

PHÂN BỐ NHIỆT TRONG MẶT ĐƯỜNG BÊ TÔNG NHỰA: THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN ASPHALT PAVEMENT: EXPERIMENT AND NUMERICAL METHOD

Nguyễn Hồng Hải*, Trần Thị Thu Thảo, Hoàng Văn Tĩnh, Tôn Thất Bảo Nam, Huỳnh Ngọc Hùng

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: nhhai@dut.udn.vn

(Nhận bài: 28/3/2022; Chấp nhận đăng: 18/4/2022)

Tóm tắt - Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu dự báo phân bố nhiệt trong lớp mặt bê tông nhựa chặt (BTNC) của kết cấu mặt đường nửa cứng. Phân bố nhiệt được thực hiện trên mô hình quan trắc thực tế và mô phỏng số bằng phần mềm ANSYS trên cơ sở lý thuyết truyền nhiệt một chiều. Kết cấu mặt đường nửa cứng sử dụng trong nghiên cứu gồm lớp mặt BTNC 12,5 dày 13cm trên lớp móng cấp phối đá dăm Dmax 31,5 gia cố xi măng 4% dày 15cm. Phân tích mô phỏng được thực hiện ở 3 trường hợp thông số nhiệt lý (độ dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng, dung trọng) của BTN khác nhau. Kết quả phân tích cho thấy, kết quả dự báo thay đổi nhiệt độ theo chiều sâu trong mặt đường BTN phụ thuộc các thông số nhiệt lý của BTN. Sử dụng thông số nhiệt lý thay đổi theo nhiệt độ làm việc thực tế của BTN (trường hợp 1) cho kết quả gần đúng với nhiệt độ quan trắc thực tế hơn so với sử dụng giá trị không đổi (trường hợp 2 và 3).

Từ khóa - Mô hình dự đoán; bê tông nhựa (BTN); lý thuyết truyền nhiệt; phân bố nhiệt độ; ANSYS.

1. Đặt vấn đề

Yếu tố khí hậu ảnh hưởng nhiều đến chất lượng khai thác và tuổi thọ của mặt đường bê tông nhựa (BTN). BTN là vật liệu có tính chất đàn hồi-nhớt-dẻo, cường độ và độ ổn định cường độ của BTN chịu ảnh hưởng nhiều của điều kiện khí hậu, đặc biệt khi nhiệt độ thay đổi. Nhiệt độ tăng, tính đàn hồi của BTN giảm, tính nhớt tăng. Dưới tác dụng lặp lại của tải trọng xe chạy, BTN dễ phát sinh biến dạng không hồi phục (biến dạng dư). Ngược lại ở nhiệt độ thấp, mặt đường trở nên giòn, dễ phát sinh hiện tượng nứt gãy. Lựa chọn, sử dụng nhiệt độ tính toán phù hợp cho vật liệu BTN góp phần đảm bảo ổn định cường độ, hạn chế các hiện tượng hư hỏng (nứt, trượt, lún sóng, lún vệt bánh xe) mặt đường BTN. Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu áo đường mềm Việt Nam 22TCN 211-06, quy định tính toán kết cấu áo đường theo 3 tiêu chuẩn trạng thái giới hạn (kéo uốn, võng, trượt) tương ứng với 3 điều kiện nhiệt độ tính toán của BTN lần lượt là 10-15°C, 30°C và 60°C [1].

Phân bố nhiệt độ trong mặt đường BTN đang khai thác khá phức tạp, phụ thuộc vào phân vùng khí hậu, điều kiện và sự thay đổi thời tiết (nhiệt độ) trong ngày, chiều dày lớp BTN, tính chất vật liệu BTN,... Để hạn chế các hiện tượng hư hỏng mặt đường BTN, cần có nhiều nghiên cứu sâu về phân bố nhiệt trong mặt đường BTN, từ đó giúp kỹ sư thiết kế có cơ sở để lựa chọn thông số nhiệt độ thiết kế thích hợp.

Abstract - This paper presents the results of the study on predicting the temperature distribution in the asphalt concrete (AC) surface layer of the semi-rigid pavement structure. Temperature distribution is studied on on-site actual monitoring and numerical simulation by ANSYS software based on one-dimensional heat transfer theory. The semi-rigid pavement structure consists of a 13cm thick AC 12,5mm surface and a 15cm thick cement-treated base 31,5mm. Simulation analysis is performed in 3 cases of different thermophysical properties (thermal conductivity, specific heat capacity, density) of the AC layer. The analysis results show that, the temperature variation with depth in the AC layer depends on its thermophysical properties. Using thermophysical properties according to the actual working temperature of AC (case 1) gives prediction results that are more approximate to the actual monitoring temperature than using a constant value (cases 2 and case 3).

Key words - Prediction model; asphalt concrete (AC); heat transfer theory; temperature distribution; ANSYS.

Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu phân bố nhiệt của mặt đường BTN thông qua mô hình thực nghiệm hoặc mô phỏng số [2], [3]. Các nghiên cứu trên thực nghiệm chủ yếu được phát triển dựa trên phương pháp phân tích thống kê các kết quả quan trắc thực nghiệm. Mô hình dự báo phân bố nhiệt độ của mặt đường và các yếu tố liên quan thường đơn giản, tuy nhiên chỉ phù hợp với đặc điểm vật liệu và khí hậu của khu vực nghiên cứu, đồng thời chi phí để thực hiện mô hình nghiên cứu thực nghiệm tốn kém. Hướng nghiên cứu dựa theo lý thuyết truyền nhiệt, áp dụng phương pháp giải tích để xác định nhiệt độ mặt đường bắt đầu từ những năm 1950, Barber [4]. Tuy nhiên, do chỉ dựa trên các giả định thực nghiệm nên các mô hình đề xuất chỉ có thể chấp nhận trong một số điều kiện cụ thể. Để áp dụng ở trường hợp tổng quát, cần được kiểm tra tính tương thích của mô hình. Mặt khác, đối với các mô hình giải tích, do sự phức tạp của thông lượng nhiệt trên bề mặt mặt đường nên thường gặp khó khăn khi áp dụng để giải phương trình truyền nhiệt, thậm chí có thể không giải được khi điều kiện biên ở mặt đường phức tạp.

Phương pháp số ra đời giúp giải quyết các bài toán với điều kiện biên phức tạp trong dự đoán phân bố nhiệt mặt đường theo hướng lý thuyết. So với mô hình giải tích, các mô hình số có thể giải được với các điều kiện biên bề mặt phức tạp vì sự dẫn nhiệt được giải quyết trên các nút hoặc trên các phần tử. Cùng với việc phát triển các công cụ tính

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Nguyen Hong Hai, Tran Thi Thu Thao, Hoang Van Tinh, Ton That Bao Nam, Huynh Ngoc Hung)

toán bằng máy tính, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) hiện đang được sử dụng khá phổ biến trong nhiều bài toán kỹ thuật. Với ưu điểm có thể phân tích ứng xử cơ học của kết cấu, FEM có thể sử dụng để phân tích các vấn đề cơ học liên quan đến nhiệt độ trong kết cấu mặt đường [5]–[7]. Tại Việt Nam, phương pháp phần tử hữu hạn đã được sử dụng để đánh giá trạng thái nhiệt độ của lớp BTN của các nhóm nghiên cứu Trịnh Văn Quang, Nguyễn Huỳnh Tấn Tài [8], [9].

Bài báo trình bày nghiên cứu dự báo phân bố nhiệt trong lớp mặt bê tông nhựa chặt (BTNC) của kết cấu mặt đường nửa cứng, gồm: Lớp mặt BTNC12,5 dày 13cm trên lớp móng cấp phối đá dăm Dmax31,5 gia cố xi măng 4% dày 15cm. Phân bố nhiệt được thực hiện trên mô hình quan trắc thực tế tại khu vực thành phố Đà Nẵng (Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng) và mô phỏng số bằng phần mềm ANSYS ACADEMIC STUDENT_2022R1.1 [10] trên cơ sở lý thuyết truyền nhiệt một chiều. Phân tích mô phỏng được thực hiện ở 3 trường hợp thông số nhiệt lý của BTN khác nhau, có đối sánh với kết quả quan trắc thực nghiệm từ mô hình thực tế, từ đó rút ra được ảnh hưởng của thông số nhiệt lý của BTN đến phân bố nhiệt độ mặt đường BTN.

2. Cơ sở lý thuyết và mô phỏng truyền nhiệt

2.1. Cơ sở lý thuyết truyền nhiệt

Phương trình tổng quát của quá trình truyền nhiệt trong vật liệu sinh nhiệt theo không gian và thời gian được biểu diễn dưới dạng:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

Trong đó: T - Nhiệt độ của BTN; t - Thời gian xảy ra quá trình truyền nhiệt; a - độ khuếch tán nhiệt, được xác định theo công thức:

$$a = \lambda / \rho C \quad (2.2)$$

với λ – độ dẫn nhiệt (W/m.°C); ρ – dung trọng (kg/m³); C – nhiệt dung riêng (J/kg.°C).

x, y, z - lần lượt là các trục theo 3 phương truyền nhiệt của BTN.

Trong kết cấu mặt đường ô tô, do chiều dày mặt đường thường nhỏ hơn nhiều so với chiều rộng và chiều dài làm việc, nên có thể xem truyền nhiệt trong kết cấu mặt đường là truyền nhiệt một chiều theo phương thẳng đứng (z). Phương trình tổng quát (2.2) có thể biểu diễn dưới dạng:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

2.2. Áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) trong bài toán truyền nhiệt [11]

a) Bước 1: Rời rạc hóa bài toán, chọn phần tử hữu hạn

Tùy thuộc tính chất của bài toán, phần tử có thể chọn theo các hình dạng khác nhau: Đoạn thẳng (đối với bài toán một chiều); hình phẳng như tam giác, tứ giác, chữ nhật (đối với bài toán hai chiều); Hình khối, như khối tứ diện, lập phương, hình hộp, lăng trụ (đối với bài toán ba chiều). Mỗi loại phần tử có thể chọn bậc nhất, bậc hai hoặc bậc ba... tùy theo nhiệt độ phụ thuộc vào tọa độ là hàm bậc mấy.

Giữa các phần tử ngăn cách nhau bởi các biên là các nút, đoạn thẳng, hay bề mặt.

Tùy thuộc loại phần tử mà mỗi phần tử có hai hay nhiều nút. Sau khi rời rạc, nhiệt độ cần phải tìm trong miền liên tục của vật thể được xấp xỉ tại các nút của các phần tử.

b) Bước 2: Chọn hàm nội suy (N_i)

Hàm nội suy N_i (hay hàm hình dạng) thể hiện mối quan hệ giữa nhiệt độ T bên trong phần tử với giá trị nhiệt độ tại các nút T_i .

$$T = N_1 T_1 + N_2 T_2 + \dots + N_k T_k = \sum_{i=1}^k N_i T_i \quad (2.4)$$

$$\text{Hoặc ở dạng ma trận: } T = [N]\{T\} \quad (2.5)$$

Trong đó:

1, 2, i, ..., k - chỉ số thứ tự các nút trong một phần tử;

N_1, N_2, \dots, N_k - hàm nội suy tại các nút 1, 2, ..., k;

T - nhiệt độ tại điểm bất kỳ trong phần tử;

T_1, T_2, T_k - nhiệt độ cần tìm tại các nút 1, 2, ..., k;

[N], {T} - lần lượt là ma trận hàm nội suy và vector nhiệt độ cần tìm.

c) Bước 3: Thiết lập phương trình đặc trưng của phần tử

Phương trình đặc trưng của phần tử biểu thị mối quan hệ giữa nhiệt độ chưa biết tại các nút với các phụ tải nhiệt.

Để thiết lập phương trình đặc trưng của phần tử, cần thực hiện xấp xỉ hàm cần tìm là nhiệt độ với một số lượng hữu hạn các biến số tại các nút, hình thành một phương trình ma trận của phần tử ở dạng:

$$[K]_i \{T\}_i = \{f\}_i \quad (2.6)$$

Trong đó:

i - chỉ số biểu thị cho phần tử thứ i;

{T}_i - nhiệt độ phải tìm tại các nút;

[K]_i - ma trận các hệ số của nhiệt độ (hay ma trận độ cứng của phần tử);

{f}_i - véc tơ phụ tải nhiệt hoặc nhiệt độ cho trước tại nút biên nào đó.

d) Bước 4: Thiết lập phương trình đặc trưng phần tử đối với phương trình vi phân dẫn nhiệt.

Phương trình đặc trưng của phần tử là mối quan hệ giữa hàm số cần tìm tại các nút (tức nhiệt độ) và các phụ tải hoặc các lực tương ứng ở dạng ma trận.

$$[K]\{T\} = \{f\} \quad (2.7)$$

Để nhận được phương trình ma trận (2.7), cần xấp xỉ tích phân phương trình vi phân truyền nhiệt (2.1 hoặc 2.3). Mặt khác, để xác định nghiệm xấp xỉ tích phân đối với bài toán truyền nhiệt, có thể áp dụng một số phương pháp: Tích phân cân bằng nhiệt (phương pháp Ritz); Biến phân (phương pháp Rayleigh Ritz); Hoặc phương pháp số dư trọng số (phương pháp Galerkin).

đ) Bước 5: Giải hệ phương trình (2.7) xác định nhiệt độ tại các nút.

Hệ phương trình (2.7) được giải bằng các phương pháp chuẩn như: Lặp, khử, Gauss, ma trận nghịch đảo...

Để giải bài toán phân bố nhiệt trong mặt đường cần sử dụng các điều kiện biên tại bề mặt của mặt đường và đáy kết cấu áo đường:

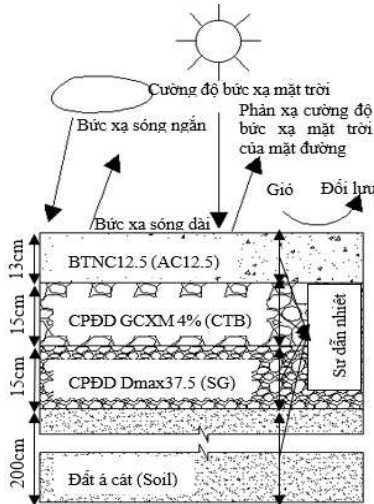
- Tại bề mặt mặt đường (z=0):

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_{ns} - q_{nl} - q_c \quad (2.8)$$

Trong đó:

- λ_1 - Độ dẫn nhiệt của lớp 1 (W/(m.K));
- q_{ns} - bức xạ mặt trời được mặt đường hấp thụ;
- q_{nl} - bức xạ sóng dài phát ra từ mặt đường;
- q_c - dòng nhiệt do đối lưu gây ra;

Theo (2.8), nhiệt độ mặt đường có thể được tính toán nếu xác định từng dòng nhiệt tại bề mặt mặt đường.



Hình 1. Trao đổi nhiệt trong hệ thống môi trường mặt đường

Ngoài phương pháp xác định từng dòng nhiệt tại bề mặt của mặt đường theo phương trình (2.8). Điều kiện biên nhiệt độ tại bề mặt có thể được xác định bằng cách đo đặc trực tiếp:

$$T = T_{sur}, \text{ với } T_{sur} \text{ là nhiệt độ đo được tại mặt đường.}$$

- Tại đáy kết cấu áo đường:

Sự dao động nhiệt trong kết cấu áo đường càng có xu hướng tắt dần nếu càng đi sâu xuống nền đường. Biên đoạn nhiệt được áp dụng ở độ sâu ứng với nhiệt độ của đất không thay đổi theo độ sâu. Theo các nghiên cứu của Minhoto và cộng sự [12], Wang [13], biên độ dao động nhiệt độ trong lòng đất đến độ sâu nhất định rất ít thay đổi. Theo Minhoto và cộng sự, nhiệt độ trong mặt đất cách mặt đường 2m hầu như không đổi trong khoảng thời gian 1 tháng [12]. Do đó, biên đoạn nhiệt được chọn áp dụng cho mô hình nghiên cứu là tại độ sâu lớp đất 2m.

2.3. Mô hình tính toán phân bố nhiệt theo phương pháp PTHH bằng phần mềm ANSYS

2.3.1. Lựa chọn thông số nhiệt lý vật liệu

Để thuận lợi khi so sánh kết quả tính toán mô phỏng với thực nghiệm, nghiên cứu chọn kết cấu mặt đường gồm các lớp vật liệu tương tự kết cấu mặt đường của mô hình thực nghiệm hiện trường gồm: (1) Lớp mặt trên BTNC12,5 dày 13cm (AC12.5); (2) Lớp móng trên cấp phối đá dăm Dmax31,5 gia cố xi măng 4% dày 15cm (CTB); (3) Lớp móng dưới cấp phối đá dăm dày 15cm (SG); và (4) Lớp đất á cát dày 2m (Hình 1).

Thông số nhiệt lý các lớp vật liệu sử dụng trong mô

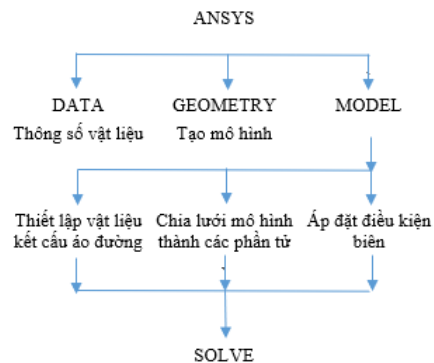
hình tính toán là giá trị thí nghiệm thực hiện trong phòng thí nghiệm ở các khoảng nhiệt độ khác nhau (ký hiệu Case 1), thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm các thông số nhiệt lý của các loại vật liệu mặt đường nghiên cứu [14]

Thông số nhiệt lý	Nhiệt độ (°C)									
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	
AC 12.5	λ (W/m.°C)	1,62	1,65	1,70	1,74	1,83	1,91	1,97	1,99	2,10
	C (J/kg.°C)	1065	1086	1106	1125	1142	1158	1173	1187	1201
	ρ (kg/m ³)	2386								
CTB	λ (W/m.°C)	1,42	1,47	1,52	1,57	1,62	1,67	1,72	-	-
	C (J/kg.°C)	1047	1046	1046	1046	1045	1045	1045	-	-
	ρ (kg/m ³)	2371								
SG	λ (W/m.°C)	1,78								
	C (J/kg.°C)	1150								
	ρ (kg/m ³)	1820								
SOIL	λ (W/m.°C)	1,71								
	C (J/kg.°C)	1000								
	ρ (kg/m ³)	1650								

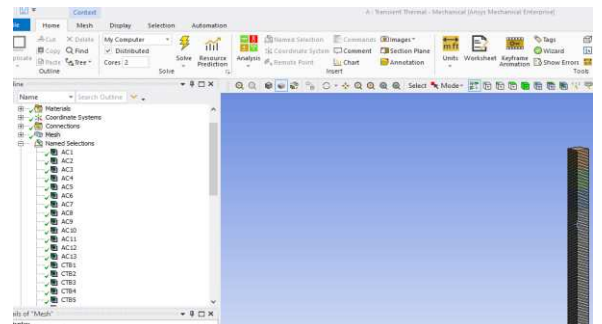
2.3.2. Mô hình tính toán trên phần mềm ANSYS

Để mô phỏng truyền nhiệt trong kết cấu, nghiên cứu sử dụng phần mềm ANSYS ACADEMIC STUDENT_2022R1.1. Quá trình các bước tính toán mô phỏng trên phần mềm ANSYS thể hiện ở Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ quá trình thực hiện mô phỏng

Để kiểm chứng mô hình mô phỏng, tiến hành mô phỏng trường hợp nghiên cứu 1 (Case 1) với thông số nhiệt lý tính toán của vật liệu được lấy ở Bảng 1. Điều kiện biên là nhiệt độ đo thực tế tại bề mặt mặt đường (Tsur). Chia lưới phần tử dựa trên chiều dày các lớp vật liệu theo chiều sâu thành các khoảng đều nhau, dày 1cm (trùng vị trí quan trắc nhiệt trên mô hình thực nghiệm) để dễ dàng kiểm chứng kết quả mô phỏng với mô hình thực nghiệm (Hình 3).



Hình 3. Chia lưới phần tử kết cấu mặt đường trong Ansys

Bước thời gian tính toán 10 phút, tương tự bước thời gian quan trắc nhiệt của mô hình thực nghiệm.

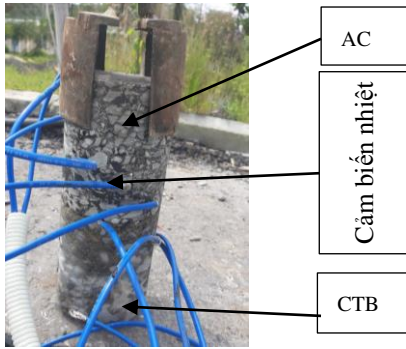
2.3.3. Mô hình thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm được thực hiện tại khu G Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, trên diện tích 2m x 2m (Hình 4), kết cấu các lớp vật liệu mặt đường như Hình 1.



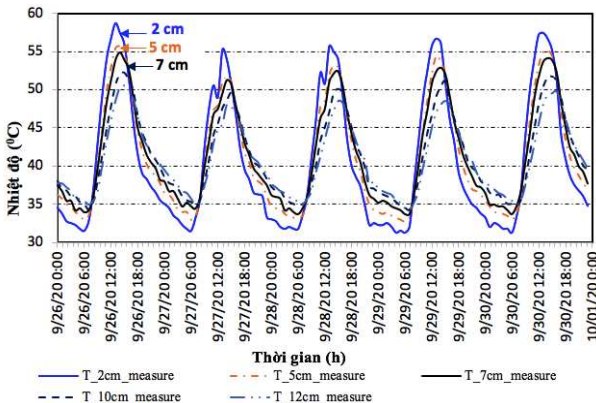
Hình 4. Thi công kết cấu mặt đường mô hình thực nghiệm

Phân bố nhiệt độ trong các lớp vật liệu được xác định nhờ các cảm biến nhiệt đặt tại các vị trí bên trong bê tông nhựa ở các độ sâu tính từ bề mặt mặt đường lần lượt là 2cm, 5cm, 7cm, 10cm và 12cm như Hình 5.



Hình 5. Lắp đặt cảm biến nhiệt độ trong lớp BTN

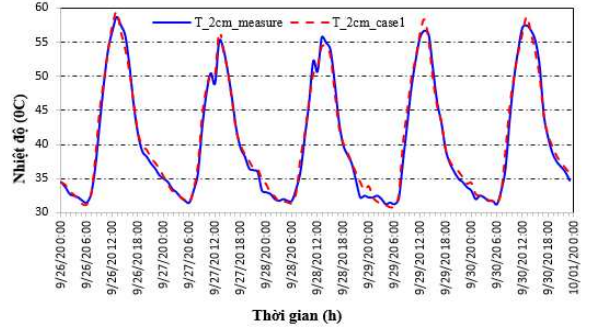
Kết quả quan trắc diễn biến thay đổi nhiệt độ ở các độ sâu khác nhau trong lớp mặt BTN (Hình 6) cho thấy: Phân bố nhiệt độ cao nhất và thấp nhất trong BTN thay đổi theo thời gian trong ngày. Ở độ sâu từ 2cm đến 7cm, nhiệt độ đạt lớn nhất trong khoảng thời gian từ 13h00 đến 14h00. Nhiệt độ cao nhất ở độ sâu 10cm, 12cm của BTN dao động trong thời gian từ 14h00 đến 15h00. Tương tự, nhiệt độ nhỏ nhất ở độ sâu 2cm đến 7cm là 06h00 và ở độ sâu 10cm đến 12cm là 07h00.



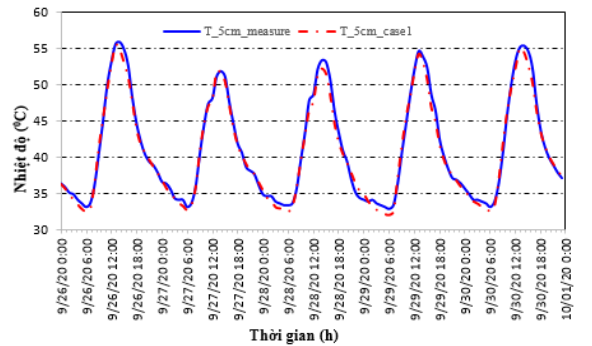
Hình 6. Thay đổi nhiệt độ ở các độ sâu khác nhau trong lớp mặt BTN (kết quả quan trắc từ mô hình thực nghiệm)

2.3.4. So sánh kết quả mô phỏng với thực nghiệm quan trắc

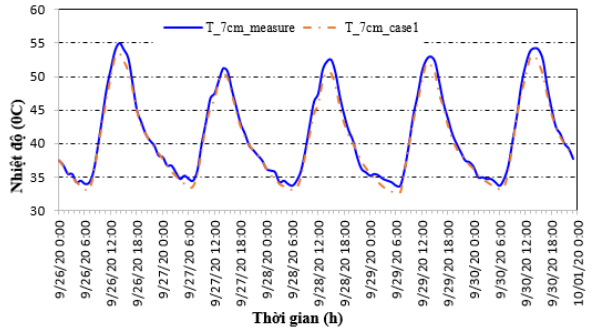
Hình 7 đến Hình 11 lần lượt thể hiện diễn biến thay đổi nhiệt độ tại các độ sâu lần lượt là 2cm, 5cm, 7cm, 10cm và 12cm trong BTN, sau 5 ngày quan trắc liên tục từ 26/9/2020 đến 30/09/2020. Đường liền nét thể hiện nhiệt độ quan trắc (ký hiệu T_measure), đường đứt nét thể hiện nhiệt độ mô phỏng (T_case1).



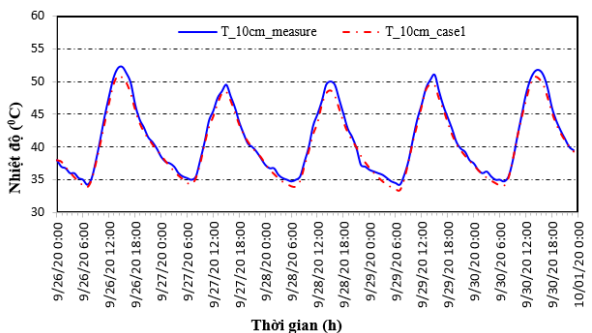
Hình 7. Diễn biến thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 2cm từ mô hình thực nghiệm (measure) và mô phỏng (Case 1)



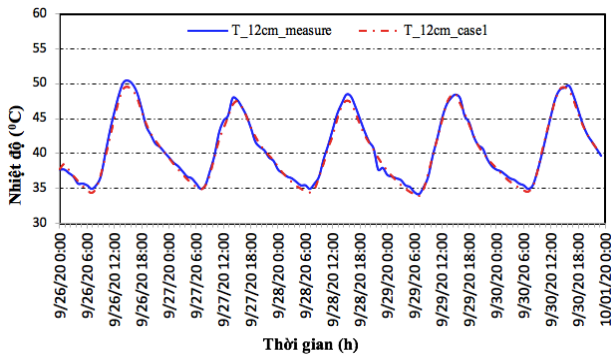
Hình 8. Diễn biến thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 5cm từ mô hình thực nghiệm (measure) và mô phỏng (Case 1)



Hình 9. Diễn biến thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 7cm từ mô hình thực nghiệm (measure) và mô phỏng (Case 1)



Hình 10. Diễn biến thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 10cm từ mô hình thực nghiệm (measure) và mô phỏng (Case 1)



Hình 11. Diễn biến thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 12cm từ mô hình thực nghiệm (measure) và mô phỏng (Case 1)

Để so sánh kết quả phân tích từ mô hình (Case 1) và kết quả quan trắc từ mô hình thực nghiệm, tiến hành tính toán sai số bình phương trung bình (Root Mean Squared Error - RMSE) theo công thức:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2}{n}}$$

Trong đó: y_i - nhiệt độ xác định bằng mô hình mô phỏng tại thời điểm t_i ; y_i^* - nhiệt độ của mô hình quan trắc thực nghiệm tại thời điểm t_i .

Kết quả tính toán RMSE ở các giá trị độ sâu khác nhau (Bảng 2) cho thấy, sai số bình phương trung bình RMSE giữa kết quả phân tích trên phần mềm ANSYS và quan trắc thực nghiệm có sự chênh lệch không đáng kể (giá trị lớn nhất là 1,01 tại độ sâu 5cm). Điều này cho thấy, giá trị nhiệt lý của vật liệu sử dụng làm đầu vào cho mô hình tính toán Case 1 là tin cậy. Các giá trị này có thể sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của thông số khí hậu và nhiệt lý của vật liệu mặt đường đến phân bố nhiệt trong BTN.

3. Ảnh hưởng của thông số nhiệt lý BTN đến phân bố nhiệt độ trong mặt đường BTN

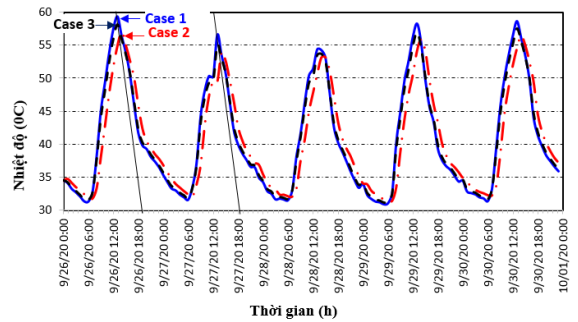
Tiến hành phân tích ảnh hưởng của thông số nhiệt lý đến phân bố nhiệt độ trong lớp mặt BTN cho 3 trường hợp:

- Trường hợp 1 (Case 1): Thông số nhiệt lý BTN được lấy theo kết quả thí nghiệm (Bảng 1), thay đổi theo nhiệt độ của BTN.
- Trường hợp 2 (Case 2): Thông số nhiệt lý BTN không thay đổi theo nhiệt độ với độ dẫn nhiệt 1,0416 W/m.°C, nhiệt dung riêng 1666,6 J/kg.°C, dung trọng 2100 Kg/m³, từ kết quả nghiên cứu của Trịnh Văn Quang [8].
- Trường hợp 3: Thông số nhiệt lý BTN không thay đổi theo nhiệt độ với độ dẫn nhiệt 1,65 W/m.°C, nhiệt dung riêng 1368 J/kg.°C, dung trọng 2350 kg/m³ (theo nghiên cứu của J. Luca và D. Mrawira [15]).

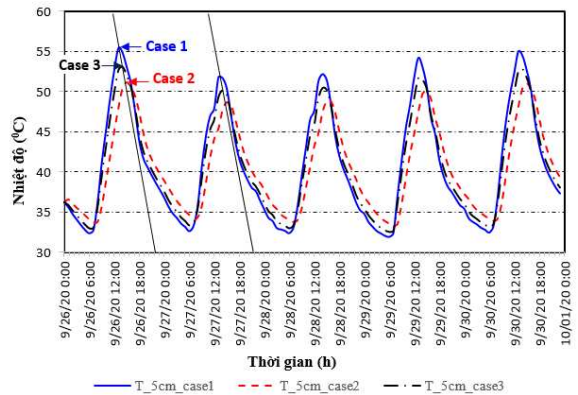
Hình 12 đến Hình 16 thể hiện kết quả tính toán mô phỏng thay đổi nhiệt độ tại các độ sâu khác nhau trong lớp mặt BTN của 03 trường hợp mô phỏng.

Phân tích RMSE so sánh sai số giữa nhiệt độ tính toán của 3 trường hợp phân tích với nhiệt độ quan trắc thực nghiệm (Bảng 2) cho thấy: Trường hợp 1 có kết quả sai số nhỏ nhất (RMSE thay đổi từ 0,57 đến 1,01); Tiếp đến là trường hợp 3 (RMSE thay đổi từ 1,03 đến 2,04); Lớn nhất là trường hợp 2 (RMSE thay đổi từ 2,97 đến 4,06).

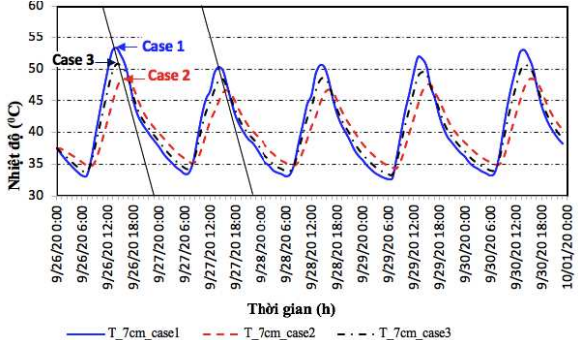
Phân tích cho thấy, thông số nhiệt lý của BTN có ảnh hưởng đến kết quả dự báo thay đổi nhiệt độ trong BTN. Ở trường hợp 1, thông số nhiệt lý được xác định thông qua thí nghiệm trong phòng, theo nhiệt độ BTN nên kết quả dự báo thay đổi nhiệt độ gần đúng với kết quả quan trắc thực tế (sai số nhỏ nhất).



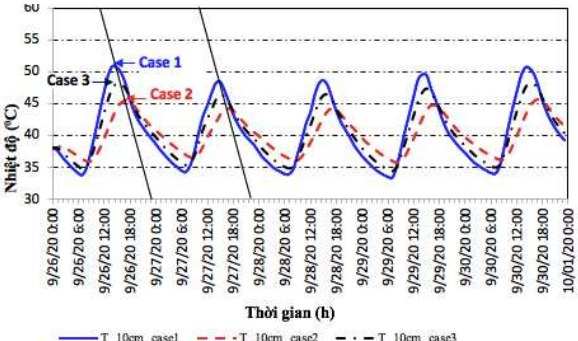
Hình 12. Thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 2cm cho 3 trường hợp tính toán mô phỏng trên phần mềm ANSYS



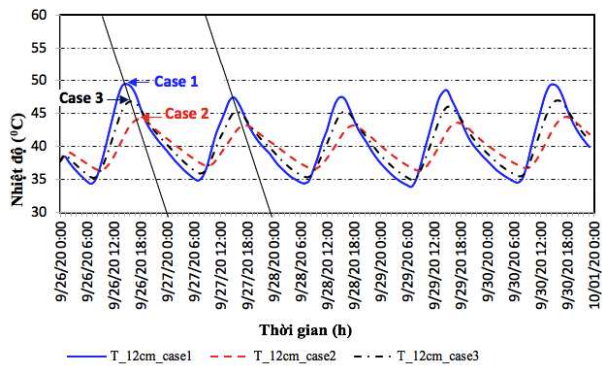
Hình 13. Thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 5cm cho 3 trường hợp tính toán mô phỏng trên phần mềm ANSYS



Hình 14. Thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 7cm cho 3 trường hợp tính toán mô phỏng trên phần mềm ANSYS



Hình 15. Thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 10cm cho 3 trường hợp tính toán mô phỏng trên phần mềm ANSYS



Hình 16. Thay đổi nhiệt độ tại độ sâu 12cm cho 3 trường hợp tính toán mô phỏng trên phần mềm ANSYS

Bảng 2. Sai số RMSE giữa nhiệt độ tính toán và nhiệt độ quan trắc thực nghiệm cho 03 trường hợp phân tích

Độ sâu (cm)	Sai số RMSE giữa nhiệt độ tính toán và nhiệt độ quan trắc cho các trường hợp phân tích		
	Case 1	Case 2	Case 3
2	0,94	2,97	1,03
5	0,74	3,48	1,40
7	1,01	4,06	2,04
10	0,75	3,93	1,99
12	0,57	3,73	1,86

4. Kết luận

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phân bố nhiệt trong kết cấu mặt đường nửa cứng có lớp mặt BTNC12,5 dày 13cm. Sự thay đổi nhiệt độ ở các độ sâu khác trong lớp mặt BTN nhau được xác định thông qua mô hình thực nghiệm kết cấu thực và mô phỏng số bằng phần mềm ANSYS. Quan trắc được thực hiện liên tục theo thời gian thực 5 ngày liên tục từ 26 đến 30 tháng 9 năm 2020.

Sự thay đổi nhiệt độ trong BTN ở các độ sâu khác nhau có quy luật giống nhau, tuy nhiên giá trị nhiệt độ lớn nhất và nhỏ nhất khác nhau theo chiều sâu. Tại độ sâu 2cm, nhiệt độ đạt lớn nhất vào đầu giờ chiều (13h-14h) và nhỏ nhất vào đầu buổi sáng (6h00). Giá trị nhiệt độ lớn nhất và nhiệt độ nhỏ nhất ở mỗi vị trí độ sâu trong mặt đường và thời gian BTN đạt giá trị nhiệt độ lớn nhất (hoặc nhỏ nhất) phụ thuộc vào thông số nhiệt lý tính toán của BTN.

Thông số nhiệt lý tính toán của BTN phụ thuộc nhiệt độ của BTN. Để đảm bảo dự báo chính xác thay đổi nhiệt độ trong mặt đường BTN, cần xác định thông số nhiệt lý BTN theo nhiệt độ để đưa vào mô hình phân tích (input value). Sử dụng hệ số dẫn nhiệt như một hằng số có giá trị thấp (trường hợp 2) cho thấy chênh lệch nhiệt độ theo chiều sâu lớn, đồng thời nhiệt độ đạt lớn nhất thường xảy ra chậm hơn so với kết quả quan trắc thực tế từ 1 đến 2 giờ.

Lời cảm ơn:

[Trần Thị Thu Thảo] được tài trợ bởi [Nhà tài trợ] thuộc Tập đoàn Vingroup và hỗ trợ bởi Chương trình học bổng thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đồi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn (VinBigdata), mã số [VINIF.2021.TS.102].

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2021-DN02-05.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] 22TCN211:06, “Áo Đường Mềm - yêu cầu thiết kế”, Bộ Giao thông vận tải, 2006.
- [2] Lijun Sun, “Structural Behavior of Asphalt Pavements”, *Butterworth-Heinemann*, p. 1045, 2016, doi: 10.1016/b978-0-12-849908-5.00007-9.
- [3] J. Chen, H. Wang, and P. Xie, “Pavement temperature prediction: Theoretical models and critical affecting factors”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 158, 2019, p. 113755, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113755.
- [4] E. S. Barber, “Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports”, *Highw. Res. Board*, vol. 168, no. 3, 1957, pp. 1–8.
- [5] Y. Qin and J. E. Hiller, “Modeling the temperature and stress distributions in rigid pavements: Impact of Solar Radiation absorption and heat history development”, *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 8, 2011, pp. 1361–1371, doi: 10.1007/s12205-011-1322-6.
- [6] D. Yinfei, H. Zheng, C. Jiaqi, and L. Weizheng, “A novel strategy of inducing solar absorption and accelerating heat release for cooling asphalt pavement”, *Sol. Energy*, vol. 159, no. October 2017, 2018, pp. 125–133, doi: 10.1016/j.solener.2017.10.086.
- [7] M. Z. Alavi, M. R. Pouranian, and E. Y. Hajj, “Prediction of asphalt pavement temperature profile with finite control volume method”, *Transp. Res. Rec.*, vol. 2456, no. 2456, pp. 96–106, 2014, doi: 10.3141/2456-10.
- [8] Trịnh Văn Quang, “Đánh giá trạng thái nhiệt áo đường bê tông nhựa bằng phương pháp số (phần 1)”, *Cầu đường Việt Nam*, vol. Số 10, pp. 30–33, 2002.
- [9] T. T. N. Nguyễn Huỳnh Tấn Tài, “Tính toán dự báo nhiệt độ mặt đường bằng phương pháp số và ứng dụng”, <https://www.researchgate.net/publication/316278763>, 2015.
- [10] “<https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>.”
- [11] Trịnh Văn Quang, “Cơ sở Truyền nhiệt”, *TP Hồ Chí Minh*, 2016.
- [12] M. J. C. Minhoto, J. C. Pais, P. A. A. Pereira, and L. G. Picado-santos, “Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Method”, *Transp. Res. Rec.*, vol. 1919, no. 1919, pp. 96–110, 2005, [Online]. Available: <http://trb.metapress.com/content/060716883r6851711>.
- [13] D. Wang, “Simplified Analytical Approach to Predicting Asphalt Pavement Temperature”, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 27, no. 12, p. 04015043, 2015, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000826.
- [14] T. T. T. Tran, H. H. Nguyen, P. Q. Nguyen, and P. N. Pham, *Developing an Apparatus to Determine Thermal Diffusivity of Paving Materials*. Springer Singapore, 2021.
- [15] J. Luca and D. Mrawira, “New Measurement of Thermal Properties of Superpave Asphalt Concrete”, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 1, pp. 72–79, 2005, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2005)17:1(72).