

シールドトンネルの大変形挙動に関する実験的考察

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

1. はじめに

シールドトンネルの構造は一般的に縦断方向および横断方向に多くの継手を有しており、その継手はセグメント本体に比べ剛性が小さい場合が多く、構造全体としてフレキシブルな構造である。このためトンネルに対してたとえば地震に代表されるような大変形が作用する場合でも周辺地山に追従して挙動すると考えられ、トンネルの挙動はその変形に大きく支配されることになる。しかし、さらに過大な変形が生じて破壊された例はシールドトンネルではこれまでにほとんどないと考えられており、破壊やそれに至るまでの非線形時の挙動には不明確な点が多く残されている。本研究では1リングのシールドトンネルを模擬した模型にせん断変形を与え、過大な変形を受ける場合のシールドトンネルの破壊時の挙動を横断方向の継手との関係を考慮した模型実験により把握することを試みた。

2. 研究方法

2. 1 実験装置・模擬地山

本研究では図-1に示す実験装置を使用して、後述するシールドトンネル模型に単純せん断変形を与えた。この装置は、外枠と土槽にせん断変形を与えることのできる内枠、および外枠に取り付けられた载荷棒より構成され、载荷棒を1回転させるごとに载荷棒位置で土槽に1mmの変位を与えることができる。

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にアルミ棒の物性諸元を示す。

2. 2 シールドトンネル模型

図-2に奥行100mm、外径約100mm、覆工厚5mmのシールドトンネル模型を示す。作製方法は、初めに豊浦砂、塗壁材、水を重量混合比3:24:11で混合した材料によりセグメントの模型を作製する。そして、完成したセグメント間を図-3に示すガムテープでつなぎ合わせることで継手を有する1リングのシールドトンネル模型とした。

2. 3 実験方法

図-1に示した実験装置に底板より2D(D:トンネル径)の位置にトンネル模型を設置後、5Dまでアルミ棒を充填する。その後、30秒ごとに外枠に取り付けられた载荷棒を一回転させ、1mmの変位を与え、変位を与えるごとに画像解析用カメラで土槽を撮影して観察する。最終的に模型が崩壊する、もしくは与変位量が64mmに達した時点で载荷を終了させる。実験中はひび割れ発生等の観察を行うとともに、終了後に画像解析を行って、模型上のマーカーを追尾することにより模型の挙動を確認した。

2. 4 実験ケース

本研究ではシールドトンネル模型の分割数、継手の配置に着目した。図-4に実験ケースを示す。実験では等六分割と等四分割の模型で継手配置を変えたものを各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。

キーワード シールドトンネル、セグメント、継手、破壊、模型実験

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

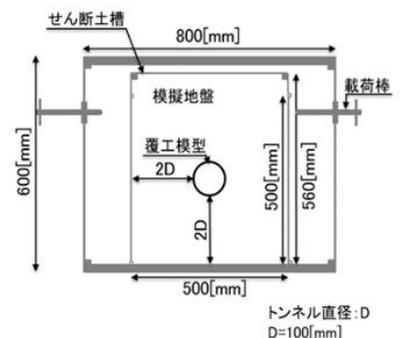


図-1 実験装置概要図

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	$\phi_1 : \phi_2 = 3 : 2$
単体体積重量	21.4 kN/m^3
内部摩擦角	30°
粘着力	0 kN/m^2



図-2 トンネル模型

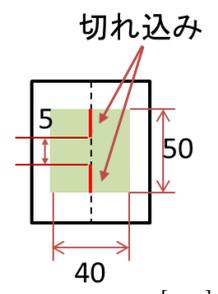


図-3 ガムテープ寸法

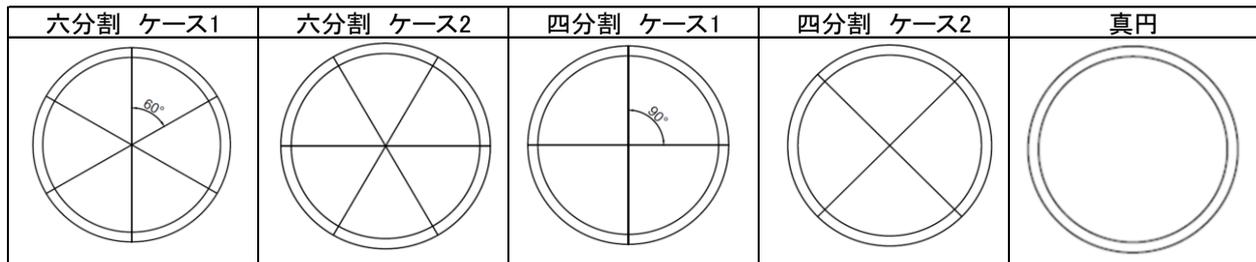


図-4 実験ケース

3. 研究結果

図-5 に与変位後の模型及び最終与変位をまとめた結果のうち、それぞれ1回目の結果の例を示す。なお、図については破壊直前の模型の画像を示している。真円形模型では、与変位 64mm で右上のひび割れより崩壊した。六分割では、ケース1において与変位 64mm で模型は崩壊しなかったが、ケース2では与変位 53mm で右上継手部より崩壊した。四分割ケース1では与変位 54mm で右上部のひび割れより崩壊したが、ケース2では与変位 64mm で崩壊は発生しなかった。また、2回目の結果については、六分割のケース2で64mmまで崩壊しない結果となり、また、四分割ケース1では左下より崩壊が発生したが、変形モードは概ね同一であり、それ以外のケースはほぼ同様の結果が得られた。六分割両ケース及び四分割ケース2では一部継手に目開きが発生し、ガムテープに剥離が生じた。真円形と四分割ケース1では模型の各45度方向にひび割れが発生したが、他ケースではセグメントに変状は見られなかったため、継手の目開きによりひび割れが抑制されていることが考えられる。以上より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化する、すなわちトンネルの耐荷力が異なることが確認されたが、積層体の作成や継手の存在およびその特性等にもなる結果へ与える影響があることも想定され、さらなる検討が必要である。

図-6、図-7 に図-5 に示したケースと同様のケースにおける画像解析による六分割と真円形の断面変形量に関する結果を示す。本研究では斜め45度方向の2点間距離において、変形量が減少するものを短軸、変形量が増加するものを長軸と呼称する。長軸では六分割、真円形ともにほぼ同一の値となった。しかし、短軸ではケース2においてケース1と比較して与変位 46mm 程度より傾きが小さくなり断面変形量が大きくなっており、変形量の観点からも継手の配置によって挙動が異なることがわかる。また、真円形についてケース1の崩壊直前を除けば、全体的に変形量が六分割より大きいことが確認できる。

4. まとめ

本研究では簡易な材料を用いることにより模擬したシールドトンネル模型にせん断変形を与えることにより過大な変形が生じた場合のトンネルの破壊挙動を再現した。その結果、模型の分割数や配置箇所により挙動が変化することが確認された。今後は実験の再現解析を実施して比較を行うとともに、継手等の特性による変形および破壊に与える影響を照査し、非線形を示す挙動や破壊のメカニズム、および耐荷力に関する検討を行う必要がある。

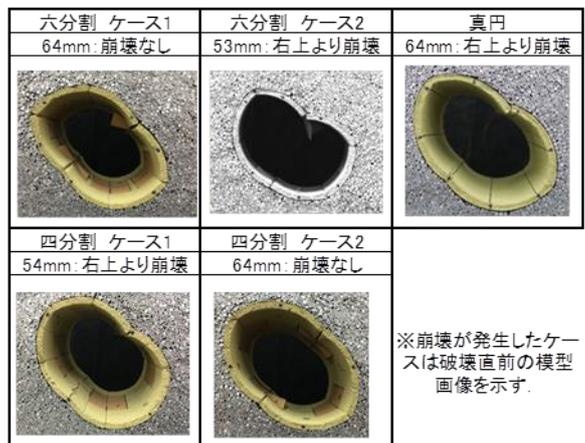


図-5 実験結果まとめ

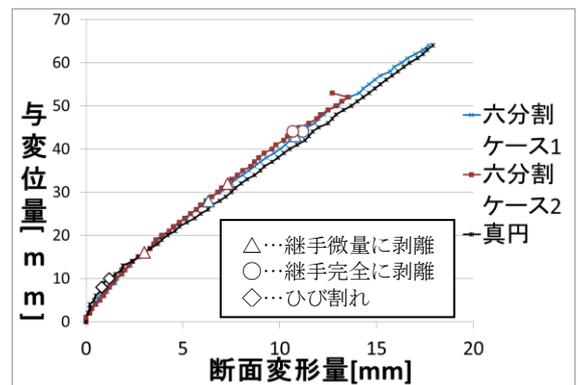


図-6 長軸 断面変形量

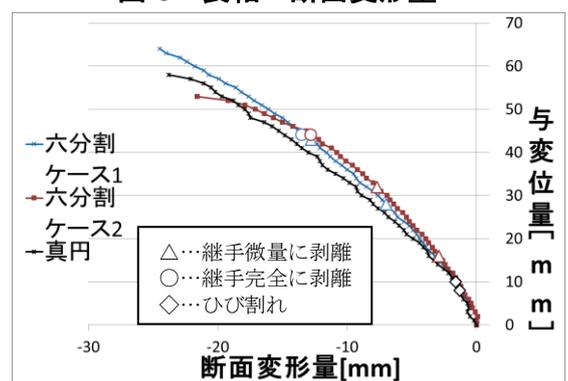


図-7 短軸 断面変形量