การประเมินการใช้คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุคันทางสำหรับถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในกรุงเทพมหานคร

Evaluation of the Use of Cellular Lightweight Concrete as Embankment Material for Asphalt Concrete Roads in Bangkok

ธนุตม์ กล่อมระนก[1,*] และ ชลลดา เลาะฟอ[2]

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จ.กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: engineering54@hotmail.com*

บทคัดย่อ

การก่อสร้างถนนบนฐานรากดินเหนียวอ่อนของกรุงเทพมหานครมักประสบปัญหาการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องในระยะยาว เนื่องจากน้ำหนักของดินถมมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินฐานราก และกระบวนการรวมตัวของดินฐานรากในสภาพชุ่มน้ำ ซึ่งปัจจุบันมีเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินฐานราก 2 หลักการคือ การถ่ายน้ำหนักของดินถมลงไปสู่ชั้นที่แข็งแรง และการเร่งการทรุดตัวด้วยน้ำหนักกดทับล่วงหน้า บทความนี้นำเสนอการใช้คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุทางเลือกในชั้นคันทาง เพื่อลดน้ำหนักของวัสดุที่กระทำบนฐานรากดินเหนียวอ่อน โดยการประเมินคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบกำลังรับดึงแยก การทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าอัตราส่วนปัวซอง และการทดกำลังรับแรงอัดแบบไดนามิค เพื่อคัดเลือกความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสมมาใช้ในการประเมินหาความหนาสำหรับการประยุกต์ใช้ในชั้นคันทางของโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตผ่านแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS จากผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนา 0.4 เมตร สามารถลดความเค้น ความเครียด และการทรุดตัวบนชั้นดินฐานรากลงได้ดีกว่าโครงสร้างถนนแบบดังเดิม ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างถนนมีเสถียรภาพระยะยาวจากการเสียรูปถาวร

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบา, วัสดุคันทาง, ถนนแอสฟัลต์คอนกรีต, แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Road construction on soft clay foundations in Bangkok often faces long-term settlement problems due to the weight of the embankment fill than the shear strength of the foundation soil and the consolidation process of foundation soil in saturated conditions. At present, there are two techniques for improving the quality of foundation soil: transferring the weight of embankment fill to a stronger layer and accelerating the settlement with pre-loadings. This paper presents the use of lightweight concrete as an alternative material in embankment layers to reduce the weight of the material acting on soft clay foundations. Evaluation of the mechanical properties of cellular lightweight concrete consisted of compressive strength test, split tensile strength test, elastic modulus and Poisson's ratio test, and dynamic compressive strength test to select the appropriate density of cellular lightweight concrete and use it to evaluate the thickness for application in the embankment layer of asphalt concrete road structure through ANSYS model. From the study, it was found that the density of cellular lightweight concrete at 600 kg/m^3 with a thickness of 0.4 m could reduce stress, strain and settlement on the foundation soil layer better than traditional structures, which resulted in the long-term stability of the road structure from permanent deformation.

Keywords: Cellular Lightweight Concrete, Embankment Material, Asphalt Concrete Roads, Finite Element Model

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบคมนาคมขนส่งทางบกเป็นระบบการขนส่งหลักในกรุงเทพมหานคร โดยเฉพาะการคมนาคมขนส่งตามเส้นทางถนนที่มีความยาวถึง 3,784.35 กิโลเมตร ที่มีความสามารถเข้าถึงชุมชนได้สะดวกกว่าระบบอื่น ทำให้อัตราส่วนการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลมีถึงร้อยละ 53 ในขณะที่สัดส่วนการใช้รถขนส่งมวลชนมีเพียงร้อยละ 47 [1] แต่อย่างไรก็ตามถนนในกรุงเทพมหานครยังคงประสบปัญหาการทรุดตัวเนื่องจากพื้นที่กรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่ที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นดินอ่อนความหนาเฉลี่ย 8-12 เมตร และเป็นที่ลุ่มต่ำน้ำท่วมถึง [2] การจะก่อสร้างถนนจำเป็นจะต้องมีการถมที่ให้สูงขึ้น เพื่อที่จะยกระดับพื้นดินใช้งานให้อยู่เหนือระดับน้ำท่วมขัง ยิ่งมีการถมดินสูง น้ำหนักดินถมก็จะไปกดชั้นฐานราก หรือชั้นดินเหนียวอ่อนให้เกิดการทรุดตัวมากขึ้น ส่งผลให้หลายโครงการก่อสร้างถนนมักประสบปัญหาการร้าวการแตกของผิวทาง และการยุบตัวของ

โครงสร้างถนน [3] ปัจจุบันกรุงเทพมหานครได้ใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินฐานราก โดยการสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ปูพรมเพื่อถ่ายน้ำหนักโครงสร้างถนนผ่านชั้นดินอ่อนลงสู่ชั้นดินแข็ง ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่ดีในหลายโครงการ แต่ก็ยังพบปัญหาการยุบตัวที่ไม่สม่ำเสมอของดินระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์ และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของผิวทางบริเวณขอบถนนและลาดไหล่ทาง [4] นอกจากเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของดินฐานรากสำหรับการก่อสร้างถนนข้างต้นแล้ว การลดปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้างถนนจากวัสดุก่อสร้างเองยังเป็นที่นิยมใช้ต่างประเทศ เช่น การปรับเปลี่ยนวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงเพื่อลดแรงที่เกิดจากน้ำหนักวัสดุกระทำบนฐานรากดินเหนียวอ่อน และการปรับเปลี่ยนวัสดุเพื่อป้องกันการสูญเสียความสามารถในการรับกำลังแบกทานของดินบดอัดแบบดั่งเดิม จะสามารถช่วยให้ถนนมีเสถียรภาพระยะยาวในการรับน้ำหนักแรงสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์จากยานพาหนะที่กระทำต่อระบบโครงสร้างถนนได้ [5] ปัจจุบันหลายประเทศ เช่น จีน เยอรมนี สหรัฐอเมริกา รัสเซีย บราซิล สิงคโปร์ อินเดีย มาเลเซีย เม็กซิโก อินโดนีเซีย ลิเบีย ซาอุดีอาระเบีย อียิปต์ เนเธอร์แลนด์ ลิเบีย และซาอุดีอาระเบีย ได้ให้ความสนใจในการประยุกต์ใช้คอนกรีตมวลเบาในงานก่อสร้างทางธรณีเทคนิคต่างๆ เช่น การก่อสร้างอุโมงค์ สะพาน ทางรถไฟ ทางหลวง อาคารสูง ฯลฯ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา การนำความร้อนต่ำ ทนต่อความชื้น การกัดกร่อนและการกระแทก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ราคาถูกและง่ายต่อการผลิต [6] ดังนั้นการใช้คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุทางเลือกในชั้นคันทางของถนนโดยการแทนที่ดินหรือทรายถมบดอัดแบบดั่งเดิม เพื่อลดน้ำหนักวัสดุก่อสร้างกระทำบนฐานรากดินเหนียวอ่อนจึงมีความน่าสนใจ แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการประเมินการใช้คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวว่าจะสามารถช่วยลดน้ำหนักกระทำบนฐานราก และเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างถนนได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเมื่อถูกใช้เป็นวัสดุคันทางสำหรับถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในกรุงเทพมหานคร
2. เพื่อศึกษาความหนาที่เหมาะสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเมื่อถูกใช้เป็นวัสดุคันทางสำหรับถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในกรุงเทพมหานคร

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการประเมินการใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นวัสดุคันทางสำหรับถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในกรุงเทพมหานครตามแบบมาตรฐานงานทางกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2565 ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทรุดตัวของถนนในกรุงเทพมหานคร

จากการรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์เหตุการณ์ถนนยุบตัวในกรุงเทพมหานคร [7-8] พบว่าสาเหตุการทรุดตัวของถนนมากจาก 5 สาเหตุหลัก ดังนี้

1. การทรุดตัวของชั้นดินถมคันทาง

การทรุดตัวของดินถมมักเกิดกับชั้นคันทางที่มีความหนามากกว่า 2.0 เมตร ซึ่งการทรุดตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่ใช้ ความหนาของการถม และวิธีการถมบดอัด การถมที่จะทำให้การทรุดตัวไม่มากนั้นจะต้องใช้ดินทรายถม มีการให้น้ำระหว่างการถม และมีการบดอัดเป็นชั้น ๆ ที่ไม่หนาจนเกินไป

2. การทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อน

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครมีคุณสมบัติในการขยายตัวและหดตัวมาก มีความแข็งแกร่งของเนื้อดินต่ำ และมีค่าดัชนีพลาสติกสูง มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 24-30% จึงทำให้เกิดการทรุดตัวได้ง่าย โดยปกติการทรุดตัวสูงสุดประมาณ 10% ของความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยระยะเวลาการทรุดตัวตามธรรมชาติอาจจะมากถึง 30-40 ปี

3. การทรุดตัวเนื่องจากการไหลของดินออกด้านข้าง

การทรุดลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักดินถมมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินฐานราก ทำให้ดินเหนียวเกิดการคราก บางส่วน และดินจะไหลออกไปทางด้านข้างส่งผลให้โครงสร้างถนนยุบตัวลง

4. การทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล

การสูบน้ำบาดาลมาใช้ ทำให้เมื่อน้ำใต้ดินลดลง แรงพยุงจากน้ำหายไป แรงกดของมวลดินก็มากขึ้น (effective stress เพิ่มขึ้น) ชั้นดินจึงทรุดตัว โดยปัจจุบันมีการควบคุมการสูบน้ำบาดาล ส่งผลให้การทรุดตัวลักษณะนี้น้อยลงไป

5. การทรุดตัวเนื่องจากความบกพร่องในการก่อสร้าง และระบบสาธารณูปโภค

พื้นที่ที่มีการขุดรื้อย้ายหรือก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคใต้ดินในบริเวณที่เกี่ยวข้องกับท่อระบายน้ำใต้ดิน จุดที่มีการรั่วหรือแตกของท่อประปาเป็นประจำถือเป็นจุดเสี่ยงต่อการสูญเสียวัสดุทรายถมลงไปในท่อระบายน้ำ และทำให้เกิดโพรงใต้ผิวถนน ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของถนนและเป็นหลุมยุบในเวลาต่อมา

2.2 การแก้ปัญหาการทรุดตัวของถนนด้วยวัสดุมวลเบา

การก่อสร้างถนนบนพื้นที่ดินเหนียวอ่อนของกรุงเทพมหานครมักประสบปัญหาการทรุดตัวเนื่องจากปัญหาหลัก 5 ประการดังกล่าวข้างต้น โดยการทรุดตัวของชั้นดินเหนียวอ่อน และการทรุดตัวของชั้นดินคันทางเป็นสาเหตุหลักที่สามารถพบได้บ่อยครั้ง เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักของโครงสร้างถนนให้กับดินฐานรากที่ต่ำลงไป การแก้ไขปัญหาสามารถทำได้โดยการลดน้ำหนักของวัสดุถมที่กดทับดินฐานราก ที่ผ่านมาการก่อสร้างถนนบนพื้นที่ดินเหนียวอ่อนในประเทศไทยได้ให้ความสำคัญกับชั้นคันทางที่มีค่าความแข็งแรงน้อย และมีการเสียรูปถาวรในระยะยาวมากกว่าโครงสร้างชั้นทางอื่น ๆ การเลือกใช้วัสดุมวลเบาในการก่อสร้างชั้นคันทางของถนนได้ถูกนำมาใช้หลายสายทาง อาทิเช่น ทางหลวงหมายเลข 35 บริเวณกิโลเมตรที่ 72 ถนนศรีนครินทร์ บริเวณกิโลเมตรที่ 16 และทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 บริเวณทางเชื่อมทางหลวงหมายเลข 34 เป็นต้น ซึ่งเริ่มแรกกรมทางหลวงได้มีการนำดินเหนียวผสมซีเมนต์มวลเบา (Air Foamed Mixed Stabilized Soil) โดยกำหนดคุณสมบัติของดินเหนียวมวลเบาให้มีความหนาแน่น 1 ตัน/

ลูกบาศก์เมตร มีค่าแรงอัดไม่น้อยกว่า 4 ksc ที่อายุบ่ม 28 วันซึ่งเทียบเท่ากับค่า CBR ที่ 10% และนำโฟมอีพีเอส (Expanded Polystyrene Geofoam) ซึ่งผลิตจากการผสมพอลิสไตรีน (Polystyrene) ร้อยละ 90 ถึง 95 กับสารขยายตัว ได้แก่ ก๊าซเพนเทน (Pentane) ซึ่งเป็นตระกูลเดียวกับก๊าซหุงต้ม นำมาขึ้นรูปเม็ดโฟมตามต้องการ มาใช้แทนที่วัสดุทรายถมสำหรับชั้นคันทาง เพื่อลดปัญหาการทรุดตัวของโครงสร้างถนนโดยรวม ซึ่งวิธีการทั้งสองวิธีสามารถแก้ปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างกันของชั้นคันทางได้อย่างมีนัยสำคัญ [9-10]

สำหรับการประยุกต์ใช้คอนกรีตมวลเบาได้ถูกนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมปฐพีของการก่อสร้างทางในหลากหลายประเทศ โดยในปี ค.ศ. 1970 ประเทศอังกฤษ ได้นำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามาใช้ครั้งแรกในการก่อสร้างชั้นคันทางของโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 14 บนพื้นที่ฐานรากดินเหนียวอ่อน เพื่อป้องกันการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างช่วงถนน เนื่องจากปริมาณการจราจรสูง รวมถึงเป็นฉนวนป้องกันการแข็งตัวของวัสดุโครงสร้างทาง (Frost Protection) โดยคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 410-590 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 10 ksc [6] สำหรับประเทศไทยกรมทางหลวงได้มีการทดลองนำวัสดุประเภท Low Density Cellular Concrete (LDCC) หรือคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตโดยแอร์โฟม ผสมมอร์ต้า โดยมีความหนาแน่น 800-1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 13.3 ksc มาใช้สำหรับลดการทรุดตัวของชั้นคันทางบริเวณทางหลวง 417 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการทรุดตัวของชั้นคันทางมีค่าน้อยกว่าคันทางดินเหนียวผสมซีเมนต์มวลเบา คันทางโฟมอีพีเอส และคันทางดินถมตามลำดับ [10] หลังจากนั้นสำนักงานวิศวกรรมทาง สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ได้ศึกษาการนำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามาใช้แทนที่วัสดุคันทาง หรือทรายถมบดอัดแบบดั่งเดิมในพื้นที่กรุงเทพมหานคร แต่ยังไม่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากยังขาดผลการศึกษาถึงผลกระทบด้านเทคนิคในระยะยาวทั้งในและต่างประเทศ ประกอบกับราคาค่าก่อสร้างที่ค่อนข้างสูง

2.3 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาเป็นคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อยกว่าคอนกรีตที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป โดยมีความหนาแน่นตั้งแต่ 400 ถึง 1,600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ตามวัสดุที่ใช้คือ คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด และคอนกรีตพรุนหรือโฟมคอนกรีต ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ [11]

1. คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (Light Weight Aggregate Concrete)

คอนกรีตชนิดนี้ใช้วัสดุมวลรวมที่มีน้ำหนักเบามาแทนที่หิน เช่น พลาสติก และดินดานเผา เป็นต้น โดยมีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 65-1,050 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และมีลักษณะที่สำคัญคือ มีความพรุน ทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะลดลง

2. คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด (No-Fine Aggregate)

คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียดเป็นคอนกรีตที่ไม่ยอมให้มีอนุภาคขนาดเล็กหรือส่วนผสมละเอียดอยู่ในส่วนผสมของคอนกรีต มีเพียงแต่มวลรวมหยาบ เช่น หินคลุก (Crushed Stone), หินหยาบ (Coarse Clinker) และ ตะกรันพรุน (Foamed Slag) เป็นต้น ซึ่งปกติจะใช้มวลรวมหยาบขนาดเดียว ทำให้คอนกรีตชนิดนี้มีช่องว่างหรือโพรงอยู่มาก ส่งผลให้กำลังค่อนข้างต่ำ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าประมาณ 640 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

3. คอนกรีตพรุน (Aerated Concrete)

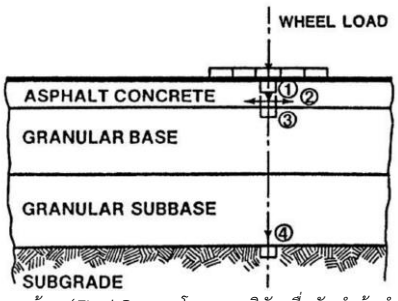
คอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตเบาชนิดหนึ่ง ซึ่งทำให้มีน้ำหนักเบาด้วยวิธีการทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต ซึ่งทำได้โดยการให้ฟองอากาศกระจายในส่วนผสมของมอร์ต้าที่ยังอยู่ในสภาพพลาสติก จากนั้นปล่อยให้แข็งตัว เนื่องจากคอนกรีตพรุนจะมีรูพรุนจากฟองอากาศและไม่ใช้มวลรวมหยาบในการผลิต ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกว่าคอนกรีตพรุน ซึ่งเรียกว่าตามลักษณะของเนื้อคอนกรีต แต่ในทวีปยุโรปจะเรียกตามกรรมวิธีการผลิตเรียกว่า โฟมคอนกรีต (Foam Concrete) หรือ ก๊าซคอนกรีต (Gas Concrete)

4. คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular Lightweight Concrete)

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าคือ คอนกรีตที่ผลิตโดยการสร้างโฟม หรือฟองอากาศปริมาณสูงขึ้นมาก่อน อาจผลิตโดยการใส่น้ำยาโฟมลงปั่นในเครื่องผลิตโฟมซึ่งจะได้โฟมเหลว (Pre-foamed Foam) จากนั้นฉีดโฟมเหลวเข้าไปผสมกับมอร์ตาร์หรือซีเมนต์เพสท์ เพื่อให้ฟองอากาศเข้าไปแทรกตัวตามเนื้อคอนกรีตแทนการใช้มวลรวมหยาบ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวเนื้อคอนกรีตที่ได้ จะมีรูพรุนและมีน้ำหนักเบา

2.4 การตอบสนองวิกฤต (Critical Response) ในโครงสร้างถนนลาดยาง

การตอบสนองวิกฤตในโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็นวัสดุไม่มีการเชื่อมแน่น (Unbound Material) หรือ หินคลุก กรวด ลูกรัง เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็นวัสดุไม่มีการเชื่อมแน่น พบว่าการตอบสนองวิกฤตจะเกิดที่ตำแหน่งหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 [12] ดังแสดงในรูปที่ 1



*** รายงานขั้นสุดท้าย (Final Report โครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อกำหนดและวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางสำหรับประเทศไทย. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.*

รูปที่ 1 การตอบสนองวิกฤตในโครงสร้างถนนลาดยาง

หมายเลข 1 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อมีรถบรรทุกหนักเกินพิกัดส่งผลให้ผิวทางมีความแน่นขึ้นและเกิดการเสียรูปถาวรเป็นแนวร่องล้อ

หมายเลข 2 เป็น Horizontal (Radial) Tensile Strain ที่เกิดใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากผิวทางแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักกระทำซ้ำๆ ส่งผลให้โครงสร้างชั้นทางด้านล่างเกิดรอยแตกเนื่องจากความล้า

หมายเลข 3 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนชั้นพื้นทาง ซึ่งไม่ส่งผลต่อการวิบัติของโครงสร้างถนนลาดยาง เนื่องจากวัสดุก่อสร้างที่ใช้ก่อสร้างพื้นทางมีความแข็งแรง และตรงตามมาตรฐานงานก่อสร้าง

หมายเลข 4 เป็น Vertical Compressive Strain ที่เกิดบนชั้นดินฐานราก (Subgrade) ส่งผลให้โครงสร้างชั้นทางเกิดการยุบตัวและเสียรูปถาวร เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุด ดังนั้นต้องใช้วัสดุอื่นมาทดแทนเพื่อเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Martin Decký, Marian Drusa, Katarína Zgútová, Matej Blaško, Matej Hájek และ Walter Scherfel [13] ได้ศึกษาการใช้คอนกรีตมวลเบา (Foam concrete) เป็นวัสดุใหม่ในการก่อสร้างถนนในสาธารณรัฐสโลวักหรือสโลวาเกีย โดยดำเนินการทดสอบกับโครงสร้างถนนในชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ภายในมหาวิทยาลัยซิลินา (FCE UNIZA) ก่อนถูกนำไปใช้กับการก่อสร้างทางหลวงภายในประเทศ ซึ่งการศึกษาดังกล่าวบริษัท ไอวีเทค จำกัด (iwtech LTd.) ได้ผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 500 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และมีกำลังรับน้ำหนักไม่น้อยกว่า 1.7 MPa สำหรับประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างทาง ซึ่งหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จได้ประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างชั้นทางด้วยวิธีการ Static Plate Load Test จากผลการทดสอบค่าโมดูลัส (E) ของชั้นรองพื้นทางที่ถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตมวลเบาที่ความหนา 15 เซนติเมตร มีค่ามากกว่าชั้นรองพื้นทางแบบดั่งเดิม หรือหินคลุกบดอัดที่มีความหนา 20 เซนติเมตร ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าคอนกรีตมวลเบามีความแข็งแรง และเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในโครงสร้างชั้นทาง

Marta Kadela, Marcin Kozáowski และ Alfred Kukieáka [14] ได้ศึกษาการใช้คอนกรีตมวลเบาในชั้นรองพื้นทาง (Subbase) ของถนนผิวทางแอสฟัลต์บนพื้นที่ดินเหนียวอ่อน โดยการศึกษาได้ผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 500-1300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และทดสอบคุณสมบัติเชิงกลได้แก่ กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด รวมทั้งประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างถนนจากการรับน้ำหนักรถยนต์ส่วนบุคคลด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulations) จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานอยู่ระหว่าง 860-1060 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้การใช้คอนกรีตมวลเบาในชั้นรองพื้นทางสามารถลดความเค้น และความเครียดของโครงสร้างทางโดยรวมลงได้

Stantec [15] ได้มีโครงการศึกษาการแก้ปัญหาการทรุดตัวของทางหลวงหมายเลข 9 ประเทศฮอลแลนด์ ระยะทาง 1.5 กิโลเมตร โดยชั้นฐานรากประกอบด้วยวัสดุอินทรีย์ (Peat) ตะกอนดินเหนียวอ่อนถึงแน่น ดินเหนียวปนทรายแป้ง และตะกอนทรายที่ความลึกตั้งแต่ 3.7-7.0 เมตร ทำให้เกิดการทรุดตัวและซ่อมแซมผิวทางบ่อยครั้ง ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงมีนโยบายในการใช้คอนกรีตมวลเบาเพื่อแก้ปัญหาดินฐานรากทรุดตัว โดยการขุดดินลึก 1.5 เมตร แล้วเทด้วยคอนกรีตมวลเบาแทนที่เพื่อรักษาการทรุดตัวของฐานรากในระยะยาว ซึ่งคอนกรีตมวลเบาที่ใช้มีความหนาแน่น 578 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และมีกำลังรับน้ำหนักมากกว่า 1.0 MPa ที่ 28 วัน โดยหลังจากการเปิดใช้งานถนนมา 1 ปี พบว่าผิวทางแอสฟัลต์ไม่มีการทรุดตัวเป็นหลุม ส่งให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้ขับขี่ นอกจากนี้การใช้คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวยังช่วยลดระยะเวลาระหว่างการก่อสร้าง และต้นทุนในการบำรุงรักษาลงได้ ลงได้

Zaolong Jiang, Xin Gao, Xiaozhe Feng และ Dachuan Chen [16] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้คอนกรีตมวลเบาในชั้นทางของทางด่วนโฟชิงคง (Foqingcong) ของเมืองโฟซาน (Foshan City) ระยะทาง 24.67 กิโลเมตร เพื่อรักษาการทรุดตัวของฐานรากดินเหนียวอ่อน ซึ่งพื้นที่ทางด่วนส่วนใหญ่อยู่เหนือแนวท่อก๊าซแรงดันสูงที่ฝังลึกในระดับ 12 เมตร จากผลการศึกษาพบว่าการใช้คอนกรีตมวลเบาที่ความหนาแน่น 650 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่มีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 1.2 MPa สามารถลดแรงที่กระทำ และการทรุดตัวของฐานรากลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างลงได้ 12% หรือประมาณ 1.07 ล้านหยวน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เสาเข็ม (CFG) ร่วมกับชั้นฐานรองกรวด (Gravel bedding layer)

3. วิธีการดำเนินวิจัย

3.1 วัสดุและอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีความหนาแน่นตั้งแต่ 400-700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ±50 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยมีวัสดุและอัตราส่วนผสมดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.15 หรือมาตรฐาน ASTM C150 Type 1 ถูกใช้ในอัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:1

2) ทรายสะอาด ต้องมีคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C33 ถูกอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 105°C ± 5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.6 มิลลิเมตร

3) น้ำสะอาด ต้องเป็นน้ำจืดสะอาด ปราศจากน้ำมัน กรด ด่าง เกลืออินทรียวัตถุ หรือวัสดุเจือปน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำประปา และถูกใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4

4) น้ำยาผสมลดน้ำ (Superplasticizer) ตามมาตรฐาน ASTM C494 Type F ถูกใช้ในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 10 mL:1 kg

5) สารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming agent) ถูกใช้ใช้ในอัตราส่วนผสมสารเพิ่มฟองอากาศน้ำเท่ากับ 1:50

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะทดสอบกับตัวอย่างชุดละ 3 ตัวอย่าง ภายใต้การบ่มในน้ำ (Wet Curing) เป็นระยะเวลา 28 วัน โดยการดำเนินการทดสอบแสดงในรูปที่ 2 และมีรายละเอียดดังนี้

1. การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength test) ดำเนินการทดสอบกับชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และปฏิบัติการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39

2. การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง (Modulus of elasticity and Poisson's ratio test) ดำเนินการทดสอบกับชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และปฏิบัติการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469

3. การทดสอบกำลังรับแรงดึง (Splitting tensile strength test) ดำเนินการทดสอบกับชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และปฏิบัติการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C496

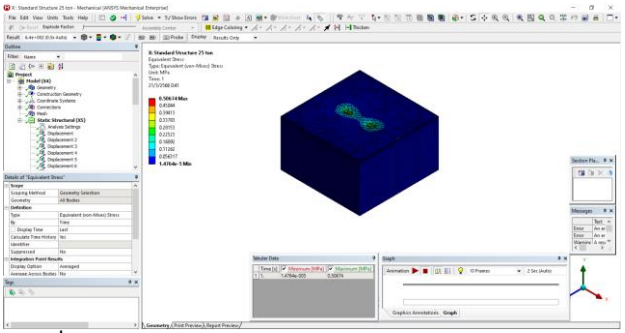
4. การทดสอบกำลังรับแรงไดนามิค (Dynamic strength test) ดำเนินการทดสอบกับชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร และปฏิบัติการทดสอบด้วยความถี่ 1 Hz ตามมาตรฐาน ASTM D5311

รูปที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

3.3 แบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์

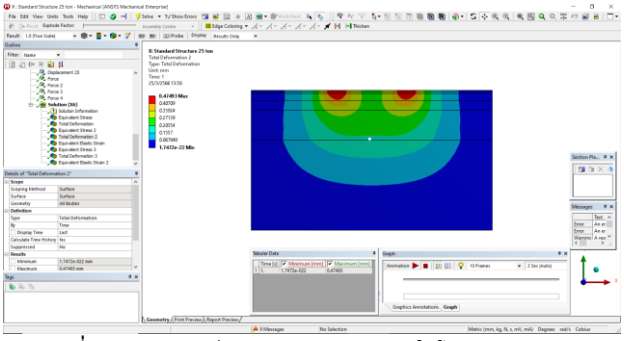
3.3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์

แบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์ ตามแบบมาตรฐานงานทางกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2565 ถูกสร้างและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ดังแสดงในรูปที่ 3

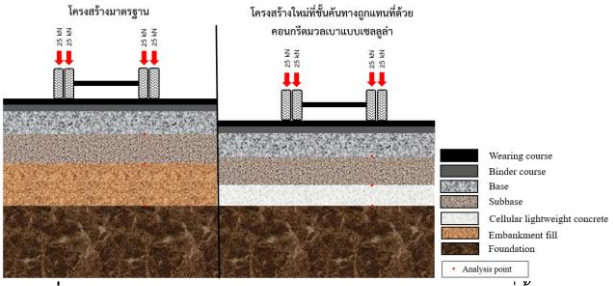


รูปที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์ในโปรแกรม ANSYS

สำหรับการวิเคราะห์จะถูกดำเนินการเป็นแบบแผ่นผิว (Surface) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเปรียบเทียบความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และการแอ่นตัว (Settlement) ใต้ชั้นพื้นทาง รองพื้นทาง และคันทางในแนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point Load) ในโครงสร้างแบบมาตรฐาน และโครงสร้างใหม่ที่ชั้นคันทางถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีความหนาตั้งแต่ 0.1 เมตรจนถึง 1.0 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 การวิเคราะห์แบบแผ่นผิว (Surface) ในโปรแกรม ANSYS



รูปที่ 5 เปรียบเทียบโครงสร้างมาตรฐานและโครงสร้างใหม่ที่ชั้นคันทางถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

3.3.2 ข้อมูลในแบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์

สำหรับการนำเข้าข้อมูลในแบบจำลองผิวทางแอสฟัลต์ประกอบด้วย น้ำหนักกระทำ คุณสมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. น้ำหนักกระทำ (Load) และพื้นที่สัมผัสระหว่างยางและผิวทาง (Contact area) ในแบบจำลองนี้ใช้รถบรรทุกขนาด 10 ล้อ น้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 25 ตัน โดยแรงจากน้ำหนักรถบรรทุกจะถูกจำลองในรูปแบบของเพลาเดี่ยวกระทำต่อผิวทางด้วยยางคู่ (Dual Tires) ซึ่งมีความดันลมยาง 690 kPa (100 psi) และกระทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 0.223 เมตรคูณ 0.324 เมตร

2. คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางแสดงดังตารางที่ 2 โดยการจำลองใช้ความหนาตามโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์จากมาตรฐานงานทางกรุงเทพมหานคร ประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์ประกอบด้วย 2 ชั้นคือ ผิวทาง (Wearing course) และรองผิวทาง (Binder course) ที่มีความหนาชั้นละ 0.05 เมตร ชั้นพื้นทางมีความหนา 0.25 เมตร ชั้นรองพื้นทางมีความหนา 0.30 เมตร ชั้นคันทางมีความหนา 1.00 เมตร และชั้นฐานรากมีความหนา 3.00 เมตร ตามลำดับ สำหรับโครงสร้างใหม่ชั้นคันทางจะถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตมวลเบามวลแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่น 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตั้งแต่ความหนา 0.10-1.00 เมตร

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางสำหรับแบบจำลอง

วัสดุชั้นทาง	ความหนาแน่น (kg/m^3)	โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง
ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Wearing/Binder)	2400	2500	0.35
พื้นทางหินคลุก (CBR≥80%)	2200	350	0.35

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางสำหรับแบบจำลอง (ต่อ)

วัสดุชั้นทาง	ความหนาแน่น (kg/m^3)	โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	อัตราส่วนปัวซอง
รองพื้นทางวัสดุมวลรวม (CBR≥25%)	2000	150	0.35
คันทาง (CBR≥10%)	1900	100	0.35
คอนกรีตมวลเบาแบบเซลล่า	600	1022	0.25
ฐานราก (CBR=4%)	1600	40	0.40

3. เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) กำหนดให้การเคลื่อนที่ที่ด้านล่างของชั้นฐานรากไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง และการเคลื่อนที่ของชั้นอื่น ๆ สามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะแนวดิ่ง

3.3.3 การตรวจสอบแบบจำลอง

เกณฑ์การตรวจสอบแบบจำลองในการศึกษานี้ใช้วิธีการคำนวณหน่วยแรงที่เกิดในโครงสร้างผิวทางแอสฟัลต์ (Stress in flexible pavements) โดยวิธีแรงในระบบสามชั้น (Three-Layer System) ในชั้นใต้ผิวทางที่ถูกแรงกระทำเปรียบกับแบบจำลองโดยต้องไม่เกิน 3% สำหรับเมชแบบละเอียด (Fine mesh) [17] ซึ่งจากผลการศึกษานี้พบว่าค่าความเค้น (Stress) จากทฤษฎีและแบบจำลองแตกต่างกันเท่ากับ 2.17% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

4. ผลการศึกษา

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุผ่านห้องปฏิบัติการ และการวิเคราะห์แบบจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

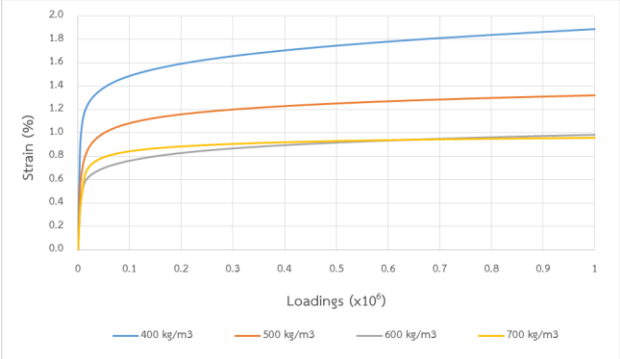
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

จากข้อกำหนดวัสดุถมคันทางแบบอัดแน่นที่มีการไหลตัวสูงของกรุงเทพมหานครได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับใช้ถมคันทางที่ 28 วัน สำหรับรูปทรงกระบอก (Cylinder) ต้องมีกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ไม่น้อยกว่า 15 ksc หรือ 1.4 MPa, กำลังรับแรงดึง (Splitting tensile strength) ไม่น้อยกว่า 1.5 ksc หรือ 0.14 MPa และกำลังรับแรงไดนามิค (Dynamic strength) ไม่น้อยกว่า 0.30 ksc หรือ 0.03 MPa ตามลำดับ โดยผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุชั้นทางสำหรับแบบจำลอง

การทดสอบ	ความหนาแน่น (kg/m^3)			
	400	500	600	700
กำลังรับแรงอัด (MPa)	0.39	0.89	1.72	2.05
โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	556.24	902.42	1222.23	1376.36
อัตราส่วนปัวซอง	0.22	0.24	0.25	0.25
กำลังรับแรงดึง (MPa)	0.02	0.1	0.18	0.24
กำลังรับแรงไดนามิค (MPa)	0.06	0.21	0.38	0.43

จากผลการประเมินการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent deformation) ของวัสดุ ความคืบ (Creep) ถูกใช้เพื่อประเมินคุณสมบัติของวัสดุในระยะยาว ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงไดนามิคพบว่าความเครียด (Strain) ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่น 400–500 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากวัสดุมีความความล้าสะสม จนทำให้เกิดการเสียรูปในช่วงที่สองหรือทุติยภูมิ (Secondary creep) ซึ่งการเสียรูปดังกล่าวอาจส่งผลให้วัสดุเกิดการวิบัติ (Failure) จนเกิดการเสียรูปช่วงที่สามหรือไตรภูมิ (Tertiary creep) อย่างไรก็ตาม คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่น 600-700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แม้ว่าเวลาจะผ่านไปมาก ทำให้เกิดการเสียรูปในช่วงที่สองหรือทุติยภูมิยังไม่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากวัสดุมีการปรับตัวให้เหมาะสมเมื่อถูกแรงกระทำ



รูปที่ 6 ความคืบ (Creep) ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลในห้องปฏิบัติการของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าโดยใช้ข้อกำหนดวัสดุถมคันทางแบบอัดแน่นที่มีการไหลตัวสูงสามารถสรุปได้ว่าความหนาแน่นที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุคันทางสำหรับถนนแอสฟัลต์คอนกรีตคือ ความหนาแน่น 600-700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร หรือความหนาแน่นตั้งแต่ 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ขึ้นไป

4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์

ผลการวิเคราะห์ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และการแอ่นตัว (Settlement) ใต้ชั้นพื้นทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นคันทาง ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินโครงสร้างถนนลาดยางที่มีพื้นทางเป็นวัสดุไม่มีการเชื่อมแน่น (Unbound Material) เพื่อป้องกันชั้นทางเกิดการยุบตัวและเสียรูปถาวร และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างแบบมาตรฐาน และโครงสร้างใหม่ที่ชั้นคันทางถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีความหนาตั้งแต่ 0.1 เมตรจนถึง 1.0 เมตร ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความเค้น (Stress) จากแบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์

ความหนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (m)	ความเค้น (MPa)		
	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นคันทาง
0.0	0.097	0.025	0.004
0.1	0.097	0.020	0.108
0.2	0.097	0.018	0.081
0.3	0.096	0.017	0.073
0.4	0.095	0.017	0.061
0.5	0.094	0.019	0.052
0.6	0.059	0.019	0.045
0.7	0.097	0.203	0.039
0.8	0.097	0.204	0.034
0.9	0.082	0.019	0.029
1.0	0.082	0.021	0.026

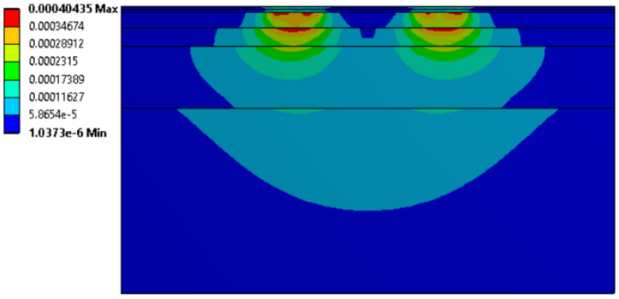
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความเครียด (Strain) จากแบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์

ความหนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (m)	ความเครียด ($x10^{-4}$)		
	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นคันทาง
0.0	2.59	2.07	1.22
0.1	2.86	1.36	1.31
0.2	2.81	1.17	1.88
0.3	2.81	1.28	1.53
0.4	2.69	1.27	1.21
0.5	2.69	1.29	0.52
0.6	2.68	1.34	0.42
0.7	2.63	1.42	0.38
0.8	2.62	1.38	0.32
0.9	2.46	1.46	0.29
1.0	2.42	1.45	0.26

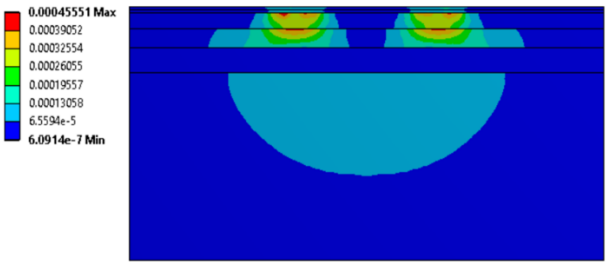
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์การแอ่นตัว (Settlement) จากแบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์

ความหนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (m)	การแอ่นตัว (mm)		
	ชั้นพื้นทาง	ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นคันทาง
0.0	0.399	0.313	0.186
0.1	0.406	0.333	0.328
0.2	0.364	0.289	0.280
0.3	0.332	0.251	0.242
0.4	0.303	0.220	0.186
0.5	0.282	0.195	0.183
0.6	0.263	0.174	0.161
0.7	0.247	0.157	0.141
0.8	0.234	0.141	0.126
0.9	0.221	0.128	0.112
1.0	0.206	0.116	0.098

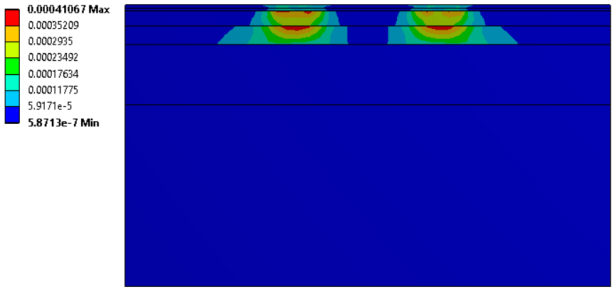
นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ความเครียดภายในชั้นคันทาง ดังแสดงในรูปที่ 7-9 พบว่าเมื่อใช้คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุคันทางสำหรับถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเปรียบเทียบกับโครงสร้างชั้นคันทางแบบดั่งเดิม การใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนา 0.40 เมตร สามารถลดความเครียดได้ดีกว่าการใช้ทรายบดอัดที่ความความหนา 1.00 เมตร และความเครียดดังกล่าวจะลดเรื่อย ๆ เมื่อความหนาของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างชั้นคันทางมีการยุบตัวและเสียรูปถาวรที่ต่ำลง เนื่องจากเป็นวัสดุที่แทนที่ดังกล่าวมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้น



รูปที่ 7 ความคืบ (Creep) ภายในชั้นคันทางของโครงสร้างมาตรฐานที่ใช้ทรายบดอัด 1.00 เมตร



รูปที่ 8 ความคืบ (Creep) ภายในชั้นคันทางของโครงสร้างใหม่ที่ใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า 0.40 เมตร



รูปที่ 9 ความคืบ (Creep) ภายในชั้นคันทางของโครงสร้างใหม่ที่ใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า 1.00 เมตร

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์ด้วยโปรแกรม ANSYS พบว่าคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าความหนาแน่น 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่ความหนาตั้งแต่ 0.40 เมตรขึ้นไป สามารถประยุกต์ใช้ในชั้นคันทางของโครงสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์กรุงเทพมหานครได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบน้ำหนักของวัสดุ

ของโครงสร้างที่กระทำกับชั้นดินฐานรากของถนน โดยประยุกต์ใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าความหนาแน่น 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่ความหนา 0.40 เมตร จะส่งผลให้น้ำหนักของโครงสร้างลดลงประมาณ 7.9 เท่าจากโครงสร้างแบบดั่งเดิม ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างถนนโดยรวมมีเสถียรภาพในระยะยาวที่ดี

5. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้เป็นการนำเสนอการใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าเป็นวัสดุทางเลือกในชั้นคันทางของโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งถูกออกแบบตามแบบมาตรฐานงานทางกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2565 เพื่อลดน้ำหนักของวัสดุที่กระทำบนฐานรากดินเหนียวอ่อน โดยประเมินคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาผ่านห้องปฏิบัติการ เพื่อคัดเลือกความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสมมาใช้ในการประเมินหาความหนาสำหรับการประยุกต์ใช้ในชั้นคันทางของโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตผ่านแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนา 0.40 เมตร สามารถลดความเค้น ความเครียด และการทรุดตัวบนชั้นดินฐานรากลงได้ดีกว่าโครงสร้างถนนแบบดั่งเดิม นอกจากนี้น้ำหนักของโครงสร้างในชั้นคันทางที่ถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตมวลเบาจะลดลงกว่า 7.9 เท่าจากโครงสร้างแบบดั่งเดิม ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างถนนมีเสถียรภาพระยะยาวจากการเสียรูปถาวร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (Mahanakorn University of Technology, MUT), ห้องปฏิบัติการและวิจัยภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, KMITL), ศูนย์ทดสอบงานถนนและรถไฟ มหาวิทยาลัยเซาเวสเจียวทง (Southwest Jiaotong University, SWJTU) และสำนักงานวิศวกรรมทาง สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (2564). รายงานผลข้อมูลระยะทางถนนและระยะทางราง เพื่อสนับสนุนการพัฒนาขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ. สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร

[2] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2546). *ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง*. บริษัท จุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ.

[3] สรศักดิ์ ชัยทวี, อิทธิ ตริสิริสัตยวงศ์ และ อนุเผ่า อบแพทย์ (2557). การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออกของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยเทคนิค Time-Series InSAR. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19*, ขอนแก่น, หน้าที่ 1-7.

[4] Soralump, S. (1996). Evaluation of design mix procedures for the soil-cement with and without additives for application to the reconstruction of the Bangna-Trad Highway improved with deep mixing method. M.Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

[5] Shui, L. S., Zhen, S.H., Ye, S. X., Ma, L., and Shen, S. L. (2015). Reducing differential settlements of approach embankments. *Civil Engineering Innovation*, 2, pp.71-86.

[6] Mydin, M. A. O. and Wang, Y. C. (2011) Structural Performance of Lightweight Steel-Foamed Concrete-Steel Composite Walling System under Compression. *Thin-Walled Structures*, 1, pp. 66–76.

[7] สุทธิศักดิ์ ศรลัมพ์ (2561). *การแก้ปัญหาการทรุดตัวของงานถนนงานถมที่ และถมบ่อดินในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยการปรับปรุงคุณภาพดิน และเทคนิค VCM*. ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คระวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 1-45.

[8] ธรรมมา เจียรธราวานิช, ชุมพล ศฤงคารศิริ, สุทธิกานต์ เจียรธราวานิช, ณิชาภา ศรีประสาท และ ณัชชารีย์ จันทร์เฉลียว (2560). ปัญหาถนนทรุดตัวในงานก่อสร้าง. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 1, หน้าที่ 237-244.

[9] สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง (2557). *รายงานขั้นสุดท้าย (Final Report) โครงการประยุกต์ใช้วัสดุมวลเบาประเภท EPS Geofoam ในการก่อสร้างทาง*. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

[10] สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง (2558). *รายงานขั้นสุดท้าย (Final Report โครงการศึกษาการปรับปรุงดินเพื่อลดระยะเวลาการก่อสร้างคันทางบนดินอ่อน*. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

[11] อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์, ธันวิน สวัสดิศานต์ และ ปรนิก จิตต์อารีกุล (2565). *รายงานขั้นสุดท้าย (Final Report โครงการวิจัยเพื่อจัดทำข้อกำหนดและวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางสำหรับประเทศไทย*. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร.

[12] นิพนธ์ สุวรรณสุขโรจน์ (2540). *คอนกรีตวิทยา*. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, ขอนแก่น.

[13] Martin, D., Marian, D., Katarína, Z., Matej, B., Matej, H. and Walter, S. (2016). Foam Concrete as New Material in Road Constructions. *Procedia Engineering*, 161, pp. 428 – 433.

[14] Marta, K., Marcin, K. และ Alfred, K. (2017). Application of foamed concrete in road pavement-weak soil system. *Procedia Engineering,* 193, pp. 439 – 446

[15] Stantec (2014). *Highway 9 Settlement West of Highway 400, Township of King*. Foundation Investigation and Design

Report prepared for Ministry of Transportation Ontario, Geocres No. 31D-568.

[16] Zaolong, J., Xin, G., Xiaozhe, F. and Dachuan, C. (2022). Research on the Application of Foamed Lightweight Concrete (FLC) in the Construction of Highway Soft Soil Foundation Engineering with Buried High-Pressure Gas Pipes. *Applied Sciences*, 12, pp. 1-13.

[17] Bangyi, L., Yang, Z., Linhao, Gu. and Xiaoming, H. (2020). Finite Element Simulation and Multi-Factor Stress Prediction Model for Cement Concrete Pavement Considering Void under Slab. *Materials*, 13, pp.1-15.