

シールドトンネルの力学的挙動に及ぼす継手挙動に関する考察

東京都立大学 ○岡村 夏之助 倉橋 和希 砂金 伸治
日本製鉄 石田 宗弘 中島 正整 今福 健一郎

1. 背景および目的

シールドトンネルの覆工は横断方向および縦断方向に多くの継手構造を有しており，例えば地震動といった巨大な変形に対してトンネル構造自体の周辺地盤への追従性が高いと考えられている．近年，南海トラフなどの巨大地震のリスクが叫ばれる中，このような大変形を考慮に入れることが可能な限界状態設計法が規定され始めた．しかし，荷重やトンネルの破壊機構の正確な把握に加えて，トンネルの限界状態を明確に定義することが困難であり，実施例は多くはない¹⁾．本報ではシールドトンネルを模擬した模型実験と，はり-ばねモデルを用いた再現解析により，大変形を生じる場合の挙動を再現することを目的として，継手部分の挙動とトンネル全体の挙動の関連性を示すことを試みた結果について報告する．

2. 研究手法

2.1 模型実験

本実験では図 1 に示す奥行 100mm，外径約 100mm，覆工厚 5mm のシールドトンネル模型を作成した．模型は既報²⁾を参考に京壁，豊浦砂，水により作成したトンネル模型を完成後に一旦切断し，改めてセグメントを模擬すると考えたピース間を，継手を模擬した粘着テープで固定することで作成した．粘着テープには切れ込みを設け，その長さによって継手強度を変更できると考えた(図 2)．模型に対して図 3 に示す実験装置を用いてせん断変形を与えた．地山材料は自立性やその挙動の力学的な特性を考慮し，実験装置に対して奥行方向の長さが 100mm の円形のアルミ棒を使用し，模擬地山を作製した．表 1 にアルミ棒の物性値，図 4 に実験ケースを示す．本研究では，模型の分割数，継手の配置に着目し，実験では等六分割と等四分割の模型で継手の地山に対する相対的な影響が把握できると考えられるケースを各 2 ケースと真円形模型の計 5 ケースをそれぞれ 2 回ずつ実施した．

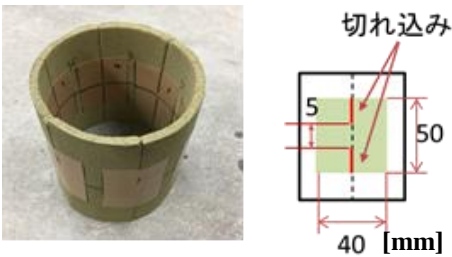


図 1 トンネル模型 図 2 継手寸法

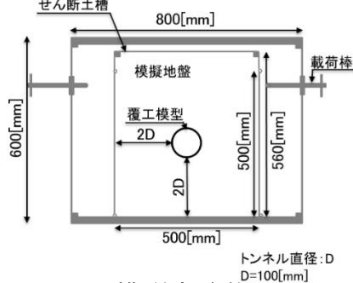
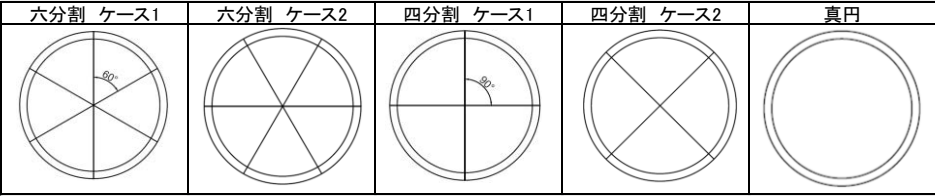


図 3 模型実験装置

表 1 アルミ棒物性値

材質	アルミ合金
長さ	100mm
径	$\phi_1=1.6\text{mm}$ $\phi_2=3.0\text{mm}$
重量混合比	$\phi_1 : \phi_2=3 : 2$
単位体積重量	$2.15 \times 10^{-5} \text{N/mm}^3$
内部摩擦角	30°
粘着力	0N/mm^2

図 4 実験ケース



2.2 1 リング模型実験再現解析

引き続いて，2.1 の模型実験に対して再現解析を行なった．全体の解析モデルを図 5 に示す．はり-ばねモデルでは，梁要素，地盤ばねのほかに，継手には軸方向ばね，せん断ばね，回転ばねを設けた(図 6)．模型の接触を模擬するため，軸方向ばねは 0.2mm の圧縮変位が発生した際に剛性が非常に大きくなるバイリニアのばねを導入した．また，せん断ばね定数は解の収束性を考慮し，最も安定して解析を行なうことができる 5.0N/mm を試行的に求めてその値に固定した．さらに，回転ばね定数は別途実施した本模型による 2 ピースを用いた曲げ試験から 100N・mm/rad を回転ばね定数と仮定した(表 2)．なお，本研究では実験装置の外枠に強制変位を与えることでせん断変形を模擬することから，実際に模型に作用する荷重が不明である．そのため，FEM 解析を別途実施し，覆工キーワード シールドトンネル，セグメント，継手，模型実験，骨組構造解析

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL 042-677-1111 (代表)

周辺の地山要素から応力を抽出し、それを作用荷重に換算することで考えた。本研究では応力の抽出方法を複数検討し、また、模擬地盤の弾性係数を2種類に分けたケースと、実験結果から得られた変位量を強制変位として覆工モデルに導入したケースを実施した。加えて、変形の途中経過を確認するために、各ケースの荷重レベルを変化させたケースも実施した。

図7は抽出方法のうちインターフェイス要素を用いたケースについての概要図である。インターフェイス要素を地山と覆工の間に設け、覆工が地山から受ける土圧を確認した。

3. 研究結果

3.1 模型実験結果

図8は再現解析の一例として六分割ケース2の結果である。与変位53mmで右上継手部より崩壊した。一部継手に目開きが発生し、粘着テープに剥離が生じた。模型の分割数や継手の配置箇所によりひび割れの発生や崩壊時の与変位量が変わる、すなわちトンネルの耐荷力が異なることが確認された。

3.2 模型実験再現解析結果

覆工に隣接している地山要素から応力抽出を行なったケースでは継手周辺のみが大きく変位し、トンネル構造全体としては実験結果と差異があった。一方、インターフェイス要素を使って応力抽出を行なったケースは実験結果ケースと同様の变形傾向がみられたものの、その変形量は実験の変位量の約3割程度であった。図9に荷重に3倍の補正を施した解析と実験の変位量を重ね合わせた。その結果、変形のモードについては両者が概ね一致することが確認された。また、継手においては、右肩部および左底部の継手が実験と比べて内空側に大きく変位している事象が見られた。

4. まとめ

覆工の軸方向、せん断方向に直ばね、回転方向には回転ばねを設けた継手モデルにより、概ね実験を再現できたと考えられる。FEM解析によって抽出される応力は既に覆工と地盤の相互作用が考慮されており、骨組構造解析への適用の際に地盤ばねによってさらに地盤からの拘束を受けているため変位が過小になっていると考えられるため、地盤ばねの課題に加え、回転ばね定数に関しては、軸力を考慮したモーメント・曲率関係を定量的に算定する手法の検討が必要である。また、任意の軸力を把握できる模型実験を新たに開発することともに、継手モデルが実際のトンネルのレベルにおいても適用できるか精査する必要がある。

参考文献

1) 土木学会トンネル工学委員会：トンネルライブラリー23 セグメントの設計【改訂版】～許容応力度設計法から限界状態設計法まで～,p.111,2010
2) 倉橋ら：シールドトンネルの大変形挙動に関する実験的考察，土木学会令和2年度全国大会第77回年次学術講演会，2020.9

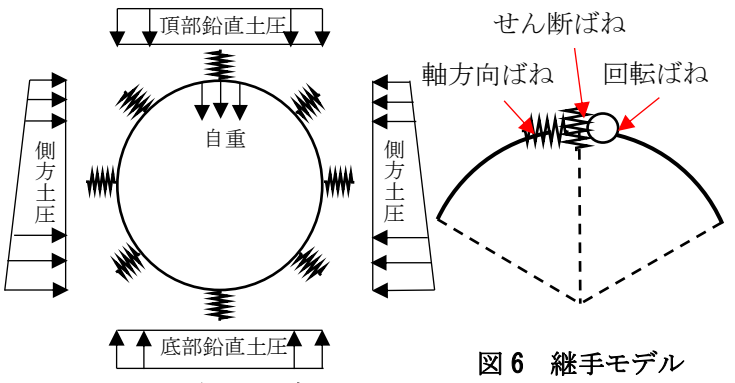


図5 解析モデル

図6 継手モデル

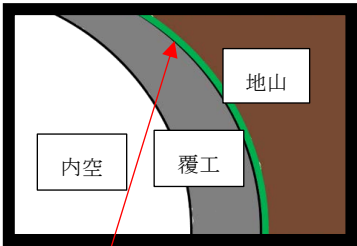


図7 応力抽出概要図

表2 各ばね定数

軸方向ばね	バイリニア
せん断ばね	50N/mm
回転ばね	100N・mm/rad

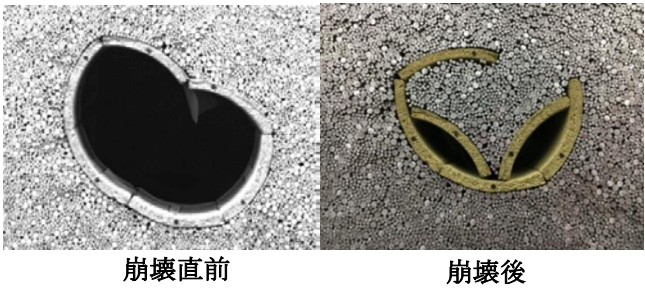


図8 実験結果

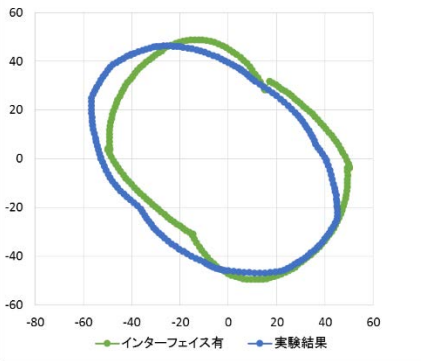


図9 変形図 重ね合わせ