

シールドトンネルの施工時荷重の影響 に関する現場計測結果と考察

In-situ Monitoring of The Effects on Shield Tunnels by Loads During Construction

矢萩秀一¹・荻野竹敏²・沼澤憲二郎³・深井直光⁴・斉藤正幸⁵

Shuichi Yahagi, Taketoshi Ogino, Kenjiro Numazawa,
Naomitu Fukai and Masayuki Saito

¹フェロー会員 東京地下鉄株式会社 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目19-6)
s.yahagi@tokyometro.jp

²正会員 工修 東京地下鉄株式会社 建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目19-6)

³正会員 東京地下鉄株式会社 建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目19-6)

⁴正会員 工修 日本シビックコンサルタント株式会社 構造技術ソリューション部
(〒270-1342 東京都荒川区西日暮里二丁目27-2)

⁵フェロー会員 工修 日本シビックコンサルタント株式会社 構造技術ソリューション部
(〒270-1342 東京都荒川区西日暮里二丁目27-2)

To investigate methods for designing high-quality shield tunnels by understanding and rationally assessing the actual loads acting on a shield tunnel during its construction and their effects on its segments, the authors monitored the loads at the site of construction and conducted a three-dimensional FEM analysis using the monitored data. This paper describes the kinds of loads that need to be considered as loads that possibly act during construction and the long remaining effects of construction loads, which were determined based on monitored data of segments, and the results of the numerical analysis, which reproduced behaviors of the segments that received loads during construction.

Key Words : shield tunnel, shield tunneling, construction load, segmental lining, measurement in site, 3 dimensional FEM

1. はじめに

従来、シールドトンネルのセグメントの設計では、施工後の実荷重が把握しきれないことや構造計算で評価することが難しい施工時に受ける様々な影響に対応するために、実績を考慮した上で経済性を追及してセグメントの厚さや幅などの仕様を定めるのが一般的であった。

とくに、セグメントに作用する施工時荷重の影響は一時的なものであると考えられており、その影響は長期的なセグメントの挙動に考慮されることは少ない。セグメントの設計において考慮されている施工時荷重は主にシールドジャッキの推力であり、その安全性の照査もジャッキ推力を一時荷重として許容応力度を割増して行っているのが実情である。

一方、最近ではテール通過時に作用する荷重¹⁾、²⁾や裏込め注入圧³⁾などに注目した研究が増えてきており、施工時荷重に関するシミュレーション解析を行った研究⁴⁾、⁵⁾、⁶⁾も見られる。土木学会においてもトンネル工学委員会技術小委員会で検討された成果として2006年10月にトンネルライブラリー「シールドトンネルの施工時荷重」⁷⁾が発表されるなど、施工時荷重に対する注目度が高くなっている。

東京地下鉄が建設する最後の地下鉄路線である地下鉄副都心線(13号線:以下副都心線)では、シールドトンネルの通過地盤が洪積世以前の自立性の高い硬質地盤であることから、国内の鉄道トンネルでは初めて1,600mmのセグメント幅を採用した。そのほかに、単線断面(外径6.6m)のセグメント厚さを320mmとしたこと、複合円形

表-1 計測対象断面

No.	工区名	断面	線形	セグメント	シールド
1	南池袋 B	単線(Do=6.6m)	曲線(R=201m)	RC 平板形(b=1400mm, h=320mm)	泥水
2	高田 A	単線(Do=6.6m)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=320mm)	泥土圧
3	高田 B	単線(Do=6.6m)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=320mm)	泥土圧
4	西早稲田	駅部(Do=8.0m)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=350mm)	泥土圧
5	新宿	単線(Do=6.6m)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=320mm)	泥水
6		単線(Do=6.6m)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=320mm)	泥水
7	新宿御苑	複線(Do=9.8m)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=400mm)	泥水
8		複線(Do=9.8m)	曲線(R=227m)	RC 平板形(b=1200mm, h=400mm)	泥水
9	千駄ヶ谷	複線(Do=9.8m)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=400mm)	泥土圧
10		複線(Do=9.8m)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=400mm)	泥土圧
11		複線(Do=9.8m)	曲線(R=253m)	RC 平板形(b=1200mm, h=400mm)	泥土圧
12	神宮前	複線(Do=9.7×8.4m) (複円形断面)	直線	RC 平板形(b=1600mm, h=400mm)	泥土圧

表-2 計測断面の計測項目

計測項目	計測機器	リングあたり測点数	備 考
土 圧	土 圧 計	4～8 点	副計測リングは測定しない場合有り
水 圧	間隙水圧計	3 点	副計測リングにて測定
鉄筋応力	鉄 筋 計	33～96 点	主鉄筋/軸方向鉄筋
継手変位	変 位 計	96～128 点	セグメント継手/リング継手 目開き量/目違い量
テールクリアランス	変 位 計	8 点	組立完了直後の掘進時のみ
断面形状	断面形状測定器	1 断面	約 30cm 間隔

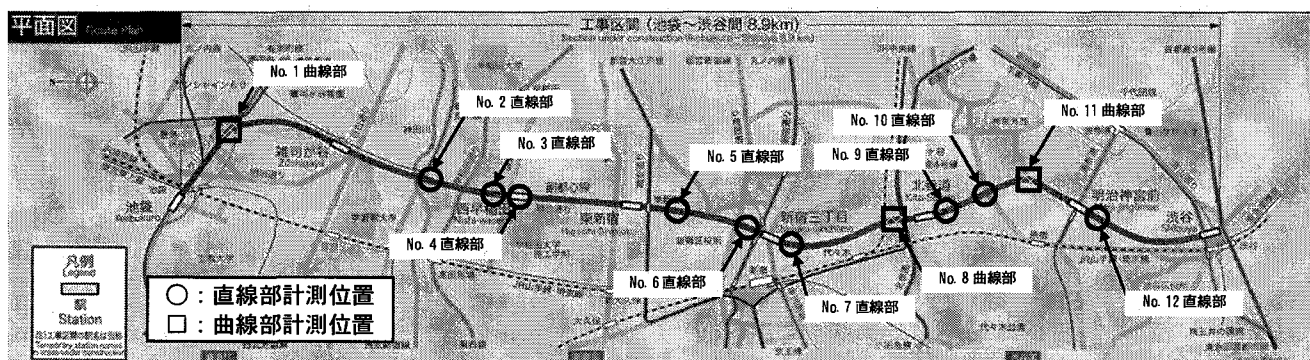


図-1 副都心線（13号線）路線平面図

※ No は、表-1 の工区名に対応する。

断面の採用、新型継手の採用など多くの新技術に取り組んでいる。このため、これらの新技術の効果を確認することを目的として各種の計測を実施した。

著者らは、副都心線で計測された各種の計測データを用いて、施工時荷重として考慮すべき荷重の種類、長期的に残留する施工時荷重の影響と傾向に考察を加えるとともに、施工時荷重を受けたセグメントの挙動を三次元FEMを用いて数値解析によるシミュレーションを実施した。

2. 現場計測の概要

現場計測は、副都心線の池袋～渋谷間のシールド工法で施工した10工区のうち、表-1に示す8工区12断面を対象として実施した。トンネル断面は、単線断面が5断面、複線断面が5断面、複合円形断面が1断面、ならびに駅シールドが1断面である。計測断面で用いられているセグメントは西早稲田工区の駅シールド部の開口用セグメント（鋼製セグメント）を除いてすべて鉄筋コンクリート平板形セグメントである。それぞれの工区における計

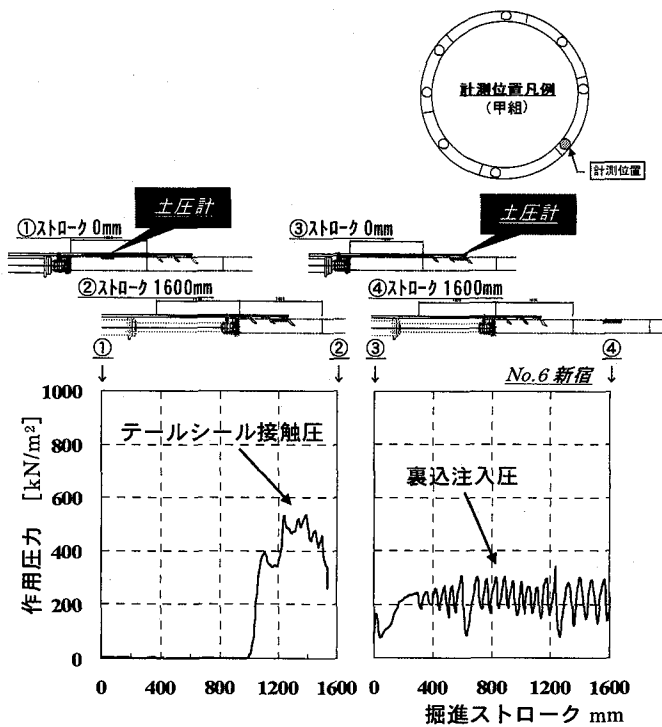


図-2 トンネル半径方向の作用圧力の計測結果

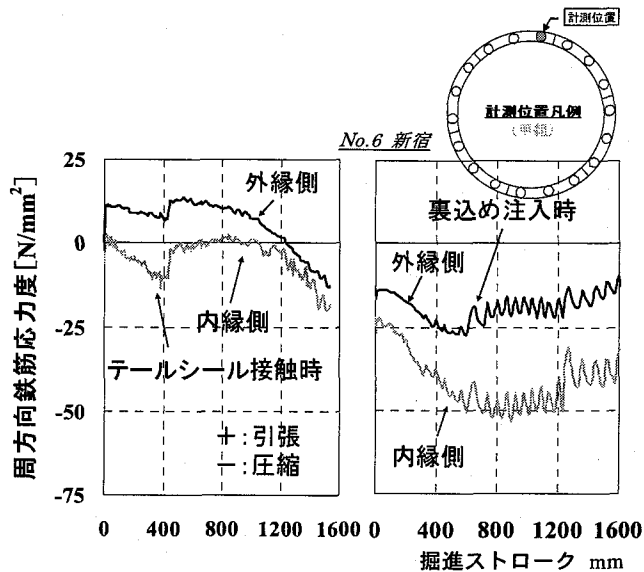


図-3 セグメント円周方向の発生応力度の計測結果

測内容は原則として表-2に示すように統一しており、それぞれの計測結果を横断的に比較することを可能とした。各工区における現場計測の詳細は文献^{8),9)}を参照されたい。

各計測断面は、図-1の平面図に示すように直線部および曲線部を対象としている。トンネル周辺地盤はN値50以上の安定した洪積世以前の土層であり、副都心線における計測結果から長期的な土圧は十分に小さいことを確認したことから、施工時荷重の影響を確認しやすい条件であると考えられる。

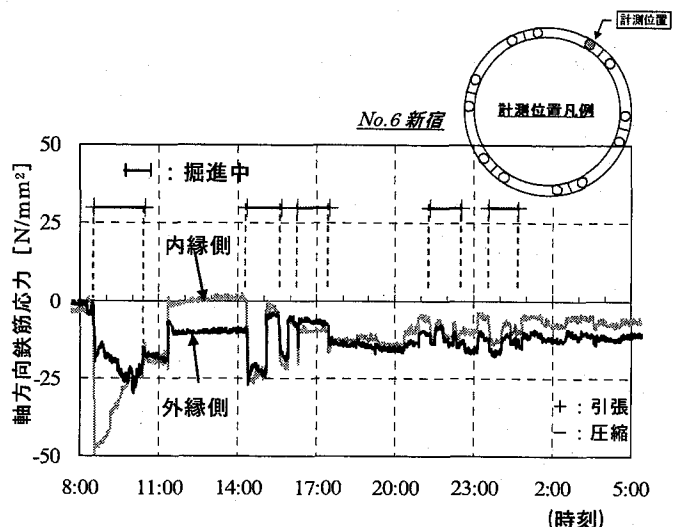


図-4 セグメント軸方向の発生応力度の経時変化

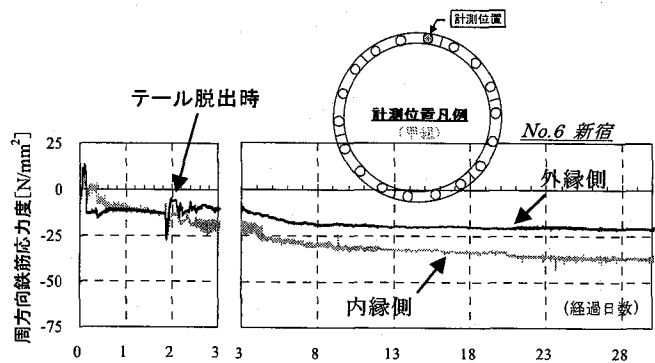


図-5 周方向の発生応力度の経時変化

3. 計測結果の概要

セグメントに作用するトンネル半径方向の荷重の現場計測の結果、大きな施工時荷重が作用するのは、セグメントリングがテールシールを通過する段階と裏込め注入圧が作用する段階であることが確認できる。テールシール通過時と裏込め注入時にセグメントリングに作用する荷重は、計測を行ったすべての断面において概ね同様の傾向を示していることから、ここでは、計測断面の中で比較的施工時荷重の影響が大きいと判断される新宿工区を対象として、掘進ストロークとテールシール通過時および裏込め注入時の荷重との関係の一例を図-2に示す。この結果から、長期的にセグメントリングに作用する土圧や水圧と同様にセグメント外面に作用する施工時荷重としてテールシールの接触圧と裏込め注入圧が挙げられることがわかる。このときの裏込め注入圧の影響は、図-3にその一例を示すようにセグメントリングの円周方向の発生応力度の変化からも確認できる。さらに、テールシールの接触圧に対応するセグメントの応力度の変化は裏込め注入時と比較して小さい。こ

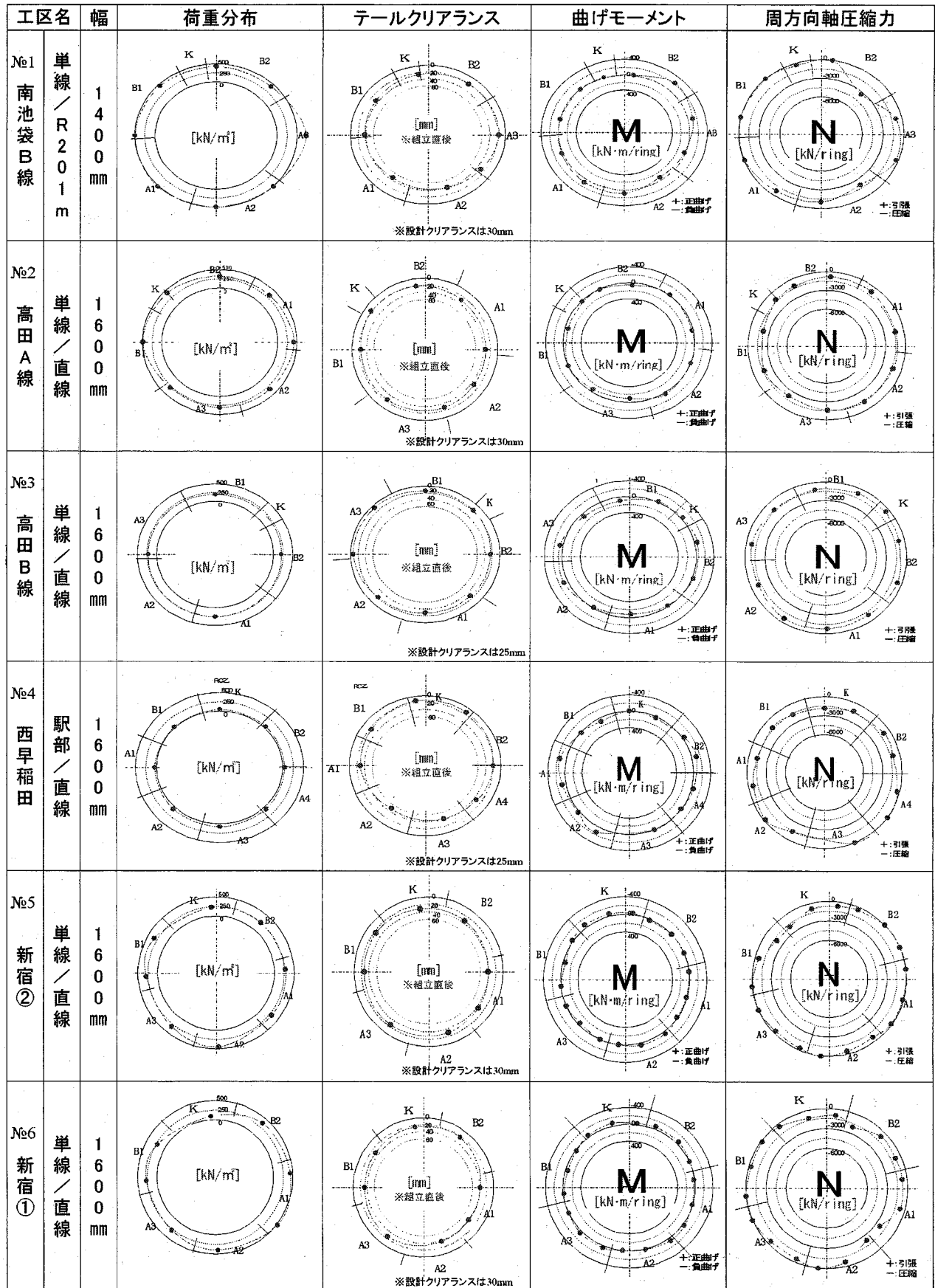


図-6-(1) テールシールの接触時の計測結果

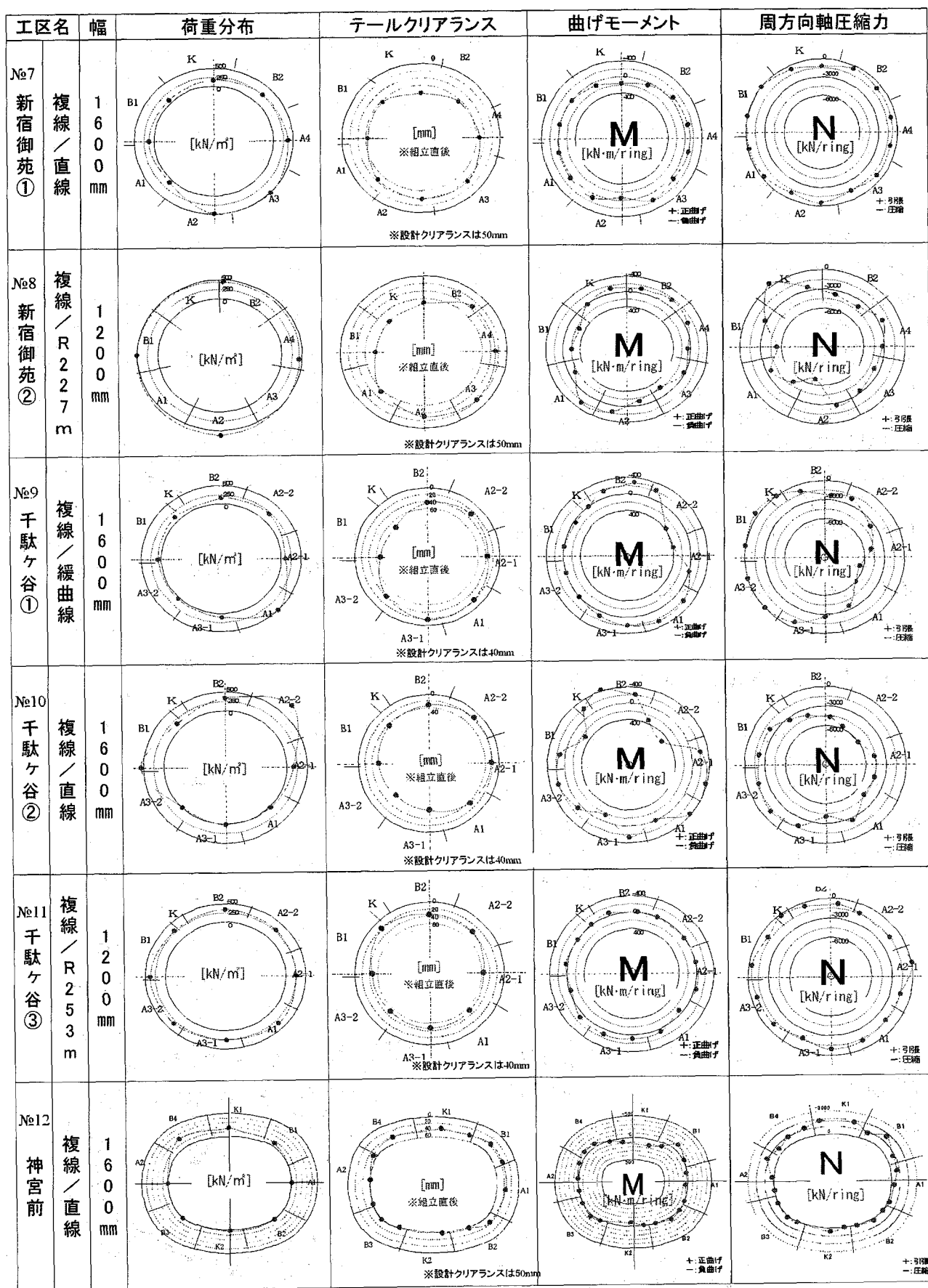


図-6-(2) テールシールの接触時の計測結果

れは、この工区で採用している継手構造の剛性が小さいため、セグメントリングの変形でテールシールの拘束力を吸収していることによるものと推定される。

また、セグメント軸方向に発生する応力度の変化を見ると、図-4にその一例を示すように、組立直後のシールド掘進時に大きな変化を示しており、テールシールの通過時から裏込め注入を経て徐々にその応力度の変化が減少して安定する様子が確認できる。このときのセグメント軸方向の応力度はセグメント内外縁で一様ではなく、セグメント軸方向に比較的大きな曲げモーメントが作用していると考えられる。このことから、セグメントに大きな影響を与える荷重としてセグメントの真円度保持を目的として設置したテール内形状保持システム(TKS)の影響や従来のセグメントの設計でも考慮しているジャッキ推力等が作用しているものと考えられる。

これらの施工時荷重によってセグメントに発生した応力度は、図-5に示すようにその大きさは時間経過とともに低減されるものの組立後1ヶ月を経過した時点においても残留する傾向にあると考えられる。

4. トンネル横断面の挙動への影響

トンネル横断面のセグメントの挙動に影響を与える施工時荷重としては、シールドのテールシールの拘束力と裏込め注入圧が挙げられる。また、施工時荷重の影響はセグメントの継手構造によって変化する傾向がみられる。ここでは、テールシールの拘束力、裏込め注入圧および継手構造に着目して評価する。

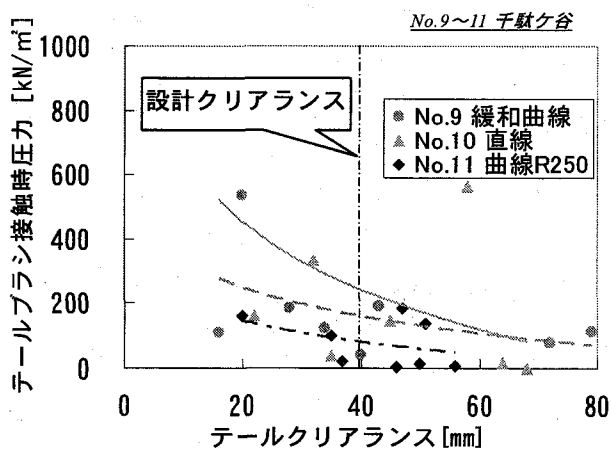


図-7 テールクリアランスとブラシの接触時の圧力

(1) テールシールの拘束圧の影響

一般的に、セグメントリングはシールドテール内で組立てられた直後の掘進時にテールシールと接触する。このとき、セグメントリングはテールシールの拘束力を受ける。図-6に各計測断面の土圧計によって測定されたテールシール通過時に発生する拘束力を示す。これらの計測結果は、土圧

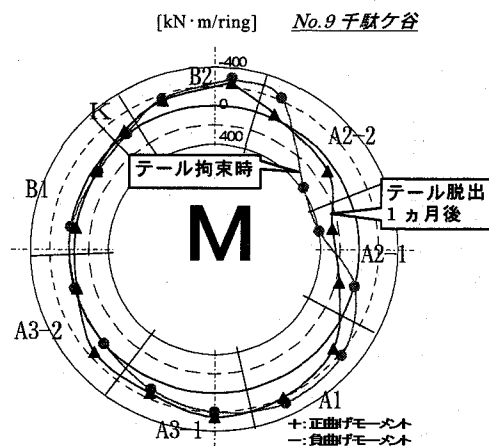


図-8 テールシールの拘束時および1ヶ月後の円周方向の曲げモーメント分布

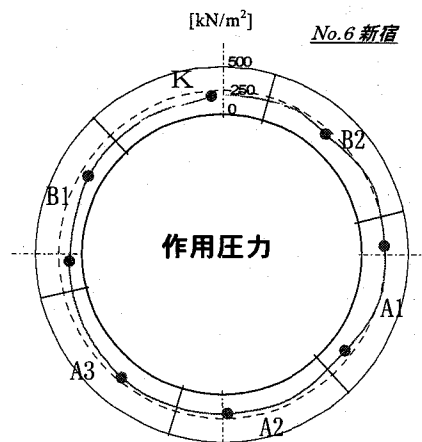


図-9 裏込め注入圧の分布

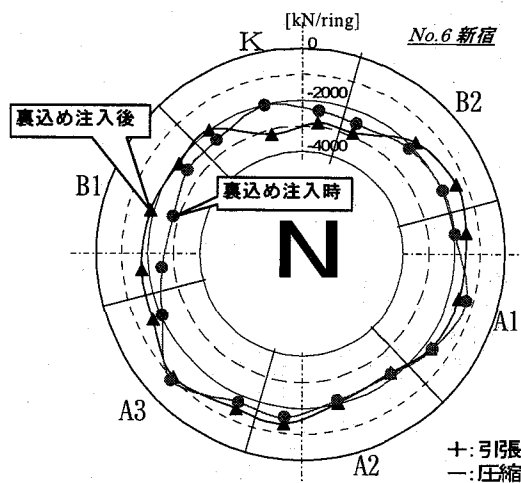


図-10 裏込め注入時および完了後の断面力分布

表-3 副都心線(13号線)に用いた継手構造¹⁾

No.	工区名	セグメント継手構造	トンネル断面	リング継手構造	継手剛性
1	南池袋B	スライドコッター継手※	単線	クイックジョイント継手	剛
2,4	高田A,西早稲田	DUET 継手※	単線/駅部	DUET 継手	中位
3,7,8	高田 B,新宿御苑	BEST 継手※	単線/複線	BEST 継手	中位
5,6	新宿	FAKT 継手※	単線	—	柔
9,10,11	千駄ヶ谷	スライドロック継手※	単線/複線	TA-SRING	剛
12	神宮前	インサート式高剛性継手※	複線	DUET 継手	剛

※:現場計測によって継手の挙動を確認した構造

表-4 継手の回転ばね定数

工 区	継手剛性	回転ばね定数 k_{θ} ($\text{kN}\cdot\text{m/rad.}$)
新宿工区	柔継手	$k_{\theta(+)}=0$ $k_{\theta(-)}=0$
高田 A 工区	中位の継手	$k_{\theta(+)}=36,000$ $k_{\theta(-)}=16,000$
南池袋 B 工区	剛継手	$k_{\theta(+)}=47,000$ $k_{\theta(-)}=21,000$

※:回転ばね定数は設計値を表す。

計による作用荷重の測定値が最大値を示した時点に着目して比較したものである。これらの拘束力の分布は、概ね均一な圧力分布となっているものと、偏圧が発生しているものとに大別することができる。これらの拘束圧を計測した時点のテールクリアランスの分布を図-6に併記する。

このとき、同一の工区で計測断面が最も多い千駄ヶ谷工区を例として、図-7に示すテールシールの拘束圧とテールクリアランスとの関係を見ると、シールドマシン外殻の変形を無視した場合、テールクリアランスが小さいほど拘束圧が大きくなる傾向を示しており、テールクリアランスの大小が拘束力の大きさに影響を与えていることがわかる。

一方、拘束力とセグメントに発生する断面力との関係を見ると、図-6に示すように拘束圧が小さい部分で負の曲げモーメントが発生し、軸力も大きくなる傾向を示している。このことから、テールシールの拘束力によってセグメントに比較的大きな断面力が発生していることがわかる。さらに、千駄ヶ谷工区のなかで最もテールシールの拘束力が大きかったNo.9断面について、図-8に示すセグメントが地山の中で安定した状態におかれていると判断できる組立1ヶ月後の断面力分布を見ると、テールシールの拘束力によって発生した断面力が低減されながらも残留する傾向にあることがわかる。

一方、拘束力とセグメントに発生する断面力との関係を見ると、図-6に示すように拘束圧が小さい部分で負の曲げモーメントが発生し、軸力も大きくなる傾向を示している。このことから、テールシールの拘束力によってセグメントに比較的大

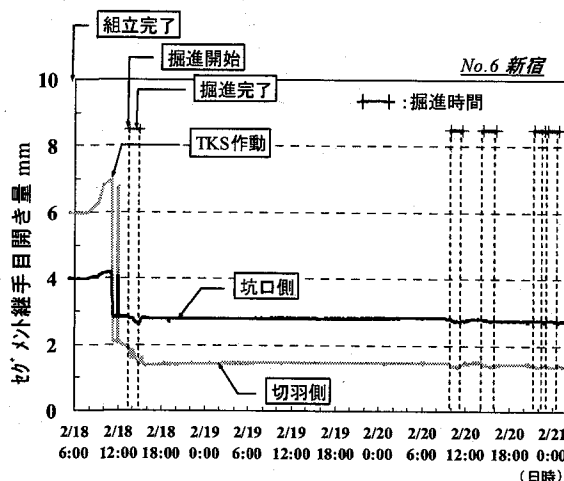


図-11 FAKT 継手の挙動 (柔な継手)

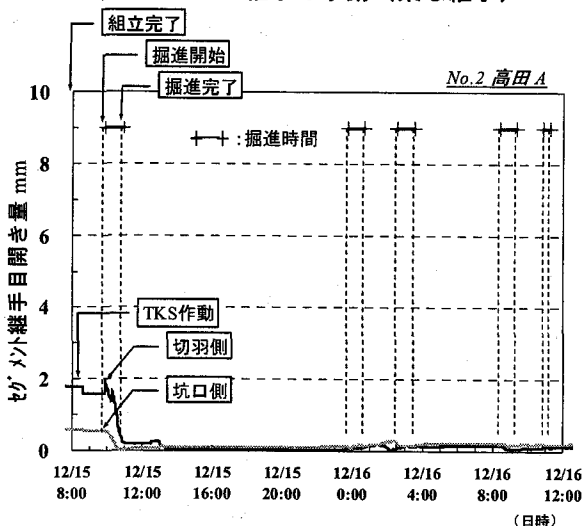


図-12 DUET 継手の挙動 (中位の継手)

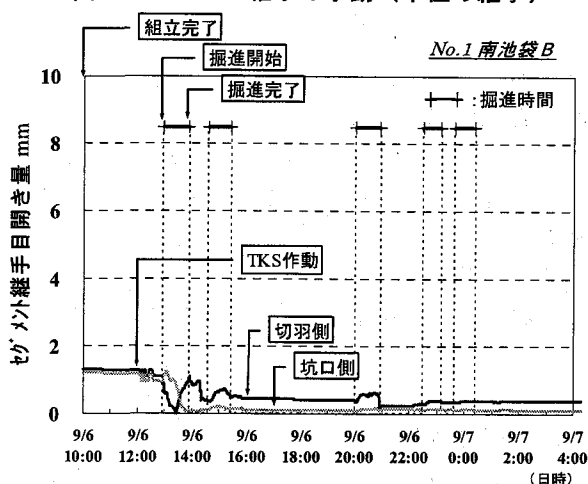
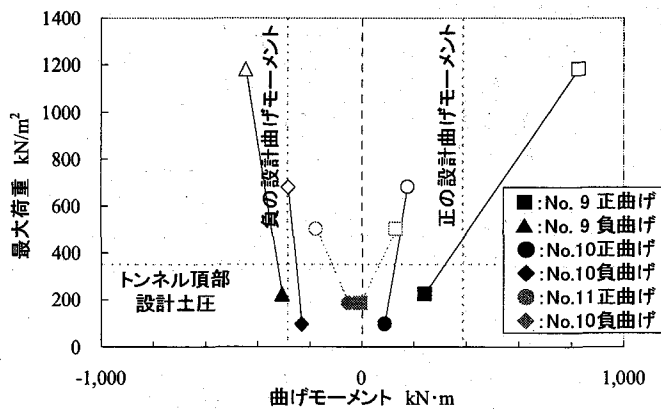
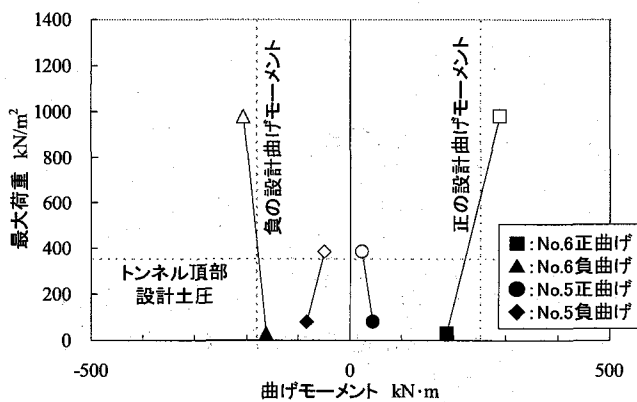


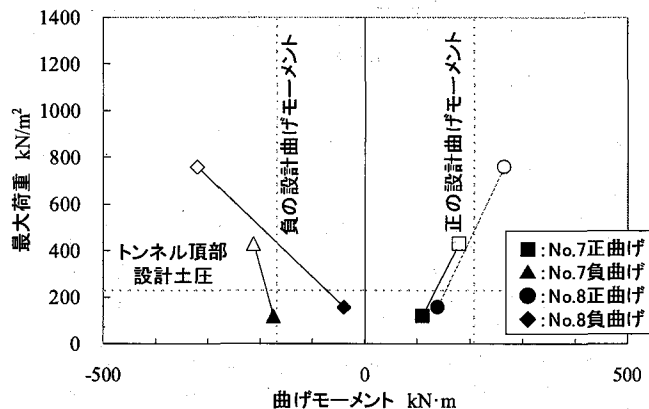
図-13 スライドロック継手の挙動 (剛な継手)



(1) 新宿工区



(2) 新宿御苑工区



(3) 千駄ヶ谷工区

図-14 セグメント内部応力と作用圧力の変化の関係

きな断面力が発生していることがわかる。さらに、千駄ヶ谷工区のなかで最もテールシールの拘束力が大きかったNo.9断面について、図-8に示すセグメントが地山の中で安定した状態におかれていると判断できる組立1ヶ月後の断面力分布を見ると、テールシールの拘束力によって発生した断面力が低減されながらも残留する傾向にあることがわかる。

(2) 裏込め注入圧の影響

セグメントリングはテール脱出とほぼ同時に裏込め注入圧を受ける。裏込め注入時の発生断面力

の変化が比較的大きい新宿工区のNo.6断面について、図-9に土圧計による裏込め注入圧の計測結果を示す。裏込め注入圧の分布は、この図に示すように概ね均一であることから、その影響は水圧が作用した状態に近いと考えることができる。このことは、図-10に示すように裏込め注入時と注入完了後のセグメントに発生する断面力の変化が小さいことから確認でき、良好な施工が行われたことがわかる。

(3) 継手構造の影響

副都心線では多くの種類の継手が採用されている。計測対象工区で採用した継手構造を表-3に示す。ここでは、継手剛性の差に着目し、同径の単線シールドのうち柔構造の継手を採用した新宿工区、中位の継手構造を採用した高田A工区、および剛構造の継手を採用した南池袋B工区における継手部の目開き量の変化に着目した。それぞれの工区で採用した継手の回転ばね定数は表-4に示すとおりである。

図-11～13にそれぞれの継手構造のセグメント継手の目開き量の変化を示す。継手剛性が中位以下の場合には初期の目開き量が4mm程度と大きいものに対して、剛構造の継手では組立直後の目開き量が1mm程度と小さくなっている。いずれの継手構造も掘進が終了し、テールシールの拘束を受けることによって目開き量は十分に小さくなる。なお、柔構造の継手では裏込め注入後における残留目開き量が2mm程度となっているが、この目開きは継手端面の接触防止を目的として設けた構造上の目開きであり、相対的な目開き量は十分小さいものと判断できる。

これらのことから、継手の締結力(剛性)が小さい場合には、施工時の継手の変形挙動が大きいことを示しており、施工時荷重の影響を検討する場合には、継手剛性に応じた初期の目開き量を考慮することが望ましいことがわかる。

(4) 施工時荷重の影響の長期的な残留

施工時荷重の影響が長期的に残留する傾向を示していることはセグメントの鉄筋応力度の計測結果から推定される。ここでは、土圧計によって計測されるセグメントの作用荷重と鉄筋応力度との関係に着目して施工時荷重の影響の長期的な残留を評価する。

図-14に作用荷重と曲げモーメントの計測結果との関係を示す。ここでは、計測の対象とした8

工区の中から比較的施工時の影響が大きく出ていた新宿工区、新宿御苑工区および千駄ヶ谷工区の3工区を対象とした。図中の白抜き記号はテールシール接触時の最大荷重と正負の最大曲げモーメントとの関係を示したものであり、黒塗り記号は裏込め注入完了後のデータが安定した時期における最大荷重と施工時に最大曲げモーメントが発生した位置の曲げモーメントとの関係である。このとき、図-6に示すように最大荷重の発生位置と最大曲げモーメントの発生位置とは必ずしも一致していない。

安定時には荷重と曲げモーメントがそれぞれ設計荷重と設計断面力以下になっており、覆工構造の安全性は保たれていることがわかる。しかしながら、トンネルの通過地盤が洪積世以前の自立性に富んだ硬質地盤であることから、有効土圧は極めて小さく、セグメントの応力状態は軸力が卓越し、曲げモーメントは十分に小さくなると考えられる。そこで、施工時に設計荷重を超える作用荷重が確認できた場合の施工時の作用荷重と曲げモーメントの関係と、裏込め注入後の安定時の作用荷重と曲げモーメントの関係を直線で結び、その延長線が作用荷重0の線と交差したときの曲げモーメントを施工時荷重の影響の残留分と仮定した。安定時の曲げモーメントには施工時荷重の影響以外に土圧や水圧などが含まれているが、土圧は全体に小さく、曲げモーメントに与える影響は小さいと考えた。

この仮定にもとづけば、施工時に設計断面力を超えない場合には発生断面力に大きな変化が生じないが、概ね原点に復帰する傾向を示す。一方、施工時に設計断面力を超えた場合には、作用荷重の低下にともなって発生断面力が低減する傾向が顕著に表れており、施工時荷重によって発生した曲げモーメントの1/3～2/3程度が残留している可能性があると考えられる。

柔な継手構造を採用している新宿工区においては、各計測断面の施工時の最大曲げモーメントの大きさにかかわらず、安定時に残留する曲げモーメントが概ね同程度となっているのに対し、中位の継手構造を採用した新宿御苑工区や、剛な継手構造を採用した千駄ヶ谷工区では、施工時の最大曲げモーメントの大きさによって安定期に残留する曲げモーメントの大きさが異なる傾向が強い。これは、図-11～13に示した継手の挙動で、中位の継手構造や剛な継手構造と比較して、柔な継手構造の初期の目開き量が大きく、組立後の継手の変

位量が大きいため、柔な継手構造では、継手の変形で荷重を吸収することによるものと考えられる。このことから、施工時に発生する最大曲げモーメントが設計断面力と比較して小さい場合に、継手構造の剛性が低いほど作用荷重が低下しても曲げモーメントが大きな変化を示さない傾向が見られるのは、荷重の変化に大きな影響を受けないと考えられる組立精度の影響などによって発生した曲げモーメントが顕在化しているためと考えられる。

このことから、施工時荷重の影響を抑制することによって、施工時の発生断面力を設計断面力以下に制御することが、セグメントの長期的な安全性を確保するために望ましいと考えられる。

5. トンネル軸方向の挙動への影響

シールドトンネルの施工時には、シールドの掘進反力をセグメントにとるため、セグメントは必ずジャッキ推力を受ける。従来からジャッキ推力に対するセグメントの安全性はシールドが装備する最大推力にジャッキ推力の作用点とセグメントの図心との位置関係による偏心量を考慮して照査されてきた。土木学会のシールド工事前標準セグメントではこの偏心量を10mmとしてセグメントの性能を定めている。

しかしながら、セグメントのトンネル軸方向の応力分布は、単純にジャッキ推力とその偏心量のみによって決定されていないことが現場計測結果から明らかとなっている。図-15, 16に組立直後の掘進時のテール内の状況と軸方向鉄筋の応力状態を、図-17, 18に計測セグメントがテールシールを通過するときのテール内の状況と軸方向鉄筋を示す。組立直後の掘進時には1リング目のセグメント2リング目のセグメントが接するリング継手部を中心として50～70N/mm²の曲げ応力度が鉄筋に発生しており、セグメント全断面が有効であると仮定すれば、曲げモーメントは $M=40\text{kN}\cdot\text{m/m}$ 程度、軸力は $N=750\text{kN/m}$ 程度となる。このことから、セグメントに伝達するジャッキ推力の偏心量は概ね50mm程度と推定される。一方、テールシールの拘束力を受けるときには、同様の継手位置付近で曲げ応力度は10N/mm²以下と小さく、圧縮応力度も2～4N/mm²程度となっている。

リング継手近傍でこのようにセグメントの軸方向応力度の分布が変化する要因として、リング継手の接触状態が考えられる。一般的に、セグメン

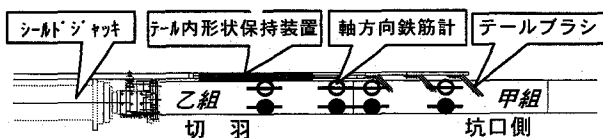


図-15 掘進直後のテールの状態

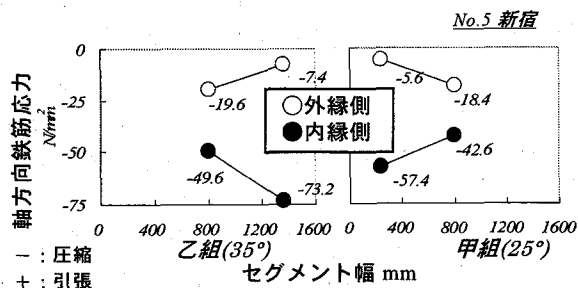


図-16 掘進直後の軸方向鉄筋の応力状態

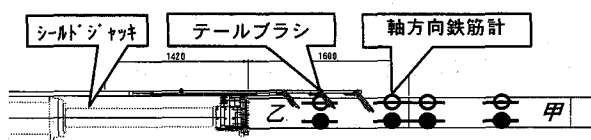


図-17 テールブラシ接触時のセグメントの状態

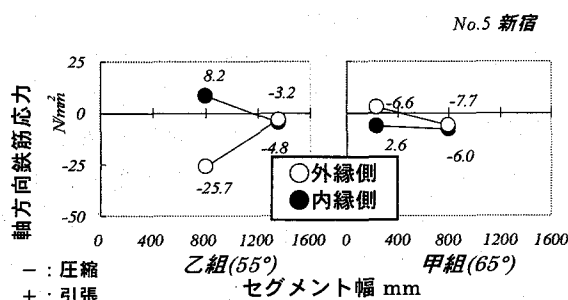


図-18 テールブラシの接触時の軸方向鉄筋の応力状態

トリリングは組立直後に、坑口側のセグメント継手の目開き量が小さく切羽側の目開き量が多い、いわゆるラッパ状となっていることが多い。このため、リング継手面の接触状態が組立直後には偏っていたものが、テールシールの拘束力によってセグメントリングの形状が矯正され、リング継手の接触状態が均一になってきたものと推定される。分析の対象とした新宿工区では、基本的にセグメント継手に締結部材をもたないFAKT継手を採用していることからこの傾向が顕著になっていると考えられる。

6. シミュレーション

現場計測結果の分析によって得られた知見に基づいて、比較的施工時荷重の影響が大きいと考えられる千駄ヶ谷工区 (No.10) を対象として、施工時荷重の影響を数値解析によってシミュレーション

を実施した。

(1) 構造モデル

施工時荷重の影響は、トンネル軸方向に作用するジャッキ推力、半径方向に作用するテールシールの拘束力や裏込め注入圧、さらに、セグメントの組立状況などによって変化することが現場計測結果で確認されたこと、継手の接触状況などによってその影響が異なることを評価するために、数値解析に用いる構造モデルは、三次元ソリッドモデルとした。セグメント継手とリング継手はともに継手金具の位置に引張ばねとせん断ばねを考慮した。継手のコンクリート面は接触問題として扱い、引張ばねと接触とで回転剛性を評価している。図-19に構造解析モデルを示す。解析範囲は3リングとし、3リング目の後方には境界条件として弾性ばねを設置している。

(2) 解析条件

解析条件を表-5に示す。セグメントは弾性体として扱っており、コンクリートのひび割れの影響などは考慮していない。

数値解析で考慮する施工時荷重は、現場計測の結果から、その影響が認められたジャッキ推力、テールシールの拘束力ならびに裏込め注入圧とした。ジャッキ推力は、シールドとセグメントとの位置関係(軸線の偏心)から生じる分力を考慮した。

(3) 解析結果と現場計測結果との比較

三次元FEMによって得られた断面力を計測結果と比較した結果を図-20に示す。シミュレーションは、計測リングが組立てられた直後の掘進による影響を対象としており、図-20は対象となる掘進が完了する直前の断面力である。断面力の着目位置は、図-21に示すようにテールシールの拘束力の影響が最も大きく現れると考えられる1リング目の切羽側から350mmである。

計測結果はA2-1セグメント (右上方) で曲げモーメントと軸力が大きくなる傾向を示しており、この付近でテールクリアランスが小さくなっていることによる偏荷重の影響が見られる。

一方、解析結果は、全体的な断面力分布の傾向は曲げモーメントの分布が縦に扁平する方向に生じていることや、軸力が右上で大きな値を示すことなど、計測結果と概ね一致している。しかしながら、曲げモーメントの分布の最大値の発生位置など一部にずれが生じている。これは、解析に相

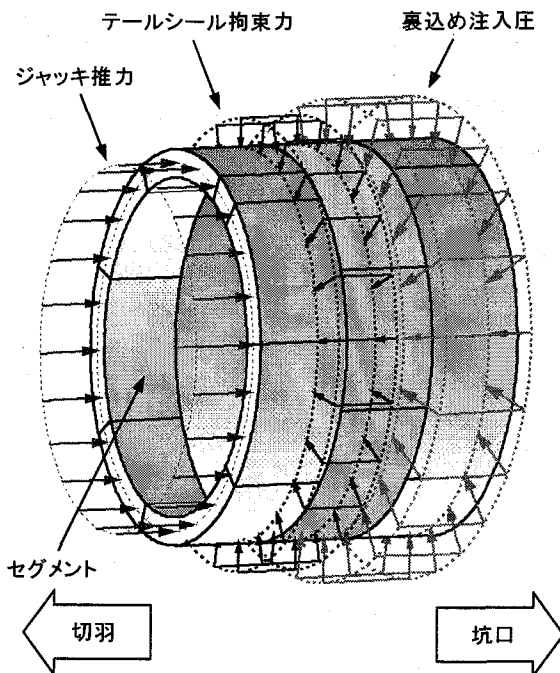


図-19 3次元 FEM 解析モデルの概念図

表-5 3次元 FEM の解析条件

項目	内容
①解析モデル	3次元ソリッドモデル
②モデル化範囲	3リング
③圧縮特性、ポアソン比	弾性体 ($E_c=40\text{kN/mm}^2$), 1/6
④セグメント継手	スライドロック (試験値を採用)
⑤リング継手	Ta-Sring (試験値を採用)
⑥境界条件	軸方向ばね値を計測結果に基づいて設定
⑦初期条件	断面変形はジャッキ偏心量で考慮
⑧ジャッキ推力	施工データをもとに設定
⑨推進分力	推進分力は上下左右のストローク差より設定
⑩ジャッキ偏心量	偏心量を偏心荷重に変換して考慮
⑪テールシール接触圧	掘進時のセグメント土圧計データをもとに設定
⑫裏込め注入圧	
⑬TKS保持圧	

応の影響を与えていると考えられるテールシールの拘束力が、テールクリアランスの変化によって変動する影響や、曲線施工やシールドの蛇行修正にともなってジャッキの伸長とともにシールドとセグメントとの相対位置が徐々に移動することで、ジャッキ推力の偏心量が変化する影響などを十分に評価できていないことに起因するものと考えられる。

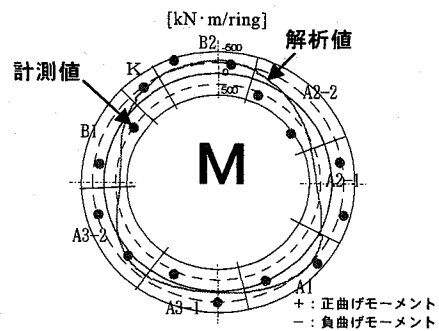
7. まとめ

施工時荷重の影響に着目して現場計測結果を分析した結果、以下の知見が得られた。

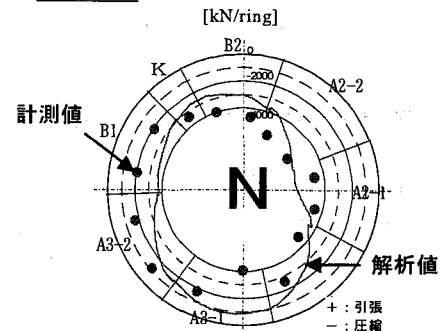
a) セグメントに影響を与える施工時荷重として、

曲げモーメント分布

No.10 千駄ヶ谷



軸力分布



※切羽側端部より 350mm 位置を抽出

図-20 実測値と解析値の整合状況

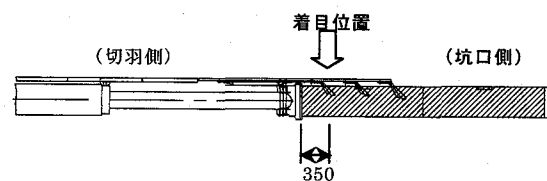


図-21 断面力の着目位置

ジャッキ推力、テールシールの拘束力および裏込め注入圧が挙げられる。このうち、セグメント円周方向の断面力に主として影響を与えるのはテールシールの拘束力であり、トンネル軸方向に主として影響を与えるのはジャッキ推力である。

- セグメントが受ける施工時荷重の影響を変化させる要因として、セグメントの組立精度、とくに、継手の剛性の違いによる継手の目開き量および継手の挙動の差があげられる。
- 施工時荷重は、荷重ごとに独立してセグメントに影響を与えるものではなく、継手の目開き量などの組立精度などを含め、複合してセグメントの挙動に影響する。
- 施工時荷重の影響を最小限に止め、構造物への長期的な影響を残留させないことが重要であると考えられる。現場計測結果から、施工時に設計断面力以上の応力状態となった場合には、施工時荷重の影響が長期的に残留する

可能性が認められた。このことから、適切な施工管理を行うことで、施工時荷重の影響によって発生する断面力が設計断面力を超えないように制御し、施工時荷重の影響を長期的に残留させないことで、その影響を一時的なものとする可以考虑。

また、現場計測結果にもとづいた数値解析によるシミュレーションによって、以下の知見が得られた。

- a) 三次元ソリッドモデルを用いたFEMによって、シールドトンネルに局部的に作用する施工時荷重の影響を評価できる。
- b) シールドの掘進にともなって変化するテールクリアランスやシールドとセグメントとの位置関係の変化など、逐次変化する荷重条件がFEM解析結果に大きな影響を与える。

今後は、適切な施工管理手法を確立することを目的として、テールシールドの拘束力をより定量的に評価するための実験を行うなど、施工時荷重に影響を与える要因を評価、整理するとともに、数値解析によるシミュレーションの精度向上をはかったうえで、複数の工区を対象としてシミュレーションを実施し、施工管理水準と施工時荷重との関連性を検討する予定である。

参考文献

- 1) 吉本正浩，阿南健一，大塚正博：シールドトンネルの施工時荷重の照査方法に関する一提案，土木学会論文集，No.756/VI-62，pp.131-144，2004.3.
- 2) 有泉毅，岡留孝一，五十嵐寛昌，長屋淳一：シールド洞道の施工時荷重に関する研究(1)，土木学会第54回年次学術講演会，Ⅲ-B，pp.220-221，1999.9.
- 3) 橋本正，長屋淳一，太田拙，塩谷智弘，杉原和彦：実測値に基づくシールドトンネルの設計土圧に関する一提案，トンネル工学研究論文・報告集，第7巻，pp.291-296，1997.11.
- 4) 小山幸則，小西真治，P.S.Jpvanovic，橋本正：シールドトンネルに施工時荷重が及ぼす影響，トンネルと地下，第33巻，第8号，pp.35-43，2002.8.
- 5) 田嶋仁志，岸田政彦，深井直光，齊藤正幸：三次元FEMモデルを用いたシールドトンネルの施工時荷重に関する検討，トンネル工学研究報告集，第14巻，pp.353-360，2004.11.
- 6) 田嶋仁志，春日清志，深井直光，團昭博，齊藤正幸：セグメント挙動に計測に基づいた大断面シールドトンネルにおける施工時荷重の影響検討，トンネル工学研究報告集，第15巻，pp.293-300，2005.12.
- 7) 土木学会：トンネルライブラリー第17号 シールドトンネルの施工時荷重，2006.10.
- 8) 奥尾展保，高橋聡，塩川太司，真保正吾，齊藤正幸：地下鉄 13 号線千駄ヶ谷工区シールド工事におけるセグメント挙動計測 ～幅広セグメントに作用する施工時荷重の考察～，土木学会第 61 回年次学術講演会，6-802，pp.163-164，2006.9.
- 9) 堤直樹，西村聡，福田隆二，西井成実，奥尾展保，齊藤正幸：地下鉄 13 号線新宿工区シールド工事におけるセグメント挙動計測 ～トンネル形状保持システムの有効性と FAKT 継手の実証～，土木学会第 61 回年次学術講演会，6-804，pp.167-168，2006.9.