

Phân tích trạng thái ứng suất biến dạng mặt đường bê tông xi măng có và không có kể đến ứng xử của lớp phân cách bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Analysis of stress-strain state of cement concrete pavement with and without considering the behavior of the separating layer using finite element method

Trung tá ThS. Nguyễn Văn Dương¹, Thiếu tá ThS. Thịnh Văn Thanh^{2*}, Thượng tá ThS. Lê Đức Linh², Thượng tá ThS. Đỗ Thành Huế² và Trung tá ThS. Nguyễn Văn Công²

¹Bộ môn Vật cản, Khoa Công trình, Trường Sĩ quan Công binh;

²Bộ môn Công sự - Ngụy trang, Khoa Công trình, Trường Sĩ quan Công binh;

*Tác giả liên hệ: Thanhz756@gmail.com

■Nhận bài: 20/03/2025 ■Sửa bài: 31/03/2025 ■Duyệt đăng: 07/05/2025

TÓM TẮT

Mục đích bài báo tác giả nghiên cứu khảo sát khả năng chịu lực của kết cấu mặt đường cứng dưới tác dụng của tải trọng bánh xe có xét đến ứng xử của lớp phân cách giữa tấm và nền, từ đó đưa ra những so sánh và nhận xét trong mô hình tính, chỉ xem xét đến sự làm việc cùng nhau của tấm và nền móng. Rời rạc hóa mô hình lớp phân cách bằng phần tử tiếp xúc trong phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng ứng xử một chiều của lớp phân cách và khảo sát trạng thái ứng suất biến dạng của tấm có kể đến sự giảm yếu tại lớp phân cách cũng như sự tách và trượt tại mặt phân giới nền – tấm. Điều này sẽ làm sáng tỏ thêm khả năng chịu lực của tấm, cũng như có thể phản ánh sự làm việc của kết cấu sát thực tế hơn.

Từ khóa: Bê tông xi măng, phương pháp phần tử hữu hạn, trạng thái ứng suất - biến dạng, tấm mặt đường

ABSTRACT

The purpose of the article is to investigate the bearing capacity of rigid pavement structures under the effect of wheel loads, taking into account the behavior of the separation layer between the slab and the foundation, thereby making comparisons and comments in the calculation model, only considering the working together of the slab and the foundation. Discretize the separation layer model using contact elements in the finite element method to simulate the one-dimensional behavior of the separation layer and investigate the stress-deformation state of the slab, taking into account the weakening at the separation layer as well as the separation and sliding at the foundation-slab interface. This will further clarify the bearing capacity of the slab, as well as reflect the working of the structure more closely to reality.

Keywords: Cement concrete, finite element method, stress-strain state, pavement slab

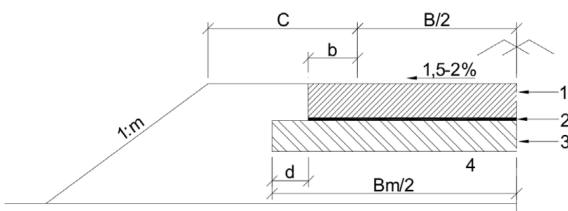
1. GIỚI THIỆU

Kết cấu mặt đường trong các công trình giao thông đường bộ thường được cấu tạo bởi lớp trên cùng là mặt đường, lớp móng cứng và nền (Hình 1). Thực tế sử dụng cho thấy việc phá hủy mặt đường có nhiều nguyên nhân, trong đó có thể kể đến một số nguyên nhân chính như: tải trọng khai thác vượt quy định cho phép

(khối lượng tải trọng, vận tốc tải trọng,...), chất lượng mặt đường, nền-móng (sau đây gọi tắt là nền) và đặc biệt sự tích lũy biến dạng dư cục bộ của nền đường trong quá trình khai thác (do chất lượng nền không đồng đều sẽ dẫn đến có những chỗ bị biến dạng dèo hoặc biến dạng dèo không đều), từ đó tình trạng tiếp xúc giữa móng với tấm bê tông không được tốt.

Hiện nay tại Việt Nam, trong tính toán kết cấu mặt đường BTXM chúng ta hay sử dụng phương pháp kết hợp giữa thí nghiệm và tính toán số học trong tiêu chuẩn tính toán mặt đường cứng của Việt Nam, 22TCN-223-95[1]. Tuy nhiên, trong tiêu chuẩn này cũng chưa đề cập đến tác động của lớp phân cách bao gồm cả loại vật liệu ngăn trung gian và chiều dày của nó. Ngoài ra, phương pháp hay sử dụng để tính toán mặt đường là tách riêng hệ tấm trên nền đàn hồi [2]. Lúc này, hệ tấm sẽ được thay thế bằng một hệ lò xo tương đương. Tuy nhiên, có nhược điểm là chỉ xác định được khả năng chịu lực của nền mà không tính được ma sát đáy tấm [3-4] hoặc là sử dụng mô hình một vật thể hai môi trường, tức là chia tấm và nền thành các phần tử nhỏ trên cùng một hệ thống lưới bằng phương pháp vật lý cơ học liên tục [5-7]. Với phương pháp mô hình nền hệ số, tính toán sẽ đỡ phức tạp, do mô hình nền đã được đơn giản hóa. Điểm hạn chế của phương pháp này là khi giải bằng máy tính dựa trên các phần mềm giải quyết bài toán nền đàn hồi thì hệ số nền ảnh hưởng rất lớn đến kết quả. Khi nền có nhiều lớp vật liệu khác nhau thì việc xác định các hệ số sẽ khó khăn và độ chính xác không cao [2].

Trong phạm vi bài báo tác giả sẽ sử dụng mô hình tính có kể đến sự làm việc một chiều của lớp phân cách, tức là phản ánh tình trạng tiếp xúc thực tế của tấm – nền. Trong mô hình, lớp mặt đường được mô hình là một vật thể khối chịu tác dụng trực tiếp của tải trọng, lớp móng cứng và nền cũng được mô hình bởi vật thể khối đàn hồi trong khi lớp phân cách được mô phỏng như một mặt có ứng xử một chiều, có nghĩa là nó chỉ làm việc khi tấm bị ép xuống. Khi đó, sự tách, trượt cục bộ trên bề mặt tiếp xúc tấm – nền được tính đến trong mô hình này.



Hình 1. Mặt cắt ngang mặt đường bê tông xi măng đô tại chỗ

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Do đặc trưng phức tạp của bài toán lý thuyết đàn hồi, đôi khi các phương trình vi phân của lý thuyết đàn hồi không thể giải được nên chỉ có một số rất hạn chế các bài toán được giải bằng phương pháp giải tích với nhiều giả thiết đơn giản hóa. Phương pháp số của cơ học môi trường liên tục [8] sẽ giải quyết bài toán một cách đầy đủ và chi tiết hơn. Đây là phương pháp gần đúng, cho phép ta có thể giải các bài toán phức tạp với sự hỗ trợ của máy tính điện tử.

2.1. Các giả thiết, mô hình và phương pháp tính

Bài toán được nghiên cứu dựa trên các giả thiết: Kết cấu tấm, móng, nền đường đàn hồi biến dạng tuyến tính; Tải trọng tác dụng lên kết cấu là tải trọng động và trực giao với mặt phẳng của tấm. Lớp mặt đường sẽ được mô hình hóa bởi hữu hạn các phần tử khối đàn hồi (3D), lớp móng cứng và nền đất cũng là tập hợp hữu hạn các phần tử khối đàn hồi (3D), giữa lớp mặt và nền móng được mô hình hóa bởi hữu hạn các phần tử tiếp xúc 3 chiều đàn hồi (3D), đặc trưng vật liệu lớp tiếp xúc được lấy của lớp phân cách trong mô hình thực.

2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn

Sau đây ta sử dụng nguyên lý cực tiểu thế năng toàn phần để thiết lập phương trình cơ bản của phương pháp PTHH. Giả sử một PTHH có thể tích V_e chịu tác dụng của lực thể tích p và lực bề mặt q trên diện tích S_e . Thế năng toàn phần của phần tử là U_e có thể viết dưới dạng :

$$U_e = \frac{1}{2} [\delta]^T \iiint_{V_e} [B]^T [D] [B] dV \{ \delta \} - \{ \delta \}^T \left(\iiint_{V_e} [N]^T \{ p \} dV + \iint_{S_e} [N]^T \{ q \} dS \right) \quad (1)$$

$$\text{Đặt } [k] = \iiint_{V_e} [B]^T [D] [B] dV \quad (2)$$

$$\text{Và } \{ P \}^e = \left(\iiint_{V_e} [N]^T \{ p \} dV + \iint_{S_e} [N]^T \{ q \} dS \right) \quad (3)$$

$$\text{Ta có } U_e = \frac{1}{2} [\delta]^T [k] \{ \delta \} - \{ \delta \}^T \{ P \}^e \quad (4)$$

Trong đó:

U_e : Thế năng toàn phần

$[k]$: Gọi là ma trận độ cứng phần tử

$\{P\}^e$: Là vectơ tải phần tử (lực nút tương đương).

V : Công của ngoại lực sinh ra trên dịch chuyển của ngoại lực do vật thể bị biến dạng

$\{\delta\}$: Vectơ chuyển vị nút

$[N]$: Ma trận các hàm nội suy

$[B]$: Ma trận tính biến dạng

$[D]$: Ma trận đàn hồi

Sau khi lấy cực tiểu (4) ta được :

$$[k]\{\delta\} = \{P\}^e \quad (5)$$

Đây là phương trình cơ bản của phương pháp phần tử hữu hạn tính theo mô hình chuyển vị. Điều đó có nghĩa là tại từng nút, lực nút do chuyển vị nút, gây ra $\{F\}_s^e = [k]\{\delta\}$ phải cân bằng với tải trọng đặt ở nút [9].

3. Ví dụ tính toán

3.1. Lựa chọn kết cấu

Xét một tấm bê tông có kích thước $1 \times b = 5,0m \times 4,5m$ với biên tự do được đặt trên lớp móng cấp phối đá dăm gia cố xi măng và nền đất á cát đầm chặt $K=0,95$. Các tham số tính toán [1, 2] được cho trong (Bảng 1) dưới đây:

Bảng 1: Các thuộc tính của bảng

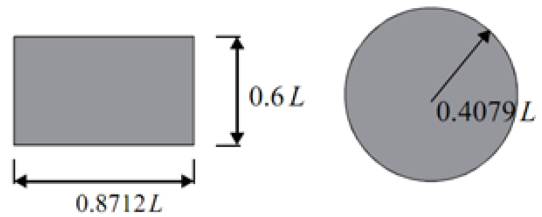
Lớp	d	E	μ	tg ϕ	C	K_n	K_t
Tấm BTXM	22	$27 \cdot 10^3$	0,15			808	231
Lớp cách ly				0,9	0,05		
Móng CPĐĐ gia cố XM 4%	20	600	0,3				
Nền đất		42	0,3				

Để có bức tranh tổng quát về khả năng chịu lực của kết cấu mặt đường bê tông xi măng khi kể đến sự ảnh hưởng của lớp phân cách, tác giả khảo sát với các chiều dày tấm tấm bê tông $h=22$ cm và chiều dày lớp móng đá gia cố là $h_{mg}=15$ cm, 18 cm, 22 cm, 25 cm.

3.2. Mô hình tải trọng

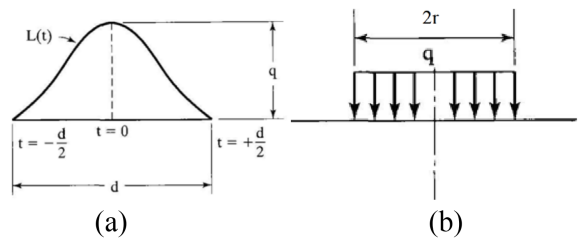
Nhằm mục đích thuận lợi cho việc chia lưới, vệt bánh xe được mô hình dưới dạng

hình chữ nhật và có mối quan hệ về kích thước với vệt bánh xe hình tròn như sau:



Hình 2. Mô hình vệt bánh xe qui đổi

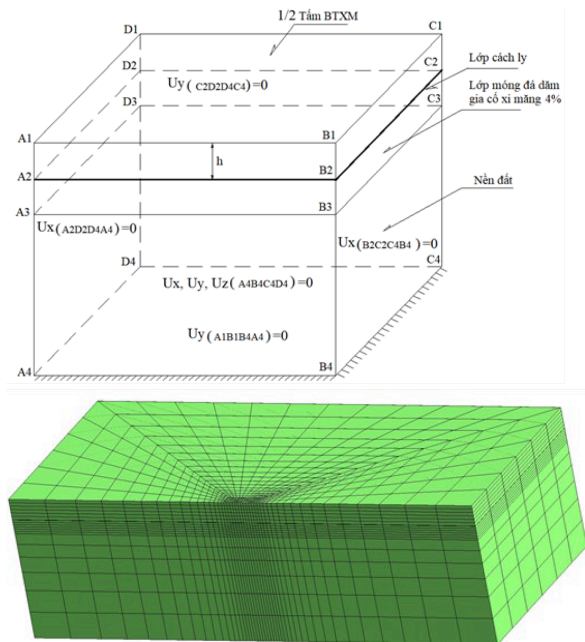
Để mô phỏng tác động của tải trọng bánh xe trên mặt đường, giả thiết cường độ của tải trọng biến thiên với thời gian theo một hàm nửa hình sin như mô tả trên (Hình 3).



Hình 3. Tải trọng phụ thuộc thời gian (a) và sự phân bố của tải trọng bánh xe trên mặt đường (b)

3.3. Mô hình tải trọng

Vì tính chất đối xứng qua mặt phẳng vuông góc và đi qua trung điểm của các cạnh ngắn mặt phẳng $A_1B_1A_4B_4$ (Hình 4), nên chỉ $1/2$ tấm cùng lớp móng và nền đất bên dưới được chọn làm mô hình nghiên cứu (Hình 4).



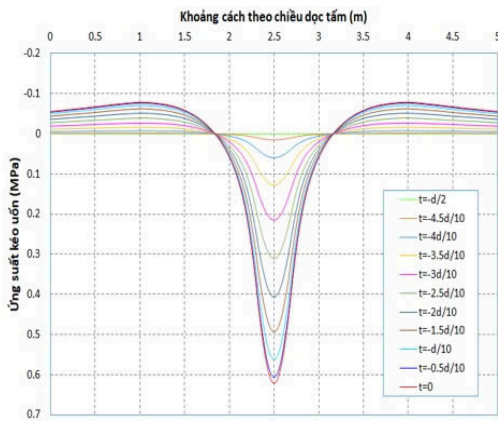
Hình 4. Mô hình hình học, điều kiện biên và mô hình chia lưới của bài toán.

3.4. So sánh sự làm việc của mặt đường có và không ảnh hưởng của lớp phân cách

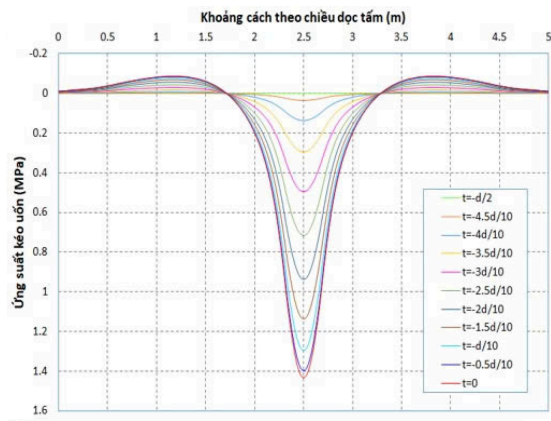
Để phản ánh một cách sát thực nhất trạng thái ứng suất biến dạng của hệ kết cấu trong thực tế, bài toán được thực hiện trên phần mềm phần tử hữu hạn Aster (Analyse des Structure Thermo-mécanique pour des Etudes et des Recherches) [10].

Trên (Hình 5a) chỉ ra rằng giữa đáy tấm chịu kéo khi uốn, phía bên ngoài chịu nén. Giá trị ứng suất kéo lớn nhất đạt được tại tâm tấm là 0,62 MPa. Theo chiều dọc tấm xuất hiện hai điểm tại đó ứng suất đổi dấu từ miền chịu kéo sang miền chịu nén và ngược lại, các điểm này được gọi là điểm uốn của tấm.

Đề ý rằng, với cùng một điều kiện tiếp xúc tấm – nền, khi tải trọng thay đổi thì vị trí điểm uốn của tấm không thay đổi, tức là vị trí các điểm này chỉ phụ thuộc vào đặc trưng của kết cấu mà không phụ thuộc vào tải trọng ngoài. Tuy nhiên (Hình 5b), ứng suất tại cạnh tấm tiến về không trong trường hợp này. Điều này được giải thích rằng, tấm trong trường hợp này được “tự do” hơn do tấm chỉ chịu ràng buộc về ma sát và lực dính nhất định đối với nền. Tại mép ngoài tấm ta cũng thấy tấm vẫn chịu nén, điều này có thể được giải thích là do trong quá trình chịu lực hệ bị biến dạng và giữa tấm và nền dính chặt do đó tấm chịu sự ràng buộc của nền móng.



(a) Trường hợp tấm và nền dính chặt.

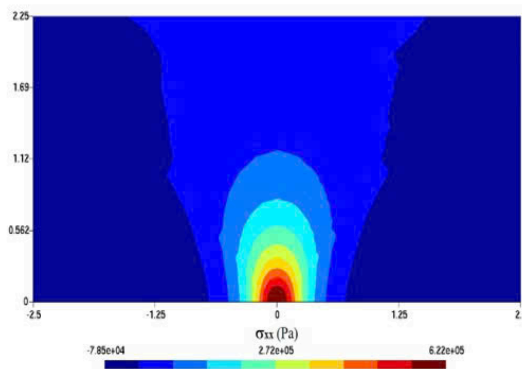


(b) Trường hợp tấm và nền không dính chặt.

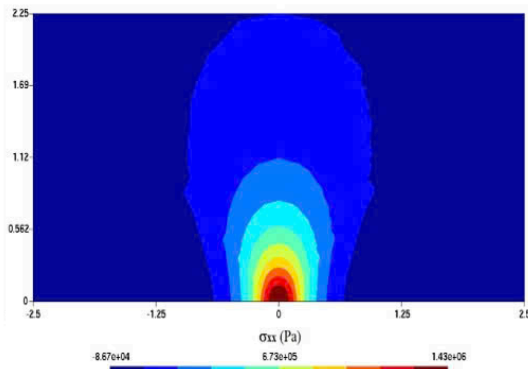
Hình 5. Ứng suất kéo uốn đáy tấm dọc theo chiều dài tấm

Ngoài ra, chúng ta cũng thấy rõ hơn bức tranh phân bố khả năng chịu lực kéo uốn đáy tấm trường hợp tấm – nền dính chặt và trường

hợp tấm – nền không dính chặt cũng được minh họa rõ ràng hơn bởi các đường đồng mức như trên (Hình 6a,b).



(a) Trường hợp tấm và nền dính chặt

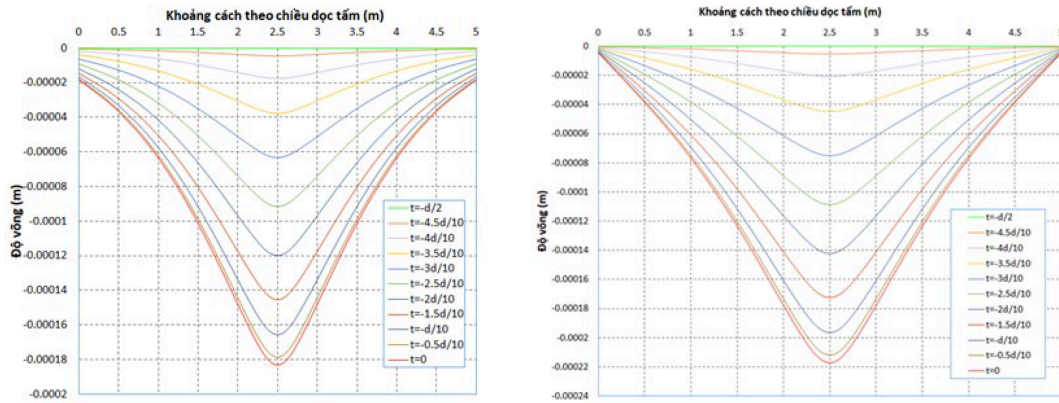


(b) Trường hợp tấm và nền không dính chặt.

Hình 6. Đường đồng mức ứng suất kéo uốn đáy tấm - trường hợp tấm và nền không dính chặt.

Các chuyển vị, đường đồng mức (độ võng), đáy tấm cho hai trường hợp về điều

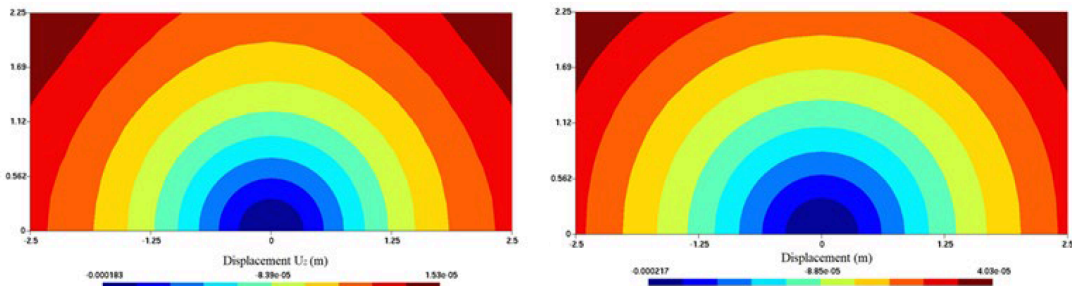
kiện tiếp xúc cũng được biểu diễn lần lượt trên các (Hình 7a,b), (Hình 8a,b).



(a) Trường hợp tấm và nền dính chặt

(b) Trường hợp tấm và nền không dính chặt.

Hình 7. Độ võng đáy tấm dọc theo chiều dài tấm



(a) Trường hợp tấm và nền dính chặt

(b) Trường hợp tấm và nền dính chặt.

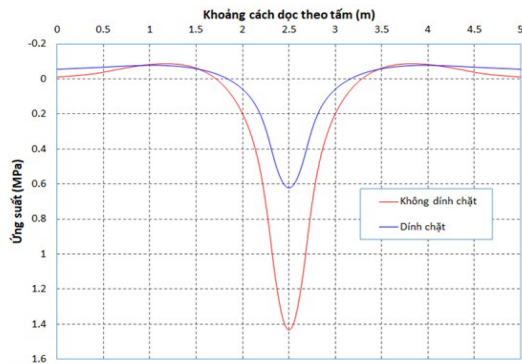
Hình 8. Đường đồng mức độ võng đáy tấm

So sánh giá trị ứng suất và chuyển vị lớn nhất cho hai trường hợp về tiếp xúc tấm - nền. Kết quả ứng suất và biến dạng trong trường hợp xét đến ảnh hưởng của lớp phân cách lớn hơn so với trường hợp nền và tấm dính chặt (Hình 9), (Hình 10). Cụ thể là, ứng suất kéo uốn lớn nhất trong trường hợp kể đến lớp phân cách (1,43 MPa) lớn hơn 130%, tương tự đối với chuyển vị là 20% so với trường hợp còn lại. Sự chênh lệch này là khá lớn. Có thể giải thích hiện tượng này như sau. Khi xem xét nền và tấm dính chặt, sự làm việc của tấm và nền là đồng thời, các lớp nền móng bên dưới tham gia chịu tải cùng tấm bê tông xi măng mặt đường. Trong khi đó, nếu kể đến sự ảnh hưởng của lớp phân cách, lớp này có tác dụng hạn chế sự truyền lực từ tấm sang nền và do đó tấm phải chịu tải lớn hơn.

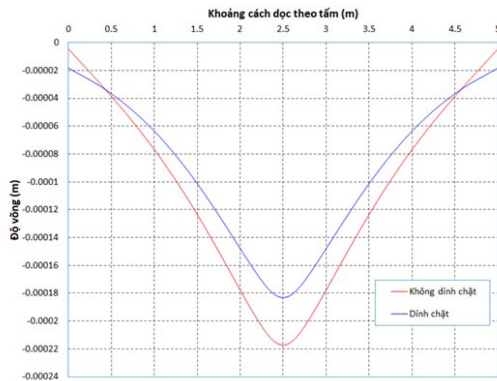
Cần lưu ý rằng, trong các khảo sát trên đây hiện tượng tấm bị tách khỏi nền và trượt trên bề mặt nền đã không được quan sát thấy. Có thể, đây là hệ quả của việc tấm bê tông mặt đường có độ cứng rất lớn nên sẽ không có

miền nào của tấm bị bành lên trong khi chịu tải. Để làm rõ hơn hiện tượng này, ta có thể khảo sát thêm một trường hợp với tấm có độ cứng nhỏ. Cụ thể là, cho mô đun đàn hồi của tấm giảm đi 10 lần, lúc này mô đun đàn hồi của tấm còn $E_b = 2700 \text{ Mpa}$. Lúc này, giá trị ứng suất tăng lên rất nhiều khi thay đổi điều kiện tiếp xúc từ dính chặt sang không dính chặt. Cụ thể giá trị ứng suất lớn nhất tăng 3,92 lần từ 0,25 MPa lên đến 0,98 MPa (tăng 292%). Rõ ràng rằng, với tấm có độ cứng nhỏ như trong tính toán này, sự trượt trên bề mặt tiếp xúc đã ảnh hưởng rất lớn đến trạng thái ứng suất trong tấm (Hình 11).

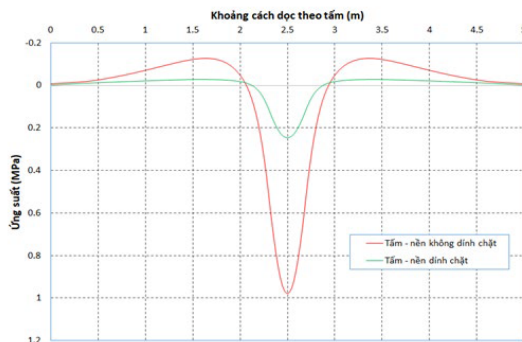
Như vậy có thể nhận xét, lớp phân cách làm việc một chiều chỉ xảy ra khi điều kiện về tương quan độ cứng của tấm, độ cứng của nền và độ lớn tải trọng được thỏa mãn. Khi tải trọng không đổi, thì tấm bê tông có độ cứng nhỏ đến một giá trị nào đó sẽ có thể dẫn đến sự tách, trượt tại mặt phân giới tấm - nền. Trong điều kiện độ cứng của tấm bê tông và nền móng cũng như tải trọng của đường ô tô, hiện tượng trượt tách tấm - nền đã không xảy ra.



Hình 9. Ứng suất kéo uốn lớn nhất dọc theo chiều dài tấm trong trường hợp tấm - nền dính chặt và không dính chặt



Hình 10. Độ võng lớn nhất dọc theo chiều dài tấm trong trường hợp tấm - nền dính chặt và không dính chặt



Hình 11. Ứng suất kéo uốn lớn nhất dọc theo chiều dài tấm trong trường hợp tấm - nền dính chặt và không dính chặt (tấm mềm)

4. KẾT LUẬN

Khi tính đến sự làm việc thực tế của lớp phân cách, kết quả ứng suất và biến dạng lớn hơn khá nhiều so với khi giả thiết tấm và nền dính chặt. Cụ thể là ứng suất có thể tăng lên hơn 100% và chuyển vị tăng hơn 20% khi thay đổi điều kiện tiếp xúc từ dính chặt sang không dính chặt (điều kiện làm việc thực tế của lớp phân cách).

Với điều kiện tấm bê tông xi măng đường ô tô (tấm có độ cứng lớn chịu tải trọng bánh

hơi ô tô), hiện tượng tách và trượt trên bề mặt tiếp xúc tấm – nền không xảy ra. Khi tấm có độ cứng nhỏ, tức là tấm đủ mềm đến một giới hạn nào đó, hiện tượng tách trượt xảy ra trên bề mặt tiếp xúc, nó làm cho ứng suất – biến dạng của tấm có sự thay đổi [11].

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ GTVT, 22TCN 223-95, “Áo đường cứng đường ô tô – Tiêu chuẩn thiết kế”, Nhà xuất bản GTVT, Hà Nội - 1995.
- [2] Phạm Cao Thăng, “Tính toán thiết kế các kết cấu mặt đường”, Nhà xuất bản Xây dựng, 2014.
- [3] Huang Y. H., “Pavement Analysis and Design”, Pearson Education, Inc (2004).
- [4] Bùi Xuân Cậy, Trần Thị Kim Đăng, Vũ Đức Sỹ, Nguyễn Quang Phúc, “Thiết kế nền mặt đường ô tô”, Nhà xuất bản GTVT, 2009.
- [5] Phạm Duy Linh, Vũ Đức Sỹ, Phạm Cao Thăng, “Phương pháp tính toán mặt đường bê tông xi măng hệ nhiều lớp có xét ảnh hưởng của chiều dày lớp cách ly giữa các lớp”, Tạp chí GTVT, 6, 2020, 80-83.
- [6] Naynish Pandey, “Analysis of Pavement Using Finite Element Techniques”, International Journal of Recent Engineering Research and Development, 3, 2018, 127-132.
- [7] M. Piotr, “Analysis of stresses in concrete pavement under a dowel according to its diameter and load transfer efficiency”, Can. J. Civ. Eng, 42, 2015, 845–853.
- [8] ThS Nguyễn Thị Thùy Liên, “Sử dụng phần mềm lập trình MathCad giải bài toán xác định trạng thái ứng suất - biến dạng trong Cơ học môi trường liên tục”, Tạp chí khoa học kiến trúc & Xây dựng, No 49, 2023.
- [9] Nguyen Thi Thu Nga, Tran Nam Hung, “Modeling of contact interface between two material layers in hybrid structures”, Transport and Communications Science Journal, 71, 2020, 419-430.
- [10] Trần Văn Xuân, Lê Thị Thùy Trang, Code Aster “Phần mềm tính toán phần tử hữu hạn”, Năng lượng hạt nhân, số 01 - tuyển tập 02 - tháng 3 2012.
- [11] L. Gabriela, M. Jozef, “Numerical simulation of moving load on concrete pavements”, Transport and Telecommunication, 2, 2015, 145-157.