

シールドテールとセグメントの接触を考慮した 施工時荷重評価手法の提案

津野 究* 仲山 貴司* 焼田 真司*

Estimation Method of Load Acting on Segmental Lining under Excavation considering Contact between Shield and Segment

Kiwamu TSUNO Takashi NAKAYAMA Shinji YAKITA

This paper proposes a method of estimating the cracks caused by the contact between the shield machine and the segments during excavation work, which are often observed in shield tunnels. A two-dimensional contact analysis method is developed to obtain the distribution of the load caused by the contact between the shield machine and the segments to enable us to know the influence of the tail seal stiffness on the load distribution. The location of cracks, as well as the stress on the segment, is calculated based on the 3-dimensional FEM by inputting the acting force calculated by the contact analysis. The influence of the stiffness at the shield tail part, the jack pattern, the ground reaction coefficient and others is clarified based on a parameter study assuming the actual railway shield tunnels.

キーワード：シールドトンネル，施工時荷重，ひび割れ，接触，テールクリアランス，FEM

1. はじめに

シールドトンネルを適切に維持管理していくためには、ひび割れ等の変状現象を基に、その原因を推定することが重要である。シールドトンネルは、元来、土水圧等の作用荷重を考慮して設計されており、施工後の周辺環境に起因する変状や、施工時に起因する変状¹⁾がほとんどである。本研究では、後者の施工時に起因する変状について、経年したシールドトンネルの維持管理を目的に、ひび割れの位置や傾向から変状原因を特定する手法を提案することを目的として検討を行った²⁾。

これまで、設計や施工段階を対象に施工時荷重を検討する手法が提案されているが、対象トンネルに対して施工に関する情報やデータが十分残っていないことも多く、施工時荷重をどのように設定するかが課題であった。例えば、詳細なシールド掘進シミュレーション^{例えば3)}を用いたとしても、入力する施工データの精度が良くなければ、詳細な作用荷重を得ることができず、十分なひび割れのシミュレーションを行うことができない。

以上を踏まえ、まず、シールドテールおよびシールド内のセグメントをモデル化し、二次元接触解析により施工時荷重による作用荷重を求める手法を提案した。つぎに、二次元接触解析で算定した作用荷重を入力値とし、セグメントリングをモデル化した三次元 FEM を行うことにより、応力の分布とひび割れの発生位置を検討した。また、ケーススタディを行うことにより、ジャッキパターンや地盤条件による影響を検討した。

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

2. 施工時荷重の解析手法の構築

施工時荷重の主要な要因の1つであるシールドテールとセグメントの接触に着目し、図1に示すようなセグメントに発生する応力分布やひび割れの発生位置を検討する手法を提案した。

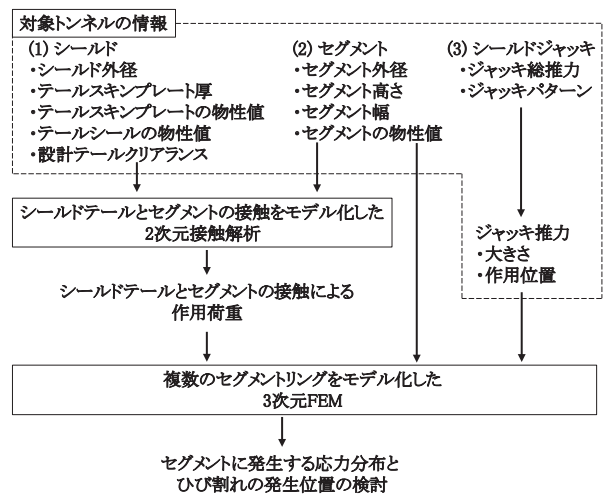


図1 検討手法のフロー

2.1 二次元接触解析

シールドテールとセグメントの幾何学的な位置関係に基づく接触について、これをモデル化した二次元接触解析手法を提案した。ここでは、図2のようにシールドテールとセグメントリングを別々にモデル化する。そして、図3のようにこれらが接触するか否かを判定し、接触し

特集：構造物技術

た要素については、両要素同士が重なり合わないよう節点に仮定の荷重を作用させながら、重なりが0となるよう収束計算を行う。この時、節点に作用させた仮定の荷重を接触による作用荷重として評価する。

シールドテールは、テールスキンプレートとテールシールの部分をモデル化する。また、セグメントリングは、テールから抜け出して地山と接する断面をモデル化し、セグメント外周に地盤ばねを配置する。

解析では、まず、設計テールクリアランスを維持した状態で、シールドテールの内側にセグメントを配置する。つぎに、シールドテールを複数のステップに分割して右方向に水平移動させ、接触部に発生する作用荷重を算定する。なお、地盤ばねは、鉄道シールドトンネルの設計で用いられる裏込め注入硬化過程を考慮した地盤反力係数⁴⁾から算出した。

2.2 三次元 FEM

切羽から複数のセグメントリングをソリッド要素でモデル化し、二次元接触解析で算定したシールドテールと

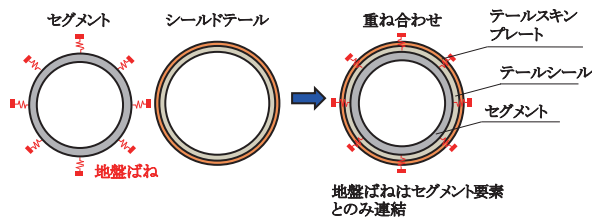


図2 シールドテール・セグメントのモデル化

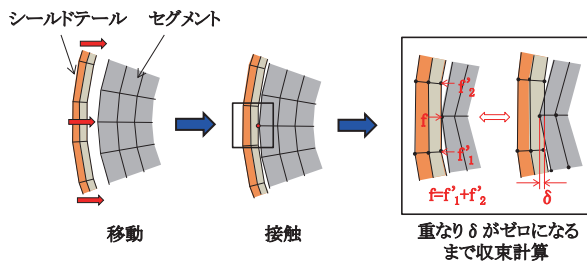


図3 二次元接触解析の概念図

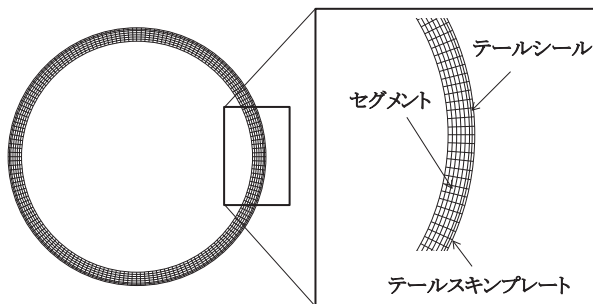


図4 解析モデル

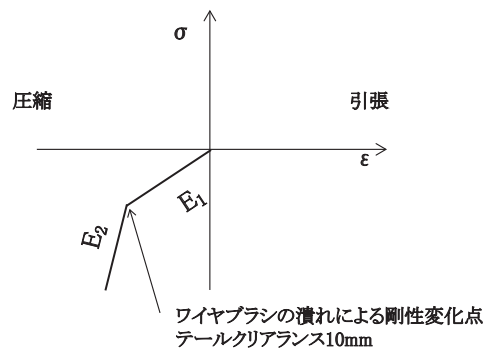
セグメントの接触による作用荷重やジャッキ推力を入力値として三次元 FEM を行う。なお、地山と接する坑口側のセグメントの外周には地盤ばねを設置する。

3. 二次元接触解析による作用荷重の算定

3.1 解析モデル

シールド外径 7.12m, セグメント外径 7.00m のシールドトンネルを対象に、図 4 のようなモデルを作成して二次元接触解析を行った。シールドのテールスキンプレートは、ヤング係数 210kN/mm², ポアソン比 0.17 の厚さ 30mm の鋼材とし、設計テールクリアランスを 30mm とした。また、セグメントについては、高さ 300mm の平板型 RC セグメントとし、コンクリートのヤング係数を 39kN/mm², ポアソン比を 0.30 とした。

ここでは、地盤反力係数を 3.0, 6.4, 10.5 および 14.0MN/m³ の 4 種類、テールシールの剛性を 4 種類設定し、計 16 ケースの解析を行った。実施工では、ワイヤブラシの間に裏込め注入材が介在する 경우가多く、注意が必要である。そこで、テールシールの剛性については、ワイヤブラシの潰れの影響を考慮して図 5 のようにバイリニアでモデル化するとともに、既往の実験結果⁵⁾を基に健全なテールシールを想定した剛性 (TYPE1-1) とワイヤブラシ間に裏込め注入材が介在した場合を想定した剛性 (TYPE2-1) を設定した。また、裏込め注入材の養生日数によりテールシールの剛性が 2.5 倍程度大きくなる場合があることから⁶⁾, 剛性を 2.5 倍にしたケース (TYPE1-2 および TYPE2-2) も設定した。



TYPE 1-1	$E_1=20\text{kN/m}^2$ $E_2=2200\text{kN/m}^2$	TYPE 2-1	$E_1=1000\text{kN/m}^2$ $E_2=2200\text{kN/m}^2$
TYPE 1-2	$E_1=50\text{kN/m}^2$ $E_2=5500\text{kN/m}^2$	TYPE 2-2	$E_1=2500\text{kN/m}^2$ $E_2=5500\text{kN/m}^2$

図5 テールシールの剛性

3.2 解析結果

地盤反力係数 14.0MN/m^3 のケースについて、シールド移動量 30mm 時点のシールドテールとセグメントの接触による作用荷重の分布を図6に示す。これより、裏込め注入材の介在のない健全なテールシールをモデル化した TYPE1-1 および TYPE1-2 では、セグメントの左側スプリングライン付近に作用荷重が集中して発生している。一方、ワイヤブラシ間に裏込め注入材が介在したテールシールをモデル化した TYPE2-1 および TYPE2-2 は、セグメントの左側半分に作用荷重が広く分布して発生している。

作用荷重の分布から算出した最大荷重の推移を図7に示す。これより、健全なテールシールをモデル化した TYPE1-1 および TYPE1-2 では、テールクリアランスがある程度確保されている状態（水平移動量 20mm 以下）では接触による作用荷重はほとんど発生していないが、テールクリアランスが極端に小さくなった状態（水平移動量 $22\sim 23\text{mm}$ 以降）で作用荷重の最大値が急激に増加する傾向となっている。一方、ワイヤブラシ間に裏込め注入材が介在したテールシールをモデル化した TYPE2-1 および TYPE2-2 では、シールドの水平移動量が小さくテールクリアランスが十分に確保されている状態でも作用荷重が発生し、シールドの水平移動量が増えてテールクリアランスが小さくなるにしたがって作用荷重が漸増する傾向が確認できる。

つぎに、シールド水平変位量 30mm 時点の地盤反力係数と作用荷重の最大値の関係を図8に示す。これより、地盤反力係数が大きくなるほど作用荷重が大きくなる傾向が確認できる。なお、地盤反力係数が大きくなっても、作用荷重の分布形状には大きく影響しないことも確認している。

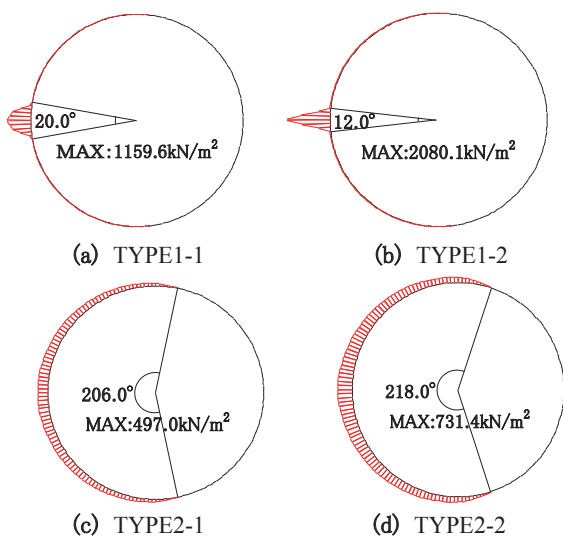
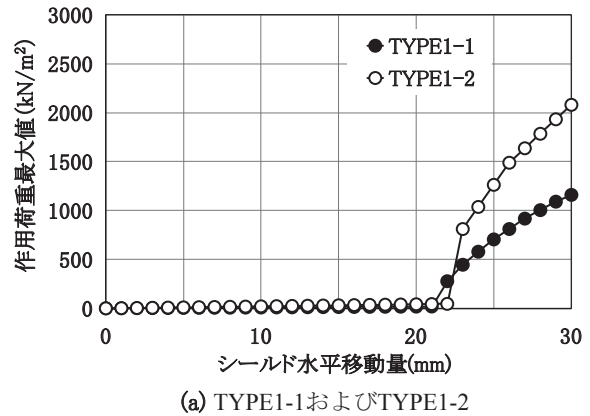
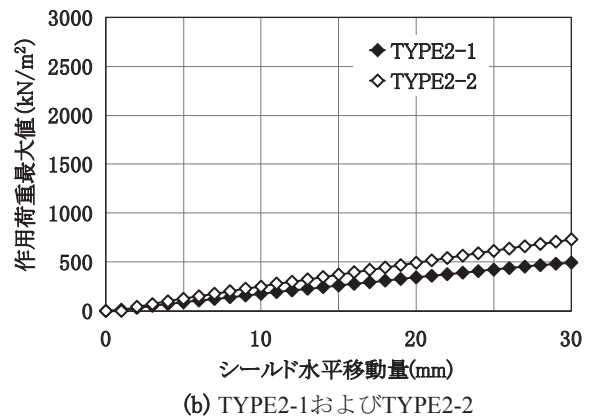


図6 作用荷重分布

以上のように、二次元接触解析により、裏込め注入材の介在も含めたテールシールの剛性が、シールドテールとセグメントの接触による作用荷重の分布形状に影響することを把握した。



(a) TYPE1-1およびTYPE1-2



(b) TYPE2-1およびTYPE2-2

図7 シールド水平移動量と作用荷重最大値の関係

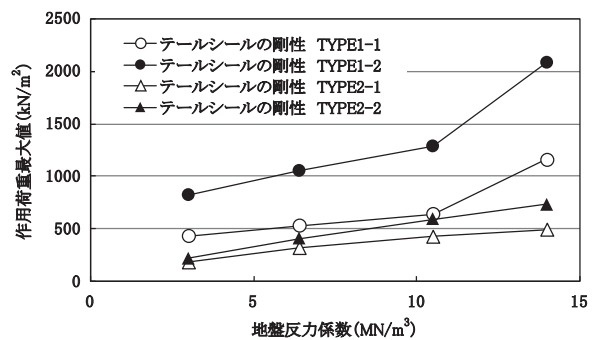


図8 作用荷重最大値と地盤条件の関係
(シールド移動量 30mm)

特集：構造物技術

4. 三次元 FEM によるひび割れ検討

4.1 解析条件

3. と同様のトンネルを対象に、三次元 FEM によるひび割れの検討を行った。ここでは、図 9 に示すように、切羽側から 5 リングをソリッド要素でモデル化した。リング継手面には、内空側から 100mm の位置にボルトを考慮した 24 本の棒要素を配置し、図 10 のような軸剛性およびせん断剛性を考慮した。

作用荷重の入力値は、健全なテールシールを考慮した場合とワイヤブラシ間に裏込め注入材が介在したテールシールを考慮した場合のそれぞれについて、二次元接触解析で得られた最も大きい荷重分布(図 6 (b)および(d))を用いた。作用荷重の載荷位置は、最切羽側のセグメントリングの切羽側から 300mm の位置とし、トンネル軸方向の載荷幅は、ワイヤブラシが 2 段配置されていることを仮定して 300mm とした。

ジャッキの総推力を 30,000kN、ジャッキ本数を 24 本と仮定し、ジャッキ推力を最も切羽側のセグメントリングの切羽側継手面上に、垂直な分布荷重として作用させた。実施工では、極端なジャッキパターンに起因すると見られるひび割れが発生している。そこで、図 11 のような 3 つのジャッキパターンを設定した。

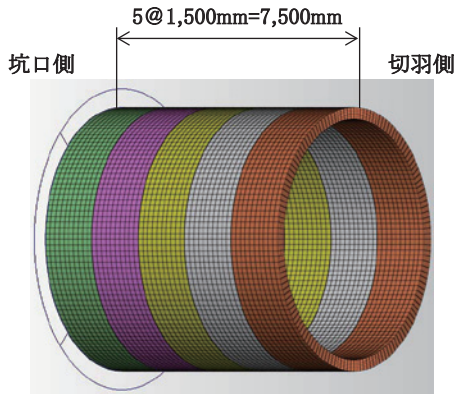


図 9 三次元 FEM 解析モデル

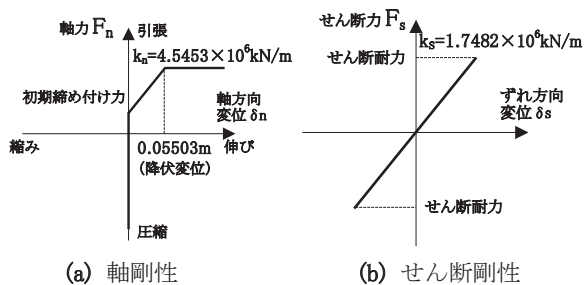


図 10 リングボルトの特性

地盤反力は、切羽から 2 リング以降について、セグメント外周に半径方向と接線方向の地盤ばねを配置しモデル化した。半径方向の地盤反力係数は、3. と同様に、3.0, 6.4, 10.5 および 14.0MN/m³ の 4 種類とし、セグメントが地盤側に変位する場合のみ地盤反力がセグメントに作用するように設定した。また、接線方向の地盤反力係数は、半径方向の地盤反力係数の 1/3 とした。

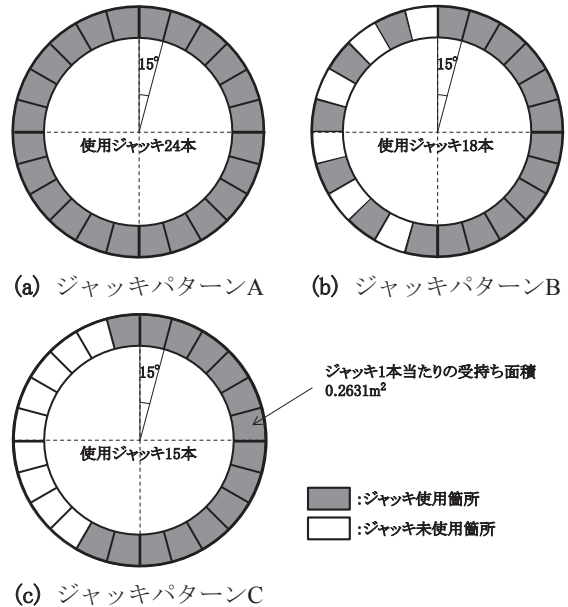


図 11 ジャッキパターン

4.2 解析結果

4.2.1 作用荷重の分布形状の影響

地盤反力係数 3.0MN/m³ のケースについて、周方向応力のコンター図を図 12 および図 13 に示す。

図 12 に示す健全なテールシールの場合の周方向応力分布を見ると、荷重が作用している箇所セグメント内側に引張応力が発生している。セグメントの圧縮強度から想定するひび割れ発生相当の引張応力は 3.08N/mm² となることから、図中の黄色～赤色の部分でひび割れが発生する可能性があるかと推定できる。

一方、図 13 に示す裏込め注入材が介在したテールシールの場合の周方向応力分布を見ると、作用荷重が作用している箇所の逆側のセグメント内側の切羽側にひび割れ発生相当以上の引張応力が発生している。さらに、図 13 では、作用荷重が作用している箇所のセグメント内側の坑口側にもひび割れ発生相当以上の引張応力が発生している。これは、曲線内側で目違いが発生し、最切羽側のセグメントリングと 2 段目のセグメントリングの間でセグメントの変形が大きくなったためと考えられる。

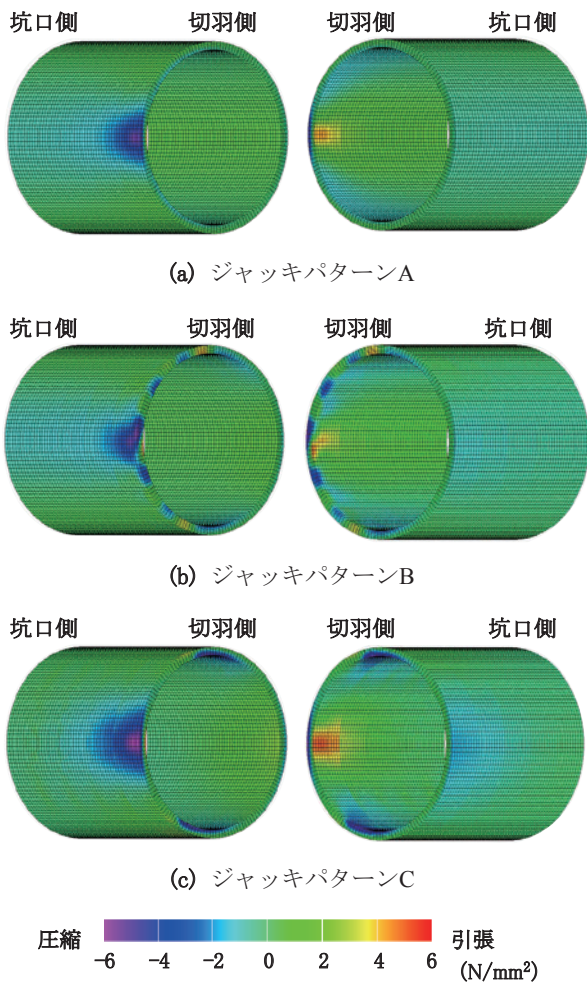


図12 周方向応力コンター
(健全なテールシールの場合)

以上より、テールシールの剛性の違いを基に設定した作用荷重の分布形状の違いが、セグメントに発生する応力分布やひび割れの発生位置に影響しており、テールシールの剛性がシールドテールとセグメントの接触によりセグメントに発生する応力分布やひび割れの発生位置に影響することがわかった。

4.2.2 ジャッキパターンの影響

図12に示すジャッキパターンの異なる3つのコンターを比較すると、ジャッキパターンCのケースは、ジャッキパターンAやジャッキパターンBを用いたケースよりもひび割れ発生相当以上の引張応力が広く分布している。また、図13においても同様の傾向が見られる。

図14のように、ジャッキパターンが異なるケースの内空変位を比較すると、ジャッキパターンAとBの両者には違いがほとんどないが、ジャッキパターンCはジャッキパターンA、Bと比べ内空変位が大きくなる傾向がある。ここで、ジャッキパターンBもCと同様に、ジャッキによる偏心が発生しているケースであるが、セ

グメントに発生する応力分布やひび割れの発生位置にさほど影響していない。これは、ジャッキパターンCのように曲線内側のジャッキを使用しない場合は、ジャッキを使用しない曲線内側では、トンネル軸方向応力がほとんど作用しないため継手面の拘束力が小さい。しかし、逆にジャッキを使用する曲線外側ではトンネル軸方向応力が大きく、継手面の拘束力が大きい。この曲線内側と外側の継手面の拘束効果の違いによりセグメントリングは変形しやすくなると考えられる。

以上より、曲線内側のジャッキを使用せず、偏心が大きくなるようなジャッキパターンの場合、シールドテールとセグメントの接触によりセグメントに発生するひび割れ発生相当以上の引張応力が広く分布し、内空変位も大きくなることがわかった。

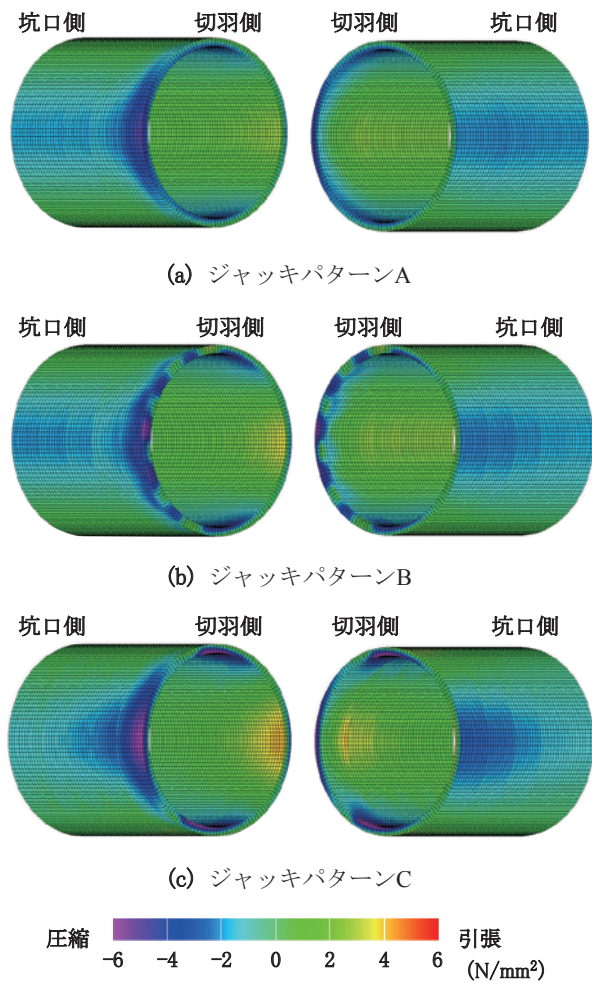
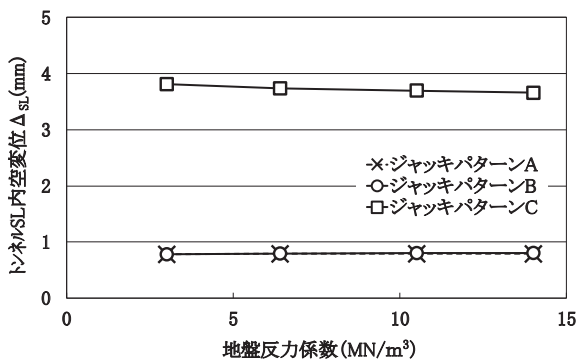
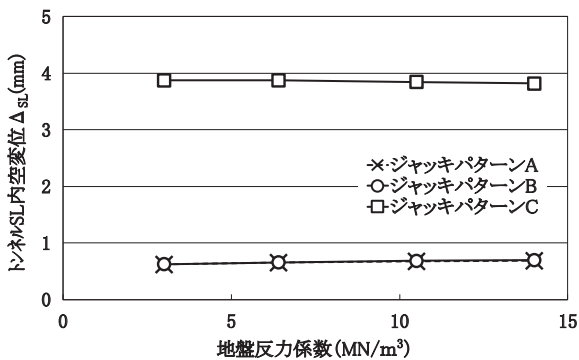


図13 周方向応力コンター
(裏込め注入材が介在したテールシールの場合)



(a) 健全なテールシールの場合



(b) 裏込め注入材が介在したテールシールの場合

図 14 内空変位

4.2.3 地盤反力の影響

図 14 において、地盤条件による内空変位の違いを比較すると、ジャッキパターン C のみが地盤反力係数が小さいほど内空変位が若干大きくなる傾向があるが、総じて変位量の違いは小さく、地盤条件の影響は小さい結果となった。これは、ジャッキ推力によるトンネル軸方向の応力がもたらす各セグメントリング間の継手面での拘束の影響に比べ地盤反力の影響が小さいためと考えられる。

なお、本研究はトンネルを直線でモデル化しているが、シールドトンネルの線形が曲線でテーパリング等を含む場合などでは、地盤反力が影響する可能性がある。

5. まとめ

施工に関する情報が十分残されていない既設シールドトンネルに対して、施工時にシールドテールとセグメン

トの接触により発生したひび割れを特定する方法について検討した。得られた知見は、以下の通りである。

- 1) シールドテールとセグメントの接触により発生する応力やひび割れの分布を、二次元接触解析と三次元 FEM により検討する手法を提案した。
- 2) 二次元接触解析により、裏込め注入材の介在も含めたテールシールの剛性が、作用荷重の分布形状に影響することを把握した。
- 3) 二次元接触解析で算定した作用荷重を基に三次元 FEM を行った結果、テールシールの剛性の違いを基に設定した作用荷重の分布形状の違いが、セグメントに発生する応力分布やひび割れの発生位置に影響することがわかった。
- 4) 三次元 FEM により、曲線内側のジャッキを使用せず、偏心が大きくなるようなジャッキパターンの場合は、シールドテールとセグメントの接触によりセグメントに発生するひび割れ発生相当以上の引張応力が広く分布し、内空変位が大きくなることを確認した。

文献

- 1) 土木学会：トンネルライブラリー 17 シールドトンネルの施工時荷重，2006
- 2) 木股浩孝，仲山貴司，津野究，粥川幸司，小西真治：シールドテールとセグメントの接触を考慮した施工時荷重の解析的検討，土木学会論文集 F1，Vol.69，No.1，pp.73-88，2013
- 3) 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，pp.463-482，2001
- 4) 国土交通省鉄道局：鉄道構造物等設計標準・同解説，シールドトンネル，2002
- 5) 高橋正朗，大塚努，藤沼愛，小泉淳：シールドのテールシールがセグメントに与える影響に関する研究，土木学会論文集 F1（トンネル工学）特集号，Vol.66，No.1，pp.109-120，2010
- 6) 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研究，土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部，Vol.59，pp.81-82，2004