



## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON DEVELOPMENT LENGTH OF GFRP REBARS IN LIGHTWEIGHT CONCRETE STRUCTURE

Tu Sy Quan<sup>1\*</sup>, Nguyen Van Tuoi<sup>2</sup>, Le Van Duong<sup>3</sup>, Nguyen Thanh Tam<sup>1</sup>,  
Tran The Truyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Transport and Communications, No3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>The 5th Central College of Transport, No28 Ngo Xuan Thu Street, Danang, Vietnam

<sup>3</sup>Department of Science - Technology, Ministry of Transport, No80 Tran Hung Dao Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 01/09/2021

Revised: 10/10/2021

Accepted: 05/11/2021

Published online: 15/12/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.3>

\* *Corresponding author*

Email: tussyquan@utc.edu.vn; Tel: +84973767555

**Abstract.** The keramzit lightweight gravel used of coarse aggregate in concrete has been applied instead in construction works in Vietnam and around the world, significantly reducing the weight of the superstructure and saving costs related to the mounting crane as well as the substructure. Besides, the calculating in development length of the reinforcement bar based on bond behavior to the concrete matrix is a requirement for the design and installation of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) rebars in concrete structure. The standards also recommend a certain diminution of bond behavior for the cases of lightweight concrete, conducting to a diminution of bearing capacity of the members. Therefore, many pull-out tests for GFRP rebars were carried out on cube-shaped lightweight concrete specimens having the same mix proportion with three different diameters and with anchor lengths corresponding five times the rebar diameter. The American, Canadian and Japanese standards referenced showing that theoretical calculations are more priori than experimental results obtained in term of safety. The research results are to make recommendations for design work, especially in the case of structures using lightweight concrete and GFRP reinforcement bar.

**Keywords:** development length, bond behavior, lightweight concrete, keramzit gravel, GFRP rebar.



## NGHIÊN CỨU LÝ THUYẾT VÀ THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CHIỀU DÀI TRIỂN KHAI CỦA CỐT THANH GFRP TRONG KẾT CẤU BÊ TÔNG NHẸ

Từ Sỹ Quân<sup>1\*</sup>, Nguyễn Văn Tươi<sup>2</sup>, Lê Văn Dương<sup>3</sup>, Nguyễn Thành Tâm<sup>1</sup>,  
Trần Thế Truyền<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông Vận tải, số 3 Cầu Giấy, Hà nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Cao đẳng Giao thông Vận tải Trung ương V, số 28 Ngô Xuân Thu, Đà Nẵng, Việt Nam

<sup>3</sup>Vụ Khoa học Công nghệ, Bộ Giao thông Vận tải, số 80 Trần Hưng Đạo, Hà nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 01/09/2021

Ngày nhận bài sửa: 10/10/2021

Ngày chấp nhận đăng: 05/11/2021

Ngày xuất bản Online: 15/12/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.3>

\* Tác giả liên hệ

Email: tusyquan@utc.edu.vn; Tel: +84973767555

**Tóm tắt.** Việc sử dụng sợi nhẹ keramzit thay thế cốt liệu thô trong bê tông đã từng bước được áp dụng trong các công trình xây dựng tại Việt Nam và trên thế giới, giúp giảm đáng kể trọng lượng phần trên của kết cấu, tiết kiệm được chi phí liên quan đến cấu lắp cũng như kết cấu phần dưới. Bên cạnh đó, tính toán chiều dài triển khai của cốt thanh gia cường dựa trên cơ sở ứng xử dính bám với bê tông nền là việc làm bắt buộc đối với công tác thiết kế bố trí cốt thanh polimer sợi thủy tinh (GFRP) trong kết cấu bê tông. Các tiêu chuẩn cũng khuyến cáo có sự suy giảm nhất định của ứng xử dính bám đối với trường hợp của bê tông nhẹ, kéo theo sự suy giảm khả năng chịu tải của các cấu kiện. Do vậy, các thí nghiệm kéo tụt thanh GFRP ra khỏi mẫu (pull out test) đã được tiến hành trên các mẫu bê tông nhẹ hình lập phương có cùng thành phần cấp phối với ba loại đường kính thanh khác nhau và với chiều dài neo gấp năm lần đường kính thanh. Các tiêu chuẩn của Mỹ, Canada và Nhật bản đã được sử dụng để tham chiếu cho thấy các tính toán lý thuyết thiên về an toàn hơn so với kết quả thí nghiệm thu được. Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho phép đưa ra các khuyến cáo cho công tác thiết kế, cụ thể là trong trường hợp của kết cấu có sử dụng bê tông sợi nhẹ và cốt thanh gia cường GFRP.

**Từ khóa:** chiều dài triển khai, ứng xử dính bám, bê tông nhẹ, sợi keramzit, cốt thanh gia cường GFRP.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thời gian qua, vấn đề nghiên cứu và sử dụng bê tông nhẹ ở Việt Nam đã phát triển mạnh mẽ. Năm 2001, Nguyễn Tiến Đích và các cộng sự đã thực hiện một chương trình nghiên cứu khá đầy đủ về vật liệu nhẹ dùng cho nhà và công trình, trong đó có phần nghiên cứu về bê tông sỏi nhẹ keramzit chịu lực [1]. Đề tài đã khảo sát các tính chất cơ lý của bê tông keramzit chịu lực, cho thấy khả năng ứng dụng tốt của bê tông sỏi nhẹ keramzit với cường độ chịu nén từ 15MPa đến 30MPa, khối lượng thể tích từ 1600kg/m<sup>3</sup> đến 1800kg/m<sup>3</sup> trong các kết cấu chịu lực.

Ngoài ra, khi thay thế cốt thép bằng cốt thanh GFRP không những giúp giảm trọng lượng bản thân của cấu kiện mà còn cải thiện đáng kể tuổi thọ và độ bền nhờ khả năng bền hóa, không dẫn điện, ít dẫn nhiệt của cốt thanh GFRP. Các nghiên cứu áp dụng cốt thanh GFRP cho công trình cầu, có thể kể đến “Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cường độ cao cốt polyme gia cường sợi (FRP) để xây dựng cầu ở Campuchia” của Cheng Por Eng (2017) [2]. Nghiên cứu đã đưa ra phương pháp thiết kế kết cấu bê tông cường độ cao sử dụng cốt GFRP theo các tiêu chuẩn của một số nước và các kết quả nghiên cứu của một số tác giả đã được tiến hành trên thế giới. Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây của Trần Thế Truyền và các cộng sự (2021) [3,4] đã chỉ ra rằng việc sử dụng kết hợp cốt thanh GFRP với bê tông sỏi nhẹ keramzit C30 thay thế cho bê tông thường làm giảm từ 25% đến 35% trọng lượng bản thân của cấu kiện đúc sẵn. So với các loại cốt thanh phi kim khác, giá thành GFRP khá rẻ, rất phù hợp với các dạng công trình chịu xâm thực và ăn mòn cao như ven biển hay hải đảo.



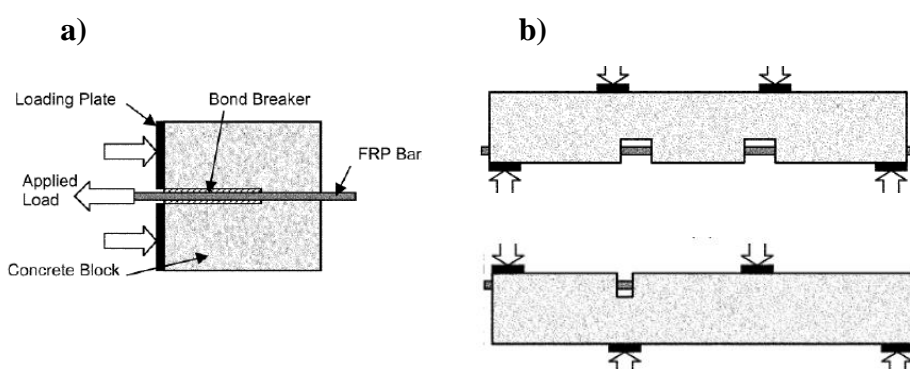
Hình 1. Hình ảnh minh họa: a) Bê tông sỏi nhẹ keramzit; b) Cốt thanh GFRP (Nguồn Internet).

Một vấn đề đặt ra khi tính toán bố trí cốt thanh GFRP trong các cấu kiện chịu tải là phải xác định được ứng xử dính bám giữa cốt thanh gia cường và bê tông nền. Đối với trường hợp của bê tông nhẹ, tiêu chuẩn ACI 408R-03[5] cho rằng có sự suy giảm cường độ dính bám so với bê tông thường. Tùy thành phần bê tông mà ứng suất dính bám cực đại của bê tông nhẹ chỉ bằng 65% đến 88% so với bê tông thường. Vì vậy, mục tiêu của nghiên cứu này là nhằm hiểu rõ hơn về ứng xử dính bám và cơ chế làm việc kết hợp của bê tông sỏi nhẹ và cốt thanh GFRP, cũng như đánh giá tác động của nó lên chiều dài triển khai của cốt thanh GFRP trong tính toán thiết kế, tạo tiền đề cho các ứng dụng rộng rãi hơn của cốt thanh GFRP trong kết cấu bê tông sỏi nhẹ nói riêng và kết cấu bê tông nói chung.

## 2. TỔNG QUAN ỨNG XỬ DÍNH BẮM CỦA BÊ TÔNG VỚI CỐT THANH GFRP

Ứng xử dính bám của cốt thanh GFRP với bê tông được kế thừa từ các nghiên cứu đối với bê tông cốt thép. Theo Alavi-Fard, M. và các cộng sự (1999) [6], trong một cấu kiện bê tông cốt thép, bê tông chủ yếu chịu lực nén, trong khi cốt thép chủ yếu chịu lực kéo. Điều này chỉ ra rằng phải có là một lực chuyển hoặc liên kết dính bám giữa hai loại vật liệu. Nếu không có sự truyền lực, cốt thép sẽ bị kéo tụt khỏi bê tông và kết cấu sẽ bị phá hoại do tải trọng kéo. Theo ACI 408R-03, trong kết cấu bê tông cốt thép, việc truyền lực giữa một thanh cốt thép và bê tông xảy ra theo ba cơ chế: (1) Bám dính hóa học giữa thanh gia cường và bê tông; (2) Lực ma sát phát sinh từ độ nhám của bề mặt tiếp xúc, lực ngang với bề mặt thanh, trượt tương đối giữa thanh và bê tông xung quanh, và (3) Sự tương tác neo cơ học và khả năng chịu lực của tiết diện cốt thép.

Ngoài ra, ứng xử dính bám còn phụ thuộc vào đường kính danh định của cốt thanh, trạng thái bề mặt gia cường, bề dày lớp bê tông bảo vệ, vị trí đặt cốt và cường độ bê tông, theo các nghiên cứu của Kotynia và các cộng sự (2017) [7]. Trong thiết kế, cường độ dính bám và chiều dài triển khai của cốt thép được quy định bởi các tiêu chuẩn như ACI 318-14 [8] hay TCVN 11823:2017 [9]. Đối với trường hợp cốt thanh FRP, các tiêu chuẩn như CSA S806-02, CSA S6-06, ACI 440.1R-15 hay JSCE [10-13] đều đưa ra công thức xác định chiều dài triển khai cũng như cường độ dính bám của cốt thanh gia cường. Hai phương pháp thực nghiệm phổ biến nhất để xác định cường độ dính bám là thí nghiệm kéo tụt (pull-out tests) và thí nghiệm xác định dính bám uốn (flexural bond tests), được thể hiện trên Hình 2.



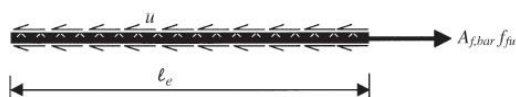
Hình 2. Các mô hình thí nghiệm xác định cường độ dính bám đề xuất bởi ACI 440R-07[12]: a) Pull-out tests; b) Flexural bond tests.

Theo Achillides và các cộng sự (2004) [15], mặc dù phân bố ứng suất trong bê tông ở thí nghiệm pull-out hiếm khi xảy ra trên thực tế nhưng nhờ cách thức thí nghiệm đơn giản nên thường được áp dụng rộng rãi để xác định cường độ dính bám của cốt thanh gia cường trong bê tông. Để thuận tiện cho các công tác thiết kế, ACI 440.1R-15 giả định rằng lực dính bám là đồng nhất trên chiều dài neo, chiều dài triển khai hoặc nối buộc của cốt thanh gia cường.

Giả sử ứng suất phân bố đồng đều, lực tác dụng lên cốt thanh được cân bằng bởi ứng suất dính bám trung bình tác dụng lên bề mặt cốt thanh. Do đó, ta có thể được thiết lập được biểu thức của cường độ dính bám cho cốt thanh neo trong bê tông với chiều dài bất kỳ:

$$u = \frac{A_{f,bar} f_f}{\pi l_e d_b} \quad (1)$$

Cũng theo ACI 440.1R-15 chiều dài triển khai được tính ở thời điểm cốt thanh bị kéo đứt đồng thời cường độ dính bám đạt giá trị cực đại, được thể hiện trên Hình 3.



Hình 3. Cân bằng tới hạn cho phép xác định chiều dài triển khai theo ACI 440.1R-15.

Khi đó, chiều dài triển khai được tính toán dựa trên cơ sở cân bằng lực bởi công thức:

$$l_d = \frac{A_{f,bar} f_{fu}}{\pi u d_b} \quad (2)$$

Trong đó:  $u$  - Ứng suất dính bám trung bình (MPa);  $l_e$  - Chiều dài neo của cốt thanh (mm);  $d_b$  - Đường kính của cốt thanh (mm);  $A_{f,bar}$  - Diện tích tiết diện cốt thanh (mm<sup>2</sup>);  $f_f$  - Ứng suất kéo trong cốt thanh (MPa);  $l_d$  - Chiều dài triển khai của cốt thanh (mm);  $f_{fu}$  - Ứng suất kéo tới hạn của cốt thanh (MPa).

### 3. CÔNG TÁC NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

#### 3.1. Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu chế tạo mẫu bao gồm bê tông cốt liệu nhẹ và cốt thanh polime sợi thủy tinh GFRP. Các tính chất của cốt thanh GFRP được cung cấp bởi nhà sản xuất và phân phối sản phẩm, công ty FRP Việt Nam. Các thông số kỹ thuật của cốt GFRP được tóm lược trong bảng sau:

Bảng 1. Cách tính chất của cốt gia cường được cung cấp bởi nhà sản xuất.

Chủng loại	Đường kính danh định (mm)	Diện tích tiết diện (mm <sup>2</sup> )	Mô đun đàn hồi (MPa)	Cường độ chịu kéo (MPa)
Cốt GFRP	20	240	45.000	800
Cốt GFRP	18	189	45.000	800
Cốt GFRP	16	165	45.000	800

Thành phần cấp phối bê tông C30 được thiết kế dựa trên chỉ dẫn của tiêu chuẩn ACI 211.4R-08 [16], trong đó xi măng PC40 Bút Sơn đã được sử dụng trong nghiên cứu, các tính chất cơ bản của xi măng thỏa mãn TCVN 2682:2009[17].

Bảng 2. Thành phần hỗn hợp vật liệu cho 1 m<sup>3</sup> bê tông nhẹ cấp 30 MPa có xét tới ảnh hưởng của độ ẩm và độ hút nước cốt liệu.

Thành phần	Khối lượng	Đơn vị
Muội silic	72	kg
Xi măng PC40 Bút Sơn	530	kg
Cát Sông Đà	800	kg
Nước	145	kg
Phụ gia siêu dẻo	6	lít
Sỏi nhẹ keramzit	250	kg

Các tính chất của cốt liệu thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 7570:2006[18]. 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[19].



Hình 4. Hình ảnh các thí nghiệm xác định tính chất cơ lý của bê tông sỏi nhẹ keramzit.

Các mẫu bê tông hình trụ tiêu chuẩn có đường kính 15cm và chiều cao 30cm đã được đúc, dưỡng hộ trong nước ở nhiệt độ phòng trong 28 ngày, sau đó được sấy khô ở nhiệt độ 70°C đến khối lượng không đổi trước khi tiến hành các thí nghiệm. Việc sấy các mẫu bê tông nhẹ là bắt buộc và tuân theo khuyến cáo của tiêu chuẩn TCVN 9030:2017[20] đối với trường hợp bê tông nhẹ. Trên thực tế, các mẫu được xử lý bề mặt, đo kích thước hình học và cân khối lượng trước khi thực hiện thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi, cường độ chịu nén. Bên cạnh đó, các thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông sỏi nhẹ keramzit cũng đã được thực hiện. Kết quả thí nghiệm được tổng hợp trong bảng sau:

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm xác định các tính chất cơ lý của bê tông sỏi nhẹ keramzit.

Đại lượng	Tiêu chuẩn thí nghiệm	Số lượng mẫu thử	Giá trị trung bình	Đơn vị
Cường độ chịu nén	ASTM C39-01	30	36,61	MPa
Mô đun đàn hồi	ASTM C469-02	30	16937	MPa



<b>Cường độ chịu kéo khi uốn</b>	ASTM C78-02	6	3,98	MPa
<b>Khối lượng thể tích</b>	ASTM C567-04	30	1753	kg/m <sup>3</sup>

Như vậy, vật liệu thu được thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật đề ra ban đầu, trong đó cường độ chịu nén của bê tông lớn hơn 30MPa và khối lượng thể tích trong khoảng từ 1600kg/m<sup>3</sup> đến 1800kg/m<sup>3</sup>, nhỏ hơn so với khối lượng thể tích trung bình của bê tông thường là 2500kg/m<sup>3</sup>.

### 3.2. Chế tạo mẫu thí nghiệm xác định ứng xử dính bám

Nghiên cứu thực nghiệm của đề tài được thực hiện với bê tông sợi nhẹ keramzit và cốt thanh GFRP đường kính 16mm, 18mm và 20mm, thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 11109:2015 [21]. Số mẫu thí nghiệm là 18 mẫu với chiều dài đoạn dính bám là 5 lần đường kính cốt thanh gia cường (5d). Đây là chiều dài đoạn neo được quy định trong thí nghiệm pull-out bởi các tiêu chuẩn TCVN 11109:2015 hay ACI 440.3R-04 [22].

Các mẫu bê tông sợi nhẹ có dạng hình lập phương, kích thước mỗi cạnh 20cm. Trong quá trình đúc mẫu dính bám, nhóm nghiên cứu cũng tiến hành thí nghiệm độ sụt và đúc các mẫu thí nghiệm để kiểm tra cường độ chịu nén bê tông của các mẻ trộn. Các mẫu phục vụ cho thí nghiệm dính bám sau đó được dưỡng hộ bằng cát ẩm trong phòng với nhiệt độ không đổi trong 28 ngày.



Hình 5. Hình ảnh cách thức đúc và chế tạo mẫu thí nghiệm.

### 3.3. Mô hình thí nghiệm và thiết bị đo đạc

Căn cứ vào điều kiện thí nghiệm hiện có tại trường Đại học Giao thông Vận tải, nhóm nghiên cứu đã thiết lập mô hình thí nghiệm theo nguyên tắc của tiêu chuẩn EN10080:2005[23]. Sơ đồ và quá trình thí nghiệm được thể hiện trên Hình 6.



Hình 6. Thí nghiệm xác định ứng xử dính bám giữa cốt thanh GFRP và bê tông nhẹ.

Thiết bị thí nghiệm gồm có: Kích thông tâm 20 tấn RCH20-155 (Trung Quốc), loadcell thông tâm 20 tấn CFBL Y (Trung Quốc), 09 bộ neo công cụ trong công nghệ nhỏ neo thép 16mm, 18mm và 20mm của hãng VSL (Thụy Sĩ), LVDT đo chuyển vị DDP - 50A (Hãng TML - Nhật Bản), bộ thu thập xử lý số liệu: DRA 30A (Hãng TML - Nhật Bản) và máy tính kết nối loadcell.

#### 4. CHIỀU DÀI TRIỂN KHAI TRONG TÍNH TOÁN THIẾT KẾ

Công tác thiết kế bố trí cốt thanh GFRP gia cường đối với kết cấu bê tông đã được nghiên cứu và quy định thông qua tiêu chuẩn quốc gia của nhiều nước như Mỹ, Canada, Nhật bản. Các tính chất cơ học của cốt thanh GFRP và bê tông sỏi nhẹ keramzit thu được bằng con đường thực nghiệm sẽ phục vụ cho các tính toán lý thuyết. Trên cơ sở công thức tính toán của các tiêu chuẩn, ta tiến hành so sánh chiều dài triển khai thu được bằng con đường thực nghiệm và lý thuyết với các giả thiết tính như sau:

- ✓ Bề dày lớp bê tông bảo vệ: 30 (mm).
- ✓ Bỏ qua ảnh hưởng của cốt ngang đến ứng xử dính bám của cốt dọc.
- ✓ Hiệu quả dính bám của cốt thanh GFRP bằng 80% so với cốt thép có cùng đường kính.
- ✓ Cấu kiện cốt GFRP phơi lộ trong điều kiện tiếp xúc trực tiếp với thời tiết ngoài trời (hệ số suy giảm cường độ 0,7 theo tiêu chuẩn ACI440.1R-15).

*Các đại lượng trong công thức của các tiêu chuẩn sau đây được giải thích chi tiết trong phần Phụ lục đi kèm [24].*

##### 4.1. Tiêu chuẩn CSA S806-02

Hiệp hội Tiêu chuẩn Canada (CSA S806-02) khuyến nghị sử dụng phương trình sau để xác định chiều dài triển khai của cốt thanh FRP:

$$l_d = 1,15 \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5}{d_{cs}} \frac{f_F}{\sqrt{f_c}} A_b \quad (3)$$



Hiệp hội tiêu chuẩn Canada cũng sử dụng phương trình sau đây cho cường độ dính bám trung bình của thanh FRP với bê tông:

$$u = \frac{d_{cs} \sqrt{f_c'}}{1,15 \cdot (k_1 k_2 k_3 k_4 k_5) \pi d_b} \quad (4)$$

Do đó, có thể nhận thấy cường độ dính bám được đề xuất trong biểu thức nêu trên là một hàm số phụ thuộc vào lớp bê tông bảo vệ, cường độ chịu nén bê tông, khối lượng riêng bê tông, đường kính thanh, điều kiện bề mặt thanh, vị trí thanh và loại sợi.

#### 4.2. Tiêu chuẩn CSA S6-06

Để xác định chiều dài triển khai của cốt thanh FRP, tiêu chuẩn thiết kế cầu và đường cao tốc Canada (CSA S6-06) đã sửa đổi phương trình xác định chiều dài triển khai đối với cốt thép bằng cách nhân chỉ số cốt ngang gia cường, được xác định bởi tỷ lệ mô đun đàn hồi của cốt thanh FRP trên mô đun đàn hồi cốt thép. Phương trình chiều dài triển khai cho một thanh FRP được đưa ra như sau:

$$l_d = 0,45 \frac{k_1 k_4}{\left( d_{cs} + k_{tr} \frac{E_{FRP}}{E_s} \right)} \left( \frac{f_{FRP}}{f_{cr}} \right) A_{FRP} \quad (5)$$

Cường độ dính bám trung bình được xác định bởi biểu thức sau:

$$u = \frac{f_{cr} (d_{cs} + k_{tr} E_{FRP} / E_s)}{0,45 \cdot \pi d_b \cdot k_1 k_4} \quad (6)$$

Như vậy, tiêu chuẩn CSA S6-06 xem xét cường độ dính bám của cốt thanh FRP là một hàm phụ thuộc vào lớp bê tông bảo vệ, lực giữ cung cấp bởi cốt ngang, mô đun đàn hồi thanh FRP, cường độ chịu nén, chịu uốn của bê tông, các đại lượng có liên quan tới khối lượng riêng bê tông, vị trí, đường kính thanh và điều kiện bề mặt thanh.

#### 4.3. Tiêu chuẩn ACI 440.1R-15

Cường độ dính bám được đề xuất bởi Viện Bê tông Hoa Kỳ (ACI) dựa trên nghiên cứu của Wambeke và Sheild (2006) [25]. Mỗi quan hệ về cường độ dính bám của thanh FRP được xây dựng tương tự như cách mà Orangun et al. (1977) [26] đã thiết lập một phương trình cho cường độ dính bám của các thanh cốt thép và bê tông. Wambeke và Shelid (2006) đã tạo ra một cơ sở dữ liệu gồm 269 thí nghiệm dính bám đối với dầm, chủ yếu bao gồm các mẫu GFRP và một vài mẫu AFRP. Một hồi quy tuyến tính của ứng suất dính bám trung bình với các tham số như lớp bê tông bảo vệ và chiều dài nhúng, được biểu diễn như sau:

$$u = \left( 0,33 + 0,025 \frac{C}{d_b} + 8,3 \frac{d_b}{l_e} \right) \sqrt{f_c'} \quad (7)$$

Phương trình sau được thiết lập để dự đoán ứng suất trong thanh có thể triển khai cho bề dày lớp bê tông bảo vệ và chiều dài nhúng nhất định:

$$f_{fe} = \frac{0,083\sqrt{f_c'}}{\alpha} \left( 13,6 \frac{l_e}{d_b} + \frac{C}{d_b} \frac{l_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad (8)$$

$$\text{hay } l_d = \frac{\frac{f_{fe}\alpha}{0,083\sqrt{f_c'}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad (9)$$

Dựa trên các thử nghiệm trong cơ sở dữ liệu của Wambeke và Shild (2006), dính bám của các thanh AFRP tương tự như các thanh GFRP. Không có dữ liệu cho các thanh CFRP, tuy nhiên, người ta dự đoán rằng độ cứng lớn hơn nhiều của các thanh CFRP có thể sẽ làm giảm chiều dài triển khai cần thiết dẫn đến hệ số sửa đổi vật liệu thấp hơn. Hệ số vật liệu được khuyến nghị là 1,0 cho các thanh CFRP. Dính bám giữa thanh FRP và bê tông theo ACI 440.1R-15 phụ thuộc vào bề dày lớp bê tông bảo vệ, đường kính thanh, chiều dài nhúng, cường độ chịu nén bê tông và vị trí của thanh.

#### 4.4. Tiêu chuẩn JSCE 1997

Tiêu chuẩn thiết kế của Nhật Bản (JSCE, 1997) tương tự như tiêu chuẩn thiết kế CSA S6-06 của Canada ở chỗ cả hai đều thực hiện sửa đổi các phương trình được sử dụng để xác định chiều dài triển khai cần thiết cho cốt thép và áp dụng nó cho cốt FRP. Chiều dài triển khai cơ bản của cốt thanh chịu kéo sẽ trải qua phá hoại tách dính bám được tính theo công thức sau:

$$l_d = \alpha_1 \frac{f_d}{4f_{bod}} d_b > 20.d_b \quad (10)$$

Cường độ dính bám trung bình được tính theo công thức:

$$u = \frac{f_{bod}}{\alpha_1} \quad (11)$$

Khuyến nghị thiết kế của JSCE chỉ rõ rằng khi cốt thanh được đặt ở vị trí có hơn 300mm bê tông bên dưới và vị trí đặt thanh ở một góc nhỏ hơn 45° so với phương ngang, thì chiều dài triển khai được xác định phải nhân với hệ số 1,3. Theo tiêu chuẩn thiết kế JSCE, có thể thấy rằng cường độ dính bám giữa thanh FRP và bê tông phụ thuộc vào vị trí thanh, cường độ chịu nén của bê tông, lớp bê tông bảo vệ, đường kính thanh và lực giữ do cốt ngang cung cấp.

#### 4.5. Nhận xét kết quả tính toán lý thuyết và thực nghiệm

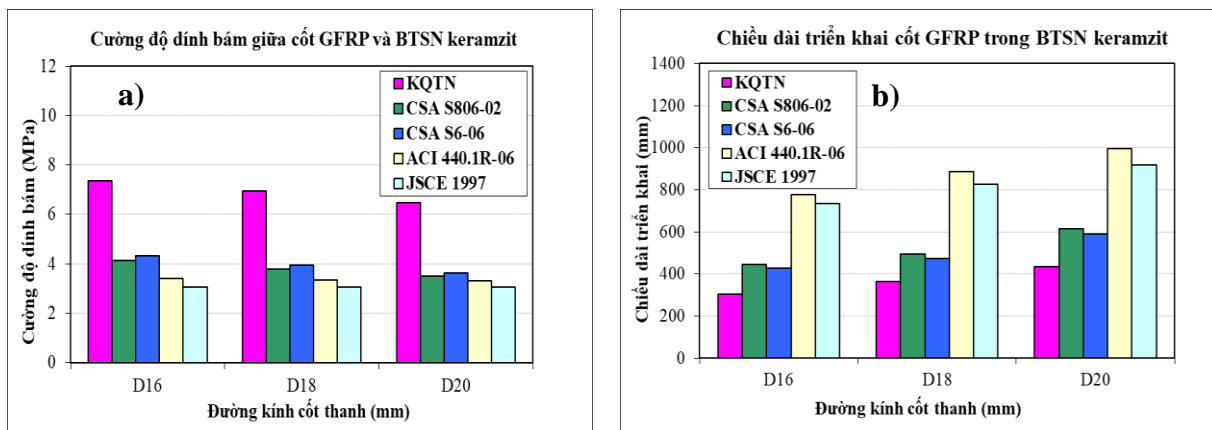
Kết quả cho thấy các mẫu thí nghiệm đều bị phá hoại do nứt tách bê tông, một phần gân trên thanh GFRP bị phá hoại. Điều này khá tương đồng với quan sát của Cosenza et al.(2002) [27] trên các mẫu có cường độ chịu nén của bê tông từ 30MPa đến 55MPa.



Hình 7. Hình ảnh mẫu bị phá hoại sau thí nghiệm pull-out: a) Các khối bê tông bị nứt tách ; b) Một phần gân trên cốt thanh GFRP bị bong tuột.

Như vậy, tùy theo đường kính thanh, cần một lực kéo có giá trị từ 7 đến 10 tấn để có thể kéo tụt thanh GFRP ra khỏi mẫu thí nghiệm. Sử dụng công thức (1), (2) với các thông số hình học và đặc tính cơ học đã biết của cốt thanh, các đại lượng như cường độ dính bám và chiều dài triển khai có thể được xác định và thể hiện trên Hình 8. Dựa trên cơ sở các tính toán lý thuyết theo tiêu chuẩn và kết quả thí nghiệm thu được, từ đồ thị Hình 8 một vài nhận xét có thể được rút ra như sau:

Kết quả cường độ dính bám thu được trên các tiêu chuẩn khác nhau là khá tương đồng, dao động từ 3,05MPa đến 4,32MPa. Cường độ dính bám theo tiêu chuẩn thấp hơn so với con số thu được thông qua thực nghiệm (dao động từ 41% đến 56% kết quả thí nghiệm).



Hình 8. So sánh cách tính theo thực nghiệm và tiêu chuẩn của 3 loại đường kính thanh GFRP 16mm, 18mm và 20mm: a) Cường độ dính bám trung bình; b) Chiều dài triển khai.

Trong khi đó, chiều dài triển khai thu được bằng con đường thực nghiệm lại thấp hơn đáng kể so với tính toán lý thuyết, dao động từ 31cm đến 43cm, chỉ bằng 41% đến 73% kết quả tính toán lý thuyết. Điều này được giải thích bởi các công thức theo tiêu chuẩn thường

được bổ sung thêm các hệ số an toàn nên có sự chênh lệch so với cách tính thuần túy theo sức bền vật liệu. Chiều dài triển khai theo tiêu chuẩn của Mỹ (ACI 440.1R-15) và Nhật Bản (JSCE 1997) là khá tương đồng và thiên về an toàn, gấp 1,4 đến 1,6 lần theo cách tính của tiêu chuẩn Canada (CSA S806-02, CSA S6-06). Như vậy, chiều dài triển khai tính toán theo chỉ dẫn của hai tiêu chuẩn Canada (CSA S806-02, CSA S6-06) là khá giống nhau và sát hơn với kết quả tính dựa trên thực nghiệm.

## 5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trên cơ sở phân tích các tài liệu và tiêu chuẩn liên quan, nhóm nghiên cứu đã thiết kế thành phần cấu tạo và thực hiện các thí nghiệm xác định tính chất cơ lý trên 30 mẫu bê tông sợi nhẹ keramzit C30, cụ thể bê tông có cường độ chịu nén trung bình đạt 36,6MPa và khối lượng thể tích trung bình 1753kg/m<sup>3</sup>. Sau đó, các mẫu thí nghiệm hình lập phương với chiều dài neo tiêu chuẩn 5d của cốt thanh GFRP đã được đúc với 3 loại đường kính thanh khác nhau. Cường độ dính bám trung bình đã được tính toán dựa trên các tiêu chuẩn của Hoa Kỳ, Canada và Nhật Bản cho giá trị khá tương đồng và nhỏ hơn giá trị thu được bằng con đường thực nghiệm. Đối với chiều dài triển khai, cách tính của tiêu chuẩn ACI 440.1R-15, JSCE 1997 thiên về an toàn hơn CSA S806-02, CSA S6-06 và đều lớn hơn nhiều so với tính toán thực nghiệm. Để kiểm chứng những nhận xét nêu trên, trong tương lai cần thực hiện thêm những thí nghiệm phi tiêu chuẩn với chiều dài neo 3d hoặc 7d. Đây cũng là hướng nghiên cứu tiếp theo của bài báo.

## LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2021-XD-002.

Xin được cảm ơn các đồng nghiệp về sự cộng tác và giúp đỡ quý báu trong quá trình hoàn thiện đề tài.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Tiến Đích, Nguyễn Đăng Do, Nghiên cứu sử dụng vật liệu nhẹ cho nhà và công trình, Báo cáo kết quả đề tài mã số RDN 06-01, Bộ Xây dựng, 2001.
- [2] Cheng Por Eng, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Nghiên cứu ứng xử uốn của dầm bê tông cường độ cao cốt polyme gia cường sợi (FRP) để xây dựng cầu ở Campuchia, 2017.
- [3] T.T. Trần, V.H. Phạm, S.Q. Từ, B.Q. Đoàn, X.B. Hồ, Phân tích ứng xử của kết cấu bản bê tông nhẹ cốt composite sợi thủy tinh (GFRP) dùng thay thế tà vẹt gỗ trên cầu dầm thép đường sắt, Tạp chí Giao thông Vận tải, 3 (2021).
- [4] T.T. Trần, S.Q. Từ, V.H. Phạm, Nghiên cứu đề xuất kết cấu bản bê tông cốt liệu nhẹ thay thế cho tà vẹt gỗ trên cầu đường sắt, Tạp chí Cầu đường Việt Nam, 3 (2021).
- [5] ACI 408R-03, Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension, 2003.
- [6] M. Alavi-Fard, Bond Characteristics of High Strength Concrete, MASC. Thesis, Memorial University, St. John's, Nfld, 1999.
- [7] R. Kotynia, D. Szczech, M. Kaszubska, Bond Behavior of GRFP Bars to Concrete in Beam Test, Procedia Eng. 2017, 193, 401–408.

- [8] ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2014.
- [9] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 11823:2017 Thiết kế cầu đường bộ, 2017.
- [10] CAN/CSA-S806-02 (R2007), Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers, Canadian Standards Association, 2007.
- [11] CAN/CSA-S6-06 (R2012), Canadian Highway Bridge Design Code, 2012.
- [12] ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, 2015.
- [13] JSCE., Recommendations for design and construction for concrete structures using continuous fibre reinforcing materials. Tokyo Concrete Engineering Series, 1997.
- [14] ACI 440R-07, Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 2007.
- [15] Z. Achillides, K. Pilakoutas, Bond behaviour of fibre reinforced polymer bars under direct pullout conditions, Journal of Composites for Construction, 8 (2004) 173-181. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:2\(173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(173))
- [16] ACI 211.4R-08, Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials, 2008.
- [17] TCVN 2682:2009, Xi măng poóc lăng - Yêu cầu kỹ thuật.
- [18] TCVN 7570:2006, Cốt liệu cho bê tông và vữa. Yêu cầu kỹ thuật.
- [19] TCVN 4506:2012, Nước cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật.
- [20] TCVN 9030:2017, Bê tông nhẹ - Phương pháp thử.
- [21] TCVN 11109: 2015, Cốt Composite Polyme.
- [22] ACI 440.3R-04, Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, 2004.
- [23] EN10080:2005, Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel, 2005.
- [24] Phụ lục: [https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1AhogawYZ3YGQ011kbQbX\\_j26AXczSpEZ](https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1AhogawYZ3YGQ011kbQbX_j26AXczSpEZ)
- [25] B. W. Wambeke, C. K. Shield, Development length of glass fibre-reinforced polymer bars in concrete, ACI Structural Journal, 103 (2006) 11-17.
- [26] C. O. Orangun, J. O. Jirsa, J. E. Breen, Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, ACI Proceedings, 74 (1977) 114-122.
- [27] E. Cosenza, G. Manfredi, R. Realfonzo, Development length of FRP straight rebars, Composites Part B:Engineering, 33 (2002) 493-504. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00051-3)