

ผลกระทบของความลาดชันอุณหภูมิต่อหน่วยแรงดึงของถนนคอนกรีต
ชนิดไม่เสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวางในประเทศไทย
Effects of Temperature Gradient on Tensile Stresses of
Jointed Plain Concrete Road in Thailand

พุทธรพล ทองอินทร์ดำ* ประกาศ ทองประไพ กฤษฏี เมลิองนนท์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12110

*Corresponding author: E-mail: puttapon.t@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

มาตรฐานการออกแบบถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตในประเทศไทยใช้วิธีการเชิงประจักษ์ จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับความลาดชันอุณหภูมิในถนนคอนกรีตค่อนข้างน้อย งานวิจัยนี้เลือกถนนคอนกรีตมาตรฐานชนิดไม่เสริมเหล็กและมีรอยต่อตามขวางของกรมทางหลวงชนบทเป็นแบบจำลอง ทำการวิเคราะห์หน่วยแรงจากอุณหภูมิและหน่วยแรงรวมที่เกิดขึ้น รวมทั้งจำนวนเที่ยวของน้ำหนักบรรทุกที่รับได้ โดยใช้วิธีออกแบบผิวทางเชิงกลศาสตร์-เชิงประจักษ์ (MEPD) ของ Eisenmann และของ Dutch ซึ่งพบว่าค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุด $0.109\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ที่บันทึกได้จากแปลงทดสอบช่วงระยะ 6 เดือนแรกของปี มีค่าสูงกว่าค่าในฐานข้อมูลของโปรแกรมวิเคราะห์ผิวทางเชิงพาณิชย์ และในกรณีศึกษาที่พบว่าการใช้ค่าตามฐานข้อมูลของโปรแกรมนั้นส่งผลให้วิศวกรประเมินประสิทธิภาพถนนคอนกรีตสูงกว่าความเป็นจริงได้มากถึงร้อยละ 35 โดยเฉลี่ย ดังนั้นผลการศึกษานี้จึงเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบถนนคอนกรีตในประเทศไทยด้วยวิธี MEPD ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ถนนคอนกรีตของไทย หน่วยแรงจากอุณหภูมิ การออกแบบผิวทางเชิงกลศาสตร์-เชิงประจักษ์

ABSTRACT

The design standards for Portland cement concrete road in Thailand are based on empirical design methods. Hence, there are very few studies about temperature gradient in concrete road. In this research a jointed plain concrete road according to the Department of Rural Highway standard is selected as a pavement model. Two different mechanistic-empirical pavement design (MEPD) methods, Eisenmann and Dutch, are employed to analyze temperature stresses, total stresses and allowable number of load applications. The results obtained from the test sections show that the maximum temperature gradient found in the first 6-month period of the year is $0.109\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$. This value is obviously higher than the maximum value provided in commercial software for pavement design. For the case study, using the maximum value in software database can lead to about a 35 percent overestimation of bearing capacity. Therefore, the results reported in this study should be an important data for more efficient design of concrete road in Thailand using MEPD.

Keyword: Thai concrete road, Temperature stresses, Mechanistic-Empirical Pavement Design (MEPD)

1. บทนำ

ถนนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตหรือที่นิยมเรียกว่าถนนคอนกรีต ซึ่งจะใช้เรียกต่อไปในบทความนี้เป็นโครงสร้างผิวทางที่มีความแกร่ง (Rigidity) และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจึงสามารถรับน้ำหนักปริมาณการจราจรได้ดีกว่าถนนแอสฟัลต์คอนกรีต ในการออกแบบจึงพิจารณาให้แผ่นคอนกรีตเป็นตัวรับกำลังทั้งหมด และวัสดุชั้นทางถัดลงไปเป็นฐานรองรับเท่านั้น ซึ่งตัวแปรหลักในการออกแบบคือหน่วยแรงดึงรวมจากการดัด (Total flexural tensile stress) ทั้งนี้จะพบว่าค่าหน่วยแรงดึงนี้เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งและช่วงเวลาที่ใช้พิจารณา

เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างถนนคอนกรีตให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงทำได้ยากมากด้วยหลายสาเหตุ เช่น ความแปรผันของชั้นดินและความชื้นตลอดแนวยาวที่ถนนพาดผ่าน ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรทุกและจำนวนเที่ยวที่คาดการณ์ตลอดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยังต้องเผชิญกับสภาพอากาศที่แปรเปลี่ยนตามฤดูกาล โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตลอดเวลา ทำให้การออกแบบในอดีตนิยมใช้วิธีเชิงประจักษ์ (Empirical design) ซึ่งอาศัยข้อมูลการทดสอบและผลของวิธีออกแบบเดิมเป็นหลัก ในด้านหนึ่งพิจารณาได้ว่าวิธีออกแบบเชิงประจักษ์มีความน่าเชื่อถือทางวิศวกรรมในระดับดี เมื่อใช้ออกแบบในพื้นที่ที่วิธีการนั้นพัฒนาขึ้น แต่อีกด้านหนึ่งก็มีข้อด้อยที่ชัดเจนคือ เมื่อนำวิธีนี้ไปใช้ออกแบบในพื้นที่อื่นที่คุณสมบัติของวัสดุและสภาพอากาศแตกต่างออกไปก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาเพื่อปรับแก้ตัวแปรให้เหมาะสมกับพื้นที่ใหม่ ทำให้หลายประเทศในทวีปยุโรปและอเมริกาหันมาใช้วิธีการออกแบบผิวทางเชิงกลศาสตร์-เชิงประจักษ์ (Mechanistic-Empirical Pavement Design, MEPD) ซึ่งเป็นการออกแบบโดยอาศัยทฤษฎีกลศาสตร์ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางโครงสร้าง (Responses) เช่น หน่วยแรง ความเครียด การเคลื่อนตัว เป็นต้น และปรับค่าการออกแบบให้เหมาะสมด้วยการปรับค่าตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุชั้นทางและสภาพแวดล้อมในพื้นที่นั้น

ทั้งนี้ตั้งแต่ Westergaard [1] และอีกหลายท่าน [2,3] เสนอทฤษฎีวิเคราะห์หน่วยแรงในผิวทางคอนกรีต แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในแผ่นคอนกรีตทำให้เกิดหน่วยแรงได้ในระดับเดียวกับกับหน่วยแรงจากน้ำหนักจราจร แต่หน่วยแรงจากอุณหภูมิเกิดขึ้นตลอดเวลา ซึ่งความแปรผันของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในพื้นที่นั้นเป็นหลัก ในขณะที่หน่วยงานหลักด้านงานทางในประเทศไทย เช่น กรมทางหลวง หรือ กรมทางหลวงชนบท เลือกใช้วิธีออกแบบถนนคอนกรีต โดยอ้างอิงวิธีการออกแบบเชิงประจักษ์ของ Portland Cement Association (PCA) เช่น วิธี PCA 1984 [4] เป็นต้น ซึ่งวิธีของ PCA พัฒนาขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีปัจจัยที่แตกต่างกับประเทศไทยทั้งด้านวัสดุก่อสร้าง น้ำหนักบรรทุก และโดยเฉพาะสภาพภูมิอากาศ

ประเทศไทยอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตร มีอากาศที่ร้อนอบอ้าวทั้งปี อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 27 °C ในช่วงฤดูร้อนจะมีอุณหภูมิสูงถึง 40 °C หรือมากกว่า [5] อุณหภูมิที่แปรผันในแผ่นคอนกรีตส่งผลให้เกิดความเสียหายที่พบเห็นได้ทั่วไป เช่น รอยร้าวตามแนวขวาง (Transverse cracking) ดังรูปที่ 1ก หรือ การยกตัว (Blowups) จากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมากทำให้ถนนคอนกรีตที่ออกแบบระยะระหว่างรอยต่อไม่เหมาะสม ขยายตัวจนดันให้ยกตัวขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1ข ซึ่งเกิดอันตรายต่อผู้ใช้ทางได้

จากเหตุผลที่กล่าวมานี้ ทีมผู้วิจัยจึงทำการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการและจากแปลงทดสอบ ตรวจวัดค่าอุณหภูมิแวดล้อม และการกระจายของอุณหภูมิตลอดความหนาของถนนคอนกรีต ทำการวิเคราะห์พฤติกรรม การรับน้ำหนักบรรทุกของถนนคอนกรีตตามมาตรฐานที่ใช้ก่อสร้างจริงในประเทศไทย ด้วยการคำนวณจากวิธี MEPD โดยในบทความนี้เป็นกรนำมาผลทดสอบที่ได้ช่วง 6 เดือนแรกของปี (มกราคม – มิถุนายน 2558) ซึ่งครอบคลุมช่วงฤดูร้อนที่สภาพอากาศรุนแรงที่สุดในประเทศไทย มาวิเคราะห์เทียบกับกรณีเลือกใช้ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากฐานข้อมูลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ออกแบบผิวทางเชิงพาณิชย์ที่พัฒนาขึ้นในทวีปยุโรป ซึ่งจะทำให้วิศวกรไทยเข้าใจพฤติกรรมถนนคอนกรีตและสามารถออกแบบให้รองรับสภาพอากาศที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น



(ก)



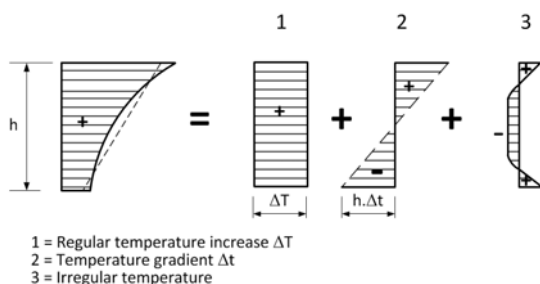
(ข)

รูปที่ 1 ก) รอยร้าวตามแนวขวาง
ข) การยกตัวของถนนคอนกรีต [6,7]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุณหภูมิในแผ่นพื้นถนนคอนกรีต

ความแปรผันของอุณหภูมิแวดล้อมของถนนคอนกรีตส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความหนา (h) แผ่นคอนกรีต โดยจำแนกได้ดังรูปที่ 2 คือ ส่วนที่ 1 แบบสม่ำเสมอ (Regular) ส่วนที่ 2 แบบลาดชัน (Gradient) และส่วนที่ 3 แบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular)



รูปที่ 2 การจำแนกอุณหภูมิในผิวทางคอนกรีต [8] โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมของแผ่นคอนกรีตจากแต่ละกรณีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังนี้

1) กรณีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสม่ำเสมอ (Regular temperature change) เมื่ออุณหภูมิลดหรือเพิ่มแบบสม่ำเสมอจะทำให้คอนกรีตพยายามจะหดหรือยืดตัวแบบรักษาระนาบของแผ่นไว้ จึงเกิดแรงเสียดทานกับ

วัสดุรองรับในทิศทางตรงข้าม และเกิดหน่วยแรงดึงหรืออัดขึ้นในแผ่นคอนกรีต ซึ่งหากแผ่นคอนกรีตมีระยะห่างของรอยต่อที่เหมาะสม ความเสียหายจากกรณีนี้จะมีน้อย และไม่อยู่ในขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้

2) กรณีความลาดชันอุณหภูมิ (Temperature gradient, Δt) แสดงในรูปความต่างของอุณหภูมิที่ผิวบน (T_t) และผิวล่าง (T_b) ของแผ่นคอนกรีตเทียบกับความหนา (h) ของแผ่นคอนกรีต ดังสมการที่ 1

$$\Delta t = \frac{T_t - T_b}{h} \quad (1)$$

กรณีกลางวันซึ่งผิวบนจะร้อนกว่าผิวล่าง แผ่นคอนกรีตจะโก่งงอ (Warping) เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งช่วงกลางของขอบแผ่น ซึ่งมักเป็นตำแหน่งวิกฤตที่ใช้ในการออกแบบ พบว่าแรงต้านจากน้ำหนักตัวคอนกรีตทำให้เกิดหน่วยแรงดึงที่ผิวล่างแผ่นคอนกรีตและยังมีทิศทางเดียวกับหน่วยแรงดึงจากน้ำหนักจราจร ในขณะที่ทิศทางของหน่วยแรงจากอุณหภูมิช่วงกลางคืนจะหักล้างกับหน่วยแรงจากการจราจร นอกจากนี้โดยทั่วไปปริมาณการจราจรในช่วงกลางวันจะมากกว่าช่วงเวลากลางคืน [2] ทำให้หน่วยแรงดึงรวมช่วงเวลากลางวันจะสูงกว่ากลางคืนมาก ด้วยเหตุนี้มาตรฐานการออกแบบผิวทางคอนกรีตในหลายประเทศเลือกวิเคราะห์หน่วยแรงดึงจากช่วงกลางวัน ซึ่งก็คือช่วงเวลาที่เกิดความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกเท่านั้น

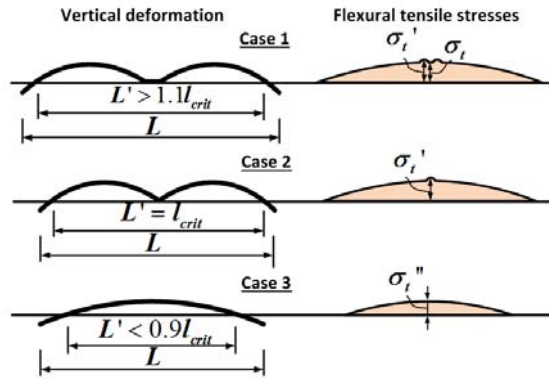
3) กรณีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบไม่สม่ำเสมอ (Irregular temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิส่วนที่เหลือจาก 2 กรณีแรก โดยจากงานวิจัยของ Lui และ Fwa [9] ได้สรุปว่าอุณหภูมิส่วนดังกล่าวมีผลกระทบในกรณีที่คอนกรีตมีความหนามาก เช่น ผิวทางสนามบิน เป็นต้น จึงไม่อยู่ในขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้

ด้วยเหตุผลข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแวดล้อมในประเทศไทยที่เกิดกับหน่วยแรงในถนนคอนกรีตจากความลาดชันอุณหภูมิเท่านั้น

2.2 หน่วยแรงจากความลาดชันอุณหภูมิ

Eisenmann [2] ได้นำเสนอทฤษฎีวิเคราะห์หน่วยแรงในแผ่นคอนกรีตขณะที่ความลาดชันอุณหภูมิเป็นบวก โดยพิจารณารูปตัดตามยาวของแผ่นคอนกรีตดังรูปที่ 3 และนิยามให้ “ความยาววิกฤต” (critical

length, l_{crit}) เป็นความยาวที่แผ่นโค้งตัวและกึ่งกลางแผ่นทั้งตัวแต่ละฐานรองรับพอดี หลักการวิเคราะห์แบ่งออกได้ 3 กรณี ขึ้นอยู่กับความยาววิกฤต และความยาวช่วงแผ่นพื้น (L') ซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2 ถึง 4



รูปที่ 3 การโค้งของแผ่นคอนกรีตและหน่วยแรงดึง
ทั้ง 3 กรณีของ Eisenmann

กรณีแผ่นยาว ($L/W > 1.2$ หรือ $L/W < 0.8$)

$$l_{crit} = 200h\sqrt{E\alpha\Delta t} \quad (2a)$$

กรณีแผ่นจตุรัส ($0.8 \leq L/W \leq 1.2$)

$$l_{crit} = 228h\sqrt{E\alpha\Delta t} \quad (2b)$$

เมื่อ $C \ll L$ $C = 4.5\sqrt{\frac{h}{k\Delta t}}$ (3)

$$L' = L - \frac{2}{3}C \quad (4)$$

โดยที่

L, W, h คือ ความยาว, ความกว้างและความหนาของแผ่นคอนกรีต (mm)

E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (MPa)

α คือ สัมประสิทธิ์ขยายตัวจากอุณหภูมิ ($^{\circ}C^{-1}$)

k คือ โมดูลัสสปริงกิริยาของฐานรองรับ (N/mm^3)

Δt คือ ความลาดชันอุณหภูมิ ($^{\circ}C/mm$)

ν คือ อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต

1) กรณีที่ $L' > 1.1 l_{crit}$ เมื่อแผ่นคอนกรีตโค้งตัวช่วงกลางแผ่นทั้งตัวสัมผัสฐานรองรับเป็นระยะทางหนึ่ง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นพอดีจะเกิดหน่วยแรงดึง σ_t ขณะที่ขอบสองด้านที่สัมผัสฐานรองรับเป็นตำแหน่งสุดท้าย

จะมีค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด σ_t' โดยคำนวณได้จากสมการที่ 5 และ 6

$$\sigma_t = \frac{1}{1-\nu} \frac{h\Delta t}{2} \alpha E \quad (5)$$

$$\sigma_t' = 1.2\sigma_t \quad (6)$$

2) กรณี $L' = l_{crit}$ เมื่อแผ่นคอนกรีตโค้งตัวจุดกึ่งกลางความยาวแผ่นทั้งตัวสัมผัสฐานรองรับ ทำให้หน่วยแรงดึงสูงสุด σ_t' อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางพอดี และคำนวณได้จากสมการที่ 6 เช่นกัน

3) กรณี $L' < 0.9 l_{crit}$ เมื่อแผ่นคอนกรีตโค้งตัวโดยช่วงที่ยกตัวยังมีความยาวไม่มาก หน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นจึงลดลงและคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$\sigma_t'' = \left(\frac{L'}{0.9l_{crit}}\right)^2 \sigma_t \quad (7)$$

สำหรับวิธี Dutch ซึ่งเป็นมาตรฐานวิธีวิเคราะห์และออกแบบของประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งพัฒนาโดยหน่วยงาน VNC (Cement Industry Association) และ CROW [2] โดยหลักการคือพิจารณาให้ช่วงกลางขอบตามยาวของแผ่นคอนกรีตเป็นตำแหน่งวิกฤต เมื่อความลาดชันอุณหภูมิแบบบวมมีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดความลาดชันอุณหภูมิ (Limit temperature gradient, Δt_l) ถือว่าแรงยกตัวมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักแผ่นคอนกรีต หรือแผ่นพื้นยังสัมผัสกับชั้นฐานรองรับอย่างสมบูรณ์ (fully support) ทำให้ได้หน่วยแรงดึงดังสมการที่ 8

$$\sigma_t = \frac{h\Delta t}{2} \alpha E \quad (8)$$

เมื่อความลาดชันอุณหภูมิสูงกว่าขีดจำกัดที่คำนวณได้ ช่วงกลางแผ่นพื้นคอนกรีตจะโค้งตัวขึ้นและไม่สัมผัสกับชั้นฐานรองรับ และคำนวณหน่วยแรงดึงที่ขอบตามยาวและตามขวางได้จากสมการที่ 9a และ 9b ตามลำดับ

$$\text{ขอบตามยาว} \quad \sigma_t = 1.8 \times 10^{-5} L^2 / h \quad (9a)$$

$$\text{ขอบตามขวาง} \quad \sigma_t = 1.8 \times 10^{-5} W^2 / h \quad (9b)$$

2.3 หน่วยแรงจากน้ำหนักบรรทุกจร

นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2469 ที่ Westergaard [1] ได้เสนอทฤษฎีวิเคราะห์หน่วยแรงในผิวทางคอนกรีตภายใต้น้ำหนักกระทำ และต่อมามีนักวิจัยหลายท่านรวมทั้ง Westergaard เองได้นำเสนอสมการชุดปรับปรุงอีกหลายครั้ง ในที่นี้แสดงเฉพาะสมการวิเคราะห์หน่วยแรงที่ตั้งตำแหน่งขอบแผ่นตามแนวยาว ซึ่งนิยมใช้เป็นตำแหน่งวิกฤตของผิวทางคอนกรีต JPCP ซึ่งจากผลการศึกษาภายหลัง [1,3] พบว่าสมการที่ 10 ซึ่งเป็นสมการดั้งเดิมของ Westergaard นั้นมีความคลาดเคลื่อนและมีการนำเสนอขึ้นใหม่ เช่น สมการที่ 11 และ 12 [3,9] ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องอย่างดีกับผลจากการวิเคราะห์แบบไฟไนต์อิลิเมนต์

ขอบแผ่น (ทฤษฎีดั้งเดิม น้ำหนักกระทำแบบครึ่งวงกลม)

$$\sigma = \frac{0.529P}{h^2} (1 + 0.54\nu) \left\{ \log \left(\frac{Eh^3}{ka_2^4} \right) - 0.71 \right\} \quad (10)$$

ขอบแผ่น (ทฤษฎีใหม่ น้ำหนักกระทำแบบวงกลม)

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + \dots \right. \\ \left. 1.84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{(1-\nu)}{2} + 1.18(1+2\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (11)$$

ขอบแผ่น (ทฤษฎีใหม่ น้ำหนักกระทำแบบครึ่งวงกลม)

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left(\frac{Eh^3}{100ka_2^4} \right) + \dots \right. \\ \left. 3.84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{(1-\nu)}{2} + 0.5(1+2\nu) \frac{a_2}{l} \right\} \quad (12)$$

โดยที่

P คือ น้ำหนักกระทำ (kN)

a คือ รัศมีพื้นที่น้ำหนักแบบวงกลม (mm)

a_2 คือ รัศมีพื้นที่น้ำหนักแบบครึ่งวงกลม (mm)

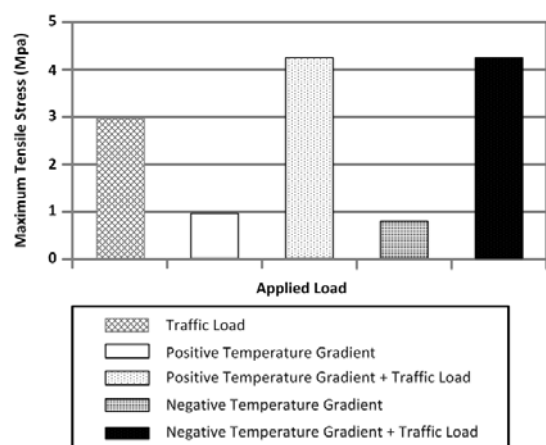
l คือ รัศมีความแกร่งสัมพัทธ์ (mm)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2546 Liu และ Fwa [9] วิเคราะห์โครงสร้างแผ่นคอนกรีตจำลองที่มีขอบทุกด้านอิสระวาง

บนฐานรองรับแบบ Pasternak โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นที่ National University of Singapore ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขนาดของแผ่นพื้นมีผลต่อหน่วยแรงอย่างมากทั้งที่เกิดจากความลาดชันอุณหภูมิและที่เกิดจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งค่าความแตกต่างของหน่วยแรงทั้งสองจะอยู่ระหว่าง 19 ถึง 54 % ในเวลา 13.00 น. นอกจากนั้นความหนาแน่นพื้นที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้หน่วยแรงทั้งสองมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด และในปีเดียวกันชยธน์วิ และคณะ [11] ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในประเทศไทยที่มีต่อการทดสอบสภาพผิวทางคอนกรีตด้วยเครื่องวัดค่าการทรุดตัวจากตุ้มกระแทก โดยวัดอุณหภูมิตลอดความหนาแน่นคอนกรีตช่วงกลางวัน เป็นระยะเวลา 1 วัน พบว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่อผลการทดสอบแบบไม่ทำลาย ได้แก่ การทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก การทดสอบการทรุดตัว รวมถึง การทดสอบค่าโมดูลัสสปริกิริยาของฐานรองรับ และแนะนำช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการทดสอบ คือช่วงเช้าก่อนเที่ยงวันเพราะแผ่นพื้นยังมีการโก่งงอน้อย

ในปี พ.ศ. 2556 Kim และคณะ [12] ทำการศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวเนื่องจากอุณหภูมิเพื่อใช้วิเคราะห์ผิวทางสนามบิน โดยจำลองน้ำหนักเครื่องบินเป็นน้ำหนักกระทำ ได้ผลดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าความลาดชันอุณหภูมิแบบลบทำให้เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงกับการณีความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกได้เช่นกัน



รูปที่ 4 หน่วยแรงดึงจากน้ำหนักจรและจากความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกและลบ [12]

ในการคำนวณออกแบบผิวทางคอนกรีตด้วย MEPD โดยใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ มีการนำค่าความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกมาประกอบการวิเคราะห์ เช่น โปรแกรม PAVERS รุ่น 2.8 ใช้ความถี่ความลาดชันอุณหภูมิแบบ VNC และ Exponential ดังตารางที่ 1 ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกสูงสุดเท่ากับ 0.07 °C/mm [13] ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าความถี่และค่าความลาดชันอุณหภูมิที่สอดคล้องกับพื้นที่ได้ แต่เนื่องด้วยยังไม่มีฐานข้อมูลค่าความลาดชันอุณหภูมิที่ครบถ้วนของประเทศไทย ทำให้มีแนวโน้มที่วิศวกรไทยจะเลือกใช้ค่าที่มีอยู่ในฐานข้อมูลเดิมของโปรแกรม ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอกรณีศึกษาที่สามารถส่งผลผิดพลาดได้เล็กน้อยเพียงใด

ตารางที่ 1 ความถี่และช่วงของความลาดชันอุณหภูมิในโปรแกรม PAVERS v. 2.8 [13]

Temperature gradient class (°C/mm)	Frequency distribution of VNC (%)	Frequency distribution of Exponential (%)
0.000	71.0	58.0
0.007	17.0	21.1
0.014	6.0	10.5
0.021	3.0	5.2
0.028	2.0	2.6
0.035	1.0	1.3
0.042	0.0	0.6
0.049	0.0	0.3
0.056	0.0	0.2
0.063	0.0	0.1
0.070	0.0	0.0

สำหรับการวิเคราะห์หาจำนวนเที่ยวหน้าหนักจราจรที่รับได้ ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ทฤษฎีความล้าตามมาตรฐานการออกแบบของประเทศเนเธอร์แลนด์ ดังสมการที่ 13 และ 14 [14]

$$f_{br} = 1.3(1.6-h)(1.05+0.05(f'_{ck}+8))/\gamma_m \quad (13)$$

$$\log N_f = \frac{12.903 \left(0.995 - \frac{\sigma_{max}}{f_{br}} \right)}{1.000 - 0.7525 \frac{\sigma_{max}}{f_{br}}} \quad (14)$$

สำหรับ $0.50 \leq \frac{\sigma_{max}}{f_{br}} \leq 0.833$

โดยที่

f_{br} คือ ค่าโมดูลัสการแตกร้าวที่อายุ 28 วัน (MPa)

f'_{ck} คือ กำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (MPa)

γ_m คือ ตัวคูณประกอบคอนกรีตภายใต้แรงดึง คือ 1.2

N_f คือ จำนวนเที่ยวของน้ำหนักจราจรที่รับได้

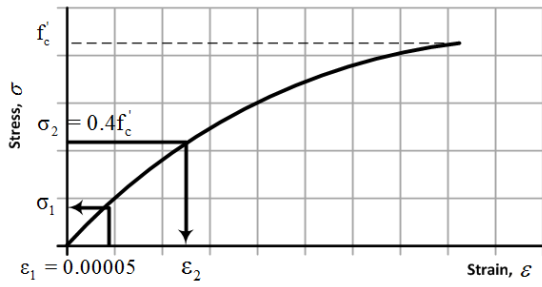
σ_{max} คือ ผลรวมของหน่วยแรงจากน้ำหนักจราจรและจากความลาดชันอุณหภูมิ (MPa)

σ_{min} คือ หน่วยแรงจากความลาดชันอุณหภูมิ (MPa)

3. ขั้นตอนและวิธีการศึกษาวิจัย

3.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีตที่ใช้สร้างแปลงทดสอบ โดยเลือกกรณีกำลังอัดประลัย 27.5 MPa เนื่องจากนิยมใช้สร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทย โดยออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐาน ACI 211.1 [15] และทำตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm จำนวน 30 ตัวอย่าง ทดสอบกำลังอัดในอุณหภูมิห้อง (25 °C) ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน และอีก 10 ตัวอย่างทดสอบที่อายุ 28 วัน โดยควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมให้มีค่า 0, 25, 40, 60 และ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบหากำลังรับแรงอัด ทำการบันทึกอุณหภูมิทั้งภายนอกและภายในจากแก่งตัวอย่างทันทีหลังการทดสอบ และคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469 [16] โดยวัดที่ความเครียด 0.00005 ถึงความเค้นเท่ากับร้อยละ 40 ของความเค้นประลัยดังรูปที่ 5 และคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่นจากสมการที่ 15



รูปที่ 5 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (15)$$

3.2 การเก็บข้อมูลจากแปลงทดสอบ

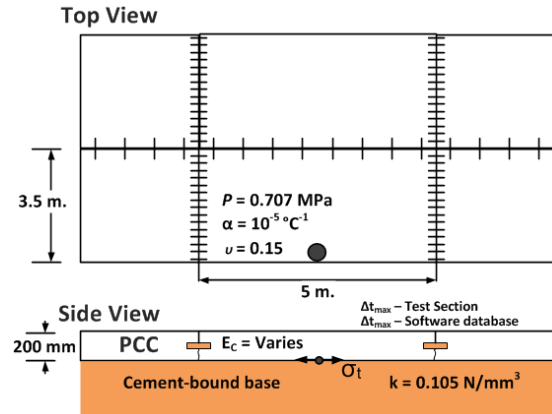
แปลงทดสอบ 2 แปลงถูกสร้างขึ้นในพื้นที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) ดังรูปที่ 6 โดยเทคอนกรีตเชื่อมต่อด้านข้างของถนนคอนกรีตเดิม ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยที่ 27.5 และ 41.2 MPa ซึ่งออกแบบส่วนผสมตามวิธีของ ACI 211.1 [15] แปลงทดสอบมีขนาด 2.0x0.5 m และหนา 20 cm ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิชนิด K (Thermocouple type K) เพื่อวัดอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิตลอดความหนาคอนกรีต ที่ความลึก 0, 2, 6, 10, 14 และ 18 cm จากผิวคอนกรีต กำหนดให้เครื่องบันทึกข้อมูลทุกวันด้วยความถี่ทุก 1 ชั่วโมง โดยมีการสอบเทียบผลทดสอบอย่างสม่ำเสมอ

ข้อมูลอุณหภูมิทั้งหมดที่ได้มาใช้วิเคราะห์แบบจำลองถนนคอนกรีตชนิด JPCP ตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท [17] ดังรูปที่ 7 โดยกำหนดให้มีชั้นฐานรองรับแบบปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์



(ก) (ข)

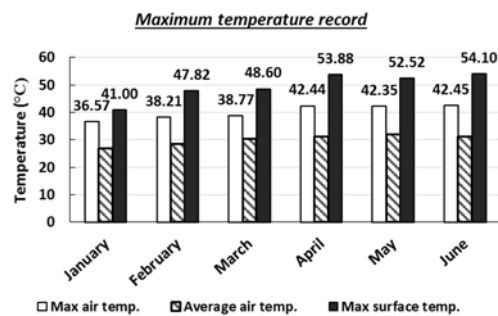
รูปที่ 6 ก) การติดตั้งสายวัดอุณหภูมิชนิด K
ข) สภาพแปลงทดสอบในสนาม



รูปที่ 7 แบบจำลองถนนคอนกรีตที่ใช้วิเคราะห์

จากแบบจำลองในรูปที่ 7 ทำการวิเคราะห์หน่วยแรงดึงจากอุณหภูมิ หน่วยแรงดึงจากน้ำหนักบรรทุกจร ซึ่งมีแรงดันลมยาง 0.707 MPa รวมทั้งวิเคราะห์เปรียบเทียบกรณีเลือกใช้ค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากโปรแกรมเชิงพาณิชย์ PAVERS เทียบกับกรณีใช้ค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้จากแปลงทดสอบ ด้วยวิธี Eisenmann และ Dutch โดยพิจารณาทั้งในรูปของหน่วยแรงและอายุการใช้งานตามทฤษฎีการวิเคราะห์ความล้า

ซึ่งในขั้นตอนนี้จะศึกษาเฉพาะกรณีคอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 27.5 MPa เท่านั้น ไม่รวมกรณี 41.2 MPa เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยต่างกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์ขยายตัวจากอุณหภูมิต่างกัน และอาจส่งผลให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นต่างกันด้วย ซึ่งการศึกษาลักษณะของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่มีต่อหน่วยแรงในผิวทางคอนกรีตอยู่นอกเหนือขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้

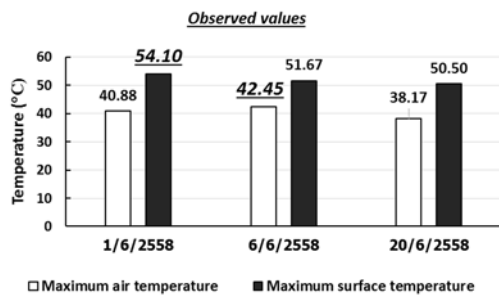


รูปที่ 8 อุณหภูมิอากาศและผิวคอนกรีต

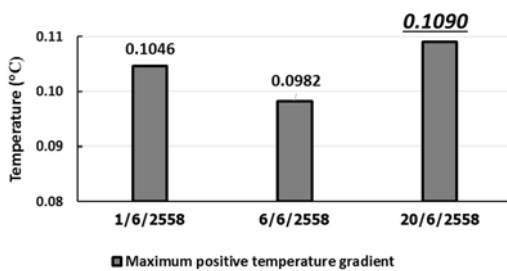
4. ผลการศึกษา

4.1 อุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวคอนกรีต

ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเดือนที่วัดได้จากแปลงทดสอบแสดงในรูปที่ 8 แสดง ซึ่งพบว่าอุณหภูมิอากาศและผิวคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากต้นปีสู่กลางปี แสดงให้เห็นการเปลี่ยนผ่านจากฤดูหนาวสู่ฤดูร้อน และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยมีค่า 26 ถึง 32 °C โดยมีข้อสังเกตว่าอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวคอนกรีตสูงสุด คือ 42.45 และ 54.10 °C ตามลำดับนั้น ไม่ได้อยู่ในช่วงเดือนเมษายน ซึ่งตามสถิติเดิมจะเป็นช่วงเดือนที่ร้อนที่สุดของไทย แต่กลับพบในเดือน มิถุนายน ซึ่งเป็นช่วงเข้าสู่ฤดูฝน โดยอาจเป็นผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก (world climate change) ดังนั้นการเก็บฐานข้อมูลที่เป็นปัจจุบันยังมีความสำคัญมากขึ้นกับการออกแบบถนนคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพดี



(ก)



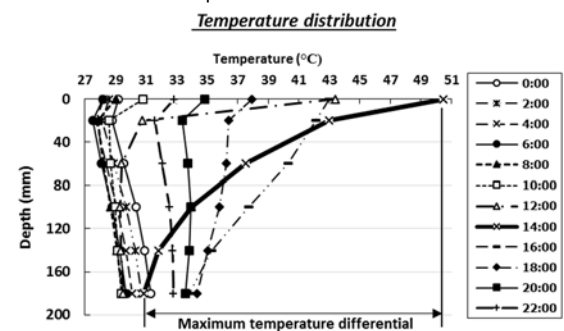
(ข)

รูปที่ 9 ข้อมูลวันที่ 1, 6 และ 20 มิ.ย. 2558
ก) อุณหภูมิ, ข) ความลาดชันอุณหภูมิแบบบวก

จากรูปที่ 9ก พบว่าค่าอุณหภูมิผิวคอนกรีตสูงสุดและอุณหภูมิอากาศสูงสุดตรวจวัดได้ใน วันที่ 1 และ 6 มิ.ย. 2558 ตามลำดับ ในขณะที่ความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกสูงสุดวิเคราะห์ได้ในวันที่ 20 มิ.ย. 2558 เท่ากับ 0.109 °C/mm ดังรูปที่ 9ข โดยอาจมีสาเหตุมาจากอยู่ใน

ช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ครีษมายัน (Summer Solstice) ซึ่งเป็นวันที่มีช่วงกลางวันยาวนานที่สุดของปี อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้นี้ทำให้ได้ข้อสังเกต 2 ประการ คือ ความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดในประเทศไทยมีค่าสูงกว่าค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดในฐานข้อมูลของโปรแกรม PAVERS คือ 0.07 °C/mm และค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดมักพบในวันที่อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูงแต่ไม่จำเป็นต้องสูงสุด เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลกระทบได้ เช่น ความยาวของช่วงกลางวัน ลม ความชื้น เป็นต้น

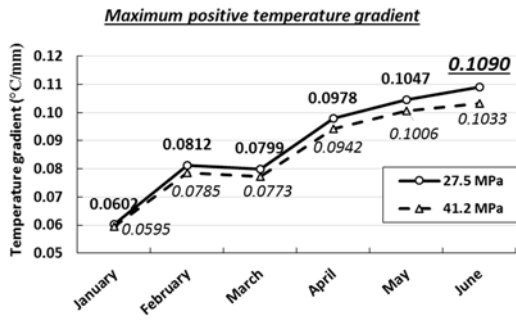
รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดความหนาแน่นคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย 27.5 MPa ในวันที่ 20 มิ.ย. 2558 ซึ่งมีค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุด พบว่าช่วงกลางคืนจนถึง 8.00 น. มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวบนและล่างเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้น ความแตกต่างดังกล่าวมีค่ามากขึ้น และมากที่สุดในเวลา 14.00 น. เท่ากับ 18.82 °C



รูปที่ 10 การกระจายตัวของอุณหภูมิในคอนกรีต (27.5 MPa) วันที่ 20 มิ.ย. 2558

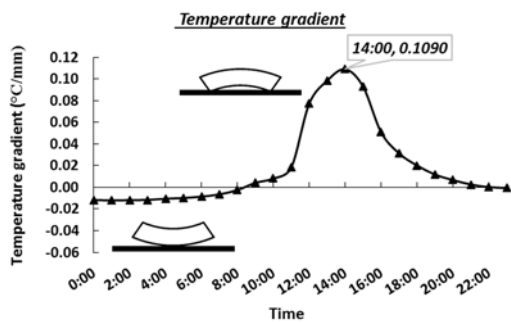
4.2 การวิเคราะห์ความลาดชันอุณหภูมิ

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเดือนที่วัดได้จากแปลงทดสอบของคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย 27.5 MPa กับกรณี 41.2 MPa มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในช่วงเดือนมกราคม หรือ กุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิอากาศไม่สูงนัก แต่ความแตกต่างนี้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงเดือนต่อมาที่อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 11 ความลาดชันอุณหภูมิแบบบวก จาก 2 แปลงทดสอบ

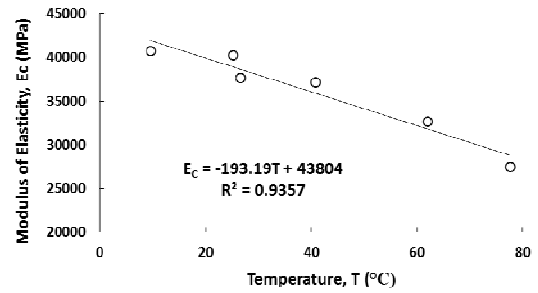
ผลวิเคราะห์ค่าความลาดชันอุณหภูมิในวันที่ 20 มิ.ย. 2558 แสดงในรูปที่ 12 ซึ่งพบว่าความลาดชันอุณหภูมิแบบลบ เกิดขึ้นในช่วงกลางคืนจนถึง 08.00 น. โดยประมาณ จึงเปลี่ยนเป็นแบบบวก และกลับเป็นแบบลบอีกครั้งที่ประมาณ 22.00 น. รวมระยะเวลาที่เกิดความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกได้ 22 ชั่วโมง ซึ่งตลอด 6 เดือน พบว่าช่วงระยะเวลาการเกิดความลาดชันอุณหภูมิแบบบวกในแต่ละวันค่อนข้างแปรผันและแตกต่างกันไปตามฤดูกาล



รูปที่ 12 ความลาดชันอุณหภูมิตายชั่วโมง วันที่ 20 มิ.ย. 2558

4.3 ผลวิเคราะห์หน่วยแรงจากอุณหภูมิ

ผลจากห้องปฏิบัติการได้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของคอนกรีต (27.5 MPa) ดังรูปที่ 13 ด้วย ค่า $R^2 = 0.9357$ ซึ่งค่อนข้างสูง พบว่าคอนกรีตมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งให้เห็นว่าผิวทางคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายในช่วงเวลากลางวันมากกว่าช่วงเวลากลางคืน



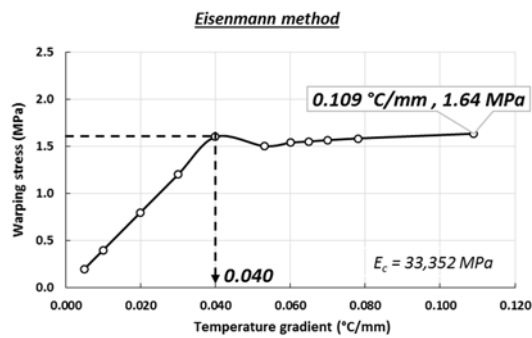
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับอุณหภูมิคอนกรีตที่กำลังอัดประลัย 27.5 MPa

ตารางที่ 2 แสดงค่าอุณหภูมิคอนกรีตที่บันทึกได้จากแปลงทดสอบและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่วิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 13

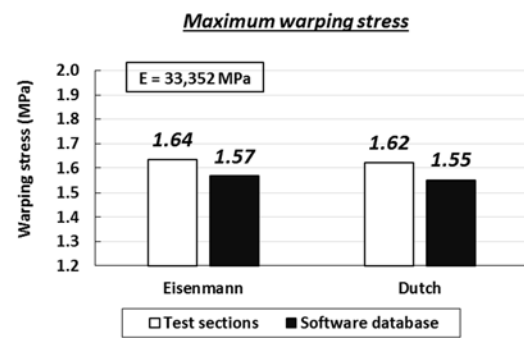
ตารางที่ 2 อุณหภูมิและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีต

อุณหภูมิคอนกรีตที่ตำแหน่งใดๆ (°C)	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (MPa)
18.29	40,270
20.00	39,940
30.00	38,008
40.00	36,076
50.00	34,144
54.10	33,352

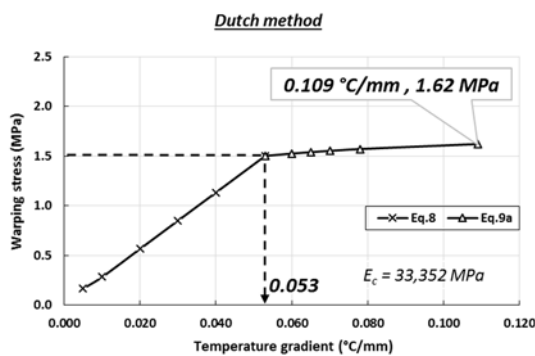
เพื่อจำลองสภาวะการณที่อุณหภูมิมีอิทธิพลรุนแรงที่สุด จึงเลือกใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำสุดจากตารางที่ 2 33,352 MPa กำหนดให้เป็นคุณสมบัติของคอนกรีตในแบบจำลอง JPCP ที่แสดงไว้ในรูปที่ 7 โดยได้ผลวิเคราะห์หน่วยแรงที่กึ่งกลางขอบตามยาวด้วยวิธี Eisenmann ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งพบว่าค่าหน่วยแรงดึงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเชิงเส้นในช่วงแรก และลดลงเล็กน้อยที่ความลาดชันอุณหภูมิประมาณ 0.040 °C/mm จากนั้นหน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนถึงที่ค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุด 0.109 °C/mm จึงเกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดขนาด 1.64 MPa



รูปที่ 14 หน่วยแรงดึงจากความลาดชันอุณหภูมิที่ขอบตามยาวตามวิธีของ Eisenmann



รูปที่ 16 หน่วยแรงดึงจากความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากแปลงทดสอบและจากฐานข้อมูลใน PAVERS



รูปที่ 15 หน่วยแรงดึงจากความลาดชันอุณหภูมิที่ขอบตามยาวตามวิธีของ Dutch

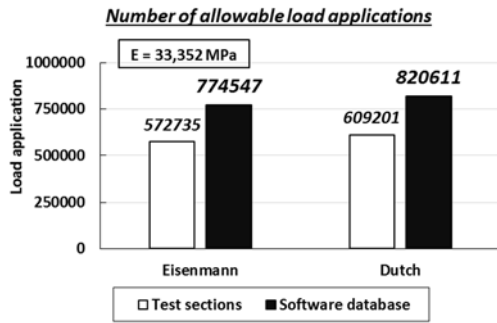
เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองเดียวกันด้วยวิธีของ Dutch ได้ผลดังรูปที่ 15 พบว่าหน่วยแรงดึงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเชิงเส้นในช่วงแรกเช่นกัน (Eq. 8) จนถึงขีดจำกัดความลาดชันอุณหภูมิ 0.053 °C/mm หน่วยแรงดึงเปลี่ยนเป็นเพิ่มขึ้นที่ละน้อย (Eq. 9) จนถึงความลาดชันอุณหภูมิสูงสุด 0.109 °C/mm ได้หน่วยแรงดึงสูงสุด 1.62 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าวิธีของ Eisenmann เพียงเล็กน้อยคือร้อยละ 1.2 จึงกล่าวได้ว่าทั้ง 2 วิธีให้ผลการวิเคราะห์ในภาพรวมไปในทิศทางเดียวกัน

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์กรณีวิศวกรรม ไม่มีฐานข้อมูลความลาดชันอุณหภูมิในประเทศไทยและเลือกใช้ค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดในฐานข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Software database) เช่น โปรแกรม PAVERS คือ 0.07 °C/mm เทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแปลงทดสอบ ได้ผลดังรูปที่ 16 ซึ่งหน่วยแรงดึงลดลงโดยเฉลี่ย 0.07 MPa หรือร้อยละ 4.3

4.4 ผลวิเคราะห์อายุการใช้งาน

ผลวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจรของแบบจำลอง JPCP ที่แสดงในรูปที่ 7 ใช้สมการที่ 11 วิเคราะห์หน่วยแรงดึงจากน้ำหนักจรจรกดที่กึ่งกลางขอบแผ่นตามยาวของแผ่นคอนกรีต โดยยังคงกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคอนกรีต $E_c = 33,352$ MPa ได้หน่วยแรงดึงเท่ากับ 2.04 MPa ซึ่งเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้นี้และหน่วยแรงดึงจากความลาดชันอุณหภูมิที่ได้ไปวิเคราะห์อายุการใช้งานตามทฤษฎีความล้าในสมการที่ 13 และ 14 ได้ผลดังรูปที่ 17 ซึ่งเป็นไปตามคาดว่าวิธีของ Eisenmann ยอมให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้น้อยกว่าวิธี Dutch เล็กน้อย เนื่องจากผลวิเคราะห์หน่วยแรงดึงจากอุณหภูมิมีค่าสูงกว่า

หากตั้งสมมติฐานว่าการใช้ข้อมูลจากแปลงทดสอบเป็นค่าที่ถูกต้องและเหมาะสมกับการวิเคราะห์โครงสร้างผิวทางคอนกรีตในประเทศไทยมากกว่า จะพบว่าผลจากวิธีของ Eisenmann และ Dutch ที่สภาวะความลาดชันอุณหภูมิจากแปลงทดสอบมีค่าสูงสุดคือ 0.109 °C/mm โครงสร้างถนนคอนกรีตจะรับน้ำหนักบรรทุกได้ 572,735 และ 609,201 เทียวดตามลำดับ แต่เมื่อใช้ค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดตามฐานข้อมูลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ 0.07 °C/mm โครงสร้างเดียวกันนั้นจะรับได้มากถึง 774,547 และ 820,611 เทียวดตามลำดับ หรืออีกนัยหนึ่งคือจะทำให้วิศวกรประเมินประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของถนนคอนกรีตสูงกว่าความเป็นจริงถึงร้อยละ 35 โดยเฉลี่ย



รูปที่ 17 ผลวิเคราะห์อายุการใช้งานจากการเลือกใช้ความลาดชันอุณหภูมิที่ต่างกัน

5. บทสรุปผลการศึกษา

จากการศึกษานี้สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1) อุณหภูมิแวดล้อมที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ความลาดชันอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น โดยข้อมูลล่าสุดของโครงการวิจัยนี้พบค่าความลาดชันอุณหภูมิสูงสุดจากแปลงทดสอบ คือ $0.109\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ในช่วงบ่ายของปลายเดือนมิถุนายน หรือช่วงเข้าสู่ฤดูฝนของประเทศไทย โดยอาจเป็นผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก (world climate change) ซึ่งยิ่งทำให้การเก็บข้อมูลที่ต้องการและเป็นปัจจุบันมีความสำคัญยิ่งขึ้นต่อการออกแบบโครงสร้างถนนคอนกรีต

2) ภายใต้อุปสรรคการศึกษานี้พบว่าค่ากำลังอัดประลัยจะมีอิทธิพลต่อความลาดชันอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเมื่อระดับอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าต่ำ และอิทธิพลนี้จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าเพิ่มมากขึ้น

3) ความสัมพันธ์เชิงเส้นของโมดูลัสยืดหยุ่นกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของคอนกรีต ที่ได้จากห้องปฏิบัติการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ค่อนข้างสูง และชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตอกย้ำสมมติฐานที่ว่าถนนคอนกรีตมีโอกาสเกิดความเสียหายในช่วงเวลากลางวันมากกว่าช่วงเวลากลางคืน

4) วิธีการวิเคราะห์ผิวทางคอนกรีตของ Eisenmann และ Dutch เป็นวิธีแบบ MEPD ที่ให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียว โดยในกรณีศึกษานี้วิธีของ Eisenmann ได้ค่าหน่วยแรงดึงมากกว่าวิธี Dutch เล็กน้อย คือร้อยละ 1.2 แต่พบว่าวิธี Dutch มีความสะดวกรวดเร็วกว่าในการวิเคราะห์

5) การวิเคราะห์และออกแบบถนนคอนกรีตโดยเลือกใช้ค่าความลาดชันอุณหภูมิจากฐานข้อมูลต่างท้องถิ่น เช่น ฐานข้อมูลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ผิวทางที่พัฒนาขึ้นในประเทศอื่น อาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ โดยจากกรณีศึกษานี้พบว่าทำให้วิศวกรประเมินประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของถนนคอนกรีตสูงกว่าความเป็นจริงถึงร้อยละ 35 โดยเฉลี่ย ซึ่งจะส่งผลทำให้ถนนคอนกรีตพังเสียหายก่อนกำหนด

ดังนั้นจึงสรุปในภาพรวมได้ว่าผลการศึกษานี้จากงานวิจัยนี้ น่าจะเป็นข้อมูลและแนวทางที่สำคัญสำหรับการออกแบบถนนคอนกรีตในประเทศไทยด้วยวิธี MEPD ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

6. ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อเนื่อง

ถึงแม้ว่าปัจจุบันหน่วยงานหลักด้านงานทางในประเทศไทยยังคงใช้วิธีการออกแบบเชิงประจักษ์ แต่แนวโน้มการเปลี่ยนมาใช้วิธีการออกแบบเชิงกลศาสตร์-เชิงประจักษ์ (MEPD) ในหลายประเทศที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีแสดงให้เห็นถึงการยอมรับในความถูกต้องและแม่นยำกว่าของวิธีการนี้ หากมีฐานข้อมูลที่ครบถ้วน ดังนั้นทีมผู้วิจัยจึงยังคงเก็บข้อมูลจากแปลงทดสอบอย่างต่อเนื่องทุกฤดูกาล โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างฐานข้อมูลความถี่ของความลาดชันอุณหภูมิ และแบบจำลองการคาดการณ์ความลาดชันอุณหภูมิ เพื่อให้การออกแบบถนนคอนกรีตในประเทศไทยมีประสิทธิภาพสูงสุดตามเจตนารมณ์ของวิศวกรผู้ออกแบบ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี พุทธศักราช 2557 ให้เป็นทุนวิจัยเพื่อดำเนินโครงการ “ผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางแบบแกร่งภายใต้สภาวะแวดล้อมในประเทศไทย” และขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี ที่สนับสนุน
ห้องปฏิบัติการและพื้นที่แปลงทดสอบงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. M. Westergaard, "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis," *Public Roads*, vol. 7, pp. 25-35, 1926.
- [2] Eisenmann, J., "Concrete Pavements-Design and Construction (in German)," *Wilhelm Ernst & Sohn*, Berlin/Munich/Düsseldorf, 1979.
- [3] Ioannides, A.M., Thompson, M.R. and Barenberg, E.J., "The Westergaard Solutions Reconsidered". *Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements*. 5-6 June 1986. Ede, Netherlands: 13-23, (1987).
- [4] PCA, "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements," *Portland Cement Association*, 1984.
- [5] กรมอุตุวิทยามหาวิทยาลัย. (2558, มิถุนายน. 2). *ภูมิอากาศของประเทศไทย*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.tmd.go.th/>
- [6] ASTV ผู้จัดการออนไลน์. (2558, มิถุนายน. 2). *ชาวเมืองข้างแตกตี้น ถนนคอนกรีตยกตัว*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.manager.co.th/>
- [7] กรมทางหลวงชนบท. *คู่มือบำรุงปกติ*. พิมพ์ครั้งที่ 3. (พ.ศ. 2555).
- [8] Houben, L. J. M., "Structural Design of Pavements: Part IV Design of Concrete Pavements," Delft University of Technology, Netherland, 2009.
- [9] W. Lui and T. F. Fwa, "Effects of Nonlinear Temperature Distribution on Thermal Stresses in Concrete Pavements," *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol.5, pp. 1023-1034, 2003.
- [10] H. M. Westergaard, "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields," *ASCE Transactions*, vol. 113, pp. 425-444, 1948.
- [11] ชยชนันท์ พรหมศร, ธนศักดิ์ ไร่กระโทก, เลิศ พัดฉวี และ พรชัย ศีลารมย์. *การประเมินสภาพผิวทางถนนที่มีผิวชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ในประเทศไทย*. รายงานฉบับที่ ว.พ. 206. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์, (2546).
- [12] S. H. Kim, J. Y. Park and J. H. Jeong, "Effect of Temperature-induced Load on Airport Concrete Pavement Behavior," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, pp. 182-187, 2014.
- [13] PAVERS, "PAVERS User Help Manuals," Netherland, 2008.
- [14] CROW, "Guideline on PCN Assignment in the Netherlands," CROW-Report 05-06, 2005.
- [15] American Concrete Institute, "ACI 318M-95: Building Code Requirements for Structural Concrete," 2000.
- [16] American Society for Testing and Materials, "ASTMC 469-94: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression," 2001.
- [17] กรมทางหลวงชนบท. *แบบมาตรฐานงานทาง*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ, (2556).