



Đánh giá sự suy giảm khả năng kháng cắt của bản mặt cầu bê tông dưới tác động kết hợp của tải trọng lặp và môi trường ẩm

Evaluation of Shear Capacity Degradation in Normal Concrete Bridge Decks under Coupled Effects of Fatigue and Wet Environment

Trương Việt Phương*

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Từ khóa:

Bản mặt cầu
Cắt chọc thủng
Mỏi
Truyền lực cắt qua vết nứt
Ma sát/cài móc cốt liệu
Gia cường cầu

TÓM TẮT

Bản mặt cầu bê tông cốt thép tại các vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa ở Đồng bằng Sông Cửu Long Việt Nam thường chịu đồng thời (i) lưu lượng xe tăng dần theo thời gian và (ii) môi trường ẩm ướt kéo dài trong mùa mưa. Bài báo phân tích cơ chế suy giảm khả năng kháng cắt chọc thủng của bản mặt cầu hiện hữu, dựa trên lý thuyết vết nứt cắt tới hạn kết hợp với mô hình suy thoái bề mặt vết nứt thu được từ thí nghiệm trượt dọc. Nghiên cứu này tổng hợp và đối chiếu các kết quả thí nghiệm trên bê tông thường làm việc trong trạng thái cắt trượt thuần túy dưới tải trọng lặp, trong điều kiện khô và ngập nước. Kết quả cho thấy tiêu chuẩn thiết kế hiện hành (TCVN 11823, AASHTO LRFD, JTG 3362, JSCE) có xu hướng đánh giá cao sức kháng cắt của cấu kiện đã nứt và bỏ qua sự mài mòn cốt liệu tại mặt nứt, ảnh hưởng của nước trong khe nứt. Đặc biệt, tải trọng lặp đối chiều mô phỏng bánh xe đi qua vết nứt gây suy giảm nhanh hơn đáng kể so với tải trọng lặp một chiều. Từ các phân tích và thí nghiệm, bài báo đưa ra cảnh báo kỹ thuật quan trọng phục vụ tính toán kiểm định và thiết kế gia cường bản mặt cầu bê tông cốt thép cũ ở ĐBSCL.

Keywords:

Bridge deck
Punching shear
CSCT
Fatigue
Aggregate interlock
Crack surface degradation
Bridge strengthening

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) bridge decks in tropical monsoon regions (e.g., Mekong Delta River, Vietnam) are frequently subjected to the coupled effects of increasing heavy-vehicle traffic and prolonged wet conditions during rainy seasons. This paper investigates the degradation mechanism of punching shear capacity in existing RC decks using the Critical Shear Crack Theory (CSCT) combined with a surface degradation model calibrated from push-off tests. The study synthesizes and contrasts experimental observations on Normal Weight Concrete (NWC) interfaces subjected to pure shear under cyclic loading, in both dry and submerged environments. The results suggest that current design codes (TCVN 11823, AASHTO LRFD, JTG 3362, and JSCE) may overestimate the shear capacity of cracked members by neglecting aggregate attrition, water lubrication, and wash-out of crushed particles within cracks. Notably, reversed cyclic loading-representative of wheel actions across existing cracks-induces much more severe damage than pulsating loading. The paper provides practical warnings for assessment and strengthening design of deteriorated bridge decks in wet environments.

* Trương Việt Phương. Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh.

Email: phuongtv@ut.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150106>

Ngày nhận bài: 15/12/2025; Ngày nộp bài sửa: 10/01/2026 ; Ngày chấp nhận đăng: 10/01/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/01/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Hệ thống cầu đường bộ tại Việt Nam, đặc biệt ở khu vực Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), đang đối mặt với thách thức lớn về suy giảm tuổi thọ khai thác do điều kiện môi trường ẩm ướt kéo dài, xâm thực và lưu lượng xe tải nặng tăng theo thời gian. Trong điều kiện khai thác, bản mặt cầu BTCT thường hình thành các vết nứt uốn, vết nứt do co ngót hoặc vết nứt mạng lưới (phụ thuộc địa chất nền, thiết kế, thi công, tải trọng khai thác và công tác bảo trì,...).

Trong công tác duy tu, bảo dưỡng và sửa chữa, cải tạo, gia cường, các giải pháp thực hành thường ưu tiên khôi phục khả năng chịu uốn (ví dụ dán tấm sợi carbon CFRP, thép tấm...) trong khi khả năng kháng cắt-đặc biệt là cắt chọc thủng của bản không cốt đai-ít được kiểm tra một cách đầy đủ. Tuy nhiên, các nghiên cứu về cơ chế truyền lực cắt qua mặt nứt cho thấy: dưới tải trọng lặp đổi chiều (reversed cyclic loading) theo đặc trưng của bánh xe chạy, kết hợp với sự tồn tại của nước tại vết nứt, bề mặt vết nứt bị mài mòn nhanh, làm suy giảm cơ chế ma sát/cài móc cốt liệu (aggregate interlock) - thành phần then chốt của sức kháng cắt trong bản không cốt đai. Việc mô phỏng thực nghiệm đầy đủ cơ chế này cho bản mặt cầu bê tông gặp nhiều thách thức về thiết bị và chi phí [1], [2].

Mục tiêu của nghiên cứu là: (i) chỉ ra khoảng trống trong đánh giá an toàn cắt cho bản mặt cầu cũ ở môi trường ẩm ướt, (ii) đối chiếu xu hướng dự báo của các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành, và (iii) đề xuất khung phân tích dựa trên CSCT kết hợp luật suy thoái bề mặt vết nứt từ thí nghiệm push-off nhằm hỗ trợ kiểm định và thiết kế gia cường cầu cũ [3], [4].

Bên cạnh các nghiên cứu nền tảng về cơ chế trượt-cắt tại mặt nứt, các nghiên cứu gần đây về môi bản mặt cầu dưới tải bánh xe di động đã cung cấp thêm bằng chứng thực nghiệm cho thấy cơ chế phá hoại chi phối thường là cắt/chọc thủng và khác biệt đáng kể so với thí nghiệm tải lặp tại một điểm. Tổng quan của Gao và Fam (2024) nhấn mạnh tải bánh xe chạy tạo ra hiện tượng đảo chiều lực cắt và mô men xoắn, dẫn đến chà xát bề mặt vết nứt nhiều hơn và rút ngắn tuổi thọ của bản mặt cầu [5]. Trên cơ sở các thí nghiệm bánh xe chạy phá hoại cắt, Kongwang và cs. (2024) đã đề xuất

phương pháp dự báo tuổi thọ mối gắn với cơ chế phá hoại, qua đó cho thấy việc giả định tham số truyền lực cắt qua vết nứt không đối có thể làm sai lệch đánh giá an toàn khi kết cấu đã suy thoái do khai thác lâu dài [6].

2. Các tiêu chuẩn thiết kế liên quan và khoảng trống nghiên cứu

2.1. Tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN 11823:2017) và Hoa Kỳ (AASHTO LRFD) [7], [8]

Theo TCVN 11823:2017, khả năng chịu cắt của bê tông được tính toán dựa trên dạng đơn giản hóa của Lý thuyết Trường nén cải biên (Modified Compression Field Theory - MCFT) [7]. AASHTO LRFD cũng dựa trên các biểu thức tương tự, với các hệ số hiệu chỉnh cho điều kiện thiết kế [8].

$$V_c = 0.083\beta\sqrt{f'_c}b_vd_v \quad (1)$$

Trong đó hệ số β đại diện cho khả năng truyền lực qua vết nứt.

- V_c (N): Khả năng chịu cắt danh định của bê tông;
- f'_c (MPa): Cường độ chịu nén quy định của bê tông ở tuổi 28 ngày;
- b_v (mm): Bề rộng hữu hiệu của sườn dầm hoặc bản bụng (đối với bản đặc, lấy bề rộng đơn vị $b = 1000\text{mm}$);
- d_v (mm): Chiều cao chịu cắt hữu hiệu, khoảng cách giữa hợp lực cốt thép kéo và hợp lực vùng nén (thường lấy không nhỏ hơn $0.9d$ hoặc $0.72h$);
- β : Hệ số biểu thị khả năng truyền lực kéo chéo và lực cắt qua vết nứt của bê tông (trong TCVN 11823:2017, giá trị này thường lấy mặc định là 2.0 cho kết cấu không cốt đai chịu tải trọng phân bố, hoặc tra bảng theo biến dạng dọc trục ϵ_g) [7].

Ưu điểm: Có xét đến hiệu ứng kích thước và biến dạng dọc trục.

Nhược điểm: Công thức này giả định cốt liệu còn nguyên vẹn và không xét đến sự suy giảm độ nhám do môi hoặc do nước. Với bản mặt cầu, tiêu chuẩn cho phép áp dụng "Thiết kế theo kinh nghiệm" (Empirical Design) giảm lượng cốt thép, dựa trên

giả thiết hiệu ứng vòm (Arching Action) là vĩnh cửu và không bị suy thoái.

2.2. Tiêu chuẩn Trung Quốc (JTG 3362-2018) [9]

Theo Điều 5.4.1 của tiêu chuẩn JTG 3362-2018 (*Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts*), khả năng kháng cắt chọc thủng (Punching Shear Capacity) của bản mặt cầu không cốt đai được xác định như sau [9]:

$$F_l \leq 0.7 \cdot \beta_h \cdot f_{td} \cdot u_m \cdot h_0 \quad (2)$$

Trong đó:

- F_l (N): Khả năng chịu lực cục bộ giới hạn (Punching shear resistance);
- 0.7: Hệ số chiết giảm, xét đến độ tin cậy của vật liệu và kết cấu (tương tự sức kháng ϕ trong AASHTO nhưng được tích hợp sẵn) [8];
- f_{td} (MPa): Cường độ chịu kéo tính toán của bê tông (Design tensile strength);
- u_m (mm): Chu vi trung bình của vùng kiểm soát chọc thủng (Critical perimeter). Được tính bằng trung bình cộng của chu vi mặt trên và mặt dưới khối tháp chọc thủng (nằm trong phạm vi cách mép vùng đặt tải một khoảng $h_0/2$);
- h_0 (mm): Chiều cao làm việc hữu hiệu của mặt cắt bản (tương đương d trong TCVN/AASHTO) [8];
- β_h : Hệ số hiệu chỉnh kích thước (Size effect coefficient):

$\beta_h = 1.0$ khi $h_0 \leq 300$ mm (thường đúng với bản mặt cầu).

$\beta_h = 0.9$ khi $h_0 \geq 800$ mm.

Tiêu chuẩn Trung Quốc JTG 3362-2018 tiếp cận bài toán dựa trên cường độ chịu kéo của bê tông. Mặc dù công thức có xét đến hiệu ứng kích thước, nhưng về bản chất đây vẫn là công thức thực nghiệm cho cấu kiện bê tông mới. Công thức này coi bê tông là một đồng chất và sử dụng cường độ vật liệu chuẩn làm tham số đầu vào duy nhất đại diện cho vật liệu. Mặc dù có xét hệ số hiệu chỉnh kích thước, công thức vẫn phù hợp chủ yếu cho cấu kiện mới. Đối với cầu cũ, khi bản mặt cầu đã nứt và bề mặt vết nứt bị mài mòn dưới tác dụng của tải trọng lặp kết hợp nước, việc dùng trực tiếp cường độ vật liệu danh định có thể dẫn đến đánh giá thiếu an

toàn do không xét suy giảm cơ chế ma sát/cài móc cốt liệu [1], [2], [9].

2.3. Tiêu chuẩn Nhật Bản (JSCE 2007 / 2017) [10]

Tiêu chuẩn JSCE 2007/2017 của *Japan Society of Civil Engineers (JSCE)* tiếp cận có tách biệt rõ ràng giữa thành phần chịu cắt của bê tông và cốt thép. Ngoài ra, JSCE 2007/2017 đề xuất công thức riêng cho bài toán mỗi bản mặt cầu [10].

- Khả năng chịu cắt chọc thủng tĩnh (Static Punching Shear Capacity) V_{pcd} của bản không cốt đai:

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d \quad (3)$$

Trong đó:

- f_{pcd} (MPa): Cường độ chịu cắt tính toán, $f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}}$ (với f'_{cd} là cường độ nén thiết kế);
- u_p (mm): Chu vi kiểm soát chọc thủng, lấy cách mép tải trọng $d/2$;
- d (mm): Chiều cao làm việc hữu hiệu;
- β_d : Hệ số ảnh hưởng của chiều cao (Size effect): $\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$ (với d tính bằng mm);
- β_p : Hệ số ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép: $\beta_p = \sqrt[3]{100\rho}$;
- β_r : Hệ số ảnh hưởng của tỷ lệ tải trọng (Loaded area ratio), thường $\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$.

- Kiểm tra về mỏi bản của mặt cầu (Fatigue Check)

JSCE sử dụng phương trình mỏi dựa trên quy luật Miner và nghiên cứu thực nghiệm của Matsui [10], [11].

Phương trình đường cong mỏi (S-N Curve) cho bản mặt cầu bê tông [11]:

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -k \cdot \log N + C \quad (4)$$

Trong đó:

- P : Tải trọng bánh xe tác dụng (tải trọng mỗi);
- P_{sx} : Khả năng chịu cắt tĩnh của bản (tính theo công thức V_{pcd} ở trên);
- N : Số chu kỳ tải trọng cho đến khi phá hoại;

- k : Hệ số góc của đường cong mỏi (Slope). Theo JSCE, với bản mặt cầu trong điều kiện khô (Dry state), $k \approx 0.078$ (tương ứng với độ dốc 1/12.7) [10].

- C : Hằng số thực nghiệm.

Ưu điểm: JSCE 2007/2017 có quy trình kiểm tra mô phỏng rõ ràng cho bản mặt cầu, thừa nhận sự suy giảm khả năng chịu lực theo số chu kỳ N . Công nhận cơ chế phá hoại mỏi do cắt chọc thủng (Punching shear fatigue). JSCE sử dụng các đường cong $S-N$ để dự báo tuổi thọ của bản mặt cầu [10], [11].

Khoảng trống nghiên cứu: Các hệ số k trong JSCE được thiết lập chủ yếu từ thí nghiệm tại các phòng thí nghiệm trong điều kiện khô ráo. [10] Các tiêu chuẩn khác không đề cập đến việc suy yếu do bản mặt cầu xuất hiện vết nứt. Trong điều kiện mưa nhiều ở ĐBSCL, hệ số k này sẽ thay đổi (độ dốc lớn hơn, phá hoại nhanh hơn). Do đó, áp dụng nguyên xi công thức JSCE cho bản cầu thường xuyên chịu tác động của mùa mưa ở đồng bằng sông Cửu Long vẫn chưa đủ an toàn.

Tổng hợp lại, các hệ tiêu chuẩn nêu trên hướng tới 'thiết kế mới'. Đối với 'đánh giá cầu hiện hữu' dưới tác động kép (mỏi + nước), hầu như chưa có quy trình rõ ràng xét đến hiện tượng trơn hóa và suy giảm độ nhám tại vết nứt.

Nhìn từ góc độ thực nghiệm - cơ chế, các kết quả tổng quan và mô hình dự báo gần đây [5], [6] cho thấy: (i) tải bánh xe chạy (moving wheel) tạo điều kiện cho đảo chiều lực cắt và gia tốc mài mòn mặt nứt, do đó đường cong $S-N$ thu được từ tải lặp tại một điểm có thể đưa ra kết quả tương đối lạc quan so với thực tế chịu lực; và (ii) các phương pháp thiết kế/kiểm tra truyền thống thường chưa mô hình hóa rõ ràng sự suy giảm độ nhám hiệu dụng theo số chu kỳ. Đây là cơ sở để trong nghiên cứu tương lai đề xuất cách chiết giảm tham số truyền lực qua vết nứt khi đánh giá cầu hiện hữu trong môi trường ẩm, mưa nhiều.

3. Cơ sở lý thuyết và chương trình thực nghiệm

Nghiên cứu sử dụng tiếp cận kết hợp: (i) CSCT làm nền tảng cơ học liên hệ sức kháng cắt với độ mở vết nứt, và (ii) thí nghiệm push-off để mô tả suy thoái cơ chế truyền lực qua mặt nứt dưới tải trọng lặp trong môi trường khô/ướt [3], [4].

3.1. Lý thuyết Vết nứt cắt tới hạn

Theo Muttoni (2008), khả năng chịu cắt của bản không cốt đai phụ thuộc vào độ mở rộng của vết nứt cắt tới hạn (w) và độ nhám của cốt liệu [3], [4].

Phương trình phá hoại:

$$\frac{V_R}{b_0 d \sqrt{f'_c}} = \frac{1}{1 + 15 \frac{\psi \cdot d}{d_{g0} + d_{dg}}} \quad (5)$$

- V_R (N): Khả năng kháng cắt chọc thủng (Punching Shear Resistance);

- b_0 (mm): Chu vi kiểm soát (Control perimeter), được xác định cách mép diện tích chịu tải (hoặc mép cột) một khoảng $d/2$;

- d (mm): Chiều cao làm việc tính từ miền nén ngoài cùng đến trọng tâm cốt thép chịu kéo dọc;

- ψ (rad): Góc xoay của bản sàn tại vùng lân cận vết nứt (Rotation of the slab). Tham số này đại diện cho trạng thái biến dạng của kết cấu; góc xoay càng lớn, vết nứt càng mở rộng;

- d_{dg} (mm): Đường kính lớn nhất của cốt liệu thô (Maximum aggregate size). Đây là tham số đại diện cho độ nhám (roughness) của bề mặt vết nứt;

- d_{g0} (mm): Kích thước cốt liệu tham chiếu, theo Muttoni (2008) lấy $d_{g0} = 16$ mm [3].

Trong đó, độ mở vết nứt tỷ lệ với góc xoay của bản: $w \propto \psi \cdot d$.

Nguyên lý cơ bản: Khi vết nứt mở rộng (w tăng) hoặc bề mặt vết nứt bị mài mòn (d_{dg} giảm hiệu quả), khả năng truyền lực cắt qua vết nứt giảm đi, dẫn đến phá hoại.

3.2. Thí nghiệm

Tác giả đã thực hiện một số thí nghiệm dựa trên mô hình của Esayas và cộng sự [12] trong đó sử dụng Bê tông thông thường có cường độ 32 MPa. Chi tiết thiết kế cấp phối và vật liệu tại Bảng 1, 2.

Bảng 1. Thiết kế cấp phối.

Series	W/C	S/A	Hàm lượng (Kg/m ³)			
			C	W	G	S
C0	65%	50	280	180	920	897
C0 wet			280	180	920	897

Bảng 2. Tính chất vật liệu.

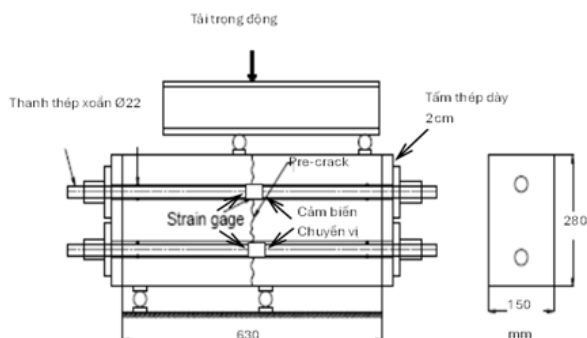
Vật liệu	Ký hiệu	Nhãn hiệu	Khối lượng riêng (kg/cm ³)
Xi măng	C	Sumitomo	3.15
Cát	S	-	2.63
Đá 1x2	G	-	2.60

Các mẫu thí nghiệm sau khi hoàn tất công tác đổ bê tông (rút ống tạo lỗ cho thép xoắn) (Hình 1) sẽ được bảo dưỡng trong 28 ngày.

Mẫu thí nghiệm có kích thước 150 × 280 × 630 mm. (Hình 2) Rãnh 5 × 5 mm được tạo trên hai mặt bên để định hướng vết nứt ổn định. Vết nứt được tạo chủ động bằng phương pháp tách (splitting). Bề rộng khe nứt ban đầu duy trì 0,3-0,5 mm.

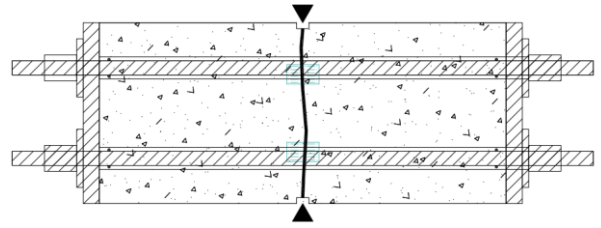


Hình 1. Mẫu thí nghiệm sau khi đổ bê tông.



Hình 2. Thiết kế mẫu thí nghiệm.

Hai nửa mẫu sau nứt được kẹp giữ bằng thanh thép D22 không dính bám (unbonded) xuyên dọc mẫu, với ứng suất kẹp nhỏ (< 0,01 MPa) nhằm mô phỏng điều kiện kìm hãm ngang thụ động/hiệu ứng vòm trong bản cầu (Hình 3).

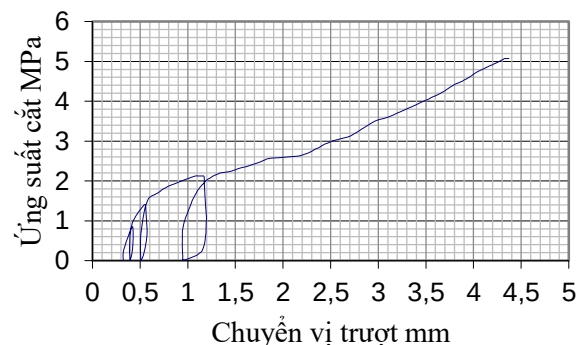


Hình 3. Tạo vết nứt chủ động cho mẫu.

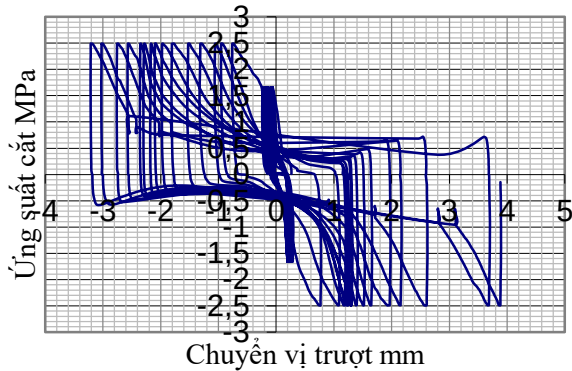
Thí nghiệm được thiết kế để các phần tử bê tông tại bề mặt vết nứt làm việc trong trạng thái thuần túy chịu lực cắt dọc trục. Chuyển vị tương đối của 2 bên vết nứt do chịu tác động của lực cắt cùng độ mở khe nứt được đo bằng các cảm biến dịch chuyển khe nứt theo hai phương, có khả năng đo đồng thời độ trượt 2 mặt bê tông và bề rộng khe nứt. Ứng suất kéo được xác định thông qua các strain gauge dán trên các thanh thép xoắn.

Đối với mẫu thí nghiệm C0 khô, thực hiện việc gia tải sau đó hạ tải ở các mức ứng suất 0.5 Mpa, 1 Mpa và 2 Mpa sau đó gia tải cho đến khi mẫu thí nghiệm phá hoại. Kết quả cho thấy, hiệu ứng vòm [4] đã được quan sát thấy ở mức tải trọng nhỏ, chuyển vị trượt có sự phục hồi nhẹ do tác động của ứng suất kéo dọc trục (Hình 4.)

Đối với mẫu thí nghiệm C0 ướt, thực hiện tải trọng lặp đối chiều ở mức tải trọng 35% tải trọng phá hoại, sau đó là 50% tải trọng phá hoại. (Hình 5). Thí nghiệm tải trọng lặp đối chiều được dừng khi chuyển vị trượt đạt 4mm (chuyển vị phá hoại giả định).



Hình 4. Quan hệ giữa ứng suất cắt và chuyển vị dưới tải trọng đơn hướng (môi trường khô).



Hình 5. Quan hệ giữa ứng suất cắt và chuyển vị dưới tải trọng lặp đối chiều (môi trường nước).

Thí nghiệm đã mô phỏng theo cơ chế chịu lực: Cắt thuần túy (Pure shear) với lực kiểm chế ngang thụ động (để mô phỏng hiệu ứng vòm trong bản cầu).

Chế độ tải thiết kế: Tải lặp một chiều (Pulsating). [13] Tải lặp đối chiều (Reversed cyclic) - Mô phỏng xe chạy.

Môi trường: Khô (Dry) và Ngập nước (Submerged).

4. Kết quả và Thảo luận

4.1. Cơ chế suy thoái bề mặt vết nứt

Kết quả thí nghiệm cho thấy cơ chế suy thoái chủ đạo của NWC dưới tải trọng lặp là mài mòn và gãy vỡ các gờ nhám (asperity attrition) tại bề mặt vết nứt. Do cốt liệu thô thường có độ cứng cao hơn vữa xi măng, vết nứt có xu hướng phát triển vòng quanh hạt cốt liệu; dưới tải lặp, các 'chốt' cốt liệu bị mài tròn dần, làm giảm khả năng cài móc và giảm lực ma sát truyền cắt.

Dưới tác dụng của tải trọng lặp bằng 35% tải trọng phá hoại (giả định mẫu thí nghiệm phá hoại khi chuyển vị trượt vượt là 4.5mm), độ nhám của bề mặt vết nứt vẫn cung cấp khả năng truyền tải lực cắt với chuyển vị trượt thay đổi không đáng kể.

4.2. Ảnh hưởng của tải trọng lặp đảo chiều

Phù hợp với nghiên cứu của Esayas và cộng sự [12], tải lặp đối chiều gây hư hỏng nghiêm trọng hơn rõ rệt so với tải lặp một chiều. Độ trượt tích lũy của mẫu chịu tải đối chiều lớn hơn khoảng 10-15 lần so với mẫu chịu tải một chiều ở cùng số chu kỳ. Cơ chế là do hai mặt vết nứt 'chà xát' theo hai

hướng, làm tăng nhanh tốc độ sản sinh bột mịn và mài mòn gờ nhám.

Lý do: Khi đảo chiều lực cắt (50% tải trọng phá hoại), hai mặt vết nứt "chà xát" lên nhau theo hai hướng, làm tăng tốc độ sản sinh bột mịn (powder) và làm mòn các gờ nhám nhanh chóng.

Các quan sát trên cũng phù hợp với thí nghiệm quy mô lớn gần đây trên bản mặt cầu được phủ UHPFRC chịu tải bánh xe di động. Makita và cs. (2024) ghi nhận tải bánh xe chạy tạo đảo chiều lực cắt và làm tăng mài mòn mặt nứt so với tải lặp tại một điểm; đồng thời kết cấu có thể phá hoại theo cắt chọc thủng kèm nứt vùng gần mặt tiếp giáp lớp phủ - nền [14]. Điều này củng cố nhận định rằng để đánh giá an toàn cho bản mặt cầu khai thác thực tế, cần đặc biệt thận trọng khi áp dụng kết quả từ thí nghiệm tải lặp một chiều hoặc tải tại điểm sang trường hợp thực tế có tác động của bánh xe chạy qua.

4.3. Ảnh hưởng của nước và hiệu ứng thủy lực trong khe nứt

Sự hiện diện của nước làm gia tăng tốc độ suy thoái theo hai cơ chế: (i) bôi trơn làm giảm ma sát tại mặt nứt, và (ii) cuốn trôi các hạt vụn/bột mịn trong khe nứt. Esayas chỉ ra rằng các hạt vụn ở trạng thái khô có thể đóng vai trò như 'vật chêm', góp phần duy trì truyền lực; khi bị nước cuốn đi, hai bề mặt bê tông trượt trực tiếp lên nhau làm mòn nhanh hơn [12].

Ngoài cơ chế bôi trơn và cuốn trôi hạt vụn tại mặt nứt, đối với các bản mặt cầu có lớp phủ/sửa chữa, nước còn có thể làm gia tăng suy thoái tại mặt tiếp giáp thông qua giảm ma sát và tăng trượt vi mô theo chu kỳ. Feng và cs. (2024) cho thấy tuổi thọ mỏi cắt dính giữa lớp UHPC (hoặc vật liệu sửa chữa cường độ cao) và nền bê tông thường phụ thuộc mạnh vào độ nhám bề mặt và mức ứng suất; đồng thời đã phát triển các phương trình dự báo tuổi thọ mỏi theo độ nhám và mức ứng suất [15]. Gợi ý này cho thấy trong thiết kế gia cường bằng lớp vật liệu phủ, cần kiểm soát nghiêm ngặt xử lý bề mặt và đánh giá bền mỏi của liên kết theo điều kiện khai thác ẩm ướt.

Với bản mặt cầu ở ĐBSCL, nơi bề mặt thường xuyên chịu ẩm và thấm nước theo chu kỳ mưa-nắng, cơ chế này là một yếu tố không thể bỏ qua

khi đánh giá an toàn cắt, đặc biệt đối với bản không cốt đai.

Esayas đã chỉ ra rằng nước cuốn trôi các hạt vụn (crushed particles) ra khỏi vết nứt. Các hạt vụn này khi ở trạng thái khô đóng vai trò như các "con lăn" hoặc vật chêm giúp tăng ma sát. Khi bị nước cuốn đi, hai mặt bê tông trượt trực tiếp lên nhau gây mòn nhanh [12].

Kết quả thí nghiệm cũng đã chỉ ra kết quả tương tự với những sự mài nhẵn bề mặt về nứt quan sát được. Từ đó có thể thấy rõ, tác động của nước đối với khả năng chịu cắt của bản cầu bê tông là không thể bỏ qua. Bản cầu bị phá hoại chỉ với tải trọng bằng 50% tải trọng phá hoại.

5. Đánh giá an toàn và cảnh báo cho thiết kế, thực hiện gia cường mặt cầu bê tông cũ

Từ các kết quả trên, tác giả đưa ra những cảnh báo kỹ thuật cho công tác thiết kế gia cường cầu cũ như sau:

5.1. Rủi ro khi chỉ gia cường khả năng chịu uốn mà không kiểm tra khả năng chịu cắt

Thực hành phổ biến hiện nay là gia cường uốn cho bản mặt cầu yếu bằng thép tấm hoặc CFRP ở đáy bản. [16], [17] Việc tăng độ cứng và sức kháng uốn có thể làm giảm biến dạng và nứt uốn quan sát được trong ngắn hạn. Tuy nhiên, khi tải trọng khai thác tăng (hoặc cho phép xe tải trọng lớn hơn), lực cắt tác dụng lên bản tăng tương ứng, trong khi sức kháng cắt của bê tông nền-đã nứt, đã mỏi và bị nước làm trơn hóa-không những không tăng mà còn suy giảm theo thời gian.

Hậu quả tiềm ẩn là cơ chế phá hoại có thể chuyển từ dạng dẻo (uốn) sang dạng giòn (cắt chọc thủng) xảy ra đột ngột, đặc biệt trong mùa mưa hoặc khi xuất hiện xe quá tải. Do đó, kiểm tra cắt chọc thủng cần được xem là bước bắt buộc khi lập phương án gia cường.

5.2. Gợi ý kỹ thuật cho kiểm định và thiết kế gia cường

Bổ sung theo hướng giải pháp vật liệu, các nghiên cứu gần đây cho thấy lớp phủ UHPFRC dày khoảng 30 mm có thể tăng đáng kể tuổi thọ mỏi của bản mặt cầu dưới tải bánh xe di động; tuy nhiên cơ chế phá hoại cuối cùng vẫn có thể là cắt chọc thủng và xuất hiện nứt vùng gần mặt tiếp giáp

[14]. Vì vậy, khi đề xuất phủ UHPFRC/UHPC để chống thấm và tăng cường, cần đồng thời: (i) kiểm tra chọc thủng của bản sau gia cường (theo CSCT hoặc quy trình tương đương) với tham số truyền lực đã chiết giảm theo suy thoái; và (ii) kiểm tra sức kháng và tuổi thọ mỏi của liên kết cắt dính tại mặt tiếp giáp, có xét đến độ nhám và mức ứng suất làm việc theo các kết quả thực nghiệm gần đây [15].

Từ kết quả nghiên cứu, có thể rút ra một số gợi ý: (i) cần chiết giảm tham số truyền lực qua vết nứt khi đánh giá cầu cũ, (ii) nên ưu tiên giải pháp chống thấm và kiểm soát nước mặt cầu như một biện pháp gia cường gián tiếp, hiệu quả, và (iii) trong trường hợp gia cường uốn bằng CFRP/thép tấm, cần đồng thời xem xét giải pháp tăng cường kháng cắt (ví dụ tăng cường liên kết, neo chống bong, lớp phủ/bê tông siêu tính năng, hoặc giải pháp cục bộ tại vùng bánh xe).

6. Kết luận và Kiến nghị

Nghiên cứu kết hợp CSCT và dữ liệu thí nghiệm push-off để làm rõ cơ chế suy giảm khả năng kháng cắt chọc thủng của bản mặt cầu BTCT dưới tác động kép của tải trọng lặp và môi trường ẩm.

6.1. Kết luận

- Bằng chứng thực nghiệm gần đây về tải bánh xe chạy cho thấy đảo chiều lực cắt và mô men xoắn có thể gia tốc mài mòn mặt nứt, làm giảm tuổi thọ mỏi so với trường hợp tải lặp tại một điểm; do đó khi đánh giá cầu hiện hữu nên ưu tiên dữ liệu/giả thiết tương ứng tải từ bánh xe chạy qua [5–14];

- Đối với các giải pháp phủ UHPC/UHPFRC, ngoài kiểm tra cắt chọc thủng, cần xem xét bền mỏi cắt dính của mặt tiếp giáp theo độ nhám và mức ứng suất làm việc [15];

- Cơ chế truyền lực cắt qua vết nứt (aggregate interlock) suy giảm nhanh dưới tải trọng lặp đổi chiều và sự hiện diện của nước [3–12];

- Các tiêu chuẩn thiết kế phổ biến có xu hướng không xét suy thoái độ nhám bề mặt vết nứt trong đánh giá cầu hiện hữu, do đó có thể đánh giá thiếu an toàn trong điều kiện mưa nhiều [7–10];

- Cần đưa kiểm tra chọc thủng với tham số vật liệu đã suy giảm vào quy trình lập hồ sơ sửa chữa, gia cường cầu cũ; đồng thời xem chống thấm và

thoát nước mặt cầu là giải pháp ưu tiên nhằm giảm tốc độ suy thoái.

6.2. Kiến nghị

Trong các dự án sửa chữa, gia cường cầu khu vực ĐBSCL, nên bổ sung bước khảo sát hiện trường về vết nứt và thấm nước, kết hợp đánh giá định lượng suy giảm cơ chế truyền lực qua vết nứt (thông qua thí nghiệm/hiệu chỉnh mô hình) để lựa chọn mức chiết giảm hợp lý.

Lời cảm ơn

Cảm ơn thầy hướng dẫn Kishi Toshiharu, nhóm nghiên cứu tại Kishi Lab, IIS, The University of Tokyo đã hỗ trợ thực hiện các thí nghiệm và nghiên cứu có liên quan.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Trương Việt Phương*. *University of Transport Ho Chi Minh City.*

*Corresponding author: phuonggtv@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] J. C. Walraven, "Fundamental analysis of aggregate interlock," *Journal of the Structural Division, ASCE*, vol. 107, no. 11, pp. 2245-2270, 1981, doi: 10.1061/JSDEAG.0005820.
- [2] H. W. Reinhardt and J. C. Walraven, "Cracks in concrete subjected to shear," *Journal of the Structural Division, ASCE*, vol. 108, no. 1, pp. 207-224, 1982, doi: 10.1061/JSDEAG.0005869.
- [3] A. Muttoni, "Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement," *ACI Structural Journal*, vol. 105, no. 4, pp. 440-450, 2008, doi: 10.14359/19858.
- [4] A. Muttoni and M. F. Ruiz, "Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width," *ACI Structural Journal*, vol. 105, no. 2, pp. 163-172, 2008, doi: 10.14359/19731.
- [5] C. Gao and A. Fam, "Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Bridge Decks under Moving Wheel Loads: A State-of-the-Art Review," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 29, no. 11, 2024, doi: 10.1061/JBENF2.BEENG-6870.
- [6] N. Kongwang, K. Takeda, Y. Sato, and P. Pheinsusom, "Fatigue life prediction method for reinforced concrete deck slabs subjected to repeated moving wheel loads and failing in shear," *Structural Concrete*, vol. 25, no. 6, pp. 4324-4339, Dec. 2024, doi: 10.1002/suco.202400114.
- [7] Ministry of Transport of Vietnam, TCVN 11823:2017: Bridge Design Standard. Hanoi, Vietnam, 2017.
- [8] AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th ed. Washington, DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [9] Ministry of Transport of the PRC, JTG 3362-2018: Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts. Beijing, China, 2018.
- [10] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Standard Specifications for Concrete Structures-Design. Tokyo, Japan, 2007.
- [11] Y. Maeda and S. Matsui, "Fatigue of reinforced concrete slabs under trucking wheel load," in *Proc. Japan Concrete Institute (JCI)*, vol. 6, 1984, pp. 221-224. (In Japanese).
- [12] G. Esayas, T. Kishi, and K. Maekawa, "Shear fatigue response of cracked concrete interface," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 365-376, 2008, doi: 10.3151/jact.6.365.
- [13] P. C. Perdikaris and S. Beim, "RC bridge decks under pulsating and moving load," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 114, no. 3, pp. 591-607, 1988, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:3(591).
- [14] T. Makita, T. Ichinomiya, and Y. Watanabe, "Experimental investigation of fatigue behavior of UHPFRC-RC composite deck slabs subjected to moving wheel loading," *Engineering Structures*, vol. 303, 117460, 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.117460.
- [15] S. Feng, J. Lyu, H. Xiao, Q. Zhang, J. Bai, Y. Pei, M. Chen, and L. Fan, "Bond shear fatigue behavior between ultra-high-performance concrete and normal strength substrate," *Construction and Building Materials*, vol. 414, 134972, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134972.
- [16] H. Saleh, K. Abdouka, R. Kalfat, and R. Al-Mahaidi, "Punching shear strengthening of bridge decks using L-CFRP laminates," in *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2021, doi: 10.1201/9780429279119-199.
- [17] Y. Fukagawa and S. Matsui, "Fatigue life extension of damaged RC slabs by strengthening with carbon fiber sheets attaching method," in *Proc. 19th U.S.-Japan Workshop on Bridge Engineering (UJNR)*, 2003.