

地盤変状計測による大断面併設シールドトンネルの掘進管理 (片福連絡線 福島シールドT工事)

Execution Control of Large-Diameter Twin Shield Tunnels by Measurement of Groud Behavior

藤波 巨*
Fujinami Takeshi

安永 正三**
Yasunaga Syozo

鈴木 通正***
Suzuki Mitimasa

鈴木 堂司***
Suzuki Takashi

要 約

近年、市街地における土木工事では、地盤を掘削することによって生じる地盤変状のメカニズムおよび地盤変状が周辺構造物に与える影響を把握し、その対策を立てることが円滑な施工を行う上で不可欠である。都市土木の中でも、シールドトンネル工事では、その延長が長いこともあり、掘進に伴う地盤変状が既設構造物に与える被害については重要な問題となっている。

本報では、片福連絡線 福島シールドT工事で採用した地盤変状計測による掘進管理システムを紹介するとともに、計測施工の結果得られた周辺地盤の挙動に関する考察について述べる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 概要
- § 3. 計測施工による掘進管理計画
- § 4. 地盤変状計測による掘進管理結果
- § 5. まとめ
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

片福連絡線は、片町線京橋駅と福知山線尼崎駅の12.3kmを結ぶ路線であり、平成9年の春開業予定である。

当社は、このうち福島駅（仮称）と野田阪神駅（仮称）

間のトンネル部の建設を担当した。

施工は、単線並列のシールド工法により行ったが、軟弱な地質に加え、以下に示すような厳しい施工条件であったため、地盤変状計測に基づく掘進管理を実施した。

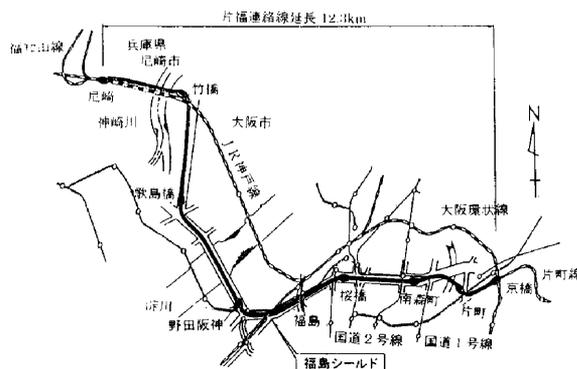


図-1 片福連絡線路線平面図

* 土木設計部設計課

** 技術部技術一課

*** 関西(支)福島地下鉄(出)

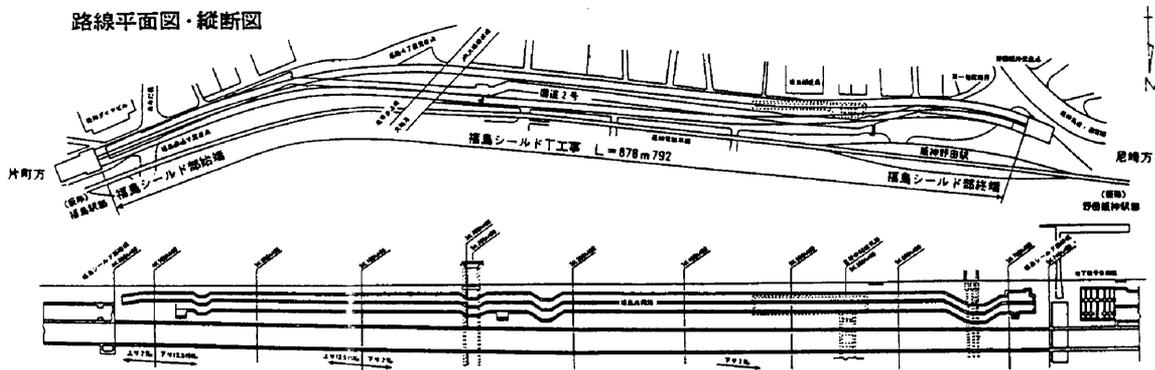


図-2 福島シールドT工事区路線平面図及び縦断面図

- ①国道2号線，福島共同溝，阪神電鉄線との併走
- ②N T T洞道，J R環状線，歩道橋との交差
- ③その他各種の埋設物との近接

本文は、この計測施工によるシールド掘進管理の結果について報告したものである。

§ 2. 概要

2-1 工事概要

工事件名：片福連絡線福島シールドT工事

施工区間：大阪市福島区福島5丁目～大開一丁目地先

企業先：関西高速鉄道株式会社

工期：自 平成3年3月29日
至 平成7年3月31日

工法：土圧式シールド工法

施工延長：上り線 870.780 m

下り線 878.792 m

マシン外径：φ7250 mm

一次覆工：一般部 RCセグメント

外径 φ7100 mm 幅 1000 mm

平板型 桁高 350 mm

換気所接合部 ダクタイルセグメント

外径 φ7100 mm 幅 1000 mm

箱型 桁高 250 mm

土被り：発進部（福島駅部） 11.7 m

到達部（野田阪神駅部） 15.8 m

曲線半径：最大R=2000 m 最小R=250 m

勾配：最大13.515% 最小2.000%

換気所：一式

2-2 路線

当工区の路線図を図-2に示す。

シールドは、福島駅舎部より発進し野田阪神駅舎部まで国道2号線直下を掘進する。その間、ほぼ全線に渡り

福島共同溝および阪神電鉄線と近接する。福島共同溝については、最小離隔距離が1.5 mと超近接施工となる。阪神電鉄線は当工区内において地下部、地上部、高架橋部があり、掘進による影響が異なる構造となっている。

その他、発進して40 mでN T T洞道と上越して交差し、305 mで歩道橋、320 mでJ R環状線高架橋と交差する。また、埋設管（ガス、水道、電気）やマンホール等の埋設物が各所に点在している。

したがって、発進直後から到達するまで全線に渡って近接施工となり、確実な掘進管理が要求される。

2-3 地質概要

当工区内の地質縦断面図を図-3に示す。当区間は、層厚変化は伴うもののほぼ様な地層特性を示している。

当地域は淀川により形成された三角州であり、上部より沖積上部砂質土層、沖積粘性土層、沖積下部砂質土層、洪積砂礫層（天満層）、洪積粘性土層と分布している大阪の代表的な地盤となっている。

シールド通過部の土質は、沖積下部砂質土層も多少含むが、ほぼ沖積粘性土層（Ac1）が主である。Ac1は、シルト分が卓越する上部、粘土分が卓越し層厚が厚い中央部および砂分が比較的多く混入し、シルトが卓越する下部に区分されるようである。N値は、上、中、下部で各々3、2、5程度であり、一軸圧縮強度が0.8～1.5kgf/cm²（78.4～147kPa）と軟弱な鋭敏粘土の特性を有している。また、下部の沖積砂質土層（As2）はN値6～13程度で、シルト分を含んだ緩い砂質土層である。

§ 3. 計測施工による掘進管理計画

3-1 シールド工事における地盤変状

シールド掘進に伴う地盤変状は地盤条件、施工方法、施工管理等の諸要因により変化し、それらが重なりあって非常に複雑である。

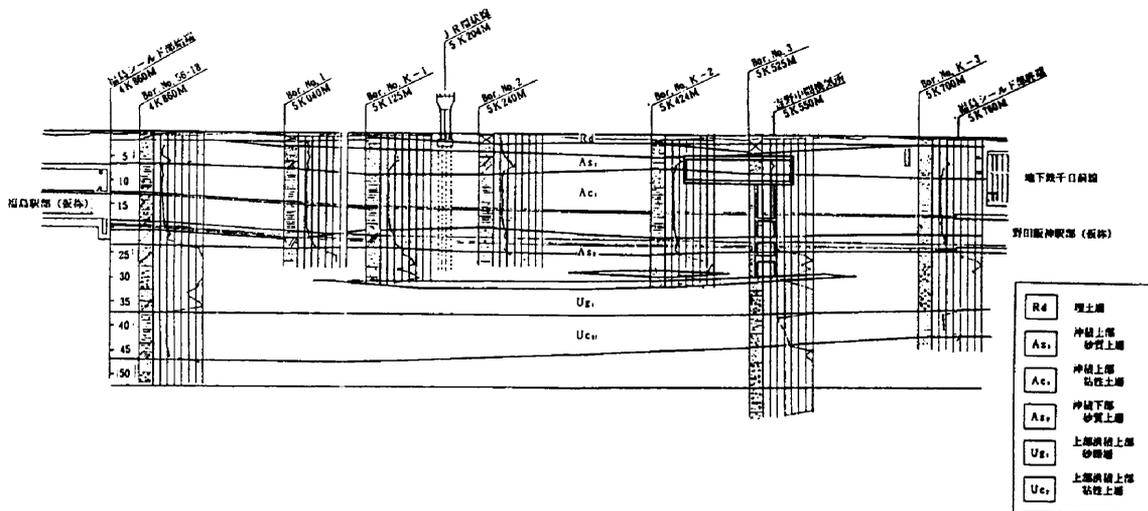


図-3 地質縦断面図

そのため、最近のシールド工事においては地盤の詳細な挙動計測が行われるようになって、ある程度は地盤沈下の発生機構が明らかとなってきた。

シールド工事における地盤沈下の主要因は、その機構上、切羽とテールボイドにあることから、過去のシールド工事の実績における地盤沈下の経験的な発生状況を切羽での先行沈下、テールボイド沈下、後続沈下の3段階に分けて以下にまとめることができる。

表-1 シールド工事における沈下要因

沈下の種類	主たる沈下要因
先行沈下	①切羽の応力解放による弾塑性変形 ②切羽における地山の呼び込みと乱れ
テールボイド沈下	①テールボイド部の応力解放による弾塑性変形 ②テールボイドへの裏込め注入の不完全 ③一次覆工の変形および沈下
後続沈下	①推進時の地盤攪乱 ②地下水の変化による圧密

3-2 地盤変状計測による掘進管理

地盤沈下の形状は、従来からのシールド工事と最近の密閉式シールド工法では変化が見られ、またその大きさもはるかに小さくなってきている。そして地盤の詳細な挙動計測が行われるようになって以下のことが明らかになってきた。

①先行沈下

密閉型機械式シールドでは、泥水圧や土圧を切羽に作用させるため、切羽での応力解放がほとんど無くなり、先行沈下が小さくなってきている。

したがって、洪積地盤では沈下などの変位は問題にならず、また軟弱地盤では従来のシールド工事に比較して

沈下量は遥かに小さくなっているが、泥水圧などの切羽作用圧に敏感に反応することが明らかになり、切羽の圧力管理の重要性が確認されている。

②テールボイド沈下

軟弱な冲積層では地山は自立しないため、テールボイドが崩壊して沈下が発生する。また、総沈下量に占める割合が大きいため、切羽の安定化をはかるだけでは地盤沈下が低減しきれないことが判明し、裏込め注入の重要性が認識されている。最近では、2液瞬結性の裏込め材料や同時裏込め注入方式が開発されてテールボイドの沈下抑制に効果を発揮している。

したがって、地山の応力解放の抑制は可能となったが、注入圧により地山が押し広げられ地表面が隆起したり地盤の乱れを引き起こすことがあるため、裏込め注入の圧力管理が重要となってきている。

③後続沈下

鋭敏比の高い粘性土では、緩やかな沈下が長期に渡って生じることがあり、シールド工事では無視のできないものとなっている。

過去に減摩剤の使用によりシールド機と地山粘土との摩擦を減少させて、後続沈下を抑えることに成果をあげた事例がある。したがって、減摩剤注入も重要な要素となってきている。

このように、地盤変状は適切な掘進管理によりかなりの程度まで防止することが可能となってきている。したがって、密閉式シールド工法では、

- ①切羽作用圧（土圧等）
- ②切羽安定材（泥土、泥漿等）の性状、品質
- ③掘進速度、カッター回転数
- ④裏込め注入量、圧

などの切羽、テールボイドを制御する掘進標準項目と

- ⑤掘削土砂量
- ⑥地盤変状（地表面沈下量，地盤内変形量）
- ⑦セグメントの変形，歪み
- ⑧トンネル線形出来形

などの掘進結果項目を同時に計測し，掘進標準の妥当性検討と必要に応じた変更，修正により工事の安全性を確保することが可能となっている。

本工事では，⑥の地盤変状計測による掘進標準項目の確立を主体とした施工を計画し，これに基づいた施工管理を行うこととした。

3-3 各計測断面および目的

本工事では，本掘進に入る前にトライアル区間を設けるものとして，この間で掘進条件を変化させながら適正な方法を設定し，本掘進に反映させるものとした。

トライアル区間では3つの計測断面を設けるものとし，その位置を図-4に各々の断面を図-5～図-7に示す。また，各計測断面での計測項目，計測目的を表-2に一覧表としてまとめる。

測定データは，ワークステーションによる自動計測システムにより即時データの収集および整理を行った。

§ 4. 地盤変状計測による掘進管理結果

4-1 地盤変状計測結果

(1) 先行シールド（下り線）通過時

各々の計測断面におけるシールド掘進時の計測結果を以下にまとめる。

① 計測断面1

掘進の設定条件は，チャンバー内土圧が1.8kgf/cm²（176kPa）（静止土圧1.92kgf/cm²（188kPa）に流動化係数0.95を乗じた）裏込注入圧が3.00kgf/cm²（294kPa）（壁面土圧計の実測値より設定）であった。

掘進の結果，面板通過前5m程度より沈下傾向が現れ，シールド通過中に急激な沈下が発生した（直上で10mm程度）。テール通過時，裏込注入の影響で直上が極短時間隆起したが，以降緩やかな沈下に入る。

この沈下は，掘進条件であるチャンバー内土圧の設定値が低かったために生じたものと考えられる。また，掘進データを見直すと，掘進中の土圧は設定土圧を保っているが，セグメント組立中は土圧の低下が見られている。したがって，基本とする設定土圧を上げることと，セグ

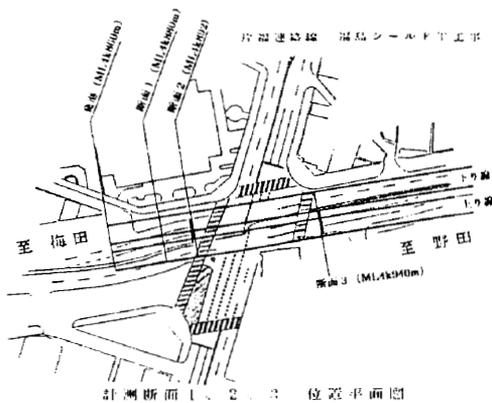


図-4 計測断面位置図

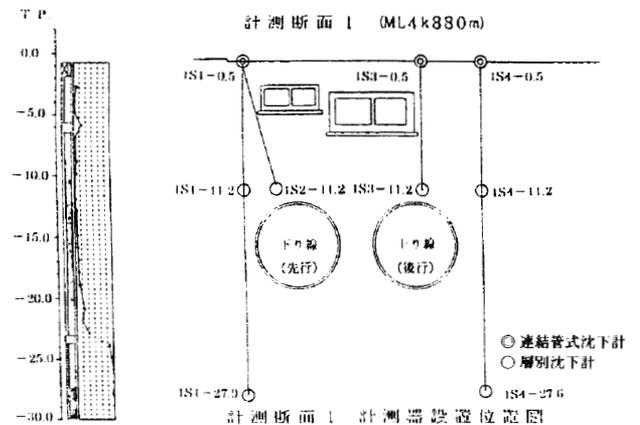


図-5 計測断面1断面図

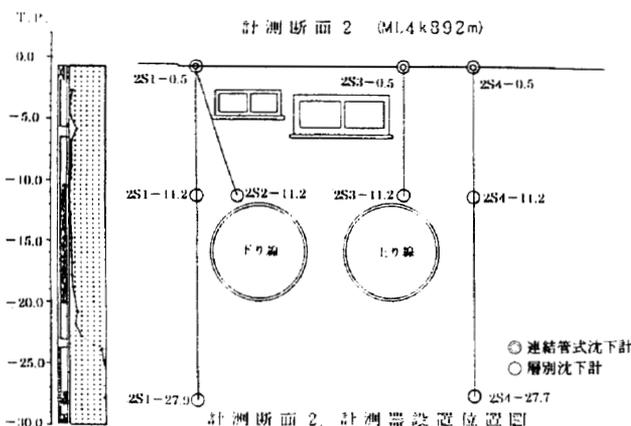


図-6 計測断面2断面図

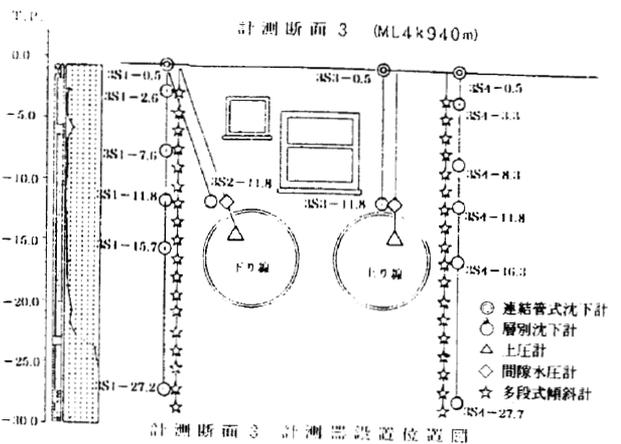


図-7 計測断面3断面図

表-2 各計測断面での計測項目および目的一覧表

調査位置	計測目的	計測項目	使用計測器
トライアル断面 計測断面1 (ML.4k880m)	シールド上部に共同溝がある状態における初期掘進管理値による掘進と、地中沈下の関連を調べ、沈下量を最小限に抑えるための最適掘進管理値設定のための資料とする。	クラウン直上とシールド側部の沈下	連通管式沈下計 層別沈下計
トライアル断面 計測断面2 (ML.4k892m)	計測断面1での結果より決定した掘進管理値による掘進と地中沈下の関連を調べ、計測断面1の結果と総合評価し、沈下量を最小限に抑えるための最適掘進管理値の設定を行う。	クラウン直上とシールド側部の沈下	連通管式沈下計 層別沈下計
トライアル断面 計測断面3 (ML.4k940m)	計測断面1・2により設定した最適掘進管理値で掘進し、周辺地盤変状の関連を調べ、その後の掘進軌道に近接する重要構造物および直上の共同溝への影響を最小限に抑えるための掘進管理値のチェックを行う。	クラウン直上とシールド側部の沈下 シールド側部の側方変位 シールド前面の土圧 シールド肩部の間隙水圧	多段式傾斜計 連通管式沈下計 層別沈下計 土圧計 間隙水圧計

メント組立時に抜くジャッキ本数を必要最小限に抑えることとし、掘進を続行した。

② 計測断面2

計測断面1の結果より、設定土圧を静止土圧と同程度の 1.95kgf/cm^2 (191kPa)とし、掘進を行った。

掘進の結果、面板通過5m程度手前より軽い先行隆起が発生し、面板通過後2m程度で急激に隆起した。この隆起は、裏込注入がマシン前方まで回って生じているものと懸念されたため、通過中の設定注入圧を段階的に下げていき、最終的には 2.5kgf/cm^2 (245kPa)とした。

テール通過時は、隆起量20mm程度となるが、すぐに沈下に転じ、3m程度通過した以降緩やかな沈下傾向となる。

また、シールドと地盤との付着による影響も考えられるため、滑材の注入量についても調整した。

③ 計測断面3

計測断面1,2の結果より設定土圧 1.95kgf/cm^2 (191kPa)、設定注入圧 2.75kgf/cm^2 (270kPa)として掘進するものとし、計測断面3にてその妥当性をチェックした。

図-8に沈下計の経時変化図を示す。図の縦軸は沈下量、横軸は時間を、また、左端の番号は、前ページの沈下計番号を示している。

掘進の結果、面板通過前5m程度手前より先行隆起が発生し、シールド通過中、断面2と同様に隆起したが、最大11mm程度に減少している。テール通過前より沈下に転じ、通過後沈下傾向が大きくなったが、すぐに緩やかな勾配の沈下となっている。経時変化図に示されるように、シールド通過に生じた地盤の挙動は、約10mm以

内に収まっており、設定土圧、注入圧が妥当な値であることが確認された。

水平変位については、面板通過前3m程度より影響し始め、横断、縦断とも押しの方向に変位している。シールド通過中は、横断方向に押し広げ傾向が大きくなるものの、縦断方向の変位は反転し、進行方向と逆に変位している(図-10参照)。テール通過後は、変位量が減少し、数mmの残留変位となる。

地中土圧計および間隙水圧計の計測結果によると、掘進の影響がでるまでは、土圧が 1.9kgf/cm^2 (186kPa)、間隙水圧 0.9kgf/cm^2 (88.2kPa)であった。掘進の影響が現れるのは5m程度手前からであった。

(2) 後行シールド(上り線)通過時

① 計測断面1

後行シールド掘進については、先行シールドの計測結果により、設定土圧 1.95kgf/cm^2 (191kPa)および、設定注入圧 2.75kgf/cm^2 (270kPa)として掘進管理を行った。

図-9に沈下量の経時変化図を示す。掘進の結果、面板通過前7m手前より影響が生じ、直前で2mm程度の先行隆起となった。シールド通過中沈下傾向になるが、すぐに隆起となり、テール通過直前で最大5mmの隆起量となった。テール通過に伴い緩やかな沈下傾向となる。

経時変化図に示されるように、シールド通過に伴う周辺地盤の挙動は、約5mm以内であり後行シールドにおいても設定値が妥当であることが確認された。

② 計測断面2, 3

以降、同様の設定値にて掘進管理を行ったところ、計測断面2および計測断面3においても良好な結果が得ら

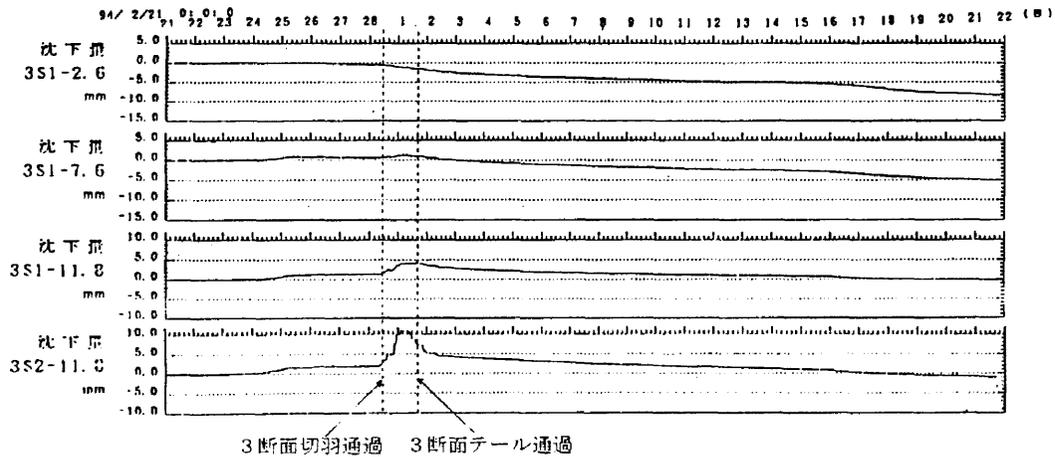


図-8 計測断面3 先行シールド通過時沈下量経時変化図

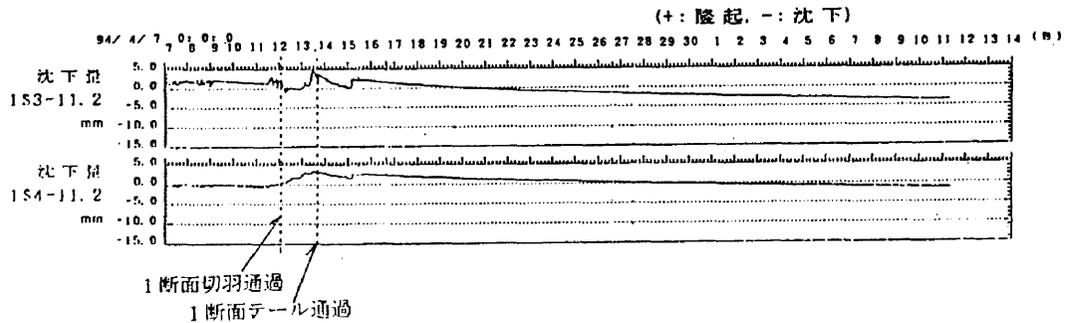


図-9 計測断面1 後行シールド掘進時沈下量経時変化図

れ、この設定値による掘進が周辺に及ぼす影響を最小限に抑えることが確認された。

また、計測断面3の水平変位計測結果については、先行シールド掘進時と同様の傾向および変位量となり、地中土圧、間隙水圧についても先行シールド掘進時と同様であった。

4-2 掘進結果に関する考察

先行シールドの計測断面1通過時の沈下は、チャンパー内土圧の設定値が低かったためと考えられる。すなわち設定土圧 p を過去の土圧式シールドの実績より $p = \alpha K_0 \gamma H$ ($\alpha = 0.95$ 流動化係数, K_0 :土圧係数, γ :土の単位体積重量, H :土被り)としたが、掘進中は設定値を確保するものの、セグメント組立時においては、最大 0.5kgf/cm^2 (49kPa)の低下が見られた。これは、くさび型セグメントを無理なく挿入するためにB型をある程度フリーにする必要があり、そのために押さえのジャッキが不足気味になるためと考えられる。したがって、施工性よりも沈下対策を優先することとし、かつ設定土圧も高く再設定することとした。設定値を 1.95kgf/cm^2 (191kPa)としてからは、すべて先行隆起気味であったが、微小値であ

り地盤変状の原因とはなっていない。

裏込注入圧の設定値は、土被り圧および計測断面前のセグメント外面に設置した壁面土圧計の実測値(図-11参照)を参考に決められていた。掘進の結果、先行シールド掘進時において、計測断面2通過時に隆起が発生した。この隆起について、注入圧の変化による地盤の隆起量をリアルタイムで観測したところ、注入圧と増加隆起量との関連性が確認されたため、設定注入圧を修正することとした。以降の断面では、隆起があるものの計測断面2以上の値とはなっていない。

その他にも沈下、隆起の原因となるものが確認されている。一つは、シールドマシンのピッチングによるものである。マシンが上向きであれば、余堀りにより面板通過後沈下する。先行シールドの計測断面1通過時には、ピッチング計も上向きを示しておりこれが沈下の原因の一つとなっている。

次に考えられる原因としては、シールドマシンと地盤との付着による影響である。滑材の効果が無く付着力の作用が大きい場合には、周辺地盤を引きずりながら掘進する形となるため、計測値として見かけの沈下量が確

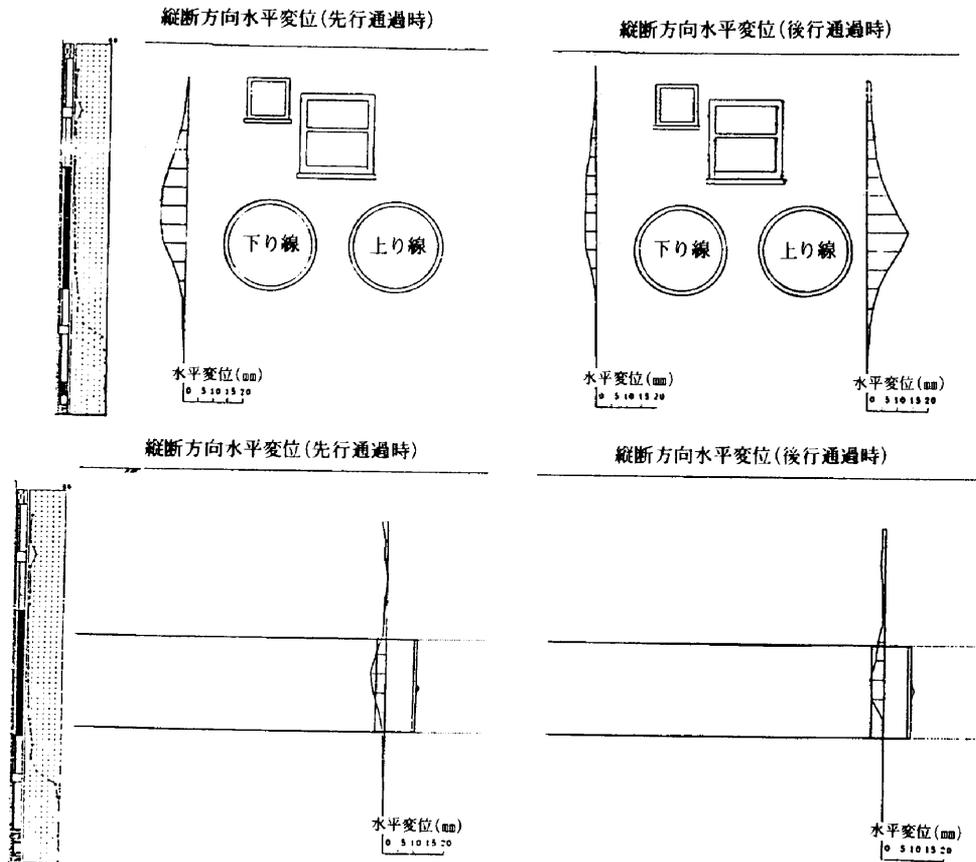


図-10 横断方向および縦断方向最大水平変化図

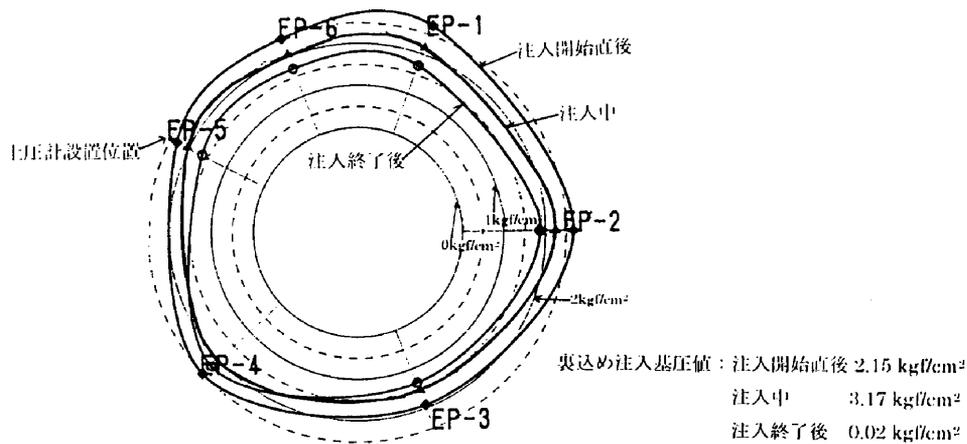


図-11 壁面土圧計実測値による注入圧分布図

認められることとなる。付着力は、総推力とマシン前面抵抗の関連性等から導くことが可能であり、ここにチャンパー内土圧と推力との相関関係を求めた一例を示す。

下り線 100R~200R
 $Y=41.9755X+608.23$
 200R~300R
 $Y=47.5511X+680.237$

ここに、 Y ：総推力 (tf) X ：チャンパー内土圧 (tf/m²)

今、シールド断面積は約40m²であるから第2項の608~680tf (5.96~6.66MN) が周面摩擦の項と考えられるので、付着力は第2項の値を接触面積174m²で除し $f=3.5\sim3.9\text{tf/m}^2$ (34.3~38.2kPa) となる。Ac1の粘着力は4tf/m² (39.2kPa) であり、滑材の効果が明確に出てい

ない結果となっている。この問題については、今後の検討項目の一つであろう。

主な原因としてもう一つ考えられるは、現地盤が元々乱されている地盤であったということである。当工区は前述のように、ほぼ全線福島共同溝と併走している。この福島共同溝の施工時に打設された土留壁および支持杭等が、計画されたトンネルの線形内に数多く存置されていたため、トンネル着工前にすべて撤去している。したがって、トンネル周辺地盤は局部的に乱されている可能性が高く、計測結果の地盤変状は掘進管理の良、不良による影響でない場合もあるということである。

横断方向の水平変位については、シールド掘進中常に押し広げ方向に変位が生じている。したがって、過剰な土砂の取り込みは考えられないが、設定土圧、裏込注入圧が多少大きいことが考えられる。しかし値自体はそれほど大きくないことおよび沈下、隆起との関係より、設定値が妥当であることが確認された。

また、縦断方向の水平変位は、シールド通過前進行方向押し側に変位している。これは、他の計測データと比較し当然の結果である。しかし、上図に示すように通過途中から変位の方向が逆転し、進行方向と逆に変位してくる。これは、上下線同様の結果となり、原因不明の結果となっている。この変位方向に作用する外力として考えられるものは、滑材の注入圧ぐらいのものであるが、その程度の力で変位するとは思えない。これも今後の検討項目の一つである。

今回の工事は大断面シールドの併設であるため、先行シールド掘進による影響が後行シールド掘進時の地盤変状に現れるものと予想されたが、逆に先行より良好な地盤であるかのような結果となった。このことも、引き続き検討項目となっている。

4-3 近接構造物の計測

当工区は近接構造物の対象となるものが数多くあるためシールド掘進による影響について、各種構造物の計測を行っている。以下にその計測項目をまとめる。

①福島共同溝および地表面

シールド掘進の影響範囲内について、レベル測量を全線について行った。

②阪神電鉄線

箱形管渠部：水盛式沈下計設置

バラスト軌道部：軌道のレベル検測

高架橋部：水盛式沈下計設置

傾斜計設置

挿入式傾斜計設置

③JR環状線高架橋

水盛式沈下計設置、傾斜計設置、温度測定

④NTT洞道

水盛式沈下計設置、内空変位計、温度測定

⑤その他の埋設管、埋設物

シールド掘進の影響範囲内について、レベル測量を行った。

掘進の結果、上記の計測項目すべて定められた管理目標値内に収まり、計測施工による掘進管理の成果が見られる。

§ 5. まとめ

片福連絡線福島シールドT工事の地盤変状計測による掘進管理の結果から明らかになった事項を以下にまとめる。

①計測システム

今回採用した計測システムは、汎用型自動計測システム(スキャニングマスター)とパソコンを組み合わせた集中管理方式で行い、計測データと掘進データとをリアルタイムにて処理できたため、地盤変状計測の結果を掘進管理に反映させる作業が円滑に行うことができた。

②地盤変状計測による掘進管理システム

トライアル区間にて設定した掘進条件により施工を行った結果、多少不明点は残るが、周辺地盤の挙動をある程度把握することができた。それに伴い周辺地盤に与える影響を最小限に抑えることができたと考えられる。その結果、近接構造物の計測結果が良好なものであった。

③後続沈下

今回の地盤が粘性土であるため、過剰な圧縮および排水により圧密が進行し、後続沈下が懸念されるため、事後計測が重要となる。

§ 6. おわりに

本工事は、軟弱な地盤であること、全線に渡り近接構造物があることおよび事前の存置杭撤去により地盤があらかじめ乱されていたという非常に厳しい施工条件であった。

しかし、今回採用した地盤変状計測による掘進管理により、防護工無しで周辺に悪影響を与えることなく、無事到達することができた。

今後は、本工事のデータを初め、この種のデータを数多く収集し、以降の工事に反映させていきたいと思う。

最後に、本工事に際し御指導いただいた関係各位に感謝する次第である。