

セグメント挙動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

Consideration of the effects of loading during the construction of a shield tunnel of large cross section through the monitoring of behavior of segmental rings

田嶋仁志¹・春日 清志²・深井直光³・団 昭博⁴・斉藤正幸³

Hitoshi Tajima, Kiyoshi Kasuga, Naomitsu Fukai, Akihiro Dan and Masayuki Saitou

¹正会員 博(工) 首都高速道路公団 工務部設計技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)

²正会員 工修 首都高速道路公団 工務部設計技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)

³正会員 工修 日本パシフィックコンサルタンツ株式会社 技術本部構造技術ソリューション部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

⁴正会員 工修 日本パシフィックコンサルタンツ株式会社 技術本部地下空間技術部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

This study monitored the behavior of segmental rings, analyzed shield behavior and made a three-dimensional FEM analysis of shield tunnels to grasp the effects of loads on segmental rings during shield excavation.

The study defined the boundary condition for three-dimensional FEM analysis based on the results of monitoring of the behavior of segmental rings, and estimated the pressure of the tail seal of the shield acting on segmental rings by shield behavior analysis. The results were applied to three-dimensional FEM analysis to evaluate the effects of varying alignments and boundary conditions on analysis results.

Key Words : shield tunnels of large cross section, field measurement, shield behavior analysis, three-dimensional FEM analysis, loads during construction

1. はじめに

最近、道路トンネルでは、外径 11~13mに及ぶ大断面で、かつ二次覆工を省略することを前提とした施工例が多くなってきている。一方、これらのシールドトンネルでは、セグメント構造の薄肉化や幅広化により、従来の設計では想定し得ない施工中の荷重(施工時荷重)の作用を受けてセグメントに損傷が発生することが懸念されている。しかし、施工時荷重によるセグメント損傷の発生メカニズム形態は未だ明らかにされていないのが現状である。

筆者らは、これまでにシールドの挙動解析に基づく施工時荷重の評価と三次元FEMによるセグメントの挙動解析とによって、施工時荷重がセグメントに及ぼす影響を定量的に把握する試みを行ってきた。

しかし、セグメントを千鳥組に組立てるシールドトンネルは、シールドの掘進に伴って作用するジャッキ推力、

テールシールド圧や裏込め注入圧の影響によって、トンネル縦断方向および横断方向に変形することを予想されるが、その挙動を表現した解析モデルが得られていないのが現状である。

本報告では、施工中のトンネル全体の挙動を構造解析モデルの境界条件として考慮することが三次元FEM解析の解析精度の向上につながると考え、セグメントの変位に着目した挙動計測を実施し、シールド掘進中のセグメントの挙動に基づいて境界条件を設定した三次元FEM解析の解析結果を報告する。

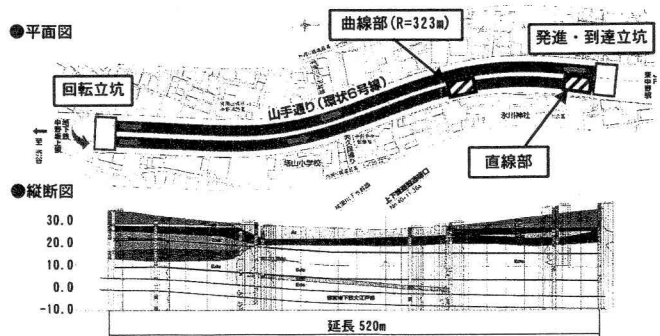


図-1 計測区間(東中野シールド)

2. セグメント挙動計測

(1) 現場概要

セグメント挙動計測は、首都高速道路中央環状新宿線の東中野シールド(図-1)を対象とし、線形の違いを評価するために直線部と曲線部(R=323m)の2断面で実施した。

東中野シールドは、都道環状6号線(山手通り)下、東中野換気所と大江戸線中野坂上駅までの約520m区間に建設される。直径11.9m、離隔約3~4.3mの併設トンネルであり、覆工厚400mmと当該シールドの規模では比較的薄肉のセグメントを使用している(図-2)。

(2) 計測方法

計測は掘進中のセグメントリング全体の挙動を把握する目的で、上下左右に90°ピッチにレーザー変

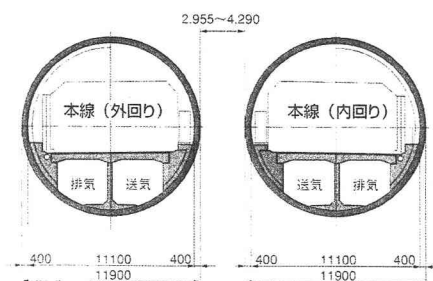
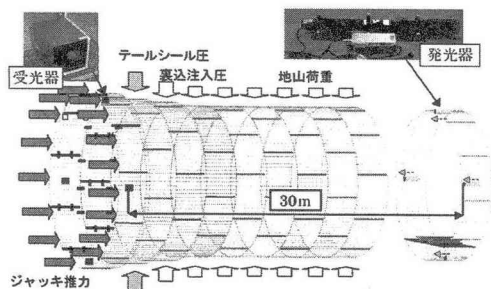
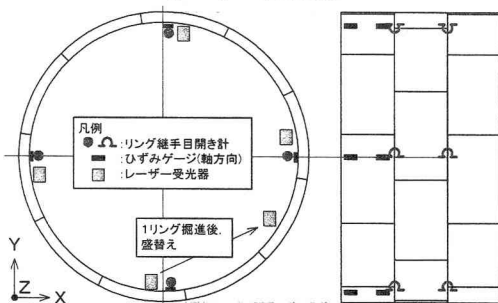


図-2 トンネル断面



〈レーザー変位計〉



〈各計器の配置〉

図-3 計測機器

位計と目開き計を、セグメント内面の軸方向ひずみ計測にコンクリート歪みゲージを配置した(図-3)。

トンネルの断面計測は、不動点とした20リング後方(30m)からレーザー光を発光し、計測リングに設置した受光器により、断面内(X,Y)の絶対変位を計測する方法を採用した。トンネル軸方向の計測は、リング継手に目開き計を、セグメント本体にひずみゲージを貼り付けて、掘進に伴うトンネルの挙動を計測する方法を採用した。計測範囲は、計測リング組立直後から、直線部で15リング掘進後まで、曲線部で19リング掘進後まで実施した。

(3) 計測データ

a) 断面変形

各リングの掘進中の断面変化を図-5に、直径変化量の経時変化を図-6に示す。

組立時のトンネルの形状は、図-5に示すように直線部と曲線部ともに縦方向の直径が約20mm大きく、横方向に約40mm小さい縦潰れの状態にある。

直線部を掘進中のトンネルの断面変化は、図-6に示すように組立直後の掘進で全体的に直径が4mm程度縮小し、その後の掘進でも2~3mm程度に収まっている。一方、曲線部を掘進中のトンネルの断面変化は、図-6に示すようにテールを抜ける2リング目の掘進まで横方向に10mm程度縮小する現象を繰り返し、2リング分掘進した状態で縦方向に5mm程度拡張する挙動を掘進毎に繰り返している。

線形による断面変形の違いは、図-4に示すように曲線部のジャッキパターンが直線部に比べて偏っていること、マシンテールからの偏圧等が関係していると考えられる。曲線部の施工では、ジャッキ推力の重心が偏心し、セグメントリングがシールドマシンに押し付けられてシールド圧による偏圧が発生する。また、曲線部は直線部より余掘量が多く、裏込注入材が硬化するまでの間、地盤の拘束力が弱くなるため、断面変形が大きいと考えられる。

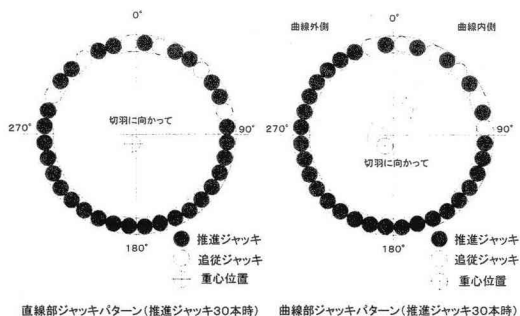


図-4 掘進中のジャッキパターン

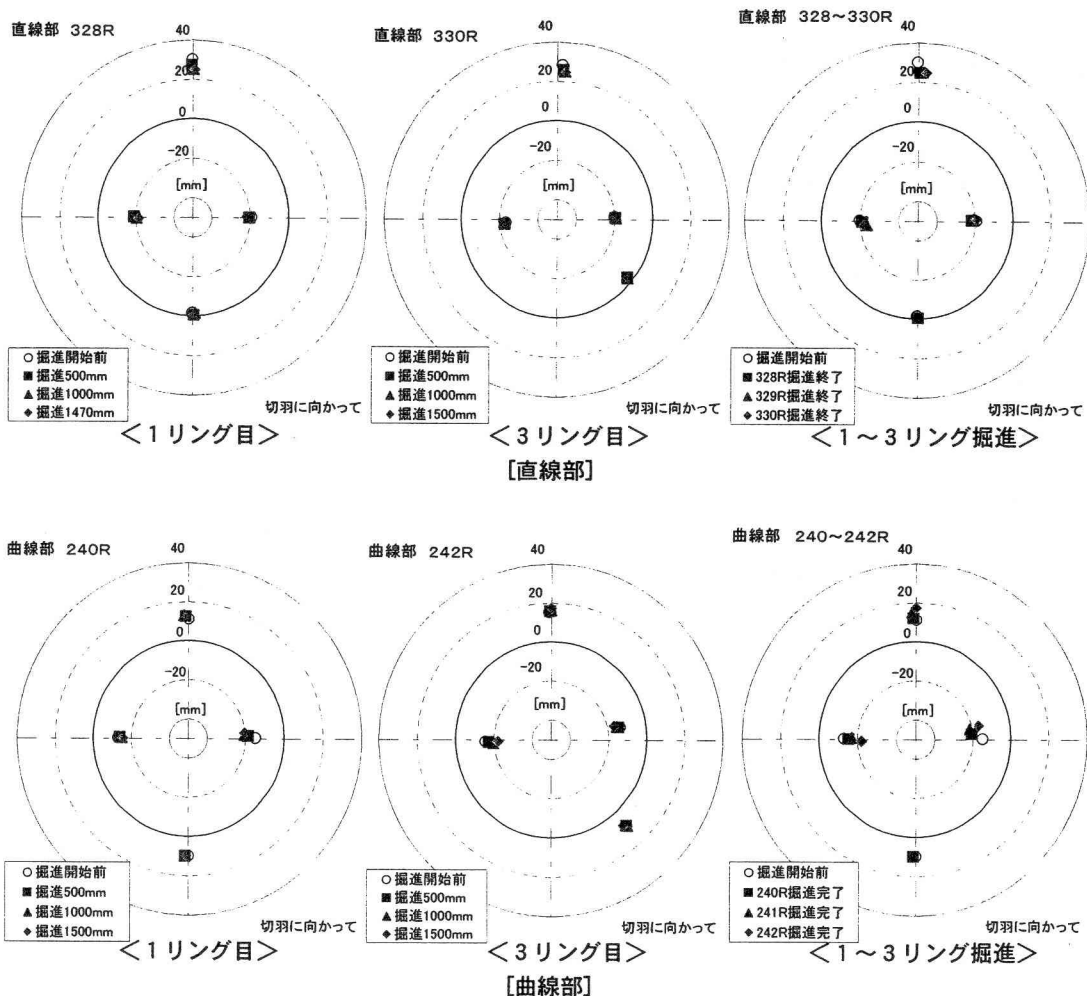


図-5 施工中のトンネルの断面変形

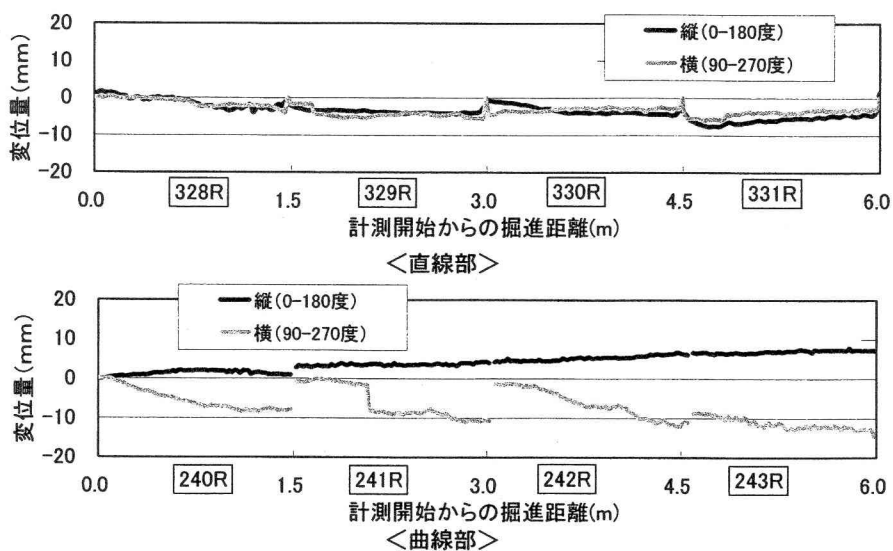


図-6 断面変形の経時変化

b) 軸方向の挙動

トンネル軸方向の挙動は、掘進開始時を初期値とした相対値として図-7に示す。

目開き計とひずみゲージの組立直後の挙動は、圧縮状態を示すことから、組立によりジャッキ推力が抜けた状態のトンネルが掘進に伴い軸方向に圧縮される状態と推察される。その後の計測値は、計測位置毎に圧縮量が増加したり引張方向に転じることから、セグメントリングが推力の伝達に伴い変形するために、このような挙動を示すと考えられる。

3. シールド機挙動解析

(1) 解析概要

セグメントに作用するジャッキ推力やテールシール圧等の施工時荷重の程度は、地盤条件や線形条件に加えてシールドの掘進条件に左右されるため、これらの条件を考慮できるモデルによりシールドの挙動を把握することが重要である。そこで、これらの施工時荷重を数値解析により把握することを目的として、シールドの推進力と周辺地盤の抵抗との力の釣り合いによりシールドの挙動を求めることのできる動力学モデル^{3), 4), 5), 6), 7)}を用いた解析を実施した。

(2) 解析結果

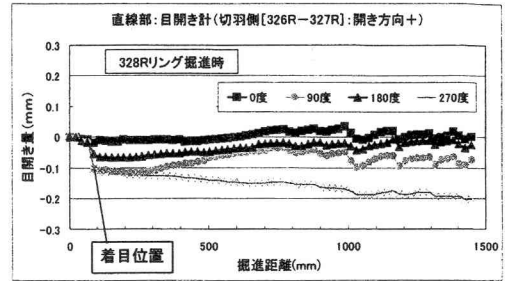
図-8 に示すシールド機姿勢に関する解析結果より、本解析の対象とした直線部および曲線部ともに、ピッチングで 0.1~0.3deg 程度、方位角で 20~30min 程度の誤差が認められるものの、実施工データと解析結果との整合性は高いことが確認された。

よって、動力学モデルを用いることにより実施工におけるシールド機の挙動を再現できるものとして、本解析結果により得られたシールド掘進時のセグメントへの作用力を三次元解析の入力条件として扱うこととした。

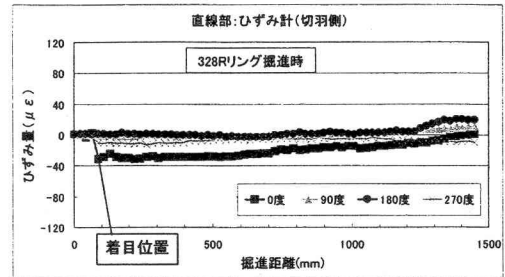
4. 三次元FEM解析

(1) 解析モデル

施工時荷重の解析には、三次元FEMモデルを採用した。シールドトンネルの構造解析モデルは図-9に示すようにセグメント本体をソリッド要素でモデル化し、ばね要素にモデル化した継手部で接続する。解析リング数は、施工時荷重として想定するジャッキ推力、テールシール圧、裏込め注入圧が作用する3リング目までとした。

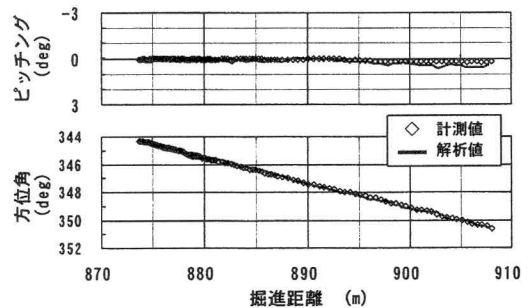


＜目開き量＞

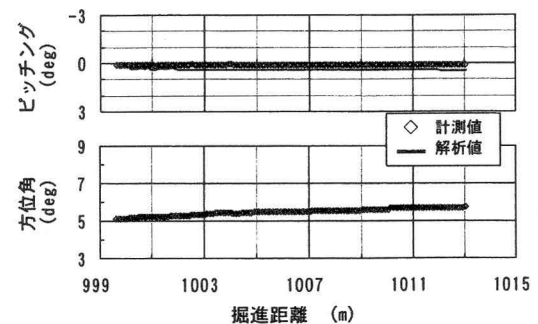


＜ひずみ量＞

図-7 軸方向の挙動（直線部 328R 掘進時）



＜直線部＞



＜曲線部＞

図-8 シールド機挙動解析

軸方向とせん断方向のばねで表現した3リング目以降の境界条件は、圧縮剛性をセグメント挙動計測結果を基に設定した。

セグメントの材料物性値は表-1に示す。材料特性は弾性体としてモデル化した。

セグメント継手およびリング継手のばね定数は、セグメント継手曲げ試験およびリング継手せん断試験結果に基づいて、各々の引張ばね定数とせん断ばね定数を設定した。

(2) 荷重条件

解析モデルに入力する施工時荷重は、図-10 に示すようにジャッキ推力、テールシール圧および裏込め注入圧を設定した。ジャッキ推力（ジャッキパターン）と裏込め注入圧は、シールドの施工管理データから設定し、テールシール圧はシールド機挙動予測解析結果から算出した。

(3) 解析ケース

表-2 に示す解析ケースは4 ケースである。解析パラメータは、線形とトンネル軸方向の境界条件（図-11）を組合わせた。

境界条件として設定するばね定数は軸方向の計測結果から算出した。算出方法は次の通りである。

①図-7 で示した目開きおよびひずみを断面全体で平均する。この時、ひずみはセグメントの変形量に換算する。②掘進直後の圧縮挙動に着目して、変位量をジャッキ推力で除して単位荷重あたりの変位量に換算する。③換算した変位量は計測終了時にほぼ0 となるため、この時点をも不動点として計測値を累積する(図-12)。

このグラフのデータを基に解析モデルの境界ばねは、1リングと2リングとの相対変位量、2リングと3リングとの相対変位量、および3リング端部の絶対変位量から算出した。算出したばね定数は直線部と曲線部で同程度の値となった。なお、今回の検討では施工状況を出来るだけ忠実に再現するために、直線部および曲線部にそれぞれのばね定数を用いた。

表-2 解析ケース

ケース	線形	トンネル軸圧縮方向の境界条件
1-1	直線部	①圧縮方向に固定
1-2		②トンネルの変形から拘束バネを設定
2-1	曲線部	①圧縮方向に固定
2-2		②トンネルの変形から拘束バネを設定

表-3 境界ばね (kN/m²)

着目位置	直線部	曲線部	平均値
リング継手			
1リング-2リング	1.06E+09	1.12E+09	1.09E+09
2リング-3リング	1.12E+09	2.25E+09	1.68E+09
境界条件	2.11E+08	2.57E+08	2.34E+08

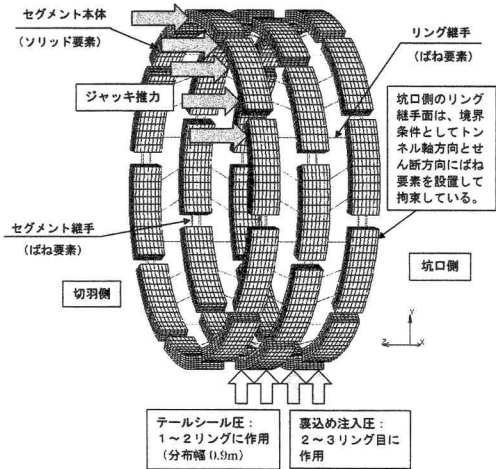


図-9 解析モデル

表-1 セグメントの物性値 ^{1), 2)}

σ_{ck} (N/mm ²)	48
E (kN/m ²)	3.9×10^7
ν	0.17
σ_{ca} (N/mm ²)	18 (施工時 $1.5 \times 18 = 27$)
f_{tk} (N/mm ²)	3

引張強度 f_{tk} はコンクリート標準示方書を参照

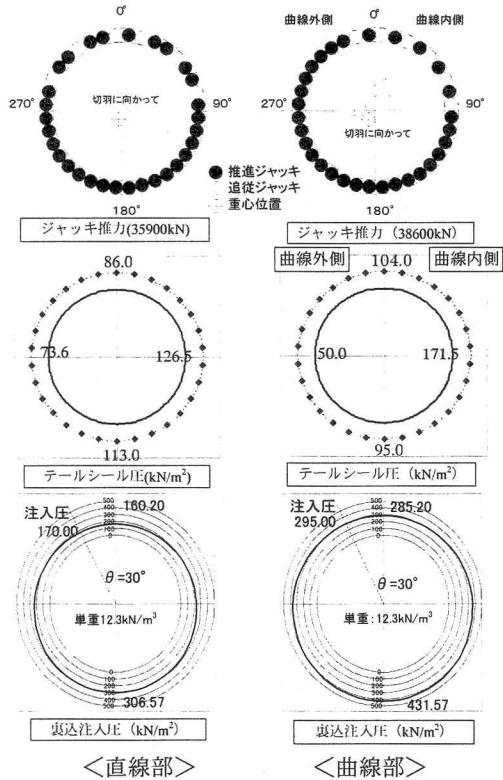
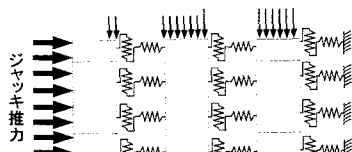
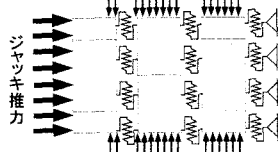


図-10 荷重条件



テールシール圧 裏込め注入圧

境界条件①

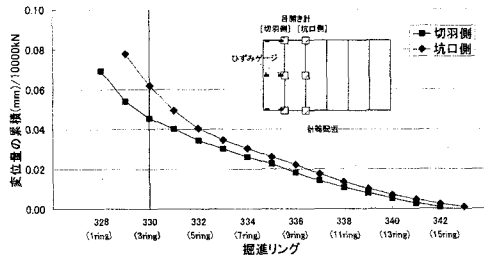


テールシール圧 裏込め注入圧

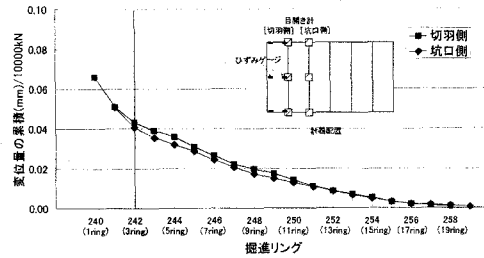
境界条件②

ばねの種類	特性
軸方向	引張(試験値)/圧縮(計測結果から設定)
せん断	なし
せん断	せん断(試験値)

図-11 境界条件



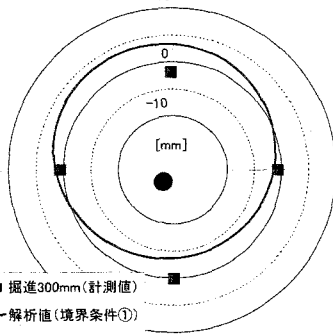
<直線部>



<曲線部>

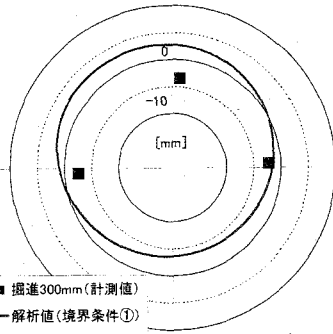
図-12 軸方向ばね定数

直線部 328R



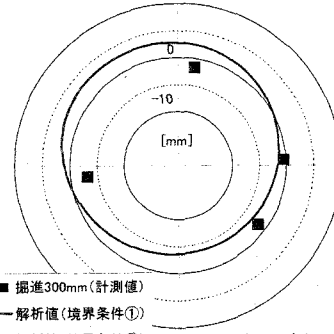
<1リング目>

直線部 329R



<2リング目>

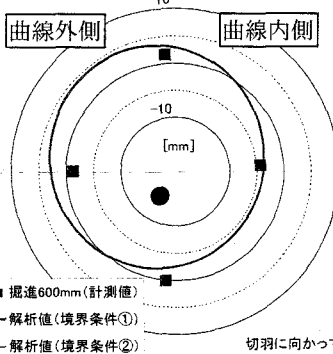
直線部 330R



<3リング目>

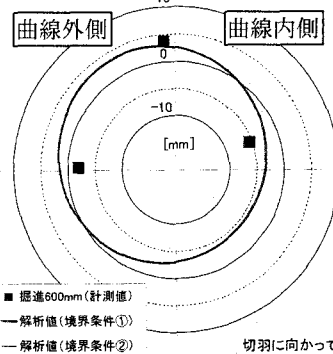
[直線部]

曲線部 240R



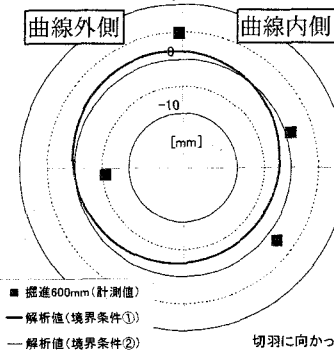
<1リング目>

曲線部 241R



<2リング目>

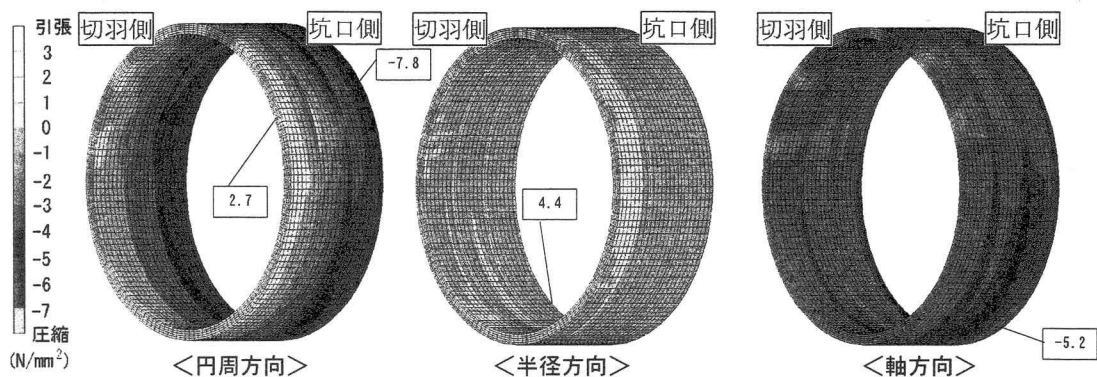
曲線部 242R



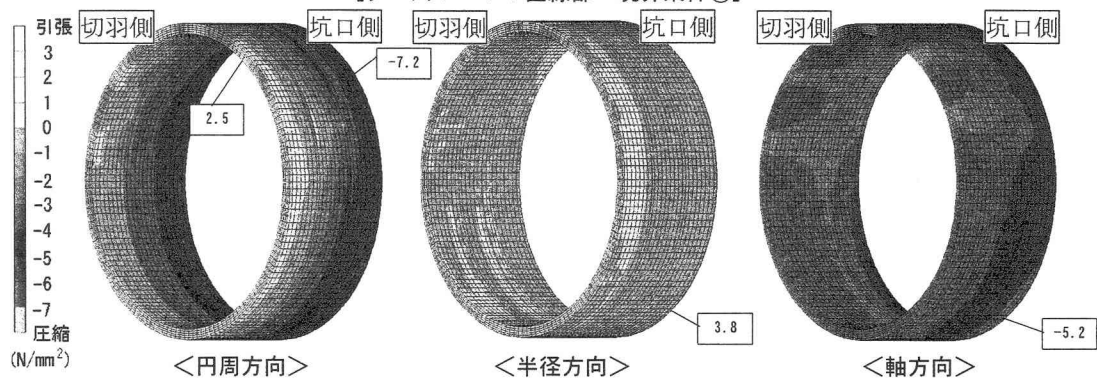
<3リング目>

[曲線部]

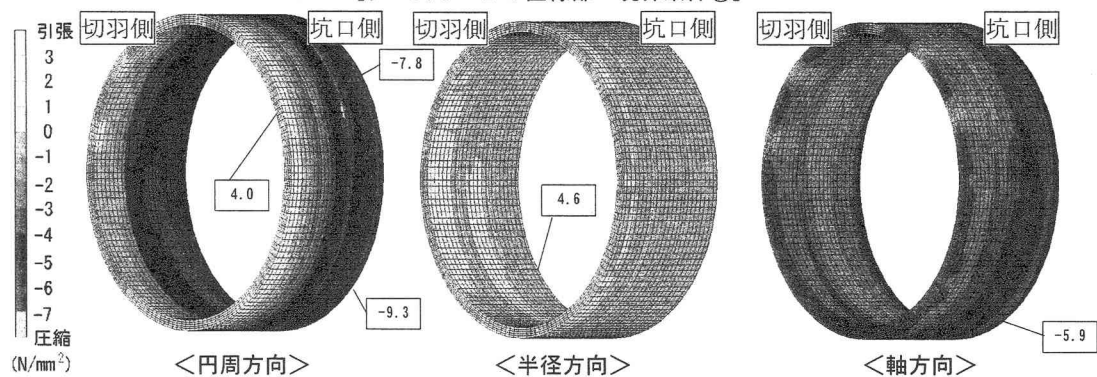
図-13 断面変形



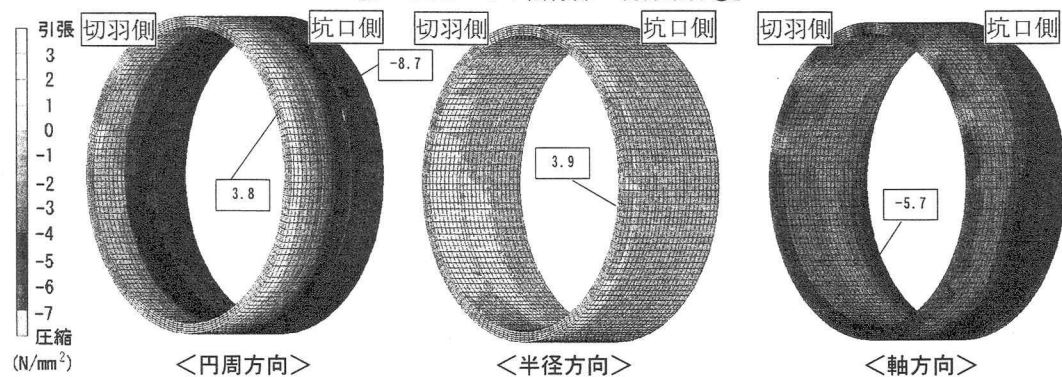
[ケース 1 - 1 : 直線部 境界条件①]



[ケース 1 - 2 : 直線部 境界条件②]



[ケース 2 - 1 : 曲線部 境界条件①]



[ケース 1 - 2 : 曲線部 境界条件②]

図-14 応力分布

(4) 断面変形

断面変形は、図-13 に計測値を(■)で、解析値を実線で示す。1リング目の中央に示す黒丸は、ジャッキ推力の重心位置を示している。

比較するデータは、解析条件に合わせて掘進開始からの絶対変位量とした。ただし、計測値は計測断面が1リングのみであるため、計測リングと切羽との位置関係が解析断面と合致するデータを計測値とした。

解析値は全体的にジャッキ推力の重心が偏心している方向に移動する傾向が現れており、1リング目のスプリングライン位置の挙動は良く一致している。

また、直線部の計測では、トンネル全体が縮む挙動が得られている。この現象は、組立直後のシールドトンネルがシールド掘進に伴いテールシールド圧や裏込め注入圧の作用を受けることで、セグメント全体の弾性変形とセグメント継手にある目開きの圧縮等で発生していると推測される。現状の解析モデルでは、セグメント継手の初期目開きを考慮していないため、弾性変形によるセグメントの微小変形に留まっており、今後、計測等によりこれらのモデル化が必要と考えられる。

(5) 応力度分布

応力度分布は、トンネル円周方向、半径方向および軸方向について図-14 に整理した。

応力度は、境界条件①の方が境界条件②に比べて、高めの値となる。境界条件①は、トンネル軸方向を計測結果で算出したばねでモデル化しており、既往の検討⁸⁾で設定している圧縮方向に剛とした境界条件②と比べて、セグメントが挙動し易いためである。

また、応力度分布は、境界条件②の場合、全体的に連続的な分布となっており、リング継手が剛に拘束されるためトンネルが一体化されている傾向が現れている。一方、境界条件①の応力度分布は、セグメントリング毎に、異なる応力度分布を示しており、より自然な挙動になっていると推察する。

5. おわりに

トンネルの断面変形と軸方向変位に着目したセグメント挙動計測とシールド機挙動解析の実施結果と、この結果を用いた三次元 FEM 解析の検討結果をについてまとめる。

①レーザー変位計によるトンネルの断面計測では、掘進中の断面の縮小(直線部)や縦潰れの挙動

(曲線部)を連続的に捉えられることを確認した。

②トンネル軸方向の計測では、リング継手の目開き計およびひずみゲージを用いることで、ジャッキ推力の作用に伴いトンネルが軸方向に圧縮される挙動を概ね把握できた。

③シールド機挙動解析が実際のシールド機の挙動を再現できることを確認した。

④計測結果を基に三次元 FEM 解析の境界条件を設定する手法を提案した。その手法を用いることで、三次元 FEM 解析で発生するセグメントの応力度に差が現れ、応力的に大きくなることを確認した。

今回の検討において、トンネルに作用するテールシールド圧や裏込め注入圧などの値は計測していないため、施工管理データを基に類推している。しかしながら、精度の高い解析を実施するためには、荷重要因を同時に計測する必要がある。また、セグメントの損傷防止にはトンネルの挙動を計測すると同時に、発生応力度を把握することも必要である。

今後、これらのデータを同時に収集する計測を実施予定であり、このデータを基に再度検討を実施し、解析精度を高めると共に、設計手法への反映を考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説，土木学会，pp.42-47，1996.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造的性能照査編]，土木学会，pp.21-24，2002.
- 3) 杉本光隆：講座 地盤工学における逆解析 12. シールドトンネル，地盤工学会 土と基礎，No. 44，pp57-62，1996.4
- 4) 杉本光隆，Aphichat SRAMOON：施工実績に基づくシールド機動力学モデルの開発，土木学会論文集，No.673/Ⅲ-54，pp163-182，2001.3
- 5) 杉本光隆，Aphichat SRAMOON，清水 孝之，団昭博，小林 亨：中折れ式シールド機挙動モデルによる現場計測データのシミュレーション，トンネル工学研究論文・報告集，第12巻，pp471-476，2002.11
- 6) 前田和也，杉本光隆，Aphichat SRAMOON，佐藤豊，安井充：シールド機動力学モデルによる古琵琶湖層(砂礫土)における現場実測データのシミュレーション，土木学会，第56回年次学術講演会/Ⅲ-B78，pp156-157，2001.9
- 7) 田嶋仁志，岸田政彦，団昭博，斉藤正幸：現場施工データに基づく大断面シールド機の挙動解析，トンネル工学研究論文・報告集，第14巻，pp345-351，2004.11
- 8) 田嶋仁志，岸田政彦，深井直光，斉藤正幸：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，トンネル工学研究論文・報告集，第14巻，pp353-360，2004.11