シールド地上発進実験およびその影響評価手法の開発

土被りゼロからのシールド発進技術により工費・工期を削減

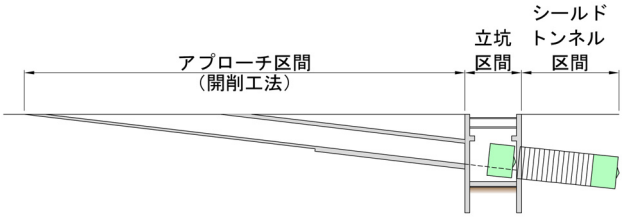
坂井 一雄[*1]・飯島 知哉[*2]・川北 潤[*3]・廣冨 聡[*4]・小池 真史[*5]

Keywords : Road tunnel, A launching method of a shield machine from ground level, Small overburden, Fine sand, 3D analysis
道路トンネル，シールド地上発進，低土被り，細砂，三次元解析

1. はじめに

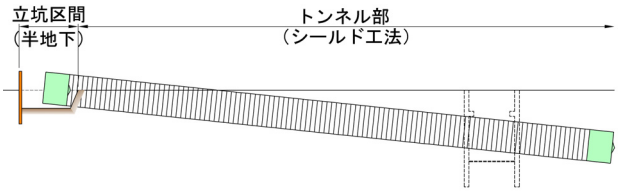
通常，地上からのアプローチ区間があるトンネルは，図－1 に示すように，ある程度の土被りが確保できる位置に立坑を設けて，それより深いシールドトンネル区間はシールド工法により施工する。立坑より浅いアプローチ区間は開削工法により施工する。これに対して，図－2 に示すように，シールド機上部が地上にある状態から，アプローチ部分も含めてシールド工法によりトンネルを一気に施工するシールド地上発進技術が注目されている。この理由は，シールド地上発進技術により道路などの大断面トンネルでは，立坑構造が簡素となるため，工事費の縮減および工期の短縮を図ることができるためである。また，シールドトンネル区間でも，初期掘進か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



図－1 立坑発進概念図

Fig.1 Basic concept of shield launching from a vertical shaft



図－2 地上発進概念図

Fig.2 Basic concept of shield launching from ground level

2. フィールド実験

2.1 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。

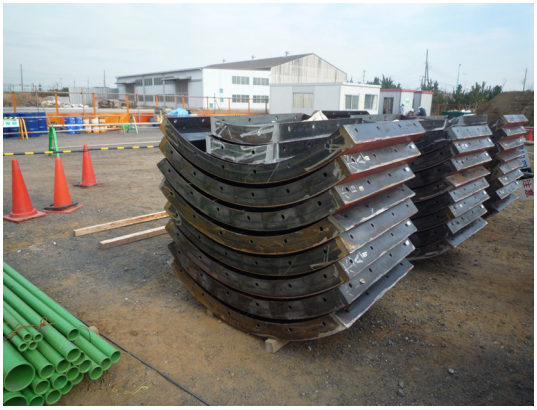
2.2 実験概要

実験は茨城県神栖市に実験ヤードを借用して実施した。2010 年 1 月末にシールド掘進を開始し，2 月中旬にシールド機が所定の位置まで到達し，実験を終了した。その後，有識者に対し公開説明会を実施した。以

＊1 技術センター土木技術研究所地盤・岩盤研究室
＊2 土木本部土木技術部都市土木技術室
＊3 技術センター土木技術開発部地下空間開発室
＊4 東京支店西新宿シールド作業所
＊5 原子力本部原子力技術第三部

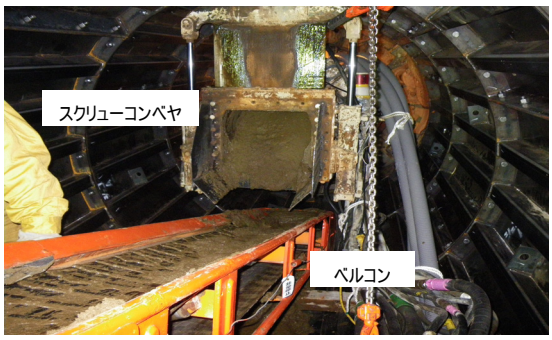
写真－1　泥土圧シールド機

Photo 1 An EPB shield machine



写真－2　鋼製セグメント

Photo 2 Steel segments



写真－3　掘削土排土状況

Photo 3 Muck haulage (Conveyor method)

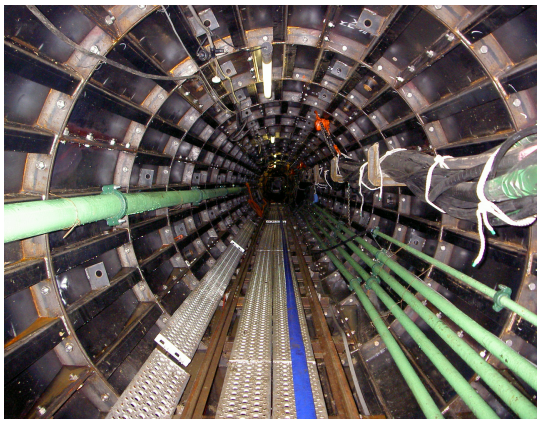
下に実験条件の概要について示す。

2.2.1　地盤条件

掘削対象土は，0.1～0.25mm 程度の粒径がそろった細砂で均等係数が 1.8 という崩壊性の高い砂層地盤である。また，事前のボーリング調査結果から，地下水位は施工基面から 0.9m 下がりであることがわかった。

2.2.2　シールド機

実験に用いたシールド機は外径 2.28m(カッターヘッド外径 2.29m)，長さ 5.16m の泥土圧シールド機である（写真－1 を参照)。



写真－4　坑内状況

Photo 4 Tunnel inside view

写真－5 仮セグメント・反力架台・反力盛土

Photo 5 Temporary segment, reaction frame, and embankment

2.2.3　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)。

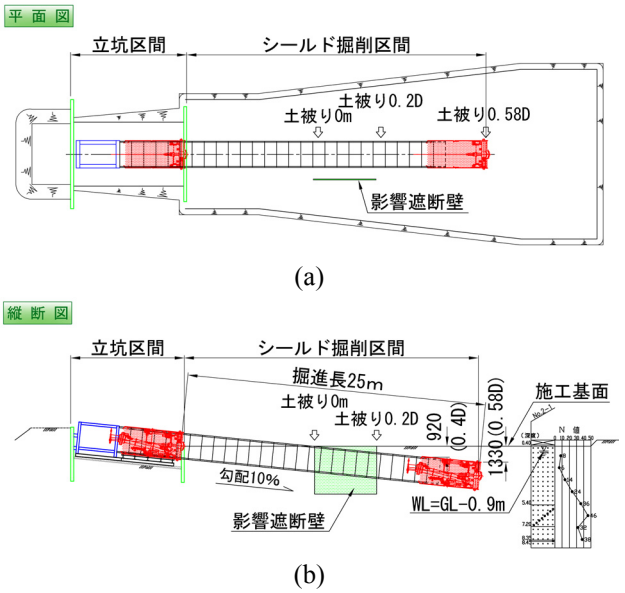
2.2.4　シールド仮設備

シールド掘進の設備である裏込注入設備，加泥・滑材注入設備，後続台車などは地上部に設置した。反力受けは鋼材(H-200)で組んだ反力架台の背面に盛土(H=1.5m)を行い，土塊重量により抵抗する方法とした。

写真－3にトンネル坑内での掘削土排出状況，写真－4に坑内状況，写真－5に反力受け設備を示す。

2.2.5　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



図－3　トンネル線形：(a)平面図 (b)縦断図

Fig.3 (a) Plan view and (b) longitudinal view of tunnel

遮断壁を設置した。

2.2.6　計測

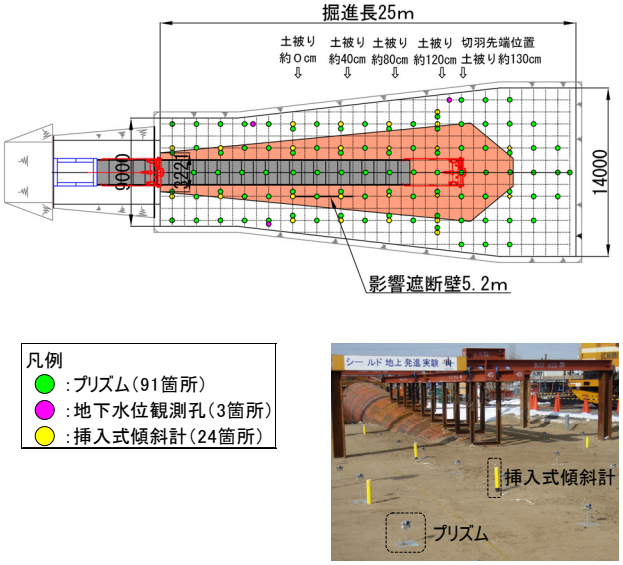
図－4 に示すように，地表面沈下を測量するためのプリズムターゲットを 91 箇所，側方水平変位を計測するための挿入式傾斜計を 24 箇所，地下水位観測孔を 3 箇所配置し，シールド掘進時の周辺地盤の変状を計測した。

2.2.7　セグメント浮き上がり対策

セグメントは地下水中に設置するため，土被りなし区間と低土被り区間では，セグメント自重と土被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（坑内軌条用レール）を設置し，その重量で浮力対策とした。

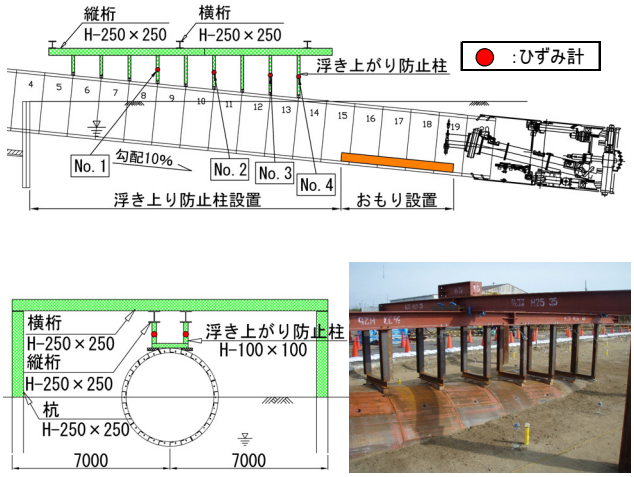
浮上り防止柱の設置手順は掘進開始前にあらかじめ杭材・桁材(縦桁・横桁)を門型に設置しておき，掘進の進捗に従ってセグメント主桁がシールド機のテールから出現次第即座に 2 本 1 組の柱部材を 1 リングごとに取り付ける方法とした。

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。



図－4　計測装置の配置と計測状況

Fig.4 Layout of measurement instruments



図－5　セグメントの浮き上がり対策

Fig.5 Countermesures against buoyancy acting on segments

2.3　実験結果

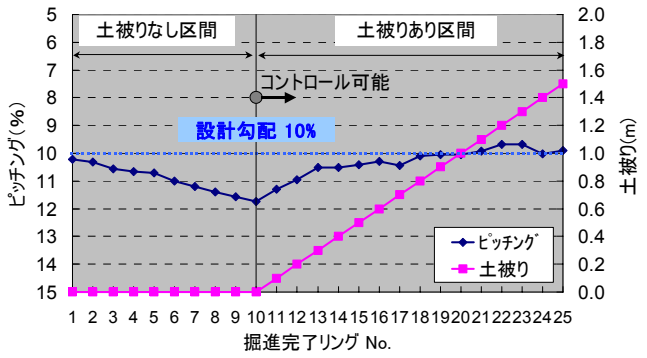
2.3.1　シールド機のコントロール

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。

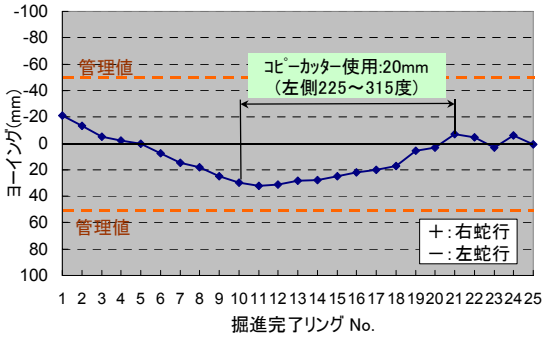
②ヨーイング

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。



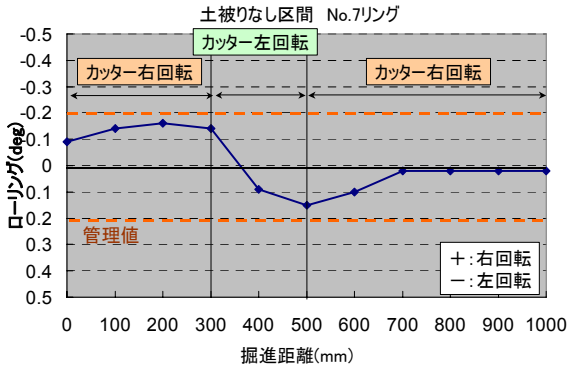
図－6　シールド機のピッチング

Fig.6 Pitching of the shield machine



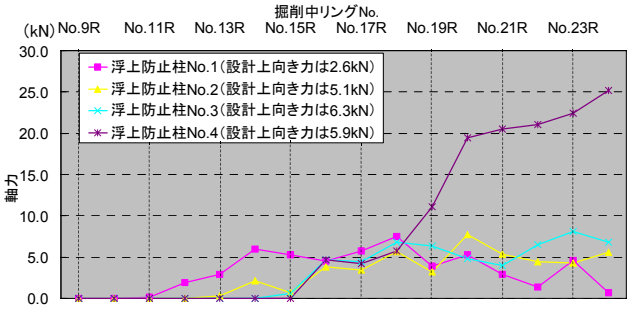
図－7　シールド機のヨーイング

Fig.7 Yawing of the shield machine



図－8　シールド機のローリング（No.7 リング掘削時）

Fig.8 Rolling of the shield machine
(during excavation of ring No.7)



図－9　浮き上がり防止柱の軸力推移図

Fig.9 Beam axial force variation along tunnel advance

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。

2.3.2　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あり，掘削時のクラックは，H／D（H；土被り，D；シールド機外径）が0.2程度で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，影響遮断壁については，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。

2.3.3　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。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手法による掘削影響評価

3.1　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，または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正確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機の掘進に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。

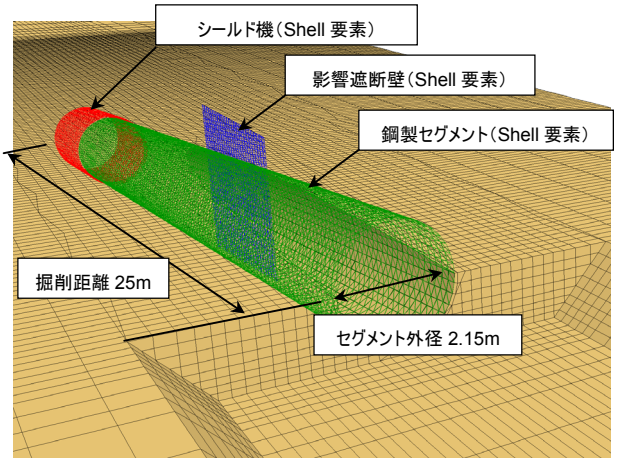
上記のような問題点を勘案して，施工条件を忠実に反映することのできる三次元逐次掘削解析により，フィールド実験時の周辺地盤の掘削影響評価を目的とした再現解析を実施した。

3.2 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。

3.2.1 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。下方境界はトンネル下端より 1D（D：掘削径 2.28m）であり，変位固定境界とした。側方境界はトンネル側壁より 5D であり，鉛直方向変位固定境界とした。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。図中に青で示す要素は，シールド中心から横断方向に 2m の位置に設置した影響遮断壁である。



図－10 三次元解析モデル

Fig.10 3D analysis model

3.2.2 地盤条件

地盤の応力-ひずみ関係は弾完全塑性体で，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。なお，解析は全応力解析とした。地盤物性値のうち，弾性係数および強度定数は実験対象サイトのボーリングコアを用いた三軸圧縮試験の結果に基づいて設定した。ただし，弾性係数は N 値の分布を参考にして深度依存性を考慮した。静止土圧係数はリング K_0 圧密試験および K_0 三軸圧密試験の結果に基づき設定した。なお，地下水位以下では水圧を考慮した。表-1 に解析で用いた地盤物性値を示す。

表-1 地盤物性値

Table 1 Ground properties

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.

3.2.3 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，フィールド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）を引き起こす主な要因 [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 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，テール部で削除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。

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解析上の静止土圧の 85%とした。なお，シールド機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 Shell 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。

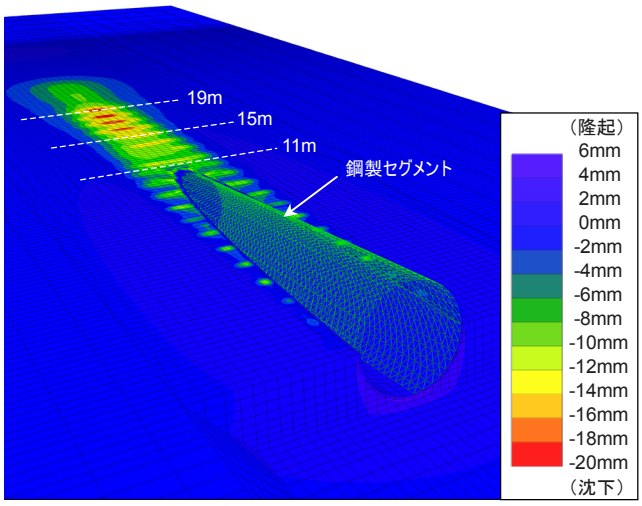
⑤　テールボイドの発生と裏込め注入過程

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，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。

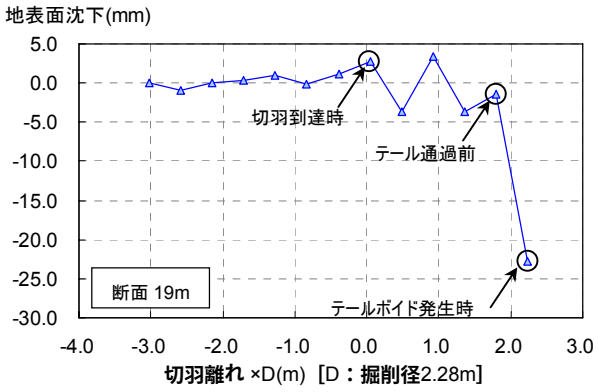
3.3　解析結果

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。



図－11　掘削完了時の地表面沈下コンター（解析結果）

Fig.11 Ground surface settlement at the final analysis step (analysis result)



図－12　シールド直上の地表面沈下の経距変化（計測結果）

Fig.12 Ground surface settlement above the shield center line along tunnel advance (mesurement result)

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。

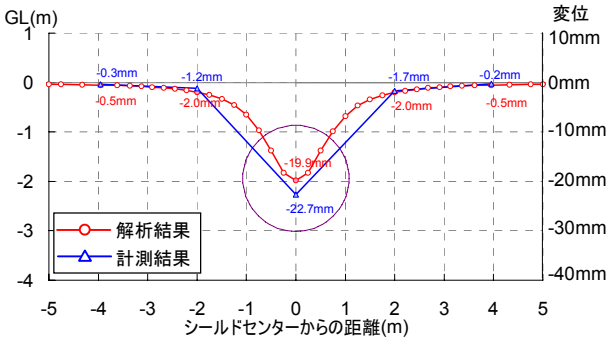
図－14 に示す側方水平変位の計測結果から，切羽が断面 19m を通過した直後ではほとんど変位を生じないことがわかる。一方，テールボイド発生時には，地表面近傍で 2mm 程度の変位が掘削側に生じた。これは，シールド直上の地盤がテールボイド部の空隙によりトンネル内部に落ち込むように挙動したことが原因であると考えられる。三次元逐次掘削解析では，上述の側方水平変位の挙動について，定量的に再現することができた。

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。

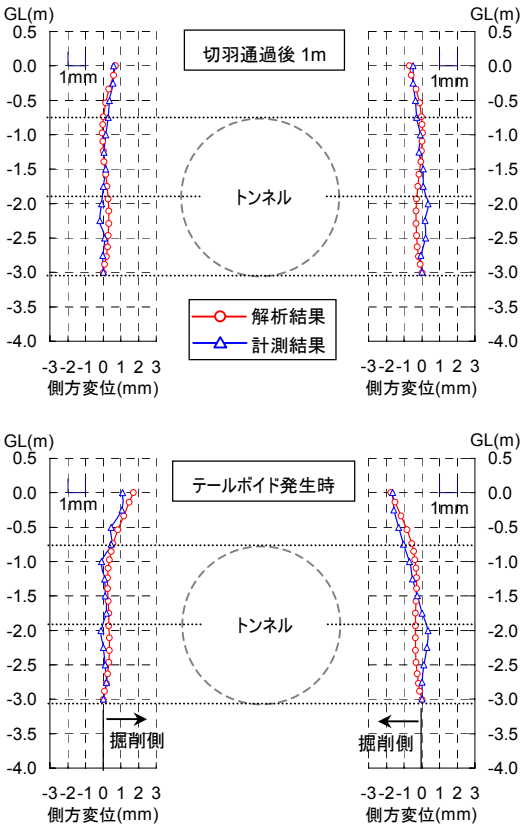
参考文献

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.



図－13 横断面地表面沈下分布（断面 19m）

Fig.13 Distribution of ground surface settlement (cross-section of 19m tunnel advance)



図－14 側方水平変位（断面 19m）

Fig.14 Distribution of horizontal ground displacement (cross-section of 19m tunnel advance)