都市部低土被り地下施工における先受け工の 支保効果に関する解析的評価と適用

蔣 宇静¹・佐々木郁夫²・大隈周史³・棚橋由彦⁴

¹正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1番14号)

jiang@civil.nagasaki-u.ac.jp

²正会員 博(工) 飛鳥建設(株)土木本部 土木技術部 (〒102-8332 東京都千代田区3番町2番地)

³学生会員 長崎大学大学院 生産科学研究科 博士後期課程 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1番14号)

⁴正会員 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1番14号)

近年、都市域におけるトンネル工事においても山岳工法を用いることが多くなっている。都市域でのトンネル施工は、未固結地山を対象とすることが多く周辺環境への影響を最小限に抑えなければならないことから、補助工法を活用して解決している。本論文では、補助工法の中でも施工実績の多い長尺鋼管先受け工について、三次元解析モデリングを行い、その変位抑制効果について評価を行った。その結果、軟弱な地山ほど沈下抑制率は大きくなり、比較的安定した地山では小さくなることが示された。また、実現場への適用として長崎県オランダ坂トンネルを対象に、計測結果から解析の妥当性を検証し、未掘削域の地表面沈下の予測と解析結果に基づく対策工の検討を行い、その効果を確認した。

Key Words: 3D numerical analysis method, tunnelling in urban area, AGF (All Ground Fastening)
ground movement

1. 緒言

近年、都市化した地域で道路を整備する場合に、都市計画や環境対策上トンネル構造が選択されることが多くなっている。また土被りの小さい場所では、従来、掘削構造や開削工法がよく採用されてきたが、用地取得や家屋移転、施工時の環境対策、掘削土処分などの困難な条件があり、非開削のトンネルの方が有利となる場合が増えてきている。土被りの小さい場所では、固結度が低いことや地下水の影響もあって、切羽の自立性や地山の強度の不足により、トンネルの施工が困難な場合がある。さらに地表の建物や地下埋設物に悪影響を与えないよう、地表面沈下を抑制しなければならないこともある。また、双設トンネルで相互の離隔をとらず眼鏡型に近接する計画や、既存のトンネルを拡幅改築する計画も現れている。こうした厳しい制約条件に対して、最近では補助工法を活用して解決している施工事例が多くなっている^{1)~10)}。

各種補助工法のうち、都市部などで土被りの小さいトンネル掘削に積極的に採用されている長尺鋼管先受け工は、地山の先行変位の抑止、地山のゆるみ防止、施工の安全性確保などを目的として採用され、その施工実績の増加が示すように、トンネル現場における長尺鋼管先受け工の評価には高いものがある^{4), 9), 11)~14)}。

近年、解析的手法はコンピューターの発達と解析コードの高度化により、複雑な地山条件や境界条件における数値シミュレーションが可能になってきており、情報化施工や支保効果評価のための有力なツールとして活用されつつある。最近の研究発表と事例報告を集めて、以下の考察を行う。

既往の研究では、設計手法の提案について中田¹⁵⁾らは、ロディンジェットフォアパイリング工で、パイプルーフ設計法に準じた設計法では切羽近傍の動きを表現することは難しいとして三次元 FEM 解析を行い、その結果を参考に弾性支承上の梁モデルを提案している。小原¹⁶⁾らは、無拡幅型の長尺鋼管先受け工法につ

いて鋼管の曲げ挙動を測定し、弾性支承上の梁モデルにおいて、荷重の取り方をゆるみ荷重と連続的な変形を想定した荷重に分けて地盤反力係数を設定している。さらに、同モデルの計測事例が不足しているため実証が必要としている。ジェオフロンテ研究会¹⁷⁾では、トンネル横断方向二次元有限要素法解析のモデル化において、先受け工について地山の弾性係数と先受け工の弾性係数を合成した等価弾性係数を用いる方法や地山の弾性係数により効果率を用いる方法が示されているが、明確な根拠が示された例はない。沈下量を算出する理論式には Limanov の式¹⁸⁾、実験式には Peck の式¹⁹⁾、島田の式²⁰⁾などがあり、比較的簡易に地表面沈下量を算出できるが、地盤条件や掘削過程を理想化しているため、補助工法の効果まで評価することは困難である。

また、長尺先受け工の作用効果の評価については、瀧²¹⁾らは、土被り 5m 程度の大断面扁平トンネルを想定し、未固結地山を対象として長尺先受け工の効果を実験・計測結果と解析結果を比較して、変位抑制は天端部および側壁部で効果があること、また弾性域では先受け工による変位抑制効果はその長さに依存しないとしている。

これらの事例においても、掘削過程を考慮した先受け工の支保効果を解明した成果が少ないように思われる。また、その構造設計に関しては、合理的設計法は未だ確立されていないのが現状で、その緒言を統一的かつ合理的に決定可能とする設計手法が求められている。そこで本研究は、三次元掘削解析モデリングを行い、様々なケーススタディにより長尺鋼管先受け工の

変位抑制効果を評価するとともに、土被りが小さく未固結地山における都市部山岳工法によるトンネルの掘削に伴う周辺地山の力学的挙動および環境影響を的確に把握・評価し、先受け工の支保効果を明らかにすることを目的とする。また、実現場への適用と計測による検証により提案手法の有用性を確かめる。

2. 都市部山岳工法における補助工法の適用の現状と課題

(1) 施工事例の分類に基づく都市トンネルの特徴

都市部で山岳工法により施工されたトンネルの特徴を考察するために、過去 20 年間の文献調査を実施し集計結果に基づいて以下のような分類と考察を試みた。なお、対象とした工事データは 77 件である^{25), 26)}。

a) 地質による分類

図-1 に、都市部で施工された工事の地質区分について分類したものを示す。工事件数は、現場で出現した地質を全てカウントし、のべ件数として表示した。その結果、砂質土が全体の 24% で最も多く、次いで粘性土、砂礫の順となっている。また、地質の種類にはローム、凝灰岩など火山噴出物も含まれている。

図-1 都市部で施工された工事の地質区分

図-2 最大土被りで分類した工事件数

b) 土かぶりによる分類

図-2に示すように、最大土被りについて工事件数を比較すると、最大土被りが10m～20mの範囲が27件と最も多く、ついで20～30mが16件、30m以上が15件となっている。このなかで、10m以下の工事件数は11件あり、地下鉄工事における山岳工法なども含まれる。なお、収集した77件の文献の内、土被りの不明な8件の文献は除外している。

c) 補助工法による分類

図-3に、各工事（77件）で採用している補助工法について、それぞれの工法を先受け工、鏡面・脚部の補強、湧水対策・地山補強に分けて分類した²⁷⁾。この図から、先受け工を採用している工事は57件と全体の74%で、鏡面・脚部の補強工を採用している工事は37件と全体の48%である。さらに、先受け工を採用した工事において鏡面・脚部補強工を併用した工事は77%と高い。この理由として、先受け工が受ける先行荷重について、脚部補強工などにより支持力を確保し対応したものが大半と考えられる。また、湧水対策・地山補強工を採用している工事は、55件と全体の71%と高く、排水工法あるいは注入などにより地山を掘削前に改良または補強してから切羽の安定性を確保して施工している例が多い。

(2) 長尺鋼管先受け工の位置付け

先受け工は、対象とする地山の状況により、施工可能となる先受け工の長さや改良範囲などが大きく限定される。一般に、噴射改良や置換えが可能な地山は、トンネル横断方向の連続性が確保しやすく、アーチ効果が大きい掘削時の沈下抑制などに有効である（噴射攪拌系）。また、巨礫を含む土砂や亀裂の多い岩盤では、鋼管などの剛性の高い材料を主体としこれを長く打ち込むことにより、トンネル縦断方向の連続性を確保することから、切羽の安定性確保と先行沈下の抑制が可能と考えられる（鋼管系）²⁸⁾。先受け工のうちフォアボーリングやAGF工法は、通常のトンネル工事標準機械で施工可能であるが、トレヴィチューブ工法や水平ジェットグラウト工法は専用機械が必要となる。

図-3 各工事で採用している補助工法

鋼管系の先受け工を採用する場合、汎用機械と専用機械の使用区分は大部分が穿孔能力によるもので、地山に対する適用性の判断が先受け工の目的の達成度および経済性や工期に重要な影響を与える。先受け工の中でも長尺鋼管先受け工は、比較的对象とする地質の適用範囲が広いことから、近年、最も採用されている工法である。

(3) 地山挙動の評価手法の適用現状

図-4に、補助工法として長尺鋼管先受け工を採用した場合について、どのような挙動評価方法を実施したかを整理した。ここでは、①長尺鋼管先受け工本体を測定する方法、②地中傾斜計や地表面沈下測定による周辺地山の挙動を測定する方法、③周辺構造物を直接測定する方法、④地すべり他に区分した。まず、長尺鋼管先受け工本体を測定する方法については、鋼管などの応力またはたわみを測定する方法があり、全体の26%で実施されている。測定区間は、長尺鋼管先受け工の採用区間全線ではなく、代表的な箇所を測定したものと考えられる。つぎに、地表面沈下測定や地中傾斜計などの周辺地山の挙動を測定しているものは全体の66%あり、その目的は、地表面沈下測定により構造物の影響評価を行うものと周辺地山の挙動を把握するために行うものに分けられる。切羽前方の地山の挙動を把握する場合は、地表面沈下測定において切羽到達前の沈下量から評価する方法や、地上からのボーリング孔を利用し、地中傾斜計を埋設して計測する方法が主体となる。このほか、周辺構造物を測定したものは全体の2%と少ない。これは、全ての構造物に計器を設置することは困難なため重要構造物のみの測定に限り、その他は地表面沈下の測定結果から評価したものと考えられる。

以上のことから、都市部のトンネルの大部分が、台地を含む平野部に代表される新生代第三紀鮮新世、第四紀洪積世および沖積世に形成された、いわゆる未固結地山となる地質を対象とし、さらに、地形的には土

図-4 地山挙動評価別手法の採用割合

被りが小さいという非常に厳しい条件下で施工されていることがわかる。このような状況において、補助工法は必要不可欠な工法となっているが、その評価については依然として不明確なところが多い。この理由として、切羽が常に進行していること、およびトンネル掘削の影響が収束するまでには、切羽通過後からかなり経過時間を要することが挙げられる。一方、施工中の調査および計測は、事前調査で得られた情報よりもはるかに精度の高いものが得られるため、絶えず調査・計測の情報が設計・施工に反映されることが必要であると考えられる。したがって、解析的手法などを用いて支保効果を評価する場合は、施工過程を忠実に再現して可能な限り現場の状況に一致させた状態で行い、かつ、情報化施工については切羽前方の地山の挙動をいち早く把握し補助工法の選定に役立てることが、最も重要であると考えられる。

3. 地山と支保工のモデリング

(1) 掘削解析の現状と問題点

1章で述べたように、数値解析法の適用にあたっては以下のような問題点があげられている。

- ① トンネル縦断(延長)方向の効果を無視した、二次元平面ひずみ問題として解析されることが多い。
- ② 地山自体のもつ複雑な材料特性が、完全弾塑性など単純化された数学モデルの形で表現されている。
- ③ 支保・覆工についても、施工過程、掘削の進行を考慮した地山との相互作用において解明されていない点があり、ある程度、理想化したモデルで表現されている。
- ④ 三次元解析においても、施工の過程は忠実に考慮されておらず、単純化されることがある。

また、長尺鋼管先受け工の構造設計に関しては、パイプルーフ工法の慣用設計法の準用²⁹⁾、弾性床土上の梁モデルによる鋼管断面設計²⁹⁾、類似の施工事例に基づく経験的設計法などが提案されているものの、一つの設計手法で長尺鋼管先受け工のすべての諸元を決定することは困難である。そこで、本研究では都市部のトンネル施工においてよく遭遇される軟岩地山を対象とし、ひずみ軟化・塑性流動を生じることを考慮して、地山の破壊後の挙動も追跡できるような三次元有限差分解析手法を用い^{30), 31)}、掘削過程を最大限忠実に再現した三次元解析を実施する。

(2) 軟岩地山の特性

トンネル周辺地山の变形挙動は、それを構成する周辺地山の応力-ひずみ特性、特にピーク強度以降

(Post-Failure 挙動と呼ぶ)の特性に大きく支配される。既往研究によれば、拘束圧が岩の脆性-完全弾塑性の転移圧力に達すると、完全弾塑性材料のような挙動を示すが、それ以下ではひずみ軟化挙動を示す^{32), 33)}。また、その時には、ダイレイタンスー(圧縮応力下におけるせん断変形を伴う体積膨張特徴)を伴うことが明らかにされている³³⁾。本研究で対象とする軟岩の応力-ひずみ関係を図-5に示す。本研究では、ひずみ軟化特性およびダイレイタンスー特性を、応力-ひずみ曲線における弾性域、ひずみ軟化域、塑性流動域の3つの領域で、図-6に示すように簡略化することができると考える。

a) ひずみ軟化挙動の表現

数値シミュレーションでは、図-6に簡略化されたひずみ軟化挙動を表現するために、図-7(a)に示すような降伏後において塑性せん断ひずみ e^p の増加とともに粘着力 c や内部摩擦角 ϕ が低下する概念を導入する。実際の適用では、この概念を図-7(b)のように線分の集合で近似する。ここで、主塑性ひずみが与えられると、塑性せん断ひずみ e^p は、次の式から導かれる³¹⁾。

$$e^p = \left\{ \frac{1}{2}(e_1^p - e_m^p) + \frac{1}{2}(e_m^p) + \frac{1}{2}(e_3^p - e_m^p)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$e_m^p = \frac{1}{3}(e_1^p + e_3^p)^2 \quad (2)$$

本解析では、塑性せん断ひずみ e^p と粘着力 c を用いて応力-ひずみ曲線を、弾性域、ひずみ軟化域と塑性流動域の三領域で直線的に近似する。

b) ダイレイタンスー特性の表現

ダイレイタンスー特性とは、ひずみ軟化および塑性流動状態における体積増加のことであり、その程度はダイレイタンスー角 ψ によって表わされ、塑性せん断ひずみ速度と塑性体積ひずみ速度の比として、次のように定義される。

$$\sin \psi = \frac{\dot{e}_v^p}{\dot{\gamma}^p} \quad (3)$$

$$\dot{e}_v^p = \dot{e}_x^p + \dot{e}_y^p + \dot{e}_z^p \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}^p = \sqrt{(\dot{e}_x^p - \dot{e}_y^p)^2 + (\dot{e}_z^p)^2} \quad (5)$$

本研究では、ダイレイタンスー角 ψ を決定する際には、三軸圧縮試験の結果から得られる体積ひずみ-軸ひずみの理想化された関係を適用した³³⁾。ここで軸ひずみと体積ひずみの関係式は、次のようになる。

$$\frac{\dot{e}_v^p}{\dot{e}_a^p} = \frac{-2 \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (6)$$

ここで、 $\dot{e}_v^p / \dot{e}_a^p = M$ とすると、

$$\psi = \sin^{-1} \frac{M}{M+2} \quad (7)$$

と書き換えることができ、軸ひずみと体積ひずみとの関係が理想化されたものであれば、

$$H = h - 1 = M : e_1^p \leq e_1 \leq \alpha e_1^e \quad (8)$$

$$F = f - 1 = M : \alpha e_1^e \leq e_1 \quad (9)$$

という関係から、塑性ポアソン比からダイレイタンスー ψ 、 ψ^* を求めることができる。式中の h, f は、ひずみ軟化および塑性流動域の塑性ひずみ比、 α は、ひずみ軟化域における強度の低下度合いを表す、脆性率である。

(3) 支保工のモデル化

鋼製支保工は、吹付けコンクリートと一体となって挙動するとみなし、等価的に強度を増加させ、ロックボルトはケーブル要素で表現することができる。従来、長尺鋼管先受け工のモデル化は複雑であるため、既往の研究でも三次元のビーム要素で表現したものは少なく、先受け工により改良される領域の地山の変形係数を大きくすることで二次元的に表現されてきた¹⁷⁾。しかしながら、本来、先受け工はトンネル周辺地山の崩落を防止したり、変形を小さくとどめたりするために切羽前方の地山に対して施工するものであるため、切羽の進行とともに三次元で表現すべきである。そこで、本研究では、長尺鋼管先受け工を三次元のビーム要素で表現する方法を用いる。また、長尺鋼管先受け工の効果のみを評価するために、解析上長尺鋼管の自重は微小なものとした。支保パターンは、鋼管長、ラップ長と打設範囲（センターラインとの角度）をパラメータとする。解析では逐次掘削過程を表現するために、標準的な施工手順に基づき、掘削は1掘削ステップ長(1.0m)毎に行い、支保工は1ステップ分遅らせて鋼製支保工を含めた吹付けコンクリートおよびロックボルトの打設を行う。また、先受け鋼管は各ラップ長に準じたステップ掘削毎に打設する。

長尺鋼管先受け工は、トンネル縦断方向に打設した鋼管の剛性により地山の安定性向上を図ることが主目的で、注入によるシェル効果は補助的であり、鋼管の打設間隔や鋼管周辺地山の改良の程度によりその効果は異なるものと考えられる。したがって、次章で述べ

図-5 軟岩の応力-ひずみ関係

(a) 応力-ひずみ曲線

(b) ひずみ軟化曲線

(c) ダイレイタンスー曲線

図-6 軟岩の強度と変形特性のモデル化

図-7 ひずみ軟化挙動の表現

る数値シミュレーションではシェル効果を見逃し梁効果のみを考慮することにする。

4. 長尺鋼管先受け工の地山変形に対する抑制効果の評価

(1) 解析ケース

地山の力学的特性および初期応力状態を忠実に考慮した三次元数値解析を用いて、以下に示す条件を変化させたケーススタディにより、長尺鋼管先受け工の変位抑制効果を評価する。解析に用いた支保モデルを図-8に、一例としての地山物性値を表-1に、長尺鋼管の物性値を表-2に示す。解析モデルは、境界の影響を受けないように、トンネル径の3倍以上の範囲をとり計算精度の高い四面体ソリッド要素を用いる。なお、トンネル径は10mとする。

図-8 支保モデル

a) 地山条件

土被りと変形係数および地山強度比が、長尺鋼管先受け工の沈下抑制効果に与える影響を把握するため、長尺鋼管先受け工のラップ長を $L=4\text{m}$ と固定し、土被りを $H=10\text{m}$, 20m ，変形係数を $E=50\text{MPa}$, 150MPa , 250MPa ，地山強度比を $Srp=1, 2, 6.54$ と変化させ、各解析ケースにおいて沈下抑制率という指標（次節に詳しく述べる）を用いて、長尺鋼管先受け工の沈下抑制効果の評価を行った。解析ケースを表-3に示す。ここで、地山強度比 (Srp) とは地山の一軸圧縮強度とトンネルの土被り荷重との比である。

表-1 地山物性値

地山等級	D I
単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	24
ポアソン比 ν	0.35
残留粘着力 $c'(\text{MPa})$	$c/2$
内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	25
残留内部摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	20
ダイレイタンス角 $\phi(^{\circ})$	20

表-2 長尺鋼管の物性値

外径 $\phi(\text{mm})$	139.8
ヤング率 (MPa)	2.1×10^5
ポアソン比	0.3
断面積 (m^2)	0.0154
断面二次モーメント (m^4)	1.875×10^{-5}

表-3 解析ケース

土被り(m)	変形係数(MPa)	地山強度比(Srp)	粘着力(MPa)
10	50	1.0	0.08
		2.0	0.15
		6.5	0.50
	150	1.0	0.08
		2.0	0.15
		6.5	0.50
	250	1.0	0.08
		2.0	0.15
		6.5	0.50
20	50	1.0	0.15
		2.0	0.31
		6.5	1.00
	150	1.0	0.15
		2.0	0.31
		6.5	1.00
	250	1.0	0.15
		2.0	0.31
		6.5	1.00

b) 鋼管ラップ長

長尺鋼管先受け工の鋼管ラップ長の違いにより、その沈下抑制効果へ与える影響を把握するために、土被りを $H=10\text{m}$ 、変形係数を $E=150\text{MPa}$ 、地山強度比が $Srp=1$ に関して、ラップ長を $L=3\text{m}$ 、 4m 、 5m 、 6m 、 7m と変化させた解析を行った。以下の考察で用いる沈下抑制率とは、先受け工を施さない場合に対して施した場合の沈下量の減少の程度を表すもので、次の式(10)によって表される。

$$\text{沈下抑制率(\%)} = \left\{ 1 - \frac{\text{先受け工が有る場合の沈下量}}{\text{先受け工ない場合の沈下量}} \right\} \times 100 \quad (10)$$

(2) 沈下抑制効果の考察

a) 地山条件の違いによる効果

図-9に、土被りが $H=10\text{m}$ と 20m のそれぞれの場合について、各地山強度比ごとの変形係数とトンネル天端における沈下抑制率の関係を示す。なお、沈下抑制率は切羽後方 1m から 25m までの 1m ごとの各点の沈下抑制率を平均した値とする。この図から、いずれの場合も変形係数が小さいほど、また、地山強度比が小さいほど沈下抑制率は大きくなることから、軟弱な地山ほど長尺鋼管先受け工の沈下抑制率は大きくなり、その値は今回の解析手法の適用内においては最大で 10% 程度であることがわかった。また、変形係数が大きい場合や地山強度比が $Srp=2$ 以上の比較的安定した地山においては、地山自体の自立性

(a) $H=10\text{m}$ (b) $H=20\text{m}$

図-9 トンネル天端における沈下抑制率

が良いために、沈下抑制率は低くなると考えられる。なお、地方面の沈下については、沈下抑制率が 3% 以内に止まっており、天端での沈下抑制率に比べてあまり明かではなかった。

b) ラップ長の違いによる沈下抑制効果

図-10に、土被り $H=10\text{m}$ 、変形係数 $E=150\text{MPa}$ 、地山強度比 $Srp=1$ のケースについて、ラップ長ごとの先受け工の有無による地表面の沈下曲線の変化を示す。また、図-11には、前述と同じケースについてトンネル天端の沈下曲線とその沈下抑制率を示す。

図-10の地表面の沈下曲線では、先受け工の有無による沈下量の明確な差はみられない。したがって、鋼管のラップ長の違いによる沈下量の差もほとんどみられない。一方、トンネル天端の沈下曲線(図-11)について、切羽前方においては、沈下抑制率が -20% ～ -35% となっているが、これは、鋼管先受け工を打設することにより、切羽後方の沈下の影響を受けたためと考えられる。沈下抑制率が比較的大きな値をとったのは、切羽前方で発生した沈下量が微小なためである。切羽後方に関しては先受け有りの場合は沈下曲線が階段状になっており、ラップ部分は水平に近い形状となり沈下を抑制していることがわかる。ラップ長を確保することにより、切羽後方に対し緩やかな変位抑制率が生じていることがわかる。これにより、ラップ長の長い方が天端沈下に対して安定した抑制効果が期待できると考えられる。次に、切羽後方 20m 付近では、全ての

ラップ長のパターンにおいて、先受けの有無による最終沈下量の差がほとんど無い。切羽通過時は全てのパターンで沈下抑制率が高くなっていることから、切羽通過後の早い時期に先受け工で受けた荷重をトンネル全体で支保することが、収束時の全体沈下量を小さくすることになると考えられる。

(a) ラップ長 3m

(b) ラップ長 4m

(c) ラップ長 5m

(d) ラップ長 6m

(e) ラップ長 7m

図-10 ラップ長の違いによる地表面沈下量の比較 ($H=10\text{m}$, $E=150\text{MPa}$, $Srp=1.0$)

(a) ラップ長 3m

(b) ラップ長 4m

(c) ラップ長 5m

(d) ラップ長 6m

図-11 ラップ長の違いによるトンネル天端沈下量の比較 ($H=10\text{m}$, $E=150\text{MPa}$, $Srp=1.0$) (続き)

図-11 ラップ長の違いによるトンネル天端沈下量 ($H=10\text{m}$, $E=150\text{MPa}$, $S_{rp}=1.0$)

5. 三次元数値シミュレーションの実現場への適用

本章では、実際に施工されている長崎県オランダ坂トンネルを対象に、長尺鋼管先受け工の三次元解析の実現場への適用を行った。以下に、その詳細を示す。

(1) 施工概要と支保工

対象トンネルは、長崎市特有の斜面利用状況からトンネルルート全線にわたり地上部に住宅が密集している(写真-1)。特に起点側坑口(出口側)の約480m区間は、土被りが2D以下で最小土被りは7m程度となる。さらに、坑口部の制約により上下線両トンネルの中心間距離は約3Dから2Dへと漸近し、最小壁面離隔は約3m程度にまで近接する^{34), 35)}。また、本トンネルの地質は、新生代第三紀鮮新世から第四紀更新世の長崎火山岩類に属し、低土被り区間では火山円礫岩層の上部には土石流堆積物や湖沼堆積物が層厚数10cmから数m範囲で堆積している。そのうち、土石流堆積層は風化が顕著な礫混じり土砂と半固結状態のシルト質砂礫からなり、N値は10から20程度である。また、湖沼堆積層は砂混じり粘土と礫混じり粗砂からなり、軟弱でN値が5以下のところも存在し、透水性は小さく土石流堆積層と火山円礫岩層の間に挟まった形で分布する。このような状況の中で、本トンネルは、切羽安定対策および地表面沈下対策としてトレヴィチューブ工法による長尺鋼管先受け工法を採用しながら、補助ベンチ付き全断面掘削工法で施工している。

先受け工の効果を評価する三次元数値シミュレーションのモデル化にあたり、起点側坑口から415mの区間をモデル対象とし、支保パターンおよび地層分布について解析モデルの設計を行った。地層分布を図-12に、モデル全体図および上下線トンネルの位置関係を図-13に示す。なお、本トンネルの低土被り区間では、

長尺鋼管先受け工の設計を行うにあたり、弾性支承上の梁モデルを用いて検討している。また、トンネル掘削によるゆるみ荷重は、Terzaghiのゆるみ荷重を採用しており、その作用荷重の差についてそれぞれ長尺鋼管の打設パターンを決定している。その結果、鋼管長14m、ラップ長4m、打設範囲はセンターラインよりそれぞれ左右60°と設計された。また、解析でも同じパターンを用い、3章で述べていたように、長尺鋼管先受け工は3次元ビーム要素で表現した^{36), 37)}。解析に必要な物性値(断面積、断面2次モーメント等)は表-4に示す。なお、地表面沈下抑制という安全の視点から、長尺鋼管からの注入材による周囲地山の改良効果(変形係数の増加)は考慮しない。

写真-1 オランダ坂トンネル起点側坑口

図-12 地層分布図

図-13 オランダ坂トンネルモデル図

(2) 周辺地山挙動の予測

研究対象は住宅密集地下での施工であるため長尺鋼管先受け工を採用した周辺地山挙動の予測を行う前に、施工中の地表面沈下量の計測データによって同定した地山の物性値を用いて、解析的に予測した結果と既掘削域における計測結果の比較を図-14 に示す。解析に用いた物性値は、現場で各区間から採取された供試体を用い行われた室内試験結果をもとに、表-4 のように設定した。この結果から、多少の差はあるものの実現場における地山の挙動を適切に表現できたと考えられる。したがって、用いた解析モデルと地山の物性値は、未掘削域での影響をある程度の範囲で予測できるものとし、未掘削域での地表面沈下量の予測を試みた。地表面沈下量を予測する位置は、図-14 から切羽後方 50m 程度で変位の収束が見られるため、後行する上り線切羽位置を基準に 50m 後方の点 (上下線の中間部) とし、切羽の進行にともない同点を移動させながら、その点における地表面沈下量を予測した。また、その区間は、上り線の切羽位置が No.3+48 (予測位置 No.3+98) から坑口の No.1+68 (予測位置 No.2+18) までとする。

図-15 に、解析によって得られた上下線トンネルの中間部の直上部の地表面の予測沈下量を示す (なお、測点の定義は図-14 と同様である)。この図から、上り線

図-14 解析結果と計測結果の比較 (地表面沈下量)

図-15 地表面沈下量の解析値と測定値の比較

切羽位置が No.2+48 (測定位置 No.2+98) 付近で、現場で設定された管理目標値の 20mm を超えていることがわかる。また、No.2+80 付近から急激な沈下が発生し、No.2+50 付近では 40mm と管理目標値の 2 倍程度の地表面沈下量が予測された。この原因として、両トンネルが漸近することにより上下線両方の掘削の影響が中間部地山に及んだことと、地山強度比が小さくなったことが考えられる。今回の解析結果から、長尺鋼管先受け工の地山変形抑制効果を考慮した場合、この補助工法のみでは地表面沈下量を管理基準値以内に抑制することが困難であることから、ラップ長の見直し脚部沈下対策などの補助工法と併用する必要があることが示された³⁴⁾。

表-4 先受け工の物性値

項目	上り線		下り線			パイプルーフ (上下線)
鋼管の外径(mm)	φ 114.3	φ 139.8	φ 76.3	φ 114.3	φ 139.8	φ 355.6
単位体積重量(kN/m ³)	78.5	78.5	78.5	78.5	78.5	78.5
ヤング率(MPa)	2.1×10 ⁵	2.1×10 ⁵	2.1×10 ⁵	2.1×10 ⁵	2.1×10 ⁵	2.1×10 ⁵
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
断面積(m ²)	0.0103	0.0154	0.0046	0.0103	0.0154	0.0990
断面二次モーメント (m ⁴)	8.378×10 ⁻⁶	1.875×10 ⁻⁵	1.663×10 ⁻⁶	8.378×10 ⁻⁶	1.875×10 ⁻⁵	7.85×10 ⁻⁴

表-5 各地層の地山物性値

地質名	土石流堆積層				岩屑なだれ堆積層				安山岩溶岩			
※断面	X-A	A-B	B-C	C-S	X-A	A-B	B-C	C-S	X-A	A-B	B-C	C-S
単位体積重量 γ (kN/m ³)	19	19	19	19	21	21	21	21	22	22	22	22
変形係数 E (MPa)	95	60	30	30	950	600	450	300	2850	2700	2500	1200
ポアソン比 ν	0.35	0.35	0.35	0.35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
粘着力 c (MPa)	0.923	0.64	0.81	0.16	3.00	1.45	2.47	0.80	1.20	1.20	1.20	1.20
内部摩擦角 ϕ (°)	7.48	2.5	8.9	15	27	23	21.25	20	40	40	40	40
引張強度 σ_t (MPa)	0.21	0.134	0.189	0.042	0.979	0.489	0.722	0.229	0.515	0.515	0.515	0.515

※X : No.5+80, A : No.4+74, B : No.4+35, C : No.2+70, S : No.1+65 とし、それらの間の物性値を示す。

6. 事前予測に基づく対策工の再検討と実効果

(1) 計測計画

長崎県オランダ坂トンネルは、住宅密集地を小さい土被りで掘削することから、既設構造物やガス管・上下水道などのライフラインを管理対象とした環境影響評価を目的とした計測計画が必要となる。一方、長尺鋼管先受け工を用いた対策工のみでは、三次元解析結果から地表面沈下の予測において 40mm を超えることが明らかとなり、追加対策工の内容とその実施時期について検討が必要となった。

計測計画を策定するにあたり、計測範囲は従来の研究や計画例から低土被り区間を 2D (D はトンネル径) 以下と定義し、この範囲について重点的に計測計画を行った。また、低土被り区間では、各種対策工の評価を行うにあたり、先行地山の挙動の把握が重要となることから、トンネル天端部に先行ボーリングを行い水平傾斜計 (以下、坑内水平傾斜計) を設置した。坑内水平傾斜計は、約 40m を一測線とし、低土被り区間の全延長 480m 間に設置した。このほか、計測項目については、住宅密集地で空き地が少なく測点を任意に選定することが困難であるため、歩道や民地を利用し可能な限り測定結果を評価しやすい測点を選定した。主計測断面の位置と坑外計測の設置状況を図-16 に、坑内計測の設置状況を図-17 に、計測項目の一覧を表-6 に示す。

(2) 計測情報による対策工の採用

図-18 は、坑内変位計測のうち、天端沈下と上半脚部沈下および上半内空変位の測定結果を示す。No.4+50 付近までは、天端沈下と上半脚部沈下が 5mm 以下で、内空変位が 5~10mm 程度で推移していたが、それ以降、全ての測定項目で増加傾向を示している。その後、No.3+20 付近まで天端沈下は 10mm 以内で推移しているが、上半脚部沈下と内空変位は更に増加傾向を示す。

表-6 各断面における計測項目

断面名 または測点	計測項目
NO. 6+28	坑内 B 計測
I 断面 (No.5+87)	坑外地中変位計 (SDE(I)-1, SDE(I)-2), 地表沈下計測
II 断面 (No.4+76)	坑外地中変位計 (SDE(II)-1, SDE(II)-2) 坑外水平傾斜計 (HI(II)-1) 坑内 B 計測, 地表沈下計測
III 断面 (No.4+36)	坑外地中変位計 (SDE(III)-1, SDE(III)-2, SDE(III)-3) 地表沈下計測
IV 断面 (No.2+68)	坑外地中変位計 (SDE(IV)-1, SDE(IV)-2, SDE(IV)-3), 坑内 B 計測, 地表沈下計測
NO. 1+65~ NO. 6+46	坑内水平傾斜計, 地表沈下計測
全区間	坑内 A 計測

図-16 坑外計測設置状況図

図-17 坑内計測設置および補助工法図

図-18 坑内変位計測結果

これは、図-19 に示した坑外地中変位測定結果からも理解できるように、上り線側トンネル周辺で発生した変位が地表面まで達している、いわゆる共下がり現象が発生している状況のなかで、天端沈下が10mm以内で推移したことは、長尺鋼管先受け工による天端沈下抑制効果と考えられるが、その他の変位増加については、一次支保後にトンネルがリング構造として機能していないためと考えられる。これらの計測情報と4章での考察結果から、切羽通過後、長尺鋼管が受けた先行荷重を早い時期に支保する必要があることから、ラップ長を6mに変更し、また、インバート吹付けによる早期閉合の対策を採用した。さらに、施工過程において上半支保工建込み後、断面閉合までに脚部沈下を抑制することが収束時の変位量を少なくするとの判断により、1基毎にサイドパイルを打設し、支保工を固定する対策を採用した。その結果、増加傾向にあった上半脚部沈下および内空変位がNo.3+10付近から減少傾向に転じている。

つぎに、No.2+70からは上半内空変位が5mm以内で推移しているのに対し、天端沈下および上半脚部沈下の急激な増加がみられた。ここでは、図-20の坑内水平傾斜計の観測データをもとに、切羽掘削以前の先行変位(No.2+68)の発生状況に着目した。その結果、長尺鋼管の穿孔時に発生する天端付近の地中沈下量が、1シフトの施工につき5mm程度発生することが判明した。切羽が到達するまでには、少なくとも2回の長尺鋼管の施工により、10mm程度の沈下量が発生していることから、できるだけ先行地山を緩めないことが重要であることがわかった。これらのことから、長尺鋼管先受け工の注入材は、鋼管の穿孔によりできるだけ地山を乱さない、または乱された地山を改良する目的として、セメント系から浸透性の優れたウレタン系に変更した³⁵⁾。

なお、No.1+96から起点側坑口(No.1+65)までの31m区間はパイプルーフ(坑外からの施工)による対策を実施している。

図-19 地中変位分布図

図-20 注入剤の違いによる地中沈下量の差

(3) 対策工の効果評価

図-18において、掘削が進み土被りが徐々に小さくなるとともに地山強度が劣化する過程の中で、No.3+16から実施したインバート吹付けによる早期閉合とNo.2+78から実施したサイドパイル打設による脚部沈下対策工により、No.4+50付近から増加傾向にあった脚部沈下量と内空変位量は、No.3+21から減少傾向を示し、No.2+69ではともに5mm以内まで減少した。これは、早期閉合により切羽掘削後の変位が早期に収束した効果と、上半支保工建込み後にサイドパイルを打設することにより、長尺鋼管が受ける先行荷重を上半支保工から下半支保工へ、さらにインバート吹付け閉合までのスムーズな荷重伝達と脚部沈下抑制効果によるものと考えられる。

図-20に示した注入材の違いによる坑内水平傾斜計から得た地中沈下量を比較すると、No.2+68のセメント系注入材を使用した区間では、切羽位置が-10mで6mm、-2mで4mmの地中沈下量が発生しており、これに対しNo.2+20のウレタン系注入材を使用した区間では、同位置で1mmと3mmに減少している。これは、ウレタン系注入材のほうがセメント系注入材に比較して浸透性が良いため周辺地山の強度が改良されたことと、注入材の早期強度の発現により、次工程の長尺鋼管の穿孔による地山の損傷に抑止効果があったためと考えられる。しかしながら切羽通過後の沈下量はNo.2+20のほうが大きく、全体沈下量はいずれも20mm程度となっている。その理由として、土被りが徐々に小さくなっていくとともに地山強度が劣化する過程の中で、地山のアーチ作用が得られずトンネル上部の全土荷重に近いゆるみ荷重を受けたためと考える。

図-18のNo.2+37から起点側坑口に向けての変位量が大幅に減少しているが、これは複数の対策工の効果と今まで作用していたゆるみ荷重が減少したものと考えられる。また、計測結果によると、地山強度が劣化する中で長尺鋼管先受け工のみでは、その効果は0～

図-21 地表面沈下量測定結果コンター図

20%程度となり、4章の三次元解析で得た抑制率の10%と概ね近い値となった。

地表面沈下について、図-15で示したように三次元数値解析で予測した値と測定値を比較してみると、対策の変更を行わなかったNo.2+80付近まではよく一致しているといえる。No.2+70から起点側坑口に向けて、解析予測値では最大で40mmの沈下量に対して、測定値は30mm以内となった。これは、解析上では長尺鋼管先受け工のみを考慮しているため、一次支保後にトンネルがリング構造として機能しておらず、切羽後方へ行くに従い先受け工の効果が薄れたが、現場においては、対策工による先受け工が受けた先行荷重を上半支保工から下半支保工へ、さらにインバート吹付け閉合までのスムーズな荷重伝達と脚部沈下抑制効果により生じた結果であり、解析予測値と測定値の差が追加対策工、ラップ長変更、サイドパイルの打設とインバート吹付けの効果と考えられる。つまり、追加対策工の効果として、最大沈下量を約30%低減させることができた。図-21に地表面沈下測定結果のコンターを示す。解析的予測と計測結果に基づいて対策工の再検討と実施を行った結果、地表面沈下量などをほぼ目標値程度に抑えることができ、施工を無事故、無災害で完了することができた。

7. 結論

本研究では、三次元掘削解析モデリングを行い長尺鋼管先受け工の変位抑制効果について評価を行った。また、都市部低土被りで施工されている長崎県オランダ坂トンネルを対象に、長尺鋼管先受け工の三次元解析の実現場への適用を行った。

さらに、事前予測に基づく対策工の採用と効果評価について述べた。以下に、本研究で得た知見を示す。

① 地山条件を変化させた場合、長尺鋼管先受け工の沈下抑制効果は、軟弱な地山ほど沈下抑制効果は大きくなるが、その値は、本解析手法の適用において最大で

10%程度となった。また、変形係数が大きい場合や地山強度比が $Srp=2$ 以上の比較的安定した地山においては、地山自体の自立性が良いため、さらに沈下抑制効果が小さくなることがわかった。

② 長尺鋼管先受け工の沈下抑制効果は、地表面よりトンネル天端付近でその差が明瞭で、沈下曲線から先受け工有りの場合は、無しの場合に比較して沈下の発生を遅らせる効果があることがわかった。

③ しかし、切羽離隔が20m程度になると最終変位量について先受け工の有無による差はみられないことから、収束時の変位量を小さくするためには、切羽通過後の早い時期に沈下量を抑制する対策が必要であることが示された。

④ 鋼管ラップ長の違いによるトンネル天端の最終沈下量の差は概ね変わらないことがわかった。また、ラップ長が長いほうが沈下抑制率は高いということではなく、むしろ必要とされるのは切羽安定を確保するための十分な先受け残長と考える。

⑤ 三次元解析の実現場への適用を行った結果、施工途中における計測結果から解析手法の妥当性が証明できたため、未掘削域での地表面沈下を予測したところ、最大で40mm程度発生することが予測された。これに対して採用した追加対策工により、約30%程度の地表面沈下量の抑制効果が確認できた。特にインバート吹付けによる断面の早期閉合やサイドパイル打設による脚部沈下対策の効果が顕著にみられた。

⑥ 本トンネルのように土被りが小さい場合、切羽前方の先行変位を把握することは、注入材の効果にみられたように、効果的な補助工法の選定と情報化施工には欠かせない要素と考える。

以上、先受け工の解析的評価を行い、実現場への適用から対策工の評価まで行った。今回のように都市部山岳工法において補助工法を採用する場合、補助工法の役割を明確化することと先行変位を含めて計測値の傾向を十分に把握しながら施工にフィードバックすることが重要であることは改めて認識することができた。今後、さらに都市部山岳工法で採用される補助工法の解析的評価と実現場の適用事例を考察しながら合理的設計手法の確立の一助となるよう研究をすすめたい。

謝辞：本研究を行うにあたり、数多くの助言を頂いた“オランダ坂トンネル技術検討委員会（委員長：山本稔 東京都立大学名誉教授）”委員の方々、貴重なデータを提供して頂いた長崎県出島バイパス建設事務所の関係諸氏、計測データのまとめを行って頂いた応用地質(株)の関係諸氏、解析結果の整理を行って頂いた長崎大学大学院修士課程の川田昌仁君に、心から深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林理志, 関 聡史, 坂田真一, 松岡誠一, 藤井広志: 営業線直下における3連 NATM の施工, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.12, pp.315-320, 2002.
- 2) 佐々木良作, 塚田昌基, 木村正樹, 鳥居 敏: 都市部における未固結地山での大断面トンネル施工事例, 土と基礎, Vol.50, No.7, pp.13-15, 2002.
- 3) 岩田充功, 福家佳則, 萩原智寿, 横尾 敦: 都市部における低土被り土砂 NATM の施工と計測, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.10, pp.101-106, 2000.
- 4) 栗山廣志, 川野貴志, 緒方隆哉, 中村秀光, 猪口光行, 上林武司, 矢根健二: 都市 NATM における先行変位に着目した補助工法の効果についての一考察, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集第3部(B), Vol.55, pp.182-183, 2000.
- 5) 野村耕司, 鈴木教義, 中山裕昭: 都市 NATM による大断面双設トンネル—名古屋高速1号線東山トンネル—, トンネルと地下, Vol.30, No.4, pp.21-29, 1999.
- 6) 中尾次生, 関本 宏, 居相好信, 西野健一郎: 住宅密集地下・含水未固結地山を掘る—神戸市高速道路2号線長田トンネル—, トンネルと地下, Vol.30, No.2, pp.19-30, 1999.
- 7) 駒村佳男, 山本浩二, 阿部勝久, 諸戸健治: 土かぶり2D以下で送電用鉄塔直下を貫く—国道148号青木湖トンネル—, トンネルと地下, Vol.28, No.4, pp.15-21, 1997.
- 8) 山本和義, 林秀夫, 坂口勝利, 石井利信: 盛土地盤中の長尺鋼管パイル工法によるアンブレラ工法の施工と地山挙動, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.6, pp.229-234, 1996.
- 9) 後藤有志, 成田政夫, 平川邦彦: 泥岩・砂互層における長尺先受けの挙動計測結果について, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第6部, Vol.51, pp.662-663, 1996.
- 10) 原節男, 山口学, 五十嵐瑞穂, 岡田憲明: MJS による坑口長尺先受け工の施工—第二神明道路(改築)小東山トンネル—, トンネルと地下, Vol.26, No.7, pp.13-26, 1995.
- 11) 武内秀木, 河上清和, 折橋恒春, 中川浩二: 長尺鋼管フォアパイル工法(AGF工法)の効果に関する研究, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.233-246, 1999.
- 12) 岩垣富治, 浜村吉昭, 玉井昭雄, 藤井剛: 長尺鋼管先受け工の挙動と作用効果についての考察, 土と基礎, Vol.46, No.8, pp.9-12, 1998.
- 13) 箱石安彦, 岩野政浩, 青木俊彦, 青野 宏, 亀山寿仁: 計測データ分析に基づいたアンブレラ工法の効果に関する一考察, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.7, pp.23-30, 1997.
- 14) 岡澤達男, 三島功裕, 倉持秀明, 伊藤邦彦, 対馬祥一: 3次元 FEM 解析による沈下抑制工法選定の試み, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.4, pp.359-364, 1994.
- 15) 中田雅博, 佐藤 淳, 伊藤 淳, 樽井 稔: トンネル先受け工に関する設計手法の提案, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.191-195, 1995.
- 16) 小原勝巳, 川端康夫, 筒井雅行, 石黒真一, 荻田雅広: 改良型注入式鋼管先受け工法における鋼管の曲げ挙動について, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.6, pp.123-128, 1996.
- 17) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会: アンブレラ工法の設計技術資料, ジェオフロンテ研究会, p.261, 1996.
- 18) K.チェッキー著: 島田隆夫訳, トンネル工学, 鹿島出版会, 1971.
- 19) Peck, R.B.: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, Proc. of 7th ICSMFE, Mexico, 1969.
- 20) 島田隆夫: 土被りの浅い鉄道山岳トンネルにおける地表沈下の形状および発生機構に関する研究, 鉄道技術研究報告 No.1162, 1981.
- 21) 瀧 治雄, 名合牧人, 大津宏康, 田中良弘: 3次元有限要素法による長尺先受け工のモデル化に関する検討, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.1172-1173, 1995.
- 22) 杉江茂彦, 吉岡尚也: 3次元有限要素法による長尺先受け工の地山安定に関する考察, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.200-201, 1996.
- 23) 玉村公児, 森川誠司, 鹿毛 量, 大野 清, 高橋祐治: 3次元 FEM 解析による長尺先受け工の作用効果の検討, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.5, pp.297-302, 1995.
- 24) 多賀直大, 磯野龍昭, 佐藤 淳, 樽井 稔: 高圧噴射攪拌改良先受け工法による変位抑制効果, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.76-80, 1993.
- 25) 例えば, 野村耕司, 鈴木教義, 中山裕昭: 都市 NATM による大断面双設トンネル名古屋高速1号線東山トンネル, トンネルと地下, Vol.30, No.4, pp.21-29, 1999.
- 26) 例えば, 木村秀雄, 大森満, 岩田充功, 藤本和義: 水戸の中心市街地を小土かぶりで貫く, トンネルと地下, Vol.34, No.3, pp.29-36, 2003.
- 27) 土木学会: トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説, pp.231-235, 1996.
- 28) 土木学会: トンネル・ライブラリー, 第10号, プレライニング工法, p.31, 2000.
- 29) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会: アンブレラ工法の計測事例と設計手法の研究, ジェオフロンテ研究会, p.4, 1998.
- 30) Cundall, P.A. and Board M.: A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems, Proc. of the 6th International Congress on Numerical Methods in Geomechanics, 1988.
- 31) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 大変形理論の岩盤挙動および安定性評価への適用, 土木学会論文集, No.575/III-40, pp.93-104, 1997.

- 32) Jiang,Y., Xiao,J., Tanabashi,Y. and Sasaki,I. : Theoretical Method for Assessing Stability of Underground Openings by Considering the Anisotropy of In-Situ Stresses, Proc. of the 3rd Int. Sympo. on Rock Stress -RS Kumamoto'03-, pp.551-556, 2003.
- 33) 蔣 宇静: 深部地下空洞の力学的安定に関する理論的および実験的研究, 九州大学学位論文, 1993.
- 34) 佐々木郁夫, 蔣 宇静, 棚橋由彦, 村里静則, 今長谷秀亮: 都市部トンネル施工における周辺地山挙動把握と環境影響評価に関する研究, 長崎大学工学部研究報告, 第 32 卷, 第 59 号, pp.157-159, 2002.
- 35) 佐々木郁夫, 川内野俊治, 横尾利春, 村里静則: 長崎の住宅密集地下を貫く(沈下対策編) - 一般国道 324 号出島バイパスオランダ坂トンネル -, トンネルと地下, Vol.34, No.10, pp.17-23, 2003.
- 36) ジェオフロンテ研究会: 山岳トンネルにおける 3 次元解析の現状と課題, ジェオフロンテ研究会, 2004.
- 37) 日本道路公団試験研究所: トンネル数値解析マニュアル(都市部トンネル解析留意事項編), 試験研究所技術資料, 第 359 号, 2002.

(2003. 10. 23 受付)

REINFORCEMENT EFFECT AGAINST SURFACE SETTLEMENT USING AN AUXILIARY TECHNIQUE FOR SHALLOW TUNNEL IN URBAN AREAS

Yujing JIANG, Ikuo SASAKI, Shuji OOKUMA and Yoshihiko TANABASHI

In recent years, the mountain construction method of tunneling in urban areas is being widely applied in Japan. In order to prevent damage to adjacent environment due to excavation in difficult geological conditions, ground improvement and reinforcement techniques are required. The steel pipe-reinforced multi-step grouting method has been applied to tunnel sites as an auxiliary construction technique for reinforcement. However, this technique has been usually employed empirically without much understanding with regard to its effect on the ground movement prevention. In this study, the three dimension simulations have been carried out for evaluating the displacement restraint effect of the steel pipe-reinforced multi-step grouting by changing its design pattern. As a result, a subsidence restraint rate became significant if the tunnel being excavated in soft ground conditions. In addition, the propriety of the proposed analysis is verified based on the field measurements of Nagasaki Oranda Slope tunnel and the future prediction of surface subsidence in the unexcavated region and the reinforcement effect of the reexamined auxiliary technique have also been investigated.