

掘進制御方式の統一により得られた 4本併設シールド掘進時のシールド挙動と地盤変位

SHIELD BEHAVIOR AND GROUND DISPLACEMENT BY THE UNIFICATION OF EXCAVATION CONTROL SYSTEM FOR FOUR PARALLEL SHIELD TUNNELS

山口 巖¹⁾, 山崎糸治²⁾, 福島健一³⁾, 杉嶋敏夫⁴⁾, 大西 豊⁴⁾

Iwao YAMAGUCHI, Itoji YAMAZAKI, Kenichi HUKUSHIMA, Toshio SUGISHIMA and Yutaka OONISHI

In grasping the behavior of the surrounding ground and foregoing tunnel by a closely running tunnel in the parallel-shield-construction, it is necessary to evaluate the influence by the dispersion in excavation control. The paper describes the result of excavation control by a unified control system in the subway construction of four parallel shield tunnels, and the characteristic mechanism of the ground behavior based on the premise of confirming the absence of the dispersion of significance in the control of excavation. The knowledge obtained for the horizontal ground behavior on the longitudinal direction of the tunnel will be introduced in the main.

Keywords : Shield tunnel, Control, Measurement, Deformation

1. はじめに

大都市では、地下の高度利用が進み、地下空間は重要構造物が近接して建設されることが多くなっている。京都市の地下鉄東西線の建設においても、地下空間の制約からトンネルを近接する必要があった。御陵東工区は、地上を走る京阪京津線が地下へ乗り入れ、地下鉄と併せて複々線となる区間であり、4本のトンネルが近接する。さらに、同方向行き線路が同一ホームに到着するという乗客の利便性を図るため、回転移行形式とした。これを4台の泥土圧式シールドにより施工した。

4本のシールドトンネルの近接施工による地盤や先行トンネルへの影響については、詳細な掘進制御内容の考慮を必要としない範囲において定量的把握を試みてきた^{1) 2)}。ところが、複数シールドの掘進により生じる地盤や近接トンネルの挙動を各シールド掘進別に比較検討する場合、各シールドの掘進制御の相違による有意な要素の影響を考慮しなければならない。

当該工事では、4台のシールドに統一した掘進制御方式を採用した。これにより、地盤やトンネル挙動モードに複数のシールドの掘進制御の相違による有意な差が生じることを抑制した。その結果、同一の土被り、地盤を掘進した複数のシールドでは、共通して特徴的なシールド方向変化特性がみられ、統一的な制御過程が確認できた。そこで、本工事の掘進実績には、制御上の有意な差がないことを前提とした地盤挙動の発生メカニズムの特性について検討した。本論では、その中で特にシールド掘進時における地盤のトンネル軸方向の水平挙動について得られた知見を述べる。

1)フェロー 京都市都市建設局, 2)フェロー 京都市交通局高速鉄道本部建設部建設第二課

3)正会員 京都市交通局高速鉄道本部第二建設事務所, 4)正会員 佐藤工業(株)大阪支店土木部技術課

2. 工事概要

2.1 シールド工事概要

シールドは、外径φ5840mmの泥土圧式を採用した。発進付近は、2段2列の四角形状のトンネル配置で、途中に菱形形状を経て、到達までに四角形状になるという90°回転移行形式の線形である。トンネル間の離隔は、発進付近の上下間で70cm以下、途中の菱形形状の上下斜行間で約70cmと超近接している。図-1は、本論で詳細な検討を行った2箇所の主計測断面である。シールド掘進順序は、下段の1号機、2号機シールドが順次掘進し、到達後、上段の3号機、4号機シールドが順次掘進した^{3), 4)}。

土質は、発進付近に脆弱な風化岩があるが、その他は上部に3m前後の層厚で沖積粘性土層、砂質土層があり、その下は洪積砂礫質土、粘性土である。シールド掘進対象土質は、細粒分を多く含み自立性の高い洪積砂礫質土が主体であった。

2.2 シールド掘進制御概要

4本のトンネルが超近接しているので、後続シールドの掘進による近接トンネルへの影響を最小限に抑制するために、シールドの位置・姿勢を的確に把握し、進行方向を正確にコントロールすることは重要な管理項目である。シールドの位置・姿勢の計測と進行方向の制御には、4台のシールドに統一した方式の自動計測・方向制御システムを導入した³⁾。

シールドの位置・姿勢の計測には、ジャイロコンパスと重力加速度計による位置・姿勢計測システムを採用した。このシステムの計測方式は、シールドの方向を計測し、ジャッキストロークで計測する推進距離で積分して位置を追従計測するものである。

シールドの方向制御方式は、図-2のブロック図に示すフィードバック制御である。位置・姿勢計測システムにより得られるシールドの方向データをフィードバックして目標の方向変化量を定め、適切な回転モーメントを算出し、それを実現するジャッキパターン、ジャッキ圧力を自動的に制御する。本制御方式では、シールドに加えた回転モーメントとそのときの方向変化量を、回転モーメント(M)－方向変化量(θ)特性として、一次式の $M = K \cdot \theta + b$ という相関式であらわし、微小推進区間ではこの相関式が成り立つと仮定

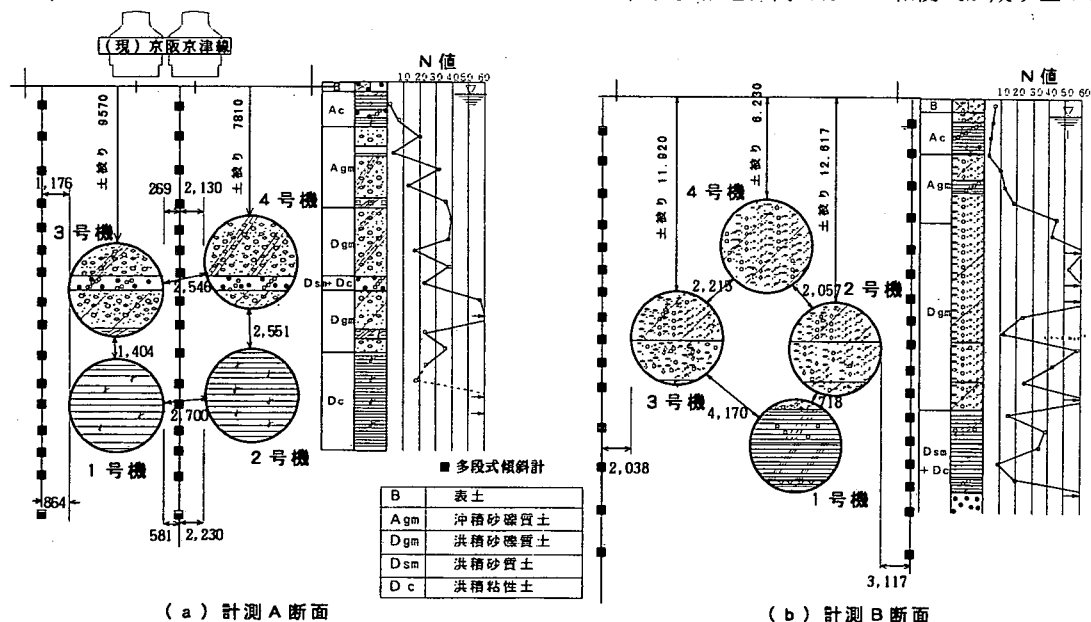


図-1 主計測断面

している。しかし、シールドの地盤中での挙動は機体、土質の相違など種々の要因が絡み合って特定は困難である。よって、これらの要因を外乱として補正項 γ で一括処理することで解決する下記の制御モデルにより、目標方向変化量-必要回転モーメント変換を行う。

$$M_s = \kappa \cdot \theta_m + \gamma$$

M_s : 必要回転モーメント κ : ゲイン

θ_m : 目標方向変化量 γ : 補正項

補正項 γ は、掘進中のデータをリアルタイムで統計処理することにより単位（掘進10cm）制御ごとに自動調整する補償値である。制御ゲイン κ は大まかな設定でよく、これまでの実績では1現場をとおして変更した例はほとんどない。本方式の制御偏差を修正する方法は、補償値である補正項 γ を与えているのが特徴である。シールドの周囲は地山に拘束されており、方向変化はスキンプレートと地山の接触抵抗の影響を受ける。つまり、シールドの方向を制御するには、その通過軌跡、すなわち方向変化履歴を考慮する必要がある。目標方向変化量 θ_m と補償値 γ は過去方向変化履歴を動的処理する回路により算出する。この回路により、ゲインを大きくすることなくシールド方向変化の振動を抑制でき、安定した制御ができる。

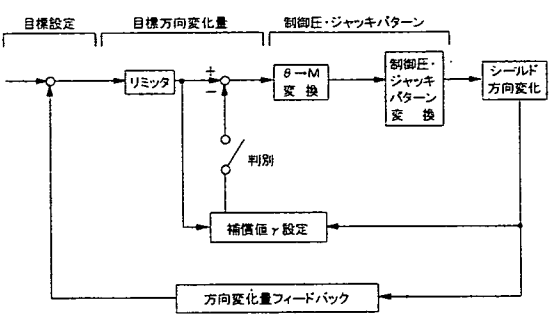


図-2 自動方向制御ブロック図

3. 掘進制御結果の評価

シールドには様々な外力が作用するので、これが外乱となりシールド方向変化は複雑な挙動を示す。しかし、同様な地盤を掘進する場合は、外力の作用状況は概ね同じであり、同じ仕様のシールドを統一した制御方式で掘進した場合は、シールドの方向変化特性は定性的に一致すると考えられる。逆に、方向変化特性が同様であるときは、掘進対象地盤の物性や制御内容等の掘進条件が同じと考えられ、このときの地盤挙動等の要因の特定は、複数データの比較検討により容易になると考えられる。

3.1 掘進制御結果

図-3は、計測A断面の1号機の掘進10cm毎のシールド方向変化量と回転モーメントの状況を示している。方向変化量が突出して大きいときは、各リングの掘進開始時である。これは、セグメント組立によるシールド停止時の姿勢変化を修正しようとする動きであり、掘進開始後の最初の10cmの推進で修正動作がほぼ完了し、その後の方向制御に影響しないことが確認されている⁶⁾。その後の掘進では、シールドの方向は微妙に変化しており、その変化状況に応じて制御量である回転モーメントが変更されている。ところで、シールド方向変化に影響を与える方向履歴は、最大1機長分であるが、中折れ式シールドであるため、1/2機長程度を影響範囲とした。よって、シールド方向変化特性は、回転モーメントと方向変化量のシールド1/2機長=3m間の移動平均値をもとに検討を進めた。

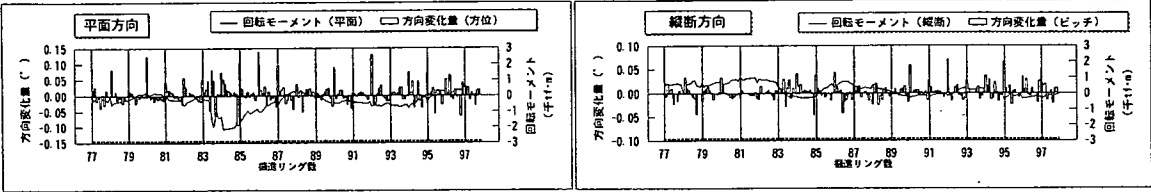


図-3 方向制御結果 計測A断面 1号機

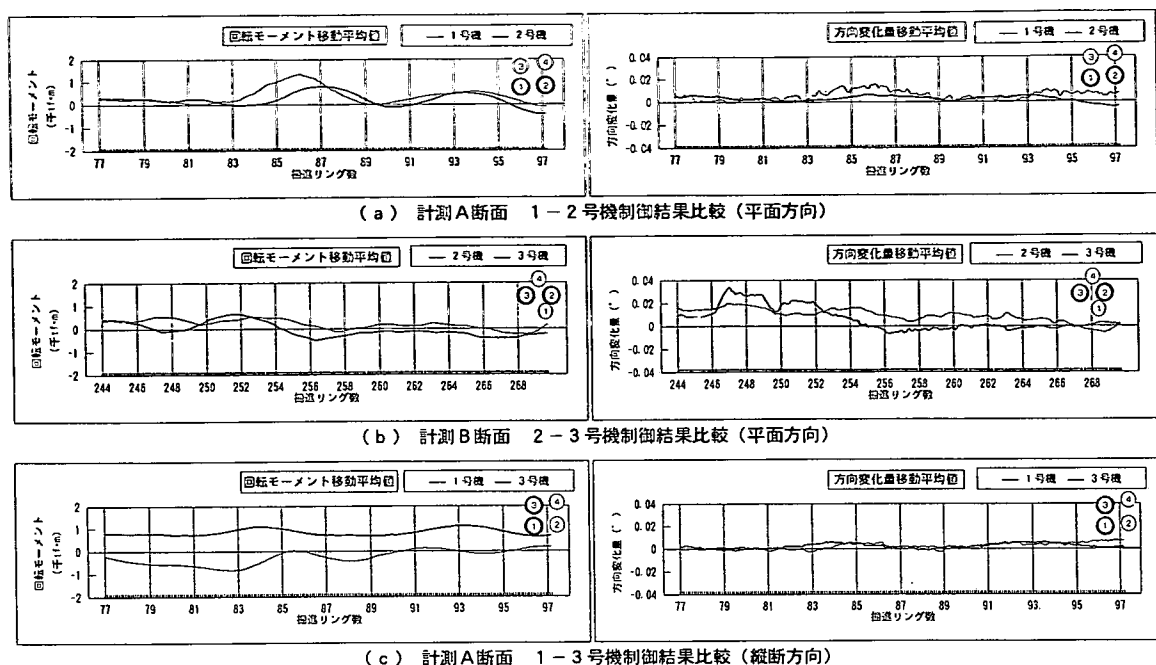


図-4 方向制御状況比較図

3.2 方向変化特性の一致

図-4は、シールドが3m掘進する間の回転モーメントと方向変化量の移動平均値を、2台のシールド掘進結果で比較したものである。図-4-(a)は、計測A断面の1号機と2号機の平面方向の制御結果の比較を、図-4-(b)は、計測B断面の2号機と3号機の平面方向の制御結果の比較を示している。これらは、左右併設のシールド掘進の結果であり、土被りや掘進対象地盤はほぼ同一の条件であるが、この図より明らかなように、同様な制御結果であり、方向変化状況も一致している。よって、シールドの方向制御方法が同一であることから、シールドに与えられる方向変化に影響する外乱の出現位置、程度が同じであることを示している。

図-4-(c)は、計測A断面の1号機と3号機の縦断方向の制御結果の比較を示している。上下併設のシールド掘進では、土被りや掘進対象地盤は異なる。上下併設の下に位置する先行の1号機より、後続シールドの方が回転モーメントが大きく、その方向は上向きである。上向きに押す度合いが大きいことは、シールド前方が下に向きやすい特性であり、ここでは先行シールド掘進による地盤の緩みなどが、後続シールド掘進時に影響を与えていると想定される。このように、土被りや地盤条件が違えば、同一制御方式でも違った方向変化特性がみられる。

以上のことから、平面方向の制御結果では方向変化特性が一致しており、地盤条件が同じであることから、制御による有意な差がほとんどなく、また併設シールドの影響を受けていないと判断される。

よって、左右併設の区間で得られたトンネル軸方向の地盤水平挙動は、併設やシールド方向制御の影響は少なく、他の要因を想定して検討を進めた。

4. 水平方向地盤挙動特性

4.1 軸方向地盤挙動の特徴

図-5は、各シールド通過時に多段式傾斜計により測定したトンネル軸方向の地盤水平挙動の相対値(シールド通過後と通過前の差)をプロットしたものであり、次のような特徴的な挙動が示されている。

①シールド進行方向に向かって右側の地山は、掘進方向の前方に動く。

②シールド進行方向に向かって左側の地山は、掘進方向の後方に動く。

図-6は、計測A断面の左右併設である1号機と2号機間の地盤が、それぞれのシールドが通過したときに示すトンネル軸方向の地盤水平挙動の経時変化図である。ハッチングしている期間は、シールドがセグメント幅1mを掘進しているときであり、他は停止している期間である。

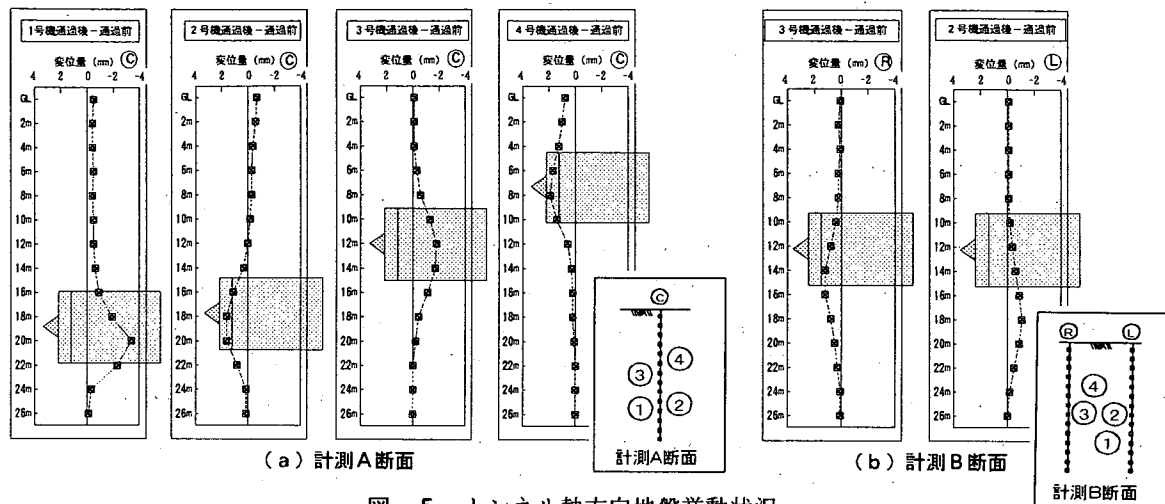
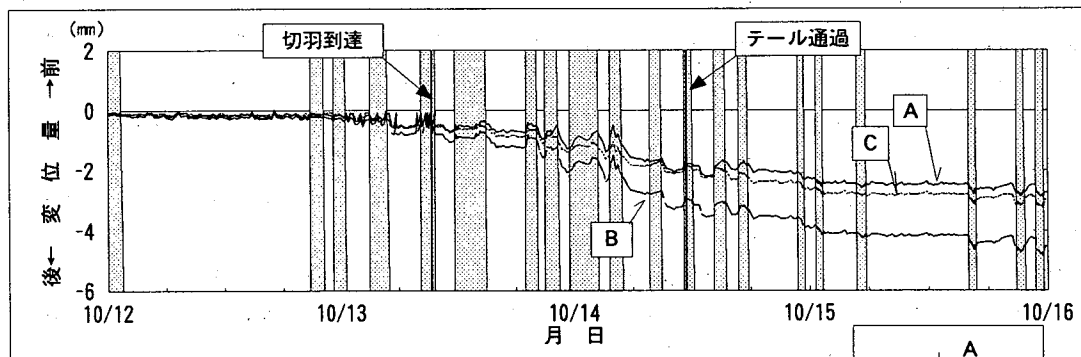
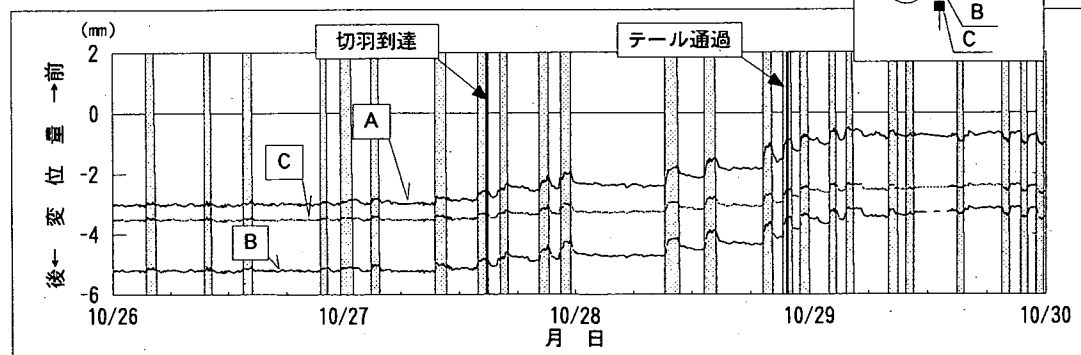


図-5 トンネル軸方向地盤挙動状況



(a) 計測A断面 1号機通過時



(b) 計測A断面 2号機通過時

図-6 軸方向地盤挙動経時変化図

シールド掘進中の地盤挙動は、シールド通過に伴うマクロな経時変化とは独立した次のような特徴を示す。

- ③シールド通過前からシールドテール部通過後3～4m掘進するまで、掘進中は地山を掘進方向の前方に押す挙動が見られ、掘進終了後は元に戻る。
- ④シールドテール部通過後3～4m掘進後は、掘進中は地山を掘進方向の後方に押す挙動が見られ、掘進終了後は元に戻る。

これらの挙動は、主計測断面2箇所ですべて4本のシールド通過時に確認された。しかも、路線中央に設置した傾斜計の両側を2台のシールドが通過したときなど、逆向きの挙動を同一の計測器により観測しており、計測上のエラーが原因となっているとは考えられない。

4.2 掘進時の軸方向挙動の検討

トンネル軸方向の地盤水平挙動は、シールド掘進中のみに見られる変位方向とマクロな経時的な変位方向とが必ずしも一致しない。前者の挙動は、切羽通過前のシールド掘進時には、その方向とタイミングより明らかに、シールド前面やスキンプレート周面摩擦から地山に伝達される荷重による変形と考えられる。シールドテール部の通過後3～4mまでの掘進方向への挙動も、これらシールド前面や周面摩擦による相対的に引張側の挙動であろう。シールド通過後4m以降では逆方向の挙動がみられ、この挙動は、既設セグメントに伝達されるジャッキ推力が、セグメント周辺摩擦を介して地山をトンネル後方へ押すものと想定できる。以上のメカニズムの想定を図-7の概念図に示す。これらシールド掘進中の挙動は、シールド接近から通過の全過程を通じて、ジャッキ推力の載荷位置および方向と符合する。また、掘進の一工程内において可逆的である。

筆者らは、当該工事におけるシールド推力と先行トンネルに設置した土圧計の計測データから、後続シールドの推力が先行トンネルに及ぼす影響荷重について、掘進中の伝播メカニズムと実作用荷重の発生過程を考察した¹⁾。その中で、後続シールドが接近する過程での伝播メカニズムは「Mindlinの第2解」²⁾により近似できること、実作用荷重は、伝播荷重の逐次残留により生じることを指摘した。図-7の概念図に従い、シールドやセグメントからの応力をもとに、「Mindlinの第2解」により算出した軸方向地盤変位のシミュレーション結果を図-8に示すが、実際の挙動と定性的に一致している。図-9は、先行トンネルに設置した土圧計により計測した後続シールドの推進中の土圧の経時変化である。シールドテール通過までは増加側であるが、テール通過後3～4mは減少し、シールド通過後4m以降では増加する。この掘進中の土圧変化は、推進終了時には元に戻っており、シールド横断面内の地盤応力と対応している。この挙動が、シールド推進の載荷により生じているのであれば、軸方向地盤挙動の傾向と定性的に一致している。

以上のように、シールド推力の載荷方向と同一方向の地盤水平変位に着目することにより、推力の伝播メカニズムが把握される。すなわち、掘進一工程内の推力伝播を表現する基礎モデルとして、載荷位置の前方および後方において弾性連続体を仮定することは妥当であるといえる。

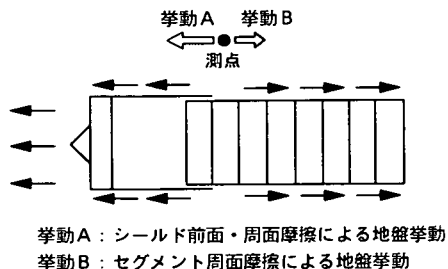


図-7 シールド掘進中のトンネル軸方向地盤挙動概念図

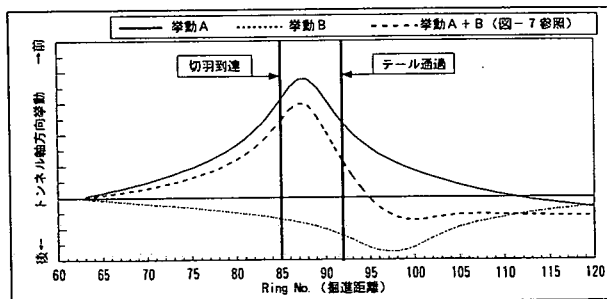


図-8 軸方向地盤挙動シミュレーション結果

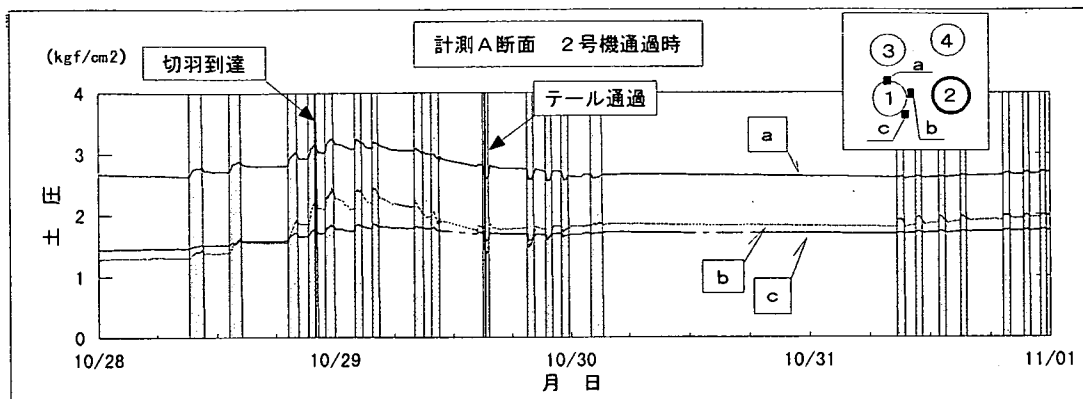


図-9 近接トンネルで計測した施工時荷重(土圧経時変化図)

4.3 軸方向左右逆挙動の検討

掘進方向に対して横断方向の地盤挙動は、トンネル方向に近づく挙動を示している。ところが、シールド掘進方向の地盤挙動は、シールドの掘進が進行するに伴い、シールドの左右の地盤に逆の挙動が生じている。

トンネル軸方向の地盤挙動は、応力解放によるトンネル側への引き込みと、切羽面に作用する推力による押し込みが考えられるが、これらは定方向の地盤挙動の要因ではあるが、シールドの左右の地盤の逆方向挙動のメカニズムの原因とはいえない。この挙動の原因として、施工時荷重と地山物性の両面から検討した。

4.3.1 掘進による影響の検討

地盤の逆方向挙動が、常に定方向の応力発生源となる総推力やチャンパー内土圧、裏込め注入圧の加減により生ずるとは考えられない。他の施工時荷重による要因では、線形の違いか、通過時の回転モーメント、面盤の回転方向の相違が想定される。線形については、計測A断面は、曲率半径300mの右カーブであるが、計測B断面では、直線部分であるが同じ結果が生じている。

シールドの方向制御のためのジャッキ推力による回転モーメントが偏向していることにより、地山に伝達される施工時荷重が左右で相違することが考えられるが、図-4に示すように特に偏った回転モーメントを作らせていない。面盤の回転方向は、ほぼ1リングの掘進ごとに回転方向を変えており影響しない。

施工時の推力や周面摩擦の影響による軸方向挙動への影響は、前述したように弾性的挙動で掘進中のみにみられる。しかし、シールド停止時は、左右逆方向に地盤挙動が進行する。これらのことから、掘進時の施工時荷重の影響ではないといえる。

4.3.2 地盤物性による影響の検討

地山の性状により、このような現象が生じるとして、次のような仮説を想定した。

①地盤の潜在応力が、掘進方向に斜行しており、トンネル掘削の応力解放により、潜在応力の方向に変位する(図-10)。

②地盤の鉛直面の滑り方向がトンネル軸方向に斜行していたため、応力解放後にその方向へ挙動した。

深い地盤では、潜在応力の斜行は確認されているが、

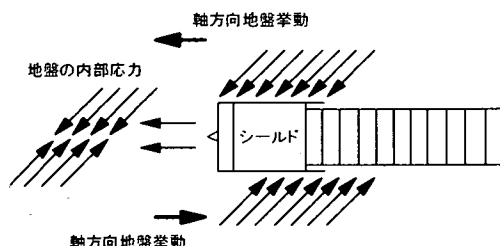


図-10 地盤内潜在応力想定図

浅い地盤では確認された例はあまりない。今回の計測もトンネルによる応力解放後に変位量として計測されたもので、応力は直接測定していない。鉛直面での滑り面も詳細な観測の事例はないので、これらについては今後のデータの蓄積が必要である。

5. まとめ

4本のシールドの掘進、管理を自動制御化して統一的に実施することにより、土被り、土質等が同条件の場合に、シールド掘進過程が同一の傾向を示すことが確認できた。これにより、併設シールドにおける地盤挙動を分析するうえで支障となる掘進制御の相違による有意な差を排除することに成功していると考えられ、良質の計測データを得ていると判断される。また、4本の併設シールドゆえに、土被り、土質等が同条件下での計測が複数回実施できたことにより計測データの信頼性は高い。当該工事においては特異な地盤挙動も観察、確認されている。しかし、たとえば、1本のみのシールド工事であれば、それは掘進方法の相違、計測器の誤差、計器設置時の地盤の乱れなどの影響によると判断され、事実の特定には至らないであろう。

以上のような計測状況下で確認した掘進制御、地盤挙動を挙げると次のようである。

- ①統一したシールド掘進制御方法のもとでは、地盤条件が同じであればシールドの方向変化特性が一致する。
- ②シールド掘進中のジャッキ推力の伝播は推力載荷位置の前方および後方に及び、そのメカニズムを説明する地盤の基礎モデルとしては弾性連続体が妥当である。
- ③水平地盤挙動の偏向が計測されたが、施工時の有意な影響によるものでないことが確認でき、地盤内潜在応力の斜行等の地盤側の要因によることが想定される。

これらの成果は、シールド掘進による周辺地盤や近接構造物への影響を評価したり、計測結果を施工管理に反映する場合などに考慮すべき事項である。

4本超近接回転移行シールドは、これまで例がなく、設計時での多くの解析²⁾、施工時の詳細な計測、種々の掘進管理システムの導入を行った。今後も得られた計測、施工データをもとに研究を続ける所存である。

当該工事では、検討時から事後解析にいたるまで「高速鉄道東西線御陵東工区シールド工法検討会（座長：足立紀尚京都大学教授）」にご指導を頂いた。委員各位、並びに関係者の方々に深謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 山口 巖, 山崎糸治, 小林 隆, 松下淳次, 宮田弘之介, 杉嶋敏夫: 4本併設シールドの地盤-トンネル挙動分析と併設シールドの設計・施工への応用に関する研究
土木学会論文集 No. 561/Ⅲ-38, pp. 47~61, 1997. 3
- 2) 山口 巖, 山崎糸治, 福島健一, 小林 隆, 杉嶋敏夫: 併設シールドの影響予測解析と実際の挙動
トンネル工学研究発表会論文・報告集第5巻, pp. 39~46. 1995
- 3) 京都市交通局: 高速鉄道東西線建設工事（御陵東工区）第7回シールド工法検討会資料
- 4) 山崎糸治, 福島健一, 小林 隆, 片岡 進: 世界初の超近接4線移行シールドの施工
トンネルと地下 1996, 2 PP. 7~PP. 16
- 5) 桐谷祥治, 守山 亨, 大西 豊, 志村和伸: 技術最前線, シールドの自動方向制御システム
土木学会誌 1991, 7 PP. 12~PP. 13
- 6) 志村和伸, 西 智男, 梅野貢一, 山田薫夫: シールド姿勢変化の連続計測に基づく停止中の挙動特性について, 土木学会第51回年次学術講演会, Ⅲ-B143, pp. 286~287, 1996. 9
- 7) たとえば, 最上武雄他: 土木学会監修土質力学, 技報堂出版(株), pp. 246~250, 1969