PHÂN TÍCH LỰA CHỌN CÁC YẾU TỐ HÌNH HỌC PHƯƠNG NGANG CHO HẦM ĐƯỜNG SẮT KHU VỰC HÀ NỘI

ANALYSIS AND SELECTION OF TRANSVERSE GEOMETRIC ELEMENTS FOR RAILWAY TUNNEL IN HANOI AREA

Nguyễn Ngọc Thuyết[1], Nguyễn Thị Ngân[2]

[1,2]Viện Khoa học công nghệ xây dựng

Email: [1]thuyetibst@gmail.com, 0982 080 989; [2]thanhngan.ige.ibst@gmail.com, 0989 380 068

DOI: https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses3-15

TÓM TẮT: Trong thời gian gần đây, các dự án metro nói riêng và đường sắt đô thị nói chung đã bắt đầu được triển khai tại các thành phố lớn của Việt Nam, điển hình là Thủ đô Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh. Đây là những đô thị có mật độ xây dựng cao và nhiều di tích lịch sử, dẫn đến sự nhạy cảm lớn đối với các biến đổi của điều kiện đất nền. Những biện pháp phòng ngừa rủi ro cho tuyến hầm và công trình lân cận luôn cần được đặt ra. Trong số đo, biện pháp căn cơ nhất chính là chọn được những thông số kỹ thuật phù hợp cho tuyến hầm, không những về phương pháp thi công mà còn về hình thái tổng thể. Những thông số hình học của tuyến hầm khi được chọn hợp lý có thể giúp tiết kiệm chi phí, giảm thiểu rủi ro, góp phần lớn và sự thành công của dự án. Bài báo này tập trung vào việc phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến việc chọn lựa cấu hình mặt cắt ngang của tuyến hầm phù hợp với điều kiện thực tế của Hà Nội, từ đó đưa ra những khuyến nghị cho việc lựa chọn hình thái hầm sao cho có thể đạt những hiệu quả mong muốn.

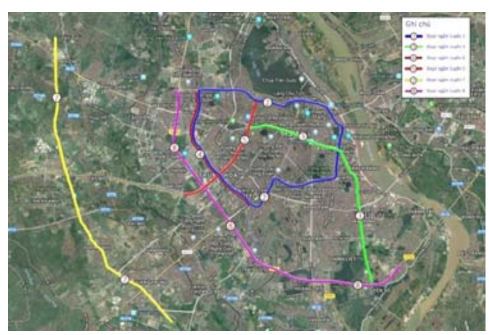
TỪ KHÓA: quy hoach tuyến, cấu hình bố trí hầm, hầm đường sắt đô thị

ABSTRACT: Recently, metro projects in particular and urban railways in general have begun to be implemented in major cities of Vietnam, typically Hanoi and Ho Chi Minh City. These are urban areas with high construction density and many historical relics, leading to great sensitivity to changes in ground conditions. Risk prevention measures for tunnels and neighboring structures always need to be put in place. Among the measurements, the most fundamental measure is to choose the appropriate technical parameters for the tunnel, not only in terms of construction methods but also in terms of overall shape. The geometric parameters of the tunnel, when chosen appropriately, can help save costs, minimize risks, and contribute greatly to the success of the project. This paper focuses on analyzing the factors affecting the selection of cross-sectional configuration of the tunnel suitable to the actual conditions of Hanoi, thereby giving recommendations for the selection of tunnel morphology to achieve the desired results.

KEYWORDS: route planning, tunnel layout configuration, urban railway tunnel.

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, những hệ thống đường sắt đô thị tại hai thành phố lớn là Thủ đô Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh đang được tích cực triển khai nhằm giải quyết vấn đề ùn tắc của giao thông đô thị, vốn đang ngày càng trở nên nhức nhối. Cho đến hiện tại tuyến metro đầu tiên tại Thành phố Hồ Chí Minh (với đoạn đi ngầm khoảng 2.6 km) đã đưa vào sử dụng và tuyến hầm đầu tiên tại Hà Nội cũng đã bắt đầu công tác khoan vào ngày 30/7/2024. Quy hoạch tổng thể mạng lưới metro Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh đã có nhưng với các tuyến chưa triển khai thì đều quy hoạch mới dừng ở thiết kế định hướng, còn thiết kế kỹ thuật tổng thể - FEED sẽ được thực hiện khi nhà thầu thi công bắt đầu thực hiện công việc của mình.



Hình1: Sơ đồ vị trí các đoạn Metro ngầm khu vực Hà Nội

Việc quyết định hình thái bố trí các hầm của các tuyến đó vẫn còn cần tiếp tục thực hiện. Điểm chung của quy hoạch tuyến Metro là các đoạn qua các khu vực lõi của đô thị sẽ là đi ngầm (hầm giao thông), khi mà mật độ dày đặc các công trình quan trọng trên bề mặt khiến việc bố trí đi nổi là không khả thi. Khi đó, việc thi công đào hầm là tất yếu.

Đặc thù của việc đào hầm là nền đất bị can thiệp, xáo động trên quy mô lớn. Điều này đặt ra yêu cầu nghiêm ngặt cho việc giữ an toàn ổn định cho công trình và con người phía trên hầm hoặc bên cạnh các nhà ga ngầm trong quá trình thi công xây dựng. Bên cạnh các vấn đề kỹ thuật nhằm hạn chế chuyển vị của nền đất thì việc lựa chọn những thông số hình học ngay từ khâu quy hoạch tuyến là một công tác quan trọng, có thể khiến đồ án thiết kế tiết kiệm, hiệu quả ngay từ những bước ban đầu. Những cân nhắc về hình học phương ngang của hầm bao gồm:

- Bán kính cong tối thiểu và đường cong chuyển tiếp: Một đoạn hầm cong (thay đổi hướng tuyến) nhìn chung chịu ảnh hưởng của hai ràng buộc đó là khả năng chuyển hướng của đoàn tàu (liên quan đến chiều dài và vận tốc) và khả năng chuyển hướng của máy khoan hầm. Với máy khoan hầm, đường kính ống hầm càng lớn thì bán kính cong yêu cầu cũng càng lớn.

- Loại tàu và cách thức vận hành (hầm ống đơn/đôi, có hay không có tường ngăn nếu là ống đơn). Các thông tin quyết định đường kính trong của ống hầm, ảnh hưởng đến đường kính tuyến hầm nói chung.

- Khoảng cách tim hai hầm trong trường hợp hầm đôi (twin-bore), thông số này ảnh hưởng đến phạm vi vùng ảnh hưởng, đến chiều rộng hộp ga, số lượng hầm nối ngang, hành lang thoát nạn. Một cân nhắc khác khi chọn hầm ống đôi là hai ống hầm sẽ chạy cùng cao độ hay chồng lên nhau.

- Chiến lược tránh chướng ngại: Nhìn chung các thiết kế sẽ né cọc sâu, móng cổ, tuyến hạ tầng ngầm chính; hạn chế việc xâm lấn vào đất tư nhân, ưu tiên việc tuyến "len lỏi" bên dưới lòng đường, vốn là không gian công cộng.

- Chiều dày lớp phủ (cover)/độ sâu đặt hầm: tiêu chí này cần cân bằng giữa an toàn lún - xung đột với hạ tầng sẵn có và chi phí khi mà "đi sâu có thể tránh nhiều hạ tầng bề mặt còn đi nông có thể giảm chi phí ga.

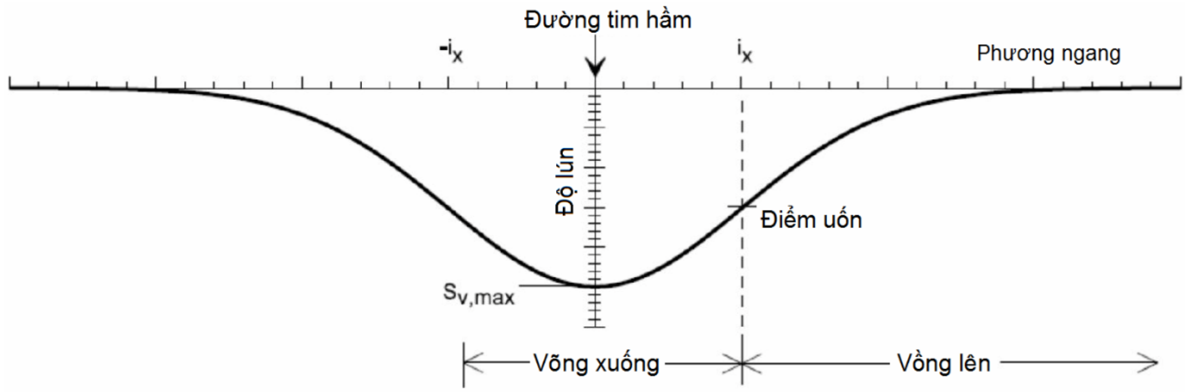
Các yếu tố hình học cho phần đi ngầm (không kể ga/giếng) được chia làm ba nhóm: (1) bình đồ, (2) trắc dọc, (3) mặt cắt ngang. Trong đó, các nội dung trắc dọc (2) chủ yếu liên quan đến vận hành như Độ dốc dọc tương thích năng lực đầu máy - phanh, thoát nước tự chảy, còn hai yếu tố còn lại (1 và 3) chi phối vấn đề chuyển vị, ổn định và giá trị xây lắp với các khía cạnh: đường kính, bán kính cong, lớp phủ, cấu hình ống hầm. Bài báo này tập trung vào các lưu ý cho việc lựa chọn thông số hình học phương ngang (nhóm 1 và 3) cho hầm trong điều kiện cụ thể tại khu vực Hà Nội, nhắm đến mục tiêu là đưa ra những khuyến nghị cho việc lựa chọn hình học phương ngang cho đoạn đi ngầm đoạn hầm hiệu quả với khu vực Hà Nội.

2. CHUYỂN VỊ CỦA NỀN ĐẤT KHI ĐÀO HẦM CÁC CÁC CÂN NHẮC VẠCH TUYẾN THEO PHƯƠNG NGANG

Việc đào hầm sẽ tạo một khoảng trống dạng tuyến trong nền đất. Trong quá trình đào, do nền đất xung quanh đường hầm không được chống giữ, hoặc được chống giữ một phần nên tại các vị trí đào ra, đất nền sẽ bị giảm ứng suất và nở ra. Lượng đất bị giãn nở, tăng thể tích này cũng cần phải di chuyển ra khỏi vị trí đào hầm để đảm bảo kích thước thiết kế của vỏ hầm. Vì vậy, trong hầu hết các trường hợp sẽ luôn luôn cần phải loại bỏ một khối lượng đất lớn hơn lượng đất nguyên thổ trong thể tích của khoảng trống hoàn thiện. Khối lượng tăng thêm này được gọi là hao hụt thể tích (hay mất đất, ký hiệu là V_L). V_L được thể hiện dưới dạng phần trăm của lượng lượng đất đào vượt quá lượng đất đào tính thuần túy theo kích thước đường hầm lý tưởng (không giãn nở), V_S.

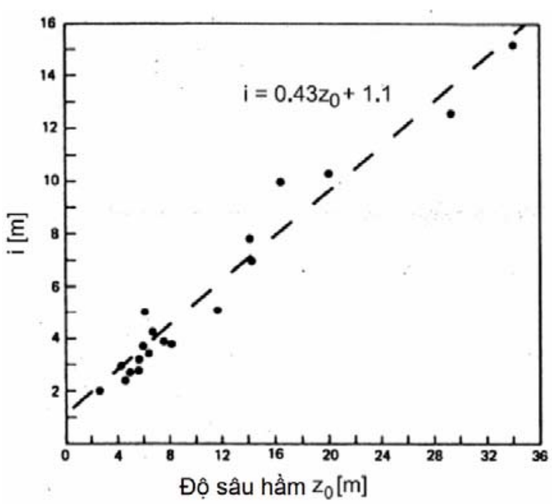
$$V_L = \frac{V_S}{\pi \frac{D^2}{4}} \tag{1}$$

Trong đó D là đường kính ngoài của kết cấu đường hầm. Với công nghệ thi công hiện tại V_L thường nằm trong khoảng 0.5 - 1%. Phạm vi máng lún (khi chỉ có nền đất, không có công trình xây dựng) được gọi là "vùng xanh". Nghiên cứu của Martos [1] về quan sát thực địa về lún bên trên hầm mỏ và sau đó nhiều tác giả khác [2, 3] đã chỉ ra rằng có thể dùng một đường cong phân phối Gaussian để mô tả tốt một máng lún ngang ngay sau khi thi công hầm. Hình 2 [3] mô tả mặt cắt ngang một máng lún bề mặt gây ra do đào hầm.



Hình 2: Biểu đồ máng lún theo phương ngang do thi công hầm gây ra [3]

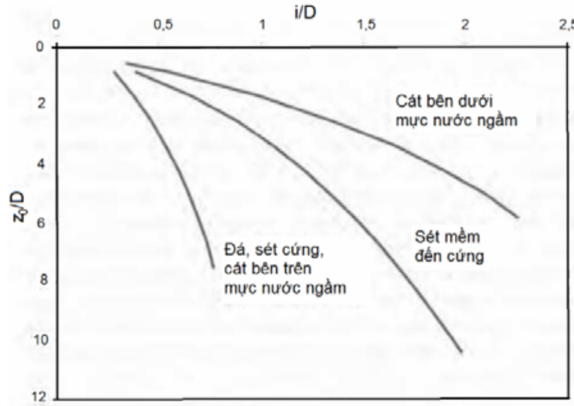
Độ sâu của hầm ảnh hưởng trực tiếp đến sự phát triển chuyển vị và biến dạng mặt đất. Lý do là thể tích của máng lún sẽ tương ứng với giá trị V_L. Khi hầm đặt sâu phần đất bị hạ xuống sẽ lan rộng hơn theo phương ngang, dẫn đến tham số chiều rộng máng lún "*i*" sẽ lớn, một số dữ liệu về nguyên lún này được thể hình trong Hình 3 [4]. Trong khi đó với mỗi công nghệ đào hầm nhất định, giá trị của V_L nhìn chung là ít biến động nên khi biến dạng phương ngang tăng lên thì độ lún (vốn là theo phương đứng) sẽ giảm bớt.



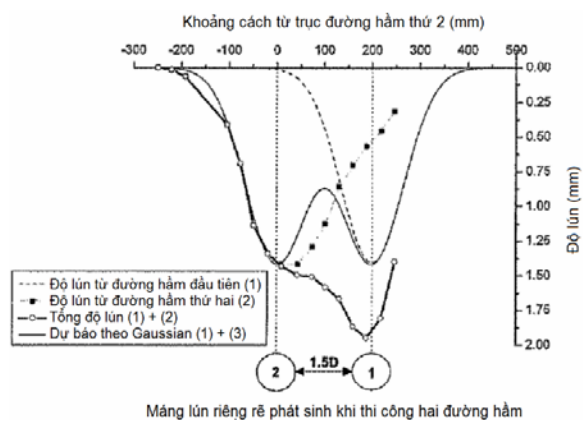
Hình 3: Tương quan giữa tham số chiều rộng máng lún bề mặt "i" và chiều sâu hầm z_0 [4]

Những thay đổi về tham số bề rộng máng lún ở các độ sâu khác nhau và các loại đất khác nhau được thể hiện trong Hình 4 [3].

Một khía cạnh khác của việc lún nền khi đào hầm là việc chia một hầm lớn thành hai hầm nhỏ song song với nhau. Hai máng lún của hai ống hầm nếu giao thoa nhau thì nhất định sẽ làm tăng độ lún tổng tại bề mặt. Hình 5 [5] thể hiện độ lún bề mặt khi đào hai ống hầm, có thể thấy rõ sự gia tăng độ lún khi đào ống hầm thứ hai.



Hình 4: Tương quan giữa tham số chiều rộng máng và độ sâu của đường hầm đối với các điều kiện nền đất khác nhau [3]



Hình 5: Kết quả khảo sát khi thi công hầm trong đất sét [5]

Khoảng cách giữa các ống hầm phải được thiết kế cẩn thận để tránh hiện tượng ảnh hưởng lẫn nhau giữa hai hầm này, và khoảng cách giữa các trục hầm có thể phải ≥ 3 lần đường kính hầm trong đất rất yếu. Khoảng cách tối thiểu giữa các hầm đôi sẽ được xác định như là một hàm số của các đặc tính đất và của các mô hình số cơ sở để đảm bảo tránh được các tác động bất lợi giữa các hầm.

Hầm đôi có thể được xây dựng gần nhau hơn với điều kiện đảm bảo an toàn trong quá trình thi công hầm và trong giai đoạn sử dụng.

3. CÁC ĐIỀU KIỆN RÀNG BUỘC CỦA KHU VỰC HÀ NỘI

3.1. Điều kiện địa chất công trình

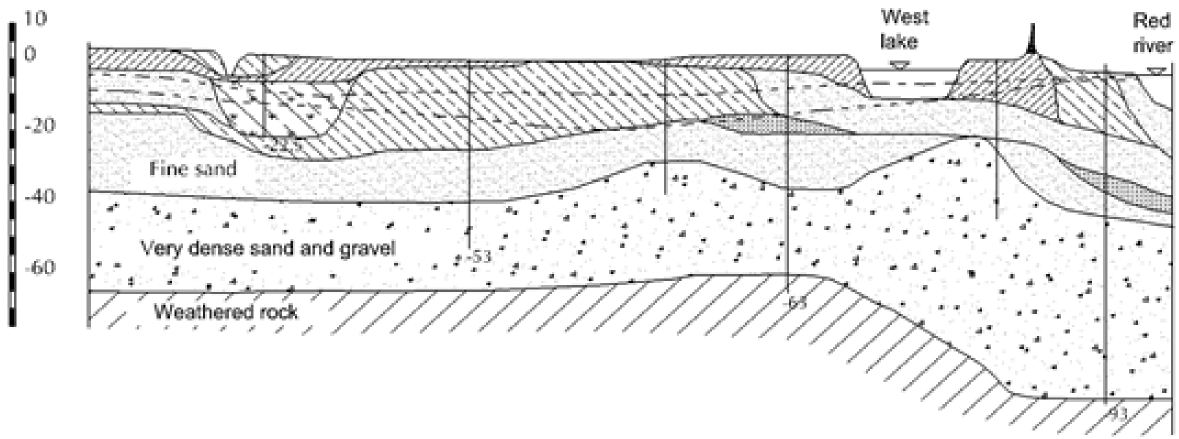
Hà Nội nằm trong vùng Đồng bằng châu thổ sông Hồng trải rộng khoảng 15.000 km^2, địa hình khá bằng phẳng. Trong phạm vi độ sâu đặt đường hầm thông thường (từ 0 - 60 m kể từ mặt đất) các lớp đất trong địa bàn Hà Nội được phân bố từ trên xuống dưới như sau [6]:

- Lớp đất phủ với tính chất và độ dày không đồng đều, chiều dày có thể lên đến 6 m.

- Lớp sét và bụi, khả năng chịu lực kém phân bố ở độ sâu 10 - 25 m.

- Các lớp cát và cát pha độ sâu phân bố từ 10 m đến 25 m và độ sâu của đáy lớp cát nằm trong khoảng từ 30 m đến 45 m. Độ chặt của những tầng cát này ở mức trung bình.

Lớp cuội sỏi với giá trị xuyên tiêu chuẩn N spt > 50. Đỉnh của tầng này nhìn chung nằm trong độ sâu từ khoảng 30 m đến 45 m. Đá trầm tích nằm ngay bên dưới lớp cát sỏi, thường gặp ở độ sâu lớn hơn 60 m.



(1)	LK10	P52	P29	P43	LK11	Q67	
(2)		5,09	6,62	7,48	5,09	5,09	
(3)		2560	2750	1300	2530	1000	

Hình 6: Mặt cắt đất địa chất điển hình ở khu vực trung tâm Hà Nội [7]

Như vậy, với các trường hợp không có yêu cầu quá đặc biệt về độ sâu, hầm trong khu vực nội thành Hà Nội nhìn chung sẽ không nằm trong lớp đá. Trường hợp gương hầm hỗn hợp sẽ xảy ra khi nằm giữa lớp cuội sỏi và lớp đất (sét hoặc cát) bên trên.

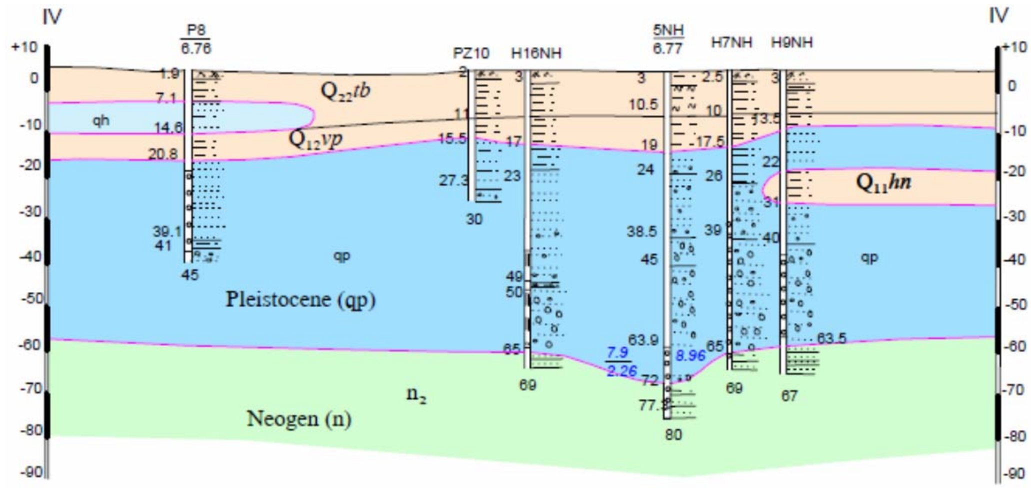
3.2. Điều kiện địa chất thủy văn

Các nghiên cứu [8] chỉ ra rằng Hà Nội có hai tầng nước ngầm. Tầng thứ nhất (Holocen - qh) ở bên trên nằm trong các thấu kính cát và do đó không liên tục.

Tầng bên dưới (Pleistocene - qp), nằm trong lớp cát và sỏi, thông với sông Hồng và do đó thay đổi mạnh mẽ theo mùa phụ thuộc vào cả lượng mưa và mực nước sông. Tầng nước ngầm này có áp ở độ sâu từ 10 - 15 m.

Tầng nước ngầm Neogene (m): Trong khu vực trung tâm Hà Nội, độ dày của lớp này nằm trong phạm vi vài chục mét đến vài trăm mét. Đỉnh của lớp này nằm trong phạm vi độ sâu từ 47 - 88 m với độ sâu trung bình 61 m.

Có thể thấy với đặc trưng trải dài của các tuyến hầm đô thị, việc gặp các tầng nước ngầm là khó tránh khỏi. Đây là một yếu tố cần lưu tâm trong việc chọn loại hình thi công hầm. Thông thường, các hầm sẽ hiếm khi bố trí chiều dày lớp phủ bên trên nhỏ hơn đường kính hầm (C/D < 1). Như vậy với hầm giao thông (phổ biến có đường kính 6 - 12 m) sẽ gần như chắc chắn nằm trong khu vực có nước ngầm. Điều kiện này khiến cho việc đào hầm không dùng vỏ bảo vệ (shield) là rất khó khả thi hoặc tốn kém cho việc xử lý nền đất trước khi đào hầm.



Hình 7: Mặt cắt thủy văn theo hướng Bắc - Nam khu vực nội đô Hà Nội [9]

3.3. Đặc điểm các công trình bề mặt

Quy hoạch đường sắt đô thị Hà Nội bố trí các đoạn hầm đi qua những khu vực có mật độ xây dựng trên bề mặt dày đặc, cùng với đó là các hạ tầng kỹ thuật đi theo. Đặc điểm về mật độ xây dựng nội đô là các nhà bố trí sát nhau. Các công trình được xây dựng trong thời gian sau năm 1990 đa phần là kết cấu nhà khung bê tông cốt thép trên nền móng tương đối vững chắc. Những tòa nhà xây dựng trước thời điểm năm 1990 hầu hết là nhà tường chịu lực. Đặc biệt tuyến số 2, 3, 4, 5 của thành phố Hà Nội, đi qua đoạn khu phố cổ có nhiều ngôi nhà đã được xây dựng lâu đời, có giá trị về mặt lịch sử. Do đó, khu vực này rất nhạy cảm với lún sinh ra do thi công đào hầm. Ngoài ra, khu vực nội đô cũng có những công trình cao tầng, những công trình loại này thường dùng móng cọc khoan nhồi với mũi cọc tựa vào lớp cuội sỏi, sâu từ 24 - 45 m. Vì vậy, nếu tuyến hầm cắt qua nhà cao tầng trong phạm vi độ sâu nêu trên, sẽ phải có những giải pháp gia cố móng, thay móng trước khi đào cắt ngang qua phía dưới.

Với tuyến hầm đô thị số 2 (Nam Thăng Long - Trần Hưng Đạo) thông tin từ lần khảo sát năm 2012 có Tổng cộng có 2.334 công trình đã được thực hiện khảo sát, trong đó có 1.791 công trình có kết cấu chịu lực bằng bê tông cốt thép và 522 công trình có kết cấu chịu lực là kết cấu gạch xây. [10]

Các đường phố có quy hoạch tuyến đường sắt ngầm đi bên dưới đa số nhỏ hẹp nên các công trình hai bên đường có khả năng nằm trong máng lún sẽ rất nhiều, thậm chí nhiều công trình có móng cọc có thể xung đột với đường hầm. Đây là một yếu tố gây rất nhiều khó khăn cho việc triển khai thi công về cả kỹ thuật, chi phí, tiến độ.

Trong nền đất thành phố Hà Nội, ngoài nền móng các công trình bề mặt còn tồn tại rất nhiều các kết cấu CTN khác như các CTN có chức năng cung cấp, thoát thải của thành phố, các giếng khai thác nước ngầm công nghiệp, giếng khai thác nước của nhà dân,... Các công trình này có những tác động bất lợi nhất định tới quá trình thi công như:

- Là nguyên nhân dẫn tới thất thoát dung dịch chất lỏng, khí nén trong buồng đào;

- Là nguồn dẫn nước xâm nhập vào không gian CTN khi đào qua;

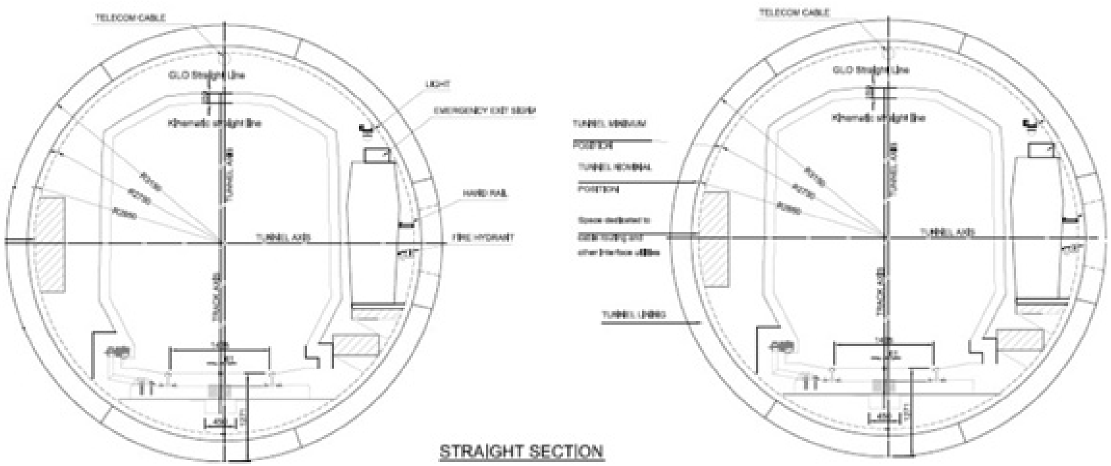
- Làm xáo trộn, mất tính đồng nhất của môi trường xây dựng và do đó gây ảnh hưởng bất lợi tới đặc tính phản ứng của khối đất như tăng ứng suất, tăng biến dạng, dịch chuyển...

3.4. Đặc điểm hình học của ống hầm dùng cho đường sắt đô thị

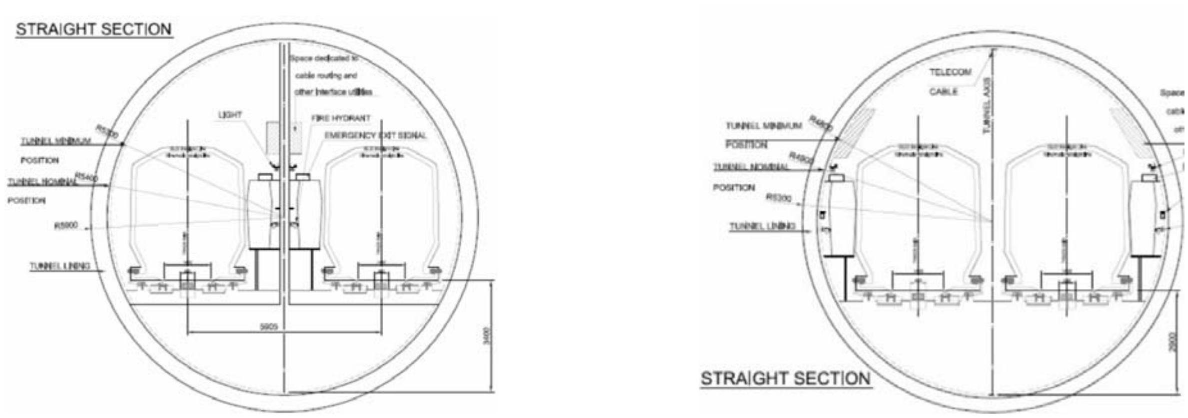
Hình thái hệ thống đường sắt đô thị nhìn chung là thống nhất và có các thông số tương tự nhau. Kích thước của đầu máy toa xe sẽ ảnh hưởng trực tiếp hoặc gián tiếp đến các thông số khác như kích thước thông thủy trong ống hầm, độ dày vỏ hầm, đường kính ngoài của hầm, bán kính cong của tuyến. Ví dụ, với dự án đường sắt Nhổn - Ga Hà Nội, kích thước trung bình của đầu máy toa xe là 2,9 m từ đó các thông số hình học yêu cầu khác của tuyến hầm có thể được xác định như trong bảng 1 [9], Với ba phương án được xét đến:

- Tuyến gồm 2 ống hầm;
- Tuyến gồm 1 ống hầm - không có tường ngăn;
- Tuyến gồm 1 ống hầm - có tường ngăn.

Đường kính ngoài của ống hầm khác nhau sẽ có mức độ ảnh hưởng đến nền đất khác nhau, do đó chúng yêu cầu có những điều kiện riêng khi bố trí trong nền đất. Bảng dưới đây tóm tắt những giới hạn chính về hình học liên quan đến xây dựng hầm.



Hình 8: Mặt cắt ngang điển hình của hầm ống đôi [9]



a) *b)*

Hình 9: Mặt cắt ngang điển hình của hầm ống đơn (a) có và (b) không có tường ngăn [9]

Bảng 1: Tóm tắt các kích thước hầm liên quan cho 3 phương án hầm xem xét [9]

Lựa chọn các phương án hầm	Đường kính bên trong hầm	Dung sai xây dựng (theo chiều bán kính)	Độ dày vỏ hầm phân đoạn	Đường kính vỏ hầm phía ngoài	Đường kính đào
1) Hầm ống đôi	5,50 m	10 cm	30 cm	6,30 m	6,60 m
2) Hầm ống đơn	9,60 m	10 cm	40 cm	10,60 m	10,90 m
3) Hầm ống đơn với tường ngăn giữa	10,60 m	10 cm	50 cm	11,80 m	12,20 m

Bảng 2: Các giới hạn thông số hình học phương ngang liên quan đến xây dựng hầm cho 3 phương án hầm [9]

Các thông số tuyến	Hầm ống đôi (D 6,3 m)	Hầm ống đơn (D 10,6 m)	Hầm ống đơn có vách ngăn (D 11,8 m)
Bán kính cong nhỏ nhất	150 - 200 m	200 - 250 m	250 - 300 m
Chiều dày lớp phủ tối thiểu trên nóc hầm - dọc tuyến (C_{min} = 1,5D – 2D)	10 - 13 m	16 - 21 m	18 - 25 m
Chiều dày lớp phủ tối thiểu trên nóc hầm - tại ga (1D)	6,5 m	10,5 m	12 m
Khoảng cách tối thiểu giữa các trục hầm đôi nằm ngang (2D-3D)	12,6 - 18,9 m	Không áp dụng	
Khoảng cách tối thiểu giữa các trục hầm đôi chồng nhau (2D)	12,6 m	Không áp dụng	
Chiều rộng máng lún (green field)	15,6 m	21 m	24 m

GHI CHÚ:

- Bảng trên đây nhấn mạnh rằng bán kính cong tối thiểu của máy đào hầm đáp ứng yêu cầu cho bán kính cong nhỏ nhất của đường sắt.

- Chiều rộng máng lún (green field) là tính với trường hợp thuần nền đất, chưa xét đến công trình.

4. CÁC LỰA CHỌN PHƯƠNG ÁN HÌNH HỌC PHƯƠNG NGANG CHO HẦM TRONG KHU VỰC HÀ NỘI

4.1. Những phương án lựa chọn Độ sâu đặt hầm

Độ sâu đặt hầm liên quan trực tiếp đến độ dày lớp phủ (C - cover) là khoảng cách giữa bề mặt đất và cao độ đỉnh hầm. Thông số này thường gắn với đường kính ngoài của hầm D. Khi hầm quá nông sẽ dẫn đến rủi ro “trồi nền/đùn đất” và khó kiểm soát áp lực buồng đào; khi hầm đặt quá sâu sẽ làm tăng chiều sâu ga/giếng, chiều dài thang cuốn, chi phí thông gió - thoát hiểm.

Trong thực hành phổ biến với TBM EPB/Slurry trong đô thị: C ≥ 1 D ở điều kiện bình thường; 1,2 - 1,5 D khi đi qua khu cực nhạy cảm (nhà cổ, móng nông, hạ tầng dày đặc). Các yếu tố quyết định cover: (i) vị trí móng/cọc công trình; (ii) tuyến ống/kênh ngầm; (iii) mực nước ngầm; (iv) tải trọng giao thông; (v) yêu cầu giảm lún cho mặt đường/công trình liền kề.

Bảng 3: So sánh 3 mức độ sâu đặt hầm (nông - trung bình - sâu) về chi phí, rủi ro, tác động

Hạng mục	Hầm đặt nông (≈ 7 - 10 m)	Hầm đặt ở đội sâu trung bình (≈ 10 - 15 m)	Hầm đặt sâu (≥ 16 - 22 m+)
Chi phí ga/giếng	Thấp - trung bình (đào nông, tiếp cận thuận lợi)	Trung bình	Cao (ga/giếng sâu, thời gian và biện pháp phụ trợ tăng)
Chi phí tuyến hầm	Thấp với hầm đôi đường kính nhỏ; tổng chiều dài đào gấp đôi nếu 2 ống	Cân bằng (một ống D ~ 10 - 11 m)	Có thể tăng (đường kính lớn, chiều sâu tăng)
Rủi ro lún bề mặt	Cao hơn (biên độ đỉnh lớn hơn); máng lún hẹp	Trung bình	Thấp hơn về biên độ đỉnh; máng lún rộng hơn (ảnh hưởng lan xa)
Xung đột tiện ích/móng nông	Nhiều (ống kỹ thuật nông, nhà phố, móng nông)	Giảm	Ít (né tiện ích nông)
Xung đột móng sâu/cọc cao tầng (24 - 45 m)	Ít	Cục bộ có	Tăng khả năng giao cắt với cọc sâu
Nước ngầm và gương hỗn hợp	Nhạy áp lực gương (tầng qp 10 - 15 m)	Ổn định hơn, vẫn trong vùng nước ngầm	Nguy cơ gặp cát sỏi 30 - 45 m/gương hỗn hợp
Linh hoạt vạch tuyến (R tối thiểu)	Tốt (Rmin nhỏ - hầm đôi D ≈ 6,3 m: 150 - 200 m)	Trung bình (Rmin 200 - 250 m)	Hạn chế (Rmin 250 - 300 m)
Tương tác hầm đôi	Dễ giao thoa hai máng lún khi đào ống thứ hai (lún tổng tăng)	–	–
Tác động đô thị/mặt bằng	Thấp cho ga (nông) nhưng cao về kiểm soát lún sát nhà phố	Cân bằng	Cao cho ga (sâu) nhưng thấp về rủi ro bề mặt và tiện ích nông
Gợi ý phạm vi áp dụng	Phố hẹp, cần R nhỏ, ưu tiên tiến độ/tiếp cận; ít công trình nhạy cảm	Đoạn điển hình: cân bằng rủi ro - chi phí - thi công	Khu rất nhạy cảm bề mặt (di sản/nhà tường gạch) hoặc né tiện ích dày đặc

4.2. Phân tích đặc điểm các hình thái bố trí ống hầm phổ biến

Như các thông số đưa ra trong Bảng 3, đường kính ống hầm có ảnh hưởng rõ rệt đến các yêu cầu về không gian đất nền bao quanh nó. Từ đó, ảnh hưởng đến cách bố trí tuyến hầm trong lòng đất theo cả phương đứng lẫn phương ngang. Có thể tạm chia các hình thái tuyến hầm thành dạng ống đôi và ống đơn. Những đặc điểm bố trí của hai hình thái này được so sánh trong Bảng 4 dưới đây:

Bảng 4: So sánh đặc điểm của phương án ống đơn (D ≅ 10 ÷ 12 m) và ống đôi (hai ống D ≅ 6 m)

Phương án ống đơn	Phương án ống đôi
- Phạm vi chiếm dụng phương ngang nhỏ hơn khiến cho có thể bố trí tuyến dưới các phố chính tốt hơn và giảm thiểu tác động trực tiếp lên các toà nhà hiện tại. - Bán kính cong lớn hơn → khó vạch tuyến hơn. - Không cần làm đường ngang nối giữa 2 chiều lưu thông. - Cần đặt sâu hơn (đắt hơn khi thi công ga). - Chiều cao ống lớn hơn → Có thể bố trí thêm 1 tầng cho hệ thống kỹ thuật → giảm chiều dài ga. - Loại không có tường ngăn: + Cần bố trí thêm giếng đứng khẩn cấp và thông gió (trừ loại có tường ngăn). + Không có đường dự phòng khi gặp sự cố (trừ loại có tường ngăn). - Loại có tường ngăn: + Thông gió tốt hơn nhờ hiệu ứng pitông. + Đường kính phải lớn hơn loại không có tường ngăn 1 chút → lún nhiều hơn. + Phải dự tính một đoạn hầm/hộp mở rộng khi tiếp cận đến ga và ra khỏi mỗi ga. + Không phổ biến → kinh nghiệm về các mặt an toàn và thiết bị vẫn còn bị hạn chế.	- Đường kính hầm nhỏ hơn và do có một sự tiêu chuẩn hoá nhất định về đường kính máy và hầm trong các dự án quốc tế, nên nói chung việc tìm máy khoan hầm SM trên phạm vi thế giới để tân trang lại theo đường kính yêu cầu và mua lại sẽ dễ dàng hơn so với việc sản xuất một máy hoàn toàn mới, với các lợi thế không thể nghi ngờ về việc tiết kiệm thời gian mua máy. - Bán kính cong nhỏ hơn → vạch tuyến linh hoạt hơn. - Hai đường chạy độc lập có thể có độ linh hoạt cao hơn cho việc thiết kế ga. - Độ lún nhỏ hơn. - Có thể đặt nông hơn → ga nông hơn → giảm chi phí, sử dụng hiệu quả hơn (do tiết kiệm thời gian lên xuống). - Có 1 tuyến dự phòng trong trường hợp 1 tuyến gặp sự cố. - Thông gió tốt nhờ hiệu ứng pitông. - Cần thi công đường ngang nối 2 ống nếu hai ống ngang nhau. Nếu 2 ống chồng nhau thì thông nhau tại các ga. - Vùng ảnh hưởng bề mặt rộng hơn. - Tương tác 2 ống khi thi công phức tạp hơn. - Chiều dài đào gấp đôi → chi phí lớn hơn (khi dùng 2 máy) hoặc thời gian thi công dài hơn (nếu dùng 1 máy).

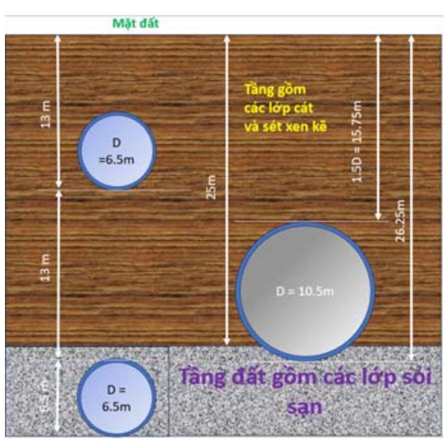
Như vậy, bố trí phương đứng cho các phương án hầm trong điều kiện địa chất của Hà Nội, gương hầm sẽ gặp các tình huống sau đây:

- Ống hầm đôi (D ≅ 6 m), Chiều dày lớp phủ tối thiểu C_{min} = 6,5 ÷ 12 m.

+ Phương án 2 ống nằm ngang nhau: gương hầm chủ yếu là hỗn hợp của sét/cát hoặc thuần trong cát nếu đi sâu.

+ Đối với phương án 2 ống chồng lên nhau, ống thấp hơn có thể xuống tới lớp sỏi (hoặc hỗn hợp cát/sỏi).

- Ống hầm đơn (D ≅ 10 ÷ 12 m) C_{min} = 11 ÷ 17: Lớp đất đào chủ yếu là hỗn hợp của sét/cát nếu đi nông, xuống sâu thêm sẽ hầu như là đất cát hoặc có thể tới lớp sỏi ở những điểm cục bộ.



Hình 10: Mặt cắt bố trí cấu hình hầm với địa chất Hà Nội

4.3. Đánh giá kịch bản lựa chọn hình học

a. Mục tiêu

So sánh 3 phương án bố trí hình học cho đoạn đi ngầm trong bối cảnh Hà Nội, dựa trên cơ sở địa chất - thủy văn, đặc điểm công trình đô thị và các giới hạn hình học/thi công đã được nêu trong tài liệu (Bảng 2; 3; 4; cơ sở lún kiểu Gauss; tương tác hầm đôi), sau đó chấm điểm đa tiêu chí (MCDA - năng lượng - chi phí vòng đời - rủi ro - vận hành - PCCC - thời gian thi công) và kiểm tra nhạy cảm trọng số. Thang điểm theo hướng càng cao càng tích cực là 1 (kém) … 5 (tốt/ít rủi ro). Tiêu chí chấm điểm như sau:

(1) Rủi ro lún và tác động bề mặt (càng thấp càng tốt).

(2) Xung đột công trình/ngầm và thủ tục (tránh va chạm cọc, hạ tầng).

(3) Chi phí và tiến độ ga/giếng (nông thuận lợi hơn).

(4) Linh hoạt vạch tuyến (khả năng R nhỏ, né chướng ngại).

(5) Rủi ro thi công (nước ngầm, gương hỗn hợp, tổ chức thi công).

(6) Sự thuận tiện trong lưu thông (thời gian kết nối với giao thông mặt đất).

b. Kịch bản minh họa

- PA-A - cover nông, R nhỏ (thường gắn với ống đôi D ≈ 6,3 m):

+ Điều kiện cốt lõi: Cmin dọc tuyến khoảng 10 - 13 m; Rmin 150 - 200 m; chiều rộng máng lún (green field) khoảng 15,6 m.

+ Ưu: linh hoạt vạch tuyến dưới phố hẹp (R nhỏ), ga/giếng nông → thi công bề mặt và kết nối đô thị thuận lợi.

+ Nhược: cover nông → rủi ro lún và xung đột tiện ích/ngầm lớn; hầm đôi có tương tác hai máng lún khi đào ống thứ hai (tổng lún có thể tăng nếu máng giao thoa), dù đường kính mỗi ống nhỏ hơn.

- PA-B - cover trung bình, R vừa (có thể là ống đôi đặt sâu hơn hoặc ống đơn D ≈ 10,6 m với tuyến hợp lý):

+ Điều kiện cốt lõi: Cmin dọc tuyến điển hình ≈ 12 - 20 m tùy cấu hình; Rmin 200 - 250 m; chiều rộng máng lún ≈ 21 m với ống đơn D 10,6 m (green field).

+ Ưu: cân bằng rủi ro lún - xung đột tiện ích so với A; linh hoạt chấp nhận R vừa; ga/giếng không quá sâu.

+ Nhược: vẫn có khả năng giao cắt cọc/móng nhà dân (nhiều cọc 12 - 25 m) và cục bộ gặp gương hỗn hợp (ranh cát - sỏi).

- PA-C - cover sâu, R lớn (thường gắn với ống đơn D≈10,6–11,8 m):

+ Điều kiện cốt lõi: Cmin dọc tuyến 16 - 25 m (tùy D); Rmin 250 - 300 m (với ống đơn có vách).

+ Ưu: đi sâu → máng lún rộng hơn nhưng biên độ đỉnh nhỏ hơn, giảm tác động bề mặt; ít xung đột với tiện ích nông.

+ Nhược: ga/giếng sâu → chi phí/thời gian tăng; có thể chạm lớp sỏi/cát sỏi (30 - 45 m) hoặc gương hỗn hợp ở ranh cát - sỏi.

Bảng 5: Tổng hợp điểm đánh giá đa tiêu chú MCDA
(trọng số có thể hiệu chỉnh theo mục tiêu dự án)

Tiêu chí	Trọng số	PA-A (nông, R nhỏ)	PA-B (trung bình, R vừa)	PA-C (sâu, R lớn)
1) Lún & tác động bề mặt	0.2	3	4	5
2) Xung đột CT/tiện ích ngầm	0.1	2	4	5
3) Chi phí & tiến độ ga/giếng	0.2	5	3	3
4) Linh hoạt vạch tuyến (R)	0.15	5	3	4
5) Rủi ro thi công (nước, gương)	0.2	3	4	5
6) Thuận tiện kết nối với bề mặt	0.15	5	3	2
Tổng điểm có trọng số	**1**	**3.9**	**3.5**	**4**

4.4. Phân tích nhạy cảm trọng số

- Nếu tăng trọng số "Rủi ro lún và tác động bề mặt" (≥ 0,2): PA-C thường vượt PA-B ở khu vực cực nhạy cảm (phố cổ/nhà tường gạch, hành lang chật hẹp).

- Nếu ưu tiên "Chi phí và tiến độ ga/giếng" do ràng buộc ngân sách/thời gian: PA-A có thể vươn lên ở những đoạn xa khu nhạy cảm, nơi tiện ích nông ít xung đột.

- Nếu ưu tiên "Linh hoạt vạch tuyến (R nhỏ)" để né chướng ngại: PA-A/PA-C trội hơn; PA-B kém phù hợp ở khu phố hẹp do yêu cầu R lớn và nằm trong độ sâu có thể xung đột với cọc của các tòa nhà. Tuy nhiên, với hầm đôi: đường kính nhỏ giúp giảm biến dạng mỗi ống, nhưng khi đào ống thứ hai, hai máng lún giao thoa có thể làm tăng lún tổng; cần tính theo trình tự thi công và khoảng cách trục phù hợp.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Khu vực nội đô Hà Nội là nơi có địa chất yếu, mực nước ngầm gần như chắc chắn sẽ gặp khi thi công hầm, có thể tạm chia thành hai địa tầng chính: địa tầng đất yếu bên trên (gồm các lớp đất từ mặt đất đến độ sâu 25 - 35 m) và địa tầng tốt (gồm các lớp sỏi sạn, đá cứng phân bố bên dưới 25 - 35 m). Về mặt công nghệ, nếu lựa chọn Shield machine, tuyến hầm nên được đặt trọn vẹn trong tầng trên hoặc tầng dưới.

Thông số đường kính ống hầm phục vụ đường sắt đô thị nhìn chung là không thay đổi quá nhiều (trong khoảng 6.5 - 7m với hầm ống đôi hoặc 9 - 12 m với hầm ống đơn. Như vậy, trong bối cảnh Hà Nội phương án đặt nông hoặc sâu sẽ có nhiều lợi thế hơn so với đặt trung bình. Để phát huy tối đa các ưu thế, nên bố trí cấu hình như sau:

- Với hầm đôi, nên chọn đặt nông (tỷ lệ C/D = 1 đến 1.5). Cấu hình này sẽ tận dụng được ưu thế về sự linh hoạt tuyến, giảm chi phí cho các ga, thuận tiện kết nối với giao thông mặt đất.

- Với hầm ống đơn nên đặt sâu hẳn hoàn toàn trong lớp sỏi sạn, tránh được các gương hầm hỗn hợp, thoát khỏi phạm vi đặt cọc nhà dân thông thường, linh hoạt tuyến và giảm ảnh hưởng của lún trên bề mặt

Việc lựa chọn các yếu tố hình học cho các tuyến Metro cần được cân nhắc kỹ lưỡng về nhiều yếu tố. Một lựa chọn hợp lý có thể giúp dự án tiết kiệm được chi phí, an toàn trong thi công và rút ngắn được tiến độ. Cần phải căn cứ vào các điều kiện cụ thể của từng dự án từ chi tiết đến tổng thể vừa đảm bảo an toàn, hợp lý vừa đảm bảo chi phí tổng thể thấp nhất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Martos, F. (1958). *Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors*. In International Strata Control Congress, Leipzig, 1958 (Berlin: Deutsche Akadamieder Wissenshaftenzu Berlin, Sektionfür Bergbau, 1958). pp. 191-205.

[2] Schmidt, B. (1969). S*ettlement sand ground movements associated with tunneling in soils*, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana.

[3] Peck, R. B. (1969). *Deep excavation sand tunneling in soft ground*. Proc. 7th International Conference soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225-290.

[4] O'Reilly, M. P. and New, B. M. (1982). *Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction*. tunneling 82, London, IMM, pp. 173-181.

[5] Chapman, D. N., Ahn, S. K., Hunt, D. V. L., & Chan, A. H. C. (2006). The use of model tests to investigate the ground displacements associated with multiple tunnel construction in soil. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *21*(3-4), 413.

[6] Ta Duc Thinh, Nguyen Van Phong *Study in engineering geological conditions for underground development in Hanoi*, Geotech Hanoi 2016 proceeding.

[7] Cuong V. Trinh, Tan H. Tran,Thuyet N. Nguyen (2016) "Back-analysis of loading tests of instrumented bored piles in Hanoi" *Proceeding of Geotech Hanoi 2016, Vietnam*, 3rd , pp. 91-95.

[8] Phuong, N.H., Thinh, T.D., Phong, N.V…et al (2004). *Collect, verify the exist documents, and additionally research to establish the partition map of soft soils for sustainable development in the Hanoi area.* The key project of Hanoi city.

[9] Systra (2017), *Báo cáo thiết kế cơ sở dự án "Đường sắt đô thị thí điểm Thành phố Hà Nội đoạn Nhổn đến ga Hà Nội"*. Ban quản lý đường sắt đô thị Thành phố Hà Nội.

[10] Công ty cổ phần tư vấn đầu tư và xây dựng giao thông vận tải - TRICC-JSC (2013) Dự án Xây dựng tuyến đường sắt đô thị Thành phố Hà Nội tuyến số 2, đoạn Nam Thăng Long - Trần Hưng Đạo - *Báo cáo điều tra, thu thập số liệu các công trình kiến trúc dọc Tuyến.* Ban quản lý đường sắt đô thị Thành phố Hà Nội.