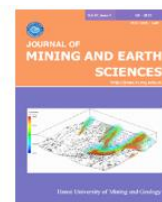




## Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



# An overview of research on metro tunnel lining in the sub-rectangular shape



Kien Van Dang <sup>\*</sup>, Anh Ngoc Do, Tien Tai Nguyen, Duy Anh Huynh  
Nguyen, Vi Van Pham

*Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam*

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 14<sup>th</sup> Apr. 2021

Revised 17<sup>th</sup> July 2021

Accepted 03<sup>rd</sup> Aug. 2021

#### Keywords:

Circular tunnel,  
HRM,  
FEM,  
Metro tunnel,  
Sub – rectangular.

### ABSTRACT

*Circular tunnels are the most popular shapes used in urban underground transportation systems when mechanized tunneling is used for tunnel excavation. However, circular tunnels have a small space utilization ratio. With the material development, non - circular tunnels such as sub - rectangular, U - shaped lining, etc. are now common, and their cross - section helps to improve the underground space utilization. However, there have been not many studies on the structure and the calculation method of the metro tunnels with the above cross - sections. The paper uses the analytical synthesis method to find out the advantages and disadvantages, the application conditions of the sub - rectangular shape, as well as the development direction for the complete calculation methods for this cross - section in Vietnamese conditions.*

Copyright © 2021 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*\*Corresponding author*

*E - mail:* [dangvankien@humg.edu.vn](mailto:dangvankien@humg.edu.vn)

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(4).10



## Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>

# Nghiên cứu tổng quan về vỏ hầm metro tiết diện ngang hình chữ nhật cong

Đặng Văn Kiên \*, Đỗ Ngọc Anh, Nguyễn Tài Tiến, Nguyễn Huỳnh Anh Duy, Phạm Văn Vĩ

Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

*Quá trình:*

Nhận bài 14/4/2021

Sửa xong 17/7/2021

Chap nhận đăng 03/8/2021

*Từ khóa:*

Hầm hình tròn,  
Hầm hình chữ nhật cong,  
Hầm metro,  
HRM,  
FEM.

### TÓM TẮT

Đường hầm với tiết diện hình tròn được sử dụng phổ biến nhất trong hệ thống giao thông ngầm đô thị khi đào hầm bằng phương pháp khiên đào. Tuy nhiên, các hầm tròn có tỷ lệ sử dụng không gian hữu ích nhỏ. Với sự phát triển của các loại vật liệu chống giữ, các đường hầm không tròn như hình chữ nhật cong, hình móng ngựa,... ngày càng phổ biến. Với mặt cắt ngang trên cho phép nâng cao hiệu quả sử dụng không gian ngầm nhờ tăng tỷ lệ không gian hữu ích đồng thời vẫn đảm bảo khả năng làm việc của vỏ hầm. Mặc dù vậy, các nghiên cứu về các loại hình kế cấu và phương pháp tính toán của các loại hầm metro với tiết diện không tròn như trên chưa được phổ biến. Bài báo sử dụng phương pháp tổng hợp phân tích để chỉ ra những ưu nhược điểm, điều kiện áp dụng của vỏ chống metro tiết diện hình chữ nhật cong, cũng như hướng phát triển hoàn thiện các phương pháp tính toán cho tiết diện loại này trong điều kiện Việt Nam.

© 2021 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

## 1. Mở đầu

Đường hầm metro với tiết diện ngang hình tròn có ưu điểm là độ ổn định của kết cấu vỏ chống đường hầm lớn, dễ thi công bằng cơ giới (khiên đào) nên được sử dụng nhiều trong thực tế. Tuy nhiên, hệ số sử dụng tiết diện ngang (tỷ số giữa phần diện tích thực tế sử dụng và diện tích đào) của tiết diện trên nhỏ. Ngoài ra, để đảm bảo yêu cầu có hai làn đường hầm metro chạy ngược chiều

nhau trên cùng một tuyến, phương án hai đường hầm đào song song thường được sử dụng (ví dụ: dự án Nhổn - Ga Hà Nội, dự án Bến Thành - Suối Tiên và nhiều dự án khác trên thế giới). Điều này làm tăng khối lượng đào và chống giữ các đường hầm. Để khắc phục các nhược điểm của phương án sử dụng đường hầm tiết diện tròn, đường hầm tiết diện ngang hình chữ nhật cong (kết hợp giữa hình tròn và hình chữ nhật "sub - rectangular") đã và đang được chú ý nghiên cứu và lựa chọn sử dụng (Nguyễn Xuân Mãn, 2015). Loại hình tiết diện này cho phép nâng cao hệ số sử dụng hữu ích diện tích tiết diện ngang so với đường hầm hình tròn, đồng thời tránh được sự tập trung ứng suất ở bốn góc so với tiết diện hình chữ nhật. Mặt khác,

\*Tác giả liên hệ

E - mail: dangvankien@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(4).10

tiết diện chữ nhật cong cũng thích hợp khi thiết kế hai làn đường tàu chạy trong cùng một đường hầm nhờ giảm chi phí đào và chống giữ đường hầm do giảm tổng khối lượng đào. Ngoài ra, tiết diện hình chữ nhật cong cũng phù hợp để áp dụng cho lối vào metro, đường dành cho người đi bộ dưới lòng đất. Mặc dù có nhiều ưu điểm trong sử dụng đã được chỉ ra, nhưng đến nay các kết quả nghiên cứu tính toán độ ổn định của vỏ chống lắp ghép từ các cấu kiện bê tông đúc sẵn bên trong đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong còn rất hạn chế và mới chủ yếu dừng lại ở các kết quả thực nghiệm trong phòng thí nghiệm trên mô hình kích thước thực hoặc mô hình thu nhỏ, chưa có phương pháp tính toán lý thuyết hoàn chỉnh được đề xuất. Các chỉ dẫn thiết kế trong các bộ tiêu chuẩn thiết kế chuyên ngành ở các nước trên thế giới cho loại hình vỏ chống này cũng chưa được đề cập. Do đó, việc nghiên cứu, đề xuất một phương pháp tính mới cho kết cấu vỏ chống lắp ghép bên trong các đường hầm metro tiết diện ngang hình chữ nhật cong nhằm mục đích tính toán, tối ưu hóa các thông số mặt cắt ngang trong quá trình thiết kế đường hầm metro là rất cần thiết.

## **2. Tổng quan về tình hình nghiên cứu phương pháp tính toán hầm metro tiết diện chữ nhật cong**

### **2.1. Tổng quan tình hình nghiên cứu tại Việt Nam**

Tại Việt Nam, cùng với việc nghiên cứu áp dụng cải tiến các quy trình công nghệ thi công hầm thì hướng nghiên cứu xây dựng phương pháp tính toán nhằm cải tiến, tối ưu hoặc phát triển các loại kết cấu chống mới cũng được quan tâm trong thời gian qua. Một số tiêu chuẩn thiết kế và thi công kết cấu chống giữ cho hầm giao thông, hầm thủy công,... cũng đã được ban hành nhằm kịp thời, chuẩn hóa và là cơ sở cho công tác thiết kế, tổ chức thi công, nghiệm thu cho các dự án. Trong những năm gần đây, các dự án xây dựng công trình ngầm lớn có vốn đầu tư nước ngoài tại Việt Nam như: dự án hầm giao thông đường bộ qua đèo Hải Vân, hầm Thủ Thiêm qua sông Sài Gòn và gần đây là các dự án hầm metro tại Thành phố Hồ Chí Minh và Thủ đô Hà Nội,... thường phải áp dụng các tiêu chuẩn thiết kế của nước ngoài. Khác với đường hầm giao thông, hầm đường bộ qua núi, hầm metro là một loại hình công trình ngầm thành phố

mới, lần đầu tiên được xây dựng ở Việt Nam. Kinh nghiệm thiết kế cũng như thi công của các đơn vị tư vấn và nhà thầu thi công của Việt Nam hầu như chưa có dẫn đến rất nhiều khó khăn cho công tác thiết kế, quản lý, tổ chức thi công, giám sát và nghiệm thu.

Các nghiên cứu hiện nay tại Việt Nam chủ yếu cho đối tượng vỏ hầm bê tông liền khối chống cố định cho hầm giao thông, hầm thủy điện, các đường lò chính, các khu vực sân ga, ngã ba,... của mỏ với tiết diện phổ biến là hình tròn và hình vòm tường thẳng hoặc tường cong (Nguyễn Xuân Mãn, 2010, 2012, 2015). Một số tác giả như Võ Trọng Hùng, Nguyễn Xuân Mãn, Đỗ Như Tráng,... đã nghiên cứu các loại vỏ hầm nhiều lớp, tương tác khối đá - vỏ chống tiết diện ngang hình tròn. Tuy nhiên, các kết quả mới chỉ đề ra các hướng áp dụng cho các dự án hầm giao thông và hầm thủy điện, các nghiên cứu cho vỏ chống metro còn hết sức hạn chế. Ngoài ra, các kết quả đạt được từ các nghiên cứu trên của các tác giả chủ yếu tập trung vào việc nghiên cứu tối ưu hóa kích thước vỏ chống, tương tác giữa khối đá và vỏ chống mà chưa chú ý nhiều đến việc nghiên cứu sự thay đổi trạng thái ứng suất, khả năng mang tải của vỏ chống khi thay đổi hình dạng tiết diện ngang đường hầm.

Do phạm vi sử dụng hẹp và chưa từng được xây dựng ở Việt Nam nên các công trình nghiên cứu trong nước về vỏ chống đường hầm metro mới chỉ tập trung vào nghiên cứu cơ sở lý thuyết, các phương pháp thiết kế quy hoạch và cấu tạo một số loại hình công trình ngầm đô thị, trong đó có hầm metro (Nguyễn Xuân Mãn, 2010, 2012, 2015). Một hướng nghiên cứu cũng được nhiều tác giả trong nước quan tâm là dự báo các tác động bề mặt do quá trình thi công và vận hành hầm metro như lún bề mặt do ảnh hưởng của đào hầm metro phía dưới lòng thành phố, ảnh hưởng đến các công trình lân cận tồn tại trước đó, chẳng hạn như các móng của các công trình trên bề mặt (Đỗ Như Tráng, 2011; Nguyễn Thế Phùng, 2004; Đoàn Thế Tường, 2012; Bùi Văn Dưỡng, 2007; Nguyễn Anh Tuấn, 2012, 2017; Phan Sỹ Liêm và Nguyễn Bá Hoàng, 2016). Một vài công trình nghiên cứu chú ý đến sự rung động của nền và công trình lân cận do chuyển động của đoàn tàu khi vận hành và đưa ra các giải pháp giảm thiểu ảnh hưởng tiêu cực của chúng (Nguyễn Tăng Thanh và Trần Nguyễn Hoàng Hùng, 2011; Nguyễn Quang Dũng,

2013). Gần đây, nhóm tác giả Đỗ Ngọc Anh đã phát triển trên cơ sở phương pháp lực kháng đàn hồi HRM (Hyperstatic Reaction Method) để tính toán khảo sát vỏ hầm metro dạng lắp ghép có tiết diện tròn (Do Ngọc Anh và nnk., 2013, 2014b,c,d; Đỗ Ngọc Anh, 2014, 2016; Do Ngọc Anh, Dias Daniel, 2017). Bằng phương pháp xây dựng đã được các tác giả tiến hành khảo sát ảnh hưởng của mối nối giữa các đốt vỏ hầm được mô phỏng trực tiếp nhờ sử dụng hệ số liên kết, xác định dựa vào độ cứng chống xoay. Phương pháp tính toán này cho phép mô phỏng mối nối vỏ hầm tại vị trí bất kỳ. Ngoài ra, độ cứng chống xoay của mối nối vỏ hầm đã được mô phỏng sử dụng hàm phi tuyến, gần với điều kiện làm việc thực tế. Các kết quả phân tích đã áp dụng cho 3 giả thiết khác nhau về tương tác giữa các vòng vỏ chống đã được so sánh và kiểm chứng bằng kết quả thu được từ mô hình số 3 chiều, cho phép xác định giả thiết phù hợp nhất (Đỗ Ngọc Anh, 2014). Kết quả các nghiên cứu chỉ ra phương pháp mới HRM có thể sử dụng để khảo sát sự làm việc của kết cấu vỏ hầm lắp ghép. Sau khi đạt được các kết quả mới cho vỏ hầm lắp ghép có tiết diện hình tròn, các tác giả tiếp tục sử dụng phương pháp HRM để khảo sát các thông số, trên cơ sở đó tối ưu hóa các thông số cho hầm có tiết diện hình chữ U (Du Dianchun và nnk., 2018a,b; Dianchun, 2019, 2020). Các công bố mới cho thấy: nhóm tác giả Đỗ Ngọc Anh đang quan tâm nghiên cứu nhiều đến vỏ hầm lắp ghép dạng hình chữ nhật cong (Do Ngọc Anh và nnk., 2020; Nguyen Tai Tien và nnk., 2020). Kết quả trong (Do Ngọc Anh và nnk., 2020; Nguyen Tai Tien và nnk., 2020) cho thấy: HRM có thể được sử dụng một cách hiệu quả để đánh giá ứng xử của vỏ hầm lắp ghép đường hầm hình vuông hoặc hình chữ nhật cong. Nghiên cứu cũng đã tiến hành khảo sát ảnh hưởng của hệ số áp lực đất và mô đun Young đến nội lực và biến dạng trong kết cấu cũng như chú ý đến ảnh hưởng hình dạng đường hầm bằng cách sử dụng các bán kính tương đương khác nhau.

Tóm lại, các nghiên cứu được thực hiện trong nước liên quan đến tính toán kết cấu vỏ chống đường hầm metro xây dựng ở khu vực thành phố lớn còn khá khiêm tốn, chủ yếu xoay quanh việc tính toán cho các kết cấu vỏ chống đường hầm hình tròn, tương tác vỏ hầm với môi trường khối đất, quy hoạch tuyến và các giải pháp hạn chế lún bề mặt. Các nghiên cứu về phương pháp tính toán áp dụng cho kết cấu vỏ chống của đường hầm

metro trong đô thị với tiết diện ngang không tròn như: hình móng ngựa, hình chữ nhật, hình ovan, đặc biệt là hình chữ nhật cong, có ý nghĩa về mặt kinh tế kỹ thuật như phân tích ở trên, mới bắt đầu được một số ít các nhà khoa học chú ý nghiên cứu. Do vậy, việc phát triển các công cụ tính toán bao gồm các thuật toán và phần mềm hỗ trợ tính toán kết cấu vỏ hầm metro, đặc biệt là vỏ hầm metro tiết diện hình chữ nhật cong tại Việt Nam trong thời gian tới là rất cần thiết và cấp bách.

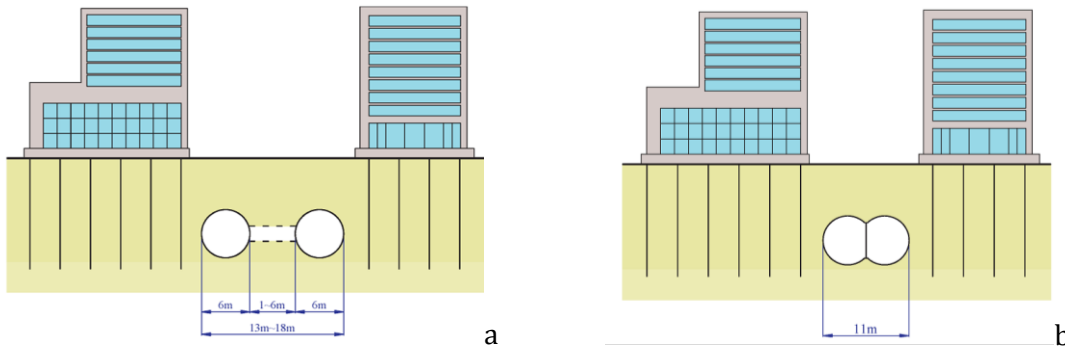
## **2.2. Tình hình nghiên cứu của các nước trên thế giới**

Hiện nay, trên thế giới đã có khoảng 60 nước xây dựng và khai thác hình thức giao thông ngầm bằng hệ thống hầm metro. Công tác thiết kế kết cấu vỏ hầm cũng như công nghệ thi công đã được chú ý nghiên cứu và đạt được những thành tựu quan trọng. Trong lịch sử phát triển của lĩnh vực xây dựng hầm metro, các đường hầm metro được xây dựng với các hình dạng khác nhau như: hình tròn, hình vòm móng ngựa, hình chữ nhật, hình elíp,... Hình dạng đường hầm được lựa chọn dựa trên nhiều yếu tố khác nhau như: chức năng, mục đích sử dụng, đặc tính cơ lý của đất đá, áp lực nước ngầm, phương pháp thi công, đặc tính của loại vỏ chống được sử dụng, đặc điểm quy hoạch dự án gồm một hay hai đường hầm song song,... Ngoài ra, mặt cắt ngang đường hầm cũng ảnh hưởng bởi quá trình thi công. Hình dạng mặt cắt được coi là kinh tế khi chi phí đào và chống giữ được coi là nhỏ nhất, thiết bị đào hoạt động hiệu quả. Một số dạng hình học mặt cắt ngang đường hầm đã được sử dụng phổ biến nhất gồm hình tròn, hình chữ nhật cho hầu hết các dự án hầm metro trên thế giới. Tại các nước phát triển, hầu hết hầm metro với tiết diện hình tròn thường được chọn khi hầm được đào bằng khiên đào qua môi trường đất yếu và ở độ sâu nhỏ tại khu vực thành phố do có độ ổn định (Nguyễn Anh Tuấn, 2012; Phan Sỹ Liêm và Nguyễn Bá Hoàng, 2016). Hình tròn có ưu điểm lớn là hình có tiết diện cong trơn trên toàn biên nên có thể phân bố đều ứng suất sinh ra trong quá trình làm việc của vỏ chống, khắc phục sự tập trung ứng suất ở bốn góc so với hình chữ nhật, do đó có khả năng chịu lực tốt hơn (Nakamura và nnk., 2003). Tuy nhiên, so với các đường hầm có tiết diện mặt cắt ngang hình chữ nhật hay gần chữ nhật, tỷ lệ sử dụng diện tích hữu ích thấp hơn dẫn đến làm tăng chi phí đào chống, nhất là các tuyến

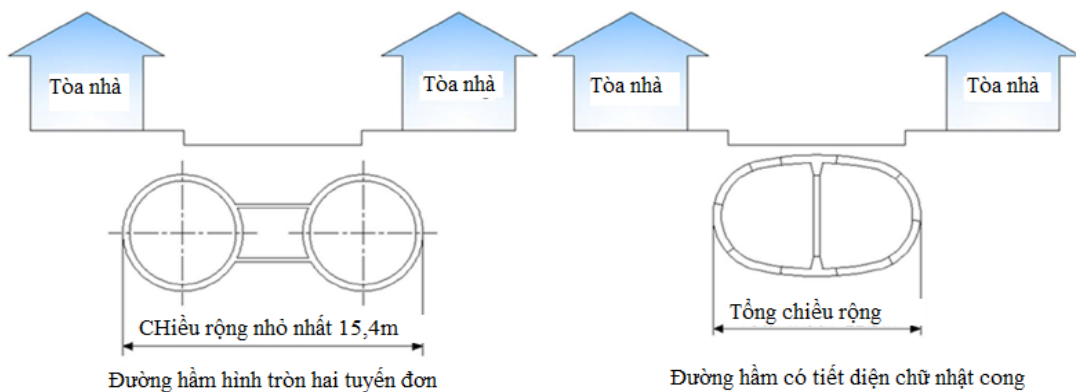
metro có chiều dài lớn. Để khắc phục các nhược điểm trên của phương án sử dụng đường hầm tiết diện tròn, đường hầm tiết diện ngang hình chữ nhật cong (kết hợp hình tròn và hình chữ nhật “sub - rectangular”) đã và đang được chú ý nghiên cứu và lựa chọn sử dụng (Zhang và nnk., 2019) như Hình 1.

Loại hình tiết diện này cho phép nâng cao hệ số sử dụng hữu ích diện tích tiết diện ngang so với đường hầm hình tròn, đồng thời tránh được sự tập trung ứng suất ở bốn góc so với tiết diện hình chữ nhật (Nakamura và nnk., 2003). Do vậy, các đường hầm có hình dạng đặc biệt như đường hầm tiết diện hình vuông hoặc hình chữ nhật, hình chữ nhật cong được chú ý nghiên cứu trong thời gian gần đây nhằm cải thiện hiệu quả sử dụng không gian ngầm. Các đường hầm có tiết diện trên có một số ưu điểm như khả năng sử dụng không gian ngầm hiệu quả và khối lượng đào giảm và giảm thiểu ảnh hưởng đến môi trường xung (Zhang và nnk., 2019) như trên Hình 2. Mặt cắt ngang hình chữ nhật thường được áp dụng thi công lộ thiên theo hình thức (cut and cover) cho các nhà ga hầm metro có kích thước lớn. Đặc biệt, các đường hầm

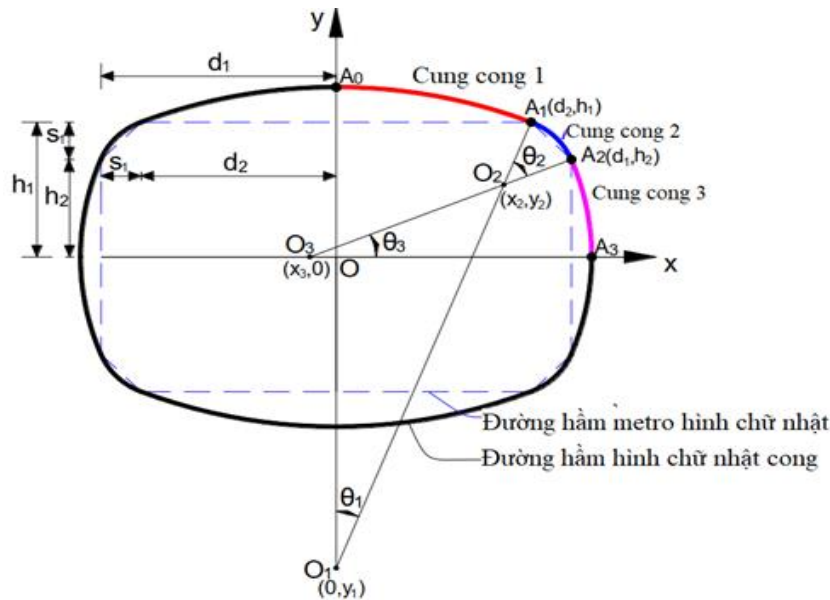
tiết diện chữ nhật cong rất thích hợp khi thiết kế dự án có hầm đôi nhờ giảm chi phí đào và chống giữ đường hầm do giảm tổng khối lượng đào, giảm thiểu ảnh hưởng đến môi trường xung quanh và trên bề mặt tại các khu vực có mật độ xây dựng lớn. Tiết diện hình chữ nhật cong cũng phù hợp cho các hạng mục hầm phụ dẫn lối vào ga metro, đường hầm cho người đi bộ như ở Hình 3. Do vậy, dạng tiết diện trên được quan tâm nghiên cứu trong thời gian gần đây nhằm nâng cao hiệu quả xây dựng các dự án hầm metro tại khu vực có mật độ xây dựng cao trên bề mặt. Tuy nhiên, đến nay kết quả đạt được về phương pháp tính toán kết cấu vỏ lắp ghép cũng như tối ưu các thông số hình học mặt cắt ngang của dạng tiết diện trên chưa đầy đủ dù đã được Nhật Bản nghiên cứu mô hình thực nghiệm từ năm 1996 (Ngoc Anh Do và nnk., 2020) và phát triển cho dự án hầm metro tại Tokyo có hầm đôi vào năm 2003. Ngoài ra, tiết diện trên cũng được các nhà khoa học Trung Quốc chú ý nghiên cứu trong những năm gần đây. Mặc dù vậy, đến nay các phương pháp tính toán thiết kế với các dạng mặt cắt ngang hình chữ nhật cong chưa hoàn chỉnh.



Hình 1. So sánh phương án chiều rộng đường hầm khi sử dụng tuyến đôi với (a) hai đường hầm đơn song song và (b) hai đường hầm chung vách.



Hình 2. So sánh chiều rộng đào của hai phương án metro tiết diện hình tròn và hình chữ nhật cong.



Hình 3. Các thông số cơ bản của tiết diện metro tiết diện chữ nhật cong.

Việc nghiên cứu tìm ra các tỉ lệ kích thước phù hợp về mặt cấu trúc hình chữ nhật cong trong các điều kiện địa chất khác nhau vẫn tiếp tục được nghiên cứu. Hiện nay, khi nghiên cứu, tính toán, thiết kế kết cấu vỏ chống của đường hầm metro thường được thực hiện bằng ba phương pháp chính gồm giải tích, thực nghiệm hay mô hình vật lý và phương pháp số. Giải tích là một trong các phương pháp được sử dụng từ rất sớm để nghiên cứu trạng thái ứng suất, nội lực và chuyển vị trong vỏ chống và khối đất xung quanh của các đường hầm với tiết diện ngang hình tròn. Với các dạng hầm có tiết diện không phải là hình tròn, việc tính toán ứng suất, biến dạng trong kết cấu chống gặp rất nhiều khó khăn. Một nhóm nhà khoa học Nga đã sử dụng phương pháp biến hình bảo giác cho phép chuyển từ hình dạng bất kỳ về hình tròn để áp dụng các lời giải giải tích sẵn có trong tính toán. Mặc dù vậy, việc áp dụng phép biến hình vào giải các bài toán còn gặp nhiều khó khăn. Phương pháp đo đạc thực nghiệm hiện trường được sử dụng có hiệu quả trong việc nghiên cứu kết cấu vỏ hầm metro tiết diện ngang hình tròn hay tiết diện ngang khác. Chẳng hạn, Molins C. và Arnau O. (2011) đã tiến hành các thử nghiệm toàn diện tại hiện trường trên vỏ hầm lắp ghép của tuyến tàu điện ngầm mới Barcelona 9, Tuyến 9 (L9) (Tây Ban Nha). Các thí nghiệm được tiến hành với mô hình tương tự thực tế có thể khắc phục được các ảnh hưởng về tỉ lệ khi tiến hành nghiên cứu bằng phương pháp thực nghiệm, kiểm tra đầy đủ đặc

tính cơ học và mô phỏng các mô hình ảnh hưởng các mô hình lắp ghép khác nhau giống như điều kiện thực tế. Một bộ hoàn chỉnh của thiết bị thí nghiệm được đặt bên trong và bên ngoài cho phép mô tả ứng xử của các đoạn vòng chống dưới tác dụng tải trọng từ các kích thủy lực. Nakamura và nnk. (2003) đã tiến hành các thử nghiệm trên mô hình khiên đào hầm metro hình chữ nhật dạng hầm đôi lần đầu tiên áp dụng tại Thành phố Kyoto (Nhật Bản) với kích thước giống như thực tế. Huang và nnk. (2018) đã tiến hành thực nghiệm trên mô hình vỏ hầm metro dạng lắp ghép đào bằng khiên đào có tiết diện hình chữ nhật cong (dạng gần chữ nhật) với kích thước mô hình bằng kích thước kết cấu trong thực tế 1:1. Đây cũng là lần đầu tiên các ứng xử cơ học của các đoạn vỏ hầm metro dạng lắp ghép do ảnh hưởng của tự trọng được khảo sát đầy đủ thông qua phương pháp thực nghiệm. Xu hướng thí nghiệm trên mô hình thực nghiệm như điều kiện thực tế cũng được Zhang và nnk. (2019) tiến hành cho vỏ hầm lắp ghép có hình dạng đặc biệt để nghiên cứu ứng xử cơ học của vỏ hầm lắp ghép có hình dạng đặc biệt đào bằng khiên đào trong điều kiện tuyến hầm đặt ở độ sâu nhỏ. Kết quả cũng đã chỉ ra ảnh hưởng của hệ số áp lực hông của đất đá đến nội lực trong kết cấu vỏ chống. Cụ thể, ảnh hưởng của áp lực đất đá hông và tương tác khối đất đá đến sự làm việc của kết cấu đã được khảo sát toàn diện thông qua thí nghiệm chất tải đầy đủ. Kết quả thử nghiệm cho thấy sự phân bố nội lực và biến dạng



trong vỏ chống do tự trọng khi thay đổi độ sâu đặt đường hầm. Kashima và nnk. (1996) đã tiến hành thực nghiệm trên mô hình khiên đào có tên DPLEX có thể đào các hầm metro với các dạng mặt cắt khác nhau như: hình chữ nhật, hình ô van,... nhờ được trang bị một vài đầu cắt trên tiết diện ngang của đường hầm cần đào, trong đó mỗi đầu cắt được xoay quanh một liên kết kiểu (parallel - link). Các đoạn vỏ hầm lắp ghép sử dụng với mô hình khiên đào DPLEX có hình dạng cắt ngang hình chữ nhật cong được chất tải như trong điều kiện thực tế. Kết quả giá trị chuyển vị của các vòng chống khi so sánh với giá trị chuyển vị đạt được bằng phương pháp lý thuyết theo thiết kế thông thường và giá trị lý thuyết theo mô hình thanh lò xo là tương đối phù hợp. Do đó, mô hình vỏ lắp ghép cho khiên đào dạng DPLEX là đủ cơ sở để có thể sử dụng trong điều kiện thực tế. Vỏ hầm lắp ghép cho đường hầm đào bằng mô hình khiên đào DPLEX lần đầu tiên được áp dụng xây dựng một đường hầm thoát nước kiểm soát lũ lụt ở khu vực Narashino ở ngoại ô thành phố Tokyo (Nhật Bản). Theo hướng trên, các tác giả khác cũng tiến hành sử dụng phương pháp nghiên cứu thực nghiệm để nghiên cứu ứng xử cơ học của các loại hầm metro có tiết diện hình chữ nhật cong trong các điều kiện địa chất khác nhau. Liu và nnk. (2018) cũng tiến hành nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình khiên đào có kích thước hình chữ nhật cong cho dự án tuyến hầm metro số 4 tại thành phố Ninh Ba, Chiết Giang (Trung Quốc) với kích thước như trong thực tế. Xu hướng sử dụng tiết diện ngang hình chữ nhật cong nhằm tăng hiệu quả sử dụng mặt cắt ngang đường hầm tại các khu vực thành phố cũng được áp dụng cho các đường hầm nhỏ đào bằng hệ thống kích đẩy. Du và nnk. (2019) đã thực nghiệm trên mô hình khiên đào loại nhỏ có tiết diện hình chữ nhật cong tại điều kiện phòng thí nghiệm và nghiên cứu tại hiện trường kết hợp với phương pháp khoan phun ép vữa trên bề mặt cho đường hầm nhỏ có kích thước phủ ngoài dài x rộng là 1407x2120 mm. Với các kết quả đạt được có thể thấy, hướng nghiên cứu thực nghiệm sử dụng để nghiên cứu các kết cấu vỏ hầm metro đang được rất nhiều các nhà khoa học và phòng thí nghiệm trên thế giới quan tâm, đầu tư, nghiên cứu với chi phí đầu tư lớn. Mô hình thực nghiệm trên kết cấu thực, tỷ lệ 1:1, có ưu điểm là cho phép nghiên cứu trực quan, đo đạc chi tiết các ứng xử cơ học của kết cấu vỏ chống đường hầm. Đây cũng

là phương pháp nghiên cứu quan trọng trong việc phát triển kiểm chứng các nghiên cứu trên mô hình số. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là chi phí tiến hành thử nghiệm cao và đòi hỏi những trang thiết bị hiện đại, phức tạp với giá thành lớn. Bên cạnh các phương pháp giải tích hay thực nghiệm, phương pháp mô hình số được sử dụng phổ biến trong thời gian gần đây do đảm bảo độ chính xác cao, sử dụng được cho mọi loại hình dạng tiết diện ngang đường hầm khác nhau, cho phép chú ý tới nhiều thông số ảnh hưởng mà các phương pháp giải tích hay thực nghiệm trong phòng không chú tới được. Các phần mềm số chuyên dụng ra đời và không ngừng được nâng cấp trở thành công cụ đắc lực cho phép mô phỏng các kết cấu vỏ hầm phức tạp như: bộ phần mềm Rocscience, Plaxis, MIDAS - GTS NX, Abaqus, Flac, UDEC, Matlab,... Trên cơ sở sử dụng mô hình số phục vụ cho công tác nghiên cứu, tính toán thiết kế và mô phỏng quá trình thi công các đường hầm, nhiều kết quả nghiên cứu mới đã được công bố. Phương pháp số cho phép khảo sát ảnh hưởng của đặc tính đất đá, thông số hình học đường hầm, đặc tính vỏ chống đến đặc tính nội lực, chuyển vị trong vỏ chống.

Các kết quả nghiên cứu cho dạng mặt cắt ngang hầm loại trên được thể hiện rõ trong các kết quả nghiên cứu. Hiện tại, một số tuyến hầm metro tại Tokyo (Nhật Bản) đã sử dụng các tiết diện loại trên và đang có xu hướng được sử dụng nhiều hơn. Do vậy, cần đẩy nhanh các nghiên cứu trong thời gian tới nhằm hoàn thiện phương pháp tính toán vỏ hầm lắp ghép hầm metro tiết diện hình chữ nhật cong.

Mặc dù vậy, các kết quả nghiên cứu bằng mô hình số đối với đường hầm metro tiết diện ngang có hình chữ nhật cong còn rất hạn chế.

Do đó, các nghiên cứu ứng xử của vỏ hầm metro lắp ghép tiết diện chữ nhật cong trong các điều kiện địa chất khác nhau cần được tiến hành nhiều hơn nữa để tiết diện loại này được sớm áp dụng trong điều kiện thế giới và ở Việt Nam.

### **3. Tính cấp thiết và định hướng nghiên cứu tại Việt Nam và trên thế giới**

#### **3.1. Tính cấp thiết của vấn đề nghiên cứu**

Ngày nay, xây dựng và phát triển không gian ngầm, trong đó có đường hầm metro, tại các đô thị đang là nhu cầu tất yếu và cấp bách của nhiều quốc

gia trên thế giới nhằm giải quyết căn bản các vấn đề liên quan đến phát triển hạ tầng cơ sở, giao thông đô thị phục vụ cho phát triển kinh tế - xã hội và đảm bảo an ninh quốc phòng. Tại Việt Nam, với sự gia tăng nhanh chóng của số lượng các phương tiện giao thông dẫn đến mật độ giao thông tại các đô thị lớn của Việt Nam tăng cao, đặc biệt là tại Thủ đô Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh. Tại hai thành phố này đã và đang triển khai hàng loạt các dự án đường hầm metro với hy vọng khi đưa vào khai thác sẽ giải quyết căn bản vấn đề ùn tắc giao thông đô thị.

Do đặc điểm thi công gần bề mặt và trong khối đất yếu nên tại các dự án thi công hầm metro trên thế giới nói chung và ở Việt Nam nói riêng chủ yếu sử dụng các thiết bị khoan hầm cơ giới hóa (Tunnel Boring Machine - TBM) với gương đào tiết diện ngang hình tròn và kết cấu vỏ chống bê tông lắp ghép để giữ ổn định đường hầm sau khi đào. Đường hầm với tiết diện ngang hình tròn có ưu điểm là độ ổn định của kết cấu vỏ chống đường hầm lớn, dễ thi công bằng cơ giới nhưng lại có nhược điểm chính là hệ số sử dụng tiết diện ngang (tỷ số giữa phần diện tích thực tế sử dụng và diện tích đào) nhỏ. Ngoài ra, để đảm bảo yêu cầu có hai làn đường hầm metro chạy ngược chiều nhau trên cùng một tuyến, phương án hai đường hầm đào song song, mỗi hầm có một làn đường tàu chạy, thường được sử dụng (ví dụ: dự án Nhổn - Ga Hà Nội, dự án Bến Thành - Suối Tiên và nhiều dự án khác trên thế giới).

Điều này làm tăng khối lượng đào và chống giữ các đường hầm. Để khắc phục các nhược điểm trên của phương án sử dụng đường hầm tiết diện tròn, đường hầm tiết diện ngang hình chữ nhật cong đã và đang được chú ý nghiên cứu và lựa chọn sử dụng (Liu, 2018; Zhang và nnk., 2019). Loại hình tiết diện này cho phép nâng cao hệ số sử dụng hữu ích diện tích tiết diện ngang so với đường hầm hình tròn, đồng thời tránh được sự tập trung ứng suất ở bốn góc so với tiết diện hình chữ nhật (Nakamura và nnk., 2003).

Mặt khác, tiết diện chữ nhật cong cũng thích hợp khi thiết kế hai làn đường tàu chạy trong cùng một đường hầm nhờ giảm chi phí đào và chống giữ đường hầm do giảm tổng khối lượng đào. Ngoài ra, tiết diện hình chữ nhật cong cũng phù hợp để áp dụng cho lối vào metro, đường dành cho người đi bộ dưới lòng đất. Mặc dù có nhiều ưu điểm trong sử dụng đã được chỉ ra nhưng đến nay

các kết quả nghiên cứu tính toán độ ổn định của vỏ chống lắp ghép từ các cấu kiện bê tông đúc sẵn bên trong đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong còn rất hạn chế và mới chủ yếu dừng lại ở các kết quả thực nghiệm trong phòng thí nghiệm trên mô hình kích thước thực hoặc mô hình thu nhỏ (Zhang và nnk., 2019; Kashima và nnk., 1996; Liu, 2018; Do Ngoc Anh và nnk., 2103; Du và nnk., 2018) chưa có phương pháp tính toán lý thuyết hoàn chỉnh được đề xuất. Các chỉ dẫn thiết kế trong các bộ tiêu chuẩn thiết kế chuyên ngành ở các nước trên thế giới cho loại hình vỏ chống này cũng chưa được đề cập. Do đó, việc nghiên cứu đề xuất một phương pháp tính mới cho kết cấu vỏ chống lắp ghép bên trong các đường hầm metro tiết diện ngang hình chữ nhật cong nhằm mục đích tính toán, tối ưu hóa các thông số mặt cắt ngang trong quá trình thiết kế đường hầm metro là rất cần thiết.

Hiện nay, phương pháp lực kháng đàn hồi (HRM) được sử dụng rất hiệu quả để tính toán vỏ chống lắp ghép của đường hầm hình tròn (Oreste, 2007; Do và nnk., 2103; Du và nnk., 2018). Phương pháp HRM đặc biệt phù hợp cho mục đích thiết kế sơ bộ, khảo sát nhanh các thông số ảnh hưởng của môi trường đất (chỉ tiêu cơ lý đất, tính đồng nhất, phân lớp đất,...) và thông số hình học của bản thân kết cấu chống (chiều dày vỏ chống, đường kính đào đường hầm,...) đến chuyển vị, nội lực gây ra trong vỏ chống lắp ghép của đường hầm. Phương pháp này được đề xuất và phát triển bởi các tác giả để nghiên cứu ứng xử của vỏ chống lắp ghép bên trong đường hầm tiết diện ngang hình tròn. Các kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp HRM cho kết quả tính toán đạt độ chính xác tương tự các phần mềm thương mại khác như: FLAC3D, Plaxis, RS2,... nhưng với thời gian tính toán ít hơn rất nhiều. Với những ưu điểm nổi bật của phương pháp HRM đã được khẳng định trong bài toán thiết kế đường hầm tiết diện tròn, việc phát triển cơ sở lý thuyết và thuật toán trong phương pháp này để áp dụng tính toán vỏ chống lắp ghép của đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong góp phần nâng cao hiệu quả cho công tác thiết kế thi công hầm metro trong điều kiện Việt Nam là hết sức cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn trong giai đoạn hiện nay.

### **3.2. Định hướng nghiên cứu liên quan hoàn thiện công tác thiết kế metro hình chữ nhật cong**

Để đáp ứng mục tiêu trên, một số công việc



cần được thực hiện như sau:

- Nghiên cứu tổng quan về các loại hình tiết diện ngang đường hầm metro, phương pháp tính toán vỏ chống lấp ghép của đường hầm metro, bao gồm:

+ Tổng hợp các cơ sở xác định kích thước tiết diện ngang đường hầm metro;

+ Phân tích các yếu tố ảnh hưởng tới hình dạng, kích thước hợp lý của tiết diện ngang công trình ngầm;

+ Phân tích khả năng ứng dụng, ưu và nhược điểm của các phương pháp tính toán kết cấu chống giữ công trình ngầm.

- Nghiên cứu, đề xuất phương pháp mới tính toán vỏ chống lấp ghép của đường hầm metro tiết diện hình chữ nhật cong; kiểm chứng độ tin cậy của phương pháp bằng các phần mềm thương mại khác hoặc bằng các số liệu thực nghiệm:

+ Nghiên cứu cơ sở lý thuyết, phát triển thuật toán mới trên cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán kết cấu vỏ chống lấp ghép bên trong đường hầm metro tiết diện hình chữ nhật cong;

+ Tiến hành xây dựng các chương trình tính toán trên cơ sở ngôn ngữ lập trình Matlab hoặc các ngôn ngữ tương đương;

+ Kiểm chứng độ chính xác của chương trình tính toán mới bằng cách so sánh kết quả tính toán độ ổn định (nội lực, biến dạng) của kết cấu vỏ chống lấp ghép đường hầm metro với các phần mềm thương mại khác như FLAC3D, Plaxis, hoặc các số liệu thực nghiệm.

- Nghiên cứu tối ưu các thông số hình học của đường hầm metro tiết diện hình chữ nhật cong theo yêu cầu độ ổn định của vỏ hầm lấp ghép:

+ Sử dụng phương pháp tính toán mới xây dựng để thực hiện khối lượng lớn các tính toán (thay đổi các điều kiện đầu vào về tiết diện ngang đường hầm), trong một số điều kiện địa chất và địa chất công trình cụ thể, nhằm tối ưu hóa thông số hình học mặt cắt ngang đường hầm theo yêu cầu về kỹ thuật và kinh tế. Cụ thể là tìm ra các tiết diện ngang đường hầm có diện tích đào nhỏ, đồng thời giảm được nội lực, biến dạng phát sinh trong kết cấu chống.

- Nghiên cứu khảo sát một số thông số ảnh hưởng của môi trường khối đất (mô đun biến dạng, hệ số áp lực ngang, tính phân lớp của môi trường,...), độ sâu đặt đường hầm, thông số hình học của kết cấu chống (chiều dày vỏ hầm, đường

kính đào đường hầm,...) đến mức độ ổn định của vỏ hầm lấp ghép bằng phương pháp đạt được ở trên:

+ Sử dụng phương pháp tính toán mới xây dựng để nghiên cứu mức độ ảnh hưởng của các yếu tố môi trường khối đất, độ sâu đặt đường hầm, thông số hình học (chiều dày, vị trí mối nối trong vỏ hầm lấp ghép) của kết cấu chống đến ổn định của vỏ hầm lấp ghép. Từ đó rút ra các quy luật ảnh hưởng đến độ ổn định của vỏ hầm lấp ghép bên trong đường hầm làm cơ sở cho các đề xuất, kiến nghị điều chỉnh trong quá trình tính toán, thiết kế và thi công đường hầm metro;

+ Sử dụng phương pháp tính toán mới đã đề xuất để tính toán thử nghiệm kết cấu vỏ hầm metro trong một số điều kiện cụ thể tại các dự án metro của Thủ đô Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh.

+ Nghiên cứu trên các trường hợp cụ thể: sử dụng điều kiện địa chất tại các dự án metro của Thủ đô Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh, tiến hành tính toán, tối ưu hóa thông số tiết diện ngang, cấu tạo của kết cấu vỏ chống lấp ghép bên trong các đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong. So sánh và phân tích kết quả tính toán kết cấu chống đạt được bằng phương pháp tính toán mới so với phương án thiết kế hiện tại của các dự án này trong điều kiện tương đương nhằm chỉ ra được hiệu quả kỹ thuật và kinh tế mang lại từ các kết quả nghiên cứu của cho loại tiết diện này.

## 5. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp các kết quả nghiên cứu chính về các kết quả đạt được cũng như những mặt hạn chế trong nghiên cứu tính toán kết cấu hầm metro có tiết diện hình chữ nhật cong trên thế giới và tại Việt Nam. Các kết quả nghiên cứu trên cho phép rút ra các kết luận sau:

- Việc sử dụng hầm metro tiết diện hình chữ nhật cong cho phép giảm diện tích đào đồng thời vẫn đảm bảo khả năng chịu lực, do đó rất phù hợp trong các dự án metro tuyến đối ở các khu vực đô thị có mật độ xây dựng cao như Thủ đô Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh;

- Các phương pháp tính hầm metro tiết diện hình chữ nhật cong chưa được chú ý nghiên cứu nhiều tại Việt Nam và các nước trên thế giới đòi hỏi phải có những nghiên cứu cụ thể hơn;

- Với điều kiện địa chất của một số thành phố lớn tại Việt Nam như Thủ đô Hà Nội và Thành phố

Hồ Chí Minh, mật độ các tòa nhà và dân cư đông đúc, việc sử dụng kết cấu metro tiết diện chữ nhật cong có nhiều thuận lợi và phù hợp để triển khai áp dụng;

- Cần có những nghiên cứu sâu hơn nhằm đưa ra các phương pháp tính toán mới kết hợp hoàn thiện phương pháp tính toán đang có để xây dựng được những quy trình tính toán hợp lý, ban hành các bộ tiêu chuẩn, quy chuẩn cấp quốc gia làm cơ sở pháp lý để việc sử dụng metro với tiết diện hình chữ nhật cong được phổ biến hơn tại Việt Nam.

### Đóng góp của các tác giả

Đặng Văn Kiên: tập hợp tài liệu lên ý tưởng và viết bản thảo; Đỗ Ngọc Anh: tập hợp tài liệu, kiểm tra bản thảo; Nguyễn Tài Tiến, Nguyễn Huỳnh Anh Duy, Phạm Văn Vĩ: tập hợp tài liệu, viết phần giới thiệu.

### Tài liệu tham khảo

- Dianchun Du, Daniel Dias, Do Ngoc Anh, (2020). Effect of a surcharge loading on horseshoe shaped tunnels excavated in saturated soils, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(5), 1674 - 7755, 2020;
- Dianchun Du, Daniel Dias, Do Ngoc Anh. (2019) Lining performance optimization of sub - rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method, *Computers and Geotechnics*.
- Do Ngoc Anh, Dias Daniel. (2017). Influence of segmental joints in lining and ground deformability on surface settlements above tunnels. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 56, 1 - 10.
- Do Ngoc Anh, Dias, D., Oreste, P.P. and Djeran - Maigre, I. (2013). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behaviour. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 115 - 127.
- Do Ngoc Anh, Dias, D., Oreste, P.P. and Djeran - Maigre, I. (2014b). The Behaviour of the Segmental Tunnel Lining Studied by the Hyperstatic Reaction Method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Do Ngoc Anh, Dias, D., Oreste, P.P. and Djeran - Maigre, I. (2014c). Three - dimensional numerical simulation for a twin mechanized

tunnelling in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, 40 - 51.

- Do Ngoc Anh, Dias, D., Oreste, P.P. and Djeran - Maigre, I. (2014d). Three - Dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground - The influence of the joints, *Acta Geotechnica*, in press.
- Đỗ Ngọc Anh. (2014). Một phương pháp mới tính toán kết cấu vỏ hầm lắp ghép. *Tuyển tập Hội nghị Khoa học Đại học Mỏ - Địa chất lần thứ 21*. Hà Nội - 2014.
- Đỗ Ngọc Anh. (2016). Một số phương pháp tính toán kết cấu chống lắp ghép trong công trình ngầm. *Tuyển tập các công trình khoa học kỷ niệm 50 năm thành lập Bộ môn "Xây dựng Công trình ngầm và Mỏ" 1996 - 2016*, Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội
- Đỗ Như Tráng. (2011.) Tính toán kết cấu vỏ hầm có kể đến ảnh hưởng do lưu biến của môi trường đất đá xung quanh trong trường hợp tiếp xúc toàn phần. *Tạp chí Địa kỹ thuật*, 4, 12.
- Du Dianchun, Dias Daniel, Do Ngoc Anh, (2018). Hyperstatic reaction method for the design of U - shaped tunnel supports. *International journal of Geomechanics*, 18, 6.
- Du Dianchun, Dias Daniel, Do Ngoc Anh. (2018). Designing U - shaped tunnel linings in stratified soils using the Hyperstatic Reaction Method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Huang X., Zhu Y., Zhang Z., Zhu Y., Wang S., Zhuang Q. (2018). Mechanical behaviour of segmental lining of a sub - rectangular shield tunnel under self - weight. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 74, 131 - 144.
- Kashima Y., Kondo N., Inoue M. (1996) Development and application of the DPLEX shield method: Results of experiments using shield and segment models and application of the method in tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(1), 40 - 50.
- Liu X., Ye Y., Liu Z., Huang D., (2018). Mechanical behavior of Quasi - rectangular segmental tunnel linings: First results from full - scale ring tests. *Tunnelling and Underground Space*

- Technology*, 71: 440 - 454.
- Do Ngoc Anh, D. Dias, Z. Zhang, X. Huang, T. T. Nguyen, V. V. Pham and O. Nait - Rabah. (2020). Study on the behavior of squared and sub - rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method, *Transportation Geotechnics*, 22.
- Molins C, Arnau O. (2011). Experimental and analytical study of the structural response of segmental 3 tunnel linings based on an in situ loading test 4 Part 1: Test configuration and execution. *Tunneling technology and underground space*, 26(6), 764 - 777.
- Nakamura H., Kubota T., Furukawa M. (2003). Unified construction of running track tunnel and crossover tunnel for subway by rectangular shape double track cross - section shield machine. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2), 253 - 262.
- Nguyễn Anh Tuấn, Lê Thanh Bình. (2012). Phân tích ảnh hưởng lún của việc xây dựng đường hầm métro đến các công trình lân cận khu vực TP.HCM. *Tạp chí Giao thông vận tải*, số tháng 9/2012.
- Nguyễn Anh Tuấn. (2017). *Phân tích ổn định khối đất trước gương hầm*. LATS Kỹ Thuật. Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh. Hồ Chí Minh. Hồ Chí Minh - 2017.
- Nguyễn Quang Dũng. (2013). *Nghiên cứu rung động và biện pháp giảm rung động trong nền do khai thác hệ thống tàu điện ngầm*. LATS Kỹ thuật. Học Viện Kỹ thuật quân sự. Hà Nội.
- Nguyen Tai Tien, Do Ngoc Anh, Karasev Maxim Anatolyevich, Dang Van Kien, Daniel Dias. (2020). Tunnel Shape Influence on the Tunnel Lining Behavior, *Proceeding of ICE - Geotechnical Engineering*.
- Nguyễn Tăng Thanh và Trần Nguyễn Hoàng Hùng. (2011). Đặc trưng của đất - xi dùnng công nghệ phụt vữa cao áp (Jet - Grouting) để giảm lún bề mặt khi thi công tuyến Metro số 1 bằng máy khiên đào TBM ở TP. Hồ Chí Minh. *Tạp chí Giao thông vận tải*, (12/2011), 23 - 26.
- Nguyễn Thế Phùng, Nguyễn Quốc Hùng. (2004). Thiết kế công trình giao thông ngầm, Nhà xuất bản Giao thông vận tải.
- Nguyễn Xuân Mãn, Nguyễn Ngọc Huệ, Phạm Đức Hình, Nguyễn Hải Hưng, Trần Tuấn Minh, Nguyễn Duyên Phong (2015). Cơ sở xây dựng hệ thống tàu điện ngầm đô thị, Hội thảo Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Viện Cơ học và tin học ứng dụng, Hồ Chí Minh, 2015.
- Nguyễn Xuân Mãn, (2012). Nghiên cứu xây dựng hệ thống metro tại thành phố Hà Nội. Báo cáo đề tài cấp Bộ. Viện Cơ học và tin học ứng dụng, Hồ Chí Minh.
- Oreste, P. P. (2007). A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 185 - 205.
- Đoàn Thế Tường, (2012). Một số vấn đề địa kỹ thuật môi trường trong xây dựng hầm tàu điện ngầm ở Việt Nam, *Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng*, số 2/2012.
- Phan Sỹ Liêm và Nguyễn Bá Hoàng. (2016). Sử dụng công nghệ Jet - Grouting gia cố xung quanh hầm bảo vệ công trình móng nông tại tuyến Đường sắt Đô thị số 1 - TP.HCM. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải*, 26 - 30.
- Zhang Z., Zhu Y., Huang X. (2019). Standing full - scale loading tests on the mechanical behavior of a special - shape shield lining under shallowly - buried conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 86(1), 34 - 50.