Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (6V): 82–94

CẢI TIẾN PHƯƠNG PHÁP ĐO TRONG THÍ NGHIỆM MÔ ĐUN ĐỘNG NHẰM XÁC ĐỊNH ỨNG XỬ 3D CỦA VẬT LIỆU BÊ TÔNG NHỰA

Nguyễn Quang Tuấn[a], Bùi Văn Phú[a,*]

[a]*Trường Đại học Giao thông Vận tải, số 3 Cầu Giấy, phường Láng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 31/7/2026, Sửa xong 11/9/2026, Chấp nhận đăng 16/9/2026

Tóm tắt

Mô đun động và hệ số Poisson động là hai thông số quan trọng được sử dụng để đặc trưng cho ứng xử đàn nhớt tuyến tính của bê tông nhựa. Tuy nhiên, phần lớn các hệ thống thí nghiệm mô đun động thương mại hiện nay tại Việt Nam chủ yếu chỉ xác định được độ lớn của mô đun động. Hệ số Poisson động thường không được đo hoặc giả định là hằng số. Nghiên cứu này trình bày một hệ thống thí nghiệm mô đun động Cooper được cải tiến, cho phép đo đồng thời biến dạng dọc trục và biến dạng ngang của mẫu bê tông nhựa. Các dữ liệu đo thông qua xử lý cho phép xác định đồng thời mô đun động và hệ số Poisson động trong các điều kiện tải trọng và nhiệt độ. Hệ thống này được bổ sung các đầu đo chuyển vị ngoài, một cảm biến lực đặt dưới đáy mẫu và hệ thống thu nhận dữ liệu thời gian thực nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng kiểm soát quá trình thí nghiệm. Kết quả cho thấy hệ thống đề xuất cung cấp các phép đo ổn định và tin cậy đối với cả biến dạng dọc trục và biến dạng ngang, cho phép đánh giá đầy đủ hơn ứng xử đàn nhớt tuyến tính của bê tông nhựa, phục vụ cho phân tích và thiết kế áo đường theo hướng cơ học – thực nghiệm.

Từ khoá: bê tông nhựa; hệ số Poisson động; mô đun động; ứng xử đàn nhớt tuyến tính; cải tiến phương pháp đo.

IMPROVEMENT OF MEASUREMENT METHODS IN DYNAMIC MODULUS TESTING FOR 3D CHARACTERIZATION OF ASPHALT CONCRETE BEHAVIOR

Abstract

The dynamic modulus $|E^*|$ and the dynamic Poisson's ratio $|\nu^*|$ are two essential properties used to characterize the linear viscoelastic behavior of asphalt mixtures. However, most commercially available dynamic modulus testing systems currently used in Vietnam are capable of determining only the magnitude of the dynamic modulus. The dynamic Poisson's ratio is generally not measured or is assumed to be constant. This study presents a modified Cooper dynamic modulus testing system capable of simultaneously measuring the axial and radial deformations of asphalt mixture specimens. By processing the measured data, both the dynamic modulus and the dynamic Poisson's ratio can be determined under identical loading and temperature conditions. The system incorporates external displacement transducers, an additional load cell installed beneath the specimen, and a real-time data acquisition system to improve measurement accuracy and experimental process control. Experimental results demonstrate that the proposed system provides stable and reliable measurements of both axial and radial deformations, enabling a more comprehensive evaluation of the linear viscoelastic behavior of asphalt mixtures and supporting mechanistic–empirical pavement analysis and design.

Keywords: asphalt mixtures; dynamic Poisson's ratio; dynamic modulus; linear viscoelastic behavior; measurement method improvement.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(6V)-07 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Trong thiết kế và phân tích kết cấu áo đường theo hướng cơ học – thực nghiệm (Mechanistic–Empirical, M–E), việc xác định chính xác các đặc trưng đàn nhớt của bê tông nhựa có ý nghĩa quyết định đến độ tin cậy của mô hình tính toán. Trong đó, mô đun động $|E^*|$ phản ánh khả năng chịu tải của vật liệu dưới tác dụng đồng thời của nhiệt độ và tần số gia tải, trong khi hệ số Poisson động $|\nu^*|$ mô tả mối quan hệ giữa biến dạng dọc trục và biến dạng ngang dưới tải trọng động. Hai thông số này,

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* buiphugt@utc.edu.vn (Phú, B. V.)

khi được xác định đồng thời trong cùng điều kiện thí nghiệm, cho phép mô tả đầy đủ hơn ứng xử đàn nhớt của bê tông nhựa và cung cấp các tham số đầu vào quan trọng cho các mô hình phân tích kết cấu áo đường theo hướng cơ học – thực nghiệm.

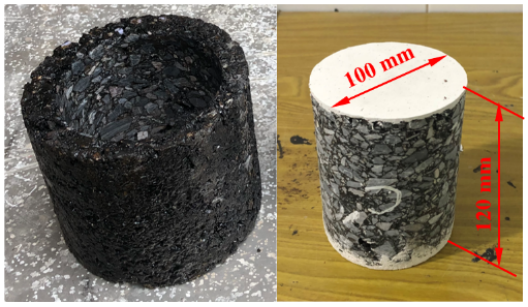
Tuy nhiên, việc xác định đồng thời $|E^*|$ và $|\nu^*|$ trong thực nghiệm vẫn còn là một thách thức. Phần lớn các hệ thống thí nghiệm mô đun động hiện nay ở Việt Nam, chẳng hạn như cấu hình nguyên bản của Cooper Research Systems NU-14 hoặc Nottingham Asphalt Tester (NAT), chủ yếu được thiết kế để xác định độ lớn của mô đun động theo các tiêu chuẩn như AASHTO T342 [1] hoặc ASTM D3497 [2]. Các hệ thống này thường chỉ được trang bị các đầu đo biến dạng dọc trục nhằm ghi nhận ứng xử của vật liệu theo phương tác dụng của tải trọng. Trong khi đó, việc đo biến dạng nở hông để xác định hệ số Poisson động hầu như chưa được tích hợp trong các cấu hình tiêu chuẩn. Nguyên nhân chủ yếu là do biên độ biến dạng ngang rất nhỏ, dễ chịu ảnh hưởng của dao động môi trường, sai số cảm biến và nhiễu tín hiệu trong quá trình đo. Bên cạnh những hạn chế về thiết bị thí nghiệm, số lượng các nghiên cứu về hệ số Poisson động của các loại bê tông nhựa trên thế giới vẫn còn tương đối hạn chế. Vì vậy, trong phần lớn các nghiên cứu cũng như trong các ứng dụng thực tế, hệ số Poisson động thường được giả định là một hằng số (khoảng 0,35–0,45) hoặc được lấy từ các tài liệu tham khảo thay vì được xác định trực tiếp bằng thực nghiệm. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng hệ số Poisson động phụ thuộc đáng kể vào nhiệt độ, tần số gia tải cũng như thành phần cấp phối của hỗn hợp bê tông nhựa [3–7].

Báo cáo của FHWA/CAIT (2013) [8] chỉ ra rằng mặc dù hệ số Poisson thường được giả định không đổi trong các mô hình thiết kế áo đường, kết quả phân tích độ nhạy cho thấy sự thay đổi của tham số này có thể ảnh hưởng đáng kể đến kết quả dự đoán ứng suất, biến dạng, độ võng cũng như tuổi thọ của kết cấu áo đường. Tương tự, nghiên cứu NCHRP Project 01-47 (2010) [9] cũng cho thấy việc giả định không chính xác hệ số Poisson động có thể gây sai số từ 5–15% trong phân bố ứng suất và biến dạng của lớp mặt, đặc biệt dưới điều kiện nhiệt độ cao hoặc tải trọng lặp lớn. Những kết quả này cho thấy việc xác định chính xác hệ số Poisson động là cần thiết nhằm nâng cao độ tin cậy của các mô hình phân tích và thiết kế áo đường theo hướng cơ học – thực nghiệm. Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này trình bày một giải pháp cải tiến hệ thống thí nghiệm Cooper Research NU-14 nhằm đo đồng thời biến dạng dọc trục và biến dạng ngang của mẫu bê tông nhựa. Trên cơ sở đó, mô đun động $|E^*|$ và hệ số Poisson động $|\nu^*|$ được xác định đồng thời trong cùng một điều kiện tải trọng và nhiệt độ.

2. Thực hiện thí nghiệm

2.1. Mẫu thí nghiệm

Để thử nghiệm phương pháp đo cải tiến, một loại bê tông nhựa thông thường ở Việt Nam được lựa chọn trong nghiên cứu. Các thông số cơ bản của hỗn hợp gồm đường kính danh định lớn nhất của cấp phối, loại nhựa đường, hàm lượng nhựa và độ rỗng dư của các mẫu bê tông nhựa (BTN) được trình bày trong Bảng 1. Để nâng cao độ chính xác của các phép đo, các mẫu thí nghiệm ban đầu được chế tạo dạng hình trụ với chiều cao 120 mm và đường kính 150 mm. Sau đó, mẫu được khoan lấy lõi đường kính 100 mm nhằm tạo bề mặt phẳng, nhẵn, thuận lợi cho việc gắn các đầu đo biến dạng. Đồng thời, việc sử dụng phần lõi cũng làm tăng



Hình 1. Mẫu bê tông nhựa

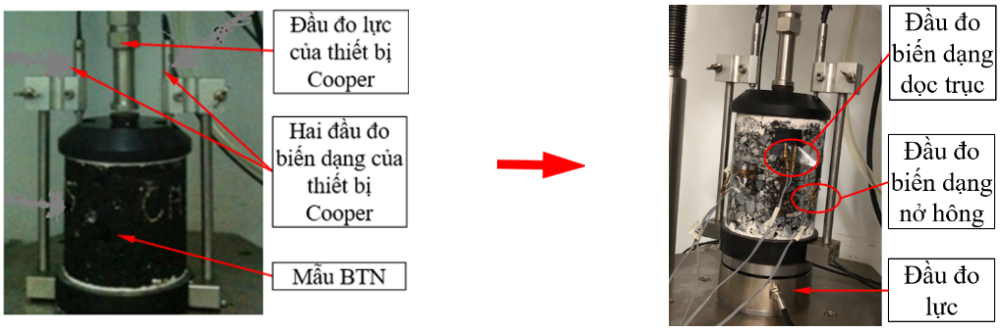
tính đồng nhất vật liệu của mẫu thí nghiệm (Hình 1). Thí nghiệm được thực hiện lặp với 3 mẫu bê tông nhựa. Giá trị được sử dụng trong phân tích là giá trị trung bình cộng của 3 mẫu.

Bảng 1. Các thông số của mẫu bê tông nhựa thí nghiệm

Cỡ hạt danh định lớn nhất (mm)	Loại nhựa đường	Hàm lượng nhựa (%)	Độ rỗng dư (%)
16	Nhựa đường Polyme PMB III	4,8	4,48

2.2. *Thiết bị thí nghiệm*

Hình 2(a) trình bày hệ thống thí nghiệm mô đun động Cooper Research NU-14 sử dụng tải trọng nén động theo phương dọc trục trên mẫu bê tông nhựa. Trong cấu hình nguyên bản, hệ thống chỉ được trang bị hai đầu đo biến dạng dọc trục, do đó chỉ xác định được mô đun động $|E^*|$ mà không thể xác định hệ số Poisson động $|\nu^*|$. Bên cạnh đó, hệ thống nguyên bản cũng không cho phép thu nhận đồng thời tín hiệu lực và biến dạng theo thời gian thực, nên không thể xác định trực tiếp góc lệch pha giữa ứng suất và biến dạng.



(a) Cấu hình nguyên bản (b) Cấu hình sau cải tiến

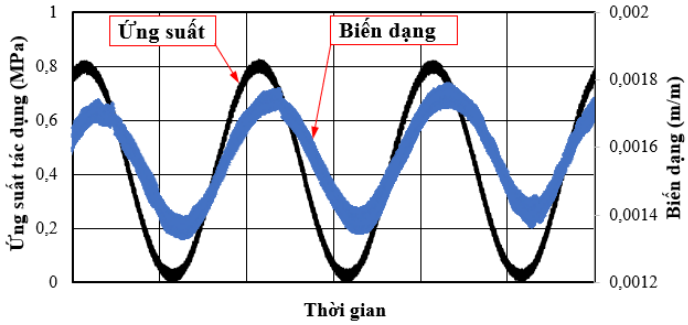
Hình 2. Thiết bị thí nghiệm Cooper

Trong nghiên cứu này, hệ thống được cải tiến bằng cách bổ sung hai đầu đo biến dạng dọc trục, hai đầu đo biến dạng ngang và một đầu đo lực đặt tại đáy mẫu, như minh họa trong Hình 2(b). Các đầu đo được cố định trực tiếp lên bề mặt mẫu bằng keo dán chuyên dụng nhằm không làm phát sinh lực cưỡng bức và không làm cản trở sự biến dạng tự nhiên của vật liệu. Để giảm thiểu sai số do sự không đồng nhất cục bộ của vật liệu, các đầu đo được bố trí đối xứng và xen kẽ chính xác tại vùng giữa thân mẫu. Ngoài ra, ở trạng thái nghỉ (khi chưa tác dụng tải trọng), hệ thống thu nhận dữ liệu được kiểm tra để đảm bảo tín hiệu thu được hoàn toàn ổn định và không xuất hiện biến dạng giả trước khi tiến hành thí nghiệm. Toàn bộ tín hiệu từ các đầu đo lực và đầu đo biến dạng được thu nhận đồng thời theo thời gian thực. Trong quá trình xử lý số liệu, biến dạng dọc trục và biến dạng ngang được xác định bằng giá trị trung bình của hai đầu đo tương ứng.

2.3. *Thí nghiệm mô đun động*

Thí nghiệm mô đun động được thực hiện tại sáu mức nhiệt độ: 10, 20, 30, 40, 50 và 60 °C. Ở mỗi nhiệt độ, tải trọng nén hình sin được tác dụng lên mẫu với các tần số gia tải 10, 5, 1, 0,5 và 0,1 Hz. Các thí nghiệm được tiến hành theo trình tự từ nhiệt độ thấp đến nhiệt độ cao; tại mỗi nhiệt độ, tần số gia tải được giảm dần từ cao xuống thấp. Để đảm bảo biến dạng dọc trục luôn nằm trong miền đàn nhớt tuyến tính, biên độ lực tác dụng lên mẫu được lựa chọn dựa trên khuyến nghị của hướng dẫn sử

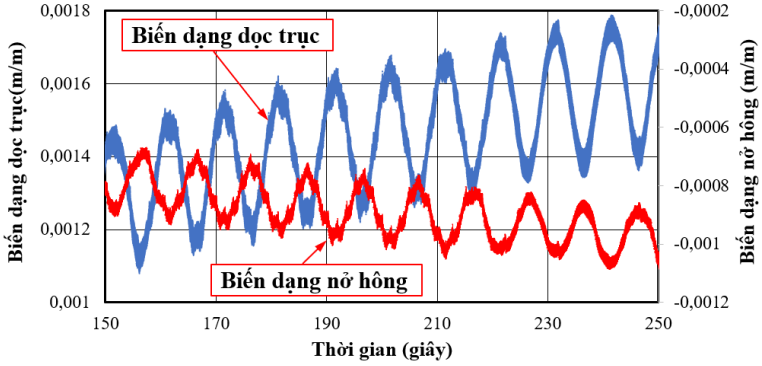
dụng của hệ thống thí nghiệm Cooper kết hợp với phương pháp thử dần trên mẫu thử. Căn cứ vào kết quả thu được trên mẫu thử, biên độ lực tác dụng được xác định linh hoạt theo nhiệt độ thí nghiệm. Trong nghiên cứu này, biên độ lực tác dụng có giá trị trong khoảng từ 7,9 kN (ở nhiệt độ thấp) đến 1,2 kN (ở nhiệt độ cao). Dưới tác dụng của tải trọng điều hòa, ứng suất và biến dạng đều có dạng hình sin; tuy nhiên, do đặc tính đàn nhớt của vật liệu, biến dạng xuất hiện trễ pha so với ứng suất một góc φ (Hình 3).



Hình 3. Ứng suất - biến dạng trong thí nghiệm mô đun động

3. Phương pháp xử lý kết quả đo

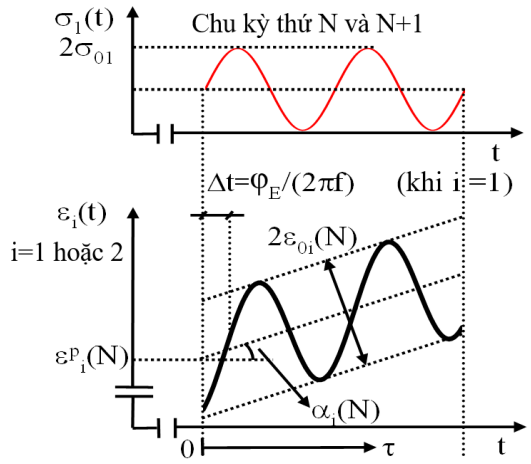
Các tín hiệu được ghi nhận trong quá trình thí nghiệm bao gồm lực tác dụng, biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông. Toàn bộ các tín hiệu này được thu nhận đồng thời và liên tục trong suốt quá trình thí nghiệm thông qua hệ thống thu thập dữ liệu bên ngoài với tần suất 500 điểm đo mỗi giây. Hình 4 trình bày một ví dụ về các tín hiệu thu được tại nhiệt độ 30 °C và tần số gia tải 0,1 Hz.



Hình 4. Tín hiệu đo biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông theo thời gian

Kết quả thí nghiệm cho thấy biến dạng của mẫu bao gồm hai thành phần: thành phần biến dạng tích lũy theo thời gian (biến dạng từ biến) và thành phần dao động tuần hoàn do tải trọng hình sin gây ra. Để minh họa rõ hơn đặc điểm này, Hình 5 biểu diễn sự phát triển của ứng suất và biến dạng theo thời gian trong hai chu kỳ gia tải liên tiếp, trong đó:

- τ là khoảng thời gian của 2 chu kỳ liên tiếp N và $N + 1$, biến thiên từ 0 đến $2/f$.
- $\varepsilon_i^p(N)$ là biến dạng tích lũy đến chu kỳ thứ N ($i = 1$ chỉ biến dạng dọc trục; $i = 2$ chỉ biến dạng nở hông).
- $\alpha_i(N)$ là độ tăng biến dạng tại chu kỳ thứ N.
- $\varepsilon_{0i}(N)$ là biên độ biến dạng tại chu kỳ thứ N.



Hình 5. Sự phát triển của biến dạng dọc trục (nở hông) trong hai chu kỳ tác dụng lực hình sin

Khi đó ứng suất và biến dạng là hàm của thời gian và được tính toán theo các công thức sau:

$$\sigma_1(t) = \sigma_{01} + \sigma_{01}\sin(2\pi f t + \varphi_{\sigma 1}) \tag{1}$$

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_1(N,\tau) = \alpha_1(N)\tau + \varepsilon_1^p(N) + \varepsilon_{01}(N)\sin(2\pi f\tau + \varphi_{\varepsilon 1}) \tag{2}$$

$$\varepsilon_2(t) = \varepsilon_2(N,\tau) = \alpha_2(N)\tau + \varepsilon_2^p(N) + \varepsilon_{02}(N)\sin(2\pi f\tau + \varphi_{\varepsilon 2}) \tag{3}$$

trong đó $\varphi_{\varepsilon 1}$ và $\varphi_{\varepsilon 2}$ tương ứng là góc lệch pha biến dạng dọc trục với tải trọng tác dụng và biến dạng nở hông với biến dạng dọc trục.

Mô đun phức được xác định theo Công thức (4), trong khi hệ số Poisson phức được xác định theo Công thức (5). Trong cả hai trường hợp, chỉ thành phần dao động điều hòa (hàm sin) của các tín hiệu lực và biến dạng trong các Công thức (1)–(3) được sử dụng để tính toán. Nhờ đó, thành phần biến dạng tích lũy (không hồi phục) phát sinh trong quá trình gia tải được loại bỏ.

$$E^* = \frac{\sigma_{01}}{\varepsilon_{01}} e^{j(\varphi_{\sigma 1} - \varphi_{\varepsilon 1})} = |E^*| e^{j\varphi_E}) \tag{4}$$

$$\nu^* = -\frac{\varepsilon_{02}}{\varepsilon_{01}} e^{j(\varphi_{\varepsilon 2} - \varphi_{\varepsilon 1})} = \frac{\varepsilon_{02}}{\varepsilon_{01}} e^{j(\varphi_{\varepsilon 2} - \varphi_{\varepsilon 1} - \pi)} = |\nu^*| e^{j\varphi_\nu} \tag{5}$$

với số phức j có $j^2 = -1$.

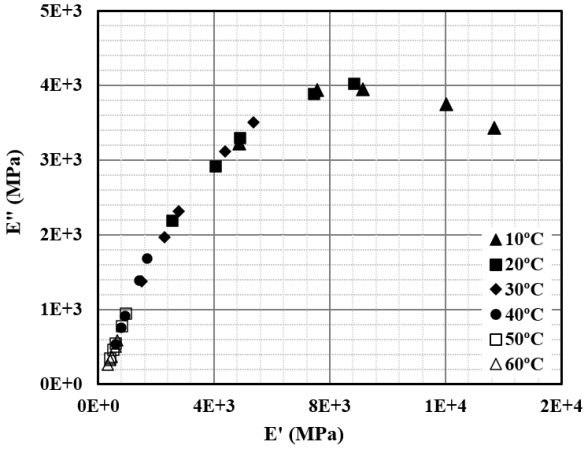
4. Phân tích kết quả

Với hệ thống thí nghiệm được cải tiến kết hợp với phương pháp xử lý số liệu được trình bày ở trên, ngoài mô đun động, nhiều thông số đàn nhớt khác của vật liệu cũng được xác định, trong khi các thông số này không thể thu được bằng cấu hình mặc định của thiết bị.

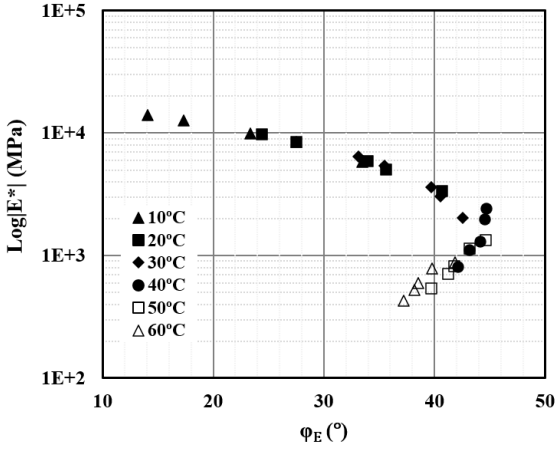
4.1. Mô đun động và góc lệch pha của mô đun động

Nhờ việc thu nhận đồng thời tín hiệu lực và biến dạng dọc trục theo thời gian thực, nghiên cứu không chỉ xác định được giá trị mô đun động $|E^*|$ tại từng điều kiện nhiệt độ và tần số mà còn xác định được góc lệch pha φ giữa ứng suất và biến dạng dọc trục (Hình 3). Trên cơ sở đó, Hình 6 và Hình 7 lần lượt trình bày biểu đồ Cole–Cole và biểu đồ Black của vật liệu nghiên cứu. Trong biểu đồ Cole–Cole, phần thực của mô đun phức ($E' = |E^*|\cos\varphi$) được biểu diễn theo phần ảo ($E'' = |E^*|\sin\varphi$). Trong khi đó, biểu đồ Black biểu diễn mối quan hệ giữa mô đun động $|E^*|$ và góc lệch pha φ. Có thể thấy

rằng toàn bộ các kết quả thí nghiệm tạo thành một đường cong liên tục duy nhất, không phụ thuộc vào nhiệt độ và tần số gia tải. Điều này xác nhận rằng vật liệu nghiên cứu tuân theo nguyên tắc tương quan nhiệt độ – tần số (Time–Temperature Superposition Principle – TTSP) và ứng xử trong miền đàn nhớt tuyến tính [10, 11].



Hình 6. Biểu đồ Cole-Cole



Hình 7. Biểu đồ Black

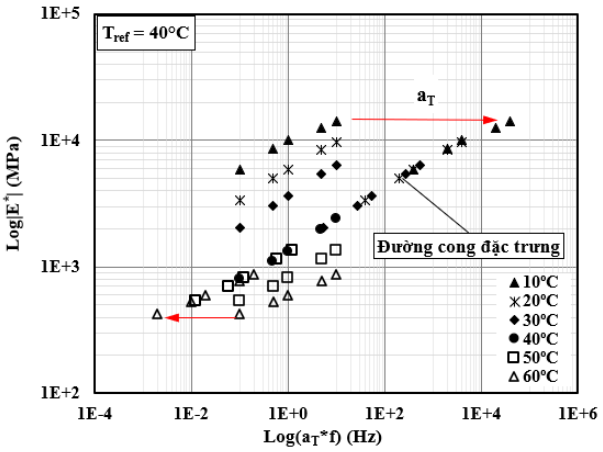
Do vật liệu thỏa mãn nguyên tắc TTSP, các đường đẳng nhiệt của mô đun động có thể được dịch chuyển bằng các hệ số dịch chuyển a_T để xây dựng đường cong đặc trưng (master curve) tại nhiệt độ tham chiếu 40 °C, như thể hiện trên Hình 8. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng đường cong đặc trưng của góc lệch pha φ cũng được xây dựng bằng cùng hệ số dịch chuyển với mô đun động. Vì vậy, Hình 9 trình bày đường cong đặc trưng của góc lệch pha tại cùng nhiệt độ tham chiếu. Các đường cong đặc trưng này cho phép dự báo tính chất đàn nhớt của vật liệu trên một dải rộng các điều kiện nhiệt độ và tần số vượt ra ngoài phạm vi thí nghiệm, đồng thời cung cấp các tham số đầu vào quan trọng cho các mô hình mô phỏng để sử dụng cho các công tác dự báo ứng xử của vật liệu cũng như cho công tác thiết kế kết cấu áo đường theo phương pháp Cơ học – Thực nghiệm (M–E) [12].

Bên cạnh đó, việc xác định được góc lệch pha φ còn cho phép tính toán năng lượng tiêu tán của vật liệu trong mỗi chu kỳ tải theo Công thức (6).

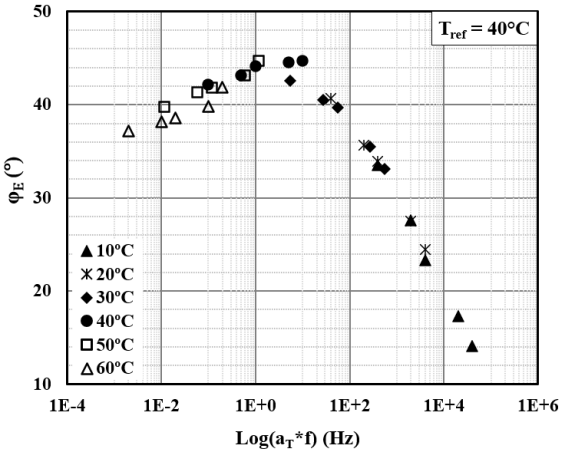
$$W_N = \pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin\varphi \tag{6}$$

trong đó W_N là năng lượng hao tán trong một chu kỳ gia tải (J/m^3); σ_0 và ε_0 lần lượt là biên độ ứng suất tác dụng và biến dạng thu được; φ là góc lệch pha giữa ứng suất và biến dạng.

Đại lượng này phản ánh phần năng lượng cơ học bị tiêu hao do ứng xử đàn nhớt của bê tông nhựa. Đối với vật liệu đàn hồi thuần túy ($\varphi = 0$), toàn bộ năng lượng biến dạng được phục hồi và năng lượng tiêu tán bằng không. Ngược lại, đối với bê tông nhựa, do tồn tại thành phần đàn nhớt, một phần năng lượng được chuyển hóa thành nhiệt và ma sát nội trong mỗi chu kỳ tải, dẫn đến năng lượng tiêu tán khác không. Theo Công thức (6), năng lượng tiêu tán tỷ lệ với giá trị $\sin\varphi$, do đó tăng khi góc lệch pha tăng. Vì vậy, đây là một thông số quan trọng phản ánh mức độ đàn nhớt của vật liệu và được sử dụng để đánh giá khả năng tiêu tán năng lượng cũng như phân tích ứng xử của bê tông nhựa dưới tác dụng của tải trọng lặp. Trong nhiều nghiên cứu, năng lượng tiêu tán đã được sử dụng như một chỉ tiêu quan trọng để phân tích quá trình tích lũy hư hỏng của bê tông nhựa dưới tải trọng lặp, bao gồm cả hư hỏng do mỏi và sự phát triển của biến dạng vĩnh cửu [13, 14].



Hình 8. Đường cong đặc trưng của mô đun động

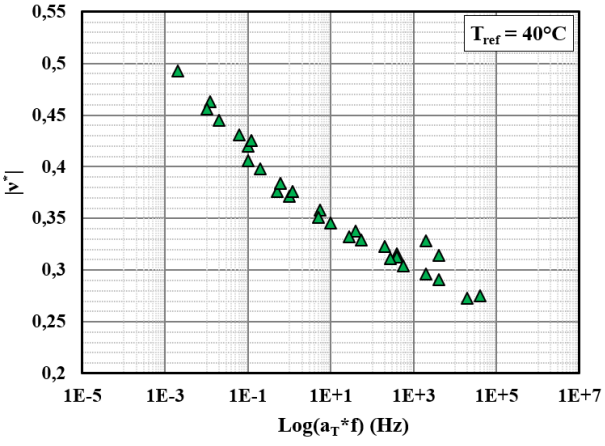


Hình 9. Đường cong đặc trưng của góc lệch pha

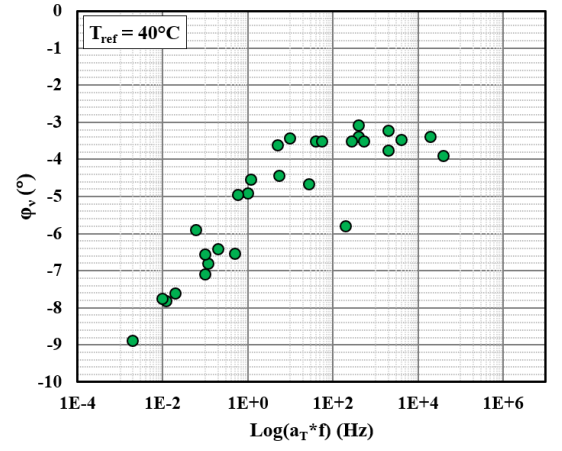
4.2. *Hệ số Poisson và góc lệch pha của hệ số Poisson*

Phương pháp thí nghiệm cải tiến cho phép ghi nhận đồng thời theo thời gian thực biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông của mẫu. Nhờ đó, ngoài mô đun động $|E^*|$, hệ số Poisson động $|\nu^*|$ và góc lệch pha của hệ số Poisson φ_ν cũng được xác định (Hình 4). Khác với mô đun động, hệ số Poisson động hiện vẫn chưa được xác định trong hầu hết các hệ thống thí nghiệm mô đun động thương mại. Tuy nhiên, đây lại là một tham số đầu vào quan trọng trong phân tích và thiết kế kết cấu áo đường theo phương pháp Cơ học – Thực nghiệm, đồng thời là cơ sở để mô phỏng đầy đủ ứng xử đàn nhớt ba chiều của vật liệu. Bên cạnh giá trị $|\nu^*|$, việc xác định được góc lệch pha φ_ν cũng cung cấp thêm thông tin về mối quan hệ động học giữa biến dạng dọc trục và biến dạng ngang dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ. Đối với vật liệu đàn nhớt tuyến tính, φ_ν phản ánh sự không đồng thời giữa hai thành phần biến dạng này, qua đó góp phần đặc trưng cho ứng xử đàn nhớt ba chiều của vật liệu.

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng hệ số dịch chuyển a_T sử dụng để xây dựng đường cong đặc trưng (master curve) của mô đun động $|E^*|$ cũng có thể được áp dụng cho hệ số Poisson động $|\nu^*|$ và góc lệch pha φ_ν [4, 15]. Trên cơ sở đó, Hình 10 và Hình 11 lần lượt trình bày các đường cong đặc trưng của $|\nu^*|$ và φ_ν tại nhiệt độ tham chiếu 40 °C.



Hình 10. Đường cong đặc trưng hệ số Poisson $|\nu^*|$



Hình 11. Đường cong đặc trưng góc lệch pha φ_ν

Từ Hình 10 có thể thấy rằng hệ số Poisson động của hỗn hợp BTN nghiên cứu không phải là một hằng số mà phụ thuộc rõ rệt vào nhiệt độ và tần số gia tải. Cụ thể, $|\nu^*|$ giảm khi nhiệt độ giảm (tương

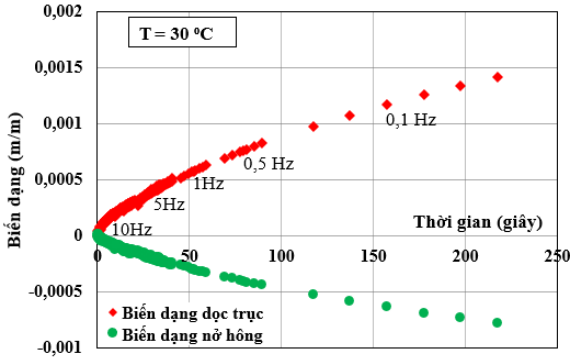
ứng với tần số tăng) và tăng khi nhiệt độ tăng (tương ứng với tần số giảm). Xu hướng này hoàn toàn phù hợp với các kết quả đã được công bố trong các nghiên cứu trước đây [4, 6, 16].

Hình 11 cho thấy góc lệch pha của hệ số Poisson cũng thay đổi theo nhiệt độ và tần số, đồng thời luôn mang giá trị âm trong toàn bộ phạm vi khảo sát. Điều này cho thấy biến dạng ngang không phát triển đồng thời với biến dạng dọc trục mà xuất hiện với một độ trễ pha nhất định. Đây là một đặc trưng điển hình của vật liệu đàn nhớt tuyến tính và cũng đã được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu trước đây. Cần lưu ý rằng biên độ biến dạng ngang nhỏ hơn đáng kể so với biến dạng dọc trục, do đó giá trị φ_v nhạy cảm hơn với sai số đo và nhiễu tín hiệu, dẫn đến độ phân tán của kết quả thường lớn hơn so với góc lệch pha của mô đun động.

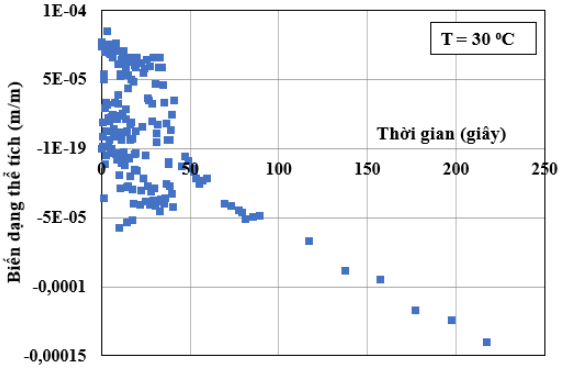
4.3. Đặc tính phát triển biến dạng trong thí nghiệm theo tần số - nhiệt độ; Biến dạng thể tích

Ngoài việc xác định các tham số đàn nhớt động, phương pháp thí nghiệm còn cho phép theo dõi sự phát triển của biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông theo thời gian. Từ đó, biến dạng thể tích của mẫu trong suốt quá trình gia tải cũng được xác định.

Hình 12 trình bày một ví dụ về sự phát triển của giá trị trung bình của biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông theo thời gian tại nhiệt độ 30 °C. Trong quá trình thí nghiệm, tần số gia tải được thay đổi liên tục từ 10 Hz xuống 0,1 Hz. Có thể thấy rằng cả biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông đều phát triển liên tục theo thời gian mà không xuất hiện sự gián đoạn tại các thời điểm chuyển đổi tần số. Điều này cho thấy trạng thái biến dạng của vật liệu tại mỗi thời điểm không chỉ phụ thuộc vào điều kiện tải hiện tại mà còn chịu ảnh hưởng của toàn bộ lịch sử gia tải trước đó. Nói cách khác, biến dạng tổng của vật liệu có thể được xem là tổng các thành phần biến dạng do từng giai đoạn tải trọng gây ra, phù hợp với nguyên lý chồng chất Boltzmann đối với vật liệu đàn nhớt tuyến tính [17]. Kết quả này tiếp tục khẳng định rằng mẫu bê tông nhựa thí nghiệm tuân theo giả thiết đàn nhớt tuyến tính trong phạm vi biến dạng khảo sát. Bên cạnh đó, tại mọi thời điểm gia tải, độ lớn của biến dạng dọc trục luôn lớn hơn độ lớn của biến dạng nở hông. Xu hướng này hoàn toàn phù hợp với sự biến thiên của hệ số Poisson động đã được trình bày ở mục trước.



Hình 12. Sự phát triển biến dạng theo thời gian tại nhiệt độ thí nghiệm $T = 30$ °C



Hình 13. Biến dạng thể tích theo thời gian của mẫu tại nhiệt độ 30 °C

Từ biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông, biến dạng thể tích của mẫu được xác định theo công thức (7). Sự phát triển của biến dạng thể tích theo thời gian được trình bày trong Hình 13.

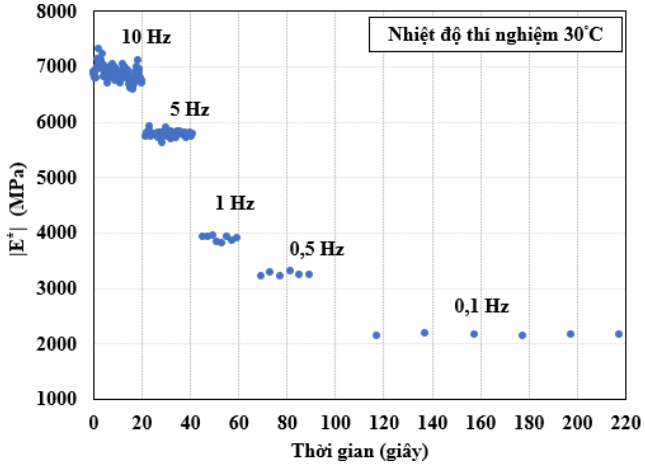
$$\varepsilon_V = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 \tag{7}$$

Có thể thấy rằng, ngay khi bắt đầu quá trình gia tải, mẫu xuất hiện biến dạng thể tích dưới tác dụng của tải trọng nén. Trong giai đoạn đầu của quá trình thí nghiệm, tương ứng với dải tần số từ

10 Hz đến 5 Hz, biến dạng thể tích dao động quanh giá trị không với biên độ nhỏ. Điều này cho thấy ứng xử đàn hồi vẫn chiếm ưu thế, mẫu gần như phục hồi hoàn toàn sau mỗi chu kỳ tải và biến dạng tích lũy còn rất nhỏ. Mặc dù vậy, biến dạng thể tích vẫn có xu hướng mang giá trị dương, cho thấy mẫu chịu co thể tích nhẹ dưới tác dụng của tải trọng nén. Khi thời gian gia tải tiếp tục tăng, tương ứng với dải tần số từ 1 Hz đến 0,1 Hz, giá trị biến dạng thể tích giảm dần và chuyển sang giá trị âm. Điều này cho thấy biến dạng nở hông phát triển chậm hơn so với biến dạng dọc trục, làm cho mẫu chuyển dần từ trạng thái co thể tích sang trạng thái nở thể tích. Xu hướng này phản ánh sự gia tăng của thành phần biến dạng nhớt khi thời gian tác dụng tải tăng lên và ứng xử của vật liệu trở nên phụ thuộc nhiều hơn vào hiệu ứng đàn nhớt.

4.4. Độ chính xác của kết quả đo

Việc sử dụng giá trị trung bình của nhiều chu kỳ tải đối với từng mẫu, kết hợp với giá trị trung bình của ba mẫu độc lập, góp phần giảm ảnh hưởng của sai số ngẫu nhiên và sự không đồng nhất cục bộ của vật liệu, qua đó nâng cao độ tin cậy của kết quả thí nghiệm.



Hình 14. Kết quả đo $|E^*|$ của mẫu tại nhiệt độ 30 °C

Để đánh giá độ chính xác của kết quả thí nghiệm trên cùng một mẫu, Hình 14 thể hiện ví dụ về kết quả xác định giá trị mô đun động $|E^*|$ của một mẫu tại nhiệt độ 30 °C với dải tần số tải trọng từ 0,1 Hz đến 10 Hz. Thống kê định lượng về giá trị trung bình, độ lệch chuẩn và hệ số biến thiên của kết quả đo (Coefficient of Variation - COV) được trình bày trong Bảng 2.

Từ Hình 14 có thể thấy rằng các giá trị mô đun động $|E^*|$ thu được trong cùng một mức tần số phân bố tập trung quanh giá trị trung bình và không xuất hiện các điểm dị thường. Đồng thời, giá trị mô đun động giảm dần khi tần số giảm, phù hợp với đặc trưng đàn nhớt tuyến tính của hỗn hợp bê tông nhựa. Điều này cho thấy hệ thống đo duy trì được tính ổn định trong suốt quá trình thay đổi điều kiện tải trọng. Cũng cần lưu ý rằng, biên độ và số chu kỳ tải trọng tác dụng tại mỗi tần số nhiệt độ đều nằm ở mức nhỏ để ảnh hưởng của tải trọng lặp không ảnh hưởng đến giá trị đo [18].

Kết quả thống kê trong Bảng 2 cho thấy các giá trị mô đun động có hệ số biến thiên COV dao động từ 0,78% đến 2,07%, chứng tỏ khả năng lặp lại cao của phép đo. Giá trị COV lớn nhất được ghi nhận tại tần số 10 Hz, khi thời gian của một chu kỳ tải chỉ khoảng 0,1 s. Ở điều kiện này, số lượng điểm dữ liệu thu nhận trong mỗi chu kỳ giảm, đồng thời quá trình đồng bộ giữa tín hiệu tải trọng và tín hiệu biến dạng trở nên nhạy cảm hơn với nhiễu của hệ thống đo. Khi tần số giảm, thời gian của mỗi chu kỳ tăng lên, số điểm dữ liệu trong một chu kỳ nhiều hơn và tín hiệu đo ổn định hơn, do đó hệ số biến thiên giảm rõ rệt.

Bảng 2. Thống kê kết quả đo và hệ số biến thiên của $|E^*|$ tại 30 °C

Tần số (Hz)	Số chu kỳ (N)	Giá trị trung bình $|E^*|$ (MPa)	Độ lệch chuẩn (MPa)	COV (%)
10	100	6879,34	142,68	2,07
5	50	5777,30	59,79	1,03
1	8	3901,91	45,56	1,17
0,5	6	3250,78	36,46	1,12
0,1	6	2166,49	16,90	0,78

Đối với độ lặp lại giữa các mẫu, Bảng 3 đến Bảng 6 trình bày kết quả thống kê của giá trị trung bình cộng thu được từ ba mẫu thí nghiệm độc lập tương ứng với mô đun động $|E^*|$, góc lệch pha của mô đun động φ_E, hệ số Poisson động $|\nu^*|$ và góc lệch pha của hệ số Poisson φ_ν tại tần số 1 Hz trong dải nhiệt độ từ 10 đến 60 °C.

Kết quả thống kê của mô đun động $|E^*|$ trên Bảng 3 cho thấy giá trị COV giảm từ 14,33% tại 10 °C xuống 5,51% tại 40 °C, sau đó tăng nhẹ lên 9,03% tại 60 °C. Giá trị COV trung bình trên toàn bộ dải nhiệt độ đạt khoảng 8,98%, cho thấy độ phân tán giữa ba mẫu ở mức thấp.

Bảng 3. Mô đun động $|E^*|$ (MPa) tại tần số 1 Hz

Nhiệt độ (°C)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	COV (%)
10	11414,40	9946,83	8556,74	9972,65	1429,01	14,33
20	6671,66	5843,88	5233,10	5916,21	722,03	12,20
30	3901,91	3531,48	3457,36	3630,25	238,29	6,56
40	1380,43	1305,34	1236,45	1307,41	72,01	5,51
50	795,33	880,08	787,36	820,92	51,37	6,26
60	536,95	643,73	597,41	592,70	53,55	9,03

Bảng 4. Góc lệch pha φ_E (độ) tại tần số 1 Hz

Nhiệt độ (°C)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	COV (%)
10	19,7207	24,9323	25,3537	23,3355	3,1381	13,45
20	33,5755	33,7227	34,4761	33,9248	0,4831	1,42
30	39,8956	39,8994	39,3855	39,7268	0,2956	0,74
40	45,2660	43,6534	43,4540	44,1245	0,9938	2,25
50	43,7391	40,9165	40,7288	41,7948	1,6854	4,03
60	40,5317	37,9317	37,1560	38,5398	1,7680	4,59

Đối với góc lệch pha của mô đun động φ_E (Bảng 4), kết quả có tính lặp lại cao hơn so với mô đun động. Hệ số biến thiên dao động từ 0,74% đến 13,45%, với giá trị trung bình chỉ khoảng 4,08%. Ngoại trừ tại 10 °C, nơi COV đạt 13,45%, các nhiệt độ còn lại đều có COV nhỏ hơn 5%, chứng tỏ khả năng xác định pha trễ của hệ thống đo ổn định. Mức phân tán lớn hơn xuất hiện ở nhiệt độ thấp 10 °C có thể liên quan đến độ cứng cao của vật liệu, làm tăng ảnh hưởng của sai số lắp đặt đầu đo và đồng bộ tín hiệu.

Bảng 5. Hệ số Poisson động $|\nu^*|$ tại tần số 1 Hz

Nhiệt độ (°C)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	COV (%)
10	0,33259	0,31824	0,29244	0,31442	0,02032	6,46
20	0,34921	0,29867	0,28952	0,31247	0,03200	10,23
30	0,36276	0,32699	0,29757	0,32910	0,03264	9,92
40	0,43551	0,34138	0,33679	0,37122	0,05572	15,01
50	0,47183	0,42461	0,38045	0,42563	0,04572	10,74
60	0,50488	0,43416	0,39509	0,44471	0,05563	12,51

Từ Bảng 5 có thể thấy, kết quả thí nghiệm của hệ số Poisson động $|\nu^*|$ có độ phân tán lớn hơn so với $|E^*|$ và φ_E. Giá trị COV biến thiên từ 6,46% đến 15,01%, với giá trị trung bình khoảng 10,81%. Mức biến thiên lớn hơn này là do $|\nu^*|$ được xác định từ đồng thời hai phép đo biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông, trong đó biên độ biến dạng nở hông bé hơn đáng kể so với biến dạng dọc trục. Vì vậy, sai số tương đối của tín hiệu biến dạng ngang cao hơn và được khuếch đại trong quá trình xác định hệ số Poisson.

Bảng 6. Góc lệch pha hệ số Poisson φ_ν (độ) tại tần số 1 Hz

Nhiệt độ (°C)	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	COV (%)
10	−1,33862	−2,94357	−0,81446	−1,69888	1,11993	65,92
20	−3,73941	−3,16700	−3,28889	−3,39843	0,3016	8,87
30	−3,20656	−2,02320	−5,35706	−3,52894	1,6902	47,90
40	−5,32617	−3,16553	−6,27654	−4,92275	1,5936	32,37
50	−5,20900	−7,60317	−7,61696	−6,80971	1,3862	20,36
60	−6,11484	−6,43173	−10,27740	−7,60799	2,3156	30,44

Thông số có độ phân tán lớn nhất là góc lệch pha của hệ số Poisson φ_ν (Bảng 6). Giá trị COV dao động từ 8,87% đến 65,92%, với giá trị trung bình khoảng 34,31%. Đặc biệt, tại 10 °C, COV đạt gần 66%, phản ánh sự nhạy cảm cao của góc lệch pha Poisson đối với những sai khác nhỏ trong phép đo biến dạng ngang. Nguyên nhân chủ yếu là giá trị φ_ν có giá trị tuyệt đối rất nhỏ (chỉ khoảng 1–10°), nên chỉ cần sai lệch pha rất nhỏ giữa hai tín hiệu biến dạng cũng làm tăng đáng kể hệ số biến thiên COV.

Nhìn chung, các kết quả thống kê cho thấy phương pháp thí nghiệm có độ lặp lại tốt và độ ổn định cao đối với các thông số cơ học động của hỗn hợp bê tông nhựa. Mô đun động $|E^*|$ và góc lệch pha φ_E đạt độ lặp lại rất tốt với giá trị COV trung bình lần lượt khoảng 9% và 4%. Mặc dù hệ số Poisson động $|\nu^*|$ và đặc biệt là góc lệch pha φ_ν có mức phân tán lớn hơn do phụ thuộc vào phép đo biến dạng ngang có biên độ nhỏ, các kết quả vẫn thể hiện xu hướng nhất quán theo nhiệt độ. Điều này chứng tỏ hệ thống thí nghiệm cải tiến đáp ứng tốt yêu cầu xác định đồng thời mô đun động, góc lệch pha, hệ số Poisson động và góc lệch pha của hệ số Poisson với độ tin cậy đủ cao để phục vụ nghiên cứu ứng xử đàn nhớt tuyến tính 3D của hỗn hợp bê tông nhựa.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã cải tiến thành công hệ thống thí nghiệm mô đun động Cooper NU-14 nhằm cho phép ghi nhận đồng thời lực tác dụng, biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông của mẫu bê tông

nhựa theo thời gian thực. Nhờ đó, ngoài mô đun động $|E^*|$, các thông số đàn nhớt ba chiều gồm hệ số Poisson động $|\nu^*|$, góc lệch pha của mô đun động φ, góc lệch pha của hệ số Poisson φ_ν và sự phát triển của biến dạng thể tích của mẫu bê tông nhựa nghiên cứu cũng được xác định trong cùng một thí nghiệm.

Các kết quả thực nghiệm cho thấy mẫu bê tông nhựa thí nghiệm tuân theo nguyên tắc tương quan nhiệt độ – tần số (TTSP) và giả thiết đàn nhớt tuyến tính trong phạm vi biến dạng khảo sát. Hệ số Poisson động không phải là một hằng số mà thay đổi theo nhiệt độ và tần số gia tải trong phạm vi điều kiện thí nghiệm, tương tự như mô đun động. Đồng thời, góc lệch pha của hệ số Poisson luôn mang giá trị âm, phản ánh sự không đồng thời giữa biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông trong quá trình chịu tải trọng động.

Đối với sự phát triển biến dạng của mẫu thí nghiệm trong quá trình gia tải, kết quả cho thấy trạng thái biến dạng của vật liệu phụ thuộc vào toàn bộ lịch sử tải và phù hợp với nguyên lý chồng chất Boltzmann đối với vật liệu đàn nhớt tuyến tính.

Kết quả phân tích thống kê cho thấy hệ thống đo cải tiến đạt độ chính xác, tính ổn định và độ lặp lại tốt. Trên cùng một mẫu thử, hệ số biến thiên COV của mô đun động qua các chu kỳ tải đạt mức thấp. Đối với tập hợp 3 mẫu thử độc lập, các thông số cơ học chính đạt độ đồng nhất cao qua toàn bộ dải nhiệt độ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo (Việt Nam) trong Đề tài mã số B2025-GHA-04.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng ChatGPT (OpenAI) nhằm rà soát chính tả. Các tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] AASHTO Designation: T 342 (2022). *Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

[2] ASTM D3497-79 (2003). *Standard test method for dynamic modulus of asphalt mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

[3] Graziani, A., Bocci, M., Canestrari, F. (2013). Complex Poisson's ratio of bituminous mixtures: Measurement and modeling. *Materials and Structures*, 47(7):1131–1148.

[4] Perraton, D., Benedetto, H. D., Sauzéat, C., Nguyen, Q. T., Pouget, S. (2018). Three-dimensional linear viscoelastic properties of two bituminous mixtures made with the same binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11).

[5] Blanc, J., Gabet, T., Hornych, P., Piau, J. M., Benedetto, H. D. (2014). Cyclic triaxial tests on bituminous mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 16(1):46–69.

[6] Nguyen, Q. T., Benedetto, H. D., Nguyen, Q. P., Hoang, T. T. N., Bui, V. P. (2021). Effect of time–temperature, strain level and cyclic loading on the complex Poisson's ratio of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 294:123564.

[7] Nguyen, Q. T., Bui, V. P., Nguyen, Q. P. (2023). 3D creep behaviour of asphalt mixtures: Experiment and modelling from complex modulus tests. *Construction and Building Materials*, 384(2):131414.

[8] Bennert, T., Maher, A. (2013). *Sensitivity analysis of asphalt mixture properties in mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG)*. Report No. FHWA-NJ-2013-005 / CAIT-UTC-017, Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT), Rutgers University / Federal Highway Administration (FHWA).

[9] NCHRP Project 01-47 (2010). *Sensitivity analysis of MEPDG for flexible pavements*. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, Transportation Research Board. Washington, DC: The National Academies Press.

[10] Nguyen, M. L., Sauzéat, C., Benedetto, H. D., Tapsoba, N. (2012). Validation of the time–temperature superposition principle for crack propagation in bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 46(7): 1075–1087.

[11] Nguyen, Q. T., Benedetto, H. D., Sauzéat, C., Tapsoba, N. (2013). Time temperature superposition principle validation for bituminous mixes in the linear and nonlinear domains. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9):1181–1188.

[12] AASHTO (2020). *Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): A manual of practice*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

[13] Cheng, H., Sun, L., Wang, Y., Liu, L., Chen, X. (2022). Fatigue test setups and analysis methods for asphalt mixture: A state-of-the-art review. *Journal of Road Engineering*, 2(4):279–308.

[14] Luo, X., Luo, R., L. Lytton, R. (2013). Characterization of fatigue damage in asphalt mixtures using pseudostrain energy. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(2):208–218.

[15] Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., Hofko, B., Graziani, A., Nguyen, Q. T., Pouget, S., Poulikakos, L. D., Tapsoba, N., Grenfell, J. (2016). 3Dim experimental investigation of linear viscoelastic properties of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 49(11):4813–4829.

[16] Tuan, N. Q. (2021). Mechanical properties of bituminous mixtures under sinusoidal cyclic loadings: Experiment and modelling. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 15 (2):67–76.

[17] Salençon, J. (1983). *Viscoélasticité*. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[18] Nguyen, Q. T., Di Benedetto, H., Sauzeat, C. (2015). Effect of fatigue cyclic loading on the linear viscoelastic properties of bituminous mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(8).