

# NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG THỰC NGHIỆM QUAN TRẮC TỰ ĐỘNG THEO THỜI GIAN THỰC CHO HỒ ĐÀO SÂU

Nguyễn Anh Đức<sup>a,\*</sup>, Hồ Ngọc Khoa<sup>a</sup>, Trần Quang Dũng<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 25/4/2025, Sửa xong 15/5/2025, Chấp nhận đăng 19/5/2025

## Tóm tắt

Công tác quan trắc hồ đào ở Việt Nam hiện vẫn dựa chủ yếu vào đo thủ công gián đoạn, hạn chế cảnh báo sớm và chất lượng dữ liệu. Nghiên cứu lắp đặt và đánh giá hệ thống quan trắc tự động thời gian thực (ARTM) cho một hồ đào 10 m × 10 m, sâu 3 m trên nền đất yếu tại cơ sở Trường Đại học Xây dựng Hà Nội tại Hà Nam. Mạng cảm biến gồm máy đo chuyên vị ngang sâu đa điểm, đo ứng suất cấu kiện và đo lún - được kết nối có và không dây, truyền dữ liệu liên tục suốt giai đoạn thi công và chất tải. Chuỗi đo cho thấy biến dạng tường cừ, lún nền và lực văng biến thiên khớp từng giai đoạn thi công và sai lệch dưới 5% so với kết quả từ máy toàn đạc. Cảnh báo đa kênh (đèn/còi, email, SMS) kích hoạt xấp xỉ 20 giây, cho phép phản ứng kịp thời với biến dạng bất thường. Kết quả nghiên cứu khẳng định ARTM dễ vận hành với nhân lực hiện có, đặc biệt hiệu quả ở các vị trí sâu, khuất và tăng cường minh bạch dữ liệu. Nghiên cứu cũng khẳng định tính thích hợp của ARTM cho các dự án tàu điện ngầm, cầu và nhà siêu cao tầng sắp triển khai, đồng thời là cơ sở đề xuất đưa quan trắc liên tục vào tiêu chuẩn và chương trình đào tạo quốc gia.

*Từ khoá:* quan trắc tự động thời gian thực; hồ đào sâu; hệ cừ, văng chống; biến dạng; cảnh báo đa kênh; Việt Nam.

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE APPLICATION OF AUTOMATIC AND REAL-TIME MONITORING FOR DEEP EXCAVATIONS

### Abstract

Excavation monitoring in Vietnam still relies mainly on intermittent manual surveys, limiting both early-warning capability and data quality. This study installs and evaluates an automatic real-time monitoring (ARTM) system for a 10 m × 10 m, 3 m-deep excavation on soft ground at the Ha Nam campus of Hanoi University of Civil Engineering. The sensor network—comprising embedded inclinometers, surface strain gauges and settlement gauges—employs hybrid wired/wireless connections to stream continuous data throughout excavation, bracing and surcharge phases. The records reveal wall deformation, ground settlement and strut forces that track each construction stage, while discrepancies with total-station checks remain below 5%. Multi-channel alerts (beacon/siren, e-mail, SMS) are issued roughly 20 s after threshold exceedance, enabling timely response to abnormal movements. Results show that ARTM can be operated by existing site personnel, performs especially well at deep or concealed locations, and enhances transparency through cloud-based data storage. These findings confirm the suitability of ARTM for forthcoming metro lines, cable-stayed bridges and super-tall buildings in Vietnam, and provide a technical basis for incorporating continuous monitoring into national standards and training programmes.

*Keywords:* automatic real-time monitoring (ARTM); deep excavation; sheet-pile and strut system; deformation; multi-channel alerting; Vietnam.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(2V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(2V)-01) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [ducna@huce.edu.vn](mailto:ducna@huce.edu.vn) (Đức, N. A.)

## 1. Mở đầu

Các hố đào sâu và kết cấu ngầm tại những đô thị lớn của Việt Nam—đặc biệt trong các dự án tuyến tàu điện ngầm, cầu dây văng nhịp dài và nhà siêu cao tầng—đang được triển khai ngày càng nhiều ngay trên nền đất yếu, mực nước ngầm nông và mật độ công trình lân cận dày đặc [1]. Do đó, chuyên vị ngang tường cừ và lún nền đất trở thành chỉ tiêu kiểm soát chính để bảo đảm an toàn thi công, ngăn ngừa hư hỏng công trình lân cận và duy trì tiến độ dự án [2]. Theo khảo sát sơ bộ trong khuôn khổ nghiên cứu này do nhóm tác giả thực hiện năm 2023–2024 tại 15 công trình ở Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh, hầu hết các dự án sử dụng phương pháp dùng các thiết bị đọc thủ công (máy toàn đạc, nivô, máy đo chuyên vị thủ công) với tần suất trung bình ba ngày một lần, thời gian xử lý báo cáo kéo dài 24–48 giờ. Cách tiếp cận gián đoạn này bỏ sót chuyển động ngắn hạn, cản trở kích hoạt biện pháp phòng ngừa kịp thời, đồng thời tạo các khoảng trống dữ liệu khi hiệu chuẩn mô hình hoặc truy vết nguyên nhân sự cố [3, 4]. Ngoài ra, dữ liệu phân tán và không đồng nhất định dạng làm giảm hiệu quả phân tích ngược, khó tích hợp vào mô hình thông tin công trình (BIM), làm cản trở tiến trình chuyển đổi số ngành xây dựng.

Trên thế giới, hệ thống quan trắc tự động thời gian thực (Automatic Real Time Monitoring - ARTM) được xem là bước tiến tất yếu của quản lý rủi ro địa kỹ thuật [5]. Các khung tiêu chuẩn từ Eurocode 7 [6] đến ISO 18674 1 [7] đều khuyến nghị tích hợp cảm biến liên tục lên các kết cấu chịu lực chính, thiết lập ngưỡng cảnh báo nhiều cấp và truyền dữ liệu theo chuẩn mở. Các nghiên cứu về các công trình ở Tokyo [8] và Singapore [9] đã chứng minh ARTM giúp giảm đáng kể xác suất biến dạng vượt giới hạn thiết kế và cung cấp chuỗi dữ liệu cần thiết cho song sinh số (digital twin), qua đó hỗ trợ ra quyết định theo thời gian thực. Lợi ích này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh xu thế công nghiệp 4.0 thúc đẩy các nền tảng internet vạn vật (IoT), trí tuệ nhân tạo (AI) và phân tích dữ liệu lớn vào quản lý công trình ngầm. Mặc dù Việt Nam đã thí điểm một số nền tảng quản trị dữ liệu tại các tuyến tàu điện ngầm, dữ liệu vẫn chủ yếu lưu hành nội bộ; quy trình cảnh báo sớm, lưu trữ đám mây và chia sẻ liên bên chưa được chuẩn hoá [10]. Dựa trên xu hướng phát triển trên, nghiên cứu này đặt mục tiêu thiết lập và vận hành một hệ thống ARTM thu thập dữ liệu liên tục cho một hố đào thử nghiệm trên nền đất yếu; phân tích hành vi biến dạng tường cừ, lún nền và nội lực văng trong suốt chu trình thi công; đồng thời đánh giá hiệu quả quy trình cảnh báo đa kênh (đèn/còi, email, SMS) so với thực tiễn đo gián đoạn tại Việt Nam. Công trình được đặt trong khuôn viên Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE) tại tỉnh Hà Nam, sử dụng trang thiết bị được cung cấp bởi dự án ASSM được triển khai trong giai đoạn 2024-2025. Dự án ASSM là một sáng kiến hợp tác quốc tế giữa Cơ quan hợp tác quốc tế Nhật Bản (JICA), công ty TNHH Toyoko Elmes (Nhật Bản) và trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Dự án được thực hiện trong môi trường nghiên cứu thuận lợi cho việc thu thập và chia sẻ dữ liệu mở nhằm phục vụ giảng dạy và nghiên cứu tiếp theo.

Bố cục bài báo sau phần (i) mở đầu bao gồm: (ii) tổng quan về công nghệ quan trắc tự động thời gian thực thi công công trình ngầm, (iii) mô tả chi tiết thiết kế thí nghiệm, (iv) kết quả quan trắc và phân tích và thảo luận kỹ thuật cùng khả năng ứng dụng, và (v) kết luận cùng khuyến nghị cho lộ trình chuẩn hóa quan trắc tự động liên tục công trình ở Việt Nam cũng như chương trình đào tạo kỹ sư xây dựng, địa kỹ thuật, và quản lý xây dựng.

## 2. Tổng quan về công nghệ quan trắc tự động thời gian thực thi công công trình ngầm

Quan trắc tự động thời gian thực đã phát triển đáng kể trong ngành xây dựng qua vài thập niên gần đây: chuyển đổi từ những hệ thống sơ khai chỉ nhằm giám sát độ bền kết cấu và an toàn sang các nền tảng tích hợp tinh vi, cho phép thu thập và phân tích dữ liệu liên tục, từ xa. Các ứng dụng ban đầu xuất hiện trong giám sát hạ tầng trọng yếu, chẳng hạn như các công trình cầu, nơi các hệ thống được triển khai để đánh giá hành vi kết cấu theo chương trình và theo thời gian thực, từ đó cung cấp thông

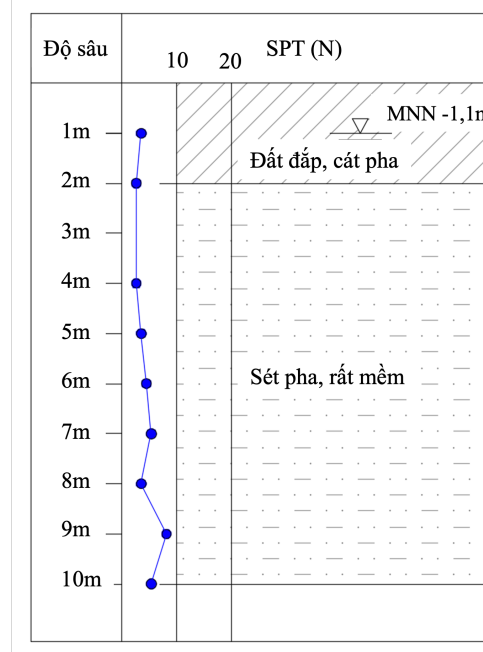
tin cho mô hình số và chiến lược bảo trì [11]. Tương tự, quá trình chuyển từ phương pháp thủ công sang tự động trong thi công đập và kiểm soát chất lượng đã cho thấy tính tất yếu của các hệ thống quan trắc thời gian thực nhằm bảo đảm an toàn thi công và đáp ứng yêu cầu chất lượng không ngừng thay đổi [12]. Những năm gần đây, tiến bộ về công nghệ cảm biến, truyền thông không dây và thị giác máy tính đã tiếp tục cách mạng hóa lĩnh vực này, cho phép đánh giá an toàn tình vi và toàn diện hơn đối với các dự án xây dựng phức tạp, bao gồm hệ ván khuôn cao và biến dạng đường hầm [13, 14]. Các xu hướng mới nổi hiện nay tập trung vào việc tích hợp các công nghệ số - chẳng hạn như xử lý ảnh, BIM và IoT - với hệ thống quan trắc tự động để cung cấp phản hồi hiệu suất theo thời gian thực và hỗ trợ ra quyết định, qua đó nâng cao kiểm soát chất lượng và quản lý an toàn trong xây dựng [15]. Mô hình “song sinh số địa kỹ thuật” [16] hiện đang được hiện thực hoá ở các dự án lớn ở châu Âu và Đông Á, cho phép đồng bộ dữ liệu quan trắc, bằng mô phỏng phần tử hữu hạn, ra quyết định thi công theo vòng phản hồi khép kín. Bộ Đất đai, Hạ tầng, Giao thông và Du lịch (MLIT) Nhật Bản quy định hai ngưỡng cảnh báo 0,8 và 1,0 lần giới hạn thiết kế cho các công trình giao thông [17]. Wang và cs. [18] đề xuất nhiều cấp cảnh báo với giá trị thích ứng cho các hố đào sâu để vừa nâng cao độ nhạy, vừa giảm tần suất cảnh báo giả. Yang và cs. [19] xét đến sự ảnh hưởng của rung động và nhiệt độ đến hệ chống đỡ hố đào. Các nghiên cứu của Joshi và Mahmoudi [20] và Macke và cs. [21] tập trung vào các thuật toán trí tuệ nhân tạo làm nâng cao khả năng phát hiện biến dạng bất thường trong các công trình hầm, cho thấy sự quan tâm của giới học thuật đến vấn đề này.

Ở Việt Nam, đã có các nghiên cứu liên quan đến việc sử dụng các cảm biến gia tốc nhằm mục đích đo lường dao động kết cấu công trình: thiết kế, chế tạo thiết bị [22], cảnh báo sạt lở [23], và quan trắc cầu thời gian thực [24, 25]. Tuy nhiên, theo khảo sát sơ bộ của nhóm tác giả trong giai đoạn 2023–2024 ghi nhận tại một số dự án thực tế (15 dự án tại các khu đô thị lớn) nhận thấy rằng: (i) việc sử dụng ARTM hiện rất hạn chế, cả về mức độ phổ biến và mức độ nhận thức, (ii) các dữ liệu đo thường lưu trữ cục bộ, không có kết nối đám mây và cảnh báo từ xa, và (iii) chưa có công trình nào công bố bộ dữ liệu thời gian thực dạng mở. Ngoài ra các tiêu chuẩn xây dựng trong nước cũng chưa quy định rõ ràng về tần suất quan trắc hoặc chưa nhắc đến yêu cầu “liên tục” và “thời gian thực” trong quan trắc công trình ngầm. Do đó nghiên cứu này nhằm mục đích tận dụng cơ sở vật chất kỹ thuật do JICA, Toyoko Elmes và HUCE cung cấp để phân tích thử nghiệm nhằm mục đích hướng tới giải quyết khoảng trống (i)–(iii) nêu trên và tạo nền tảng khoa học cho lộ trình sửa đổi tiêu chuẩn quốc gia về quan trắc thi công.

### 3. Thiết kế nghiên cứu thực nghiệm và kế hoạch quan trắc

#### 3.1. Mô tả công trình thử nghiệm

Hố đào thử nghiệm có kích thước 10 m × 10 m, sâu 3 m, đáy được phủ lớp bê tông lót dày 0,15 m. Hệ chống đỡ gồm tường cừ thép Larsen loại IV dài 6,5 m, phối hợp hai hàng văng thép hình H-350 và hai bơm hạ mực nước ngầm bảo đảm duy trì mực nước dưới đáy hố. Theo kết quả khoan khảo sát (Hình 1), địa tầng phía trên là lớp đất đắp cát pha

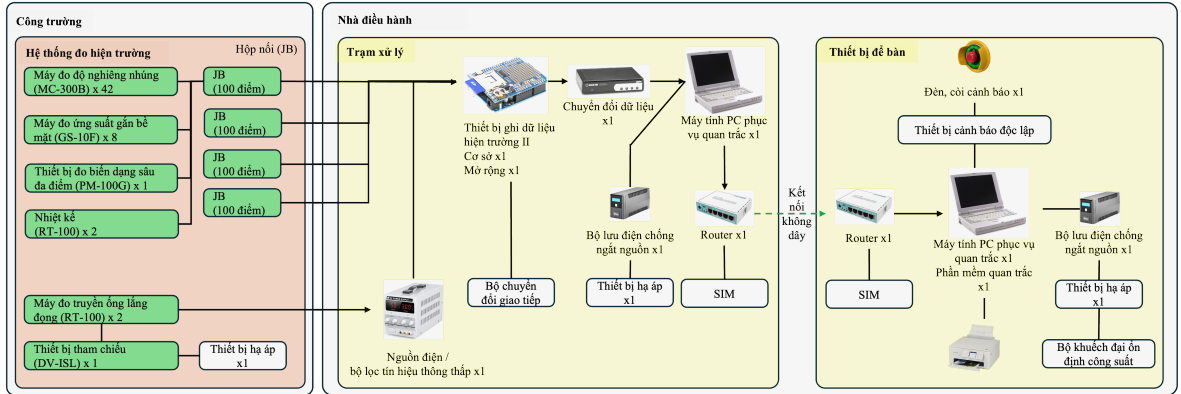


Hình 1. Kết quả khảo sát địa chất gián lược tại khu vực thí nghiệm

dày khoảng 2 m; bên dưới là lớp sét pha rất mềm kéo dài tới cao độ  $-10$  m với chỉ số SPT-N từ 2 đến 4. Mực nước ngầm ổn định ở độ sâu xấp xỉ 1,1 m dưới mặt đất tự nhiên.

### 3.2. Thiết bị quan trắc và sơ đồ kết nối

Hệ thống ARTM trong nghiên cứu này bao gồm ba cấu phần: (i) công trường – thu thập tín hiệu từ công trình và nền đất xung quanh, (ii) trạm xử lý được bố trí trong nhà điều hành/nhà quan trắc, bao gồm các thiết bị ghi, chuyển đổi dữ liệu, và (iii) hệ thống giao tiếp với con người, bao gồm máy tính hiển thị kết quả và nhận lệnh, và thiết bị cảnh báo (Hình 2).



Hình 2. Sơ đồ làm việc hệ thống quan trắc - cảnh báo

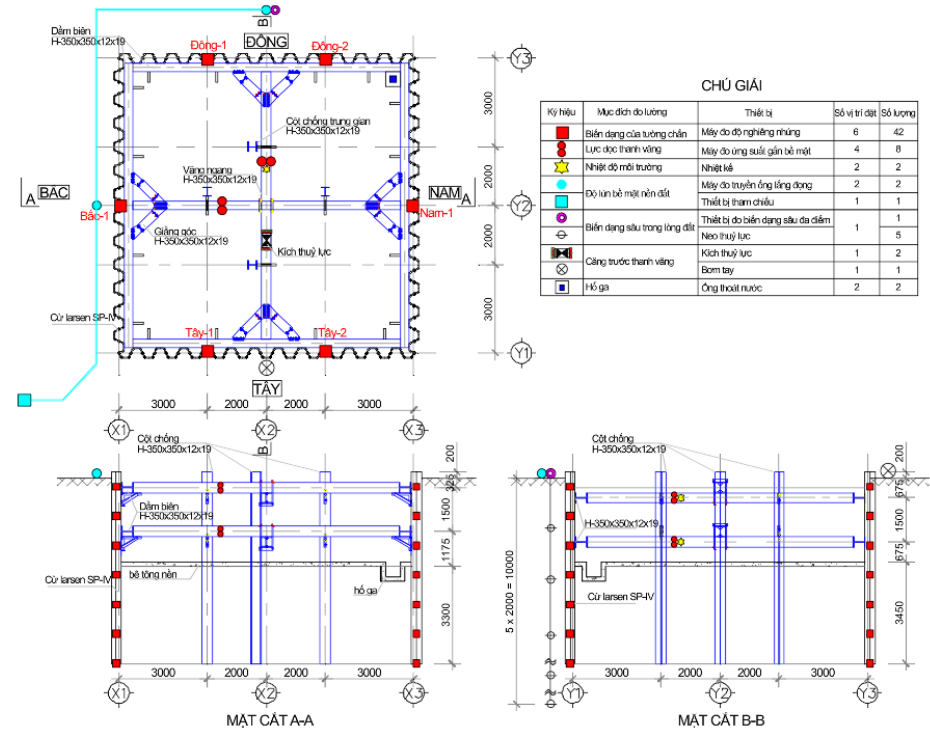
Trong hệ thống, bộ phận (i) được kết nối với (ii) thông qua cáp thông tin chuyên dụng, có thể đi ngầm hoặc đi nổi trên công trường. Còn bộ phận (ii) kết nối với (iii) thông qua mạng nội bộ không dây, có dây, hoặc kết nối di động nhờ SIM 4G của một nhà cung cấp viễn thông bất kỳ. Trong thí nghiệm này, do (ii) và (iii) đều nằm trong nhà quan trắc để đều được bảo vệ khỏi thời tiết hoặc các yếu tố bên ngoài, chúng được liên kết bằng liên kết mạng nội bộ có dây để tăng tốc độ truyền tín hiệu. Bộ phận giao tiếp với người sử dụng (iii) gửi cảnh báo từ xa đến người dùng (email, tin nhắn SMS) qua SIM 4G.

### 3.3. Thiết kế hố đào và lắp đặt

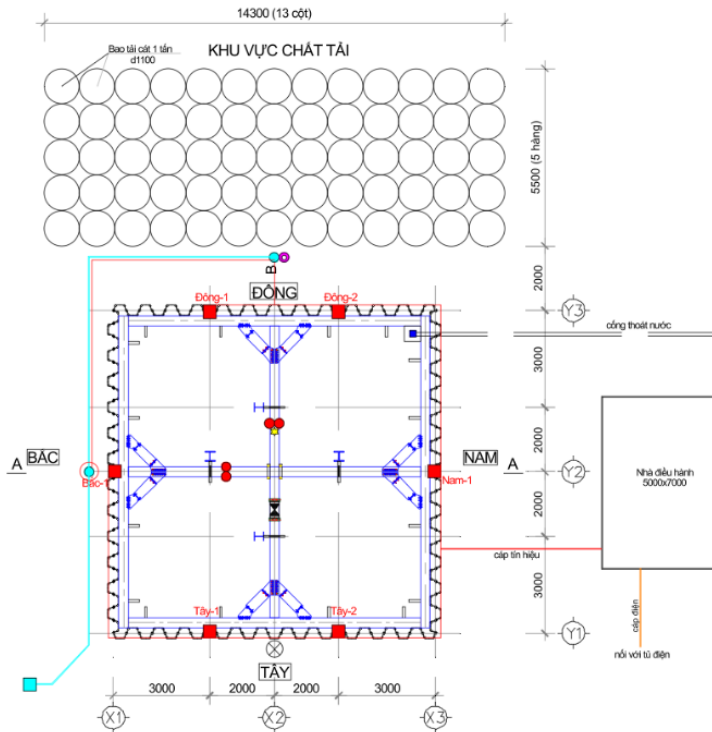
Hình 3 và Hình 4 lần lượt thể hiện cấu tạo hố đào, vị trí lắp đặt thiết bị, và vị trí đặt tải trọng. Do mục đích của thí nghiệm là phân tích sự làm việc của hệ thống quan trắc, đặc biệt là độ nhạy và khả năng cảnh báo, kích thước tiết diện của các bộ phận chống tam (cừ và văng) đều lớn hơn các cấu kiện tại các hố đào có quy mô tương đương ở Việt Nam.

### 3.4. Trình tự thi công và lắp đặt thiết bị

Đầu tiên, công trường được nhà thầu xây dựng san phẳng mặt bằng, bố trí mốc không chế và kéo cáp nguồn–tín hiệu tới vị trí nhà quan trắc tạm. Tiếp đó, bốn cọc thép tiết diện chữ H và 100 cừ Larsen được ép bằng máy ép êm. Sau khi ống bảo vệ được hàn trực tiếp vào bản cừ và thiết bị nhúng đo nghiêng đa tầng được luồn vào, các cảm biến lún bề mặt được lắp và đấu cáp về logger. Hố đào được tiến hành thành hai giai đoạn: đào lần 1 xuống cao độ  $-1,5$  m rồi lắp văng chống tầng 1, căng văng và hàn thiết bị đo ứng suất cùng nhiệt kế; đào lần 2 đạt độ sâu thiết kế  $-3$  m, san đáy và đổ bê tông lót trước khi lắp văng chống tầng 2. Toàn bộ cáp tín hiệu sau đó được gom gọn vào rãnh kỹ thuật dẫn về logger IoT, router 4G và UPS bên trong nhà quan trắc; hệ thống được chạy thử 24 giờ để xác nhận đồng bộ dữ liệu và kích hoạt chu trình cảnh báo trước khi chuyển sang giai đoạn chắt tải kiểm chứng.



Hình 3. Thiết kế thực nghiệm



Hình 4. Sơ đồ chất tải thí nghiệm

#### 4. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

##### 4.1. Quá trình thi công đào đất và lắp dựng thiết bị

Hình 5 thể hiện chọn lọc các công tác chính của việc thi công lắp dựng trên hiện trường; tổng tiến độ giai đoạn này kéo dài khoảng 25 ngày.

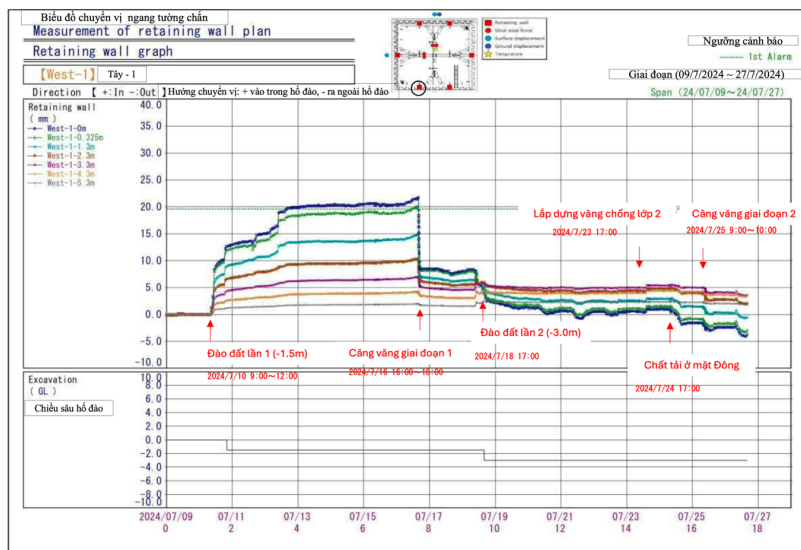


Hình 5. Quá trình thi công lắp dựng trên hiện trường

##### 4.2. Kết quả biến dạng, chuyển vị, nội lực của hệ thống được ghi nhận và cảnh báo

Hình 6 thể hiện số liệu biến dạng của thanh cừ tại vị trí Tây-1 theo các giai đoạn thi công. Trong đó, biến dạng có dấu (+) là chuyển vị theo phương tác động của tải trọng, còn dấu (-) là chuyển vị ngược với phương tác động của tải trọng. Dữ liệu trên Hình 6 cho thấy chuyển vị ngang biến đổi phù hợp với dự đoán của các giai đoạn và hoạt động thi công. Cụ thể, khi đào đất đợt 1, biến dạng lớn nhất trên đỉnh cừ (~ 20 mm) và giảm dần xuống chân cừ. Khi căng văng giai đoạn 1, các biến dạng giảm đều (đỉnh cừ ~ 8 mm). Khi đào đất lần 2, sơ đồ biến dạng thay đổi: các đoạn giữa cừ biến dạng nhiều hơn so với đỉnh cừ. Cuối cùng, khi chất tải, đỉnh cừ biến dạng âm (~ -3 mm). Hiện tượng này xảy ra có thể vì tải trọng phân bố trên bề mặt làm tăng áp lực thẳng đứng và đồng thời giảm chênh lệch áp lực đất bên dưới đỉnh cừ, khiến đỉnh cừ dịch nhẹ trở lại phía ngoài hố đào. Ngoài ra, hướng dịch chuyển trái chiều giữa hai pha đào bắt nguồn từ việc pha 1 chưa có hệ chống, nên tường bị đẩy ra ngoài dưới áp lực chủ động (chuyển vị dương). Còn ở pha 2, hệ văng lớp 1 đã căng nên khoá phía đỉnh cừ, khiến đỉnh cừ chuyển vị ngược hướng tương đối so với bụng cừ. Qua so sánh với kết quả đo

không liên tục bằng máy toàn đạc (Bảng 1) đối với điểm đỉnh cừ, kết quả cho thấy các sai lệch nhỏ, đều ở mức < 5%.



Hình 6. Chuyển vị cừ vị trí Tây-1

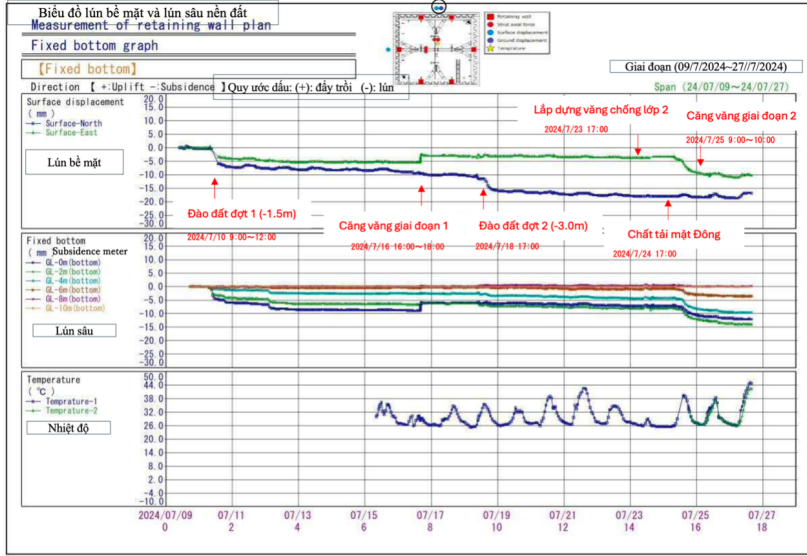
Bảng 1. So sánh kết quả đo chuyển vị đỉnh cừ của ARTM với đo quang thủ công (mm)

Ngày đo	ARTM	Toàn đạc	Sai lệch
Ngày 15/7	21,4	22,3	-4,04%
Ngày 18/7	7,9	7,7	2,60%
Ngày 21/7	1,1	1,1	0%
Ngày 24/7	1,5	1,5	0%

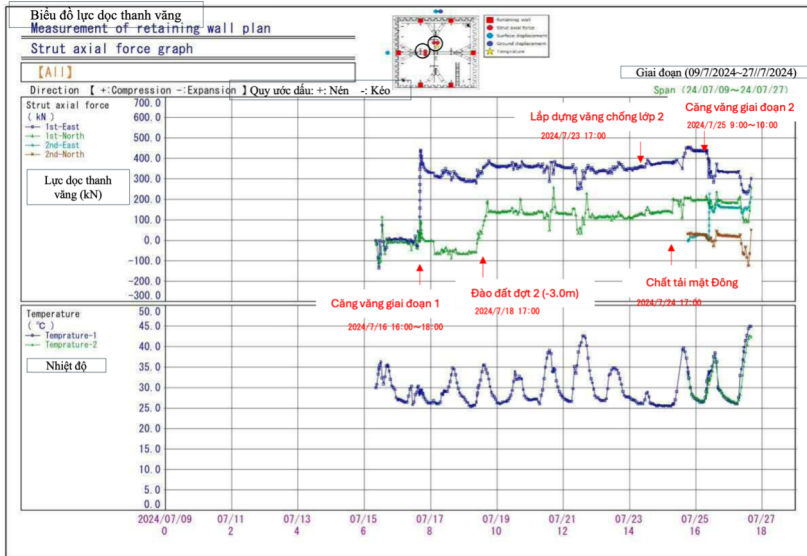
Các dịch chuyển ngang và lún của nền đất được thể hiện Hình 7. Về chuyển vị ngang, hướng Đông-Tây (theo phương chất tải) có chuyển vị không biến đổi nhiều, chỉ trong khoảng -5 mm đến -10 mm và thay đổi khi có các hành vi đào đất, căng văng, và chốt tải. Theo phương Bắc-Nam (phương vuông góc với phương chất tải), chuyển vị tăng dần theo thời gian khi có các hành vi đào đất đợt 1 và đợt 2. Ở thời điểm chuyển vị vượt ngưỡng cảnh báo (nghiên cứu này lựa chọn ngưỡng  $\pm 20$  mm với mục đích kiểm tra sự hoạt động của hệ thống), hệ thống đã gửi cảnh báo thành công đến thư điện tử và nhắn tin SMS đến điện thoại của cá nhân đã đăng ký.

Hình 7 cũng thể hiện chuyển vị theo phương đứng (lún) ở các độ sâu 0, -2, -4, -6, -8, -10 m. Chuyển vị lún nhiều nhất ở ngay trên bề mặt đất và cao độ -2 m (tối đa ~ -8 mm khi chưa chốt tải, tối đa ~ -14 mm khi đã chốt tải). Khi chưa chốt tải, lún tụt ở cao độ -6 m. Khi chốt tải, lún tụt ở cao độ -8 m.

Hình 8 thể hiện kết quả nội lực đo được trong các thanh văng 2 lớp. Khi chưa chốt tải, nội lực ở thanh Đông-Tây, lớp 1 biến đổi trong khoảng ~ 300 kN đến ~ 450 kN (kéo). Còn ở thanh Bắc-Nam, lớp 1 trong khoảng -70 kN (nén) đến ~ 140 kN (kéo). Nguyên nhân của sự sai lệch khi chưa chốt tải, trong khi hố đào và hệ chống được thiết kế đối xứng, có thể do sự không đồng nhất của địa chất xung quanh hố đào. Ngoài ra, nhiệt độ môi trường có một số ảnh hưởng đến nội lực thanh văng; tuy nhiên, nghiên cứu này chưa xem xét cụ thể các ảnh hưởng này.



Hình 7. Chuyển vị nền đất lân cận



Hình 8. Biểu đồ lực dọc thanh văng

#### 4.3. Thảo luận kết quả và tính ứng dụng của sản phẩm dự án trong thi công xây dựng hố đào tại Việt Nam

Sau đợt quan trắc, vào ngày 10/01/2025, nhóm nghiên cứu đã tổ chức một buổi tọa đàm kỹ thuật tại trường Đại học Xây dựng Hà Nội với tên gọi “Công nghệ quan trắc địa kỹ thuật và hệ thống cảnh báo sớm hỗ trợ quản lý an toàn trong thi công xây dựng công trình tại Việt Nam”. Các đại diện tham gia bao gồm một số nhà thầu nền móng trong nước, các đơn vị tư vấn giám sát, các giảng viên chuyên ngành Cơ học đất – Nền móng, công nghệ và quản lý xây dựng thi công thuộc các trường đại học kỹ thuật, và một số chuyên gia từ Bộ Xây dựng. Cuộc thảo luận xoay quanh bốn khía cạnh: khả năng vận hành, giá trị kỹ thuật của dữ liệu liên tục, hiệu quả cảnh báo và triển vọng nhân rộng.



a. Khả năng vận hành

Qua trình bày và nhận định sơ bộ của nhóm nghiên cứu, các thành viên tham gia toạ đàm đồng ý rằng thiết lập phần cứng–phần mềm của hệ ARTM không phức tạp hơn so với quy trình đo thủ công truyền thống: mô-đun logger hoạt động theo nguyên lý “cắm–chạy”, bảng điều khiển hiển thị đồ hoạ trực quan và các ngưỡng cảnh báo được cấu hình sẵn nên kỹ sư hiện trường chỉ cần thao tác cơ bản (cắm cáp, khởi động, xem màn hình bảng điều khiển). Cơ chế truyền dữ liệu qua 4G LTE hoạt động ổn định; ba sự cố mất nguồn được UPS lưu điện xử lý tự động và không gây mất mát dữ liệu. Theo đánh giá của đại diện nhà thầu DELTA: “một tổ quan trắc hai người có thể giám sát 24/24h thay vì bốn người phải thiết lập trạm đo toàn đạc 3 ngày/lần”.

b. Giá trị kỹ thuật của dữ liệu liên tục

Dữ liệu liên tục đã làm rõ đường cong biến dạng của tường cừ theo từng bước thi công, giúp các chuyên gia truy vết được “điểm gãy” biến dạng ứng với thời điểm đào và căng văng, điều mà chuỗi đo gián đoạn không thể phản ánh. Đặc biệt, ở độ sâu  $-4$  m và  $-6$  m cảm biến chuyển vị ngang vẫn ghi nhận biến dạng nhỏ ở mức  $0,02-0,04$  mm—mức nhiều nằm dưới ngưỡng phát hiện của phương pháp thủ công. Các giảng viên từ Đại học Xây dựng Hà Nội và Đại học Thủy lợi đánh giá lợi thế này “rất quan trọng đối với hố đào sâu  $> 10$  m, nơi biến dạng lớn nhất thường nằm sâu dưới mặt đất”. Hệ thống cũng giúp khớp nối nội lực văng và dịch chuyển tường trong cùng khung thời gian, tạo cơ sở dữ liệu quý cho các nghiên cứu mô hình ngược (back-analysis) sau này.

c. Hiệu quả cảnh báo đa kênh

Trong hai tháng, hệ thống đã một số cảnh báo khi biến dạng vượt ngưỡng. Thời gian chênh giữa ghi nhận biến dạng vượt ngưỡng và khoảnh khắc email–SMS đến điện thoại nhóm phản ứng trung bình 20 giây. Chuông còi và đèn xoay kích hoạt tức thì, hỗ trợ công nhân và quản lý nhận biết nguy cơ ngay cả khi không truy cập màn hình điều khiển. Đại diện phía đơn vị tư vấn giám sát (công ty CONINCO) đánh giá khả năng này của hệ thống rất cao trong việc nâng cao kiểm soát an toàn toàn thời gian cho giai đoạn thi công ngầm.

d. Quy trình ứng dụng hệ ARTM tại công trường

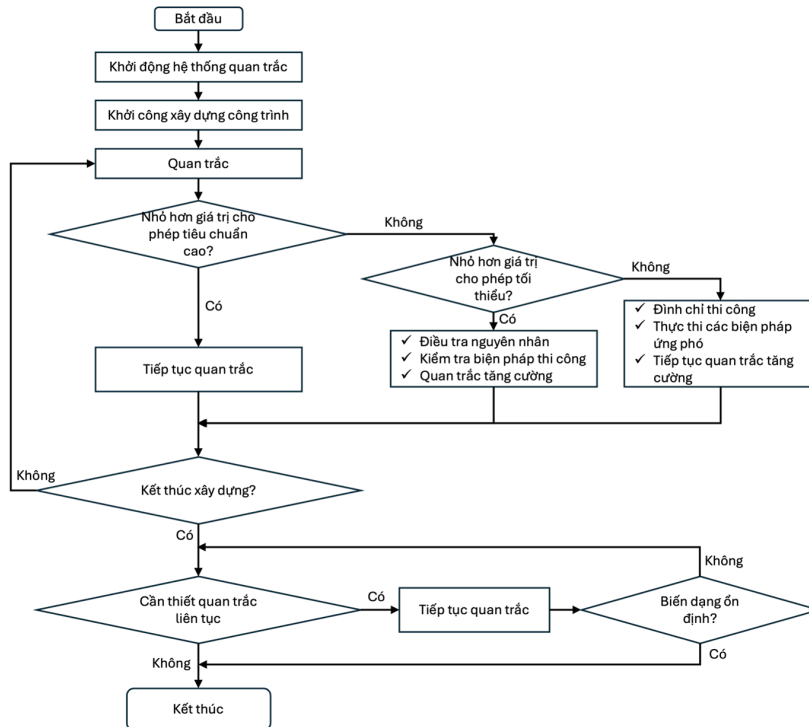
Nhóm nghiên cứu đề xuất quy trình ứng dụng và được các chuyên gia góp ý. Sau khi chỉnh sửa, nghiên cứu đưa ra quy trình (Hình 9). Trong quy trình này, hệ thống quan trắc có thể được duy trì kể cả sau khi phần xây dựng ngầm đã hoàn thành, tùy thuộc tính chất công trình và nhu cầu của chủ đầu tư.

e. Triển vọng áp dụng đại trà tại Việt Nam

Các bên tham gia toạ đàm thống nhất rằng mô hình hố đào thử nghiệm - dù quy mô nhỏ và chỉ chịu một dạng tải tĩnh - đủ chứng minh tính khả thi tại hiện trường Việt Nam. Nhờ cấu trúc modun, chuỗi thiết bị có thể mở rộng cho hố đào sâu hoặc kết cấu chịu tải động (đường hầm khoan bằng máy, cầu dây văng, nhà siêu cao tầng). Chuyên gia từ Bộ Xây dựng đề xuất bổ sung tiêu chí “quan trắc liên tục” vào các tiêu chuẩn xây dựng về quản lý chất lượng thi công để “áp dụng trước cho công trình cấp đặc biệt và cấp I”.

f. Các hạn chế và hướng nghiên cứu tiếp

(i) Thí nghiệm chỉ khảo sát một kịch bản tải nên chưa lượng hoá ảnh hưởng của tải động; (ii) dữ liệu mới kéo dài hai tháng, cần mở rộng theo dõi sau thi công nhiều năm để đánh giá biến dạng thứ cấp; (iii) chưa tích hợp mô hình số song sinh (digital twin) để tự động hiệu chỉnh tham số đất; và rất quan trọng, (iv) chưa xét đến bài toán chi phí ở mức độ dự án.



Hình 9. Quy trình ứng dụng mô hình ARTM để quan trắc công trình

Các chuyên gia kết luận rằng hệ ARTM thỏa mãn ba tiêu chí cốt lõi cho điều kiện Việt Nam: (1) dễ triển khai – vận hành, (2) nâng cao minh bạch dữ liệu thông qua truy cập liên tục và lưu trữ đám mây, (3) cảnh báo 24/24 kịp thời để hỗ trợ quyết định an toàn. Những kết quả bước đầu này đặt nền tảng vững chắc cho việc định chế hoá ARTM vào hệ tiêu chuẩn xây dựng quốc gia, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu sâu hơn về song sinh số và trí tuệ nhân tạo trong quản lý rủi ro địa kỹ thuật.

## 5. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh rằng hệ thống quan trắc tự động thời gian thực (ARTM) mang lại những lợi thế vượt trội cho công tác kiểm soát hồ đào trong điều kiện nền đất yếu và mực nước ngầm nông phổ biến ở Việt Nam. Trước hết, chuỗi dữ liệu liên tục cho phép nhận diện chính xác diễn biến biến dạng của tường cừ và nền đất ngay khi phương pháp thi công thay đổi, thay vì phải chờ các đợt đo gián đoạn cách nhau nhiều ngày. Nhờ vậy, quy trình cảnh báo sớm đa kênh được kích hoạt kịp thời, giúp nhà thầu thi công có thể phản ứng ngay tại chỗ và giảm rủi ro vượt giới hạn thiết kế. Cách tiếp cận dòng thông tin liên tục này đồng thời tạo ra bộ dữ liệu giàu chiều sâu, một điều kiện tiên quyết để hiệu chuẩn mô hình số, thực hiện phân tích ngược và tiến tới xây dựng song sinh số cho công trình ngầm cũng như các mô hình tiên tiến khác. Thứ hai, quá trình vận hành thử cho thấy ARTM có thể được triển khai và quản lý bởi kỹ sư hiện trường Việt Nam mà không đòi hỏi công nghệ cao cấp hay nhân lực chuyên biệt. Giao diện trực quan, cấu trúc mô-đun “cắm-chạy” và khả năng truyền dữ liệu qua mạng di động khiến hệ thống phù hợp với cả công trường nội đô chật hẹp lẫn khu vực hạ tầng hạn chế. Ưu điểm này đặc biệt giá trị đối với các dự án trong tương lai như tuyến tàu điện ngầm, cầu dây văng nhịp lớn hay nhà siêu cao tầng, nơi nhu cầu giám sát 24/7 là bắt buộc. Thứ ba, dữ liệu được lưu trữ trên nền tảng đám mây và chia sẻ minh bạch giữa nhà thầu, tư vấn và chủ đầu tư, qua đó nâng cao trách nhiệm các bên và hỗ trợ quá trình kiểm định sau khi hoàn thành. Mô hình này phù hợp với lộ trình chuyển đổi số của ngành xây dựng Việt Nam, đồng thời đáp ứng yêu cầu về an toàn và phát

triển bền vững trong các chuẩn mực quốc tế. Từ những lợi ích đã được kiểm chứng, nhóm tác giả kiến nghị: (i) lồng ghép yêu cầu quan trắc liên tục vào các tiêu chuẩn và quy chuẩn xây dựng đối với công trình cấp I trở lên, (ii) xây dựng chương trình đào tạo ngắn hạn về ARTM cho kỹ sư và cán bộ hiện trường, và (iii) thúc đẩy các dự án nghiên cứu mở rộng ARTM sang công trình chịu tải động và theo dõi dài hạn sau thi công. Việc triển khai rộng rãi ARTM không chỉ nâng cao an toàn lao động mà còn góp phần nâng tầm năng lực quản lý rủi ro địa kỹ thuật, phù hợp với xu hướng số hóa và hội nhập quốc tế của ngành xây dựng Việt Nam.

### Lời cảm ơn

Nhóm nghiên cứu trân trọng cảm ơn Cơ quan Hợp tác Quốc tế Nhật Bản (JICA), Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE), và Công ty TNHH Toyoko Elmes (Nhật Bản), thông qua Dự án ASSM (QĐ 315/QĐ-BGDĐT của Bộ Giáo dục và Đào tạo ngày 17/01/2024) đã hỗ trợ nghiên cứu này.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Khoa, N. D. Đ., Sỹ, Đ. T., Hải, P. T. (2022). [Đánh giá những nhân tố gây ảnh hưởng đến chất lượng tường vây, tường chắn đất trong các dự án xây dựng ở Việt Nam](#). *Tạp chí Vật liệu & Xây dựng - Bộ Xây dựng*, 11(05).
- [2] Toàn, L. T. A., Quý, L. V., Bình, L. T., Việt, T. Q. (2022). [Phân tích chiều sâu hố đào có xét đến chuyên vị giới hạn của tuyến tunnel ở khu vực lân cận](#). *Tạp chí Vật liệu & Xây dựng - Bộ Xây dựng*, 12(03).
- [3] Dunnycliff, J. (1993). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons.
- [4] Soga, K. (2017). [Whole life sensing of infrastructure](#). *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 43:111–130.
- [5] Lebedev, M. (2016). [Automated Systems as a Part of Geotechnical Monitoring in Construction and Operation of Transport Tunnels](#). *Procedia Engineering*, 165:448–454.
- [6] Bond, A. J., Bernd, S., Scarpelli, G., Orr, T. L. L. (2013). *BS EN 1997-1:2004+A1:2013 Eurocode 7: Geotechnical Design - Part 1: General Rules*. Volume 87, Number 18.
- [7] ISO 18674 1:2021 (2021). *Geotechnical investigation and testing—Geotechnical monitoring by field instrumentation—Part 1: General rules*. International Organization for Standardization.
- [8] Cong, Y., Inazumi, S. (2024). [Integration of Smart City Technologies with Advanced Predictive Analytics for Geotechnical Investigations](#). *Smart Cities*, 7(3):1089–1108.
- [9] Yang, H.-Q., Chu, J., Wu, S., Zhu, X., Qi, X., Chiam, K. (2024). [Advancing geological modelling and geodata management: a web-based system with AI assessment in Singapore](#). *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 19(1):218–232.
- [10] Trì, N. N. M., Tùng, N. X., Quyết, L. N. (2024). [Áp dụng mô hình tích hợp BIM và GIS phục vụ quản lý, khai thác, vận hành và bảo trì dự án công trình hạ tầng – nghiên cứu điển hình: ga Tân Cảng, Metro số 1: Bến Thành – Suối Tiên](#). *Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ*, 60(5):11–18.
- [11] Sousa, H., Figueiras, J., Bento, J. (2010). [Structural Monitoring of Lezíria Bridge Since Its Construction](#). 191–191.
- [12] Zhong, D., Cui, B., Liu, D., Tong, D. (2009). [Theoretical Research on Construction Quality Real-Time Monitoring and System Integration of Core Rockfill Dam](#). *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52(11):3406–3412.
- [13] Chi, C., Pang, B., Ren, J., Lu, Y., Li, X., Huang, M. (2024). [A Safety Monitoring Method for High-Formwork Support Structures Based on Computer Vision Recognition](#). *Industrial Construction*, 54(2): 65–72.
- [14] Xu, Y., Li, Y., Qiu, J. (2022). [Application of Inclination Sensor in Real-Time Remote Monitoring System of Tunnel Structure Deformation](#). *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022:1–12.
- [15] Omar, H., Mahdjoubi, L., Kheder, G. (2018). [Towards an Automated Photogrammetry-Based Approach for Monitoring and Controlling Construction Site Activities](#). *Computers in Industry*, 98:172–182.
- [16] Guan, Z., Wang, Y. (2024). [Fusion of three-dimensional geotechnical and geophysical data for developing digital twin of underground space](#). *Soils and Foundations*, 64(6):101528.

- [17] Shimizu, N. (2024). *Guidelines for Geotechnical Instrumentation for Safety Monitoring in Open-Cut Construction Ver.2*. Tokyo.
- [18] Wang, X., Pan, Y., Li, M., Chen, J. (2024). [A novel data-driven optimization framework for unsupervised and multivariate early-warning threshold modification in risk assessment of deep excavations](#). *Expert Systems with Applications*, 238:121872.
- [19] Yang, Y., Zeng, H., Liu, X., Yang, B., Li, Y. (2023). [Real-Time Monitoring for Effects of Vibration and Temperature of Construction Site on Steel Assembly Bracing of Foundation Pit](#). *Buildings*, 13(2):450.
- [20] Joshi, K., Mahmoudi, E. (2023). [Comparison of Various Methodologies to Detect Anomalies in a Time Series Data Taken from a Tunnelling Project](#). *Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering*, Cham, Springer International Publishing, 205–222.
- [21] Macke, S., Munsch, S., Stascheit, J., Maidl, U., Hegemann, F. (2024). [AI-based anomaly detection in tunnel excavation data](#). *Geomechanics and Tunnelling*, 17(4):312–323.
- [22] Thăng, P. B., Khánh, D. Q., Dũng, V. Q., Đức Anh, N. X., Quân, H. M., Giang, L. H. (2025). [Thiết kế, chế tạo thiết bị đo dao động kết cấu công trình sử dụng cảm biến gia tốc MEMS](#). *Tạp chí điện tử Khoa học và Công nghệ Giao thông*, 5(1):36–45.
- [23] Vũ, N. T., Hải, N. T. (2023). [Nghiên cứu, đánh giá tiềm năng ứng dụng cảm biến gia tốc trong quan trắc và cảnh báo sạt lở](#). *Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu*, 26(26):68–81.
- [24] Dương, N. H. (2025). [Ứng dụng điện thoại thông minh và phép đo gián tiếp khảo sát dao động công trình cầu](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 19(1V).
- [25] Quang, V. N., Hà, N. V., Trọng, T. Đ. (2023). [Kết hợp GNSS, cảm biến gia tốc và giải pháp IoT trong quan trắc cầu thời gian thực](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 17(4V): 139–151.