การออกแบบโครงสร้างสะพานเหล็กด้วยวิธีการโทโพโลยีที่เหมาะที่สุด

Topology Optimization of Steel Bridge

กิตติพศ ฉัตรวิทยาทรัพย์[1] ภูมิภัทร อุตตมธนินทร์[2] และ รองศาสตราจารย์ ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

การก่อสร้างในปัจจุบันการออกแบบโครงสร้างให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยและใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นมีความสำคัญอย่างมาก จึงเกิดเป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีการโทโพโลยีบนวิธีการวิเคราะห์แบบ bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) ซึ่งเป็นการนำพื้นฐานทางด้าน Finite element มาช่วยวิเคราะห์เพื่อลดทอนวัสดุที่ไม่จำเป็นในโครงสร้างออกไป และคงไว้เพียงส่วนที่จำเป็นต่อโครงสร้างเท่านั้น ส่งผลให้โครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพในการใช้งานและสามารถลดการใช้วัสดุที่ไม่จำเป็นได้ โดยโครงสร้างที่สนใจ คือ โครงสร้างสะพานที่ใช้วัสดุเหล็กมาใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งนำโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง Rhino 3D, Grasshopper 3D และ Karamba 3D มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน

คำสำคัญ: การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการโทโพโลยี; **Bi-directional evolutionary structural optimization (BESO);** โครงสร้างสะพาน

Abstract

In the modern era of construction, it is crucial to ensure safeness and efficient use of materials during structures designing. This necessity has given rise to the development of optimal design methods through topology optimization using bi-directional evolutionary structural optimization (BESO). This approach integrates the fundamentals of finite element analysis to eliminate unnecessary materials from the structure, remaining only the essential parts. Consequently, the structure derived from this analysis maintains its performance while minimizing the use of redundant materials. The structure of interest is a steel bridge. Structural analysis programs such as Rhino 3D, Grasshopper 3D, and Karamba 3D are applied for the analysis of this bridge structure.

Keywords: Topology Optimization; Bi-directional evolutionary structural optimization (BESO); Steel bridge

1. คำนำ

การออกแบบโครงสร้าง คือ การเลือกและนำวัสดุต่างๆมาประกอบกันเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ของเจ้าของงาน โดยที่โครงสร้างจะต้องมีความแข็งแรง ปลอดภัย และมีการใช้วัสดุอย่างเหมาะสม จึงทำให้วิศวกรผู้ออกแบบมีความจำเป็นในการบริหารจัดการวัสดุที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการทำให้โครงสร้างนั้นมีการใช้วัสดุน้อยลง แต่ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพในการใช้งาน

รูปที่ 1.1 โครงสร้างตัวอย่างที่ลดการใช้วัสดุ

โครงสร้างสะพานเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมรูปแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นมาเพื่อข้ามสิ่งกีดขวางและเชื่อมต่อให้พื้นที่ 2 จุด สามารถเดินทางหรือสัญจรได้ โดยประเภทของสะพานนั้นไม่มีการกำหนดไว้อย่างชัดเจน เพียงแต่อาจจำแนกได้ด้วยการแบ่งประเภทของวัสดุที่ใช้สร้าง ลักษณะการรับแรงของโครงสร้าง เป็นต้น ซึ่งการออกแบบสะพานในปัจจุบันแตกต่างจากในอดีต โดยมีการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามาร่วมใช้งานในการออกแบบเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการใช้งานมากขึ้น ซึ่งการออกแบบที่เหมาสมที่สุดโดยการใช้โทโพโลยีนั้นมีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบและเทคนิคการวิเคราะห์ เช่น Homogenization Method (HM) – (1981), Solid Isotropic Microstructure with Penalty (SIMP) – (1989), Evolutionary Structural Optimization (ESO) – (1993) โดย

หากมีลักษณะของการเติมเนื้อวัสดุเข้ามาร่วมด้วยจะเป็น Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization หรือ BESO ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ร่วมกับงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างเนื่องจากมีวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพกับการออกแบบ รวมถึงมีโปรแกรมที่รองรับการใช้งานในหลายแพลตฟอร์มอีกด้วย

โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบด้วยวิธีการ Topology optimization นั้นคือ Karamba 3D ซึ่งเป็น Module ย่อยหนึ่งของภาษาโปรแกรมแบบ Visual Programming language ที่มีชื่อว่า Grasshopper ซึ่งเป็น Built-in ของโปรแกรมทำโมเดล 3 มิติที่มีชื่อว่า Rhino 3D โดยโปรแกรมนี้สามารถออกแบบโครงสร้างได้อย่างหลากหลาย เนื่องจากเดิมทีเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบทางสถาปัตยกรรม แต่ด้วยความสามารถของ Karamba 3D ที่เข้ามาช่วยในการทำ Finite Element Analysis (FEA) และการวิเคราะห์ Topology Optimization แบบ Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization(BESO) ทำให้การออกแบบและวิเคราะห์นั้นสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และสามารถแสดงผลของการออกแบบได้แบบทันทีอีกด้วย

วัตถุประสงค์

1.) เพื่อเป็นการเสนอการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบโครงสร้างสะพานเหล็กด้วยวิธีการ Topology optimization เพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างสะพานที่เหมาะสมที่สุด

ขอบเขตการวิจัย

1.) พิจารณาวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบ linearly elastic isotropic
2.) พิจารณาเพียงวิธี Bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) ในกระบวนการวิเคราะห์ของ Topology optimization
3.) พิจารณาโครงสร้างสะพานที่ใช้วัสดุเหล็ก
4.) พิจารณาโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยวัสดุประเภทเดียวกันทั้งโครงสร้าง
5.) แรงที่พิจารณาในโครงสร้าง
    5.1) น้ำหนักบรรทุกคงที่เกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป และวัสดุพื้น
    5.2) น้ำหนักบรรทุกจร อ้างอิงจาก AASHTO LRFD Guide specifications for the design of pedestrian bridges, 2009
    5.3) แรงลมอ้างอิงตามมาตรฐาน มยผ.1311-50, 2550
    5.4) แรงแผ่นดินไหวอ้างอิงตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61
6.) Load combinations ที่พิจารณาโครงสร้างสะพานอ้างอิงตาม AASHTO LRFD 2012

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.) ได้นำเทคโนโลยีใหม่มาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมโยธา
2.) โครงสร้างลดการใช้วัสดุในการทำงาน แต่ยังคงประสิทธิภาพในการใช้งาน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 Direct stiffness method

Direct stiffness method เป็นวิธีการวิเคราะห์สำหรับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น Linear Static analysis ซึ่งเป็นพื้นฐานการคิดที่นำไปสู่วิธีการทาง Finite Element ต่อไป ซึ่งโครงสร้างที่พิจารณาแบบ Linear Static Analysis จะพิจารณาถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงที่เป็น Linear Elastic Region กล่าวคือเป็นการวิเคราะห์หาความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นในช่วงที่คุณสมบัติของวัสดุมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ดังสมการ (2.1)

$$\sigma = \varepsilon E \qquad (2.1)$$

โดยคำนึงถึงการเสียรูปที่น้อยมากและเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เท่านั้น และไม่พิจารณาการเสียรูปแบบพลาสติกและการเสียรูปที่ทำให้แรงที่กระทำกับโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

2.1.2 Finite Element Method

ทฤษฎี Finite Element Method (FEM) เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่สำคัญในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมและคณิตศาสตร์ โดยเฉพาะในงานที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณโครงสร้างของวัสดุ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้หาคำตอบประมาณจากการแบ่งพื้นที่ของวัสดุออกเป็นส่วนๆ ที่เรียกว่า "elements" แล้วทำการคำนวณค่าต่างๆ ในแต่ละส่วนนั้นๆ โดยใช้สมการที่แบ่งพื้นที่นั้นออกเป็น "nodes" หรือจุดที่ใช้เป็นตำแหน่งหรือจุดที่คำนวณค่าต่างๆ ได้ และจากนั้นนำมาประกอบกันเพื่อหาคำตอบของระบบโดยรวม

ในงาน Topology Optimization นั้น ทฤษฎี Finite Element มีบทบาทสำคัญในการคำนวณหาโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพที่สุดโดยใช้วัสดุให้น้อยที่สุด หรือมีน้ำหนักเพียงพอที่จะรองรับโหลดและเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ โดยการใช้ข้อมูลเริ่มต้นเกี่ยวกับโครงสร้างที่ต้องการ แล้วนำมาปรับเปลี่ยนทั้งรูปร่างและขนาดของวัสดุในแต่ละส่วนของโครงสร้าง ซึ่งการคำนวณเหล่านี้จะใช้ทฤษฎี Finite Element เพื่อช่วยในการประมวลผล

ดังนั้น การใช้ทฤษฎี Finite Element ในงาน Topology Optimization เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณหาโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างให้มีน้ำหนักเพียงพอ และมีประสิทธิภาพในการรับโหลดและเงื่อนไขต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.3 Topology Optimization

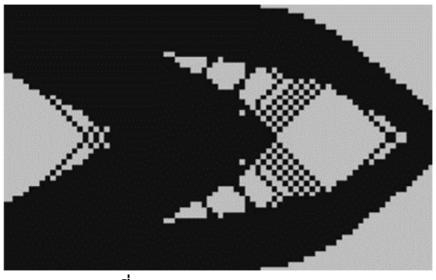
ในการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี อาทิเช่น Shape optimization นั้นเป็นการวิเคราะห์เพื่อลดขนาดหน้าตัด หรือลดความหนาของโครงสร้าง โดยตรง ในขณะที่วิธี Topology optimization นั้นคือการพิจารณาถึงรูปร่างโครงสร้างเพื่อใช้ในการรับแรงที่กระทำในขอบเขตที่กำหนด เพื่อให้ได้มาซึ่งการจัดวางโครงสร้างและการเชื่อมต่อโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด

2.1.4 Bi-directional evolutionary structural optimization (BESO)

BESO เป็นการ optimization ซึ่งเป็นเทคนิคที่จะทำการทั้งเพิ่มและลบ elements จาก finite element model ของโครงสร้างไปพร้อมกัน ซึ่งมีขีดความสามารถที่ดีกว่าวิธี ESO ดั้งเดิม โดย ESO แบบดั้งเดิมนั้นจะเป็นเทคนิคที่กำจัด elements ที่ไม่จำเป็นออกจากโดเมนการออกแบบโดยที่จะไม่ทราบเลยว่า elements ที่ถูกกำจัดไปนั้นจะส่งผลต่อการ optimization ขั้นถัดไปเลยหรือไม่

โดยในช่วงแรกของการพัฒนา BESO ที่เป็นการปรับปรุงมาจาก ESO นั้นคือต้องการที่จะกำจัด elements ที่ไม่จำเป็นออก แต่ใน BESO นั้นจะทำการกู้คืน elements ที่ถูกลบไปแล้วหากมีความจำเป็น ถึงแม้จะเป็นแค่ช่วงแรกของการพัฒนา แต่ก็เป็นเทคนิคในการทำ Structural optimization ที่มีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือมากกว่าเทคนิคเดิมอย่าง ESO โดยในเทคนิค BESO นี้จะใช้ stress-based optimality criteria จากนั้นจะดำเนินการเพิ่มและลด elements ของโครงสร้าง และทำซ้ำจากโครงสร้างพื้นฐานที่ต่ำที่สุด จนไปถึงโครงสร้างที่ถูกกำจัดส่วนที่ไม่จำเป็นออก แต่อย่างไรก็ตาม BESO ในช่วงแรกนั้นก็ยังคงให้คำตอบที่ดีที่สุดได้ เพราะยังคงมีข้อบกพร่องในบางจุด เช่น

1. Checkerboard pattern ที่เกิดจากการแบ่ง continuum structure โดยใช้ finite elements mesh แบบ low-order โดยถ้าคำตอบนั้นมี Checkerboard pattern นั้นจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้



รูปที่ 2.1 Checkerboard pattern

2. Mesh-dependency Problems เกิดขึ้นหลังจากที่ต้องการแก้ปัญหาด้วยการใช้ finite element mesh ที่แตกต่างกันออกไป โดยเมื่อใช้ mesh ที่มีขนาดเล็กลง แทนที่โครงสร้างจะมีความแตกต่างกันหรือมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น กลับกลายเป็นว่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นการเพิ่มชิ้นส่วนเล็กๆให้มากขึ้นแทน

รูปที่ 2.2 Mesh-dependency Problems

3. Computational Efficiency อัลกอริธึมของ BESO เดิมนั้นถือว่ามีประสิทธิภาพน้อย เนื่องจากการเพิ่มและลด Element นั้นดำเนินไปอย่างอิสระ ทำให้ต้องมีการแก้ไขหลายรอบถึงจะได้รูปแบบสุดท้ายของการออกแบบ นอกจากนี้อัลกอริธึมของ BESO ยังไม่สามารถรับรองความถูกต้องของการทำ Topology Optimization ได้อีกด้วย
4. Convergence ในการเพิ่มและลด Element ยังคงใช้หลักฐานเชิงประจักษ์ หรือ empirical premise เป็นพื้นฐาน ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ค่อนข้างวุ่นวาย ดังนั้นจึงควรต้องมีเหตุผลทางคณิตศาสตร์ที่มั่นคงเพื่อชี้นำกระบวนการให้ไปสู่ผลลัพธ์ในการออกแบบให้ดีที่สุด

ในปัจจุบันนี้ BESO ได้ถูกพัฒนาและแก้ไขโดยการรวบรวมเทคนิคแบบใหม่หลายแบบเข้ามาอยู่ในกระบวนการ optimization เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาที่เคยเกิดขึ้นในอดีต

2.1.5 นิยามคำศัพท์กระบวนการทำงานของ BESO

Meshing (Quadtree) เป็นการแบ่งโครงสร้างออกเป็น element ที่มีขนาดเล็ก เป็นรูปต่างๆไม่ว่าจะเป็นสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยม เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย Finite element ต่อไป

Sensitivity function ฟังก์ชันที่ใช้เพื่อประเมินว่า Element ไหนควรที่จะถูกลดหรือเพิ่มโดยใช้ FEA ก่อนที่จะเข้ากระบวนการ BESO

Element selection process กระบวนการที่จะเลือกว่า Element ในโดเมนออกแบบจะถูกลดหรือเพิ่มโดยพิจารณาจาก sensitivity function ในแต่ละ iteration เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด

Convergence เป็นกระบวนการที่จะบอกว่าการ optimize นั้นเสร็จสมบูรณ์และได้โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่ได้กำหนดไว้โดยพิจารณาจากความต่างจากการวิเคราะห์ในรอบก่อนหน้า

2.1.6 กระบวนการ BESO

กระบวนการของ BESO เริ่มต้นด้วย

1. การกำหนดขอบเขตที่ต้องการออกแบบ ที่จะถูกแบ่ง element เป็นลักษณะคล้ายตาข่าย (mesh) โดยใช้ Finite element (FE) จากนั้นจะทำการกำหนดค่าเริ่มต้นลงไปในแต่ละ element ซึ่งทำหน้าที่เป็นค่าเริ่มต้นก่อนการวิเคราะห์ ที่จะถูกปรับแก้ไประหว่าง optimization เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสม

2. ขั้นตอนการกำหนดค่าตัวแปร (parameter) ของ BESO ที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป

3. กำหนดเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆ ในขอบเขตที่ต้องการออกแบบ

4. ใช้กระบวนการทาง Finite element (FE) วิเคราะห์แต่ละ element ของโครงสร้าง ให้ได้ค่า sensitivity number

5. ขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาค่า Target Volume เพื่อใช้ในการวนหาค่าที่ใช้ในการ Volume of the design (Vk) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าให้ใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการในจุดนั้น

6. Sensitivity number ที่ได้ในแต่ละ element ของทั้งโครงสร้างจะถูกคัดกรองตามสมการที่กำหนด

7. จากการวิเคราะห์ค่า sensitivity ที่จุดนั้นๆของโครงสร้าง ซึ่งจะแสดงค่าที่บ่งบอกถึงความจำเป็นในการรับแรง จากนั้นจึงทำการเพิ่มหรือลด element

2.2 โปรแกรมที่ใช้งาน

2.2.1 Rhinoceros 3D (Rhino 3D)

คือ โปรแกรมเชิงพาณิชย์ทางด้านกราฟิกสามมิติ ที่ทำหน้าที่ช่วยเหลือและออกแบบโมเดลรูปแบบต่างๆ ซึ่งเป็นโปรแกรมพื้นฐานสำหรับใช้งานอื่นๆ

รูปที่ 2.3 โปรแกรม Rhinoceros 3D

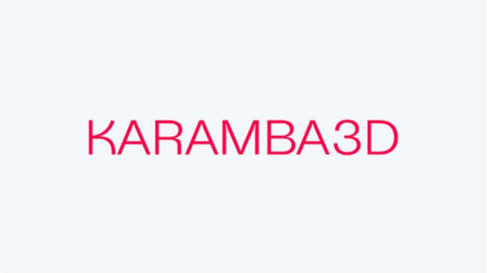
2.2.2 Grasshopper 3D

คือ built-in programming language ที่ทำงานอยู่บนโปรแกรม Rhino 3D โดยใช้ในการสร้างโมเดลสามมิติที่สามารถกำหนดค่าเชิงตัวแปรหรือคุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในงานวิเคราะห์ทางวิศวกรรมโครงสร้างได้ ซึ่งนิยมใช้อย่างแพร่หลายทั้งทางด้านวิศวกรรม และสถาปัตยกรรม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเรียนรู้ภาษาที่ใช้ในโปรแกรมโดยตรง เพียงแต่เป็นการหยิบฟังก์ชันที่มีอยู่แล้วมาใช้งาน ทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน

รูปที่ 2.4 โปรแกรม Grasshopper 3D

2.2.3 Karamba 3D

คือ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าเชิงตัวแปรต่างๆในงานวิศวกรรมโครงสร้าง ซึ่งรองรับการออกแบบโครงถัก (Truss), โครงข้อแข็ง (Frame) และ โครงสร้างเปลือกบาง (Shell) เป็นต้น โดยเป็นการนำกระบวนการทาง Finite Element มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งทำงานเป็นเครื่องมือภายใต้การใช้งานร่วมกับ Grasshopper 3D



รูปที่ 2.5 โปรแกรม Karamba 3D

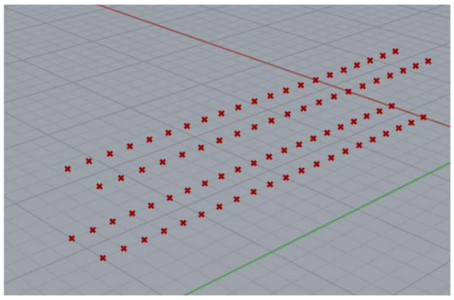
3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การสร้างแบบจำลอง

3.1.1 การออกแบบโครงสร้างแบบถัก (Truss)

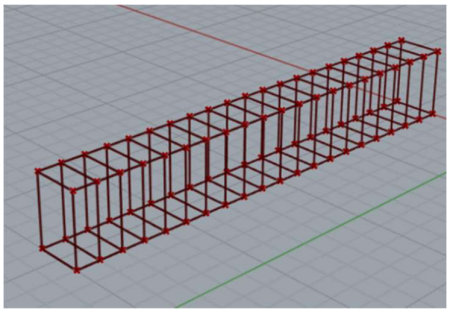
1.) ในการออกแบบโครงสร้างถัก Truss นั้น จะทำการออกแบบโดยเริ่มต้นจากสร้างเส้นที่ใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งที่ต้องการออกแบบ โดยกำหนดเป็นพิกัดที่จุดเริ่มต้นและจุดปลายของเส้นอ้างอิง โดยสามารถกำหนดความยาวโดย Span Length Slider

2) ทำการแบ่งช่วงของแต่ละ Truss ด้วย Span division Slider ผ่าน Perp Frames จากนั้นทำการเพิ่มจุดพิกัดให้เป็นลักษณะสี่เหลี่ยม โดยเพิ่ม Point Oriented



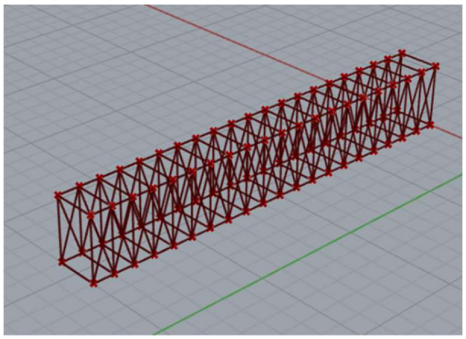
รูปที่ 3.1 จุดพิกัดของ Truss

3) นำพิกัดจุดที่เป็นลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมที่ได้มาเชื่อมต่อกัน โดยใช้คำสั่ง Merge ที่จะทำการเชื่อมต่อจุดต่างๆที่ต้องการ ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อจุดเป็นสี่เหลี่ยม

(4) เชื่อมต่อจุดที่เหลือในแนวทแยงระหว่างพิกัดจุดบนและพิกัดจุดล่างให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะโครงสร้างแบบที่ต้องการ โดยทำการ shift พิกัดจุดบนไป 1 พิกัด และทำการ shift พิกัดจุดล่างไป -1 พิกัด เพื่อให้ได้ 2 จุดพิกัดที่มีลักษณะทแยงกัน และทำการเชื่อมทั้งสองพิกัดด้วย Line ที่จะนำค่าจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดมาใช้ในการวาดแนวเส้นตรง จากนั้นทำให้ครบทั้ง 2 ด้านตามที่ต้องการในลักษณะเช่นเดิม



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อในแนวแทยง

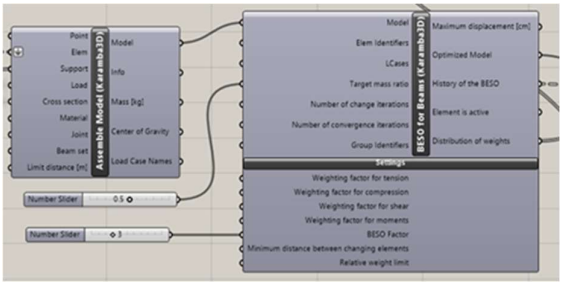
(5) เมื่อได้โครงสร้างลักษณะเป็นสะพานคนเดินตามที่ต้องการแล้ว จึงพิจารณาใส่แรงกระทำที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจร, แรงลมลม และแรงแผ่นดินไหว (โดยกำหนดให้ทิศทางแรงลมและแรงแผ่นดินไหวกระทำกับโครงสร้างในแนวตั้งฉากกับช่วงความยาวของโครงสร้าง ทิศทาง -x)

(6) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งในการออกแบบครั้งนี้เลือกใช้เหล็กหน้าตัดท่อกลม HSSขนาด 90 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.60 มิลลิเมตร และความหนา 3.2 มิลลิเมตร โดยคุณสมบัติวัสดุ คือ A572 Grade 50 มาใช้ในการวิเคราะห์

(7) กำหนดฐานรองรับโครงสร้างที่ต้องการ โดยในที่นี้ระบุฐานรองรับที่แต่ละจุดของโครงสร้างให้เป็นโครงสร้างที่ต้านทานต่อแรงในแนวแกน x, y, z (pinned support)

3.2 การกำหนดค่า Parameter ในฟังก์ชั่น BESO

นำฟังก์ชันของ Karamba 3D เข้ามาเชื่อมต่อกับข้อมูลโครงสร้างที่ออกแบบไว้ เพื่อใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ Finite Element และ BESO



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชัน BESO

3.2.1 ความหมายของแต่ละ Parameter ใน Input ของฟังก์ชั่นการวิเคราะห์ BESO

Target mass ratio อัตราส่วนระหว่างมวลของโครงสร้างที่ต้องการต่อมวลของโครงสร้างในตอนเริ่มต้น โดยมวลที่ถูกนำมาคำนวนจะต้องเป็น Element ที่ถูกนำมาคำนวนในกระบวนการ BESO เท่านั้น

BESO Factor ถ้าในแต่ละ iteration นั้นต้องการที่จะลดมวลไป n กิโลกรัม เพื่อให้มวลรวมของโครงสร้างไปถึง Target mass ในจำนวนรอบ iteration ที่ได้กำหนดไว้ ถ้าค่า $\mathbf{BESO\ factor} = \mathbf{m}$ จะทำให้ใน iteration นั้นจะมี Element ที่ต้องถูกลดไป $(\mathbf{m}+1) \times \mathbf{n}$ หลังจากนั้น ในขั้นถัดไปก็จะนำ Element จำนวน $\mathbf{m} \times \mathbf{n}$ กลับมา เพื่อให้มวลที่ถูกลดไปใน iteration ยังคงเป็น n เท่าเดิม การทำเช่นนี้จะเพิ่มส่วนประกอบแบบ bi-directional ในกระบวนการซึ่งมันจะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น

Number of change iterations จำนวน iterations ในการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อให้ไปถึง Target mass ที่กำหนดไว้ โดยถ้าค่าที่ถูกตั้งไว้มีค่าน้อยจนเกินไปอาจส่งผลให้โครงสร้างดูไม่สมจริงได้

Number of convergence iterations จำนวนรอบ iterations เพิ่มเติมหลังจากโครงสร้างถึง Target mass แล้วเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้ดีที่สุด

3.3 เงื่อนไขและข้อจำกัดในการออกแบบ

3.3.1 ข้อมูลทั่วไปของสะพานที่ใช้ออกแบบ

รูปแบบโครงสร้างที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นโครงสร้างสะพานลอยแบบ 3 มิติ ที่ออกแบบให้คนเดินเท้า โดย

- หน้าตัดเป็น เหล็กท่อกลม (HSS)
- ความยาวช่วงของสะพานที่ 20 เมตร
- ความสูงของสะพาน 3 เมตร
- ความลึกของสะพาน 2 เมตร

โครงสร้างนั้นจะถูกแบ่งช่วงออกเป็น 20 ช่วง โดยแต่ละช่วงนั้นจะเชื่อมต่อกันด้วยชิ้นส่วนเอียงสถานที่ตั้งของสะพานคือใจกลางกรุงเทพมหานคร ซึ่งจัดเป็นภูมิประเทศแบบ C เป็นศูนย์กลางเมืองใหญ่ มีอาคารสูงหนาแน่น โดยอ้างอิงจาก มยผ. 1311-50

3.3.2 Material Properties

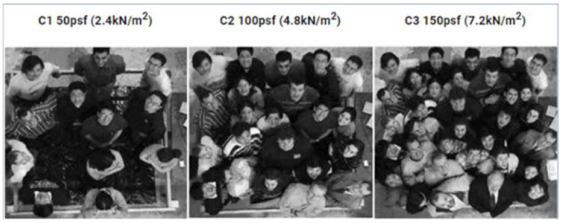
ในขั้นตอนการออบแบบเบื้องต้นจะใช้คุณสมบัติและหน้าตัดของเหล็กดังนี้

- เหล็ก A572 Grade 50
- หน้าตัดประเภทท่อกลม HSS ขนาด 90
- เส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร
- ความหนา 3.2 มิลลิเมตร
- น้ำหนักต่อหน่วยความยาว 7.76 กิโลกรัม/เมตร

3.3.3 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างในแนวดิ่ง

1. น้ำหนักบรรทุกคงที่
   - น้ำหนักจากโครงสร้าง
   - วัสดุพื้น ใช้พื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหนา 5 เซนติเมตร และ พิจารณาเทผิวพื้นคอนกรีตความหนา 5 เซนติเมตร
2. น้ำหนักบรรทุกจร

อ้างอิงจาก AASHTO LRFD Guide specifications for the design of pedestrian bridges, 2009



รูปที่ 3.5 การทดลองเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับสะพานคนเดินเท้า

เนื่องจากเป็นสะพานลอยที่ถูกออกแบบมาให้เดินเท้า จึงพิจารณาใช้งานเป็นรูปแบบที่มีคนไม่หนาแน่นโดยมีน้ำหนักบรรทุกจรเป็น $24\ \text{kN/m}^2$

3.3.4 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างด้านข้าง

พิจารณาโดยการเปรียบเทียบจาก มยผ. 1311-50 และ กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 ข้อที่ 17 โดยในการนำมาออกแบบจะพิจารณาใช้ค่าที่มากกว่า

ตาม มยผ. 1311-50 แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างใช้วิธีคำนวนแบบแรงสถิตเทียบเท่า เนื่องจากโครงสร้างมีรูปแบบที่ซับซ้อน ทำให้คิดแรงลมได้ยาก จึงสมมุติให้โครงสร้างเป็นอาคารที่ไม่มีช่องเปิด และมีความกว้างของด้านที่รับลมเป็น 20 เมตร ด้านลึก 2 เมตร และมีความสูง 3 เมตร แต่เนื่องด้วยภูมิประเทศแบบ C นั้นไม่มีอยู่ในการคำนวนอย่างง่าย ดังนั้นจึงเลือกคำนวนด้วยวิธีการละเอียด

หน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายนอกอาคารในทิศทางลม สามารถคำนวณได้จาก

$$p = I_w q C_e C_g C_p \qquad (3.1)$$

โดย $I_w = 1$

$q = 39.82\ \text{kg/m}^2$

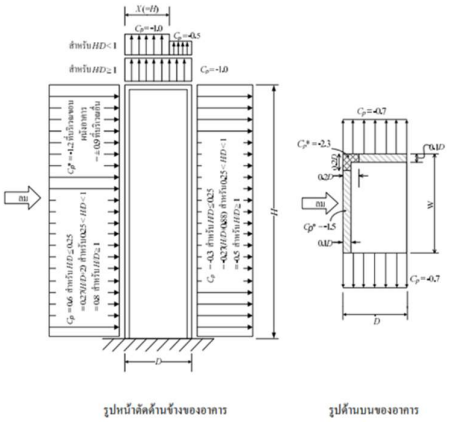
จากรูป 3.6 จะได้ว่า $C_e = 0.4$

ความสูงจากพื้นดิน	สภาพภูมิประเทศ แบบ A	สภาพภูมิประเทศ แบบ B	สภาพภูมิประเทศ แบบ C
สูงไม่เกิน 10 เมตร	1.00	0.50	0.40
สูงเกิน 10 เมตรแต่ไม่เกิน 20 เมตร	1.21	0.63	0.40
สูงเกิน 20 เมตรแต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.47	0.89	0.49
สูงเกิน 40 เมตรแต่ไม่เกิน 80 เมตร	1.79	1.25	0.81
สูงเกิน 80 เมตรแต่ไม่เกิน 120 เมตร	2.01	1.54	1.09
สูงเกิน 120 เมตรแต่ไม่เกิน 160 เมตร	2.17	1.77	1.34
สูงเกิน 160 เมตรแต่ไม่เกิน 200 เมตร	2.31	1.98	1.57
สูงเกิน 200 เมตรแต่ไม่เกิน 250 เมตร	2.46	2.22	1.84
สูงเกิน 250 เมตรแต่ไม่เกิน 300 เมตร	2.50	2.43	2.10

รูปที่ 3.6 ค่าประกอบเนื่องจากภูมิประเทศ (C_e) สำหรับวิธีการอย่างละเอียด

$C_g = 3.49$

จากรูป 3.7 จะได้ $C_p = 0.8$



รูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม สำหรับอาคารที่มีค่า $\frac{H}{D_s} = 1.5$

จะได้ว่าหน่วยแรงลมที่กระทำบนพื้นผิวภายนอกของอาคารในทิศทางลม

$$p = 44.21\ kgf/m^2$$

แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกฎกระทรวงฉบับที่ 6 ข้อที่ 17 ในอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 10 เมตร ดังรูปที่ 3.8 พบว่าค่าที่ทำการคำนวนมาจาก มยผ. 1311-50 นั้นจะให้ค่าที่น้อยกว่า

ความสูงของอาคารหรือส่วนของอาคาร	หน่วยแรงลมอย่างน้อย กิโลปาสกาล (กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
(1) ส่วนของอาคารที่สูงไม่เกิน 10 เมตร	0.5 (50)
(2) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	0.8 (80)
(3) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.2 (120)
(4) ส่วนของอาคารที่สูงเกิน 40 เมตร	1.6 (160)

รูปที่ 3.8 หน่วยแรงลมตาม กฎกระทรวงฉบับที่ 6 ข้อที่ 17

ดังนั้น ใช้หน่วยแรงลมที่นำมาใช้ออกแบบอ้างอิงจาก กฎกระทรวงฉบับที่ 6 ข้อที่ 17 โดยหน่วยแรงลมมีค่าเท่ากับ $50\ kgf/m^2$

3.3.5 แรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้างด้านข้าง

จังหวัดกรุงเทพมหานครนั้นถูกจัดอยู่ในโซน 5

โซน \ S_a	S_a (0.01s)	S_{DS} (0.2 s)	S_a (0.5 s)	S_{D1} (1.0s)	S_a (2.0 s)	S_a (3.0 s)	S_a (4.0 s)	S_a (5.0 s)	S_a (6.0 s)
1	0.451	0.451	0.451	0.233	0.110	0.053	0.042	0.031	0.029
2	0.439	0.439	0.439	0.249	0.196	0.108	0.058	0.038	0.030
3	0.320	0.320	0.320	0.353	0.217	0.109	0.064	0.044	0.034
4	0.330	0.330	0.330	0.264	0.218	0.100	0.039	0.029	0.027
5	0.220	0.220	0.220	0.250	0.223	0.126	0.067	0.047	0.038
6	0.340	0.340	0.340	0.198	0.207	0.093	0.053	0.040	0.035
7	0.291	0.291	0.291	0.231	0.177	0.103	0.064	0.046	0.040
8	0.210	0.210	0.210	0.097	0.055	0.033	0.018	0.012	0.011
9	0.269	0.269	0.269	0.194	0.144	0.061	0.026	0.017	0.013
10	0.225	0.225	0.225	0.059	0.047	0.031	0.017	0.012	0.010

รูปที่ 3.9 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (อัตราส่วนความหน่วง 2.5%) ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

จากรูปที่ 3.9 ใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่มากที่สุดในโซน 5 มาออกแบบ โดยที่ไม่ปรับลดค่าของแผ่นดินไหว จะได้ $S_a = 0.250g$ และเมื่อนำมาคำนวนแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้าง โดยโครงสร้างและวัสดุพื้นมีน้ำหนักรวม 20.0 ตัน จะได้ว่า

$$V = (0.250g)(20.0 \times 1000) = 49.06 \text{ kN}$$

เนื่องด้วยโครงสร้างที่นำมาออกแบบมีเพียง 1 ชั้นจึงทำให้ค่า C_{vx} หรือตัวประกอบการกระจายในแนวดิ่ง นั้นมีค่าเท่ากับ 1 จะได้ว่าแรงด้านข้างที่กระทำกับโครงสร้างด้านข้างเนื่องจากแผ่นดินไหวนั้นมีค่าเท่ากับ 49.06 kN

3.3.6 Load combination

Load combination จะอ้างอิงมาจากมาตรฐาน AASHTO LRFD 2012 โดยจะพิจารณา Load combination ที่มี Wind Load หรือ Earthquake Load ซึ่งจะได้ดังนี้

Strength V Limit State:

1.25DL + 1.5SDL+1.35LL+0.4WL

Extreme Event I:

1.25DL + 1.5SDL+0.5LL+EQ

โดยน้ำหนักคนเดินข้ามสะพาน หรือ Pedestrian Live Load นั้นจะถูกจัดอยู่ในประเภท Live Load และจะสมมุติให้สะพานนี้ไม่มี Impact Load เนื่องจากจุดประสงค์ของสะพานนั้นออกแบบมาเพื่อให้คนเดินเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

3.4 การวัดผลการทดลอง

3.4.1 ทำการยืนยันผลลัพธ์ด้วยโปรแกรม SAP2000

โครงสร้างที่ถูกออกแบบและพัฒนาด้วยวิธี Topology Optimization จะถูกกำหนดแรงที่กระทำต่อโครงสร้างตามจริงโดยที่ยังไม่ได้ถูกปรับเปลี่ยนด้วย Scale factor ทั้งนี้เพื่อให้ได้โครงสร้างที่ถูกออกแบบรูปร่างมาแล้วจากนั้นจึงนำโครงสร้างไปทำการโมเดลด้วยโปรแกรม SAP2000 และใช้ Load combination ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.6 จากนั้นวิเคราะห์ว่าโครงสร้างนั้นเกิดการวิบัติหรือไม่

3.4.1 เปรียบเทียบมวลของโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุง

หลังจากยืนยันผลลัพธ์ด้วยโปรแกรม SAP2000 ทำการเปรียบเทียบมวลของโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุง ว่ามวลของโครงสร้างที่ได้ลดลงไปนั้นตรงกับ Target mass ratio ที่ได้ทำการกำหนดไว้หรือไม่

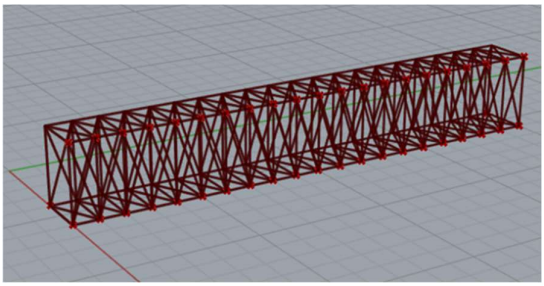
4. ผลการดำเนินงานวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยโดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบโครงสร้างสะพานเหล็กด้วยวิธีการ Topology optimization เพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างสะพานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีการใช้งาน Rhino 3d ร่วมกับ Grasshopper 3D และ Karamba 3D ในการสร้างแบบสามมิติเพื่อวิเคราะห์และแสดงผลให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่ผ่านการ Optimization

4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.1.1 ข้อมูลของโครงสร้างพื้นฐานที่นำมาออกแบบ (Ground structure)

รูปแบบโครงสร้างที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นโครงสร้างสะพาน 3 มิติ มีหน้าตัดเป็นเหล็กท่อกลม(HSS) มีความยาวของ Span อยู่ที่ 20 เมตร มีความสูงอยู่ที่ 3 เมตร และถูกแบ่งช่วงออกเป็น 20 ช่วง โดยแต่ละช่วงนั้นจะเชื่อมต่อกันด้วยชิ้นส่วนเอียง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานที่นำมาออกแบบ

โดยในโครงสร้างพื้นฐาน (Ground structure) มีน้ำหนักแรกเริ่มของโครงสร้างเหล็กเท่ากับ 5.60 ตัน

4.1.2 Material Properties

ใช้เหล็ก A572 Grade 50

หน้าตัดประเภทท่อกลม HSS ขนาด 101.6 โดยมี

- เส้นผ่านศูนย์กลาง 76.3 มิลลิเมตร
- ความหนา 3.2 มิลลิเมตร
- น้ำหนักต่อหน่วยความยาว 7.76 กิโลกรัม/เมตร

4.1.3 Boundary Condition

สถานที่ตั้ง = ในตัวเมืองกรุงเทพมหานคร ที่มีตึกค่อนข้างหนาแน่น

แรงกระทำในแนวดิ่ง = ผลรวมของน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และน้ำหนักของตัวโครงสร้าง

Wind Load = ผลรวมแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างทางด้านข้างและทำการกระจายไปยัง Node ทางด้านข้างของโครงสร้างทั้งหมด

Earthquake load = ผลรวมของแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อโครงสร้าง และทำการกระจายไปยังที่ Node ทางด้านข้างของโครงสร้างทั้งหมด

Load Combination =

Strength V Limit State:

1.25DL + 1.5SDL+1.35LL+0.4WL

Extreme Event I:

1.25DL + 1.5SDL+0.5LL+EQ

4.1.4 การตั้งค่า Parameter ของ BESO ภายในโปรแกรม

- Target mass ratio = 0.8
- BESO Factor = 6
- Number of change iterations = 100
- Number of convergence iterations = 100

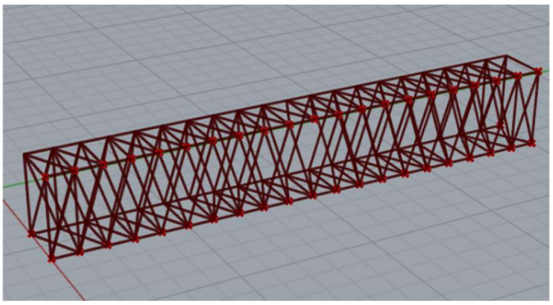
4.2 ผลการวิเคราะห์

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรมผ่านการคำนวณทาง Finite element โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา โดยพิจารณา

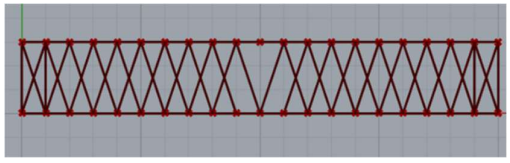
1. กรณีที่มีแรงจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ แรงจากน้ำหนักบรรทุกจรและแรงลมกระทำกับโครงสร้าง
2. พิจารณาแรงที่กระทำจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ และแรงแผ่นดินไหว

4.2.1 ผลจากการพิจารณาแรงจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ร่วมกับน้ำหนักบรรทุกจรและแรงลม

ผลลัพธ์ที่ได้จากวิเคราะห์โครงสร้างโดยพิจารณาผลของผลจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ผลจากน้ำหนักบรรทุกจร และผลจากแรงแผ่นดินไหว ผลลัพธ์ที่ได้มีการนำโครงสร้างแนวดิ่งออกในหลายช่วง เนื่องจากโครงสร้างที่ออกแบบในตอนแรกนั้นมีการใช้โครงสร้างมากเกินความจำเป็น อีกทั้งยังพบว่าแนวโน้มผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับพฤติกรรมการรับแรง จากการสังเกตถึงรูปแบบที่บริเวณใกล้กับฐานรองรับของโครงสร้างมีชิ้นส่วนจำนวนมากในการรับแรง และในช่วงกลางของโครงสร้างนั้นจะมีชิ้นส่วนน้อยลงโดยมีการนำชิ้นส่วนแนวดิ่งและแนวทแยงบางส่วนออก ซึ่งเกิดเป็นผลมาจากพฤติกรรมการรับแรงเฉือน ที่ในช่วงกลางของโครงสร้างนั้นมีค่าน้อยกว่าในช่วงใกล้ฐานรองรับโครงสร้าง



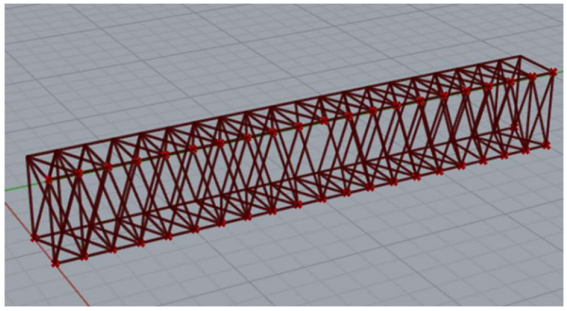
รูปที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากวิเคราะห์โครงสร้างกรณีคิดแรงลม(3D)



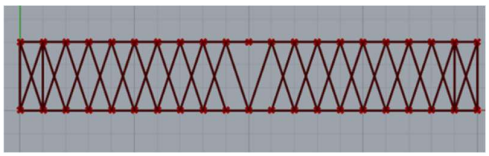
รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากวิเคราะห์โครงสร้างกรณีคิดแรงลม(Side view)

4.2.2 ผลจากการพิจารณาแรงจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ ร่วมกับผลจากน้ำหนักบรรทุกจรและแรงแผ่นดินไหว

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่าโครงสร้างมีการนำชิ้นส่วนแนวดิ่งออกหลายจุด ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับกรณีก่อนหน้า เนื่องจากแรงกระทำในแนวดิ่งมีความคล้ายคลึงกัน เพียงแต่ในกรณีนี้พิจารณาเพียงผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ และผลของแรงแผ่นดินไหวเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีความสอดคล้องกับกรณีก่อนหน้าที่บริเวณฐานรองรับโครงสร้างมีชิ้นส่วนรับแรงอยู่มาก ในช่วงกลางสะพานนั้นมีความแตกต่างเล็กน้อย คือ ในกรณีนี้ที่คิดผลของแรงแผ่นดินไหว แรงที่ได้นั้นมีค่าไม่มากเท่ากับที่พิจารณาในกรณีก่อน ส่งผลให้โครงสร้างช่วงกลางคานนั้นมีโครงสร้างรับแรงเฉือนแนวดิ่งน้อยกว่าเล็กน้อย โดยไม่มีชิ้นส่วนแนวทแยงเหมือนกับโครงสร้างในกรณีก่อนหน้า



รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากวิเคราะห์โครงสร้างกรณีคิดแรงแผ่นดินไหว(3D)

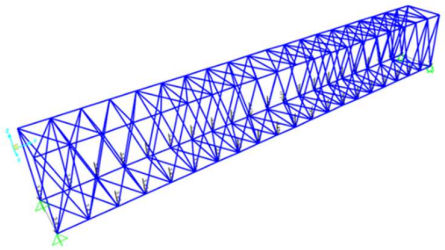


รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์ที่ได้จากวิเคราะห์โครงสร้างกรณีคิดแรงแผ่นดินไหว(Side view)

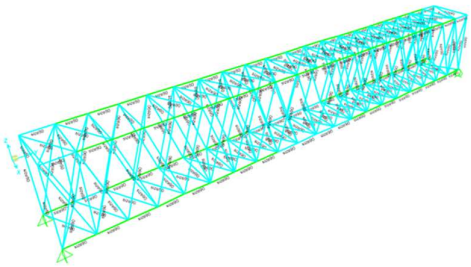
4.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก Karamba 3D นั้นพบว่ามีการนำโครงสร้างในการรับแรงบางจุดออกไป โครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์จึงเป็นโครงสร้างที่ผ่าน optimization เรียบร้อยแล้ว เพื่อเป็นการยืนยันผลและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลว่ามีแนวโน้มตรงกับความเป็นจริง จึงทำการนำโครงสร้างที่ได้จาก Karamba 3D มาทำการวิเคราะห์ในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 โดยใช้รูปร่างโครงสร้างดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์กับเงื่อนไขการรับแรงที่กำหนด

4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างใน SAP2000 ในกรณีที่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และแรงลม



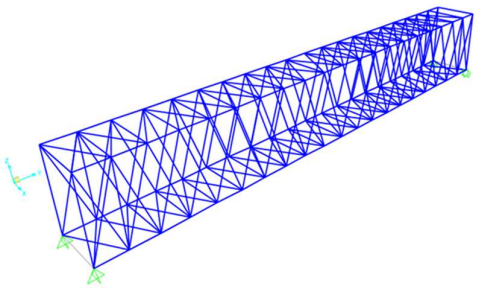
รูปที่ 4.6 โมเดล SAP2000 โครงสร้างกรณีคิดแรงลม



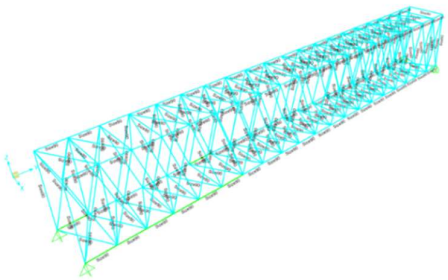
รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์โมเดล SAP2000 โครงสร้างกรณีคิดแรงลม

เมื่อนำโครงสร้างที่ได้มาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 ภายใต้เงื่อนไขการรับแรงที่กำหนดไว้ ผลที่ได้พบว่าโครงสร้างนั้นสามารถรับแรงได้และไม่มีชิ้นส่วนใดเลยที่รับแรงเกินความสามารถในการรับแรง อีกทั้งยังสังเกตจากผลได้ว่าในช่วงกลางสะพานมีชิ้นส่วนแนวนอนที่เกิดผลกระทบจากแรงมากกว่าชิ้นส่วนปลายสะพาน ซึ่งเกิดมาจากแรงกระทำทางด้านข้างที่ทำให้เกิดพฤติกรรมการรับแรงคล้ายคานที่ด้านบนรับแรงอัดและด้านล่างรับแรงดึง

4.3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างใน SAP2000 ในกรณีที่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร และแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 4.8 โมเดล SAP2000 โครงสร้างกรณีคิดแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์โมเดล SAP2000 โครงสร้างกรณีคิดแรงแผ่นดินไหว

เมื่อทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000 พบว่าโครงสร้างที่ได้จาก Karamba 3D นั้นสามารถรับผลจากแรงกระทำที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งในมีชิ้นส่วนจำนวนน้อยที่บริเวณใกล้ฐานรองรับ ที่มีการรับแรงมากกว่าบางชิ้นส่วนในโครงสร้าง

4.3.2 เปรียบเทียบมวลของโครงสร้างระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง

หลังจากการปรับปรุงโครงสร้างและทำการยืนยันผลด้วยโปรแกรม SAP2000 แล้ว จะทำการหามวลของโครงสร้างในโปรแกรม SAP2000 ด้วยเช่นกัน และในการเปรียบเทียบจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ 1. กรณีที่มีแรงจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ แรงจากน้ำหนักบรรทุกจร และแรงลมกระทำกับโครงสร้าง 2. พิจารณาแรงที่กระทำจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ และแรงแผ่นดินไหว โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างมวลของโครงสร้างพื้นฐานหรือก็คือโครงสร้างก่อนปรับปรุง และมวลของโครงสร้างที่ทำการปรับปรุงแล้ว ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 สรุปการเปรียบเทียบมวลของโครงสร้าง

กรณี	Target mass ratio	มวลก่อนปรับปรุง (ตัน)	มวลหลังปรับปรุง (ตัน)	มวลที่ลดลงไป (%)
แรงลม	0.8	5.60	4.48	19.9
แรงแผ่นดินไหว	0.8	5.60	4.50	19.7

จะสังเกตได้ว่ามวลที่ลดลงไปมีค่าที่ใกล้เคียงกับ Target mass ratio ที่ได้ทำการกำหนดไว้ โดยมวลของโครงสร้างหลังปรับปรุงมีค่าประมาณ 80% จากโครงสร้างพื้นฐาน

5. สรุปผลการวิจัย

จากระเบียบวิธีที่ใช้หาคำตอบที่ดีที่สุดโดย Bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) สามารถสรุปผลจากวัตถุประสงค์การวิจัยได้ดังนี้

เพื่อเป็นการเสนอการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบโครงสร้างสะพานเหล็กด้วยวิธีการ Topology optimization เพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างสะพานที่เหมาะสมที่สุดตามขอบเขตการวิจัย ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ได้ดังนี้

(1) การกำหนดข้อกำหนดและข้อจำกัดที่พิจารณาในการใช้งานโครงสร้างสะพานที่ต้องการออกแบบ แล้วทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของโครงสร้างใน Rhino 3D ร่วมกับ Grasshopper 3D

(2) วิเคราะห์แบบจำลองสามมิติผ่านการทำงานของ Karamba 3D ร่วมกับ Rhino 3D และ Grasshopper 3D ภายใต้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) ให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ของโครงสร้างช่วงต้นที่มีการนำโครงสร้างบางส่วนออกไป

(3) นำผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้มาตรวจสอบผลและประสิทธิภาพในการรับแรง ผ่านการใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง SAP2000

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้จาก Karamba 3D นั้นมีจำนวนชิ้นส่วนที่ลดลง เมื่อผ่านการตรวจสอบประสิทธิภาพร่วมกับ SAP2000 แล้วนั้นทำให้สามารถบรรลุจุดประสงค์ในการวิจัยเพื่อออกแบบโครงสร้างที่มีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบโครงสร้างคือการตั้งค่าและปรับตัวแปรที่มีผลต่อการ Optimization เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์การออกแบบที่โครงสร้างมีความสมมาตร ใกล้เคียงกับความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และให้คำปรึกษาในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ด้วยความเอาใจใส่

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านจากภาควิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้ทางวิศวกรรมโยธา และการสนับสนุนตลอดระยะเวลาที่ศึกษา และทำปริญญานิพนธ์นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Su Rut. “Automatic image-based SBFE approach for multiphase-materials topology optimization under dynamic loading” Doctoral dissertation, Chulalongkorn University, Thailand, 2022.

[2] Yu Li, Yaping Lai, Gan Lu, Fucheng Yan, Peng Wei, Yi Min Xie. “Innovative design of long-span steel–concrete composite bridge using multi-material topology optimization” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114838. [9 พฤษภาคม 2567].

[3] มยผ. 1311-50, 2550. มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร, กรมโยธาธิการและผัง เมือง ,กระทรวงมหาดไทย

[4] มยผ. 1301/1302-61. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว, กรมโยธาธิการและผัง เมือง ,กระทรวงมหาดไทย

[5] Robert McNeel & Associates. **Rhino3D**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.rhino3d.com. [9 พฤษภาคม 2567].

[6] Scott Davidson. **Grasshopper**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.grasshopper3d.com. [9 พฤษภาคม 2567].

[7] Clemens Preisinger. **KARAMBA3D 2.2.0**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://manual.karamba3d.com. [9 พฤษภาคม 2567].