

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหึ่งห้อยในการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF FIREFLY ALGORITHM TO OPTIMAL DESIGN OF REINFORCED
CONCRETE STRUCTURES

Mr. Ekaraj Prakobkit



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหึ่งห้อยในการออกแบบอย่าง เหมาะสมสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
โดย	นายเอกราช ประกอบกิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิตาการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จรุงนุญ รุ่งอมรรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิตาการ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)

เอกราช ประกอบกิจ : การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหิ่งห้อยในการออกแบบอย่างเหมาะสม สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (APPLICATION OF FIREFLY ALGORITHM TO OPTIMAL DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES) อ.ที่ปรี กษา วิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. วัฒนชัย สมิตถากร, 109 หน้า.

อัลกอริทึมหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) เป็นวิธีการหาค่าตอบอย่างเหมาะสม แบบเมตะฮิวริสติก ที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการใช้แสงในการหาคู่ และหาอาหารของหิ่งห้อย งานวิจัยนี้ นำวิธีอัลกอริทึมหิ่งห้อยมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบอย่างเหมาะสม สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้ได้โครงสร้างที่ประหยัด และมีความแข็งแรงปลอดภัย วิธีอัลกอริทึมหิ่งห้อยนี้มีข้อดีคือ สามารถหาค่าตอบเหมาะสมเฉพาะที่ (Local Optimum) ได้ทั้งหมด เพื่อยืนยันการค้นพบค่าตอบเหมาะสมที่แท้จริง (Global Optimum) กรณีศึกษาที่พิจารณา ได้แก่ โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กจตุรกรรับแบบง่าย คานคอนกรีตเสริมเหล็กปลายทั้งสองข้างยึดแน่น เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กแบบพอร์ทัล และโครงสร้างกริด

ผลการคำนวณออกแบบกรณีศึกษาพบว่า อัลกอริทึมหิ่งห้อย สามารถออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต ด้วยวิธีจำลองการอบเหนียวและวิธีฮามอนิเซอร์ การเลือกจำนวนหิ่งห้อยจะต้องมากพอและเพิ่มขึ้นตามจำนวนตัวแปรของปัญหา เพื่อความครอบคลุมในการค้นหาค่าตอบ หากจำนวนหิ่งห้อยน้อยเกินไป อาจทำให้ค่าตอบที่ได้เป็นค่าตอบเหมาะสมเฉพาะที่ ไม่ใช่ค่าตอบเหมาะสมที่แท้จริง นอกจากนี้ยังต้องเลือกสัมประสิทธิ์การกรองแสงและพารามิเตอร์การสุ่ม ให้เหมาะสมกับตัวแปรต่าง ๆ ของปัญหาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้การค้นหาค่าตอบมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าเท่ากับ 1.0 ทั้งคู่

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5770372021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: OPTIMAL DESIGN / REINFORCED CONCRETE STRUCTURES / FIREFLY ALGORITHM

EKARAJ PRAKOBKIT: APPLICATION OF FIREFLY ALGORITHM TO OPTIMAL DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. ADVISOR: ASST. PROF. WATANACHAI SMITTAKORN, Ph.D., 109 pp.

Firefly Algorithm is a meta-heuristic method inspired by the behavior of fireflies which use flashes to attract mate partners and potential prey. This study applies the Firefly Algorithm to the design of reinforced concrete structures and seeks for an economical and sound structure. The advantage of the Firefly Algorithm is the ability to find all of local optimum answers in order to guarantee the finding of global optimum. Case studies involve a reinforced concrete simple beam, a fixed-end beam, a column, a portal frame and grid structures.

Results from case studies have shown that Firefly Algorithm, when incorporated into the optimal design of reinforced concrete structure, yields a very good solution compared with previous research by the method of simulated annealing and harmony search. Number of fireflies should be large enough and increasing with the number of primary variables in order to cover the entire search space. Too small number of fireflies may result in a local optimum, not the global one. Moreover, the search performance is dependent on whether the values of absorption coefficient and randomization parameter well suit the problem variables. In this study, both the absorption coefficient and randomization parameter are used as 1.0.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัฒนชัย สมิตชากร เป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง และสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี เพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ที่สุด ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณนายอลงกต ประกอบกิจ ที่สละเวลาช่วยแนะนำการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาจาวา ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรักและกำลังใจในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้การสนับสนุนในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	15
1.1 ความเป็นมา.....	15
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	21
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	21
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	22
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	23
2.1 วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด.....	23
2.2 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม	24
2.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	24
2.4 ฟังก์ชันข้อจำกัด	29
2.4.1 การวิเคราะห์ความแข็งแกร่งของคาน.....	31
2.4.2 การวิเคราะห์ความแข็งแกร่งของเสา	39
2.5 อัลกอริทึมหึ่งห้อย.....	42
2.6.1 ที่มาและสมมุติฐานของอัลกอริทึมหึ่งห้อย	43
2.6.2 ความสว่างและการติดตั้งของหึ่งห้อย.....	43

2.6.3 การแก้ปัญหาแบบมีข้อจำกัด (Constraint handling).....	46
2.6.4 ขั้นตอนการดำเนินการของอัลกอริทึมหึ่งห้อย.....	46
2.6.5 ตัวอย่างการคำนวณด้วยอัลกอริทึมหึ่งห้อย.....	48
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย.....	53
3.1 ขอบของตัวแปร.....	53
3.2 รายละเอียดการเสริมเหล็ก.....	54
3.3 ตัวแปรการออกแบบอย่างเหมาะสม.....	54
3.3.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว.....	54
3.3.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ช่วง.....	56
3.3.3 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 ช่วง.....	57
3.3.4 เสา.....	58
3.4 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมหึ่งห้อย.....	59
บทที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบอย่างเหมาะสม.....	61
4.1 กรณีศึกษาการออกแบบอย่างเหมาะสม.....	61
4.2 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการออกแบบโครงสร้างโดยอัลกอริทึมหึ่งห้อย.....	64
4.3 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสม.....	69
4.3.1 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 1.....	70
4.3.2 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 2.....	72
4.3.3 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 3.....	74
4.3.4 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 4.....	76
4.3.5 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 5.....	78
4.3.6 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 6.....	83
4.3.7 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยในอดีต (HS และ SA).....	100

บทที่ 5 บทสรุป.....	102
5.1 สรุปผล.....	102
รายการอ้างอิง.....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	หน้าตัดคานและเสาเพื่อคำนวณปริมาณคอนกรีต	25
รูปที่ 2.2	รูปด้านคานเสาเพื่อคำนวณปริมาณคอนกรีต	26
รูปที่ 2.3	การเสริมเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	27
รูปที่ 2.4	การเสริมเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	27
รูปที่ 2.5	การเสริมเหล็กปลอกคาน	28
รูปที่ 2.6	หน้าตัดคานและเสาขณะเข้าไม้แบบ	29
รูปที่ 2.7	พฤติกรรมของคานเสริมเหล็กคู่	32
รูปที่ 2.8	การแบ่งแรงคู่ควบ	33
รูปที่ 2.9	แผนภูมิปฏิสัมพันธ์	40
รูปที่ 2.10	หน้าตัดเสารับแรงดัดและแรงตามแนวแกนในภาวะสมดุล	41
รูปที่ 2.11	ผังชั้นตอนวิธีอัลกอริทึมหึ่งห้อย	47
รูปที่ 2.12	แผนภาพสามมิติสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์	48
รูปที่ 2.13	ตำแหน่งเริ่มต้นของหึ่งห้อย	49
รูปที่ 2.14	ตำแหน่งของหึ่งห้อยหลังจากการเคลื่อนที่ 5 ครั้ง	49
รูปที่ 2.15	ตำแหน่งของหึ่งห้อยหลังจากการเคลื่อนที่ 10 ครั้ง	50
รูปที่ 2.16	ตำแหน่งของหึ่งห้อยหลังจากการเคลื่อนที่ 15 ครั้ง	50
รูปที่ 2.17	ตำแหน่งของหึ่งห้อยหลังจากการเคลื่อนที่ 20 ครั้ง	51
รูปที่ 3.1	การเสริมเหล็กคานช่วงเดียว	55
รูปที่ 3.2	การเสริมเหล็กคาน 2 ช่วง	56
รูปที่ 3.3	การเสริมเหล็กคาน 3 ช่วง	57
รูปที่ 3.4	การเสริมเหล็กเสา	58
รูปที่ 3.5	ผังชั้นตอนการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมด้วยวิธีอัลกอริทึมหึ่งห้อย	60

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1-4	62
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 5	62
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 6	63
รูปที่ 4.4 รูปกรณีศึกษาที่ 1	70
รูปที่ 4.5 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 1	71
รูปที่ 4.6 รูปกรณีศึกษาที่ 2	72
รูปที่ 4.7 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 2	73
รูปที่ 4.8 รูปกรณีศึกษาที่ 3	74
รูปที่ 4.9 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 3	75
รูปที่ 4.10 รูปกรณีศึกษาที่ 4	76
รูปที่ 4.11 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 4	77
รูปที่ 4.12 รูปกรณีศึกษาที่ 5	78
รูปที่ 4.13 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (200 กก./ตร.ม.)	79
รูปที่ 4.14 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (200 กก./ตร.ม.)	80
รูปที่ 4.15 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (400 กก./ตร.ม.)	81
รูปที่ 4.16 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (400 กก./ตร.ม.)	82
รูปที่ 4.17 รูปกรณีศึกษาที่ 6	84
รูปที่ 4.18 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (200 กก./ตร.ม.)	85
รูปที่ 4.19 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (200 กก./ตร.ม.)	87
รูปที่ 4.20 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (200 กก./ตร.ม.)	89
รูปที่ 4.21 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (200 กก./ตร.ม.)	91
รูปที่ 4.22 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (400 กก./ตร.ม.)	93
รูปที่ 4.23 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (400 กก./ตร.ม.)	95
รูปที่ 4.24 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (400 กก./ตร.ม.)	97

รูปที่ 4.25 การรู้เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (400 กก./ตร.ม.)	99
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบผลการออกแบบอย่างเหมาะสมระหว่าง HS, SA และ FA.....	101



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตำแหน่งและคำตอบของหิ้งห้อยหลังการเคลื่อนที่ 20 ครั้ง.....	52
ตารางที่ 3.1 ขอบเขตและตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ.....	53
ตารางที่ 3.2 ราคาวัสดุก่อสร้าง.....	54
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	64
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (ต่อ).....	65
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (ต่อ).....	66
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของสัมประสิทธิ์การกรองแสง (γ)	67
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การสุ่ม (α)	68
ตารางที่ 4.4 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 1	70
ตารางที่ 4.5 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 2	72
ตารางที่ 4.6 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 3	74
ตารางที่ 4.7 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 4	76
ตารางที่ 4.8 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (200 กก./ตร.ม.).....	79
ตารางที่ 4.9 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (200 กก./ตร.ม.).....	80
ตารางที่ 4.10 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (400 กก./ตร.ม.)	81
ตารางที่ 4.11 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (400 กก./ตร.ม.)	82
ตารางที่ 4.12 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (200 กก./ตร.ม.)	84
ตารางที่ 4.13 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (200 กก./ตร.ม.)	86
ตารางที่ 4.14 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (200 กก./ตร.ม.)	88
ตารางที่ 4.15 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (200 กก./ตร.ม.)	90
ตารางที่ 4.16 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (400 กก./ตร.ม.)	92
ตารางที่ 4.17 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (400 กก./ตร.ม.)	94

ตารางที่ 4.18 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (400 กก./ตร.ม.)	96
ตารางที่ 4.19 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (400 กก./ตร.ม.)	98
ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบผลการออกแบบอย่างเหมาะสมระหว่าง HS, SA และ FA.....	100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น การวางแผนธุรกิจให้มีกำไรมากที่สุด หรือการเดินทางถึงจุดหมายให้เร็วที่สุดโดยใช้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด เป็นต้น จะเห็นว่าการหาค่าที่เหมาะสมนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งจากการวางแผนและคำนวณเป็นอย่างดีและจากสามัญสำนึกในการใช้ชีวิตของมนุษย์ เมื่อมองย้อนกลับไปในอดีตจะพบว่ามีการศึกษาและคิดค้นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมกันมาอย่างยาวนาน

ตัวอย่างการหาค่าเหมาะสมในอดีต เช่น ในปี ค.ศ. 1781 วิศวกรโยธาชื่อ Gaspard Monge ได้ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาจราจรในเมืองฝรั่งเศส หรือในปี ค.ศ. 1805 นักคณิตศาสตร์ชื่อ Adrien Legendre ได้คิดค้นและเขียนหนังสือเกี่ยวกับการสร้างเส้นตรงแทนข้อมูล (Fitting Curve) โดยใช้วิธี Least Squares Method ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมรูปแบบหนึ่ง นอกจากนี้หลักการหาค่าที่เหมาะสมยังประยุกต์ใช้ในการสงครามได้อีกด้วย เช่นในปี ค.ศ. 1940 ช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง นักคณิตศาสตร์ชื่อ Alan Turing และ Gordon Welchman ได้สร้างเครื่องถอดรหัสชื่อ The Bomb เพื่อถอดรหัสนลับของเยอรมันชื่อ German Enigma โดย The Bomb ใช้วิธีฮิวริสติกที่สามารถค้นหาค่าตอบรหัสได้ถึง 1022 รูปแบบ

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธาได้ อาทิ เช่น การออกแบบและก่อสร้างอาคารให้มีความประหยัดที่สุดโดยมีความแข็งแรงตามมาตรฐานที่กำหนด อาคารในประเทศไทยนิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก ซึ่งแบบก่อสร้างจะออกแบบโดยวิศวกรโยธา โดยผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงแบบสถาปัตยกรรม สิ่งแวดล้อมโดยรอบและความแข็งแรงให้ได้ตามมาตรฐานวิศวกรรม แต่ในยุคปัจจุบัน เจ้าของอาคารไม่เพียงแต่ต้องการอาคารที่แข็งแรงเพียงอย่างเดียว ยังต้องการอาคารที่ราคาต่ำที่สุดอีกด้วย ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจึงต้องคำนึงถึงการออกแบบให้ประหยัดด้วยเช่นกัน

การประหยัดต้นทุนวัสดุก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหมายถึง การใช้คอนกรีตเสริมเหล็กเส้น ไม้แบบ น้ายาทาแบบ น้ายาบ่มคอนกรีต ฯลฯ ให้น้อยที่สุด โดยยังคงความแข็งแรงและปลอดภัยได้ตามกฎหมายและมาตรฐานวิศวกรรม

โดยทั่วไปแล้ว การออกแบบโครงสร้างให้แข็งแรงและประหยัดนั้น วิศวกรผู้ออกแบบจะใช้ประสบการณ์ส่วนตัวในการตัดสินใจเลือก วัสดุ ขนาดขององค์อาคาร และวิธีการออกแบบ โดยไม่มี

หลักการตายตัว ไม่สามารถตอบได้ว่าแบบที่ได้มานั้นประหยัดที่สุดหรือไม่ และไม่สามารถถ่ายทอดประสบการณ์ให้กับวิศวกรคนอื่นได้อย่างเป็นหลักวิชา หากใช้วิศวกรสิบคนออกแบบอาคารเดียวกัน ก็จะได้แบบโครงสร้างที่แตกต่างกันสิบแบบ แต่มีรูปแบบทางสถาปัตยกรรมและการใช้สอยอาคารที่เหมือนกันทุกประการ ดังนั้นจึงมีการคิดค้นและพัฒนาวิธีการออกแบบโครงสร้างให้เป็นระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) โดยประยุกต์ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งการออกแบบโครงสร้างงานโยธาอันมีตัวแปรจำนวนมากและมีความซับซ้อนสูง ดังนั้นเทคนิควิธีเมตะฮิวริสติก (Metaheuristic) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการสุ่มตัวแปร จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ออกแบบโครงสร้างให้ประหยัดที่สุด

วิธีเมตะฮิวริสติกนั้นสามารถแยกย่อยได้หลายประเภท เช่น วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm : GA) , วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีเมตะฮิวริสติกชื่อว่าวิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm : FA) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2007 โดย Xin She Yang ซึ่งได้แรงบันดาลใจมาจากการจับคู่ของหิ่งห้อย จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาพบว่าวิธีหิ่งห้อยมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมและวิธีกลุ่มอนุภาคในการหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของฟังก์ชันคณิตศาสตร์และสามารถประยุกต์ใช้ในงานออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณให้ประหยัดได้เป็นอย่างดี

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การหาคำตอบที่เหมาะสมมีความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากปัญหาใหม่ ๆ เริ่มมีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear) และมีจำนวนตัวแปรที่มากขึ้น ทำให้วิธีการแก้ปัญหาในอดีตไม่สามารถแก้ได้ จึงได้มีการคิดค้นวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่เรียกว่าวิธีฮิวริสติกและเมตะฮิวริสติกขึ้นมาเพื่อรองรับปัญหาที่ซับซ้อนขึ้น โดยทั้งสองวิธีใช้รูปแบบการหาคำตอบโดยการลองผิดลองถูกและปรับปรุงค่า

วิธีฮิวริสติกคือวิธีแก้ปัญหาโดยขึ้นกับคำถาม (Question dependent) หมายความว่า เป็นวิธีที่คิดค้นเพื่อแก้ปัญหาหนึ่ง ๆ โดยเฉพาะ ไม่สามารถใช้แก้ปัญหาอื่นได้ เช่น วิธีถอดรหัสลับเยอรมันที่ Alan Turing เป็นผู้คิดค้น ซึ่งเป็นวิธีที่สร้างมาเพื่อถอดรหัสลับของเยอรมันในสงครามโลกครั้งที่สอง โดยเฉพาะ ส่วนวิธีเมตะฮิวริสติกคือวิธีแก้ปัญหาโดยไม่ขึ้นกับปัญหา (Question independent) หมายความว่า เป็นวิธีที่ใช้แก้ปัญหาได้ทุกรูปแบบ ไม่เจาะจงเฉพาะปัญหาใดปัญหาหนึ่ง แต่ไม่ได้หมายความว่าวิธีเมตะฮิวริสติกวิธีหนึ่ง ๆ จะมีประสิทธิภาพในการแก้ทุกปัญหา เช่น วิธีเมตะฮิวริสติกวิธี A อาจมีประสิทธิภาพสูงในการแก้ปัญหาที่ 1 ได้ แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่ 2 ในขณะที่วิธีเมตะฮิวริสติกวิธี B อาจไร้ประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่ 1 แต่มีประสิทธิภาพสูงในการ

แก้ปัญหาที่ 2 โดย Xin She Yang (2010) กล่าวว่า ยังไม่มีวิธีเมตะฮิวริสติกใดที่สามารถแก้ปัญหาทุกประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งหมด นอกจากนี้ Xin She Yang ยังได้กล่าวอีกว่า วิธีเมตะฮิวริสติกมักใช้การเลียนแบบพฤติกรรมในธรรมชาติเนื่องจากธรรมชาติได้วิวัฒนาการลงผิดลองถูกมานับล้านปี พฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจึงเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้รับการคัดเลือกแล้วว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะดำรงอยู่

วิธีเมตะฮิวริสติกสมัยใหม่ที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรมจะได้แก่ วิธีคำนวณเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm ,GA) , วิธีจำลองการอบเหนียว (Simulated annealing , SA) , วิธีความฉลาดแบบกลุ่ม (Particle Swarm Optimization , PSO) , วิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Harmony search ,HA) , และวิธีหิ่งห้อยอัลกอริทึม (Firefly algorithm , FA) โดยแต่ละวิธีมีแนวทางการคำนวณดังนี้

วิธีคำนวณเชิงพันธุกรรม หรือ GA พัฒนาโดย John Hollands ในปี ค.ศ 1960 วิธีการนี้ได้แรงบันดาลใจจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติที่ได้นำเสนอโดยชาร์ลส ดาร์วิน ในปี ค.ศ. 1858 ซึ่งมีใจความสำคัญว่าสิ่งมีชีวิตจะมีการผสมพันธุ์แลกเปลี่ยนยีนส์กัน เพื่อให้เกิดโครโมโซมใหม่ ๆ ออกมา โดยที่โครโมโซมใหม่นั้นเกิดจากการผสมกันระหว่างยีนส์ของพ่อและแม่ และมีโอกาสเกิดการกลายพันธุ์ขึ้นแบบสุ่ม โครโมโซมใหม่ที่แข็งแรงจะมีโอกาสอยู่รอดสืบลูกสืบหลานต่อไป ส่วนโครโมโซมใหม่ที่อ่อนแอจะถูกขจัดทิ้งจนสูญพันธุ์ไป วิธีคำนวณเชิงพันธุกรรมได้นำหลักดังกล่าวมาใช้ โดยการแปลงคำตอบที่ได้จากฟังก์ชันเป็นรหัสโครโมโซม แล้วกำหนดให้ตัวแปรเป็นยีนส์ภายในโครโมโซมโดยการแปลงตัวแปรเป็นเลขฐานสอง จากนั้นนำโครโมโซมต่าง ๆ มาไขว้สายพันธุ์เพื่อให้เกิดโครโมโซมใหม่ หากโครโมโซมใหม่ที่เกิดขึ้นเป็นคำตอบที่เหมาะสมกว่าก็ให้อยู่ไขว้สายพันธุ์ต่อไป ส่วนโครโมโซมใหม่ที่แยกว่าให้ตัดทิ้งไป ดำเนินกระบวนการนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้โครโมโซมที่แข็งแรงที่สุด ซึ่งคือค่าที่เหมาะสมที่สุดนั่นเอง โดยมีการศึกษาการประยุกต์ใช้วิธี GA กับการออกแบบโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา ดังนี้

วรพรรณ วงศ์สรรครกร (1993) ได้ทดลองออกแบบโครงข้อมุมอย่างเหมาะสมด้วย GA เปรียบเทียบกับการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีการงานสมมุติ ในขณะที่ วีระพงษ์ ไชยสถิตวานิช (1997) ก็ได้ทำการออกแบบโครงข้อมุมที่มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นอย่างเหมาะสมด้วย GA เปรียบเทียบกับการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีการงานสมมุติ และ วรนาถ แซ่มสุวรรณ (2005) ได้ทดลองออกแบบโครงข้อมุมอย่างเหมาะสมด้วย GA เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยโปรแกรม SAP2000 และ DTRUSS ทั้งสามงานวิจัยให้ข้อสรุปว่าการออกแบบโครงข้อมุมด้วย GA ให้ค่าที่เหมาะสมกว่าวิธีอื่น ๆ

ลำไพโร มีทอง (2009) ได้นำวิธี GA มาใช้ทดสอบออกแบบโครงหลังคาเหล็กรูปพรรณ 3 มิติว่ามีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยใช้มาตรฐาน AISC/LRFD 2005 ได้ผลว่า GA สามารถออกแบบโครง

หลังคาเหล็กรูปพรรณ 3 มิติ ได้เป็นอย่างดี โดยผลที่ออกมาโครงหลังคามีน้ำหนักน้อยที่สุดหรือใกล้เคียงน้อยที่สุด

วิรัช เลิศไพฑูรย์พันธ์ และ ชัชวาลย์ พูนลาภพานิช (2010) ได้ศึกษาการใช้ GA ออกแบบโครงข้อหมุน 2 มิติอย่างเหมาะสมที่สุด โดยใช้ตัวแปรจริงในการคำนวณแทนที่จะใช้เลขฐานสอง พบว่าการออกแบบโครงหลังคาเหล็กโดยใช้ GA ด้วยตัวแปรจริงสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมหรือใกล้เคียงเหมาะสมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบจริงได้

วิธีความฉลาดแบบกลุ่ม หรือ PSO พัฒนาโดย Kennedy และ Eberhart ในปี ค.ศ. 1995 วิธีการนี้ได้แรงบันดาลใจมาจากการหาอาหารเป็นกลุ่มของฝูงนกหรือฝูงปลา โดยเมื่อปลาหรือนกพบอาหาร ปลาหรือนกตัวอื่น ๆ ก็จะมุ่งตรงเข้าหาอาหารดังกล่าวทันที การหาค่าที่เหมาะสมได้ประยุกต์ฝูงนกหรือฝูงปลาเป็นอนุภาค โดยแปลงคำตอบที่เหมาะสมให้เป็นอาหารและมีพื้นที่ในการค้นหาเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ โดยอนุภาคทุกตัวสามารถสื่อสารกันได้ อนุภาคแต่ละตัวจะพยายามเคลื่อนที่เข้าหาอนุภาคที่เจอคำตอบที่ดีที่สุด โดยที่ระหว่างเคลื่อนที่นั้นจะมีพฤติกรรมการค้นหาคำตอบอื่น ๆ ระหว่างทางไปด้วยจนครบจำนวนครั้งการเคลื่อนที่ ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่อนุภาคพบหลังจากหยุดการเคลื่อนที่จะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

Guan-Chun Luh และ Chun-Yi Lin (2011) ได้ศึกษาและทดลองใช้วิธี PSO ในการออกแบบและจัดรูปโครงข้อหมุนอย่างเหมาะสม เปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ เช่น GA และพบว่า วิธี PSO ให้คำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่า วิธี GA

วิธีจำลองการอบเหนียวหรือ SA พัฒนาโดย Scott Kirkpatrick ในปี ค.ศ. 1983 วิธีการนี้ได้แรงบันดาลใจมาจากการอบเหนียวของโลหะ ที่เริ่มการหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูง แล้วค่อย ๆ ลดอุณหภูมิช้า ๆ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในโลหะต่ำ อะตอมของโลหะมีเวลาในการจัดเรียงตัวได้อย่างมีระเบียบ จะทำให้โลหะมีความแข็งแกร่งทนทาน เหนียว ไม่แตกหักง่าย การหาค่าที่เหมาะสมได้ประยุกต์ใช้การจำลองอะตอมเป็นคำตอบที่เหมาะสม มีฟังก์ชันอุณหภูมิลดลงอย่างช้า ๆ ควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิลดลง จะมีการสุ่มหาคำตอบใหม่ โดยจะยอมรับคำตอบที่ดีกว่าและใช้ความน่าจะเป็นในการยอมรับคำตอบที่ด้อยกว่า ให้ดำเนินกระบวนการลดอุณหภูมิไปเรื่อย ๆ จนได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยมีการศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวดังนี้

สิริวัฒน์ จัยสุวรรณทัต (2014) ได้ศึกษาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้เหมาะสมด้วย SA โดยใช้มาตรฐาน ACI318M-11 พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการออกแบบ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้เหมาะสมได้เป็นอย่างดี แต่ต้องเริ่มต้นคำนวณที่อุณหภูมิสูงและมีอัตราการลดอุณหภูมิที่ต่ำจึงจะได้ผลที่น่าพึงพอใจ ซึ่งทำให้ใช้เวลาคำนวณค่อนข้างมาก

วิธีฮาโมนีเสิร์ช หรือ HS พัฒนาโดย Zong Woo Geem ในปี ค.ศ. 2001 วิธีการนี้ได้แรงบันดาลใจมาจากการเล่นดนตรีของนักดนตรี โดยนักดนตรีจะเล่นเพลงให้ไพเราะได้มีสามวิธี คือ เล่นตัวโน้ตที่รู้จัก , เล่นตัวโน้ตโดยปรับเปลี่ยนตัวโน้ตเล็กน้อย และเล่นตัวโน้ตโดยการสุมตัวโน้ตใหม่ การหาค่าที่เหมาะสมได้ประยุกต์เปลี่ยนตัวแปรในฟังก์ชันเป็นตัวโน้ต โดยครั้งแรกจะทำการสุมกลุ่มตัวแปรมาเก็บไว้ในความจำ เรียกว่าความจำฮาโมนี ซึ่งถือว่าเป็นบทเพลงที่นักดนตรีรู้จักอยู่แล้ว โดยใช้คำตอบที่ได้จากฟังก์ชันเป็นความไพเราะของบทเพลง หากคำตอบมีค่าที่เหมาะสมมากกว่าให้ถือว่าเป็นบทเพลงที่ไพเราะกว่า จากนั้นจะทำการสุมตัวแปรใหม่ เสมือนสุมเล่นเพลงใหม่ โดยใช้ความน่าจะเป็นในการเลือกตัวแปรว่า จะใช้ตัวแปรเดิมจากบทเพลงเก่า หรือใช้ตัวแปรเดิมแต่ปรับเปลี่ยนค่าเล็กน้อย หรือสุมตัวแปรใหม่ไปเลย โดยทำแบบนี้กับตัวแปรทุกตัวจนได้คำตอบใหม่ออกมา แล้วเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับคำตอบเก่าว่าคำตอบใดเหมาะสมกว่ากัน เสมือนบทเพลงใดไพเราะกว่ากัน แล้วให้ยอมรับบทเพลงที่ไพเราะกว่าเป็นบทเพลงที่นักดนตรีรู้จักในการคำนวณรอบต่อไป ดำเนินการซ้ำไปเรื่อย ๆ จนได้บทเพลงที่ไพเราะที่สุด ซึ่งก็คือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั่นเอง โดยมีการศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวดังนี้

อัฐพล เตชะรัตนประเสริฐ (2014) ได้ศึกษาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วยวิธี HS โดยใช้มาตรฐาน ACI318M-11 ได้ผลสรุปว่า HS สามารถออกแบบได้เป็นที่น่าพอใจ และมีการคำนวณที่รวดเร็ว เนื่องจาก HS ใช้การคำนวณเป็นกลุ่ม เก็บข้อมูลในเมตริกทำให้คำตอบมีความหลากหลาย สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างรวดเร็วในขั้นตอนการคำนวณที่น้อย

วิธีหิ่งห้อยอัลกอริทึม หรือ FA พัฒนาโดย Xin She Yang ในปี 2007 โดยได้แรงบันดาลใจจากการจับคู่ของหิ่งห้อยที่สามารถดึงดูดเพศตรงข้ามให้เข้ามาโดยใช้แสงของตนเอง การหาค่าที่เหมาะสมได้ประยุกต์ใช้แสงของหิ่งห้อยในการดึงดูดเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งวิธี FA นั้นมีความคล้ายกับ PSO เป็นอย่างมาก เพียงแต่ PSO ใช้การสื่อสารให้อนุภาคทุกตัวเข้าหาคำตอบที่เหมาะสม ดังนั้นคำตอบที่เหมาะสมจึงมีความสามารถในการดึงดูดอนุภาคทุกตัวได้เท่ากัน แต่สำหรับ FA นั้นใช้แสงเป็นตัวดึงดูดแทน หากหิ่งห้อยตัวอยู่บริเวณที่มีค่าเหมาะสมมาก แสงสว่างก็จะมาก หิ่งห้อยตัวที่สว่างมากกว่าจะดึงดูดหิ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยกว่าให้เข้ามา โดยที่ระยะห่างระหว่างหิ่งห้อยมีผลต่อความสว่างของแสง ยิ่งหิ่งห้อยอยู่ห่างกัน แสงก็ยิ่งจางลงตามระยะทาง ดังนั้นค่าที่เหมาะสมจึงมีความสามารถในการดึงดูดหิ่งห้อยได้ไม่เท่ากัน โดยจะมีแรงดึงดูดหิ่งห้อยตัวที่อยู่ใกล้ได้มากกว่า เมื่อให้

หิ่งห้อยเคลื่อนที่หาค่าที่เหมาะสมจนครบจำนวนครั้งที่กำหนด ค่าสุดท้ายที่ได้จะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยมีการศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวดังนี้

Amir Hossein Gandomi , Xin-She Yang และ Amir Hossein Alavi (2011) ได้ศึกษาการออกแบบคานยีนเหล็กกรุปพรรณอย่างเหมาะสมด้วย FA เทียบกับวิธีอื่น ๆ พบว่า FA ให้คำตอบที่เหมาะสมกว่าเมื่อเทียบกับ GA และ PSO ส่วน HS จะให้คำตอบที่ดีกว่า FA เล็กน้อย นอกจากนี้ยังได้ทดลองกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 1 ช่วง พบว่า FA ให้คำตอบที่ดีกว่าวิธี GA และวิธีอื่น ๆ ส่วนใหญ่

Sina Kazemzadeh Azad และ Saeid Kazemzadeh Azad (2011) ได้ศึกษาและพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยใหม่และตั้งชื่อว่า IFA (Improve Firefly Algorithm) ซึ่งเป็นการปรับปรุงให้หิ่งห้อยกระโดดไปหาตัวที่สว่างกว่าทันที แทนที่จะค่อย ๆ ถูกดึงดูดเข้าไป มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงข้อหมุนอย่างเหมาะสม 5 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบมีจำนวน member ที่แตกต่างกัน โดยทดลองออกแบบซ้ำรูปแบบละ 50 ครั้ง พบว่ายิ่งโครงข้อหมุนมีจำนวน member มาก อัตราการแกว่งของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจะมากตามไปด้วย หรือกล่าวได้ว่าค่า Standard Deviation ของคำตอบจะสูงขึ้นตามจำนวนของ member

ภาสุระ อังกุลานนท์ (2014) ได้ทดสอบความสามารถในการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี FA และ PSO โดยทดสอบด้วยปัญหาแรงกดของสปริงและแรงกระทำต่อสปริง พบว่า วิธี FA นั้นได้ผลดีกว่าทั้งเรื่องค่าที่เหมาะสมที่สุดและระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ A. Baghlani, M.H. Makiabadi และ M. Sarcheshmehpour (2014) ที่ได้นำวิธี FA มาออกแบบโครงถักเหล็กกรุปพรรณในแบบจำลอง 2 มิติและ 3 มิติ เปรียบเทียบกับวิธี GA และ PSO โดยพบว่า วิธี FA นั้นให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดหรือโครงถักที่ประหยัดที่สุดได้ดีกว่าวิธี GA และ PSO อีกทั้งยังพัฒนาสมการการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยใหม่ โดยใช้ชื่อว่า AFA (Accelerated Firefly Algorithm) ซึ่งให้คำตอบที่เหมาะสมกว่าและรวดเร็วกว่าวิธี FA ในการออกแบบโครงถักเหล็กกรุปพรรณ โดยที่ค่า Standard Deviation ของคำตอบในการออกแบบแต่ละครั้งก็ต่ำกว่าอีกด้วย

Siamak Talatahari , Amir Hossein Gandomi and Gun Jin Yun (2014) ได้ศึกษาการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบโครงสร้างเหล็กขนาดสูง เช่น เสาไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้วิธี FA แก้ปัญหาฟังก์ชันข้อจำกัดด้วยวิธีฟังก์ชันลงโทษ (Penalty function) เทียบกับวิธีอื่น ๆ พบว่า FA จะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดดีกว่าวิธีอื่น ๆ ส่วนใหญ่ เช่น GA , SA และ PSO

นอกจากนี้แล้ว ยังมีการพัฒนาเทคนิค FA เพื่อให้แก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น Xin-She Yang (2010) ผู้คิดค้นวิธี FA ได้ดัดแปลงสมการการเคลื่อนที่ FA เป็น L'evy-flight Firefly Algorithm (LFA) แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพกับฟังก์ชันคณิตศาสตร์ชื่อ Ackley

function เทียบกับ PSO และ GA พบว่า LFA ได้ผลดีกว่าทั้งในด้านคำตอบและเวลาในการคำนวณ ในขณะที่ R. Sheikholeslami, B. Gholipour Khalili, และ S. M. Zahrai (2014) ได้นำข้อดีของ FA และ HS มารวมกันเป็นวิธีการใหม่ เรียกว่า Hybrid Firefly Algorithm (IFA-HS) เพื่อออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม พบว่า IFA-HS ให้ผลการออกแบบที่ประหยัดกว่า FA ธรรมดา

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมหิ่งห้อย เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีค่าใช้จ่ายวัสดุสำหรับก่อสร้างต่ำที่สุด โดยยังมีความแข็งแรงปลอดภัยเพียงพอ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตสำหรับการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมในงานวิจัยนี้ได้แก่

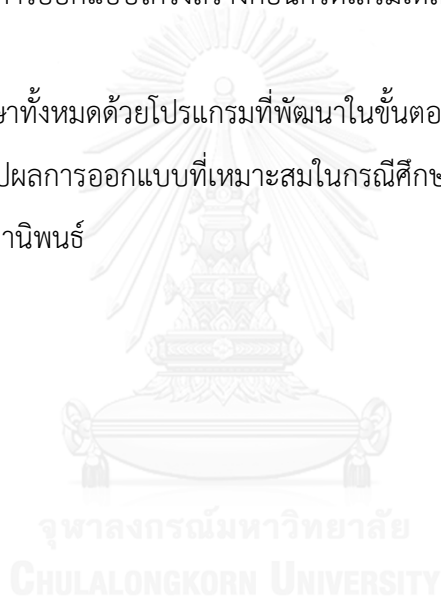
1. พิจารณาชิ้นส่วนโครงสร้างคานและเสาเป็นแบบโครงข้อแข็งพอร์ทัล (Portal Frame) และโครงสร้างกริด (Grid Structure) ในระนาบ 2 มิติ
2. พิจารณาแรงกระทำต่อโครงสร้างเฉพาะน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) เท่านั้น
3. วิเคราะห์หาแรงภายในของโครงสร้างด้วยวิธีสติฟเนสตรง (Direct Stiffness) โดยวิเคราะห์แบบเส้นตรง (Linear Analysis) และโครงสร้างมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linearly Elastic)
4. ไม่พิจารณาการจัดเรียงเหล็กเสริมของเสาและคาน โดยคิดเสมือนเหล็กเสริมเรียงเป็นชั้นเดียวในแต่ละด้าน โดยไม่จำกัดจำนวนเหล็กเสริมที่สามารถวางได้
5. ไม่พิจารณาเหล็กปลอกในเสาเนื่องจากไม่ได้ทำการจัดเรียงเหล็กยื่นจึงไม่สามารถกำหนดตำแหน่งของเหล็กปลอกได้
6. เหล็กปลอกในคานใช้ระยะห่างเหล็กปลอกเท่า ๆ กันตลอดความยาวคาน
7. ไม่พิจารณาการโก่งตัวของคาน
8. ออกแบบโครงสร้างเสาโดยพิจารณาเป็นเสาสั้นรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงความชะลูด
9. ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง

10. การออกแบบใช้ $\phi = 0.90$ สำหรับโมเมนต์ดัดในคาน , $\phi = 0.75$ สำหรับแรงเฉือนในคาน และ $\phi = 0.65$ สำหรับเสา

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสม
2. ศึกษาการประยุกต์ใช้ทฤษฎีหาค่าที่เหมาะสมกับงานออกแบบโครงสร้างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. พัฒนาโปรแกรมการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีอัลกอริทึมหึ่งห้อย โดยใช้ภาษาจาวา
4. ทดสอบกรณีศึกษาทั้งหมดด้วยโปรแกรมที่พัฒนาในขั้นตอนที่ 4
5. วิเคราะห์และสรุปผลการออกแบบที่เหมาะสมในกรณีศึกษาต่าง ๆ
6. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ทฤษฎี

การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดมีอยู่รอบตัว มีความหลากหลายและสามารถใช้แก้ปัญหาต่างๆ ได้มากมาย สามารถเขียนการหาคำตอบที่เหมาะสมในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ (Xin She Yang 2010)

$$\text{Minimize} \quad f(x) \quad (2.1)$$

$$\text{Subject to} \quad \phi_j(x) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, J) \quad (2.2)$$

$$\varphi_k(x) \leq 0 \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (2.3)$$

$$\text{And} \quad x \in R^n$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

โดยที่ $f(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

$\phi_j(x)$ คือ ฟังก์ชันข้อจำกัดที่เท่ากัน (Equalities constraints)

$\varphi_k(x)$ คือ ฟังก์ชันข้อจำกัดที่ไม่เท่ากัน (Inequalities constraints)

x คือ ตัวแปรออกแบบ (Design variables or Decision variables)

R^n คือ มิติค้นหา (Search Space) โดยจำนวนมิติขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรออกแบบ

2.1 วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

การคำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดมีอยู่มากมายหลายวิธีสามารถแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

1. วิธีคำนวณโดยตรง (Analytical Method)

วิธีคำนวณโดยตรง เป็นวิธีที่ใช้หลักคณิตศาสตร์คำนวณหาคำตอบโดยตรง เช่น ใช้การหาอนุพันธ์ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือสามารถหาคำตอบได้อย่างแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือมีความยุ่งยาก ไม่สามารถใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้

2. วิธีคำนวณโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)

วิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่ใช้การลองผิดลองถูก ปรับปรุงค่า เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ข้อดีของวิธีนี้คือ มีเทคนิคที่หลากหลาย เช่น วิธีค้นหาแบบสุ่มครั้งละหนึ่งตัวแปร (Univariate Search Method) , วิธีเกรเดียนเบส (Gradient-Based Method), วิธีมอนเตคาร์โร (Monte Carlo Method) , วิธีเมตะฮิวริสติก (Metaheuristic Method) ฯลฯ ซึ่งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขนั้น

สามารถใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ แต่มีข้อเสียคือ ยังไม่มีเทคนิคใดที่สามารถหาคำตอบได้ทุกปัญหา เทคนิคหนึ่งๆ สามารถหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บางประเภทได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อาจไม่สามารถหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์รูปแบบที่แตกต่างออกไป แม้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าก็ตาม นอกจากนี้คำตอบที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะเป็นค่าประมาณที่ใกล้เคียงค่าที่ถูกต้อง ซึ่งอาจตรงหรือไม่ตรงกับค่าที่ถูกต้องก็ได้

2.2 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสม หมายถึงการออกแบบโครงสร้างให้มีความแข็งแรงปลอดภัยและประหยัด โดยความประหยัดนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุที่ใช้ ค่าแรงคนงาน ค่าเครื่องจักร และค่าดำเนินการก่อสร้าง สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาราคาค่าก่อสร้างโดยคำนวณจากปริมาณวัสดุที่ใช้เป็นหลัก

เมื่อพิจารณาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะพบว่าราคาของโครงสร้างเป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุ และความแข็งแรงเป็นฟังก์ชันข้อจำกัด ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้

2.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ราคาของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุ ซึ่งประกอบไปด้วยคอนกรีต เหล็กเส้น และไม้แบบ โดยเหล็กเส้นแยกออกเป็นสองประเภท ได้แก่ เหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก ดังนั้นจึงสามารถสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } Z = \sum (C_c V_c + C_s W_s + C_{st} W_{st} + C_f A_f) \quad (2.4)$$

โดยที่	Z	คือ ราคารวมของโครงสร้าง	(บาท)
	C_c	คือ ราคาต่อหนึ่งหน่วยปริมาณของคอนกรีต	(บาท/ลูกบาศก์เมตร)
	C_s	คือ ราคาต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเหล็กเสริมหลัก	(บาท/กิโลกรัม)
	C_{st}	คือ ราคาต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเหล็กปลอก	(บาท/กิโลกรัม)
	C_f	คือ ราคาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของไม้แบบ	(บาท/ตารางเมตร)
	V_c	คือ ปริมาณคอนกรีต	(ลูกบาศก์เมตร)
	W_s	คือ น้ำหนักของเหล็กเสริมหลัก	(กิโลกรัม)

W_{st}	คือ น้ำหนักของเหล็กปลอก	(กิโลกรัม)
A_f	คือ พื้นที่ของไม้แบบ	(ตารางเมตร)

การคำนวณปริมาณคอนกรีต (V_c)

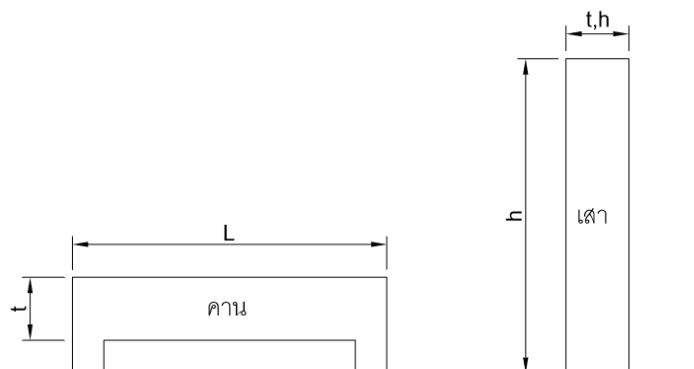
คาน $V_c = b \times t \times L$ (2.5)

เสา $V_c = b \times t \times h$ (2.6)

โดยที่ b	คือ ความกว้างของหน้าตัดคานหรือเสา	(เมตร)
t	คือ ความลึกของหน้าตัดคานหรือเสา	(เมตร)
L	คือ ความยาวคาน	(เมตร)
h	คือ ความสูงเสา	(เมตร)



รูปที่ 2.1 หน้าตัดคานและเสาเพื่อคำนวณปริมาณคอนกรีต

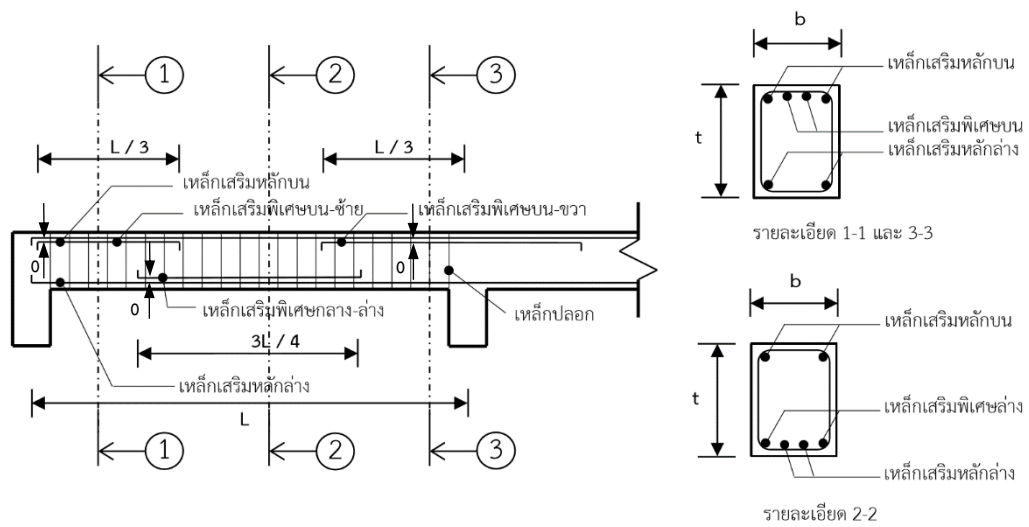


รูปที่ 2.2 รูปด้านคานเสาเพื่อคำนวณปริมาณคอนกรีต

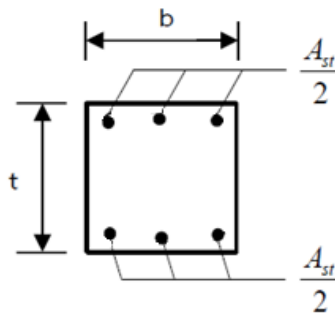
การคำนวณน้ำหนักเหล็กเสริม (W_s)

$$\text{คาน} \quad W_s = w_s \times L \times \left(A_{s,top,m} + A_{s,bottom,m} + \frac{1}{3} A_{s,top,exL} + \frac{1}{3} A_{s,top,exR} + \frac{3}{4} A_{s,bottom,ex} \right) \quad (2.7)$$

- โดยที่ w_s คือ หน่วยน้ำหนักต่อพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม (กิโลกรัม/ตารางเมตร)
- $A_{s,top,m}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมหลักบนของคาน (ตารางเมตร)
- $A_{s,bottom,m}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมหลักล่างของคาน (ตารางเมตร)
- $A_{s,top,exL}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมพิเศษบนด้านซ้ายของคาน (ตารางเมตร)
- $A_{s,top,exR}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมพิเศษบนด้านขวาของคาน (ตารางเมตร)
- $A_{s,bottom,ex}$ คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมพิเศษล่างของคาน (ตารางเมตร)
- A_{sc} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กยื่นในเสา (ตารางเมตร)



รูปที่ 2.3 การเสริมเหล็กเสริมในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 2.4 การเสริมเหล็กเสริมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

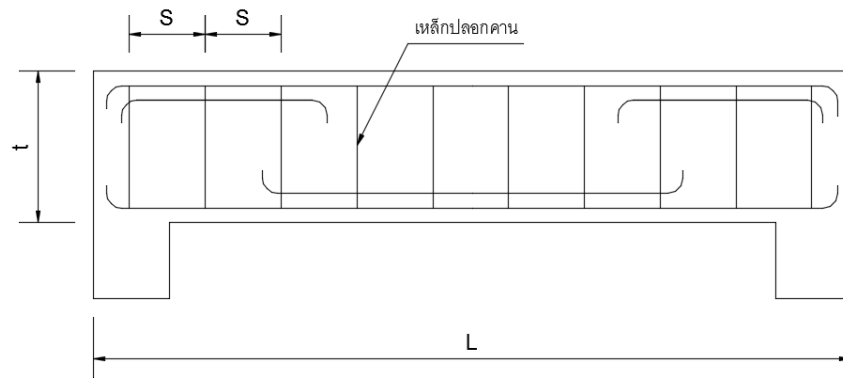
การคำนวณน้ำหนักเหล็กปลอก (W_{st})

$$W_{st} = 2 \times w_s \times (b + t) \times A_{st} \times n \tag{2.8}$$

$$n = \frac{L}{s} \tag{2.9}$$

โดยที่	w_s	คือ หน่วยน้ำหนักต่อพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม	(กิโลกรัม/ตารางเมตร)
	b	คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน	(เมตร)
	t	คือ ความลึกของหน้าตัดคาน	(เมตร)
	L	คือ ความยาวคาน	(เมตร)
	A_{st}	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก (ขาเดียว)	(ตารางเมตร)

- n คือ จำนวนเหล็กปลอก (ปลอก)
- s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (เมตร)

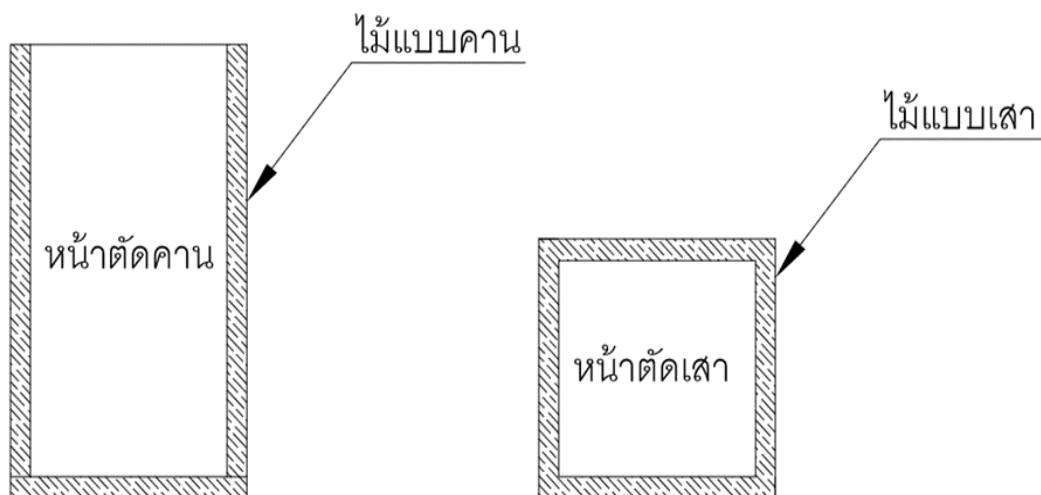


รูปที่ 2.5 การเสริมเหล็กปลอกคาน

การคำนวณพื้นที่ไม้แบบ (A_f)

$$A_f = L \times (2 \times t + b) \quad (2.10)$$

- โดยที่ b คือ ความกว้างของหน้าตัดคานหรือเสา (เมตร)
- t คือ ความลึกของหน้าตัดคานหรือเสา (เมตร)
- L คือ ความยาวคาน (เมตร)



รูปที่ 2.6 หน้าตัดคานและเสาขณะเข้าไม้แบบ

2.4 ฟังก์ชันข้อจำกัด

ฟังก์ชันข้อจำกัดคือฟังก์ชันที่กำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบ หากตัวแปรออกแบบไม่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด จะถือว่าคำตอบที่ได้มาไม่ถูกต้อง

ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ฟังก์ชันข้อจำกัดคือ ความแข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย ดังแสดงในสมการที่ (2.11) โดยงานวิจัยนี้ใช้การตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยมาตรฐาน ACI318M-14

$$\text{Design Strength} \geq \text{Required Strength} \quad (2.11)$$

สำหรับคาน จะต้องสามารถรับแรงดัดและแรงเฉือนที่กระทำได้ โดยสมมุติให้แรงตามแนวแกนน้อยมาก

$$\phi M_n \geq M_u$$

$$\phi V_n \geq V_u$$

สำหรับเสา จะต้องสามารถรับแรงตามแนวแกน และแรงดัดที่กระทำได้ โดยสมมุติให้แรงเฉือนน้อยมาก

$$\phi P_n \geq \phi P_u$$

$$\phi M_n \geq M_u$$

โดยที่ ϕ	คือ	ตัวคูณลดกำลัง
M_u	คือ	โมเมนต์ดัดประลัยที่กระทำ
V_u	คือ	แรงเฉือนประลัยที่กระทำ
P_u	คือ	แรงตามแนวแกนระลัยที่กระทำ
M_n	คือ	โมเมนต์ดัดระบุ
V_n	คือ	แรงเฉือนระบุ
P_n	คือ	แรงตามแนวแกนระบุ

สำหรับตัวคูณลดกำลัง มาตรฐานกำหนดไว้ดังนี้

ชั้นส่วนวิบัติด้วยแรงดึง	$\phi = 0.9$
ชั้นส่วนรับแรงเฉือน	$\phi = 0.75$
ชั้นส่วนวิบัติด้วยแรงอัด	$\phi = 0.65$

ทั้งนี้เพื่อให้สะดวกในการออกแบบและโครงสร้างมีความปลอดภัย ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ค่า $\phi = 0.9$ สำหรับการออกแบบหน้าตัดคานรับแรงดัด และ $\phi = 0.65$ สำหรับการออกแบบเสา รับแรงแนวแกนร่วมกับแรงดัด

โดยกำหนดตัวคูณน้ำหนักบรรทุกไว้ดังนี้

$$U = 1.2D + 1.6L \quad (2.12)$$

$$M_u = 1.2M_D + 1.6M_L$$

$$V_u = 1.2V_D + 1.6V_L$$

$$P_u = 1.2P_D + 1.6P_L$$

โดยที่ U	คือ	แรงประลัย
D	คือ	น้ำหนักบรรทุกคงที่
L	คือ	น้ำหนักบรรทุกจร
M_D	คือ	แรงดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่
V_D	คือ	แรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่
P_D	คือ	แรงตามแนวแกนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่
M_L	คือ	แรงดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร
V_L	คือ	แรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร
P_L	คือ	แรงตามแนวแกนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร

การออกแบบโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเป็นการสุ่ม ตรวจสอบ และปรับปรุงค่า ดังนั้น การออกแบบโครงสร้างในงานวิจัยนี้จึงไม่ใช่การออกแบบโดยตรง แต่จะใช้การสุ่มหน้าตัดขึ้นมาแล้วนำไปตรวจสอบกับฟังก์ชันข้อจำกัดซึ่งก็คือการวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีกำลังประลัย (Ultimate Strength Design Method , USD) ตามมาตรฐาน ACI318M-14

2.4.1 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของคาน

2.4.1.1 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด

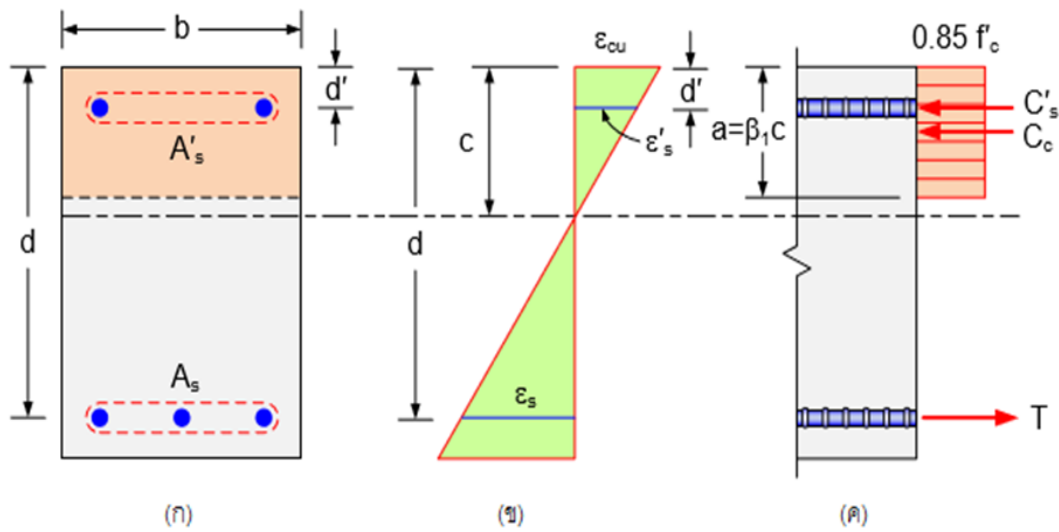
ในงานวิจัยนี้จะถือว่าหน้าตัดคานที่ได้จากการสุ่มเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัดหรือคานเสริมเหล็กคู่ทั้งหมด (Doubly reinforced beam) โดยคอนกรีตและเหล็กเสริมบนมีหน้าที่รับแรงอัดส่วนเหล็กเสริมล่างมีหน้าที่รับแรงดึง กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดจะเกิดจากแรงคู่ควบสองแรง ได้แก่ แรงคู่ควบระหว่างคอนกรีตกับเหล็กรับแรงดึง และแรงคู่ควบระหว่างเหล็กรับแรงอัดกับเหล็กรับแรงดึง ดังแสดงในสมการที่ (2.13) และรูปที่ 2.7

$$M_n = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (2.13)$$

แทนค่า $C_c = 0.85 f_c' b a$ และ $C_s = A_s' (f_s' - 0.85 f_c')$ ลงในสมการที่ (2.13)

$$จะ\ได้ \quad M_n = 0.85 f_c' b a \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' (f_s' - 0.85 f_c') (d - d') \quad (2.14)$$

โดยที่	C_c	คือ แรงอัดจากคอนกรีต	
	C_s	คือ แรงอัดจากเหล็กรับแรงอัด	
	d	คือ ระยะจากผิวคานด้านบนถึงศูนย์กลางเหล็กเสริมล่าง	
	d'	คือ ระยะจากผิวคานด้านบนถึงศูนย์กลางเหล็กเสริมบน	
	a	คือ ความลึกของกล่องรับแรงอัด (stress block)	
	A_s'	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมบน	
	f_c'	คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	(กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)
	f_s'	คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมบน	(กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 2.7 พฤติกรรมของคานเสริมเหล็กคู่

จากสมดุลแรงอัดเท่ากับแรงดึงในรูปที่ 2.7 สามารถเขียนเป็นสมการสมดุลได้ดังนี้

$$T = C_c + C_s \quad (2.15)$$

เมื่อแบ่งแรงดึงออกเป็นสองส่วนเพื่อนำไปเป็นแรงคู่ควบคู่กับแรงอัดจากคอนกรีตและแรงอัดจากเหล็กเสริมบน จะได้สมการดังนี้

$$T = T_1 + T_2 = C_c + C_s \quad (2.16)$$

และ $T_1 = C_c \quad (2.17)$

$$T_2 = C_s \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.17) จะได้

$$A_{s1} f_y = 0.85 f_c ' b a \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.18) จะได้

$$A_{s2} f_y = A_s '(f_s ' - 0.85 f_c ') \quad (2.20)$$

โดยที่ $A_s = A_{s1} + A_{s2} \quad (2.21)$

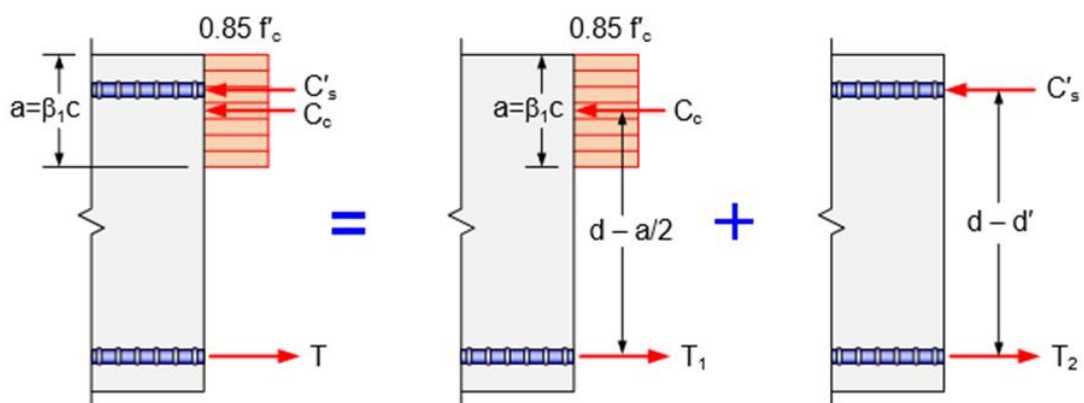
จากการแยกแรงคู่ควบออกเป็นสองส่วน กำลังรับโมเมนต์ดัดจึงแยกเป็นสองส่วนเช่นกัน

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} \quad (2.22)$$

เมื่อ $M_{n1} = T_1 \left(d - \frac{a}{2} \right) = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.85 f_c ' b a \left(d - \frac{a}{2} \right)$

และ $M_{n2} = T_2 (d - d') = C_s (d - d') = A_s' (f_s' - 0.85 f_c') (d - d')$
 จะสังเกตได้ว่าสมการที่ (2.22) และ (2.14) คือสมการเดียวกันนั่นเอง

โดยที่ T คือ แรงดึงในเหล็กเสริมล่าง
 T_1 คือ แรงดึงในเหล็กเสริมล่างที่คู่ควบกับแรงอัดในคอนกรีต
 T_2 คือ แรงดึงในเหล็กเสริมล่างที่คู่ควบกับแรงอัดในเหล็กเสริมบน
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมล่าง
 A_{s1} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมล่างที่ใช้คู่ควบกับแรงอัดในคอนกรีต
 A_{s2} คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมล่างที่ใช้คู่ควบกับแรงอัดในเหล็ก
 f_y คือ หน่วยแรงครากของเหล็กเสริม



รูปที่ 2.8 การแบ่งแรงคู่ควบ

การวิบัติของคานที่จะยอมรับได้คือ คานต้องวิบัติจากแรงดึงเป็นหลัก หมายถึงเหล็กเสริมรับแรงดึงต้องมี $\epsilon_s \geq 0.005$ โดย ACI318M-14 กล่าวว่าจะใช้ค่า $\phi = 0.9$ ได้ต่อเมื่อ $\epsilon_s \geq 0.005$ เท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ $\phi = 0.9$ เท่านั้น ดังนั้นหากเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่า $\epsilon_s < 0.005$ ถือว่าคานดังกล่าวใช้ไม่ได้

สำหรับเหล็กรับแรงอัดนั้นจะถึงจุดครากหรือไม่ก็ได้ ซึ่งการคำนวณกำลังรับโมเมนต์ตัดของคานเมื่อเหล็กเสริมรับแรงอัดครากและไม่ครากนั้นจะแตกต่างกัน โดยมีวิธีคำนวณดังนี้

กรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดถึงจุดคราก ($f_s' = f_y$)

จากสมการที่ (2.20) หาก $f_s' = f_y$ ดังนั้น $A_{s2} = A_s'$ ด้วย แทนค่าในสมการที่ (2.21) จะ
ได้

$$\begin{aligned} A_s &= A_{s1} + A_s' \\ \text{จัดรูปใหม่ได้} \quad A_{s1} &= A_s - A_s' \end{aligned} \quad (2.23)$$

นำ (2.23) ไปแทนใน (2.19) ได้

$$(A_s - A_s')f_y = 0.85f_c'ba \quad (2.24)$$

จะเห็นว่าค่า a เป็นตัวไม่รู้ค่าเพียงตัวเดียว ดังนั้นจึงจัดรูปสมการที่ (2.24) ใหม่ เพื่อหาค่า
 a จะได้

$$a = \frac{(A_s - A_s')f_y}{0.85f_c'b} \quad (2.25)$$

เมื่อได้ค่า a แล้ว กำลังรับโมเมนต์ดัดของคานสามารถหาได้จากสมการที่ (2.14)

กรณีเหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ถึงจุดคราก ($f_s' < f_y$)

จากรูปที่ 2.7 สามารถใช้กฎของสามเหลี่ยมคล้ายได้สมการดังนี้

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (2.26)$$

$$\text{เมื่อ} \quad f_s' = E_s \varepsilon_s' = E_s \varepsilon_{cu} \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (2.27)$$

แทนสมการที่ (2.27) ลงในสมการที่ (2.15) จะได้

$$T = C_c + A_s' E_s \varepsilon_{cu} \left(\frac{c-d'}{c} \right) \quad (2.28)$$

$$\text{โดย} \quad C_c = 0.85f_c'b\beta_1c$$

$$\text{และ} \quad T = A_s f_y$$

$$\text{จะได้} \quad A_s f_y = 0.85f_c'b\beta_1c + A_s' E_s \varepsilon_{cu} \left(\frac{c-d'}{c} \right)$$

จัดรูปสมการเพื่อหาค่า c จะได้

$$c^2 + \frac{A_s' E_s \varepsilon_{cu} - A_s f_y}{0.85f_c'\beta_1b} c - \frac{A_s' E_s \varepsilon_{cu} d'}{0.85f_c'\beta_1b} = 0 \quad (2.29)$$

กำหนดให้

$$R = \frac{A_s' E_s \varepsilon_{cu} - A_s f_y}{1.7 f_c' \beta_1 b} \quad (2.30)$$

และ

$$Q = \frac{A_s' E_s \varepsilon_{cu} d'}{0.85 f_c' \beta_1 b} \quad (2.31)$$

แทนสมการที่ (2.30) และ (2.31) ลงใน สมการที่ (2.29) จะได้

$$c^2 + 2Rc - Q = 0$$

สามารถแก้สมการกำลังสองได้

$$c = -R \pm \sqrt{R^2 + Q} \quad (2.32)$$

เลือกค่า c ที่เป็นไปได้ แล้วนำไปคำนวณหาค่า a ด้วยสมการ

$$a = \beta_1 c \quad (2.33)$$

และนำค่า c ไปหาค่า f_s' ด้วยสมการที่ (2.27)

จากนั้นจึงคำนวณกำลังรับโมเมนต์ตัดโดยใช้สมการที่ (2.14)

การตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมรับแรงอัด

จากรูปที่ 2.7 สามารถใช้กฎของสามเหลี่ยมคล้ายได้สมการดังนี้

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \left(1 - \frac{d'}{c} \right) \quad (2.34)$$

แทนสมการที่ (2.34) ลงในสมการที่ (2.25) จะได้

$$c = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f_c' b \beta_1} \quad (2.35)$$

กำหนดให้

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (2.36)$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} \quad (2.37)$$

แทนสมการที่ (2.36) และ (2.37) ลงในสมการที่ (2.35) จะได้

$$c = \frac{(\rho - \rho') f_y d}{0.85 f_c' \beta_1} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ (2.34) จะได้

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} \left(1 - \frac{0.85 f_c' \beta_1 d'}{(\rho - \rho') f_y d} \right) \quad (2.39)$$

เมื่อ $\varepsilon_s' = \frac{f_s'}{E_s}$ จะได้

$$\frac{f_s'}{E_s} = \varepsilon_{cu} \left(1 - \frac{0.85 f_c' \beta_1 d'}{(\rho - \rho') f_y d} \right)$$

จัดรูปสมการเพื่อหา f_s' จะได้

$$f_s' = E_s \varepsilon_{cu} \left(1 - \frac{0.85 f_c' \beta_1 d'}{(\rho - \rho') f_y d} \right) \leq f_y \quad (2.40)$$

หากค่า $f_s' \geq f_y$ แปลว่าเหล็กรับแรงอัดคราก ให้ใช้ $f_s' = f_y$

หากค่า $f_s' < f_y$ แปลว่าเหล็กรับแรงอัดไม่ถึงจุดคราก ให้ใช้ f_s' ตามค่าที่คำนวณได้

ตรวจสอบการเสริมเหล็กรับแรงดึง

เนื่องจากการวิบัติของคานที่ยอมรับได้ในงานวิจัยนี้ คือการวิบัติจากแรงดึงเท่านั้น หากเสริมเหล็กรับแรงดึงมากเกินไปคานจะวิบัติก่อนที่เหล็กเสริมจะคราก ซึ่งเป็นการวิบัติแบบแรงอัด เป็นคานที่ใช้ไม่ได้ต้องทำการสับหน้าตัดใหม่ ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบปริมาณเหล็กรับแรงดึงไม่ให้มากเกินไปด้วย

โดยมาตรฐาน ACI318M-14 กำหนดให้ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงต้องมากกว่า 0.005 ($\varepsilon_s \geq 0.005$) จึงจะถือว่าคานวิบัติด้วยแรงดึง

จากรูปที่ 2.7 ได้กฎสามเหลี่ยมคล้ายดังนี้

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) \geq 0.005 \quad (2.41)$$

นอกจากนี้ มาตรฐานยังได้กำหนดเหล็กเสริมขั้นต่ำไว้ดังนี้

$$A_{s\min} = \text{ค่ามากกว่าระหว่าง } \frac{0.80\sqrt{f_c'}}{f_y} \text{ และ } \frac{14}{f_y} bd \text{ หรือไม่น้อยกว่า } 1.33A_{s,required} \quad (2.42)$$

สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าลัมบ์รีโมเมนต์ตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ขั้นตอนที่ 1

- ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริม ด้วยสมการที่ (2.41) และ (2.42)
- หากอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดให้ดำเนินการขั้นตอนที่ 2
- หากเหล็กเสริมน้อยเกินไปให้เพิ่มปริมาณเหล็กเสริมจนเท่ากับปริมาณขั้นต่ำ แล้วจึงดำเนินการขั้นตอนที่ 2
- หากปริมาณเหล็กเสริมมากเกินไปให้ลดปริมาณเหล็กเสริมลงให้เท่ากับปริมาณสูงสุด แล้วจึงดำเนินการขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2

- ตรวจสอบการครากของเหล็กรับแรงอัดด้วยสมการที่ (2.40)
- หากเหล็กรับแรงอัดคราก ให้ดำเนินการต่อขั้นตอนที่ 3.1
- หากเหล็กรับแรงอัดไม่คราก ให้ดำเนินการต่อขั้นตอนที่ 3.2

ขั้นตอนที่ 3.1

- ให้ $f_s' = f_y$
- คำนวณค่า a ด้วยสมการที่ (2.25)
- ดำเนินการต่อขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 3.2

- คำนวณค่า c ด้วยสมการที่ (2.32)
- คำนวณค่า a ด้วยสมการที่ (2.33)
- คำนวณค่า f_s' ด้วยสมการที่ (2.27)
- ดำเนินการต่อขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4

- ตรวจสอบความเครียดของคานด้วยสมการที่ (2.41) หากไม่ผ่านให้ลดปริมาณเหล็กเสริมลงหรือปรับเปลี่ยนค่า ϕ ให้เป็นไปตามข้อกำหนด

ขั้นตอนที่ 5

- คำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานด้วยสมการที่ (2.14) แล้วดำเนินการต่อขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6

- ตรวจสอบกำลังรับแรงดัดของคานว่าเพียงพอหรือไม่ด้วยสมการที่ (2.12)
- หากเพียงพอ ถือว่าหน้าตัดดังกล่าวใช้ได้
- หากไม่เพียงพอ ให้ทำการสู่มหน้าตัดใหม่ และเริ่มขั้นตอนที่ 1 ใหม่

2.4.1.2 กำลังรับแรงเฉือน

สำหรับกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น คอนกรีตและเหล็กปลอกจะช่วยกันต้านทานแรงเฉือน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.43)$$

- โดยที่ V_n คือ แรงเฉือนระบุ
- V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต
- V_s คือ กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก

โดยคานจะรับแรงเฉือนได้อย่างปลอดภัยจะต้องเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\phi V_n \geq V_u$$

ขั้นตอนวิเคราะห์หน้าตัดคานรับแรงเฉือน

ขั้นตอนที่ 1 ตรวจสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตด้วยสมการ

$$V_c = 0.53\lambda\sqrt{f'_c}bd \quad , \quad (\lambda = 1)$$

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบเงื่อนไขว่าจำเป็นต้องเสริมเหล็กปลอกหรือไม่

หาก $0.5\phi V_c \geq V_u$ ไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กปลอก (แต่ในทางปฏิบัติจะใส่เหล็กปลอกขั้นต่ำ)

หากไม่เข้าเงื่อนไขดังกล่าว ให้ดำเนินการต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบการรับแรงเฉือนสูงสุดของคานและเหล็กปลอก

หาก $V_u \leq \phi(V_c + 2.2\sqrt{f'_c}bd)$ แสดงว่าหน้าตัดใช้ได้ ให้ดำเนินการต่อ

ขั้นตอนที่ 4 หากไม่เข้าเงื่อนไขดังกล่าวให้ทำการสู่มหน้าตัดใหม่

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกที่ต้องการโดยสมการ

$$\phi V_s = V_u - \phi V_c$$

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณปริมาณเหล็กปลอกรับแรงเฉือนจะแบ่งเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 $V_u \geq \phi V_c$ คำนวณโดยสมการ

$$s = \frac{A_v f_{yt} d}{V_s}$$

กรณีที่ 2 $0.5\phi V_c < V_u < \phi V_c$ คำนวณโดยใช้ค่าน้อยกว่าระหว่างสมการ

$$s = \frac{A_v f_{yt}}{0.2\sqrt{f'_c} b}$$

และ

$$s = \frac{A_v f_{yt}}{3.5b}$$

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบระยะห่างมากที่สุด โดยระยะห่างของเหล็กปลอกต้องไม่เกินค่าดังต่อไปนี้

การคำนวณแบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 $V_s \leq 1.1\sqrt{f'_c} bd$

$$s \leq \text{ค่าน้อยกว่าระหว่าง } \frac{d}{2} \text{ และ } 0.60 \text{ ม.}$$

กรณีที่ 2 $V_s > 1.1\sqrt{f'_c} bd$

$$s \leq \text{ค่าน้อยกว่าระหว่าง } \frac{d}{4} \text{ และ } 0.30 \text{ ม.}$$

โดยที่ A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอก (2ขา)

f_{yt} คือ หน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กปลอก

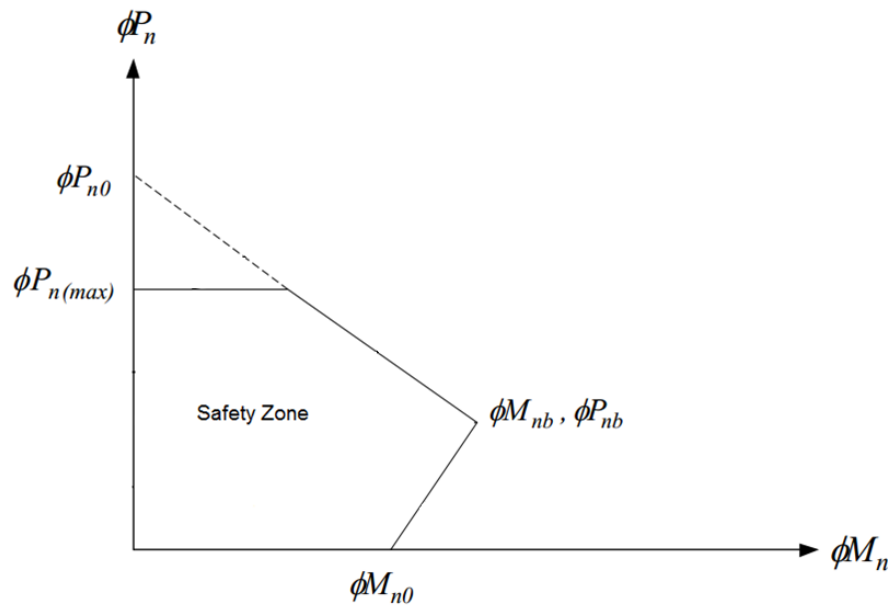
s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

2.4.2 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของเสา

ในงานวิจัยนี้ จะทำการออกแบบเฉพาะเสาสั้น โดยรับเพียงแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดทิศทางเดียวเท่านั้น ไม่คิดแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Load) และโมเมนต์ที่เกิดจากการโก่งเดาะ (P- Δ Effect)

การวิเคราะห์จะทำการสร้างแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ (Interaction diagram) แบบประมาณขึ้นมา โดยงานวิจัยนี้จะประมาณแผนภูมิปฏิสัมพันธ์เป็นเส้นตรง 3 เส้น โดยใช้จุด 4 จุด ได้แก่

$(0, \phi P_0)$, $(0, \phi P_{n(max)})$, $(\phi M_{n0}, 0)$ และ ตำแหน่งสมดุล $(\phi M_b, \phi P_b)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หาก พิกัดของแรงกระทำตามแนวแกนและโมเมนต์ดัด (M_u, P_u) อยู่ภายในกราฟหรือโซนปลอดภัย (Safety zone) ถือว่าหน้าตัดเสาดังกล่าวรับน้ำหนักได้ หากอยู่นอกโซนปลอดภัย ถือว่าหน้าตัดดังกล่าวใช้ไม่ได้ ต้องทำการส่อมหน้าตัดใหม่



รูปที่ 2.9 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์

การหาจุดสำหรับสร้างกราฟสามารถทำได้ดังนี้

คำนวณกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว $(\phi P_0, \phi P_{n(max)})$

$$\text{โดยที่ } \phi P_{n0} = \phi \left(0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \right)$$

$$\text{และ } \phi P_{n(max)} = 0.80 \phi P_{n0}$$

$$\text{ดังนั้น } \phi P_{n(max)} = \phi 0.8 \left(0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \right)$$

โดยที่ P_{n0} คือ กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาตามทฤษฎี

$P_{n(max)}$ คือ กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาในทางปฏิบัติ

P_{nb} คือ กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาในสภาวะการวิบัติแบบสมดุล

M_{nb} คือ กำลังต้านทานแรงดัดของเสาในสภาวะการวิบัติแบบสมดุล

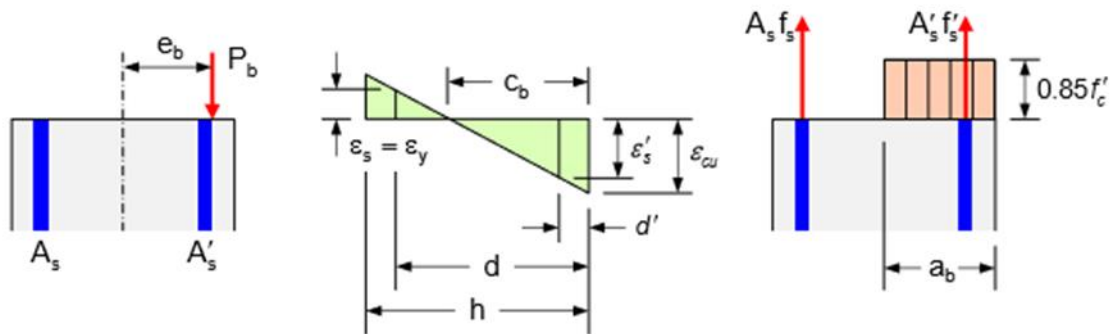
M_{n0} คือ กำลังต้านทานแรงดัดของเสาในกรณีไม่มีแรงอัดตามแนวแกน

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดรวมของเสา

A_{st} คือ พื้นที่หน้าตัดรวมของเหล็กเสริม

คำนวณกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนและกำลังรับแรงดัดที่ตำแหน่งสมดุล ($\phi P_b, \phi M_b$)

จุดสมดุลคือ จุดที่เสาวิบัติในภาวะสมดุล หมายถึงจุดที่ความเครียดที่ผิวคอนกรีตด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับค่าความเครียดประลัย ($\epsilon_{cu} = 0.003$) และความเครียดของเหล็กรับแรงดึงถึงจุดคราก ($\epsilon_s = \epsilon_y$) พร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หน้าตัดเสารับแรงดัดและแรงตามแนวแกนในภาวะสมดุล

จากรูปที่ 2.10 สามารถใช้กฎสามเหลี่ยมคล้ายได้สมการดังนี้

$$\frac{c_b}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_s + \epsilon_{cu}} = \frac{0.003}{f_y/E_s + 0.003} \quad (2.45)$$

และ
$$\epsilon'_s = \epsilon_{cu} \frac{c - d'}{c} \quad (2.46)$$

จัดรูปสมการที่ (2.46) ใหม่จะได้

$$c_b = \frac{0.003}{f_y/E_s + 0.003} d \quad (2.47)$$

จากสมการที่ (2.47) เมื่อ $\epsilon'_s = f'_s/E_s$ จะได้สมการสำหรับคำนวณหา f'_s ดังนี้

$$f'_s = \epsilon_{cu} E_s \frac{c - d'}{c} \leq f_y \quad (2.48)$$

จากสมดุลในแนวตั้ง จะได้

$$P_b = C_c + C_s - T \quad (2.49)$$

$$C_c = 0.85 f'_c \beta_1 c_b b$$

แทนค่า $C'_s = A'_s (f'_s - 0.85 f'_c)$

$$T = A_s f_y$$

ลงในสมการที่ (2.49) จะได้

$$P_b = 0.85 f'_c \beta_1 c_b b + A'_s (f'_s - 0.85 f'_c) - A_s f_y$$

ดังนั้น $\phi P_b = \phi (0.85 f'_c \beta_1 c_b b + A'_s (f'_s - 0.85 f'_c) - A_s f_y)$

(2.50)

จากสมมูลโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางเสา จะได้

$$M_b = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

ดังนั้น $\phi M_b = \phi C_c \left(\left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + C_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) + T \left(d - \frac{h}{2} \right) \right)$ (2.51)

คำนวณกำลังรับแรงดัดเพียงอย่างเดียว (ϕM_{n0})

ใช้การคำนวณเหมือนกำลังรับแรงดัดของคาน

2.5 อัลกอริทึมหึ่งห้อย

ในการหาคำตอบที่เหมาะสมของปัญหาทางวิศวกรรม วิธีเชิงตัวเลขแบบเมตะฮิวริสติกเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เมตะฮิวริสติกคือวิธีแก้ปัญหที่ไม่ขึ้นกับคำถาม (Question-Independent) หมายความว่า เป็นวิธีที่ใช้สำหรับแก้ปัญหได้ทุกรูปแบบ ไม่เจาะจงรูปแบบเฉพาะปัญหาใดปัญหาหนึ่งเท่านั้น แต่ถึงแม้วิธีเมตะฮิวริสติกจะสามารถแก้ปัญหได้ทุกรูปแบบ คำตอบที่ได้ อาจไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดแท้จริง (Global Optimum) โดยอาจได้คำตอบที่เป็นเพียงค่าที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimum) เท่านั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาและวิธีเมตะฮิวริสติกที่ใช้แก้ปัญห งานวิจัยนี้เลือกใช้อัลกอริทึมหึ่งห้อยซึ่งเป็นวิธีแก้ปัญหแบบเมตะฮิวริสติกวิธีหนึ่ง เพื่อนำมาใช้กับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีความประหยัด โดยจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

2.6.1 ที่มาและสมมติฐานของอัลกอริทึมหึ่งห้อย

อัลกอริทึมหึ่งห้อยคือ วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด คิดค้นโดย Xin She Yang จากมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ในปี ค.ศ. 2007 โดยได้แรงบันดาลใจจากการที่หึ่งห้อยใช้แสงเพื่อหาคู่หรือหาเหยื่อ ในการหาคู่หึ่งห้อยตัวเมียจะถูกดึงดูดจากความสว่างและจังหวะกระพริบของแสงจากหึ่งห้อยตัวผู้ หึ่งห้อยต่างชนิดกันจะมีแสงสว่างและจังหวะกระพริบที่ต่างกัน ดังนั้นจึงมีหึ่งห้อยบางชนิดที่สามารถเลียนแบบแสงสว่างของหึ่งห้อยชนิดอื่น เพื่อล่อหึ่งห้อยชนิดอื่นมาเป็นอาหาร

Xin She Yang ได้ประยุกต์พฤติกรรมเหล่านี้ของหึ่งห้อยมาเป็นวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสม โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. หึ่งห้อยทุกตัวนั้นไร้เพศ (Unisex) และหึ่งห้อยสามารถดึงดูดหากันได้ทุกตัว
2. ความน่าดึงดูดของหึ่งห้อยขึ้นอยู่กับความสว่าง หึ่งห้อยตัวที่สว่างมากกว่าจะดึงดูดตัวที่สว่างน้อยกว่าให้เข้าหา ระยะทางระหว่างหึ่งห้อยก็มีผลกับความสว่าง ยิ่งหึ่งห้อยห่างกันมากความสว่างก็ยิ่งลดลง ความน่าดึงดูดก็จะลดลงตามระยะทาง หากไม่มีตัวที่สว่างกว่าหึ่งห้อยจะทำการเคลื่อนที่แบบสุ่ม
3. ความสว่างของหึ่งห้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่หึ่งห้อยอยู่ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Landscape of the objective function) โดยความสว่างของหึ่งห้อยแปรผันตรงกับคำตอบที่ตำแหน่งที่หึ่งห้อยตัวนั้น ๆ อยู่

2.6.2 ความสว่างและการดึงดูดของหึ่งห้อย

ความสว่างของหึ่งห้อยจะแทนด้วยความเข้มของแสง ความเข้มของแสงจะออกจากหึ่งห้อยตัวกำเนิดแสง หึ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยกว่าจะได้รับแสงและถูกดึงดูดให้เข้าหา โดยจะได้รับ ความเข้มของแสงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างหึ่งห้อยทั้งสองตัว โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (2.52)$$

และความน่าดึงดูดของหึ่งห้อยตัวกำเนิดแสงแปรผันตรงกับ ความเข้มของแสง จึงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (2.53)$$

โดยที่	I	คือ ความเข้มแสงที่หึ่งห้อยตัวรับแสงได้รับ
	I_0	คือ ความเข้มแสงของหึ่งห้อยตัวกำเนิดแสง
	β	คือ ความน่าดึงดูดที่หึ่งห้อยตัวกำเนิดแสงดึงดูดหึ่งห้อยตัวรับแสง
	β_0	คือ ความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสง

\mathcal{V} คือ สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞)

r คือ ระยะห่างระหว่างหึ่งห้อยทั้งสองตัว

ตัวอย่างการคำนวณระยะห่างระหว่างหึ่งห้อยสองตัวสำหรับฟังก์ชันสองมิติ สามารถหาได้จากสมการ

$$r_{ij} = \sqrt{(x_{1,j} - x_{1,i})^2 + (x_{2,j} - x_{2,i})^2} \quad (2.54)$$

โดยที่ $x_{1,i}$ คือ ตำแหน่งในแกน x_1 ของหึ่งห้อยตัวรับแสง

$x_{1,j}$ คือ ตำแหน่งในแกน x_1 ของหึ่งห้อยตัวกำเนิดแสง

$x_{2,i}$ คือ ตำแหน่งในแกน x_2 ของหึ่งห้อยตัวรับแสง

$x_{2,j}$ คือ ตำแหน่งในแกน x_2 ของหึ่งห้อยตัวกำเนิดแสง

โดยระยะและทิศทางที่หึ่งห้อยตัวรับแสงจะเคลื่อนที่เข้าหาหึ่งห้อยตัวกำเนิดแสง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{x}_i^{k+1} = \vec{x}_i^k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \beta_{ij} (\vec{x}_j^k - \vec{x}_i^k) + \alpha \vec{\epsilon}_i \quad (2.55)$$

เมื่อ $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots)$

$\vec{\epsilon} = (\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots)$

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots = \text{rand} - 0.5$

โดยที่ \vec{x}_i^{k+1} คือ ตำแหน่งหึ่งห้อยตัวรับแสงตัวที่ i หลังเคลื่อนที่

\vec{x}_i^k คือ ตำแหน่งหึ่งห้อยตัวรับแสงตัวที่ i ก่อนเคลื่อนที่

\vec{x}_j^k คือ ตำแหน่งหึ่งห้อยตัวกำเนิดแสงตัวที่ j ก่อนเคลื่อนที่

N คือ จำนวนหึ่งห้อยทั้งหมด

α คือ พารามิเตอร์การสุ่ม กำหนดค่าครั้งเดียวก่อนหึ่งห้อยเคลื่อนที่ มีผลต่อความรวดเร็วในการลู่เข้าของคำตอบ

$\vec{\epsilon}_i$ คือ เวกเตอร์การเดินสุ่มของหึ่งห้อยตัวที่ i

rand คือ ค่าสุ่มตั้งแต่ 0-1 โดยสุ่มค่าทุกครั้งที่หึ่งห้อยมีการเคลื่อนที่และสุ่มแตกต่างกันสำหรับหึ่งห้อยแต่ละตัว

จากสมการที่ (3.4) จะเห็นได้ว่า หากหิ่งห้อยไม่ส่องแสง ($\beta_0 = 0$) แล้ว หิ่งห้อยทุกตัวจะเคลื่อนที่แบบสุ่มตลอดเวลา โดยหิ่งห้อยจะไม่ลู่เข้าคำตอบที่เหมาะสมและไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้ ถึงแม้หิ่งห้อยจะเจอคำตอบที่เหมาะสมแล้ว แต่จะไม่สามารถดึงดูดหิ่งห้อยตัวอื่น ๆ มายังตำแหน่งนั้นได้ แล้วหิ่งห้อยตัวดังกล่าวก็จะเคลื่อนที่แบบสุ่มหึ่งค่าที่เหมาะสมไปหาคำตอบอื่นต่อไป โดยไม่มีจุดหมาย

สัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) มีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนตัวของหิ่งห้อย ในทางปฏิบัติแล้วมักปรับค่าให้เหมาะสมฟังก์ชันปัญหา สำหรับพื้นที่ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาก หิ่งห้อยจะอยู่ห่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางควรมีค่าต่ำเพื่อให้หิ่งห้อยสามารถส่องแสงหากันได้ หากค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางมีมากเกินไป ($\gamma \rightarrow \infty$) หิ่งห้อยจะมองไม่เห็นกันและมีพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบสุ่ม นั่นคือเป็นเหมือนกับหิ่งห้อยไม่ส่องแสง หากสัมประสิทธิ์การกรองแสงมีค่าน้อยเกินไป ($\gamma \rightarrow 0$) แสงสว่างจากหิ่งห้อยตัวกำเนิดแสงจะไม่ลดลงตามระยะห่างระหว่างหิ่งห้อย และจะทำให้หิ่งห้อยเคลื่อนเข้าหาตัวที่สว่างที่สุดเท่าที่มองเห็นส่งผลให้หิ่งห้อยจะไม่พบคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะที่ ซึ่งเป็นพฤติกรรมเดียวกันกับวิธีความฉลาดแบบกลุ่ม (Particle Swarm Optimization) โดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลางอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 (Xin She Yang 2010)

การลู่เข้าของคำตอบขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การสุ่ม (α) หากพารามิเตอร์การสุ่มมีค่ามาก ($\alpha \rightarrow \infty$) ระยะการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยในแต่ละครั้งจะมากตามไปด้วย ทำให้หิ่งห้อยสามารถสำรวจพื้นที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้อย่างรวดเร็ว แต่หากพารามิเตอร์การสุ่มมีค่ามากเกินไปจะทำให้หิ่งห้อยเคลื่อนที่ได้เร็วเกินกว่าจะถูกดึงดูดจากแสงของหิ่งห้อยตัวอื่น ทำให้หิ่งห้อยมีพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบสุ่มและไม่ลู่เข้าหาคำตอบ หากพารามิเตอร์การสุ่มมีค่าน้อย ($\alpha \rightarrow 0$) จะทำให้ระยะการเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยในแต่ละครั้งน้อย ทำให้สำรวจค่าได้ละเอียดยิ่งขึ้น แต่ใช้จำนวนครั้งในการเคลื่อนที่มากขึ้น หากมีพารามิเตอร์การสุ่มค่าน้อยเกินไปหิ่งห้อยก็จะไม่ลู่เข้าคำตอบในเวลาที่กำหนด อีกทั้งยังไม่มีโอกาสสำรวจค่าที่เป็นไปได้อื่น ๆ รอบๆตัว ทำให้ค่าที่ได้อาจยังไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด และหากหิ่งห้อยตัวรับแสงอยู่ห่างจากหิ่งห้อยตัวอื่นมากๆ จนไม่สามารถรับแสงได้ หิ่งห้อยตัวนั้น ๆ จะหยุดการเคลื่อนที่ ไม่ลู่เข้าหาคำตอบเช่นกัน

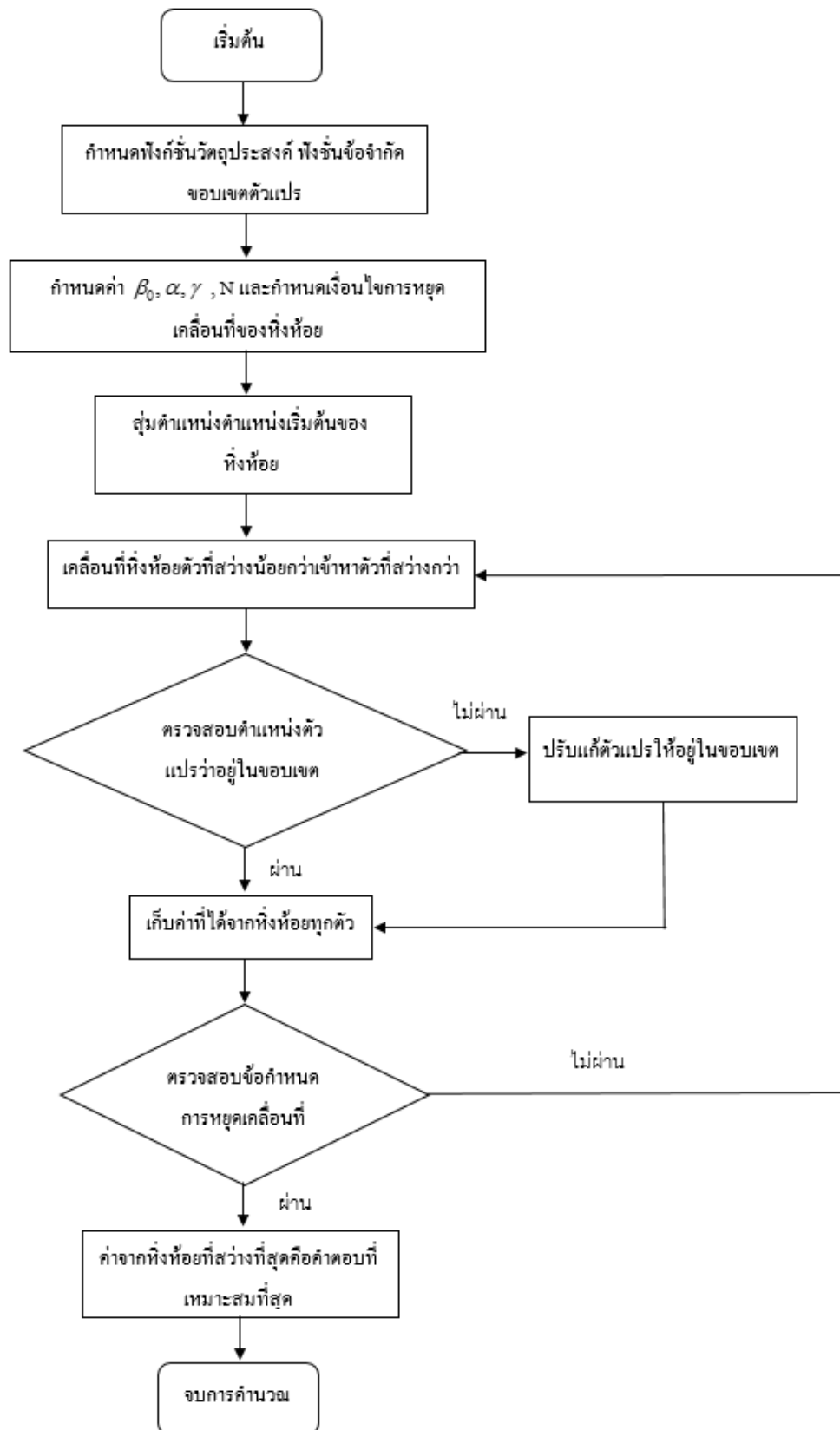
จุดเด่นของอัลกอริทึมหิ่งห้อยคือการสำรวจพบคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะที่ทั้งหมด เพื่อเป็นการรับรองว่าหิ่งห้อยสามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมแท้จริงอย่างแน่นอน แต่ทั้งนี้จะต้องกำหนดจำนวนหิ่งห้อย (N) สัมประสิทธิ์การกรองแสง (γ) และพารามิเตอร์การสุ่ม (α) ให้เหมาะสมกับปัญหา

2.6.3 การแก้ปัญหาแบบมีข้อจำกัด (Constraint handling)

เนื่องจากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมหึ่งห้อย เป็นวิธีการแก้ปัญหาสำหรับฟังก์ชันแบบไม่มีข้อจำกัด (Unconstraint function) แต่ปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาแบบมีข้อจำกัด (Constraint function) ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.4 งานวิจัยนี้ได้เสนอการแก้ปัญหาฟังก์ชันข้อจำกัดโดยวิธีไม่ยอมรับค่าที่อยู่นอกฟังก์ชันข้อจำกัด หากหึ่งห้อยเคลื่อนที่ออกนอกฟังก์ชันข้อจำกัดแล้วให้ไม่ยอมรับค่าหึ่งห้อยตัวดังกล่าวและให้หึ่งห้อยตัวนั้นกลับไปใช้ค่าเดิมก่อนหน้า

2.6.4 ขั้นตอนการดำเนินการของอัลกอริทึมหึ่งห้อย

- ขั้นตอนการหาค่าตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมหึ่งห้อย มีทั้งหมด 10 ขั้นตอน ดังนี้
- | | |
|---------------|--|
| ขั้นตอนที่ 1 | กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัดและกำหนดขอบเขตของตัวแปร |
| ขั้นตอนที่ 2 | กำหนดความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสง(โดยทั่วไปมักใช้เท่ากับ 1 , $\beta_0 = 1$) จำนวนหึ่งห้อย ค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง และตัวแปรระยะการเคลื่อนที่ จำนวนครั้งการเคลื่อนที่ หรือเงื่อนไขการหยุดเคลื่อนที่ของหึ่งห้อย |
| ขั้นตอนที่ 3 | สุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของหึ่งห้อยให้กระจายทั่วพื้นที่ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และอยู่ในขอบเขตที่กำหนด แล้วเก็บค่าจากตำแหน่งของหึ่งห้อยทุกตัว |
| ขั้นตอนที่ 4 | ตรวจสอบว่าหึ่งห้อยที่สุ่มออกมาอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัดหรือไม่ หากไม่ ให้สุ่มตัวที่ไม่ผ่านใหม่ จนกว่าจะอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัดทุกตัวแล้วจึงดำเนินการต่อขั้นตอนที่ 5 |
| ขั้นตอนที่ 5 | ทำการเคลื่อนที่หึ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยกว่าเข้าหาตัวที่สว่างมากกว่าทุกตัวด้วยสมการที่ (2.55) |
| ขั้นตอนที่ 6 | ตรวจสอบว่าตัวแปรอยู่ในขอบเขตหรือไม่ หากไม่ ให้ปรับแก้ให้อยู่ในขอบเขต |
| ขั้นตอนที่ 7 | ตรวจสอบว่าหึ่งห้อยทุกตัวอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัดหรือไม่ หากไม่ ให้ปรับแก้ให้อยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัด |
| ขั้นตอนที่ 8 | เปรียบเทียบค่าที่ได้จากหึ่งห้อยทุกตัว เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเคลื่อนที่ครั้งนี้ |
| ขั้นตอนที่ 9 | ตรวจสอบข้อกำหนดการหยุดเคลื่อนที่ หากผ่านข้อกำหนดให้ดำเนินการต่อขั้นตอนที่ 10 หากไม่ผ่านให้ดำเนินซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 5 |
| ขั้นตอนที่ 10 | ใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 9 เป็นคำตอบค่าที่เหมาะสมที่สุด และจบการคำนวณ |



รูปที่ 2.11 ผังขั้นตอนวิธีอัลกอริทึมหิ่งห้อย

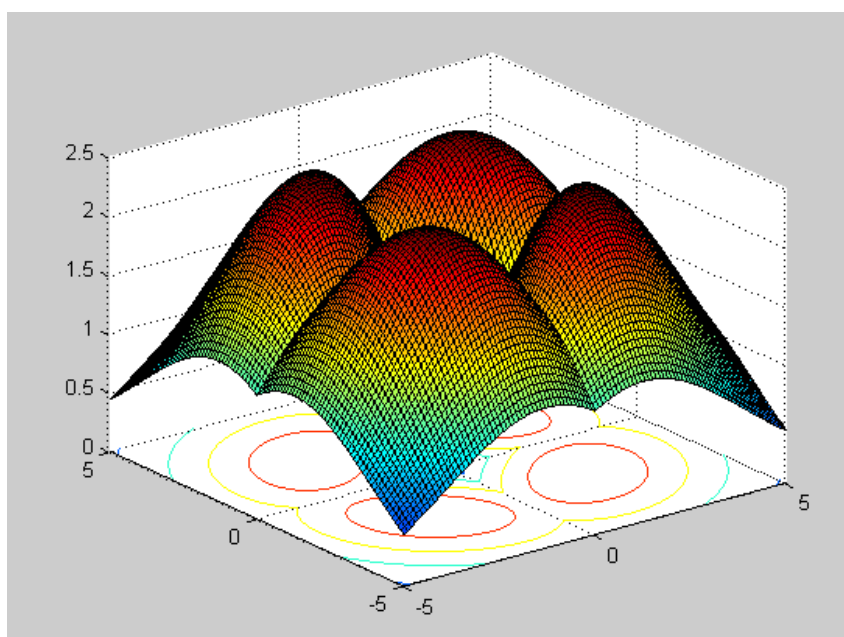
2.6.5 ตัวอย่างการคำนวณด้วยอัลกอริทึมหิ่งห้อย

จงหาค่าสูงสุดของ $f(x, y) = (|x| + |y|) \times \exp(-0.0625(x^2 + y^2))$ (Xin She Yang , 2010)

โดยที่มีฟังก์ชันข้อจำกัดคือ $(x, y) \in [-5, 5] \times [-5, 5]$

วิธีทำ

เมื่อนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปวาดกราฟ 3 มิติจะเห็นว่าฟังก์ชันดังกล่าวมีจุดสูงสุดอยู่ 4 จุด ได้แก่ ตำแหน่งที่ (2,2) (-2,2) (2,-2) และ (-2,-2) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

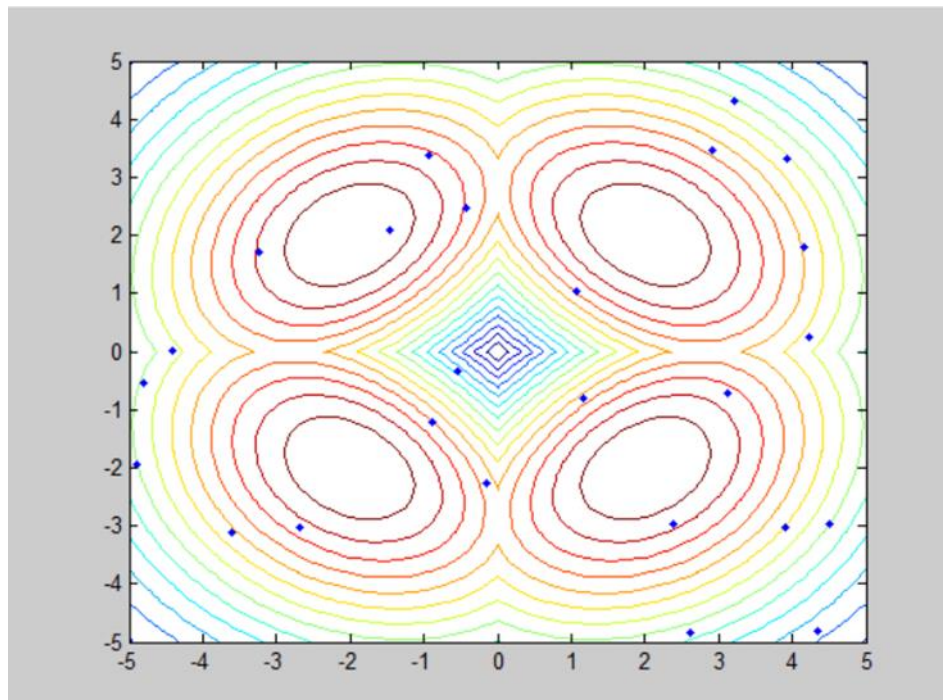


รูปที่ 2.12 แผนภาพสามมิติสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์

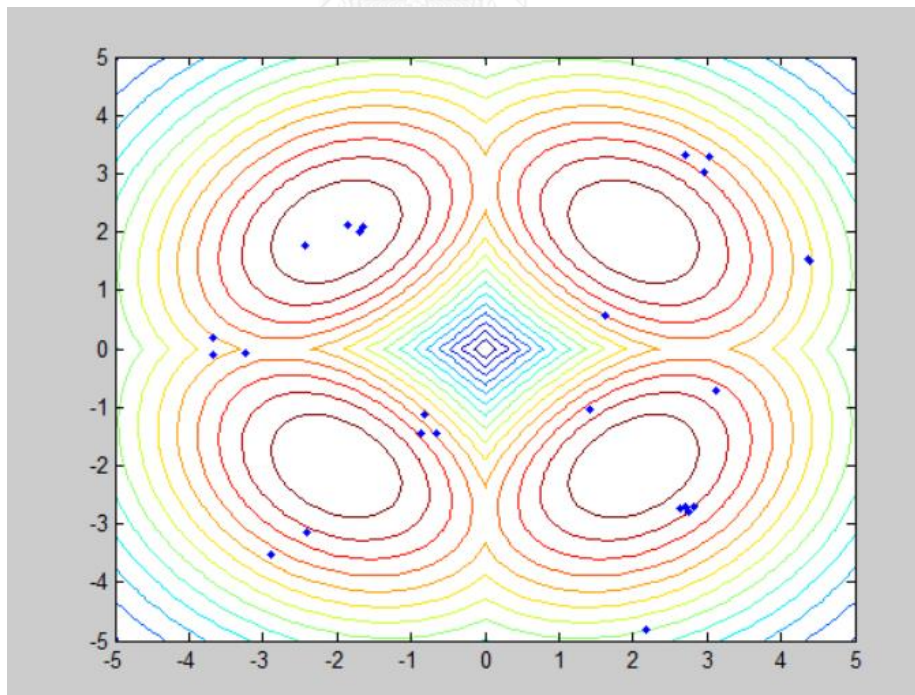
3. เริ่มใช้อัลกอริทึมหิ่งห้อยโดยกำหนดค่าดังต่อไปนี้

$\alpha = 0.2$, $\gamma = 1.0$, $\beta_0 = 1$, จำนวนหิ่งห้อย 25 ตัว และจำกัดการเคลื่อนที่ทั้งหมด 20 ครั้งโดยกำหนดความสว่างของหิ่งห้อยแปรผันกับคำตอบของฟังก์ชัน ยิ่งคำตอบมีค่ามาก หิ่งห้อยก็ยิ่งสว่างมาก

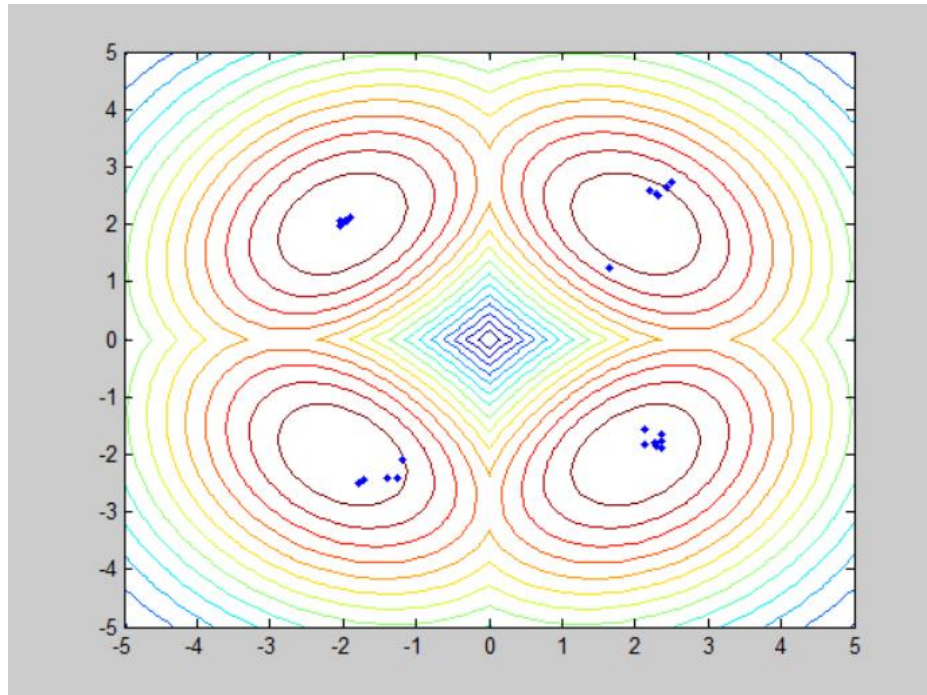
2. สุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของหิ่งห้อยโดยที่หิ่งห้อยทุกตัวอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัด โดยตำแหน่งของหิ่งห้อยแสดงดังรูปที่ 2.13
3. ทำการเคลื่อนที่หิ่งห้อยจนครบกำหนด 20 ครั้ง ตำแหน่งสุดท้ายของหิ่งห้อยแสดงในรูปที่ 2.17
4. ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าที่สูงสุดของฟังก์ชันคือ 2.4261 ที่ตำแหน่ง (-2.0167 , -1.9953) โดยค่าที่ได้จากตำแหน่งสุดท้ายของหิ่งห้อยทุกตัว แสดงในตารางที่ 2



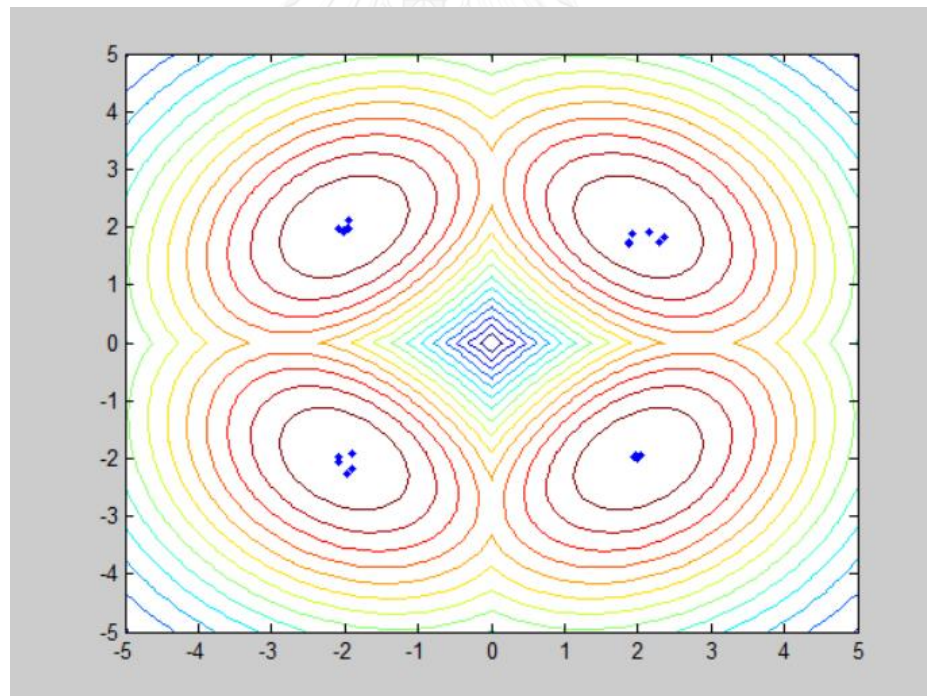
รูปที่ 2.13 ตำแหน่งเริ่มต้นของหิ้งห้อย



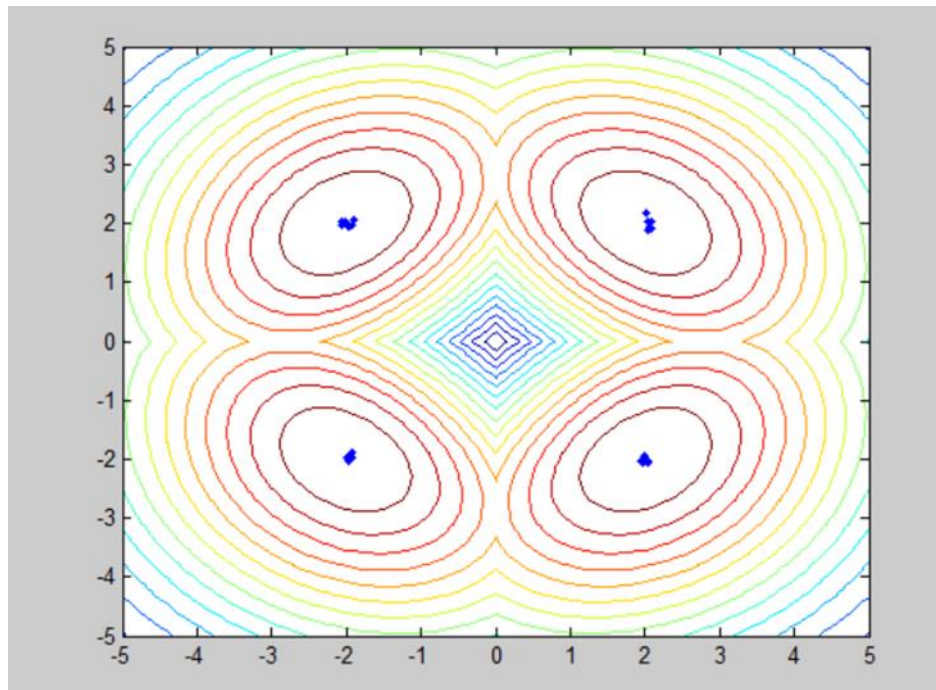
รูปที่ 2.14 ตำแหน่งของหิ้งห้อยหลังจากการเคลื่อนที่ 5 ครั้ง



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งของหิ้งห้อยหลังจากการเคลื่อนที่ 10 ครั้ง



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งของหิ้งห้อยหลังจากการเคลื่อนที่ 15 ครั้ง



รูปที่ 2.17 ตำแหน่งของหิ้งห้อยหลังจากการเคลื่อนที่ 20 ครั้ง

ตารางที่ 2.1 ตำแหน่งและคำตอบของฟังก์ชันหลังการเคลื่อนที่ 20 ครั้ง

ลำดับความเหมาะสม	ตำแหน่งแกน x	ตำแหน่งแกน y	คำตอบของฟังก์ชัน
1	2.06466	2.36706	2.39211
2	-1.82717	2.37100	2.39800
3	-1.66485	2.16848	2.40273
4	2.14077	-2.21328	2.40732
5	1.72161	-2.19678	2.40805
6	2.06558	-2.24099	2.40994
7	-1.92990	1.76988	2.41020
8	1.92024	2.22191	2.41621
9	-1.82236	2.13951	2.41829
10	2.14772	-2.05274	2.41945
11	1.81894	2.05863	2.41948
12	1.84560	2.06914	2.42123
13	-1.95943	-1.89258	2.42242
14	-2.06753	-1.90179	2.42390
15	-2.07364	-2.02403	2.42450
16	-1.98560	2.08576	2.42459
17	-2.07048	2.00006	2.42500
18	-2.01593	-1.93999	2.42539
19	1.96424	1.97564	2.42556
20	-2.03330	-2.02749	2.42556
21	-1.97274	2.04409	2.42569
22	1.96729	-2.03522	2.42577
23	2.03120	1.96588	2.42580
24	-2.02659	-2.01255	2.42588
25	-2.01670	-1.99527	2.42607

บทที่ 3

ขั้นตอนการวิจัย

3.1 ขอบของตัวแปร

ในการวิจัยนี้จะทำการออกแบบโครงสร้างสองประเภทได้แก่ คานและเสา ดังนั้นตัวแปรที่จะใช้ในการคำนวณขนาดของโครงสร้างจะประกอบด้วย ความกว้าง ความลึก เหล็กเสริมล่างและเหล็กเสริมบนสำหรับคาน เหล็กปลอกสำหรับคาน และเหล็กยื่นสำหรับเสา โดยขอบเขตตัวแปรแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณราคาได้แก่ ราคาคอนกรีต ราคาเหล็กข้ออ้อย ราคาเหล็กกลมและราคาไม้แบบ โดยจะใช้ราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นราคาวัสดุก่อสร้าง ส่วนกลาง กรุงเทพมหานคร ของกระทรวงพาณิชย์ ประจำเดือนเมษายน พ.ศ. 2558 โดยยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม เช่นเดียวกับงานวิจัย การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวของ สิริวิวัฒน์ จุ้ยสุวรรณทัต และการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีฮาร์โมนิเสิร์ชของ อัฐพล เตชะรัตนประเสริฐ เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีหาค่าที่เหมาะสม โดยราคาของวัสดุก่อสร้างแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตและตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวแปร	ขอบเขต	หน่วย	หมายเหตุ
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	280	กก./ตร.ซม.	-
กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม	4000	กก./ตร.ซม.	-
กำลังรับแรงดึงของเหล็กปลอก	2400	กก./ตร.ซม.	-
ชิ้นส่วนคาน			
ความกว้าง (b)	0.20-0.50	เมตร	ปรับขึ้นลงครั้งละ 0.025
ความลึก (t)	0.20-0.50	เมตร	ปรับขึ้นลงครั้งละ 0.025
$(t-d), d'$	0.05-0.065	เมตร	ใช้ 0.065 กรณีที่ 1-4
ขนาดเหล็กเสริมหลัก	DB12-DB28	-	-
ขนาดเหล็กปลอก	RB9	-	-
จำนวนเหล็กเสริมหลัก	2-10	เส้น	-
จำนวนเหล็กเสริมพิเศษ	0-10	เส้น	-

ชิ้นส่วนเสา			
ความกว้าง (b)	0.20-0.50	เมตร	ปรับขึ้นลงครั้งละ 0.025
ความลึก (t)	0.20-0.50	เมตร	ปรับขึ้นลงครั้งละ 0.025
$(t-d), d'$	0.065	เมตร	
ขนาดเหล็กเสริมหลัก	DB12-DB28	-	-
จำนวนเหล็กเสริมหลักด้านเดียว	2-10	เส้น	-

ตารางที่ 3.2 ราคาวัสดุก่อสร้าง

วัสดุ	ราคาต่อหน่วย	หน่วย
คอนกรีต	2550	บาท/ลูกบาศก์เมตร
เหล็กเสริม	16.89	บาท/กิโลกรัม
เหล็กปลอก	17.44	บาท/กิโลกรัม
ไม้แบบ	150	บาท/ตารางเมตร

3.2 รายละเอียดการเสริมเหล็ก

สำหรับคานจะทำการจัดเหล็กเสริมเป็นแยกเป็นเหล็กเสริมรับแรงอัดและเหล็กเสริมรับแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 , 3.2 และ 3.3 สำหรับเสาจะไม่มีการกระจายเหล็กทั่วหน้าตัดเสา แต่จะแยกเหล็กเป็นเหล็กรับแรงดึงและแรงอัดอย่างละครึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยในงานวิจัยนี้จะไม่ทำการพิจารณาจัดเรียงเหล็กเสริมเพื่อใช้ในการก่อสร้างจริงได้เนื่องจากการคำนวณมีความซับซ้อนเกินไป ดังนั้นผลที่ได้ต้องทำการปรับแก้เหล็กเสริมให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้งานจริง

3.3 ตัวแปรการออกแบบอย่างเหมาะสม

3.3.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว

งานวิจัยนี้มีกรณีศึกษาที่เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว 2 ตัวอย่าง ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวมีฐานรับแบบยึดหมุนและแบบล้อยเลื่อน ในกรณีศึกษาที่ 1 และ คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีฐานรองรับทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น ในกรณีศึกษาที่ 2 และ 4

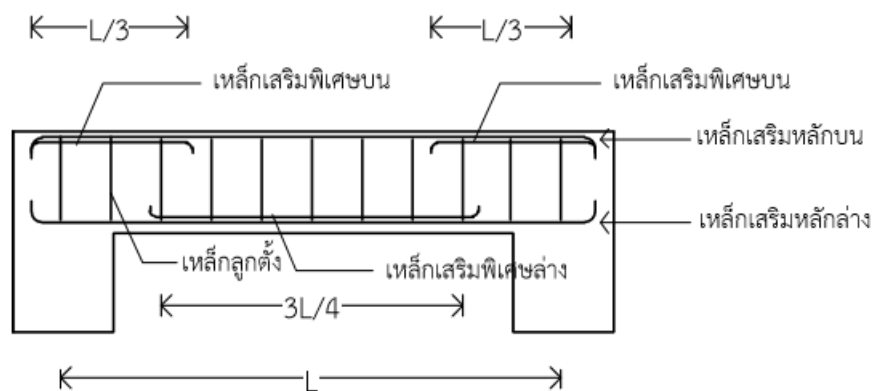
คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวมีฐานรับแบบยึดหมุนและแบบล้อยเลื่อน มีตัวแปรออกแบบทั้งหมด 8 ตัวแปร

1. ความกว้าง
2. ความลึก
3. ขนาดเหล็กเสริมหลักบน
4. จำนวนเหล็กเสริมหลักบน
5. ขนาดเหล็กเสริมหลักล่าง
6. จำนวนเหล็กเสริมหลักล่าง
7. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษกลางล่าง
8. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษกลางล่าง

คานคองกรีตเสริมเหล็กมีฐานรองรับทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น มีตัวแปรรูปแบบทั้งหมด

12 ตัวแปร

1. ความกว้าง
2. ความลึก
3. ขนาดเหล็กเสริมหลักบน
4. จำนวนเหล็กเสริมหลักบน
5. ขนาดเหล็กเสริมหลักล่าง
6. จำนวนเหล็กเสริมหลักล่าง
7. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษกลางล่าง
8. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษกลางล่าง
9. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษบนซ้าย
10. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษบนซ้าย
11. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษบนขวา
12. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษบนขวา

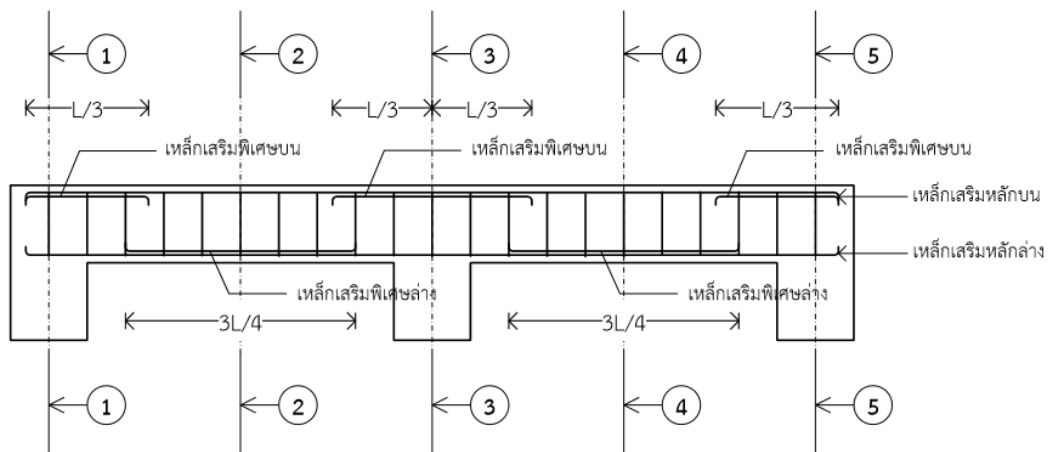


รูปที่ 3.1 การเสริมเหล็กคานช่วงเดียว

3.3.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ช่วง

คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ช่วง มีตัวแปรรูปแบบทั้งหมด 16 ตัวแปร งานวิจัยนี้มีคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ช่วง ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 5

1. ความกว้าง
2. ความลึก
3. ขนาดเหล็กเสริมหลักบน
4. จำนวนเหล็กเสริมหลักบน
5. ขนาดเหล็กเสริมหลักล่าง
6. จำนวนเหล็กเสริมหลักล่าง
7. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษหน้าตัด 1-1
8. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษ หน้าตัด 1-1
9. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษหน้าตัด 2-2
10. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษ หน้าตัด 2-2
11. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษหน้าตัด 3-3
12. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษ หน้าตัด 3-3
13. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษหน้าตัด 4-4
14. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษ หน้าตัด 4-4
15. ขนาดเหล็กเสริมพิเศษหน้าตัด 5-5
16. จำนวนเหล็กเสริมพิเศษ หน้าตัด 5-5

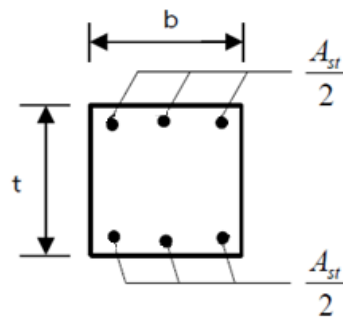


รูปที่ 3.2 การเสริมเหล็กคาน 2 ช่วง

3.3.4 เสา

เสามีตัวแปรรูปแบบทั้งหมด 4 ตัวแปร งานวิจัยนี้มีเสาได้แก่ กรณีศึกษาที่ 3 และ 4

1. ความกว้าง
2. ความลึก
3. ขนาดเหล็กเสริมหลัก
4. จำนวนเหล็กเสริมหลัก

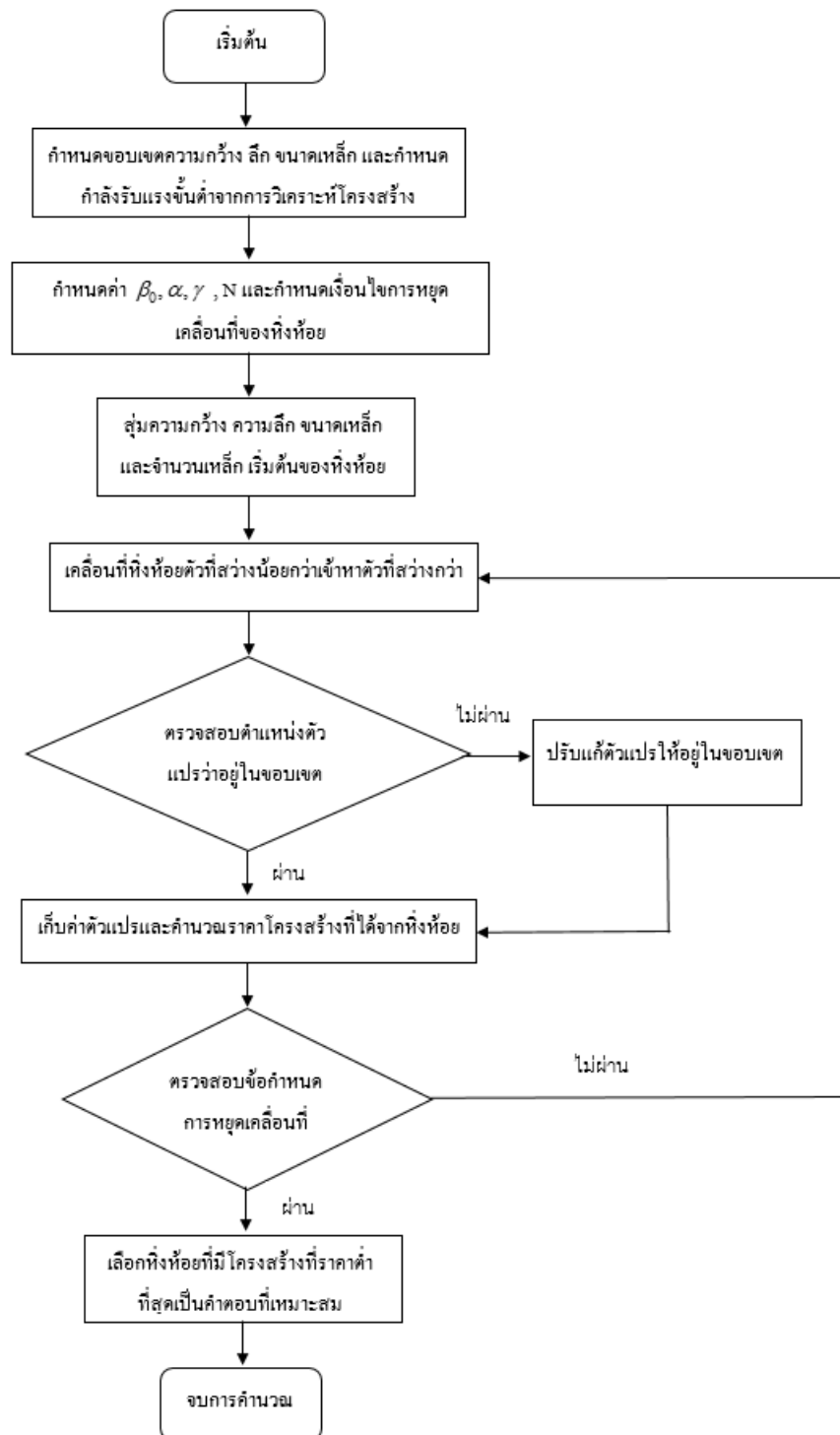


รูปที่ 3.4 การเสริมเหล็กเสา

3.4 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมหึ่งห้อย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ภาษา JAVA ในการพัฒนาโปรแกรมออกแบบอย่างเหมาะสม โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 กำหนดกำลังรับแรงขั้นต่ำของโครงสร้าง
- ขั้นตอนที่ 2 กำหนดความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสงเท่ากับ $1 (\beta_0 = 1)$, จำนวนหึ่งห้อย (N) , ค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงของตัวกลาง (γ) , และตัวแปรระยะการเคลื่อนที่ (α) และกำหนดจำนวนครั้งการเคลื่อนที่ หรือเงื่อนไขการหยุดเคลื่อนที่ของหึ่งห้อย
- ขั้นตอนที่ 3 สุ่มความกว้างและความลึกของหน้าตัดแล้วทำการคำนวณเหล็กเสริม หรือสุ่มความกว้างความยาวและปริมาณเหล็กเสริม โดยสุ่มตัวแปรทุกตัวให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด
- ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบหน้าตัดทุกตัวว่าสามารถรับแรงได้ตามกำหนดหรือไม่ หากไม่ได้ ให้ทำการสุ่มในขั้นตอนที่ 3 ใหม่จนกว่าทุกหน้าตัดจะสามารถรับแรงได้ตามกำหนด
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการเคลื่อนที่หึ่งห้อยตัวที่สว่างน้อยกว่าเข้าหาตัวที่สว่างมากกว่า โดยให้หึ่งห้อยที่อยู่บริเวณตำแหน่งที่โครงสร้างราคาถูกกว่าส่องสว่าง มากกว่าตัวที่โครงสร้างราคาแพงกว่า
- ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบว่าตัวแปรอยู่ในขอบเขตหรือไม่ และปรับแก้ตัวแปรทั้งหมดให้อยู่ในขอบเขต
- ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบว่าโครงสร้างทุกตัวสามารถรับแรงได้ตามข้อกำหนดหรือไม่ หากโครงสร้างไม่สามารถรับแรงได้ ให้ไม่ยอมรับโครงสร้างนั้น และกลับไปใช้โครงสร้างเดิมในรอบการเคลื่อนตัวก่อนหน้า
- ขั้นตอนที่ 8 เปรียบเทียบโครงสร้างที่ได้จากหึ่งห้อยทุกตัว เพื่อหาโครงสร้างที่ราคาต่ำที่สุด
- ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบข้อกำหนดการหยุดเคลื่อนที่ หากผ่านข้อกำหนดให้ใช้โครงสร้างที่ราคาต่ำที่สุดเป็นโครงสร้างที่เหมาะสม หากยังถึงข้อกำหนดการหยุดเคลื่อนที่ ให้ดำเนินซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 5



รูปที่ 3.5 ผังขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างอย่างเหมาะสมด้วยวิธีอัลกอริทึมหิ่งห้อย

บทที่ 4

ตัวอย่างการออกแบบอย่างเหมาะสม

4.1 กรณีศึกษาการออกแบบอย่างเหมาะสม

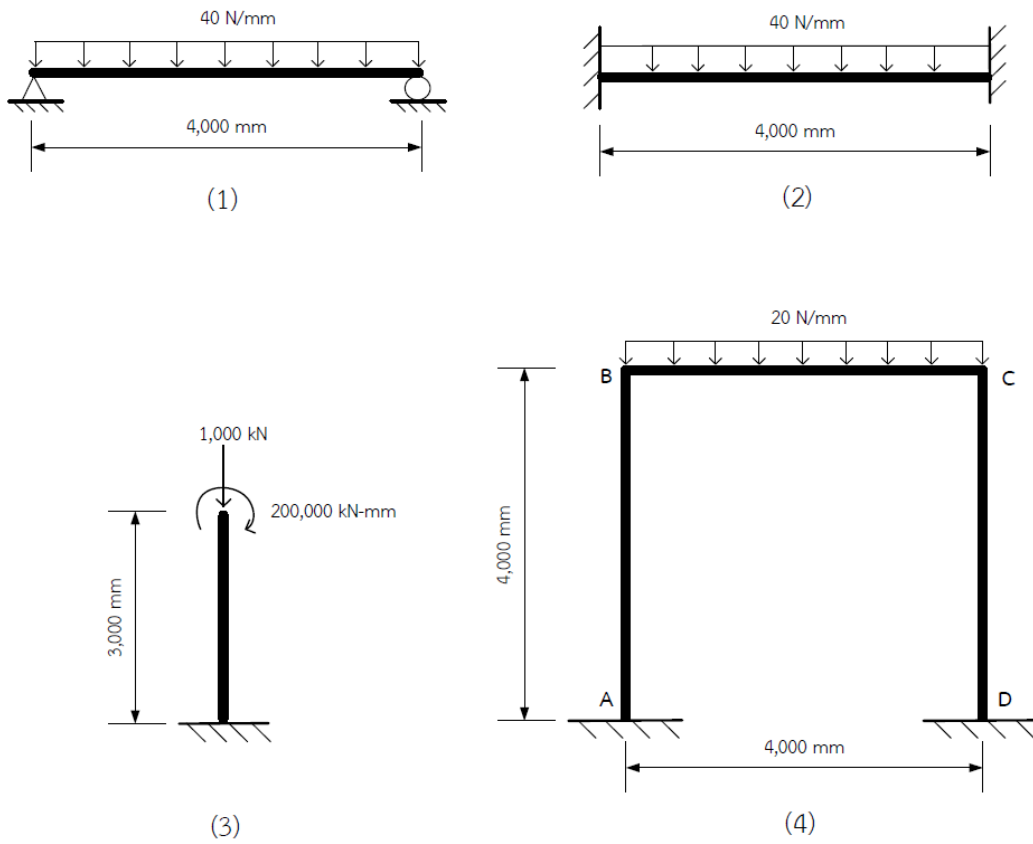
งานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่างการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีอัลกอริทึมหึ่งห้อยและเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยก่อนหน้าทั้งหมด 6 ตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว มีฐานรับแบบยึดหมุน และแบบล้อเลื่อน
2. คานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีฐานรองรับทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น
3. เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก มีฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่นและปราศจากการยึดรั้ง
4. โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานรองรับแบบยึดแน่น
5. คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 2×2 ช่วง รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้นทางเดียว
6. คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 3×3 ช่วง รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้นทางเดียว

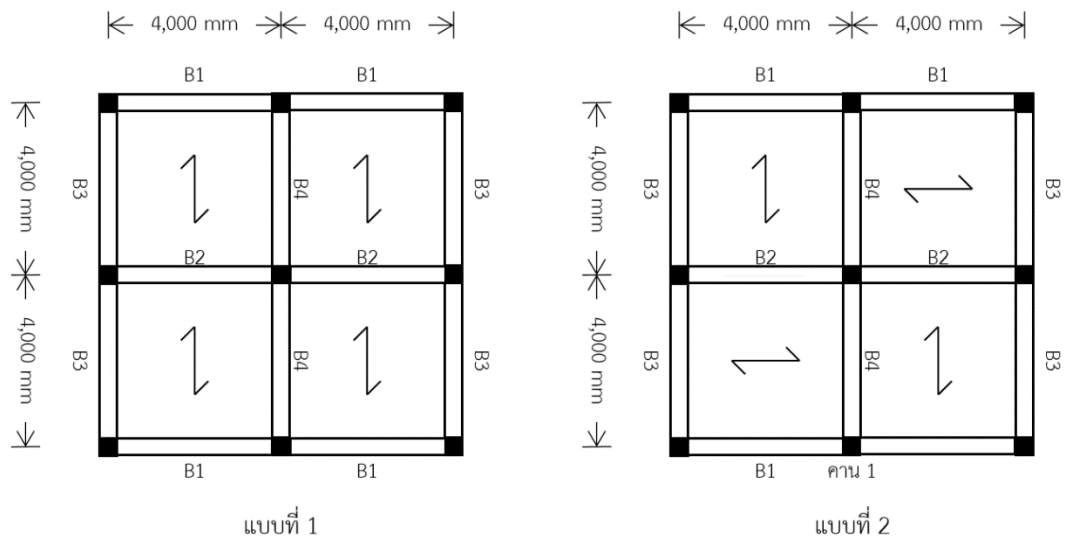
โดยน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างจะเป็นน้ำหนักจรทั้งหมด ลักษณะของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.1 , 4.2 และ 4.3

สำหรับกรณีศึกษาที่ 1-4 นั้นน้ำหนักที่กระทำจะถือเป็นน้ำหนักบรรทุกจรเท่านั้น สำหรับกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 นั้นจะสมมติให้พื้นทางเดียวคือแผ่นพื้นสำเร็จรูป Hollow Core ขนาด 120×600 มม. และจำแนกคานเป็น 4 ชนิดได้แก่ B1 B2 B3 และ B4 โดยมีน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ดังนี้

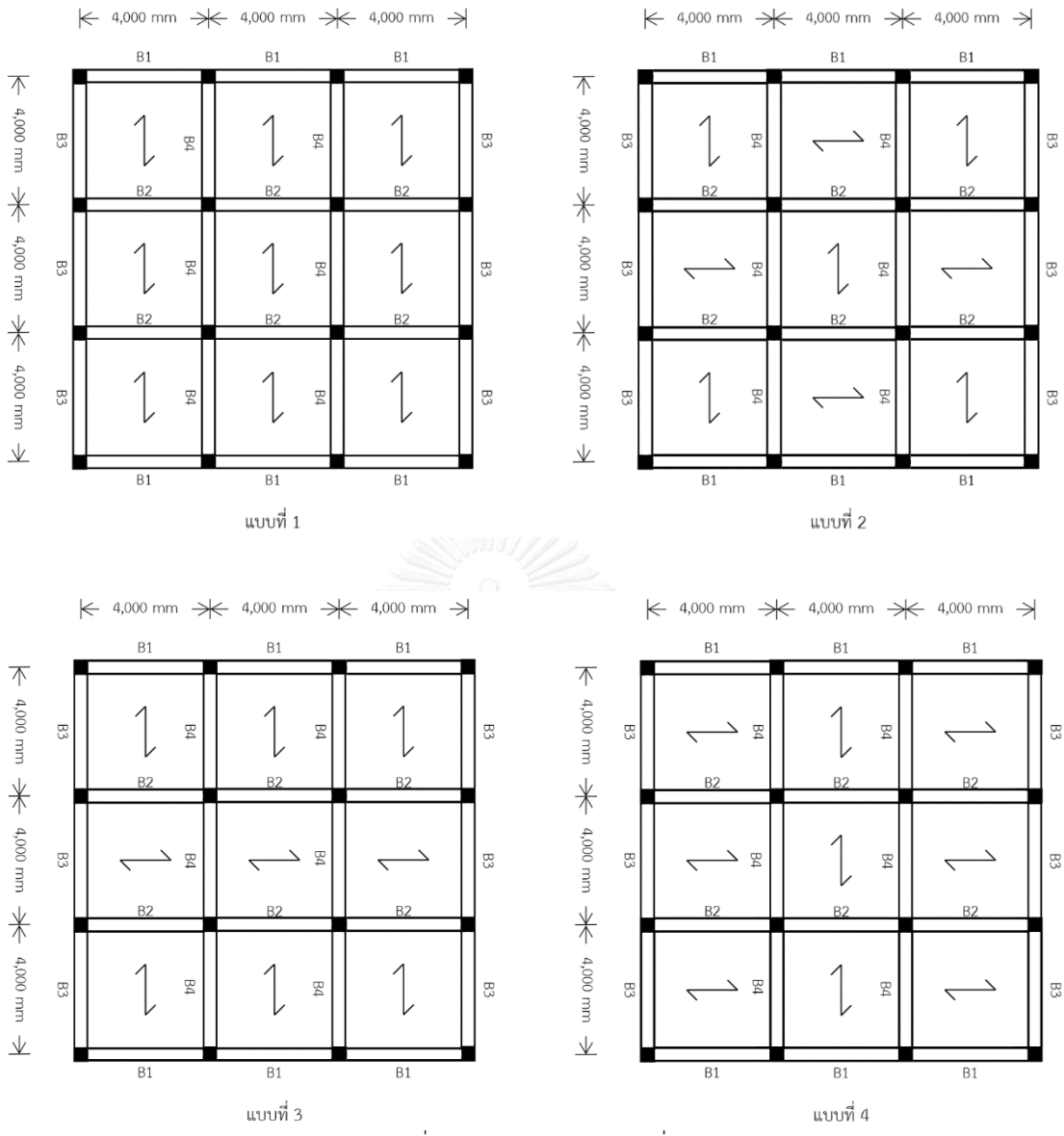
- พื้นสำเร็จรูป Hollow Core รวมคอนกรีตทับหน้า 5 เซนติเมตร หน้า 331 กก./ตร.ม.
- น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมบนพื้น (Super-Imposed dead load) หน้า 120 กก./ตร.ม.
- กำแพงวางบนคานริมนอก สูง 3 เมตร หน้า 660 กก./ตร.ม.
- น้ำหนักบรรทุกจร จะแยกเป็น 2 กรณี ได้แก่ 200 กก./ตร.ม.และ 600 กก./ตร.ม.



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 1-4



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 5



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 6

4.2 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการออกแบบโครงสร้างโดยอัลกอริทึมหึ่งห้อย

ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหึ่งห้อยขึ้นอยู่กับกำหนัดจำนวนหึ่งห้อย (N) สัมประสิทธิ์การกรองแสง (γ) และพารามิเตอร์การสุ่ม (α) ให้เหมาะสมกับปัญหา ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทดลองจับคู่หาค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสงและพารามิเตอร์การสุ่ม โดยกำหนัดจำนวนหึ่งห้อย $N = 50$ ให้หึ่งห้อยเคลื่อนที่ 1000 รอบต่อหึ่งห้อยคู่สัมประสิทธิ์การกรองแสงและพารามิเตอร์การสุ่ม และทดลองคำนวณคู่ละ 3 ครั้ง โดยใช้กรณีศึกษาที่ 1 เป็นตัวแทนในการทดลอง พบว่ามีค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ให้โครงสร้างที่มีราคาต่ำที่สุดและมีความเสถียรในการลู่เข้าหาค่าตอบอยู่จำนวนหลายคู่ด้วยกัน ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สัมประสิทธิ์การกรองแสง $\gamma = 1.0$ และพารามิเตอร์การสุ่ม $\alpha = 1.0$ ในการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาทั้งหมด

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

γ	α	ราคาโครงสร้าง			γ	α	ราคาโครงสร้าง			γ	α	ราคาโครงสร้าง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0.25	0.25	2864	2821	2940	0.50	0.25	2864	2902	2847	0.75	0.25	2770	2770	2787
0.25	0.50	2880	2835	2902	0.50	0.50	2821	2787	2821	0.75	0.50	2770	2770	2787
0.25	0.75	2821	2902	2847	0.50	0.75	2815	2821	2770	0.75	0.75	2770	2770	2770
0.25	1.00	2902	2775	2821	0.50	1.00	2770	2770	2770	0.75	1.00	2770	2787	2770
0.25	1.25	2821	2902	2821	0.50	1.25	2797	2775	2770	0.75	1.25	2770	2770	2770
0.25	1.50	2821	2902	2775	0.50	1.50	2770	2769	2775	0.75	1.50	2815	2770	2770
0.25	1.75	2770	2835	2891	0.50	1.75	2775	2770	2811	0.75	1.75	2770	2770	2770
0.25	2.00	2860	2902	2835	0.50	2.00	2811	2770	2770	0.75	2.00	2835	2770	2811
0.25	2.25	2770	2770	2864	0.50	2.25	2770	2770	2835	0.75	2.25	2862	2835	2787
0.25	2.50	2770	2770	2770	0.50	2.50	2873	2860	2864	0.75	2.50	2862	2852	2770
0.25	2.75	2770	2770	2770	0.50	2.75	2873	2885	2770	0.75	2.75	2770	2821	2821
0.25	3.00	2818	2770	2770	0.50	3.00	2835	2835	2838	0.75	3.00	2770	2797	2815
0.25	3.25	2787	2770	2770	0.50	3.25	2818	2878	2770	0.75	3.25	2802	2840	2775
0.25	3.50	2846	2811	2770	0.50	3.50	2770	2818	2821	0.75	3.50	2770	2833	2835
0.25	3.75	2821	2770	2770	0.50	3.75	2770	2811	2787	0.75	3.75	2840	2821	2775
0.25	4.00	2862	2864	2831	0.50	4.00	2770	2862	2867	0.75	4.00	2833	2753	2753
0.25	4.25	2770	2797	2770	0.50	4.25	2770	2862	2852	0.75	4.25	2787	2844	2818
0.25	4.50	2871	2770	2821	0.50	4.50	2818	2787	2835	0.75	4.50	2875	2885	2797
0.25	4.75	2797	2787	2797	0.50	4.75	2787	2818	2831	0.75	4.75	2877	2770	2867
0.25	5.00	2865	2821	2770	0.50	5.00	2821	2753	2753	0.75	5.00	2787	2824	2867

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (ต่อ)

γ	α	ราคาโครงสร้าง			γ	α	ราคาโครงสร้าง			γ	α	ราคาโครงสร้าง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1.00	0.25	2770	2753	2770	1.25	0.25	2770	2815	2770	1.50	0.25	2770	2770	2770
1.00	0.50	2770	2770	2770	1.25	0.50	2770	2770	2770	1.50	0.50	2770	2770	2770
1.00	0.75	2787	2770	2770	1.25	0.75	2770	2770	2770	1.50	0.75	2770	2770	2770
1.00	1.00	2770	2770	2770	1.25	1.00	2770	2770	2770	1.50	1.00	2770	2770	2770
1.00	1.25	2770	2770	2770	1.25	1.25	2770	2770	2770	1.50	1.25	2770	2770	2769
1.00	1.50	2770	2770	2770	1.25	1.50	2770	2770	2770	1.50	1.50	2770	2770	2770
1.00	1.75	2770	2770	2770	1.25	1.75	2787	2770	2815	1.50	1.75	2770	2770	2770
1.00	2.00	2815	2811	2770	1.25	2.00	2815	2775	2787	1.50	2.00	2775	2770	2821
1.00	2.25	2787	2821	2821	1.25	2.25	2821	2835	2816	1.50	2.25	2787	2818	2860
1.00	2.50	2770	2770	2821	1.25	2.50	2770	2821	2821	1.50	2.50	2770	2846	2787
1.00	2.75	2818	2797	2864	1.25	2.75	2775	2770	2855	1.50	2.75	2802	2770	2797
1.00	3.00	2770	2846	2797	1.25	3.00	2818	2818	2821	1.50	3.00	2770	2770	2811
1.00	3.25	2787	2787	2770	1.25	3.25	2787	2787	2864	1.50	3.25	2833	2770	2797
1.00	3.50	2770	2811	2787	1.25	3.50	2902	2787	2797	1.50	3.50	2787	2818	2753
1.00	3.75	2770	2818	2775	1.25	3.75	2851	2838	2829	1.50	3.75	2797	2797	2787
1.00	4.00	2838	2770	2775	1.25	4.00	2775	2818	2824	1.50	4.00	2787	2821	2802
1.00	4.25	2874	2786	2811	1.25	4.25	2802	2802	2880	1.50	4.25	2821	2787	2802
1.00	4.50	2852	2851	2852	1.25	4.50	2797	2811	2877	1.50	4.50	2836	2835	2770
1.00	4.75	2770	2816	2815	1.25	4.75	2880	2818	2878	1.50	4.75	2786	2851	2769
1.00	5.00	2770	2897	2888	1.25	5.00	2816	2835	2787	1.50	5.00	2882	2874	2821

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (ต่อ)

γ	α	ราคาโครงสร้าง			γ	α	ราคาโครงสร้าง			γ	α	ราคาโครงสร้าง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1.75	0.25	2770	2770	2770	2.00	0.25	2770	2787	2770	2.25	0.25	2770	2770	2787
1.75	0.50	2770	2770	2770	2.00	0.50	2770	2787	2787	2.25	0.50	2770	2770	2770
1.75	0.75	2770	2770	2784	2.00	0.75	2770	2770	2770	2.25	0.75	2770	2770	2770
1.75	1.00	2770	2770	2770	2.00	1.00	2770	2787	2770	2.25	1.00	2815	2787	2787
1.75	1.25	2770	2770	2770	2.00	1.25	2770	2770	2770	2.25	1.25	2770	2770	2770
1.75	1.50	2770	2770	2787	2.00	1.50	2770	2770	2770	2.25	1.50	2787	2770	2787
1.75	1.75	2770	2770	2770	2.00	1.75	2770	2770	2787	2.25	1.75	2770	2815	2787
1.75	2.00	2815	2787	2815	2.00	2.00	2770	2787	2770	2.25	2.00	2770	2815	2770
1.75	2.25	2770	2787	2770	2.00	2.25	2787	2821	2787	2.25	2.25	2770	2815	2775
1.75	2.50	2770	2821	2770	2.00	2.50	2815	2843	2811	2.25	2.50	2842	2787	2815
1.75	2.75	2824	2821	2835	2.00	2.75	2811	2850	2821	2.25	2.75	2821	2797	2787
1.75	3.00	2770	2800	2753	2.00	3.00	2787	2787	2802	2.25	3.00	2888	2821	2797
1.75	3.25	2787	2806	2821	2.00	3.25	2787	2775	2869	2.25	3.25	2815	2802	2821
1.75	3.50	2843	2775	2821	2.00	3.50	2811	2843	2847	2.25	3.50	2787	2818	2818
1.75	3.75	2811	2818	2786	2.00	3.75	2854	2797	2831	2.25	3.75	2824	2797	2770
1.75	4.00	2818	2835	2821	2.00	4.00	2821	2786	2818	2.25	4.00	2770	2787	2850
1.75	4.25	2770	2770	2883	2.00	4.25	2753	2835	2775	2.25	4.25	2833	2770	2876
1.75	4.50	2775	2821	2769	2.00	4.50	2838	2818	2786	2.25	4.50	2821	2902	2875
1.75	4.75	2786	2786	2821	2.00	4.75	2818	2831	2802	2.25	4.75	2860	2815	2816
1.75	5.00	2787	2769	2769	2.00	5.00	2876	2770	2856	2.25	5.00	2902	2753	2821

การทดลองหาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการรู้เข้าของคำตอบ โดยใช้กรณีศึกษาที่ 1 เป็นตัวอย่างทดสอบเช่นกัน แสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การกรองแสง (γ) น้อย ๆ จะทำให้หึ่งห้อยเปลี่ยนค่าตัวแปรแบบก้าวกระโดด บางครั้งอาจจะก้าวกระโดดเกินไปจนทำให้การรู้เข้าไม่มีประสิทธิภาพ เช่น จำนวนเหล็กเส้นขยับทีละ 5 เส้น แต่เมื่อมีค่ามากกว่า 0.75 การรู้เข้าคำตอบจะเริ่มเสถียร หึ่งห้อยจะเริ่มไม่กระโดดข้ามตัวแปร เช่น จำนวนเหล็กเส้นจะขยับทีละ 1 เส้น และเมื่อ γ มีค่ามาก ๆ เช่น เข้าใกล้ ∞ หึ่งห้อยอาจจะขยับจำนวนเหล็กเส้นทีละ 0.01 เส้น แต่เนื่องจากเหล็กเส้นเป็นจำนวนเต็ม โปรแกรมจึงบังคับให้เหล็กเส้นขยับขั้นต่ำคือ 1 เส้น ดังนั้นการเพิ่ม γ มากๆ จึงไม่ทำให้ความเสถียรในการรู้เข้าเปลี่ยนแปลงเมื่อ $\gamma \geq 0.75$

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของสัมประสิทธิ์การกรองแสง (γ)

γ	α	ราคาโครงสร้าง		
		คำนวณครั้งที่ 1	คำนวณครั้งที่ 2	คำนวณครั้งที่ 3
0.25	1.00	2,829.42	2,829.42	2,770.07
0.50	1.00	2,770.07	2,770.07	2,829.42
0.75	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.00	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.25	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.50	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.75	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
2.00	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
2.25	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
2.50	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
2.75	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
3.00	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
3.25	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
3.50	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
3.75	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
4.00	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
4.25	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
4.50	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
4.75	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
5.00	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07

เมื่อทดลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์การสุ่ม (α) จะพบว่าค่าที่ทำให้การลู่เข้าเสถียรจะอยู่ที่ ช่วง 0.50 – 1.50 เมื่อพิจารณาตัวแปรต่างๆ ที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่องดังนี้ ความกว้างความยาว ขยับค่า ครั้งละ 0.025 , จำนวนเหล็กเสริมเพิ่มลดครั้งละ 1 เส้น , ขนาดเหล็กเสริมเปลี่ยนแปลงครั้งละ 1 ประเภท พบว่า พฤติกรรมการเคลื่อนที่แบบสุ่มควรมีค่าใกล้เคียงกับ Step การเคลื่อนที่ของตัวแปร ซึ่งผลของงานวิจัยนี้คือ $\alpha = 0.50 - 1.50$ จึงจะเหมาะสมในการลู่เข้าของคำตอบ

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การสุ่ม (α)

γ	α	ราคาโครงสร้าง		
		คำนวณครั้งที่ 1	คำนวณครั้งที่ 2	คำนวณครั้งที่ 3
1.00	0.25	2,770.07	2,829.42	2,770.07
1.00	0.50	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.00	0.75	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.00	1.00	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.00	1.25	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.00	1.50	2,770.07	2,770.07	2,770.07
1.00	1.75	2,829.42	2,770.07	2,770.07
1.00	2.00	2,770.07	2,829.42	2,770.07
1.00	2.25	2,829.42	2,770.07	2,829.42
1.00	2.50	2,770.07	2,829.42	2,829.42
1.00	2.75	2,770.07	2,829.42	2,829.42
1.00	3.00	2,770.07	2,770.07	2,829.42
1.00	3.25	2,829.42	2,770.07	2,829.42
1.00	3.50	2,770.07	2,809.20	2,770.07
1.00	3.75	2,809.20	2,770.07	2,829.42
1.00	4.00	2,829.42	2,829.42	2,770.07
1.00	4.25	2,770.07	2,829.42	2,829.42
1.00	4.50	2,829.42	2,809.20	2,829.42
1.00	4.75	2,829.42	2,829.42	2,809.20
1.00	5.00	2,829.42	2,770.07	2,770.07

4.3 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสม

จากการทดลองประยุกต์ใช้อัลกอริทึมหึ่งห้อย โดยใช้สัมประสิทธิ์การกรองแสง $\gamma = 1.0$ และ พารามิเตอร์การสุ่ม $\alpha = 1.0$ พบว่า การลู่เข้าถึงโครงสร้างที่ราคาต่ำที่สุดได้นั้น จะต้องใช้จำนวน หึ่งห้อย (N) ให้เหมาะสมกับจำนวนตัวแปรที่ทำการสุ่ม ยิ่งตัวแปรที่ทำการสุ่มมีจำนวนมาก มิติการ เคลื่อนที่ของหึ่งห้อยยิ่งมาก ทำให้มีพื้นที่ของคำตอบที่หลากหลาย จำนวนหึ่งห้อยจึงต้องมีมากพอที่จะ ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด หากจำนวนหึ่งห้อยน้อยเกินไป คำตอบจะไม่ลู่เข้าสู่โครงสร้างที่ราคาต่ำที่สุด แม้จำนวนรอบการคำนวณจะมากเท่าใดก็ตาม เห็นได้ชัดในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6

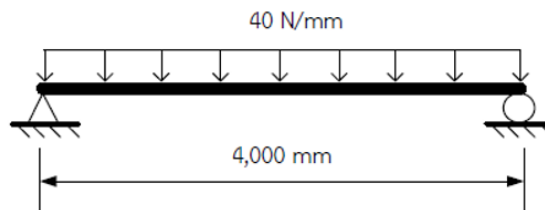
นอกจากนี้จากกรณีศึกษาที่ 1-4 พบว่า ยิ่งจำนวนหึ่งห้อยมาก จำนวนครั้งการคำนวณ เพื่อให้ลู่เข้าหาคำตอบยิ่งน้อยลงไปด้วย แต่จำนวนหึ่งห้อยที่มากจะทำให้การคำนวณแต่ละรอบช้าลง สำหรับกรณีศึกษาที่ 5-6 ตัวแปรที่ทำการสุ่มมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องใช้หึ่งห้อยจำนวนมากจึงจะ ครอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบ และด้วยเพราะหึ่งห้อยมีจำนวนมากแล้ว ทำให้ใช้รอบการคำนวณที่ น้อยก็สามารถถึงโครงสร้างที่ราคาต่ำที่สุดได้

สำหรับจำนวนรอบการเคลื่อนที่ของหึ่งห้อย กรณีศึกษาที่ 1-4 ใช้การเคลื่อนที่ 1000 รอบ และกรณีศึกษาที่ 5-6 ใช้การเคลื่อนที่ 100 รอบ เนื่องจากใช้เวลาคำนวณนานและลู่เข้าคำตอบเร็ว โดยรูปการลู่เข้าจะตัดมาเฉพาะช่วงที่สิ้นสุดการลู่เข้าโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคำตอบแล้วแม้หึ่งห้อย จะเคลื่อนที่ต่ออีกกี่ครั้งก็ตาม

นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Harmony Search , HS) จากงานวิจัยของ อัฐพล เตชะรัตนประเสริฐ (2014) และออกแบบอย่าง เหมาะสมด้วยวิธีอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing , SA) จากงานวิจัยของ สิริวัฒน์ จุ้ยสุวรรณทัต (2014)

4.3.1 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 1

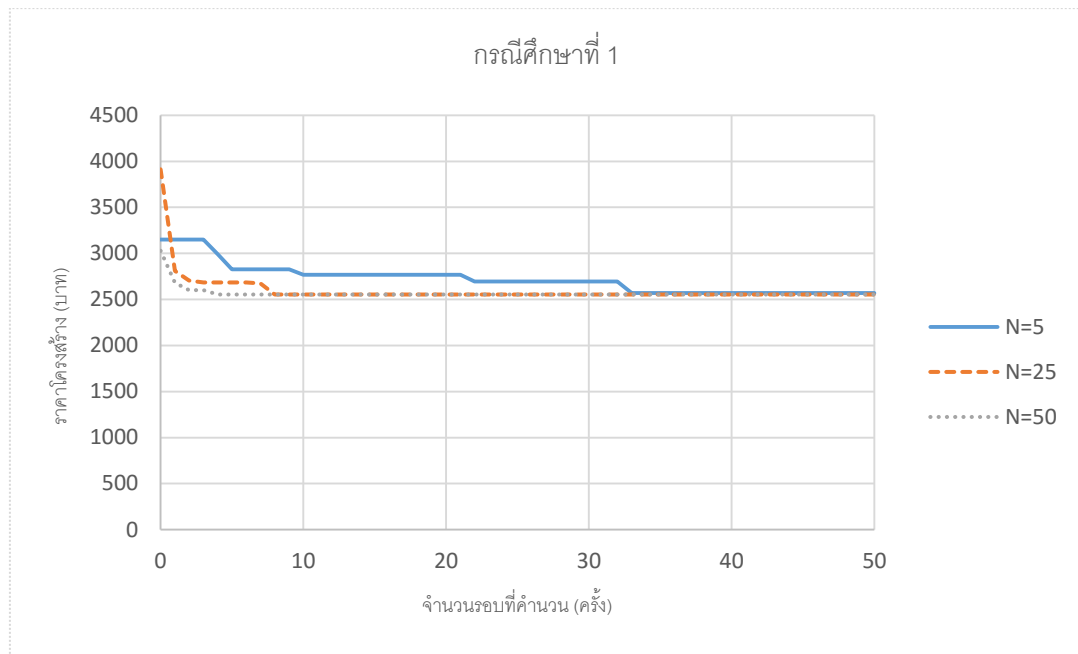
กรณีศึกษาที่ 1 เป็นโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว มีฐานรับแบบยึดหมุน และแบบล้อเลื่อน ตัวแปรที่ทำการสุ่มมีทั้งหมด 8 ตัวแปร พบว่าหิ้งห้อยสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมภายในการเคลื่อนที่ไม่เกิน 40 ครั้ง โดยยิ่งจำนวนหิ้งห้อยมากก็ยิ่งใช้จำนวนครั้งการเคลื่อนที่น้อย โดยลู่เข้าที่คำตอบเดียวกันทั้งหมด



รูปที่ 4.4 รูปกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.4 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ตัวแปร	หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม
ความกว้าง	ม.	0.200
ความลึก	ม.	0.450
เหล็กเสริมหลัก	บน	-
	ล่าง	-
เหล็กเสริมพิเศษ	บนซ้าย	-
	กลางล่าง	-
	บนขวา	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ม.	RB9 @ 0.10
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท
	ค่าเหล็กยื่น	บาท
	ค่าเหล็กปลอก	บาท
	ค่าไม้แบบ	บาท
	รวม	บาท

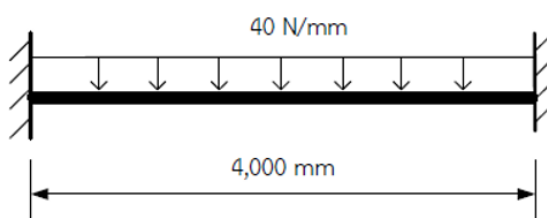


รูปที่ 4.5 การเข้าสู่คำตอบของกรณีศึกษาที่ 1

จากรูปที่ 4.5 พบว่าจำนวนหึ่งห้อยเพียง 5 ตัว ก็สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ไม่ต่างจากจำนวนหึ่งห้อย 25 หรือ 50 ตัว เพียงแต่จะใช้จำนวนการเคลื่อนที่มากกว่า หากต้องการให้จำนวนการเคลื่อนที่ลดลงจะต้องเพิ่มจำนวนหึ่งห้อย ซึ่งจะได้คำตอบสุดท้ายเดียวกันแต่จำนวนรอบการเคลื่อนที่น้อยกว่า จากการทดลอง พบว่าใช้จำนวนหึ่งห้อย 50 ตัว สามารถพบคำตอบที่เหมาะสมได้ภายในการเคลื่อนที่เพียง 2-3 ครั้งเท่านั้น ดังนั้นตัวแปร 8 ตัว เป็นจำนวนตัวแปรที่หึ่งห้อยสามารถค้นพบคำตอบได้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพ หมายความว่าปัญหานี้หึ่งห้อยจะค้นพบคำตอบเหมาะสมที่แท้จริง (Global Optimum) เมื่อจำนวนหึ่งห้อยมากกว่า 5 ตัวเสมอ

4.3.2 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 2

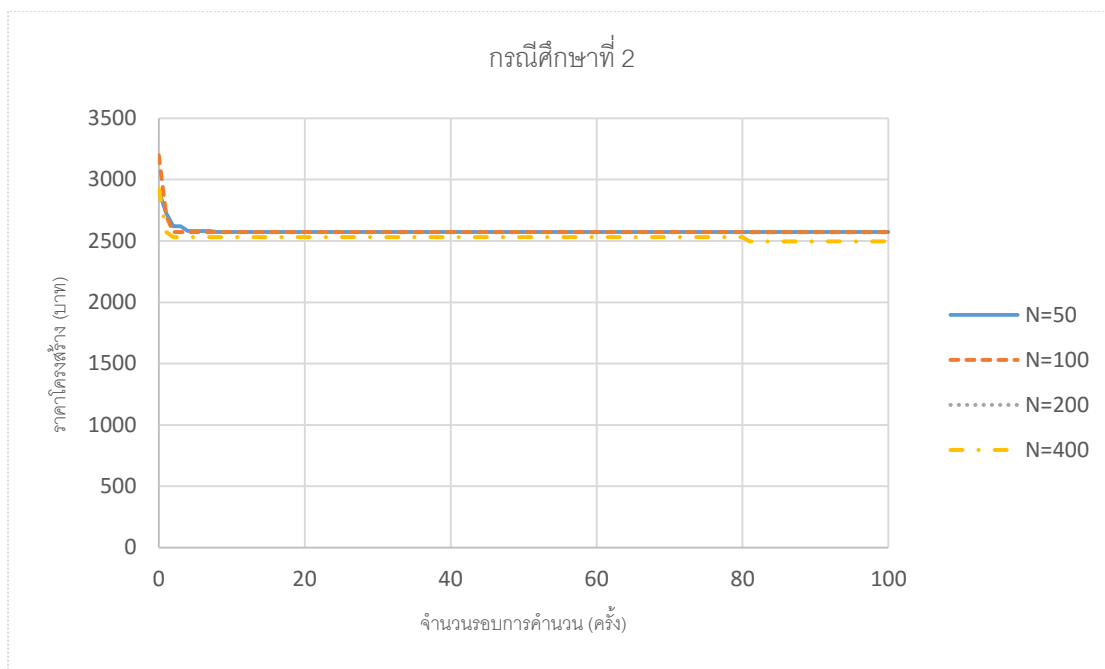
กรณีศึกษาที่ 2 เป็นโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีฐานรองรับทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น ตัวแปรที่ทำการสุ่มมีทั้งหมด 12 ตัวแปร ซึ่งมากกว่ากรณีศึกษาที่ 1 จึงต้องใช้จำนวนหึ่งห้อยที่มากกว่าเพื่อความครอบคลุมในการค้นหา เนื่องจากความเป็นไปได้ของโครงสร้างมีมากกว่า พบว่าเมื่อหึ่งห้อยมีมากกว่า 50 ตัว ความเร็วในการลู่เข้าจะใกล้เคียงกันมาก โดยหึ่งห้อยจะพบคำตอบสุดท้ายในการเคลื่อนที่เพียง 2-3 8iyh' เท่านั้น แต่เนื่องจากตัวแปรที่มีปริมาณมาก หึ่งห้อยที่น้อยเกินไปจะค้นไม่พบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแม้ว่าจะใช้จำนวนการเคลื่อนที่ที่รอบก็ตาม ดังนั้นต้องใช้จำนวนหึ่งห้อยที่มากพอเพื่อเพิ่มโอกาสพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.6 รูปกรณีศึกษาที่ 2

ตารางที่ 4.5 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ตัวแปร	หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม	
ความกว้าง	ม.	0.200	
ความลึก	ม.	0.450	
เหล็กเสริมหลัก	บน	-	2DB12
	ล่าง	-	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษ	บนซ้าย	-	1DB25
	กลางล่าง	-	1DB12
	บนขวา	-	1DB25
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ม.	RB9 @ 0.10	
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	918.00
	ค่าเหล็กอื่น	บาท	458.26
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	452.77
	ค่าไม้แบบ	บาท	660.00
	รวม	บาท	2,489.03

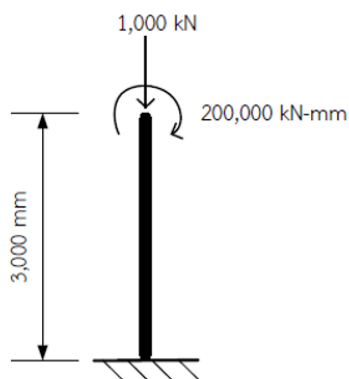


รูปที่ 4.7 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 2

จากรูปที่ 4.7 พบว่า จำนวนหิ่งห้อยที่มากกว่า 50 ตัว จะใช้จำนวนครั้งการลู่เข้าที่น้อยมาก โดยการใช้การเคลื่อนที่ไม่เกิน 5 รอบ ถึงแม้การลู่เข้าจะรวดเร็วแต่คำตอบที่พบเป็นเพียงคำตอบเหมาะสมเฉพาะที่ (Local Optimum) แต่เมื่อเพิ่มจำนวนหิ่งห้อยจะพบว่าตั้งแต่หิ่งห้อยจำนวน 100 ตัวขึ้นไป จะใช้การเคลื่อนที่เพียง 2 รอบก็จะพบคำตอบสุดท้าย แต่เมื่อจำนวนหิ่งห้อยเกิน 400 ตัว หิ่งห้อยได้ค้นพบคำตอบที่ดีกว่าเดิม โดยใช้การเคลื่อนที่เพียง 2 รอบเท่านั้น จะเห็นได้ว่าปัญหาตัวแปร 12 ตัว หิ่งห้อยเริ่มไม่ค่อยลู่เข้าคำตอบเดียวกัน หมายความว่าปัญหานี้หากใช้จำนวนหิ่งห้อยน้อยกว่า 400 ตัว อาจทำให้ได้คำตอบที่เป็นเพียงคำตอบเหมาะสมที่เหมาะสมเฉพาะที่ (Local Optimum) มิใช่คำตอบเหมาะสมที่แท้จริง (Global Optimum) สาเหตุเพราะหิ่งห้อยมีจำนวนไม่เพียงพอที่จะครอบคลุมทั่วทั้งขอบเขตการค้นหา

4.3.3 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 3

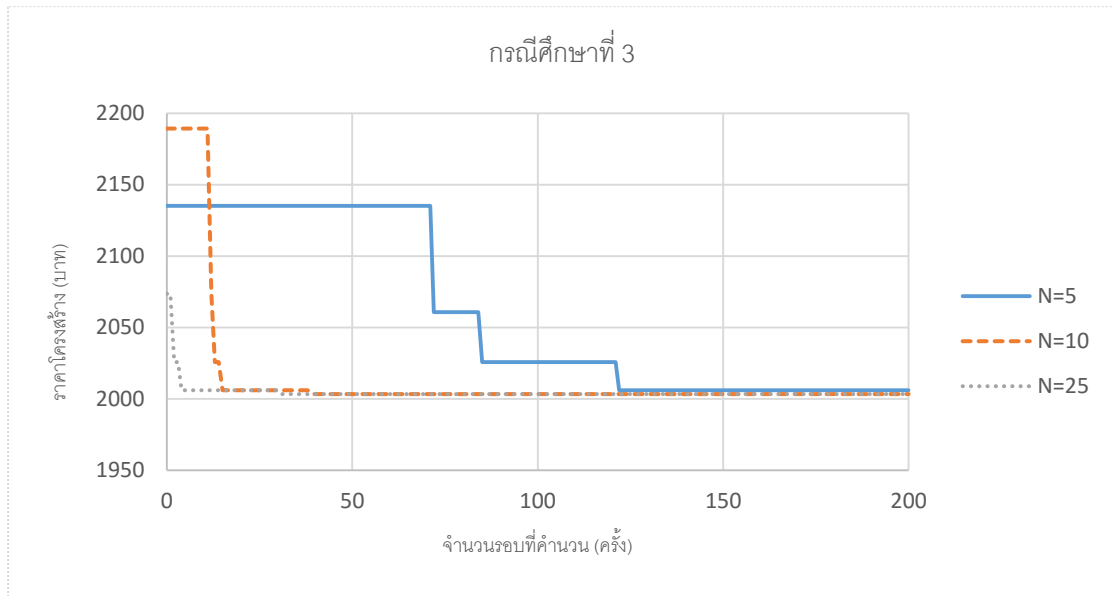
กรณีศึกษาที่ 3 เป็นโครงสร้างเสามีตัวแปรที่ทำการออกแบบเพียง 4 ตัว ซึ่งค่อนข้างน้อย จึงใช้หึ่งห้อยไม่มากนักก็สามารถพบคำตอบที่เหมาะสมได้



รูปที่ 4.8 รูปกรณีศึกษาที่ 3

ตารางที่ 4.6 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 3

ตัวแปร	หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม	
ความกว้าง	ม.	0.250	
ความลึก	ม.	0.450	
เหล็กเสริมหลัก	-	4DB20	
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,625.63
	ค่าเหล็ก	บาท	980.08
	ค่าไม้แบบ	บาท	832.50
	รวม	บาท	1,990.21

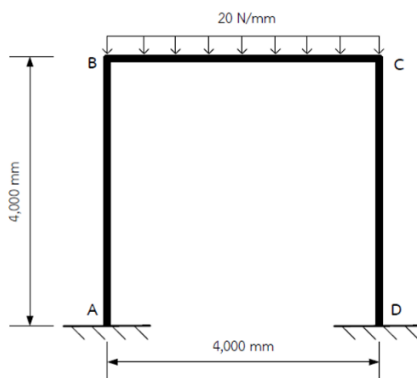


รูปที่ 4.9 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 3

ตัวแปรในกรณีศึกษาที่ 3 มีเพียง 4 ตัว ซึ่งค่อนข้างน้อย จากรูปที่ 4.7 พบว่า จำนวนหิ่งห้อยเพียง 5 ตัวก็สามารถพบคำตอบที่เหมาะสมได้ แต่ใช้การเคลื่อนที่มากกว่า 100 รอบ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนหิ่งห้อยเป็น 10 ตัวจะพบว่าใช้จำนวนครั้งการเคลื่อนที่น้อยกว่ามาก นั่นคือน้อยกว่า 50 ครั้ง และเมื่อเพิ่มจำนวนหิ่งห้อยเป็น 25 พบว่าใช้การเคลื่อนที่น้อยกว่า 20 ครั้ง โดยสังเกตได้ว่าจำนวนหิ่งห้อย 5 -25 ตัวให้คำตอบเดียวกัน แต่ต่างเพียงจำนวนครั้งการคำนวณ เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 1 ปัญหานี้หิ่งห้อยจะพบคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง (Global Optimum) เมื่อจำนวนหิ่งห้อยมากกว่า 5 ตัวเสมอ

4.3.4 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 4

กรณีศึกษาที่ 4 เป็นโครงข้อแข็ง ประกอบไปด้วยคานและเสา มีตัวแปรรูปแบบทั้งหมด 16 ตัวแปร จึงต้องใช้จำนวนหิ้งห้อยที่มากพอจึงจะพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

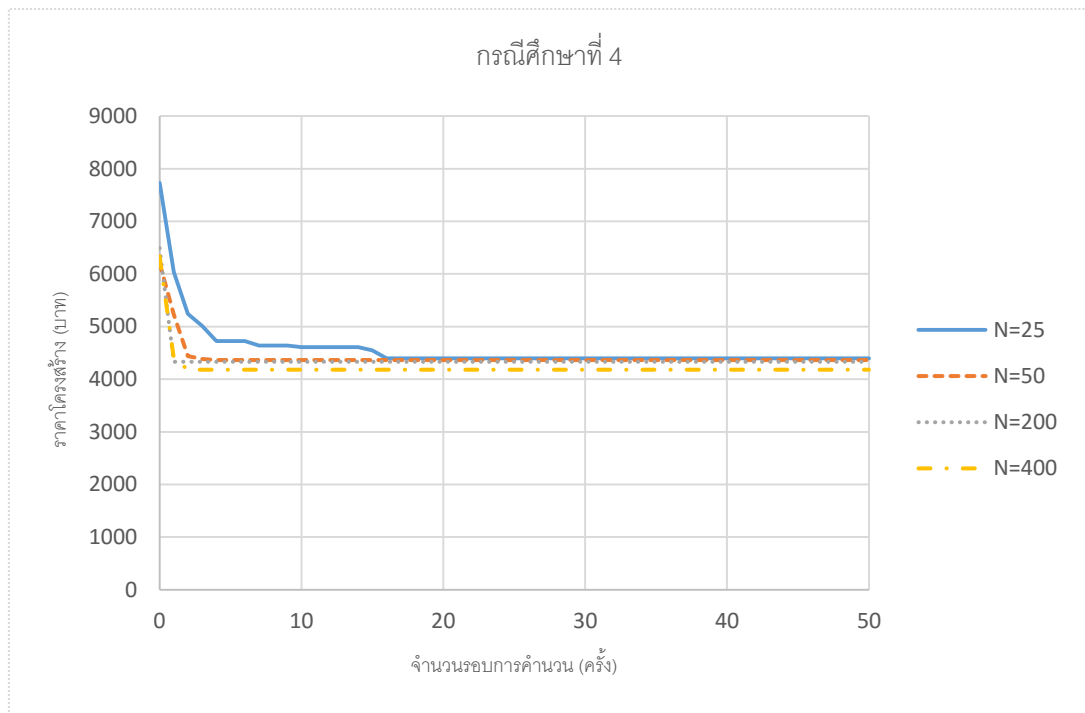


(4)

รูปที่ 4.10 รูปกรณีศึกษาที่ 4

ตารางที่ 4.7 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 4

ตัวแปร	หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม	
ความกว้างคาน	ม.	0.200	
ความลึกคาน	ม.	0.325	
เหล็กเสริมหลักคาน	บน	-	
	ล่าง	-	
เหล็กเสริมพิเศษคาน	บนซ้าย	-	
	กลางล่าง	-	
	บนขวา	-	
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ม.	RB9 @ 0.125	
ความกว้างเสา	ม.	0.200	
ความลึกเสา	ม.	0.200	
เหล็กเสริมหลักเสา	-	4DB12	
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีตคาน	บาท	663.00
	ค่าเหล็กยื่นคาน	บาท	419.50
	ค่าเหล็กปลอกคาน	บาท	292.56
	ค่าไม้แบบคาน	บาท	510.00
	ค่าคอนกรีตเสา	บาท	816.00
	ค่าเหล็กเสา	บาท	479.43
	ค่าไม้แบบเสา	บาท	960.00
	รวม		4,140.49



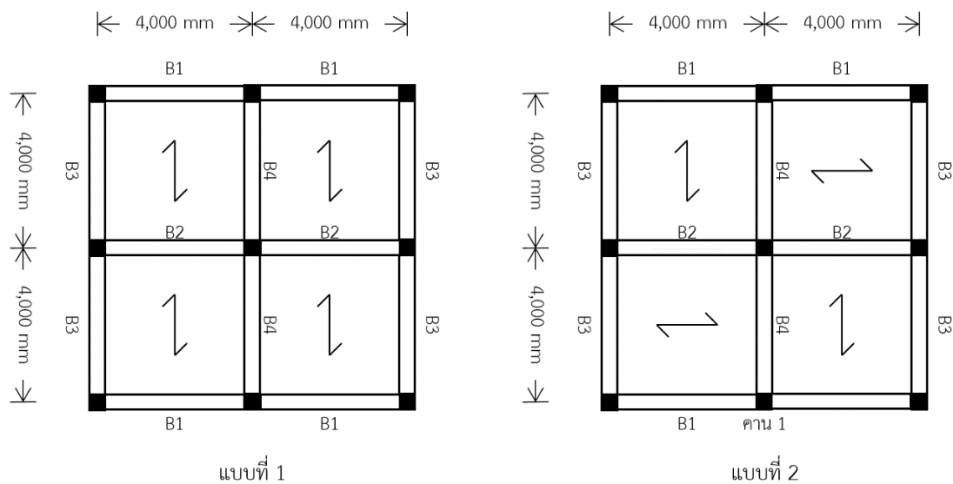
รูปที่ 4.11 การลู่อู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 4

กรณีศึกษาที่ 4 มีตัวแปรทั้งหมด 16 ตัว ดังนั้นจึงมีแนวโน้มคล้ายกับกรณีศึกษาที่ 2 แม้การเพิ่มจำนวนหิ้งห้อยจะทำให้หิ้งห้อยค้นพบคำตอบด้วยจำนวนการเคลื่อนที่ที่ลดลง โดยหิ้งห้อย 25 ตัว ใช้การเคลื่อนที่ประมาณ 15 ครั้ง หิ้งห้อยจำนวน 50-200 ตัว ใช้การเคลื่อนที่ 2 ครั้ง แต่คำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบเหมาะสมเฉพาะที่ หิ้งห้อยจะพบคำตอบเหมาะสมแท้จริงเมื่อมีจำนวนหิ้งห้อยมากกว่า 400 ตัวขึ้นไป กล่าวคือแม้หิ้งห้อยจะใช้จำนวนครั้งการเคลื่อนที่น้อย แต่คำตอบที่ได้จะเป็นเพียงคำตอบเหมาะสมเฉพาะที่หากจำนวนหิ้งห้อยไม่มากพอ

4.3.5 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 5

กรณีศึกษาที่ 5 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 2×2 ช่วง รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้นทางเดียว และทดลองกับน้ำหนักบรรทุก 2 ขนาด ได้แก่ 200 กก./ตร.ม. และ 400 กก./ตร.ม. โดยคานในโครงสร้างเป็นคาน 2 ช่วง มีตัวแปรที่ทำการออกแบบ 16 ตัวแปรต่อคาน 1 ตัว โดยมีคานทั้งหมด 4 ตัว จึงต้องใช้จำนวนหิ้งห้อยที่มากเพื่อให้ครอบคลุมในการค้นหาและเพื่อเพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด หากจำนวนหิ้งห้อยเกินไปจะอาจทำให้หิ้งห้อยไม่พบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แม้ว่าจะใช้จำนวนการเคลื่อนที่ที่รอบก็ตาม

นอกจากนี้ยังพบว่า การวางพื้นในทิศทางเดียวจะทำให้โครงสร้างมีราคาต่ำกว่าวางพื้นแบบสลับทิศ เนื่องจากการวางพื้นทิศทางเดียวกันจะเกิดคานขนาดเล็กและใหญ่คละกันทำให้ราคาต่ำกว่าการวางพื้นแบบสลับซึ่งทำให้เกิดคานขนาดใหญ่เท่านั้น

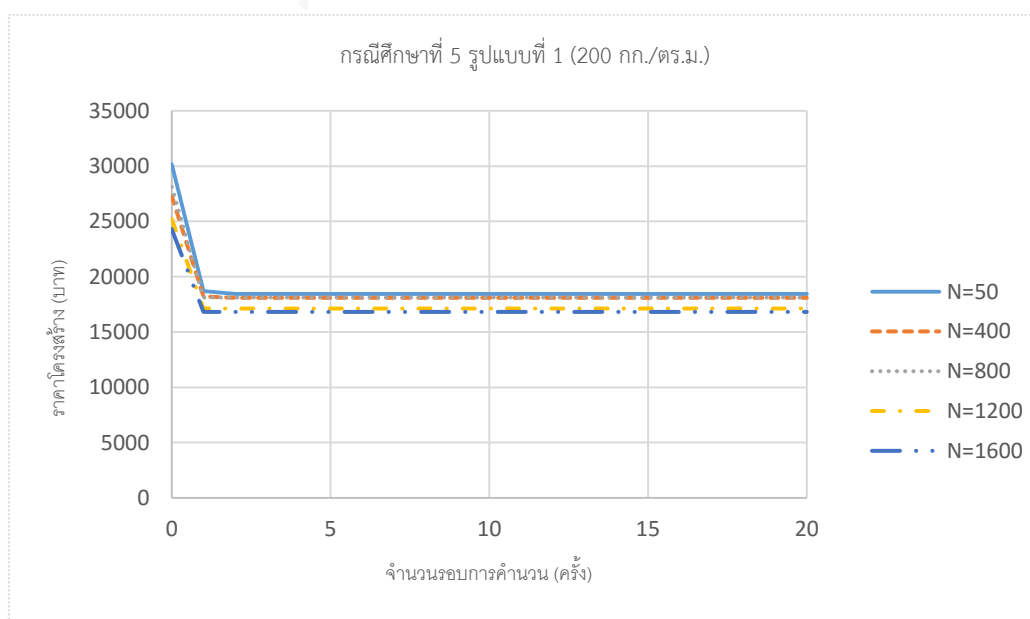


รูปที่ 4.12 รูปกรณีศึกษาที่ 5

ตารางที่ 4.8 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (200 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร		หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.200	0.200	0.200	0.200
ความลึก		ม.	0.250	0.300	0.250	0.200
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	4DB12	5DB12	2DB12	2DB12
	บน	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	4DB12	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	-	6DB12	3DB20	1DB12	-
	หน้าตัด 5-5	-	4DB12	-	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.10	RB9 @ 0.125	-	-
	ช่วงที่ 2	ม.	RB9 @ 0.10	RB9 @ 0.125	-	-
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,020.00	1,224.00	1,020.00	816.00
	ค่าเหล็กยื่น	บาท	1,118.68	1,172.06	519.39	479.43
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	626.91	557.25	0.00	0.00
	ค่าไม้แบบ	บาท	840.00	960.00	840.00	720.00
	รวม	บาท	3,605.59	3,913.32	2,379.39	2,015.43
	รวมทั้งหมด	บาท	17,898.70			

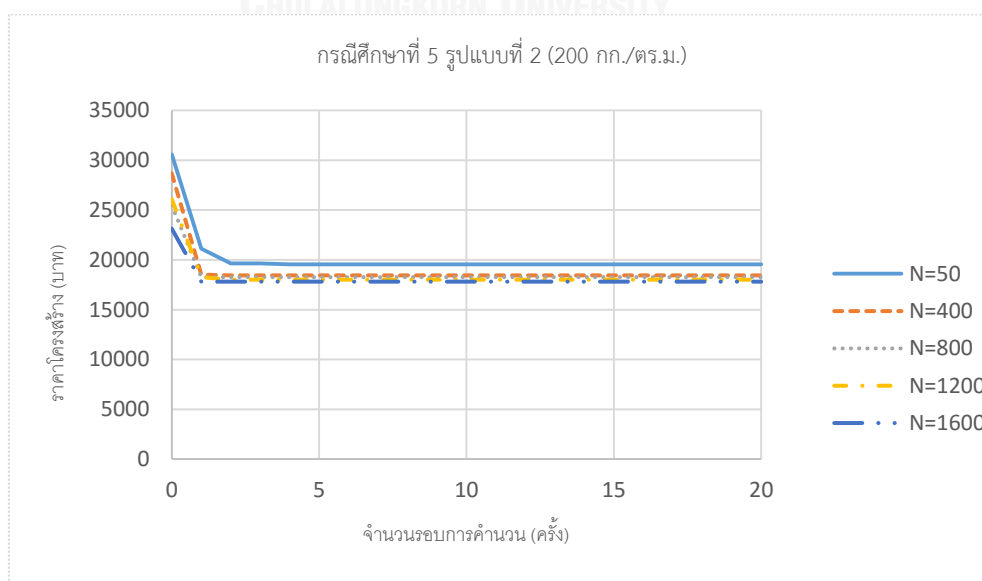
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (200 กก./ตร.ม.)

ตารางที่ 4.9 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (200 กก./ตร.ม.)

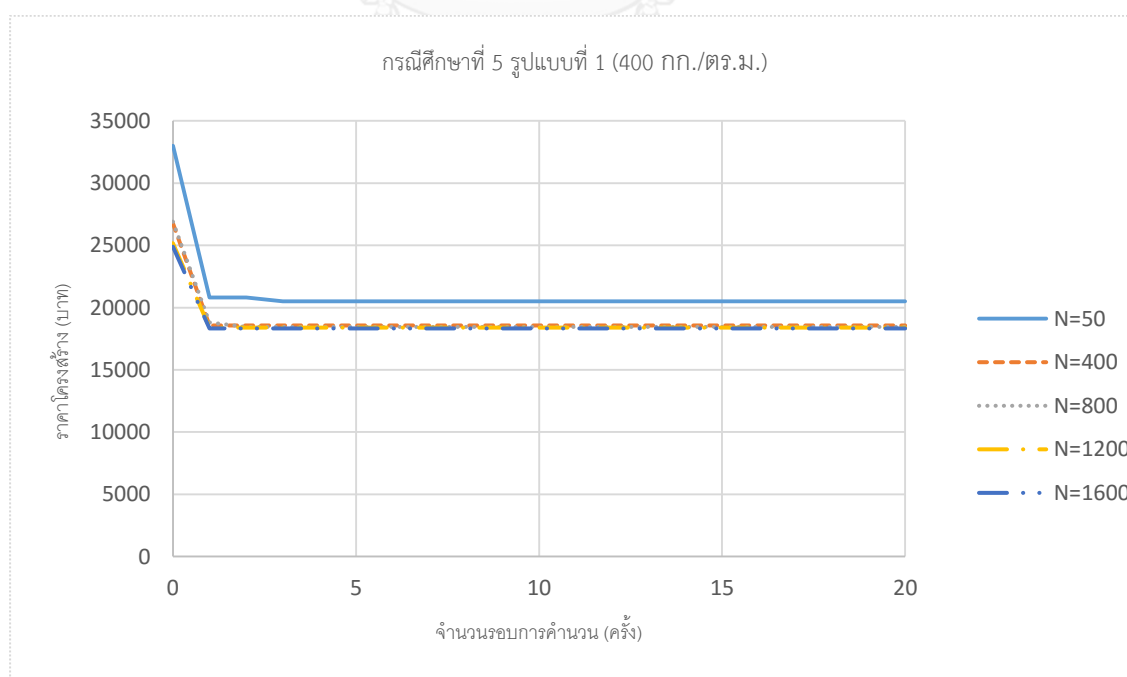
ตัวแปร		หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.200	0.200	0.200	0.200
ความลึก		ม.	0.300	0.300	0.300	0.200
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
	บน	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	2DB12	-	2DB12	2DB12
	หน้าตัด 4-4	-	-	-	-	3DB12
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	-	3DB12	2DB12	3DB12	6DB12
	หน้าตัด 5-5	-	-	-	-	1DB12
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.125	-	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.075
	ช่วงที่ 2	ม.	-	-	-	RB9 @ 0.075
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,224.00	1,224.00	1,224.00	816.00
	ค่าเหล็กยื่น	บาท	689.18	559.34	689.18	963.86
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	278.63	0.00	278.63	743.01
	ค่าไม้แบบ	บาท	960.00	960.00	960.00	720.00
	รวม	บาท	3,151.81	2,743.34	3,151.81	3,242.87
	รวมทั้งหมด	บาท	18,593.45			



รูปที่ 4.14 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (200 กก./ตร.ม.)

ตารางที่ 4.10 ค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (400 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร	หน่วย	ค่าตอบที่เหมาะสม				
		B1	B2	B3	B4	
ความกว้าง	ม.	0.2	0.2	0.2	0.2	
ความลึก	ม.	0.325	0.35	0.25	0.2	
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	2DB16	5DB12	2DB12	2DB12
	บน	-	2DB12	2DB16	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	1DB12	-	-
	หน้าตัด 3-3	-	5DB12	6DB12	-	-
	หน้าตัด 5-5	-	-	1DB12	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.10	RB9 @ 0.125	-	-
	ช่วงที่ 2	ม.	RB9 @ 0.10	RB9 @ 0.125	-	-
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,326.00	1,428.00	1,020.00	816.00
	ค่าเหล็กอื่น	บาท	815.94	1,235.44	479.43	479.43
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	731.40	510.82	0.00	0.00
	ค่าไม้แบบ	บาท	1,020.00	1,080.00	840.00	720.00
	รวม	บาท	3,893.33	4,254.26	2,339.43	2,015.43
	รวมทั้งหมด	บาท	18,735.22			

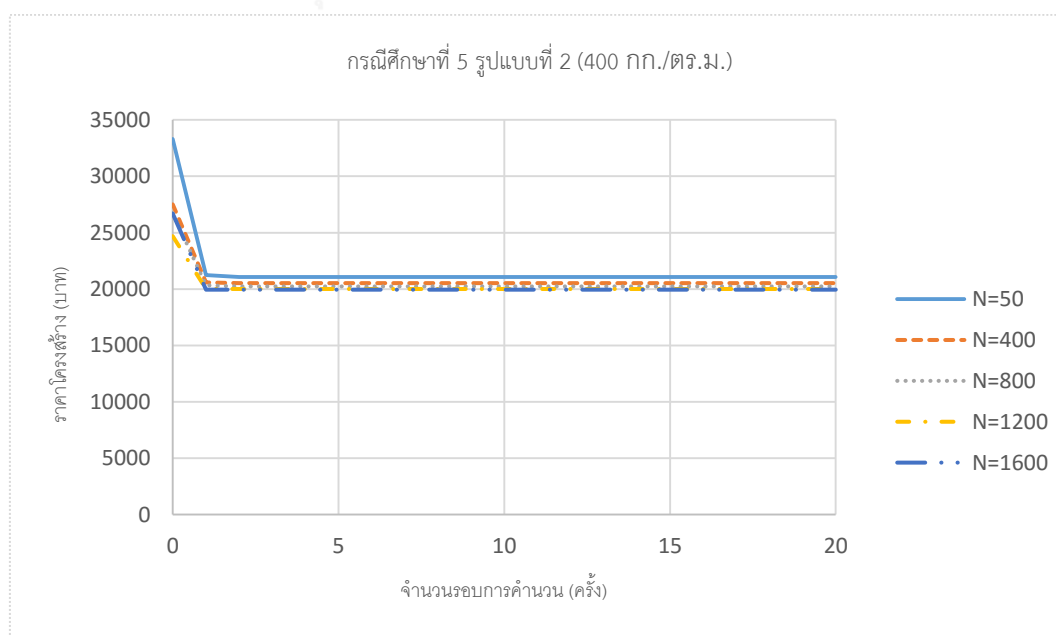


รูปที่ 4.15 การเข้าสู่คำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 1 (400 กก./ตร.ม.)

ตารางที่ 4.11 ค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (400 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร		หน่วย	ค่าตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.225	0.2	0.2	0.2
ความลึก		ม.	0.3	0.375	0.325	0.3
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	2DB12	2DB12	2DB12	3DB12
	บน	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	4DB12	1DB12	5DB12	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	1DB12	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	6DB12	2DB12	-
	หน้าตัด 3-3	-	4DB12	5DB12	3DB12	5DB12
	หน้าตัด 5-5	-	-	-	-	8DB23
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.125	-	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.125
	ช่วงที่ 2	ม.	-	-	-	RB9 @ 0.125
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,377.00	1,530.00	1,326.00	1,224.00
	ค่าเหล็กอื่น	บาท	779.08	809.04	824.03	749.11
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	292.56	0.00	292.56	0.00
	ค่าไม้แบบ	บาท	990.00	1,140.00	1,020.00	960.00
	รวม	บาท	3,438.64	3,479.04	3,462.58	2,933.11
	รวมทั้งหมด	บาท	20,214.60			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



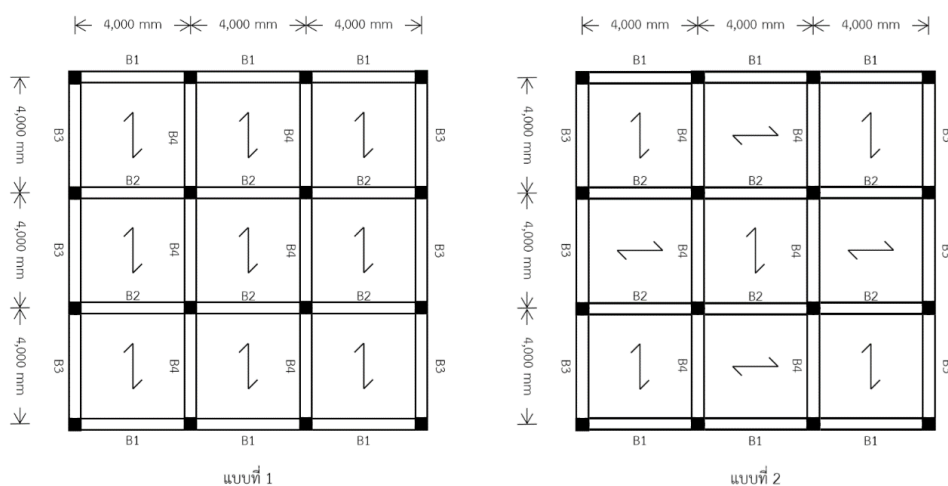
รูปที่ 4.16 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 (400 กก./ตร.ม.)

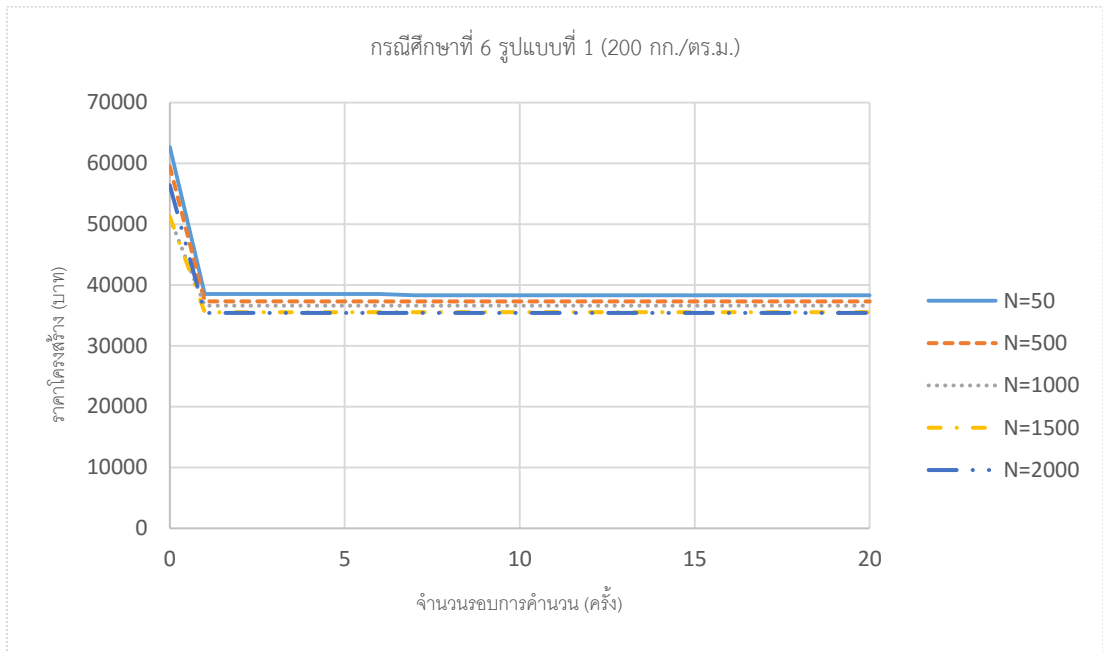
กรณีศึกษาที่ 5 มีจำนวนตัวแปร 16 ตัวเท่ากับกรณีศึกษาที่ 4 ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมเหมือนกัน คือ หิ้งห้อยอาจไม่พบคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง แม้หิ้งห้อยจะมีจำนวนมากจนทำให้ใช้การเคลื่อนที่เพียง 2 ครั้งก็ตาม จะเห็นได้ชัดเจนที่รูปที่ 4.15 จำนวนหิ้งห้อย 50 ตัว ใช้การเคลื่อนที่เพียง 3 ครั้งก็พบคำตอบ จากนั้นไม่ว่าจะเคลื่อนที่อีกกี่ครั้งหิ้งห้อยก็ไม่พบคำตอบที่ดีกว่าเดิม แต่จากรูปเห็นได้ว่า หิ้งห้อยจำนวน 50 ตัวให้คำตอบที่เป็นคำตอบเหมาะสมเฉพาะที่ ดังนั้นจำนวนหิ้งห้อยต้องมากพอที่จะครอบคลุมพื้นที่ค้นหาจึงจะพบคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง และเนื่องจากตัวอย่างนี้มีคานถึง 4 ตัว จึงต้องใช้จำนวนหิ้งห้อยมากกว่ากรณีศึกษาที่ 4 นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนหิ้งห้อยเท่ากับ 1600 ตัวจะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่ทั้งนี้ไม่ได้แปลว่าเมื่อใช้หิ้งห้อย 1600 ตัว จะได้คำตอบเดิมทุกครั้งที่คำนวณ บางครั้งหิ้งห้อยจำนวน 1600 ตัวก็ให้คำตอบที่แย่กว่าหิ้งห้อยจำนวน 1200 ตัวก็ได้ และเมื่อทดลองจำนวนหิ้งห้อยมากกว่า 1600 ตัว ก็ไม่ได้คำตอบที่ดีกว่าอีกต่อไปเพียงแต่จะเพิ่มโอกาสเจอคำตอบที่เหมาะสมที่สุดบ่อยขึ้นแต่จะใช้เวลาคำนวณนานขึ้นเช่นกัน

4.3.6 ผลการออกแบบอย่างเหมาะสมกรณีศึกษาที่ 6

กรณีศึกษาที่ 6 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 3×3 ช่วง รับน้ำหนักบรรทุกจากพื้นทางเดียว และทดลองกับน้ำหนักบรรทุก 2 ขนาด ได้แก่ 200 กก./ตร.ม. และ 400 กก./ตร.ม. โดยคานในโครงสร้างเป็นคาน 3 ช่วง มีตัวแปรที่ทำการออกแบบ 20 ตัวแปรต่อคาน 1 ตัว โดยมีคานทั้งหมด 4 ตัว จึงต้องใช้จำนวนหิ้งห้อยที่มากเพื่อให้ครอบคลุมในการค้นหาและเพื่อเพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด หากจำนวนหิ้งห้อยเกินไปจะอาจทำให้หิ้งห้อยไม่พบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แม้ว่าจะใช้จำนวนการเคลื่อนที่ที่รอบก็ตาม

นอกจากนี้ยังพบว่าการวางพื้นในทิศทางเดียวจะทำให้โครงสร้างมีราคาต่ำกว่าวางพื้นแบบสลับทิศ เนื่องจากการวางพื้นทิศทางเดียวกันจะเกิดคานขนาดเล็กและใหญ่คละกันทำให้ราคาต่ำกว่าการวางพื้นแบบสลับซึ่งทำให้เกิดคานขนาดใหญ่เท่านั้น



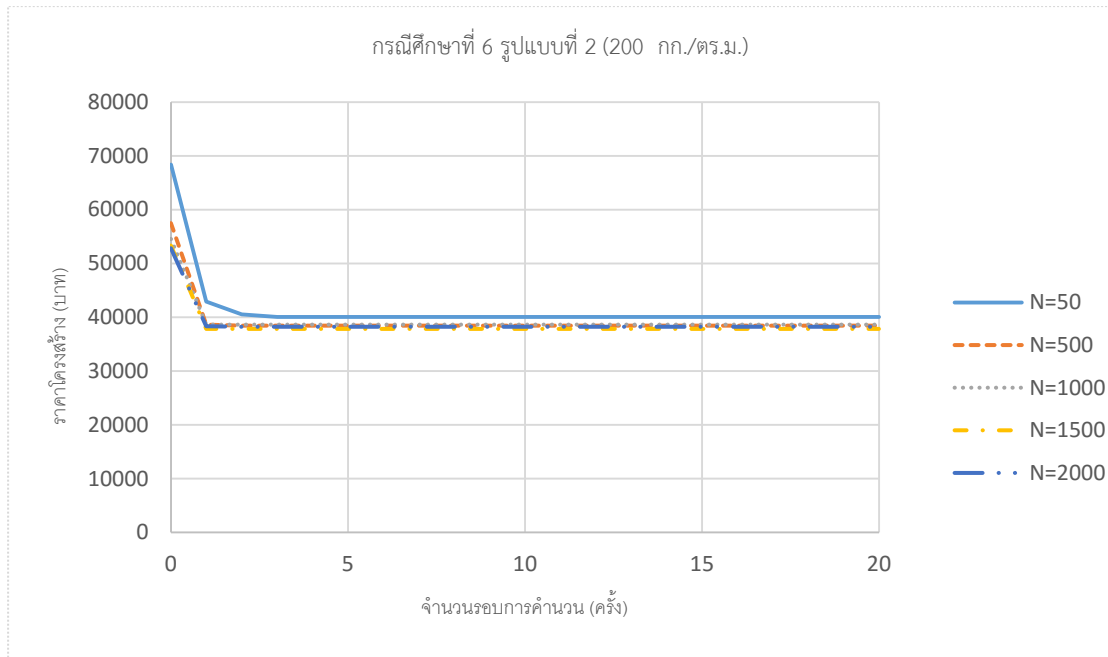


รูปที่ 4.18 การดูเข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (200 กก./ตร.ม.)



ตารางที่ 4.13 ค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (200 กก./ตร.ม.)

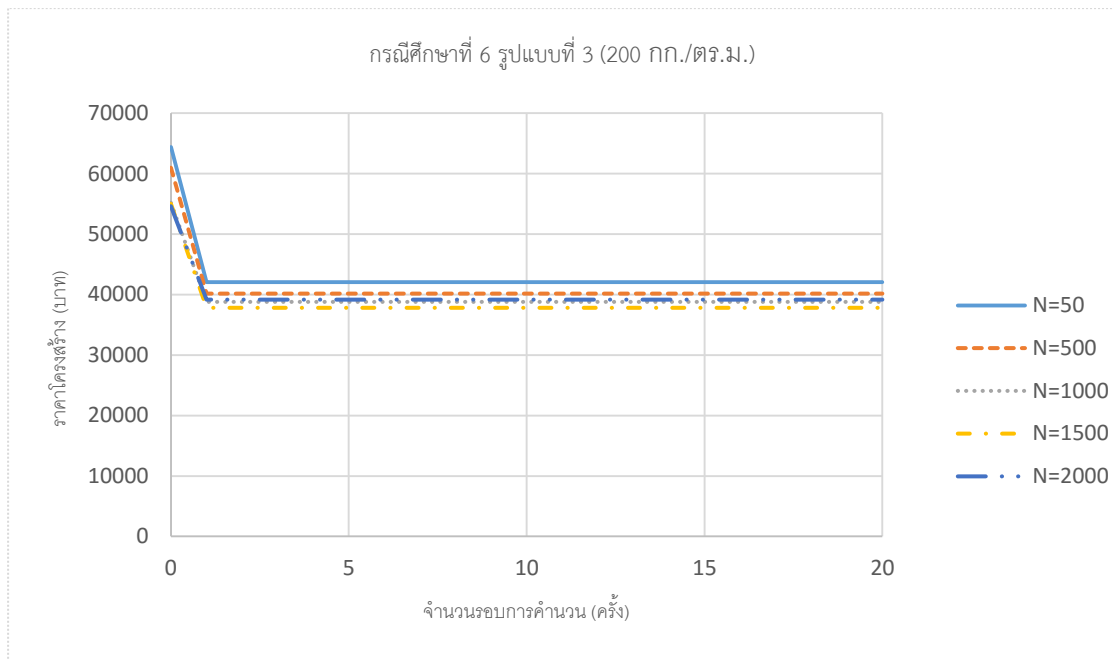
ตัวแปร		หน่วย	ค่าตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.200	0.200	0.225	0.200
ความลึก		ม.	0.250	0.250	0.275	0.300
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	2DB12	4DB12	2DB16	3DB12
	บน	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	2DB12	-	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	2DB12	-	-	-
	หน้าตัด 6-6	-	2DB12	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-	1DB12
	หน้าตัด 3-3	-	4DB12	4DB12	1DB16	5DB12
	หน้าตัด 5-5	-	4DB12	4DB12	1DB16	5DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-	1DB12
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	-	RB9 @ 0.125
	ช่วงที่ 2	ม.	-	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.125
	ช่วงที่ 3	ม.	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	-	RB9 @ 0.125
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,530.00	1,530.00	1,683.00	1,836.00
	ค่าเหล็กยื่น	บาท	1,308.45	1,558.24	1,141.30	1,338.42
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	626.91	940.37	330.87	835.88
	ค่าไม้แบบ	บาท	1,260.00	1,260.00	1,350.00	1,440.00
	รวม	บาท	4,725.36	5,288.61	4,505.17	5,450.30
	รวมทั้งหมด	บาท	39,938.89			



รูปที่ 4.19 การเข้าสู่คำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (200 กก./ตร.ม.)

ตารางที่ 4.14 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (200 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร		หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.2	0.2	0.2	0.2
ความลึก		ม.	0.3	0.225	0.275	0.275
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
	บน	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	1DB16	1DB16	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	-	1DB12	3DB12
	หน้าตัด 6-6	-	1DB16	1DB16	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	-	3DB12	3DB12	2DB12	2DB12
	หน้าตัด 5-5	-	3DB12	3DB12	2DB12	2DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	-
	ช่วงที่ 2	ม.	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100
	ช่วงที่ 3	ม.	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	-
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,836.00	1,530.00	1,683.00	1,530.00
	ค่าเหล็กอื่น	บาท	1,418.41	1,358.75	1,178.96	1,094.24
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	835.88	940.37	330.87	313.46
	ค่าไม้แบบ	บาท	1,440.00	1,260.00	1,350.00	1,260.00
	รวม	บาท	5,530.29	5,089.11	4,542.83	4,197.69
	รวมทั้งหมด	บาท	38,719.85			

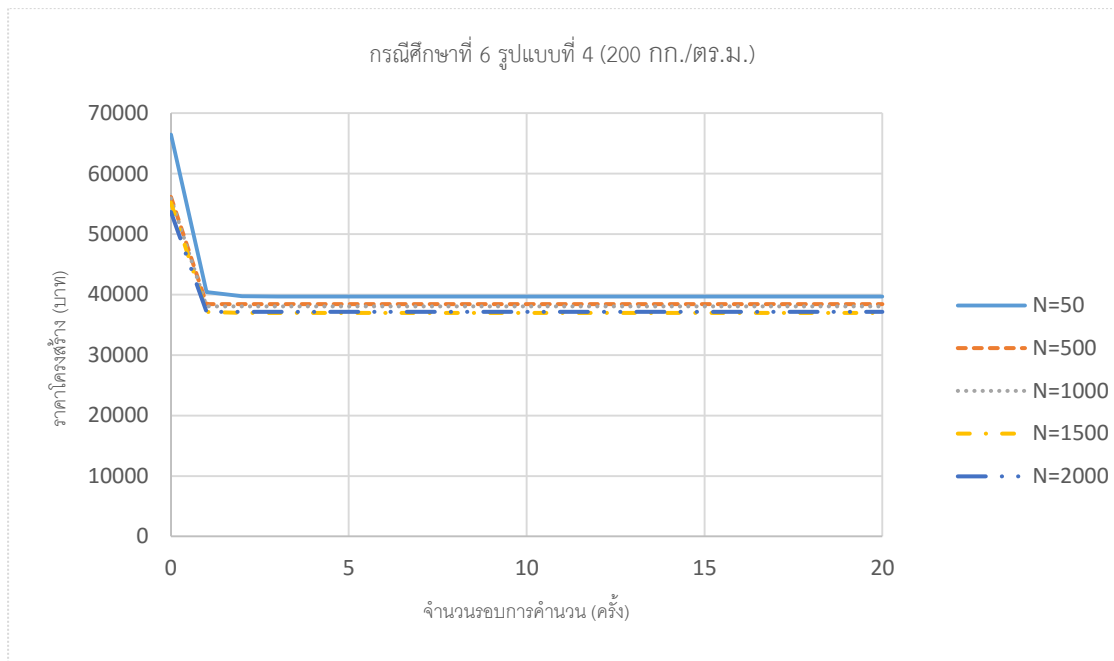


รูปที่ 4.20 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (200 กก./ตร.ม.)



ตารางที่ 4.15 ค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (200 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร		หน่วย	ค่าตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.2	0.2	0.225	0.2
ความลึก		ม.	0.275	0.3	0.225	0.225
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	4DB12	2DB12	2DB12	5DB12
	บน	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	-	2DB12	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	2DB12	-	-
	หน้าตัด 6-6	-	-	2DB12	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	3DB12	-	-
	หน้าตัด 3-3	-	2DB12	5DB12	-	3DB12
	หน้าตัด 5-5	-	2DB12	5DB12	-	3DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	3DB12	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	-	RB9 @ 0.075
	ช่วงที่ 2	ม.	-	-	-	RB9 @ 0.075
	ช่วงที่ 3	ม.	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	-	RB9 @ 0.075
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,683.00	1,836.00	1,549.13	1,377.00
	ค่าเหล็กอื่น	บาท	1,198.58	1,378.37	719.15	1,438.30
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	661.74	696.57	0.00	1,184.16
	ค่าไม้แบบ	บาท	1,350.00	1,440.00	1,215.00	1,170.00
	รวม	บาท	4,893.32	5,350.94	3,483.27	5,169.46
	รวมทั้งหมด	บาท	37,793.99			

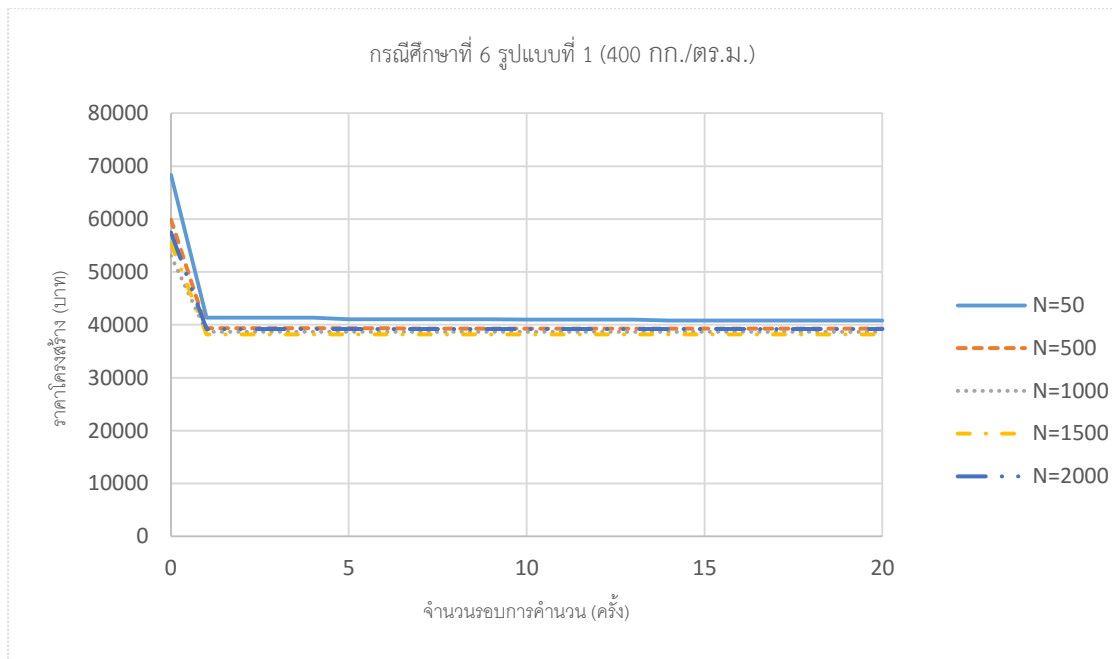


รูปที่ 4.21 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (200 กก./ตร.ม.)



ตารางที่ 4.16 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (400 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร		หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.2	0.2	0.2	0.2
ความลึก		ม.	0.3	0.4	0.225	0.2
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	6DB12	6DB12	2DB12	-
	บน	-	2DB12	2DB12	2DB12	-
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 6-6	-	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	-	4DB12	6DB12	-	-
	หน้าตัด 5-5	-	4DB12	6DB12	-	-
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	-	-
	ช่วงที่ 2	ม.	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.125	-	-
	ช่วงที่ 3	ม.	RB9 @ 0.100	RB9 @ 0.100	-	-
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,836.00	2,448.00	1,377.00	1,224.00
	ค่าเหล็กอื่น	บาท	1,678.01	1,797.87	719.15	719.15
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	975.19	1,170.23	0.00	0.00
	ค่าไม้แบบ	บาท	1,440.00	1,800.00	1,170.00	1,080.00
	รวม	บาท	5,929.21	7,216.11	3,266.15	3,023.15
	รวมทั้งหมด	บาท	38,869.23			

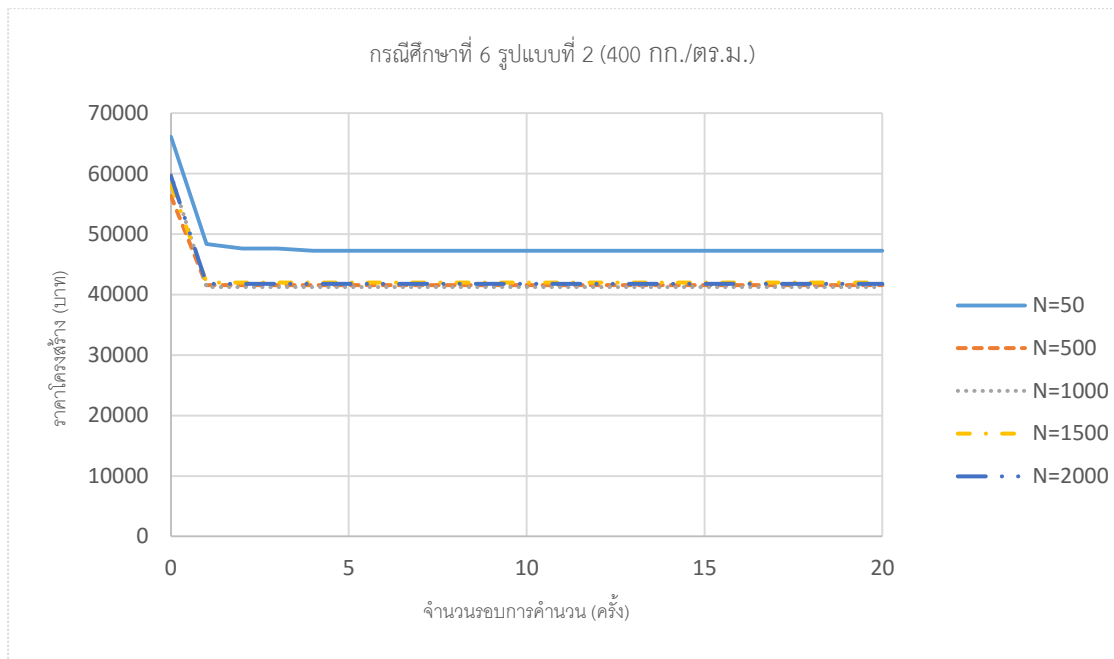


รูปที่ 4.22 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 1 (400 กก./ตร.ม.)



ตารางที่ 4.17 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (400 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร		หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.2	0.2	0.2	0.2
ความลึก		ม.	0.3	0.3	0.3	0.3
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	2DB16	2DB16	2DB16	5DB12
	บน	-	2DB12	3DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	2DB12	-	-
	หน้าตัด 6-6	-	-	-	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-	-
	หน้าตัด 3-3	-	3DB12	3DB12	3DB12	3DB12
	หน้าตัด 5-5	-	3DB12	3DB12	3DB12	3DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.125	-	RB9 @ 0.125
	ช่วงที่ 2	ม.	-	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.125
	ช่วงที่ 3	ม.	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.125	-	RB9 @ 0.125
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,836.00	1,836.00	1,836.00	1,836.00
	ค่าเหล็กยื่น	บาท	1,178.96	1,448.64	1,178.96	1,438.30
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	557.25	835.88	278.63	835.88
	ค่าไม้แบบ	บาท	1,440.00	1,440.00	1,440.00	1,440.00
	รวม	บาท	5,012.21	5,560.52	4,733.59	5,550.18
	รวมทั้งหมด	บาท	41,713.00			

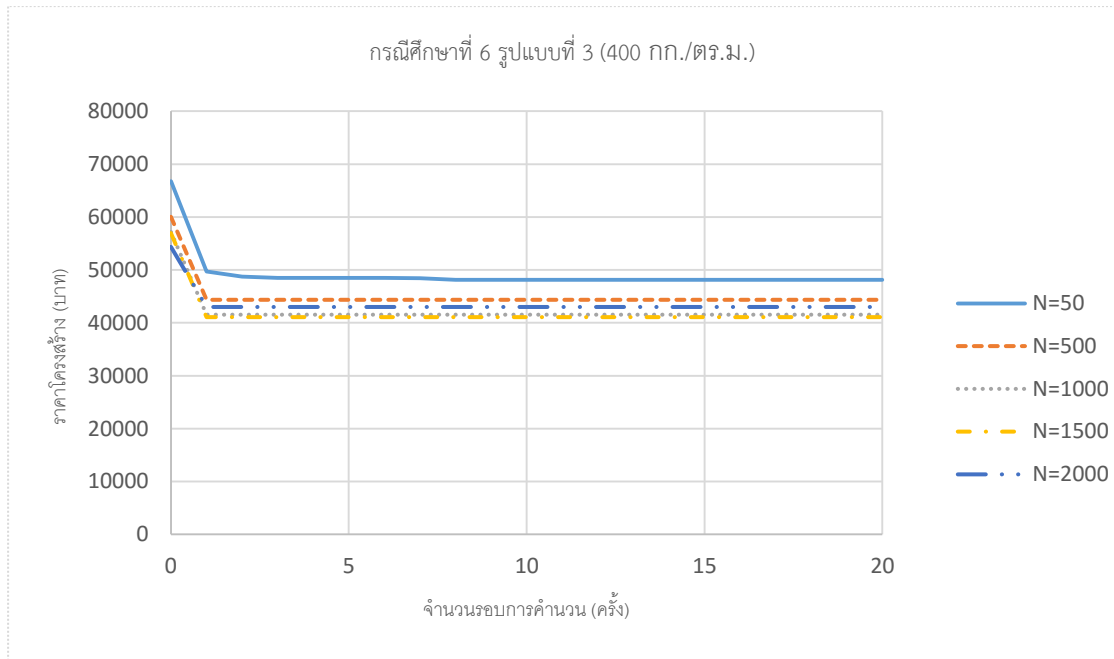


รูปที่ 4.23 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 2 (400 กก./ตร.ม.)



ตารางที่ 4.18 คำตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (400 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร		หน่วย	คำตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.2	0.2	0.2	0.2
ความลึก		ม.	0.35	0.3	0.3	0.3
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	2DB12	2DB16	2DB16	2DB12
	บน	-	2DB12	3DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	1DB20	1DB12	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	3DB12	-	-	5DB12
	หน้าตัด 6-6	-	1DB20	1DB12	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	3DB12	-	-
	หน้าตัด 3-3	-	3DB12	3DB12	5DB12	3DB12
	หน้าตัด 5-5	-	3DB12	3DB12	5DB12	3DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	3DB12	-	-
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.150	RB9 @ 0.125	-	-
	ช่วงที่ 2	ม.	RB9 @ 0.150	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.075
	ช่วงที่ 3	ม.	RB9 @ 0.150	RB9 @ 0.125	-	-
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	2,142.00	1,836.00	1,836.00	1,836.00
	ค่าเหล็กอื่น	บาท	1,283.57	1,538.53	1,298.82	1,123.67
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	766.22	835.88	278.63	464.38
	ค่าไม้แบบ	บาท	1,620.00	1,440.00	1,440.00	1,440.00
	รวม	บาท	5,811.79	5,650.41	4,853.44	4,864.05
	รวมทั้งหมด	บาท	42,359.40			

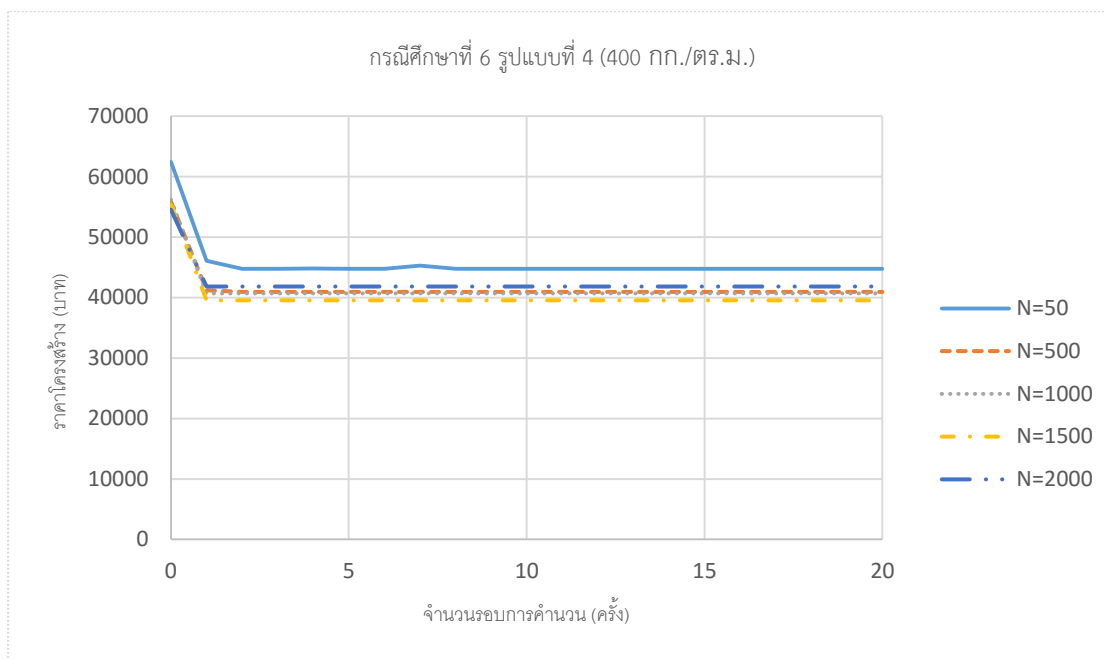


รูปที่ 4.24 การลู่เข้าคำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 3 (400 กก./ตร.ม.)



ตารางที่ 4.19 ค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (400 กก./ตร.ม.)

ตัวแปร		หน่วย	ค่าตอบที่เหมาะสม			
			B1	B2	B3	B4
ความกว้าง		ม.	0.2	0.2	0.225	0.2
ความลึก		ม.	0.3	0.325	0.225	0.25
เหล็กเสริมหลัก	ล่าง	-	5DB12	2DB12	2DB12	7DB12
	บน	-	2DB12	2DB12	2DB12	2DB12
เหล็กเสริมพิเศษล่าง	หน้าตัด 2-2	-	-	2DB12	-	-
	หน้าตัด 4-4	-	-	2DB12	-	-
	หน้าตัด 6-6	-	-	2DB12	-	-
เหล็กเสริมพิเศษบน	หน้าตัด 1-1	-	-	-	-	1DB12
	หน้าตัด 3-3	-	3DB16	3DB12	-	5DB12
	หน้าตัด 5-5	-	3DB16	3DB12	-	5DB12
	หน้าตัด 7-7	-	-	-	-	1DB12
ระยะเรียงเหล็กปลอก	ช่วงที่ 1	ม.	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.075	-	RB9 @ 0.100
	ช่วงที่ 2	ม.	-	-	-	RB9 @ 0.100
	ช่วงที่ 3	ม.	RB9 @ 0.125	RB9 @ 0.075	-	RB9 @ 0.100
ราคาวัสดุ	ค่าคอนกรีต	บาท	1,836.00	1,989.00	1,549.13	1,530.00
	ค่าเหล็กอื่น	บาท	1,578.31	1,168.62	719.15	1,947.70
	ค่าเหล็กปลอก	บาท	557.25	975.19	0.00	940.37
	ค่าไม้แบบ	บาท	1,440.00	1,530.00	1,215.00	1,260.00
	รวม	บาท	5,411.56	5,662.81	3,483.27	5,678.06
	รวมทั้งหมด	บาท	40,471.42			



รูปที่ 4.25 การเข้าสู่คำตอบของกรณีศึกษาที่ 6 รูปแบบที่ 4 (400 กก./ตร.ม.)

เช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 5 เพียงแต่กรณีศึกษาที่ 6 มีจำนวนตัวแปรเพิ่มเป็น 20 ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมเหมือนกันคือ หึ่งห้อยอาจไม่พบคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง แม้หึ่งห้อยจะมีจำนวนมากจนทำให้ใช้การเคลื่อนที่เพียง 2 ครั้งก็ตาม จะเห็นได้ชัดเจนที่รูปที่ 4.23 , 4.24 , 4.25 จำนวนหึ่งห้อย 50 ตัว ใช้การเคลื่อนที่เพียง 3 ครั้งก็พบคำตอบ จากนั้นไม่ว่าจะเคลื่อนที่อีกกี่ครั้งหึ่งห้อยก็ไม่พบคำตอบที่ดีกว่าเดิม แต่จากรูปเห็นได้ว่าหึ่งห้อยจำนวน 50 ตัวให้คำตอบที่เป็นคำตอบเหมาะสมเฉพาะที่ ดังนั้นจำนวนหึ่งห้อยต้องมากพอที่จะครอบคลุมพื้นที่ค้นหาจึงจะพบคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนหึ่งห้อยเท่ากับ 2000 ตัวจะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่ทั้งนี้ไม่ได้แปลว่าเมื่อใช้หึ่งห้อย 2000 ตัว จะได้คำตอบเดิมทุกครั้งที่คำนวณ บางครั้งหึ่งห้อยจำนวน 2000 ตัวก็ให้คำตอบที่แย่กว่าหึ่งห้อยจำนวน 1500 ตัวก็ได้ และเมื่อทดลองจำนวนหึ่งห้อยมากกว่า 2000 ตัว ก็ไม่ได้คำตอบที่ดีกว่าอีกต่อไปเพียงแต่จะเพิ่มโอกาสเจอคำตอบที่เหมาะสมที่สุดบ่อยขึ้นแต่จะใช้เวลาคำนวณนานขึ้นเช่นกัน

4.3.7 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยในอดีต (HS และ SA)

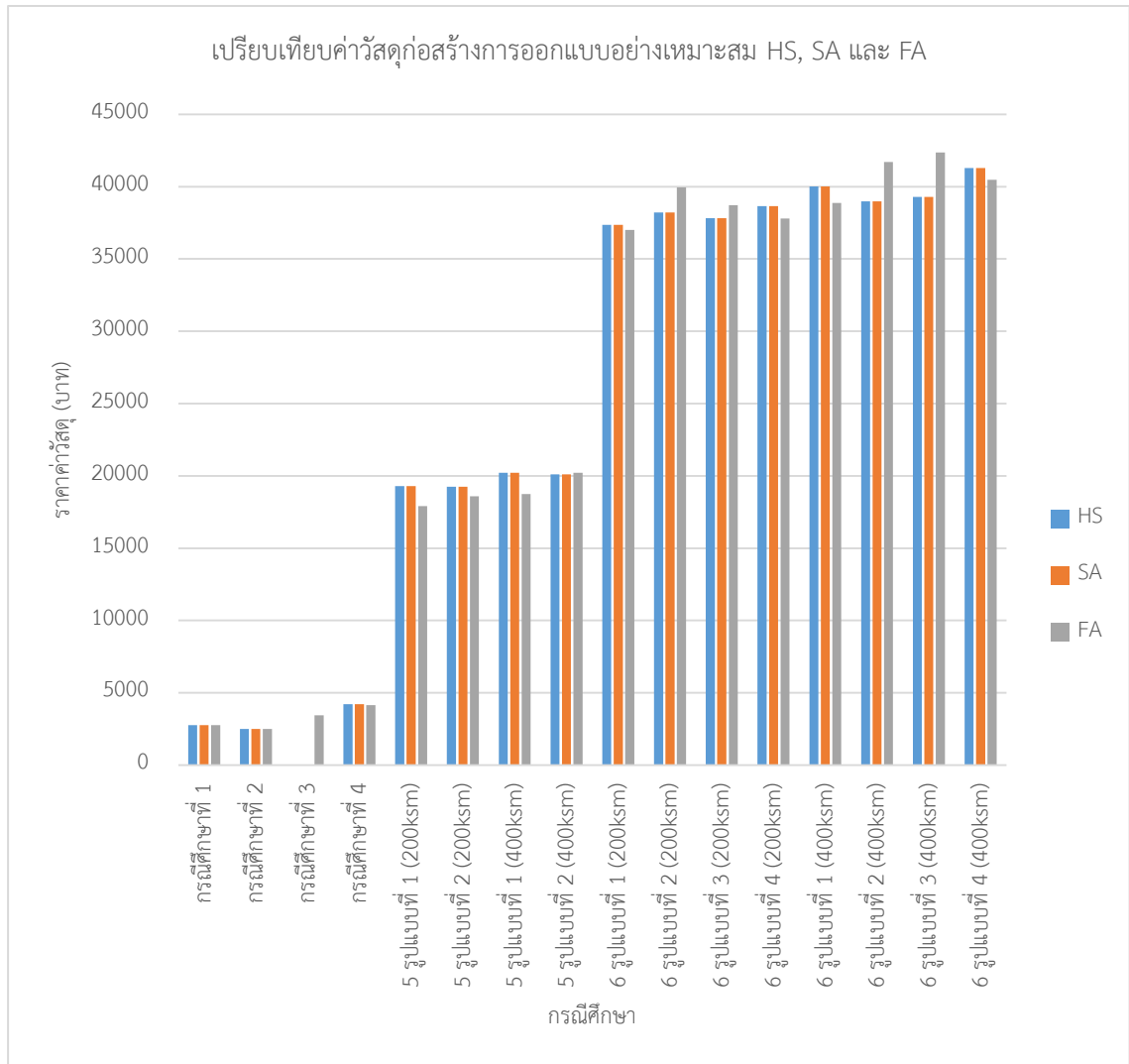
ประสิทธิภาพของ FA ใกล้เคียงกับ HS และ SA ในทุกกรณีศึกษา สำหรับกรณีศึกษาที่ 1-5 FA ให้คำตอบที่ใกล้เคียงหรือดีกว่า แต่ในกรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งมีตัวแปรเท่านั้น FA ให้ผลที่ดีกว่าบ้างแยกว่าบ้าง แต่โดยรวมถือว่าใกล้เคียงกัน

พบว่ากรณีศึกษาที่ 1-4 FA ให้คำตอบที่ดีกว่า HS และ SA ในกรณีที่ 5 ส่วนใหญ่ FA ให้คำตอบที่ดีกว่า มีเพียงกรณีศึกษาที่ 5 รูปแบบที่ 2 ด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกจร 400 กก./ตร.ม. ที่ HS และ SA ให้ผลที่ดีกว่า แต่ก็เพียง 0.49% เท่านั้น สำหรับกรณีศึกษาที่ 6 FA ให้คำตอบที่ดีกว่าบ้างแยกว่าบ้าง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า FA จะประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อตัวแปรน้อย แต่เมื่อตัวแปรมากขึ้นประสิทธิภาพจะลดลง

ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบผลการออกแบบอย่างเหมาะสมระหว่าง HS, SA และ FA

กรณีศึกษา	ราคาวัสดุ			ร้อยละความแตกต่างของราคา FA เทียบกับ HS และ SA (%)	หมายเหตุ
	HS	SA	FA		
กรณีศึกษาที่ 1	2770.07	2770.07	2770.07	0.00	FA HS และ SA ให้ราคาเท่ากัน
กรณีศึกษาที่ 2	2506.12	2506.12	2489.03	-0.68	FA ให้ราคาถูกลง
กรณีศึกษาที่ 3	NA*	NA*	3438.2	NA*	NA*
กรณีศึกษาที่ 4	4215.54	4215.54	4140.49	-1.78	FA ให้ราคาถูกลง
5 รูปแบบที่ 1 (200ksm)	19287.82	19287.82	17898.7	-7.20	FA ให้ราคาถูกลง
5 รูปแบบที่ 2 (200ksm)	19250.39	19250.39	18593.45	-3.41	FA ให้ราคาถูกลง
5 รูปแบบที่ 1 (400ksm)	20216.86	20216.86	18735.22	-7.33	FA ให้ราคาถูกลง
5 รูปแบบที่ 2 (400ksm)	20115.12	20115.12	20214.6	0.49	FA ให้ราคาถูกลง
6 รูปแบบที่ 1 (200ksm)	37357.56	37357.56	36995.67	-0.97	FA ให้ราคาถูกลง
6 รูปแบบที่ 2 (200ksm)	38218.55	38218.55	39938.89	4.50	FA ให้ราคาแพงกว่า
6 รูปแบบที่ 3 (200ksm)	37823.91	37823.91	38719.85	2.37	FA ให้ราคาแพงกว่า
6 รูปแบบที่ 4 (200ksm)	38662.85	38662.85	37793.99	-2.25	FA ให้ราคาถูกลง
6 รูปแบบที่ 1 (400ksm)	40011.1	40011.1	38869.23	-2.85	FA ให้ราคาถูกลง
6 รูปแบบที่ 2 (400ksm)	38986.63	38986.63	41713	6.99	FA ให้ราคาแพงกว่า
6 รูปแบบที่ 3 (400ksm)	39289.43	39289.43	42359.4	7.81	FA ให้ราคาแพงกว่า
6 รูปแบบที่ 4 (400ksm)	41285.08	41285.08	40471.42	-1.97	FA ให้ราคาถูกลง

*ข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบไม่เพียงพอ



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบผลการออกแบบอย่างเหมาะสมระหว่าง HS, SA และ FA

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิควิวัฒนาการอัลกอริทึมหิ่งห้อย (Firefly Algorithm , FA) กับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม เพื่อให้โครงสร้างมีราคาวัสดุต่ำที่สุดโดยยังคงความแข็งแรงตามมาตรฐาน วิธี FA ให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต และคำตอบของการออกแบบอย่างเหมาะสมทุกกรณีจะเข้าสู่โครงสร้างที่มีราคาต่ำกว่าเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากหิ่งห้อยจะเคลื่อนที่หาโครงสร้างที่ราคาต่ำกว่าแต่ยังคงแข็งแรงตามมาตรฐาน หากหิ่งห้อยเจอโครงสร้างที่แข็งแรงไม่เพียงพอก็จะไม่ยอมรับโครงสร้างตัวนั้นและกลับไปใช้โครงสร้างตัวเดิมแทนและในกรณีที่คำตอบเหมาะสมเฉพาะที่หลายคำตอบ วิธีนี้จะสามารถหาคำตอบเฉพาะที่เหล่านั้นได้ทั้งหมด จากนั้นหิ่งห้อยแต่ละตัวจะทำการเปรียบเทียบโครงสร้างที่ได้ระหว่างกัน โดยโครงสร้างที่ราคาต่ำที่สุดจะเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด

จากการศึกษาพฤติกรรมการเข้าสู่คำตอบของการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมโดยวิธีหิ่งห้อย พบว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีผลต่อการคำนวณดังนี้

- ค่าของสัมประสิทธิ์การกรองแสง (γ) ค่า γ มีผลต่อระยะการมองเห็นของหิ่งห้อย ถ้า γ มีค่ามากหิ่งห้อยจะมองเห็นกันได้ยากทำให้หิ่งห้อยติดคู่กันได้ง่ายขึ้น ถ้า γ มีค่าน้อยหิ่งห้อยจะมองเห็นกันได้ชัดเจนทำให้ถูกดึงดูดได้ง่าย แต่การเปลี่ยนแปลงของค่า γ ไม่ส่งผลกระทบต่อผลของการเข้าสู่คำตอบในงานวิจัยนี้มากนัก ในการออกแบบโครงสร้างตัวแปรแต่ละตัวไม่ได้ห่างกันมากนัก ดังนั้นการเพิ่มค่า γ แม้ทำให้ระยะการมองเห็นหิ่งห้อยน้อยลงแต่หิ่งห้อยก็ยังสามารถมองเห็นกันได้ชัดเจนเพียงพอ

- พารามิเตอร์การสุ่ม (α) มีผลต่อระยะการเคลื่อนที่สุ่มของหิ่งห้อย จากการทดลองพบว่า ค่าควรใกล้เคียงกับระยะห่างของตัวแปร เพื่อให้พฤติกรรมเคลื่อนที่สุ่มของหิ่งห้อยไม่กระโดดข้ามตัวแปรมากเกินไป เช่นตัวแปรจำนวนเหล็กเสริมมีการเปลี่ยนแปลงค่าทีละ 1 เส้น ดังนั้นค่า α จึงควรใกล้เคียงกับ 1.0

- ความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสง (β_0) มีผลต่อความแรงในการดึงดูดของหิ่งห้อย ถ้า β_0 มีค่ามากหิ่งห้อยจะถูกดึงดูดให้รวมกลุ่มกันเร็วขึ้น แต่ถ้า β_0 มากเกินไปหิ่งห้อยจะถูกดึงดูดแรงเกินไปจนอาจหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมได้ ค่าที่เหมาะสมคือ $\beta_0 = 1.0$

- จำนวนหิ้งห้อย (N) มีผลต่อการกระจายเต็มพื้นที่การค้นหาคำตอบของหิ้งห้อย ควรมีย่านมากน้อยตามความเป็นไปได้ของโครงสร้าง ยิ่งโครงสร้างมีความเป็นไปได้มากจำนวนหิ้งห้อยควรมากตามไปด้วย เพื่อเพิ่มโอกาสให้หิ้งห้อยค้นพบโครงสร้างที่เหมาะสม หากมีหิ้งห้อยจำนวนน้อยเกินไปโอกาสที่หิ้งห้อยจะพบโครงสร้างที่เหมาะสมก็จะน้อย แต่ทั้งนี้หิ้งห้อยจำนวนที่มากกว่าก็ไม่ได้รับประกันว่าจะพบโครงสร้างที่ดีกว่าหิ้งห้อยจำนวนน้อยกว่าเสมอไป เพียงแต่เพิ่มโอกาสที่จะพบมากกว่าเท่านั้น นอกจากนี้จำนวนหิ้งห้อยที่มากยังลดจำนวนรอบการเคลื่อนที่ให้น้อยลงแต่จะใช้เวลาในการคำนวณแต่ละรอบนานขึ้น

นอกจากการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสมแล้ว จำนวนตัวแปรที่ค้นหาที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหิ้งห้อยเช่นกัน จากกรณีศึกษาที่ 1-4 พบว่าอัลกอริทึมหิ้งห้อยสามารถค้นหาโครงสร้างที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบคำตอบกับงานวิจัยที่ผ่านมา แต่ในกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 แม้อัลกอริทึมหิ้งห้อยจะสามารถหาโครงสร้างที่ราคาต่ำได้ แต่ประสิทธิภาพไม่ค่อยดีนักจากการศึกษาพบว่าสาเหตุเกิดจากจำนวนตัวแปรมากเกินไป เช่น กรณีศึกษาที่ 6 คานหนึ่งตัวมีหน้าตัดถึง 7 หน้าตัด หากมีเพียงหน้าตัดเดียวที่ความแข็งแรงไม่ผ่านเกณฑ์ คานตัวดังกล่าวก็จะไม่ถูกยอมรับ นั่นคือหิ้งห้อยจะทิ้งหน้าตัดทั้งหมดไม่มีการเก็บค่าไว้แม้หน้าตัดที่เหลือจะแข็งแรงเพียงพอและราคาถูกก็ตาม ดังนั้นความเป็นไปได้ในการสุ่มหน้าตัดทั้ง 7 ให้ราคาถูกลงกว่าเดิมและความแข็งแรงเพียงพอทั้งหมดจึงมีความเป็นไปได้ต่ำ

จากผลการออกแบบของกรณีศึกษาต่าง ๆ พบว่าการออกแบบให้ได้โครงสร้างที่มีราคาต่ำที่สุด โครงสร้างจะมีแนวโน้มไปยังทิศทางเดียวกัน คือใช้หน้าตัดให้มีความกว้างต่ำและมีความลึกมาก แต่ความลึกก็ต้องสมดุลกับปริมาณเหล็กเสริมเพื่อให้มีราคาวัสดุต่ำที่สุด หากมีการเปลี่ยนแปลงราคาวัสดุต่าง ๆ แนวโน้มการออกแบบก็จะต่างออกไปเช่นกัน สำหรับกรณีศึกษาที่ 5 และ 6 เป็นการศึกษารวางพื้นสำเร็จในทิศทางต่างๆ เพื่อให้ได้โครงสร้างคานรับพื้นที่ราคาต่ำที่สุด พบว่าการวางพื้นไปแนวทางเดียวกันจะให้โครงสร้างที่ราคาต่ำที่สุด เนื่องจากการวางแผ่นพื้นในทิศทางเดียวกันทำให้เกิดคานที่ไม่ได้รับแรง ซึ่งคานดังกล่าวขนาดจะเล็กที่สุดเท่าที่กำหนดไว้ ทำให้ได้โครงสร้างที่ราคาถูก ส่วนโครงสร้างที่วางพื้นแบบสลับส่งผลให้คานทุกตัวต้องรับแรงกระทำและมีขนาดใหญ่ เมื่อคิดราคารวมออกมาจึงมีราคาสูงกว่า

รายการอ้างอิง

American Concrete Institute (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14), ACI Committee 318.

Baghlani, A., et al. (2013). "A new accelerated firefly algorithm for size optimization of truss structures." Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering 20(6): 1612.

Gandomi, A. H., et al. (2011). "Mixed variable structural optimization using firefly algorithm." Computers & Structures 89(23): 2325-2336.

KAZEMZADEH, A. S. (2011). "OPTIMUM DESIGN OF STRUCTURES USINGAN IMPROVED FIREFLYALGORITHM."

Luh, G.-C.และC.-Y. Lin (2011). "Optimal design of truss-structures using particle swarm optimization." Computers & Structures 89(23): 2221-2232.

Sheikholeslami, R., et al. (2014). "Optimum cost design of reinforced concrete retaining walls using hybrid firefly algorithm." International Journal of Engineering and Technology 6(6): 465.

Talatahari, S., et al. (2014). "Optimum design of tower structures using firefly algorithm." The Structural Design of Tall and Special Buildings 23(5): 350-361.

Yang, X.-S. (2010). Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications, John Wiley & Sons.

Yang, X.-S. (2010). Firefly algorithm, Levy flights and global optimization. Research and development in intelligent systems XXVI, Springer: 209-218.

ภาสุระ อังกุลานนท์. (2014). การศึกษาเปรียบเทียบวิธีไฟร์ฟลายและวิธีกลุ่มอนุภาคสำหรับปัญหาการทดสอบสปริง. การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ราชภัฏเพชรบุรีวิจัยเพื่อแผ่นดินไทยที่ยั่งยืน ครั้งที่ 5.

ลำไพ มีทอง (2009). การออกแบบโครงหลังคาเหล็กอย่างเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีคำนวณเชิงพันธุกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.

วรนาถ แซ่มสุวรรณ (2005). การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงถักเหล็กในระนาบโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.

วรพรรณ วงศ์สรคร (1993). การคำนวณออกแบบโครงถักเหล็กระนาบอย่างเหมาะสมโดยใช้วิธีงานสมมุติ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.

วิรัช เลิศไพฑูรย์พันธ์ และชัชวาล พูลลาภพานิช. (2010). การออกแบบโครงหลังคาโดยอาศัยระเบียบวิธีเลียนแบบพันธุศาสตร์กับตัวแปรจริง. การประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9: STR-149-154.

วีระพงษ์ ไชยสถิตวานิช (1997). การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับโครงถักระนาบ ที่มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นโดยใช้วิธีงานสมมุติ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.

สิริวัฒน์ จัยสุวรรณทัต (2014). การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยอัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียว, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.

อัฐพล เตชะรัตนประเสริฐ (2014). การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ.



ภาคผนวก

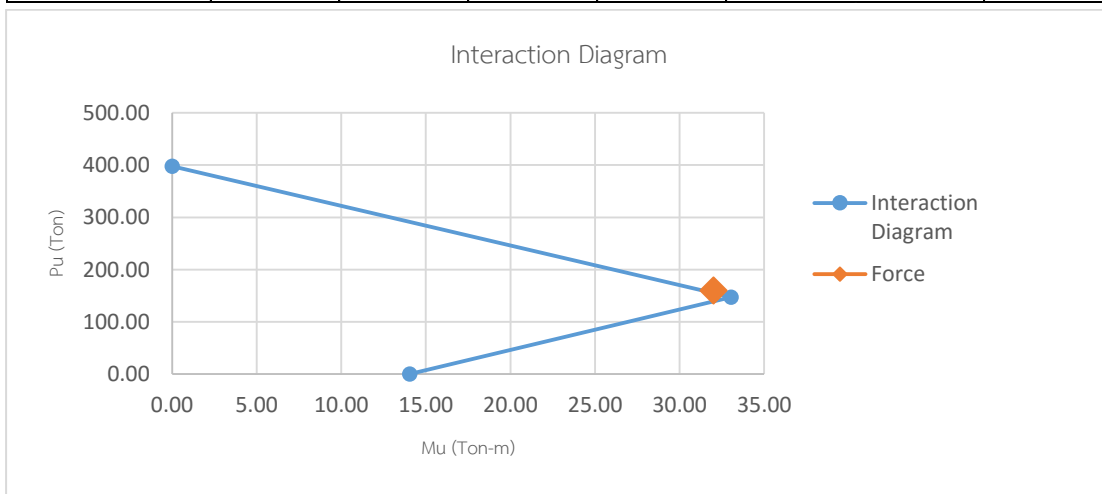
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 ตรวจสอบความแข็งแรงของหน้าตัดคานกรณี 1

กำหนดค่า							
วัสดุ	$f_c' =$	280	ksc	หน้าตัด	$b =$	0.20	m.
	$f_y =$	4000	ksc		$h =$	0.45	m.
	Beta 1 =	0.85			$d =$	0.385	m.
	ϵ_{cu}	0.003			$d' =$	0.065	m.
	E_s	2000000			$A_s =$	11.68	cm ²
	ϵ_y	0.002			$A_s' =$	2.26	cm ²
Design Parameter	$\phi =$	0.90					
วิเคราะห์หน้าตัด							
ตรวจสอบการครากของเหล็กเสริมบน				คำนวณค่า a เมื่อเหล็กบนคราก			
$\rho =$	0.01517			$a =$	7.92	cm.	
$\rho' =$	0.00294			คำนวณค่า a เมื่อเหล็กบนไม่คราก			
$\rho - \rho' =$	0.01223			$R =$	-4.06		
$(0.85f_c' \beta_1 d' / (f_y d)) \times (6120 / (6120 - f_y)) =$	0.02465			$Q =$	22.22		
$f_s' =$	2253.53	ksc		$c =$	10.29		
				$a =$	8.75	cm.	
คำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัด				คำนวณเหล็กรับแรงเฉือน			
$a_{use} =$	8.75	cm.		Use RB9 Area =	0.636	cm ²	
$\phi Mn =$	<u>14.25</u>	<u>Ton-m.</u>		$f_{yt} =$	2400	ksc	
$Mu =$	<u>12.8</u>	<u>Ton-m.</u>		$A_v =$	1.272	cm ²	
$Mu =$	128	N-mm		$V_u =$	12.8	Tons	
				$V_c =$	6.83	Tons	
				$\phi_{shear} =$	0.75		
				<u>$s_{required} =$</u>	<u>0.115</u>	<u>m.</u>	
				<u>$s_{use} =$</u>	<u>0.100</u>	<u>m.</u>	

ตารางที่ ก.2 ตรวจสอบความแข็งแรงของหน้าตัดเสากรณีที่ 3

กำหนดค่า							
วัสดุ	$f_c' =$	280	ksc	หน้าตัด	$b =$	0.425	m.
	$f_y =$	4000	ksc		$h =$	0.5	m.
	Beta 1 =	0.85			$d =$	0.435	m.
	ϵ_{cu}	0.003			$d' =$	0.065	m.
	E_s	20000000			$A_g =$	2125	cm ²
	ϵ_y	0.002			$A_s =$	26.44	cm ²
Design Parameter	$\phi =$	0.65					
สถานะสมมูลการวิบัติ				คำนวณ Mn			
$C_b =$	26.31	cm.		$a = (A_s f_y) / (0.85 f_c' b)$	5.23	cm.	
$a_b =$	22.36	cm.		Mn =	21.62	Tons	
$f_s = f_y =$	4000	ksc		คำนวณ Pn ₀			
$f_s' =$	4517.47	ksc		Pn ₀ =	611.51	Tons	
$f_s'' =$	4000	ksc					
$C_c =$	226.18	Tons					
T =	52.88	Tons					
$C_s =$	52.88	Tons					
Pb =	226.18	Tons					
Mb =	50.82	Tons-m.					
ข้อมูล Plot Interaction Diagram							
จุดที่	Mn	Pn	ϕMn	ϕPn	Force		
	Ton.-m.	Ton.	Ton.-m.	Ton.	Mu	Pu	
1	<u>0.00</u>	<u>611.51</u>	<u>0.00</u>	<u>397.48</u>	Ton.-m.	Ton.	
2	<u>50.82</u>	<u>226.18</u>	<u>33.03</u>	<u>147.01</u>	<u>32</u>	<u>160</u>	
3	<u>21.62</u>	<u>0.00</u>	<u>14.05</u>	<u>0.00</u>			



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกราช ประกอบกิจ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี การศึกษา 2551 และเข้ารับการศึกษาคือต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี การศึกษา 2557

