

既設シールドトンネル直上を交差する 開削トンネルの設計・施工 DESIGN AND CONSTRUCTION OF OPEN-CUT TUNNEL CROSSING RIGHT ABOVE EXISTING SHIELD TUNNEL

古山章一*・瀧内義男*・中村昭良**
Shoichi FURUYAMA, Yoshio TAKIUTI, Akiyoshi NAKAMURA

At present, subway construction work is going on for about 3.9 km on the JR Senseki Line. This open-cut tunnel section in the subway construction work of the Senseki Line will cross right above the existing NTT Telephone-line Shield tunnel with an overburden of 2.0 m. For this purpose, we have already executed an estimate of the influence of excavating this new tunnel on the existing shield tunnel, and confirmed that there would be no trouble. Further, in actual construction, we are supervising the construction work, while measuring the behaviors of the existing shield tunnel.

Keywords: open-cut tunnel, overburden of 2.0 m, NTT Telephone-line Shield tunnel, influence estimation, measurements

1. まえがき

現在、仙台市が事業主体でJR仙石線仙台・苦竹間、延長約3.9kmの地下化工事を行っており、JR東日本が設計・施工監督を実施している。この工事の開削トンネル区間において、既設のNTT洞道の直上を土被り2.0mで交差することになった。このため、事前に開削に伴う既設シールドへの影響予測解析を行い、問題のないことを確認し、工事にあたっては既設シールドの挙動を計測しながら施工を進めている。これらの影響予測及び現在までの計測結果について報告する。

2. 既設洞道との位置関係・地質

2.1 既設洞道との位置関係(図-1, 2 参照)

平面的には図-1に示すように、シールドの到達立坑の近くで交差する位置関係となっており、この立坑の存在により、シールド縦断方向の動きが拘束される懸念がある。

また、交差位置は道路のT字路の直下であり、交通規制の困難な箇所となっている。

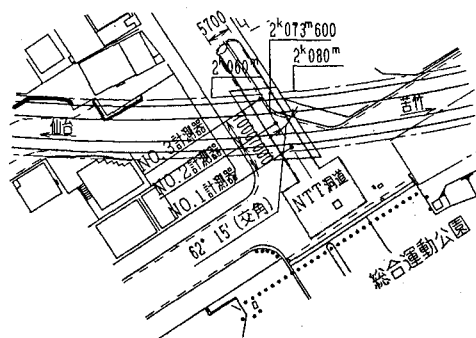


図-1 位置平面図

* 正会員 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 工事管理室
** 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 工事第一課

断面的位置関係では、函体掘削床付け面とシールド最上部との離隔は2mであり、1D（シールド外径D＝5.70m）を下回っている。

既設NTT洞道諸元 ①シールド内径：5.00m ②シールド外径：5.70m ③セグメント：鋼製セグメント（SS41相当）④二次覆工：有り（厚さ35cm）⑤ボルト：M22（普通ボルト材質4.6）⑥施工：昭和52年

函体の開削工事着手前の現地調査では、二次覆工のコンクリートにクラックの補修跡がみられた。また、漏水跡も確認された。

既設シールドの許容変位量は、NTTの保守サイドから以下に示す値が示された。

- (1) 水平、鉛直変位 ——— $\pm 5\text{mm}$ ($\pm 3\text{mm}$)
- (2) 傾斜（縦断） ——— $\pm 5'$ ($\pm 3'$)
- (3) 内空変位 ——— $\pm 5\text{mm}$ ($\pm 3\text{mm}$)

注）（ ）：管理目標値

2. 2 地質状況

ボーリング柱状図に示すように、地表1.0m前後は表土、ローム層であり、その下位に函体の床付け面である第四紀洪積土の段丘礫層が位置する。その層厚は15m程度であり、N値は27～50以上とばらついている。さらに、その下位に基盤である新第三紀鮮新世仙台層群に属する滝の口層の砂岩が分布している。この砂岩の上層10mは風化が進んでおり、N値も10～20程度となっている。既設シールドの下側半分がこの風化砂岩部分に位置している。地下水位はGL-7.6m程度である。

3. 影響予測

今回、シールド上部を土被り2mで掘削することから、横断方向については上載荷重が除荷されることによりセグメント、二次覆工に偏圧が作用し、局部的に大きな曲げモーメントが発生することが、縦断方向には同様に上載荷重が除荷されること、かつ、到達立坑に近いことから縦断方向の動きが拘束され、リング間のボルトに大きな応力が生じ、目開きが生じることが懸念された。そこで、これらの問題点について、次のような解析により影響予測を行った。

3. 1 横断方向解析

- (1) 解析手法 非線型FEM（掘削相当外力を掘削面に作用させる手法）
- (2) 解析範囲 深さ方向 19.5m×横断方向 25.0m（5D程度）
- (3) 解析ステップ

①STEP 1：シールド構築前（初期状態）②STEP 2：シールド掘進時（二次覆工の初期状態）③STEP 3：シールド上部掘削時

(4) 物性値

地盤の変形係数は、応力水準で変化する。計算では、各掘削段階で要素毎に応力状態に応じて変形係数Eを再評価し、次のステップに進む。破壊基準としては、モール・クーロンの破壊基準を用い、破壊接近度により変形係数およびポアソン比を低減する手法を採用した。地盤の物性値を表-1に示す。

(5) 計算結果

計算結果を表-2に示すが、STEP 3においても鋼製セグメント発生応力度は許容値以下であり、STEP 2よりも小さくなっているが、これはシールドの上部だけではなく、側部の土も除荷されることによると考えら

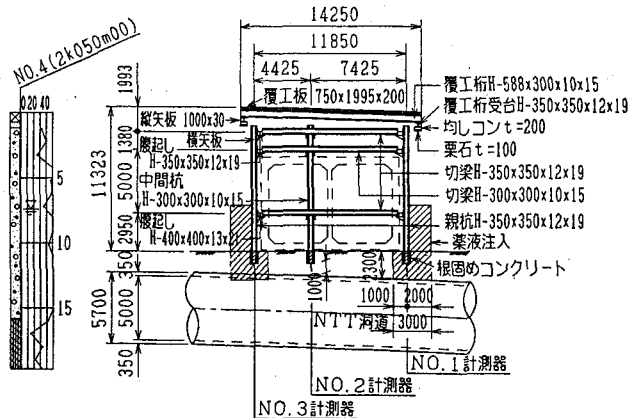


図-2 断面図

れる。一方、二次覆工のコンクリートについては引張が16.7kgf/cm²（シールド側部が最大）、圧縮が106.4kgf/cm²（シールド頂部が最大）と引張、圧縮強度よりも小さいものの許容曲げ引張、圧縮応力度よりも大きい。そのため、横断方向の検討からは、シールド頂部コンクリートの圧壊およびシールド側部のひびわれが施工管理上の着目点となる。

表－1 地盤の物性値

地 盤	物 性	単位体積重量 γ (tf/m ³)	初期変形係数 E_0 (kgf/cm ²)	破壊時変形係数 E_r (kgf/cm ²)	初期 ν の比 ν_0	破壊時 ν の比 ν_r	n	粘着力c (tf/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
砂礫層	上層N=30	2.0	750	75	0.3	0.45	1.0	1.0	36
	下層N=50	2.0	1250	125	0.3	0.45	1.0	1.0	36
風化粗粒砂岩N=30		1.6	2700	270	0.3	0.45	0.25	1.0	34
粗粒砂岩 N>50		2.0	7000	700	0.3	0.45	0.17	35.0	28

$$E_r = 0.1E_0 \quad \frac{E}{E_0} = R^n + (1-R^n) \frac{E_r}{E_0} \quad \frac{\nu}{\nu_0} = R^n + (1-R^n) \frac{\nu_r}{\nu_0}$$

表－2 計算結果（横断）

STEP	モーメント正が最大		モーメント負が最大	
	σ_i	σ_o	σ_i	σ_o
STEP-2	-587	944	1511	-430
	($\theta=0$)		($\theta=5/12 \pi$)	
STEP-3	-11	593	994	285
	($\theta=2/3 \pi$)		($\theta=5/12 \pi$)	

単位：kgf/cm²

3. 2 縦断方向

(1)解析手法^{1), 2)} 棒構造モデル（図－3 参照）

(2)解析モデル³⁾

①解析範囲 シールド外径の50倍

②立坑との構造 ピン構造でモデル化

(3)物性値

①変形係数 $E_0=28N$, $90N$ の両方でバネ値を計算している。 $E_0=28N$ は載荷時の変形係数、 $E_0=90N$ はリバウンド（荷重が除荷されるということ）を考慮した変形係数である。

②二次覆工の剛性は考慮しない

(4)荷重

土被り荷重の減少分を上向きの荷重として作用させる方法が荷重としては最大値であるため、この値を用いて計算する。

(5)ボルトの仮設割増し

シールドの上を掘削するのは一時（1年半程度）であり、その後函体を構築するので5割の割増しとする。リング継ぎボルトに生じる応力は、中立軸を境にして縦リブセグメント継手板およびスキンプレートの有効断面からなる圧縮断面と全ボルトの有効断面積からなる引張断面とに分けて算出する。

(6)計算結果

計算結果を表－3に示す。発生応力度については許容値を満足している。しかし、変位については $E_0=28N$ の場合、5mmの許容値に対して4.6mmとぎりぎりである。そのため、縦断方向の検討からは、シールドの浮き上がりが施工管理上の着目点となる。これらは、二次覆工の剛性を考慮していないことによると考えられる。

表－3 計算結果（縦断）

CASE 地盤・ 変位・ 応力	変位 mm	傾斜角 分	応力度 kgf/cm ²		目録 mm
			引 張	圧 縮	
CASE 1($E_0=28N$)	4.6	2.7	348.0	625.3	0.72
CASE 2($E_0=90N$)	1.4	1.1	198.4	514.4	0.41
許 容 値 (割増分)	5.0	5.0	1800.0 (600)	1200.0 (400)	

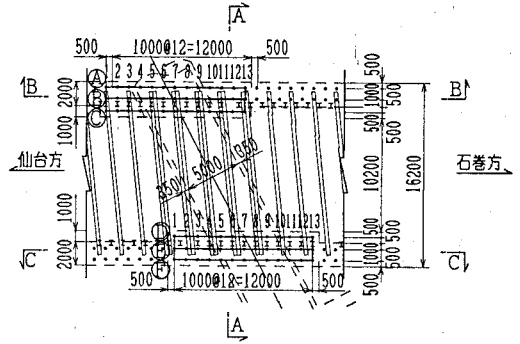
4. 施工（図－4，5 参照）

シールド直上の仮土留工は、シールドがあるためつり合いから求まる根入れ長が確保できない。そこで、最下段切梁を支点とした片持ち梁で部材を計算した。また、この区間は交差点に位置し交通止めができないため、親杭横矢板式土留工とし、止水のため地下水位以下は薬液注入を行うこととし、これらは夜間の片側ずつの交通規制により施工した。

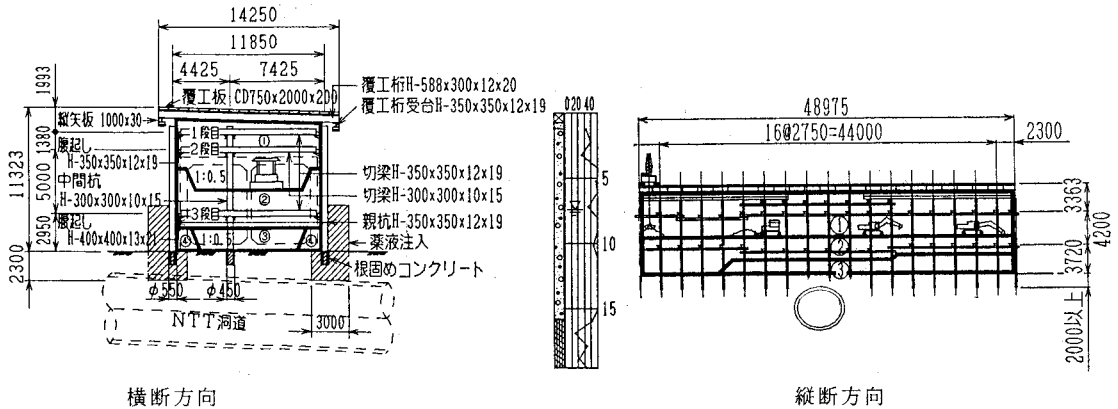
掘削方法では、既設シールドに極力影響を与えない掘削方法とするため、以下のような掘削順序とした。

- ・横断方向－土留壁の変形を抑えるため、アイランド工法を採用
- ・縦断方向－シールド直上の土を極力残し、両側を掘削してから直上部を掘削する方法を採用

シールド直上の仮土留工の歯抜け部分の止水は、仮土留工が親杭横矢板式であるため、止水工を完全なものとしないと、水および土粒子がぬけて変状をきたす恐れがある。特に、掘削底から下の歯抜け部分においては、その危険性が高い。そこで、止水工として①薬液注入工法②噴射攪拌工法（コラムジェット等）を考えたが、現地で径20cm程度の玉石がでてくることが想定され、噴射攪拌工法では玉石の背面が改良されないことが懸念されたため、薬液注入工法を採用した。注入は、土被りが十分ある時点で行い、注入範囲は対象地盤の透水係数が 10^{-2} cm/secと大きい土留壁背面側2列、掘削側1列とした。注入は二重管複合注入工法を採用し、ゲルタイムはショートで5秒、ロングで60分と設定した。



図－4 薬液注入



図－5 掘削方法

5. 計測

影響予測解析の結果から、特別の対策工はいらないと判断したが、縦断方向の検討ではバネ値の計算で変形係数を $E_0=28$ Nで計算した場合、変位量が4.6mmと許容値ぎりぎりとなっていること、また、横断方向でも

コンクリートのひびわれ発生の懸念もあること、また、止水の薬注による影響も予想されることから、計測管理を実施することとした。計測はNTT関係者以外には常にはシールド内に入れないことから、NTTに委託することとした。

5. 1 計測内容、計測点

- (1)沈下 —— 水盛式沈下計 測定範囲 100mm (精度±1%) 基準装置は到達立坑内に設置
(2)傾斜 (横断) —— 傾斜計 測定範囲±50' (精度±0.5%)
(3)内空変位 —— 内空変位計 測定範囲 20mm (精度±1%) [鉛直、水平両方向]

計測点は図-1、2に示すように①到達立坑に近い断面 (仙石線函体上り線) ②中間断面③到達立坑から離れた断面 (仙石線函体下り線) とし、計測器はシールド内に設置した。

5. 2 計測結果

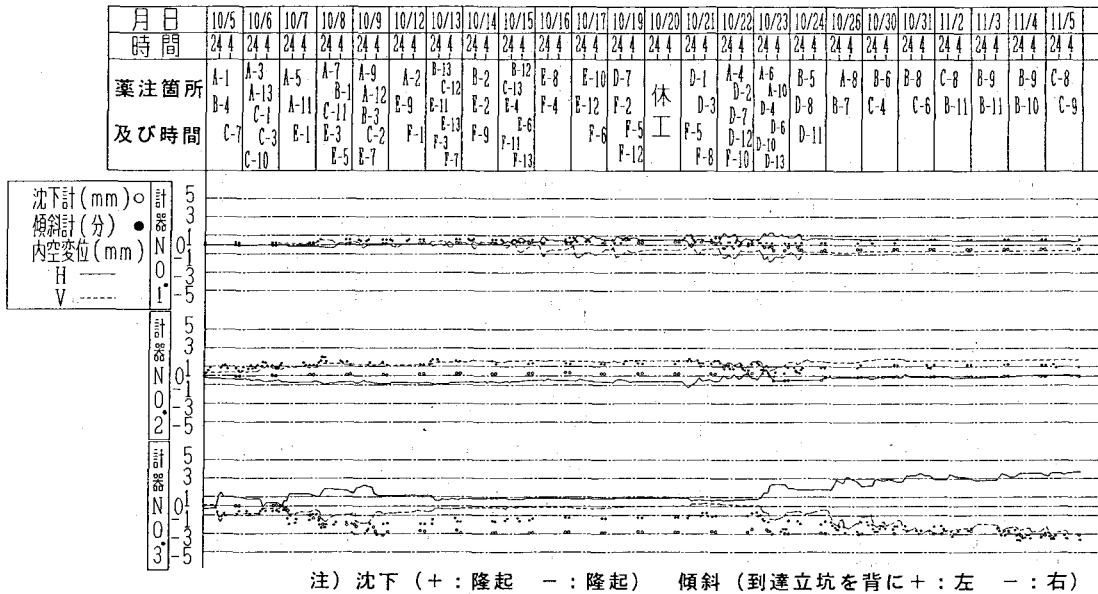
(1)薬液注入時 (図-6 参照)

沈下、傾斜 (横断) とともに断面①、②では縦長に、断面③では横長の内空変位の変化がみられた。沈下については注入時に沈下が進行するが、注入を終了すると若干戻る傾向が見られた。傾斜は、注入方向と同じ方向に回転する傾向がみられた。

この変状の原因としては、以下のことが考えられる。

- ①いままで土粒子のかみ合わせで、せりもっていたものが、薬液注入により均衡がくずれて沈下した。
②建設時の裏込め注入、テールボイド処理技術が現在ほど完全ではなかった。
③シールド下部もすいており、シールド自体が浮いている状態にあった。

対策としては、薬液注入のショートとロングの比率を1:1 から1:2 へ変更するとともにショートの注入速度を15ℓ/分から2/3 の10ℓ/分とした。



注) 沈下 (+: 隆起 - : 隆起) 傾斜 (到達立坑を背に + : 左 - : 右)

図-6 薬液注入時の挙動

(2)掘削時 (表-4、図-7 参照)

薬液注入終了時及び掘削終了時の実測値と計算値を表-4に示す。断面①、③については薬液注入による影響がキャンセルされる傾向にあるが、断面②については、沈下以外は助長される傾向がみられた。①、③断面は仮土留壁で拘束されるため、掘削の影響は②断面が一番大きい結果となった。

解析値との比較では薬液注入終了後のものを基準とすると、定性的には合っている。定量的には、ケース1とケース2の間にある。

6. あとがき
土被り2.0mという非常に離隔の小さい開削工事であるが、現在掘削が終了し函体の構築を行っているところである。薬液注入時及び掘削時には管理目標値を超えたものもあったが、許容値を超えたものはなかった。今後、埋戻し作業があるが、沈下、内空変位についてはこれまでの変状を緩和する方向に寄与すると想定される。

本工事の開削に伴う既設シールドに対する影響解析は、八千代エンジニアリング(株)にお願いし、そのモデル化、結果の評価等に当たっては(財)鉄道総研小山室長にご指導を頂いた。ここに、深甚の謝意を表します。

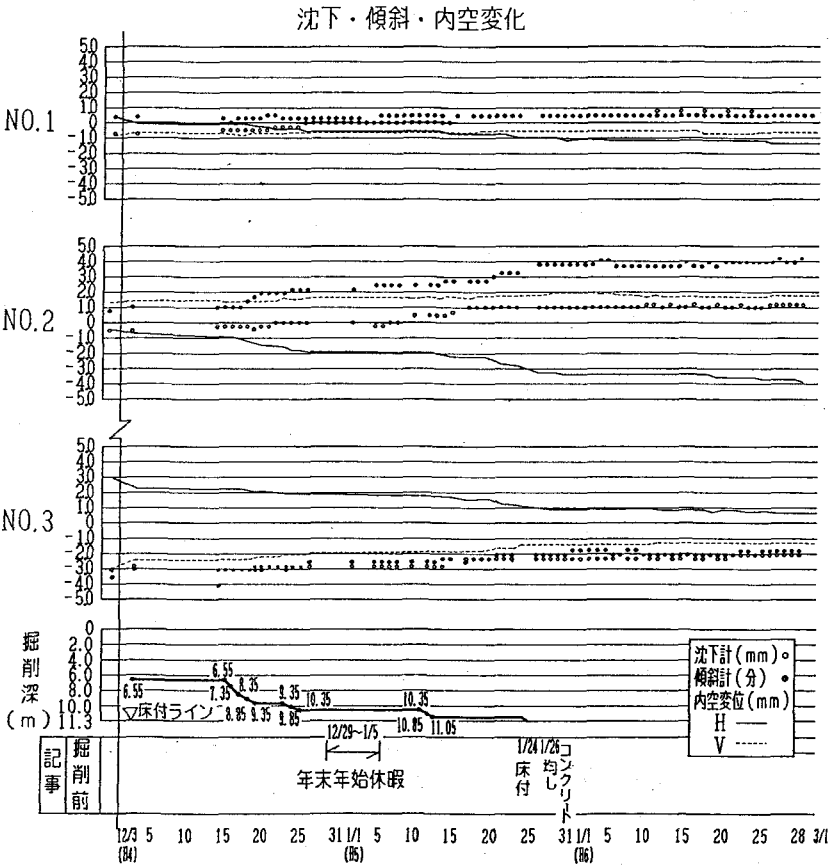


図-7 掘削時の挙動

表-4 計算値と実測値

7. 参考文献

1) 村上博智・小泉 淳：シールド工事用セグメントのセグメント継手の挙動について、土木学会論文報告集，第296号，pp.73～86，1980.4.

2) 村上博智・小泉 淳：二次覆工された千鳥組セグメントリングの挙動について，土木学会論文報告集，第430号，pp.135～142，1991.6.

3) 小泉 淳・村上博智・西野健三：シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について，土木学会論文報告集，第394号，pp.79～88，1988.6.

位置 計測項目	断面①				断面②				断面③			
	沈下 (mm)	断面方向傾斜 (°)	内空変位mm		沈下 (mm)	断面方向傾斜 (°)	内空変位mm		沈下 (mm)	断面方向傾斜 (°)	内空変位mm	
計算値												
実測値												
CASE 1(E ₀ =28N)	+2.3	-	-	-	+4.6	-	-	-	+4.1	-	-	-
CASE 2(E ₀ =90N)	+0.7	-	-	-	+1.4	-	-	-	+1.4	-	-	-
実測 1.薬注終了時	-0.5	0.3 左	+0.3	-0.9	-0.8	0.8 左	-0.4	+1.3	-3.0	3.5 右	+2.9	-2.9
実測 2.掘削終了時	+0.5	0.5 左	-1.0	-0.3	+1.0	4.0 左	-4.0	+1.7	-2.0	1.8 右	+0.6	-1.3
値 2-1	+1.0	0.2	-1.3	+0.6	+1.8	3.2	-3.6	+0.4	+1.0	-1.7	-2.3	+2.6

注) +: 隆起 - : 沈下