

# NGHIÊN CỨU TÍNH ĐẲNG HƯỚNG CỦA VẬT LIỆU BÊ TÔNG NHỰA

## Study of the isotropy of bituminous mixture

Phạm Nguyễn Hoàng

hoang.kcct@thu.edu.vn

Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy Lợi, Việt Nam

Đến tòa soạn: 29/06/2017; Chấp nhận đăng: 31/07/2017

**Tóm tắt.** Bài báo giới thiệu kết quả thí nghiệm trên vật liệu bê tông nhựa tại phòng thí nghiệm LGCB/LTDS-Pháp. Việc đo lường mô đun phức động, bằng thí nghiệm kéo nén trên mẫu thí nghiệm hình trụ, đã được tiến hành để xác định ứng xử đàn hồi nhớt tuyến tính (Linear Viscoelastic - LVE) của vật liệu. Tải trọng theo chu kỳ hình sin, với biên độ biến dạng vào khoảng  $50 \times 10^{-6}$ , đã được áp dụng trên miền nhiệt độ từ khoảng  $-20^\circ\text{C}$  đến khoảng  $+40^\circ\text{C}$  và miền tần số từ 0.03Hz đến 10Hz. Ứng suất theo phương dọc trục và các biến dạng theo phương ngang đã được tiến hành đo đạc. Từ đó, mô đun phức động,  $E^*$ , và các hệ số Poisson phức động,  $\nu^*$ , theo hai phương ngang vuông góc với nhau đã được xác định. Nguyên tắc tương quan tần số nhiệt độ (Time-Temperature Superposition Principle - TTSP) đã được kiểm tra trong không gian 3 chiều, trong điều kiện mà hệ số dịch chuyển aT dùng cho mô đun phức động và các hệ số Poisson phức động là như nhau. Từ những kết quả thu được, tính đẳng hướng trong vật liệu đã được xác nhận khi vật liệu được sử dụng ở những tần số trung bình (từ 0.01Hz đến 10Hz). Khi tần số áp dụng quá cao hoặc quá thấp, vật liệu trở thành vật liệu bất đẳng hướng.

**Từ khóa:** Bê tông nhựa; Mô đun phức động; Ứng xử đàn hồi nhớt tuyến tính; Tính đẳng hướng

**Abstract.** This paper presents the results of the test of bituminous mixtures in the laboratory LGCB/LTDS-France. Complex modulus measurements, using the tension-compression test on cylindrical specimens, were conducted to determine Linear Viscoelastic (LVE) behavior. Sinusoidal cyclic loadings, with strain amplitude of approximately  $50 \times 10^{-6}$ , were applied at several temperatures (from  $-20$  to  $+40^\circ\text{C}$ ) and frequencies (from 0.03Hz to 10Hz). In addition to axial stresses and strains, radial strains were also measured. The complex modulus,  $E^*$ , and complex Poisson's ratios,  $\nu^*$ , were then obtained in two perpendicular directions. The Time-Temperature Superposition Principle (TTSP) was verified with good approximation in three-dimensional (3D) conditions for the same values of shift factor aT. Thanks to the results obtained, the isotropy of the material has been confirmed when the material used in the medium frequencies (from 0.01Hz to 10Hz). When the applied frequency is too high or too low, the material becomes anisotropic.

**Keywords:** Bituminous mixture; Complex modulus; Linear Viscoelastic; Isotropy

### 1. GIỚI THIỆU

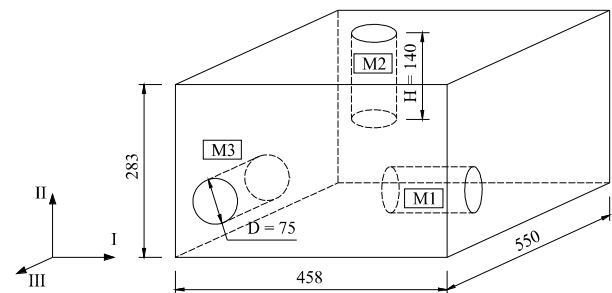
Từ trước đến nay, vật liệu bê tông nhựa vẫn luôn được quan niệm là vật liệu đẳng hướng. Điều này đã được áp dụng trong tính toán và thiết kế nhiều công trình đường. Bài báo trên là một công trình nghiên cứu về tính đàn hồi nhớt tuyến tính của vật liệu bê tông nhựa bằng việc thực hiện các thí nghiệm xác định mô đun phức động. Dựa vào những kết quả của thí nghiệm trên, việc đánh giá tính đẳng hướng của vật liệu đã được xác định. Một vài tác giả trên thế giới cũng đã nghiên cứu và đề cập đến tính đàn hồi nhớt tuyến tính của vật liệu bê tông nhựa, phải kể đến như: Olard, F. [1]; Garcia-Barrueta, J. [2]; Zhao [3,4]; Katicha, S. [5]; Weldegiorgis, M.T. [6]; Doubbaneh E. [7]; Mogawer, W. [8] và các cộng sự... Trong bài báo, sau phần mở đầu, phần 2 sẽ dành để giới thiệu về vật liệu, thiết bị cũng như quy trình thí nghiệm. Phần 3 tập trung trình bày các kết quả thu được cũng như phân tích đánh giá các kết quả đó. Trong phần 4, một vài kết luận quan trọng sẽ được rút ra.

### 2. NỘI DUNG

#### 2.1 Vật liệu

Vật liệu để chuẩn bị cho các thí nghiệm là một khối bê tông nhựa được cắt lấy trực tiếp từ cao tốc A430 tại vùng Rhône-Alpes – Pháp, với kích thước  $550 \times 458 \times 283$  mm<sup>3</sup> (Hình 1). Trên hình vẽ, phương I là phương đường xe chạy, phương II là phương thẳng đứng, cũng chính là phương đầm nén khi sản xuất vật liệu, phương III là phương vuông góc với hai phương I và II. Tiến hành khoan lấy mẫu để thu được 3 mẫu thí nghiệm hình trụ với tên gọi M1, M2 và M3 có kích

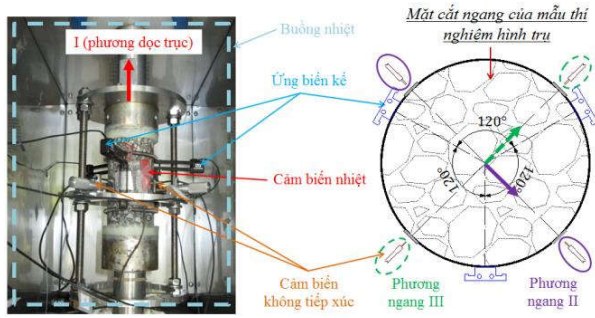
thước: đường kính  $D = 75$  mm và chiều cao  $H = 140$  mm. 3 mẫu M1, M2, M3 là các khối trụ có phương dọc trục lần lượt là phương I, II và III.



**Hình 1.** Kích thước, phương vật liệu của khối bê tông nhựa & vị trí, kích thước của 3 mẫu thí nghiệm M1, M2 và M3

#### 2.2 Thiết bị thí nghiệm

Máy nén thủy lực đã được sử dụng để tiến hành thí nghiệm. Ngoài ra, một buồng nhiệt cũng được sử dụng cho việc thay đổi nhiệt độ của mẫu theo yêu cầu, trong suốt quá trình thí nghiệm. Ba ứng biến kế đã được đặt cách đều  $120^\circ$  xung quanh mẫu hình trụ để đo biến dạng dọc trục của mẫu. Hai cặp cảm biến không tiếp xúc được đặt từng đôi một theo hai phương ngang vuông góc để đo biến dạng ngang trên hai phương đó. Ngoài ra, một cảm biến nhiệt được dính vào bề mặt mẫu để đo nhiệt độ của mẫu trong quá trình thí nghiệm. Hình 2 minh họa tổng quát thí nghiệm đối với mẫu M1 (có phương dọc trục là phương I).



**Hình 2.** Mẫu thí nghiệm và các thiết bị đo đạc được bố trí trên máy nền thủy lực và đặt trong buồng nhiệt (hình trái); mặt cắt ngang của mẫu thí nghiệm cùng với vị trí của các ứng biến kế và các cảm biến không tiếp xúc (hình phải)

### 2.3 Quy trình thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm được chất tải tại 6 tần số khác nhau (0.03Hz, 0.1Hz, 0.3Hz, 1Hz, 3Hz, 10Hz) và 9 nhiệt độ khác nhau theo thứ tự lần lượt như sau: 21.7°C, 30.5°C, 17.1°C, 12.3°C, 2.9°C, -6.4°C, -15.4°C, 39.2°C và 21.5°C. Mục đích nhằm xác định đặc trưng đàn hồi nhớt của vật liệu trên một khoảng rộng của nhiệt độ và tần số. Biên độ biến dạng dọc trục áp dụng lên mẫu là 50µm/m. Thời gian thí nghiệm cho mỗi nhiệt độ yêu cầu là 5h. Tổng thời gian thí nghiệm cho mỗi mẫu vật liệu là 45h.

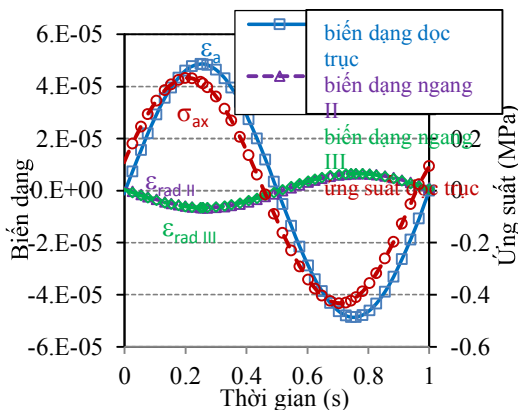
Đặt vào mẫu thí nghiệm một biến dạng dọc trục (axial strain -  $\epsilon_{ax}$ ) theo chu kỳ và được biểu diễn dưới dạng phương trình hình sin (1). Kết quả thu được là ứng suất dọc trục (axial stress -  $\sigma_{ax}$ ) theo dạng hình sin (2) và các biến dạng ngang theo hai phương ngang II và III lần lượt là  $\epsilon_{rad II}$  (radial strain II) và  $\epsilon_{rad III}$  (radial strain III), cũng được biểu diễn dưới dạng hình sin (3, 4).

$$\epsilon_{ax}(t) = \epsilon_{Aax} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\sigma_{ax}(t) = \sigma_{Aax} \sin(\omega t + \varphi_E) \quad (2)$$

$$\epsilon_{rad II}(t) = -\epsilon_{Arad II} \sin(\omega t + \varphi_{v II}) \quad (3)$$

$$\epsilon_{rad III}(t) = -\epsilon_{Arad III} \sin(\omega t + \varphi_{v III}) \quad (4)$$



**Hình 3.** Tín hiệu biến dạng dọc trục theo phương I, biến dạng ngang theo phương II và III và ứng suất dọc trục theo phương I

Một ví dụ minh họa các điểm kết quả thu được trong quá trình thí nghiệm đối với mẫu thí nghiệm M1 (có phương dọc trục là phương I) tại tần số 1Hz được trình bày tại hình 3. Phương trình từ (1) tới (4) là những phương trình minh họa các tín hiệu trên Hình 3.

Tại đây,  $\varphi_E$  là góc lệch pha giữa biến dạng và ứng suất dọc trục theo phương I,  $\varphi_{v II}$  và  $\varphi_{v III}$  lần lượt là góc lệch pha giữa biến dạng dọc trục theo phương I và biến dạng ngang theo phương II và III.  $\epsilon_{Aax}$ ,  $\epsilon_{Arad II}$ ,  $\epsilon_{Arad III}$  và  $\sigma_{Aax}$  lần lượt là biên độ biến dạng dọc trục theo phương I, biên độ biến dạng ngang theo phương II và III, và biên độ ứng suất dọc trục theo phương I.

Từ những phương trình trên (1, 2, 3, 4), mô đun phức động theo phương I ( $E^*I$ ) và hệ số Poisson phức động theo phương II và III ( $\nu^*II-I$  and  $\nu^*III-I$ ) được tính toán theo các phương trình sau:

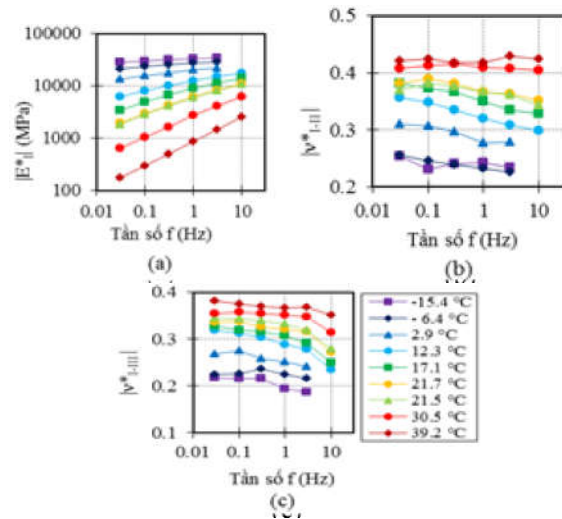
$$E_I^* = \frac{\sigma_{Aax}}{\epsilon_{Aax}} e^{j\varphi_E} = |E_I^*| e^{j\varphi_E} \quad (5)$$

$$\nu_{II-I}^* = -\frac{\epsilon_{Arad II}}{\epsilon_{Aax}} e^{j\varphi_{v II}} = |\nu_{II-I}^*| e^{j\varphi_{v II}} \quad (6)$$

$$\nu_{III-I}^* = -\frac{\epsilon_{Arad III}}{\epsilon_{Aax}} e^{j\varphi_{v III}} = |\nu_{III-I}^*| e^{j\varphi_{v III}} \quad (7)$$

Tại đây,  $|E^*I|$  là độ lớn của mô đun phức động theo phương I,  $|\nu^*II-I|$ ,  $|\nu^*III-I|$  là độ lớn của các hệ số Poisson phức động theo phương ngang II và III và  $j$  là số phức, xác định bởi  $j^2 = -1$ .

### 2.4 Đường đẳng nhiệt



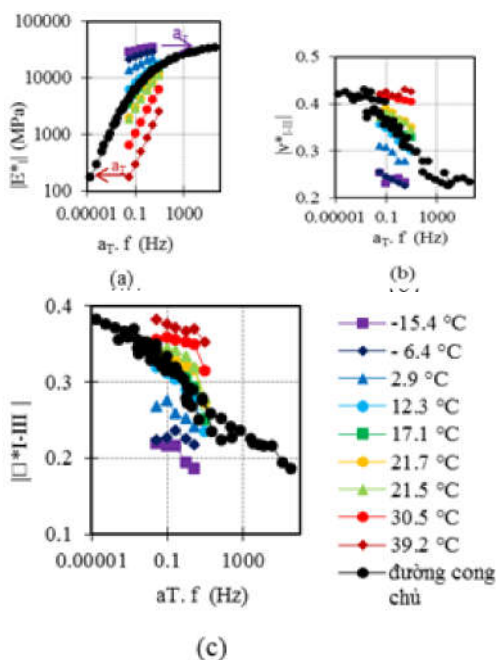
**Hình 4.** Đường đẳng nhiệt của độ lớn mô đun phức động theo phương dọc trục I (a), độ lớn hệ số Poisson phức động theo phương ngang II (b) và độ lớn hệ số Poisson phức động theo phương ngang III (c) của mẫu thí nghiệm M1

Trong phần này, bài báo sẽ giới thiệu các kết quả trên thí nghiệm với mẫu M1, có phương dọc trục là phương I. Hình 4 giới thiệu lần lượt những đường đẳng nhiệt của giá trị tuyệt đối của hệ số Poisson phức động theo hai phương ngang II và III theo hàm của tần số. Đối với kết quả đo tại -15.4°C, -6.4°C và 2.9°C ứng với tần số 10Hz sẽ không được sử dụng

và trình bày, bởi máy nén thủy lực sử dụng cho các thí nghiệm trên không đủ khả năng thực hiện đo đặc tại các điểm này.

### 2.5 Đường cong chủ

Sử dụng nguyên tắc tương quan tần số - nhiệt độ [9] cho phép xây dựng một đường cong liên tục ứng với một nhiệt độ tham chiếu bất kì ( $T_R$ ), với tên gọi là đường cong chủ (của mô đun phức động hay hệ số Poisson phức động). Đường cong này được xây dựng bằng cách dịch chuyển song song theo trục tần số lần lượt các đường đẳng nhiệt nhờ sử dụng hệ số dịch chuyển  $a_T = a_{TE} = a_{TV}$  (được biểu diễn trên hình 6). Ở đây,  $a_{TE}$  và  $a_{TV}$  lần lượt là hệ số dịch chuyển ứng với mô đun phức động và với các hệ số Poisson phức động. Tác giả cũng đã đề cập đến việc sử dụng cùng một hệ số dịch chuyển ứng với mô đun phức động và với các hệ số Poisson phức động Phạm, N. H. [11,12]. Đường cong chủ này cho phép xác định giá trị độ đón của mô đun phức động hay hệ số Poisson phức động tại những tần số quá lớn hoặc quá nhỏ mà không thể đo lường bằng phương pháp thí nghiệm. Trên hình 5, đường cong chủ được xây dựng tại nhiệt độ tham chiếu được chọn là  $T_R=15^\circ\text{C}$ .

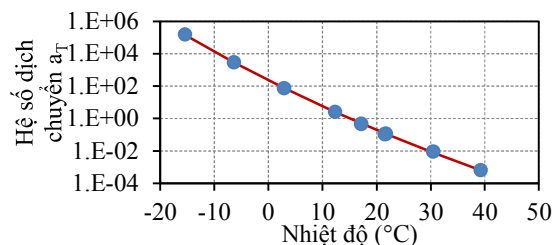


**Hình 5.** Đường cong chủ của độ lớn mô đun phức động theo phương dọc trục I (a), độ lớn hệ số Poisson phức động theo phương ngang II (b) và độ lớn hệ số Poisson phức động theo phương ngang III của mẫu thí nghiệm M1 với nhiệt độ tham chiếu chọn là  $T_R=15^\circ\text{C}$

Sau khi đã xác định nhiệt độ tham chiếu  $T_R$ , các hệ số dịch chuyển  $a_T$  là duy nhất ứng với mỗi nhiệt độ xác định theo luật WLF (Williams, Landel và Ferry) [10]. Đường cong biểu diễn các giá trị  $a_T$  (Hình 6) được xác định theo phương trình (8), với tên gọi là phương trình WLF:

$$\log(a_T, T_R) = \frac{-C_1(T-T_R)}{C_2+T-T_R} \quad (8)$$

Tại đây,  $C_1=32.6$  và  $C_2=222.5$  là hai hằng số đặc trưng của từng vật liệu nhất định.



**Hình 6.** Hệ số dịch chuyển  $a_T$  theo hàm của nhiệt độ

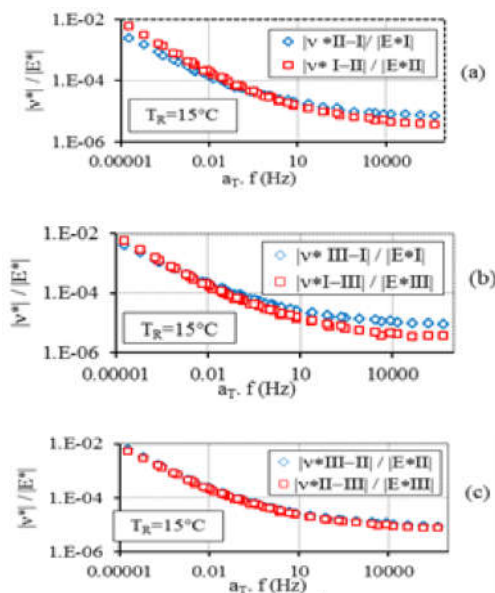
### 2.6 Đánh giá tính đẳng hướng của vật liệu

Như đã biết, công thức liên hệ giữa trường biến dạng và trường ứng suất  $[\varepsilon]=J[\sigma]$

Tại đây :  $J = \begin{bmatrix} \frac{1}{|E_I|} & -\frac{|v_{I-II}|}{|E_{II}|} & -\frac{|v_{I-III}|}{|E_{III}|} \\ -\frac{|v_{II-I}|}{|E_I|} & \frac{1}{|E_{II}|} & -\frac{|v_{II-III}|}{|E_{III}|} \\ -\frac{|v_{III-I}|}{|E_I|} & -\frac{|v_{III-II}|}{|E_{II}|} & \frac{1}{|E_{III}|} \end{bmatrix}$

Tiến hành kiểm tra tính đối xứng của ma trận J, từ đó sẽ đánh giá được tính đẳng hướng của vật liệu. Việc kiểm tra tính đối xứng của ma trận J được tiến hành bằng cách so sánh các cặp giá trị :

$$-\frac{|v_{II-I}|}{|E_I|} \text{ và } -\frac{|v_{I-II}|}{|E_{II}|}; -\frac{|v_{III-I}|}{|E_I|} \text{ và } -\frac{|v_{I-III}|}{|E_{III}|}; -\frac{|v_{III-II}|}{|E_{II}|} \text{ và } -\frac{|v_{II-III}|}{|E_{III}|}.$$



**Hình 7.** Hình vẽ biểu diễn so sánh các cặp tỉ số  $|v^*_{II-I}|/|E^*_I|$  và  $|v^*_{I-II}|/|E^*_{II}|$  (hình a),  $|v^*_{III-I}|/|E^*_I|$  và  $|v^*_{I-III}|/|E^*_{III}|$  (hình b),

Nhận thấy rằng, ba cặp đường biểu diễn rất gần nhau tại tần số thông thường, trong khoảng [0.01Hz ; 10Hz], điều đó dẫn đến, có thể kết luận rằng ma trận J là ma trận đối xứng,

đồng nghĩa với việc vật liệu thí nghiệm là vật liệu đẳng hướng.

Tại những tần số rất cao hoặc rất thấp, quan sát thấy, các cặp đường biểu diễn có xu hướng rời xa nhau, vì vậy ma trận J được xác định không đối xứng, vật liệu bất đẳng hướng.

### 3. KẾT LUẬN

Trong khuôn khổ của bài báo này, ứng xử đàn hồi nhớt tuyến tính và tính đẳng hướng của vật liệu bê tông nhựa đã được nghiên cứu. Mô đun phức động trong ba phương đặc trưng của vật liệu cũng như các hệ số Poisson phức động đã được tính toán. Những kết quả này sẵn sàng được áp dụng trong thiết kế và bảo dưỡng vật liệu trên. Một vài kết luận được đưa ra như sau:

- Mô đun và hệ số Poisson của vật liệu không là hằng số mà thay đổi theo tần số và nhiệt độ.
- Nguyên tắc tương quan tần số - nhiệt độ trong miền biến dạng bé đã được kiểm tra thông qua việc xác định mô đun phức động và hệ số Poisson phức động.
- Hệ số dịch chuyển  $a_T$  được sử dụng để xây dựng các đường cong chủ của hệ số Poisson phức động là hoàn toàn tương tự với các hệ số xây dựng đường cong chủ của mô đun phức động.
- Vật liệu bê tông nhựa được coi là đẳng hướng khi tần số áp dụng là trung bình, trong khoảng [0.01Hz ; 10Hz]. Nếu tần số áp dụng vào vật liệu là quá cao, hoặc quá thấp, vật liệu trở thành vật liệu bất đẳng hướng.

### 4. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] F. Olard, & H. Di Benedetto, "General 2S2P1D model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes," Road materials and pavement Design, 4(2), 185-224, 2003.
- [2] J. García-Barruetabeña, F. Cortés, J.M. Abete, P. Fernández, M. J. Lamela, & A. Fernández-Canteli, "Relaxation modulus-complex modulus interconversion for linear viscoelastic materials," Mechanics of Time - Dependent materials, 17(3), 465-479, 2013.
- [3] Y. Zhao, H. Liu, & W. Liu, "Characterization of linear viscoelastic properties of asphalt concrete subjected to confining pressure," Mechanics of Time-Dependent materials, 17(3), 449-463, 2013.
- [4] Y. Zhao, H. Liu, L. Bai, and Y. Tan, "Characterization of linear viscoelastic behavior of asphalt concrete using complex modulus model," Journal of materials in Civil Engineering, 25(10), 1543-1548, 2013.
- [5] S. W. Katicha, A. K. Apeagyei, G. W. Flintsch, & A. Loulizi, "Universal linear viscoelastic approximation property of fractional viscoelastic models with application to asphalt concrete," Mechanics of Time-Dependent materials, 18(3), 555-571, 2014.
- [6] M. T. Weldegiorgis, & R. A. Tarefder, "Laboratory investigation of asphalt concrete dynamic modulus testing on the criteria of meeting linear viscoelastic requirements," Road materials and pavement design, 15(3), 554-573, 2014.
- [7] E. Doubbaneh, Comportement mécanique des enrobés bitumineux des petites aux grandes déformations, INSA Lyon, 1995, ch. 8, 201-218.
- [8] W. Mogawer, T. Bennert, J. S. Daniel, R. Bonaquist, A. Austerman, & A. Booshehrian, "Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures," Road Materials and Pavement Design, 13(1), 183-208, 2012.
- [9] H. Di Benedetto and J. F. Corté, "Matériaux routiers bitumineux", Hermes (French), 2005.
- [10] J. D. Ferry, "Viscoelastic properties of polymers (3rd ed.)," New York, NY: John Wiley & Sons, 1980.
- [11] N. H. Pham, C. Sauzéat, & H. Di Benedetto, "Reclaimed asphalt pavement and additives' influence on 3D linear behaviour of warm mix asphalts," Road Materials and Pavement Design, 16(3), 569-591, 2015.
- [12] N. H. Pham, C. Sauzéat, H. Di Benedetto, & J. A. González-León, "Analysis and modeling of 3D complex modulus tests on hot and warm bituminous mixture," Mechanics of Time-Dependent Materials, 19(2), 167-186, 2015.

### TIÊU SỬ TÁC GIẢ



*Phạm Nguyễn Hoàng*

Năm sinh 1987, Hải Phòng. Tốt nghiệp Đại học tại trường Đại học Xây Dựng năm 2010. Tốt nghiệp Thạc sĩ năm 2011 và Tiến sĩ chuyên ngành Xây dựng năm 2014 tại trường Công chính Quốc gia – Cộng hòa Pháp. Hiện anh đang là giảng viên khoa Công trình trường Đại học Thủy Lợi. Lĩnh vực nghiên cứu: Kết cấu công trình, Mô phỏng ứng xử của kết cấu bằng phần mềm, Ứng dụng tái chế vật liệu,... Email: hoang.kcct@tlu.edu.vn