การแพร่กระจายตัวของรอยแตกในพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตัน ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

Crack Propagation in Prestressed Concrete Plank Girder Bridge by Using Nonlinear-Finite Element Analysis

ภูเบศ เลิศนันทกุล[1*] และ วิชัย กิจวัทวรเวทย์[2]

Pubeth Lertnantakul[1*] and Wichai Kijawatworawet[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้ ได้ทำการศึกษาเรื่องการแพร่กระจายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้น ในสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตัน โดยใช้สะพานข้ามคลองพระมอพิสัย ณ ตำบลบางภาษี อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม เป็นกรณีศึกษา โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างนั้นมีหลายตัวแปร แต่จะพิจารณาตัวแปรคุณสมบัติของคอนกรีตและลวดอัดแรง 5 ตัวแปรเท่านั้น ได้แก่ f_c', f_t, E_c, f_{ps}, E_{ps} โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เมื่อมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่อการรับแรง การเกิดรอยแตก และการแอ่นตัวของโครงสร้าง โดยผู้วิจัยใช้โปรแกรม ATENA version 5.1.3 ในการดำเนินงานวิจัยนี้ เนื่องจากลักษณะเด่นของโปรแกรมที่สามารถจำลองโมเดลเสมือนจริง 2 มิติของโครงสร้างสะพานและยังสามารถทำการเพิ่มน้ำหนักที่กระทำเข้าไปทีละน้อยจนโครงสร้างเกิดการวิบัติได้ ทั้งนี้แรงกระทำที่พิจารณาจะเป็นลักษณะแรงสถิตยศาสตร์เท่านั้น ไม่รวมถึงแรงลม แรงแผ่นดินไหว ผลสรุปจากงานวิจัยนี้พบว่า ค่าตัวแปร f_{ps} เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายตัวของรอยแตกควบคู่กับการการแอ่นตัวของสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตันมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ

ABSTRACT

The article has studied of crack propagation in Prestressed Plank girder structure which Phra-mor-pi-sai bridge in Nakhon Pathom province for adapted in this case study. Considering the physical properties 5 variables of concrete and wire stand, such as f_c', f_t, E_c, f_{ps}, E_{ps} ,and this article has analyzed by Nonlinear – Finite Element Analysis. Therefore, variables were changed, there will be affected to bridge structure such as crack and displacement. The researcher used “ATENA” program version 5.1.3 in analyzing. This research only considered about the Static load. Summarily, the f_{ps} are main variables that affecting to crack propagation and displacement of Prestressed plank girder bridge significant.

Key words: prestressed concrete bridge, crack, number of cracks, finite element

*Corresponding author; e-mail address: pubeth.lert@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม

[2]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม

คำนำ

ในปัจจุบันสะพานเป็นสาธารณูปโภคที่สำคัญเป็นลำดับต้น ๆ ของระบบการคมนาคม โดยเป็นสิ่งที่เรียบง่ายและให้ความสะดวกสบายในการเดินทางมากขึ้น เช่น การข้ามแม่น้ำลำคลองต่าง ๆ หรือการใช้ในการข้ามผ่านถนนหรือแยกต่าง ๆ เป็นต้น (วิชัย, 2555) กล่าวว่า โครงสร้างสะพานคอนกรีตที่ถูกใช้งานมานานมักเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน และสภาพ ที่มักพบบ่อย ได้แก่ การเกิดรอยแตกแยก คอนกรีตหลุดล่อนและการทรุดตัว เป็นต้น ซึ่งอาจเกิดจาก อุบัติเหตุ หรือเกิดจากการกัดกร่อนจากสารเคมีหรือจากสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ ดังนั้นการตรวจสอบคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม อายุการใช้งาน ความน่าเชื่อถือของสะพาน สามารถช่วยให้ผู้ใช้งานเกิดความปลอดภัยและมั่นใจในการเดินทางมากขึ้นด้วย ในปัจจุบันมีรูปแบบของสะพานมากมายหลายแบบและมีจำนวนมาก ดังนั้นการชำรุดเสียหายจึงมีจำนวนมากเช่นกัน ส่งผลให้สะพานเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน ดังนั้นการตรวจสอบโครงสร้างสะพานจึงทำให้เกิดความน่าเชื่อถือของสะพานนั้น ๆ ได้

จากข้อมูลของ (กรมทางหลวง, 2561) พบว่าปัจจุบันในประเทศไทยมีสะพานมากกว่า 15,512 สะพาน ทั้งนี้มีสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปแบบแผ่นพื้นตัน (Plank Girder) อยู่ทั้งสิ้นประมาณ 31.65 % ซึ่งมีมากเป็นอันดับที่ 2 รองลงมาจากสะพานชนิด Slab Type และในปัจจุบันก็มีแนวโน้มของการก่อสร้างสะพานชนิดนี้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากมีความเรียบง่ายในการก่อสร้างและยังสามารถสร้างได้รวดเร็วกว่าสะพานแบบหล่อในที่เนื่องจากเป็นแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูป ดังนั้นการวิจัยนี้จะพิจารณาที่สะพานชนิด Plank Girder นี้เป็นตัวแทนของสะพานที่ใช้ในงานวิจัย

(จิรายุส, 2559) กล่าวว่า จากงานวิจัยที่ได้ทำการวิเคราะห์รอยแตกของคานขวางของสะพานด้วยคุณสมบัติของคอยกรีตและเหล็กเสริม 4 ตัวแปร ได้แก่ f_c' , f_t , E_c , E_{ps} โดยทำการเพิ่มลดค่าตัวแปร 10% เทียบกับค่าเริ่มต้นที่ได้จากแบบก่อสร้าง พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนรอยแตก ขนาดรอบแตก และการทรุดตัวมากที่สุด คือ f_c' และ f_t ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้นงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์โครงสร้างของพื้นสะพานชนิด Plank Girder Bridge โดยแบบจำลองเสมือนจริงด้วยโปรแกรม ATENA version 5.1.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมลิขสิทธิ์ของ Červenka Consulting จากประเทศสาธารณรัฐเช็ก โดยการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear - Finite Element) ด้วยตัวแปร f_c', f_t, E_c, f_{ps}, E_{ps} โดยทำการเพิ่มลดค่าให้ละเอียดขึ้น เพื่อหาจำนวนรอยแตก และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพาน ด้วยโปรแกรม ATENA 5.1.3 ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นเป็นเพียงการเริ่มต้นเท่านั้น ยังสามารถนำไปต่อยอดหาค่าความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งานของสะพานต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

รายละเอียดของสะพานที่นำมาวิเคราะห์

พื้นสะพานที่นำมาวิเคราะห์จะใช้แค่พื้นสะพานแผ่นเดียวเท่านั้น โดยมีความยาว 8 เมตร กว้าง 0.99 เมตร และมีความสูง 0.25 เมตร และมีคอนกรีตทับหน้าหนา 0.1 เมตร โดยหน้าตัดของพื้นสะพานและความยาวของคานแสดงใน Figure 1 และFigure 2 ตามลำดับ

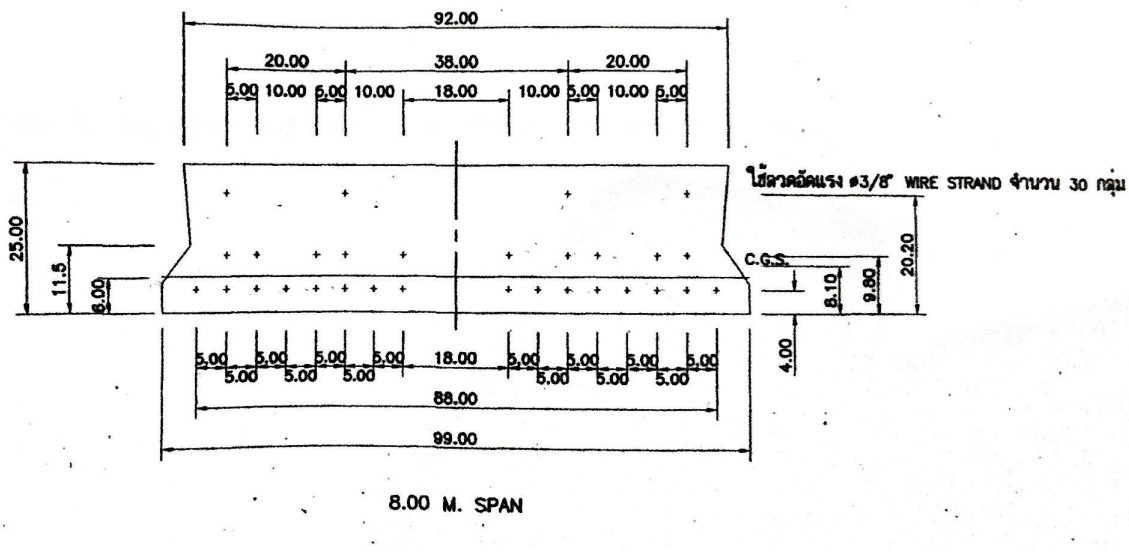

Figure 1 Cross-Section of Plank Girder

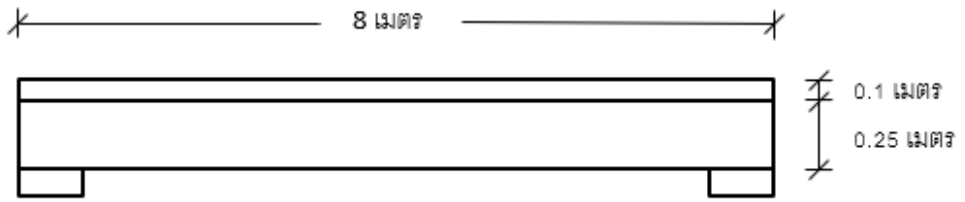

Figure 2 Span length of Plank Girder

กระบวนการเกิดรอยแตกและลักษณะการขยายตัวของรอยแตก

(Červenka Consulting, 2012) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตแสดงใน Figure 3 เป็นกราฟแสดงให้เห็นว่าวัสดุคอนกรีตนั้นจะมีพฤติกรรมบางช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ดังนั้นในการวิเคราะห์รอยแตกที่เป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบ สถิติเชิงตัวเลข (Numerical Static Analysis) จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์สถิตยศาสตร์ แบบไม่เชิงเส้น (Static Nonlinear-Finite Element Analysis)

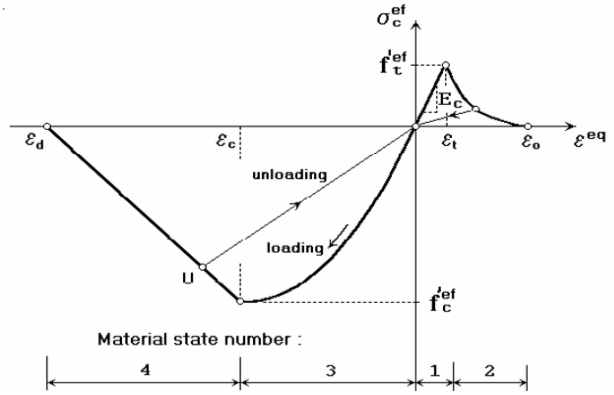

Figure 3 Stressed – Strain Curve

Reference: ATENA Program Documentation, Part 1 (2012)

(Červenka Consulting, 2012) การเกิดรอยแตกนั้นเป็นพฤติกรรมที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ของโครงสร้างวัสดุคอนกรีต โดยในการขยายตัวของรอยแตกนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรก ช่วงที่ไม่เกิดรอยแตก (Uncrack zone) เนื่องจาก tensile strength ยังไม่ถึงจุดสูงสุด ช่วงที่สอง เป็นช่วงที่มีกระบวนการการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นบนผิวคอนกรีต (Process zone) อันเนื่องมาจาก tensile stress เกิดการลดลงอย่างต่อเนื่อง และช่วงที่สามเป็นช่วงที่เกิดและขยายตัวของรอยแตกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Crack zone) แสดงใน Figure 4

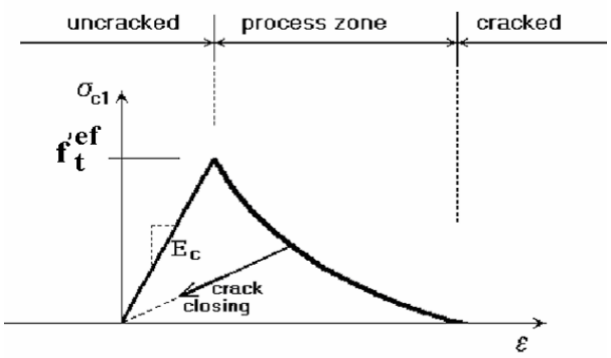

Figure 4 Stages of Crack

Reference: ATENA Program Documentation, Part 1 (2012)

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์สะพานด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมที่ชื่อ ATENA version 5.1.3 โดยการสร้างแบบจำลองเสมือนจริง 2 มิติของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงของสะพานชนิดแผ่นพื้นตันและใส่น้ำหนักกระทำจากรถบรรทุกซ้ำ ๆ เพิ่มขึ้นในจำนวนที่เท่า ๆ กัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของลักษณะรอยแตก จำนวนรอยแตก ขนาดรอยแตกและการทรุดตัวของสะพาน เมื่อเทียบกับตัวแปรจากแบบก่อสร้างจริง โดยใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆ ดัง Table 1 ตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยมีรูปแบบของการผสมผสานตัวแปรและมีการเพิ่มลดค่าของตัวแปรเทียบกับตัวแปรต้นแบบทีละ 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% และ 20% รวมทั้งสิ้น 160 โมเดล

Table 1 Properties of Concrete and Wire stand

Variables	Values	Unit	Symbol
Compressive strength of concrete (f_c')	350	ksc	A
Tensile strength of concrete (f_t)	32.93	ksc	B
Modulus of elasticity of concrete (E_c)	282,495.13	ksc	C
Tensile strength of wire stand (f_{ps})	17,584.1	ksc	D
Modulus of elasticity of wire stand (E_{ps})	1,970,000	ksc	E

Reference: แบบก่อสร้างสะพานข้ามคลองพระมอพิมัย กรมทางหลวงชนบทจังหวัดนครปฐม

โดย
$$f_t = 1.76\sqrt{f_c'} \quad (1)$$
$$E_c = 15200\sqrt{f_c'} \quad (2)$$

Reference: การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (สาโรจน์, 2559)

เมื่อ

f_c' คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

f_t คือ กำลังแรงดึงของคอนกรีต มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การสร้างแบบจำลองสองมิติและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATENA 2D version 5.1.3

เริ่มต้นจากการ plot จุดตามแบบของสะพานที่กำหนดลงใน AutoCAD และลากเส้นเชื่อมตามที่กำหนด จากนั้น Import สู่โปรแกรม ATENA version 5.1.3 ทำการใส่ Element ลงไปในแบบจำลองจำนวน 38 Elements จากนั้นใส่ข้อมูลคุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริม ใส่ Supports และเหล็กเสริมลงในแบบจำลอง และใส่น้ำหนักบรรทุก ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดโมเมนต์สูงสุดบนสะพานโดยพิจารณาจาก Influence line จากนั้นใส่ Load Step กับแบบจำลอง โดยหลักการของ Load Step นั้นจะทำการแบ่งน้ำหนัก 25 ตันออกเป็นช่วง ๆ โดยแบ่ง 1 Load step มีน้ำหนักของล้อหน้าเท่ากับ 0.2 ตันและล้อหลังแบ่งเป็น 0.4 ตัน 2 ล้อ รวมเท่ากับน้ำหนัก 1 ตัน หรือกล่าวคือ 25 Load steps มีค่าเป็นน้ำหนักรถบรรทุก 10 ล้อตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่พิจารณา 1 คันดัง Figure 5 โดยทำการวิเคราะห์จนกว่าตัวโครงสร้างจะเกิดการวิบัติ ทำการใส่จุดพิจารณา (Monitoring point) ในแบบจำลอง เพื่อให้โปรแกรมแสดงค่า ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ออกมา โดยทำการใส่ที่ตำแหน่ง Supports ตำแหน่งใต้โหลดเพื่อให้แสดงค่าน้ำหนักรถบรรทุก ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ และตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเพื่อดูค่าการแอ่นตัวของสะพาน เมื่อใส่ทุกอย่างดัง Figure 6 แล้วจากนั้นเริ่มทำการวิเคราะห์ข้อมูลการแอ่นตัวและรอยแตกที่เกิดขึ้นในสะพาน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่งวิกฤติออกมาข้างละ 0.5 เมตรของสะพานดัง Figure 7

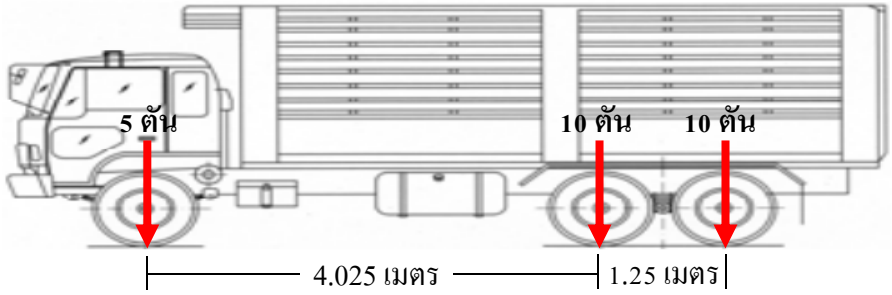

Figure 5 Thai Truck load 25 Tons

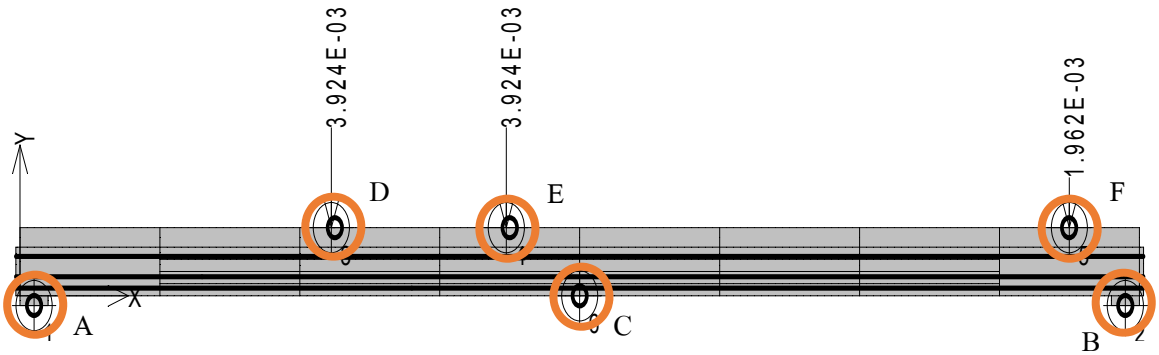

Figure 6 Model of Bridge after add load (MN) and Monitoring point

หมายเหตุ Monitoring point ของ Supports แทนด้วย A, B

Monitoring point ของ Displacement แทนด้วย C

Monitoring point ของ Truck load แทนด้วย D, E, F

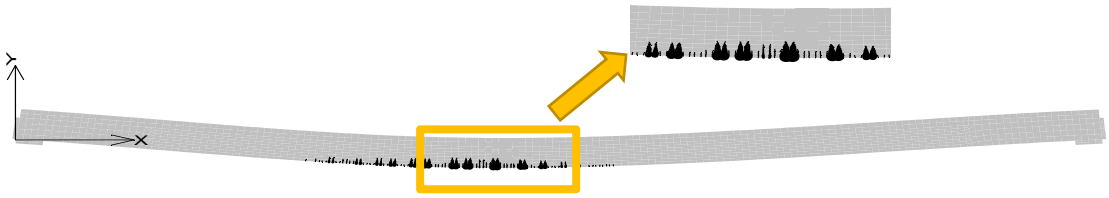

Figure 7 Model Analyzed by ATENA 2D version 5.1.3

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการจำลองโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นของแบบจำลองทั้งหมด 160 โมเดลผ่านโปรแกรมลิขสิทธิ์ ATENA version 5.1.3 ได้ทำการคัดเลือกค่าที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานมากที่สุด ดังที่ได้แสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลดัง Table 2 มาพล็อตเป็นกราฟ

Table 2 Data for Displacement, Number of cracks and Crack width

Combination	Displacement (m.)	Number of Cracks	Crack Width (m.)
Original	0.03692	35	0.0001698
A-20%, B-20%	0.03835	41	0.0003014
A-20%, D-20%	0.04116	52	0.0004832
B-20%, D-20%	0.03729	54	0.0003801
C-20%, D-20%	0.05882	55	0.0003582
D-20%, E-20%	0.04081	57	0.0007803

หมายเหตุ *สัญลักษณ์ของตัวแปรแสดงใน Table 1 และ -20% ค่าการลดค่าตัวแปรนั้น ๆ ลง 20%

จาก Figure 8 เป็นการแสดง Elastic stage, In-Elastic stage และUltimate stage ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATENA version 5.1.3 โดยจะทำการพิจารณารอยแตกและการแอ่นตัวในช่วง In-Elastic เท่านั้น พบว่าจาก Figure 9 แสดงถึงการแอ่นตัวของสะพานเทียบกับน้ำหนักบรรทุก และ Figure 10 แสดงถึงแพร่กระจายของรอยแตก พบว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการแอ่นตัวและการแพร่กระจายตัวของรอยแตกของสะพานมากที่สุดคือ กำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรง (Tensile Strength of wire stand, f_{ps})

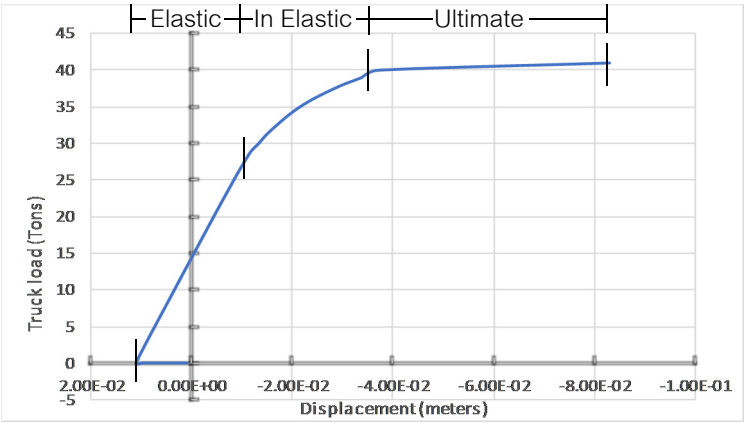

Figure 8 Stage of Modulus of Elasticity

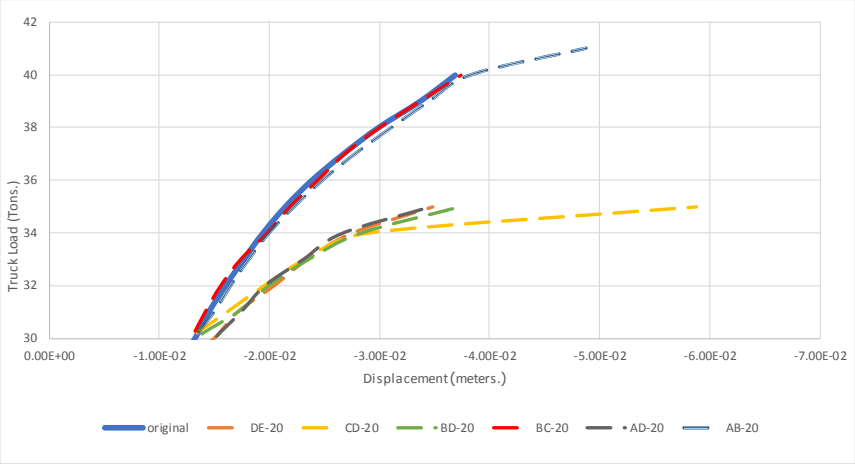

Figure 9 The relations between Truck load and Displacement

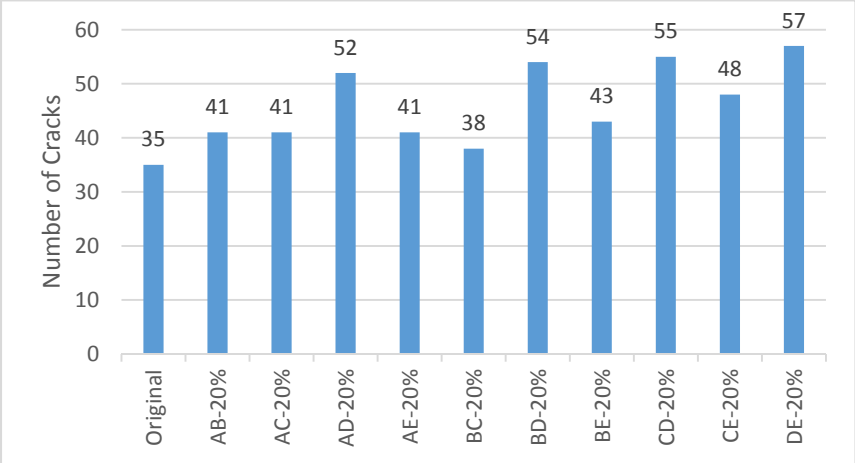

Figure 10 The Number of cracks at Truck load 40 Tons (Before Ultimate). And considering only the cracks larger than 0.4 millimeter

สรุป

บทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบผสมผสาน (Combination) ของตัวแปร 5 ตัวแปร ได้แก่ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive strength of concrete, f_c'), กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile strength of concrete, f_t), โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity of concrete, E_c), กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของลวดอัดแรง (Tensile strength of wire stand, f_{ps}) และ โมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง (Modulus of elasticity of wire stand, E_{ps}) โดยการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงแบบสองมิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น จากโปรแกรมลิขสิทธิ์ ATENA version 5.1.3 เพื่อพิจารณาการแพร่กระจายของรอยแตก เมื่อค่าตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง พบว่าการทรุดตัวของโครงสร้างเมื่อค่าตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง พบว่าหากทำการลดค่าตัวแปร f_{ps} และ E_c การแอ่นตัวของโครงสร้างสะพานเกิดการแอ่นตัวมากที่สุดถึง 5.882 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับสะพานต้นแบบที่มีการแอ่นตัวเท่ากับ 3.692 เซนติเมตร ซึ่งหมายถึงมีการแอ่นตัวของสะพานมากขึ้นถึง 62.768% (Table 2, Figure 9) และการแพร่กระจายตัวของรอยแตก หากทำการลดค่าตัวแปร f_{ps} และ E_{ps} จำนวนรอยแตกเกิดขึ้นมีจำนวนมากที่สุดถึง 57 รอยแตก ซึ่งเมื่อเทียบกับสะพานต้นแบบมีจำนวน 35 รอยแตก ซึ่งหมายถึงรอยแตกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นถึง 61.404 % (Table 2, Figure 10) สามารถสรุปได้ว่า กำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรง (Tensile Strength of wire stand, f_{ps}) มี

ผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานมากที่สุด ทั้งนี้บทความนี้สามารถนำไปพิจารณาถึงขอบเขตในการออกแบบของโครงสร้างให้มีความปลอดภัย เมื่อมีค่าตัวแปรที่เปลี่ยนไปไม่ว่าจะเป็น การก่อสร้างที่ผิดพลาด คุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม และยังสามารถนำข้อมูลไปศึกษาต่อหรือใช้ประกอบในการพิจารณาการรับแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตัน (Plank Girder)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Červenka Consulting และ Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ license ของโปรแกรมลิขสิทธิ์ ATENA version 5.1.3 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และบุคลากรทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำบทความนี้ รวมถึงขอขอบคุณกรมทางหลวงชนบทนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลของสะพานที่ใช้ทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง . 2561 . **ระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (**Bridge Maintenance and Management System**)** . สืบค้นเมื่อ มิถุนายน 20, 2561, จาก http://bridge.doh.go.th/bmms/.

กรมทางหลวงชนบท . 2554 . **แบบก่อสร้างสะพานข้ามคลองพระมอพิมัย** . นครปฐม.

จีรายุส เหลืองพาณิชย์กุล . 2559 . **การประเมินความน่าเชื่อถือของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์** . วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ . กรุงเทพมหานคร.

วิชัย กิจวัทวรเวทย์ . 2554 . **การตรวจประเมินพินิจของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก** (Visual Inspection of Reinforced concrete Bridge) . การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16.

สาโรจน์ ดำรงศีล . 2559 . **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน** . มหาวิทยาลัยรัตนโกสินทร์ . นครปฐม.

ATENA Program Documentation, Part 1, **ATENA Theory Manual**, CERVENKA CONSULTING, 2000-2014.

ATENA Program Documentation, Part 4-1, **Tutorial for Program ATENA 2D**, ČERVENKA CONSULTING, 2000-20140.