

PHÂN TÍCH TRUYỀN NHIỆT VÀ ỨNG SUẤT NHIỆT TRONG TẤM BÊ TÔNG XI MĂNG: NGHIÊN CỨU TRƯỜNG HỢP BÃI CONTAINER CẢNG TÂN VŨ - HẢI PHÒNG

HEAT TRANSFER AND THERMAL STRESS
IN PORTLAND CEMENT CONCRETE SLABS: A CASE STUDY
AT THE TAN VU PORT CONTAINER YARD, HAI PHONG

PHẠM THỊ LY, NGUYỄN PHAN ANH*

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: phananh.ctt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.919>

Tóm tắt

Bài báo phân tích cơ chế truyền nhiệt và ứng suất nhiệt trong tấm bê tông xi măng (BTXM) dày khoảng 30 cm tại bãi container Cảng Tân Vũ - Hải Phòng, trong điều kiện chịu bức xạ mặt trời mạnh và tải trọng nặng đặc trưng của khu vực cảng biển. Mô hình dẫn nhiệt Fourier một chiều (1D) được áp dụng kết hợp với các tham số nhiệt hiệu dụng của vật liệu nhằm mô phỏng phân bố nhiệt theo chiều sâu và đánh giá nguy cơ phát sinh ứng suất nhiệt trong tấm.

Kết quả mô phỏng cho thấy nhiệt độ bề mặt BTXM có thể đạt khoảng 60-65°C trong những ngày nắng gắt, tạo ra gradient nhiệt lớn theo chiều sâu. Trường nhiệt lan truyền sâu tới khoảng 20 cm, với chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và đáy tấm đạt khoảng 28-29°C, kéo theo ứng suất nhiệt ước tính khoảng 8,3MPa, vượt quá giới hạn chịu kéo uốn thông thường của BTXM. Phân tích nhạy cảm cho thấy hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng là tham số chi phối chính đến gradient nhiệt và ứng suất nhiệt, trong đó việc tăng hệ số dẫn nhiệt giúp giảm đáng kể nguy cơ nứt nhiệt. Các kết quả cung cấp cơ sở định lượng cho việc đánh giá phá hoại nhiệt và định hướng lựa chọn vật liệu, thiết kế kết cấu BTXM cho các công trình giao thông chịu tải trọng nặng tại khu vực cảng biển.

Từ khóa: Bê tông truyền nhiệt, bê tông xi măng, truyền nhiệt 1D, ứng suất nhiệt, hệ số dẫn nhiệt, mô phỏng nhiệt - cơ.

Abstract

This paper analyzes the heat transfer mechanism and thermal stress development in a 30-cm-thick cement concrete slab used in the container yard of Tan Vu Port, Hai Phong, under intense solar

radiation and heavy traffic loading typical of port environments. A one-dimensional (1D) Fourier heat conduction model, combined with effective thermal properties of concrete, is employed to simulate the temperature distribution through the slab depth and to assess the risk of thermally induced stresses.

The simulation results indicate that the concrete surface temperature can reach approximately 60-65°C during hot sunny days, leading to a pronounced thermal gradient through the slab. Heat penetration extends to about 20 cm, with a temperature difference between the surface and the slab bottom of approximately 28-29°C, resulting in an estimated thermal stress of about 8.3MPa, which exceeds the typical flexural tensile strength of ordinary cement concrete. Sensitivity analysis shows that effective thermal conductivity is the dominant parameter controlling the thermal gradient and thermal stress level, where higher conductivity significantly reduces the risk of thermal cracking. These findings provide a quantitative basis for evaluating thermal-induced damage and for material selection and design optimization of cement concrete pavements in heavy-duty port infrastructures.

Keywords: Thermally conductive concrete, portland cement concrete, 1D heat conduction, thermal stress, thermal conductivity, thermo-mechanical simulation.

1. Giới thiệu

Trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm của Việt Nam, nhiệt độ bề mặt bê tông vào mùa hè có thể tăng lên mức rất cao do bức xạ mặt trời và các nguồn nhiệt gián tiếp từ môi trường xung quanh. Nhiệt lượng này không chỉ làm tăng nhiệt độ bề mặt mà còn truyền sâu

vào trong kết cấu, gây ảnh hưởng đến trạng thái ứng suất-biến dạng và có thể làm bất lợi cho độ bền lâu, gia tăng nguy cơ nứt do tác động nhiệt, đặc biệt khi kết hợp với tải trọng lặp. Các nghiên cứu về dẫn nhiệt trong bê tông cho thấy gradient nhiệt lớn theo chiều sâu có thể tạo ra ứng suất nhiệt đủ lớn để gây nứt bề mặt hoặc phá hoại theo thời gian [1], đặc biệt trong các kết cấu có độ dày lớn như tấm bê tông xi măng trong hạ tầng giao thông. Trong môi trường cảng biển, tác động nhiệt càng trở nên đặc biệt rõ rệt. Bề mặt kho bãi rộng, ít bóng râm và thường xuyên tiếp xúc trực tiếp với bức xạ mặt trời. Các container kim loại có hệ số phản xạ nhiệt cao tạo ra các vùng nhiệt cục bộ, làm tăng nhiệt độ bề mặt bê tông so với môi trường đô thị thông thường. Đồng thời, tải trọng xe container nặng khiến kết cấu bê tông chịu tác động kết hợp giữa ứng suất cơ học và ứng suất nhiệt, từ đó làm tăng tốc độ hư hỏng. Tuy nhiên, mặc dù các nghiên cứu về dẫn nhiệt trong bê tông đã được thực hiện trong các bối cảnh khác nhau, phần lớn tập trung vào các cấu kiện chịu tác động nhiệt độ cực trị hoặc môi trường công nghiệp đặc biệt như chất lỏng cryogenic [2]. Theo khảo sát tài liệu của nhóm tác giả, hiện còn rất ít nghiên cứu trong nước đánh giá sự truyền nhiệt trong các tấm bê tông xi măng có kích thước lớn và vận hành liên tục trong điều kiện đặc thù của bãi container tại cảng biển.

Hơn nữa, các tham số nhiệt của bê tông như độ dẫn nhiệt hiệu dụng (trung đương), nhiệt dung riêng và hệ số khuếch tán nhiệt có mức độ biến thiên lớn tùy vào cấu trúc vi mô và loại cốt liệu sử dụng [3]. Điều này khiến việc mô hình hóa truyền nhiệt trong các kết cấu quy mô lớn đòi hỏi dữ liệu thực nghiệm và cách tiếp cận mô phỏng phù hợp. Khoảng trống nghiên cứu này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh nhu cầu nâng cấp hạ tầng cảng biển ngày càng tăng, trong đó kết cấu bê tông xi măng đóng vai trò chủ đạo.

Kết cấu bãi container tại Cảng Tân Vũ được thi công bằng tấm bê tông xi măng liền khối có chiều dày khoảng 28-32 (cm), đặt trên lớp móng cấp phối đá dăm dày 20-25 (cm). Tại bãi container, khảo sát thực địa ghi nhận nhiệt độ bề mặt BTXM có thể đạt khoảng 60-65°C vào các ngày nắng gắt. Chiều dày lớn của tấm khiến dòng nhiệt lan truyền theo phương sâu diễn ra chậm, tạo ra độ trễ nhiệt đáng kể giữa lớp bề mặt và các lớp dưới. Đặc điểm này làm cho BTXM trong môi trường cảng biển dễ xuất hiện gradient nhiệt lớn trong các ngày nắng đỉnh điểm, từ đó phát sinh biến dạng nhiệt không đồng nhất, có thể gây cong vênh và gia tăng nguy cơ nứt nhiệt, làm bất lợi cho tuổi thọ kết cấu. Đây là yếu tố quan trọng cần được phân tích khi

đánh giá cơ chế truyền nhiệt của các kết cấu BTXM chịu tải trọng nặng trong khu vực cảng.

Xuất phát từ nhu cầu thực tiễn đó, bài báo tập trung phân tích cơ chế truyền nhiệt theo chiều sâu của tấm bê tông xi măng tại bãi container Cảng Tân Vũ - Hải Phòng, sử dụng mô hình Fourier 1D kết hợp với bộ tham số vật liệu được tổng hợp từ các nghiên cứu quốc tế có liên quan. Thông qua mô phỏng và đánh giá phân bố nhiệt theo chiều sâu, bài báo phân tích nguy cơ phát sinh ứng suất nhiệt trong điều kiện khí hậu đặc trưng của khu vực cảng biển và đề xuất các hướng tối ưu vật liệu nhằm cải thiện khả năng kiểm soát truyền nhiệt cho các kết cấu BTXM tương tự. Hình 1 mô tả mặt đường BTXM tại vị trí cổng cảng.

2. Tổng quan

2.1. Cơ sở truyền nhiệt trong bê tông xi măng và ý nghĩa đối với kết cấu giao thông

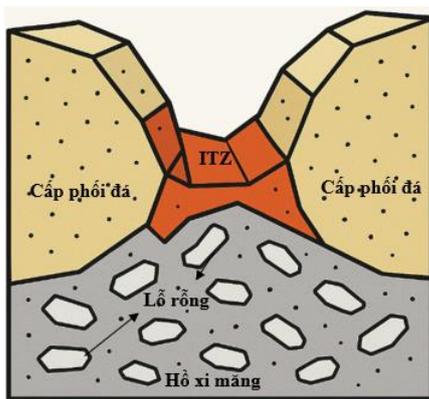


Hình 1. Cảng Tân Vũ (Nguồn: haiphongport.com.vn)

Truyền nhiệt trong bê tông xi măng là quá trình dẫn nhiệt qua môi trường rắn có độ khuếch tán nhiệt thấp, khiến vật liệu phản ứng chậm trước sự biến thiên nhiệt độ bề mặt. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng của bê tông thông thường dao động trong khoảng 1,0-1,8 (W/m·K) và hệ số khuếch tán nhiệt chỉ vào mức xấp xỉ 10-6 (m²/s), phản ánh bản chất truyền nhiệt chậm, đặc trưng của vật liệu có cấu trúc rỗng và phân bố pha phức tạp [3], [4]. Trong các mô hình truyền nhiệt ở quy mô kết cấu, bê tông thường được xem như môi trường liên tục tương đương với các tham số nhiệt hiệu dụng phản ánh ảnh hưởng tổng hợp của cấu trúc vi mô. Điều này đặc biệt quan trọng đối với các tấm BTXM trong công trình giao thông vì gradient nhiệt hình thành theo chiều sâu có thể đạt giá trị rất lớn trong thời gian ngắn, gây phát sinh biến dạng nhiệt không đồng nhất giữa các lớp. Kết quả của hiện tượng này là chênh lệch giãn nở nhiệt giữa bề mặt và lớp dưới, dẫn đến ứng suất kéo-nén luân phiên theo chu kỳ ngày-đêm.

Đối với mặt đường và bề mặt bãi container, nơi bức xạ mặt trời tác động trực tiếp lên diện tích rộng, các dữ liệu quan trắc thực địa tại bãi container chỉ ra rằng nhiệt độ bề mặt có thể tăng nhanh đến mức 60-65°C chỉ sau vài giờ phơi nắng. Các mô hình theo dõi nhiệt đã xác nhận dạng cong của trường nhiệt trong bê tông, với tốc độ giảm nhanh trong lớp bề mặt, và giảm chậm dần ở các lớp sâu hơn [1], [4]. Đặc điểm này cho thấy BTXM có năng lực tích nhiệt đáng kể, khiến các lớp sâu tiếp tục giữ nhiệt cao ngay cả khi bề mặt bắt đầu nguội đi vào cuối ngày. Chính quá trình lệch pha nhiệt này đã được nhiều nghiên cứu xác định là nguyên nhân chủ đạo gây ra hiện tượng cong vênh và nứt góc tấm - những dạng hư hỏng quen thuộc trong kết cấu BTXM làm việc dưới tải trọng lặp và chu kỳ nhiệt lớn.

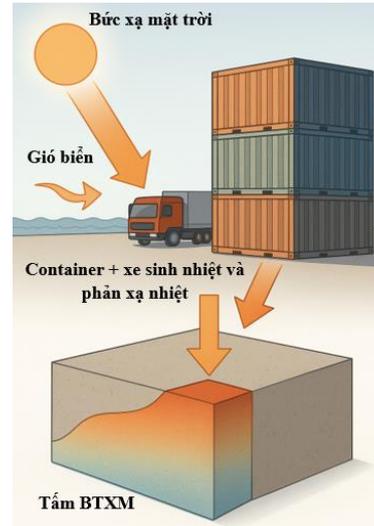
Mặt khác, cấu trúc vi mô của bê tông chịu ảnh hưởng mạnh khi tiếp xúc với nhiệt độ cao. Các nghiên cứu phân tích biến đổi vi mô cho thấy khi bê tông bị nung nóng, vùng chuyển tiếp ITZ, được mô phỏng như trong Hình 2 [5] (vùng chuyển tiếp giữa hạt cốt liệu và hồ xi măng trong bê tông. Đây là một lớp mỏng, dày khoảng 20-50 (µm), nhưng lại có ảnh hưởng rất lớn đến cơ tính và cơ chế truyền nhiệt - truyền ẩm của bê tông.) và cấu trúc gel C-S-H có thể suy giảm độ đặc chắc, làm thay đổi độ dẫn nhiệt và khả năng truyền nhiệt xuống các lớp sâu [4]. Điều này khiến trường nhiệt trong kết cấu BTXM không chỉ phụ thuộc vào tác động nhiệt bề mặt mà còn liên quan đến trạng thái ẩm và sự thay đổi vi mô theo thời gian, yếu tố đặc biệt quan trọng đối với kết cấu giao thông phải làm việc lâu dài trong điều kiện khí hậu khắc nghiệt.



Hình 2. Truyền nhiệt trong tấm BTXM

Những cơ sở thực nghiệm và cơ học này chứng minh rằng truyền nhiệt đóng vai trò trung tâm trong cơ chế làm việc của BTXM giao thông. Việc mô phỏng trường nhiệt theo chiều sâu là cần thiết để đánh giá ứng suất nội bộ và dự báo nguy cơ phá hoại nhiệt trong các kết cấu bãi container hoặc mặt đường bê

tông. Đây cũng chính là nền tảng để nghiên cứu hiện tại áp dụng mô hình truyền nhiệt Fourier 1D trong giả thiết truyền nhiệt chủ yếu theo phương vuông góc bề mặt cho tấm BTXM tại Cảng Tân Vũ. Mô phỏng cơ chế truyền nhiệt trong BTXM tại bãi container cảng biển được thể hiện như trong Hình 3.



Hình 3. Truyền nhiệt trong tấm BTXM

2.2. Xu hướng cải tiến vật liệu và khoảng trống nghiên cứu trong bối cảnh BTXM cảng biển

Cùng với việc đánh giá cơ chế truyền nhiệt, nhiều nghiên cứu đã tập trung cải thiện đặc tính nhiệt của BTXM nhằm kiểm soát gradient nhiệt và nâng cao độ bền kết cấu. Đối với các ứng dụng yêu cầu tăng tốc độ phân tán nhiệt, các loại bê tông dẫn nhiệt sử dụng sợi thép, hạt đồng hoặc sợi carbon cho thấy khả năng gia tăng độ dẫn nhiệt thêm 30-50% so với bê tông thường. Việc cải thiện độ dẫn nhiệt giúp giảm độ dốc trường nhiệt và theo đó giảm biên độ cong vênh trong tấm BTXM dưới bức xạ mặt trời. Nhiều nghiên cứu ứng dụng vào kết cấu tan băng tuyết cũng cho thấy bê tông dẫn nhiệt giúp ổn định phân bố nhiệt và làm giảm nguy cơ nứt mặt trong chu kỳ nhiệt ngày-đêm. Các kết quả này cung cấp cơ sở so sánh quan trọng để đánh giá vai trò của hệ số dẫn nhiệt đối với gradient nhiệt trong tấm BTXM thông thường.

Ngược lại, các vật liệu hướng đến hạn chế truyền nhiệt xuống lớp móng như bê tông tro bay, bê tông cốt liệu nhẹ hoặc bê tông có sợi tre lại có cấu trúc rỗng làm giảm độ dẫn nhiệt của vật liệu [10]. Những vật liệu này phù hợp cho các kết cấu yêu cầu bảo vệ lớp dưới khỏi tích nhiệt quá mức, nhất là trong các khu vực gần kho lạnh hoặc chịu vi khí hậu đặc biệt. Tuy nhiên, giảm độ dẫn nhiệt có thể làm bề mặt nóng hơn

Bảng 1. Truyền nhiệt trong tấm BTXM [6], [7], [8], [9]

Loại bê tông	λ (W/m·K)	C_p (kJ/kg·K)	ρ (kg/m ³)	α (10 ⁻⁶ m ² /s)
BT thường	1,2-1,8	0,75	2300-2400	0,9-1,1
BT UHPC + sợi thép	2,13-2,56	0,75	2400-2500	1,1-1,3
BT dẫn nhiệt (đồng/sợi)	tăng 30-45% so với BT thường	0,75	2300-2400	~1,4
BT cách nhiệt (LECA, tre)	0,8-1,4	0,70-0,75	1400-1800	0,5-0,8

trong thời gian ngắn, dẫn đến tăng ứng suất kéo bề mặt khi chênh lệch nhiệt lớn hình thành nhanh chóng. Điều này cho thấy việc lựa chọn vật liệu phải dựa trên mục tiêu thiết kế tổng thể và đặc điểm vận hành của công trình.

Mặc dù có nhiều nghiên cứu hướng đến cải tiến vật liệu theo hai hướng đối lập - tăng dẫn nhiệt hoặc giảm dẫn nhiệt - phần lớn các nghiên cứu này chỉ được thực hiện trên mẫu thí nghiệm kích thước nhỏ hoặc mô phỏng trong điều kiện biên lý tưởng. Theo khảo sát tài liệu của nhóm tác giả, hiện còn rất ít nghiên cứu nào đánh giá sự truyền nhiệt theo chiều sâu và cơ chế phát sinh ứng suất nhiệt trong các tấm BTXM diện tích lớn, đặt trong điều kiện thực tế tại cảng biển, nơi tác động của bức xạ mặt trời, phản xạ từ container kim loại và tải trọng xe container tạo thành một hệ tương tác nhiệt - cơ phức tạp. Khoảng trống này là nền tảng để nghiên cứu hiện tại hướng tới mô phỏng truyền nhiệt 1D [11] kết hợp phân tích ứng suất nhiệt cho tấm BTXM tại bãi container Cảng Tân Vũ, nhằm cung cấp bằng chứng định lượng cho sự thâm nhập nhiệt và dự báo nguy cơ phá hoại nhiệt trong thực tế vận hành. Tổng hợp đặc tính nhiệt điển hình của các loại bê tông trong nghiên cứu được đưa ra như trong Bảng 1.

3. Ứng dụng cụ thể: Phân tích truyền nhiệt trong tấm BTXM tại bãi container Cảng Tân Vũ - Hải Phòng

3.1. Mô tả điều kiện làm việc và xây dựng bài toán truyền nhiệt

Tấm bê tông xi măng tại khu vực bãi container Cảng Tân Vũ được thiết kế với chiều dày khoảng 30cm, thuộc nhóm kết cấu BTXM chịu tải trọng nặng thường sử dụng cho sân bãi cảng. Chiều dày lớn khiến quá trình lan truyền nhiệt theo phương sâu diễn ra chậm, làm tăng độ trễ nhiệt của kết cấu và khiến lớp dưới giữ nhiệt lâu hơn đáng kể so với bề mặt. Sự khác biệt này đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành trạng thái cong vênh của tấm dưới tác động của chu kỳ nhiệt ngày-đêm.

Bên cạnh đó, bãi container có diện tích mặt bằng lớn, bố trí liên tục và hầu như không có bóng râm che

phủ, khiến bề mặt BTXM chịu bức xạ mặt trời với cường độ cao trong nhiều giờ liên tục. Các container kim loại xung quanh làm gia tăng nhiệt lượng bằng cơ chế phản xạ nhiệt, làm nhiệt độ bề mặt tấm cao hơn so với các kết cấu giao thông thông thường. Quá trình di chuyển liên tục của xe đầu kéo - rơ-moóc cũng tạo thêm nhiệt do ma sát và tải trọng lặp, khiến bề mặt BTXM thường xuyên trong trạng thái chịu gia nhiệt cơ học kết hợp. Khảo sát thực địa cho thấy nhiệt độ bề mặt tấm bê tông có thể đạt tới 60-65°C vào những ngày nắng gắt, tạo nên chênh lệch 25-30°C so với nhiệt độ không khí. Đây là điều kiện điển hình dẫn đến hình thành gradient nhiệt lớn theo chiều sâu và là nguyên nhân trực tiếp gây ra các dạng biến dạng và ứng suất nhiệt trong tấm.

Trong môi trường này, dòng nhiệt lan truyền chủ yếu theo phương thẳng đứng vì chiều dài và chiều rộng của các tấm BTXM lớn hơn nhiều so với chiều dày. Điều đó cho phép mô hình hóa hiện tượng truyền nhiệt bằng phương pháp dẫn nhiệt một chiều (1D Fourier), với giả thiết rằng trường nhiệt theo phương mặt phẳng gần như đồng nhất. Bài toán truyền nhiệt được xác định bởi phương trình:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

Với các giả thiết biên:

- Bề mặt nhận nhiệt độ biên $T_s(t)$ thay đổi theo thời gian;

- Lớp dưới ($z=0,30m$) có tốc độ trao đổi nhiệt thấp, được xem như môi trường bán vô hạn;

- Đối lưu bề mặt được bỏ qua nhằm đơn giản hóa mô hình, phù hợp với phạm vi phân tích định hướng vật liệu.

Các giả thiết này tuân theo cách tiếp cận đã được kiểm chứng trong các nghiên cứu về truyền nhiệt trong bê tông chịu nhiệt độ cao [2], [4].

Hơn nữa, giả thiết rằng chiều dài và chiều rộng của tấm BTXM lớn hơn nhiều so với chiều dày, và điều kiện nhiệt bề mặt phân bố tương đối đồng đều trên

diện tích lớn, quá trình truyền nhiệt trong nghiên cứu này được xấp xỉ bằng bài toán dẫn nhiệt không ổn định một chiều theo phương vuông góc bề mặt. Cách tiếp cận Fourier 1D này được sử dụng nhằm đánh giá xu thế phân bố nhiệt theo chiều sâu và mức độ phát sinh gradient nhiệt trong tấm.

3.2. Mô hình toán và quy trình tính nhiệt độ theo chiều sâu tấm BTXM

Để mô phỏng sự lan truyền nhiệt, các tham số vật liệu được lựa chọn từ các nghiên cứu thực nghiệm:

- Hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng của bê tông $\lambda_{eq} = 1,8 W/m \cdot K$;
- Khối lượng riêng $\rho = 2400 kg/m^3$;
- Nhiệt dung riêng $C_p = 0,75 kJ/kg \cdot K$, phù hợp với các nghiên cứu về dẫn nhiệt của bê tông đặc và bê tông cường độ cao [3], [6].

Các tham số nhiệt nêu trên được xem là các giá trị hiệu dụng ở cấp độ kết cấu, phản ánh ảnh hưởng tổng hợp của cốt liệu, hồ xi măng, vùng chuyển tiếp ITZ và độ rỗng của bê tông. Từ đó hệ số khuếch tán nhiệt được tính:

$$\alpha = \frac{\lambda_{eq}}{\rho C_p} = \frac{1,8}{2400 \times 750} \approx 1,0 \times 10^{-6} m^2/s \quad (2)$$

Dưới tác động của bức xạ mạnh trong 3 giờ ($t = 10.800s$), chiều sâu thâm nhập nhiệt:

$$\delta = \sqrt{4\alpha t} = \sqrt{4 \times 10^{-6} \times 10800} \approx 0,208m \quad (3)$$

cho thấy vùng 0-20 (cm) là nơi chịu biến thiên nhiệt lớn nhất.

Dựa trên nghiệm gần đúng của bài toán truyền nhiệt bán vô hạn, nhiệt độ tại độ sâu z được tính theo [10]:

$$T(z, t) = T_s + (T_0 - T_s) \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (4)$$

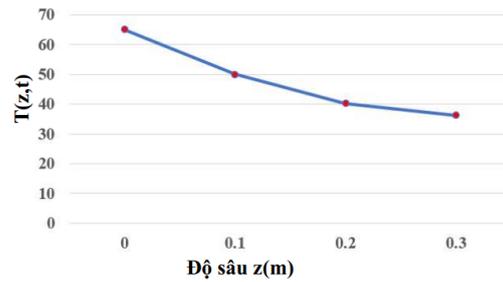
Với $T_s = 65^\circ C$ và $T_0 = 35^\circ C$ tương ứng là nhiệt độ bề mặt bê tông xi măng và nhiệt độ ban đầu của tấm; z là chiều sâu đo từ bề mặt xuống đáy tấm (m); $T(z, t)$ là nhiệt độ tại độ sâu z , thời gian t ;

Công thức (4) là nghiệm giải tích của bài toán dẫn nhiệt không ổn định một chiều trong môi trường bán vô hạn với điều kiện biên nhiệt độ bề mặt không đổi.

Với các độ sâu quan trọng đối với tấm BTXM:

- $z = 10cm$; $T(0,1, t) = 49,89^\circ C$;
- $z = 20cm$; $T(0,2, t) = 40,21^\circ C$;
- $z = 30cm$ (đáy tấm); $T(0,3, t) = 36,24^\circ C$.

Hình 4 ở trên thể hiện sự biến thiên nhiệt độ trong lớp BTXM theo độ sâu từ bề mặt xuống đáy tấm.



Hình 4. Biến thiên nhiệt độ theo độ sâu

Các giá trị này phù hợp với dạng đường cong và xu thế giảm theo chiều sâu được ghi nhận trong các thí nghiệm theo phương pháp truy vết nhiệt [1], cho thấy sự giảm nhiệt nhanh ở lớp trên và giảm chậm ở lớp sâu.

Một điểm quan trọng là độ trễ nhiệt giữa lớp trên và lớp dưới. Khi bề mặt nguội nhanh vào cuối buổi chiều, lớp dưới vẫn giữ nhiệt cao hơn, tạo ra trạng thái nhiệt ngược, vốn được xem là nguyên nhân chính gây cong vênh ngược, theo phân loại của PCA và AASHTO.

3.3. Phân tích ứng suất nhiệt và cơ chế phá hoại theo đặc trưng BTXM giao thông

Ứng suất nhiệt được ước tính theo giả thiết đàn hồi tuyến tính và phân bố nhiệt một chiều. Trên cơ sở phân bố nhiệt theo chiều sâu, ứng suất nhiệt được tính bằng:

$$\sigma = E\alpha_T \Delta T \quad (5)$$

Với mô đun đàn hồi $E = 32GPa$ và hệ số giãn nở nhiệt $\alpha_T = 9 \times 10^{-6}/^\circ C$.

Chênh lệch nhiệt giữa bề mặt ($65^\circ C$) và lớp sâu 20cm ($40,21^\circ C$) cho: $\Delta T = 24,79^\circ C$; $\sigma \approx 7,14MPa$;

Chênh lệch nhiệt giữa bề mặt ($65^\circ C$) và đáy tấm 30cm ($36,24^\circ C$) cho: $\Delta T = 28,76^\circ C$; $\sigma \approx 8,28MPa$;

Ứng suất này vượt quá giới hạn kéo uốn của BTXM (4,5-5,0 MPa), cho thấy nguy cơ phá hoại nhiệt là đáng kể ngay cả khi chưa xét đến tải trọng xe nặng.

Theo mô hình đánh giá độ bền tấm BTXM của AASHTO, ứng suất nhiệt sẽ cộng hưởng với ứng suất môi do tải lặp từ xe container. Sự kết hợp này đẩy trạng thái ứng suất vượt khỏi vùng an toàn, đặc biệt tại:

- Góc tấm;
- Mép tấm;
- Vùng gần khe co giãn.

Hiện tượng cong vênh được giải thích rõ dựa trên dạng trường nhiệt: lớp trên nóng hơn giãn nở mạnh \rightarrow mép tấm nâng lên; khi trời chuyển mát, lớp trên nguội nhanh, lớp dưới vẫn nóng \rightarrow mép tấm bị hút

Bảng 2. Tham số vật liệu và điều kiện biên đầu vào của mô hình Fourier 1D [10], [11]

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú	Tham số
Nhiệt độ bề mặt	T_s	65	$^{\circ}\text{C}$	Bức xạ cực đại	Nhiệt độ bề mặt
Nhiệt độ ban đầu của tấm	T_0	35	$^{\circ}\text{C}$	Đo thực tế	Nhiệt độ không khí
Dẫn nhiệt hiệu dụng	λ_{eq}	1,8	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	BTXM thường	Dẫn nhiệt
Nhiệt dung	C_p	0,75	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	750 $\text{J/kg}\cdot\text{K}$	Nhiệt dung
Khối lượng riêng	ρ	2400	kg/m^3	—	Khối lượng riêng
Khuếch tán nhiệt	α	1×10^{-6}	M^2/s	Tính toán	Khuếch tán nhiệt
Giãn nở nhiệt	α_T	9×10^{-6}	$1/^{\circ}\text{C}$	—	Giãn nở nhiệt
Mô đun đàn hồi	E	32	GPa	—	Mô đun đàn hồi
Thời gian phơi nắng	T	10.800	s	3 giờ	Thời gian phơi nắng
Chiều sâu thâm nhập	δ	0,208	m	Tính toán	Chiều sâu thâm nhập

xuống. Chu kỳ cong - võng này lặp lại hàng ngày, sinh ra ứng suất nhiệt môi. Đây là cơ chế khởi phát nứt cạnh tấm, nứt góc tấm, nứt chân chim và bong mặt - những dạng hư hỏng đã được ghi nhận phổ biến tại các bãi container lớn.

3.4. Phân tích nhạy cảm và hạn chế của mô hình

Việc đánh giá phân bố nhiệt và ứng suất nhiệt chỉ dựa trên một bộ tham số duy nhất có thể dẫn đến sai lệch trong diễn giải cơ học của kết cấu BTXM. Do đó, phân tích nhạy cảm được thực hiện nhằm xem xét mức độ ảnh hưởng của các tham số vật liệu và điều kiện biên đến kết quả mô phỏng. Kết quả cho thấy hệ số dẫn nhiệt λ là tham số chi phối mạnh nhất; khi λ tăng từ 1,8-2,5 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), gradient nhiệt giảm đáng kể, kéo theo sự suy giảm biên độ ứng suất nhiệt. Điều này phù hợp với cơ chế lan truyền nhiệt đã được ghi nhận trong các nghiên cứu về BTXM dẫn nhiệt và bê tông có bổ sung sợi kim loại. Ngược lại, khi λ giảm về vùng 1,0-1,2 ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), bề mặt bê tông giữ nhiệt lâu hơn, làm tăng tốc độ hình thành chênh lệch nhiệt theo chiều sâu và dẫn tới ứng suất kéo bề mặt lớn hơn. Các tham số ρ và C_p cũng tạo ra ảnh hưởng nhưng ở mức độ thấp hơn, chủ yếu tác động đến tốc độ đáp ứng nhiệt của vật liệu. Các tham số vật liệu và điều kiện biên phục vụ mô phỏng truyền nhiệt một chiều được tổng hợp và trình bày trong Bảng 2, làm cơ sở để xác định hệ số khuếch tán nhiệt và thiết lập mô hình Fourier 1D cho tấm bê tông xi măng tại bãi container.

Tuy nhiên, việc mô phỏng trong nghiên cứu này vẫn dựa trên mô hình dẫn nhiệt một chiều (Fourier 1D) với các giả thiết biên lý tưởng hóa. Mô hình không xét đến đối lưu bề mặt, không mô phỏng sự thay đổi hệ số dẫn nhiệt theo trạng thái ẩm và không tính đến các hiện tượng truyền nhiệt cục bộ tại mép tấm, khe co giãn hoặc khu vực chịu phản xạ nhiệt mạnh từ container. Những yếu tố này trong thực tế có

thể tạo ra trường nhiệt theo phương mặt phẳng (2D), làm biến dạng biên độ cong vênh khác biệt đáng kể so với mô hình 1D. Ngoài ra, sự kết hợp giữa ứng suất nhiệt và ứng suất môi do tải trọng lặp của xe container cũng không được mô phỏng trong khuôn khổ nghiên cứu này, dù đây là cơ chế phá hoại phổ biến tại các bãi container.

Trong tương lai, các nghiên cứu mở rộng [12] nên sử dụng mô hình phần tử hữu hạn 2D-3D để mô tả đầy đủ hơn tác động của bức xạ không đồng nhất, hiệu ứng che bóng từng phần và sự tích nhiệt cục bộ tại vùng mép tấm. Đồng thời, cần tích hợp mô hình liên hợp nhiệt - cơ - để đánh giá ứng suất môi theo chu kỳ nhiệt - tải trọng, phản ánh sát hơn điều kiện làm việc thực tế của các kết cấu BTXM tại khu vực cảng biển. Đây sẽ là hướng phát triển quan trọng nhằm nâng cao độ tin cậy của mô phỏng và hỗ trợ quá trình tối ưu vật liệu cho mục tiêu kiểm soát truyền nhiệt trong các công trình giao thông chịu tải trọng nặng.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã phân tích cơ chế truyền nhiệt và ứng suất nhiệt trong tấm bê tông xi măng (BTXM) dày khoảng 30cm tại bãi container Cảng Tân Vũ - Hải Phòng bằng mô hình dẫn nhiệt Fourier một chiều (1D), sử dụng các tham số nhiệt hiệu dụng của vật liệu. Kết quả mô phỏng cho thấy nhiệt độ bề mặt BTXM trong điều kiện nắng gắt có thể đạt khoảng 60-65 $^{\circ}\text{C}$, phù hợp với quan trắc thực địa, từ đó hình thành gradient nhiệt lớn theo chiều sâu của tấm.

Trường nhiệt lan truyền sâu tới khoảng 20cm sau vài giờ chịu bức xạ, tạo nên phân bố nhiệt dạng cong đặc trưng của bài toán dẫn nhiệt không ổn định trong môi trường rắn. Chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và đáy tấm có thể đạt khoảng 28-29 $^{\circ}\text{C}$, kéo theo ứng suất nhiệt ước tính lên tới khoảng 8,3MPa, vượt đáng kể giới hạn chịu kéo uốn thông thường của BTXM. Kết

quả này giải thích cơ chế xuất hiện cong vênh, nứt bề mặt và nứt góc tấm - những dạng hư hỏng phổ biến trong các kết cấu BTXM chịu tải trọng nặng tại khu vực cảng biển.

Phân tích nhạy cảm cho thấy hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng là tham số chi phối mạnh nhất đến gradient nhiệt và ứng suất nhiệt trong tấm. Việc tăng hệ số dẫn nhiệt giúp cải thiện khả năng lan truyền nhiệt và giảm biên độ ứng suất nhiệt, trong khi các loại bê tông có hệ số dẫn nhiệt thấp làm gia tăng nguy cơ nứt nhiệt. Mặc dù mô hình Fourier 1D phản ánh hợp lý xu thế truyền nhiệt theo chiều sâu, các hiệu ứng hai chiều tại mép tấm, khe co giãn và sự kết hợp với tải trọng xe lạp chưa được xét đến. Đây là hướng cần được mở rộng trong các nghiên cứu tiếp theo bằng mô hình nhiệt - cơ 2D-3D nhằm phản ánh đầy đủ hơn điều kiện làm việc thực tế.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.95**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Li, Z. Huang, G. Li, X. Wu, and P. Yan, (2017), *Study of the conductive heat flux from concrete to liquid nitrogen by solving an inverse heat conduction problem*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.48, pp.48-54.
- [2] T. Olewski, S. Mannan, and L. Véchet, (2015), *Validation of liquid nitrogen vaporisation rate by small scale experiments and analysis of the conductive heat flux from the concrete*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.35, pp.277-282.
- [3] F. Cheng, J. Chen, and X. Wei, (2025), *Thermal tracing method for surface spalling monitoring in underwater concrete structures*, Construction and Building Materials, Vol.489, p. 142445.
- [4] H. Qiu, H. Chen, P. Song, Y. Liu, Q. Zhang, and Y. Wu, (2025), *The effect of heat transfer behavior on the temperature field distribution characteristics and heating effect of concrete containing magnetite during microwave heating*, Construction and Building Materials, Vol.472, p. 140787.
- [5] H. J. Jeong, S. W. Hyun, J. H. Kim, and D. H. Shin, (2025), *A study on the thermal performance of pipes embedded in concrete pavement for snow removal using latent heat thermal energy storage*, Applied Thermal Engineering, p. 127358.
- [6] M. L. Rahman, A. Malakooti, H. Ceylan, S. Kim, and P. C. Taylor, (2022), *A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation*, Construction and Building Materials, Vol.329, p. 127139.
- [7] X. Ji, Y. Ge, M. Li, L. Wang, and S. Liu, (2023), *Preparation of carbon fiber conductive concrete and study on its mechanical and heating properties*, Journal of Materials Research and Technology, Vol.27, pp.3029-3040.
- [8] Y. Wu, Y. Li, C. Li, X. Liu, W. Zhu, S. Yao, and H. Wang, (2025), *Snow-melting behavior enhancement mechanism of rGO-CF-SF ternary electrically conductive concrete for cold-region road surfaces*, Construction and Building Materials, Vol.485, p. 141928.
- [9] H. S. Kim, C. Jang, H. G. Kim, and B. H. Woo, (2024), *Snow-melting performance of the thermally conductive concrete pavement-experimental evaluation in field application*, Construction and Building Materials, Vol.411, p. 134508.
- [10] X. Wang, X. Liu, C. Zhao, P. Zhu, and H. Liu, (2023), *The permeability, mechanical and snow melting performance of graphene composite conductive-pervious concrete*, Journal of Building Engineering, Vol.79, p. 107929.
- [11] X. Wang, H. Wu, P. Zhu, C. Chen, H. Liu, X. Yan, and C. Zhao, (2024), *Study on physical properties and snow-melting performance of multilayer composite conductive-pervious concrete for improving the snow-melting efficiency and energy consumption of ECON*, Construction and Building Materials, Vol.446, p. 137969.
- [12] C. Zhao, W. Dong, J. Liu, S. Peng, and W. Li, (2025), *Toward intelligent buildings and civil infrastructure: A review on multifunctional concrete through nanotechnology*, Cement & Concrete Composites, Vol.163.

Ngày nhận bài:	25/11/2025
Ngày nhận bản sửa:	10/12/2025
Ngày duyệt đăng:	10/01/2026