

ỨNG DỤNG HỆ THỐNG QUAN TRẮC KẾT CẤU CÔNG TRÌNH BDI TRONG CÔNG TÁC KIỂM ĐỊNH CẦU

Đoàn Xuân Hưng¹, Phạm Thị Thanh Vân², Vũ Đức Trường³

^{1,2,3}*Viện Thiết kế/Tổng cục Hậu cần - Kỹ thuật/Bộ Quốc phòng*

Email: ¹xuanhungdhhk@gmail.com, 0334 044402; ²vanvtnbqp@gmail.com, 0914 344761;

³truongthinghiem.vtk@gmail.com, 0989 310024

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses2-19>

TÓM TẮT: Hệ thống quan trắc kết cấu công trình BDI (Bridge Diagnostics Incorporated) là một giải pháp tích hợp giữa thiết bị đo lường hiện trường và phần mềm phân tích số liệu, được thiết kế nhằm phục vụ công tác đánh giá trạng thái kỹ thuật và hiệu năng làm việc của các kết cấu công trình dân dụng và giao thông, đặc biệt là công trình cầu. Bằng cách sử dụng mạng lưới cảm biến có độ chính xác cao (bao gồm cảm biến gia tốc, chuyển vị, lực căng cáp và nhiệt độ), hệ thống cho phép thu thập dữ liệu động và tĩnh trong quá trình công trình chịu tải thực tế. Dữ liệu sau đó được xử lý và phân tích bằng các thuật toán chuyên biệt nhằm xác định các thông số đặc trưng của kết cấu như tần số dao động, dạng dao động hay lực căng cáp... Bài báo trình bày tổng quan về cấu tạo và nguyên lý hoạt động cũng như một số phần mềm của hệ thống BDI, quy trình triển khai khảo sát hiện trường và xử lý dữ liệu. Một số ứng dụng thực tiễn được trích dẫn nhằm làm rõ hiệu quả của hệ thống trong công tác quan trắc kết cấu công trình, từ đó đề xuất khả năng mở rộng ứng dụng trong các công trình tại Việt Nam.

TỪ KHÓA: Quan trắc kết cấu công trình, BDI, giám sát công trình, kiểm định cầu.

ABSTRACT: The BDI (Bridge Diagnostics Incorporated) structural health monitoring system is an integrated solution combining field measurement devices and data analysis software, designed to support the assessment of the technical condition and performance of civil and transportation structures, particularly bridges. By employing a high-precision sensor network including accelerometers, displacement sensors, cable force sensors, and temperature sensors the system enables the collection of both dynamic and static data under actual load conditions. This data is subsequently processed and analyzed using specialized algorithms to identify key structural parameters such as natural frequencies, mode shapes, and cable tensions. This paper presents an overview of the system's components, operating principles, and associated software, along with the field deployment and data processing procedures. Several practical applications are highlighted to demonstrate the effectiveness of the BDI system in structural health monitoring, thereby proposing its potential for wider implementation in infrastructure projects across Vietnam.

KEYWORDS: Structural Health Monitoring, BDI, Bridge Diagnostics Incorporated, Infrastructure Monitoring, Bridge Inspection.

1. TỔNG QUAN

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ đo lường và phân tích dữ liệu, các hệ thống quan trắc kết cấu công trình đã trở thành công cụ quan trọng trong lĩnh vực kiểm định, đánh giá và quản lý công trình xây dựng, đặc biệt là công trình cầu [3, 4]. Một trong những giải pháp nổi bật được áp dụng rộng rãi trên thế giới là hệ thống quan trắc kết cấu công trình BDI (Bridge Diagnostics Incorporated) [1].



Hình 1: Thử tải cầu Rạch Miễu 2 [11]

Hệ thống BDI được thiết kế với mục tiêu tích hợp đồng bộ giữa thiết bị đo lường hiện trường và phần mềm phân tích số liệu, cho phép đánh giá chính xác trạng thái kỹ thuật và hiệu năng làm việc của công trình. Với mạng lưới cảm biến đa dạng và có độ chính xác cao như cảm biến gia tốc, chuyển vị, lực căng cáp và nhiệt độ, hệ thống có khả năng thu thập dữ liệu cả động và tĩnh trong điều kiện công trình chịu tác động tải trọng thực tế [2, 5].

Sau khi thu thập, dữ liệu được xử lý và phân tích bằng các thuật toán chuyên biệt nhằm trích xuất những thông số đặc trưng của kết cấu, diễn hình như tần số dao động riêng, dạng dao động, độ võng hay lực căng cáp [3, 9]. Nhờ đó, hệ thống không chỉ hỗ trợ đánh giá chất lượng công trình tại thời điểm kiểm định mà còn là cơ sở quan trọng cho việc dự báo, chẩn đoán hư hỏng và lập kế hoạch bảo trì, sửa chữa hợp lý [4, 7].

Bài báo này tập trung trình bày tổng quan về cấu tạo, nguyên lý hoạt động và một số phần mềm phân tích dữ liệu đi kèm của hệ thống BDI. Bên cạnh đó, quy trình triển khai khảo sát hiện trường và xử lý dữ liệu cũng được mô tả nhằm làm rõ cơ sở khoa học và thực tiễn của giải pháp. Một số kết quả ứng dụng thực tiễn tại các công trình cầu được trích dẫn, qua đó khẳng định hiệu quả của hệ thống trong công tác kiểm định [6, 8]. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất khả năng mở rộng ứng dụng hệ thống BDI trong các dự án kiểm định và quản lý cầu ở Việt Nam, góp phần nâng cao độ tin cậy, an toàn và hiệu quả kinh tế trong khai thác công trình giao thông [7, 10].



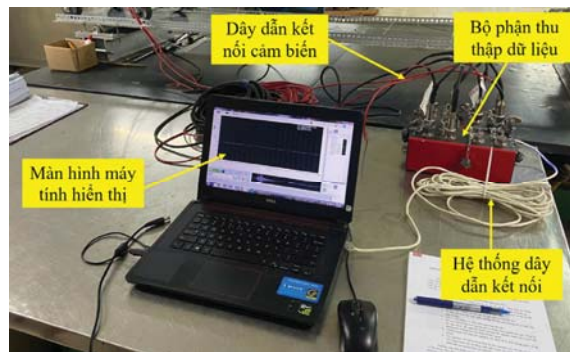
Hình 2: Bộ thiết bị BDI trong công tác khảo sát, kiểm định cầu Bản Hiệu, Điện Biên

2. CẤU TẠO VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG QUAN TRẮC BDI

2.1 Cấu tạo của hệ thống BDI

BDI là bộ phận làm việc tại hiện trường của hệ thống kiểm định, gồm bốn thành phần chính: các cảm biến thông minh, bộ phận thu thập dữ

liệu tích hợp pin, thiết bị kết nối không dây và có dây, phụ kiện và máy tính hiển thị [1, 12, 13]. Hệ thống có chức năng cung cấp các giải pháp quan trắc cả ngắn hạn và dài hạn [14, 18]. Mục đích chính của việc sử dụng hệ thống BDI là thu thập dữ liệu về ứng xử của cầu, cụ thể là thu thập dữ liệu biến dạng hay các thông số dao động khi một xe tải có kích thước và trọng lượng đã biết chạy qua cầu [1, 13].



Hình 3: Cấu tạo hệ thống BDI kết nối có dây

2.1.1 Hệ thống cảm biến thông minh

Cảm biến BDI bao gồm cảm biến biến dạng, cảm biến gia tốc, cảm biến nhiệt độ, cảm biến chuyển vị, lực và tải... để thử tải trực tiếp hoặc giám sát dài hạn. Cảm biến BDI có thể được gắn bằng chất kết dính trong thời gian ngắn hoặc gắn vĩnh viễn bằng bu lông neo hoặc hàn để theo dõi lâu dài [1]. Hiện tại, Viện Thiết kế/ Tổng cục Hậu cần - Kỹ thuật/ Bộ Quốc phòng được trang bị khá đầy đủ hệ thống các cảm biến, tuy nhiên ở bài báo này tập trung làm rõ đối với cảm biến dạng và cảm biến gia tốc.

a) Cảm biến đo biến dạng ST-350 Strain Gauge

Các cảm biến biến dạng ST-350 được thiết kế để ghi nhận biến dạng động và các biến dạng gây ra khác trên mọi loại cấu kiện kết cấu, đồng thời tương thích với hầu hết các hệ thống thu thập dữ liệu [15]. Cảm biến được thiết kế phù hợp với điều kiện đo khắc nghiệt tại hiện trường cũng như trong phòng thí nghiệm và được kiểm chứng bởi nhà sản xuất.



Hình 4: Cảm biến đo biến dạng ST-350-B

Mạch bên trong của Strain Gauge bao gồm một cầu Wheatstone đầy đủ với bốn điện trở biến dạng lá kim loại 350 Ω được tối ưu hóa để cung cấp tín hiệu điện đầu ra cho một độ lớn biến dạng nhất định. Mỗi cảm biến đều được hiệu chuẩn riêng biệt bằng hệ thống hiệu chuẩn có độ chính xác cao, được truy xuất theo chuẩn N.I.S.T.

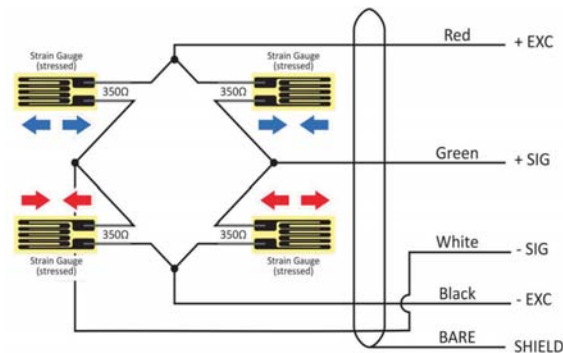
Mỗi thiết bị đều được bọc kín hoàn toàn, thiết kế theo tiêu chuẩn IP67 và được trang bị hai lỗ khoan sẵn để đảm bảo chiều dài đo biến dạng nhất quán trong mọi lần lắp đặt. Dựa trên vật liệu của kết cấu và thời gian dự kiến lắp đặt ST-350, có thể sử dụng nhiều phương pháp lắp khác nhau bao gồm keo dán, hàn, neo nở, và vít.



a) Các tấm gắn cảm biến có thể tái sử dụng,
b) Cổng kết nối với bộ phận thu thập dữ liệu,
c) Giá định vị tấm gắn cảm biến với cảm biến

Hình 5: Phụ kiện kết nối

Cảm biến biến dạng Strain Gauge thường được gắn vào bề mặt của các thành phần kết cấu và được nối với các thiết bị thu thập dữ liệu. Khi kết cấu bị biến dạng, sự thay đổi về chiều dài ở bề mặt của kết cấu được truyền đến máy đo biến dạng thông qua các thiết bị kết nối. Từ đó, tín hiệu tương ứng được truyền đến thiết bị thu thập dữ liệu thông qua các thiết bị kết nối này.



Hình 6: Sơ đồ nguyên lý hoạt động đầu đo biến dạng ST-350 Strain Gauge [15]

Cảm biến Strain Gauge sẽ thu thập các tín hiệu lực tác động vào nó như lực căng, áp suất,

trọng lượng, mô-men xoắn... sau khi nhận các lực này giá trị điện trở sẽ thay đổi, các thay đổi sẽ được truyền về thiết bị đo lực căng - kéo - nén, qua bộ chuyển đổi thành tín hiệu điện để hiển thị lên màn hình giúp người dùng có thể đọc số liệu lực cần đo.

Cảm biến ST-350 hoạt động dựa trên nguyên lý điện trở kim loại thay đổi khi bị biến dạng. Khi cấu kiện chịu kéo, điện trở tăng; khi chịu nén, điện trở giảm. Sự thay đổi này được chuyển thành tín hiệu điện áp, khuếch đại và ghi nhận. Cảm biến cần gắn chặt vào cấu kiện để phản ánh chính xác ứng xử, đồng thời phải hiệu chỉnh định kỳ để bù ảnh hưởng của nhiệt độ và điện trở dây dẫn [16, 17].

b) Cảm biến đo gia tốc MEMS

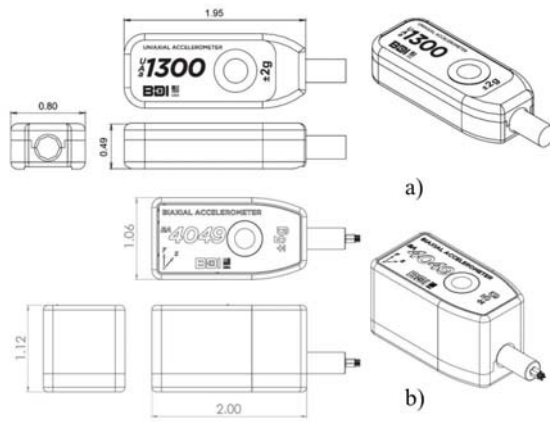
Gia tốc kế MEMS (MicroElectroMechanical Systems) đã được thiết kế bao gồm gia tốc 1 phương và A1512 gia tốc 3 phương A2512 để ghi lại các phản ứng động trên tất cả các loại kết cấu ngay cả trong điều kiện môi trường khắc nghiệt. Điều này cũng làm cho chúng phù hợp với nhiều ứng dụng trong phòng thí nghiệm phục vụ nghiên cứu và sản xuất [19]. Kích thước cảm biến A1512 và A2512 được thể hiện tại Hình 8.



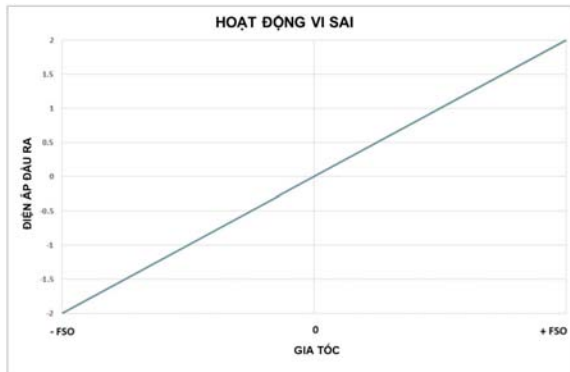
Hình 7: Cảm biến gia tốc 1 phương A1512 gia tốc 3 phương A2512

Cảm biến khi hoạt động cho phép tạo ra hai tín hiệu điện áp đầu ra thay đổi theo gia tốc thể hiện như ở Hình 9. Các đầu ra này có thể được sử dụng ở chế độ vi sai hoặc một đầu, tùy thuộc vào khả năng của hệ thống DAQ mà người dùng sở hữu. Ở trạng thái không gia tốc, cả hai tín hiệu đầu ra đều xấp xỉ điện áp +0,625 Vdc [19].

Các thành phần bên trong của cảm biến gia tốc A1512/A2512 bao gồm phần tử cảm biến điện dung MEMS được hỗ trợ bởi một mạch tích hợp bao gồm bộ khuếch đại cảm biến và giai đoạn đầu ra vi sai. Một cảm biến gia tốc cho phép hiệu chỉnh điện áp đầu ra để giải quyết bất kỳ thay đổi nhiệt độ nào có thể xảy ra trong quá trình thử nghiệm.



a) Cảm biến gia tốc 1 phương A1512,
b) Cảm biến gia tốc 3 phương A2512 [19]
Hình 2. Kích thước cảm biến gia tốc



Hình 9: Điện áp đầu ra theo hàm của gia tốc [19]

2.1.2. Bộ phận thu nhận dữ liệu Datalogger STS-16

Bộ thu thập dữ liệu 16 kênh đo đồng thời được thiết kế đặc biệt thích hợp sử dụng trong phòng thí nghiệm cũng như cho phép kiểm định, phân tích và sử dụng cho mục đích quan trắc ngắn hạn hay quan trắc dài hạn theo yêu cầu sử dụng ngoài hiện trường. Các kênh đầu vào của bộ thu thập dữ liệu 16 kênh cho phép thu thập các dữ liệu với tốc độ cao và mỗi kênh đo được tích hợp nhiệt điện trở với chức năng bù chỉnh nhiệt độ trên mỗi kênh đo.

Bộ thu thập dữ liệu 16 kênh có thiết kế mô-đun chắc chắn, dễ dàng mở rộng tới 1.000 kênh mà không cần lập trình nhờ hệ thống dây dẫn kết nối. Thiết bị hỗ trợ tốc độ lấy mẫu 1000 Hz/kênh, cho phép kết nối nhanh với nhiều loại cảm biến khác nhau. Hệ thống tương thích với nhiều nguồn cấp năng lượng như năng lượng mặt trời và PoE, có tùy chọn giao tiếp không dây, đồng thời tất cả các kênh đều được bảo vệ chống sét và quá áp, đảm bảo an toàn và độ tin cậy trong vận hành.



Hình 10: Bộ phận thu nhận dữ liệu Datalogger STS-16

Ngoài hệ thống kết nối có dây, STS còn trang bị kết nối không dây phù hợp quan trắc các loại kết cấu lớn. Hệ thống kiểm định kết cấu không dây STS-WiFi do Bridge Diagnostics, Inc. (BDI) phát triển là giải pháp hiện đại phục vụ thử tải và quan trắc cầu. Hệ thống bao gồm trạm cơ sở (Base Station), các nút thu thập dữ liệu (WiFi Nodes) được kết nối với các cảm biến, tổ chức đảm bảo tính linh hoạt và hiệu quả trong thu thập dữ liệu hiện trường.



Hình 11: Hệ thống STS-WiFi

Trạm cơ sở di động có vai trò mở rộng phạm vi thu phát nhờ ăng-ten và hoạt động như bộ chuyển tiếp giữa máy tính điều khiển và các nút đo. Các nút STS-WiFi kết nối trực tiếp với cảm biến (biến dạng, dịch chuyển, gia tốc...) và truyền dữ liệu về máy tính theo thời gian thực. Với khả năng không dây, dễ lắp đặt, mở rộng linh hoạt và an toàn, hệ thống STS-WiFi đặc biệt phù hợp cho các thí nghiệm ngắn hạn tại hiện trường cũng như phục vụ phân tích hiệu chỉnh mô hình kết cấu [20].

2.1.3. Phần mềm xử lý số liệu

Trong hệ thống kiểm định kết cấu của BDI, ba phần mềm STS-LIVE, STS-VIEW và STS-CFA đảm nhận vai trò thu thập, xử lý và phân tích dữ liệu.

STS-LIVE ứng dụng điều khiển phần cứng STS4 trên nền Windows, cho phép khởi động nhanh, tự động nhận diện thiết bị và thiết lập các thông số đo mà không cần lập trình. Phần mềm hỗ trợ theo dõi dữ liệu theo thời gian thực, bù nhiệt độ, lọc tín hiệu và lưu trữ dưới định dạng TDMS.

STS-VIEW cung cấp công cụ trực quan hóa và phân tích hậu kỳ, cho phép hiệu chỉnh hệ số chuẩn, lọc nhiễu, xác định trục trung hòa, tính toán lực trục, phân tích FFT, cũng như so sánh dữ liệu với mô hình phần tử hữu hạn.

STS-CFA mang tính chất ứng dụng chuyên biệt để xác định lực căng cáp từ dữ liệu gia tốc, chuyển đổi dữ liệu thô sang miền tần số và ước tính lực kéo trực tiếp tại hiện trường.

Sự kết hợp của ba phần mềm này giúp quá trình kiểm định kết cấu trở nên nhanh chóng, chính xác và hiệu quả, đặc biệt trong các thử nghiệm tải trọng thực tế trên cầu.

2.2. Nguyên lý hoạt động của hệ thống BDI

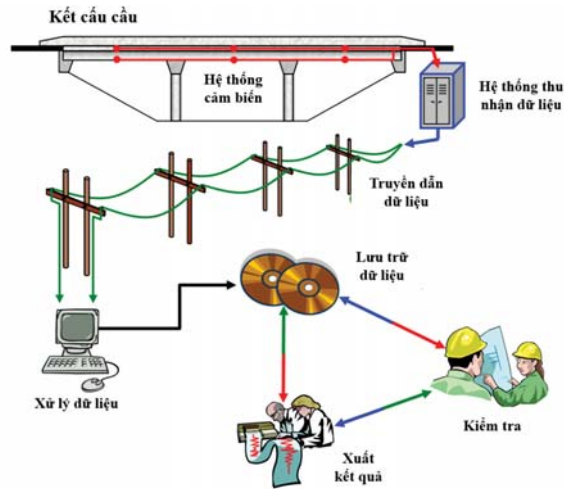
Hệ thống kiểm định kết cấu của Bridge Diagnostics Inc. (BDI) được thiết kế nhằm ghi nhận đáp ứng động của cầu dưới tác dụng của tải trọng thử nghiệm hoặc các tác động môi trường. Khi cầu chịu ảnh hưởng của xe tải thử tải, gió, hoặc chấn động giao thông, kết cấu sẽ dao động ở những tần số đặc trưng, phản ánh đặc tính động lực học của công trình.

Các cảm biến được bố trí tại những vị trí thích hợp trên bản mặt cầu, dầm chủ, dầm phụ hoặc trụ cầu và kết nối với bộ thu nhận tín hiệu. Tín hiệu này được thu nhận bởi các nút thu thập dữ liệu (STS Units hoặc STS-4 wireless nodes), sau đó truyền đến trạm cơ sở di động và máy tính hiển thị trên phần mềm STS-live thông qua hệ thống truyền dữ liệu không dây hoặc có dây.

Dữ liệu thu được được xử lý và hiển thị theo thời gian thực bằng phần mềm STS-View. Thông qua các thuật toán phân tích phổ tần số (FFT) và lọc tín hiệu, hệ thống cho phép xác định các tham số động lực học chủ yếu của cầu, bao gồm tần số dao động riêng, dạng dao động riêng, hệ số tắt dần đối với phép đo gia tốc và các thông số cần thiết khác tùy thuộc vào cảm biến sử dụng.

Các thông số này là cơ sở quan trọng để đánh giá độ cứng, khả năng suy giảm năng lượng và mức độ toàn vẹn kết cấu. Khi so sánh với kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn, dữ liệu thực nghiệm từ hệ thống BDI giúp hiệu chỉnh mô hình, đồng thời hỗ trợ nhận diện những bất thường như sự suy

giảm độ cứng cục bộ, sự hình thành vết nứt hoặc hư hỏng vật liệu.



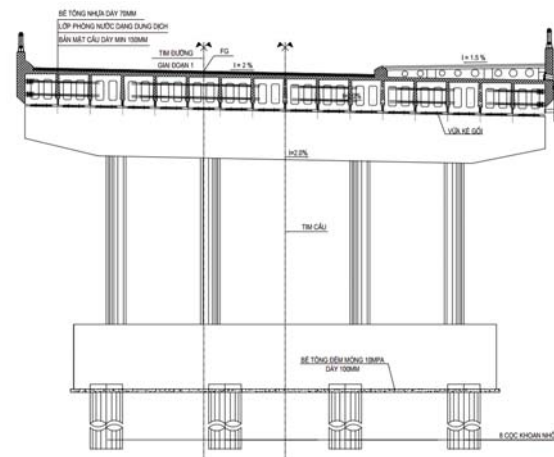
Hình 12: Sơ đồ nguyên lý hoạt động [21]

Nhờ đó, hệ thống BDI không chỉ phục vụ cho công tác thử tải và giám sát trong ngắn hạn, mà còn là công cụ quan trọng trong quản lý, chẩn đoán và đánh giá tuổi thọ công trình cầu [22].

3. KIỂM TRA DAO ĐỘNG CẦU NGŨ HUYỆN KHÊ SỬ DỤNG HỆ THỐNG QUAN TRẮC BDI

3.1. Giới thiệu chung về cầu Ngũ Huyện Khê

Cầu Ngũ Huyện Khê có vị trí tuyến bắt đầu Km2+00 từ ĐT.286, thuộc địa phận phường Vạn An, tỉnh Bắc Ninh; điểm cuối Km3+622,92 nối với ĐT.286 thuộc địa phận xã Phúc Xuyên, tỉnh Bắc Ninh. Trên tuyến có 01 vị trí cầu bắc qua sông Ngũ Huyện Khê tại ranh giới phường Vạn An và xã Phong Khê. Cách vị trí cầu Đào Xá - QL18 khoảng 3,71 km về phía hạ lưu cầu Đào Xá; cách vị trí trạm cống tiêu Đặng Xá khoảng 0,9 km.



Hình 13: Mặt cắt ngang kết cấu nhịp

Cầu được thiết kế với bề rộng 3 làn xe, hoạt tải HL93 theo 22TCN272-05 [23]. Sơ đồ kết cấu nhịp: 1@21m+3@24+1@21. Kết cấu nhịp dầm bản rộng bê tông cốt thép dự ứng lực 21 m và 24 m, mặt cắt ngang kết cấu nhịp dầm được thể hiện như Hình 13.

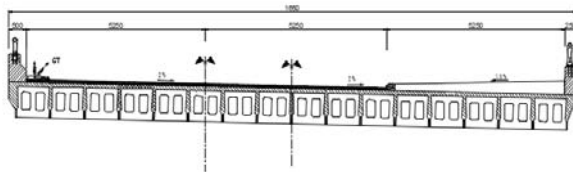


Hình 14: Toàn cảnh cầu Ngũ Huyện Khê

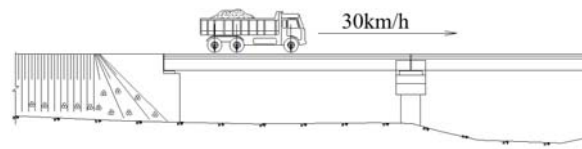
3.2. Đo đặc thông số dao động cầu dầm bản rộng nhịp 21m và xây dựng mô hình kết cấu kiểm chứng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM)

3.2.1. Đo đặc thông số dao động cầu

Phản ứng của dầm bản rộng kết cấu nhịp giản đơn có chiều dài nhịp 21 m (nhịp N1) được ghi lại thông qua cảm biến đo gia tốc 3 phương A2512 mang số hiệu TA2100 được bố trí tại vị trí giữa nhịp như Hình 15 và Hình 17. Kích thước cảm biến được thể hiện tại Hình 8, cảm biến có tần số đáp ứng 0-400 Hz, độ nhạy 400 mV/g, phần tử cảm biến điện dung được gia công vi mô, điện áp kích thích 5,0 Vdc $\pm 5\%$, nhiệt độ làm việc từ -50°C đến +80°C đảm bảo nhiệt độ tại hiện trường trong thời gian đo đặc là 37°C. Lớp vỏ bảo vệ cảm biến đo gia tốc được làm bằng hợp kim nhôm 6061 có chức năng bảo vệ cảm biến chống lại sự ăn mòn. Cảm biến được gắn chặt với kết cấu nhịp cầu thông qua tấm gắn cảm biến và keo dán. Tần số lấy mẫu 200 Hz/s, thời gian đo được tiến hành trong 2 phút bắt đầu từ lúc xe di chuyển vào cầu đảm bảo dầm trở về trạng thái bình thường sau khi kết thúc phép đo. Đối với nghiên cứu này, vận tốc di chuyển qua cầu sử dụng vận tốc 30km/h.



Hình 15: Bố trí cảm biến đo gia tốc trên mặt cắt ngang dầm bản rộng nhịp 21 m



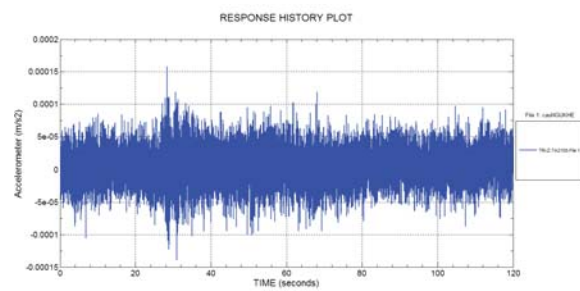
Hình 16: Phương tiện di chuyển qua cầu

Hoạt tải thử nghiệm di chuyển từ đầu cầu đến cuối cầu là tác nhân gây rung cho kết cấu nhịp. Các cảm biến gia tốc có chức năng ghi lại toàn bộ quá trình rung động của dầm và lưu trữ trên máy tính theo thời gian thực. Kết quả được lưu dưới dạng file .dat.

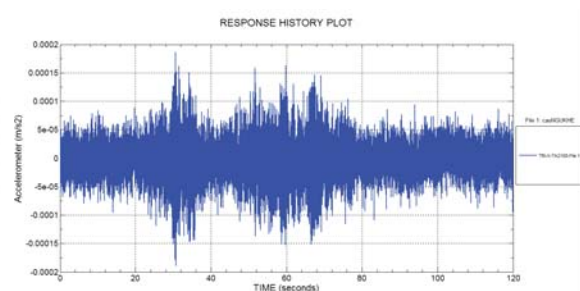


Hình 3: Bố trí cảm biến trên kết cấu nhịp

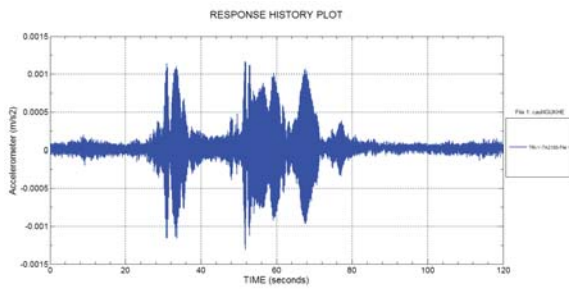
Kết quả của quá trình đo rung được thể hiện như Hình 18 đến Hình 21.



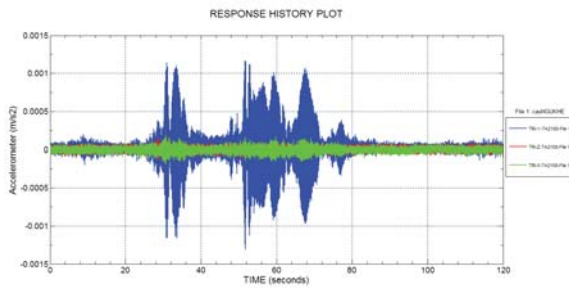
Hình 18: Biểu đồ dao động theo phương Z



Hình 19: Biểu đồ dao động theo phương X

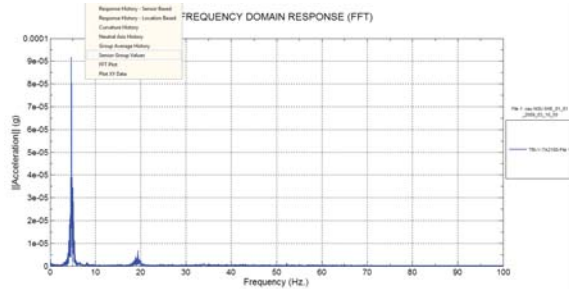


Hình 20: Biểu đồ dao động theo phương Y

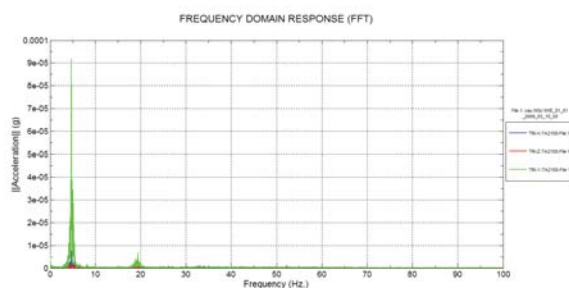


Hình 21: Kết hợp Biểu đồ dao động ba phương X, Y, Z

Sử dụng phần mềm STS-Live phân tích kết quả dữ liệu đo dao động. Kết quả tần số dao động thứ nhất đối với kết cấu nhịp N1 là 4,789 Hz, tần số dao động thứ 2 là 19,625 Hz (tính theo phương dao động thẳng đứng - phương Y đối với phép đo thực tế ở nghiên cứu này). Các Hình 22, Hình 23 thể hiện kết quả phân tích FFT của phần mềm.



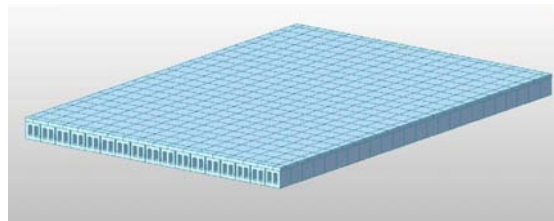
Hình 22: Tần số dao động theo phương Y



Hình 23: Biểu đồ thể hiện tần số dao động theo 3 phương X, Y, Z

3.2.2. Mô phỏng phản ứng của kết cấu nhịp

Một mô hình phân tử hữu hạn (FEM) của hệ thống kết cấu được hiển thị trong Hình 24 được sử dụng để mô phỏng trên phần mềm Midas Civil 2019. Các tính chất vật lý của kết cấu nhịp được mô phỏng như hệ dầm bản rộng bê tông cốt thép dự ứng lực kết cấu dạng giản đơn, được giả định như số liệu thiết kế thực tế bao gồm cường độ chịu nén của bê tông dầm chủ $f'_c = 40$ MPa, cường độ chịu nén của bê tông bản mặt cầu, dầm ngang $f'_c = 30$ MPa. Cấp dự ứng lực sử dụng loại tảo 12,7mm (0,5") có độ chùng thấp theo tiêu chuẩn ASTM A416-90a, cấp 270; giới hạn bền $f_{pu} = 1860$ Mpa, giới hạn chảy $f_{py} = 1670$ Mpa; mô đun đàn hồi $E = 195000$ Mpa. Mô hình mô phỏng được thể hiện như trong Hình 24.



Hình 24: Mô phỏng sơ đồ kết cấu nhịp bằng một mô hình FEM

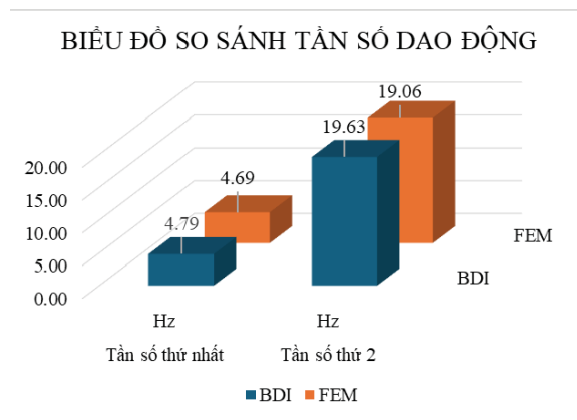
3.3.4. So sánh kết quả thực tế và mô hình mô phỏng

Kết quả đo dao động kết cấu nhịp N1 bằng cảm biến gia tốc của hệ thống BDI cho thấy tần số dao động riêng thứ nhất đạt 4,789 Hz và tần số dao động riêng thứ hai đạt 19,625 Hz. Trong khi đó, kết quả phân tích mô phỏng trên phần mềm Midas Civil 2019 lần lượt cho giá trị 4,692 Hz và 19,058 Hz.

So sánh giữa hai phương pháp cho thấy sự sai lệch tương đối nhỏ, cụ thể là 2,0% đối với tần số thứ nhất và 0,6% đối với tần số thứ hai. Điều này chứng tỏ mô hình mô phỏng trên Midas Civil và thực tế của hệ thống thiết bị BDI có mặt tương quan, phản ánh chính xác tương đối đặc trưng dao động của kết cấu. Kết quả đồng thời khẳng định hiệu quả của việc kết hợp giữa thử nghiệm thực địa bằng hệ thống BDI và mô phỏng số trên Midas Civil trong đánh giá động lực học công trình cầu.

Bảng 1: So sánh tần số dao động giữa hai phương pháp BDI và mô phỏng

Phương pháp	Tần số thứ nhất	Tần số thứ 2
Đơn vị	Hz	Hz
BDI	4.789	19.625
FEM	4.692	19.058



Hình 25: Biểu đồ so sánh sai khác tần số dao động giữa hai phương pháp

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã giới thiệu tổng quan về hệ thống quan trắc kết cấu công trình BDI, bao gồm nguyên lý hoạt động, cấu tạo thiết bị và phần mềm xử lý dữ liệu chuyên dụng. Thông qua ứng dụng thực tế tại cầu Ngũ Huyện Khê (Bắc Ninh), hệ thống BDI đã được triển khai để đo dao động của kết cấu nhịp. Kết quả phân tích cho thấy tần số dao động riêng thu được từ thực nghiệm có độ tương đồng cao với kết quả mô phỏng trên phần mềm Midas Civil 2019, với sai số nhỏ, khẳng định độ chính xác và tính tin cậy của hệ thống trong công tác kiểm định cầu.

Đặc biệt, thiết bị BDI thể hiện nhiều ưu điểm vượt trội như khả năng lắp đặt nhanh, tính linh hoạt trong cấu hình, độ bền cao khi làm việc trong điều kiện hiện trường, cũng như khả năng thu thập dữ liệu chính xác theo thời gian thực. Những ưu điểm này không chỉ giúp rút ngắn thời gian kiểm định và giảm thiểu sai số so với các phương pháp truyền thống, mà còn mở ra hướng ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực khác. Cụ thể, hệ thống BDI có thể được phát triển để phục vụ giám sát kết cấu công trình dân dụng và công nghiệp, theo dõi tình trạng các tòa nhà cao tầng, kiểm định an toàn trụ điện gió, cũng như các công trình hạ tầng quan trọng khác.

Kết quả nghiên cứu đã minh chứng tính hiệu quả của việc kết hợp giữa thử nghiệm thực địa bằng thiết bị BDI và mô phỏng số trên Midas Civil, đồng thời đặt nền tảng cho việc ứng dụng công nghệ này trong quản lý, giám sát lâu dài và nâng cao độ an toàn của các công trình hạ tầng tại Việt Nam. Đây là cơ sở quan trọng để mở rộng triển khai BDI trong tương lai, hướng tới một hệ thống kiểm định - quan trắc thông minh,

hiện đại và phù hợp với xu thế chuyển đổi số trong xây dựng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bridge Diagnostics, Inc. (2015). *Bridge Diagnostics Incorporated – Structural Testing & Monitoring Solutions*. Available at: <https://www.bridgetest.com>.
- [2] Catbas, F.N., Brown, D.L., Aktan, A.E. (2006). *Use of Modal Flexibility for Damage Detection and Condition Assessment of Structures*. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 132(12), pp. 1699-1707.
- [3] Farrar, C.R., Worden, K. (2013). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons.
- [4] Carden, E.P., Fanning, P. (2004). *Vibration Based Condition Monitoring: A Review*. Structural Health Monitoring, 3(4), pp. 355-377.
- [5] 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*. Los Alamos National Laboratory Report.
- [6] Bộ Giao thông Vận tải (2015). *Quy trình kiểm định cầu đường bộ - 22TCN 263-2000 (cập nhật)*. Hà Nội.
- [7] Trần Đức Nhiệm, Nguyễn Văn Mỹ (2019). *Ứng dụng công nghệ quan trắc trong đánh giá an toàn công trình cầu tại Việt Nam*. Tạp chí Cầu đường Việt Nam, số 5, tr. 12-18.
- [8] Nguyễn Thị Hương, Phạm Văn Thịnh (2020). *Phân tích dao động kết cấu cầu nhịp giản đơn từ số liệu đo hiện trường*. Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, Tập 71, số 2, tr. 45-52.
- [9] Zhang, Y., et al. (2017). *Structural Health Monitoring of Long-Span Bridges in Mainland China: Review and Future Trends*. Structural Control and Health Monitoring, Vol. 24(3), e1850.
- [10] Xu, Y.L., Xia, Y. (2012). *Structural Health Monitoring of Long-span Suspension Bridges*. CRC Press.
- [11] <https://baoxaydung.vn/tang-toc-nhung-hang-muc-cuoi-tai-cau-rach-mieu-2-ve-dich-truoc-6-thang-192250812140026786.htm>
- [12] Melling, E., Samuelson, A., Wipf, T. J., Phares, B. M., & Klaiber, F. W. (2003). *Development of bridge load testing process for*

- load evaluation*. Final Report, Iowa DOT Project TR-445, CTRE Project 00-65. Center for Transportation Research and Education (CTRE), Iowa State University, Ames, Iowa, USA.
- [13] Garnica, G. I. Z., Lantsoght, E., & Yang, Y. (2022). *Monitoring structural responses during load testing of reinforced concrete bridges: a review*. Structure and Infrastructure Engineering, 18(4), 509–526.
- [14] Gastineau, A., Johnson, T., Schultz, A. (2009). *Bridge Health Monitoring and Inspection – A Survey of Methods*. Final Report, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, September 2009.
- [15] Bridge Diagnostics, Inc. (2015). *Strain Transducer ST350 - User Manual (Rev A, November 2015)*. Boulder, Colorado, USA.
- [16] Phạm Thị Thanh Vân, (2023). *Nghiên cứu phương pháp gián tiếp đo dao động công trình cầu*. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp cơ sở, **VTK-2022-01**.
- [17] Bridge Diagnostics, Inc. (2015). *Applying Calibration Factors for BDI Strain Transducers*. Technical Note, Bridge Diagnostics, Inc., Boulder, Colorado, USA.
- [18] Rageh, A., Linzell, D. G., & Azam, S. E. (2018). *Automated, strain-based, output-only bridge damage detection*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 8, pp. 833-846.
- [19] Bridge Diagnostics, Inc. (2015). *MEMS Accelerometers - User Manual*. Technical Note, Bridge Diagnostics, Inc., Boulder, Colorado, USA.
- [20] Sadiku, H., & Kamberi, M. (2024). *Load testing of new bridges with wireless system equipment*. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESN), 10(3), 350-357.
- [21] Yang, M. (2015). *An integrated real-time health monitoring and impact/collision detection system for bridges in cold remote regions*. Department of Civil and Environmental Engineering, North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA.
- [22] Nguyen, D. H., Nguyen, N. M. T., Doan, X. H., Nguyen, Q. B., Nguyen, V. P., & Pham, D. H. (2022). *Damage detection in structures using strain measurement*. In Proceedings of the International Conference of Steel and Composite for Engineering Structures (pp. 24-34). Springer, Cham.
- [23] Bộ Giao thông Vận tải (2005). *Tiêu chuẩn kỹ thuật công trình giao thông, tập VII, Tiêu chuẩn Thiết kế cầu 22-TCN 272:05*, Nhà xuất bản GTVT, Hà Nội.