

# Đánh giá ổn định hố đào và nội lực kết cấu ga S11 thi công top-down trong điều kiện mực nước ngầm cao

Assessment of excavation stability and structural internal forces of S11 underground station constructed by the top-down method under high groundwater conditions

> THS TRẦN THỊ THU HIỀN

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: tranhiennxht@utc.edu.vn

## TÓM TẮT

Thi công ga ngầm trong điều kiện đô thị có mực nước ngầm cao đặt ra nhiều thách thức về ổn định hố đào và an toàn kết cấu khi áp dụng công nghệ top-down. Bài báo trình bày đánh giá đồng thời ổn định địa kỹ thuật và nội lực kết cấu của ga ngầm S11 thông qua mô hình phân tích liên hợp đất-kết cấu có xét đến điều kiện địa chất, tải trọng thi công, áp lực nước ngầm và trình tự thi công theo giai đoạn. Hai kịch bản mực nước ngầm, gồm mực nước tự nhiên và hạ đến cao độ đáy, được so sánh để xác định ảnh hưởng đến ổn định đáy, chuyển vị tường vây và nội lực trong hệ sàn-tường. Kết quả cho thấy mực nước ngầm cao làm giảm hệ số an toàn bùng đáy, tăng chuyển vị ngang và gia tăng mô-men uốn trong các bản sàn, đặc biệt ở sàn đáy, trong khi biện pháp hạ nước giúp cải thiện rõ rệt ổn định và giảm nội lực kết cấu. Nghiên cứu cung cấp cơ sở cho thiết kế và kiểm soát nước ngầm trong các dự án tương tự.

**Từ khóa:** Hố đào sâu; ổn định địa kỹ thuật; nội lực kết cấu; thi công top-down; mực nước ngầm.

## ABSTRACT

The construction of underground stations in urban areas

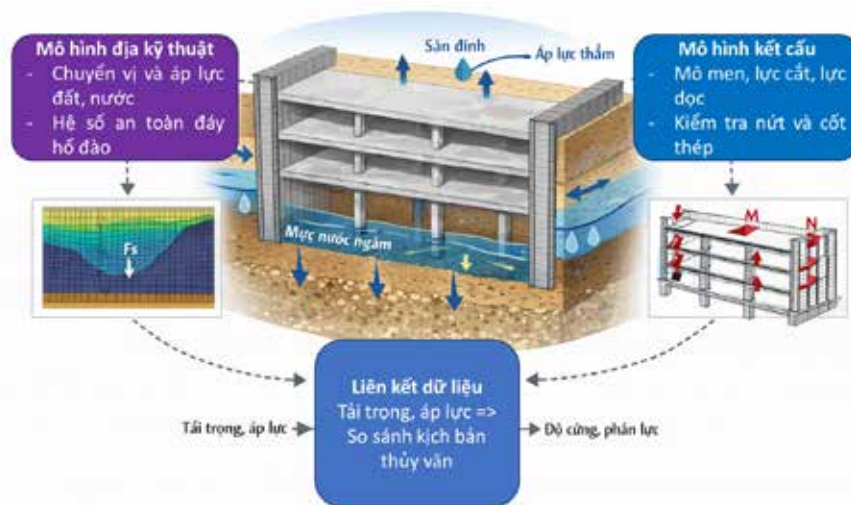
with high groundwater levels poses significant challenges to excavation stability and structural safety when using the top-down method. This study provides an integrated assessment of geotechnical stability and structural internal forces for Station S11 using a coupled soil-structure numerical model that accounts for geological conditions, construction loads, groundwater pressure and staged construction sequences. Two groundwater scenarios, including the natural level and a lowered level to the base slab, were compared to evaluate their effects on basal stability, diaphragm wall displacement and internal forces within the slab-wall system. The results show that high groundwater levels considerably reduce basal safety factors, increase lateral wall deformation and amplify bending moments in structural slabs, particularly in the base slab, whereas lowering groundwater levels significantly improves stability and reduces structural demand. The findings offer practical guidance for groundwater control and structural design optimization for underground stations constructed under similar geotechnical and hydrogeological conditions.

**Keywords:** Deep excavation; geotechnical stability; structural internal forces; top-down construction; groundwater level.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, hệ thống đường sắt đô thị đang được phát triển mạnh tại các thành phố lớn nhằm giảm ùn tắc giao thông và nâng cao năng lực vận tải hành khách. Phần lớn các nhà ga trung tâm được bố trí ngầm trong khu vực đô thị mật độ xây dựng cao, không gian thi công hạn chế và điều kiện địa chất-thủy văn phức tạp. Trong bối cảnh đó, phương pháp thi công top-down được áp dụng rộng rãi nhờ ưu điểm giảm chiếm dụng mặt bằng, hạn chế

ảnh hưởng giao thông bề mặt, tận dụng các bản sàn như hệ chống tạm và tăng độ cứng tổng thể của hệ tường vây-sàn, từ đó kiểm soát chuyển vị và lún nền hiệu quả hơn so với nhiều phương án đào mở truyền thống. Tuy nhiên, đối với các hố đào sâu trong đất bão hòa nước, mực nước ngầm cao có thể gây mất ổn định đáy hố đào, gia tăng áp lực thấm và lực đẩy nổi, đồng thời làm tăng chuyển vị tường vây và nội lực trong hệ kết cấu chống đỡ, tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn trong thi công cũng như khai thác lâu dài [1].



Hình 1. Khung phân tích liên hợp đất-kết cấu trong thi công top-down

Nhiều nghiên cứu trước đây đã tập trung đánh giá ứng xử của hố đào sâu và hệ tường vây thông qua quan trắc thực địa hoặc mô phỏng số, trong đó các chỉ tiêu thường được xem xét bao gồm chuyển vị ngang tường, lún bề mặt, mô-men uốn tường và lực trong hệ chống. Các kết quả cho thấy công nghệ top-down có khả năng giảm biến dạng đáng kể nhờ sự tham gia sớm của các bản sàn như các tầng chống cứng. Bên cạnh đó, các nghiên cứu địa kỹ thuật cũng chỉ ra rằng trong điều kiện nền bão hòa, hiện tượng bùng đáy, xói ngầm và phá hoại thủy lực do dòng thấm hướng lên là những cơ chế mất ổn định quan trọng, đặc biệt khi chênh lệch cột nước giữa trong và ngoài hố đào lớn [2]. Các giải pháp như hạ mực nước ngầm, tăng chiều sâu ngầm tường vây hoặc gia cố nền đất thường được đề xuất nhằm cải thiện hệ số an toàn và hạn chế rủi ro thi công.

Mặt khác, trong thực hành thiết kế, bài toán kết cấu bê tông cốt thép của hệ sàn-tường vây thường được kiểm toán riêng rẽ thông qua các tổ hợp tải trọng ULS/SLS, xét đến tải trọng đất, nước, hoạt tải và động đất. Cách tiếp cận này giúp đảm bảo khả năng chịu lực của kết cấu, song chưa phản ánh đầy đủ sự tương tác giữa biến dạng nền đất và nội lực kết cấu trong từng giai đoạn thi công. Thực tế cho thấy sự thay đổi mực nước ngầm không chỉ ảnh hưởng đến ổn định đáy hố đào mà còn làm thay đổi đáng kể phân bố nội lực, mô-men uốn và yêu cầu cốt thép trong các bản sàn, đặc biệt đối với sàn đáy chịu lực đẩy nổi lớn [3, 4]. Do đó, xu hướng nghiên cứu gần đây nhấn mạnh việc sử dụng mô hình phân tích liên hợp đất-kết cấu (soil-structure interaction) nhằm đánh giá đồng thời ổn định địa kỹ thuật và ứng xử kết cấu theo trình tự thi công thực tế [5, 6]. Trong hồ sơ thiết kế ga ngầm S11, hệ kết cấu bên trong đã được mô hình hóa bằng khung 2D và 3D với các tổ hợp tải trọng chi tiết, cung cấp cơ sở dữ liệu phù hợp cho các phân tích tích hợp dạng này [7].

Mặc dù vậy, các nghiên cứu trường hợp áp dụng cách tiếp cận liên hợp cho điều kiện địa chất - thủy văn đặc trưng của Việt Nam vẫn còn hạn chế, đặc biệt đối với các ga ngầm thi công top-down trong môi trường mực nước ngầm cao. Xuất phát từ khoảng trống đó, bài báo này thực hiện nghiên cứu trường hợp tại Ga Văn Miếu (ga S11) của tuyến đường sắt đô thị Hà Nội nhằm đánh giá đồng thời ổn định hố đào và nội lực kết cấu dưới các kịch bản mực nước ngầm khác nhau. Cụ thể, một mô hình mô phỏng số liên hợp đất-kết cấu được xây dựng có xét đến điều kiện địa chất, áp lực nước, tải trọng thi công và trình tự đào theo giai đoạn; các chỉ tiêu như hệ số an toàn bùng đáy, chuyển vị tường vây và nội lực trong hệ sàn-tường được phân tích và so sánh giữa các trường hợp. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn giải

pháp kiểm soát nước ngầm và tối ưu thiết kế kết cấu trong thi công các nhà ga ngầm tương tự.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ MÔ HÌNH PHÂN TÍCH

### 2.1. Khung phân tích liên hợp đất-kết cấu

Nghiên cứu áp dụng phương pháp phân tích liên hợp đất-kết cấu (soil-structure interaction) nhằm đánh giá đồng thời ổn định địa kỹ thuật của hố đào và nội lực trong hệ kết cấu chống đỡ khi thi công top-down. Thay vì tách riêng bài toán địa kỹ thuật và kết cấu, cách tiếp cận này xem xét sự tương tác hai chiều giữa biến dạng nền đất, áp lực nước ngầm và độ cứng của hệ tường vây-sàn theo từng giai đoạn thi công. Quy trình thực hiện gồm: (i) Mô phỏng địa kỹ thuật để xác định chuyển vị và áp lực đất-nước; (ii) sử dụng các tải trọng và phản lực thu được cho mô hình kết cấu và (iii) so sánh các chỉ tiêu ổn định và nội lực giữa các kịch bản mực nước ngầm.

### 2.2. Mô hình tính toán nền đất và kết cấu

Mô hình địa kỹ thuật được xây dựng bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong môi trường biến dạng phẳng (2D plane strain), phù hợp với hình dạng kéo dài của nhà ga ngầm. Nền đất được chia thành nhiều lớp theo điều kiện địa chất khảo sát, mỗi lớp được đặc trưng bởi các thông số cơ học và thấm như dung trọng tự nhiên, dung trọng bão hòa, mô-đun biến dạng, lực dính, góc ma sát trong và hệ số thấm theo phương ngang và phương đứng. Ứng xử đất được giả thiết theo mô hình đàn hồi-đẻo Mohr-Coulomb nhằm mô tả đồng thời biến dạng và trạng thái phá hoại cắt của đất trong quá trình đào.

Điều kiện biên của mô hình được thiết lập với đáy cố định theo cả hai phương và biên bên hạn chế chuyển vị ngang nhằm giảm ảnh hưởng biên. Tường vây được mô phỏng bằng phần tử dầm hoặc tấm có độ cứng tương đương, liên kết với nền đất thông qua phần tử tiếp xúc. Áp lực nước ngầm được xét đến thông qua trường áp lực lỗ rỗng và phân tích thấm ổn định. Các chỉ tiêu địa kỹ thuật được theo dõi bao gồm hệ số an toàn ổn định đáy (basal stability safety factor), chuyển vị ngang đỉnh tường, phân bố mô-men trong tường và áp lực nước thấm tại đáy hố đào.

Trình tự thi công top-down được mô phỏng theo từng giai đoạn: Thi công tường vây, đào đến cao độ bản đỉnh, đổ sàn đỉnh, tiếp tục đào và thi công các bản sàn trung gian, sau cùng đào đến đáy và thi công sàn đáy. Việc kích hoạt hoặc vô hiệu hóa phần tử đất và kết cấu theo từng bước cho phép phản ánh đúng quá trình thay đổi trạng thái ứng suất - biến dạng của nền đất.

### 2.3. Mô hình kết cấu và các kịch bản tính toán

Song song với phân tích địa kỹ thuật, hệ kết cấu bên trong

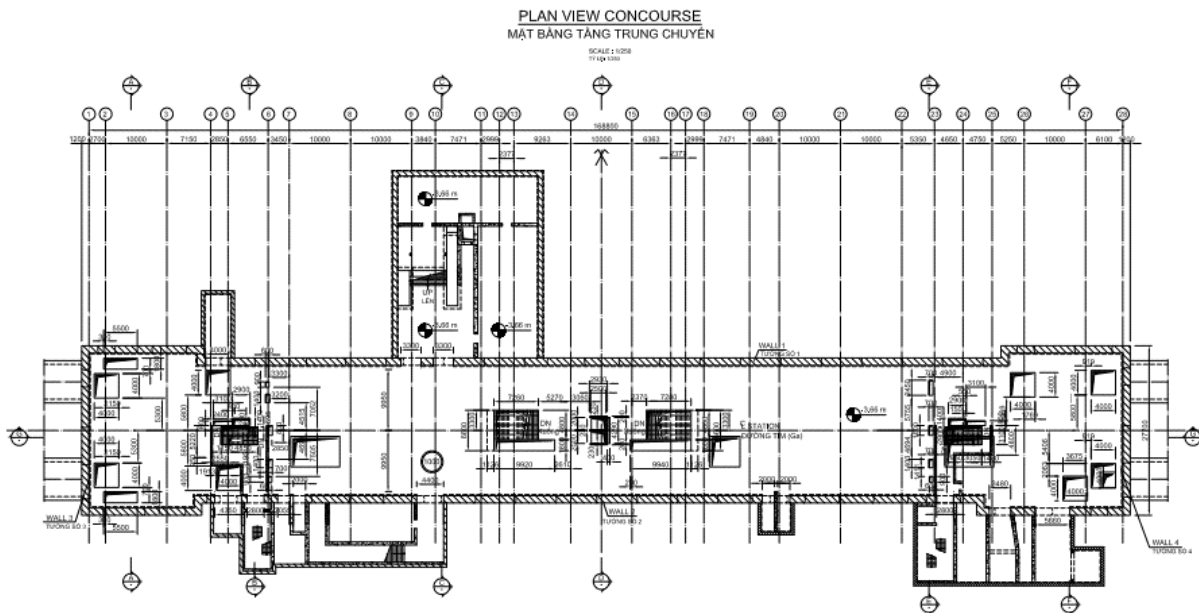
nhà ga được mô hình hóa bằng khung bê tông cốt thép gồm tường vây, sàn đỉnh, sàn trung gian và sàn đáy. Các cấu kiện được giả thiết liên kết ngầm hoàn toàn tại các nút giao tường-sàn nhằm mô tả cơ chế làm việc đồng thời của hệ kết cấu vình cửa trong công nghệ top-down. Mô hình khung 2D được sử dụng cho tính toán tổng thể theo phương ngang, trong khi mô hình 3D được áp dụng tại các vị trí đặc biệt như khu vực có lỗ mở hoặc khu vực máy đào TBM ra vào.

Tải trọng tác dụng lên kết cấu bao gồm trọng lượng bản thân, tải trọng đất, áp lực nước ngầm, tải trọng thi công, hoạt tải sử dụng và tải trọng động đất giả tĩnh. Các tổ hợp tải trọng được xét theo trạng thái giới hạn cực hạn (ULS) và trạng thái giới hạn sử dụng (SLS) theo hệ tiêu chuẩn châu Âu. Kết quả tính toán bao gồm mô-men uốn, lực cắt, lực dọc, kiểm tra ứng suất bê tông-cốt thép và kiểm soát độ rộng vết nứt của các bản sàn. Cách mô hình hóa và kiểm toán nội lực này tương thích với hệ thống tính toán đã được áp dụng trong hồ sơ thiết kế kỹ thuật của ga S11. Để đánh giá ảnh hưởng của nước ngầm, hai kịch bản chính được xem xét: (i) Mực nước tự nhiên và (ii) hạ mực nước đến cao độ đáy hố đào. Kết quả giữa các trường hợp được so sánh nhằm xác định tác động của nước ngầm đến ổn định địa kỹ thuật và nhu cầu chịu lực của kết cấu.

### 3. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH GA S11 THI CÔNG TOP-DOWN TRONG ĐIỀU KIỆN NƯỚC NGẦM CAO

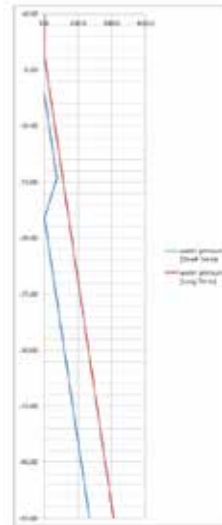
#### 3.1. Giới thiệu ga S11

Ga Văn Miếu (S11) [8] thuộc tuyến đường sắt đô thị Hà Nội, thi công theo công nghệ đào hở top-down với hệ tường vây bê tông cốt thép kết hợp các bản sàn làm kết cấu chống đỡ tạm và vình cửa. Khoảng cách giữa hai tường vây thay đổi từ 22,5 - 26,5 m, bao gồm sàn đỉnh, sàn trung gian và sàn đáy liên kết ngầm hoàn toàn với tường, tạo thành hệ khung không gian có độ cứng lớn.



Hình 2. Mặt bằng kết cấu ga S11

Điều kiện nền gồm nhiều lớp đất sét và cát bão hòa nước với hệ số thấm thay đổi theo chiều sâu; mực nước ngầm tự nhiên ở cao độ nông so với đáy hố đào. Tải trọng tác dụng bao gồm trọng lượng bản thân kết cấu, áp lực đất, áp lực nước ngầm, tải trọng thi công, hoạt tải sử dụng và tải trọng động đất giả tĩnh. Các tổ hợp tải trọng và thông số vật liệu được xác định theo hệ tiêu chuẩn châu Âu và hồ sơ thiết kế kỹ thuật của dự án.



Type of Water Level	Upper aquifer	Lower aquifer
Short-term water level	-0.7	-11.7
Long-term water level	+3	+3.0

Hình 3. Biểu đồ áp lực nước cho ga 11

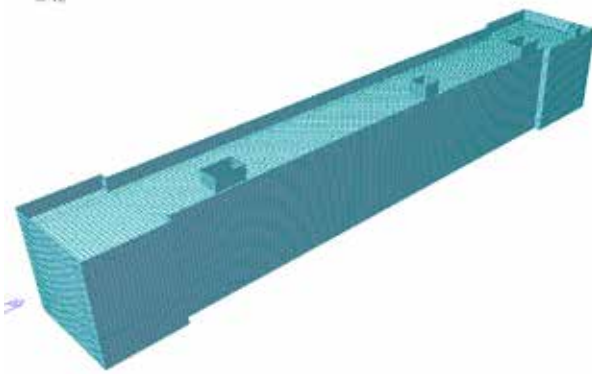
Hai kịch bản thủy văn được xem xét: (i) Mực nước ngầm tự nhiên và (ii) hạ mực nước đến dưới cao độ sàn đáy trong quá trình thi công, nhằm đánh giá mức độ ảnh hưởng của nước ngầm đến ổn định và nội lực kết cấu.

#### 3.2. Phân tích và đánh giá

Mô hình tính toán số của công trình được xây dựng dưới dạng mô hình phần tử hữu hạn ba chiều (3D finite element model), trong đó toàn bộ hệ tường vây, bản sàn và khối đất nền xung quanh được rời rạc hóa bằng lưới phần tử không gian. Hình học mô hình phản ánh đầy đủ kích thước thực tế của nhà ga, bao gồm tường vây hai

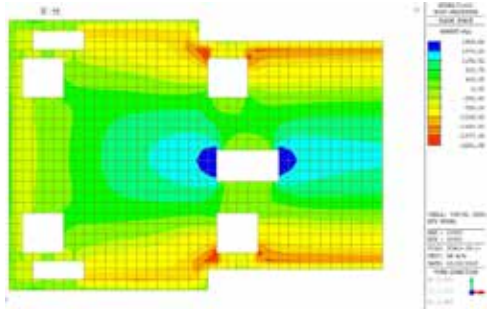
bên, các bản sàn trung gian, sàn đáy và các khu vực mở cục bộ. Nền đất được mô phỏng như môi trường liên tục với các lớp địa chất khác nhau, cho phép xét đến sự phân bố ứng suất, biến dạng và áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình đào. Hệ kết cấu bê tông cốt thép được liên kết tương tác với đất thông qua các phần tử tiếp xúc nhằm mô phỏng cơ chế làm việc đồng thời giữa đất và kết cấu. Lưới tính được tinh chỉnh tại các vùng quan trọng như chân tường và đáy hố đào để tăng độ chính xác của kết quả. Mô hình 3D này cho phép

đánh giá chi tiết chuyển vị không gian của tường vây cũng như nội lực trong hệ sàn - tường theo từng giai đoạn thi công top-down.

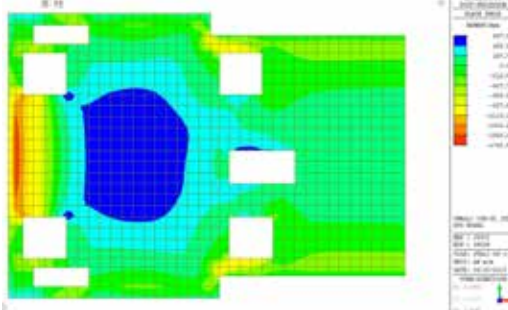


Hình 4. Mô hình 3D ga S11

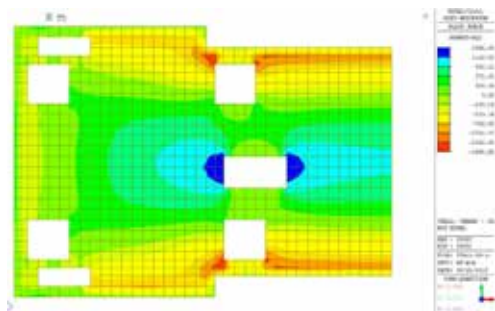
Kết quả mô phỏng địa kỹ thuật cho thấy mực nước ngầm có ảnh hưởng rõ rệt đến trạng thái ứng suất và biến dạng của nền đất. Ở kịch bản mực nước tự nhiên, áp lực nước thấm hướng lên làm giảm ứng suất hữu hiệu tại đáy hố đào, dẫn đến giảm hệ số an toàn ổn định đáy và gia tăng nguy cơ bùng nền. Đồng thời, chuyển vị ngang của tường vây tăng đáng kể, đặc biệt tại giai đoạn đào sâu cuối cùng khi hệ chống chưa hoàn thiện.



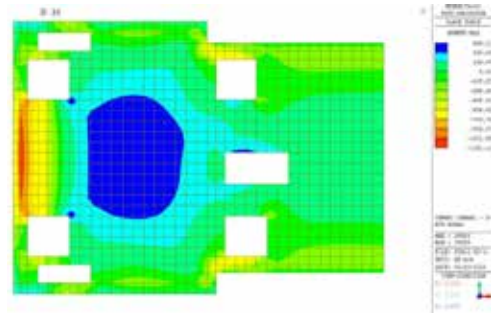
Mô-men uốn ngang, kN-m (ULS)



Mô-men uốn dọc, kN-m (ULS)



Mô-men uốn ngang, kN-m (SLS - đặc trưng)



Mô-men uốn dọc, kN-m (SLS-đặc trưng)

Hình 5. Nội lực tại mặt cắt nguy hiểm theo các kịch bản kiểm tra

Sự thay đổi điều kiện nước ngầm dẫn đến biến thiên đáng kể nội lực trong hệ sàn-tường. Trong trường hợp mực nước cao, mô-men uốn và lực cắt trong các bản sàn tầng rõ rệt do tác động đồng thời của áp lực nước và chuyển vị tường vây. Nội lực lớn nhất tập trung tại sàn đáy, nơi chịu ảnh hưởng của lực đẩy nổi và phản lực đất nền, với giá trị mô-men uốn lớn hơn đáng kể so với sàn trung gian. Xu hướng này phù hợp với kết quả kiểm toán kết cấu trong hồ sơ thiết kế.

So sánh giữa hai kịch bản cho thấy việc hạ mực nước giúp giảm đáng kể mô-men uốn và yêu cầu cốt thép của sàn, đồng thời hạn chế nguy cơ nứt và thấm nước trong giai đoạn khai thác. Điều này chứng tỏ rằng kiểm soát nước ngầm không chỉ có ý nghĩa về mặt địa kỹ thuật mà còn góp phần tối ưu hóa thiết kế kết cấu và giảm chi phí gia cường.

Tổng hợp các kết quả cho thấy mực nước ngầm là yếu tố chi phối đồng thời cả ổn định hố đào và nội lực kết cấu. Do đó, việc phân tích liên hợp đất-kết cấu là cần thiết để đánh giá chính xác mức độ an toàn và lựa chọn giải pháp thi công phù hợp cho các ga ngầm thi công top-down trong điều kiện địa chất-thủy văn tương tự.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phát triển mô hình phân tích liên hợp đất-kết cấu để đánh giá đồng thời ổn định hố đào và nội lực kết cấu cho ga ngầm thi công top-down, áp dụng cho trường hợp Ga Văn Miếu (S11). Kết quả cho thấy mực nước ngầm ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái làm việc của công trình: Mực nước cao làm giảm ổn định đáy hố đào, tăng chuyển vị tường vây và gia tăng nội lực trong các bản sàn, đặc biệt tại sàn đáy. Hạ mực nước ngầm giúp cải thiện an toàn địa kỹ thuật và giảm yêu cầu chịu lực của kết cấu. Phương pháp đề xuất cung cấp cơ sở tin cậy cho việc lựa chọn giải pháp kiểm soát nước ngầm và tối ưu thiết kế các ga ngầm trong điều kiện địa chất-thủy văn tương tự.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Thanh Giám, Tạ Tiến Đạt. Tính toán thiết kế công trình ngầm. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2002.
- [2] Nghiêm Hữu Hạnh. Cơ học đá. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2004.
- [3] Nghiêm Hữu Hạnh, nnk. Báo cáo đề tài: Nghiên cứu các giải pháp kỹ thuật để hạn chế ảnh hưởng tới công trình lân cận khi xây dựng công trình ngầm bằng phương pháp đào hở tại Hà Nội. Hà Nội, 2010.
- [4] Ivachnuc V.A. Thiết kế và xây dựng công trình ngầm và công trình đào sâu. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2004.
- [5] Nguyễn Bá Kế. Xây dựng công trình ngầm đô thị theo phương pháp đào mở. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2006.
- [6] Nguyễn Thế Phùng, Nguyễn Quốc Hùng. Thiết kế công trình hầm giao thông. NXB. Giao thông vận tải, Hà Nội, 2004.
- [7] Nguyễn Văn Quảng, Nguyễn Đức Nguồn. Tổ chức khai thác không gian ngầm. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2006.
- [8] Hồ sơ ga ngầm S11 thuộc tuyến đường sắt đô thị thị điểm thành phố Hà Nội.