

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CẤP PHỐI BÊ TÔNG SỬ DỤNG PHÉ PHẨM TRO BAY VÀ BỘT ĐÁ ĐẾN VẬN TỐC VÀ BIÊN ĐỘ XUNG SIÊU ÂM

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CONCRETE MIXTURES USING FLY ASH AND STONE POWDER ON VELOCITY AND AMPLITUDE OF ULTRASONIC PULSE

Vương Lê Thăng*, Lê Cung, Nguyễn Đình Sơn

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: vlthang@dut.udn.vn

(Nhận bài: 13/02/2023; Chấp nhận đăng: 30/3/2023)

Tóm tắt - Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của thành phần cấp phối bê tông đến vận tốc và tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm. Tính mới của các cấp phối này là sử dụng hai phế phẩm tro bay và bột đá tại miền Trung, thay thế cho 20% xi măng và cát, bê tông đạt được dải cường độ chịu nén rộng từ 10MPa đến 60MPa. Nghiên cứu sử dụng phương pháp qui hoạch thực nghiệm đa yếu tố để xác định thành phần vật liệu cho 72 cấp phối bê tông. Các biểu đồ phân tích cho thấy cấp phối bê tông có ảnh hưởng khác nhau đến hai đặc tính vận tốc và tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm, hai đặc tính này thường được sử dụng để đánh giá chất lượng bê tông. Kết quả nghiên cứu giúp hiểu rõ ảnh hưởng của cấp phối bê tông đến các đặc tính xung siêu âm và góp phần đánh giá ảnh hưởng của cấp phối đến chất lượng bê tông.

Từ khóa - Cấp phối bê tông; tro bay; bột đá; vận tốc xung siêu âm; biên độ xung siêu âm

1. Tổng quan

Bê tông là vật liệu được sử dụng phổ biến trong các công trình xây dựng trong và ngoài nước. Vì vậy, công tác kiểm tra chất lượng bê tông là cần thiết và bắt buộc với tất cả công trình xây dựng. Hiện nay có hai phương pháp để kiểm tra chất lượng bê tông là phương pháp kiểm tra phá hủy và kiểm tra không phá hủy. Phương pháp kiểm tra không phá hủy dựa trên vận tốc và biên độ xung siêu âm có nhiều ưu điểm như cho kết quả nhanh và chi phí thấp, nhưng vẫn đảm bảo được độ chính xác cao, nên được sử dụng phổ biến [1-4].

Các nghiên cứu đã tìm ra được các quan hệ giữa các đặc tính xung siêu âm, như vận tốc và biên độ xung siêu âm khi lan truyền qua bê tông, với chất lượng bê tông. Khi vận tốc xung siêu âm càng tăng thì cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi bê tông càng lớn [5, 4]. Khi biên độ xung siêu âm giảm thì cường độ chịu nén bê tông giảm theo [2]. Mô hình hồi quy hoặc mô hình mạng nơ-ron nhân tạo được tạo dựng dựa trên các đặc tính xung siêu âm này giúp dự đoán được nhiều đặc tính về chất lượng bê tông như cường độ chịu nén [6-8], mô đun đàn hồi bê tông [5, 9],... Thay vì phải phá hủy mẫu để kiểm tra chất lượng, các tính chất của bê tông có thể được dự đoán dựa trên các đặc tính của xung siêu âm.

Xung siêu âm trong quá trình lan truyền sẽ tương tác với cấu trúc bên trong của bê tông, do vậy vận tốc và biên độ xung siêu âm thay đổi tùy thuộc từng loại bê tông. Nhiều nghiên cứu đã thực hiện đánh giá ảnh hưởng của cấp phối bê tông đến đặc tính xung siêu âm cho nhiều loại bê tông khác nhau [10-13].

Abstract - This paper investigates the influence of concrete mix on the velocity and the attenuation of ultrasonic pulse amplitude. The novelty of these mixtures is using two waste products of fly ash and stone powder in Central Vietnam to replace 20% of cement and sand for making concrete with a wide range of compressive strength from 10MPa to 60MPa. The full factorial experimental method is used to determine the material composition of 72 concrete mixes. The analysis graphs show that the concrete mixtures have different effects on the velocity and amplitude characteristics of the ultrasonic pulses. These two characteristics are often used to evaluate the concrete quality. The research results help to understand the influence of the mixtures on the ultrasonic pulse characteristics and contribute to evaluate the influence of the mixtures on the concrete quality.

Key words - Concrete mixture; fly ash; stone powder; ultrasonic pulse velocity; ultrasonic pulse amplitude

Tại miền Trung Việt Nam, các loại bê tông được sử dụng phổ biến với cường độ chịu nén từ 10MPa đến 60MPa và được chế tạo từ các vật liệu như cát, đá, xi măng và nước. Sự khai thác quá mức các vật liệu truyền thống này đã gây nên nhiều ảnh hưởng xấu đến môi trường tự nhiên. Vì vậy cần tìm kiếm các nguồn vật liệu thay thế thân thiện với môi trường. Hằng năm tại Nhà máy nhiệt điện Vũng Áng-Hà Tĩnh phát sinh hàng triệu tấn tro bay và tại các mỏ khai thác đá ở khu vực tồn đọng một lượng lớn bột đá.

Nghiên cứu này đề xuất sử dụng phế phẩm tro bay thay thế cho 20% xi măng và phế phẩm bột đá thay thế cho 20% cát. Phương pháp qui hoạch thực nghiệm được sử dụng để xác định số lượng cấp phối cần thiết sao cho bê tông đạt cường độ chịu nén từ 10MPa đến 60MPa. Phần mềm Minitab 14 được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của thành phần vật liệu đến vận tốc và tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm. Các kết quả nghiên cứu giúp hiểu rõ ảnh hưởng của cấp phối bê tông đến vận tốc và tỉ lệ suy giảm biên độ sóng siêu âm trong quá trình lan truyền.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Quy trình thực hiện

i. Dựa trên chỉ dẫn lựa chọn thành phần cấp phối của Bộ Xây dựng, chọn loại và khoảng thay đổi vật liệu để bê tông đạt cường độ chịu nén 10MPa đến 60MPa;

ii. Sử dụng phương pháp qui hoạch thực nghiệm đa yếu tố để xác định số lượng cấp phối cần thiết và thành phần vật liệu trong các cấp phối;

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Vuong Le Thang, Le Cung, Nguyen Dinh Son)

- iii. Chế tạo mẫu thử theo thành phần vật liệu đã xác định;
- iv. Dưỡng hộ mẫu và đo vận tốc và biên độ xung siêu âm qua mẫu ở 28 ngày tuổi;
- v. Sử dụng phần mềm Minitab 14 để phân tích dữ liệu thực nghiệm;
- vi. Phân tích và đánh giá ảnh hưởng của thành phần vật liệu đối với giá trị vận tốc và tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm (Hình 1).



Hình 1. Quy trình thực hiện

2.2. Thiết kế cấp phối

Vấn đề cấp bách là phải tìm các vật liệu mới thay thế dần các vật liệu truyền thống trong sản xuất bê tông. Với nguồn cung ứng dồi dào các phế phẩm tro bay và bột đá tại miền Trung (Hình 3) và qua tham khảo thực tế cấp phối các nhà máy sản xuất bê tông tại khu vực, bài báo lựa chọn tro bay và bột đá thay thế cho 20% xi măng và cát. Các chỉ tiêu cơ lý tính của các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu này được trình bày chi tiết trong [14].



a) Cát b) Đá dăm c) Xi măng

Hình 2. Các vật liệu truyền thống chế tạo bê tông



a) Phế phẩm tro bay

b) Phế phẩm Bột đá

Hình 3. Phế phẩm tro bay tại Nhà máy Nhiệt điện Vũng Áng và bột đá tại Mô đá Phước Tường

Dựa trên chỉ dẫn của Bộ Xây dựng về lựa chọn thành phần cấp phối [15] và với yêu cầu bê tông đạt cường độ chịu nén từ 10MPa đến 60MPa, khoảng thay đổi cấp phối được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Khoảng thay đổi cấp phối bê tông

Vật liệu		Đơn vị	Khoảng thay đổi	
Cốt liệu bé	Cát (80%)	kg	512-755,2	640-944
	Bột đá (20%)	kg	128-188,8	
Cốt liệu lớn (đá dăm)		kg	1100-1200	1100-1200
Chất kết dính	Xi măng (80%)	kg	172,8-420	216-525
	Tro bay (20%)	kg	43,2-105	
Nước		lít	190-230	190-230

Bảng 2. Chi tiết thành phần vật liệu tại các mức thay đổi

Ký hiệu	Vật liệu	Mức thay đổi			
		1	2	3	4
A	Cốt liệu bé (kg)	640	792	944	*
B	Cốt liệu lớn (kg)	1100	1200	*	*
C	Chất kết dính (kg)	216	319	422	525
D	Nước (lít)	190	210	230	*

Bảng 1 cho thấy, chất kết dính có khoảng thay đổi rộng nhất, tiếp theo là cốt liệu bé và nước, cốt liệu lớn ít thay đổi nhất. Vì vậy nghiên cứu lựa chọn 4 mức thay đổi khác nhau đối với chất dính kết, cốt liệu bé và nước thay đổi với 3 mức và cốt liệu lớn thay đổi với 2 mức. Chi tiết thành phần vật liệu tại các mức được thể hiện trong Bảng 2.

Để đảm bảo độ chính xác, nghiên cứu sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm đa yếu tố (full factorial) để xác định số lượng mẫu thử cần thiết (n) theo công thức (1).

$$n = 2^1 \times 3^2 \times 4^1 = 72 \tag{1}$$

2.3. Chế tạo và dưỡng hộ mẫu

Chất lượng bê tông có thể được xác định qua nhiều dạng mẫu khác nhau, trong đó mẫu hình lập phương kích thước 15cmx15cmx15cm được sử dụng phổ biến nhất. Nghiên cứu thực hiện 72 mẫu ứng với 72 cấp phối đã thiết kế tại Phòng thí nghiệm Kết cấu công trình thuộc Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng. Quy trình chế tạo và dưỡng hộ mẫu tuân thủ các quy định của Tiêu chuẩn Việt Nam và được thể hiện trên Hình 4 và Hình 5.



Hình 4. Khuôn và mẫu bê tông chế tạo tại Phòng thí nghiệm Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng



Hình 5. Dưỡng hộ mẫu bê tông tại Phòng thí nghiệm

2.4. Đo vận tốc và biên độ xung siêu âm

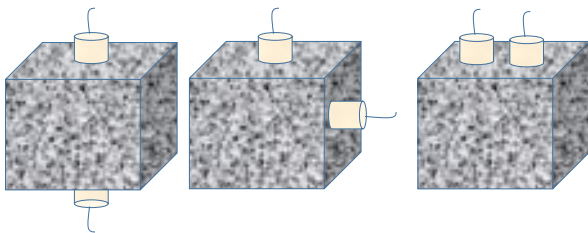
2.4.1. Đo vận tốc xung siêu âm

Tại tuổi bê tông 28 ngày, vận tốc xung siêu âm được đo đạc bằng máy siêu âm Tico Proceq (Hình 6a). Hình 7 thể hiện 3 cách bố trí đầu dò để xác định vận tốc xung siêu âm. Nghiên cứu sử dụng cách bố trí 2 đầu dò đối đầu nhau để thu nhận xung siêu âm truyền trực tiếp qua mẫu thử.



a) Máy siêu âm Tico Proceq b) Thiết bị SYSAM-SP5

Hình 6. Máy siêu âm Tico Proceq và thiết bị thu nhận tín hiệu số SYSAM-SP5



Trực tiếp Bán trực tiếp Gián tiếp

Hình 7. Phương pháp đo vận tốc xung siêu âm

2.4.2. Đo biên độ xung siêu âm

Xung siêu âm bị suy giảm năng lượng khi đi qua mẫu bê tông. Bài báo thực hiện đo đạc biên độ xung siêu âm trước và sau khi đi qua mẫu để xét đến sự suy giảm này. Để xác định được các giá trị biên độ xung siêu âm trước khi đi qua mẫu (A_1) và sau khi đi qua mẫu (A_2), nghiên cứu thực hiện kết nối thiết bị như sau: Thiết bị phát xung là máy siêu âm Tico với tần số phát xung là 54kHz (Hình 6a); Đầu dò máy siêu âm kết nối với thiết bị thu nhận tín hiệu số SYSAM-SP5 của hãng Eurosmart Cộng hòa Pháp (Hình 6b); Thiết bị thu nhận tín hiệu số kết nối với máy tính qua phần mềm Latis-Pro (Hình 8).

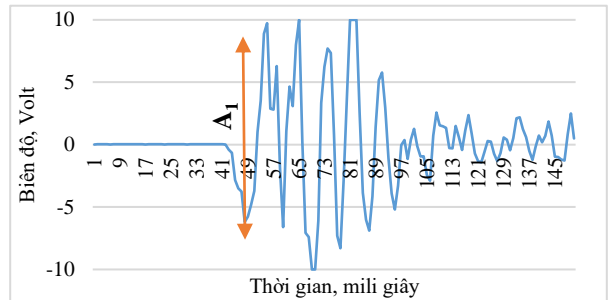


Hình 8. Kết nối thiết bị để thu nhận xung siêu âm

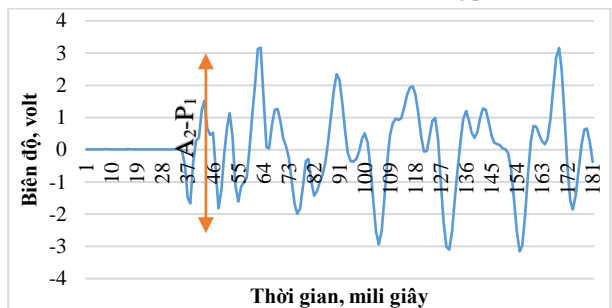
Biên độ của xung phát là A_1 (Hình 9), biên độ của xung nhận A_2 được lấy là giá trị trung bình của xung đi qua mẫu theo hai phương vuông góc với nhau (Hình 10).

Đối với cấp phối 5: Từ tín hiệu xung thu được từ nguồn phát (Hình 9), xác định được $A_1=20$ volt; Từ tín hiệu xung nhận theo phương 1 và phương 2 (Hình 10), xác định được biên độ A_2-P_1 theo phương 1 là 6,32volt và biên độ A_2-P_2 theo phương 2 là 7,56volt, từ đó giá trị trung bình biên độ

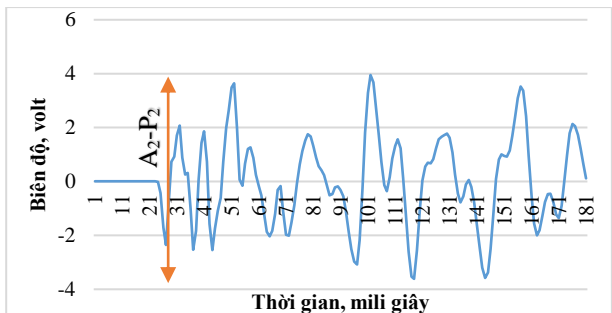
theo hai phương là 6,94volt. Tỷ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm qua khi mẫu bằng $\frac{A_2}{A_1} = \frac{6,94}{20} = 0,347$. Thực hiện tương tự, xác định được tỷ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm ứng với toàn bộ 72 cấp phối bê tông.



Hình 9. Xác định biên độ A_1 của xung phát



a) Xác định biên độ A_2 phương 1 của xung nhận



b) Xác định biên độ A_2 phương 2 của xung nhận

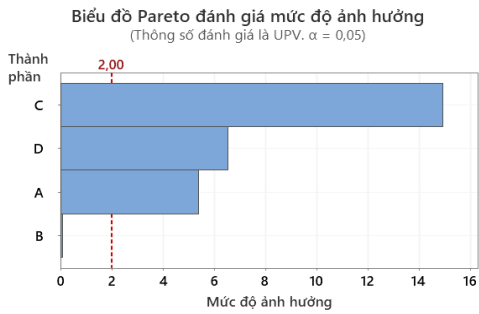
Hình 10. Xác định biên độ A_2 qua mẫu bê tông của xung nhận

3. Kết quả và thảo luận

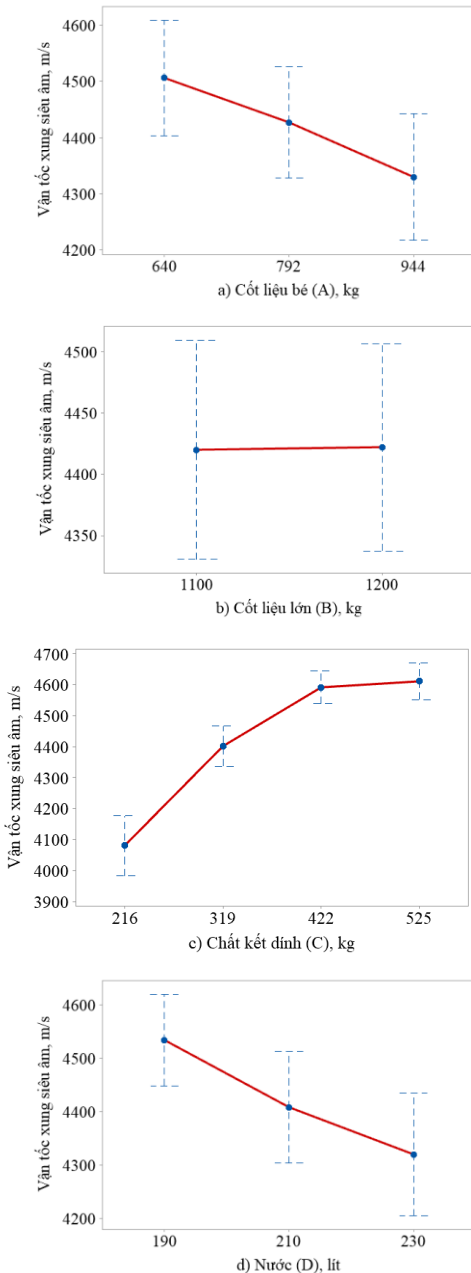
Bài báo nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của 4 tham số đầu vào cấp phối bê tông gồm cốt liệu bé (A), cốt liệu lớn (B), chất kết dính (C) và nước (D) đến các tham số đầu ra là vận tốc và tỷ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm. Bên cạnh việc đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng tham số đầu vào đến 2 tham số đầu ra, bài báo cũng nghiên cứu sự biến thiên của vận tốc và tỷ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm theo các tham số đầu vào. Thuật toán phân tích thống kê và việc xây dựng các biểu đồ phân tích được thực hiện bằng phần mềm Minitab 14.

3.1. Ảnh hưởng của cấp phối đến vận tốc xung siêu âm

Mức độ ảnh hưởng của từng tham số cấp phối bê tông đến vận tốc xung siêu âm (UPV) được đánh giá qua biểu đồ Pareto (Hình 11), hiển thị giá trị tuyệt đối của các tham số được tiêu chuẩn hóa từ tham số lớn nhất đến tham số nhỏ nhất. Đường tham chiếu màu đỏ trên biểu đồ chỉ ra những tham số nào có ảnh hưởng đáng kể đến tham số đang xét, với độ tin cậy là $(1-\alpha)$ với $\alpha=0,05$.



Hình 11. Biểu đồ Pareto: Mức độ ảnh hưởng của cấp phối đến vận tốc xung siêu âm (UPV)



Hình 12. Biểu đồ Interval Plot: Ảnh hưởng của từng vật liệu đến UPV

Trục hoành thể hiện giá trị tuyệt đối của tham số đầu vào đã được chuẩn hóa và trục tung là 4 tham số đầu vào của bài toán. Kết quả phân tích cho thấy mức độ ảnh hưởng của 3

tham số chất kết dính (C), nước (D) và cốt liệu bé (A) vượt qua đường tham chiếu nét đứt, chứng tỏ ảnh hưởng của các vật liệu này đến UPV là đáng kể. Cốt liệu lớn (B) không ảnh hưởng nhiều đến UPV. Chất kết dính (C) ảnh hưởng nhiều nhất đến UPV, tiếp đến nước (D), cốt liệu bé (A).

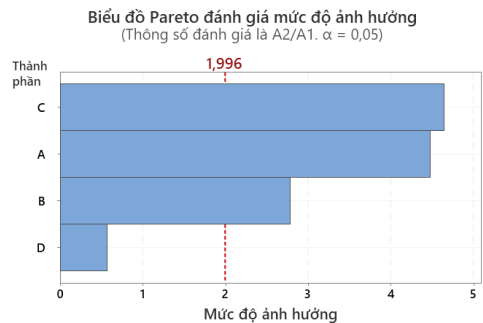
Hình 11 cho thấy mức độ ảnh hưởng của các vật liệu đến UPV, tuy nhiên chưa cho biết sự thay đổi của các thành phần vật liệu sẽ ảnh hưởng như thế nào đến UPV. Biểu đồ Interval Plot (Hình 12) cho phép đánh giá ảnh hưởng của sự thay đổi thành phần cấp phối đến UPV. Trên Hình 12, đường nét liền thể hiện giá trị trung bình tương ứng của các vật liệu thành phần.

Kết quả cho thấy, quan hệ giữa hàm lượng chất kết dính (tro bay+xi măng) (C) với UPV là quan hệ tỉ lệ thuận (Hình 12c). Ngược lại, khi hàm lượng cốt liệu bé (A) và nước (D) càng lớn thì UPV càng giảm (Hình 12a, d). Hình 12b cho thấy, sự thay đổi hàm lượng cốt liệu lớn (B) hầu như không ảnh hưởng đến UPV. Độ dốc của các đồ thị quan hệ ứng với chất dính kết (Hình 12c) là lớn nhất, tiếp theo là nước (Hình 12d), cốt liệu bé (Hình 12a). Điều này chứng tỏ hàm lượng chất kết dính (C) ảnh hưởng mạnh nhất đến UPV, tiếp theo đến nước và cốt liệu bé. Hàm lượng cốt liệu lớn ảnh hưởng không đáng kể đến UPV (ở tần số 54KHz).

3.2. Ảnh hưởng cấp phối đến tỷ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm

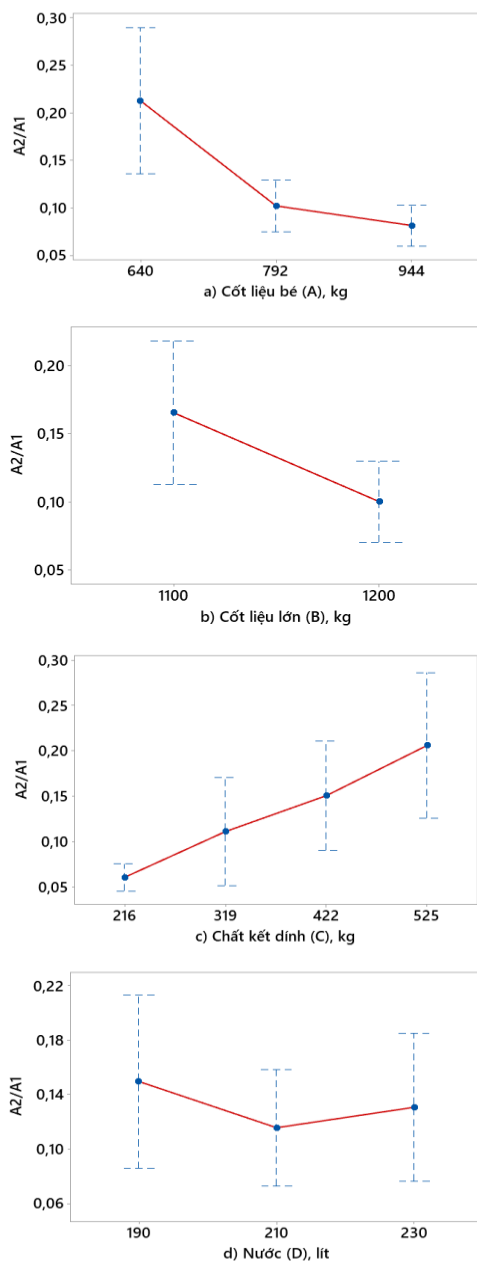
Cùng với vận tốc xung siêu âm, tỷ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm tại tuổi 28 ngày cũng là một trong các thông số hiệu quả để dự đoán cường độ chịu nén bê tông. Kết quả phân tích mức độ ảnh hưởng của các thành phần cấp phối đến tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm được thể hiện ở Hình 13.

Kết quả phân tích cho thấy, mức độ ảnh hưởng của ba tham số chất kết dính (C), cốt liệu bé (A) và cốt liệu lớn (B) vượt qua đường tham chiếu nét đứt, chứng tỏ các vật liệu này ảnh hưởng đáng kể đến tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm trong bê tông tuổi 28 ngày. Trong khi đó, ảnh hưởng của hàm lượng nước (D) đến tỉ lệ suy giảm biên độ là không lớn. Chất kết dính (C) ảnh hưởng nhiều nhất đến tỉ lệ suy giảm biên độ, tiếp theo đến cốt liệu bé (A), cốt liệu lớn (B).



Hình 13. Mức độ ảnh hưởng của các vật liệu đến tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm

Để nghiên cứu ảnh hưởng của sự thay đổi hàm lượng vật liệu thành phần đến tỉ lệ suy giảm biên độ, biểu đồ Interval Plot (Hình 14) được sử dụng. Kết quả cho thấy, quan hệ giữa hàm lượng chất kết dính (C) với tỉ lệ suy giảm biên độ là quan hệ tỉ lệ thuận (Hình 14c). Ngược lại, quan hệ giữa hàm lượng cốt liệu bé (A) và cốt liệu lớn (B) với tỉ lệ suy giảm biên độ là quan hệ tỉ lệ nghịch (Hình 14a, b). Hình 14d cho thấy, sự thay đổi hàm lượng nước (D) ít ảnh hưởng đến tỉ lệ suy giảm biên độ.



Hình 14. Biểu đồ Interval Plot: Ảnh hưởng của từng vật liệu đến tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm

4. Kết luận và hướng phát triển

Bài báo đã phân tích và đánh giá được ảnh hưởng của bốn thành phần vật liệu chế tạo bê tông gồm cốt liệu bé, cốt liệu lớn, chất kết dính và nước đến vận tốc và tỷ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm. Điểm nổi bật của các cấp phối này là sử dụng hai phế phẩm tro bay và bột đá tại miền Trung thay thế cho 20% xi măng và cát, giá trị vận tốc và tỷ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm trong nghiên cứu ứng với đối tượng bê tông có dải cường độ chịu nén rộng từ 10MPa đến 60MPa.

Các kết quả phân tích cho thấy, với bê tông ở 28 ngày tuổi, hàm lượng chất dính kết ảnh hưởng đáng kể đến UPV và tỉ lệ suy giảm biên độ sóng siêu âm. Khi hàm lượng chất dính kết càng lớn, UPV và tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm càng tăng. Khi hàm lượng cốt liệu bé tăng thì UPV và tỉ lệ suy giảm

biên độ sóng siêu âm giảm (với tần số xung siêu âm 54kHz).

Do vận tốc và biên độ xung siêu âm thường được sử dụng để đánh giá chất lượng bê tông, nên các kết quả phân tích trong nghiên cứu này cũng gián tiếp góp phần đánh giá ảnh hưởng cấp phối đối với chất lượng bê tông.

Nghiên cứu mới chỉ giới hạn với trường hợp tro bay và bột đá thay thế 20% cho xi măng và cát, vì vậy, trong tương lai cần mở rộng với trường hợp tro bay và bột đá thay thế ở nhiều tỉ lệ khác nhau. Từ đó, có được sự đánh giá chi tiết và đầy đủ hơn về ảnh hưởng của cấp phối, đặc biệt là cấp phối sử dụng hai phế phẩm tro bay và bột đá đến vận tốc và tỉ lệ suy giảm biên độ xung siêu âm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hashmi, A. F., Shariq, M., and Baqi, A., "Age-dependent strength assessment of low calcium fly ash concrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer number measurement", *Iranian Journal of Science Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 46, 2022, pp. 4327-4341.
- [2] Liu, X., Sun, D., Liao, J., Shao, Z., Shi, Y., Zhang, S., Yao, Y., and Hong, B., "Quality evaluation of lightweight cellular concrete by an ultrasound-based method", *Frontiers of Structural Civil Engineering*, vol. 16, 2022, pp. 1170-1182.
- [3] Mata, R., Ruiz, R. O., and Nuñez, E., "Correlation between compressive strength of concrete and ultrasonic pulse velocity: A case of study and a new correlation method", *Construction Building Materials*, vol. 369, 2023, pp. 130569.
- [4] Mohana, M. H., "Assessment of concrete compressive strength by ultrasonic pulse velocity test", *Journal of Civil Engineering*, vol. 10, 2020, pp. 39-46.
- [5] Kim, W., Jeong, K., Choi, H., and Lee, T., "Correlation analysis of ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of normal aggregate and lightweight aggregate concretes in 30–60 MPa range", *Materials*, vol. 15, 2022, pp. 2952.
- [6] Almasaeid, H., Alkasasbeh, A., and Yasin, B., "Prediction of Geopolymer Concrete Compressive Strength Utilizing Artificial Neural Network and Nondestructive Testing", *Civil Environmental Engineering*, vol. 18, 2022, pp. 655-665.
- [7] Candelaria, M. D. E., Kee, S.-H., and Lee, K.-S., "Prediction of compressive strength of partially saturated concrete using machine learning methods", *Materials*, vol. 15, 2022, pp. 1662.
- [8] Migallón, V., Penadés, H., Penadés, J., and Tenza-Abril, A. J., "A Machine Learning Approach to Prediction of the Compressive Strength of Segregated Lightweight Aggregate Concretes Using Ultrasonic Pulse Velocity", *Applied Sciences*, vol. 13, 2023, pp. 1953.
- [9] Kim, W., Jeong, K., Lee, T., and Park, S., "A Study on Correlation between Ultrasonic Pulse Velocity Method and Coarse Aggregate for Estimating Residual Modulus of Elasticity of Concrete Exposed to High Temperatures", *Applied Sciences*, vol. 12, 2022, pp. 6644.
- [10] Datta, S. D., Sobuz, M. H. R., Akid, A. S. M., and Islam, S., "Influence of coarse aggregate size and content on the properties of recycled aggregate concrete using non-destructive testing methods", *Journal of Building Engineering*, vol. 61, 2022, pp. 105249.
- [11] Güçlüer, K., "Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete", *Journal of Building Engineering*, vol. 27, 2020, pp. 100949.
- [12] Mohammed, T. U. and Mahmood, A. H., "Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete", *Ultrasonics*, vol. 69, 2016, pp. 129-136.
- [13] Mohammed, T. U. and Rahman, M. N., "Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete", *Construction Building Materials*, vol. 125, 2016, pp. 832-841.
- [14] Thăng, V. L., Cung, L., Son, N. Đ., "Dự đoán cường độ chịu nén bê tông dựa trên vận tốc xung siêu âm sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm và mạng nơ-ron nhân tạo cho vật liệu địa phương", *Tap chí Xây dựng Việt Nam*, vol. 4, 2020, pp. 163-168.
- [15] Bộ Xây Dựng, *Chỉ dẫn kỹ thuật chọn thành phần bê tông các loại*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội, 1998.