

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

A STUDY ON THE EFFECTS OF LOADS ACTING ON SHIELD TUNNELS OF LARGE CROSS SECTION DURING CONSTRUCTION

川田 成彦¹・白鳥 明¹・春日 清志¹・斉藤 正幸²

Naruhiko KAWADA・Akira SHIRATORI・Kiyoshi KASUGA・Masayuki SAITOU

With recent technological advancements, secondary linings have been eliminated, segmental linings have become thinner and lining rings have become wider to reduce the cost of constructing shield tunnels of large cross section. There have, however, been concerns about the functional deterioration of linings due to the effects of loads during construction, which are difficult to handle in conventional design processes.

In the Shinjuku Route of the Central Circular Route of the Metropolitan Expressway, the effects of loads on tunnels during construction have been analyzed using the data on the control of construction with shields and the measurements of the behavior of segmental linings. No measurements were, however, available to identify the effects of loads during construction, and no detailed studies could be made.

In this study, construction control data and measurements were collected in the Kamiyamacho-Yoyogi shield work section of the Shinjuku Route based on a measurement plan aimed at analyzing the loads during construction. Three-dimensional FEM analysis was made using the measurements. A method for analytically checking the effects of loads on tunnel linings during construction was examined. The concept of the method and problems involved in its future application are described in this paper.

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

1. はじめに

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い。また、近年の技術の進歩を背景として建設コストを縮減することを目的に、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、従来の設計で定量的に扱うことが難しかった施工時荷重に対して経験的にその安全性を担保してきた安全代が小さくなることによってセグメントに損傷が発生する可能性が高くなっている。

シールドトンネルのセグメントは、施工中にジャッキ推力、テールシールド圧および裏込め注入圧などの荷重が作用する。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。これらの施工時荷重の影響はセグメント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、これまでの施工実績から認められる。

キーワード：大断面シールドトンネル、三次元FEM解析、施工時荷重、セグメント、道路トンネル

¹正会員 首都高速道路株式会社 技術管理室

²フェロー 日本シビックコンサルタント株式会社 事業統轄本部

通常、シールドトンネルの設計では、これらの荷重の一部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多くの要因が組み合わされて発生していると考えられる。筆者らは、この現象を再現するために施工中の挙動に着目した現場計測を実施し、シールド機の挙動解析や三次元FEM解析を実施してきた。

本報告では、新たに実施した現場計測結果に基づいて、施工時荷重がセグメントに与える影響について評価した結果を示す。

本検討では、現場の計測結果およびシールド機の施工データに基づいて、施工時荷重がセグメントに及ぼす影響を把握するために、シールドトンネルの三次元FEMモデルを用いてセグメントの挙動解析を実施した。挙動解析の妥当性は解析結果と現場計測結果との比較によって検証し、その結果に基づいて施工時荷重に対するセグメントの設計手法を検討した。

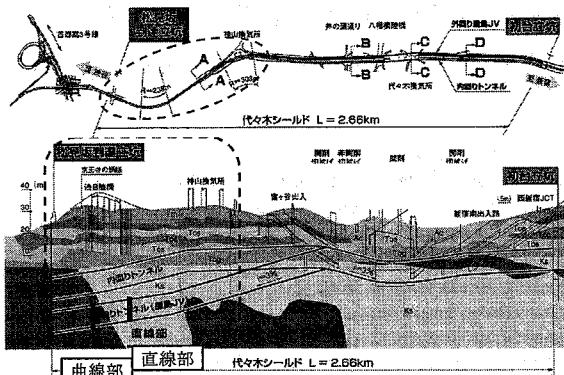


図-1 計測区間（神山市・代々木シールド）

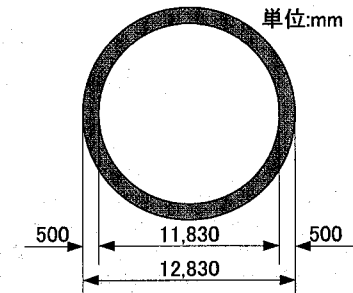


図-2 トンネル断面（外回りトンネル）

2. 施工時荷重を対象とした現場計測結果

(1) 現場概要

施工時荷重を対象とした現場計測は、首都高速中央環状新宿線の神山市・代々木シールド（図-1）を対象とし、線形が異なることによる影響を評価するために直線部と曲線部(R=238m)の2断面で実施した。

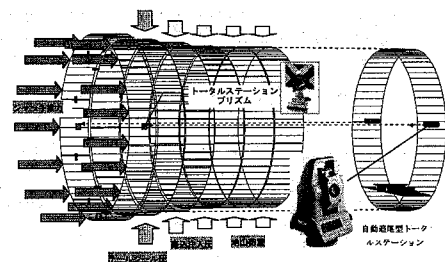
神山市・代々木シールドは、都道環状6号線(山手通り)下、渋谷区初台1丁目から目黒区青葉台4丁目までの延長2,660mに泥水式シールドで構築される。トンネル通過地盤は上総層を主体とした強固な地盤である。直径D=12.83m、離隔3.5～9m以下の横併設から縦併設に変化するトンネルであり、現場計測区間では覆工厚500mmのRCセグメントを使用した(図-2)。セグメント分割数は9等分割である。

(2) 計測内容

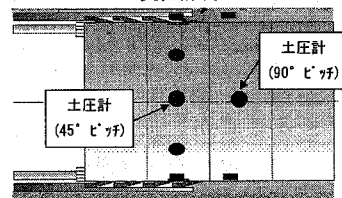
施工時荷重を対象とした現場計測では、変位、土圧、鉄筋ひずみおよび継手目開き・目違いの4項目を実施した（直線部は変位計測および継手の目開き計測のみ）。

変位計測はトンネルの三次元的な挙動を把握するためにトータルステーションを90°ピッチで配置した。

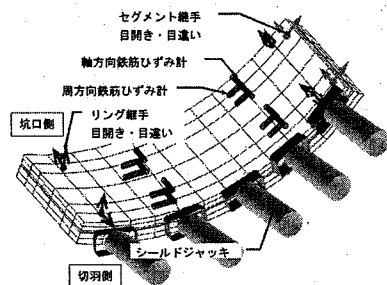
土圧計はシールド掘進中にセグメントへ作用するテールシールド圧や裏込め注入圧を把握するために2リン



<変位計測>



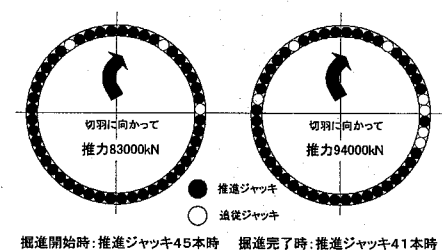
<土圧計測>



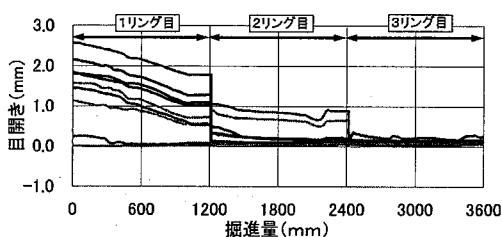
<鉄筋ひずみ・継手目開き・目違い計測>

図-3 計測機器

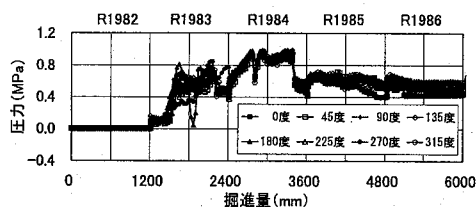
グ（正・副）に配置した。



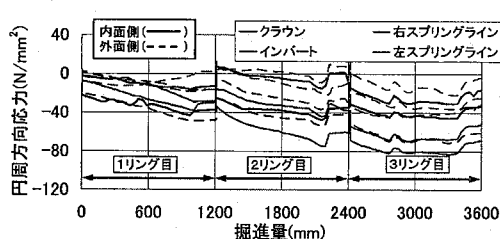
＜ジャッキパターン（曲線部）＞



＜セグメント継手目開き量の変化＞



＜セグメントに作用する圧力変化＞



＜円周方向応力度の変化＞

図-4 計測結果（曲線部）

鉄筋ひずみ計は、組立直後から掘進中にセグメントへ生じる応力変化を把握するために、1ピースに4箇所、リング全体で36箇所に、円周方向と軸方向のひずみを計測できるよう配置した。

継手の目開き・目違い計測は、組立直後に生じる初期目開き・目違いが掘進に伴い変化する状況を把握するために、各ピースの4隅のセグメント継手とリング継手に配置した。

(3) 計測結果

計測結果は、施工データであるジャッキパターンや掘進中の土圧の変化、セグメント継手の目開き量の変化、ならびに円周方向応力の変化に着目して整理した(図-4)。

曲線部施工中の使用ジャッキ本数は、曲線を曲がるために内側のジャッキを中心に掘進開始時から徐々に減らしていた。一方、総推力は掘進開始時より掘進完了後の方が大きくなっており、推進ジャッキ1本当りの推力が24%増加している。

セグメント周面に作用する圧力は、土圧計の計測値と掘進量の関係で示す。計測開始から1リング目を掘進中のセグメントリングはテールシールに達していないため、トンネル周面からの圧力が作用していない状況にある。次に計測開始から2リング目を掘進中のセグメントリングには、テールシールからの圧力が作用するために急激に変動が見られる。計測開始から3リング目を掘進中のセグメントリングは、マシンテールから抜けるため裏込め注入圧の影響を受けて最も高い圧力値を示している。計測開始から4リング目以降は圧力の変化はほとんど見られない結果となっている。

セグメント継手の目開き量は、組立直後のKセグメント近傍で最大2mm程度生じているものの、掘進に伴い減少し、2リング掘進後に全て0.2mm以下まで閉じている。

円周方向の応力度は、掘進開始から徐々に圧縮応力が増加しており、周面圧力やセグメント目開きの挙動と一致している。

これまでの三次元FEM解析^{4),5),6)}では、荷重要因としてジャッキ推力（ジャッキパターン）とトンネルに作用する周面圧力変化を考慮している。今回の解析モデルでは、これらに加え、セグメント継手の目開きの状態を考慮した。解析結果は応力度と変形量を計測値と比較することによって検証した。

3. 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解析モデルを採用した(図-5)。解析モデルはセグメントの局所的な挙動を把握するためにソリッド要素でモデル化し、ばね要素でモデル化した継手部で接続した。解析リング数は、計測結果で周面圧力の変動が確認された3リング目までとした。掘進中のトンネルの挙動は図-6に示すようにジャッキ推力によりトンネル軸方向に圧縮される。解析モデルの境界条件には、この挙動を再現するために、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境界ばね値を設定した。

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ことを目的としており、完全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は、要素試験の結果を基にトンネル円周方向、半径方向、長手方向の3方向の値を設定している(図-7)。また、本検討では、図-4で示したセグメント継手目開き量の経時変化に基づき、継手ばね特性を原点からずらして、施工状況に近いモデル化を行った。

(2) 荷重条件

解析に用いた施工時荷重は、図-4で示すジャッキ推力のパターンとトンネル周面に作用する圧力の変化とした。トンネル周面圧力は、土圧計により45°ピッチで計測されているため円周方向に線形補完して入力荷重とした。

表-1 セグメント物性値^{1),2)}

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

引張強度 ftk はコンクリート標準示方書を参照

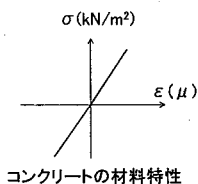


表-2 解析ケース

計測区間	ケース	施工条件	セグメント継手目開き
曲線部	1	掘進開始時	なし
	2	掘進完了時	
	3	掘進開始時	あり
	4	掘進完了時	

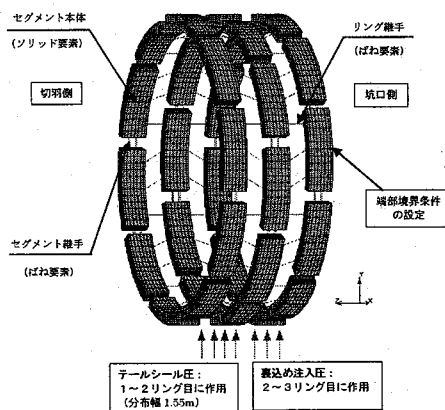
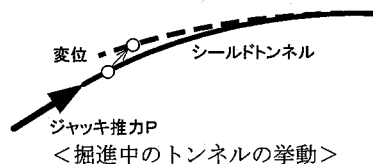
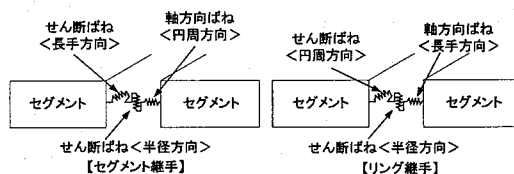


図-5 解析モデル

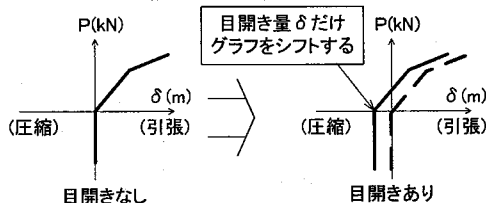


ばねの種類	特性
軸方向	引張(継手ばね)/圧縮(計測値より設定)
水平方向	せん断(継手ばね)

図-6 境界条件の設定



＜継手ばねの設定方向＞



＜継手ばね目開きの設定＞

図-7 継手ばねの特性

(3) 解析ケース

解析は施工時荷重の影響が顕著な曲線部に着目し、表-2に示す4ケースを実施した。解析パラメータはジャッキ使用本数の異なる掘進開始時と掘進完了時としセグメント継手目開き量の有無を組み合わせている。

(4) 解析結果

a) 発生応力度分布

発生応力度は、計測値を標点で解析値を実線で示す(図-8)。図中に示す解析結果は検討を実施した4ケースのうち、掘進完了時のセグメント目開きの有無に着目したケース2とケース4を示す。

円周方向の応力分布は目開きを考慮するとセグメント継手位置に変化が現れているものの、その差が少なく両ケースとも計測値と比較すると応力度のレベルが一致する傾向にある。しかし、局所的に生じている内外面の応力差は再現できていない部分がある。この局所的な応力は計測位置毎に大きく変化していることから、解析で考慮していないセグメント継手の回転状況(内外面の接触状態の違い)が影響要因として考えられる。

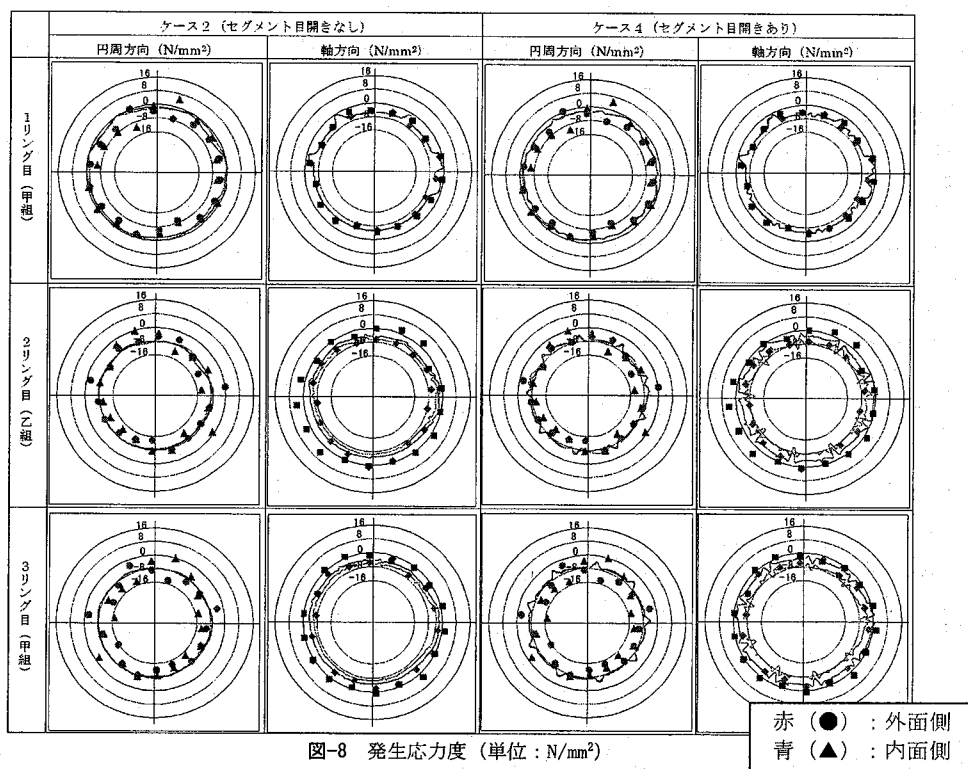
一方、軸方向の応力分布は目開きを考慮することにより、計測結果で見られた2リング目以降のセグメントの内面側に軸圧縮力がほとんど生じない現象を概ね再現できることが確認できた。

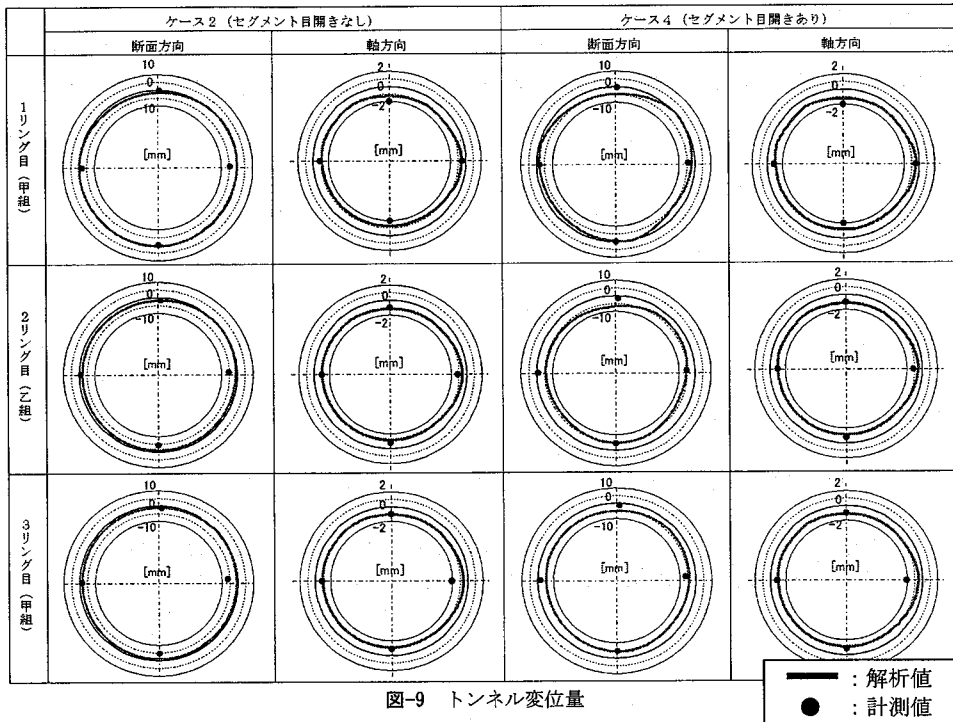
b) 変形状態

トンネルの変形量を図-9に示す。図中の標点(●)は計測値を、実線は解析値を示す。図中に示す解析結果は、発生応力度と同様に掘進完了時のセグメント目開きの有無に着目したケース2とケース4を示す。

断面方向の変形量は、目開きを考慮すると計測値に現れている掘進に伴いトンネル断面が縮小する傾向が再現される結果となっている。

トンネル軸方向の変形量は、セグメント継手目開きと方向が異なるため、両ケースとも大きな違いがなく、計測値と概ね一致している。したがって、計測値を基に設定した解析モデルの境界条件は適切であったと判断できる。しかし、トンネル軸方向の変形量が部分的に異なる点は、境界条件の設定をトンネル断面で均一に設定しているためと推察されるため、より詳細な設定を行えば、解析精度を高めることも可能





と考えられる。

4. おわりに

シールド掘進中のセグメントの挙動に着目した現場計測結果および三次元FEMを用いた検討手法による検証結果と今後の課題について整理する。

三次元FEM解析モデルは、ジャッキ推力、セグメント周面圧力とトンネルの絶対変位から求めた境界条件に加えて、セグメントの目開き状態を考慮することで、現場計測結果で得られたセグメントの挙動がおおむね再現できることを確認した。

今後の課題として、円周方向で局所的に生じている応力度の変化に対して解析的な検証を行う。

さらに荷重条件や組立精度は、計測データから設定しているため、設計手法として確立するために、定量的な設定方法を整理する必要がある。

一方、今回検証した地盤条件はN値50以上の非常に強固な地盤条件であることから、軟弱地盤などの地盤条件に適用する場合は、更なる検証が必要である。

また、今回提案した解析モデルは、非常に複雑であるため、通常の設計業務で頻繁に実施することが難しいと言える。今後、得られた知見を基に二次元モデルを用いた設計手法を検討しており、簡易的な設計手法を提案することを考えている。

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，pp.345-351，2004.11
- 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，pp.353-360，2004.11
- 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，pp.293-300，2005.12
- 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.