



THE EFFECT OF KEY DEPTH ON SHEAR RESISTANCE OF SINGLE KEY IN SEGMENTAL ASSEMBLY OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE

Nguyen Duc Duc¹, Nguyen Ngọc Long¹, Tran Duc Nhiem¹, Hoang Nhat Minh^{2,*}

¹University of Transport and Communications, No3 Cau Giay Street, Lang Thuong Ward, Dong Da District, Hanoi, Vietnam

²Viettel Aerospace Institute, Viettel Building, Hoa Lac Hi-Tech Park, Commune Tan Xa, Thach That District, Hanoi, Vietnam.

ARTICLE INFO

Received: 30/09/2022

Revised: 10/11/2022

Accepted: 28/12/2022

Published online: 15/12/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.9.1>

* *Corresponding author*

Email: minhhn5@viettel.com.vn; Tel: +84 0976840260

Abstract. The segmental girder bridge is assembled by segments. These segments are connected at joints by prestressed cables, shear key and epoxy glue. The moment resistance of the section at the joint thanks to the prestressed cables and the compressive strength of the concrete is calculated as a conventional flexural prestressed reinforced concrete structure. However, the joints have not reinforcement and stirrups, so the shear resistance of the joint depends on the shear resistance of the shear key itself, the friction of the smooth surfaces and component of prestressed reinforcement if any. This has been shown by many experimental studies, simulations and in many standards of AASHTO, DIN, EURO CODE, BS...in which the shear resistance of the shear key itself has a significant proportion. The shear resistance of key depends not only on compressive strength of concrete, height key but also the key depth significantly. Many studies have been done to give the formula for calculating the shear resistance of the key itself as well as the joint, but only performed on one or some specific key sizes, so that they do not reflect the effect of key depth on shear resistance. This paper focuses on investigating the shear resistance of a single key without reinforcement and reinforcement arrangement when changing the key depth while the height is constant to determine the effect of key depth on shear resistance. The research results may contribute in the completion of the design as well as maintenance of the segmental bridge.

Keywords: Shear key, joint, shear resistance, segmental bridge, precast concrete

© 2022 University of Transport and Communications



ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU SÂU KHÓA ĐẾN KHẢ NĂNG CHỊU CẮT CỦA KHÓA CHỐNG CẮT ĐƠN TRONG CẤU KIỆN LẮP GHEP PHÂN ĐOẠN BÊ TÔNG CỐT THÉP DỰ ỨNG LỰC

Nguyễn Đắc Đức¹, Nguyễn Ngọc Long¹, Trần Đức Nhiệm¹, Hoàng Nhật Minh^{2,*}

¹Trường Đại học Giao thông vận tải, số 3 phố Cầu Giấy, P.Láng Thượng, Q.Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

²Viện hàng không vũ trụ Viettel, tòa nhà Viettel, khu công nghệ cao Hòa Lạc, xã Tân Xá, H.Thạch Thất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 30/09/2022

Ngày nhận bài sửa: 10/11/2022

Ngày chấp nhận đăng: 28/12/2022

Ngày xuất bản Online: 15/12/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.9.1>

* Tác giả liên hệ

Email: minhnh5@viettel.com.vn; Tel: +84 0976840260

Tóm tắt. Kết cấu nhịp cầu dầm lắp ghép phân đoạn được hình thành từ các khối đúc sẵn. Các khối này liên kết với nhau tại vị trí mối nối nhờ cáp dự ứng lực, khóa chống cắt và keo liên kết. Khả năng chịu mô men của mặt cắt tại vị trí mối nối nhờ vào cáp dự ứng lực và khả năng chịu nén của bê tông được tính toán như kết cấu bê tông cốt thép dự ứng lực chịu uốn thông thường. Tuy nhiên, vị trí mối nối không bố trí cốt thép thường và cốt thép đai do đó khả năng chịu cắt của mối nối phụ thuộc vào khả năng chịu cắt của bản thân khóa chống cắt, ma sát phần tiếp xúc phẳng và thành phần tham gia của cốt thép dự ứng lực nếu có. Điều này đã được chỉ ra bởi rất nhiều nghiên cứu thực nghiệm, mô phỏng và thể hiện trong các Tiêu chuẩn tính toán thiết kế như AASHTO, DIN, EURO CODE, BS...trong đó khả năng chịu cắt của bản thân khóa chống cắt chiếm tỷ trọng đáng kể. Khả năng chịu cắt của khóa không chỉ phụ thuộc vào cường độ bê tông, chiều cao khóa mà còn phụ thuộc rất lớn vào chiều sâu khóa. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm đưa ra công thức tính khả năng chịu cắt của bản thân khóa cũng như mối nối tuy nhiên mới thực hiện trên một hoặc một số kích thước khóa cụ thể do đó không phản được ảnh hưởng của chiều sâu khóa đến ứng xử chịu cắt của bản thân khóa. Bài báo tập trung khảo sát khả năng chịu cắt của một khóa chống cắt đơn không bố trí cốt thép và có bố trí cốt thép khi thay đổi chiều sâu khóa trong khi chiều cao khóa không đổi để xác định chiều sâu khóa hợp lý nhằm góp phần hoàn thiện công tác thiết kế cũng như khai thác bảo dưỡng kết cấu cầu dầm bê tông cốt thép lắp ghép phân đoạn.

Từ khóa: Khóa chống cắt, mối nối, khả năng chịu cắt, cầu lắp ghép, bê tông lắp ghép

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, ngành kỹ thuật xây dựng công trình giao thông không ngừng lớn mạnh cả về quy mô, kỹ thuật thiết kế và công nghệ xây dựng. Các nghiên cứu không chỉ đưa ra những giải pháp kết cấu vượt được nhịp lớn hơn nhằm đáp ứng yêu cầu ngày càng cao của tỉnh không thông thuyền cũng như vượt những chướng ngại vật có khẩu độ lớn như các eo biển, thung lũng... các công nghệ thi công hiện đại cũng luôn được chú trọng nghiên cứu nhằm cải thiện điều kiện thi công, đẩy nhanh tiến độ phát huy hiệu quả vốn đầu tư. Việc áp dụng công nghệ lắp ghép và lắp ghép phân đoạn cho phép đẩy nhanh được tiến độ thi công vì công tác đúc các đốt dầm được tiến hành song song cùng công tác thi công móng, trụ và các hạng mục khác do đó rút ngắn được tiến độ thi công công trình. Công nghệ lắp ghép phân đoạn đặt biệt phát huy ưu thế khi thi công công trình cầu khu vực đô thị, mặt bằng thi công chật hẹp, khi đó các đốt dầm được đúc ở khu vực xa đô thị sau đó vận chuyển vào lắp ghép hoàn thiện.

Những khái niệm đầu tiên về cấu kiện phân đốt bê tông đúc sẵn lắp ghép đã bắt đầu hình thành trong những năm đầu của thập niên 30 của thế kỷ trước. Người đặt nền móng là Eugene Freyssinet, cho đến năm 1946 mới có thiết kế và thi công công trình cầu lắp ghép đầu tiên trên thế giới - cầu Luzancy bắc qua sông Marne. Từ biện pháp thi công ban đầu là lắp ghép trên đà giáo cố định đến nay đã phát triển các biện pháp thi công như: Công nghệ lắp hẫng tĩnh tiến, công nghệ lắp ghép cân bằng đối xứng bằng giàn treo di động, công nghệ lắp hẫng cân bằng, công nghệ lắp ghép tuần tự hoàn chỉnh cho từng nhịp trên đà giáo (Span By Span - SBS). Các công nghệ thi công này đã đáp ứng nhu cầu thi công kết cấu nhịp vượt điều kiện tự nhiên khó khăn, phức tạp.

Với dạng kết cấu nhịp cầu lắp ghép phân đoạn việc tồn tại các mối nối sẽ làm cho cơ chế chịu lực nói chung và cơ chế chịu cắt, xoắn nói riêng có sự khác biệt. Cùng với sự phát triển của công nghệ thi công thì các loại mối nối được sử dụng cũng được nghiên cứu, cải tiến bắt đầu từ mối nối vữa xi măng phẳng nghiên cứu năm 1959 bởi Franz, mối nối răng cưa không có cốt thép...tiếp đến là các nghiên cứu của Jones năm 1959, Buyukozturk, Bakhoun, Beattie năm 1990 với mối nối khô và keo epoxy có một khóa chống cắt không có cốt thép, nghiên cứu mối nối có khóa chống cắt và keo epoxy...Kết quả các nghiên cứu lý thuyết, thực nghiệm và tổng kết khai thác cho thấy mối nối sử dụng khóa chống cắt kết hợp với keo epoxy dễ chế tạo cũng như có độ tin cậy trong chịu lực. Khả năng chịu cắt của mối nối được hình thành nhờ ma sát phần tiếp xúc phẳng, khả năng chịu cắt của khóa và lực dục ứng lực.

Trong các phiên bản Tiêu chuẩn AASHTO [1] cũng đưa ra công thức tính toán khả năng chịu cắt của khóa chống cắt khô có xét đến lực nén dự ứng lực.

$$V_{Nj} = A_k \sqrt{f'_c} (1 + 0,205 f_{pc}) + 0,6 A_{sm} f_{pc} \quad (1)$$

Trong đó:

A_k - diện tích ở chân của tất cả các khóa trong mặt phẳng phá hoại, mm²

f'_c - sức kháng nén của bê tông, MPa

f_{pc} - ứng suất nén của bê tông sau khi đã trừ đi các mất mát ứng suất và tính ở trọng tâm mặt cắt ngang, MPa

A_{sm} - diện tích tiếp xúc giữa các bề mặt nhẵn trên mặt phẳng phá hoại, mm²

Từ công thức (1) cho thấy khả năng chịu cắt của bản thân khóa góp phần quan trọng hình thành sức kháng cắt của mối nối tuy, nhiên công thức tính chỉ xét đến chiều cao khóa (A_k diện tích chân khóa) mà không xét đến chiều sâu khóa.

Các nghiên cứu nhằm xác định khả năng chịu cắt của bản thân khóa chống cắt cũng được thực hiện như: nghiên cứu của In Hwan Yang và cộng sự năm 2013 [2] đã tiến hành thí nghiệm với khóa chống cắt có chiều dày 100 mm, chiều cao khóa 70 mm, chiều sâu khóa thay đổi 10, 20 mm. Với áp lực ngang ban đầu 2 MPa, kết quả thí nghiệm cho thấy với chiều cao khóa 10 mm, 20 mm khả năng chịu cắt của khóa tăng và đạt giá trị lần lượt là 83,50 kN và 101,10 kN trong khi đó kết quả tính toán theo AASHTO có giá trị không đổi và đạt 87,70 kN. Nghiên cứu của Haibo Jiang và cộng sự năm 2014 [3] đã thí nghiệm và mô phỏng số xác định khả năng chịu cắt của khóa chống cắt khô với mẫu có chiều cao không đổi 100 mm, chiều dày 100 mm và chiều sâu lần lượt là 25,35,50mm. Kết quả cho thấy khả năng chịu cắt của các khóa tăng khi chiều sâu khóa tăng từ 25-35 mm và đạt giá trị lần lượt là 80,79 kN, 113,87 kN. Tuy nhiên, khi chiều sâu khóa 50 mm thì khả năng chịu cắt của khóa giảm chỉ còn 94,47 kN.

Ở Việt Nam, một số dự án lớn, đòi hỏi tiến độ thi công nhanh như dự án tuyến Metro Bến Thành – Suối Tiên, thành phố Hồ Chí Minh; dự án Tân Vũ – Lạch Huyện, thành phố Hải Phòng áp dụng công nghệ thi công lắp ghép phân đoạn kết cấu nhịp sử dụng mối nối khóa chống cắt cùng keo epoxy và cáp dự ứng lực [4], [5]. Khóa chống cắt sử dụng có chiều sâu 32 và 40 mm mà không có thực nghiệm đánh giá khả năng chịu cắt của khóa trong điều kiện chế tạo tại Việt Nam. Bên cạnh đó một số nghiên cứu trong nước cũng được thực hiện như nghiên cứu của nhóm tác giả Nguyễn Đức Đức, Nguyễn Ngọc Long, Trần Đức Nhiệm [6], [7], [10] đã chỉ ra ảnh hưởng của tải trọng đặt lệch tâm đối với mối nối là rất lớn, giảm khả năng chịu tải đến 30,38% đối với mẫu thử nghiệm và giảm từ 3,05HL93 xuống 1,92HL93 khi mô phỏng cầu dầm hộp lắp ghép phân đoạn. Nghiên cứu của Nguyễn Thái Khanh và các cộng sự thực hiện tại Viện KHCN GTVT, năm 2019 [8] đã đưa ra khả năng chịu cắt của bản thân khóa với các kích thước cụ thể cũng như xét đến ảnh hưởng của xoắn khi tải trọng khai thác lệch tâm. Qua đó cho thấy việc xác định chính xác khả năng chịu cắt của khóa chống cắt đóng vai trò quan trọng trong việc tính toán thiết kế mối nối kết trong kết cấu lắp ghép phân đoạn.

Các nghiên cứu đã đề cập cho thấy khả năng chịu cắt của khóa ảnh hưởng rõ rệt bởi chiều sâu khóa, để làm rõ hơn ảnh hưởng của chiều sâu khóa đến khả năng chịu cắt tác giả tiến hành thực nghiệm và mô phỏng số với các khóa có chiều sâu lần lượt 30,40,55 và 60 mm khi giữ nguyên chiều cao 140 mm từ đó đưa ra kiến nghị chiều sâu khóa phù hợp góp phần kiểm soát và hoàn thiện hơn về thiết kế, thi công và dự báo khả năng phá hoại tại vị trí mối nối trong kết cấu lắp ghép phân đoạn nói chung và cầu dầm lắp ghép phân đoạn nói riêng.

2. THỰC NGHIỆM

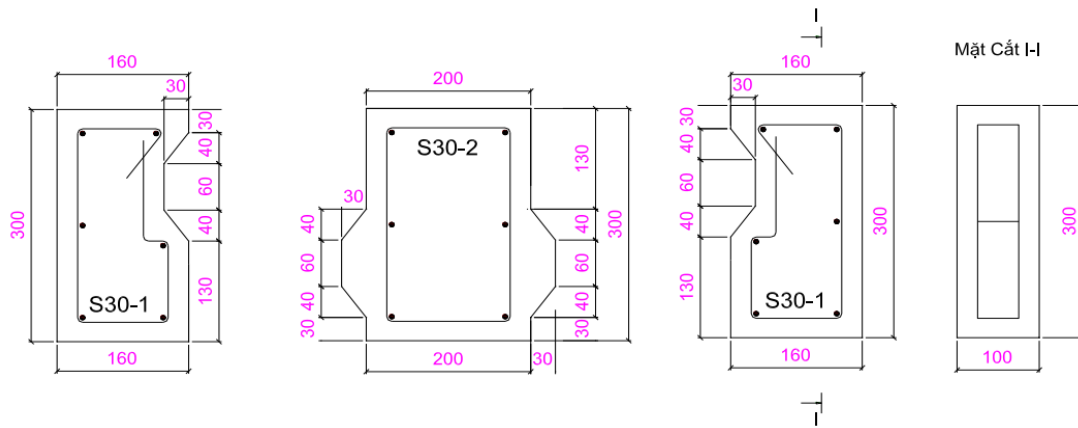
2.1 Cấu tạo mẫu thí nghiệm

Tiến hành làm thực nghiệm xác định khả năng chịu cắt của khóa chống cắt với chiều cao khóa không thay đổi là 120 mm, chiều sâu khóa “n” lần lượt là 30, 40, 55 và 60 mm, thân khóa không bố trí cốt thép. Cấu tạo một tổ mẫu dùng thí nghiệm bao gồm 2 mẫu loại 1 (Sn-1) và 1 mẫu loại 2 (Sn-2), bê tông dùng đúc mẫu ở tuổi 28 ngày đạt cường độ nén mẫu hình trụ 53,19 MPa. Công tác đúc mẫu thí nghiệm được thực hiện theo nguyên lý in oản nhằm đảm bảo độ kín khít của bề mặt tiếp xúc mẫu Sn-1 và Sn-2 thể hiện trong Hình 1. Bê tông được thiết kế thành phần, cấp phối, thí nghiệm xác định cường độ trung bình đạt 53,19 MPa.

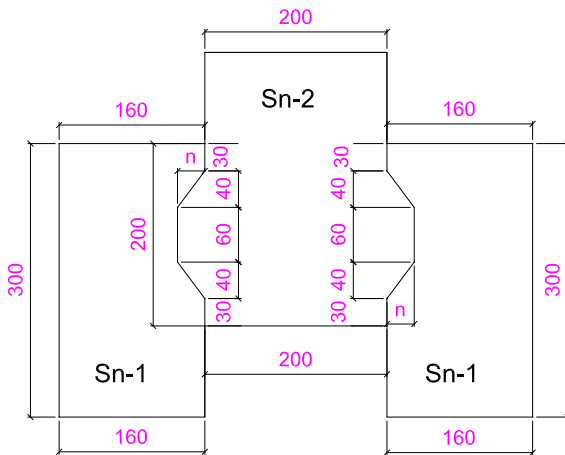
2.2 Bố trí thí nghiệm

Giá thí nghiệm được thiết kế đảm bảo cứng tuyệt đối khi tiến hành thí nghiệm. Cấu tạo bộ giá gồm phần đế chi tiết CT4 bằng thép dày 20 mm, các chi tiết CT2 bằng thép dày 40 mm và

bu lông được thiết kế đảm bảo toàn bộ lực ngang được ép chặt mẫu thí nghiệm Sn-1 vào mẫu Sn-2. Thiết bị thí nghiệm bao gồm kích tạo lực ngang ban đầu và Loadcell đo lực ngang khi gia tải theo phương thẳng đứng, máy gia tải theo phương thẳng đứng và Loadcell ghi nhận tốc độ tăng tải cũng như lực thẳng đứng V khi thí nghiệm, LVDT đo chuyển vị của mẫu Sn-2 trong quá trình thí nghiệm thể hiện Hình 2.



Cấu tạo các mẫu trong tổ mẫu có chiều sâu khóa 30 mm



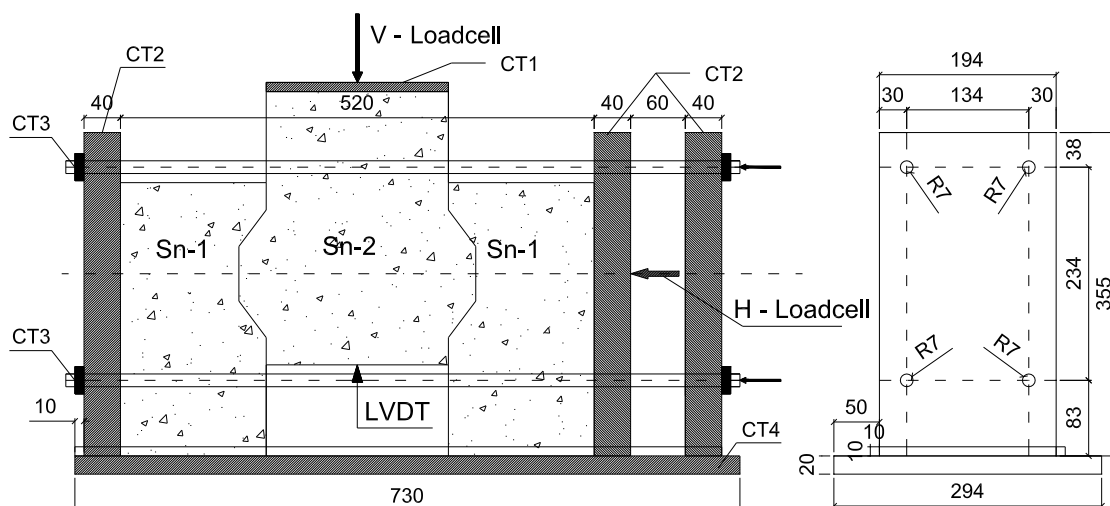
Cấu tạo tổ mẫu



Đúc tổ mẫu thí nghiệm

Hình 1. Cấu tạo mẫu và đúc mẫu thí nghiệm theo nguyên lý in oản.

Công tác thí nghiệm được thực hiện với trình tự lắp mẫu thí nghiệm vào giá, lắp kích dẹt thủy lực 200 kN tạo lực nén ngang ban đầu, lực nén ngang được thay đổi khi gia tải lực thẳng đứng (V) và được ghi nhận bằng loadcell 500 kN. Máy nén 5000 kN tạo lực nén theo phương thẳng đứng, sử dụng Loadcell 1000 kN đo lực thẳng đứng, tiến hành gia tải cho đến khi mẫu phá hoại. Bố trí LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) đo chuyển vị của mẫu Hình 3.



Hình 2. Sơ đồ bố trí mẫu và thiết bị thí nghiệm.



Hình 3. Hình ảnh bố trí thiết bị thí nghiệm và thí nghiệm phá hoại mẫu.

2.3 Kết quả thí nghiệm

Với mỗi loại chiều sâu khóa tiến hành thí nghiệm với 5 tổ mẫu, kết quả thí nghiệm được xử lý theo cách tính trị số trung bình sau khi đã loại bỏ số liệu không đạt yêu cầu (có sai số vượt quá 15% hoặc bị hư hại trong quá trình thí nghiệm). Kết quả thí nghiệm các tổ mẫu được thể hiện trong các bảng từ Bảng 1 đến Bảng 4.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm phá hoại tổ mẫu S30.

TT	Lần thí nghiệm	Lực ngang H (kN)	Ứng suất nén ngang (MPa)	Lực thẳng đứng Vmax (kN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Chuyển vị (mm)	Ghi chú
1	S30-Lần 1						Failure
2	S30-Lần 2	82,650	5,904	259,107	18,508	3,900	
3	S30-Lần 3	81,720	5,837	257,361	18,383	3,150	
4	S30-Lần 4	81,370	5,812	267,907	19,136	3,800	
5	S30-Lần 5	80,880	5,777	249,564	17,826	3,990	
	Trung bình	81,655	5,833	258,485	18,463	3,710	

Từ bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm các tổ mẫu S30 ta thấy khả năng chịu cắt trung bình của một khóa đạt 258,485 kN (tương đương ứng suất cắt trong khóa khi phá hoại 18,463 MPa) với lực nén ngang 81,655 kN (tương đương áp lực nén ngang 5,833 MPa).

Bảng 2. Tổng hợp lực V – H và chuyển vị khi phá hoại tổ mẫu S40.

TT	Lần thí nghiệm	Lực ngang H (KN)	Ứng suất nén ngang (MPa)	Lực thẳng đứng Vmax (KN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Chuyển vị (mm)	Ghi chú
1	S40-Lần 1						Failure
2	S40-Lần 2	82,163	5,869	252,744	18,053	3,210	
3	S40-Lần 3	83,500	5,964	269,608	19,258	3,250	
4	S40-Lần 4	82,244	5,875	259,284	18,520	3,940	
5	S40-Lần 5	88,252	6,304	279,508	19,965	3,980	
Giá trị trung bình		84,040	6,003	265,286	18,949	3,595	

Từ bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm các tổ mẫu S40 ta thấy khả năng chịu cắt trung bình của một khóa đạt 265,286 kN (tương đương ứng suất cắt trong khóa khi phá hoại 18,949 N/ mm²) với lực nén ngang 84,040 kN (tương đương áp lực nén ngang 6,003 MPa).

Bảng 3. Tổng hợp lực V – H và chuyển vị khi phá hoại tổ mẫu S55.

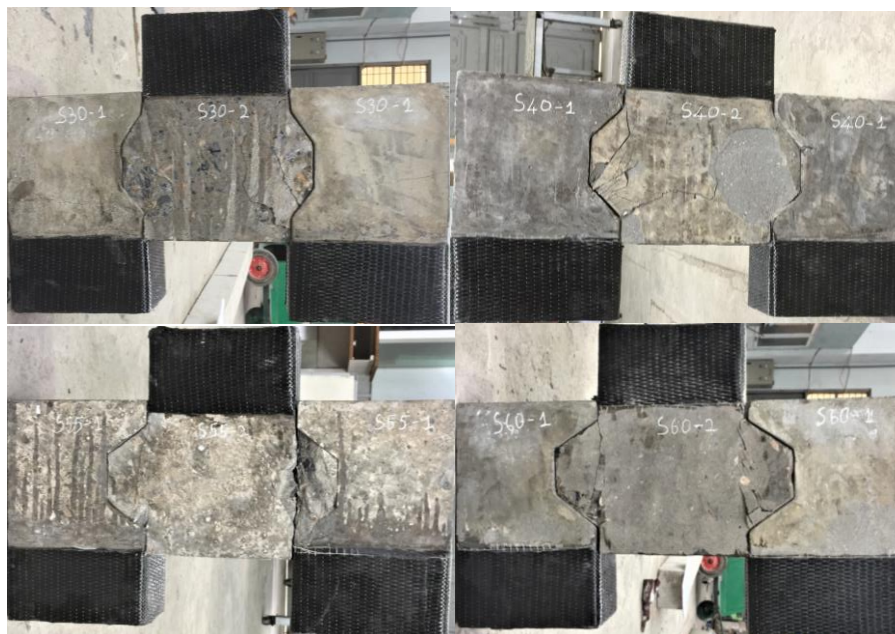
TT	Lần thí nghiệm	Lực ngang H (kN)	Ứng suất nén ngang (MPa)	Lực thẳng đứng Vmax (kN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Chuyển vị (mm)	Ghi chú
1	S55-Lần 1						Failure
2	S55-Lần 2	54,260	3,876	191,053	13,647	3,300	
3	S55-Lần 3	53,540	3,824	182,284	13,020	3,100	
4	S55-Lần 4	50,135	3,581	167,176	11,941	3,020	
5	S55-Lần 5	50,352	3,597	172,065	12,290	3,520	
Giá trị trung bình		52,072	3,719	178,144	12,725	3,235	

Từ bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm các tổ mẫu S55 ta thấy khả năng chịu cắt trung bình của một khóa đạt 178,144 kN (tương đương ứng suất cắt trong khóa khi phá hoại 12,725 N/ mm²) với lực nén ngang 52,072 kN (tương đương áp lực nén ngang 3,719 MPa).

Bảng 4. Tổng hợp lực V – H và chuyển vị khi phá hoại tổ mẫu S60.

TT	Lần thí nghiệm	Lực ngang H (kN)	Ứng suất nén ngang (MPa)	Lực thẳng đứng Vmax (kN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Chuyển vị (mm)	Ghi chú
1	S60-Lần 1	40,190	2,871	167,164	11,940	2,515	Failure
2	S60-Lần 2	40,850	2,918	178,300	12,736	3,251	
3	S60-Lần 3						
4	S60-Lần 4	40,892	2,921	184,969	13,212	2,418	
5	S60-Lần 5	41,038	2,931	188,965	13,498	2,928	
Giá trị trung bình		40,743	2,910	179,850	12,846	2,778	

Từ bảng tổng hợp kết quả thí nghiệm các tổ mẫu S60 ta thấy khả năng chịu cắt trung bình của một khóa đạt 179,850 kN (tương đương ứng suất cắt trong khóa khi phá hoại 12,846N/ mm²) với lực nén ngang 40,743 kN (tương đương áp lực nén ngang 2,910 MPa).



Hình 4. Hình ảnh đại diện thí nghiệm các tổ mẫu.

Tổng hợp kết quả thí nghiệm khả năng chịu cắt các tổ mẫu khi chiều sâu khóa thay đổi được thể hiện trong Bảng 5.

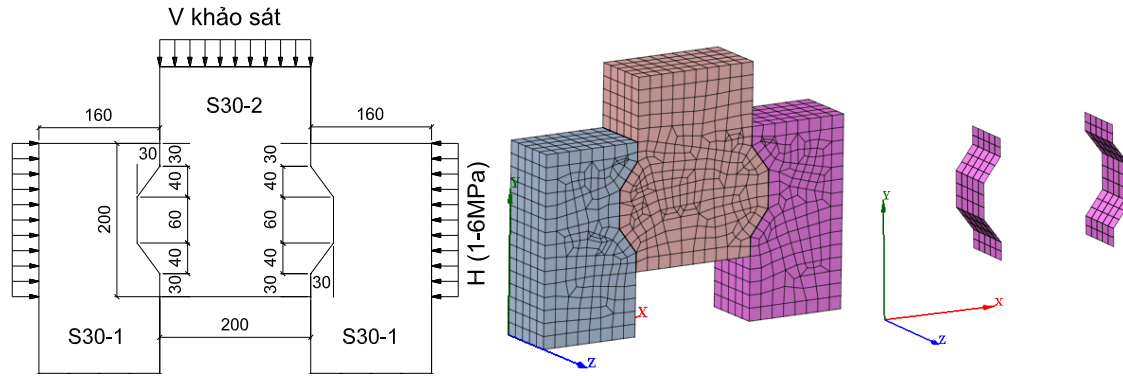
Bảng 5. Tổng hợp khả năng chịu cắt các tổ mẫu.

TT	Chiều sâu khóa (mm)	Ký hiệu mẫu	Lực thẳng đứng Vmax (kN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Chuyển vị (mm)	Ghi chú
1	30	S30	258,485	18,463	3,710	
2	40	S40	265,286	18,949	3,595	
3	55	S55	178,144	12,725	3,235	
4	60	S60	179,850	12,846	2,778	

3. PHÂN TÍCH MÔ PHỎNG

3.1 Mô hình kết cấu

Kết cấu được mô hình và phân tích trên phần mềm ANSYS 2019 R2, bao gồm 3 khối lắp ghép, giữa các khối được mô hình phần tử tiếp xúc, thể hiện Hình 5. Với kết cấu lắp ghép phân đoạn khi chịu uốn mỗi nối có xu hướng mở ra ở khu vực chịu kéo, khi này lực ép mặt trên khóa chống cắt có xu hướng tăng dần khi mỗi nối mở rộng. Do đó, mô hình mô phỏng được tạo áp lực nén ngang 2 MPa [4] ban đầu, tiến hành khảo sát giá trị lực thẳng đứng (V) và lực ngang (H).



Hình 5. Mô hình khóa chống cắt chiều sâu 30 mm và mô hình mặt trượt tiếp xúc.

3.2 Mô hình vật liệu

Vật liệu bê tông sử dụng trong mô hình phân tích trong các giai đoạn gia tải được lấy theo mô hình vật liệu tuyến tính. Các thông số đầu vào đặc trưng cơ lý của vật liệu thể hiện trong Bảng 6.

Bảng 6. Bảng thông số vật liệu bê tông.

Đặc trưng vật liệu	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Cường độ bê tông ở tuổi 28 ngày	f'_c	53,19	MPa	Thí nghiệm
Mô đun đàn hồi	$E_c = 0,0017K_1 W_c^2 f'_c{}^{0,33}$	31938	MPa	
Trọng lượng riêng của bê tông	$W_c = 2240 + 2,29f'_c$	2362	kg/m ³	
Hệ số nở ngang Poisson	μ	0,2		
Mô đun phá hoại	$f_t = 0,63\sqrt{f'_c}$	4,595	MPa	

Mô hình ứng xử của vật liệu: Thông số đầu vào ảnh hưởng co ngót từ biến và sự phụ thuộc của việc hình thành cường độ trong bê tông vào thời gian được xét đến trong mô hình vật liệu lấy theo tiêu chuẩn CEB-FIP (1990) [9].

Thông số mặt tiếp xúc giữa khóa chống cắt được sử dụng là tiếp xúc phi tuyến dưới dạng ma sát với hệ số ma sát giữa hai bề mặt bê tông thường từ 0,6 đến 0,85. Trong nghiên cứu này hệ số ma sát giữa phần tiếp xúc phẳng được lấy 0,6 phù hợp theo công thức (1) của AASHTO.

3.3 Kết quả phân tích mô phỏng

3.3.1 Kết quả phân tích mô phỏng với khóa không cốt thép

Kết quả phân tích mô phỏng khóa chiều sâu 30 mm không cốt thép

Bảng 7. Tổng hợp kết quả mô phỏng tổ mẫu S30.

TT	Áp lực ngang (MPa)	Lực thẳng đứng Vmax (kN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Độ mở rộng vết nứt (mm)	Chuyển vị (mm)
1	2,00	1,00	0,25	0,00	0,05
2	2,24	17,10	1,01	0,00	0,27
3	2,45	31,47	1,81	0,00	0,46
4	2,68	46,89	2,65	0,00	0,67
5	3,02	70,01	3,85	0,00	0,99
6	3,25	96,98	5,26	0,00	1,35

7	3,41	139,10	9,09	0,00	1,93
8	4,38	162,14	11,67	0,00	2,24
9	4,88	196,32	14,26	0,20	2,70
10	5,39	230,87	17,44	0,80	3,18
11	5,70	252,16	19,35	1,61	3,66

Kết quả phân tích cho thấy khóa chống cắt xuất hiện vết nứt tại giá trị lực thẳng đứng 162 kN, áp lực ngang 4,37 MPa và ứng suất cắt tại khóa 11,57 MPa. Vết nứt hình thành và phát triển theo đường chéo có xu hướng ăn sâu vào tiết diện cấu kiện do đó mô hình phá hoại không hoàn toàn bị cắt chân khóa mà gây phá hoại ở bản thân khóa.

Kết quả phân tích khóa chiều sâu 40 mm không cốt thép

Bảng 8. Tổng hợp kết quả mô phỏng tổ mẫu S40.

TT	Áp lực ngang (MPa)	Lực thẳng đứng Vmax (kN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Độ mở rộng vết nứt (mm)	Chuyển vị (mm)
1	2,00	1,00	0,07	0,00	0,03
2	2,22	17,87	0,98	0,00	0,23
3	2,46	37,14	1,99	0,00	0,46
4	2,61	48,79	2,63	0,00	0,61
5	2,85	68,51	3,65	0,00	0,84
6	3,17	92,54	4,98	0,00	1,14
7	3,53	120,14	7,19	0,00	1,47
8	3,89	148,77	9,27	0,00	1,81
9	4,20	173,69	12,41	0,00	2,10
10	4,56	202,47	13,34	0,18	2,45
11	5,14	246,89	16,79	0,84	2,99
12	5,47	273,66	18,78	2,20	3,52

Kết quả phân tích cho thấy khóa chống cắt xuất hiện vết nứt tại giá trị lực thẳng đứng 173 kN, áp lực ngang đạt 4,19 MPa và ứng suất cắt tại khóa 12,34 MPa. Vết nứt cũng được hình thành từ chân khóa và phát triển theo hướng cắt đứt chân khóa do đó mặc dù áp lực ngang trong trường hợp này thấp hơn mẫu có chiều sâu 30 mm nhưng khả năng chịu cắt lớn hơn.

Kết quả phân tích khóa chiều sâu 55 mm không cốt thép

Bảng 9. Tổng hợp kết quả mô phỏng tổ mẫu S55.

TT	Áp lực ngang (MPa)	Lực thẳng đứng Vmax (kN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Độ mở rộng vết nứt (mm)	Chuyển vị (mm)
1	2,00	1,00	0,04	0,00	0,01
2	2,20	11,68	0,67	0,00	0,18
3	2,46	26,47	1,52	0,00	0,42
4	2,82	46,66	2,66	0,00	0,74
5	3,19	67,87	3,86	0,00	1,07
6	3,53	87,96	4,94	0,00	1,38
7	3,68	96,02	5,73	0,00	1,52
8	3,84	104,88	6,53	0,00	1,68
9	4,10	119,48	8,35	0,01	1,90
10	4,68	152,11	10,67	0,20	2,41
11	5,21	182,47	13,31	1,40	2,98

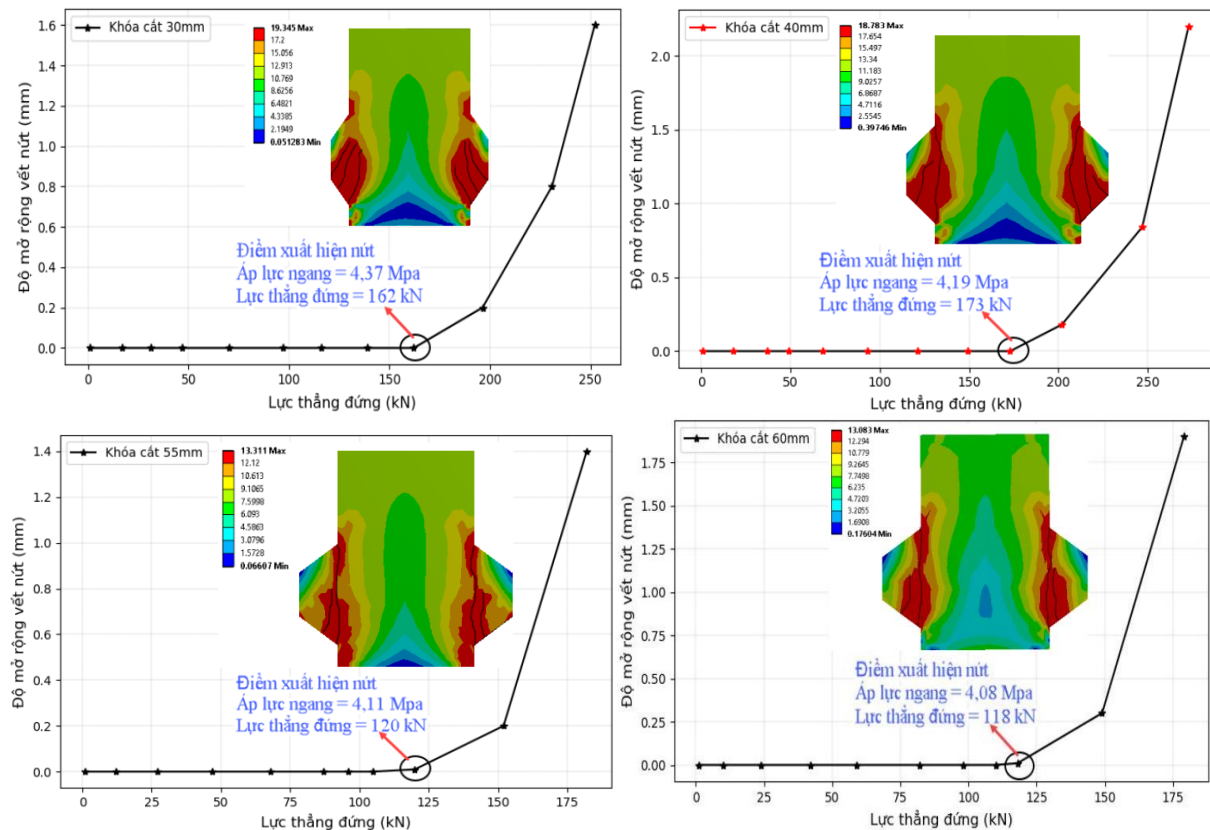
Kết quả phân tích cho thấy khóa chống cắt xuất hiện vết nứt tại giá trị lực thẳng đứng 120 kN, áp lực ngang đạt 4,11 MPa và ứng suất cắt tại khóa 8,57 MPa. Với trường hợp này, số lượng vết nứt hình thành ít hơn các mẫu 30 mm, 40 mm nhưng do chiều sâu khóa lớn nên sự phá hoại của khóa không thuận tụy chịu cắt mà có yếu tố mô men dẫn đến khả năng chịu cắt của khóa giảm.

Kết quả phân tích khóa chiều sâu 60 mm không cốt thép

Bảng 10. Tổng hợp kết quả mô phỏng tổ mẫu S60.

TT	Áp lực ngang (MPa)	Lực thẳng đứng Vmax (kN)	Ứng suất cắt tại khóa (MPa)	Độ mở rộng vết nứt (mm)	Chuyển vị (mm)
1	2,00	1,00	0,02	0,00	0,03
2	2,16	10,25	0,57	0,00	0,16
3	2,41	24,67	1,42	0,00	0,36
4	2,73	41,99	2,52	0,00	0,61
5	3,04	59,22	3,55	0,00	0,86
6	3,45	82,11	4,95	0,00	1,18
7	3,73	97,58	6,29	0,00	1,41
8	3,95	111,14	7,30	0,00	1,58
9	4,23	125,47	8,64	0,01	1,81
10	4,64	148,77	10,57	0,30	2,14
11	5,18	178,52	13,08	1,94	2,65

Biểu đồ tương quan giữa tải trọng thẳng đứng, độ mở rộng vết nứt và hình ảnh phân bố ứng suất cũng như dạng phá hoại được thể hiện trong Hình 6.



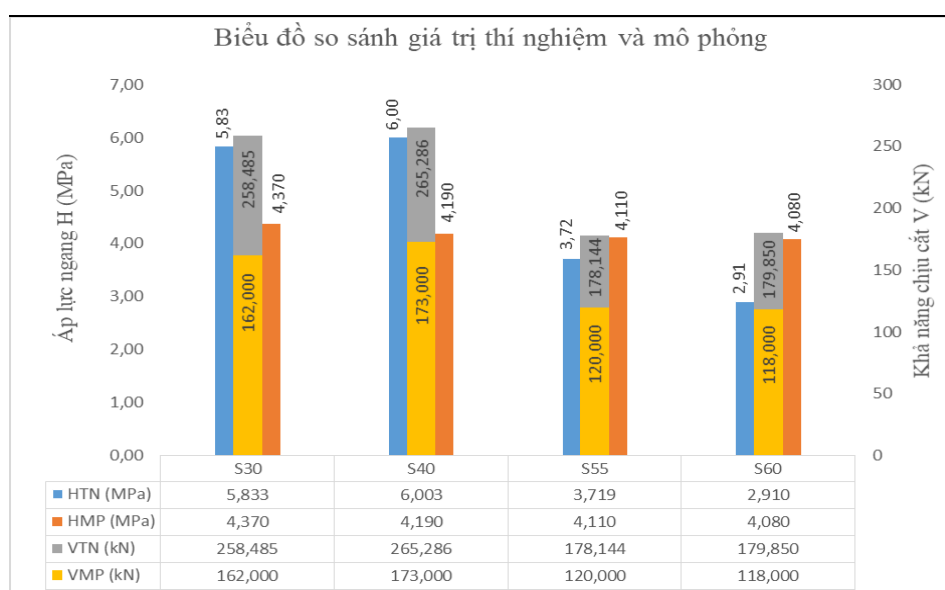
Hình 6. Ứng suất và vùng phát triển vết nứt tại các tổ mẫu.

Kết quả phân tích cho thấy khóa chống cắt xuất hiện vết nứt tại giá trị lực thẳng đứng 118 kN, áp lực ngang đạt 4,08 MPa và ứng suất cắt tại khóa 8,43 MPa. Với mẫu 60 mm sự hình thành vết nứt và mô hình phá hoại mẫu tương tự như mẫu 55 mm và yếu tố phá hoại do uốn thể hiện rõ rệt khi cùng chiều cao mà khả năng chịu cắt giảm rõ rệt chỉ đạt 118 kN.

Tổng hợp, so sánh đánh giá kết quả thí nghiệm và mô phỏng được thể hiện trong Bảng 11 và biểu đồ Hình 7.

Bảng 11. Tổng hợp kết quả thí nghiệm và mô phỏng số.

TT	Ký hiệu mẫu	Thí nghiệm		Mô phỏng		Chênh lệch	
		H _{TN} (MPa)	V _{TN} (kN)	H _{MP} (MPa)	V _{MP} (kN)	H (MPa)	V (kN)
1	S30	5,833	258,485	4,370	162,000	25%	37%
2	S40	6,003	265,286	4,190	173,000	30%	35%
3	S55	3,719	178,144	4,110	120,000	-11%	33%
4	S60	2,910	179,850	4,080	118,000	-40%	34%



Hình 7. Biểu đồ so sánh giá trị thí nghiệm và mô phỏng.

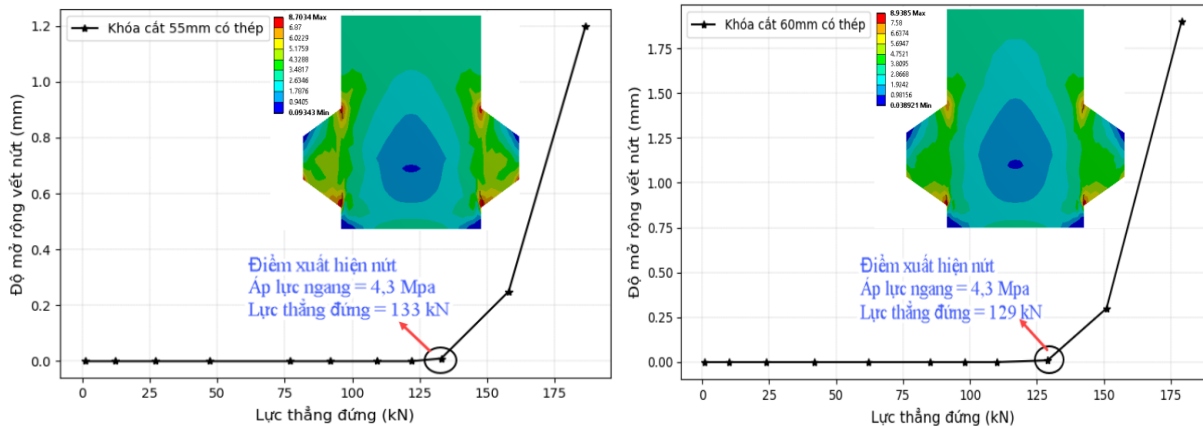
Từ bảng tổng hợp và biểu đồ so sánh giá trị thí nghiệm với mô phỏng cho thấy: khả năng chịu cắt của khóa khi thí nghiệm cao hơn so với mô phỏng từ 33% đến 37%, tỷ lệ chênh lệch là tương đối đồng đều ở các nhóm mẫu cho thấy sự phù hợp giữa mô hình mô phỏng và thí nghiệm. Giá trị lực nén ngang chênh lệch trong giải rộng hơn, với mẫu S30, S40 tăng từ 25% đến 30% trong khi đó các mẫu S55 và S60 giảm 11% đến 40%, điều này cho thấy ảnh hưởng của hiệu ứng mô men là rất lớn khi chiều sâu khóa lớn.

3.3.2 Kết quả phân tích mô phỏng với khóa có cốt thép

Kết quả phân tích khóa chiều sâu 55 mm và 60 mm có cốt thép.

Với khóa có chiều sâu 55 mm và 60 mm tăng cường thêm cốt thép thường có đường kính 8 mm ở mặt khóa với chiều dày bê tông bảo vệ 25 mm. Cốt thép 8 mm được lấy theo TCVN11823-5:2017 với giới hạn chảy của thép 400 MPa, giới hạn bền 570 MPa, mô đun đàn

hồi 200000 MPa, trọng lượng riêng 7850 kG/m³. Phần tử cốt thép được sử dụng trong mô phỏng là phần tử LINK 180. Kết quả mô phỏng thể hiện Hình 7.



Hình 7. Biểu đồ thể hiện tương quan lực thẳng đứng và áp lực ngang.

Kết quả phân tích cho thấy khóa chống cắt S55 xuất hiện vết nứt tại giá trị lực thẳng đứng 133 kN, áp lực ngang đạt 4,33 MPa, ứng suất cắt tại khóa 9,50 MPa. Khóa chống cắt S60 xuất hiện vết nứt tại giá trị lực thẳng đứng 129 kN, áp lực ngang đạt 4,3 MPa và ứng suất cắt tại khóa 9,21 MPa. So sánh với trường hợp không bố trí cốt thép ta thấy khi bố trí cốt thép có đường kính nhỏ 8 mm trong khóa chống cắt không làm thay đổi đáng kể khả năng chịu cắt cũng như độ mở rộng vết nứt mẫu mô phỏng.

4. KẾT LUẬN

Kết quả thí nghiệm và mô phỏng là đồng nhất và cho thấy khi chiều sâu khóa tăng từ 30 mm đến 40 mm thì khả năng chịu cắt của khóa tăng, tuy nhiên khi tăng đến 55 mm và 60 mm thì khả năng chịu cắt của khóa lại giảm rõ rệt do ảnh hưởng của mô men uốn phát sinh trong khóa.

Đối với khóa chống cắt có chiều sâu 55 mm và 60 mm việc bố trí cốt thép đường kính 8 mm không làm thay đổi đáng kể khả năng chịu cắt cũng như biến dạng của khóa. Nếu bố trí cốt thép có đường kính lớn hơn ở thân khóa sẽ không đủ chiều dày lớp bê tông bảo vệ do đó không nên sử dụng khóa chống cắt có chiều sâu lớn 55-60 mm.

Do đó chỉ nên thiết kế khóa chống cắt không cốt thép có chiều sâu từ 30 đến 40 mm. Điều này cũng phù hợp với chiều sâu các khóa chống cắt đang sử dụng cho các dự án lớn ở Việt Nam (Bến Thành – Suối Tiên khóa chống cắt dây 32 mm, cầu dẫn dự án Tân Vũ Lạch Huyện khóa chống cắt dây 40 mm).

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2022-CT-011.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. AASHTO, Guide Specifications for the Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, 2017.

- [2]. In-Hwan Yang, Kyung-Cheol Kim, Young-Joon Kim, Shear strenght of dry joints in precast concrete modunles, Proceeding conference of Hokkaido University, 13 September, 2013.
- [3]. Haibo Jiang, Li Chen, Zhongguo John Ma, Wenxian Feng, Shear behavior of dry joint with castellated keys in precast concrete segmental bridges. Journal of Bridge Engineering, 27 May, 2014.
- [4]. Hồ sơ thiết kế kỹ thuật tuyến Metro Bến Thành - Suối Tiên, thành phố Hồ Chí Minh.
- [5]. Hồ sơ thiết kế kỹ thuật tuyến Tân Vũ- Lạch Huyện, Liên danh OC, Padeco, Nippon Koei, JBSI, Jan 2013.
- [6]. Nguyễn Đắc Đức, Nguyễn Ngọc Long, Trần Đức Nhiệm, Mô phỏng số đánh giá ảnh hưởng của xoắn đến khóa chống cắt trong cầu dầm lắp ghép phân đoạn, Tạp chí Khoa học GTVT, 70 (2019) 386-396. <https://doi.org/10.25073/tcsj.70.5.3>
- [7]. Nguyễn Đắc Đức, Nguyễn Ngọc Long, Trần Đức Nhiệm, Đỗ Anh Tú, Lê Bá, Ứng xử của cầu dầm hộp liên tục lắp ghép phân đoạn dưới tác dụng của tải trọng lệch tâm, Tạp chí Khoa học GTVT, 70 (2019) 440-450. <https://doi.org/10.25073/tcsj.70.5.8>
- [8]. Nguyễn Thái Khanh, Phân tích, lựa chọn công thức xác định sức kháng cắt của mối nối “in oản” trong cầu bê tông dự ứng lực lắp ghép phân đoạn, báo cáo tổng kết đề tài, Mã số đề tài: DT183063, Viện KHCN GTVT, 2019.
- [9]. CEB-FIP Model Code Comite EURO – International du Beton, Design Code, 1990.
- [10]. Nguyễn Đắc Đức, Nghiên cứu khả năng chịu cắt và xoắn tại vị trí mối nối trong cầu dầm lắp ghép phân đoạn, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2020.