Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2022, 16 (1V): 11–21

MÔ PHỎNG ỨNG XỬ LIÊN KẾT BÁM DÍNH GIỮA THANH CFRP VÀ BÊ TÔNG TRONG KỸ THUẬT NSM

Nguyễn Thái Bình[a,b,*], Võ Khắc Lê Anh[a,b], Cao Nguyên Thi[c], Lương Văn Hải[a,b]

[a]*Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh, 268 đường Lý Thường Kiệt, Quận 10, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam*
[b]*Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam*
[c]*Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Tiền Giang, 119 đường Ấp Bắc, Phường 05, TP. Mỹ Tho, Tiền Giang, Việt Nam*

Nhận ngày 23/6/2021, Sửa xong 10/2/2022, Chấp nhận đăng 21/2/2022

Tóm tắt

Bài báo trình bày nghiên cứu mô phỏng ứng xử của liên kết bám dính giữa thanh CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) và bê tông khi sử dụng kỹ thuật sửa chữa/gia cường NSM (Near-Surface Mounted). Mô hình mô phỏng được xây dựng gồm khối bê tông có hình dạng chữ C, thanh CFRP được đặt vào và liên kết với bê tông thông qua hệ vật liệu bao gồm lớp keo epoxy và bổ sung thêm lớp vật liệu sửa chữa. Phần mềm ANSYS/Workbench (ANSYS Academic 2020) được sử dụng để mô phỏng quá trình kéo trực tiếp thanh CFRP ra khỏi khối bê tông hình dạng chữ C. Ba vị trí đặt thanh CFRP trong khối bê tông được khảo sát cụ thể. Mô hình PTHH được kiểm chứng từ các kết quả của nghiên cứu thí nghiệm trước đây. Từ kết quả nghiên cứu mô phỏng có thể kết luận phần tử contact element (CE) cùng với mô hình vùng kết dính song tuyến tính (Bi-linear Cohesive Zone Modelling - CZM) mô phỏng tốt ứng xử của liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông trong kỹ thuật sửa chữa/gia cường NSM.

Từ khoá: ứng xử liên kết bám dính; kỹ thuật sửa chữa/gia cường NSM; thanh CFRP; ANSYS/Workbench; mô hình vùng kết dính song tuyến tính CZM.

A SIMULATION STUDY OF BOND BEHAVIOR BETWEEN CFRP RODS AND CONCRETE IN NSM TECHNIQUE

Abstract

The purpose of this article is to conduct a simulation study of the bonding behavior of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) rods and concrete in the NSM (Near-Surface Mounted) repair/reinforcement technique. The proposed finite element model is composed of a C-shaped concrete block and CFRP rods that are positioned and bonded to the concrete block using a material system composed of an epoxy adhesive layer and supplementary repair material. The pull-out test is modeled using the ANSYS/Workbench software (ANSYS Academic 2020). Three locations for CFRP rods in the concrete block are surveyed. The presented finite element models are validated using data from an extensive experimental study conducted previously. According to the simulation results, the contact element (CE) in combination with the bi-linear cohesive zone modeling (CZM) well models the behavior of the adhesive bond between the CFRP rods and the concrete in the NSM repair/reinforcement technique.

Keywords: bond behavior; near-surface mounted (NSM) technique; carbon fiber reinforcement polymer (CFRP) rods; ANSYS/Workbench; bi-linear cohesive zone modeling (CZM).

https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(1V)-02 © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

[*]Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* tbnguyen@hcmut.edu.vn (Bình, N. T.)

1. Giới thiệu

Vật liệu Polymer gia cố bằng sợi (FRP) là một trong những vật liệu gia cường được ứng dụng rộng rãi trong ngành xây dựng hiện nay. Mục đích của việc sử dụng loại vật liệu này là nhằm tăng cường khả năng chịu lực cho các kết cấu bê tông cốt thép đã bị giảm khả năng chịu lực do nhiều tác nhân gây ra như lỗi trong thiết kế hoặc thi công; việc xuống cấp, hư hỏng các bộ phận kết cấu theo thời gian; hỏa hoạn... Đối với trường hợp kết cấu bê tông chịu ảnh hưởng bởi nhiệt độ cao, đặc tính cơ học sẽ bị giảm đi [1], các hư hỏng có thể quan sát được trên bề mặt, điều này có thể dẫn đến việc kết cấu bê tông cốt thép sẽ bị nứt và mất đi khả năng chịu lực [2]. Ngoài ra, sau khi cháy cường độ liên kết của bê tông và cốt thép giảm, ảnh hưởng trực tiếp đến sự làm việc của những cấu kiện chịu lực này. Đi kèm với loại vật liệu gia cường FRP này là các kỹ thuật sử dụng chúng cũng trở nên quan trọng vì chúng ảnh hưởng đến chi phí thực hiện cũng như khả năng khai thác tối đa các đặc tính ưu việt của FRP. Hai kỹ thuật sửa chữa/gia cường phổ biến hiện nay sử dụng FRP bao gồm kỹ thuật gia cường bên ngoài (Externally Bonded Reinforcement - EBR) [3, 4] và kỹ thuật gia cường gần bề mặt (Near-Surface Mounted - NSM) [5, 6].

Kỹ thuật sửa chữa/gia cường NSM bằng thanh FRP đã thu hút sự quan tâm ngày càng tăng của nhiều nhà nghiên cứu cũng như trong các ứng dụng thực tế [7, 8]. Trong kỹ thuật NSM, đầu tiên bề mặt của kết cấu bê tông sẽ được dỡ bỏ và khoét một rãnh sâu; sau đó thanh FRP gia cường sẽ được đặt vào bên trong rãnh, được tạo liên kết bám dính với lớp bê tông sẵn có bằng lớp keo epoxy và cuối cùng một loại vật liệu sửa chữa sẽ trám lại phần bề mặt đã bị dỡ bỏ của bê tông cũ, khôi phục lại hình dáng ban đầu. Do diện tích liên kết với bê tông cao hơn và được bảo phủ bởi các lớp bê tông xung quanh, kỹ thuật NSM này đã được chứng minh mang lại hiệu quả cơ học cao hơn so với kỹ thuật EBR [9, 10]. Những ưu điểm đặc biệt mà kỹ thuật NSM mang lại như: lớp gia cường ít bị bong tróc khỏi bề mặt bê tông, FRP được bảo vệ tốt hơn khỏi tác hại bên ngoài như va đập, cháy... [9, 11].

Các khảo sát đã được báo cáo trong các nghiên cứu [9, 12, 13] cho thấy rằng vật liệu polymer gia cố bằng sợi cacbon (CFRP) được sử dụng trong hầu hết các nghiên cứu hiện có về kỹ thuật NSM đối với kết cấu bê tông cốt thép. CFRP đáp ứng tốt các yêu cầu cần thiết trong việc sửa chữa, gia cường cho các cấu kiện bê tông cốt thép nhờ vào những ưu điểm nổi bật về đặc tính của loại vật liệu này mang lại như độ bền cơ học cao, trọng lượng riêng nhẹ, dễ dàng lắp đặt, khả năng chống ăn mòn và độ bền mỏi tốt. Hình dạng các loại CFRP thường được sử dụng tương đối đa dạng như tấm, dải hoặc thanh thường được đặt vào thớ chịu kéo của kết cấu chịu uốn [3]. Việc sử dụng vật liệu thanh CFRP mang lại một số hiệu quả cao hơn trong kỹ thuật NSM này như diện tích mặt cắt ngang sử dụng nhỏ hơn, kích thước rãnh khoét trên bê tông sẽ nhỏ hơn dẫn đến sẽ tiết kiệm được lượng vật liệu kết dính dùng để trám rãnh.

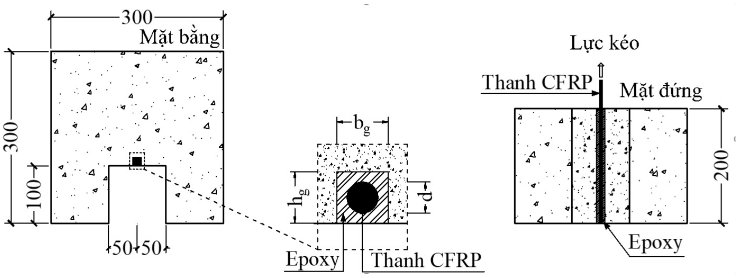
Hiệu quả của kỹ thuật sửa chữa/gia cường NSM phần lớn phụ thuộc vào liên kết bám dính giữa thanh CFRP gia cường và bề mặt bê tông vì nó kiểm soát sự làm việc chung của hai loại vật liệu này [14, 15], từ đó ảnh hưởng đến khả năng chịu tải của cấu kiện gia cường [16]. Có nhiều tác nhân ảnh hưởng đến ứng xử liên kết bám dính của thanh CFRP và bê tông trong kỹ thuật NSM như đặc tính cơ học của lớp vật liệu liên kết khi trám rãnh, kích thước rãnh, vị trí khoét rãnh cũng như vị trí lắp đặt thanh CFRP [12, 17]. Để nghiên cứu ứng xử liên kết bám dính giữa vật liệu CFRP và bê tông trong kỹ thuật NSM, hai phương pháp chính thường được sử dụng là thí nghiệm và mô phỏng. Thí nghiệm kéo trực tiếp là một trong những thí nghiệm phổ biến nhất do tính đơn giản và có những ưu điểm như: có thể dễ dàng thao tác trên các mẫu thử, vùng quan tâm dễ dàng quan sát và có thể sử dụng nhiều loại mẫu thử cũng như cách thiết lập chúng [18]. Với mục đích nghiên cứu độ bền liên kết bám dính giữa CFRP và bê tông được gia cường theo kỹ thuật NSM, Thi và cs. [19] đã thực hiện thí nghiệm các mẫu kéo tuột thanh CFRP ra khỏi bê tông. Các thí nghiệm tương tự cũng đã được thực hiện bởi

Emara và cs. [20] nhằm quan sát và đánh giá năng suất làm việc của dải CFRP và bê tông. Kết quả thí nghiệm cho kết quả trực quan với số lượng mẫu thí nghiệm hợp lý. Tuy nhiên phương pháp này sẽ khá tốn kém và phức tạp, đòi hỏi các thiết bị thí nghiệm chuyên dụng. Phương pháp nghiên cứu mô phỏng bằng phần mềm phần tử hữu hạn (PTHH) có thể coi là một lựa chọn thay thế tốt. Tuy nhiên một trong những điểm quan trọng ảnh hưởng đến tính đúng đắn trong mô phỏng là mô hình ứng xử của liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông. Trong nghiên cứu thí nghiệm của Thi và cs. [19] đã giả định độ trượt giữa thanh CFRP và bê tông có thể được biểu thị bằng mô hình song tuyến lực-chuyển vị (Bi-linear force-motion law) bằng phần mềm ABAQUS, tuy nhiên phần mô phỏng này mới được Thi và cs. [19] giới thiệu một cách sơ lược với biểu đồ lực và độ trượt của mẫu A.

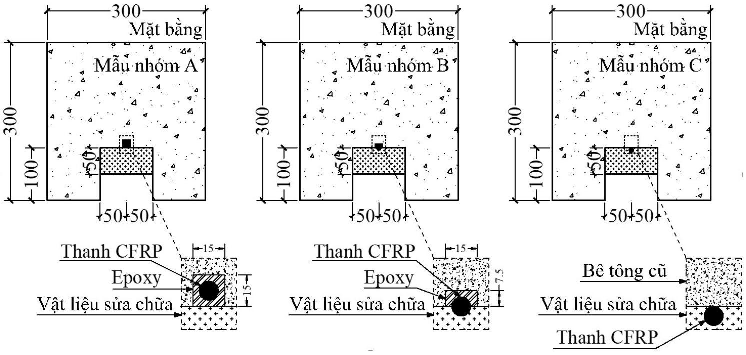
Bài báo này sử dụng phương pháp PTHH để nghiên cứu mô phỏng ứng xử của liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông. Mô hình mô phỏng PTHH của thí nghiệm kéo tuột thanh CFRP trong khối bê tông hình dạng chữ C theo kỹ thuật NSM được xây dựng bằng phần mềm ANSYS/Workbench. Ba vị trí đặt thanh CFRP gia cường trong khối bê tông được khảo sát. Nghiên cứu thí nghiệm đã được thực hiện bởi Thi và cs. [19] được sử dụng để kiểm chứng mô hình PTHH về ứng xử liên kết bám dính đề xuất. Một số thông tin quan trọng về cơ chế phá hủy trên bề mặt tiếp xúc giữa các loại vật liệu, thông số về liên kết nhận được từ thí nghiệm của Thi và cs. [19] sẽ được sử dụng trong nghiên cứu mô phỏng này.

2. Sơ lược về thí nghiệm kéo trực tiếp

Để khảo sát ứng xử của liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông với các vị trí đặt thanh CFRP khác nhau trong phương pháp gia cường NSM, thí nghiệm kéo đã được thực hiện bởi Thi và



(a) Kích thước hình học khối bê tông chữ C



(b) Ba trường hợp lắp đặt thanh CFRP bên trong khối bê tông chữ C

Hình 1. Khối bê tông chữ C và các trường hợp lắp đặt thanh CFRP khảo sát

cs. [19]. Khối bê tông có hình dạng chữ C được khoét rãnh vuông ở giữa để lắp đặt thanh CFRP. Kích thước của mẫu thí nghiệm được trình bày trong Hình 1(a). Ba vị trí lắp đặt thanh CFRP để khảo sát được thể hiện ở Hình 1(b) gồm, mẫu nhóm A (mẫu A): thanh CFRP được lắp đặt nằm bên trong lớp bê tông; mẫu nhóm B (mẫu B): thanh CFRP nằm giữa lớp bê tông và lớp vật liệu sửa chữa; mẫu nhóm C (mẫu C): thanh CFRP nằm hoàn toàn bên trong lớp vật liệu sửa chữa. Các thông số thí nghiệm cụ thể có thể xem chi tiết trong nghiên cứu của Thi và cs. [19].

3. Mô hình mô phỏng thí nghiệm kéo trực tiếp

3.1. Đặc trưng cơ học của các vật liệu sử dụng

Thông số các vật liệu sử dụng trong mô hình PTHH được trình bày trong các Bảng 1–3. Các giá trị này được lấy từ các vật liệu thực tế sử dụng trong thí nghiệm của Thi và cs. [19], bao gồm thông số của vật liệu thanh CFRP, bê tông, vật liệu sửa chữa và keo epoxy.

Bảng 1. Thông số vật liệu của thanh CFRP [19]

Khối lượng riêng (kg/m^3)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson	Giới hạn chảy (MPa)
1800	133	0,4	2220

Bảng 2. Thông số vật liệu của khối bê tông và vật liệu sửa chữa [19]

Khối lượng riêng (kg/m^3)	Mô đun đàn hồi (MPa)	Hệ số Poisson	Cường độ chịu nén cực đại (MPa)	Cường độ chịu kéo cực đại (MPa)
2500	30000	0,2	35	3,5

Bảng 3. Thông số vật liệu của keo epoxy [19]

Khối lượng riêng (kg/m^3)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson	Cường độ chịu nén cực đại (MPa)	Cường độ chịu kéo cực đại (MPa)
1650	11,2	0,25	85	26

3.2. Mô hình vùng kết dính song tuyến tính (Bi-linear Cohesive Zone Modelling – CZM)

Trong nghiên cứu thí nghiệm kéo trực tiếp [19], sự mất liên kết quan sát được chủ yếu xảy ra trên bề mặt giữa 2 lớp vật liệu khác nhau (giữa thanh CFRP và lớp keo dán epoxy cho mẫu A và B; hoặc giữa thanh CFRP và lớp vật liệu sửa chữa cho mẫu B và C). Hình thức phá hoại này tương tự như sự mô phỏng mất liên kết của phần tử contact element (CE), ngoài ra các số liệu về sự phá hoại của liên kết bám dính khá hạn chế trong nghiên cứu thí nghiệm. Do đó, trong mô hình mô phỏng của nghiên cứu này, tác giả đề xuất sử dụng phần tử CE với mô hình vùng kết dính song tuyến tính để mô tả liên kết bám dính trong các trường hợp khảo sát trong phần mềm ANSYS/Workbench [21, 22]. Bề mặt tiếp xúc nhau giữa thanh CFRP và bê tông được chia kích thước phần tử là tương tự nhau. Các thông số sử dụng trong mô hình CZM trong mô phỏng các mẫu A, B và C được thể hiện trong các Bảng 4 và 5.

Bảng 4. Thông số trong mô hình vùng kết dính song tuyến tính CZM

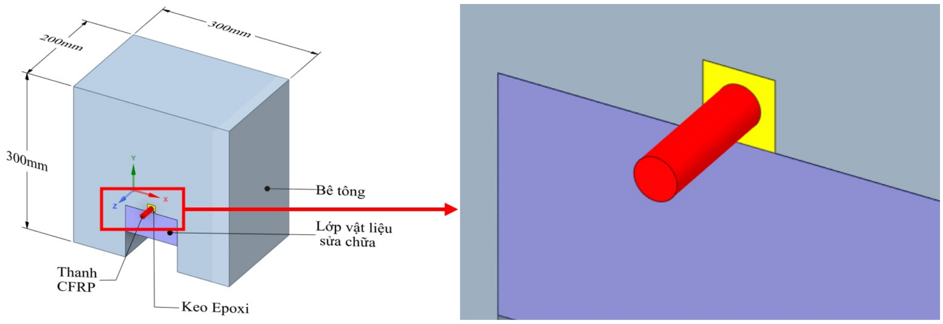
Mẫu	Ứng suất tiếp lớn nhất trong liên kết (MPa)	Độ trượt sau khi hoàn thành phân tách liên kết (mm)	Hệ số giảm chấn (s)
A	2,843	10	0,001
B	2,955	10	0,001
C	7,669	10	0,001

Bảng 5. Giá trị độ cứng tiếp tuyến K_t ứng với các mẫu thí nghiệm

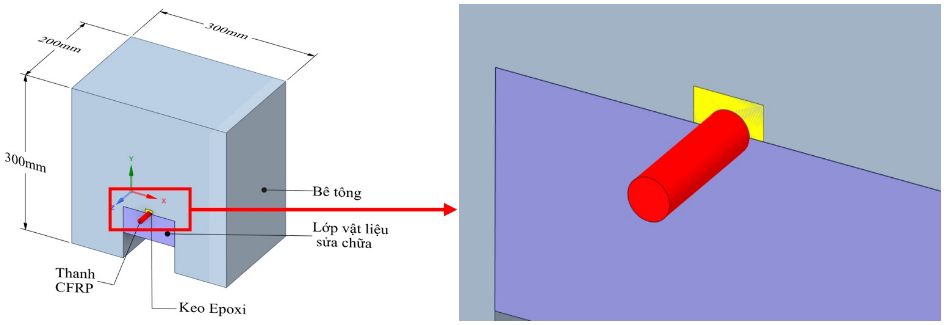
Mẫu	$\tau_{\max}$ (MPa) (Thí nghiệm) [19]	δ_t (mm) (Thí nghiệm)	Độ cứng K_t (N/mm/m^2)
A	2,843 (mẫu C1)	1,4	2,0
B	2,955 (mẫu C4)	1,2	2,5
C	7,669 (mẫu C6)	0,3	25,0

3.3. Mô phỏng PTHH liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông

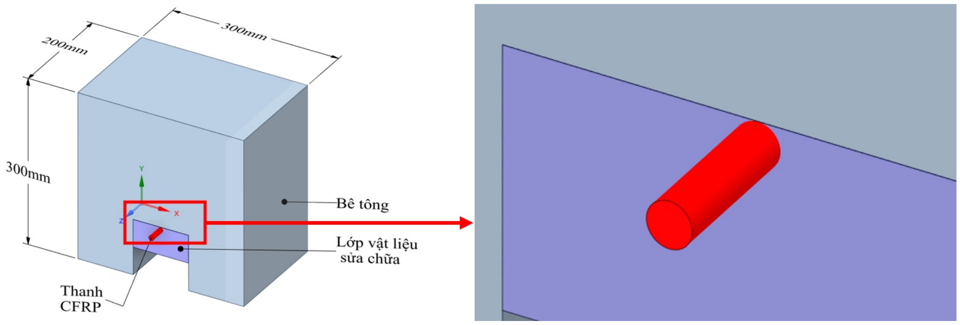
Nhằm mục đích mô phỏng ứng xử liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông trong kỹ thuật NSM, mô hình PTHH sử dụng phần mềm ANSYS/Workbench được xây dựng. Các mô hình mô phỏng thể hiện trong Hình 2 được thiết lập dựa trên các thông số kích thước từ các mẫu thí nghiệm được thực hiện bởi Thi và cs. [19]. Các liên kết giữa các bề mặt vật liệu (bê tông, keo epoxy, vật liệu sửa chữa) trong mô hình mô phỏng được thiết lập dựa trên quan sát cơ chế phá hủy liên kết từ thí nghiệm [19] gồm 2 trường hợp sau:



(a) Mẫu A



(b) Mẫu B



(c) Mẫu C

Hình 2. Mô hình mô phỏng thí nghiệm kéo trực tiếp trong phần mềm ANSYS/Workbench

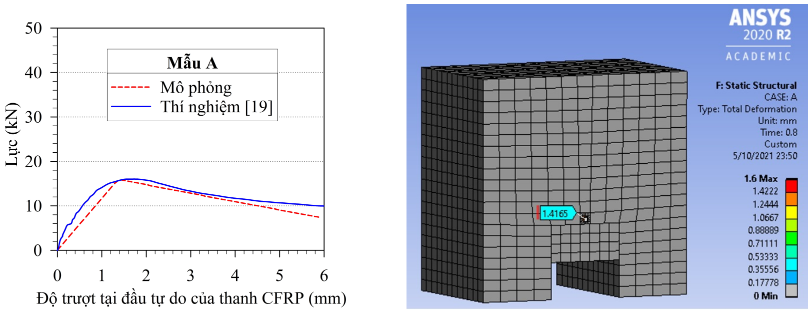
- Mô hình liên kết bám dính hoàn hảo được thiết lập cho các bề mặt liên kết giữa bê tông - keo epoxy cho mẫu A; giữa bê tông - keo epoxy và giữa bê tông - vật liệu sửa chữa cho mẫu B; giữa bê tông - vật liệu sửa chữa cho mẫu C.

- Mô hình vùng kết dính song tuyến tính CZM, sử dụng phần tử CE (phần tử 3D, 8 nút CONTA174 liên kết giữa mặt – mặt) được thiết lập cho bề mặt liên kết giữa keo epoxy - thanh CFRP cho mẫu A; bề mặt liên kết giữa keo epoxy - thanh CFRP và giữa thanh CFRP - vật liệu sửa chữa cho mẫu B; và bề mặt liên kết giữa thanh CFRP - vật liệu sửa chữa cho mẫu C.

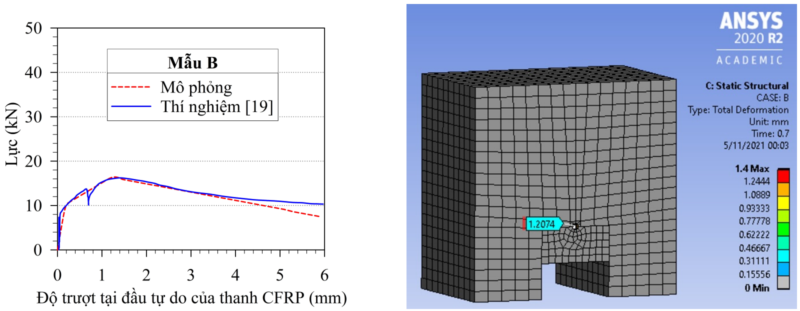
4. Kết quả phân tích từ mô hình phần tử hữu hạn

4.1. Quan hệ lực kéo và chuyển vị tại đầu tự do

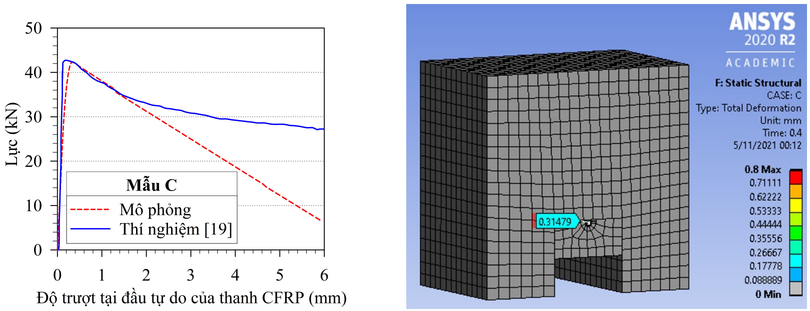
Biểu đồ quan hệ giữa lực kéo và chuyển vị tại đầu tự do của các mẫu A, B và C từ mô phỏng và thí nghiệm được trình bày trong Hình 3. Qua các biểu đồ Hình 3 cho thấy hình dạng kết quả nhận được từ mô hình là phù hợp với kết quả thí nghiệm [19]. Mặc dù kết quả từ mô phỏng chỉ diễn tả được xu hướng tuyến tính của cả hai nhánh tăng và giảm nhưng giá trị nhận được tiệm cận với giá trị từ thí nghiệm. Điều này có thể lý giải là do trong mô phỏng liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông sử dụng mô hình CZM song tuyến tính nên kết quả thu được từ mô phỏng chỉ dừng lại ở quan hệ tuyến tính cho cả nhánh tăng và nhánh giảm (song tuyến tính). Tuy nhiên, kết quả mô phỏng vẫn cho giá trị lực kéo lớn nhất hoàn toàn phù hợp với kết quả thí nghiệm tương ứng. Giá trị lực kéo lớn nhất P_{max} từ mô hình và kết quả thí nghiệm [19] cho các mẫu A, B và C được tóm tắt và trình bày trong Bảng 6.



(a) Mẫu A



(b) Mẫu B



(c) Mẫu C

Hình 3. So sánh quan hệ giữa lực kéo - chuyển vị trong liên kết bám dính giữa mô phỏng và thí nhiệm

Các giá trị lực kéo P_{max} giữa mô phỏng và thí nghiệm hoàn toàn tương đồng với sai số khoảng dưới 2,4% (xảy ra ở mẫu nhóm B).

Bảng 6. So sánh giá trị lực kéo lớn nhất P_{max} giữa mô phỏng và thí nghiệm

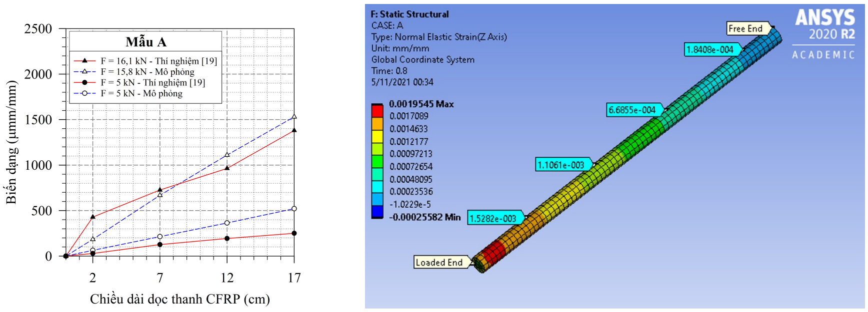
Mẫu	P_{max} (kN) (Thí nghiệm) [19]	P_{max} (kN) (Mô phỏng)	Sai số ΔP_{max} (%)
A	16,1 (mẫu C1)	15,8	1,86%
B	16,7 (mẫu C4)	16,3	2,40%
C	43,4 (mẫu C6)	42,8	1,38%

Sự thay đổi độ dốc xảy ra trên nhánh tăng của mẫu nhóm B có thể được giải thích là do trong mẫu này, thanh CFRP sẽ được đặt giữa 2 lớp vật liệu gồm nửa phần tiếp xúc với lớp keo epoxy, và nửa phần tiếp xúc với lớp vật liệu sửa chữa, liên kết bám dính giữa thanh CFRP – keo epoxy (bê tông) và giữa thanh CFRP – vật liệu sửa chữa là khác nhau. Dưới tác dụng của lực kéo, một trong 2 liên kết bám dính này sẽ bị phá hủy trước do đó tạo nên sự thay đổi độ dốc trong nhánh tăng này. Trái ngược với mẫu nhóm B, thanh CFRP được đặt hoàn toàn trong bê tông (bao quanh bởi keo epoxy) cho mẫu A hoặc thanh CFRP được đặt hoàn toàn trong vật liệu sửa chữa cho mẫu C do đó sẽ không xảy ra hiện tượng thay đổi độ dốc của nhánh tăng trong 2 mẫu này.

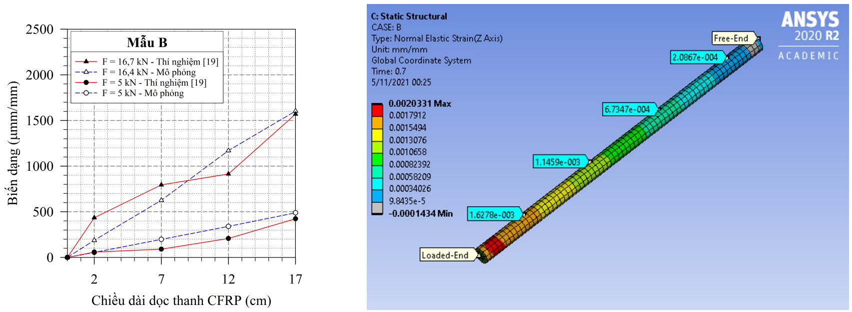
4.2. Biến dạng dọc trục trên thanh CFRP

Biến dạng dọc trục trên thanh CFRP của các mẫu khảo sát được trích xuất từ mô hình và so sánh với kết quả thí nghiệm [19] được trình bày trong Hình 4. Các giá trị biến dạng từ phân tích mô phỏng

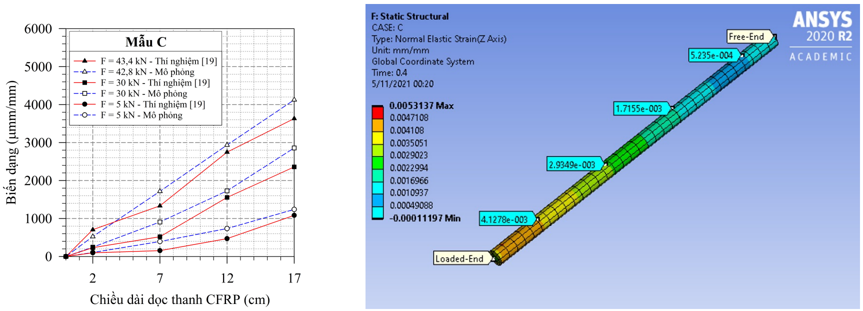
của ba mô hình có khuynh hướng tương đối tương đồng với các giá trị tương ứng từ thí nghiệm đo được bằng các cảm biến. Có thể thấy rằng mô hình vùng kết dính CZM song tuyến tính mô phỏng được liên kết bám dính dọc theo liên kết giữa thanh CFRP và bê tông trong kỹ thuật NSM cho cả ba mẫu khảo sát, mặt dù còn hạn chế do sử dụng mô hình song tuyến tính. Có thể khắc phục nhược điểm này bằng các mô hình vùng kết dính CZM phi tuyến được trang bị trong phần mềm ANSYS nếu có đầy đủ dữ liệu đầu vào từ thí nghiệm phá hủy liên kết.



(a) Mẫu A



(b) Mẫu B

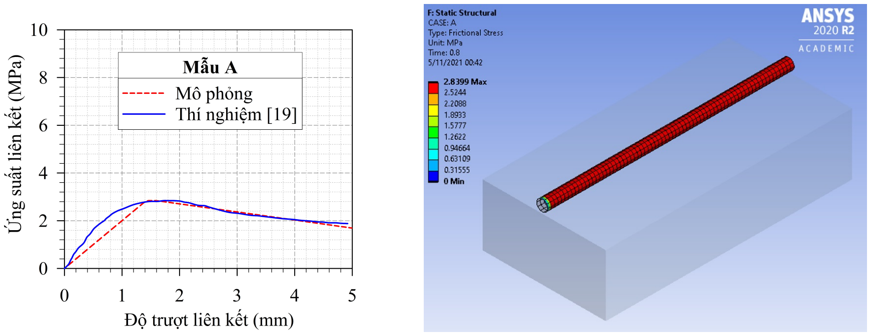


(c) Mẫu C

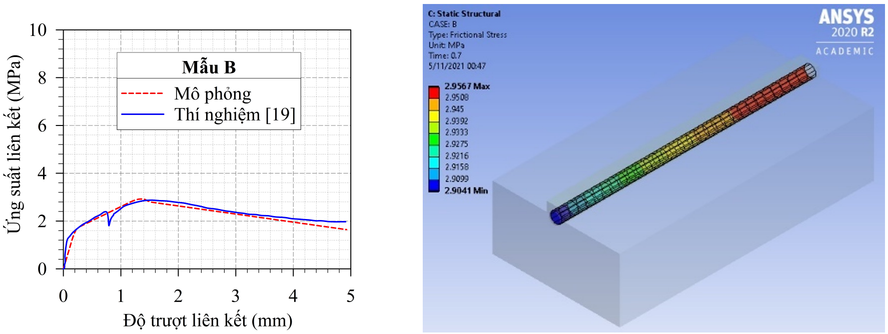
Hình 4. So sánh biến dạng dọc trục trên thanh CFRP giữa mô phỏng và thí nghiệm của các nhóm mẫu khảo sát

4.3. Quan hệ giữa ứng suất liên kết bám dính và độ trượt

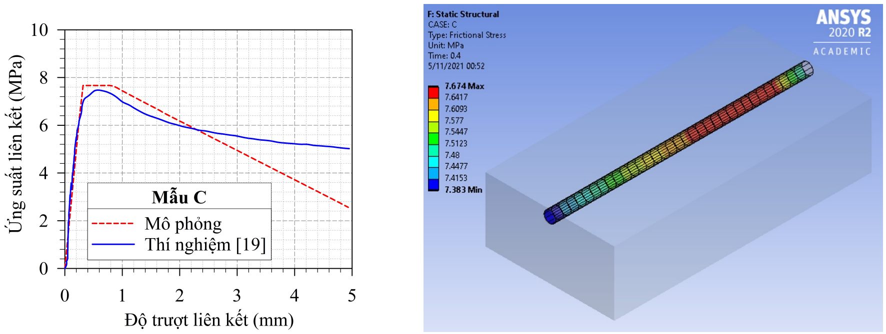
Hình 5 thể hiện sự tương quan giữa kết quả mô phỏng và kết quả thí nghiệm [19] về mối quan hệ giữa ứng suất liên kết bám dính và độ trượt lần lượt cho các mẫu A, B và C. Qua các biểu đồ ta thấy kết quả mô phỏng là tương đồng với kết quả thí nghiệm cho cả ba nhóm mẫu. Bảng 7 trình bày giá trị lớn nhất giữa ứng suất liên kết bám dính và độ trượt của mô phỏng và thí nghiệm cho cả ba mẫu A, B và C. Kết quả mô phỏng tương đối giống với kết quả thí nghiệm, với sai số nhỏ hơn 0,14%.



(a) Mẫu A



(b) Mẫu B



(c) Mẫu C

Hình 5. So sánh quan hệ giữa ứng suất liên kết - độ trượt giữa mô phỏng và thí nghiệm

Bảng 7. So sánh ứng suất trượt lớn nhất giữa mô phỏng và thí nghiệm

Mẫu	τ_{max} (MPa) (Thí nghiệm) [19]	τ_{max} (MPa) (Mô phỏng)	Sai số $\Delta\tau_{max}$ (%)
A	2,843 (mẫu C1)	2,839	−0,14%
B	2,955 (mẫu C4)	2,957	0,07%
C	7,669 (mẫu C6)	7,674	0,07%

5. Kết luận

Mô hình phần tử hữu hạn có khả năng mô phỏng ứng xử của liên kết bám dính giữa thanh CFRP gia cường và bê tông trong kỹ thuật sửa chữa/gia cường NSM đã được xây dựng thành công bằng phần mềm ANSYS/Workbench. Phần tử CE sử dụng mô hình vùng kết dính CZM song tuyến tính mô phỏng khá chính xác ứng xử liên kết bám dính giữa thanh CFRP gia cường và bê tông trong cả ba trường hợp đặt thanh CFRP trong bê tông khảo sát bao gồm: thanh CFRP đặt hoàn toàn bên trong lớp bê tông; thanh CFRP đặt một phần trong lớp bê tông và lớp vật liệu sửa chữa; thanh CFRP đặt hoàn toàn trong lớp vật liệu sửa chữa. Mô hình vùng kết dính CZM song tuyến tính vẫn còn hạn chế trong mô phỏng ứng xử liên kết bám dính dọc theo liên kết giữa thanh CFRP và bê tông, tuy nhiên mô hình này vẫn dự đoán khá chính xác giá trị lực kéo tối đa mà liên kết bám dính chịu được với sai số khoảng 2,4% (nhận được ở mẫu nhóm B), cũng như dự đoán chính xác ứng suất lớn nhất phát sinh trong liên kết bám dính này (sai số so với thí nghiệm khoảng 0,14%) là những giá trị khá quan trọng khi xem xét liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông trong kỹ thuật NSM. Với kết quả tích cực thu được từ mô phỏng trong nghiên cứu này, mô hình CZM song tuyến tính sử dụng phần tử CE mô phỏng liên kết bám dính giữa thanh CFRP và bê tông đề xuất hứa hẹn sẽ hiệu quả trong việc mô phỏng/phân tích ứng xử của các kết cấu bê tông cốt thép được sửa chữa/gia cường sử dụng kỹ thuật NSM.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

[1] Sangluaia, C., Haridharan, M. K., Natarajan, C., Rajaraman, A. (2013). Behaviour of reinforced concrete slab subjected to fire. *International Journal of Computational Engineering Research*, 3(1):195–206.

[2] Haddad, R., AL-Mekhlafy, N., Ashteyat, A. (2011). Repair of heat-damaged reinforced concrete slabs using fibrous composite materials. *Construction and Building Materials*, 25(3):1213–1221.

[3] Quỳnh, D. Đ., Hiếu, N. T., Đạt, P. X., Hùng, N. M. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng tấm composite CFRP ở trạng thái đang chịu tải. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(2V):1–11.

[4] Hùng, N. M., Lành, L. P., Hiếu, N. T. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường vai cột bằng tấm sợi composite gốc các bon CFRP. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(5V):146–156.

[5] Parretti, R., Nanni, A. (2004). Strengthening of RC Members Using Near-Surface Mounted FRP Composites: Design Overview. *Advances in Structural Engineering*, 7(6):469–483.

[6] Kotynia, R. (2012). Bond between FRP and concrete in reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted and externally bonded reinforcement. *Construction and Building Materials*, 32:41–54.

[7] De Lorenzis, L., Nanni, A. (2002). Bond between Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods and Concrete in Structural Strengthening. *ACI Structural Journal*, 99(2):123–132.

[8] Sharaky, I. A., Torres, L., Baena, M., Miàs, C. (2013). An experimental study of different factors affecting the bond of NSM FRP bars in concrete. *Composite Structures*, 99:350–365.

[9] Lorenzis, L. D., Teng, J. (2007). Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering*, 38(2):119–143.

[10] El-Hacha, R., Rizkalla, S. H. (2004). Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, 101(5):717–726.

[11] Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R., Tourneur, C. (2010). RC beams strengthened with NSM CFRP rods and modeling of peeling-off failure. *Composite Structures*, 92(8):1920–1930.

[12] Szabó, Z. K., Balázs, G. L. (2007). Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 51(1):33.
[13] Coelho, M. R., Sena-Cruz, J. M., Neves, L. A. (2015). A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials*, 93:1157–1169.
[14] Hassan, T., Rizkalla, S. (2003). Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips. *Journal of Composites for Construction*, 7(3): 248–257.
[15] Galati, D., Lorenzis, L. D. (2009). Effect of Construction Details on the Bond Performance of NSM FRP Bars in Concrete. *Advances in Structural Engineering*, 12(5):683–700.
[16] Teng, J. G., Lorenzis, L. D., Wang, B., Li, R., Wong, T. N., Lam, L. (2006). Debonding Failures of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips. *Journal of Composites for Construction*, 10(2):92–105.
[17] De Lorenzis, L., Ludgren, K., Rizzo, A. (2004). Anchorage Length of Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars for Concrete Strengthening—Experimental Investigation and Numerical Modeling. *ACI Structural Journal*, 101(2):269–278.
[18] Lorenzis, L. D., Rizzo, A., Tegola, A. L. (2002). A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering*, 33(8):589–603.
[19] Thi, C. N., Pansuk, W., Torres, L. (2015). Flexural Behavior of Fire-Damaged Reinforced Concrete Slabs Repaired with Near-Surface Mounted (NSM) Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Rods. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13(1):15–29.
[20] Emara, M., Barris, C., Baena, M., Torres, L., Barros, J. (2018). Bond behavior of NSM CFRP laminates in concrete under sustained loading. *Construction and Building Materials*, 177:237–246.
[21] Release 2020R1 (2020). *ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide*. ANSYS Inc.
[22] Release 2020R1 (2020). *ANSYS Mechanical APDL Material Reference*. ANSYS Inc.