

三次元FEMを用いたシールドトンネルの 施工時荷重に対する照査方法に関する一考察

Study on three-dimensional finite element method for controlling
construction loads acting on shield tunnel

春日清志¹・川田成彦²・白鳥 明²・深井直光³

Kiyoshi Kasuga, Naruhiko Kawada, Akira Shiratori, Naomitsu Fukai

¹正会員 工修 首都高速道路株式会社 西東京管理局調査・環境グループ (〒102-0093 東京都千代田区平河町2-16-3)

²正会員 工修 首都高速道路株式会社 技術管理室設計技術グループ (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1)

³正会員 工修 日本ビッドコンサルタント株式会社 技術統括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)

The authors comparatively investigated the results of three-dimensional finite element analysis and actually monitored behaviors of segments to evaluate the construction loads acting on the segments. In this study, construction loads were investigated by inputting the predicted conditions of a future highway tunnel construction project into three-dimensional finite element models.

The investigation involved evaluation of the effects of structural factors and construction factors on stresses acting on segments using three-dimensional finite element models, which were constructed by comparing the analytical results and the actually monitored behaviors of segments.

Key Words : shield tunnels of large cross section, three-dimensional FEM analysis,
loads during construction, segments, road tunnels

1. はじめに

近年の施工技術の進歩を背景に建設コストを縮減することを目的として、セグメント厚さの低減や幅の拡大が進んでいる。その結果、施工実績などにもとづいて、経験的に確保してきた安全性が低下するため、セグメントに損傷が発生する可能性が高まっている。一方、道路シールドトンネルは、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、セグメントの耐久性の確保が重要な課題となっている。このため、施工時のセグメントの損傷を防止する必要性が高まっている。

施工中のシールドトンネルのセグメントは、ジャッキ推力、テールシール圧および裏込め注入圧などの荷重が作用するが、セグメントの組立直後は、周辺地盤による支持が期待できないため、トンネルの変形や継手部の目開き、目違いが発生しやすい状況にある。このため、施工時荷重の影響は切羽から数リングに集中して発生する。さらに、これまでの施工実績から、施工時荷重の影響はシールドトンネルの方向とシールド機の姿勢が一致

しない曲線部において顕著であることが知られている。

一方、常時の荷重に対する設計では、大深度施工で、かつ固結地盤を対象とすると、水圧が卓越した設計条件になるため、極めて薄肉の覆工構造となる傾向がある。しかし、現状の施工時荷重に対する照査方法は、はりばねモデルや理論式を用いて、ジャッキ推力、テールシール圧や裏込め注入圧の影響を個別に評価する検証が中心であることから、施工中のセグメントの損傷を防止できない可能性がある。このため、断面決定の際には、施工時荷重の影響を複合的に考慮した検討を行う必要があると考えられる。

筆者らはセグメントに作用する施工時荷重の影響を評価するために、三次元FEM解析結果とセグメントの挙動計測結果との比較検証を進めてきた。

本報告では、セグメントの挙動計測結果との比較検証により構築した三次元FEM解析モデルを用いて、将来的に道路トンネルで想定される構造的な要因や施工的な要因を計算パラメータに設定し、各要因がセグメントの発生応力におよぼす影響を評価した。

2. 三次元FEMによる施工時荷重の照査方法

(1) 解析モデル

筆者らは施工時荷重の検討に三次元FEM解析を採用している(図-1)③④⑤⑥⑦。解析モデルはセグメントの局所的な挙動を再現するためにセグメントをソリッド要素でモデル化し、継手部をモデル化したばね要素で接続する。解析範囲は、これまでの計測結果をもとに施工時荷重の影響が大きい1リング目から3リング目までとした。

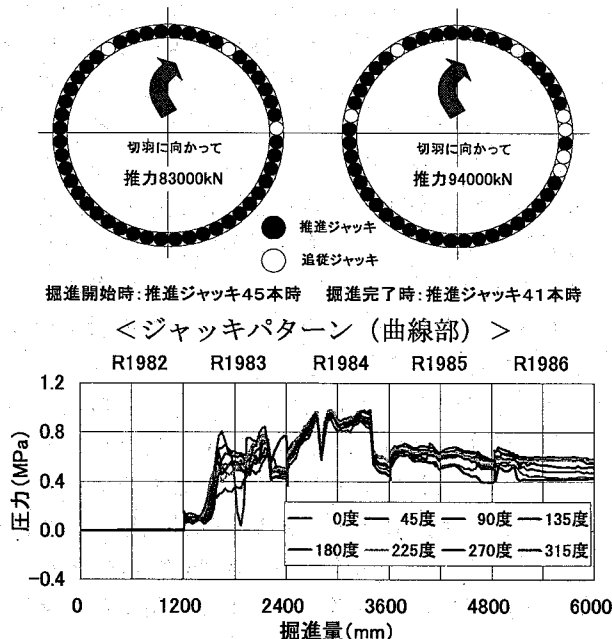
(2) 境界条件および継手ばねの特性

解析モデルの坑口側の境界条件は、掘進中のトンネルがジャッキ推力により軸方向に圧縮される挙動を再現できるように、現場計測で得られたシールドトンネルの絶対変位量とジャッキ推力の関係からばね値を求め設定した(図-2)。

セグメント継手およびリング継手のばねは、トンネル円周方向、半径方向、長手方向の3方向に設置する(図-3)。また、セグメント継手は、継手ばねの特性を原点から圧縮側にずらすことで、目開きを表現した。

(3) 荷重条件の設定

計算に用いる施工時荷重は、図-4に示すジャッキ推力とトンネル周面に作用する圧力の変化とした。圧力データは図-4に示す掘進時の経時変化から該当する範囲を抽出し、計器配置(45°ピッチ)に応じて円周方向に線形補完を行った。



＜セグメントに作用する圧力変化＞
図-4 セグメントに作用する荷重
(神山町・代々木シールド)

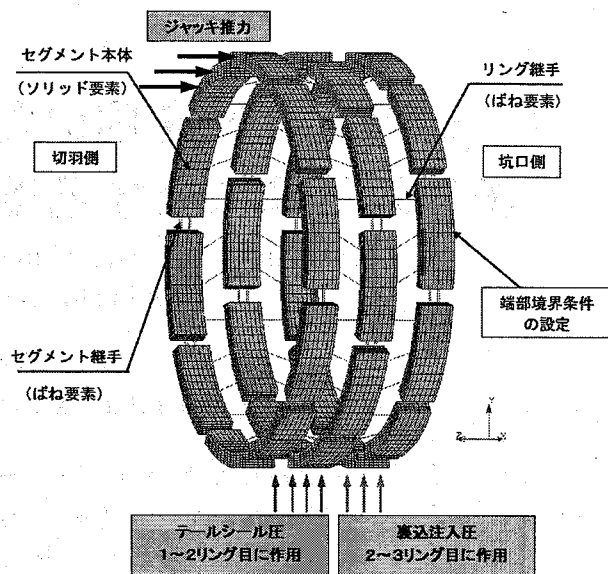
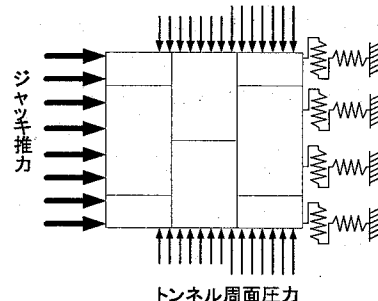
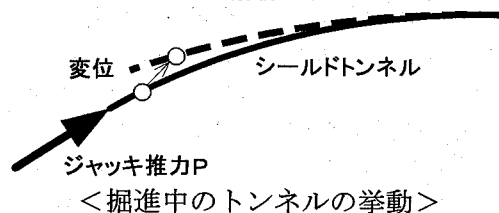
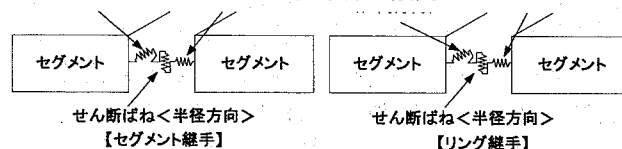


図-1 解析モデル



ばねの種類		特性
軸方向		引張(継手ばね)／圧縮(計測値より設定)
水平方向		せん断(継手ばね)

図-2 境界条件の設定



＜継手ばねの成分＞

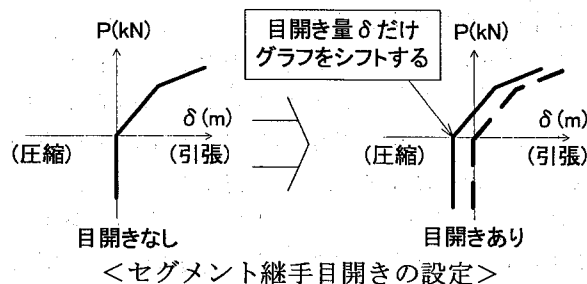


図-3 継手ばねの特性

3. パラメータ解析の条件設定

(1) 計算条件

パラメータ解析は、硬質地盤を対象に筆者らが検討した神山町・代々木シールド外回りトンネル(図-5)の条件および施工データをもとに、今後、道路トンネルで計画しているセグメントの構造条件や、セグメントに影響を与えると考えられる施工条件を設定した。

セグメントの材料物性値を表-1に示す。コンクリートの材料特性はひび割れ発生前の応力状態を把握するため、完全弾性体とした。

セグメント継手およびリング継手のばね定数は、要素試験の結果をもとに設定した(表-2)。

また、セグメント継手は図-6で示す目開き量の変化を初期不整として考慮したモデル化を行った。

(2) 解析ケース

解析ケースは表-3に示すように、構造的な要因と施工的な要因に着目して7ケースとした。また、本検討では初期不整の影響を確認することを目的として、各ケースについて、図-6に示すセグメント継手の目開きがある場合とない場合について解析を実施した(計14ケース)。

a) 構造的な要因の設定

構造的な要因は、セグメントの幅と厚さに着目した(図-7)。セグメント幅は道路トンネルの計画で想定している最大の幅を設定した。セグメント厚さは中央環状新宿線の実績をもとに最小厚さを設定した。

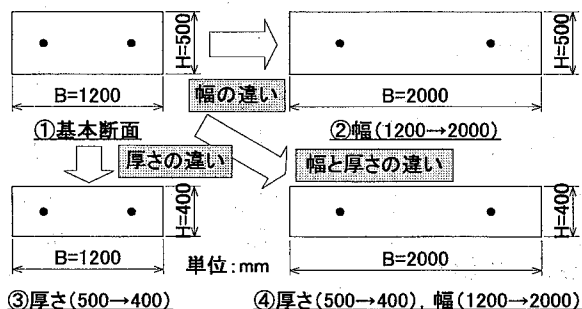


図-7 構造条件の違い

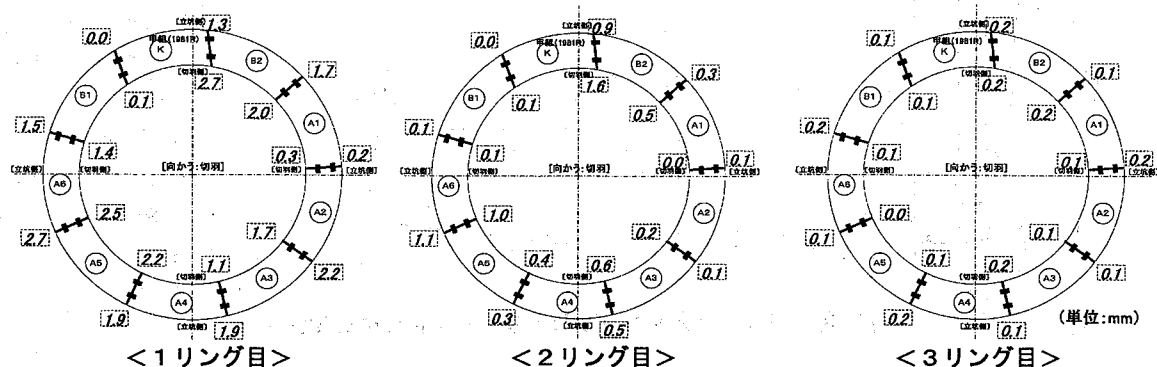


図-6 セグメント継手の目開き状況(計測値)

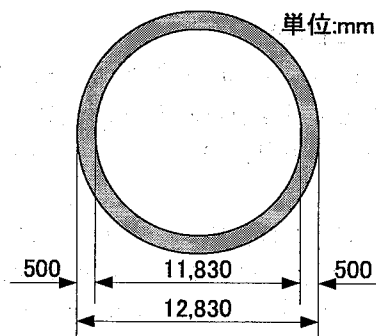


図-5 トンネル断面(神山町代々木シールド)

表-1 セグメント物性値^{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

表-2 継手ばね定数

セグメント 継手	軸方向ばね(kN/m)			せん断ばね k_s (kN/m)	
	引張 k_t		圧縮 k_c	半径 方向	長手 方向
	第1勾配	第2勾配			
リング 継手	1.21×10^6	3.14×10^5	∞	∞	∞
	引張 k_t		圧縮 k_c	半径 方向	長手 方向
	第1勾配	第2勾配			
	3.14×10^5	1.16×10^5	∞	5.7×10^4	5.7×10^4

表-3 解析ケース

施工条件	解析ケース	パラメータ条件		厚さ (mm)	幅 (mm)
掘進開始時 ／掘進完了時	①	基本ケース		500	1200
	②	構造要因	幅の違い	500	2000
	③		厚さの違い	400	1200
	④		幅と厚さの違い	400	2000
	⑤	施工要因	ジャッキパターンの違い	500	1200
	⑥		テールクリアランスの影響	500	1200
	⑦		ジャッキストローク差の影響	500	1200

表中のケースは初期不整の有無の2通りで検討した。

b) 施工的な要因の設定

施工的な要因は、神山町・代々木シールドの施工データをもとにジャッキパターンの違い、テールクリアランスの影響、ジャッキストローク差の影響に着目した。

ジャッキパターンは、本シールド工区における240リング分の施工データからジャッキ推力の最大値を抽出し、最小の使用ジャッキ本数のパターンに当てはめることで、施工条件の厳しい組合せを設定した(図-8)。

テールクリアランスは、本シールド工区において中立的な間隔である40mmに対して、曲線施工時にシールドマシン内側のクリアランスが10mmまで偏りを生じた場合の状況を想定した(図-9)。テールクリアランスの影響はテールブラシばねを解析モデルに設置し、テールクリアランスとテールシールド圧の関係⁸⁾を参考にブラシ圧を設定した。

ジャッキストローク差は、シールドマシンが曲線部を掘削する際にテーパリングのテーパ量に応じて発生する。ジャッキストローク差により生じる角度差 θ は 0.15° （ストローク差32mm/ジャッキ中心距離 $L=12210\text{mm}$ ）程度となる。ジャッキ推力は角度差を考慮し軸方向とせん断方向の分力で評価している。本検討では、せん断力 σ_s の有無に着目し、影響を確認した。

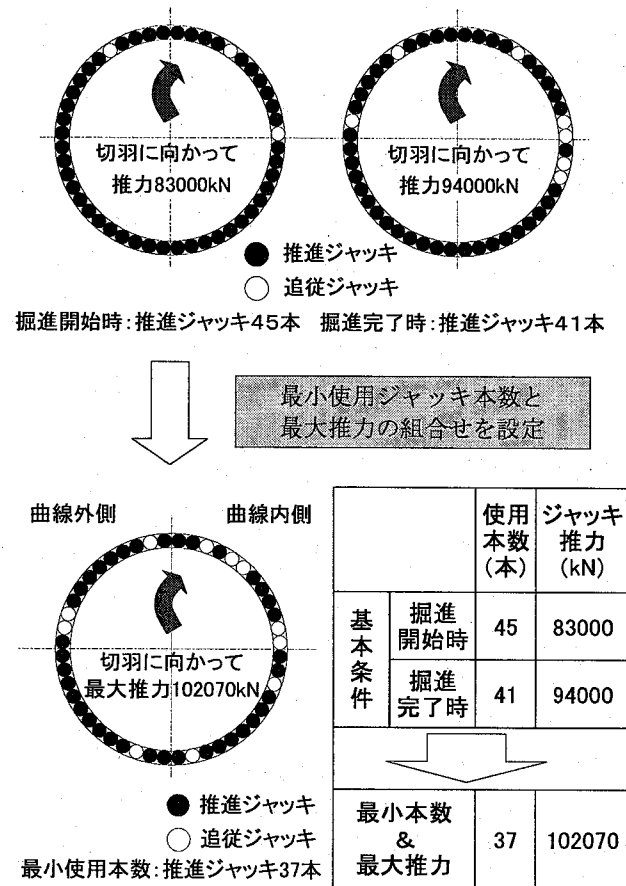


図-8 ジャッキパターンの設定

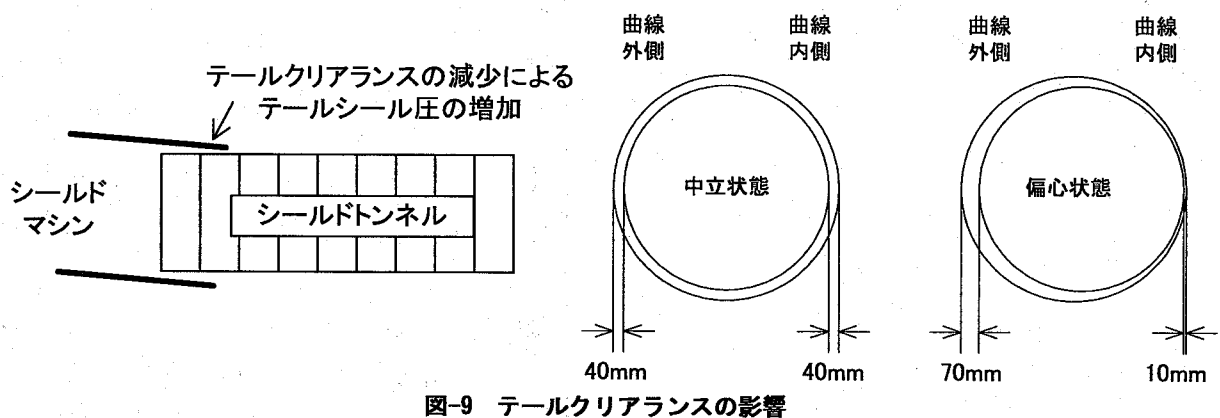


図-9 テールクリアランスの影響

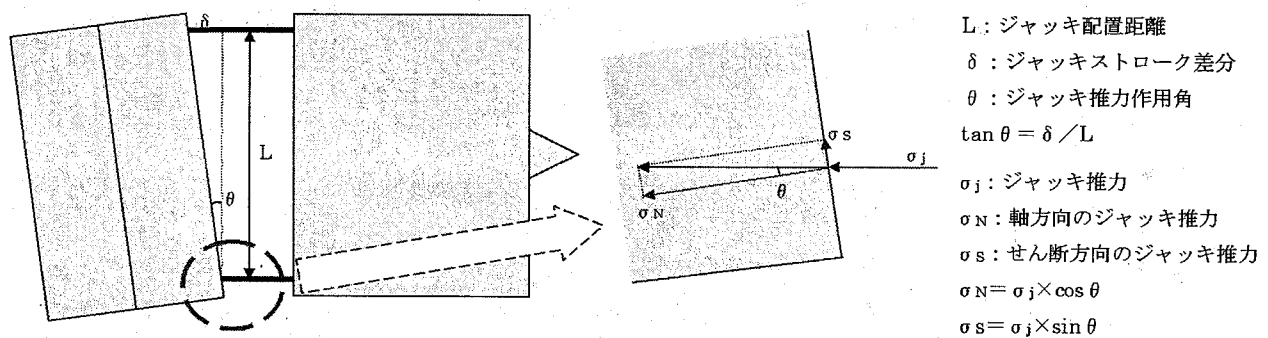


図-10 ジャッキストローク差とジャッキ推力の分解方法

4. パラメータ解析の結果

解析結果は、コンクリートの損傷に着目しセグメント表面に生じる応力度について整理した。

構造条件の違いが顕著に現れた例は、図-11に示す初期不整有り掘進開始時のケース①とケース④の軸方向応力分布である。トンネル内面の軸方向応力は、ケース④の方が切羽側で薄肉化に伴いジャッキ推力による圧縮応力が大きくなるとともに、2リング目でテールシール圧や裏込注入圧によりジャッキ推力で拘束されたセグメントリングが絞り込まれる現象にセグメントの拡幅化が影響し引張応力が大きくなる傾向が見られる(図-12)。

次に、各ケースの発生応力とコンクリートの許容圧縮応力度および引張強度に対する比較結果を表-4に示す。

初期不整の影響はセグメント継手目開きを考慮した方が全体的に高めの応力度が生じている。

基本ケースの応力は、全て基準値内に収まり、実際に問題が生じていないことと整合する。

構造的な要因の影響は、セグメント幅の拡幅でトンネル軸方向の応力が1.2倍に、セグメント厚さの減少でトンネル円周方向の応力が1.1倍になり、拡幅と薄肉化を同時に行うとトンネル軸方向の応力が1.6倍に増加した。

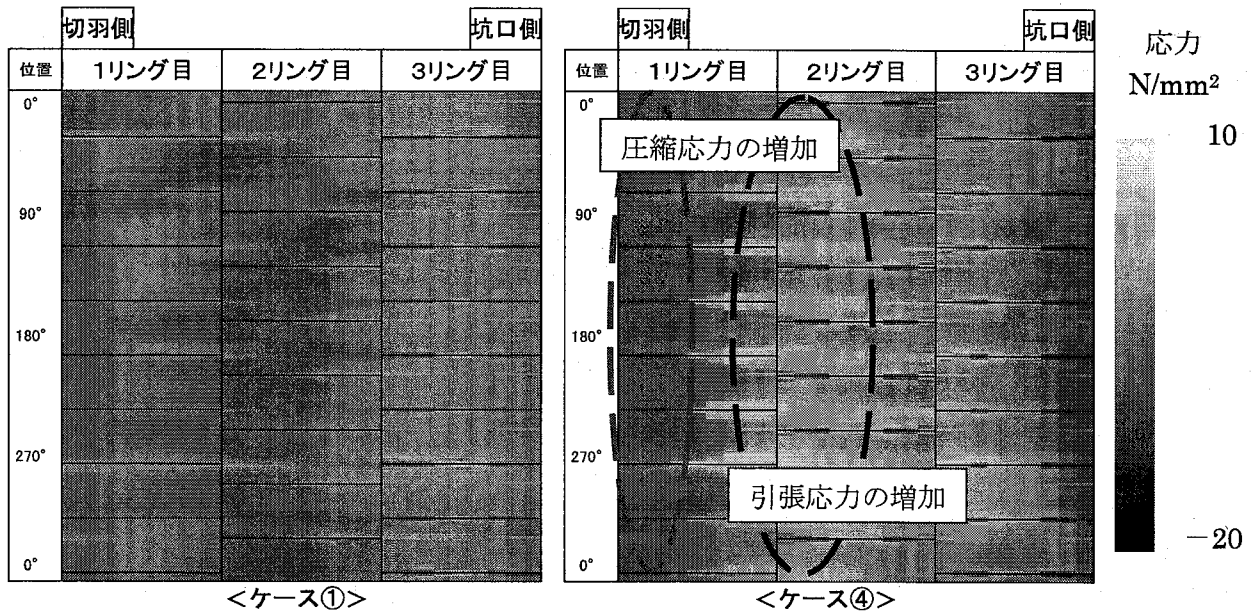


図-11 軸方向トンネル内面応力コンター図（初期不整有り掘進開始時）

表-4 コンクリートの基準値と発生応力度との比

施工条件	解析ケース	厚さ (mm)	幅 (mm)	初期不整なし				初期不整あり				パラメータ条件
				周方向		軸方向		周方向		軸方向		
				$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{tk}}$	$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{ca}}$	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{tk}}$	$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{ca}}$	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{tk}}$	$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{ca}}$	$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{tk}}$	$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{ca}}$	
掘進開始時	①	500	1200	0.9	0.5	0.2	0.4	0.9	0.4	0.7	0.4	基本ケース
	②	500	2000	0.8	0.5	0.1	0.3	0.6	0.4	1.2	0.6	幅の違い
	③	400	1200	1.0	0.5	0.2	0.5	1.1	0.5	0.7	0.5	厚さの違い
	④	400	2000	1.0	0.6	0.1	0.4	1.1	0.6	1.6	0.8	幅と厚さの違い
	⑤	500	1200	1.2	0.6	0.9	0.5	1.6	0.6	1.0	0.6	ジャッキパターンの違い
	⑥	500	1200	1.5	0.7	0.5	0.4	1.6	0.6	1.1	0.5	テールクリアランスの影響
	⑦	500	1200	—	—	—	—	1.0	0.4	0.7	0.4	ジャッキストローク差の影響
掘進完了時	①	500	1200	0.8	0.5	0.1	0.5	0.8	0.5	0.8	0.5	基本ケース
	②	500	2000	0.8	0.5	0.4	0.4	0.8	0.6	1.1	0.5	幅の違い
	③	400	1200	1.1	0.6	0.2	0.6	0.9	0.6	1.0	0.6	厚さの違い
	④	400	2000	1.0	0.7	0.5	0.5	1.0	0.7	1.6	0.7	幅と厚さの違い
	⑤	500	1200	1.0	0.6	0.5	0.5	1.0	0.7	1.0	0.6	ジャッキパターンの違い
	⑥	500	1200	1.6	0.7	0.6	0.5	1.0	1.0	1.7	0.5	テールクリアランスの影響
	⑦	500	1200	—	—	—	—	0.8	0.5	0.9	0.5	ジャッキストローク差の影響

コンクリートの許容圧縮応力度 $\sigma_{ca} = 18 \times 1.5 = 27 (\text{N/mm}^2)$

コンクリートの引張強度 $\sigma_{tk} = 0.23f_{ck}^{2/3} = 0.23 \times 48^{2/3} = 3.0 (\text{N/mm}^2)$

□ 応力比(1以下) □ 応力比(1~2) ■ 応力比(2以上)

施工的な要因は、ジャッキパターンの違いやテールクリアランスの変化に伴いセグメントの応力が構造的な要因よりも高い値を示す。特にテールクリアランスの影響は、コンクリートの基準値と発生応力度との比が最も大きい値(1.7)となっており、セグメントに損傷を与える可能性が高いことが判る。一方、ジャッキストローク差の影響は小さく、セグメント発生応力がほとんど変化しない結果となっている。

5. おわりに

筆者らが提案してきた三次元FEM解析モデルを用いて、今後、道路トンネルで想定される構造条件や施工条件に対して検討した結果をまとめる。

- ①構造的な要因は、セグメント幅の拡幅がトンネル軸方向の応力に、セグメント厚さの低減がトンネル円周方向の応力に影響を与えており、拡幅と薄肉化を同時に行くと単独よりも大きな割合で応力を増加させる可能性があることが判った。
- ②施工的な要因は、ジャッキパターンの違いやテールクリアランスの影響で、各々が1.6~1.7倍の応力増加に繋がる結果となっている。特にセグメントに発生する応力度はテールクリアランスが偏心した場合に最も高くなる。この結果は、施工中のセグメントの損傷要因の1つであるシールドマシンとセグメントとの競りの影響を裏付ける結果になっている。
- ③今回の検討において、初期不整としてセグメント継手の目開き量を考慮するとセグメントの発生応力が高くなる傾向が見られた。そのため、継手の目開きを完全になくすことは難しいものの、セグメントリングの組立精度を高めることは、施工時にセグメントの損傷を抑制することに繋がると考えられる。

なお、本検討で示した施工時荷重の評価方法は、シールドトンネルの計画時に用いることで、より合理的なトンネル構造の検討が行えると考えている。しかし、本検討における条件設定は、実際の施工データをもとに設定している項目がある。解析精度の向上には、今後も多くの事例に対して施工時の影響を評価し、条件設定の方法を整理していく必要があると考えられる。

また、施工中に生じるひび割れは、抑制される

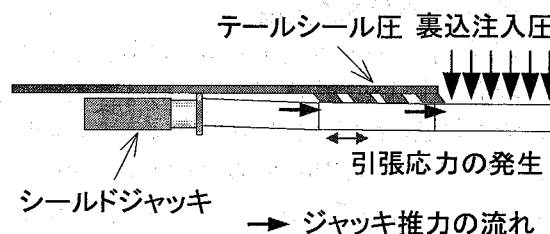


図-12 軸方向引張応力の発生メカニズム

ことが望ましいもののシールドトンネルの長期耐久性に、どの程度影響を与えるか明確な根拠がないのが現状である。施工時荷重によるひび割れは、一時的な荷重による影響であるため、掘進が進むと土水圧の作用により閉塞することもある。そのため、施工時に発生したひび割れが長期的にどの程度残留するかを適切に評価する必要がある。

しかし、現状ではその評価手法が明確でないため、例えば100%残留する等の仮定にもとづいて耐久性の照査をすることになる。設計の合理化に向けては、ひび割れの残留とシールドトンネルの長期的な耐久性への影響を整理することが課題となる。

参考文献

- 1) 首都高速道路公団：トンネル構造物設計要領，首都高速道路公団，pp.61-66，2003.
- 2) 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.
- 3) 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，pp345-351,2004.11
- 4) 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
- 5) 田嶋仁志，春日清志，深井直光，団昭博，斉藤正幸：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，トンネル工学報告集，第15巻，pp293-300，2005.12
- 6) H. Tajima, M. Kishida, N. Fukai, A. Dan and M. Saito : Study on construction loads during shield tunneling using a three-dimensional FEM model, ITA-AITES2006, 22-27. April, 2006.
- 7) 川田成彦，白鳥明，春日清志，斉藤正幸：大断面シールドトンネルに作用する施工時荷重の影響に関する検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第12巻，pp253-258，2007.1
- 8) 中村益美，沢里能雄，小林豊，李黎明：テールブラシの施工時荷重を考慮した実験的検討，土木学会第59回年次学術講演会，pp81-82，2004.9