

超低土被り大断面シールドの施工に伴う地盤挙動計測

MEASUREMENT OF GROUND BEHAVIOR UNDER CONSTRUCTING SUPER-SHALLOW SHIELD TUNNEL

新堀 敏彦*・小島 芳之*・金子 静夫*

Toshihiko NIIBORI, Yoshiyuki KOJIMA and Sizuo KANEKO

We constructed double-track railway tunnel under operating tracks by pressed muddy water shield method. This tunnel crossed under the tracks obliquely and the overburden of the tunnel was 0.5~1.5 as diameter of it. Under construction, we made protection for the tracks according to overburden, change of soil, and distance between the tracks and the tunnel. We made some observations and measurements paying attention to mechanics of ground behavior as tunnelling.

This paper describes estimation of ground behavior according to overburden and soil quality.

Keyword: super-shallow depth, double-track railway tunnel, pressed muddy water shield method, ground behavior according to overburden, measurement

1. まえがき

近年、鉄道線路等の重要構造物の直下を横断するシールドトンネルの施工事例が増大している。特に、縦断線形や近接構造物の関係から、小さい土被りで施工せざるえない場合も多い。今回、鉄道用のシールドトンネルが既設の線路下を0.5~1.5 D (D:掘削径)という非常に小さい土被りで斜めに横断する工事において、掘削に伴う地盤の力学的挙動に着目した種々の安全監視計測を行った。

今回は、これらのうち地盤変位の計測結果と地盤内応力の計測結果¹⁾²⁾を基に、土被りや地質の変化に応じて発生する地盤挙動の特性について述べる。

2. 概 要³⁾

2.1 工事概要(図-1)

東葉高速鉄道は、営団都下鉄東西線西船橋駅から船橋市、八千代市のほぼ中央を貫いて、勝田台に至る16.2kmの都市鉄道である。このうちJR東日本は西船橋から1200mを鉄道建設公団から受託施工を行った。JR受託区間の中で0+700m~1+200mまで(500m)がシールドトンネルである。

トンネル構造は、複線1断面・外径φ9,800mmであり、掘削外径φ10,000mmの泥水シールド工法で施工を行った。工事の特徴としては、トンネル直上にJR営業線の総武緩行、快速上下線および営団地下鉄線

* 正会員 JR東日本(株) 東京工事事務所

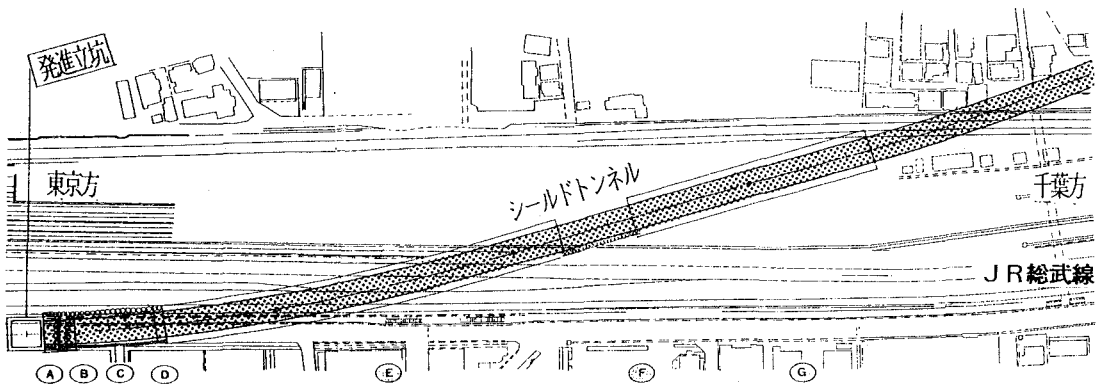


図-1 平面図

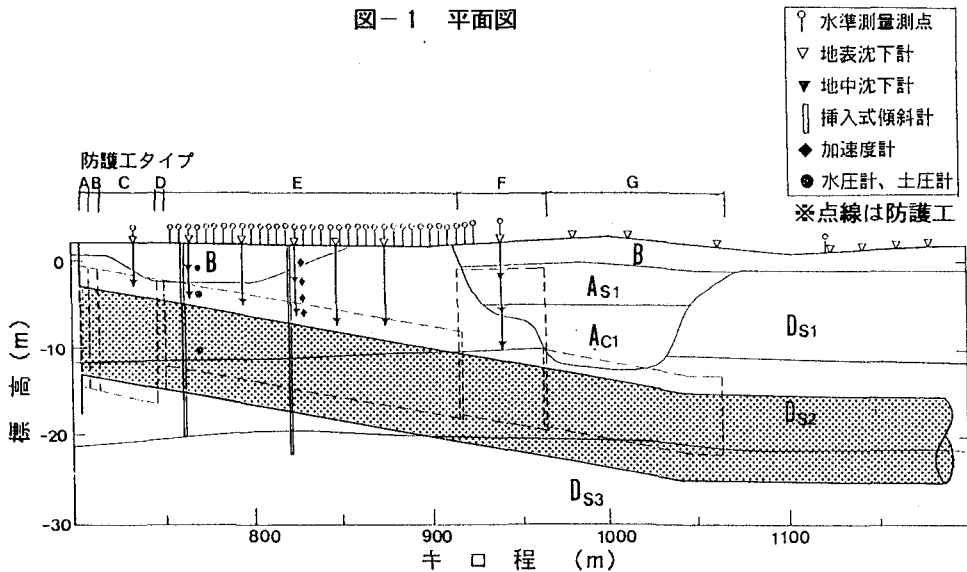


図-2 地質縦断面図

があり発進部分には $\phi 700\text{mm}$ の水道管、 $\phi 200\text{mm}$ のガス管、NTT管路等の地下埋設物がある。土被りは非常に浅く、発進部分で約 5.0m 、営業線線路下部分で $7.0 \sim 11.0\text{m}$ 程度である。

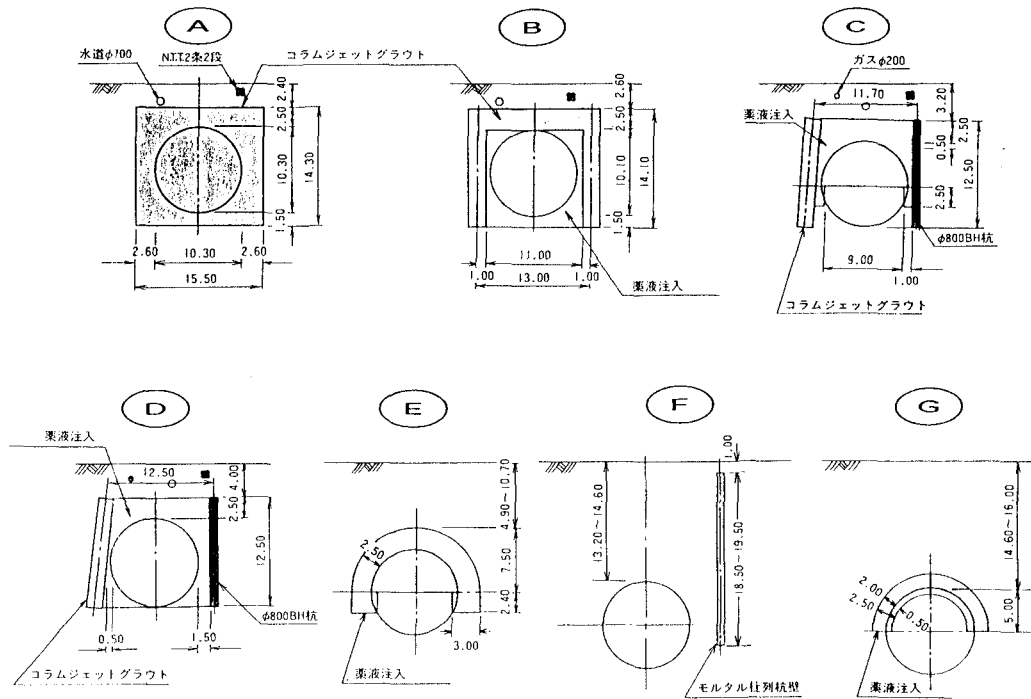
平面線形は市道下の立坑より $R=750\text{m}$ の曲線から発進し、さらに到達側は $R=800\text{m}$ の曲線となっている。また縦断線形は $35\% \cdot 2\%$ の下り勾配及び 2% の上り勾配である。

2.2 地質概要 (図-2)

シールド通過断面の地質は、洪積世の成田層と呼ばれる D_{s1} 層、 D_{s2} 層及び D_{s3} 層であるが、このうち砂質土層である D_{s1} 層、 D_{s2} 層が大部分を占めている。この砂質土層は、粒度特性の点において細粒分の占める割合がほとんど 13% 以下であり、大部分の区域で均等係数 $U_c=1.8 \sim 5.3$ と粒度分布が悪く、切羽の安定性が問題となる土質である。なお、一部に深さ 11m 程度の埋没谷が存在し、谷部には N 値 $0 \sim 4$ の軟弱な沖積粘性土層(A_{c1})が堆積している。

2.3 防護工概要

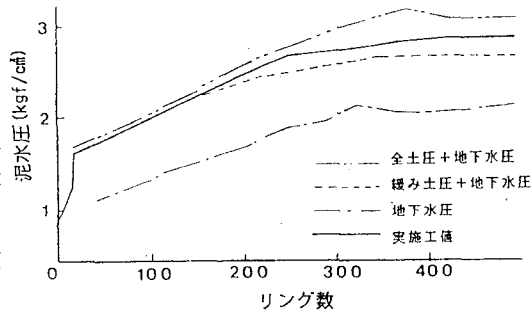
シールド掘削に際し、前記のような土被りや土質の変化、線路への近接の程度等に応じて、予め薬液注入等の種々の防護工を施工した。線路下横断部の代表的なものは、図－3 に併記したとおりである。なお、裏込注入は同時注入方式である。



図－3 防護工

2.4 切羽泥水圧 (図－4)

掘削時の切羽泥水圧は、初期掘進時において土被りが浅いため発進部の全断面コラム部、上部コラム部及び薬液注入部の3区画に分けて泥水圧を設定した。本掘進時の泥水圧は、全土被りの計算による設定であると噴発する恐れがあるため、ゆるみ土圧の計算を考慮して両者のほぼ中間値を設定した。



図－4 切羽泥水圧

3. 計測結果

3.1 計測項目 (図－2、表－1)

計測は、掘削するシールドトンネル工事がJR総武線に及ぼす影響を把握することを目的とし、シールド通過に伴う地盤変位、地盤内応力を測定することとした。計測種類、測点数は表－1 に示したとおりである。計測期間は、シールド発進よりJR総武線通過後約1ヵ月までの6ヵ月間とした。

表－1 測定項目

計 測 項 目		箇所数
地 表	水圧式沈下計	2
	水盛式沈下計	16
	水準測量	158
地 盤	一深度型地中沈下計	4
	多段式地中沈下計	3
	挿入式傾斜計	2
	加速度計	1
	鉛直土圧計	4
	水平土圧計	1
内	間隙水圧計	4

3.2 地盤の変位測定結果

(a) 地表面鉛直変位の挙動

地表面の切羽進行に伴うシールド軸線上の鉛直変位挙動を示したものが、図-5である。この図より、土被りが小さい場合は、先行隆起の後、シールド通過時に大きく隆起し、その後相対的な沈下挙動に転じて収束傾向となる。これに対し、土被りが大きい場合は、土被りが大きくなるにつれて初期の隆起挙動は沈下挙動に移行する傾向を示していることが分かる。

(b) 土被りと地表面変位

土被りと地表面の最大変位量の関係を示したものが図-6である。これより、隆起から沈下に移行する土被りは7.5m程度で、沈下量が最大を示すのは土被り9～10m(最大沈下量=17mm)である。土被りが10mを越えると沈下量は減少に転じ、土被り12.5mで2.5mm程度の沈下となり、土被り17m付近の計測点では殆ど沈下挙動は見られない。なお、軟弱な沖積粘性土(埋没谷)が分布する範囲は、当然のことながら地盤変位(沈下)が大きいことが分かる。

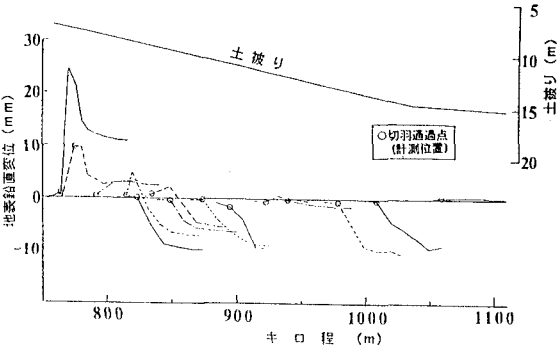


図-5 地表面鉛直変位の挙動

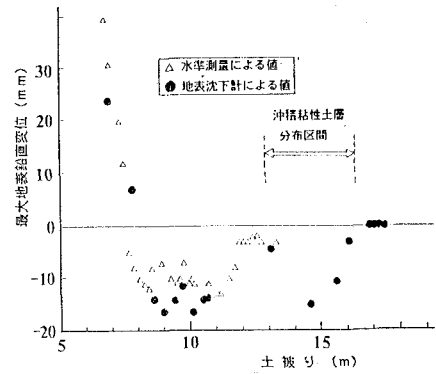


図-6 土被りと地表面変位

(c) 地中鉛直変位

地中変位計による地盤鉛直変位の経時変化の例を図-7,8に示す。図-7の計測点①では、切羽通過後に隆起挙動を示し、シールド直上の地中変位が地表変位に比べて相対的に大きいことから、上部の地盤は上向きに圧縮されたと思われる。これに対し、図-8の計測点②では、切羽通過後に沈下挙動を示す。これは、切羽通過直後にはシールド直上部の沈下が大きく、その後地盤全体が一体となって沈下する挙動となっている。この挙動は、今回の施工箇所においては地表面沈下量が増加する土被り9～10m以下の範囲で、グラウンドアーチが形成されなかったことを示している。さらに土被りが大きい計測点で地表面沈下量が減少するのは、シールド周辺に生じた緩みに対して、地盤のアーチ作用により地表面の挙動が吸収されたためと考えられる。

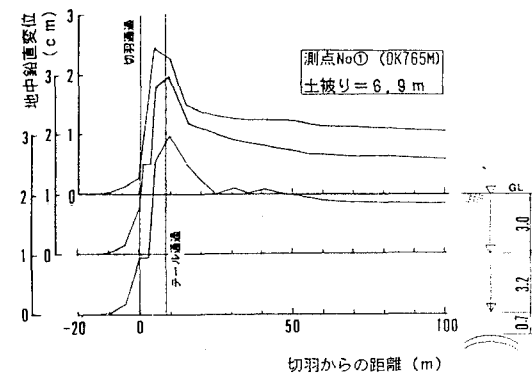


図-7 地中鉛直変位 (測点①)

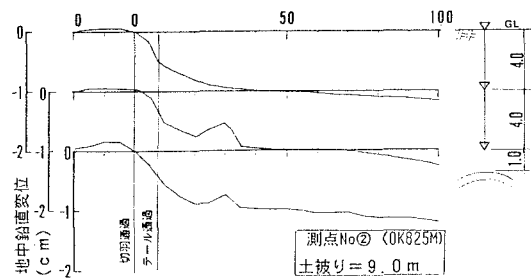


図-8 地中鉛直変位 (測点②)

3.3 地盤内応力測定結果

地盤内応力の測定結果を、施工前、施工時（最大変位時）及び最終測定時という形で整理したものが、図-9である。

(a) 間隙水圧の挙動

施工前の間隙水圧は、図に見られるように静水圧分布をなしており、水位はGL-1.2m程度であった。施工が進むにつれ、ウェルポイントやシールドの影響でGL-9.3mまで低下するが、シールド通過後に回復し、最終測定時には静水圧分布を示し、GL-3.7mまで回復している。

(b) 地盤内応力（土圧）の挙動

土圧の測定結果は、地盤が洪積砂質土で剛であったため、土被りの応力に比べて低めの値を示している。シールドの直上と側面の土圧の挙動を見ると、直上では切羽通過時及び最大変位時に鉛直土圧は増加している。その後、減少に転じ最終測定時には当初の値より低くなる。側面では、シールド通過時において鉛直土圧は減少し、水平土圧は増加した。

これらの結果は、地盤変位と同様に掘進するシールド上面では押し上げる方向の作用圧が生じ、その後応力開放が行われた事を示している。側面部では、掘進に伴い水平土圧は増大するが、鉛直土圧は低下している。この傾向は、傾斜計の測定でも水平方向の変位を示して、土圧と同じ挙動を示す事を確認した。

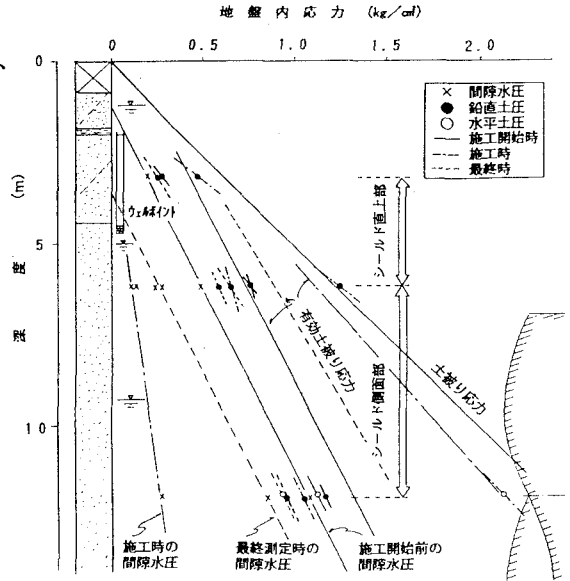


図-9 地盤応力（施工前～施工後）
（0 k 7 6 5 m付近）

4. FEM解析

各種計測を行った地点において、実測データ（直上地表面変位）との比較を行うためにFEM解析による事後解析を行った。解析にあたりモデル図、地盤条件は図-10に示すとおりである。解析は線形弾性解析で行い、4 Stage からなり、各施工順序に従って行った。各Stage の解析条件を次に表す。

- ① Stage 1：初期状態、地表面に荷重を分布させる。
- ② Stage 2：地盤に薬液注入を行う。
- ③ Stage 3：掘削（開放率30%）し、泥水圧をトンネル全周に分布させる。
- ④ Stage 4：掘削（開放率70%）し、泥水圧を解除するとともに、トンネル外周に梁要素を加える。

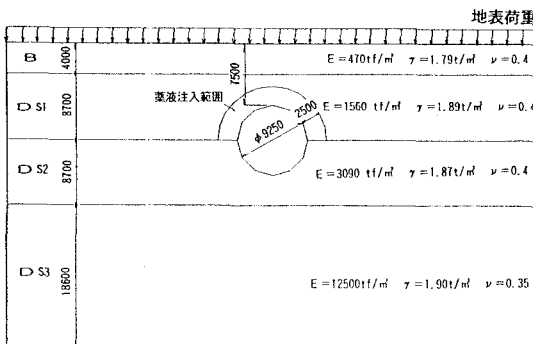


図-10 FEM解析モデル図

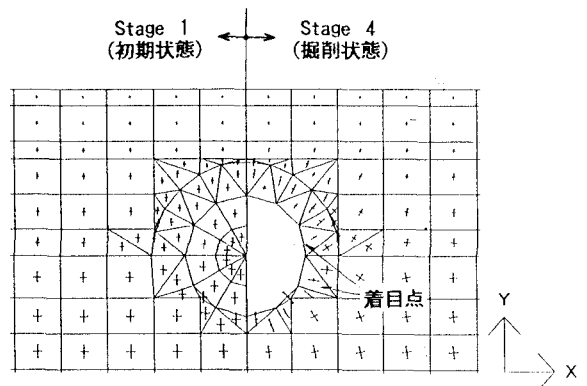


図-11 地盤内の主応力図

次に解析結果の内、地盤変位と地盤内主応力に注目して実測値と解析値を比較した。地盤変位についてトンネル直上部の地表変位は、Stage 3で +15mm(+10mm)、Stage 4で +21mm(+24mm)となった。なお、()は、実測値である。

また、地盤内主応力について初期状態(Stage 1)と掘削終了状態(Stage 4)を比較した結果を、図-11に示す。これによると、解析では初期状態と比較して、トンネル側面部の水平方向(X軸方向)の応力は増加し、鉛直方向(Y軸方向)の応力は減少している。これは、前項の計測結果(土圧)と同様な結果となり、泥水圧により水平土圧が増加し、掘削により地山が緩み鉛直土圧が減少したものと考えられる。

5. まとめ

今回、地盤の変位挙動についてはシールドトンネルの土被りによる先行隆起～後方沈下に至る地山の変位状況がよく把握されたと思う。地盤内応力測定については、測定点が1測線であったため、他の箇所との対比ができなかった。しかし、泥水圧・地表面鉛直変位・地中変位結果等より総合して考えると、測定位置の深度は隆起挙動と沈下挙動の境界深度(7m～8m)になっている。これは、シールド泥水圧・推力・裏込注入圧などの上向き応力と、土被り応力などの下向き応力がつりあっている地点である。このような地盤の条件と事前防護工(薬液注入など)の関係で、図-9においては施工前～施工後の土圧の挙動にばらつきが見られたのではないと思う。

また、FEM解析の事後解析を行ったが、結果をみると実測値とほぼ同様な値を得られ、FEMにより地盤変位・地盤内応力のシュミレーションが概ねできたと思われる。今後は、各入力データを精査するとともにモデル化の検討を深度化し、事前解析により地盤動向を把握して現場の施工にフィードバックして行きたい。

6. おわりに

シールドトンネルが既設の線路下を非常に小さい土被りで横断する工事での地盤変位、地盤内応力の計測結果を基に、土被りや地質の変化に応じて発生する地盤挙動について述べた。

今後、このような土被りの小さい線路下縦断シールドトンネルを施工する機会が増えると考えられるため、類似した工事を行う際の参考になれば幸いである。

7. 参考文献

- 1)小島ら：土被りの小さいシールドトンネルの施工に伴う地盤挙動計測とその考察，土木学会関東支部 1993
- 2)新堀ら：土被りの小さいシールドトンネルの施工に伴う地盤挙動計測，第28回土質工学発表会 1993
- 3)森田輝夫：超低土被り大断面シールドの施工について，JR東日本、東工技報第3号 1990