

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ VÀ KỸ THUẬT TP.HCM**

**PHAN THÀNH NHÂN**

**PHÂN TÍCH VÀ MÔ HÌNH HÓA ỨNG XỬ ĐÀN HỒI NHÓT – ĐỂ  
NHÓT CỦA BÊ TÔNG ÁT-PHAN TRONG MIỀN BIẾN DẠNG NHỎ**

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số chuyên ngành: 9520101

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2026**

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Công nghệ và Kỹ thuật  
Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: TS. Nguyễn Huỳnh Tấn Tài

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở họp tại  
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày        tháng        năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Trường Đại học Kỹ thuật Công nghệ Tp.HCM

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Phan, T.N.; Nguyen, D.L.; Vu, T.V.; Tran, V.T.; Nguyen, H.T.T; and Nguyen, M.L. Determining with High Accuracy the Relaxation Modulus and Creep Compliance of Asphaltic Materials in the Form of Sums of Exponential Functions from Mathematical Master Curves of Dynamic Modulus. *Journal of Materials in Civil Engineering* 34(9): 04022219. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004366, 2022.
2. Phan, T.N.& Nguyen, H.T.T. Comparison the accuracy of approximate methods by sums of exponential using real-valued coefficients. *Proceedings of 11th national mechanics conference*. 513-521, 2022.
3. Tran, V.T., Phan, T.N., Tran, V.T., Do, T.T., Nguyen, H.T.T; and Nguyen, M.L. Development of a generalised creep-recovery test and a back-calculation method for determining the permanent deformation of asphalt mixtures in the time domain. *Road Materials and Pavement Design*. DOI: 10.1080/14680629.2023.2180291. 2023.
4. Nguyen, N.H., Phan, T.N., Do, T.T., and Nguyen, H.T.T. Evaluating the accuracy of linear viscoelastic properties in the time domain analytically approximated from complex modulus data . *Proceedings of national mechanics conference for 45th anniversary of The Institute of Mechanics*. 103-110, 2022.
5. Phan, T.N., Nguyen, N.H., Do, T.T., Nguyen, H.T.T; and Nguyen, M.L. Verification of time–temperature superposition principle for viscoplastic strains of asphalt mixtures obtained from creep-recovery tests in the low-strain regime. *Road Materials and Pavement Design*. DOI: 10.1080/14680629.2024.2390156. 2024.
6. Phan, T.N.& Nguyen, H.T.T. Characterizing the creep compliance of a conventional asphalt mixture using creep-recovery test. *Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development (MMMS2024)*. 141-148, 2025.

# CHƯƠNG I: GIỚI THIỆU

## 1.1 Đặt vấn đề

Hần lún là một dạng hư hỏng phổ biến của mặt đường bê tông nhựa do sự tích lũy của biến dạng không thể hồi phục (PD). Thông qua quan sát thực nghiệm, Di Benedetto và cộng sự (2007) đã phân loại ứng xử của bê tông nhựa thành bốn loại phụ thuộc vào nhiệt độ, độ lớn của biến dạng/ ứng suất và thời gian (chu kỳ) gia tải, bao gồm: đàn hồi nhớt tuyến tính (LVE), đàn hồi nhớt phi tuyến, biến dạng không hồi phục (hần lún) và nứt. Trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh sẽ tập trung khảo sát PD của bê tông nhựa và chưa đánh giá ảnh hưởng do nứt của vật liệu nhằm đơn giản hóa vấn đề. Do biến dạng của bê tông nhựa bao gồm biến dạng hồi phục và PD nên nghiên cứu ứng xử LVE là một phần không thể thiếu của luận án này.

## 1.2 Tổng quan tình hình nghiên cứu

### *1.2.1 Các mô hình dự báo DP của mặt đường bê tông nhựa*

Các mô hình đã được đề xuất nhằm dự báo PD có thể phân thành hai loại: mô hình hồi quy và mô hình dựa trên quan hệ giữa ứng suất và biến dạng (C-M). Các mô hình hồi quy cần nhiều tài chính và thời gian cho việc hiệu chỉnh các thông số của mô hình và chúng không thể mô phỏng lịch sử tải và ứng xử hóa cứng – dẻo của vật liệu. Các đặc tính LVE trong các C-M được xác định trong miền tần số nên cần được chuyển đổi sang miền thời gian trước khi cấy ghép vào các phần mềm tính toán. Quy trình đó làm tăng chi phí tính toán và giảm độ chính xác các đặc tính LVE của vật liệu. Hơn nữa, các giải thuật nhằm xác định các biến dạng không hồi phục có độ chính xác chưa cao (sẽ được thảo luận ở mục 2.2 của chương này). Do đó, các kết quả dự báo chiều cao phần lún của các mô hình này có sự khác biệt khá lớn so với dữ liệu đo đạc thực tế.

### *1.2.2 Xác định đặc tính của bê tông nhựa bằng thí nghiệm trong phòng*

Các phương pháp thí nghiệm trong phòng nhằm xác định đặc tính VP của vật liệu hiện tại có một trong các khuyết điểm như sau: trường ứng suất và biến dạng không đồng nhất (ví dụ thí nghiệm Hamburg Wheel Tracking), biến dạng đo được còn một phần biến dạng VE chưa hồi phục hết (ví dụ thí nghiệm tải trọng lặp) và độ chính xác của các giải thuật xác định biến dạng VE chưa cao. Do đó, phát triển một phương pháp thí nghiệm và giải thuật đi kèm có thể xác định đồng thời đặc tính LVE và VP của bê tông nhựa với một lịch sử gia tải phức tạp là điều cần thiết.

### *1.2.3 Chuyển đổi đặc tính LVE của vật liệu từ miền tần số sang miền thời gian*

Việc chuyển đổi đặc tính LVE từ miền tần số sang miền thời gian là một bài toán bình phương tối thiểu phi tuyến. Để giải bài toán một cách đơn giản cần chọn trước tiên nghiệm nhằm đưa bài toán về dạng tuyến tính hoặc sử dụng kỹ thuật xấp xỉ giải tích. Các cách tiếp cận đó dẫn đến sai số của phép chuyển đổi có thể lên đến 5% như báo cáo của Emri và cộng sự (2005). Vì vậy, phát triển một giải thuật nhằm chuyển đổi các đặc tính LVE từ miền tần số sang miền thời gian với độ chính xác cao là một vấn đề cần phải xem xét.

## **1.3 Mục tiêu nghiên cứu**

Mục tiêu của luận án này bao gồm: (i) phát triển một giải thuật nhằm chuyển đổi các đặc tính LVE từ miền tần số sang miền thời gian với độ chính xác cao và có dạng tổng của các hàm số mũ; (ii) tổng quát hóa thí nghiệm từ biến – hồi phục (GCR) và phát triển phương pháp tính ngược để xác định PD của bê tông nhựa trong miền thời gian; (iii) sử dụng thí nghiệm GCR để khảo sát các đặc tính VP của bê tông nhựa; (iv) phát triển mô hình dẻo nhớt để dự báo ứng xử VP của bê tông nhựa.

**1.4 Giới hạn nghiên cứu:** luận án này tập trung khảo sát biến dạng vĩnh viễn của các lớp bê tông nhựa và bỏ qua biến dạng của các lớp nền của kết cấu áo đường.

**1.5 Phương pháp nghiên cứu:** luận án sử dụng ba phương pháp nghiên cứu là nghiên cứu lý thuyết, thực nghiệm và mô hình hóa.

## **1.6 Kết cấu của luận án**

Luận án này có 6 chương bao gồm: chương I đặt vấn đề và tổng quan về tình hình nghiên cứu nhằm xác định mục tiêu nghiên cứu của luận án, hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu. Chương II trình bày phương pháp đề xuất về chuyển đổi đặc trưng LVE từ miền tần số sang miền thời gian với độ chính xác cao và tổng quát hóa thí nghiệm CR để có thể xác định cả biến dạng VE và VP trong cùng một lần thí nghiệm. Trong chương III, giải thuật GCR được áp dụng để xác thực nguyên lý tương đương thời gian - nhiệt độ vẫn có hiệu lực trong miền biến dạng VP. Chương IV thực hiện khảo sát điểm chảy dẻo của bê tông nhựa bằng cách sử dụng thí nghiệm CR với tải trọng tuyến tính. Chương V thực hiện xác định tính chất và mô hình hóa ứng xử VE và VP của vật liệu bê tông nhựa. Chương VI tổng hợp các kết quả đã được thực hiện, trình bày các kiến nghị và các hướng nghiên cứu tiếp theo.

## **CHƯƠNG II: CƠ SỞ LÝ THUYẾT**

### **2.1 Phương pháp chuyển đổi các đặc trưng LVE giữa miền tần số và miền thời gian**

Các phương pháp đã được đề xuất không thỏa mãn hoặc thỏa mãn một phần của quan hệ Kramer-Kronig, hoặc có độ chính xác không cao. Vì vậy, trong mục này trình bày một phương pháp được đề xuất có thể thỏa mãn hoàn toàn nguyên lý nhân quả, lý thuyết LVE và có độ chính xác cao.

#### *2.2.1 Giải thuật xác định RM và CC dưới dạng tổng của các hàm số mũ (SEFs) từ đường cong chủ của mô đun động (DM)*

**Dữ liệu vào:** làm trơn dữ liệu của DM:

- Xác định khoảng tính toán của tần số ( $\omega_i$ ) theo thang logarith.
- Xác định khoảng tính toán của thời gian ( $t_i$ ) theo thang logarith.

Bước 1. Tính toán góc lệch pha (PA)  $\varphi_E(\omega_i)$  bằng phương pháp số, sau đó tính toán mô đun trữ  $E'(\omega_i) = |E(i\omega_i)| \cos \varphi_E(\omega_i)$

Bước 2. Phân rã mô đun trữ thành SEFs với độ chính xác cao có dạng  $E'(\omega) = E'(\omega \rightarrow \infty) - \sum_{j=1}^{N_j} E'_j e^{b_j \omega}$

Bước 3. Tính toán RM:  $E(t) = E^*(\omega \rightarrow \infty) - \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{N_j} E'_j \tan^{-1} \left[ t / (-b_j) \right]$

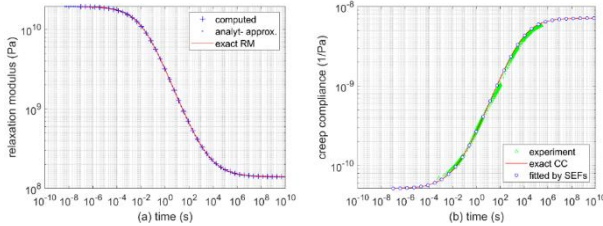
Bằng cách thức tương tự, ta thu được CC như sau:

$$D(t) = D^*(\omega \rightarrow \infty) + \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^{N_j} D'_j \tan^{-1} \left[ t / (-c_j) \right]$$

### 2.2.2 Ví dụ áp dụng

Hai ví dụ được thực hiện nhằm đánh giá sự hiệu quả của giải thuật đề xuất. Kết quả thu được được so sánh với lời giải chính xác, lời giải xấp xỉ hoặc kết quả thực nghiệm nhằm mục đích xác thực lại giải thuật.

#### 2.2.2.1 Dữ liệu vào là đường cong chủ của DM của mô hình HS



Hình 2.12. (a) Tính toán RM từ DM của mô hình HS và xấp xỉ chúng bằng dạng SEFs; và (b) tính toán CCs từ DM của mô hình HS và xấp xỉ chúng bằng dạng SEFs.

Mô đun dẫn và độ mềm từ biến được tính toán bằng công thức trong phương trình Eq (2.65), Eq (2.66) và được trình bày ở Hình 2.12. Kết quả cho thấy sai số tương đối của RM và CC thu được nhỏ hơn  $3.46 \times 10^{-4}$  tại mỗi điểm tính toán. Thêm vào đó, đường cong chủ thực nghiệm của CCs của hỗn hợp được xác định bởi Nguyen và cộng sự (2021a) cũng được thể hiện trong hình nhằm khẳng định sự tương thích tốt giữa CCs tính toán và thực nghiệm.

#### 2.2.2.2 Dữ liệu vào là đường cong chủ của DM của mô hình GS

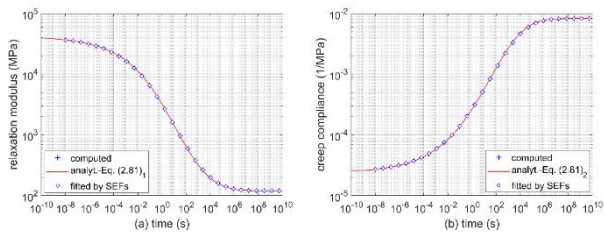


Figure 2.14. (a) Tính toán RM từ DM của mô hình GS và xấp xỉ chúng bằng dạng SEFs; và (b) tính toán CCs từ DM của mô hình GS và xấp xỉ chúng bằng dạng SEFs.

Mô đun trữ và độ mềm được tính toán, sau đó xấp xỉ thành dạng SEFs. Số hàm số mũ được sử dụng cho mô đun trữ là 97 và cho độ mềm trữ là 74, đã giúp cho sai số tương đối rất bé, thấp hơn  $8 \times 10^{-8}$  tại mọi điểm ước lượng. Sau đó RM và CC thu được khi tính toán bằng công thức trong phương trình Eq (2.65 và 2.66) và được trình bày ở Hình 2.14. Kết quả xấp xỉ giải tích cũng được trình bày chung nhằm kiểm chứng sự tương thích giữa kết quả của hai cách tiếp cận. Có thể thấy rằng sự sai khác tương đối giữa các kết quả là khá nhỏ, thấp hơn  $2.7 \times 10^{-2}$  tại mỗi tần số ước lượng. Do đó, giải thuật đề xuất cho phép xác định các giá trị hợp lý của đặc trưng LVE mà chỉ cần dựa trên đường cong chủ của DM.

### 2.2.3 Kết luận

Một phương pháp lý thuyết có thể xác định RM và CC của vật liệu bê tông nhựa với độ chính xác cao, có dạng SEFs chỉ dựa trên đường cong chủ của DM đã được phát triển thành công. Trong công thức, PA được tính toán bằng phương pháp số từ đường cong chủ của DM dựa trên mối quan hệ Kramers-Kronig chính xác. Do dạng đặc biệt của SEFs dùng để xấp xỉ chính xác cao mô đun trữ và độ mềm trữ, phép biến đổi Fourier nghịch đảo được thực hiện, từ đó suy ra các công thức tính toán RM và CC. Do đó, công thức đề xuất có thể xem như tuân thủ đầy đủ lý thuyết LVE và nguyên lý nhân quả, làm cho kết quả thu được có mức độ chính xác cao. Các phát hiện chính của công trình này có thể được tóm tắt như sau: (i) Sai số tương đối của các PA được tính toán là rất nhỏ mặc dù bước tần số được sử dụng khá thô, cụ thể là nhỏ hơn  $1.75 \times 10^{-4}$  tại các điểm tính toán; (ii) sai số tương đối tối đa khi sử dụng giải thuật Dombi hiệu

chỉnh để xấp xỉ thành dạng SEFs là cực kỳ nhỏ, cụ thể là nhỏ hơn  $8 \times 10^{-8}$  khi sử dụng cả hệ số âm và hệ số dương, sai số này có thể được xem là không đáng kể; (iii) Biến đổi nghịch đảo Fourier được thực hiện chính xác để tính toán RM và CC nhờ vào dạng đặc biệt của SEFs. (iv) RM và CC được tính toán sau đó cũng được xấp xỉ với độ chính xác cao thành dạng SEFs bằng giải thuật Dombi hiệu chỉnh. Sai số tương đối lớn nhất nhỏ hơn  $3.8 \times 10^{-5}$  khi chỉ sử dụng các hệ số dương.

Độ chính xác tổng thể của tất cả các thuộc tính LVE được tính toán chủ yếu phụ thuộc độ chính xác của việc xác định PA. Do đó, để kết quả thu được chính xác hơn thì chỉ cần cải thiện độ chính xác của phép tích phân số trong bước tính toán PA. Mặc dù giải thuật đề xuất để xác định RM và CC ở dạng SEFs đòi hỏi nhiều bước tính toán nhưng kết quả thu được chính xác hơn, điều này góp phần vào việc phân tích và thiết kế mặt đường bê tông nhựa tốt hơn và do đó sẽ kéo dài được tuổi thọ sử dụng.

## **2.3 Xác định các đặc tính LVE bằng thí nghiệm trong phòng**

Thuộc tính LVE của vật liệu bê tông nhựa có thể được xác định trong cả miền thời gian và miền tần số. Trong miền thời gian, chúng có thể được xác định bởi các thí nghiệm như: thí nghiệm đảo, thí nghiệm từ biến, thí nghiệm từ biến – hồi phục (CR). Trong luận án này, giải thuật được đề xuất bởi Nguyễn và cộng sự (2021) được lựa chọn để xử lý dữ liệu của thí nghiệm CR vì giải thuật này có thể xác định các CC của bê tông nhựa với độ chính xác cao ở miền nhiệt độ trung bình và cao. Trong miền tần số, thí nghiệm mô đun động (DM) được sử dụng rộng rãi bởi sự ổn định và đơn giản.

## **2.4 Xác định biến dạng vĩnh viễn bằng thí nghiệm trong phòng**

### *2.4.1 Thuật toán xác định biến dạng VP thuần túy dựa trên dữ liệu thí nghiệm GCR*

**Dữ liệu đầu vào:** Lịch sử tải trọng theo thời gian, biến dạng đo được, số lượng chu kỳ gia tải  $n$

- Tính toán độ mềm từ biến thực nghiệm theo phương trình (2.015)

$$\frac{\varepsilon_T(t_n) - \varepsilon_T(t)}{\sigma_n} = \sum_{i=0}^{n-1} D(t_n - t_i) \frac{\Delta\sigma_i}{\sigma_n} - \sum_{i=0}^{n-1} D(t - t_i) \frac{\Delta\sigma_i}{\sigma_n} + D(t - t_n), \text{ for } t \geq t_n \quad (2.105)$$

- Tính toán độ gia tăng ứng suất rời rạc:  $\Delta\sigma_i, i \in \{0, n-1\}$

Bước 1. Tính ngược CC:

Đầu tiên, chọn bộ giá trị ban đầu cho hàm xấp xỉ giải tích của CC (AACC) rút ra từ mô hình HS. Sau đó, sử dụng kỹ thuật “curve fitting” để khớp tốt nhất phương trình (2.105). Hàm AACC với tham số cho kết quả khớp tốt nhất là nghiệm của phương trình (2.105) bằng cách sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu.

Bước 2. Dự đoán biến dạng VE thuần túy:

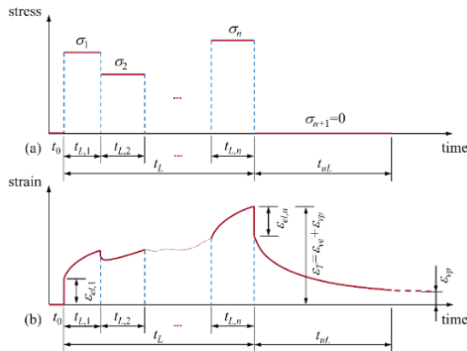
Tính toán biến dạng VE với hàm AACC với các tham số khớp tốt nhất xác định ở Bước 1:

$$\varepsilon_{ve}(t) = \sum_{i=0}^{m, t_m \leq t \leq t_{m+1}} D(t - t_i) \Delta\sigma_i, \text{ for } t_0 < t \leq t_n \quad (2.99)$$

$$\varepsilon_{ve}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} D(t - t_i) \Delta\sigma_i - D(t - t_n) \cdot \sigma_n, \text{ for } t > t_n \quad (2.100)$$

Bước 3. Tính toán biến dạng VP thuần túy:

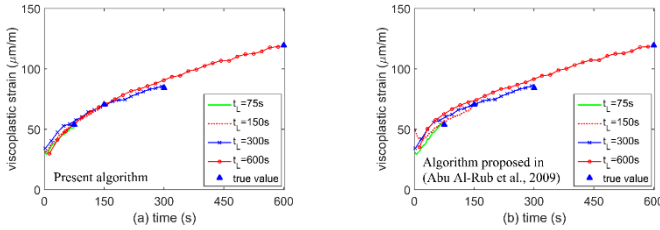
$$\varepsilon_{vp}(t) = \varepsilon_T(t) - \varepsilon_{ve}(t) \quad (2.101)$$



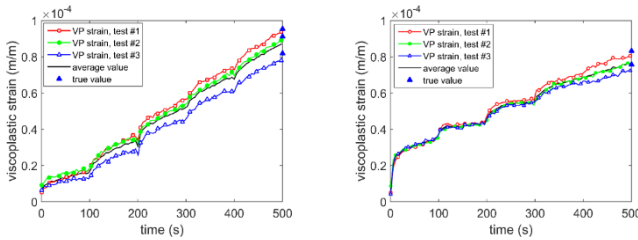
Hình 2.22. Mô tả thí nghiệm GCR, (a) lịch sử tải tác dụng, (b) biến dạng phản ứng (Tran et al, 2022).

### 2.4.2 Xác thực phương pháp

Kết quả thu được từ các thí nghiệm CR với mức ứng suất đơn (SSCR) cho thấy giá trị của biến dạng VP tính toán với thuật toán đề xuất chính xác hơn khi so với thuật toán của Abu Al-Rub và cộng sự (2009) (xem Hình 2.29).



Hình 2.29. Biến dạng VP thuần túy thu được từ tất cả các thí nghiệm SSCR ở 50°C, (a) sử dụng hàm AACC, (b) sử dụng hàm CC có dạng chuỗi Prony



Hình 2.37. Sự tiến triển của biến dạng VP ở 50°C trong mẫu # 3 của các thí nghiệm MSCR tăng dần

Hình 2.37. Sự tiến triển của biến dạng VP ở 50°C trong mẫu # 3 của các thí nghiệm MSCR giảm dần

Thêm nữa, tải tác dụng gồm 5 bước thời gian bằng nhau có ứng suất tăng dần và giảm dần (MSCR) được thực hiện nhằm xác minh hiệu suất của thí nghiệm GCR trong việc xử lý các tải có lịch sử phức tạp. Sau khi loại trừ biến dạng VE ra khỏi biến dạng đo được, biến dạng VP của tất cả các thí nghiệm MSCR tăng dần được xác định và trình bày ở Hình 2.37. Do tích lũy PD ban đầu của tất cả các thí nghiệm là khác nhau nên cơ bản biến dạng VP thu được của mỗi thí nghiệm là không thể so sánh với nhau. Tuy nhiên, việc so sánh vẫn được coi là có ý nghĩa nếu khả năng kháng PD của vật liệu không thay đổi nhiều. Trong trường hợp của nghiên cứu này, sự khác biệt không quá 10.91% giữa một đường cong VP bất kỳ so với đường cong trung bình, vì vậy, các biến dạng VP được

tính toán có thể xem như có sự lặp lại. Thêm nữa, sự khác biệt tương đối giữa biến dạng VP thu được và “giá trị thực” thấp 4.78% đã chứng minh độ tin cậy cao của các giá trị biến dạng VP được tính toán dựa trên phương pháp đề xuất ngay cả với lịch sử tải trọng phức tạp.

Hình 2.41 trình bày biến dạng VP được xác định từ dữ liệu của các thí nghiệm MSCR giảm dần. Sự khác biệt tương đối giữa một đường cong VP bất kỳ so với đường cong trung bình thấp hơn 4.35%. Hơn thế nữa, biến dạng VP tính toán chỉ khác không quá 4.41% so với ‘giá trị thực’. Do đó, phương pháp đề xuất có thể xác định một cách tin cậy biến dạng VP với điều kiện tải trọng tác dụng phức tạp như trong thí nghiệm MSCR giảm dần.

### 2.4.3 Kết luận

Phiên bản tổng quát của quy trình thử nghiệm CR đã được đề xuất nhằm tính toán PD của hỗn hợp bê tông nhựa chịu tác động của bất kỳ lịch sử tải trọng phức tạp nào trong miền thời gian. Việc sử dụng thí nghiệm GCR đã thành công để mô tả đặc tính cả về VE và PD của vật liệu ở 50°C mà không cần tiến hành các thí nghiệm DM. Nhờ thuật toán ngược, các CC được xác định với độ chính xác và độ lặp lại tốt, dựa vào đó biến dạng VP có thể được xác định chính xác ngay cả với thời gian phục hồi ngắn. Các kết quả chính có thể được tóm tắt như sau: (i) Hàm AACC suy ra từ mô hình HS vượt trội hơn hàm CC ở dạng chuỗi Prony khi dùng để khớp với dữ liệu độ mềm hồi phục. Các CC thu được bởi chuỗi Prony lệch khá xa so với các CC chính xác, đặc biệt tại các thời điểm gia tải ngắn, trong khi các CC thu được theo hàm AACC cho thấy sự phù hợp tốt với các CC chính xác; (ii) Thời gian hồi phục có tác động đáng kể đến các biến dạng VP đo trực tiếp 50°C; tuy nhiên, nó không ảnh hưởng nhiều đến biến dạng VP được tính toán ngược. Thực tế, với thời gian xả tải bằng 2–3 lần thời gian gia tải có thể mang đến độ chính xác khoảng 3% đối với các biến dạng VP được tính toán ngược. Do đó, tỷ số giữa thời gian xả tải và thời gian gia tải trong khoảng từ 2 đến 5 là đủ cho thuật toán tính ngược cho kết quả tin cậy khi thí nghiệm ở 50°C. Ngược lại, phương pháp đo trực tiếp cần thời gian dỡ tải dài hơn

để đạt được kết quả tốt ở cùng nhiệt độ thí nghiệm, ít nhất là 7 lần thời gian gia tải; (iii) Ở nhiệt độ cao (50°C), biến dạng vĩnh cửu đóng góp một phần quan trọng vào biến dạng tổng, điều này cho thấy một hỗn hợp có độ cứng cao hơn có thể có khả năng kháng hần lún tốt hơn; (iv) khi thời gian dỡ tải bằng 5 lần thời gian gia tải, sai số tương đối của biến dạng VP nhỏ hơn 4.78%, trong khi sự khác biệt giữa các đường cong VP so với đường cong trung bình nhỏ hơn 10.91% chứng minh rằng thuật toán giải ngược đáng tin cậy khi thí nghiệm ở nhiệt độ cao (50°C); (v) Lịch sử tác dụng tải có ảnh hưởng đến sự phát triển của biến dạng VP. Với cùng số lần gia tải, thời gian gia tải, và giá trị lớn nhất của của ứng suất tác dụng, biến dạng VP thu được của kiểu thí nghiệm MSCR tăng dần thì lớn hơn biến dạng VP thu được trong kiểu thí nghiệm MSCR giảm dần, cao hơn xấp xỉ 14.16% trong điều kiện của nghiên cứu này.

Theo các kết quả thu được, quy trình thí nghiệm đề xuất cho phép xác định biến dạng vĩnh viễn thuần túy của hỗn hợp bê tông nhựa với độ chính xác và khả năng lặp lại cao. Do đó, các kết quả có thể được sử dụng để hiệu chỉnh các mô hình dự đoán cũng như đánh giá khả năng phát triển vết hần lún của hỗn hợp bê tông nhựa.

### **CHƯƠNG III: KIỂM CHỨNG NGUYÊN LÝ TƯƠNG ĐƯƠNG THỜI GIAN – NHIỆT ĐỘ ĐỐI VỚI BIẾN DẠNG ĐỂ NHÓT XÁC ĐỊNH TỪ THÍ NGHIỆM TỪ BIẾN – HỒI PHỤC CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA TRONG MIỀN BIẾN DẠNG NHỎ**

#### **3.1 Giới thiệu**

Mục tiêu của chương này là kiểm chứng một cách đầy đủ khả năng áp dụng nguyên lý tương đương thời gian – nhiệt độ (TTSP) cho biến dạng VP trong miền biến dạng nhỏ. Lý do của việc giới hạn biên độ biến dạng là nhằm đảm bảo sự hợp lệ của lý thuyết LVE và các đặc tính LVE có thể được xác định trong cả miền thời gian và miền tần số bằng các quy trình cơ bản, trên cơ sở đó có thể đánh giá được độ tin cậy của biến dạng VP thu được. Mục tiêu của chương này cụ thể như sau: (i) Xác định biến dạng VP thuần túy trong miền biến dạng nhỏ

của nhiều loại hỗn hợp bê tông nhựa gây ra bởi nhiều mức ứng suất và nhiệt độ khác nhau bằng thí nghiệm CR; (ii) phát triển công thức lý thuyết mới để ước lượng định lượng ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau gây ra sai lệch trong kết quả thu được; (iii) Xem xét việc mở rộng các kỹ thuật dịch chuyển LVE hiện có cho biến dạng tổng và biến dạng VP và phát triển một phương pháp dịch chuyển mới để xác định các hệ số dịch chuyển một cách đáng tin cậy; (iv) phân tích các đặc tính của các đường cong chính thu được và các hệ số dịch chuyển tương ứng của chúng để chứng minh về mặt lý thuyết khả năng áp dụng TTSP trong miền VP; (v) áp dụng một mô hình VP đơn giản để dự đoán biến dạng không hồi phục của tất cả các hỗn hợp được khảo sát trong nghiên cứu này nhằm chứng minh sự hiệu quả của đường cong chính của biến dạng VP và các hệ số dịch chuyển tương ứng trong việc xác định đặc trưng và dự báo ứng xử PD của hỗn hợp bê tông nhựa, dựa vào đó TTSP trong miền VP có thể được xác thực bằng thực nghiệm.

### 3.2 Vật liệu và phương pháp

Trong mục này, việc áp dụng TTSP cho miền LVE và VP của ba loại hỗn hợp bê tông nhựa gồm: bê tông nhựa thường, bê tông nhựa PMB (polymer-modified bitumen) và bê tông nhựa HiMA (highly modified asphalt mixture) được xem xét. Biến dạng VP của các thí nghiệm SSCR được tính toán bằng thuật toán trình bày ở tiểu mục 2.4.1. Sau đó, các biến dạng VP này được chuyển dịch để hình thành các đường cong chủ bằng một phương pháp chuyển dịch mới với thuật toán được trình bày ngay bên dưới.

#### *Thuật toán xác định hệ số dịch chuyển*

Bước 1: Xác định hệ số dịch chuyển  $(a_T^{n+1,n})$  áp dụng cho đẳng nhiệt  $(n+1)^{th}$  theo đẳng nhiệt  $n^{th}$

- Khớp mỗi bộ dữ liệu bằng một đa thức (bậc 2), ký hiệu  $f_n[\log(t)]$  ;  $f_{n+1}[\log(t)]$
- Chọn giá trị ban đầu của  $a_T^{n,n+1}$  , tính toán giá trị của  $f_{n+1}[\log(t/a_T^{n+1,n})]$
- xác định  $a_T^{n+1,n}$  bằng cách cực tiểu hóa:

$$\Delta f^2 = \sum_{j=j_1}^{j_2} \left\{ f_n(t_j) - f_{n+1} \left[ \log(t_j) - \log(a_T^{n+1,n}) \right] \right\}^2,$$

Trong đó  $f_n \left[ \log(t_{j_1}) \right]$  và  $f_n \left[ \log(t_{j_2}) \right]$  được định nghĩa là vùng chồng lấn tiềm năng của hai đường đẳng nhiệt.

Bước 2: Xác định hệ số chuyển dịch áp dụng cho một đường đẳng nhiệt bất kỳ theo đường đẳng nhiệt tại nhiệt độ tham chiếu  $T_{ref}$

- Lấy đường đẳng nhiệt thứ  $k$  là đường đẳng nhiệt tham chiếu; hệ số chuyển dịch áp dụng cho đường đẳng nhiệt bất kỳ thứ  $n$  theo đường đẳng nhiệt tại nhiệt độ tham chiếu  $T_{ref}$ :

$$a_T^{n,k} = \prod_{i=k}^n a_T^{i,i+1} \text{ if } n \geq k; a_T^{n,k} = \prod_{i=n}^k a_T^{i,i+1} \text{ if } n < k.$$

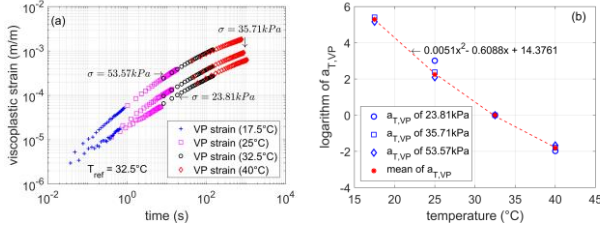
### 3.3 Kết quả thực nghiệm và phân tích

Trong mục này, kết quả của 21 thí nghiệm SSCR cho mỗi hỗn hợp được sử dụng để kiểm chứng TTSP trong miền VP và kiểm tra độ lặp lại của kết quả. Mỗi thí nghiệm SSCR bao gồm mộ gia đoạn gia tải 150s và xả tải 3000s. Mỗi mẫu thí nghiệm chịu tác dụng bởi một mức ứng suất (23.81, 35.71, hoặc 53.57MPa) ở bốn nhiệt độ khác nhau nhằm loại bỏ ảnh hưởng của tính dị hướng của hỗn hợp bê tông nhựa đến kết quả thu được. Nhiệt độ thí nghiệm là 17.5, 25, 32.5 và 40°C đối với hỗn hợp AC; 27.5, 35, 42.5 và 50°C đối với hỗn hợp PMB; 40, 47.5, 55 và 62.5 đối với hỗn hợp HiMA.

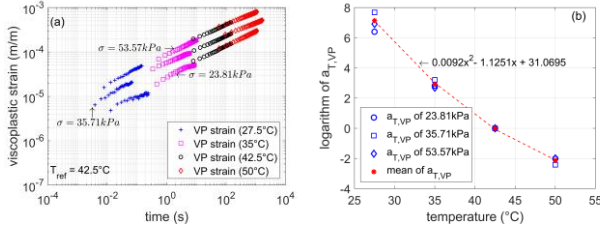
#### 3.3.1 Master curve of VP strains

Các hình 3.18 - 3.20 trình bày đường cong biến dạng VP sau khi dịch chuyển của các hỗn hợp nghiên cứu và các hệ số dịch chuyển tương ứng của chúng (ký hiệu là  $a_{T,VP}$ ). Các hình 3.18 – 3.20 (a) cho thấy hình dạng của các đường cong này tương đối trơn mượt và duy nhất. Thêm nữa, với hình dạng đơn điệu, những đường cong đó đáp ứng mối quan hệ duy nhất giữa thời gian và biến dạng VP. Do đó, có thể xem các đường cong dịch chuyển của các biến dạng VP

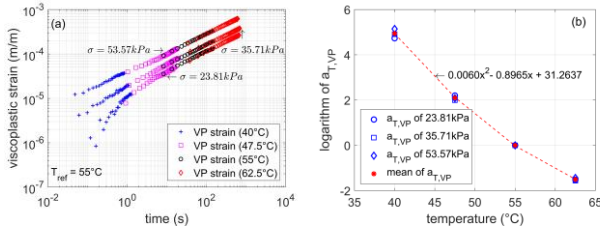
là các đường cong chính ở nhiệt độ tham chiếu. Thêm nữa, các hình 3.18 – 3.20 (b) còn chỉ ra tất cả các hệ số chuyển dịch đảm bảo một mối quan hệ đơn ánh giữa nhiệt độ và  $a_{T,VP}$  bởi vì các hàm của chúng cũng đơn điệu. Điều đó có nghĩa là TTSP có thể được áp dụng cho miền biến dạng VP của các hỗn hợp trong nghiên cứu này.



Hình 3.18. (a) Đường cong chủ của tất cả các biến dạng VP của hỗn hợp AC và (b) hệ số dịch chuyển tương ứng của chúng.



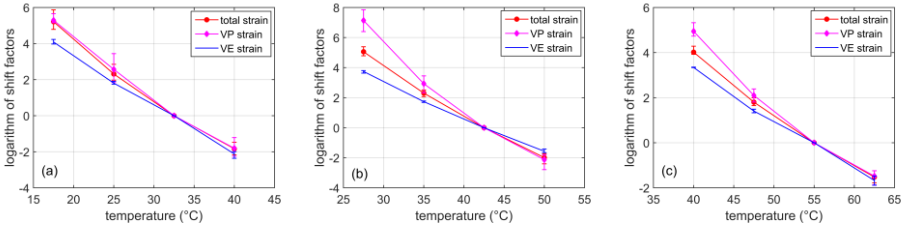
Hình 3.19. (a) Đường cong chủ của tất cả các biến dạng VP của hỗn hợp PMB và (b) hệ số dịch chuyển tương ứng của chúng.



Hình 3.20. (a) Đường cong chủ của tất cả các biến dạng VP của hỗn hợp HiMA và (b) hệ số dịch chuyển tương ứng của chúng.

### 3.3.2 So sánh hệ số dịch chuyển của biến dạng tổng, VE, VP

Trong Hình 3.2, các giá trị của  $a_{T,T}$  (hệ số dịch chuyển của biến dạng tổng),  $a_T$  (hệ số dịch chuyển của biến dạng VE) và  $a_{T,VP}$  được vẽ chung với nhau để so sánh chúng. Ảnh hưởng của sự tích lũy biến dạng VP và sự tác dụng không tức thời của tải trọng tác dụng trong giai đoạn gia tải của thí nghiệm CR cũng được nghiên cứu để xác định các khoảng tin cậy của các hệ số dịch chuyển.



Hình 3.21. Hệ số dịch chuyển của biến dạng tổng, VE và VP thu được với mẫu của (a) AC, (b) PMB và (c) HiMA.

Có thể quan sát trong Hình 3.21, các giá trị của  $a_{T,T}$  và  $a_{T,VP}$  dường như tương tự các giá trị của  $a_T$  ở nhiệt độ cao. Điều này giải thích vì sao nhiều tác giả đề xuất mở rộng tính hợp lệ của các hệ số dịch chuyển của biến dạng VE sang miền VP. Tuy nhiên, có thể dễ dàng quan sát giá trị của các hệ số dịch chuyển của biến dạng tổng và biến dạng VP không giống giá trị của  $a_T$  trong toàn bộ phạm vi nhiệt độ được khảo sát. Trong trường hợp loại bỏ tất cả các yếu tố gây lệch giá trị của các hệ số dịch chuyển, khoảng cách giữa  $a_{T,T}$  và  $a_T$ , giữa  $a_{T,VP}$  và  $a_T$  vẫn tồn tại rõ ràng. Điều đó có nghĩa là  $a_{T,T}$  và  $a_{T,VP}$  là độc lập với  $a_T$  như được Cao & Kim (2022) đề xuất.

### 3.4 Kết luận

Trong mục này, ứng xử của VE và VP của hỗn hợp bê tông nhựa là AC, PMB và HiMA đã được xác định đặc trưng thành công bằng các thí nghiệm SSCR và giải thuật tính toán ngược đi kèm. Nhờ phương pháp dịch chuyển được đề xuất, các hệ số dịch chuyển của biến dạng VE và VP đã được xác định riêng biệt và chứng minh là rõ ràng khác nhau. Với các hệ số dịch chuyển thu được, các đường cong chủ của CC và biến dạng VP đã được xây dựng. Kết quả đã chỉ

ra rằng các CC thu được với thí nghiệm SSCR phù hợp tốt với những dữ liệu chuyển đổi từ thí nghiệm DM, điều này xác nhận độ tin cậy của các biến dạng VP thu được. Tất cả các đường cong chủ của biến dạng VP thì tương đối trơn mượt và đơn điệu, đảm bảo mối quan hệ đơn ánh giữa thời gian và biến dạng VP. Bên cạnh đó, tất cả các hệ số dịch chuyển VP đều độc lập với các mức ứng suất tác dụng và đơn ánh với nhiệt độ. Do đó, TTSP vẫn hoàn toàn có hiệu lực trong miền VP, ít nhất là với các hỗn hợp nhựa đường đã được kiểm tra.

Dựa vào kết quả của mục này, ứng xử VP của hỗn hợp bê tông nhựa có thể được khảo sát trong phạm vi thời gian gia tải dài bằng cách thực hiện một loạt các thí nghiệm SSCR với thời gian gia tải phù hợp thay cho việc thực hiện các thí nghiệm SSCR kéo dài cực kỳ lâu. Khi các đường cong chính của biến dạng VP được xây dựng, khả năng kháng PD của hỗn hợp bê tông nhựa có thể được đánh giá với độ nhạy cao. Thực tế, hỗn hợp AC được chứng minh là có khả năng kháng PD kém nhất khi so với hỗn hợp PMB và HiMA. Hơn nữa, các đường cong chính của biến dạng VP có thể được dùng để hiệu chuẩn các mô hình dự báo hần lún, điều này sẽ được thực hiện trong các công trình tiếp theo.

## **CHƯƠNG IV: XÁC ĐỊNH NGUỒN ĐỀO NHÓT CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA**

### **4.1 Giới thiệu**

Xác định đặc trưng của mặt chảy dẻo của hỗn hợp bê tông nhựa là rất việc rất quan trọng để dự đoán chính xác sự tích tụ của biến dạng vĩnh viễn. Tuy nhiên, các phương pháp xác định ứng suất chảy dẻo đã được đề xuất còn gây tranh cãi và không thuyết phục được các độc giả. Do đó, mục tiêu của mục này là đề xuất một phương pháp có khả năng xác định tồn tại hay không tồn tại ứng suất chảy VP của vật liệu trong miền biến dạng nhỏ.

### **4.2 Cơ sở lý thuyết**

Trong mục này, thí nghiệm SCR (the slope creep-recovery) được dùng để xác định tính chất của ứng suất chảy VP của hỗn hợp bê tông nhựa AC. Một

hàm ứng suất tăng tuyến tính được áp dụng trong một khoảng thời gian nhất định trước khi được dỡ bỏ để biến dạng phục hồi có thể hồi phục lại. Thuật toán GCR đã được đề xuất ở tiểu mục 2.4.1 được sử dụng để xử lý dữ liệu thí nghiệm SCR với khoảng thời gian gia tải được chia thành  $n$  khoảng. Ứng suất chảy VP được xác định dựa trên quan sát đường cong biến dạng VP thu được như phương trình sau

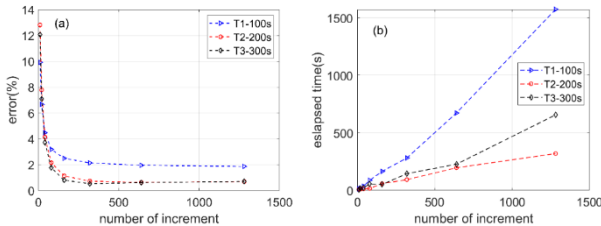
$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_{vp}(t) = 0, & \text{khi } \sigma \leq \sigma_y \\ \dot{\epsilon}_{vp}(t) > 0, & \text{khi } \sigma > \sigma_y \end{cases} \quad (4.2)$$

### 4.3 Kết quả thực nghiệm và phân tích

Trong mục này, hỗn hợp bê tông nhựa AC được chọn khảo sát ngưỡng chảy VP do hỗn hợp này được sử dụng phổ biến ở Việt Nam.

#### 4.3.1 Sự hội tụ của thuật toán GCR

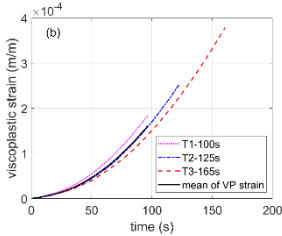
Trước khi đánh giá ứng suất chảy VP của vật liệu, một phân tích ngắn về sự hội tụ của thuật toán GCR được thực hiện nhằm xác định hệ số  $n$  sao cho cân bằng giữa độ chính xác và thời gian tính toán. Như quan sát được ở Hình 4.4(a), sai số tương đối giảm nhanh theo sự tăng lên của số lượng khoảng chia  $n$ . Còn về thời gian tính toán, khoảng chia càng mịn đòi hỏi nhiều thời gian tính toán hơn, như Hình 4.4(b). Theo kết quả thu được, với giá trị  $n = 320$  là đảm bảo cả độ chính xác và hiệu suất tính toán.



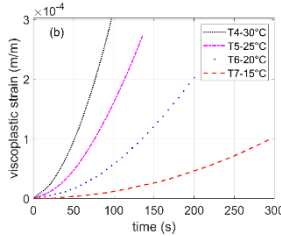
Hình 4.4. Ảnh hưởng của số lượng khoảng chia đến (a) độ chính xác của kết quả thu được với thuật toán GCR và (b) thời gian xử lý.

#### 4.3.2 Kiểm chứng sự không tồn tại của điểm chảy dẻo nhớt

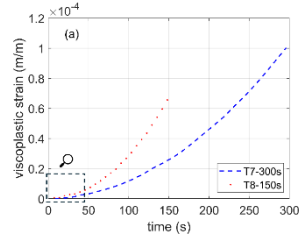
Về sự phát triển của biến dạng VP, có thể quan sát trong Hình 4.5(b) tất cả các đường cong của biến dạng VP tăng liên tục kể từ khi bắt đầu tác dụng ứng suất. Từ đó có thể đề xuất rằng vật liệu không thể hiện điểm chảy VP ở 30 °C.



Hình 4.5. (b) Sự phát triển của biến dạng VP của tất cả các thí nghiệm thực hiện trên mẫu #1.



Hình 4.6. (b) Sự phát triển của biến dạng VP của tất cả các thí nghiệm thực hiện trên mẫu #2.



Hình 4.7. (a) Sự phát triển của biến dạng VP ở 15°C

Hình 4.6(b) cho thấy biến dạng VP thu được ở các nhiệt độ khác nhau có xu hướng tăng liên tục theo thời gian gia tải do sự gia tăng độ lớn của ứng suất tác dụng, trừ trường hợp biến dạng VP thu được 15°C với tốc độ gia tải là 3N/s. Để kiểm chứng có sự tồn tại của điểm chảy VP của hỗn hợp nghiên cứu ở 15 °C thí nghiệm T8 được thực hiện bổ sung ở cùng nhiệt độ này nhưng với tốc độ gia tải là 6 N/s và biến dạng VP thu được cho thấy xu hướng tăng mặc dù có sự biến động tương đối lớn. Điều này chứng minh điểm chảy VP của hỗn hợp AC ở 15 °C, nếu có tồn tại, là rất nhỏ và do đó có thể xem như không đáng kể.

#### 4.4 Kết luận

Điểm chảy VP của hỗn hợp bê tông nhựa AC đã được xác định đặc tính thành công bằng thí nghiệm SCR trong miền biến dạng nhỏ. Việc áp dụng thuật toán GCR để tách biến dạng VE và VP của mẫu thử từ dữ liệu thí nghiệm SCR là hiệu quả. Dựa trên đường cong biến dạng VP tìm được, vật liệu không cho thấy bất kỳ điểm chia tách nào có thể quan sát được giữa vùng biến dạng phục hồi và biến dạng không phục hồi trong khoảng nhiệt độ thí từ 15°C đến 30°C. Phát hiện này phù hợp với giả định của nhiều tác giả khác, nhưng chưa được kiểm chứng một

cách đầy đủ. Kết quả của nghiên cứu này sẽ hỗ trợ cho việc phát triển mô hình ứng xử DP dựa trên lý thuyết VP không có điểm chảy.

## CHƯƠNG V: MÔ HÌNH HÓA ỨNG XỬ CỦA HỖN HỢP BÊ TÔNG NHỰA DƯỚI TÁC DỤNG CỦA ỨNG SUẤT NÉN ĐƠN TRỰC

### 5.1 Giới thiệu

Như trình bày ở tiểu mục 1.2.1, các mô hình được đề xuất trước đây còn tồn tại nhiều hạn chế như: tốn nhiều tài chính và thời gian, không thể xem xét ảnh hưởng của thời gian gia tải và xả tải, ứng suất tác dụng, nhiệt độ, ảnh hưởng của sự hóa cứng - dẻo, giả thuyết hỗn hợp bê tông nhựa có điểm chảy dẻo. Do đó, trong chương này, quy luật hóa cứng của biến dạng vĩnh viễn và hiện tượng hồi phục khả năng phát triển biến dạng VP trong giai đoạn xả tải được nghiên cứu trước khi một mô hình mới được đề xuất để dự đoán hiệu quả sự phát triển của biến dạng VP dưới tác dụng của các đường ứng suất phức tạp.

### 5.2 Đề xuất mô hình dẻo nhớt

Bằng cách áp dụng quy luật chảy VP của Perzyna, tốc độ biến dạng tại thời điểm bất kỳ được đề xuất như sau:

$$\dot{\epsilon}_{VP}(t) = h(P) \cdot \xi(s) \cdot \text{sign}(f(\sigma)) \cdot |f(\sigma)|^m \quad (5.2)$$

trong đó,  $h(P)$  đại diện cho ảnh hưởng của “cơ chế hóa cứng của biến dạng vĩnh viễn”,  $\xi(s)$  là tham số dẻo theo thời gian, đại diện cho “khả năng thực tế” của vật liệu trong việc hình thành tốc độ biến dạng VP của vật liệu và  $f(\sigma)$  là hàm tải trọng. Như quan sát của nhiều tác giả và xác nhận thông qua thực nghiệm của nghiên cứu này, hỗn hợp bê tông nhựa không thể hiện rõ ràng ứng suất chảy VP như chứng minh ở chương IV. Do đó, hàm tải trọng có thể viết dưới dạng  $f(\sigma)^m = \sigma/\sigma_L$ , khi  $\sigma \leq \sigma_L$  và  $f(\sigma)^m = (\sigma/\sigma_L)^m$ , khi  $\sigma > \sigma_L$  trong đó  $m > 1$  là tham số đại diện cho ảnh hưởng phi tuyến của ứng suất đến sự phát triển của biến dạng VP. Lưu ý  $m$  cũng có thể là một tham số phụ thuộc vào ứng suất. Ví dụ, mô hình sau đây đã được sử dụng để dự đoán sự phụ thuộc của hệ số lũy thừa.  $m = 1 + n$ , khi  $\sigma \leq \sigma_L$  và  $m = 2 + n - 1/(1 + m_1\sigma^{m_2})$ , khi  $\sigma > \sigma_L$  trong đó  $n$  là hệ

số mũ trong phương trình của hàm chầy. Sự tiến triển của biến  $s$  là được đặc trưng bởi phương trình  $s = \int_0^t D_s(t-\tau) \dot{\sigma} d\tau$ . Hàm  $D_s(t)$  chọn theo dạng hàm lũy thừa như sau:  $D_s(t) = A_1 t^{q_1} + A_2 t^{q_2}$ . Quy luật hóa cứng của biến dạng vĩnh viễn và hàm chầy được dự báo bởi phương trình  $h(P) = h_1 + h_2 / (1 + h_3 \cdot e^{h_4 P})$  và phương trình  $\xi(s) = \xi_1 + \xi_2 / (1 + \xi_3 \cdot s^n)$ .

### 5.3 Hiệu chuẩn mô hình

Mục này trình bày một quy trình phân tích có hệ thống để hiệu chuẩn mô hình VE và VP. Dữ liệu thô thu được từ các thí nghiệm được phân tích dựa trên thuật toán đề xuất ở tiểu mục 2.4.1. Các CC tính ngược được dùng hiệu chuẩn tham số của mô hình VE (mô hình HS) trong khi tham số của mô hình VP được xác định theo biến dạng VP tính toán.

#### 5.3.1 Xác định tham số của mô hình HS

Tham số của mô hình HS được hiệu chuẩn bằng cách khớp hàm của mô hình HS với đường CC trung bình (lấy trung bình của các đường CC). Giá trị của các tham số mô hình được trình bày ở bảng 5.4.

| Bảng 5.4: Tham số của mô hình HS |             |                  |       |       |          |        |
|----------------------------------|-------------|------------------|-------|-------|----------|--------|
| Tham số                          | $E_0$ (MPa) | $E_\infty$ (MPa) | $h$   | $k$   | $\delta$ | $\tau$ |
| Giá trị                          | 109.929     | 38319.305        | 0.525 | 0.435 | 912.613  | 0.185  |

#### 5.3.2 Xác định tham số của mô hình VP từ thí nghiệm CR-TC (two cycle CR)

Bảng 5.5 trình bày các tham số của hàm tăng cứng của biến dạng vĩnh viễn  $h(P)$  được xác định bằng cách khớp với kết quả thực nghiệm. Tham số của hàm dao theo thời gian và tham số phi tuyến của biến dạng VP được xác định bằng các cực tiểu hóa tổng sai số khi khớp đồng thời với biến dạng VP tính toán của thí nghiệm #1÷8 và #15÷18 được thực hiện trên mẫu #1. Kết quả được thể hiện ở Bảng (5.7 – 5.8).

Bảng 5.5: Tham số của  $h(P)$  thu được từ các thí nghiệm thực hiện trên mẫu # 1

| Tham số | $h_1$ | $h_2$    | $h_3$    | $h_4$    |
|---------|-------|----------|----------|----------|
| Giá trị | 0.196 | 1435.441 | 1786.121 | 1462.376 |

Bảng 5.7: Tham số của hàm dao tho thời gian

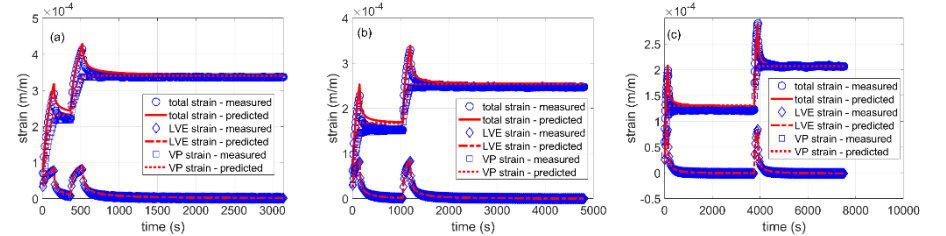
| Tham số | $\xi_1$ | $\xi_2$                | $\xi_3$ | $A_1$                  | $q_1$ | $A_2$                  | $q_2$ |
|---------|---------|------------------------|---------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| Giá trị | 0       | $9.684 \times 10^{-6}$ | 7.297   | $1.039 \times 10^{-5}$ | 0.613 | $1.128 \times 10^{-5}$ | 0.9   |

Bảng 5.8: Tham số của  $m$  và hệ số phi tuyến của biến dạng VP

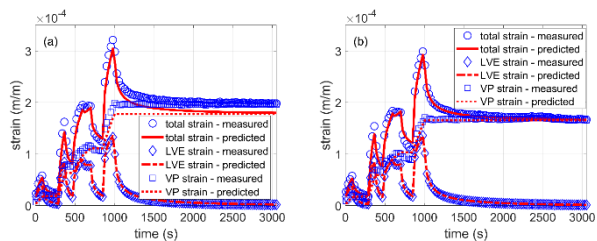
| Tham số | $m_1$ | $m_2$                  | $n$ |
|---------|-------|------------------------|-----|
| Giá trị | 1.127 | $1.144 \times 10^{-3}$ | 0.5 |

### 5.4 Xác thực mô hình

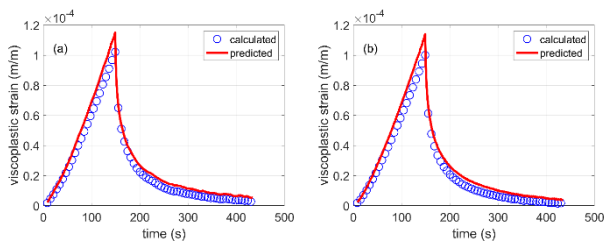
Khi tham số của mô hình LVE và VP được xác định từ các thí nghiệm thực hiện trên mẫu #1, kết quả dự đoán của mô hình được so sánh với các thí nghiệm được tiến hành độc lập trên mẫu #2 nhằm đánh giá hiệu quả của mô hình. Kết quả dự đoán của các thí nghiệm CR-TC, CR-VTL (various applied stress and loading time creep – recovery) và SCR được trình bày ở các Hình 5.9 - 5.11



Hình 5.9. So sánh giữa kết quả dự báo bằng mô hình và thực nghiệm bởi thí nghiệm GCR-TC. (a) thí nghiệm GCR-TC-225s, (b) thí nghiệm GCR-TC-900s, (c) thí nghiệm GCR-TC-1h.



Hình 5.10. So sánh giữa kết quả dự báo bằng mô hình và thực nghiệm bởi thí nghiệm GCR-VLT. (a) thí nghiệm GCR-VLT-R1, (b) thí nghiệm GCR-VLT-R2.



Hình 5.11. So sánh giữa kết quả dự báo bằng mô hình và thực nghiệm bởi thí nghiệm SCR. (a) thí nghiệm SCR- R1, (b) thí nghiệm SCR- R2.

## 5.5 Kết luận

Trong mục này, một mô hình dự báo ứng xử của hỗn hợp bê tông nhựa dưới tác dụng của ứng suất đơn trục đã được đề xuất thành công với các đóng góp cụ thể như sau: (i) tìm ra quy luật hóa cứng của biến dạng vĩnh viễn dựa trên dữ liệu thực nghiệm; (2) xác định tính chất của hiện tượng dao theo thời gian của biến dạng VP; và (3) phát triển một mô hình lý thuyết cho vật liệu bê tông nhựa khi chịu nén có xét đến sự hóa cứng và hiện tượng dao theo thời gian của biến dạng vĩnh viễn.

Các thí nghiệm CR-TC, GCR-VLT, và SCR được áp dụng để xác thực mô hình ở 32.5°C cho thấy mô hình đề xuất có khả năng dự đoán ứng xử của hỗn hợp bê tông nhựa dưới tác dụng của các đường tải phức tạp. Cũng giống các mô hình dự báo khác, khả năng áp dụng của mô hình này chỉ phù hợp trong vùng điều kiện (ứng suất tác dụng, thời gian gia tải và xả tải, nhiệt độ) dùng để xác

định thông số mô hình. Mặc dù, việc xác định tham số và xác thực mô hình chỉ được thực hiện với hỗn hợp bê tông nhựa AC, mô hình đề xuất dự kiến có thể dự đoán được ứng xử của các hỗn hợp bê tông nhựa khác trong cùng điều kiện. Mục tiêu đó sẽ được tập trung thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

## **CHƯƠNG 6: KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ**

### **6.1 Các kết luận chính**

Trong luận án này, ứng xử của VE và VP của hỗn hợp bê tông nhựa đã được xác định đặc trưng thành công bằng cách sử dụng thí nghiệm GCR cùng thuật toán đi kèm và được dự đoán tốt bởi một mô hình mới đề xuất. Những kết quả chính của luận có thể được rút ra như sau:

Trước hết, một phương pháp mới để chuyển đổi lẫn nhau giữa mô đun đàn hồi và độ mềm từ biến của vật liệu bê tông nhựa dưới dạng SEFs chỉ dựa trên các đường cong chính của mô đun động. Phương pháp đề xuất không chỉ có mức độ chính xác xuất sắc mà còn hoàn toàn tuân thủ theo lý thuyết LVE và nguyên tắc nhân quả vật lý. Ý nghĩa quan trọng của phương pháp là xác thực biến dạng VP thu được trong nghiên cứu này.

Thứ hai, quy trình thí nghiệm CR được tổng quát hóa để xác định ứng xử VE và PD mà không cần thực hiện thí nghiệm mô đun động. Đáng chú ý là quy trình đề xuất có thể áp dụng để xác định biến dạng vĩnh viễn của hỗn hợp bê tông nhựa dưới bất kỳ lịch sử tải trọng phức tạp nào trong miền thời gian. Đây là nền tảng để nghiên cứu các tính chất của dẻo nhớt của hỗn hợp bê tông nhựa.

Thứ ba, khi áp dụng thí nghiệm với ba mức ứng suất và bốn nhiệt độ khác nhau trên ba loại hỗn hợp bê tông nhựa, các biến dạng VP thu được đã được dịch chuyển bằng một phương pháp dịch chuyển mới, được sửa đổi từ đề xuất của HonerKamp và Weese (1993). Kết quả đã cho thấy rằng các đường cong chính của biến dạng VP tương đối mượt và đơn điệu, đảm bảo mối quan hệ đơn ánh giữa thời gian và biến dạng VP. Hơn nữa, kết quả còn chỉ ra rằng các mức ứng suất không ảnh hưởng đến các hệ số dịch chuyển và chúng có quan hệ đơn ánh

với nhiệt độ. Do đó, nguyên lý tương đương thời gian – nhiệt độ vẫn được xác thực là đúng trong miền VP, ít nhất với các hỗn hợp bê tông nhựa đã được kiểm tra.

Thứ tư, bằng cách sử dụng thí nghiệm SCR trong miền biến dạng nhỏ và áp dụng thuật toán GCR để chia tách biến dạng VE và VP, điểm chảy của VP của hỗn hợp bê tông nhựa thường được xác định thành công. Dựa trên đường cong biến dạng VP được xác định, vật liệu không cho thấy bất kỳ điểm tách nào có thể được quan sát giữa vùng biến dạng phục hồi và không phục hồi trong khoảng nhiệt độ thí nghiệm từ 15°C đến 30°C. Phát hiện này phù hợp với giả định được nhiều tác giả khác đưa ra, nhưng chưa được xác minh một cách đầy đủ. Kết quả của nghiên cứu này sẽ hỗ trợ việc phát triển các mô hình hành vi biến dạng vĩnh viễn dựa trên lý thuyết viscoplastic không tuân theo giới hạn chảy.

Cuối cùng, một mô hình VP mới đã được đề xuất và kết hợp với mô hình Huet-Sayegh để dự đoán hành vi của hỗn hợp nhựa đường dưới ứng suất nén đơn trục. Vì mô hình có xem xét qui luật hóa cứng của biến dạng vĩnh viễn và hàm dẫn liên quan đến thời gian của biến dạng VP nên mô hình đề xuất có thể dự đoán hiệu quả ứng xử của hỗn hợp nhựa đường dưới các đường lịch sử tải trọng phức tạp.

## **6.2 Các kiến nghị**

Dựa trên kết quả của luận án này, một số khuyến nghị được đề xuất cho các nghiên cứu sắp tới nhằm mở rộng khả năng áp dụng của mô hình như sau:

Trong nghiên cứu này, quy trình thí nghiệm GCR được giới hạn ở miền biến dạng thấp để nguyên lý Boltzmann vẫn còn có thể áp dụng cho ứng xử đàn hồi nhớt tuyến tính của vật liệu. Do đó, cần phát triển một quy trình phù hợp cho cả ứng xử đàn hồi nhớt phi tuyến của hỗn hợp nhựa đường.

Các trạng thái ứng suất của tất cả các thí nghiệm trong nghiên cứu này là đơn trục trong khi các lớp bê tông nhựa đường lại có trạng thái ứng suất đa

trục. Do đó, cần xem xét ảnh hưởng của ứng suất bên trong các nghiên cứu tiếp theo để mở rộng khả năng dự đoán của mô hình đề xuất.

Mô hình được đề xuất chỉ được hiệu chuẩn và xác thực thông qua các thí nghiệm thực hiện trên hỗn hợp AC. Cần xem xét thay đổi hỗn hợp để đánh giá độ nhạy của các tham số mô hình.