

Nghiên cứu thiết kế cấp phối bê tông san hô

Design of coral concrete mixtures

> TS LÊ HẢI DƯƠNG, THS TRẦN VĂN CƯƠNG, PGS.TS NGUYỄN TRÍ TÁ, THS ĐÌNH QUANG TRUNG, TS NGUYỄN XUÂN BÀNG

Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn; Email: haiduongle9282@gmail.com; nxb@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu, thiết kế cấp phối bê tông san hô cấp độ bền B15, B20, B22.5 (sử dụng cốt liệu cát, đá san hô và nước mặn). Kết quả cho thấy, việc sử dụng vật liệu san hô, nước biển thay thế cho vật liệu truyền thống là khả thi. So với định mức xây dựng, khi xét từng cấp phối bê tông có cấp độ bền tương đương, các cấp phối thiết kế có lượng dùng xi măng cao hơn từ 17,4% đến 22,3% để bù đắp khả năng chịu lực giảm yếu do cốt liệu san hô kém hơn so với cốt liệu đá dăm thông thường.

Từ khóa: Cốt liệu bê tông; bê tông san hô; cát đá san hô; nước biển.

ABSTRACT

This paper presents the results of research and design of coral concrete mixes with durability levels B15, B20, and B22.5 (using coral sand, coral stone, and seawater). The results show that using coral and seawater materials to replace sand, crushed stone, and water is feasible. Compared to construction norms, when considering each concrete mix with an equivalent durability level, the design mixes have a higher amount of cement from 17.4% to 22.3% to compensate for the bearing capacity. Weak reduction due to coral aggregate being inferior to normal crushed stone aggregate.

Keywords: Coral aggregates; coral concrete; coral sand stone; seawater.

1. MỞ ĐẦU

Cho đến nay, khi xây dựng các công trình trong môi trường biển, các loại vật liệu được sử dụng chủ yếu là vật liệu kim loại, bê tông, bê tông cốt thép, gần đây có thêm các loại vật liệu mới như composit, FRP,... Trong đó, các loại vật liệu kim loại có nhược điểm là dễ bị ăn mòn, chi phí xây dựng lớn. Các loại bê tông và bê tông cốt thép trong môi trường biển cũng nhanh bị xuống cấp, cốt thép bên trong bê tông bị ăn mòn và sản phẩm phản ứng ăn mòn trương nở làm tăng thể tích bên trong, dẫn tới phá hoại kết cấu bê tông. Các loại bê tông chịu mặn, bê tông cường độ siêu cao, bê tông geopolimer chống sự xâm thực của nước biển đang được nghiên cứu ứng dụng trong xây dựng công trình biển. Vật liệu composit, chất dẻo cốt sợi FRP có đặc tính bền vững trong môi trường chứa muối, axit và các chất ăn mòn khác. Chúng có khả

năng chịu lực cao, dễ tạo hình, đã được nghiên cứu ứng dụng vào xây dựng công trình, phương tiện hoạt động trong môi trường biển cách đây khoảng 20 năm, nhưng chủ yếu dùng làm kết cấu dạng tấm như bể chứa, vỏ cano, vỏ tàu, hoặc dạng thanh để thay thế cốt thép trong bê tông. Sau nhiều năm nghiên cứu, ứng dụng vào việc cải tạo, sửa chữa, nâng cấp, xây mới công trình và sản xuất phương tiện kỹ thuật, các nội dung lý thuyết về tính toán thiết kế dần được hoàn thiện, theo đó tiêu chuẩn về tính toán thiết kế, tiêu chuẩn về vật liệu mới cũng được hình thành, như bộ tiêu chuẩn ACI, ASTM D3039, ASTM D5229, ASTM D7136, ...

Các công trình nghiên cứu và ứng dụng của bê tông san hô được khởi xướng từ Hoa Kỳ. Trong Thế chiến II, quân đội Hoa Kỳ bắt đầu sử dụng bê tông san hô để vận chuyển và xây dựng công trình trên một số hòn đảo ở phía tây Thái Bình Dương và một số trong số đó vẫn đang hoạt động cho đến ngày nay [0]. Kể từ đó, những ưu điểm của việc sử dụng cốt liệu san hô trong kỹ thuật đại dương thu hút sự chú ý của các nhà nghiên cứu khác nhau. Năm 1951, Dempsey chỉ ra rằng việc sử dụng nước biển và cốt liệu san hô trong bê tông là khả thi [0], trong khi đó, cần phải phát triển một tỷ lệ hỗn hợp thích hợp dựa trên sự phân cấp của cốt liệu san hô. Narver (1964) nhận thấy rằng, so với bê tông thông thường có cùng thiết kế cấp phối, bê tông san hô có cường độ sớm cao hơn nhưng cường độ muộn lại thấp hơn một chút [0]. Ehlert (1991) đã tiến hành khảo sát chất lượng bê tông san hô trên đảo san hô Bikini ở Thái Bình Dương và kết luận rằng bê tông san hô có chất lượng cao vẫn có thể duy trì độ bền sau 11-16 năm sử dụng [0]. Nghiên cứu của Arumugam và Ramamurthy (1996) đã chứng minh rằng bê tông san hô thuộc loại bê tông cốt liệu nhẹ và mối tương quan giữa tỷ lệ xi măng-nước và cường độ của bê tông san hô phù hợp với bê tông thông thường [0]. Các nghiên cứu trên cho thấy bê tông san hô có cường độ thấp hơn không đáng kể hoặc tương đương với bê tông thông thường. Bên cạnh đó, việc sử dụng cốt liệu san hô đã được báo cáo là có thể ảnh hưởng đến cường độ ở tuổi muộn của bê tông. Howdyshell (1974) đã kiểm tra cường độ lâu dài của các tòa nhà được xây dựng bằng bê tông san hô trên một số đảo và rạn san hô. Kết quả cho thấy ion clorua từ cốt liệu san hô đưa vào có thể dễ dàng ăn mòn thanh thép, vì vậy cần tăng độ dày lớp bê tông bao phủ cốt thép [0]. Bullen (1990) đề xuất rằng tro bay và chất siêu dẻo được thêm vào có thể làm giảm độ sâu thâm nhập của ion clorua trong bê tông san hô [0]. Wattanachai và cộng sự (2009) báo cáo rằng hệ số khuếch tán của ion clorua đối với bê tông san hô cao hơn so với bê tông thông thường với cùng tỷ lệ xi măng - nước [0].

Việc nghiên cứu và ứng dụng bê tông san hô ở Trung Quốc hiện đang được thực hiện mạnh mẽ và có bước phát triển nhanh chóng. Liang và Lu (1993) bắt đầu khám phá việc sử dụng cốt liệu san hô trong bê tông từ năm 1986 và thấy rằng cường độ của bê tông san hô có thể đạt tới hơn 20 MPa [0]. Nhóm tác giả Bing Liu, Jingkai Zhou, Xiaoyan Wen, Jianhua Guo, Xuanyu Zhang, Zhiheng Deng, và Huailiang Wang (2019) đã công bố kết quả nghiên cứu về khả năng chống va đập của bê tông san hô cốt sợi carbon. Kết quả thu được bê tông có cấp độ bền C20, C30 và C40 (tương đương

cấp độ bền B15, B22,5 và B30 theo TCVN 5574:2018) [0]. Năm 2020, nhóm tác giả Luoxin Wang, Junshuai Mei, Jing Wu, Xingyang He, Hainan Li và Qingjun Ding đã công bố kết quả nghiên cứu về đặc tính của vữa san hô. Trong đó, chất kết dính là xi măng pooc-lăng thông thường, cát san hô được nghiền nhỏ từ cành san hô, thành phần phụ là tro bay của nhà máy nhiệt điện, phụ gia siêu dẻo polycarboxylate loại SDS - (natri dodecyl sulfat) hóa lỏng. Kết quả đạt được. Độ bền cơ học của vữa san hô thấp hơn so với vữa tiêu chuẩn, các đặc tính cơ học của vữa san hô có thể được cải thiện bằng các phụ gia khoáng, giúp cải thiện cấu trúc vi mô và vùng chuyển tiếp bề mặt, cường độ nén của vữa san hô biến tính bằng phụ gia khoáng ở 28 ngày cao hơn 2,08% so với vữa tiêu chuẩn [0].

Trong những năm gần đây, Việt Nam cũng đã tiến hành một số công trình nghiên cứu về bê tông san hô. Cố GS.TS Vũ Đình Lợi (Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn) và các cộng sự nghiên cứu ứng dụng vật liệu mới, trong đó có mẫu bê tông nước mặn (bê tông cát san hô, cốt liệu lớn gồm khoảng 30 % đá san hô + 70% đá dăm, nước biển (hoặc nước ngọt)), phụ gia SikamenNN, Silicafume, cường độ nén đạt đến 47,2 MPa, cường độ bê tông phát triển tăng theo thời gian (kết quả đến 28 ngày + 2 năm), bước đầu đánh giá có thể sử dụng nước biển, cát san hô, đá san hô thay thế cho nước ngọt, cát thông thường và một phần đá dăm [0, 20]. Năm 2013, Công ty Thạch Anh đã công bố vật liệu bê tông từ nước biển và cát san hô, có sử dụng phụ gia, là dạng mẫu gạch bê tông tự chèn, không phải phải mẫu bê tông tiêu chuẩn theo quy phạm, chưa đề cập đến tuổi thọ, khả năng chống ăn mòn của bê tông, mẫu thử chưa đủ điều kiện để khẳng định chất lượng sản phẩm.

Sử dụng san hô nói chung và sử dụng san hô ở vùng biển xa bờ nói riêng làm vật liệu xây dựng đã được đặt vấn đề từ lâu, và càng là vấn đề cấp thiết khi yêu cầu nâng cấp và xây mới công trình trên các đảo xa bờ là nhiệm vụ cấp thiết trong tình hình hiện nay. Tuy nhiên, hầu hết các kết quả nghiên cứu liên quan mới chỉ dừng lại ở việc sử dụng cát san hô hoặc san hô như là một loại cốt liệu nhỏ trong thành phần cấp phối bê tông. Cốt liệu thô và là thành phần chính quyết định cường độ bê tông vẫn là đá dăm - loại cốt liệu truyền thống của bê tông - dẫn đến chưa đem lại hiệu quả cao về khai thác, thiết kế, thi công xây dựng công trình. Tác giả đã nghiên cứu việc sử dụng vật liệu san hô, nước biển thay thế cho vật liệu truyền thống là hoàn toàn khả thi và có cơ sở khoa học [31].

2. CƠ SỞ KHOA HỌC CỦA VIỆC THIẾT KẾ CẤP PHỐI CHO BÊ TÔNG SAN HÔ

Thiết kế thành phần bê tông là yêu cầu bắt buộc trong thi công bê tông đối với các loại kết cấu bê tông và bê tông cốt thép (TCVN 4453:1995 - Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép toàn khối - Quy phạm thi công và nghiệm thu) nhằm đảm bảo chất lượng của bê tông. Tuy nhiên, tùy theo tầm quan trọng của từng loại công trình hoặc từng bộ phận công trình, trên cơ sở quy định cấp độ bền của bê tông thiết kế mà thành phần bê tông được chọn như sau:

- Đối với bê tông mác 100 (cấp độ bền B7,5) có thể sử dụng bảng tính sẵn theo phụ lục C trong TCVN 4453: 1995.

- Đối với bê tông mác 150 (cấp độ bền B12,5) trở lên thì thành phần vật liệu trong bê tông phải được thiết kế cấp phối theo tỷ lệ cốt liệu thực tế và thông qua phòng thí nghiệm (tính toán và đúc mẫu thí nghiệm).

Công tác thiết kế thành phần bê tông do các cơ sở sản xuất vật liệu bê tông thí nghiệm có tư cách pháp nhân thực hiện. Khi thiết kế thành phần bê tông phải đảm bảo các nguyên tắc:

- Sử dụng đúng các chủng loại vật liệu theo thiết kế sẽ dùng để thi công.

- Độ sụt hoặc độ cứng của hỗn hợp bê tông xác định tùy thuộc tính chất của công trình, đặc điểm cấu kiện, hàm lượng cốt thép, phương pháp vận chuyển, điều kiện thời tiết. Khi chọn độ sụt của hỗn hợp bê tông để thiết kế cần tính tới sự tổn thất độ sụt, trong thời gian lưu giữ và vận chuyển.

Việc hiệu chỉnh thành phần bê tông tại hiện trường được tiến hành theo nguyên tắc không làm thay đổi tỉ lệ nước/xi măng (N/X) của thành phần bê tông đã thiết kế, trong các trường hợp sau:

- Khi cốt liệu ẩm cần giảm bớt lượng nước trộn, giữ nguyên độ sụt yêu cầu.

- Khi cần tăng độ sụt hỗn hợp bê tông cho phù hợp với điều kiện thi công thì có thể đồng thời thêm nước và xi măng để giữ nguyên tỉ lệ N/X.

- Khi cần tăng hoặc giảm thời gian đạt cường độ của bê tông cần sử dụng các loại phụ gia phù hợp, trên cơ sở đã thực hiện các thử nghiệm trước đó

Hiện nay, san hô mới được nghiên cứu để đưa một phần vào trong thành phần cốt liệu của bê tông như là một thành phần thứ yếu. Chính vì vậy, để có thể có được sản phẩm bê tông với cốt liệu hoàn toàn bằng san hô, sử dụng nước biển và xi măng pooc-lăng (hoặc pooc-lăng hỗn hợp) thông thường thì trước tiên rất cần phải nghiên cứu thiết kế cấp phối các thành phần của bê tông. Việc nghiên cứu thiết kế được tiến hành trên cơ sở các lý thuyết thiết kế thành phần bê tông đã được công nhận rộng rãi, kết hợp tham khảo thành phần cấp phối của bê tông nặng thông thường có cấp độ bền tương đương, đồng thời tiến hành phân tích hiệu chỉnh thành phần bê tông dựa trên sự khác nhau về chỉ tiêu cơ lý của các vật liệu thành phần (cốt liệu, nước biển) tương ứng. Mỗi lần nghiên cứu điều chỉnh thành phần đều được sản xuất mẫu thử và thí nghiệm trong điều kiện tiêu chuẩn. Thành phần cấp phối được chấp nhận khi kết quả nghiên cứu cho mẫu thử có kết quả thí nghiệm đạt yêu cầu đặt ra về độ bền theo cấp độ bền của bê tông.

Theo đó, việc thiết kế cấp phối bê tông phải được thực hiện dựa trên các nguyên tắc khoa học và dữ liệu thực nghiệm được thu thập thông qua các công trình nghiên cứu khoa học và các thử nghiệm rộng rãi, cũng như từ các dự án công trình đã xây dựng.

Cơ sở khoa học của việc thiết kế cấp phối bê tông liên quan đến việc xem xét các đặc tính và sự tương tác giữa các loại vật liệu thành phần khác nhau trong bê tông để đạt được tính năng và độ bền tổng thể của bê tông theo yêu cầu sử dụng. Đối với bê tông thông thường, cơ sở khoa học thiết kế cấp phối cũng như mối quan hệ và tương tác giữa các vật liệu thành phần truyền thống (xi măng, cát sông, đá dăm, nước ngọt, phụ gia) đã được làm rõ, phổ biến và được thừa nhận rộng rãi.

Vì vậy, khi xem xét cơ sở khoa học của việc thiết kế cấp phối cho bê tông san hô, vấn đề cơ bản cần xem xét chính là cơ sở khoa học của việc sử dụng cốt liệu san hô và sử dụng nước biển trong chế tạo bê tông xi măng. Từ đó tìm ra những điểm mới và khác biệt trong thiết kế thành phần bê tông sử dụng san hô làm cốt liệu. Đây là điểm mấu chốt cần được nghiên cứu, làm rõ để hình thành cơ sở lý luận phục vụ cho việc áp dụng vào thực tiễn.

3. NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ CẤP PHỐI BÊ TÔNG SAN HÔ CẤP ĐỘ BỀN B15

Tác giả lựa chọn áp dụng phương pháp Bolomey-Skrantsev để thiết kế cấp phối bê tông. Nội dung của phương pháp dựa trên cơ sở lý thuyết "thể tích tuyệt đối" có nghĩa là hỗn hợp bê tông sau khi trộn đều và lèn chặt là một thể tích đặc tuyệt đối. Theo đó, tổng thể tích của các vật liệu thành phần trong hỗn hợp bê tông sẽ bằng thể tích của hỗn hợp bê tông, 1 m³ hỗn hợp bê tông bằng 1000 lít.

Trình tự quá trình thiết kế cấp phối được tiến hành qua các bước:

- Thiết kế cấp phối lý thuyết:

+ Tính toán sơ bộ thành phần bê tông: thực hiện các bước tính toán lựa chọn các vật liệu thành phần theo trình tự các bước thiết kế của phương pháp đã lựa chọn áp dụng.

+ Dùng thực nghiệm để kiểm tra, điều chỉnh cấp phối sơ bộ: Chế tạo các mẫu thử và kiểm tra các yêu cầu theo quy định của tiêu chuẩn kỹ thuật dự án. Từ đó điều chỉnh thiết kế sơ bộ (nếu có) hoặc kết thúc bài toán thiết kế cấp phối bê tông.

- Tính toán cấp phối thực tế:

Từ cấp phối lý thuyết và các thông số về độ ẩm cốt liệu thực tế, tiến hành tính toán hiệu chỉnh để thu được cấp phối thực tế cho bê tông.

Trong quá trình thi công, kỹ sư vật liệu tại công trường phải thường xuyên giám sát các điều kiện thực tế về vật liệu thành phần để đảm bảo sự tương thích giữa cấp phối bê tông đã thiết kế với các điều kiện thực tế tại hiện trường; xử lý các vấn đề phát sinh về vật liệu thành phần và phương pháp thi công bê tông khi có các yếu tố sai khác so với thiết kế ban đầu.

Trình tự tiến hành các bước cụ thể để thiết kế cấp phối bê tông được trình bày theo phương pháp Bolomey - Skramtaev [17, 18] như sau:

3.1. Phương trình tính

Từ các giả thuyết về thể tích tuyệt đối của bê tông đã nêu trên, các phương trình tính được áp dụng là các phương trình (1 đến 4):

Gọi khối lượng các vật liệu dùng để sản xuất 1 m³ bê tông là Đ, C, X, N; ta có:

$$\frac{\Delta}{\rho_{\Delta}} + \frac{C}{\rho_C} + \frac{X}{\rho_X} + N = 1000 \quad (1)$$

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{X}{\rho_X} + N = \alpha \cdot r_{\Delta} \cdot \frac{\Delta}{\gamma_{\Delta}} \quad (2)$$

$$R_b = A \cdot R_x \cdot (X/N - 0,5), \text{ khi } R_b \leq 2 \cdot A \cdot R_x \quad (3)$$

$$R_b = A_1 \cdot R_x \cdot (X/N + 0,5), \text{ khi } R_b > 2 \cdot A \cdot R_x \quad (4)$$

Trong đó:

Đ, C, X, N - khối lượng các loại vật liệu đá, cát, xi măng và nước;

γ_{Δ} - khối lượng thể tích xốp của hỗn hợp cốt liệu lớn (đá) (kg/m³);

$\rho_{\Delta}, \rho_C, \rho_X$ - khối lượng riêng của đá, cát và xi măng (kg/m³);

α - hệ số dư vữa (bao bọc bề mặt hạt cốt liệu lớn);

r_{Δ} - độ rỗng của hỗn hợp cốt liệu lớn (đá);

R_b - cường độ chịu nén của bê tông (MPa);

A, A_1 - các hệ số kể đến ảnh hưởng của chất lượng cốt liệu, xác định bằng thực nghiệm [17, 18];

R_x - cường độ xi măng (MPa).

3.2. Tính toán sơ bộ các vật liệu thành phần:

- Tìm tỉ lệ N/X:

Từ các điều kiện cho trước của bài toán thiết kế, biết được R_b ; R_x ; A hoặc A_1 .

Nếu $R_b \leq 2 \cdot A \cdot R_x$ từ phương trình (3) suy ra:

$$N/X = A \cdot R_x / (R_b + 0,5 \cdot A \cdot R_x)$$

Nếu $R_b > 2 \cdot A \cdot R_x$ từ phương trình (4) suy ra:

$$N/X = A_1 \cdot R_x / (R_b - 0,5 \cdot A_1 \cdot R_x)$$

- Xác định lượng nước trộn sơ bộ N:

Căn cứ vào đường kính lớn nhất của cốt liệu lớn, độ sụt yêu cầu, loại và lượng xi măng sử dụng để tra bảng, tìm được lượng nước sơ bộ (N) theo bảng tra [17]. Chú ý rằng, lượng nước trộn sơ bộ (N) được xác định thông qua sự kết hợp giữa tra bảng [17] với sự điều chỉnh cần thiết tùy vào loại cát và cốt liệu lớn (cát, đá san hô) sử dụng.

- Xác định sơ bộ lượng dùng xi măng (X):

Từ tỉ lệ N/X và lượng nước sơ bộ (N) đã có, ta xác định được lượng xi măng sơ bộ (X) cần dùng.

Lượng xi măng tìm được phải thỏa mãn không nhỏ hơn lượng dùng tối thiểu theo tiêu chuẩn quy định. Nếu nhỏ hơn thì cần chọn loại xi măng có mác thấp hơn, hoặc chọn lượng xi măng bằng lượng tối thiểu theo quy định và tính lại lượng nước sơ bộ (N).

- Xác định lượng dùng cốt liệu lớn (Đ) và cốt liệu nhỏ (C):

Từ kết quả N và X đã tính, sử dụng phương trình (3) và (4) để tính lượng dùng cốt liệu:

$$\Delta = 1000 / (1/\rho_{\Delta} + \alpha \cdot r_{\Delta} / \gamma_{\Delta}) \quad (\text{kg})$$

$$C = [1000 - (\Delta/\rho_{\Delta} + X/\rho_X + N)] \cdot \rho_C \quad (\text{kg}).$$

Từ đó, kết luận lượng dùng sơ bộ các vật liệu thành phần: Đ, C, X, N.

3.3. Dùng thực nghiệm để kiểm tra và điều chỉnh cấp phối sơ bộ:

- Tiến hành kiểm tra và điều chỉnh theo độ dẻo (tính công tác) yêu cầu của hỗn hợp bê tông:

+ Trộn mẻ trộn thí nghiệm với lượng dùng vật liệu thành phần là Δ_m ; C_m ; X_m ; N_m .

+ Tiến hành xác định độ sụt thực tế.

Nếu độ sụt thực tế nhỏ hơn độ sụt yêu cầu: tiến hành thêm nước và xi măng nhưng phải đảm bảo tỉ lệ X/N. Ghi lại lượng xi măng và nước đã thêm.

Nếu độ sụt thực tế lớn hơn độ sụt yêu cầu: tiến hành thêm cát và đá nhưng phải đảm bảo tỉ lệ C/Đ. Ghi lại lượng cốt liệu đã thêm.

Lưu ý rằng, nếu phải điều chỉnh vật liệu thành phần thì mỗi lần điều chỉnh nên giới hạn trong khoảng 5% đến tối đa là 10% theo khối lượng vật liệu. Ghi chép sự điều chỉnh để có cấp phối sau điều chỉnh một cách chính xác. Sau hai lần điều chỉnh liên tiếp mà vẫn chưa đạt yêu cầu về tính công tác thì cần loại bỏ mẻ trộn và thực hiện lại bài toán thiết kế lại cấp phối.

- Tiến hành xác định khối lượng thể tích thực tế của hỗn hợp bê tông sau điều chỉnh (γ_{hh}^{tt}).

- Đúc mẫu và bảo dưỡng trong điều kiện tiêu chuẩn để kiểm tra cường độ chịu nén của bê tông (R_b) khi đến tuổi thí nghiệm:

Nếu cường độ thực tế bằng hoặc lớn hơn cường độ yêu cầu không quá 15% thì bài toán thiết kế đạt yêu cầu.

Nếu cường độ thực tế nhỏ hơn cường độ yêu cầu thì bài toán thiết kế chưa đạt yêu cầu, bắt buộc phải tính toán lại hoặc tiến hành điều chỉnh tỉ lệ vật liệu thành phần.

Nếu cường độ thực tế vượt quá cường độ yêu cầu trên 15% thì tùy thuộc vào tình hình thực tế để xem xét điều chỉnh giảm lượng dùng xi măng để đảm bảo tính kinh tế.

Ứng với tỉ lệ vật liệu thành phần điều chỉnh, ta đúc được các tổ mẫu thí nghiệm. Từ đó lựa chọn tỉ lệ X/N phù hợp để đảm bảo được cường độ bê tông theo yêu cầu thiết kế.

3.4. Tính toán lại các vật liệu thành phần:

Từ giá trị N/X hợp lý vừa tìm được, tiến hành tính lại thành phần hợp lý của bê tông:

- Thể tích mẻ trộn đạt yêu cầu thiết kế:

$$V_m = (\Delta_m + \Delta_d + C_m + \Delta_c + X_m + \Delta_x + N_m + \Delta_n) / \gamma_{hh}^{tt}$$

- Khối lượng các vật liệu thành phần hợp lý:

$$\Delta_0 = (\Delta_m + \Delta_d) \cdot 1000 / V_m$$

$$C_0 = (C_m + \Delta_c) \cdot 1000 / V_m$$

$$X_0 = (X_m + \Delta_x) \cdot 1000 / V_m$$

$$N_0 = (N_m + \Delta_n) \cdot 1000 / V_m$$

Từ đó, kết luận cấp phối lý thuyết của bê tông là: X_0 ; C_0 ; Δ_0 ; N_0 .

3.5. Tính toán thành phần thực tế của bê tông:

Khi đã biết cấp phối lý thuyết của bê tông (X_0 ; C_0 ; Δ_0 ; N_0) và số liệu độ ẩm của cốt liệu (C, Đ) tại thời điểm sản xuất yêu cầu; sẽ tiến hành tính toán cấp phối thực tế của bê tông (X_t ; C_t ; Δ_t ; N_t). Trong đó:

$$X_t = X_0;$$

$$\Delta_t = \Delta_0 \cdot ((100 + w_d) / 100)$$

$$C_t = C_0 + C_0 \cdot w_c$$

$$N_t = N_0 - \Delta_0 \cdot w_d - C_0 \cdot w_c$$

Kết quả nghiên cứu thiết kế cấp phối bê tông san hô cấp độ bền B15, đá 1x2 và B15 đá 2x4 được thể hiện trong bảng 1, bảng 2. Cấp phối này áp dụng cho cát và đá san hô khô tuyệt đối, độ ẩm $w = 0\%$.

Trong đó, xi măng sử dụng cho nghiên cứu là xi măng PCB40

Hoàng Thạch. Các chỉ tiêu tính chất cơ lý được tiến hành thí nghiệm đánh giá (theo TCVN 6016:2011, TCVN 6017:2015, TCVN 4030:2003), đảm bảo đáp ứng yêu cầu của Tiêu chuẩn hiện hành (TCVN 6260:2020).

Bảng 1. Cấp phối Bê tông san hô cấp độ bền B15

Cấp phối	Loại cốt liệu lớn	Tỷ lệ N/X	Xi măng (kg)	Cát san hô	Đá san hô	Nước biến (lít)	PGSD BASF (kg)	Tỷ lệ BASF/XM (%)
				(kg)	(m ³)			
B15(1x2)-1	Đá 1x2	0,7	370	850	950	259	3,70	1,00
B15(1x2)-2				0,660	0,943			
B15(1x2)-3				860	900			
B15(2x4)-1	Đá 2x4	0,69	360	830	900	248	2,80	0,85
B15(2x4)-2				0,645	0,894			
B15(2x4)-3				915	900			
B15(2x4)-1				0,711	0,894			
B15(2x4)-2	Đá 2x4	0,73	330	925	915	241	2,64	0,80
B15(2x4)-3				0,719	0,909			
B15(2x4)-3	Đá 2x4	0,67	350	890	920	235	2,80	0,80
B15(2x4)-3				0,692	0,914			

Phụ gia: Sử dụng phụ gia BASF MasterGlenium ACE 8588 là một loại phụ gia thế hệ mới, được tổng hợp từ các polymer cao phân tử dùng chất khởi mào là peroxy. Sản phẩm này phù hợp với tiêu chuẩn ASTM C494 - loại F (phụ gia siêu dẻo giảm nước và nhanh ninh kết cao cấp).



Hình 1. Phân loại san hô làm cốt liệu bê tông



Hình 2. Các mẫu thí nghiệm



Hình 3. Máy nén bê tông bán tự động



Hình 4. Nén thí nghiệm kiểm tra cường độ bê tông

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm bê tông san hô cấp độ bền B15

Cấp phối	Loại cốt liệu lớn	Tỷ lệ N/X	Độ sụt	R7	R14	R28
			(cm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
B15(1x2)-1	Đá 1x2	0,7	0	16,64	17,58	19,32
B15(1x2)-2		0,65	2	17,49	18,24	21,70
B15(1x2)-3		0,75	6	17,61	18,37	20,30
B15(2x4)-1	Đá 2x4	0,69	5	22,60	24,12	24,70
B15(2x4)-2		0,73	8	19,60	20,80	22,90
B15(2x4)-3		0,67	2	20,01	21,38	21,67
B15(2x4)-3		0,67	2	20,01	21,38	21,67

Nhận xét:

Kết hợp Bảng 1, Bảng 2, nhận thấy:

- Cấp phối B15(1x2)-1 và B15(2x4)-3 có cường độ đáp ứng yêu cầu (so với định mức) nhưng độ sụt bằng 0 - 2 cm, không đáp ứng yêu cầu cho thi công. Thực tế trộn tại phòng thí nghiệm cho thấy hàm lượng xi măng và cát thấp trong khi hàm lượng đá lớn dẫn đến cấu tạo của bê tông chưa thực sự tốt, dẫn đến cường độ thiết kế (R28) thấp hơn cấp phối còn lại.

- Cấp phối B15(1x2)-2 có cường độ cao nhất, tuy nhiên độ sụt bằng 2 cm chưa đảm bảo tốt nhất cho thi công bê tông, đặc biệt là thi công bằng thủ công. Bên cạnh đó, lượng xi măng sử dụng lớn hơn cấp phối liền kề là 23% khối lượng xi măng nhưng cường độ chỉ cao hơn 6,8%. Đây là sự khác biệt không lớn. Tương tự, cấp phối B15(2x4)-1 so với cấp phối liền kề là B15(2x4)-2 thì dùng nhiều xi măng hơn 9% nhưng cường độ không cao hơn đáng kể (dưới 8%). Trong khi đó độ sụt thấp hơn 30%. Do đó, nếu xét đến cả yếu tố kinh tế thì chưa đảm bảo tối ưu.

- Cấp phối B15(1x2)-3 và B15(2x4)-2 có lượng dùng xi măng thấp nhất nhưng vẫn đảm bảo tính công tác (độ sụt 6 và 8 cm), cường độ thiết kế (R28) đảm bảo yêu cầu đặt ra do sử dụng lượng cốt liệu với tỷ lệ phối trộn hợp lý, đáp ứng được yêu cầu kinh tế và kỹ thuật. Do đó, nhóm tác giả xác định cấp phối B15(1x2)-3 và B15(2x4)-2 là cấp phối tối ưu.

4. NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ CẤP PHỐI BÊ TÔNG SAN HỒ CẤP ĐỘ BỀN B20

Trình tự các bước tiến hành tương tự như quá trình thiết kế cấp phối bê tông san hô cấp độ bền B15, kết quả nghiên cứu thiết kế được thể hiện trong bảng 3, bảng 4.

Bảng 3. Cấp phối Bê tông san hô cấp độ bền B20

Cấp phối	Loại cốt liệu lớn	Tỷ lệ N/X	Xi măng (kg)	Cát san hô	Đá san hô	Nước biến (lít)	PGSD BASF (kg)	Tỷ lệ BASF/XM (%)
				(kg)	(m ³)			
B20(1x2)-1	Đá 1x2	0,51	323	677	1154	166	3,23	1,00
B20(1x2)-2				0,526	1,146			
B20(1x2)-3				720	950			
B20(2x4)-1	Đá 2x4	0,64	400	780	950	234	3,90	1,00
B20(2x4)-2				0,606	0,943			
B20(2x4)-3				900	880			
B20(2x4)-1				0,699	0,874			
B20(2x4)-2	Đá 2x4	0,62	400	900	880	250	4,00	1,00
B20(2x4)-3				0,699	0,874			
B20(2x4)-3	Đá 2x4	0,55	400	880	920	220	4,00	1,00
B20(2x4)-3				0,684	0,914			

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm bê tông san hô cấp độ bền B20

Cấp phối	Loại cốt liệu lớn	Tỷ lệ N/X	Độ sụt	R7	R14	R28
			(cm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
B20(1x2)-1	Đá 1x2	0,51	0	20,97	24,62	26,82
B20(1x2)-2		0,59	4	21,10	24,37	25,64
B20(1x2)-3		0,6	6	19,36	23,99	26,35
B20(2x4)-1	Đá 2x4	0,64	12*	23,40	25,70	28,10
B20(2x4)-2		0,625	10	25,36	26,68	28,71
B20(2x4)-3		0,55	3	22,65	24,09	25,81
B20(2x4)-3		0,55	3	22,65	24,09	25,81

* Cấp phối có độ đồng nhất và tính lưu biến của hỗn hợp bê tông chưa đảm bảo (bắt đầu xuất hiện hiện tượng tách nước)

Nhận xét:

Kết hợp bảng 3 và bảng 4, nhận thấy:

- Cấp phối B20(1x2)-1 và B20(2x4)-3 có tỷ lệ nước/xi măng thấp ở mức chưa hợp lý nên độ sụt hỗn hợp bê tông thấp hoặc chưa đảm bảo (bằng 0-3 cm). Dù cường độ thiết kế đảm bảo yêu cầu nhưng chưa đáp ứng yêu cầu về tính công tác. Riêng cấp phối B20(2x4)-3 có lượng dùng xi măng lớn, vượt quá 400 kg xi măng

cho 1 m³ bê tông, xét về tính kinh tế thì chưa tối ưu và về mặt kỹ thuật thì đặt ra nhiều vấn đề phức tạp hơn trong việc kiểm soát chất lượng khi chế tạo và thi công. Ngược lại, cấp phối B20(2x4)-1 do tỷ lệ nước/xi măng cao (64%) ở mức chưa hợp lý nên cấu tạo hỗn hợp bê tông chưa đảm bảo, thực tế trộn mẻ trộn tại phòng thí nghiệm cho thấy bắt đầu xuất hiện hiện tượng tách nước, độ đồng nhất và tính lưu biến của hỗn hợp bê tông chưa đảm bảo.

- Cấp phối B20(1x2)-2 có cấp phối cơ bản đáp ứng yêu cầu về tính công tác (độ sụt 4 cm) và cường độ ở tuổi sớm (7 và 14 ngày), nhưng cường độ thiết kế (R28) thấp, chưa đáp ứng yêu cầu (so với định mức và các cấp phối còn lại).

- Cấp phối B20(1x2)-3 tuy có lượng dùng xi măng lớn, nhưng chưa vượt quá 400 kg/m³ bê tông, so với cấp phối liên kế thì lượng dùng xi măng chỉ lớn hơn 5,4% nhưng cường độ ở các độ tuổi đều đạt yêu cầu thiết kế, đồng thời tính công tác đảm bảo tốt (độ sụt 6 cm). Tương tự, cấp phối B20(2x4)-2 cũng đảm bảo cả về tính công tác (độ sụt 10 cm), cường độ và lượng dùng xi măng tối ưu hơn so với cấp phối khác cùng nhóm (bê tông đá 2x4). Do đó, nhóm tác giả xác định cấp phối B20(1x2)-3 và B20(2x4)-2 là cấp phối tối ưu.

5. NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ CẤP PHỐI BÊ TÔNG SAN HỒ CẤP ĐỘ BỀN B22,5

Trình tự các bước tiến hành tương tự như quá trình thiết kế cấp phối bê tông san hồ cấp độ bền B15 và B20, kết quả được thể hiện trong bảng 5, bảng 6.

Bảng 5. Cấp phối Bê tông san hồ cấp độ bền B22,5

Cấp phối	Loại cốt liệu lớn	Tỷ lệ N/X	Xi măng	Cát san hồ	Đá san hồ	Nước biến	PGSD BASF	Tỷ lệ BASF/XM (%)
			(kg)	(kg) (m ³)	(kg) (m ³)			
B22,5(1x2)-1	Đá 1x2	0,6	440	820 0,637	950 0,943	264	5,28	1,20
B22,5(1x2)-2		0,55	420	840 0,653	900 0,894	231	4,20	1,00
B22,5(1x2)-3		0,58	440	860 0,668	900 0,894	255	4,84	1,10
B22,5(2x4)-1	Đá 2x4	0,614	440	856 0,665	880 0,874	270	4,40	1,00
B22,5(2x4)-2		0,59	450	880 0,684	840 0,834	266	4,50	1,00
B22,5(2x4)-3		0,58	450	880 0,684	840 0,834	262	4,50	1,00

Bảng 6. Kết quả thí nghiệm bê tông san hồ cấp độ bền B22,5

Cấp phối	Tỷ lệ N/X	Độ sụt	R7	R14	R28
		(cm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
B22,5(1x2)-1	0,6	8*	25,111	27,892	29,699
B22,5(1x2)-2	0,55	2	23,549	25,479	30,671
B22,5(1x2)-3	0,58	8	24,978	27,040	30,123
B22,5(2x4)-1	0,614	12*	24,72	27,23	29,91
B22,5(2x4)-2	0,59	11,5*	22,13	27,80	31,61
B22,5(2x4)-3	0,58	9	23,42	27,67	32,03

* Các cấp phối có độ đồng nhất và tính lưu biến của hỗn hợp bê tông chưa đảm bảo (bắt đầu xuất hiện hiện tượng tách nước)

Nhận xét:

Kết hợp bảng 5, bảng 6 nhận thấy:

- Cấp phối B22,5(1x2)-1 có độ sụt hỗn hợp bê tông đạt yêu cầu, nhưng thực tế trộn tại phòng thí nghiệm cho thấy cấu tạo hỗn hợp bê tông kém, bắt đầu có hiện tượng tách nước trong vòng 1 phút sau khi kết thúc trộn. Do đó, dù cường độ thiết kế đảm bảo yêu cầu nhưng chưa đáp ứng yêu cầu về tính công tác và cấu tạo bê tông. Kết quả cường độ cũng cho thấy ở tuổi 28 ngày cấp phối này đạt cường độ

thấp nhất. Điều này cũng xảy ra tương tự với cấp phối B22,5(2x4)-1 và B22,5(2x4)-2. Hai cấp phối này có độ sụt cao do tỷ lệ nước/xi măng cao. Tuy nhiên khi tỷ lệ này quá cao thì vượt quá khả năng giữ nước của cốt liệu nên sẽ xuất hiện hiện tượng tách nước, làm giảm độ đồng nhất và tính lưu biến của hỗn hợp bê tông. Sự tách nước dẫn theo hồ xi măng thoát ra, làm giảm chất lượng hỗn hợp bê tông nên dù lượng xi măng lớn thì kết quả cho thấy cường độ bê tông cũng không cao bằng các cấp phối khác trong cùng nhóm cốt liệu.

- Cấp phối B22,5(1x2)-2 dù có cường độ R28 lớn nhất nhưng sự khác biệt không đáng kể so với cấp phối liên kế. Trong khi đó, cấp phối này chưa áp dụng yêu cầu về tính công tác (độ sụt 2 cm) để đảm bảo tốt nhất điều kiện thi công, đặc biệt là thi công thủ công.

- Cấp phối B22,5(1x2)-3 và B22,5(2x4)-3 có cường độ ở các độ tuổi đều đạt yêu cầu thiết kế, đồng thời tính công tác đảm bảo tốt (độ sụt 8 và 9 cm). Lượng dùng xi măng gần như tương đương với các cấp phối còn lại. Do đó, nhóm tác giả xác định cấp phối B22,5(1x2)-3 và B22,5(2x4)-3 là cấp phối tối ưu.

6. THẢO LUẬN CHUNG

- So với định mức xây dựng, khi xét từng cấp phối bê tông có cấp độ bền tương đương, các cấp phối thiết kế có lượng dùng xi măng cao hơn từ 17,4% đến 22,3% để bù đắp khả năng chịu lực giảm yếu do cốt liệu san hồ kém hơn so với cốt liệu đá dăm thông thường. Tuy sử dụng xi măng nhiều hơn nhưng lại tiết kiệm được lượng lớn chi phí cát sông và đá dăm nhờ sử dụng toàn bộ cốt liệu là cát và đá san hồ thay thế. Do vậy, về tổng thể chi phí sản xuất bê tông của đề tài vẫn cho thấy triển vọng tiết kiệm chi phí lớn.

- Lượng cốt liệu nhỏ (cát) cũng được sử dụng nhiều hơn và lượng cốt liệu lớn (đá) sử dụng ít hơn khi so sánh với cấp phối tham khảo ở tập định mức xây dựng vì cốt liệu đá san hồ có độ rỗng lớn, độ hút nước lớn, dẫn đến lượng cần nước nhiều. Việc giảm lượng dùng cốt liệu lớn giúp giảm mức độ cần nước của hỗn hợp bê tông. Bên cạnh đó, việc giảm lượng đá - vốn có cường độ thấp hơn đá dăm thông thường - dẫn đến giảm hệ thống lỗ rỗng trong bộ khung cốt liệu, cũng là giảm mức độ ảnh hưởng tiêu cực của bộ khung cốt liệu yếu đến cường độ chung của bê tông. Đồng thời để đảm bảo khối lượng đơn vị của bê tông cũng như thành phần hạt nhỏ đủ để điền đầy các lỗ rỗng trong bộ khung cốt liệu lớn thì cần thiết tăng hàm lượng cát và xi măng, vừa để hình thành cấu tạo đặc chắc cho bê tông, giúp tăng cường độ, cũng vừa góp phần tăng thể tích thành phần vữa xi măng để làm dày lớp bao bọc quanh các hạt cốt liệu lớn, làm chúng chuyển động linh động hơn, qua đó tạo tính công tác tốt hơn cho hỗn hợp bê tông.

- Đối với thành phần nước, như đã đề cập, lượng nước trộn lớn hơn nhiều so với định mức. Để bê tông sau chế tạo đảm bảo đáp ứng các yêu cầu đặt ra thì tỷ lệ nước/xi măng trong thí nghiệm này nhỏ nhất là 0,58 và lớn nhất là 0,75. Điều này là do cốt liệu san hồ có độ rỗng lớn, dẫn đến độ hút nước lớn. Vì vậy cần thiết phải tăng lượng dùng nước và tỷ lệ nước/xi măng. Đồng thời cần kết hợp sử dụng phụ gia giảm nước tầm cao, thế hệ mới để cải thiện tối đa tính công tác và cường độ bê tông.

7. KẾT LUẬN

Từ những kết quả nghiên cứu và ý kiến thảo luận đã trình bày, một số kết luận được rút ra như sau:

- Hoàn toàn có thể sử dụng cốt liệu mới gồm cát và đá san hồ (cỡ hạt 1x2 và 2x4) thay thế toàn bộ cốt liệu truyền thống (cát sông, đá dăm), đồng thời sử dụng nước biển thay thế nước ngọt để chế tạo bê tông san hồ nước biển đạt cấp độ bền B15, B20 và B22,5.

- Bê tông san hồ nước biển có lượng dùng xi măng cao hơn 17,4% đến 22,3% so với định mức xây dựng và tỷ lệ nước/xi măng

lớn so với bê tông truyền thống do cốt liệu san hô có cấu trúc rỗng xốp, độ hút nước lớn, khả năng chịu lực hạn chế hơn so với cốt liệu truyền thống (đá dăm). Với các cấp độ bền bê tông trong nghiên cứu này, tỷ lệ nước/xi măng ghi nhận dao động từ 0,58 đến 0,75.

- Việc thiết kế cấp phối bê tông san hô nước biển cấp độ bền thông thường hoàn toàn có thể được thực hiện trên cơ sở vận dụng phương pháp thể tích tuyệt đối như bê tông xi măng truyền thống, tuy nhiên cần thực hiện các biện pháp điều chỉnh cấp phối phù hợp với những đặc điểm riêng của các vật liệu thành phần. Trong đó đặc biệt lưu ý đến các tính chất cơ lý của cốt liệu san hô sẽ ảnh hưởng đến hàm lượng nước và xi măng cần sử dụng.

- Việc sử dụng nước biển đã được khẳng định tính khả thi đối với việc chế tạo bê tông xi măng bởi nhiều nghiên cứu trước đây với dạng cấu kiện bê tông không có cốt thép. Trong nghiên cứu này, việc sử dụng nước biển để chế tạo bê tông san hô cho thấy đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật đặt ra.

- Hiện chưa có báo cáo về việc tương tác hóa học bất lợi giữa nước biển với các vật liệu thành phần khác trong bê tông san hô. Tuy nhiên, việc tiếp tục nghiên cứu tương tác giữa chúng nên được khuyến khích, bao gồm cả tương tác giữa nước biển với cốt thép (nếu có) trong bê tông.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo được hoàn thành dưới sự bảo trợ bởi đề tài NCKH cấp Bộ mã số 2022.73.34 và sự giúp đỡ của Phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng/Viện KTCTĐB/Trường ĐHKHT Lê Quý Đôn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Vũ Đình Lợi (2020), Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp Nhà nước mã số ĐTĐL.CN-25/16.
- [2]. Vũ Đình Lợi (2019), *Dự án nhánh ĐTB 11.3 GĐ2*, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn.
- [3]. Vũ Ngọc Anh, Trương Minh Trí, Đào Kim Thành (2016), *Bê tông từ cát biển và nước biển*, Tạp chí xây dựng, số tháng 3/2016.
- [4]. Bing Liu, Jingkai Zhou, Xiaoyan Wen, Jianhua Guo, Xuanyu Zhang, Zhiheng Deng, Huailiang Wan, (2019), *Experimental Investigation on the Impact Resistance of Carbon Fibers Reinforced Coral Concrete*, Materials, 12, (23), 4000.
- [5]. Bullen, F. (1990), *Coralline concrete in the Pacific*, Proceedings of the Third International Colloquium on Concrete in Developing Countries, 1-12.
- [6]. Hongfa Yu, Bo Da, Haiyan Ma, Xuemei Dou, Zhangyu Wu, (2020), *"ervice life prediction of coral aggregate concrete structure under island reef environment*, Construction and Building Materials.
- [7]. John G. Dempsey, (1951), *Coral and Salt Water as Concrete Materials*, Journal Proceedings, 157-166.
- [8]. Lu, Bo, and Yuanbo Liang, (1993), *Experimental study of concrete prepared with coral reef and sea water 1*, Marine science bulletin/Haiyang Tongbao, 12, (5), 69-74.
- [9]. Luoxin Wang, Junshuai Mei, Jing Wu, Xingyang He, Hainan Li, Qingjun Ding (2020), *Mechanical Properties and Microscopic Mechanism of Coral Sand-Cement Mortar*, Advances in Materials Science and Engineering.
- [10]. Narver, D. L. (1964), *Good concrete made with coral and water*, Civil Engineering, 24, 654-658.
- [11]. Nishida, Takahiro, et al, (2003), *Study on strength and permeability of concrete using low quality coarse aggregates from circum-pacific region*, Doboku Gakkai Ronbunshu, (746), 103-114.
- [12]. P.A. Howdyshell, (1974), *The use of coral as an aggregate for portland cement concrete structures*, National Technical Information Service.
- [13]. R. A. Arumugam, K. Ramamurthy (1996), *Study of compressive strength characteristics of coral aggregate concrete*, Magazine of Concrete Research, (176).
- [14]. Rick A. Ehlert (1991), *Coral Concrete at Bikini Atoll*, Concrete International, 13, 19-24.
- [15]. Wang Lei, Zhao Yanlin (2012), *The comparison of Coral concrete and other light weight aggregate concrete on mechanics performance*, Advanced Materials Research, 446-449.
- [16]. Wattanachai, Pitiwat, et al, (2009), *A study on chloride ion diffusivity of porous aggregate concretes and improvement method*, Doboku gakkai ronbunshuu E, 65, (1), 30-44.
- [17]. Lê Văn Dung (2005), *Vật liệu xây dựng*, NXB Quân đội nhân dân, Hà Nội,
- [18]. Phùng Văn Lự (2006), *Vật liệu xây dựng*, NXB Giáo dục, Hà Nội.
- [19]. Wang, Fei, et al (2023), *Effect of superfine cement modification on properties of coral aggregate concrete*, Materials 16.3: 1103.
- [20]. Ngô Ngọc Thuỷ, Vũ Đình Lợi, Đình Quang Trung (2021), *Nghiên cứu sử dụng cốt liệu san hô thay thế một phần cốt liệu thông thường trong sản xuất bê tông xi măng*, Tạp chí Vật liệu & Xây dựng, số 3.2021, tr.5-9.
- [21]. Trần Văn Cương (2002), *Nghiên cứu chế tạo bê tông hạt nhỏ sử dụng cát nhiễm mặn ứng dụng cho các công trình quân sự ven biển và hải đảo*, Đề tài NCKH cấp cơ sở, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn.
- [22]. Weiwei Su, Jianhui Liu, Leping Liu, Zheng Chen, Caijun Shi (2023), *Progresses of high-performance coral aggregate concrete (HPCAC): A review*, Cement and Concrete Composites, Volume 140, 105059, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105059>.
- [23]. Kishore, Kamal, Aaysha Pandey, and Ahmed S. Abed (2023), *Coral Concrete: Overview, Composition and its Behavior in Environment*, Materials Science Forum. Vol. 1085. Trans Tech Publications Ltd.
- [24]. Dhondy, Tanaz, Alex Remennikov, and M. Neaz Shiekh (2019), *Benefits of using sea sand and seawater in concrete: a comprehensive review*, Australian Journal of Structural Engineering 20.4: 280-289.
- [25]. Wang, Junjie, Engui Liu, and Liang Li (2018). *"ultiscale investigations on hydration mechanisms in seawater OPC paste*, Construction and Building Materials 191: 891-903.
- [26]. Chen, Caiyi, et al (2015). *Workability, mechanical properties and affinity of artificial reef concrete*, Construction and Building Materials 98: 227-236.
- [27]. Xiao, Jianzhuang, et al (2017), *Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities*, Construction and Building Materials 155: 1101-1111.
- [28]. Nguyễn Viết Trung, Nguyễn Ngọc Long, Nguyễn Đức Thị Thu Định (2004), *Phụ gia và hoá chất dùng cho bê tông*, NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [29]. Changbiao Jiang, Jianhui Liu, Leping Liu, Zheng Chen, Caijun Shi (2023), *Interactions between coral sand and polycarboxylate superplasticizer and their effects on rheological properties of cement-based materials-A review*, Construction and Building Materials, Volume 389, 131607, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131607>.
- [30]. Ren, Jun, Yan, Shuo, Fang, Yunhui, Tian, Zhenhe, Li, Hao, Guo, Jinyi, Xing, Feng, Fan, Yiding, Wang, Xianfeng and Ren, Zengle (2023), *Performance of polycarboxylate superplasticisers in seawater-blended cement: Effect from chemical structure and nano modification*, Nanotechnology Reviews, vol. 12, no. 1, 2023, pp. 20230573. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0573>.
- [31]. Nguyễn Xuân Bằng, Nguyễn Trí Tã, Trần Văn Cương, Phạm Anh Vũ, Lê Hải Dương (2023), *Xác định tính chất cơ học của vật liệu san hô sử dụng làm cốt liệu bê tông*, Tạp chí Xây dựng, số tháng 9/2023, 87-81.