

シールド地上発進実験および その影響評価手法の開発

飯島 知哉¹・川北 潤²・廣富 聡³・小池 真史⁴・坂井 一雄⁵

¹正会員 大成建設株式会社 土木技術部都市土木技術室 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿一丁目25-1)
E-mail:tom@ce.aisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術開発部地下空間開発室 (〒245-0051 神奈川県横浜市
戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 大成建設株式会社 東京支店西新宿シールド作業所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿3-13-9)

⁴正会員 大成建設株式会社 原子力本部原子力技術第三部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿六丁目8-1)

⁵正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所地盤・岩盤研究室 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

近年、道路トンネルを中心に土被りの無いトンネルのアプローチ部よりシールドを発進することで大規模な立坑が不要となり、工事費の低減および工期の短縮を図る技術が注目されている。このニーズに対応する技術を確立するために、実際のシールド機を用いて地上発進実験を実施した。また、本実験で得た知見を実案件に活用するために、掘削時の地盤挙動や掘削影響範囲などを評価できる三次元逐次掘削解析手法を開発した。

Key Words : road tunnel, a launching method of a shield machine from ground level, small overburden, fine sand, 3D analysis

1. はじめに

通常、地上からのアプローチ区間があるトンネルは、図-1に示すように、ある程度の土被りが確保できる位置に立坑を設けて、それより深いシールドトンネル区間はシールド工法により施工する。立坑より浅いアプローチ区間は開削工法により施工する。これに対して、図-2に示すように、シールド機上部が地上にある状態から、アプローチ部分も含めてシールド工法によりトンネルを一気に施工するシールド地上発進技術が注目されている。この理由は、シールド地上発進技術により道路などの大断面トンネルでは、立坑構造が簡素となるため、工事費の縮減および工期の短縮を図ることができるためである。また、シールドトンネル区間でも、初期掘進から本掘進への段取り替え作業が簡素化できることで工期の短縮が可能となる。

一方、地表面沈下や側方水平変位などの地盤変状を事前に予測するためには、精度の高い影響評価手法の確立が不可欠である。しかし、従来の二次元解析では、施工条件や施工手順などを正確に反映することが困難であるため、シールド掘削時の地盤挙動を精度良く再現することができないという問題点がある。そこで、トンネル本体

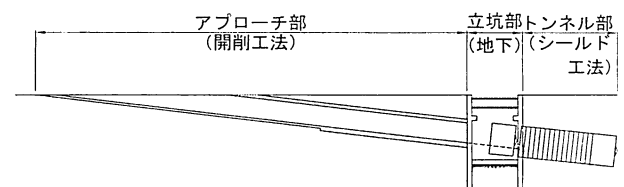


図-1 立坑発進概念図

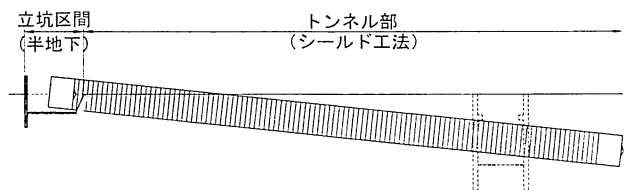


図-2 地上発進概念図

構造や施工過程を忠実に模擬できる三次元逐次掘削解析手法を開発し、シールド地上発進実験時の周辺地盤の掘削影響評価を目的とした再現解析を実施した。

2. フィールド実験

(1) 実験の目的

シールド機を土被りのない地上部から発進させる場合

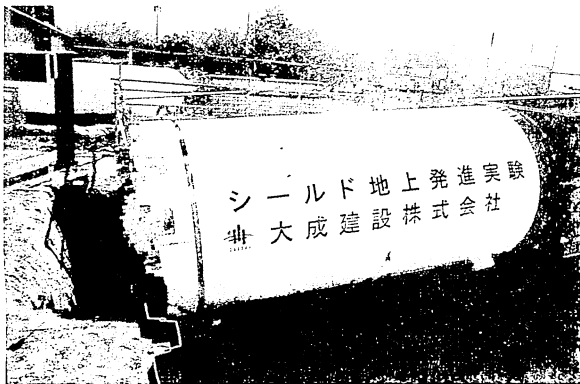


写真-1 泥土圧シールド機

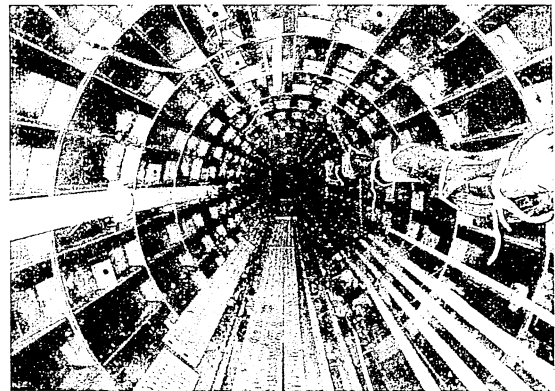


写真-4 坑内状況



写真-2 鋼製セグメント



写真-3 掘削土排土状況

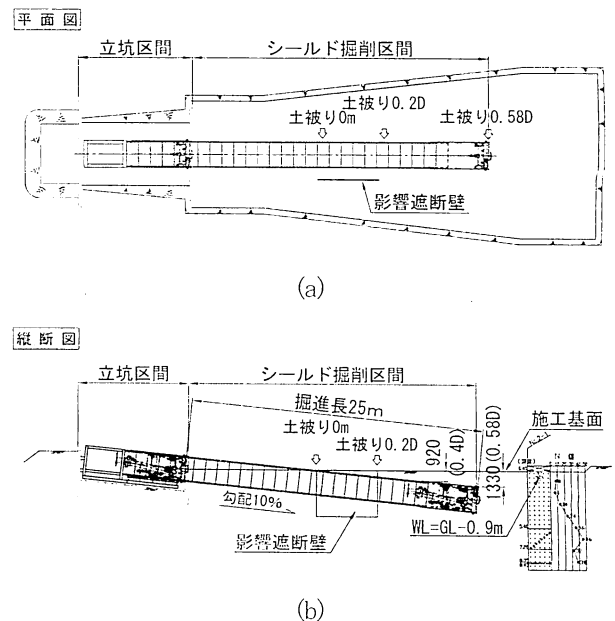


図-3 トンネル線形: (a) 平面図 (b) 縦断面図

において、①周辺地盤の拘束が少ない状態でのシールド機のコントロール、②周辺地盤の変形状況、③セグメントの浮き上がり、などに関する基礎データを収集すること、および地盤の自立性が低い滞水砂層地盤での地上発進技術を確立することを目的に、フィールド実験を実施した。

(2) 実験の概要

a) 実験場所および実験期間

実験は茨城県神栖市の実験ヤードで実施した。2010年

1月末にシールド掘削を開始し、2月中旬にシールド機が所定の位置まで到達した。

b) 地質条件

掘削対象地盤は、0.1～0.25mm程度の粒径がそろった細砂で均等係数が1.8と非常に崩壊性の高い地盤であった。地下水位は施工基面から0.9m下がりであった。

c) シールド機

シールド機は、外径2.28m、長さ5.16mの泥土圧シールド機を用いた(写真-1を参照)。

d) セグメント

セグメントは外径2.15m、桁高10cm、幅1.0mの鋼製セグメントを用い、その分割数は5分割とした(写真-2を参照)。

e) シールド仮設備

シールド掘進の設備として、裏込注入設備、加泥・滑材注入設備、後続台車などを地上に設置した。

写真-3にトンネル坑内での掘削土排出状況を、写真-4に坑内の状況を示す。

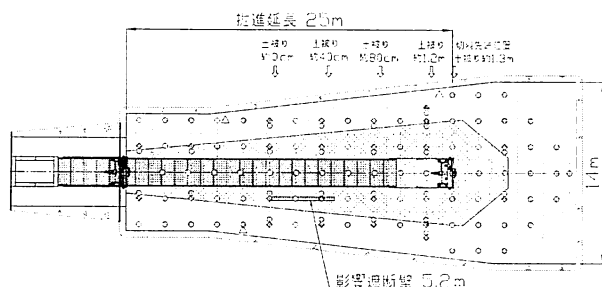


図-4 計測器等の配置図

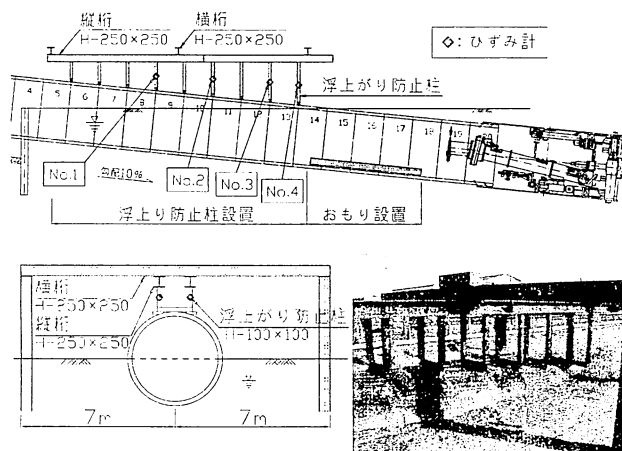


図-5 セグメントの浮き上がり対策

f) トンネル線形

シールド機上部が地上にある状態から発進し、土被りがシールド機外径の0.58倍に相当する1.33mになるところまで掘削した。掘進延長は25m、縦断勾配は10%、平面線形は直線とした(図-3を参照)。

また、既存構造物に対する防護策としての遮断壁の効果を確認するために、図-3に示す位置に鋼矢板による影響遮断壁を設置した。

g) 計測計画

図-4に示すように、地表面沈下を測量するためのプリズムターゲットを91箇所、側方水平変位を計測するための挿入式傾斜計を24箇所、地下水位観測孔を3箇所配置し、シールド掘進時の周辺地盤の変状を計測した。

h) セグメントの浮き上がり対策とその計測

セグメントは地下水中に設置するため、土被りのない区間や土被りの小さい区間では、セグメント自重と土被

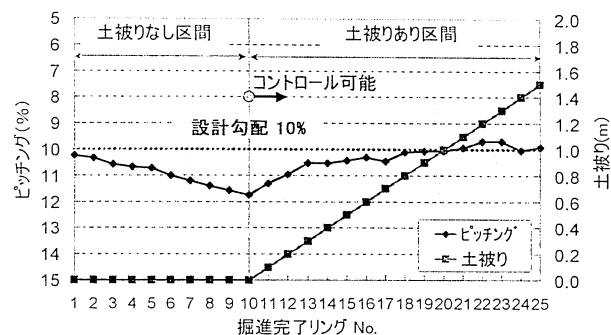


図-6 シールド機のピッチング

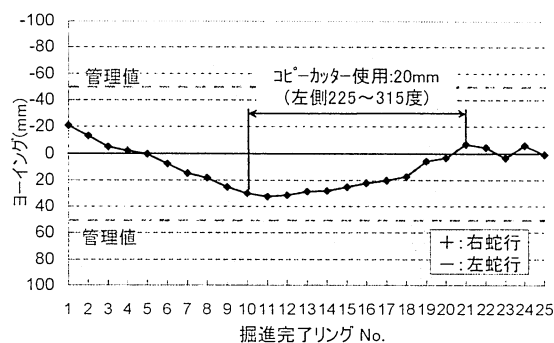


図-7 シールド機のヨーイング

り部分の土重量より浮力の方が大きくなり、浮力対策が必要となった。図-5に示すように、セグメントが地表面から出ているところでは、浮き上がり防止柱を設置し浮力対策とし、セグメントが地中に入ったところでは、坑内におもりを設置してその重量で浮力対策とした。また、セグメントに作用する浮力等の鉛直上向きの荷重(上向力)を把握するために、浮き上がり防止柱に取り付けたひずみ計により軸力計測を行った。

(3) 実験結果

a) シールド機のコントロール

①ピッチング

図-6に示すように、土被りなし区間では、シールド機がノーズダウンする傾向にあった。そこで、ジャッキ選択により回復を試みたが、シールド機前面の一部にしか地盤が無く、掘進抵抗が小さいため、ノーズダウンを回復させることができなかった。シールド機前面の掘削抵抗が確保できる土被りあり区間になると、シールド機のピッチングコントロールが可能となった。

②ヨーイング

図-7に示すように、コピーカッターの使用とジャッキ選択による偏心力で制御可能であった。

③ローリング

図-8に示すように、土被りなし区間でもシールド機のカッターの回転方向を変えることで制御可能であった。

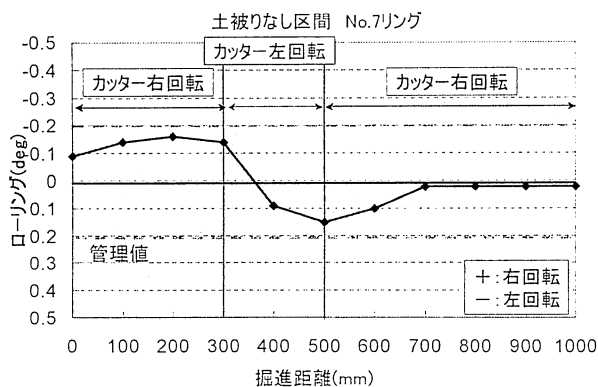


図-8 シールド機のローリング (No. 7 リング掘削時)

b) 地表面クラック

掘削時のクラックの発生はほぼ主働崩壊角の範囲内で見られた。シールド機先端上の土被り厚さが H/D (H ; 土被り, D ; シールド機外径) で0.2程度より大きくなるとクラックは発生するものの崩壊することなく掘削でき、 H/D が0.4程度では、地表面にクラックを発生させることなく掘削できた。また今回の掘削対象地盤は細砂層であるため、シールド機の肩部の崩壊がみられた。

また、影響遮断壁周辺では、遮断壁内面にそってクラックが発生したが、背面側にはクラックがなく、また沈下も微小であり影響遮断壁の効果が確認できた。

c) セグメントの浮き上がり

図-9に浮き上がり防止柱の軸力推移図を示す。ひずみ計No.1, 2, 3は設計上向力と実測上向力がほぼ近似していたが、No.4は浮き上がり防止柱設置後、掘削が進むにつれ設計上向力以上になった。これはシールド機が地中に入るにつれジャッキ推力が増加し、その推力の鉛直成分の一部が浮き上がり防止柱に作用したものと想定される。

3. 三次元逐次掘削解析による掘削影響評価

(1) 三次元逐次掘削解析の目的

フィールド実験により得た周辺地盤の掘削時挙動に関する知見を実案件に活用し、地表面沈下や側方水平変位などの地盤変状を事前に予測、および評価するためには数値解析的な検討が必要である。

通常、シールドトンネル施工時の地盤変状を数値解析により評価する場合、トンネル横断面を対象とした二次元解析が実施される。しかし、一般的に二次元解析は地盤変状を引き起こす要因を掘削解放率という概念に置き換える手法を用いるため、切羽土圧や余掘りなどの影響を詳細に反映することができず、地表面沈下などの地盤変位を精度良く再現することが非常に難しい。また、シールド地上発進実験のように土被りがシールドの掘進に

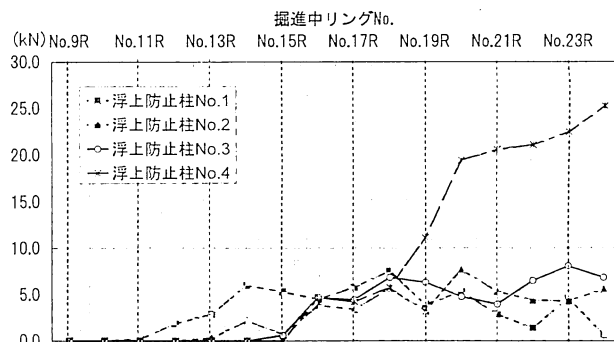


図-9 浮き上がり防止柱の軸力推移図

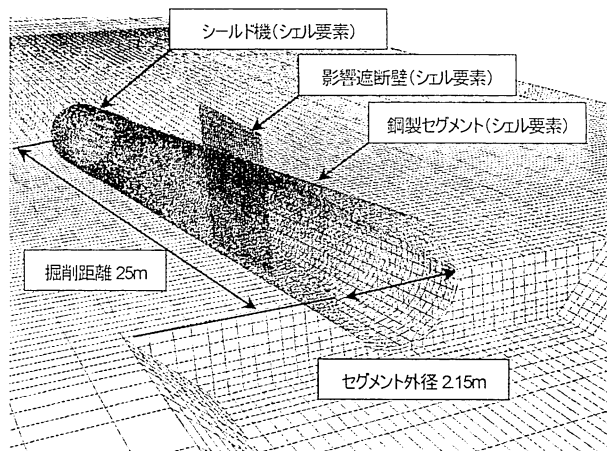


図-10 三次元解析モデル

伴い変化する施工条件を、二次元解析により正確に表現することは困難である。

上記のような問題点を勘案して、施工条件を忠実に反映することのできる三次元逐次掘削解析により、フィールド実験時の周辺地盤の掘削影響評価を目的とした再現解析を実施した。

(2) 解析条件

以下に示す条件で、三次元逐次掘削解析を実施した。なお、解析には有限差分法解析コードFLAC3D ver3.1を用いた。

a) 三次元解析モデル

図-10に三次元解析モデルを示す。本解析モデルでは、実験時のトンネルの縦断勾配を正確に反映した。また、掘削時の周辺地盤の挙動を詳細に評価するために、縦断方向のメッシュサイズは20cm、すなわち1Ring (=1m)の掘進を5ステップで実施するものとした。影響遮断壁は、剥離・滑りを考慮できるシェル要素でモデル化し、シールド中心から横断方向に2mの位置に設置した。

b) 地盤条件

地盤の応力-ひずみ関係は弾完全塑性体とし、降伏条件はモール・クーロンの破壊規準に従うものとした。地盤物性値は、実験対象サイトで実施した標準貫入試験や

SBLT 試験などのボーリング調査結果やボーリングコアを用いた室内土質試験の結果に基づいて設定した。表-1に解析で用いた地盤物性値を示す。

c) シールド掘進のモデル化

三次元逐次掘削解析は二次元解析のように掘削解放率という近似的手法を用いる必要が無いため、シールド掘進時の地盤変状を引き起こす要因を忠実に反映することができる。そこで、シールド地上発進実験で取得した計測結果から比較的顕著であった、切羽前沈下（隆起）、シールド本体通過時の沈下（隆起）、およびテールボイド沈下（隆起）を引き起こす主要因¹⁾を解析でモデル化した。以下では三次元逐次掘削解析における、①シールド機の掘進、②切羽土圧、③余掘り、④シールド本体と周辺地盤との接触条件、および⑤テールボイドの発生と裏込め注入過程のモデル化手法の概要について説明する。

①シールド機の掘進

シールド機の掘進を三次元解析でモデル化する場合、シールド機をモデル化した要素に対して、マシン後方から推力を付加して移動させることにより掘進を模擬する手法がある²⁾。また、切羽前方で1掘進分の地盤要素を消すと同時にシールド機要素を前方に付加し、テール部ではシールド機要素を削除してセグメント要素を付加することにより掘進を模擬する方法もある³⁾。本解析では、比較的モデル化が容易である後者の手法を用いて、シールド機の掘進を模擬するものとした。ただし、シールド機の姿勢は施工時のコントロール方法によって、複雑に変化するため、解析に反映する必要はないと判断した。

テール部で付加するセグメントはシェル要素を用いて表現した。セグメントが地中から出ている土被りなし区間では、浮力によるセグメントの浮き上がりが問題となるが、フィールド実験では浮き上がり防止柱による浮力対策を講じたため、解析では、セグメントは地盤と剥離しない条件とした。

②切羽土圧

本解析では、切羽前面およびカッターヘッドの外周面方向に荷重を与えることにより、切羽土圧をモデル化した。切羽土圧の大きさは、チャンバー内土圧の計測値の下限値を参考にして、解析上の静止土圧の85%とした。なお、シールドの掘進に伴い土被りが大きくなり、切羽土圧が大きくなることを解析でも考慮した。

③余掘り

実験で用いたシールド機の場合、カッターヘッドの外径が2290mmであり、シールド本体の外径が2280mmである。そのため、カッターヘッド通過後、シールド本体前面が到達する際に半径方向に片側5mmの余掘りが生じる。また、同時にシールド本体周辺地盤はカッターヘッド部

表-1 地盤物性値

応力-ひずみ関係	弾完全塑性体
破壊規準	モール・クーロンの破壊規準
単位体積重量(kN/m ³)	19.0
弾性係数(MPa)	5.3(GL0m~GL-3m) 深度に比例(GL-3m以深) ^{*1}
ポアソン比	0.3
粘着力(MPa)	0
内部摩擦角(°)	40
静止土圧係数K ₀ ^{*2}	0.63

*1三軸圧縮試験、標準貫入試験結果を参考に設定。

*2水圧を考慮。

で作用していた切羽土圧から解放されるため、余掘り分の空隙を埋めるように挙動すると考えられる。したがって、本解析ではシールド本体通過時にシールド本体と接する地盤の節点に、余掘り分の変位をシールド中心に向かって与えることにより、カッターヘッド外径とシールド本体外径の差に起因する余掘りを表現した。

④シールド本体と周辺地盤との接触条件

シールド本体はスキンプレートで覆われており、シールド本体と地盤の境界部は鋼板と地盤の接触条件となる。そのため、シールド本体と地盤間にある一定以上のせん断応力が発生する場合滑りを生じ、仮に引張応力が発生する場合は、剥離する条件であると考えられる。したがって、本解析では、滑り・剥離の条件を考慮できるシェル要素を用いてシールド本体をモデル化した。なお、摩擦係数は0.4とした。

⑤テールボイドの発生と裏込め注入過程

実験では、鋼製セグメントのグラウトホールから可塑状裏込め材の注入を実施したが、グラウトホールが鋼製セグメントのトンネル軸方向中心付近にあることから、1Ring掘進中の途中からの注入であった。そのため、1Ring掘進中のテールボイド部の状態は、裏込め注入前はほぼ空隙であり、その後裏込め注入時に流動性を保持した裏込め材が空隙に充填されたと考えられる。また、各種詳細な計測を実施しながらの掘進であったため、1Ring掘進に0.5日～1日程度費やしていたことから、1Ring掘進後は裏込め材がほぼ硬化し、地盤およびセグメントと一体化して挙動したと想定される。

上記の点を考慮して、本解析では、裏込め注入過程を裏込め注入前の掘進、裏込め注入後から1Ringまでの掘進、および1Ring掘進後に分けてモデル化し、裏込め材を表したソリッド要素の弾性係数を逐次変化させた。

(3) 解析結果と計測結果の比較

図-11に地表面沈下コンターの解析結果を示す。図-11では、断面15m以降において、シールド直上で局所的に

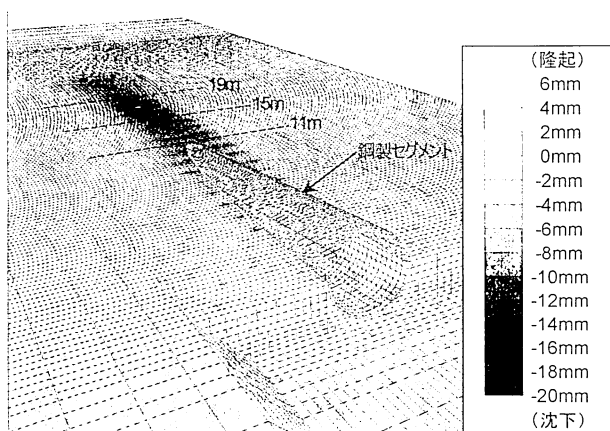


図-11 掘削完了時の地表面沈下コンター（解析結果）

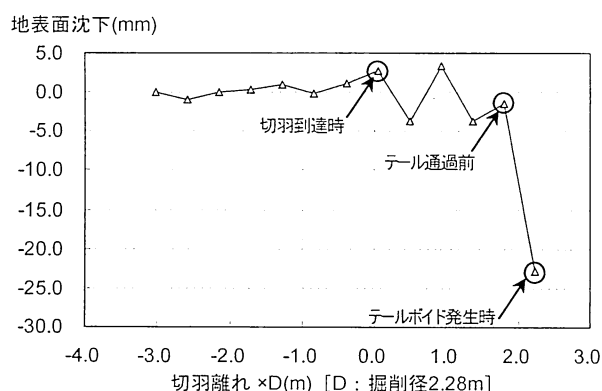


図-12 シールド直上の地表面沈下の計測結果（断面 19m）

沈下が大きくなる領域が見られる。これは、テールボイド発生時に空隙が生じる断面の直上である。一方、図-12に示すように、実際の計測においても、テールボイド発生時に大きく地表面沈下が増加する傾向が見られ、解析と同様の傾向を示す。これらは、裏込め注入前に空隙が生じることにより、大きく地盤の応力が解放されたことが原因であると考えられる。

解析の再現性について、より詳細に検討するために、土被りが約 0.8m となる断面 19m におけるシールド本体通過直後（テールボイド発生時）のトンネル横断方向の地表面沈下、および側方水平変位に関して、解析結果と計測結果を比較した。図-13に横断面地表面沈下分布を、図-14に側方水平変位分布を示す。なお、側方水平変位はシールド中心から横断方向に 2m 離れた位置の計測値および解析値であり、GL-3m を基準とした相対変位である。

図-13より、シールド本体通過後におけるシールド直上の沈下量は計測値 22.7mm であるのに対し、解析結果

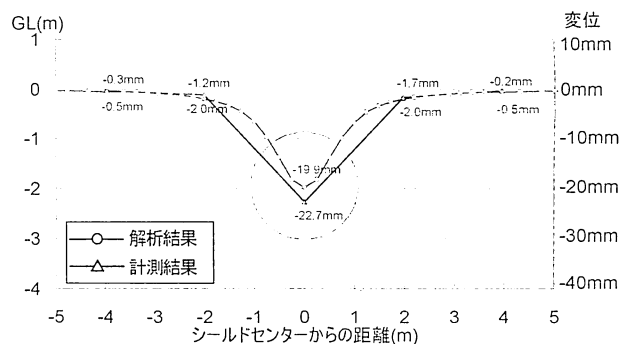
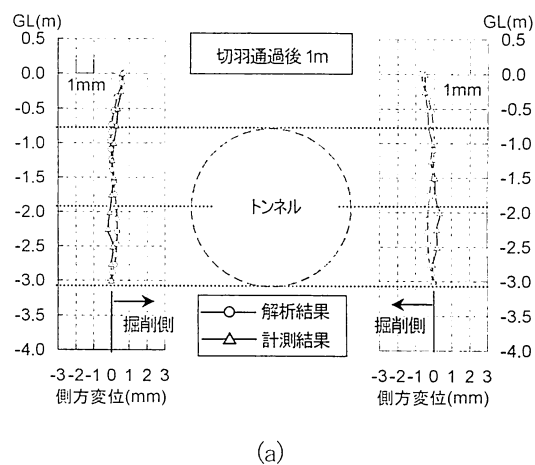
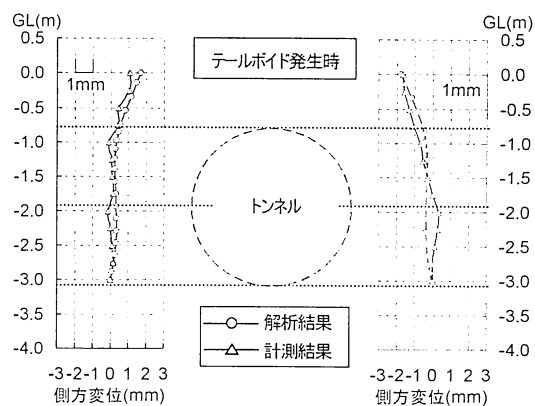


図-13 横断面地表面沈下分布（断面 19m）



(a)



(b)

図-14 断面 19m における側方水平変位：
(a) 切羽通過後 1m, (b) テールボイド発生時

では 19.9mm であり、ほぼ同程度であるといえる。また、沈下を生じるトンネル横断方向の範囲についても概ね再現できており、解析で 2mm 以上の沈下が生じる範囲はシールド中心から横断方向に 2m と限定的である。

図-14に示す側方水平変位の計測結果から、切羽が断面 19m を通過した直後ではほとんど変位を生じないことがわかる。一方、テールボイド発生時には、地表面近傍で 2mm 程度の変位が掘削側に生じた。これは、シールド

直上の地盤がテールボイド部の空隙によりトンネル内部に落ち込むように挙動したことが原因であると考えられる。三次元逐次掘削解析では、上述の側方水平変位の挙動について、定量的に再現することができた。

4. まとめ

今回の実験から、シールド機のコントロール方法、シールド掘進時の周辺地盤の変形状況、およびセグメントの浮き上がり防止対策などに関するさまざまな施工上の知見が得られた。また、三次元逐次掘削解析では、フィールド実験で計測された地表面変位や地中変位の値を良く再現できることが確認された。したがって、実案件に対しても、本手法を適用することで、事前に地盤の掘削時挙動や掘削影響範囲などを予測することができると

もに、既存構造物の防護方法を検討する必要がある場合には、影響遮断壁の施工範囲や地盤改良範囲などを適切に設定することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 3 シールド工法の調査・設計から施工まで, pp. 275-279, 2006.
- 2) 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, pp.59-68, 1993.
- 3) 宮川房夫, 川口廣, 水谷進, 吉村和彦, 粥川幸司：泥水式シールドの超近接施工における地盤変状とその掘進過程を考慮した3次元FEM解析, 土木学会論文集, No.528, pp17-30, 1995.

DEMONSTRATIVE LAUNCHING OF A SHIELD MACHINE FROM GROUND LEVEL AND ITS NUMERICAL SIMULATION

Tomoya IJIMA, Jun KAWAKITA, Satoru HIROTOMI, Masashi KOIKE
and Kazuo SAKAI

Recently, a launching method of a shield machine from ground level in the approach section of a subsurface road tunnel is drawing attention. Since it does not use a deep large shaft, it will enable us to curtail the work period and to reduce the construction cost. We performed a demonstration test of launching of a shield machine from ground level to master this technology. In order to apply the findings to actual construction cases, we developed a technique of a three-dimensional successive-excavation analysis in which excavation influences and subsequent ground behaviors are taken into account.