



BEHAVIOR OF SEGMENTAL BOX-GIRDER BRIDGE UNDER ECCENTRIC LOADING

Nguyen Duc Duc, Nguyen Ngoc Long, Tran Duc Nhiem,
Do Anh Tu, Le Ba Anh

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 26/11/2019

Revised: 25/12/2019

Accepted: 30/12/2019

Published online: 16/1/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.5.8>

* *Corresponding author*

Email: nguyendacduc@tcsj.com; Tel: 0904133791

Abstract. Joints in segmental box-girder bridges not only connect segments but also ensure the transmissibility of external forces (i.e., the longitudinal force, bending moment, torsion, and shear force) between adjacent segments. At the “dry joint” of 2 segments, where there is no reinforcement, the longitudinal prestressing tendons mostly take the bending moment while the shear key and the frictional force resist the shear force. When an eccentric load is applied on the girder, it induces torsion causing a harmful addition of shear stress at the joint. Therefore, the evaluation of the effect of torsion to the shear resistance of the shear key is essential to ensure its performance. This study investigates the behavior of a segmental box-girder bridge under eccentric loading using numerical simulations. The research results can help engineers properly design dry joints for such segmental bridges.

Keywords: Eccentric load, torsion, shear resistance, segmental box-girder bridges, shear stress.



ỨNG XỬ CỦA CẦU DÀM HỘP LIÊN TỤC LẮP GHÉP PHÂN ĐOẠN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG LỆCH TÂM

Nguyễn Đắc Đức, Nguyễn Ngọc Long, Trần Đức Nhiệm,
Đỗ Anh Tú, Lê Bá Anh

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 26/11/2019

Ngày nhận bài sửa: 25/12/2019

Ngày chấp nhận đăng: 30/12/2019

Ngày xuất bản Online: 16/1/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.5.8>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyendacduc@tcsj.edu.vn; Tel: 0904133791

Tóm tắt. Mỗi nối trong cầu dầm lắp ghép phân đoạn ngoài nhiệm vụ nối ghép các đốt dầm thành kết cấu hoàn chỉnh thì phải đảm bảo truyền lực giữa các đốt dầm như lực dọc, mô men uốn, mô men xoắn, lực cắt... Đặc trưng của dầm lắp ghép phân đoạn sử dụng mỗi nối không tại vị trí mỗi nối không có cốt thép thường, do đó cốt thép dự ứng lực đóng vai trò chịu mô men uốn, lực cắt sinh ra ứng suất tiếp tại vị trí mỗi nối sẽ do khoá chống cắt và ma sát tiếp xúc của bề mặt bê tông đảm nhiệm. Khi tải trọng đặt lệch tâm hay có tác động gây ra mô men xoắn tại vị trí mỗi nối, mô men xoắn này sẽ sinh ra ứng suất tiếp phụ thêm. Việc đánh giá ảnh hưởng của mô men xoắn đến khả năng chịu lực của mỗi nối nói chung và khoá chống cắt nói riêng là cần thiết, nhằm đảm bảo việc thiết kế mỗi nối là an toàn. Bài báo nghiên cứu ứng xử của cầu dầm hộp liên tục lắp ghép phân đoạn dưới tác dụng của tải trọng lệch tâm thông qua phương pháp mô phỏng số nhằm giúp việc tính toán mỗi nối và kết cấu hoàn thiện hơn.

Từ khóa: Tải trọng lệch tâm, mô men xoắn, dầm liên tục, sức kháng cắt, dầm hộp lắp ghép phân đoạn, ứng suất cắt.

© 2019 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, mặt cắt ngang kết cấu nhịp dạng hộp được sử dụng rộng rãi cho cầu nhịp lớn bê tông cốt thép dự ứng lực do có những ưu điểm vượt trội như: có tính ổn định cao, khả năng chịu xoắn tốt... Bên cạnh các nghiên cứu cải tiến sử dụng dạng mặt cắt hình hộp cho những

nhip lớn hơn thì việc sử dụng công nghệ thi công tiên tiến như công nghệ thi công lắp ghép phân đoạn (các đốt dầm được đúc tại nhà máy, xưởng... vận chuyển đến công trường và lắp ghép thành kết cấu nhịp nhờ mối nối và cáp dự ứng lực) cho phép chuyên môn hóa và đẩy nhanh tiến độ thi công.

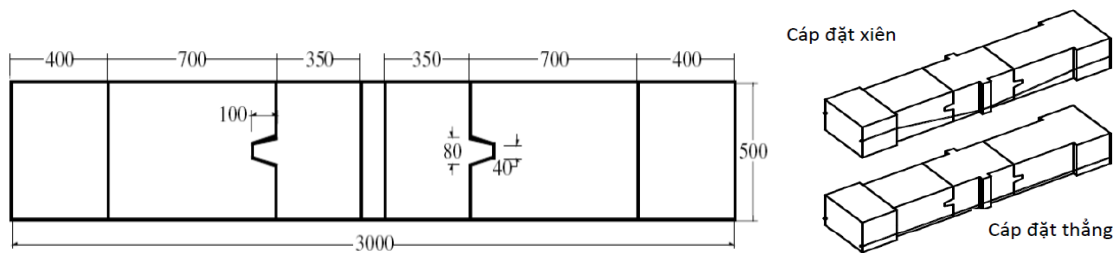
Một số dự án lớn đã và đang đang triển khai ở Việt Nam hiện nay như dự án Tân Vũ – Lạch Huyện, thành phố Hải Phòng [1], dự án tuyến Metro Bến Thành – Suối Tiên [2], thành phố Hồ Chí Minh,... áp dụng công nghệ thi công lắp ghép phân đoạn kết cấu nhịp sử dụng mối nối khóa chống cắt cùng keo epoxy và cáp dự ứng lực, mặt cắt ngang dầm dạng chữ U hay mặt cắt hình hộp.

Một trong những ưu điểm của mặt cắt hộp là khả năng chịu xoắn tốt. Tuy nhiên trong “Nghiên cứu ảnh hưởng của xoắn đến giá trị ứng suất - biến dạng của mặt cắt ngang dầm hộp” năm 2015 của Lê Bá Khánh, Phạm Thế Hùng [3] đối với dầm hộp liền khối đã chỉ ra xoắn làm thay đổi giá trị, chiều của ứng suất và biến dạng. Ứng suất tiếp tại vị trí chu vi mặt cắt dầm tăng khoảng 20%.

Với mặt cắt ngang dạng hộp như dự án Tân Vũ – Lạch Huyện [1], khả năng chịu xoắn của mặt cắt hộp là tương đối tốt, tuy nhiên do đặc thù thi công theo công nghệ lắp ghép phân đoạn, dẫn đến có khả năng kết cấu bị phá hoại tại vị trí mối nối trước khi phá hoại tại các mặt cắt khác. Việc phá hoại tại mối nối xảy ra khi khóa chống cắt bị phá hoại dưới tác dụng của ứng suất cắt có thể do lực cắt hoặc do đồng thời lực cắt và mô men xoắn gây ra (tải trọng đặt lệch tâm).

Tác giả Prof. Dr.-Ing. G. Rombach [4] trong nghiên cứu công bố năm 2002 đã chỉ ra rằng ảnh hưởng của xoắn đối với mặt cắt ngang dầm hộp lắp ghép phân đoạn khi xếp tải lệch tâm là đáng kể.

Năm 2010, 2011, M.A. Algorafi và các cộng sự [5, 6] đã tiến hành thí nghiệm 6 dầm, chiều dài mỗi dầm 3m được lắp ghép từ 3 khối đúc sẵn, 3 dầm bố trí cáp dự ứng lực ngoài chạy thẳng, 3 dầm bố trí cáp dự ứng lực ngoài đặt gẫy khúc thể hiện trong Hình 1. Chi tiết vật liệu, bố trí cáp và điểm đặt lực thể hiện trong Bảng 1.



Hình 1. Cấu tạo và bố trí cáp trên mẫu thí nghiệm.

Bảng 1. Đặc tính vật liệu, bố trí cáp và độ lệch tâm của tải trọng thí nghiệm.

Số hiệu dầm	Cường độ bê tông (MPa)	Mô đun đàn hồi bê tông (MPa)	Bố trí cáp	Độ lệch tâm của tải trọng (mm)	Diện tích A_{sm} (m ²)	Diện tích A_{key} (m ²)	Góc xiên của cáp α (rad)	Lực dự ứng lực (kN)
C1	49	34000	Cáp thẳng	0	0,15	0,01	0	82
C2	47	34000	Cáp thẳng	100	0,15	0,01	0	77
C3	49	34500	Cáp thẳng	200	0,15	0,01	0	87
D1	47	34000	Cáp xiên	0	0,15	0,01	0,1351	93
D2	47	34000	Cáp xiên	100	0,15	0,01	0,1351	74
D3	43	34500	Cáp xiên	200	0,15	0,01	0,1351	93

Trong đó A_{sm} , A_{key} là diện tích tiếp xúc phần phẳng và diện tích chân các khóa chống cắt tại vị trí mối nối.

Mỗi dầm bố trí 2 tao cáp dự ứng lực loại 7 sợi đường kính 12,7mm (theo tiêu chuẩn ASTM A 416-85 Grade 270), diện tích mỗi tao là 98,7mm², lực căng trong mỗi tao cáp là 30kN.

Với đặc tính vật liệu, các tác giả tiến hành thí nghiệm uốn 3 điểm tới khi dầm phá hoại và kết quả thí nghiệm thu được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tải trọng thẳng đứng khi phá hoại mẫu thí nghiệm.

Số hiệu dầm thí nghiệm	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Độ lệch tâm của tải trọng (mm)	0	100	200	0	100	200
Tải trọng thẳng đứng lớn nhất thí nghiệm (kN)	190	150	159	*	172	160

(*) không ghi nhận được giá trị lực thẳng đứng khi phá hoại mẫu.

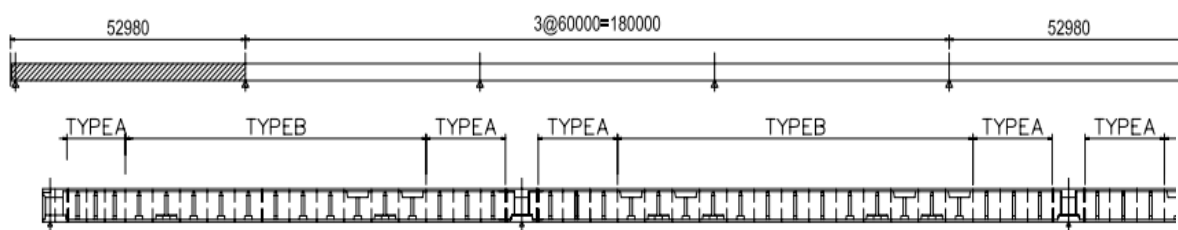
Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy, khi tải trọng đặt lệch tâm thì khả năng chịu tải trọng thẳng đứng của dầm đều giảm so với trường hợp tải trọng đặt đúng tâm. So sánh dầm thí nghiệm mang số hiệu C1 và C2 thì khả năng chịu tải trọng thẳng đứng của dầm C2 giảm 21,05%.

Từ các phân tích trên ta thấy ảnh hưởng của xoắn đến khả năng chịu tải không chỉ đối với dầm hộp toàn khối mà đối với cả dầm lắp ghép phân đoạn khi thực nghiệm. Do đó cần có những nghiên cứu cụ thể hơn nhằm đánh giá ảnh hưởng của xoắn đối với khả năng chịu tải trọng của cầu dầm bê tông cốt thép lắp ghép phân đoạn.

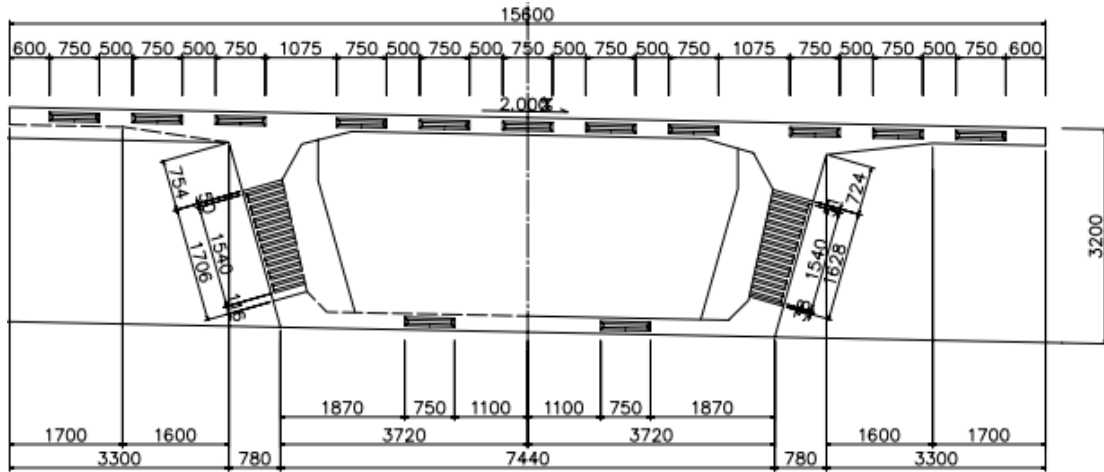
2. TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG SỐ

2.1. Thông số kết cấu

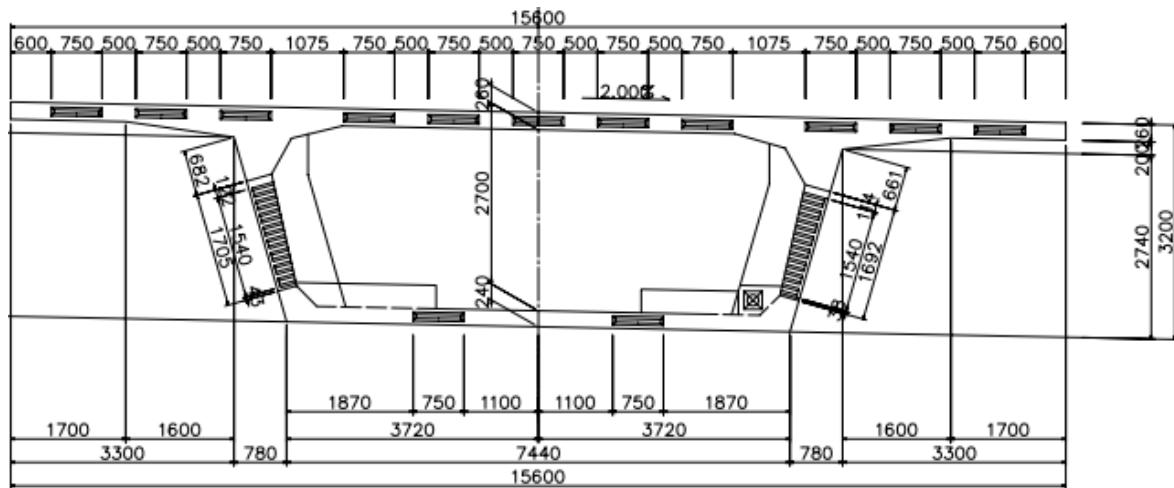
Tiến hành tính toán mô phỏng số kết cấu cầu gồm 5 nhịp liên tục, mặt cắt ngang một hộp 2 sườn, thi công theo công nghệ lắp ghép phân đoạn từng nhịp (Span By Span – SBS). Sơ đồ kết cấu nhịp 52980+3@60000+52980, được thể hiện Hình 2, các nhịp được lắp ghép từ các đốt dầm đúc sẵn, nối với nhau bằng cáp dự ứng lực trong và cáp dự ứng lực ngoài. Mỗi mối dầm sử dụng khóa chống cắt không xét đến ảnh hưởng của keo epoxy. Trên mỗi nhịp sử dụng mối nối loại A (Type A) cho các mặt cắt gần đỉnh trụ, mối nối loại B (Type B) cho mặt cắt giữa nhịp, mặt cắt ngang chỉ khác nhau về chiều dày sườn dầm và bố trí khóa chống cắt ở sườn dầm được thể hiện ở Hình 3 và Hình 4.



Hình 2. Sơ đồ kết cấu và bố trí mối nối.



Hình 3. Mặt cắt ngang tại vị trí mối nối loại A (Type A).



Hình 4. Mặt cắt ngang tại vị trí mối nối loại B (Type B).

2.2. Mô hình vật liệu

Vật liệu bê tông sử dụng trong mô hình phân tích được lấy theo mô hình vật liệu tuyến tính. Các thông số đầu vào của vật liệu được lấy theo tiêu chuẩn TCVN11823-5:2017 [7], AASHTO 2012 [8], và được khai báo như sau:

Bảng 3. Các thông số vật liệu bê tông.

TT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Tiêu chuẩn áp dụng
1	Cường độ bê tông	f_c	50	MPa	TCVN11823-5:2017
2	Mô đun đàn hồi	E	35749	MPa	
3	Trọng lượng riêng	γ	2400	Kg/m ³	
4	Hệ số poisson	μ	0,2		
5	Giới hạn chịu kéo	f_y	$f_t = 0,25\sqrt{f'_c}$	1,77 MPa	AASHTO2012
6	Giới hạn chịu cắt	f_c	$0,7\sqrt{f'_c}$	4,95MPa	

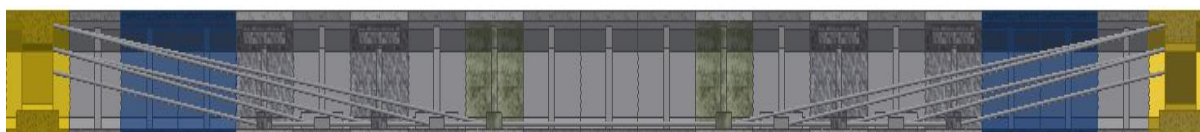
Ảnh hưởng của co ngót, từ biến và sự phụ thuộc của việc phát triển cường độ trong bê tông vào thời gian được xét đến trong mô hình vật liệu lấy theo tiêu chuẩn CEB-FIP [9].

Cốt thép cường độ cao lấy theo tiêu chuẩn ASTM A416 [10], cấp 270, độ tự chùng thấp

Bảng 4. Các chỉ tiêu cơ lý thép cường độ cao.

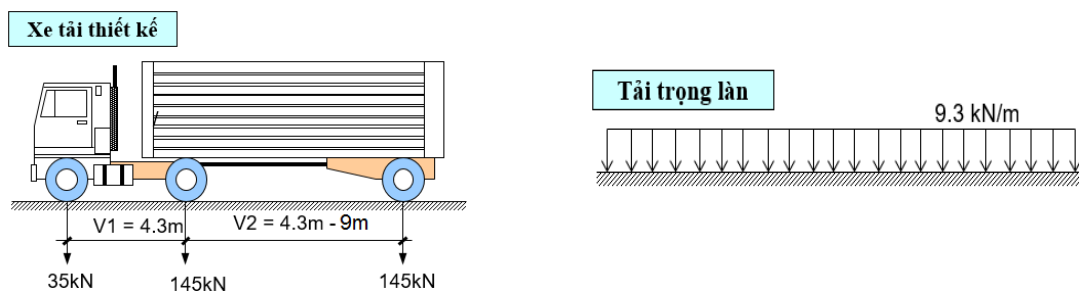
TT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Cường độ chịu kéo	f_{pu}	1860	MPa
2	Cường độ chảy	f_{py}	1674	MPa
3	Mô đun đàn hồi	E_{ps}	197000	MPa
4	Hệ số poisson	μ	0,3	
5	Hệ số giãn nở nhiệt	Δ	$10,08 \times 10^{-6}$	$1/^\circ\text{C}$

Kết cấu nhịp được bố trí cả cáp dự ứng lực trong và cáp dự ứng lực ngoài. Cáp dự ứng lực trong là loại bó cáp 12 tao xoắn 7 sợi 12S15,2, lực kéo mỗi bó 2834kN. Cáp dự ứng lực ngoài cũng là loại bó cáp tao xoắn 7 sợi 19S15,2, lực kéo mỗi bó 2885kN. Bó cáp ngoài chuyển hướng thông qua các ụ neo và được chứa trong vỏ bọc bảo vệ.



Hình 5. Bố trí cáp dự ứng lực cho một nhịp.

Tải trọng dùng phân tích là một trường hợp tải HL93 (gồm tải trọng làn và xe tải thiết kế), các hệ số tính tải, hoạt tải được lấy theo TCVN11823-5:2017.



Hình 6. Hoạt tải tính toán HL 93.

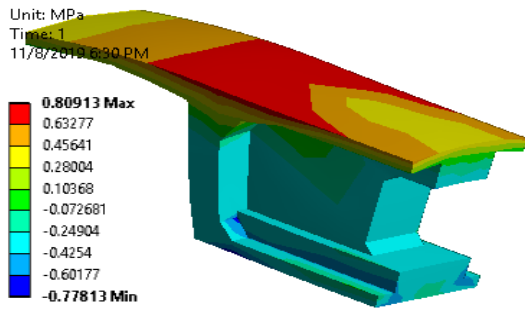
2.3. Kết quả tính toán mô phỏng

Từ các dữ liệu đầu vào nêu trên, sử dụng phần mềm MIDAS/Civil tiến hành phân tích kết cấu khi chịu tĩnh tải và hoạt tải.

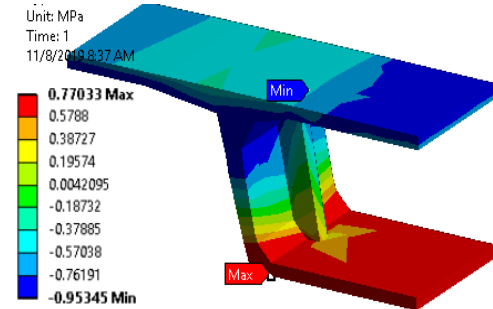
Với hoạt tải tiến hành khảo sát với hai cấp tải trọng là HL93 theo TCVN11823-5:2017 và tăng dần cấp tải HL93 đến khi kết cấu bị phá hoại. Để đánh giá ảnh hưởng của xoắn tới ứng suất tại khóa chống cắt thì với mỗi cấp tải trọng tiến hành đặt tải đúng tâm và đặt tải lệch tâm.

Kết quả phân tích tập trung vào ứng suất kéo trên đỉnh trụ, ứng suất kéo bản đáy hộp giữa nhịp, ứng suất cắt tại mỗi nối khóa chống cắt, độ võng dầm để làm rõ tác động của xoắn.

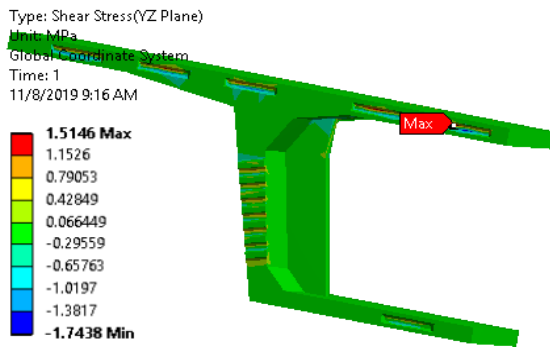
2.3.1 Trường hợp phân tích với tĩnh tải



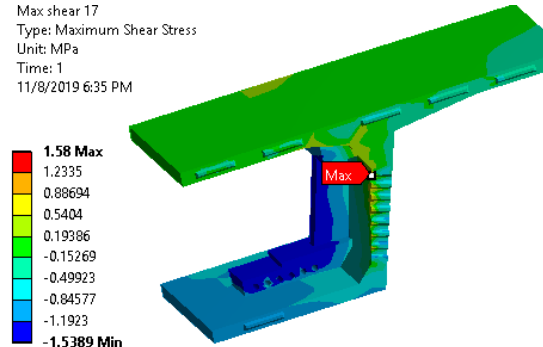
Ứng suất kéo đốt đỉnh trụ 0,81MPa



Ứng suất kéo đốt giữa nhịp 0,77 MPa



Ứng suất cắt đốt giữa nhịp 1,51 MPa



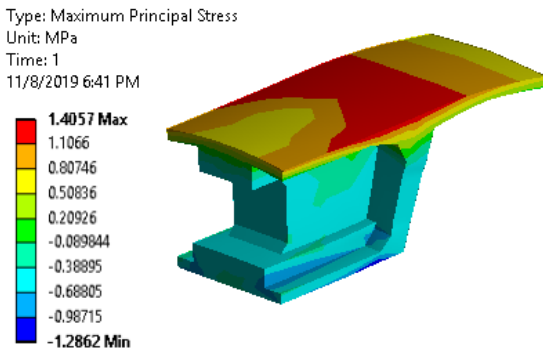
Ứng suất cắt sát trụ 1,58 Mpa

Hình 7. Kết quả phân tích với tĩnh tải.

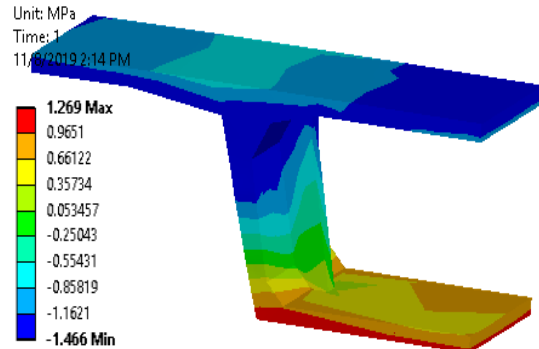
Từ kết quả trên cho ta thấy, ứng suất cắt lớn nhất xuất hiện tại mặt cắt sát trụ do lực cắt lớn và giá trị ứng suất này tập trung vị trí sườn hộp. Đối với mặt cắt giữa nhịp giá trị ứng suất cắt lớn nhất lại tập trung vị trí bản nắp hộp.

2.3.1 Trường hợp phân tích với tải trọng HL93

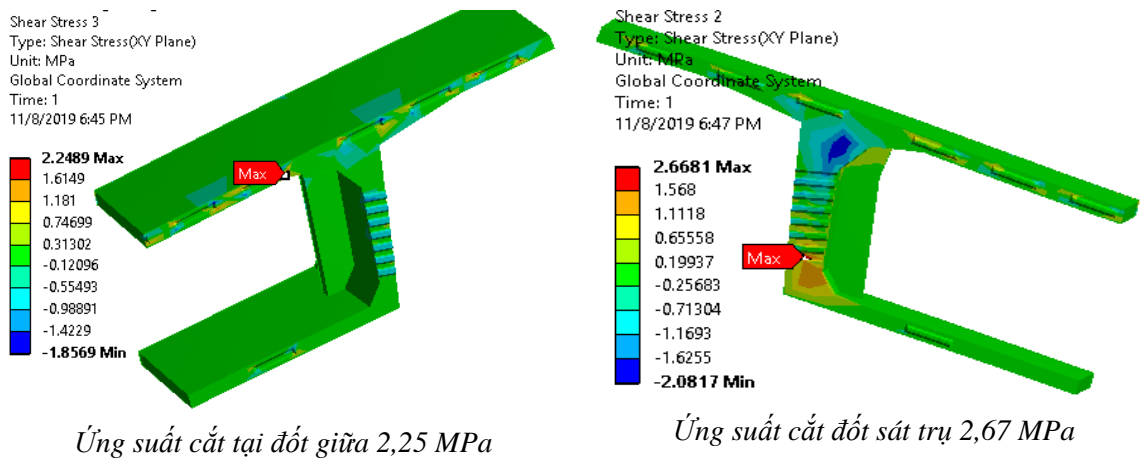
Bề rộng mặt cầu thiết kế 4 làn, tuy nhiên để khảo sát so sánh ảnh hưởng của tải trọng đặt lệch tâm thì trong cả hai trường hợp chỉ xếp 2 làn chịu tải theo hai trường hợp đúng tâm và lệch tâm.



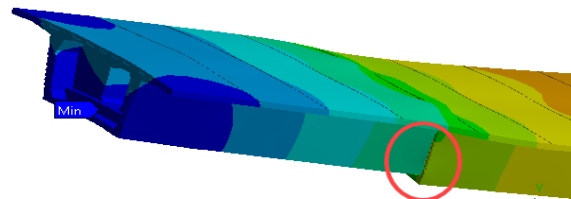
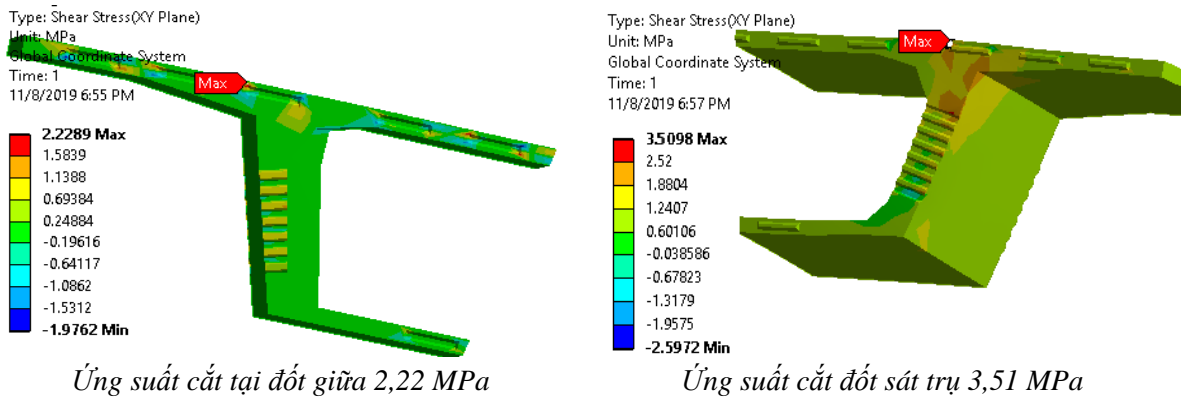
Ứng suất kéo đốt đỉnh trụ 1,41 MPa



Ứng suất kéo đốt giữa 1,27 MPa



Hình 8. Kết quả phân tích với HL93 đặt đúng tâm.



Vị trí ứng suất cắt lớn nhất

Hình 9. Kết quả phân tích với HL93 đặt lệch tâm.

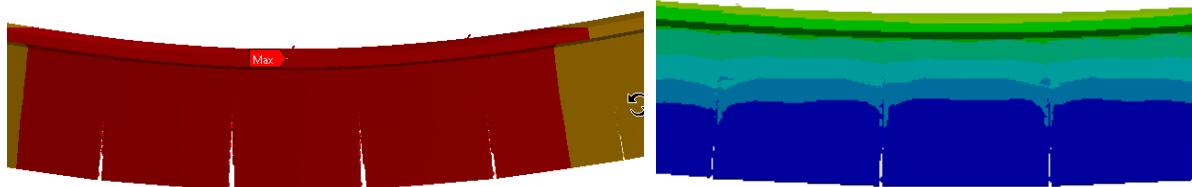
Bảng 5. Tổng hợp kết quả phân tích với tĩnh tải và hoạt tải HL93.

Trường hợp tải	Độ võng lớn nhất (mm)	Độ võng lớn nhất (mm)	Ứng suất kéo bản nắp đốt đỉnh trụ (MPa)	Ứng suất kéo bản đáy đốt giữa (MPa)	Ứng suất cắt tại mỗi nối ở $\frac{1}{4} l_{nhịp}$ (MPa)	Ứng suất cắt tại mỗi nối đốt giữa (MPa)	Ứng suất tại neo cáp đốt đỉnh trụ (MPa)
Tĩnh tải	24,00	2,95	0,81	0,77	1,58	1,51	14,60
HL93 đúng tâm	31,14	7,45	1,41	1,27	2,67	2,25	14,85
HL93 lệch tâm	32,99	9,57	1,59	1,27	3,51	2,39	14,84

Từ kết quả phân tích ta thấy, cả hai trường hợp tải trọng đặt đúng tâm và lệch tâm ứng suất cắt lớn nhất đều xuất hiện tại vị trí nối ở mặt tiếp xúc đốt thứ 4 và đốt thứ 5 (tương đương vị trí $\frac{1}{4}l_{nhịp}$) và đạt giá trị lớn nhất 3,51MPa.

Khi tải trọng đặt lệch tâm, ứng suất kéo bản nắp đốt đỉnh trụ tăng lên đáng kể, đạt 1,59MPa, trong khi ứng suất kéo bản đáy đốt giữa nhịp hầu như không thay đổi .

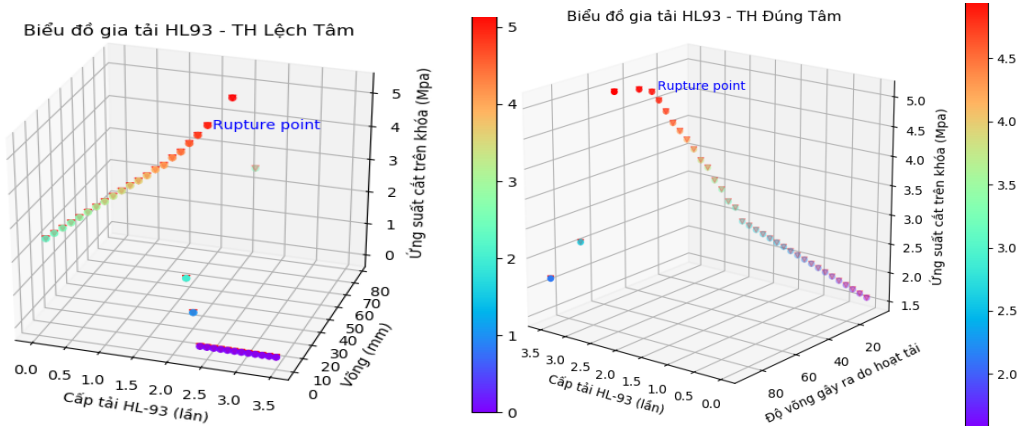
2.3.2 Trường hợp phân tích với tải trọng tới khi kết cấu phá hoại



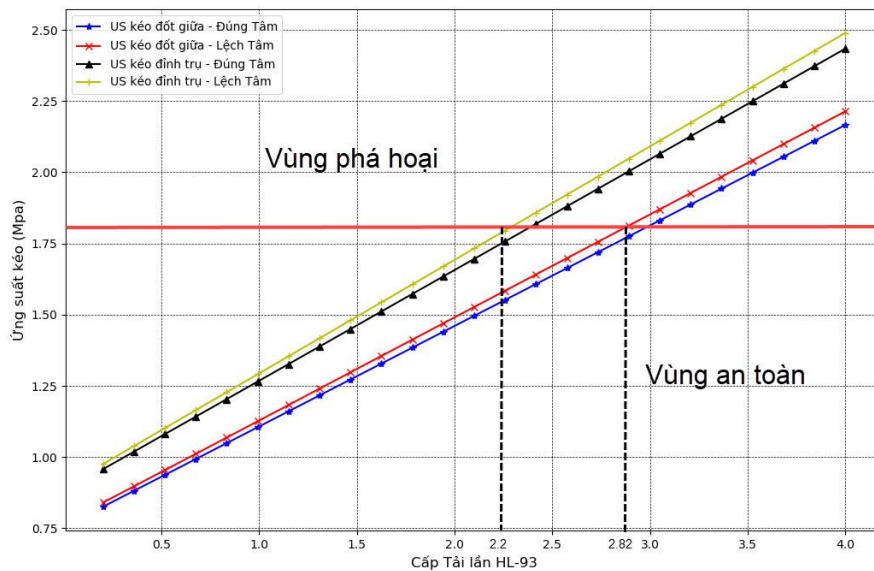
Mối nối mở rộng vị trí chịu mô men dương

Gradient ứng suất trên mặt cắt ngang

Hình 10. Mô tả mở rộng mối nối và gradient ứng suất.

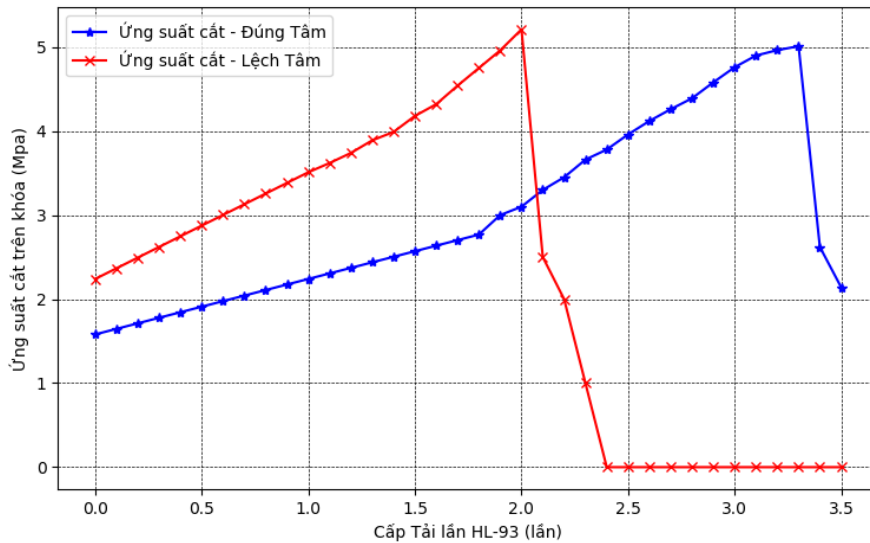


Hình 11. Sơ đồ gia tải và giá trị độ võng, ứng suất.



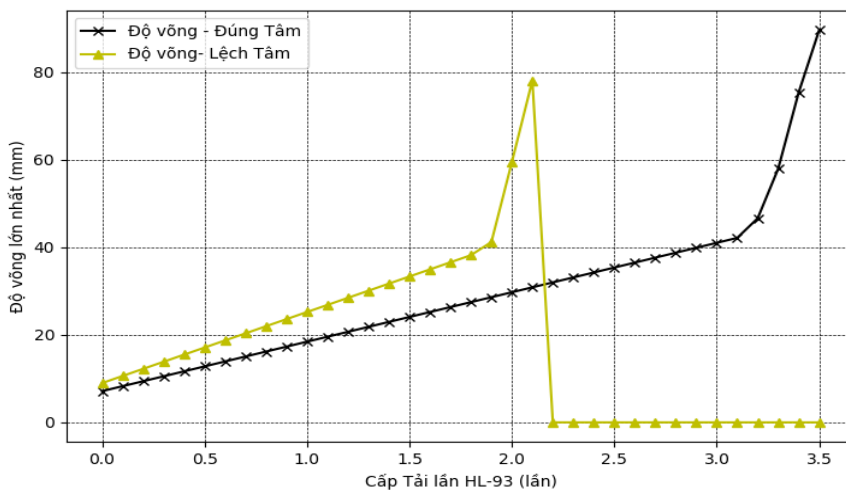
Hình 12. Biểu đồ ứng suất kéo tại mặt cắt đỉnh trụ và mặt cắt giữa nhịp theo lần cấp tải HL93.

Ứng suất kéo của cốt dầm không có sự khác biệt khi đặt tải lệch tâm hay đúng tâm. Giới hạn ứng suất kéo 1,77MPa với kết cấu bê tông dự ứng lực [4]. Từ kết quả trên ta thấy bản nắp đỉnh trụ sẽ xuất hiện các vết nứt do vượt giới hạn ứng suất kéo của bê tông khi tải trọng đặt lên cầu bằng 2,2 lần hoạt tải HL93.



Hình 13. Ứng suất cắt trên khóa theo cấp tải HL 93.

Ứng suất cắt lớn nhất trên khóa khi chất tải có sự chênh lệch rõ rệt đối với hai trường hợp chất tải đúng tâm và lệch tâm. Ứng suất cắt trường hợp đặt tải lệch tâm lớn hơn khi đặt tải đúng tâm. Kết cấu sẽ chịu được cấp tải tương đương 1,92 lần hoạt tải HL93 đặt theo sơ đồ lệch tâm và 3,05 lần hoạt tải HL93 nếu đặt theo sơ đồ đúng tâm. Khi đó ứng suất cắt trên khóa chống cắt vượt quá giới hạn chịu cắt 4,95 MPa.



Hình 14. Độ võng do hoạt tải gây ra trên cầu.

Biểu đồ độ võng kết cấu nhịp thể hiện Hình 14 cho thấy độ võng lớn nhất trên nhịp không còn tuyến tính tại giá trị cấp tải mà ở đó các khóa bắt đầu hư hỏng do nứt. Với trường hợp đặt tải lệch tâm độ võng do hoạt tải gây ra tại cấp tải phá hoại là 40,02mm, và với trường hợp đặt đúng tâm có giá trị là 42,06mm.

3. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết quả phân tích mô phỏng kết cấu nhịp với tải trọng HL93 trong hai trường hợp đặt đúng tâm và lệch tâm thì độ võng cũng như độ vòng của kết cấu trong trường hợp đặt lệch tâm đều lớn hơn trường hợp đặt đúng tâm lần lượt là 5,9% và 28,46%.

Do ảnh hưởng của hiệu ứng xoắn dẫn đến ứng suất cắt lớn nhất xuất hiện tại vị trí mối nối ở $\frac{1}{4}l_{nhịp}$ trong trường hợp tải trọng đặt lệch tâm lớn hơn 31,46% so với trường hợp tải trọng đặt đúng tâm.

Ứng suất kéo bản nắp đốt đỉnh trụ trong trường hợp đặt hoạt tải lệch tâm 1,59MPa lớn hơn trường hợp hoạt tải đặt đúng tâm 12,76%. Trong khi đó ứng suất kéo bản đáy đốt giữa nhịp không thay đổi.

Phân tích mô phỏng ở giai đoạn dầm bị phá hoại cho thấy, khi tải trọng lệch tâm khóa chống cắt sẽ chịu thêm ảnh hưởng của xoắn nên tải trọng tới hạn khi đặt lệch tâm chỉ đạt 1,92HL93 trong khi tải trọng đặt đúng tâm là 3,05HL93.

Từ các kết quả phân tích trên ta thấy cần xét đến ảnh hưởng của tải trọng lệch tâm hay xoắn khi tính toán khả năng chịu cắt của khóa chống cắt. Kết quả phân tích mô phỏng trên đây chỉ thực hiện đối với mặt cắt ngang cụ thể, cũng như chưa xét đến các yếu tố tác động khác của tải trọng hoặc cầu trên đường cong. Do đó tác giả kiến nghị tiếp tục nghiên cứu xét đến ảnh hưởng của lực ly tâm, thí nghiệm với kết cấu thực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hồ sơ thiết kế kỹ thuật tuyến Tân Vũ- Lạch Huyện, Liên danh OC, Padeco, Nippon Koei, JBSI, Jan 2013.
- [2]. Hồ sơ thiết kế kỹ thuật tuyến Metro Bến Thành - Suối Tiên, Liên danh Sumitomo – Cienco6, 11-2013.
- [3]. B.K. Lê, T.H. Phạm, Nghiên cứu ảnh hưởng của xoắn đến giá trị ứng suất - biến dạng của mặt cắt ngang dầm hộp, Tạp chí GTVT, 12 (2015).
- [4]. Prof. Dr.-Ing. G. Rombach Technical University Hamburg, Germany. Precast segmental box girder bridges with external prestressing. INSA Rennes, Feb. 2002.
- [5]. M.A. Algorafi, A.A.A. Ali, I. Othman, M.S. Jaafar, and R.A. Almansob, Evaluation of Structural Behavior of Externally Prestressed Segmented Bridge with Shear Key under Torsion, Journal of Engineering, 1 (2011) 28-35. DOI: [10.32738/jepm.201107.0004](https://doi.org/10.32738/jepm.201107.0004)
- [6]. M.A. Algorafi, A.A.A. Ali, A. Othman, M.S. Jaafar, M.P Anwar, M. P, Experimental study of externally prestressed segmental beam under torsion, Journal of Engineering Structures, 32 (2010) 3528-3538. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.07.021>
- [7]. TCVN11823-5:2017 Tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ, Phần 5: Kết cấu bê tông.
- [8]. AASHTO (2012). Guide Specifications for the Design and Construction of Segmental Concrete Bridges. Second Edition. pp. 3-118.
- [9]. CEB-FIP Model Code Comite EURO – International du Beton, Design Code, 1990.
- [10]. ASTM A416 Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete.