

Nghiên cứu ứng xử thực tế của kết cấu dầm hộp bê tông mở rộng bản cánh bằng thanh chống thép thông qua quan trắc ứng suất trong quá trình thi công và thí nghiệm thử tải

Behavior of box girder structures with strutted wing slabs through stress monitoring during construction and load testing

> TS CÙ VIỆT HƯNG

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Email: hungcv@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Kết cấu dầm hộp mở rộng bản cánh bằng thanh chống có nhiều ưu điểm như giảm được trọng lượng bản thân, tính thẩm mỹ cao. Tuy nhiên, các nghiên cứu về ứng xử của loại kết cấu này vẫn còn nhiều hạn chế, đặc biệt là các nghiên cứu thực nghiệm đối với công trình thực tế. Bài báo phân tích ứng xử của bản cánh mở rộng và thanh chống thép thông qua kết quả quan trắc biến dạng - ứng suất kết cấu trong suốt quá trình thi công và thí nghiệm thử tải đối với cầu cạn trên cao thuộc tuyến đường vành đai II Hà Nội. Kết quả nghiên cứu cho thấy, kết cấu dầm hộp mở rộng bản bằng thanh chống xiên đảm bảo khả năng chịu lực, có ứng xử phù hợp với các kết quả nghiên cứu thí nghiệm đốt dầm trước khi tiến hành thi công.

Từ khóa: Dầm hộp bê tông, bản cánh mở rộng, thanh chống thép, quan trắc, thử tải.

ABSTRACT

The strut-supported extended wing slab box girder structure offers several advantages, including reduced self-weight and enhanced aesthetic appeal. However, research on the behavior of this structural type remains limited, particularly regarding experimental studies on real-life structures. This paper analyzes the behavior of the extended wing slab and steel struts based on strain-stress monitoring results throughout the construction process and six load tests conducted on an elevated viaduct on Hanoi's Ring Road II. The research findings demonstrate that the box girder structure with a wing slab supported by inclined struts adequate load capacity, with behavior consistent with girder segment test results.

Keywords: Box girder bridges, strutted wing slabs, steel pipe struts, monitoring, load testing.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu cầu dầm hộp sử dụng thanh chống đã được nghiên cứu và phát triển tại châu Âu từ những năm 1970 nhằm khắc phục một số nhược điểm của dầm hộp bê tông cốt thép truyền thống như trọng lượng kết cấu lớn hay hạn chế về mặt thẩm mỹ. Với dạng kết cấu này, chiều dài bản cánh hẫng lớn hơn, bề rộng bản đáy nhỏ hơn so với dầm hộp truyền thống. Các thanh chống chéo có thể bằng bê tông cốt thép, thép ống hoặc các vật liệu composite... Ưu điểm của kết cấu dầm hộp mở rộng bản cánh bằng thanh chống là giảm trọng lượng bản thân của dầm trên chiều dài cầu so với dầm hộp truyền thống, từ đó có thể giảm kích thước các kết cấu phần dưới như móng, trụ và móng [1, 2]. Cầu dẫn Incheon (Hàn Quốc) sử dụng các thanh chống bằng ống polyme cốt sợi bê tông (FRP) để mở rộng bản cánh đã giảm được 15% lượng vật liệu sử dụng cho kết cấu phần trên và 50% trọng lượng cho kết cấu phần dưới so với các

giải pháp dầm hộp bê tông dự ứng lực truyền thống [3]. Hơn nữa, với kết cấu dầm và trụ thanh mảnh không chỉ góp phần tiết kiệm chi phí mà còn tăng tính thẩm mỹ cho công trình cầu. Bên cạnh đó, việc tối ưu hóa kích thước trụ tạo ra nhiều không gian hơn cho giao thông bên dưới cầu, đặc biệt là ở các khu vực đô thị. Mở rộng bản cánh bằng thanh chống xiên còn là giải pháp hiệu quả gia tăng khổ cầu theo từng giai đoạn đầu tư để đáp ứng lưu lượng giao thông tăng lên, ví dụ như cầu Kochertal (Đức) [4]. Cho đến nay, nhiều cầu dầm hộp có thanh chống xiên đã được xây dựng ở châu Âu, bao gồm các ví dụ đáng chú ý như cầu cạn Kochertal ở Đức, cầu cạn Rogerville ở Pháp và cầu cạn Piedrafita ở Tây Ban Nha [4-7].

Ở châu Á, Nhật Bản bắt đầu xây dựng các cầu dầm hộp sử dụng thanh chống vào đầu những năm 2000, chủ yếu là các cầu đường bộ dọc theo đường cao tốc New Tomei [1]. Năm 2009, cầu Incheon là cây cầu dầm hộp sử dụng thanh chống FRP đầu tiên ở

Hàn Quốc được đưa vào sử dụng [3]. Ở Việt Nam, cầu cạn Vành đai II Hà Nội hoàn thành vào năm 2023 là công trình cầu đầu tiên sử dụng thanh chống xiên để mở rộng bản cánh dầm hộp bê tông, đánh dấu một bước phát triển vượt bậc của loại kết cấu này.

Do có ứng xử phức tạp, dầm hộp thanh chống được áp dụng tương đối hạn chế, các nghiên cứu liên quan là chưa đầy đủ. Có thể thấy rằng, trong khi đã có nhiều nghiên cứu về ứng xử của cầu dầm hộp truyền thống [2, 8-17] thì số lượng nghiên cứu về cầu dầm hộp sử dụng thanh chống vẫn còn hạn chế [1, 3, 18-22]. Chỉ có một số thiết kế kết cấu phần trên của các dự án thực tế được giới thiệu trong các nghiên cứu trước đây như cầu cạn Uchimaki [22], Katsurashima [18] (Nhật Bản), cầu dẫn Incheon [3] (Hàn Quốc). Các thí nghiệm thực nghiệm về loại kết cấu này là hoàn toàn chưa đầy đủ. Chỉ có một nghiên cứu thực nghiệm về cầu dầm hộp với các thanh chống polyme cốt sợi bê tông (FRP) của cầu dẫn Incheon được công bố [3]. Việc thiếu các nghiên cứu thực hiện về ứng xử của cầu dầm hộp mở rộng bản cánh bằng thanh chống khiến cho việc áp dụng kết cấu này vào thực tế còn khó khăn.

Trước khi triển khai thi công thực tế dự án cầu cạn Vành đai II Hà Nội, một thí nghiệm thử tải với 3 thể tải đối với dầm mở rộng bản cánh bằng thanh chống thép dài 6 m với kích thước thực tế theo thiết kế được tiến hành nhằm nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của loại kết cấu này [23]. Để đánh giá lại một cách chính xác về sự làm việc của kết cấu dầm hộp mở rộng bản bằng thanh chống, một nghiên cứu quan trắc biến dạng - ứng suất của bản cánh mở rộng và thanh chống thép trong quá trình thi công kết hợp với thí nghiệm thử tải với 6 thể tải đối với phần bản cánh dầm mở rộng và thanh chống thép xiên cũng được tiến hành tại thực tế công trình cầu Vành đai II Hà Nội. Kết quả quan trắc và thử tải đã một lần nữa khẳng định về ứng xử, tính hiệu quả, tính an toàn của kết cấu này và khả năng ứng dụng rộng rãi đối với các dự án công trình cầu trong tương lai.

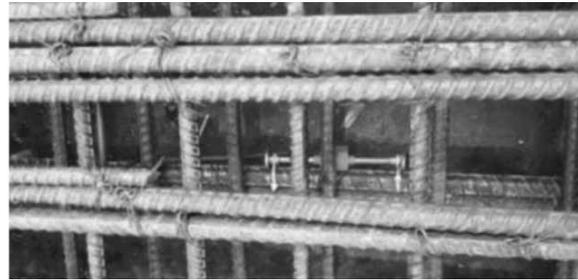
2. ĐỐI TƯỢNG VÀ CHƯƠNG TRÌNH NGHIÊN CỨU



Hình 1. Hình ảnh cầu cạn Vành đai II Hà Nội



Hình 2. Lắp đặt thiết bị lên thanh chống thép



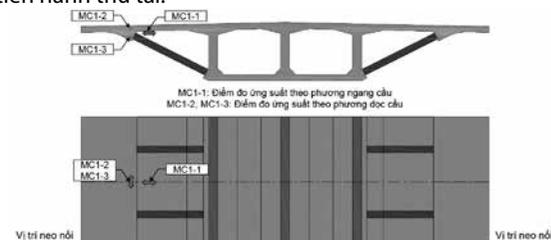
Hình 3. Lắp đặt thiết bị chôn trong bê tông



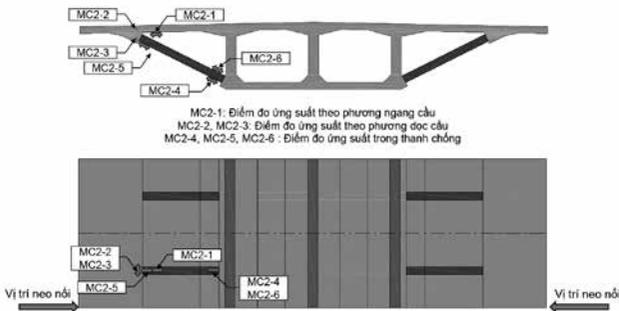
Hình 4. Thu thập số liệu

Dự án đầu tư xây dựng tuyến đường bộ dọc theo đường Vành đai II từ Vĩnh Tuy tới Ngã Tư Sở với công trình cầu cạn sử dụng dầm hộp bê tông cốt thép dự ứng lực mở rộng bản cánh bằng thanh chống thép xiên lần đầu tiên ở Việt Nam. Để nghiên cứu ứng xử của loại kết cấu dầm này, một nhịp P8-P9 của liên cầu 5 nhịp từ trụ P8 đến P13 được lựa chọn để lắp đặt thiết bị quan trắc và thử tải. Dầm hộp bê tông có cường độ $f_c = 45$ MPa với bề rộng 18,7 m, cao 2,5 m, chiều dài cánh hằng 5,58 m. Bề dày bản trên là 0,27 m, bề dày bản đáy thay đổi từ 0,27 m đến 0,55 m từ giữa nhịp đến vị trí trên đỉnh trụ. Các bản cánh mở rộng được hỗ trợ bởi các thanh chống thép đặt cách tim trụ 1,5 m và cách đều nhau 3 m theo chiều dài cầu. Thanh chống xiên sử dụng ống thép có giới hạn chảy $F_y = 345$ Mpa, đường kính 300 mm, dày 12 mm, liên kết với sườn dầm và bản mặt cầu thông qua đỉnh neo và liên kết bằng bu-lông thép cường độ cao không gỉ. Mỗi nhịp dầm được đúc tại chỗ trên đà giáo di động theo 2 giai đoạn: Giai đoạn 1 thi công toàn bộ lõi dầm hộp bê tông cốt thép; giai đoạn 2 thi công phần mở rộng cánh hằng và lắp đặt thanh chống sau khi bê tông lõi dầm đủ cường độ.

Để thu thập dữ liệu về biến dạng - ứng suất của bản cánh mở rộng và thanh chống thép, các thiết bị cảm biến dây rung được lắp đặt ở khu vực có nội lực lớn nhất được xác định thông qua các phân tích kết cấu bằng lý thuyết. Các cảm biến này được lắp đặt ở 2 mặt cắt dầm (1 mặt cắt tại vị trí giữa 2 thanh chống, 1 mặt cắt tại vị trí có thanh chống) gần vị trí tiết diện nối cáp dự ứng lực dọc cầu như thể hiện trong Hình 5 và Hình 6. Các dữ liệu biến dạng - ứng suất của dầm được đo tại nhiều thời điểm từ lúc bắt đầu lắp đặt cốt thép phần bản cánh mở rộng đến khi hoàn thiện bản mặt cầu và trước khi tiến hành thử tải.

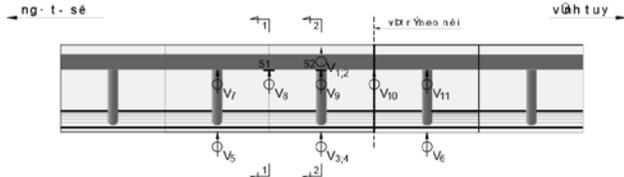


Hình 5. Sơ đồ bố trí thiết bị tại mặt cắt 1 - Mặt cắt giữa 2 thanh chống

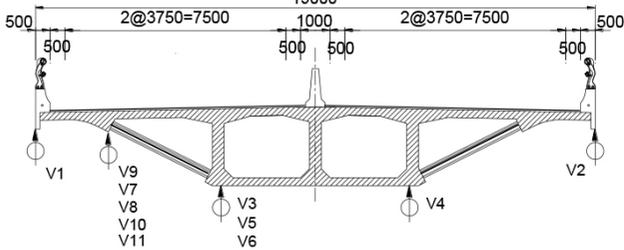


Hình 6. Sơ đồ bố trí thiết bị tại mặt cắt 2 - Mặt cắt trên thanh chống

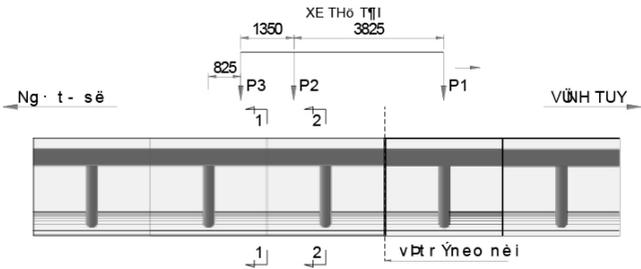
Sau 3,5 tháng kể từ lúc đổ bản cánh mở rộng, tiến hành thí nghiệm thử tải được tiến hành với với 3 kịch bản xếp tải theo phương dọc cầu nhằm gây ra các trường hợp bất lợi nhất đối với các mặt cắt nghiên cứu. Ứng với mỗi kịch bản xếp tải dọc cầu, 2 sơ đồ tải theo phương ngang cầu đã được bố trí tương ứng với mục đích tạo mô-men uốn dương lớn nhất và mô-men uốn âm lớn nhất theo phương ngang trong bản tương tự như trong thí nghiệm thử tải đốt dầm trước đó [23]. Như vậy, có tổng cộng 6 thể tải thí nghiệm (Hình 9 - Hình 13). Bố trí 11 thiết bị đo chuyển vị như trên Hình 7 và Hình 8.



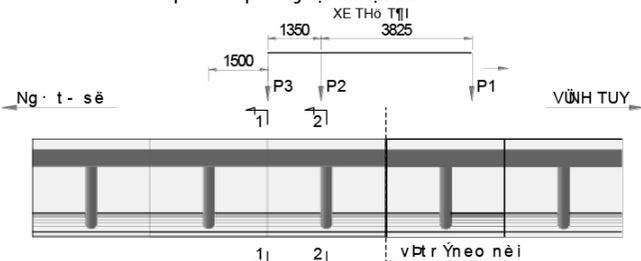
Hình 7. Bố trí thiết bị đo vòng theo phương dọc cầu



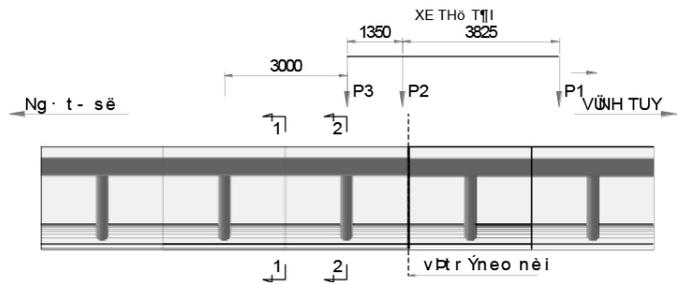
Hình 8. Bố trí thiết bị đo vòng trên mặt cắt ngang cầu



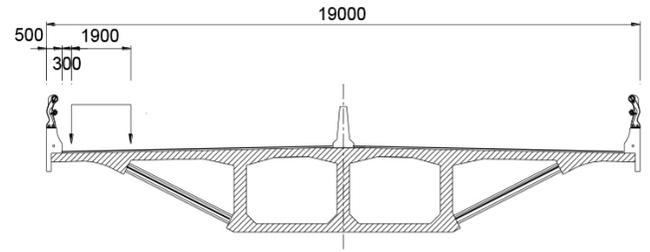
Hình 9. Sơ đồ xếp xe theo phương dọc cầu kịch bản 1



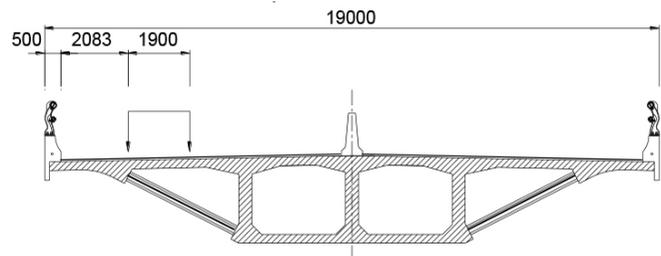
Hình 10. Sơ đồ xếp xe theo phương dọc cầu kịch bản 2



Hình 11. Sơ đồ xếp xe theo phương dọc cầu kịch bản 3



Hình 12. Sơ đồ xếp xe theo phương ngang cầu thể tải 1



Hình 13. Sơ đồ xếp xe theo phương ngang cầu thể tải 2



Hình 14. Xe thử tải

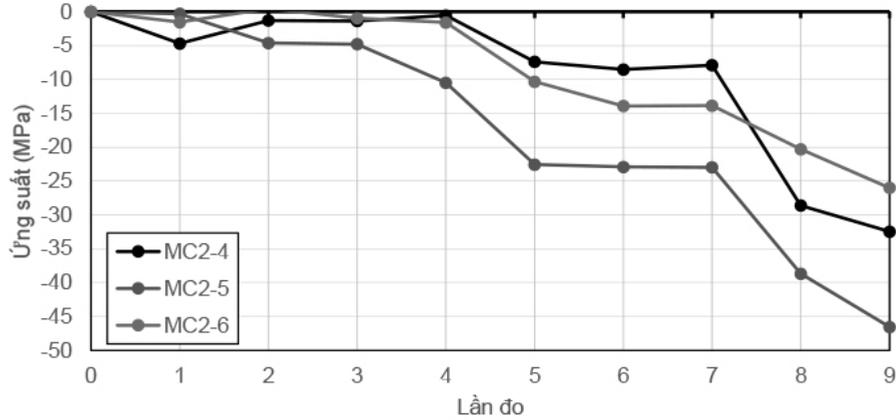


Hình 15. Lắp đặt thiết bị đo vòng

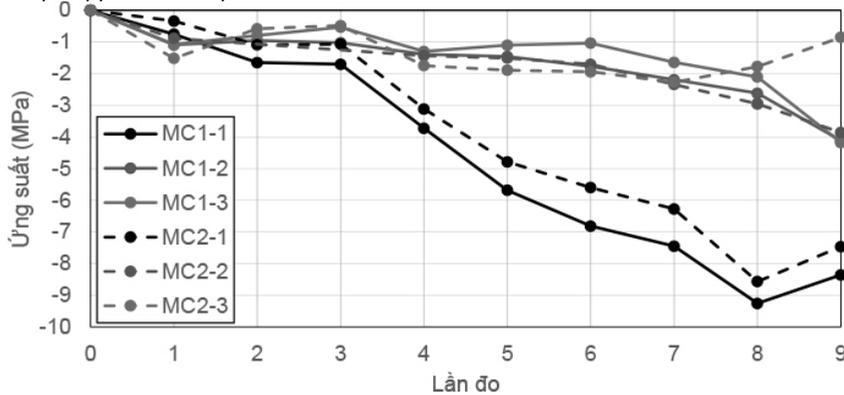
3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Phân tích dữ liệu quan trắc trong giai đoạn thi công

Kết quả quan trắc ứng suất của dầm cầu trong giai đoạn thi công được trình bày trên Hình 16, Hình 17. Bảng 1 trình bày tình trạng kết cấu dầm tương ứng từng lần đo.



Hình 16. Ứng suất trên thanh chống trong giai đoạn thi công



Hình 17. Ứng suất trong bản mặt cầu trong giai đoạn thi công

Để dàng thấy ứng suất trong bản cánh mở rộng và thanh chống đều là ứng suất nén và có xu hướng tăng dần trong suốt quá trình thi công. Tuy nhiên, giá trị ứng suất này là rất nhỏ khi so sánh với giá trị ứng suất cho phép của kết cấu trong quá trình thi công. Điều đó cho thấy, bản cánh mở rộng làm việc an toàn trong quá trình thi công dưới sự hỗ trợ của thanh chống tương tự như với dầm hộp bê tông cốt thép sử dụng vách đặc truyền thống. Trong suốt quá trình quan trắc, không có sự biến đổi đột ngột nào trong giá trị ứng suất của bản và thanh chống chứng tỏ không có xuất hiện vết nứt nào tại vị trí mối nối thi công bản hay sự xoay ở chân thanh chống trong quá trình thi công như xảy ra trong thí nghiệm đốt dầm trước đó [23].

Bảng 1. Thời điểm quan trắc và trạng thái kết cấu trong quá trình thi công

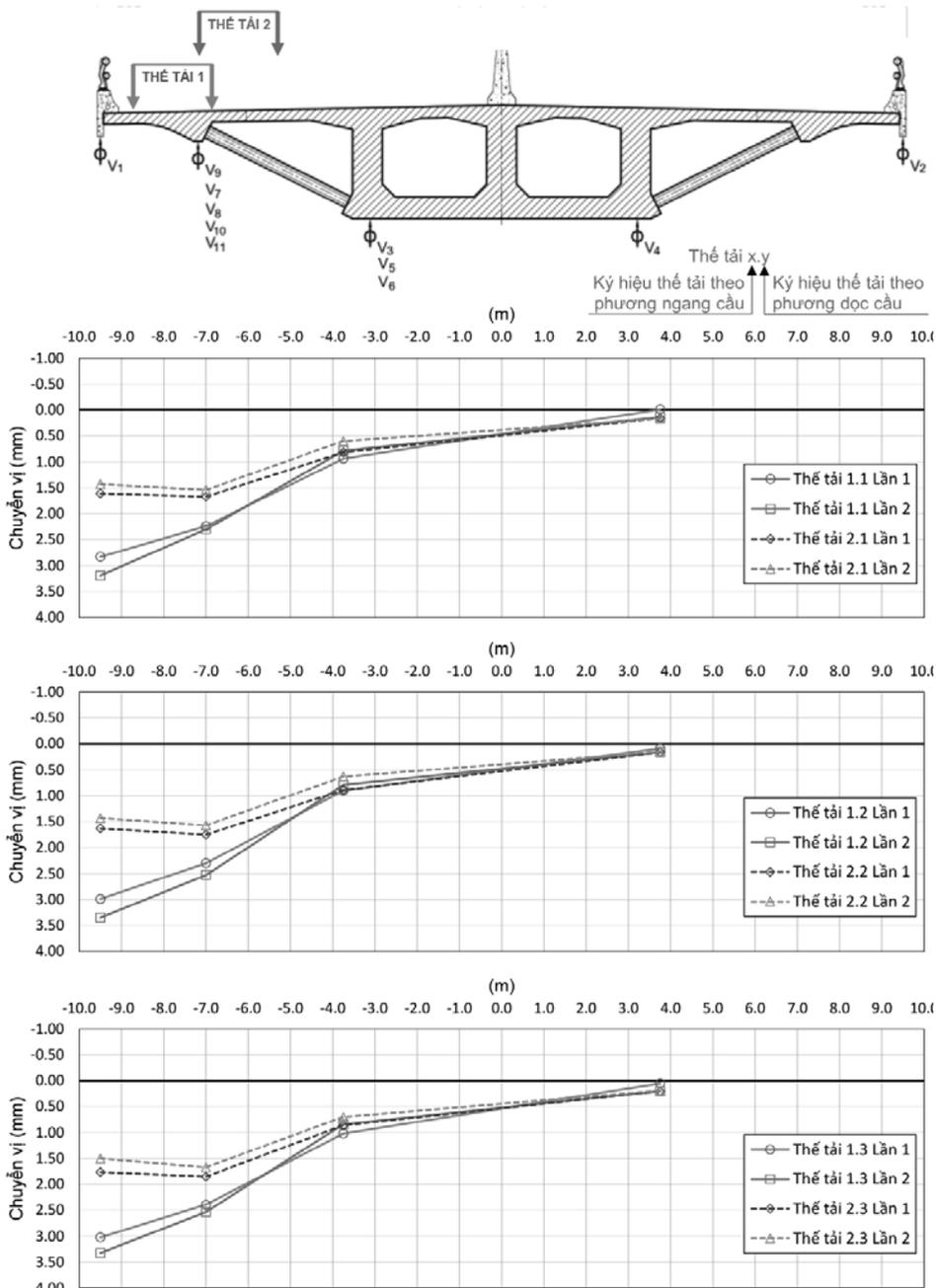
Lần đo	Thời gian đo (ngày)	Trạng thái kết cấu
0	0	Hoàn thành đổ bê tông bản cánh
1	1	Sau khi đổ bê tông bản cánh mở rộng được 24h
2	3	Sau khi đổ bê tông bản cánh mở rộng được 72h
3	4	Trước khi căng cáp dự ứng lực
4	5	Sau khi căng cáp dự ứng lực
5	7	Sau khi đổ bê tông 7 ngày
6	14	Sau khi đổ bê tông 14 ngày
7	28	Sau khi đổ bê tông 28 ngày
8	53	Hoàn thành thi công gỡ lan can, dải phân cách của dầm
9	62	Sau khi hoàn thành thi công lan can 9 ngày

3.2. Phân tích số liệu thử tải cầu

Hình 18 thể hiện chuyển vị thẳng đứng của các điểm trên mặt cắt ngang dầm ở 6 thể tải thực nghiệm. Cả 3 trường hợp xếp tải dọc cầu đều cho ra giá trị chuyển vị tại cùng điểm quan sát tương đối bằng nhau, điều đó chứng tỏ khoảng cách giữa các thanh chống là đảm bảo để duy trì hiệu quả ảnh hưởng của chúng lên bất kỳ tiết diện nào theo phương dọc cầu. Hình dạng và giá trị chuyển vị tại các vị trí đầu dầm và trên thanh chống đều thể hiện sự tương tự với các kết quả thu được trong thí nghiệm thử tải đốt dầm trước khi đưa vào xây dựng [23]. Giá trị chuyển vị lớn nhất của dầm ghi nhận được là 3,5 mm tại vị trí đầu cánh hẫng, nhỏ hơn một chút so với thí nghiệm đốt dầm là 4,31 mm. Sự chênh lệch này một phần do sự xuất hiện vết nứt tại vị trí mối nối thi công trong quá trình gia tải ở

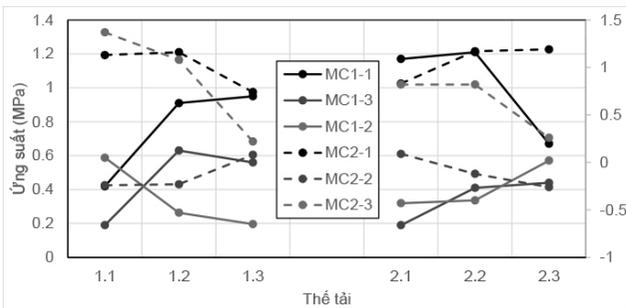
thí nghiệm đốt dầm.

Hình 19 và Hình 20 trình bày giá trị ứng suất của các cảm biến tại vị trí quan trắc trong bản và trên thanh chống trong quá trình thử tải. Tại tất cả các thể tải, giá trị kéo lớn nhất xảy ra trong bản do tải trọng thử gây nên là -1,21 MPa và giá trị ứng suất nén lớn nhất trong thanh chống là -29,86 MPa. Các giá trị này đều nhỏ hơn đáng kể so với giá trị ứng suất bất lợi nhất trong bản và thanh chống ở thí nghiệm thử tải đốt dầm trước đó (giá ứng suất lớn nhất trong bản và thanh chống của đốt dầm thí nghiệm tương ứng là 4,59 MPa và -51,46 MPa). Tương tự như sự khác biệt trong chuyển vị dầm, sự cải thiện này có thể được giải thích là do việc không xuất hiện vết nứt tại vị trí mối nối và chuyển vị xoay của chân thanh chống trong quá trình thử tải như thí nghiệm trước đó.

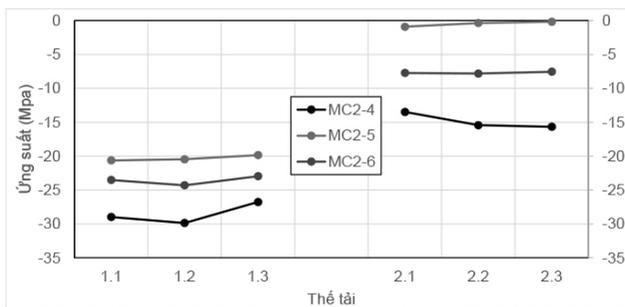


Hình 18. Chuyển vị thẳng đứng của các điểm trên mặt cắt ngang dầm

Ngoài ra, ứng suất tích lũy từ thời điểm thi công đến khi xếp tải trong bản dầm là ứng suất nén, trong đó giá trị ứng suất nén lớn nhất là 8,57 Mpa, nhỏ hơn đáng kể so với giới hạn ứng suất nén cho phép của bê tông dầm theo tiêu chuẩn thiết kế. Đối với thanh chống thép, ứng suất nén cộng dồn lớn nhất sau khi xếp tải là 64,39 MPa, trong khi giới hạn chảy của vật liệu cho thanh chống là 345 MPa. Do đó có thể khẳng định, bản mặt cầu và thanh chống thép có thể làm việc an toàn dưới tải trọng khai thác như thiết kế.



Hình 19. Ứng suất trong bản mặt cầu trong quá trình thử tải



Hình 20. Ứng suất trong thanh chống trong quá trình thử tải

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày nghiên cứu ứng xử thực tế của kết cấu dầm mở rộng bản cánh hẫng bằng thanh chống thép. Thông qua phân tích các số liệu quan trắc trong quá trình thi công và thí nghiệm thử tải với cầu cạn Vành đai II Hà Nội, kết hợp so sánh với một số nghiên cứu trước đây cũng như kết quả phân tích lý thuyết khi thiết kế công trình, có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Trong suốt quá trình thi công, ứng suất trong thanh chống và bản cánh tại vị trí nguy hiểm đều là ứng suất nén và các ứng suất này đều nhỏ hơn nhiều so với các giá trị ứng suất cho phép của vật liệu. Điều này chứng tỏ kết cấu đảm bảo khả năng chịu lực trong quá trình thi công.

- Kết quả thử tải đối với cánh dầm sau trong công trình thực tế hoàn toàn tương đồng với các giá trị thu được trong thí nghiệm một đốt dầm được thực hiện trước đó. Một số giá trị ứng suất và độ võng trong quá trình thử tải nhỏ hơn so với thí nghiệm đốt dầm trong nghiên cứu [23].

- Các giá trị ứng suất cộng dồn từ giai đoạn bắt đầu thi công cũng như độ võng trong quá trình thử tải đều nằm trong giới hạn cho phép của vật liệu cho thấy sự an toàn của kết cấu dầm hộp mở rộng bằng thanh chống khi đưa vào khai thác.

Lời cảm ơn: Tác giả bài báo chân thành cảm ơn TS Trần Việt Hùng, ThS Trịnh Phúc Thành và nhóm thực hiện thí nghiệm đã đóng

góp cho nghiên cứu; cảm ơn Ban Quản lý dự án đường Vành đai II của Tập đoàn Vingroup, Công ty TNHH Thương mại và Xây dựng Trung Chính đã cho phép và hỗ trợ để thực hiện các thí nghiệm hiện trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Saito, K., et al. (2016), Structural characteristics of box girder bridge with strutted wing slabs in 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, FIB 2016, AA Balkema Publishers.
- [2]. Choi, Y.C. and B.H. Oh (2013), Transverse modeling of concrete box-girder bridges for prediction of deck slab ultimate load capacity, Journal of Bridge Engineering, 18(12), pp.1373-1382.
- [3]. Park, J.-H., et al. (2009), Development of New PSC Box Girder Bridge with Concrete-filled FRP Struts in International Commemorative Symposium for the Incheon Bridge, Korea.
- [4]. Shushkewich, K.W. (2003), The strutted box widening method for prestressed concrete segmental bridges, PCI journal, 48(6), pp.64-81.
- [5]. Sigrist, V. and A. Baurich (2006), The Development of Form in Prestressed Concrete Bridge Design, in Proceedings of the International Conference on Bridges, Dubrovnik, Croatia.
- [6]. RICHARD, D., G. FRANTZ and P. JACQUET (1996), Le viaduc de Rogerville, Travaux, 719.
- [7]. The Piedrafita Viaducts, Lugo, Spain (1999), Available from: <https://www.cfsl.com/en/piedrafita-viaduct-lugo-spain/>.
- [8]. Weldon, B.D., et al. (2010), Feasibility analysis of ultra high performance concrete for prestressed concrete bridge applications, New Mexico. Dept. of Transportation, Research Bureau.
- [9]. Sennah, K.M. and J.B. Kennedy (2002), Literature review in analysis of box-girder bridges, Journal of Bridge Engineering, 7(2), pp.134-143.
- [10]. Mirambell, E. and A. Aguado (1990), Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges, Journal of Structural Engineering, 116(9), pp.2388-2409.
- [11]. Gupta, P., K. Singh and A. Mishra (2010), Parametric study on behaviour of box-girder bridges using finite element method.
- [12]. Kristek, V., et al. (2006), Box girder bridge deflections, Concrete international, 28(1), pp.55-63.
- [13]. Agarwal, P., P. Pal and P. Kumar Mehta (2022), Box-girder bridges-modelling and analysis, International Journal for Engineering Modelling, 35(1 Regular Issue), pp.19-42.
- [14]. Song, S.-T., Y. Chai and S.E. Hida (2003), Live-load distribution factors for concrete box-girder bridges, Journal of bridge engineering, 8(5), pp.273-280.
- [15]. Bouwkamp, J.G., A.C. Scordelis and S.T. Wasti (1974), Ultimate strength of concrete box girder bridge, Journal of the Structural Division, 100(1), pp.31-49.
- [16]. Soni, P. and D.P. Bokare, Review of Design Procedure for Box Girder Bridges, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology ISSN, pp.2321-9653.
- [17]. Ates, S. (2011), Numerical modelling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages, Applied Mathematical Modelling, 35(8), pp.3809-3820.
- [18]. Hagiwara, N., et al. (2005), Design and construction of the katurashima viaduct-prestressed concrete corrugated steel web box girder bridge with ribs and struts, Journal of prestressed concrete, 47(3), pp.25-34.
- [19]. Kimio, S. (2001), The Superstructure Design of the Uchimaki Viaduct, 第 11 回 PC シンポジウム, 年 11 月.
- [20]. Park, J., Y. Kim and I. Jang (2007), Practical Behavior of PSC Box Girder Bridge with FRP Concrete Struts, Computational Structural Engineering, 20(1), pp.71-77.
- [21]. Song, J.-J., et al. (2009), An Experimental Study on the Application of FRP Tube to the Struts of PSC Box Girder Bridge, Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection, 13(1), pp.179-185.
- [22]. Saito, K., A. Homma and T. Sato (5-8, June, 2006), A Time-dependent Analysis Applied to the Superstructure Design of the Uchimaki Viaduct, in Proceedings of fib'06 - The 2nd International Congress, Naples, Italy.
- [23]. TRAN, H.V., et al. (2024), Experimental study on transverse behavior of concrete box girder bridges with strutted wing slabs, Journal of Materials and Engineering Structures "JMES", 11(2), pp.99-116.