

การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบฐานรากต้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF OPTIMIZATION METHOD FOR SHALLOW FOUNDATION DESIGN



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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการ ออกแบบฐานรากตื้น
โดย	นายอดุลพัฒน์ บุนนาค
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน)	
.....	กรรมการ
(ดร.วีรยุทธ โภมลวิลาศ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)	

อดุลพัฒน์ บุญนาค : การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบฐานรากตื้น. (APPLICATION OF OPTIMIZATION METHOD FOR SHALLOW FOUNDATION DESIGN) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดกับปัญหาการออกแบบฐานรากตื้น โดยแบ่งออกเป็น 2 ปัญหา ได้แก่ 1) ปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงในแนวแกนตั้ง แรงในแนวแกนราบ โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด ตามข้อกำหนดการออกแบบฐานรากของ DAS (2016) และ มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ACI318-14 2) ปัญหารูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงวิกฤตสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่ ปัญหาฐานรากเดี่ยวมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดของฐานรากและปริมาณการเสริมเหล็กให้มีราคาวัสดุที่ต่ำที่สุดและยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้อย่างปลอดภัย และสำหรับปัญหาคานบนฐานรากยึดหยุนมีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบการวางตัวของน้ำหนักบรรทุก (Load Pattern) ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนวิกฤตสูงสุดเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเหล็กเสริมต่อไป ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาค่าตอบที่ดีที่สุดได้ศึกษาจากวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดทั้งหมด 6 วิธี ประกอบด้วย อัลกอริทึมสำเร็จรูปในโปรแกรมเมทแลป จำนวน 2 อัลกอริทึม ได้แก่ fmincon, Pattern search และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติก จำนวน 4 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหึ่งห้อย วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น พบว่าวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า เป็นวิธีที่สามารถหาค่าตอบได้ดีที่สุดและพบว่าวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณาจักรมดเป็นวิธีที่สามารถหาค่าตอบได้โดยใช้เวลาประมวลผลน้อยที่สุด

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070364621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Shallow foundation, Optimization, Metaheuristic, Rectangular footing, General loading, Beam on elastic foundation

Adulpat Bunnag : APPLICATION OF OPTIMIZATION METHOD FOR SHALLOW FOUNDATION DESIGN. Advisor: Assoc. Prof. Boonchai Ukritchon, Sc.D.

This research presents the mathematical model and the suitable parameters for the optimization of shallow foundation design which consists of 2 problems. The first problem is an optimum design of isolated footing subjected to axial load, horizontal load, bending moment, and torsional moment following DAS (2016) and ACI318M-14. Another problem is the load optimization of beam on non-homogeneous elastic foundation. The objective of isolated footing is to minimize the cost of material including footing concrete and amount of steel reinforcement while the objective of the second problem is to find the critical load pattern for maximizing bending moment and shear force in the beam. In this research, two MATLAB's built-in function (fmincon and pattern search) and four metaheuristic algorithms (Particle Swarm optimization, Firefly Algorithm, Cuckoo search, and Ant colony optimization) are chosen for the optimum design of the shallow foundation. The study found that the optimization method can be effectively applied to the shallow foundation design. The results show that Cuckoo search algorithm is the most competitive algorithm while the Ant colony optimization provides the fastest calculation time.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร.บุญชัย อุกฤษฏชน เป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ ความคิดเห็น คำแนะนำ รวมทั้งปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องและสนับสนุนการดำเนินงานเป็นอย่างดี เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ฐิรวีตร บุญยงฐิ ผศ.ดร. สยาม ยิ้มศิริ และ ดร.วีรยุทธ โกมลวิลาศ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรง เจริญพระชนมายุครบ ๗๒ พรรษา และทุน ๕๐ ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้ความรักและกำลังใจในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์และขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่แนะนำ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

อดุลพัฒน์ บุณนาค



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.2.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว.....	2
1.2.2 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานราก ยึดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว.....	3
1.4.2 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานราก ยึดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่.....	3
1.4.3 ระเบียบวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาค่าที่ดีที่สุดสำหรับออกแบบฐานรากตื้น.....	4
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 ประเภทของฐานรากตื้น.....	5
2.1.2 การออกแบบฐานรากเดี่ยว (Isolated footing design).....	6
2.1.3 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของดิน.....	6
2.1.4 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
2.1.5 คานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on Elastic Foundation).....	12
2.1.6 สัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของดิน (Coefficient of Subgrade Reaction).....	15
2.1.7 กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization method).....	16
2.1.8 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบต่าง ๆ	17
2.1.9 อัลกอริทึมสำเร็จรูปในแมทแลป (MATLAB's Build in function).....	18
2.1.10 วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮีวิริสติก.....	21
2.2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง	30
2.2.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว.....	30
2.2.2 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานราก ยืดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่	34
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	35
3.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว	36
3.1.1 ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว	36
3.1.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว	37
3.1.3 ข้อจำกัดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิคสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว.....	38
3.1.4 ข้อจำกัดด้านการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก	44
3.2 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานราก	53
ยืดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่.....	53

3.2.1	ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหารูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่	53
3.2.2	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับปัญหารูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่	54
3.2.3	การวิเคราะห์แรงภายในคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่	55
บทที่ 4	ผลการทดสอบ การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว.....	57
4.1	กรณีศึกษาการออกแบบฐานรากเดี่ยว	57
4.2	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาการออกแบบฐานรากต้นด้วยวิธีเมตาฮิวริสติก	59
4.2.1	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ PSO	59
4.2.2	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ ACO	61
4.2.3	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ FA	64
4.2.4	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ CS	67
4.3	การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการออกแบบฐานรากเดี่ยวด้วยกรณีศึกษา 1-4 ..	69
4.3.1	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 1	70
4.3.2	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 2	72
4.3.3	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 3	74
4.3.4	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 4	76
4.3.5	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 5	78
4.4	สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการออกแบบฐานรากเดี่ยว	80
บทที่ 5	ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด สำหรับปัญหาการออกแบบคานบนฐานรากยึดหยุน.....	81
5.1	กรณีศึกษารูปแบบบรรทุกวิกฤตสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินแบบคงที่และไม่คงที่.....	81

5.2 ผลการศึกษากรณีรูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อ สัมพันธ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าคงที่.....	82
5.2.1 ผลการทดสอบรูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อ สัมพันธ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าคงที่.....	83
5.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการหาคำตอบของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษา 5.1.....	84
5.3 ผลการศึกษากรณีรูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อ สัมพันธ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าไม่คงที่.....	85
5.3.1 ผลการทดสอบรูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกและสัมพันธ์ด้านทานแรงกดของ ดินที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อสัมพันธ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าไม่คงที่	86
5.3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการหาคำตอบของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษา 5.2.....	87
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	88
บรรณานุกรม.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	93

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน.....	4
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมการคำนวณตัวแปรในสมการหากำลังรับแรงแบกทานประลัย.....	7
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและสมการสำหรับคำนวณราคาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง	37
ตารางที่ 3.2 กรณีน้ำหนักบรรทุกรวมและตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก	44
ตารางที่ 3.3 สรุปสมการข้อจำกัดสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว.....	51
ตารางที่ 4.1 แรงและโมเมนต์สำหรับใช้ออกแบบฐานรากเดี่ยว	57
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ที่ใช้ในการออกแบบฐานรากเดี่ยว	58
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ c_1 และ c_2 สำหรับ PSO.....	60
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ PSO.....	61
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบพารามิเตอร์สำหรับ ACO	62
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ ACO	63
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบพารามิเตอร์สำหรับ FA.....	65
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ FA.....	66
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบพารามิเตอร์สำหรับ CS.....	67
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ CS	68
ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับกรณีศึกษาที่ 1-4 โดยวิธีเมตาฮีวิริสติก.....	69
ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 1	70
ตารางที่ 4.13 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1	71
ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 2	72
ตารางที่ 4.15 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2	73
ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 3	74

ตารางที่ 4.17	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 3	75
ตารางที่ 4.18	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 4	76
ตารางที่ 4.19	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 4	77
ตารางที่ 4.20	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 5	78
ตารางที่ 4.21	คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5	79
ตารางที่ 5.1	ค่าแรงภายในและรูปแบบน้ำหนักบรรทุกวิกฤตสำหรับกรณีศึกษา 5.1.....	82
ตารางที่ 5.2	ค่าแรงภายในและรูปแบบน้ำหนักบรรทุกวิกฤตสำหรับกรณีศึกษา 5.2.....	85



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ฐานรากตื้นประเภทต่าง ๆ.....	5
รูปที่ 2.2 การวิบัติจากกำลังแบกทานของดิน [3].....	7
รูปที่ 2.3 หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนแบบทางเดียว	8
รูปที่ 2.4 หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนแบบสองทาง.....	9
รูปที่ 2.5 การจัดวางเหล็กเสริมในฐานกรากเดี่ยว.....	10
รูปที่ 2.6 หน้าตัดวิกฤตสำหรับระยะความยาวฝังยึด	11
รูปที่ 2.7 สมมติฐานของ Winkler [4]	12
รูปที่ 2.8 สมมติฐานในการวิเคราะห์คานบนฐานรากยึดหย่อน	12
รูปที่ 2.9 ชิ้นส่วนย่อยที่ใช้ในการวิเคราะห์คานบนฐานรากยึดหย่อน	13
รูปที่ 2.10 การจำแนกประเภทคานบนฐานรากยึดหย่อน.....	15
รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวและแรงกระทำฐาน	15
รูปที่ 2.12 ประเภทของคำตอบที่ได้จากวิธีหาค่าตอบที่ดีที่สุด.....	17
รูปที่ 2.13 วิธีหาค่าเหมาะสมแบบ f_{mincon}	18
รูปที่ 2.14 วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ Pattern search [8].....	19
รูปที่ 2.15 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Pattern search [9].....	20
รูปที่ 2.16 พฤติกรรมการบินหาอาหารของกลุ่มอนุภาค	22
รูปที่ 2.17 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค [12].....	23
รูปที่ 2.18 พฤติกรรมการปล่อยแสงเพื่อดึงดูดหิ่งห้อยตัวอื่น	24
รูปที่ 2.19 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย [14].....	25
รูปที่ 2.20 การเลียนแบบและการฟักไข่ของนกกาเหว่า	26
รูปที่ 2.21 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า [16].....	27

รูปที่ 2.22	ขั้นตอนหาอาหารของระบบอาณาจักรมด	28
รูปที่ 2.23	โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณาจักรมด.....	29
รูปที่ 2.24	ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรจาก งานวิจัยของ Ukritchon และ Keawsawasvong [19]	31
รูปที่ 2.25	ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรจากงานวิจัยของ Rawat และ Mittal [20].....	32
รูปที่ 2.26	ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรจากงานวิจัยของ Nigdeli และคณะ [21]	33
รูปที่ 2.27	ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยของ Matsuda และ Sakiyama [22]	34
รูปที่ 2.28	ผลการศึกษาในงานวิจัยของ Ukritchon [23].....	34
รูปที่ 3.1	ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาฐานรากเดี่ยว	36
รูปที่ 3.2	หน่วยแรงที่เกิดขึ้นใต้ฐานราก	38
รูปที่ 3.3	แรงกระทำ ระยะ และจุดหมุนที่ใช้ในการพิจารณา Local over-turning stability	40
รูปที่ 3.4	แรงกระทำและจุดหมุนที่ใช้ในการพิจารณา Global over-turning stability	41
รูปที่ 3.5	การพิจารณาการวิบัติจากการเลื่อนไถล	42
รูปที่ 3.6	พื้นที่รับผิวดขอบและจุดหมุนในการคำนวณแรงเสียดทานต้านโมเมนต์บิด	43
รูปที่ 3.7	หน้าตัดวิกฤตสำหรับการวิบัติจากแรงเฉือนทางเดียว	45
รูปที่ 3.8	หน้าตัดวิกฤตสำหรับการวิบัติจากแรงเฉือนแบบสองทาง	46
รูปที่ 3.9	มุมมองด้านบนของฐานรากเดี่ยวแสดงปริมาณเหล็กเสริมและหน้าตัดวิกฤต	47
รูปที่ 3.10	หน้าตัดวิกฤตสำหรับตรวจสอบการวิบัติจากระยะความยาวฝังยึดไม่เพียงพอ	48
รูปที่ 3.11	ขั้นตอนการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด สำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว	52
รูปที่ 3.12	ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาคานบนฐานรากยึดหย่อน	53
รูปที่ 3.13	Free Body Diagram สำหรับคานบนฐานรากยึดหย่อน.....	55
รูปที่ 3.14	การเชื่อมกันแรงภายในระหว่างชิ้นส่วนย่อยสำหรับคานบนฐานรากยึดหย่อน.....	56
รูปที่ 4.1	แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ c_1 และ c_2 สำหรับ PSO	60
รูปที่ 4.2	อัตราลู่เข้าหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ PSO ที่จำนวนประชากรแตกต่างกัน.....	61
รูปที่ 4.3	แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ Kernel และ Focus สำหรับ ACO	63

รูปที่ 4.4 อัตราลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ ACO ที่จำนวนประชากรแตกต่างกัน	64
รูปที่ 4.5 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ β_{\min} และ α	65
รูปที่ 4.6 อัตราลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ FA ที่จำนวนประชากรแตกต่างกัน	66
รูปที่ 4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ p_a สำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมแบบนกกาเหว่า.....	67
รูปที่ 4.8 อัตราลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ CS ที่จำนวนประชากรแตกต่างกัน	68
รูปที่ 4.9 กรณีศึกษาที่ 1	70
รูปที่ 4.10 กรณีศึกษาที่ 2	72
รูปที่ 4.11 กรณีศึกษาที่ 3	74
รูปที่ 4.12 กรณีศึกษาที่ 4	76
รูปที่ 4.13 กรณีศึกษาที่ 5	78
รูปที่ 4.14 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบราคาและเวลาเฉลี่ยสำหรับกรณีศึกษาที่ 1-5.....	80
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบอัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึม.....	80
รูปที่ 5.1 คานบนฐานรากยึดหยุนที่มีสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของดินคงที่ตลอดความยาวคาน ..	82
รูปที่ 5.2 ค่าแรงภายในสูงสุดซึ่งพิจารณาที่ตำแหน่งทุกจุดบนคานสำหรับกรณีศึกษาที่ 5.1	82
รูปที่ 5.3 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในสูงสุดสำหรับกรณีศึกษา 5.1...	83
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบอัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึม สำหรับกรณีศึกษา 5.1	84
รูปที่ 5.5 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบเวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบสำหรับกรณีศึกษา 5.1	84
รูปที่ 5.6 คานบนฐานรากยึดหยุนที่มีสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของดินคงที่ตลอดความยาวคาน ..	85
รูปที่ 5.7 แรงภายในสูงสุดซึ่งพิจารณาที่ตำแหน่งชั้นย่อยทุกจุดบนคาน	85
รูปที่ 5.8 ผลการศึกษาสำหรับกรณีศึกษา 5.2	86
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบอัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึม สำหรับกรณีศึกษา 5.2	87
รูปที่ 5.10 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบเวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบสำหรับกรณีศึกษา 5.2	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ฐานรากตื้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งของโครงสร้าง มีหน้าที่กระจายน้ำหนักจากโครงสร้างลงบนพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อลดแรงดันก่อนที่จะถ่ายลงสู่ชั้นดิน โดยทั่วไปแล้ววิศวกรจะเลือกใช้ฐานรากตื้นก็ต่อเมื่อดินใต้ฐานรากมีกำลังแบกทานค่อนข้างสูง อัตราการทรุดตัวต่ำ หรือเป็นบริเวณที่ไม่สามารถตอกเสาเข็มได้ นอกจากนี้ฐานรากตื้นยังมีต้นทุนการใช้วัสดุต่ำและสามารถก่อสร้างได้ง่ายกว่าฐานรากแบบเสาเข็มอีกด้วย ซึ่งในการออกแบบวิศวกรจะสุ่มเลือกขนาดหน้าตัดฐานรากขึ้นมาแล้วจึงนำไปตรวจสอบข้อกำหนดด้านเสถียรภาพด้านธรณีเทคนิค (Geotechnical design) และข้อกำหนดด้านโครงสร้าง (Structural design) ตามลำดับ หากพบว่าขนาดของฐานรากที่สุ่มเลือกไว้ไม่ผ่านข้อกำหนดข้อใดข้อหนึ่ง วิศวกรจะต้องเลือกขนาดหน้าตัดของฐานรากขึ้นมาใหม่แล้วทำการตรวจสอบซ้ำอีกครั้งจนผ่านครบทุกข้อกำหนด แต่หน้าตัดที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวอาจจะไม่ใช่หน้าตัดขนาดที่ประหยัดที่สุด ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าตอบที่ดีที่สุด (Optimization method) เพื่อนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธา เพื่อลดต้นทุนค่าวัสดุในการก่อสร้าง ลดเวลาในการคำนวณ อีกทั้งยังสามารถลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นอีกด้วย วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดนั้นสามารถกระทำได้หลากหลายวิธี โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ 1) วิธีการหาค่าตอบโดยตรง (Analytical method) เป็นวิธีที่ใช้หลักการหาอนุพันธ์ในการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชัน วิธีนี้มีข้อดีคือใช้เวลาในการคำนวณที่น้อย เหมาะกับปัญหาที่มีจำนวนตัวแปรไม่มาก แต่มีข้อเสียคือจะไม่สามารถหาค่าตอบที่ต่ำที่สุดแบบสากลได้ (Global optimum) หากเป็นปัญหาที่ซับซ้อนหรือมีความชันไม่สม่ำเสมอ ยกตัวอย่างเช่น Steepest descent method, Newton's method, fmincon 2) วิธีการหาค่าตอบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เป็นวิธีการปรับปรุงผลของคำตอบให้ดีที่สุดอย่างเป็นขั้นตอน มีข้อดีคือสามารถใช้ได้กับปัญหาได้หลากหลายประเภท และมีเทคนิคในการหาค่าตอบที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น Pattern search, วิธีเมตาฮีริสติก (Metaheuristic method), Random search method

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบฐานรากตื้น โดยผู้จัดทำได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการออกแบบฐานรากตื้น ซึ่งได้แบ่งประเด็นที่สนใจออกเป็น 2 ประเด็นที่สำคัญ ได้แก่

- 1) ปัญหาฐานรากเดี่ยวที่รับแรงในแนวตั้ง แรงในแนวราบ โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด โดยปัญหาที่พบในการออกแบบฐานรากประเภทดังกล่าวนี้เกิดจากวิศวกรผู้ออกแบบคำนึงถึงแต่ข้อจำกัดด้านธรณีเทคนิค คือ กำลังรับแบกทานของดิน การพลิกคว่ำ การเลื่อนไถล การหมุน และข้อจำกัดในด้านโครงสร้าง ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับโมเมนต์ดัดและกำลังรับโมเมนต์บิดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มักจะมองข้ามปัจจัยในด้านราคาค่าก่อสร้าง ได้แก่ ปริมาณคอนกรีตที่ใช้ ปริมาณเหล็กเสริม ปริมาณแบบหล่อ เป็นต้น ดังนั้นการประยุกต์วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดมาใช้ในการออกแบบฐานรากให้มีราคาที่ถูกที่สุด และสามารถรับแรงภายนอกได้ตามข้อจำกัดต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถช่วยลดระยะเวลาและความผิดพลาดในการออกแบบ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายให้กับเจ้าของโครงการได้อีกด้วย
- 2) ปัญหาคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่ โดยปัญหาที่พบในการออกแบบฐานรากประเภทดังกล่าวนี้เกิดจาก การวิเคราะห์หารูปแบบการวางตัวของน้ำหนักกดทับ (Load pattern) แต่เดิมนั้นจะวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้นด้วยวิธี Influence Line ต้องอาศัยกระบวนการทำซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนวิกฤตที่สุดสำหรับนำไปใช้ออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทางผู้จัดทำจึงต้องการนำเสนอวิธีการประยุกต์วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดมาใช้เพื่อให้ได้รูปแบบการจัดวางตัวของน้ำหนักกดทับที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ แรงเฉือนวิกฤตที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและสามารถนำไปใช้ออกแบบฐานรากได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว

- 1) นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาราคาวัสดุที่ต่ำที่สุดสำหรับการออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงในแนวตั้ง แนวราบ โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด
- 2) ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดกับปัญหาออกแบบฐานรากเดี่ยว
- 3) ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบเมตาฮิวริสติก
- 4) ศึกษาประสิทธิภาพของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดประเภทต่าง ๆ

1.2.2 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่

- 1) นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หารูปแบบการวางตัวของน้ำหนักกดทับที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนวิกฤต
- 2) ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดกับปัญหาคานบนฐานรากยึดหยุน
- 3) ศึกษาประสิทธิภาพของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดประเภทต่าง ๆ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

- 1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ต้องการศึกษาในการคำนวณและออกแบบฐานรากตื้น
- 2) นำเสนอพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติกกับปัญหาการออกแบบฐานรากตื้น
- 3) นำเสนอผลการเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากตื้นด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดประเภทต่าง ๆ
- 4) เป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดในการออกแบบโครงสร้างด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคแบบอื่น ๆ ต่อไป

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว

1.4.1.1 ข้อกำหนดในการออกแบบฐานรากเดี่ยว

- 1) การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงตามมาตรฐาน ACI 318-14
- 2) ตรวจสอบเสถียรภาพด้านธรณีเทคนิคตามข้อกำหนดของ DAS (2006)

1.4.1.2 พิจารณาราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงในการก่อสร้างฐานตื้น ได้แก่ คอนกรีต เหล็กเสริม และแบบหล่อคอนกรีต

1.4.1.3 วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติก

1.4.2 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่

- 1.4.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินต่างกัน

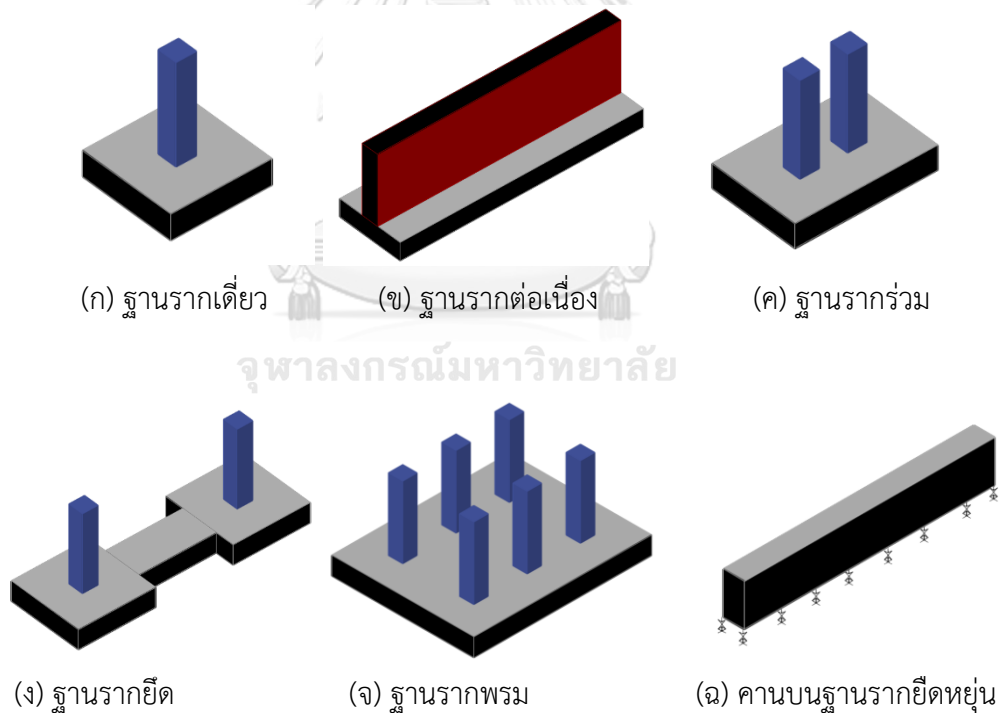
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ประเภทของฐานรากตื้น

ฐานรากตื้น คือส่วนล่างสุดของโครงสร้างมีหน้าที่ถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างลงสู่ชั้นดินที่รองรับ โดยทั่วไปแล้วฐานรากตื้นเหมาะสำหรับอาคารหรือโครงสร้างขนาดเล็กที่วางอยู่บนชั้นดินที่มีกำลังค่อนข้างสูง ไม่เสี่ยงต่อการโดนน้ำกัดเซาะ และมีระยะฝังดิน (Embedment depth) ไม่เกิน 2.5 เท่าของความกว้างฐาน ซึ่งสามารถแบ่งฐานรากตื้นออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ ฐานรากเดี่ยว (Isolated footing) ฐานรากต่อเนื่อง (Continuous footing) ฐานรากร่วม (Combine footing) ฐานรากยึด (Strap footing) และฐานรากพรม (Mat footing) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ฐานรากตื้นประเภทต่าง ๆ

2.1.2 การออกแบบฐานรากเดี่ยว (Isolated footing design)

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเสถียรภาพด้านธรณีเทคนิคตามข้อกำหนดของ Das, B.M. [1] และข้อจำกัดด้านการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI318-14 [2] หลักการทั่วไปสำหรับการออกแบบฐานรากตื้น วิศวกรจะเป็นผู้กำหนดขนาดของฐานรากแล้วนำไปตรวจสอบเสถียรภาพด้านธรณีเทคนิคด้วยน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Service Load) ประกอบด้วย อัตราส่วนความปลอดภัยการรับน้ำหนักบรรทุก (Bearing capacity) เสถียรภาพด้านการเลื่อนไถล (Sliding stability) เสถียรภาพด้านการพลิกคว่ำ (Overturning stability) และเสถียรภาพด้านการหมุน (Torsional stability) เมื่อผ่านข้อกำหนดดังกล่าวแล้วจึงพิจารณาข้อจำกัดด้านการรับน้ำหนักของโครงสร้างด้วยน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate load) คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตทั้งแบบเฉือนทางเดียว (One-way shear) และแบบเฉือนสองทาง (Two-way shear) กำลังต้านทานแรงบิดของคอนกรีต (Torsional capacity) จากนั้นจึงคำนวณปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องใช้รับโมเมนต์ดัดและตรวจสอบระยะยึดฝัง (Development length) หากวิศวกรตรวจสอบแล้วพบว่าขนาดของฐานรากและปริมาณเหล็กเสริมที่วิศวกรออกแบบไม่ผ่านข้อกำหนดข้อใดข้อหนึ่ง วิศวกรจะต้องกำหนดขนาดของฐานรากใหม่แล้วทำการตรวจสอบซ้ำอีกครั้งจนผ่านข้อกำหนดทั้งหมด

2.1.3 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของดิน

การวิบัติของฐานรากเดี่ยวโดยส่วนมากแล้วจะเกิดจากการวิบัติจากกำลังแบกทานของดินไม่เพียงพอที่จะรับน้ำหนักจากโครงสร้าง (Bearing capacity failure) โดยมีลักษณะการวิบัติดังรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการจำกัดหน่วยแรงรับน้ำหนักบรรทุกได้ฐานรากไม่ให้เกินค่าที่ยอมรับได้ ในการออกแบบฐานรากตื้นตามข้อกำหนดของ Das, B.M. [1] จะพิจารณาออกแบบขนาดของฐานรากจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Service load) ทั้งนี้สามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ (q_{ult}) จากสมการของเทอร์ซาคี โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองสภาวะ ได้แก่ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของดินแบบระยะสั้น ($q_{ult,s}$) และกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของดินแบบระยะยาว ($q_{ult,l}$) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) และตารางที่ 2.1

$$q_{ult,s} = s_u N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 0.5 B' N_g \gamma F_{gs} F_{gd} F_{gi} \quad (2.1)$$

$$q_{ult,l} = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q' N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 0.5 B' N_g \gamma' F_{gs} F_{gd} F_{gi} \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมการคำนวณตัวแปรในสมการหาค่ากำลังรับแรงแบกทานประลัย

Factor	Bearing	Shape	Depth	Inclination
Cohesion	$N_c = (N_q - 1) \cot \phi'$	$F_{cs} = 1 + \frac{B N_q}{L N_c}$	$F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{D}{B}$	$F_{ci} = (1 - \frac{\beta}{\pi/2})^2$
Surcharge	$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2})$	$F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi$	$F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 D / B$	$F_{qi} = (1 - \frac{\beta}{\pi/2})^2$
Weight	$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi'$	$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$	$F_{\gamma d} = 1$	$F_{\gamma i} = (1 - \frac{\beta}{\phi})^2$

เมื่อ S_u หมายถึง กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวในสภาวะไม่ระบายน้ำ (kPa)

c' หมายถึง ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลของดิน (kPa)

ϕ' หมายถึง ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลของดิน (deg)

γ หมายถึง หน่วยน้ำหนักของดินใต้ฐานราก (kN/m³)

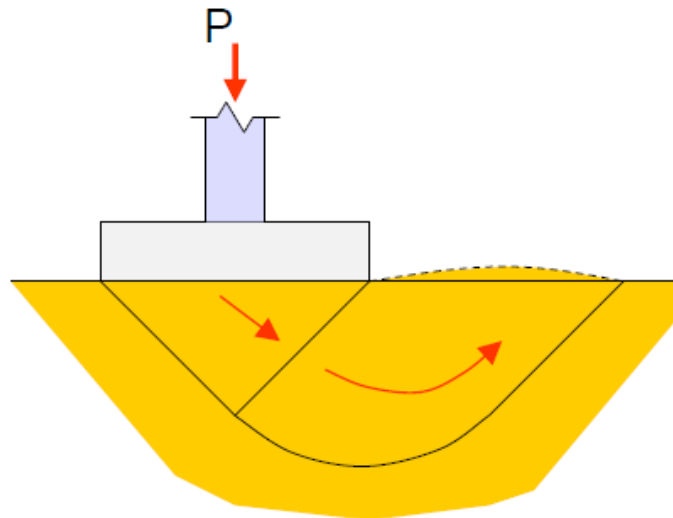
B หมายถึง ความกว้างประสิทธิผลของฐานราก (m)

N_c, N_q, N_γ หมายถึง ตัวแปรกำลังรับแรงแบกทาน (Bearing capacity factor)

F_{cs}, F_{cd}, F_{ci} หมายถึง ตัวคูณปรับแก้รูปร่าง

F_{qs}, F_{qd}, F_{qi} หมายถึง ตัวคูณปรับแก้ความลึก

$F_{\gamma s}, F_{\gamma d}, F_{\gamma i}$ หมายถึง ตัวคูณปรับแก้ความลาดเอียง



รูปที่ 2.2 การวิบัติจากกำลังแบกทานของดิน [3]

2.1.4 การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการออกแบบฐานรากเดี่ยวจะต้องมีการตรวจสอบการวิบัติจากแรงเฉือนแบบทางเดียว (One-way shear) การวิบัติจากแรงเฉือนแบบสองทาง (Two-way shear) กำลังรับโมเมนต์บิด และต้องมีการออกแบบเสริมเพื่อรับโมเมนต์ดัด รวมถึงต้องมีการตรวจสอบระยะยึดฝังของเหล็กด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้การตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยมาตรฐาน ACI 318M-14 [2] ซึ่งมีรายละเอียดในการตรวจสอบดังนี้

1) การวิบัติจากแรงเฉือนแบบทางเดียว

ฐานรากอาจวิบัติโดยการเฉือนทางเดียวเหมือนเช่นคาน โดยแรงเฉือนวิกฤตแบบทางเดียวจะพิจารณาหน้าตัดวิกฤตอยู่ที่ระยะเท่ากับความลึกประสิทธิผล (d) วัดจากขอบเสา ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยปกติในการออกแบบฐานรากแล้วจะไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน แต่จะเพิ่มความหนาของฐานรากเพื่อให้กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าแรงเฉือนวิกฤต ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$V_{c, \text{oneway}} = \phi_v 0.15 \sqrt{f'_c} b d \quad (2.3)$$

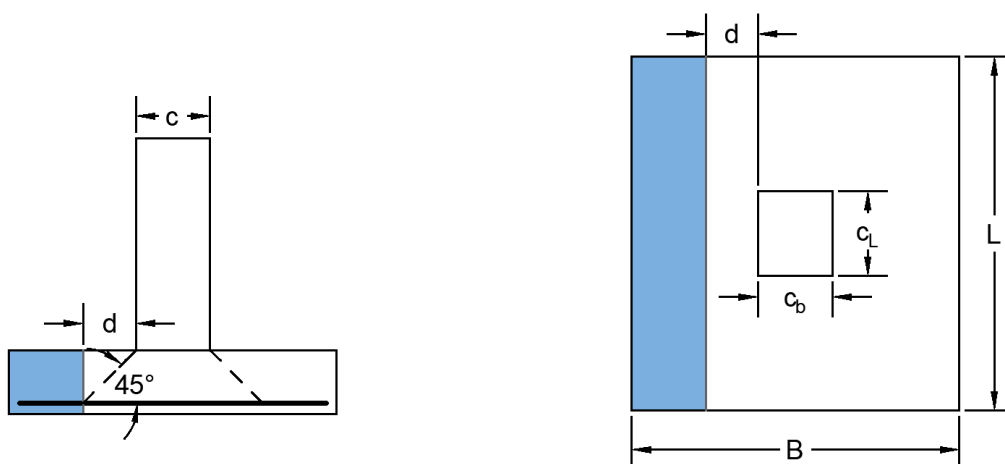
เมื่อ $V_{c, \text{oneway}}$ หมายถึง กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวของคอนกรีต (N)

ϕ_v หมายถึง ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงเฉือน = 0.75

f'_c หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)

b หมายถึง ด้านกว้างของฐานราก (mm)

d หมายถึง ความลึกประสิทธิผลของฐานราก (mm)



รูปที่ 2.3 หน้าตัดวิกฤตสำหรับแรงเฉือนแบบทางเดียว

2) การวิบัติจากแรงเฉือนแบบสองทาง

ผลจากแรงเฉือนอาจทำให้เกิดการเจาะทะลุผ่านคอนกรีตหากมีความหนาไม่เพียงพอ ในการตรวจสอบแรงเฉือนวิฤติจะพิจารณาหน้าตัดวิฤติห่างจากขอบเสาเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผล ($d/2$) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ตามมาตรฐาน ACI กำหนดให้ใช้ค่าที่น้อยที่สุดที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

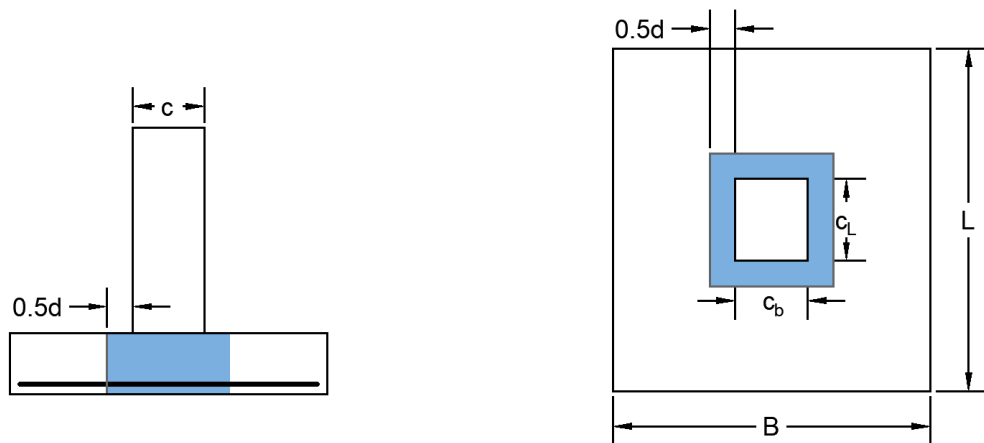
$$V_{ntwo\text{way}} = \left\{ \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) / 6, \left(\frac{\alpha_s d}{b_o} + 2\right) / 12, 1/3 \right\} \sqrt{f_c} b_o d \quad (2.4)$$

เมื่อ $V_{c,two\text{way}}$ หมายถึง กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวของคอนกรีต (N)

b_o หมายถึง ความยาวเส้นรอบรูปที่ระยะ $d/2$ จากขอบเสา (mm)

β_c หมายถึง อัตราส่วนระหว่างด้านยาวต่อด้านสั้นของหน้าตัดเสา

α_c หมายถึง 40 สำหรับเสภายใน, 30 สำหรับเสาต้นริม, 20 สำหรับเสาต้นมุม



รูปที่ 2.4 หน้าตัดวิฤติสำหรับแรงเฉือนแบบสองทาง

3) การออกแบบเหล็กเสริมเพื่อรับโมเมนต์ดัด

แรงดันดินใต้ฐานรากทำให้เกิดโมเมนต์ดัดประลัย ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบเสาและลดลงจนถึงขอบของฐานราก โมเมนต์ที่เกิดขึ้นนี้จะถูกต้านทานโดยการเสริมเหล็กในแนวขวางและแนวยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัดได้จากสมการที่ (2.5)

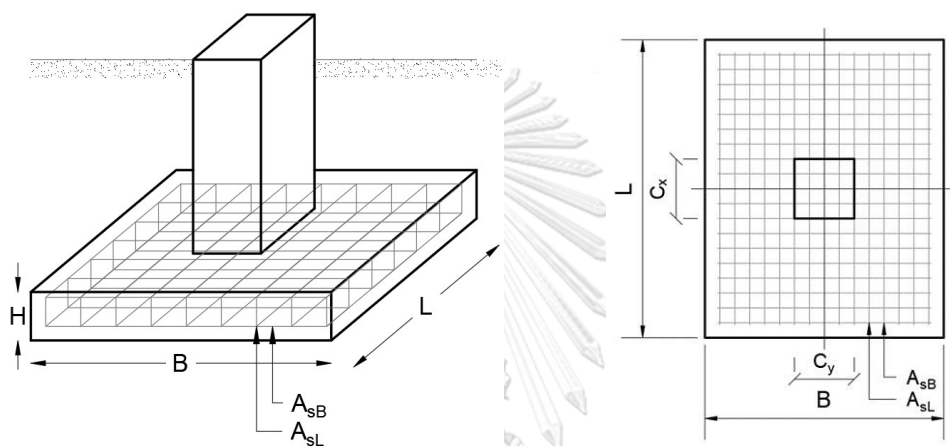
$$M_n = \phi_m \rho f_y b d^2 \left(1 - \frac{\rho f_y}{1.7 f_c'} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ ϕ_m หมายถึง ตัวคูณลดกำลังสำหรับการดัด = 0.90

M_n หมายถึง กำลังรับโมเมนต์ดัดกระทำ (N-m)

ρ หมายถึง อัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด

f_y หมายถึง ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (MPa)



รูปที่ 2.5 การจัดวางเหล็กเสริมในฐานกรอกเดี่ยว

4) ความยาวฝังยึดของเหล็กเสริม

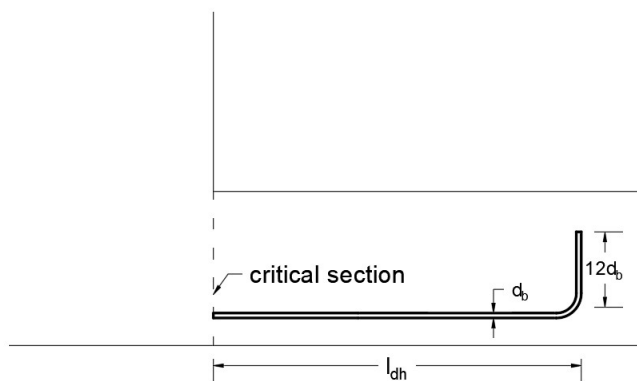
การกำหนดความยาวฝังยึดของเหล็กเสริมทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตเพื่อให้เหล็กสามารถรับแรงดึงได้จนถึงกำลังครากของเหล็ก ซึ่งโดยปกติแล้วในฐานรากจะใช้การงอฉาก (90°) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เนื่องจากความยาวฝังยึดตามแนวเส้นตรงไม่เพียงพอ ตามมาตรฐาน ACI318-14 [2] ได้กำหนดให้ส่วนปลายยื่นต้องยาวต่อออกไปอีกอย่างน้อย 12 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเส้นนั้น โดยสามารถคำนวณความยาวฝังยึดขั้นต่ำได้จากสมการที่ (2.6)

$$l_{dh} = \frac{0.24 \Psi_e f_y}{\sqrt{f_c'}} d_b \geq (8d_b, 150\text{mm}) \quad (2.6)$$

เมื่อ l_{dh} หมายถึง ระยะฝังยึดขั้นต่ำแบบข้อมฉาก (mm)

Ψ_e หมายถึง ตัวคูณปรับแก้สำหรับเหล็กเสริมเคลือบ Epoxy

d_b หมายถึง เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม (mm)



รูปที่ 2.6 หน้าตัดวิกฤตสำหรับระยะความยาวฝังยึด

5) การวิบัติจากโมเมนต์บิด

เนื่องจากฐานรากไม่มีการเสริมเหล็กปลอกจึงทำให้คอนกรีตแตกร้าวเมื่อรับโมเมนต์บิด ดังนั้นกำลังรับโมเมนต์บิดของฐานรากนั้นจะเกิดจากกำลังของคอนกรีตเพียงอย่างเดียว ตามมาตรฐาน ACI ได้กำหนดว่าแรงบิดในองค์อาคารสามารถถูกละเลยได้ก็ต่อเมื่อ ค่าโมเมนต์บิดประลัยมีค่าไม่เกิน 25 % ของกำลังต้านโมเมนต์บิดแตกร้าว ซึ่งสามารถคำนวณโมเมนต์บิดแตกสำหรับหน้าตัดฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้จากสมการที่ (2.7)

$$T_n = \phi_t 0.083 \sqrt{f_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \quad (2.7)$$

เมื่อ T_n หมายถึง กำลังรับโมเมนต์บิดสำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (N)

ϕ_t หมายถึง ตัวคูณลดกำลังสำหรับการบิด = 0.85

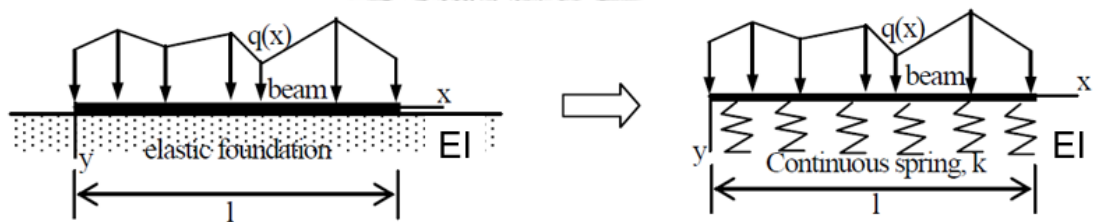
A_{cp} หมายถึง พื้นที่ของหน้าตัดที่รับโมเมนต์บิด (mm)

P_{cp} หมายถึง เส้นรอบรูปของหน้าตัดที่รับโมเมนต์บิด (mm)

2.1.5 คานบนฐานรากยืดหยุ่น (Beam on Elastic Foundation)

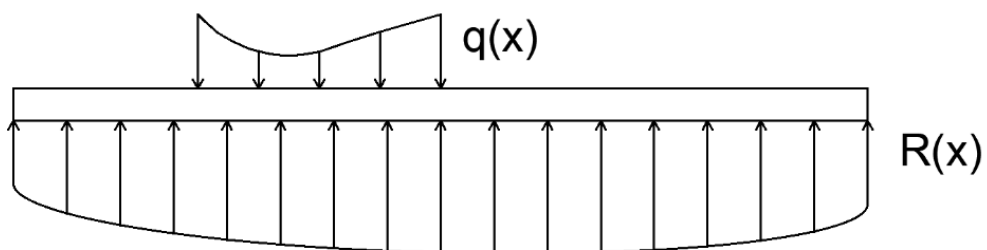
Winkler, 1867 ได้นำเสนอแนวทางการวิเคราะห์คานบนฐานรากยืดหยุ่นโดยสมมติให้ดินใต้ฐานรากมีพฤติกรรมเป็นสปริง ดังรูปที่ 2.7 อ้างอิงจากสมมติฐานของ Winkler ซึ่งมีนิยามดังนี้

- 1) แรงปฏิกิริยาต้านของฐานรากเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง และแรงแต่ละจุดต่อน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำในแต่ละจุดเป็นอิสระต่อกัน
- 2) ดินใต้ฐานรองรับติดกันกับโครงสร้างซึ่งจะไม่แยกออกจากกันแม้ว่าจะเกิดแรงดึง
- 3) โครงสร้างที่วางบนฐานรองรับแบบยืดหยุ่นมีความยาวไม่จำกัด
- 4) โครงสร้างไม่รับแรงตามแนวแกน
- 5) แรงเฉือนไม่มีผลต่อการโก่งตัว



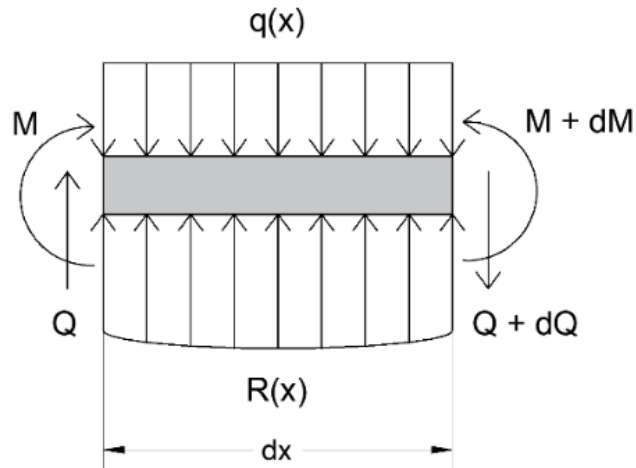
รูปที่ 2.7 สมมติฐานของ Winkler [4]

ในการวิเคราะห์แบบ One-Dimensional Linear Element ภายใต้สมมติฐานของคานวางบนฐานรากยืดหยุ่นที่มีแรงกระทำภายนอก $q(x)$ โดยมีแรงปฏิกิริยาตามแนวยาวของคาน $R(x)$ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สมมติฐานในการวิเคราะห์คานบนฐานรากยืดหยุ่น

เมื่อพิจารณาชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นขนาดย่อย dx กำหนดทิศทางของแรงในทิศทางพุ่งขึ้นและโมเมนต์ในทิศทางเข็มนาฬิกาเป็นบวก และพิจารณาระนาบในสภาวะสมดุลแรงกระทำและแรงปฏิกิริยาต้านทานจะทำให้เกิดการตัดของคาน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ชิ้นส่วนย่อยที่ใช้ในการวิเคราะห์คานบนฐานรากยึดหยุ่น

จากสมการสมดุลแรงในแนวตั้ง ($\sum V = 0$)

$$Q - (Q + dQ) + R(x)dx - q(x)dx = 0$$

$$\frac{dQ}{dx} = R(x) - q$$

จากสมการผลรวมของโมเมนต์ที่ปลายคาน

$$dM - (Q + dQ)dx - q \frac{dx^2}{2} + R \frac{dx^2}{2} = 0$$

$$\frac{dM}{dx} = Q$$

จากสมการการแอ่นตัวของคาน

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวตั้ง โมเมนต์และการแอ่นตัวของคาน

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{d^2 M}{dx^2} = EI \frac{d^4 y}{dx^4}$$

จะได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์พื้นฐานสำหรับวิเคราะห์คานบนฐานรากยึดหยุนดังแสดงในสมการที่ (2.8)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^2} + ky = q \quad (2.8)$$

เมื่อ x หมายถึง ระยะตามแนวนาน (m)

y หมายถึง ระยะการแอ่นตัวของคาน (m)

EI หมายถึง ค่าความแข็งของคาน (kNm^2)

k หมายถึง คุณสมบัติความยึดหยุนของดินใต้ฐานราก ($\text{kN/m}^2/\text{m}$)

q หมายถึง แรงกระทำภายนอก (kN)

ในการจำแนกประเภทของคานบนฐานรากยึดหยุนจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าสตีฟเนสสัมพัทธ์ (Relative Stiffness) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับ Flexural rigidity ของคาน (EI) และคุณสมบัติความยึดหยุนของดินใต้ฐานราก (k) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.9) ตัวแปรดังกล่าวจะเป็นตัวแปรที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของคาน ดังรูปที่ 2.10 โดยจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) Short Beam

เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งเกร็ง (Rigid) แรงปฏิกิริยาของฐานรองรับมีผลเล็กน้อยมากต่อการตัดของโครงสร้างจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงการโก่งตัวของคาน

2) Intermediate Beam

เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งปานกลาง แรงกระทำต่อคานที่ปลายข้างหนึ่งจะมีผลต่อปลายอีกข้างหนึ่ง เนื่องจากความยาวคานเป็นแบบจำกัด (Finite length)

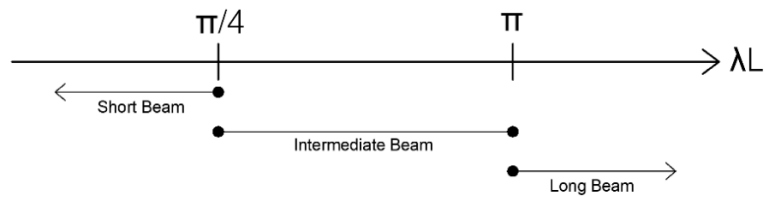
3) Long Beam

เป็นโครงสร้างที่ไม่พิจารณาแรงกระทำที่ปลายทั้งสองด้านของคานเนื่องจากมีความยาวเป็นแบบไม่จำกัด (Infinite length) ถือเป็นโครงสร้างที่สามารถตัดตัวได้ (Flexible)

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{kB}{4EI}} \quad (2.9)$$

เมื่อ kB หมายถึง ค่าความแข็งของดิน (kN/m^2)

L หมายถึง ความยาวของคานบนฐานรากยึดหยุน (m)



รูปที่ 2.10 การจำแนกประเภทคานบนฐานรากยึดหยุ่น

2.1.6 สัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของดิน (Coefficient of Subgrade Reaction)

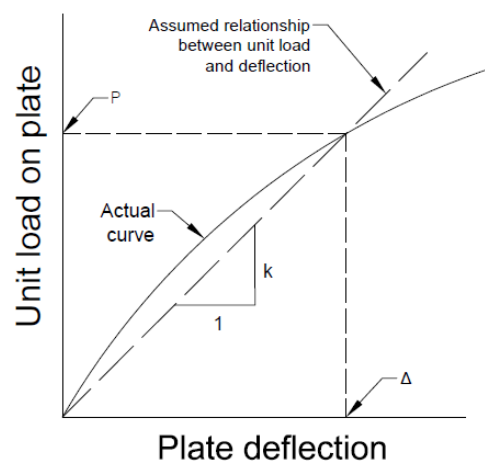
สัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของดิน (k) คืออัตราส่วนการของแรงกระทำต่อการทรุดตัวซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10) โดยสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของดินนั้นมีความสัมพันธ์กับความกว้างของฐาน (B) แรงที่กระทำต่อพื้นที่ฐาน (q) และระยะการทรุดตัวของฐาน สามารถหาได้จากการทดสอบแรงกดบนแผ่นเหล็ก (Plate load test) ซึ่งจะทดสอบโดยนำแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.3×0.3 เมตร กดลงบนดิน ณ ระดับที่ต้องการจะก่อสร้างฐานราก จากนั้นทำการวัดหน่วยแรงและค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจนกระทั่งดินวิบัติ หรือจนกระทั่ง $q=1.5q_u$ แล้วทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์เพื่อหาความชันของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (2.10)$$

เมื่อ k หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของดิน (kN/m^3)

P หมายถึง แรงที่กระทำต่อฐาน (kN)

Δ หมายถึง ค่าการยุบตัวของฐาน (m)



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวและแรงกระทำฐาน

2.1.7 กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization method)

กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization method) เป็นกระบวนการค้นหาทางเลือกหรือคำตอบที่ทำให้ฟังก์ชันเกิดค่าสูงสุดหรือต่ำสุด สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่มีข้อจำกัด (Unconstrained optimization) 2) การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีข้อจำกัด (Constrained optimization) ซึ่งในการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นต้องเขียนปัญหาที่สนใจให้อยู่ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } f_i(x) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (2.11)$$

$$\text{Subjected to } h_j(x) = 0, \quad (j = 1, 2, 3, \dots, J) \quad (2.12)$$

$$g_k(x) \leq 0, \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) \quad (2.13)$$

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

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T$$

โดยที่ $f_i(x)$ หมายถึง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$h_j(x)$ หมายถึง ฟังก์ชันข้อจำกัดแบบเท่ากับ (Equalities constraints)

$g_k(x)$ หมายถึง ฟังก์ชันข้อจำกัดแบบอสมการ (Inequalities constraints)

x หมายถึง ตัวแปรออกแบบ (Design variables)

R^n หมายถึง มิติในการค้นหาคำตอบ (Search space)

M หมายถึง จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

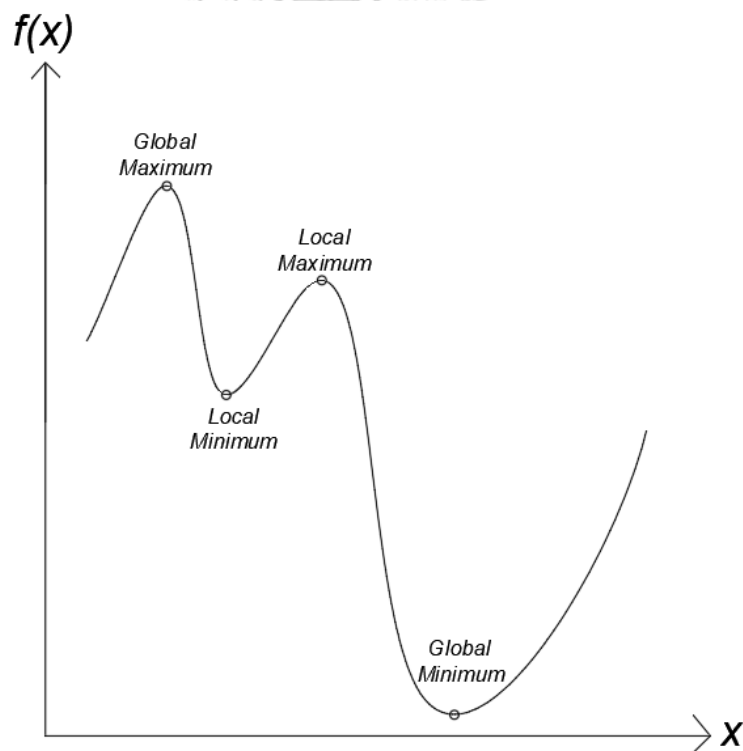
J หมายถึง จำนวนฟังก์ชันข้อจำกัดแบบเท่ากับ โดยจะมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีข้อจำกัด และมีค่ามากกว่า 0 สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่มีข้อจำกัด

K หมายถึง จำนวนฟังก์ชันข้อจำกัดแบบอสมการ โดยจะมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีข้อจำกัด และมีค่ามากกว่า 0 สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่มีข้อจำกัด

n หมายถึง จำนวนตัวแปรออกแบบ

2.1.8 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบต่าง ๆ

เมื่อกำหนด ตัวแปรออกแบบ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัดต่าง ๆ ดังสมการที่ (2.11) (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ การเลือกอัลกอริทึมให้เหมาะสมกับปัญหาเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้สามารถหาคำตอบที่เป็นจุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุดสัมบูรณ์ (Global Optimum) แทนที่จะเป็นคำตอบแบบจุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ (Local Optimum) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อัลกอริทึมทั้งหมด 6 วิธี ประกอบด้วย อัลกอริทึมสำเร็จรูปในโปรแกรมแมทแลป (MATLAB's Build in function) จำนวน 2 อัลกอริทึม ได้แก่ fmincon Pattern search และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮีริสติก (Metaheuristic Algorithm) จำนวน 4 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า (Cuckoo search) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากต้น



รูปที่ 2.12 ประเภทของคำตอบที่ได้จากวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด

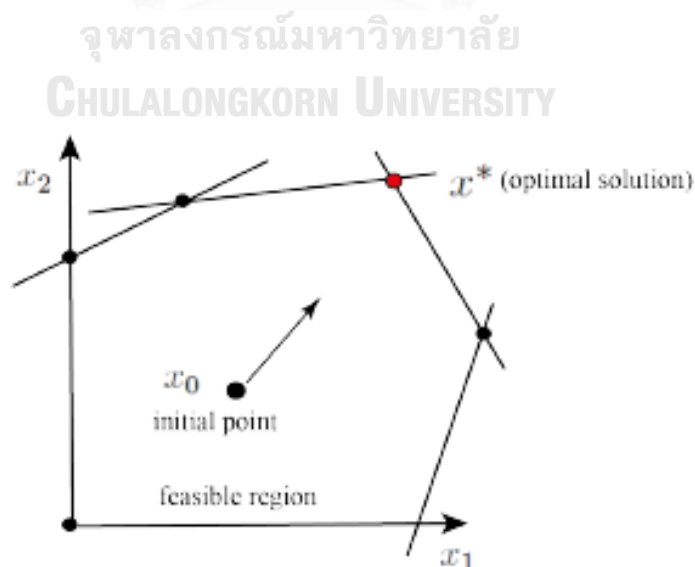
2.1.9 อัลกอริทึมสำเร็จรูปในแมทแลป (MATLAB's Build in function)

1) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วย `fmincon`

`fmincon` (`fmin`) เป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปในโปรแกรมแมทแลป [5] สำหรับแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดประเภทหลายตัวแปรแบบมีข้อจำกัด (Constrained Multivariable Optimization) ด้วยวิธี Interior-point ซึ่งพัฒนาโดย Byrd, R. H. และคณะ [6] มีพื้นฐานมาจากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน สามารถเรียกใช้ฟังก์ชันนี้โดยใช้ชุดคำสั่ง ดังนี้

$$x = \text{fmincon}(\text{fun}, x_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, \text{nonlcon})$$

โดยที่ <i>fun</i>	หมายถึง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
x_0	หมายถึง เวกเตอร์จุดเริ่มต้นคำตอบในการคำนวณ
<i>A</i>	หมายถึง แมทริกซ์สำหรับข้อจำกัดต่อสมการเชิงเส้นแบบเท่ากับ
<i>b</i>	หมายถึง เวกเตอร์สำหรับข้อจำกัดต่อสมการเชิงเส้นแบบเท่ากับ
A_{eq}	หมายถึง แมทริกซ์สำหรับข้อจำกัดต่อสมการเชิงเส้นแบบไม่เท่ากับ
b_{eq}	หมายถึง เวกเตอร์สำหรับข้อจำกัดต่อสมการเชิงเส้นแบบไม่เท่ากับ
<i>lb</i>	หมายถึง เวกเตอร์สำหรับค่าต่ำสุดของคำตอบที่ค้นหา
<i>ub</i>	หมายถึง เวกเตอร์สำหรับค่าสูงสุดของคำตอบที่ค้นหา
<i>nonlcon</i>	หมายถึง ข้อจำกัดต่อสมการแบบไม่เชิงเส้น



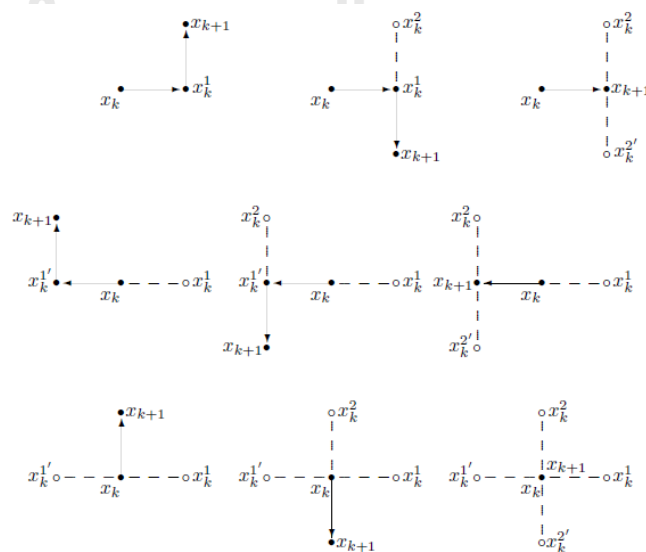
รูปที่ 2.13 วิธีหาค่าเหมาะสมแบบ `fmincon`

2) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วย Pattern search

Patterns search (PS) เป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปในโปรแกรมแมทแลป [5] สำหรับแก้ไขปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดประเภทหลายตัวแปรแบบมีข้อจำกัด (Constrained Multivariable Optimization) ถูกพัฒนาโดย Hooke และ Jeeves [7] เป็นวิธีการค้นหาคำตอบแบบไม่ใช่ออนุพันธ์แต่จะใช้การค้นหาแบบพิกัด (Coordinate search) เพื่อเปรียบเทียบคำตอบปัจจุบันกับคำตอบก่อนหน้าจนกว่าจะไม่เจอคำตอบที่ดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.14 สามารถเรียกใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วย Pattern search ในโปรแกรมแมทแลปโดยใช้ชุดคำสั่ง ดังนี้

$$x = \text{patternsearch}(\text{fun}, x_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, \text{nonlcon})$$

- โดยที่ *fun* หมายถึง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- x_0 หมายถึง เวกเตอร์จุดเริ่มต้นคำตอบในการคำนวณ
- A* หมายถึง แมทริกซ์สำหรับข้อจำกัดต่อสมการเชิงเส้นแบบเท่ากับ
- b* หมายถึง เวกเตอร์สำหรับข้อจำกัดต่อสมการเชิงเส้นแบบเท่ากับ
- A_{eq} หมายถึง แมทริกซ์สำหรับข้อจำกัดต่อสมการเชิงเส้นแบบไม่เท่ากับ
- b_{eq} หมายถึง เวกเตอร์สำหรับข้อจำกัดต่อสมการเชิงเส้นแบบไม่เท่ากับ
- lb* หมายถึง เวกเตอร์สำหรับค่าต่ำสุดของคำตอบที่ค้นหา
- ub* หมายถึง เวกเตอร์สำหรับค่าสูงสุดของคำตอบที่ค้นหา
- nonlcon* หมายถึง ข้อจำกัดต่อสมการแบบไม่เชิงเส้น



รูปที่ 2.14 วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ Pattern search [8]

ขั้นตอนการดำเนินการของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วย *Pattern search*

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด และขอบเขตของตัวแปร

ขั้นตอนที่ 2 สุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของคำตอบแรก

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของคำตอบไปยังตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบว่าคำตอบว่าอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัดที่กำหนดหรือไม่

ขั้นตอนที่ 5 สุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของคำตอบใหม่ แล้วทำการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของคำตอบ ถ้าตรวจสอบข้อกำหนดการเคลื่อนที่และเงื่อนไขการหยุดค้นหา หากครบจำนวนแล้ว ตำแหน่งสุดท้ายจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดและจบการคำนวณ

ขั้นตอนที่ 6 ทำการลดขนาดของคำตอบ แล้วกลับเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 อีกครั้ง แต่ถ้าไม่สามารถลดขนาดได้แล้วให้หยุดดำเนินการ

Begin

Initialize: predefine the default search step Δ_0 , initialize current solution p_0 ;

$\Delta = \Delta_0$;

While (Termination conditions are not satisfied)

$\Omega = \{p_0 + \Delta * p_k \mid \text{for each column } p_k \text{ in } P_k\}$;

Evaluate the nearest neighbors in Ω ;

If (there are improvements in the Ω)

Update the current solution to the best neighbor in Ω ; $\Delta = \Delta_0$;

Else

Decrease the search step $\Delta = \Delta_0/2$;

End If

End While

End

รูปที่ 2.15 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี *Pattern search* [9]

2.1.10 วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮีริสติก

วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮีริสติก เป็นระเบียบวิธีแบบอิสระที่สามารถสร้างกรรมวิธีหรือขั้นตอนใด ๆ มาใช้ในการค้นหาคำตอบ [10] ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาวิธีเมตาฮีริสติกประเภทที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ รวมทั้งสิ้น 4 วิธี ได้แก่ วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด (Ant Colony Optimization) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า (Cuckoo search) ซึ่งแต่ละวิธีการนั้นจะมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน บางวิธีให้ผลคำตอบที่ดีแต่ใช้เวลาในการคำนวณนาน บางวิธีใช้เวลาในการคำนวณสั้นแต่ได้คำตอบที่มีความแม่นยำน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

1) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย J. Kennedy และ R. Eberhart [11] เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมการบินออกไปหาอาหารของนก เมื่อบินกลับเข้าฝูงนกแต่ละตัวจะเปรียบเทียบกับแหล่งอาหารกับนกตัวอื่น ๆ เพื่อหาแหล่งอาหารที่อุดมสมบูรณ์มากที่สุด ดังรูปที่ 2.16 สามารถอธิบายพฤติกรรมการบินหาอาหารของนกได้จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ

$$V_{ij}^{k+1} = wV_{ij}^k + c_1r_1(P_{best}^k - x_{ij}^k) + c_2r_2(G_{best}^k - x_{ij}^k) \quad (2.14)$$

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + V_{ij}^{k+1} \quad (2.15)$$

โดยที่ x_i^{k+1} หมายถึง ตำแหน่งของนกตัวที่ i หลังการเคลื่อนที่

x_i^k หมายถึง ตำแหน่งของนกตัวที่ i ก่อนการเคลื่อนที่

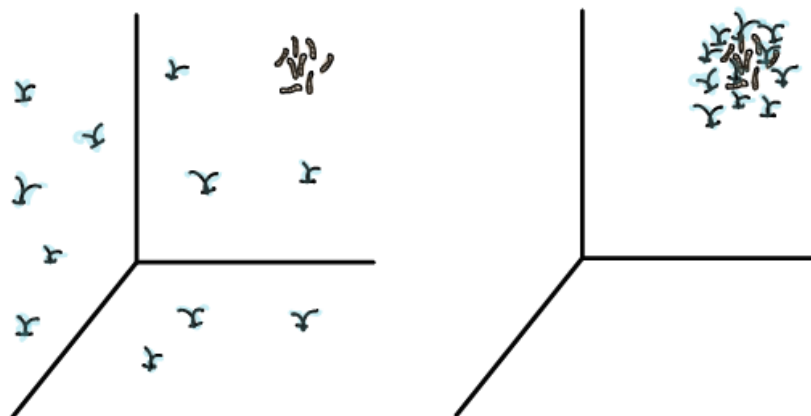
V_{ij}^{k+1} หมายถึง ความเร็วในการบินรอบถัดไป

V_{ij}^k หมายถึง ความเร็วในการบินปัจจุบัน

w หมายถึง น้ำหนักแรงเฉื่อยสำหรับลดความเร็วในการบินลง

c_1 หมายถึง พารามิเตอร์สำหรับควบคุมตำแหน่งดีที่สุ่มส่วนตัว

c_2 หมายถึง พารามิเตอร์สำหรับควบคุมตำแหน่งดีที่สุ่มสากล



รูปที่ 2.16 พฤติกรรมการบินหาอาหารของกลุ่มอนุภาค

ขั้นตอนการดำเนินการของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด และขอบเขตของตัวแปร

ขั้นตอนที่ 2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ จำนวนอนุภาค (N)

พารามิเตอร์สำหรับควบคุมตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวและสากล (c_1, c_2) น้ำหนักแรงเฉื่อย (w) จำนวนครั้งในการเคลื่อนที่ (iteration) และเงื่อนไขการหยุดค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 สุ่มตำแหน่งและความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคแต่ละตัว

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบว่าอนุภาคอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัดจนครบทุกตัว

ขั้นตอนที่ 5 เปรียบเทียบและจัดลำดับอนุภาคจาก P_{best}^k และ G_{best}^k

ขั้นตอนที่ 6 อัปเดตความเร็วและตำแหน่งของพารามิเตอร์แต่ละตัวด้วยสมการที่ (2.14) และ (2.15)

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบข้อกำหนดการเคลื่อนที่และเงื่อนไขการหยุดค้นหา หากครบจำนวนแล้ว อนุภาคตัวสุดท้ายจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด และจบการคำนวณ หากยังไม่ครบจำนวนรอบ ให้ดำเนินการ ขั้นตอนที่ 5 ซ้ำจนกว่าจะครบ

Particle Swarm Optimization

Objective function $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$
 Initialize locations x_i and velocity v_i of n particles.
 Find g^* from $\min\{f(x_1), \dots, f(x_n)\}$ (at $t = 0$)
 while (criterion)
 for loop over all n particles and all d dimensions
 Generate new velocity v_i^{t+1} using equation (7.1)
 Calculate new locations $x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$
 Evaluate objective functions at new locations x_i^{t+1}
 Find the current best for each particle x_i^*
 end for
 Find the current global best g^*
 Update $t = t + 1$ (pseudo time or iteration counter)
end while
Output the final results x_i^* and g^*

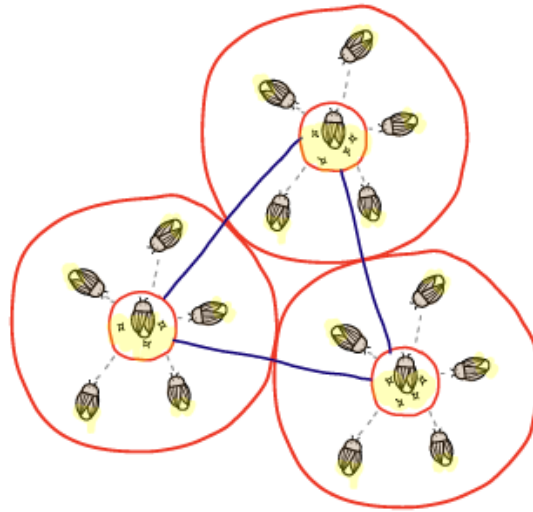
รูปที่ 2.17 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค [12]

2) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย

วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm, FA) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Yang, X.S. [13] เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยตัวที่มีแสงน้อย ซึ่งความสว่างของหิ่งห้อยนั้นจะแปรผันตรงกับคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หิ่งห้อยตัวที่สว่างมากจะดึงดูดตัวที่สว่างน้อยกว่าให้เข้าหา สามารถอธิบายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหิ่งห้อยได้จากสมการที่ (2.16) และรูปที่ 2.18 ตามลำดับ

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^k - x_i^k) + \alpha \epsilon_i \quad (2.16)$$

- โดยที่ x_i^{k+1} หมายถึง ตำแหน่งหิ่งห้อยตัวรับแสงที่ i หลังการเคลื่อนที่
 x_i^k หมายถึง ตำแหน่งหิ่งห้อยตัวรับแสงตัวที่ i ก่อนการเคลื่อนที่
 x_j^k หมายถึง ตำแหน่งหิ่งห้อยตัวกำเนิดแสงตัวที่ j ก่อนการเคลื่อนที่
 β_{ij} หมายถึง ความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสง
 r_{ij} หมายถึง ระยะทางระหว่างหิ่งห้อยทั้งสองตัว
 N หมายถึง จำนวนหิ่งห้อยทั้งหมด
 α หมายถึง พารามิเตอร์สุ่ม
 ϵ_i หมายถึง เวกเตอร์การเดินสุ่มของหิ่งห้อยตัวที่ i



รูปที่ 2.18 พฤติกรรมการปล่อยแสงเพื่อหาคู่หึ่งห้อยตัวอื่น

ขั้นตอนการดำเนินการของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหึ่งห้อย

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด และขอบเขตของตัวแปร

ขั้นตอนที่ 2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ จำนวนหึ่งห้อย (N)

พารามิเตอร์สุ่ม (α) และความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสง (β_{\min}) จำนวนครั้งในการเคลื่อนที่ (iteration) และเงื่อนไขในการหยุดค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 สุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของหึ่งห้อยและจัดลำดับตำแหน่งของหึ่งห้อยทุกตัว

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบว่าหึ่งห้อยจนกว่าจะอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัดจนครบทุกตัว

ขั้นตอนที่ 5 ทำการเคลื่อนที่หึ่งห้อยทุกตัวเข้าสู่หึ่งห้อยตัวที่สว่างมากที่สุดด้วยสมการ (2.16)

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบหึ่งห้อยที่เคลื่อนที่ว่าทุกตัวอยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัด

ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากหึ่งห้อยเพื่อจัดลำดับความสว่าง

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบข้อกำหนดการเคลื่อนที่ หากครบจำนวนแล้วหึ่งห้อยที่มีแสงสว่างมากที่สุดจะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดและจบการคำนวณ หากยังไม่ครบจำนวนรอบให้ดำเนินการขั้นตอนที่ 5 วนซ้ำ

Firefly Algorithm

Objective function $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$
 Generate initial population of fireflies x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)
 Light intensity I_i at x_i is determined by $f(x_i)$
 Define light absorption coefficient γ
while ($t < \text{MaxGeneration}$)
 for $i = 1 : n$ all n fireflies
 for $j = 1 : n$ all n fireflies (inner loop)
 if ($I_i < I_j$), Move firefly i towards j ; **end if**
 Vary attractiveness with distance r via $\exp[-\gamma r]$
 Evaluate new solutions and update light intensity
 end for j
end for i
 Rank the fireflies and find the current global best g_*
end while
 Postprocess results and visualization

รูปที่ 2.19 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย [14]

3) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า

วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า (Cuckoo search, CS) ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Yang, X.S. [15] เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมการลักลอบวางไข่ในรังของนกตัวอื่น ซึ่งนกกาเหว่าจะทำการเลียนแบบไข่ของตัวเองให้เหมือนไข่ของนกเจ้าของรังมากที่สุดเพื่อลดอัตราการทำลายไข่และการทิ้งรัง (p_a) รวมทั้งจะวางไข่รุ่นใหม่ไปโดยการหารังใหม่โดยใช้หลักการของ *Lévy flight* สามารถอธิบายพฤติกรรมวางไข่ของนกกาเหว่าได้จากสมการที่ (2.17) และ (2.18) ตามลำดับ

$$x_i^{t+1} = x_i^t \oplus \alpha \text{Lévy}(\lambda) \quad (2.17)$$

$$\text{Lévy}(\lambda) \sim u = t^{-\lambda} \quad (1 \leq \lambda \leq 3) \quad (2.18)$$

- โดยที่ x_i^{t+1} หมายถึง ค่าตอบใหม่ที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว
 x_i^t หมายถึง ค่าตอบเดิมก่อนที่จะได้รับการปรับปรุง
 α หมายถึง ช่วงระยะห่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของคำตอบ (step-size)
 $\text{Lévy}(\lambda)$ หมายถึง กระบวนการปรับปรุงคำตอบด้วยหลักการ Levy distribution



(ก) นกกาเหว่าสุ่มเลือกรัง (ข) นกเจ้าของรังเลี้ยงไข่ของนกกาเหว่า (ค) ไข่นกกาเหว่าฟักเป็นตัว

รูปที่ 2.20 การเลียนแบบและการฟักไข่ของนกกาเหว่า

ขั้นตอนการดำเนินการของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด และขอบเขตของตัวแปร

ขั้นตอนที่ 2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ จำนวนรังของนก (N) และค่าความน่าจะเป็นในการละทิ้งหรือทำลายไข่ (p_a)

ขั้นตอนที่ 3 สุ่มคำตอบเริ่มต้นตามจำนวนประชากร

ขั้นตอนที่ 4 พัฒนาคำตอบใหม่ โดยสุ่มเลือกคำตอบ x_i ในกลุ่มประชากร เพื่อปรับปรุงด้วยหลักการ Levy flight ดังสมการที่ (2.17) และ (2.18) ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินค่าความเหมาะสมของคำตอบที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว

ขั้นตอนที่ 6 ละทิ้งคำตอบที่มีคุณภาพไม่ดีด้วยอัตราการทิ้งหรือทำลายไข่ พร้อมทั้งสุ่มคำตอบใหม่แทนคำตอบที่ถูกละทิ้ง

ขั้นตอนที่ 7 จัดเรียงคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อใช้ในการปรับปรุงคำตอบใหม่ในรอบถัดไป

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบจำนวนรอบการค้นหาคำตอบ หากครบจำนวนรอบการค้นหาคำตอบแล้วคำตอบที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 7 จะถือเป็นผลเฉลยของปัญหา หากยังไม่ครบจำนวนรอบ ให้วนซ้ำกลับไปยังขั้นตอนที่ 4 อีกครั้งจนกว่าเงื่อนไขจะเป็นจริง จึงจะหยุดการทำงาน

Cuckoo Search via Lévy Flights

```

begin
Objective function  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ 
Generate initial population of
  n host nests  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
while ( $t < \text{MaxGeneration}$ ) or (stop criterion)
  Get a cuckoo randomly by Lévy flights
  evaluate its quality/fitness  $F_i$ 
  Choose a nest among n (say, j) randomly
  if ( $F_i > F_j$ ),
    replace j by the new solution;
  end
  A fraction ( $p_a$ ) of worse nests
  are abandoned and new ones are built;
  Keep the best solutions
  (or nests with quality solutions);
  Rank the solutions and find the current best
end while
Postprocess results and visualization
end

```

รูปที่ 2.21 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า [16]

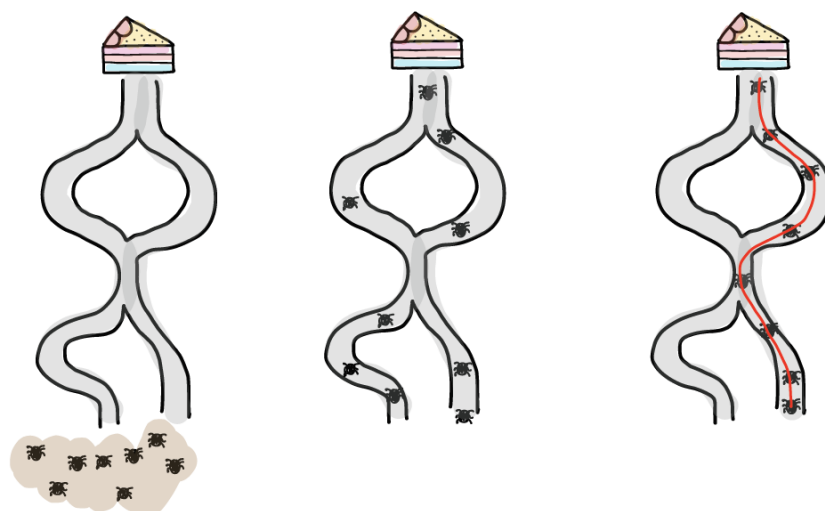
4) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมมด

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมมด (Ant colony optimization, ACO) นำเสนอครั้งแรกโดย Dorigo et al. [17] เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมหาอาหารของมด เมื่อมดออกไปหาอาหารจะปล่อยฟีโรโมนออกมาเพื่อให้มดตัวอื่นสามารถตามมายังแหล่งอาหารได้ถูกต้อง ซึ่งความเข้มข้นของฟีโรโมนจะแปรผกผันกับระยะทางที่ใช้ในการเดินทาง เนื่องจากฟีโรโมนจะระเหยไปเรื่อย ๆ จากการเปรียบเทียบระยะทางของมดไปยังแหล่งอาหารเดียวกัน จะพบว่ามดจะเดินทางไปยังเส้นทางต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปมดเกือบทุกตัวจะเดินทางด้วยระยะทางที่สั้นที่สุดไปยังแหล่งอาหาร เพราะมีความเข้มข้นของฟีโรโมนมากที่สุด โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมทางเลือกเส้นทางไปยังอาหารของมด และการปล่อยฟีโรโมนของมดได้จากสมการที่ (2.19) และ (2.20)

$$p_{ij} = \frac{(\tau_{ij}^\alpha)(\eta_{ij}^\beta)}{\sum_{j \in S} (\tau_{ij}^\alpha)(\eta_{ij}^\beta)} = \frac{\omega(i, j)}{\sum_{j \in S} \omega(i, j)} \quad (2.19)$$

$$\omega(i, j) = \tau_{i,j}^\alpha \times \pi_{i,j}^\beta \quad (2.20)$$

- เมื่อ p_{ij} หมายถึง ความน่าจะเป็นที่มดจะเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j
 τ_{ij}^α หมายถึง ผลการระเหยของสารฟีโรโมนของการเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j
 $\omega(i, j)$ หมายถึง ค่าความน่าสนใจของเส้นทางจากจุด i ไปยังจุด j
 π_{ij}^β หมายถึง ระยะทางระหว่างจุด i ไปยังจุด j



(ก) กำหนดจำนวนมดเริ่มต้น

(ข) มดเริ่มออกหาอาหารและปล่อยฟีโรโมน

(ค) มดตัวต่อไปจะเลือกเส้นทางที่มีค่าฟีโรโมนสูงที่สุด

รูปที่ 2.22 ขั้นตอนหาอาหารของระบบอาณาจักรมด

ขั้นตอนการดำเนินการของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณาจักรมด

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด และขอบเขตของตัวแปร

ขั้นตอนที่ 2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ จำนวนประชากรมด (Ant population) ค่าฟีโรโมน (Pheromone) และค่าความน่าสนใจ (Attractiveness)

ขั้นตอนที่ 3 สร้างคำตอบเริ่มต้นจากพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้

ขั้นตอนที่ 4 ประเมินเส้นทางที่มดแต่ละตัวได้เลือกเดิน (คำตอบ) ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ขั้นตอนที่ 5 ทำการปรับปรุงค่าฟีโรโมนสำหรับเส้นทางที่มดแต่ละตัวเพื่อใช้เป็นเส้นทางให้มดตัวใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบจำนวนรอบการค้นหาคำตอบ หากครบจำนวนรอบการค้นหาคำตอบแล้วคำตอบที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 4 จะถือเป็นผลเฉลยของปัญหา หากยังไม่ครบจำนวนรอบ ให้นำวนซ้ำกลับไปยังขั้นตอนที่ 4 อีกครั้งจนกว่าเงื่อนไขจะเป็นจริง จึงจะหยุดการทำงาน

Ant colony optimization

Objective function $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_n)^T$

Define pheromone evaporation rate

while (criterion)

for loop over all n dimensions (or nodes)

 Generate new solutions

 Evaluate the new solutions

 Mark better locations/ routes with pheromone

 Update pheromone

end for

Daemon actions such as finding the current best

end while

Output the best results and pheromone distribution

รูปที่ 2.23 โค้ดเทียมสำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคม



2.2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

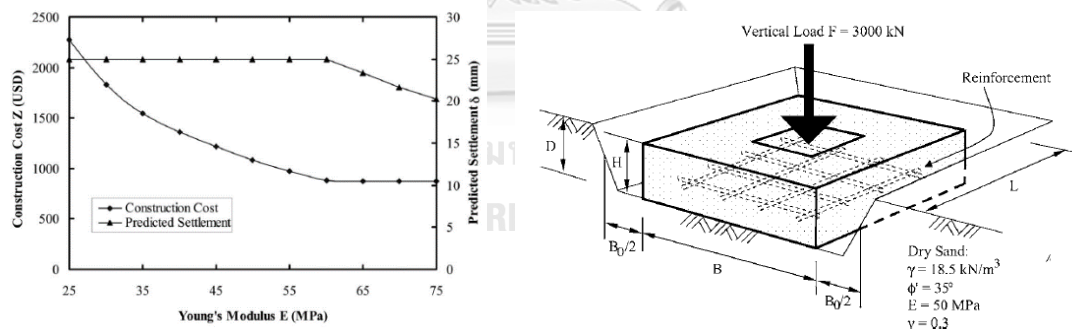
2.2.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว

Wang และ Kulhawy [18] ได้ศึกษาการออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงตามแนวแกน เพื่อให้ได้ราคาที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาทางด้าน Geotechnical design ได้แก่ เรื่อง กำลังแบกทานและการทรุดตัวของดินเป็นหลัก และได้คำนวณราคาในการก่อสร้างฐานราก ตื่นจากงานขุด แบบหล่อ คอนกรีต เหล็กเสริม และดินถมบดสำหรับฝังกลบ โดยใช้ฐานราก เดี่ยวรับแรงแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.24 เป็นตัวอย่างในการศึกษา โดยมีตัวแปรตัดสินใจเป็นขนาด ของฐานราก ได้แก่ ความลึก (D), ความกว้าง (B) และความยาว (L)

จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อราคาก่อสร้างฐานรากตื่น ได้แก่

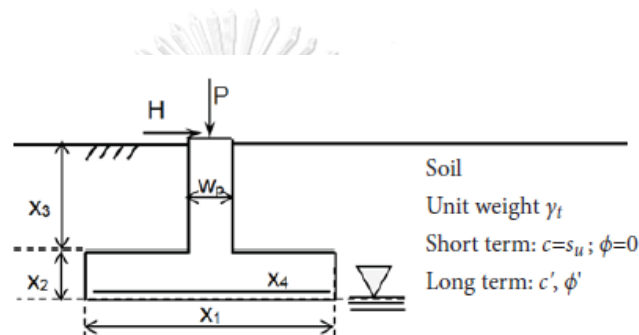
- 1) โมดูลัสความยืดหยุ่นของดินซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้คำนวณค่าการทรุดตัวของดิน
- 2) มุมเสียดทานภายในของดินซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้คำนวณกำลังรับน้ำหนักของดิน

ในกรณีที่ค่า E มีค่าน้อยกว่า 60 MPa ค่าการทรุดตัวของฐานรากจะเกิดขึ้นมาก ราคาก่อสร้างฐานรากก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่กลับกันถ้ากรณีที่ค่า E มีค่ามากกว่า 60 MPa ค่าการทรุดจะไม่ใช้ตัวแปรหลักที่จะควบคุมขนาดฐานราก แต่จะเป็นกำลังแบกทานซึ่ง ขึ้นกับค่าของมุมเสียดทานภายในของดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างและผลการวิจัยของ Wang และ Kulhawy [18]

Ukritchon และ Keawsawasvong [19] ได้เสนอ Mathematical formulations สำหรับใช้ออกแบบฐานรากต่อเนืองรับแรงแนวตั้งและแรงด้านข้าง ดังรูปที่ 2.25 โดยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข Ant-Colony algorithm ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับราคาค่าก่อสร้างฐานราก โดยเขาได้พิจารณาทางด้าน Geotechnical design ได้แก่ กำลังแบกทานของดิน เสถียรภาพต่อการพลิกคว่ำ เสถียรภาพต่อการเลื่อนไถลทั้งในแบบระยะสั้นและระยะยาวและด้าน Structural design ได้แก่ ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้เพื่อรับแรง รวมเป็นเงื่อนไขเชิงตัวเลขแบบไม่ต่อเนื่อง (Non-linear constraint) ทั้งหมด 23 เงื่อนไข เพื่อให้ได้ขนาดความกว้างของฐานราก ความหนา ระยะฝังกลบ ปริมาณเหล็กเสริม และราคาค่าก่อสร้างที่เหมาะสมที่สุด



where

- x_1 = Footing width (m)
- x_2 = Footing thickness (m)
- x_3 = Soil-embedment depth (m)
- x_4 = Cross-sectional area of the main steel reinforcement (m^2/m)

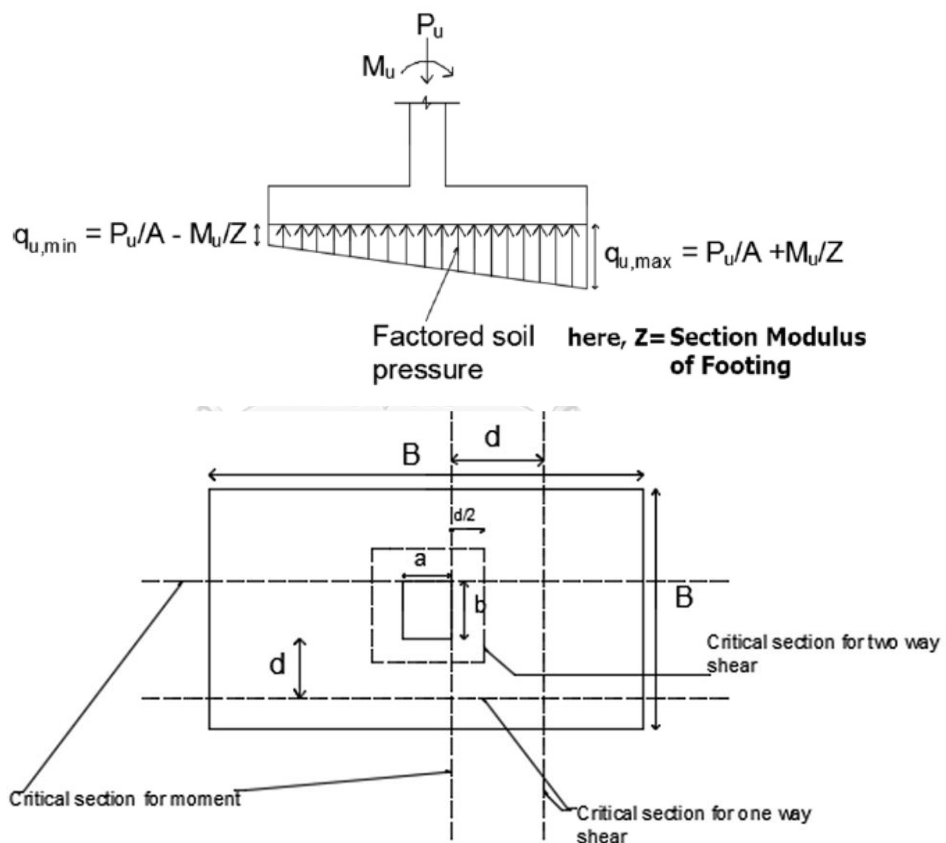
รูปที่ 2.24 ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรจาก

งานวิจัยของ Ukritchon และ Keawsawasvong [19]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Rawat และ Mittal [20] ศึกษาการหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงเยื้องศูนย์กลางดังรูปที่ 2.26 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel เนื่องจากวิศวกรผู้ออกแบบส่วนใหญ่จะมีความคุ้นชินกับโปรแกรม โดยเขาได้พิจารณาด้าน Structural Design เป็นหลัก ได้แก่ ความสามารถในการรับแรงเฉือน, ความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด และระยะฝั่งของเหล็กเสริม เพื่อให้ได้ความกว้าง ความลึก ระยะฝั่ง และปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ทั้งด้านสั้นและด้านยาว ซึ่งปัจจัยทั้งหมดนี้จะส่งผลต่อการคิดราคาค่าก่อสร้าง

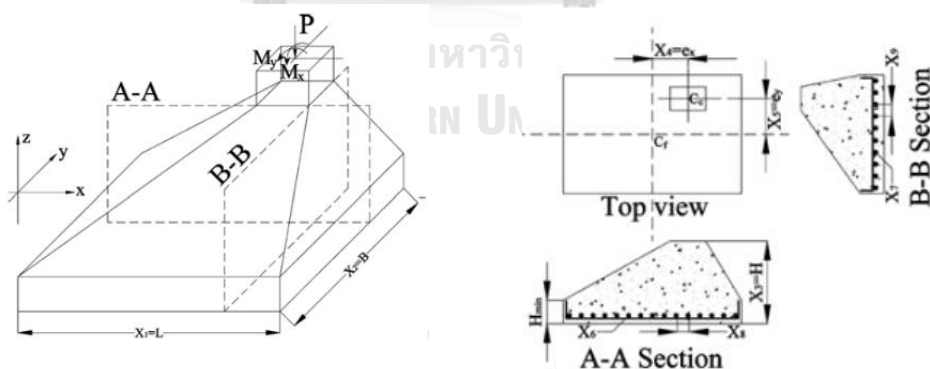
จากการศึกษาพบว่าในการออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงเยื้องศูนย์กลางลดพื้นที่หน้าตัดของฐานรากร่วมกับการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมอย่างเหมาะสมจะทำให้การออกแบบฐานรากมีประสิทธิภาพสูงสุด และมีราคาเหมาะสมที่สุดอีกด้วย



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรจากงานวิจัยของ Rawat และ Mittal [20]

Nigdeli และคณะ [21] ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อออกแบบฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปทรงปริซึมรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัด ดังรูปที่ 2.27 โดยใช้ Metaheuristic algorithm รูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ Differential evolution (DE), Particle swarm optimization (PSO), Harmony search (HS), Teaching-Learning based algorithm (TLBO) และ Flower Pollination Algorithm (FPA) โดยได้พิจารณาเงื่อนไขในการออกแบบทางด้าน Geotechnical ได้แก่ กำลังแบกทานของดิน และการทรุดตัวของดิน รวมถึงเงื่อนไขในการออกแบบด้าน Structural ได้แก่ One-way shear และ Two-way shear เพื่อให้ได้ขนาดฐานรากและปริมาณเหล็กเสริมที่สามารถนำไปก่อสร้างได้โดยมีราคาเหมาะสมที่สุด

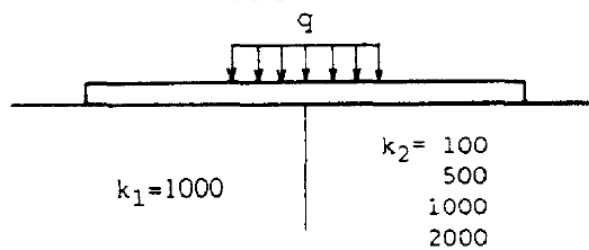
ผลจากการศึกษาโดยใช้ Load Case 5 กรณี แบ่งเป็นแรงแนวตั้งและโมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจร เพื่อใช้เปรียบเทียบ Algorithm ที่แตกต่างกัน พบว่าในกรณีที่ External Force มีค่าไม่มาก ได้แก่กรณี 1-4 ทุก Algorithm สามารถหาขนาดฐานรากและราคาได้เท่ากัน ซึ่งหมายถึงสามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ (Optimal solution) แต่สำหรับกรณีที่ 5 External force จะมีค่ามาก จะพบว่าวิธี Differential evolution และ Harmony search สามารถหาขนาดฐานรากและราคาได้แตกต่างจากวิธีอื่น จึงแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีดังกล่าวข้างต้นไม่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างการกำหนดตัวแปรจากงานวิจัยของ Nigdeli และคณะ [21]

2.2.2 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานรากยืดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่

Matsuda และ Sakiyama [22] ได้พัฒนาวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาคานบนฐานรากยืดหยุ่นที่มีสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของดินแตกต่างกัน ด้วยวิธีการแปลงสมการ Differential Equations ให้อยู่รูปของ Integral Equation จากการวิเคราะห์คานที่มีจุดรองรับต่าง ๆ ได้แก่ Hinged-Hinged, Fixed-Fixed, Free-Free, Fixed-Free และ Fixed-Hinged โดยกำหนดคานแบ่งออกเป็น 2 ช่วงย่อยซึ่งมีค่า Modulus of Subgrade Reaction แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยของ Matsuda และ Sakiyama [22]

Ukritchon [23] ได้นำวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดร่วมกับการใช้ Finite Element Method มาใช้กับปัญหาคานบนฐานรากยืดหยุ่นเพื่อใช้หา Load pattern ที่ทำให้เกิด Maximum Positive moment, Maximum Negative moment และ Maximum Shear Force ที่ตำแหน่งใด ๆ บนคาน โดยกำหนดให้คานมีความยาวจำกัด และมีค่า Modulus of subgrade reaction คงที่ตลอดความยาวคาน และมีแรงภายนอกเป็น Uniform distributed load ซึ่งมีผลการศึกษาแสดง ดังรูปที่ 2.29

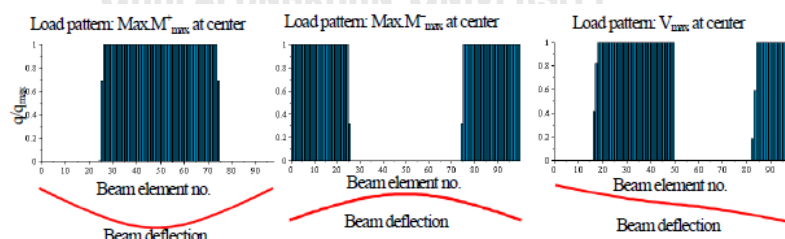


Fig. 4. Load patterns for Max M_{max} , Max M_{max} , V_{max} at the center of beam and its deflection

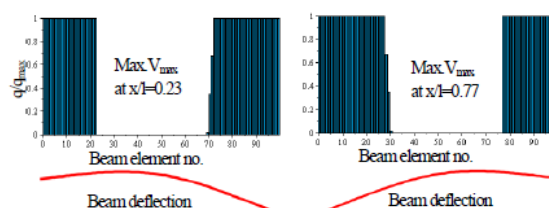


Fig. 5. Load patterns for Max V_{max} at $x/l=0.23, 0.77$ and its deflection

รูปที่ 2.28 ผลการศึกษาในงานวิจัยของ Ukritchon [23]

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

ภาพรวมของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในงาน ออกแบบฐานรากต้นด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่ง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) ปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงตามแนวดิ่ง แนวราบ โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด ให้มีราคาค่าวัสดุที่ถูกที่สุดและยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามข้อกำหนดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิคและมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นจัดปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีข้อจำกัด (Constrained Optimization Problem)

2) ปัญหาการวิเคราะห์รูปแบบการวางตัวของน้ำหนักบรรทุก (Load pattern) ที่ทำให้เกิด โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงสุด สำหรับนำไปวิเคราะห์แรงภายในคานบนฐานรากยึดหยุนที่มี สัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่ ซึ่งเป็นจัดปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มี ข้อจำกัด (Unconstrained Optimization Problem)

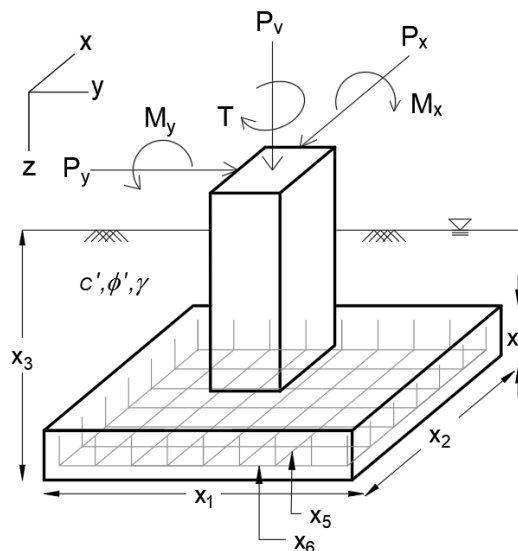
เมื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำเร็จแล้ว จึงนำแบบจำลองที่ได้มาประยุกต์ใช้กับ วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดประเภทต่าง ๆ จำนวน 6 อัลกอริธึม ประกอบด้วย อัลกอริธึมสำเร็จรูปใน โปรแกรมแมทแลป (MATLAB's Build in function) จำนวน 2 อัลกอริธึม ได้แก่ fmincon, Pattern search และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮีริสติก (Metaheuristic Algorithm) จำนวน 4 อัลกอริธึม ได้แก่ วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า (Cuckoo search) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบระบบอาณานิคม (Ant Colony Optimization) เพื่อ ประเมินและสรุปว่าวิธีใดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละปัญหา รวมถึงนำเสนอค่าพารามิเตอร์ที่ เหมาะสมสำหรับใช้ตั้งค่าในอัลกอริธึมแบบเมตาฮีริสติกเพื่อให้สามารถหาค่าตอบได้ดีที่สุด

3.1 การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว

ในการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่ดีที่สุดมาใช้ออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงแนวตั้ง (P_v) แรงด้านข้าง (P_x, P_y) โมเมนต์ดัด (M_x, M_y) และโมเมนต์บิด (T) ให้มีราคาวัสดุต่ำที่สุดจำเป็นที่จะต้องกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัดต่าง ๆ ในการออกแบบให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยอ้างอิงวิธีการตรวจสอบเสถียรภาพทางธรณีเทคนิคตามข้อกำหนดของ Das, B.M. [1] และมาตรฐานการออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก ACI 318M-14 [2]

3.1.1 ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว

งานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว รวมทั้งสิ้น 6 ตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาฐานรากเดี่ยว

โดยที่ x_1 หมายถึง ความกว้างของฐานราก (m.)

x_2 หมายถึง ความยาวของฐานราก (m.)

x_3 หมายถึง ความลึกจากผิวดินจนถึงระดับของฐานราก (m.)

x_4 หมายถึง ความหนาของฐานราก (m.)

x_5 หมายถึง อัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดในด้านกว้างของฐานราก

x_6 หมายถึง อัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดในด้านยาวของฐานราก

3.1.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว

งานวิจัยนี้ได้กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบฐานรากเป็นราคาในการก่อสร้างที่ถูกที่สุด ซึ่งราคาในงานก่อสร้างฐานรากจำเป็นต้องพิจารณาจากราคาของวัสดุประกอบไปด้วย ปริมาตรคอนกรีต น้ำหนักเหล็กเสริม และปริมาณแบบหล่อที่ใช้ในการก่อสร้างฐานรากติดตั้งแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งอ้างอิงจากราคาวัสดุก่อสร้างส่วนกลางกรุงเทพมหานครของกระทรวงพาณิชย์ ประจำปี 2561 [24] โดยยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม สามารถคำนวณราคาวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการก่อสร้างฐานรากต้นโดยใช้สมการของ Al-Ansari [25] ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$f(x) = C_{con} V_{con} + C_{st} W_{st} + C_{fw} A_{fw} \quad (3.1)$$

เมื่อ C_{con} หมายถึง ราคาต่อปริมาตรของคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ($\text{฿}/\text{m}^3$)

V_{con} หมายถึง ปริมาตรของคอนกรีต (m^3)

C_{st} หมายถึง ราคาต่อน้ำหนักเหล็กเสริม 1 ตัน ($\text{฿}/\text{tons}$)

W_{st} หมายถึง น้ำหนักของเหล็กเสริม (tons)

C_{fw} หมายถึง ราคาต่อปริมาณแบบหล่อ 1 ตารางเมตร ($\text{฿}/\text{m}^2$)

A_{fw} หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของแบบหล่อ (m^2)

A_{slong} หมายถึง ปริมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมสำหรับด้านกว้างของฐานราก (m^2) = $(x_5)(x_2)(d)$

A_{strans} หมายถึง ปริมาณพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมสำหรับด้านยาวของฐานราก (m^2) = $(x_6)(x_1)(d)$

d หมายถึง ความลึกประสิทธิภาพของฐานราก (m.) = x_4 - ระยะหุ้มคอนกรีต

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและสมการสำหรับคำนวณราคาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง

ประเภทวัสดุ	ปริมาณวัสดุ	ราคาต่อหน่วย	
คอนกรีต	$V_{con} = x_1 x_2 x_4 + c_x c_y (x_3 - x_4)$ เมื่อ c_x = ความกว้างของเสาในแนวแกน x c_y = ความกว้างของเสาในแนวแกน y	f_c'	ราคา
		(MPa)	($\text{฿}/\text{m}^3$)
		14	2211.30
		18	2173.60
		21	2208.80
		24	2244.00
		28	2314.40
		30	2358.40
		32	2411.20
35	2472.80		

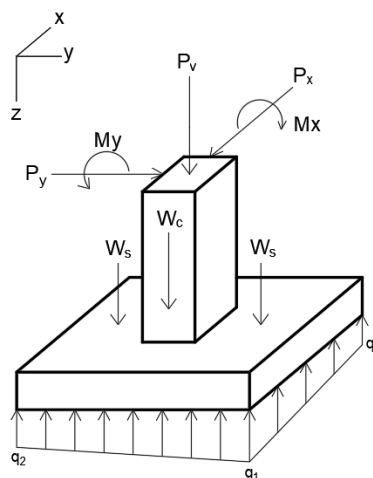
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและสมการสำหรับคำนวณราคาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง (ต่อ)

ประเภทวัสดุ	ปริมาณวัสดุ	ราคาต่อหน่วย		
		DB	SD40 (฿/tons)	SD50 (฿/tons)
เหล็กเสริม	$W_{st} = (A_{slong}x_1 + A_{strans}x_2)\gamma_{steel}$			
		10	18200	18450.00
		12	18566.67	18150.00
		16	18566.67	17950.00
		20	18566.67	17950.00
		25	18566.67	17950.00
		28	18566.67	17950.00
		32	18566.67	17950.00
ไม้แบบ	$A_{fv} = 2(x_4)(x_1 + x_2) + 2(x_3 - x_4)$	165 ฿/m ²		

3.1.3 ข้อจำกัดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิคสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว

งานวิจัยนี้ได้อ้างอิงข้อกำหนดในการตรวจสอบเสถียรภาพด้านธรณีเทคนิคตามข้อกำหนดการออกแบบฐานรากเดี่ยวของ Das, B.M. [1] ทั้งในระยะสั้น (Short-term condition) และในระยะยาว (Long-term condition) ประกอบไปด้วย กำลังแบกทานของดิน การพลิกคว่ำ การเลื่อนไถล นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบสภาพด้านทานการหมุนของฐานรากเนื่องมาจากโมเมนต์บิด ตามปกติแล้วข้อกำหนดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิคจะเป็นตัวกำหนดความกว้าง ความยาว และความลึกของฐานราก ซึ่งจะใช้น้ำหนักบรรทุกในสถานะใช้งานในการตรวจสอบ

1) ข้อจำกัดด้านกำลังแบกทานของฐานราก



รูปที่ 3.2 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นใต้ฐานราก

รูปที่ 3.2 แสดงถึงค่าหน่วยแรงใต้ฐานรากซึ่งอาจเกิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูใต้ฐานราก อันเนื่องมาจากแรงต้านข้างหรือโมเมนต์ดัดที่กระทำรอบแกน x และแกน y ส่งผลให้การกระจายของหน่วยแรงใต้ฐานรากกระจายไม่เท่ากันตลอดพื้นที่ใต้ฐานราก สามารถคำนวณค่าหน่วยแรงสูงสุด (q_{\max}) และหน่วยแรงต่ำสุด (q_{\min}) ที่เกิดขึ้นใต้ฐานรากได้จากสมการที่ (3.2)

$$q_{\min}^{\max} = \frac{Q_v}{x_1 x_2} \pm \frac{6(M_y + P_x x_3)}{x_1 x_2^2} \pm \frac{6(M_x + P_y x_3)}{x_1^2 x_2} \quad (3.2)$$

เมื่อ Q_v หมายถึง แรงสุทธิที่กระทำเหนือฐานราก (kN) = $P_v + W_f + W_s$

P_v หมายถึง แรงกระทำจากภายนอก (kN)

W_f หมายถึง น้ำหนักฐานราก (kN)

W_s หมายถึง น้ำหนักดินเหนือฐานราก (kN)

ดินใต้ฐานรากจำเป็นต้องมีความแข็งแรงและมีพื้นที่รองรับมากเพียงพอเพื่อควบคุมให้แรงสุทธิและหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นใต้ฐานรากมีค่าต่ำกว่าค่าความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย โดยสามารถคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยของกำลังรับน้ำหนักของฐานรากขึ้น สำหรับแรงสุทธิและหน่วยแรงสูงสุดทั้งในแบบระยะสั้นและระยะยาว ได้จากสมการที่ (3.3) (3.4) (3.5) และ (3.6) ตามลำดับ และต้องมีค่ามากกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยแบกทานที่กำหนด (FS_{breq}) แต่เนื่องจากดินไม่สามารถรับแรงดึงได้ จึงต้องมีการควบคุมหน่วยแรงต่ำสุดที่เกิดขึ้นใต้ฐานรากให้เป็นหน่วยแรงอัด ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของข้อกำหนดแบบอสมการ ดังที่แสดงในสมการที่ (3.7)

$$FS_{bpres,s} = q_{ult,s} / q_{\max} \quad (3.3)$$

$$FS_{bpres,l} = q_{ult,l} / q_{\max} \quad (3.4)$$

$$FS_{bforce,s} = Q_{ult,s} / Q_v \quad (3.5)$$

$$FS_{bforce,l} = Q_{ult,l} / Q_v \quad (3.6)$$

$$q_{\min} \geq 0 \quad (3.7)$$

เมื่อ $FS_{bpres,s}$ หมายถึง อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับกำลังแบกทานแบบหน่วยแรงแบบระยะสั้น

$FS_{bpres,l}$ หมายถึง อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับกำลังแบกทานแบบหน่วยแรงแบบระยะยาว

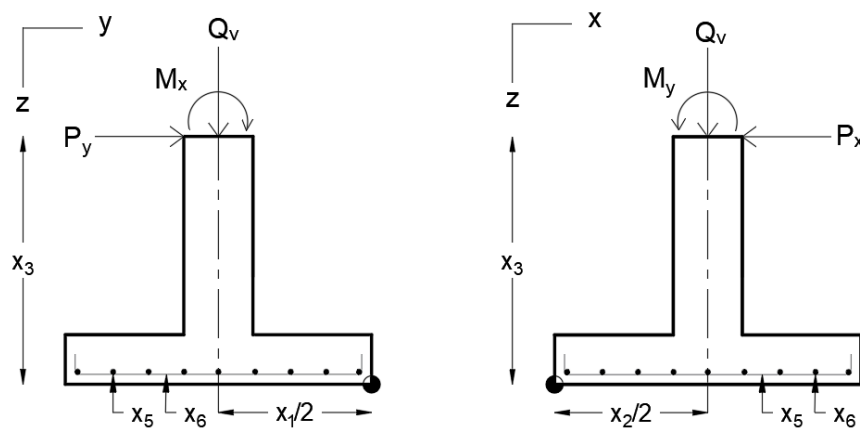
$FS_{bforce,s}$ หมายถึง อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับกำลังแบกทานแบบแรงสุทธิแบบระยะสั้น

$FS_{bforce,l}$ หมายถึง อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับกำลังแบกทานแบบแรงสุทธิแบบระยะยาว

2) ข้อจำกัดด้านการพลิกคว่ำของฐานราก

งานวิจัยนี้ได้แบ่งพิจารณาเสถียรภาพด้านการพลิกคว่ำของฐานรากออกเป็นทั้งหมด 2 กรณี คือ Local over-turning stability สำหรับพิจารณาเมื่อมีโมเมนต์ดัดหรือแรงกระทำด้านข้างเพียงแกนใดแกนหนึ่งของฐานราก และ Global over-turning stability สำหรับพิจารณาเมื่อมีโมเมนต์ดัดหรือแรงกระทำด้านข้างกระทำทั้งสองแกนของฐานราก

2.1) Local over-turning stability



รูปที่ 3.3 แรงกระทำ ระยะ และจุดหมุนที่ใช้ในการพิจารณา Local over-turning stability

รูปที่ 3.3 แสดงโมเมนต์พลิกคว่ำ (M_d) ซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัดและแรงด้านข้างที่กระทำในแกน x และ y ตามลำดับ และสำหรับโมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำ (M_r) เกิดจากแรงกระทำสุทธิที่กระทำเหนือฐานราก โดยมีแขนของโมเมนต์ซึ่งวัดจากจุดศูนย์กลางฐานรากถึงปลายของฐานรากโดยสามารถคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการพลิกคว่ำในระนาบ x-z ($FS_{ovlocalx}$) และระนาบ y-z ($FS_{ovlocaly}$) ได้จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการพลิกคว่ำที่กำหนด (FS_{ovreq})

$$FS_{ovlocalx} = M_{rx} / M_{dx} \quad (3.8)$$

$$FS_{ovlocaly} = M_{ry} / M_{dy} \quad (3.9)$$

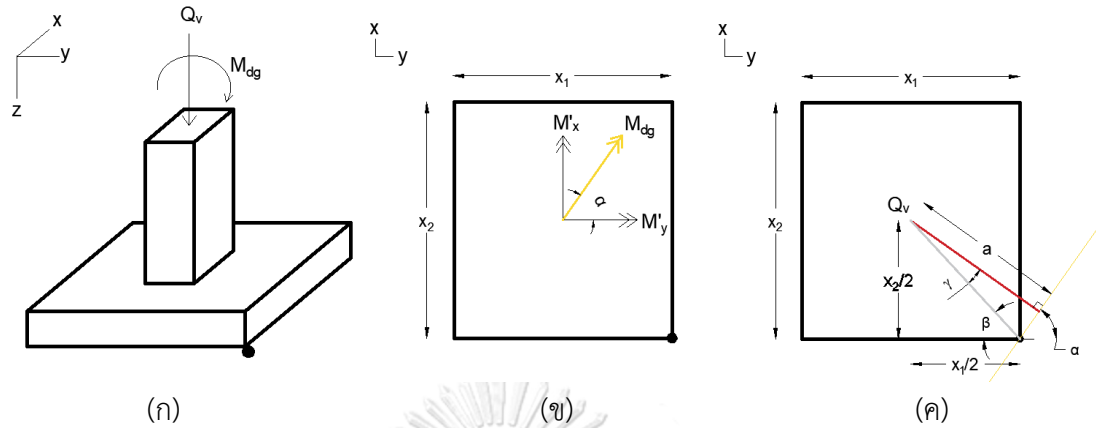
เมื่อ M_{ry} หมายถึง โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำในระนาบ y-z (kN-m) = $(\frac{1}{2})(Q_v)(x_1)$

M_{dy} หมายถึง โมเมนต์พลิกคว่ำในระนาบ y-z (kN-m) = $M_y + P_x(x_3)$

M_{rx} หมายถึง โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำในระนาบ x-z (kN-m) = $(\frac{1}{2})(Q_v)(x_1)$

M_{dx} หมายถึง โมเมนต์พลิกคว่ำในระนาบ x-z (kN-m) = $M_x + P_y(x_3)$

2.2) Global over-turning stability



รูปที่ 3.4 แรงกระทำและจุดหมุนที่ใช้ในการพิจารณา Global over-turning stability

เสถียรภาพการพลิกคว่ำแบบ Global over-turning stability จะต้องพิจารณาในรูปแบบเวกเตอร์สามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.4(ก) โดยเวกเตอร์ของโมเมนต์พลิกคว่ำ (M_{dg}) คือโมเมนต์ลัพธ์ของโมเมนต์พลิกคว่ำในระนาบ x-z และ y-z ดังแสดงในรูปที่ 3.4(ข) และเวกเตอร์ของโมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำ (M_{rg}) สามารถคำนวณได้จากแรงสุทธิที่กระทำเหนือฐานราก (Q_v) ซึ่งมีระยะแขนของโมเมนต์ (a) ดังแสดงในรูปที่ 3.4(ค) และพิจารณาเสถียรภาพจากอัตราส่วนความปลอดภัย (FS_{ovg}) ดังสมการที่ (3.10) ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการพลิกคว่ำที่กำหนด

$$FS_{ovg} = M_{rg} / M_{dg} \quad (3.10)$$

เมื่อ M_{rg} หมายถึง ขนาดของเวกเตอร์โมเมนต์พลิกคว่ำ $= \sqrt{(M_x + P_y(x_3))^2 + (M_y + P_x(x_3))^2}$

M_{dg} หมายถึง ขนาดของเวกเตอร์โมเมนต์ต้านทานการพลิกคว่ำ $= Q_v \sin \gamma \sqrt{\left(\frac{x_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{2}\right)^2} \beta$

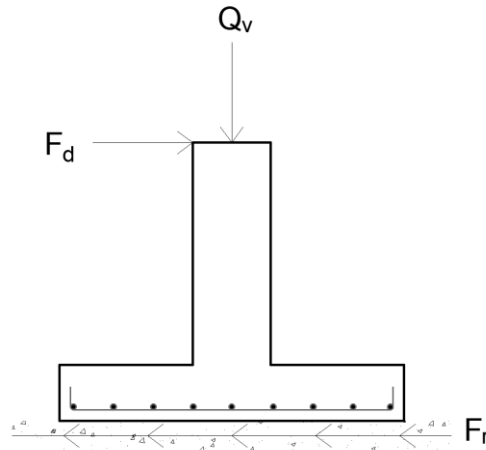
α หมายถึง มุมระหว่างเวกเตอร์โมเมนต์พลิกคว่ำและแกน y

β หมายถึง อัตราส่วนขนาดของฐานรากด้านแกน x ต่อแกน y

$\gamma = \alpha + \beta$ เมื่อ $|\alpha| + \beta \leq 90^\circ$

$= 180^\circ - (\alpha + \beta)$ เมื่อ $|\alpha| + \beta > 90^\circ$

3) ข้อจำกัดด้านการเลื่อนไถลของฐานราก



รูปที่ 3.5 การพิจารณาการวิบัติจากการเลื่อนไถล

รูปที่ 3.5 แสดงถึงแรงด้านข้างที่กระทำกับโครงสร้างตั้งจากทั้ง 2 ทิศทาง ซึ่งรวมเป็นแรงกระทำด้านข้างแบบเวกเตอร์ (F_d) ดังสมการที่ (3.11) ส่วนแรงด้านการเลื่อนไถลแนวราบคำนวณมาจากกำลังรับแรงเฉือนของดินใต้ฐานรากซึ่งพิจารณาทั้งในแบบระยะสั้น ($F_{r,s}$) และระยะยาว ($F_{r,l}$) ดังสมการที่ (3.12) และ (3.13) ตามลำดับ

$$F_d = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (3.11)$$

$$F_{r,s} = s_{ui} B' L' \quad (3.12)$$

$$F_{r,l} = c_i' B' L' + Q_v \tan(\delta') \quad (3.13)$$

เมื่อ s_{ui} หมายถึง แรงเสียดทานที่ระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีตใต้ฐานราก = $0.7(s_u)$

c_i' หมายถึง แรงเสียดทานจากค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลของดินกับคอนกรีต = $0.7(c')$

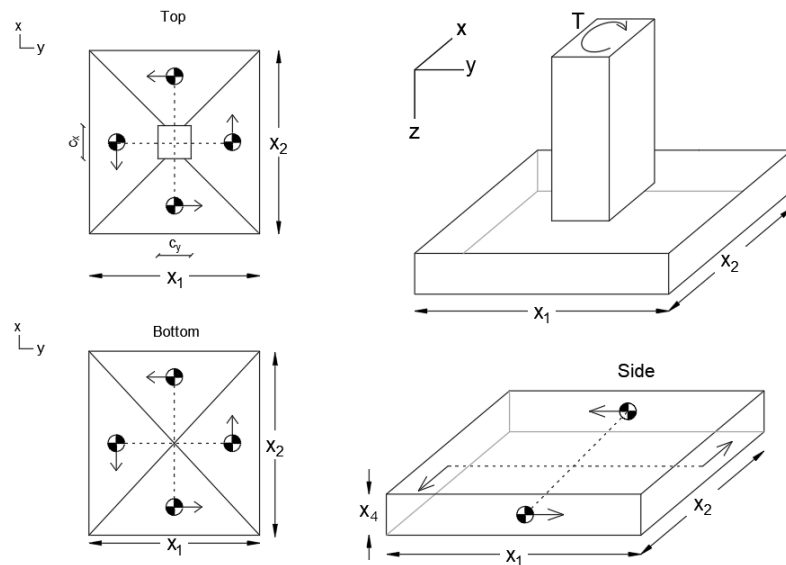
δ' หมายถึง มุมเสียดทานประสิทธิผลของดินกับคอนกรีตใต้ฐานราก = $\frac{2}{3}(\phi')$

โดยสามารถคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการเลื่อนไถลทั้งในแบบระยะสั้น ($FS_{slide,s}$) และระยะยาวได้ ($FS_{slide,l}$) ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับการพลิกคว่ำที่กำหนด ($FS_{slide,req}$) จากสมการที่ (3.14) และ (3.15)

$$FS_{slide,s} = F_d / F_{r,s} \quad (3.14)$$

$$FS_{slide,l} = F_d / F_{r,l} \quad (3.15)$$

4) ข้อจำกัดด้านการรับแรงบิดของดิน



รูปที่ 3.6 พื้นที่รับผิวดูดและจุดหมุนในการคำนวณแรงเสียดทานด้านโมเมนต์บิด

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาแรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างที่ไม่สมมาตรทำให้เกิดเป็นโมเมนต์บิดถ่ายลงสู่ฐานรากและดิน ในสมมติฐานของงานวิจัยนี้ได้พิจารณาให้ดินมีความสามารถในการรับโมเมนต์บิดนี้ได้โดยใช้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่รอบฐานรากทั้งด้านบน ด้านล่าง และด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งสามารถคำนวณแรงด้านโมเมนต์บิดทั้งในแบบระยะสั้นและแบบระยะยาวได้จากดังสมการ (3.16) และ (3.17)

$$T_r = f_s \sum_{i=1}^n (surface_i) (arm_i)$$

$$T_{rtotal,s} = f_{s_s} (T_{r,side} + T_{r,bot} + T_{r,top}) \tag{3.16}$$

$$T_{rtotal,l} = f_{s_l} (T_{r,side} + T_{r,bot} + T_{r,top}) \tag{3.17}$$

- เมื่อ $T_{rtotal,s}$ หมายถึง กำลังเสียดทานด้านโมเมนต์บิดพิจารณาแบบระยะสั้น
- $T_{rtotal,l}$ หมายถึง กำลังเสียดทานด้านโมเมนต์บิดพิจารณาแบบระยะยาว
- f_{s_s} หมายถึง สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบระยะสั้น = $0.7(s_u)$
- f_{s_l} หมายถึง สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบระยะยาว = $0.7c' + (\sigma'_h)(\tan \delta')$
- $T_{r,side}$ หมายถึง แรงเสียดทานด้านโมเมนต์บิดที่เกิดบริเวณด้านข้างของฐานราก
- $T_{r,bot}$ หมายถึง แรงเสียดทานด้านโมเมนต์บิดที่เกิดบริเวณใต้ฐานราก
- $T_{r,top}$ หมายถึง แรงเสียดทานด้านโมเมนต์บิดที่เกิดบริเวณด้านบนฐานราก

จากผลรวมของแรงต้านโมเมนต์บิดของดินทั้งหมด สามารถคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับโมเมนต์บิดทั้งในแบบระยะสั้น ($FS_{tor,s}$) และในระยะยาว ($FS_{tor,l}$) ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่กำหนด (FS_{torreq}) ดังแสดงในสมการที่ (3.18) และ (3.19)

$$FS_{tor,s} = T_{r,s} / T \quad (3.18)$$

$$FS_{tor,l} = T_{r,l} / T \quad (3.19)$$

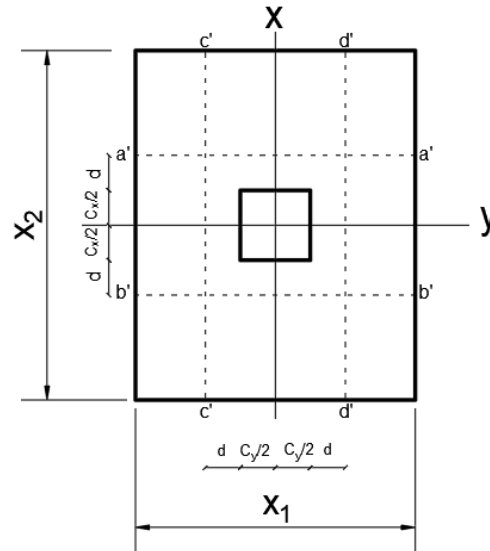
3.1.4 ข้อจำกัดด้านการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยนี้ได้ใช้มาตรฐานการออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI318-14 [2] ซึ่งตามมาตรฐานได้กำหนดให้มีการตรวจสอบความหนาของฐานรากและเหล็กเสริม ประกอบด้วย ตรวจสอบการเอียงแบบทางเดียว ตรวจสอบการเอียงทะลุ การออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด ตรวจสอบระยะฝังยึด และกำลังรับโมเมนต์บิด นอกจากนี้ได้กำหนดน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด 6 กรณี โดยใช้น้ำหนักบรรทุกกรณีพื้นฐาน กรณีน้ำหนักคงที่ และกรณีของแรงลม อ้างอิงตามมาตรฐาน ACI318-14 [2] และ มยผ. 1311-50 [26] ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 กรณีน้ำหนักบรรทุกรวมและตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก

กรณีบรรทุก	ตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก
พื้นฐาน	$U_1 = 1.2D + 1.6L$
น้ำหนักคงที่	$U_2 = 1.4D$
ลม	$U_3 = 1.2D + 1.0L + 1.0W_x + 0.4W_y + 0.4T$ $U_4 = 1.2D + 1.0L + 0.4W_x + 1.0W_y + 0.4T$ $U_5 = 0.9D + 1.0W_x + 0.4W_y + 0.4T$ $U_6 = 0.9D + 0.4W_x + 1.0W_y + 0.4T$

1) ข้อกำหนดด้านการวิบัติจากแรงเฉือนทางเดียว



รูปที่ 3.7 หน้าตัดวิกฤตสำหรับการวิบัติจากแรงเฉือนทางเดียว

รูปที่ 3.7 แสดงหน้าตัดวิกฤตทั้ง 4 ทิศทางรอบฐานราก ซึ่งวัดจากขอบเสา ออกมาเป็นระยะเท่ากับความลึกประสิทธิผล (d) โดยเป็นค่าแรงเฉือนทางเดียวสูงสุดในระนาบ $a'-a'$ $b'-b'$ $c'-c'$ หรือ $d'-d'$ ที่คำนวณมาจากน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยทั้ง 6 กรณี ซึ่งโดยปกติแล้วในการออกแบบฐานรากจะไม่เสริมเหล็กปลอกแต่จะเพิ่มความหนาของฐานราก (x_d) เพื่อให้กำลังรับแรงเฉือนแบบทางเดียวของคอนกรีตทั้งในด้านสั้น ($V_{nx1, oneway}$) และด้านยาวของฐานราก ($V_{nx2, oneway}$) เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าแรงเฉือนวิกฤต ($V_{u, oneway}$) ดังแสดงในสมการที่ (3.20) และ (3.21)

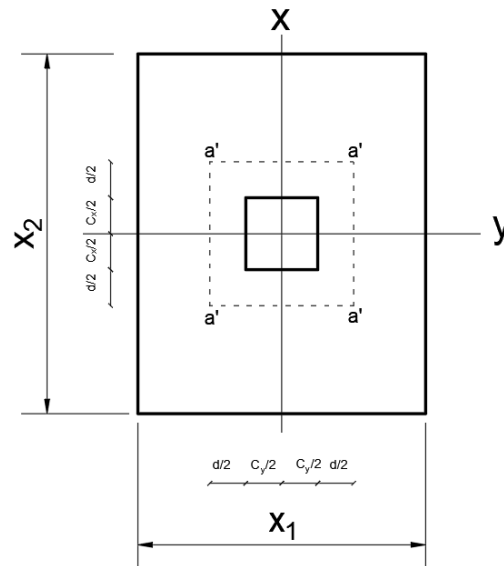
$$V_{nx1, oneway} = \phi_v (0.15 \sqrt{f'_c} x_1 d) \quad (3.20)$$

$$V_{nx2, oneway} = \phi_v (0.15 \sqrt{f'_c} x_2 d) \quad (3.21)$$

เมื่อ ϕ_v หมายถึง ตัวคูณลดกำลังสำหรับแรงเฉือน = 0.75

f'_c หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)

2) ข้อกำหนดด้านการวิบัติจากแรงเฉือนแบบสองทาง



รูปที่ 3.8 หน้าตัดวิกฤตสำหรับการวิบัติจากแรงเฉือนแบบสองทาง

รูปที่ 3.8 แสดงหน้าตัดวิกฤตของแรงเฉือนแบบสองทาง โดยในการตรวจสอบแรงเฉือนวิกฤต ($V_{u,two-way}$) จะพิจารณาหน้าตัดวิกฤตอยู่ห่างจากของเสาเป็นระยะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพ ($d/2$) และสามารถคำนวณกำลังรับแรงเฉือนทะเล ($V_{n,two-way}$) ซึ่งตามมาตรฐาน ACI 318-14 [2] กำหนดให้ใช้ค่าน้อยที่สุดจากสมการต่อไปนี้

$$V_{n,two-way} = \phi_s (0.17) \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \sqrt{f'_c} b_o d$$

$$V_{n,two-way} = \phi_s (0.083) \left(\frac{\alpha_s d}{b_o} + 2\right) \sqrt{f'_c} b_o d$$

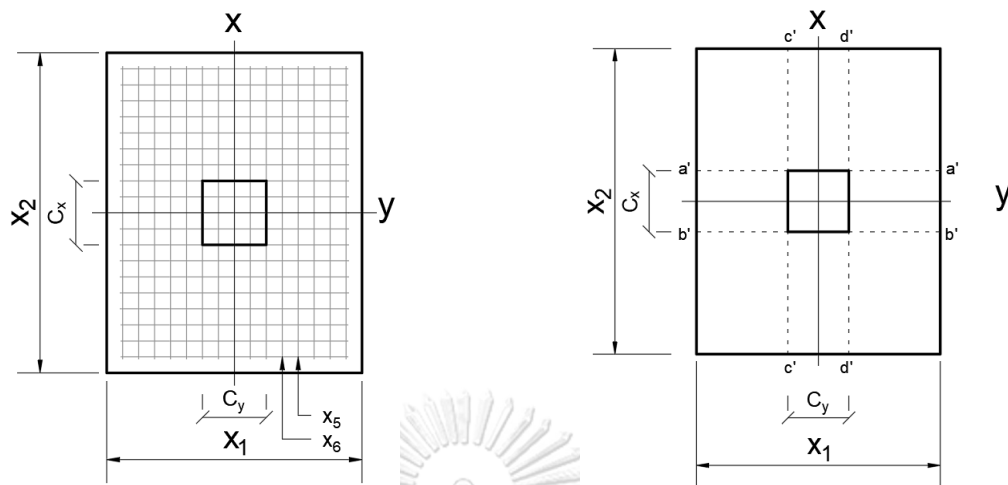
$$V_{n,two-way} = \phi_s (0.33) \sqrt{f'_c} b_o d_e$$

เมื่อ b_o หมายถึง ความยาวเส้นรอบรูปที่ระยะ $d/2$ จากขอบเสา (mm)

β_c หมายถึง อัตราส่วนระหว่างด้านยาวต่อด้านสั้นของหน้าตัดเสา

α_s หมายถึง ค่าคงที่ตามตำแหน่งเสา โดยค่าเท่ากับ 40 สำหรับเสาภายใน, 30 สำหรับเสาต้นริม, และ 20 สำหรับเสาต้นมุม

3) ข้อกำหนดด้านการเสริมเหล็กในฐานราก



(ก) เหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด

(ข) หน้าตัดวิกฤตสำหรับการวิบัติจากโมเมนต์ดัด

รูปที่ 3.9 มุมมองด้านบนของฐานรากเดี่ยวแสดงปริมาณเหล็กเสริมและหน้าตัดวิกฤต

รูปที่ 3.9(ก) แสดงการเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดทั้งในด้านกว้างและด้านยาวของฐานราก โดยในการออกแบบฐานรากจำเป็นต้องมีปริมาณเหล็กเสริมมากเพียงพอเพื่อรับโมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น (M_u) โดยปกติแล้วจะมีความมากที่สุดบริเวณขอบเสาซึ่งพิจารณาเป็นหน้าตัดวิกฤตสำหรับออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.19(ข) โดยกำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดในด้านกว้างและด้านยาว (x_5, x_6) ดังแสดงในสมการที่ (3.22) และ (3.23) ตามลำดับ

$$M_{nx1} = \phi_m x_5 f_y x_1 d^2 \left(1 - \frac{x_5 f_y}{1.7 f_c'} \right) \quad (3.22)$$

$$M_{nx2} = \phi_m x_6 f_y x_2 d^2 \left(1 - \frac{x_6 f_y}{1.7 f_c'} \right) \quad (3.23)$$

เมื่อ ϕ_m หมายถึง ตัวคูณลดกำลังสำหรับการดัด = 0.90

M_{nx1} หมายถึง กำลังรับโมเมนต์ดัดระบุสำหรับด้านกว้างของฐานราก (kN-m)

M_{nx2} หมายถึง กำลังรับโมเมนต์ดัดระบุสำหรับด้านยาวของฐานราก (kN-m)

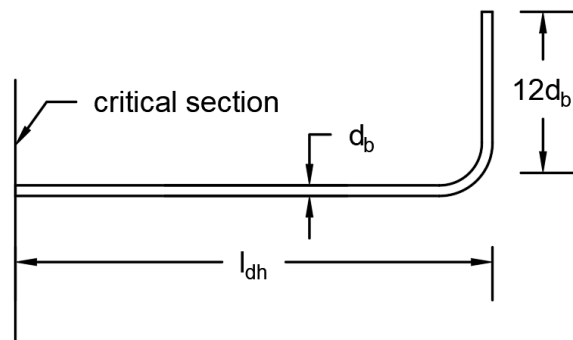
f_y หมายถึง ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (MPa)

นอกจากนี้ตามมาตรฐาน ACI 318-14 [2] กำหนดให้ต้องควบคุมปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด (ρ_{min}) และมากที่สุด (ρ_{max}) ในฐานราก เพื่อป้องกันการแตกร้าวและเพื่อป้องกันการวิบัติแบบทันทีทันใดซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.24) และ (3.25) ตามลำดับ

$$\rho_{min} = \max\left\{\frac{1.4}{f_y}, 0.25 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y}\right\} \quad (3.24)$$

$$\rho_{max} = 0.75(0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_y} (\frac{600}{600 + f_y})) \quad (3.25)$$

4) ข้อกำหนดด้านความยาวฝังยึดสำหรับเหล็กเสริม



รูปที่ 3.10 หน้าตัดวิกฤตสำหรับตรวจสอบการวิบัติจากระยะความยาวฝังยึดไม่เพียงพอ

รูปที่ 3.10 แสดงความยาวฝังยึดของเหล็กเสริมแบบข้องอแบบ 90 องศา (l_d) โดยวัดจากขอบเสาจนถึงปลายเหล็กทั้งด้านสั้นและด้านยาวของฐานราก ดังสมการที่ (3.26) และ (3.27) ตามลำดับ ซึ่งความยาวฝังยึดนี้ต้องมีค่ามากกว่าความยาวฝังยึดขั้นต่ำ (l_{dh}) เพื่อให้เหล็กสามารถรับแรงดึงได้จนถึงกำลังครากของเหล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.28)

$$l_{atrans} = (x_2 - c_x) / 2 - cv \quad (3.26)$$

$$l_{along} = (x_1 - c_y) / 2 - cv \quad (3.27)$$

$$l_{dh} = \frac{0.24\Psi_e f_y}{\sqrt{f'_c}} d_b \geq (8d_b, 150mm) \quad (3.28)$$

เมื่อ l_{atrans} หมายถึง ความยาวฝังยึดสำหรับเหล็กเสริมแนวตั้งฉากกับด้านกว้างของฐานราก (ม.)

l_{along} หมายถึง ความยาวฝังยึดสำหรับเหล็กเสริมแนวตั้งฉากกับด้านยาวของฐานราก (ม.)

cv หมายถึง ระยะหุ้มคอนกรีต (ม)

- c_x หมายถึง ความกว้างของเสาในแนวแกน x (m)
 c_y หมายถึง ความกว้างของเสาในแนวแกน y (m)
 ψ_e หมายถึง ตัวคูณปรับแก้สำหรับเหล็กเสริมเคลือบ epoxy
 d_b หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเหล็กเสริม (mm)

5) ข้อจำกัดด้านการวิบัติจากโมเมนต์บิด

สำหรับโครงสร้างที่รับแรงเฉือนและโมเมนต์บิดร่วมกันจะต้องตรวจสอบการวิบัติจาก Interaction Diagram แต่สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีการเสริมเหล็กเพื่อรับโมเมนต์บิดนั้น สามารถคำนวณกำลังรับโมเมนต์บิดของหน้าตัดได้ ดังสมการที่ (3.29) โดยจะเป็นขนาดของโมเมนต์บิดมากที่สุดที่ไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลของแรงดัดงอซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 25 ของกำลังรับโมเมนต์บิดแต่กร้าวของคอนกรีตซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าโมเมนต์บิดประลัย

$$T_n = \phi_t 0.083 \sqrt{f_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \quad (3.29)$$

เมื่อ ϕ_t หมายถึง ตัวคูณลดกำลังสำหรับโมเมนต์บิด = 0.75

A_{cp} หมายถึง พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตที่รับโมเมนต์บิด (m^2) = $(x_1)(x_2)$

P_{cp} หมายถึง เส้นรอบรูปคอนกรีตที่รับโมเมนต์บิด (m) = $2 \cdot (x_1 + x_2)$

จากข้อจำกัดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิค จำนวน 12 สมการ และด้าน
 สำหรับปัญหาการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 10 สมการ ที่กล่าวมา
 เบื้องต้นแล้ว ข้อจำกัดด้านฐานการควบคุมขนาดฐานรากเป็นอีกส่วนหนึ่งที่
 จำเป็นต้องพิจารณา ประกอบไปด้วย 2 สมการ ได้แก่ 1) สมการกำหนดความลึก
 ของฐานรากต้องมีค่าไม่เกินความลึกของฐานราก [1] 2) ฐานรากต้องมีความหนาไม่
 น้อยกว่า 15 เซนติเมตร [2] ในการประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด สมการ
 ข้อจำกัดทั้ง 24 สมการนี้จะต้องเขียนอยู่ในรูปแบบของข้อจำกัดแบบอสมการไม่เชิง
 เส้น (nonlinear inequality constraints) ซึ่งได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 3.3 จึงสามารถ
 ประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อออกแบบฐานรากเดี่ยวได้โดยมีขั้นตอนในการ
 ค้นหาฐานรากที่มีราคาวัสดุต่ำที่สุดที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกแฉกดัง แรงกระทำ
 ด้านข้าง โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิดได้ ดังแสดงสมการที่ (3.31) และ (3.32)

$$\text{Minimize } f(x) = C_{con} V_{con} + C_{st} W_{st} + C_{fw} A_{fw} \quad (3.31)$$

$$\text{Subjected to } g_k(x) \leq 0, \quad (k = 1, 2, 3, \dots, 24) \quad (3.32)$$

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

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_6)^T$$

เมื่อ $f(x)$ หมายถึง ฟังก์ชันค่านวณราคาวัสดุสำหรับฐานรากเดี่ยว

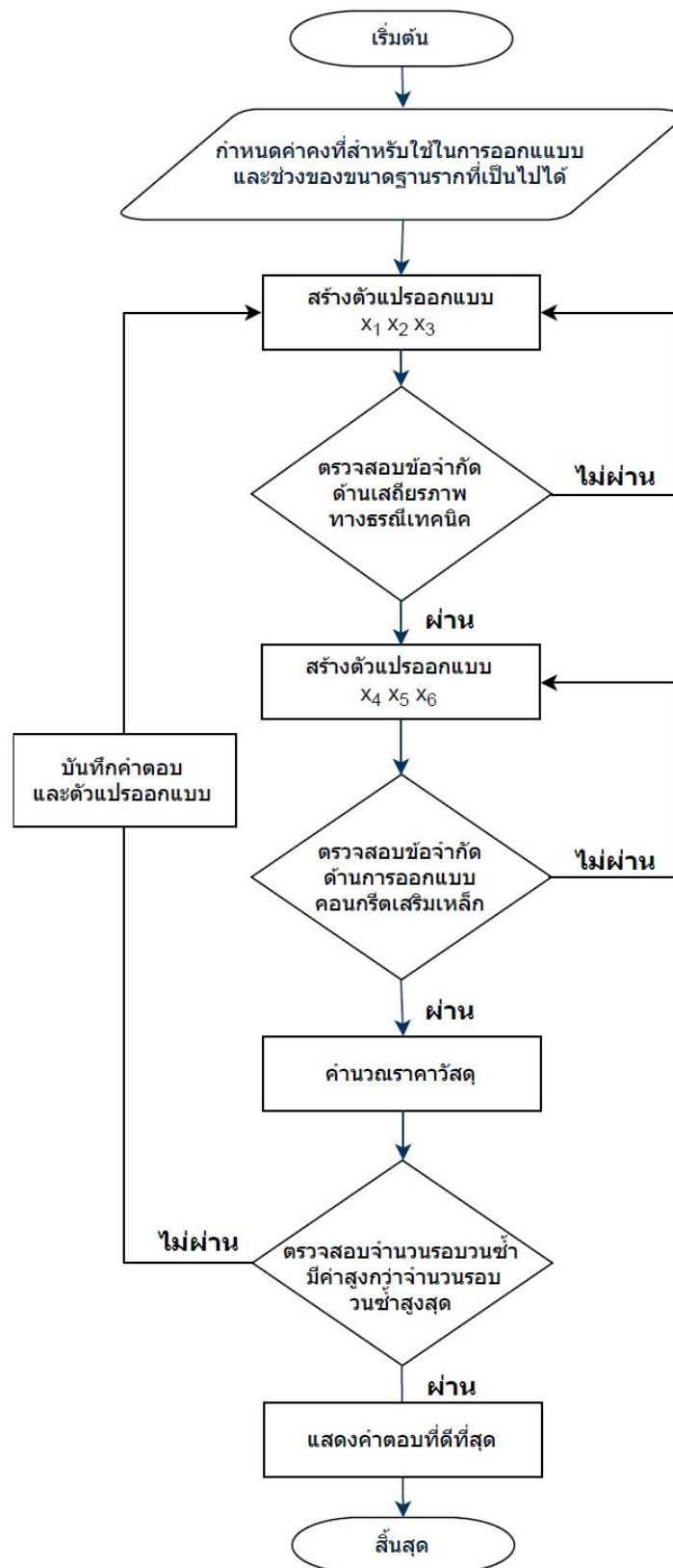
$g_k(x)$ หมายถึง ฟังก์ชันข้อจำกัดสำหรับการออกแบบฐานรากเดี่ยว

x หมายถึง ตัวแปรออกแบบสำหรับการออกแบบฐานรากเดี่ยว

R^n หมายถึง มิติในการค้นหาคำตอบ (Search space)

ตารางที่ 3.3 สรุปสมการข้อจำกัดสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว

สมการ	คำอธิบาย	ข้อจำกัด
ข้อจำกัดด้านขนาดของฐานราก		
$g_1(x)$	ความลึกของฐานราก	$x_3 \leq \min(x_1, x_2)$
$g_2(x)$	ความหนาของฐานราก	$0.15 \leq x_3 - x_4$
ข้อจำกัดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิค		
$g_3(x)$	กำลังแบกทานของดินแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้น	$FS_{breq} \leq FS_{bpres,s}$
$g_4(x)$	กำลังแบกทานของดินแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะยาว	$FS_{breq} \leq FS_{bpres,l}$
$g_5(x)$	กำลังแบกทานแบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะสั้น	$FS_{breq} \leq FS_{bforce,s}$
$g_6(x)$	กำลังแบกทานแบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะยาว	$FS_{breq} \leq FS_{bforce,l}$
$g_7(x)$	หน่วยแรงดึงใต้ฐานราก	$0 \leq q_{min}$
$g_8(x)$	การพลิกคว่ำเนื่องจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน x	$FS_{ovreq} \leq FS_{ovlocalx}$
$g_9(x)$	การพลิกคว่ำเนื่องจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน y	$FS_{ovreq} \leq FS_{ovlocaly}$
$g_{10}(x)$	การพลิกคว่ำเนื่องจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน x และแกน y	$FS_{ovreq} \leq FS_{ovg}$
$g_{11}(x)$	การเลื่อนไถลของฐานรากพิจารณาแบบระยะสั้น	$FS_{slidreq} \leq FS_{slide,s}$
$g_{12}(x)$	การเลื่อนไถลของฐานรากพิจารณาแบบระยะยาว	$FS_{slidreq} \leq FS_{slide,l}$
$g_{13}(x)$	กำลังรับโมเมนต์บิดของฐานรากพิจารณาแบบระยะสั้น	$FS_{torreq} \leq FS_{tor,s}$
$g_{14}(x)$	กำลังรับโมเมนต์บิดของฐานรากพิจารณาแบบระยะยาว	$FS_{torreq} \leq FS_{tor,l}$
ข้อจำกัดด้านการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก		
$g_{15}(x)$	การเคียนทางเดียวสำหรับด้าน x_1	$V_{ux1-oneway} \leq \phi_v V_{nx1-oneway}$
$g_{16}(x)$	การเคียนทางเดียวสำหรับด้าน x_2	$V_{ux2-oneway} \leq \phi_v V_{nx2-oneway}$
$g_{17}(x)$	การเคียนสองทาง	$V_{u-twoway} \leq \phi_v V_{n-twoway}$
$g_{18}(x)$	กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_1	$M_{ux1} \leq \phi_m M_{nx1}$
$g_{19}(x)$	กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_2	$M_{ux2} \leq \phi_m M_{nx2}$
$g_{20}(x)$	ปริมาณเหล็กเสริมสำหรับด้าน x_1	$\rho_{min} \leq x_5 \leq \rho_{max}$
$g_{21}(x)$	ปริมาณเหล็กเสริมสำหรับด้าน x_2	$\rho_{min} \leq x_6 \leq \rho_{max}$
$g_{22}(x)$	ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมสำหรับด้าน x_1	$l_{dx1} \leq l_{ax1}$
$g_{23}(x)$	ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมสำหรับด้าน x_2	$l_{dx2} \leq l_{ax2}$
$g_{24}(x)$	กำลังรับโมเมนต์บิดของคอนกรีตเสริมเหล็ก	$T_u \leq \phi_t T_n$



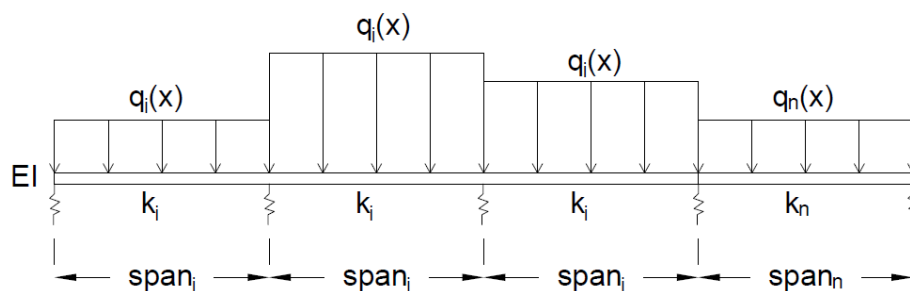
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด สำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยว

3.2 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่

ในหัวข้อวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะประยุกต์ระเบียบวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อใช้หาค่าวิกฤติสำหรับการออกแบบคานบนฐานรากยึดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่เท่ากันสามารถนำไปใช้ออกแบบพื้นวางบนดิน (Slab on ground) เช่น ภายในโกดังเก็บของหรือโรงงานขนาดใหญ่ที่ต้องการเก็บสินค้าหรือวางเครื่องจักรที่มีน้ำหนักมาก ซึ่งในฐานะผู้ออกแบบนั้นจะทราบเพียงน้ำหนักของสินค้าหรือเครื่องจักร แต่ผู้ออกแบบจะไม่ทราบรูปแบบการจัดวางสินค้าหรือเครื่องจักรซึ่งจะส่งผลต่อแรงที่เกิดขึ้นภายในพื้น การนำระเบียบวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดประยุกต์ใช้กับปัญหาดังกล่าวนี้ จะช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์รูปแบบการจัดวางน้ำหนัก (Load Pattern) ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด แรงเฉือนสูงสุด เพื่อนำไปใช้ออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กได้ต่อไป

3.2.1 ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาการปรับรูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่

ในการวิเคราะห์หารูปแบบการจัดวางน้ำหนักที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตนั้นทำได้โดยแบ่งคานออกเป็นชั้นย่อยจำนวน n ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งในแต่ละชั้นย่อยจะประกอบไปด้วยตัวแปรออกแบบจำนวน 2 ตัวแปร ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดิน k_i และน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเหนือคาน q_i ดังนั้นจำนวนตัวแปรออกแบบทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ $2n$ จะเห็นได้ว่าเมื่อแบ่งคานละเอียดมากขึ้นค่าตอบที่ได้ก็จะมีค่าแม่นยำมากขึ้น แต่จะยังใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.12 ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาคานบนฐานรากยึดหยุ่น

- เมื่อ EI หมายถึง ค่าความแข็งแรงต้านโมเมนต์ดัด (kN/m^3)
 $span_i$ หมายถึง ช่วงคานที่ i
 q_i หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนช่วงคานที่ i (kN/m)
 k_i หมายถึง สัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินบนช่วงคานที่ i (kN/m^3)
 n หมายถึง จำนวนคานย่อยทั้งหมด

3.2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาการวางแผนน้ำหนักบรรทุกสำหรับคาน บนฐานรากยึดหยุนที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่

งานวิจัยนี้ได้ศึกษารูปแบบการวางตัวของน้ำหนักบรรทุกเพื่อใช้วิเคราะห์แรงภายในคานบนฐานรากยึดหยุน ประกอบไปด้วย 3 ค่าวิกฤตที่สำคัญสำหรับนำออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนี้

1) รูปแบบการวางตัวของน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์บวกสูงสุดในคาน

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & f(x) = EI \frac{d^2 y}{dt^2} \\ \text{Subjected to} \quad & LB \leq x \leq UB \\ \text{And} \quad & x \in R^n \\ & x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{2n})^T \end{aligned} \quad (3.30)$$

2) รูปแบบการวางตัวของน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ลบสูงสุดในคาน

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & f(x) = -EI \frac{d^2 y}{dt^2} \\ \text{Subjected to} \quad & LB \leq x \leq UB \\ \text{And} \quad & x \in R^n \\ & x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{2n})^T \end{aligned} \quad (3.31)$$

3) รูปแบบการวางตัวของน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงเฉือนสูงสุดในคาน

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & f(x) = EI \frac{d^4 y}{dt^4} \\ \text{Subjected to} \quad & LB \leq x \leq UB \\ \text{And} \quad & x \in R^n \\ & x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_{2n})^T \end{aligned} \quad (3.32)$$

เมื่อ $f(x)$ หมายถึง ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าแรงภายในวิกฤต

x หมายถึง ตัวแปรออกแบบ

t หมายถึง ตำแหน่งใด ๆ บนคาน

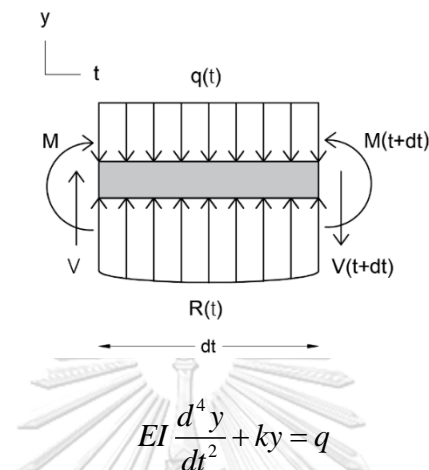
LB หมายถึง ขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ

UB หมายถึง ขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ

R^n หมายถึง มิติในการค้นหาคำตอบ (Search space)

3.2.3 การวิเคราะห์แรงภายในคานบนฐานรากยึดหยุ่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่

ในการวิเคราะห์ค่าแรงวิกฤตภายในคานบนฐานรากยึดหยุ่นสามารถทำได้โดยการแบ่งชิ้นส่วนคานเป็นชิ้นย่อย ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 Free Body Diagram สำหรับคานบนฐานรากยึดหยุ่น

จากจกสมการสมดุลแรงภายในคานบนฐานรากยึดหยุ่น ซึ่งเขียนอยู่ในแบบของ Homogenous differential equation ดังสมการที่ 3.33

$$y^{IV} + 4\alpha^4 \cdot y = \frac{q(t)}{EI} \quad (3.33)$$

จะสามารถแก้ปัญหาโดยการอินทิเกรตและสามารถเขียนสมการการทรุดตัว $y(t)$ มุมการโก่งตัวของคาน $\phi(t)$ โมเมนต์ดัด $M(t)$ และแรงเฉือนของคานบนฐานราก $Q(t)$ ที่ตำแหน่งใด ๆ บนคานได้ โดยเขียนอยู่ในรูปแบบสมการอย่างง่ายได้ของแต่ละชิ้นส่วนย่อยได้ ดังนี้

$$y(t) = A(\alpha t) \cdot y_0 + B(\alpha t) \cdot \frac{\phi_0}{\alpha} - C(\alpha t) \cdot \frac{M_0}{\alpha^2 \cdot EI} - D(\alpha t) \cdot \frac{Q_0}{\alpha^3 \cdot EI}$$

$$\phi(t) = y'(t) = -4\alpha D(\alpha t) \cdot y_0 + \alpha \cdot A(\alpha t) \cdot \frac{\phi_0}{\alpha} - \alpha \cdot B(\alpha t) \cdot \frac{M_0}{\alpha^2 \cdot EI} - \alpha C(\alpha t) \cdot \frac{Q_0}{\alpha^3 \cdot EI}$$

$$M(t) = -EI y''(t) = EI \cdot 4\alpha^2 \cdot C(\alpha t) \cdot y_0 + EI \cdot 4\alpha^2 D(\alpha t) \cdot \frac{\phi_0}{\alpha} + EI \cdot \alpha^2 A(\alpha t) \cdot \frac{M_0}{\alpha^2 \cdot EI} + EI \cdot \alpha^2 B(\alpha t) \cdot \frac{Q_0}{\alpha^3 \cdot EI}$$

$$Q(t) = -EI y'''(t) = EI \cdot 4\alpha^3 B(\alpha t) \cdot y_0 + EI \cdot 4\alpha^3 C(\alpha t) \cdot \frac{\phi_0}{\alpha} - EI \cdot 4\alpha^3 D(\alpha t) \cdot \frac{M_0}{\alpha^2 \cdot EI} + EI \cdot 4\alpha^3 A(\alpha t) \cdot \frac{Q_0}{\alpha^3 \cdot EI}$$

จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของแมทริกซ์เพื่อใช้สำหรับการคำนวณด้วยโปรแกรมเมทแลป

$$\begin{Bmatrix} y(t) \\ \phi(t) \\ M(t) \\ Q(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B/\alpha & -C/\alpha^2 & -D/\alpha^3 \\ -4\alpha D & A & -B/\alpha & -C/\alpha^2 \\ 4\alpha^2 C & 4\alpha D & A & B/\alpha \\ 4\alpha^3 B & 4\alpha^2 C & -4\alpha D & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_0 \\ \phi_0 \\ M_0 \\ Q_0 \end{Bmatrix} \quad (3.34)$$

เมื่อ $\alpha = \sqrt[4]{k/4EI}$

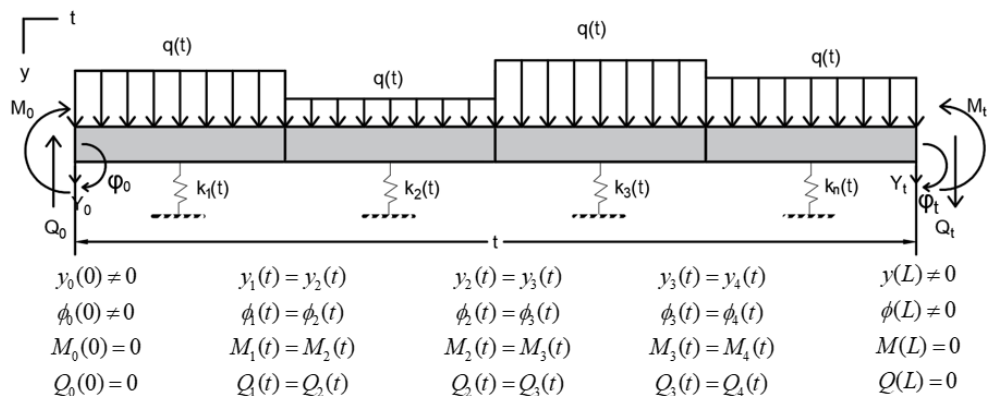
$$A(\alpha x) = \cosh(\alpha x) \cdot \cos(\alpha x)$$

$$B(\alpha x) = \frac{\cosh(\alpha x) \cdot \sin(\alpha x) + \sinh(\alpha x) \cdot \cos(\alpha x)}{2}$$

$$C(\alpha x) = \frac{\sinh(\alpha x) \cdot \sin(\alpha x)}{2}$$

$$D(\alpha x) = \frac{\cosh(\alpha x) \cdot \sin(\alpha x) - \sinh(\alpha x) \cdot \cos(\alpha x)}{4}$$

รูปแบบสมการที่ (3.34) ได้มาจากการอินทิเกรตดังนั้นจะมีตัวแปรที่ติดอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ ได้แก่ การทรุดตัวเริ่มต้นที่ฝั่งต้นคาน (y_0) มุมโก่งตัวของคานเริ่มต้นที่ฝั่งต้นคาน (ϕ_0) โมเมนต์ตัดเริ่มต้นที่ฝั่งต้นคาน (M_0) และแรงเฉือนเริ่มต้นที่ฝั่งต้นคาน (Q_0) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการความสอดคล้องของแรงภายในคาน (Compatibility equation) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเชื่อมกันแรงภายในระหว่างชิ้นส่วนย่อยสำหรับคานบนฐานรากยืดหยุ่น

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

การออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยว

4.1 กรณีศึกษาการออกแบบฐานรากเดี่ยว

งานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวอย่าง แรงและโมเมนต์ ทั้งหมด 5 กรณี ซึ่งได้กำหนดค่าคงที่สำหรับใช้ในการออกแบบฐานรากเดี่ยว ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่แตกต่างกัน 6 วิธี ซึ่งใช้โค้ดที่พัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB (2018b) สามารถดาวน์โหลดและศึกษาวิธีการตั้งค่าเบื้องต้นได้ตามเอกสารอ้างอิงดังนี้ fmincon (fmin) [27] Pattern search (PS) [28] วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) [29] วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด (Ant colony optimization, ACO) [30] วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย (Firefly algorithm, FA) [31] วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า (Cuckoo search algorithm, CS) [32] โดยการประมวลผลในงานวิจัยนี้ทั้งหมดจะประมวลผลบนระบบปฏิบัติการ Windows 10 Intel Core i7-4790 3.6 GHz หน่วยความจำ 32 GB

ตารางที่ 4.1 แรงและโมเมนต์สำหรับใช้ออกแบบฐานรากเดี่ยว

กรณีศึกษาที่	1	2	3	4	5
P_D (kN)	700	700	700	700	700
P_L (kN)	500	500	500	500	500
M_{DX} (kN-m)	-	-	140	140	140
M_{LX} (kN-m)	-	-	100	100	100
M_{DY} (kN-m)	-	-	120	120	350
M_{LY} (kN-m)	-	-	80	80	250
P_x (kN)	-	60	-	60	60
P_y (kN)	-	50	-	50	50
T (kN-m)	-	-	-	115	115

*หมายเหตุ รายละเอียดสำหรับตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก U_1-U_6 แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่สำหรับการออกแบบฐานรากเดี่ยว

ค่าจำกัดความ	ค่าคงที่	หน่วย
หน่วยน้ำหนักของดิน	20	kN/m ³
หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต	24	kN/m ³
หน่วยน้ำหนักของเหล็ก	7850	kg/m ³
กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	200	kPa
ค่าความเชื่อมแน่นระหว่างเม็ดดิน	10	kPa
มุมเสียดทานระหว่างเม็ดดิน	35	deg
ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก	400	MPa
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	28	MPa
ระยะหุ้มคอนกรีต (c_v)	0.08	m
ด้านกว้างของเสา (c_x)	0.40	m
ด้านยาวของเสา (c_y)	0.40	m
ค่าความปลอดภัยกำลังแบกทานขั้นต่ำ (FS_{breq})	3.0	-
ค่าความปลอดภัยการพลิกคว่ำขั้นต่ำ (FS_{ovreq})	2.0	-
ค่าความปลอดภัยการเลื่อนไถลขั้นต่ำ ($FS_{slidreq}$)	2.0	-
ค่าความปลอดภัย torsion ขั้นต่ำ (FS_{torreq})	2.0	-
ช่วงของขนาดฐานราก	1.0-5.0	m
ช่วงของความลึกฐานราก	0.5-2.0	m
ช่วงของความหนาฐานราก	0.25-1.0	m
ช่วงของอัตราส่วนเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด	2.0-5.0	%
ราคาต่อหน่วยสำหรับคอนกรีต	2314.40	฿/m ³
ราคาต่อหน่วยสำหรับเหล็กเสริม	18366.67	฿/tons
ราคาต่อหน่วยสำหรับแบบหล่อ	165	฿/m ²

4.2 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาการออกแบบฐานรากตื้นด้วยวิธีเมตาฮิวริสติก

ในการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติกจำเป็นที่จะต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ของในแต่ละอัลกอริทึมให้เหมาะสมกับรูปแบบของปัญหา ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ในขั้นแรกเป็นการทดสอบพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบซึ่งในแต่ละอัลกอริทึม มีพารามิเตอร์ที่ใช้แตกต่างกัน โดยการทดสอบขั้นแรกได้กำหนดจำนวนประชากรคงที่ตลอดการทดสอบ ขั้นที่สองเป็นการนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งได้จากการทดสอบแรกมาใช้ทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมสำหรับแต่ละอัลกอริทึม (N) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10 – 50 โดยการทดสอบทั้งสองขั้นตอนที่กล่าวไปเบื้องต้น ใช้ตัวอย่างแรงและโมเมนต์ในกรณีศึกษาที่ 4 เป็นตัวแทนในการทดสอบ กำหนดเงื่อนไขการวนซ้ำ (iteration) เท่ากับ 2000 รอบ และทำการทดสอบซ้ำ 20 ครั้งเพื่อเก็บค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าที่ต่ำที่สุด ค่าที่สูงที่สุด ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

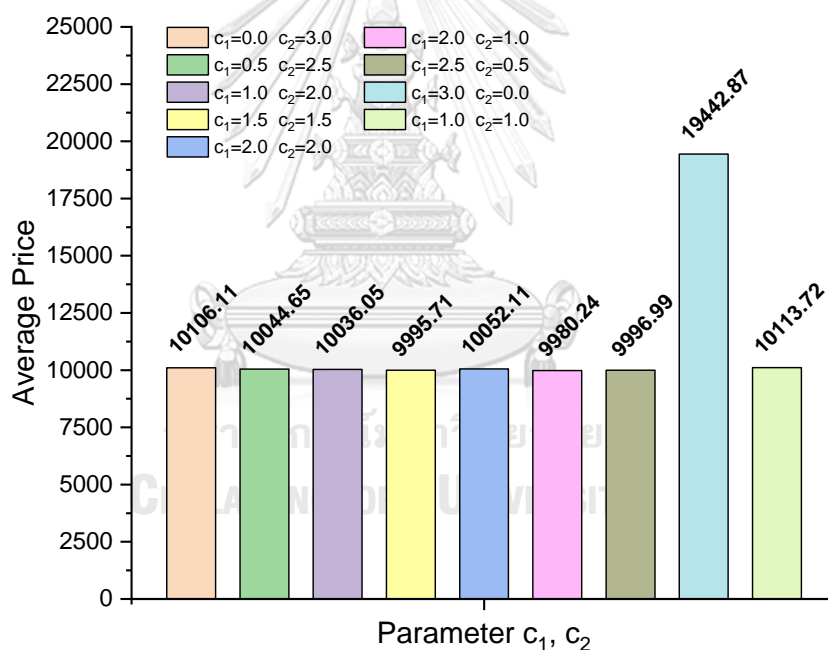
4.2.1 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ PSO

ประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคขึ้นอยู่กับ การกำหนดพารามิเตอร์ 3 ประเภท ประกอบด้วย 1) Cognitive parameter (c_1) มีหน้าที่ค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด在线ทางการบินของตัวมันเอง 2) Social parameter (c_2) มีหน้าที่เปรียบเทียบคำตอบที่ดีที่สุดของตัวเองกับอนุภาคตัวอื่น ๆ 3) จำนวนอนุภาค (N) ยังมีจำนวนอนุภาคมากโอกาสที่จะพบแหล่งอาหาร (คำตอบ) ก็จะมีมากขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะมากขึ้น

ในขั้นแรก ผู้วิจัยได้ทดสอบค่าพารามิเตอร์ c_1 และ c_2 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 3 จำนวน 9 ชุด [33] พบว่า การกำหนดให้ผลรวมของ c_1 และ c_2 มีค่าไม่เกิน 4 จะทำอัลกอริทึมมีความเสถียรและสามารถเข้าสู่หาคำตอบที่ดีที่สุดได้ โดยกำหนดให้จำนวนประชากร และค่าถ่วงน้ำหนัก (Inertia weight) มีค่าคงที่เท่ากับ 20 และ 0.875 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า การกำหนด $c_1 = 2.0$ และ $c_2 = 1.0$ เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากตื้น เนื่องจากมีราคาที่ดีที่สุด ราคาเฉลี่ย ต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบพารามิเตอร์ c_1 และ c_2 สำหรับ PSO

c_1	c_2	ราคาต่ำที่สุด (บาท)	ราคาสูงที่สุด (บาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0.0	3.0	9929.23	10457.62	10106.11	208.06
0.5	2.5	9890.66	10554.54	10044.65	202.79
1.0	2.0	9999.96	10505.49	10036.05	209.21
1.5	1.5	9992.54	10435.27	9995.71	181.86
2.0	2.0	10064.28	10424.69	10052.11	163.17
2.0	1.0	9926.87	10532.75	9980.24	189.88
2.5	0.5	9869.65	10451.09	9996.99	136.72
3.0	0.0	15163.00	27105.74	19442.87	2971.28
1.0	1.0	9826.68	10629.47	10113.72	231.14

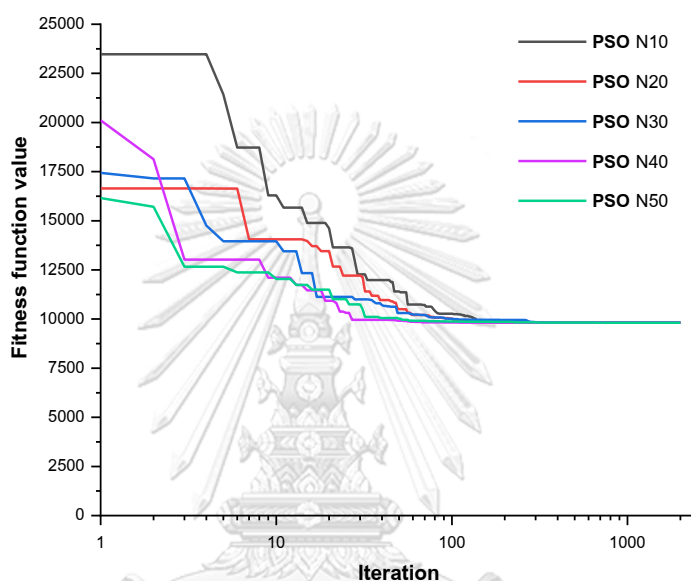


รูปที่ 4.1 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ c_1 และ c_2 สำหรับ PSO

ในขั้นตอนที่สอง ผู้วิจัยต้องการศึกษาผลของการกำหนดจำนวนอนุภาค (N) โดยใช้พารามิเตอร์ $c_1 = 2.0$ และ $c_2 = 1.0$ ซึ่งได้จากการทดสอบในขั้นตอนแรก นำมาใช้ในการทดสอบหาจำนวนอนุภาคที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบจำนวนอนุภาคตั้งแต่ 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10 ตัว เป็นจำนวนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฐานราคามีราคาเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ดังแสดงผลการทดสอบและกราฟแสดงการลู่เข้าคำตอบในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ PSO

จำนวนประชากร (N)	10	20	30	40	50
ราคาต่ำที่สุด (บาท)	9825.27	9814.45	9818.99	9811.72	9814.47
ราคาที่สูงที่สุด (บาท)	10526.50	10175.52	10197.25	10510.35	10296.98
ราคาเฉลี่ย (บาท)	10122.59	9922.12	9907.46	9902.10	9902.28
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	193.30	116.78	103.05	181.88	126.15



รูปที่ 4.2 อัตราลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ PSO ที่จำนวนประชากรแตกต่างกัน

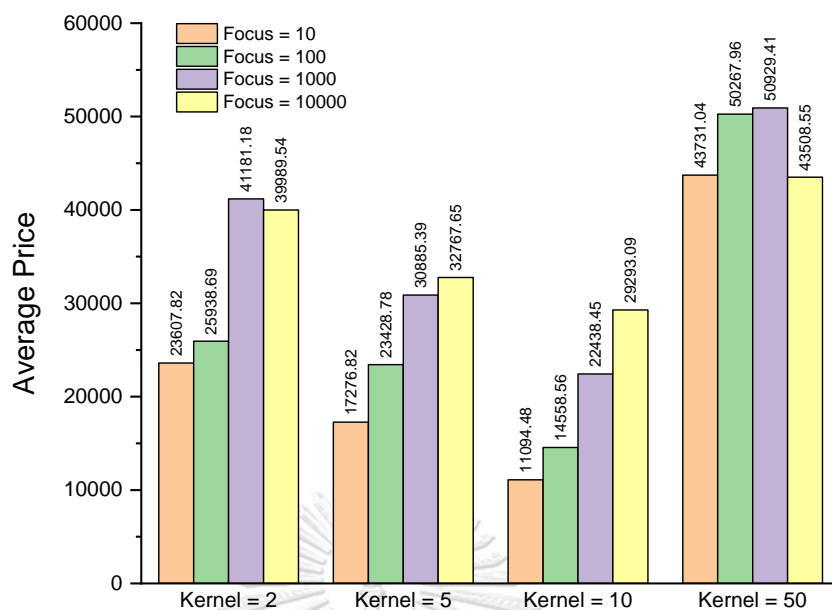
4.2.2 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ ACO

ประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบระบบอาณาจักรมดของโปรแกรม MIDACO ขึ้นอยู่กับการกำหนดพารามิเตอร์ 3 ประเภท ประกอบด้วย 1) Focus มีหน้าที่ค้นหาคำตอบที่ดีกว่าที่อยู่ใกล้เคียงกับคำตอบปัจจุบัน ยังมีค่ามากโปรแกรมจะยังคงหาอย่างละเอียดส่งผลให้ใช้จำนวนรอบในการค้นหามากขึ้นตามไปด้วย 2) Kernel มีหน้าที่จัดเก็บคำตอบที่ได้จากมดแต่ละตัวสำหรับเปรียบเทียบคำตอบของตัวเองกับคำตอบของมดตัวอื่น การกำหนดค่า Kernel ต่ำจะใช้เวลาในการคำนวณน้อยลงแต่ก็จะส่งผลให้คำตอบที่ได้อาจเป็นคำตอบเฉพาะที่ การเพิ่มค่า Kernel จะส่งผลให้มดสามารถค้นหาคำตอบใหม่ ๆ ได้เพิ่มมากขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน 3) จำนวนประชากรมด (ANT) ใช้สำหรับการค้นหาเส้นทางหาอาหาร (คำตอบ) ยังมีจำนวนมดมากโอกาสที่จะเจอคำตอบที่ดีกว่าก็ย่อมมีมากขึ้น

ในขั้นแรกของการทดสอบจะทำการทดสอบพารามิเตอร์ Focus และ Kernel ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 – 10000 โดยกำหนดให้จำนวนมดมีค่าคงที่เท่ากับ 20 ตัว ผลการทดสอบพบว่าข้อกำหนดพารามิเตอร์ Focus = 10 และ Kernel = 10 เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากดินเนื่องจากมีราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบพารามิเตอร์สำหรับ ACO

Kernel	Focus	ราคาต่ำที่สุด (บาท)	ราคาสูงที่สุด (บาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
2	10	10235.06	43468.59	23607.82	10582.20
	100	13769.86	57162.68	25938.69	10917.56
	1000	10931.84	74556.22	41181.18	17211.29
	10000	13049.21	111572.92	39989.54	21495.70
5	10	10033.73	41610.32	17276.82	10073.23
	100	11547.85	50367.53	23495.18	9135.54
	1000	11776.31	95745.79	30885.39	18784.72
	10000	12131.88	68921.86	32646.21	15180.35
10	10	9863.81	16226.90	11094.48	1531.15
	100	9914.27	32217.14	14558.56	6742.59
	1000	9947.84	44994.37	22438.45	11279.94
	10000	10316.68	65719.47	29213.54	13116.31
50	10	10181.30	141112.59	43731.04	35014.91
	100	11534.09	102921.53	50267.96	26651.86
	1000	10633.76	193766.35	50929.41	40310.08
	10000	10439.61	105414.01	42597.29	27811.99

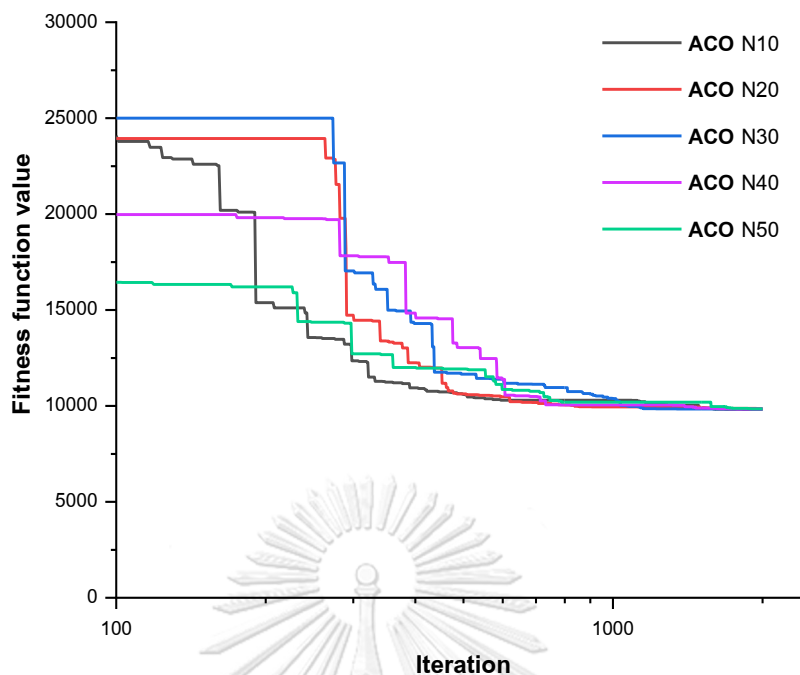


รูปที่ 4.3 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ Kernel และ Focus สำหรับ ACO

ในขั้นตอนที่สอง ผู้วิจัยต้องการศึกษาผลของการกำหนดจำนวนมด (ANT) โดยใช้พารามิเตอร์ Focus = 10 และ Kernel = 10 ซึ่งได้จากการทดสอบในขั้นตอนแรก นำมาใช้ในการทดสอบหาจำนวนมดที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบจำนวนมดตั้งแต่ 10 20 30 40 และ 50 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าจำนวนประชากรมด ANT = 10 เป็นจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฐานราคามีราคาเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ดังแสดงผลการทดสอบและกราฟแสดงการลู่เข้าคำตอบ ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ ACO

จำนวนประชากร (N)	10	20	30	40	50
ราคาต่ำสุด (บาท)	9816.90	9862.56	9837.28	9836.62	9846.11
ราคาที่สูงที่สุด (บาท)	11171.90	21261.79	13113.79	18048.56	11200.22
ราคาเฉลี่ย (บาท)	10248.89	12101.74	10378.03	11199.29	10254.53
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	415.52	3323.37	709.72	2138.80	388.35



รูปที่ 4.4 อัตราลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ ACO ที่จำนวนประชากรแตกต่างกัน

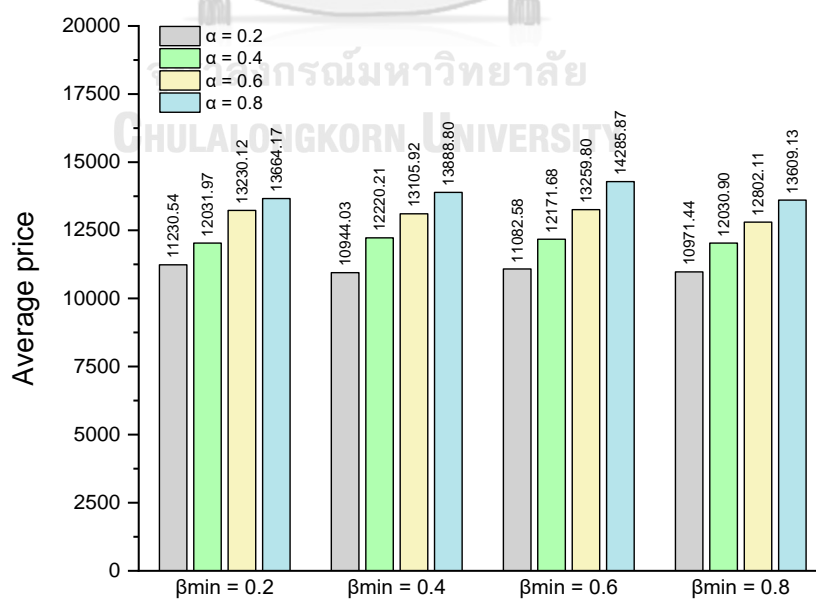
4.2.3 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ FA

ประสิทธิภาพของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหึ่งห้อยจะขึ้นอยู่กับกำหนพารามิเตอร์ 3 ประเภท ประกอบด้วย 1) ความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสงขั้นต่ำ (β_{\min}) มีผลต่อการดึงดูดของหึ่งห้อย ยิ่งมีค่ามากหึ่งห้อยจะถูกดึงดูดให้รวมกลุ่มกันเร็วขึ้น แต่ถ้ามีค่ามากเกินไปจะทำให้หึ่งห้อยหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมได้ 2) พารามิเตอร์สุ่ม (α) มีผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่สุ่มสำหรับค้นหาคำตอบใหม่ ๆ ยิ่งมีค่ามากหึ่งห้อยก็จะยิ่งค้นหาคำตอบได้เพิ่มมากขึ้น 3) จำนวนหึ่งห้อย (N) ยิ่งหึ่งห้อยมีมากขึ้น โอกาสที่จะพบคำตอบใหม่ก็ยังมีมากขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ในขั้นแรกผู้วิจัยได้ทดลองจับคู่หาความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสงและพารามิเตอร์สุ่มซึ่งอยู่ในช่วง 0.2 - 0.4 ปรับค่าเพิ่มขึ้นทีละ 0.20 ผลการทดสอบพบว่าความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสงขั้นต่ำ $\beta_{\min} = 0.2$ และพารามิเตอร์สุ่ม $\alpha = 0.4$ เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ฐานรากมีราคาเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบพารามิเตอร์สำหรับ FA

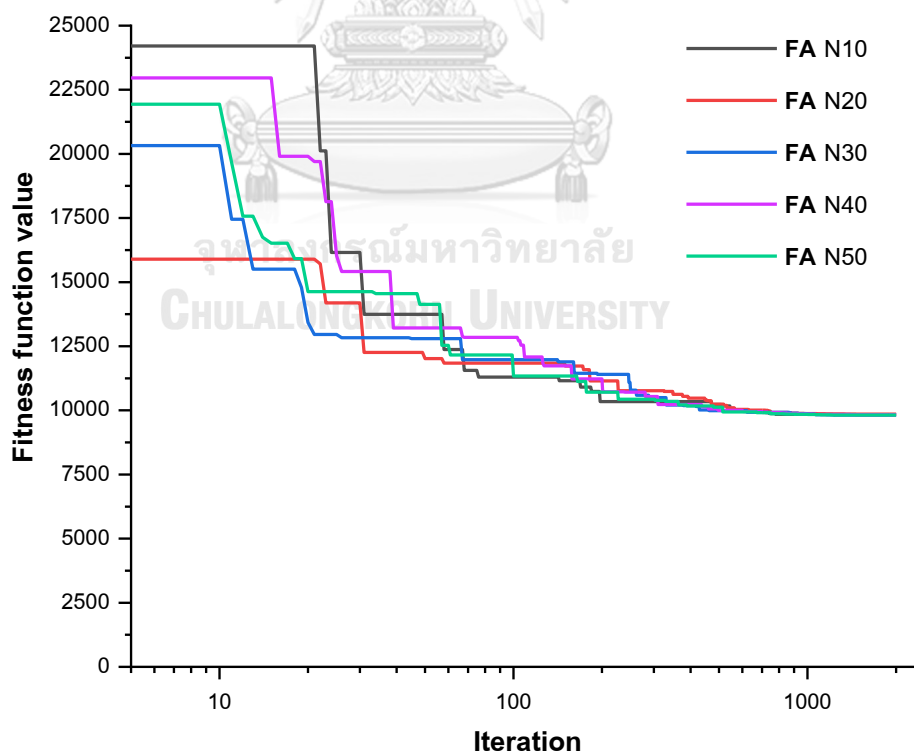
β_{\min}	α	ราคาต่ำที่สุด (บาท)	ราคาสูงที่สุด (บาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0.2	0.2	10614.47	11888.74	11230.54	319.27
	0.4	10917.74	12854.69	12031.97	441.12
	0.6	11773.13	14254.81	13230.12	746.96
	0.8	12112.68	15151.26	13664.17	691.07
0.4	0.2	10390.75	11967.16	10944.03	320.73
	0.4	11419.39	13301.67	12220.21	457.50
	0.6	11783.01	13678.86	13105.92	509.93
	0.8	12505.44	15046.44	13888.80	770.43
0.6	0.2	10702.85	11544.42	11082.58	241.52
	0.4	11121.54	12884.02	12171.68	451.92
	0.6	11514.32	14278.92	13259.80	636.51
	0.8	12956.20	15745.78	14285.87	792.62
0.8	0.2	10670.93	11467.06	10971.44	227.85
	0.4	10860.16	13274.45	12030.90	580.77
	0.6	11367.72	14711.46	12802.11	833.87
	0.8	12351.36	14711.88	13609.13	660.63

รูปที่ 4.5 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ β_{\min} และ α สำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมแบบหึ่งห้อย

ในขั้นตอนที่สอง ผู้วิจัยต้องการศึกษาผลของการกำหนดจำนวนหึ่งห้อย โดยใช้ความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสงขั้นต่ำ $\beta_{\min} = 0.40$ และพารามิเตอร์สุ่ม $\alpha = 0.20$ ซึ่งได้จากขั้นแรก นำมาใช้ในการทดสอบหาจำนวนประชากรหึ่งห้อยที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบจำนวนหึ่งห้อยตั้งแต่ 10 20 30 40 และ 50 ตัว จากผลการทดสอบพบว่าจำนวนหึ่งห้อยเท่ากับ 50 ตัว เป็นจำนวนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฐานรากมีราคาเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ดังแสดงผลการทดสอบและกราฟแสดงการลู่เข้าคำตอบในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ FA

จำนวนประชากร (N)	10	20	30	40	50
ราคาต่ำที่สุด (บาท)	9832.77	9816.66	9819.99	9832.53	9817.59
ราคาที่สูงที่สุด (บาท)	12348.77	11326.77	11702.89	11307.87	10974.56
ราคาเฉลี่ย (บาท)	10421.75	10246.44	10189.03	10101.39	9936.68
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	708.47	418.45	456.32	377.12	255.65



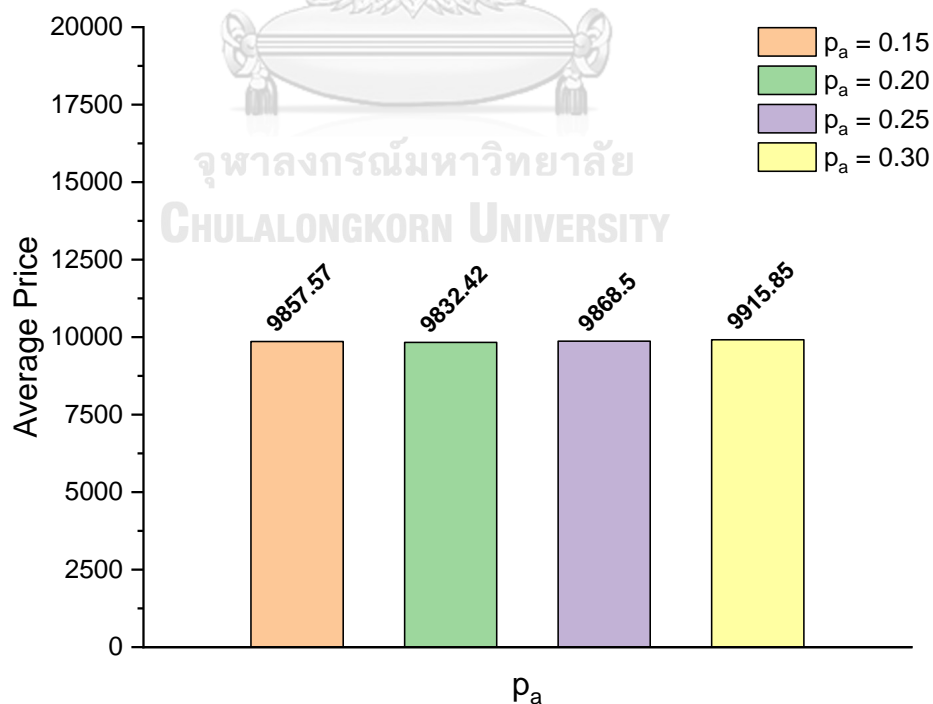
รูปที่ 4.6 อัตราลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ FA ที่จำนวนประชากรแตกต่างกัน

4.2.4 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ CS

ประสิทธิภาพของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่าจะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดอัตราการทิ้งหรือทำลายรังของนกกาเหว่า (p_a) และจำนวนนกกาเหว่า (N) ให้เหมาะสมกับปัญหา ซึ่งในขั้นแรกจะทำการทดสอบการหาอัตราการทิ้งหรือทำลายรังของนกกาเหว่าซึ่งอยู่ในช่วง 0.15 – 0.30 [34] และปรับค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 โดยกำหนดให้จำนวนนกกาเหว่า (N) คงที่เท่ากับ 20 ผลการทดสอบพบว่าอัตราการทิ้งหรือทำลายรังของนกกาเหว่า $p_a = 0.20$ เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ราคาเฉลี่ยต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และ รูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบพารามิเตอร์สำหรับ CS

p_a	ราคาต่ำที่สุด (บาท)	ราคาสูงที่สุด (บาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.15	9812.79	10393.30	9857.57	124.43
0.20	9812.82	9916.61	9832.42	22.55
0.25	9817.48	10254.18	9868.50	96.87
0.30	9833.35	10228.33	9915.85	104.20

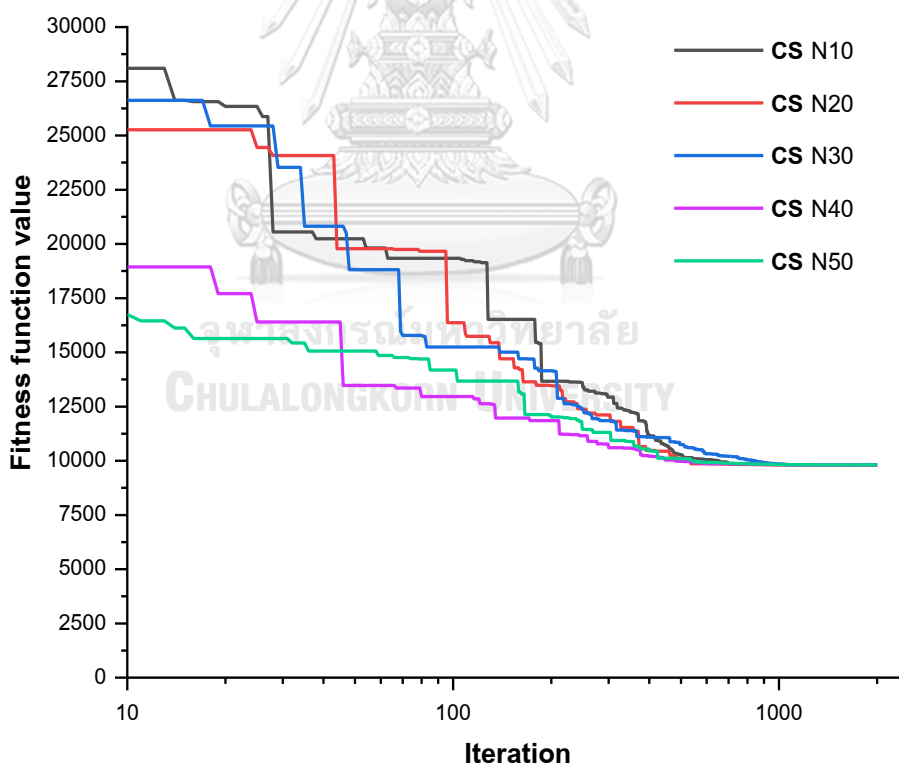


รูปที่ 4.7 แผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ p_a สำหรับวิธีหาค่าเหมาะสมแบบนกกาเหว่า

ในขั้นตอนที่สอง ผู้วิจัยต้องการศึกษาผลของการกำหนดจำนวนหิ่งห้อย โดยกำหนดให้อัตราการทิ้งหรือทำลายรังของนกกาเหว่า $p_a = 0.20$ ซึ่งได้จากขั้นแรก นำมาใช้ทดสอบหาจำนวนประชากรนกกาเหว่าเหมาะสม โดยเปรียบเทียบจำนวนหิ่งห้อยตั้งแต่ 10 20 30 40 และ 50 ตัว จากผลการทดสอบพบว่าจำนวนนกกาเหว่า $N = 30$ เป็นจำนวนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฐานรากมีราคาเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ดังแสดงผลการทดสอบและกราฟแสดงการลู่เข้าคำตอบในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ CS

จำนวนประชากร (N)	10	20	30	40	50
ราคาต่ำที่สุด (บาท)	9811.58	9811.58	9811.60	9811.63	9811.64
ราคาที่สูงที่สุด (บาท)	9848.38	9820.26	9812.23	9819.42	9817.43
ราคาเฉลี่ย (บาท)	9814.84	9812.14	9811.75	9812.45	9812.69
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.45	1.87	0.18	1.67	1.38



รูปที่ 4.8 อัตราลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ CS ที่จำนวนประชากรแตกต่างกัน

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการออกแบบฐานรากเดี่ยวด้วยกรณีศึกษา 1-4

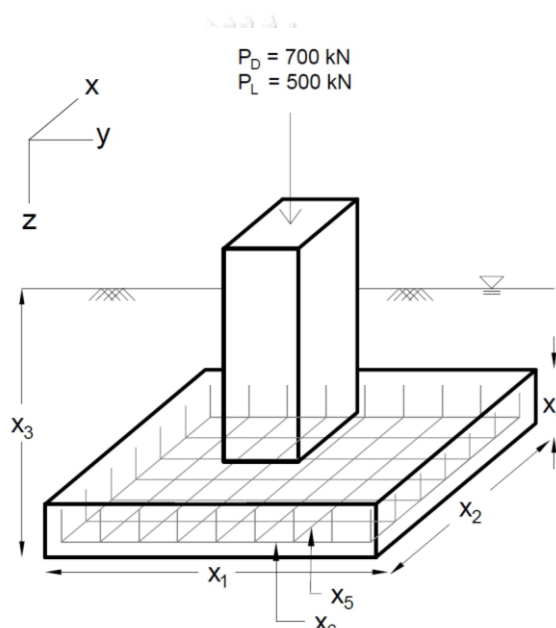
ในการทดสอบประสิทธิภาพในการหาค่าตอบของอัลกอริทึมทั้ง 6 แบบ ใช้ตัวอย่างแรงและโมเมนต์สำหรับออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ x โดยทำการทดสอบทั้งหมด 20 ครั้ง โดยสุ่มจุดเริ่มต้น (x_0 – initial point) ใหม่ทุกครั้ง กำหนดเงื่อนไขการวนซ้ำสูงสุด (Iteration) เท่ากับ 2000 รอบ และสำหรับวิธีเมตาฮิวริสติกได้ตั้งค่าโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อ 4.3 ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับกรณีศึกษาที่ 1-4 โดยวิธีเมตาฮิวริสติก

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด
วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด แบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization)	Cognitive parameter (c_1) = 2 Social parameter (c_2) = 1 จำนวนประชากรอนุภาค $N = 40$
วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm)	ความน่าดึงดูดของตัวกำเนิดแสงขั้นต่ำ (β_{min}) = 0.4 พารามิเตอร์สุ่ม (α) = 0.20 จำนวนประชากรหิ่งห้อย $N = 50$
วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search Algorithm)	อัตราการทิ้งหรือทำลายรังของนกกาเหว่า (p_a) = 0.20 จำนวนประชานกกาเหว่า $N = 30$
วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด แบบระบบอาณาจักรมด (Ant colony Optimization)	Kernel = 10 Focus = 10 จำนวนประชารมด $N = 10$

4.3.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษาที่ 1 เป็นฐานรากดินรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกน รับน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่จากเสา 700 kN และน้ำหนักบรรทุกจร 500 kN ผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึม FMIN และ CS พบราคาต่ำที่สุดเท่ากับ 3724.94 บาท แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่า CS มีราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.12 นอกจากนี้ยังพบว่า มีสมการข้อจำกัดจำนวน 5 สมการที่ควบคุมขนาดและปริมาณการเสริมเหล็กในฐานราก ได้แก่ กำลังแบกทานแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้นและระยะยาว การเงื่อนไขแบบสองทาง และกำลังรับโมเมนต์ดัดในด้าน x_1 และ x_2 ดังแสดงในตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.9 กรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 1

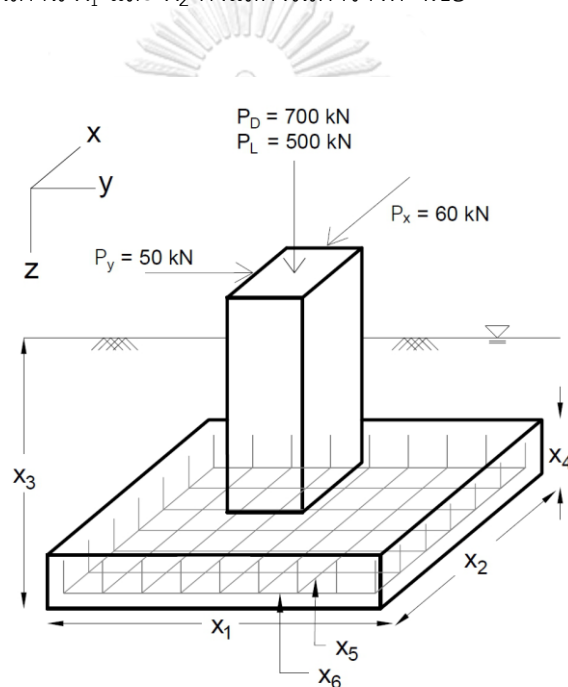
	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ราคาต่ำที่สุด (บาท)	3724.94	3833.66	3725.66	3725.87	3724.94	3730.61
ราคาที่สูงที่สุด (บาท)	85200.85	52734.90	3773.02	3768.62	3725.28	6111.91
ราคาเฉลี่ย (บาท)	11412.59	8253.17	3746.79	3737.75	3724.99	4037.05
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	23108.75	11316.04	14.08	5.75	0.07	517.18
เวลาเฉลี่ย (วินาที)	65.62	149.16	3387.95	4075.71	4861.12	83.38

ตารางที่ 4.13 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ความยาวด้าน x_1 (m)	1.48	1.55	1.49	1.49	1.48	1.51
ความยาวด้าน x_2 (m)	1.48	1.63	1.49	1.49	1.48	1.48
ความลึกของฐานรากจากผิวดิน (m)	1.48	0.78	1.42	1.42	1.48	1.37
ความหนาของฐานราก (m)	0.39	0.41	0.39	0.39	0.39	0.39
พื้นที่หน้าตัดส่วนเหล็กเสริมในด้าน x_1 (cm ²)	15.50	16.91	15.60	15.66	15.50	15.50
พื้นที่หน้าตัดส่วนเหล็กเสริมในด้าน x_2 (cm ²)	15.50	15.45	15.64	15.60	15.50	15.95
ราคาต่ำที่สุด (฿)	3724.94	3833.66	3725.66	3725.87	3724.95	3730.61
ข้อจำกัดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิค						
อัตราส่วนความปลอดภัยกำลังแบกทาน แบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้น	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
อัตราส่วนความปลอดภัยกำลังแบกทาน แบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะยาว	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
อัตราส่วนความปลอดภัยกำลังแบกทาน แบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะสั้น	3.92	3.26	3.87	3.87	3.92	3.82
อัตราส่วนความปลอดภัยกำลังแบกทาน แบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะยาว	3.92	3.26	3.87	3.87	3.92	3.82
ค่าหน่วยแรงต่ำสุดใต้ฐานราก (kN)	579.97	490.13	572.08	571.58	579.97	565.68
ข้อจำกัดด้านการรับน้ำหนักโครงสร้าง						
ค่าแรงเฉือนทางเดียววิกฤตสำหรับด้าน x_1 (kN)	264.28	281.69	266.66	267.80	264.28	264.08
กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวสำหรับด้าน x_1 (kN)	311.98	362.43	314.55	314.21	311.98	319.26
ค่าแรงเฉือนทางเดียววิกฤตสำหรับด้าน x_2 (kN)	264.28	247.47	267.48	266.68	264.28	274.00
กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวสำหรับด้าน x_2 (kN)	311.98	384.39	314.12	314.80	311.98	313.94
แรงเฉือนสองทางวิกฤต (kN)	1322.75	1320.18	1325.42	1325.58	1322.75	1327.39
กำลังรับแรงเฉือนสองทาง (kN)	1322.75	1540.75	1325.42	1325.67	1322.75	1329.37
ค่าโมเมนต์ดัดวิกฤตสำหรับด้าน x_1 (kN-m)	169.53	179.91	171.32	170.94	169.53	174.98
กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_1 (kN-m)	169.53	179.91	171.32	170.94	169.53	174.99
ค่าโมเมนต์ดัดวิกฤตสำหรับด้าน x_2 (kN-m)	169.52	198.49	170.91	171.50	169.53	169.96
กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_2 (kN-m)	169.52	198.49	170.91	171.51	169.53	170.28
ระยะฝังยึดขั้นต่ำของเหล็กเสริมด้าน x_1 (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมด้าน x_1 (m)	0.46	0.54	0.46	0.47	0.46	0.46
ระยะฝังยึดขั้นต่ำของเหล็กเสริมด้าน x_2 (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมด้านยาว x_2 (m)	0.46	0.49	0.46	0.46	0.46	0.47

4.3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 2

กรณีศึกษาที่ 2 เป็นฐานรากตื้นรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกน รับน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่จากเสา 700 kN น้ำหนักบรรทุกจร 500 kN และแรงด้านข้างซึ่งเป็นแรงลมในแนวแกน x เท่ากับ 60 kN และในแนวแกน y เท่ากับ 50 kN ผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึม FMIN PSO และ CS พบราคาที่ดีที่สุดเท่ากับ 5076.03 บาท แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่า CS มีราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.14 นอกจากนี้ยังพบว่า มีสมการข้อจำกัดจำนวน 4 สมการที่ควบคุมขนาดและปริมาณการเสริมเหล็กในฐานราก ได้แก่ กำลังแบกทานแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้น การเหือนแบบสองทาง และกำลังรับโมเมนต์ดัดในด้าน x_1 และ x_2 ดังแสดงในตารางที่ 4.15



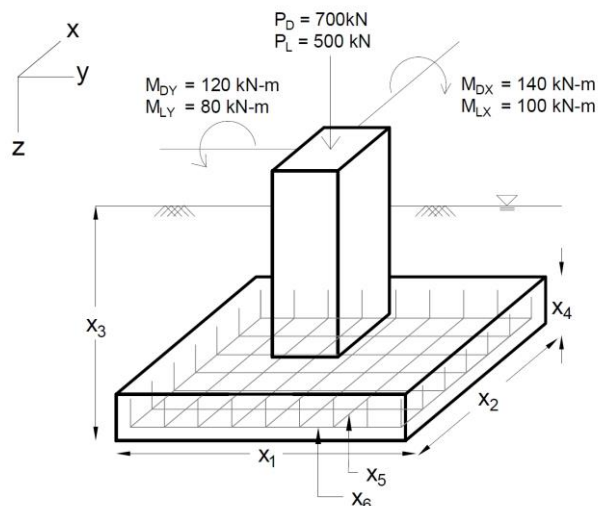
รูปที่ 4.10 กรณีศึกษาที่ 2

ตารางที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 2

	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ราคาที่ดีที่สุด (บาท)	5076.03	5256.47	5076.03	5078.08	5076.03	5106.65
ราคาที่สูงที่สุด (บาท)	30861.68	41464.04	5183.69	5805.47	5076.03	9323.10
ราคาเฉลี่ย (บาท)	6365.31	8035.56	5108.35	5351.11	5076.03	5871.24
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5619.85	7799.97	28.29	245.91	0.00	1219.80
เวลาเฉลี่ย (วินาที)	37.99	204.75	3504.81	4280.51	5089.82	87.92

4.3.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 3

กรณีศึกษาที่ 3 เป็นฐานรากตีนรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกน รับน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่จากเสา 700 kN น้ำหนักบรรทุกจร 500 kN โมเมนต์ดัดคงที่ในทิศทางแกน x เท่ากับ 140 kN-m ในทิศทางแกน y เท่ากับ 120 kN-m โมเมนต์ดัดจรในทิศทางแกน x เท่ากับ 100 kN-m และในทิศทางแกน y เท่ากับ 80 kN แรงด้านข้างซึ่งเป็นแรงลมในแนวแกน x เท่ากับ 80 kN และในแนวแกน y เท่ากับ 60 kN ผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึม FMIN และ CS พบราคาต่ำที่สุดเท่ากับ 8313.61 บาท แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่า CS มีราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.16 นอกจากนี้ยังพบว่ามีสมการข้อจำกัดจำนวน 5 สมการที่ควบคุมขนาดและปริมาณการเสริมเหล็กในฐานราก ได้แก่ กำลังแบกทานแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้น การเฉือนแบบทางเดียวในด้าน x_1 และ x_2 และกำลังรับโมเมนต์ดัดในด้าน x_1 และ x_2 ดังแสดงในตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.11 กรณีศึกษาที่ 3

ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 3

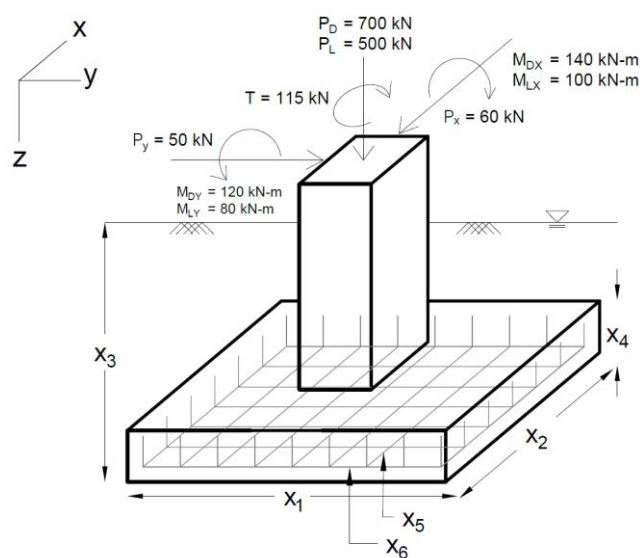
	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ราคาต่ำที่สุด (บาท)	8313.61	8750.76	8339.31	8345.87	8313.61	8363.93
ราคาสูงที่สุด (บาท)	8313.61	16677.20	8566.33	8579.01	8313.71	10328.28
ราคาเฉลี่ย (บาท)	8313.61	10997.58	8438.62	8476.78	8313.64	8972.08
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.00	2672.92	64.82	58.33	0.02	457.90
เวลาเฉลี่ย (วินาที)	16.21	176.62	3602.87	4367.68	5185.15	85.37

ตารางที่ 4.17 คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 3

วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ความยาวด้าน x_1 (m)	2.07	2.28	2.20	2.10	2.07	2.10
ความยาวด้าน x_2 (m)	2.12	2.25	2.14	2.11	2.12	2.15
ความลึกของฐานรากจากผิวดิน (m)	2.00	0.79	1.43	1.94	2.00	1.79
ความหนาของฐานราก (m)	0.47	0.49	0.48	0.47	0.47	0.47
พื้นที่หน้าตัดส่วนเหล็กเสริมในด้าน x_1 (cm ²)	31.11	30.34	30.20	30.39	31.11	31.62
พื้นที่หน้าตัดส่วนเหล็กเสริมในด้าน x_2 (cm ²)	31.62	32.38	32.84	31.76	31.62	32.11
ราคาต่ำสุด (฿)	8313.61	8750.76	8474.74	8345.87	8313.61	8363.93
ข้อกำหนดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิค						
สัดส่วนความปลอดภัยสำหรับกำลังแบกทาน	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
แบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้น						
สัดส่วนความปลอดภัยสำหรับกำลังแบกทาน	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12
แบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะยาว						
สัดส่วนความปลอดภัยสำหรับกำลังแบกทาน	4.50	3.44	4.05	4.48	4.50	4.32
แบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะสั้น						
สัดส่วนความปลอดภัยสำหรับกำลังแบกทาน	6.18	4.72	5.56	6.15	6.18	5.93
แบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะยาว						
ค่าหน่วยแรงต่ำสุดได้ฐานราก	28.21	24.47	27.55	28.40	28.21	28.13
สัดส่วนความปลอดภัยสำหรับการพลิกคว่ำ	5.97	6.13	6.17	6.04		6.00
เนื่องจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน x					5.97	
สัดส่วนความปลอดภัยสำหรับการพลิกคว่ำ	7.35	7.25	7.19	7.28		7.37
เนื่องจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน y					7.35	
สัดส่วนความปลอดภัยสำหรับการพลิกคว่ำ	6.54	6.59	6.59	6.55		6.56
เนื่องจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน x และ y					6.54	
ข้อกำหนดด้านการรับน้ำหนักโครงสร้าง						
ค่าแรงเฉือนทางเดียววิกฤตสำหรับด้าน x_1 (kN)	545.56	530.90	532.15	536.11	545.56	549.36
กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวสำหรับด้าน x_1 (kN)	545.56	625.84	589.69	559.37	545.56	551.81
ค่าแรงเฉือนทางเดียววิกฤตสำหรับด้าน x_2 (kN)	559.71	563.59	572.85	561.37	559.71	564.99
กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวสำหรับด้าน x_2 (kN)	559.71	617.04	573.06	561.43	559.71	565.01
แรงเฉือนสองทางวิกฤต (kN)	1597.01	1526.81	1569.04	1591.98	1597.00	1590.35
กำลังรับแรงเฉือนสองทาง (kN)	1834.48	1949.07	1878.19	1863.98	1834.49	1825.76
ค่าโมเมนต์ดัดวิกฤตสำหรับด้าน x_1 (kN-m)	430.50	460.17	454.07	437.04	430.50	435.07
กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_1 (kN-m)	430.50	460.17	454.07	437.06	430.50	435.77
ค่าโมเมนต์ดัดวิกฤตสำหรับด้าน x_2 (kN-m)	423.52	432.18	418.98	418.82	423.52	427.02
กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_2 (kN-m)	423.52	432.18	418.98	418.82	423.52	428.98
ระยะฝังยึดขั้นต่ำของเหล็กเสริมด้าน x_1 (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมด้าน x_1 (m)	0.78	0.84	0.79	0.77	0.78	0.80
ระยะฝังยึดขั้นต่ำของเหล็กเสริมด้าน x_2 (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมด้านยาว x_2 (m)	0.75	0.86	0.82	0.77	0.75	0.77

4.3.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 4

กรณีศึกษาที่ 4 เป็นฐานรากตีนรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกน รับน้ำหนักบรรทุกทุกคองที่จากเสา 700 kN น้ำหนักบรรทุกจร 500 kN โมเมนต์ดัดคองที่ในทิศทางแกน x เท่ากับ 140 kN-m ในทิศทางแกน y เท่ากับ 120 kN-m โมเมนต์ดัดคองในทิศทางแกน x เท่ากับ 100 kN-m และในทิศทางแกน y เท่ากับ 80 kN แรงดันข้างและโมเมนต์บิดซึ่งเป็นแรงลมในแนวแกน x เท่ากับ 80 kN และในแนวแกน y เท่ากับ 60 kN และรอบแกน z เท่ากับ 115 kN-m ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึม FMIN PSO และ CS พบราคาที่ดีที่สุดเท่ากับ 9811.58 บาท แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่า CS มีราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.18 นอกจากนี้ยังพบว่ามีสมการข้อจำกัดจำนวน 5 สมการที่ควบคุมขนาดและปริมาณการเสริมเหล็กในฐานราก ได้แก่ กำลังแบกทานแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้น การเคียนแบบทางเดียวในด้าน x_1 และ x_2 และกำลังรับโมเมนต์ดัดในด้าน x_1 และ x_2 ดังแสดงในตารางที่ 4.19



รูปที่ 4.12 กรณีศึกษาที่ 4

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 4

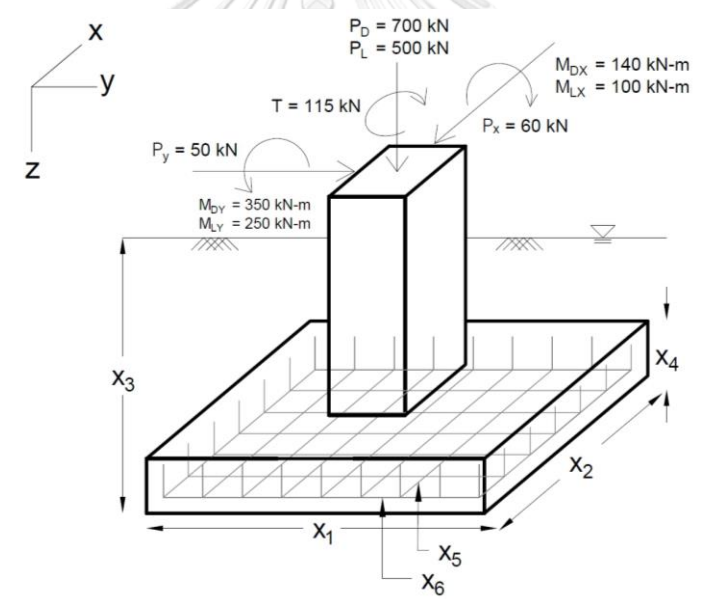
	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ราคาที่ดีที่สุด (บาท)	9811.58	10268.65	9811.58	9817.59	9811.58	9816.90
ราคาที่สูงที่สุด (บาท)	9833.15	18305.84	10510.35	10974.56	9812.23	11171.90
ราคาเฉลี่ย (บาท)	9812.66	11679.64	9962.10	9936.68	9811.75	10248.89
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.70	1867.90	181.88	297.61	0.18	415.52
เวลาเฉลี่ย (วินาที)	42.99	221.17	3299.52	4002.35	4717.55	85.73

ตารางที่ 4.19 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 4

วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ความยาวด้าน x_1 (m)	2.41	2.45	2.41	2.41	2.41	2.42
ความยาวด้าน x_2 (m)	2.47	2.42	2.47	2.47	2.47	2.46
ความลึกของฐานรากจากผิวดิน (m)	0.75	0.81	0.75	0.76	0.75	0.75
ความหนาของฐานราก (m)	0.45	0.51	0.45	0.45	0.45	0.45
พื้นที่หน้าตัดส่วนเหล็กเสริมในด้าน x_1 (cm ²)	37.64	31.51	37.64	37.63	37.64	37.23
พื้นที่หน้าตัดส่วนเหล็กเสริมในด้าน x_2 (cm ²)	38.05	33.39	38.05	38.05	38.05	38.06
ราคาที่ดีที่สุด (฿)	9811.58	10268.65	9811.58	9817.59	9811.58	9816.90
ข้อจำกัดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิค						
กำลังแบกทานแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้น	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
กำลังแบกทานแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะยาว	4.16	4.17	4.16	4.16	4.16	4.16
กำลังแบกทานแบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะสั้น	3.35	3.43	3.35	3.36	3.35	3.36
กำลังแบกทานแบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะยาว	4.64	4.77	4.64	4.66	4.64	4.66
ค่าหน่วยแรงต่ำสุดใต้ฐานราก	2.25	0.48	2.25	1.94	2.25	2.13
การเลื่อนไถลของฐานรากพิจารณาแบบระยะสั้น	7.43	7.36	7.43	7.43	7.43	7.42
การเลื่อนไถลของฐานรากพิจารณาแบบระยะยาว	7.55	7.59	7.55	7.56	7.55	7.55
การพลิกคว่ำจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน x	5.63	5.70	5.63	5.63	5.63	5.66
การพลิกคว่ำจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน y	6.56	6.36	6.56	6.55	6.56	6.52
การพลิกคว่ำจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน x และ y	6.04	5.99	6.04	6.03	6.04	6.04
การหมุนของฐานรากจากโมเมนต์บิดพิจารณาแบบระยะสั้น	20.03	20.70	20.03	20.02	20.03	20.03
การหมุนของฐานรากจากโมเมนต์บิดพิจารณาแบบระยะยาว	5.66	5.72	5.66	5.67	5.66	5.66
ข้อจำกัดด้านการรับน้ำหนักโครงสร้าง						
ค่าแรงเฉือนทางเดียววิกฤตสำหรับด้าน x_1 (kN)	603.08	546.90	602.99	603.15	603.08	599.77
กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวสำหรับด้าน x_1 (kN)	603.08	708.82	603.23	603.41	603.08	608.55
ค่าแรงเฉือนทางเดียววิกฤตสำหรับด้าน x_2 (kN)	620.17	576.97	620.16	620.32	620.17	620.02
กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวสำหรับด้าน x_2 (kN)	620.17	700.83	620.18	620.34	620.17	620.02
แรงเฉือนสองทางวิกฤต (kN)	1584.26	1563.55	1584.24	1585.38	1584.26	1583.45
กำลังรับแรงเฉือนสองทาง (kN)	1702.57	2116.35	1702.94	1704.12	1702.58	1715.18
ค่าโมเมนต์ดัดวิกฤตสำหรับด้าน x_1 (kN-m)	491.36	502.52	491.42	491.62	491.36	493.67
กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_1 (kN-m)	491.36	502.52	491.42	491.65	491.36	493.90
ค่าโมเมนต์ดัดวิกฤตสำหรับด้าน x_2 (kN-m)	485.79	475.03	485.71	485.90	485.79	482.92
กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_2 (kN-m)	485.79	475.03	485.71	485.91	485.79	483.28
ค่าโมเมนต์บิดวิกฤต (kN-m)	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00
กำลังรับโมเมนต์บิด (kN-m)	1194.87	1183.72	1194.82	1194.12	1194.87	1192.85
ระยะฝังยึดขั้นต่ำของเหล็กเสริมด้าน x_1 (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมด้าน x_1 (m)	0.96	0.93	0.96	0.96	0.96	0.95
ระยะฝังยึดขั้นต่ำของเหล็กเสริมด้าน x_2 (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมด้านยาว x_2 (m)	0.92	0.94	0.92	0.92	0.92	0.93

4.3.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษาที่ 5

กรณีศึกษาที่ 5 เป็นฐานรากดินรับน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกน รับน้ำหนักบรรทุกคงที่จากเสา 700 kN น้ำหนักบรรทุกจร 500 kN โมเมนต์ดัดคงที่ในทิศทางแกน x เท่ากับ 140 kN-m ในทิศทางแกน y เท่ากับ 350 kN-m โมเมนต์ดัดจรในทิศทางแกน x เท่ากับ 100 kN-m และในทิศทางแกน y เท่ากับ 250 kN แรงด้านข้างและโมเมนต์บิดซึ่งเป็นแรงลมในแนวแกน x เท่ากับ 60 kN และในแนวแกน y เท่ากับ 50 kN และรอบแกน z เท่ากับ 115 kN-m ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึม FMIN และ CS พบราคาต่ำที่สุดเท่ากับ 25043.71 บาท แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่า CS มีราคาเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.20 นอกจากนี้ยังพบว่ามีสมการข้อจำกัดจำนวน 5 สมการที่ควบคุมขนาดและปริมาณการเสริมเหล็กในฐานราก ได้แก่ ค่าหน่วยแรงต่ำสุดได้ฐานราก การเงื่อนไขแบบทางเดียวในด้าน x_1 และ x_2 และกำลังรับโมเมนต์ดัดในด้าน x_1 และ x_2 ดังแสดงในตารางที่ 4.21



รูปที่ 4.13 กรณีศึกษาที่ 5

ตารางที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากกรณีศึกษาที่ 5

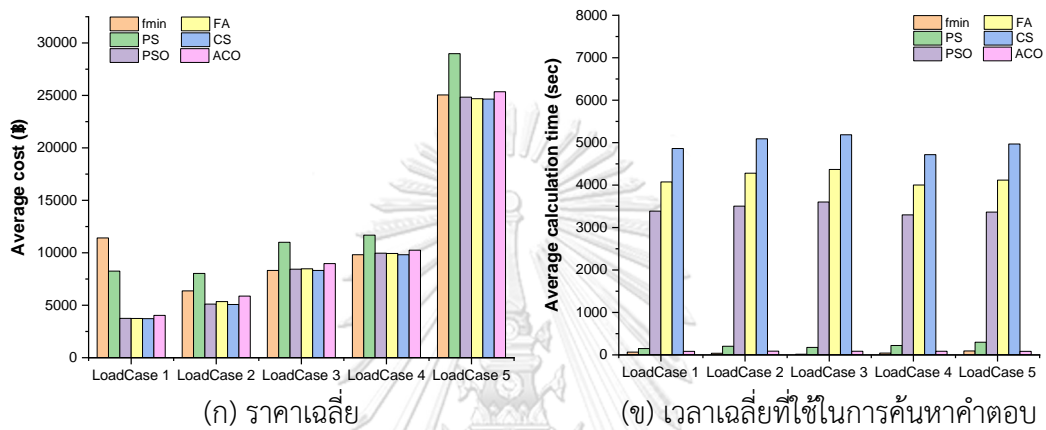
	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ราคาต่ำที่สุด (บาท)	24646.96	25440.46	24750.72	24657.09	24647.83	24727.73
ราคาที่สูงที่สุด (บาท)	25440.46	32523.00	24918.92	24716.99	24647.83	26372.12
ราคาเฉลี่ย (บาท)	25043.71	28981.73	24834.98	24682.94	24647.83	25349.56
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	396.75	3541.27	68.67	25.13	0.00	728.68
เวลาเฉลี่ย (วินาที)	93.06	297.54	3365.26	4116.74	4969.27	84.76

ตารางที่ 4.21 ค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 5

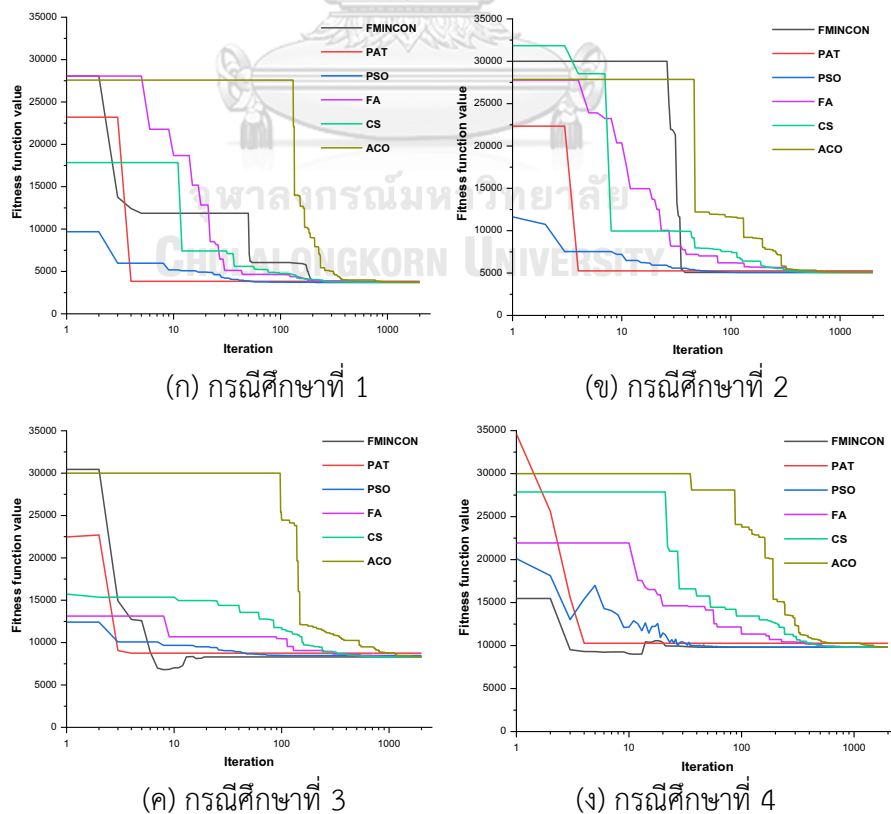
วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด	FMIN	PS	PSO	FA	CS	ACO
ความยาวด้าน x_1 (m)	3.29	2.91	3.16	3.31	3.29	3.15
ความยาวด้าน x_2 (m)	4.12	4.49	4.13	4.06	4.12	4.24
ความลึกของฐานรากจากผิวดิน (m)	0.89	0.85	1.25	1.04	0.92	0.87
ความหนาของฐานราก (m)	0.51	0.55	0.54	0.51	0.51	0.53
พื้นที่หน้าตัดส่วนเหล็กเสริมในด้าน x_1 (cm ²)	79.89	77.67	77.90	79.47	79.79	78.87
พื้นที่หน้าตัดส่วนเหล็กเสริมในด้าน x_2 (cm ²)	50.20	49.68	47.07	51.14	50.23	46.02
ราคาที่ดีที่สุด (฿)	2464696	2544046	2475072	2465709	2464783	2472773
ข้อจำกัดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิค						
กำลังแบกทานแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะสั้น	5.88	5.60	5.62	5.82	5.87	5.78
กำลังแบกทานแบบหน่วยแรงพิจารณาแบบระยะยาว	8.14	7.77	7.78	8.06	8.12	8.00
กำลังแบกทานแบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะสั้น	7.54	6.77	7.77	7.77	7.57	7.25
กำลังแบกทานแบบแรงสุทธิพิจารณาแบบระยะยาว	10.43	9.39	10.76	10.76	10.48	10.04
ค่าหน่วยแรงต่ำสุดใต้ฐานราก	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
การเลื่อนไถลของฐานรากพิจารณาแบบระยะสั้น	16.83	16.25	16.21	16.68	16.79	16.61
การเลื่อนไถลของฐานรากพิจารณาแบบระยะยาว	8.96	8.84	9.39	9.16	8.99	8.91
การพลิกคว่ำจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน x	8.49	7.48	8.13	8.54	8.49	8.13
การพลิกคว่ำจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน y	4.64	5.01	4.75	4.62	4.64	4.76
การพลิกคว่ำจากโมเมนต์กระทำในแนวแกน x และ y	5.25	5.40	5.32	5.26	5.26	5.29
การหมุนของฐานรากจากโมเมนต์บิดพิจารณาแบบระยะสั้น	63.81	63.30	61.60	63.07	63.66	63.50
การหมุนของฐานรากจากโมเมนต์บิดพิจารณาแบบระยะยาว	11.47	11.34	11.97	11.71	11.51	11.38
ข้อจำกัดด้านการรับน้ำหนักโครงสร้าง						
ค่าแรงเฉือนทางเดียววิกฤตสำหรับด้าน x_1 (kN)	952.84	929.53	972.35	965.07	954.68	943.08
กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวสำหรับด้าน x_1 (kN)	952.84	929.61	972.35	965.09	954.69	947.43
ค่าแรงเฉือนทางเดียววิกฤตสำหรับด้าน x_2 (kN)	733.98	655.02	733.12	747.35	735.54	707.13
กำลังรับแรงเฉือนทางเดียวสำหรับด้าน x_2 (kN)	1194.55	1434.31	1269.58	1185.46	1195.07	1275.19
แรงเฉือนสองทางวิกฤต (kN)	1864.68	1829.82	1949.01	1904.95	1871.14	1850.19
กำลังรับแรงเฉือนสองทาง (kN)	2114.16	2453.92	2315.13	2136.41	2121.07	2235.21
ค่าโมเมนต์ดัดวิกฤตสำหรับด้าน x_1 (kN-m)	757.40	656.57	755.90	776.37	759.52	720.29
กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_1 (kN-m)	757.40	829.93	755.90	776.40	759.56	722.71
ค่าโมเมนต์ดัดวิกฤตสำหรับด้าน x_2 (kN-m)	1176.16	1260.76	1219.93	1179.05	1177.38	1202.86
กำลังรับโมเมนต์ดัดสำหรับด้าน x_2 (kN-m)	1176.16	1260.76	1219.93	1179.05	1177.40	1204.79
ค่าโมเมนต์บิดวิกฤต (kN-m)	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00
กำลังรับโมเมนต์บิด (kN-m)	4087.80	3804.41	3852.31	4039.50	4076.37	3987.28
ระยะฝังยึดขั้นต่ำของเหล็กเสริมด้าน x_1 (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมด้าน x_1 (m)	1.78	1.97	1.78	1.75	1.78	1.84
ระยะฝังยึดขั้นต่ำของเหล็กเสริมด้าน x_2 (m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
ระยะฝังยึดของเหล็กเสริมด้านยาว x_2 (m)	1.36	1.18	1.30	1.37	1.36	1.30

4.4 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการออกแบบฐานรากเดี่ยว

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยวด้วยกรณีศึกษาที่ 1-5 พบว่าทุกอัลกอริทึมสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ใกล้เคียงกัน เห็นได้จากกราฟอัตราการรู้เข้าหาคำตอบแต่จากการทดสอบซ้ำทั้งหมด 20 ครั้ง พบว่าคำตอบที่ได้จากวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหวามีความแปรปรวนน้อยที่สุด แต่จะใช้เวลาในการประมวลผลนานที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบราคาและเวลาเฉลี่ยสำหรับกรณีศึกษาที่ 1-5



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบอัตราการรู้เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึม

บทที่ 5

ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด สำหรับปัญหาการออกแบบคานบนฐานรากยึดหยุน

5.1 กรณีศึกษารูปแบบบรรทุกวิกฤตสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกตของชั้นดินแบบคงที่และไม่คงที่

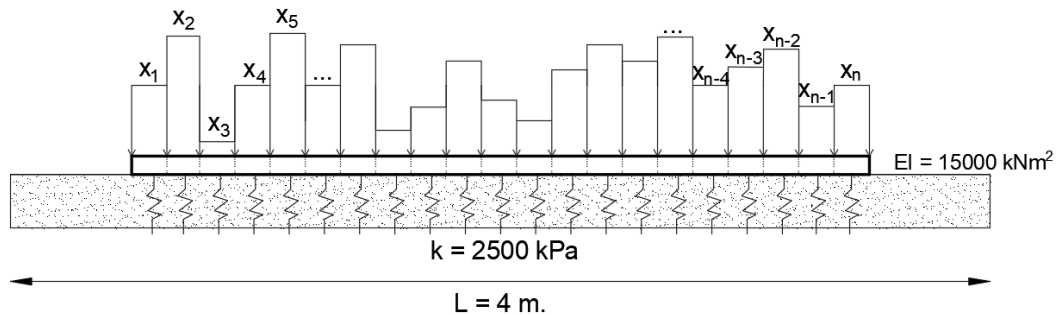
ในการศึกษาประสิทธิภาพในการหาค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับปัญหารูปแบบของน้ำหนักบรรทุกจรที่ทำให้เกิดแรงภายในสูงสุดสำหรับใช้ในการออกแบบคานบนฐานรากยึดหยุน โดยใช้ตัวอย่างกรณีศึกษาจาก Ukritchon , B. [4] ซึ่งได้กำหนดให้คานมีความยาว 4 เมตร แบ่งเป็นชั้นย่อยทั้งหมด 100 ชั้นส่วน กำหนดหน่วยแรงสูงสุดที่กระทำในแต่ละชั้นส่วน (q_i) มีค่าไม่เกิน 10 kN/m ค่าความแข็งแรงต้านโมเมนต์ดัด (EI) เท่ากับ 15000 kNm² แบ่งเป็น 2 กรณี ประกอบด้วย

1) กรณีค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกตของชั้นดินมีค่าคงที่เท่ากับ 2500 kPa ตลอดความยาวคาน ($kCons$) กำหนดตัวแปรออกแบบจำนวน 100 ตัวแปร ได้แก่ q_i อยู่ในขอบเขต 0–10 kN/m ดังแสดงในรูปที่ 5.1

2) กรณีค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกตของชั้นดินมีค่าไม่คงที่ ($kRange$) ซึ่งมีตัวแปรออกแบบจำนวน 200 ตัวแปร แบ่งเป็น q_i อยู่ในขอบเขต 0 – 10 kN/m จำนวน 100 ตัวแปร และค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานของชั้นดินตัวแปร k_i อยู่ในขอบเขต 2000 – 3000 kPa จำนวน 100 ตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 5.6

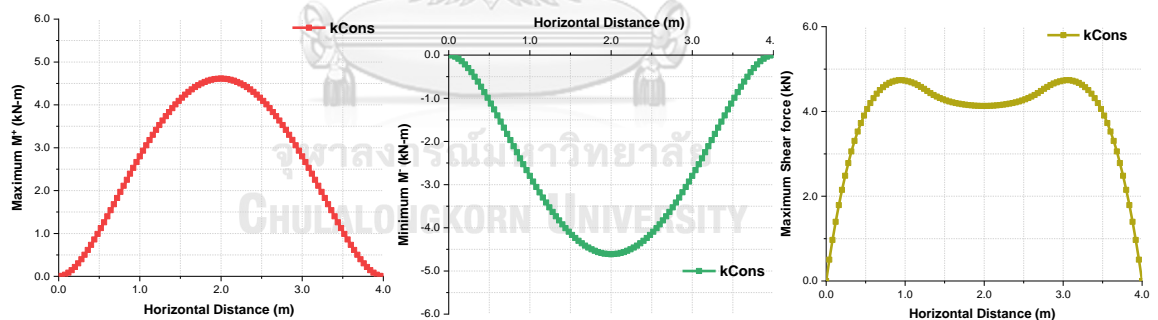
นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการหาค่าตอบที่เหมาะสมสำหรับปัญหาประเภทไม่มีข้อจำกัด (Unconstrained optimization problem) โดยใช้อัลกอริทึมทั้ง 6 แบบ ได้แก่ fmin PS PSO FA CS และ ACO เช่นเดียวกับในบทที่ 4 โดยทำการทดสอบทั้งหมด 20 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยกำหนดเงื่อนไขการวนซ้ำสูงสุด (Iteration) เท่ากับ 10000 รอบ และสำหรับวิธีเมตาฮีวิริสติกได้ตั้งค่าโดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อ 4.2

5.2 ผลการศึกษากรณีรูปแบบการจัตวางน้ำหนักรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าคงที่



รูปที่ 5.1 คานบนฐานรากยึดหยุ่นที่มีสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของดินคงที่ตลอดความยาวคาน

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาตำแหน่งและรูปแบบของแรงกระทำภายนอกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์บวกสูงสุด โมเมนต์ลบสูงสุด และแรงเฉือนสูงสุด เมื่อกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าคงที่เท่ากับ 2500 kPa ตลอดความยาวคาน ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดพบว่าอัลกอริทึม fmin PS PSO FA CS และ ACO สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เป็นคำตอบเดียวกัน โดยพบว่าค่าโมเมนต์บวกและโมเมนต์ลบสูงสุดเกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน ($x = 2$ m) มีค่าเท่ากับ 4.61 kN-m และ -4.61 kN-m ตามลำดับ และพบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $x = 0.96$ m และ $x = 3.04$ m มีค่าเท่ากับ 4.73 kN ดังรูปที่ 5.2



(ก) ค่าโมเมนต์บวกสูงสุดบนคาน (ข) ค่าโมเมนต์ลบสูงสุดบนคาน (ค) ค่าแรงเฉือนสูงสุดบนคาน

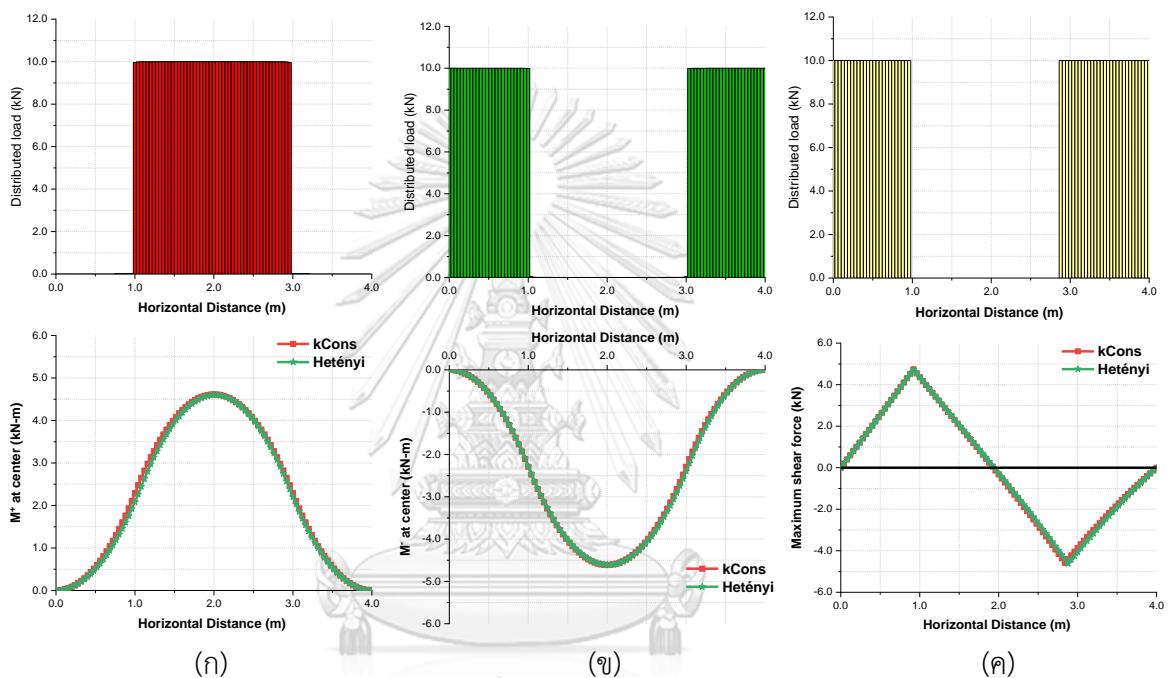
รูปที่ 5.2 ค่าแรงภายในสูงสุดซึ่งพิจารณาที่ตำแหน่งทุกจุดบนคานสำหรับกรณีศึกษาที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าแรงภายในและรูปแบบน้ำหนักรรทุกวิกฤตสำหรับกรณีศึกษา 5.1

แรงภายใน	ค่าแรงภายในสูงสุด	ตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุด	ตำแหน่งรูปแบบน้ำหนักรรทุก
โมเมนต์บวกสูงสุด	4.61 kN-m	กึ่งกลางคาน	$x/l = 0.26 - 0.75$
โมเมนต์ลบสูงสุด	-4.61 kN-m	กึ่งกลางคาน	$x/l = 0 - 0.25$ and $0.76 - 1.00$
แรงเฉือนสูงสุด	-4.73 kN	$x/l = 0.24$ and 0.76	$x/l = 0 - 0.24$ and $0.72 - 1.00$

5.2.1 ผลการทดสอบรูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าคงที่

จากการทดสอบพบว่ารูปแบบของน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์บวกสูงสุด โมเมนต์ลบสูงสุด และค่าแรงเฉือนสูงสุด ดังสรุปไว้ในตารางที่ 5.1 โดยในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบรูปแบบของน้ำหนักบรรทุกวิกฤตนี้กับวิธีวิเคราะห์แรงภายในของคานบนฐานรากยึดหยุ่นของ Hetényi ดังแสดงในรูปที่ 5.3

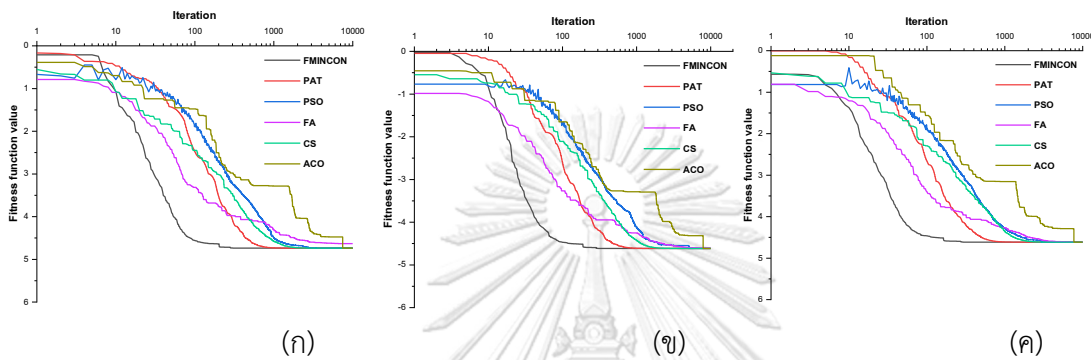


รูปที่ 5.3 รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในสูงสุดสำหรับกรณีศึกษา 5.1

- (ก) รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์บวกสูงสุด
- (ข) รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ลบสูงสุด
- (ค) รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงเฉือนสูงสุด

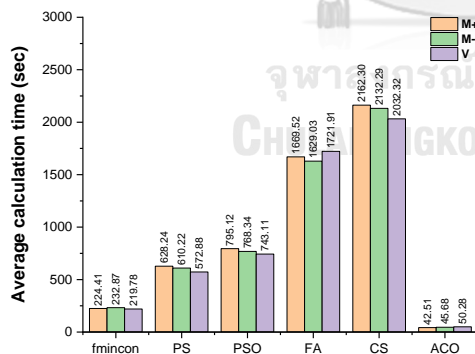
5.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการหาคำตอบของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษา 5.1

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหารูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อสัมพันธ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าคงที่ พบว่าทุกอัลกอริทึมสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เท่ากันจากการประมวลผล 20 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 นอกจากนี้ยังพบว่าอัลกอริทึม ACO ใช้จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบมากที่สุดแต่ใช้เวลาเฉลี่ยในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.5

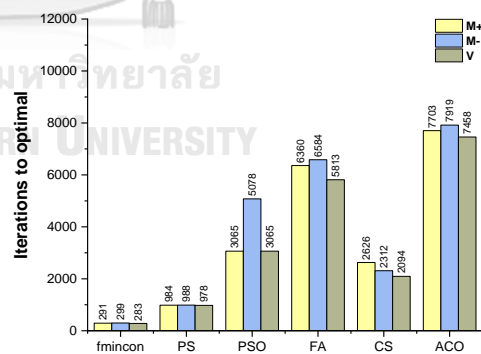


รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบอัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึม สำหรับกรณีศึกษา 5.1

- (ก) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบสำหรับค่าโมเมนต์บวกสูงสุด
- (ข) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบสำหรับค่าโมเมนต์ลบสูงสุด
- (ค) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบสำหรับค่าแรงเฉือนสูงสุด



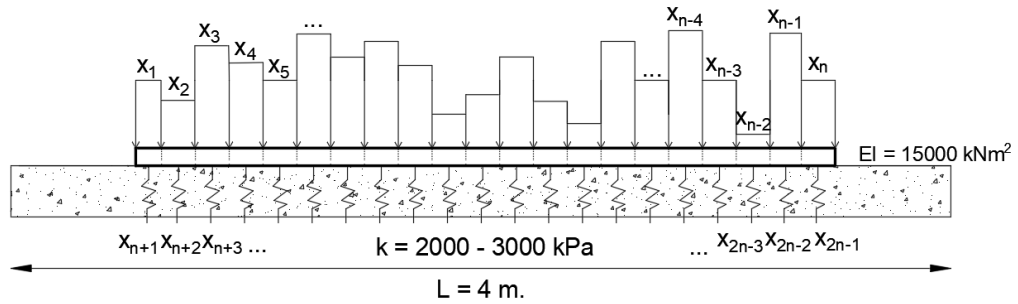
(ก) เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ



(ข) จำนวนรอบเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

รูปที่ 5.5 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบเวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบสำหรับกรณีศึกษา 5.1

5.3 ผลการศึกษากรณีรูปแบบการจذبวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อ
สัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าไม่คงที่

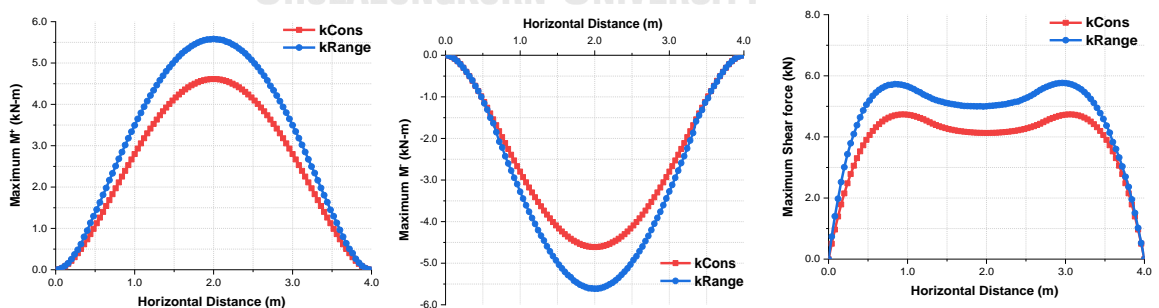


รูปที่ 5.6 คานบนฐานรากยึดหยุ่นที่มีสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของดินคงที่ตลอดความยาวคาน

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่าแรงแรงกระทำภายนอกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์บวกสูงสุด โมเมนต์ลบสูงสุด และแรงเฉือนสูงสุด เมื่อกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าอยู่ในช่วง 2000 – 3000 kPa จากผลการทดสอบพบว่า ค่าโมเมนต์บวกสูงสุด โมเมนต์ลบสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน ($x = 2 \text{ m}$) มีค่าเท่ากับ 5.59 kN-m และ -5.62 kN-m ตามลำดับ และพบว่าค่าแรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $x = 0.96 \text{ m}$. มีค่าเท่ากับ 5.76 kN ซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานของชั้นดินคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 5.7

ตารางที่ 5.2 ค่าแรงภายในและรูปแบบน้ำหนักบรรทุกวิกฤตสำหรับกรณีศึกษา 5.2

แรงแรงภายใน	ค่าแรงแรงภายในสูงสุด	ตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุด	ตำแหน่งรูปแบบน้ำหนักบรรทุก
โมเมนต์บวกสูงสุด	5.59 kN-m	กึ่งกลางคาน	$x/l = 0.24 - 0.77$
โมเมนต์ลบสูงสุด	-5.62 kN-m	กึ่งกลางคาน	$x/l = 0 - 0.27 \text{ and } 0.72 - 1.00$
แรงเฉือนสูงสุด	5.76 kN	$x/l = 0.24$	$x/l = 0 - 0.30 \text{ and } 0.74 - 1.00$

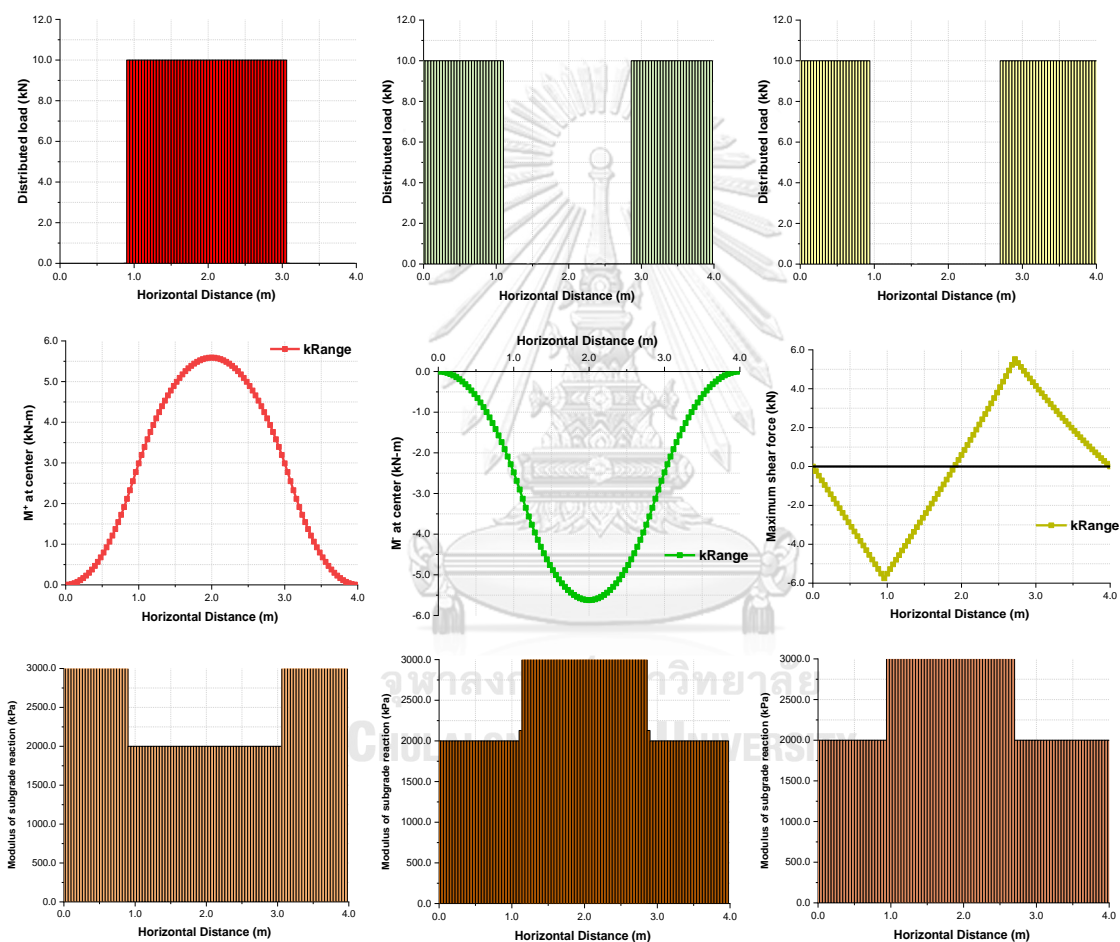


รูปที่ 5.7 แรงแรงภายในสูงสุดซึ่งพิจารณาที่ตำแหน่งขี้น้อยยทุกจุดบนคาน

- (ก) เปรียบเทียบค่าโมเมนต์บวกสูงสุดบนคานกรณีที่ 5.1 และ 5.2
- (ข) เปรียบเทียบค่าโมเมนต์บวกสูงสุดบนคานกรณีที่ 5.1 และ 5.2
- (ค) เปรียบเทียบค่าแรงเฉือนสูงสุดบนคานกรณีที่ 5.1 และ 5.2

5.3.1 ผลการทดสอบรูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกทุกและสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของดินที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าไม่คงที่

จากการทดสอบรูปแบบของน้ำหนักบรรทุกทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์บวกสูงสุด โมเมนต์ลบสูงสุด และค่าแรงเฉือนสูงสุด พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีผลต่อแรงภายในคานบริเวณที่มีน้ำหนักบรรทุกมากระทำหากค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าน้อยจะทำให้คานสามารถโก่งตัวได้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.8 ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงกว่ากรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าคงที่ตลอดความยาวคาน

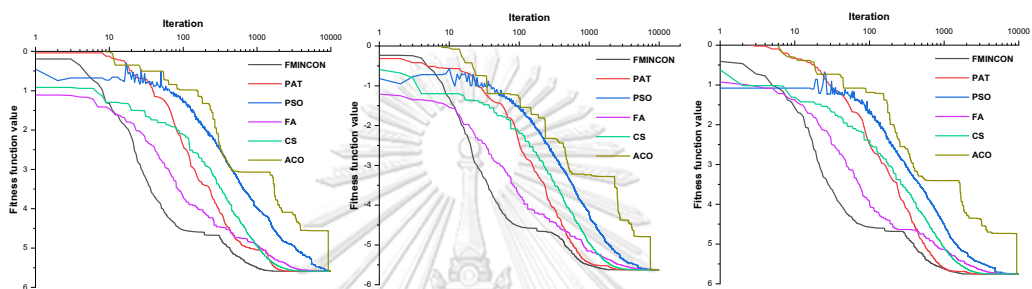


รูปที่ 5.8 ผลการศึกษาสำหรับกรณีศึกษา 5.2

- (ก) รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์บวกสูงสุด
- (ข) รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ลบสูงสุด
- (ค) รูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกทุกและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินที่ทำให้เกิดค่าแรงเฉือนสูงสุด

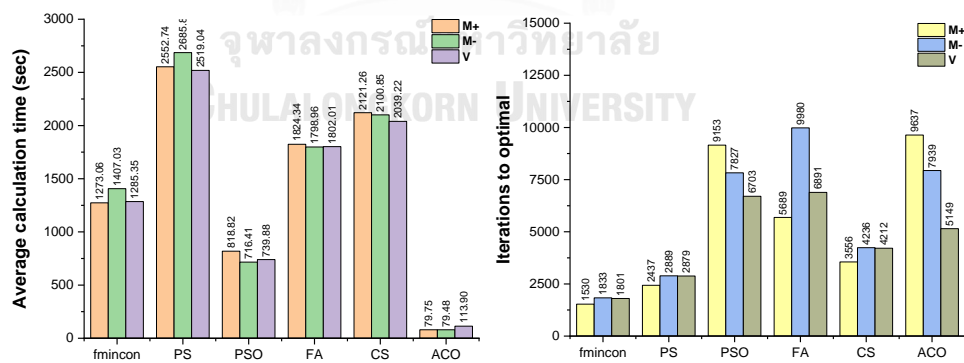
5.3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการหาคำตอบของอัลกอริทึมด้วยกรณีศึกษา 5.2

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหารูปแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตเมื่อสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าไม่คงที่ พบว่าทุกอัลกอริทึมสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เท่ากันจากการประมวลผล 20 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และเนื่องจากกรณีศึกษาที่ 5.2 นี้มีจำนวนตัวแปรออกแบบมากกว่ากรณีศึกษาที่ 5.1 อยู่ 2 เท่า ส่งผลให้ทุกอัลกอริทึมใช้เวลาและจำนวนรอบเฉลี่ยมากกว่า โดยพบว่าอัลกอริทึมที่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดและมากที่สุด ได้แก่ ACO และ PS ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบอัตราการลู่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึม สำหรับกรณีศึกษา 5.2

- (ก) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบสำหรับค่าโมเมนต์บวกสูงสุด
- (ข) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบสำหรับค่าโมเมนต์ลบสูงสุด
- (ค) อัตราการลู่เข้าหาคำตอบสำหรับค่าแรงเฉือนสูงสุด



- (ก) เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ
- (ข) จำนวนรอบเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

รูปที่ 5.10 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบเวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบสำหรับกรณีศึกษา 5.2

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดกับปัญหาการออกแบบฐานรากดินแบ่งเป็น ปัญหาการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับฐานรากเดี่ยวซึ่งเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีข้อจำกัด และปัญหารูปแบบการวางตัวของน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับคานบนฐานรากยึดหยุนที่มีสัมประสิทธิ์ต้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่ซึ่งเป็นปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่มีข้อจำกัด โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการหาค่าตอบของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดจำนวน 6 วิธี ประกอบด้วย อัลกอริทึมสำเร็จรูปในโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB's Built-in function) จำนวน 2 อัลกอริทึม ได้แก่ fmincon, Pattern search และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮีริสติก (Metaheuristic Algorithm) จำนวน 4 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหิ่งห้อย (Firefly Algorithm) วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า (Cuckoo search) และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด (Ant Colony Optimization)

ในส่วนของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการออกแบบฐานรากเดี่ยวรับแรงแนวตั้ง แรงแนวราบ โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดของฐานรากและปริมาณการเสริมเหล็กให้มีราคาวัสดุที่ต่ำที่สุด ออกแบบตามข้อกำหนดด้านเสถียรภาพทางธรณีเทคนิคโดยพิจารณาทั้งแบบระยะสั้นและระยะยาวและข้อจำกัดด้านการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมทั้งสิ้น 24 สมการข้อจำกัด ได้แก่ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของดิน การพลิกคว่ำของฐานราก การเลื่อนไถลของฐานราก ด้านกำลังรับแรงบิดของดิน การวิบัติจากแรงเฉือนทางเดียว การวิบัติจากแรงเฉือนสองทาง การเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัด การตรวจสอบระยะฝังยึด และกำลังรับโมเมนต์บิดของคอนกรีต ซึ่งได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่าตอบที่ดีที่สุด 6 อัลกอริทึม โดยตัวอย่างการออกแบบจำนวน 4 กรณี ได้แก่ 1) กรณีฐานรากรับแรงในแนวตั้ง 2) กรณีฐานรากรับแรงแนวตั้งและแรงด้านข้างสองทิศทาง 3) กรณีฐานรากรับแรงแนวตั้งและโมเมนต์ดัดสองทิศทาง 4) กรณีฐานรากรับแรงแนวตั้ง แรงในแนวราบ โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด ผลการทดสอบพบว่าข้อจำกัดที่ควบคุมขนาดและปริมาณการเสริมเหล็กในฐานรากได้แก่ ข้อจำกัดด้านกำลังแบกทานของดินซึ่งเป็นกำหนดความกว้างและความยาวของฐานราก ข้อจำกัดด้านกำลังรับแรงเฉือนแบบทางเดียวซึ่งเป็นตัวกำหนดความหนาของฐานราก และข้อจำกัดด้านกำลังรับโมเมนต์ดัดซึ่งเป็นตัวกำหนดปริมาณเหล็กเสริมในฐานราก ตามลำดับ

สำหรับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการปรับแบบการจัดวางน้ำหนักบรรทุกคงที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤตสำหรับปัญหาการขนถ่ายน้ำหนักบรรทุกที่มีสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินไม่คงที่ การหารูปแบบน้ำหนักกระทำเหนือฐานที่ทำให้เกิดค่าแรงภายในวิกฤต ได้แบ่งคานออกเป็นชั้นย่อย ๆ ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกแก่กระทำเหนือฐานรากและค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินเป็นตัวแปรออกแบบ แต่ละชั้นส่วนย่อยจะเชื่อมกันด้วยสมการความสอดคล้องของแรงภายในคาน (compatibility equation) จากผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินมีผลต่อแรงภายในของคาน ในบริเวณที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำหากค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าน้อยจะทำให้คานสามารถโก่งตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้โมเมนต์ดัดและแรงเฉือนมีค่าสูงกว่ากรณีที่มีค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานแรงกดของชั้นดินมีค่าคงที่ตลอดความยาวคาน

นอกจากนี้ในงานวิจัยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาคำตอบจากทั้ง 2 ปัญหาที่ได้กล่าวไปเบื้องต้น พบว่าวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ fmincon, Pattern search และวิธีเมตาฮิวริสติกแบบต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาเบื้องต้นนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการออกแบบฐานรากต้นได้เป็นอย่างดีแต่จะพบว่าแต่วิธีนั้นจะมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน fmincon เป็นอัลกอริทึมที่สามารถหาค่าที่ต่ำที่สุดในทุกปัญหาแต่จากการทดสอบซ้ำ 20 ครั้งพบว่ากำหนดจุดค้นหาเริ่มต้น (x_0) มีผลต่อการหาคำตอบเป็นอย่างมาก ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยสำหรับแต่ละกรณีศึกษาที่มีความแปรปรวนมาก Pattern search เป็นอัลกอริทึมที่ไม่เหมาะสมกับปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมีข้อจำกัดเห็นได้จากปัญหาที่ 1 แต่จากปัญหาที่ 2 จะพบว่าวิธีนี้สามารถหาคำตอบได้ดีไม่แพ้วิธีอื่น วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) เป็นอัลกอริทึมที่สามารถหาคำตอบที่ต่ำที่สุดและพบค่าเฉลี่ยของวิธีนี้จะต่ำกว่าอื่น ๆ แต่วิธีนี้เป็นวิธีเมตาฮิวริสติกที่มีจำนวนพารามิเตอร์ที่จะต้องตั้งค่ามากกว่าวิธีอื่น ๆ วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหึ่งห้อย (FA) เป็นอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาโดยมีพื้นฐานมาจาก PSO ประสิทธิภาพในการหาคำตอบถือว่าใกล้เคียงกันเห็นได้จากราคาเฉลี่ย แต่จะพบว่าอัลกอริทึม FA นั้นใช้เวลาในการหาคำตอบที่นานกว่า วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนกกาเหว่า (CS) เป็นอัลกอริทึมที่สามารถหาค่าที่ต่ำที่สุดในทุกปัญหาและทุกรอบในการทดสอบ แต่จะพบว่าอัลกอริทึมนี้จะใช้เวลาในการหาคำตอบที่นานที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคม (ACO) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยที่สุดในทุกกรณีศึกษาแต่คำตอบที่ได้นั้นมีราคาเฉลี่ยที่สูงกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ แต่หากเพิ่มรอบการค้นหาจะพบว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบสูงมาก

บรรณานุกรม

- [1] Das, B.M. 2011. *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning, Inc., 794 pages.
- [2] ACI Committee 318. 2014. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*. Farmington Hills, MI: American concrete Institute. 522 pages.
- [3] มงคล จิรวัชรเดช. 2557. *การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 420 หน้า.
- [4] Ukritchon, B. 2011. Load Optimization of Beam on Elastic Foundation. *24th KKCNN Symposium on Civil Engineering*, Hyogo, Japan. December 14-16, 2011. 5 pages.
- [5] Mathworks. 2014. *Matlab Help: fmincon*, Available from: <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>.
- [6] Karmarkar, N. 1984. *A New Polynomial-time Algorithm for Linear Programming*. *Combinatorica*, 4(4): 373-395.
- [7] Hooke, R. and Jeeves, T.A. 1960. *"Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems*. *Journal of the ACM*, 8(2): 212-229.
- [8] Torczon, V. 1997. *On The Convergence of Pattern Search Algorithms*. *Society of Industrial and Applied Mathematics*, 7(1): 1-25.
- [9] Hu, Z.Y., Bao, Y.K., and Xiong, T. 2013. *Electricity Load Forecasting Using Support Vector Regression with Memetic Algorithms*, *The Scientific World Journal*, 2013: 10 pages.
- [10] ระพีพันธ์ ปิตาคะโส. 2554. *วิธีการเมตาฮิวริสติกเพื่อแก้ไขปัญหาการวางแผนการผลิตและการจัดการโลจิสติกส์*. *สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)*, 208 หน้า.
- [11] Kennedy, J. and Eberhart, R. 1995. Particle Swarm Optimization, *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia. 27 Nov.-1 Dec. 1995 7 pages.

- [12] Yang, X.S. 2014. Nature-Inspired Optimization Algorithms. Elsevier Inc., 258 pages.
- [13] Yang, X.S. 2010. Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimisation. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2(2): 78-84.
- [14] Yang, X.S. 2010. Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimisation (Firefly algorithm). International Journal of Bio-Inspired Computation, 2(2): 80.
- [15] Yang, X.S., and Deb, S. 2009. Cuckoo Search via Lévy Flights. 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, pp. 210-214.
- [16] Lim, W.C., Ganesan, K., and Ponnambalam, S.G. 2014. PCB Drill Path Optimization by Combinatorial Cuckoo Search Algorithm. The Scientific World Journal, 2014(2): 10 pages.
- [17] Dorigo, M., Maniezzo, V., and Coloni, A. 1996. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B, 26, pp. 1-13.
- [18] Wang, Y., and Kulhawy, F. H. 2008. Economic Design Optimization of Foundations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(8).
- [19] Ukritchon, B., and Keawsawasvong, S. 2016. A Practical Method for the Optimal Design of Continuous Footing Using Ant-Colony Optimization. Acta geotechnica Slovenica, 45-55.
- [20] Rawat, S., and Mittal, K. 2018. Optimization of Eccentrically Loaded Reinforced-Concrete Isolated Footings. American Society of Civil Engineers., 23(2).
- [21] Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., and Yang, X.S. 2018. Metaheuristic Optimization of Reinforced Concrete Footings. KSCE Journal of Civil Engineering.
- [22] Matsuda, H., and Sakiyama, T. 1987. Analysis of Beams on Non-Homogeneous Elastic Foundation. Computers & Structures, 25(6), 941-946.
- [23] Ukritchon, B. 2011. Load Optimization of Beam on Elastic Foundation. 24th KCCNN Symposium on Civil Engineering, Hyogo, Japan. December 14-16, 2011. 5 pages.**

- [24] สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า. 2561. ราคาวัสดุก่อสร้างส่วนกลางกรุงเทพมหานครของ
กระทรวงพาณิชย์ ประจำปี 2561, กระทรวงพาณิชย์.
- [25] Al-Ansari, M. S. 2013. Structural Cost of Optimized Reinforced Concrete
Isolated Footing. International Scholarly and Scientific Research & Innovation,
7(4), 193-200.
- [26] สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร. 2550. มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการ
ตอบสนองของอาคาร (มยพ.1311-50). กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย,
122 หน้า.
- [27] MATLAB and Optimization Toolbox. 2018. fmincon. The MathWorks, Inc.,
Natick, Massachusetts, United States.
- [28] MATLAB and Optimization Toolbox. 2018. Pattern Search. The MathWorks,
Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [29] Chen, S. 2018. Constrained Particle Swarm Optimization MATLAB File
Exchange, Available from:
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25986>.
- [30] Schlueter, M. 2013. MIDACO, Global optimization software for mixed integer
nonlinear programming, Available from: <http://www.midaco-solver.com>.
- [31] Yang, X.S. 2011. Firefly Algorithm, Available from:
[https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29693-firefly-
algorithm](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29693-firefly-algorithm).
- [32] Yang, X.S. 2013. Cuckoo Search (CS) Algorithm, Available from:
[https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29809-cuckoo-
search-cs-algorithm](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29809-cuckoo-search-cs-algorithm).
- [33] Perez, R.E. and Behdinan, K. 2007. Swarm Intelligence: Focus on Ant and
Particle Swarm Optimization. Itech Education and Publishing, 532 pages.
- [34] Yang, X.S., and Deb, S. 2010. Engineering Optimisation by Cuckoo Search.
International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation,
17 pages.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อดุลพัฒน์ บุณนาค
วัน เดือน ปี เกิด	27 กันยายน 2537
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลพระมงกุฎเกล้า
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา พ.ศ.2559 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมธรณีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	81/49 หมู่บ้านคาสซ่า-เพอร์สโต้ ซอยวัดส้มเกลี้ยง ถนนกาญจนาภิเษก ตำบลศาลากลาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130

