

Mô phỏng ứng xử của tấm mặt đường bê tông xi măng (đường ô tô) do chênh lệch nhiệt độ giữa hai bề mặt tấm

Numerical simulation of concrete pavement response to temperature gradients

Hoàng Khắc Tuấn, Phạm Ngọc Thạch*

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

*Email liên hệ: thach.pham@ut.edu.vn

Tóm tắt:

Bài báo trình bày phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn ứng xử của tấm mặt đường bê tông xi măng do chênh lệch nhiệt độ giữa mặt trên và mặt dưới tấm. Phương pháp có xét đến các đặc trưng phức tạp của bài toán: Ứng xử ba chiều của hệ; sự hiện diện của các lớp móng đường; tương tác tiếp xúc giữa tấm bê tông xi măng và móng; sự tham gia của các thanh truyền lực tại khe nối giữa các tấm. Để kiểm chứng phương pháp, tác giả sử dụng kết quả đo đạc thực nghiệm của một nghiên cứu đã công bố trước đây. Sau đó, tác giả áp dụng phương pháp mô phỏng đã trình bày để khảo sát ứng xử của tấm mặt đường bê tông xi măng tại khu công nghiệp Phú Hữu, thành phố Thủ Đức.

Từ khóa: Mặt đường bê tông xi măng, ứng suất nhiệt, phần tử hữu hạn.

Abstract:

In this paper, we present a finite element simulation method for the behavior of concrete pavement slabs due to the temperature gradient between the top and bottom slab surfaces. The method takes the following characteristics into consideration: three-dimensional behaviors of the system; foundation layers between the pavement slab and the ground; contact interaction between the pavement slab and the foundation; dowel bars at the transverse joint of pavement slabs. To verify the simulation method, we use the experimental measurement results of a previously published study. Then, we apply the simulation method to investigate the behavior of concrete pavement in Phu Huu industrial zone, Thu Duc city.

Keywords: concrete pavement; thermal stress; finite element method.

1. Giới thiệu

Ngoài chịu tác dụng của tải trọng xe, tấm mặt đường bê tông xi măng (BTXM) còn chịu tác dụng của sự thay đổi nhiệt độ. Vào ban ngày, ánh nắng Mặt Trời làm mặt trên tấm có nhiệt độ cao hơn mặt dưới. Sự chênh lệch nhiệt này làm cho mặt trên dãn ra so với mặt dưới, nghĩa là tấm có xu hướng uốn “phồng lên”. Tuy nhiên, sự dãn mặt trên và sự co mặt dưới lại bị cản trở bởi trọng lượng bản thân của tấm, từ đó làm sinh ra ứng suất nén ở mặt trên và ứng suất kéo ở mặt dưới tấm. Ngược lại, vào ban đêm, mặt trên tấm có nhiệt độ thấp hơn mặt dưới. Sự

chênh lệch nhiệt này làm cho mặt trên co lại so với mặt dưới, nghĩa là tấm có xu hướng uốn “lõm xuống”. Tuy nhiên, sự co mặt trên và sự dãn mặt dưới lại bị cản trở bởi trọng lượng bản thân của tấm, từ đó làm sinh ra ứng suất kéo ở mặt trên và ứng suất nén ở mặt dưới tấm.

Ứng suất kéo/nén do tấm bị uốn (gọi chung là ứng suất uốn) có độ lớn phụ thuộc vào mức độ chênh lệch nhiệt giữa mặt trên và mặt dưới tấm, do vậy ứng suất uốn thay đổi theo buổi trong ngày và theo mùa trong năm. Theo [1], nhiệt độ lớn nhất trên bề mặt tấm BTXM có thể lên đến 65°C , như vậy mức độ chênh lệch nhiệt

giữa hai mặt có thể lên đến $20^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ và sinh ra ứng suất uốn nguy hiểm trong tấm BTXM.

Trong thiết kế mặt đường BTXM tại Việt Nam, ứng suất uốn trong tấm do chênh lệch nhiệt được tính toán chủ yếu bằng các phương pháp giải tích dựa trên lý thuyết tấm đặt trên nền Winkler của Westergaard [2][3][4]. Do sử dụng nhiều giả thiết đơn giản hóa nên phương pháp này chưa xét đến các yếu tố quan trọng trong mô hình tính, cụ thể là:

- (i) Ứng xử 3 chiều của hệ;
- (ii) Các lớp móng đường nằm giữa tấm BTXM và nền đất;
- (iii) Tương tác tiếp xúc giữa mặt dưới tấm BTXM và lớp móng;
- (iv) Sự tham gia của các thanh truyền lực tại các khe nối giữa các tấm.

Để xét các yếu tố trên trong tính toán mặt đường BTXM, chúng ta có thể tiếp cận bài toán bằng cách mô phỏng phần tử hữu hạn (PTHH). Tuy nhiên, trong nước hiện không nhiều nghiên cứu được thực hiện theo cách tiếp cận này. Một trong số đó có nghiên cứu [5], nhưng nghiên cứu này chưa xét đến các lớp móng và tương tác tiếp xúc giữa móng và tấm BTXM.

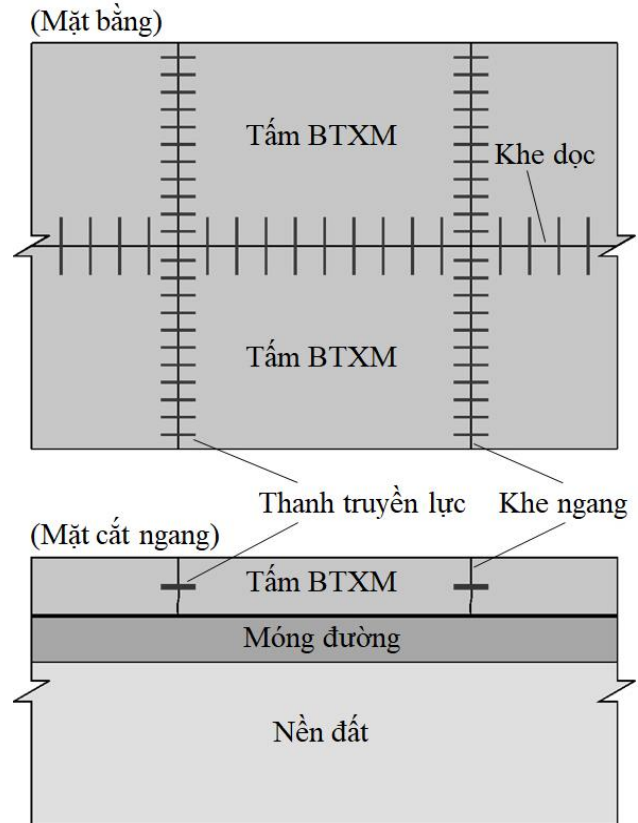
Trong bài báo, tác giả trình bày phương pháp mô phỏng PTHH ứng xử của tấm mặt đường BTXM do chênh lệch nhiệt độ giữa hai bề mặt tấm, trong đó có xét đến các yếu tố mô hình quan trọng đã đề cập. Để kiểm chứng phương pháp, tác giả sử dụng kết quả đo đạc thực nghiệm của bài báo [6]. Sau đó, tác giả áp dụng phương pháp mô phỏng đã trình bày để khảo sát ứng xử của tấm mặt đường BTXM tại khu công nghiệp Phú Hữu, thành phố Thủ Đức.

2. Phương pháp mô phỏng

Ứng xử của hệ mặt đường BTXM được mô phỏng trên phần mềm Abaqus. Đây là phần mềm PTHH có khả năng mô phỏng ứng suất và biến dạng trong kết cấu do tác dụng của tải trọng và nhiệt [7].

Hệ mặt đường BTXM gồm có: Tấm BTXM, các lớp móng, nền đất, thanh thép truyền lực tại

khe giữa các tấm (hình 1). Mô hình PTHH của hệ được minh họa trên hình 2. Sau đây là giải thích chi tiết các thành phần của mô hình.



Hình 1. Các thành phần của hệ mặt đường BTXM.

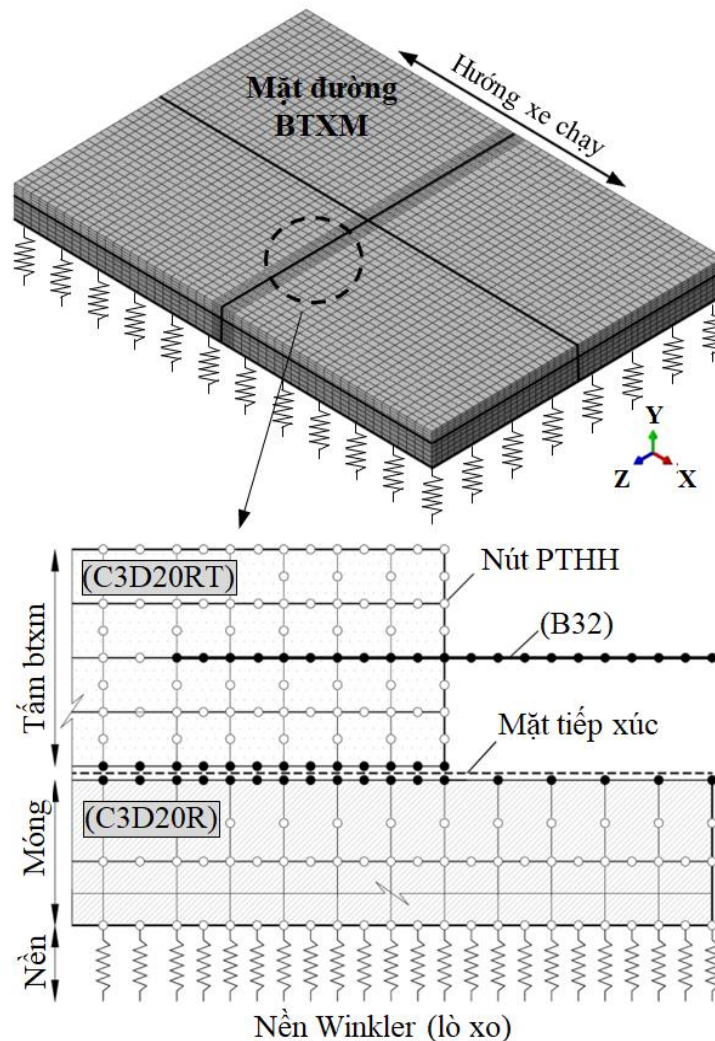
Tấm BTXM được giả định có ứng xử đàn hồi với các tham số vật liệu: Module đàn hồi (E) hệ số Poisson (ν) và hệ số dẫn nở do nhiệt của vật liệu (α). Loại PTHH dùng cho lớp BTXM là phần tử liên tục ba chiều C3D20RT được dùng cho phân tích ứng suất, biến dạng và nhiệt đồng thời. Phần tử này có 20 nút, trường chuyển vị bậc 2, trường nhiệt bậc 1 và dùng thuật toán tích phân thu gọn cho nội lực nút phần tử [7][8].

Lớp móng đường được giả định có ứng xử vật liệu đàn hồi với hai tham số là E và ν . Loại PTHH được dùng là phần tử liên tục ba chiều C3D20R. Phần tử này có 20 nút, chuyển vị bậc 2 và dùng thuật toán tích phân thu gọn [7][8].

Nền đất dưới lớp móng được mô hình hóa bằng nền Winkler với các phần tử lò xo tuyến tính, đặt thẳng đứng, phân bố đều suốt bề mặt và làm việc độc lập với nhau. Nền Winkler được đặc trưng bằng hệ số nền (k).

Thanh thép truyền lực giữa các tấm BTXM được giả định có ứng xử vật liệu đàn hồi với 2 tham số là E và ν . Loại phần tử được dùng là phần tử dầm bậc hai B32 [7][8]. Trong mô hình PTHH, các nút của phần tử dầm B32 được kết nối với các

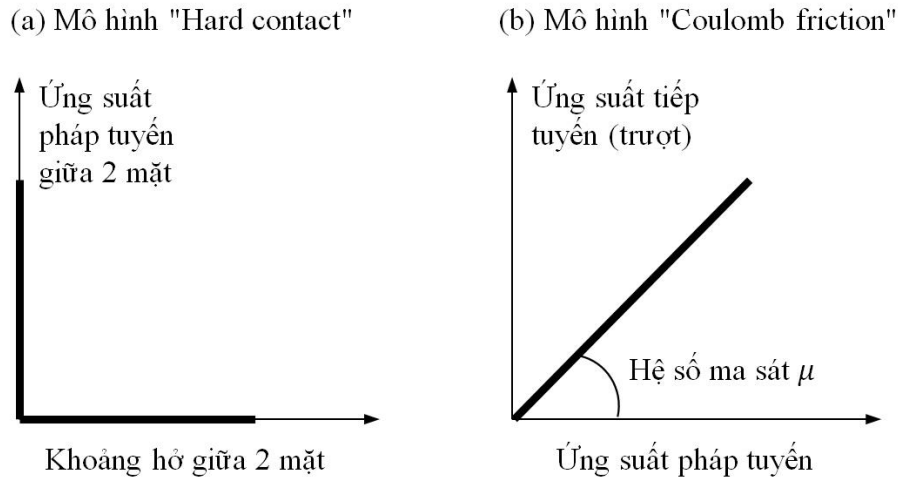
nút của phần tử C3D20RT. Việc kết nối này tạo sự tương thích đối với ba thành phần chuyển vị thẳng của hai loại phần tử khác nhau, qua đó đảm bảo tính chất truyền lực tại khe nối giữa các tấm.



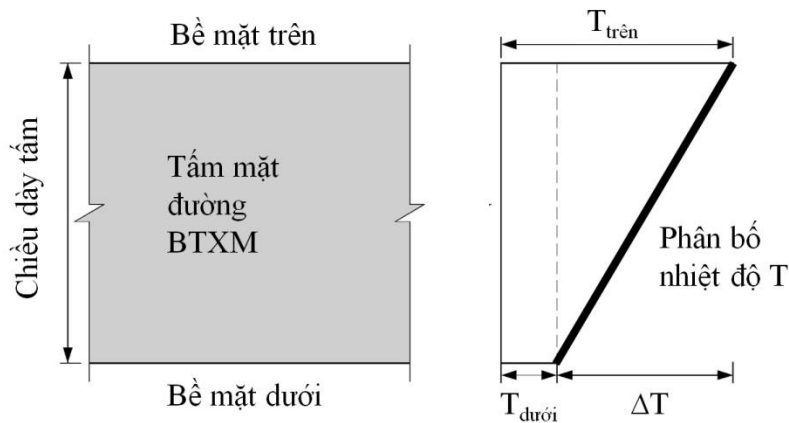
Hình 2. Mô hình PTHH hệ mặt đường BTXM.

Mặt dưới lớp BTXM và mặt trên của lớp móng ứng xử tiếp xúc theo phương tiếp tuyến và pháp tuyến với mặt tiếp xúc. Ứng xử tiếp xúc được tạo ra trong mô hình PTHH bằng mô hình ma sát “Coulomb friction” cho phương tiếp tuyến và mô hình “hard contact” cho phương pháp tuyến (hình 3) [7][8]. Ứng xử ma sát được đặc trưng bằng hệ số ma sát giữa tấm BTXM và lớp móng (μ).

Trường nhiệt được tạo ra trong mô hình PTHH bằng cách gán giá trị nhiệt vào tất cả các nút PTHH thuộc phạm vi chiều dày tấm BTXM. Nhiệt thường được giả định phân bố tuyến tính theo chiều dày tấm như minh họa trên hình 4. Tùy theo thời tiết và khu vực được khảo sát, chênh lệch nhiệt độ giữa mặt trên và mặt dưới (ΔT) có thể nằm trong khoảng từ 5°C đến 25°C .



Hình 3. Ứng xử tiếp xúc giữa tấm BTXM và móng.



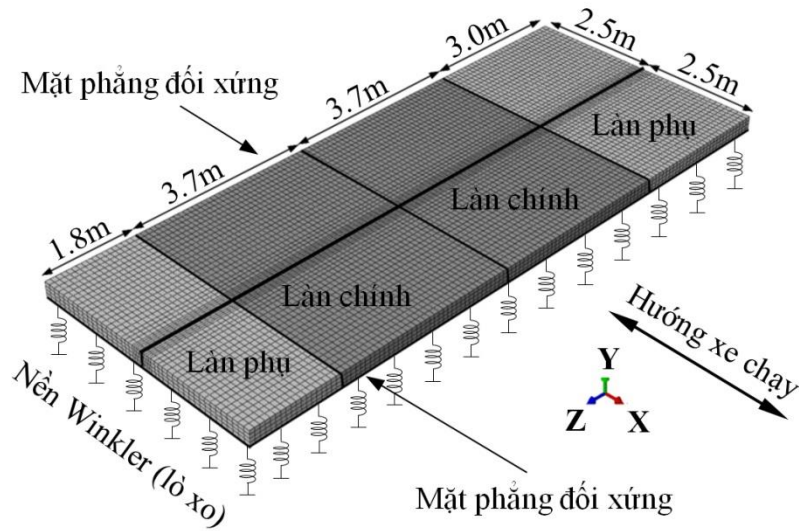
Hình 4. Phân bố nhiệt theo chiều dày tấm BTXM.

3. Kiểm chứng phương pháp mô phỏng

Để kiểm chứng phương pháp mô phỏng, tác giả sử dụng kết quả thí nghiệm đo đặc chuyển vị trên mặt đường BTXM do nhóm nghiên cứu Gedafa [6] thực hiện. Mặt đường rộng 12.2 m có 04 làn xe, gồm 20 làn chính rộng 3.7 m và 02 làn phụ ở biên có chiều rộng 1.8 m và 3 m. Tấm BTXM có module đàn hồi là 29 GPa; hệ số Poisson là 0.15. Móng và nền đường được đặc trưng bằng module phản lực nền $k = 0,0533 \text{ MPa/mm}$. Tại khe ngang có bố trí các thanh thép truyền lực với đường kính 37.5 mm, dài 450 mm và khoảng cách giữa các thanh 300 mm. Thanh thép truyền lực có module đàn hồi và hệ số Poisson là 200 GPa và 0.25. Tấm

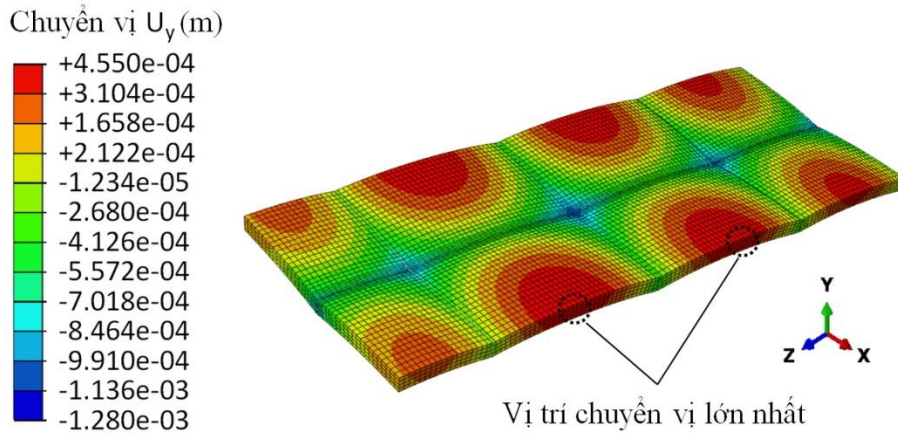
BTXM có độ dẫn nhiệt $2.5 \text{ W/m}^0\text{C}$, nhiệt dung riêng $700 \text{ J/kg}^0\text{C}$ và hệ số giãn nở nhiệt $0.000009 \text{ m/m}^0\text{C}$. Chênh lệch nhiệt giữa mặt trên và dưới tấm được khảo sát từ 2.3^0C đến 15^0C .

Hình 5 trình bày mô hình PTHH của hệ được xây dựng theo phương pháp trong phần 2. Tấm BTXM sử dụng phần tử C3D20RT. Kích thước phần tử là $45 \times 100 \times 75 \text{ mm}$ tại vùng gần khe nối ngang và $125 \times 100 \times 75 \text{ mm}$ tại các vị trí còn lại. Áp dụng tính chất đối xứng của hệ theo phương dọc tuyến (phương X), chỉ cần mô phỏng một nửa chiều dài của mỗi tấm và sử dụng điều kiện biên chống chuyển vị theo phương X tại các mặt phẳng đối xứng.



Hình 5. Mô hình PTHH cho bài toán kiểm chứng.

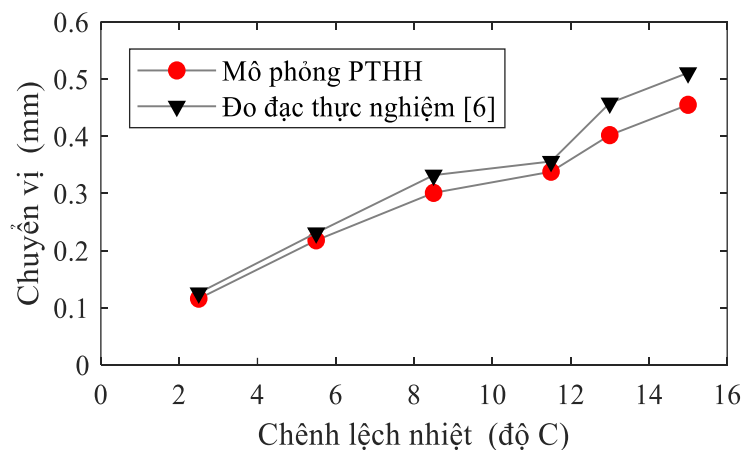
Hình 6 trình bày kết quả trường chuyển vị mô phỏng bằng PTHH cho trường hợp chênh lệch nhiệt 15°C giữa mặt trên và dưới tấm BTXM.



Hình 6. Trường chuyển vị của tấm BTXM do chênh lệch nhiệt độ 15°C .

Hình 7 trình bày kết quả chuyển vị theo phương thẳng đứng tại vị trí giữa tấm BTXM với phạm vi chênh lệch nhiệt độ từ 2.3°C đến 15°C . Kết quả đo đạc của nhóm Gedafa [6] cũng được trình bày trên

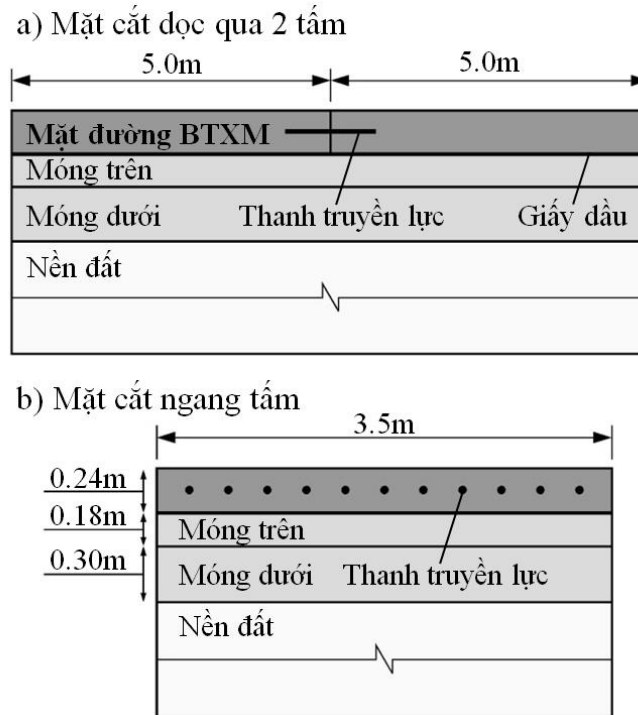
hình. So sánh hai kết quả cho thấy chuyển vị mặt đường từ mô phỏng PTHH phù hợp với chuyển vị từ đo đạc thực nghiệm, với sai trung bình chỉ khoảng 0.03 mm.



Hình 7. So sánh chuyển vị của tấm BTXM giữa đo đạc thực nghiệm [6] và mô phỏng PTHH.

4. Khảo sát ứng xử mặt đường BTXM do chênh lệch nhiệt độ

Tác giả khảo sát phân đoạn hai tấm trong hệ mặt đường BTXM nối từ đường Nguyễn Duy Trinh vào khu công nghiệp Phú Hữu, thành phố Thủ Đức, Thành phố Hồ Chí Minh (hình 8).



Hình 8. Phân đoạn hai tấm mặt đường BTXM.

Mỗi tấm BTXM có kích thước 3.5 m x 5.0 m x 0.24 m và hai tấm được ngăn cách bởi khe nối ngang. Tấm được đặt trên các lớp móng và được phân cách bằng lớp giấy dầu. Lớp móng trên dày 0.18 m và có kết cấu đá dăm gia cố xi măng. Lớp móng dưới dày 0.3 m và có kết cấu đá dăm. Khe

ngang giữa hai tấm BTXM có các thanh thép truyền lực với đường kính 32 mm, dài 50 cm và được bố trí ở giữa chiều dày của tấm. Bảng 1 liệt kê các tham số vật liệu của tấm BTXM, lớp móng trên, lớp móng dưới và thanh truyền lực. Dưới lớp móng là nền đất có hệ số nền $k = 49$ MPa/m.

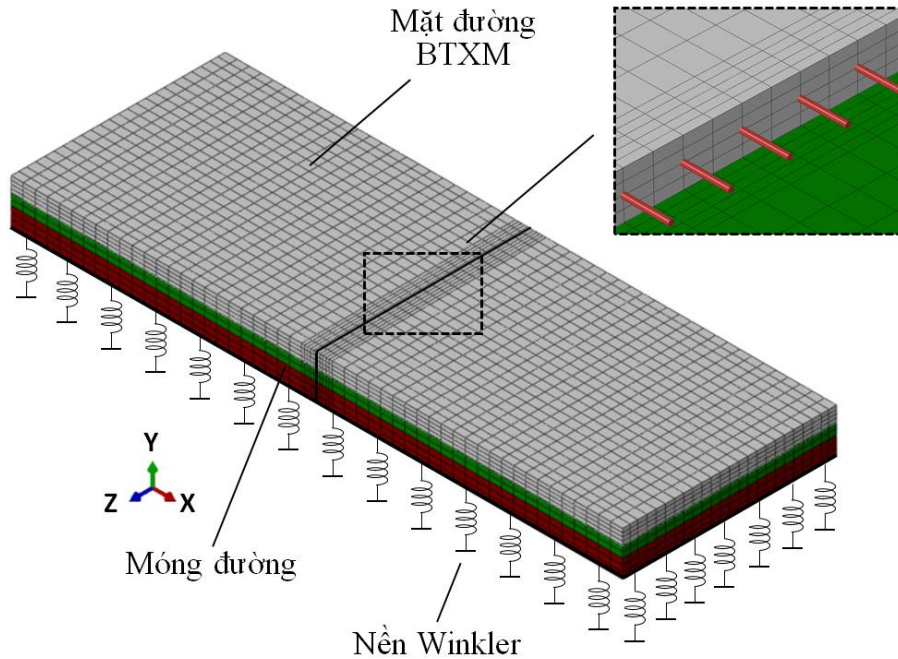
Bảng 1. Tham số vật liệu.

Tham số	Tấm BTXM	Móng trên	Móng dưới	Thanh truyền lực
Khối lượng riêng (kg/m^3)	2400	2200	2200	7850
Hệ số dẫn nở nhiệt ($\text{mm/mm}^0\text{C}$)	1×10^{-5}	-	-	-
Module đàn hồi (MPa)	33000	7000	250	210000
Hệ số Poisson	0.15	0.20	0.30	0.3

4.1. Mô hình PTHH

Tác giả sử dụng phương pháp đã trình bày trong phần 2 để xây dựng mô hình PTHH (hình 9). Phần tử khối C3D20RT được dùng cho lớp BTXM, phần tử khối C3D20R được dùng cho lớp móng

trên và móng dưới, phần tử dầm B32 được dùng cho các thanh thép truyền lực giữa các tấm BTXM. Mô hình có tổng cộng 5568 phần tử C3D20RT, 6960 phần tử C3D20R và 110 phần tử B32.



Hình 9. Mô hình PTHH của phân đoạn 2 tấm mặt đường BTXM.

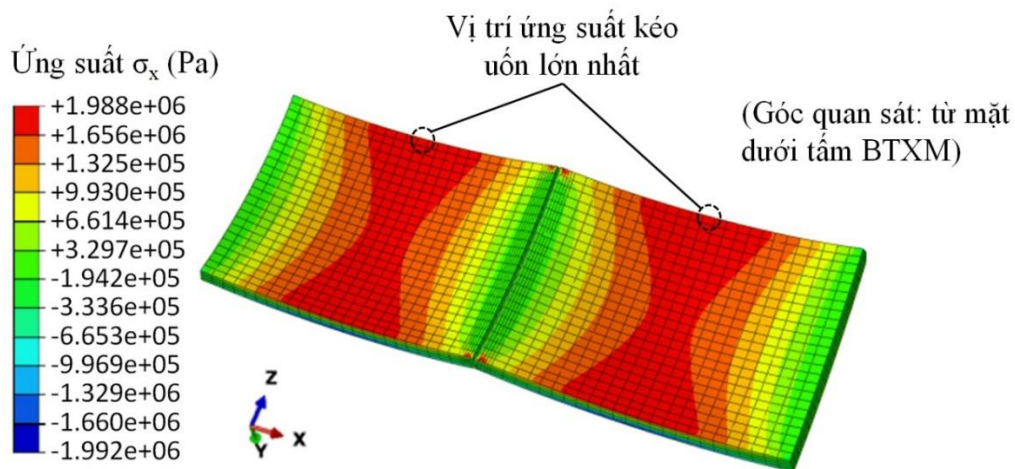
Mô hình “Coulomb Friction” và “Hard Contact” được dùng cho ứng xử tiếp xúc giữa tấm BTXM và lớp móng trên. Theo [9], hệ số ma sát μ giữa hai lớp vật liệu thường được lấy trong khoảng 0.9 đến 2.2. Tuy nhiên, do có bố trí lớp giấy dầu giữa hai lớp vật liệu nên ma sát bị giảm đáng kể và hệ số ma sát được lấy là 0.5 [10].

Bốn mặt xung quanh của hai lớp móng sử dụng điều kiện biên chống chuyển vị theo phương vuông góc với mặt. Các mặt xung quanh tấm BTXM sử dụng điều kiện biên chuyển vị tự do.

Nền đất dưới lớp móng sử dụng mô hình nền lò xo Winkler với giá trị số nền $k = 49 \text{ MPa/m}$.

4.2. Ứng xử mặt đường BTXM do chênh lệch nhiệt độ

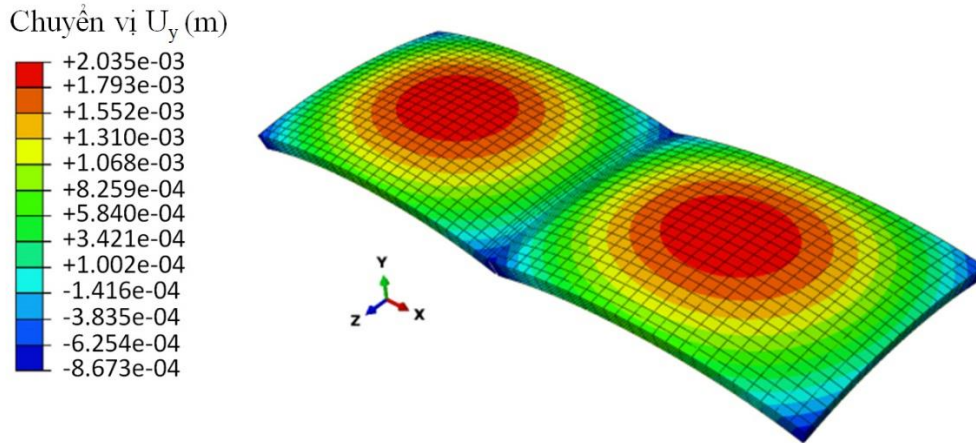
Theo [2], gradient nhiệt độ lớn nhất cho khu vực miền Nam là $0,92^\circ\text{C/cm}$. Với tấm có chiều dày $0,24\text{m}$ thì chênh lệch nhiệt độ giữa mặt trên và dưới tấm BTXM là $\Delta T = 22,08^\circ\text{C}$. Với giá trị ΔT này, mô phỏng PTHH cho kết quả trường ứng suất uốn như trên hình 10. Từ hình, giá trị ứng suất kéo lớn nhất được xác định là $1,988 \text{ MPa}$.



Hình 10. Ứng suất uốn trong tấm BTXM khi $\Delta T = 22,08^\circ\text{C}$.

Hình 11 trình bày trường chuyển vị của tấm BTXM. Quan sát trường chuyển vị sẽ thấy sự chênh lệch nhiệt giữa mặt trên và dưới tấm

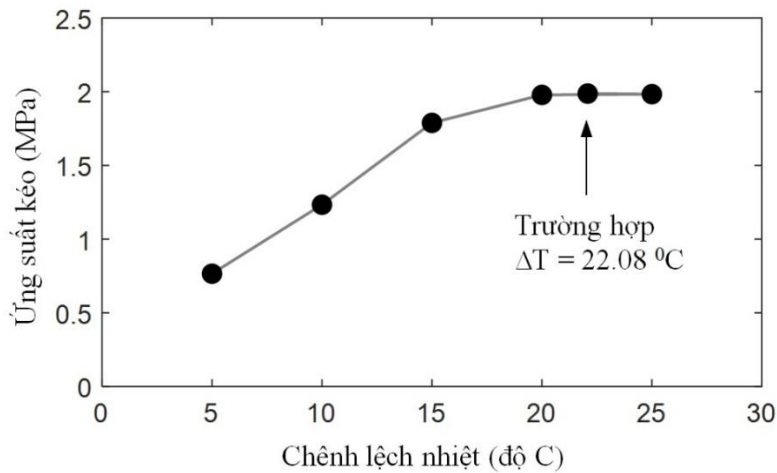
BTXM, đã làm cho tấm bị chuyển vị uốn vòng lên $2,035 \text{ mm}$ tại vị trí giữa tấm.



Hình 11. Chuyển vị tấm BTXM khi $\Delta T = 22.08^{\circ}\text{C}$.

Để hiểu rõ hơn ảnh hưởng của chênh lệch nhiệt độ đến ứng suất kéo trong tấm BTXM, tác giả đã mô phỏng một số trường hợp với chênh lệch nhiệt độ trong khoảng từ 5°C đến 25°C . Hình 12 trình bày

kết quả ứng suất kéo lớn nhất trong tấm BTXM từ các trường hợp mô phỏng. Kết quả cho thấy sự chênh lệch nhiệt giữa hai mặt càng lớn, ứng suất kéo lớn nhất sinh ra trong tấm càng tăng.

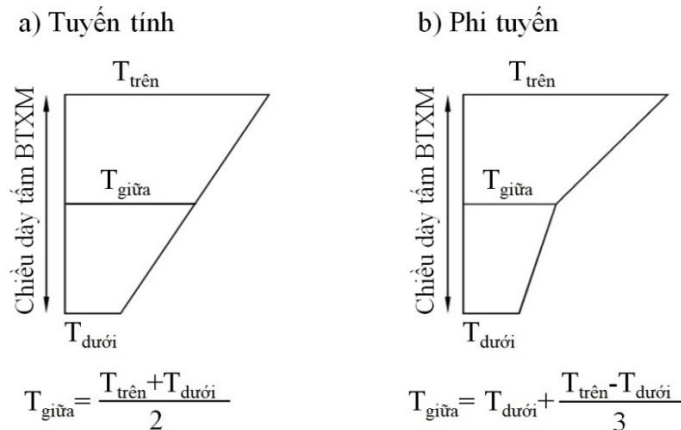


Hình 12. Ứng suất kéo lớn nhất trong tấm BTXM

4.3. Ảnh hưởng của phân bố nhiệt theo chiều dày tấm

Theo [2][3], nhiệt độ được giả định phân bố tuyến tính theo chiều dày tấm BTXM (hình 13a). Tuy

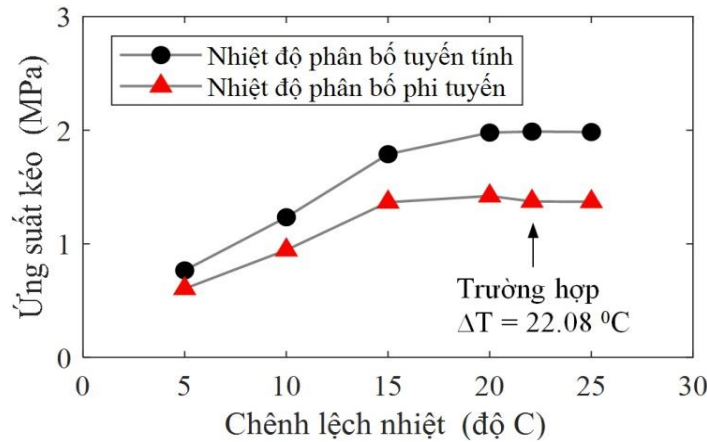
nhiên, nghiên cứu thực nghiệm [10] cho thấy nhiệt độ phân bố phi tuyến theo chiều dày tấm và có thể được xấp xỉ như trên hình 13b.



Hình 13. Phân bố nhiệt theo chiều dày tấm.

Để thấy được ảnh hưởng của kiểu phân bố nhiệt đến ứng xử của hệ hai tấm BTXM đang khảo sát, tác giả đã mô phỏng một số trường hợp để so sánh và hình 14 trình bày kết quả thu được. Kết quả cho

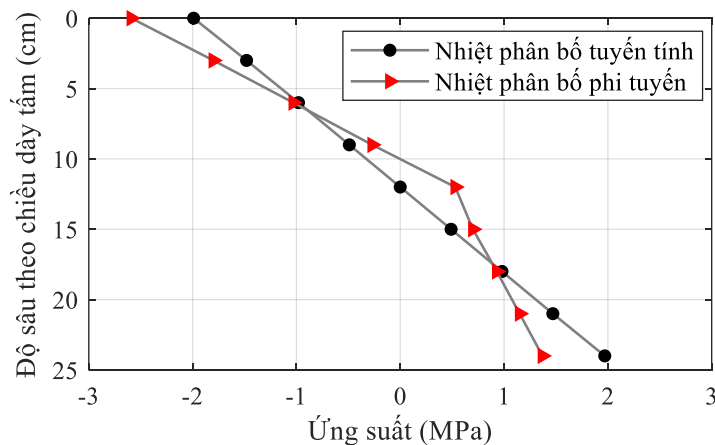
thấy có sự chênh lệch về ứng suất kéo lớn nhất trong tấm BTXM giữa hai trường hợp phân bố nhiệt. Chênh lệch ứng suất tăng khi chênh lệch nhiệt ΔT càng lớn.



Hình 14. Ứng suất kéo lớn nhất trong tấm BTXM trong 2 trường hợp phân bố nhiệt.

Hình 15 trình bày kết quả phân bố ứng suất uốn theo chiều dày tấm BTXM (tại vùng giữa cạnh dọc tấm) cho trường hợp $\Delta T = 22.08^\circ\text{C}$. Kết quả cho thấy ứng suất kéo lớn nhất xuất hiện tại đáy tấm

(vị trí 24 cm). Trường hợp phân bố nhiệt tuyến tính cho giá trị ứng suất kéo 1.998 MPa, trong khi trường hợp phân bố nhiệt phi tuyến cho giá trị ứng suất kéo 1.373 MPa (chênh lệch 0.615 MPa).



Hình 15. Phân bố ứng suất uốn theo chiều dày tấm tại vị trí giữa cạnh dọc tấm BTXM ($\Delta T = 22.08^\circ\text{C}$).

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp mô phỏng PTHH ứng xử của tấm mặt đường BTXM do chênh lệch nhiệt độ. Phương pháp có xét đến các yếu tố phức tạp trong mô hình: Ứng xử ba chiều của hệ; sự hiện diện của các lớp móng đường; tương tác tiếp xúc giữa tấm bê tông xi măng và móng; sự tham gia của các thanh truyền lực tại khe nối giữa các tấm. Kết quả kiểm chứng cho thấy chuyển vị mặt đường mô phỏng bằng PTHH phù hợp với chuyển vị đo đạc thực nghiệm của nghiên cứu [6], qua đó chứng tỏ được độ tin cậy của phương pháp được trình bày.

Kết quả khảo sát phân đoạn hai tấm trong hệ mặt đường BTXM tại khu công nghiệp Phú Hữu, thành phố Thủ Đức cho thấy:

- Chênh lệch nhiệt độ giữa hai bề mặt tấm làm cho tấm BTXM bị uốn vòng. Chuyển vị dương lớn nhất xuất hiện ở vị trí giữa tấm và chuyển vị âm lớn nhất ở xuất hiện ở các vị trí góc tấm;
- Với giá trị gradient nhiệt độ lớn nhất $0.92^\circ\text{C}/\text{cm}$ của khu vực miền Nam, tấm dày 0.24 m có thể chịu chuyển vị uốn vòng lên 2.035 mm tại vị trí giữa tấm và chịu ứng suất kéo lớn nhất 1.988 MPa tại vị trí mép tấm. Sự chênh lệch nhiệt

càng lớn thì ứng suất kéo lớn nhất sinh ra trong tấm BTXM càng tăng;

- Việc xét phân bố nhiệt tuyến tính hoặc phi tuyến có ảnh hưởng đến kết quả tính toán ứng suất uốn trong tấm BTXM. Trường hợp phân bố nhiệt phi tuyến cho ra ứng suất nén lớn hơn và ứng suất kéo nhỏ hơn so với trường hợp phân bố nhiệt tuyến tính. Khoảng chênh lệch nhiệt giữa hai mặt tấm càng lớn, chênh lệch ứng suất giữa hai trường hợp phân bố nhiệt độ càng lớn.

Tài liệu tham khảo

- [1] P. D. Linh, V. Đ. Sỹ, P. C. Thăng; “Nghiên cứu tính toán gradient nhiệt độ và nhiệt độ trung bình trong tấm bê tông xi măng mặt đường trong điều kiện khí hậu Việt Nam”. Tạp chí Giao thông vận tải. 2020; số tháng 8:43-46.
- [2] Tổng cục đường bộ Việt Nam; “Thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông”. TCCS 39:2022; Tổng cục đường bộ Việt Nam. 2022.
- [3] Bộ Giao thông vận tải; “22TCN 233-95: Quy trình thiết kế mặt đường cứng đường ô tô”. Hà Nội, Việt Nam: NXB Giao thông vận tải. 1995.
- [4] N. Q. Chiêu; “Mặt đường bê tông xi măng”. Hà Nội, Việt Nam: NXB Giao thông vận tải. 2004.
- [5] P. N. T. Vy, N. M. Tuấn; “Ứng xử mặt đường bê tông xi măng có khe nối do chênh lệch nhiệt độ bằng phần mềm abaqus”. Tạp chí Giao thông vận tải. 2016; số tháng 5:56-59.
- [6] D. S. Gedafa, M. Hossain, Z. Q. Siddique, K. Fredrichs and D. Meggers; “Curling of New Concrete Pavement and Long-Term Performance”. Journal of Civil Engineering and Architecture. 2012; 6(2): 121-131.
- [7] Dassault Systèmes Simulia Corp.; “Abaqus theory manuals”. RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp. 2016.
- [8] T. Belytschko, W. Liu, B. Moran, K. Elkhodary; “Nonlinear finite elements for continua and structures”. Second Edition. USA: John Wiley & Sons. 2014.
- [9] AASHTO; “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”. Washington, D.C, USA: AASHTO. 1993.
- [10] S. R. Maitra, K. S. Reddy, L. S. Ramachandra; “Estimation of Critical Stress in Jointed Concrete Pavement”. Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2013; 104: 208-217. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.113.