วนของ การตอบสนองขององค์อาคารต่อแรงแผ่นดินไหวนั้นมีความซับซ้อน เพราะจะต้องพิจารณาผลของความยืดหยุ่นของจุดต่อ (Connection Flexibility) , การเสียรูปของหน้าตัดชิ้นส่วน (Member cross-section Deformation) และผลของสภาพไม่ยืดหยุ่นภายใต้ hysteretic response ของ Connection

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการอื่นๆ อ้างอิงจากการศึกษางานวิจัย [3] พบว่า สามารถนำระบบโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหวแบบ Strap-braced Shear wall นั้นขึ้นโมเดลในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างได้ เนื่องจากมีลักษณะเป็นเฟรมที่มีแกนแรงในระบบโครงสร้าง ทั้งนี้อยู่ในระหว่างการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้จริงต่อไป



(a) No diaphragm model, 1st mode (b) Rigid diaphragm model, 1st mode
Figure 9 First mode shapes of 3D models

Table 4 Natural period comparison of two 3D models using $K(V_n)$ stiffness

Mode number	No diaphragm model	Rigid diaphragm model
	Period (sec)	Period (sec)
1	0.919 ^a	0.882 ^b
2	0.881	0.832
3	0.825	0.638
4	0.557	0.342
5	0.390	0.315
6	0.335	0.270

(a) for $K(0.4V_n)$, no diaphragm, mode 1 period = 0.817 sec.
(b) for $K(0.4V_n)$, rigid diaphragm, mode 1 period = 0.782 sec.

รูปที่ 14 ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ linear static ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.4 Diaphragm

สำหรับการศึกษาการออกแบบ Diaphragm ในระบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว พบว่า จากรูปที่ 14 ผลของความยืดหยุ่นของ Diaphragm จะมีผลต่อการสั่นและการตอบสนองขององค์อาคารต่อแรงแผ่นดินไหว ซึ่งมาตรฐานการออกแบบตาม ASCE 7-10 Minimum design load for building and other structure ระบุไว้ว่า สำหรับโครงสร้างที่มีชิ้นส่วนโครงสร้างแนวตั้งเป็นแบบ Braced framed ให้พิจารณาส่วนของ Diaphragm เป็นแบบ flexible diaphragm นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า ส่วนของ Diaphragm นั้นได้ถูกทดสอบและบันทึกค่าสำหรับกำลังรับแรงเฉือนดังแสดงในรูปที่ 15 เพื่อใช้ในการออกแบบระบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวต่อไป

Table F2.4-1
Nominal Shear Strength (V_n) per Unit Length for Diaphragms Sheathed With Wood Structural Panel Sheathing 1,2
United States and Mexico (lb/ft)

Sheathing	Thick-ness (in.)	Blocked				Unblocked	
		Screw spacing at diaphragm boundary edges and at all continuous panel edges (in.)				Screws spaced maximum of 6 in. on all supported edges	
		6	4	2.5	2	Load perpendicular to unblocked edges and continuous panel joints	All other configurations
Structural I	3/8	768	1022	1660	2045		
	7/16	768	1127	1800	2255	755	565
	15/32	925	1232	1970	2465	825	615
C-D, C-C and other graded wood structural panels	3/8	690	920	1470	1840	615	460
	7/16	760	1015	1620	2030	680	505
	15/32	832	1110	1770	2215	740	555

รูปที่ 15 ตารางกำลังรับแรงเฉือนเชิงทฤษฎี ต่อ หนึ่งหน่วยความยาว (V_n) โดอะแฟรมเหล็กกรีดยึดปิดด้วยแผ่นไม้

4.5 ข้อเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานการออกแบบสำหรับแรงแผ่นดินไหวของ AS CE 7-10 และ AS1170.4

จากการศึกษา [4] ความแตกต่างระหว่างผลของแรงแผ่นดินไหวที่ได้จากการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานของทั้งสองประเทศดังต่อไปนี้

- การคำนวณ Natural time period โดยการใช้มาตรฐานของประเทศออสเตรเลียนั้นทำให้ได้ค่าที่มีค่าสูงกว่ามาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา
- Imposed dead load และ dead load factor ใน Load combination ของมาตรฐานของประเทศออสเตรเลีย นั้นจะทำให้ผลของ load combination นั้นมีค่าต่ำกว่าผลของ load combination ของมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งรวมถึงผลของ P-delta effect ที่จะน้อยลงเนื่องด้วยจาก load combination ดังกล่าวด้วย
- มาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในประเทศออสเตรเลียใช้ค่า $\pm 0.1b$ สำหรับ eccentric center of mass โดยสำหรับมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ค่า $\pm 0.05b$ สำหรับผลของ torsional effects
- แรงเฉือนที่ฐาน ของมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในประเทศออสเตรเลียนั้นจะให้ค่ามากกว่าประมาณ 20 % เมื่อเทียบกับ
- Drift limit ของโครงสร้างตามมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในประเทศออสเตรเลียจะให้ค่าน้อยกว่า เป็นผลเนื่องจากผลของ load combination ที่น้อยกว่า

ทั้งนี้การเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐานการออกแบบสำหรับแรงแผ่นดินไหวของแต่ละประเทศนั้นมีประเด็นข้อแตกต่าง เนื่องจากผลของสภาพพื้นที่มีการตอบสนองของแรงแผ่นดินไหวที่แตกต่างออกไป โดยในการใช้งานการออกแบบสำหรับแรงแผ่นดินไหว ที่มาตรฐานออกแบบโครงสร้างเหล็กเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว (AISI S400) นั้นอ้างอิงตามมาตรฐาน ASCE 7-10 minimum design load for building and other structure สำหรับการเปรียบเทียบจะทำให้เห็นถึงความแตกต่างและระมัดระวังในการประยุกต์ใช้งานการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานที่อ้างอิงในประเทศต่างๆ

5. สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีตเย้นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ผลดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้พบว่า การวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กกรีตเย้นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว สามารถใช้วิธี Equivalent static ที่ระบุไว้ในมาตรฐาน

เนื่องจากวิธีการอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็น modal analysis หรือ linear และ nonlinear time histories analysis สามารถทำได้ยากเนื่องจากพฤติกรรมโครงสร้างมีความซับซ้อนมากกว่าทั้งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหรือโครงสร้างเหล็กเอง ไม่ว่าจะเป็นผลของ connection fixity หรือผลของ thin section member failure ทั้งนี้ทั้งนั้นมาตรฐานการออกแบบ AISI S400 ได้มีการทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว ซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบรวมถึงการรูปแบบของค้ำอาคารเพื่อให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวที่ได้จากการวิเคราะห์ แต่ในกรณีของ AS4600 มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กกรีตเย้นที่ใช้อ้างอิงในประเทศออสเตรเลีย มิได้มีการกล่าวถึงการใส่ค่าแรงแรงเฉือนไว้ในมาตรฐาน มีเฉพาะหัวข้อที่ระบุสำหรับการออกแบบจะต้องไปแรงกระทำที่ได้จากการวิเคราะห์จากมาตรฐาน AS1170.4

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากผลของการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบและศึกษาพฤติกรรมของค้ำแรงแรงเฉือนนั้นมีความแตกต่างกันในแต่ละชนิด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติวัสดุ รวมถึงคุณภาพของวัสดุที่ใช้ ตัวอย่างเช่นกรณีของค้ำแรงแรงเฉือนที่ปิดด้วยวัสดุต่างๆ วัสดุนั้นจะต้องมีกำลังในการช่วยต้านทาน lateral deformation ที่เกิดจาก lateral force ที่กระทำดังเห็นได้จาก failure ที่เกิดขึ้นมักเกิดที่แผ่น sheathing เป็นหลัก ซึ่งวัสดุแผ่น sheathing ที่มาตรฐาน AISI S400 ใช้ นั้นจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานวัสดุของประเทศนั้นเท่านั้นซึ่งมีความแตกต่างกันในการใช้งานในต่างประเทศ ดังนั้นการนำไปใช้งานจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ นอกจากนี้ตลอดจนข้อกำหนดระยะหรือขนาดของส่วนประกอบอื่นๆ ที่อยู่ในระบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวของค้ำแรงแรงเฉือน ในการใช้งานจะต้องเป็นไปข้อกำหนดดังกล่าวทุกประการ เพื่อเป็นการมั่นใจว่าพฤติกรรมโครงสร้างเหล็กกรีตเย้นจะมีแนวโน้มที่จะเป็นไปตามที่ได้ทดสอบและระบุไว้ในมาตรฐานนั้นๆ

สำหรับการใช้งานโครงสร้างเหล็กกรีตเย้นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย เนื่องด้วยการใช้งานเหล็กกรีตเย้นในประเทศไทยนั้นยังไม่ถูกใช้งานเป็นโครงสร้างสำหรับอาคาร ทั้งนี้การที่จะประยุกต์การใช้งานค้ำแรงแรงเฉือนในการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวในไทย จะต้องมีการศึกษาทั้งในส่วนของคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ , ขนาดและคุณสมบัติของเหล็กกรีตเย้น สอดคล้องกับที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ตลอดจนจะต้องศึกษาความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์กับการใช้งานก่อสร้างโครงสร้างเหล็กกรีตเย้นเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวสำหรับอาคารในประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

[1] Robert L., Thomas A., and Benjamin W.(2016) Seismic Design of Cold-Formed Steel Lateral Load-Resisting Systems A Guide for Practicing Engineers. The United States of America: National Institute of Standards and Technology.

[2] American Iron and Steel Institute. (2020). AISI S400-20 North American Standard for Seismic Design of Cold-Formed Steel Structural Systems. The United States of America: American Iron and Steel Institute.

[3] Ali Al-Obaidi. (2018). Comparison between the American code ASCE7-16 and the Australian code AS1170.4 against the seismic design effects. Dubai: The British University in Dubai.

[4] Leng J., Schafer B. W., and Buonopane S. G. (2012). Seismic Computational Analysis of CFS-NEES Building. Missouri: Missouri University of Science and Technology.