三次元有限要素法解析による既設トンネルへの シールド掘進の影響評価

遠藤 啓一郎¹・赤木 寛一²・Alireza AFSHANI³・土橋 浩⁴

¹正会員 首都高速道路株式会社 更新・建設局 (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町 2-2-1) E-mail: k.endou164@,shutoko.jp

²フェロー会員 早稲田大学 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1) E-mail: akagi@waseda.jp

³正会員 株式会社大林組 生産技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2) E-mail: afshani.alireza@obayashi.co.jp

⁴フェロー会員 首都高速道路技術センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-10-11) E-mail: dobashi@tecmex.or.jp

2020年2月に開通した首都高速神奈川7号横浜北線の馬場出入ロトンネルは、シールド工法によって構築されており、急曲線かつ急勾配で街路および民家の下を通過しながら、既設の本線トンネルに近接して 接続する特殊な出入ロトンネルである.また、出入ロトンネルは、供用中のトンネルに近接して掘進する ため、事前に掘進による影響を把握することが大きな課題であった.本論文では、馬場出入ロトンネルの 掘進による影響について、施工前に実施した二次元はり一ばね解析の結果と三次元有限要素法解析の結果 を現場計測結果に基づいて比較し、施工前における影響検討手法の妥当性について検討した.

Key Words: underground structure, shield tunnel, beam-spring model, three-dimensional analysis

1. はじめに

近年,首都高速道路で新たに建設する路線の多くは, 周辺環境への影響などを考慮して,トンネル構造によっ て構築されている.また,構築するトンネルは,地上へ の影響に加え,建設に要する費用などを考慮し,多くの 範囲でシールド工法を採用している.

シールド工法は、特に都市内において、インフラの地 下化が進んでいることから、既に地下に存する構造物へ 近接することや既設構造物への影響を最小限にするため に、施工の影響を考慮する必要がある.また、新設する シールドトンネルは、線形に急曲線や急勾配が必要とな る場合も多く、施工が困難な事例も増えているため、既 設構造物への影響を事前に防止する安全性が求められ、 現場状況を適切に把握した設計、施工中の安全性を確保 する施工計画の立案が不可欠となっている.特に道路シ ールドトンネルなどに活用される直径10m以上の大断面 のシールドトンネルでは、影響が更に大きくなることが 想定され、より綿密な検討を要するが、大断面のシール ドトンネルは計画の段階で施工による影響を考慮される ことが多く、特殊なシールド掘進の設計および施工事例 が少ない.しかし、都市空間の有効活用の観点から、制 約条件や特殊な状況のシールド掘進工事は、今後増加す るものと考えられ、安全に工事を進めるために、事前の 検討段階で掘進による地盤の挙動を正確に把握すること が重要である.

トンネルの掘進による地盤の挙動を把握するため、そ の変形は、有限要素法を用いた数値解析によって算出さ れることが多い.有限要素法を用いた数値解析では、施 工条件を適切に考慮する必要があり、これまでにも施工 過程を考慮した地盤の変位挙動などが再現されるに至っ ている^{11,2,3}.一般にトンネルの掘進による影響を施工前 に確認する場合、二次元の有限要素法解析を用いた検討 が多い.しかし、都市内の地下構造物の増加や新たに構 築するトンネル構造物の特異性にともない、三次元の有 限要素法解析を用いた検討事例も増えてきている⁴.有 限要素法を用いた数値解析は、一般的に二次元と三次元 を比較した場合、三次元解析では要素数が増大し、変数 が幾何級数的に増大することから、得られる解析精度は 高くなる.しかし、トンネルの施工ステップを考慮した 検討手法として、二次元解析と三次元解析を具体的に比 較した事例は見当たらない.

筆者らは、併設するトンネルが水平面および縦断面内 で三次元的に同時に変化する特殊な事例において、先行 トンネルにおける影響を三次元有限要素法解析により検 討した⁹.本論文では、急曲線、急勾配など非常に困難 な施工条件下において掘進した馬場出入口のシールドト ンネルについて、近接する構造物に及ぼす影響を事前に 検討した二次元はり一ばね解析の結果を報告し、別途検 討した三次元有限要素法解析と二次元はり一ばね解析の 結果を比較することで、影響検討手法の妥当性について 考察した.

2. 馬場出入口工事の概要

馬場出入口は,首都高速神奈川7号横浜北線(以下, 横浜北線)の中間地点付近に位置する出入口である. 横浜北線は,延長約8.2kmのうち7割以上の約5.9kmが トンネル構造であり,大部分にシールド工法を採用して いる.横浜北線は,図-1に示すように横浜市の交通ネッ トワークの骨格を形成する横浜環状道路の北側区間に位 置する自動車専用道路である.

馬場出入口は、地表の現道と横浜北線の港北および生 麦の両方向にアクセスが可能な4枝のランプウェイをも つフルランプである.横浜北線本線部のトンネル(以下, 本線トンネル)における馬場出入口部は、土被りが40 ~50mとなっているため、馬場出入口からの本線への接 続もトンネル構造となっている(以下,出入口トンネ ル).馬場出入口の各ランプも周辺環境への配慮などか ら、主にシールド工法(以下,ランプシールド)を採用 している.

各出入口は,限られた用地条件から,地下深くの本線 トンネルへ接続するために,図-2および表-1に示すとお り急曲線かつ急勾配という特徴を有している.また,各 出入ロトンネルは、本線トンネルと接続するため,近接 することになる.また,出入ロトンネルは、掘進開始か ら到達まで,離隔が三次元的に変化しながら本線トンネ ルに近接し、出入ロトンネルと本線トンネルの位置関係 が常に大きく変化するため、本線トンネルへの影響を正 確に把握することが重要であった.

二次元はり—ばね解析による本線トンネルへの影響評価

各出入ロトンネルの到達部においては、それぞれ本線 トンネルと近接するため、出入ロトンネルの掘進による 本線トンネルへの影響を二次元はり一ばね解析によって 事前に検討した.なお、解析は、施工前に全ての出入ロ



図-1 首都高速神奈川7号横浜北線位置図

表-1 各出入ロトンネルの勾配,曲線半径,最小離隔

	最大縦断勾 配	最小曲線半径	本線トンネル との最小離隔
	%	m	m
Aランプ	7.38	80.0	12
Bランプ	7.62	50.2	0.3
Cランプ	8.12	50.5	1.0
Dランプ	7.47	109.0	0.6



図-2 馬場出入口全体平面図

において実施しているが、ここでは最終的に新たに再現 した三次元有限要素法解析と比較および評価することを 見据え、4 つの出入口において、最小曲線半径が中間的 なAランプを対象として述べる.

施工前の検討は、出入ロトンネルと近接する本線トン ネルをはり一ばねによってモデル化し、ランプシールド 掘進による泥土圧およびランプシールド通過後の土水圧 の影響を与え、本線トンネルのセグメントリングの安全 性を照査した.算出した結果は施工における管理値とし て定め、ランプシールドの掘進計画に反映させた.二次 元はり一ばね解析は、本線トンネルに対する応力が変化 すると考えられるシールド掘進時およびシールド通過 後の2ケースをモデル化した.作用させる荷重や地盤ば ねの範囲を変化させ、本線トンネルのセグメントに発生 する応力度が長期許容応力度に達する際の変形量を算出 した.二次元はり一ばね解析のパラメータおよび検討条 件を表2および表3に示す.

はり一ばね解析の検討は、ランプシールドの掘進時お よびランプシールド通過後でそれぞれ荷重と地盤ばねに ついて異なる条件とした. Aランプシールドの掘進は、 4 つのランプシールドにおいて、最後の掘進であったた め、計画切羽圧はこれまでのランプシールドの掘進実績 を参考とし、主働土圧に水圧を加えた値とした. 一方、 シールド通過後においては、本線シールドの側方には既 に出入ロシールドが構築されていることから、荷重は土 水圧のみとなり、A ランプに近接している本線トンネル の側方土圧を 0%から 50%低減して荷重を変化させ、さ らにランプシールドの通過側においては、90 度の範囲 で地盤ばねを控除した.

ここで, A ランプシールド掘進時のはり一ばね解析の 結果をA ランプシールド掘進時を表-4 に, A ランプシー ルド通過後を表-5 にそれぞれ示す.

はり一ばね解析の結果は、それぞれ本線トンネルのセ グメントにおける、コンクリート圧縮応力度、鉄筋応力 度、平均せん断応力度を照査した.A ランプシールド掘 進時は、計画切羽圧の40%を作用させた場合、本線トン ネルのコンクリートの圧縮応力度が許容圧縮応力度を超 過する結果となった.また、A ランプシールド通過後は、 出入ロトンネル近接側の設計側方土圧が0%の場合、本 線トンネルのコンクリート圧縮応力度が許容応力度を超 過する結果となった.解析の結果から、本線トンネルの 変形量と許容圧縮応力度に対する比率(以下、応力度) を図3および図4に示す.

図-3における変形量は、水平方向は本線トンネルの内 空側をプラスで示し、鉛直方向は、外面側をプラスで示 している.図4における変形量は、水平方向は本線トン ネルの外面側をプラスで示し、鉛直方向は、内空側をプ ラスで示している.応力度は、コンクリートの許容圧縮

表-2 二次元はり一ばね解析のパラメータ一覧

	パラメータ
地盤ばね(自重)	5MN/m ³ (全周)
地盤ばね(切羽圧)	50MN/m ³ (全周)
地盤ばね(土水圧)	50MN/m ³ (全周)
側方土圧係数	0.35
地盤反力係数(外荷重)	50000kN/m^3
地盤反力係数(自重)	5000 kN/m ³
水の単位体積重量	10 kN/m^3
コンクリート単位体積重量	26kN/m ³

表-3 二次元はり一ばね解析の検討概要

	シールド掘進時	シールド通過後	
荷重	土水圧+掘進時の計画 切羽圧の 30%~100% が側方から作用 計画切羽圧は主働土圧 +水圧	土水圧 (A ランプ近接側 の側方土圧を 0% ~50%に低減)	
地盤ばね	全周設定	A ランプ通過側 90 度を除いた範囲	
許容応力度	長期許容応力度に対して評価		

表4 A ランプシールド掘進時の解析結果

	土水圧+切羽 圧 30%	土水圧+切羽 圧 40%	
コンクリートの圧縮広力度	15.6 N/mm ²	17.8 N/mm ²	
	許容圧縮応	动度 16.0	
鉄笛広力産	0 N/mm ²	0 N/mm ²	
	許容圧縮応 0N/mm ² 許容引張応 0.37 N/mm ² 許容せん断 112 mm	5力度 200	
亚均叶在断达力库	0.37 N/mm ²	0.45 N/mm ²	
干均已70两加7万度	15.6 N/mm ² 17. 許容圧縮応力度 0 0 N/mm ² 0 許容引張応力度 0.37 N/mm ² 0.37 N/mm ² 0.4 許容せん断応力度 11.2 mm 11.2 mm 3 2.6 mm 3	芯力度 1.03	
最大変形量 (水平)	11.2 mm 15.5 mm		
最大変形量(鉛直)	2.6 mm	3.5 mm	

表-5 A ランプシールド通過後の解析結果

	土水圧+側方 土圧 50%	土水圧+側方 土圧 0%	
コンクリートの圧縮広力度	14.0 N/mm ²	18.2 N/mm ²	
	許容圧縮応	芯力度 16.0	
建筑中中	0 N/mm ²	20.6 N/mm ²	
<u> </u>	許容引張応	5力度 200	
亚均计在新达力库	0.34 N/mm ²	0.52 N/mm ²	
干均 已化时心 月及	許容せん断応力度 1.0		
最大変形量 (水平)	13.3 mm 23.9 mm		
最大変形量(鉛直)	6.6 mm	10.1 mm	

応力度に対する、本線トンネルのセグメントコンクリートの圧縮応力度の比率を示している. A ランプシールドの掘進に対する本線トンネルの変形量の管理値は、本線トンネルの応力度が 1.0 を超えた場合、本線トンネルに

ランプシールドの掘進の影響により有害な変状が発生す ると仮定し、応力度 1.0 の本線トンネルの変形量を管理 値の目安とした.このため、図-3、図-4 の検討結果より ランプシールドの施工は、シールド掘進時においては、 本線トンネルのスプリングライン部の水平変形量が本線 トンネルの内空側に 12mm、外面側に 18mm に至った際 に掘進を停止する変形量として設定し、安全に施工する ことができた.

4. 三次元有限要素法解析による影響評価 5

トンネルの掘進による影響を確認するためには、二次 元有限要素法を用いた解析が一般的である.しかし、本







図4 シールド通過後の側部、天端の応力度と変形量の関係



セグメントリング割付(R1~R316)

発進部(R1)



図-5 A ランプシールドにおける縦断方向地層構成図

研究においては、馬場出入ロトンネルの線形が急曲線お よび急勾配であることに加え、既設の本線トンネルに近 接する特殊な条件であることから、周辺地盤への影響を 詳細に確認するため、三次元有限要素法解析を用いて影 響評価を行うこととした.

(1) 解析モデルの構築

本解析では、本線トンネルおよび出入ロトンネル工事 の着工前に実施したボーリングデータから算出した地盤 物性値を用いて地盤のモデルを構築した.本解析にて使 用したAランプ出入ロトンネルにおける、縦断方向の地 層構成図を図-5に示す.図-5に示す発進部(リング番号, R1)から発進したランプシールド(外径,99m)は、下 り縦断勾配が最大7.38%、平面的には最小曲線半径80.0m で掘進方向に対して左方向に旋回しながら、約460m 掘 進して本線トンネル(リング番号,R316)に到達して いる.また,表-6に各地層の入力物性値を示す.

土の構成式はモール・クーロン型の弾塑性モデルとし、 地盤物性値におけるN値およびポアソン比は、土質調査 におけるデータが十分でなかったことから、横浜北線の 設計土圧算定時の数値 ^のを採用した.単位体積重量およ び粘着力は、土質調査結果の平均値から設定した.ヤン グ率は、上総層の泥岩および砂泥互層のデータにばらつ

表-6 解析に使用した地盤物性値

地層		N值	単位 体積 重量γ	粘着 力 <i>c</i>	ヤング 率 <i>E</i>	ポア ソン
			kN/m ³	kN/m ²	MN/m ²	νLν
ローム 層	ローム	15	14.00	54.0	7.80	0.45
相模層	粘性土	5	15.50	160.0	19.00	0.4
	砂質土	8	18.50	48.0	20.00	0.3
上総層	泥岩	34	18.50	2000.0	450.00	0.3
	細砂	>50	19.50	75.0	78.00	0.3
	砂泥 互層	>50	19.00	1800.0	500.00	0.3
	砂質 泥岩	>50	19.00	1800.0	500.00	0.3

きがあったため、標準偏差を用いて平均値を安全側に補 正した値を採用した.また、上総層の砂質泥岩は土質調 査結果がないことから、砂泥互層と同じ地盤物性値と した.

次に本線トンネルおよびAランプ出入ロトンネルのシ ールド機とセグメント躯体をモデル化した. 材料物性値 は表-7に示すとおりとし,双方のトンネルは,セグメン トの寸法,割付を実構造と同様に設定した. 鋼製セグメ ント(以下,ST セグメント)は,実際に使用したコン クリート中詰めセグメントの物性値として設定した.本 線トンネルとAランプ出入ロトンネルの位置関係は,実 際のそれぞれの平面,縦断線形を反映させることでモデ ルを構築した.以上の土質データとトンネル躯体を基に 構築した地盤モデルを図-6に,縦断,平面における各ト ンネル躯体の三次元モデルを図-7に示す.

図-6の地盤モデルは、X-Y-Z空間において土質調査結

パラメータ	RCセグメント	STセグメント	スキンプレート
ヤング率 E	39GPa	33GPa	210GPa
単位体積重量 γ	26 kN/m ³	26 kN/m ³	78.5 kN/m ³
ポアソン比 v	0.17	0.17	0.3

表-7 トンネル躯体の材料物性値





図-7 本線トンネルおよびAランプトンネルのモデル

果を基に三次元に地層構成を反映している.地盤モデル は、地盤モデル内に設置される発進部、本線トンネル、 ランプトンネルなどの構造物からの下方および側方境界 との離隔が 5D (D は本線トンネル外径)を満たすこと を基本として地盤モデルを準備した.この結果、地盤モ デルは図-6 に示すような形状、寸法となった.

図-7の本線トンネルとAランプトンネルモデルの境界 条件は、A ランプシールドは、地上から開削工法にて構 築した立坑から発進しているため、ランプトンネルの発 進部が拘束されるように設定している.また、到達部も 同様に本線トンネルの拡幅部に到達して接続されるため、 発進部と同様に本線トンネル端部を含めて拘束境界条件 となっている.

(2) 解析ステップ

本解析では、三次元モデルに対して各荷重が作用し、 さらに対応する変位を与えることで、対象となる周辺地 盤および本線トンネルの変位と応力を算出することとした.解析ステップを以下に示す.

a) 本線トンネル

出入ロトンネルの構築時に本線トンネルが既に構築さ れていることを再現するため、本線トンネルの線形に合 わせ、トンネル内の地盤要素を除去し、セグメント覆工 部をコンクリート要素で置き換えた.また、本線トンネ ル両端を境界面で鉛直方向および水平方向に拘束するこ とで、地盤内に本線トンネルが構築されている初期応力 状態を再現した.

b) 出入ロトンネルの発進部

4本の馬場出入ロトンネルのうち、3本のA、C、Dラ ンプシールドは、コンクリートで構築された同じ発進立 坑から掘進している.解析でも同様に立坑躯体をコンク リート要素で構成し、立坑内の地盤要素を除去すること で発進立坑部をモデル化した.

c) 出入ロトンネルの構築

出入ロトンネルの掘削と構築は、シールドマシンの掘 削による周辺地盤への影響を表現するために、まずシー ルドマシン内の地盤要素を除去した.その後に、シール ドマシンとセグメント要素で支持された切羽面に静止土 圧に相当する切羽圧を与えるとともに、テールボイド部 分にギャップ要素^のを導入することで、出入ロトンネル の掘削と構築を再現した.

ギャップ要素は、水平面(X-Y平面)内における急曲 線、鉛直面(Y-Z平面)内における急勾配の線形変化の 影響、裏込め注入量の影響、裏込め注入圧力の影響の3 つの要因に伴う理論掘削体積を超えて掘削される土の体 積(以下、地盤損失)を考慮したものである.なお、3 つの要因は、シールドトンネル施工時には互いに関係す るものと思われるが、既設構造物に及ぼす影響の観点か ら,互いに独立な3つの要因による影響係数の積で強制 変位を増減させ、全体的な地盤損失の影響を評価するこ ととした.

本解析は、ギャップ要素を含めて掘削想定地盤要素を 除去し、シールドマシン要素を地盤モデルに追加後、ギ ャップ要素外周節点に対して、曲線および勾配を有する シールドトンネルにおける、1日当たりの施工リング数 を想定した5リングを単位として強制変位を作用させた. このプロセスを本線トンネル到達点まで繰り返すことで 解析的に再現した.

以上の解析ステップにより、最終的に地盤モデルの中 に立坑部と本線トンネル、出入ロトンネルのモデルが設 置されることで、解析完了後のモデルは実際の馬場出入 ロのAランプ出入ロトンネルおよび本線トンネルと同様 の構成となっている.

(3) A ランプシールドにおける変位計測状況と解析結果の比較

三次元有限要素法によって新たに再現した本解析は, 最終的にはり一ばね解析の結果と比較するために,本線 トンネルの最も変位が大きい到達部付近のクラウン部お よびスプリングライン部の計測結果と比較することとし た.

図-8は、Aランプシールドが本線トンネルに最接近す るリング範囲 R281~R316において本線トンネル内に設 けた変位計測点[1], [2], [3]の設置位置を示したもので ある.また、図中には、変位計測点における本線トンネ ルとAランプシールドの断面図も示している.

計測点では、トータルステーションを用いて本線トン ネル内空断面のクラウン部、クラウンから 45°の位置, スプリングライン部の3箇所に設置したターゲットの変 位を計測した.計測点[1], [2], [3]は、本線トンネルに おける到達部からの距離がそれぞれ 61m, 31m, 13m の 位置となっており、出入ロトンネルと本線トンネルの離 隔距離はそれぞれ約4m, 3m、1mと減少していく.

各計測点にて計測した鉛直および水平変位と解析結果 の比較を図-9,図-10に示す.なお、それぞれの図中に おける[1]~[3]の計測日の位置は、計測点を通過した位 置を示している.

図-9は、本線トンネルクラウン部に設置した計測点に おける鉛直変位の解析結果と計測結果を比較したもので あり、本線トンネルの外面側への変形をプラスで示し、 内空側への変形をマイナスで示している.解析結果は、 A ランプシールドが各計測点に達するまでは、わずかに マイナス方向に変形し、計測点を過ぎた後からプラス方 向に変形後、マイナス方向に変形し、その後収束してい る.一方、計測結果も同様に計測点までは大きな変形が 生じていないが、計測点に達する前からマイナス方向に



図-10 本線トンネルスプリングライン部の水平変位の比較

変形し、その後収束している.解析結果と計測結果の最 大変異差は約 3mm であり、変位量の傾向も近似してい ることがわかる.

図-10は、本線トンネルのスプリングライン部の車道 部の高さに設置した計測点における、水平変位の解析結 果と計測結果を比較したものである.本線トンネル内空 側の変形をプラスで示し、外面側の変形をマイナスで示 している.

解析結果は、トンネルクラウン部での変位状況と同様 な傾向を示しているが、いずれの計測点においても収束 した最大変形量が約-7mm となり、最も大きい変形が残 留している.一方、計測結果は計測点位置に応じた残留 水平変位量の違いが顕著であり、離隔が大きい計測点 [1]は-4mm、計測点 [2]では-10mm、最接近した計測点[3] では-12mm となっている.実際のAランプシールド施工 においては、本線トンネルとの合流部での接合に向けて 通過する際にはシールド機のヨーイング、ピッチングな どの姿勢をリアルタイムで本線トンネルの計測結果を確 認しながら、きめ細かく制御している.具体的には、中 折れ装置およびコピーカッターによって、余掘りを確保 することで、到達時の精度およびマシンの姿勢を確保す るためである. 一方, 解析においては, テールボイドを ギャップ要素にて評価しており、中折れ装置およびコピ ーカッターの使用量に対する評価していない. このため、 A ランプシールド機テールボイド発生状況は変化するの で、本線トンネルクラウン部やスプリングライン部での 観測される計測値は解析値と異なった値となったものと 考えられる.

以上の計測結果と三次元解析結果の比較から、三次元 解析による本線トンネルクラウン部およびスプリングラ イン部における変位は、A ランプシールドの線形変化お よびギャップ要素を考慮することで、全体的な変位傾向 とシールド通過後の収束値については、ほぼ同等の結果 が得られたものと考えることができる.

5. 二次元はり---ばね解析による事前検討結果の 評価

A ランプシールド施工時の事前検討においては、二次 元はり---ばね解析による影響検討により, A ランプシー ルド掘進時と通過後の本線トンネルの最大変位量を求め た(表-4,5参照). ここでは、図-9、図-10にて示した 三次元解析結果と現場の計測結果に対し、二次元はり-ばね解析の結果を比較することにより,影響検討手法の 妥当性について検討する.

図-11, 図-12 は, 図-9, 図-10 の比較結果に二次元は り一ばね解析にて算出した変形量を追記したものである. これらの図では、本線トンネルクラウン部の鉛直変





図-12 本線トンネルスプリングライン部の水平変位の比較

位量とスプリングライン部の水平変位量について. はり 一ばね解析値がシールド通過前と通過後の検討をしてい ることから、各計測点までの変位量をシールド掘進時の 変位量で示し、各計測点後から本線トンネルまで近接す るまでを掘進後の変位量で示すことで、三次元解析の結 果と比較している. A ランプシールド掘進時の本線トン ネルクラウン部、スプリングライン部のAランプシール ドの掘進による変位は計測値、三次元解析値ともに十分 小さい値であり、はり--ばね解析値は過大であることが わかる.一方,Aランプシールドが各計測点を通過した 後の変位 については、クラウン部内空側への鉛直変位、 スプリングライン部外面側への水平変位の計測値、三次 元解析値の最大値はともに、はり一ばねモデルによる解 析値の70%程度の値が得られている.

以上のことから、ここで用いられた近接部の二次元は り---ばね解析による影響評価検討手法については、A ラ ンプシールド掘進の影響をばねで表現し、適切に設定す ることで、特に新設シールド通過後の既設トンネルの変 形評価については、安全率を有した評価法と判断できる.

6. まとめ

本論文では、施工前に実施した二次元はり一ばねモデ ルを用いた解析と新設シールドトンネルの掘進による影 響を再現した三次元有限要素法解析結果と計測結果との 比較を踏まえて現場施工前の有効な影響検討手法につい て検討した.検討によって得られた内容を要約すると, 以下のとおりである.

1) 新設シールドトンネルの掘進による既設シールドト ンネルへの影響は、二次元のはり一ばねモデルを用いた 解析によって、既設シールドトンネルの最大変形量を算 出し、その結果を掘進管理に反映することで、安全に施 工することができる.

2) 新設シールドトンネルの掘進による荷重の影響は, 既設シールドトンネルに対して近接する前から影響があ ると考えられることから、二次元のはり--ばねモデルを 用いた解析においても影響を確認した.しかし、実際の 新設シールドの掘進による影響は、新設するトンネルが 近接するまでほぼ影響はなく、三次元解析においても実 施工結果と同様に、併設する既設トンネルへの影響がな いことを確認した.

3) ここで用いられた近接部の二次元はり一ばね解析に よる影響評価検討手法については、新設シールドトンネ ルの掘進による、近接時の変位については過大である. しかし、新設シールド通過後の既設トンネルの変形評価 については適正な安全率を有した評価法と判断できる.

謝辞:本研究を進めるにあたり,施工前の検討内容についてご助言をいただいた清水建設(株)の関係各位に感謝の意を表する.

参考文献

- 赤木寛一,小宮一仁:有限要素法によるシールド工 事の施工過程を考慮した地盤挙動解析,土木学会論 文集, No. 481/III-25, pp. 59-68, 1993.
- Afshani, A., Dobashi, H., Komiya, K. and Akagi, H.: Numerical analysis of the effect of earth pressure balanced shield tunneling on stress-deformation behavior, *Journal of JSCE*, Vol. 2, pp. 224-238, 2014.
- 杉本光隆, Aphichat Sramoon:施工実績に基づくシ ールド機動力モデルの開発,土木学会論文集, No. 673/III-54, pp. 163-182, 2001.
- 4) 土橋浩,桑野玲子:三次元FEM解析による大深度シ ールドトンネル拡幅工法の作用の評価に関する研究,

生産研究, 第67卷4号, pp.343-347, 2015.

- 5) 遠藤啓一郎,赤木寛一, Afshani, A., 土橋浩, Grant, H.:離隔が三次元的に変化する併設トンネルにおけ る新設シールド掘進の影響評価,土木学会論文集, 投稿中
- 6) 寺山徹,山本泰幹,今田徹:シールドトンネルラン プ接続部の非開削拡幅工法の開発と設計土圧,トン ネル工学報告集,第 14 巻,土木学会,pp. 367-374, 2004.
- Rowe, R. K. and Kack, G. J.: A theoretical examination of the settlements induced by tunneling: Four case histories, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, No. 2, pp. 299-314, 1983.

(2021.8.6 受付)

RAMP SHIELD TUNNELING EFFECTS EVALUATION ON EXISTING MAIN TUNNEL USING THREE-DIMENSIONAL FEM ANALYSIS

Keiichiro ENDO, Hirokazu AKAGI, Alireza AFSHANI and Hiroshi DOBASHI

This paper studies the interaction effects between a newly excavated shield tunnel near the Baba entrance of the Metropolitan Expressway and the existing main twin deep tunnels of the Yokohama Kita Line. It was a challenging issue to understand the influence of the proximity tunnel excavation of the Baba entrance on the existing main tunnels of the Yokohama Kita line. In this study, a three-dimensional numerical model of Baba entrance underground ramp is prepared. The predicted lining deformation of existing main tunnel induced by a new tunnelling was compared with the field measurement results. A 2D beam-spring model is also used for the preliminary examination of this proximity tunnelling and the output of it was compared with the numerical results. It was concluded that the simple beam-spring model can be used to predict the lining deformation induced by proximity construction accurately enough for the active deformation of an exisiting tunnel.