

# Tấm bê tông cốt liệu tái chế trên nền cát: Từ thiết kế đến ứng dụng

## Recycled aggregate concrete paving slabs on sand base: From design to application

> **THS NGUYỄN XUÂN HIỂN<sup>1,2</sup>, GS.TS PHAN QUANG MINH<sup>1</sup>, PGS.TS NGUYỄN NGỌC TÂN<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

<sup>2</sup>Vụ Khoa học Công nghệ và Môi trường, Bộ Xây dựng

### TÓM TẮT

Nghiên cứu mô tả một chương trình thí nghiệm được tiến hành trên các tấm lát bê tông cốt liệu tái chế (BTCLTC) được đặt trên lớp nền cát. Các tấm có kích thước 300x300x50 mm và 300x300x70 mm và được thí nghiệm dưới tải trọng tập trung. Các kết quả thu được từ các thí nghiệm đã được sử dụng để xác định khả năng chịu lực, biến dạng (bao gồm độ lún và nứt) và dạng phá hoại của các tấm BTCLTC. Những phát hiện này sau đó đã được sử dụng để hiệu chỉnh các công thức lý thuyết và đề xuất một công thức thực nghiệm để dự đoán khả năng chịu lực của các tấm BTCLTC trên nền đàn hồi. Nghiên cứu chứng minh tiềm năng sử dụng các tấm BTCLTC cho vỉa hè, hè đường đô thị và sân bãi như một giải pháp thay thế bền vững với môi trường cho các vật liệu xây dựng truyền thống.

**Từ khóa:** Bê tông cốt liệu tái chế; chất thải rắn xây dựng; tấm lát; tải trọng tập trung; nền cát.

### ABSTRACT

The study describes an experimental program conducted on recycled aggregate concrete (RAC) paving slabs placed on a sand base course. The slabs had dimensions of 300x300x50 mm and 300x300x70 mm and were tested under a point load. The results obtained from the tests were used to determine the bearing capacity, deformation (including settlement and cracks), and failure mode of the RAC paving slabs. These findings were then used to refine theoretical formulas and propose an empirical formula for predicting the bearing capacity of RAC paving slabs on an elastic base. The study demonstrates the potential for using RAC paving slabs in urban sidewalks, pavements, and yards as an environmentally sustainable alternative to traditional construction materials.

**Keywords:** Recycled aggregate concrete; construction and demolition waste; paving slabs; point load, sand base.

### 1. MỞ ĐẦU

Cùng với sự gia tăng về dân số, quá trình công nghiệp hóa và đô thị hóa đã và đang diễn nhanh chóng ở các nước phát triển. Hội nghị Thượng đỉnh trái đất tại Rio là lần đầu tiên thế giới đặt ra mục tiêu phát triển kinh tế song hành cùng việc bảo vệ môi trường [1]. Trong những năm gần đây, thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng đã có những bước tiến để đạt được mục tiêu này. Việt Nam đã quyết liệt xây dựng lộ trình Net Zero, đặt mục tiêu phát thải ròng khí CO<sub>2</sub> bằng 0 vào năm 2050. Trong đó, ngành Xây dựng là một trong những ngành có ảnh hưởng lớn nhất, khi phát thải đến 33% tổng lượng CO<sub>2</sub> [2]. Đáp ứng cam kết trung hòa carbon, Chính phủ Việt Nam thông qua Nghị định 06/2022/NĐ-CP [3], để ra mục tiêu giảm thiểu phát thải khí nhà kính đến năm 2030 là 563,8 triệu tấn CO<sub>2</sub>eq, trong đó Bộ Xây dựng đóng góp mục tiêu 74,3 triệu tấn CO<sub>2</sub>eq. Hàng năm, ngành Xây dựng sử dụng khoảng 20 tỷ tấn cốt liệu tự nhiên để sản xuất bê tông [4], một trong các loại vật liệu xây dựng được sử dụng phổ biến nhất. Trong đó, các loại cốt liệu chiếm đến 70% tổng khối lượng cấp phối bê tông [5]. Nhu cầu về vật liệu cao, nhưng nguồn tài nguyên thiên nhiên ngày càng cạn kiệt đặt ra yêu cầu về những loại cốt liệu mới.

Theo Thông tư số 08/2017/TT-BXD [6], chất thải rắn xây dựng (CTRXD) là chất thải rắn phát sinh trong quá trình khảo sát, thi công xây dựng công trình. Lượng chất thải rắn phát sinh trong quá trình đô thị hóa ngày càng tăng, gây quá tải cho các cơ sở xử lý và các bãi chôn lấp tập trung. Đồng thời, khó khăn trong quản lý dẫn đến tình trạng đổ trộm CTRXD ra sông, hồ hay hệ thống đường phố dẫn đến tình trạng ô nhiễm môi trường và phá vỡ mỹ quan đô thị. Do đó, việc tái chế CTRXD là một mục tiêu cấp bách đối với ngành Xây dựng, ở Việt Nam và trên thế giới, không chỉ góp phần phát triển bền vững trong xây dựng mà còn giúp bảo vệ môi trường [7, 8].

Trong số các loại CTRXD, bê tông cũ và khối xây thường được sử dụng để sản xuất cốt liệu tái chế (CLTC) với các cỡ hạt khác nhau để thay thế cho đá tự nhiên và cát sông trong sản xuất bê tông. Tại các nước đã phát triển, CLTC đã và đang được sử dụng ngày càng phổ biến để thay thế cốt liệu tự nhiên theo một số hướng dẫn hiện hành [9-11]. Hàm lượng CLTC có thể chiếm từ 30% đến 100% tổng lượng cốt liệu [12], phụ thuộc vào các tính chất cơ lý của CLTC. Tại Việt Nam, các nghiên cứu cũng đã được thực hiện để kiểm tra tính chất cơ lý và tính ứng dụng của CLTC [13-16], đi kèm với các tiêu chuẩn [20, 21] nhằm nâng cao tính ứng dụng của CLTC trong xây dựng. Theo de Brito và cộng sự [22], CLTC thường được sử dụng làm cốt liệu trong bê tông, cốt

liệu của các lớp bê tông móng, các lớp lót bề mặt đường, và đặc biệt là kết cấu vỉa hè.

Trong thực tế tại Việt Nam, kết cấu vỉa hè đang sử dụng chủ yếu các loại gạch bê tông tự chèn, gạch terazo với cốt liệu đá tự nhiên. Tuy nhiên, sau một thời gian sử dụng, các kết cấu này thường bị xuống cấp, do gạch bị nứt vỡ, bề mặt không bằng phẳng, hiệu quả thoát nước cũng giảm dần theo thời gian, như minh họa trên Hình 1. Ngoài ra, vỉa hè của một số tuyến đường đô thị đã và đang được sửa chữa, nâng cấp, sử dụng đá tự nhiên làm vật liệu lát thay thế cho gạch bê tông tự chèn hoặc các sản phẩm gạch truyền thống. Tuy nhiên, việc sử dụng đá tự nhiên gây ra những tác động bất lợi đối với môi trường, đi ngược lại tầm nhìn Quốc gia về trung hòa carbon Net Zero. Do đó, tiềm năng để sử dụng các tấm bê tông cốt liệu tái chế (BTCLTC) cho mục đích này là rất lớn.



**Hình 1.** Vỉa hè bị xuống cấp trên phố tại Hà Nội

Các tấm BTCLTC thường được tính toán theo lý thuyết tấm trên nền đàn hồi, dựa trên các công thức tính toán cổ điển của Westergaard [23], Ringo và Anderson [24], hay của Shentu [25]. Theo đó, Westergaard [23] đưa ra mô hình tính toán theo lý thuyết đàn hồi, chỉ áp dụng được khi tải trọng tính toán nhỏ. Shentu [25] đã cải thiện mô hình Westergaard, khi xét đến trạng thái đàn dẻo của vật liệu. Tuy nhiên, giả thuyết tính toán của mô hình này là tải trọng tập trung đặt trên một tấm dài vô tận. Giả thuyết tính toán này chỉ phù hợp với các tấm bê tông có kích thước lớn (tỷ số chiều rộng/chiều dày lớn hơn 10) và áp dụng cho bê tông nặng thông thường.

Do đó, để thúc đẩy việc tái chế CTRXD, sử dụng BTCLTC trong xây dựng, thực tế đặt ra các yêu cầu về nghiên cứu ứng xử cơ học và tính toán khả năng chịu lực của tấm bê tông có kích thước nhỏ chế tạo bằng vật liệu mới, cụ thể là các tấm BTCLTC được sử dụng trong nghiên cứu này. Bài báo trình bày các kết quả thực nghiệm thu được từ một chương trình thí nghiệm thực hiện trên các tấm BTCLTC có kích thước 300×300×50 mm và 300×300×70 mm đặt trên nền cát và chịu tác dụng của một tải trọng tập trung ở giữa tấm. Các kết quả thu được cho phép xác định khả năng chịu lực của tấm BTCLTC thông qua biểu đồ tải trọng - độ lún, sơ đồ vết nứt và dạng phá hoại. Các kết quả này cũng được sử dụng để hiệu chỉnh công thức cổ điển và đề xuất công thức mới để dự đoán khả năng chịu lực của tấm BTCLTC trên nền đàn hồi.

## 2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

### 2.1. Vật liệu sử dụng

Dựa trên kết quả nghiên cứu của Hiên và cộng sự [26], một loại BTCLTC đã được thiết kế và chế tạo, sử dụng các thành phần vật liệu gồm xi măng PC40 Bút Sơn, xỉ hạt lò cao nghiền mịn (GGBFS), cát vàng sông Lô, đá dăm có cỡ hạt lớn nhất là 20 mm, cốt liệu lớn tái chế (CLLTC) có cỡ hạt trong khoảng 5 mm đến 20 mm và nước sạch, như trong Bảng 1 [27]. GGBFS có chỉ số hoạt tính cường độ ở 28 ngày là 595 theo tiêu chuẩn TCVN 11586:2016 [28], chiếm 30% tổng khối lượng chất kết dính. Trong khi đó, CLLTC có thành phần chính là bê

tông cũ được thu gom trong quá trình phá dỡ một công trình bê tông cốt thép trên địa bàn thành phố Hà Nội. CLLTC này được sản xuất bằng phương pháp nghiền, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật của CLLTC loại I theo tiêu chuẩn TCVN 11969:2018 [20]. Hàm lượng CLLTC chiếm 70% tổng khối lượng cốt liệu lớn trong cấp phối BTCLTC.

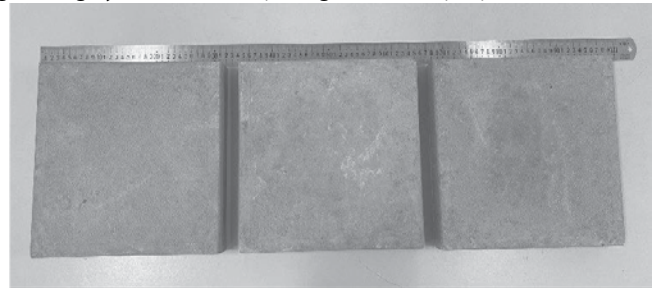
**Bảng 1.** Cấp phối bê tông cốt liệu tái chế [27]

Xi măng (kg)	GGBFS (kg)	Cát sông (kg)	Đá dăm (kg)	CLLTC (kg)	Nước (kg)	N/CKD
329	141	596	375	875	185	0,39

Cường độ chịu nén trung bình trên mẫu hình lập phương 150×150×150 mm của BTCLTC bằng 41,3 MPa với hệ số biến động 2,3%. Mô đun đàn hồi của BTCLTC có giá trị trung bình bằng 35,6 GPa ở 28 ngày tuổi. Các kết quả thí nghiệm này chỉ ra rằng BTCLTC sử dụng trong nghiên cứu này có cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi tương đương với bê tông đối chứng được chế tạo với 100% cốt liệu tự nhiên [27].

### 2.2. Mẫu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, các mẫu tấm BTCLTC đã được chế tạo và bảo quản trong cùng điều kiện khí hậu của phòng thí nghiệm. Hai loại mẫu có chiều dày khác nhau được sử dụng, có kích thước (chiều rộng × chiều dài × chiều dày) lần lượt là 300×300×50 mm và 300×300×70 mm, như minh họa trên Hình 2. Quy trình sản xuất bê tông bằng máy trộn cưỡng bức được áp dụng như nhau đối với tất cả mẫu thử. Trong một mẻ trộn, 10 tấm BTCLTC có kích thước như nhau được chế tạo. Từng mẫu thử được đặt trên bàn rung trong thời gian 60 giây để đảm bảo độ đồng nhất của vật liệu.



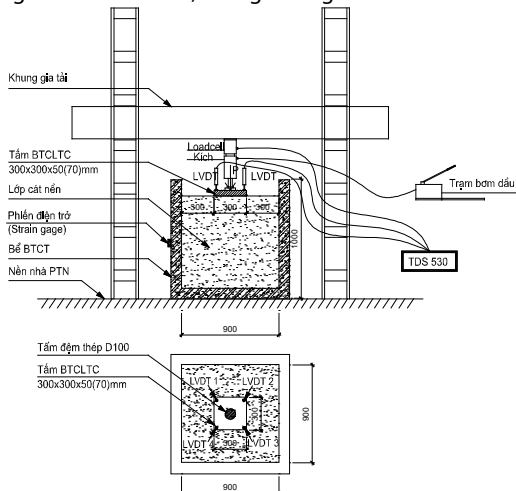
**Hình 2.** Mẫu tấm bê tông cốt liệu tái chế

Trước khi tiến hành thí nghiệm, tất cả các mẫu thử đều được kiểm tra kích thước bằng thước kim loại, màu sắc và khuyết tật ngoại quan ở trạng thái khô bằng quan sát trực quan. Kết quả kiểm tra cho thấy các mẫu thử có sai lệch kích thước nhỏ hơn ±2 mm đối với chiều dài và chiều rộng, nhỏ hơn ±3 mm đối với chiều dày, thỏa mãn yêu cầu theo tiêu chuẩn TCVN 7744:2013 [29]. Tất cả mẫu thử có màu sắc đồng đều, không có vết nứt trên mặt trên và mặt dưới của tấm, không có vết nứt trên các cạnh bên và các vết lõm. Khối lượng thể tích của BTCLTC được xác định bằng 2,13 T/m<sup>3</sup>. Do đó, mỗi tấm 300×300×50 mm có khối lượng trung bình bằng 9,6 kg, trong khi mỗi tấm 300×300×70 mm có khối lượng trung bình bằng 13,4 kg. Để đáp ứng yêu cầu thi công, các tấm lát thường có khối lượng không lớn hơn 20 kg, nên với tấm có bề rộng 300 mm, thì chiều dày không lớn hơn 100 mm. Đây cũng là lý do vì sao chiều dày 50 mm và 70 mm được lựa chọn trong nghiên cứu này.

Thí nghiệm độ hút nước đã được thực hiện theo tiêu chuẩn TCVN 6355-4:2009 [30] trên tổ mẫu thử có kích thước 300×300×50 mm. Kết quả chỉ ra độ hút nước thay đổi khoảng 6,8% đến 7,2%, có giá trị trung bình bằng 7%, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn TCVN 7744:2013 [29]. Ngoài ra, cường độ chịu uốn của mẫu thử ở 28 ngày tuổi thay đổi trong khoảng từ 3,81 MPa đến 4,32 MPa, có giá trị trung bình bằng 4,11 MPa.

### 2.3. Sơ đồ thí nghiệm

Khi bê tông đủ 28 ngày tuổi, thí nghiệm kiểm tra khả năng chịu lực của tấm BTCLTC được thực hiện đối với hai tổ mẫu: (i) Tổ mẫu I gồm 6 tấm có kích thước 300×300×50 mm; (ii) Tổ mẫu II gồm 6 tấm có kích thước 300×300×70 mm. Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện như trên Hình 3, nhằm mô phỏng sự làm việc thực tế của tấm BTCLTC khi chịu nén trên nền cát. Tấm BTCLTC được đặt trên đệm cát có độ chặt trung bình  $K=0,93$ . Mỗi tấm BTCLTC được đặt chính giữa bề thí nghiệm, chịu tác dụng của một tải trọng tập trung ( $P$ ) ở giữa tấm. Đây là dạng tải trọng được cho là nguy hiểm nhất đối với tấm lát vỉa hè. Tải trọng được tạo ra bởi kích thủy lực và trạm bơm dầu. Kích thủy lực được lắp đặt với load-cell đo lực và hệ khung gia tải. Tải trọng tác dụng lên tấm BTCLTC thông qua một tấm thép hình tròn có đường kính  $D=100$  mm, tương đương 1/3 chiều dài mẫu thử.



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm tấm BTCLTC trên nền cát

Để khảo sát chuyển vị đứng (độ lún) của tấm BTCLTC so với đệm cát, thí nghiệm sử dụng 4 thiết bị điện tử đo chuyển vị, ký hiệu LVDT<sub>1,2,3,4</sub> (Linear Variable Differential Transformer), lắp đặt tại bốn góc của tấm. Độ lún của tấm là giá trị trung bình của bốn LVDT. Tất cả thiết bị đo điện tử được kết nối với bộ thu thập số liệu data-logger TDS630 và kết nối với máy tính, để ghi nhận số liệu thí nghiệm tự động và liên tục. Ngoài ra, một biến dạng kế (strain gage) cũng được dán trên mặt ngoài của thành bể thí nghiệm, để theo dõi biến dạng của bê tông vách bể, nhằm đảm bảo rằng vùng ảnh hưởng của tải trọng nằm hoàn toàn trong vùng đệm cát.

**2.4. Quy trình thí nghiệm**

Đối với mỗi mẫu thử, quy trình thí nghiệm được thực hiện gồm các bước chính như sau:

- Lắp dựng hệ khung gia tải và bể thí nghiệm chứa đệm cát vào đúng vị trí thí nghiệm;
- Đặt tấm BTCLTC có kích thước 300×300×50 mm hoặc 300×300×70 mm vào đúng vị trí thí nghiệm;
- Lắp đặt các dụng cụ và thiết bị đo (kích thủy lực, load-cell, LVDT) vào đúng vị trí theo sơ đồ thí nghiệm và kết nối với bộ thu thập số liệu data-logger TDS630;
- Tiến hành gia tải thử ở cấp tải trọng  $P=0,1$  kN, nhằm kiểm tra sự ổn định của hệ gia tải và các dụng cụ, thiết bị đo đảm bảo hoạt động bình thường;
- Tiến hành gia tải thí nghiệm lên tấm BTCLTC cho đến khi bị phá hoại hoàn toàn. Tải trọng được tăng liên tục và đều đặn với tốc độ gia tải  $0,6\pm 0,2$  MPa/s trong quá trình thí nghiệm;
- Hạ tải về 0 và lấy mẫu thử ra khỏi vị trí thí nghiệm, quan sát sơ đồ vết nứt và chụp ảnh dạng phá hoại;
- Tiến hành đào bỏ lớp đệm cát phía dưới mẫu thử đảm bảo chiều sâu đào, thỏa mãn điều kiện hết vùng ảnh hưởng của tải trọng

thí nghiệm gây lún nền. Sau đó, đầm chặt lại lớp cát theo quy trình đảm bảo độ chặt  $K>0,90$ ;

- Tiếp tục thí nghiệm tấm BTCLTC tiếp theo đúng với quy trình trên.
- Thu thập, phân tích và xử lý số liệu các kết quả thí nghiệm.

Hình 4 giới thiệu hình ảnh thí nghiệm được thực hiện trên một mẫu thử điển hình. Kết quả thí nghiệm cho phép xác định khả năng chịu lực của tấm BTCLTC (tải trọng lớn nhất), độ lún tại tải trọng lớn nhất và dạng phá hoại (sơ đồ nứt). Đối với mỗi tổ mẫu, kết quả thí nghiệm là giá trị trung bình của 6 mẫu thử. Độ lệch giữa các mẫu thử là do sự biến động của BTCLTC và độ chặt của nền cát. Trong phạm vi nghiên cứu, tổng cộng 12 mẫu thử đã được thí nghiệm cho hai loại tấm BTCLTC có kích thước 300×300×50 mm và 300×300×70 mm.

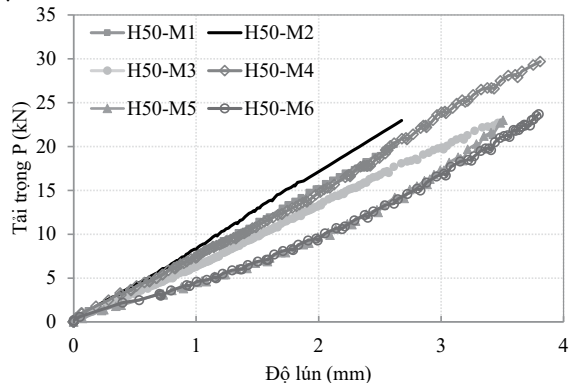


Hình 4. Hình ảnh thực hiện thí nghiệm tấm

**3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM**

**3.1. Biểu đồ tải trọng - độ lún**

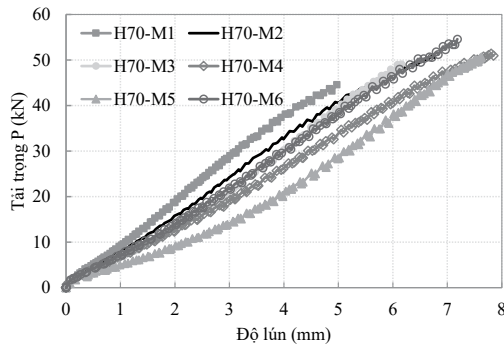
Thí nghiệm đã được thực hiện trên tổ mẫu I gồm 6 tấm BTCLTC có kích thước 300×300×50 mm, ký hiệu lần lượt từ H50-M1 đến H50-M6, trong đó “H50” nghĩa là tấm có chiều dày 50 mm, “M1, ..., M6” là số thứ tự mẫu thử. Hình 5 giới thiệu các biểu đồ tải trọng - độ lún thu được từ thí nghiệm. Khả năng chịu lực của tấm được xác định thông qua tải trọng lớn nhất và độ lún tương ứng. Tải trọng lớn nhất của các mẫu thử có giá trị trong khoảng từ 20,2 kN đến 29,7 kN. Tải trọng lớn nhất của tổ mẫu đạt giá trị trung bình là 23,7 kN, độ lệch chuẩn là 2,9 kN và hệ số biến động là 12,2%. Độ lún của các mẫu thử tại tải trọng lớn nhất dao động trong khoảng từ 2,62 mm đến 3,81 mm. Độ lún của tổ mẫu có giá trị trung bình là 3,31 mm, độ lệch chuẩn là 0,49 mm và hệ số biến động là 14,7%. Độ lún của tấm BTCLTC có phạm vi biến động tương đối lớn. Kết quả này có thể được giải thích là do sự biến động độ chặt nền đất giữa các lần thí nghiệm.



Hình 5. Biểu đồ tải trọng - độ lún của các mẫu thử 300x300x50 mm

Tương tự, thí nghiệm đã được thực hiện trên tổ mẫu II gồm 6 tấm BTCLTC có kích thước 300×300×70 mm, ký hiệu lần lượt từ H70-

M1 đến H70-M6, trong đó “H70” nghĩa là tấm có chiều dày 70 mm, “M1, ..., M6” là số thứ tự mẫu thí nghiệm. Hình 6 giới thiệu các biểu đồ tải trọng - độ lún thu được từ thí nghiệm. Tải trọng lớn nhất của các mẫu thử có giá trị trong khoảng từ 44,6 kN đến 54,6 kN. Tải trọng lớn nhất của tổ mẫu đạt giá trị trung bình là 50,2 kN, độ lệch chuẩn là 3,0 kN và hệ số biến động là 6,0%. Độ lún của các mẫu thử tại tải trọng lớn nhất dao động trong khoảng từ 4,97 mm đến 7,85 mm. Độ lún của tổ mẫu có giá trị trung bình là 6,76 mm, độ lệch chuẩn là 0,97 mm và hệ số biến động tương đương với độ lún của các tấm 300×300×70 mm có hệ số biến động tương đương với độ lún của các tấm 300×300×50 mm. Trong khi đó, tải trọng lớn nhất của các tấm có chiều dày lớn hơn thì có xu hướng hội tụ hơn so với các tấm mỏng hơn.



Hình 6. Biểu đồ tải trọng - độ lún của các mẫu thử 300x300x70 mm

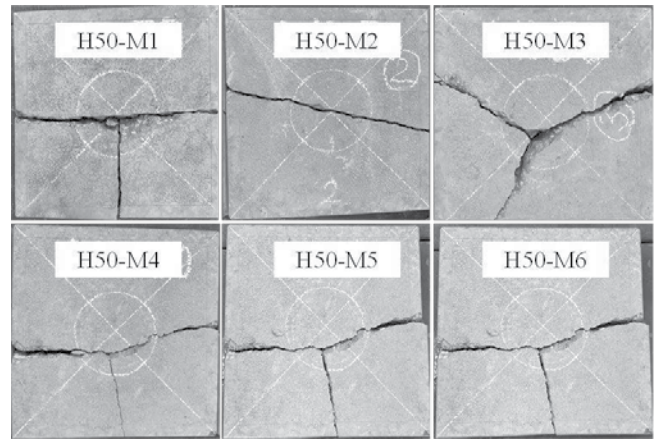
Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng, mối quan hệ giữa tải trọng và độ lún của tấm BTCLTC gần như tuyến tính. Với cùng kích thước 300×300 mm (chiều dài × chiều rộng), thì tấm BTCLTC có chiều dày 70 mm có khả năng chịu lực cao hơn 2,12 lần so với tấm có chiều dày 50 mm (50,2 kN so với 23,7 kN). Đồng thời, độ lún trung bình của các tấm có chiều dày 70 mm cũng cao gấp 2,04 lần so các tấm có chiều dày 50 mm (6,76 mm so với 3,31 mm). Như vậy, tăng chiều dày tấm BTCLTC cho phép cải thiện đáng kể khả năng chịu lực và giảm hệ số biến động giữa các tấm BTCLTC.

**3.2. Sơ đồ nứt và dạng phá hoại**

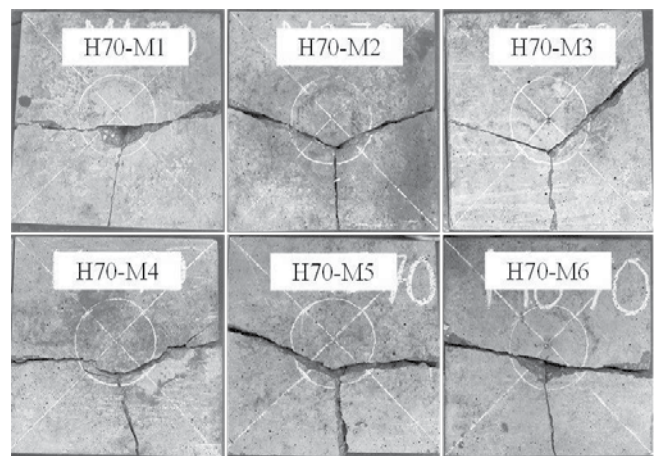
Dưới tác dụng của tải trọng tập trung, vết nứt đầu tiên hình thành ở giữa cạnh tấm và phát triển từ mặt đáy lên mặt trên của tấm. Khi tải trọng tăng, vết nứt mở rộng và chạy xuyên qua giữa tấm. Vết nứt trên các tấm có kích thước 300×300×70 mm có độ mở rộng lớn hơn trên các tấm có kích thước 300×300×50 mm, như quan sát thấy trên Hình 7. Tại thời điểm phá hoại, các tấm BTCLTC bị vỡ và chia làm 3 miếng cứng, như trên Hình 8 và Hình 9. Sơ đồ nứt của các tấm là tương tự nhau và tương đồng giữa hai tổ mẫu. Tất cả tấm BTCLTC đều bị phá hoại giòn, sau khi đạt đến tải trọng lớn nhất, thì mất khả năng chịu lực.



Hình 7. Vết nứt do tải trọng tập trung tác dụng trên tấm BTCLTC



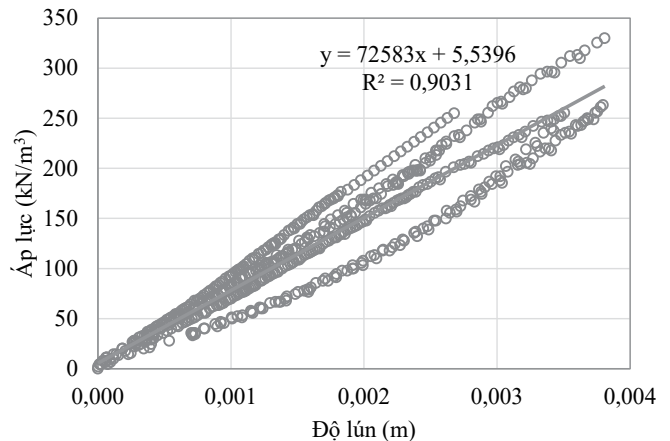
Hình 8. Dạng phá hoại của các mẫu thử 300×300×50 mm



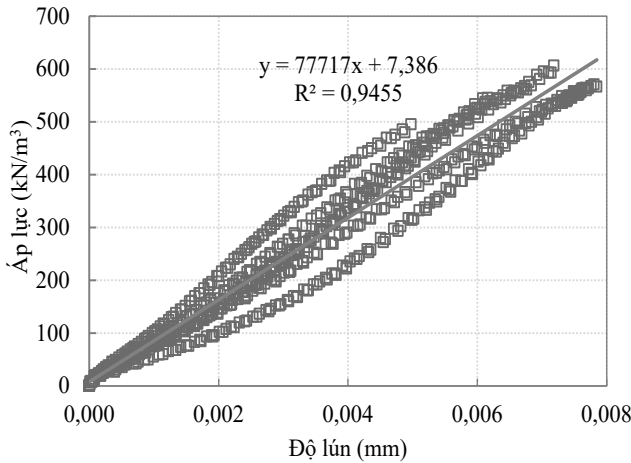
Hình 9. Dạng phá hoại của mẫu thử 300×300×70 mm

**3.3. Xác định hệ số nền**

Dựa trên các kết quả thí nghiệm, mối quan hệ giữa áp lực đáy tấm và độ lún của lớp cát được thiết lập lần lượt cho tổ mẫu 300×300×50 mm và tổ mẫu 300×300×70 mm. Hệ số nền  $k$  (kN/m<sup>3</sup>) được xác định theo công thức (1), trong đó  $q$  (kN/m<sup>2</sup>) là tải trọng phân bố lên tấm và  $\Delta$  (m) là độ lún của nền cát. Mối quan hệ giữa áp lực và độ lún của nền cát được mô tả bằng hai phương trình tuyến tính như trên như trên Hình 10 và Hình 11. Như vậy, hệ số nền được xác định từ thí nghiệm có giá trị trong khoảng từ 72583 đến 77717 kN/m<sup>3</sup>.



Hình 10. Biểu đồ áp lực và độ lún của các mẫu thử 300×300×50 mm



Hình 11. Biểu đồ áp lực và độ lún của các mẫu thử 300x300x70 mm

$$k = \frac{q}{\Delta} \quad (1)$$

#### 4. ĐỀ XUẤT CÔNG THỨC THỰC NGHIỆM

##### 4.1. Đề xuất công thức

Dựa trên công thức cổ điển, công thức Westergaard [23] và công thức Shentu [25], nghiên cứu này đề xuất công thức thực nghiệm dự báo khả năng chịu lực của tấm BTCLTC có kích thước nhỏ 300x300 mm đặt trên nền đàn hồi, như sau:

$$P_u = \alpha_{TN} \frac{R_{bt} d^2}{A} \quad (2)$$

Trong đó:  $P_u$  (kN) là khả năng chịu lực giới hạn của tấm bê tông;  $R_{bt}$  (MPa) là cường độ chịu kéo của bê tông được xác định từ cường độ chịu nén trên mẫu lập phương ( $R_n$ ) theo công thức (3);  $d$  (mm) là chiều dày tấm bê tông;  $\alpha_{TN}$  là hệ số thực nghiệm.

$$R_{bt} = 0,26 R_n^{2/3} \quad (3)$$

Hệ số  $A$  được tính toán theo công thức (4), với  $k$  (N/mm<sup>3</sup>) là hệ số nền có giá trị trong khoảng từ 0,01 đến 0,1 và  $E_c$  (GPa) là mô đun đàn hồi của bê tông được tính toán theo công thức (5) khi không có số liệu thí nghiệm.

$$A = \log \left( \frac{88 E_c 10^3}{kd} \right) \quad (4)$$

$$E_c = 20,83 \left( \frac{R_n}{10} \right)^{0,3} \quad (5)$$

Hệ số thực nghiệm  $\alpha_{TN}$  được xác định từ kết quả thí nghiệm thu được trên các mẫu thử 300x300x50 mm, theo công thức (6), với  $P_u^{TN}$  (kN) là giá trị lớn nhất của tải trọng thí nghiệm.

$$\alpha_{TN} = \frac{A P_u^{TN}}{R_{bt} d^2} \quad (6)$$

Bảng 2. Kết quả tính toán hệ số thực nghiệm  $\alpha_{TN}$

Mẫu thử	$P_u^{TN}$ (kN)	$R_n$ (MPa)	$R_{bt}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$k$ (N/mm <sup>3</sup> )	$\alpha_{TN}$
H50-M1	20,2	41,3	3,11	35,6	0,072583	15,43
H50-M2	23,0	41,3	3,11	35,6	0,072583	17,57
H50-M3	22,7	41,3	3,11	35,6	0,072583	17,34
H50-M5	23,0	41,3	3,11	35,6	0,072583	17,57
H50-M6	23,7	41,3	3,11	35,6	0,072583	18,10
Trung bình						17,20

Bảng 2 giới thiệu kết quả tính toán hệ số thực nghiệm  $\alpha_{TN}$  đối với từng mẫu thử 300x300x50 mm. Cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của BTCLTC được lấy bằng các giá trị thí nghiệm, như nêu trong mục 2.1. Hệ số nền  $k$  lấy bằng 0,007258 như kết quả trên Hình 10. Lưu ý rằng, giá trị thí nghiệm của mẫu thử H50-M4 có độ lệch tương đối lớn so với giá trị trung bình của 5 mẫu thử còn lại nên không sử dụng vào tính toán. Hệ số thực nghiệm  $\alpha_{TN}$  có giá trị trung bình là 17,2 và được làm tròn số là  $\alpha_{TN} = 17$ . Do đó, công thức thực nghiệm để dự báo khả năng chịu lực của tấm BTCLTC trên nền đàn hồi như sau:

$$P_u = 17 \frac{R_{bt} d^2}{A} \quad (7)$$

##### 4.2. Đánh giá độ tin cậy

Để đánh giá độ tin cậy của công thức thực nghiệm, tiến hành tính toán khả năng chịu lực của tấm BTCLTC có 300x300x70 mm theo công thức (7) và so sánh với kết quả thí nghiệm thu được trong mục 3.1. Cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của BTCLTC lấy bằng các giá trị nêu trong Bảng 2. Với hệ số nền  $k = 0,007258$ , thì khả năng chịu lực của tấm tính toán theo công thức thực nghiệm là  $P_u = 44,7$  kN. Trong khi đó, tải trọng lớn nhất trên các mẫu thử có giá trị trung bình bằng 50,2 kN. Theo tính toán, khả năng chịu lực của tấm nhỏ hơn khoảng 10,9% so với kết quả thí nghiệm, là thiên về an toàn và chấp nhận được. Như vậy, công thức (7) có thể được sử dụng để dự báo khả năng chịu lực của tấm bê tông có kích thước 300x300 mm và chiều dày  $d$  (mm) bất kỳ.

##### 4.3. Mở rộng công thức thực nghiệm

Phạm vi áp dụng của công thức (7) bị giới hạn đối với các tấm bê tông hình vuông với chiều rộng 300 mm. Trong mục này, công thức đề xuất được mở rộng để dự báo khả năng chịu lực của tấm bê tông hình vuông với các chiều rộng  $b$  (mm) khác nhau, thay đổi trong khoảng từ 300 mm đến 600 mm, phù hợp với kích thước cơ bản của gạch terazo theo tiêu chuẩn TCVN 7744:2013 [29].

Khả năng chịu mô men uốn của tấm có kích thước 300x300 mm và chiều dày  $d$  (mm) được tính toán theo công thức (8).

$$M_{u,300} = \frac{300 R_{bt} d^2}{6} \quad (8)$$

Khả năng chịu mô men uốn của tấm có kích thước  $b \times b$  (mm) và chiều dày  $d$  (mm) được tính toán theo công thức (9).

$$M_{u,b} = \frac{b R_{bt} d^2}{6} \quad (9)$$

$$\text{Đặt: } \beta = \frac{300}{b}$$

Công thức (7) được phát triển thành công thức (10) để dự báo khả năng chịu lực của tấm bê tông có bề rộng và chiều dày lựa chọn trước.

$$P_u = 17 \frac{R_{bt} d^2}{A} \beta^{2/3} \quad (10)$$

#### 5. KẾT LUẬN

Từ những kết quả thu được có thể đưa ra một số kết luận chính như sau:

- Đối với BTCLTC được sử dụng trong nghiên cứu này, thì tấm kích thước 300x300x50 mm chịu được tải trọng tập trung với giá trị trung bình bằng 23,7 kN và độ lún trung bình bằng 3,31 mm.
- Khả năng chịu lực của tấm BTCLTC được cải thiện đáng kể khi tăng chiều dày tấm. Tấm kích thước 300x300x70 mm chịu được tải trọng tập trung với giá trị trung bình bằng 50,2 kN và độ lún trung

bình là 6,76 mm, cao hơn 2,12 lần so với tấm kích thước 300×300×50 mm.

• Các công thức thực nghiệm đã được đề xuất để dự báo khả năng chịu lực của tấm bê tông kích thước nhỏ trên nền đàn hồi. Độ tin cậy của các công thức này đã được đánh giá thông qua kết quả thí nghiệm.

#### Lời cảm ơn

Các tác giả chân thành cảm ơn sự giúp đỡ của các thành viên Dự án SATREPS (No. JPMJSA1701) giữa Trường Đại học Xây dựng Hà Nội và Trường Đại học Saitama, Nhật Bản.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Agenda 21, the Rio Declaration on Environment and Development, the Statement of Forest Principles, the United Nations Framework Convention on Climate Change and the United Nations Convention on Biological Diversity, United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, 3–14 June 1992.
- [2] D. Ürge-Vorsatz, A. Novikova, Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings. *Energy Policy* 36 (2) (2008) 642–661.
- [3] Nghị định 06/2022/NĐ-CP của Chính phủ: Quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn.
- [4] Fredonia; World Construction Aggregates to 2011 – Demand and Sales Forecasts; Market Share, Market Size, Market leaders, Industry.
- [5] Xie T., Gholampour A., Ozbakkaloglu T. (2018). Toward the development of sustainable concrete with recycled concrete aggregates: Comprehensive review of studies on mechanical properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), 04018211.
- [6] Thông tư số 08/2017/TT-BXD của Bộ Xây dựng: Quy định về quản lý chất thải rắn xây dựng.
- [7] Hoang N.H., Ishigaki T., Kubota R., Tong T.K., Nguyen T.T., Nguyen H.G., Yamada M., Kawamoto K. (2020). Waste generation, composition, and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam. *Waste Management*, 117, 32–41.
- [8] Tong T.K., Nguyen N.T., Nguyen H.G., Ishigaki T., Kawamoto K. (2022). Management assessment and future projections of construction and demolition waste generation in Hai Phong City, Vietnam. *Sustainability*, 14, 9628.
- [9] K. Obla, H. Kim, C. Lobo. Crushed Returned Concrete as Aggregates for New Concrete. *RMC Res Educ Found* 2007:51.
- [10] WRAP, NRW. Aggregates from Inert Waste: End of Waste Criteria for the Production of Aggregates from Inert Waste 2013, pp. 1–24.
- [11] DAfStb. DAfStb 2010, Concrete in accordance with DIN EN 206- 1 and DIN 1045-2 with recycled aggregates in accordance with DIN EN 12620, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Berlin, Germany. 2010.
- [12] Tam V.W.Y., Kotrayothar D, Xiao J. (2015). Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 100, 262–272.
- [13] Quang N.T., Cường T.V., Tân N.N., Tân N.H., Giang N.H. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của tỷ lệ sử dụng cốt liệu lớn tái chế đến sự phát triển cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông theo thời gian. *Tạp chí Khoa học Công nghệ xây dựng*, 15(1V), 48–59.
- [14] Huy N.S., Tân N.N., Hang M.T.N., Quang L.N. (2021). Environmentally friendly unburnt bricks using raw rice husk and bottom ash as fine aggregates: Physical and mechanical properties. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 15(1), 110–120.
- [15] Quang N.T., Cuong T.V., Tân N.N., Tân N.H., Kawamoto K., Giang N.H. (2022). Experimental studies on behaviors of reinforced concrete column structures made of recycled aggregates under concentric loads. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, 16(2), 1–11.
- [16] Ngo S-H., Nguyen N.T., Nguyen X.H. (2022). Assessing the effect of GGBFS content on mechanical and durability properties of high-strength mortars. *Civil Engineering Journal*, 8(5), 983–950.
- [17] T.T. Kiên (2017). Nghiên cứu sử dụng phế thải xây dựng trong chế tạo bê tông. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng.
- [18] N.T. Quang (2022). Nghiên cứu thực nghiệm về tính chất cơ lý của bê tông sử dụng cốt liệu lớn tái chế từ chất thải rắn xây dựng và ứng dụng cho cột bê tông cốt thép chịu nén đúng tâm. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [19] N.K. Tuân (2024). Nghiên cứu chế tạo bê tông rỗng thoát nước sử dụng cốt liệu tái chế từ phế thải xây dựng. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [20] TCVN 11969:2018. Cốt liệu lớn tái chế cho bê tông.
- [21] TCVN 13694:2023. Cấp phối tái chế từ chất thải rắn xây dựng làm lớp móng đường giao thông đô thị - Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử.
- [22] de Brito, J., Saikia, N., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). Concrete with recycled aggregates in international codes. *Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*, 379–429.
- [23] Westergaard, H. M. (1948). New formulas for stresses in concrete pavements of airfields. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113(1), 425–439.
- [24] Ringo, B. C., & Anderson, R. B. (1996). Designing floor slabs on grade. The Aberdeen Group, printed in United States of America.
- [25] Shentu, L., Jiang, D., & Hsu, C. T. T. (1997). Load-carrying capacity for concrete slabs on grade. *Journal of Structural Engineering*, 123(1), 95–103.
- [26] Nguyen X.H., Phan Q.M., Nguyen N.T., Tran V.Q. (2023). Interpretable machine learning model for evaluating mechanical properties of concrete made with recycled concrete aggregate. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202300614>.
- [27] Hiền N.X., Minh P.Q., Tân N.N. (2024). Nghiên cứu cường độ nén và mô đun đàn hồi của bê tông cốt liệu tái chế sử dụng bê tông phá dỡ và xỉ hạt lò cao nghiên cứu. *Tạp chí Xây dựng*, số 07-2024, 156–160.
- [28] TCVN 11586:2016. Xi hạt lò cao nghiên cứu dùng cho bê tông và vữa.
- [29] TCVN 7744:2013 Gạch Terazo
- [30] TCVN 6355-4:2009 Gạch xây - Phương pháp thử. Phần 4: Xác định độ hút nước.