

Nghiên cứu thực nghiệm quan hệ lực dính - độ trượt bê tông nhẹ sử dụng hạt cốt liệu nhẹ tái chế

Experimental study on the bond - slip behavior of lightweight concrete using recycled light aggregates

> TS LÊ NGỌC LAN

Bộ môn XDDD&CN, Khoa Công trình,
Trường ĐH Công nghệ Giao thông vận tải

TÓM TẮT

Công nghệ mới hiện nay cho phép chế tạo các hạt cốt liệu nhẹ từ phế thải phá dỡ công trình góp phần làm giảm đi việc sử dụng các nguyên liệu tự nhiên đang ngày càng cạn kiệt. Trong bài báo, tác giả giới thiệu về nghiên cứu thực nghiệm quan hệ lực dính - độ trượt bê tông nhẹ sử dụng hạt cốt liệu nhẹ tái chế này. Thông qua thí nghiệm kéo tuột cốt thép ra khỏi bê tông nhẹ xác định công thức xác định giá trị lực dính và đề xuất mối quan hệ lực dính - độ trượt giữa bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế và cốt thép làm cơ sở cần thiết trong việc phân tích sự làm việc của kết cấu bê tông cốt thép sử dụng bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế.

Từ khoá: Bê tông nhẹ; hạt cốt liệu nhẹ tái chế; lực dính.

ABSTRACT

Advanced technologies have been developed to produce lightweight aggregate from construction and demolition wastes, which allow to reduce the use of the limited natural resources. In this paper, the author present experimental research on the bond-slip behavior of lightweight concrete using recycled lightweight aggregate. Pull-out tests were carried out to determine the bonding and propose the bond-slip relationship between recycled lightweight concrete and steel bar. This provides essential groundwork for analyzing the performance of reinforced concrete structures using lightweight concrete with recycled lightweight aggregates.

Keyword: Lightweight concrete; recycled lightweight aggregates; bonding.

1. GIỚI THIỆU

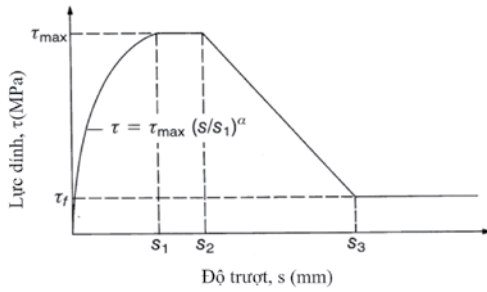
Bê tông nhẹ là một vật liệu xây dựng hiện đang được sử dụng phổ biến trong xây dựng. Sử dụng bê tông nhẹ trong công trình

xây dựng mang lại lợi ích kinh tế - kỹ thuật như giảm tải cho công trình, dẫn tới giảm kinh phí xử lý nền móng và hệ thống kết cấu của công trình. Bên cạnh đó, tốc độ công nghiệp hoá nước ta diễn ra nhanh chóng, tương ứng với đó, mỗi năm có một lượng lớn rác thải xây dựng được thải ra mà không được xử lý gây ô nhiễm môi trường. Do đó, việc nghiên cứu khả năng tái chế và ứng dụng chất thải này đang được nhiều quốc gia và các nhà khoa học quan tâm. Công nghệ mới hiện nay cho phép chế tạo các hạt cốt liệu nhẹ từ phế thải phá dỡ công trình xây dựng [15]. Điều này góp phần làm giảm đi việc sử dụng các nguyên liệu tự nhiên - nguồn tài nguyên thiên nhiên đang ngày càng cạn kiệt để chế tạo nguyên vật liệu cho ngành Xây dựng.

Trong bài báo tác giả sử dụng hạt cốt liệu nhẹ sản xuất từ phế thải phá dỡ công trình xây dựng để chế tạo ra bê tông nhẹ có khối lượng thể tích từ 1400 - 1800 kg/m³ và cường độ chịu nén đạt từ 15 - 35 MPa. Thông qua các tính chất cơ lý của bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế như: cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn, cường độ chịu kéo khi ép chệch, mối quan hệ giữa cường độ chịu kéo khi ép chệch và cường độ chịu nén. Đồng thời, thông qua thí nghiệm kéo tuột cốt thép ra khỏi bê tông nhẹ xác định công thức xác định giá trị lực dính và đề xuất mối quan hệ lực dính - độ trượt giữa bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế và cốt thép làm cơ sở cần thiết trong việc phân tích sự làm việc của kết cấu bê tông cốt thép sử dụng bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế.

2. MÔ HÌNH ỨNG SUẤT LỰC DÍNH - ĐỘ TRƯỢT GIỮA BÊ TÔNG NHẸ VÀ CỐT THÉP

Ứng suất dính giữa bê tông và cốt thép là quan trọng [16], nó trực tiếp góp phần vào hiệu quả của sự làm việc của dầm, kiểm soát vết nứt và độ cứng uốn. Hơn nữa, các phương trình thiết kế trong các tiêu chuẩn cơ bản liên quan đến ứng suất dính. Lực dính liên kết có thể đạt được bằng hai cơ chế [20]: hoá lý (chất kết dính) và cơ học (ma sát giữa bê tông và cốt thép). Lực dính liên kết đến từ tương tác hoá học giữa hồ xi măng và bề mặt thanh thép. Lực ma sát phát sinh từ tiếp xúc giữa bề mặt gờ thép và bê tông xung quanh [1]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra ảnh hưởng tới lực dính của bê tông nhẹ (sau đây viết tắt là BTN) như: loại cốt liệu, tỷ lệ Nước/chất kết dính, bảo dưỡng bê tông, phụ gia, loại và bề mặt kết cấu của thanh cốt thép, đường kính của thanh cốt thép, độ dài liên kết.



Hình 2. 1. Mối quan hệ ứng suất - độ trượt theo CEB-FIP [8]

Theo CEB-FIP [7] các thông số để xác định mối quan hệ lực dính - độ trượt cho BTN được đề nghị như sau:

Bảng 2. 1. Hệ số tương ứng trong biểu đồ lực dính - độ trượt của BTN

Thông số	Liên kết tốt	Điều kiện liên kết khác
s_1	1.0 mm	1.0 mm
s_2	2.0 mm	2.0 mm
s_3	Theo khoảng cách gờ cốt thép	Theo khoảng cách gờ cốt thép
α	0.35	0.35
τ_{max}	$0.6f_{ck}^{0.82}$	$0.3f_{ck}^{0.82}$
τ_f	$0.15\tau_{max}$	$0.15\tau_{max}$

Nhiều phương trình dự đoán cường độ lực dính của bê tông nhẹ cũng được đề xuất, theo Bogas và cộng sự [2]:

$$\tau = \left[171.9 \left(\frac{h}{d} \right)^2 - 24.24 \left(\frac{h}{d} \right) + 1.2981 \right] f'_c \quad (1.1)$$

Theo Kim và cộng sự [12]

$$\tau = \left[\frac{37.5}{(d+l_d)^{0.25}} - 9.4 \right] f'_c{}^{0.5} \quad (1.2)$$

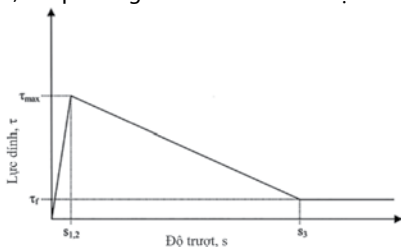
Theo Tang [18]

$$\tau = K \left[44.5 - 60 \left(\frac{w}{c} \right) \right] \frac{\rho_d}{2200} \quad (1.3)$$

Trong đó, h là chiều cao dầm, d là đường kính thanh; l_d chiều dài thanh thép nhúng trong bê tông; f'_c cường độ nén của bê tông; $\frac{w}{c}$ là tỷ lệ nước trên xi măng; ρ_d là khối lượng thể tích (sau đây viết tắt là KLTT) khô của bê tông.

Theo Hückler và Schlaich [10] đối với ảnh hưởng của lực dính trong mối quan hệ lực dính - độ trượt của bê tông siêu nhẹ khác với BTN. Cường độ lực dính của bê tông siêu nhẹ phụ thuộc chính vào cấp cường độ của bê tông siêu nhẹ, cường độ chịu kéo càng cao thì cường độ lực dính càng cao. Theo kết quả thực nghiệm giá trị cường độ lực dính được tính toán theo mô hình tương tự như CEB-FIP [7] và MC 2010 [3], với giá trị đỉnh của đường quan hệ ứng suất - lực dính được điều chỉnh [10].

Mô hình đề xuất được thể hiện bằng ba phần tuyến tính, trong đó độ bám chắc của bê tông siêu nhẹ được thể hiện rõ nhất, độ dốc đột ngột tới đỉnh đạt giá trị τ_{max} tương ứng với giá trị độ trượt rất nhỏ s_1 . Sau đó là sự suy giảm đột ngột, không duy trì giá trị τ_{max} trong một khoảng giá trị trượt tương ứng như đối với bê tông thường (sau đây viết tắt là BTT) hoặc BTN. Mô hình được biểu thị như trong Hình 2. 2, các phương trình điều chỉnh được biểu thị [10]



Hình 2. 2. Mối quan hệ ứng suất - độ trượt của bê tông siêu nhẹ [4]

$$\tau = \begin{cases} \left(\frac{\tau_{max}}{s_{1,2}} \right) & 0 \leq s \leq s_{1,2} \\ \tau_{max} - \frac{\tau_{max} - \tau_f}{s_3 - s_{1,2}} & s_{1,2} \leq s \leq s_3 \\ \tau_f & s_3 < s \end{cases} \quad (1.4)$$

Trong đó, $\tau_{max} = 0.3f_{ck}^{0.82}$; $\tau_f = 0.045f_{ck}^{0.82}$; $s_{1,2} = 0.1\tau_{max}$

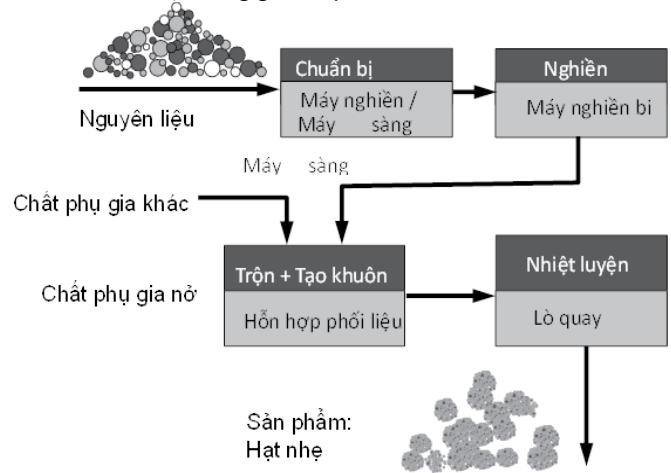
f_{ck} là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông và s_3 theo khoảng cách giữa các gờ cốt thép. Theo các tác giả [4] đây là mô hình lực dính bê tông siêu nhẹ đầu tiên. Thêm vào đó, thử nghiệm các mô hình lực dính trước đây đối với BTN không được áp dụng đối với bê tông siêu nhẹ, mặc dù họ đã xem xét đến giới hạn khối lượng thể tích và cường độ.

Có thể thấy, trong các nghiên cứu chưa có nhiều nghiên cứu để cập tới trường hợp bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế (sau đây viết tắt là BTNCLNTC). Do đó, khi nghiên cứu mô hình ứng suất lực dính - độ trượt đối với BTNCLNTC đòi hỏi cần phải có những nghiên cứu dựa trên kết quả nghiên cứu thực nghiệm.

3. MẪU THÍ NGHIỆM

3.1. Cốt liệu nhẹ sử dụng trong nghiên cứu

Cốt liệu nhẹ sử dụng trong nghiên cứu là sỏi nhân tạo chế tạo từ phế thải phá dỡ công trình (sau đây viết tắt là CLNTC từ PTXD). Hạt CLNTC sử dụng nguyên liệu từ phế thải xây dựng (sau đây viết tắt là PTXD) thường sử dụng các vật liệu PTXD như vữa xây - trát tường, gạch xây dựng, các nguyên liệu này được phân loại, nghiền mịn và được trộn theo một tỷ lệ phù hợp [15]. Các chất tạo nở như: $CaCO_3$, dầu nặng, SiC,... được sử dụng để tạo nở cho hạt. Quy trình công nghệ sản xuất sản phẩm hạt nhẹ từ các chất phế thải được thực hiện thông qua các bước sau [15]: nghiền mịn hỗn hợp các chất phế thải đến độ mịn xác định; trộn hỗn hợp chất thải đã được nghiền mịn với các phụ gia khác và phụ gia nở; viên tạo hạt hỗn hợp phối liệu; nung chảy và gây nở hạt ở nhiệt độ cao; phân loại theo kích thước hạt; đóng gói sản phẩm.

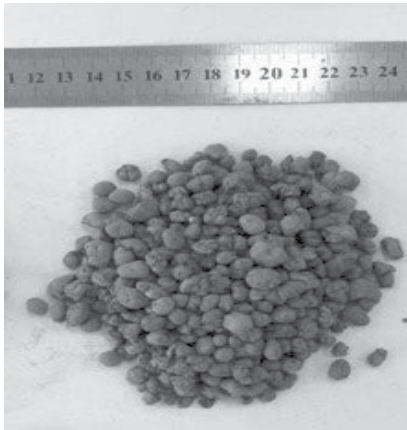


Hình 3. 1. Quy trình công nghệ sản xuất sản phẩm hạt nhẹ từ PTXD

3.2. Cấp phối chế tạo

Cấp phối lựa chọn để tạo ra cường độ chịu nén (mẫu trụ) của bê tông khoảng 15 MPa, 20 MPa, 30 MPa tại 28 ngày tuổi lần lượt ký hiệu là M1, M2, M3. Nguồn gốc vật liệu gồm hạt cốt liệu nhẹ tái chế từ phế thải xây dựng được cung cấp bởi Viện Nghiên cứu Xây dựng ứng dụng Weimar - Cộng hoà liên bang Đức [15], cát vàng Sông Lô, xi măng Pooc lăng Vicem Bút Sơn PC40, phụ gia cuốn khí Placc-air và tro bay được khai thác từ nhà máy nhiệt điện Phả Lại.

Thành phần cấp phối của bê tông được thể hiện trong Bảng 3. 1, trong đó N/CKD , V_{CLN}/V_b , V_c/V_{CL} lần lượt là tỷ lệ nước/chất kết dính, tỷ lệ thể tích cốt liệu nhẹ/thể tích bê tông, tỷ lệ thể tích cát/cốt liệu.



Hình 3.2. Mẫu hạt CLN tại chế từ PTXD

Bảng 3.1. Cấp phối hỗn hợp bê tông nhẹ

STT	Tên cấp phối	N/CKD	V_{CLN}/V_b	V_c/V_{CL}	Tro bay (%)	Phụ gia siêu dẻo (%)
1	M3	0.36	0.35	0.45	27.61%	1%
2	M2	0.36	0.31	0.45	27.61%	1%
3	M1	0.36	0.28	0.45	27.61%	1%

3.3. Các tính chất cơ lý

Các đặc trưng cơ lý của các mẫu cấp phối BTNCLNTC lựa chọn được thể hiện trong Bảng 3.2, Bảng 3.3, trong đó: f_c , f_r , $f_{ct,sp}$, E_c lần lượt là cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn, cường độ chịu kéo khi ép chế và mô đun đàn hồi của BTNCLNTC.

Bảng 3.2. Tính chất cơ lý của các mẫu cấp phối lựa chọn

Tên mẫu	Tính chất cơ lý	Kích thước mẫu (cm)	Giá trị trung bình (MPa)	Hệ số biến động
Nhóm M1	f_c	Mẫu trụ 15x30	15.11	0.027
	$f_{ct,sp}$	Mẫu trụ 15x30	1.73	0.02
Nhóm M2	f_c	Mẫu trụ 15x30	21.11	0.012
	$f_{ct,sp}$	Mẫu trụ 15x30	2.07	0.05
Nhóm M3	f_c	Mẫu trụ 15x30	30.68	0.034
	$f_{ct,sp}$	Mẫu trụ 15x30	2.48	0.03

Bảng 3.3. Khối lượng thể tích bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế (gọi tắt là KLTT)

Tên mẫu	KLTT (hỗn hợp) (kg/m^3)	Hệ số biến động	KLTT (khô) (kg/m^3)	Hệ số biến động
Nhóm M1	1773	0.023	1715	0.047
Nhóm M2	1783	0.011	1762	0.019
Nhóm M3	1798	0.012	1775	0.016

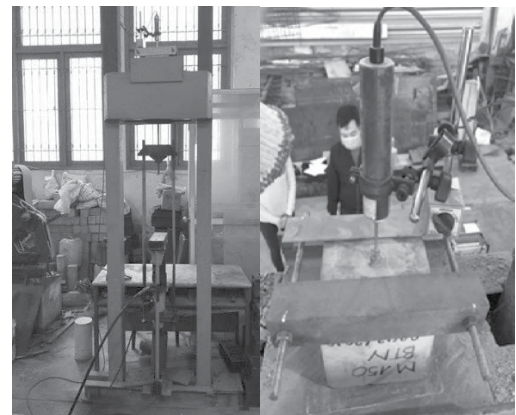
3.4. Thí nghiệm xác định lực dính - độ trượt của bê tông nhẹ sử dụng hạt cốt liệu nhẹ tái chế với cốt thép

Xác định quan hệ giữa độ lớn của lực bám dính với chuyển vị trượt cốt thép (quan hệ bám dính - độ trượt) trong trường hợp kéo đúng tâm [17]. Mẫu thí nghiệm: Ứng với mỗi nhóm mẫu M1, M2, M3 chế tạo 03 mẫu lập phương có kích thước 150x150x150mm. Đặt thanh cốt thép đường kính $d = 12$ mm đi qua tâm mẫu thí nghiệm và song song với các cạnh của mẫu bê tông. Chiều dài tiếp xúc giữa thanh thép và bê tông được lấy bằng 5d (60mm). Việc chọn chiều dài tiếp xúc và trình tự thí nghiệm tuân thủ theo hướng dẫn của RILEM (Hiệp hội các phòng thí nghiệm cơ học và vật liệu thế giới (SNIP 2.03.01-84) [6]).

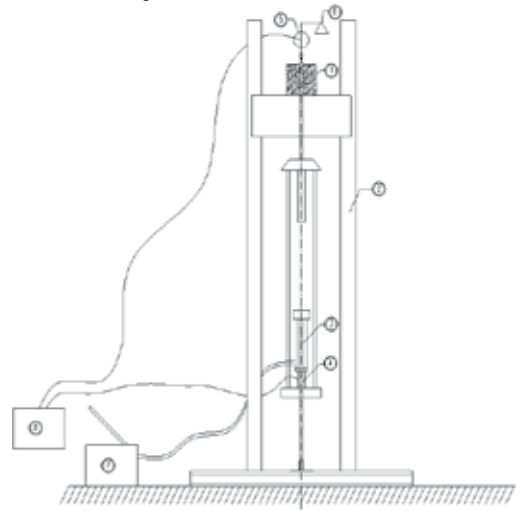


Hình 3.3. Mẫu thí nghiệm kéo xác định độ bám dính giữa bê tông và cốt thép

Sơ đồ bố trí thí nghiệm như Hình 3.5, để đo độ dịch chuyển của thanh thép so với bê tông, ở đầu của thanh được lắp đặt 01 indicator điện tử LVDT. Kết quả thu được là chuyển vị của thanh thép trong bê tông. Lực kéo tác dụng lên thanh thép được tạo ra bằng kích thủy lực kết hợp với trạm bơm dầu. Giá trị lực kéo tác dụng lên thanh thép được xác định thông qua 1 dụng cụ đo lực điện tử (Load Cell) đặt trên kích thủy lực. LVDT và Load Cell được kết nối với bộ phận xử lý số liệu Datalogger TDS530 và máy tính cho phép ghi nhận tự động số liệu.



Hình 3.4. Thiết bị thí nghiệm



Hình 3.5. Sơ đồ khung gia tải

1-Mẫu thí nghiệm; 2-Khung gia tải; 3-Kích thủy lực; 4-Đầu đo lực Loadcell; 5-Đầu đo chuyển vị LVDT; 6-Các khung thép đỡ LVDT; 7-Trạm bơm kích thủy lực; 8-Datalogger TDS 530

3.5. Kết quả thí nghiệm và bàn luận

Kết quả thí nghiệm thu được như Hình 3.6, quan hệ lực dính - độ trượt khi chịu kéo đúng tâm, thí nghiệm trong khoảng 5d (d là đường kính cốt thép) phát triển theo 4 giai đoạn:

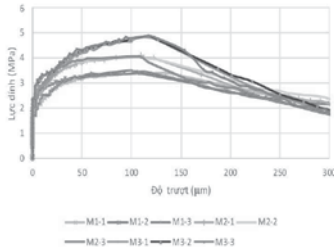
- Giai đoạn đầu tiên, bê tông chưa nứt, quan hệ lực dính - độ trượt là đường thẳng tuyến tính.
- Giai đoạn thứ 2, các vết nứt xuất hiện trên bê tông xung quanh cốt thép, ở giai đoạn này biểu đồ có dạng đường cong, đường cong

tương đối dốc, giá trị lực dính tăng. Các vết nứt xuất hiện dọc theo các thanh cốt thép và phát triển ra bên ngoài kết cấu, giá trị lực dính đạt gần tiến tới giá trị lớn nhất. Đồng thời, độ trượt cốt thép trên bê tông ε bắt đầu tăng, nhưng tăng rất chậm.

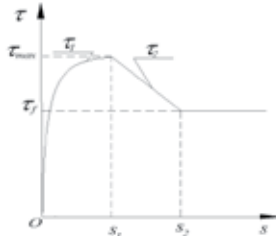
- Giai đoạn 3, giá trị lực dính sau khi đạt giá trị lớn nhất, giá trị lực dính không đổi trong một thời gian rất ngắn rồi bắt đầu giảm. Độ trượt tăng nhưng giá trị lực dính giảm tới vị trí tương ứng với ứng suất cốt thép đạt giới hạn chảy.

- Giai đoạn 4, cơ chế kết dính chủ yếu trong giai đoạn này sẽ dựa vào ma sát giữa gờ của thanh thép bị biến dạng và bê tông xung quanh nó. Giá trị lực dính được xem là không đổi, duy trì cho đến khi thanh thép được kéo tuột ra khỏi bê tông.

Theo kết quả nghiên cứu thực nghiệm có thể thấy biểu đồ quan hệ lực dính - độ trượt của BTNCLNTC tương ứng với 3 nhóm mẫu cấp phối có dạng như Hình 3. 7. Trong đó, giá trị τ_{max} , τ_f tương ứng lần lượt là lực dính đạt giá trị lớn nhất, lực dính tại thời điểm thép bị kéo tuột ra khỏi bê tông. Giá trị S_1 , là độ trượt tương ứng tại thời điểm đạt giá trị ứng suất dính τ_{max} và S_2 là độ trượt tương ứng tại thời điểm đạt giá trị ứng suất dính τ_f . Các tham số S_1 , S_2 , τ_{max} , τ_f xác định từ kết quả thực nghiệm được thể hiện trong Bảng 3. 4



Hình 3. 6. Biểu đồ quan hệ lực dính - độ trượt của bê tông tương ứng đến khi mẫu bị kéo tuột thép hoàn toàn tương ứng với 3 nhóm mẫu cấp phối BTNCLNTC M1; M2; M3



Hình 3. 7. Quan hệ lực dính - độ trượt BTNCLNTC

Bảng 3. 4. Bảng giá trị S_1 , S_2 , τ_{max} , τ_f , τ_{ph} xác định từ kết quả thực nghiệm tương ứng

Mẫu	τ_{max} (N/mm ²)	τ_f (N/mm ²)	S_1 (mm)	S_2 (mm)
M1-1	3.41	2.36	0.100	0.272
M1-2	3.43	2.36	0.105	0.244
M1-3	3.50	2.36	0.100	0.244
Mẫu M1 TB	3.44	2.41	0.102	0.253
M2-1	4.09	2.56	0.110	0.250
M2-2	4.08	2.53	0.110	0.250
M2-3	4.08	2.53	0.108	0.250
Mẫu M2 TB	4.08	2.47	0.109	0.250

Bảng 3. 6. Các giá trị τ_{max} , τ_f theo kết quả thực nghiệm và theo lý thuyết

Mẫu	f_c (MPa)	τ_{max-TN} (MPa)	τ_{max-LT} (MPa)	Sai số	τ_f-TN (MPa)	τ_f-LT (MPa)	Sai số
Mẫu M1	15.12	3.44	3.42	0.53%	2.41	2.19	9.13%
Mẫu M2	21.40	4.08	4.07	0.22%	2.47	2.52	2.18%
Mẫu M3	30.69	4.86	4.88	0.31%	2.70	2.93	8.33%
Giá trị TB				0.35%			6.55%

M3-1	4.85	2.68	0.115	0.233
M3-2	4.87	2.68	0.118	0.233
M3-3	4.88	2.74	0.118	0.230
Mẫu M3 TB	4.86	2.70	0.117	0.232
TB			0.109	0.245

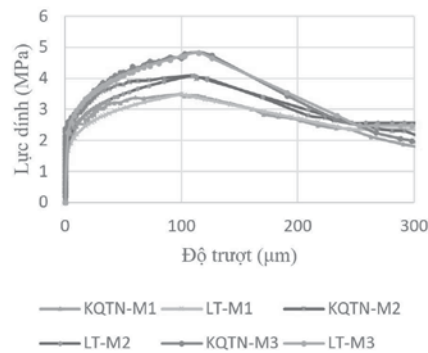
Dựa trên kết quả nghiên cứu thực nghiệm và tiêu chuẩn CEB-FIP [7], về mối quan hệ lực dính - độ trượt cho BTN, xác định giá trị lực dính được tính toán dựa trên độ lớn của đoạn trượt như sau:

$$\text{Với } 0 \leq s \leq s_1 \text{ thì } \tau = \tau_1 = \tau_{max}(s/s_1)^{0.2} \quad (3.1)$$

$$\text{Với } s_1 < s \leq s_2 \text{ thì } \tau = \tau_2 = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \left(\frac{s-s_1}{s_2-s_1} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{Với } s_2 < s \text{ thì } \tau = \tau_f \quad (3.3)$$

Biểu đồ quan hệ lực dính - độ trượt xác định theo phương pháp thực nghiệm và theo lý thuyết để xuất được thể hiện như Hình 3. 8 Đường cong biểu thị quan hệ lực dính - độ trượt BTNCLNTC theo kết quả thực nghiệm và theo lý thuyết tính toán cho sai số nhỏ (dưới 10%)



Hình 3. 8. Quan hệ lực dính - độ trượt BTNCLNTC theo kết quả thực nghiệm và theo lý thuyết tính toán

Các tham số S_1 , S_2 , τ_{max} , τ_f là các giá trị xác định theo phương pháp thực nghiệm đạt đến trạng thái phá hoại được thể hiện trong bảng sau:

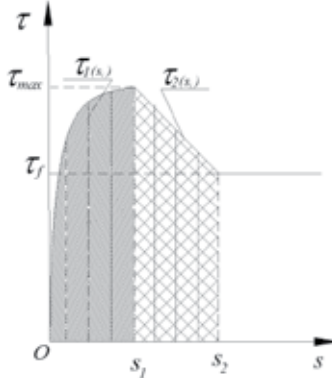
Bảng 3. 5. Các giá trị xác định S_1 , S_2 , τ_{max} , τ_f

Mẫu	τ_{max} (MPa)	τ_f (MPa)	S_1 (mm)	S_2 (mm)
Mẫu M1	$0.88\sqrt{f_c}$	$0.70.\tau_{max}$	0.102	0.250
Mẫu M2	$0.88\sqrt{f_c}$	$0.62.\tau_{max}$	0.109	0.250
Mẫu M3	$0.88\sqrt{f_c}$	$0.56.\tau_{max}$	0.117	0.251
Giá trị TB	$0.88\sqrt{f_c}$	$0.62.\tau_{max}$	0.109	0.245

Trong đó: f_c là cường độ chịu nén (MPa) của BTNCLNTC xác định từ giá trị thực nghiệm trên mẫu trụ 15x30cm.

Kết quả so sánh giá trị lực dính lớn nhất τ_{max} và lực dính tại thời điểm thép bị kéo tuột ra khỏi bê tông τ_f xác định theo kết quả thực nghiệm và theo lý thuyết tính toán được thể hiện trong Hình 3. 6. Có thể thấy, giá trị lực dính theo kết quả thực nghiệm và theo lý thuyết tính toán cho sai số nhỏ nằm trong giới hạn cho phép (sai số chênh lệch trung bình giá trị lực dính lớn nhất là 0.35%; và chênh lệch trung bình giá trị lực dính tại thời điểm thép bị kéo tuột ra khỏi bê tông là 6.55%).

Có thể thấy, ảnh hưởng của lực dính trong mối quan hệ lực dính - độ trượt của BTNCLNTC khác với BTN theo tiêu chuẩn CEB-FIP [7], giá trị đỉnh của đường quan hệ ứng suất - lực dính được điều chỉnh. Mô hình đề xuất được thể hiện bằng ba phần, trong đó độ bám chắc của vật liệu BTNCLNTC được thể hiện rõ nhất, độ dốc đột ngột đạt tới đỉnh đạt giá trị τ_{max} tương ứng với giá trị độ trượt rất nhỏ s_1 . Sau đó là sự suy giảm đột ngột, không duy trì giá trị τ_{max} trong một khoảng giá trị trượt tương ứng như đối với BTT và BTN thông thường. Mô hình được biểu thị như trong Hình 3. 7, các phương trình điều chỉnh được biểu thị theo công thức (3.1), (3.2), (3.3)



Hình 3. 9. Sơ đồ tính tích phân chia nhỏ lực dính τ

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_1 \cdot s_1 + \tau_2 \cdot (s_2 - s_1)}{s_2} \quad (3.4)$$

Với: $\bar{\tau}_1 = \frac{\int_0^{s_1} \tau_1(s) ds}{s_1 - 0}$; $\bar{\tau}_2 = \frac{\int_{s_1}^{s_2} \tau_2(s) ds}{s_2 - s_1}$
 Thông qua biến đổi toán học, xác định được giá trị lực dính trung bình theo công thức:

$$\bar{\tau} = 1.60 \sqrt{\frac{2200}{\rho_c}} f_{ct} \quad (3.5)$$

Giá trị lực dính trung bình của BTNCLNTC của nhóm mẫu M1, M2 và M3 tương ứng theo khối lượng thể tích được thể hiện trong Bảng 3. 7. Trong phạm vi nghiên cứu BTNCLNTC, có thể thấy, tỷ lệ $\bar{\tau}/f_{ct}$ của các nhóm mẫu bê tông nhẹ gần như tương đương nhau và có thể coi là một hằng số, có giá trị xấp xỉ bằng 1.8.

Bảng 3. 7. Các giá trị lực dính $\bar{\tau}$ theo khối lượng thể tích

Tên mẫu cấp phối	Khối lượng thể tích bê tông ρ_c (kg/m ³)	Giá trị ứng suất dính trung bình $\bar{\tau}$ (MPa)
Nhóm mẫu M1	1715	$1.81 f_{ct}$
Nhóm mẫu M2	1762	$1.80 f_{ct}$
Nhóm mẫu M3	1775	$1.78 f_{ct}$
Trung bình		$1.80 f_{ct}$

4. KẾT LUẬN

Từ nghiên cứu thực nghiệm về vật liệu bê tông nhẹ và dầm bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu nhẹ tái chế có thể đưa ra các kết luận sau:

Quan hệ lực dính - độ trượt BTNCLNTC phát triển theo 4 giai đoạn. Khi ứng suất lực dính đạt giá trị lớn nhất, giá trị ứng suất không đổi trong một thời gian rất ngắn rồi bắt đầu giảm đột ngột. Giá trị ứng suất lực dính lớn nhất tỷ lệ thuận với $\sqrt{f_c}$. Đề xuất công thức xác định giá trị ứng suất dính đạt giá trị lớn nhất $\tau_{max} = 0.88\sqrt{f_c}$, trong đó: f_c là cường độ chịu nén (MPa) của BTN xác định từ giá trị thực nghiệm trên mẫu trụ 15x30cm.

Đề xuất công thức xác định giá trị ứng suất dính trung bình:

$$\bar{\tau} = 1,60 \sqrt{\frac{2200}{\rho_c}} f_{ct}, \text{ trong đó: } f_{ct} \text{ là cường độ chịu kéo dọc trục (MPa) của BTNCLNTC.}$$

Kết quả nghiên cứu về giá trị lực dính trung bình, mô hình quan hệ lực dính - độ trượt BTNCLNTC làm cơ sở cần thiết trong việc phân tích sự làm việc của kết cấu bê tông cốt thép sử dụng bê tông nhẹ cốt liệu nhẹ tái chế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. ACI 408R-03. Development of straight reinforcing bars in tension; 2003.
2. Bogas JA, Gomes MG, Real S. Bonding of steel reinforcement in structural expanded clay lightweight aggregate concrete: The influence of failure mechanism and concrete composition. *Construct Build Mater.* 2014;65:350-359.
3. CEB-FIB. Fib model code for concrete structures 2010; Ernst & Sohn. Berlin, Germany: Wiley, 2013.
4. Elshahawi M, Hückler A, Schlaich M. Infra lightweight concrete: A decade of investigation (a review). *Structural Concrete.* 2021;22(Suppl. 1):E152-E168. <https://doi.org/10.1002/suco.202000206>.
5. EN 1992-1-1, *Design of Concrete Structures: General Rules and Rules for Buildings and Structural Fire Design*, Thomas Telford London, UK.
6. Evans R., H., Marathe M., S. (1968), *Microcracking and Stress-Strain Curves for Concrete in Tension, Material and Structures (RILEM)* 1(1): 61–64.
7. FIP Guidance documents - bulletin 8 (2000) *Lightweight aggregate concrete - Recommended extensions to Model Code 90 Guide*, Identification of research needs Technical report, Case studies State of art report.
8. FIP State of Art Report - bulletin 4 (1999) *Lightweight aggregate concrete - Codes and standards*.
9. Francis Barre, Philippe Bisch, Danièle Chauvel, Jacques Cortade, Jean-François Coste, Jean-Philippe Dubois, Silvano Erlicher, Etienne Gallitre, Pierre Labbé, Jacky Mazars, Claude Rospars, Alain Sellier, Jean-Michel Torrenti, François Toutlemonde (2016), *“Control of Cracking in Reinforced Concrete Structures”, Great Britain and the United States.*
10. Hückler A, Schlaich M. Structural behavior of reinforced infralightweight concrete (ILC). *ACI Struct J.* 2019;116(2):3-14.
11. Ivan Tomičić. (2012), *Analysis of lightweight aggregate concrete beams*, GRAĐEVINAR 64 (2012) 10, 817-823.
12. Kim D-J, Kim MS, Yun GY, Lee YH. Bond strength of steel deformed rebars embedded in artificial lightweight aggregate concrete. *J Adhes Sci Technol.* 2013;27(5-6):490-507.
13. MC 1990, (1990) *CEB-FIP model code 1990-design code*, Conmite Euro-International du Beton.
14. MC 2010, (2010) *CEB-FIP model code 2010-design code*, Conmite Euro-International du Beton.
15. Nguyễn Hùng Phong (2016), *Nghiên cứu chế tạo và ứng dụng hạt cốt liệu nhẹ từ phế thải phá dỡ công trình xây dựng dân dụng ở Việt Nam - NĐT.21.GER/16.*
16. Prince MJR, Singh B. Bond behaviour of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete. *Construct Build Mater.* 2013;49:852-862.
17. SNIP 2.03.01-84, *Guidelines for Design of Concrete and reinforced concrete structures made of heavy - weight and light - weight concrete without reinforcement prestress.*
18. Tang C-W. Local bond stress-slip behavior of reinforcing bars embedded in lightweight aggregate concrete. *Comput Concrete.* 2015;16(3):449-466.
19. TCVN 5574:2018, *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép.*
20. Zhao Y, Lin H, Wu K, Jin W. Bond behaviour of normal/recycled concrete and corroded steel bars. *Construct Build Mater.* 2013;48:348-359.