

ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG TUỔI BÊ TÔNG ĐẾN VẬN TỐC XUNG SIÊU ÂM

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF CONCRETE AGE ON ULTRASONIC PULSE VELOCITY

Vương Lê Thăng*, Lê Cung, Nguyễn Đình Sơn

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: vlthang@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 10/3/2023; Sửa bài / Revised: 12/4/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 15/4/2023)

Tóm tắt - Bài báo nhằm đánh giá ảnh hưởng của tuổi bê tông đến vận tốc xung siêu âm (UPV) ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày. Bê tông trong nghiên cứu đạt cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày trong dải rộng từ 10MPa đến 60MPa, hai phế phẩm tại khu vực miền Trung là tro bay và bột đá được sử dụng thay thế lần lượt cho 20% xi măng và cát. Phương pháp qui hoạch thực nghiệm đa yếu tố được sử dụng để xác định số lượng mẫu và thành phần vật liệu cho 72 cấp phối bê tông. Các kết quả phân tích cho thấy, ảnh hưởng của từng vật liệu chế tạo bê tông đến UPV ở các ngày tuổi khác nhau. Quan hệ giữa UPV ở tuổi 7 và 14 ngày với cường độ chịu nén bê tông 28 ngày tuổi được thiết lập dựa trên phương pháp hồi quy, góp phần dự báo cường độ chịu nén bê tông ở 28 ngày tuổi dựa trên UPV ở tuổi 7 và 14 ngày.

Từ khóa - Bột đá; cấp phối bê tông; cường độ chịu nén; tro bay; tuổi bê tông; vận tốc xung siêu âm (UPV)

1. Đặt vấn đề

Bê tông là vật liệu được sử dụng phổ biến tại Việt Nam và trên thế giới. Việc kiểm tra và đánh giá các đặc tính của bê tông là công việc cần thiết với tất cả công trình. Tùy theo yêu cầu mà các đặc tính khác nhau của bê tông cần được kiểm tra như: Cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi, độ chống thấm,... trong đó, cường độ chịu nén là thông số quan trọng nhất và bắt buộc phải kiểm tra với tất cả công trình.

Hiện nay có nhiều phương pháp để kiểm tra cường độ chịu nén của bê tông, trong đó phương pháp dựa trên vận tốc xung siêu âm (UPV) đi qua bê tông được sử dụng phổ biến. Nhiều nghiên cứu đã tìm được mối liên hệ giữa cường độ chịu nén và vận tốc xung siêu âm cho nhiều loại bê tông khác nhau [1-5].

Giá trị cường độ chịu nén bê tông tăng theo thời gian, do vậy, để đánh giá được cường độ chịu nén bê tông ở các ngày tuổi khác nhau, cần thiết nghiên cứu ảnh hưởng của tuổi bê tông đến UPV. Nhiều tác giả đã quan tâm đánh giá ảnh hưởng của tuổi bê tông đến vận tốc xung siêu âm đối với một số loại bê tông có sử dụng các vật liệu thay thế khác nhau [6, 7].

Bên cạnh việc quan tâm đến chất lượng bê tông, một vấn đề rất cấp thiết hiện nay là tìm kiếm các nguồn vật liệu mới thay thế cho vật liệu truyền thống chế tạo bê tông. Một số tác giả trong nước đã nghiên cứu sử dụng nhiều vật liệu như tro bay thay thế cho xi măng [8, 9], bê tông tái chế và phế phẩm thủy tinh y tế thay thế một phần cho cát [10, 11].

Tại khu vực miền Trung Việt Nam, việc khai thác quá mức các vật liệu như cát tại các sông ngòi hoặc đá tại mỏ đá đã gây ra các tác động rất xấu đến môi trường. Đây là

Abstract - This paper investigates the effect of concrete age on ultrasonic pulse velocity (UPV) at 3, 7, 14 and 28 days. The study includes a wide range of compressive strength at 28 days from 10MPa to 60MPa. Two waste products, fly ash and stone powder in the Central Region, are used to replace 20% of cement and sand content, respectively. Full factorial experimental planning method was used to determine the number of specimens and detailed material composition for 72 concrete mixtures. The analysis reveals the influence of each concrete material on the UPV at different ages. The relationship equations between the UPV at 7 and 14 days with the compressive strength of 28-day concrete were established, using the regression analysis, contributing to the prediction of the concrete compressive strength at 28 days based on UPV at 7 and 14 days.

Key words - Concrete mixture; concrete age; compressive strength; fly ash; stone powder; ultrasonic pulse velocity (UPV)

một trong các nguyên nhân gây ra các trận lũ lụt lớn hoặc xói lở nghiêm trọng tại khu vực này. Bài báo đề xuất sử dụng hai vật liệu thay thế là tro bay thay thế cho 20% xi măng và bột đá thay thế cho 20% cát. Nguồn gốc của phế phẩm tro bay là từ Nhà máy nhiệt điện Vũng Áng - Hà Tĩnh và phế phẩm bột đá tại mỏ đá Phước Tường - Đà Nẵng. Các vật liệu này sẽ được sử dụng để chế tạo bê tông đạt cường độ chịu nén tại tuổi 28 ngày là từ 10MPa đến 60MPa. Khi sử dụng vật liệu mới chế tạo bê tông, cần phải có các nghiên cứu đánh giá về vật liệu mới này.

Nghiên cứu này thực hiện đánh giá ảnh hưởng của tuổi bê tông đến UPV ở các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày, cho bê tông sử dụng tro bay và bột đá lần lượt thay thế 20% xi măng và cát, có cường độ chịu nén dao động trong dải rộng từ 10MPa-60MPa. Các biểu đồ quan hệ giữa UPV tại tuổi 7 và 14 ngày với cường độ chịu nén bê tông 28 ngày tuổi bằng phương pháp hồi quy được xây dựng, góp phần đánh giá cường độ chịu nén dựa trên UPV ở các tuổi khác nhau.

2. Xây dựng bộ dữ liệu thực nghiệm

2.1. Thiết kế cấp phối và chế tạo mẫu

Vật liệu sử dụng chế tạo bê tông có nguồn gốc từ cát tại sông Vu Gia Quảng Nam, đá dăm và bột đá tại mỏ đá Phước Tường Đà Nẵng, xi măng PC50 Sông Gianh và tro bay tại Nhà máy nhiệt điện Vũng Áng-Hà Tĩnh. Chi tiêu cơ lý của các vật liệu này được trình bày chi tiết trong nghiên cứu [12].

Sử dụng hướng dẫn về lựa chọn cấp phối của Bộ xây dựng [13], thành phần vật liệu cần thiết để bê tông đạt cường độ chịu nén từ 10MPa đến 60MPa được thể hiện như ở Bảng 1.

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

Bảng 1. Thành phần vật liệu chế tạo 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 1 cho thấy, lượng chất kết dính thay đổi trong khoảng rộng nhất, tiếp theo là cốt liệu bé, nước và cốt liệu lớn có khoảng thay đổi hẹp hơn. Sử dụng phương pháp qui hoạch thực nghiệm đa yếu tố (full factorial), xác định được số lượng cấp phối cần thiết là 72 cấp phối. Phương pháp xác định số lượng cấp phối, thành phần chi tiết vật liệu các cấp phối, quá trình chế tạo mẫu hình lập phương (15cm x 15cm x 15cm), dưỡng hộ mẫu và xác định cường độ chịu nén các mẫu ở tuổi 28 ngày được trình bày chi tiết trong nghiên cứu [14].

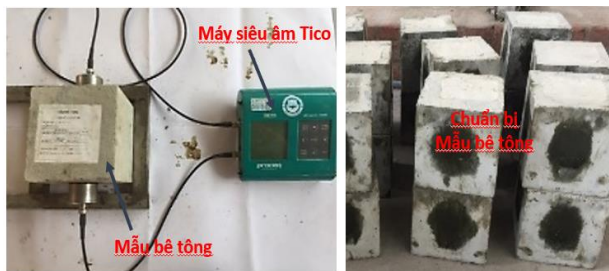
2.2. Đo đạc vận tốc xung siêu âm

Sử dụng máy siêu âm Tico Proceq để đo đạc UPV tại các tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày. Vận tốc xung siêu âm có thể được xác định bằng phương pháp lan truyền trực tiếp, bán trực tiếp và gián tiếp. Ở nghiên cứu này, phương pháp lan truyền trực tiếp được sử dụng để xác định UPV của toàn bộ 72 mẫu tại các tuổi khác nhau (Hình 1). Quá trình đo đạc UPV được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Kết cấu Công trình thuộc Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng với nhiệt độ đo được trong quá trình dưỡng hộ là $25 \pm 2^\circ\text{C}$ và độ ẩm đo được là $80 \pm 7\%$. Vận tốc xung siêu âm được đo theo 2 phương vuông góc với phương đổ bê tông cho mẫu và mỗi lần đo lặp lại 3 lần, sau đó lấy giá trị trung bình của các lần đo (Bảng 2).

Bảng 2. Giá trị vận tốc xung siêu âm (UPV) tại 3 ngày, 7 ngày, 14 ngày và 28 ngày

Cấp phối	UPV 3 ngày	UPV 7 ngày	UPV 14 ngày	UPV 28 ngày
1	3428	3723	4003	4250
2	3390	3635	3830	4055
3	3090	3443	3768	3935
4	3973	4233	4438	4495
5	3843	4208	4320	4360
6	3695	4050	4228	4355
7	4215	4463	4558	4695
8	4080	4428	4545	4560
9	4035	4250	4520	4515
10	4310	4580	4650	4715
11	4308	4575	4655	4675
12	4040	4423	4455	4520
13	3815	3875	4215	4440
14	3543	3760	4043	4215
15	3348	3595	3858	4185
16	4113	4320	4495	4690
17	3925	4080	4363	4525
18	3973	4105	4250	4465

Cấp phối	UPV 3 ngày	UPV 7 ngày	UPV 14 ngày	UPV 28 ngày
19	4420	4498	4555	4760
20	4350	4428	4580	4745
21	4155	4265	4490	4715
22	4415	4570	4760	4900
23	4358	4555	4578	4705
24	4330	4468	4605	4680
25	3678	3873	4173	4410
26	3305	3643	3895	4120
27	3273	3573	3863	4080
28	4060	4260	4445	4560
29	3883	3950	4278	4485
30	3740	3933	4195	4330
31	4285	4398	4568	4705
32	4225	4285	4483	4680
33	3948	4320	4478	4540
34	4325	4560	4760	4775
35	4108	4408	4620	4625
36	3885	4248	4500	4445
37	3660	3990	4333	4245
38	3525	3815	4083	3945
39	3208	3485	3910	3905
40	3815	4278	4530	4490
41	3835	4133	4425	4310
42	3640	4015	4295	4260
43	3963	4483	4670	4630
44	4053	4330	4555	4500
45	4025	4148	4558	4510
46	4235	4485	4698	4650
47	4163	4485	4680	4550
48	4015	4423	4648	4505
49	3533	3855	4258	4105
50	3183	3560	4010	3975
51	2898	3358	3798	3720
52	3735	4150	4488	4445
53	3600	4080	4355	4285
54	3460	3945	4230	4175
55	3933	4478	4703	4580
56	3905	4448	4678	4620
57	3998	4375	4483	4495
58	4373	4553	4713	4645
59	4263	4473	4618	4555
60	4195	4393	4563	4455
61	3745	3978	4218	4135
62	3503	3815	4025	3965
63	3228	3608	3780	3765
64	4088	4363	4483	4415
65	4018	4318	4440	4370
66	3805	3790	4240	4215
67	4250	4475	4570	4540
68	4188	4430	4525	4460
69	4058	4293	4473	4400
70	4380	4548	4628	4555
71	3833	4503	4588	4525
72	4228	4420	4508	4520



a) Đo UPV qua mẫu b) Chuẩn bị mẫu khi đo UPV

Hình 1. Đo vận tốc xung siêu âm (UPV)

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của vật liệu đến vận tốc xung siêu âm truyền qua bê tông ở các tuổi khác nhau

Bê tông được tạo thành từ cốt liệu bé (A), cốt liệu lớn (B), chất kết dính (C) và nước (D), nên việc đánh giá ảnh hưởng của tuổi bê tông đến UPV cũng chính là đánh giá ảnh hưởng của các thành phần vật liệu này đến UPV ở các tuổi khác nhau. Bài báo sử dụng biểu đồ Pareto với sự hỗ trợ của phần mềm Minitab 19 để đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng tham số vật liệu đến UPV.

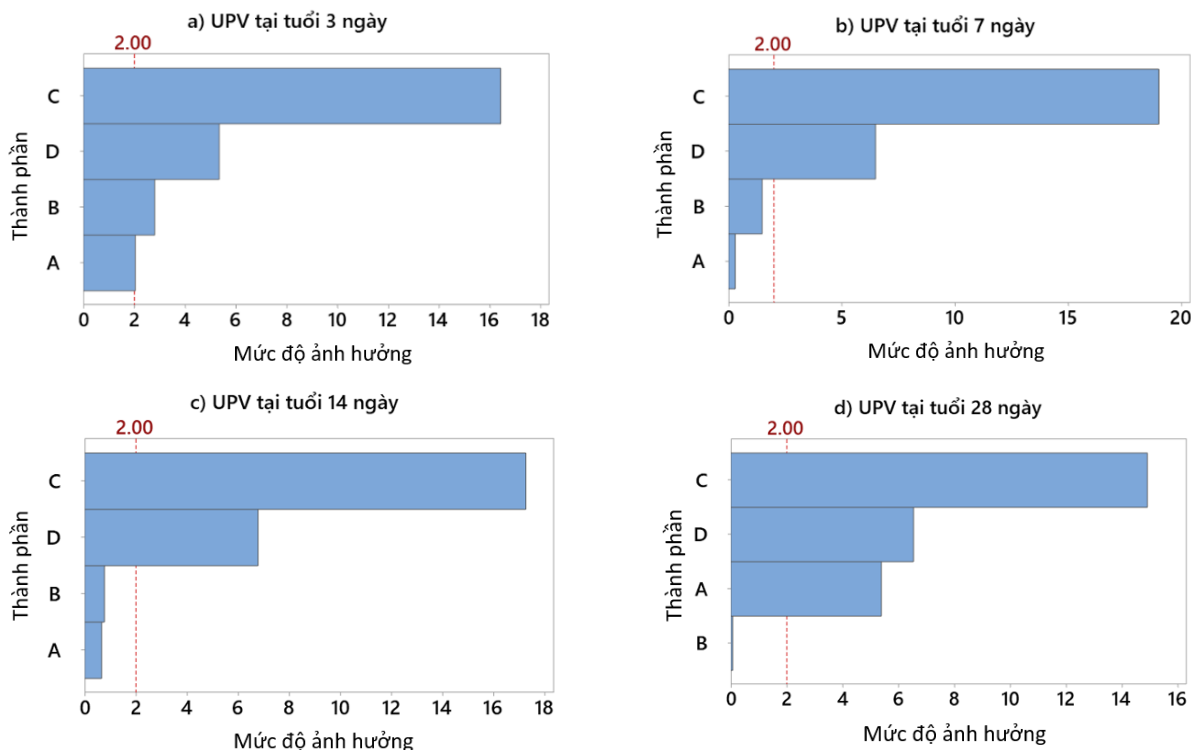
Kết quả đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng vật liệu đến UPV được thể hiện như Hình 2. Trong Hình 2, trục hoành là giá trị tuyệt đối của 4 tham số đầu vào đã được chuẩn hóa và trục tung thể hiện 4 thành phần vật liệu đầu vào của bài toán. Đường tham chiếu màu đỏ trên biểu đồ chỉ ra những tham số nào có ảnh hưởng đáng kể đến tham số đầu vào đang xét, với độ tin cậy là $(1-\alpha)$ với $\alpha=0,05$. Kết quả cho thấy, có sự khác nhau về ảnh hưởng của vật liệu đến UPV ở các tuổi. Ở tuổi 3 ngày, cả bốn vật liệu đều ảnh hưởng đáng kể đến UPV, khi tuổi tăng lên 7 và 14 ngày, chỉ có 2 vật liệu chất kết dính (C) và nước (D) ảnh hưởng

đáng kể, và khi tuổi 28 ngày, 3 vật liệu là chất kết dính (C), nước (D) và cốt liệu bé (A) ảnh hưởng khá mạnh đến UPV.

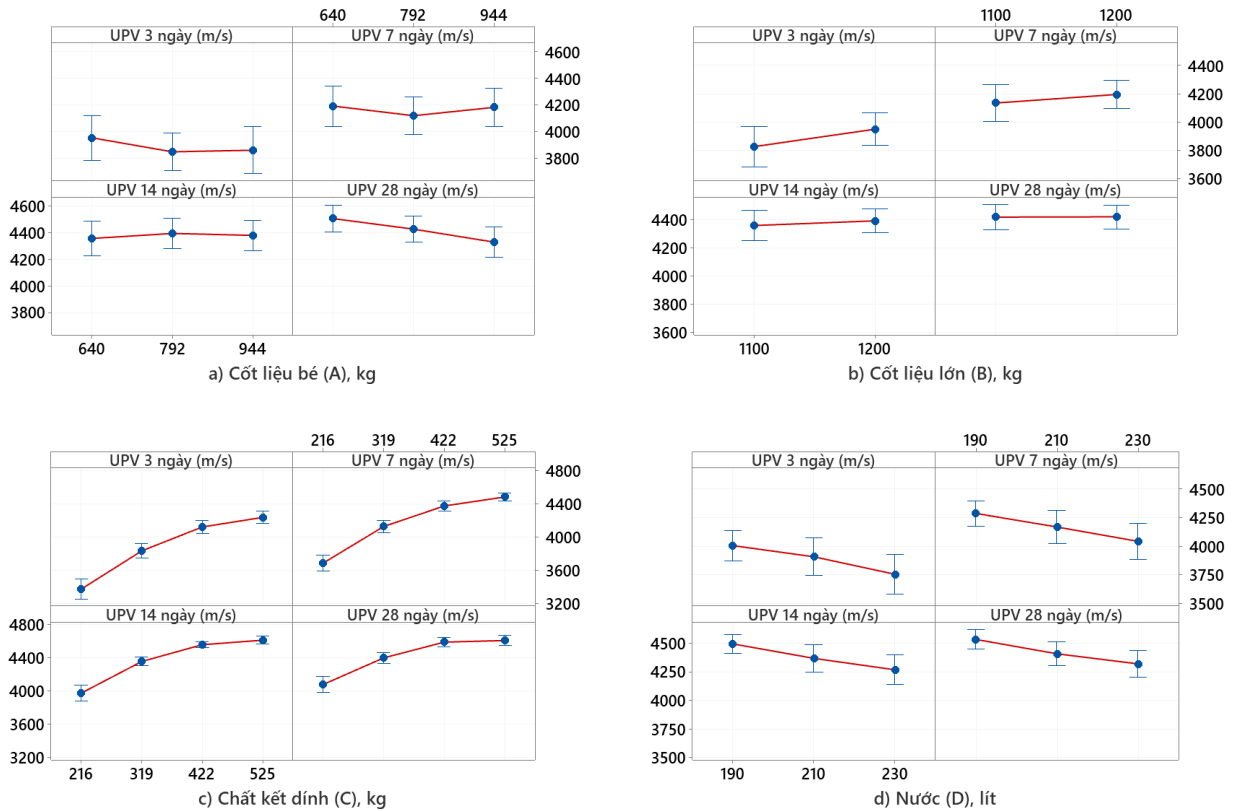
Giải thích cho mức độ ảnh hưởng này là vì UPV chịu ảnh hưởng của môi trường vật chất khi nó lan truyền. Chẳng hạn CKD (C) đóng vai trò như keo dán để dính kết các cốt liệu với nhau, Nước (D) đóng vai trò trong quá trình thủy hóa nhưng lượng nước dư thừa sẽ làm bê tông toi xốp. Vì vậy, CKD (C) và Nước (D) đều sẽ ảnh hưởng đáng kể đến UPV. Ngoài ra, quá trình thủy hóa trong bê tông thay đổi theo thời gian nên mức độ ảnh hưởng của các vật liệu đến UPV ở các tuổi khác nhau cũng sẽ có điểm khác nhau.

Ngoài việc đánh giá mức độ ảnh hưởng, sự tăng - giảm vật liệu ảnh hưởng như thế nào đến UPV được thể hiện qua biểu đồ Interval Plot ở Hình 3. Kết quả cho thấy, khi hàm lượng chất kết dính (C) tăng lên thì UPV tăng theo, còn khi hàm lượng nước (D) càng thấp thì UPV càng giảm. Giải thích cho điều này là vì CKD (C) tăng sẽ làm tăng độ dính kết giữa các cốt liệu bên trong bê tông, làm bê tông đặc chắc hơn nên UPV tăng. Trong khi đó, nếu lượng Nước (D) tăng, ngoài tác dụng thủy hóa của nước thì lượng Nước (D) dư thừa sẽ tạo ra lỗ rỗng trong bê tông nên UPV sẽ giảm. Quy luật này là tương đồng với quy luật ảnh hưởng của chất kết dính (C) và nước (D) với cường độ chịu nén bê tông.

Ảnh hưởng của hàm lượng cốt liệu bé (A) và cốt liệu lớn (B) đến UPV là khác nhau tùy theo tuổi của bê tông. Ở các tuổi 3, 7 và 14 ngày, ảnh hưởng của cốt liệu bé đến UPV là không nhiều. Nhưng ở tuổi 28 ngày thì ảnh hưởng này lại đáng kể và theo quy luật là cốt liệu bé (A) tăng thì UPV giảm. Cốt liệu lớn (B) ảnh hưởng không lớn đối với UPV, ở các tuổi 3 ngày và 7 ngày khi cốt liệu lớn tăng thì UPV tăng, nhưng tuổi 14 ngày và 28 ngày thì đường quan hệ màu đỏ chủ yếu nằm ngang, cho thấy cốt liệu lớn hầu như ít ảnh hưởng đến UPV.



Hình 2. Mức độ ảnh hưởng của từng vật liệu đến UPV ở các tuổi khác nhau



Hình 3. Biểu đồ Interval Plot: Ảnh hưởng thay đổi vật liệu đến UPV ở các tuổi khác nhau

3.2. Độ lớn vận tốc xung siêu âm ở các tuổi khác nhau

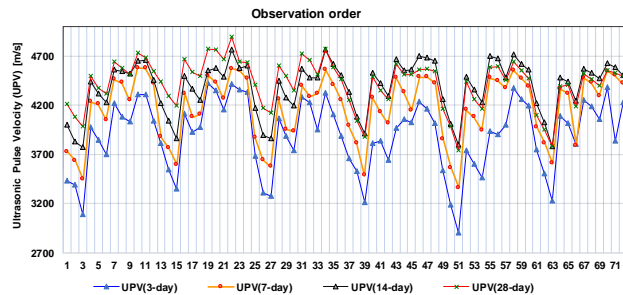
Ảnh hưởng của cấp phối (thành phần vật liệu) bê tông đến UPV ở các tuổi khác nhau được phân tích và đánh giá. Kết quả độ lớn của UPV của 72 cấp phối ở các tuổi khác nhau thể hiện trên Hình 4.

ảnh hưởng của hàm lượng cốt liệu bé, nhưng ở tuổi 28 ngày UPV giảm khi hàm lượng CLB tăng.

3.3. Quan hệ cường độ chịu nén bê tông với vận tốc xung siêu âm

Vận tốc xung siêu âm UPV là tham số được sử dụng phổ biến để dự đoán cường độ chịu nén của bê tông. Dựa trên bộ dữ liệu thực nghiệm về UPV ở Bảng 2 và cường độ chịu nén được trình bày chi tiết ở nghiên cứu [14], các mối quan hệ hồi quy giữa cường độ chịu nén với UPV ở các ngày tuổi khác nhau được xây dựng, sử dụng phần mềm Minitab 19.

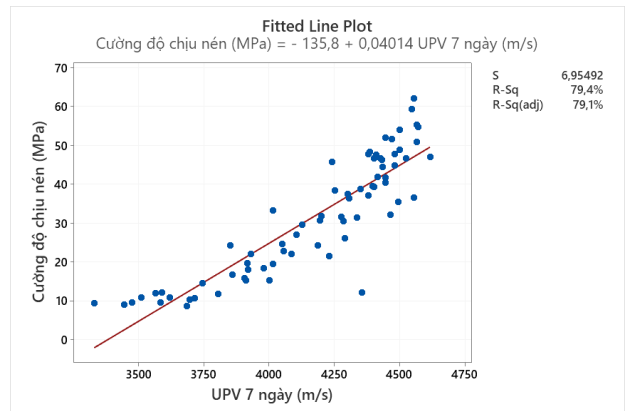
Kết quả xác định được quan hệ hồi quy giữa cường độ chịu nén tuổi 28 ngày với UPV tuổi 7 ngày như thể hiện ở Hình 5, Hình 6 và Hình 7.



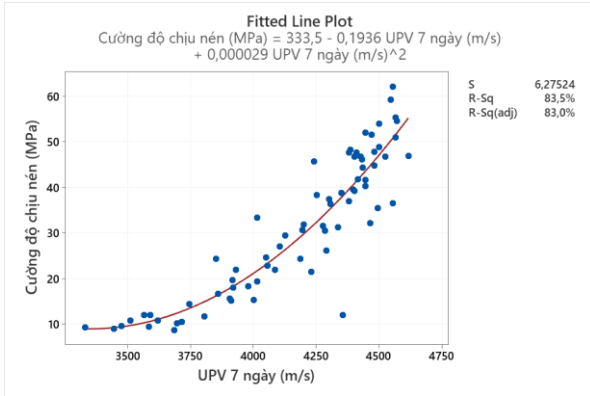
Hình 4. Độ lớn vận tốc xung siêu âm của 72 cấp phối ở các tuổi

Kết quả trên Hình 4 cho thấy, xu hướng chung là độ lớn UPV tăng dần theo tuổi của bê tông, UPV ở tuổi 3 ngày là nhỏ nhất, và ở tuổi 28 ngày là lớn nhất. Điều này chính là do quá trình thủy hóa của bê tông, chẳng hạn tuổi tăng thì lượng nước trong bê tông sẽ giảm, theo kết quả trên Hình 3d thì UPV sẽ tăng.

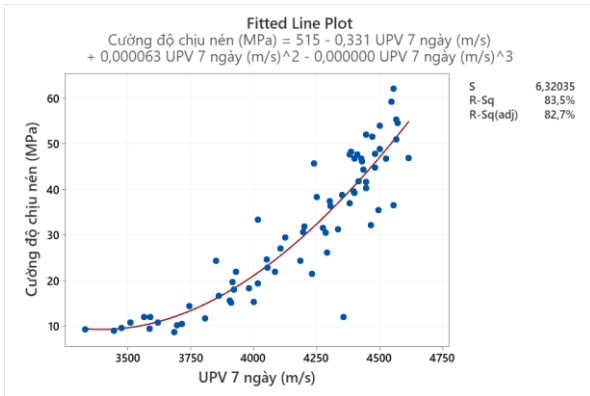
Một kết quả đáng quan tâm khác là các cấp phối từ CP1 đến CP38 có UPV tuổi 28 ngày lớn hơn UPV tuổi 14 ngày, nhưng các cấp phối từ CP39 đến CP72 lại có UPV tuổi 14 ngày lớn hơn. Điều này có thể giải thích như sau: Thành phần vật liệu của các cấp phối nghiên cứu [14] cho thấy các cấp phối từ 1 đến 38 có hàm lượng cốt liệu bé (CLB) nhỏ hơn so với trong các cấp phối 39 đến 72. Biểu đồ Interval Plot ở Hình 3a cho thấy, UPV tuổi 14 ngày ít chịu



Hình 5. Quan hệ tuyến tính bậc 1 giữa cường độ chịu nén 28 ngày tuổi và UPV 7 ngày tuổi



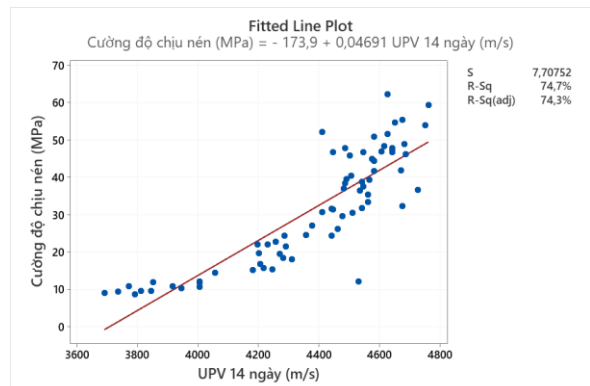
Hình 6. Quan hệ đa thức bậc 2 giữa cường độ chịu nén 28 ngày tuổi và UPV 7 ngày tuổi



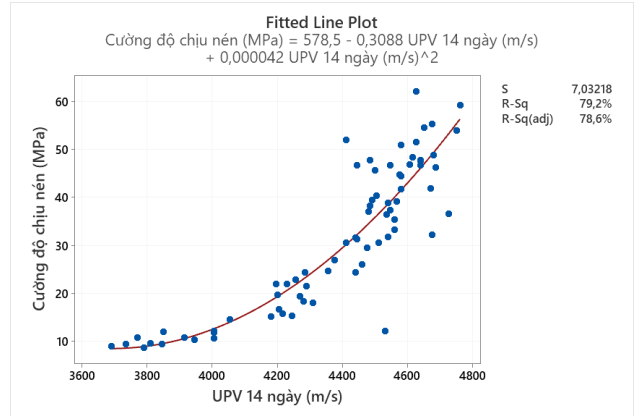
Hình 7. Quan hệ đa thức bậc 3 giữa cường độ chịu nén 28 ngày tuổi và UPV 7 ngày tuổi

Kết quả từ biểu đồ cho thấy, khi UPV tăng thì cường độ chịu nén cũng tăng. Tuy nhiên, tốc độ tăng của cường độ chịu nén và UPV là khác nhau. Ở các cấp phối bê tông có cường độ chịu nén cao thì tốc độ tăng UPV là chậm hơn so với tốc độ tăng cường độ chịu nén. Bên cạnh đó, các hệ số đánh giá R^2 của mô hình dự đoán đa thức bậc 1 là 79,4%, thấp hơn so với mô hình đa thức bậc 2 và bậc 3 là 83,5%. Điều này cho thấy, quan hệ cường độ chịu nén với UPV theo đa thức bậc 2 hoặc bậc 3 sẽ phù hợp hơn so với bậc 1.

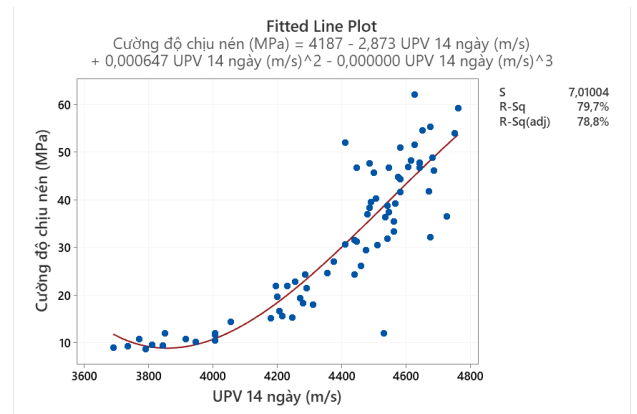
Tương tự, quan hệ giữa cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày theo UPV ở tuổi 14 ngày được thể hiện ở Hình 8, Hình 9 và Hình 10. Các kết quả này cũng cho thấy, mức độ phù hợp của mô hình dự đoán đa thức bậc 2 và bậc 3 là phù hợp hơn so với bậc 1.



Hình 8. Quan hệ tuyến tính bậc 1 giữa cường độ chịu nén 28 ngày tuổi và UPV 14 ngày tuổi



Hình 9. Quan hệ đa thức bậc 2 giữa cường độ chịu nén 28 ngày tuổi và UPV 14 ngày tuổi



Hình 10. Quan hệ đa thức bậc 3 giữa cường độ chịu nén 28 ngày tuổi và UPV 14 ngày tuổi

Các mô hình hồi qui trên đây có thể giúp dễ dàng dự báo cường độ chịu nén của bê tông ở 28 ngày tuổi, dựa trên độ lớn UPV đo được ở 7 và 14 ngày tuổi, đối với bê tông sử dụng vật liệu thay thế là tro bay và bột đá.

4. Kết luận và hướng phát triển

Qua việc nghiên cứu UPV ở các tuổi 3 ngày, 7 ngày, 14 ngày và 28 ngày đối với 72 cấp phối bê tông sử dụng hai phế phẩm là tro bay và bột đá thay thế cho 20% xi măng và cát, các kết quả đạt được như sau:

- Mức độ ảnh hưởng của các thành phần vật liệu đến UPV là khác nhau ở các tuổi của bê tông: Chất dính kết (C) và Nước (D) đều ảnh hưởng đáng kể ở tất cả các tuổi bê tông, trong đó Chất dính kết (C) có ảnh hưởng lớn nhất; Ở tuổi 3 ngày do tuổi bê tông còn nhỏ, nên Cốt liệu bé (A) và Cốt liệu lớn (B) cũng có ảnh hưởng đáng kể; Trong khi đó, ở tuổi 28 ngày khi bê tông đã ổn định về mặt cấu trúc, thêm Cốt liệu bé (A) cũng ảnh hưởng đáng kể đến UPV.

- Đối với hai thành phần vật liệu ảnh hưởng nhiều nhất đến UPV thì khi Chất dính kết (C) tăng, UPV tăng theo, còn khi Nước (D) tăng thì UPV giảm.

- Độ lớn UPV ở tuổi 14 và 28 ngày lớn hơn UPV ở tuổi 3 ngày và 7 ngày; UPV 28 ngày lớn hơn UPV 14 ngày đối với các cấp phối CP1 đến CP36, nhưng lại nhỏ hơn với CP37 đến CP72 do các cấp phối này có hàm lượng Cốt liệu bé (A) lớn hơn, dẫn đến giảm UPV.

Cường độ chịu nén bê tông tuổi 28 ngày có thể được dự đoán dựa trên UPV ở tuổi 7 ngày và 14 ngày bằng các mô hình hồi quy với mức độ chính xác phù hợp (R^2 dao động từ 83,5% đến 79,7%). Tuy các mô hình hồi quy có thể giúp dự đoán cường độ chịu nén bê tông tuổi 28 ngày theo UPV ở tuổi 7 và 14 ngày, nhưng độ chính xác của các mô hình này là chưa cao. Trong tương lai cần nghiên cứu các mô hình phi tuyến khác và mô hình mạng nơ-ron nhân tạo để nâng cao độ chính xác của kết quả dự đoán.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. El-Mir and S. El-Zahab, "Assessment of the Compressive Strength of Self-Consolidating Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycles Using Ultrasonic Pulse Velocity Method", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 58, pp. 108-117, 2022.
- [2] A. F. Hashmi, M. Shariq, and A. Baqi, "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, pp. 4327-4341, 2022.
- [3] T. Lee and J. Lee, "Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age", *Construction Building Materials*, vol. 252, pp. 119027, 2020.
- [4] R. Mata, R. O. Ruiz, and E. Nuñez, "Correlation between compressive strength of concrete and ultrasonic pulse velocity: A case of study and a new correlation method", *Construction Building Materials*, vol. 369, pp. 130569, 2023.
- [5] Y. Zhang, F. Aslani, and B. Lehane, "Compressive strength of rubberized concrete: Regression and GA-BPNN approaches using ultrasonic pulse velocity", *Construction Building Materials*, vol. 307, pp. 124951, 2021.
- [6] T.-T. Chen, W.-C. Wang, and H.-Y. Wang, "Mechanical properties and ultrasonic velocity of lightweight aggregate concrete containing mineral powder materials", *Construction Building Materials*, vol. 258, pp. 119550, 2020.
- [7] M. Karimaei, F. Dabbaghi, M. Dehestani, and M. Rashidi, "Estimating compressive strength of concrete containing untreated coal waste aggregates using ultrasonic pulse velocity", *Materials*, vol. 14, pp. 647, 2021.
- [8] C. V. Nguyen, P. Lambert, and V. N. J. I. J. o. C. E. Bui, "Effect of locally sourced pozzolan on corrosion resistance of steel in reinforced concrete beams", *International Journal of Civil Engineering*, vol. 18, pp. 619-630, 2020.
- [9] C. V. Nguyen, P. Lambert, and Q. H. Tran, "Effect of Vietnamese fly ash on selected physical properties, durability and probability of corrosion of steel in concrete", *Materials*, vol. 12, pp. 593, 2019.
- [10] N. N. Lam, "Recycling of AAC Waste in the Manufacture of Autoclaved Aerated Concrete in Vietnam", *Int. J. GEOMATE*, vol. 20, pp. 128-134, 2021.
- [11] H. T. M. Dung, H. V. Hiep, and H. T. Phuoc, "Possibility of using recycled waste medical-glass as fine aggregate in normal-strength concrete", *Journal of Science and Technology in Civil Engineering, NUCE 2021*, vol. 15, 2021, pp. 93-108.
- [12] V. Thang, L. Cung, and D. Nguyen, "Predicting the compressive strength of concrete based on ultrasonic pulse velocity using experimental design methodology and artificial neural networks for local materials", *Journal of Construction*, vol. 4, pp. 163-168, 2020.
- [13] Ministry of Construction, *Technical guidelines for selecting concrete components*, Construction Publishing House, Hanoi, 1998.
- [14] V. Thang, L. Cung, and D. Nguyen, "An Application of Artificial Neural Network to Predict the Compressive Strength of Concrete using Fly Ash and Stone Powder Waste Products in Central Vietnam", *International Journal of Engineering*, vol. 35, pp. 967-976, 2022.