

大断面泥水式シールドの通過に伴う 橋梁・鉄道構造物への影響と対策

—首都高速中央環状線山手トンネル神山町代々木シールド—

Excavation of Large Cross Section Slurry Shield Tunnels
which affect Bridges and Railways

波津久毅彦¹・松田満²・則竹啓³・森口敏美⁴・長谷川勝哉⁵

Takehiko Hatsuku, Mitsuru Matsuda, Hiroshi Noritake, Masami Moriguchi,
Katsuya Hasegawa

¹正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 設計第一グループ (〒160-0022 東京都新宿区西新宿六丁目6-2)

²正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 設計第一グループ (同上)

E-mail:m.matsuda1313@shutoko.jp

³正会員 首都高速道路(株) 東京建設局 建設管理第一グループ (同上)

⁴正会員 鹿島・熊谷・竹中土木特定建設工事共同企業体 (〒151-0061 東京都渋谷区初台二丁目5-8-202)

⁵正会員 大成・フジタ・戸田特定建設工事共同企業体 (〒151-0061 東京都渋谷区初台一丁目10-8)

Kamiyama-Yoyogi Shield Tunnel is a part of the Central Circler Route, Tokyo Metropolitan Expressway. The large diameter (excavation diameter approx. 13 meter) expressway tunnel had successfully driven through numbers of existing underground infrastructures. The proximate influence by the tunnel excavation against these important infrastructures was pre-analyzed by FEM and the deformation was carefully monitored by the instruments during construction.

This paper presents the influence analysis and actual deformation measurements on Tokyo Metro Chiyoda Line, pile foundations of Hachiman-bashi and Shibume overpass during the Kamiyama-Yoyogi shield tunneling.

Key Words : slurry shield tunnel, neighboring construction, FEM, measurement

1. はじめに

首都高速中央環状線は、首都圏三環状道路の最も内側を形成する半径約8km、全長約47kmの環状道路である。このうち西側区間を形成する中央環状線山手トンネルは、東京都目黒区から板橋区までの全長約10kmのトンネルであり、このうち約7割の区間でシールド工法を採用している。なお、平成19年12月には4号新宿線から5号池袋線間6.7kmが開通しており、3号渋谷線から4号新宿線間は平成21年度の開通を目指し、鋭意事業中である。(図-1)

神山町代々木シールドは、山手トンネルの7つあるシールド区間の1つで、渋谷区初台一丁目の山手通りに位置する初台立坑を発進して、目黒区青葉台四丁

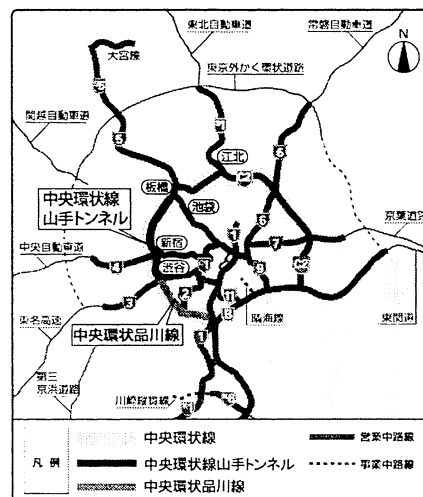


図-1 首都高速道路ネットワーク

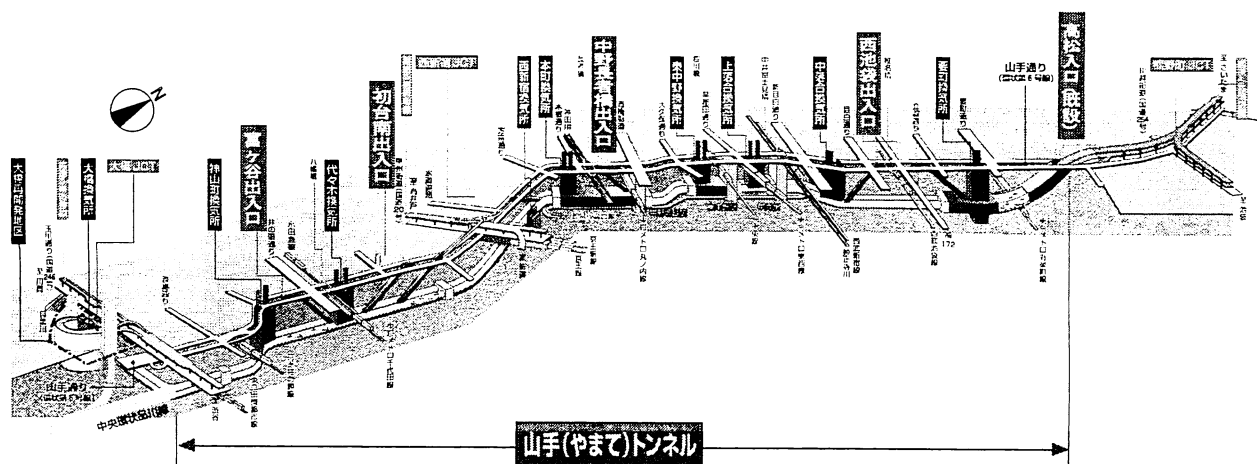


図-2 中央環状線山手トンネル路線図

表-1 工事概要・シールドマシン仕様

項目		外回りシールド	内回りシールド
工事名		SJ11工区(4)～SJ31工区 (外回り)トンネル工事	SJ11工区(4)～SJ31工区 (内回り)トンネル工事
施工者		鹿島・熊谷・竹中土木 特定建設工事共同企業体	大成・フジタ・戸田 特定建設工事共同企業体
施工延長		2,660m	
シールド	外 径	13,050mm	13,060mm
	工 法	泥水式シールド	
セグメント外径		12,830mm	
本体シールド	外径	φ 13,050mm	13,060mm
	機長	12,800mm	12,340mm
	テールシール	ワイヤーブラシ耐圧型×4段	
推進装置	シールドジャッキ	3,490kN×2,450st×48本	4,000kN×2,200st×42本
	総推力	167,520kN	168,000kN
カッター装置	装備トルク	23,180kN・m	24,174kN・m
	カッター回転数	0.441rpm	0.370rpm
裏込注入部	注入方法	同時注入方式	
	注入箇所	シールド本体上部4箇所	

目の淡島通り南側に位置する松見坂立坑に到達する施工延長約2.7kmの併設トンネルである。発進立坑から1.3km付近までは横併設、その後、到達立坑までは縦併設となっている。

掘進方法は、外径約13mの大断面シールドにおける切羽安定保持の信頼性と実績に加え、排土効率の優位性がある泥水式シールド工法を採用し、外回りおよび内回り各々1機のシールドマシンにて施工した。工事概要およびシールドマシンの仕様を表-1に示す。

中央環状線山手トンネルは、既設路線とのジャンクションや出入口、換気所との接続部など、大規模かつ複雑なトンネル構造物となる上に、山手通りには、鉄道や河川、大規模なライフラインを含むインフラ等が輻輳している。(図-2)

本シールドは、東京メトロ千代田線、小田急小田原線、京王井の頭線の直下を通過するほか、内回りシールドは、山手通りの橋梁である八幡橋、渋谷陸橋と近接して施工した。

本稿では、これらのうち、とくに近接して施工した東京メトロ千代田線、八幡橋および渋谷陸橋における影響解析と対策および計測結果について述べる。

2. 地質概要

当該工区の地質縦断面図を図-3に示す。シールドトンネル掘進部に出現する主な土層は、東京礫層（以下、Tog層）、上総層群砂質土（以下、Ks層）および

地質層序表			
地質時代	地層名	土質名	記号
完新世	沖積層	粘土、シルト 腐食土、砂礫	AC
更新世	関東ローム層	ローム	Lm
		凝灰質粘土	Lc
	東京層	砂、シル質砂	
		粘土、シルト	
	東京礫層	砂礫	Tog
上総層群		砂	Ks
		泥岩	Kc

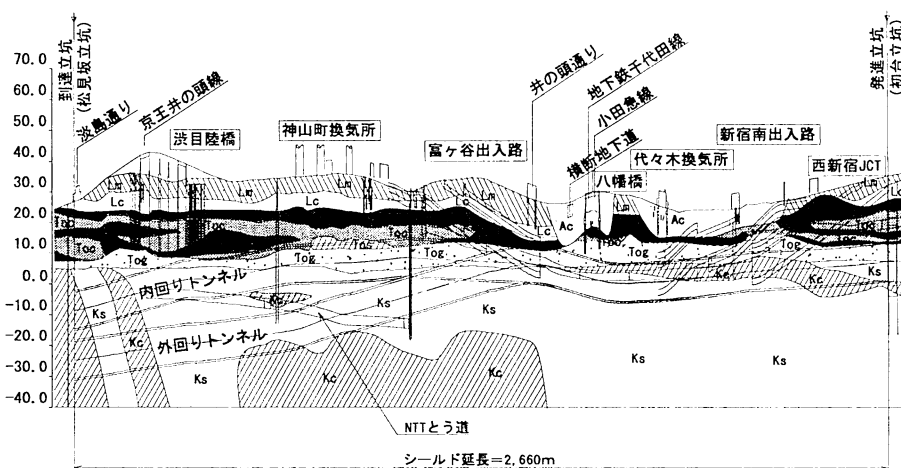


図-3 神山町代々木シールド 地質縦断面図

粘性土（以下、Kc層）であり、いずれもN値50以上の非常に硬質な地盤である。内回りシールドでは、全線のほぼ90%にあたる約2,400mの区間において、上半部にTog層があり、下半部にKs層が存在する。さらに、初台立坑より200mから700m付近において、トンネル中心付近にKc層が出現する。また、松見坂立坑付近には、全断面にKs層またはKc層が存在する。一方、外回りシールドでは、初台立坑より1,300m付近までは、横併設している内回りシールドと同様な条件であるが、続く約1,100mの区間では、土被りが大きくなるため、主としてKs層を通過する。また、松見坂立坑付近では、内回りと同様にKs層とKc層が全断面に互層で出現する。

今回近接して施工した東京メトロ千代田線および八幡橋下部の土層構成をみると、掘進対象土層は、内外回りシールドともTog層、Kc層およびKs層であり、その上層にある東京メトロ千代田線周辺は、ローム（Lm層）および沖積層（Ac層）である。また、八幡橋基礎杭の支持層は、Tog層である。

渋目陸橋下部の土層構成をみると、上層内回りシールドの掘進対象土層は、上部10%がTog層、残り90%がKs層であり、下層外回りトンネルは、全断面Ks層である。また、渋目陸橋基礎杭の支持層は、Tog層である。

両箇所とも、掘進対象土層は、硬質の非常に安定した土層であるが、後述するとおり各構造物とシールドトンネルとの最小離隔が非常に小さいため、事前の影響解析および掘進中の計測管理を行ない、慎重に工事を進めた。

3. 東京メトロ千代田線交差部

(1) 近接状況

神山町代々木シールドは、初台立坑から約1,000m

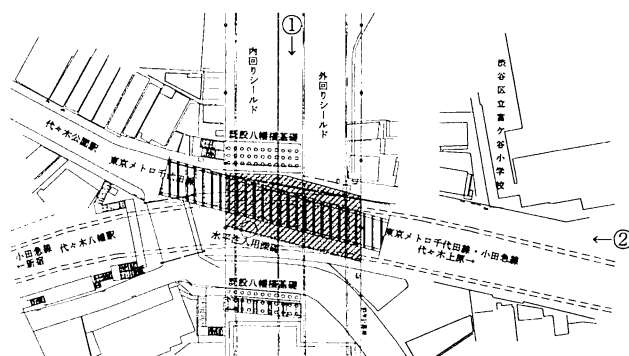


図-4 千代田線 近接状況図（平面図）

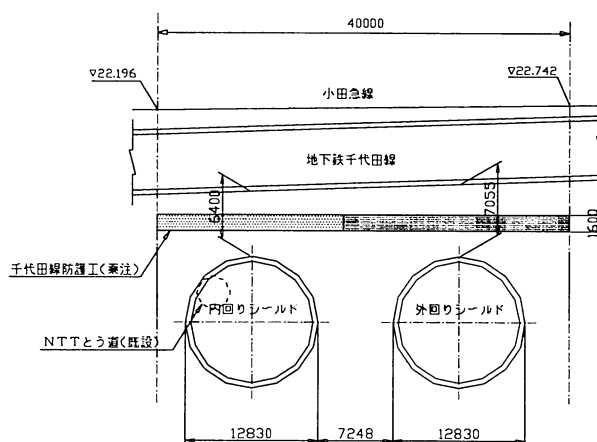


図-5 千代田線 近接状況図（①横断面図）

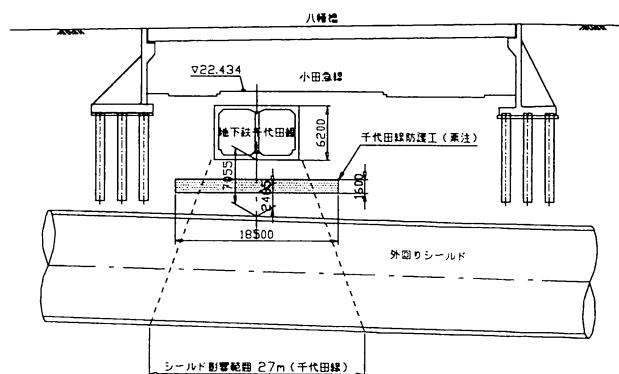


図-6 千代田線 近接状況図（②縦断面図）

の地点において、東京メトロ千代田線の直下を横断方向に近接掘進した。図-4から図-6に示すとおり、千代田線との最小離隔は6.4m（約0.5D）であり、シールド掘進に伴い、開削トンネルである千代田線躯体への影響が懸念されたため、東京メトロと協議を行い、安全に施工するための施工法の検討を行った。

(2) 影響解析と施工結果

同地点では、本シールドに先行してとう洞撤去シールド工法により既設NTTシールドを地中にて解体埋戻しをする工事が施工された。この工事の施工結果は、千代田線の躯体沈下量が -0.1mm と非常に小さい値であり、これにより、当該個所における実際の地盤物性値が想定している値より堅固であったことが推定された。よって、本シールドの影響検討に際しては、逆解析により地盤変形係数等の推定を行い、二次元弾性FEMにより影響解析を行うこととした。逆解析の結果は、地盤変形係数を当初想定していた $28N$ （ N は N 値）の2.7倍評価できるという結果となった。

影響解析の結果は、図-7に示すとおりである。千代田線躯体底版部において、外回りシールドが先行して通過する際は -2.47mm 、続いて内回りシールドが通過する際は -2.56mm の沈下が予測された。これは東京メトロとの協議における許容値 $\pm 5\text{mm}$ 以内に収まる結果であった。しかしながら、当該個所では、営業中の鉄道構造物の安全性を重視し、トンネル掘進による影響を最小限にするための施工可能な対策として、千代田線躯体下部に有効厚さ 1.6m の地盤改良を施し、変位を抑制することとした。

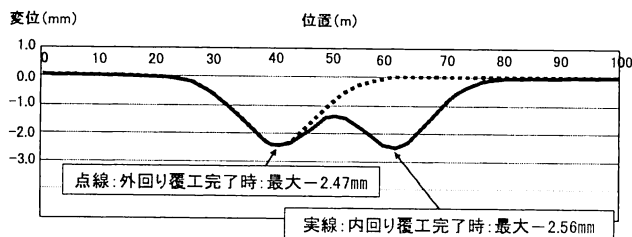


図-7 千代田線 影響解析結果

地盤改良は、まず深礎工法により千代田線側部に直径 5m 、深さ 13m の注入用立坑を構築し、立坑内から水平削孔した上で恒久注入材（超微粒子セメント系懸濁型注入材）により行った。

また、施工時においては、防護注入中の隆起およびシールド掘進の影響を管理しながら施工するために、千代田線躯体の2測線上14個所に水盛式沈下計（ 0.1mm 読み）を設置し、自動計測を実施した。計測結果は図-8に示すとおりである。

外回り側から施工した防護注入の影響により、注

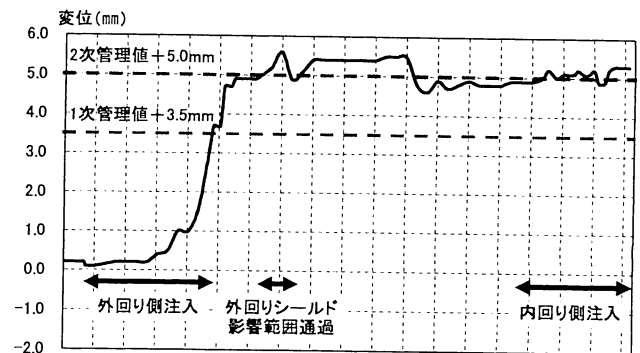


図-8 千代田線 計測結果（経時変化）

入後に千代田線躯体が徐々に隆起し、その値は外回りシールド通過前には約 5mm となった。ただし、軌条の変位は営業線の運行に支障は無く、千代田線躯体についてもほとんど影響は発生しなかった。また、防護注入による隆起を除いた外回りシールド通過時の影響は、最大沈下で -0.5mm 、最大隆起で $+1.2\text{mm}$ という結果となり、マシンテールが抜けても変位が極端に落ちることはなかった。その後、内回り側も防護注入を行い、影響範囲をシールドが通過したが、ほとんど変位は見られなかった。影響解析結果と計測結果の比較を表-2に示す。

表-2 千代田線 影響解析と計測結果の比較

解析値		実測値
外回り通過時	-2.47mm	-0.5mm
内回り通過時	-2.56mm	$+1.2\text{mm}$

4. 八幡橋交差部

(1) 近接状況

八幡橋は小田急線の跨線橋となる山手通りの橋梁であり、構造形式は支間長約 60m の単径間鋼鈑桁橋である。この橋梁は前掲の図-4および図-6に示すとおり、本シールドと縦断方向に近接しており、最も近接する八幡橋南側橋台部の基礎杭先端と内回りシールドとの最小離隔は 0.8m であった。

(2) 影響解析と計測結果

影響解析は二次元弾性FEMにより行った。しかし、前述の千代田線交差部のように諸パラメータの逆解析を行えるような施工結果がなかったため、解析結果に大きく影響する地盤変形係数について検討し、孔内水平載荷試験 E_b （ $=7N$ 相当）から求めた変形係数と $4E_b$ （ $=28N$ 相当）の変形係数の双方について影響解析を行った。なお、掘進時の応力解放率は 10% とした。解析結果は、図-9に示すとおりである。

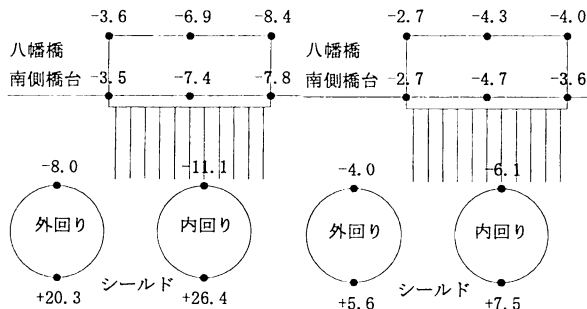


図-9 八幡橋南側橋台 影響解析結果
(地盤反力係数 左図：7N，右図：28N)

解析の結果，地盤変形係数が7N相当の場合は最大沈下量が -8.4mm ，28N相当の場合は最大沈下量が -4.7mm となった。許容値については「近接施工技術総覧 近接施工技術総覧編集委員会編」より旧日本道路公団の道路橋基礎構造物の許容変位量 $\pm 10\text{mm}$ を採用し，影響解析結果は許容値に収まる結果であった。

また，シールド通過時には橋台の沈下計測を行いながら掘進管理を行った。計測は電子レベルと電子スタッフによる自動計測で実施し，影響範囲通過時の計測値は，シールドトンネルに最も近接している南側橋台の最大沈下量が -2.0mm という結果であった。影響解析結果と計測結果の比較を表-3に示す。

表-3 八幡橋南側橋台 影響解析と計測結果の比較

解析値		実測値
7N相当	-8.4mm	-2.0mm
28N相当	-4.7mm	

5. 渋目陸橋交差点

(1) 近接状況

渋目陸橋は山手通りと旧山手通りの合流部に架か

る5径間のPC桁橋であり，図-10に示すとおり，当該部では縦併設の上層側で掘進する内回りシールドと縦断方向に近接し，最も近接する北側橋台部の基礎杭先端と内回りシールドとの最小離隔は 1.3m であった。

(2) 影響解析と計測結果

影響解析は2次元弾性FEMにより行った。前述の八幡橋と同様に孔内水平載荷試験(7N相当)から求めた地盤変形係数と28N相当の地盤変形係数の双方を用いたが，八幡橋での解析結果と実測結果の比較により，地盤変形係数が28Nのケースのほうが相対的に変位を再現出来ていることが確認されたため，ここではこのケースを採用した。なお，掘進時の応力解放率は10%として影響解析を行った。解析結果は，図-11(左図)に示すとおりである。

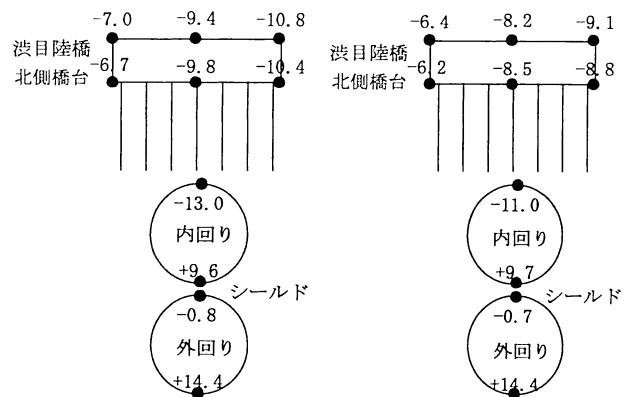


図-11 渋目陸橋北側橋台 影響解析結果
(地盤反力係数28N 左図：対策なし，右図：対策あり)

解析の結果，最大沈下量が -10.8mm という結果になり，許容変位量が八幡橋と同様に $\pm 10\text{mm}$ であることから，これを超過する結果となった。また，杭およびフーチングの許容応力度も超過する結果となったため，恒久グラウト工法を用いて杭先端部のTog層およびTos層を厚さ 6.8m ，幅 20m の範囲で地盤改良

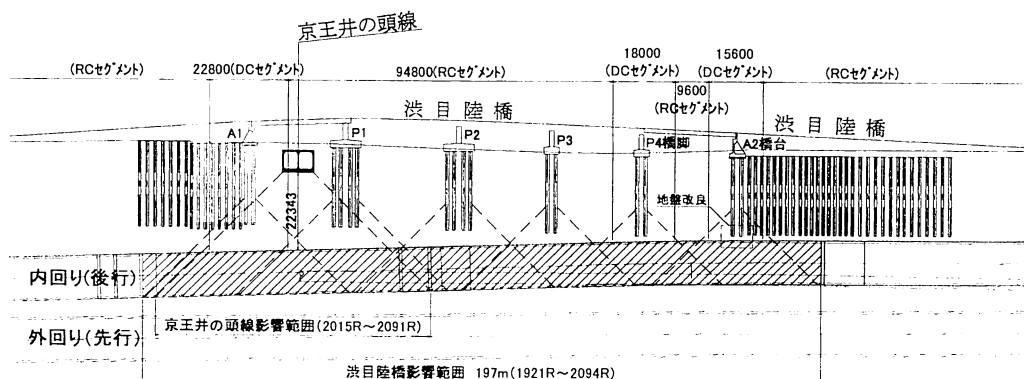


図-10 渋目陸橋 近接状況図(縦断面図)

を行うこととした。この地盤改良により再度影響解析を行った結果が図-11(右図)である。これにより、最大沈下量が-9.1mmとなり、沈下量および発生応力度ともに許容値に収まる結果となった。

また、シールド通過時には橋台および橋脚の沈下計測を行いながら掘進管理を行った。沈下計測は水盛式沈下計およびトータルステーションの併用による自動計測を実施し、影響範囲通過時の計測値は、シールドトンネルに最も近接している北側橋台の最大沈下量で-5.3mmという結果であった。影響解析結果と計測結果の比較を表-4に示す。

表-4 渋目陸橋北側橋台 影響解析と計測結果の比較

解析値		実測値
28N相当・対策なし	-10.8mm	-
28N相当・対策あり	-9.1mm	-5.3mm

6. 考察

本稿では、神山町代々木シールドにおける鉄道および橋梁構造物への近接施工の影響解析とその施工結果について述べた。

各々の影響解析手法については、二次元弾性FEM解析を用いた。シールドトンネル掘進を行う場合、泥水圧等により地盤の解放応力を微少に抑えることができるため、地盤内に生じるひずみについても小さく抑えることが可能であること、また、掘進対象地盤がTog層以深の堅固な地盤で、地盤の塑性化が大きな影響を与えることは考えられないこと等の理由により、本解析においては弾性解析が妥当であると判断した。

また、各々の解析値と実測値を比較すると、総じて実測値が解析値を下回る結果となった。考えられる主な要因を以下に列記する。

(解析条件に関すること)

- ・地盤の変形係数が過小に評価されていたこと：橋梁部の解析では、参考とできる施工結果がなく、一般的な値として用いられる7Nから28Nの両極値を用いて解析したが、実際の地盤変形係数はさらに大きかった（地盤変形係数のみを変数とした逆解析の結果では、八幡橋付近ではおよそ100N相当、渋目陸橋付近ではおよそ50N相当と推定される）。

(掘進管理に関すること)

- ・テールボイド沈下を抑制したこと：裏込注入は、シールドマシンに設置した注入管から、掘進と同時に注入できる同時注入方式を採用した。注入量はテールボイドの120%以上とし、同時裏込注入管に設置した土圧計の測定値により泥水圧+100kPaの上限圧付近で確実に注入した。また、曲線区間においては、シールドマシンの中折れ機構により余堀量は最小限とし、とくに上部の余堀りは行わなかった。
- ・適切な泥水管理を行ったこと：泥水圧は主動土圧+水圧+変動圧（20kPa～30kPa）とし、静止土圧+水圧を上限として管理した。また、透水性の大きいTog層が介在していたため、泥水調整により適度な粘性を持たせるよう管理した。

7. おわりに

鉄道および橋梁等の重要な構造物と新設トンネルとの近接施工は、都市内トンネルの施工において最も重要な課題のひとつである。今回の千代田線の例のように、先行する工事実績を参考にして地盤変形係数等の諸パラメータを適切に評価した上で近接影響検討を行えるような場合は、より合理的で、ある程度精度の高い評価が可能である。そうでない八幡橋や渋目陸橋のような場合においても、解析条件によりある程度のバラつき（往々にして地盤物性値の過少評価、安全側設計）はあるものの、適切な施工管理および計測管理を行うことにより安全に施工を行うことができる。

今回報告した施工結果が、他の類似工事の参考になれば幸いである。

謝辞：今回の工事では、東京都第二建設事務所、東京地下鉄（株）、小田急電鉄（株）をはじめとする関係者の皆様からご指導を頂き、安全かつ円滑に完工することができた。この場を借りて深く感謝の意を表する。

参考文献

1) 波津久 毅彦, 則竹 啓, 森口 敏美, 長谷川 勝哉：大断面シールドで都市部の長距離掘進に挑む－首都高速中央環状新宿線 代々木シールドー, トンネルと地下, Vol.38 No.9, pp.17-28, 2007.