

การวิเคราะห์พฤติกรรมของแป้นหูช้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น Behavioral analysis of Corbel using Nonlinear Finite Element Analysis

ภุรินทร์ สุขเกษม^{1,*} ธรา ทานวิรัตน์² ศุภศิษฐ์ ศรีวรานันท์³ และ ธิดารัตน์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์⁴

^{1,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

² NorCiv Engineering Co., Ltd.

*Corresponding author; E-mail address: 6670193721@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

แป้นหูช้าง (Corbel) เป็นโครงสร้างรองรับแรงที่ยื่นออกจากเสาหรือผนังคอนกรีต โดยมีหน้าที่หลักในการรองรับและถ่ายแรงจากโครงสร้างส่วนบน (Superstructure) เช่น สะพาน อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และระบบพื้นสำเร็จรูป อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าชิ้นส่วนแป้นหูช้างของสะพานที่เปิดใช้งานมาเป็นเวลานานมักมีความเสียหายเกิดขึ้นบริเวณแป้นหูช้างโดยมีลักษณะการรุดร่อนของคอนกรีตจนเห็นผิวเหล็กซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและความปลอดภัยของโครงสร้างโดยรวม งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมของแป้นหูช้าง ภายใต้แรงกระทำโดยใช้ โปรแกรม ATENA ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Analysis) สามารถจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างแม่นยำ การศึกษานี้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของแป้นหูช้าง (Corbel) ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะประสิทธิภาพ (shear span-to-effective depth ratio) ที่ระยะ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้พบว่าอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะประสิทธิภาพ มีผลต่อการรับแรงเฉือนสูงสุดของแป้นหูช้าง

Keywords: แป้นหูช้าง, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, คอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

The corbel is a cantilevered structural element projecting from a reinforced concrete column or wall, primarily responsible for supporting and transferring loads from the superstructure, such as bridges, reinforced concrete buildings, and precast floor systems. However, studies have revealed that corbels in long-service bridges often exhibit damage, characterized by concrete deterioration and exposure of reinforcement, which may compromise the load-carrying capacity and overall safety of the structure.

This research focuses on investigating the behavior of corbels under applied loads using ATENA software, a nonlinear finite element analysis (NLFEA) program capable of accurately simulating the behavior of reinforced concrete structures. The study compares the behavior of corbels under varying shear span-to-effective depth ratios (a/d) of 0.10, 0.15, 0.20,

and 0.25, respectively. The results indicate that the shear span-to-effective depth ratio significantly influences the ultimate shear capacity of corbels.

Keywords: Corbel, Nonlinear Finite Element Method, Reinforced Concrete

1. บทนำ

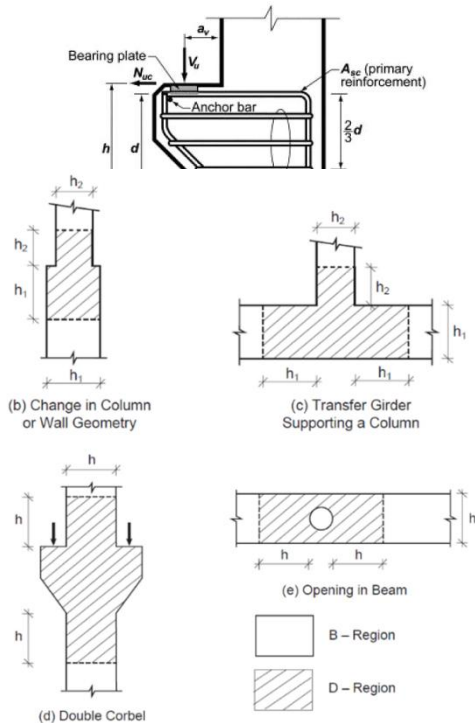
ปัจจุบัน สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหลายแห่งมีอายุการใช้งานอย่างยาวนาน จากการลงพื้นที่สำรวจพบว่าแป้นหูช้าง (Corbel) ของสะพานบางแห่งที่เปิดใช้งานมานานมักมีความเสียหายเกิดขึ้นบริเวณแป้นหูช้างโดยมีลักษณะการรุดร่อนของคอนกรีตจนเห็นผิวเหล็กซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและความปลอดภัยของโครงสร้างโดยรวม ซึ่งแป้นหูช้างถือเป็นชิ้นส่วนสำคัญในการถ่ายแรงจากโครงสร้างส่วนบนมาที่โครงสร้างส่วนล่าง โดยอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะประสิทธิภาพอาจเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้แป้นหูช้างเกิดความเสียหาย

แป้นหูช้าง (Corbel) เป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงสร้างสะพานที่ทำหน้าที่รองรับคานและถ่ายแรงลงสู่ตอม่อหรือเสาสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทั่วไปแป้นหูช้างในระบบสะพานจะต้องรับแรงเฉือนสูงและโมเมนต์ดัดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรของสะพาน การออกแบบและการวิเคราะห์แป้นหูช้างอย่างถูกต้องจึงมีความสำคัญต่อความมั่นคงและความปลอดภัยของโครงสร้างสะพาน โดยแป้นหูช้างจัดว่าเป็นบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่องของแรงภายใน หรือ D-region (Discontinuity Region) [1] เนื่องจากมีลักษณะทางเรขาคณิตที่ซับซ้อน หรือมีการเปลี่ยนทิศทางและกระจุกตัวของแรงภายใน (Stress concentration) ซึ่งแตกต่างจากบริเวณอื่นของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของแป้นหูช้างที่อัตราส่วนแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพ (shear span-to-effective depth ratio) ที่ระยะ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 โดยในอดีต Abdul-Razzaq & Dawood [2] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพที่ระยะ 0.5, 1 และ 1.5 จากการทดลองพบว่า เมื่อค่า a/d เพิ่มขึ้นความสามารถในการรับน้ำหนักของแป้นหูช้างมีแนวโน้มลดลงประมาณ 17–55% งานวิจัยในอดีตยังขาดการศึกษาในช่วงค่า a/d ที่ต่ำมาก ในบทความนี้จึงเน้นการศึกษาในช่วง a/d ระหว่าง 0.10–0.25 เนื่องจากการสร้างแบบจำลองของแป้นหูช้างของสะพานแห่งหนึ่งซึ่งมีระยะของแป้นหูช้างที่ค่อนข้างต่ำและค่า a/d ต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้เป็นอย่างมาก ทั้งนี้ ในการศึกษาได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิง

เส้น (Nonlinear Finite Element Analysis, NLFEA) ด้วยโปรแกรม ATENA ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมที่ซับซ้อนของแป้นหูช้างภายใต้ภาวะน้ำหนักต่างๆ ได้อย่างละเอียด เพื่อในอนาคตสามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาประยุกต์กับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีแป้นหูช้างไม่ให้เกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานสะพานที่มากยิ่งขึ้น

รูปที่ 1 รายละเอียดของแป้นหูช้าง [2]
รูปที่ 2 โครงสร้าง D region และ B region [4]



2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 ศึกษารูปแบบการวิบัติของแป้นหูช้าง

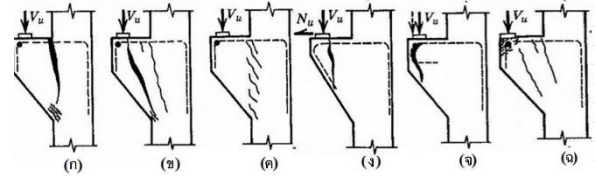
แป้นหูช้างสามารถแบ่งรูปแบบการวิบัติออกเป็น 6 รูปแบบ [5,6] ดังแสดงในรูปที่ 3 และสามารถสรุปได้ดังนี้

- การวิบัติแบบดึง (Flexural Tension Failure) เกิดจากแรงดึงในเหล็กเสริมหลักรับแรงเกินเกินค่ากำลังรับแรงดึงที่ยอมให้ ทำให้คอนกรีตส่วนล่างแตกร้าวและเสียความสามารถในการรับแรง (รูป 3(ก))
- การวิบัติแบบกดเฉียง (Diagonal Shear Failure) เกิดจากคอนกรีตบริเวณรับแรงอัด รับแรงอัดเกินกำลัง ส่งผลให้โครงสร้างล้มเหลวก่อนเหล็กจะคราก สาเหตุหลักคือกำลังอัดคอนกรีตต่ำหรือการถ่ายแรงไม่สมดุล (รูป 3(ข))
- การวิบัติแบบเฉือน (Shear Failure) สาเหตุหลักเกิดจากแรงเฉือนสูงเกินค่ารับได้ของคอนกรีต ทำให้เกิดรอยร้าวเฉียงใกล้รอยต่อกับเสา (รูป 3(ค))
- การวิบัติจากแรงแนวนอน (Failure due to Horizontal Loads) เกิดจากแรงแนวนอน เช่น จากการหดตัวหรือครีป สะสมจนเกิดรอยร้าวและวิบัติในที่สุด (รูป 3(ง))
- การวิบัติจากการยึดเหล็กไม่เพียงพอ (Loss of Anchorage) สาเหตุหลักเกิดจากเหล็กเสริมหลักมีระยะฝังไม่เพียงพอ ทำให้

เกิดการครากก่อนวิบัติทั้งหมด แม้จะยังรับแรงได้บางส่วน ถือเป็นการวิบัติแบบเหนียว (Ductile) (รูป 3(จ))

- การวิบัติแบบกดอัดใต้แผ่นรองรับ (Bearing Failure) คอนกรีตใต้แผ่นรับแรงอัดเกินกำลัง จนเกิดความเสียหายแบบกดอัด แก้ไขได้ด้วยการออกแบบแผ่นรองรับให้กระจายแรงได้ดีและเลือกวัสดุที่เหมาะสม (รูป 3(ฉ))

รูปที่ 3 รูปแบบการวิบัติของแป้นหูช้าง (ก) Flexural Tension Failure, (ข)



Diagonal Shear Failure, (ค) Shear Failure, (ง) Failure due to Horizontal Loads, (จ) Loss of Anchorage of main reinforcement, (ฉ) Bearing Failure [7]

2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของแป้นหูช้างด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

โครงสร้างโดยทั่วไปแสดงพฤติกรรมทั้งในลักษณะเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น โดยพฤติกรรมของโครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น มีความซับซ้อน และต้องอาศัยข้อมูลที่หลากหลายในการประเมินผล หากใช้เพียงการวิเคราะห์ทางทฤษฎีอาจนำไปสู่ข้อผิดพลาด ดังนั้น จึงประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D Finite Element Analysis) เพื่อจำลองแป้นหูช้าง โดยบทความนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองแป้นหูช้างด้วยโปรแกรม GiD Simulation และวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยโปรแกรม ATENA

2.2.1 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม GiD Simulation

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [8] เนื่องจากในแบบก่อสร้างไม่มีรายละเอียดของแป้นหูช้าง จึงทำการลงพื้นที่ภาคสนามเพื่อทำการวัดขนาด วัดระยะและตำแหน่งของเหล็กด้วยเครื่อง Ferro Scan โดยมีกำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 30 MPa โดยมีรายละเอียดของคุณสมบัติของคอนกรีตและคุณสมบัติของเหล็กดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยค่าต่างๆอ้างอิงจากงานวิจัย Canha, R. M. F et al [9]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของคอนกรีต

Parameter	Formula
Material Prototype	CC3DNonLinCementitious2
Young Modulus (MPa)	25,000
Poisson' Ratio	0.2
Tensile Strength (MPa)	1.81
Compressive Strength (MPa)	30
Fracture Energy (MN/m)	4.525×10^{-5}
Critical compressive displacement (mm)	-0.5
Compressive strength reduction factor of crack concrete	0.8

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเหล็ก

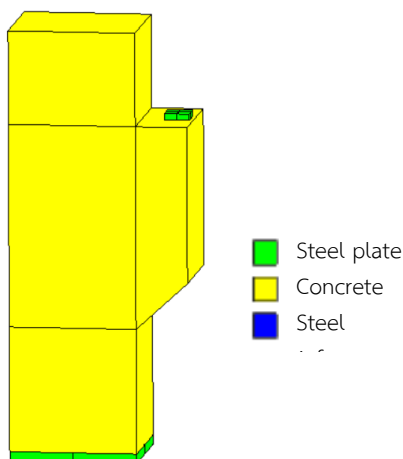
Parameter	Formula
Material Prototype	CCCyclingReinforcement
Elastic of Modulus (GPa)	200
Yield Strength (MPa)	
- Deformed Bar	390
Ultimate Tensile Strength (MPa)	
- Deformed Bar	560

นอกจากนี้มีการสร้างแผ่นเหล็กรองรับเพื่อให้แรงกระทำกระจายได้เท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด โดยคุณสมบัติของแผ่นเหล็กเป็น Solid Steel ชนิด Steel Von Mises 3D [10] และกำหนดค่าคุณสมบัติดังตารางที่ 3 และทำการสร้างแบบจำลองโครงตาข่าย (mesh)

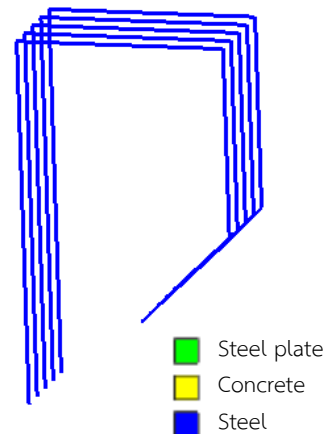
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของแผ่นเหล็ก

Parameter	Formula
Material Prototype	CC3DBilinearSteelVonMises
Elastic of Modulus (GPa)	200
Hardening Modulus (GPa)	10
Poisson' Ratio	0.3
Yield Strength (MPa)	550

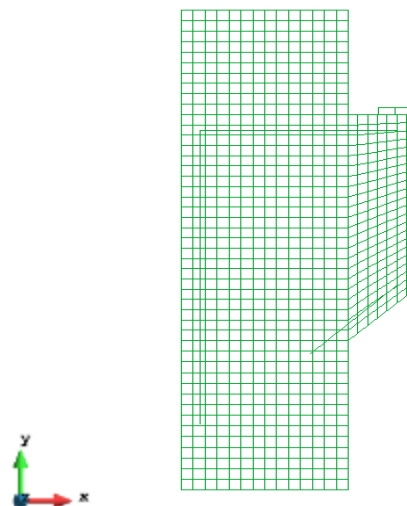
โดยรายละเอียดแบบจำลองคอนกรีตและแบบจำลองเหล็กเสริมดังรูปที่ 4 และ 5 และแบบจำลองการสร้างโครงตาข่าย (mesh) ดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 แบบจำลองคอนกรีต



รูปที่ 5 แบบจำลองเหล็กเสริม



รูปที่ 6 แบบจำลองการสร้างโครงตาข่าย (Mesh)

2.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม ATENA

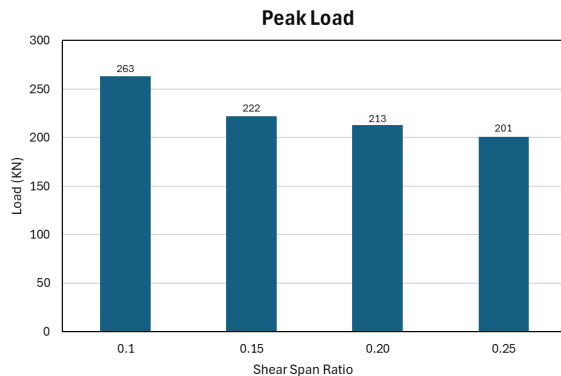
หลังจากสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม GiD Simulation จึงทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATENA โดยทำการวิเคราะห์โดยแบ่งตำแหน่งอัตราส่วนแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพ (shear span-to-effective depth ratio) ได้แก่ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 เพื่อทำการหาค่ารับแรงเฉือนสูงสุดของแป้นหูช้าง

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของแป้นหูช้าง

รูปที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของแป้นหูช้าง (Corbel) ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพ พบว่าค่ากำลังรับแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปลี่ยนแปลงตัวแปร อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึก (a/d) โดยตัวอย่างที่อัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพที่ 0.10 จะพบว่ามีความ

กำลังรับแรงเฉือนสูงมากที่สุดที่ 265 kN และเมื่ออัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นที่ระยะ 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของแต่ละระยะมีค่าลดลงที่ 222, 213 และ 201 ตามลำดับ

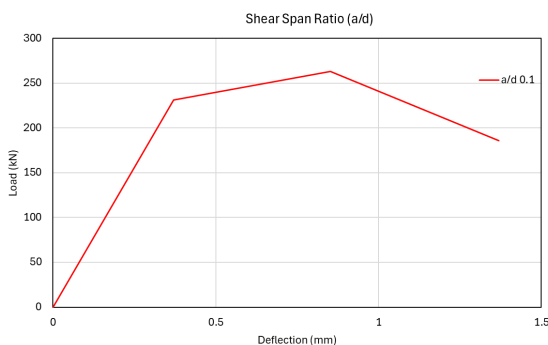


รูปที่ 7 แผนภาพแสดงกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด

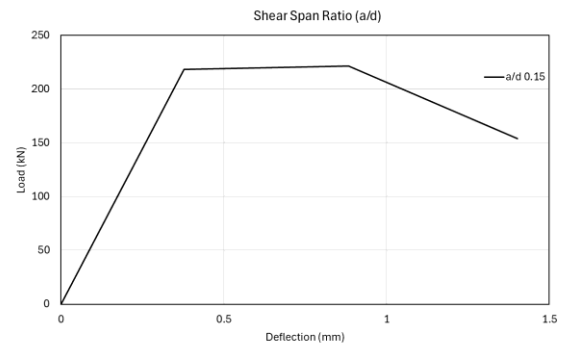
3.2 การโก่งตัว (Deflection)

จากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ATENA จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) กับ การโก่งตัว (Deflection) ของแป้นหุ้มข้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้ค่าที่แตกต่างกันของอัตราส่วนระยะเฉือนต่อความลึก (shear span-to-effective depth ratio, a/d) ได้แก่ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 พบว่าอัตราส่วน a/d มีผลอย่างชัดเจนต่อพฤติกรรมเชิงกลขององค์อาคาร โดยรูปที่ 8 ซึ่งระยะอัตราส่วนแรงเฉือนต่อความลึกที่ 0.10 แสดงค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่สามารถรับได้ 265 kN ก่อนเกิดการลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นว่าแป้นหุ้มข้างที่มีค่า a/d ต่ำมีความสามารถในการรับแรงเฉือนได้สูงสุด แต่มีแนวโน้มที่จะล้มเหลวแบบเปราะมากขึ้น (brittle failure)

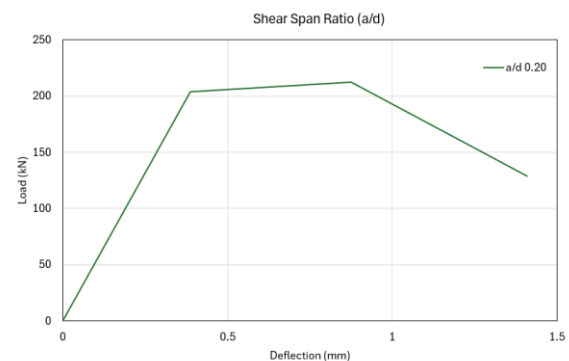
เมื่อค่า a/d เพิ่มขึ้นเป็น 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ แรงที่แป้นหุ้มข้างสามารถรับได้จะลดลงอย่างชัดเจน ขณะเดียวกันการโก่งตัว (deflection) ที่ตำแหน่งที่แรงสูงสุดเริ่มลดลงกลับเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 12 ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมที่มีความเหนียว (ductile) มากขึ้น และการวิบัติที่ไม่เกิดขึ้นทันที ทำให้สามารถดูดซับพลังงานก่อนเกิดการวิบัติได้มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานของ Abdul-Razzaq & Dawood [2] ที่รายงานว่าการเพิ่มค่า a/d จาก 0.5 เป็น 1.5 ลดกำลังรับแรงและเพิ่มการเสียรูปอย่างมีนัยสำคัญ



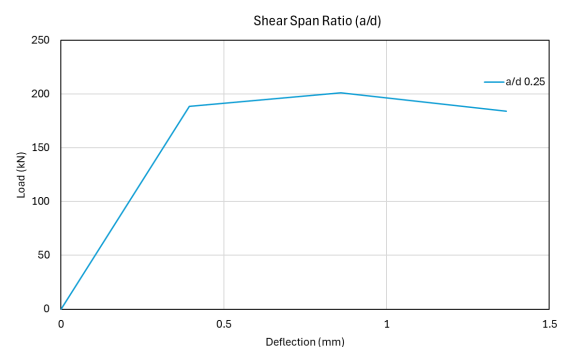
รูปที่ 8 อัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพที่ 0.1



รูปที่ 9 อัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพที่ 0.15

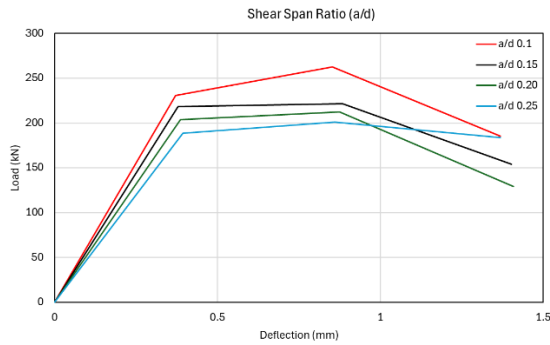


รูปที่ 10 อัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพที่ 0.20



รูปที่ 11 อัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพที่ 0.25

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) กับ การโก่งตัว (Deflection) ของทุกอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพพบว่าอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพ a/d ที่น้อยช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของแป้นหุ้มข้าง แต่ลดความเหนียวของพฤติกรรม ในขณะที่ค่า a/d ที่สูงกว่า แม้จะมีความสามารถในการรับแรงลดลง แต่กลับมีพฤติกรรมที่เหนียวและปลอดภัยจากการวิบัติแบบฉับพลันมากขึ้น การวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับแนวคิดทางทฤษฎีในด้านกลศาสตร์ของโครงสร้างที่ระบุไว้ว่าโซนที่มีระยะเฉือนสั้น (short shear span) จะเกิดแรงอัดเฉียง (diagonal compressive struts) ได้มีประสิทธิภาพมากกว่า จึงสามารถรับแรงได้สูงขึ้น แต่จะวิบัติเร็วเมื่อเกิดรอยร้าวเฉือน (shear cracking)



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพ
ที่ 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25

4. ข้อสรุป

บทความนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Analysis) ผ่านแบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม GiD Simulation และการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม ATENA เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพ (shear span-to-effective depth ratio) และลักษณะการวิบัติของแป้นหูช้าง จากการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) ที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วน a/d มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อพฤติกรรมเชิงกลของคอคอด โดยแป้นหูช้างที่มีค่า a/d ต่ำ เช่น อัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพที่ 0.10 สามารถรับแรงเฉือนสูงสุดได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอคอดที่มีค่า a/d สูงกว่า อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการวิบัติในกรณีดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นแบบเปราะ (Brittle failure) ซึ่งเกิดขึ้นอย่างฉับพลันและไม่แสดงการเตือนล่วงหน้า ในทางกลับกัน แป้นหูช้างที่มีค่า a/d สูง เช่น อัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพที่ 0.25 แม้จะรับแรงได้ต่ำกว่า แต่แสดงพฤติกรรมการเสียรูปแบบเหนียว (ductile failure) ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ โดยตามรูปแบบการวิบัติในอัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพ (shear span-to-effective depth ratio) ที่ 0.10, 0.15, 0.20 จะมีลักษณะรูปแบบการวิบัติที่เรียกว่า การวิบัติแบบกดเฉียง (Diagonal Shear Failure) แต่ที่อัตราส่วนระยะแรงเฉือนต่อระยะความลึกประสิทธิภาพ (shear span-to-effective depth ratio) ที่ 0.25 รูปแบบการวิบัติมีแนวโน้มจะวิบัติในรูปแบบการวิบัติแบบดึง (Flexural Tension Failure) เกิดจากแรงดึงในเหล็กเสริมหลักเกินขีดจำกัด ทำให้คอนกรีตส่วนล่างแตกร้าวและเสียความสามารถในการรับแรงต่อเนื่อง มักเกิดจากปริมาณเหล็กเสริมหรือการยึดเกาะไม่เพียงพอ

ผลการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกอัตราส่วน a/d ที่เหมาะสมในการออกแบบคอคอดคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะในกรณีที่มีความต้องการทั้งความแข็งแรงและความเหนียวของโครงสร้าง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความปลอดภัยในการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ กรมทางหลวง และบุคลากรที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูลของสะพาน และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในความเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบตลอดจนเป็นสถานที่ในการศึกษาปฏิบัติการตั้งแต่ต้นจนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Schlaich, J., Schafer, K., & Jennewein, M. (1987). Toward a Consistent Design of Structural Concrete. *PCI Journal*, 32(3), 74–150.
- [2] Abdul-Razzaq, K. S., & Dawood, A. A. (2021). Reinforcing Struts and Ties in Concrete Corbels. *ACI Structural Journal*, 118(4).
- [3] Putri, M. R., Sulisty, D., & Triwiyono, A. (2018). Reinforced Concrete Corbel's Behavior using Strut and Tie Model. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 4(2), 97.
- [4] Method of solution. (2021). https://structurepoint.org/publication/html/Design-of-Deep-Beam-Transfer-Girder-Using-Strut-and-Tie-Method-ACI-318-14-v10/10_Deep_Beam/1._Method_of_Solution/1._Method_of_Solution.htm?rhtocid=2
- [5] Kriz, L. B., & Rath, C. H. (1965). Connections in Precast Concrete Structures-Strength of Corbels. *PCI Journal*, 10, 10–61.
- [6] Mattock, A. H., Chen, K. C., & Soongswang, K. (1976). The Behavior of Reinforced Concrete Corbels. *PCI Journal*, 21(2), 52–77.
- [7] Ali, A. A. M. (2011). Nonlinear Analysis of High Strength Fibrous Reinforced Concrete Corbels Using Plane Stress Elements (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis, Civil Engineering Department, College of Engineering, Mosul University146).
- [8] Zdenka Procházková, Jan Červenka, Zdenek Janda, Dobromil Pryl, Jitka Mikolášková, 2019, ATENA Program Documentation (ATENA Science – GiD Tutorial), Červenka Consulting s.r.o.
- [9] Canha, R. M. F., Kuchma, D. A., El Debs, M. K., & Souza, R. A. de. (2014). Numerical analysis of reinforced high strength concrete corbels. *Engineering Structures*, 74, 130–144. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.014>
- [10] Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka, 2022, ATENA Program Documentation (Theory), Červenka Consulting s.r.o.