การเสริมกำลังฐานรากสะพานด้วยเสาเข็มชนิดสปันไมโครไพล์

REINFORCEMENT OF SCOURED PILE GROUP BRIDGE FOUNDATIONS WITH SPUN MICRO PILES

อภิชัย วชิระปราการพงษ์[1], จุติ ใคร่ครวญ[1], จิระศักดิ์ วัชรกรโยธิน[1,*] และ ภวินท์ ฤทธิรุฒม์[1]
[1]สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท จ.กรุงเทพฯ
[*]Corresponding author address: bookjirasak@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการซ่อมแซมตอม่อสะพานที่ถูกลดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเนื่องมาจากการที่ดินใต้ฐานรากถูกกัดเซาะโดยกระแสน้ำ ด้วยการใช้สปันไมโครไพล์เสริมกำลังฐานรากสะพานมิตรภาพดงป่าลัน-หนองมะจับ ต.แม่ฝาย อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ (สะพาน ชม. 015) ซึ่งเปิดใช้งานสะพานมาเป็นระยะเวลากว่า 30 ปี กรมทางหลวงชนบทได้ทำการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักฐานรากเสาเข็มกลุ่มโดยตรวจสอบความยาวเสาเข็มด้วยวิธีคลื่นไซสมิคผ่านการเจาะขนาน (Parallel Seismic Test) และได้คำนวณย้อนกลับกำลังรับน้ำหนักของฐานราก จากการประเมินพบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเพียง 1.04 ซึ่งในทางวิศวกรรมปฐพีซึ่งนิยมใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า 3 ถือว่ากรณีนี้มีความอันตรายเป็นอย่างมาก ถ้าสะพานนี้ถูกกัดเซาะเพิ่มขึ้นและถูกเปิดใช้งานต่อไปโดยไม่ซ่อมแซมอาจเกิดการพังทลายได้ กรมทางหลวงชนบทจึงได้คัดเลือกวิธีการซ่อมแซมโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของพื้นที่ในการก่อสร้าง ความจำเป็นในการเปิดใช้งานสะพานในระหว่างการซ่อมแซม งบประมาณในการก่อสร้าง และความปลอดภัยระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งได้พิจารณาข้อจำกัดต่าง ๆ แล้วจึงเลือกใช้การเสริมกำลังด้วยเสาเข็มด้วยสปันไมโครไพล์ซึ่งถูกตอกลึกถึงชั้นดินแข็ง จากนั้นทำให้น้ำหนักโครงสร้างสะพานถูกถ่ายผ่านโครงสร้างชั่วคราวลงบนเสาเข็มใหม่ที่ตอกไว้ ทำการยกสะพานขึ้นเล็กน้อยเพื่อถ่ายน้ำหนักสะพานลงสู่เสาเข็มและทำการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมท่อเหล็กรูปพรรณเชื่อมต่อระหว่างฐานรากเดิมและเสาเข็มใหม่ ผลการดำเนินงานก่อสร้างแสดงให้เห็นว่าตอม่อสะพานบนเสาเข็มสปันไมโครไพล์สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างสะพานและได้มาตรฐานตามหลักวิศวกรรม

คำสำคัญ: *สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก, อัตราส่วนความปลอดภัย, สปันไมโครไพล์, การเสริมกำลังฐานราก, การกัดเซาะ*

Abstract

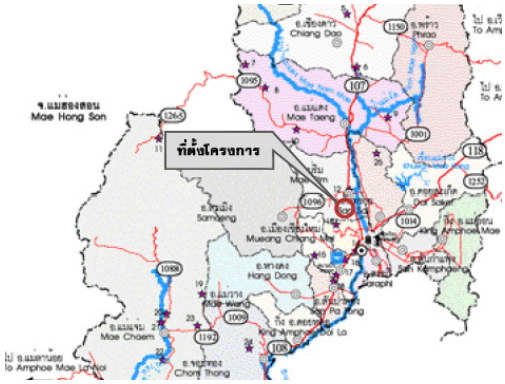
This article demonstrates an approach to reinforce the bridge's foundations which its safety factor had been reduced to a dangerous level by scouring, with the use of spun micro piles. The bridge was built more than 30 years ago at Dong Pa Lan, Mae Fai, Amphoe San Sai, Chiang Mai. The Department of Rural Roads investigated the existing piles' lengths embedded in the soil using Parallel Seismic Test and then recalculated the capacity of the foundations. The calculation suggested that one of the foundations had a safety factor of 1.04 which was considered extremely dangerous from a geotechnical engineering aspect since a value higher than 3.0 is typical. A collapse would occur if the bridge was subjected to more scour and traffic without reinforcement. The department examined a few solutions to the problem considering limitations on the construction space, necessity of traffic during the repairing process, cost, and safety for the construction, and then decided to reinforce the foundations with spun micro piles. The process began with pressing the piles around the old foundations into the hard soil layer by using hydraulic jacks. The weight of the superstructure was transferred by temporary steel structures to the new micro piles. The bridge was then lifted a little to pre-load the piles. Finally, concrete columns reinforced with steel tubes were cast to connect the old foundations with the micro piles. The result suggested that the spun micro piles were able to support the weight of the bridge and complied with the design criteria and engineering standards.

Keywords: *Reinforced concrete bridge, safety factor, spun micro pile, foundation reinforcement, scouring*

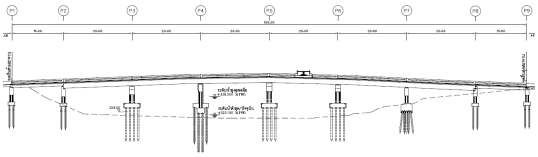
1. บทนำ

สะพานมิตรภาพดงป่าลัน-หนองมะจับข้ามแม่น้ำปิง ตั้งอยู่ที่ตำบลแม่ฝาย อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ (สะพาน ชม. 015) ดังที่แสดงในรูปที่ 1 โดยเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 2 ช่องจราจร มีความยาว 150 เมตร แบ่งออกเป็น 8 โดยช่วงริมทั้ง 2 ด้านยาวช่วงละ 15 เมตร และช่วงกลาง 6 ช่วง ยาวช่วงละ 20 เมตร มีตอม่อตับที่ 3 ถึง 6 ตั้งอยู่กลางน้ำดังที่แสดงในรูปที่ 2 โดยตอม่อสะพานเป็นตอม่อแบบเสาเข็มกลุ่ม สะพานก่อสร้างเสร็จเมื่อปี พ.ศ. 2540 และถูกเปิดใช้งานมากกว่า 30 ปี จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่า ดินใต้ฐานรากถูกกัดเซาะโดยกระแสน้ำและเนื่องจากการดูด

ทรายบริเวณลุ่มแม่น้ำปิง ทำให้มองเห็นเสาเข็มใต้ฐานรากชัดเจน ตามที่แสดงในรูปที่ 3 พบว่าเสาเข็มที่อยู่เหนือดินมีความยาวมากกว่า 4 เมตร และมีความชะลูด ส่งผลให้ความลึกของเสาเข็มที่ยังจมอยู่ในดินมีความยาวลดน้อยลง ซึ่งหากยังคงเปิดใช้งานต่อไปอาจจะเกิดอันตรายต่อประชาชนและตัวสะพาน กรมทางหลวงชนบทจึงได้ทำการสำรวจและออกแบบเพื่อซ่อมแซมสะพานแห่งนี้



รูปที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งสะพาน



รูปที่ 2 แบบด้านข้างของสะพาน

รูปที่ 3 ภาพการถูกกัดเซาะของฐานรากเสาเข็มกลุ่ม

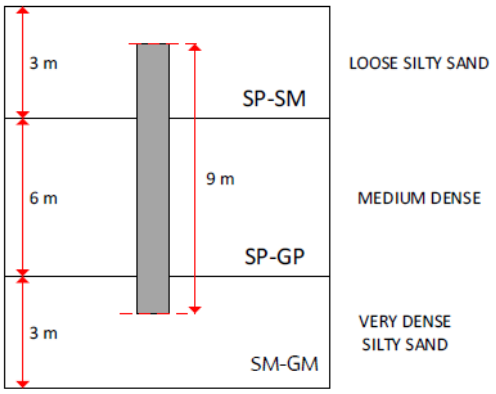
2. การประเมินความเสียหายและการเลือกวิธีการซ่อมแซมสะพาน

2.1. การเจาะสำรวจดิน

ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการคำนวณตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ในโครงการนี้ได้มีการเจาะสำรวจดินและทำการทดสอบหาความยาวเสาเข็มเดิมที่ฝังอยู่ในดินด้วยวิธีคลื่นขนาน (Parallel Seismic Test) [1] และหากำลังรับน้ำหนักที่ปลายเข็ม (End Bearing) โดยประเมินจากผลดิน พบว่ากำลังรับน้ำหนักที่ปลายเข็มเดิมมีค่า 16.7 ตันต่อต้น ที่ความลึก 6.8 เมตร นับจากใต้ฐานราก แสดงว่าในขณะนั้นเหลือความยาวเสาเข็มในดินเพียงประมาณ 3 เมตร

หลังจากนั้นจะทำการเจาะสำรวจดินไปจนถึงระดับความลึกใหม่สำหรับปลายเสาเข็มสปันไมโครไพล์ที่จะใช้ และคำนวณออกแบบฐานรากเสาเข็มสปันไมโครไพล์เพื่อเสริมกำลังฐานรากให้มีอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่าหรือเท่ากับ 3.0

รูปที่ 4 แสดงข้อมูลลักษณะชั้นดินตามความลึกและตำแหน่งของเสาเข็มใหม่ที่จะใช้เพื่อเสริมกำลังฐานรากสะพาน



รูปที่ 4 แบบจำลองผลการทดสอบเจาะสำรวจชั้นดิน

2.2. การประเมินความเสียหาย

จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่า ฐานรากทุกตับที่อยู่กลางลำน้ำถูกน้ำกัดเซาะดินที่อยู่ข้างใต้ สามารถเห็นเสาเข็มใต้ฐานรากได้ชัดเจน โดยต้นที่ยาวที่สุดยาวถึง 4 เมตรวัดจากท้องน้ำถึงใต้ฐานราก ทำให้เสาเข็มมีความชะลูดและกำลังรับน้ำหนักเองดินรอบๆเสาเข็มลดน้อยลง ด้วยเหตุนี้ ฐานรากจะต้องถูกลดกำลังรับน้ำหนักตามหลักการออกแบบโครงสร้าง ความเสียหายดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานราก โดยจากการประเมินพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยของฐานรากที่เหลืออยู่มีค่าเพียง 1.04 ซึ่งในทางวิศวกรรมปฐพีนิยมใช้ค่ามากกว่า 2.5 หรือ 3.0 ทำให้ในกรณีนี้มีความอันตรายเป็นอย่างมากถ้ายังคงใช้งานต่อไป กรมทางหลวงชนบทจึงได้ดำเนินการประเมินและคัดเลือกวิธีการซ่อมแซมโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของพื้นที่ในการก่อสร้าง ความจำเป็นในการเปิดใช้งานสะพานในระหว่างการซ่อมแซม งบประมาณในการก่อสร้าง และความปลอดภัยระหว่างการก่อสร้าง

จากทางเลือกต่างๆซึ่งประกอบด้วย การทุบรื้อและก่อสร้างสะพานใหม่ทั้งหมด แต่กรมทางหลวงชนบทได้พิจารณาแล้วเห็นว่าวิธีนี้ต้องใช้งบประมาณเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อประชาชนในพื้นที่ คือ ประชาชนไม่สามารถเดินทางข้ามลำน้ำได้โดยจะต้องไปใช้สะพานข้างเคียงแทน ซึ่งก่อให้เกิดความลำบากสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลาในการเดินทาง ในการสร้างสะพานใหม่จะใช้งบประมาณทั้งสิ้น 36,000,000 บาท

อีกหนึ่งทางเลือกคือวิธีเสริมกำลังของฐานรากเดิม วิธีนี้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทุบโครงสร้างเดิมทิ้ง ทำให้ประชาชนยังคงใช้สะพานในการเดินทางสัญจรไปมาในระหว่างการก่อสร้างได้ และยังใช้งบประมาณน้อยกว่ามากเพราะไม่ได้ก่อสร้างสะพานใหม่ทั้งหมด

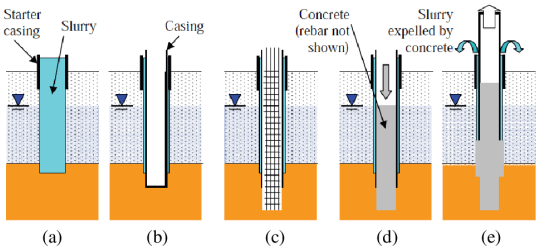
2.3. ทางเลือกวิธีการซ่อมแซม

การก่อสร้างฐานรากใหม่ในตำแหน่งของฐานรากเดิมมีความท้าทายและมีหลายทางเลือกโดยขึ้นอยู่กับกับสภาพความเสียหายและสภาพแวดล้อมของพื้นที่ โดยทางหน่วยงานถนนของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (The Federal Highway Administration: FHWA) ได้นำเสนอทางเลือกและกรณีศึกษามากมายในการซ่อมฐานรากสะพาน [2] โดยวิธีไปทั่วที่เลือกใช้สำหรับการซ่อมฐานรากสะพานในประเทศไทยคือการสร้างโครงเฟรม (Portal Frame) คร่อมฐานรากเดิม [3] ดังที่แสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 5 การซ่อมแซมฐานรากสะพานด้วยวิธีโครงเฟรม

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าหนึ่งในฐานรากของสะพานแห่งเดียวนี้ได้ถูกซ่อมแซมด้วยวิธีโครงเฟรมมาก่อนแล้ว โดยวิธีนี้จำเป็นที่จะต้องสร้างฐานรากใหม่จำนวน 2 ตับข้างๆ ฐานรากเดิม และวางพื้นสะพานบนคานหัวเสา (Cap Beam) ที่ก่อสร้างใหม่ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังคงสิ้นเปลืองเนื่องจากต้องสร้างฐานรากใหม่จำนวนมากกว่าฐานรากเดิมและยังต้องออกแบบคานหัวเสาให้แข็งแรงและยาวมากขึ้น โดยจากการประเมินถ้าเลือกใช้วิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 19,000,000 บาท

อีกหนึ่งชนิดของฐานรากที่มีความนิยมคือการใช้เสาเข็มเจาะ (Drilled Shaft) โดยวิธีนี้จะทำการเจาะดินนำลงไปก่อนจนถึงระดับความลึกที่ต้องการโดยใส่ท่อเหล็กปลอก (Casing) และสารละลายป้องกันดินถล่มลงในหลุมเจาะ หลังจากนั้นจะทำการใส่เหล็กเสริมและเทคอนกรีตเพื่อหล่อเสาเข็มใหม่ เมื่อเทคอนกรีตแล้วเสร็จจะดึงท่อเหล็กปลอกออก [4] ตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 6 โดยวิธีนี้มีข้อดีคือสามารถเจาะเสาเข็มไปยังระดับความลึกของชั้นดินแข็งที่ต้องการได้ อีกทั้งยังออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างเสาเข็มได้มากกว่าเสาเข็มตอกหล่อสำเร็จ เนื่องจากสามารถกำหนดขนาดเสาเข็ม ปริมาณเหล็กเสริม และความแข็งแรงของวัสดุเหล็กและคอนกรีตได้อย่างไรก็ตาม วิธีการหล่อเสาเข็มชนิดนี้ใช้พื้นที่ก่อสร้างมากเนื่องจากต้องใช้ปั้นจั่นขนาดใหญ่ เหมาะสำหรับการก่อสร้างสะพานใหม่ และไม่สามารถทำงานใต้ฐานรากเดิมได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การซ่อมแซมด้วยเสาเข็มเจาะไม่เหมาะกับลักษณะของโครงการนี้



รูปที่ 6 ขั้นตอนการหล่อเสาเข็มแบบเจาะ Drilled shaft [4]

จากการพิจารณาทางเลือกต่างๆ ข้างต้น กรมทางหลวงชนบทจึงได้พิจารณาทางเลือกใหม่โดยใช้นวัตกรรมไมโครไพล์ซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมในปัจจุบันในการใช้ซ่อมแซมฐานรากของอาคารที่อยู่อาศัยมาประยุกต์ใช้กับการซ่อมแซมสะพาน เนื่องจากมีความสะดวกในการก่อสร้างเพราะมีความยาวเป็นท่อนๆ สามารถเปิดใช้งานจราจรในระหว่างการก่อสร้างได้ ตอม่อใหม่ไม่ขวางลำน้ำโดยตำแหน่งและใกล้เคียงกับตอม่อเดิม และมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่ถูกกว่า โดยเสาเข็มชนิดนี้จะสามารถตอกได้ใต้ฐานรากเดิมได้ทันที เนื่องจากมีความยาวเพียง 1.5 เมตร หลังจากนั้นจะทำการก่อสร้างฐานรากใหม่และถ่ายน้ำหนักสะพานลงบนเสาเข็มสปันไมโครไพล์ จากการประเมินค่าใช้จ่ายโครงการ การซ่อมแซมด้วยวิธีนี้จะใช้งบประมาณทั้งสิ้นโดยประมาณ 11,950,000 บาท ในระยะเวลาโครงการ 360 วัน ซึ่งถูกกว่าการซ่อมแซมโดยใช้วิธีโครงเฟรม

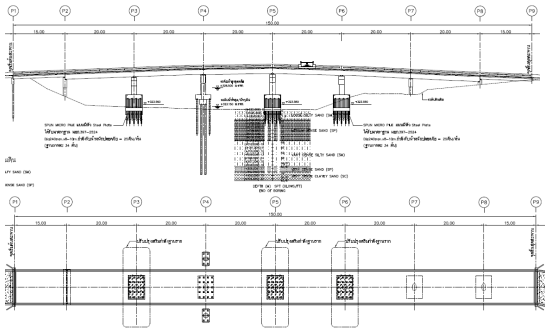
2.4. สปันไมโครไพล์ (SPUN MICRO PILES)

เสาเข็มสปันไมโครไพล์เป็นเสาเข็มคอนกรีตประเภทหล่อสำเร็จมีทั้งหน้าตัดแบบกลมหรือสี่เหลี่ยม มีโครงเหล็กฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีตโดยรอบในขณะที่ตรงกลางกลวงดังที่แสดงในรูปที่ 7 เสาเข็มชนิดนี้ถูกผลิตโดยการเหวี่ยงคอนกรีตในแบบหล่อที่หมุนรอบแกนยาวของเสาเข็มด้วยความเร่งมากกว่าความเร่งโน้มถ่วง ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความหนาแน่นสูงและแข็งแรงกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยทั่วไปสปันไมโครไพล์จะรับน้ำหนักปลอดภัยได้ 20 ถึง 40 ตันต่อต้น และมีความยาวอยู่ในช่วง 1 ถึง 1.5 เมตร ความยาวนี้สามารถเพิ่มได้โดยการต่อเชื่อมหัวเสาเข็ม [5]

เสาเข็มสปันไมโครไพล์จะช่วยลดการสั่นสะเทือนในขณะตอกเนื่องจากการที่มีรูตรงกลาง และยังช่วยลดแรงดันดินในขณะตอกอีกด้วยเพราะดินสามารถขึ้นทางรูกลวงของเสาเข็ม [5] การขนส่งเสาเข็มยังมีความสะดวกมากเนื่องจากขนาดและความยาวของเสาเข็มน้อย ปั้นจั่นที่ใช้ตอกเสาเข็มก็มีขนาดเล็กตาม ทำให้ประหยัดพื้นที่ในการก่อสร้างเหมาะสำหรับการทำงานในพื้นที่จำกัดหรือพื้นที่

ที่ยากต่อการก่อสร้าง จากปัจจัยข้างต้นทำให้ทางกรมทางหลวงชนบทเลือกใช้เสาเข็มสปันไมโครไพล์ในการเสริมกำลังฐานรากของสะพาน โดยทำการเสริมกำลังฐานรากตับที่ 3 5 และ 6 ซึ่งอยู่ใต้ระดับน้ำตามที่แสดงในรูปที่ 8 จากนั้นจะทำการก่อสร้างกำแพงปิดตอม่อป้องกันรอบฐานรากดังกล่าว เพื่อลดการกัดเซาะของดินใต้ฐานรากใหม่นี้ และป้องกันท่อนไม้หรือเศษวัตถุที่ไหลมาตามลำน้ำมาติดเสาของตอม่อที่ใช้ถ่ายน้ำหนักสู่เสาเข็มด้วย

รูปที่ 7 สปันไมโครไพล์ [6]



รูปที่ 8 แบบแสดงแผนการซ่อมแซมสะพาน

เสาเข็มสปันไมโครไพล์ที่ใช้ในโครงการนี้ได้รับมาตรฐานมอก. 397-2534 [7] มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 ซม. ยาวท่อนละ 1.5 เมตร โดยมีกำลังรับน้ำหนักปลอดภัย 25 ตันต่อต้น

3. ขั้นตอนการก่อสร้าง

การเสริมกำลังฐานรากด้วยเสาเข็มสปันไมโครไพล์ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ การจัดเตรียมสถานที่ วัสดุและเครื่องมือ งานขุดดินและเตรียมพื้นที่ในการทำงาน การตอกเสาเข็มสปันไมโครไพล์ การถ่ายน้ำหนักของสะพานลงบนเสาเข็มใหม่ การก่อสร้างฐานรากและกำแพงป้องกันฐานราก งานปรับดินกลับคืนและการเก็บความเรียบร้อยของงาน

3.1. การจัดเตรียมสถานที่ วัสดุและเครื่องมือ

ขั้นตอนแรกของการทำงานประกอบด้วยการเตรียมสถานที่ เช่น การกั้นเขตพื้นที่การก่อสร้างให้ชัดเจน เพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน การรักษาความปลอดภัยและการรักษาความสะอาด จากนั้นจะทำการจัดเตรียมพื้นที่เก็บของ ย้ายวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ จัดตั้งสาธารณูปโภคที่จำเป็นสำหรับการทำงาน

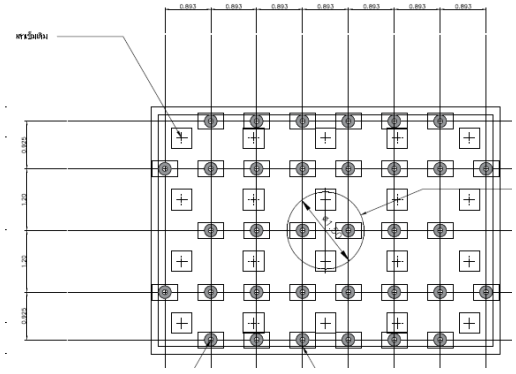
3.2. งานขุดดินและปรับพื้นที่ในการทำงาน

เนื่องจากการเสริมกำลังฐานรากและถ่ายน้ำหนักโครงสร้างลงบนฐานรากใหม่เป็นการทำงานใต้ฐานรากเดิม จึงต้องมีการขุดและถมปรับพื้นที่ลำน้ำเพื่อเป็นสภานที่ทำงานก่อสร้าง และเตรียมกำแพงดินรอบฐานราก ตามรูปที่ 9

รูปที่ 9 การเตรียมพื้นที่ก่อนการก่อสร้าง

3.3. การตอกเสาเข็มสปันไมโครไพล์

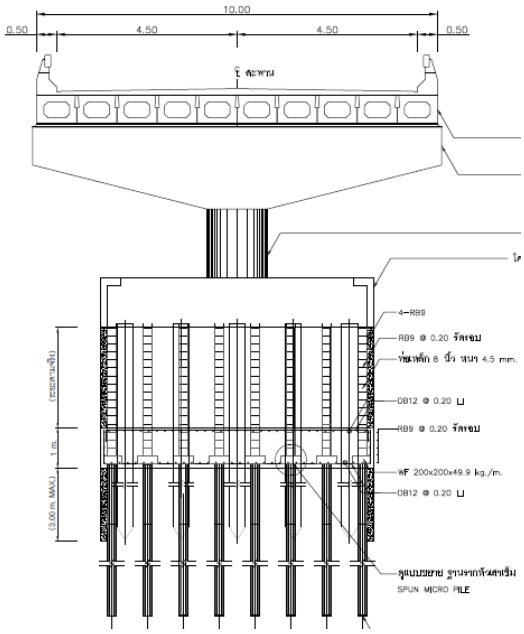
ขั้นตอนการตอกเสาเข็มไมโครไพล์เริ่มต้นด้วยการวางผังตำแหน่งที่จะตอกเสาเข็มตามแบบที่แสดงในรูปที่ 10 จากนั้นทำการประกอบติดตั้งชุดโครงเหล็กสำหรับการตอกเข็ม การเจาะนำร่องการตอกและเชื่อมเสาเข็มสปันไมโครไพล์



รูปที่ 10 แบบแสดงตำแหน่งของเสาเข็มไมโ8รไพล์ใต้ฐานรากเดิม

โดยทั่วไปการตอกเสาเข็มสปันไมโครไพล์ จะใช้ปั้นจั่นเฉพาะที่มีขนาดเล็กกว่าที่ใช้กับเสาเข็มทั่วไป (Micro driven equipment) อย่างไรก็ตามในโครงการนี้เป็นการตอกเสาเข็มใต้ฐานราก ซึ่งไม่สามารถทำงานด้วยปันจั่นได้ จึงได้ทำการแก้ปัญหาด้วยการกดโดยใช้แม่แรงไฮดรอลิคซึ่งค้ำยันกับท้องฐานรากเดิม แต่จากผลการทดสอบดินพบว่า มีชั้นหินอยู่ที่ประมาณความลึก 4 ถึง 5 เมตรจาก

ระดับผิวดินใต้ฐานรากเดิม ทำให้ไม่สามารถใช้เพียงการกดเสาเข็มสปันไมโครไพล์ด้วยแม่แรงไฮดรอลิคเพียงอย่างเดียวจนถึงระดับความลึก 10.5 เมตรตามที่ออกแบบได้ จึงได้แก้ปัญหานี้โดยประยุกต์ใช้วิธีของเสาเข็มเจาะ โดยเจาะนำไปถึงความลึก 7 เมตรก่อน และกดเสาเข็มด้วยแม่แรงไฮดรอลิคต่อจนถึงระดับความลึกตามที่ออกแบบ รูปที่ 11 แสดงแบบของฐานรากใหม่ที่มีการเสริมกำลังด้วยเสาเข็มไมโครไพล์



รูปที่ 11 แบบแสดงรูปตัดด้านข้างของฐานรากใหม่

ในระหว่างที่เจาะหลุมเสาเข็มจะใส่ปลอกเหล็กชั่วคราว (Casing) ที่ถูกออกแบบเป็นท่อนๆ มีความยาวใกล้เคียงกับเสาเข็มสปันไมโครไพล์ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าตัวเสาเข็มเล็กน้อยตามรูปที่ 12 ระหว่างการเจาะจะทำการพ่นเศษดินและหินกรวดที่อยู่ในท่อเหล็กออก โดยการเติมน้ำลงในหลุมเสาเป่าออกผ่านท่อ PVC โดยการอัดอากาศลงในหลุม ในกรณีนี้จะทำให้เกิดกาลักน้ำขึ้นโดยน้ำจะนำพาเศษดินและหินออกมายังปากหลุมด้วย หลังจากที่ได้ความลึก 7 เมตร จะทำการหย่อนเสาเข็มเสาเข็มทีละต้นและต่อเชื่อมรอยต่อเสาเข็มแต่ละต้นจนถึงระดับความลึกที่เจาะนำ หลังจากนั้นจะทำการกดเสาเข็มส่วนที่เหลือด้วยแม่แรงไฮดรอลิคโดยค้ำยันกับใต้ฐานรากเดิม ตามที่แสดงในรูปที่ 13

รูปที่ 12 ปลอกเหล็กชั่วคราว และเสาเข็มสปันไมโครไพล์

3.4. การถ่ายน้ำหนักของสะพานลงบนเสาเข็มใหม่

หลังจากที่ได้ตอกเสาเข็มและตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว จะมีการติดตั้งค้ำยันชั่วคราวเพื่อใช้ในการถ่ายน้ำหนักโครงสร้างลงสู่เสาเข็มใหม่ทุกต้น เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเสาเข็มและฐานรากใหม่สามารถรับน้ำหนักได้ตามที่คำนวณไว้ น้ำหนักของสะพานจะถูกถ่ายน้ำหนักผ่านเสาเข็มใหม่โดยผ่านโครงสร้างเหล็กค้ำยันชั่วคราว โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิคยกพื้นสะพานขึ้นเล็กน้อย น้ำหนักของสะพานจะกดลงบนเสาเข็มใหม่ หลังจากนั้นจะทำการหล่อฐานรากใหม่เพื่อเป็นโครงสร้างถาวรบนเสาเข็มที่ตอกไว้

รูปที่ 13 การกดเสาเข็มลงดินด้วยแม่แรงไฮดรอลิค

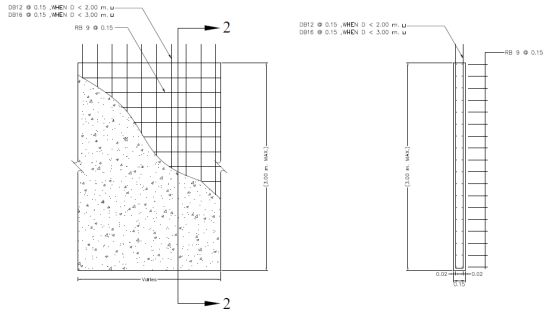
ในการถ่ายน้ำหนักของสะพานเสาเข็มลงสู่เสาเข็มใหม่ จะใช้การค้ำยันผ่านโครงสร้างท่อเหล็กรูปพรรณยึดเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่หัวเสาเข็มสปันไมโครไพล์แต่ละต้น และยึดกับด้านใต้ของฐานรากเดิม ดังที่แสดงในรูปที่ 14 โดยการออกแบบเสาเหล็กที่ใช้ จะต้องสามารถรองรับกำลังมากกว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้นได้ ในที่นี้ใช้ท่อเหล็กขนาด 8 นิ้ว หนา 4.5 มม. โดยมีกำลังรับน้ำหนักประลัยในแนวแกนเท่ากับ 31.8 ตันต่อต้น ซึ่งมากกว่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มที่ 25 ตันต่อต้น

รูปที่ 14 โครงสร้างท่อเหล็กรูปพรรณสำหรับถ่ายน้ำหนักสะพานลงบนเสาเข็มสปันไมโครไพล์

3.5. การก่อสร้างฐานรากใหม่และกำแพงป้องกันฐานราก

หลังจากทำการถ่ายน้ำหนักของสะพานเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการหล่อฐานรากใหม่บนเสาเข็มสปันไมโครไพล์ที่ตอกไว้เพื่อรองรับน้ำหนักสะพาน ตามรูปที่ 15 และทำการก่อกำแพงคอนกรีตปิดรอบฐานรากเพื่อป้องกันการกัดเซาะและป้องกันท่อนไม้หรือเศษวัตถุที่ไหลมาตามลำน้ำ ดังแบบที่แสดงในรูปที่ 16

รูปที่ 15 ขั้นตอนการหล่อฐานรากใหม่



รูปที่ 16 แบบแสดงกำแพงปิดฐานราก

3.6. งานปรับดินกลับคืนและการเก็บความเรียบร้อย

เมื่อก่อสร้างสิ้นสุดลง ได้ทำการปรับสภาพดินและพื้นที่เพื่อให้กลับไปสู่สภาพเดิม ให้ลำน้ำไหลผ่านตามปกติ และทำการตรวจสอบความเรียบร้อยของโครงสร้าง รูปที่ 17 แสดงภาพสะพานที่ถูกซ่อมแซมแล้วเสร็จ

รูปที่ 17 สะพานที่ถูกเสริมกำลังฐานรากเรียบร้อย

4. การประเมินตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ตอก

4.1. การประเมินกำลังรับน้ำหนักของฐานรากเดิม

ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มไมโครไพล์ใหม่ จะออกแบบให้มีกำลังรับน้ำหนักสูงกว่ากำลังของฐานรากเดิมที่ประเมินได้เพื่อความปลอดภัยและการใช้งานในระยะยาว โดยการประเมินกำลังรับน้ำหนักของฐานรากเดิมนั้น สามารถกระทำได้โดยคำนวณกำลังรับน้ำหนักของดินย้อนกลับจากขนาดและจำนวนของเสาเข็มเดิม โดยไม่จำเป็นต้องคำนวณกำลังรับน้ำหนักทางโครงสร้างเนื่องจากความแข็งแรงทางโครงสร้างยังคงดีอยู่

ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของดินใต้ฐานรากเสาเข็มเดิม จะถือว่าเสาเข็มเดิมแทบไม่มีดินรอบๆ หลงเหลืออยู่ตลอดความยาว เพราะการตรวจสอบความยาวเสาเข็มแต่ละต้นที่ยังคงฝังอยู่ใต้ดินนั้นต้องใช้ค่าใช้จ่ายอย่างมากอีกทั้งดินยังคงถูกกัดกร่อนอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น เพื่อความประหยัดและปลอดภัย จะคำนวณกำลังรับน้ำหนักของดินที่เหลืออยู่จากกำลังที่ปลายเข็ม (End Bearing) เท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงกำลังจากแรงเสียดทาน (Skin Friction) จากนั้นจะทำการออกแบบปริมาณเสาเข็มไมโครไพล์ใหม่เพื่อทดแทนฐานรากเดิมในกรณีที่ดินของเสาเข็มเดิมถูกกัดเซาะออกจนหมดและไม่มีกำลังรับน้ำหนักอีกต่อไป

จากการทดสอบหาความยาวเข็มโดยวิธีส่งคลื่นขนาน (Parallel seismic test) [1] และการเก็บตัวอย่างดินที่ปลายเข็ม พบว่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเดิมมีค่า 16.7 ตันค่อค้น เมื่อรวมกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มทั้ง 20 ต้นต่อฐานราก 1 ตับ พบว่าฐานรากสามารถรับน้ำหนักได้เพียง 334 ตัน

การออกแบบเสาเข็มไมโครไพล์เพื่อซ่อมแซมสะพานแห่งนี้ จะใช้เพียงกำลังที่ปลายเสาเข็ม โดยจะไม่ใช้กำลังแรงเสียดทาน เนื่องจากในอนาคตดินรอบๆเสาเข็มใหม่อาจจะถูกกัดเซาะเพิ่มเติมและสูญเสียกำลังในส่วนนี้ไปเช่นกัน โดยกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็มสามารถคำนวนได้ตามสมการที่ (1) [8] ดังนี้

$$Q_b = q_b A_p \leq 1000\ t/m^2 \quad (1)$$

โดยที่ q_b คือ กำลังรับน้ำหนักที่ปลายเข็มของดิน

A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

เนื่องจากเสาเข็มที่ใช้เป็นชนิดสปันไมโครไพล์ เมื่อทำการตอกเสาเข็มดินจะเข้าไปอัดแน่นอยู่ในรูตรงกลางของหน้าตัด ดังนั้นจะสามารถใช้พื้นที่หน้าตัดเต็มของเสาเข็มได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 453 ตร.ซม. ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่ปลายเข็ม (q_b) ที่ระดับความลึก 10.5 เมตร ได้จากผลการเจาะสำรวจดิน โดยคำนวณผ่านค่า SPT N เฉลี่ยเท่ากับ 68 blow/ft โดยในการคำนวณมีค่าจำกัดที่ 1000 ตันต่อตร.ม. ดังนั้น สามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักสุทธิที่ปลายเข็มได้ 45.3 ตันต่อต้น จะเห็นว่าค่าที่ได้นั้นมากกว่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มสปันไมโครไพล์ต้นละ 25 ตัน โดยคิดเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.81 อย่างไรก็ตาม ค่านี้ยังถือว่ายังน้อยเกินไปสำหรับงานโครงสร้างใต้ดิน ดังนั้น ในการออกแบบจำนวนเสาเข็มจะต้องมีการเพิ่มจำนวนมากกว่าที่ต้องการเพื่อเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัย และทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสปันไมโรไพล์ทุกต้นอีกครั้งหลังจากตอกเสร็จ

จำนวนเสาเข็มสปันไมโครไพล์ที่ต้องการ (N) เพื่อปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักของฐานรากเดิม สามารถคำนวณย้อนกลับได้จากสมการที่ (2) ดังนี้

$$F.S. = \frac{Q_{old} + NQ_{pile}}{Q_{old}} \geq 3 \qquad (2)$$

จะได้ว่า $$N \geq \frac{2Q_{old}}{Q_{pile}}$$

โดยที่ Q_{old} คือ กำลังรับน้ำหนักรวมของฐานรากเดิม

Q_{pile} คือ กำลังรับน้ำหนักต่อต้นของเสาเข็มสปันไมโครไพล์ที่ตอกใหม่

เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนความปลอดภัยเท่า 3 กำลังรับน้ำหนักของฐานรากเดิมเท่ากับ 334 ตัน กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสปันไมโครไพล์เท่ากับ 25 ตันต่อต้น จะสามารถคำนวณปริมาณเสาเข็มที่ต้องตอกเพิ่มจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 27 ต้น ในที่นี้เลือกใช้เสาเข็มใหม่ทั้งหมด 34 ต้นเพื่อเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัย โดยคำนึงถึงความสมมาตรของแบบฐานราก ตามที่แสดงในรูปที่ 7

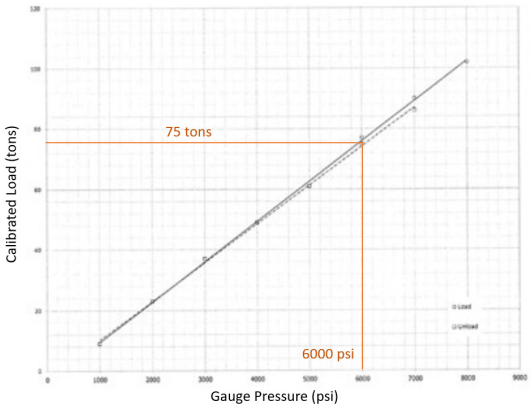
4.2. การกระเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ก่อสร้างได้

การตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ตอกเสร็จ สามารถประเมินได้จากการวัดอ่านค่าความดันของแม่แรงไฮดรอลิคซึ่งถูกทดสอบปรับค่า (Calibration) เพื่ออ่านค่าแรงในหน่วยตัน ตามมาตรฐาน ISO 17025:2017 [9]

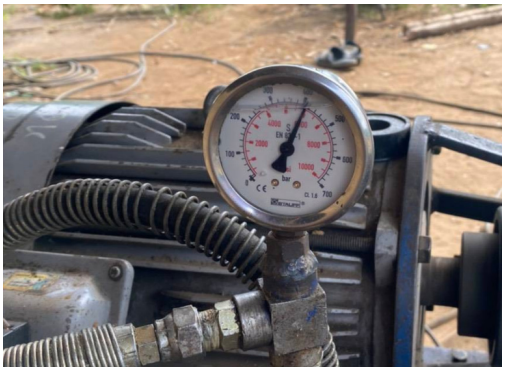
ตามที่อธิบายในหัวข้อ 3.3 เสาเข็มสปันไมโครไพล์ถูกหย่อนลงสู่ความลึก 7 เมตร จากนั้นทำการกดด้วยแม่แรงไฮดรอลิคจนถึงความลึก 10 เมตร หลังจากได้ความลึกนี้ได้นำแม่แรงไฮดรอลิคที่มีมาตรวัดความดันในหน่วย psi เพื่อวัดค่าแรงด้านทานในหน่วยตันของเสาเข็มโดยตรงผ่านกราฟการปรับค่าที่ได้มาจากผลการทดสอบโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [10] ดังที่แสดงในรูปที่ 18 ในที่นี้กำหนดให้เสาเข็มแต่ละต้นมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3.0

ดังนั้น เสาเข็มที่มีกำลังปลอดภัย 25 ตันจะต้องถูกกดด้วยแม่แรงไฮดรอลิคและสามารถรับน้ำหนัก 75 ตันได้ จากการทดสอบพบว่า เสาเข็มแต่ละต้นจะจมเพิ่มเล็กน้อยเมื่อเพิ่มแรงในการกดและจะหยุดนิ่งเมื่อหยุดเพิ่มแรงที่ 75 ตัน ทำให้มั่นใจได้ว่าเสาเข็มแต่ละต้นสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ออกแบบไว้

รูปที่ 19 แสดงมาตรวัดความดันที่ใช้ทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในขณะที่อ่านค่า 6000 psi (สีแดง) ซึ่งเทียบกับน้ำหนัก 75 ตัน



รูปที่ 18 มาตรวัดความดันไฮดรอลิคสำหรับทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม



รูปที่ 19 มาตรวัดความดันไฮดรอลิคสำหรับทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

5. สรุป

กรมทางหลวงชนบทได้ดำเนินการซ่อมแซมและเสริมกำลังสะพานมิตรภาพดงป่าลัน-หนองมะจับ ตั้งอยู่ที่ตำบลแม่ฝาย อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ (สะพาน ชม. 015) ซึ่งได้รับความเสียหายจากการกัดเซาะเนื่องจากกระแสน้ำของดินใต้ฐานรากเสาเข็มกลุ่ม จากการประเมินกำลังรับน้ำหนักก่อนการซ่อมแซมพบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าเพียง 1.04 ซึ่งถือว่ามีความอันตรายเป็นอย่างมาก กรมทางหลวงชนบทจึงได้พิจารณาทางเลือกต่างๆ ในการออกแบบซ่อมแซมสะพาน โดยคำนึงถึง จากการประเมินปัจจัยด้านความมั่นคงแข็งแรง ความทนทานในระยะยาว ข้อจำกัดทางการ

ก่อสร้าง งบประมาณที่ใช้ในการซ่อมแซม และความจำเป็นในการเปิดใช้งานในระหว่างการก่อสร้าง การเสริมกำลังฐานรากใหม่ด้วยเสาเข็มสปันไมโครไพล์ใต้ฐานรากเดิม และการก่อสร้างฐานรากใหม่เพื่อเสริมกำลังจึงเป็นวิธีที่คุ้มค่าและเหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมสะพานแห่งนี้

ขั้นตอนในการออกแบบและก่อสร้างเริ่มจากการประเมินกำลังรับน้ำหนักที่เหลืออยู่ของฐานรากเดิม และออกแบบฐานรากเสาเข็มไมโครไพล์ใหม่ทดแทนฐานรากเดิมที่อยู่ในลำน้ำ โดยขั้นตอนการก่อสร้างนั้นประกอบด้วยการตอกเสาเข็มไมโครไพล์ โดยการเจาะนำ จากนั้นจึงกดด้วยแม่แรงไฮดรอลิคจนถึงความลึกตามที่ออกแบบ การติดตั้งโครงเหล็กค้ำยัน การถ่ายน้ำหนักโครงสร้างสะพานลงบนเสาเข็มไมโครไพล์ และการก่อสร้างฐานรากใหม่ทดแทน และการก่อสร้างกำแพงปิดตอม่อ ซึ่งในขณะที่ก่อสร้างประชาชนยังคงใช้สะพานสัญจรได้ตามปกติยกเว้นในขั้นตอนการถ่ายน้ำหนักและระหว่างการสร้างฐานรากใหม่ ซึ่งต้องมีการปิดการจราจรชั่วคราว ทำให้วิธีการซ่อมแซมนี้ส่งผลกระทบต่อประชาชนในพื้นที่น้อยที่สุด

การเสริมกำลังฐานรากเสาเข็มกลุ่มด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย สามารถประเดินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้นได้ชัดเจนในทันทีที่ตอกเสร็จด้วยการกดและวัดกำลังรับน้ำหนักด้วยแม่แรงไฮดรอกลิค เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักที่ออกแบบ ผลการวัดค่าพบว่าเสาเข็มที่ตอกทุกต้นมีกำลังเพียงพอต่อการรับน้ำหนักสะพานโดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า 3 และทำให้สามารถใช้งานสะพานได้อีกเป็นเวลานานและสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้

6. การอ้างอิง

[1] GEO Vision geophysical services. (2020). *Parallel Seismic Test Method.* GEO Vision geophysical services co. ltd., Corona, CA, USA.

[2] U.S. Department of Transportation, The Federal Highway Administration. (2016). *Protocols for the Assessment and Repair of Bridge Foundations.* The Federal Highway Administration, McLean, VA, USA.

[3] D. Kumar et al. (2013). *Design of Bridge Component.* BML Munjal University, India.

[4] J. Garder et.al. (2012). *Development of a Database for Drilled Shaft Foundation Testing (DSHAFT).* Semantic Scholar. Corpus ID: 108019510.

[5] C. Irawan, P. Suprobo, P. Raka, and R. Djamaluddin. (2015). *A review of prestressed concrete pile with circular hollow section (Spun pile).* Jurnal Teknologi. 72(5) DOI: 10.11113/jt.v72.3950.

[6] ภูมิสยาม. (2559). *เสาเข็มสปันไมโครไพล์.* บริษัท ภูมิสยาม ซัพพลาย จำกัด ประเทศไทย. https://www.bhumisiam/micro-pile051017/

[7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2537). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงโดยใช้แรงเหวี่ยง (มอก. 398-2537).* ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 111 ตอนที่ 93 ง.

[8] Hamzah M. Beakawi Al-Hashemi. (2016). *End Bearing Capacity of Pile Foundations.* University of Bahrain. DOI: 10.13140/RG.2.2.21744.46080

[9] International Organization for Standardization. (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO 17025:2017).* International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.

[10] คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2018). *Calibration of Hydraulic Jack Report (Reference no. CHJ-84/61).* คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย.