

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

Study on shield tunnel construction loads using a three-dimensional FEM model

田嶋仁志¹・岸田政彦²・深井直光³・斉藤正幸³

Masahiko Kishida, Hitoshi Tajima, Naomitsu Fukai and Masayuki Saitou

¹正会員 工博 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日土地ビル)

²正会員 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日土地ビル)

³正会員 工修 日本シビックコンサルタント株式会社 技術本部技術研究部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

With a three-dimensional FEM model of a shield tunnel, this report studies the influence of construction loads on segments during drilling.

For this study, the jacking force, back-filling pressure, and tail sealing pressure are set on the basis of construction data, measurement data, and forecast behavioral analysis data of shield tunneling machine.

This report evaluates the influence of loads on segments based on alignment for linear and curved sections, joint aperture, and segment size.

Key Words : Large-cross-section shield, three-dimensional FEM analysis, and construction load

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。また、コスト縮減の観点から、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。

シールドトンネルの施工時には、セグメントにジャッキ推力、テールシール圧や裏込め注入圧が作用する。さらに、セグメントの組立直後は、周辺地盤による拘束効果が期待できないためトンネルが変形し、継手部の目開きや目違いが発生しやすい状況にある。通常、シールドトンネルの設計では、これらの荷重に対して個別に検討を行っているが、セグメントの損傷はこれらの要因が組み合わさって発生していると考えられる。

本報告では、施工時荷重の実態を把握するために、大断面道路シールドトンネルで実施された現場計測データを基に、シールドトンネルの三次元FEMモデルを作成し、線形の違い、組立誤差の有無および

セグメントの構造諸元の違いがセグメントに及ぼす影響を評価した。

2. 施工データの整理

検討の対象区間は、首都高中央環状新宿線で掘進が完了している西新宿シールドとし、計測が実施された直線部と、曲線部の2断面を選定した。

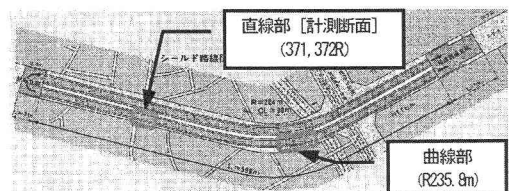


図-1 検討区間 (SJ32 工区)

このうち、直線部では、セグメントの応力計測を実施している。計測リングには、鉄筋計を各ピース毎の 10 箇所、土圧計と水圧計をそれぞれ 2 台と 2 台設置している。

計測リングの組立開始からの鉄筋計の応力度と土圧計の計測結果を図-2 に示す。

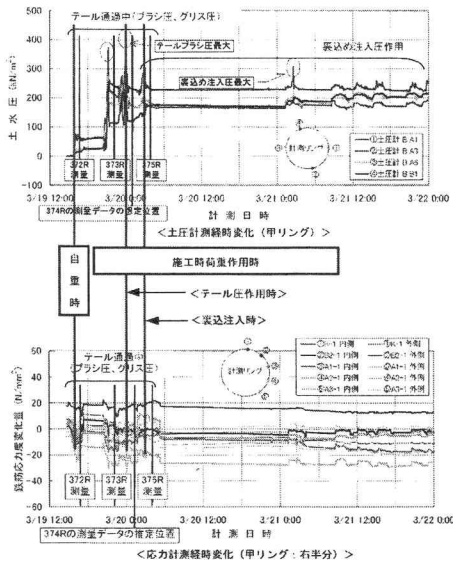


図-2 計測データ

計測値の変動は、シールド掘進中の次の要因が主的であると考え、解析に使用する荷重を抽出した。

- ・シールドマシンのジャッキ推力
- ・テールシール圧
- ・裏込め注入圧

なお、組立リングの自重の影響については、組立直後を鉄筋ひずみの初期値として取り除いている。

2. 解析手法の整理

(1) 解析モデル

施工時荷重の解析には、トンネルの面内方向と面外方向の異なる荷重を考慮するために三次元FEMモデルを採用した。

三次元FEM解析によるシールドトンネルの構造解析モデルは図-3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リング目までとする。

3リング目以降の境界条件は、トンネル軸方向に圧縮される場合を固定とし、引張とせん断に対してリング継手ばねにより拘束した。

セグメントの材料モデルは、コンクリートの応力状態を確認することが目的のため、弾性体とした。

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を参考にして、各々の引張ばね定数とせん断ばね定数を設定した。

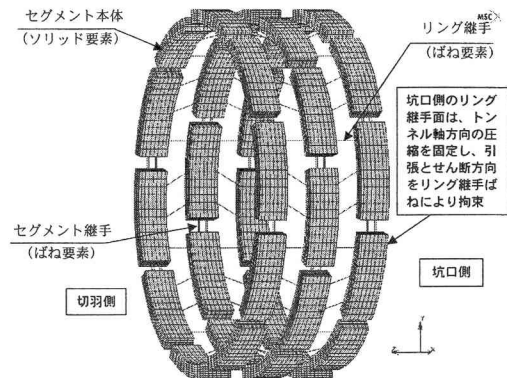


図-3 解析モデル

セグメントの材料特性を表-1に示す。

表-1 セグメントの材料特性

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

(2) 荷重条件

解析モデルに入力する施工時荷重は、ジャッキ推力、テールシール圧および裏込め注入圧とする。ジャッキ推力(ジャッキパターン)と裏込め注入圧は、それぞれ施工データと計測結果から設定する。また、テールシール圧はシールド機挙動解析結果のテールクリアランスにテールシールばねを乗じる場合と実測値の2通りの方法で設定した。荷重図を図-4に示す。

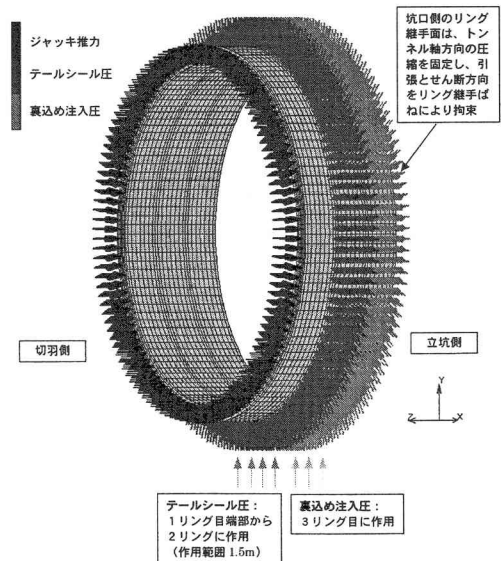


図-4 荷重図

(3) 解析ケース

解析ケースは表-2 に示す 6 ケースとした。解析パラメータは線形に直線部と曲線部の 2 タイプを設定し、組立誤差として軸方向目開き（リング継手の目開き）の有無を仮定した。さらに、構造諸元は中央環状新宿線で採用されている最大のセグメント幅と最も薄いセグメント厚さを直線部の組立誤差なしの条件に設定した。組立誤差は図-5 に示すように 1 リング目と 2 リング目のリング間に 1 ピースの範囲で目開きが 1mm 発生したことを想定した。このうち、ケース 1 において計測データとの整合性を確認した。

表-2 解析ケース

ケース	線形	組立誤差*	セグメント幅 (mm)	セグメント厚さ (mm)
1	直線部	なし	1200	550
2		あり		
3	曲線部	なし	1500	400
4		あり		
5	直線部	なし	1200	400
6		あり		

*組立誤差は、1ピースの範囲で目開き1mmを想定

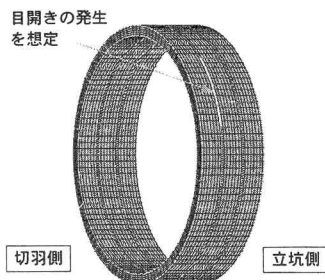


図-4 組立誤差の想定位置

3. 直線部の解析

(1) 解析条件

直線部の検討断面は、計測断面B（計測リング No.371, No.372）を含めたNo.370～No.372の3リングとした。セグメントリングの種別や掘進時のジャッキ推力およびジャッキパターンは表-3に示す。

使用ジャッキ本数は、全ジャッキ本数42本に対して約8割の35本となっている。

なお、直線部の解析では、解析結果と計測値の比較を行った後、組立誤差の影響を検証している。

テールシール圧は図-6に示すシールド機挙動予測解析²⁾より得られたテールクリアランスに、テール

シールばね定数（53kN/m³）を掛け合わせて圧力値を求め、三次元的な分布荷重を設定した。テールシールばねは、過去の文献³⁾を参考に設定している。

表-3 セグメント種別とジャッキパターン（直線部）

リングNo.	370	371	372	373
セグメント種別	標準	標準	標準	標準
振り角	348°	12°	348°	12°
ジャッキパターン				
総推力 (kN)				35本使用 83370 [8337]
備考	モデル化範囲			荷重データ

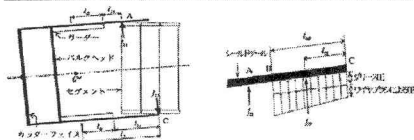
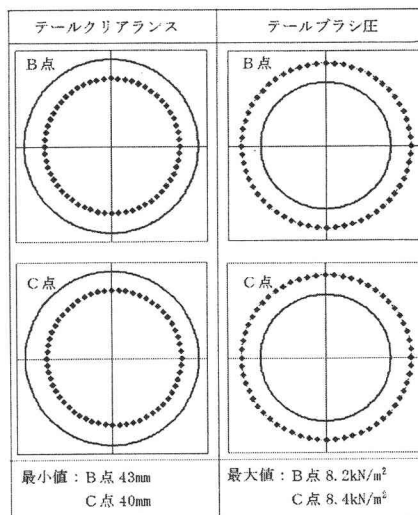


図-6 テールシール圧の分布状態（直線部）

テールシール圧の作用範囲はテールブラシの幅が図-7に示すように1.5mであることから、1リング目の一部と2リング目全体に掛かるように設定した。

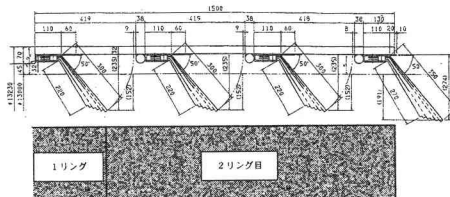


図-7 テールシール圧の分布幅

裏込め注入圧の分布は、図-8に示す計測結果より、頂部付近で 180kN/m^2 、底部付近で 300kN/m^2 であり、水頭差を考慮した直線勾配に近似している。

裏込め注入圧はテールブラシから抜け出た3リング目に作用させている。

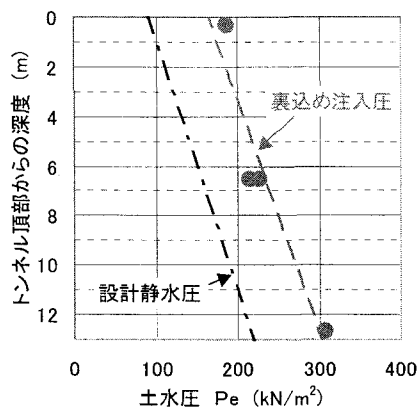


図-8 裏込め注入圧の分布状況

(2) 解析結果と計測値の比較

解析結果と計測値は、トンネル断面方向の断面力として整理した。解析結果は、実測値に対して曲げモーメントや軸力の正負の傾向が一致するものの、かなり小さい値となっている。

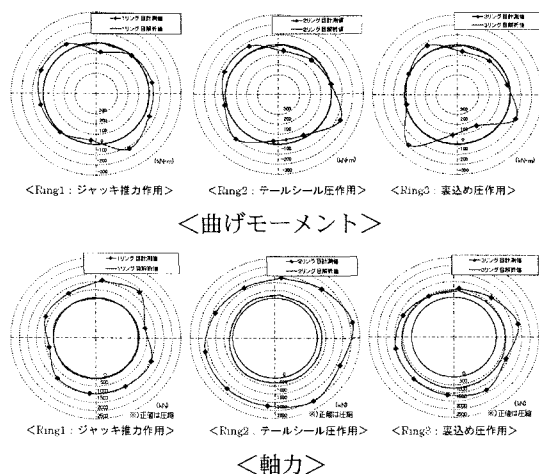


図-9 断面力の比較（テールシール圧：推定値）

設定した荷重条件のうち、テールシール圧は、シールド機挙動解析²⁾から求めたテールクリアランスにテールシールばねを掛けた推定値である。そのため、テールシール圧は、テールシールばねを仮定していることとグリス圧が考慮されていないため、圧力値を低く設定している可能性がある。そこで、テールシール圧に計測値を用いた解析について試みた結果を図-10に示す。

テールシール圧に実測値を考慮した解析結果は、計測値に対して曲げモーメントが低いものの、軸力が概ね一致する結果となった。

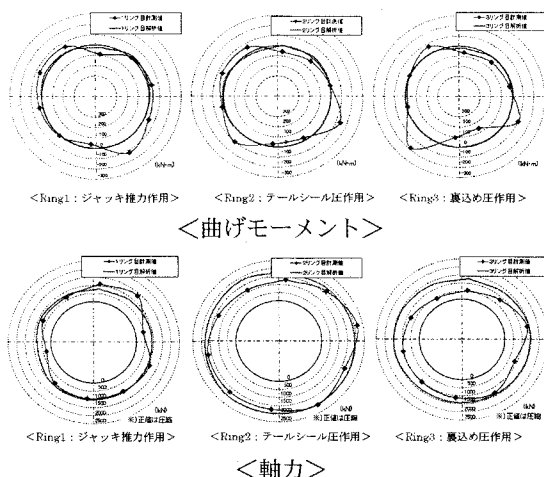


図-10 断面力の比較（テールシール圧：計測値）

曲げモーメントが一致しない理由は、隣接リングの自重の影響を計測値から算出すると図-11に示すように $10\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度となっていることから、計測リング以外の自重の影響が関係している可能性がある。

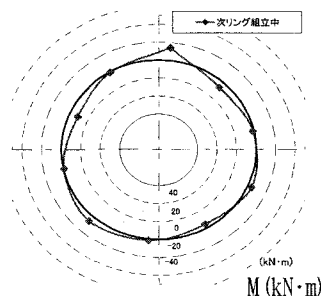


図-11 隣接リングの自重の影響（計測値）

今回用いている施工データでは、各リングの組立時間や施工段階を数値の変動から推定しているため、これ以上の分析が困難である。

しかし、本検討の解析モデルでは、実測値を用いれば軸力が一致していることから、現場計測により施工中の荷重変動とトンネルの挙動を明確することで、解析モデルの精度を高めることが可能と考えている。

なお、今後の解析では、現状の解析モデルを用いて線形の違いや組立誤差の有無および構造諸元の違いが及ぼす影響を確認している。解析に用いるテールシール圧については、曲線部の解析を含めて検討条件を統一するために、シールド機挙動解析の結果を用いることとした。

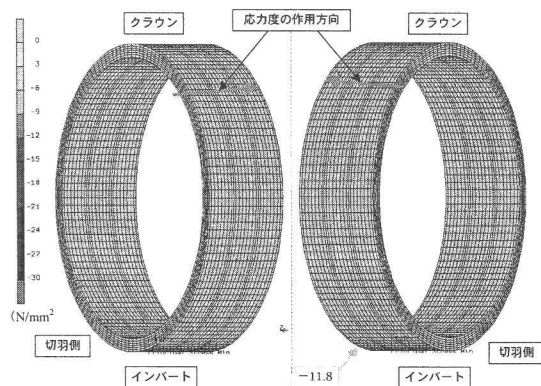
(3) 組立誤差の影響

a) 最小主応力（圧縮応力）

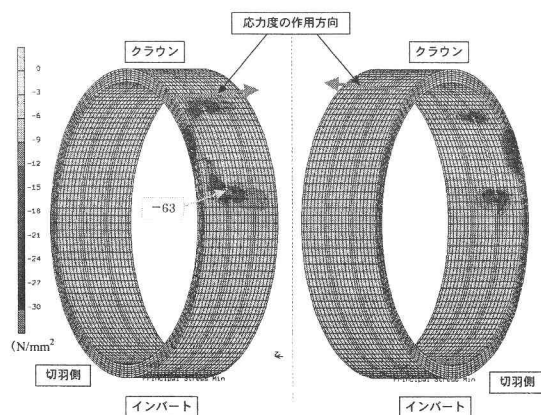
直線部の圧縮応力は、使用ジャッキ本数が多いため、概ね均一な応力度分布となっている。ジャッキ推力が作用していない位置では、周辺のジャッキ推力が伝搬して圧縮状態になっている。平均的な圧縮応力は約 -5N/mm^2 となっている。

圧縮応力は組立誤差があると許容圧縮応力度 -27N/mm^2 を超える結果となっている。

組立誤差がある場合は、目開きによりリング継手面に段差が生じて、セグメントに局所的な応力集中が起こるため、目開きのない場合に比べて応力度が約5倍となる箇所が見られる。



(a) ケース1：組立誤差なし



組立誤差の想定箇所

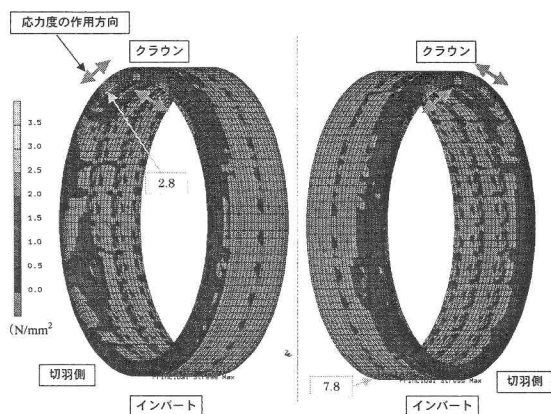
(b) ケース2：組立誤差あり

図-8 最小主応力（圧縮応力）

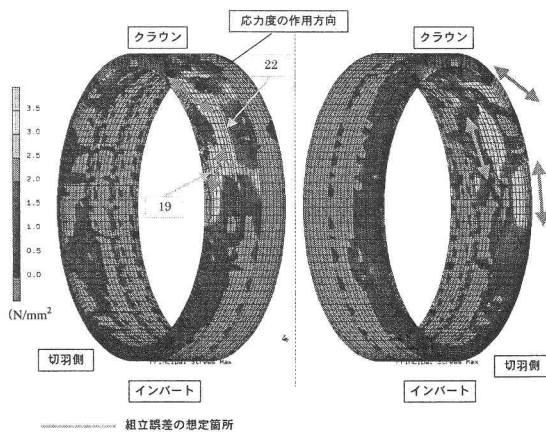
b) 最大主応力（引張応力）

直線部の引張応力は、ジャッキ推力が作用していない位置の境界と組立誤差が影響して大きく変化している。

組立誤差の有無によりセグメントに発生する引張応力は、目開きを考慮した場合にセグメントが片持ち梁の状態になることで曲げによる引張応力が生じるため、目開きがある方が目開きのない場合に比べて3倍程度となる。



(a) ケース1：組立誤差なし



(b) ケース2：組立誤差あり

図-9 最大主応力（引張応力）

4. 曲線部の解析

(1) 解析条件

曲線部の検討断面は、シールド機挙動解析を実施したR235.8mの区間においてジャッキの偏心が大きく、かつテールシール圧が高い断面としてNo.200～No.202の3リングを選定した。セグメントリングの組立状況や掘進時のジャッキ推力およびジャッキパターンを表-3に示す。

表-3 セグメント種別とジャッキパターン（曲線部）

リングNo.	200	201	202	203
セグメント種別	右片 テーパー	右両 テーパー	右両 テーパー	標準
ジャッキパターン				
総推力 (kN)				29本使用 94540 [9454]
備考	モデル化範囲			荷重データ

使用ジャッキ本数は、全ジャッキ本数42本に対して約7割の29本となっている。ジャッキ推力は、曲線を曲がるために、片側に集中した状態である。

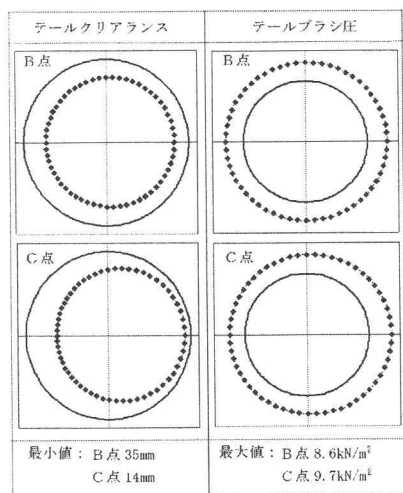


図-10 テールシール圧の分布状態（曲線部）

テールシール圧は図-10に示すようにシールド機挙動予測解析²⁾より得られたテールクリアランスに、テールシールばね定数（53kN/m³）を掛け合わせて

圧力値を求めている。テールシール圧の作用範囲は直線部と同様に1リング目の一部と2リング目全体としている。裏込め注入圧は、直線部と同様にテールブラシから抜け出た3リング目に作用させている。

(2) 解析結果

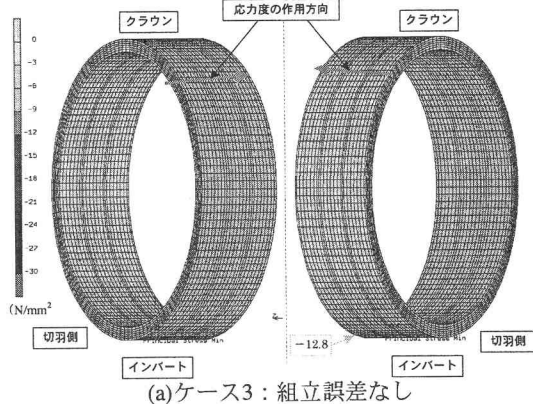
a) 最小主応力（圧縮応力）

曲線部での圧縮応力は、直線部に比べて使用ジャッキ本数が少なくジャッキ推力の偏心の影響や使用するセグメントタイプの違いから、トンネル内外面の応力度分布やリング継手面の発生応力に差が現れる。

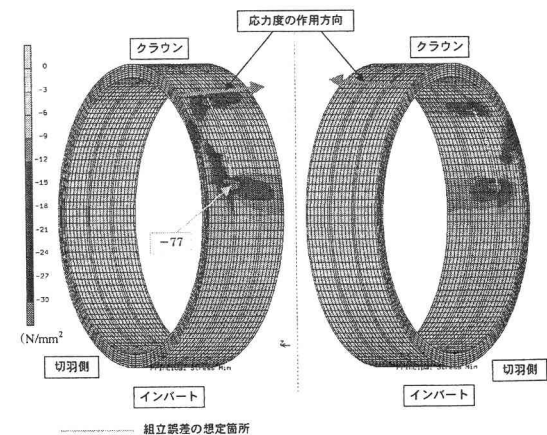
圧縮応力の平均値は、直線区間で5N/mm²に対して曲線部で6.5N/mm²と3割の増加が見られる。

しかし、線形の違いによる最大圧縮応力度の差は、1～1.5N/mm²程度であり、組立誤差（リング継手目開き）の有無に比べて影響が少ない結果となる。

組立誤差がある場合の発生応力は、直線部と同様に目開きの周辺に応力集中が生じるため、目開きのない場合に比べて約6倍となる。



(a) ケース3：組立誤差なし



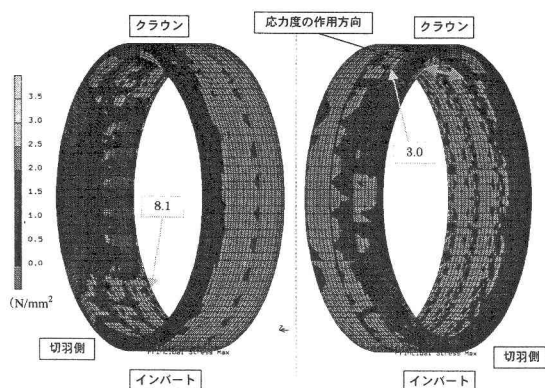
(b) ケース4：組立誤差あり
図-11 最小主応力（圧縮応力）

b) 最大主応力 (引張応力)

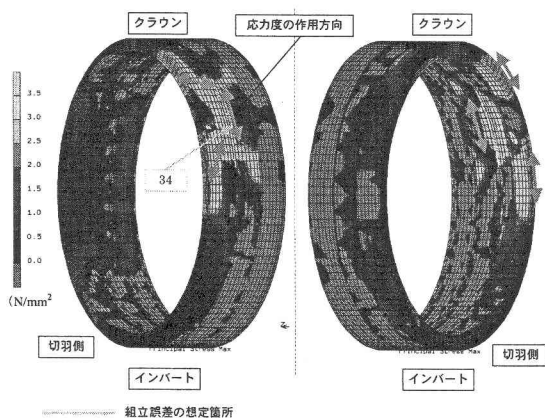
曲線部での引張応力は、ジャッキ推力が偏心している影響を受けて、ジャッキ推力が作用している境界付近と3リング目以降の境界付近に局所的な応力集中が見られる。

曲線部モデルのセグメントに発生する引張応力は、圧縮応力と同様に直線部に比べて高めとなる。線形の違いによる最大引張応力度の差は、 0.3N/mm^2 であり組立誤差 (リング継手目開き) の有無に比べると影響が少ない結果となっている。

組立誤差がある場合の発生応力は、直線部と同様に目開きの周辺に応力集中が生じるため、目開きの無い場合に比べて約4倍となる。



(a) ケース3：組立誤差なし



(b) ケース4：組立誤差あり

図-12 最大主応力 (引張応力)

(1) 解析条件

本検討では、掘進が完了しているS J 3 2工区のデータを基に計算を行っている。S J 3 2工区のセグメントは、幅1200mm、厚さ550mmであり、中央環状新宿線で使用されるセグメントの中で幅が狭く、厚肉となっている。

セグメントに作用する荷重の影響は、拡幅化や薄肉化に合わせて顕著になる可能性が考えられる。

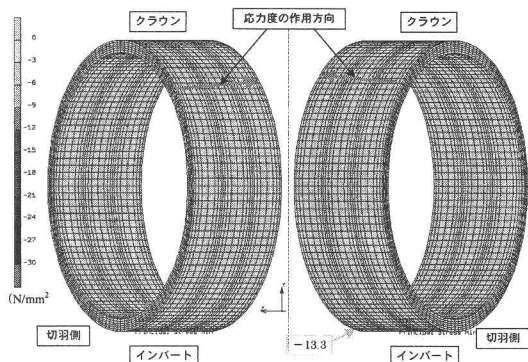
構造条件の違いでは、直線部の組立誤差なしの条件に、中央環状新宿線で使用されているセグメントの最大幅 (B=1500mm) と最小厚 (H=400mm) を設定することで影響を確認する。

(2) 解析結果

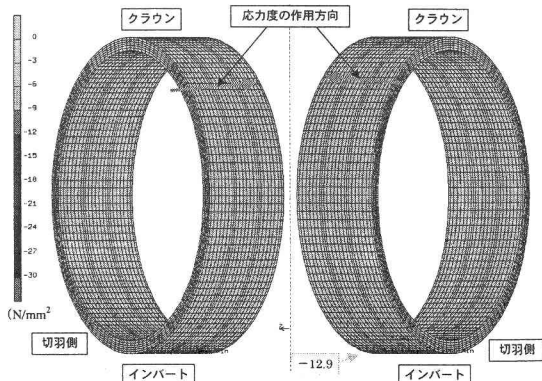
a) 最小主応力 (圧縮応力)

セグメント幅を拡幅した場合の圧縮応力は、応力度分布に違いがないものの、最大値が1割程度高くなる。

セグメント厚さを薄肉化した場合の圧縮応力は、平均的な応力度が 5N/mm^2 から 6N/mm^2 になり、約1割増加する。



(a) ケース5：セグメント幅1500mm



(b) ケース6：セグメント厚さ400mm

図-13 最小主応力 (圧縮応力)

5. 構造諸元の違い

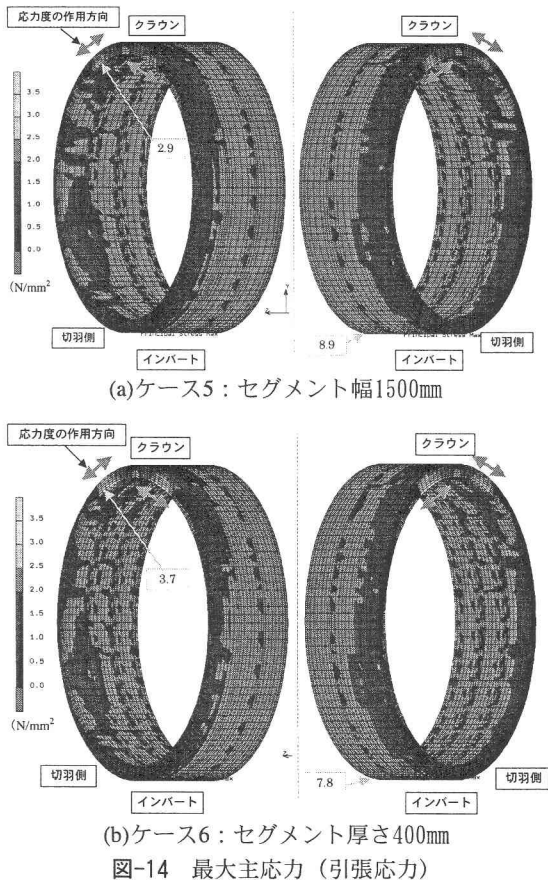
b) 最大主応力（引張応力）

セグメント幅を拡幅した場合の引張応力の最大値は、1割程度高くなる傾向が見られる。

セグメント厚さを薄肉化した場合の引張応力は、載荷面で3割程度高くなる傾向が見られる。

セグメントの拡幅化は、リング継手のせん断応力に影響を及ぼす可能性がある。

一方、セグメントの薄肉化は、トンネル掘進に必要なジャッキ推力を受ける面積が減少するため、全体的に応力度が高くなり、発生応力度が許容値を超える結果となっている。



①線形の違いによる応力度の差は圧縮応力、引張応力ともに1割弱で、曲線部の方が高くなる。

②組立誤差による影響は組立誤差なしと比較して応力度の差が3～6倍となる。

③セグメントの拡幅化および薄肉化を考慮した場合は、施工時荷重による影響が大きくなる。

今回の検討で明確になった課題は、施工時荷重の推定には、施工状況とリンクした計測データの収集が必要不可欠と考えている。また、シールド機の挙動予測解析によるテールシールド圧の推定には、テールブラシの剛性やテールグリス圧の影響を考慮する必要があると考えられるため、データの収集が必要である。

今後、これらの計測データを基に再度解析を実施し、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：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，土木学会，pp.21-24，2002.
- 2) 岸田政彦，田嶋仁志，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，2004年11月（投稿中）
- 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，1999年11月報告（36）

6. おわりに

線形の違いとして直線部および曲線部を想定し、組立誤差として目開きの有無を想定した解析結果と直線部を想定し、セグメントの構造条件の違いとして薄肉化や幅広化を想定した解析結果を以下にまとめる。