

NGHIÊN CỨU QUAN TRẮC ỨNG SUẤT - BIẾN DẠNG CẦU VÒM NHỊP LỚN TRONG QUÁ TRÌNH THI CÔNG SỬ DỤNG HỆ THỐNG CẢM BIẾN DÂY RUNG Ở VIỆT NAM

Trịnh Phúc Thành^a, Trần Việt Hùng^a, Cù Việt Hưng^{a,*}, Nguyễn Tiến Phát^a, Nguyễn Hùng Sơn^a,

Vũ Thị Hồng Nhung^b, Nguyễn Ngọc Tuấn^a

^aKhoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bCông ty TNHH Tư vấn Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 20/9/2021, Sửa xong 16/11/2021, Chấp nhận đăng 17/11/2021

Tóm tắt

Ngày nay, quan trắc sức khỏe công trình, đặc biệt là đối với cầu nhịp lớn, thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học và kỹ sư. Phép đo ứng suất - biến dạng là một trong những phép đo quan trọng nhất trong quan trắc công trình cầu. Cảm biến dây rung là thiết bị hiện đại có độ bền cao thích hợp cho việc thu thập dữ liệu ứng suất - biến dạng của kết cấu theo thời gian. Trong vài thập kỷ vừa qua, lĩnh vực xây dựng công trình cầu của Việt Nam có những bước tiến vượt bậc, nhiều cây cầu nhịp lớn được thực hiện bởi các nhà thầu trong nước, theo đó là nhu cầu quan trắc cho các công trình cầu này ngày càng cao. Bài báo này giới thiệu nghiên cứu ứng dụng thiết bị cảm biến dây rung quan trắc ứng suất – biến dạng theo thời gian trong suốt quá trình thi công hai công trình cầu vòm nhịp lớn có kết cấu và công nghệ thi công phức tạp: cầu Kỳ Cùng (Lạng Sơn) và cầu Hoàng Văn Thụ (Hải Phòng). Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu quả và tiềm năng lớn của việc ứng dụng thiết bị cảm biến dây rung trong quan trắc, theo dõi sức khỏe công trình cầu nhịp lớn với điều kiện đặc thù của một đất nước đang phát triển như Việt Nam.

Từ khoá: theo dõi sức khỏe công trình; quan trắc theo thời gian; thiết bị cảm biến dây rung; cầu vòm bê tông cốt thép; cầu vòm ống thép nhồi bê tông.

STRESS-STRAIN MONITORING OF LONG-SPAN ARCH BRIDGES DURING CONSTRUCTION USING VIBRATION WIRE STRAIN GAUGE SYSTEM IN VIETNAM

Abstract

Structural health monitoring, especially for long span bridges, has attracted much attention from engineers and researchers. Stress-strain measurement is one of the most important measurements in the bridge health monitoring. Vibrating wire strain gauge is a modern and durable device which suitable for measuring stress-strain of structures over time. In the past few decades, Vietnam's bridge construction has a great progress, many long-span bridges have been built by domestic contractors, which has led to the high demand of structure monitoring during construction. This paper introduces research and application of vibrating wire strain gauge to monitor stress-strain over time during construction of two long-span arch bridges with complex structure and construction technology: Ky Cung bridge (Lang Son) and Hoang Van Thu bridge (Hai Phong). The research results show the efficiency and great potential in the application of vibrating wire strain gauge in structural health monitoring of long-span bridges with the specific conditions of a developing country like Vietnam.

Keywords: structural health monitoring; long-term monitoring; vibrating wire strain gauge; RC arch bridge; CFST arch bridge.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(7V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7V)-02) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hungcv@nuce.edu.vn (Hưng, C. V.)

1. Giới thiệu

Quan trắc sức khỏe công trình (Structural Health Monitoring - SHM) là lĩnh vực nghiên cứu mới và đang ngày càng phát triển mạnh mẽ trên thế giới. Mục tiêu của SHM là đưa ra các chuẩn đoán về trạng thái của kết cấu, vật liệu trong suốt vòng đời của một công trình từ lúc thi công cho đến khi hết thời gian khai thác hoặc bị phá hủy [1]. Đặc biệt, đối với công trình cầu, việc theo dõi trạng thái làm việc của kết cấu để đánh giá, phát hiện kịp thời những hư hỏng là hết sức cần thiết để duy trì và nâng cao tuổi thọ của công trình. Thu thập dữ liệu là công tác đầu tiên và quan trọng trong quá trình SHM [2]. Với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học - kỹ thuật, rất nhiều loại thiết bị thu dữ liệu hiện đại ứng dụng công nghệ cao được nghiên cứu, ứng dụng và phát triển trong đó phải kể đến các thiết bị cảm biến. Có thể thấy rằng, trong các hệ thống quan trắc tự động nói chung và các bài toán quan trắc quá trình nói riêng thì vai trò của thiết bị cảm biến là vô cùng quan trọng bởi chúng có khả năng cảm nhận các tín hiệu trạng thái của kết cấu và kết nối với nhau tạo thành một hệ thống thu thập dữ liệu đồng bộ liên tục theo thời gian.

Các dữ liệu được thu thập phục vụ cho công tác đánh giá sức khỏe công trình rất đa dạng như dữ liệu về ứng suất - biến dạng, nhiệt độ, độ võng, gia tốc, mô đun đàn hồi vật liệu, cường độ vật liệu v.v... [3]. Trong đó, ứng suất - biến dạng trong điều kiện thông thường luôn là một trong những thông số quan trọng và được sử dụng rộng rãi nhất khi quan trắc công trình [4]. Có rất nhiều phương pháp được sử dụng để xác định ứng suất - biến dạng trong kết cấu. Tenzomet cơ học (Mechanical strain gauges - Extensometer) là thiết bị đo ứng suất - biến dạng đầu tiên được phát minh bởi Charles Huston vào năm 1879 [5], tuy nhiên nó có nhược điểm là chỉ đo biến dạng tĩnh và sai số bởi ảnh hưởng của yếu tố thời tiết và điều kiện lắp đặt tương đối lớn. Một loại cảm biến được sử dụng khá phổ biến để đo biến dạng của kết cấu là cảm biến điện trở (Electrical strain gauges - Metal foil strain gauge). Loại cảm biến này gồm một lá điện trở dạng lưới được gắn trực tiếp lên bề mặt kết cấu khi đo và dây dẫn được nối trực tiếp với bộ ghi dữ liệu (Data logger) [6], biến dạng của kết cấu được xác định thông qua sự thay đổi điện trở. Nhược điểm lớn của cảm biến điện trở là độ bền không cao, sai số lớn do ảnh hưởng của nhiệt độ, thời tiết, các tác nhân bên ngoài và công tác lắp đặt. Cảm biến quang điện (Photoelectric gauges) sử dụng một chùm sáng với hai lưới mịn và một máy dò quang điện (Photocell detector) để tạo ra dòng điện tỷ lệ thuận với biến dạng kết cấu [7]. Phương pháp này tương đối phức tạp và tốn kém. Cảm biến cáp quang (Fiber optic Strain gauges) xác định biến dạng của kết cấu thông qua đo thời gian phản hồi của ánh sáng trong cáp được gắn vào kết cấu. Đây là phương pháp có độ chính xác cao, phù hợp với quan trắc dài hạn, tuy nhiên chi phí rất cao và lắp đặt tương đối phức tạp [8, 9]. Cảm biến dây rung (Vibrating wire strain gauges - VWSG) làm việc dựa trên nguyên lý đo biến dạng thông qua số liệu về tần số của một sợi dây mảnh được kích thích chấn động. VWSG có ưu điểm tốc độ kiểm tra nhanh, kết quả đo ổn định và đáng tin cậy nên được sử dụng khá phổ biến trong lĩnh vực quan trắc sức khỏe công trình [10, 11].

Ở Việt Nam, cùng với sự phát triển của kinh tế - xã hội, xây dựng công trình cầu có những bước tiến vượt bậc, đạt được những thành tựu to lớn. Nhiều cây cầu nhịp lớn được thiết kế, thi công bởi các đơn vị tư vấn, nhà thầu và kỹ sư trong nước. Để đảm bảo tiến độ, các yêu cầu về kỹ thuật, an toàn khi thi công và trong suốt tuổi thọ của công trình, nghiên cứu ứng dụng các thiết bị quan trắc hiện đại để theo dõi, đánh giá trạng thái làm việc và sức khỏe công trình nhằm đảm bảo an toàn cho công trình, thiết bị và con người trong suốt quá trình thi công, sớm có cảnh báo về các phản ứng bất thường của kết cấu từ đó làm cơ sở đưa ra các biện pháp xử lý kịp thời là nhiệm vụ cấp bách, song hành cùng với sự phát triển của lĩnh vực xây dựng nói chung và xây dựng công trình cầu nói riêng. Tuy nhiên, hiện nay công tác quan trắc sức khỏe công trình cầu chưa được thực sự quan tâm và đầu tư thích đáng, mới chỉ có một vài công trình cầu lớn như Bãi Cháy, Nhật Tân, Trần Thị Lý, Rạch Miễu v.v... được thực

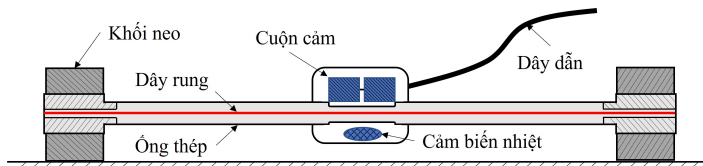
hiện quan trắc bởi các công ty nước ngoài với giá thành rất cao. Thêm nữa, khi kiểm định công trình cầu thì thường chỉ tiến hành tại từng thời điểm sử dụng hai phương pháp đo ứng suất - biến dạng cổ điển là sử dụng tenzomet cơ và cảm biến điện trở với rất nhiều hạn chế bởi nhược điểm của chúng.

Nghiên cứu ứng dụng VWSG thu dữ liệu ứng suất – biến dạng của kết cấu cầu là hướng đi đúng đắn, đặc biệt với điều kiện đặc thù về kinh tế - kỹ thuật của Việt Nam. VWSG có độ bền cao, xử lý được vấn đề sai số do nhiệt độ, phù hợp với quan trắc lâu dài theo thời gian. VWSG có thể dán bên ngoài bề mặt hoặc chôn trong lòng kết cấu phù hợp với quan trắc các bộ phận công trình nằm sâu trong đất, dưới nước hoặc những vị trí khó tiếp cận.

Bài báo này trình bày quá trình, kết quả nghiên cứu ứng dụng VWSG quan trắc ứng suất – biến dạng trong quá trình thi công cho hai công trình cầu vòm nhịp lớn có kết cấu và công nghệ thi công phức tạp là cầu vòm bê tông cốt thép (BTCT) Kỳ Cùng (Lạng Sơn) và cầu vòm ống thép nhồi bê tông (Concrete Filled Steel Tubular – CFST) Hoàng Văn Thụ (Hải Phòng). Kết quả nghiên cứu chứng minh độ tin cậy và hiệu quả cao của VWSG trong quan trắc ứng suất – biến dạng của kết cấu theo thời gian, mở ra hướng đi và tiềm năng lớn cho việc ứng dụng thiết bị này để theo dõi sức khỏe của công trình cầu nói riêng, công trình xây dựng nói chung và khả năng làm chủ công nghệ của kỹ sư Việt Nam.

2. Cấu tạo và nguyên lý làm việc của cảm biến dây rung

VWSG được giới thiệu lần đầu tiên trên thế giới vào năm 1936 bởi Maihak [12–14]. Sau đó, với ưu điểm nổi bật, VWSG dần trở thành loại cảm biến được ứng dụng rộng rãi để đo lực, ứng suất, nhiệt độ trong kết cấu, áp lực đất, áp lực nước, v.v... cho các công trình xây dựng phục vụ quan trắc sức khỏe công trình theo thời gian. Hình 1 thể hiện cấu tạo điển hình của một thiết bị VWSG, bao gồm: một hoặc hai nam châm điện; một sợi dây rung bằng thép được bảo vệ bên trong ống thép không gỉ; hai đầu cảm biến có hai khối neo bằng thép để đảm bảo sợi dây rung bên trong luôn được căng và dao động tự do, đồng thời là điểm neo để gắn thiết bị vào kết cấu. Khi kết nối cảm biến với thiết bị đọc dữ liệu, dây rung được kích thích bởi một cuộn nam châm điện và dao động, ngay lúc đó giá trị tần số dao động được ghi lại bởi chính cuộn nam châm đó hoặc một cuộn khác (nếu có). Ngoài ra, thiết bị có thể được tích hợp thêm một nhiệt kế điện tử nhằm xác định nhiệt độ kết cấu tại thời điểm đo.



Hình 1. Cấu tạo điển hình của cảm biến dây rung thông minh

Khi kết cấu cần quan trắc bị biến dạng làm thay đổi khoảng cách giữa hai khối neo dẫn đến chiều dài dây rung cũng bị thay đổi theo. Dưới tác dụng của dòng điện khi nối cảm biến với nguồn, tần số cộng hưởng của dây rung sau khi thay đổi trạng thái sẽ được xác định thông qua một cảm biến điện tử. Sau đó, tín hiệu điện thu từ cảm biến sẽ được truyền tới thiết bị điều khiển để khuếch đại và xử lý thành tín hiệu số và hiển thị trên thiết bị đọc dữ liệu. Tần số đo được sẽ được dùng để xác định giá trị biến dạng, phụ thuộc vào chiều dài dây, trọng lượng riêng dây và mô đun đàn hồi của dây theo công thức (1):

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\epsilon E}{\mu}} \quad (1)$$

trong đó f là tần số dao động của sợi dây rung (Hz); L là chiều dài sợi dây rung (m); μ là khối lượng riêng của dây rung (kg/m^3); E là mô đun đàn hồi của sợi dây rung và ε là biến dạng tỷ đối của sợi dây rung.

Giá trị biến dạng của dây rung tương ứng với biến dạng tại vị trí cần đo của kết cấu và được xác định theo tần số dao động như sau:

$$\Delta\varepsilon = K(f^2 - f_0^2) \quad (2)$$

trong đó $\Delta\varepsilon$ là biến dạng tỷ đối của dây so với ban đầu; $K = \frac{4\mu L^2}{E}$ là hệ số gauges của VWSG; f là tần số dao động của dây tại thời điểm đo (Hz); f_0 là tần số dao động ban đầu của dây (Hz).

Khi làm việc thực tế, nhiệt độ của môi trường là một yếu tố chính ảnh hưởng đến giá trị biến dạng thông qua hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu [15–17]. Nếu vật liệu của kết cấu và thiết bị đo (sợi dây rung) có cùng giá trị giãn nở nhiệt thì biến dạng trong kết cấu được tính tương tự như trong sợi dây theo công thức (2). Tuy nhiên, nếu hệ số giãn nở nhiệt của thiết bị đo và kết cấu là khác nhau thì giá trị biến dạng trong kết cấu phải hiệu chỉnh theo công thức (3) dưới đây:

$$\varepsilon_s^{\text{mean}} = \varepsilon_s^{\text{load}} + (T_1 - T_0)(\alpha_s - \alpha_w) \quad (3)$$

trong đó $\varepsilon_s^{\text{mean}}$ là biến dạng thực tế của kết cấu; $\varepsilon_s^{\text{load}}$ là biến dạng đo được của kết cấu từ thiết bị đo; T_1 là nhiệt độ tại thời điểm đo; T_0 là nhiệt độ tại thời điểm ban đầu; α_s là hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu kết cấu; α_w là hệ số giãn nở nhiệt của dây rung.

3. Thiết lập hệ thống cảm biến dây rung quan trắc kết cấu công trình cầu trong giai đoạn thi công

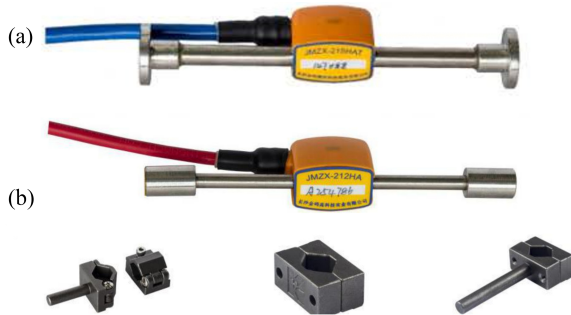
Một hệ thống thiết bị cảm biến đảm bảo đo ứng suất – biến dạng liên tục, lâu dài theo thời gian của kết cấu tại nhiều vị trí cần được nghiên cứu nhằm giúp người kiểm tra nhanh chóng phát hiện và kịp thời đưa cảnh báo nếu xuất hiện sự thay đổi bất lợi về ứng suất – biến dạng của kết cấu so với giá trị theo thiết kế và tiêu chuẩn cho phép. Xác định vị trí lắp đặt thiết bị cảm biến dây rung dựa trên vai trò, tầm quan trọng của kết cấu cần đo, vị trí mặt cắt được dự báo sẽ phát sinh nội lực lớn. Thông thường các vị trí lắp đặt cảm biến này được thống nhất giữa các đơn vị liên quan dựa trên hồ sơ thiết kế, biện pháp thi công nhằm đảm bảo vừa tiết kiệm chi phí vừa đủ số liệu để đánh giá trạng thái làm việc của kết cấu thực tế.

Hệ thống VWSG được thiết lập phải đáp ứng được các yêu cầu sau: (1) Nhiều cảm biến được kết nối đồng bộ có thể đồng thời thu được giá trị ứng suất - biến dạng tại nhiều vị trí của kết cấu công trình; (2) Các giá trị ứng suất – biến dạng thu được đảm bảo độ chính xác và liên tục; (3) Thiết bị cảm biến phải có độ bền cao, không thấm nước, đảm bảo khả năng khai thác lâu dài.

Dựa trên cách lắp đặt, cảm biến dây rung gồm 2 loại: cảm biến gắn bên trong kết cấu (Hình 2(a)) và cảm biến gắn bên ngoài kết cấu (Hình 2(b)). Cần lưu ý rằng với cảm biến chôn trong bê tông, kết cấu cần quan trắc ngâm trong nước hoặc nằm trong đất thì phải lựa chọn loại có khả năng chống được nước với áp lực cao. Việc lắp đặt thiết bị cảm biến tương đối đơn giản, tuy nhiên cần lưu ý một số vấn đề sau: (1) Hai đầu cảm biến phải được gắn chắc chắn, phần giữa cảm biến vị trí ống bảo vệ dây rung phải đảm bảo trống không đối với cảm biến gắn ngoài và trước khi đổ bê tông đối với cảm biến chôn trong kết cấu; (2) Các dây dẫn phải được dẫn đến vị trí thuận lợi để kết nối với thiết bị đọc dữ liệu, tránh các tác động có thể làm hư hỏng trong suốt quá trình thi công.

Việc đọc và lưu trữ số liệu quan trắc được thực hiện bởi data logger kết nối với thiết bị cảm biến thông qua dây dẫn. Tùy thuộc số lượng cảm biến và yêu cầu lưu trữ cũng như kinh phí quan trắc, có

thể bố trí một hay nhiều data logger. Hình 3 thể hiện một data logger đơn giản. Data logger này bao gồm: bộ xử lý trung tâm (Central Processing Unit – CPU); bộ nhớ giúp số liệu được lưu trữ; màn hình hiển thị trực tiếp các giá trị số liệu đo được và đơn vị đo; có thể tự động xác định từng cảm biến. Khi tiến hành đo, kết quả biến dạng sẽ được tự động tính toán dựa trên các thông số của thiết bị đo đã được cài đặt từ ban đầu.

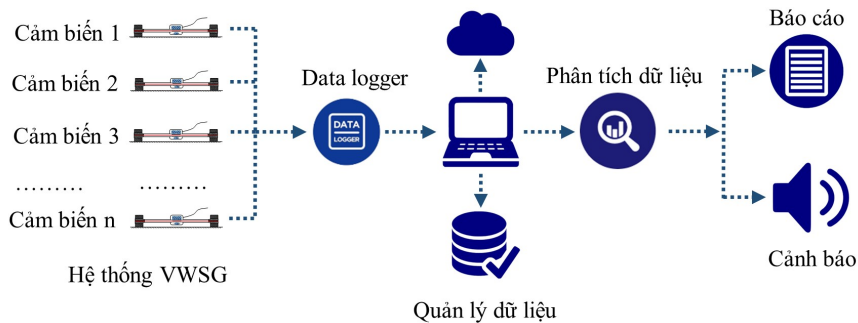


Hình 2. Cảm biến dây rung thông minh: (a) - Cảm biến gắn bên trong kết cấu; (b) - Cảm biến gắn bên ngoài bề mặt kết cấu



Hình 3. Thiết bị đọc dữ liệu (Data logger)

Dữ liệu cũng có thể truyền từ data logger về trung tâm quan trắc thông qua kết nối không dây. Sau khi xử lý dữ liệu, xuất kết quả thành các báo cáo hoặc đưa ra các cảnh báo nếu phát hiện các vấn đề bất thường về trạng thái làm việc của kết cấu. Hình 4 thể hiện sơ đồ hệ thống quan trắc ứng suất – biến dạng sử dụng cảm biến dây rung.



Hình 4. Sơ đồ hệ thống quan trắc ứng suất – biến dạng sử dụng cảm biến dây rung

4. Nghiên cứu ứng dụng VWSG quan trắc ứng suất - biến dạng cầu vòm nhịp lớn trong quá trình thi công

4.1. Đối tượng nghiên cứu

Để nghiên cứu hiệu quả của thiết bị cảm biến dây rung trong việc quan trắc ứng suất – biến dạng kết cấu công trình cầu trong quá trình thi công, nhóm nghiên cứu đã thiết lập, lắp đặt hệ thống thiết bị VWSG và quan trắc ứng suất – biến dạng cho các kết cấu chính của hai công trình cầu vòm nhịp lớn tiêu biểu, có kết cấu và công nghệ thi công phức tạp ở Việt Nam, đó là cầu vòm BTCT Kỳ Cùng (Lạng Sơn) và cầu chính vòm CFST của cầu Hoàng Văn Thụ (Hải Phòng).



Hình 5. Cầu Kỳ Cùng (Lạng Sơn)



Hình 6. Cầu Hoàng Văn Thụ (Hải Phòng)

Cầu Kỳ Cùng (Hình 5) nằm tại trung tâm thành phố Lạng Sơn, bắc qua sông Kỳ Cùng là cây cầu vòm BTCT đường xe chạy trên với nhịp khẩu độ 102,2 m, bề rộng cầu 21 m [18]. Cầu Hoàng Văn Thụ (Hình 6) bắc qua sông Cẩm, nối liền phường Minh Khai với huyện Thủy Nguyên, thành phố Hải Phòng [19]. Cầu chính cầu Hoàng Văn Thụ được thiết kế dạng kết cấu cầu vòm CFST đường xe chạy giữa với nhịp chính 200 m, hai nhịp biên mỗi nhịp 45 m sử dụng các bó cáp dự ứng lực làm giằng dọc. Bề rộng cầu 33,5 m cho bốn làn xe cơ giới và hai làn xe thô sơ. Kết cấu vòm chính gồm hai sườn vòm ống CFST liên kết với nhau bởi hệ giằng ngang dạng khung phía trên và dầm ngang đầu cầu. Kết cấu vòm biên gồm hai sườn BTCT với mặt cắt ngang hình chữ nhật 4 m × 2 m.

4.2. Thiết lập sơ đồ bố trí thiết bị và chu kỳ quan trắc

Với hai đối tượng nghiên cứu là hai công trình cầu vòm có kết cấu khác nhau, nên nhóm nghiên cứu đã sử dụng VWSG chôn trong bê tông cho cầu vòm BTCT Kỳ Cùng và VWSG gắn ngoài bề mặt kết cấu cho cầu vòm CFST Hoàng Văn Thụ. Các thông số kỹ thuật của VWSG sử dụng trong nghiên cứu này được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của cảm biến dây rung

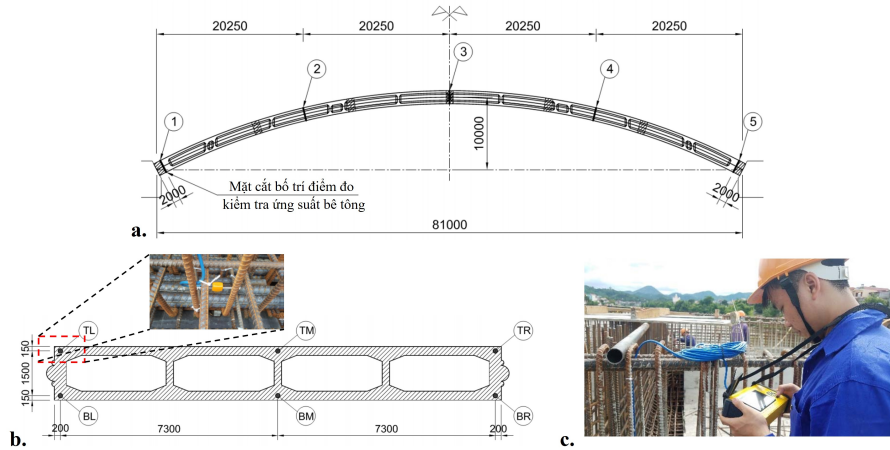
Thông số	Giá trị
Phạm vi ứng biến	$\pm 1500 \mu\epsilon$
Độ chính xác ứng biến	0,5% F.S
Độ phân giải ứng biến	0,03% F.S. (1 $\mu\epsilon$)
Phạm vi đo nhiệt độ	-20 °C ~ + 110 °C
Độ chính xác đo nhiệt độ	$\pm 0,5$ °C
Hệ số giãn nở nhiệt của dây	12,2 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$

Loại thiết bị cảm biến dây rung này được nhóm nghiên cứu kiểm tra về độ chính xác và tin cậy thông qua tiến hành một số thí nghiệm trong phòng với các kết cấu đơn giản có vật liệu đồng nhất, điều kiện lý tưởng.

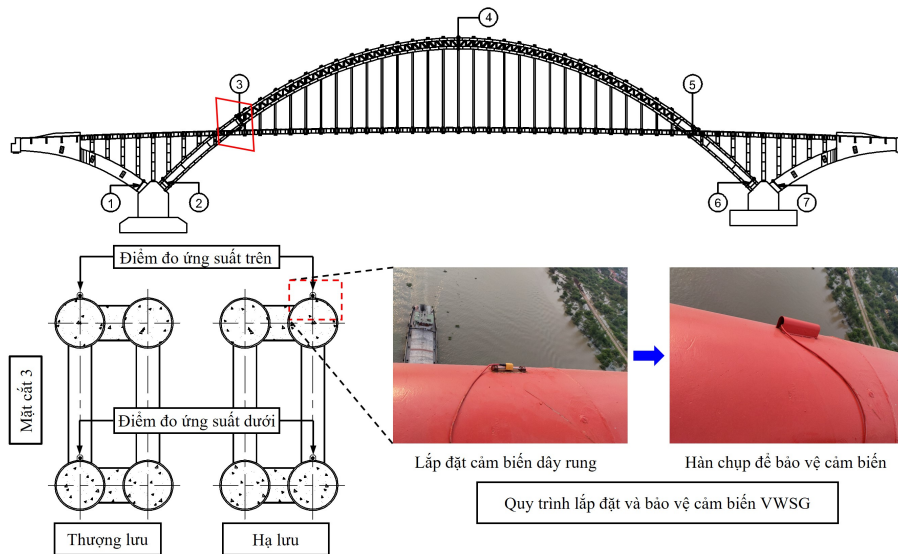
Vành vòm là kết cấu quan trọng nhất trong công trình cầu vòm. Trong suốt quá trình thi công, quan trắc chuyển vị, ứng suất – biến dạng của vành vòm là hết sức cần thiết nhằm đảm bảo hình dạng và khả năng chịu lực của kết cấu nằm trong phạm vi an toàn. Để quan trắc ứng suất – biến dạng, một loạt các VWSG được lắp đặt tại các vị trí, mặt cắt quan trọng của vành vòm.

Đối với cầu Kỳ Cùng, 30 VWSG loại chôn trong bê tông được lắp đặt tại 5 vị trí mặt cắt dọc theo chiều dài vòm như Hình 7 lần lượt theo trình tự thi công. Trong quá trình thi công cầu Kỳ Cùng, ứng

suất vành vòm sẽ được thu thập và xử lý với 3 chu kỳ chính: Chu kỳ 1 - Từ khi đổ bê tông đến khi tháo đà giáo ván khuôn; Chu kỳ 2 - Sau khi tháo đà giáo đến sau khi thi công xong dầm đỉnh vòm và dầm hộp bê tông dự ứng lực; Chu kỳ 3 - Sau khi hoàn thiện cầu.



Hình 7. Sơ đồ, vị trí lắp đặt VWSG cho cầu Kỳ Cùng



Hình 8. Sơ đồ, vị trí lắp đặt VWSG cho vành vòm cầu Hoàng Văn Thụ

Đối với cầu Hoàng Văn Thụ, sau khi kết thúc thi công nhồi bê tông vành vòm, 15 VWSG loại gắn ngoài được lắp đặt tại các mặt cắt bất lợi như thể hiện trên Hình 8. Mặt cắt 1 và 2 bố trí mỗi mặt cắt 1 VWSG tại thố trên của vành vòm thượng lưu và 1 cảm biến tại thố trên của vành vòm hạ lưu. Mặt cắt 3 và 4 mỗi vành vòm thượng lưu và hạ lưu bố trí 2 VWSG tại mặt trên hai ống thép trên và 2 VWSG tại mặt trên hai ống thép dưới. Mặt cắt 5 bố trí 1 VWSG tại thố dưới của vành vòm thượng lưu. Mặt cắt 6 và 7 bố trí mỗi mặt cắt 1 VWSG tại thố trên của vành vòm hạ lưu. Dữ liệu ứng suất – biến dạng được thu thập và xử lý với 5 chu kỳ: Chu kỳ 1 - Sau khi lắp tấm bản mặt cầu BTCT đợt 1; Chu kỳ 2 - Sau khi lắp tấm bản mặt cầu BTCT đợt 2; Chu kỳ 3 - Sau khi lắp tấm bản mặt cầu BTCT đợt 3; Chu kỳ 4 - Sau khi lắp tấm bản mặt cầu BTCT đợt 4; Chu kỳ 5 - Sau khi lắp tấm bản bê tông đợt 5 (hoàn thành thi công bản mặt cầu).

4.3. Kết quả quan trắc ứng suất – biến dạng

Với cầu Kỳ Cùng, tính từ thời điểm lắp đặt VWSG đầu tiên đến khi kết thúc công tác quan trắc ứng suất – biến dạng là khoảng 7 tháng, với cầu Hoàng Văn Thụ là 8 tháng. Tại thời điểm dừng quan trắc, tất cả các VWSG vẫn hoạt động bình thường. Mặc dù trải qua thời gian quan trắc tương đối dài với rất nhiều tác nhân về thời tiết, công tác thi công ảnh hưởng nhưng các thiết bị VWSG vẫn chứng tỏ được độ bền và ổn định. Đặc biệt, trong quá trình thi công cầu Kỳ Cùng, do gặp lũ, phần lớn vành vòm chìm trong nước, các thiết bị chôn trong bê tông vòm cũng ngâm trong nước trong thời gian dài, tuy nhiên tất cả các thiết bị đều hoạt động ở trạng thái ổn định.

Bảng 2 thể hiện kết quả quan trắc ứng suất vành vòm cầu Kỳ Cùng với 3 chu kỳ đo. Bảng 3 thể hiện kết quả quan trắc ứng suất vành vòm cầu Hoàng Văn Thụ với 5 chu kỳ đo. Trong hai bảng này, giá trị dương (+) thể hiện ứng suất kéo và giá trị âm (–) thể hiện ứng suất nén.

Bảng 2. Giá trị ứng suất vành vòm quan trắc được của cầu Kỳ Cùng (MPa)

Chu kỳ	Mặt cắt 1		Mặt cắt 2		Mặt cắt 3		Mặt cắt 4		Mặt cắt 5	
	Biên trên	Biên dưới	Biên trên	Biên dưới	Biên trên	Biên dưới	Biên trên	Biên dưới	Biên trên	Biên dưới
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	–1,23	–2,30	–2,70	–2,67	–2,33	–1,67	–2,43	–2,27	–1,07	–2,47
2	0,45	–7,60	–5,40	–5,86	–6,30	–3,47	–5,23	–5,10	0,20	–7,40
3	1,23	–10,10	–5,87	–5,97	–6,80	–2,77	–5,60	–5,13	0,80	–8,90

Từ Bảng 2 có thể thấy, tại chân và đỉnh vòm cầu Kỳ Cùng có sự chênh lệch lớn giữa ứng suất biên trên và biên dưới, chứng tỏ tại các mặt cắt này xuất hiện mô men tương đối lớn. Tại các mặt cắt 1/4 nhịp vòm, sự chênh lệch ứng suất giữa biên trên và biên dưới không nhiều nghĩa là mômen tại các vị trí này rất nhỏ. Ứng suất nén của bê tông lớn nhất đo được ở chân vòm khoảng –10,10 MPa và ở đỉnh vòm là khoảng –6,80 MPa.

Đối cầu Hoàng Văn Thụ, do các thiết bị được lắp đặt sau khi đã lắp dựng xong vành vòm và hoàn thành công tác bơm nhồi bê tông vào ống thép của vành vòm nên các giá trị thể hiện trong Bảng 3 là ứng suất của thép vòm tại vị trí lắp đặt thiết bị do các tải trọng tác dụng kể từ thời điểm lắp đặt thiết bị như tĩnh tải hệ dầm cầu, lan can, lớp phủ v.v. . . Tại mặt cắt đỉnh vòm, giá trị ứng suất của thép đo được lớn nhất khoảng –48,28 MPa tại mặt trên ống thép dưới của vành vòm thượng lưu.

Bảng 3. Giá trị ứng suất vành vòm quan trắc được của cầu Hoàng Văn Thụ (MPa)

Chu kỳ	Mặt cắt 1		Mặt cắt 2		Mặt cắt 3				Mặt cắt 4				Mặt cắt 5	Mặt cắt 6	Mặt cắt 7
	TL-TOP	HL-TOP	TL-TOP	HL-TOP	TL-TOP	HL-TOP	TL-BOT	HL-TOT	TL-TOP	HL-TOP	TL-BOT	HL-BOT	TL-BOT	HL-TOP	HL-TOP
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	–4,80	–5,51	–8,28	–6,98	–8,45	–15,86	–7,86	–7,86	–15,10	–24,04	–31,17	–26,11	–7,86	–2,28	–5,41
2	–7,52	–10,75	–10,98	–8,32	–10,47	–19,00	–12,84	–12,75	–19,36	–21,87	–34,12	–30,37	–8,40	–15,79	–7,77
3	–9,16	–9,75	–16,65	–12,17	–9,04	–18,39	–17,16	–14,87	–24,85	–30,97	–34,55	–34,45	–7,26	–18,71	–6,07
4	–10,77	–16,91	–24,59	–21,81	–14,33	–21,65	–25,25	–22,35	–43,85	–45,32	–44,02	–34,46	–14,26	–40,40	–10,99
5	–12,95	–19,88	–22,17	–19,35	–21,05	–26,78	–27,49	–22,35	–43,60	–38,96	–48,28	–38,13	–19,05	–47,03	–9,35

Ghi chú: TL - Thượng lưu; HL - Hạ lưu; TOP – mặt trên ống vòm trên; BOT – mặt trên ống vòm dưới



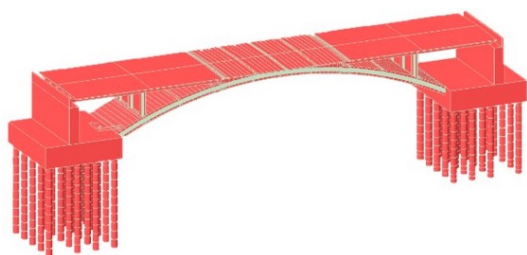
Hình 9. Hình ảnh cầu Kỳ Cùng khi lũ về



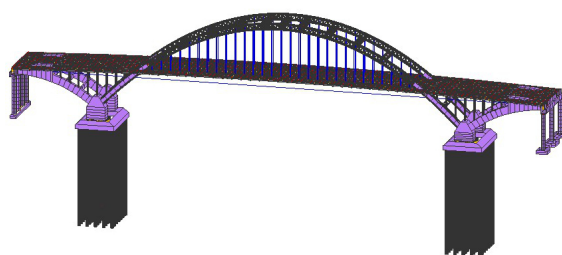
Hình 10. VWSG cho cầu Hoàng Văn Thụ

5. So sánh ứng suất vành vòm giữa kết quả phân tích kết cấu bằng phần tử hữu hạn với kết quả quan trắc thực tế

Độ tin cậy các giá trị kết quả đo được kiểm tra thông qua so sánh ứng suất vành vòm từ thực tế đo với phân tích kết cấu cầu sử dụng mô phỏng bằng phần tử hữu hạn theo giai đoạn thi công thực tế. Hai phần mềm phân tích kết cấu sử dụng trong nghiên cứu này là Midas Civil cho cầu Kỳ Cùng và RM Bridge cho cầu chính cầu Hoàng Văn Thụ. Các đặc trưng vật liệu, điều kiện biên khai báo trong mô hình được lấy theo hồ sơ thiết kế bản vẽ thi công [18, 19]. Mô hình phân tích kết cấu cầu Kỳ Cùng được thể hiện trên Hình 11 và cầu chính cầu Hoàng Văn Thụ được thể hiện trên Hình 12.



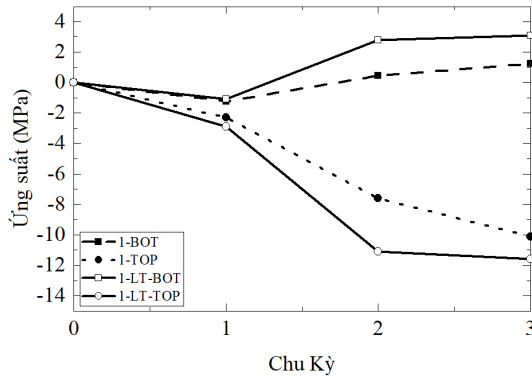
Hình 11. Mô hình phần tử hữu hạn cầu vòm BTCT Kỳ Cùng bằng phần mềm Midas Civil



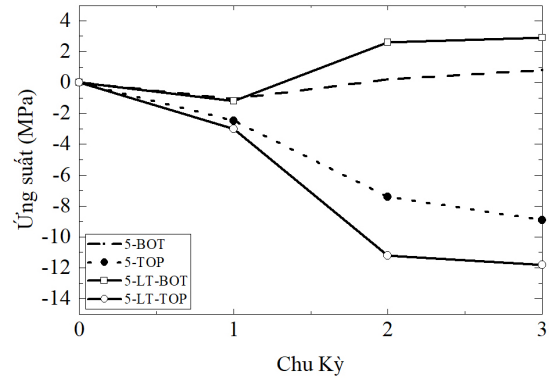
Hình 12. Mô hình phần tử hữu hạn cầu chính cầu vòm CFST Hoàng Văn Thụ bằng phần mềm RM Bridge

Kết quả phân tích kết cấu theo lý thuyết và kết quả quan trắc thực tế được so sánh và thể hiện trên các Hình 13 cho cầu Kỳ Cùng và Hình 14 cho cầu Hoàng Văn Thụ. Trong các hình này, kí hiệu LT là thể hiện giá trị lý thuyết, TOP là thớ trên và BOT là thớ dưới.

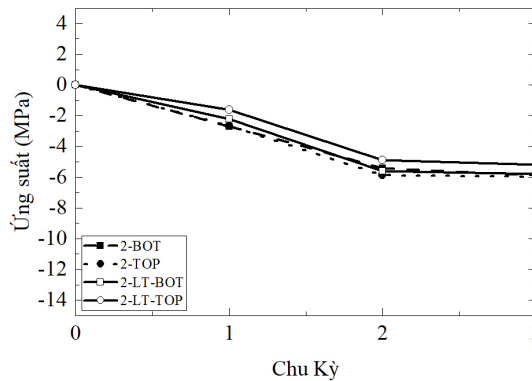
Hình 13 cho thấy rằng giá trị ứng suất của kết quả đo ứng suất – biến dạng cầu Kỳ Cùng tương đồng về hình dạng với giá trị theo phân tích lý thuyết. Các mặt cắt đối xứng có kết quả đo khá tương đồng, có thể thấy rõ điều này khi so sánh biểu đồ kết quả đo ứng suất của mặt cắt 1 với mặt cắt 5, của mặt cắt 2 với mặt cắt 4. Sau khi hoàn thành cầu, tại mặt cắt chân vòm 2 và 5, thớ trên chịu ứng suất kéo, thớ dưới là nén chứng tỏ chân vòm xuất hiện mômen âm. Tại mặt cắt 2 và 4 (1/4 nhịp vòm), tất cả các kết quả đo được từ các cảm biến đều cho giá trị biến dạng nén và chênh lệch nhau không lớn, điều này chứng tỏ mômen tại hai mặt cắt này rất nhỏ. Tại mặt cắt đỉnh vòm (mặt cắt 3), tất cả các kết quả đo được từ các cảm biến đều cho giá trị biến dạng nén, ứng suất nén thớ trên lớn hơn ứng suất nén thớ dưới chứng tỏ tại mặt cắt đỉnh vòm có xuất hiện mômen dương. Có thể thấy rằng từ kết quả đo ứng suất – biến dạng cho thấy ứng xử thực tế của vành vòm phù hợp với ứng xử lý thuyết của kết cấu.



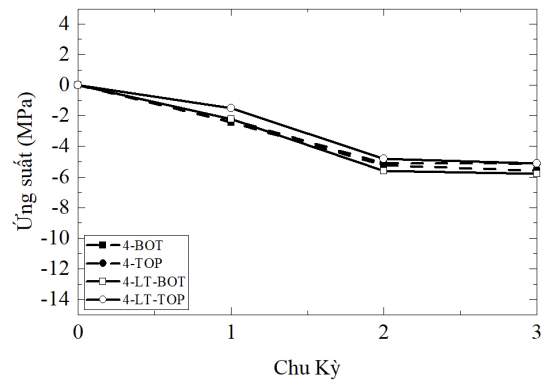
(a) Mặt cắt 1



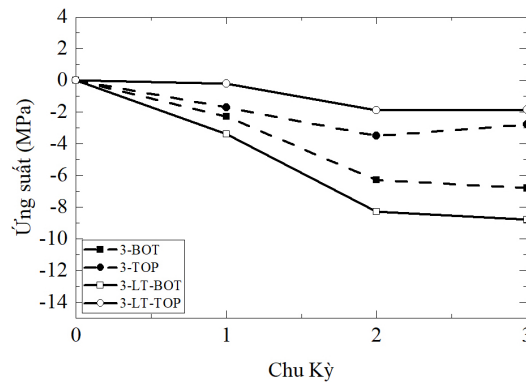
(b) Mặt cắt 5



(c) Mặt cắt 2



(d) Mặt cắt 4

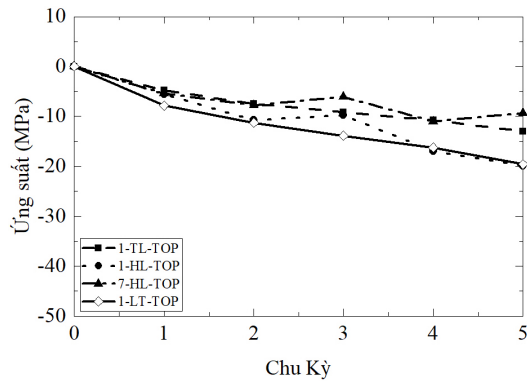


(e) Mặt cắt 3

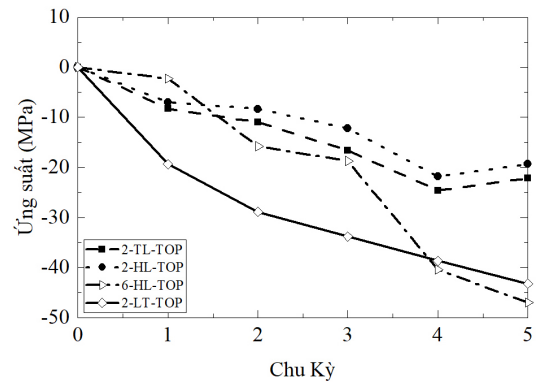
Hình 13. Ứng suất vành vòm cầu Kỳ Cùng

Hình 14 cho thấy hầu hết giá trị ứng suất vành vòm cầu Hoàng Văn Thụ đo được tương quan với giá trị ứng suất lý thuyết và theo một quy luật. Tại thời điểm kết thúc quan trắc, tất cả các giá trị đo đều là ứng suất nén. Cần lưu ý rằng cầu vòm CFST có kết cấu và công nghệ thi công rất phức tạp, kết quả mô hình phân tích kết cấu theo từng giai đoạn thi công ảnh hưởng bởi rất nhiều yếu tố đầu vào và điều kiện biên. Trong quá trình thi công thực tế chắc chắn có sự sai khác lớn với giả thiết khi phân

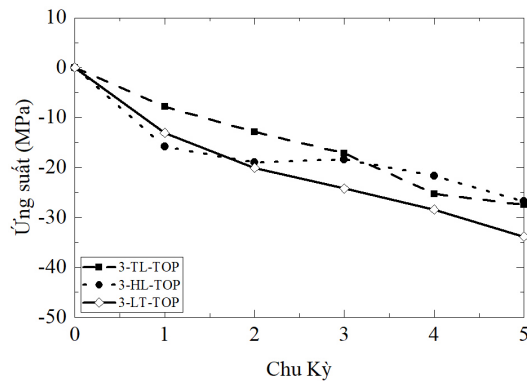
tích kết cấu theo lý thuyết. Thêm nữa, không giống như các mô hình thí nghiệm trong phòng với tỷ lệ nhỏ, bài toán thí nghiệm ngoài hiện trường còn chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố khác như thời tiết, tác động của các thiết bị phụ trợ thi công, tải trọng cục bộ v.v. . . nên sai số giữa kết quả đo thực tế công trường và lý thuyết sẽ có thể tương đối lớn. Tuy nhiên, từ kết quả quan trắc và phân tích lý thuyết cầu chính cầu Hoàng Văn Thụ có thể thấy rằng ứng xử của kết cấu thực tế khá tương đồng với lý thuyết.



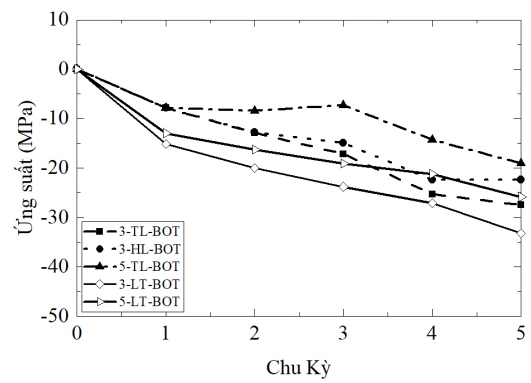
(a) Mặt cắt 1 và Mặt cắt 7



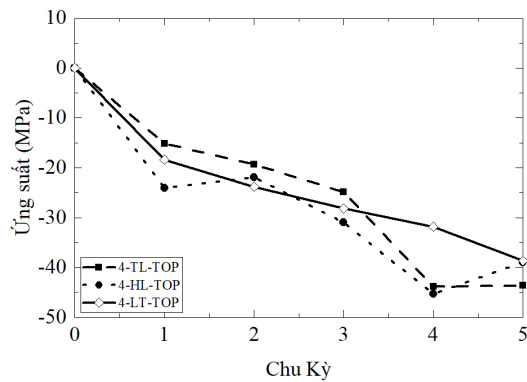
(b) Mặt cắt 2 và Mặt cắt 6-biên trên



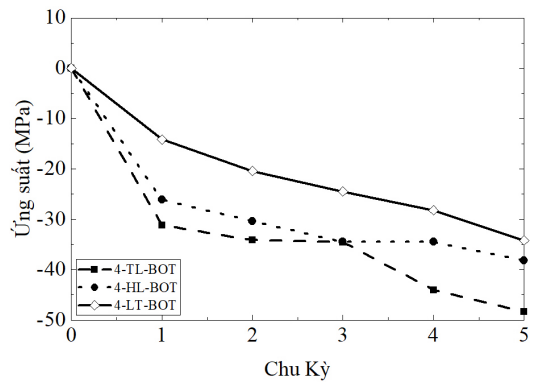
(c) Mặt cắt 3-biên trên



(d) Mặt cắt 3 và mặt cắt 5-biên dưới



(e) Mặt cắt 4-biên trên



(f) Mặt cắt 4-biên dưới

Hình 14. Ứng suất vành vòm cầu Hoàng Văn Thụ

Từ kết quả quan trắc ứng suất và phân tích lý thuyết hai cây cầu vòm có kết cấu khác nhau sử dụng hai loại VWSG chôn trong bê tông và gắn ngoài, có thể thấy rằng: (1) Kết quả đo ứng suất từ VWSG là tương đối khớp với kết quả mô hình tính. (2) Số liệu quan trắc được thu thập VWSG chôn trong bê tông cho kết quả ổn định hơn so với VWSG gắn ngoài. Điều đó được lý giải do VWSG gắn ngoài sẽ chịu nhiều tác động khách quan bên ngoài hơn, đặc biệt là trong quá trình thi công. (3) Mặc dù thời gian quan trắc tương đối dài, tuy nhiên đến thời điểm kết thúc quan trắc, nếu không bị hư hỏng do va đập bởi máy móc, thiết bị thi công thì VWSG vẫn hoạt động ổn định và đảm bảo độ tin cậy.

6. Kết luận

Thông qua nghiên cứu ứng dụng VWSG quan trắc ứng suất - biến dạng hai công trình cầu vòm nhịp lớn là cầu vòm BTCT Kỳ Cùng (Lạng Sơn) và cầu vòm CFST Hoàng Văn Thụ, có thể rút ra một số kết luận sau:

(1) Thiết lập hệ thống quan trắc sức khỏe công trình nói chung và quan trắc ứng suất - biến dạng kết cấu cho các cầu nhịp lớn ở Việt Nam cả trong giai đoạn thi công và khai thác nói riêng là hết sức cần thiết nhằm đảm bảo sự an toàn cho người và công trình, kịp thời đưa ra các cảnh báo và biện pháp xử lý nếu có vấn đề bất thường đối với trạng thái làm việc của kết cấu, nhờ đó có thể giảm được thiệt hại và chi phí khi xảy ra các rủi ro không lường trước.

(2) Đối với các kết cấu đòi hỏi phải quan trắc theo dõi trong thời gian dài, sử dụng hệ thống VWSG để quan trắc ứng suất – biến dạng là đặc biệt phù hợp bởi các ưu điểm chính của nó như:

- VWSG cho phép quan trắc theo thời gian, độ bền cao, ổn định, xử lý được vấn đề sai số do nhiệt độ, lắp đặt đơn giản, thích hợp với nhiều vị trí quan trắc kể cả khi kết cấu nằm dưới nước, chôn vùi trong đất hoặc ở những vị trí khó tiếp cận v.v. . .

- Công tác lấy dữ liệu tương đối đơn giản, nhanh chóng, ít ảnh hưởng bởi các yếu tố bên ngoài. Có thể đồng bộ và truy xuất dữ liệu với thời gian thực và liên tục, đặc biệt các kết quả đo sẽ được tích lũy dần theo các giai đoạn nên rất phù hợp với công trình cầu với nhiều giai đoạn (bước) thi công.

(3) Từ kết quả quan trắc ứng suất vành vòm và so sánh với giá trị phân tích lý thuyết của hai công trình cầu vòm BTCT Kỳ Cùng và cầu vòm CFST Hoàng Văn Thụ cho thấy:

- VWSG cho kết quả đo đảm bảo độ ổn định và chính xác cao, phản ánh đúng ứng xử của kết cấu theo lý thuyết.

- Mặc dù việc so sánh giữa kết quả đo ứng suất – biến dạng từ VWSG của công trình cầu vòm thực tế có kết cấu và trình tự thi công phức tạp với kết quả phân tích lý thuyết từ mô hình phần tử hữu hạn là hết sức khó khăn, tuy nhiên có thể thấy rằng kết quả đo được thực tế khá tương đồng với lý thuyết tính toán, đảm bảo mục tiêu về quan trắc, đánh giá và cảnh báo kết cấu trong quá trình thi công.

- Số liệu quan trắc được thu thập bởi VWSG chôn trong bê tông cho kết quả ổn định hơn so với VWSG gắn ngoài do ít chịu nhiều tác động khách quan bên ngoài hơn.

Kết quả nghiên cứu này cho thấy tiềm năng rất lớn và khả năng ứng dụng của VWSG trong kiểm định hay quan trắc dài hạn kết cấu cầu nhịp lớn tại Việt Nam.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn công ty Công ty Cổ phần Xây dựng Cầu 75, Công ty TNHH Thương mại & Xây dựng Trung Chính, Tổng Công ty Tư vấn Thiết kế Giao thông Vận tải (TEDI), Công ty Cổ phần Tư vấn Thiết kế Cầu lớn Hàm, Công ty Tư vấn Công trình Châu Á Thái Bình Dương (APECO) đã hỗ trợ và tạo điều kiện tốt nhất cho chúng tôi hoàn thành bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Balageas, D., Fritzen, C.-P., Güemes, A. (2010). *Structural health monitoring*, volume 90. John Wiley & Sons.
- [2] Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R., Czarnecki, J. J. (2003). *A review of structural health monitoring literature: 1996–2001*. Los Alamos National Laboratory, USA.
- [3] Soyoz, S., Feng, M. Q. (2009). [Long-Term Monitoring and Identification of Bridge Structural Parameters](#). *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(2):82–92.
- [4] Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., Shevitz, D. W. (1996). [Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review](#). Technical report, United States.
- [5] Huston, C. (1879). [The effect of continued and progressively increasing strain upon iron](#). *Journal of the Franklin Institute*, 107(1):41–45.
- [6] Webster, J. G. (1999). *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. Springer Science & Business Media.
- [7] Juds, S. (1988). *Photoelectric sensors and controls: selection and application*, volume 63. CRC Press.
- [8] Habel, W. R. (1995). [Fiber optic sensors in civil engineering: experiences and requirements](#). Uttamchandani, D. G., editor, *Smart Structures: Optical Instrumentation and Sensing Systems*, SPIE.
- [9] Casas, J. R., Cruz, P. J. S. (2003). [Fiber Optic Sensors for Bridge Monitoring](#). *Journal of Bridge Engineering*, 8(6):362–373.
- [10] Lee, H. M., Kim, J. M., Sho, K., Park, H. S. (2010). [A wireless vibrating wire sensor node for continuous structural health monitoring](#). *Smart Materials and Structures*, 19(5):055004.
- [11] Bourquin, F., Joly, M. (2004). [A magnet-based vibrating wire sensor: design and simulation](#). *Smart Materials and Structures*, 14(1):247–256.
- [12] Benmokrane, B., Chekired, M., Xu, H. (1995). [Monitoring Behavior of Grouted Anchors Using Vibrating-Wire Gauges](#). *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(6):466–475.
- [13] Dreyer, H. (1979). Long-term measurements in rock mechanics by means of Maihak vibrating wire instrumentation. *Proc., Int. Symp. on Field Measurements in Rock Mech*, 109–122.
- [14] Hanna, T. H. (1985). Field instrumentation in geotechnical engineering. *Series on rock and soil mechanics*.
- [15] Neild, S. A., Williams, M. S., McFadden, P. D. (2005). [Development of a Vibrating Wire Strain Gauge for Measuring Small Strains in Concrete Beams](#). *Strain*, 41(1):3–9.
- [16] Arutunian, S. G., Dobrovolski, N. M., Mailian, M. R., Sinenko, I. G., Vasiniuk, I. E. (1999). [Vibrating wire for beam profile scanning](#). *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2(12):122801.
- [17] Arutunian, S. (2008). Vibrating wire sensors for beam instrumentation. *Beam Instrumentation Workshop, BIW*, Lake Tahoe, USA.
- [18] Công ty CP TVTK Cầu lớn Hầm (2016). *Dự án cầu Kỳ Cùng, thành phố Lạng Sơn, tỉnh Lạng Sơn*. Hồ sơ thiết kế bản vẽ thi công.
- [19] Tổng công ty TVTK GTVT - CTCP (2017). *Cầu Hoàng Văn Thụ, thành phố Hải Phòng*. Hồ sơ thiết kế bản vẽ thi công.