

ẢNH HƯỞNG CỦA PHƯƠNG PHÁP BẢO DƯỠNG ĐẾN PHÂN BỐ NHIỆT VÀ CƯỜNG ĐỘ CỦA LỚP CẤP PHỐI ĐÁ DĂM GIA CỔ XI MĂNG

EFFECT OF CURING METHODS ON THERMAL DISTRIBUTION AND MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT TREATED BASES

Trần Thị Thu Thảo^{1*}, Nguyễn Hồng Hải¹, Nguyễn Quang Phúc², Lê Đức Châu¹

¹Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

²Trường Đại học Giao thông Vận tải

*Tác giả liên hệ: ttthao@dut.udn.vn

(Nhận bài: 25/11/2020; Chấp nhận đăng: 20/01/2021)

Tóm tắt - Bài báo này trình bày và phân tích kết quả của các phương pháp (PP) bảo dưỡng lớp cấp phối đá dăm gia cố xi măng (CPĐD GCXM) khác nhau. Sử dụng 3 PP bảo dưỡng khác nhau là màng nhũ tương, phủ bao bố kết hợp tưới nước và phủ vải địa kết hợp tưới nước. Kết quả từ dữ liệu quan trắc nhiệt độ trong suốt quá trình bảo dưỡng tại các chiều sâu khác nhau trong lớp CPĐD GCXM cho thấy, ở cùng độ sâu, bảo dưỡng bằng PP nhũ tương có nhiệt độ cao nhất, cao hơn PP bao bố tưới nước từ 12°C đến 18°C và vải địa tưới nước từ 10°C đến 13°C. PP bảo dưỡng bằng nhũ tương có biên độ giao động nhiệt độ trong lớp vật liệu giữa ngày và đêm lên đến 23°C, PP bao bố có biên độ rất thấp nhất chỉ khoảng 5°C và PP bảo dưỡng vải địa có biên độ khoảng 10°C. Kết quả mẫu khoan xác định cường độ nén và ép chệ ở tuổi 14 ngày của PP bảo dưỡng bằng bao bố tưới ẩm cho kết quả tốt nhất.

Từ khóa - Cấp phối đá dăm gia cố xi măng; phương pháp bảo dưỡng mặt đường; phân bố nhiệt độ trong mặt đường; cường độ nén; cường độ ép chệ

1. Đặt vấn đề

Trong các thập kỷ qua, các khái niệm thiết kế đường kết cấu mặt đường đã mở rộng từ việc tập trung vào các khía cạnh vận hành nghiêm ngặt như đảm bảo tốc độ di chuyển, kiểm soát tải trọng xe chạy trên đường và tính kinh tế sang các khía cạnh thân thiện với người sử dụng và về an toàn. Cấp phối đá dăm (CPĐD) hoặc cấp phối thiên nhiên gia cố xi măng là một hỗn hợp vật liệu hạt có thành phần hạt theo nguyên lý cấp phối đem trộn với xi măng theo một tỷ lệ nhất định rồi lu lèn chặt ở độ ẩm tốt nhất trước khi xi măng ninh kết [1] và sau thời gian bảo dưỡng sẽ hình thành nên một loại vật liệu móng đường có cường độ cao và ổn định cường độ dưới sự tác dụng của điều kiện khí hậu. Trên lớp CPĐD gia cố xi măng (GCXM) thường được phủ bởi lớp bê tông xi măng hoặc bê tông nhựa [2]. Chính vì ưu điểm nổi bật nên CPĐD GCXM ngày càng được sử dụng rộng rãi làm lớp móng cho đường cao tốc, đường, phố, khu vực đỗ xe, sân bay, cơ sở công nghiệp và các khu vực xử lý và lưu trữ vật tư [1], [2], [3].

Hiện nay, các tài liệu hướng dẫn thi công lớp CPĐD GCXM đưa ra các phương pháp bảo dưỡng CPĐD GCXM như: Cần giữ cho bề mặt CPĐD GCXM ẩm cho đến khi thi công màng kín bịt bề mặt thoáng của mặt đường [2], [4] hoặc giữ ẩm bề mặt CPĐD GCXM trong 7 ngày bằng với

Abstract - This paper presents and analyzes the results of different curing methods of the different cement treated bases (CTB). Using 3 different curing methods is emulsion cure, wet burlap and wet geotextile. Results from the temperature monitoring data during the curing process at different depths in the CTB show that at the same depth, the curing by emulsion makes the temperature in the CTB higher than the wet burlap method from 12°C to 18°C and higher than the wet geotextile method from 10°C to 13°C. Curing method by emulsion makes the temperature of CTB highest, amplitude of temperature fluctuation in the pavement between day and night is up to 23°C. For the other 2 methods, the amplitude of thermal fluctuation is lower, the wet burlap method is only about 5°C and the wet geotextile method is about 10°C. The results of drilled samples determined compressive strength and split compression at 14 days of the cement treated bases by wet burlap the best results.

Key words - Cement treated bases; pavement curing method; temperature distribution; compressive strength; splitting tensile strength

phun nước dạng sương mù để không làm xói bề mặt CPĐD GCXM [2] hoặc bảo dưỡng trong thời gian 14 ngày theo [1]. Kết quả nghiên cứu của Songtao Lv và cộng sự [5] cho thấy, thời gian đóng rắn có ảnh hưởng đáng kể đến cường độ và tính năng mỗi đối với vật liệu.

Lớp móng CPĐD GCXM có nhiều ưu điểm, tuy nhiên một vấn đề khó khăn hiện nay khi sử dụng lớp móng này đó là vấn đề làm thế nào để có thể giảm được hiện tượng nứt do co ngót trong thời gian bảo dưỡng. Vì vết nứt này có thể gây ra hiện tượng nứt phản ánh lên lớp mặt sau khi đường đưa vào khai thác dưới tác dụng của tải trọng xe và môi trường [3]. Sự hình thành và phát triển của các vết nứt của lớp móng nửa cứng sẽ rút ngắn tuổi thọ của mặt đường (Sebesta 2005, Chen, Hong et al. 2011, Chen, Chang et al. 2011). Hiện nay, có rất nhiều nghiên cứu tìm cách khắc phục nứt do co ngót của CPĐD GCXM. Tuy nhiên, đa số các nghiên cứu tập trung vào việc đưa vào hỗn hợp CPĐD GCXM một loại vật liệu nhằm giảm co ngót cho loại vật liệu này, như nghiên cứu của Jun Yang và cộng sự [6] đã sử dụng hạt cao su kích thước 40mm, 60mm, 80mm để thay thế đá dăm với 1%, 1,5% và 2% theo thể tích. Kết quả cho thấy, việc thay thế 1 phần hàm lượng cao su phế thải giúp giảm hiện tượng co ngót trong CPĐD GCXM. Nghiên cứu của Zhang và cộng sự [7] đã sử dụng sợi polypropylene

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Tran Thi Thu Thao, Nguyen Hong Hai, Le Duc Chau)

² University of Transport and Communications (Nguyen Quang Phuc)

đưa vào hỗn hợp với 0,04; 0,06; 0,08; và 0,1% theo thể tích nhằm cải thiện hiện tượng co ngót CPĐĐ GCXM. Nghiên cứu của Yoon-Ho Cho và cộng sự [8] đã sử dụng 25% tro bay và 10% phụ gia trương nở đưa vào hỗn hợp CPĐĐ GCXM đã làm giảm được hiện tượng co ngót cho loại vật liệu này.

Nghiên cứu về ảnh hưởng của nhiệt độ trong giai đoạn bảo dưỡng đến chất lượng của CPĐĐ GCXM cũng đã được triển khai như: Nghiên cứu của Junqi Gao và cộng sự [3] cho thấy, các vết nứt nhiệt về cơ bản xuất hiện ở vị trí mà ứng suất co ngót khô hiển thị cao nhất trong giai đoạn co ngót khô và ứng suất nhiệt ảnh hưởng mạnh đến bề rộng vết nứt và nghiên cứu này cũng cho thấy vết nứt do co ngót thường phát sinh sớm trong thời gian bảo dưỡng lớp CPĐĐ GCXM. Nghiên cứu của Wang [9] cho thấy, hệ số co ngót càng lớn khi nhiệt độ càng cao và đánh giá loại mặt đường này có khả năng gặp bất lợi co ngót về mùa hè. Nghiên cứu của Ali Ghahremaninezhad và cộng sự [10] đã cho thấy, nhiệt độ giúp tăng quá trình thủy hóa làm tăng tốc độ hình thành cường độ nén của hồ xi măng nhưng nhiệt độ cao quá sẽ làm cho cường độ nén ở tuổi cao bị giảm xuống với nhiệt độ ở 60°C cường độ nén thấp hơn nhiệt độ ở 40°C tại tuổi 28 ngày.

Bài báo này, nghiên cứu ảnh hưởng của các phương pháp bảo dưỡng khác nhau đến cường độ nén, cường độ ép chẻ và phân bố nhiệt độ trong lớp cấp phối đá dăm gia cố xi măng Dmax 31.5. Sử dụng các phương pháp bảo dưỡng bằng màng nhũ tương kín và giữ ẩm bề mặt cho CPĐĐ GCXM bằng cách phủ bao bố kết hợp tưới nước và vải địa tưới nước.

2. Mô hình thực nghiệm và phương pháp thí nghiệm

2.1. Thí nghiệm chất lượng các loại vật liệu thành phần

Tất cả các chỉ tiêu của cấp phối đá dăm gia cố xi măng đều đạt yêu cầu theo [1] và cấp phối thi công có thành phần hạt như Bảng 1.

2.1.1. Thành phần hạt cấp phối đá dăm

Bảng 1. Thành phần hạt cấp phối đá dăm

Cỡ sàng vuông	Hàm lượng lọt sàng (%)	
	Cấp phối tiêu chuẩn	Cấp phối thử nghiệm
31,5	95-100	100
25	79-90	89,09
19	67-83	77,66
9,5	49-64	54,92
4,75	34-54	38,83
2,36	25-40	27,37
0,425	12-24	12
0,075	2-12	4,88

2.1.2. Xi măng

Xi măng PCB 40 đạt tiêu chuẩn chất lượng yêu cầu theo [1] và có thời gian bắt đầu đông kết 120 phút và kết thúc đông kết 176 phút. Hàm lượng xi măng sử dụng gia cố là 4%.

2.1.3. Thí nghiệm đầm nén tiêu chuẩn

Kết quả thí nghiệm đầm nén tiêu chuẩn trong phòng theo [11] xác định được dung trọng khô lớn nhất của cấp phối đá dăm gia cố xi măng 2,28T/m³ và độ ẩm tốt nhất là 6,1%.

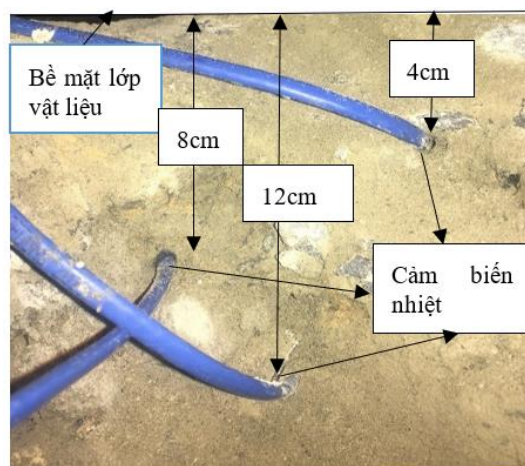
2.2. Thi công thử nghiệm cấp phối đá dăm gia cố xi măng

Đoạn thử nghiệm được thi công trong khuôn viên Trường Đại học Bách khoa – ĐHQĐN, gần khu G, vị trí thi công không bị ảnh hưởng của bóng mát từ tòa nhà hay cây cối. Lớp cấp phối đá dăm gia cố xi măng có kích thước 2m x 6m, dày 15cm chia làm 2 lần thi công. Phương pháp thi công đổ tại chỗ sử dụng máy trộn dung tích 250l. Sau khi san phẳng, sẽ đầm bằng lu con 8 lượt/ điểm sau đó bật rung lu 16 lượt/ điểm. Sau khi lu lèn thí nghiệm kiểm tra độ chặt bằng phương pháp rót cát, kết quả cho thấy lớp vật liệu đảm bảo độ chặt yêu cầu theo [1]. Tổng thời gian từ khi trộn hỗn hợp đến khi kết thúc lu lèn đảm bảo <2h. Hình ảnh hiện trường đang thi công lớp CPĐĐ GCXM thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Hình ảnh thực tế đoạn thi công thử nghiệm

2.3. Lắp đặt cảm biến quan trắc nhiệt độ



Hình 2. Lắp đặt cảm biến quan trắc nhiệt

Lớp CPĐĐ GCXM được thi công xong lúc 17h ngày 30/5/2019. Sau khi thi công xong tiến hành lắp thiết bị quan trắc nhiệt độ. Cảm biến nhiệt độ thermal couple và mạch đọc arduino được sử dụng để xác định nhiệt độ tại các vị trí trong CPĐĐ GCXM, thiết bị đã được hiệu chỉnh có độ chính xác so với nhiệt kế thủy ngân là $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ và so với TDS303 là $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$. Do vậy, có thể sử dụng thiết bị này để xác định nhiệt độ tại các vị trí trong lớp vật liệu. Dữ liệu được thu thập với thời gian 10 phút 1 lần trong thời gian bảo dưỡng mẫu. Dữ liệu thu thập tự động và được truyền lên

<https://thingspeak.com/>. Số liệu cho phép xuất ra file excel và ngoài ra dữ liệu còn được đọc từ thẻ nhớ gắn ở thiết bị để phòng khi đường truyền dữ liệu gặp sự cố. Đối với mỗi phương pháp bảo dưỡng cấp phối đá dăm gia cố xi măng, sẽ đặt cảm biến quan trắc nhiệt độ bên trong lớp vật liệu ở vị trí 4cm, 8cm và 12cm cách bề mặt lớp vật liệu. Sơ đồ lắp đặt cảm biến quan trắc nhiệt độ trong thời gian bảo dưỡng thể hiện ở Hình 2. Nhiệt độ không khí của Đà Nẵng được lấy tại trạm khí tượng Đà Nẵng ở cùng thời điểm.

2.4. Bảo dưỡng lớp cấp phối đá dăm gia cố xi măng sau khi thi công xong

Thi công xong sẽ tiến hành các phương pháp bảo dưỡng khác nhau, phân 3 đoạn bảo dưỡng với mỗi đoạn kích thước 2x2m. Đoạn 1 tưới nhũ tương CSS-1h liều lượng 1 lít/ m² như Hình 3a, đoạn 2 phủ vải địa kết hợp tưới nước như Hình 3b và đoạn 3 phủ bao bố kết hợp tưới nước như Hình 3c. Hàng ngày phun nước vào vị trí bảo dưỡng bằng phủ bao bố lúc 6h, 11h00 và 17h.



Hình 3. Các phương pháp bảo dưỡng CPĐD GCXM (a. Nhũ tương; b. Vải địa tưới nước; c. Bao bố tưới nước)

2.5. Khoan mẫu xác định cường độ chịu nén và chịu kéo khi ép chế sau 14 ngày bảo dưỡng

Sau khi bảo dưỡng mẫu được khoan như Hình 4 và được cắt gọt thành mẫu có đường kính 101mm và chiều cao 116mm. Thí nghiệm cường độ chịu nén theo [1] và xác định cường độ chịu kéo khi ép chế theo [12].



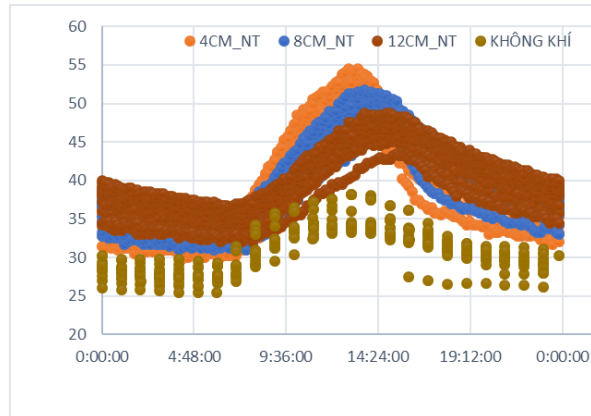
Hình 4. Khoan mẫu CPĐD GCXM ở hiện trường sau khi bảo dưỡng

3. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

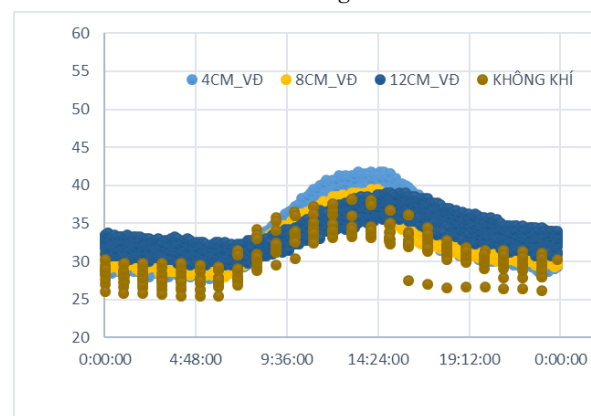
3.1. Nhiệt độ trong lớp CPĐD GCXM trong thời gian bảo dưỡng

3.1.1. Nhiệt độ trong lớp CPĐD GCXM ở từng phương pháp bảo dưỡng

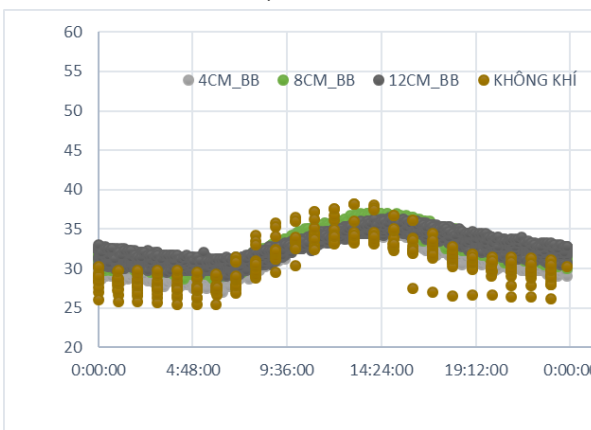
Nhiệt độ của CPĐD GCXM quan trắc ở từng phương pháp bảo dưỡng được thể hiện thông qua các biểu đồ ở Hình 5, 6 và 7



Hình 5. Nhiệt độ trong CPĐD GCXM bảo dưỡng bằng nhũ tương



Hình 6. Nhiệt độ trong CPĐD GCXM bảo dưỡng bằng vải địa tưới nước



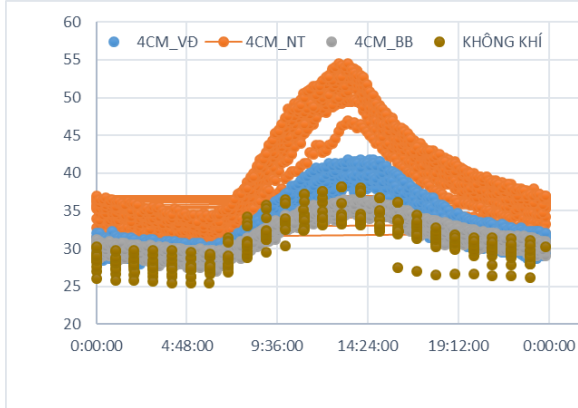
Hình 7. Nhiệt độ trong CPĐD GCXM bảo dưỡng bằng bao bố tưới nước

Kết quả từ Hình 5, 6 và 7 cho thấy, phương pháp bảo dưỡng bằng nhũ tương làm cho nhiệt độ của lớp CPĐD GCXM cao nhất, biên độ giao động nhiệt độ trong lớp vật liệu giữa ngày và đêm lên đến 23°C. Đối với 2 PP còn lại biên độ giao động nhiệt thấp hơn, với PP bao bố biên độ giao động rất thấp chỉ khoảng 5°C. PP bảo dưỡng vải địa chênh lệch biên độ khoảng 10°C. Phương pháp bảo dưỡng này làm cho nhiệt độ CPĐD GCXM cao nhất, có thể do lớp nhũ tương nhựa có màu đen nên khả năng hấp thụ nhiệt cao hơn làm tăng nhiệt độ tại bề mặt lớp vật liệu. Nhiệt độ trong CPĐD GCXM khi bảo dưỡng bằng phương pháp bao bố thấp nhất, có thể do bao bố dày và khả năng giữ ẩm tốt hơn

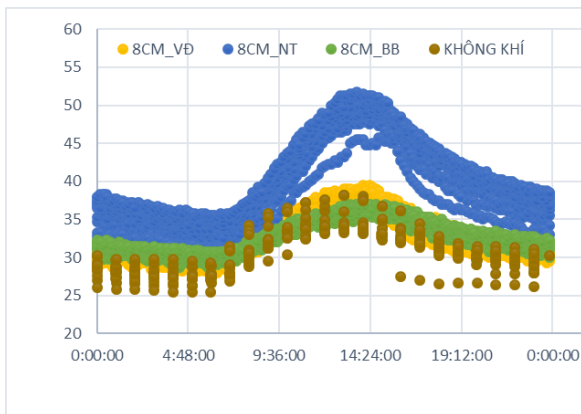
nên làm cho nhiệt độ ở bề mặt lớp vật liệu thấp. Bảo dưỡng bằng phương pháp vãi địa nhiệt độ thấp hơn phương pháp nhũ tương do bề mặt vật liệu hấp phụ nhiệt không cao, tuy nhiên nhiệt độ cao hơn phương pháp bảo dưỡng bằng bao bó do vãi địa mỏng và khả năng giữ ẩm không tốt bằng bao bó.

3.1.2. Nhiệt độ trong CPĐĐ GCXM của các phương pháp bảo dưỡng tại cùng chiều sâu giống nhau

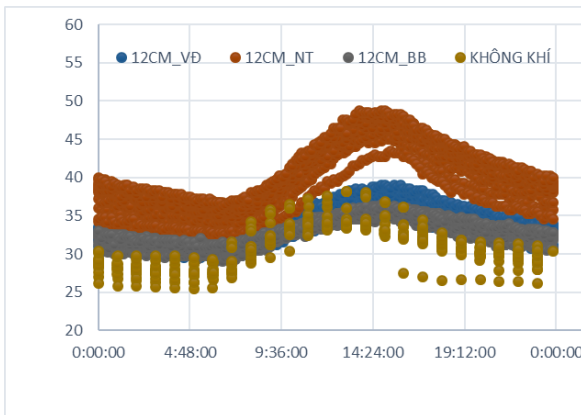
Nhiệt độ khảo sát trong CPĐĐ GCXM ở các phương pháp bảo dưỡng khác nhau tại cùng một chiều sâu lớp vật liệu được thể hiện thông qua các biểu đồ ở Hình 8, 9 và 10.



Hình 8. Nhiệt độ trong CPĐĐ GCXM của các phương pháp bảo dưỡng tại vị trí 4cm



Hình 9. Nhiệt độ trong CPĐĐ GCXM của các phương pháp bảo dưỡng tại vị trí 8cm



Hình 10. Nhiệt độ trong CPĐĐ GCXM của các phương pháp bảo dưỡng tại vị trí 12cm

Kết quả từ Hình 8, 9 và 10 cho thấy, tại cùng 1 chiều sâu như nhau nhiệt độ trong lớp CPĐĐ GCXM, bảo dưỡng

bằng phương pháp nhũ tương làm cho nhiệt độ cao nhất trong lớp CPĐĐ GCXM cao hơn phương pháp bao bó tưới nước từ 12°C đến 18°C và vãi địa tưới ẩm từ 10°C đến 13°C. Trong ngày, thời gian đạt nhiệt độ cao nhất trong lớp CPĐĐ GCXM trễ hơn thời gian nhiệt độ cao nhất của nhiệt độ không khí. Nhiệt độ cực trị của PP nhũ tương đạt cao nhất và ở thời gian đạt cực trị là sớm nhất cho thấy tốc độ dẫn nhiệt của CPĐĐ GCXM ở PP bảo dưỡng bằng nhũ tương nhanh nhất và PP bao bó chậm nhất. Điều này xảy ra do nhiệt độ bề mặt của lớp cấp phối đá dăm bảo dưỡng bằng nhũ tương cao nhất nên hệ số dẫn nhiệt cao hơn. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu về hệ số dẫn nhiệt của X. Yan và cộng sự [13].

3.2. Cường độ của CPĐĐ GCXM sau khi bảo dưỡng 14 ngày bằng các phương pháp khác nhau

Kết quả cường độ chịu nén và ép chệch của mẫu đúc được bảo dưỡng trong phòng và mẫu khoan trên từng đoạn dùng các PP bảo dưỡng khác nhau ở tuổi 14 ngày thể hiện như Bảng 2.

Kết quả từ Bảng 2 cho thấy, cả 3 PP bảo dưỡng đều cho kết quả đủ cường độ yêu cầu theo tiêu chuẩn hiện hành [1].

Bảng 2. Cường độ mẫu CPĐĐ GCXM sau 14 ngày bằng các PP bảo dưỡng khác nhau

Phương pháp bảo dưỡng	Cường độ nén (MPa)	Cường độ ép chệch (MPa)
Nhũ tương	5,21	0,50
Vãi địa tưới nước	6,64	0,61
Bao bó tưới nước	7,02	0,68

Kết quả từ Bảng 2 cũng cho thấy, PP bảo dưỡng bằng bao bó ẩm nước cho cường độ cao nhất. Cường độ nén mẫu bảo dưỡng bằng PP bao bó cao hơn PP nhũ tương 34,7%, PP vãi địa cao hơn PP nhũ tương 27,4%. Cường độ ép chệch, PP bao bó cao hơn PP nhũ tương 36%, PP vãi địa cao hơn PP nhũ tương 22%. Điều này, do nhiệt độ trong CPĐĐ GCXM bảo dưỡng bằng phương pháp này cao nhất làm thúc đẩy quá trình thủy hóa xi măng tăng tốc độ hình thành cường độ gây thiếu nước cho xi măng thủy hóa theo [10], dẫn đến cường độ lớp CPĐĐ GCXM thấp và dễ sinh ra nứt co ngót.

Ngoài ra, dữ liệu nhiệt độ quan sát được cho thấy sự chênh lệch nhiệt độ giữa các vị trí theo chiều sâu của PP bảo dưỡng nhũ tương khác nhau lớn hơn các PP khác. Điều này sẽ sinh ra ứng suất nhiệt làm mở rộng vết nứt, theo nghiên cứu của Junqi Gao và cộng sự [3]. Đây có thể là 1 trong số các nguyên nhân dẫn đến hiện tượng nứt phản ánh trên lớp mặt bê tông xi măng hoặc BTN đặt trên nó.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chỉ ra được sự thay đổi nhiệt độ của lớp CPĐĐ GCXM bằng 3 phương pháp bảo dưỡng: Màng nhũ tương, bao bó tưới nước và vãi địa tưới nước. Ngoài ra, nghiên cứu còn chỉ ra ảnh hưởng của các phương pháp bảo dưỡng khác nhau đến cường độ chịu nén và cường độ ép chệch ở 14 ngày tuổi. Từ kết quả thực nghiệm và biểu đồ cho thấy:

- Tại cùng một độ sâu như nhau, PP bảo dưỡng bằng nhũ tương làm cho nhiệt độ trong lớp CPĐĐ GCXM cao hơn phương pháp bao bó tưới ẩm từ 12°C đến 18°C và vãi

địa tưới ẩm từ 10°C đến 13°C. Ngoài ra, nhiệt độ cao nhất tại vị trí 4cm và 12cm trong lớp CPĐD GCXM bảo dưỡng bằng PP nhũ tương chênh nhau lên đến 23°C. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa các vị trí theo chiều sâu lớn sẽ dễ sinh ra nứt co ngót.

- Cường độ nén của mẫu bảo dưỡng bằng PP bao bố tưới nước cao hơn PP nhũ tương 34,7%, PP vải địa tưới nước cao hơn PP nhũ tương 27,4%. Cường độ ép chèn của mẫu bảo dưỡng bằng PP bao bố tưới nước cao hơn PP nhũ tương 36%, PP vải địa tưới nước cao hơn PP nhũ tương 22%. Nguyên nhân, do PP bảo dưỡng bằng bao bố tưới nước và vải địa tưới nước làm bề mặt lớp vật liệu ẩm, còn bảo dưỡng bằng PP nhũ tương cường độ thấp do bề mặt màu đen hấp phụ nhiệt cao làm thúc đẩy nhanh quá trình thủy hóa xi măng gây thiếu nước trong lúc CPĐD GCXM hình thành cường độ.

Lời cảm ơn: Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số T2020-02-13.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ Khoa học và Công nghệ, *TCVN 8858-2011_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*, Hà Nội, 2011.
- [2] G. E. Halsted, D. R. Luhr, and W. S. Adaska, *Guide to cement-treated base (CTB)*, Plant-mixed CTB project in South Georgia, USA, 2006.
- [3] J. Gao, P. Jin, Y. Sheng, and P. An, "A case study on crack propagation law of cement stabilised macadam base", *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 21, no. 4, 2020, pp. 516–523, doi: 10.1080/10298436.2018.1492135.
- [4] California Department of Transportation, "Chapter 4_Cement Treated Bases", *Construction Manua.*, vol. 3, no. Chapter 4, 2019, pp. 56–74, doi: 10.1016/B978-0-08-044529-8.50007-0.
- [5] S. Lv *et al.*, "Strength and fatigue performance for cement-treated aggregate base materials", *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 0, no. 0, 2019, pp. 1–10, doi: 10.1080/10298436.2019.1634808.
- [6] X. Sun, S. Wu, J. Yang, and R. Yang, "Mechanical properties and crack resistance of crumb rubber modified cement-stabilized macadam", *Constr. Build. Mater.*, vol. 259, 2020, p. 119-228, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119708.
- [7] P. Zhang and Q. Li, "Experimental study on shrinkage properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, no. 12, 2010, pp. 1851–1860, doi: 10.1177/0731684409337336.
- [8] Y. H. Cho, K. W. Lee, and S. W. Ryu, "Development of cement-treated base material for reducing shrinkage cracks", *Transp. Res. Rec.*, no. 1952, 2006, pp. 134–143, doi: 10.3141/1952-15.
- [9] R. Hanzu-pazara, P. Arsenie, A. Varsami, and C. Popescu, "Traffic and Transportation Studies © 2010", ASCE 1447, 2010, pp. 1447–1456.
- [10] K. P. Teixeira, I. P. Rocha, L. D. S. Carneiro, J. Flores, E. A. Dauer, and A. Ghahremaninezhad, "The effect of curing temperature on the properties of cement pastes modified with TiO₂ nanoparticles", *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 11, 2016, pp. 1–15, doi: 10.3390/ma9110952.
- [11] Bộ Giao thông vận tải, *22TCN333-2006 Quy trình đầm nén đất, đá dăm trong phòng thí nghiệm*, Hà Nội, 2006.
- [12] Bộ Khoa học và Công nghệ, *TCVN-8862:2011 Quy trình thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chèn của vật liệu hạt liên kết bằng các chất kết dính*, Hà Nội, 2011.
- [13] X. Yan, L. Chen, Q. You, and Q. Fu, "Experimental analysis of thermal conductivity of semi-rigid base asphalt pavement", *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 20, no. 5, 2019, pp. 1215–1227, doi: 10.1080/14680629.2018.1431147.