

Nghiên cứu khả năng sử dụng xỉ thép khu vực Bà Rịa-Vũng Tàu để chế tạo hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA)

Study on the possibility of using steel slag in Ba Ria Vung Tau for the Stone Mastic Asphalt (SMA)

Lê Văn Phúc*, Đỗ Như Khang, Phan Đức, Võ Hồng Lâm

Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải

*Tác giả liên hệ: phuclv_ph@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 9/6/2023; Ngày chấp nhận đăng: 12/7/2023

Tóm tắt:

Hiện nay nguồn cung ứng vật liệu sử dụng xây dựng công trình giao thông ngày càng khan hiếm ở Việt Nam. Do vậy, việc nghiên cứu các giải pháp tận dụng nguồn vật liệu phế phẩm như xỉ thép để thay thế cốt liệu trong việc chế tạo bê tông nhựa là hết sức cần thiết. Bài báo đã bước đầu đánh giá khả năng sử dụng 50% và 75% xỉ thép khu vực Bà Rịa-Vũng Tàu thay thế cốt liệu để chế tạo hỗn hợp đá vữa nhựa có cỡ hạt lớn nhất danh định là 12,5 mm (SMA 12,5). Trên cơ sở các thí nghiệm trong phòng, nghiên cứu đã đánh giá các chỉ tiêu kỹ thuật yêu cầu của SMA 12,5 về độ chảy nhựa, tổn thất Cantabro, độ ổn định Marshall, độ ổn định còn lại và hằn lún vết bánh xe theo TCCS 36:2021/TCĐBVN. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng có thể sử dụng 50% xỉ thép để thay thế cốt liệu trong việc chế tạo SMA 12,5 làm mặt đường ô tô.

Từ khóa: SMA 12,5; Xi thép; Cốt liệu; Độ ổn định Marshall; Hằn lún vết bánh xe.

Abstract:

Currently, the source of materials using to construct transport infrastructure is increasingly scarce in Vietnam. Therefore, it is very necessary to study solutions for utilizing steel slag as aggregates for asphalt concrete. This paper evaluated initially the possibility of use of 50% and 75% steel slag in Ba Ria-Vung Tau replacement aggregates for stone mastic asphalt with a nominal maximum aggregate size of 12,5mm (SMA 12,5). Based on the laboratory experiments, the study evaluated the required technical parameters of SMA 12,5 in terms of drain down characteristic, Cantabro abrasion loss, Marshall stability, Marshall stability ratio, and rutting according to TCCS36:2021/TCĐBVN. Test results indicated the possibility of use of 50% steel slag replacement aggregates for SMA 12,5 in pavement construction.

Keywords: SMA 12,5; Steel slag; Aggregate; Marshall stability; Rutting.

1. Giới thiệu

Kết cấu mặt đường bê tông nhựa (BTN) được sử dụng rộng rãi và trở thành sự lựa chọn hàng đầu khi thiết kế cho lớp tầng mặt áo đường ô tô. Hiện nay, rất nhiều tuyến đường BTN ở nước ta sau một thời gian ngắn đưa vào khai thác sử dụng đã xuất hiện những hiện tượng phổ biến như: Xô dòn, nứt trượt lớp mặt BTN, hằn lún vết bánh xe (HLVBX), rạn nứt bong bật, gây hư hỏng nghiêm trọng mặt đường làm mất an toàn giao thông. Để khắc phục hạn chế các loại hư hỏng trên, cần sử dụng bê tông

nhựa có module đàn hồi và cường độ chịu nén cao, ít bị ảnh hưởng bởi nước, bằng cách tăng cường cốt liệu khác có cường độ, độ dính bám cao. Trong đó, SMA là vật liệu có khả năng chống biến dạng dư tốt, cho độ nhám cao và phù hợp điều kiện khắc nghiệt về khí hậu cả nóng và lạnh. Hỗn hợp SMA giàu nhựa đường hơn các loại bê tông nhựa đã làm tăng độ bền và kéo dài tuổi thọ vật liệu. Khi hàm lượng nhựa kết hợp sợi cellulose cùng bột khoáng hình thành dạng keo Mastic sẽ duy trì cường độ, chống chảy nhựa trong thi công và khai thác.

Bên cạnh đó xi thép đang được xem là chất thải rắn công nghiệp cần được xử lý để hạn chế ảnh hưởng đến môi trường. Xi thép không những gây tác động xấu đến môi trường, còn gây tổn thất kinh phí và chiếm dụng một diện tích đất nhất định cho việc xử lý xi thép. Trên thế giới có một số nghiên cứu sử dụng xi thép thay thế cốt liệu để chế tạo BTN. Asi và cộng sự [1] chỉ ra rằng khi thay thế 100% cốt liệu lớn bằng xi thép sẽ cho chiều sâu HLVBX lớn nhất trong khi thay thế 25%, 50%, 75%, tăng khả năng kháng lún của BTN. Kết quả cho thấy khi thay thế 25% cốt liệu lớn bằng xi thép, chiều sâu HLVBX là nhỏ nhất. Tương tự kết quả nghiên cứu Wen và cộng sự [2] kết luận rằng khi sử dụng 0%, 20%, 40%, 60% xi thép, cho thấy kết quả 40% và 60% với khả năng kháng lún tốt nhất trong môi trường nước ở 50⁰C. Kavussi và Qazizadeh [3] đã đánh giá ảnh hưởng của các hàm lượng xi thép khác nhau đến khả năng kháng mỏi vật liệu. Kết quả đánh giá được thực hiện trên cơ sở thí nghiệm dầm 04 điểm dưới tác dụng tải trọng lặp với sự thay thế cốt liệu lớn (> 2,36 mm) cho kết quả, khi tăng hàm lượng xi thép, khả năng kháng mỏi vật liệu tăng. Tuy nhiên, khi thay thế 100% hàm lượng cốt liệu lớn bởi xi thép cho khả năng kháng mỏi BTN kém hơn so với BTN truyền thống. Xie và cộng sự [4] đánh giá khả năng kháng mỏi của vật liệu khi thay thế cốt liệu lớn (> 4,75 mm), khả năng kháng mỏi tốt hơn so với mẫu đối chứng không sử dụng xi thép. Một vài kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng khi thay thế cốt liệu bằng xi thép dẫn đến giảm khả năng kháng mỏi của vật liệu BTN. Goili và cộng sự [5] sử dụng thí nghiệm uốn 04 điểm dưới tác dụng tải trọng lặp ở 25⁰C với tần số 10Hz cho thấy rằng khi thay thế cốt liệu lớn bởi xi thép cho khả năng kháng mỏi vật liệu của BTN giảm. Bên cạnh đó, kết quả chỉ rõ việc thay thế cốt liệu nhỏ cho khả năng kháng mỏi vật liệu giảm đáng kể. Asi và các cộng sự [1] đã đánh giá ảnh hưởng của cốt liệu lớn thay thế bởi xi thép đến khả năng kháng mỏi vật liệu giảm khi tăng phần trăm hàm lượng xi thép thay thế cốt liệu. Tại Việt Nam, đã có một số nghiên cứu sử dụng xi thép chế

tạo BTN. Hùng và cộng sự [6] đã đánh giá bước đầu khả năng sử dụng xi thép làm cốt liệu sản xuất bê tông nhựa ở Việt Nam. Tuy nhiên, vẫn chưa có nhiều các nghiên cứu sử dụng xi thép làm cốt liệu để chế tạo SMA tại Việt Nam.

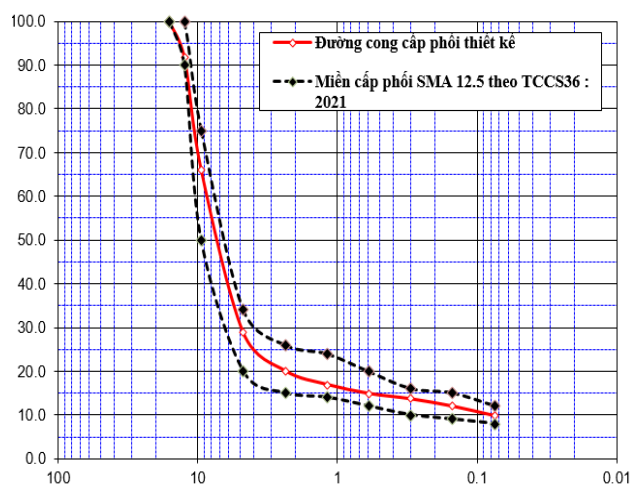
Do vậy, thông qua các thí nghiệm trong phòng như độ chảy nhựa, tổn thất cantabro, độ ổn định marshall, độ ổn định còn lại và hần lún vệt bánh xe theo TCCS 36:2021/TCĐBVN [7], nghiên cứu đã tiến hành phân tích và đánh giá bước đầu khả năng sử dụng xi thép Bà Rịa-Vũng Tàu để chế tạo SMA tại Việt Nam.

2. Thiết kế cấp phối hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA 12,5) có và không có xi thép

Theo nghiên cứu của Wen và cộng sự [2] khi thay thế từ 40% đến 60% cốt liệu bằng xi thép để chế tạo BTN C12,5 cho kết quả hần lún vệt bánh xe và độ ổn định Marshall là tốt nhất. Ngoài ra Wei chen và cộng sự [8] đã thay thế 25%, 50%, 75%, 100% cốt liệu thay thế xi thép để chế tạo SMA 12,5 cho kết quả có thể thay thế đến 75% cốt liệu thay thế xi thép. Do vậy trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiến hành nghiên cứu 50% và 75% cốt liệu thay thế xi thép để sản xuất SMA 12,5.

2.1. Xác định hàm lượng nhựa tối ưu cấp phối SMA 12,5

Đường cong thiết kế cấp phối SMA 12,5 trong nghiên cứu này được thể hiện hình 1.



Hình 1. Đường cong thiết kế cấp phối SMA 12,5.

Bảng 1. Tổng hợp các kết quả thí nghiệm cấp phối SMA 12,5.

Hàm lượng nhựa theo hỗn hợp (%)	Độ rỗng dư (%)	Độ rỗng lấp đầy (%)	Độ rỗng cốt liệu (%)	Độ ổn định Marshall (KN)
6,0	5,7	69,1	18,3	14,0
6,5	4,7	74,7	18,5	11,8
7,0	3,4	81,7	18,5	10,7
7,5	2,5	86,8	18,7	8,7
8,0	0,7	96,0	18,3	6,3
Yêu cầu kỹ thuật	3÷4	75÷85	≥ 17,0	≥ 6,0

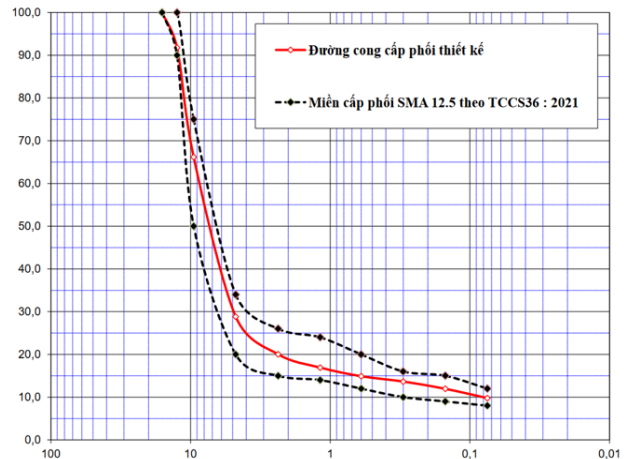
Từ kết quả thí nghiệm tổng hợp bảng 1 cho thấy khi hàm lượng nhựa tăng từ 6% lên 8%, độ ổn định Marshall thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo TCCS 36:2021/TCĐBVN. Tuy nhiên, khi hàm lượng nhựa từ 7,5% trở lên, các chỉ tiêu độ rỗng dư và độ rỗng lấp đầy không thỏa mãn yêu cầu theo TCCS 36:2021/TCĐBVN. Do vậy, hàm lượng nhựa tối ưu cho cấp phối SMA 12,5 là 7,0%.

2.2. Xác định hàm lượng nhựa tối ưu cấp phối SMA 12,5 sử dụng 50% cốt liệu bằng xỉ thép

Đường cong thiết kế cấp phối SMA 12,5 sử dụng 50% cốt liệu bằng xỉ thép trong nghiên cứu này được thể hiện hình 2.

Tiến hành thí nghiệm các chỉ tiêu của 05 tổ mẫu hỗn hợp ứng với 05 hàm lượng nhựa 6,3%; 6,8%; 7,3%; 7,8%; 8,3% và sợi cellulose 0,5% (theo hỗn

hợp). Kết quả thí nghiệm các đặc trưng thể tích và ổn định Marshall các hàm lượng nhựa trên được trình bày tại bảng 2. Từ đó, có thể tìm ra hàm lượng nhựa tối ưu cho cấp phối SMA 12,5 khi thay thế 50% cốt liệu bằng xỉ thép là 7,5%.



Hình 2. Đường cong thiết kế cấp phối SMA 12,5 khi thay thế 50% cốt liệu bằng xỉ thép.

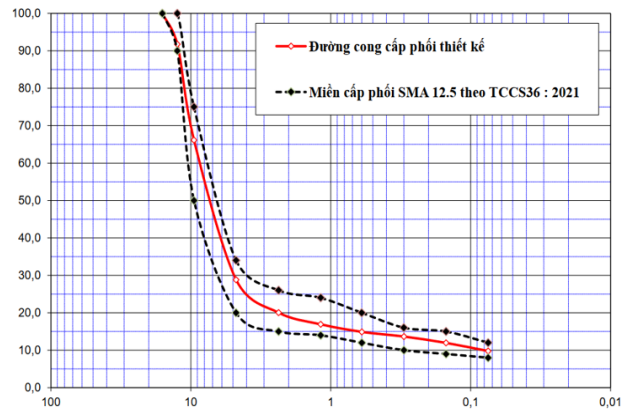
Bảng 2. Tổng hợp các kết quả thí nghiệm cấp phối SMA 12,5 khi thay thế 50% cốt liệu bằng xỉ thép.

Hàm lượng nhựa theo hỗn hợp (%)	Độ rỗng dư (%)	Độ rỗng lấp đầy (%)	Độ rỗng cốt liệu (%)	Độ ổn định Marshall (KN)
6,3	6,9	65,9	20,1	7,6
6,8	5,4	72,6	19,9	9,1
7,3	3,9	80,0	19,7	11,5
7,8	2,6	86,5	19,6	12,6
8,3	1,5	92,6	19,7	12,2
Yêu cầu kỹ thuật	3÷4	75÷85	≥17,0	≥6,0

2.3. Xác định hàm lượng nhựa tối ưu cấp phối SMA 12,5 sử dụng 75% cốt liệu bằng xi thép

Đường cong thiết kế cấp phối SMA 12,5 sử dụng 75% cốt liệu bằng xi thép trong nghiên cứu này được thể hiện hình 3.

Tương tự, tiến hành thí nghiệm các chỉ tiêu của 05 tổ mẫu hỗn hợp ứng với 05 hàm lượng nhựa 6,3%; 6,8%; 7,3%; 7,8%; 8,3% và sợi cellulose 0,5% (theo hỗn hợp). Kết quả thí nghiệm các đặc trưng thể tích và ổn định Marshall các hàm lượng nhựa trên được thể hiện bảng 3.



Hình 3. Đường cong thiết kế cấp phối SMA 12,5 khi thay thế 75% cốt liệu bằng xi thép.

Bảng 3. Tổng hợp các kết quả thí nghiệm cấp phối SMA 12,5 khi thay thế 75% cốt liệu bằng xi thép.

Hàm lượng nhựa theo hỗn hợp (%)	Độ rỗng dư (%)	Độ rỗng lấp đầy (%)	Độ rỗng cốt liệu (%)	Độ ổn định Marshall (KN)
6,3	6,4	68,1	19,9	6,4
6,8	5,7	71,8	20,4	7,8
7,3	4,5	77,8	20,4	10,0
7,8	2,9	85,5	20,1	11,1
8,3	2,0	90,1	20,3	10,1
Yêu cầu kỹ thuật	3÷4	75÷85	≥17,0	≥6,0

Từ kết quả thí nghiệm tổng hợp bảng 3 tìm ra hàm lượng nhựa tối ưu cho cấp phối SMA 12,5 khi thay thế 75% cốt liệu bằng xi thép là 7,7%.

3. Thí nghiệm đánh giá một số chỉ tiêu cơ học của hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) cốt liệu sử dụng xi thép thay thế

3.1. Thí nghiệm xác định độ ổn định Marshall và độ ổn định còn lại của SMA 12,5 khi thay thế cốt liệu bằng xi thép

Mẫu thí nghiệm được chế bị theo phương pháp Marshall của SMA 12,5 khi thay thế cốt liệu bằng xi thép với hàm lượng 0%, 50% và 75% để chế tạo

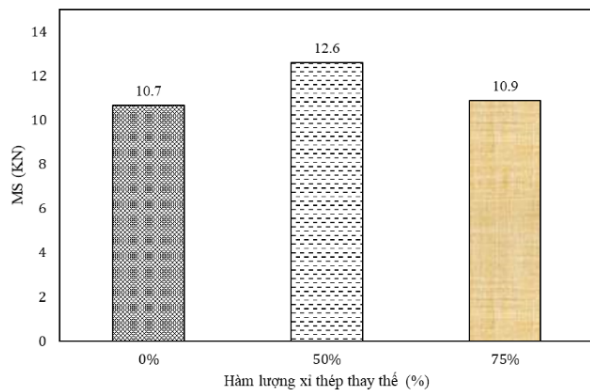
hỗn hợp SMA. Mẫu thí nghiệm độ dẻo và độ bền Marshall là mẫu có đường kính 101,6 mm và chiều cao là 63,5 mm. Khối lượng mẫu được tính toán sao cho mẫu đạt dung trọng ứng với độ rỗng dư thiết kế là 3,5% và có chiều cao mẫu đạt 63,5 mm. Tạo mẫu bằng máy đầm Marshall, 75 chày trên mỗi mặt. Mẫu được để nguội ở nhiệt độ phòng, sau đó tháo khuôn và giữ nhiệt độ phòng trong ít nhất 16 giờ rồi tiến hành thí nghiệm. Nhóm tiến hành đúc 06 mẫu. Hàm lượng nhựa trong hỗn hợp SMA tương ứng 7,0%, 7,5% và 7,7% như thiết kế. Kết quả thí nghiệm các đặc trưng thể tích, độ chảy nhựa, và tổn thất Cantabro trình bày tại bảng 4.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm xác định chỉ tiêu thể tích của SMA 12,5 khi thay thế cốt liệu bằng xi thép.

Hàm lượng xi thép (%)	Hàm lượng nhựa (%)	Độ rỗng dư (%)	Độ rỗng lấp đầy (%)	Độ rỗng cốt liệu (%)	Độ chảy nhựa (%)	Tổn thất Cantabro (%)
0	7,0	3,50	80,8	18,4	0,27	12,62
50	7,5	3,45	82,3	19,7	0,3	11,3

Hàm lượng xi thép (%)	Hàm lượng nhựa (%)	Độ rỗng dư (%)	Độ rỗng lấp đầy (%)	Độ rỗng cốt liệu (%)	Độ chảy nhựa (%)	Tổn thất Cantabro (%)
75	7,7	3,50	82,6	20,3	0,46	10,67
Yêu cầu kỹ thuật	-	3÷4	75÷85	≥17,0	≤0,3	≤15

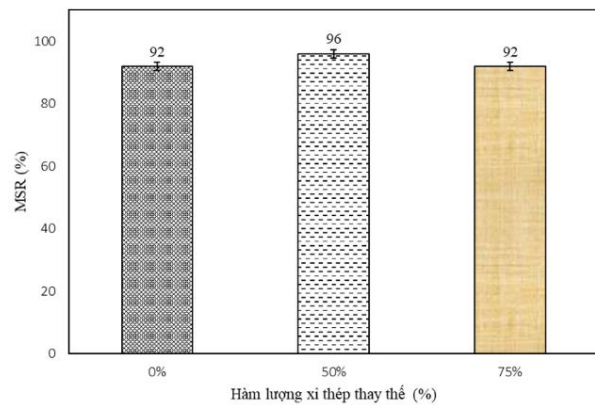
Từ bảng 4 cho thấy khi thay thế 50% và 75% cốt liệu bằng xi thép để chế tạo SMA 12,5, kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật về độ rỗng dư, độ rỗng lấp đầy, độ rỗng cốt liệu và tổn thất Cantabro thỏa mãn các chỉ tiêu kỹ thuật yêu cầu tại TCCS 36:2021/TCĐBVN. Một điều đáng chú ý rằng khi thay thế cốt liệu bởi 75% xi thép, độ chảy nhựa không thỏa mãn yêu cầu theo TCCS 36:2021/TCĐBVN. Tuy nhiên, để tăng độ tin cậy khi kết luận rằng chỉ nên sử dụng 50% xi thép để thay thế cốt liệu trong việc chế tạo hỗn hợp SMA 12,5, trong nghiên cứu này vẫn tiến hành thực các thí nghiệm độ ổn định Marshall, độ ổn định còn lại và HLVBX với các hàm lượng xi thép thay thế là 50% và 75%. Thực hiện thí nghiệm độ ổn định Marshall để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng xi thép thay thế đến độ ổn định Marshall, kết quả được thể hiện hình 4.



Hình 4. Độ ổn định Marshall với các hàm lượng xi thép khác nhau.

Từ kết quả thí nghiệm hình 4 cho thấy khi thay thế 50% và 75% cốt liệu bằng xi thép để chế tạo SMA 12,5, độ ổn định Marshall thỏa mãn chỉ tiêu kỹ thuật yêu cầu theo TCCS 36:2021/TCĐBVN ($MS \geq 6$ KN). Một kết quả đáng chú ý, đó là độ ổn định Marshall của SMA 12,5 thay thế 50% cốt liệu bằng xi thép tăng khoảng 18% so với SMA 12,5 không sử dụng xi thép. Tuy nhiên, khi thay thế 75% cốt liệu bằng xi thép thì độ ổn định Marshall

hầu như tương đương với SMA 12,5 không sử dụng xi thép. Như vậy bước đầu cho thấy có thể thay thế 50% cốt liệu bằng xi thép để chế tạo SMA 12,5. Tương tự tiến hành thí nghiệm độ ổn định còn lại của hỗn hợp SMA 12,5 không và có sử dụng xi thép thay thế. Kết quả thí nghiệm độ ổn định còn lại được thể hiện hình 5.



Hình 5. Độ ổn định còn lại với các hàm lượng xi thép khác nhau.

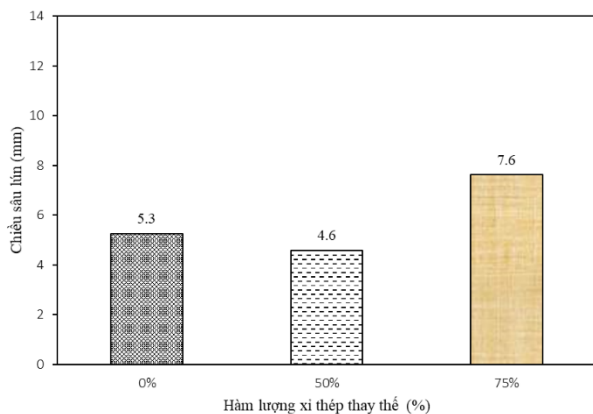
Từ kết quả phân tích thí nghiệm ở hình 5 cho thấy khi thay thế 50% và 75% cốt liệu bằng xi thép để chế tạo SMA 12,5, kết quả thí nghiệm độ ổn định còn lại thỏa mãn chỉ tiêu kỹ thuật yêu cầu theo TCCS36:2021/TCĐBVN ($MSR \geq 80\%$). Tương tự như kết quả thí nghiệm độ ổn định Marshall, độ ổn định còn lại của SMA 12,5 thay thế 50% cốt liệu bằng xi thép tăng khoảng 5% so với SMA 12,5 không sử dụng xi thép. Tuy nhiên, khi thay thế 75% cốt liệu bằng xi thép, độ ổn định còn lại hầu như tương đương với SMA 12,5 không sử dụng xi thép. Như vậy với kết quả độ ổn định còn lại, có thể thay thế 50% cốt liệu bằng xi thép để chế tạo SMA 12,5.

3.2. Thí nghiệm hần lún vệt bánh xe của SMA 12,5 sử dụng xi thép

Mẫu thí nghiệm hần lún vệt bánh xe là mẫu dạng tấm, sử dụng khuôn thép dạng tấm có kích thước 320 x 260 x 50 mm. Mẫu được bảo dưỡng ở nhiệt

độ phòng, sau đó tháo khuôn và bảo dưỡng ở nhiệt độ phòng trong vòng ít nhất 16 giờ đồng hồ, sau đó tiến hành thí nghiệm.

Mẫu được lắp vào và cài đặt máy chạy theo phương pháp A ở nhiệt độ 50°C trong môi trường nước (ẩm ướt). Máy gia nhiệt lên đến 50°C và ổn định nhiệt trong vòng 15 phút, sau đó, tự động thí nghiệm. Sau 40.000 chu kỳ máy tự động dừng lại, ghi nhận và thu thập số liệu. Phân tích kết quả thí nghiệm chiều sâu hằn lún vết bánh xe ở 40.000 lượt tải tại hình 6.



Hình 6. Chiều sâu hằn lún vết bánh xe với các hàm lượng xỉ thép khác nhau.

Kết quả phân tích ở hình 6 cho thấy khi thay thế 50% và 75% cốt liệu bằng xỉ thép để chế tạo SMA 12,5, hằn lún vết bánh xe thỏa mãn chỉ tiêu kỹ thuật yêu cầu theo TCCS 36:2021/TCĐBVN ($RD \leq 12,5$ mm ở 40.000 lượt tải). Cụ thể, chiều sâu hằn lún của SMA 12,5 khi thay thế 50% cốt liệu bằng xỉ thép giảm khoảng 12% so với SMA 12,5 không sử dụng xỉ thép. Thế nhưng, khi thay thế 75% cốt liệu bằng xỉ thép, chiều sâu hằn lún tăng lên 45% so với SMA 12,5 không sử dụng xỉ thép. Như vậy, có thể kết luận rằng chỉ có thể thay thế 50% cốt liệu bằng xỉ thép để chế tạo SMA 12,5.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, trên cơ sở kết quả thí nghiệm trong phòng, bước đầu cho thấy có thể sử dụng xỉ thép thay thế một phần cốt liệu trong việc chế tạo SMA 12,5 làm mặt đường ô tô. Dựa vào tiến hành thí nghiệm trong phòng cho SMA 12,5 sử dụng xỉ thép thay cốt liệu cho thấy:

- Khi thay thế 50% và 75% cốt liệu bằng xỉ thép để chế tạo SMA 12,5, kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý thỏa mãn yêu cầu theo TCCS 36:2021/TCĐBVN. Tuy nhiên chỉ tiêu về độ chảy nhựa khi thay thế cốt liệu bởi 75% xỉ thép không thỏa mãn yêu cầu theo TCCS 36:2021/TCĐBVN;

- Kết quả thí nghiệm độ ổn định Marshall và độ ổn định còn lại cho thấy khi thay thế 50% cốt liệu bằng xỉ thép sẽ tăng tương ứng khoảng 18% và 5% so với SMA 12,5 không sử dụng xỉ thép. Tuy nhiên khi thay thế 75% cốt liệu bằng xỉ thép, độ ổn định Marshall và độ ổn định còn lại hầu như tương đương với SMA 12,5 không sử dụng xỉ thép.

- Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng chiều sâu hằn lún của SMA 12,5 ở 40.000 lượt tải khi thay thế 50% cốt liệu bằng xỉ thép giảm khoảng 12% so với SMA 12,5 không sử dụng xỉ thép. Tuy nhiên, khi thay thế 75% cốt liệu bằng xỉ thép, chiều sâu hằn lún tăng lên 45% so với SMA 12,5 không sử dụng xỉ thép.

- Do vậy nghiên cứu có thể kết luận rằng chỉ có thể sử dụng 50% xỉ thép để thay thế cốt liệu để chế tạo SMA 12,5 làm mặt đường ô tô.

Tài liệu tham khảo

- [1] I. M. Asi; “Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes”. *Buil. Environ.* 2007; 42 (1):325-329. DOI:10.1016/j.buildenv.2005.08.020.
- [2] H. Wen, S. Wu, S. Bhusal; “Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear”. *J. Mater. Civ. Eng.* 2015; 28(5):1-7. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001475.
- [3] A. Kavussi, M. J. Qazizadeh; “Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging”. *Constr. Buil. Mater.* 2014; 72:158-166. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052.
- [4] J. Xie, J. Chen, S. Wu, J. Lin, W. Wei; “Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag”. *Cons. Buil. Mater.* 2013; 38:796-803. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.056.

- [5] H. Goli, S. Hesami, M. Ameri; “Laboratory evaluation of damage behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates”. *J. Mater. Civ. Eng.* 2017; 29(6):1-9. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001832.
- [6] N. V. Hùng, N. V. Du; “Đánh giá khả năng sử dụng xỉ thép làm cốt liệu sản xuất bê tông nhựa ở Việt Nam”. *Tạp chí GTVT.* 2015; 06:40-42.
- [7] Tổng cục đường bộ Việt Nam; “Lớp mặt đường bằng hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) - Thi công và nghiệm thu”. TCCS 36:2021/TCĐBVN; Bộ Giao thông vận tải, Hà Nội, Việt Nam; 2021.
- [8] C. Wei, J. Wei, X. Xizhong, Z. Xiaomeng, H. Wenyang, Y. Xiangpeng, H. Guiling and L. Zizhao; “Study on the Optimum Steel Slag Content of SMA-13 Asphalt Mixes Based on Road Performance”. *Coatings.* 2021; 11(12):1436. DOI:10.3390/coatings11121436.