

ユニバーサル変位計の計測結果に基づく併設シールドトンネルの解析について

シールドトンネル 近接施工 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 高田正治 神田大
数値解析 (財) 地域 地盤 環境 研究所 正会員 水原勝由 Yingyongrattanakul, N.

1. はじめに

つくばエクスプレスの内、「常新、つくばT他」工事は、終点つくば駅までの約900m区間を単線並列シールドトンネルで施工したものである。本工事では、近接施工管理の一環として、新しく開発したユニバーサル変位計による併設トンネル断面の変形計測を実施した¹⁾。ここでは、ユニバーサル変位計および地中変位計の計測値に基づいた併設シールドトンネル施工時の2次元FEM解析を行った。本解析ではシールドの切羽通過時、テール通過時およびテール通過後に分けて、先行トンネル断面の変形および地盤の変形に及ぼす影響を表現するパラメータを現場計測データに基づいて設定した。さらに、応力解放に関わる補正係数をパラメータとし、ケーススタディを行った。

2. 工事概要

工事²⁾は、シールド外径7,450mm、セグメント外径7,300mmの単線並列トンネルを泥土圧式シールド工法により施工したものである。シールド施工は、下り線を先行掘進し、つくば駅で回転した後、上り線の掘進を行っている。トンネル土被りは約6~14m、併設トンネルの最小離隔は発進到達立坑付近で約0.3mである。トンネル覆工は、立坑付近で一部ダクトイルセグメントを使用し、その他区間ではRCセグメントを使用している。

3. ユニバーサル変位計の計測概要(図-1参照)

先行トンネル(下り線)断面の変形計測は、つくば駅回転立坑から約42m(57k979m)の位置で実施した。この位置でのトンネル土被りは約12m、併設トンネルとの離隔は約2.5m(0.33D)である。計測器の設置は、トンネル覆工(RCセグメント, 579R)内面にユニバーサル変位計を45度ピッチ(計8箇所)に設置し、計測点間を連結ロッドで連結併合したものである。トンネル断面の変形量は、トンネル最下端部を基準点(X=Y=0)とし、各計測点の相対変位量で整理している。

4. 解析概要

本解析では、各施工段階で実測した施工時荷重を基に、以下の荷重モデルを仮定し、2次元弾性FEM解析を実施した³⁾。

(1) 切羽通過時(Step1): 地盤変形の要因は地山側圧と切羽圧の差圧であると考え、掘削面の載荷荷重が、

$$\Delta P_1 = \gamma_1 \times (P_f - P_h)$$

ここに、 P_f : 切羽圧、 P_h : 切羽面の地山側圧、 γ_1 : 切羽面の応力増加に対するシールド半径方向の応力増加割合としている。

(2) テール通過時(Step2): テールボイドでの裏込め注入圧と地山応の差圧を掘削面に載荷し、その載荷荷重は、

$$\Delta P_2 = \gamma_2 \times (P_g - P_i)$$

ここに、 P_g : 裏込め注入圧、 P_i : Step1後の地山応力、 γ_2 : 3次元応力状態の2次元応力状態への補正係数としている。解析時の裏込め注入圧はポンプから注入吐出までの圧力損失を100kPaとし、圧力分布は裏込め注入材の比重分を考慮した分布圧とした。また、この時の地山応力は前ステップにおける変形後の応力とした。

(3) テール通過後(Step3): セグメント(ビーム要素)を設置し、前ステップの残留応力を解放させた。

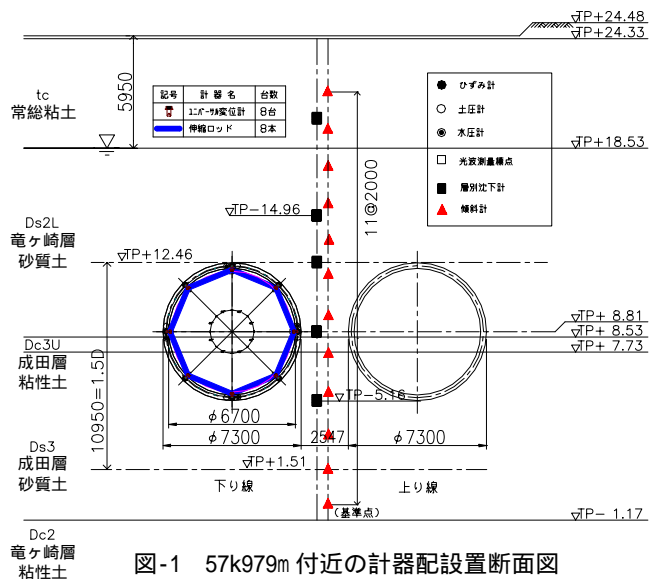


図-1 57k979m 付近の計器配設置断面図

表-1 土質パラメータの一覧表

地層	N 値	(kN/m ³)		E (kN/m ²)	v	q _u (kN/m ²)
tc	5	16.0	0.50	16,380	0.45	156.0
Ds2L	30	18.1	0.40	75,000	0.30	-
Dc3U	21	16.7	0.50	11,025	0.45	105.0
Ds3	24	18.1	0.50	60,000	0.30	-
Dc2	5	14.5	0.50	8,243	0.45	78.5

表-2 解析に用いた施工時荷重

施工時荷重	先行シールド	後行シールド
切羽泥土圧 (kPa)	206	217
総推力 (kN)	16,611	17,540
カッター圧 (kPa)	46	45
裏込め注入圧 (kPa)	298	303

今回の解析は応力解放に関わる係数をパラメータとし、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 20\%, 30\%, 40\%$ の3ケースの解析を行った。表-1に土質パラメータを示し、計測断面掘進時の施工時荷重を表-2に示す。切羽通過時の載荷荷重は、実測の泥土圧とカッター圧の和、テール通過時は実測の裏込め注入圧とした。なおカッター圧は、総推力から泥土圧による切羽前面抵抗、シールド外周面摩擦抵抗（摩擦係数 = 0.2）、セグメントとスキンプレートとの摩擦抵抗、および後方台車の牽引抵抗（約 500kN）を引いたものとした。

5. 計測値と解析結果の比較

後行シールド掘進時の先行トンネル断面の変形分布と地中水平変位分布を図-2, 3に示す。図は計測値と解析結果を比較したものである。なお、図-2の解析結果は計測値と同じ、トンネル最下端点（P1）からの相対変位量で示している。

(1) 切羽通過時：後行シールド切羽通過時のトンネル断面実測変形は、水平方向に最大約 1.5mm、鉛直方向に最大約 1mm 変形し、トンネルが縦長の形状を示す。これは後行シールドの切羽通過によって地山が側方へ押し広げられたことによるものと考えられる。また、地中水平変位は、後行トンネル外側方向に最大 2mm 程度変位している。解析結果は、 $\alpha_1 = 30\% \sim 40\%$ の時にトンネル断面変形および地中水平変位ともに概ね計測値と一致する。

(2) テール通過時：裏込め注入時のトンネル断面実測変位は、トンネル肩部の変形が若干増加し、水平・鉛直方向の変形量が若干減少する傾向を示す。地中水平変位量も若干減少する結果である。この時の解析結果は、 $\alpha_2 = 20\% \sim 30\%$ とすることで概ね計測値と一致する結果が得られた。

(3) テール通過後：テール通過以後、実測値のトンネル断面変形および地中水平変位は少ない。一方、解析結果は、後行トンネルのセグメント要素を追加し、残留応力を解放することにより、さらに地山が先行トンネル側へ押され、先行トンネルの変形量が若干増加する結果となっている。

なお、トンネル側部の実測地中鉛直変位は、シールド通過中に $\pm 1\text{mm}$ 程度の沈下と隆起挙動を示すが、側部地表面における最終沈下量は 1mm 程度であり、解析結果と概ね一致している。

6. おわりに

今回実施した2次元FEM解析では、ユニバーサル変位計から得られた先行トンネル断面の変形挙動、特に後行シールドの切羽通過時とテール通過時の変形分布を定性的に再現することができた。また今回の地盤条件、施工条件下では $\alpha_1 = 30\% \sim 40\%$ 、 $\alpha_2 = 20\% \sim 30\%$ の範囲であり、載荷荷重を施工時荷重、特に実際の裏込め注入圧としたこと、また切羽通過時の荷重として、泥土圧 + カッター圧としたこととで実態に近い変形解析結果が得られたと考える。今回解析に用いたカッター圧は、マシン推力と摩擦抵抗等から簡易的に算出したものであるが、カッター圧を定量的に評価できれば、より実態に近い変形解析が可能になると考える。今後は、これらの結果を基に、同一断面で計測した側圧および覆工応力等の結果と併せた分析を行い、総合的な近接施工の影響評価手法について検討を行いたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 小野, 清水, 小山, 水原他: 連結ユニバーサル変位計を用いたトンネル断面の変形挙動計測, 第39回地盤工学研究発表会, 2004.7.
- 2) 小野, 清水, 西田, 廻田: 離隔30cm以下の併設泥土圧シールドつくばエクスプレス つくばトンネル, トンネルと地下, 2004.2.
- 3) 沢田, 太田, 橋本, 長屋: 施工過程を考慮したシールド掘進に伴う近接構造物の影響予測, 施工過程を考慮した地盤の変形・破壊予測に関するシンポジウム, 2002.9.

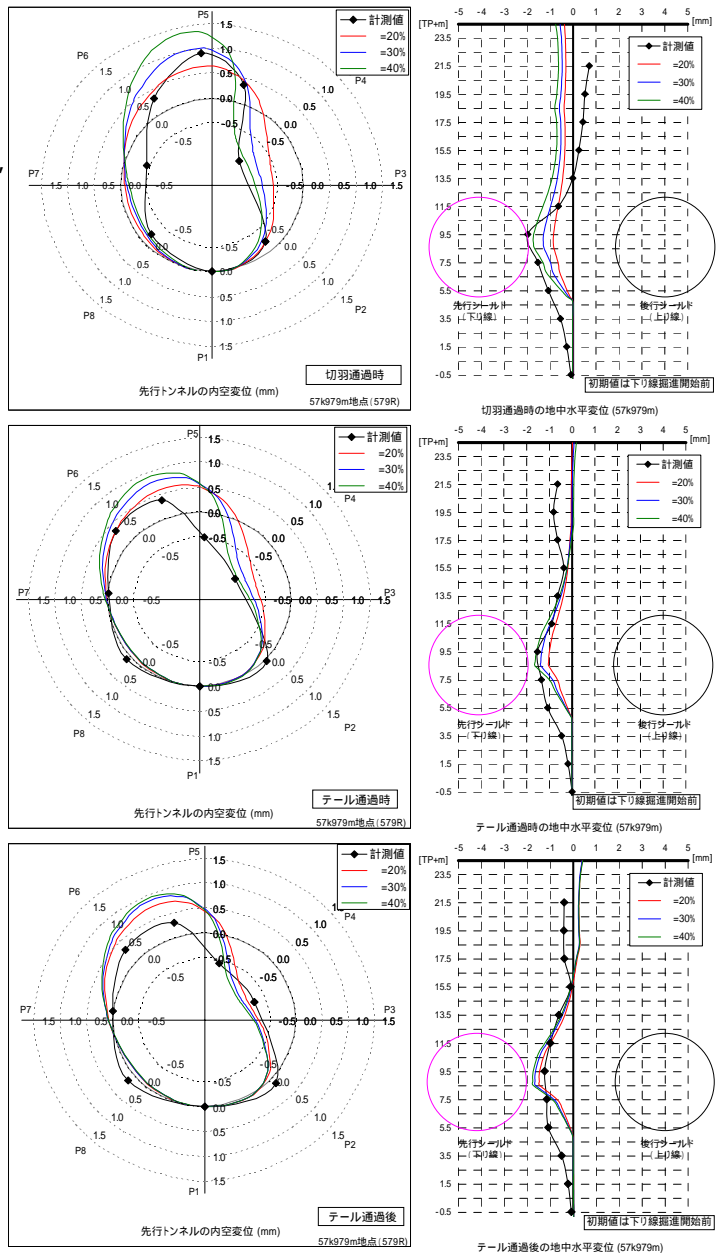


図-2 先行トンネル断面の変形分布 図-3 地中水平変位分布