Research and Development Journal
Volume 26 Issue 4 October-December 2015

Received 18 August 2015 Accepted 21 November 2015

STUDY ON FLEXURAL BEHAVIORS OF PRECAST SEGMENTAL BRIDGE BOX GIRDER BY FINITE ELEMENT METHOD

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

The Engineering Institute of Thailand
under H.M. The King's Patronage

การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STUDY ON FLEXURAL BEHAVIORS OF PRECAST SEGMENTAL BRIDGE BOX GIRDER BY FINITE ELEMENT METHOD

สุวิทย์ วงศ์ทองดี[1] และกฤดายุทธ์ ชมภูมิ่ง[2]

[1, 2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์ 0-2564-3001-9 โทรสาร 0-2564-3010

E-mail: suvit19082519@gmail.com and kridayut@tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงดัดของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในการสร้างแบบจำลองได้ใช้เอลิเมนต์แผ่นบางสำหรับคานคอนกรีต เอลิเมนต์โครงถักสำหรับลวดอัดแรง และเอลิเมนต์สัมผัสสำหรับรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จ และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของคานขนาดเท่าของจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์และความเหมาะสมของสมมติฐานและเงื่อนไขที่พิจารณารวมถึงประสิทธิภาพของเอลิเมนต์และแบบจำลองที่ใช้ จากการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ และสามารถแสดงพฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงดัดของคานได้ในช่วงของสภาวะน้ำหนักบรรทุกออกแบบใช้งานไปจนถึงน้ำหนักบรรทุกออกแบบสูงสุด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลวิเคราะห์ของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและลวดอัดแรง รวมถึงผลของการเปิดออกของหน้าตัดบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จที่มีต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานรวมถึงลักษณะการกระจายของค่าความเครียดบนหน้าตัดคานและการเปลี่ยนตำแหน่งของแกนสะเทินเมื่อคานเข้าสู่สภาวะ Decompression ไปจนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

คำสำคัญ: พฤติกรรมการรับแรงดัด, คานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ABSTRACT

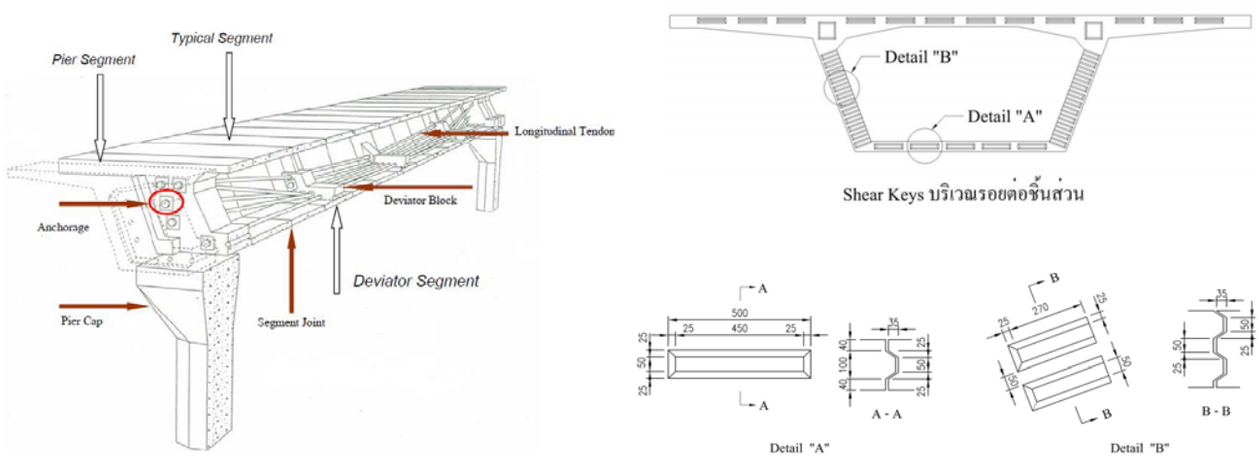
A main objective of this study is to investigate and study the flexural behaviors of a precast segmental bridge box girder under static load using finite element method. A finite element model employed is composed of shell elements for discretization of the concrete box girder, truss elements for the tendons of prestressing steel, and contact elements for the flat joints between precast segments. The results of finite element analysis are compared to the test results of a full-scale box girder to verify the validity and efficiency of the analysis model and the hypotheses employed in the investigation. The analysis results obtained are found in good agreement with the test results of the box girder under design service load up to design ultimate load. The results of strains in concrete box girder and tendons are also discussed in comparison with the test. Furthermore, the effects on strain distributions and flexural behaviors of the box girder due to opening of the joints between the precast segments during decompression up to ultimate loading stage, as well as the shifting of the beam neutral axis, are illustrated.

KEYWORDS: flexural behaviors, precast segmental bridge box girder, finite element method

3-4.indd 25 21/1/2559 5:35:48

1. บทนำ

การก่อสร้างสะพานเพื่อใช้เป็นโครงสร้างทางยกระดับเพื่ออำนวยความสะดวกในการจราจรและการเดินทางสัญจรของประชาชนในเมืองขนาดใหญ่นั้นเป็นสิ่งที่พบเห็นกันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน ทั้งนี้รูปแบบหนึ่งที่นิยมสำหรับการก่อสร้างคานสะพานในปัจจุบันได้แก่ โครงสร้างคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จซึ่งเป็นเทคนิคและวิธีการก่อสร้างที่ได้เริ่มนำมาใช้ในประเทศแถบทวีปยุโรปจากนั้นมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในประเทศอเมริกาและอีกหลายประเทศรวมทั้งประเทศไทยในปัจจุบัน ดังเช่นทางพิเศษศรีรัช เป็นทางยกระดับในกรุงเทพมหานคร มีระยะทางรวม 38.4 กิโลเมตร และทางพิเศษบูรพาวิถี มีระยะทางรวม 55 กิโลเมตร รวมถึงโครงการระบบขนส่งมวลชนทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ หรือแอร์พอร์ตเรลลิงก์ มีระยะทางรวม 28.6 กิโลเมตร เป็นต้น ลักษณะทางโครงสร้างของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จโดยทั่วไปจะประกอบด้วย ชิ้นส่วนสำเร็จที่ตั้งอยู่บนเสาตอม่อ (Pier Segments) ชิ้นส่วนสำเร็จสำหรับเบี่ยงเบนลวดอัดแรง (Deviator Segments) และชิ้นส่วนสำเร็จทั่วไป (Typical Segments) มีสลักเพื่อส่งถ่ายแรงเฉือน (Shear Keys) บริเวณรอยต่อชิ้นส่วน (Segment Joint) โดยจะทำการหล่อชิ้นส่วนสำเร็จมาจากโรงงาน (Match Cast) และนำมาประกอบเข้าด้วยกันด้วยลวดอัดแรงตามแนวยาว (Longitudinal Tendons) เพื่อสร้างเป็นคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ

ในการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการรวมถึงหลักเกณฑ์ต่าง ๆในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานได้ดียิ่งขึ้น จำเป็นต้องอาศัยการศึกษาวิจัยเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกรวมทั้งพฤติกรรมในการรับแรงของโครงสร้างคานสะพาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุกสถิตของโครงสร้างคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและการตอบสนองของโครงสร้างคานสะพานภายใต้สภาวะต่าง ๆในการรับน้ำหนักบรรทุก โดยมีการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์และความเหมาะสมของสมมติฐานและเงื่อนไขที่พิจารณารวมถึงประสิทธิภาพของ เอลิเมนต์และแบบจำลองที่ใช้ในครั้งนี้ ผลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลและแนวทางในการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จรวมถึงการตรวจสอบและประเมินความมั่นคงแข็งแรง เพื่อการซ่อมแซมและบำรุงรักษาคานสะพานเพื่อให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานได้อย่างปลอดภัยและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานต่อไป

3-4.indd 26 21/1/2559 5:35:48

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

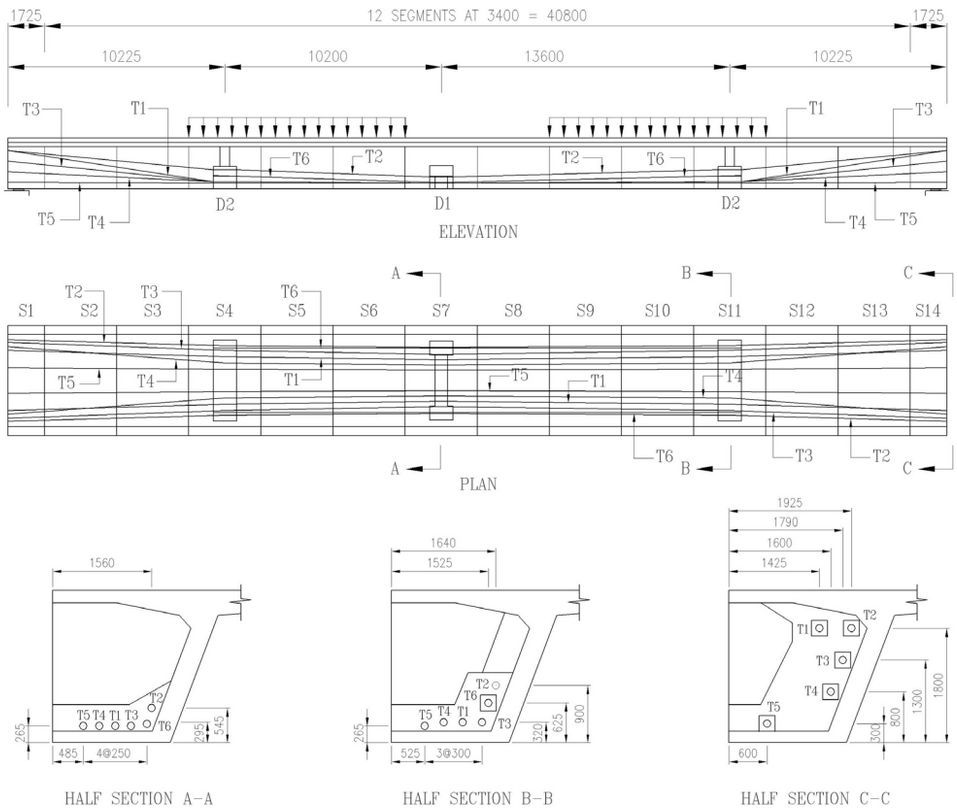
ในการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์โครงสร้างคานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะขอกล่าวในที่นี้โดยสังเขป ได้แก่งานของ Rombach และ Specker [1] โดยทำการจำลองคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จด้วยเอลิเมนต์แผ่นบาง (Shell Element) ใช้เอลิเมนต์โครงถัก (Truss Element) สำหรับลวดอัดแรง และเอลิเมนต์สัมผัส (Contact Element) สำหรับรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จโดยพิจารณาเป็นแบบราบเรียบ (Flat Joint) สำหรับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตพิจารณาในลักษณะของ Multi-Linear Elastic และลวดอัดแรงเป็นแบบ Elastic-Plastic โดยพบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ Nguyen และ คณะ [2] ได้พิจารณาพารามิเตอร์สำหรับเอลิเมนต์สัมผัสซึ่งประกอบด้วยค่าสติฟเนสในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส (Normal Stiffness) และในแนวระนาบของผิวสัมผัส (Tangential Stiffness) ซึ่งเป็นค่าเชิงตัวเลข (Numerical Parameter) เพื่อแสดงถึงแรงต้านทานรวมถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของรอยต่อชิ้นส่วนสำเร็จ Diep และ คณะ [3] ได้ทำการศึกษาผลของการเลื่อนไถล (Slip) ของลวดอัดแรง (Tendon) บริเวณจุดเบี่ยงเบนแนวลวดอัดแรง (Deviator Block) โดยพบว่าเมื่อเกิดการเลื่อนไถลจะส่งผลให้แรงภายในลวดอัดแรงมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องการกระจายซ้ำของหน่วยแรง (Stress Redistribution) ในลวดอัดแรงแต่ละเส้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการพิจารณาการเลื่อนไถล อย่างไรก็ตามค่าการแอ่นตัวของคานทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ Takebayashi และ คณะ [4] ได้ทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของคานสะพานสำหรับโครงการทางด่วนขั้นที่สองโดยเป็นการทดสอบแบบ Ultimate Load Test ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวได้นำมาพิจารณาในการเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้นำเสนอในการศึกษาครั้งนี้ ทั้งนี้รายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานของสุวิทย์ [5]

3. วิธีการศึกษา

3.1 ลักษณะของโครงสร้างคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ

โครงสร้างคานสะพานที่พิจารณาเป็นกรณีศึกษาในครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการทางยกระดับทางด่วนขั้นที่สองโดยมีลักษณะเป็นคานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จอัดแรงภายนอก มีความยาวช่วงคาน 44.25 เมตร กว้าง 10.20 เมตร หน้าตัดคานสะพานลึก 2.40 เมตร ประกอบด้วยชิ้นส่วนสำเร็จ 14 ชิ้นส่วน แบ่งเป็นชิ้นส่วนทั่วไปจำนวน 9 ชิ้นส่วน มีความยาวชิ้นส่วนละ 3.40 เมตร ชิ้นส่วนเบี่ยงเบนแนวลวดอัดแรงจำนวน 3 ชิ้นส่วน มีความยาวของแต่ละชิ้นส่วน 3.40 เมตร และชิ้นส่วนที่ตั้งอยู่บนเสาตอม่อ จำนวน 2 ชิ้นส่วน มีความยาวชิ้นส่วนละ 1.725 เมตร สำหรับลวดอัดแรงหมายเลข T1, T2, T3, T4, T5 มีลวดอัดแรงจำนวน 19 เส้น และลวดอัดแรง T6 มีลวดอัดแรงจำนวน 12 เส้น โดยมีระยะระหว่างจุดรองรับ เท่ากับ 43.25 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จมีการก่อสร้างเป็นแบบ Dry Joint

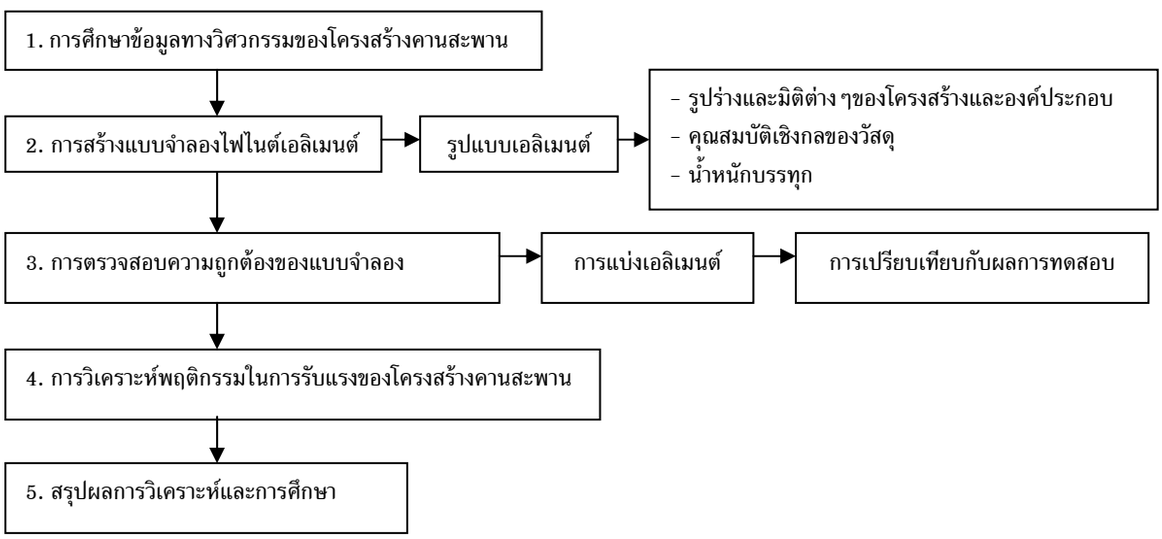
3-4.indd 27 21/1/2559 5:35:48



รูปที่ 2 โครงสร้างคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จที่พิจารณา

3.2 ขั้นตอนในการศึกษา

ขั้นตอนในการวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคานสะพานรูปกล่องสามารถแสดงได้ดังแผนผังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนในการศึกษา

3-4.indd 28 21/1/2559 5:35:49

3.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างคานสะพานที่พิจารณาในครั้งนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

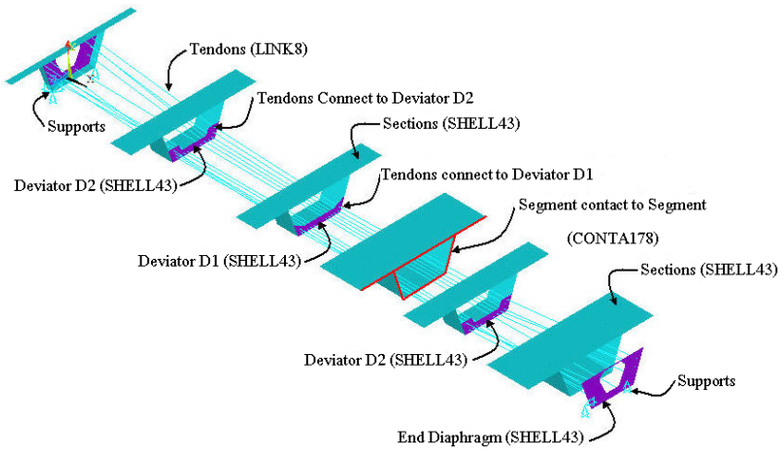
3.3.1 เอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาเอลิเมนต์แผ่นบาง (Shell Element) ในการสร้างแบบจำลองของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จสำหรับแผ่นพื้นด้านบนและด้านล่าง (Top/Bottom Slab) รวมถึงส่วนผนัง (Web) ของคาน โดยแต่ละเอลิเมนต์มี 4 จุดต่อ (Node) แต่ละจุดต่อมีตัวแปรแสดงการเคลื่อนที่ (Degrees of Freedom) จำนวน 6 ตัว ประกอบด้วยการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x, y และ z (Translations) และการหมุนรอบแกนทั้งสาม (Rotations) แรงภายในเอลิเมนต์ประกอบด้วย แรงในแนวระนาบ แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด สำหรับลวดอัดแรงได้ทำการจำลองโดยใช้เอลิเมนต์โครงถัก (Truss Element) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์มี 2 จุดต่อ มีตัวแปรแสดงการเคลื่อนที่ประกอบด้วยการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x, y และ z แรงภายในเอลิเมนต์ประกอบด้วยแรงตามแนวแกน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานรูปกล่องสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยมีสมมติฐานและเงื่อนไขที่พิจารณาในการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างเป็นดังนี้

1) รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จได้ทำการจำลองในลักษณะของการสัมผัสเป็นจุด (Point Contact) โดยอาศัย Contact Element แบบ Node-to-Node ประกอบด้วย 2 จุดต่อ โดยอยู่ในตำแหน่งจุดต่อแต่ละด้านของเอลิเมนต์แผ่นบางที่สัมผัสกันตรงรอยต่อ และมีการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x, y และ z ในลักษณะเดียวกับจุดต่อของเอลิเมนต์แผ่นบาง โดยพิจารณาให้แรงตั้งฉากกับผิวสัมผัส (Normal Contact Force) มีค่าเป็นศูนย์เมื่อรอยต่อมีการเปิดออก (Joint Opening) และจุดต่อของ Contact Element มีการเคลื่อนที่แยกออกจากกัน ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงที่หน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าเป็นศูนย์ (สภาวะ Decompression)

2) จากการรายงานของผลการทดสอบคานไม่พบว่ามีการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสัมพัทธ์ (Relative Vertical Movement) ระหว่าง Segment ที่สัมผัสกันตั้งแต่สภาวะของน้ำหนักบรรทุกออกแบบใช้งานจนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด [4] ในการศึกษาครั้งนี้จึงพิจารณาการวิบัติของคานภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดเป็นหลัก โดยกำหนดให้การเคลื่อนที่ของจุดต่อของ Contact Element ที่อยู่แต่ละด้านของรอยต่อในระนาบของผิวสัมผัส มีค่าเท่ากันตลอดการกระทำของน้ำหนักบรรทุก กล่าวคือ Shear Key สามารถส่งถ่ายแรงเฉือนได้อย่างต่อเนื่องและไม่มีการเลื่อนไถลในแนวระนาบที่สัมผัสกันของชิ้นส่วนสำเร็จ

3) พิจารณาการยึดรั้งระหว่างลวดอัดแรง และ Deviator เป็นแบบยึดแน่น (Fixed) โดยให้จุดต่อของเอลิเมนต์ของทั้งสองส่วนบริเวณดังกล่าวมีการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 4 แบบจำลองคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ

3-4.indd 29 21/1/2559 5:35:49

3.3.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุและน้ำหนักบรรทุก

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงอัดแกนเดียว โดยอาศัยสมการของ Modified Popovics [6] โดยกำหนดให้คอนกรีตจะเกิดการวิบัติแบบอัดแตก (Crushing) เมื่อมีค่าความเครียดเท่ากับ 0.003 และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของลวดอัดแรงโดยอาศัยสมการของ Ramberg-Osgood [7] และเกิดการวิบัติเมื่อถึงจุดคราก (Yielding) ในส่วนของน้ำหนักบรรทุกได้พิจารณาในรูปของแรงกระทำกระจายสม่ำเสมอต่อหน่วยพื้นที่ (Uniformly Distributed Load) โดยกระทำบนชิ้นส่วนสำเร็จชิ้นที่ 4 ถึง 6 และชิ้นที่ 9 ถึง 11 ดังแสดงในรูปที่ 2 ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีในการทดสอบเพื่อการเปรียบเทียบผล ข้อมูลสำหรับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรวมถึงขนาดหน้าตัดของลวดอัดแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ดำเนินการโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS [8] ดังแสดงในรูปที่ 4 (ชนิดของเอลิเมนต์แสดงอยู่ในวงเล็บในรูป)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

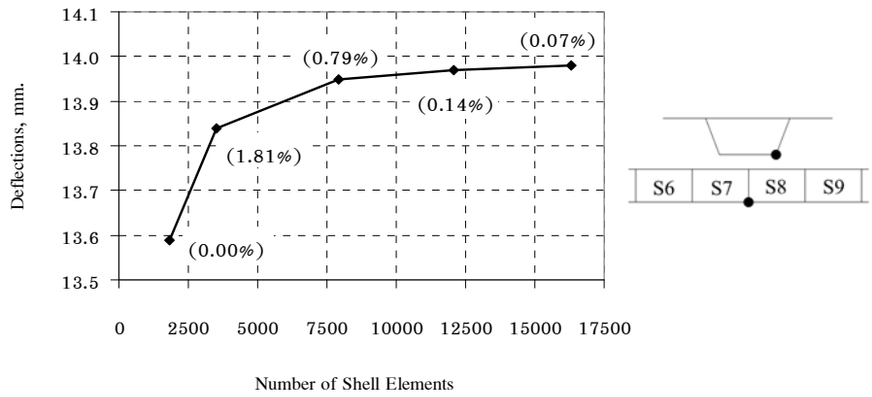
Concrete		Prestressing Steel			
Ultimate Compressive Strength (MPa)	58.5	Ultimate Tensile Strength (MPa)	1860	Tendon No.	Area (mm^2)
Modulus of Elasticity (MPa)	43000	Modulus of Elasticity (MPa)	193000	T1 – T5	2660
Poisson's Ratio	0.2	Poisson's Ratio	0.3	T6	1680

4. ผลการศึกษา

4.1 รูปแบบการแบ่งและจำนวนเอลิเมนต์สำหรับแบบจำลอง

ในการศึกษาความเหมาะสมของการแบ่งแบบจำลองออกเป็นชิ้นส่วนย่อย (Discretization) ได้ทำการแบ่งคานรูปกล่องออกเป็น 5 รูปแบบ ประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวน 1841, 3517, 7921, 12,059 และ 16,313 เอลิเมนต์ และพิจารณาการลู่เข้าของคำตอบ (Convergence) จากค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งของรอยต่อระหว่าง Segment No. 7 และ 8 ภายใต้ผลของน้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 1.3 เท่าของ AASHTO HS20-44 ซึ่งเป็นน้ำหนักที่กำหนดในการออกแบบคาน โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการลู่เข้าของค่าการแอ่นตัว โดยตัวเลขที่แสดงในวงเล็บแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของคำตอบเมื่อเทียบกับรูปแบบของการแบ่งเอลิเมนต์ก่อนหน้า จากผลลัพธ์ดังกล่าวประกอบกับเมื่อคำนึงถึงระยะเวลาที่ต้องใช้ในการหาคำตอบของระบบสมการของโครงสร้าง จึงได้พิจารณารูปแบบของการแบ่งเอลิเมนต์จำนวน 7,921 เอลิเมนต์ สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานสะพานรูปกล่องในการศึกษาครั้งนี้

3-4.indd 30 21/1/2559 5:35:49



รูปที่ 5 ผลของการแบ่งและเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์แผ่นบางสำหรับแบบจำลองคานสะพานรูปกล่อง

4.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงดัดของคานจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และประสิทธิภาพของวิธีการที่พิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการโดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ค่าการแอ่นตัวของคาน

ในการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของคานระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 สภาวะภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกของคานซึ่งสามารถสรุปผลโดยรวมได้ดังแสดงในรูปที่ 6 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) สภาวะของโมเมนต์ดัดออกแบบใช้งาน (Design Service Moment) โดยภายใต้เงื่อนไขในการออกแบบโครงสร้างคานดังกล่าวได้กำหนดน้ำหนักบรรทุกจรไว้เท่ากับ 1.3 เท่าของน้ำหนักบรรทุกออกแบบประเภท HS20-44 [4] ซึ่งเมื่อพิจารณาผลในรูปของโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคาน (Midspan Bending Moment) จะมีขนาดเท่ากับ 24.60 MN-m โดยจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองได้ค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคาน (Midspan Deflection) เท่ากับ 30.37 mm ซึ่งมีค่ามากกว่าผลการทดสอบซึ่งวัดได้ 26.76 mm โดยมีค่าแตกต่างคิดเป็น 13.49% นอกจากนี้พบว่าภายใต้น้ำหนักบรรทุกในช่วงนี้ยังไม่มีการเปิดออกของรอยต่อระหว่าง Segment และจากรายงานของผลการทดสอบภายใต้แรงกระทำในช่วงนี้พบว่ามีการเลื่อนไถลของลวดอัดแรง T5 เกิดขึ้นขณะที่โมเมนต์ดัดมีขนาดเท่ากับ 19.0 MN-m [4]

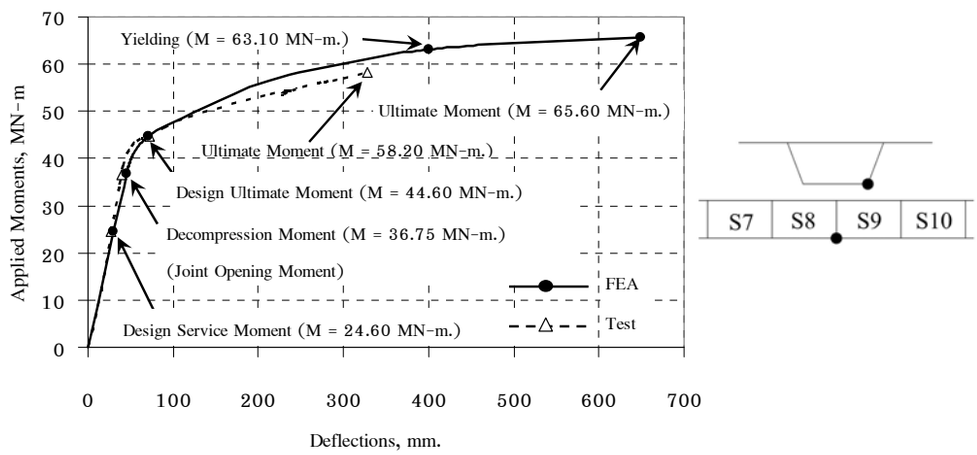
2) สภาวะที่หน่วยแรงของคอนกรีตที่ท้องคานมีค่าเป็นศูนย์ (Decompression Moment) หรือสภาวะที่รอยต่อระหว่าง Segment เริ่มเปิดออก (Joint Opening Moment) โดยพบว่าจากผลการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคานที่สภาวะดังกล่าวมีขนาดเท่ากับ 36.75 MN-m ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบที่มีค่าเท่ากับ 36.50 MN-m โดยมีค่าแตกต่างคิดเป็น 0.7% ในขณะที่การแอ่นตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคานมีค่าเท่ากับ 45.35 และ 38.93 mm สำหรับผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบตามลำดับ โดยผลจากการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่า 16.49% จากรายงานของผลการทดสอบในช่วงนี้มีการเลื่อนไถลของลวดอัดแรง T6 เกิดขึ้นขณะที่โมเมนต์ดัดมีขนาดเท่ากับ 35.0 MN-m [4]

3) สภาวะของโมเมนต์ดัดออกแบบสูงสุด (Design Ultimate Moment) โดยโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคานที่สภาวะนี้มีขนาดเท่ากับ 44.60 MN-m ซึ่งมีผลให้การแอ่นตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคานที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 70.19 mm และจากผลการทดสอบเท่ากับ 71.58 mm โดยมีค่าแตกต่างกัน 1.94% จากรายงานของผลการทดสอบในช่วงนี้มีการเลื่อนไถลของลวดอัดแรง T1 เกิดขึ้นขณะที่โมเมนต์ดัดมีขนาดเท่ากับ 40.0 MN-m [4]

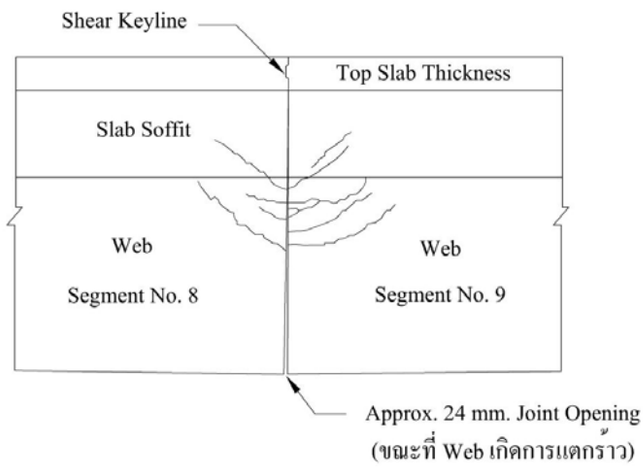
4) สภาวะของโมเมนต์ดัดสูงสุด (Ultimate Moment) โดยพบว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 65.60 MN-m ซึ่งเป็นผลจากการวิบัติ (Failure Mode) เนื่องจากการครากของลวดอัดแรงโดยเกิดการครากเริ่มต้น (Initial Yielding) เมื่อโมเมนต์ดัดมีค่าเท่ากับ 63.10 MN-m ในขณะที่โมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 58.20 MN-m

3-4.indd 31 21/1/2559 5:35:49

ซึ่งเกิดจากการวิบัติแบบอัดแตก (Crushing) ของแผ่นพื้นคอนกรีตด้านบนบริเวณรอยต่อระหว่าง Segment No. 8 และ 9 โดยพบว่าการแตกร้าวของคอนกรีตเริ่มสังเกตได้ในส่วนตั้ง (Web) ของคานบริเวณหน้าสัมผัสของรอยต่อระหว่าง Segment ที่กำลังจะเปิดออกซึ่งมีผลให้หน่วยแรงอัดในบริเวณนี้เกิดขึ้นในลักษณะของ Stress Concentration ที่มีขนาดสูงมากและคาดว่าน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้คานเกิดการวิบัติในบริเวณดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยสังเกตพบในช่วงของ Segment No. 6 ถึง 9 และเริ่มเกิดขึ้นเมื่อโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคานมีค่าเท่ากับ 45 MN-m [4]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและการแอ่นตัวของคานที่วิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ



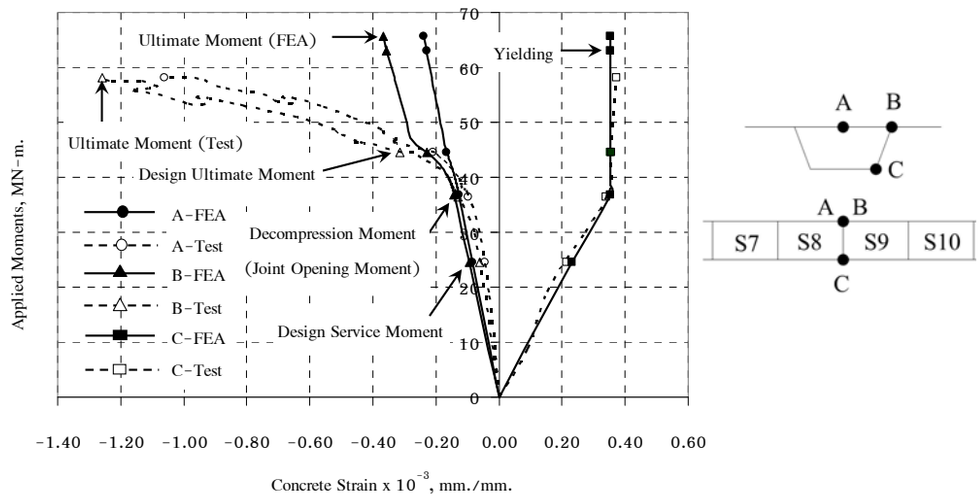
รูปที่ 7 รอยแตกบริเวณส่วนตั้งของคานบริเวณรอยต่อระหว่าง Segment No. 8 และ 9 จากผลการทดสอบ [4]

4.2.2 ค่าความเครียดของคอนกรีตและลวดอัดแรง

รูปที่ 8 แสดงค่าความเครียดของคอนกรีตบริเวณรอยต่อระหว่าง Segment No. 8 และ 9 ที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยพบว่าผลจากการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่ขอบด้านบนของคาน (จุด A และ B, ค่าลบแสดงผลของความเครียดอัด) และที่ขอบด้านล่าง (จุด C, ค่าบวกแสดงผลของความเครียดดึง) มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดสอบภายใต้สภาวะโมเมนต์ดัดออกแบบใช้งานไปจนถึงสภาวะโมเมนต์ดัดออกแบบสูงสุด โดยในช่วงของ Decompression Moment มีความแตกต่างของค่าความเครียดระหว่าง 3.56% (จุด C) ถึง 30.68% (จุด A) และที่สภาวะของโมเมนต์ดัดออกแบบสูงสุดมีความแตก

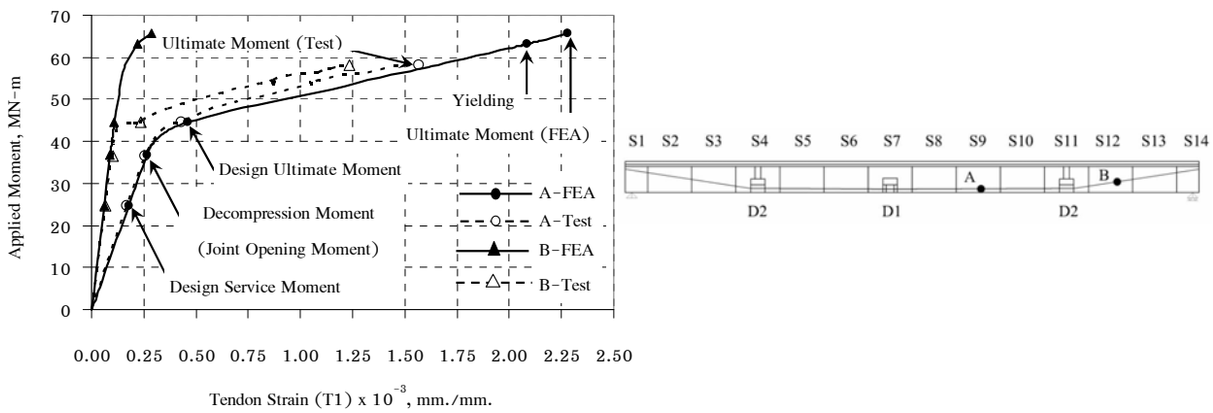
3-4.indd 32 21/1/2559 5:35:49

ต่าง 0.86% (จุด C) ถึง 27.06% (จุด B) อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าสู่ช่วงของสภาวะน้ำหนักบรรทุกสูงสุดซึ่งโหมดการวิบัติที่เกิดขึ้นของแบบจำลองมีความแตกต่างจากการวิบัติของคานทดสอบดังที่กล่าวข้างต้นจึงมีผลให้ในช่วงนี้ค่าความเครียดที่ขอบด้านบนของคานที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแตกต่างจากผลการทดสอบอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 8 ค่าความเครียดของคอนกรีตที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดของลวดอัดแรงเปรียบเทียบกับผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยเป็นผลสำหรับลวดอัดแรง T1 ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดสอบภายใต้สภาวะโมเมนต์ดัดออกแบบใช้งานจนถึงสภาวะ Decompression โดยในช่วงของ Decompression มีความแตกต่างของค่าความเครียดระหว่าง 3.94% (จุด A) ถึง 11.00% (จุด B) และที่สภาวะของโมเมนต์ดัดออกแบบสูงสุดมีความแตกต่าง 6.94% (จุด A) ถึง 53.59% (จุด B) โดยในช่วงนี้จากผลการทดสอบพบว่ามีการเลื่อนไถลของลวดอัดแรง T1 ที่โมเมนต์ดัดเท่ากับ 40.0MN-m และหลังจากช่วงนี้ไปแล้วผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีความแตกต่างจากผลการทดสอบมากขึ้นซึ่งน่าจะมีสาเหตุเช่นเดียวกับค่าความเครียดของคอนกรีตดังที่ได้กล่าวข้างต้น



รูปที่ 9 ค่าความเครียดของลวดอัดแรง T1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

3-4.indd 33 21/1/2559 5:35:50

4.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงดัดของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากที่ได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และประสิทธิภาพของวิธีการที่พิจารณาในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ โดยสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

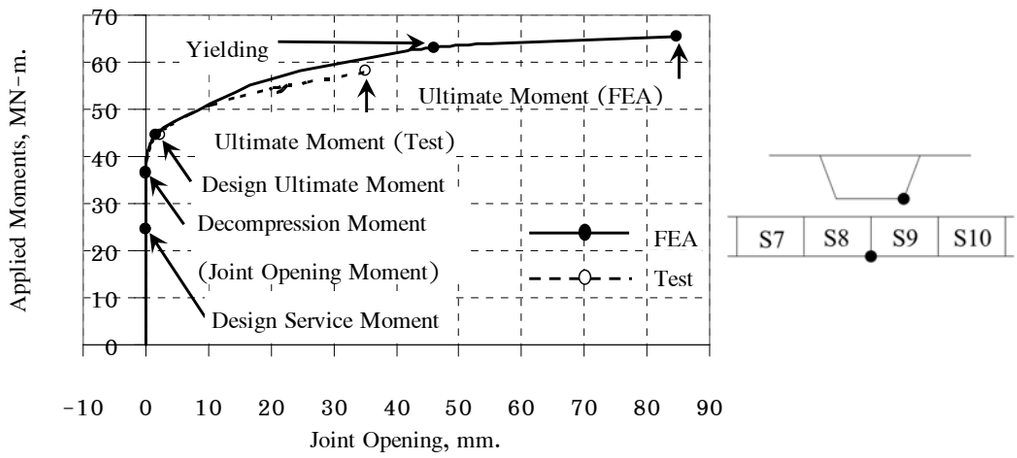
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและการแอ่นตัวของคาน

พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกภายใต้โมเมนต์ดัดของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จที่ทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงได้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและการแอ่นตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงคานดังแสดงในรูปที่ 6 โดยพบว่าในช่วงเริ่มต้นเมื่อรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จยังไม่เปิดออกพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานมีความสัมพันธ์กับการแอ่นตัวเป็นแบบเชิงเส้น จนถึงระดับที่โมเมนต์ดัดมีค่าเท่ากับ 36.75 MN-m ซึ่งเป็นระดับที่มีผลให้หน่วยแรงอัดที่ขอบล่างของหน้าตัดระหว่าง Segment No. 8 และ 9 มีค่าเท่ากับศูนย์ (Decompression) จนกระทั่งถึงค่าโมเมต์ดัดประมาณ 37.85 MN-m เมื่อรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จที่ 8 กับ 9 เปิดออกมีค่าเท่ากับ 0.01 mm พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของคานจะเข้าสู่ช่วงไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขขอบเขตของหน่วยแรง (Stress Boundary Conditions) บนหน้าสัมผัส (Contact Area) ของรอยต่อในขณะที่มีการเปิดออก และมีผลทำให้ Flexural Stiffness ของคานลดลง โดยพิจารณาได้จากความชันของกราฟระหว่างโมเมนต์ดัดและการแอ่นตัวในรูปที่ 6 ที่มีค่าลดลงโดยลำดับเมื่อโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น จนถึงสภาวะที่เหล็กเสริมอัดแรงเริ่มคราก (Initial Yielding) ที่ค่าโมเมนต์ดัดเท่ากับ 63.10 MN-m ซึ่งในช่วงนี้คานจะมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 65.60 MN-m นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเสียรูปของคาน (Ductility) ก่อนถึงจุดวิบัติ ซึ่งเป็นดัชนีหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบความปลอดภัยหรือการเตือนล่วงหน้าโดยหากพิจารณาในรูปของอัตราส่วนของค่าการแอ่นตัวที่สภาวะน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเทียบต่อสภาวะ Decompression พบว่ามีค่าเท่ากับ 8.43 และ 14.32 สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ตามลำดับ

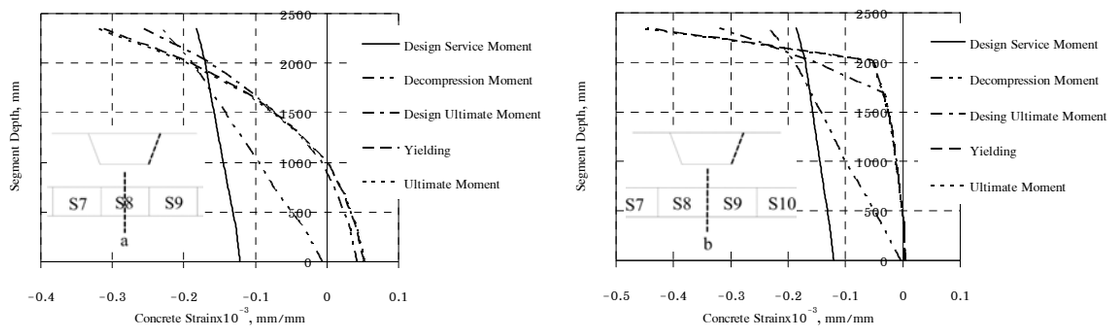
4.3.2 ระยะการเปิดออกของรอยต่อและตำแหน่งแกนสะเทินของหน้าตัดคาน

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและระยะการเปิดออกของรอยต่อระหว่าง Segment สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 โดยจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองพบว่า ที่สภาวะของโมเมนต์ดัดออกแบบสูงสุด ระยะเปิดออกของรอยต่อมีค่าเท่ากับ 1.6 mm และจากผลการทดสอบวัดได้ 2.3 mm มีค่าแตกต่างกัน 30.4% หลังจากสภาวะนี้ไปแล้วผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างจากผลการทดสอบเพิ่มขึ้นซึ่งสาเหตุหนึ่งน่าจะเป็นผลจากโหมดการวิบัติของวัสดุที่แตกต่างกันของแบบจำลองดังที่กล่าวข้างต้น รูปที่ 11 แสดงการกระจายของค่าความเครียด (Strain Distribution) ของคอนกรีตตามระยะความลึกของคานรูปกล่องเปรียบเทียบระหว่างหน้าตัดบริเวณกึ่งกลาง Segment และบริเวณรอยต่อระหว่าง Segment โดยพบว่าการกระจายของความเครียดจะมีลักษณะเช่นเดียวกันในช่วงเริ่มต้นจนถึงสภาวะ Decompression ซึ่งหลังจากสภาวะนี้ไปแล้วที่บริเวณกึ่งกลาง Segment จะมีความเครียดดึงเกิดขึ้นที่ท้องคานในขณะที่บนหน้าตัดบริเวณรอยต่อระหว่าง Segment ความเครียดจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อรอยต่อมีการแยกออกจากกัน และการกระจายของค่าความเครียดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแกนสะเทินของคานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จภายใต้โมเมนต์ดัดที่สภาวะต่าง ๆของการรับน้ำหนักบรรทุก โดยสังเกตได้ว่าหลังจากสภาวะ Decompression แกนสะเทินของบนหน้าตัดที่อยู่ตรงรอยต่อระหว่าง Segment จะมีตำแหน่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับหน้าตัดที่อยู่ตรงกึ่งกลางของ Segment ภายใต้น้ำหนักบรรทุกเดียวกันเนื่องจากผลของการเปิดออกของหน้าตัดบริเวณรอยต่อ

3-4.indd 34 21/1/2559 5:35:50

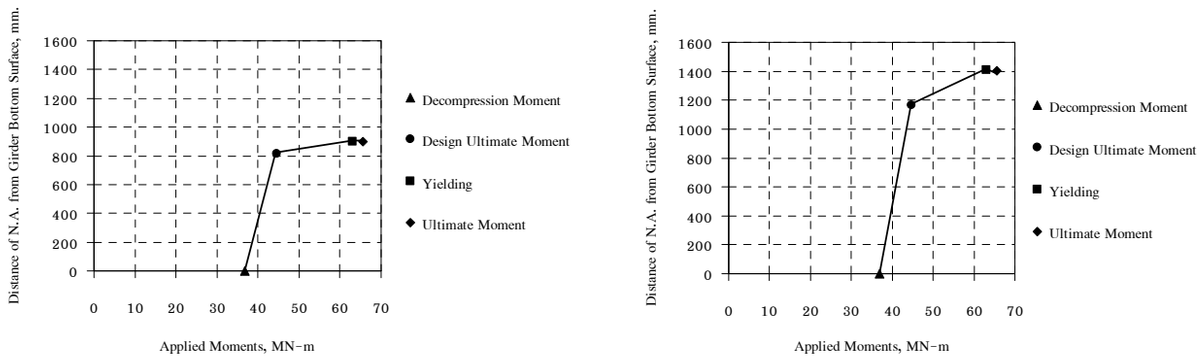


รูปที่ 10 ระยะการเปิดออกของรอยต่อระหว่าง Segment



(a) บริเวณกึ่งกลาง Segment No. 8 (b) บริเวณรอยต่อระหว่าง Segment No. 8 และ 9

รูปที่ 11 ความเครียดบนหน้าตัดของคานภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะต่าง ๆ



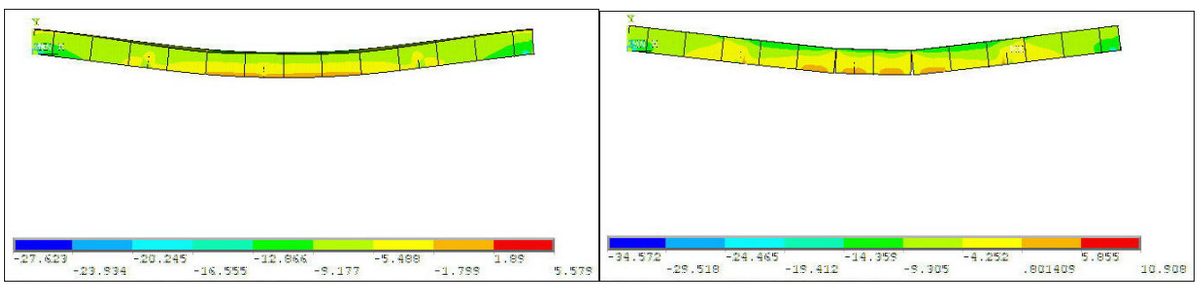
(a) บริเวณกึ่งกลาง Segment No. 8 (b) บริเวณรอยต่อระหว่าง Segment No. 8 และ 9

รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแกนสะเทินภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะต่าง ๆ

3-4.indd 35 21/1/2559 5:35:50

4.3.3 การกระจายของหน่วยแรงในคานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ

ผลของความไม่ต่อเนื่องของคานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จบริเวณรอยต่อระหว่าง Segment เมื่อมีการเปิดออก สามารถแสดงในรูปของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 13 โดยพบว่าการกระจายของหน่วยแรงจะมีความต่อเนื่องจนถึงสภาวะ Decompression หลังจากสภาวะนี้ไปแล้วจะมีลักษณะไม่ต่อเนื่องบริเวณรอยต่อซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลง Boundary Condition ของหน่วยแรงบริเวณที่ Segment มีการแยกออก และมีผลให้การกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัดรอบ ๆรอยต่อซึ่งเป็นหน่วยแรงอัดทั้งหมดมีความแตกต่างจากหน้าตัดที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของ Segment ที่มีทั้งหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึง

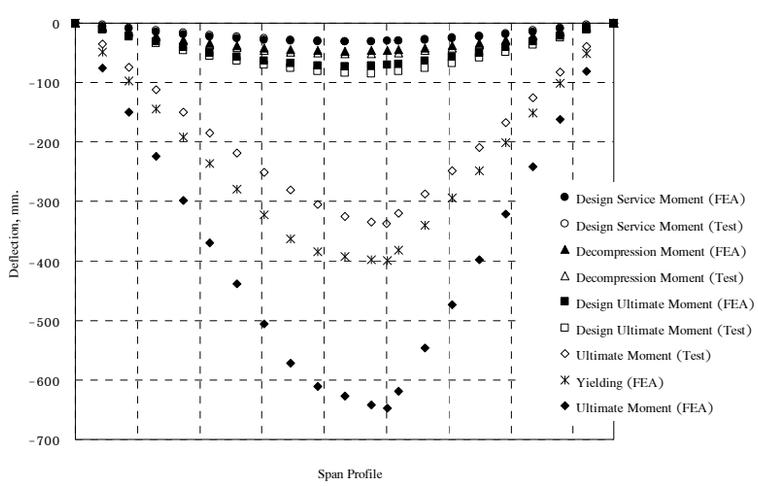


(a) สภาวะ Decompression (b) สภาวะ Ultimate Moment

รูปที่ 13 การกระจายของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคาน

4.3.4 การแอ่นตัวของคานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ

การเสียรูปของคานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จที่ได้จากผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของการแยกออกของหน้าตัดบริเวณรอยต่อระหว่าง Segment ที่มีต่อการแอ่นตัว (Deflected Shape) ของคาน โดยจะสังเกตความไม่ต่อเนื่องของการเสียรูปของคานได้ชัดเจนเมื่อเข้าสู่ช่วงในสภาวะโมเมนต์ดัดสูงสุด



รูปที่ 14 การแอ่นตัวของคานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ

3-4.indd 36 21/1/2559 5:35:50

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุกสถิตของโครงสร้างคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จภายใต้ผลของโมเมนต์ดัดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1) จากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเพื่อประเมินถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมของเอลิเมนต์รวมถึงสมมติฐานและเงื่อนไขที่พิจารณาในการศึกษาครั้งนี้พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปของค่าการแอ่นตัวของคานรวมถึงค่าความเครียดของคอนกรีตและลวดอัดแรงมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบตั้งแต่การรับแรงในสภาวะของน้ำหนักบรรทุกออกแบบใช้งานโดยที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของคานเป็นแบบเชิงเส้น รวมถึงสภาวะ Decompression ที่รอยต่อมีการเปิดออก ไปจนถึงสภาวะของโมเมนต์ดัดออกแบบสูงสุด โดยหลังจากนี้ไปแล้วเมื่อเข้าสู่ช่วงของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดผลการวิเคราะห์มีความแตกต่างจากผลการทดสอบเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากลักษณะการวิบัติของวัสดุที่พิจารณาของแบบจำลองมีความแตกต่างจากการวิบัติที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

2) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงการกระจายของความเครียด (Strain Distribution) บนหน้าตัดของคานบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องรวมถึงการเปลี่ยนตำแหน่งแกนสะเทินของหน้าตัดคานซึ่งแตกต่างจากกรณีที่คานหล่อเป็นเนื้อเดียวกัน (Monolithic) ภายหลังจากที่รอยต่อมีการเปิดออกเมื่อเข้าสู่สภาวะ Decompression ไปจนถึงสภาวะน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบประกอบพบว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงขอบรอยต่อที่กำลังเปิดออกมีโอกาสที่จะเกิดความเค้นที่มีความเข้มสูงในลักษณะของ Stress Concentration และทำให้คอนกรีตในบริเวณเหล่านี้เกิดการแตกร้าวดังแสดงในรูปที่ 7 และเป็นเหตุให้คานทดสอบเกิดการวิบัติในที่สุด

3) เนื่องจากหลักเกณฑ์การวิบัติของคาน (Failure Criteria) ที่พิจารณาสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาครั้งนี้มีความแตกต่างจากโหมดการวิบัติที่เกิดขึ้นในคานทดสอบ ผลการวิเคราะห์ภายใต้การรับแรงในสภาวะน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจึงมีความแตกต่างจากผลการทดสอบ ดังนั้นเพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยเหล่านี้ที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงภายใต้สภาวะน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จ จึงควรพิจารณาแบบจำลองของวัสดุและทฤษฎีการวิบัติของคอนกรีตเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคลุมถึงผลของ Stress Concentration บริเวณผิวสัมผัสที่กำลังเปิดออกของรอยต่อแบบ Dry Joint รวมถึงการเลื่อนไถลของลวดอัดแรงบริเวณ Deviator

เอกสารอ้างอิง

[1] Rombach, G. & Specker, A. (1999). Numerical Modelling of Segmental Bridge, ECCM, Munchen, Germany.

[2] Nguyen, D. H., J. Watanabe, K. & Sivaleepunth, C. (2008). Numerical Study on Shear Behavior of Segmental Prestressed Concrete Beams Considering Joint Location. The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA, 2008.

[3] Diep, B. K., Umehara, H. & Tanabe, T. (2002). Numerical Analysis of Externally Prestressed Concrete Beams Considering Friction at Deviators. J. Material, Conc. Struct. Pavement, JSCE, No. 718/V-57, November 2002, pp. 107-119.

[4] Takenayashi, T., Deeprasertwong, K. & Leung, Y. W. (1994). A Full-Scale Destructive Test of a Precast Segmental Box Girder Bridge with Dry Joints and External Tendons., Proc. Instn Civ.Engrs Structs & Bldgs., 104, Aug. 1994, pp. 297-315.

[5] สุวิทย์ วงศ์ทองดี, การศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานสะพานรูปกล่องชิ้นส่วนสำเร็จโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2558

[6] MacGregor, J. M., & Wight, J. K. (4th Ed.) Reinforced Concrete Mechanics and Design. Prentice-Hall, Inc., Singapore, 2005.

[7] Barker, R. D., & Puckett, J. A. Design of Highway Bridges. New York, John Wiley & Sons. Inc., 1997

[8] ANSYS Inc. Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench, PA: SAS IP, Inc., Canonsburg, 2007.

3-4.indd 37 21/1/2559 5:35:50