

Nghiên cứu thực nghiệm một số tính chất cơ lý của vật liệu đất nện gia cố xi măng

Experimental study on some mechanical and physical properties of cement-stabilized rammed earth

Nguyễn Tiên Dũng

Trường Đại học Giao thông vận tải

Tác giả liên hệ: nguyen.tiendung@utc.edu.vn

Tóm tắt:

Đất nện là một vật liệu xây dựng “xanh” nhận được nhiều sự quan tâm trong thời gian gần đây. Bài báo này trình bày một số đặc tính cơ lý của vật liệu đất nện gia cố xi măng bao gồm: Cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và khối lượng thể tích. Đất nện được gia cố bằng xi măng poóc lăng hỗn hợp PCB40 với hàm lượng trong khoảng 4-10% (theo khối lượng của đất). Các kết quả thí nghiệm cho thấy khi tăng hàm lượng xi măng, các tính năng cơ học của đất nện được cải thiện. Với hàm lượng xi măng sử dụng từ 4 đến 10%, tương ứng khoảng 64-171 kg/m³ hỗn hợp đất nện, cường độ chịu nén của đất nện dao động trong khoảng 1 - 2 MPa, mô đun đàn hồi của đất nện dao động trong khoảng 182-427 MPa, khối lượng thể tích dao động trong khoảng 1720-1942 kg/m³. Mối tương quan giữa cường độ chịu nén với khối lượng thể tích và mô đun đàn hồi đã được tìm thấy thông qua các phương trình hồi quy thực nghiệm thu được.

Từ khóa: Đất nện không nung; Đất nện; Xi măng; Cường độ chịu nén; Mô đun đàn hồi; Khối lượng thể tích.

Abstract:

Rammed earth is a “green” material that has received a lot of attention in recent times. This paper presents some mechanical and physical properties of cement-stabilized rammed earth, including compressive strength, elastic modulus, and density. The rammed earth was stabilized by blending Portland cement PCB40 with a content in the range of 4-10% (by the weight of the soil). The experimental results show that the mechanical properties of the rammed earth increased significantly with increasing cement content. With the cement content used from 4-10%, equivalent to about 64-171 kg/m³ of the soil, the compressive strength of the rammed earth was varied in the range of 1-2 MPa, the elastic modulus was varied in the range of 182-427 Mpa and the density was varied in the range of 1720-1942 kg/m³. These specifications are suitable for using this material as a building wall structure. The correlation between compressive strength with density and elastic modulus was found through the obtained experimental regression equations.

Keywords: Earth construction; Rammed earth; Cement; Compressive strength; Elastic modulus; Density.

1. Giới thiệu

Đất nện không nung là một loại vật liệu thân thiện với môi trường với hai thành phần chính là đất và nước. Ngoài ra có thể bổ sung thêm một số thành phần khác như cốt liệu (cát, đá dăm, sỏi,...), chất kết dính vô cơ như xi măng, vôi tôi và cốt sợi tự nhiên (sợi rơm, sợi đay, sợi xơ dừa,...) để cải thiện các tính năng cơ lý của vật liệu. Vật liệu này được chế tạo thông qua quá trình nén ép như nén tĩnh

hoặc nén động và có khả năng hình thành cường độ mà không cần thông qua xử lý nhiệt. Vật liệu đất nện thường được chế tạo dưới dạng đất nện (Rammed Earth) hoặc các khối xây (block-adobe) [1]. Trong những năm gần đây, vật liệu đất nện đã được quan tâm nghiên cứu trên quy mô vật liệu và kết cấu tại nhiều nước trên thế giới như Pháp, Mỹ, Newzeland, Trung Quốc, Úc,... [2].

Vật liệu này đã được chế tạo và ứng dụng cho nhiều dạng kết cấu công trình xây dựng như kết cấu tường, kết cấu vòm, sàn nhà,... Sở dĩ đất nện đang nhận được nhiều sự quan tâm như vậy là bởi nó có nhiều ưu điểm so với các vật liệu truyền thống khác. Tính “xanh” của loại vật liệu này được thể hiện thông qua việc tận dụng có hiệu quả nguồn tài nguyên đất có trữ lượng lớn và hạn chế sử dụng những loại vật liệu xây dựng đang có nguy cơ cạn kiệt như cát, đá dăm, sỏi.

Hơn nữa, vật liệu này tiêu thụ năng lượng thấp, giúp giảm lượng phát thải khí CO₂ gây hiệu ứng nhà kính. Ngoài ra, nó còn có khả năng cách âm, cách nhiệt rất tốt. Đặc biệt, đất nện có tính thẩm mỹ cao, màu sắc và kiểu dáng đa dạng, phong phú đem lại nét đẹp riêng cho công trình [3]-[5].

Tại Việt Nam, đất nện (Rammed Earth) đã được người dân sử dụng từ lâu nay. Một trong những dạng điển hình đó là kết cấu nhà “trình tường” có mặt tại một số khu vực vùng núi phía Bắc nước ta. Tuy vậy, việc chế tạo đất nện vẫn theo kinh nghiệm dân gian truyền lại, chưa có sự áp dụng bài bản các cơ sở khoa học. Bởi vậy nhà “trình tường” thường xuất hiện các hư hỏng như xói chân tường, xói mặt ngoài của tường, co ngót, có thể xuất hiện các vết nứt với chiều rộng từ vài cm thậm chí tới gần chục cm [6].

Mặc dù vậy, đất nện chưa thực sự được quan tâm nghiên cứu ở Việt Nam. Để có thể khắc phục được các nhược điểm này, cần có các nghiên cứu chuyên sâu về thành phần vật liệu, công nghệ chế tạo và đánh giá đầy đủ về các tính năng cơ lý, cũng như độ bền của loại vật liệu này trong điều kiện Việt Nam.

Về thành phần vật liệu, một trong những phương pháp hiệu quả để cải thiện các tính năng cơ học của đất nện là sử dụng xi măng làm chất kết dính gia cố cho đất. Một số nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng cường độ chịu nén của đất nện tăng lên khi tăng hàm lượng xi măng sử dụng. Hầu hết các nghiên cứu đã sử dụng hàm lượng xi măng trong khoảng từ 2 đến 15% và phổ biến nhất là trong khoảng 4 - 10%. Bên

cạnh sự cải thiện về cường độ, gia cố đất nện bằng xi măng còn cho phép cải thiện một số đặc tính về độ bền của đất nện như khả năng chống xói mòn, độ bền chống đóng và tan băng,... [7]. Đây là những yếu tố quan trọng trong việc ứng dụng vật liệu đất nện làm kết cấu tường bao. Bên cạnh cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi là một đặc trưng cơ học cho việc tính toán thiết kế kết cấu đất nện.

Đối với vật liệu bê tông xi măng, trên thế giới đã có rất nhiều nghiên cứu, chỉ dẫn thiết kế và tiêu chuẩn đề xuất tính toán gián tiếp mô đun đàn hồi thông qua cường độ chịu nén. Theo đó, mô đun đàn hồi có thể được tính toán thông qua tham số duy nhất là cường độ chịu nén và thông thường là quan hệ tuyến tính với căn bậc hai của cường độ chịu nén. Ngoài ra mô đun đàn hồi cũng có thể được tính toán bởi hai tham số kết hợp là cường độ chịu nén và khối lượng thể tích [8]. Tuy nhiên, với vật liệu đất nện, vấn đề này chưa được nghiên cứu nhiều [9].

Xuất phát từ những phân tích kể trên, nghiên cứu này tập trung đánh giá hiệu quả của xi măng trong việc cải thiện các đặc tính cơ học của đất nện. Bên cạnh đó xây dựng mối tương quan giữa các đặc trưng cơ lý bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và khối lượng thể tích cũng là một nội dung được đề cập đến trong nghiên cứu này.

2. Vật liệu chế tạo và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu chế tạo

Các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm cốt liệu được nghiền từ đất, xi măng và nước.

- Đất: Nghiên cứu này sử dụng đất tự nhiên lấy từ khu vực cửa biển thành phố Hải Phòng. Đất tự nhiên được sấy khô và nghiền nhỏ bằng máy nghiền bi tại phòng thí nghiệm Vật liệu Xây dựng – Trường Đại học Giao thông vận tải.

Phân bố cỡ hạt của đất được thí nghiệm theo phương pháp nhiễu xạ laze và được trình bày ở bảng 1. Các kết quả thu được cho thấy sau khi nghiền, các hạt đất có kích thước trung bình khá nhỏ (khoảng 34 μ m).



Hình 1. Vật liệu đất sử dụng trong nghiên cứu.



Hình 2. Nghiền đất bằng máy nghiền bi.



Hình 3. Cốt liệu nghiền từ đất.

Bảng 1. Phân bố cỡ hạt của đất.

STT	Phần trăm kích thước tổng	Kết quả μm
1	5	3.2856
2	10	5.2085
3	20	9.0218
4	30	12.8567
5	40	16.9138
6	60	27.9428
7	70	37.2529
8	80	53.0053
9	90	83.8865
10	95	113.0151
	D50	21.6698
	Kích thước trung bình	34.2002

Thành phần hoá học của đất được xác định bằng phương pháp phổ huỳnh quang tia X. Từ kết quả thí nghiệm phân tích thành phần hóa học của mẫu đất thí nghiệm (bảng 2), có thể nhận thấy hàm lượng

khoáng vật sét (SiO_2 , Al_2O_3) chiếm tỷ lệ phần trăm khối lượng lớn nhất trong hỗn hợp. Điều này làm tăng khả năng kết dính giữa các vật liệu thành phần.

Bảng 2. Thành phần hoá học của đất.
(% theo khối lượng)

STT	Chỉ tiêu phân tích	Đơn vị	Kết quả
1	SiO_2	%	46,2
2	TiO_2	%	0,83
3	T- Fe_2O_3	%	7,41
4	Al_2O_3	%	18,04
5	Na_2O	%	7,41
6	K_2O	%	2,68
7	CaO	%	1,65
8	MgO	%	3,55
9	MKN	%	5,24

Thành phần khoáng vật của đất được phân tích bằng phương pháp nhiễu xạ Ronghen (XRD) trên máy Empryean (PANalytical- Hà Lan) và được trình bày ở bảng 3.

Bảng 3. Thành phần khoáng vật của đất.

Thành phần khoáng vật chính	Hàm lượng (%)
Kaolinit - $Al_2Si_2O_5(OH)_4$	7
Thạch anh – SiO_2	42
Felspat – $K_{0.5}Na_{0.5}AlSi_3O_8$	18
Mica + Clorit	33

Từ kết quả thí nghiệm cho thấy, thành phần khoáng vật chính của đất là thạch anh (SiO_2) chiếm 42%. Thành phần khoáng vật sét (Kaolinit, Mica, Clorit) chiếm khoảng 40%. Các kết quả này là tương đồng với kết quả phân tích thành phần hoá học của đất.

• Xi măng: Ở Việt Nam hiện nay có hai loại xi măng được sử dụng phổ biến nhất là xi măng Poocăng và xi măng Poocăng hỗn hợp. Do yêu cầu về cường độ của vật liệu đất nện không nung thường tương đối thấp (cường độ chịu nén 1-3 MPa) và thông thường không có yêu cầu về tốc độ phát triển cường độ sớm, bởi vậy lựa chọn xi măng Poocăng hỗn hợp là phù hợp để chế tạo vật liệu đất nện trong điều kiện Việt Nam. Để đảm bảo tính kinh tế và kỹ thuật của loại vật liệu này, nghiên cứu đã sử dụng xi măng Poocăng PCB40 Bút Sơn (hình 4) có các đặc trưng kỹ thuật phù hợp với các quy định tại TCVN 6260:2009.



Hình 4. Xi măng PCB40 sử dụng trong nghiên cứu.

2.2. Tính toán thành phần vật liệu

Nghiên cứu này áp dụng nguyên lý thiết kế thành phần vật liệu theo quan điểm cơ học đất, trong đó lượng nước được tính toán dựa trên độ ẩm đầm nén tốt nhất. Độ ẩm đầm nén tốt nhất của các hỗn hợp

đất nện được xác định theo phương pháp Proctor tiêu chuẩn (sử dụng chày đầm 2,495 kg với chiều cao rơi là 305 mm để đầm mẫu - ASTM D1557 [10]). Để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến các đặc tính cơ lý của đất nện, 4 loại hàm lượng xi măng được lựa chọn là 4%, 6%, 8% và 10% hỗn hợp đất. Sau khi tính toán và điều chỉnh thành phần đất nện theo thực nghiệm tại phòng thí nghiệm, thành phần cấp phối đất nện được giới thiệu ở bảng 4.

Bảng 4. Thành phần cấp phối cho 1m³ hỗn hợp đất nện.

Vật liệu	4% XM	6% XM	8% XM	10% XM
Đất (kg)	1602	1643	1692	1713
Xi măng (kg)	64	99	135	171
Nước (kg)	178	187	200	207
Khối lượng thể tích hỗn hợp (kg/m ³)	1844	1928	2028	2092

2.3. Chế tạo mẫu và phương pháp thí nghiệm

Nghiên cứu này sử dụng mẫu hình trụ kích thước 10x20 cm. Mỗi mẫu được đầm thành 03 lớp bằng chày Proctor tiêu chuẩn với số chày đầm là 25 lượt/lớp. Sau 1 ngày tiến hành tháo mẫu và bảo dưỡng tự nhiên trong phòng thí nghiệm đến 14, 28 ngày tuổi và tiến hành làm thí nghiệm.

Đối với thí nghiệm cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi, hiện nay, chưa có tiêu chuẩn dành riêng cho vật liệu đất nện. Nghiên cứu này đã tham khảo tiêu chuẩn TCVN 8858:2011 [11] (dành cho cấp phối đá dăm và cấp phối thiên nhiên gia cố xi măng) để xác định cường độ chịu nén. Theo đó, nén mẫu bằng cách tăng tải liên tục với tốc độ không đổi và bằng (6±1) KPa/s cho đến khi phá hủy mẫu. Cường độ nén của mẫu là tỷ số giữa tải trọng phá hoại mẫu chia cho diện tích chịu lực của viên mẫu. Mô đun đàn hồi ở 28 ngày tuổi của đất nện được xác định dựa theo tiêu chuẩn TCVN 9843:2013 (dành cho cấp phối đá dăm và cấp phối thiên nhiên gia cố xi măng) [12].



Hình 5. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén của đất nện.

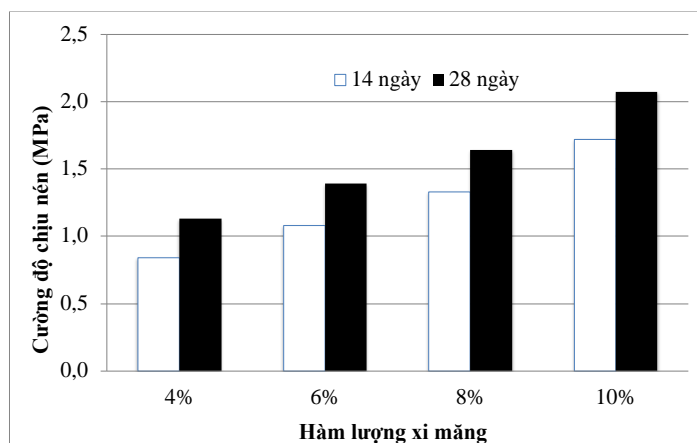


Hình 6. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi của đất nện.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Cường độ chịu nén

Kết quả thí nghiệm về cường độ chịu nén của các cấp phối đất nện với các hàm lượng xi măng từ 4 đến 10% ở 14 và 28 ngày tuổi được thể hiện trên hình 5.



Hình 7. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến cường độ chịu nén của vật liệu đất nện ở 14 và 28 ngày tuổi.

Các kết quả thu được cho thấy cường độ chịu nén của các cấp phối đất nện được cải thiện rõ rệt khi tăng hàm lượng xi măng sử dụng. Cụ thể, khi được gia cố 4% xi măng, cường độ chịu nén của đất nện đạt ở 14 ngày tuổi và 28 ngày tuổi lần lượt là 0,84 MPa và 1,13 MPa. Khi tăng hàm lượng xi măng từ 4% lên 6%, cường độ chịu nén ở 14 ngày tuổi và 28 ngày tuổi đạt lần lượt là 1,08 MPa và 1,39 MPa, tương ứng với mức tăng lần lượt là 28% và 23% so với cấp phối sử dụng 4% xi măng. Khi tăng hàm lượng xi măng từ 6% lên 8% thì cường độ chịu nén tiếp tục được cải thiện lên 1,33 MPa (ở 14 ngày tuổi) và 1,64 MPa (ở 28 ngày tuổi), tương ứng với mức tăng lần lượt là

58% và 45% so với cấp phối sử dụng 4% xi măng. Cấp phối sử dụng 10% xi măng có cường độ chịu nén cao nhất. Khi đó cường độ chịu nén của đất nện ở 14 và 28 ngày tuổi lần lượt là 1,72 MPa và 2,07 MPa. Như vậy cường độ chịu nén của cấp phối 10% xi măng cao bằng khoảng 2 lần so với cấp phối 4% xi măng. Xi măng đóng vai trò là chất kết dính chính giúp gắn kết các hạt cốt liệu đất và tạo thành một bộ khung chịu lực cho vật liệu đất nện. Thêm vào đó, xi măng có kích thước hạt mịn làm giảm lỗ rỗng, tăng độ đặc chắc cho bộ khung chịu lực, qua đó giúp cải thiện cường độ chịu nén. Do đó khi tăng hàm lượng xi măng thì cường độ chịu nén của đất nện tăng lên.

Tương quan giữa cường độ chịu nén của vật liệu đất nện ở 14 và 28 ngày tuổi được thể hiện thông qua tỷ số giữa cường độ chịu nén ở 14 ngày tuổi và cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi. Với các cấp phối sử dụng hàm lượng xi măng 4%, 6%, 8% và 10% thì tỷ số này lần lượt là 0,74, 0,78, 0,81 và 0,83. Như vậy cường độ chịu nén ở 14 ngày tuổi của các cấp phối đạt 74-83% so với ở 28 ngày tuổi. Mặt khác cũng có thể thấy tốc độ phát triển cường độ chịu nén của vật liệu đất nện có xu hướng tăng lên khi tăng hàm lượng xi măng sử dụng trong khoảng từ 4% đến 10%. Với cấp phối sử dụng 4% xi măng, cường độ chịu nén ở 14 ngày tuổi bằng 74% so với 28 ngày tuổi. Trong khi đó với phối sử dụng 10% xi măng, cường độ chịu nén ở 14 ngày tuổi bằng 83% so với 28 ngày tuổi.

3.2. Khối lượng thể tích của đất nện và tương quan giữa khối lượng thể tích với cường độ chịu nén

Khối lượng thể tích của vật liệu đất nện ở 28 ngày tuổi được trình bày ở bảng 5. Các kết quả thu được cho thấy: Các cấp phối vật liệu đất nện có khối lượng thể tích trong khoảng 1720-1942 kg/m³. Các kết quả này cũng tương đồng với các nghiên cứu trước đây trên thế giới, theo đó khối lượng thể tích của đất nện dao động trong một phạm vi tương đối rộng từ 1700-2200 kg/m³ [1].

Bảng 5. Khối lượng thể tích của các cấp phối đất nện ở 28 ngày tuổi.

Cấp phối	4%	6%	8%	10%
	XM	XM	XM	XM
Khối lượng thể tích (kg/m ³)	1720	1805	1905	1942

Như vậy vật liệu đất nện có khối lượng thể tích thấp hơn đáng kể so với bê tông thông thường (khối lượng thể tích khoảng 2200-2400 kg/m³). Các kết quả thu được cho thấy khối lượng thể tích của vật liệu đất nện tăng khi hàm lượng xi măng sử dụng tăng từ 4% lên 6%, 8% và 10%. Điều này cũng chứng tỏ độ đặc của đất nện được cải thiện khi sử dụng xi măng gia cố và độ đặc có xu

hướng tăng lên khi tăng hàm lượng xi măng từ 4% lên 6%, 8% và 10%.

Tương quan giữa khối lượng thể tích và cường độ chịu nén của vật liệu đất nện:

Trên thực tế khối lượng thể tích có liên hệ chặt chẽ với độ rỗng của vật liệu nói chung và của vật liệu đất nện nói riêng. Mặt khác độ rỗng ảnh hưởng trực tiếp đến cường độ chịu nén của vật liệu đất nện. Do đó cường độ chịu nén có mối liên hệ mật thiết với khối lượng thể tích của vật liệu đất nện. Điều này đã được ghi nhận trong một số nghiên cứu trước đây trên thế giới [1].

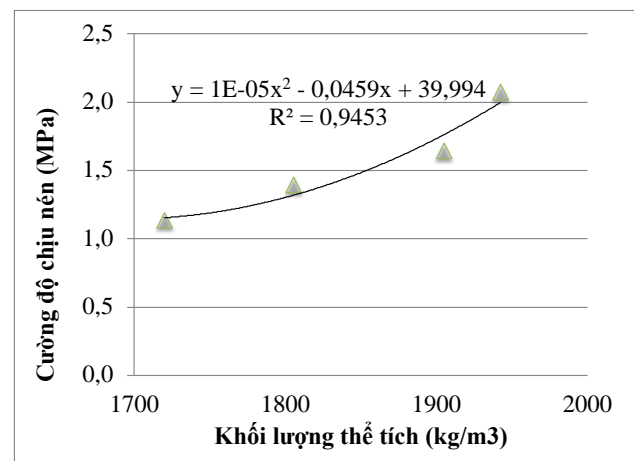
Tương quan giữa khối lượng thể tích và cường độ chịu nén của vật liệu đất nện được thể hiện trên hình 8. Dựa trên các kết quả thực nghiệm thu được, có thể biểu diễn tương quan giữa khối lượng thể tích và cường độ chịu nén của vật liệu đất nện ở 28 ngày tuổi thông qua phương trình hồi quy thực nghiệm sau:

$$R_c = 0,00001.\rho_0^2 - 0,0459.\rho_0 + 39,994$$

Trong đó:

R_c : Cường độ chịu nén của vật liệu đất nện (MPa);

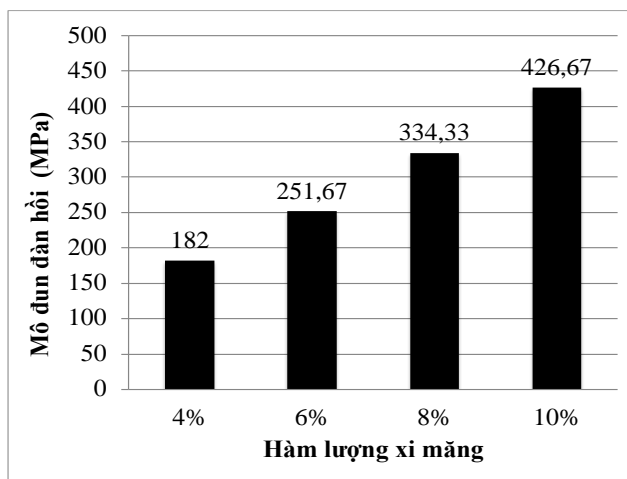
ρ_0 : Khối lượng thể tích của vật liệu đất nện (kg/m³).



Hình 8. Tương quan giữa khối lượng thể tích và cường độ chịu nén của vật liệu đất nện.

3.2. Mô đun đàn hồi của đất nện và tương quan giữa mô đun đàn hồi với cường độ chịu nén

Các kết quả thí nghiệm về mô đun đàn hồi của vật liệu đất nện ở 28 ngày tuổi được thể hiện ở hình 9.



Hình 9. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến mô đun đàn hồi của đất nện.

Khi sử dụng hàm lượng xi măng lần lượt là 4%, 6%, 8% và 10%, mô đun đàn hồi của vật liệu đất nện đạt lần lượt là 182 MPa, 252 MPa, 334 MPa và 427 MPa. Tương tự như hiệu quả mang lại với cường độ chịu nén, việc gia tăng hàm lượng xi

măng sử dụng từ 4% lên 6%, 8% và 10% giúp mô đun đàn hồi của vật liệu đất nện tăng lên đáng kể.

Tương quan giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén:

Với các loại bê tông xi măng thông thường, mối quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén thường được thể hiện bằng công thức tương quan giữa mô đun đàn hồi và giá trị căn bậc hai của cường độ chịu nén. Công thức phổ biến có dạng sau:

$$E_c = k.R_c^{0,5} + b$$

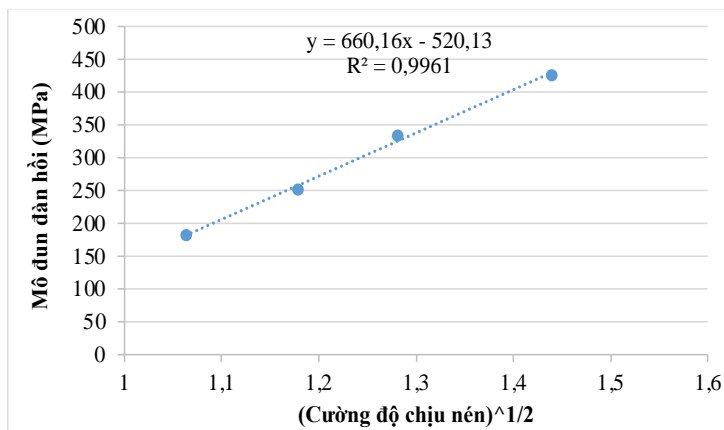
Trong đó:

E_c là mô đun đàn hồi của bê tông (MPa);

R_c là cường độ chịu nén của bê tông (MPa);

k và b là các hệ số thực nghiệm.

Đối với vật liệu đất nện, mối quan hệ này cũng được tìm thấy và được thể hiện trên hình 10.



Hình 10. Tương quan giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của vật liệu đất nện.

Như vậy, tương quan giữa mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén của vật liệu đất nện trong nghiên cứu này có thể được biểu diễn thông qua công thức thực nghiệm sau:

$$E_c = 660,16.R_c^{0,5} - 520,13$$

Mặt khác, cũng có thể thấy mô đun đàn hồi bằng khoảng 161-206 lần cường độ chịu nén. Điều này là tương đồng với một số kết quả nghiên cứu khác về đất nện [1].

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu trên, một số kết luận có thể rút ra như sau:

- Hàm lượng xi măng ảnh hưởng rõ rệt đến các đặc tính cơ lý của đất nện bao gồm cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và khối lượng thể tích. Khi tăng hàm lượng xi măng thì các tính năng cơ học của đất nện được cải thiện;

- Khi gia cố đất nện bằng xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 với hàm lượng từ 4-10%, tương ứng khoảng 64-171 kg/m³ hỗn hợp đất nện, cường độ chịu nén của đất nện dao động trong khoảng 1,13-2,07 Mpa, mô đun đàn hồi của đất nện dao động trong khoảng 182-427 MPa. Các thông số kỹ thuật như vậy là phù hợp để sử dụng vật liệu này làm kết cấu tường nhà [1]-[5];

• Từ các phương trình hồi quy thực nghiệm thu được, có thể thấy khối lượng thể tích và mô đun đàn hồi có mối liên hệ chặt chẽ với cường độ chịu nén của loại vật liệu này. Tuy nhiên cần nghiên cứu thêm trên nhiều loại đất cũng như cần có thêm nhiều số liệu kết quả thí nghiệm để có thể đề xuất các công thức liên hệ giữa các đại lượng này.

• Để có thể ứng dụng rộng rãi vật liệu “xanh” này trong điều kiện Việt Nam, cần có thêm các nghiên cứu về một số tính chất khác liên quan đến độ bền của đất nện như tính thấm nước, khả năng chống xói mòn, khả năng cách nhiệt của đất nện. Ngoài ra, cần khảo sát và nghiên cứu thêm các loại đất khác để đánh giá được ảnh hưởng của loại đất đến các tính chất cơ lý và độ bền của vật liệu đất nện không nung.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài mã số “B2021-GHA-10”.

Tài liệu tham khảo

- [1] R. E. Nabouch; “Mechanical behavior of rammed earth walls under Pushover tests”. Ph.D Thesis; Université de Grenoble Alpes, Grenoble France; 2016.
- [2] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali; “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction”. *Construction and Building Materials*. 2012; 29:512–519. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [3] L. Miccoli, U. Müller, P. Fontana; “Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob”. *Construction and Building Materials*. 2014; 61:327-339. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009.
- [4] S. Burroughs; “Soil property criteria for rammed earth stabilization”. *J. Materials Civil Engineering*. 2008; 20(3):264–273. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(264).
- [5] T. D. Nguyen, T. T. Bui, A. Limam, T. L. Bui, Q. B. Bui; “Evaluation of seismic performance of rammed earth building and improvement solutions”. *Journal of Building Engineering*, 2021; 43:103113. DOI:10.1016/j.job.2021.103113.
- [6] D.V. Luyén, N.Q. Huy, T.M. Liễu; “Nghiên cứu một số đặc trưng cơ lý đất dùng làm nhà trình tường tại khu vực Mèo Vạc, tỉnh Hà Giang”. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*. 2014; 30(4):11-24. Available: <https://js.vnu.edu.vn/EES/article/view/777>. Ngày truy cập: 14/2/2023.
- [7] V. Maniatidis, P. Walker; “A Review of Rammed Earth Construction for DTi Partners in Innovation Project Developing Rammed Earth for UK Housing”; University of Bath, Bath, UK; 2003.
- [8] P.D. Hữu, N.X. Quảng, M.Đ. Lộc, N.T. Dũng, L.T. Hà; “Giáo trình Vật liệu Xây dựng”; Hà Nội, Việt Nam: NXB Giao thông vận tải; 2017.
- [9] T. D. Nguyen, T. T. Bui, A. Limam, A. Topa; “Effect of openings on the behaviour of rammed earth structures under quasi-static loading”. *Engineering Structures*. 2023; 281:115759. DOI:10.1016/j.engstruct.2023.115759.
- [10] ASTM International; “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort”; ASTM D1557-12; Pennsylvania, USA; 2012.
- [11] Bộ Giao thông vận tải; “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”; TCVN 8858:2011; Hà Nội, Việt Nam; 2011.
- [12] Bộ Giao thông vận tải; “Xác định mô đun đàn hồi của vật liệu đá gia cố chất kết dính vô cơ trong phòng thí nghiệm”; TCVN 9843:2013; Hà Nội, Việt Nam; 2013.