การซ่อมแซมตอม่อสะพานที่ทรุดตัวด้วยเสาเข็มชนิดสปันไมโครไพล์

REPAIR OF SETTLED PILE BENT BRIDGE FOUNDATIONS WITH SPUN MICRO PILES

อภิชัย วชิระปราการพงษ์[1], จุติ ใคร่ครวญ[1], วิชัย ยู[1,*] และ ธันวา วิบูลย์ศรัณย์[1]
[1]สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท จ.กรุงเทพฯ
[*]Corresponding author address: w.noengine@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการซ่อมแซมตอม่อสะพานใต้ฐานรากซึ่งถูกกัดเซาะโดยกระแสน้ำทำให้เกิดการทรุดตัว โดยแก้ไขด้วยการใช้สปันไมโครไพล์ทดแทนเสาเข็มฐานรากเดิมของสะพานข้ามคลองระแนะ อำเภอพิปูน จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเปิดใช้งานสะพานมาเป็นเวลากว่า 27 ปี กรมทางหลวงชนบทได้ทำการตรวจสอบสะพานแล้วพบว่า ฐานรากสะพานแห่งนี้เป็นแบบเสาเข็มเดี่ยว (Pile bent) สภาพความเสียหายที่พบได้แก่ การทรุดตัวของตอม่อสะพานจำนวนสองตอม่อจากแปดตอม่อกว่า 7 และ 10 เซนติเมตร ทำให้พื้นสะพานไม่อยู่ในแนวระดับเดิม ซึ่งจากความเสียหายดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพานและอาจก่อให้เกิดอันตรายถ้ายังคงใช้งานต่อไป กรมทางหลวงชนบทจึงได้คัดเลือกวิธีการซ่อมแซมโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของพื้นที่ในการก่อสร้าง ความจำเป็นในการเปิดใช้งานสะพานในระหว่างการซ่อมแซม ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และความปลอดภัยระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งได้พิจารณาข้อจำกัดต่าง ๆข้างต้นแล้วจึงเลือกใช้วิธีการก่อสร้างด้วยเสาเข็มสปันไมโครไพล์ทดแทนเสาเข็มฐานรากเดิม โดยการตอกเสาเข็มดังกล่าวถึงบริเวณรอบฐานรากเดิมที่ทรุดตัวถึงชั้นดินแข็ง จากนั้นทำการดีดยกระดับพื้นสะพานและถ่ายน้ำหนักผ่านโครงสร้างชั่วคราวลงบนเสาเข็มสปันไมโครไพล์ใหม่ที่ตอกไว้ จากนั้นได้ทำการก่อสร้างฐานรากและเสาตอม่อรองรับพื้นสะพาน ทำการถ่ายน้ำหนักของสะพานลงสู่ตอม่อที่สร้างใหม่ ผลการดำเนินงานก่อสร้างแสดงให้เห็นว่าตอม่อสะพานบนเสาเข็มสปันไมโครไพล์สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างสะพานและได้มาตรฐานตามหลักวิศวกรรม

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

Abstract

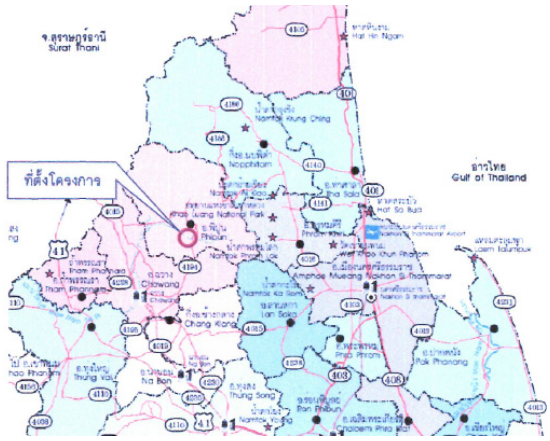
This article demonstrates an approach to reinforce bridge's foundations, which had been settled from scouring, with the use of spun micro piles to substitute the existing piles. The bridge was built 27 years ago crossing Ranae Canal in Amphoe Phipun, Nakhon Si Thammarat. The bridge has eight pile bent foundations. The Department of Rural Roads-investigated the bridge in 2020 and found that two foundations in the middle of the channel settled down by 7 and 10 centimeters from the initial elevation, causing a shift in the bridge's horizontal alignment. This deflection significantly reduced the capacity of the bridge and would cause danger if it was still opened for traffic. 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 during construction, and then decided to reinforce the foundations with spun micro piles. The process began with driving the micro piles around the old foundations and constructing temporary structures to transfer the weight of the bridge to the new piles. The superstructure of the bridge was then lifted using hydraulic jacks against the load-transferring structures to obtain the desired level. Finally, new reinforced concrete foundations were cast on the micro piles to support the bridge. The result suggested 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, settlement, spun micro pile, foundation reinforcement, scouring*

1. บทนำ

สะพานข้ามคลองระแนะเป็นสะพานชุมชน ตั้งอยู่ในอำเภอพิปูน จังหวัดนครศรีธรรมราช ดังที่แสดงในแผนที่รูปที่ 1 สะพานแห่งนี้เป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก มี 2 ช่องจราจร ยาว 70 เมตร แบ่งออกเป็น 7 ช่วงความยาว ช่วงละ 10 เมตร มีฐานรากจำนวนทั้งหมด 8 ตอม่อ โดยตอม่อตับที่ 3 ถึง 7 รวม 4 ตอม่อ ตั้งอยู่ในน้ำ โดยตอม่อสะพานเป็นตอม่อแบบเสาเข็มเดี่ยว (Pile bent) สะพานแห่งนี้ก่อสร้างเสร็จและถูกเปิดใช้งานมากว่า 20 ปี จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่า ตอม่อตับที่ 5 และ 6 ที่อยู่กึ่งกลางลำน้ำ ได้เกิดการทรุดตัวอันเนื่องมาจากการที่ดินใต้ฐานรากถูกกัดเซาะโดยกระแสน้ำตามรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามสะพานนี้เป็นสะพานของชุมชน แต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นความเสียหายทางโครงสร้างที่ซับซ้อนเกินความ

รับผิดชอบของหน่วยงานชุมชน ทางกรมทางหลวงชนบทจึงได้ทำการออกแบบเพื่อซ่อมแซมและดีดยกระดับสะพาน



รูปที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งสะพาน

รูปที่ 2 ภาพด้านข้างสะพานที่ทรุดตัว

2. การประเมินความเสียหายและการเลือกวิธีซ่อมแซม

2.1. การประเมินความเสียหาย

จากการสำรวจค่าระดับของสะพานพบว่า ตอม่อตับที่ 5 และ 6 ได้ทรุดตัวลงไป 7 และ 10 เซนติเมตรจากตำแหน่งเดิม ทำให้พื้นสะพานไม่อยู่ในแนวระดับเดิม ซึ่งจากความเสียหายดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของสะพานและอาจก่อให้เกิดอันตรายถ้ายังคงใช้งานต่อไป กรมทางหลวงชนบทจึงได้คัดเลือกวิธีการซ่อมแซมโดยคำนึงถึงข้อจำกัดของพื้นที่ในการก่อสร้าง ความจำเป็นในการเปิดใช้งานสะพานในระหว่างการซ่อมแซม ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และความปลอดภัยระหว่างการก่อสร้าง

ทางเลือกต่างๆประกอบด้วย การทุบรื้อทิ้งและก่อสร้างสะพานใหม่ทั้งหมด แต่กรมทางหลวงชนบทได้พิจารณาแล้วเห็นว่าวิธีนี้ต้องใช้งบประมาณมหาศาล อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อประชาชนในพื้นที่ คือ ประชาชนไม่สามารถเดินทางข้ามลำน้ำได้ โดยจะต้องเลี่ยงใช้เส้นทางอีกที่อยู่ไกลเกิน 10 กิโลเมตร ก่อให้เกิดความลำบากสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลาในการเดินทาง โดยการก่อสร้างสะพานใหม่จะใช้งบประมาณประมาณ 16,000,000 บาท

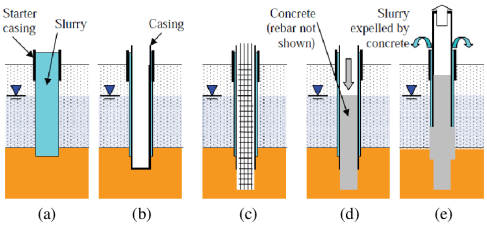
อีกหนึ่งทางเลือกคือวิธีก่อสร้างฐานรากใหม่แทนที่ฐานรากเดิมซึ่งทรุดตัวและดีดยกระดับสะพาน วิธีนี้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทุบโครงสร้างเดิมทิ้ง ทำให้ประชาชนยังคงใช้สะพานในการเดินทางระหว่างการก่อสร้างได้ และยังใช้งบประมาณน้อยกว่ามากเพราะไม่ได้ก่อสร้างสะพานใหม่ทั้งหมด

2.2. ทางเลือกวิธีการซ่อมแซมฐานราก

การสร้างฐานรากใหม่ในตำแหน่งของฐานรากเดิมมีความท้าทายและมีหลายทางเลือกโดยขึ้นอยู่กับกับสภาพความเสียหายและสภาพแวดล้อมของพื้นที่ โดยทางหน่วยงานถนนของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา (The Federal Highway Administration: FHWA) ได้นำเสนอทางเลือกและกรณีศึกษามากมายในการซ่อมฐานรากสะพาน [1] โดยวิธีไปทั่วที่เลือกใช้สำหรับการซ่อมฐานรากสะพานในประเทศไทยคือการสร้างโครงเฟรม (Portal frame) คร่อมฐานรากเดิม [2] ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3 โดยวิธีนี้จำเป็นที่จะต้องสร้างฐานรากใหม่จำนวน 2 ตับข้างๆ ฐานรากเดิม และวางพื้นสะพานบนคานหัวเสา (Cap beam) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังคงสิ้นเปลืองเนื่องจากต้องสร้างฐานรากใหม่จำนวนมากกว่าฐานรากเดิมและยังต้องออกแบบคานหัวเสาให้แข็งแรงและยาวมากขึ้น จากการประเมินถ้าเลือกใช้วิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 13,500,000 บาท

รูปที่ 3 การซ่อมแซมฐานรากสะพานด้วยวิธีโครงเฟรม

อีกหนึ่งชนิดของฐานรากที่มีความนิยมคือการใช้เสาเข็มเจาะ (Drilled shaft) โดยวิธีนี้จะทำการเจาะดินนำลงไปก่อนจนถึงระดับความลึกที่ต้องการโดยใส่ท่อเหล็กปลอก (Casing) และสารละลายป้องกันดินถล่มลงในหลุมเจาะ หลังจากนั้นจะทำการใส่เหล็กเสริมและเทคอนกรีตเพื่อหล่อเสาเข็มใหม่ เมื่อเทคอนกรีตแล้วเสร็จจะดึงท่อเหล็กปลอกออก [3] ตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการหล่อเสาเข็มแบบเจาะ Drilled shaft [3]

วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถเจาะเสาเข็มไปยังระดับความลึกของชั้นดินแข็งที่ต้องการได้ อีกทั้งยังออกแบบความแข็งแรงของโครงสร้างเสาเข็มได้มากกว่าเสาเข็มเจาะหล่อสำเร็จ เนื่องจากสามารถกำหนดขนาดเสาเข็ม ปริมาณเหล็กเสริม และความแข็งแรงของวัสดุเหล็กและคอนกรีตได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการหล่อเสาเข็มชนิดนี้ใช้พื้นที่ก่อสร้างมากเนื่องจากต้องใช้ปั้นจั่นขนาดใหญ่และอุปกรณ์ต่างๆ มากมายที่เกี่ยวข้อง จึงทำให้ไม่เหมาะสมกับพื้นที่ของสะพานชุมชนที่อยู่ห่างไกล ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การซ่อมแซมด้วยเสาเข็มเจาะไม่เหมาะกับลักษณะของโครงการนี้

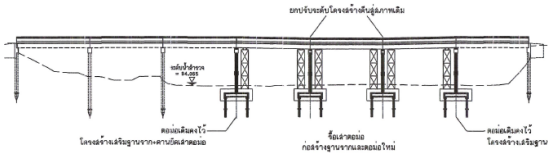
จากปัจจัยต่างๆ กรมทางหลวงชนบทจึงได้พิจารณาทางเลือกใหม่โดยใช้ไมโครไพล์ซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมในปัจจุบันในการใช้ก่อสร้างที่อยู่อาศัย มาประยุกต์ใช้กับการซ่อมแซมสะพาน เนื่องจากมีความสะดวกในการก่อสร้าง สามารถเปิดใช้งานจราจรในขณะก่อสร้างได้ และค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่า โดยหลังจากฐานรากใหม่เสร็จสิ้นระดับของสะพานจะถูกยกตัวให้อยู่ในแนวระดับและวางบนฐานรากใหม่ จากการประเมินค่าใช้จ่ายโครงการ การซ่อมแซมด้วยวิธีนี้จะใช้งบประมาณทั้งสิ้น 8,020,000 บาท ในระยะเวลาโครงการ 300 วัน ซึ่งถูกกว่าการใช้วิธีโครงเฟรม

2.3. สปันไมโครไพล์ (SPUN MICRO PILES)

เสาเข็มสปันไมโครไพล์เป็นเสาเข็มคอนกรีตประเภทหล่อสำเร็จมีทั้งหน้าตัดแบบกลมหรือสี่เหลี่ยม มีโครงเหล็กฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีตโดยรอบในขณะที่ตรงกลางกลวงดังที่แสดงในรูปที่ 5 เสาเข็มชนิดนี้ถูกผลิตโดยการเหวี่ยงคอนกรีตในแบบหล่อที่หมุนรอบแกนยาวของเสาเข็มด้วยความเร่งมากกว่าความเร่งโน้มถ่วง ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความหนาแน่นสูงและแข็งแรงกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยทั่วไปสปันไมโครไพล์จะรับน้ำหนักปลอดภัยได้ 20 ถึง 40 ตันต่อต้น และมีความยาวอยู่ในช่วง 1 ถึง 1.5 เมตรต่อท่อน ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดไม่เกิน 30 ซม. ความยาวนี้สามารถเพิ่มได้โดยการต่อเชื่อมหัวเสาเข็ม [4]

รูปที่ 5 สปันไมโครไพล์ [5]

เสาเข็มสปันไมโครไพล์จะช่วยลดการสั่นสะเทือนในขณะตอกเนื่องจากการที่มีรูตรงกลาง และยังช่วยลดแรงดันดินในขณะตอกอีกด้วยเพราะดินสามารถขึ้นทางรูกลวงของเสาเข็ม [4] การขนส่งเสาเข็มยังมีความสะดวกมากเนื่องจากขนาดและความยาวของเสาเข็มน้อย ปั้นจั่นที่ใช้ตอกเสาเข็มก็มีขนาดเล็กตาม ทำให้ประหยัดพื้นที่ในการก่อสร้างเหมาะสำหรับการทำงานในพื้นที่จำกัดหรือพื้นที่ที่ยากต่อการก่อสร้าง จากปัจจัยข้างต้นทำให้ทางกรมทางหลวงชนบทเลือกใช้เสาเข็มสปันไมโครไพล์ในการเสริมกำลังฐานรากของสะพาน โดยทำการเสริมกำลังฐานรากตับที่ 4 ถึง 7 ซึ่งอยู่ใต้ระดับน้ำตามที่แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบแสดงแผนการซ่อมแซมสะพาน

เสาเข็มสปันไมโครไพล์ที่ใช้ในโครงการนี้ได้รับมาตรฐานมอก. 398-2537 [6] มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 ซม. ยาวท่อนละ 1.5 เมตร โดยมีกำลังรับน้ำหนักปลอดภัย 25 ตันต่อต้น

3. ขั้นตอนการก่อสร้าง

การเสริมกำลังฐานรากและยกระดับปรับโครงสร้างประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ได้แก่ การจัดเตรียมสถานที่ วัสดุและเครื่องมือ งานขุดดินและปรับพื้นที่ในการทำงาน การตอกเสาเข็มสปันไมโครไพล์ การยกปรับระดับโครงสร้างสะพาน งานก่อสร้างและประกอบฐานรากใหม่ งานปรับดินกลับคืนและการเก็บความเรียบร้อยของงาน

3.1. การจัดเตรียมสถานที่ วัสดุและเครื่องมือ

ขั้นตอนแรกของการทำงานประกอบด้วยการเตรียมสถานที่ เช่น การกั้นเขตพื้นที่การก่อสร้างให้ชัดเจน เพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน การรักษาความปลอดภัยและการรักษาความสะอาด จากนั้นจะทำการจัดเตรียมพื้นที่เก็บของ ย้ายวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ จัดตั้งสาธารณูปโภคที่จำเป็นสำหรับการทำงาน

3.2. งานขุดดินและปรับพื้นที่ในการทำงาน

เนื่องจากการเสริมกำลังฐานรากและถ่ายน้ำหนักโครงสร้างลงบนฐานรากใหม่เป็นการทำงานภายนอกโครงสร้างเดิม เพื่อที่การจราจรยังคงสามารถดำเนินต่อไปได้ในขั้นตอนการก่อสร้างส่วนใหญ่ จึงต้องมีการขุดและถมปรับพื้นที่คลองสำหรับการทำงานดังที่แสดงในรูปที่ 7

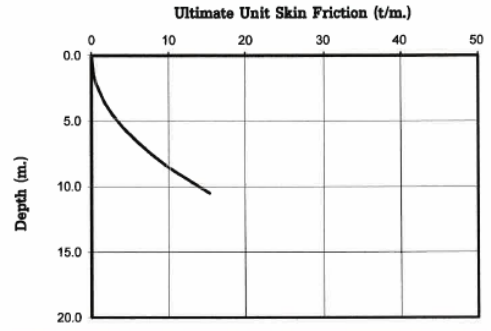
3.3. การเจาะสำรวจดิน

ข้อมูลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินมีความสำคัญอย่างมากในการคำนวณตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม ในโครงการนี้ได้มีการเจาะสำรวจดินจำนวน 4 หลุมลึกหลุมละ 10.5 เมตร โดยตำแหน่งของหลุมเจาะอยู่ในแนวเดียวกับฐานรากทั้ง 4 ตับ ที่จะทำการเสริม

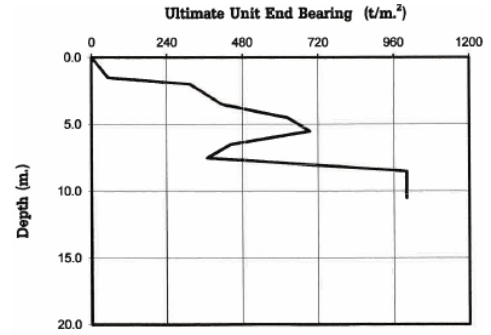
กำลังเพื่อนำค่ากำลังแรงเสียดทานที่เปลี่ยนแปลงตามความลึก (Skin friction) และค่ากำลังที่ปลายเข็ม (End bearing) ไปคำนวณออกแบบฐานรากเสาเข็มสปันไมโครไพล์ ค่ากำลังของดินที่ได้จะถูกลดทอนด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่าหรือเท่ากับ 2.5

รูปที่ 7 การเตรียมพื้นที่ก่อนการก่อสร้าง

รูปที่ 8 และ 9 แสดงผลการเจาะทดสอบดินของหลุมเจาะที่ 1 ซึ่งตั้งอยู่ที่ฐานรากตับที่ 4



รูปที่ 8 ผลการทดสอบค่ากำลังแรงเสียดทานของดิน



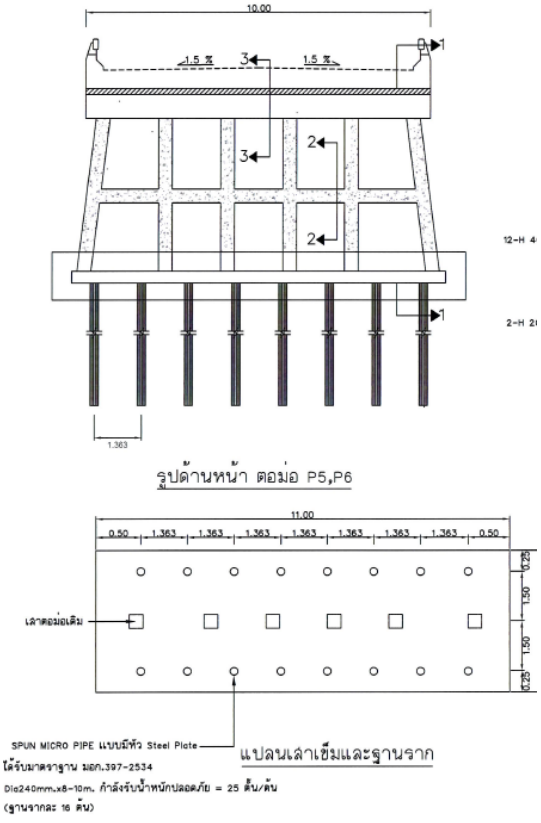
รูปที่ 9 ผลการทดสอบค่ากำลังที่ปลายเข็ม

รูปที่ 8 แสดงค่ากำลังรับน้ำหนักของดินอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างดินกับผิวของเสาเข็ม ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก เนื่องจากแรงดันดินที่เพิ่มขึ้น เมื่อดินรอบๆเสาเข็มถูกกัดเซาะออกไป ความต้านในส่วนนี้จะลงลด ดังนั้น ในการออกแบบซ่อมแซมฐานรากเสาเข็มให้มีอายุใช้งานยืนยาวทางผู้ออกแบบจะไม่ใช้กำลังในส่วนนี้ รูปที่ 9 แสดงค่ากำลังกำลังรับน้ำหนักที่ปลายเข็มของดิน โดยกำลังรับน้ำหนักในส่วนนี้จะขึ้นกับคุณสมบัติของดินที่ความลึกนั้นๆ กำลังในส่วนนี้จะยังคงอยู่แม้ว่าดินที่ผิวรอบๆตัวเสาเข็มจะถูกกัดเซาะออกไป ค่ากำลังรับน้ำหนักในส่วนนี้ในการออกแบบจะถูกจำกัดที่ 1000 ตันต่อตร.ม. ซึ่งในโครงการนี้ต้องการจะออกแบบใช้กำลังสูงสุดที่ยอมให้ ดังนั้น จึงจะทำการตอกเสาเข็มจนถึงความลึก 10.5 เมตร

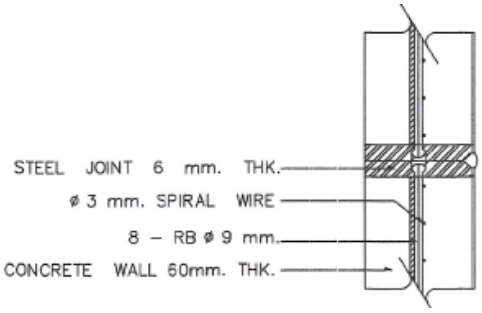
3.4. การตอกเสาเข็มสปันไมโครไพล์

ขั้นตอนการตอกเสาเข็มสปันไมโครไพล์เริ่มต้นด้วยการวางผังตำแหน่งที่จะตอกเสาเข็มตามแบบที่แสดงในรูปที่ 10 จากนั้นทำการประกอบติดตั้งชุดโครงเหล็กสำหรับการตอกเข็ม การเจาะนำร่องการตอกและเชื่อมเสาเข็มสปันไมโครไพล์

ในการตอกเสาเข็มสปันไมโครไพล์ จะใช้ปั้นจั่นเฉพาะที่มีขนาดเล็กกว่าที่ใช้กับเสาเข็มทั่วไป (Micro driving equipment) ตัวปั้นจั่นยกสูง 1 เมตร และตัวลูกตุ้มหนัก 2 ตัน โดยทำการตอกเสาเข็มทีละต้นและต่อเชื่อมรอยต่อเสาเข็มแต่ละต้นตามแบบในรูปที่ 11 จนได้ความลึก 10.5 เมตร ซึ่งเท่ากับเสาเข็มสปันไมโครไพล์จำนวน 7 ต้น หลังจากที่ตอกจนได้ความลึกที่ต้องการถึงชั้นดินแข็งจะทำการบันทึกความลึกของเสาเข็มที่จมลงในการตอด 10 ครั้งสุดท้าย (Blow count) เพื่อใช้ในการตรวจสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยใช้การคำนวณตามสูตรมาตรฐาน



รูปที่ 10 แบบแสดงตำแหน่งของเสาเข็มสปันไมโครไพล์



รูปที่ 11 แบบขยายรอยต่อของเสาเข็มสปันไมโครไพล์

รูปที่ 12 แสดงภาพระหว่างการตอกเสาเข็ม จะเห็นได้ว่าปั้นจั่นที่ใช้ตอกเสาเข็มมีขนาดเล็กกว่าปั้นจั่นทั่วไปมาก ซึ่งง่ายต่อการขนส่งและทำให้สามารถทำงานใต้ระดับสะพานเดิมได้

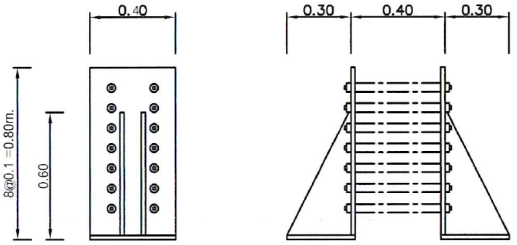
รูปที่ 12 ภาพการตอกเสาเข็มสปันไมโครไพล์

3.5. การยกปรับระดับโครงสร้างสะพาน

หลังจากที่ได้ตอกเสาเข็มเรียบร้อยแล้ว จะมีการติดตั้งค้ำยันชั่วคราวเพื่อใช้ในการถ่ายน้ำหนักโครงสร้างลงสู่เสาเข็มใหม่ทุกต้น เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเสาเข็มและฐานรากใหม่สามารถรับน้ำหนักได้ตามที่คำนวณไว้ โดยเสาของสะพานเดิมจะถูกตัดยกและเชื่อมต่อกับคานเหล็กรูปพรรณ (Wide flange) ขนาบทั้ง 2 ด้านของเสาและวางลงบนเสาเข็มใหม่ โดยรอยต่อระหว่างเสาคอนกรีตเดิมกับโครงสร้างเหล็กแสดงตามรูปที่ 13 จากนั้นจะทำการปรับยกระดับสะพานที่ทรุดตัวด้วยแม่แรงไฮดรอลิคผ่านค้ำยันชั่วคราวที่เชื่อมต่อไปยังเสาเข็มใหม่ ดังที่แสดงในรูปที่ 14 พร้อมทั้งทำการตรวจสอบค่าระดับให้เหมาะสมกับการปรับระดับฐานราก ในที่นี้ใช้ท่อเหล็กขนาด 8 นิ้ว หนา 4.5 มม. จำนวน 16 ต้น โดยมีกำลังรับน้ำหนักประลัยในแนวแกนเท่ากับ 31.8 ตันต่อต้น ซึ่งมากกว่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มที่ 25 ตันต่อต้น

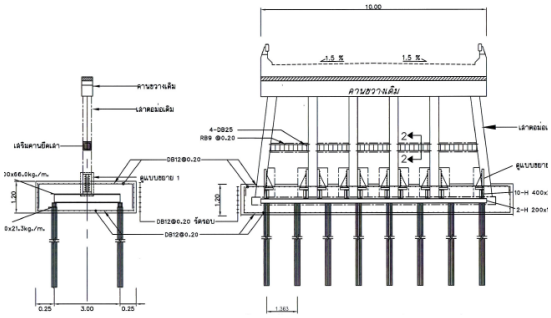
3.6. งานก่อสร้างและประกอบฐานรากใหม่

หลังจากทำการยกปรับระดับของสะพานเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการหล่อฐานรากใหม่บนเสาเข็มสปันไมโครไพล์ที่ตอกไว้เพื่อรองรับน้ำหนักสะพาน โดยฐานรากคอนกรีตใหม่จะก่อสร้างหุ้มคานเหล็กและมีเสริมเหล็กเส้นเพิ่มเติมตามแบบที่แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 13 แบบรอยต่อระหว่างเสาคอนกรีตเดิมกับคานเหล็ก

รูปที่ 14 การยกปรับระดับสะพานด้วยแม่แรงไฮดรอลิค



รูปที่ 15 แบบแสดงฐานรากคอนกรีตใหม่

3.7. งานปรับดินกลับคืนและการเก็บความเรียบร้อย

เมื่อก่อสร้างสิ้นสุดลง ได้ทำการปรับสภาพดินและพื้นที่เพื่อให้กลับไปสู่สภาพเดิม และทำการตรวจสอบความเรียบร้อยของโครงสร้าง รูปที่ 16 แสดงภาพของสะพานเมื่อโครงการซ่อมแซมสิ้นสุด

รูปที่ 16 สะพานหลังการซ่อมแซมสำเร็จ

4. การประเมินตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักฐานราก

4.1. การประเมินกำลังรับน้ำหนักของฐานรากเดิม

ในการออกแบบฐานรากใหม่นั้น จะต้องออกแบบให้รับน้ำหนักได้มากกว่าฐานรากเดิม โดยการประเมินกำลังรับน้ำหนักของฐานรากเดิมนั้น สามารถกระทำได้โดยคำนวณย้อนกลับจากขนาดของเสาสะพานจริงซึ่งเป็นเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสจำนวน 6 ต้นที่มีขนาดเสาเท่ากับ 40 ซม. ยาว 5 เมตรและไม่มีคานค้ำยัน (Bracing) ข้อมูลอื่นๆ สามารถอ้างอิงตามแบบมาตรฐานงานสะพาน เล่มที่ 1 พ.ศ. 2561 [7] ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง ค.4 ที่มีกำลัง f'_c = 350 กก.ต่อตร.ซม. และเหล็กเสริมที่มีกำลัง f_y = 2,400 กก.ต่อตร.ซม. และสมมุติใช้พื้นที่เหล็กเสริมปริมาณน้อยสุดเท่ากับ 1 เปอเซนต์ของพื้นที่หน้าตัดเพื่ออนุรักษ์ความปลอดภัย (Conservative) จะสามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักของของเสา 1 ต้นตามมาตรฐาน ACI 318 [8] ได้ตามสมการที่ (1)

$$\phi P_n = 0.80\phi\left[0.85f'_c\left(A_g - A_{st}\right) + f_y A_{st}\right] \quad (1)$$

โดยที่ ϕP_n คือ กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสา
A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา
A_{st} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม
ϕ คือ ตัวคูณลดกำลัง (0.65 สำหรับเสาสั้น)

จากสมการที่ (1) สามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสา 1 ต้น ได้เท่ากับ 265 ตัน อย่างไรก็ตามเสาเข็มมีกำลังรับน้ำหนักปลอดภัยได้อย่างน้อยเท่ากับ 50 ตันต่อต้น เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลดินในรูปที่ 7 ถ้าเสาเข็มยาวเพียง 4 เมตร จะสะมารถคำนวณค่ากำลังที่ปลายเข็มได้เท่ากับ 80 ตัน ซึ่งยังคงมากกว่ากำลังปลอดภัยของตัวเข็ม ดังนั้น กำลังรับน้ำหนักของฐานรากจึงขึ้นกับเสาเข็ม 6 ต้น ซึ่งมีค่ารวมเท่ากับ 300 ตัน ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มไมโครไพล์ใหม่ จะออกแบบให้มีกำลังรับน้ำหนักสูงกว่ากำลังของฐานรากเดิมที่ประเมินได้เพื่อความปลอดภัยและการใช้งานในระยะยาว

4.2. การออกแบบจำนวนเสาเข็มสปันไมโครไพล์

ในการออกแบบเสาเข็มเพื่อซ่อมแซมสะพาน จะใช้เพียงกำลังที่ปลายเข็ม โดยจะไม่ใช้กำลังแรงเสียดทาน เนื่องจากในอนาคตดินรอบ ๆเสาเข็มอาจจะถูกกัดเซาะเพิ่มเติมและสูญเสียกำลังในส่วนนี้ไป โดยจะสามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มได้จากสมการที่ 2 [9] ดังนี้

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

โดยที่ q_b คือ กำลังรับน้ำหนักที่ปลายเข็มของดิน
A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

เนื่องจากเมื่อตอกเขาเข็มสปันไมโครไพล์ ดินจะเข้าไปอัดแน่นอยู่ในรูตรงกลางของหน้าตัด ดังนั้นจะสามารถใช้พื้นที่หน้าตัดเต็มของเสาเข็มได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 453 ตร.ซม. ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่ปลายเข็ม (q_b) ที่ระดับความลึก 10.5 เมตรได้จากผลการเจาะสำรวจดินตามรูปที่ 9 มีค่าจำกัดที่ 1,000 ตันต่อตร.ม. ดังนั้นสามารถคำนวณกำลังรับน้ำหนักสุทธิที่ปลายเข็มได้ 45.3 ตันต่อต้น จะเห็นว่าค่าที่ได้นั้นมากกว่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มสปันไมโครไพล์ต้นละ 25 ตัน ดังนั้น จำนวนเสาเข็มไมโครไพล์ที่ต้องการสามารถคำนวณได้จาก 300 ตัน/25 ตันต่อต้น เท่ากับ 12 ต้น โดยสำหรับโครงการนี้ได้เลือกใช้เสาเข็มจำนวน 16 ต้น โดยเสาเข็มที่เพิ่มมาอีก 4 ต้น จะช่วยเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัยของฐานราก

4.3. การกระเมินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ก่อสร้างได้

การตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ตอกเสร็จ สามารถประเมินได้จากการวัดความลึกเสาเข็มที่จมลงไป ในการตอก 10 ครั้งสุดท้าย (Last ten blows) และเทียบกับกำลังที่คำนวณได้ ซึ่งในที่นี้ใช้ Janbu's formula [10] ดังที่แสดงในสมการที่ (3)

$$Q_u = \frac{Wh}{K_u S} \quad (3)$$

โดยที่ $K_u = C_d[1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}}$

$$C_d = 0.75 + 0.15\frac{P}{W}$$

$$\lambda = \frac{WhL}{AES^2}$$

W คือ น้ำหนักของลูกตุ้ม
h คือ ระยะยกลูกตุ้ม
S คือ ระยะจมของเสาเข็มโดยเฉลี่ยจาก 10 ครั้งสุดท้าย
P คือ น้ำหนักของเสาเข็ม
E คือ มอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
A คือ พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม
L คือ ความยาวเสาเข็ม

ตัวอย่างการคำนวณสามารถทำได้จากการแทนค่าน้ำหนักลูกตุ้มเท่ากับ 2 ตัน ระยะยกเท่ากับ 3 เมตร น้ำหนักเสาเข็มเท่ากับ 0.733 ตัน พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มไมโครไพล์เท่ากับ 453 ตร.ซม. ความยาวเสาเข็ม 10.5 เมตร ตัวอย่างระยะจมของเสาเข็มเฉลี่ย 10 ครั้งสุดท้ายของเสาเข็มต้นหนึ่งในโครงการเท่ากับ 1.7 ซม. จะคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักของดิน (Q_u) ได้เท่ากับ 63.4 ตัน ซึ่งมากกว่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มที่ 25 ตัน คิดเป็นอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.54 โดยสรุปสามารถประเมินได้ว่าเสาเข็มไมโครไพล์ที่ตอกมีเพียงพอตามที่ออกแบบไว้

4.4. การทดสอบสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า

ในการตรวจสอบและประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักจริงของสะพานจะใช้การทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่า (Load

test) [11] ซึ่งทางสำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบทจะดำเนินการทดสอบช่วงความยาวสะพานที่ทรุดตัวและได้ถูกรองรับด้วยฐานรากใหม่ โดยใช้รถบรรทุก 25 ตัน จำนวน 2 คัน ซึ่งมีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานสะพานชุมชนเป็นน้ำหนักทดสอบ โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ดังนี้

- อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) ที่กึ่งกลางความยาวของคานสะพานแต่ละตัว ในช่วงของสะพานที่มีการซ่อมแซมทรุดตัว
- อุปกรณ์วัดความเร่งจากการสั่นไหว (Accelerometer) บริเวณกึ่งกลางความยาว ริมทั้งสองฝั่งของช่วงของสะพานที่มีการซ่อมแซมทรุดตัว
- อุปกรณ์วัดการเอียงตัว (Tilt meter) บริเวณกึ่งกลางความยาว ริมทั้งสองฝั่งของช่วงของสะพานที่มีการซ่อมแซมทรุดตัว
- ค่าระดับที่กึ่งกลางของช่วงความยาวสะพานที่มีการซ่อมแซมการทรุดตัว ก่อนและหลังการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุก

ข้อมูลต่างๆจากการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่าจะถูกนำมาประเมินดังนี้

- ข้อมูลความเครียดที่จุดกึ่งกลางของโครงสร้างคานจะถูกนำเปรียบเทียบกับความเครียดสูงสุดที่ยอมให้ที่กำลังรับน้ำหนักของคาน เพื่อตรวจสอบว่าคานสะพานสามารถรับน้ำหนักได้ตามปกติ
- ข้อมูลความเร่งการสั่นไหว จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน AASHTO [12]
- ข้อมูลการเอียงตัวจะถูกนำมาใช้ยืนยันว่าสะพานจะไม่เกิดการบิดตัว หรือทรุดตัวไม่เท่ากันภายใต้การใช้งานจริง
- ข้อมูลค่าระดับจะใช้ในการยืนยันว่าสะพานจะไม่ทรุดตัวเพิ่มเติมมากเกินไปจากการใช้งานจริง

5. สรุป

กรมทางหลวงชนบทได้ดำเนินการซ่อมแซมและเสริมกำลังสะพานข้ามคลองระแนะ อำเภอพิปูน จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งได้รับความเสียหายจากการกัดเซาะของดินใต้ฐานรากเสาเข็ม และตอม่อจำนวน 2 ตับ ได้เกิดการทรุดตัวลง ทางกรมทางหลวงชนบทได้พิจารณาทางเลือกต่าง ๆในการออกแบบซ่อมแซมสะพาน โดยคำนึงถึง จากการประเมินปัจจัยด้านความมั่นคงแข็งแรง ความทนทานในระยะยาว ข้อจำกัดทางการก่อสร้าง งบประมาณที่ใช้ และความจำเป็นในการเปิดใช้งานในการก่อสร้าง การเสริมกำลังฐานรากใหม่ด้วยไมโครไพล์และการดีดยกระดับสะพานจึงเป็นวิธีที่คุ้มค่าและเหมาะสมสำหรับสะพานแห่งนี้

ขั้นตอนในการออกแบบและก่อสร้างเริ่มจากการประเมินกำลังรับน้ำหนักที่เหลืออยู่ของฐานรากเดิม และออกแบบฐานรากไมโครไพล์ใหม่ทดแทนต่อม่อทั้ง 4 ตับที่อยู่ในลำน้ำ โดยการก่อสร้างประกอบด้วยการตอกไมโครไพล์ สร้างโครงเหล็กค้ำยัน ถ่ายน้ำหนักสะพานลงบนเสาเข็มไมโครไพล์ การดีดยกสะพานให้ได้ระดับ และการก่อสร้างฐานรากใหม่ทดแทน ซึ่งในขณะที่ก่อสร้าง ประชาชนยังคงใช้สะพานสัญจรตามปกติยกเว้นในขั้นตอนการดีดยกสะพานและระหว่างการสร้างฐานรากใหม่ ทำให้ส่งผลกระทบต่อประชาชนในพื้นที่น้อยที่สุด

การเสริมกำลังฐานรากด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย สามารถประเดินกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้นได้ด้วยการคำนวณผ่านสูตรกำลังเข็มจากการนับระยะจมของการตอกเสาเข็ม 10 ครั้งสุดท้ายเพื่อเทียบกำลังรับน้ำหนักที่ออกแบบ ผลการคำนวณพบว่าเสาเข็มและดินที่เสาเข็มทุกต้นมีกำลังเพียงพอต่อการรับน้ำหนักสะพาน นอกจากนั้นกรมทางหลวงชนบทจะทำการเฝ้าติดตามและตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของสะพานด้วยการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกที่ทราบค่าต่อไปเพื่อยืนยันผลการออกแบบต่อไป

6. การอ้างอิง

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

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

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

[4] 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.

[5] ภูมิสยาม. (2559). *เสาเข็มสปันไมโครไพล์.* บริษัท ภูมิสยาม ซัพพลาย จำกัด ประเทศไทย.

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

[7] American Concrete Institute. (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08) and commentary (ACI 318R-08).* American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

[8] กรมทางหลวงชนบท. (2561). *แบบมาตรฐานงานสะพาน เล่มที่ 1 พ.ศ. 2561.* กรมทางหลวงชนบท ประเทศไทย.

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

[10] R. J. Fragaszy et al. (1985). *Development of Guidelines for Construction Control of Pile Driving and Estimation of Pile Capacity.* Report WA-RD 68.1. Washington State Transportation Center, Olympia, WN, USA.

[11] C. Dong et al. (2020). *Bridge Load Testing for Identifying Live Load Distribution, Load Rating, Serviceability and Dynamic Response.* Civil, Environmental, and Construction Engineering Department, University of Central Florida, Orlando, FL, USA.

[12] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2018). *Manual for Bridge Evaluation.* Washington, D.C., USA.