

# セグメント覆工を対象とした 数値解析における地盤ばねの影響

木下 果穂<sup>1</sup>・津野 究<sup>2</sup>・牛田 貴士<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail:kinoshita.kaho.96@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)  
E-mail:tsuno.kiwamu.00@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)  
E-mail:ushida.takashi.33@rtri.or.jp

シールドトンネルのセグメント覆工を模擬した載荷試験を対象とした解析モデルを用いて、地盤ばねのパラメトリックスタディを実施した。ここでは、セグメント覆工の継手周囲のひずみ分布や曲げモーメント等への影響について検討を行った。また、シミュレーション結果をもとにセグメント継手の目開き量を算出し、地盤ばねを設定する際の地盤反力係数の違いが継手の目開き量や回転角と曲げモーメントの関係(回転ばね特性)に与える影響について整理した。パラメトリックスタディの結果、設定した地盤ばねが小さいほど、セグメント継手の目開き量やひずみが大きな領域の範囲が大きくなり、回転ばね定数も小さくなる傾向を示し、軟弱地盤に囲まれたトンネルほど継手部の変形や損傷の程度が大きくなる可能性を示した。

**Key Words:** shield tunnel, segment, numerical analysis, ground spring, loading test

## 1. はじめに

シールドトンネルは筒状の機械で掘削をしながら、セグメントと呼ばれるプレキャスト部材を組み立て、トンネル覆工がつくられる地下構造物である。シールドトンネルは一般的に安定した構造物であるが、近接施工の影響や軟弱粘性土地盤の圧密沈下など、トンネルに作用する外力により、トンネル覆工に変形やひび割れが生じる場合がある。シールドトンネルの変形挙動は、セグメント継手やリング継手といった多数の継手を有することから複雑であり、剛性一様の構造体と挙動が大きく異なるため、力学的挙動が十分に把握されていないのが現状である。今後、近接施工や圧密沈下等の影響を受けて変形が生じているシールドトンネルを適切に管理していくためには、外力に対するトンネル覆工の力学的挙動や周辺地盤が与える影響等について把握することが重要であると考えられる。

そこ筆者らは、外力が作用するシールドトンネルの力学的挙動を把握するため、シールドトンネルの覆工を模擬したセグメント覆工モデルの載荷実験および載荷実験の再現シミュレーションを実施した。載荷実験は大型トンネル覆工モデル実験装置<sup>1)</sup>を用いて実施し<sup>2)</sup>、実験の再現

シミュレーションは3次元FEMにより行った<sup>3)</sup>。載荷実験では継手部に圧ざやひび割れが集中しており、3次元FEMにより得られた継手部周囲のひずみ分布はひび割れ発生位置と概ね対応していることを確認した。

シールドトンネルを取り囲む周辺地盤により、覆工に生じる変形や断面力は異なり、継手部の損傷状態についても異なることが考えられる。載荷実験に用いた実験装置においては、トンネルの周辺地盤を皿ばねで模擬しており、再現シミュレーションでは皿ばねの位置に引張ばね切りとする地盤ばねを設置している。そこで本論文では、再現シミュレーションに使用したモデルを用いて、地盤ばねに着目したパラメトリックスタディ実施し、周辺地盤の性状の違いが、セグメント覆工の継手周囲のひずみ分布、曲げモーメント、回転ばね定数に与える影響等を把握した。

## 2. セグメント覆工モデルの載荷実験

### (1) 実験装置

図-1に載荷実験に用いた大型トンネル覆工モデル実験装置<sup>1)</sup>を示す。実験装置は新幹線複線標準断面の1/5スケー

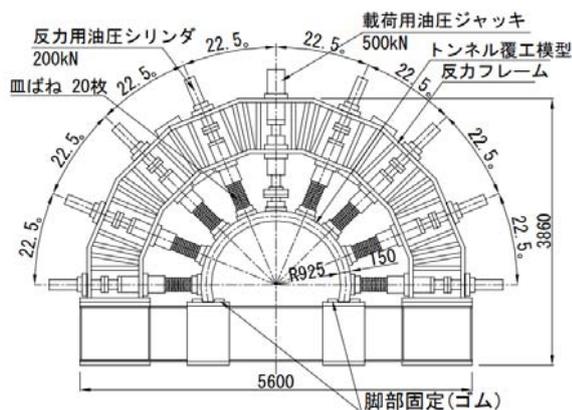


図-1 大型トンネル覆工模型実験装置

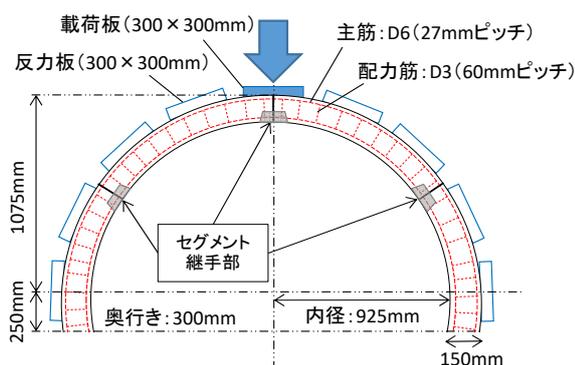


図-2 セグメント覆工模型概要

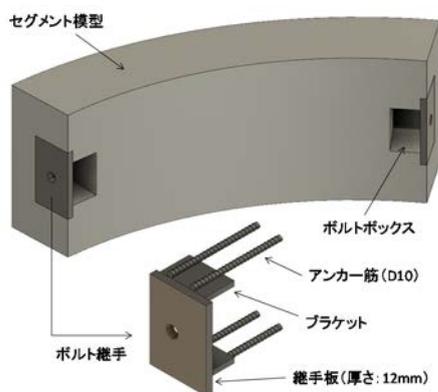


図-3 セグメント模型

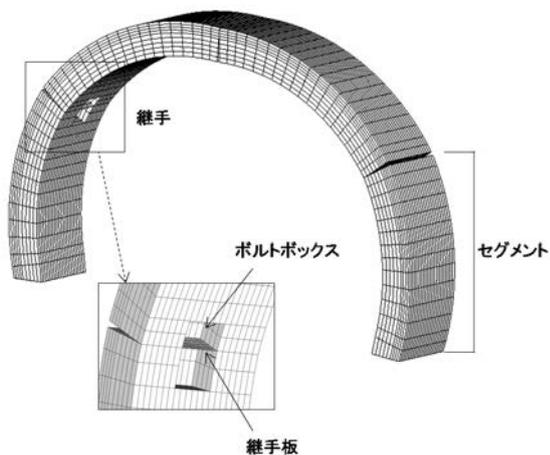


図-4 解析モデル

ル相当のトンネル覆工模型を載荷でき、実際の覆工に近い変形挙動の再現が可能である。実験装置は載荷用油圧ジャッキ、反力フレーム、反力用油圧シリンダ、載荷板等から構成され、全周に配置された反力用油圧シリンダとトンネル覆工模型の間には、トンネル周囲の地盤ばねを模擬した皿ばねと反力板が設置されている。覆工模型と反力板は全て接触させており、覆工と背面地盤の間に空洞がない状態を想定して載荷を行った。覆工模型天端部の載荷用油圧ジャッキにより、鉛直下向きに荷重を作用させることで、覆工と地盤との相互作用を模擬することができる。

## (2) セグメント覆工模型

セグメント覆工模型は4つのセグメント模型が3つのボルト継手により締結されており、寸法は外径1075 mm、厚さ150 mm、奥行き300 mmである(図-2)。セグメントはRC構造であり、D6の複鉄筋とD3の配力筋を配筋している。セグメント模型にはボルト継手を設置しており、材質SM490で寸法140×100×12 mmの継手板、寸法60×90×6 mmのブラケット、D10のアンカー筋4本により構成される(図-3)。打込みの際はボルトを締結するための空間であるボルトボックスを設けて、モルタルを打設しており、モルタルの一軸圧縮強度(材齢28日)は37.2 N/mm<sup>2</sup>であった。なお、ボルト(M20)の初期軸力は、載荷実験前に許容応力度相当の27.4kNとなるように増締めを行っている。

## 3. 覆工模型実験の数値解析

### (1) 構造モデル

本研究では、筆者らが行ったセグメント覆工模型の載荷実験の再現シミュレーション<sup>3)</sup>を用いた。解析モデルを図-4に示す。覆工模型のモデルの要素分割は周方向を70分割、厚さ方向を10分割、奥行方向を20分割としており、総要素数は11,736である。セグメント本体はソリッド要素、継手板をシェル要素、継手部のボルトをばね要素で構成した。材料物性値を表-1に示す。継手板のシェル要素はセグメント本体のソリッド要素と、それぞれの要素が接している三辺を固定している。継手部分のセ

表-1 材料物性値

	ヤング係数	22.5 kN/mm <sup>2</sup>
セグメント本体	ポアソン比	0.2
	単位体積重量	24.5 kN/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数	200 kN/mm <sup>2</sup>
継手板	ポアソン比	0.3
	単位体積重量	77.0 kN/mm <sup>2</sup>

表-2 パラメトリックスタディに使用した地盤反力係数

	土の種類	地盤反力係数
(a)	非常に密な砂質土	47000 kN/m <sup>3</sup>
(b)	緩い砂質土	21500 kN/m <sup>3</sup>
(c)	固結した粘性土	31500 kN/m <sup>3</sup>
(d)	非常に軟らかい粘性土	3500 kN/m <sup>3</sup>

セグメント同士の接触状態を模擬できるように、セグメント間には引張ばね切りとするばね要素を設置した。また、覆工模型周囲の皿ばねについては、覆工に反力板が接する範囲に引張ばね切りとする地盤ばねを設置している。

## (2) 解析ケース

トンネル周辺地盤の性状の違いがセグメント覆工や継手に与える影響を把握するため、载荷実験の再現シミュレーションに使用したモデルを用いて、地盤ばねのパラメトリックスタディ実施した。地盤ばねは表-2をもとに設定している。パラメトリックスタディでは(a)非常に密な砂質土、(b)緩い砂質土、(c)固結した粘性土、(d)非常に軟らかい粘性土のそれぞれの地盤相当の地盤ばねと、地盤ばね 0 kN/mm を設定した。ここで、地盤反力係数は鉄道的设计標準<sup>9</sup>をもとに設定している。

## (3) 解析結果

### a) 継手周辺のひずみ分布

载荷荷重 60kN 作用時における、天端部および肩部の継手周辺のひずみ分布を図-5 に示す。载荷荷重 60kN は载荷実験と再現シミュレーションが線形領域において、概ね一致している荷重である。ひずみについては式(1)の von Mises 相当ひずみを表示している。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2\}} \quad (1)$$

( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  : 最大, 中間, 最小主ひずみ)

天端部の継手では、正面から観察すると(図-5(B)) 载荷板が接する範囲とセグメントの覆工外面側のセグメント同士が接触する箇所において、ひずみの大きな領域が生じている。载荷によって生じる継手部の目開きに伴い、継手部の覆工外面側が圧縮されることにより、圧縮領域にひずみが生じていると考えられる。天端部の継手においては、地盤ばねの値を小さく設定するほど、覆工外面側の圧縮領域に生じる大きなひずみの領域はトンネル覆工の周方向に向かって広がっていることを確認した。また、天端部のボルトボックス周辺を内側から観察すると(図-5(C))、ボルトボックスから四方に広がるように、ひずみの大きな領域が生じていることを確認した。さらには、ボルトボックスのひずみは奥行方向の面ではなく、周方向の面を中心に生じており、ボルトボックス

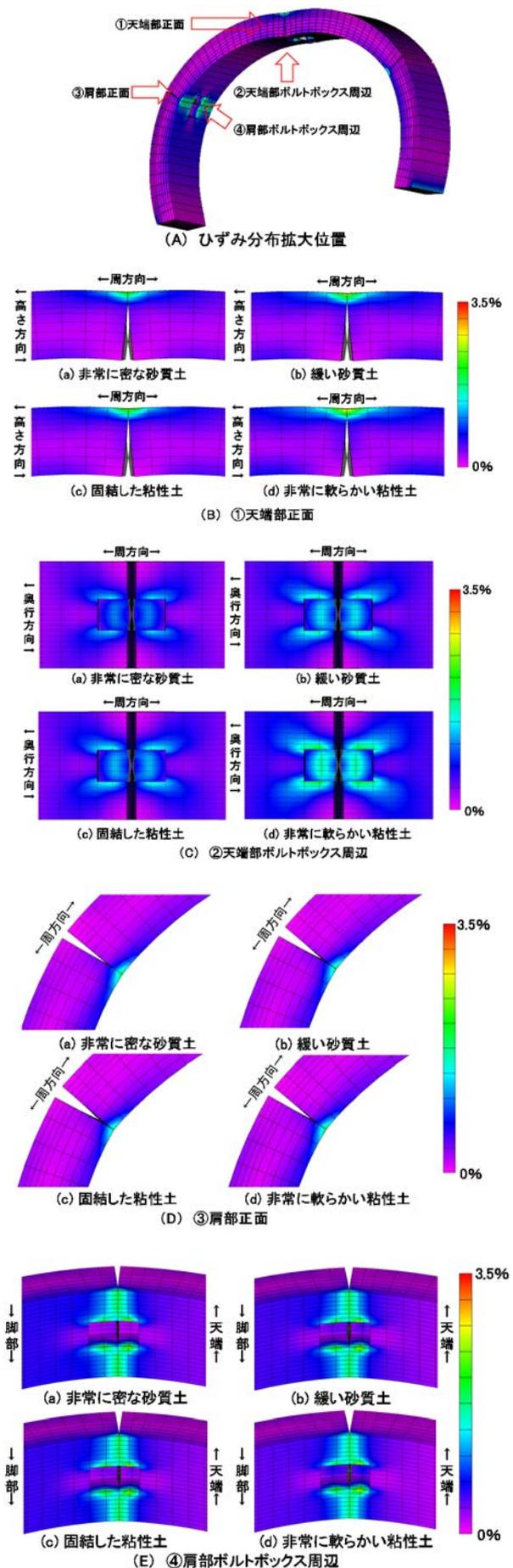


図-5 全周継手周辺のひずみ分布 (60kN 载荷時)

の内部でもひずみが生じていた。天端部の継手では、セグメントが接触する箇所だけではなく、ボルトボックス周辺においてもひずみが大きくなっており、地盤ばねの値を小さく設定するほど、ひずみの大きい領域が広がっていた。

図-6 にセグメント覆工载荷実験での载荷荷重 60kN 時の天端部の継手の状況を示す。载荷実験における地盤ばねは軟弱粘性土地盤相当の 3kN/mm である。セグメント覆工模型は、ボルトボックスの周方向の面を中心にひび割れが発生しており、シミュレーション結果と同様の傾向を示している。

つぎに、肩部の継手について正面から観察すると（図-5(D)）天端部の継手と同様に、セグメントの覆工内面側のセグメント同士が接触する箇所において、ひずみが大きな領域が生じている。肩部においては、地盤ばねの設定値を変化させてもひずみの大きな領域は同程度であり、天端部の継手とは異なる傾向を示した。また、肩部のボルトボックス周辺（図-5(E)）では、ボルトボックスの周方向の面において、ひずみの大きな領域が生じた。天端部ではボルトボックスから四方に広がるように、大きなひずみの領域が生じていたが、肩部ではセグメント同士の接触面に集まるように大きなひずみが分布している。

地盤ばねの値を小さく設定するほど、ボルトボックス内部のひずみは大きくなり、一方で脚部に近い覆工内面では、ひずみはほとんど変わらなかった。肩部の継手部では、セグメント同士の接触面と同様に、ボルトボックス周辺の地盤ばねの感度は、天端部と比較して小さいことを確認した。

#### b) 継手目開き量

地载荷荷重 60kN, 40kN, 20kN 作用時における、地盤反力係数と目開き量の関係を図-7 に示す。いずれの载荷荷重においても地盤反力係数の値が小さいほど、目開き量は大きくなる傾向を示した。この結果より、トンネル周囲を囲む地盤が軟弱地盤であるほど、継手部の変形量が大きくなることが予測される。また、いずれの载荷荷重においても地盤反力係数が約 25000 kN/m<sup>3</sup> より大きくなると、目開き量に対する地盤ばねの感度が小さくなる傾向を示した。さらには、载荷する荷重が小さいほど地盤ばねの感度が小さくなる傾向を確認した。

#### c) 曲げモーメント

载荷荷重60kN作用時の、セグメント覆工に発生する曲げモーメント図を図-8 に示す。曲げモーメントは、天端部周辺において大きな正曲げが生じており、アーチ肩部から脚部にかけては負曲げが発生している。天端部では地盤ばね0kN/mmを設定した場合に最も曲げモーメン

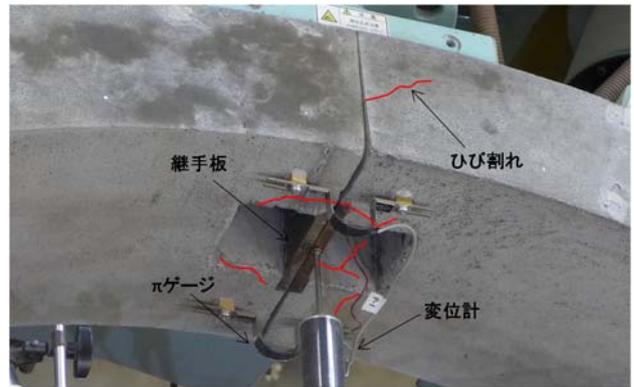


図-6 载荷実験の天端部の状況（60kN 载荷時）

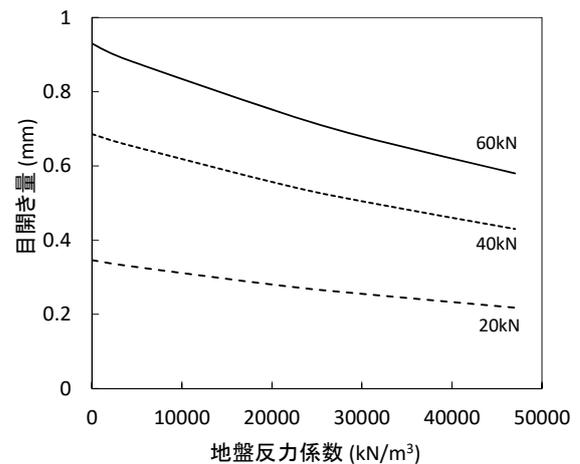


図-7 地盤反力係数と目開き量の関係

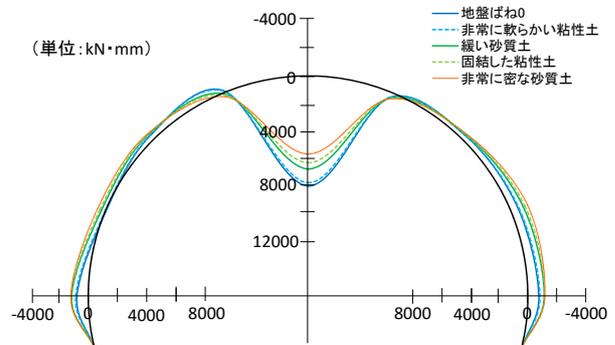


図-8 曲げモーメント分布

トが大きく、軟弱な地盤相当のばねであるほど、曲げモーメントは大きな値を示している。また、地盤ばねの値を小さく設定するほど、天端部の正曲げが生じている範囲が広がっている。

一方、アーチ肩部から脚部にかけて生じている負曲げの場合は、地盤ばねの値を小さく設定するほど、曲げモーメントは小さい値を示している。アーチ肩部の継手付近については、地盤ばねを変化させると曲げモーメントの値も変化するものの、地盤ばねの感度は天端部よりも小さい傾向を示した。

#### d) 軸力

載荷荷重60kN作用時に、セグメント覆工に発生する軸力図を図-9に示す。天端部とアーチ肩部の継手部において軸力が大きくなっており、天端部に生じる軸力が最も大きい値を示している。天端部では地盤ばね0kN/mmを設定した場合が最も軸力が大きく、曲げモーメントと同様に地盤ばねの値を小さく設定するほど、軸力は大きな値を示している。

一方、アーチ肩部周辺では地盤ばねの値を小さく設定するほど、軸力の値は小さくなるが、地盤ばねの感度は天端部よりも小さかった。天端部とアーチ部分肩部周辺とも曲げモーメントと軸力は同様の傾向を示した。

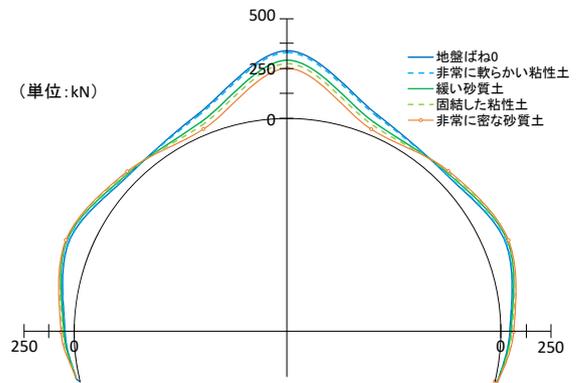


図-9 軸力分布

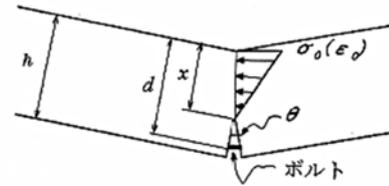


図-10 継手部の力のつり合い (引張部材あり) 4)

#### e) 回転ばね特性

シールドトンネルの設計では一般的にセグメント本体をはり、セグメント継手を回転ばねとして扱うはりばねモデルが用いられている。このモデルでは、継手の剛性を回転角 $\theta$  (図-10) と曲げモーメント $M$ の関係から得られる式(2)の回転ばね定数 $k_m$  4)で示す。

$$k_m = \frac{M}{\theta} \quad (2)$$

そこで、地盤ばねのパラメトリックスタディの結果において、セグメント継手の剛性について評価するため、天端部の継手の目開き量から回転角を算出し、回転角と曲げモーメントの関係について整理した。図-11 に回転角と曲げモーメントの関係図を示す。載荷荷重 60kN, 40kN, 20kN 作用時の値をプロットしている。

パラメトリックスタディの結果、地盤ばねの感度は小さいものの、天端部では地盤ばね 0kN/mm を設定した場合が最も軸力が大きく、地盤ばねの値を小さく設定するほど回転ばね定数は小さくなり、セグメント継手の剛性が小さくなる結果となった。

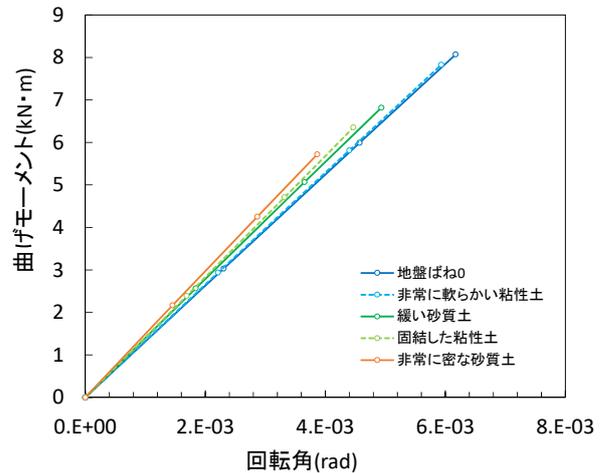


図-11 回転角と曲げモーメントの関係

#### 4. まとめ

本論文では、トンネル周辺地盤がセグメント覆工に与える影響を把握するため、再現シミュレーションに使用したモデルを用いて、地盤ばねに着目したパラメトリックスタディ実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 天端部の継手では、セグメント同士が接触する箇所とボルトボックスの周方向の面において、ひずみの大きな領域を確認した。地盤ばねの値を小さく設定するほど、ひずみが大きなが領域が広がることを確認した。
- 2) アーチ肩部の継手では、セグメント同士が接触する箇所とボルトボックスの周方向の面において、ひずみの大きな領域を確認した。地盤ばねの値を小さく設定するほど、ボルトボックス内部のひずみ

は大きくなる傾向を示したが、地盤ばねの感度は天端部よりも小さかった。

- 3) 地盤ばねの値を小さく設定するほど、継手の目開き量は大きくなる傾向を示し、軟弱地盤であるほど継手部の変形が大きくなる可能性を示した。また、作用する荷重が小さいほど、地盤ばねの感度が小さくなった。
- 4) セグメント覆工に生じる曲げモーメントと軸力は、地盤ばねの値を小さく設定するほど、天端部では大きくなり、アーチ肩部においては小さくなる傾向を示した。また、地盤ばねの感度は天端部の方がアーチ肩部よりも大きかった。
- 5) 回転ばね定数は、地盤ばねの値を小さく設定するほど小さくなり、セグメント継手の回転剛性が小さ

くなる結果となった。

#### 参考文献

- 1) 高橋幹夫, 津野究, 小島芳之: 大型トンネル覆工模型実験装置の開発, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, III-070, pp.139-140, 2006.9
- 2) 津野究, 鎌田和孝: シールドトンネルを対象とした大型覆工模型実験, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, III-436, pp.871-872, 2016.9
- 3) 木下果徳, 津野究, 牛田貴士: セグメント覆工の力学的挙動に関する解析的検討, トンネル工学報告集, 第 28 巻, II-6, 2018.11
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル, 2002

## INFLUENCE OF SOIL SPRING VALUES ON NUMERICAL ANALYSIS OF SEGMENTAL LINING

Kaho KINOSHITA, Kiwamu TSUNO and Takashi USHIDA

This paper discussed parametric studies of soil springs using an analytical model of segment lining. The parametric studies revealed the effect of the soil spring on the strain distribution near the joint and bending moment. The analysis results show the influence of soil springs on opening of the segment joint and the relationship between the rotation angle and bending moment. As a result of the parametric study, the smaller the soil spring, the larger the opening of the segment joint and strain area, and the smaller the rotational spring constant. As a result of the research, it was found that the tunnel surrounded by loose soil is large deformation and damage at the segment joint.