

# 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

宮川房夫<sup>1</sup>・川口廣<sup>2</sup>・水谷進<sup>3</sup>・吉村和彦<sup>4</sup>・粥川幸司<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 元日本鉄道建設公団東京支社 (〒108 東京都港区芝五丁目33-8)

<sup>2</sup>日本鉄道建設公団東京支社工事第三部 (〒108 東京都港区芝五丁目33-8)

<sup>3</sup>正会員 工修 パシフィックコンサルタント(株)鉄道部 (〒163-07 東京都新宿区西新宿二丁目7-1)

<sup>4</sup>正会員 ハザマ技術研究所技術研究部 (〒305 茨城県つくば市刈間字西向515-1)

<sup>5</sup>正会員 工修 ハザマ技術研究所技術開発部 (〒305 茨城県つくば市刈間字西向515-1)

シールド工法による近接施工では、施工中の周辺の地盤挙動のみならず既設の構造物への影響も把握することが必要である。そこで本研究では、シールド施工による地盤挙動の予測手法の一つとして3次元FEM解析を用いることを検討している。解析では、シールド工事における施工過程のモデル化を行い、更に施工中の地盤変状の主要因と考えられる切羽圧、裏込め注入圧に着目してこれを荷重条件として用いている。ここでは、トンネル離間0.40~0.80mの単線並列泥水式シールド工法で施工された京葉線西八丁堀トンネルについて、本解析手法を適用した3次元FEM解析を行い、その地盤変状について計測結果との比較検討を行った。

**Key Words :** shield driving tunnel, super neighboring construction, 3-Dimensional FEM analysis, excavating process, ground behavior

## 1. はじめに

近年、都市の過密化に伴い地下空間の利用が積極的に進められているが、地下においても鉄道、道路、電力などのトンネル、あるいは地下駐車場や建造物の基礎などが錯綜し、過密化した状態となっている。そこで、今後建設されるトンネル構造物は、これらの既設構造物に近接して施工されることになり、それらへの影響が懸念されるところである。

シールド工法は一般に、周辺地盤や他の既設構造物への影響が少ない工法であるといわれている。しかし、本工法においても周辺地盤への影響は皆無ではなく、地盤は掘削により乱され、なつかつ切羽圧、裏込め注入圧などによって荷重を受けることにより変状を発生する。特に既設構造物との離間が小さいいわゆる近接施工においては、その影響度合いも大きいものと考える。そこで、これら地盤変状の現象を的確に捉え、事前に解析などによって変状度合いを予測し、設計、施工に役立てることが重要となる<sup>1)</sup>。

シールド施工による地盤変状については、過去に多数の研究事例がある。久武ら<sup>2)</sup>は、併設シールド施工において

切羽の進行に伴う3次元的ひずみの変化を、クリープ関数として置き換えて解析する方法を提案している。赤木ら<sup>3)</sup>は、シールド切羽面における地盤の攪乱領域を想定した掘削要素を考慮し、切羽の掘削状況をモデル化した解析を行っている。亀村ら<sup>4)</sup>は、泥土圧シールドにおいてシールド機およびセグメントを、構造部材として考慮した3次元解析を行っている。これらはシールド施工の地盤挙動を3次元的に捉えたものである。一方、地盤挙動の3次元効果を2次元解析に取り入れているものに、山田ら<sup>5)</sup>、中山ら<sup>6)</sup>の研究がある。前者は沖積地盤を、後者は硬質地盤を対象として、それぞれの地盤変状要因を整理しこれを2次元解析に取り入れている。

これらの研究成果は各方面で利用されており、特に近接施工時の地盤挙動、あるいは既設構造物への影響等を予測する上で有用である。しかし、今後の地下空間開発では、今まで以上に近接して、構造物を施工する場合が増加することが予想され、これに対する的確な地盤挙動予測が必要となってくる。

筆者らは、今までにない近接施工の例として、硬質地盤における超近接の単線並列シールドトンネル(京葉線西八

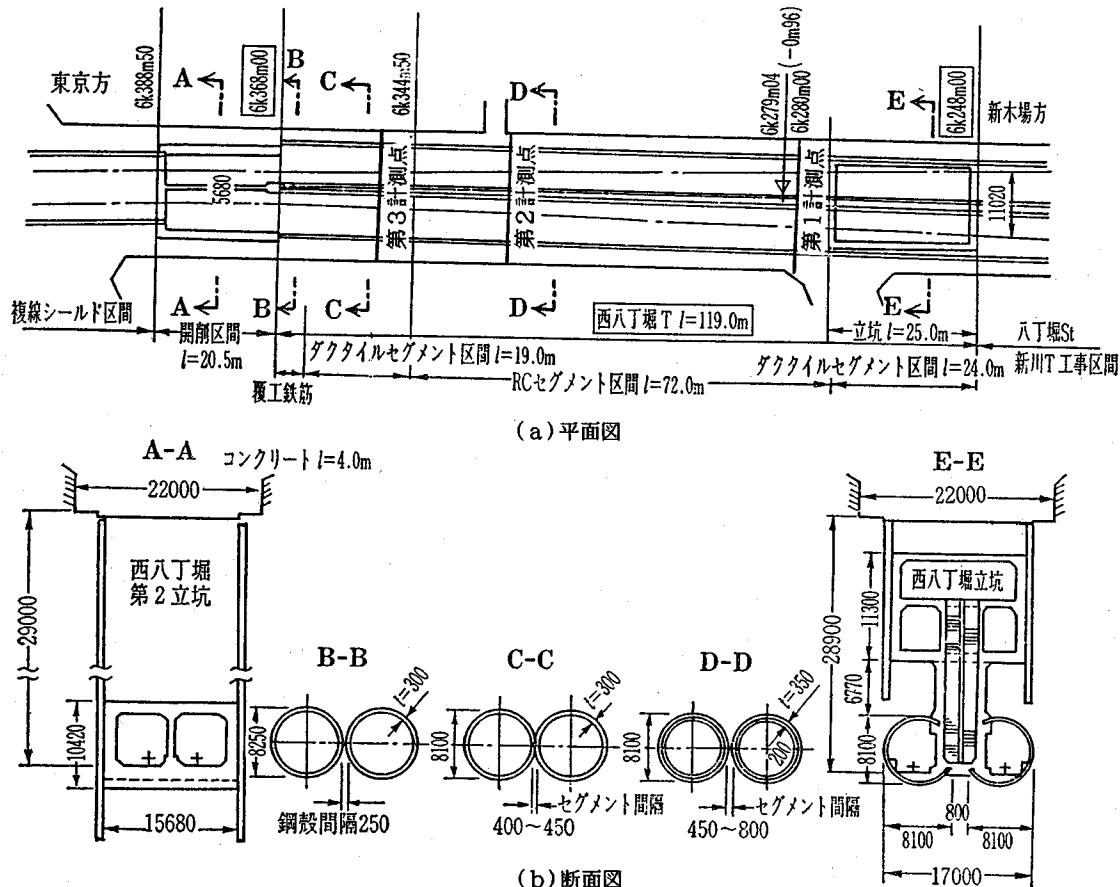


図-1 西八丁堀トンネル全体図<sup>7)</sup>(単位mm)

表土(埋土): Ts  
 沖積層(細砂: As<sub>1</sub>, 砂質シルト: Ac<sub>1</sub>)  
 洪積層(シルト質粘土: Dc<sub>3</sub>, 砂: Dg<sub>3</sub>, 粘性土, 砂質土: Dsc)

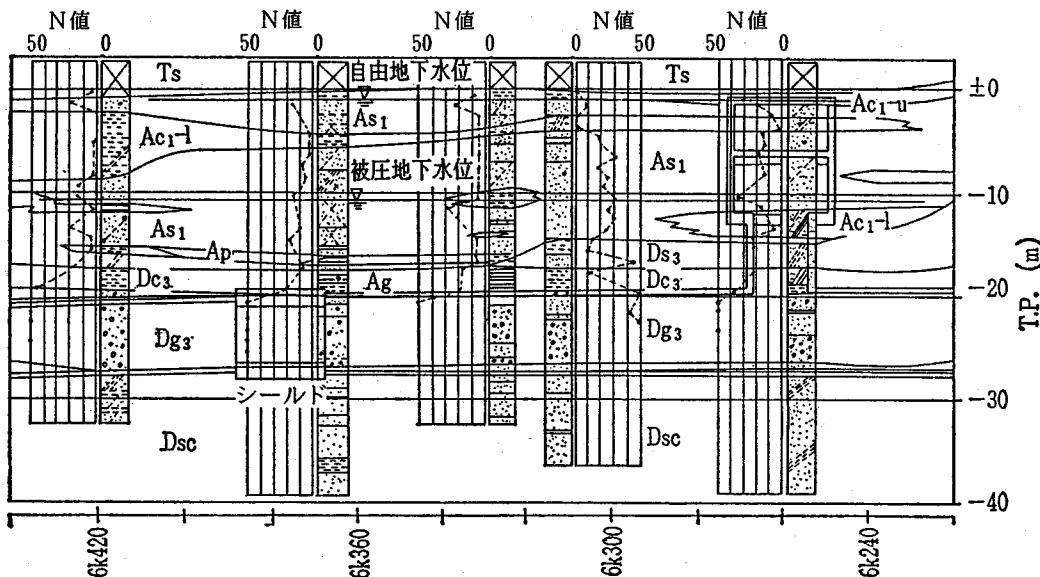


図-2 西八丁堀トンネル地質概要<sup>7)</sup>

丁堀トンネル、シールド径8.10m、トンネル離間距離0.40~0.80m、泥水式シールド工法)の設計、施工に携わる機会を得た。そして、実施工に伴い、セグメントや周辺地盤の変状などについて、詳細な計測を行った。計測の結果、後行トンネルの掘進によって、先行トンネルが縦長に変形するという、従来の設計での考え方(土圧係数の低減、地盤係数の低減あるいは鉛直土圧の割り増し)では説明できないような現象が認められた<sup>7)</sup>。このため、筆者らは、本シールドトンネルのような超近接という特殊な条件下での地盤挙動、あるいは先行トンネルの挙動などを、解析的に表現するために、2次元解析を用いた新しい地盤挙動予測手法<sup>8)</sup>について研究するとともに、新しい考え方を導入した比較的簡便な3次元FEM解析を実施して、地盤変状計測結果との比較、検討を行うことにより、実現象の解明を試みている<sup>9)</sup>。ここで提案する3次元解析法では、シールド機、セグメント、裏込め注入材などのシールド工事における主要と思われる構造部材をモデル化している。さらに、解析における荷重条件として、切羽では泥水圧でなくシールドジャッキの総推力をトンネル断面積で除した切羽圧を、テールボイドでは、セグメント外周面に沿って圧力損失を考慮した裏込め注入圧を採用している。このように、シールド工事における施工過程をできるだけ忠実に、なおかつ簡便に表現した3次元解析を行った事例は、今までに非常に少ないと思われる。

本報では、先ず、西八丁堀トンネルでの現場計測値から、シールドの施工に伴う地盤挙動の傾向を整理した。次に、前述した方法による3次元FEM弾性解析を実施し、解析結果と地盤変状計測値の比較、検討を行い、実現象の解明を行うとともに、離間の極めて小さい場合のシールド工事における新たな知見を示した。

## 2. 西八丁堀トンネル概要および計測結果

### (1) 西八丁堀トンネル概要<sup>7)</sup>

#### a) 線形概要

JR京葉線西八丁堀トンネルは図-1に示すとおり、単線並列シールドから、複線シールドへのすり付け区間に位置している。トンネルは外径8.10mの単線並列泥水式シールドトンネルであり、シールド間の純間隔が延長120mにわたって0.40m~0.80m(シールド機鋼殻間隔は0.25m)の超近接施工となっている。施工は、西八丁堀立坑より向かって左側先行で行った。

#### b) 地質概要

図-2に地質の概要を示す。地質は、地表面下17m付近までは粘性土、砂質土からなる軟弱な冲積層(上部有楽町層)が分布し、その下部は粘性土、砂れき、砂質土からなる洪積層により構成されている。地下水位は、地表面下約20m付近に分布する洪積粘性土(Dc<sub>3</sub>層)を不透水層として、上部の自

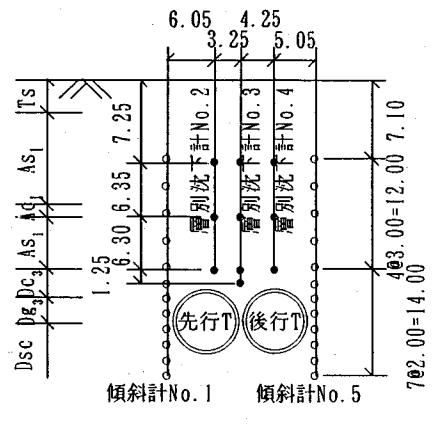


図-3 第3計測点における計測機器配置(単位:m)

由水は地表面下約4mであり、下部の被圧地下水はトンネル施工基面で約17mの被圧水頭を有している。

#### c) 設計方針

シールドトンネルにおける、併設の影響を考慮する方法としては、トンネルの間隔を考慮した土圧係数の低減、地盤係数の低減、あるいは鉛直土圧の割り増し等によって評価する方法があると思われる。「シールドトンネルの設計施工指針(案)<sup>10)</sup>によれば、併設トンネルの影響を考慮する方法として、鉛直荷重を割増しする考え方を用いている。具体的には、トンネル径をDとしてトンネルの離間距離が1D以下、0.5D以上において1~1.5倍の割り増しを考慮した設計鉛直土圧を用いることを述べている。

一方、今回のように、外径8.10mのトンネルに対して離間距離が0.40m(約0.05D)と、極めて小さい場合の設計法は確立されていない。そこでここでは、先行トンネルに対する後行トンネルの掘進によって、周辺地盤に緩みが発生することが考えられる。これにより先行トンネルへの鉛直荷重の増加と側方地盤反力の低下が発生し、先行トンネルが横長に変形することが最も不利な状態であると考えられた。セグメントの設計および対策は、このような状態を想定して行うこととした。

#### d) 地盤挙動計測

本トンネルでは、地盤変状およびセグメント関係の計測を3ヶ所で行った。第1計測点(位置6k265m、トンネル離間0.80m)および第2計測点(同6k330m、0.60m)では、主にセグメントの計測を行い、第3計測点(位置6k350m、セグメント離間0.40m)では、セグメントの計測の他に地盤の変状についても詳細な計測を行った。

第3計測点における計測器配置を図-3に示す。層別沈下計は、先行トンネル、後行トンネルの上部および両トンネル間の3測線(合計10点)、傾斜計は先行、後行両トンネルの外側に2測線(合計24点)に設置した。なお、第3計測点

における地盤変位計測の開始は、昭和63年9月21日であり、平成元年3月29日まで継続した。

#### e) 施工状況

先行トンネルは、昭和63年8月27日から10月1日までの66日間で115リングを、後行トンネルは同年10月13日から11月25日までの42日間で同じく115リングを完了した。なお、西八丁堀第2立坑到達部では、シールドの到達防護として凍結工法が採用されている。先行トンネルの凍結開始は8月8日、後行トンネルのそれは10月12日、凍結終了は12月27日であり凍結期間は約5ヶ月であった。

シールドの掘進状況は表-1に示すとおりである。切羽泥水圧は、トンネル中心における水平土圧(土被り圧×洪積地盤における一般的な側圧係数 $\lambda=0.4$ 程度)にはほぼバランスする値(約0.22MPa)で施工を行った。

裏込め注入は、シールドテール脱出位置にあるリングの2リング後方で、吐出口管理上限値を0.59MPaとして、トンネルの天端付近から行った。

#### (2) 地盤変位計測結果および考察

##### a) 地盤変位計測値の補正

計測結果の整理については、今回特にシールドの掘進に伴う地盤変状を把握することを目的とするため、到達立坑付近の凍結工法などによる影響を除くこととした。

先ず、先行、後行両トンネルそれぞれの施工に対して、シールド機が第3計測点までの切羽距離-3D(D: トンネル径8.10m)地点に到達した時点での計測値を0とし、切羽距離2Dまでの計測値を補正した。次に、後行トンネル施工による補正計測値を、先行トンネル完成(切羽距離2D)時点での補正計測値から累積することによって、全体の地盤変位を算出した。

以上の方法で整理した第3計測点での傾斜計、層別沈下計による地盤変位計測結果を図-4～7に示す。なお、図で用いている切羽距離は、トンネル径D=8.10mを用いて表しているが、切羽距離1Dとは、本工区で用いられたシールド機長が6.5mであることから、計測地点がほぼシールドテールに位置する時の切羽距離となる。また、切羽距離2Dとは、切羽が到達立坑に到達した時の切羽距離となる。

図-4では、傾斜計による地盤の水平変位分布を(a)先行トンネル施工時、(b)後行トンネル施工時について、それぞれ切羽位置との関係で示している。図の横軸は変位量、縦軸は深度を表している。図-5では、先行、後行両トンネルの施工に伴う、それぞれのトンネルに近い方の傾斜計計測値(先行では傾斜計No.1、後行では傾斜計No.5)を、横軸に切羽距離、縦軸に水平変位量で示している。図-6では先行、後行両トンネルの施工に伴う、層別沈下計による沈下の分布状況を示している。ここで横軸にそれぞれの計器(No.2～4)の位置関係を、縦軸に沈下量(正:沈下)で示している。また図-7では、図-5の場合と同様に各トンネルに近い方の

表-1 シールド掘進状況

主要な施工条件	先行シールド	後行シールド
切羽泥水圧 (MPa)	約0.19 (0.19)	約0.22 (0.22)
ジャッキ推力 (kN)	平均21,600 (25,500)	平均26,500 (24,500)
掘削土量 (m <sup>3</sup> /リング <sup>*</sup> )	57.0～74.0 (64.0)	57.0～75.0 (63.0)
裏込め注入圧 (MPa)	約0.29 (0.29)	約0.29 (0.29)

( ): 第3計測点近傍における値

層別沈下計計測値(先行では沈下計No.2、後行では沈下計No.4)を、横軸に切羽距離、縦軸に沈下量で表している。次に、先行、後行各トンネルの施工時における地盤変位の状況について考察する。

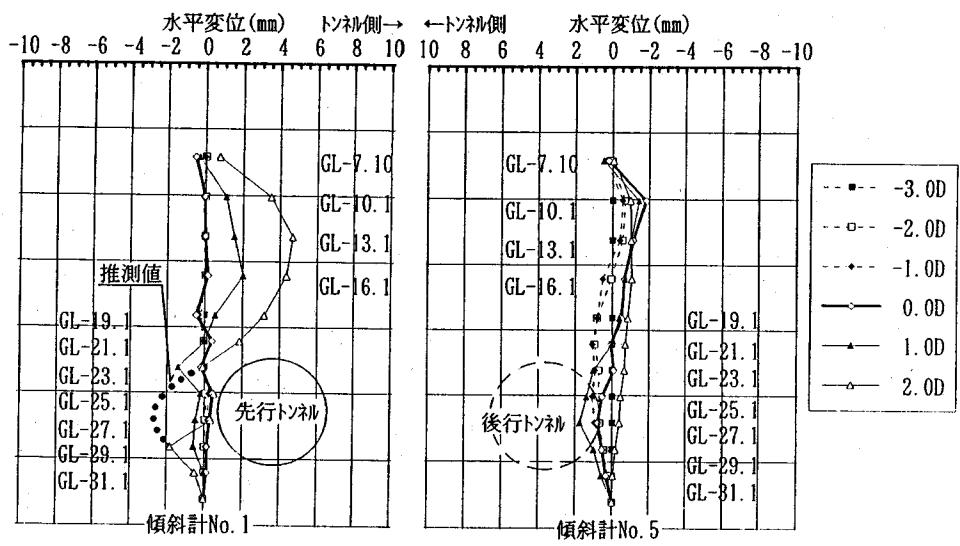
##### b) 先行トンネル施工時

先ず図-4(a)に示した先行トンネル施工時では、傾斜計No.1位置において、切羽が第3計測点に到達するまで地盤変位はほとんど発生しておらず、切羽通過後にトンネル上部においてトンネル側に最大4.7mm(GL-13.1m測点)の変位が発生している。トンネル側部においてはGL-29.1m測点で地盤側へ1.8mmの押し出しとなっているもの、GL-25.1、-27.1m測点においては、切羽の通過に伴う地盤側への押し出しはほとんど発生していない。計測ではこのような地盤変位となっているが、ここではGL-25.1、-27.1m測点を除いて、各測点を滑らかに結んだ変位曲線(●で示した曲線)を推測した。これは、後述する後行トンネル施工時の傾斜計No.5のトンネル側部変位(図-4(b))において、両トンネルの施工条件が大きく変わらないにも関わらず、切羽通過後に約4mm地盤側へ押し出されていることなどから判断したものである。一方、後行側の傾斜計No.5位置では、僅かながらトンネル上部で地山側へ1.9mm(切羽到達時、GL-10.1m測点)、トンネル側部でトンネル側へ1.8mm(切羽距離1D、GL-27.1m測点)の変位を発生している。ただし、シールド機の通過後には、トンネル上部では約1mm、トンネル側部では約2mmの戻りが認められる。

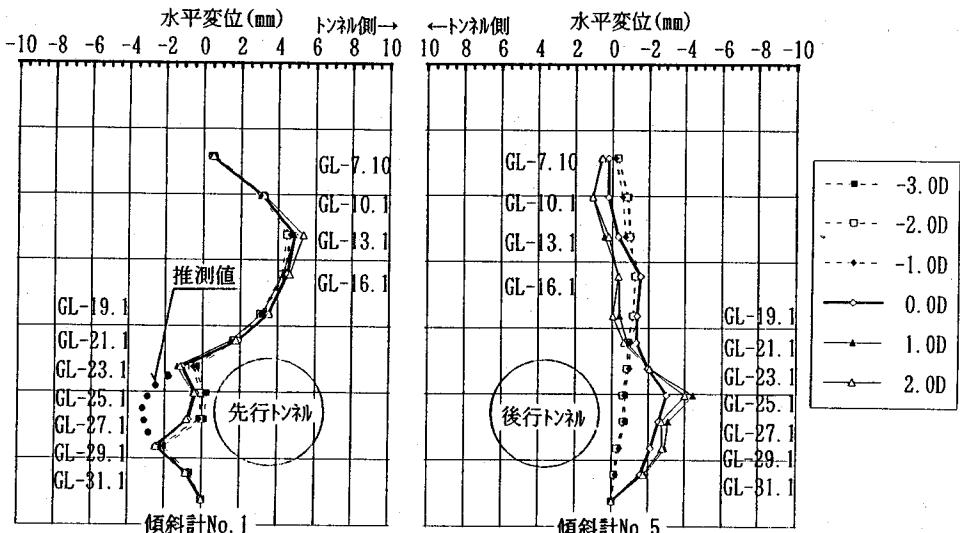
次に、図-6(a)に示す地盤内の沈下分布では、先行トンネル直上の層別沈下計No.2位置でのみ沈下を発生しており、No.3、4ではほとんど沈下を示していない。No.2におけるこれらの沈下は、図-7(a)に示したように切羽の到達時以前ではほとんど沈下しておらず、切羽の通過に伴って最大6.5mm(GL-19.9m測点)まで沈下している。

##### c) 後行トンネル施工時

後行トンネル施工時では、先行時と若干異なった地盤の変状を示した。先ず、図-4(b)および図-5(b)で示した傾斜計No.5での地盤水平変位では、切羽距離-0.5Dまでは大きな変状はないものの、それ以降、トンネル上部ではトンネル側へ、トンネル側部では地山側への変位を発生した。

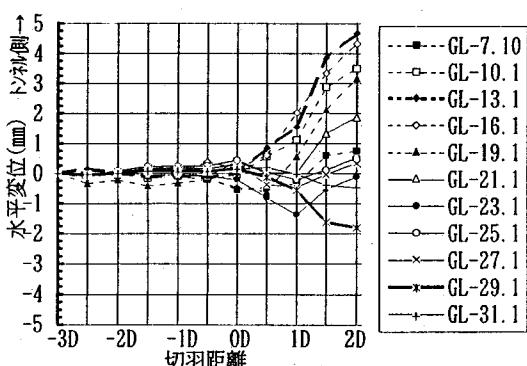


(a) 先行シールド施工時

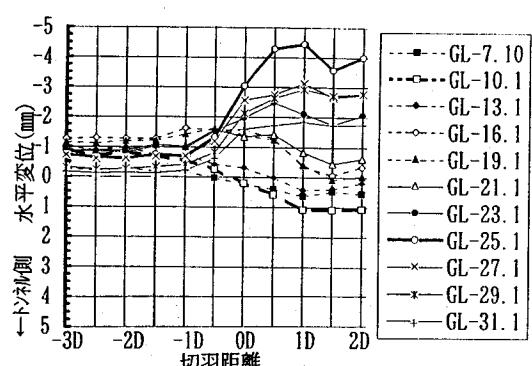


(b) 後行シールド施工時

図-4 傾斜計による地盤水平変位の計測結果(D:トンネル径8.10m GL:深度m)



(a) 先行シールド施工時(傾斜計No. 1)



(b) 後行シールド施工時(傾斜計No. 5)

図-5 傾斜計による地盤水平変位の経時変化(D:トンネル径8.10m GL:深度m)

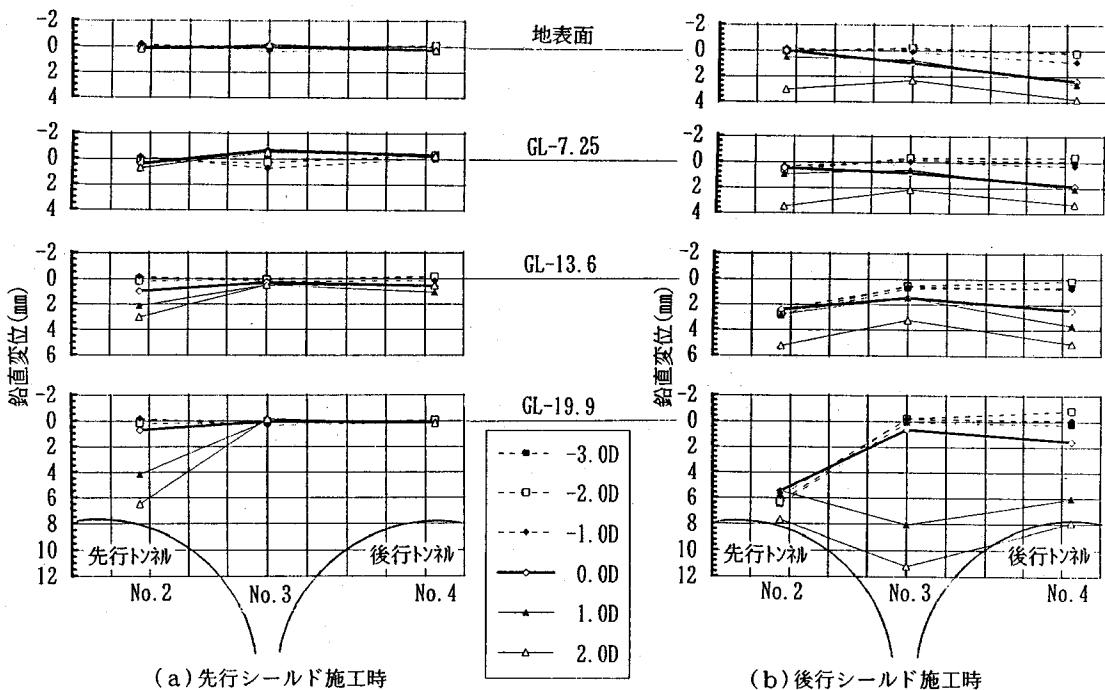


図-6 層別沈下計による地盤鉛直変位の計測結果(D:トンネル径8.10m GL:深度m)

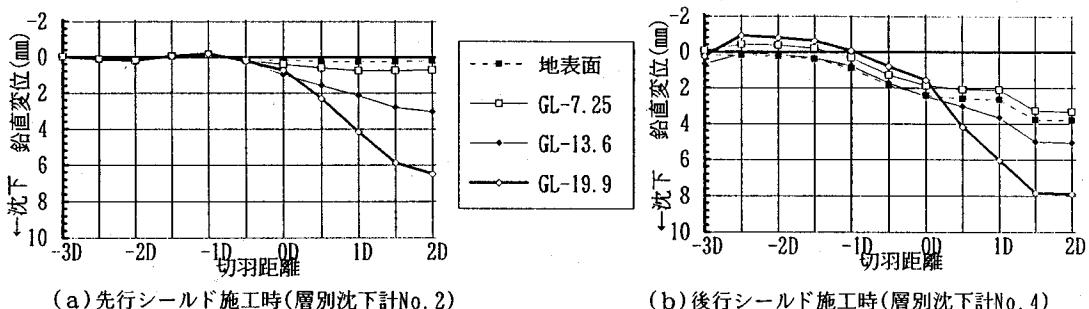


図-7 層別沈下計による地盤鉛直変位の経時変化(D:トンネル径8.10m GL:深度m)

特に、トンネル側部のGL-25.1m測点では、切羽到達時では3.0mm、切羽距離1Dでは4.3mmの変位を示している。これは、シールド機の切羽圧によって、地盤が側方へ押し出されたものと考えられる。一方、トンネル上部では、シールド機の通過に伴いトンネル側への変位を発生するものの、変位量はGL-10.1m測点で2.0mmと小さく、先行シールド施工時のGL-13.1m測点でのトンネル方向への変位量4.7mmの半分以下となっている。なお、先行トンネル側の傾斜計No.1では後行トンネル施工に伴う、地盤水平変位の増加はほとんど認められていない。これは、後行トンネル施工時の影響が先行トンネルによって遮断され、地盤側へ伝達されないことが要因の一つであると思われる。

次に、図-6(b)に示した地盤の沈下分布では、後行トンネル上の層別沈下計No.3、4はいずれも沈下を示し、特に両トンネルの間となるNo.3、GL-19.9m測点では、最終的に

11.2mmの沈下を示した。一方、図-7(b)に示したNo.4における沈下の経時変化では、切羽距離-3Dから若干隆起しているものの、切羽距離-1Dから沈下を発生し、特に切羽到達時以降は、トンネル直上のGL-19.9m測点での沈下量が急激に増加しており、最終7.9mmの沈下となった。

#### d) 計測結果のまとめ

先行トンネル施工時について、切羽前方ではほとんど変位を発生していないが、切羽通過後は特にトンネル上部で沈下および切羽に向かって、右方向への水平変位が確認された。またトンネル側部での地盤の水平方向挙動については、計測値自体は小さいものの、その変位分布の形状、および、後行トンネル施工時の傾斜計No.5に示された水平変位の傾向から、シールド通過後は約3mm程度地山側へ変位していることが推測される。

先行トンネルの施工により、緩んだと考えられる地盤中

で施工した後行トンネルについては、切羽前方約0.5Dより変位が発生し始めている。トンネル上部では、先行トンネル施工時ほど地盤の水平変位は大きくないものの、トンネル側部の水平変位では、切羽到達時に側方へ大きく変位している。すなわち、後行トンネルの場合、既に緩んだ地盤に対して、切羽圧によって切羽前方地盤が押し広げてられたような状況になっていると考えられる。

以上のことから、本トンネルにおける地盤挙動の検討では、切羽の通過後だけでなく、切羽前方についても考慮する必要があるものと判断された。

### 3. シールドの施工過程を考慮した3次元FEMによる地盤変状解析手法の提案

#### (1) 解析の方針

シールド工法における周辺地盤の変状要因は、以下のように分類される<sup>5), 6)</sup>。

##### 切羽部

- ・切羽圧の不釣り合いによる地盤沈下、隆起
- ・掘削土取り込み量の多少による地盤沈下、隆起

##### シールド機部

- ・シールド掘進によって発生する地盤とシールド機間の摩擦による地盤の乱れ

##### テールボイド部

- ・テールボイド部での応力解放による地盤沈下
- ・裏込め注入の注入圧、注入量および硬化の時期

##### シールド機後方

- ・地盤と一体化した覆工体(セグメント)の変形

これらの内、切羽部における切羽圧およびテールボイド部での応力解放、裏込め注入圧は、それぞれ切羽前方およびシールド機後方において、特に地盤変状の支配的な要因であると考えられる。すなわち、切羽前方においては、切羽圧の大小により地盤が周辺へ押し出されたり、あるいはシールド機側へ変状したりする。このことは、本研究で取り扱う超近接シールドにおいて、後行トンネルの施工が先行シールドに及ぼす影響の内、特に問題となる項目であると考える。また「トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案)」<sup>11)</sup>によれば、シールドテール部では、テールボイドの発生により、地盤応力が解放され沈下が発生するが、全沈下量に対するテールボイドでの沈下量の割合は、粘性土で平均54.4%、砂質土で平均87.2%と報告されており、シールド掘進に伴う地盤変状の無視し得ない影響要因であると考える。したがって、地盤変状に関する解析においては、切羽部における切羽圧およびテールボイド部における裏込め注入圧は考慮すべき問題であると考える。

一方、シールド工法はシールド機による地盤掘削の後、後方でセグメントの組み立て、およびセグメントと地盤の空隙に裏込め材による充填が行われ、これらが覆工体とな

り地盤と一体化して挙動することになる。既往の研究ではセグメントのみならず、裏込め注入材までを構造部材として考慮した3次元解析の例はない。

そこで、ここでは次節で述べるようなシールドの施工過程を考慮したモデル化を行い、前述した切羽圧、裏込め注入圧を荷重条件として用いた3次元FEM解析を提案することとした。

#### (2) 施工過程のモデル化および解析手順

##### a) 施工過程のモデル化

シールド工法では、トンネルの掘進とともにシールド機後方でセグメントの組み立て、裏込め材の注入が行われ、裏込め注入材が硬化して地盤と覆工体が一体となる。本解析ではこれらを図-8に示すようにモデル化した。

モデルでは地盤の他に、シールド機、セグメント、硬化した裏込め注入材を有限要素としてモデル化した。

シールド機は、地盤、セグメントなどと比較して非常に変形し難いものと考えられるため、円筒形状の剛体と仮定した(面板はモデル化していない)。なお、解析の対象とする西八丁堀トンネルにおけるシールド機は、外径8.10mに対してシールド機長6.5mとなっているため、モデルではシールド機長を7mとしている。

セグメントは、その横断面内の曲げ剛性に関して継手部での曲げ剛性の低下<sup>12)</sup>を考慮して、単体での曲げ剛性にその有効率 $\eta=0.6$ を用いた一様剛性部材として、シェル要素でモデル化した。なお、モデルでは実際と同様に、セグメントはシールド機テールで組み立てられ、その位置から後方に設置するものとした。

裏込め注入は、本トンネルではシールドテール脱出後2リング目で注入が行われている。そこでモデルでは、2リング分(2m)のテールボイドを設定し、3リング目以降にセグメントと地盤の間に硬化した裏込め注入材を設置することとした。すなわち、ここで裏込め注入材は、実際と同様に、セグメントと地盤を連結して一体化する役目を有している。

##### b) 解析手順

解析手順は以下の通りである。初期応力解析によって地盤に初期応力を発生させた後、実際の1リング(ここでは1m)毎の掘進を行うものとする。各掘進ステップでは、切羽前方の地盤要素1掘進分を削除する。これと同時に、掘進長分のシールド機要素の付加、およびテール部での要素の削除を行い、セグメント1リング分の組立、裏込め注入材要素の付加を行う。

シールド機の掘進では、シールド機要素の移動によって表現する方法と、本方法のようにシールド機要素の前方での付加、テール部での削除によって掘進を表現する方法が考えられる。前者の場合、地盤とシールド機の間の摩擦に関する挙動を比較的単純に表現することが可能であり、な

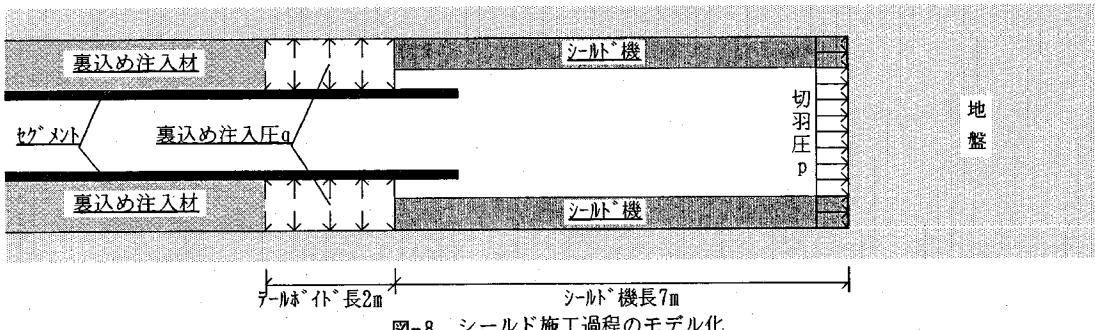


図-8 シールド施工過程のモデル化

おかつ、シールド機が移動するという状況を視覚的に表現できる利点がある。しかし、地盤とシールド機間についての接触問題となるため、その定式化が複雑なことや解析時間が多くのくなるという問題がある。これに対して後者の方法では、1リング掘進時点の解析となる、あるいは地盤とシールド機の摩擦について、別途モデル化を考える必要がある、などの検討事項があるものの、取り扱いが比較的容易である。

荷重条件については、各掘進ステップにおいて切羽圧  $p$  と裏込め注入圧  $q$  を用い、これらを所定の位置に載荷することとした。

シールド機を推進するシールドジャッキの総推力は、主に泥水圧、面板押圧力、シールド機周面摩擦力の和になると考えられる。したがって一般的には、シールドジャッキの総推力は、泥水圧と面板押圧力の和である切羽圧と、シールド機周面摩擦力の2種類を考えるところとなる。一方今回のような泥水式シールドの場合、中山ら<sup>6)</sup>は、地盤とシールド機周面の間に泥水が回り込むことによって、摩擦力が小さくなると予想している。また、森ら<sup>13)</sup>は外径10m級の泥水式シールドの場合、シールド機総推力約38,000kNのうち、シールド機と地盤の摩擦抵抗などは約8,600kN(約2割)であり、ジャッキ総推力の約8割が切羽での押え圧として作用していると報告している。これらのことから泥水式シールドにおいては、施工時荷重による周辺地盤への影響を考えた場合、シールド機周面摩擦力による影響は、切羽圧による影響と比較して小さいものと考えられる。

以上のこと考慮して、ここではシールドジャッキの総推力を全て切羽圧に置き換える、という仮定を立てることとした。しかしながら、解析においてシールド機周面摩擦力の地盤への影響の程度を概略把握しておくために、簡単なモデルを用いて試算を行うこととした。試算は、地盤のみの素堀り状態を仮定した円形半断面モデルを考え、①シールドジャッキの総推力が、全て切羽圧として切羽に作用した場合と、②シールドジャッキの総推力の内、1/2を切羽圧、1/2をシールド機周面摩擦力とした場合、の2種類について行い、地盤変状の結果を比較した。

その結果、天端位置などのトンネル極近傍では地盤変状

に若干の差があるものの、マクロ的に捉えた場合にはほとんど差がなかったことから、実用上、モデル化に際しては、シールドジャッキの総推力を全て切羽圧に置き換えるても良いものと考えた。したがってここでは、切羽圧  $p$  として、シールドジャッキの総推力を、切羽面積で除した等分布荷重値を用いることとした。

テールボイド部では、裏込め注入圧を地盤側およびセグメント側に作用させることとした。なお、天端注入の場合、裏込め注入圧のセグメント外周面に沿った圧力損失が想定されるが、ここでは大阪での地下鉄シールド工事における実測例<sup>14)</sup>を参考として考慮するものとした。

#### 4. 西八丁堀トンネルを模擬した3次元FEMによる地盤変状解析

ここでは、3章で提案した3次元FEMによる地盤変状解析手法を用いて、2章で述べた西八丁堀トンネルを例とした3次元FEM解析を試みる。

解析手順として、先ず単円シールドの場合を想定して、単円モデルを用いた解析を行い、西八丁堀トンネルでの先行トンネル施工時の地盤変状計測結果と比較することとした。次いで、単線並列シールド超近接施工をモデル化した解析を行い、地盤変状計測結果と比較するとともに、後行トンネルの掘進に伴う、先行トンネルへの影響について考察した。

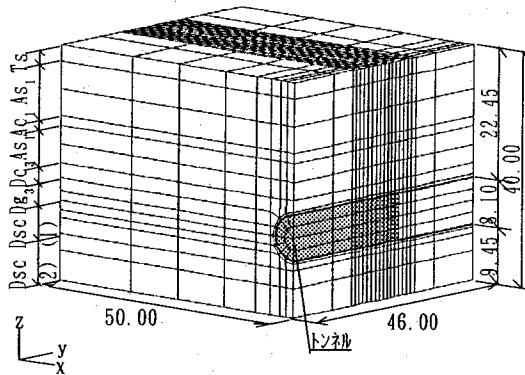
##### (1) 単円シールドを想定した3次元FEM解析

###### a) 解析モデルおよび解析方法

図-9に、単円シールドを想定した解析モデルを示す。

(a)ではモデルの鳥瞰図を、(b)ではモデルの境界条件、トンネル側部での解析結果出力位置を示している。

モデルの作成においては、西八丁堀トンネルにおける線形条件および地盤条件などを考慮した。モデルは、トンネル径8.10mの半断面モデルであり、土被り22.45m、鉛直下方約1.2D:9.45m(D:トンネル径)、トンネル側方約1.6H:50m(H:トンネル下端深度約30m)<sup>15)</sup>、トンネル軸方向46mを解析領域とした。モデル端面の境界条件はローラー支床とし



(a) 単円解析モデル全体図

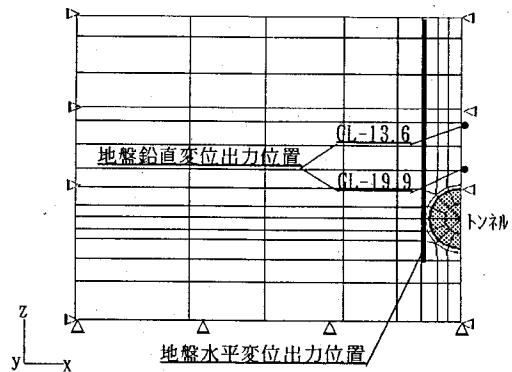


図-9 単円解析モデル(単位:m)

た。

表-2に、解析に用いた地盤、セグメント、裏込め注入材の材料物性値を示す。地質構造は前述した西八丁堀トンネルの周辺地盤<sup>7)</sup>を模擬した。地盤の弾性係数については、砂質土ではN値や孔内水平載荷試験(LLT)結果から総合判断して設定した。また、粘性土では $E=E_{50}$ ( $E_{50}$ :一軸圧縮試験による変形係数)を用いた。セグメントは単体の曲げ剛性に継手部での剛性低下を考え、有効率 $\eta=0.6$ を考慮するものとした。

解析では、モデル中程まで一括掘削を行い、その後、図-8に示した方法で1掘進(1m)づつの逐次掘削を行った。図-8における切羽圧 $p$ については、施工時のジャッキ総推力(24,500kN)を切羽面積(51.53m<sup>2</sup>)で除した値の等分布荷重(0.48MPa)とした。

裏込め注入圧 $q$ については、注入ポンプ突出口での計測値は0.59MPaであるが、注入管内の圧力損失などを考慮して、天端での注入圧には0.29MPaを用いることとした。さらに、トンネル外周面での注入圧分布については、裏込め注入材が天端からの注入によってトンネル全周に行き渡る際に、セグメント外周面などとの摩擦などによって発生すると思われる圧力損失を考慮することとした。トンネル外周面に沿った裏込め注入圧分布の実測例は、非常に少ないが、大阪での地下鉄シールド工事における実測例<sup>14)</sup>を参考として、裏込め注入圧を天端0.29MPa、トンネル側部0.20MPa、トンネル底部0.10MPaと仮定した。

解析結果の整理では、各掘進ステップ間の地盤変位の増分値に着目し、それが収束に達した時点で正しい変位増分が得られたものと判断し、それをもとに切羽の進行を考慮して重ね合わせることによって算出するものとした<sup>16)</sup>。

#### b) 解析結果および考察

図-10に、トンネル側部の水平変位比較結果を示す。(a)では、切羽距離-2D(切羽到達前)、0D(切羽到達時)、2D(切羽通過後)時点での水平変位分布を縦軸深度、横軸変位量で示している。

表-2 材料物性値<sup>7)</sup>

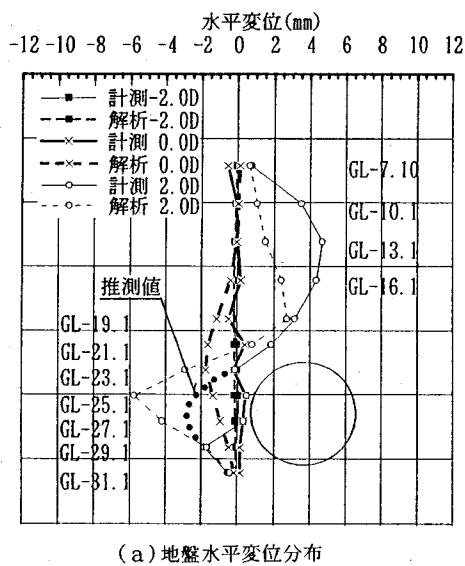
材 料 項 目	弾性係数 $E$ (MPa)	$\phi$ アソシ リ	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	
沖 積 層	表土Ts	3.92	17.64	
細砂As <sub>1</sub>				
砂質シットAc <sub>1</sub>				
洪 積 層	シット質粘土Dc <sub>3</sub>	19.60	0.45	17.64
砂礫Dg <sub>3</sub>	98.0			
シット混り砂質土Dsc (1)	$1.47 \times 10^2$	0.30	19.60	
シット混り砂質土Dsc (2)	$1.47 \times 10^3$			
セグメント	$1.67 \times 10^5$	0.30	147kN/リンク*	
裏込め注入材	$2.94 \times 10^2$	0.30	17.64	
シールドマシン	無限大	0.49	2,940kN**	

\*): セグメント1リンク当たりの重量を示す。

\*\*): シールド機の総重量を示す。半断面モデルでは1,470kNを用いた。

切羽到達時では、地盤変位はほとんど発生していないものの、解析では特にトンネル天端付近で地盤を押し広げるような分布となっている。これは、解析において切羽圧としてシールドジャッキの総推力を用いたためであると考える。

切羽通過後では、トンネル上部では計測、解析ともにトンネル側に変位する傾向が見られるが、変位量としては、計測値の方が大きいものとなった。実地盤においては、前述した図-4(a)傾斜計No.5においてトンネル上部で、僅かながら地盤側に変位していることからも推定されるように、トンネル上部では主に切羽に向かって右方向に地盤が変位している。このことから実施工においては、シールドジャッキの動作パターンによる、切羽圧の左右のアンバランスや裏込め注入圧分布のアンバランスなど、厳密には施



(a) 地盤水平変位分布

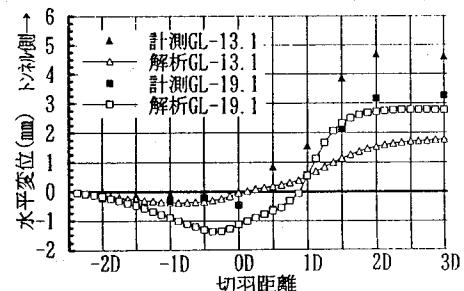
図-10 先行トンネルによる地盤水平変位の計測解析結果(D: トンネル径8.10m GL: 深度m)

工条件が左右対称ではなかったと考えられる。これに対して解析では、半断面モデルを採用しており、地盤条件や荷重条件などが、トンネルの左右において対称となっており実際の施工条件を厳密には表していない部分がある。この結果、解析値の方が計測値よりも小さくなつたものと考えられる。

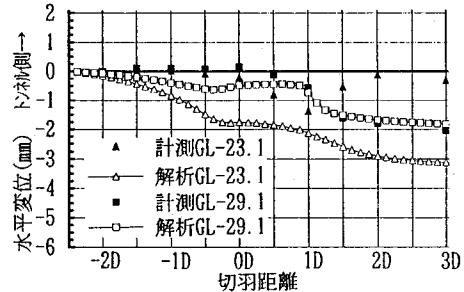
一方、トンネル側部においては、解析では地盤側に押し出される傾向を示している。計測においては、変位は記録されていないものの、2章2節で示したように変位分布としては図中に●で示した推測値のような分布になると考えられ、傾向的にはほぼ一致しているものと思われる。ただし、その変位量は解析では約6mmと大きくなっている。これは、地盤の沈下により覆工体が鉛直方向に縮む形となりその結果、水平方向に押し出されたためであると考えられる。

(b)、(c)では代表的な測点での地盤水平変位の経時変化を、横軸に切羽距離、縦軸に変位量で示している。これによれば切羽通過後において、GL-13.1, -23.1m測点で計測値と解析値はあまり一致していないものの、GL-19.1, -29.1m測点ではよく一致しているものと思われる。

図-11に、図-9(b)で示したトンネル上部での鉛直変位の経時変化の比較結果を示す。計測では、GL-19.9m測点で切羽通過後で6.5mmの沈下であった。これに対して解析では、テールボイド部で約10mm、セグメント、裏込め注入材の覆工体部分で約7mmの沈下を生じた。これは、テールボイド部において裏込め注入圧を0.29MPaと、地盤応力の0.39MPa



(b) トンネル上部における地盤水平変位の経時変化



(c) トンネル側部における地盤水平変位の経時変化

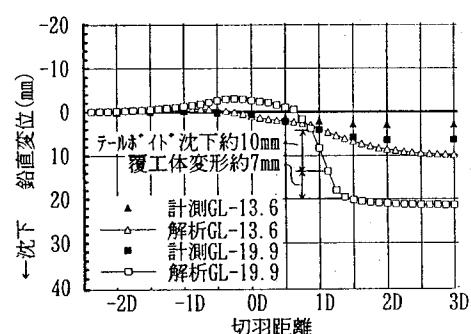


図-11 先行トンネルによる地盤鉛直変位の計測解析結果(D: トンネル径8.10m GL: 深度m)

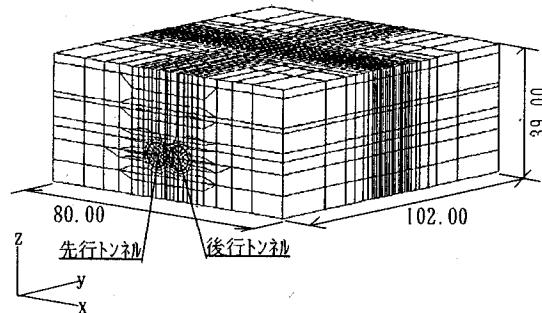
よりも小さく設定したことが原因として考えられる。さらに本解析では、セグメントの剛性に設計で用いる曲げ剛性有効率 $\eta=0.6$ を用いたが、本解析のような場合には、セグメントの曲げ剛性を解析上、大きくとる必要があるものと考えられる。このように沈下に関しては、絶対値は異なるものの、テールボイド部で大きく沈下するという傾向は概ね表現されたものと思われる。

以上のことから、実施工における計測結果の特殊性を考慮すれば、解析は概ね実際の地盤挙動の傾向を表現しているものと考えられた。

## (2) 単線並列シールド超近接施工の3次元FEM解析

### a) 解析モデルおよび解析方法

図-12(a)に単線並列シールドの場合の解析モデル全体



(a) 解析モデル全体図

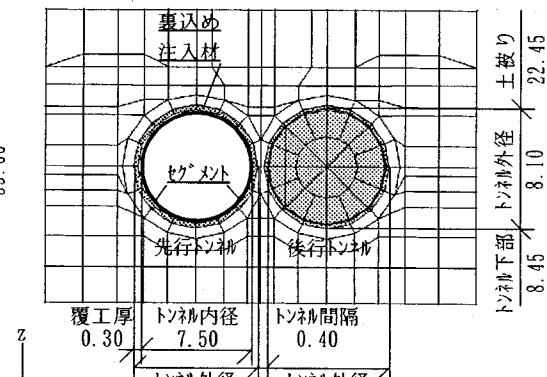


図-12 単線並列シールド解析モデル全体図(単位m)

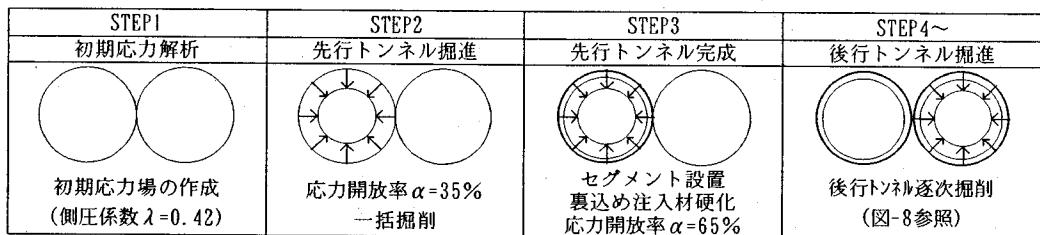


図-13 単線並列シールド解析における解析手順

図を、(b)にトンネル近傍の詳細図を示す。モデルは全断面モデルであり、解析領域を鉛直方向39m、断面水平方向80m、トンネル軸方向102mとした。掘進方向に向かって左側が先行トンネル、右側が後行トンネルであり、トンネルの間隔は0.40mとしている。

図-13に解析手順を示す。本来ならば、先行、後行いずれのトンネルにおいても、図-8で示した逐次掘削解析を行う必要があると考える。しかし、ここでの解析の目的が、後行トンネルの掘進による先行トンネルへの影響、および周辺地盤の変状を把握すること、および解析時間の短縮を図ることから、ここでは先行トンネルについてはシールドの掘進過程を考慮せず、一体でトンネルが構築されるものと仮定した。

解析は3次元で行うが、先行トンネルの構築まではトンネル軸方向に同一の作業を行うため、基本的に2次元平面ひずみ問題と同一となる。先ずSTEP1において、初期応力解析を行った後、STEP2で所定の地盤要素を削除すると同時に、トンネル内面における応力解放を行う。ここで解放する応力について中山ら<sup>6)</sup>は、主にテールボイドの発生に伴う解放応力は、地盤の初期地圧と切羽から回り込む泥水圧との差であるとしている。また、テールボイドの区間長により応力開放率は変化するが、2リング分(2m)で約35%であると報告している。一方、本トンネルでは、裏込め注入材は約半日で固結する材料を用いており、シールド掘進速

度は4リング/日であったため、裏込め注入材の未固結によるテールボイド部は2リング分である。そこでここで用いる解放応力は、中山らの研究成果を基に、地盤の初期応力と泥水圧(ここでは0.22MPa)の差の35%とした。その後、STEP3では、セグメントおよび裏込め注入材を付加した後、残りの応力を解放し先行トンネルが完成したものとした。次に、STEP4以降において後行トンネルの逐次掘削解析を行う。逐次掘削における解析手順は図-8に示した通りである。

荷重条件では、単円モデルでの解析の場合と同様に切羽圧 $p$ は、シールドジャッキ総推力(24,500kN)をトンネル断面積(51.53m<sup>2</sup>)で除した値による等分布荷重(0.48MPa)とし、裏込め注入圧 $q$ は天端0.29MPa、トンネル側部0.20MPa、トンネル底部0.10MPaの値とした。その他、モデルの境界条件、材料物性値等は単円モデルの場合と同様とした。

#### b) 解析結果および考察

図-14、15に、それぞれ後行トンネル施工による地盤水平変位、鉛直変位の計測、解析結果示す。ここでは、切羽距離-2.0D(切羽到達前)、0D(切羽到達時)、2D(切羽通過後)の各時点での変位を、計測実線、解析破線で示している。

先ず、地盤水平変位において、先行トンネル側の傾斜計No.1では、計測、解析ともにトンネル上部ではトンネル側へ、トンネル側部では地山側へ変位している。これらは主に先行トンネル施工による地盤変位であり、後行トンネル

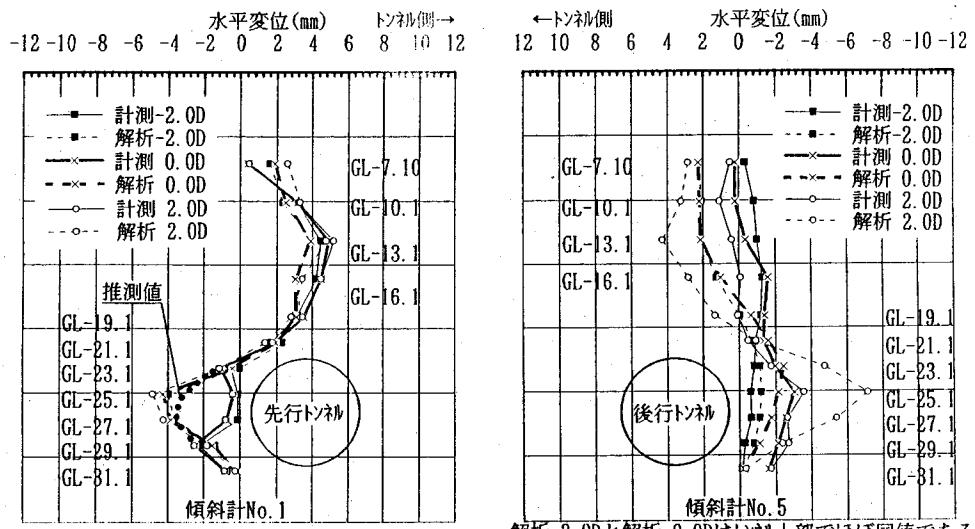


図-14 後行トンネルによる地盤水平変位の計測解析結果(D: トンネル径8.10m GL: 深度m)

の施工による変位の増分は計測、解析ともに小さいものとなっている。ただしトンネル側部においては、前述したように、変位は記録されていないものの変位分布としては図中に●で示した推測値になると思われる。

一方、後行トンネル側の傾斜計No.5においては、トンネル上部で計測値-1.0~1.0mm、解析値2.0~4.0mmと絶対値は異なるものの、後行トンネルの施工に伴う変位増加の傾向が、計測、解析ともに認められる。トンネル側部においては、特に最も変位の大きいGL-25.1m測点で、計測は切羽到達時に1.0から3.0mmへと変位し、その後の変位増分はほとんどないものとなっている。これに対して解析では、切羽到達時に1.0mmから2.0mmへと、若干ではあるが地盤が押し広げられ、切羽通過後に7.0mmの変位を生じる結果となった。これは、切羽後方でセグメントを含む覆工体が鉛直方向に大きく縮み、水平方向に地盤を押す変形になったためと考えられる。

次に、図-15に示した地盤鉛直変位について考察する。後行トンネル直上の層別沈下計No.4における解析値は、地表面を含むいずれの地点においても、切羽到達時までは大きな沈下はないものの、切羽通過後に沈下を生じている。特にGL-19.9m測点では、切羽到達時までは計測、解析ともに2.0mmの沈下量となっているものの、切羽通過後は計測で8.0mm、解析で23mmの沈下となった。これは、主にテールボイドで発生しているものであり、テールボイドにおける地盤の解放応力と裏込め注入圧の大小関係や、トンネル外周面に沿った裏込め注入圧の分布などについて、実際の施工条件がより複雑であり、解析においてこれらを表現しきれなかったことが原因であると考えられる。さらに図-8で示したように、設定したテールボイド直後において、裏込め注入圧によって発生した地盤応力の全てを解放し、セグメ

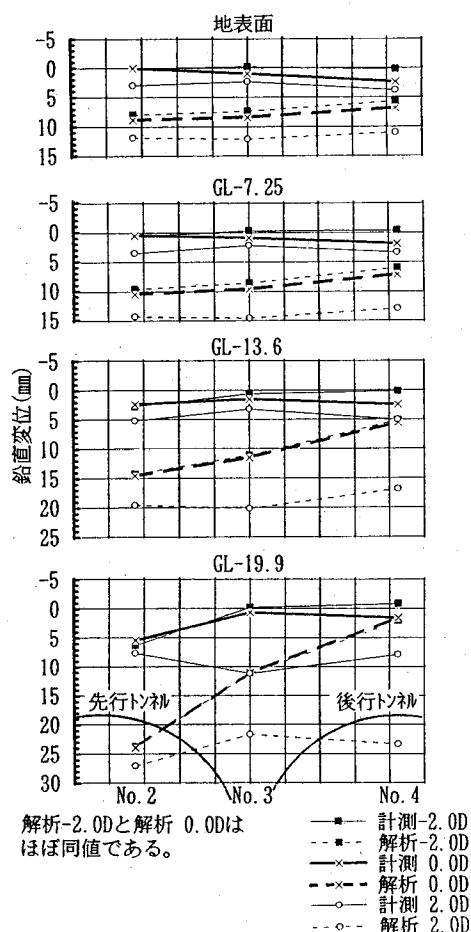


図-15 後行トンネルによる地盤鉛直変位の計測解析結果(D: トンネル径8.10m GL: 深度m)

ントを含む覆工全体に作用するモデル化となっている。一方、実地盤に対して裏込め注入圧は、間隙水圧の上昇と地盤内の有効応力に分担されると想定される。本トンネル周辺地盤のような砂質土地盤においては、間隙水圧の消散が比較的早く発生すると考えられる。その結果、テールボイド直後において解放される地盤応力は有効応力となり、当初の裏込め注入圧によって発生した地盤応力よりは小さくなっていると考えられる。すなわち、解析では覆工体に作用する地盤の解放応力が、過大になっていることも要因の一つと思われる。

一方、先行トンネル直上の層別沈下計No.2においては、計測値はCL-19.9m測点で5.0~8.0mmの沈下量となっているのに対して、解析では切羽到達以前より大きな沈下を示している(24mm)。これは、先行トンネルの一括掘削において設定した応力開放率(35%)が、本トンネルへの適用に際しては大きめであったことが考えられる。しかしながら、後行トンネル施工による沈下量の増分については、計測で2.0mm、解析で3.0mmとなっており、ほぼ同等な沈下レベルとなっている。

図-16には、後行トンネル施工中の先行、後行各トンネルのセグメントに発生しているトンネル横断面方向の曲げモーメントの分布を示す。図では正曲げを赤、負曲げを青で示した。これによれば、先行トンネルの後行トンネル切羽前方では、トンネル天端で正曲げ、トンネル側部で負曲げが卓越しており、変形モードとしては鉛直方向に縮む形となっている。一方、切羽後方では正・負曲げが緩和されており、鉛直方向の縮みが少なくなっている。すなわち、後行トンネルの施工により、先行トンネルは見かけ上、縦長に変形する傾向にあることが、解析において表現されたと思われる。

## 5. 結論

JR京葉線西八丁堀トンネルは、前例のない極めて小さい離間を有する単線並列シールドトンネルである。本トンネルの施工においては、先行トンネルが後行トンネルの施工に伴って縦長に変形するという、従来の設計思想では表現されないような地盤変状傾向が見られた。そこで、このような状況を解析的に表現することを目的として、新しい考え方を導入した3次元FEM解析手法を提案した。

本解析手法では、シールド工事の一連の施工過程を表現するために、シールド機、セグメントおよび裏込め注入材を有限要素としてモデル化した。また、その荷重条件としてシールドジャッキの総推力を用いた切羽圧、およびテールボイドでの裏込め注入圧を採用した。そして、本トンネルをモデルとした3次元FEM解析を実施し、計測結果との比較、検討を行った。その結果、以下のことが判明した。  
・解析では、地盤水平変位について、トンネル上部でト

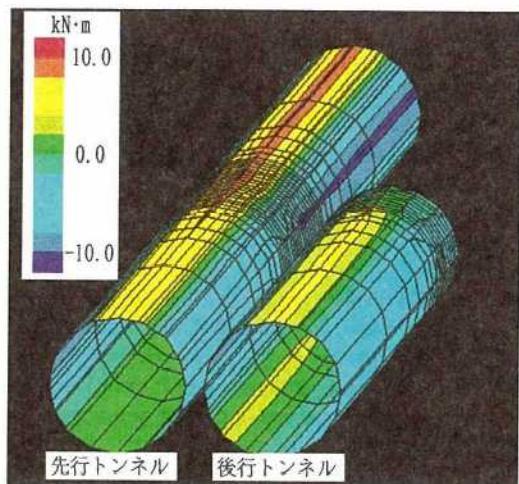


図-16 先行、後行トンネルセグメントの曲げモーメント分布(+:正曲げ)

ネル側へ、トンネル側部で地山側へ変位するという計測と一致するような傾向が表現された。特に、シールドの切羽前方においては、切羽圧にシールドジャッキの総推力を用いたことにより、地盤を前方、側方へ押すような傾向が表現された。この結果、後行トンネルの施工により、先行トンネルが見かけ上縦長に変形するという傾向も表現することができた。

- ・これらのことから、本トンネルのような超近接シールドトンネルにおいては、従来の設計検討に加えて、後行トンネルの施工時荷重(特に、切羽に作用していると思われるシールドジャッキ総推力)による先行トンネルの挙動についても検討する必要があるものと思われる。
- ・一方、鉛直変位については、解析での沈下量は計測でのそれよりも大きいものとなった。これらは、特に解析におけるテールボイドでの地盤の解放応力と、裏込め注入圧のアンバランスによるものと思われるため、今後更なる詳細な検討が必要である。

## 6. おわりに

シールド工事による近接施工では、周辺地盤の変状はもとより、施工時の荷重が地盤を介して、既存の構造物へどのように伝達されるかを把握することが重要となる。今回は、超近接の単線並列シールドトンネルについて、新しい考え方を導入した3次元FEM解析を提案、実施した。そして、施工における計測結果と比較し、概ね地盤変状傾向との一致を見たことから、本解析手法の一応の成果が見られたと思われる。

今後は、ここで判明した課題についてさらに検討を加えるとともに、他のシールド工事の近接施工例と比較するこ

となどにより、本解析手法の妥当性検討を行っていく予定である。また、今回は考慮しなかったが、大断面、小土被り時に問題となるであろう、シールド機と地盤の摩擦による地盤変状などについても検討を加え、本解析手法の更なる高度化を図り、シールドトンネルによる近接施工時の解析手法として、確立を図っていく所存である。

## 参考文献

- 1) 吉田保, 内田賢司: シールドトンネルの新技術(19)15. 近接施工と対策, トンネルと地下, vol22, no. 12, pp. 53-65, 1991.
- 2) 久武勝保, 竹山喬, 伊藤富雄: 双設シールドトンネルによる地表面沈下の算定手法とその現場への適用, 土木学会論文集第332号, pp. 75-83, 1983.
- 3) 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, 土木学会論文集第481号, pp. 59-68, 1993.
- 4) 亀村勝美, 桑田尚史: 泥土圧シールド掘進時の地盤挙動とその3次元数値解析, 土質工学会山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp. 281-284, 1992.
- 5) 山田孝治, 吉田保, 間片博之, 橋本定雄: 沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状とその予測解析について, 土木学会論文集第373号, VI-5, pp. 103-112, 1986.
- 6) 中山隆, 中村信義, 中島信: 泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について, 土木学会論文集第397号, VI-9, pp. 133-141, 1988.
- 7) 川口廣, 久保泰文, 町田茂一, 水谷進: 超近接単線並列シールドトンネルの設計・施工, 土と基礎, pp. 13-18, 1993. 5.
- 8) 宮川房夫, 久保泰文, 町田茂一: ジャッキ推力による影響を考慮したシールド掘進に伴う地盤変位の予測手法, 第49回年次学術講演会概要集第3部(B), pp. 1388-1389, 1994年9月.
- 9) 宮川房夫, 久保泰文, 水谷進, 吉村和彦, 渋川幸司: 泥水式シールド超近接施工の掘進過程を考慮した3次元FEM解析, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻, pp. 63-70, 1994.
- 10) 国鉄建設局・構造物設計事務所編: シールドトンネルの設計施工指針(案), 1983年8月.
- 11) 建設省: トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案), 土木研究所資料第3232号, 1994年2月.
- 12) 土木学会: トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, 土木学会, 1986年6月.
- 13) 森仁司, 森麟, 栗原和夫, 小川雄二: 泥水シールドにおける切羽安定機構について, トンネルと地下vol24, no. 5, pp. 29-35, 1993.
- 14) 草深守人, 吉村和彦: 土圧式シールドの掘進に伴う軟弱地盤の挙動, 間組研究年報, pp. 25-40, 1983.
- 15) 建設省: 大深度, 大断面シールドトンネルの設計・施工技術に関する研究, 平成3年度共同研究報告書, pp. 229-231.
- 16) 伊東淳, 木崎明, 樽井稔: 切羽進行に伴う地山挙動における一考察, 富士総研技法, Vol. 2, No. 2, 1991.

(1994. 12. 7 受付)

## GROUND DEFORMATION FOR SUPER NEIGHBORING CONSTRUCTION OF SLURRY SHIELD TUNNELS AND 3-DIMENSIONAL FEM ANALYSIS CONSIDERING EXCAVATING PROCESS

Fusao MIYAKAWA, Hiroshi KAWAGUCHI, Susumu MIZUTANI, Kazuhiko YOSHIMURA  
and Koji KAYUKAWA

In neighboring construction by shield tunneling method, it is necessary to grasp the ground deformation and the effect to the existing structures within the execution. In this paper, the method of 3-Dimensional FEM analysis considering the excavating process was suggested first. In this analysis, shield machine, segments and back-filling material are modeled and tunnel face pressure and backfill grouting pressure are considered as load conditions. Secondly, as an example of the shield tunnel by super neighboring construction, the FEM analysis was carried out and compared with the result of the measurements.