

セグメント覆工の 力学的挙動に関する解析的検討

木下 果穂¹・津野 究²・牛田 貴士³

¹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

²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

³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

シールドトンネルはセグメントを結合する多数の継手を有する複雑な構造であり，継手の状況が覆工の剛性や耐力に対して，大きな影響を及ぼすと考えられている．本報告では，シールドトンネルのセグメント覆工を模擬した供試体の載荷実験を2ケースを行い，継手位置によって異なる変形挙動を把握した．さらに，3次元FEMにより実験の再現解析を実施し，実験結果との比較により解析手法の妥当性を確認した．また，解析においてトンネル覆工の部材の物性値に着目したパラメトリックスタディ実施し，継手やコンクリートの剛性が解析結果に与える影響について確認した．

Key Words : segment, finite element method, loading test, segment joint, stiffness

1. はじめに

シールドトンネルはセグメント継手やリング継手といった多数の継手によって，セグメント同士が結合された複雑な構造をしている構造物である．継手部の剛性はセグメント本体よりも小さいため，継手を有することによって剛性一様の構造と力学的挙動は大きく異なり，この継手部の状況がトンネル覆工の剛性や耐力に対して，大きな影響を及ぼすことが考えられている．

そこで本報告では，シールドトンネルのセグメント覆

工を模擬した供試体の載荷実験と，実験の再現解析を実施した．載荷実験は，大型覆工模型実験装置¹⁾を用いて継手位置の異なる覆工模型2ケースについて実施し²⁾，それぞれのケースについて実験結果を整理した．また，載荷実験の再現解析を実施し，実験結果と比較することで解析手法の妥当性を確認した．さらには，トンネル覆工の物性値に着目したパラメトリックスタディ実施し，継手やコンクリートの剛性が力学特性に与える影響について確認した．

2. 解析対象とした実験

(1) 実験装置

載荷実験に用いた大型トンネル覆工模型実験装置¹⁾は，新幹線標準断面の1/5スケール相当の覆工模型を載荷できる実験装置である．実験装置は反力フレーム，載荷用油圧ジャッキ（最大載荷重500kN），反力用油圧シリンダ，載荷板等で構成される（図-1）．反力用油圧シリンダと覆工模型間には，トンネル周囲の地盤ばねを模擬した皿ばね（ばね定数3,000kN/m）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

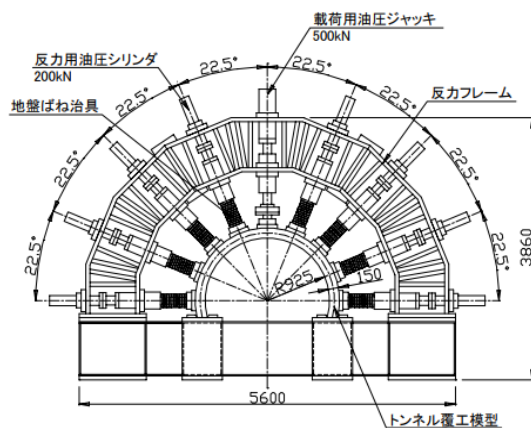


図-1 模型実験装置の概要¹⁾

背面地盤の間に空洞がない状態を想定して载荷を行った。覆工模覆工模型天端部の载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) 覆工模型

覆工模型の概要を図-2に示す。本報告では (a) 4つのセグメント模型が3つの継手部により締結されているケースAと、(b) 5つのセグメント模型が4つの継手部より締結されているケースBの、2ケースの载荷実験の結果を整理する。それぞれの覆工模型の大きさは厚さ

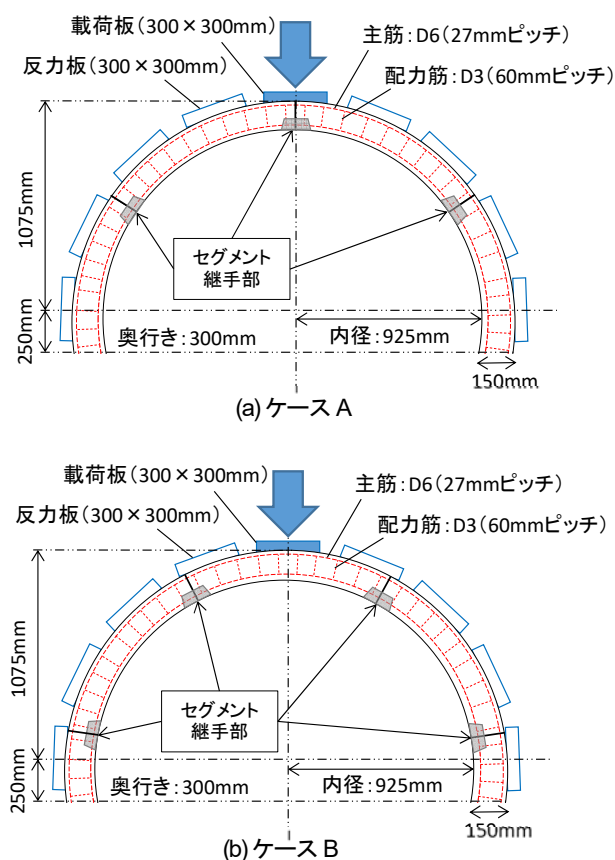


図-2 覆工模型の概要

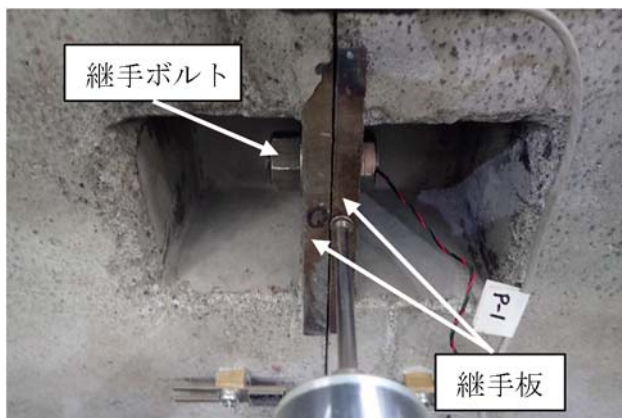


写真-1 ボルト継手の外観

150mm、奥行き300mmである。セグメントはD6@27mmの複鉄筋とD3@60mmの配力筋を配筋した上で、モルタルを打設して作製している。モルタルの一軸圧縮強度（材齢28日）は30.9～37.2N/mm²であった。

継手形式はボルト継手であり、図-3に示している継手板（板厚12mm）をボルト（M20）で締結している（写真-1）。ボルトの初期軸力については、载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) 载荷方法

载荷方法については天端部の载荷用油圧ジャッキにより、鉛直下向きの荷重を変位制御（载荷速度0.1mm/分）により作用させている。载荷ステップ毎に覆工の状況を観察するとともに、载荷荷重、覆工内面の法線方向変位、鉄筋のひずみ、ボルトのひずみ等の計測を行った。

(4) 実験結果

a) 荷重と変位の関係

载荷実験により得られた、覆工天端部における荷重と载荷板変位の関係を図-4に示す。

継手が天端にあるケースAは、ケースBよりも初期の剛性が小さい結果となった。また、最大荷重後も大きな荷重の低下は見られなかった。この結果は、ケースAではセグメント継手が天端に位置しているために、継手の目

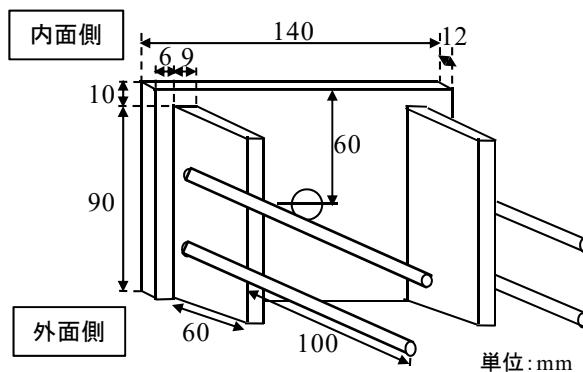


図-3 継手板の概要

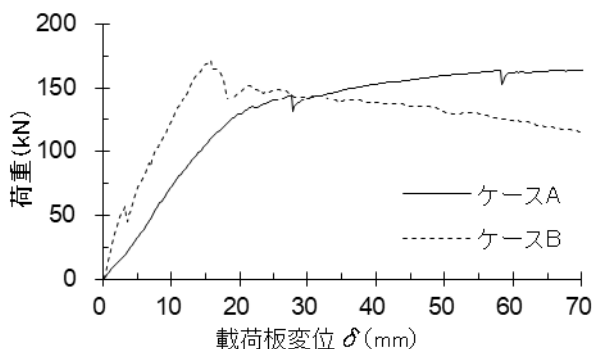


図-4 荷重と変位の関係（天端部）

開きが生じることによると考えられる。一方、継手が天端にないケースBは、初期の剛性は大きい、最大荷重後に荷重の低下が見られた。このようにセグメント継手の位置の違いによって覆工模型の変形挙動が異なる結果となった。

b) ボルト軸力

ケースAにおける、载荷実験により得られたボルト軸力と载荷板変位の関係を図-5に示す。これより、载荷板変位 δ の増加に伴い、ボルト軸力が増加するが、天端では $\delta=8.6\text{mm}$ の斜めひび割れ発生後に、左右アーチの継手部では $\delta=19\text{mm}$ の圧ぎ（圧縮破壊）発生後に、ボルトの軸力が低下している結果となった。

c) ひび割れ

実験によって得られたひび割れの状況を図-6に示す。ケースAにおいては、天端およびアーチの継手周辺に集中的にひび割れが発生し、その後圧ぎが発生した。

ケースBにおいても、継手周辺にひび割れが発生し圧ぎが発生しているが、ケースAとは異なり、天端内側にもひび割れが集中的に発生した。このことから、セグメント継手位置によってひび割れ発生傾向が異なることを確認した。

3. 载荷実験の再現解析

(1) 構造モデル

トンネル覆工模型の载荷実験の再現解析に用いたモデルを図-7に示す。覆工模型のモデルは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。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。载荷に伴う継手部分の開口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ばねを設置している。ケースA、ケースBともモデルの総節点数は14,700、総要素数は11,736である。

(2) 再現解析

a) 荷重と変位の関係

解析および実験により得られたセグメント覆工の天端部における荷重と変位の関係を図-8に示す。ケースAでは载荷位置変位10.0mm付近で剛性が低下するまでは、実験結果と概ね対応する結果が得られた。

また、ケースBにおいても、载荷位置変位2.5mm付近でいったん剛性が低下するまでは、解析結果と実験結果

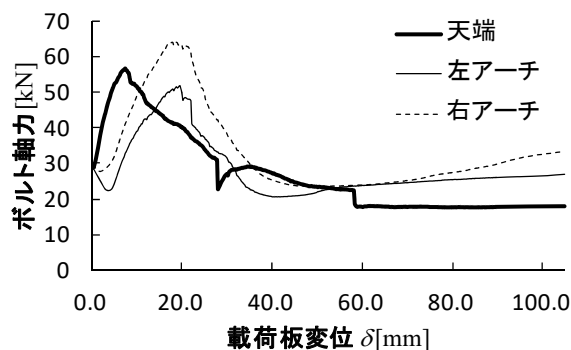


図-5 継手ボルトの軸力（ケースA）

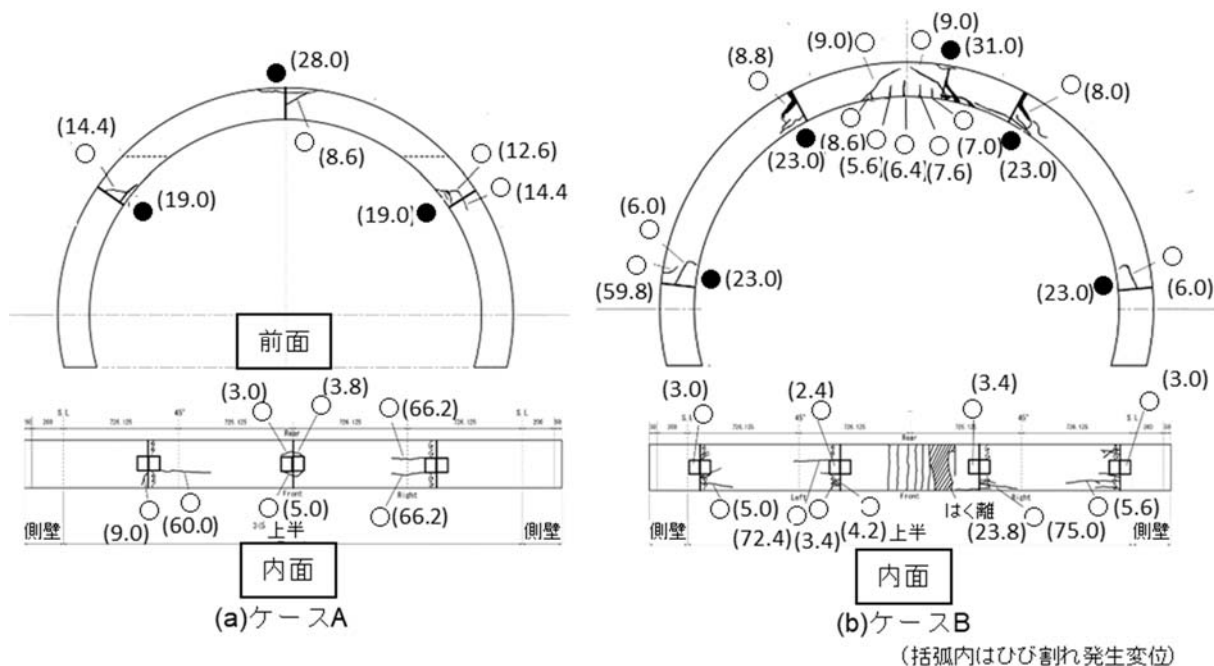


図-6 ひび割れ発生状況

が概ね対応した。解析を実施した2ケースにおいて、実験結果を概ね再現することができた。

b) ボルト軸力

ケースAについて、解析および実験より得られたセグ

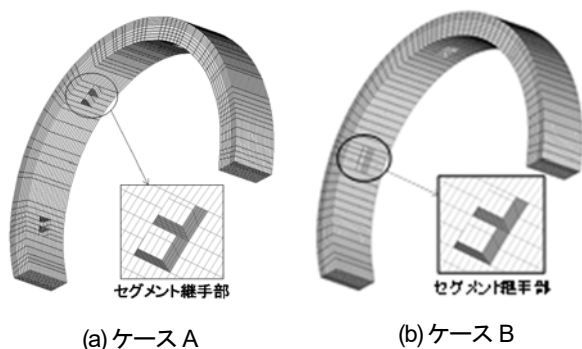


図-7 三次元解析で用いたモデル

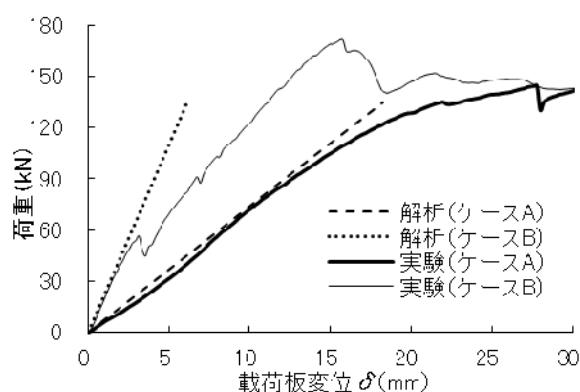


図-8 荷重と変位の関係

メント天端部の継手ボルト軸力を図-9に示す。解析と実験ともに載荷板変位の増加に伴い、天端部のボルトの軸力が増加する。載荷位置変位8.6mmでボルトの軸力が低下するまでは、実験結果を概ね再現することができた。

c) ひずみ分布

解析により得られたvon Mises (VM) 相当ひずみの分布を図-10に示す。

ケースAでは図-6に示すように、実験において載荷位置変位3.0mmでは、天端内面のボルトボックス付近にひび割れが発生し、載荷位置変位8.6mmにおいて、天端に斜めひび割れが発生している。また、載荷位置変位19.0mmにおいては、アーチ肩部の継手に圧ぎが発生している。解析により得られたひずみ分布については、実験と対応する位置にひずみの大きな領域が生じている。このことから、ケースAのひび割れ発生位置とひずみ分

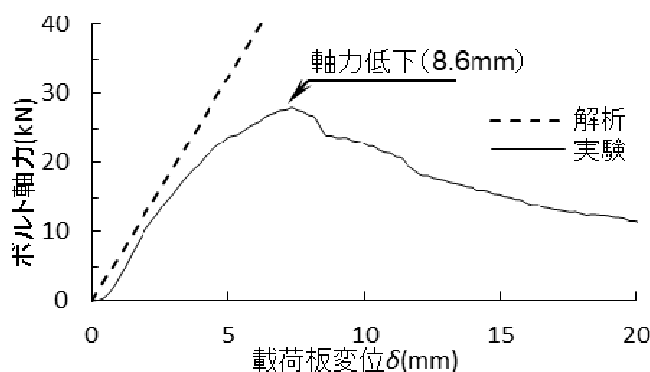


図-9 ボルト軸力 (ケースA)

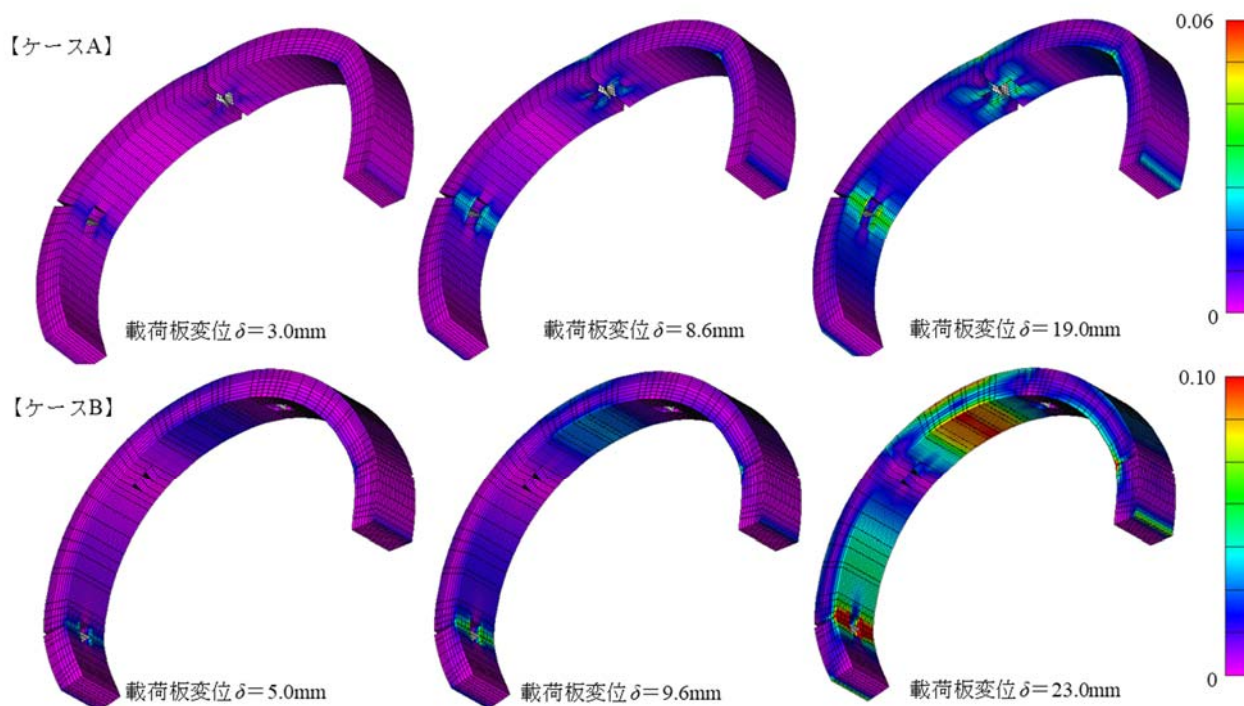


図-10 ひずみ分布

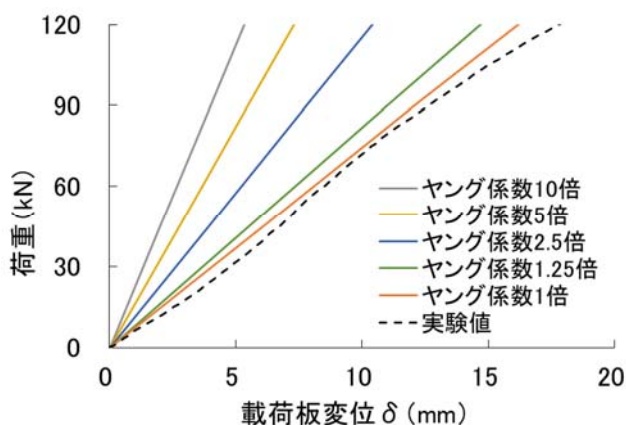


図-11 継手板の剛性を変えたパラメトリックスタディの結果（ケース A）

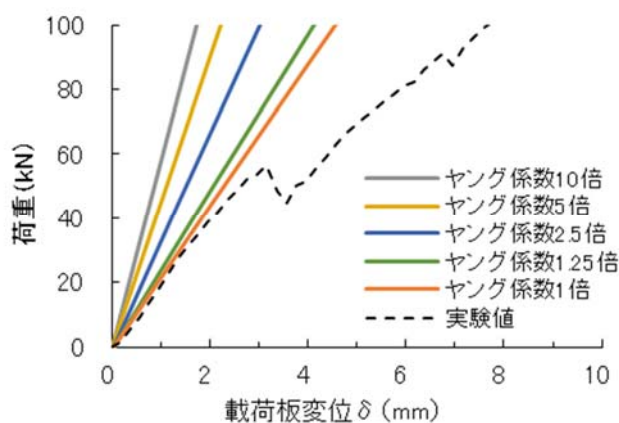


図-12 セグメント本体（載荷位置）の剛性を変えたパラメトリックスタディの結果（ケース B）

布は概ね一致していると考えられ、実験を概ね再現することができた。

ケースBでは図-6に示すように、実験において載荷位置変位5.0mmでは、天端内面にひび割れが発生し始め、載荷位置変位9.0mmにおいては、天端にひび割れが集中しており、斜めひび割れも発生している。また、載荷位置変位23.0mmにおいては、全ての継手において圧ぎが発生している。解析により得られたひずみ分布は、実験と対応する位置にひずみの大きな領域が生じている。このことから、ケースAと同様にケースBにおいてもひび割れ発生位置とひずみ分布は概ね一致していると考えられ、実験を概ね再現することができた。

(3) パラメトリックスタディ

トンネル覆工の物性値に着目したパラメトリックスタディ実施し、継手板やセグメント本体の剛性が解析結果に与える影響について確認をした。

a) 継手板のヤング係数

継手板の剛性が解析結果に与える影響を確認するため、継手板のヤング係数を1.25倍、2.5倍、5倍、10倍としたパラメトリックスタディを行った。継手板のヤング係数を大きくするとケースA、ケースBの両方において、解析結果の剛性が大きくなるが、特に図-11に示すケースAでは、継手板のヤング係数の影響を大きく受けることを確認した。

b) セグメント本体のヤング係数（載荷位置）

セグメント本体の剛性が解析結果に与える影響を確認するため、載荷位置のコンクリートのヤング係数を1.25倍、2.5倍、5倍、10倍としたパラメトリックスタディを行った。セグメント本体の載荷位置のヤング係数を大きくするとケースA、ケースBの両方において、解析結果の剛性が大きくなる結果となるが、特に図-12に示すケースBでは、セグメント本体のヤング係数の影響を大き

く受けることを確認した。

4. まとめ

本報告では、シールドトンネルのセグメント覆工を模擬した供試体の載荷実験と、実験の再現解析を実施した。また、解析において、トンネル覆工の物性値に着目したパラメトリックスタディ実施し、物性値が解析結果に与える影響について確認した。得られた知見は以下の通りである。

- ・実験により、セグメント継手の位置によって、荷重－変位曲線、ボルト軸力等の変形挙動が異なることを確認した。
- ・継手が天端部に位置するケースAでは、ひび割れや圧ぎがセグメント継手に集中して発生し、継手が天端部に位置しないケースBでは、天端の内側にひび割れが集中して発生するなど、セグメント継手の位置がひび割れ等の発生状況に影響することを確認した。
- ・三次元FEMによる数値解析によって、荷重－変位曲線、ボルト軸力、ひずみ分布について載荷実験の結果を概ね再現することができた。
- ・継手板やセグメント本体の剛性を変えたパラメトリックスタディを行い、継手が天端部に位置するケースAにおいては、継手板の剛性の影響が大きく、継手が天端部に位置しないケースBにおいては、セグメント本体の剛性の影響が大きいことを確認した。

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

ANALYTICAL INVESTIGATION ON MECHANICAL BEHAVIOR OF SEGMENTAL LINING

Kaho KINOSHITA, Kiwamu TSUNO and Takashi USHIDA

The shield tunnel is a complicated structure having a large number of joints connecting the segments, and it is thought that the situation of the joint exerts a great influence on the stiffness and strength of the lining. In this report, two cases of loading tests of specimens simulating the segment lining of shield tunnels were conducted and different deformation behaviors depending on joint position were grasped. In addition, we reproduced and analyzed the experiment with three-dimensional FEM and confirmed the validity of the analytical method by comparison with the experimental result. In the analysis, a parametric study was conducted focusing on the physical properties of the tunnel lining members, and the effect of the stiffness of the joint and concrete on the analysis results was confirmed.