

Investigation of thermal stress in concrete pavement based on the finite element method

Tran Nam Hung*, Pham Duc Tiep

Military Technical Academy, 236 Hoang-Quoc-Viet Street, Hanoi, Vietnam

Article info

Type of article:

Original research paper

*Corresponding author:

E-mail address:

tranhung@lqdtu.edu.vn

Received:

November 23, 2021

Accepted:

February 14, 2022

Published:

March 2, 2022

Abstract: The variation of ambient temperature in days causes thermal stress in the cement concrete slabs of the road rigid pavement. There have been many studies on this issue in the literature. However, because the thermal stress in the pavement depends a lot on the climatic condition of the region where the road is located, so this topic is still being interested by scientific community. In the technical standards of rigid pavement calculations of some countries, thermal stress is calculated from the temperature gradient between the concrete slab surface and slab bottom and this quantity is usually taken as a constant value. In fact, the temperature gradient varies continuously with depth from the slab surface. This paper presents the analysis of thermal stress state of concrete pavement caused by the nonlinear distribution of temperature in the slab. Ho Chi Minh City area temperature conditions were used. Numerical calculations in this study were based on the finite element method. The obtained results showed that the concrete pavement slab is continuously subjected to convex and concave bendings and the tensile and compressive thermal stresses occur at all positions in the slab depending on the time of day that could result in thermal fatigue damage of the pavement.

Keywords: concrete pavement; thermal stress; temperature gradient; convex bending; concave bending.

Nghiên cứu trạng thái ứng suất nhiệt trong tấm bê tông xi măng mặt đường bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Trần Nam Hưng*, Phạm Đức Tiệp

Bộ môn Cầu đường sân bay, Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội, Việt Nam

Thông tin bài viết:

Bài báo khoa học

*Tác giả liên hệ:

Địa chỉ E-mail:

tranhung@lqdtu.edu.vn

Ngày nộp bài:

23/11/2021

Ngày chấp nhận:

14/2/2022

Ngày đăng bài:

2/3/2022

Tóm tắt: Sự biến đổi nhiệt độ môi trường trong ngày làm phát sinh ứng suất nhiệt trong tấm bê tông xi măng mặt đường ô tô. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về vấn đề này, song vì ứng suất nhiệt trong mặt đường phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện khí hậu của từng khu vực, do đó chủ đề này vẫn đang được tiếp tục quan tâm của các nhà khoa học. Trong quy trình tính toán mặt đường cứng của một số nước, ứng suất nhiệt được tính từ gradient nhiệt độ giữa mặt tấm và đáy tấm và đại lượng này thường được lấy bằng một giá trị không đổi. Trên thực tế, gradient nhiệt độ thay đổi liên tục theo chiều sâu từ bề mặt tấm. Bài báo này trình bày các phân tích trạng thái ứng suất nhiệt của mặt đường bê tông xi măng do sự phân bố phi tuyến của nhiệt độ trong tấm gây ra. Điều kiện nhiệt độ khu vực thành phố Hồ Chí Minh được sử dụng. Các tính toán dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả nhận được cho thấy, mặt đường bê tông xi măng liên tục chịu uốn vòng và uốn võng và ứng suất kéo, ứng suất nén do nhiệt xuất hiện tại tất cả các vị trí trong tấm tùy thuộc vào thời điểm trong ngày khiến mặt đường dễ bị phá hủy do mỏi nhiệt.

Từ khóa: mặt đường bê tông xi măng; ứng suất nhiệt; gradient nhiệt độ; uốn vòng; uốn võng.

1. Giới thiệu

Đối với mặt đường bê tông xi măng (BTXM), cùng với việc tính toán khả năng chịu tải trọng xe chạy của mặt đường thì một vấn đề không thể bỏ qua là kiểm toán mặt đường dưới tác động của nhiệt độ môi trường, tức là ứng suất nhiệt trong tấm BTXM khi có sự phân bố không đều nhiệt độ trong tấm. Hiện nay quy trình của nhiều nước có những yêu cầu và khuyến cáo việc xem xét và kiểm tra sự tác động của nhiệt độ sau khi đã tính toán đủ về khả năng chịu tải trọng xe chạy của mặt đường cứng [1-5]. Vì sự phức tạp của bài toán và phụ thuộc vào điều kiện khí hậu từng vùng, cho đến nay việc nghiên cứu về trường ứng suất nhiệt

của mặt đường BTXM vẫn đang được tiếp tục được thực hiện để ngày càng hoàn thiện hơn cho các quy trình thiết kế của mỗi quốc gia.

Các điều kiện về khí hậu tự nhiên thường có sự khác biệt khá lớn giữa các vùng, các địa phương, do vậy tác động của chúng đến sự làm việc của mặt đường ô tô và sân bay cũng khác nhau. Việt Nam nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa, sự chênh lệch nhiệt độ trong ngày đôi khi rất lớn. Tại khu vực phía Nam, sự chênh lệch nhiệt độ bề mặt đường trong ngày thậm chí lên đến trên 30°C [6]. Điều đó cho thấy, nó có ảnh hưởng rất nhiều đến trường ứng suất nhiệt trong mặt đường BTXM đường ô tô và sân bay.

Để tính toán ứng suất nhiệt, cho đến nay trong quy trình tính toán mặt đường cứng của Việt Nam người ta thường lấy chênh lệch nhiệt độ giữa mùa nóng và mùa lạnh khi tính toán ứng suất do co ngán và giãn dài tấm, và chênh lệch nhiệt độ mặt trên và mặt dưới của tấm bê tông khi tính toán ứng suất uốn vòng. Trong tính toán ứng suất uốn vòng, gradient nhiệt độ thường được lấy theo một tỷ lệ không đổi của chiều dày tấm. Gradient nhiệt độ này được tính toán dựa trên việc giải bài toán truyền nhiệt một chiều trong một môi trường đồng nhất vô hạn xuất phát từ mặt tấm xuống đến chiều sâu vô cùng và kết quả được lấy trong phạm vi từ mặt tấm đến đáy tấm. Khi đó, sự thay đổi nhiệt độ bề mặt tấm được giả thiết tuân theo một hàm điều hòa. Các giả thiết này phần nào chưa phản ánh chính xác được sự truyền nhiệt thực tế trong kết cấu nền mặt đường BTXM. Thực tế là, nhiệt độ bề mặt tấm biến đổi không theo một quy luật điều hòa [7]. Bằng các thực nghiệm cũng như các tính toán khác nhau nhiều tác giả chỉ ra rằng, sự phân bố nhiệt trong tấm theo chiều sâu tuân theo một quy luật phi tuyến [7-9]. Do vậy, quy luật phân bố trường ứng suất nhiệt trong tấm BTXM cũng sẽ trở nên phức tạp.

Nghiên cứu này dành để phân tích trường ứng suất nhiệt trong tấm BTXM mặt đường ô tô, trong đó nhiệt độ bề mặt tấm được tính toán từ nhiệt độ môi trường và trường ứng suất nhiệt phát sinh do sự phân bố nhiệt độ trong tấm theo chiều dày tấm và theo thời gian. Phương pháp phần tử hữu hạn với phần tử ba chiều sẽ được sử dụng trong nghiên cứu.

2. Các phương trình cơ bản

Bài toán xác định ứng suất nhiệt trong mặt đường BTXM là một bài toán dựa trên một mô hình ứng xử cơ-nhiệt kết hợp (thermo-mechanical behavior). Có nghĩa là, ứng suất phát sinh là do hiệu ứng nhiệt bên trong kết cấu gây ra. Do đó, trước khi tính toán ứng suất nhiệt trong kết cấu ta cần phải biết sự phân bố của trường nhiệt độ trong đó. Để thực hiện được điều này, ta phải giải quyết bài toán truyền nhiệt (heat transfer problem). Tiếp sau đó, ứng suất nhiệt sẽ được tính toán dựa trên do sự phân bố của trường nhiệt độ đã biết dựa trên các điều kiện biên động học. Trong bài báo

này tác giả giới hạn nghiên cứu của mình với một ứng xử nhiệt - đàn hồi tuyến tính.

Như lập luận ở trên, để xác định được trạng thái ứng suất nhiệt của hệ cần phải giải được phương trình truyền nhiệt và phương trình ứng xử nhiệt - đàn hồi. Các phương trình cơ bản này được trình bày ở dưới đây.

2.1. Phương trình truyền nhiệt

Dòng nhiệt trong hệ kết cấu nền - mặt đường có liên quan đến chênh lệch nhiệt độ trong hệ. Quá trình truyền nhiệt tuân theo định luật Fourier. Định luật này thiết lập mối quan hệ về sự biến thiên nhiệt độ theo thời gian (τ) và không gian (tọa độ x , y , z) với các tính chất nhiệt của vật liệu. Đối với vật liệu đồng nhất, đẳng hướng ta có phương trình vi phân truyền nhiệt như sau [10-12]:

Ví dụ, công thức như sau:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

trong đó k là hệ số dẫn nhiệt, ρ là khối lượng riêng và C_p là nhiệt dung riêng của vật liệu.

Đặt $a = k/\rho C_p$ gọi là hệ số khuếch tán nhiệt, thì phương trình vi phân dẫn nhiệt được viết gọn như sau:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T \quad (2)$$

trong đó ∇^2 là ký hiệu toán tử Laplace. Giải phương trình (2) sẽ xác định được trường nhiệt độ trong hệ. Để giải phương trình này cần phải biết được điều kiện ban đầu và điều kiện biên của hệ.

2.2. Phương trình ứng xử nhiệt - đàn hồi

Ta có phương trình ứng xử cơ bản của bài toán nhiệt - đàn hồi trong hệ tọa độ Đề-các ba chiều được cho như sau:

$$\{\varepsilon\}^t = [S] \{\sigma\}^t + \{\alpha\}^t T \quad (3)$$

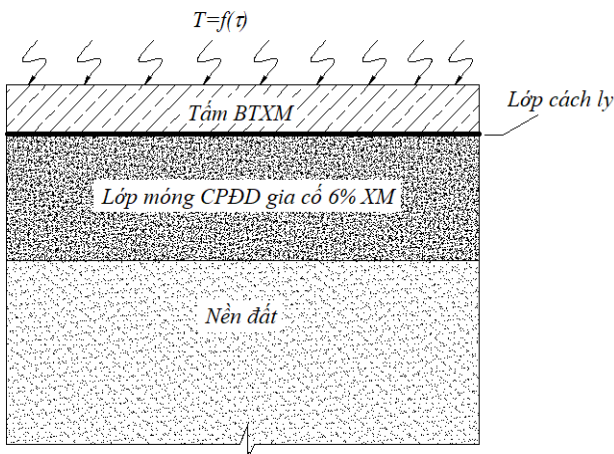
trong đó: $\{\varepsilon\}^t, \{\sigma\}^t, \{\alpha\}^t$ lần lượt là chuyển trí của các vec-tơ biến dạng, ứng suất nhiệt và hệ số giãn nở nhiệt; $[S]$ là ma trận các hệ số mềm của vật liệu, các hệ số này phụ thuộc xác định theo các hằng số đàn hồi của vật liệu bao gồm mô-đun đàn

hồi E, hệ số Poisson ν và mô-đun trượt G [13]; T biểu thị lượng thay đổi nhiệt độ bên trong vật thể.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Mô tả bài toán

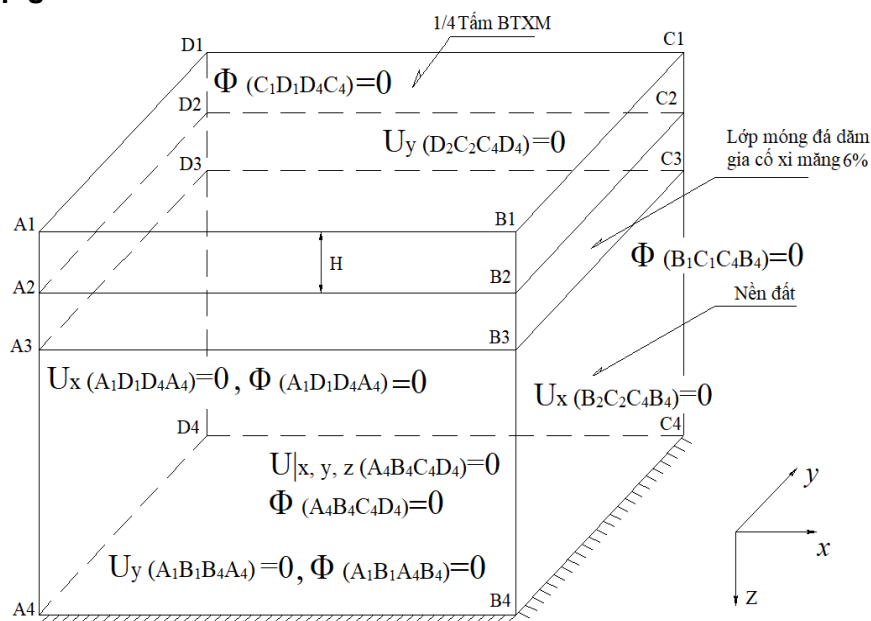
Xét một hệ kết cấu nền - mặt đường bao gồm một tấm bê tông có kích thước mặt bằng $L \times B$ và chiều dày H được đặt trên một lớp móng cấp phối đá dăm gia cố xi măng và dưới cùng là nền đất đầm chặt được minh họa như trên Hình 1. Tấm được giả thiết có các mặt bên tự do (biên tự do).



Hình 1. Mô hình kết cấu mặt đường bê tông xi măng

Ta sẽ xác định trạng thái ứng suất nhiệt của tấm BTXM mặt đường dưới tác động của sự thay đổi nhiệt độ.

3.2. Phương pháp giải



Hình 2. Mô hình hình học và điều kiện biên của hệ

Trong bài báo này, tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để giải bài toán đặt ra. Để giải quyết bài toán đã cho, như đề cập ở phần trên, ta phải giải quyết lần lượt hai bài toán là bài toán truyền nhiệt và bài toán cơ - nhiệt. Lời giải của bài toán truyền nhiệt sẽ cho ta sự phân bố nhiệt độ trong kết cấu, từ đó ta sẽ tính ứng suất nhiệt của kết cấu do trường nhiệt độ này gây ra thông qua bài toán cơ - nhiệt. Bài toán truyền nhiệt đã được giải quyết trong [8]. Trong nghiên cứu này chúng tôi sẽ thực hiện lại thủ tục của bài toán truyền nhiệt để lấy dữ liệu giải quyết bài toán cơ - nhiệt. Tuy nhiên, chúng tôi sẽ không trình bày chi tiết về cách thức giải quyết bài toán truyền nhiệt ở đây.

Quá trình tính toán được thực hiện trên phần mềm phần tử hữu hạn Aster được phát triển bởi Tập đoàn Điện lực Pháp. Ở châu Âu, phần mềm này đã được sử dụng để phân tích các bài toán cơ - nhiệt cho các kết cấu đòi hỏi độ chính xác cao như kết cấu lò phản ứng hạt nhân, các công trình lưu trữ chất thải hạt nhân hay các đập thủy điện, các chi tiết cơ khí chính xác. Sự tin cậy của phần mềm đã được các cơ quan nghiên cứu của Pháp và châu Âu xác nhận.

Để phản ánh một cách sát thực nhất phản ứng cơ - nhiệt của hệ, phần tử hữu hạn ba chiều dạng hình hộp chữ nhật 8 điểm nút được lựa chọn cho tấm BTXM, lớp móng và nền đất. Để mô phỏng sự làm việc của mặt tiếp xúc giữa đáy tấm và lớp móng (đối với mặt đường BTXM thì đây thường là lớp cách ly), chúng tôi sử dụng phần tử tiếp xúc dạng 8 điểm nút trong đó chiều dày của phần tử bằng không.

Mô hình hình học bài toán được minh họa trong Hình 2. Vì tính chất đối xứng qua hai mặt phẳng vuông góc và đi qua hai trung điểm của các cạnh ngắn và dài (mặt phẳng $A_1B_1B_4A_4$ và mặt phẳng $A_1D_1D_4A_4$ trong Hình 2) nên chỉ 1/4 tấm cùng lớp móng và nền đất bên dưới được chọn làm mô hình nghiên cứu.

Các điều kiện biên cho hệ được áp đặt như được trình bày dưới đây.

3.2.1. Điều kiện biên nhiệt học

Trong bài báo này, tác giả dùng những số liệu về nhiệt độ tại thành phố Hồ Chí Minh. Nhiệt độ bề mặt tấm được xác định từ nhiệt độ không khí và bức xạ mặt trời [6]. Nhiệt độ không khí và bức xạ mặt trời được quan trắc tại trạm Xuân Lộc, TP. Hồ Chí Minh từ năm 1993 đến năm 2001. Nhiệt độ không khí và bức xạ mặt trời tương đối cao nhất trong ngày được dùng để tính cho ngày có nhiệt độ bề mặt tấm cao nhất, từ đó áp lên bề mặt tấm. Nhiệt độ bề mặt tấm cao nhất theo giờ trong một ngày đêm được cho trong Bảng 1.

Mặt bên dưới của mô hình hình học dòng nhiệt pháp tuyến qua đó bằng không ($\Phi_{A_4B_4C_4B_4}=0$), tức là xem như không còn sự truyền nhiệt đến

chiều sâu nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, chiều sâu của mô hình được chọn là 1m bao gồm cả tấm bê tông mặt đường, lớp móng đường và nền đất còn lại. Trong [8] cũng chỉ ra rằng, đến chiều sâu cỡ 1m tính từ mặt đường, sự truyền nhiệt đã không còn xảy ra.

Tại các mặt bên của hệ, dòng nhiệt pháp tuyến bằng không ($\Phi_{B_1C_1C_4B_4}=0, \Phi_{C_1D_1D_4C_4}=0$), điều này sẽ luôn được đảm bảo khi có các tấm BTXM khác nằm lân cận tấm đang nghiên cứu.

Tại các mặt giữa phân đôi hệ theo chiều dài và chiều ngang tấm (các mặt phẳng tạo thành 1/4 mô hình như Hình 2) dòng nhiệt pháp tuyến bằng không ($\Phi_{A_1B_1B_4A_4}=0, \Phi_{A_1D_1D_4A_4}=0$).

Trên thực tế, nhiệt độ của hệ bị ảnh hưởng bởi hiện tượng địa nhiệt, tức là nhiệt độ từ lõi quả đất truyền ra. Trong một phạm vi nghiên cứu với chiều sâu của đất nhỏ, có thể xem rằng nhiệt độ của lớp đất nghiên cứu này chủ yếu do nhiệt độ không khí và bức xạ mặt trời ở bên trên gây ra. Khi đó, nhiệt độ ban đầu của hệ có thể lấy bằng nhiệt độ thấp nhất của bề mặt tấm 22,81°C lúc 5 giờ sáng. Với điều kiện ban đầu này, khi áp nhiệt độ lên bề mặt tấm, dưới sự chênh lệch nhiệt độ sẽ xuất hiện dòng nhiệt truyền vào hệ kết cấu nền mặt đường. Đối với mô phỏng số, sau một số chu kỳ ngày đêm trường nhiệt độ trong hệ không thay đổi từ chu kỳ này qua chu kỳ khác, khi đó có thể nói sự diễn biến nhiệt độ trong kết cấu theo một quy luật ổn định. Kết quả của [8] chỉ ra rằng, sau 10 chu kỳ thì điều này đạt được. Do đó trường nhiệt độ của chu kỳ thứ 10 sẽ được dùng cho phân tích cơ - nhiệt.

Bảng 1. Nhiệt độ tính toán bề mặt tấm BTXM tại khu vực TP. Hồ Chí Minh

TT	Giờ tính toán	t_{bm} (°C)	TT	Giờ tính toán	t_{bm} (°C)	TT	Giờ tính toán	t_{bm} (°C)	TT	Giờ tính toán	t_{bm} (°C)
1	7h	25,10	7	13h	56,89	13	19h	27,03	19	1h	23,86
2	8h	32,82	8	14h	54,16	14	20h	26,03	20	2h	23,57
3	9h	41,19	9	15h	49,21	15	21h	25,46	21	3h	23,32
4	10h	48,45	10	16h	43,44	16	22h	25,01	22	4h	23,03
5	11h	53,64	11	17h	36,96	17	23h	24,62	23	5h	22,81
6	12h	56,34	12	18h	29,79	18	24h	24,29	24	6h	23,22

3.2.2. Điều kiện biên cơ học

Tại mặt đáy của mô hình, chuyển vị theo 3 phương bằng không ($U_x, U_y, U_z|_{A_4B_4C_4D_4}=0$), tức là ở một chiều sâu đủ lớn ảnh hưởng cơ học của tấm đến nền đất không còn nữa.

Tại mặt giữa của hệ theo chiều dài tấm (mặt $A_1B_1B_4A_4$) và mặt bên của lớp móng và nền đất theo chiều dọc tấm (mặt $D_2C_2C_4D_4$) chuyển vị theo phương y bằng không ($U_y|_{A_1B_1B_4A_4}=0, U_y|_{D_2C_2C_4D_4}=0$).

Tại mặt giữa của hệ theo chiều ngang tấm (mặt $A_1D_1D_4A_4$) và mặt bên của lớp móng và nền đất theo chiều ngang tấm (mặt bên $B_2C_2C_4B_4$) chuyển vị theo phương x bằng không ($U_x|_{A_1D_1D_4A_4}=0, U_x|_{B_2C_2C_4B_4}=0$).

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Lựa chọn các tham số tính toán

Các khảo sát số cho một hệ kết cấu nền - mặt đường với tấm bê tông có kích thước mặt bằng $L \times B=5,0m \times 4,5m$; $L \times B=4,5m \times 3,5m$ hoặc

$L \times B=4,0m \times 3,0m$ tùy theo trường hợp nghiên cứu. Nhằm mục đích có được cái nhìn tổng quát về trường ứng suất nhiệt phân bố trong tấm BTXM, tác giả khảo sát với các chiều dày tấm $H=22cm, 26cm, 30cm, 32cm, 36cm$ và $40cm$. Các chiều dày tấm như vậy có thể được dùng trong mặt đường ô tô, đường cao tốc hoặc sân bay.

Các tham số vật liệu tấm BTXM cũng như của lớp móng và nền đất được cho trong Bảng 2 dưới đây [2]:

Loại bê tông của tấm với các thông số trong Bảng 2 tương ứng với cường độ chịu kéo uốn $R_{ku}=4,5MPa$ [2].

Bảng 3 cho biết các thông số của mặt tiếp xúc giữa tấm và lớp móng nơi ta dùng phần tử tiếp xúc trong mô phỏng số:

Trong các mô hình sử dụng trong nghiên cứu, số lượng phần tử hình hộp chữ nhật 8 điểm nút là 8400 phần tử.

Bảng 2. Các tham số tính toán của nền mặt đường

Lớp kết cấu	Chiều dày (cm)	Mô-đun đàn hồi E (MPa)	Hệ số Poisson ν	Hệ số giãn nở nhiệt α ($1/^\circ C$)	Hệ số truyền nhiệt k (J/m.giờ.độ)	Nhiệt dung riêng C_p (J/kg.độ)	Khối lượng riêng ρ (kg)
Tấm BTXM	22-40	29000	0,15	10^{-5}	2,33	872	2400
Móng CPĐD gia cố XM 6%	25	6000	0,25	7.10^{-6}	2,1	837	2000
Nền đất đầm chặt		420	0,30	5.10^{-6}	0,9	837	1800

Bảng 3. Các tham số tính toán của mặt tiếp xúc

Hệ số ma sát $f=tg\varphi$	Lực dính đơn vị C (MPa)	Độ cứng pháp tuyến K_n (MPa)	Độ cứng tiếp tuyến K_t (MPa)
0,9	0,05	808	231

4.2. Các kết quả nhận được của trường ứng suất nhiệt

Sau đây chúng tôi sẽ trình bày những kết quả nhận được khi phân tích trường ứng suất nhiệt trong tấm BTXM.

4.2.1. Ảnh hưởng của chiều dày tấm đến trường ứng suất nhiệt của tấm BTXM

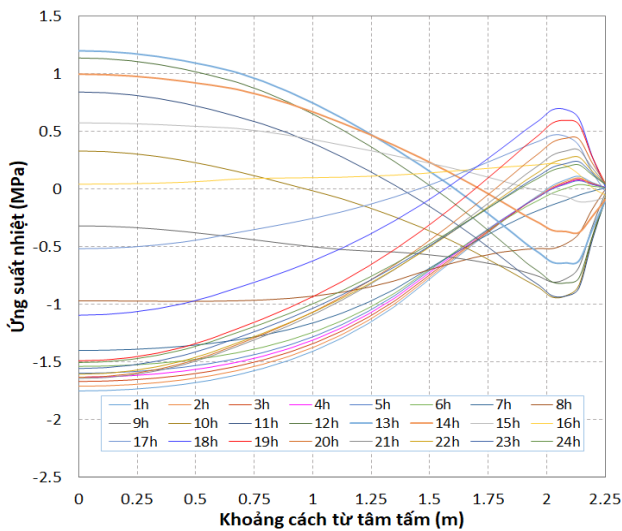
Ở phần này để đánh giá ảnh hưởng của chiều dày tấm đến sự phân bố ứng suất nhiệt trong tấm, ta giữ nguyên kích thước mặt bằng tấm

$L \times B = 4,5m \times 3,5m$ và thay đổi chiều dày từ 22cm đến 40cm như đã đề cập ở trên.

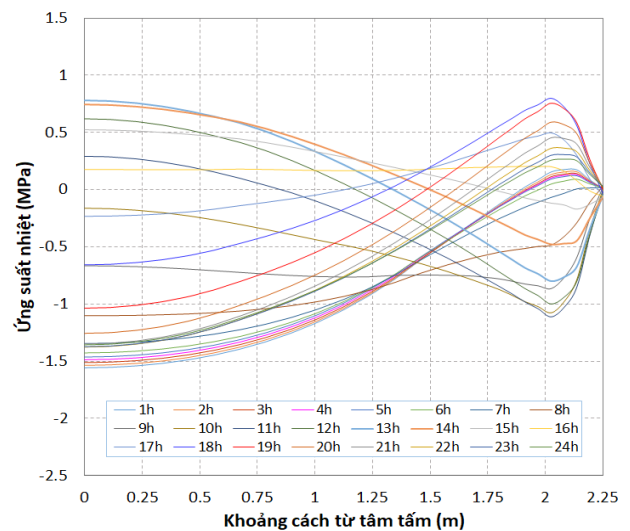
Trong các khảo sát, chúng tôi nhận thấy ứng suất nhiệt theo phương x (theo chiều dọc tấm) thường lớn hơn phương y (theo chiều ngang tấm), và do đó tất cả các ứng suất nhiệt được trình bày ở các phần sau sẽ là ứng suất theo phương X, $\sigma_T = \sigma_x$.

Hình 3 thể hiện ứng suất nhiệt theo giờ trong một chu kỳ ngày đêm (từ 1h đến 24h) trên đoạn thẳng A_2B_2 nối giữa tâm tấm và trung điểm cạnh ngắn và nằm dưới đáy tấm cho hai trường hợp tấm dày 22cm và 26cm. Ta thấy rằng, ứng suất nhiệt của hai trường hợp có sự khác nhau. Đáy tấm mỏng hơn (dày 22cm) xuất hiện ứng suất

nhiệt lớn hơn cả đối với trị số ứng suất kéo và trị số ứng suất nén. Cụ thể là, đối với tấm dày 22cm trị số ứng suất kéo lớn nhất đáy tấm xuất hiện tại khu vực tâm tấm có giá trị bằng 1,20MPa và đạt được tại 13h trong khi trị số này đối với tấm dày 26cm là 0,81MPa và đạt được tại thời điểm 18h. Như vậy khi tăng chiều dày tấm từ 22cm lên 26cm thì trị số ứng suất nhiệt kéo uốn giảm được 33%. Nếu lấy hệ số chiết giảm cường độ dành cho ứng suất nhiệt $k_T = 0,30$ [4, 7], thì $\sigma_{T,max} = 1,20MPa < 0,30 \times R_{ku} = 1,35MPa$, tức là tấm thỏa mãn điều kiện chịu ứng suất nhiệt kéo uốn đáy tấm. Ta cũng thấy rằng, đối với tấm dày 22cm ứng suất kéo lớn nhất đáy tấm do uốn vòng xuất hiện tại khu vực giữa tấm (Hình 3a) trong khi đối với tấm dày 26cm thì tại khu vực gần cạnh tấm (Hình 3b).

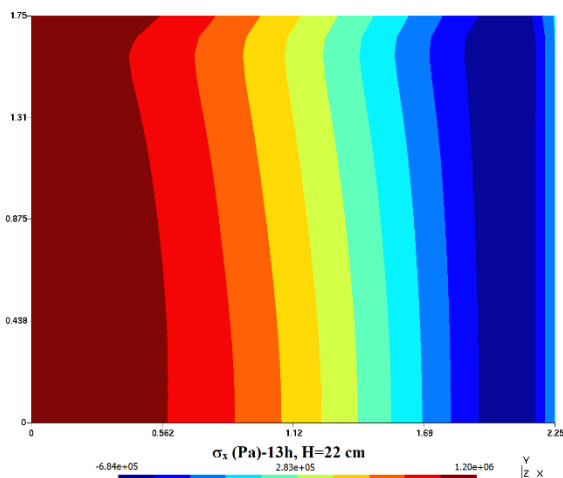


(a)

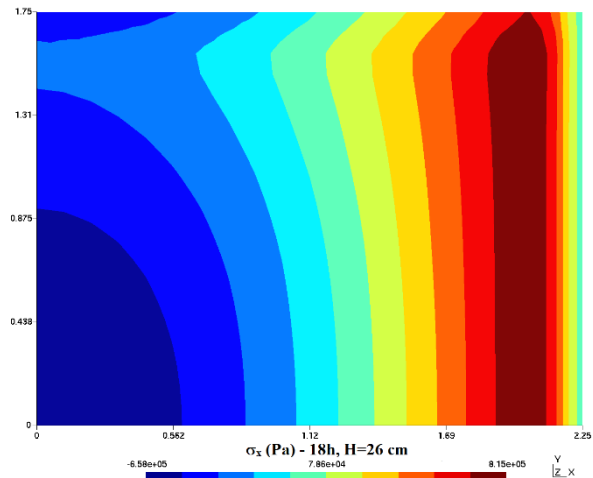


(b)

Hình 3. Ứng suất nhiệt đáy tấm (trên đoạn thẳng A_2B_2) cho tấm dày 22cm (a) và 26cm (b)



(a)



(b)

Hình 4. Phân bố ứng suất nhiệt đáy tấm tại thời điểm 13 giờ - tấm dày 22 cm (a) và tại thời điểm 18 giờ - tấm dày 26cm (b)

Hình 4 minh họa rõ hơn bức tranh phân bố ứng suất nhiệt đáy tấm cho tấm dày 22cm và 26cm lần lượt ở thời điểm 13h và 18h.

Hình 5 biểu thị ứng suất nhiệt theo giờ trong một chu kỳ ngày đêm (từ 1h đến 24h) cho đoạn thẳng A_1B_1 là đoạn thẳng trên bề mặt tấm nối từ tâm tấm đến trung điểm cạnh ngắn của tấm và với hai chiều dày tấm khác nhau là 22cm và 26cm. Ta thấy rằng, giá trị ứng suất nhiệt trên bề mặt tấm gần như bằng nhau cho cả hai chiều dày tấm tương ứng với tất cả các thời điểm trong ngày. Đối với các tấm có chiều dày 30cm, 32cm, 36cm và 40cm cũng cho kết quả tương tự và chúng tôi không thể hiện ở đây. Như vậy có thể nói, giá trị ứng suất nhiệt trên bề mặt tấm không phụ thuộc vào chiều dày tấm. Hiện tượng này có thể được giải thích là gradient nhiệt độ trong phạm vi lân cận bề mặt tấm gây ra ứng suất nhiệt trong khi bề mặt tấm không bị ràng buộc bởi điều kiện biên cơ học nào. Một điểm đáng lưu ý là, trong khoảng thời gian từ 16h chiều đến 7h sáng, trên bề mặt tấm luôn xuất hiện ứng suất kéo là ứng suất có thể gây nứt tấm bê tông; còn từ khoảng 8h sáng đến 15h chiều thì bề mặt tấm chịu nén. Hay nói một cách khác, bề mặt tấm chịu kéo trong khoảng 2/3 thời gian của một chu kỳ ngày đêm trong khi nó chịu nén chỉ trong khoảng 1/3 thời gian còn lại. Giá trị ứng suất kéo lớn nhất trên bề mặt tấm xấp xỉ $2,7\text{MPa}$ xuất hiện tại vị trí tâm tấm và tại thời điểm khoảng 18h tối. Nếu phân cường độ cho tấm BTXM chịu ứng suất nhiệt vào khoảng $(0,30 \div 0,35)R_{ku}$ [4, 7], thì ta thấy rằng giá trị ứng suất nhiệt kéo uốn lớn nhất trên bề mặt tấm $\sigma_T = 2,7\text{MPa} > 0,35R_{ku} = 0,35 \times 4,5 = 1,58\text{MPa}$, có nghĩa là đã vượt trị số ứng suất kéo uốn cho phép. Đây có thể là nguyên nhân gây ra các vết nứt do môi nhiệt của tấm bê tông trong thực tế (trên bề mặt tấm xuất hiện các vết nứt nằm ngang ở khu vực giữa tấm).

Hình 6 thể hiện ứng suất kéo uốn theo chiều sâu ở vị trí tâm tấm với các tấm dày 22cm và 30cm. Ta thấy rằng hầu hết các thời điểm trong ngày, các thớ bê tông bên trên và bên dưới diễn ra các quá trình trái ngược nhau, tức là các thớ trên chịu kéo thì các thớ dưới chịu nén và ngược lại. Đối với tấm dày 22cm thì ở thời gian khoảng 8h sáng cả mặt tấm và đáy tấm đều chịu nén, còn

đối với tấm dày 30cm thì hiện tượng này xảy ra ở khoảng 8÷11h sáng. Trong trường hợp tấm dày 30cm, ta thấy có thời điểm ứng suất kéo do uốn vòng ở chiều sâu giữa tấm còn lớn hơn so với đáy tấm, chẳng hạn thời điểm 12h, trái với quan niệm phổ biến rằng ứng suất kéo do uốn vòng lớn nhất ở đáy tấm. Hiện tượng này sẽ được thấy rõ rệt hơn với các tấm có chiều dày lớn hơn. Hình 6b cho thấy ứng suất kéo lớn nhất tại đáy tấm dày 30cm ở thời điểm 14h (đường màu đỏ) nhỏ hơn khá nhiều ứng suất kéo tại các thời điểm từ 10h đến 13h ở độ sâu từ 16cm đến 20cm. Hiện tượng này chỉ có thể được giải thích là, trên thực tế sự phân bố nhiệt độ trong tấm BTXM theo quy luật phi tuyến chứ không phải là phân bố tuyến tính. Giả thiết phân bố nhiệt độ trong tấm tuyến tính là một giả thiết đơn giản hóa nhằm phục vụ việc tính toán ứng suất nhiệt được dễ dàng.

Các kết quả cũng cho thấy rằng, trong một chu kỳ ngày đêm bên trong tấm luôn xuất hiện ứng suất nhiệt và đại lượng này đổi dấu liên tục khiến cho tấm bê tông có thể bị mỏi nhiệt. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, tại khu vực miền Nam nước ta nhiều mặt đường BTXM bị phá hoại do mỏi nhiệt, tức là tấm bị phá hoại ngay cả khi có rất ít tải trọng bánh xe tác dụng [4, 14].

Để nhìn rõ hơn sự phân bố của trường ứng suất nhiệt trong tấm, ta biểu thị nó dưới dạng hình ảnh ba chiều như trong Hình 7 với tấm dày 26cm và ở một số thời điểm trong ngày. Có thể quan sát thấy rằng, tại thời điểm 10h, vùng lõi của tấm chịu ứng suất kéo lớn nhất, trên bề mặt tấm vẫn chịu nén. Đến 13h vùng chịu kéo đã di chuyển xuống dưới, khu vực xung quanh tâm đáy tấm đã hoàn toàn chịu kéo. Ứng suất kéo đáy tấm đạt được cực đại ở thời điểm 13h sau đó giảm dần và vùng ứng suất kéo lại dần xuất hiện trên bề mặt tấm.

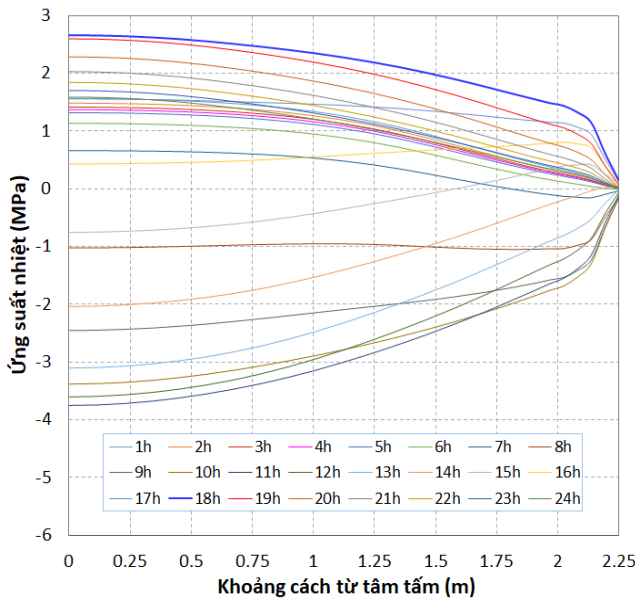
Hình 7c cho thấy rằng, lúc 16h vùng chịu kéo ở trên bề mặt tấm và gần cạnh tấm. Thời điểm 18h thì vùng này di chuyển vào khu vực tâm tấm và đạt giá trị cực đại tại đây (Hình 7d).

Hình 8 là biểu đồ thể hiện giá trị ứng suất kéo lớn nhất do nhiệt ở trên bề mặt tấm và đáy tấm tương ứng với các chiều dày tấm khác nhau. Có thể quan sát thấy rằng, khi chiều dày tấm lớn

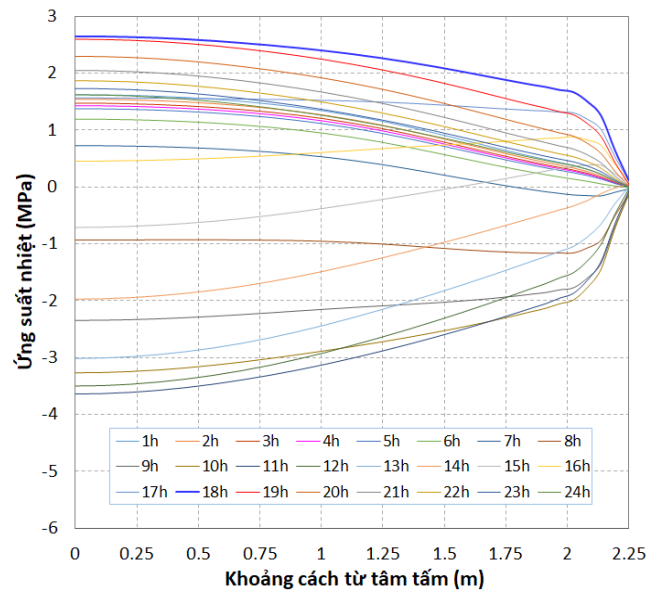
(từ 30cm đến 40cm), giá trị ứng suất kéo uốn lớn nhất dưới đáy tấm dịch chuyển ra sát cạnh tấm chứ không ở khu vực lân cận tâm tấm như ở các tấm có chiều dày nhỏ hơn nữa. Cụ thể là, đối với tấm có chiều dày 32cm thì vùng này nằm cách mép tấm khoảng 0,25m (xem Hình 9a) còn đối với tấm dày 40cm khoảng cách này cỡ 0,3m (xem Hình 9b). Hình 9 cũng cho ta hình dung về sự biến đổi ứng suất nhiệt đáy tấm từ tâm tấm ra cạnh tấm. Đối với tấm có chiều dày 40cm thậm chí chúng ta còn thấy ứng suất kéo tâm tấm rất nhỏ, xấp xỉ bằng không.

Biểu đồ Hình 8 cũng xác nhận lại rằng, khi chiều dày tấm thay đổi ứng suất kéo lớn nhất trên bề mặt có sự biến động không đáng kể.

Từ tất cả các phân tích ở trên ta thấy quá trình diễn tiến của sự phân bố ứng suất nhiệt trong tấm bê tông rất phức tạp. Dấu và giá trị của ứng suất nhiệt cũng như vị trí xuất hiện của nó trong tấm liên tục thay đổi qua các thời điểm khác nhau trong ngày. Do vậy, ảnh hưởng của nó đến sức chịu tải và tuổi thọ của mặt đường BTXM cần phải được chú ý đặc biệt.

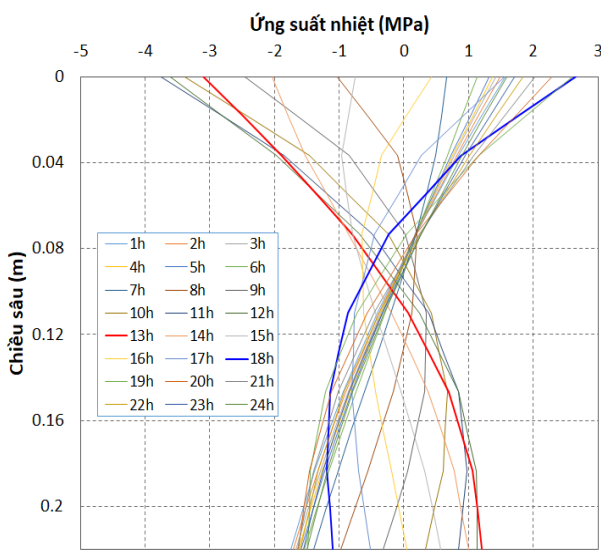


(a)

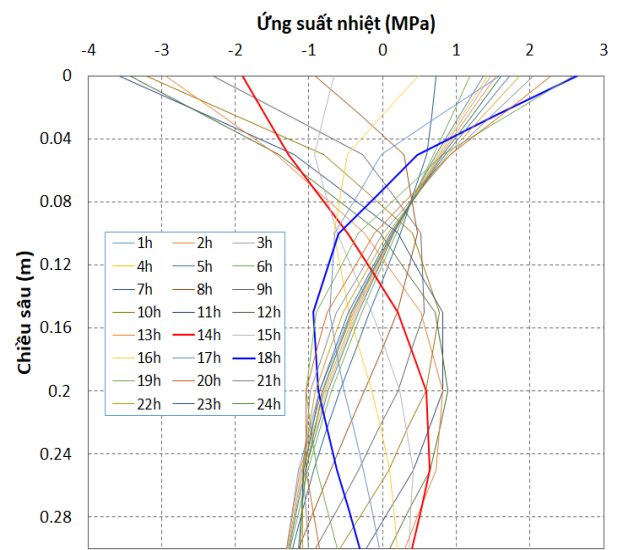


(b)

Hình 5. Ứng suất nhiệt bề mặt tấm (trên đoạn thẳng A1B1), tấm dày 22cm (a) và tấm dày 26cm (b)

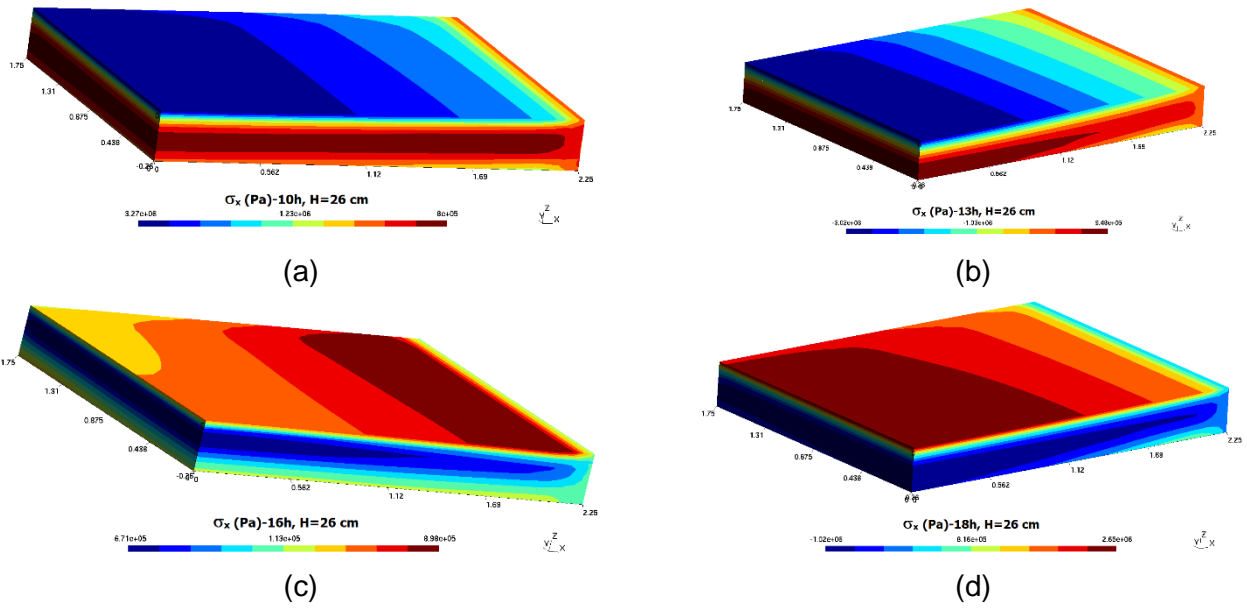


(a)

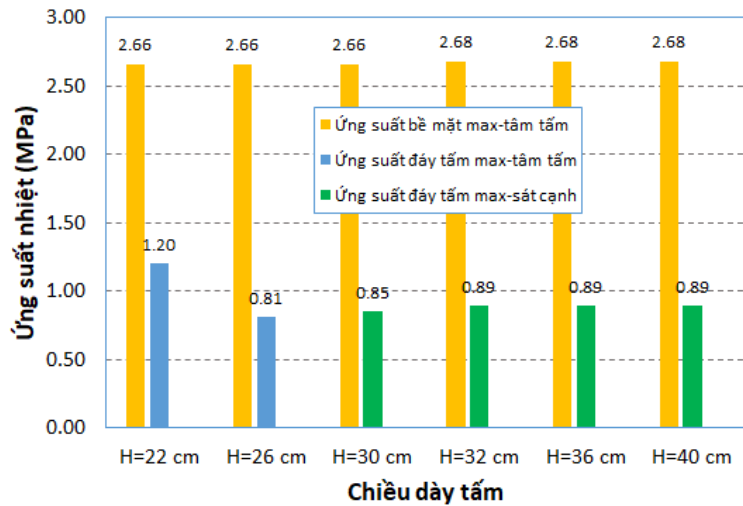


(b)

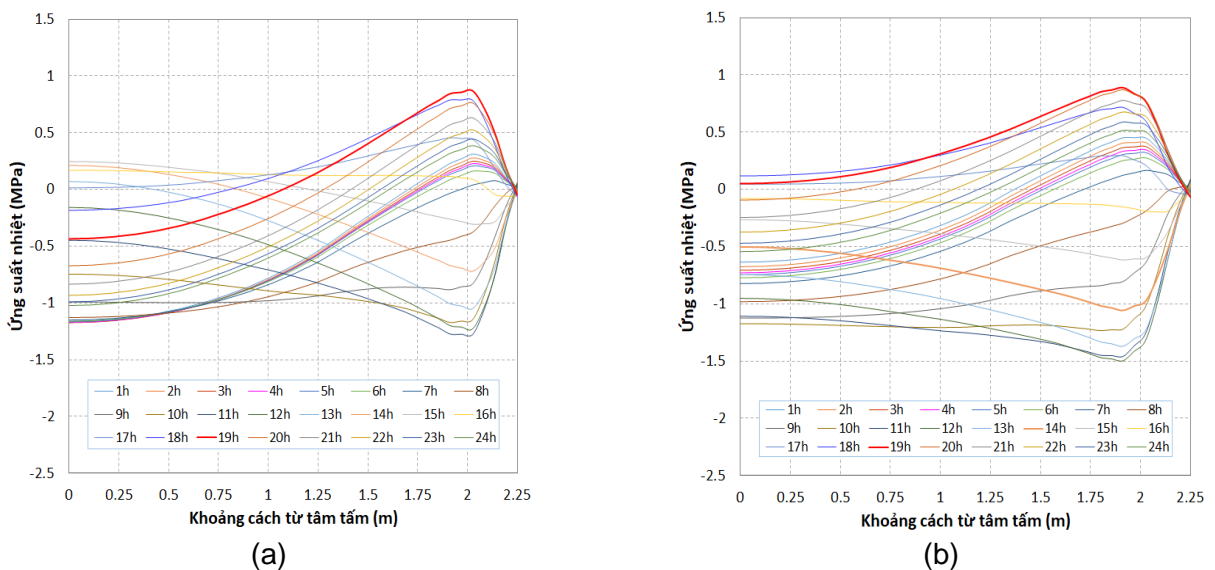
Hình 6. Sự phân bố ứng suất nhiệt theo chiều sâu trên đoạn thẳng đứng qua tâm tấm–tấm dày 22cm (a) và tấm dày 30cm (b)



Hình 7. Trường ứng suất nhiệt trong tấm tại thời điểm 10h (a), 13h (b), 16h (c) và 18h (d)–tấm dày 26cm



Hình 8. Ứng suất nhiệt kéo uốn lớn nhất tại bề mặt và đáy tấm tương ứng với các chiều dày tấm khác nhau



Hình 9. Ứng suất nhiệt đáy tấm (trên đoạn thẳng A2B2) – tấm dày 32 cm (a) và tấm dày 40cm (b)

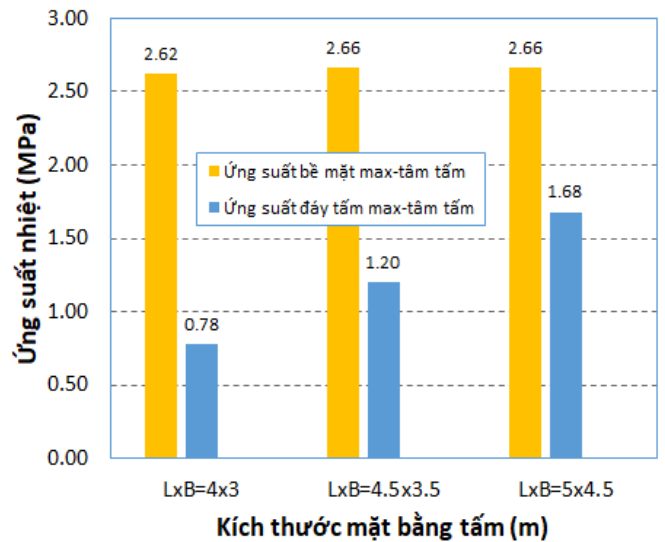
4.2.2. Ảnh hưởng của kích thước mặt bằng tấm đến trường ứng suất nhiệt của tấm

Dưới đây ảnh hưởng của kích thước mặt bằng tấm đến trường ứng suất nhiệt được đánh giá. Do vậy, chỉ chiều dài và chiều rộng tấm được thay đổi trong khi chiều dày tấm được giữ nguyên là 22cm. Ngoài kích thước mặt bằng tấm như đánh giá ở phần trên $L \times B = 4,5 \times 3,5$ m, chúng tôi xét thêm các tấm có các kích thước mặt bằng như sau: $L \times B = 5 \times 4,5$ m và $L \times B = 4 \times 3$ m.

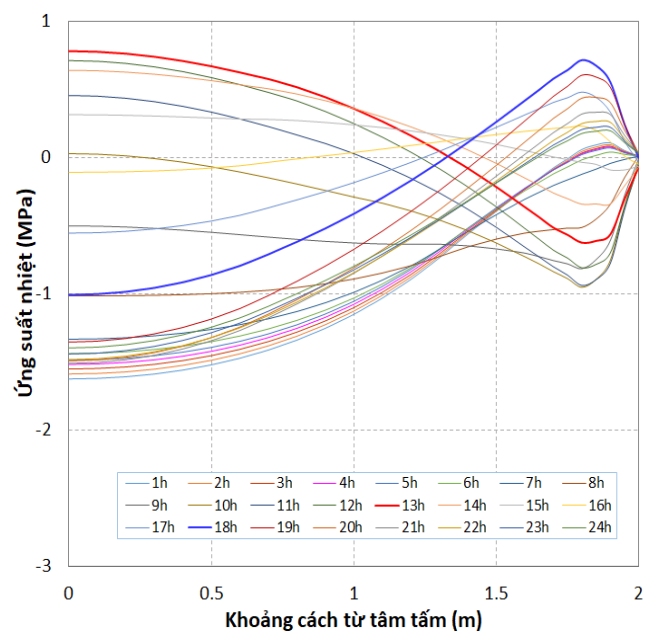
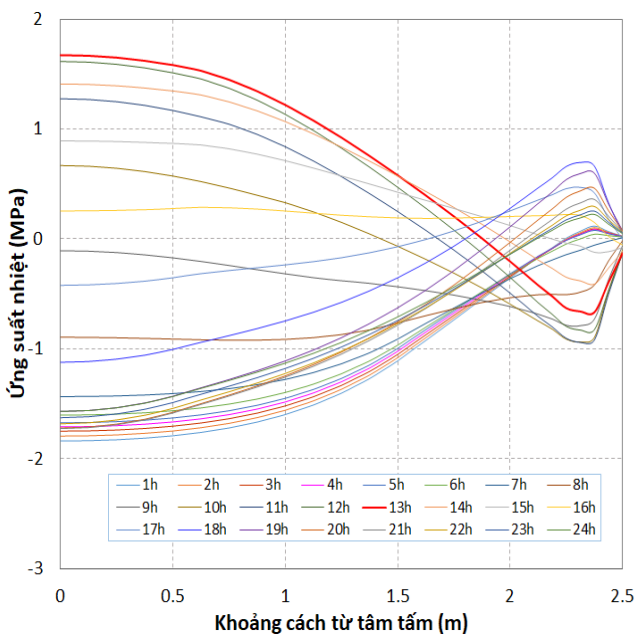
Hình 10 biểu thị ứng suất kéo lớn nhất trên bề mặt và dưới đáy tấm lần lượt do uốn võng và uốn vồng tương ứng với các kích thước mặt bằng tấm khác nhau. Có thể quan sát thấy, như được dự báo, kích thước mặt bằng tấm càng tăng thì trị số ứng suất kéo uốn đáy tấm càng tăng và ngược lại. Điều này hoàn toàn phù hợp với các phương pháp tính toán kinh điển của Westergaard và Brabbury [7, 15]. Hình 11 minh họa rõ hơn ứng suất nhiệt theo giờ cho tấm có $L \times B = 5 \times 4,5$ m và $L \times B = 4 \times 3$ m.

Ở đây thấy rằng với tấm có kích thước lớn, $L \times B = 5 \times 4,5$ m, ứng suất kéo uốn đáy tấm đạt $1,68 \text{MPa} > 0,35R_{ku} = 0,35 \times 4,5 = 1,58 \text{MPa}$, tức là ứng suất nhiệt kéo-uốn đã vượt ứng suất nhiệt kéo uốn cho phép. Tuy nhiên, khi kích thước tấm thay đổi

thì trị số ứng suất kéo lớn nhất do uốn võng trên bề mặt tấm lại thay đổi rất ít. Điều này thêm khẳng định rằng, ứng suất kéo trên bề mặt do uốn võng cũng không phụ thuộc vào kích thước mặt bằng tấm. Kết hợp với trường hợp khảo sát ở phần trên, có thể đi đến nhận định rằng, giá trị ứng suất kéo trên bề mặt tấm do uốn võng chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường, tức là nhiệt độ gây ra gradient nhiệt độ cục bộ tại bề mặt tấm.



Hình 10. Ứng suất nhiệt kéo uốn lớn nhất tại bề mặt và đáy tấm tương ứng với các kích thước mặt bằng tấm khác nhau



Hình 11. Ứng suất nhiệt đáy tấm (trên đoạn thẳng A_2B_2), khi $L \times B = 5 \times 4,5$ m (a) và khi $L \times B = 4 \times 3$ m (b)

5. Kết luận

Nghiên cứu này được dành để thực hiện các khảo sát số cho các tấm BTXM có biên tự do với

chiều dày cũng như chiều dài và chiều rộng khác nhau. Phương pháp phần tử hữu hạn với phần tử 3 chiều hình hộp chữ nhật 8 điểm nút được sử dụng. Các tính toán số được thực hiện trên phần mềm mã nguồn mở ASTER. Nhiệt độ bề mặt tấm BTXM của một chu kỳ ngày đêm bất lợi nhất trong một số năm tại khu vực thành phố Hồ Chí Minh được dùng để phân tích ứng suất nhiệt tấm. Từ các kết quả khảo sát số, có thể đưa ra một số nhận xét sau.

Ứng suất kéo do nhiệt trong tấm BTXM có thể xuất hiện ở ngay trên bề mặt tấm, đáy tấm hoặc bên trong tấm tùy thuộc vào thời điểm trong ngày. Ứng suất nhiệt của tấm thay đổi liên tục theo thời gian và đổi dấu trong một chu kỳ ngày đêm có thể là nguyên nhân gây ra phá hủy tấm do mỏi.

Giá trị ứng suất kéo lớn nhất ở đáy tấm khi uốn vòng phụ thuộc vào chiều dày tấm cũng như kích thước mặt bằng tấm và nhỏ hơn so với ứng suất kéo lớn nhất trên bề mặt tấm khi uốn võng. Giá trị ứng suất kéo đáy tấm càng lớn khi chiều dày tấm càng nhỏ hoặc/và kích thước mặt bằng tấm càng tăng và ngược lại. Ứng suất kéo lớn nhất đáy tấm có thể xuất hiện ở khu vực tâm tấm (giữa tấm) khi tấm có chiều dày nhỏ hoặc ở khu vực lân cận cạnh tấm khi tấm có chiều dày lớn.

Ứng suất kéo lớn nhất trên bề mặt tấm do gradient nhiệt độ cục bộ gây ra có giá trị khá lớn và không phụ thuộc vào kích thước tấm mà chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường nơi mặt đường được xây dựng. Do vậy, trong kiểm toán tấm BTXM chịu ứng suất nhiệt giá trị ứng suất kéo trên bề mặt tấm do uốn võng là một đại lượng gây bất lợi và không nên bỏ qua.

Nghiên cứu này được giới hạn với tấm BTXM có biên tự do, điều kiện biên tấm sử dụng thép truyền lực sẽ được tác giả thực hiện trong thời gian tới nhằm đánh giá được đầy đủ hơn trạng thái ứng suất nhiệt của tấm bê tông mặt đường ô tô và sân bay trong thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Bộ GTVT, 22TCN 223-95. (1995). Áo đường cứng đường ô tô – Tiêu chuẩn thiết kế.
- [2]. Bộ GTVT, 3230/QĐ-BGTVT. (2012). Quy định tạm thời về thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nổi trong xây dựng công trình giao thông.
- [3]. X.C. Bùi, T.K.D. Trần, D.S. Vũ, Q.P. Nguyễn (2009). Thiết kế nền mặt đường ô tô. Nhà xuất bản GTVT.
- [4]. H.H. Dương, X.T. Nguyễn. (2005). Thiết kế đường ô tô: tập 2. Nhà xuất bản Giáo dục.
- [5]. H.H. Dương, T. Hoàng. (2010). Mặt đường bê tông xi măng cho đường ô tô - sân bay. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [6]. D.Đ. Nguyễn. (2007). Nghiên cứu sự làm việc của mặt đường cứng sân bay trong điều kiện nhiệt độ Việt Nam, Luận án tiến sĩ – Học viện Kỹ thuật Quân sự.
- [7]. C.T. Phạm. (2014). Tính toán thiết kế các kết cấu mặt đường. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [8]. N.H. Trần và V.P. Lê. (2018). Phân tích sự truyền nhiệt trong mặt đường bê tông xi măng theo mô hình truyền nhiệt ba chiều. Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, Học viện KTQS (195).
- [9]. V.V. Nguyen, Q.V. Nguyen, H. M. Tran, D. D. Nguyen. (2020). Study and propose a numerical method determining temperature distribution in concrete pavement in Hanoi due to air temperature and solar radiation. The 3rd International Conference on Sustainability in Civil Engineering, 26th-27th November 2020, University of Transport and Communication, Hanoi, Vietnam.
- [10]. V.Q. Trịnh. (2013). Cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn trong truyền nhiệt. Nhà xuất bản Thế giới.
- [11]. R. W. Lewis, N. Perumal, K. N. Seetharamu. (2004). Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow. John Wiley & Sons.
- [12]. R. W. Lewis, K. Morgan. H. R. Thomas, K. N. Seetharamu. (1996). The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis. John Wiley & Sons.

- [13]. M. H. Sadd (2009). Elasticity: theory, applications, and numeric. Elsevier Inc.
- [14]. H.C. Hà. (1994). Công nghệ mới trong xây dựng và sửa chữa mặt đường BTXM sân bay.

- Đề tài Nghiên cứu cấp Nhà nước (KC10-06), Viện khoa học Công nghệ GTVT, Bộ GTVT.
- [15]. Y. H. Huang (2004). Pavement Analysis and Design. Pearson Education, Inc.