

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

Nguyễn Văn Bích^{a,*}, Trần Đức Anh^b, Bùi Phú Doanh^a

^aKhoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,

55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bCông ty TNHH Tư vấn Đại học Xây dựng, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 19/11/2024, Sửa xong 27/12/2024, Chấp nhận đăng 18/02/2025

Tóm tắt

Thực trạng hằn lún vệt bánh xe trên mặt đường bê tông nhựa các công trình giao thông trong 10 năm gần đây đã trở nên rất nghiêm trọng, dù đã có nhiều giải pháp từ quản lý tới kỹ thuật của Bộ Giao thông vận tải. Nguồn gốc của hiện tượng hằn lún thì có thể đến từ nhiều nguyên nhân, nhưng một trong những nguyên nhân quan trọng đến từ sức kháng cắt của hỗn hợp bê tông nhựa. Thực tế hiện nay, trong các quy trình hiện hành không có tiêu chuẩn hướng dẫn cụ thể về phương pháp xác định sức kháng cắt của hỗn hợp bê tông nhựa dẫn đến công tác thiết kế kết cấu áo đường không kiểm toán nội dung này. Bài báo này tập trung nghiên cứu giải pháp 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 từ đó đưa ra những kiến nghị để hướng dẫn tính toán hằn lún vệt bánh xe trong công tác thiết kế. Kết quả bài báo đã chỉ ra rằng, có thể tính được chiều sâu lún vệt bánh xe lớp bê tông nhựa trong kết cấu áo đường thông qua phần mềm Abaqus. Bên cạnh đó, nghiên cứu này cũng gợi ý có thể tối ưu hóa thiết kế dựa trên kết quả mô phỏng, giúp định hướng việc cải thiện thiết kế áo đường bằng cách điều chỉnh độ dày lớp bê tông nhựa, thay đổi vật liệu, và xem xét lại cấu trúc của lớp nền nhằm giảm thiểu ứng suất cắt và tăng độ bền lâu dài.

Từ khóa: hằn lún vệt bánh xe; ứng suất cắt lớn nhất; bê tông nhựa; kết cấu áo đường mềm; Abaqus.

RESEARCH TO DETERMINATION OF MAXIMUM SHEAR STRESS ON THE SURFACE OF ASPHALT CONCRETE LAYER OF FLEXIBLE PAVEMENT STRUCTURE USING FINITE ELEMENT ANALYSIS METHOD

Abstract

The issue of rutting on asphalt concrete pavements in recent highway projects has become increasingly severe, despite various management and technical solutions from the Ministry of Transport. The causes of rutting can stem from multiple factors, with one of the critical causes being the shear resistance of the asphalt concrete mixture. Currently, existing standards lack specific guidelines for determining the shear resistance of asphalt concrete mixtures, which results in pavement structural designs not accounting for this factor. This paper focuses on a solution to determine the maximum shear stress in the asphalt concrete surface layer of flexible pavement structures using the finite element method. Based on the findings, recommendations are proposed to incorporate rutting calculations into future pavement design guidelines. The results of this study indicate that the rutting depth of the asphalt concrete layer within the pavement structure can be calculated using Abaqus software. Additionally, the study suggests that it is possible to optimise the design based on simulation results, offering direction for improving pavement designs by adjusting the thickness of the asphalt concrete layer, altering materials, and reconsidering the structure of the subgrade layer to minimise shear stress and enhance long-term durability.

Keywords: rutting; maximum shear stress; asphalt concrete; flexible pavement structure; Abaqus.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(1V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(1V)-03) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: bichnv@huce.edu.vn (Bích, N. V.)

1. Giới thiệu

Bê tông nhựa hay còn gọi là bê tông asphalt là hỗn hợp vật liệu khoáng – bitum sử dụng trong xây dựng đường, được hình thành sau quá trình làm hóa cứng hỗn hợp bê tông nhựa. Hỗn hợp bê tông nhựa bao gồm cốt liệu thô, cốt liệu mịn, bột khoáng, bitum dầu mỡ, phụ gia.

Hỗn hợp bê tông nhựa bao gồm: đá dăm, cát, bột khoáng, bitum và phụ gia được lựa chọn thành phần hợp lý, chúng được trộn nóng ở nhiệt độ cao (thường trong khoảng 140 ~ 180 °C) giúp tăng khả năng kết dính của nhựa đường với cốt liệu và tạo gia một hỗn hợp đồng nhất. Cốt liệu thô đóng vai trò làm tăng thể tích và khối lượng hỗn hợp, làm giảm giá thành, tăng cường độ và độ ổn định của bê tông nhựa. Cốt liệu mịn khi trộn với bitum tạo thành vữa asphalt có vai trò liên kết cốt liệu lớn và lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt cốt liệu lớn, giúp tăng độ đặc chặt, giảm thể tích rỗng trong kết cấu tổng thể, và cải thiện các đặc tính cơ học của bê tông nhựa, làm tăng tính dẻo của hỗn hợp, ảnh hưởng lớn tới khả năng làm việc và phạm vi ứng dụng của bê tông nhựa. Bột khoáng với kích thước hạt rất nhỏ, có vai trò lấp đầy các khoảng trống giữa các hạt cốt liệu lớn và mịn, làm giảm thể tích rỗng trong hỗn hợp và tăng độ đặc chặt. Đồng thời, bột khoáng bổ sung diện tích bề mặt cốt liệu thông qua việc tạo lớp phủ trên bề mặt các hạt lớn, làm tăng khả năng bám dính giữa cốt liệu và bitum, từ đó cải thiện tính ổn định của hỗn hợp bê tông nhựa. Chất lượng của bê tông nhựa phụ thuộc vào nguồn gốc của cốt liệu, bột khoáng và độ nhớt của bitum [1–3].

Khi tải trọng bánh xe gây ra ứng suất cắt lớn nhất tại bề mặt đường vượt quá cường độ chống cắt của vật liệu lớp mặt thì trên mặt đường sẽ sinh ra các loại biến dạng trượt, hình thành làn sóng và các hiện tượng hư hỏng như làn sóng, đẩy trôi... khiến cho chất lượng sử dụng của mặt đường bị suy giảm [4–6]. Trạng thái ứng suất trong kết cấu mặt đường là rất phức tạp và thay đổi phụ thuộc vào nhiều nhân tố: bố trí các tầng lớp kết cấu, bề dày và mô đun các lớp, tác dụng của tải trọng... Do vậy, trong phạm vi cho phép, cần phải dựa vào tải trọng xe chạy và cường độ vật liệu để lựa chọn kết cấu mặt đường vừa thích hợp vừa kinh tế trên cơ sở phân tích các trị số ứng suất và chuyển vị (độ võng, có thể phát sinh) [7–9].

Trên thế giới cũng như ở Việt Nam, áo đường là công trình được xây dựng trên nền đường bằng nhiều lớp vật liệu có độ cứng và cường độ lớn hơn so với đất nền để phục vụ cho xe chạy, trực tiếp chịu tác dụng phá hoại thường xuyên của các phương tiện giao thông và của các nhân tố thiên nhiên (mưa gió, sự biến đổi nhiệt độ). Theo nghiên cứu của một số tác giả trong nước cũng như nhiều nghiên cứu trên thế giới [10–16], hiện tượng lún vệt bánh xe có ba dạng phổ biến là lún vệt bánh xe do bê tông nhựa bị chảy dẻo (Instability rutting – Plastic flow), lún vệt bánh xe do kết cấu (Structural rutting) và lún vệt bánh xe tại lớp mặt bê tông nhựa (Surface/wear course rutting). Trong đó, nguyên nhân chính của hiện tượng lún vệt bánh xe cũng như xô dòn vật liệu là do bản thân bê tông nhựa không đủ cường độ kháng cắt để chịu ứng suất cắt trượt do tải trọng bánh xe gây ra (loại lún Instability Rutting) được thế giới tập trung nghiên cứu nhằm đưa ra các giải pháp khắc phục. Cường độ kháng cắt lại phụ thuộc vào lực dính và góc nội ma sát của vật liệu bê tông nhựa. Do vậy, có thể khẳng định các đặc trưng kháng cắt vừa nêu có liên hệ chặt chẽ tới khả năng chống vệt lún bánh xe của bê tông nhựa. Chính vì thế, sức kháng cắt và các đặc trưng của nó phải được coi là các chỉ tiêu đầu vào quan trọng trong thiết kế thành phần bê tông nhựa.

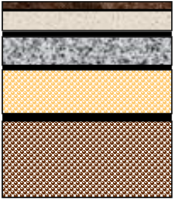
Chính vì vậy, nhóm tác giả đã nghiên cứu xác định ứng suất cắt lớn nhất trong tầng mặt bê tông nhựa của kết cấu áo đường mềm bằng phương pháp phần tử hữu hạn, từ đó đánh giá khả năng kháng cắt của vật liệu và đề xuất giải pháp nhằm giảm thiểu các hư hỏng như lún vệt bánh xe và xô dòn vật liệu, góp phần nâng cao chất lượng và tuổi thọ của mặt đường.

2. Mô hình phần mềm Abaqus để tính toán ứng suất cắt lớn nhất của tầng mặt bê tông nhựa

Phần mềm Abaqus là một trong những bộ phần mềm mạnh, rất hữu hiệu trong việc mô phỏng kết cấu công trình dự án thông qua phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng khá phổ biến ở các nước phát triển. Phần mềm này có thể giải quyết các vấn đề kỹ thuật phức tạp như các vấn đề đa mục đích, các vấn đề động phi tuyến tính và các điều kiện biên thay đổi. Abaqus có kho phần tử phong phú, có thể mô phỏng hình dạng thực tế bất kỳ. Đồng thời kho mô hình vật liệu có thể mô phỏng đại đa số tính năng vật liệu công trình. Abaqus không chỉ giải quyết vấn đề trong phân tích kết cấu (ứng suất/chuyển vị), mà còn có khả năng mô phỏng và nghiên cứu nhiều vấn đề trong các lĩnh vực khác. Vì thế, phần mềm Abaqus hoàn toàn đủ độ tin cậy để tính toán biến dạng trong các lớp kết cấu mặt đường bê tông nhựa.

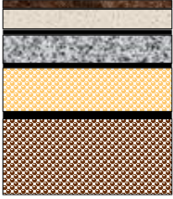
Mô hình phần mềm Abaqus bao gồm 02 loại kết cấu áo đường: (i) kết cấu 1 áp dụng cho tuyến cao tốc Phan Thiết – Dầu Giây với bề rộng làn 3,75 m, kết cấu mặt đường cấp cao A1, Eyc > 215 MPa, tải trọng trục tính toán $P = 120$ kN, vận tốc thiết kế 120 km/h; (ii) kết cấu 2 áp dụng cho tuyến cao tốc Hàm Nghi – Vũng Áng với bề rộng làn 3,5 m, kết cấu mặt đường cấp cao A1, Eyc > 207 MPa, tải trọng trục tính toán $P = 100$ kN, vận tốc thiết kế 80 km/h. Thông tin chi tiết về các lớp trong kết cấu áo đường tổng hợp trong Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Kết cấu 1 – kết cấu áo đường Dự án cao tốc Dầu Giây – Phan Thiết

	Lớp tạo nhám	3 (cm)
	Bê tông nhựa chặt 12,5	6 (cm)
	Bê tông nhựa chặt 19	6 (cm)
	Bê tông nhựa rỗng	10 (cm)
	Cấp phối đá dăm gia cố xi măng 4%	16 (cm)
	Cấp phối đá dăm loại I	52 (cm)
	Tổng chiều dày kết cấu	93 (cm)

Lớp nền thượng $K \geq 98$

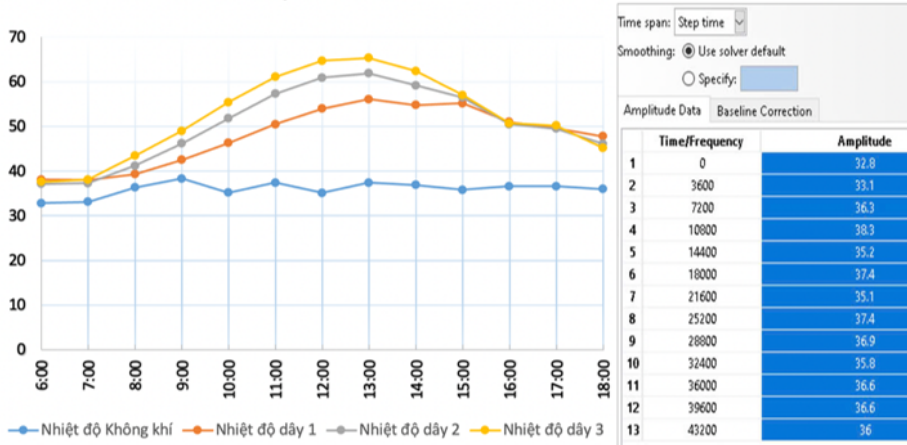
Bảng 2. Kết cấu 2 – kết cấu áo đường Dự án cao tốc Hàm Nghi – Vũng Áng

	Bê tông nhựa chặt 16	6 (cm)
	Bê tông nhựa chặt 19	6 (cm)
	Hỗn hợp nhựa bán Rỗng 25	10 (cm)
	Cấp phối đá dăm gia cố xi măng 4%	16 (cm)
	Cấp phối đá dăm loại I	38 (cm)
	Tổng chiều dày kết cấu	76 (cm)

Lớp nền thượng $K \geq 98$

Thời gian tiến hành phân tích diễn ra trong một ngày với khoảng nhiệt độ được lấy theo số liệu đo từ 6:00 sáng đến 18:00 tối để đánh giá chính xác sự phân bố nhiệt độ trong kết cấu áo đường và mối quan hệ giữa nhiệt độ và ứng suất cắt lớn nhất trong tầng mặt bê tông nhựa, nhóm tác giả đã bố trí hệ thống dây đo nhiệt độ tại các vị trí khác nhau: dây đo không khí ở độ cao 1 m phía trên mặt đường nhằm ghi nhận điều kiện môi trường bên ngoài; các dây đo nhiệt độ trong kết cấu áo đường được bố trí lần lượt tại các độ sâu 2 cm, 5 cm và 7 cm so với mặt đường. Cách bố trí này cho phép ghi nhận sự phân bố nhiệt độ dọc theo độ sâu trong lớp bê tông nhựa và xác định mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ đến ứng suất trong kết cấu áo đường. Đồng thời, dữ liệu nhiệt độ thực nghiệm được sử dụng để hiệu chuẩn và kiểm chứng độ chính xác của mô hình phần tử hữu hạn, đảm bảo kết quả phân tích ứng suất phản ánh đúng trạng thái thực tế của kết cấu. Việc thu thập dữ liệu nhiệt độ sẽ tiến hành dựa trên

các thông số: bao gồm nhiệt độ không khí và các dây đo trong kết cấu áo đường bao gồm: (i) Dây đo nhiệt độ không khí được bố trí phía trên mặt đường khoảng 1 m; (ii) Dây đo trong kết cấu áo đường cách mặt đường 2 cm; (iii) Dây đo trong kết cấu áo đường cách mặt đường 5 cm; (iv) Dây đo trong kết cấu áo đường cách mặt đường 7 cm. Biến thiên nhiệt độ trong ngày được thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Đồ thị thể hiện biến thiên nhiệt độ trong ngày

Thao tác đo dây nhiệt độ là rời rạc theo độ sâu, từ vị trí của ba dây nhiệt độ trong kết cấu áo đường, xây dựng trường nhiệt độ theo hồi quy tuyến tính. Phương pháp này có thể cải thiện bằng cách tăng độ phân giải của phạm vi đo, tăng số lượng dây đo phân bố theo chiều sâu. Thông số điều kiện nhiệt độ đầu vào được thể hiện ở Bảng 3.

Thông số vật liệu dùng trong mô phỏng được thể hiện ở Bảng 4 (Kết cấu 1) và Bảng 5 (Kết cấu 2). Mỗi bảng sẽ bao gồm các thông số nhiệt dung riêng C ($J/kg \cdot ^\circ C$), hệ số giãn nở nhiệt CTE (K^{-1}), khối lượng riêng ρ (kg/mm^3) hệ số dẫn nhiệt K ($W/m \cdot ^\circ C$), mô-đun đàn hồi Young E (N/mm^2), hệ số Poisson ν , và hệ số phát xạ bề mặt ϵ .

Bảng 3. Thông số điều kiện nhiệt độ đầu vào của quá trình phân tích

Thời tiết	Thời gian	Nhiệt độ không khí	Nhiệt độ dây 1	Nhiệt độ dây 2	Nhiệt độ dây 3
Nắng	6:00	32,8	38,1	37,1	37,6
	7:00	33,1	38	37,3	38,1
	8:00	36,3	39,3	41,2	43,4
	9:00	38,3	42,5	46,2	49
	10:00	35,2	46,3	51,8	55,4
	11:00	37,4	50,5	57,3	61,1
	12:00	35,1	54	60,9	64,7
	13:00	37,4	56,1	61,9	65,3
	14:00	36,9	54,8	59,2	62,4
	15:00	35,8	55,2	56,5	57,0
	16:00	36,6	51	50,5	50,7
	17:00	36,6	49,6	49,5	50,2
	18:00	36	47,8	46,1	45,4

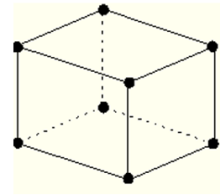
Bảng 4. Thông số vật liệu của Kết cấu 1 dùng trong mô phỏng

K (W/m.°C)	C (J/kg.°C)	ρ (kg/mm ³)	CTE (°C ⁻¹)	E (N/mm ²)	ν Poisson's ratio	ε Emissivity (Hệ số phát xạ)
Vật liệu		Lớp tạo nhám				
1,5	850	2250×10^{-9}	6×10^{-5}	448	0,3	0,95
Vật liệu		Bê tông nhựa chặt 12,5				
1,8	952	2500×10^{-9}	1×10^{-5}	420	0,3	–
Vật liệu		Bê tông nhựa chặt 19				
1,8	952	2500×10^{-9}	1×10^{-5}	420	0,3	–
Vật liệu		Bê tông nhựa rỗng				
1,8	925	2500×10^{-9}	1×10^{-5}	280	0,3	–
Vật liệu		Cấp phối đá dăm gia cố xi măng 4%				
1,4	910	2400×10^{-9}	1×10^{-5}	794,8	0,2	–
Vật liệu		Cấp phối đá dăm loại I				
1,4	910	2400×10^{-9}	1×10^{-5}	269,4	0,35	–
Vật liệu		Nền đất				
1,4	1040	1800×10^{-9}	1×10^{-5}	50	0,4	–

Bảng 5. Thông số vật liệu của Kết cấu 2 dùng trong mô phỏng

K (W/m.°C)	C (J/kg.°C)	ρ (kg/mm ³)	CTE (°C ⁻¹)	E (N/mm ²)	ν Poisson's ratio	ε Emissivity
Vật liệu		Bê tông nhựa chặt 16				
1,8	952	2500×10^{-9}	1×10^{-5}	340,3	0,3	–
Vật liệu		Bê tông nhựa chặt 19				
1,8	952	2500×10^{-9}	1×10^{-5}	360,5	0,3	–
Vật liệu		Hỗn hợp nhựa bán rỗng 25				
1,8	925	2500×10^{-9}	1×10^{-5}	280,8	0,3	–
Vật liệu		Cấp phối đá dăm gia cố xi măng 4%				
1,4	910	2400×10^{-9}	1×10^{-5}	655	0,2	–
Vật liệu		Cấp phối đá dăm loại I				
1,4	910	2400×10^{-9}	1×10^{-5}	265,9	0,35	–
Vật liệu		Nền đất				
1,4	1040	1800×10^{-9}	1×10^{-5}	51	0,4	–

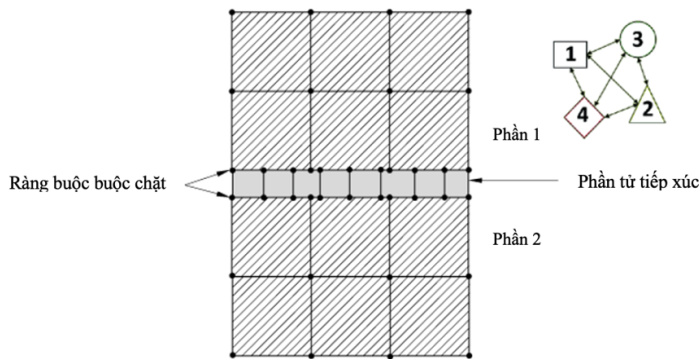
Phương pháp phân tích “Transient” được áp dụng trong phần mềm Abaqus để mô phỏng sự thay đổi cơ - nhiệt theo thời gian trong kết cấu áo đường. Phương pháp dựa trên việc giải phương trình cân bằng động lực học và truyền nhiệt, cho phép mô phỏng các hiện tượng phức tạp như sự tương tác cơ học và nhiệt học trong điều kiện tải trọng trùng phức. Phân tích được thực hiện bằng bước Dynamic-Explicit với mô hình Coupled Temperature-Displacement, đảm bảo khả năng ghi nhận chính xác sự thay đổi nhiệt độ và ứng suất theo thời gian. Mô hình phần tử hữu hạn của kết cấu mặt đường, sử dụng phần tử trường cặp đôi như Hình 2. Theo đó phần tử có dạng hình hộp, cấu tạo bởi tám nút. Tại mỗi nút sẽ có 7 bậc tự do, bao gồm ba bậc tự do chuyển vị U_x, U_y, U_z , ba bậc tự do xoay $RO_{xy}, RO_{yz}, RO_{zx}$ và bậc tự do nhiệt độ T^o .



Phần tử tuyến tính (8-điểm, C3D8)

Hình 2. Phần tử trường cặp đôi cơ-nhiệt được lựa chọn cho phân tích cấu trúc dưới ảnh hưởng của nhiệt độ

Trên thực tế, giữa các lớp vật liệu của kết cấu đường sẽ liên kết với nhau thông qua nhựa dính bám và nhựa thấm bám, và liên kết này rất chắc chắn trong giới hạn đàn hồi. Do đó, liên kết giữa các lớp sẽ sử dụng phần tử tiếp xúc, kiểu ràng buộc chặt không xét sự trượt, đại diện cho nhựa dính bám và nhựa thấm bám như trong Hình 3.



Hình 3. Phần tử tiếp xúc giữa hai lớp vật liệu theo thiết lập ràng buộc chặt (tie constrain)

Đối với các lớp móng không có lớp dính bám hoặc thấm bám, liên kết giữa các lớp được mô phỏng bằng phần tử tiếp xúc trong Abaqus. Bề mặt tiếp xúc được định nghĩa với hành vi theo phương pháp tuyến là ‘Hard Contact’, đảm bảo các lớp không xuyên qua nhau và có khả năng tách rời khi không chịu lực nén. Hành vi theo phương tiếp tuyến được mô phỏng với ‘Penalty Frictional Contact’ và hệ số ma sát ($\mu = 0,3\mu$), cho phép mô phỏng chính xác hiện tượng trượt giữa các lớp khi chịu lực ngang. Phương pháp này đảm bảo phản ánh đúng tính chất cơ học thực tế của kết cấu áo đường.

Tải trọng lưu thông trên bề mặt đường được đơn giản hóa thành giá trị phân bố trên các bề mặt tiếp xúc giữa bánh xe và mặt đường, dựa trên diện tích của từng trường hợp phân tích kết cấu sẽ tính toán ra được áp lực cần đặt vào bề mặt trên cùng của kết cấu. Phương của lực là phương thẳng đứng. Hướng của lực là hướng ép xuống theo hướng gia tăng độ sâu của các lớp vật liệu của kết cấu. Tải trọng trùng phức được khai báo trong Abaqus bằng cách sử dụng áp lực bề mặt (Surface Traction) với sự thay đổi theo thời gian được định nghĩa bởi một hàm Amplitude dạng sóng sin. Chu kỳ tải trọng là 1 giây với biên độ cực đại. Phân tích được thực hiện bằng phương pháp Dynamic-Explicit, đảm bảo khả năng ghi nhận sự thay đổi động lực học và tương tác cơ-nhiệt trong quá trình tải trọng lặp lại.

Giá trị lực được áp đặt lên mỗi bước của bề mặt tiếp xúc lăn của bánh xe với bề mặt Kết cấu 1,

với chiều dài phân tích là 3,840 m và bề rộng làn đường là 3,75 m, được tính dựa trên công thức:

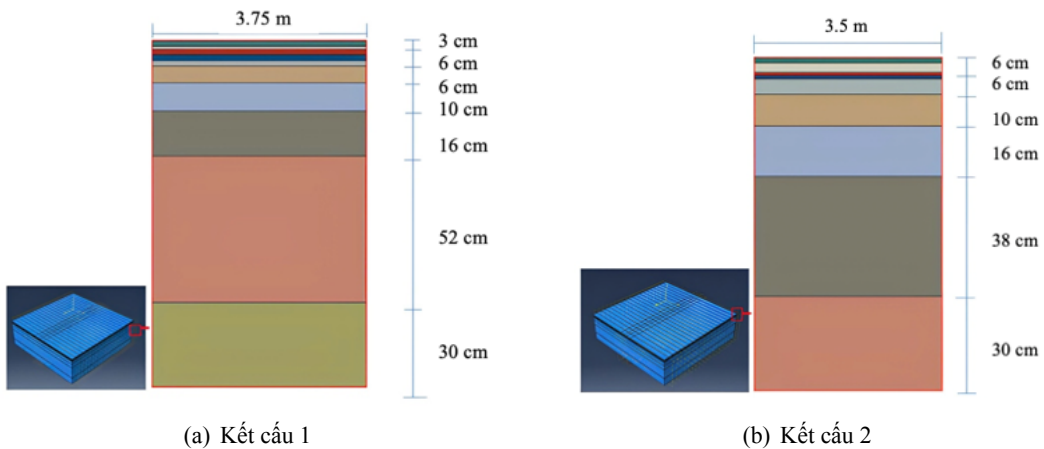
$$P = \frac{F}{A} = \frac{120000}{0,186 \times 0,192} = 3,36 \times 10^6 \quad (\text{N/m}^2) \quad (1)$$

trong đó P là giá trị lực được áp đặt lên mỗi bước của bề mặt tiếp xúc lăn của bánh xe (N/m^2); F là tải trọng trục tính toán (N); A là diện tích vệt bánh xe được quy đổi (m^2).

Giá trị lực được áp đặt lên mỗi bước của bề mặt tiếp xúc lăn của bánh xe với bề mặt Kết cấu 2, với chiều dài phân tích là 3,840 m và bề rộng làn đường là 3,5 m, được tính dựa trên công thức:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{100000}{0,186 \times 0,192} = 2,80 \times 10^6 \quad (\text{N/m}^2) \quad (2)$$

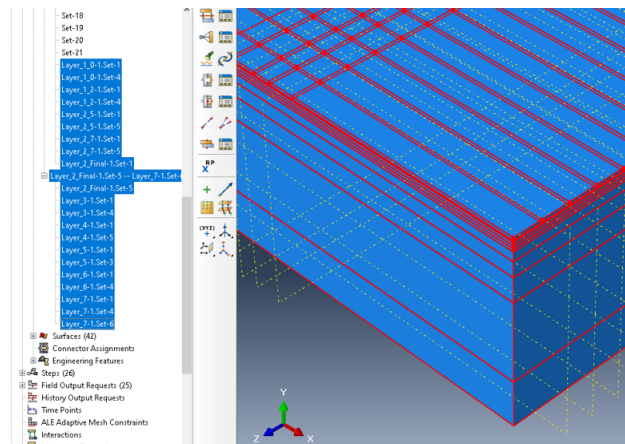
Mô hình hình học 3D được lựa chọn để thiết lập phân tích, theo đó, mô hình sẽ bao gồm nhiều lớp vật liệu của kết cấu xếp chồng lên nhau. Các lớp vật liệu cũng sẽ được thiết lập tương tác ràng buộc chặt với nhau bằng phần tử tiếp xúc. Kiểu ràng buộc buộc chặt. Phân bố vật liệu và vị trí đặt dây đo nhiệt độ thể hiện trong Hình 4.



(a) Kết cấu 1

(b) Kết cấu 2

Hình 4. Phân bố vật liệu và vị trí đặt dây đo nhiệt độ



Hình 5. Phần tử contact được sử dụng nhằm liên kết các bề mặt của các lớp lại

Sử dụng phương pháp tạo các lớp độc lập, sau đó liên kết lại bằng bề mặt tiếp xúc dựa trên kết cấu ảo đường thực tế được thể hiện như Hình 5.

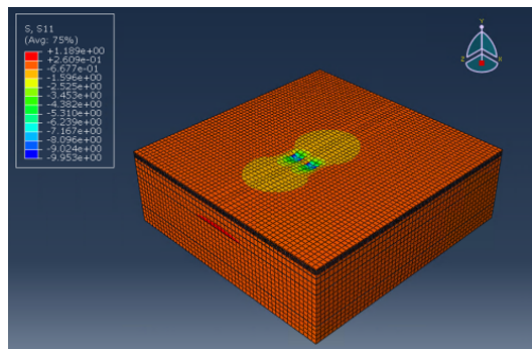
Các điều kiện biên đưa vào tính toán: (i) Điều kiện biên ngàm chặt tại đáy kết cấu của mô hình phân tích; (ii) Điều kiện biên đối xứng tại hai đầu mô hình phân tích; (iii) Điều kiện biên nhiệt độ của mô hình không khí phân tích biến thiên theo thời gian; (iv) Điều kiện biên nhiệt độ của mô hình 3 dấy đặt trong kết cấu ảo đường phân tích biến thiên theo thời gian.

3. Phân tích kết quả

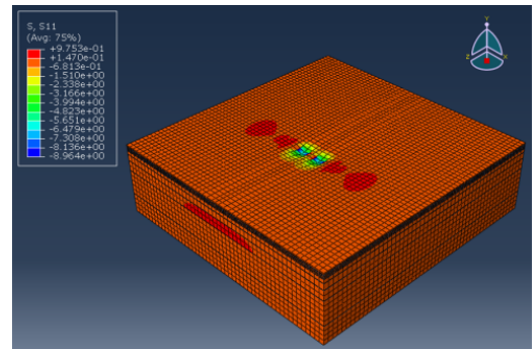
Kết quả tính toán ứng suất và giá trị hần lún vệt bánh xe cho Kết cấu 1 và Kết cấu 2 được tổng hợp trong Bảng 6. Kết quả mô phỏng ứng suất pháp tuyến, ứng suất cắt và ứng suất chuyển vị cho hai loại kết cấu ảo đường lần lượt thể hiện trong Hình 6, Hình 7 và Hình 8.

Bảng 6. Kết quả tính toán ứng suất và giá trị hần lún cho hai loại kết cấu

Kết cấu	Ứng suất cắt	Hần lún vệt bánh xe
Kết cấu 1	1,21 (MPa)	2,45 (cm)
Kết cấu 2	1,21 (MPa)	3,04 (cm)

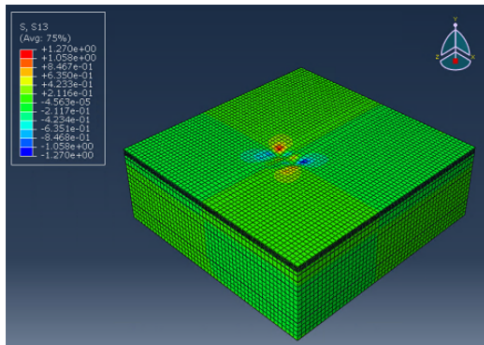


(a) Kết cấu 1

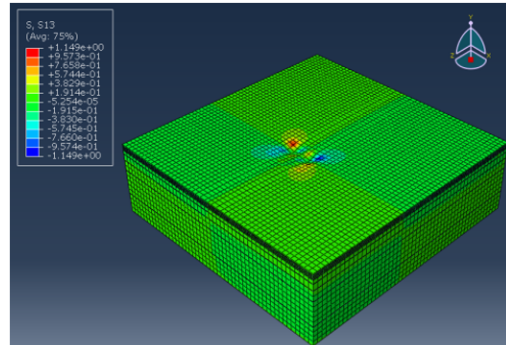


(b) Kết cấu 2

Hình 6. Ứng suất pháp tuyến (S11)



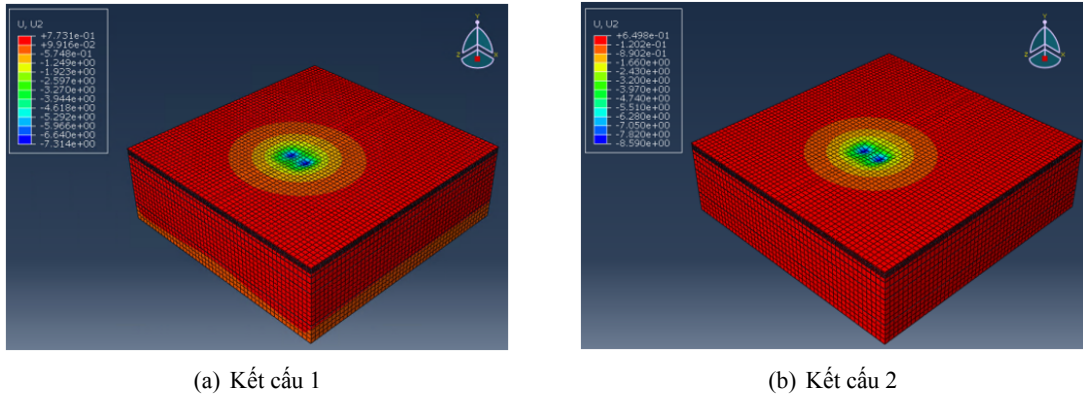
(a) Kết cấu 1



(b) Kết cấu 2

Hình 7. Ứng suất cắt (S12)

Phân bố ứng suất cắt theo tải trọng bánh xe: Ứng suất cắt lớn nhất thường tập trung tại khu vực tiếp xúc trực tiếp với bánh xe (Hình 7). Ở những khu vực này, áp lực từ tải trọng dồn lên sẽ cao hơn



Hình 8. Chuyển vị (U2)

và dẫn đến ứng suất cắt vượt trội. Ứng suất cắt có xu hướng tăng theo tải trọng tác dụng và kích thước vùng tiếp xúc của bánh xe. Các điều kiện tải trọng trùng phục (do xe cộ thường xuyên di chuyển) sẽ làm tăng nguy cơ hư hỏng do mỏi vật liệu ở tầng mặt bê tông nhựa.

Ảnh hưởng của độ dày và vật liệu của lớp bê tông nhựa: Độ dày của lớp bê tông nhựa có vai trò quan trọng trong việc phân phối lại ứng suất cắt. Các lớp dày hơn thường có khả năng chịu ứng suất cắt cao hơn mà không bị biến dạng quá mức, nhờ đó giảm nguy cơ nứt vỡ. Tính chất vật liệu, chẳng hạn như mô đun đàn hồi và cường độ chịu kéo, quyết định khả năng chống lại ứng suất cắt. Vật liệu có mô đun đàn hồi cao (cứng hơn) có thể chịu ứng suất cắt lớn hơn nhưng cũng có nguy cơ nứt gãy cao hơn do độ giòn của vật liệu. Khi sử dụng bê tông nhựa biến tính (như sử dụng phụ gia polymer), ứng suất cắt có thể giảm nhờ vào sự cải thiện độ dẻo dai và khả năng chống nứt của vật liệu.

Tác động của điều kiện biên và lớp nền: Tính chất cơ học của lớp nền ảnh hưởng trực tiếp đến phân bố ứng suất trong kết cấu áo đường. Lớp nền mềm hơn có khả năng biến dạng lớn hơn dưới tải trọng, giúp hấp thụ một phần ứng suất và giảm mức độ tập trung ứng suất cắt tại tầng mặt. Ngược lại, lớp nền cứng hơn, do có độ biến dạng nhỏ, truyền tải trọng trực tiếp lên tầng mặt, làm tăng ứng suất cắt tại vùng tiếp xúc, từ đó có thể làm giảm tuổi thọ của tầng mặt. Do đó, cần cân nhắc thiết kế lớp nền có độ cứng phù hợp để đảm bảo sự cân bằng giữa biến dạng tổng thể và khả năng chịu lực. Việc mô phỏng với các điều kiện biên khác nhau trong Abaqus cho phép dự báo chính xác sự thay đổi trong ứng suất cắt khi thay đổi các yếu tố cấu trúc của lớp nền.

Ảnh hưởng của tải trọng động và tốc độ di chuyển: Khi áp dụng tải trọng động, mô hình Abaqus có thể mô phỏng tác động của các yếu tố như tốc độ di chuyển của xe, tải trọng trực, và thời gian tác dụng của tải trọng lên bề mặt đường. Kết quả cho thấy tốc độ xe cao hơn có thể gây ra ứng suất cắt lớn hơn do các lực động tăng cường, làm gia tăng nguy cơ hư hỏng do mỏi và nứt vỡ. Tải trọng nặng hơn cũng làm gia tăng mức độ ứng suất cắt, đặc biệt là tại vùng tiếp xúc bánh xe.

Sự suy giảm ứng suất theo độ sâu của kết cấu: Kết quả từ mô phỏng cho thấy ứng suất cắt giảm dần từ lớp bề mặt xuống các lớp sâu hơn. Điều này phù hợp với lý thuyết về phân bố ứng suất trong kết cấu áo đường mềm, nơi lớp bề mặt chịu tác động lớn nhất từ tải trọng bánh xe. Ứng suất cắt tại độ sâu lớn hơn thường nhỏ hơn đáng kể, nhưng vẫn có thể ảnh hưởng đến sự lan truyền nứt hoặc biến dạng vĩnh viễn, tùy thuộc vào độ cứng và cấu trúc của các lớp dưới.

4. Kết luận

Có thể tính được chiều sâu lún vệt bánh xe lớp bê tông nhựa trong kết cấu áo đường thông qua phần mềm Abaqus. Đối với tuyến Phan Thiết – Dầu Giây, hần lún vệt bánh xe 2,45 cm; Hàm Nghi – Vũng Áng hần lún vệt bánh xe 3,04 cm được thể hiện ở Bảng 6. Tính toán xác định được chiều sâu

vùng biến dạng dẻo lớp bê tông nhựa mặt đường ở 2 kết cấu, phục vụ lựa chọn chiều dày lớp bê tông nhựa bề mặt có cường độ kháng cắt phù hợp với yêu cầu của mặt đường thiết kế.

Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Abaqus) giúp chia nhỏ kết cấu thành các phần tử nhỏ, từ đó cho phép tính toán chi tiết các giá trị ứng suất và biến dạng trong từng phần tử dưới tác động của tải trọng. Kỹ thuật này cung cấp khả năng mô phỏng các tình huống phức tạp, chẳng hạn như sự tương tác giữa các lớp vật liệu khác nhau, sự thay đổi của đặc tính vật liệu theo thời gian (mỏi), và các điều kiện tải trọng không đồng đều.

Có thể tối ưu hóa thiết kế dựa trên kết quả mô phỏng. Kết quả mô phỏng giúp định hướng việc cải thiện thiết kế áo đường bằng cách điều chỉnh độ dày lớp bê tông nhựa, thay đổi vật liệu, và xem xét lại cấu trúc của lớp nền nhằm giảm thiểu ứng suất cắt và tăng độ bền lâu dài. Các kịch bản mô phỏng có thể bao gồm việc thử nghiệm với các loại vật liệu khác nhau, hoặc điều chỉnh độ dày của các lớp để tìm ra phương án tối ưu nhất.

Tài liệu tham khảo

- [1] Bửu, T. Đ., Chiêu, N. Q., Hải, D. H., Khải, N. (1978). *Xây dựng mặt đường ô tô*. Nhà xuất bản Đại học và Trung học chuyên nghiệp.
- [2] Hải, D. H., Phúc, N. Q. (2015). Về phương pháp thiết kế kết cấu áo đường mềm và ảnh hưởng của thiết kế đến việc thời gian gần đây ở nước ta mặt đường bê tông nhựa bị hư hỏng sớm do hằn lún vệt bánh xe. *Tạp chí Cầu Đường Việt Nam*, (12):41–45.
- [3] Hải, D. H. (2016). Các nghiên cứu về thiết kế và thi công hỗn hợp bê tông nhựa nóng trong điều kiện Việt Nam nhằm hạn chế phát sinh lún vệt bánh xe trên mặt đường ô tô. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (JSTCE) - ĐHXDHN*, 10(4):11–17.
- [4] Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 4054-05 (2005). *Đường ô tô - Yêu cầu thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [5] Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 13567-1,2,3 (2022). *Mặt đường bê tông nhựa nóng - Yêu cầu thi công và nghiệm thu*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [6] 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.
- [7] Nguyen, V. B., Thom, N., Hoang, T. (2024). [A new test to simulate asphalt crack development at particle contacts](#). *Construction and Building Materials*, 457:139360.
- [8] Nguyen V., B. (2024). [Using the indirect tensile fatigue test to evaluate fatigue characterisation of asphalt mixtures](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE)-HUCE*, 18(3):92–101.
- [9] Nguyen, V. B., Thom, N. (2021). [Using a beam wheel tracker fatigue test to evaluate fatigue performance of asphalt mixtures](#). *Road Materials and Pavement Design*, 22(12):2801–2817.
- [10] Thom, N. (2014). *Principles of pavement engineering*. 2nd edition, ICE Publishing, London.
- [11] Khanzada, S. (2000). *Permanent Deformation in Bituminous Mixtures*. PhD Thesis, University of Nottingham.
- [12] Al-Mosawe, H. (2016). *Prediction of Permanent Deformation in Asphalt Mixtures*. PhD Thesis, University of Nottingham.
- [13] Al-Mosawe, H., Thom, N., Airey, G., Albayati, A. (2018). [Linear viscous approach to predict rut depth in asphalt mixtures](#). *Construction and Building Materials*, 169:775–793.
- [14] Bích, N. V., Tâm, V. M., Doanh, B. P. (2015). Phương pháp phần tử hữu hạn khảo sát sự phát triển của vết hằn bánh xe trong kết cấu áo đường ô tô. *Tạp chí Kết cấu và Công nghệ Xây dựng*, 1(16):51–58.
- [15] Phúc, N. Q., Hà, T. T. C., Hoi, T. D., Hiên, P. V. (2023). [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 rắn](#). *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 75(2):1249–1263.
- [16] Chăm, L. V. và cs. (2014). Nguyên nhân và giải pháp khắc phục hằn lún vệt bánh xe trên mặt đường bê tông nhựa. *Hội thảo khoa học, Trường Đại học Giao thông vận tải và Tổng công ty Xây dựng Công trình Giao thông 4*.