

Nghiên cứu sử dụng cấp phối xỉ thép gia cố xi măng-tro bay làm móng đường ô tô

Study on using cement-fly ash treated steel slag aggregate as base for pavement

> TS NGUYỄN THỊ THÚY HẰNG

Khoa Xây dựng, Trường ĐH Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

Email: hangntt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nguồn vật liệu truyền thống sử dụng trong xây dựng ngày càng khan hiếm trong khi chất thải từ sản xuất công nghiệp ngày càng phát sinh nhiều. Trong bài báo này, tác giả sử dụng cấp phối xỉ thép thay thế cấp phối đá dăm trong cấp phối gia cố. Đồng thời, hàm lượng tro bay từ 10%-30% cũng được thêm vào với vai trò là phụ gia. Kết quả thí nghiệm xác định cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi ép chẻ và mô đun đàn hồi của cấp phối xỉ thép gia cố xi măng-tro bay cho thấy có thể dùng vật liệu này làm móng của đường ô tô. Cấp phối gia cố với hàm lượng tro bay 30% có thể dùng làm lớp móng trên cho đường tất cả các cấp.

Từ khóa: Xi thép; tro bay; gia cố xi măng; cường độ chịu nén; cường độ chịu ép chẻ; mô đun đàn hồi.

ABSTRACT

Traditional building materials are increasingly scarce while industrial waste is produced more and more. In this paper, the author used steel slag aggregate to replace crushed aggregate in treated aggregate. Fly ash admixture with a content of 10% to 30% was added to the treated aggregate. Experimental results determined the compressive strength, splitting tensile strength, and elastic modulus of cement-fly ash treated steel slag aggregate in 7, 14, 28, and 56 days show that it can be used as the base for road pavement. Treated steel slag aggregate with 30% fly ash content can be used as the base course of road pavement.

Keywords: Steel slag; fly ash; cement treated; compressive strength; splitting tensile strength and elastic modulus.

1. GIỚI THIỆU

Xi thép là sản phẩm được sinh ra trong quá trình tách thép nóng chảy khỏi tạp chất trong lò luyện thép. Xi thép đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như trong nông nghiệp, làm cốt liệu cho bê tông, làm vật liệu xây dựng đường [1]. Một số nghiên cứu sử dụng xỉ thép ở Việt Nam [2-6] và nước ngoài [7-12] đã chứng minh

xi thép không phải là chất thải rắn nguy hại, có thể dùng xỉ thép tái chế để thay thế các nguồn vật liệu truyền thống trong xây dựng.

Khi không gia cố xi măng, cấp phối xỉ thép chỉ có thể làm lớp móng dưới của đường ô tô [13]. Khi được gia cố với xi măng từ 4%-10%, các chỉ tiêu về cường độ được cải thiện nhưng vẫn chưa đạt yêu cầu để làm móng trên của đường ô tô [14]. Để cải thiện cấp phối hạt của xỉ thép, cát mịn hay đá mi được phối trộn với xỉ thép tạo ra cấp phối xỉ thép-cát mịn gia cố xi măng [15] hay cấp phối xỉ thép-đá mi gia cố xi măng [16]. Hai loại cấp phối này đã khắc phục được nhược điểm của của cấp phối xỉ thép gia cố xi.

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng tro bay, là phụ phẩm trong sản xuất công nghiệp tham gia vào cấp phối với vai trò là chất gia cố. Cấp phối xỉ thép gia cố sử dụng chất gia cố là xi măng 4% (so với khối lượng của cấp phối xỉ thép) và tro bay với hàm lượng từ 10%-30%. Để đánh giá sự phù hợp của cấp phối xỉ thép gia cố xi măng-tro bay trong việc làm lớp móng của đường ô tô, các chỉ tiêu cường độ chịu nén, cường độ kéo khi ép chẻ và mô đun đàn hồi ở các ngày tuổi 7, 14, 28 và 56 ngày được khảo sát để so sánh với các yêu cầu về cường độ trong tiêu chuẩn TCVN 8858:2023 [17] và quyết định 2218/QĐ-BGTVT [18].

2. VẬT LIỆU THỬ NGHIỆM

2.1 Xi măng

Xi măng Insee PCB40, được dùng để làm chất kết dính trong nghiên cứu. Các chỉ tiêu cơ lý của xi măng được xác định bao gồm cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày (xác định theo TCVN 6016:2011), khối lượng riêng và độ mịn Blaine của xi măng (xác định theo TCVN 13605:2023), lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết (xác định theo TCVN 6017:2015). Kết quả về chỉ tiêu cơ lý của xi măng được trình bày ở Bảng 1 thỏa yêu cầu của tiêu chuẩn TCVN 8858:2023 [19]

Bảng 1. Các chỉ tiêu cơ lý của xi măng Insee PCB40

Nội dung thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả
Cường độ chịu nén 28 ngày (MPa)	MPa	43
Khối lượng riêng (g/cm ³)	(g/cm ³)	3,04
Độ mịn Blaine (cm ² /g)	cm ² /g	3900
Lượng tiêu chuẩn (%)	%	31
Thời gian đông kết (phút)	phút	
+ Bắt đầu		110
+ Kết thúc		190

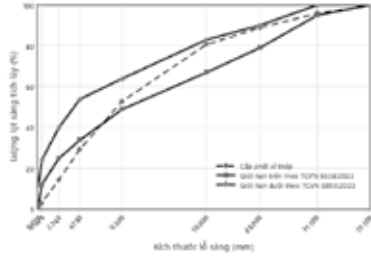
2.2 Nước

Nước dùng trộn cấp phối gia cố là nước sạch đảm bảo yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 4506-2012 [20]

2.3 Xi thép

Xi thép tái chế có các tính chất cơ lý tương đồng như cấp phối đá dăm đã được nghiên cứu ở [13] Tuy nhiên, thành phần hạt của

cấp phối xi thép trình bày ở Hình 1 cho thấy lượng lọt sàng tích lũy tại các mắt sàng nhỏ hơn 5mm không đạt yêu cầu theo TCVN 8858:2023 nên cấp phối xi thép gia cố xi măng chỉ phù hợp để làm lớp móng dưới của kết cấu áo đường [14]. Để cải thiện cấp phối gia cố, trong nghiên cứu này đã phối trộn thêm tro bay.



Hình 1. Thành phần hạt của cấp phối xi thép

2.4 Tro bay

Tro bay là một loại sản phẩm phụ được sản sinh từ quá trình đốt than của các nhà máy nhiệt điện [21]. Trữ lượng tro bay hiện rất lớn và đang được xử lý bằng cách chôn lấp. Một số nghiên cứu cho thấy tro bay có thể sử dụng làm phụ gia trong bê tông [22] hoặc sử dụng tro bay nhiệt điện thay thế đất sét sản xuất clanhke xi măng [23]. Tro bay cũng được khuyến khích bổ sung cùng với xi măng trong các cấp phối gia cố. Trong nghiên cứu này, hàm lượng tro bay (15÷25)% khối lượng của xi măng được dùng làm chất gia cố của cấp phối xi thép

Thành phần hóa học của tro bay trình bày ở Bảng 1 [24].

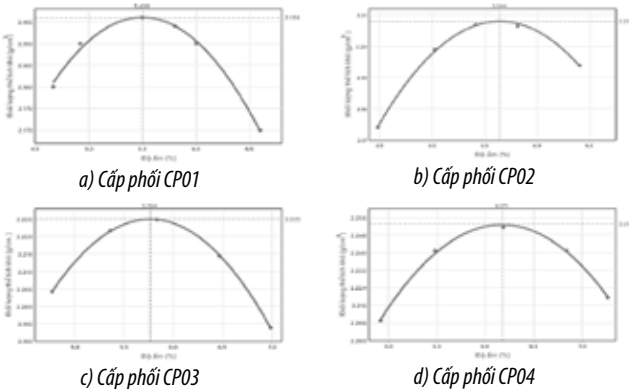
Bảng 2. Thành phần hóa học của tro bay

Oxit	Thành phần (%)
SiO ₂	51.7
CaO	1.21
Al ₂ O ₃	31.9
Fe ₂ O ₃	3.48
MgO	0.81
SO ₃	0.25
Na ₂ O	1.02
K ₂ O	-
LOI	9.63

3. THIẾT KẾ THÍ NGHIỆM

Bốn loại cấp phối xi thép gia cố CP01, CP02, CP03, CP04 với hàm lượng xi măng là 4% và lượng tro bay lần lượt là 0%, 10%, 20% và 30% so với khối lượng của xi măng được thiết lập để nghiên cứu.

3.1 Xác định độ ẩm hợp lý và khối lượng thể tích khô lớn nhất



Hình 2. Biểu đồ quan hệ giữa khối lượng thể tích và độ ẩm

Để có thể chế tạo mẫu gia cố, cần xác định độ ẩm hợp lý và khối lượng thể tích lớn nhất theo phương pháp II-D trong TCVN 12790:2020 [25] của các cấp phối CP01, CP02, CP03, CP04. Kết quả được trình bày ở Hình 2.

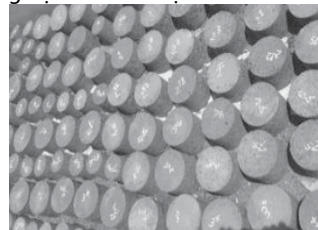
3.2 Chế tạo mẫu cấp phối xi thép gia cố.

Cấp phối xi thép được trộn với xi măng và tro bay cùng với lượng nước đảm bảo các cấp phối đạt được độ ẩm tốt nhất (Bảng 3), sau đó ủ ẩm trong 2h rồi mới tiến hành chế tạo mẫu

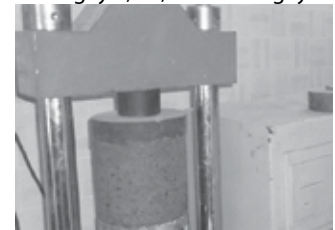
Bảng 3. Thành phần cấp phối gia cố

Cấp phối	Hàm lượng xi măng so với khối lượng hỗn hợp cốt liệu khô (%)	Hàm lượng tro bay so với khối lượng xi măng (%)	Độ ẩm (%)
CP01	4%	0%	5.498
CP02	4%	10%	5.644
CP03	4%	20%	5.754
CP03	4%	30%	6.171

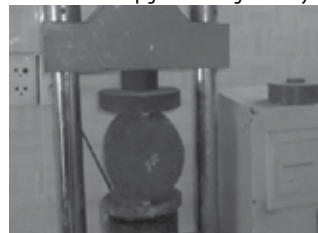
Các mẫu hình trụ có đường kính 152mm, chiều cao 117mm được chế tạo để xác định cường độ chịu nén theo TCVN 8858:2023 [17] và cường độ ép chẻ theo TCVN 8862:2011 [26]. Các mẫu hình trụ có đường kính 101.6mm, chiều cao 117mm được chế tạo để xác định mô đun đàn hồi theo TCVN 9843:2013 [27]. Các chỉ tiêu thí nghiệm ở trên được khảo sát ở các tuổi ngày 7, 14, 28 và 56 ngày.



Hình 3. Mẫu xi thép gia cố xi măng và tro bay



Hình 4. Thí nghiệm cường độ chịu nén



Hình 5. Thí nghiệm cường độ ép chẻ



Hình 6. Thí nghiệm mô đun đàn hồi

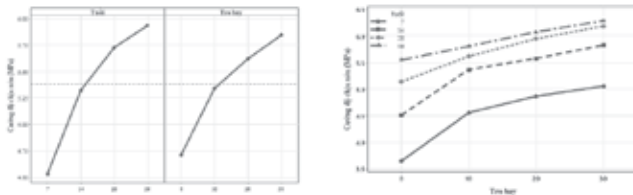
4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

4.1 Phân tích cường độ chịu nén R_n

Kết quả về cường độ chịu nén (R_n) ở tuổi 7, 14, 28, 56 ngày được thể hiện ở Bảng 4.

Bảng 4. Bảng kết quả thí nghiệm cấp phối xi thép gia cố xi măng tro bay

Tỷ lệ Tro bay	Tuổi mẫu	R _{n1}	R _{n2}	R _{n3}	Cường độ chịu nén, R _n (MPa)
0%	7	3.58	3.92	4.05	3.85
	14	4.46	4.73	4.34	4.51
	28	5.22	4.95	5.40	5.19
	56	5.41	5.75	5.49	5.55
10%	7	4.85	4.92	4.87	4.88
	14	5.09	5.35	5.46	5.30
	28	6.00	6.23	6.07	6.10
20%	7	5.04	5.10	4.92	5.02
	14	5.51	5.48	5.45	5.48
	28	6.21	6.41	6.43	6.35
30%	7	5.11	5.18	5.46	5.25
	14	5.61	5.88	5.70	5.73
	28	6.43	6.57	6.62	6.54
	56	7.08	7.23	7.11	7.14



a) Ảnh hưởng của tuổi thí nghiệm và hàm lượng tro bay đến cường độ chịu nén b) Ảnh hưởng tương tác của tuổi thí nghiệm và tro bay

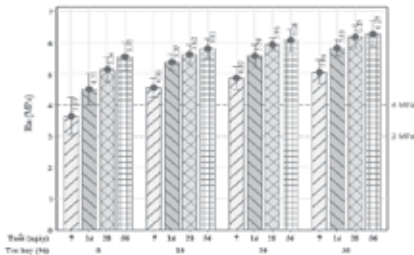
Hình 7. Biểu đồ ảnh hưởng các yếu tố đến R_n

Hình 7 cho thấy sự ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và tuổi ngày thí nghiệm đến cường độ chịu nén. Cả hàm lượng tro bay sử dụng và tuổi thí nghiệm đều có những ảnh hưởng nhất định đến cường độ chịu nén của cấp phối xi thép gia cố xi măng- tro bay.

Tương tự như cấp phối xi thép gia cố xi măng [14] hay cấp phối xi thép - cát mịn gia cố xi măng [15] hay cấp phối xi thép đá mi gia cố xi măng [16], cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay có cường độ phát triển theo thời gian. Cường độ phát triển nhanh nhất được ghi nhận ở giai đoạn tuổi từ 7-14 ngày sau đó giảm dần; Hàm lượng tro bay có ảnh hưởng đáng kể đến cường độ chịu nén của cấp phối gia cố. Cường độ chịu nén tăng tỷ lệ thuận với lượng tro bay sử dụng. Hình 7a cho thấy cường độ chịu nén của cấp phối CP02 tăng khoảng 13% so với cấp phối không sử dụng tro bay CP01, cấp phối CP03 tăng khoảng 19% so với cấp phối CP01 và cấp phối CP04 tăng khoảng 23% so với cấp phối CP01.

Biểu đồ tổng hợp cường độ chịu nén R_n theo lượng tro bay và ngày tuổi được minh họa ở Hình 8. Cho thấy cường độ chịu nén ở 14 ngày tuổi của các cấp phối đều lớn hơn 4.0MPa, nghĩa là các cấp phối CP01, CP02, CP03 và CP04 có chỉ tiêu cường độ chịu nén đạt yêu cầu làm lớp móng trên của kết cấu mặt đường có tầng mặt BTN và BTXM của đường cao tốc, đường cấp I, cấp II hoặc lớp mặt có láng nhựa theo quy định của [17].

Cường độ chịu nén của cấp phối gia cố xi măng-tro bay cũng được cải thiện hơn cấp phối xi thép-cát mịn gia cố xi măng với tỷ lệ 4% [14]. So với cấp phối xi thép-đá mi gia cố xi măng 4% thì cường độ chịu nén ở 14 ngày tuổi lại nhỏ hơn khoảng 40%.



Hình 8. Biểu đồ tổng hợp cường độ chịu nén của cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay

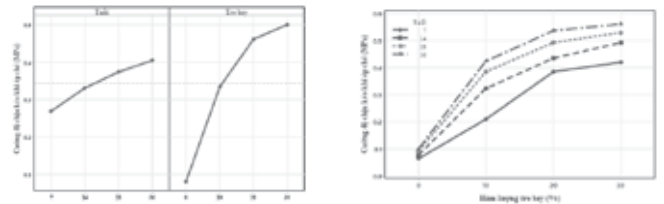
4.2 Phân tích cường độ chịu ép chèn R_{ech}

Kết quả về cường độ chịu kéo khi ép chèn (R_{ech}) ở tuổi 7, 14, 28, 56 ngày được thể hiện ở Bảng 5

Bảng 5. Bảng kết quả thí nghiệm cấp phối xi thép gia cố xi măng tro bay

Tỷ lệ Tro bay	Tuổi mẫu	R_{ech1}	R_{ech1}	R_{ech1}	Cường độ chịu kéo khi ép chèn, R_{ech} (MPa)
0%	7	0.066	0.061	0.062	0.063
	14	0.069	0.076	0.080	0.075
	28	0.090	0.083	0.097	0.090
	56	0.117	0.078	0.099	0.098
10%	7	0.211	0.191	0.225	0.209
	14	0.309	0.335	0.322	0.322
	28	0.386	0.386	0.380	0.384
	56	0.432	0.436	0.401	0.423

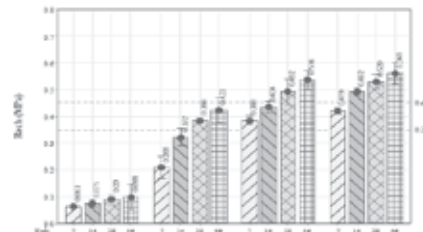
Tỷ lệ Tro bay	Tuổi mẫu	R_{ech1}	R_{ech1}	R_{ech1}	Cường độ chịu kéo khi ép chèn, R_{ech} (MPa)
20%	7	0.385	0.377	0.390	0.384
	14	0.425	0.442	0.435	0.434
	28	0.513	0.488	0.475	0.492
	56	0.519	0.546	0.543	0.536
30%	7	0.421	0.414	0.422	0.419
	14	0.494	0.496	0.486	0.492
	28	0.541	0.519	0.527	0.529
	56	0.552	0.580	0.551	0.561



a) Ảnh hưởng của tuổi thí nghiệm và hàm lượng tro bay đến R_{ech} . b) Ảnh hưởng tương tác của tuổi thí nghiệm và tro bay

Hình 9. Biểu đồ ảnh hưởng các yếu tố đến R_{ech}

Sự ảnh hưởng của tuổi ngày thí nghiệm và hàm lượng tro bay đến cường độ chịu kéo khi ép chèn (R_{ech}) được trình bày ở Hình 9. R_{ech} tăng khi tuổi ngày thí nghiệm và hàm lượng tro bay tăng. Sự ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến R_{ech} là nhiều hơn so với tuổi ngày thí nghiệm. Hình 9a cho thấy cường độ chịu kéo khi ép chèn của cấp phối xi thép gia cố được cải thiện đáng kể khi sử dụng chất gia cố là xi măng-tro bay. R_{ech} của CP02, CP03, CP04 tăng lần lượt khoảng 75%, 82% và 83% so với cấp phối không sử dụng tro bay CP01.



Hình 10. Biểu đồ tổng hợp R_{ech} của cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay

Hình 10 cho thấy với cấp phối CP02 có R_{ech} ở 14 ngày tuổi nhỏ hơn 0.35MPa nên chỉ có thể làm vật liệu cho lớp móng dưới. Trong khi đó CP03 có R_{ech} ở 14 ngày tuổi lớn hơn 0.35MPa và nhỏ hơn 0.45MPa nên có thể dùng làm vật liệu cho lớp móng trên của đường cấp III và IV. Cấp phối CP04 có R_{ech} ở 14 ngày tuổi lớn hơn 0.45MPa nên có thể dùng làm vật liệu cho lớp móng trên của kết cấu áo đường trong mọi trường hợp.

Cường độ ép chèn của cấp phối gia cố CP04 mặc dù không lớn hơn so với cấp phối xi thép-cát mịn gia cố xi măng với tỷ lệ 4% [14] và cấp phối xi thép-đá mi gia cố xi măng nhưng vẫn đáp ứng yêu cầu kỹ thuật về cường độ ép chèn của cấp phối gia cố theo TCVN 8858:2023 [17].

4.3 Phân tích mô đun đàn hồi E

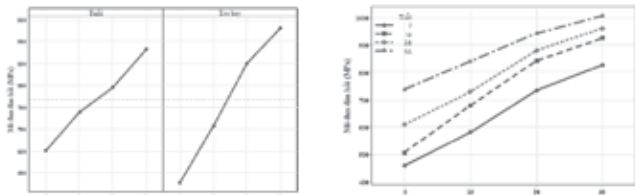
Kết quả về mô đun đàn hồi (E) ở tuổi 7, 14, 28, 56 ngày được thể hiện ở Bảng 6

Bảng 6. Bảng kết quả thí nghiệm cấp phối xi thép gia cố xi măng tro bay

Tỷ lệ Tro bay	Tuổi mẫu	E_1	E_2	E_3	Mô đun đàn hồi, E (MPa)
0%	7	456.32	456.32	464.00	458.88
	14	507.99	507.99	504.18	506.72
	28	619.59	610.97	593.44	608.00

Tỷ lệ Tro bay	Tuổi mẫu	E ₁	E ₂	E ₃	Mô đun đàn hồi, E (MPa)
	56	731.49	730.49	750.31	737.43
10%	7	569.38	588.17	584.43	580.66
	14	665.70	685.79	683.42	678.30
	28	712.54	734.20	739.40	728.71
	56	835.18	859.39	827.45	840.67
20%	7	734.65	741.99	725.99	734.21
	14	852.38	836.00	838.82	842.40
	28	853.09	896.91	889.81	879.94
	56	957.41	939.08	932.33	942.94
30%	7	830.26	814.96	836.26	827.16
	14	931.81	928.67	913.22	924.57
	28	973.95	950.91	960.58	961.81
	56	1005.50	991.42	1023.85	1006.92

Tương tự như chỉ tiêu cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi ép chế, mô đun đàn hồi của cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay được phân tích ở Hình 11. Kết quả cho thấy, ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến mô đun đàn hồi lớn hơn so với tuổi ngày thí nghiệm.

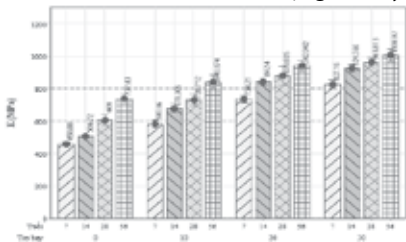


a) Ảnh hưởng của tuổi thí nghiệm và hàm lượng tro bay đến mô đun đàn hồi
b) Ảnh hưởng tương tác của tuổi thí nghiệm và tro bay

Hình 11. Biểu đồ ảnh hưởng các yếu tố đến mô đun đàn hồi

Biểu đồ tổng hợp mô đun đàn hồi E theo lượng tro bay và ngày tuổi ở Hình 12 cho thấy khi bổ sung thêm tro bay vào chất gia cố, mô đun đàn hồi ứng của các cấp phối gia cố ở 14 ngày tuổi trở lên đều nằm trong giới hạn 600-800 MPa. Riêng mô đun đàn hồi sau 14 ngày của cấp phối CP03 và mô đun đàn hồi sau 7 ngày của cấp phối CP04 đều lớn hơn 800MPa, nghĩa là xét về tiêu chí mô đun đàn hồi cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay có thể đáp ứng yêu cầu về mô đun đàn hồi đối với lớp móng trên cho kết cấu mặt đường.

So với cấp phối xi thép gia cố xi măng với tỷ lệ 4% [14], cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay có mô đun đàn hồi được cải thiện khoảng 15%-35%, và lớn nhất khi hàm lượng tro bay là 30%.



Hình 12. Biểu đồ tổng hợp E của xi thép gia cố xi măng-tro bay

5. KẾT LUẬN

Dựa những phân tích ở trên, có thể đưa ra một số kết luận như sau:

Cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay có các chỉ tiêu cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi ép chế mà mô đun độ lớn được cải thiện so với cấp phối xi thép gia cố xi măng nhưng kém hơn so với cấp phối xi thép cát mịn gia cố xi măng và cấp phối xi thép đá mi gia cố xi măng.

Cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay với hàm lượng tro bay từ 10%-30% có thể dùng làm vật liệu cho lớp móng dưới của đường ô tô tất cả các cấp.

Cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay với hàm lượng tro bay 20% có thể dùng làm vật liệu cho móng trên của đường ô tô cấp III và IV

Cấp phối xi thép gia cố xi măng-tro bay với hàm lượng tro bay 30% có thể dùng làm vật liệu cho lớp móng trên của đường ô tô tất cả các cấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Wei, L.J., et al. *Utilizing steel slag in environmental application-An overview*. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. IOP Publishing.
- [2]. Nguyen, T.-T.-H., et al., *Investigation on Compressive Characteristics of Steel-Slag Concrete*. 2020. **13**(8): p. 1928.
- [3]. Nguyen, T.-T.-H., et al., *Responses of Concrete Using Steel Slag as Coarse Aggregate Replacement under Splitting and Flexure*. Sustainability, 2020. **12**(12): p. 4913.
- [4]. Nguyen, T.T.H., D.H. Phan, and H.H. Mai, *Modified compositions of concretes using steel slag coarse aggregate*. Jour. Build, 2016. **2**&3: p. 63-71.
- [5]. Van Tran, M., et al., *Properties of high strength concrete using steel slag coarse aggregate*. The IES Journal Part A: Civil Structural Engineering, 2009. **2**: p. 202-214.
- [6]. Tran, A.T., et al., *Characterization of carbonated steelmaking slag and its potential application in construction*. VN. Jour. Sci.Tech, 2019. **57**(3A): p. 61.
- [7]. Furlani, E., G. Tonello, and S.J.W.M. Maschio, *Recycling of steel slag and glass cullet from energy saving lamps by fast firing production of ceramics*. 2010. **30**(8-9): p. 1714-1719.
- [8]. Gurnel S Ghataora, Richard J Freer-Hewish, and James Jessic, *The utilisation of recycled aggregates generated from highway arisings and steel slag fines*. 2004, Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Birmingham. p. 2.
- [9]. Hunt, L. and G. Boyle, *Steel slag in hot mix asphalt concrete*. 2000: Oregon Department of Transportation Research Group.
- [10]. Behry, A.E.A.E.-M., *Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement*. Ain Shams Engineering Journal, 2013. **4**(1): p. 43-53.
- [11]. Mladenović, A., *Application of steel slag aggregate in road construction*, in ARCHES and SPENS Final Seminar. 2009: Slovenian National Building and Civil Engineering Institute.
- [12]. Barra, M., E. Ramonich, and M. Munoz. *Stabilization of soils with steel slag and cement for application in rural and low traffic roads*. in Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications University of New Hampshire, Durham. 2001.
- [13]. Mai Hong Ha and N.T.T. Hang, *Nghiên cứu sử dụng xi thép tái chế làm lớp móng đường ô tô*. Khoa học công nghệ giao thông vận tải, 2018(27+28).
- [14]. Mai Hong Ha, N.T.T. Hang, and P.D. Hung, *Nghiên cứu sử dụng xi thép tái chế gia cố xi măng làm lớp móng đường ô tô*. Khoa học công nghệ giao thông vận tải, 2019(31-32): p. 149-154.
- [15]. Hằng, N.T.T., M.H. Hà, and T.V.J.T.c.K.h.C.n.X.d.-Đ. Tiếng, *Nghiên cứu sử dụng xi thép-cát mịn gia cố xi măng làm lớp móng đường ô tô*. 2019. **13**(5V): p. 93-101.
- [16]. Mai Hong Ha, N.T.T.H., *Study on improving the properties of steel slag to apply for pavement foundations*. Journal of Transportation Science and Technology, 2018. **30**.
- [17]. *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*. 2023: Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [18]. *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 mặt đường ô tô*, in Quyết định số 2218/QĐ-BGTVT. 2018, Bộ Giao thông vận tải: Việt Nam.
- [19]. *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*. 2011: Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [20]. *Nước trộn bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. 2012: Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [21]. Arulrajah, A., et al., *Strength and microstructure evaluation of recycled glass-fly ash geopolymer as low-carbon masonry units*. 2016. **114**: p. 400-406.
- [22]. Plowman, C. and J.J.W.M. Cabrera, *The use of fly ash to improve the sulphate resistance of concrete*. 1996. **16**(1-3): p. 145-149.
- [23]. Chindaprasit, P., et al., *Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer*. 2007. **29**(3): p. 224-229.
- [24]. Tran, T.T. and V.M.H.J.o.T.E.S. Pham, *Use Recycled Glass As Fine Aggregate in Slag-Blended Fly Ash-Based Geopolymer Mortar*. 2023. **18**(4): p. 1-7.
- [25]. *Đất, đá dăm dùng trong công trình giao thông - Đầm nén Proctor*. 2020: Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [26]. *Quy trình thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chế của vật liệu hạt liên kết bằng các chất kết dính*. 2011: Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [27]. *Xác định mô đun đàn hồi của vật liệu gia cố chất liên kết vô cơ*. 2013: Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.