



ỨNG XỬ CƠ HỌC CỦA BÊ TÔNG CỐT LIỆU TÁI CHẾ SỬ DỤNG XI MĂNG VÀ CHẤT KẾT DÍNH XI KIỂM HOẠT HÓA

Tổng Tôn Kiên^{1*}, Lê Trung Thành²

Tóm tắt: Bê tông sử dụng cốt liệu tái chế (BTCLTC) đã và đang được nhiều nghiên cứu quan tâm về đặc tính vật liệu. Tuy nhiên, còn rất ít nghiên cứu về các đặc tính của BTCLTC trên các kết cấu bê tông cốt thép. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu về ứng xử cơ học của mẫu bê tông và kết cấu dầm bê tông cốt thép sử dụng cốt liệu tái chế kết hợp với chất kết dính xi măng hoặc chất kết dính xi kiểm hoạt hóa. Các đặc trưng cơ học như cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi của các mẫu BTCLTC đã được nghiên cứu và so sánh với ứng xử cơ học của bê tông sử dụng cốt liệu tự nhiên có cường độ chịu nén 30 MPa. Kết quả thử nghiệm cho thấy BTCLTC sử dụng chất kết dính xi kiểm có tính chất cơ học và mô men kháng nứt tốt hơn so với BTCLTC sử dụng xi măng, nhưng số lượng vết nứt và sự phát triển bề rộng vết nứt của dầm giảm không đáng kể.

Từ khóa: Cốt liệu bê tông tái chế (CLBTTC); bê tông sử dụng cốt liệu tái chế (BTCLTC); chất kết dính xi kiểm hoạt hóa (CKDXK); phế thải xây dựng (PTXD).

Comparative mechanical behaviour of recycled aggregate concrete used cement and alkaline-activated slag binder

Abstract: Concrete using recycled aggregates and Portland cement (RAC) has been being carried out in different countries and most of these studies were focused on material properties. However, not many studies were done on structural reinforced-concrete members with RAC. This paper presents the mechanical behaviour of the recycled aggregate concrete using Portland cement in comparable with using alkaline activated slag binder (AAS). The mechanical properties including compressive strength, flexural strength and elastic modulus of the recycled concrete specimens and reinforced concrete beams were studied and compared to that of reinforced concrete using natural aggregate with compressive strength of 30MPa. The experimental results showed that mechanical properties and cracking resistance moment of RAC containing AAS are improved significantly compared with those of cement-based RAC, however the number of cracks and crack width of AAS-based RAC are slightly decreased.

Keywords: Recycled Concrete Aggregates-RCA; Recycled Aggregate Concrete-RAC; Alkaline activated slag binder-AAS; Construction and Demolition Waste-CDW.

Nhận ngày 19/8/2017; sửa xong 31/8/2017; chấp nhận đăng 26/9/2017

Received: August 19th, 2017; revised: August 31th, 2017; accepted: September 26th, 2017



1. Giới thiệu

Việc tái chế phế thải bê tông trong xây dựng giúp bảo vệ môi trường, đồng thời sẽ giảm sử dụng nguyên vật liệu thiên nhiên. Để tận dụng hiệu quả phế thải bê tông, có thể sử dụng các loại phế thải bê tông làm cốt liệu (CLBTTC) trong sản xuất bê tông. Nhiều tác giả đã tập trung nghiên cứu từ quá trình tái chế phế thải bê tông đến việc thiết kế thành phần bê tông và nghiên cứu các tính chất cơ lý, độ bền lâu của bê tông cốt liệu tái chế (BTCLTC) [1-4]. Có thể thấy rằng, BTCLTC thường có các tính chất cơ học thấp hơn so với bê tông cốt liệu tự nhiên (BTCLTN) [1-3], khả năng chịu lực của kết cấu BTCLTC cũng thấp hơn so với kết cấu BTCLTN [4-8]. Điều này là do hạt cốt liệu tái chế thường có cấu tạo rỗng xốp do có phần vữa cũ bám dính, có nhiều vết nứt do quá trình gia công cốt liệu. Nhưng loại bê tông này vẫn có thể đảm bảo yêu cầu của một số dạng kết cấu nhất định, kể cả trong kết cấu chịu lực khi sử dụng các biện pháp nâng cao chất lượng [8, 9].

¹ TS, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

² TS, Vụ Khoa học công nghệ & Môi trường, Bộ Xây dựng.

* Tác giả chính. E-mail: kientt@nuce.edu.vn.

Trong những năm gần đây, một số nghiên cứu khảo sát quan hệ ứng suất - biến dạng và ứng xử cơ học của các kết cấu dầm bê tông sử dụng CLBTTTC đã được đề cập [5-7,10,11]. Ajdukiewicz và Kliszczewicz [11] đã sử dụng cốt liệu bê tông tái chế để thay thế một phần hoặc toàn bộ cốt liệu tự nhiên (CLTN) trong nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông $200 \times 300 \times 2600\text{mm}$ có hàm lượng cốt thép 0,90% và 1,60%. Kết quả thử nghiệm cho thấy các dầm BTCLTC có mô men kháng uốn thấp hơn khoảng 3,5% và độ võng lớn hơn so với các dầm BTCLTN. Kang và cộng sự [6] cũng nghiên cứu dầm bê tông có hàm lượng cốt thép 0,5% và 1,8% sử dụng CLBTTTC có nguồn gốc từ bê tông thường và bê tông cường độ cao để thay thế CLTN đến 50%. Kết quả nghiên cứu cho thấy các dầm BTCLTC có số vết nứt nhiều hơn và mô men kháng nứt thấp hơn so với dầm BTCLTN, nhưng các dầm BTCLTC sử dụng 30% CLBTTTC lại có khả năng chịu uốn tương đương. Knaack và Kurama [7] cũng nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông có kích thước $150 \times 230 \times 2000\text{mm}$, sử dụng 50% CLBTTTC. Các tác giả cho rằng độ võng của dầm BTCLTC cao hơn độ võng của dầm đối chứng, nhưng mô hình tính toán kết cấu của dầm BTCLTN cũng phù hợp cho dầm BTCLTC.

Gần đây, nhiều nghiên cứu có xu hướng sử dụng chất kết dính không xi măng trong chế tạo bê tông do loại chất kết dính này có cường độ và độ bền cao, đồng thời giảm thiểu các tác động môi trường do quá trình sản xuất xi măng poóc lăng [12-15]. Loại chất kết dính này là hỗn hợp của các phế thải công nghiệp (tro bay nhiệt điện, xỉ lò cao hạt hóa) hoặc vật liệu puzolan (đất puzolan, mê ta cao lanh) được hoạt hóa bằng các chất kiềm [13,14,16]. Collins [12] cho rằng cường độ chịu nén và cường độ kéo của BTCLTC sử dụng chất kết dính xỉ kiềm hoạt hóa có thể bằng hoặc cao hơn so với BTCLTC sử dụng xi măng. Điều này có thể do bản thân trong hạt CLBTTTC đã có sẵn chất kiềm $\text{Ca}(\text{OH})_2$ là sản phẩm thủy hóa của xi măng, cho nên hiệu ứng hoạt hóa và hiệu ứng puzolan của Xi lò cao nghiền mịn (XLCNM) có thể sẽ tăng mạnh. Hơn nữa, hạt CLBTTTC cũng còn một phần clanhke xi măng chưa thủy hóa sẽ tiếp tục thủy hóa trong hỗn hợp BTCLTC và sẽ góp phần làm tăng cường độ và độ bền lâu của bê tông. Tuy nhiên, các nghiên cứu này mới chủ yếu được phân tích trên các mẫu thí nghiệm nhỏ, chưa có nhiều nghiên cứu trên các kết cấu chịu lực. Để mở rộng khả năng sử dụng cốt liệu tái chế trong chế tạo các kết cấu bê tông cốt thép chịu lực, bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu so sánh ảnh hưởng của việc sử dụng chất kết dính xỉ kiềm hoạt hóa thay thế chất kết dính xi măng đến các đặc trưng cơ học của mẫu bê tông, cũng như ứng xử uốn của kết cấu dầm BTCLTC cốt thép.



2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1 Vật liệu sử dụng

Xi măng PC40 Bút Sơn được sử dụng trong nghiên cứu này, các tính chất cơ bản của xi măng thỏa mãn TCVN 2682:2009. Xi lò cao hạt hóa nghiền mịn (XLCNM) được nghiền từ xỉ hạt lò cao của nhà máy gang thép Hòa Phát, theo TCVN 4315:2007 thì loại xỉ hạt lò cao đạt yêu cầu để sản xuất xi măng.

CLTN sử dụng gồm đá dầm $D_{max}=20\text{mm}$ và cát vàng Sông Lô được sử dụng chế tạo các mẫu bê tông đối chứng. CLBTTTC được gia công từ phế thải bê tông xi măng. Các tính chất của cốt liệu thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7570:2006.

Nước sinh hoạt được sử dụng để trộn bê tông và thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật của nước trộn trong bê tông theo TCVN 4506:2012.

Dung dịch kiềm là hỗn hợp của dung dịch thủy tinh lỏng (Na-Si) có $\text{Na}_2\text{O} = 11,8\%$; $\text{SiO}_2 = 28,0\%$; $\text{H}_2\text{O} = 58,2\%$ và dung dịch NaOH 32% (chứa 32% NaOH rắn). Dung dịch này được sử dụng làm chất hoạt hóa trong chế tạo chất kết dính xỉ kiềm để thay thế chất kết dính xi măng.

2.2 Thành phần cấp phối bê tông

Có hai cấp phối bê tông đối chứng sử dụng CLTN có độ sụt $10 \pm 2\text{cm}$ là: ĐCI có cường độ chịu nén tiêu chuẩn quy đổi đạt mức M300 (cấp độ bền B22,5) và ĐCII đạt mức M250 (cấp độ bền B20). ĐCII có mức tương đương với mức của bê tông sử dụng 100% CLBTTTC thay thế CLTN (BTCLTC). Theo các nghiên cứu trước đây [17,18] hỗn hợp bê tông sử dụng chất kết dính xỉ kiềm (CKDXK) với hàm lượng kiềm sử dụng là 7% và mô đun kiềm là 1,0% thay thế hoàn toàn xi măng (BTCLTC-XK 7%) có thể tăng cường chất lượng của BTCLTC. Trên cơ sở phương pháp thiết kế thành phần cấp phối theo nguyên tắc thể tích tuyệt đối, lượng dùng vật liệu của các hỗn hợp bê tông nghiên cứu được nêu ở Bảng 1.

2.3 Phương pháp nghiên cứu

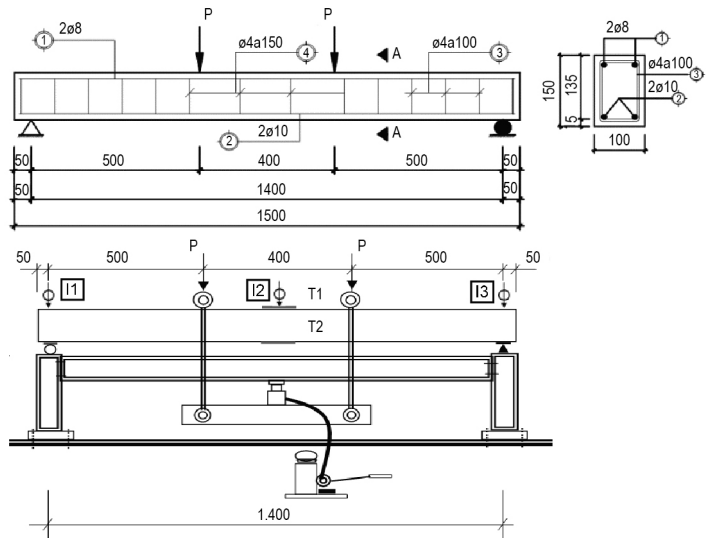
Hỗn hợp bê tông được trộn theo quy trình trộn hai giai đoạn [19]. Giai đoạn 1 làm ẩm cốt liệu trong khoảng 5 phút, sau đó giai đoạn 2 là cho chất kết dính vào trộn để tăng khả năng hấp thụ và bám dính

Bảng 1. Thành phần vật liệu của các hỗn hợp bê tông nghiên cứu

STT	Kí hiệu cấp phối	Lượng dùng các vật liệu cho 1m ³ bê tông, (kg)								
		Xi măng	XLCNM	Nước	Na-Si	NaOH 32%	Đá dăm	Đá CLBTTT	Cát vàng	Cát CLBTTT
1	ĐCI	350	0	202	0	0	1058	0	705	0
2	ĐCII	310	0	195	0	0	1050	0	720	0
3	BTCLTC	350	0	267	0	0	0	947	0	631
4	BTCLTC-XK7%	0	350	179	82	60	0	917	0	611

bề mặt hạt cốt liệu. Các mẫu được chế tạo và bảo dưỡng tại phòng thí nghiệm theo TCVN 3105:1993 đến tuổi 28 ngày.

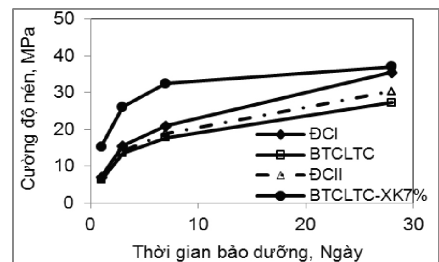
Để đánh giá hiệu quả cải thiện chất lượng kết cấu BTCLTC, ứng xử cơ học của các dầm BTCLTC và BTCLTC-XK7% được so sánh với cả hai dầm bê tông đối chứng (ĐCI, ĐCII). Các đặc trưng cơ học được đánh giá thông qua cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi theo TCVN 3118:1993 và tiêu chuẩn ASTM C469:2002. Ứng xử uốn của bê tông được khảo sát trên dầm bê tông cốt thép chịu uốn thuần túy với sơ đồ chịu tải như Hình 1. Cả chuyển vị và biến dạng xuất hiện trong quá trình chịu tải trọng uốn được ghi tự động bằng bộ thu TDS-530 thông qua 3 đầu đo chuyển vị (LVDT) I1, I2, I3 và 2 cảm biến điện trở đo biến dạng T1, T2. Bề rộng vết nứt được xác định bằng thiết bị quang học DJCK-2, có độ chính xác đến 0,01mm.


Hình 1. Sơ đồ bố trí cốt thép và chịu tải của dầm thí nghiệm


3. Kết quả và thảo luận

3.1 Các đặc trưng cơ học của bê tông

Cường độ chịu nén: Sự phát triển cường độ chịu nén của bê tông được so sánh ở Hình 2, giá trị biểu thị là giá trị trung bình của ba mẫu lập phương 100×100×100 mm. Có thể thấy rằng, cường độ chịu nén của tất cả các mẫu bê tông đều tăng theo thời gian bảo dưỡng, tuy nhiên cường độ chịu nén của BTCLTC thấp hơn so với cường độ chịu nén bê tông sử dụng CLTN ở hầu hết các tuổi thí nghiệm. Cường độ chịu nén ở 28 ngày của mẫu ĐCI là 35,5 MPa (cường độ chịu nén quy đổi đạt mức M300), trong khi đó cường độ chịu nén của BTCLTC chỉ đạt 26,9 MPa (giảm 24,2%). Điều này có thể do 2 nguyên nhân sau: (1) Thành phần vữa cũ có cấu trúc rỗng xốp bám dính vào hạt CLTN cũ và (2) bản thân trong hạt CLBTTT cũng tồn tại nhiều khuyết tật và vết nứt xuất hiện trong quá trình gia công nghiền phế thải bê tông. Những điều này đã dẫn đến tính chất cơ lý của các hạt CLBTTT thường kém hơn CLTN [20].

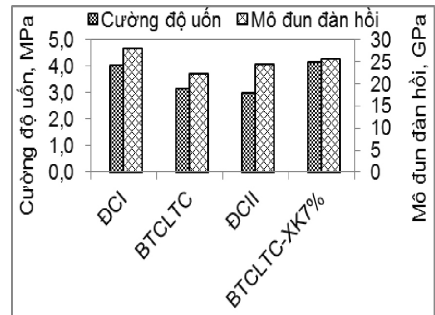

Hình 2. Cường độ chịu nén của mẫu BTCLTC so với mẫu bê tông đối chứng

Khi sử dụng CKDXK với hàm lượng kiềm 7%, thì cường độ chịu nén của BTCLTC được cải thiện đáng kể. Cường độ chịu nén của bê tông BTCLTC-XK7% sau 28 ngày bảo dưỡng đã đạt 37,1 MPa; tăng 35,9% so với mẫu BTCLTC chỉ sử dụng xi măng poóc lăng. Việc tăng cao cường độ chịu nén của bê tông có CKDXK là do ảnh hưởng của sự hoạt hóa kiềm và hiệu ứng puzolanic của XLCNM [20]. Các hạt CLBTTT luôn có phần vữa xi măng bám dính có nhiều lỗ rỗng và $\text{Ca}(\text{OH})_2$ có sẵn trong các lỗ rỗng. Khi bê tông sử dụng CLBTTT kết hợp với CKDXK thì sẽ có 2 hiệu ứng có thể góp phần nâng cao cường độ chịu nén của bê tông là [12,17,19]: (1) Một phần hạt XLCNM sẽ xâm nhập vào các lỗ rỗng và cấu trúc rỗng của phần vữa

bám dính trong hạt CLBTTTC, sau đó cải thiện vùng giao diện chuyển tiếp (ITZ) liên kết giữa đá chất kết dính xi măng với bề mặt hạt CLBTTTC tốt hơn nhờ thực hiện các phản ứng kiềm hoạt hóa, phản ứng puzolanic ngay tại các lỗ rỗng và khuyết tật [17,19]; (2) Các vết nứt và khuyết tật có sẵn trong hạt CLBTTTC cũng sẽ được lấp đầy và hàn gắn bằng các sản phẩm thủy hóa của CKDXK [12] và của phản ứng puzolan giữa XLCNM và $\text{Ca}(\text{OH})_2$ có sẵn trong các lỗ rỗng, các khe nứt nhỏ hoặc do clanhke xi măng cũ tiếp tục thủy hóa, tăng độ đặc vì cấu trúc hạt cốt liệu cũng như tăng cường độ đá chất kết dính.

Cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi

Tương tự như cường độ chịu nén, cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi của BTCLTC ở 28 ngày cũng giảm mạnh so với BTCLTN (giảm tương ứng 22,2% và 20,3%), các giá trị trong Hình 3 là giá trị trung bình trên 03 mẫu lăng trụ $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ (đối với cường độ chịu uốn) và 03 mẫu hình trụ $D \times H = 15 \times 30 \text{ cm}$ (đối với mô đun đàn hồi). Khi sử dụng CKDXK với hàm lượng kiềm 7% thay thế xi măng cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi của BTCLTC đã cải thiện rõ rệt (35,7% và 14,3%), lên tương đương và thậm chí còn vượt cả cường độ chịu uốn của mẫu ĐCI, nhưng mô đun đàn hồi vẫn thấp hơn so với mẫu ĐCI khoảng 9% (Hình 3). Điều này chứng tỏ mô đun đàn hồi thấp của hạt CLBTTTC mặc dù đã được cải thiện nhưng vẫn còn thấp hơn so với mô đun đàn hồi của CLTN [21].

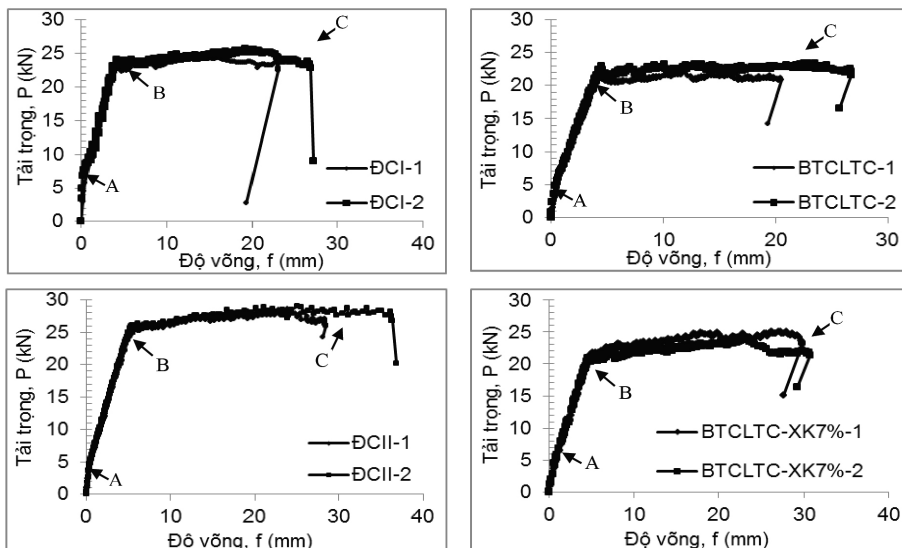


Hình 3. Cường độ chịu uốn và mô đun đàn hồi của mẫu BTCLTC so với mẫu ĐC

3.2 Ứng xử uốn của dầm bê tông cốt thép

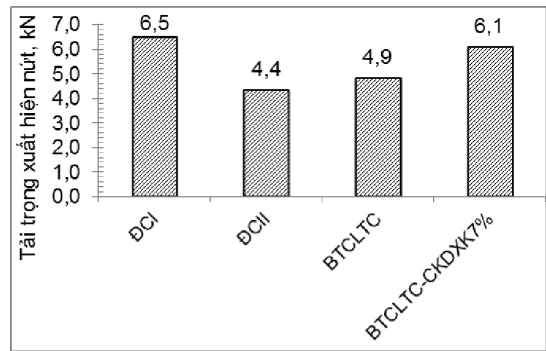
Quan hệ giữa tải trọng và biến dạng (độ võng)

Quan hệ giữa tải trọng uốn và độ võng của dầm BTCT sử dụng BTCLTN, BTCLTC là tương tự nhau và cơ chế phá hoại là phá hoại dẻo (Hình 4). Trước khi có điểm xuất hiện vết nứt đầu tiên (điểm A), đường quan hệ có dạng tuyến tính và thể hiện ứng xử đàn hồi của dầm. Các loại bê tông có mức tương đương nhau sẽ có ứng xử uốn tương tự nhau (ĐCII và BTCLTC, ĐCI và BTCLTC-XK 7%). Điều này chứng tỏ các mô hình dự đoán ứng xử uốn của BTCLTN có thể sử dụng cho BTCLTC [10]. Cụ thể, phần biểu thị quan hệ tải trọng - độ võng là tuyến tính của dầm BTCLTC thấp, chứng tỏ dầm BTCLTC có mô men kháng nứt thấp hơn so với của dầm ĐCI. Điều này là do BTCLTC có mô men đàn hồi thấp hơn bê tông ĐCI. Hơn nữa, trong BTCLTC luôn tồn tại ba vùng giao diện chuyển tiếp (giữa CLTN và vữa cũ trong hạt CLBTTTC, giữa vữa mới và vữa cũ hoặc cốt liệu cũ), trong khi đó trong dầm ĐCI chỉ có một vùng ITZ giữa CLTN và chất kết dính. Khi sử dụng CKDXK 7% thay thế xi măng poóc lăng mô men kháng nứt của dầm BTCLTC-XK 7% đã được cải thiện rõ rệt (đạt 6,1 kN) và tương đương với dầm ĐCI (đạt 6,5 kN), cao hơn đáng kể so với dầm BTCLTC và ĐCII (tương ứng là 4,9 và 4,4 kN) (Hình 5).



Hình 4. Đường cong quan hệ giữa tải trọng và độ võng của dầm bê tông cốt thép

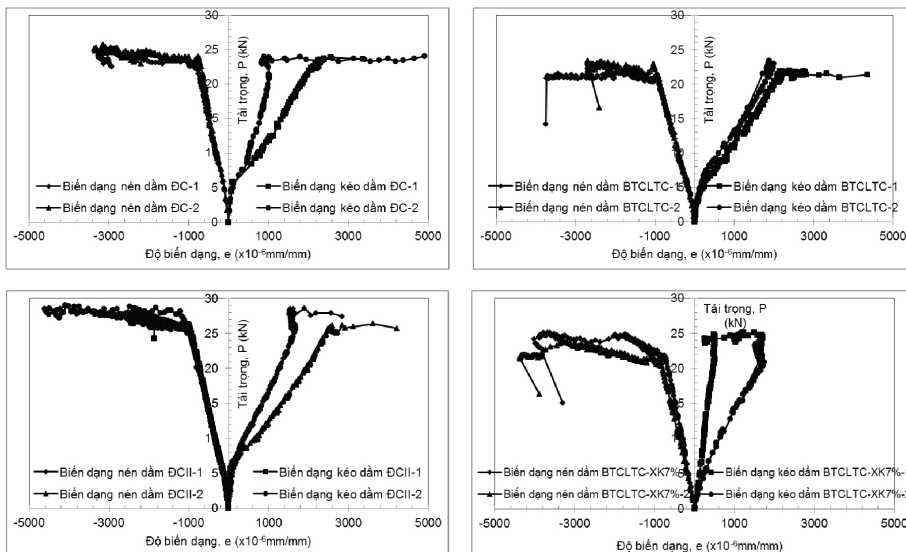
Khi tải trọng tiếp tục tăng dần, cốt thép bắt đầu bị chảy dẻo (điểm B) và dầm bê tông bị phá hủy (điểm C), mất khả năng chịu lực. Cả bốn loại dầm đều phá hủy ở trạng thái tải trọng gây chảy dẻo cốt thép dọc chịu lực, mặc dù đường quan hệ tải trọng - độ võng là phi tuyến (AB) của các dầm khá giống nhau và có hình dáng theo dạng phá hủy dạng 1. Khi sử dụng CKDXK7%, tải trọng gây chảy dẻo cốt thép dọc chịu lực của dầm BTCLTC-XK7% tăng lên không đáng kể (đạt khoảng 22 kN) so với dầm BTCLTC (21 kN), vẫn nhỏ hơn so với dầm ĐCI và ĐCII (đạt lần lượt khoảng 23 và 26 kN). Hơn nữa, đoạn BC trên đồ thị quan hệ tải trọng - độ võng thể hiện sự làm việc của bê tông vùng nén của dầm BTCLTC-XK7% cũng tốt hơn do tải trọng vẫn tăng khi độ võng tăng, còn dầm BTCLTC có tải trọng gần như không thay đổi khi độ võng tăng. Điều này chứng tỏ cường độ nén và lực bám dính giữa cốt thép với BTCLTC đã được cải thiện khi sử dụng chất kết dính xi kiềm [5].



Hình 5. Tải trọng xuất hiện vết nứt của dầm bê tông cốt thép

Quan hệ giữa tải trọng và biến dạng

Quan hệ giữa tải trọng và biến dạng của các dầm được thể hiện trên Hình 6. Có thể thấy rằng quan hệ giữa tải trọng và biến dạng nén của bê tông trong các dầm có thể chia thành ba phần gồm: biến dạng đàn hồi (khi tải trọng nhỏ hơn tải trọng xuất hiện vết nứt), sau đó là vùng duy trì biến dạng và cuối cùng là vùng phá hủy. Kết quả này phù hợp với lý thuyết tính toán thiết kế dầm BTCT theo TCVN 5574:2012. Quan hệ giữa tải trọng và biến dạng kéo của các loại bê tông là tuyến tính khi tải trọng còn thấp hơn tải trọng xuất hiện vết nứt, biến dạng kéo của dầm sử dụng BTCLTC đạt khoảng 117 μm , lớn hơn so với của dầm ĐCI và ĐCII (tương ứng là 97 μm và 95 μm), tuy nhiên biến dạng kéo của dầm bê tông khi sử dụng CKDXK7% (BTCLTC-XK7%) còn lớn hơn nhiều (khoảng 130 μm). Điều này là do các hạt CLBTT có nhiều khuyết tật (vết nứt, lỗ rỗng) cho nên khả năng chịu kéo của BTCLTC giảm mạnh [17,20]. Tuy nhiên, việc sử dụng chất kết dính xi kiềm đã không cải thiện được biến dạng kéo của dầm BTCLTC.



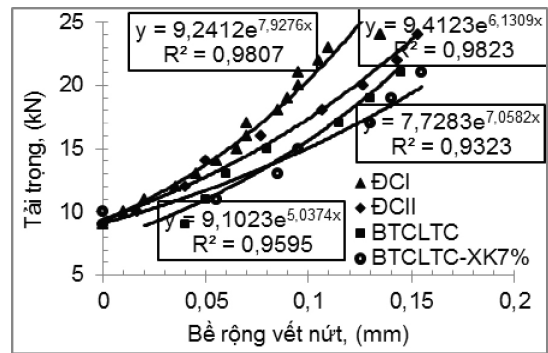
Hình 6. Quan hệ giữa tải trọng và biến dạng

Sự phát triển bề rộng và đặc tính vết nứt

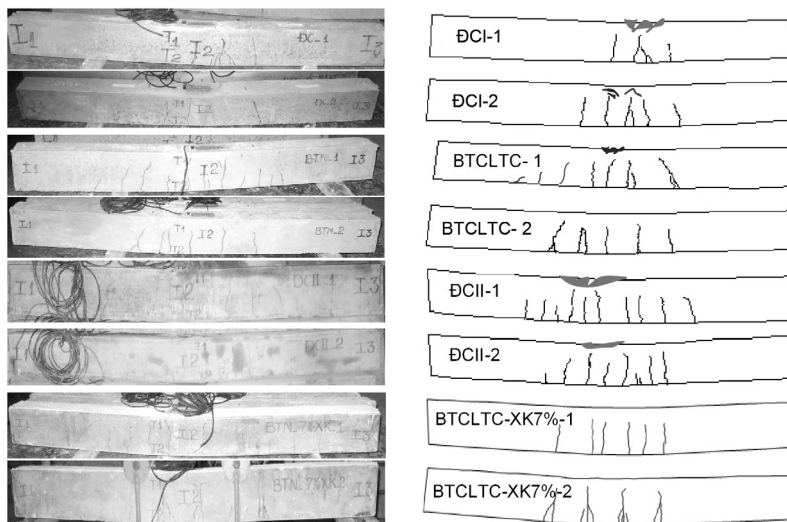
Các vết nứt thường xuất hiện trong vùng chịu kéo của dầm BTCT và khi ứng suất kéo trong vùng này vượt quá giới hạn kéo của bê tông. Khi tải trọng càng tăng, các vết nứt càng phát triển theo chiều cao. Sau đó, các vết nứt nghiêng bắt đầu xuất hiện và số các vết nứt cũng tăng dần. Hình 7 cho thấy quan hệ giữa tải trọng uốn và bề rộng vết nứt xuất hiện trong dầm, giá trị biểu diễn là giá trị trung bình bề rộng của các vết nứt đầu tiên của các dầm thí nghiệm. Tải trọng tăng sẽ làm tăng bề rộng vết nứt theo quy luật gần đúng

là hàm số mũ. Với cùng cấp tải trọng, bề rộng vết nứt của dầm BTCLTC lớn hơn nhiều so với dầm BTCLTN (ĐCI và ĐCII) [22].

Hình 8 thể hiện trực quan hình dạng và sự phân bố vết nứt trên các dầm sử dụng CLTN và CLBTTTC ở tải trọng phá hủy. Từ sơ đồ vết nứt cho thấy hầu hết các vết nứt xuất hiện ở vùng chịu uốn thuần túy của dầm (trong vùng đặt tải trọng uốn). Lúc đầu các vết nứt xuất hiện vuông góc với trục dầm, sau đó chiều cao vết nứt tăng dần và thay đổi góc nghiêng nhanh và trở thành vết nứt nghiêng. Các vết nứt trên dầm BTCLTC thường dài hơn và cách xa nhau hơn so với các vết nứt trên dầm đối chứng (ĐCI, ĐCII). Một số vết nứt nhỏ có thể liên kết với nhau thành vết nứt lớn và làm tăng nhanh quá trình phá hủy vùng bê tông chịu nén của dầm. Hơn nữa, số vết nứt trong các dầm BTCLTC cũng nhiều hơn so với các dầm đối chứng. Kết quả này cũng phù hợp các nghiên cứu trước đây của Arezoumandi và Knaack [7, 10]. Việc sử dụng CKDXK7% góp phần hạn chế sự phát triển bề rộng vết nứt và giảm số vết nứt của dầm BTCLTC, nhưng không rõ rệt (Hình 8).



Hình 7. Quan hệ giữa tải trọng và bề rộng vết nứt



Hình 8. Sơ đồ vết nứt trên dầm ở tải trọng phá hủy



4. Kết luận

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

Cốt liệu bê tông tái chế thay thế cốt liệu tự nhiên làm giảm các đặc trưng cơ học của bê tông một cách rõ rệt. Tuy nhiên, chất kết dính xi măng thay thế hoàn toàn xi măng có khả năng cải thiện rõ rệt các đặc trưng cơ học của bê tông, nhưng số lượng vết nứt và bề rộng vết nứt lại cải thiện không đáng kể.

Bê tông cốt liệu tái chế sử dụng chất kết dính xi măng có ứng xử uốn tương tự như dầm bê tông cốt liệu tự nhiên sử dụng xi măng và sự phá hủy xảy ra ở trạng thái tải trọng gây chảy dẻo cốt thép dọc chịu lực. Tải trọng xuất hiện vết nứt và tải trọng phá hủy của dầm bê tông cốt liệu tái chế thấp hơn 25 và 10% so với của dầm sử dụng bê tông thường. Tuy nhiên, ứng xử cơ học uốn của dầm BTCLTC đã được cải thiện rõ rệt và đạt tương đương dầm BTCLTN đối chứng khi sử dụng chất kết dính xi măng thay thế hoàn toàn xi măng poóc lăng.

Việc sử dụng đồng thời cốt liệu tái chế từ phế thải bê tông để thay thế cốt liệu tự nhiên, kết hợp với chất kết dính xi măng (sản phẩm từ phế thải công nghiệp luyện gang thép) để thay thế xi măng poóc lăng, không những tạo ra được loại bê tông có chất lượng tương đương với bê tông xi măng cốt liệu tự nhiên về khả năng chịu lực, mà còn góp phần giảm thiểu các tác động môi trường do quá trình sản xuất bê tông và sản xuất xi măng truyền thống gây ra.

Lời cảm ơn: Các tác giả xin chân thành cảm ơn Công ty Cổ phần Cơ điện và Xây dựng công trình đã gia công các loại cốt liệu tái chế cho đề tài.

Tài liệu tham khảo

1. ACI 555 (2001), *Removal and Reuse of Hardened Concrete*, ACI_555R-01, American Concrete Institute, Farmington Hills.
2. Hansen T.C. (1992), "Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: recycling of demolished concrete, recycling of masonry rubble, and localised cutting by blasting of concrete", *RILEM report 6*, E & EN Spon, London.
3. Kien T.T, Thanh T.L, Lu V. P. (2013), "Recycling construction demolition waste in the world and in Vietnam", Ed. Soutsos Marios et al., *The international Conference on Sustainable Built Environment for Now and the Future*, 26-27 March 2013, Construction publishing house, Hanoi, Vietnam, 247-256.
4. Jianzhuang X. et. al. (2012), "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)", *Construction and Building Materials*, 31:364-383.
5. Yagishita F., Sano M., Yamada M. (1994), "Behavior of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate", *Demolition and reuse of concrete & masonry RILEM proceeding*, Ed. Erik K.Lauritzen, E&FN Spon, Frederiksberg, Denmark, 331-342.
6. Kang TH-K et. al. (2014), "Flexural testing of reinforced concrete beams with recycled concrete aggregates", *ACI Structure Journal*, 111(3):607-616.
7. Knaack A.M., Kurama Y.C. (2014), "Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates", *Journal Structures Engineering* 2014 © ASCE 2014.
8. Kou S. C. (2006), *Reusing recycled aggregates in structural concrete*, PhD thesis, The Hong Kong polytechnic university.
9. Kou S.C., Poon C.S, Agrela F. (2011), "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures", *Cement & Concrete Composites*, 33 (8):788-795.
10. Mahdi A. et. al. (2015), "An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate", *Engineering Structures*, 88:154-162.
11. Ajdukiewicz B. A., Kliszczewicz T. A. (2007), "Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete", *Journal Advanced Concrete Technology*, 5(2):259-273.
12. Collins F., Sanjayan J. (1999), "Strength and shrinkage properties of alkaliactivated slag concrete placed into a large column", *Cement Concrete Research*, 29:659-666.
13. Garcia J. I. E. et. al. (2009), "Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement ", *Construction and Building Materials*, 23:2511-2517.
14. Jiménez A. F., Palomo A. (2003), "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements", *Fuel*, 82:2259-2265.
15. Juenger M.C.G. et. al. (2011), "Advances in alternative cementitious binders", *Cement and Concrete Research*, 41:1232-1243.
16. Tổng Tôn Kiên, Phạm Thị Vinh Lan và Lê Trung Thành (2014), "Bê tông Geopolymer- Những thành tựu, tính chất và khả năng ứng dụng ở Việt Nam", *Tạp chí Vật liệu xây dựng*. (3):62-66.
17. Tổng Tôn Kiên (2015), *Nghiên cứu nâng cao chất lượng bê tông sử dụng cốt liệu tái chế bê tông từ phế thải bê tông xi măng*, Báo cáo tổng kết đề tài KHCC cấp trường, Mã số 60-2015/KHXD, Trường Đại học Xây dựng.
18. Tổng Tôn Kiên, cs. (2014), "Nghiên cứu chế tạo vữa xi kiềm sử dụng cốt liệu tái chế từ phế thải xây dựng", *Tạp chí Xây dựng*, Bộ Xây dựng, (6):69-72.
19. Vivian W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam (2005), "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach", *Cement and Concrete Research*. 35:1195-1203.
20. Kou S.C., Poon C.S. (2012), "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate", *Construction and Building Materials*. 35:69-76.
21. Jorge D. B, Nabajyoti S. (2012), "Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste", *Green Energy and Technology*, Springer London Heidelberg New York Dordrecht.
22. Choi C. W., Yun H. D. (2013), "Long-term deflection and flexural behaviour of reinforced concrete beams with recycled aggregate", *Materials and Design*, 51:742-750.