

Phân tích ứng suất cắt trượt trong kết cấu mặt đường mềm có xét đến điều kiện tiếp xúc giữa các lớp và phân lớp thi công

Analyze the shear stress in the soft pavement structure considering the contact conditions of interlayers and the constructive stratification

Trung tá, TS. Nguyễn Văn Tứ¹; Thiếu tá, ThS. Thịnh Văn Thanh^{2*}; Thiếu tá, ThS. Nguyễn Văn Cảnh¹; Thượng tá, ThS. Đỗ Thành Huê²

¹ Bộ môn Cầu quân sự, Khoa Cầu đường Vượt sông, Trường Sĩ quan Công binh;

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

*Tác giả liên hệ: thanhz756@gmail.com

■Nhận bài: 28/03/2025 ■Sửa bài: 19/04/2025 ■Duyệt đăng: 02/06/2025

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tính toán ứng suất trong kết cấu mặt đường mềm trên cơ sở bài toán bán không gian vô hạn nhiều lớp đàn hồi của Burmister. Nghiên cứu, phân tích quy luật phân bố ứng suất cắt trượt của kết cấu mặt đường mềm dưới tác dụng của tải trọng bánh xe có kể đến tình trạng tiếp xúc giữa các lớp và phân lớp thi công. Thông qua ví dụ về kết cấu và tính toán trên máy tính (phần mềm BISAR 3.0) làm sáng tỏ ảnh hưởng của tải trọng bánh xe đến trạng thái ứng suất cắt trượt của kết cấu mặt đường mềm. Trên cơ sở đó đưa ra các kiến nghị về sử dụng mô hình và phương pháp tính vào thực tế khi giải bài toán mặt đường mềm chịu tác dụng của tải trọng bánh xe.

Từ khóa: Các lớp và phân lớp thi công, Độ dính bám, Lý thuyết đàn hồi, Mặt đường mềm. Ứng suất cắt trượt.

ABSTRACT

The article presents a method for calculating stress in flexible pavement structures based on Burmister's multi-layer elastic half-space problem. It studies and analyzes the distribution of shear stress in flexible pavement structures under the influence of wheel load, taking into account the contact conditions between layers and the construction stratification. Through an example of the structure and calculations using the BISAR 3.0 software, it clarifies the impact of wheel load on the shear stress state of the flexible pavement structure. Based on this, recommendations are made for the use of models and calculation methods in practice when addressing the problem of flexible pavements subjected to wheel load.

Keywords: Layers and sub-layers of construction, Adhesion, Elasticity theory, Soft road surface, Shear stress.

1. GIỚI THIỆU

Kết cấu mặt đường mềm thường có nhiều lớp, các lớp có nhiệm vụ khác nhau để đáp ứng yêu cầu chịu lực khác nhau phù hợp với trạng thái ứng suất biến dạng. Do vậy, việc tính toán kết cấu mặt đường mềm chính là việc tính toán kiểm tra ba tiêu chuẩn cường độ (ứng suất cắt-trượt, ứng suất kéo - uốn và độ lún đàn hồi) khi biết trước tải trọng và lưu lượng xe [1, 2]. Cơ sở của phương pháp tính

toán theo ba tiêu chuẩn giới hạn nêu trên là lời giải của bài toán hệ bán không gian đàn hồi nhiều lớp [6, 7]. Hiện nay trên thế giới có một số quy trình và hướng dẫn (Trung Quốc JTJ014-86, Nga PNCT 542-2021, Mỹ AASHTO) đã giải được bài toán nhiều lớp nhưng trong đó mới chỉ xét tới lực thẳng đứng mà chưa xét tới tác dụng của lực ngang, trong các bài toán chưa kể tới trạng thái tiếp xúc thực tế giữa các lớp [5]. Trong quy trình tính

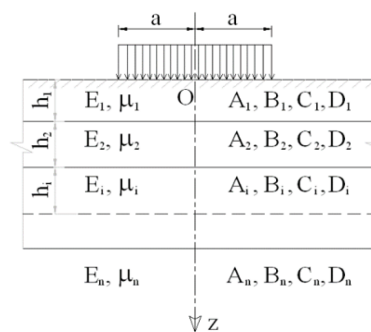
toán thiết kế kết cấu mặt đường mềm của Việt Nam [1, 2] quy định khi kiểm toán kết cấu mặt đường theo tiêu chuẩn độ võng đàn hồi và ứng suất cắt trượt trong nền đất, xem các lớp trong kết cấu áo đường là dính chặt trong khi đó khi kiểm toán ứng suất kéo uốn đáy các lớp vật liệu liền khối, xem rằng mặt tiếp xúc giữa đáy lớp này với kết cấu bên dưới là không liên kết, có nghĩa là lớp vật liệu đang kiểm toán có thể dịch chuyển tự do trên mặt phân cách. Như vậy, trạng thái tiếp xúc thực tế của các lớp và phân lớp mặt đường như đề cập ở trên chưa được tính đến trong tiêu chuẩn này. Đó cũng là một trong những nguyên nhân dẫn đến mặt đường mềm khi khai thác sử dụng thường có các hiện tượng hư hỏng dù đã bám sát tiêu chuẩn trên. Một số nghiên cứu gần đây [3, 4, 8, 10, 11] đã xét tới tác động của lực ngang và điều kiện bám dính giữa các lớp bê tông asphalt nhưng cũng giải được bài toán hai lớp và chưa có nghiên cứu sâu về điều kiện bám dính của các lớp móng và phân lớp thi công.

Trạng thái ứng suất - biến dạng và chuyển vị của hệ mặt đường nhiều lớp là trạng thái không gian ba chiều và được nghiên cứu trong hệ tọa độ Descartes hoặc hệ tọa độ trụ [6, 7]. Trong trường hợp xem vệt bánh tương đương có dạng hình tròn, trạng thái chịu lực của hệ đối xứng qua trục thẳng góc qua tâm vệt bánh xe thì sử dụng hệ tọa độ trụ có nhiều thuận lợi. Burmister (1943) đưa ra lời giải cho bán không gian vô hạn đàn hồi nhiều lớp chịu tác dụng của tải trọng phân bố đều trên một hình tròn, lời giải này hoàn toàn phù hợp để ứng dụng cho việc tính toán kết cấu mặt đường mềm nhiều lớp đường ô tô sân bay, Ngoài ra còn có thể tính toán theo mô hình Westergaard, nhưng mô hình thường ứng dụng hiệu quả cho kết cấu mặt đường cứng. Việc giải bài toán của lý thuyết đàn hồi cho mặt đường mềm thực chất là xác định trường ứng suất, trường biến dạng và trường chuyển vị phát sinh trong vật thể chịu tác dụng của tải trọng bánh hơi ô tô. Trên cơ sở đó bài báo đã xây dựng mô hình tính toán, lấy ví dụ về kết cấu mặt đường với sự hỗ trợ của máy tính (phần mềm BISAR

3.0 do bộ phận chuyên nghiên cứu của tập đoàn Shell phát triển chương trình BISAR 3.0 cho phép tính toán với tải trọng phân bố của bánh hơi trên mặt đường dưới dạng một hoặc nhiều hình tròn gia tải, số lớp tính toán tối đa là 10 và có thể tính được ứng suất, biến dạng, chuyển vị tại bất kỳ một vị trí nào trong kết cấu mặt đường. Thế mạnh của phần mềm này so với một số phần mềm tính toán kết cấu mặt đường mềm khác là ngoài tải trọng phân bố theo phương đứng, còn xét đến tải trọng theo phương ngang hoặc phương bất kỳ, và có thể xét đến các trường hợp khác nhau về mức độ bám dính giữa các lớp. Phần mềm BISAR 3.0 đã khẳng định sự tin cậy và được ứng dụng nhiều trong nghiên cứu khoa học [4, 5, 8, 9]) để nghiên cứu quy luật phân bố ứng suất cắt trượt dưới tác dụng của tải trọng bánh xe có kể đến tình trạng tiếp xúc giữa các lớp và phân lớp thi công để kiến nghị về sử dụng mô hình và phương pháp tính vào thực tế khi giải bài toán mặt đường mềm chịu tác dụng của tải trọng bánh xe.

2. CƠ SỞ TÍNH VÀ MÔ HÌNH BÀI TOÁN

Trên cơ sở phương pháp tính của Burmister mở rộng phương pháp giải cho bài toán bán không gian có nhiều lớp, mỗi lớp được đặc trưng bởi chiều dày h_i , mô đun đàn hồi E_i và hệ số Poisson μ_i , lớp dưới cùng có chiều dày $h_n = \infty$.



Hình 1. Bán không gian nhiều lớp đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng phân bố đều trên diện tròn

Với mỗi lớp, ta có tương ứng một phương trình trùng điều hòa, thí dụ đối với lớp thứ i :

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi_i(r, z) = 0 \quad (1)$$

trong đó:
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$\varphi(r, z)$ là hàm ứng suất trong hệ tọa độ trụ đối xứng trục (r - bán kính vệt tròn, z - chiều sâu).

Nghiệm của phương trình trùng điều hòa (1) có thể được viết dưới dạng sau:

$$\varphi^*(m, z) = A(m)e^{mz} + B(m)ze^{mz} + C(m)e^{-mz} + D(m)ze^{-mz} \quad (2)$$

trong đó: $\varphi^*(m, z)$ là biến đổi tích phân của hàm ứng suất $\varphi(m, z)$, giữa chúng có mối quan hệ sau đây:

$$\begin{cases} \varphi^*(m, z) = \int_0^\infty rJ_0(mr)\varphi(r, z)dr \\ \varphi(m, z) = \int_0^\infty mJ_0(mr)\varphi^*(m, z)dm \end{cases} \quad (3)$$

với A, B, C, D: là các hằng số tích phân; $J_0(mr)$: là hàm Bessel cấp chỉ số 0, với m là tham số Bessel.

Việc ứng dụng phép biến đổi tích phân sẽ dẫn đến mỗi lớp có một hàm biến đổi ứng suất $\varphi^*(m, z)$ như (2) với các hệ số A_i, B_i, C_i, D_i và cũng từ đó xác định các hàm biến đổi: $\sigma_{zi}^*(m, z), \tau_{rzi}^*(m, z), w_i^*(m, z), \dots$

Trong đó ứng với mỗi lớp có 4 hằng số A_i, B_i, C_i, D_i , trừ lớp cuối cùng chỉ có hai hằng số C_n và D_n . Như vậy nếu bán không gian có n lớp thì ta có $4(n-1)+2$ hằng số phải xác định. Số điều kiện để xác định các hằng số tích phân bao gồm: 2 điều kiện ở biên bán không gian tức là ở lớp thứ nhất trên cùng; $4(n-1)$ điều kiện ở ranh giới $n-1$ lớp dưới bao gồm:

Trường hợp 2 mặt tiếp xúc giữa hai lớp gắn chặt không trượt:

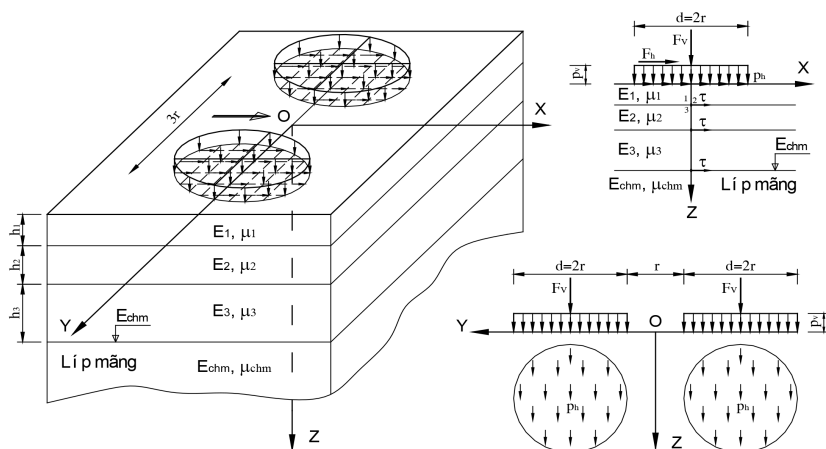
$$\begin{cases} \sigma_{z(i)} = \sigma_{z(i-1)} \\ \tau_{rz(i)} = \tau_{rz(i-1)} \\ w_{(i)} = w_{(i-1)} \\ u_{(i)} = u_{(i-1)} \end{cases} \quad (4)$$

Trường hợp 2 mặt tiếp xúc giữa hai lớp trượt tự do với nhau:

$$\begin{cases} \sigma_{z(i)} = \sigma_{z(i-1)} \\ \tau_{rz(i)} = 0 \\ \tau_{rz(i-1)} = 0 \\ w_{(i)} = w_{(i-1)} \end{cases} \quad (5)$$

3. MÔ HÌNH BÀI TOÁN NGHIÊN CỨU

Việc khảo sát được tiến hành với mô hình có dạng hai vệt bánh xe hình tròn tương đương có đường kính $d = 2r$ dành để khảo sát kết cấu theo các tiêu chuẩn ứng suất cắt trượt như hình 2 [4]. Giá trị lực ngang p_h từ (0 - 0,8) lực thẳng đứng p_v ; tải trọng trục tiêu chuẩn đề xuất trong nghiên cứu là trục 100 kN với các thông số: Tải trọng trục đơn, bánh kép $P = 2F_v = 100$ kN; Áp lực tác dụng lên vệt bánh $p_v = 0,7$ Mpa; Bán kính tương đương $r = 10,5$ cm; Cự ly giữa hai vệt bánh xe bằng $3r = 31,5$ cm. Trong bài báo chỉ phân tích về ứng suất cắt trượt τ tại các vị trí nghiên cứu trên trục qua tim, mép trước và mép sau vệt bánh xe. Điều kiện biên của ứng suất cắt trượt τ theo các công thức (4) và (5).



Hình 2. Mô hình vệt bánh xe hai hình tròn tương đương

Sự truyền áp lực, độ võng và sự nén ép trong các lớp vật liệu mặt đường mềm hệ nhiều lớp phụ thuộc vào chiều dày, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson của từng lớp và sự liên kết giữa các lớp vật liệu theo nguyên lý làm việc của hệ nhiều lớp. Đây là quá trình diễn ra hết sức phức tạp. Vì vậy, để nghiên cứu trạng thái ứng suất của mặt đường mềm cần xuất phát từ một số giả thiết như sau:

Kết cấu mặt đường gồm các lớp bê tông nhựa, các lớp móng và nền đất được xem là kết cấu nhiều lớp đàn hồi tuyến tính, đồng nhất và đẳng hướng trong mỗi lớp.

Mặt đường chịu tác dụng của tải trọng bánh hơi với áp lực p_v (MPa) và tải trọng ngang p_h (MPa), phân bố đều trên một hình tròn quy đổi có đường kính d .

Xét sự tồn tại lực ma sát tại mặt tiếp xúc giữa các lớp vật liệu và các phân lớp thi công. Khi lực ma sát lớn sẽ gắn kết các lớp lại thành một lớp làm tăng sức chịu tải của mặt đường, khi lực ma sát nhỏ, khi bị uốn các lớp vật liệu sẽ chuyển dịch tương đối với nhau. Các lớp vật liệu càng bám dính tốt với nhau, càng góp phần làm tăng cường độ của hệ nhiều lớp.

4. VÍ DỤ KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG VÀ KHẢO SÁT TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT

Nhằm mục đích đánh giá ảnh hưởng của điều kiện tiếp xúc giữa các lớp và phân lớp thi công đến trạng thái ứng suất mặt đường mềm, sau đây tác giả tiến hành khảo sát ứng suất cắt trượt cho một hệ kết cấu mặt đường mềm điển hình thường được dùng trong mặt đường ô tô cấp cao, với các tham số tính toán cho trong bảng dưới đây [5, 8]:

Bảng 1: Các tham số tính toán của kết cấu

TT	Lớp vật liệu	H (cm)	E (Mpa)	μ
1	BTAP chặt hạt mịn	6	300	0,4
2	BTAP chặt hạt trung	8	250	0,4
3	CPĐĐ loại I	20	300	0,3
4	CPĐĐ loại II	12	250	0,3
5	CPĐĐ loại II	13	250	0,3
6	Nền đất		42	0,3

Bảng 2: Tổ hợp tải trọng ngang

TT	Giá trị	Ký hiệu
1	$p_h=0\%p_v$	T0
2	$p_h=20\%p_v$	T20
3	$p_h=50\%p_v$	T50
4	$p_h=80\%p_v$	T80

Trong mô hình vệt bánh xe 2 hình tròn tương đương: $p_v = 0,7$ MPa; $d = 21$ cm, $r = 10,5$ cm.

Bảng 3: Điều kiện liên kết

TT	Mức độ dính bám	Ký hiệu
1	Dính bám 0%	D0
2	Dính bám 20%	D20
3	Bám dính 100%	D100

Ta ký hiệu các trường hợp nghiên cứu đối với bài toán khảo sát như sau: Tải trọng ngang_Điều kiện dính bám_Vị trí. Ví dụ: T50_D100_TIM VET, có nghĩa là tính toán khảo sát cho trường hợp Tải trọng ngang bằng 50% tải trọng đứng_Dính bám giữa các lớp bằng 100%_Vị trí khảo sát nằm trên trục đi qua tim vệt bánh xe.

Trong thực tế thi công kết cấu áo đường, khi chiều dày của lớp cấp phối (lớp vật liệu rời rạc) lớn, để đảm bảo hiệu quả của công tác đầm nén, người ta thường chia lớp đó ra làm các phân lớp thi công với chiều dày nhỏ hơn. Khi đó tiếp xúc giữa hai phân lớp sẽ không được tốt như trường hợp ta chỉ thi công một lần cho toàn bộ lớp vật liệu. Để đánh giá ảnh hưởng của việc dùng các phân lớp thi công này, bài báo cũng xét đến điều kiện tiếp xúc giữa các phân lớp đó. Ở đây, lớp cấp phối đá dăm II có chiều dày khá lớn (25 cm) nên sẽ được chia thành hai phân lớp có chiều dày lần lượt từ dưới lên trên là 13 cm và 12 cm.

Để đánh giá ảnh hưởng riêng rẽ của điều kiện bám dính giữa các lớp tầng mặt và các lớp tầng móng đến trạng thái ứng suất-biến dạng của hệ, khi khảo sát ta thực hiện qua hai bước. Đầu tiên khi đánh giá ảnh hưởng của điều kiện tiếp xúc giữa hai lớp bê tông nhựa và giữa lớp bê tông nhựa dưới với lớp móng

trên (trên 2 mặt tiếp xúc), ta giả thiết các lớp móng và nền đất dính chặt với nhau. Tiếp theo đó, khi khảo sát ảnh hưởng của liên kết giữa các lớp móng, các phân lớp thi công và nền đất ta giả thiết tại tất cả các mặt tiếp xúc điều kiện liên kết là như nhau và bằng 20% (trên 5 mặt tiếp xúc tất cả).

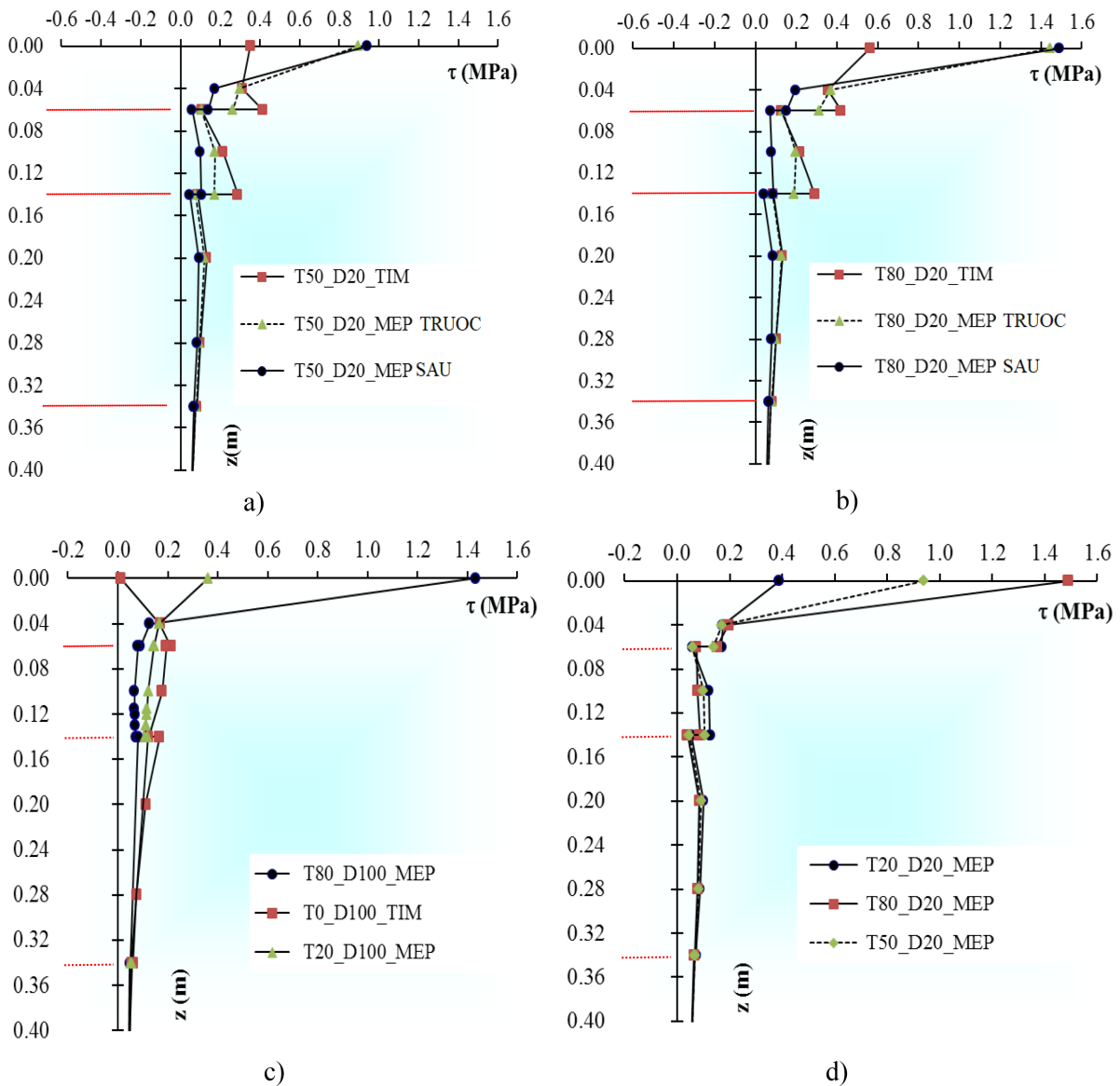
Ứng suất cắt trượt lớn trong các lớp mặt BTN là một trong những nguyên nhân gây phá hỏng kết cấu mặt đường. Dưới tác dụng của tải trọng và các điều kiện thời tiết, khi lực bám dính giữa các lớp không đủ, lớp mỏng phía trên sẽ bị dịch chuyển dẫn đến lớp vật liệu bị xô dồn, lượn sóng, nứt và bong bật. Tại các bến xe buýt, nút giao cắt, bãi đỗ xe, những chỗ thường xuyên phải dừng xe, tăng giảm

tốc thì lực ngang rất lớn - có thể gây ra các hư hỏng mặt đường như lún trôi, xô trượt, lún kết hợp nứt parabol,... dẫn đến kết cấu bị phá hoại. Khi nhiệt độ mặt đường tăng cao, cường độ chịu lực của các lớp BTN giảm thì các hư hỏng trên càng lớn.

4.1. Khảo sát bước 1

a) Phân tích ảnh hưởng của thành phần lực ngang đến ứng suất cắt

Dựa trên các tính toán cho các trường hợp khác nhau trên phần mềm BISAR 3.0, ta thu được các kết quả thể hiện ảnh hưởng của lực ngang đến ứng suất cắt trong kết cấu mặt đường mềm. Sau khi xử lý, chúng được thể hiện trên các biểu đồ như hình 3.



Hình 3. Ứng suất cắt - trượt tương ứng với các giá trị lực ngang (đường chấm chấm nằm ngang trên hình thể hiện phân giới giữa các lớp)

Từ các biểu đồ trên hình 3 ta có thể có các nhận xét như sau:

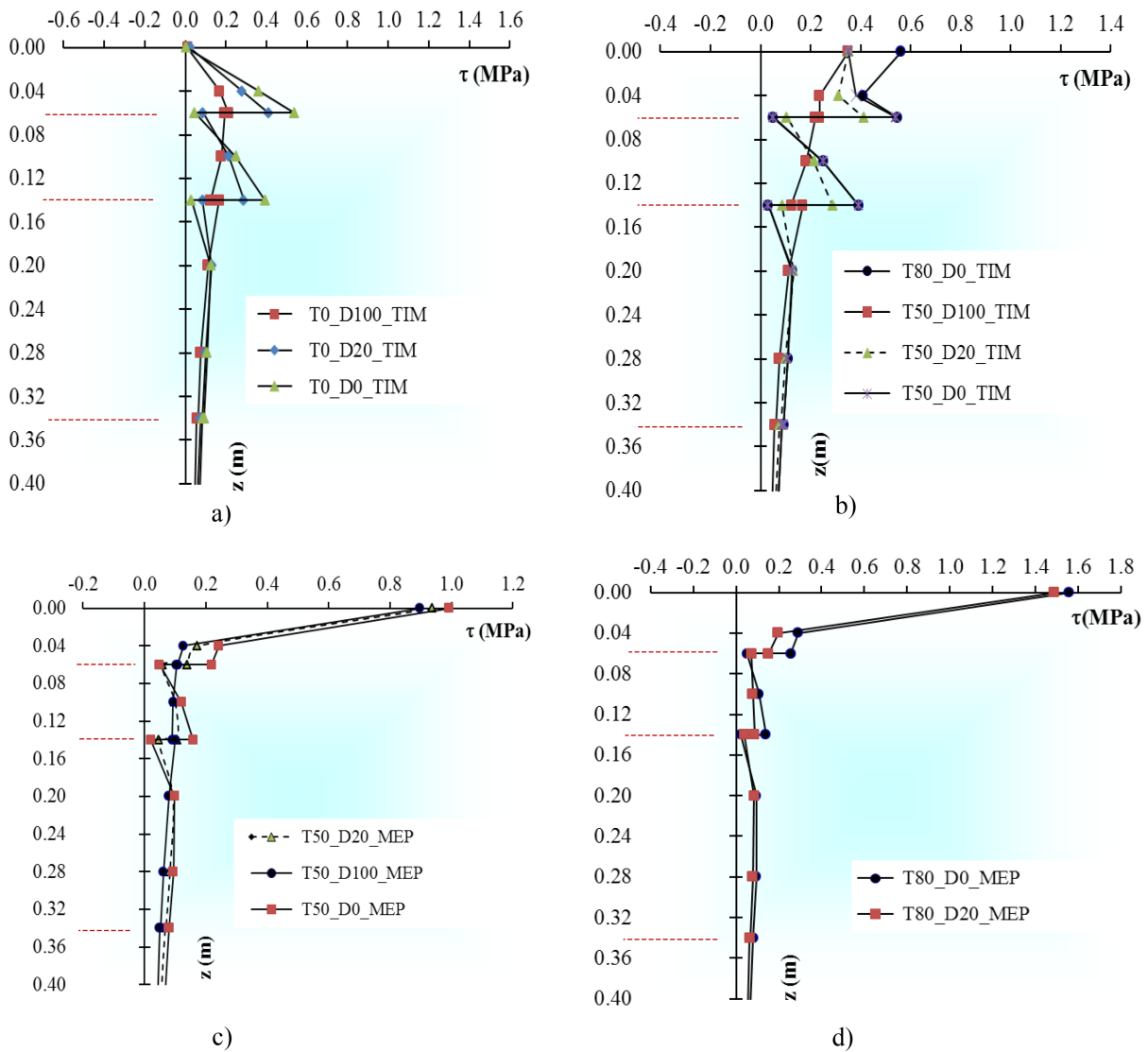
Khi chỉ có lực tác dụng thẳng đứng, ứng suất cắt lớn nhất phát sinh dưới đáy lớp BTN và nằm trên trục đi qua tim vệt bánh xe (hình 3c).

Khi kết cấu chịu tác dụng đồng thời của lực đứng và lực ngang, ứng suất cắt trượt tăng lên một cách đáng kể, khi lực ngang đạt giá trị 80% lực đứng, ứng suất cắt có giá trị rất lớn. Ứng suất cắt lớn nhất này phát sinh ngay tại bề mặt của kết cấu mặt đường và ở mép sau của vòng tròn vệt bánh xe gia tải (hình 3a, 3b cho so sánh ứng suất cắt tại các vị trí trên trục qua tim, mép trước và mép sau vệt bánh xe). Trị số ứng suất cắt lớn trên bề

mặt đường làm lớp mặt nhanh chóng bị bong tróc, xô dòn, trượt..., điều này giải thích tại sao mặt đường BTN tại các bên bãi, trước các trạm thu phí, tại các nút giao cắt nhanh chóng bị hư hỏng. Lực ngang chủ yếu ảnh hưởng đến ứng suất cắt trượt trên lớp mặt mà ít ảnh hưởng đến các lớp bên dưới.

b) Phân tích ảnh hưởng của điều kiện bám dính đến ứng suất cắt trượt:

Dựa trên các tính toán cho các trường hợp khác nhau trên phần mềm BISAR 3.0, ta thu được các kết quả thể hiện ảnh hưởng của điều kiện bám dính đến ứng suất cắt trượt trong kết cấu mặt đường mềm. Sau khi xử lý, chúng được thể hiện trên các biểu đồ như hình 4.



Hình 4. Ảnh hưởng của lực ngang và điều kiện tiếp xúc giữa các lớp đến ứng suất cắt trượt
 a - khi $ph=0\%pv$ và thay đổi điều kiện dính bám;
 b,c,d- khi $ph=50(80)\%pv$ và thay đổi điều kiện dính bám

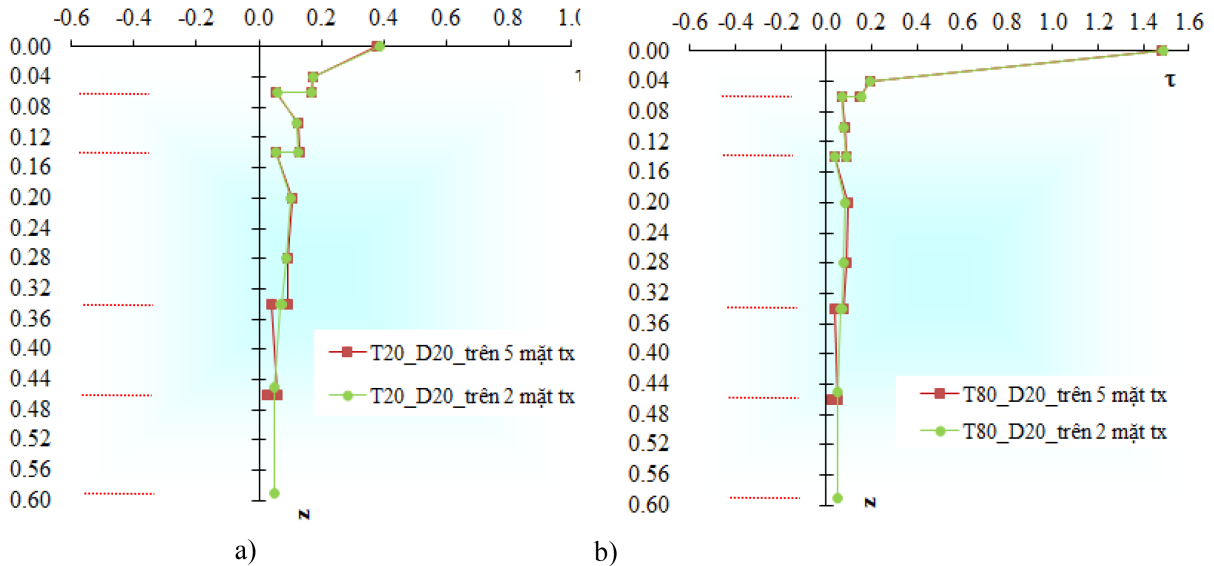
Từ các kết quả nhận được ở hình vẽ 4 ta có nhận xét, điều kiện bám dính giữa các lớp ảnh hưởng lớn đến ứng suất cắt trượt dưới tim vết bánh xe ở vị trí đáy các lớp BTN nhưng gần như không ảnh hưởng đến ứng suất cắt trên bề mặt đường. Chẳng hạn như trên hình 4b khi cùng xét tải trọng ngang T50, độ bám dính lần lượt là D20 và D100, ứng suất cắt trượt trên bề mặt đường trong hai trường hợp bằng nhau. Trong khi đó dưới đáy lớp bê tông nhựa lớp trên ứng suất cắt trong trường hợp D20 lớn

hơn trong trường hợp D100 là 0,2 MPa (tương đương 100%). Biểu hiện trên cũng có nghĩa là, các lớp có khả năng liên kết với nhau càng tốt thì ứng suất cắt tại mặt tiếp xúc giữa các lớp càng nhỏ và ngược lại.

4.2. Khảo sát bước 2

Lúc này ta lại tiếp tục áp đặt bám dính trên cả 5 mặt tiếp xúc bằng 20% và tiến hành khảo sát ứng suất cắt trượt trong kết cấu.

Kết quả được thể hiện trên hình 5.



Hình 5. Ảnh hưởng điều kiện bám dính trên 2 mặt tiếp xúc và 5 mặt tiếp xúc đến ứng suất cắt trượt trên mép sau vết bánh xe

Có thể thấy rằng, ứng suất cắt-trượt của hai trường hợp vừa xét gần như giống nhau ở các điểm xem xét, chỉ có một chút khác biệt tại các mặt phân giới các lớp dưới và có thể bỏ qua.

Tóm lại, qua những phân tích các kết quả thu được ở cả hai bước khảo sát trên có thể thấy ứng suất cắt lớn nhất ở bề mặt đường khi có xét đến lực ngang và khi không xét đến lực ngang thì nó lớn nhất ở đáy lớp mặt. Ứng suất cắt càng lớn khi liên kết giữa các lớp càng nhỏ và ngược lại. Điều kiện liên kết giữa các lớp mặt ảnh hưởng lớn đến ứng suất cắt-trượt, đặc biệt tại các mặt phân giới giữa các lớp mặt. Trong khi đó điều kiện tiếp xúc giữa các lớp móng và phân lớp thì công ảnh hưởng không đáng kể đến phân bố ứng suất cắt trượt trong kết cấu.

Để tránh việc phát sinh ứng suất cắt gây

phá hỏng mặt đường thì việc tăng chiều dày lớp mặt hay tạo bám dính tốt giữa các lớp là cần thiết, song chưa đủ, vì ứng suất cắt trên bề mặt đường khi xét thêm lực tác dụng ngang thường lớn hơn giá trị ứng suất cắt cho phép của BTN thông thường. Do đó, biện pháp quan trọng là phải có được lớp mặt trên của mặt đường từ vật liệu có cường độ kháng cắt cao như Mastic Asphalt, Stone Matrix Asphalt chẳng hạn hoặc dùng mặt đường cứng tại các vị trí có lực ngang lớn.

5. KẾT LUẬN

Khi chỉ xét đến tải trọng tác dụng thẳng đứng, ứng suất cắt lớn nhất phát sinh dưới đáy lớp bê tông nhựa và nằm trên trục đi qua tim vết bánh hơi.

Khi kết cấu chịu tác dụng đồng thời của tải trọng đứng và ngang, ứng suất cắt-trượt tăng lên một cách đáng kể. Ứng suất này phát

sinh ngay tại bề mặt của kết cấu mặt đường và ở mép của vòng tròn vệt bánh xe gia tải.

Lực ngang chủ yếu ảnh hưởng đến ứng suất cắt trượt trên lớp mặt mà ít ảnh hưởng đến các lớp bên dưới.

Điều kiện bám dính giữa các lớp mặt ảnh hưởng nhiều đến ứng suất cắt-trượt trong kết cấu trong khi điều kiện bám dính các lớp dưới ảnh hưởng nhỏ, có thể bỏ qua.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ GTVT, 22TCN 211-06, *Áo đường mềm- Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế*, Nhà xuất bản GTVT, Hà Nội, 2006.
- [2] Tiêu chuẩn cơ sở TCCS 38:2022/TCĐBVN (2022). *Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế*. Tổng cục đường bộ Việt Nam, 2022.
- [3] N.V. Bích, T.Đ. Anh và B.P Doan, *Nghiên cứu xác định ứng suất cắt lớn nhất ở tầng mặt bê tông nhựa trong kết cấu áo đường mềm bằng phương pháp phần tử hữu hạn*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 19 (1V): 24–33, 2025.
- [4] B.X. Cây, N.Q. Phúc và T.N Hưng, *Phân tích ứng suất kéo uốn trong kết cấu mặt đường mềm có xét đến điều kiện dính bám giữa các lớp bê tông asphalt*, Tạp chí Cầu đường Việt Nam (số 7), Hà Nội, 2010.
- [5] P. Kiên, *Khảo sát sự tác động của tải trọng ngang đến ứng suất cắt- trượt trong kết cấu áo đường mềm*, Tạp chí KH và CN Đại học Đà Nẵng. Số 1(86): 62-64, 2015.
- [6] N.V Liên, *Lý thuyết đàn hồi*, Nhà xuất bản Đại học Xây dựng, 2022.
- [7] V.Đ. Lai, *Lý thuyết đàn hồi*, Trường Đại học GTVT Hà Nội, Hà Nội, 2000.
- [8] N.Q. Phúc và T.N Hưng, *Nghiên cứu cường độ dính bám giữa các lớp bê tông asphalt trong kết cấu mặt đường mềm*, Tạp chí GTVT (số 10), Hà Nội, 2010.
- [9] N. Q. Phúc, T. T. C. Hà, T. D. Hợi, và P. V. Hiền, *Phân tích, đánh giá kết cấu áo đường mềm cấp cao sử dụng lớp móng cấp phối đá chặt gia cố nhựa nóng và bê tông nhựa bán rỗng*. Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 75(2):1249–1263, 2023.
- [10] N. H. T. Tài, và T. V. Tự, *Phân tích ứng suất cắt trượt giữa các lớp trong kết cấu áo đường sử dụng bê tông nhựa cứng*. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN, 13(5V), 85-92, 2019.
- [11] K. Yang, & R. Li, *Characterization of bonding property in asphalt pavement interlayer: A review*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 8(3), 374-387, 2021.