



การศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบตอม่อแบบเสาตึบของสะพานช่วงสั้น สำหรับโครงการหมู่บ้านจัดสรรในเขตกรุงเทพมหานคร

A Comparative Study of Short-Span Pile Bents for Housing Projects in Bangkok

เกียรติศักดิ์ สหะศักดิ์มนตรี

Kiertisak Sahasakmontri

วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ปทุมธานี ประเทศไทย
College of Engineering, Rangsit University, Pathum Thani, Thailand
E-mail: kiertisak@rsu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอรูปแบบทางเลือกของตอม่อแบบเสาตึบของสะพานที่มีช่วงยาวไม่เกิน 10 เมตรสำหรับโครงการหมู่บ้านในเขตกรุงเทพมหานคร และเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักแนวตั้งของตอม่อสะพาน 3 รูปแบบ ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้าง 3 มิติซึ่งจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างด้วยเอลิเมนต์ 1 มิติ และถูกรองรับด้วยสปริงที่เป็นตัวแทนของการปฏิสัมพันธ์กับดิน โดยคำนึงถึงพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง และของวัสดุคอนกรีต เหล็กเสริม และดิน ผลการศึกษาแสดงว่า จากการพิจารณาเฉพาะความสามารถในการรับน้ำหนักแนวตั้ง หากสามารถยึดเหล็กเสริมของเสาเข็มเข้ากับคานรับพื้นสะพาน และของคานขวางเข้ากับเสาเข็มอย่างเหมาะสมสามารถใช้รูปแบบทางเลือกที่ใช้เสาเข็มต่อกับคานรับพื้นสะพานโดยตรงแทนรูปแบบมาตรฐานที่ต้องหล่อเสากลางน้ำ

คำสำคัญ: ตอม่อแบบเสาตึบ เสาเข็มต่อกับคานรับพื้นสะพานโดยตรง พฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น

Abstract

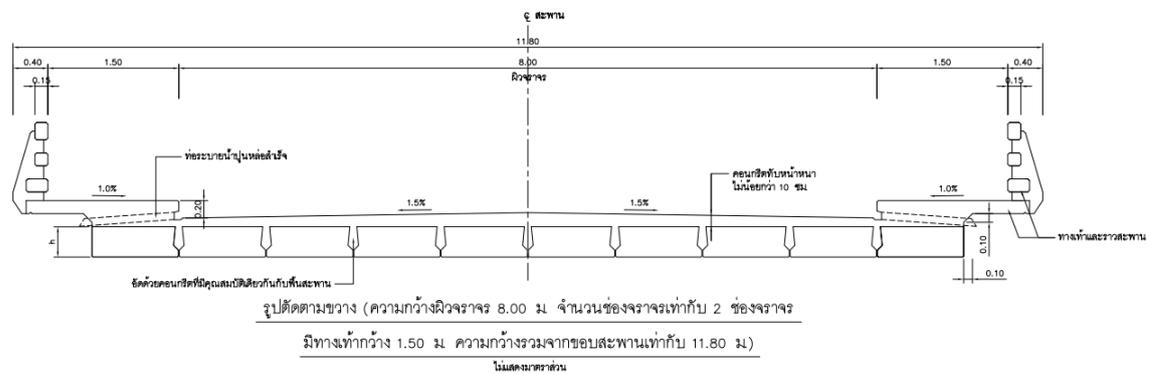
The present study examines alternative forms of pile bents for bridges with a span less than 10 m in the Bangkok areas and compares the vertical load-carrying capacity of three types of bridge piers. Three-dimensional nonlinear analyses using frame elements supported by nonlinear springs representing pile-soil interaction show that the alternative forms, connecting precast piles directly to the bent cap instead of in-situ casting reinforced concrete columns over water, can be the viable solutions provided that proper anchorages are achieved of the precast piles' reinforcement into the bent cap and of bracing beams' reinforcement into the precast piles.

Keywords: Pile Bent, Precast-Pile-Supported Bent Cap, Nonlinear Behavior

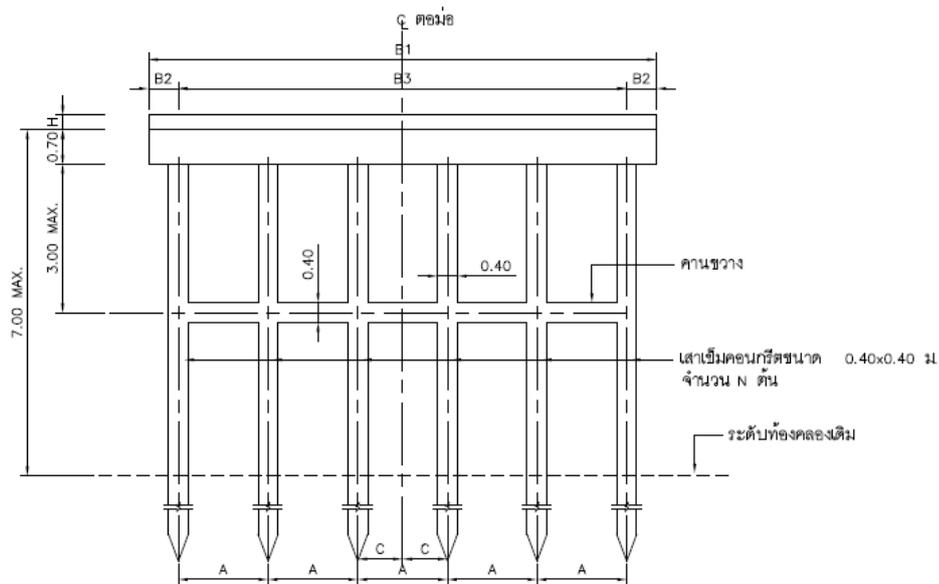


1. บทนำ

โดยทั่วไป เมื่อโครงการหมู่บ้านจัดสรรจำเป็นต้องมีการสร้างสะพานเพื่อข้ามคูคลองในโครงการ มักเลือกใช้รูปแบบของสะพานช่วงสั้นจากแบบมาตรฐานของหน่วยงานราชการ เช่น กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท เป็นต้น รูปแบบที่เลือกใช้สำหรับความยาวช่วงสะพานไม่เกินประมาณ 10 เมตร ส่วนมากจะมีลักษณะดังรูปที่ 1 คือ ใช้คานคอนกรีตอัดแรงหน้ากว้างประมาณ 1 เมตร (Plank girder) วางพาดตามทิศการจราจร ลงบนตอม่อสะพานแบบเสาตึบ (Pile-bent) สำหรับบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลซึ่งมีสภาพชั้นดินอ่อนหนา ตอม่อมีลักษณะดังรูปที่ 2 คือ ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงตึบเดี่ยว โดยตอกให้หัวเสาเข็มพ่นน้ำ จากนั้นจึงหล่อคานขวางคานหัวเสาเข็มและหล่อเสาเข็มเสริมเหล็กขนาดเท่ากับเสาเข็มขึ้นไปรับคานรับพื้นสะพาน (Bent cap)



รูปที่ 1 รูปแบบพื้นสะพานช่วงสั้นจากแบบมาตรฐาน (กรมทางหลวงชนบท, 2556)



รูปที่ 2 รูปแบบตอม่อสะพานแบบตึบจากแบบมาตรฐาน (กรมทางหลวงชนบท, 2556)



การหล่อในส่วนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกลางน้ำเป็นงานที่มีความยุ่งยาก ในกรณีที่ต้องหล่อเหล็กเรียงหรือต้องการปรับรูปแบบโครงสร้างในส่วนนี้ วิธีที่กระทบรูปแบบเดิมน้อยที่สุด คือ การใช้เสาเข็มต่อกับคานรับพื้นสะพานโดยตรง (รูปที่ 3 แบบที่ 2) ไม่ต้องหล่อเสาคอนกรีตกับที่ และหล่อคานขวางต่อเข้ากับด้านข้างของเสาเข็มภายหลัง รูปแบบนี้มีข้อเสียคือ ความยุ่งยากในการเจาะด้านข้างของเสาเข็มเพื่อยึดเหล็กเสริมหลักของคานขวาง เนื่องจากหน้าตัดของเสาเข็มเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูขนาด 0.40 m x 0.40 m และเหล็กเสริมหลักของคานขวางมีขนาดใหญ่ (25 mm) ทำให้จำเป็นต้องเจาะเสาเข็มทะลุเป็นระยะถึง 0.40 m นอกจากนี้เนื่องจากคานขวางมีขนาดเท่ากับเสาเข็ม ทำให้เป็นการยากที่จะเจาะรูเจาะขนาดใหญ่ในตำแหน่งที่มีเหล็กเสริมอยู่ก่อนข้างหนาแน่น

รูปแบบทางเลือกที่เป็นไปได้คือรูปแบบหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบเดิมคือ เปลี่ยนเสาเข็มเป็นหน้าตัดรูปตัวโอขนาด 0.40 m x 0.40 m และต่อกันขึ้นไปต่อกับคานรับพื้นสะพานโดยตรงเช่นเดียวกับรูปแบบทางเลือกแรก และปรับลดขนาดความกว้างของคานขวางและใช้เหล็กเสริมขนาดเล็กลง (รูปที่ 3 แบบที่ 3) ทำให้รูเจาะมีขนาดเล็กลงและอยู่ในตำแหน่งของเอวของหน้าตัดตัวโอ ทำให้ทำการเจาะทะลุตัวเสาเข็มได้ง่ายขึ้น แต่มีข้อเสียคือ เสาเข็มมีสติเฟสและความสามารถในการรับแรงลดลง การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มมากขึ้น ทำให้ผลของการขยายตัวของโมเมนต์คดเนื่องจากแรงกดในแนวตั้ง (P-δ effect) มากขึ้น และจำเป็นต้องออกแบบทุกชิ้นส่วนใหม่

2. วัตถุประสงค์

1. นำเสนอรูปแบบรายละเอียดของต่อมอแบบเสาดับที่ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปตัวโอต่อกับคานรับพื้นสะพานโดยตรง

2. ทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักของ

2.1 ต่อมอตามแบบมาตรฐานซึ่งใช้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ เชื่อมต่อคานขวางกับคานรับพื้นสะพาน

2.2 ต่อมอที่ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมต่อกับคานรับพื้นสะพานโดยตรง

2.3 ต่อมอที่ใช้เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหน้าตัดรูปตัวโอต่อกับคานรับพื้นสะพานโดยตรง

ทั้งนี้เป็นการพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักแนวตั้งบนชั้นดินซึ่งพิจารณาเป็นตัวแทนชั้นดินอ่อนของบริเวณกรุงเทพมหานคร

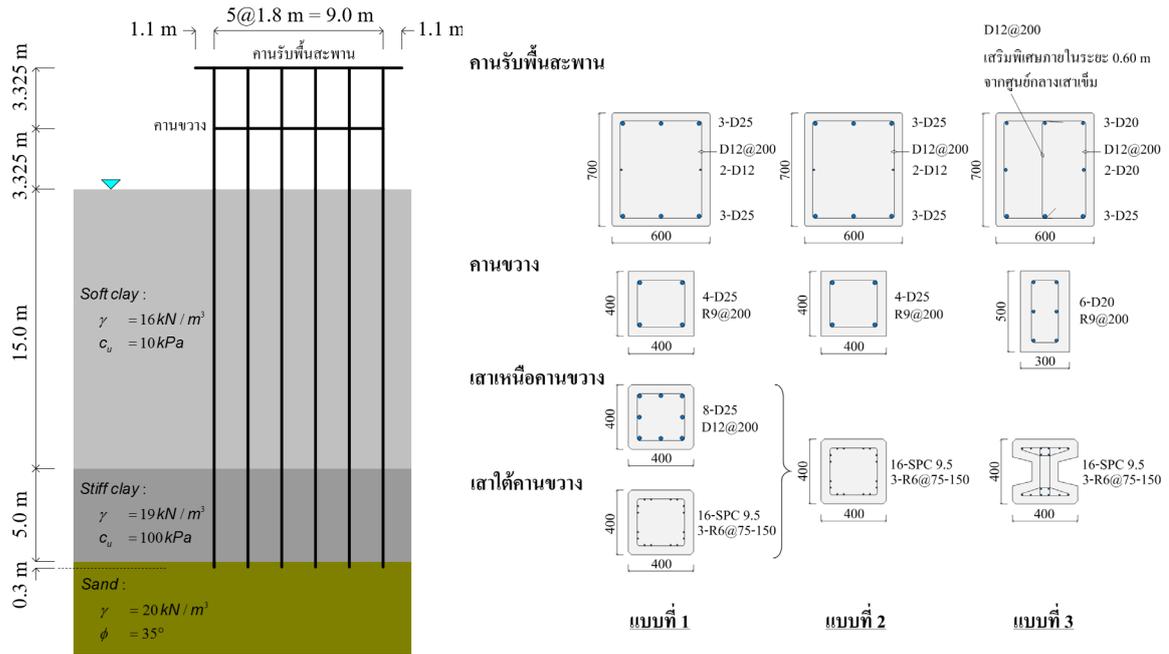
3. อุปกรณ์และวิธีการ / วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง 3 มิติโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ (Material nonlinearity) และความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูป (Geometrical nonlinearity) โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

3.1 แบบจำลองของโครงสร้างในทิศตั้งฉากการจราจร รายละเอียดของแต่ละชิ้นส่วนที่ใช้ในแบบจำลองทั้ง 3 แบบ และชั้นดินที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3 โดยไม่มีฐานรองรับที่หัวเสาในทิศการจราจรเนื่องจากไม่คิดผลของการค้ำยันโดยพื้นสะพานผ่านแผ่นขางรองสะพาน จำลองชิ้นส่วน โครงสร้างด้วยเอลิเมนต์ 1 มิติ (Frame element) โดยแบ่งเสาแต่ละต้นส่วนเหนือดินออกเป็น 10 เอลิเมนต์ ส่วนใต้ดิน 30 เอลิเมนต์ และแบ่งคานรับสะพานออกเป็น 143 เอลิเมนต์เพื่อสะดวกต่อการกระจายแรงกระทำจากพื้นสะพานและล้อรถบรรทุกลงที่จุดต่อของเอลิเมนต์



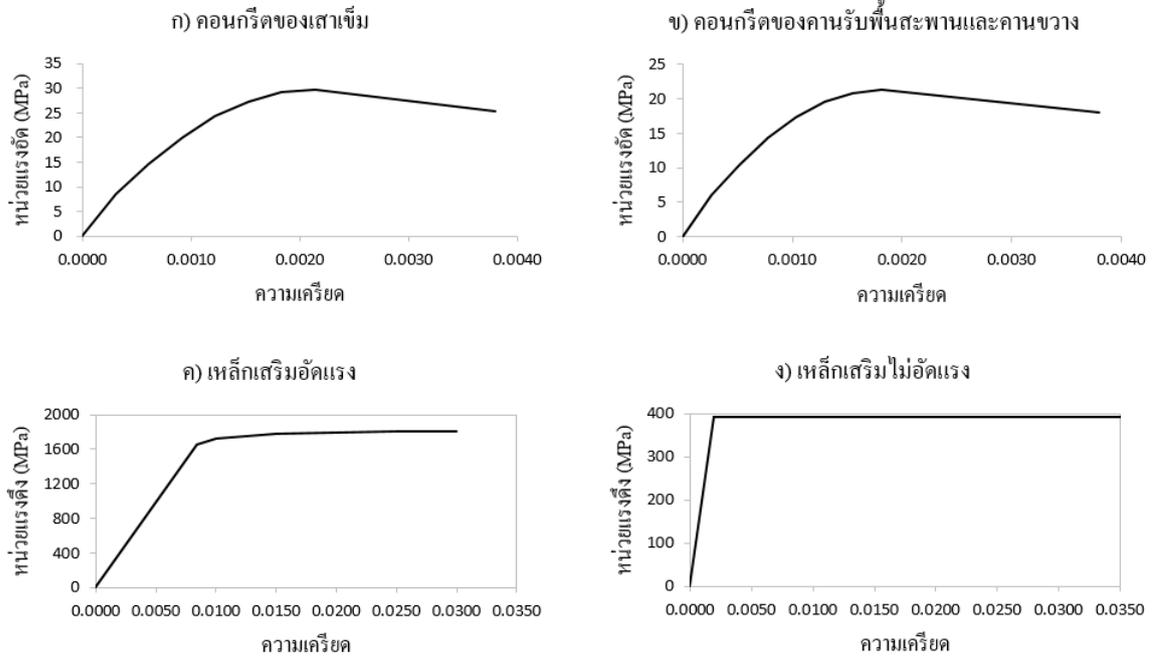
การพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริม มีเฉพาะในส่วนของพฤติกรรมภายใต้แรงแนวแกน และโมเมนต์ดัด จุดเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ของเสาที่อยู่ใต้ดินถูกรองรับด้วยสปริงที่มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear spring) ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองการปฏิสัมพันธ์ของเสาเชื่อมกับดิน



รูปที่ 3 ลักษณะแบบจำลองของโครงสร้างและชั้นดิน

3.2 คอนกรีตของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงมีกำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกที่ 28 วัน เท่ากับ 35 MPa ในขณะที่ของชั้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่า 25 MPa เหล็กเสริมธรรมดาขนาดตั้งแต่ 12 mm ขึ้นไปเป็นชั้นคุณภาพ SD40 เหล็กเสริมอัดแรงเป็นชั้นคุณภาพ 1860 ประเภทความพ่อนคลายต่ำและอยู่ภายใต้ความเครียดดึงจากการอัดแรง 5×10^{-3}

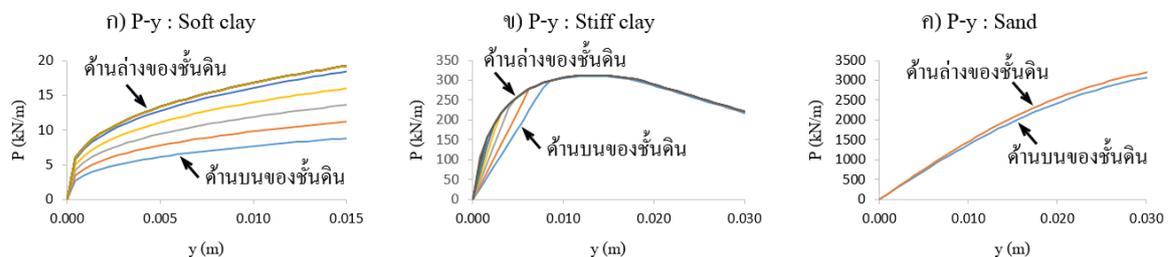
3.3 แบบจำลองวัสดุสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4 โดยในส่วนของคอนกรีต ใช้แบบจำลองภายใต้แรงอัดตามรูปที่ 4 ก) และ ข) ซึ่งปรับมาจากรูปแบบของ Hognestad โดยมีการลดค่าหน่วยแรงอัดสูงสุดลงเนื่องจากความแตกต่างของค่ากำลังของคอนกรีตรูปทรงกระบอกกับค่าใน โครงสร้างจริง (Wight, 2016) ในส่วนการรับแรงดึงใช้สมการเส้นตรงโดยกำหนดค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ โมดูลัสแตกหัก (Modulus of rupture) ที่ความเครียด 132×10^{-6} และใช้แบบจำลองตามรูปที่ 4 ค) และ ง) สำหรับเหล็กภายใต้แรงดึงและแรงอัด โดยของเหล็กเสริมอัดแรงใช้สมการตาม PCI (1992) และของเหล็กเสริมธรรมดาเป็นแบบอีลาสติก-พลาสติกที่ไม่คิดผลของการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain hardening)



รูปที่ 4 แบบจำลองวัสดุสำหรับคอนกรีตและเหล็กเสริม

3.4 พิจารณาการปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มกับชั้นดินโดยรอบด้วยการใช้สปริง 3 ประเภทรองรับส่วนของเอลิเมนต์ของเสาเข็มที่อยู่ใต้ดิน ดังนี้

3.4.1 สปริงที่รองรับการเคลื่อนที่ด้านข้างตลอดความลึกของเสาเข็ม คำนวณจากแบบจำลอง P-y โดยในส่วนของดินเหนียวอ่อนใช้แบบจำลองของ Matlock (1970) ส่วนของดินเหนียวแข็งใช้แบบจำลองของ Reese & Welch (1975) และส่วนของทรายใช้แบบจำลองของ O'Neill & Dumnivant (1984) ความสัมพันธ์ P-y ทั้งหมดมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและขึ้นกับความลึกจากผิวดินดังแสดงในรูปที่ 5

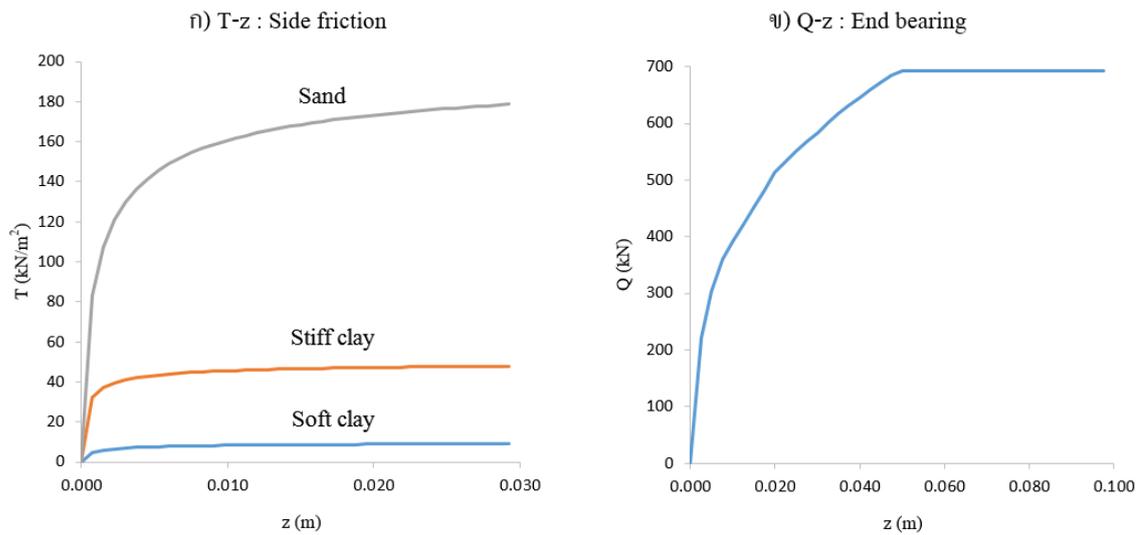


รูปที่ 5 แบบจำลอง P-y สำหรับการรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม

3.4.2 สปริงที่รองรับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งมี 2 ส่วนคือ ส่วนที่รองรับตลอดความลึกของเสาเข็มอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานจากดิน คำนวณจากแบบจำลอง T-z ของ McVay, O'Brien, Townsend, Bloomquist, and

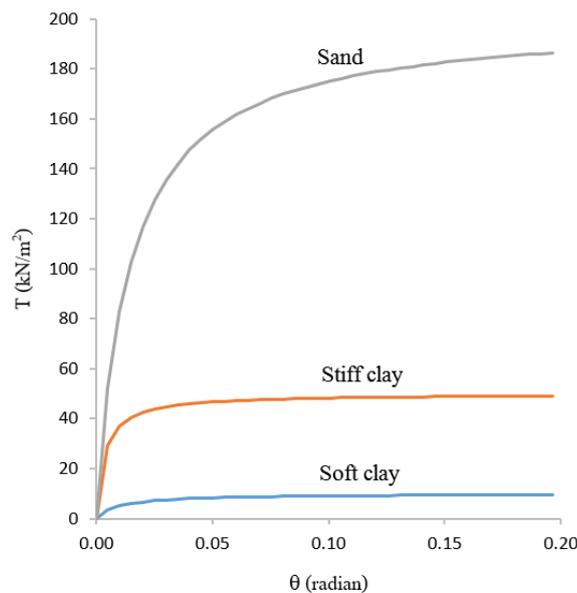


Caliendo (1989) ส่วนที่รองรับที่ปลายล่างอันเนื่องมาจากแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End bearing) ใช้แบบจำลอง Q-z ของ API RP2A LFRD (1993) ทั้งความสัมพันธ์ T-z และ Q-z มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลอง T-z และ Q-z สำหรับการรับแรงแนวตั้งของเสาเข็ม

3.4.3 สปริงที่รองรับการบิดรอบแกนของเสาเข็ม คำนวณจากแบบจำลอง T-θ ในรูปแบบของ McVay, Hays, and Hoit (1996) ซึ่งมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลอง T- θ สำหรับการรับแรงบิดของเสาเข็ม



3.5. น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของตอม่อ พิจารณาเฉพาะน้ำหนักในแนวตั้ง ประกอบด้วย

3.5.1 น้ำหนักของตัวตอม่อเอง

3.5.2 น้ำหนักของตัวสะพานที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีช่วงสะพานยาว 10 เมตรจากทั้ง 2 ฝั่งของตอม่อ โดยเพื่อน้ำหนักของผิวลาดข้างหนา 0.05 m น้ำหนักจรบนทางเท้า 5 kN/m²

3.5.3 น้ำหนักจรจากรถบรรทุกออกแบบ ในที่นี้เลือกใช้รถบรรทุก AASHTO HS20-44 ซึ่งพิจารณาว่าเหมาะสมกับสะพานที่ใช้ในโครงการหมู่บ้านจัดสรร และเป็นไปตามระเบียบกรุงเทพมหานคร ว่าด้วยการขออนุญาตก่อสร้างสะพานข้ามคลอง พ.ศ. 2549 โดยเพื่อผลของแรงกระแทก 30%

3.5.4 การตรวจสอบที่สภาวะประลัยใช้ตัวคูณน้ำหนักบรรทุกคงที่เท่ากับ 1.30 และตัวคูณน้ำหนักบรรทุกจรรวมการกระแทกเท่ากับ 1.67 ตามข้อกำหนดของ AASHTO (2002)

4. ผลการวิจัย

รูปที่ 8 และ 9 แสดงสรุปผลการคำนวณของเสาเข็มที่มีการโยกตัวมากที่สุด ขณะที่รถบรรทุก 2 เลนวิ่งในทิศเดียวกันและเบียดชิดกันที่สุด โดยที่คันหนึ่งอยู่ชิดขอบทางเท้าและเพลาลังของรถทั้งสองคันข้ามพื้นรอยต่อของพื้นสะพานพอดี ทั้งนี้พิจารณาว่าเป็นภาวะที่เกิดชั่วคราว ในการคำนวณจึงไม่ลดสติเฟนสของเสาจากผลของการคืบ

4.1 ภายใต้น้ำหนักใช้งานสูงสุด (Full service load)

4.1.1 ตอม่อทั้ง 3 แบบ โยกตัวตามทิศจรรยาจรมากกว่าด้านข้างมาก แบบที่ 1 และ 2 มีการโยกตัวใกล้เคียงกัน (ตามทิศจรรยาจร 15 mm) แบบที่ 3 โยกตัวมากที่สุด (21 mm) ใกล้เคียงกับเสาเข็มด้านไกลรถบรรทุก ซึ่งโยกตัว 19 mm)

4.1.2 ไม่เกิดความเครียดดึงในเสาตอม่อแบบที่ 2 และ 3 ขณะที่แบบที่ 1 เกิดความเครียดดึงในเสา 114×10^{-6} ที่ตำแหน่งใกล้จุดต่อของเสาที่อนบนกับคานขวาง

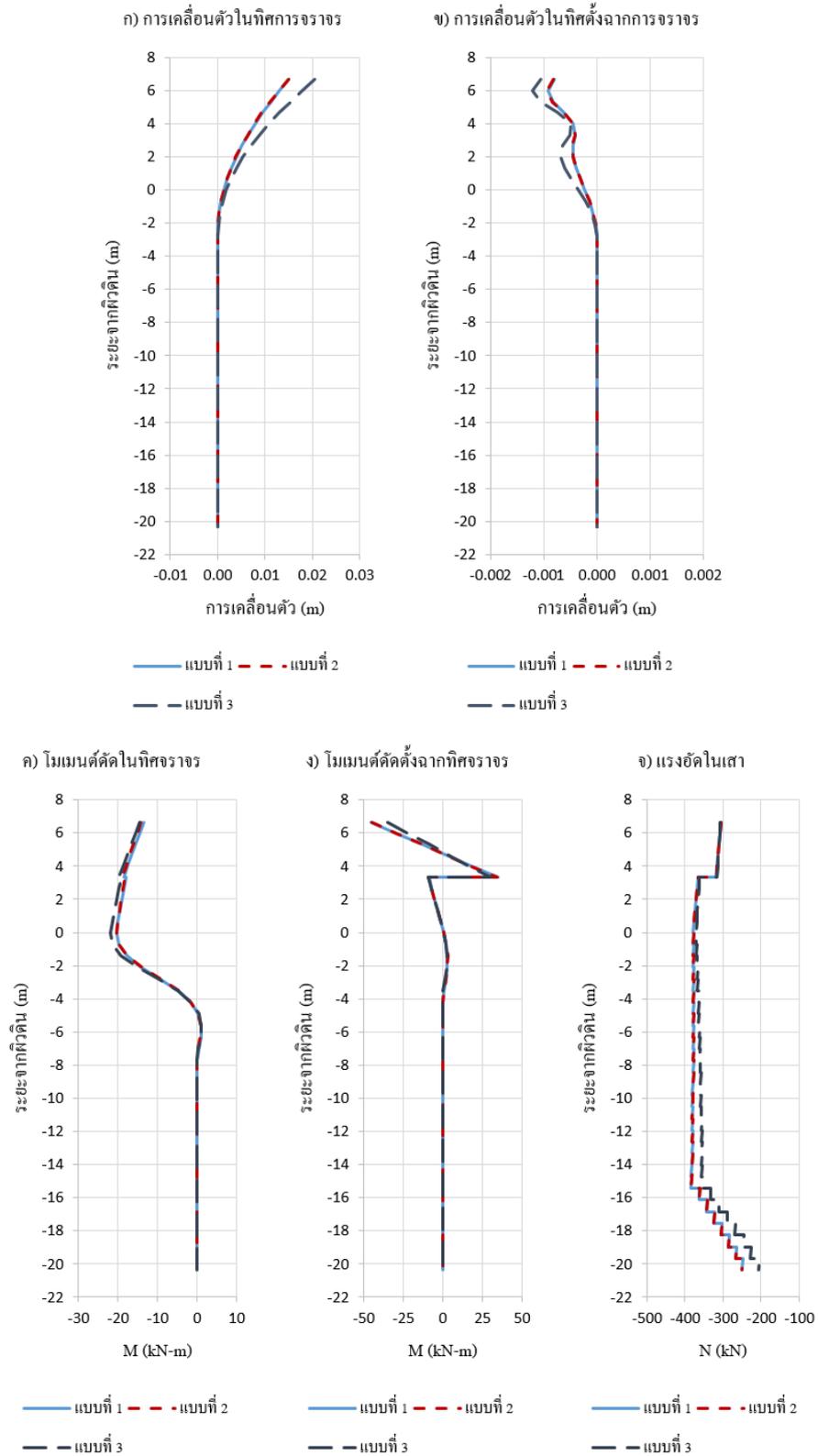
4.1.3 แรงอัดสูงสุดในเสาเข็มที่ระดับดินของตอม่อทั้ง 3 แบบ เกิดที่เสาด้านกลางและมีค่าประมาณ 430 kN และถ้าลดความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนจาก 15 เมตรลงเหลือ 10 เมตร จะมีค่าประมาณ 450 kN

4.2 ภายใต้น้ำหนักประลัย (Ultimate load)

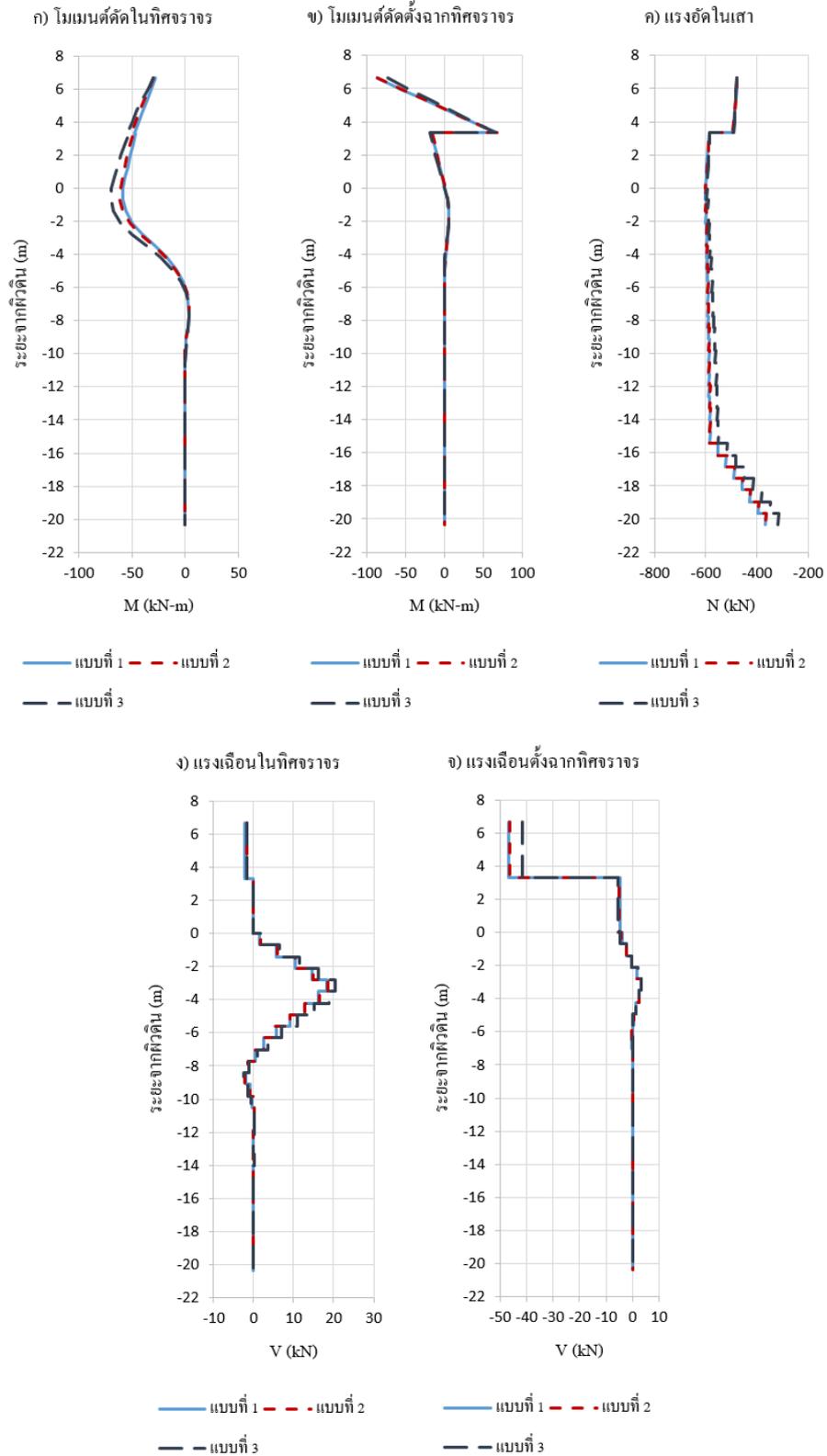
4.2.1 จุดที่วิกฤตที่สุดของเสาอยู่ที่ตำแหน่งใกล้จุดต่อของเสาที่อนบนกับคานรับสะพานและคานขวาง ภายใต้อัดและโมเมนต์ดัด 2 ทิศ อัตราส่วนของแรงภายในที่สภาวะประลัยเทียบกับกำลังระบุ (Ultimate load/Nominal resistance Ratio: L/R ratio) สูงสุดของตอม่อทั้ง 3 แบบ คือ 0.37 0.40 และ 0.51 ตามลำดับ

4.2.2 แรงเฉือนและแรงบิดมีค่าต่ำ จากการวิเคราะห์หน้าตัดพบว่า แรงเฉือนในทิศตั้งฉากจรรยาจรซึ่งมีค่ามากกว่าและอยู่ในส่วนของเสาเหนือคานขวาง ทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนสูงสุดต่ำกว่าครึ่งหนึ่งค่าเฉลี่ยที่คอนกรีตรับได้

4.2.3 L/R ratio สูงสุดของคานรับพื้นสะพานของตอม่อทั้ง 3 แบบ ภายใต้อัดและโมเมนต์ดัดซึ่งเป็นแรงอัดและโมเมนต์ดัด 2 ทิศ คือ 0.57 0.58 และ 0.59 ตามลำดับ ขณะที่ของคานขวางซึ่งอยู่ภายใต้แรงดึงและโมเมนต์ดัด 2 ทิศ คือ 0.75 0.75 และ 0.61 ตามลำดับ โดยของคานรับพื้นสะพาน เกิดในตำแหน่งระหว่างเสาช่วงกลาง ขณะที่ของคานขวางเกิด ณ จุดต่อของคานขวางและเสาเข็มด้านชิดรถบรรทุก



รูปที่ 8 การเคลื่อนที่และแรงภายในเสาริมด้านซิดรบนรถทุก ภายใต้น้ำหนักใช้งานสูงสุด (รวมแรงกระแทก)



รูปที่ 9 แรงภายในเสริมด้านซิดรอบรทุก ภายใต้น้ำหนักประลัย (รวมแรงกระทำ)



5. การอภิปรายผล

5.1 เนื่องจากรอยต่อของพื้นสะพานตามแบบมาตรฐานมีความกว้าง 20 mm แสดงว่า ที่น้ำหนักใช้งานสูงสุด พื้นสะพานของแบบที่ 3 มีโอกาสมากกว่าที่จะเกิดการชนกันเล็กน้อยที่รอยต่อ แต่ทั้ง 3 แบบจะเกิดการชนกันที่น้ำหนักบรรทุกประลัยแน่นอน ผลคือทำให้เกิดแรงช่วยรองรับหัวเสาในทิศจากร มีผลให้แรงภายในเสาดลดลง แต่อาจส่งผลกระทบต่ออาการออกเบบพื้นสะพาน รอยต่อ เหล็กเดือย และแผ่นยางรองสะพาน

5.2 ต่อม่อมีการเคลื่อนตัวด้านข้างและบิดตัวน้อยมาก แม้อยู่ภายใต้รูปแบบของน้ำหนักจรที่ 1 ไม่สมมาตรที่สุด

5.3 ภายใต้น้ำหนักใช้งานสูงสุด เสาคอมแบบที่ 2 และ 3 ไม่อยู่ในสภาพแตกร้าว เพราะการอัดแรงทำให้ไม่เกิดความเครียดดึง แต่เสาของแบบที่ 1 มีโอกาสที่จะแตกร้าวและมีการ โยคตัวมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากความเครียดดึงมีค่าอยู่ในช่วงที่อาจทำให้เกิดหน่วยแรงเท่ากับ โมดูลัสแตกหัก ซึ่งในที่นี้กำหนดไว้ที่ 132×10^6

5.4 แรงอัดสูงสุดในเสาเข็มที่ระดับดิน แม้วรวมผลแรงกระแทกจากน้ำหนักจร 30% ก็มีค่าในช่วง 430-450 kN ไม่เกินข้อกำหนดของแบบมาตรฐานซึ่งระบุน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็มไว้ที่ 50 ตัน

5.5 แม้อันรับสะพานและคานขวางของตอม่อแบบที่ 3 มีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าแบบที่ 1 และ 2 แต่มีความสามารถในการรับแรงแนวแกนและ โมเมนต์ดัด 2 ทิศที่ใกล้เคียงหรือดีกว่า

5.6 จุดต่อของเสาเข้ากับคานรับพื้นสะพาน และของคานขวางเข้ากับเสาเข็ม เป็นจุดวิกฤตที่สภาวะประลัย ทำให้ต้องพิจารณาการยึดเหล็กเสริมหลักอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะตอม่อแบบที่ 2 และ 3 เนื่องจากเสาเป็นคอนกรีตอัดแรง แต่ตอม่อแบบที่ 1 มีจุดที่ต้องระวังแม้จะไม่ต้องเจาะ-ยึดเหล็กเสริมหลัก คือ จุดต่อของคานขวางเข้ากับเสาเข็ม เนื่องจากมีค่า L/R ratio ภายใต้แรงดึงและ โมเมนต์ดัดสูงสุด และต้องยึดเหล็กเสริมขนาดใหญ่ (25 mm) เข้ากับเสาขนาดเล็ก (0.40 m)

6. บทสรุป

การศึกษานี้นำเสนอรูปแบบทางเลือกของตอม่อแบบเสาดับของสะพานที่มีความยาวช่วงสะพานไม่เกิน 10 เมตร สำหรับโครงการหมู่บ้านจัดสรรในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักแนวตั้งของตอม่อสะพาน 3 รูปแบบ ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้าง 3 มิติที่จำลองชิ้นส่วนโครงสร้างด้วยเอลิเมนต์ 1 มิติ และถูกรองรับด้วยสปริงที่เป็นตัวแทนของการปฏิสัมพันธ์กับดิน โดยคำนึงถึงพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง และของวัสดุคอนกรีต เหล็กเสริม และดิน

การศึกษาแสดงว่า จากการพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักแนวตั้ง หากสามารถยึดเหล็กเสริมของเสาเข็มเข้ากับคานรับพื้นสะพาน และของคานขวางเข้ากับเสาเข็มอย่างเหมาะสม สามารถใช้รูปแบบทางเลือกที่ใช้เสาเข็มต่อกับคานรับสะพาน โดยตรงแทนรูปแบบมาตรฐานที่ต้องหล่อเสาคอนกรีตกลางน้ำ หากต้องการปรับรายละเอียดจากแบบมาตรฐานน้อยที่สุดและพิจารณาเฉพาะพฤติกรรมโดยรวม รูปแบบทางเลือกที่ใช้เสาเข็มสี่เหลี่ยมมีความเหมาะสมกว่า เนื่องจากโยคตัวน้อย เสาไม่เกิดการแตกร้าวขณะใช้งานและมีส่วนปลอดภัยมากที่ภาวะประลัย ส่วนรูปแบบทางเลือกที่ใช้เสาเข็มตัวโอโดยที่มีการปรับรายละเอียดของคานรับพื้นสะพานและคานขวาง เป็นทางเลือกที่ทำงานง่ายกว่าในการเจาะและยึดเหล็กเสริมหลักของคานขวางเข้ากับตัวเสาเข็ม แม้มีการ โยคตัวมากกว่าและเสามี



ส่วนปลอดภัยต่ำกว่าของแบบมาตรฐานเล็กน้อย นอกจากนี้คานรับพื้นสะพานและคานขวางที่ปรับรายละเอียดแล้วมีส่วนปลอดภัยมากกว่ารูปแบบตามแบบมาตรฐาน แม้มีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่า

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.พิสิทธิ์ ชันดิวัฒน์กุล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับข้อมูลของดินและแบบจำลองการปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มกับดิน

8. เอกสารอ้างอิง

- กรมทางหลวงชนบท. (2556). *แบบมาตรฐานงานสะพาน*. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: กรมทางหลวงชนบท.
- Wight, J. K. (2016). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. (7th Edition). New Jersey: Pearson.
- Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI). (1992). *PCI Design Handbook*. (4th Edition). Chicago, Illinois: Precast/Prestressed Concrete Institute.
- Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. *Second Annual Offshore Technology Conference: Vol. 1*. (pp. 577-594). Houston, Texas.
- Reese, L. C., and Welch, R. C. (1975). Lateral loading of deep foundations in stiff clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 101(7), 633-649.
- O'Neill, M. W. and Dinnavan, T. W. (1984). A study of effect of scale, velocity, and cyclic degradability on laterally loaded single piles in overconsolidated clay: Report No.UHCE 84-7. Houston, Texas: University of Houston.
- McVay, M. C., O'Brien, M., Townsend, F. C., Bloomquist, D. G., and Caliendo, J. A. (1989). Numerical analysis of vertically loaded pile groups. *ASCE Foundation Engineering Congress*. (pp. 675-690). Northwestern University, Illinois.
- American Petroleum Institute (API). (1993). *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-load and resistance factor design: RP2A-LRFD*. (1st Edition). Washington, District of Columbia: American Petroleum Institute.
- McVay, M.C., Hays, C., and Hoyt, M. (1996). Development of a coupled bridge superstructure–foundation finite element code: Final report B-8415. Gainesville, Florida: University of Florida.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2002). Standard specifications for highway bridges. (17th Edition). Washington, District of Columbia: American Association of State Highway and Transportation Officials.