

NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH MỐI QUAN HỆ GIỮA CƯỜNG ĐỘ NÉN VÀ MÔ ĐUN ĐÀN HỒI CỦA BÊ TÔNG SỬ DỤNG PHỤ GIA KHOÁNG TRO TRÁU ỨNG DỤNG THI CÔNG CÁC CÔNG TRÌNH THỦY LỢI

Phạm Nguyễn Hoàng, Nguyễn Quang Phú

Trường Đại học Thủy lợi

Ngô Anh Quân

Viện Thủy công

Tóm tắt: Sử dụng phụ gia khoáng tro trấu thay thế 15% xi măng Poocăng, kết hợp lượng dùng phụ gia siêu dẻo hợp lý để chế tạo bê tông có cường độ nén đạt mức từ 30 đến 60 MPa, bê tông có tính công tác tốt, cường độ nén, mô đun đàn hồi và mức chống thấm cao, phù hợp cho thi công các công trình Thủy lợi. Thí nghiệm xác định cường độ nén và mô đun đàn hồi của các mẫu bê tông thiết kế. Xác định mối quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ nén của bê tông, công thức thực nghiệm giúp dự đoán được mô đun đàn hồi của bê tông thông qua cường độ nén, giảm thiểu được các chi phí thí nghiệm trực tiếp mô đun đàn hồi của bê tông.

Từ khóa: Mô đun đàn hồi; cường độ nén; tro trấu; phụ gia siêu dẻo.

Summary: Using rice husk ash mineral admixture to replace the Portland cement binder by 15%, combined with a reasonable amount of superplasticizer to manufacture concrete with compressive strength of 30 to 60 (MPa), The concrete is designed with good workability, high compressive strength, high elastic modulus and high waterproof grade, meeting the technical requirements for Hydraulic constructions. Experiment to determine the compressive strength and elastic modulus of engineered concrete marks. Determining the relationship between the elastic modulus and compressive strength of concrete, the experimental formula helps to predict the elastic modulus through compressive strength, reducing the cost of testing the elastic modulus of concrete.

Key words: Elastic modulus; Compressive strength; Rice Husk Ash (RHA); Superplasticizer.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các công trình xây dựng đa phần được thiết kế và thi công bởi các kết cấu bê tông và bê tông cốt thép, việc đánh giá chất lượng bê tông trong quá trình thi công và nghiệm thu để đưa công trình vào khai thác vận hành rất cần thiết. Một số chỉ tiêu kỹ thuật cần phải thí nghiệm nhanh để đánh giá chất lượng bê tông kịp thời và nhanh chóng, đó là cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của bê tông. Hiện nay, thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi của bê tông thông qua thí nghiệm trên các mẫu tiêu chuẩn và thí nghiệm phá hủy mẫu theo ASTM C469-02 và

TCVN 5276:1993 [2, 6].

Theo các tiêu chuẩn, việc xác định mô đun đàn hồi của bê tông vẫn thông qua thí nghiệm trực tiếp tại phòng thí nghiệm với máy móc, trang thiết bị phức tạp, đồng thời phải chuẩn bị mẫu có kích thước theo tiêu chuẩn quy định. Tuy nhiên, nhiều khi kết quả thí nghiệm trên mẫu tiêu chuẩn lại có độ chính xác chưa được tương đồng với bê tông sử dụng tại công trình, do kích thước các mẫu thí nghiệm tương đối nhỏ, thiết bị thí nghiệm cũng có những sai số nhất định.

Để thực hiện được các thí nghiệm, đề tài nghiên

Ngày nhận bài: 22/9/2022

Ngày thông qua phản biện: 25/10/2022

Ngày duyệt đăng: 02/12/2022

cứ sử dụng các loại vật liệu để thiết kế các mác bê tông từ M30 ÷ M60 (MPa). Để đảm bảo bê tông thiết kế có cường độ và tính bền cao, đặc biệt là bê tông thiết kế có tính chống thấm và chống xâm thực tốt, trong đề tài đã thay thế một phần xi măng Poocăng bằng phụ gia khoáng hoạt tính tro trấu, kết hợp lượng dùng phụ gia siêu dẻo hợp lý, đảm bảo yêu cầu của bê tông thi công cho các công trình Thủy lợi.

2. VẬT LIỆU SỬ DỤNG TRONG NGHIÊN CỨU

2.1. Xi măng: Đề tài sử dụng xi măng PC40 để thiết kế bê tông, kết quả thí nghiệm một số tính chất của xi măng như: Khối lượng riêng đạt 3.16 g/cm^3 , lượng nước tiêu chuẩn là 29.5%; thời gian bắt đầu đông kết là 121 phút, thời gian kết thúc đông kết là 318 phút và giới hạn bền nén tuổi

28 ngày đạt 48.8 N/mm^2 . Xi măng PC40 đạt yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 2682:2009.

2.2. Phụ gia khoáng hoạt tính: Tro trấu được thay thế một phần xi măng trong thành phần của các mác bê tông thiết kế, kết quả thí nghiệm một số tính chất của tro trấu như sau: Khối lượng riêng đạt 2.26 g/cm^3 ; khối lượng thể tích xốp: 0.51 g/cm^3 ; kính thước hạt trung bình là $8.05 \mu\text{m}$ và chỉ số hoạt tính với xi măng là 118%. Tro trấu có các chỉ tiêu kỹ thuật thỏa mãn TCVN 8827:2011.

2.3. Cốt liệu nhỏ (Cát): Cát trong thí nghiệm sử dụng cát tự nhiên, lấy từ công trình và đưa về phòng thí nghiệm, cát sử dụng có thành phần hạt và các chỉ tiêu cơ lý phù hợp TCVN 7570:2006. Kết quả thí nghiệm tính chất của cát được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1: Tính chất của cát

STT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm
1	Khối lượng riêng	g/cm^3	2.68
2	Khối lượng thể tích xốp	g/cm^3	1.67
3	Độ rỗng	%	37.7
4	Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	0.85
5	Mô đun độ lớn	-	2.67
6	Tạp chất hữu cơ	-	Đạt
7	Thành phần hạt	-	Đạt

2.4. Cốt liệu lớn (Đá dăm): Đá dăm Granit dùng thi công công trình thực tế có cỡ hạt (5-20)mm, một số tính chất của đá dăm được trình

bày ở bảng 2. Đá dăm có các tính chất cơ lý và thành phần hạt đạt tiêu chuẩn dùng cho bê tông theo TCVN 7570:2006.

Bảng 2: Tính chất của đá dăm

STT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả thí nghiệm
1	Khối lượng riêng	g/cm^3	2.73
2	Khối lượng thể tích xốp	g/cm^3	1.69
3	Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	0.08
4	Hàm lượng thoi dẹt	%	3.5
5	Độ hút nước	%	0.48
6	Thành phần hạt	-	Đạt

2.5. Nước: Nước sử dụng để trộn và bảo dưỡng bê tông là nước sinh hoạt phù hợp tiêu chuẩn TCVN 4506: 2012.

2.6. Phụ gia hoá học: Đề tài sử dụng phụ gia khoáng siêu mịn là tro trấu để thay thế một phần xi măng trong thiết kế các mác bê tông, vì vậy sử dụng phụ gia siêu dẻo giảm nước bậc cao gốc Polycarboxylate (PC) với lượng dùng hợp lý để duy trì độ sụt của các hỗn hợp bê tông, thông qua thí nghiệm để xác định tỷ lệ pha trộn hợp lý, đảm bảo tính công tác yêu cầu của hỗn hợp bê tông và cường độ bê tông thiết kế.

3. THIẾT KẾ BÊ TÔNG VÀ KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

3.1. Thiết kế thành phần bê tông

Sử dụng các loại vật liệu đã thí nghiệm ở trên để thiết kế thành phần bê tông mác: M30, M40, M50, M60 (MPa). Để tăng tính bền cho bê tông sử dụng trong các công trình Thủy lợi, trong thiết kế đã sử dụng 15% phụ gia khoáng hoạt tính tro trấu (RHA) thay thế xi măng Pooc-lăng, kết hợp với lượng dùng phụ gia siêu dẻo hợp lý. Thành phần các loại vật liệu cho 1m³ bê tông thiết kế như trong bảng 3.

Bảng 3: Thành phần vật liệu cho 1m³ bê tông thiết kế

Mác BT	XM (kg)	RHA (kg)	Cát (kg)	Đá (kg)	Nước (lít)	PGSD (lít)
M30	327.3	57.8	790	1055	188	4.81
M40	382.5	67.5	800	1003	182	5.63
M50	416.5	73.5	820	965	176	7.35
M60	442.0	78.0	865	930	161	7.80

Phối trộn vật liệu đúng tiêu chuẩn và thí nghiệm tính công tác của các hỗn hợp bê tông (độ sụt, Sn). Sau đó, đúc các tổ mẫu thí nghiệm tiêu chuẩn, bảo dưỡng trong điều kiện môi trường tiêu chuẩn, thí nghiệm xác định cường độ nén của tất cả các mác bê tông thiết kế theo 2 phương pháp: phá hủy và không phá hủy. Tiếp theo đúc các mẫu thí nghiệm kiểm tra mác chống thấm và mô đun đàn hồi của các mác bê tông thiết kế theo các TCVN.

3.2. Kết quả thí nghiệm độ sụt của các HGBT

Trộn các hỗn hợp bê tông với thành phần các loại vật liệu như trong bảng 3, thí nghiệm xác định độ sụt của các hỗn hợp bê tông (HGBT) theo tiêu chuẩn TCVN 3106:2007. Kết quả thí nghiệm như trong bảng 4.

Bảng 4: Kết quả thí nghiệm độ sụt

của các HGBT

STT	Mác BT	Độ sụt, Sn (cm)
1	M30	14.5
2	M40	13.5
3	M50	12.0
4	M60	10.5

Nhận xét: Từ kết quả thí nghiệm độ sụt của các HGBT ở bảng 4 nhận thấy tất cả các mác bê tông đảm bảo tính công tác yêu cầu thi công đối với các công trình Thủy lợi theo TCVN 8218:2009 và TCVN 9139:2012. Trong quá trình làm thí nghiệm, quan sát HGBT sau khi trộn nhận thấy được độ đồng nhất của các hỗn hợp bê tông tươi rất tốt, không có hiện tượng phân tầng và không xuất hiện tách nước tại mép rìa ngoài của HGBT sau khi trộn, cũng như sau khi làm thí nghiệm kiểm tra độ sụt và đúc các mẫu thí nghiệm khác. Việc sử dụng phụ gia siêu dẻo giảm nước bậc cao gốc Polycarboxylate trong bê tông có pha phụ gia khoáng tro trấu (RHA) là rất cần thiết để duy trì độ sụt của

HHBT trong quá trình thí nghiệm và thi công.

3.3. Kết quả thí nghiệm mác chống thấm của bê tông

Thí nghiệm mác chống thấm W (atm) của các mác bê tông thiết kế theo TCVN 3116:2007. Kết quả thí nghiệm như trong bảng 5.

Bảng 5: Kết quả thí nghiệm mác chống thấm của các cấp phối bê tông

STT	Mác BT	Mác chống thấm, W (atm)
1	M30	W10
2	M40	W14
3	M50	W16
4	M60	W16

Nhận xét: Từ kết quả thí nghiệm cường ở bảng 5 nhận thấy: tất cả các mác bê tông thiết kế có mác chống thấm cao hơn bê tông thông thường không sử dụng phụ gia khoáng siêu mịn. Tuy nhiên với bê tông mác cao hơn (M40 ÷ M60) thì sự có mặt của PGK siêu mịn tro trấu sẽ tăng mác chống thấm lên được 2 đến 3 cấp (mỗi cấp tương ứng

Bảng 6: Kết quả R_n của bê tông (phương pháp đo xung siêu âm)

Mác BT	V, m/s	R ₃ , MPa	V, m/s	R ₇ , MPa	V, m/s	R ₂₈ , MPa
M30	3939	18.7	4236	29.4	4565	39.7
M40	4089	24.3	4494	38.5	4931	52.8
M50	4273	30.7	4644	43.2	5253	63.7
M60	4365	34.9	4760	48.5	5575	74.2

Từ các kết quả vận tốc xung siêu âm (V) và giá trị cường độ nén (R_n) xác định được như trong bảng 5, dự đoán mối quan hệ giữa R_n và V, kết quả dự đoán được thể hiện ở công thức (CT1). Đường cong biểu diễn quan hệ đó được thể hiện ở hình 1 dưới đây.

$$R_n = 0.0338 * V - 113.55;$$

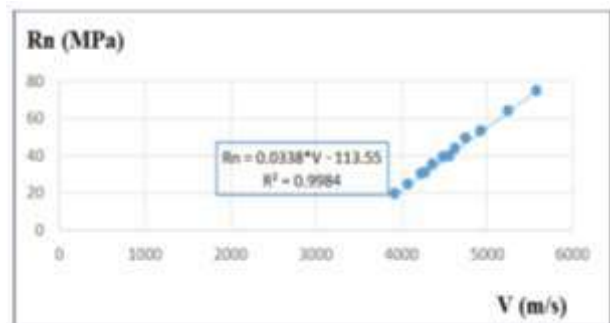
$$R^2 = 0.9984 \quad (CT1)$$

Trong đó: R_n: Cường độ nén (MPa); V: Vận tốc xung siêu âm (m/s); R²: Hệ số độ tin cậy.

2at) so với các mẫu bê tông thông thường. Loại bê tông này có thể sử dụng cho tất cả các công trình Thủy lợi và công trình biển có yêu cầu cao về cường độ chịu lực và yêu cầu chống thấm, mác chống thấm đạt tới W14 ÷ W16.

3.4. Kết quả thí nghiệm cường độ nén của bê tông bằng phương pháp đo xung siêu âm

Để kiểm tra cường độ nén (R_n) của các mác bê tông thiết kế theo phương pháp đo xung siêu âm, tiến hành đúc các tổ mẫu có kích thước (15x15x15)cm theo TCVN 3105:1993. Các mẫu bê tông được bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn đến ngày tuổi thí nghiệm. Tiến hành đo xung siêu âm truyền xuyên qua mẫu để xác định cường độ nén của các mẫu bê tông thiết kế ở 3, 7 và 28 ngày tuổi; dựa vào các bảng tra quan hệ giữa R_n và V trong TCVN 9357:2012, bằng phương pháp nội suy tuyến tính các đường biểu diễn trong tiêu chuẩn, xác định được cường độ nén tương ứng của bê tông các mẫu thiết kế. Kết quả xác định cường độ nén của bê tông theo phương pháp xung siêu âm như trong bảng 6.



Hình 1: Quan hệ giữa cường độ nén của bê tông và vận tốc xung siêu âm

3.5. Kết quả thí nghiệm cường độ nén của bê tông bằng phương pháp nén mẫu trực tiếp

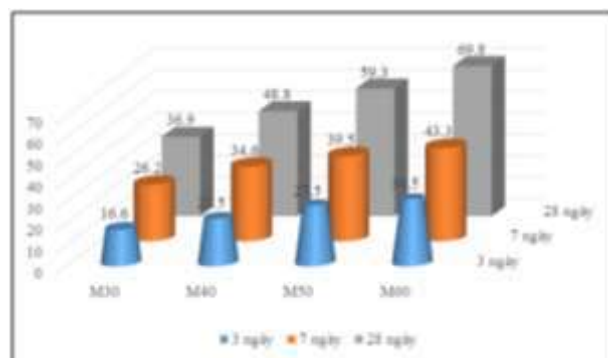
Để kiểm tra cường độ nén của các mác bê tông theo phương pháp phá hủy mẫu, tiến hành nén trực tiếp các mẫu thí nghiệm tiêu chuẩn có kích thước (15x15x15)cm đã được kiểm tra cường độ nén bằng phương pháp đo xung siêu âm tương ứng ở mục trên. Thí nghiệm nén mẫu kiểm tra cường độ nén của các mác bê tông thiết kế ở 3, 7 và 28 ngày tuổi, kết quả như trong bảng 7 và đồ thị hình 2.

Bảng 7: Kết quả thí nghiệm Rn của bê tông (phương pháp nén mẫu)

Mác BT	Cường độ nén, MPa		
	3 ngày	7 ngày	28 ngày
M30	16.6	26.2	36.9
M40	21.5	34.6	48.8
M50	27.5	39.5	59.3
M60	30.5	43.3	69.8

Nhận xét: Từ kết quả thí nghiệm cường độ ở bảng 7 nhận thấy: tất cả các mác bê tông thiết kế có cường độ nén vượt mác thiết kế ở tuổi 28 ngày, bê tông chế tạo phù hợp với một số mác bê tông thi công cho các công trình Thủy lợi. Bê tông thiết kế có pha phụ gia khoáng siêu mịn tro trấu (RHA) thì sự phát triển cường độ của bê tông ở tuổi ngắn ngày tăng nhanh, cụ thể: ở 3 ngày tuổi cường độ

nén đạt từ 50.8% đến 55.3% so với mác thiết kế ở tuổi 28 ngày và ở 7 ngày tuổi cường độ nén đạt từ 72,2% đến 87.3% mác thiết kế ở tuổi 28 ngày. Điều này được giải thích như sau: vì trong thành phần bê tông có phụ gia khoáng siêu mịn thì các thành phần hoạt tính của PGK sẽ phản ứng triệt để với các sản phẩm thủy phân thủy hóa của xi măng Pooc-lăng, làm tăng độ đặc và tăng cường độ của đá xi măng, dẫn đến tăng cường độ của bê tông.



Hình 2: Biểu đồ cường độ nén của các mác bê tông thiết kế (phương pháp nén mẫu)

So sánh kết quả cường độ nén của các mác bê tông thiết kế theo 2 phương pháp: Nén mẫu (PP1) và xung siêu âm (PP2) cho như trong bảng 8 dưới đây.

Bảng 8: So sánh kết quả Rn của 2 phương pháp thí nghiệm

Mác BT	3 ngày			7 ngày			28 ngày		
	PP1	PP2	Sai số (%)	PP1	PP2	Sai số (%)	PP1	PP2	Sai số (%)
M30	16.6	18.7	12.65	26.2	29.4	12.21	36.9	39.7	7.59
M40	21.5	24.3	13.02	34.6	38.5	11.27	48.8	52.8	8.20
M50	27.5	30.7	11.64	39.5	43.2	9.37	59.3	63.7	7.42
M60	30.5	34.9	14.43	43.3	48.5	12.01	69.8	74.2	6.30

Từ kết quả ở bảng 8 nhận thấy sự sai khác giữa 2 phương pháp xác định cường độ nén của bê tông: Độ chênh lệch của phương pháp xung siêu âm cho giá trị cường độ nén cao hơn phương pháp nén mẫu trực tiếp từ 11.64% đến 14.43% ở 3 ngày tuổi, tương ứng từ 9.37% đến 12.21% ở 7 ngày tuổi và từ 6.3% đến 8.2% ở 28 ngày

tuổi. Như vậy ở những ngày tuổi dài ngày (từ 28 ngày tuổi trở đi) thì sai số của 2 phương pháp thí nghiệm càng giảm. Điều này sẽ phù hợp hơn với thời gian kéo dài cho việc kiểm định chất lượng bê tông bằng phương pháp xung siêu âm sau khi hoàn thiện thi công bê tông và đưa công trình vào khai thác.

3.6. Kết quả thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi của bê tông

Để thí nghiệm mô đun đàn hồi, đúc các tổ mẫu có kích thước (10x10x30)cm, mẫu đúc thí nghiệm được chế tạo và bảo dưỡng theo TCVN 3105:1993. Bảo dưỡng mẫu trong điều kiện môi trường tiêu chuẩn sau 7 và 28 ngày tuổi, kiểm tra mô đun đàn hồi của tất cả các tổ mẫu. Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi của các mẫu bê tông thiết kế như trong bảng 9.

Bảng 9: Kết quả thí nghiệm mô đun đàn hồi của các mác bê tông thiết kế

STT	Mác bê tông	Mô đun đàn hồi, E_c (GPa)	
		7 ngày	28 ngày
1	M30	24.77	33.90
2	M40	32.85	39.64
3	M50	37.10	42.19
4	M60	39.58	44.62

Nhận xét: Từ kết quả thí nghiệm trong bảng 9, thì mô đun đàn hồi của bê tông tăng khi cường độ nén bê tông tăng và ngày tuổi của mẫu thí nghiệm tăng. Để xác định chính xác mô đun đàn hồi của các mác bê tông khác nhau, cần thiết phải thí nghiệm kiểm tra song song giữa cường độ nén và mô đun đàn hồi tương ứng của nhiều tổ mẫu khác nhau ở nhiều ngày tuổi khác nhau, thông qua các kết quả thí nghiệm đó có thể dự đoán chính xác công thức tính mô đun đàn hồi từ cường độ nén của bê tông.

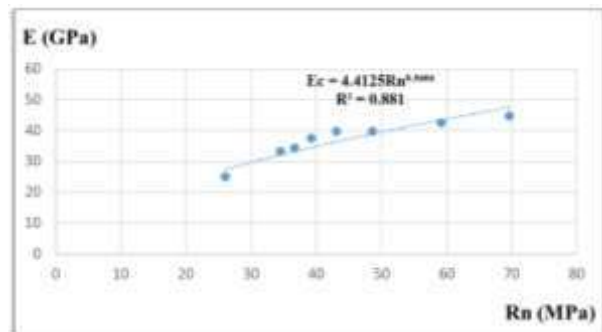
3.7. Kết quả dự đoán mô đun đàn hồi của bê tông theo cường độ nén

Hiện nay, dự đoán đặc tính cơ học của bê tông dựa vào một số tính chất của nó rất được quan tâm. Trong một vài nghiên cứu gần đây, các công thức thực nghiệm dự đoán mô đun đàn hồi của bê tông dựa trên một số đặc điểm của hỗn hợp bê tông đã biết như: loại cốt liệu, tỷ lệ nước/chất kết dính, loại và hàm lượng chất kết dính, hàm lượng và loại phụ gia khoáng Để dự đoán mô đun đàn hồi của bê tông (E_c) dựa vào

cường độ nén của bê tông (R_n) và nghiên cứu ảnh hưởng của phụ gia khoáng siêu mịn tro trấu đến mô đun đàn hồi, thì các mẫu thí nghiệm được đúc theo tiêu chuẩn, bảo dưỡng và thí nghiệm song song xác định mô đun đàn hồi và cường độ nén sau 7 và 28 ngày tuổi. Từ các kết quả thí nghiệm ở bảng 7 và bảng 9, xác định mối quan hệ giữa mô đun đàn hồi và cường độ nén của bê tông, kết quả dự đoán được thể hiện ở công thức (CT2). Đường cong biểu diễn quan hệ đó được thể hiện ở hình 3 dưới đây.

$$E_c = 4.4125 R_n^{0.5606}, \quad R^2 = 0.881 \quad (CT2)$$

Trong đó: E_c : Mô đun đàn hồi (GPa); R_n : Cường độ nén (MPa); R^2 : Hệ số độ tin cậy.



Hình 3: Biểu đồ quan hệ giữa cường độ nén (R_n) và Mô đun đàn hồi (E_c)

4. KẾT LUẬN

Đề tài sử dụng phụ gia khoáng hoạt tính tro trấu, kết hợp các loại vật liệu như xi măng, cát, đá, phụ gia siêu dẻo... để thiết kế thành phần bê tông mác từ M30 đến M60. Với các loại vật liệu đã được sử dụng trong nghiên cứu đều thỏa mãn các tiêu chuẩn hiện hành, đảm bảo bê tông thiết kế có tính công tác và cường độ nén phù hợp thi công các công trình Thủy lợi theo TCVN 8218:2009 và TCVN 9139:2012.

Kiểm tra cường độ của các mác bê tông thiết kế theo 2 phương pháp: phương pháp phá hủy (*nén mẫu*) và phương pháp không phá hủy (*đo xung siêu âm*), kết quả sai số của 2 phương pháp nằm trong phạm vi cho phép. Kết quả cho thấy ở những ngày tuổi dài ngày thì sai số của 2 phương pháp thí nghiệm càng giảm, như vậy rất

phù hợp cho thời gian kiểm định chất lượng bê tông bằng phương pháp xung siêu âm sau khi hoàn thiện thi công bê tông.

Do các thí nghiệm trực tiếp cường độ nén và mô đun đàn hồi đều thực hiện trên các mẫu tiêu chuẩn, nên các kết quả thu được sẽ có những sai số nhất định. Vì vậy cần thiết phải tăng số lượng tổ mẫu thí nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật trên, bên cạnh đó cần có các số liệu thí nghiệm bê tông hiện trường để so sánh đánh giá một cách chính xác nhất về công thức dự đoán.

Để dự đoán mô đun đàn hồi của bê tông sử dụng PGK hoạt tính và thiết lập mối quan hệ giữa E_c và R_n , cần phải thí nghiệm xác định hai chỉ tiêu kỹ thuật này của các mác bê tông ở các ngày tuổi khác nhau. Khi dự đoán được mô đun đàn hồi thông qua cường độ nén của bê tông sẽ giảm thiểu được các chi phí thí nghiệm trực tiếp mô đun đàn hồi của bê tông và góp phần đánh giá chất lượng bê tông công trình sau khi hoàn thiện một cách chính xác, thuận lợi, sớm đưa công trình vào khai thác sử dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Aitcin, P. C. & Mehta, P. K. (1990), "Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high strength concrete". ACI Materials Journal, 87(2), P103-107.
- [2] ASTM C469-02, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".
- [3] Giaacio, G., Rocco, C., Violini, D., Zappitelli, J. & Zerbino, R. (1992). "High strength concrete incorporating different coarse aggregate". ACI Materials Journal, 89(3), P242-246.
- [4] Khayat, K. H., Bickley, J. A. & Hooton, R. D. (1995). "High strength concrete properties derived from compressive strength values". Cement, Concrete, and Aggregate. CCAGDP, 17(2), P126-133.
- [5] TCVN 3015:1993, "Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử".
- [6] TCVN 5276:1993, "Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ lãg trụ và mô đun đàn hồi khi nén tĩnh".
- [7] TCVN 5574:2018, "Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép".
- [8] TCVN 8218:2009, "Bê tông Thủy công - Yêu cầu kỹ thuật".
- [9] TCVN 8827:2011, "Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa - Silica fume và tro trấu nghiền mịn".
- [10] TCVN 9139:2012, "Công trình thủy lợi - Kết cấu bê tông, bê tông cốt thép vùng ven biển - Yêu cầu kỹ thuật".
- [11] TCVN 9335:2012, "Bê tông nặng - Phương pháp thử không phá hủy - Xác định cường độ nén sử dụng kết hợp máy đo siêu âm và súng bật nảy".
- [12] TCVN 9357:2012, "Bê tông nặng - Phương pháp thử không phá hủy - Đánh giá chất lượng bê tông bằng xung siêu âm".