

# 開削工事による地下鉄トンネル縦断線形への影響に関する一考察

坂田 聡<sup>1</sup>・岡ノ谷 圭亮<sup>2</sup>・岡山 大輔<sup>3</sup>・岩波 基<sup>4</sup>・小西 真治<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒160-0004 東京都台東区)  
E-mail: s.sakata@tokyometro.jp

<sup>2</sup>正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒160-0004 東京都台東区)  
E-mail: k.okanoya@tokyometro.jp

<sup>3</sup>学生会員 早稲田大学 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区 3-4-1)  
E-mail: d-okayama7129@toki.waseda.jp

<sup>4</sup>正会員 早稲田大学 社会環境工学科 教授 (〒169-8555 東京都新宿区 3-4-1)  
E-mail: miwanami@waseda.jp

<sup>5</sup>正会員 早稲田大学 社会環境工学科 非常勤講師 (〒169-8555 東京都新宿区 3-4-1)  
E-mail: shinjikonishi@aoni.waseda.jp

近年、都市の再開発事業が活発になり既存の地下鉄構造物に近接した掘削工事が増加している。トンネルは、周辺の地盤から均等に近い圧力を受け、その程よいバランスに守られてきた。近接施工の影響により、このバランスが崩れ、新たな外力が加わった場合にはトンネルに急激に大きな変状が発生し大きな問題となる。このため、都市部のトンネルでは、近接施工の影響を、事前に正確に予測して影響を把握し対策を講じることが、安全上また構造物の維持管理上重要である。近接施工は、一般には既設トンネルに交差するケースが多くそのような事例データも多く存在する。しかし、縦断方向に並行に施工される場合もあり、その影響の分析はあまり進んでいないのが現状である。また、既設トンネルの構造が異なる場合には、発生する挙動や変状も異なり、注意点や対処方法も異なって来る。このようなことから、既設の地下鉄に対する複数の近接工事のデータを収集し、既設トンネルの挙動分析を進めている。本報告では、整理が進んでいるケーソンによるトンネルとシールドトンネルの事例について縦断構造特性を考慮した縦断線形の変形について分析した結果を報告する。

**Key Words:** *influence of neighboring construction, subway tunnel, shield tunnel, caisson tunnel, longitudinal direction*

## 1. はじめに

近年、都市機能の再生に伴う再開発事業が活発に行われるようになった。これに伴い、既存の地下鉄構造物に近接した工事も増えている。安定した地盤内にある都市部のトンネルは、山岳部のトンネルのように地盤の塑性化、膨潤、すべり等による外力を受けて変形することがほとんどないが、唯一、近接施工による影響を受ける場合がある。トンネルは、周辺の地盤から均等に近い圧力を受け、その程よいバランスに守られてきた。覆工の劣化のような内因による影響と異なり、上記バランスが崩れ、新たな外力が加わった場合にはトンネルに急激に大きな変状が発生し大きな問題となる。一度発生

してしまった既設トンネルの変状は、地下鉄の営業を維持しながら直していくことは困難を極める。このため、都市部のトンネルでは、近接施工の影響を事前に正確に予測して影響を把握し、事前に対策を講じることが、安全上また構造物の維持管理上、重要になる<sup>1,2)</sup>。近接施工は、一般には既設トンネルに交差するケースが多いが、状況によっては、縦断方向に並行に施工される場合もあり、後者の場合は、影響を受ける範囲も大きくなる<sup>4)</sup>。また、既設トンネルが、開削トンネル、シールドトンネル、ケーソンによるトンネル等、異なる構造の場合には、発生する挙動や変状も異なり、注意点や対処方法も異なって来る。このようなことから、既設の地下鉄に対する複数の近接工事のデータを収集し、既設トンネルの挙動

の分析を進めている。本報告では、整理が進んでいるケーソンによるトンネルとシールドトンネルの事例について縦断構造特性を考慮した縦断線形の変形について分析した結果を報告する。

ソンによる2連ボックストンネルの左右の地盤を、縦断方向に170m(約6函体分)にわたって、底盤位置まで掘削し、既設トンネルが地盤のリバウンドによる浮上りの影響を受けた事例である。

## 2. 検討対象

ここでは、ニューマチックケーソン工法で構築された地下鉄トンネルに近接して開削工事(以降、現場1と呼ぶ)とシールド工法の直上で開削工事(以降、現場2と呼ぶ)を行った2現場の事例を検討対象とした。

現場1は、既設トンネル駅を拡幅してリニューアルした事例である<sup>5,6)</sup>。表-1に、現場の諸条件を示す。図-2に、現場の概要を示す。地盤は、もともと運河であったところを埋め立てたもので、軟弱なシルトである。ケー

表-1 検討対象の諸条件 (現場1)

掘削幅 (m)	30.5	
掘削深さ (m)	12.4	
掘削長さ (m)	170.0	
トンネル土被り (m)	4.4	
トンネル幅 (m)	15.0	
トンネル高さ (m)	10.0	
地盤条件	上部層	下部層
層厚 (m)	7.3	20.9
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	16	17
弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	730	4150
ポアソン比	0.45	0.40

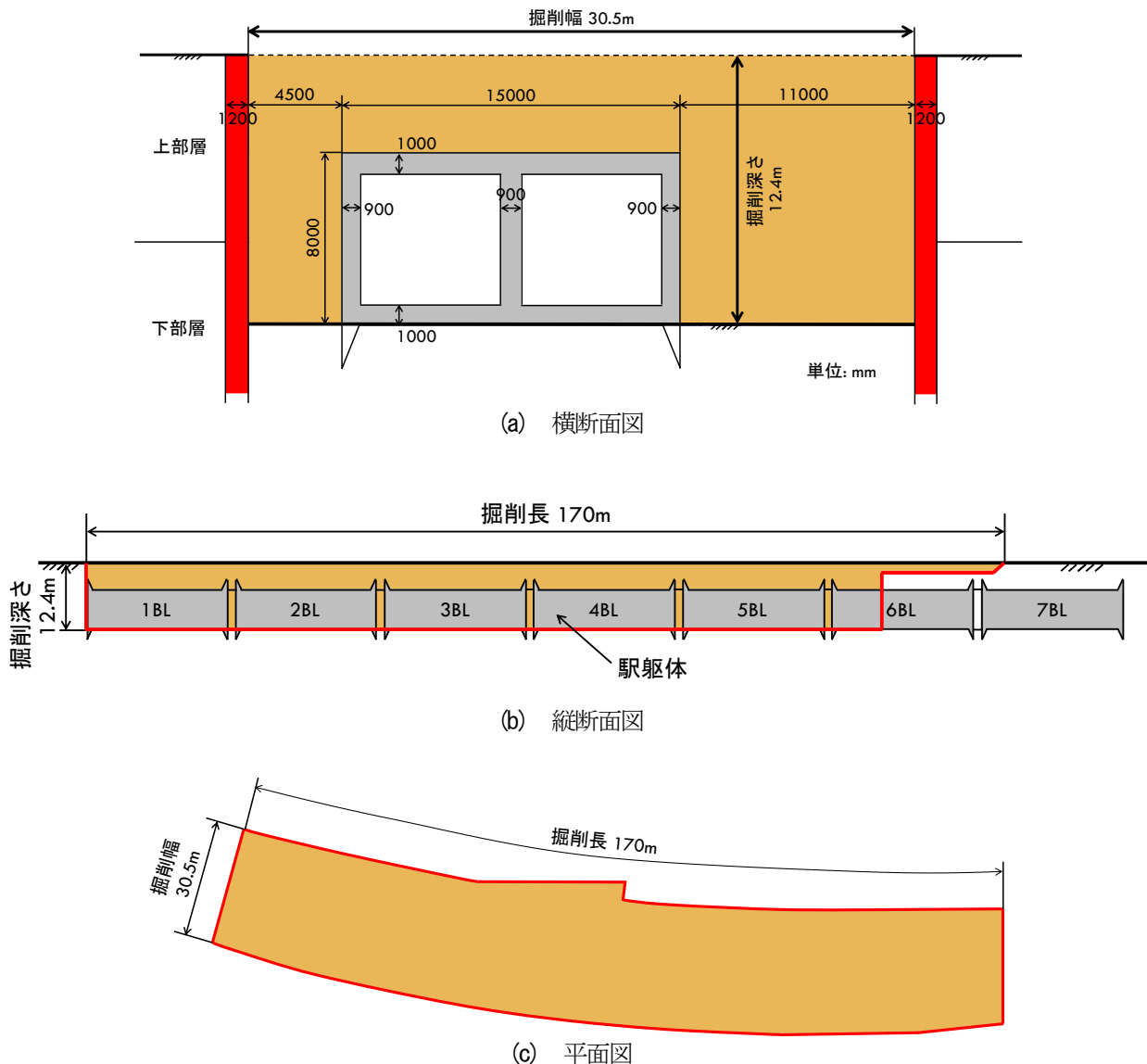


図-1 現場概要 (現場1)

現場2は、地下鉄の既設シールドトンネルに近接して、半地下構造の道路が建設された事例である。表-2に、現場の諸条件を示す。図-2に、現場の概要を示す。周辺の地盤は、固結度の高い東京砂層および東京礫層が主体である。既設シールドトンネルはRC平板セグメントを用いた直径6.6mの併設単線トンネルで、その上部に、10.4m~17.4m離れで底盤となる掘削工事が、縦断方向320mに渡って行われた。この施工でも、若干のリバウンドの影響がみられた。

なお、近接施工の詳細なデータが将来に渡って残される例は少なく、これらは貴重な資料である。

表-2 検討対象の諸条件 (現場2)

開削幅 (m)	18.8	
掘削深さ (m)	16.4	
開削長さ (m)	320.0	
トンネル土被り (m)	25.0	
トンネル直径 (m)	6.6	
地盤条件	上部層	下部層
層厚 (m)	10.6	39.4
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	15	18
弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	14200	121000
ポアソン比	0.45	0.30

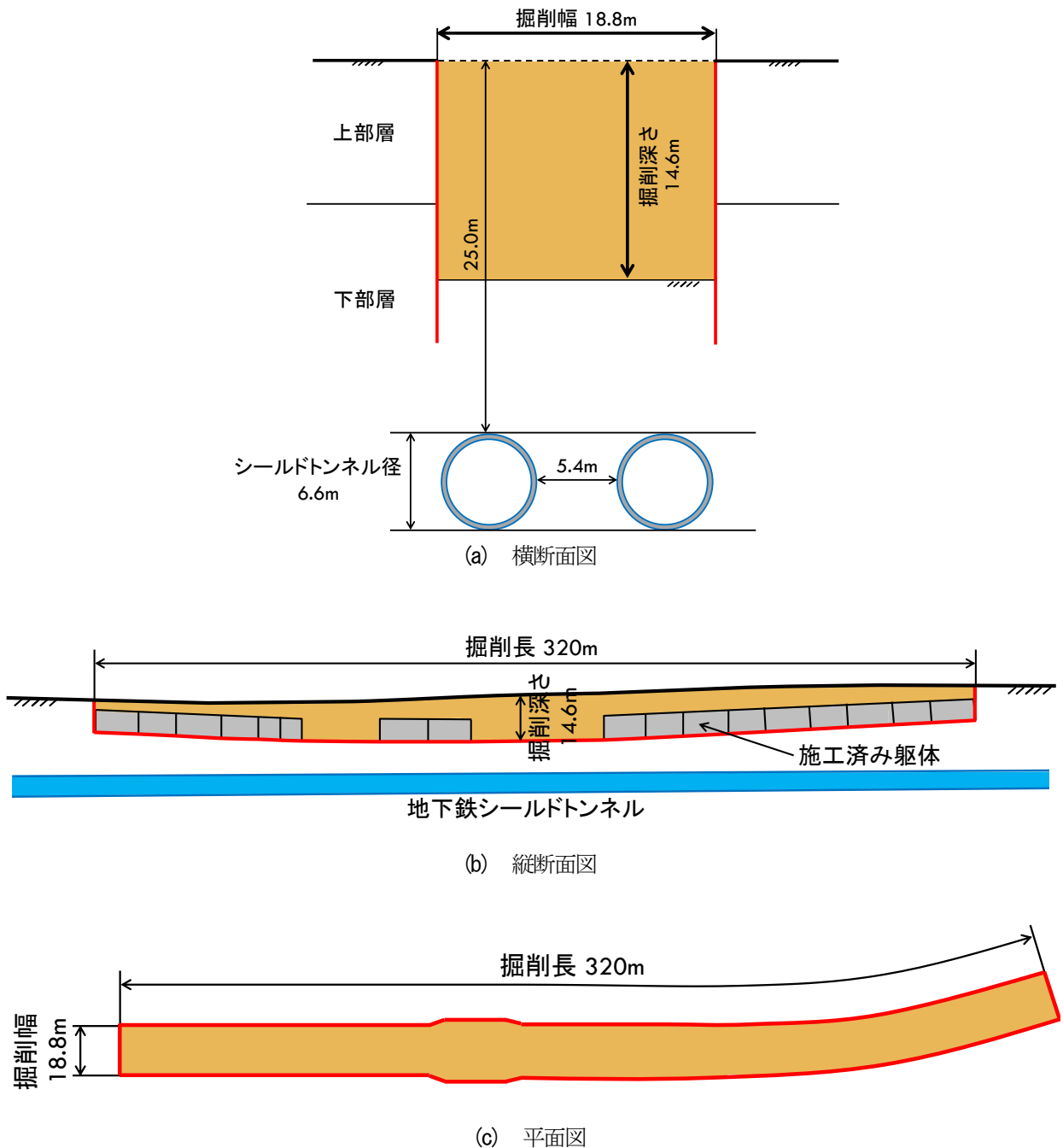


図-2 現場概要 (現場2)

### 3. 計測結果

#### (1) 現場 1

現場 1 の最大のリバウンド変位量が生じた施工段階における分布を表-3 と図-3 に示す。また、正の値は上方方向の変位を示す。なお、事前の FEM 解析による予測値は 34.2mm であった。端部から 80m までは、約 20mm 浮上がっている。しかし、140m 付近では、約 10mm の沈下になっている。

通常の周辺地盤掘削の影響による挙動として評価できるのは、端部から 80m 程度までのデータと考えられる。また、図より、継手部で大きくトンネルの変形が生じていることが分かる。

表-3 リバウンド変位量積 (現場 1)

端部からの距離 (m)	リバウンド変位量 (mm) [+: 上変位]
0.0	15.4
1.5	15.8
24.5	14.4
26.0	14.8
49.0	18.2
50.5	20.0
73.5	21.6
75.0	20.2
98.0	9.6
99.5	7.4
122.5	-4.2
124.0	-6.2
147.0	-10.4
148.5	-9.8
168.5	2.6
170.0	4.4

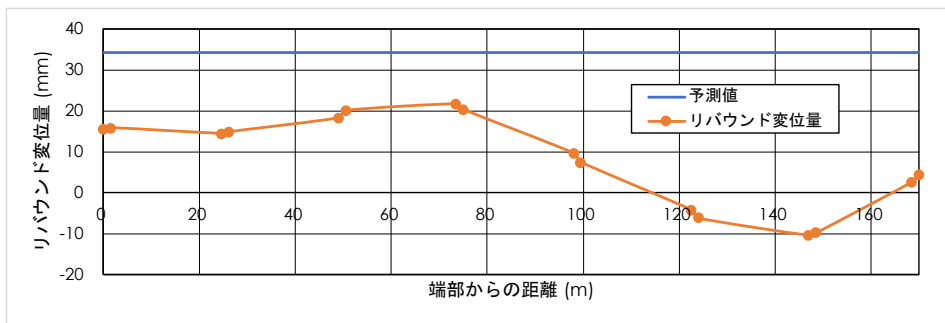


図-3 リバウンド変位量の分布 (現場 1)

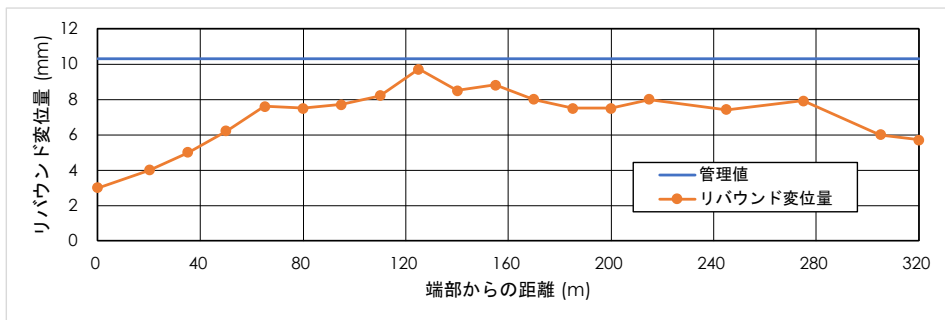


図-4 リバウンド変位量の分布 (現場 2)

#### (2) 現場 2

現場 2 の最大のリバウンド変位量が生じた施工段階における分布を表-4 と図-4 に示す。また、正の値は上方方向の変位を示す。なお、管理値は 10.3mm であった。既設トンネルと掘削底面との離れの変化の影響も少し考えられるが、両端部のリバウンド量が一番小さく、掘削距離 0m の端部で 3.0mm、320m の端部で 5.7mm であった。端部から 40m~60m にかけて、リバウンド量が徐々に増加している。中央の 70m~280m 間では約 8mm のリバウンド量になっている。

表-4 リバウンド変位量積 (現場 2)

端部からの距離 (m)	リバウンド変位量 (mm) [+: 上変位]
0	3.0
20	4.0
35	5.0
50	6.2
65	7.6
80	7.5
95	7.7
110	8.2
125	9.7
140	8.5
155	8.8
170	8.0
185	7.5
200	7.5
215	8.0
245	7.4
275	7.9
305	6.0
320	5.7

#### 4. 考察

##### (1) 現場 1

現場 1 の地下トンネル断面概要と特性を表-5 と図-5 に、継手構造を図-6 に示す。また、変形については図-7 に示す。

表-5 構造概要と特性 (現場 1) <sup>1)</sup>

トンネル幅 (m)	15.0
トンネル高さ (m)	8.0
上床版厚さ (m)	1.0
下床版厚さ (m)	1.0
側壁圧さ (m)	0.9
中壁厚さ (m)	0.9
断面積 (m <sup>2</sup> )	46.2
断面二次モーメント (m <sup>4</sup> )	418.6
地盤の弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	4150
地盤反力係数 (kN/m <sup>3</sup> )	736
特性値β (m <sup>-1</sup> )	0.0409
コンクリート弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	2350000
π/β (m)	76.8

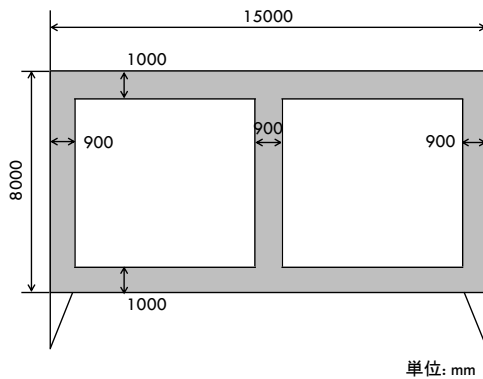


図-5 断面構造概要 (現場 1)

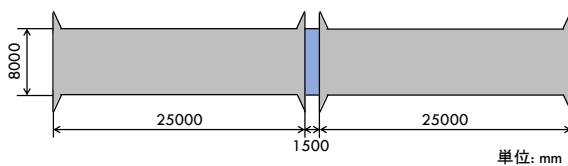


図-6 継手構造寸法概要 (現場 1)

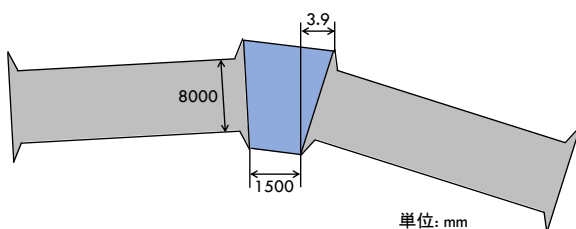


図-7 継手における変形 (現場 1)

図-3 では継手部でトンネルが大きく変形しており、折れ曲がっているような挙動となっている。これは継手部の変形が大きくトンネル縦断線形の角度が変化し、ケーソン躯体部は剛体が移動しているような挙動になっていると考えられる。図-5 および表-5 から、 $\pi/\beta$  が 76.8m となりニューマチックケーソン躯体長 25m より長くなっているのが分かる。躯体 25m は弾性床上の半無限長曲げ部材にならないことがわかる。74m 付近で段差が 1.4mm、折角が 0.03° 生じている。その結果、図-7 に示すように継手上面で 3.9mm の目開きが生じている可能性がある。

これらのことから、当該ニューマチックケーソンをつなげて構築したトンネルの近接施工の影響による挙動の予測を行い近接施工の影響検討を行うにあたっては、FEM 解析における継手部およびケーソン躯体の適切なモデル化が重要になることが分かった。

##### (2) 現場 2

現場 2 の地下トンネル断面概要と特性を表-6 に示す。

表-6 構造概要と特性 (現場 2) <sup>1)</sup>

トンネル外径 (mm)	6600
セグメント厚さ (mm)	320
セグメント幅 (mm)	1600
リング継手本数 (本)	12
リング鉄筋断面積 (mm <sup>2</sup> )	572.6
断面積 (m <sup>2</sup> )	6.313
断面二次モーメント (m <sup>4</sup> )	0.6253
中立軸 (mm)	92
等価断面二次モーメント (m <sup>4</sup> )	0.3244
地盤の弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	121000
地盤反力係数 (kN/m <sup>3</sup> )	39705
特性値β (m <sup>-1</sup> )	0.4595
コンクリート弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	2350000
π/β (m)	6.8

図-4 に示されている挙動を分析すると、リバウンド変位に応じてトンネルの変形が生じていることが分かる。表-6 では、 $\pi/\beta$  が 6.8m となっており、全長 320m のトンネルは弾性床上の半無限長曲げ部材に見なすことができる。これらのことから、近接施工の影響を受ける既設シールドトンネルのリバウンド変位予測には、等価曲げ剛性を用いた曲げ部材としてモデル化することが可能と考えられる。

#### 5. おわりに

既存の地下鉄構造物に近接した掘削工事が増加してお

り、近接施工の影響により既設地下鉄トンネルに与える影響を適切に予測し、対処することが重要になっていることから、既設の地下鉄トンネルに対する複数の近接工事のデータを収集し、既設トンネルの挙動分析を進めた。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) ニューマチックケーソンをつなげて構築したトンネルの近接施工の影響による挙動の予測を行い近接施工の影響検討を行うにあたっては、FEM解析における継手部およびケーソン躯体の適切なモデル化が重要になる。
- 2) 近接施工の影響を受ける既設シールドトンネルのリバウンド変位予測には、等価曲げ剛性を用いた曲げ部材としてモデル化することが可能である。

今後、これらの知見を活かすと伴に、既設シールドトンネル、ケーソン工法によるトンネル以外の構造、例えば、通常の開削トンネルに対する事例の分析を進め、FEMによる近接施工による既設地下鉄トンネルに与える影響予測の適切な手法の開発を進めていく予定である。これらの検討結果が、地下鉄構造物の保守を担当されている技術者や地下鉄構造物への近接工事を担当される技術者の業務に寄与できれば幸いです。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会：近接施工，地盤工学・実務シリーズ 28，丸善，2011.
- 2) 鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル，鉄道総合技術研究所，2007.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編
- 4) 伊藤聡，小西真治，村上哲哉，新田裕樹，阿南健一，中川貴之，本田中，赤木寛一：地盤沈下に起因する地下鉄開削トンネルの縦断方向の変状メカニズムについて，土木学会論文集 F2，Vol.76，No.1，pp. 14-31，2020.
- 5) 市原鴻，桑本寛之，谷一彰彦，岡田龍二，福田隆二，津田由：掘削に伴う営業線躯体のリバウンドと対策について，第74回土木学会年次学術講演会概要集VI，VI-070，2019.
- 6) 岡田龍二，福田隆二，神澤拓，近藤達也，桑本寛之：地下鉄営業線大規模改良工事における地下連続壁及び構築下地盤改良の施工について，日本トンネル技術協会，施工体験発表会資料，pp. 33-40，2018.

(2022. 8. 26 受付)

## STUDY ON IMPACT ON LONGITUDINAL ALIGNMENT OF SUBWAY TUNNEL DUE TO OPEN CUT METHOD

Satoshi SAKATA, Keisuke OKANOYA, Daisuke OKAYAMA  
Motoi IWANAMI and Shinji KONISHI

In recent years, urban redevelopment projects have become more active, and excavation work in close proximity to existing subway structures has increased. Tunnels are protected by a good balance of equal pressure from the surrounding ground. When this balance is disturbed by the influence of close construction and a new external force is applied, a sudden and large deformation of the tunnel occurs, causing a major problem. For this reason, it is important for the safety and maintenance of structures in urban tunnels to accurately predict in advance the effects of neighboring construction, to understand the effects, and to take countermeasures. In general, neighboring construction is often done at the intersection of existing tunnels, and there is a large amount of data on such cases. However, in some cases, the tunnel is constructed parallel to the existing tunnel in the longitudinal direction, and the effects of such construction have not been well analyzed. In addition, when the structure of the existing tunnel is different, the behavior and deformations due to neighboring construction will also differ, and the precautions and measures to be taken will also differ. For these reasons, data from several neighboring construction projects for existing subways have been collected, and the behavior of existing tunnels is being analyzed. This report presents the results of the analysis of longitudinal deformations considering longitudinal structural characteristics for the cases of tunnels with caissons and shield tunnels, which are in the process of being organized.