

営業線地下鉄シールド直上の大規模近接掘削工事 Large-Scale Excavation immediate above active subway shield tunnel and adjacent to the neighbor structures

和田 洋明*

Hiroaki Wada

島津 嘉裕*

Yoshihiro Shimazu

要 約

戸塚駅西口第1地区第二種市街地再開発事業共同ビル棟新築工事（以下、本工事）は、営業線である横浜市営地下鉄1号線の直上を、シールドトンネル直近まで長さ180mにわたって大規模な掘削を行い、建物を構築する工事であった。本施工報告では、本工事の掘削によるシールドトンネルに与える影響を事前に検討したうえで、変位抑制における各種対策と計測管理を行い、その変位を許容値内に納めた工事の施工記録を報告する。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 掘削工事計画
- §4. 計測管理計画
- §5. まとめ

§1. はじめに

戸塚駅西口第1地区第二種市街地再開発事業（以下、本事業）は、多数の乗降客数（約27万人/日）にのぼる戸塚駅周辺の都市基盤整備を目的としたもので、平成6年10月に都市計画、平成9年3月に事業計画が決定された。しかしながら、その後も周辺地域との調整に困難を極めたため、計画当初は再開発事業完了後に開通を予定していた市営地下鉄1号線戸塚駅湘南台駅間¹⁾が、再開発事業実施前の平成11年8月に開業した。本建物は、平成19年5月の特定建築者決定後、平成19年12月に工事に着工した。このため、本工事は営業線地下鉄シールドトンネルの直上を、土被り約2.3m~0.8mで約180mにわたり大規模な掘削を実施することとなった。本事業と地下鉄の位置関係を写真-1に示す。

本報告は、掘削による営業線地下鉄シールドに与える影響を事前に検討したうえで、変位を許容値以内に納めるための対策検討・計画および、施工結果について報告するものである。



写真-1 戸塚駅西口再開発周辺と地下鉄位置

§2. 工事概要

2-1 建物概要

工事件名：戸塚駅西口第1地区第二種市街地再開発事業 共同ビル棟新築工事

工事場所：神奈川県横浜市戸塚区戸塚町77番地他
発注者：東急不動産株式会社、株式会社東急コミュニティー

設計者：西松建設株式会社一級建築士事務所

工期：平成19年12月4日~平成22年2月15日

建築物 敷地面積：11,232.65 m²
建築面積：10,103.86 m²
法定延床面積：70,773.44 m²
軒高：29.2 m
構造種別：S造，SRC造
階数：地下2階/地上7階

建物用途：ショッピングモール，自走式重層屋内駐車場，屋内駐輪場

* 関東建築（支）戸塚駅西口再開発（出）

2-2 シールドトンネルおよび地質概要

営業線地下鉄では大規模掘削があることを前提に、一次覆工をダクトイルセグメント（二次覆工あり）としていた（トンネル外径 $\phi 6500$ mm, 一次覆工桁高 300 mm, 二次覆工 250 mm）。隣接する第一交通広場の工事を含めると影響を受ける営業線地下鉄の延長は約 210 m となる（図-1）。

工事場所は、柏尾川の沖積低地に位置し、上部 15 m 程度が砂とシルトからなる互層の沖積層で、その下部に固結シルトと狭在砂層からなる洪積層で構成され、明確に遮水層と見なせる不透水層が認められない。掘削箇所の大半を占める沖積層は、盛土層、腐植土層、粘性土層が主体であり、N 値 0~3, 含水比 180~300%, 圧縮指数 1.5 程度の腐植土層（Ap 層）がトンネル直上を覆っている（図-2）。

戸塚駅周辺は地盤沈下特定地域に指定され、地下水の汲み上げにより圧密沈下を起しやすい地域である。また地下水位は、沖積層、洪積層とも GL-3.0 m 程度となっている。

§3. 掘削工事計画

3-1 掘削工事の課題

掘削工事に伴い、地下鉄シールド直上部の土被り厚さが小さくなるため（図-3）、地下水により作用する浮力が土被り重量より大きくなり、シールドが浮き上がる状況になる。また、敷地外部の沖積層の地下水位が下がると周辺の地盤沈下が生じるため、止水壁となるソイルセメント柱列壁（以下、SMW）構築中の品質管理が重要であった。

掘削によるシールドトンネルへの影響を少なくするためには、分割施工が望ましいが、本事業の平成 22 年春のオープンに間に合わせるためには、一度に掘削を行う必要があった。

営業線地下鉄シールド直上の掘削は、営業線の鉄道に対する近接施工に該当するため、施工に際しては施工協議により計画の妥当性を監理者である横浜市交通局と協議し、施工の了承を得る必要があった。このため、当初計画により地下鉄シールドへの影響検討を FEM 解析等により実施し、施工の妥当性を説明した。しかし、共同ビル棟の構造変更等により、掘削形状も変更となり、当初の影響検討の見直しが必要となった。

また、近接施工を行う場合には、解析により安全性を検証することは当然であるが、解析通りに挙動するかどうかを計測管理することが最も重要となる。したがって、施工に際しては、適切な計測計画を立て、計測中の挙動に対する判断・予測を正確に行い、さらに、不測の事態に対して適切かつ迅速に対応できる体制を整えておくことが重要である。

本工事における最大の問題は、営業線の地下鉄シールド

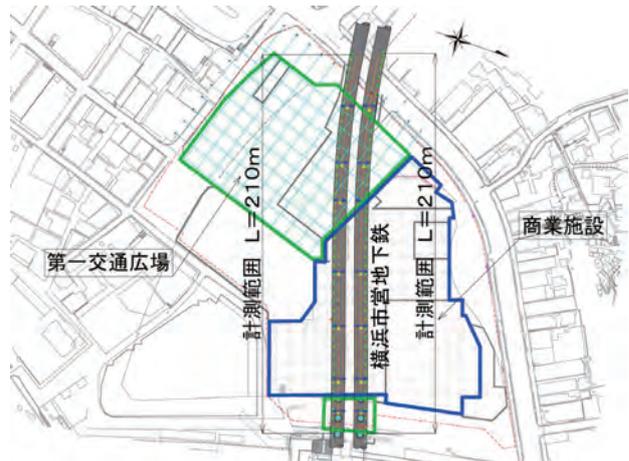


図-1 本事業の工事範囲と地下鉄配置

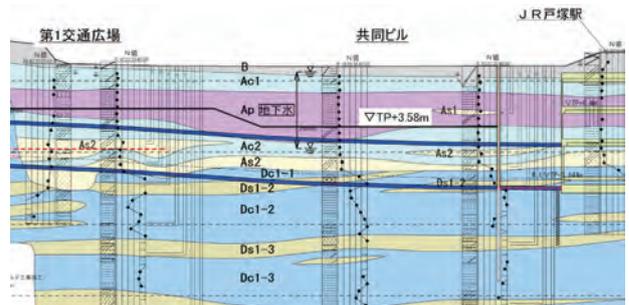


図-2 地質縦断面図

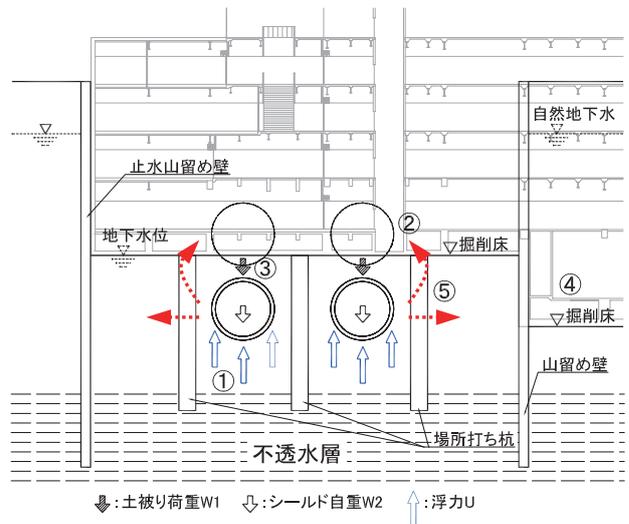


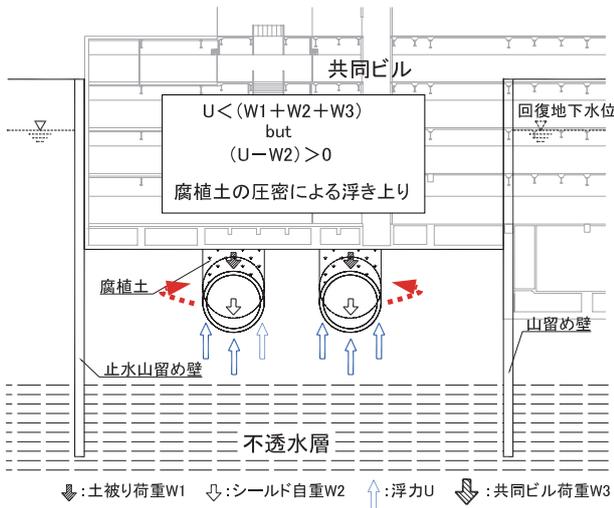
図-3 掘削中の課題

ド直上をその直近まで約 180 m にわたって行う大規模掘削は前例がなく、各種計測を基に地下鉄シールドの安全性を確認しながら、繊細に施工を進めて行く状況にあったことである。

課題としては、以下の点が上げられる。

(1) 掘削中の課題

- ① 地下水の浮力によるシールドの浮き上がり
- ② 掘削時のリバウンドによるシールドの浮き上がり
- ③ 掘削時の土被り減によるシールド形状の変位
- ④ シールド側面の掘削によるシールドの移動
- ⑤ 杭の施工によるシールドの水平変位



図一四 腐植土層の圧密

(2) 建築工事完了後の地下水位回復時の課題

本工事の地下構造物と地下鉄シールド間には腐植土層が介在しており、地下構造物の構築後に、水位が回復するとシールドに浮力が生じる。この際に、地下構造物とシールド間に介在している腐植土層が圧密変形を起こし、シールドが浮き上がることが懸念された(図一四)。

3-2 掘削工事の対策

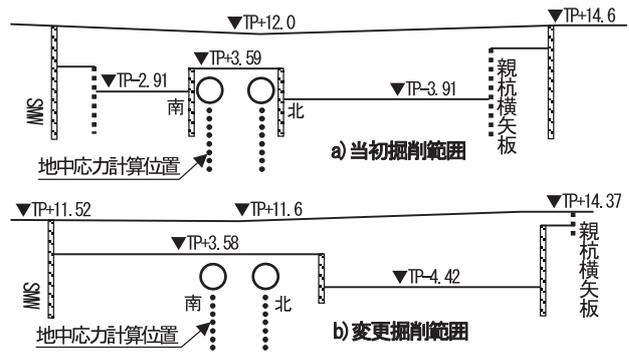
(1) 設計協議への対応

掘削によるシールドへの影響を抑えるため、地下2階部分のプランの見直しを行い、掘削形状をシールドより1スパン逃げる計画に変更した。この変更により、地下鉄シールドへの影響検討を見直す必要があったが、当初の影響検討と同様の方法で再検討を行うことは費用的にも時間的に問題があった。このことから、図一五に示すように、当初のFEM解析断面と比較した。シールドからの掘削部の離隔が大きくなり、掘削土量も減少したため、当初の影響検討時より地中応力の変化量が小さくなり、シールドの変位・応力共に問題のないことを確認した(図一六)。

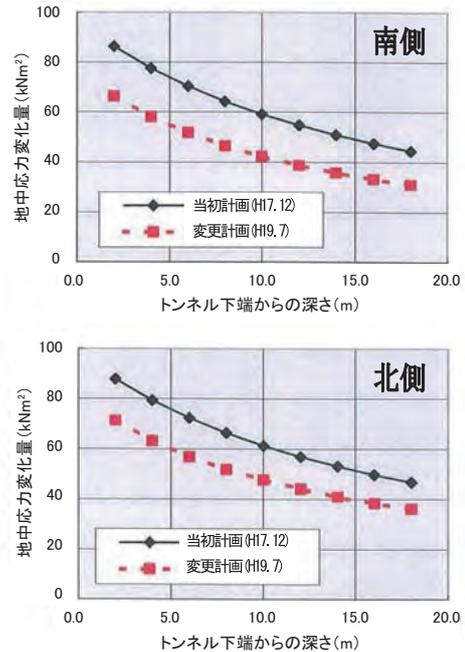
(2) 掘削工事中の対策

① 地下水の浮力によるシールドの浮き上がり対策

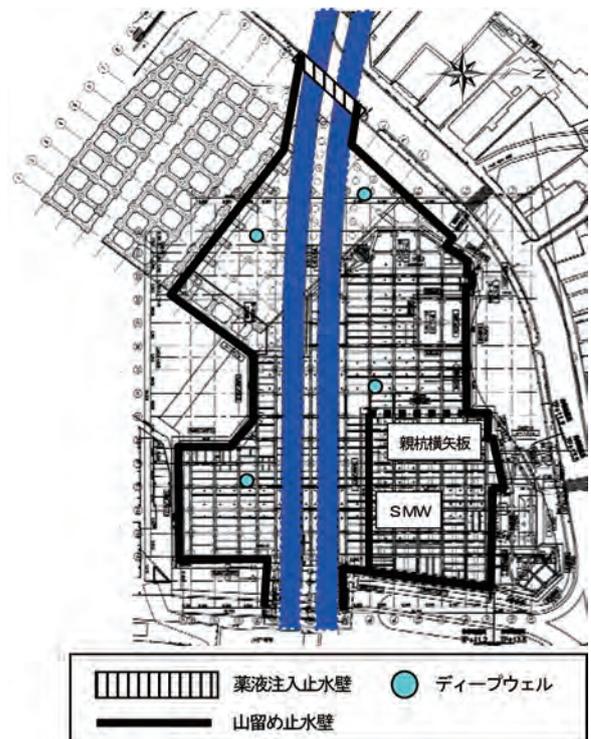
掘削に先立ち、共同ビルの建物外周にSMWによる止水壁を構築し外部からの水の供給を遮断した。ただし、地下鉄シールド東側妻はSMWの構築が困難であったため、薬液注入による止水壁を構築することとした。また、西側妻は地下鉄戸塚駅施工時の土留め壁(SMW)を利用することで、地下鉄シールド周囲の止水性を確保した。排水処理工法にはディープウェル工法を採用した。本工事では、特に掘削内部の地下水位の管理に注意を払い、掘削完了時にシールドトンネルが浮き上がらなくなる位置(TP+1.27m)まで地下水位を低下させるよう日々の計測管理を行った(図一八)。ここで、ディープウェルの配置に関しては、南北方向の地下水の流れがシールドによ



図一五 掘削断面形状の比較



図一六 地中応力変化量の比較



図一七 止水壁とディープウェルの配置

り遮断されていると考えられたため、山留め内部の水が均等に排水されるように配慮し計画を行った（図-7）。

当初計画では、SMWの深度は一般部でGL-18m、深部ではGL-33mであったが、根伐り底以深の洪積シルト層に狭在する洪積砂層が連続性を有している懸念があることから遮水性を確保するため、一般部・深部共GL-33mに変更した。また、掘削によりシールド上部の床付面がGL-4.0m（TP+8.2m）以下となると、地下水位上昇により地下鉄シールドが浮き上がる可能性があるため、降雨等による地下水位の上昇を防止することが重要となる。そこで、大雨等の緊急時の対策としてTP+8.2mより深い部分の掘削においては、北側の地下2階部分（図-3、7）を先行して掘削し、ポンプ排水能力を超える降雨および周辺からの流入が生じた場合にも、地下2階部分に貯水することにより、地下鉄シールド周辺の地下水位の上昇を防止した。

掘削中の課題②、③の掘削時のリバウンドによるシールドの浮き上がりや掘削時の土被り減によるシールド形状の変位対策に関しては、あらかじめシールド上部を掘削工事の全長にわたり高圧噴射攪拌工（JEP工法）により地盤改良し補強を行った（図-9、図-10）。この補強は、建築工事完了後の地下水位回復時の補強対策としても兼用しており、地下鉄シールド上部の腐植土層が地下鉄シールドの浮力により、変形することのないよう強度を持たせる必要があったが、腐植土層を改良する事で構造物と地下鉄シールド間に介在する地盤の変形を防ぎ、地下水位回復後の地下鉄シールドの変位を抑制した。

④ シールド側面の掘削によるシールドの移動対策

シールド側面の掘削によるシールドの変位防止対策としては、躯体構築の作業性も考慮し、山留め支保工にアースアンカーを採用し（図-8）、山留め壁の剛性を大きくすることで変位量を10mm以下で管理した。シールド側面の山留め壁は、外周部で止水壁を構築しているため親杭横矢板工法の採用も考えられたが、親杭横矢板工法では施工時に背面地盤を緩める懸念があったためSMW工法を採用した（図-7）。

⑤ 杭の施工によるシールドの水平変位対策

地下鉄シールド脇に構築する場所打ち杭の施工については、片側に偏って削孔すると地盤を緩めてしまいシールドに悪影響を及ぼすため、シールド脇の杭施工は、集中しないよう、また偏らないよう施工順序を入念に検討し施工を行った。

§4. 計測管理計画

4-1 計測管理計画

シールドの計測管理については、施工協議の結果により図-11に示す計測項目を実施した。また、表-1に示した管理値で管理を行い、計測値が警戒値を超えた場合には、担当者の携帯電話に自動で通報が入り、警戒値を

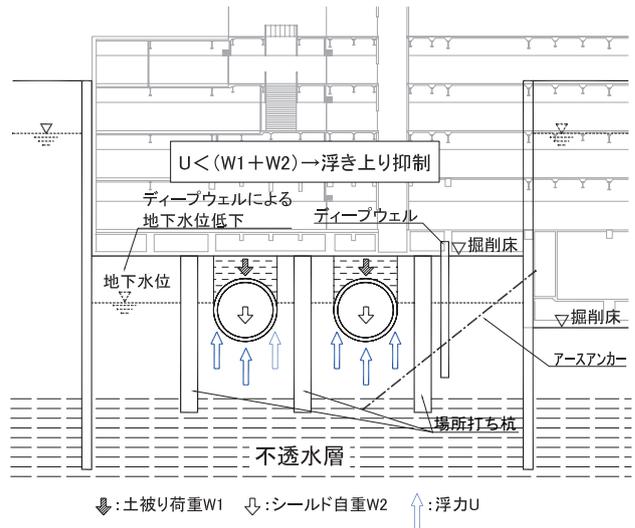


図-8 地下水位低下対策

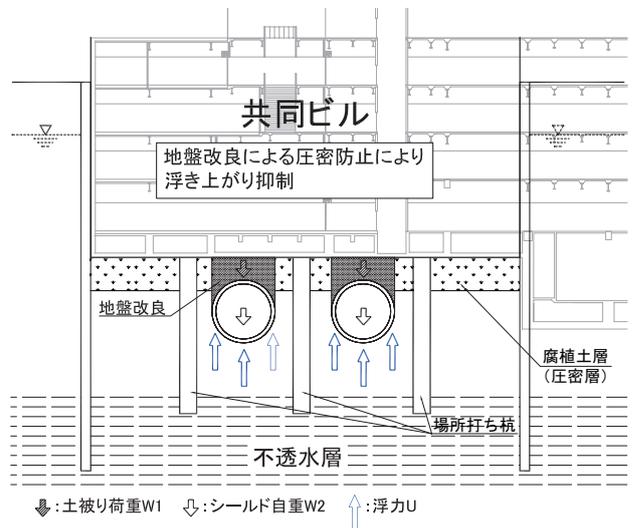


図-9 地盤改良による圧密防止対策

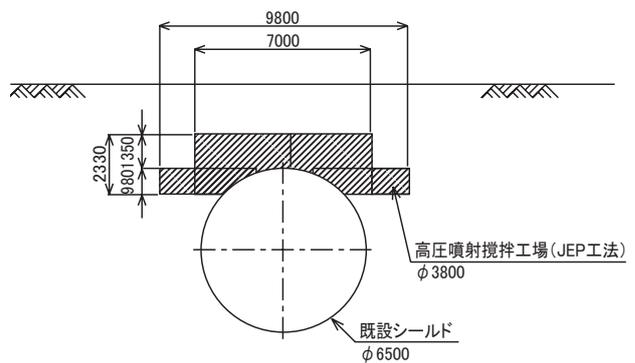


図-10 揚圧力対策工

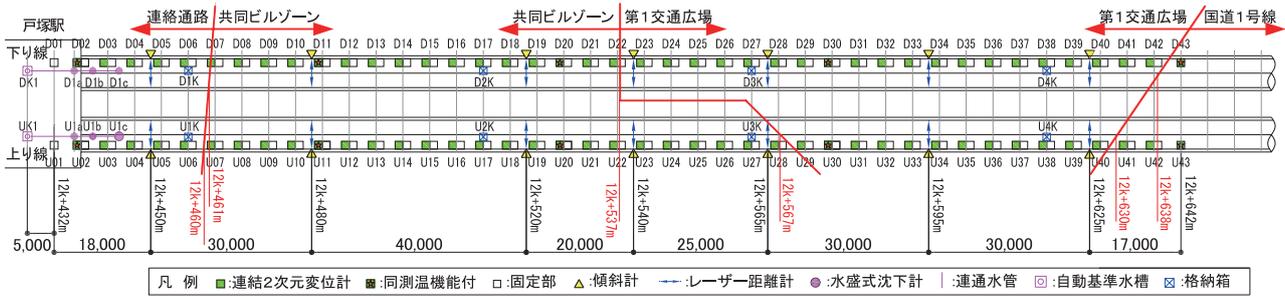


図-11 シールド内変位計設置位置

超えた計測データをメールで自動配信するシステムを採用した。

1) 連結2次元変位計

連結2次元変位計は、鉛直変位および水平変位計測を目的とし、シールド側壁に5m間隔で設置しトンネル本体の変位を計測する。固定部～センサ間に緊張したワイヤーの傾斜角を鉛直変位量および水平変位量に変換することにより10m弦(相対変位)を計測し管理基準に従い管理する。一次警戒値は、許容値の50%で設定している。連結2次元変位計の概念図を図-12に、その設置位置を写真-2に示す。

2) 内空レーザー変位計

シールド側壁に設置したレーザー距離計により内空変位を計測する。シールドトンネルセグメントの許容応力度に対する許容変位を算出し、内空変位計の管理基準値とする。

3) 構造物傾斜計

傾斜角度に対する管理基準値はないが、トンネルの傾斜により水準狂いが生じることから、軌間W=1,435mmに対する水準狂いを確認するために、シールド側壁に設置した傾斜計により計測する。

4) 水盛式沈下計

戸塚駅駅舎断面とシールド断面との接合部での絶対変位を計測するために、水盛式沈下計により鉛直変位を計測する。管理値は、軌道計測の10m弦に準じて±7.0mmを許容値とした。

5) 水準測量

軌道とシールドトンネルの事前水準測量を行い、施工に伴いシールドトンネルに変位が生じた場合、必要に応じて軌道とシールドトンネルの水準測量を行う。計測ポイントにはマーキングを行い同じポイントでの計測を行うことにより、軌道の絶対変位を計測するとともに、シールドトンネルとの相関関係を確認する。

4-2 計測結果

最小土被り部のうち北側にある上り線のシールドの計測結果を図-14に、また本工事の実施工程を図-13に示す。

掘削工事が進むにつれて、シールドの各種計測値も増加する傾向は見られたが、床付け時点に於いても一次警

表-1 計測器と管理値

| 計器名 | 計測目的 | 一次警戒値 | 二次警戒値 |
|----------|------|----------|----------|
| 連結2次元変位計 | 高低狂い | 35mm/10m | 50mm/10m |
| | 通り狂い | 25mm/10m | 35mm/10m |
| 水盛り式沈下計 | 絶対変位 | 35mm | 49mm |
| 傾斜計 | 水準狂い | 7.18mm | 10.1mm |
| レーザー距離計 | 内空変位 | 5.0mm | 7.0mm |

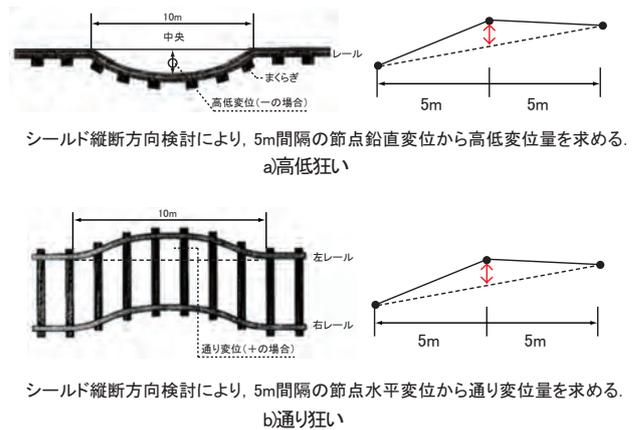


図-12 連結2次元変位計の概念図



— 連結2次元変位計設置位置

写真-2 連結2次元変位計の設置位置

| | 2007 | | | | 2008 | | | | 2009 | | | | |
|----------|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|----|
| | 10 | 1 | 4 | 7 | 10 | 1 | 4 | 7 | 10 | 1 | 4 | 7 | 10 |
| 土留め工 | | | | | | | | | | | | | |
| 地盤改良工 | | | | | | | | | | | | | |
| 場所打ち杭工 | | | | | | | | | | | | | |
| 掘削工 | | | | | | | | | | | | | |
| 地下躯体工 | | | | | | | | | | | | | |
| 鉄骨建て方 | | | | | | | | | | | | | |
| 内装他 | | | | | | | | | | | | | |
| ディープウェル工 | | | | | | | | | | | | | |

図-13 本工事の実施工程

戒値を超えることは無かった。また、地下躯体の構築後にディープウェルによる揚水を停止したが、覆水によるシールドの浮き上がりは見られなかった。

§5. まとめ

掘削にあたってはトレンチ掘削を行えばシールドトンネルへの影響を低減できると考えられるが、工期の制約により隣接工区と調整し掘削高さを揃えて掘削を進めていった。リバウンド、地下水による影響に対して適切な対策と、掘削量に合わせた地下水位の制御などにより、一度も一次警戒値を超えることはなかった。

地下鉄シールドは、掘削による応力解放、上載荷重の変化、掘削形状による偏土圧の影響に加え、近接した支持杭の施工、高圧噴射攪拌工法による地盤改良および地下水位の変化に敏感に反応を示した。しかし、地下鉄シールドに一次警戒値を超える変位を生じさせることなく掘削を完了することができた。

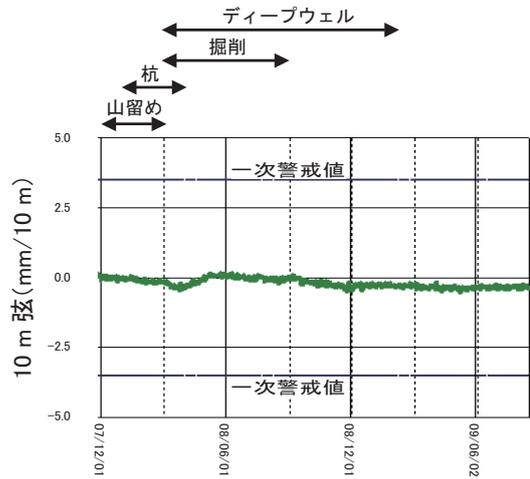
施工に際しては、変位の計測結果に一喜一憂するのではなく、施工ステップ毎の地下鉄シールドの変位を予測し、生じる変位について原因を追究し、施工方法を工夫し変位をコントロールする意識が重要であると感じた。

営業線地下鉄シールド直上の小土被りでの約180mにわたる掘削は前例のない事例であり、リスクが非常に大きいことから、今後同様の施工が行われるかはわからない疑問であるが、わが社の貴重な施工実績として、今後の計画や設計、施工、技術提案等に役立つものとする。

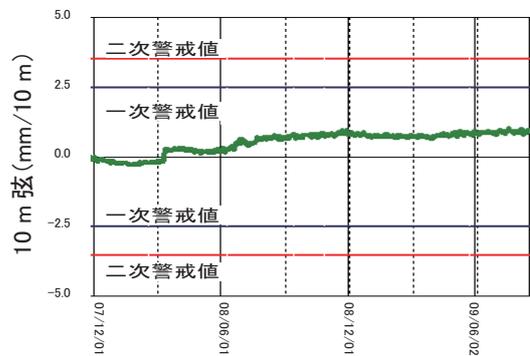
謝辞。本工事において数多くのご指導を頂きました(財)鉄道総合技術研究所の皆様および本社建築部、土木設計部を始め、関係各部署の皆様感謝いたします。

参考文献

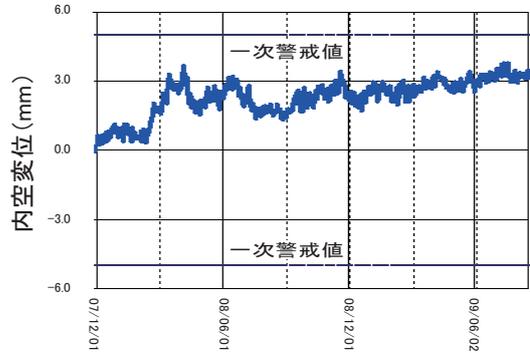
- 1) 芦屋, 花井, 田尻, 甘利: ピート層直下を泥水シールドで掘る 横浜市高速鉄道1号線 戸塚西口鉦区 トンネルと地下, Vol.341, p.35-43,1999.1.
- 2) 大江他: 大規模掘削工事とともに営業線地下鉄シールドの挙動について 土木学会第65回年次学術講演会, VI-255, p.509-510,2010.9.



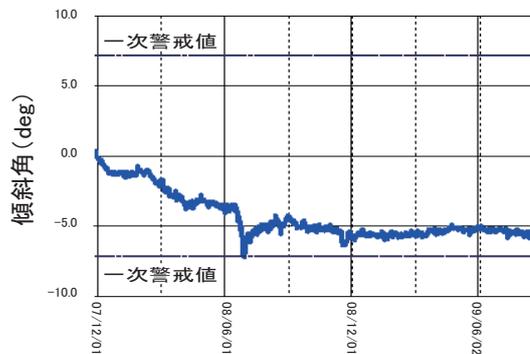
注) +が上
a) 10m弦 (鉛直)



注) +が戸塚駅からみて右
b) 10m弦 (水平)



注) +が横潰れ
c) 内空変位 (S.L.)



注) +が戸塚駅からみて時計回り
d) 傾斜角

図-14 計測結果