

営業線地下鉄シールド直上の大規模近接掘削工事

大江 郁夫*

Ikuo OE



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、土被り2.3～0.8mで、長さ180mにわたり大規模な掘削を行い、建築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2.3m～0.82mで、延長約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。

本報告では、掘削による営業線地下鉄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。



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：11,232.65m²

建築面積：10,103.86m²

法定延床面積：70,773.44m²

軒高：29.2m

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

* 西松建設(株)土木設計部

東京都港区虎ノ門1-20-10

E-Mail: ikuo_oe@nishimatsu.co.jp

2-2 シールドトンネル及び地質概要

営業線地下鉄では建築物の荷重が作用することを前提に、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 $\phi 6500\text{mm}$ 、一次覆工桁高 300mm 、二次覆工 250mm ）。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 210m となる（図-1）。

工事場所は、柏尾川の沖積低地に位置し、上部 15m 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 $0\sim 3$ ・含水比 $180\sim 300\%$ ・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 $\text{GL}-3.0\text{m}$ 程度となっていて、地下水の流れは南北方向で $0.6\sim 0.8\text{m/day}$ の流速を観測した。

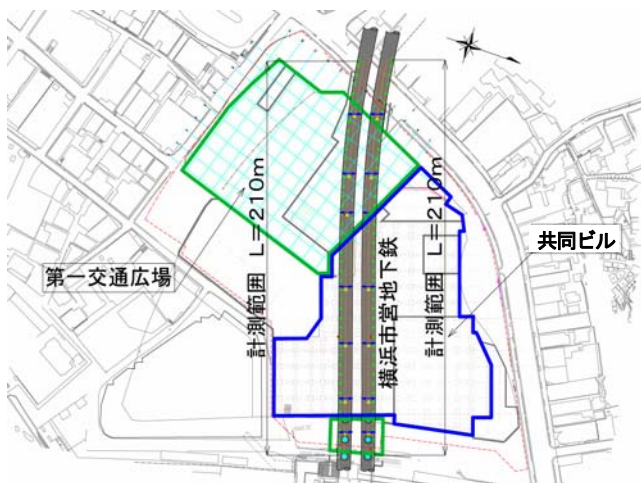


図-1 本事業の工事範囲と地下鉄配置

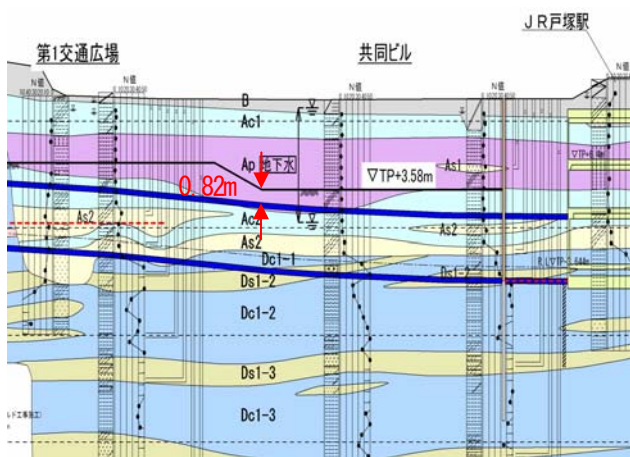


図-2 地質縦断面図

§ 3. 掘削工事計画

3-1 掘削工事の課題

本工事では、掘削時のリバウンドおよび浮力による営業線地下鉄への影響などが懸念された。具体的な課題は、以下の通りである。

(1) 掘削中における課題

- ① 地下水の浮力によるトンネルの浮き上がり（図-3）
- ② 掘削時の応力解放によるトンネルの隆起（図-4）
- ③ 掘削時の土被り減少によるトンネル断面形状の変形（図-5）
- ④ トンネル側面の掘削によるトンネルの水平移動および変形（図-6）
- ⑤ 杭の施工によるトンネルの水平移動（図-7）

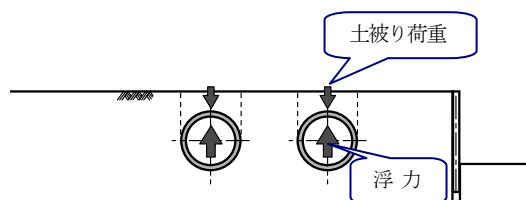


図-3 掘削中の課題（①浮力）

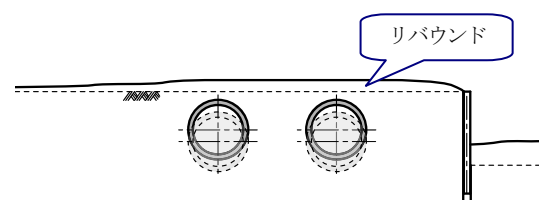


図-4 掘削中の課題（②応力解放）

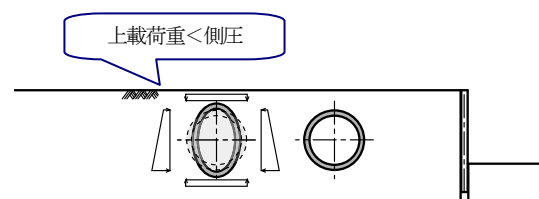


図-5 掘削中の課題（③土被り荷重減少）

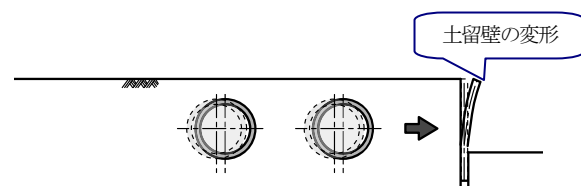


図-6 掘削中の課題（④トンネル側面掘削）

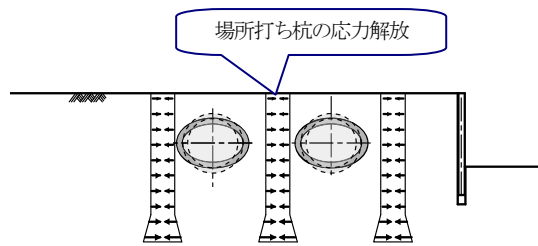


図-7 掘削中の課題(⑤杭打設)

(2) 建築工事完了後の地下水位回復時の課題

⑥ 腐食土層の圧密によるトンネルの浮き上がり

本工事の地下構造物とトンネル間には腐植土層が介在しており、地下構造物の構築後に、水位が回復するとトンネルに浮力が生じる。この際に、地下構造物とトンネル間に介在している腐植土層が圧密変形を起こし、トンネルが浮き上がることが懸念された(図-8)。

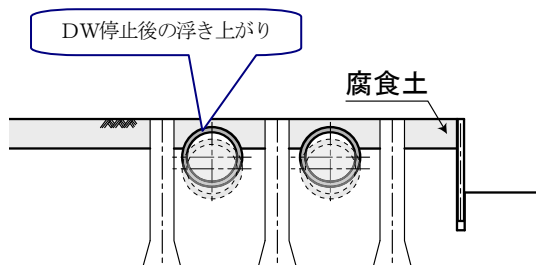


図-8 完成後の課題(腐植土層の圧密)

3-2 掘削工事の対策

(1) 掘削工事の課題への対策

① 地下水の浮力によるトンネルの浮き上がり対策

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、地下鉄トンネル東側妻は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、地下鉄トンネル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、掘削内部の地下水位の管理に注意を払い、掘削完了時に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。

ディープウェルの配置は、南北方向の水の流れがトンネルにより遮断されている可能性があると考え、山留め内部の水が均等に排水されるように配慮し配置した(図-9)。

SMWの深度は遮水性を確保するため、洪積粘性土が遮水層になるGL-33mとした。また、掘削によりトンネル上部の床付面がGL-4.0m(TP+8.2m)以下となると、地下水位上昇により地下鉄トンネルが浮き上がる可能性があるため、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-

9)を先行して掘削し、ポンプ排水能力を超える降雨が生じた場合にも、地下2階部分に貯水することにより、地下鉄トンネル周辺の地下水位の上昇を防止することとした。

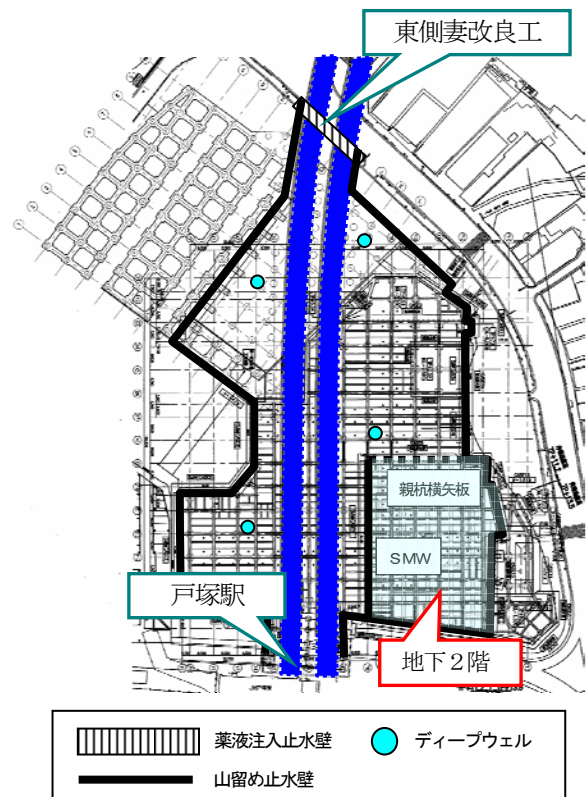


図-9 止水壁とディープウェルの配置

②④ 掘削時の応力解放によるトンネルの隆起およびトンネル側面の掘削による水平移動および変形への対策

掘削によるトンネルへの影響を少なくするためには、トレンチカット工法など分割施工が望ましい。一方で、本事業は平成22年春にオープンが予定されていたため、本工事は工期短縮が命題であった。そこで、トンネル縦断方向になだらかな変形をするように、全面同一レベルで掘削するオープンカット工法で工程短縮を図ることとした。

また、原設計では FEM 解析から、本工事の施工による地下鉄トンネルへの影響が小さいと確認していたが、万全を期すため、トンネルの両脇に近接して配置されていた機械室(B2階)を1つにまとめ、かつ、トンネルから離すこととし(図-10)、これにより以下の効果を期待した。

- ・ トンネル下地盤の応力解放を低減する。掘削形状の違いによるトンネル下の地盤の解放応力の違いをプシネスク式で確認した結果を図-11に示す。
- ・ トンネルに対する土留めの変形の影響を抑止する。

トンネル脇の土留めは剛性を確保するため SMW とし、
支保工はアースアンカーとした。

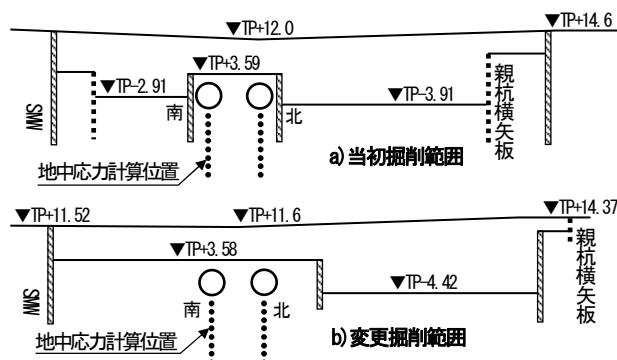


図-10 掘削断面形状の比較

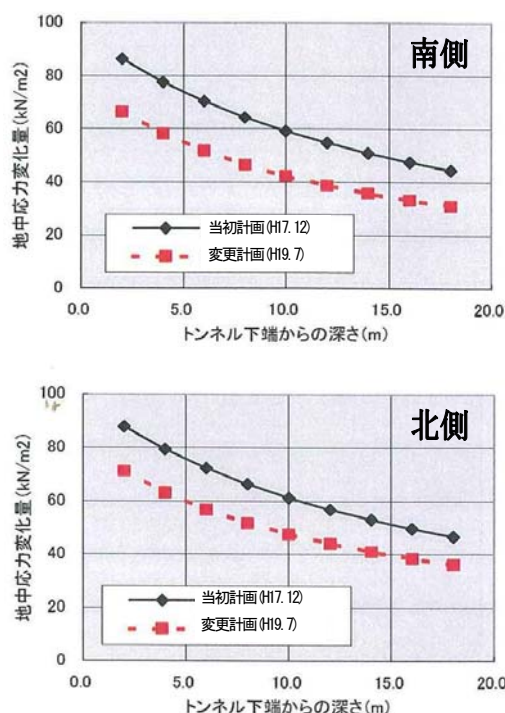


図-11 地中応力変化量の比較

③⑥ 掘削時の土被り減少によるトンネル断面形状の変形および腐食土層の圧密によるトンネルの浮き上がりへの対策

土被り圧減少に伴うトンネルの縦つぶれを防止するため、トンネル上部の拘束を高めトンネルの変形を抑制することを狙い、トンネル上部を掘削工事の全長にわたり高圧噴射攪拌工（JEP 工法）により地盤改良による補強を行うこととした（図-12）。

この補助工法により、建築工事完了後の地下水位回復時のトンネルの浮力によるトンネル上部の腐植土層の圧密変形を抑制することも可能となる。

⑤ 杭の施工によるトンネルの水平移動への対策

トンネルの左右に配置される場所打ち杭は両側を交互に削孔することとし、トンネルの水平移動が片側だけに影響を及ぼさないように計画した。

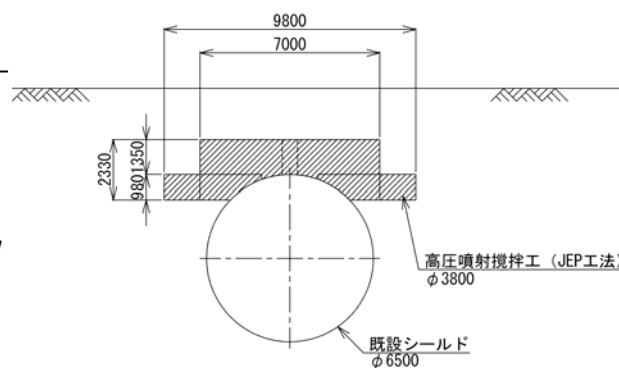


図-12 揚圧力対策工

§ 4. 計測管理計画

4-1 計測管理計画

計測管理は、施工協議の結果により図-13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った。なお、表-1に示す一次警戒値は許容値の50%、二次警戒値は許容値の70%で設定したものである。

表-1 計測機と管理値

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	3.5mm/10m	5.0mm/10m
	通り狂い	2.5mm/10m	3.5mm/10m
水盛り式沈下計	絶対変位	3.5mm	4.9mm
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

(1) 連結2次元変位計

連結2次元変位計は、鉛直変位及び水平変位計測を目的とし、トンネル側壁に5m間隔で設置しトンネル本体の変位を計測するもので、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及び水平変位量に変換することにより10m弦（相対変位）を計測する。連結2次元変位計による計測の概念図を図-14に、その設置位置を写真-2に示す。

(2) 内空レーザー変位計

トンネル側壁のスプリングラインに設置したレーザー距離計により内空変位を計測する。現状のセグメントおよび二次覆工に発生している応力は不明ではあったが、理想的な施工を行っていたと仮定した上で、トンネルの縦つぶれ、および横潰れに対する許容応力度に基づいた許容変位量を算出し、内空変位量の許容値とした。

(3) 構造物傾斜計

トンネルの傾斜による水準狂いを確認するため、傾斜計を連結2次元変位計の脇に設置した。水準狂いの許容値は、軌間 $W=1,435\text{mm}$ に対する傾斜角に換算することで算出した。

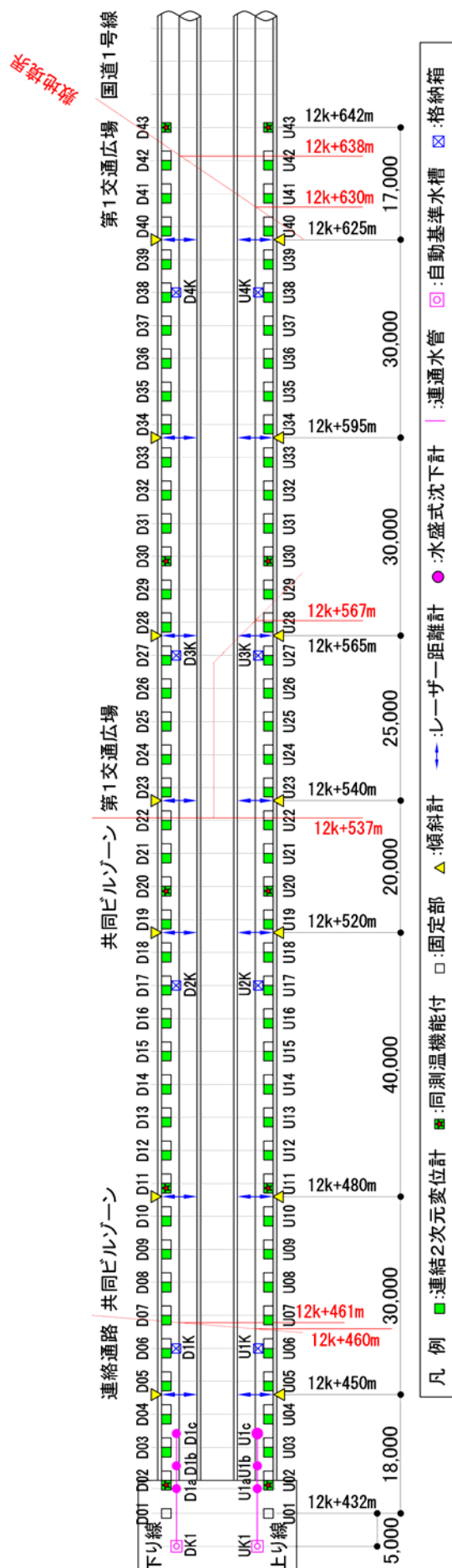
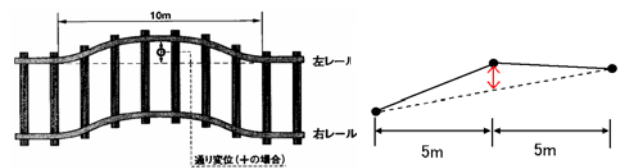


図-13 計測器配置図



シールド縦断方向検討により、5m間隔の節点鉛直変位から高低変位量を求める。

a) 高低狂い



シールド縦断方向検討により、5m間隔の節点水平変位から通り変位量を求める。

b) 通り狂い

図-14 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

(4) 水盛式沈下計

戸塚駅駅舎断面とトンネル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こととした。許容値は、軌道計測の10m弦に準じて $\pm 7.0\text{mm}$ とした。

(5) 水準測量

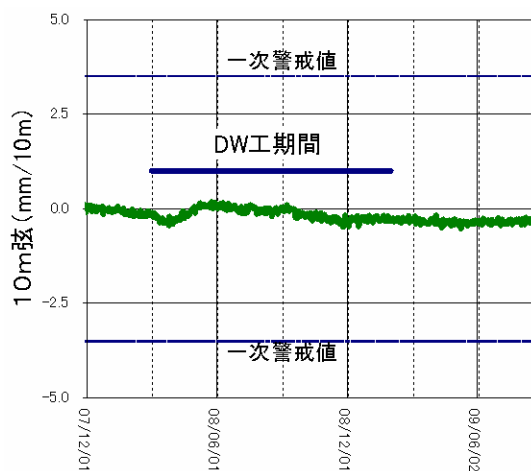
軌道とトンネル内の事前水準測量を行った。施工に伴いトンネルに変位が生じた場合、必要に応じて軌道とトンネルの水準測量を行う。計測ポイントにはマーキングを行い、同じポイントでの計測を行うことにより、軌道の絶対変位を計測するとともに、トンネルとの相関関係を確認することとした。

4-2 計測結果

最小土被り部のうち北側にある上り線の計測結果を図-15に示す。また、本工事の実施工程を図-16に示す。

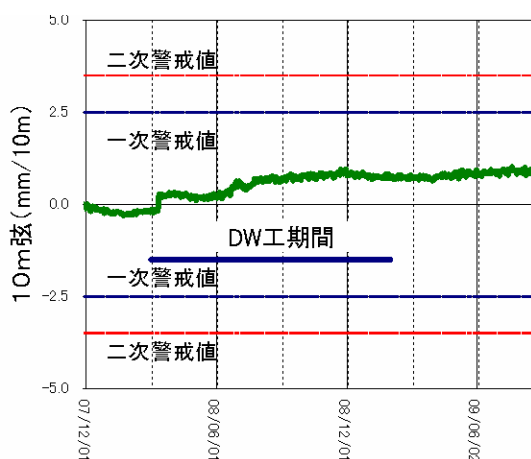
掘削工事が進むにつれて、各種計測値は増加する傾向にあったが、床付け時点で一次警戒値を超えることはなかった。また、地下躯体の構築後にディープウェルによる揚水を停止したが、復水によるトンネルの浮き上が

りは確認されなかった。



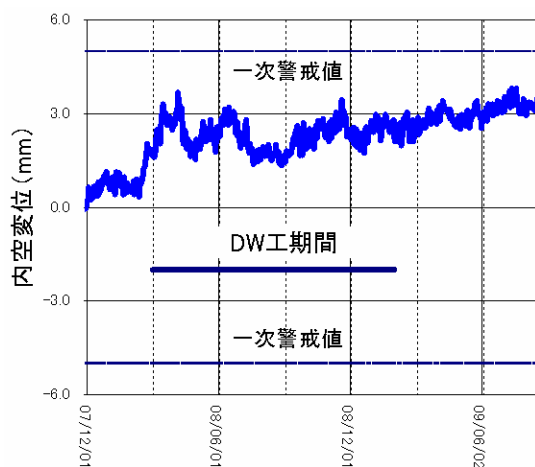
注) +が上

a) 10m弦 (高低狂い)



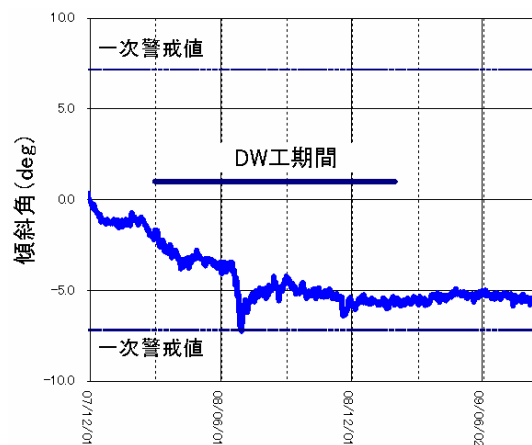
注) +が戸塚駅からみて右

b) 10m弦 (通り狂い)



注) +が横潰れ

c) 内空変位 (SL)



注) +が戸塚駅からみて時計回り

d) 傾斜角 (水準狂い)

図-15 計測結果

	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													
ディーブウェル工													

図-16 本工事の実施工程

§ 5. まとめ

掘削工では、部分掘削～構築とすればトンネルへの影響をより低減できると考えられるが、工期の制約により、全面同一レベルで掘削を進めていった。

掘削レベルが異なると高低狂い (10m弦) に影響を与えることから隣接する第1交通広場の工事と調整を行ったこと、リバウンド、地下水による影響に対しての適切な対策を行ったこと、掘削量に合わせた地下水位の制御を行ったことにより、営業線地下鉄に悪影響を与えずに施工ができた。また、二次覆工にクラックが生じることもしなかった。

謝辞:本工事において数多くのご指導を頂きました横浜市および (財) 鉄道総合技術研究所の皆様に感謝いたします。

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:大規模掘削工事にとまなう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.