



## ANALYSIS OF THE CHANGE IN MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES DURING THE FIRST PHASE OF FATIGUE TEST

Quang Tuan Nguyen\*

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 23/2/2020

Revised: 6/4/2020

Accepted: 15/4/2020

Published online: 24/4/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.3.12>

\* *Corresponding author*

Email: [quangtuan.nguyen@utc.edu.vn](mailto:quangtuan.nguyen@utc.edu.vn)

**Abstract.** During the fatigue test on the asphalt mixtures, the stiffness of tested materials decreases with the increase of cyclic loading number. This decrease in the stiffness can be explained by many different phenomena: thixotropy, self-heating by the viscous dissipated energy, existence of micro-crack and macro-crack. The decrease process of the material stiffness can be divided into three phases. This paper focuses only on the first phase (the initiation phase) of fatigue test where the number of applied cyclic loading is from some thousands to some hundreds thousands cycles. The asphalt mixtures are tested using the cyclic tension-compression tests conducted in the strain-controlled mode on the cylindrical specimens. Temperature, frequency and strain amplitude are parameters which vary for different tests. From the obtained results, the change in complex modulus, phase angle, complex Poisson's ratio and volumetric strain are analyzed. The effect of the temperature and frequency on the decrease of the material stiffness is also presented in the paper. The test results show that the relationship between the damage factor and the increase of the phase angle is not affected by the testing parameters.

**Keywords:** asphalt mixtures, fatigue, complex modulus, complex Poisson's ratio, volumetric strain.



## PHÂN TÍCH SỰ THAY ĐỔI CÁC ĐẶC TÍNH CƠ LÝ CỦA BÊ TÔNG NHỰA TRONG GIAI ĐOẠN ĐẦU CỦA THÍ NGHIỆM MỎI

Nguyễn Quang Tuấn\*

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 23/2/2020

Ngày nhận bài sửa: 6/4/2020

Ngày chấp nhận đăng: 15/4/2020

Ngày xuất bản Online: 24/4/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.3.12>

\* Tác giả liên hệ

Email: quangtuan.nguyen@utc.edu.vn

**Tóm tắt.** Trong thí nghiệm mỏi đối với bê tông nhựa, độ cứng của mẫu vật liệu suy giảm khi tăng số lần tải trọng tác dụng. Nguyên nhân dẫn đến sự suy giảm này được giải thích bởi rất nhiều các hiện tượng khác nhau: hiện tượng xúc biến, sự tăng nhiệt độ của mẫu do năng lượng hao tán, sự xuất hiện các vết nứt vi mô và vĩ mô. Diễn biến suy giảm độ cứng của vật liệu thường được chia làm ba giai đoạn. Bài báo này tập trung nghiên cứu chủ yếu giai đoạn đầu (giai đoạn thứ nhất) của thí nghiệm mỏi khi số chu kỳ tải trọng tác dụng từ vài nghìn đến vài trăm nghìn lượt. Thí nghiệm mỏi kéo nén đồng thời không chế biến dạng trên mẫu hình trụ tròn được sử dụng trong nghiên cứu. Các thông số thay đổi trong thí nghiệm bao gồm nhiệt độ, tần số và biên độ biến dạng tác dụng. Từ các kết quả nhận được, sự thay đổi các đặc tính cơ lý của bê tông nhựa: mô đun động, góc lệch pha, hệ số Poát xông động, biến dạng thể tích mẫu được phân tích. Sự ảnh hưởng của tần số, nhiệt độ đối với sự suy giảm độ cứng của vật liệu cũng được đề cập trong bài báo. Kết quả thí nghiệm cũng cho thấy mối liên hệ giữa mức độ suy giảm mô đun và độ tăng góc pha không bị ảnh hưởng bởi các thông số thí nghiệm.

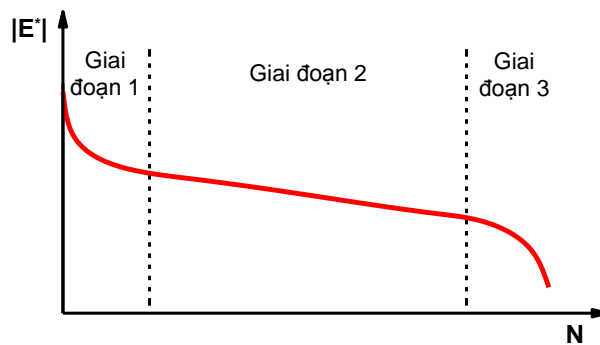
**Từ khóa:** bê tông nhựa, mỏi, mô đun động, hệ số Poát xông động, biến dạng thể tích.

© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thí nghiệm mỏi đối với bê tông nhựa thường được thực hiện bằng cách tác dụng tải trọng lặp hình sin lên mẫu vật liệu. Số lần tác dụng tải trọng ( $N$ ) càng lớn, độ cứng (mô đun động  $E^*$ ) của mẫu vật liệu càng giảm và dẫn đến bị phá hoại. Quá trình suy giảm độ cứng của mẫu

thường được chia làm 3 giai đoạn [1,2] và thể hiện như trong hình 1. Giai đoạn 1, còn gọi là giai đoạn đầu, là giai đoạn các vết nứt vi mô bắt đầu hình thành. Trong giai đoạn này, độ cứng của vật liệu giảm nhanh chủ yếu do hiện tượng xúc biến và sự tăng nhiệt độ của mẫu do năng lượng hao tán sinh ra [3,4]. Trong giai đoạn 2 (giai đoạn môi), độ giảm mô đun chậm lại và đều hơn theo số chu kỳ tác dụng của tải trọng. Độ giảm mô đun trong giai đoạn 2 chủ yếu do các vết nứt vi mô bắt đầu phát triển trong toàn bộ mẫu. Giai đoạn 3 là giai đoạn phá hủy. Các vết nứt vi mô phát triển và tập hợp lại tạo thành vết nứt lớn hơn. Sự tập trung ứng suất tại các vùng vết nứt và sự xuất hiện các vết nứt lớn gây ra sự giảm nhanh độ cứng và phá hủy mẫu. Để phân chia các giai đoạn và đánh giá tuổi thọ mỏi của vật liệu thí nghiệm, có rất nhiều các phương pháp khác nhau (tham khảo thêm tại [2, 5-7]) như dựa vào độ giảm của mô đun, điểm uốn của đường cong, năng lượng hao tán...



Hình 1. Ba giai đoạn của quá trình suy giảm độ cứng vật liệu trong thí nghiệm mỏi.

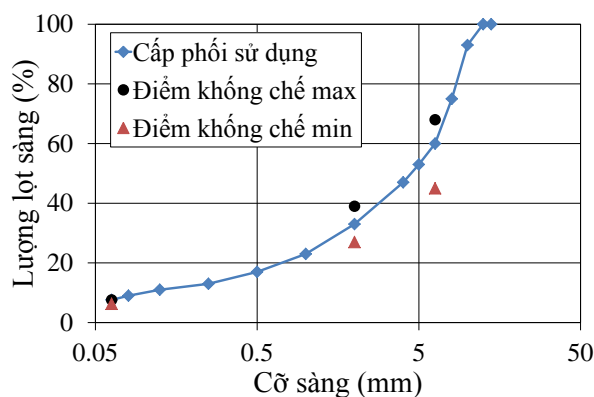
Thí nghiệm mỏi đối với bê tông nhựa có thể thực hiện trên nhiều loại hình dạng mẫu khác nhau: trụ tròn, dầm chữ nhật, hình thang. Ở Việt Nam, thí nghiệm mỏi với bê tông nhựa chủ yếu là thí nghiệm uốn dầm 4 điểm với số lượng nghiên cứu còn hạn chế [8,9]. Nguyên nhân đây là thí nghiệm tốn kém chi phí và thiết bị thí nghiệm chỉ có tại một số cơ sở nghiên cứu. Các kết quả nghiên cứu ở Việt Nam chủ yếu đánh giá độ bền mỏi của vật liệu (số chu kỳ tác dụng ứng với 50% độ giảm mô đun hoặc mẫu bị phá hoại). Trên thực tế, hiện tượng mỏi rất phức tạp. Tác dụng trùng phục của tải trọng có thể gây ra rất nhiều hiện tượng kết hợp cùng lúc với nhau trong thí nghiệm mỏi: hiện tượng phi tuyến, hiện tượng xúc biến, tăng nhiệt độ do năng lượng hao tán, các vết nứt vi mô, vĩ mô, hiện tượng tự hồi phục [4,10-13]. Do vậy, để hiểu rõ bản chất cũng như tách biệt từng hiện tượng trong phân tích là không hề đơn giản. Hơn nữa, trong thực tế, phá hủy do mỏi trong kết cấu áo đường [14] có sự khác biệt rất lớn với kết quả trong phòng thí nghiệm từ mô hình thí nghiệm đến các điều kiện tác dụng: nhiệt độ, phương thức tác dụng tải, thời gian ngừng nghỉ của tải trọng... Chính vì vậy, hư hỏng do mỏi trong kết cấu áo đường vẫn là vấn đề còn nhiều tranh luận trên thế giới.

Bài báo này tập trung chủ yếu nghiên cứu độ giảm mô đun trong giai đoạn đầu của thí nghiệm mỏi. Ngoài các thông số thông dụng trong thí nghiệm như mô đun động  $|E^*|$  và góc lệch pha, sự biến đổi của hệ số Poát xông động, biến dạng thể tích mẫu theo số chu kỳ tải trọng tác dụng cũng được phân tích. Ảnh hưởng của các yếu tố như tần số, nhiệt độ, biên độ tải trọng tác dụng đến sự biến đổi đặc tính cơ học của bê tông nhựa trong giai đoạn 1 được thí nghiệm và đánh giá. Kết quả nghiên cứu góp phần hiểu rõ hơn sự thay đổi tính chất cơ học của vật liệu bê tông nhựa trong giai đoạn đầu của hiện tượng mỏi, từ đó có thể phát triển các thí nghiệm và mô hình để giải thích rõ hơn tác dụng của tải trọng trùng phục đến ứng xử của vật liệu và kết cấu áo đường trong giai đoạn này.

## 2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu

Bê tông nhựa (BTN) được sử dụng trong thí nghiệm có cấp phối được thể hiện trên hình 2. Bé tông nhựa sử dụng nhựa đường 50/70 với hàm lượng nhựa là 5,7% (so với khối lượng cốt liệu). Độ rỗng của hỗn hợp bê tông nhựa là 4,5%. Cần lưu ý rằng độ rỗng này hơi nhỏ hơn giá trị độ rỗng thông thường của hỗn hợp được sử dụng khi thực hiện thí nghiệm mới (từ 5 đến 8%).



Hình 2. Cấp phối của các loại bê tông nhựa sử dụng trong nghiên cứu.

### 2.2. Các thí nghiệm thực hiện

Các thí nghiệm mới thực hiện là dạng kéo nén đồng thời trên mẫu bê tông nhựa hình trụ tròn (xem hình 3). Mẫu bê tông nhựa có đường kính 7,5 cm và cao 14 cm. Mẫu được đặt trong buồng nhiệt kín có hệ thống điều khiển và duy trì nhiệt độ tự động. Phía trên và dưới của mẫu được gắn keo cố định với hệ thống truyền lực. Biến dạng dọc trục được đo thông qua hệ thống 3 đầu đo biến dạng lắp đặt trên một khoảng độ dài 7,5 cm ở chính giữa thân mẫu. Biến dạng nở hông và nhiệt độ mẫu cũng được ghi lại trong quá trình thí nghiệm bởi các đầu đo lắp thêm. Các thí nghiệm đều thực hiện với phương pháp khống chế biến dạng. Để thực hiện thí nghiệm, biến dạng hình sin theo phương dọc trục (với biên độ, tần số, và số lần tải trọng tác dụng định trước) sẽ tác dụng lên mẫu. Trong quá trình thí nghiệm, hệ thống sẽ ghi lại các dữ liệu hình sin của lực, biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông theo từng chu kỳ tải trọng tác dụng. Từ đó, có thể xử lý để tính toán ra các thông số sau :

- $\sigma_0, \varepsilon_{dt0}, \varepsilon_{nh0}$  : biên độ của ứng suất, biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông
- $|E^*| = \sigma_0/\varepsilon_{dt0}$  : độ lớn của mô đun động
- $\phi_E$ : góc lệch pha của mô đun (độ lệch pha giữa ứng suất và biến dạng dọc trục)
- $|v^*| = \varepsilon_{nh0}/\varepsilon_{dt0}$  : độ lớn của hệ số Poát xông động
- $\phi_v$ : góc lệch pha của hệ số Poát xông (độ lệch pha giữa biến dạng dọc trục và biến dạng nở hông)
- $\varepsilon_v$ : biến dạng thể tích của mẫu. Biến dạng thể tích là tổng biến dạng theo 3 phương của mẫu. Do thí nghiệm đồng nhất trên mẫu hình trụ tròn và khống chế biến dạng theo phương dọc trục nên biến dạng thể tích mẫu được xác định bằng 2 lần biến dạng nở hông.

Chi tiết hơn về thí nghiệm cũng như phương pháp xử lý số liệu có thể tham khảo các tài liệu [15-18].



Hình 3. Bộ trí đầu đo trên mẫu thí nghiệm môi.

Mỗi thí nghiệm môi được đặc trưng bởi các thông số thí nghiệm khác nhau bao gồm : nhiệt độ thí nghiệm, tần số gia tải, biên độ biến dạng tác dụng, số chu kỳ tác dụng. Tổng hợp các thí nghiệm được thể hiện trong bảng 1. Như đã nhấn mạnh ở trước, bài báo tập trung nghiên cứu giai đoạn đầu của thí nghiệm môi. Do vậy, số chu kỳ tác dụng trong các thí nghiệm không lớn, dừng lại ở vài nghìn đến vài trăm nghìn lượt. Chỉ có một thí nghiệm số chu kỳ tải trọng được kéo dài đến gần 200000 chu kỳ. Với số chu kỳ tác dụng này, các mẫu đều chưa bị phá hoại (trong giai đoạn 1 và một thí nghiệm ở giai đoạn 2 của thí nghiệm môi).

Bảng 1. Bảng tổng hợp các thí nghiệm thực hiện.

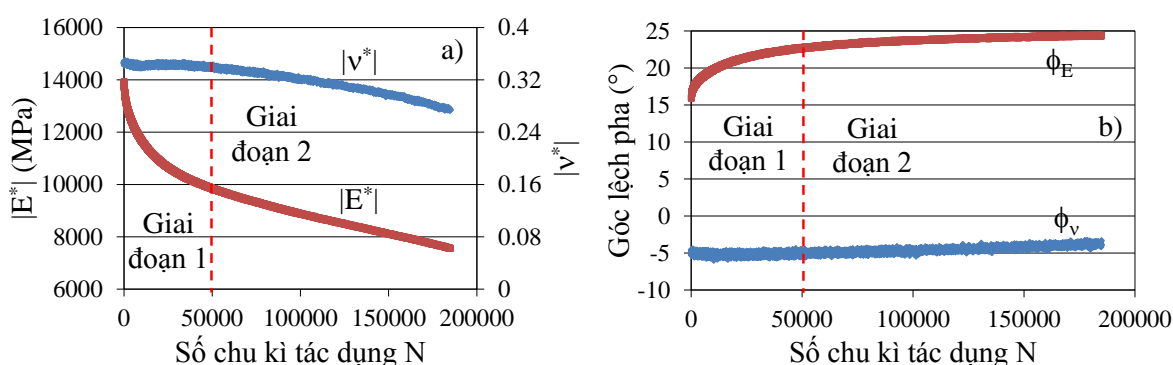
Tên thí nghiệm	Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Tần số gia tải (Hz)	Biên độ biến dạng (μm/m)	Số chu kỳ tác dụng
TN1	7,4°C	1	70	10000
TN2	7,4°C	3	70	10000
TN3	7,4°C	10	70	10000
TN4	7,4°C	1	120	10000
TN5	7,4°C	3	120	10000
TN6	7,4°C	10	120	10000
TN7	12,3°C	1	120	10000
TN8	12,3°C	3	120	10000
TN9	12,3°C	10	120	10000
TN10	20,8°C	1	120	10000
TN11	7,4°C	3	72	15000
TN12	7,4°C	3	131	4500
TN13	11,6°C	10	72	15000
TN14	11,6°C	10	131	185000

### 3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

#### 3.1. Sự thay đổi mô đun động và hệ số Poát xông động

Sự thay đổi độ lớn và góc lệch pha của mô đun động, hệ số Poát xông động trong thí nghiệm môi được thể hiện trong hình 4 thông qua thí nghiệm TN14. Có thể nhận thấy giai đoạn 2 của thí nghiệm bắt đầu ở khoảng chu kỳ 50000 khi mà độ giảm của mô đun trở nên

tuyến tính. Trong thí nghiệm mỗi, việc mô đun động giảm và góc lệch pha của mô đun tăng theo số chu kì tải trọng tác dụng là yếu tố cơ bản đã được đề cập rất nhiều trong các tài liệu nghiên cứu. Ở đây, nghiên cứu tập trung hơn vào sự thay đổi của hệ số Poát xông động. Kết quả trên hình 4 chỉ ra rằng hệ số Poát xông giảm và góc lệch pha của nó cũng tăng tương tự như mô đun động. Tuy nhiên, độ giảm của hệ số Poát xông ít hơn so với mô đun. Sau 185000 chu kì, độ giảm của hệ số Poát xông chỉ khoảng 20% (so với mô đun là 45%) và góc lệch pha tăng  $1^\circ$  (so với góc lệch pha của mô đun tăng  $8,5^\circ$ ). Đặc biệt xu hướng tăng giảm của hệ số Poát xông và mô đun động trong 2 giai đoạn là hoàn toàn trái ngược nhau. Hệ số Poát xông (và góc lệch pha) gần như không thay đổi trong giai đoạn 1 và tăng tốc mạnh hơn ở giai đoạn 2. Điều này ngược xu thế đối với mô đun động của bê tông nhựa. Điều này có thể được giải thích bởi trong giai đoạn đầu, biên độ biến dạng nở hông (dùng để tính toán hệ số Poát xông) ít bị ảnh hưởng bởi hiện tượng xúc biến và ít nhạy cảm nhiệt hơn so với mô đun động. Tuy nhiên, các vết nứt vi mô trong vật liệu (từ giai đoạn 2) lại có ảnh hưởng đến biến dạng nở hông. Các vết nứt tạo ra các sự mất liên tục (đứt gãy) trong môi trường vật liệu sẽ ngăn cản sự lan truyền biến dạng và làm giảm biến dạng nở hông.

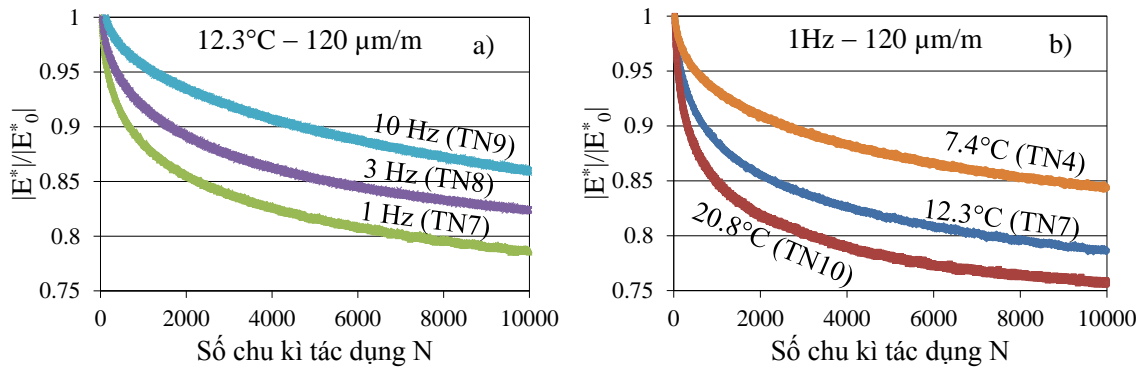


Hình 4. Sự thay đổi của mô đun và hệ số Poát xông động trong thí nghiệm TN14 : a) độ lớn, b) góc lệch pha.

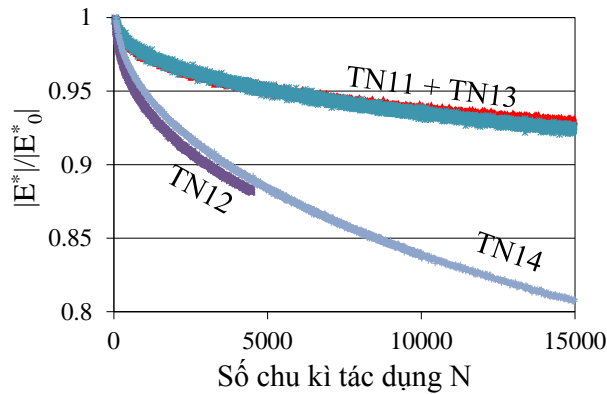
### 3.2. Ảnh hưởng của tần số, nhiệt độ đến độ giảm mô đun động

Các thí nghiệm mỗi thường được thực hiện với nhiều biên độ biến dạng khác nhau ở cùng một tần số và nhiệt độ cố định. Chính vì vậy yếu tố tần số và nhiệt độ thường không được xem xét trong các nghiên cứu. Hình 5 thể hiện sự ảnh hưởng của tần số và nhiệt độ đến độ giảm tương đối  $|E^*|/|E^*_0|$  trong các thí nghiệm mỗi. Giá trị  $|E^*_0|$  là giá trị mô đun động ban đầu của vật liệu tại tần số và nhiệt độ của từng thí nghiệm. Do thí nghiệm cần có khoảng thời gian nhất định để tải trọng hình sin ổn định, giá trị  $|E^*_0|$  thường không được lấy ở ngay chu kì đầu tiên ( $N = 1$ ). Giá trị này được xác định tại  $N = 15$  (với tần số  $f = 1\text{Hz}$ ),  $N = 25$  (với tần số  $f = 3\text{Hz}$ ) và  $N = 60$  (với tần số  $f = 10\text{Hz}$ ). Giá trị  $|E^*|/|E^*_0|$  biểu thị độ giảm tương đối của mô đun động tại chu kì  $N$  so với mô đun ban đầu của vật liệu.

Các thí nghiệm trên hình 5a đều thực hiện tại cùng một nhiệt độ và biên độ biến dạng, chỉ khác nhau về tần số tác dụng. Còn kết quả trên hình 5b thể hiện cho các thí nghiệm chỉ khác nhau về điều kiện nhiệt độ thí nghiệm (tần số và biên độ biến dạng tác dụng là như nhau). Kết quả trên hình 5 cho thấy tần số và nhiệt độ có ảnh hưởng rõ rệt đến độ giảm tương đối mô đun động của vật liệu. Khi tần số giảm và nhiệt độ tăng, độ giảm tương đối của mô đun tăng lên. Để giải thích sự biến đổi này có thể dựa vào giá trị năng lượng hao tán của vật liệu trong từng thí nghiệm. Tuy nhiên, điều này là khá phức tạp và nằm ngoài phạm vi của bài báo.



Hình 5. Ảnh hưởng của tần số (a) và nhiệt độ (b) đến độ giảm tương đối của mô đun động.



Hình 6. Ảnh hưởng của tương quan tần số - nhiệt độ đến độ giảm mô đun động.

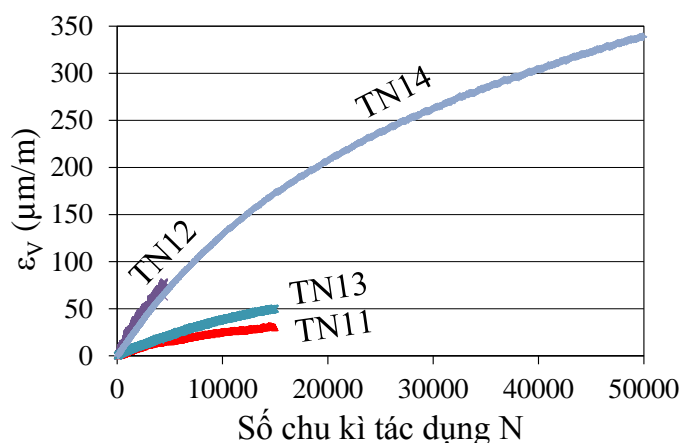
Các cặp thí nghiệm (TN11 và TN13), (TN12 và TN14) là các cặp thí nghiệm nhằm mục đích kiểm tra ảnh hưởng của tính tương quan tần số - nhiệt độ [19] đến hiện tượng mỏi. Các cặp thí nghiệm được lựa chọn sao cho giá trị mô đun ban đầu  $|E^*_{0}|$  của mỗi thí nghiệm là xấp xỉ nhau ( $|E^*_{0}|$  tại  $7,4^{\circ}\text{C}$  và  $3\text{Hz}$  tương tự  $|E^*_{0}|$  tại  $11,6^{\circ}\text{C}$  và  $10\text{Hz}$ ). Hai cặp thí nghiệm này tương ứng với 2 biên độ biến dạng khác nhau  $72\ \mu\text{m/m}$  và  $131\ \mu\text{m/m}$ . Kết quả trên hình 6 cho thấy các thí nghiệm trong cùng một cặp có độ giảm mô đun là giống nhau. Điều này chứng tỏ, trong giai đoạn đầu của thí nghiệm mỏi, độ giảm mô đun cũng tuân theo nguyên tắc tương quan tần số - nhiệt độ. Kết quả này cho phép phân tích chi tiết hơn ảnh hưởng của tần số, nhiệt độ đến sự biến đổi tính chất vật liệu trong thí nghiệm mỏi đối với vật liệu bê tông nhựa.

### 3.3. Biến dạng thể tích của mẫu trong thí nghiệm mỏi

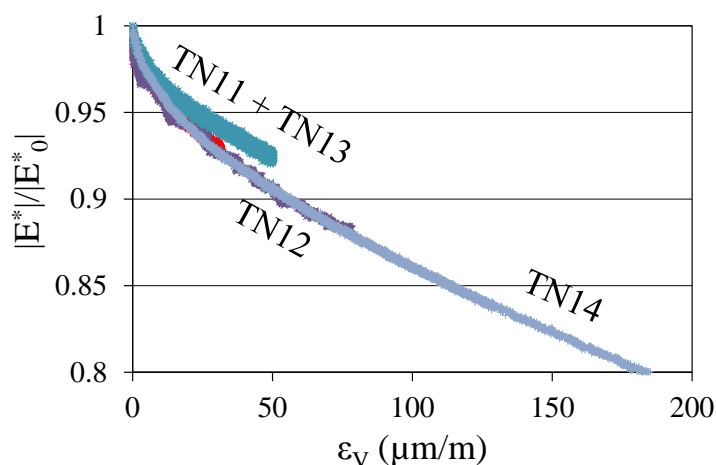
Hình 7 thể hiện sự thay đổi biến dạng thể tích của mẫu trong thí nghiệm mỏi thông qua một vài thí nghiệm TN11-TN14. Giá trị dương thể hiện mẫu bị nở ra trong quá trình tải trọng tác dụng. Cần lưu ý rằng, do thí nghiệm không chế biến dạng, theo phương thẳng đứng mẫu không có sự thay đổi biến dạng giữa các chu kỳ với nhau. Biến dạng thể tích chỉ do biến dạng nở hông của mẫu.

Kết quả thí nghiệm trên hình 7 cho thấy biến dạng thể tích của các cặp thí nghiệm tương quan tần số - nhiệt độ bám khá sát nhau. Nghĩa là nguyên tắc tương quan tần số - nhiệt độ có thể áp dụng cho biến dạng thể tích của mẫu cho giai đoạn đầu của thí nghiệm mỏi (khi  $N < 5000$  chu kỳ). Ngoài ra khi biểu diễn mối quan hệ giữa biến dạng thể tích mẫu và độ giảm tương đối của mô đun (xem hình 8), cả 4 đường thí nghiệm (TN11 đến TN14) trong giai đoạn 1 đi khá sát nhau. Có nghĩa là trong giai đoạn đầu của thí nghiệm mỏi, giữa độ giảm mô đun

và biến dạng thể tích có sự liên quan nhất định. Kết quả trên hình 7 và 8 cho thấy, biến dạng thể tích có thể coi là một thông số đặc trưng trong thí nghiệm môi và có thể dùng để đánh giá quá trình hư hỏng của vật liệu. Cần lưu ý rằng việc đo biến dạng nở hông nói riêng và thể tích nói chung là không dễ dàng và cần độ chính xác cao hơn so với việc đo biến dạng dọc trục do bởi biên độ biến dạng nở hông nhỏ hơn và phương thức đo khó khăn hơn.



Hình 7. Biến dạng thể tích của mẫu trong thí nghiệm môi.

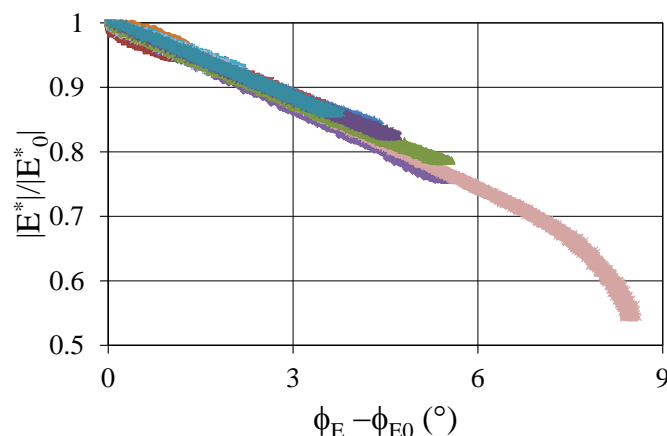


Hình 8.  $|E^*/|E^*_0|$  biểu diễn theo biến dạng thể tích của mẫu.

### 3.4. Quan hệ giữa độ giảm mô đun động và độ tăng góc lệch pha trong thí nghiệm môi

Hình 9 thể hiện mối quan hệ giữa độ giảm tương đối mô đun động  $|E^*/|E^*_0|$  và độ tăng góc lệch pha  $\phi_E - \phi_{E0}$  trong thí nghiệm môi. Trong đó  $\phi_{E0}$  là góc lệch pha ban đầu của mỗi thí nghiệm (được xác định tương tự như  $|E^*_0|$ ). Trong hình 9, tất cả các thí nghiệm từ TN1 đến TN14 đều được thể hiện. Có thể nhận thấy tất cả các đường thí nghiệm từ TN1 đến TN14 đều khá sát nhau. Điều này thể hiện dù thay đổi nhiệt độ, tần số hay biên độ biến dạng tác dụng, mối quan hệ giữa độ giảm mô đun động và độ tăng góc lệch pha đều theo một quy luật nhất định. Mối quan hệ này khá tuyến tính và được kiểm chứng đến 25% độ giảm mô đun ban đầu ( $|E^*/|E^*_0| = 0,75$ ). Điều này có ý nghĩa quan trọng trong phân tích và mô phỏng hiện tượng môi. Độ giảm mô đun có thể được thể hiện thông qua một hàm của góc lệch pha và ngược lại.





Hình 9. Mối quan hệ giữa độ giảm mô đun động và độ tăng góc lệch pha (TN1-TN14).

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo tập trung phân tích giai đoạn đầu của thí nghiệm mỗi. Thông qua các thí nghiệm và việc phân tích kết quả thu được, một số kết luận sau được rút ra :

- Hệ số Poát xông tăng và góc lệch pha của nó giảm khi số chu kì tải tác dụng tăng lên. Độ tăng của hệ số Poát xông nhỏ hơn so với mô đun động. Trong giai đoạn đầu của thí nghiệm, sự tăng này không đáng kể và có xu hướng tăng trong các giai đoạn ngược với mô đun động.
- Tần số nhiệt độ có ảnh hưởng rõ rệt đến độ giảm mô đun động trong thí nghiệm mỗi. Độ giảm mô đun được chứng minh là tuân theo nguyên tắc tương quan tần số - nhiệt độ. Khi giảm tần số/tăng nhiệt độ trong thí nghiệm mỗi, độ giảm tương đối của mô đun sẽ tăng lên.
- Trong quá trình tác dụng tải trọng trùng phục, biến dạng thể tích của mẫu tăng lên. Giữa biến dạng thể tích và độ giảm mô đun mỗi liên hệ nhất định.
- Mối quan hệ giữa độ giảm mô đun động và độ tăng góc lệch pha trong giai đoạn đầu của thí nghiệm mỗi là tuyến tính và không phụ thuộc vào các thông số đặt tải của thí nghiệm.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.02-2018.305.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. H. Di Benedetto, C. De La Roche, H. Baaj, A. Pronk, R. Lundström, Fatigue of bituminous mixtures, *Materials and Structures*, 37 (2004) 202–216. <https://doi.org/10.1007/BF02481620>
- [2]. D.A. Anderson, Y.M. Le Hir, M. Marasteanu, J.P. Planche, D. Martin, G. Gauthier, Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders, *Transportation Research Record*, 1766 (2001) 48-56. <https://doi.org/10.3141/1766-07>
- [3]. Q.T. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, Determination of Thermal Properties of Asphalt Mixtures as Another Output from Cyclic Tension-Compression Test, *Road Materials and Pavement Design*, 13 (2012) 85-103. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.644082>

- [4]. H. Di Benedetto, Q.T. Nguyen, C. Sauzéat, Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 12 (2011) 129-158. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.9690356>
- [5]. Y.R. Kim, D.N. Little, R.L. Lytton, Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (2003) 75-83. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(75))
- [6]. P.C. Hopman, P.A.J. Kunst and A.C. Pronk, A renewed interpretation method for fatigue measurement, verification of Miner's rule, in 4th Eurobitume Symposium, pp. 557–561, 1989.
- [7]. G. Rowe, Application of the dissipated energy concepts to fatigue cracking in asphalt pavements, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK, 1996. <http://eprints.nottingham.ac.uk/11888/>
- [8]. Trần Thiện Lưu, Lã Văn Chăm, Nguyễn Xuân Đào, Nghiên cứu thực nghiệm độ bền mỏi bê tông asphalt làm lớp mặt đường tại Việt Nam, *Tap chí Giao thông Vận tải*, 4 (2015) 22-25. <http://www.tapchigiaothong.vn/nghien-cuu-thuc-nghiem-do-ben-moi-betong-asphalt-lam-lop-mat-duong-tai-viet-nam-d2247.html>
- [9]. Vũ Phương Thảo, Bùi Xuân Cây, Nguyễn Quang Tuấn, Phân tích các thông số trong kết quả thí nghiệm uốn mỏi bốn điểm đối với vật liệu bê tông nhựa, *Tap chí Cầu đường Việt Nam*, 9 (2014) 17-20. <http://hkhktcd.vn/tap-chi-cau-duong/khoa-hoc-cong-nghe/phan-tich-cac-thong-so-trong-ket-qua-thi-nghiem-uon-moi-bon-diem-doi-voi-vat-lieu-be-tong-nhua-1462.aspx>
- [10]. Q.T. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, Effect of fatigue cyclic loading on linear viscoelastic properties of bituminous mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2015). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000996)
- [11]. P. Gayte, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, Q.T. Nguyen, Influence of transient effects for analysis of complex modulus tests on bituminous mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, 17 (2016) 271-289. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1067246>
- [12]. Q.T. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, Linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures, *Materials and Structures*, 48 (2015) 2339-2351. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0316-5>
- [13]. D. Bodin, H. Soenen and C. De la Roche, Temperature Effects in Binder Fatigue and Healing Tests, in 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2004, Vienna, pp 1996-2004. <https://trid.trb.org/view/743984>
- [14]. G. Al-Khateeb, K. Stuart, W. Mogawer, N. Gibson, Fatigue performance, asphalt binders versus mixtures versus full-scale pavements, *Canadian Journal of Transportation*, 2 (2008) 13–33. <https://journalhosting.ucalgary.ca/index.php/cjt/article/view/15848>
- [15]. Q.T. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, M.L. Nguyen, T.T.N. Hoang, 3D complex modulus tests on bituminous mixture with sinusoidal loadings in tension and/or compression, *Materials and Structures*, 50 (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0970-x>
- [16]. D. Perraton, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, Q.T. Nguyen, S. Pouget, Three-Dimensional Linear Viscoelastic Properties of Two Bituminous Mixtures Made with the Same Binder, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (2018). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002515](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002515)
- [17]. Q.T. Nguyen, M.L. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, E. Chailleux, T.T.N. Hoang, Nonlinearity of bituminous materials for small amplitude cyclic loadings, *Road Materials and Pavement Design*, 20 (2019) 1571-1585. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1465452>
- [18]. Q.T. Nguyen, N.H. Pham, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, "Anisotropic Behavior of Bituminous Mixtures in Road Pavement Structures, *Journal of Testing and Evaluation*, 48 (2020) 178-188. <https://doi.org/10.1520/JTE20180828>
- [19]. Q.T. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, N. Tapsoba, Time Temperature Superposition Principle Validation for Bituminous Mixes in the Linear and Nonlinear Domains, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (2013) 1181–1188. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000658](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000658)