

シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析 (その 3)

RESULT AND ANALYSIS ON SITE MEASUREMENT OF LOAD ACTING ON SHIELD TUNNEL (3RD REPORT)

有泉 毅¹⁾・吉本 正浩²⁾

Takeru ARIIZUMI, Masahiro YOSHIMOTO

In order to evaluate the load acting on segments based on in-situ measurements, it is necessary to understand the relation between the deformation of segments, the deformation of ground, the measured earth pressure and the geometry of the segments.

In this paper, the relation between the observed load and ground deformation is examined based on the data measured at a site (clay ground of alluvium).

Key words : shield tunnel, earth pressure, deformation of ground, slurry pressure

1. まえがき

筆者らは、現在、シールドトンネルにおけるセグメントの設計荷重について、現場計測に基づいたデータから現行設計法に対し、より合理的な設計手法確立を目指す研究を行っている。セグメントに働く荷重を現場計測値から評価するには、セグメントの変形挙動を把握し、『地盤の変位－土水圧計測値－セグメント変形（リング変形・継手挙動）－セグメント断面力』といった一連のシールドトンネルトンネル周辺およびセグメント自体の変形－応力に関する相互関係を明確にする必要がある。これまで一連の現場計測結果とその分析^{1)～3)}において、セグメントに働く荷重をセグメント組立以後の短・長期分布状況と同時期に発生するセグメントの変形・断面力を示すとともに、特にセグメント組立直後に発生する施工時荷重の分布状況と発生要因について明らかにしてきた。本論文では、残った『地盤の変位－土水圧計測値』の関係について、トンネル坑内のセグメント周りで実施した土水圧やセグメント鉄筋ひずみ測定と並行して地上から行った地盤変位等の測定データを用いて分析検討した結果を報告するものである。

具体的には、残った『地盤の変位－土水圧計測値』関係の課題については、次の 2 点がある。

- ① 上述の土圧計測結果から長期的に安定した荷重状態においては、土圧計測値は静水圧と同値で有効土圧はほとんど働いていないという結果を得たが、掘削解放力は何処にいったのか明確にする必要がある。
- ② 実現場ではシールド掘削直後に地盤変位は生じているが、密閉型シールドという施工条件下での地盤変位と荷重状態の関係を明確にする必要がある。

すなわち、セグメントに働く荷重状態（特に土水圧）を評価するには、セグメントに設置した計器（土圧計やひずみ計）では組立直後からの載荷状態またはその時点からの相対的増減圧を対象とすることになるが、地表からボーリング孔を利用した地盤変位計・間隙水圧計等による地上計測では、シールド機による掘削前からセグメントがシールド機テールを離脱した後の状態の評価が可能である。

1) 正会員 東京電力(株)送変電建設部(東電設計株式会社都市土木部出向)

2) 正会員 東京電力(株)送変電建設部送変電技術センター

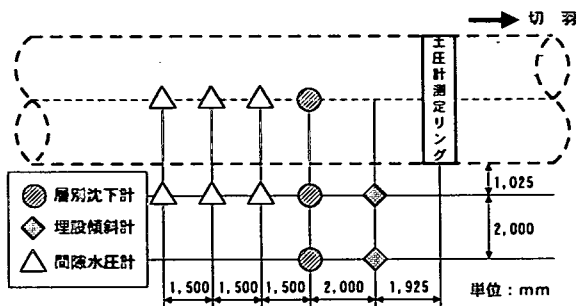


図-1 トンネル・地上計測位置（沖積）

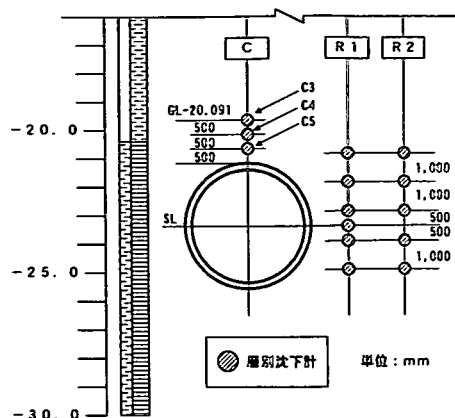


図-2 層別沈下計深さ方向配置（沖積）

2. 現場計測概要（沖積）

ここでは、既報告^{1, 2)}における荷重計測を行った沖積地盤（土被り21.6mの沖積シルト質粘土(Uc2)）の近傍で実施した地上計測について報告する。

当該工事は、川崎市の臨海地区でセグメント外径3,950mm、桁高275mm、幅1,200mm、6分割のRC平板形セグメント（継手：長ボルト）で巨長1,866mを泥水式シールドで施工した工事である。現場におけるセグメント背面土圧計等のトンネル坑内計測箇所と層別沈下計等の地上計測箇所の相対位置を図-1に示す。また、層別沈下計等の深さ方向の計測位置を図-2に示す。また、図-3に当該地盤の地質柱状図を示す。

3. 荷重計測データと地上計測データとの比較分析

3.1 長期的計測結果について

図-4には、土圧計計測値とシールド直上に設置した層別沈下計の経時変化について、土圧計計測値が安定する3ヶ月程度までの長期傾向を示した。ここで、層別沈下計はセグメントクラウン直上部のC5計測点をセグメント背面土圧計は、図中のクラウン部のP-4・P-5について示した。この経時グラフから、土圧計はシールド離脱直後の高めの状態から徐々に減圧していくが、その減圧変化状況とシールド直上の層別沈下計による地盤変位の沈下増加傾向は、非常に合致している。計測地点近傍は、地下水位の低下が見られないため、少なくとも1ヶ月

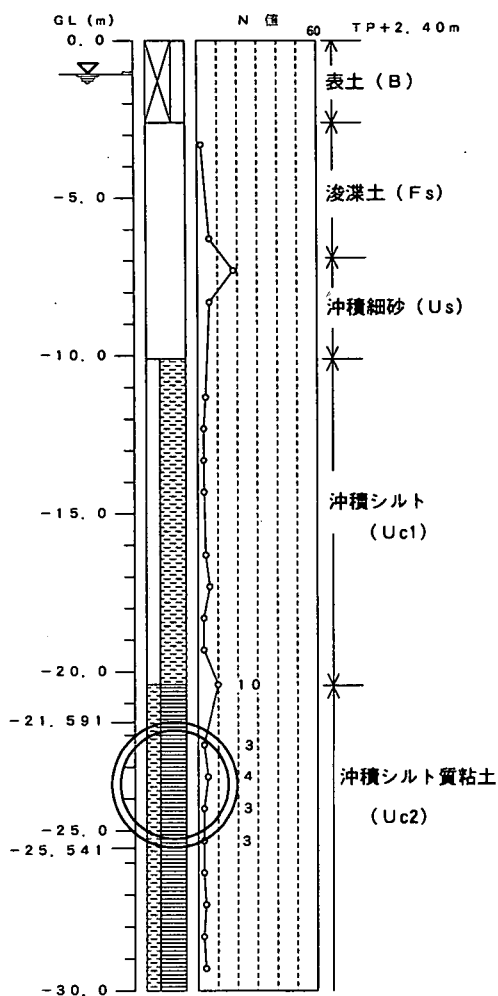


図-3 層別沈下計深さ方向配置（沖積）

程度経過までの地盤変位は、シールド近傍の減圧に起因するものと考えられる。

3. 2 短期的計測結果について

ここで、層別沈下計が設置された固定点に着目してみると、時系列的には、シールド機の接近・切羽到達（掘削）・通過・テールボイド発生・裏込注入・裏込注入固化安定というプロセスになる。このプロセスは、時間的変化であると同時に、シールド機の掘削すなわち切羽の進行といった距離的变化としても評価が可能である。前記のように、地上からの計測は、シールド機の到達前のトンネル周辺地盤状態からセグメントがシールド機離脱した以後の状態まで評価できることから、セグメントがシールド機内で組立てられテールから離脱し、周辺地盤から外荷重を受けた状態について、地盤変位等の計測値から1. まえがきで述べた課題について考察する。

(1) 地盤変位とセグメント土圧計計測値の関係

図-5に、土圧計とシールド直上に設置した層別沈下計の計測値について、計器設置位置とシールド機面版位置との相対距離(m)を横軸に(+)が通過後を示し、縦軸の沈下計は(-)が沈下を示す。ここで、図-1に示すように土圧計計測位置と層別沈下計設置位置は、約4m離隔があるため同一箇所で測定しているように距離を補正している。シールド機のカッター面版からテールエンドまでの機長は約6.2mであり、裏込注入は可塑性を用いた掘削時にセグメントグラウトホールから行う即時注入で、掘進リングから3リング後方で行うものであり、シールド面版からは8.4~9.6m離れていることになる。

この図から、次項がいえる。

- ①最近接沈下計計測点(C5)における経距変化から、沈下変位はシールド機切羽到達から9m前後で収束しており、上記の裏込注入位置と符合する。つまり、当該リング位置の裏込注入前では、切羽が到達した時点から急激に沈下変位が発生し、シールド機通過からテールボイド発生を経て裏込注入まで沈下変位は継続する。
- ②シールド機通過直後のテールボイド発生位置での明確な沈下変位は認められない。土圧計が取り付けられたセグメントは、この位置でシールド機から離脱し、土水圧を受けることになるが、地盤変位で評価すると裏込注入で収束した時点での地盤変位に対するシールド機からセグメントが離脱した以後の相対的地盤変位は、4mm/15mm≒3割弱である。

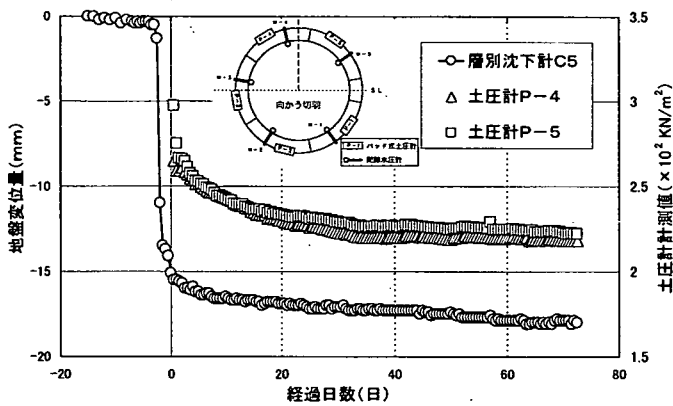


図-4 土圧計・沈下計長期経時変化（沖積）

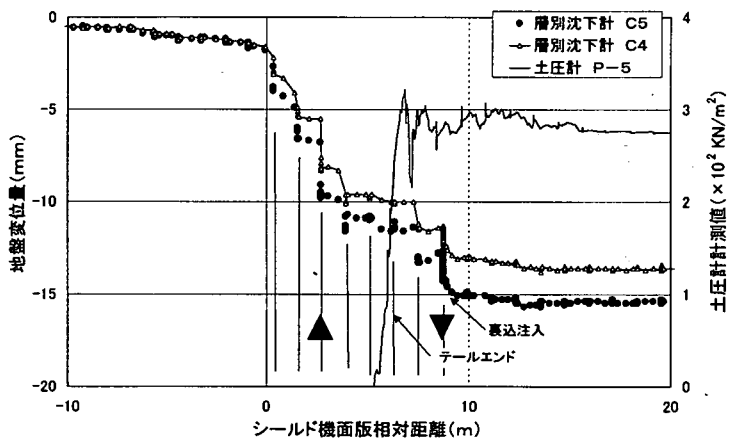


図-5 土圧計・沈下計短期経距変化（沖積）

③切羽到達から裏込注入施工までの沈下変位の経距的傾向に着目すると、沈下変位は階段状に発生しており、階段の階代に相当する幅は、セグメント幅に相当し、掘進中の沈下変位は相対的に小さく、昼夜作業終了またはリング単位のセグメント組立や配管延長のためのシールド機停止時に沈下変位が大きく発生している。ここで、特に図中▲印記載箇所が夜方から昼方へ、▼印記載箇所がセグメント土圧計等計測配線のための停止に相当し、他のリング単位の停止と比べ比較的大きい。

④各位置においては、以下のようなのである。

1) 切羽到達前の先行沈下は小さいが、切羽の直接的影響は1 D前方から発生しているようである。

2) 切羽到達前後の掘進リングと直後のリングでは、掘進中の変位が生じているが、以降の掘進中の地盤変位は微小である。

また、図-6にシールド機面版到達から裏込注入までの地盤変位の生じている期間について、セグメント再近接層別沈下計計測点(C5)のデータの経時変化を示す。この図から、シールド機停止時における地盤変位は時間経過にほとんど関係なくほぼ一定で、掘進終了から停止に移行する時点で発生している。

以上のことから、当該地盤におけるシールド機掘進直後の短期間における傾向は、掘進に伴う地山応力解放による地盤変位への影響は切羽到達前後のみ発生して、以後は切羽チャンパー内圧による影響が大きく、

シールド機周辺の泥水を通じ後方まで伝達されている。このシールド機停止直後の地盤変位は、セグメント組立に伴うシールド推進ジャッキ引き操作に伴うシールド機後退⁴⁾により、切羽泥水圧が低下することにより切羽が除荷されているものと想定される。

(2) 地盤相対変位とセグメント土圧計計測値の関係

図-7に層別沈下計直上計測点間(C5とC4、C4とC3間)の地盤変位の相対変位について、シールド機の掘進に伴うシールド機面版位置との相対距離との関係を示した。ここで、相対変位量(ー)は引張ひずみを示しており、図-7からシールド機が層別沈下計に到達した以後の変位は、C5とC4・C4とC3とも引張ひずみを示し、裏込注入施工によりやや圧縮されるが以後ほぼ一定値を示す。また、図-5と同様に掘進停止時に引張ひずみが発生しており、このことからシールド

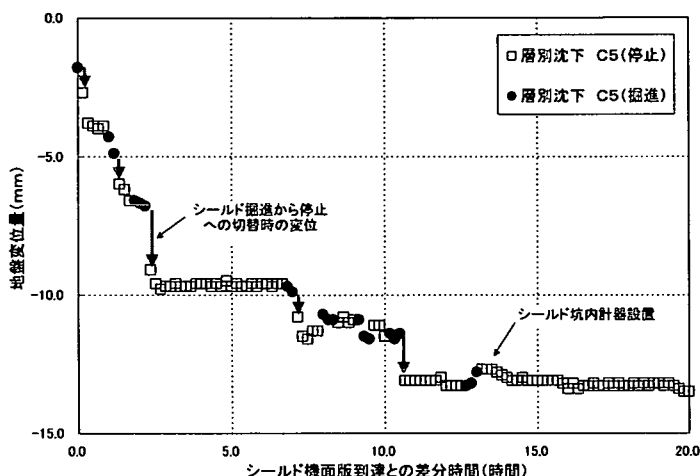


図-6 層別沈下計短期経時変化(沖積)

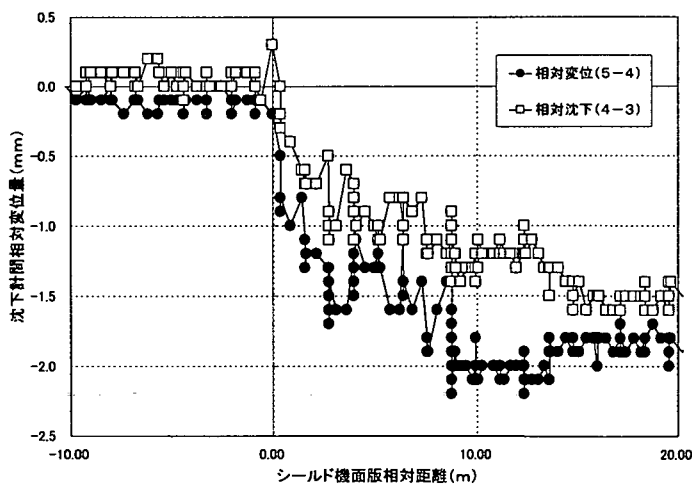


図-7 地盤相対変位短期経距変化(沖積)

ド停止直後に切羽圧力が下がり、これが後方の地盤に減圧すなわちクラウン部地盤を下方に引っ張る力が発生したと同様の現象が生じていると想定される。これは、周辺地盤が一様に粘性土である場合に顕著に発生する現象と想定され、今回の沖積粘性土の場合は比較的に大きな地盤変位が発生し、洪積粘性土地盤においては地盤自体の剛性により除荷変位が小さい。セグメントがシールド機から離脱する+6.2mからそれ以降の相対変位量については、両測点間においても引張ひずみとして微増することから、セグメントへの有効土圧荷重としてこの鉛直変位は評価されない。すなわち、地盤変位と有効土圧発生は、ほとんど無関係であり、すくなくとも密閉型シールドのうち泥水式の場合、掘削に伴うトンネル周辺の地盤変位とセグメントに働く荷重状態は、一義的に評価できない。

4. 他工事における検証

4. 1 現場計測概要（洪積）

前記の図-5に示した地盤変位の短期経距変化傾向が、他工事においても同様の傾向を示すか以下に検証した。検証した工事は、セグメント荷重計測を行った既報告の洪積¹⁾地盤に相当する工事で、地盤変位計測を行った計測断面は、セグメント荷重計測断面と異なり図-9の土質柱状図に示すように洪積砂層が卓越した地盤である。図-8に計測平面配置を、図-9に層別沈下計測点とトンネル位置の縦断位置について示した。

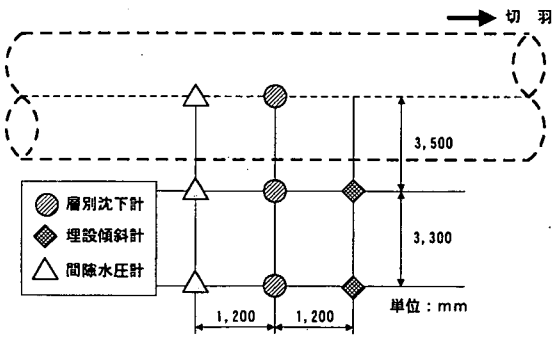


図-8 地上計測位置（洪積）

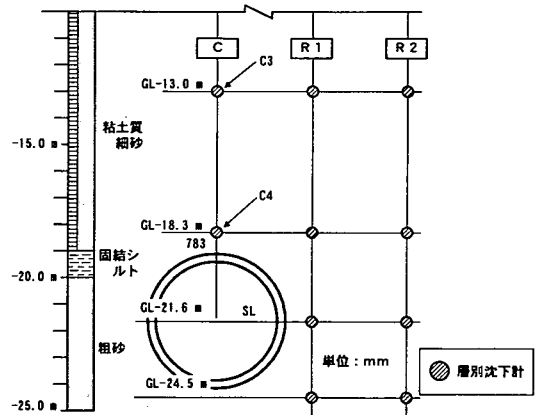


図-9 層別沈下計深さ方向配置（洪積）

4. 2 地盤変位の経距変化

図-10に当該洪積砂質地盤におけるシールド直上に設置した層別沈下計の計測値について、計器設置位置とシールド機面版位置との相対距離で図化した。本工事では、シールド機長は約7.3mであり、裏込注入は可塑性を用いた掘進時にセグメントグラウトホールから行う即時注入で、掘進リングから3リング後方で行い、シールド面版からは8.8~10.0m程度離れていることになる。この図から、図-5と同様にシールド機面版到達から急激に沈下が生じており、リング掘進ご

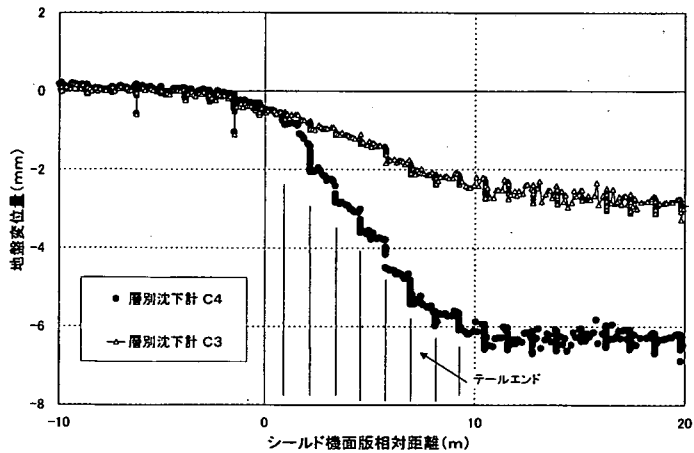


図-10 層別沈下計短期経距変化（洪積）

とに変位が階段状になる傾向が再確認され、ここでもシールド機停止中に変位が生じている。ただし、沖積粘性土の場合と異なり、掘進中も掘進に応じ変地盤変位が生じていること、裏込注入後以降もシールド機停止中の変動が生じており、砂地盤では掘進時ならびに停止時の切羽泥水圧の変動を間隙水圧を通してかなり後方まで伝達していると考えられる。

5. まとめ

シールドトンネル掘削に伴う地盤の変位と、これまでに報告してきたセグメントに働く土水圧の計測値との関係について、分析・検討してきたが、さらなる検討課題を含め、以下のようにまとめられる。

- ①沖積粘性土の場合、シールド機の掘削による応力解放によるものとみられる地盤変位がシールド機面版が到達した直後の掘削時に発生しているが、地盤変位のほとんどがシールド機が掘削から停止に移行する時点で発生しており、セグメント組立に伴う推進ジャッキ引き操作によるシールド機後退によるチャンパー泥水圧の圧力低下が泥水を媒体としてシールド機後方に伝達されたものと想定される。

(ただし、この地盤変位の発生状況は粘性土地盤を泥水式で掘削する場合の現象であり、土圧式の場合等それぞれ特有の地盤変位の発生状況になると思われる。)

- ②層別沈下計測点間の相対変位の経距変化について、シールド機面版到達から引張ひずみが増大し、裏込注入施工により、ひずみの増加はほぼ収束する。シールド機からセグメントが離脱するテールエンド位置からそれ以降の相対変位量については、両測点間において引張ひずみとして微増することから、密閉型シールドのうち泥水式の場合、掘削に伴うトンネル周辺の地盤変位は生じていてもそれがセグメントに働く荷重としては働いていないと考えられる。

これらの計測値の発生傾向から、冒頭1. まえがきに記載した課題すなわち「掘削前の初期応力に対する掘削解放力は、何処にいったか」に対する回答は、当該計測箇所においては切羽泥水圧で除荷され、地盤変位とバランスすることで、セグメントによる有効土圧成分はほとんど負担していないと考えられる。すなわち、この地盤変位と切羽の荷重状態ならびに覆工荷重負担の考え方は、泥水圧や裏込注入圧の圧力増減の影響を除けば、NATMの覆工に対する考え方と同じであり、今回のような計測値の分析は芥川ら⁶⁾が提唱する『「変形と土圧の関係」を現場レベルで蓄積することにより、「変形を考慮したトンネル設計土圧式」を確立する必要性』は今後非常に重要なテーマといえる。

【参考文献】

- 1) 有泉 毅、岡留 孝一、長屋 淳一：シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析について、トンネル工学研究 論文・報告集第8巻、土木学会、pp.367～372,1998.11
- 2) 有泉 毅、岡留 孝一、長屋 淳一：シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析（その2）、トンネル工学研究 論文・報告集第9巻、土木学会、pp.277～282,1999.11
- 3) 有泉 毅、岡留 孝一、五十嵐 寛昌、長屋 淳一：シールド洞道に働く施工時荷重に関する分析、トンネル工学研究 論文・報告集第9巻、土木学会、pp.271～276,1999.11
- 4) 有泉 毅、五十嵐 寛昌、今立 文雄、吉村 宗男、貝沼 憲男：高耐久性新型テールシールの開発、トンネル工学研究 論文・報告集第7巻、土木学会、pp.313～318,1997.11
- 5) 伊藤 浩史、井原 健、杉山 博一、桂 豊：洪積砂層土地盤中のシールド掘進に伴う地盤の変状計測（その1～3）、第32回地盤工学研究発表会講演概要集、地盤工学会、pp.2061～2066,1997.7
- 6) 芥川 真一、木谷 努、阿部 泰典、桜井 春輔：極限状態の仮定に基づく Terzaghi のゆるみ土圧に関する一考察、トンネル工学研究 論文・報告集第8巻、土木学会、pp.95～100,1998.11