

Nghiên cứu thiết kế thành phần cọc vật liệu hỗn hợp cát biển - xi măng - tro bay gia cố nền đất yếu phục vụ xây dựng công trình giao thông khu vực ven biển

■ **TS. NGUYỄN TRỌNG DŨNG; PGS. TS. TẠ ĐỨC THỊNH**

Trường Đại học Mở - Địa chất Hà Nội

■ **PGS. TS. HỒ ANH CƯỜNG**

Trường Đại học Giao thông vận tải

TÓM TẮT: Vùng ven biển Việt Nam có cấu trúc nền đất yếu phức tạp gây nhiều khó khăn cho việc xây dựng công trình giao thông. Việc sử dụng công nghệ cọc vật liệu hỗn hợp cát biển - xi măng - tro bay (CB-XM-TB) để gia cố nhằm tăng sức chịu tải nền đất yếu sẽ giúp giải quyết tồn tại trên nhờ những cơ chế chính như tăng độ chặt và cố kết thoát nước của nền đất cũng như hình thành hệ cọc cứng chịu tải. Bài báo đề cập đến việc thiết kế thành phần cấu tạo của cọc vật liệu hỗn hợp CB-XM-TB và kết quả thử nghiệm trong phòng để đánh giá về cường độ chịu nén tuổi 28 ngày của hỗn hợp vật liệu. Các kết quả thu được sẽ tạo cơ sở khoa học để xuất thành phần thích hợp cho công tác thi công cọc ngoài hiện trường.

TỪ KHÓA: Cọc vật liệu, cát biển, tro bay, gia cố, nền đất yếu.

ABSTRACT: The Viet nam's coastal area has a complex soft soil structure that causes many difficulties for the construction of transport works. The use of pile technology using mixed sea sand - cement - fly ash for reinforcement to increase the bearing capacity of soft ground will contribute to solve the above problem due to the main mechanisms such as increased compaction and consolidation of drainage of the ground as well as forming a load-bearing rigid pile system. This paper aims to design the composition of the piles of mixed materials of sea sand - cement - fly ash and the test results in lab condition to evaluate the compressive strength at the age of 28 days of the material mixture. The observed results will create a scientific basis to propose suitable components for field pile construction.

KEYWORDS: Material pipe, sea sand, fly ash, reinforcement, soft soil.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xây dựng công trình giao thông ven biển đảm bảo phát triển bền vững có ý nghĩa vô cùng quan trọng trong chiến lược phát triển kinh tế - xã hội của nước ta. Tuy nhiên, việc xây dựng công trình giao thông ven biển thường gặp những khó khăn trong việc xử lý nền đất yếu khi xây dựng nền móng công trình. Vùng ven biển và hải đảo nước ta có cấu trúc nền đất yếu phức tạp. Đất yếu khu vực này thường phân bố rộng rãi ở dưới sâu, có chiều dày lớn, biến đổi phức tạp, gây khó khăn cho hoạt động xây dựng công trình nói chung, công trình giao thông nói riêng. Vì vậy, để gia cố, xử lý nền móng các công trình đặt trên cấu trúc nền như ở vùng ven biển thì lựa chọn các công nghệ phù hợp như bắc thẳm, cọc cát, cọc đất-xi măng.

Trên thế giới, công nghệ gia cố nền đất yếu dưới sâu bằng cọc đất - xi măng, đất - vôi được triển khai phổ biến ở châu Âu từ những năm 1960 của thế kỷ trước tại Thụy Điển, Phần Lan [1] để gia cố nền đất yếu, thành hố đào, ổn định khối đất, gia cố hố móng nông tại các công trình xây dựng dân dụng và công nghiệp. Công nghệ cọc đất - xi măng trộn sâu (Deep Mixing - DM) là công nghệ được dùng lần đầu tiên ở các nước Bắc Âu và Nhật Bản trong những năm 1970 [2], sau đó được dùng nhiều ở Thái Lan, Trung Quốc, Mỹ, Anh, Đức và các nước khác [1], [3-6]. Năm 1996, Ahnberg đã phát triển ứng dụng công nghệ cọc đất-xi măng (Deep Mixing - DM) để gia cố, xử lý nền đất yếu các tuyến đường giao thông (đường bộ, đường sắt) [7].

Tại Việt Nam, có thể nói, hầu hết các công trình giao thông, dân dụng và công nghiệp, thủy lợi... xây dựng trên nền đất yếu đều ứng dụng các công nghệ cọc cát, bắc thẳm, cọc đất - xi măng để gia cố nền [8-10]. Tuy nhiên, việc ứng dụng các công nghệ cọc cát, bắc thẳm, cọc đất-xi măng vào thực tiễn xử lý nền đất yếu không phải lúc nào cũng mang lại hiệu quả kinh tế - kỹ thuật cao do các công nghệ này tồn tại một số hạn chế, bất cập như: cọc cát thường gây ra tiếng ồn lớn khi thi công, cọc bị biến dạng ngang lớn, nguồn cát sông khan hiếm, đắt đỏ. Bắc thẳm bị giảm hiệu quả thoát

nước do hiệu ứng xáo trộn, phải nhập khẩu nên giá thành cao. Cọc đất - xi măng không có tác dụng nén chặt vùng đất xung quanh cọc, việc tính toán độ lún và sức chịu tải của cọc khi dưới mũi cọc phân bố đất yếu còn có ý kiến khác nhau... [11-12].

Năm 2002, Tạ Đức Thịnh [13] đã nghiên cứu đề xuất công nghệ xử lý nền đất yếu bằng cọc cát - xi măng - vôi. Cơ sở lý thuyết của công nghệ là dựa vào quá trình nén chặt cơ học trong đất nền, quá trình cố kết thắm của đất nền và quá trình gia tăng cường độ của cọc và ma sát giữa cọc và đất nền xung quanh cọc. Công nghệ này đã được ứng dụng để gia cố, xử lý nền đất yếu ở một số công trình ở Quảng Ninh, Thái Bình, Thanh Hóa, mang lại hiệu quả kinh tế - kỹ thuật cao [13-16]. Dựa trên cơ sở lý thuyết của nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất ứng dụng công nghệ gia cố nền đất yếu bằng cọc vật liệu hỗn hợp CB - XM - TB dựa trên việc cải tiến và tích hợp hai công nghệ đang được sử dụng phổ biến hiện nay: cọc cát và cọc đất - xi măng. Công nghệ mới này có thể thích hợp trong xây dựng công trình hạ tầng giao thông tại khu vực đất liền ven biển, hải đảo nhờ những đặc điểm chính như sau: tăng độ chặt của nền đất (nhồi vật liệu làm cọc nhưng không lấy đất lên), cố kết thoát nước cho nền đất (nhờ khả năng hút nước của cọc chứa xi măng, tro bay) và hình thành hệ cọc cứng chịu tải (cọc vật liệu hỗn hợp CB - XM - TB sau khi đóng rắn). Đồng thời, việc sử dụng nguồn cát dưới biển dạng hạt mịn và tro bay nhiệt điện nguyên khai tại chỗ làm vật liệu cọc sẽ giúp hạn chế sử dụng nguồn cát sông vốn đang ngày càng khan hiếm và giải quyết vấn đề tro xỉ thải ra môi trường. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu tập trung vào công tác thực nghiệm để bước đầu đưa ra tỷ lệ thành phần vật liệu hợp lý khi chế tạo mẫu cọc hỗn hợp CB - XM - TB.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Nghiên cứu này sử dụng xi măng hỗn hợp PCB40 Nghi Sơn có các chỉ tiêu kỹ thuật thỏa mãn Tiêu chuẩn TCVN 6260-2009. Các chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng PCB40 được ghi trong *Bảng 2.1*.

Bảng 2.1. Các chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng Bút sơn PCB40

Tên chỉ tiêu	Giá trị	Yêu cầu
Cường độ chịu nén, (MPa)	31,8	≥21
3 ngày ± 45 phút	50,2	≥40
28 ngày ± 8h		
Thời gian ninh kết, phút:		
- Thời gian ninh kết	110	≥45
- Thời gian ninh kết	200	≤375
Độ nghiêng mịn, xác định theo:		
Bề mặt riêng, phương pháp Blaine, cm ² /g, không nhỏ hơn	3518	≥2800
Độ ổn định thể tích xác định theo phương pháp Le Chatelier, mm, không lớn hơn	0,5	≤10
Hàm lượng anhydric sunphuric (SO ₃), % không lớn hơn	1,86	≤3,5
Lượng nước tiêu chuẩn, %	28	

Cát trong nghiên cứu này sử dụng là cát biển Hải Phòng, cát được hút ở vùng ngập mặn hoàn toàn. Các đặc tính kỹ thuật của cát biển được xác định theo Tiêu chuẩn TCVN 7572:2006. Thành phần hạt của cát biển được kiểm tra theo bộ sàng của Tiêu chuẩn TCVN 7570:2006 được thể hiện trong *Bảng 2.2*. Như vậy, có thể thấy cát biển sử dụng trong nghiên cứu này là cát mịn có mô-đun độ lớn rất thấp (0,3). Phần lớn kích thước hạt của cát biển đều dưới 0,315 mm. Lượng hạt nhỏ hơn 0,014 mm chiếm tới 74%. Hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,075 mm có trong cát biển được xác định theo phương pháp sàng ướt (TCVN 9205:2012). Kết quả thí nghiệm cho thấy hàm lượng hạt nhỏ này chiếm tới 21,6%. Các đặc tính kỹ thuật của loại cát biển sử dụng trong đề tài được tổng hợp ở *Bảng 2.3*.

Bảng 2.2. Thành phần hạt của cát biển Hải Phòng sử dụng trong thí nghiệm

Cỡ sàng	Lượng sót riêng biệt, %	Lượng sót tích lũy, %	TCVN 7570:2006
5	0	0	0
2,5	0	0	0÷20
1,25	0	0	15÷45
0,63	0	0	35÷70
0,315	5	5	65÷90
0,14	21	26	90÷100
Đáy	74	100	
Mô-đun độ lớn	0,3	<2	<2

Bảng 3.3. Các đặc tính kỹ thuật chính của cát biển Hải Phòng sử dụng trong thí nghiệm

Chỉ tiêu	
Khối lượng riêng (g/cm ³)	2,48
Khối lượng thể tích ở trạng thái khô (g/cm ³)	2,26
Khối lượng thể tích ở trạng thái bão hòa nước (g/cm ³)	2,35
Khối lượng thể tích xốp (g/cm ³)	1,35
Độ hút nước 24 giờ (%)	3,60
Hàm lượng bụi, bùn, sét (%)	9,20
Hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,075 mm (%)	21,60

Tro bay sử dụng trong nghiên cứu là tro bay không qua tuyển chọn của Nhà máy Nhiệt điện Formosa thỏa mãn các yêu cầu của TCVN 10302:2014, ASTM C618-03 và GOST P 56592-2015 với tỷ diện bề mặt riêng là 5820 cm²/g và khối lượng riêng là 2,35 g/cm³. Đây là loại tro bay có tổng hàm lượng SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ = 87,5% và lượng mất khi nung là 4,5%, thỏa mãn yêu cầu tro bay loại F. Thành phần hóa học của tro bay Formosa được giới thiệu trong *Bảng 2.4*, các tính chất cơ lý được giới thiệu trong *Bảng 2.5*.

Bảng 2.4. Thành phần hóa học của tro bay Formosa sử dụng trong nghiên cứu

Vật liệu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	P ₂ O ₅	Lượng mất khi nung
Tro bay	54,2	23,3	9,8	2,5	1,4	1,1	0,6	1,2	1,4	4,5
Xi măng	36,3	4,4	5,4	3,4	1,2	0,3	2,5	60,2	-	2,2

Bảng 2.5. Tính chất cơ lý của tro bay Formosa

Khối lượng riêng (g/cm ³)	Lượng nước yêu cầu (%)	Tỷ diện bề mặt (cm ² /g)	Độ mịn trên sàng 45 μm (%)	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	Chỉ số hoạt tính: $M_s = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	Chỉ số kiểm: $M_i = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$	Tổng hàm lượng: (CaO+MgO)
2,35	104,1	5820	22,8	87,3	0,43	0,0232	1,8

2.2. Phương pháp thí nghiệm

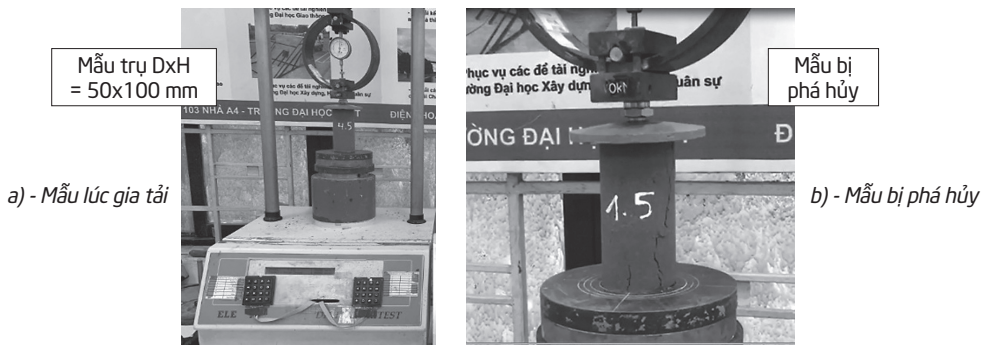
Trong bài báo này, mẫu vật liệu hỗn hợp CB - XM - TB được thiết kế với các hàm lượng chất kết dính (CKD là hỗn hợp gồm xi măng và tro bay) khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng CKD đến cường độ chịu nén của mẫu vật liệu. Các mẫu hỗn hợp vật liệu được thiết kế với 3 hàm lượng chất kết dính 5%, 10% và 15% theo khối lượng cát biển. Để làm rõ ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến sự hình thành cường độ của mẫu, tỷ lệ thay thế theo khối lượng của tro bay cho xi măng được thay đổi với 3 mức 0% (tương ứng hàm lượng XM 100%), 10% (tương ứng XM 90%) được quy ước TB/CKD 10% và 20% (tương ứng XM 80%) được quy ước TB/CKD 20%. Để dễ theo dõi các mẫu, nghiên cứu đặt tên các mã mẫu như sau: M X-Y, trong đó X có giá trị 5,10 và 15 thể hiện hàm lượng CKD, Y có giá trị 0,10 và 20 thể hiện hàm lượng tro bay trong hỗn hợp CKD.

Hàm lượng nước được giữ nguyên cho tất cả các hỗn hợp. Bảng 2.6 trình bày quy định ký hiệu và thành phần thiết kế cho các mẫu hỗn hợp.

Bảng 2.6. Thành phần vật liệu thiết kế cho 9 hỗn hợp

Loại mẫu	Hàm lượng chất kết dính/khối lượng cát và tỷ lệ giữa TB/CKD	Mã mẫu	CKD (kg)	Xi măng (kg)	Tro bay (kg)	Cát (kg)	Nước (kg)	Tỷ lệ N/CKD
Không tro bay	CKD 5% (chỉ có XM, 0% TB)	M5-0	75	75	0	1500	300	4,0
	CKD 10% (chỉ có XM, 0% TB)	M10-0	150	150	0	1500	300	2,0
	CKD 15% (chỉ có XM, 0% TB)	M15-0	225	225	0	1500	300	1,3
Có tro bay	CKD 5%, TB/CKD 10%	M5-10	75	67,5	7,5	1500	300	4,0
	CKD 10%, TB/CKD 10%	M10-10	150	135	15	1500	300	2,0
	CKD 15%, TB/CKD 10%	M15-10	225	202,5	22,5	1500	300	1,3
Có tro bay	CKD 5%, TB/CKD 20%	M5-20	75	60	15	1500	300	4,0
	CKD 10%, TB/CKD 20%	M10-20	150	120	30	1500	300	2,0
	CKD 15%, TB/CKD 20%	M15-20	225	180	45	1500	300	1,3

Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của mẫu được thí nghiệm theo TCVN 9403:2012 với tốc độ gia tải 1,5 mm/phút (Hình 2.2). Với mỗi cấp phối, thí nghiệm được tiến hành trên 4 mẫu thử ở tuổi 28 ngày.

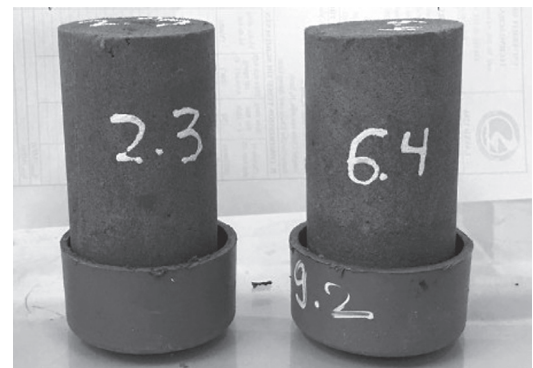


Hình 2.2: Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của mẫu trụ

Các vật liệu hình trụ tròn, chiều cao 100 mm, đường kính 50 mm được chế tạo và bảo quản trong điều kiện phòng thí nghiệm (Hình 2.1). Phương pháp đúc mẫu và đầm tay tuân thủ theo TCVN 9403:2012.



a) - Các mẫu được bảo quản trong phòng thí nghiệm



b) - Mẫu chuẩn bị làm thí nghiệm nén tại tuổi 28 ngày

Hình 2.1: Các mẫu trụ cao 100 mm, đường kính 50 mm

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bảng 3.1 giới thiệu kết quả nén trung bình của các 4 mẫu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày.

Bảng 3.1. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén trung bình của các mẫu hỗn hợp ở tuổi 28 ngày

Loại mẫu	Hàm lượng chất kết dính/khối lượng cát và tỷ lệ giữa TB/CKD	Mã mẫu	R nén (Mpa)
Không tro bay	CKD 5% (chỉ có XM, 0% TB)	M5-0	0,72
	CKD 10% (chỉ có XM, 0% TB)	M10-0	1,52
	CKD 15% (chỉ có XM, 0% TB)	M15-0	2,00
Có tro bay	CKD 5%, TB/CKD 10%	M5-10	0,68
	CKD 10%, TB/CKD 10%	M10-10	1,40
	CKD 15%, TB/CKD 10%	M15-10	1,74
Có tro bay	CKD 5%, TB/CKD 20%	M5-20	0,63
	CKD 10%, TB/CKD 20%	M10-20	1,30
	CKD 15%, TB/CKD 20%	M15-20	1,55

Bảng 3.2. Mức độ tăng R nén theo hàm lượng CKD

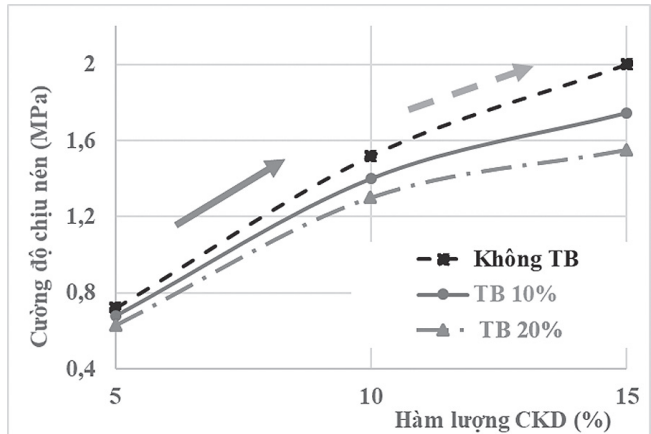
Hàm lượng CKD (%)	Mức độ tăng R nén theo hàm lượng CKD		
	Không tro bay	TB/CKD 10%	TB/CKD 20%
5	1	1	1
10	2,11	2,06	2,06
15	2,78	2,56	2,46

Bảng 3.2 cho thấy, việc tăng hàm lượng CKD từ 5% lên 15% đã làm tăng cường độ chịu nén của các mẫu hỗn hợp vật liệu. R nén tăng trung bình từ 2 - 2,8 lần khi tăng tỷ lệ CKD từ 10 - 15%. Tuy nhiên, với sự xuất hiện của tro bay thay thế một phần hàm lượng xi măng thì tốc độ tăng cường độ lại có xu hướng giảm cùng với việc tăng tỷ lệ thay thế tro bay. Cụ thể, không có tro bay, tỷ lệ tăng từ 2,11 - 2,78 lần. Trong khi có sự xuất hiện TB (10 - 20%) thì mức độ tăng đã giảm, chỉ còn tăng 2,06 - 2,56 lần. Độ dốc mũi tên nét đứt thoải hơi mũi tên liền trên Hình 3.1 cũng phản ánh sự giảm mức độ tăng R nén khi tăng hàm lượng TB trong CKD.

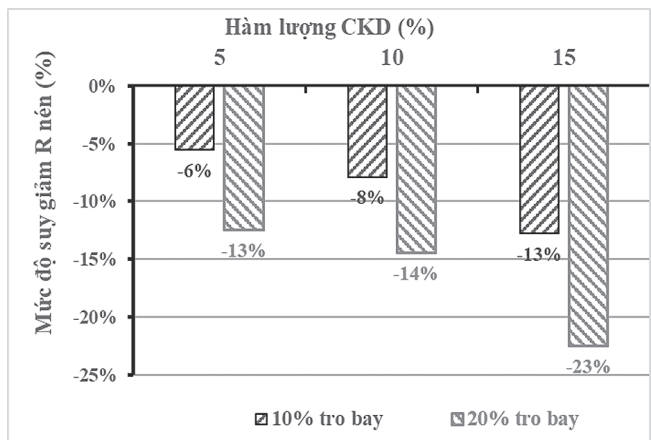
Hình 3.2 với các cột còn cho thấy rõ hơn ảnh hưởng của TB tới R nén. Khi hàm lượng CKD bằng 5%, mẫu 10% tro bay đã giảm so với mẫu 0% tro bay khoảng 6% còn mẫu 20% tro bay đã giảm so với mẫu 0% tro bay khoảng 13%. Khi tro bay tăng từ 10 - 20%, mẫu 10% CKD có Rnén giảm 8% và 14%; mẫu 15% CKD, giảm 13 - 23%. Các cột ở tỷ lệ 10% CKD và 15% CKD dài hơn so các cột 5% CKD một lần nữa cho thấy tốc độ suy giảm cường độ tăng lên khi tăng hàm lượng tro bay. Điều này có thể được giải thích rằng việc gia tăng hàm lượng CKD lên 15% và tăng tỷ lệ TB/CKD nhưng vẫn giữ nguyên lượng nước nhào trộn có thể dẫn tới sự thiếu hụt nước trong quá trình thủy hóa tro bay.

So sánh tương đối với cường độ của các hỗn hợp gia cố xi măng đất ở tuổi 28 ngày (TCVN 9403:2012) [16], Rxi măng đất (7% xi măng) chỉ đạt 0,3 - 0,336 MPa và Rxi măng đất (12% xi măng) trong ngưỡng từ 0,2 - 1,1 MPa có thể thấy hỗn hợp vật liệu CB - XM - TB trong nghiên cứu này đều có R nén cao hơn (so sánh tương đương tỷ lệ CKD 5 - 10%).

Bên cạnh đó, việc sử dụng cấp phối 5%, 10% và 15% chất kết dính với tỷ lệ thay thế tro bay lên đến 20% dự kiến giúp giảm đáng kể giá thành cọc vật liệu hỗn hợp mà vẫn đảm bảo các yêu cầu về cường độ.



Hình 3.1: Quan hệ giữa cường độ chịu nén với các hàm lượng chất kết dính ở tuổi 28 ngày



Hình 3.2: Mức độ suy giảm cường độ của các hỗn hợp 5, 10 và 15% CKD khi với hàm lượng tro bay 10% và 20%

4. KẾT LUẬN

Qua một số kết quả trình bày ở trên, có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Công nghệ cọc vật liệu hỗn hợp CB - XM - TB rất thích hợp trong xây dựng công trình hạ tầng giao thông tại khu vực đất liền ven biển, hải đảo nhờ những đặc điểm chính như tăng độ chặt của nền đất, cố kết thoát nước cho nền đất và hình thành hệ cọc cứng chịu tải.

- Các mẫu vật liệu CB - XM - TB với hàm lượng CKD 5% vẫn có R nén > R nén cọc xi măng đất (7% XM), thỏa mãn Tiêu chuẩn TCVN 9403:2012.

- Tốc độ tăng R nén có xu hướng chậm lại khi tỷ lệ CKD tăng từ 10 - 15%.

- Tăng hàm lượng TB/CKD làm tăng mức độ suy giảm cường độ của mẫu vật liệu.

- Tỷ lệ thay thế TB trong chất kết dính có thể đạt tới 20% mà vẫn đảm bảo R nén thỏa mãn Tiêu chuẩn TCVN 9403:2012.

- Việc sử dụng cát biển và tro bay nhiệt điện nguyên khai sẽ giúp hạn chế sử dụng nguồn cát sông vốn đang ngày càng khan hiếm và giải quyết vấn đề tro xỉ thải ra môi trường.

- Các kết quả này sẽ là cơ sở khoa học cho việc lựa chọn, đề xuất tỷ lệ chất kết dính phù hợp trong các nghiên cứu tại hiện trường trong giai đoạn tiếp theo.

Tài liệu tham khảo

[1]. Swedish Geotechnical Soc. (1997), *Lime and Lime Cement columns*, Guide for Project Planning Construction and Inspection, Sweden.

[2]. M. Kitazume and M. Terashi (2017), *The Deep Mixing Method*, CRC Press.

[3]. H. W. Xiao and F. H. Lee (2008), *Curing Time Effect on Behavior of Cement Treated Marine Clay*. pp.71-78.

[4]. P. Jamsawang, P. Voottipruex, P. Boathong, W. Mairaing and S. Horpibulsuk (2015), *Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows*, Eng. Geol., vol.188, pp.159-167.

[5]. A. Sukponya and A. Jotisankasa (2016), *Large simple shear testing of soft Bangkok clay stabilized with soil-cement-columns and its application*, Soils Found., vol.56, no.4, pp.640-651.

[6]. J. C. Chai, S. Shrestha, T. Hino, W. Q. Ding, Y. Kamo and J. Carter (2015), *2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil-cement columns*, Comput. Geotech., vol.68, pp.28-37.

[7]. Ahnberg, H., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. (1995), *Deep stabilization of different types of soft soils*, Proceedings of XI ECSMFE, 7(7), 167-172.

[8]. Nguyễn Ngọc Bích (2011), *Các phương pháp cải tạo đất yếu trong xây dựng*, NXB. Xây dựng, Hà Nội.

[9]. D.T Bergado, J.C. Chai, M.C. Alfaro (1996), *Những biện pháp kỹ thuật mới cải tạo đất yếu trong xây dựng*, NXB. Giáo dục, Hà Nội.

[10]. Nguyễn Uyên (2013), *Xử lý nền đất yếu trong xây dựng*, NXB. Xây dựng, Hà Nội.

[11]. Nguyễn Châu Lân (2009), *Cải tạo nền đường trên đất yếu bằng cọc xi măng đất*, Tạp chí Địa kỹ thuật, tập 13, số 2, tr.40-57.

[12]. Tạ Đức Thịnh (10/2017), *Bàn về phương pháp tính toán sức chịu tải và độ lún của nền đất yếu gia cố bằng cọc đất-xi măng*, Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, số 58, kỳ 5, ISSN 1859-1469, tr.386-390.

[13]. Tạ Đức Thịnh (2002), *Nghiên cứu xử lý nền đất yếu bằng cọc cát-xi măng-vôi*, Báo cáo tổng kết đề tài KHCN cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo.

[14]. Tạ Đức Thịnh, Nguyễn Huy Phương, Đỗ Minh Toàn (2005), *Các phương pháp tính toán và công nghệ cải tạo, xử lý nền*, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội.

[15]. Tạ Đức Thịnh (Chủ biên), Nguyễn Huy Phương, Nguyễn Hồng (2009), *Nền và móng công trình*, NXB. Xây dựng, Hà Nội.

[16]. TCVN 9403:2012 - *Gia cố nền đất yếu - Phương pháp trụ đất xi măng*.

Ngày nhận bài: 25/10/2021

Ngày chấp nhận đăng: 14/11/2021

Người phản biện: TS. Vũ Ngọc Trụ

TS. Vũ Phương Thảo