



## MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT-TREATED BASE MATERIALS INCORPORATING RUBBER AGGREGATES: FROM LABORATORY EVALUATION TO FIELD EXPERIMENT VALIDATION

Pham Ngoc Phuong<sup>1\*</sup>, Nguyen Van Tai<sup>1,2</sup>, Tran Thi Thu Thao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Road and Bridge Engineering, The University of Danang – University of Science and Technology, 54 Nguyen Luong Bang str., Danang, Vietnam

<sup>2</sup>Binh Minh General Consulting Co., Ltd., 68 Pham Tuan Str., Quang Ngai, Viet Nam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 26/07/2022

Revised: 04/10/2022

Accepted: 10/10/2022

Published online: 15/10/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.8.1>

\* *Corresponding author*

Email: pnphuong@dut.udn.vn; Tel: +84983577027

**Abstract.** Incorporating rubber aggregates grinding from end-of-life waste tires into cement-based materials could help improve the resistance of the composites to shrinkage cracking. However, few studies were found on rubber aggregate incorporation into cement-treated base materials. This study added rubber aggregates size 1-3 mm to cement-treated aggregates type Dmax25 (4% cement) at different contents of 1%, 2% and 5%, by weight of dry graded aggregates. These rubberized cement-treated materials were then assessed in the laboratory to determine fundamental mechanical properties. Two pavement segments were also constructed using the composites incorporating 0% and 2% rubber aggregates. The results showed that the cement-treated base materials contained 0%, 1% and 2% rubber aggregates that met the mechanical properties requirements for pavement bases. In addition, two transverse cracks (1 mm wide and 3,25 m long) appeared in the reference cement-treated base (without rubber aggregates) 30 days after the pavement was paved, whereas the one incorporating rubber aggregate was still intact. This observation demonstrated that rubber aggregates could help the cement-treated base reduce shrinkage and limit resulting cracking. The research promotes using crumb rubber aggregates from waste tires in pavement construction, limiting environmental pollution caused by end-of-life tires.

**Keywords:** rubberized cement-based composites, rubberized cement-treated base, cement-treated base cracking, modulus of elasticity, trial pavement construction.

© 2022 University of Transport and Communications



## ĐÁNH GIÁ TÍNH CHẤT CƠ HỌC CỦA CẤP PHỐI ĐÁ DĂM GIA CỐ XI MĂNG CÓ TRỘN THÊM CỐT LIỆU CAO SU Ở PHÒNG THÍ NGHIỆM VÀ NGOÀI HIỆN TRƯỜNG

Phạm Ngọc Phương<sup>1\*</sup>, Nguyễn Văn Tài<sup>1,2</sup>, Trần Thị Thu Thảo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, Số 54 Nguyễn Lương Bằng, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>2</sup>Công ty TNHH tư vấn tổng hợp Bình Minh, 68 Phạm Tuấn, Quảng Ngãi, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 26/07/2022

Ngày nhận bài sửa: 04/10/2022

Ngày chấp nhận đăng: 10/10/2022

Ngày xuất bản Online: 15/10/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.8.1>

\* Tác giả liên hệ

Email: pnphuong@dut.udn.vn; Tel: +84983577027

**Tóm tắt.** Cốt liệu cao su được nhận định sẽ giúp tăng khả năng kháng nứt do co ngót của vật liệu xi măng. Tuy nhiên hiện không nhiều các nghiên cứu sử dụng cốt liệu phế thải này trong lớp móng cấp phối đá dăm (CPĐD) gia cố xi măng (GCXM). Nghiên cứu này sử dụng cốt liệu cao su cỡ hạt 1÷3 mm thêm vào CPĐD Dmax25 gia cố 4% xi măng với tỉ lệ 1%, 2% và 5% khối lượng cốt liệu khô. Các loại CPĐD-cao su GCXM này được thí nghiệm đánh giá các chỉ tiêu cường độ và đặc biệt triển khai thi công thí điểm 2 loại CPĐD GCXM sử dụng 0% và 2% cao su. Kết quả cho thấy CPĐD GCXM trộn thêm 1% và 2% cao su đạt cường độ yêu cầu làm lớp móng trên. Ngoài ra, đã quan sát được 2 vết nứt rộng khoảng 1 mm xuất hiện ở ngày thứ 30 trên lớp móng GCXM không trộn thêm cốt liệu cao su trên toàn bộ bề rộng lớp móng (3,25 m), trong khi đó CPĐD GCXM thêm 2% cao su không xuất hiện vết nứt. Điều này chứng tỏ cốt liệu cao giúp CPĐD GCXM giảm co ngót và hạn chế nứt do co ngót. Nghiên cứu góp phần thúc đẩy sử dụng cốt liệu cao su được nghiên từ lớp xe phế thải trong xây dựng đường, góp phần hạn chế các vấn đề môi trường do lớp xe phế thải gây ra.

**Từ khóa:** Vật liệu xi măng cao su, cấp phối đá dăm gia-cao su cố xi măng, nứt móng gia cố xi măng, mô đun đàn hồi, thi công thí điểm cấp phối đá dăm gia cố xi măng.

© 2022 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Móng cấp phối đá dăm (CPĐĐ) gia cố xi măng (GCXM) có cường độ cao và ổn định nước nên thường được sử dụng cho đường cao tốc, đường có tải trọng trục lớn, các tuyến đường đi qua khu vực có chế độ thủy nhiệt không thuận lợi [1,2]. Tuy nhiên móng đường gia cố thường bị nứt do co ngót và dẫn đến hiện tượng nứt phản ánh lên lớp mặt bê tông nhựa sau khi đường đưa vào khai thác dưới tác dụng của tải trọng xe chạy và môi trường [3]. Các biện pháp chống nứt cho lớp móng GCXM chủ yếu là tạo nứt trước [4–7], sử dụng vải địa kỹ thuật [8] hoặc sử dụng tro bay hoặc kết hợp với phụ gia giảm co ngót [9]. Việc tạo nứt trước sẽ làm giảm chức năng ổn định nước và chống xâm thực của lớp móng gia cố. Gần đây có nghiên cứu kiến nghị sử dụng dầu phế thải hoặc nhũ tương để hạn chế nứt [10]. Việc sử dụng phế thải dầu ăn được xem là một giải pháp kinh tế, tiết kiệm nguồn năng lượng, bảo vệ môi trường. Một số nghiên cứu khác ứng dụng cốt sợi như sợi bazan [11] hoặc sợi polymer [12,13] để hạn chế co ngót và tăng khả năng kháng nứt của CPĐĐ GCXM. Việc sử dụng cốt sợi chỉ giúp hạn chế sự mở rộng vết nứt mà không ngăn cản sự hình thành vết nứt [13]. Ở nước ta, việc xử lý nứt lớp móng CPĐĐ GCXM chủ yếu là sau khi các vết nứt đã xuất hiện bằng cách sử dụng cát trộn nhựa đường để bịt kín các vết nứt nhỏ [14] hoặc sử dụng lưới sợi thủy tinh [15,16] trong trường hợp nứt cục bộ lớn hoặc tại các khe giả. Tùy theo mức độ nứt, lớp SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayers-lớp trung gian hấp thụ ứng suất) có thể được sử dụng [5,14]. Ngoài ra để hạn chế hiện tượng nứt phản ánh lên mặt đường bê tông nhựa, tiêu chuẩn TCCS 38:2022/TCĐBVN [17] yêu cầu chiều dày tầng mặt có sử dụng nhựa phải bằng bề dày lớp móng nửa cứng và tối thiểu bằng 14-18 cm. Tất cả các giải pháp nêu trên có những ưu nhược điểm nhất định, liên quan đến vấn đề chi phí hoặc hiệu quả trong việc cải thiện khả năng kháng nứt của cấp CPĐĐ GCXM.

Đối với móng đường GCXM, việc sử dụng cốt liệu cao su phế thải được cho rằng sẽ tăng khả năng kháng nứt do co ngót và do thay đổi nhiệt độ [18]. Tuy nhiên hiện có rất ít các nghiên cứu cụ thể về việc ứng dụng cốt liệu cao su cho lớp móng CPĐĐ GCXM [8,19,20]. Xiaoyin Sun và cs [8] đã khảo sát tính chất co ngót của CPĐĐ-cao su GCXM và nhận thấy mức độ co ngót và hệ số co ngót của các mẫu tăng dần theo thời gian bảo dưỡng, tăng nhanh ở giai đoạn đầu, sau đó chỉ tăng nhẹ và ổn định dần sau 4 ngày bảo dưỡng. Đặc biệt, mức độ co ngót và hệ số co ngót của CPĐĐ-cao su GCXM sử dụng cốt liệu cao su 0,4 mm để thay thế 1-2% thể tích cốt liệu mịn nhỏ hơn so với CPĐĐ GCXM không sử dụng cốt liệu cao su. P.N. Phương và cs [21] cũng chỉ ra cốt liệu cao su kích thước 3-6 mm thay thế 25% cỡ hạt từ 0,425-9,5 mm trong CPĐĐ Dmax25 GCXM 4% giúp giảm co ngót so với cấp phối đối chứng (không sử dụng cốt liệu cao su). Từ kết quả đo co ngót kết hợp với việc giảm mô đun đàn hồi (giảm tính giòn) của CPĐĐ-cao su GCXM, Xiaoyin Sun và cs [8] và P.N. Phương và cs [21] đã nhận định sử dụng cốt liệu cao su giúp cải thiện khả năng kháng nứt của CPĐĐ GCXM. Tuy nhiên, cũng chưa có thí nghiệm cụ thể nào ở phòng thí nghiệm để đánh giá khả năng kháng nứt của CPĐĐ GCXM có sử dụng cốt liệu cao su, đặc biệt chưa có thí nghiệm điểm nào khẳng định khả năng kháng nứt của CPĐĐ-cao su GCXM.

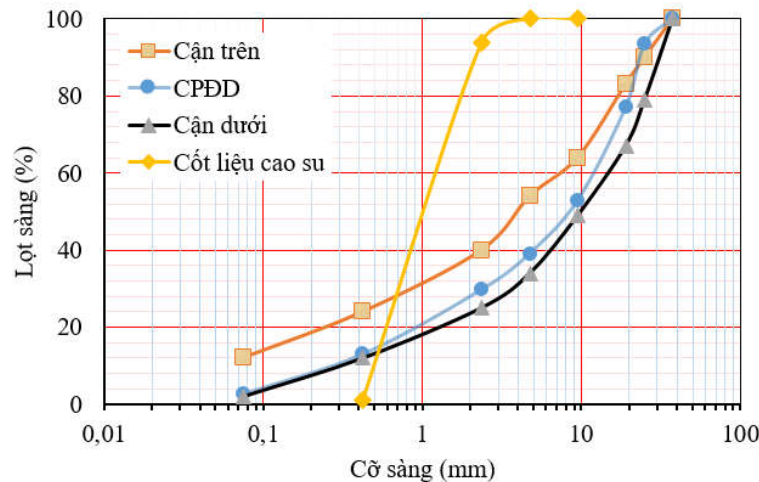
Từ các tổng hợp ở trên cho thấy có 2 hướng xử lý vấn đề nứt cho CPĐĐ GCXM: (i) nghiên cứu giải pháp xử lý vết nứt (sau khi nứt) và (ii) nghiên cứu giải pháp hạn chế phát sinh và phát triển vết nứt. Theo hướng nghiên cứu thứ 2, sử dụng cốt liệu cao su nghiền từ lốp xe phế thải trong CPĐĐ GCXM là 1 giải pháp giúp giảm co ngót và hạn chế nứt, góp phần giảm thiểu các vấn đề môi trường, thúc đẩy phát triển kinh tế tuần hoàn do tái sử dụng các phế thải công nghiệp, hướng đến phát triển xanh và bền vững. Tuy nhiên, các nghiên cứu đã tiến hành theo hướng này chỉ nhận định về khả năng kháng nứt thông qua thí nghiệm co ngót trong

phòng thí nghiệm. Trong nghiên cứu này, sử dụng cốt liệu cao su kích cỡ hạt 1÷3 mm thêm vào CPĐD Dmax25 gia cố 4% xi măng với 1%, 2% và 5% khối lượng CPĐD khô. Các loại CPĐD-cao su GCXM được tiến hành đúc mẫu trong phòng thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ học và thi công thí điểm hiện trường 2 loại CPĐD GCXM sử dụng 0% và 2% cao su để có đánh giá toàn diện về các tính chất cơ học của CPĐD-cao su GCXM, đặc biệt quan trắc nứt của các đoạn thi công thí điểm. Qua đó đối sánh với CPĐD GCXM đối chứng để làm rõ hơn về hiệu quả kháng nứt khi sử dụng cốt liệu cao su trong các lớp móng GCXM.

## 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu

CPĐD loại 1 Dmax25 sử dụng để GCXM được lấy tại mỏ đá An Hội, Quảng Ngãi, có các tính chất cơ lý đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật để GCXM theo TCVN 8858:2021 [16]. Cốt liệu cao su sử dụng có cỡ hạt 1-3 mm được nghiền từ lốp xe ô tô phế thải, có khối lượng riêng 1,2 g/cm<sup>3</sup> và độ hút nước không đáng kể [22–24]. Thành phần hạt của CPĐD và cốt liệu cao su thể hiện ở Hình 1. Xi măng PCB40 The Vissal có cường độ chịu nén 28 ngày  $\geq 44$  MPa được sử dụng để gia cố CPĐD. Thời gian xi măng bắt đầu và kết thúc ninh kết tương ứng là  $\geq 120$  phút và  $\leq 260$  phút. Xi măng có khối lượng riêng 3,02 g/cm<sup>3</sup> và lượng nước tiêu chuẩn 31% phù hợp các yêu cầu theo TCVN 6260:2009 [25].



Hình 1. Thành phần hạt cốt liệu cao su 1-3 mm và CPĐD Dmax25.

### 2.2. CPĐD-cao su GCXM

Hàm lượng xi măng 4-8% dùng để gia cố CPĐD (theo khối lượng CPĐD khô) [26]. Nghiên cứu này sử dụng hàm lượng xi măng 4% để gia cố CPĐD Dmax25. Để tạo ra CPĐD-cao su GCXM, các nghiên cứu có trước thường thay thế một phần thể tích đá dăm trong CPĐD GCXM bằng cốt liệu cao su có kích thước tương ứng [8,19–21,27,28]. Tuy nhiên, việc thay thế một phần cốt liệu theo thể tích có một số vấn đề nhất định trong việc phối trộn cốt liệu. Do đó trong nghiên cứu này, cốt liệu cao su được sử dụng như một chất độn và thêm vào CPĐD GCXM với hàm lượng 0%, 1%, 2% và 5% theo khối lượng cốt liệu khô của CPĐD GCXM để có các cấp phối nghiên cứu tương ứng 0CS (cấp phối đối chứng), 1CS, 2CS và 5CS. Lưu ý đối với CPĐD-cao su GCXM, khối lượng xi măng được tính theo 4% tổng khối lượng khô của CPĐD và cao su. Việc chọn tỷ lệ cốt liệu cao su này trên cơ sở quy đổi tỉ lệ thể

tích từ một số kết quả nghiên cứu có trước đồng thời có thể tạo ra cấp phối gia cố có thể đạt cường độ yêu cầu của tầng móng kết cấu mặt đường.

Công thức tính toán thành phần CPĐĐ-cao su GCXM như sau:

$$m_{cs} = p_{cs} m^k_{cpdd} \quad (1)$$

$$m_{xm} = p_{xm} (m^k_{cpdd} + m_{cs}) \quad (2)$$

trong đó:

$m_{cs}$ : Khối lượng cốt liệu cao su trộn thêm vào CPĐĐ (kg)

$p_{cs}$ : Thành phần phần trăm cốt liệu cao su (%)

$m^k_{cpdd}$ : Khối lượng CPĐĐ khô (kg)

$m_{xm}$ : Khối lượng xi măng trộn vào CPĐĐ-cao su (kg)

$p_{xm}$ : Thành phần phần trăm xi măng ( $p_{xm} = 4\%$ )

Từ đó thiết kế được thành phần vật liệu các CPĐĐ-cao su GCXM cho 100 kg CPĐĐ khô như Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần vật liệu CPĐĐ-cao su GCXM cho 100 kg CPĐĐ khô.

Cấp phối	$p_{cs}$ (%)	CPĐĐ khô (kg)	CS (kg)	Xi măng (kg)
0CS	0	100	0,0	4,00
1CS	1	100	1,0	4,04
2CS	2	100	2,0	4,08
5CS	5	100	5,0	4,20

### 2.3. Các phương pháp thí nghiệm

#### a. Thí nghiệm đầm nén tiêu chuẩn

Thí nghiệm này được tiến hành theo tiêu chuẩn TCVN 12790:2020, sử dụng phương pháp II-D [29]. Do CPĐĐ có hàm lượng hạt quá cỡ (>19 mm), do đó cần thực hiện hiệu chỉnh để tìm độ ẩm tốt nhất và dung trọng khô lớn nhất trong phòng thí nghiệm.

#### b. Đúc mẫu cho các thí nghiệm

Sau khi thực hiện thí nghiệm đầm nén tiêu chuẩn và hiệu chỉnh để có độ ẩm tốt nhất và dung trọng khô lớn nhất của các loại CPĐĐ-cao su GCXM, tiến hành đúc mẫu để thí nghiệm các tính chất cơ học như cường độ ép chẻ, cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi để kiểm tra tính phù hợp khi làm tầng móng kết cấu mặt đường. Mẫu chế bị là mẫu hình trụ có kích thước 15 cm x 30 cm, được đúc bằng phương pháp ép rung cho đến khi đạt được dung trọng yêu cầu. Vật liệu vào khuôn theo 3 lớp (chia phần vật liệu cho một khuôn làm 3 phần bằng nhau), dùng đầm rung ép chặt phần vật liệu trong khuôn cho đến khi đạt chiều cao 10 cm cho mỗi lớp đã được đánh dấu trước trong khuôn. Các lớp tiếp theo thực hiện thao tác tương tự, cần xới bề mặt lớp trước đã đầm để tạo liên kết với lớp đầm lớp tiếp theo. Sau khi đầm ép xong lớp cuối cùng, tiến hành hoàn thiện bề mặt mẫu bằng phẳng. Cách chế bị này phù hợp với quá trình thi công ở hiện trường và tiết kiệm thời gian đúc mẫu.

Mẫu được tháo khuôn 24h kể từ khi hoàn thiện đúc mẫu. Sau đó các mẫu sẽ được bảo dưỡng 7 ngày ẩm và 7 ngày ngâm trong nước theo yêu cầu của TCVN 8858:2021 [16]. Sau

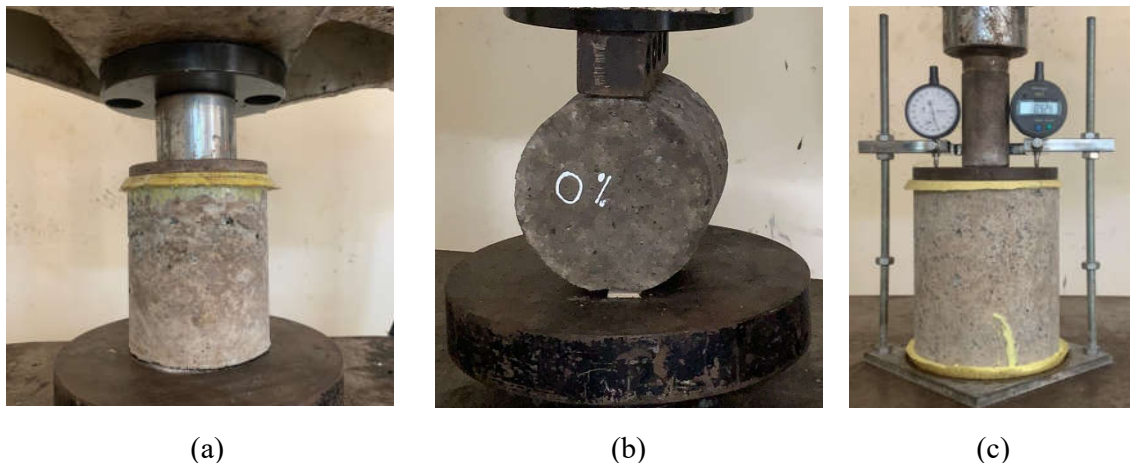
khi đủ thời gian bảo dưỡng, mẫu sẽ được cắt ra thành các mẫu hình trụ có các kích thước 15 cm × 17,25 cm (tỉ lệ chiều cao/đường kính mẫu: 1,15) để thí nghiệm cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi, mẫu 15 cm × 10 cm phục vụ thí nghiệm ép chẻ. Số lượng mẫu chế bị đảm bảo tối thiểu 3 mẫu cho từng nội dung thí nghiệm (cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ và mô đun đàn hồi). Việc chế bị mẫu và mẫu đúc thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Đúc mẫu CPĐD GCXM.

b. Thí nghiệm cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ và mô đun đàn hồi

Cường độ nén ( $f_c$ ) của CPĐD GCXM được thí nghiệm theo TCVN 8858:2021 [16] trên các mẫu trụ có kích thước trụ 15 cm x 17,25 cm (Hình 3a). Cường độ ép chẻ ( $f_i$ ) thực hiện trên các mẫu trụ 15 cm x 10 cm theo TCVN 8862:2011 [30] (Hình 3b). Tốc độ gia tải khi nén là 1mm/phút và khi ép chẻ là 0,7 MPa/phút. Thí nghiệm mô đun đàn hồi được thực hiện theo TCVN 9843:2013 [31] với sơ đồ thí nghiệm như Hình 3c. Mẫu được lập gia tải đến 30% $f_c$  sau đó dỡ tải 5 lần để khử bỏ các biến dạng dư trước khi ghi biến dạng chính thức của mẫu trong 3 lần gia và dỡ tải tiếp theo. Khi gia tải đến 30% $f_c$  hoặc kết thúc dỡ tải, cần đợi khoảng 1 phút để ổn định chuyển vị trên đồng hồ trước khi đọc giá trị. Trị số biến dạng phục hồi của mẫu để tính toán mô đun đàn hồi là giá trị trung bình trên 2 đồng hồ đo.



Hình 3. Thí nghiệm cường độ chịu nén (a), cường độ ép chẻ (b) và mô đun đàn hồi (c).

## 2.4. Thi công thí điểm CPĐĐ GCXM

Mục đích của thi công thí điểm ở hiện trường là để kiểm tra tính phù hợp của vật liệu CPĐĐ-cao su GCXM trong xây dựng móng đường, đặc biệt kiểm tra khả năng kháng nứt thực tế của CPĐĐ GCXM có sử dụng chất độn cốt liệu cao su. Do điều kiện hạn chế, nghiên cứu này chỉ thi công và đối sánh 2 loại cấp phối: Cấp phối đối chứng (0CS) và CPĐĐ GCXM trộn thêm 2% cao su (2CS). Việc lựa chọn cấp phối 2CS trên cơ sở kết quả thí nghiệm trong phòng khi 2% cao su cho kết quả đảm bảo các yêu cầu cường độ làm móng đường (xem phần kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ học mục 2.2). Đoạn thi công là công trình đường cấp IV, miền núi, tốc độ thiết kế 40 Km/h, bề rộng mặt đường là 5,5 m, bề rộng lề đường 2 x 1 m (trong đó gia cố 2 x 0,5 m) ở xã Long Mai, huyện Minh Long, tỉnh Quảng Ngãi. Lớp gia cố thi công thí điểm nằm trên lớp móng dưới cấp phối thiên nhiên dày 30 cm với độ chặt đạt yêu cầu K98 và mô đun đàn hồi đo được 80,47 MPa. Mỗi phân đoạn thi công thí điểm dài 20 m gồm đoạn sử dụng CPĐĐ gia cố 4% xi măng (0CS) từ KM1+ 300 - KM1 + 320 và đoạn với cấp phối trộn thêm 2% cao su (2CS) từ KM1 + 320 - KM1 + 340. Lớp cấp phối thi công thí điểm có chiều dày 15 cm và chiều rộng 3,25 m (Hình 4a).

Do khối lượng thi công nhỏ nên chỉ có thể trộn và rải cấp phối bằng thủ công. Khả năng trộn lớn nhất của mẻ trộn là 4,5 m<sup>3</sup>, mỗi phân đoạn cần khoảng 12 m<sup>3</sup> CPĐĐ do đó chia làm 4 lần trộn (Hình 4b). Thời gian cho 1 mẻ trộn là 30 phút, trong đó 20 phút chuẩn bị vật liệu, cho CPĐĐ, cao su và xi măng vào mẻ và tiến hành trộn khô hỗn hợp; tiếp theo cho nước vào máng và trộn kỹ hỗn hợp trong máng trong 10 phút. Sau khi mẻ trộn thứ 4 kết thúc, dùng máy đào kết hợp với công nhân san gạt hỗn hợp phân bố đều trong ván khuôn trong thời gian 30 phút (Hình 4c). Sau đó tiến hành lu sơ bộ, lu lèn chặt (Hình 4d) đến khi kiểm tra đạt độ chặt không nhỏ hơn 100%, sau đó lu hoàn thiện móng đường. Thời gian lu lèn khoảng 40 phút. Tổng thời gian cho dây chuyền thi công lớp móng CPĐĐ GCXM và cao su 190 phút.

Đối với lớp CPĐĐ GCXM đối chứng (0CS), không xuất hiện vết nứt trên bề mặt vật liệu trong suốt quá trình lu lèn. Ngược lại trong giai đoạn lu lèn chặt (khi bật chế độ rung), lớp móng CPĐĐ GCXM trộn thêm 2% cao su (2CS) đã xuất hiện hiện tượng nứt và các vết nứt này có thể nhìn thấy được trên bề mặt lớp móng trong các lượt lu đầu tiên. Hiện tượng này có thể là do cao su có tính đàn hồi, dưới tác dụng của tải trọng lu, lớp vật liệu bị ép chặt xuống, nhưng khi lu đi qua lớp vật liệu lại có xu hướng nở ra gây ra hiện tượng nứt. Chính vì vậy, số lượt lu lèn để đạt độ chặt của hỗn hợp 2CS nhiều hơn so với hỗn hợp 0CS. Tuy nhiên, khi lu đến các lượt cuối cùng của giai đoạn lu lèn chặt thì các vết nứt đã biến mất. Sở dĩ các vết nứt biến mất ở giai đoạn này là do lớp vật liệu đã đạt đến độ chặt nhất định, lúc này khả năng biến dạng của cao su không thắng được lực ma sát và sự chèn móc giữa các hạt cốt liệu.

Sau khi thi công xong, tiến hành bảo dưỡng lớp móng gia cố trong 14 ngày bằng phương pháp phủ cát tưới ẩm (Hình 4e) theo hướng dẫn trong TCVN 8858:2021 [16]. Lớp cát được phủ kín và đều khắp bề mặt lớp móng có chiều dày khoảng 7 cm. Hai bên mép ván khuôn sử dụng bao tải phủ kín. Sau đó tưới nước bảo dưỡng 2 lần/ngày vào sáng sớm (6-7 h) và chiều muộn (17-18 h), lượng nước tưới đảm bảo thấm ướt toàn bộ lớp cát phủ. Kết thúc thời gian bảo dưỡng (14 ngày), tiến hành vệ sinh toàn bộ mặt đường như dọn cát, vệ sinh bề mặt. Sau đó khoan mẫu đường kính 15 cm để xác định chỉ tiêu cường độ chịu nén, độ ép chế và mô đun đàn hồi. Đồng thời cũng quan sát nứt trên mặt đường. Tại thời điểm 14 ngày sau khi thi công thì cả 2 đoạn thi công đều chưa xuất hiện nứt, do đó tiếp tục quan trắc theo dõi.



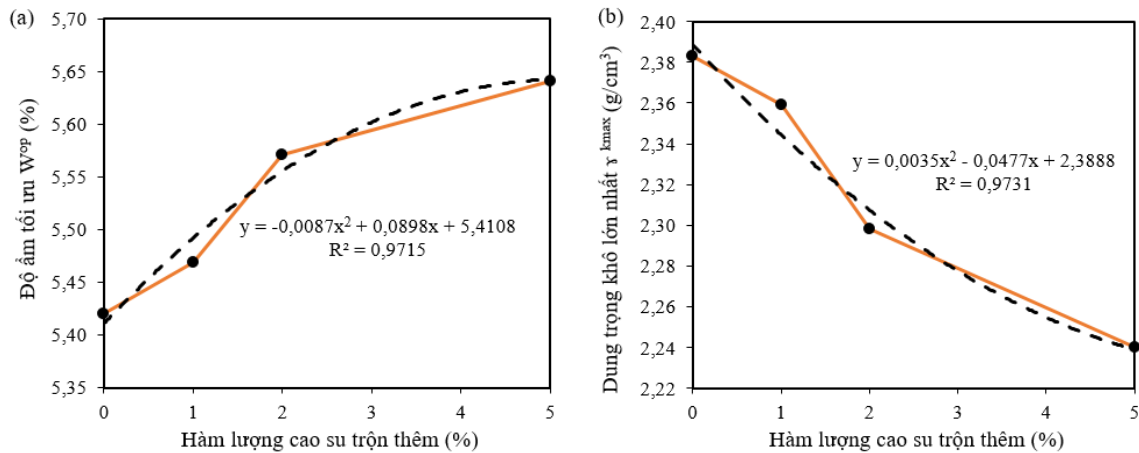
Hình 4. Thi công và bảo dưỡng lớp CPĐĐ GCXM.

### 3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

#### 3.1. Độ ẩm tốt nhất và dung trọng khô lớn nhất

Quan hệ giữa hàm lượng cốt liệu cao và độ ẩm tốt nhất  $W_{op}$  cũng như dung trọng khô lớn nhất  $\gamma_{kmax}$  sau khi hiệu chỉnh được trình bày trên Hình 5. Sử dụng phương pháp hồi qui với đường cong phù hợp nhất và xác định các hệ số xác định  $R^2$  tương ứng. Kết quả cho thấy các mối quan hệ có dạng bậc hai chặt chẽ giữa tỷ lệ cốt liệu cao su trộn thêm và độ ẩm tốt nhất  $W_{op}$  cũng như dung trọng khô lớn nhất  $\gamma_{kmax}$ , hệ số xác định  $R^2$  đều lớn hơn 0,97. Hình 5 cho thấy khi tăng tỷ lệ cốt liệu cao su dẫn đến độ ẩm tốt nhất  $W_{op}$  tăng và dung trọng khô lớn nhất  $\gamma_{kmax}$  giảm, tỷ lệ chất độn cao su càng lớn thì  $W_{op}$  càng lớn và  $\gamma_{kmax}$  càng nhỏ. Sự sụt giảm dung trọng khô lớn nhất của CPĐĐ-cao su GCXM là do cốt liệu cao su có khối lượng riêng nhỏ hơn đá dăm. Ngoài ra, tính đàn hồi của cốt liệu cao su ảnh hưởng đến quá trình đầm nén và làm giảm độ chặt của CPĐĐ-cao su GCXM. Điều này cũng góp phần làm giảm  $\gamma_{kmax}$  của các cấp phối có trộn thêm cốt liệu cao su. Trong khi  $\gamma_{kmax}$  giảm thì  $W_{op}$  lại tăng lên vì cao su là vật liệu kỵ nước nên chúng có khả năng bám khí trên bề mặt khi tiếp xúc với nước. Do vậy khi sử dụng cốt liệu cao su trong các cấp phối dẫn đến nhu cầu nước sẽ nhiều hơn để đảm bảo xung quanh bề mặt hạt cao su đủ độ ẩm để làm giảm ma sát của giữa các hạt cao su với các thành phần khác, giúp hỗn hợp dễ được lèn chặt [21], tỷ lệ cao su càng lớn thì nhu cầu nước càng nhiều. Kết quả trên có xu hướng tương đồng với nghiên cứu của P.N. Phương và cs [21] khi tác giả này sử dụng cốt liệu cao su có kích thước 3-6 mm để thay thế một phần thể tích đá dăm cỡ hạt 0,425-9,5 mm trong CPĐĐ Dmax25 gia cố 4% xi măng.

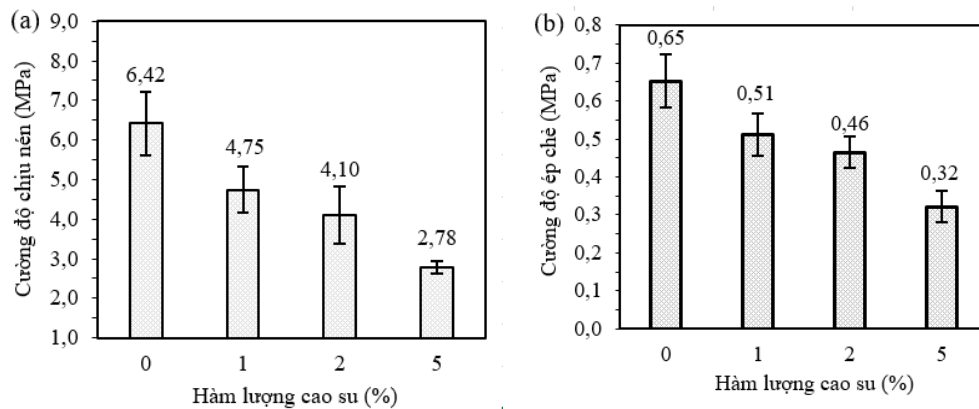




Hình 5. Ảnh hưởng của cốt liệu cao su trộn thêm với độ âm tốt nhất (a) và dung trọng khô lớn nhất (b).

### 3.2. Cường độ chịu nén và ép chế mẫu chế bị trong phòng thí nghiệm

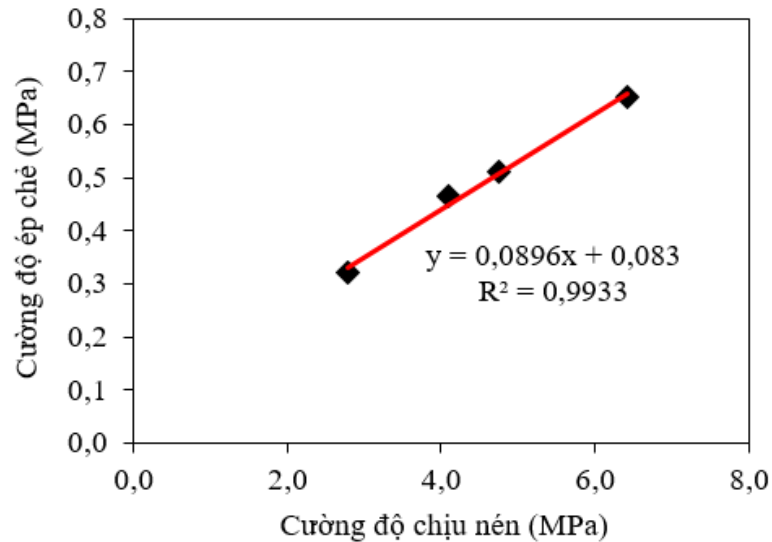
Hình 6 cho thấy rằng tỷ lệ cốt liệu cao su phối trộn ảnh hưởng rất lớn đến cường độ chịu nén ( $f_c$ ) và cường độ ép chế ( $f_t$ ) của các CPĐĐ GCXM, hàm lượng cao su trộn thêm càng lớn thì cường độ giảm càng sâu. Xu hướng này khá tương đồng với kết quả từ các nghiên cứu có trước [8,19,21,27]. Cụ thể, cường độ chịu nén và cường độ ép chế lớn nhất thuộc về cấp phối đối chứng 0CS ( $f_c = 6,42$  MPa và  $f_t = 0,65$  MPa) và nhỏ nhất là cấp phối 5CS ( $f_c = 2,78$  MPa và  $f_t = 0,32$  MPa). Khi trộn thêm cốt liệu cao su với các hàm lượng 1%, 2% và 5%, cường độ chịu nén của cấp phối gia cố giảm lần lượt là 26,06%, 36,14% và 56,69%. Trong khi đó cường độ ép chế của các cấp phối giảm tương ứng là 21,41%, 28,68% và 50,63% so sánh với cấp phối 0CS. Số liệu này cho thấy sự suy giảm cường độ nén lớn hơn sự suy giảm cường độ ép chế, điều này có nghĩa là cốt liệu cao su ít ảnh hưởng đến cường độ chịu kéo của CPĐĐ GCXM. Sự suy giảm các tính chất cơ học nói trên có thể giải thích như sau: (i) lực dính bám kém giữa cốt liệu cao su và hồ xi măng; (ii) độ cứng thấp của cốt liệu phế thải cao su so với đá dăm; (iii) CPĐĐ-cao su GCXM rỗng hơn do tính ưa khí của cốt liệu cao su; (iv) công tác đầm nén khó đạt độ chặt do tính đàn hồi của cốt liệu cao su, đặc biệt khi sử dụng tỷ lệ cốt liệu cao su trộn thêm lớn. Kết quả thu được nêu trên khá tương đồng với kết quả nghiên cứu gần đây của P.N. Phương và cs [21].



Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt liệu cao su trộn thêm đến (a) cường độ chịu nén và (b) cường độ ép chế của CPĐĐ GCXM chế bị trong phòng thí nghiệm.

So sánh với các yêu cầu cường độ lớp móng CPĐD GCXM theo TCVN 8858:2021 [16], các cấp phối 0CS, 1CS và 2CS có cường độ chịu nén và cường độ ép chế đều lớn hơn 4,0 MPa và 0,45 MPa nên có thể sử dụng làm lớp móng trên của mặt đường bê tông nhựa và bê tông xi măng các đường cao tốc, đường cấp I, cấp II hoặc lớp mặt có láng nhựa và trong các trường hợp khác. Cấp phối 5CS có cường độ chịu nén lớn hơn 1,5 MPa nên có thể sử dụng làm tầng móng dưới cho các loại mặt đường.

Mối quan hệ giữa cường độ ép chế và cường độ chịu nén của các CPĐD GCXM có sử dụng chất độn cao su ở 14 ngày được thể hiện ở Hình 7. Có thể nhận thấy rằng, quan hệ giữa cường độ ép chế và cường độ chịu nén của các CPĐD GCXM tuyến tính rất chặt chẽ với hệ số xác định  $R^2 > 0,99$ .



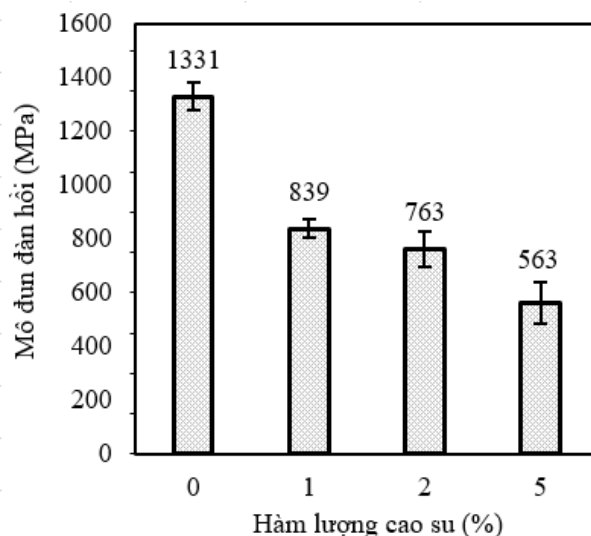
Hình 7. Quan hệ giữa cường độ chịu nén và ép chế của các CPĐD GCXM ở 14 ngày tuổi.

### 3.3. Mô đun đàn hồi mẫu chế bị trong phòng thí nghiệm

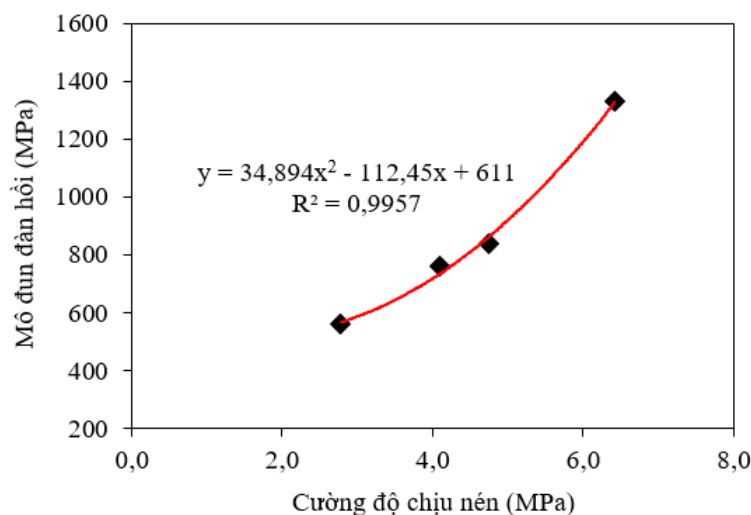
Xu hướng ảnh hưởng của chất độn cao su đến mô đun đàn hồi thể hiện ở Hình 8 tương tự như cường độ chịu nén và ép chế, tức là tỷ lệ cao su tăng dẫn đến giảm mô đun đàn hồi của các CPĐD GCXM. Mô đun đàn hồi của các cấp phối 1CS, 2CS và 5CS giảm lần lượt là 37,0%, 42,65% và 57,74% so với cấp phối đối chứng 0CS. Có thể nói sự suy giảm mô đun đàn hồi của các CPĐD GCXM trộn thêm cốt liệu cao su là lớn nhất, tiếp đến là cường độ nén và sự suy giảm cường độ ép chế là nhỏ nhất. Sử dụng cốt liệu phế thải cao su trong CPĐD-cao su GCXM giúp tăng khả năng chịu biến dạng của lớp móng gia cố do cao su có độ cứng nhỏ và tính chịu biến dạng cao. Từ đó giúp tăng khả năng kháng nứt của tầng móng gia cố do tải trọng xe chạy hoặc do co ngót. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi thu được của các CPĐD-cao su GCXM có xu hướng tương đồng với các nghiên cứu trước đây [8,19,21].

TCCS 38:2022/TCĐBVN [17] đưa ra giá trị mô đun đàn hồi của CPĐD GCXM tối thiểu từ 400 MPa (tương ứng cường độ chịu nén ở 14 ngày  $\geq 2$  MPa). Tất cả các CPĐD GCXM sử dụng chất độn cao su đều có  $E_{đh} > 500$  MPa (Hình 8). Do vậy các cấp phối trong nghiên cứu này đều có thể sử dụng làm tầng móng cho kết cấu mặt đường. Ngoài ra, mối quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của các của các cấp phối gia cố ở 14 ngày thể

hiện trên Hình 9 có dạng đường cong bậc 2 với hệ số xác định  $R^2 > 0,99$ , xu hướng phù hợp với mô hình của Balo [26].



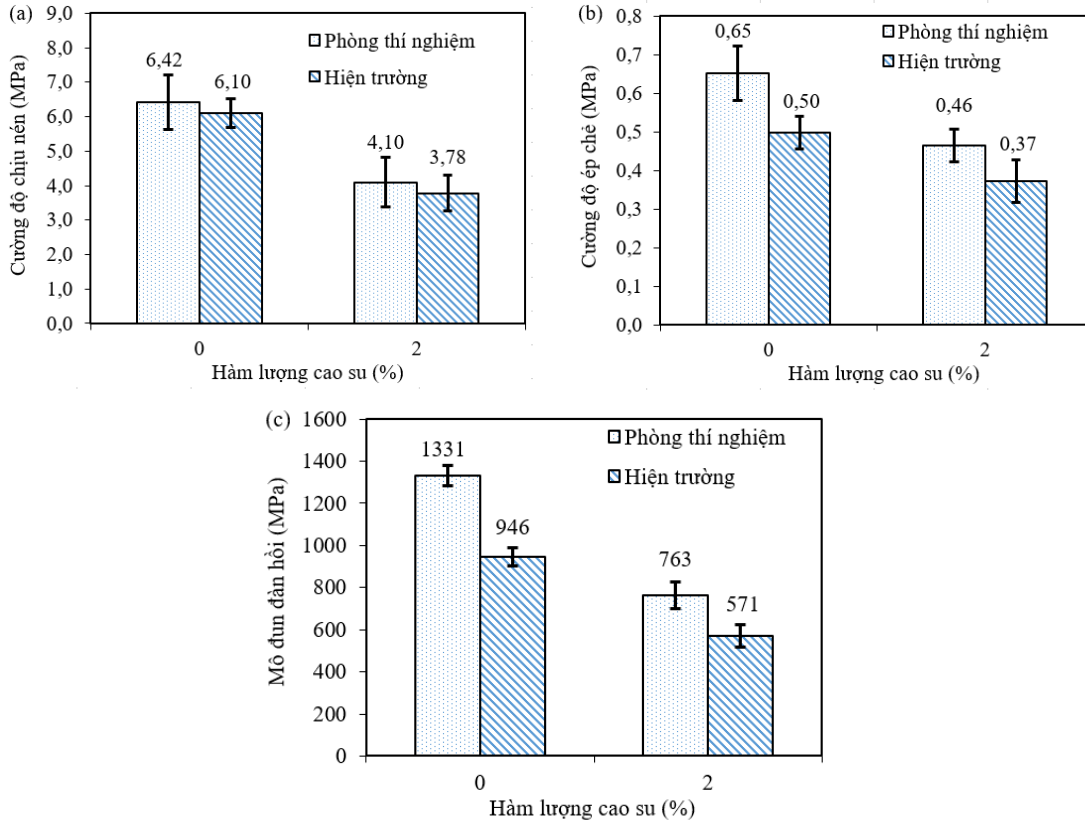
Hình 8. Ảnh hưởng của tỷ lệ cốt liệu cao su trộn thêm đến mô đun đàn hồi của CPĐD GCXM.



Hình 9. Tương quan giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của CPĐD GCXM ở 14 ngày.

### 3.4. Đánh giá chất lượng thi công hiện trường và các yếu tố ảnh hưởng

Các mẫu thi công ở hiện trường cũng được thí nghiệm các tính chất cơ học như cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ và mô đun đàn hồi. Các chỉ tiêu cơ học này được so sánh với các mẫu ở phòng thí nghiệm và trình bày ở Hình 10. Trong các chỉ tiêu cường độ thì cường độ chịu nén của các mẫu khoan hiện trường xấp xỉ với các mẫu chế bị trong phòng thí nghiệm. Cường độ chịu nén các mẫu khoan hiện trường 0CS và 2CS chỉ thấp hơn khoảng 5,0% và 7,9% so với mẫu đúc. Trong khi đó cường độ ép chẻ và mô đun đàn hồi lại giảm khá nhiều, khoảng 23,6% và 28,9% đối với cấp phối 0CS và khoảng 19,9% và 25,2% đối với cấp phối 2CS.



Hình 10. So sánh cường độ chịu nén (a), cường độ ép chế (b) và mô đun đàn hồi (c) của CPDD GCXM giữa mẫu đúc trong phòng thí nghiệm và thi công hiện trường.

Việc suy giảm cường độ của các mẫu khoan hiện trường so với mẫu đúc trong phòng thí nghiệm có thể được giải thích như sau: (1) Tỷ lệ thành phần hạt tiêu chuẩn và hạt quá cỡ khó đảm bảo giống như các hỗn hợp đã phối trộn trong phòng thí nghiệm; (2) Công tác cân, đong và trộn vật liệu ngoài hiện trường khó chính xác và đạt được độ đồng đều; (3) Thời gian thi công ngoài hiện trường (khoảng 190 phút) dài hơn thời gian đúc mẫu trong phòng thí nghiệm; (4) Công tác lu lèn cũng khó đảm bảo đạt được độ chặt đồng đều như mẫu đúc; (5) Bảo dưỡng lớp GCXM ngoài hiện trường có sự khác biệt so với trong phòng thí nghiệm (ngoài hiện trường bảo dưỡng ẩm 14 ngày, trong phòng thí nghiệm bảo dưỡng ẩm 7 ngày và ngâm nước 7 ngày), hơn nữa bảo dưỡng ẩm ngoài hiện trường khó đảm bảo điều kiện về nhiệt độ và độ ẩm như trong phòng thí nghiệm; (6) Sự khác biệt về chiều cao của mẫu khoan hiện trường và mẫu đúc trong phòng thí nghiệm. Ngoài ra có thể thấy cường độ nén của các mẫu khoan hiện trường xấp xỉ cường độ nén của mẫu đúc trong phòng thí nghiệm là do có tính đến hệ số điều chỉnh thông qua tỉ số chiều cao và đường kính của mẫu (H/D). Trong khi đó cường độ ép chế và mô đun đàn hồi không xét đến hệ số này nên góp phần làm giảm thêm cường độ của chúng so với mẫu đúc trong phòng thí nghiệm.

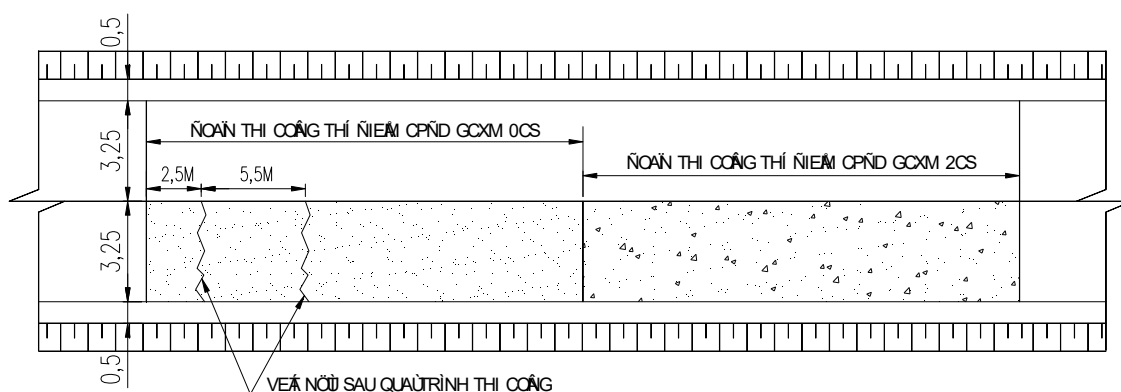
Vấn đề cần bàn luận thêm là thời gian thi công của mỗi phân đoạn thử nghiệm ngoài hiện trường lớn hơn thời gian khuyến cáo trong TCVN 8858:2021 [16] (vượt quá thời gian bắt đầu minh kết của xi măng). Mặc dù thời gian thi công dài hơn thời gian đông kết của xi măng nhưng không ảnh hưởng nhiều đến sự phát triển cường độ của các CPDD GCXM. Sự suy giảm cường độ của cấp phối ở hiện trường là có thể do các nguyên nhân khác như phân tích ở trên. Kết quả này cho thấy rằng khi thi công lớp vật liệu CPDD GCXM, có thể kéo dài

thời gian thi công (thời gian từ khi trộn đến khi kết thúc lu lèn và hoàn thiện) nhưng không nên vượt quá thời gian kết thúc ninh kết của xi măng. Xi măng dùng trong nghiên cứu này có thời gian kết thúc đông kết lên đến 260 phút, do đó thời gian thi công đoạn thử nghiệm lên đến 190 phút vẫn đảm bảo yêu cầu.

### 3.5. Quan sát nứt móng CPĐĐ GCXM đoạn thử nghiệm

Sau khi ngừng bảo dưỡng lớp móng, tiếp tục theo dõi thì trên đoạn CPĐĐ GCXM 0CS đã xuất hiện 2 vết nứt ngang ở thời điểm 30 ngày (kể từ lúc thi công). Hai vết nứt cách đầu đoạn lần lượt 2,5 m và 5,5 m (Hình 11). Chiều dài vết nứt rộng bằng bề rộng mặt đường đoạn thử nghiệm (3,25 m). Các vết nứt có chiều rộng trung bình 1 mm (Hình 12). Trong thời gian quan trắc, lớp móng chưa chịu ảnh hưởng của tải trọng xe chạy, do vậy hiện tượng nứt ở lớp móng gia cố 0CS là nứt do co ngót. Trong khi đó đoạn mặt đường có sử dụng cốt liệu cao su vẫn nguyên vẹn. Điều này chứng tỏ cốt liệu phế thải này đã làm giảm co ngót và tăng khả năng kháng nứt do co ngót của lớp móng GCXM. Kết quả quan trắc khá phù hợp với thí nghiệm của Xiaoyin Sun và cs [8] và P.N. Phuong và cs [21] khi các tác giả này đã quan sát được sự giảm co ngót của CPĐĐ-cao su GCXM khi thực hiện các khảo sát trong phòng thí nghiệm. Nghiên cứu này đã quan trắc trực quan được khả năng kháng nứt (không nứt) của lớp móng gia cố có sử dụng cốt liệu cao su so với lớp móng đối chứng (bị nứt) khi thi công ở hiện trường.

Khả năng kháng nứt của tầng móng CPĐĐ GCXM có sử dụng cốt liệu cao su có thể được giải thích như sau: (i) cốt liệu phế thải cao su đóng vai trò như là các khe dẫn nhỏ [32]; (ii) cốt liệu cao su có khả năng hấp thụ năng lượng nứt lớn và có tính chịu biến dạng khi kéo cao hơn so với đá dăm [33]; (iii) cường độ chịu kéo uốn ở giai đoạn tuổi sớm của cấp phối có sử dụng cốt liệu cao su cao hơn cấp phối đối chứng vì lúc đó cường độ của xi măng còn thấp, khả năng chịu kéo uốn của cấp phối gia cố được cải thiện nhờ vào khả năng chịu biến dạng kéo của cốt liệu cao su. Do đó cao su giúp hạn chế hình thành và phát triển nứt do co ngót (do ngăn cản hay ma sát) [3,34]. Tuy nhiên, vấn đề già hóa của cốt liệu cao su trong quá trình khai thác có thể ảnh hưởng đến khả năng kháng nứt của CPĐĐ-cao su GCXM. Do đó sẽ được xem xét khảo sát đánh giá trong các nghiên cứu tiếp theo.



Hình 11. Vị trí vết nứt trên mặt bằng thi công thử nghiệm.



Hình 12. Hình ảnh vết nứt ngoài thực tế đoạn thử nghiệm.

Sau hơn 30 ngày từ khi kết thúc bảo dưỡng, đơn vị thi công đã phải triển khai thi công các lớp móng và mặt đường nên các loại xe máy thi công đi lại trên các phân đoạn thử nghiệm cũng như thi công lớp mặt đường BTXM phủ lên trên. Do vậy, công tác theo dõi, kiểm tra vết nứt không thể tiếp tục.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đánh giá tính chất cơ học của CPĐD Dmax25 gia cố 4% xi măng có trộn thêm 1%, 2%, 5% cốt liệu cao su cỡ hạt 1-3 mm (theo khối lượng CPĐD khô). Đặc biệt đã thực hiện thi công 2 đoạn thí điểm CPĐD GCXM sử dụng 0CS và 2CS, mỗi đoạn dài 20 m, rộng 3,25 m và dày 15 cm. Trên cơ sở các thí nghiệm trong phòng, đánh giá chất lượng thi công hiện trường và theo dõi sự hình thành vết nứt trên các đoạn thi công thí điểm, một số kết luận chủ yếu được rút ra như sau:

- Sử dụng cốt liệu cao su như là chất độn trong CPĐD GCXM đã làm tăng độ ẩm tốt nhất  $W_{op}$  và giảm dung trọng khô lớn nhất  $\gamma_{kmax}$  của CPĐD-cao su GCXM, tỷ lệ trộn thêm cốt liệu cao su càng lớn thì  $W_{op}$  càng lớn và  $\gamma_{kmax}$  càng nhỏ.

- Cường độ ép chẻ, cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của các CPĐD-cao su GCXM giảm tỉ lệ thuận với hàm lượng cao su. Có mối quan hệ tuyến tính chặt chẽ ( $R^2 > 0,99$ ) giữa cường độ ép chẻ và cường độ chịu nén của các CPĐD GCXM. Các cấp phối nghiên cứu 0CS, 1CS và 2CS có cường độ chịu nén và ép chẻ đều lớn hơn 4,0 MPa và 0,45 MPa đáp ứng cường độ yêu cầu của lớp móng trên các loại mặt đường, cấp phối 5CS có thể sử dụng làm lớp móng dưới.

- Yêu cầu công đầm nén nhiều hơn đối với CPĐD GCXM trộn thêm cốt liệu cao su. Thời gian thi công mỗi phân đoạn thử nghiệm kéo dài khoảng 190 phút, lớn hơn thời gian khuyến cáo trong TCVN 8858:2021 [16] là thời gian xi măng bắt đầu ninh kết. Tuy nhiên việc thi công kéo dài không ảnh hưởng nhiều đến sự phát triển cường độ của CPĐD GCXM. Kiến nghị xem xét cho phép kéo dài thời gian thi công của CPĐD GCXM từ khi trộn ẩm đến khi kết thúc lu lèn và hoàn thiện lớp móng gia cố sớm hơn thời gian kết thúc ninh kết của xi măng.

- Điều kiện thi công thí điểm hạn chế, đặc biệt là phối trộn và san rải bằng thủ công đã phần nào ảnh hưởng đến chất lượng thi công CPĐD GCXM ở hiện trường, nhất là cường độ

ép chẻ. Tuy nhiên các lớp móng gia cố này vẫn đảm bảo cường độ yêu cầu. Nếu thi công hoàn toàn bằng máy như sử dụng trạm trộn, rải cấp phối bằng máy rải theo yêu cầu của TCVN 8858 [16] thì sẽ cải thiện hơn chất lượng lớp móng cấp phối 0CS và 2CS.

- Hiện tượng nứt do co ngót đã không xuất hiện trên hai phân đoạn thi công thử nghiệm trong 14 ngày đầu bảo dưỡng. Tuy nhiên, 2 vết nứt rộng khoảng 1 mm đã xuất hiện ở ngày thứ 30 trên móng cấp phối 0CS trên toàn bộ bề rộng lớp móng (3,25 m). Trong khi đó đoạn sử dụng 2% cao su đã không xuất hiện vết nứt, đây là căn cứ quan trọng và thực tế khẳng định khả năng kháng nứt của CPĐD-cao su GCXM.

## 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 107.01-2020.12.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T.T.T. Tran, T. Nguyen, P.N. Pham, H.H. Nguyen, P.Q. Nguyen, Thermal distribution in cement-treated base: Effect of curing methods and temperature estimation using Artificial Neural Networks, *Constr. Build. Mater.*, 279 (2021) 122528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122528>.
- [2]. Q.V. Hồ, U.T. Phạm, Ảnh hưởng của hàm lượng hạt lớn đến cường độ nén và ép chẻ của cấp phối đá dăm gia cố xi măng, *Tạp Chí Khoa Học Giao Thông Vận Tải*, 71 (2020) 220–229.
- [3]. P.N. Pham, Y. Zhuge, A. Turatsinze, A. Toumi, R. Siddique, Application of rubberized cement-based composites in pavements: Suitability and considerations, *Constr. Build. Mater.*, 223 (2019) 1182–1195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.007>.
- [4]. S. Sebesta, Use of microcracking to reduce shrinkage cracking in cement-treated bases, *Transp. Res. Rec.*, 1936 (2005) 3–11. <https://doi.org/10.1177/0361198105193600101>.
- [5]. W.S. Adaska, D.R. Luhr, Control of Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavements, 5th Int. RILEM Conf. Limoges, Fr., 2004, pp. 1–8.
- [6]. M. He, S. Ma, C. Liu, J. Zhang, S. Yuan, Effect of microcracking on the shrinkage cracking and durability performance of cement-treated macadam material, *Int. J. Pavement Eng.*, 21 (2021) 1–14. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1984477>.
- [7]. F. Intaj, Y. Liu, Z. Wu, Application and Evaluation of Micro-Cracking on Cement-Stabilized Bases at Field Projects in Louisiana, *Transp. Res. Rec.*, 2673 (2019) 355–364. <https://doi.org/10.1177/0361198119847467>.
- [8]. X. Sun, S. Wu, J. Yang, R. Yang, Mechanical properties and crack resistance of crumb rubber modified cement-stabilized macadam, *Constr. Build. Mater.*, 259 (2020) 119708. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119708>.
- [9]. Y.H. Cho, K.W. Lee, S.W. Ryu, Development of cement-treated base material for reducing shrinkage cracks, *Transp. Res. Rec.*, 1952 (2006) 134–143. <https://doi.org/10.3141/1952-15>.
- [10]. J. Zhou, M. Zeng, Y. Chen, M. Zhong, Evaluation of cement stabilized recycled concrete aggregates treated with waste oil and asphalt emulsion, *Constr. Build. Mater.*, 199 (2019) 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.028>.
- [11]. Y. Zheng, P. Zhang, Y. Cai, Z. Jin, E. Moshtagh, Cracking resistance and mechanical properties of basalt fibers reinforced cement-stabilized macadam, *Compos. Part B Eng.*, 165 (2019) 312–334. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.115>.
- [12]. Z. Liu, Experimental research on the engineering characteristics of polyester fiber-reinforced cement-stabilized macadam, *J. Mater. Civ. Eng.*, 27 (2015) 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001251](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001251).

- [13]. P. Zhang, C.H. Liu, Q.F. Li, T.H. Zhang, Effect of polypropylene fiber on fracture properties of cement treated crushed rock, *Compos. Part B Eng.*, 55 (2013) 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.005>.
- [14]. Bộ Giao thông vận tải, Quyết định 2218/QĐ-BGTVT: Hướng dẫn điều chỉnh, bổ sung một số nội dung kỹ thuật trong công tác thiết kế, thi công và nghiệm thu lớp móng cấp phối đá dăm gia cố xi măng trong kết cấu đường ô tô, 2018.
- [15]. D. Zamora-Barraza, M.A. Calzada-Pérez, D. Castro-Fresno, A. Vega-Zamanillo, Evaluation of anti-reflective cracking systems using geosynthetics in the interlayer zone, *Geotext. Geomembranes.*, 29 (2011) 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.10.005>.
- [16]. Bộ Giao thông vận tải, TCVN 8858:2021: Móng cấp phối đá dăm và cấp phối thiên nhiên gia cố xi măng trong kết cấu áo đường ô tô - Thi công và nghiệm thu, 2021.
- [17]. Bộ Giao thông vận tải, TCCS 38:2022/TCĐBVN: Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế, 2022.
- [18]. H.M. Guo, H. Zhu, Y. Zhou, The Applied Research of Waste Crumb Rubber in Road Base, *Appl. Mech. Mater.*, 253–255 (2012) 317–321. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.253-255.317>.
- [19]. A.H. Farhan, A.R. Dawson, N.H. Thom, Characterization of rubberized cement bound aggregate mixtures using indirect tensile testing and fractal analysis, *Constr. Build. Mater.*, 105 (2016) 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.018>.
- [20]. X. Zhao, Q. Dong, X. Chen, F. Ni, Meso-cracking characteristics of rubberized cement-stabilized aggregate by discrete element method, *J. Clean. Prod.*, 316 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128374>.
- [21]. P.N. Phạm, T.M. Lê, H.H. Huỳnh, T.T. Trần, C.T. Nguyễn, C.Đ. Lê, Ảnh hưởng của cốt liệu cao su đến tính chất cơ lý của cấp phối đá dăm-cao su gia cố xi măng, *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng, ĐHXDHN*, 15 (2021) 68–78. [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(7V\)-07](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7V)-07).
- [22]. N.P. Pham, A. Toumi, A. Turatsinze, Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite, *Constr. Build. Mater.*, 207 (2019) 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.147>.
- [23]. N.P. Pham, A. Toumi, A. Turatsinze, Rubber aggregate-cement matrix bond enhancement: Microstructural analysis, effect on transfer properties and on mechanical behaviours of the composite, *Cem. Concr. Compos.*, 94 (2018) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.005>.
- [24]. N.-P. Pham, A. Toumi, A. Turatsinze, Evaluating damage of rubberized cement-based composites under aggressive environments, *Constr. Build. Mater.*, 217 (2019) 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.066>.
- [25]. Bộ Xây dựng, TCVN 6260:2009: Xi măng hỗn hợp – yêu cầu kỹ thuật, 2009.
- [26]. D.X. Xuan, L.J.M. Houben, A.A.A. Molenaar, Z.H. Shui, Mechanical properties of cement-treated aggregate material - A review, *Mater. Des.*, 33 (2012) 496–502. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.055>.
- [27]. A. Farhan, A. Dawson, N. Thom, Compressive behaviour of rubberized cement-stabilized aggregate mixtures, *Constr. Build. Mater.*, 262 (2020) 120038. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120038>.
- [28]. A.H. Farhan, A.R. Dawson, N.H. Thom, S. Adam, M.J. Smith, Flexural characteristics of rubberized cement-stabilized crushed aggregate for pavement structure, *Mater. Des.*, 88 (2015) 897–905. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.071>.
- [29]. Bộ Giao thông vận tải, TCVN 12790:2020: Đất, đá dăm dùng trong công trình giao thông - Đàm nén Proctor, 2020.
- [30]. Bộ Giao thông vận tải, TCVN 8862:2011: Quy trình thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chẻ của vật liệu hạt liên kết bằng các chất kết dính, 2011.



- [31]. Bộ Giao thông vận tải, TCVN 9843:2013: Xác định mô đun đàn hồi của vật liệu đá gia cố chất kết dính vô cơ trong phòng thí nghiệm, 2013.
- [32]. K. Kaloush, G. Way, H. Zhu, Properties of Crumb Rubber Concrete, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 1914 (2005) 8–14. <https://doi.org/10.3141/1914-02>.
- [33]. A.C. Ho, A. Turatsinze, R. Hameed, D.C. Vu, Effects of rubber aggregates from grinded used tyres on the concrete resistance to cracking, *J. Clean. Prod.*, 23 (2012) 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.016>.
- [34]. T.-H. Nguyen, A. Toumi, A. Turatsinze, F. Tazi, Restrained shrinkage cracking in steel fibre reinforced and rubberised cement-based mortars, *Mater. Struct.*, 45 (2011) 899–904. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9806-x>.