

軟弱沖積粘土層のシールド掘削 —つくばエクスプレス（常磐新線）綾瀬川トンネル— AYASEGAWA TUNNEL IN TSUKUBA EXPRESS EXCAVATED THROUGH A SOFT ALLUVIAL CLAY LAYER BY SHIELD METHOD

半田 卓¹⁾・須田悦次²⁾・内田雅洋³⁾

Takashi HANDA, Etsuji SUDA and Masahiro UCHIDA

Ayasegawa tunnel in Tsukuba Express has been constructed through a soft alluvial clay layer by shield tunneling method. Some important structures have existed close to Ayasegawa tunnel in the ground. Therefore, it was important to predict the ground behavior caused by shield tunneling and monitor the ground movements. Before construction, a mutual influence has been analyzed and a safety of an adjacent structure has been confirmed. As a result, the influence of the shield tunneling upon an adjacent structure was very small. In this paper, a comparison between the prediction of ground movements and the result of measurements is discussed.

Key Words: soft alluvial clay layer, adjacent structure, mutual influence, ground movement

1. はじめに

つくばエクスプレス（常磐新線）は、東京都内秋葉原を起点として、埼玉県、千葉県を経て茨城県つくば市に至る延長58.3kmの都市高速鉄道線であり、平成17年度の開業に向け現在工事中である。開業後は、秋葉原～つくば間が最速45分で結ばれる予定である。

今回報告する綾瀬川トンネルは、埼玉県八潮市大曽根に発進立坑を配置し、東京都足立区六町駅（仮称）に向かって、延長 $L=2,056\text{m}$ 、土被り $H=6.2\text{m}\sim 20.8\text{m}$ を外径 $\phi=10.2\text{m}$ のシールドマシンにより、泥水式シールド工法を用いて掘進した複線断面のトンネルである。

掘削対象地山の約8割において、 N 値が0～10である有楽町層および七号地層の軟弱沖積粘性土であった。図-1に綾瀬川トンネルの地質縦断面図を示す。

本トンネルは、軟弱地盤中を通過する上に、さらに電力、水道、下水道の幹線及び首都高速道路といった主要なライフラインとの交差及び近接施工が避けられない工事でもあった。そのため、シールド掘進に際しては事前に影響解析を行うと共に、掘進中は各種計測を行い地盤の挙動を把握して、近接構造物への影響を極力少なくする必要があった。

本稿では、綾瀬川トンネルが近接する既設構造物のうち、東京電力地中線洞道のシールドトンネル（以下、東電洞道）に対する影響予測と計測結果について報告する。

-
- 1) 日本鉄道建設公団東京支社足立鉄道建設所
 - 2) 日本鉄道建設公団東京支社足立鉄道建設所
 - 3) 正会員 日本鉄道建設公団東京支社足立鉄道建設所

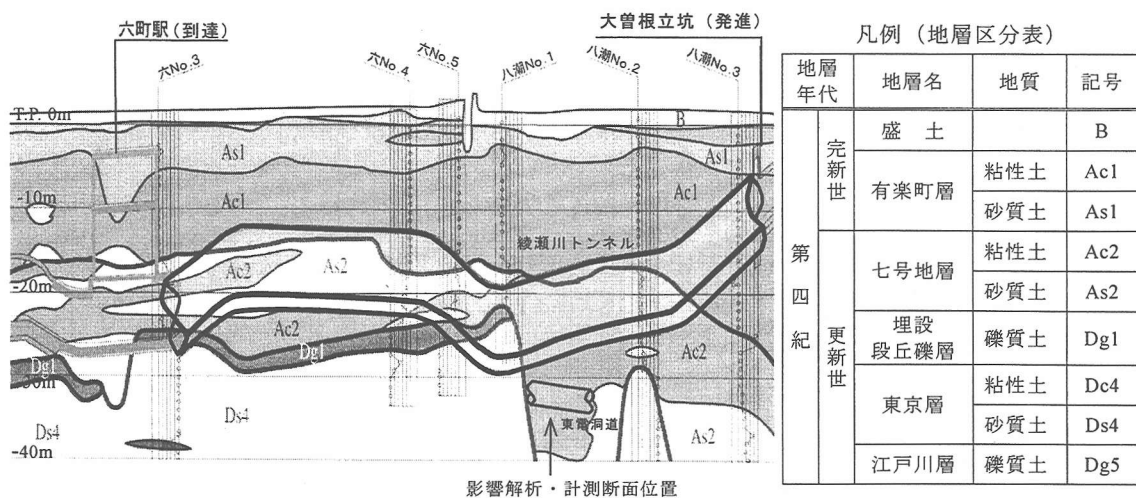


図-1 地質縦断面図

2. 東電洞道に対する影響解析

(1) 予測解析

綾瀬川トンネルとその掘進方向右下から左側へ位置している東電洞道（シールド外径 $\phi = 3.6\text{m}$ ）とは、八潮市において延長約 $L = 200\text{m}$ に渡り併走して交差している。この区間における地質構造は沖積粘土層のおぼれ谷が想定されていた。交差部の位置関係を表す縦断面図を図-1に、平面図を図-2に示す。

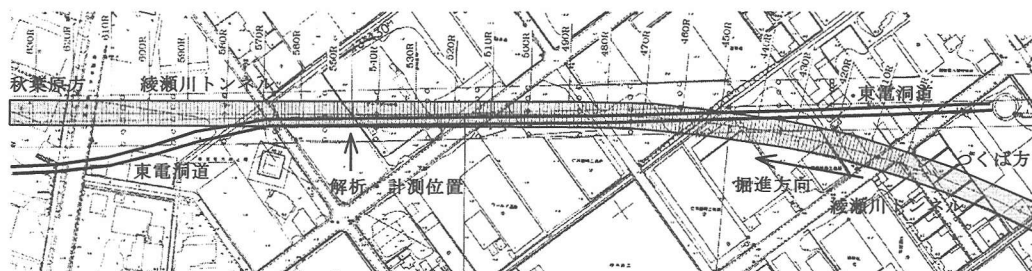


図-2 交差平面図

施工に当り、東電洞道の安全性を確認する必要があり、綾瀬川トンネルの掘進に伴う東電洞道の応力変化・変位を算定するため、事前にFEM解析（弾性解析）を行った。

解析断面は、東電洞道が綾瀬川トンネルに最も近接する位置に決定した。解析断面図を図-3に示す。

解析は、以下の3ステップで行った。

Step 1 …掘削前の地山の原地中応力を計算

Step 2 …シールド断面位置の地山が除去された状態を計算
（切羽通過時）シールドに作用する泥水圧を考慮

$$\text{解放荷重 } \Delta P = \alpha (\sigma_0 - P_1)$$

ここに、 α : 解放率 ($\alpha = 35\%$)

σ_0 : 原地中応力 (= 地山の有効応力)

P_1 : 切羽泥水圧

Step 3 …セグメントに地山の全応力が作用した状態を計算

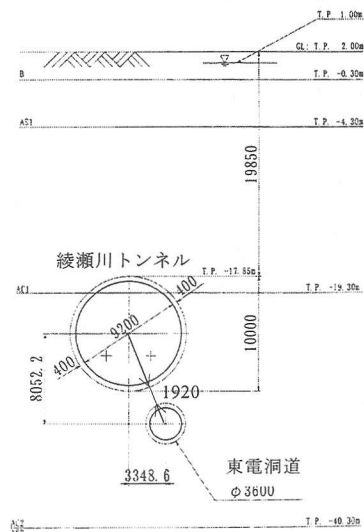


図-3 解析断面図

(セグメント組立、裏込注入完了後) 解放荷重の残り分 (65%) を負荷させて計算

セグメントに作用する荷重 $P = \sigma_0 - \Delta P$

Step 2において、泥水圧を算定するための有効鉛直土圧には、地表面活荷重 ($P_0 = 9.8 \text{ kN/m}^2$) も載荷することとし、側圧係数は $\lambda (K_0) = 0.7$ (土水一体) として計算し、シールド中心での泥水圧は $P_f = 2.91 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ と設定した。

地盤定数は、解析断面位置から約 400m 離れたところのボーリング結果に基づいて決定した。解析に用いた各地盤定数を表-1に示す。

表-1 解析に用いた地盤定数

地層	標高 T.P.(m)	N値	単位体積重量 $\gamma_t (\text{kN/m}^3)$	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 $\phi (^{\circ})$	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
B	+2.0	1	16	29	0	2,450	0.30
As1	-0.3	2	18	0	20	5,680	0.30
Ac1-2D	-4.3	2	18	75	0	24,500	0.45
Ac2-1	-19.3	5	16	67	0	23,520	0.45
As2-1	-40.3	10	18	0	30	68,600	0.35
Ds4-U	-44.3	65	22	0	42	156,800	0.30

(2) 解析結果

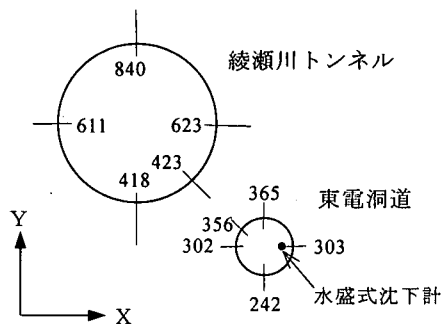
解析の結果、綾瀬川トンネルと東電洞道における変位は、表-2の通りであった。東電洞道は、Step 2および Step 3のいずれにおいても綾瀬川トンネル方向へ引っ張られるような変形が見られる。一方、綾瀬川トンネルは、左右方向に広がり上下方向につぶれる傾向が見られる。また、綾瀬川トンネル上端付近での地中鉛直変位は、Step 2で 18mm 程度の沈下、Step 3で 15mm 程度の沈下となり、セグメント組立および裏込注入完了後、3mm 程度隆起する結果になった。

表-2 解析結果 (各節点の変位)

各節点の変位(mm)

節点 No.	Y方向		X方向	
	Step 2	Step 3	Step 2	Step 3
418	13.63	34.57	-0.41	-0.44
423	13.45	33.78	0.24	0.19
611	-3.80	6.46	-2.60	-11.08
623	-3.23	7.62	3.58	13.14
840	-21.45	-20.42	0.64	1.27
242	6.34	17.17	-2.90	-6.49
302	8.97	23.09	-1.13	-2.39
303	5.37	15.31	-2.85	-6.51
356	9.15	23.66	-1.57	-3.43
365	8.35	21.91	-1.33	-2.93

凡例 (各節点の位置)



東電洞道における応力変化については、綾瀬川トンネルの掘進に伴い、東電洞道に働く断面力のうち、卓越する上下方向の荷重が除荷されるように働き、結果として最大応力は掘進前と比べて余り変化なかった。応力度の計算結果は以下の通りであり、いずれも許容応力度以内に十分収まっており、安全であることが確認された。

セグメント本体コンクリート圧縮応力度： $\sigma_c \cong 7.8 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{ca} = 14.7 \text{ N/mm}^2$
鉄筋の引張応力度： $\sigma_s \cong 49.0 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{sa} = 176.4 \text{ N/mm}^2$
継手部のボルトの引張応力度： $\sigma_{bs} \cong 4.9 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{bsa} = 294.0 \text{ N/mm}^2$

3. シールド掘進に伴う地盤の挙動調査

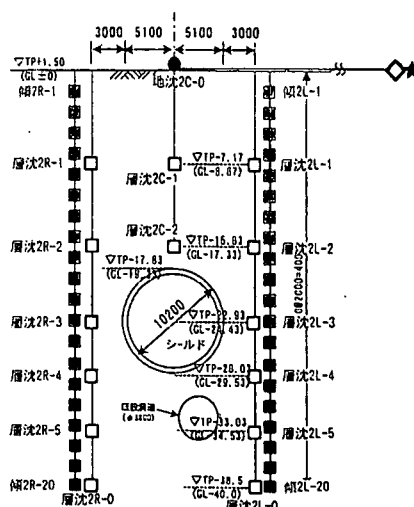
(1) 地盤挙動の調査項目と調査方法

綾瀬川トンネル掘削に際しては、東電洞道との近接地点において地盤鉛直変位および地盤水平変位ならびに地表面変位の挙動調査を行った。調査に用いた計測器の設置断面および使用計測器を図-4に示す。

凡例（使用計測器）

記号	計測項目	使用計器	台数
□	地盤鉛直変位	ワイヤ式変位計	3セット(14台)
■	地盤水平変位	埋設型傾斜計	40台
●	地表面変位	連通管式沈下計	1台
◇	〃	基準装置	1台
★	外気温	温度計	1台

図-4 計測器設置断面図



(2) シールド掘進実績

シールドの掘進は、計測断面の前後で一日当りおよそ 6 リング(L=9.0m)と順調に進んだ。切羽の計測断面通過前-2D(D=10m≒シールド外径)からテールの計測断面通過後+2Dの区間における掘進データの各平均値は、以下の通りであった。これらはすべて、計測断面の前後で大きな変動はなく、シールドの掘進管理は適正に行われたものと考えられる。

總 推 力：切羽 通過前 $2.9 \times 10^4 \text{kN}$

: テール通過後 $3.0 \times 10^4 \text{ kN}$

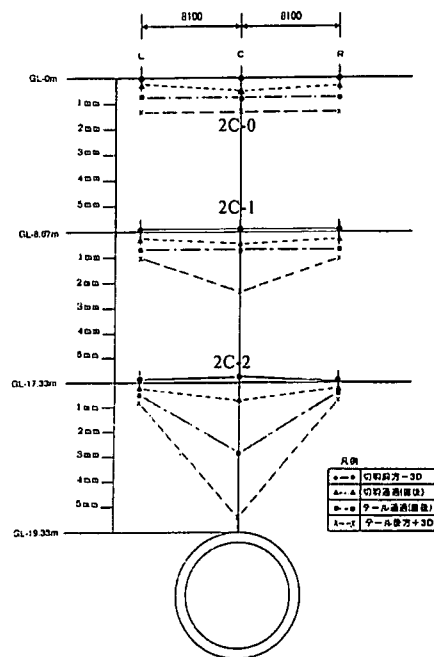
切羽泥水压：切羽 通過前 $3.06 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$

: テール通過後 $3.10 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$

裹込注入圧：切羽 通過前 $3.56 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$

: テール通過後 $3.60 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$

(切羽泥水压に対して $+0.50 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$)



圖—5 地盤鉛直變位分布圖

(3) 地盤挙動の調査結果

計測結果のうち、トンネル上部における地盤鉛直変位の分布を図-5に示す。トンネル直上で変位量が最も大きく、それに対して左右の変位量は小さくほぼ左右同じであった。

また、シールド掘進における主要時点でのトンネル上部の地盤鉛直変位量および地表面変位量を表－３に示す。切羽が計測断面に近づくにつれ地盤が隆起し、切羽が通過する直前から沈下する傾向にあることが分かる。テールが通過する前後においてはわずかながら隆起するが、その後再び沈下し始める。この傾向は、トンネル直上のトンネル上端付近において顕著に表れる。

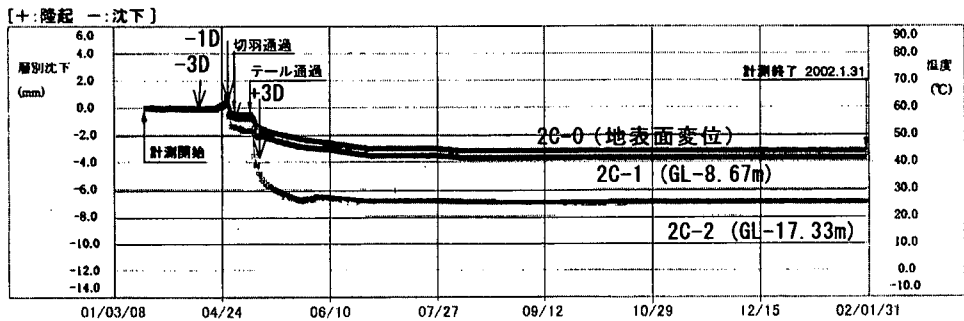
表－３ 地盤鉛直変位および地表面変位の計測結果

単位：mm

切羽、テール距離		－3D	－2D	－1D	切羽通過		テール通過		＋1D	＋2D	＋3D	最終
					直前	直後	直前	直後				
掘進リング（数）		527	534	540	547	548	553	554	560	566	573	
トンネル直上	地表面	0	0.2	0.6	-0.3	-0.3	-0.7	-0.6	-1.2	-1.4	-1.5	-3.2
	GL-8.67m	0.1	0.3	0.8	-0.4	-0.5	-1.1	-0.8	-2.1	-2.3	-2.0	-3.7
	GL-17.33m	0.2	0.3	1.0	-0.6	-0.7	-3.2	-3.0	-4.1	-4.6	-5.2	-7.0
トンネル左側	地表面	0	0	0.6	-0.1	-0.1	-0.3	-0.5	-1.2	-1.4	-1.4	-2.8
	GL-8.67m	0.1	0.1	0.6	-0.2	-0.2	-0.7	-0.8	-1.3	-1.5	-1.5	-2.3
	GL-17.33m	0.1	0.2	0.7	-0.2	-0.2	-0.8	-0.5	-1.1	-1.2	-1.2	-1.6
トンネル右側	地表面	0	0.1	0.8	-0.2	-0.2	-0.5	-0.6	-1.0	-1.2	-1.6	-3.0
	GL-8.67m	0	0.1	0.5	-0.2	-0.2	-0.7	-0.8	-1.3	-1.5	-1.8	-2.6
	GL-17.33m	0.1	0.2	0.6	-0.3	-0.3	-0.7	-0.4	-0.8	-1.0	-1.1	-2.1
計測時 日 時		2001/ 4/23 14:00	2001/ 4/24 21:00	2001/ 4/25 21:00	2001/ 4/26 22:15	2001/ 4/26 23:18	2001/ 5/7 12:36	2001/ 5/7 14:21	2001/ 5/8 14:30	2001/ 5/9 13:00	2001/ 5/10 21:00	2001/ 11/30 23:00

〔＋：隆起；－：沈下〕

トンネル直上における地盤鉛直変位および地表面沈下の経時変化を図－６に示す。トンネル上端付近（GL-17.33m）においては、切羽が通過するまでに 1.0mm の先行隆起が見られる。切羽通過直後には-0.7mm まで沈下し、テール通過直後には-3.0mm まで沈下した。テール通過後＋3D 時点での沈下量は 5.2mm であったが、その後大きな変化はなく最終的に変位は 7.0mm の沈下で収束した。また、地表面変位は、0.6mm の先行隆起が生じたあと、切羽通過直後には-0.3mm の沈下であった。最終的には地表面の沈下は 3.2mm で収束している。



図－６ 地盤鉛直変位および地表面変位の経時変化図（トンネル直上）

一方、地盤水平変位調査からは、トンネル近傍の左側および右側で共に背面側（地山外側）に変位する傾向が認められたが、最大3mm程度（左側、GL-17.33m）で小さな変位レベルにあった。これは、シールドの切羽泥水圧によって変位したものと考えられる。

4. 東電洞道の計測

綾瀬川トンネル掘進に伴う東電洞道に与える影響は解析結果より微少であることが確認されている。しかし、東電洞道は供用中であり、シールド掘進中に悪影響を及ぼすようなことは絶対避けなければならなかった。このため、シールド掘進によって受ける影響を計測し、東電洞道への安全性を図ることを目的として、東電洞道内に水盛式沈下計を設置した（表－2 凡例図参照）。

計測値は切羽通過時において 2.1mm、シールド完成後において 2.8mm の上昇であった。表－4 に解析値と共に示す。

表－4 東電洞道の変位量 単位：mm

項目 施工 Step	解析値	計測値
Step 2	5.37	2.1
Step 3	15.31	2.8

[+：上昇]

5. 影響解析における予測値と実測値との評価

トンネル上端付近における鉛直変位の収束値は、解析では 15mm の沈下であったが、実際には計測結果によると 7mm の沈下であった。また、東電洞道に設置した沈下計の値は表－4 に示す通り、解析値に比べて随分と小さい値に収まった。一般的に応力解放率の値は、硬質地盤に比べ軟弱地盤になるほど小さくなることが報告されており、今回解析を行った地盤特性からすると、解放率 $\alpha = 35\%$ という値は大き過ぎた可能性がある。また、初期応力として、掘削前に生じている初期ひずみを考慮した土圧ではなく、全土圧を用いていることも大きめの変位が予測された要因の一つと言える。

さらに、影響解析における綾瀬川トンネル上端付近の鉛直変位は、Step 2 において 18mm 沈下した後、Step 3 において 3mm 上昇する結果となった。しかし実際は、切羽が近づくにつれ先行隆起はしたものの、テール通過時にわずかに隆起した他は、収束するまで沈下し続ける傾向にあった。このことは、Step 2 として解放率 $\alpha = 35\%$ で応力解放を行った後、Step 3 として解放荷重の残り分 65% を負荷させ全荷重を考慮して応力再配分を行っているために、セグメント組立および裏込注入完了後、トンネル周辺が逆に締まる（変形係数が大きくなる）結果になった可能性が考えられる。

掘進中における切羽泥水圧は、計測断面の前後において大きな変動もなくほぼ一定であり、解析で用いた泥水圧とほぼ同程度の値であった。また地盤鉛直変位は、切羽通過時およびテール通過時において特に目立った増加もなく、変位を抑制することができた。

6. おわりに

シールドトンネルの設計段階において、個々の地山特性を考慮した再現可能な応力解放率を設定することは容易なことではない。それ故に施工段階においても、解析特性を考慮しつつ掘進中に得られた各計測結果を吟味しながら適正に掘進管理していくことが重要である。トンネル周辺地盤や既設構造物への影響を最小限に抑制する目的として、本報告が施工計画の検討および近接施工上の対策などの参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団：シールドトンネル設計施工指針（案）、1999.8
- 2) 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、1988.9
- 3) 中村 浩、山崎糸治、中廣俊幸、杉嶋敏夫、大西 豊：応力解放率の概念を導入したシールドトンネルの一設計法、土木学会論文集、No.638／III－49、pp.241-250、1999.12