

Một phương pháp tính toán quy đổi lưu lượng trục xe khai thác về trục xe tiêu chuẩn trong thiết kế mặt đường bê tông xi măng

A method for calculating the conversion of operational axle load traffic to the standard axle in cement concrete pavement design

Nguyễn Văn Công¹, Thịnh Văn Thanh^{1,2*}, Phạm Tôn Hiệp¹ và Hoàng Hồng Phán¹

¹ Khoa Công trình, Trường Sĩ quan Công binh;

² Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy Lợi;

* Tác giả liên hệ: Thanhz756@gmail.com

■ Nhận bài: 19/12/2025 ■ Sửa bài: 30/01/2026 ■ Duyệt đăng: 05/03/2026

DOI: <https://doi.org/10.66195/mtu.2026.16.154>

TÓM TẮT

Trong thiết kế mặt đường bê tông xi măng, việc xác định chính xác lưu lượng trục xe tiêu chuẩn là yếu tố then chốt nhằm đảm bảo độ bền và tuổi thọ khai thác của kết cấu mặt đường. Trên thực tế, lưu lượng giao thông khai thác bao gồm các phương tiện có tải trọng trục và đặc điểm phân bố tải khác nhau, do đó cần được quy đổi về trục xe tiêu chuẩn thông qua các hệ số quy đổi phù hợp. Tuy nhiên, các phương pháp quy đổi hiện nay chủ yếu dựa trên những giả thiết đơn giản hóa và chưa xét đầy đủ ảnh hưởng của độ cứng mặt đường, diện tích tiếp xúc bánh xe với mặt đường và điều kiện làm việc của kết cấu. Các nghiên cứu lý thuyết cho thấy những yếu tố này có ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái ứng suất - biến dạng của tấm bê tông và các lớp nền móng, từ đó tác động đến khả năng làm việc và cơ chế hư hỏng của mặt đường. Việc bỏ qua các ảnh hưởng này có thể dẫn đến sai lệch trong tính toán thiết kế. Vì vậy, bài báo tập trung phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến lưu lượng trục xe quy đổi nhằm nâng cao độ tin cậy và cơ sở khoa học cho thiết kế mặt đường bê tông xi măng.

Từ khóa: Khai thác giao thông, lưu lượng trục xe quy đổi, mặt đường bê tông xi măng, trục xe tiêu chuẩn, tải trọng trục xe

ABSTRACT

In the design of cement concrete pavements, accurate estimation of standard axle load traffic is essential for ensuring structural durability and service life. In practice, in-service traffic consists of vehicles with varying axle loads and load distribution characteristics, which must be converted into equivalent standard axle loads using appropriate equivalency factors. However, existing conversion methods are largely based on simplified assumptions and do not fully account for the effects of pavement stiffness, tire-pavement contact area, and pavement structural conditions. Theoretical studies indicate that these factors significantly influence the stress-strain responses of concrete slabs and underlying foundation layers, thereby affecting pavement performance and damage mechanisms. Neglecting these influences may lead to inaccuracies in pavement design. Therefore, this paper investigates the key factors affecting axle load equivalency to improve the reliability and scientific basis of cement concrete pavement design.

Keywords: Traffic operation, equivalent axle load traffic, cement concrete pavement, standard axle, axle load

1. GIỚI THIỆU

Trong thiết kế mặt đường bê tông xi măng, việc quy đổi lưu lượng trục xe khai thác về trục xe tiêu chuẩn là một nội dung quan

trọng nhằm đánh giá tác động của tải trọng giao thông đến khả năng chịu lực và độ bền lâu dài của kết cấu mặt đường. Các phương pháp quy đổi hiện nay chủ yếu dựa trên khái

niệm tải trọng trục tương đương, trong đó mối quan hệ giữa tải trọng trục và mức độ hư hỏng của mặt đường được thiết lập thông qua các hệ số quy đổi phục vụ tính toán thiết kế [1], [2].

Trên cơ sở các phương pháp truyền thống, nhiều hướng dẫn và tiêu chuẩn thiết kế đã được xây dựng nhằm đơn giản hóa quá trình xác định lưu lượng trục xe tiêu chuẩn trong thực hành thiết kế. Các hướng dẫn này thường xem xét ảnh hưởng của tải trọng và cấu hình trục xe, đồng thời giả thiết kết cấu mặt đường có đặc tính làm việc tương đối đồng nhất trong suốt thời gian khai thác [3].

Tuy nhiên, về mặt lý thuyết, trạng thái ứng suất - biến dạng trong tấm bê tông và các lớp kết cấu bên dưới không chỉ phụ thuộc vào tải trọng trục xe mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể bởi độ cứng của tấm bê tông và điều kiện làm việc của nền móng. Các nghiên cứu kinh điển về mặt đường cứng đã chỉ ra rằng sự thay đổi các đặc trưng cơ học của kết cấu mặt đường có thể làm biến đổi đáng kể quy luật phân bố ứng suất do tải trọng bánh xe gây ra [4].

Các tiêu chuẩn thiết kế mặt đường của Việt Nam hiện nay chủ yếu dựa trên phương pháp quy đổi tải trọng trục mang tính kinh nghiệm, trong đó mức độ hư hỏng được biểu diễn chủ yếu theo tải trọng trục danh định với số mũ lớn. Cách tiếp cận này ngầm giả định diện tích tiếp xúc lớp-mặt đường không đổi và chưa xét trực tiếp đến ảnh hưởng của áp suất bơm lớp, khiến cơ chế truyền tải trọng bị quy gộp vào một hệ số kinh nghiệm duy nhất. Bên cạnh đó, các hệ số quy đổi được xây dựng từ điều kiện giao thông trước đây nên chưa phản ánh đầy đủ đặc điểm của phương tiện tải nặng và áp suất lốp cao hiện nay, từ đó có thể dẫn đến sai lệch trong đánh giá lưu lượng trục xe quy đổi khi áp dụng cho điều kiện khai thác hiện tại, từ đó đặt ra yêu cầu cần có các nghiên cứu mới bổ sung nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học cho công tác tính toán và thiết kế.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Đặc điểm các loại trục xe khai thác hiện nay tại Việt nam

Trong điều kiện khai thác thực tế, kết cấu mặt đường phải chịu tác động của nhiều loại

phương tiện với đặc trưng tải trọng và cấu hình trục khác nhau. Đối với đường bộ, sự đa dạng thể hiện ở số lượng trục và tải trọng trục của các loại xe; trong khi đó, đối với sân bay, tải trọng tác dụng phụ thuộc vào loại máy bay, số lượng càng chính, số bánh trên mỗi càng và cường độ khai thác. Vì vậy, để phục vụ công tác tính toán kết cấu, tải trọng của các phương tiện khai thác cần được quy đổi về một dạng tải trọng đại diện, được lựa chọn làm cơ sở thiết kế.

Theo hệ thống tiêu chuẩn thiết kế mặt đường đang áp dụng tại Việt Nam [5], tải trọng trục đại diện được sử dụng trong tính toán là trục 10 tấn đối với các tuyến đường giao thông thông thường như cao tốc, quốc lộ và tỉnh lộ, và trục 12 tấn đối với các tuyến đường thuộc khu công nghiệp hoặc đường chuyên dụng. Đối với mặt đường sân bay, tải trọng thiết kế được xác định theo tải trọng càng chính của loại máy bay có trọng lượng cất cánh lớn nhất. Tải trọng tác dụng lên mỗi bánh được xác định thông qua việc phân bố tải trọng càng chính cho số lượng bánh tương ứng theo sơ đồ bố trí bánh của càng.

2.2 Cơ sở lý thuyết tính toán tấm bê tông xi măng mặt đường

Để tính toán tấm bê tông trên nền đàn hồi chúng ta sử dụng lý thuyết tấm mỏng trong lý thuyết đàn hồi [6] và thỏa mãn điều kiện:

$$\frac{1}{5} \leq \frac{h}{b} \leq \frac{1}{100} \quad (1)$$

Trong đó: h là chiều dày tấm (mm); b là kích thước cạnh nhỏ nhất của tấm (mm).

Phương trình vi phân cân bằng độ võng (phương trình Sophie - Germain) mặt trung gian tấm trên nền đàn hồi được xác định thông qua các giả thiết của lý thuyết tấm mỏng cổ điển [7].

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) = q(x, y) - r(x, y) \quad (2)$$

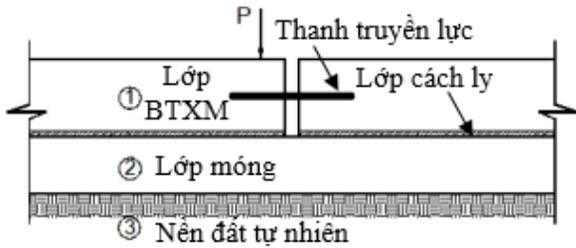
Trong đó: D là độ cứng uốn (N/m); w là chuyển vị (m); q(x,y) là tải trọng trên một đơn vị diện tích (N/m²); r(x,y) là cường độ phản lực nền (N/m²).

Trong điều kiện tấm bê tông mặt đường có kích thước hữu hạn ta cần phải xét đến điều kiện biên tấm.

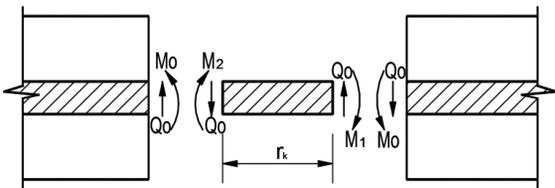
Biên tấm tự do theo Poisson trên cạnh của tấm không có mô men uốn, xoắn và lực cắt thẳng đứng, chính vì vậy Kirchhoff đưa ra một điều kiện biên duy nhất gọi là lực cắt quy ước [8] và xác định như sau:

$$(V_x)_x = a = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (2 - \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

Biên tấm là liên kết thép truyền lực (Hình 1a) đóng vai trò truyền tải trọng từ tấm có tải trọng tác dụng sang tấm bên cạnh và có thể thay thế thép truyền lực tại cạnh tấm bằng một mô men M_0 và một lực cắt Q_0 (Hình 1b) được xác định như (công thức số 3).



(a) Liên kết khe dẫn là thanh thép truyền lực



(b) Lực cắt và mômen tại đầu thanh

Hình 1. Điều kiện biên là thép truyền lực

$$\begin{aligned} M_0 &= -EJ \frac{d^2 W_{tt}}{dx^2}; \\ Q_0 &= -EJ \frac{d^3 W_{tt}}{dx^3} \end{aligned} \quad (4)$$

Trong đó: W_{tt} là độ võng thép truyền lực (m); J là mô men quán tính (cm^4), E là mô đun đàn hồi Young (N/cm^2), r_k là chiều rộng khe liên kết (cm).

2.3 Cơ sở lý thuyết tính toán quy đổi trục xe tương đương

Dưới tác dụng của tải trọng bánh xe, trong tấm bê tông xi măng phát sinh trạng thái ứng

suất và biến dạng, là nguyên nhân trực tiếp dẫn đến quá trình suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu. Khi chịu tác động lặp lại của tải trọng trong suốt thời gian khai thác, các trạng thái ứng suất - biến dạng này gây ra hiện tượng tích lũy hư hỏng, từ đó làm phát sinh các dạng phá hoại đặc trưng của mặt đường bê tông xi măng. Vì vậy, việc xác định lưu lượng trục xe quy đổi được thực hiện trên cơ sở quy đổi lưu lượng trục xe khai thác sao cho mức độ hư hỏng tích lũy do lưu lượng trục xe quy đổi, dưới tác dụng của tải trọng trục tiêu chuẩn, là tương đương với mức độ hư hỏng tích lũy do lưu lượng trục xe khai thác gây ra.

Trong nghiên cứu này, mức độ hư hỏng tích lũy được đánh giá thông qua hệ số môi k_m [9], từ đó thiết lập mối quan hệ tính toán lưu lượng trục xe quy đổi theo biểu thức sau.

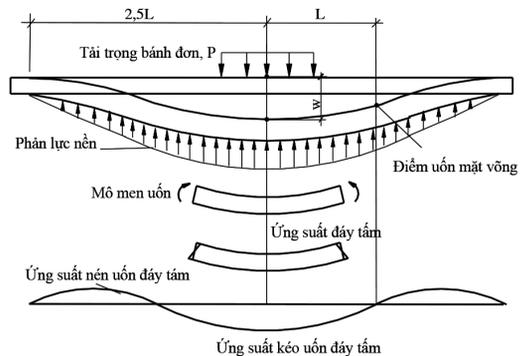
$$\frac{\sigma_{kt}}{K_{mkt}} = \frac{\sigma_{tc}}{K_{mtc}} = R_{gh} \quad (5)$$

Trong đó: σ_{kt} là ứng suất do tải trọng bánh xe khai thác (MPa); σ_{tc} là ứng suất do tải trọng bánh xe tiêu chuẩn (Mpa); K_{mkt}, K_{mtc} lần lượt là hệ số môi phụ thuộc lưu lượng trục xe khai thác, và tiêu chuẩn; R_{gh} là cường độ kéo uốn của bê tông (MPa)

2.4 Phương pháp tính toán quy đổi trục xe tương đương, có xét ảnh hưởng của độ cứng mặt đường

a) Trường hợp tính toán quy đổi không xét ảnh hưởng của diện tích truyền tải trọng (DTTTT)

Độ cứng của tấm bê tông mặt đường có ảnh hưởng trực tiếp đến độ võng và trạng thái ứng suất trong tấm, qua đó chi phối mức độ tác dụng của tải trọng lên nền (Hình 2).



Hình 2. Ý nghĩa đặc trưng đàn hồi tấm L

Trong nghiên cứu này, việc quy đổi lưu lượng trục xe được thực hiện với giả thiết chỉ xét ảnh hưởng của độ cứng tấm bê tông, trong khi bỏ qua ảnh hưởng của DTTT. Để đánh giá tác động của độ cứng tấm đến lưu lượng trục xe quy đổi, có thể áp dụng các mô hình tính toán khác nhau; trong đó, nghiên cứu này sử dụng công thức xác định ứng suất kéo uốn theo Grbunov-Posadov [10].

$$\sigma_{ku}^{kt} = 6 \cdot \frac{P_{kt}}{h^2} (0,0592 - 0,928 \ln \frac{R_{kt}}{L}) \quad (6)$$

$$\sigma_{ku}^{tc} = 6 \cdot \frac{P_{tc}}{h^2} (0,0592 - 0,928 \ln \frac{R_{tc}}{L}) \quad (7)$$

Trong đó: σ_{ku}^{kt} , σ_{ku}^{tc} là ứng suất kéo uốn trong tấm bê tông dưới tác dụng bánh xe khai thác và tiêu chuẩn (Mpa); P_{kt} , P_{tc} là tải trọng bánh xe khai thác và tiêu chuẩn tại vị trí tâm tấm bê tông xi măng (T); R_{kt} , R_{tc} là bán kính vệt bánh xe khai thác và tiêu chuẩn (cm); L là bán kính độ cứng tương đối của tấm bê tông xi măng (cm).

Khi không xét ảnh hưởng DTTT và chấp thuận hệ số môi theo quy trình thiết kế áo đường của Nga $K_m = 1,08N^{-0,063}$ [9] ta nhận thấy (công thức số 8) tương tự trong công thức quy đổi lưu lượng trục xe khai thác về lưu lượng trục xe tiêu chuẩn có xét độ cứng của mặt đường, nhưng không xét ảnh hưởng của DTTT trong QĐ 2231/QĐ - TCĐBVN tháng 5 năm 2022 [5] và trong quy trình của Trung Quốc [11].

$$N_{qd} = N_{kt} \left(\frac{P_{kt}}{P_{tc}} \right)^{16} \quad (8)$$

b) Trường hợp tính toán quy đổi lưu lượng tương đương có xét đến ảnh hưởng của DTTT

Ảnh hưởng của DTTT được khảo sát thông qua đại lượng R là bán kính vệt bánh xe quy đổi $R_{kt} \neq R_{tc}$ và được tính toán phụ thuộc vào P_{kt}, P_{tc} theo công thức:

$$N_{qd}^{-0,063} = N_{kt}^{-0,063} \frac{P_{tc} (0,0592 - 0,928 \ln \frac{R_{tc}}{L})}{P_{kt} (0,0592 - 0,928 \ln \frac{R_{kt}}{L})} \quad (9)$$

$$\text{Đặt: } A = \left(0,0592 - 0,928 \ln \frac{R_{tc}}{L} \right)$$

$$B = \left(0,0592 - 0,928 \ln \frac{R_{kt}}{L} \right)$$

Trong đó: N_{kt}, N_{qd} là lưu lượng trục xe khai thác và lưu lượng trục xe quy đổi (trục/năm), A và B là các hệ số đáp ứng.

Ngoài ra giá trị bán kính độ cứng tương đối L phụ thuộc chiều dày tấm bê tông, mô đun đàn hồi bê tông và cường độ lớp móng và nền.

$$L = h^3 \sqrt{\frac{E_{bt} (1 - \mu_o^2)}{6E_o (1 - \mu_{bt}^2)}} \quad (10)$$

Trong đó: h là chiều dày tấm bê tông (cm); E_{bt} là mô đun đàn hồi bê tông (MPa); E_o là mô đun đàn hồi chung lớp móng và nền (Mpa); μ_{bt} là hệ số poisson bê tông; μ_o là hệ số poisson nền móng tương đương.

Khảo sát với mặt đường bê tông xi măng với tấm bê tông đường ô tô thông thường có chiều dày ($h = 20 - 26$ cm); mô đun đàn hồi bê tông trung bình ($E = 30000$ MPa); móng cát hoặc đá dăm gia cố xi măng (6 - 8 %) có chiều dày ($h = 15 - 20$ cm); nền có mô đun đàn hồi ($E = 25 - 40$ MPa). Giá trị L tính trung bình $= 70$ cm ta được công thức tính quy đổi theo thuật toán Graphi [12] như sau:

$$N_{qd} = N_{kt} \left(\frac{P_{kt}}{P_{tc}} \right)^{12} \quad (11)$$

Kết quả so sánh cho thấy mô hình đã mô tả cơ chế truyền tải trọng theo hướng có cơ sở vật lý rõ ràng hơn, số mũ quy đổi giảm từ $n=16$ xuống $n=12$ khi diện tích tiếp xúc giữa lớp xe và mặt đường được đưa trực tiếp vào mô hình tính toán, ảnh hưởng của tải trọng trục đối với hư hỏng mặt đường được phản ánh một phần thông qua ứng suất tiếp xúc, thay vì bị quy gộp hoàn toàn vào số mũ tải trọng và ảnh hưởng của DTTT của Cộng hòa Pháp [13].

3. KIỂM CHỨNG VÀ NHẬN XÉT CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN LƯU LƯỢNG QUY ĐỔI TRỤC TẢI TRỌNG

3.1 Kiểm chứng ảnh hưởng diện tích truyền tải trọng

Để kiểm chứng DTTT có ảnh hưởng đến ứng suất sinh ra trong tấm bê tông sử dụng công thức tính ứng suất kéo uốn tại tâm tấm theo công thức của Westergaad [14]

$$\sigma_{km} = 0,275(1 + \mu) \frac{P}{h^2} \left(\log \frac{Eh^3}{CR^4} \right) \quad (12)$$

Trong đó: E, h, μ : Tương ứng là mô đun đàn hồi (MPa), chiều dày (cm) và hệ số poisson của bê tông; P, R: Tương ứng là độ lớn tải trọng tác dụng và bán kính vệt tải trọng

(cm); C là độ cứng của nền (MPa/cm).

Khảo sát cụ thể với tấm bê tông xi măng dày 21 cm, có mô đun đàn hồi E = 30000 MPa; lớp nền và móng có mô đun đàn hồi tương đương bằng 130 MPa, tương đương độ cứng C = 0,65 MPa/cm. Cho tải trọng tác dụng tăng từ 10T/trục đến 16T/trục với áp suất bánh hơi q=0,6 MPa. Kết quả tính ứng suất (Bảng 1).

Bảng 1: Ứng suất kéo uốn

P,T	R (cm)	L (cm)	σ_{km} (MPa)		
			Có xét DTTTT	Không xét DTTTT	Sai lệch,%
10	16,30	71,0	1,39	1,39	0
12	17,84	71,0	1,53	1,60	4,3
14	19,27	71,0	1,71	1,87	8,4
16	20,60	71,0	1,88	2,14	12,0

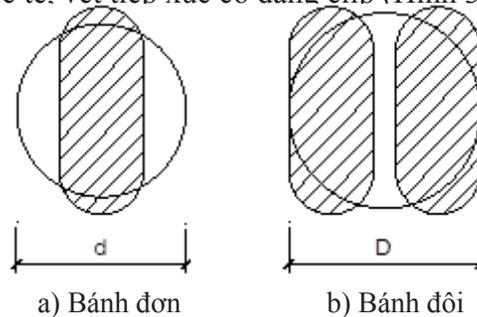
Kết quả tính toán cho thấy, khi không xét đến DTTTT, ứng suất kéo uốn tăng khoảng 0-12% khi tải trọng trục tăng từ 10T lên 16T so với trường hợp có xét ảnh hưởng của DTTTT. Sự gia tăng ứng suất kéo uốn dẫn đến lưu lượng trục xe quy đổi lớn hơn. Do đó, phương pháp tính không xét DTTTT mang tính an toàn hơn. Trong điều kiện áp suất bánh hơi không đổi, việc tăng tải trọng đồng thời với việc xét đến sự gia tăng diện tích tiếp xúc làm giảm ứng suất và biến dạng trong tấm bê tông so với trường hợp không xét đến ảnh hưởng này.

3.2 Yếu tố thay đổi áp suất bánh hơi

Thực tế khai thác đường bộ cho thấy, nhiều phương tiện có trục xe chịu tải vượt quá 2 đến 3 lần tải trọng cho phép. Để đảm bảo khả năng lưu hành, các tài xế thường tăng áp suất bánh hơi từ mức khoảng 0,6 MPa lên 0,65

MPa, thậm chí đến 0,7 MPa.

Do kích thước và đặc tính của lớp là các yếu tố quan trọng chi phối hình dạng và diện tích vệt tiếp xúc bánh xe-mặt đường. Trên thực tế, vệt tiếp xúc có dạng elíp (Hình 3).



Hình 3. Vệt tiếp xúc của bánh xe với mặt đường

Tuy nhiên, để thuận tiện cho tính toán áp lực bánh xe và mô phỏng thực nghiệm cường độ mặt đường, vệt tiếp xúc này thường được xấp xỉ bằng một hình tròn có diện tích tương đương. Kết quả khảo sát (Bảng 2-5).

Bảng 2: Thay đổi áp suất hơi trục 10T

q (MPa)	R_{tc} (cm)	R_{kt} (cm)	L (cm)	Tải trọng trục 10T			
				A	B	N_{kt}	N_{qd}
0,6	16,30	16,30	70	0,1944	0,1944	23	23
0,65	16,30	15,65	70	0,1944	0,1982	23	31,35
0,7	16,30	15,08	70	0,1944	0,2016	23	41,15

Bảng 3: Thay đổi áp suất hơi trục 12 T

q (MPa)	R_{tc} (cm)	R_{kt} (cm)	L (cm)	Tải trọng trục 12T			
				A	B	N_{kt}	N_{qd}
0,6	16,30	17,84	70	0,1944	0,1860	22	200,62
0,65	16,30	17,14	70	0,1944	0,1897	22	274,95

0,7	16,30	16,52	70	0,1944	0,1931	22	365,34
-----	-------	-------	----	--------	--------	----	--------

Bảng 4: Thay đổi áp suất hơi trực 14 T

q (MPa)	R _{tc} (cm)	R _{kt} (cm)	L (cm)	Tải trọng trực 14T			
				A	B	N _{kt}	N _{qd}
0,6	16,30	19,27	70	0,1944	0,1789	5	288,16
0,65	16,30	18,51	70	0,1944	0,1826	5	399,84
0,7	16,30	17,84	70	0,1944	0,1860	5	537,13

Bảng 5: Thay đổi áp suất hơi trực 16T

q (MPa)	R _{tc} (cm)	R _{kt} (cm)	L (cm)	Tải trọng trực 16T			
				A	B	N _{kt}	N _{qd}
0,6	16,30	20,60	70	0,1944	0,1728	4	1110,49
0,65	16,30	19,79	70	0,1944	0,1764	4	1558,89
0,7	16,30	19,07	70	0,1944	0,1798	4	2115,79

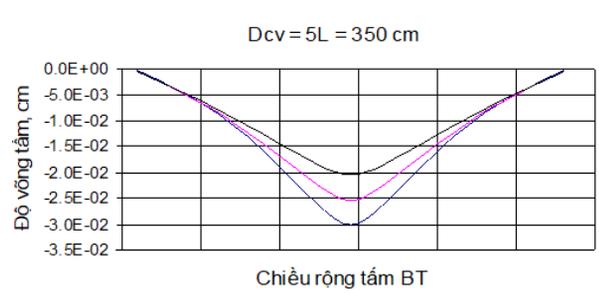
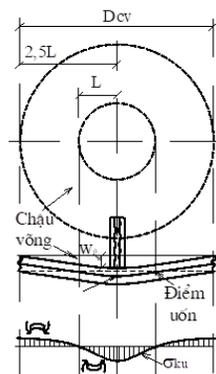
Kết quả phân tích cho thấy áp suất bơm lốp không làm thay đổi lưu lượng trực xe thực tế, mà ảnh hưởng đến lưu lượng trực xe quy đổi thông qua sự thay đổi điều kiện tiếp xúc lốp-mặt đường. Khi áp suất lốp tăng, diện tích tiếp xúc giảm, dẫn đến gia tăng ứng suất trong tấm bê tông và mức độ hư hỏng tương đương của mỗi lần tác dụng tải trực.

Theo mô hình quy đổi tải trọng, sự gia tăng áp suất bơm lốp làm tăng hệ số quy đổi, mặc dù số lượng trực xe khai thác không đổi. Cụ thể, khi áp suất lốp tăng từ 0,6 MPa lên 0,7 MPa, lưu lượng trực xe quy đổi tăng từ 78% đến 90% tùy theo mức tải trực. Kết quả này cho thấy cần xem xét ảnh hưởng của áp suất bơm lốp trong quá trình quy đổi lưu lượng trực xe nhằm đảm bảo độ tin cậy của tính toán thiết kế mặt đường bê tông xi măng.

3.3 Yếu tố thay đổi độ cứng mặt đường

Các đặc trưng đàn hồi của mặt đường và hình dạng chậu vồng dưới tác dụng tải trọng bánh xe đã được trình bày trong nhiều tài liệu kinh điển [15-20].

Ví dụ minh họa (Hình 4a, b) trên cơ sở phân tích lý thuyết kết hợp với kết quả thực nghiệm, đường kính chậu vồng của mặt đường phụ thuộc chủ yếu vào độ cứng uốn của tấm bê tông và độ cứng của nền; cho kết quả tính toán đối với tấm bê tông dày 22 cm đặt trên nền có hệ số C = 9 daN/cm³, sự thay đổi tải trọng trong khoảng 4-6 tấn không làm ảnh hưởng đến đường kính chậu vồng. Giá trị này được xác định theo quan hệ $D_{cv} = 5L$, với đặc trưng đàn hồi của tấm $L = 70$ cm.



a) Ứng xử của tấm BT khi chịu tác dụng của tải trọng bánh xe.

b) Sơ đồ chậu vồng tấm bê tông và quan hệ chậu vồng - tải trọng

Hình 4. Minh họa kết quả tính toán đối với tấm bê tông khi chịu tác dụng của tải trọng bánh xe

Bảng 6: Thay đổi độ cứng trục 10 T

q (MPa)	R _{tc} (cm)	R _{kt} (cm)	L (cm)	Tải trọng trục 10T			
				A	B	N _{kt}	N _{qd}
0,6	16,30	16,30	60,0	0,1801	0,1801	23	23
0,6	16,30	16,30	70,0	0,1944	0,1944	23	23
0,6	16,30	16,30	80,0	0,2068	0,2068	23	23

Bảng 7: Thay đổi độ cứng trục 12 T

q (MPa)	R _{tc} (cm)	R _{kt} (cm)	L (cm)	Tải trọng trục 10T			
				A	B	N _{kt}	N _{qd}
0,6	16,30	17,84	60,0	0,1801	0,1717	22	189,42
0,6	16,30	17,84	70,0	0,1944	0,1860	22	200,62
0,6	16,30	17,84	80,0	0,2068	0,1984	22	209,49

Bảng 8: Thay đổi độ cứng trục 14 T

q (MPa)	R _{tc} (cm)	R _{kt} (cm)	L (cm)	Tải trọng trục 10T			
				A	B	N _{kt}	N _{qd}
0,6	16,30	19,27	60,0	0,1801	0,1646	5	258,03
0,6	16,30	19,27	70,0	0,1944	0,1789	5	288,16
0,6	16,30	19,27	80,0	0,2068	0,1912	5	310,46

Bảng 9: Thay đổi độ cứng trục 16 T

q (MPa)	R _{tc} (cm)	R _{kt} (cm)	L (cm)	Tải trọng trục 10T			
				A	B	N _{kt}	N _{qd}
0,6	16,30	20,60	60,0	0,1801	0,1584	4	945,89
0,6	16,30	20,60	70,0	0,1944	0,1727	4	1110,49
0,6	16,30	20,60	80,0	0,2068	0,1851	4	1252,20

Khảo sát lần lượt cho các tải trọng trục từ 10T đến 16T và đặc trưng đàn hồi thay đổi từ 60cm đến 80cm tương đương tấm bê tông dày khoảng từ 20cm - 26cm. Kết quả khảo sát thể hiện ở trong (Bảng 6-9). Kết quả cho thấy, khi L tăng (tức là độ cứng tổng thể của tấm bê tông tăng), các hệ số đáp ứng A và B đều có xu hướng tăng nhẹ phản ánh khả năng phân bố và làm giảm mức độ tập trung ứng suất của kết cấu mặt đường. Đối với cùng một chiều dài đặc trưng L, khi tải trọng trục tăng từ 10T lên 16T, giá trị lưu lượng trục xe quy đổi N_{qd} tăng rất mạnh và mang tính phi tuyến. Điều này chứng tỏ tải trọng trục lớn có ảnh hưởng chi phối đến mức độ phá hoại tích lũy của mặt đường, vượt trội so với ảnh hưởng của sự thay đổi độ cứng tấm trong phạm vi khảo sát. Đồng thời, số trục xe tiêu chuẩn N_{kt} giảm dần khi tải trọng trục tăng, phản ánh tác động bất lợi rõ rệt của các trục nặng đến tuổi thọ khai thác kết cấu áo đường.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi tính toán quy đổi lưu lượng trục xe khai thác trong tính toán, thiết kế mặt đường bê tông xi măng, cần xét ảnh hưởng của độ cứng tấm bê tông và của DTTT xuống mặt đường, sẽ phản ánh sát thực tế hơn điều kiện làm việc và trạng thái ứng suất của tấm bê tông xi măng.

Thực tiễn khai thác đường bộ cho thấy phương tiện có tải trọng trục vượt mức cho phép vẫn diễn ra thường xuyên, trong đó áp suất bánh hơi đôi khi được điều chỉnh tăng nhằm đáp ứng yêu cầu vận hành. Kết quả phân tích của nghiên cứu chỉ ra rằng áp suất bánh hơi là một tham số có ảnh hưởng rõ rệt đến hệ số quy đổi lưu lượng tải trọng. Sự kết hợp giữa tải trọng trục lớn và áp suất bánh hơi cao làm gia tăng đáng kể lưu lượng trục xe quy đổi, qua đó đẩy nhanh quá trình suy giảm khả năng làm việc và tuổi thọ khai thác của kết cấu mặt đường. Vì vậy, việc kiểm soát đồng thời tải trọng trục và áp suất bánh hơi trong giai

đoạn khai thác là cần thiết nhằm bảo đảm độ bền lâu dài của mặt đường.

Do đó, đối với các tuyến đường chịu tác dụng của trục xe nặng, việc lựa chọn chiều

dày tấm bê tông phù hợp là cần thiết nhằm hạn chế sự gia tăng nhanh của N_{qd} và đảm bảo tuổi thọ khai thác của kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, DC, USA.
- [2] Y.H. Huang (2004). *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education.
- [3] AASHTO (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*, Washington, DC, USA.
- [4] D.K.N. Inoue, J.L.F. Junior (2024). Mechanistic-empirical assessment of axle load legal limits on Brazilian roadways. *Transportes*, 32(1), DOI: 10.58922/transportes.v32i1.2888
- [5] Quyết định số 2231/QĐ-TCĐBVN ngày 11/05/2022 về việc công bố Tiêu chuẩn: “*cơ sở Thiết kế mặt đường bê tông xi măng thông thường có khe nối trong xây dựng công trình giao thông*”, Tổng cục Đường bộ Việt Nam, Hà Nội, 2022.
- [6] N.T. Hiep, L.V. An, D.N. Tien (2023). Analysis of Concrete Pavement Slab resting on Non-uniform Elastic Foundation using the Finite Element Method. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, 13(4), 11242-11247.
- [7] S.P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger (1959). *Theory of Plates and Shells*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- [8] J.N. Reddy (2007). *Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- [9] L. Tsantilis (2024). *Structural Pavement Design According to the Russian Method* (including ODN 218.046-01: Design of Flexible Road Pavements), MSc Thesis, Politecnico di Torino, Italy.
- [10] A.M. Gorbunov (2020). *The Solution of Elasticity Problems for Plates and Beams on Elastic Foundations* (Gorbunov-Posadov Method), Collected Research Papers, BelNIIS, Minsk.
- [11] H. Cheng, L. Sun, Y. Hu, Z. Chen, X. Tong (2025). Evaluation of equivalent axle load factors for multi axles based on fatigue tests using actual strain waveforms. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 19, 17-32, DOI:10.1016/j.ijtst.2024.07.005
- [12] M. Mitchell (2020). Engauge Digitizer: A tool for extracting numerical data from graphs. *SoftwareX*, 12, DOI: 10.1016/j.softx.2020.100547
- [13] H. Cheng, L. Sun, Y. Hu, Z. Chen, and X. Tong (2025). Evaluation of equivalent axle load factors for multi axles based on fatigue tests using actual strain waveforms. *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, 19, 17-32, DOI:10.1016/j.ijtst.2024.07.005
- [14] S. Olita, M. Diomed, and D. Ciampa (2020). Alternative formula for rigid pavement stress calculation in corner load conditions based on Westergaard's theory. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(5), 506-517, DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.507
- [15] A. Sawangsuriya, T. Svasdisant, and P. Jitarekul (2023). Deflection-Based Approach for Flexible Pavement Design in Thailand. *Infrastructures*, 8(7), 116, DOI: 10.3390/infrastructures8070116
- [16] E. Horak and S. Emery (2006). *Falling Weight Deflectometer Bowl Parameters as an Analysis Tool for Pavement Structural Evaluations*, in Proc. 22nd ARRB International Conference, Brisbane, Australia.
- [17] J. K. Andrews, V. Radhakrishnan, and R.Z. Koshy (2023). Evaluation of Deflection Bowl Parameters in Low-Volume Roads. *J. Transp. Eng. Part B: Pavements*, 149(4), 04023021, DOI: 10.1061/JPEODX.PVENG-1273
- [18] M. Zhang (2024). Traffic Speed Deflectometer for Network-Level Pavement Structural Evaluation. *J. South Afr. Inst. Civ. Eng.*, 66(1).
- [19] A. Hamidi (2024). Elastic and viscoelastic back-calculation of pavement layer moduli using deflection measurements. *Constr. Build. Mater.*, 42.
- [20] M. Larsson (2024). Alternative Deflection Bowl Parameters for Structural Assessment of Pavements. *J. Eastern Asia Soc. Transp. Stud.*