

継手特性を考慮したシールドトンネルの大変形挙動に関する実験的研究

東京都立大学 ○倉橋 和希 河田 皓介 砂金 伸治

1. 研究背景・目的

シールドトンネルはトンネル軸方向及び断面方向に多くの継手を有し、それ自体はセグメント本体に比べて剛性が小さく、全体としてフレキシブルな構造となっている。このため、トンネルの挙動は地震に代表される大変形時には周辺地盤に追従した変形に支配されやすいと考えられている。しかし、過大な変形が生じてトンネルが破壊に至った事例はこれまでにほとんど報告されておらず、被害発生メカニズムには不明瞭な点が多い。本研究ではシールドトンネルを模擬した模型実験を行い、大変形を受ける場合の変状の発生メカニズム、及び継手特性を変化させた場合のシールドトンネル構造全体の挙動に及ぼす影響を把握することを目的とし、変状や崩壊の抑制につながる構造の考え方に関して検討を行った。

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、シールドトンネルを模擬した模型に単純せん断変形を与えた。装置は反力フレーム右肩に取り付けられた载荷棒により、せん断土槽に変形を与える構造で、最大与変位は64mmである。

模擬地山には砂礫等に比重が類似し、扱いやすく、壁面との摩擦を無視できる**表-1**に示す諸元のアルミ棒積層体を使用した。

2. 2 トンネル模型

図-2にトンネル模型を示す。模型は奥行き及び外径約100mm、厚さ5mmで、六分割の模型を2リング作成し千鳥組で設置した。材料は豊浦砂、塗り壁材、水を重量混合比3:24:11で混合し、乾燥させて使用した。材料物性値を**表-1**に示す。

2. 3 模型継手

模型継手の素材には、テグス、ビニール被覆電線を使用した。**表-2**に示す、セグメント継手とリング継手の組み合わせをパラメータとしてその特性がトンネルの挙動に及ぼす影響を確認した。各継手の期待性能として、タイプA、Raはせん断抵抗力、曲げ抵抗力がないものである。また、タイプB、Rbは片方向にのみ継手間のずれに抵抗でき、継手高さが高く良好なかみ合わせを有する。さらに、タイプCはタイプBの継手配置を変更し、両方向への継手間のずれに抵抗できるが、抵抗面が小さい。そして、タイプD、RdはタイプB・Cと比較して継手高さが低く、かみ合わせに劣るが、比較的大きな抵抗面で両方向に対して継手間のずれに抵抗できる。タイプB、C、Dは継手部の隙間により変形の吸収を期待した。なお、継手に使用した素材は剛性が低く、模型の挙動に追従する。また地山設置時の模型の支保、目開き挙動の再現を目的にセグメント継手にのみガムテープを設置したが、設置しないケース（以下継手タイプの後に_{ng}と表記）も実施し、その有無による差も検討した。

2. 4 実験方法

図-1に示した装置の底版及び側板より2D(D:トンネル径)の位置にトンネル模型を設置後、天板までアルミ棒を充填する。载荷は载荷棒により変位制御(1mm/30秒)で行った。装置の最大与変位、もしくは模型が崩壊した時点で载荷を終了した。

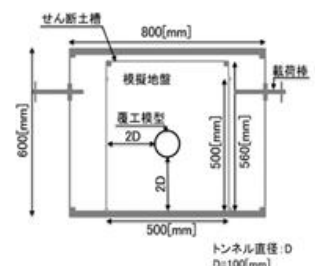


図-1 実験装置

表-1 アルミ棒・模型物性値

アルミ棒積層体	
材質	アルミ合金
長さ[mm]	100
直径[mm]	1.6 : 3.0
重量比	3 : 2
単位体積重量[kN/m ³]	21.4
粘着力[N/m ²]	0
内部摩擦角[°]	30
模型物性	
圧縮強度[MPa]	0.57
弾性係数[MPa]	56



図-2 トンネル模型

表-2 継手構造

タイプ	セグメント継手縦断面	横断面
A(Ra)		
B(Rb)		
C		
D(Rd)		

※Ra, Rb, Rdは上記の継手をリング継手で使用

キーワード シールドトンネル, 大変形, 継手, 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)

結果は目視によりひび割れや継手の破壊などを観察し、画像解析による断面変形量の測定等を行い、模型の挙動を確認した。

3. 研究結果

図-5に与変位後の模型の画像を示す。なお、崩壊したケースは崩壊直前の画像を示す。初めに、セグメント継手の構造による挙動の傾向について、タイプAでは、ガムテープ無のケースでは右肩継手部の変形が崩壊の発生につながり、引張抵抗の差が継手の挙動に影響を及ぼした。タイプBでは、Aと比較して鉛直、側壁中央部における継手ずれや、右肩・左下での変形の増大がみられた。タイプCでは、Bと比較して鉛直方向や右肩、左下での変形が抑えられているが、一部ケースで側壁中央の継手部が破壊し、大きなずれ等が発生した。また、継手破壊時には継手が噛み合わずに破壊していた。タイプDでは、継手部でずれが発生したが、ガムテープによる引張抵抗の差や、リング継手の構造でずれの度合いが変化した。しかし、ケースCのような水平部における継手破壊・大きなずれは発生しなかった。以上より、継手高さや材質による影響、すなわち、かみ合わせや剛性による影響や継手配置によって、その継手特性が変化し、模型の挙動に影響を及ぼすことを確認した。

次にリング継手の構造による挙動の傾向について、タイプRbでは、セグメント継手Bと組み合わせた場合に右肩・左下の変形が小さくなるなど、その挙動が変化した一方、セグメント継手にタイプA、Cを組み合わせたケースでは、Raを用いたケースですでにリング間の挙動差が小さかったため、リング継手の違いによる影響がほとんど見られず、セグメント継手構造によりその特性の表れやすさが異なった。また、タイプRdでは、特にセグメント継手タイプD_{ng}と組み合わせた場合において、タイプRbと比較して、セグメント継手及び模型の挙動が大きく変わった。特徴として、タイプRdはRbと比較して変形伝達性能を持つため、セグメント継手の大きなずれを抑制でき、さらに隙間により、リング間挙動差を適切に許容できることで、他方のリング継手部の目開き・変形によるひび割れ発生を抑制できることが分かった。以上より、継手特性にくわえ、セグメントとリングの継手特性の相互作用により、トンネルの挙動が変化することが分かった。

崩壊が発生したケースでは、すべて右肩の継手及び、付近のひび割れより崩壊していた。崩壊要因は、図中に赤丸で示す、右肩部の大きな継手間のずれ・変形、側壁中央の継手間のずれ・破壊等が考えられる。つまり、上半肩部の継手間のずれ・ひび割れ・変形の抑制、側壁中央の継手間のずれの抑制等が崩壊の抑制につながると考えられる。崩壊抑制の傾向が得られているケースとして、ケースD_{ng}-Rdにおいては、継手が隙間の範囲でわずかにずれることで、右肩部のひび割れが抑制されたと考えられる。また、リング継手も変形伝達性能を保つことで、セグメント継手の大きなずれを抑制しつつ、リング間挙動の差を許容することで、他方のリングの継手部の変形による崩壊に至るようなひび割れ・変形を抑制していると考えられる。以上より、少量のセグメント継手のずれや、リング間挙動の差を適切に許容することで、セグメント本体の変状や崩壊の抑制につながると考えられ、また、その適切な評価が重要であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では継手特性を変化させたシールドトンネル模型にせん断変形を与えた模型実験を通じて、セグメント継手、リング継手の特性により、変形挙動が異なることを確認した。また、継手部で少量の変形を許容することでひび割れや崩壊につながる変形を抑制できる可能性があることが分かった。今後の課題としては具体的な継手部の変形量や実構造物との比較について、数値解析を用いた検討や実験において地山条件・荷重条件の変更を行った検証が必要である。

継手構造	セグメント 継手	リング継手	セグメント 継手	リング継手
最終変位	A	Ra	A _{ng}	Ra
最終変位	64mm：崩壊無し		59mm：右肩より崩壊	
与変位後 模型				
継手構造	B	Ra	B	Rb
最終変位	64mm：崩壊無し		64mm：右肩より崩壊	
与変位後 模型				
継手構造	C	Rb	D	Rb
最終変位	64mm：崩壊無し		64mm：崩壊無し	
与変位後 模型				
継手構造	D _{ng}	Rb	D _{ng}	Rd
最終変位	64mm：崩壊無し		64mm：崩壊無し	
与変位後 模型				
継手構造	D _{ng}	Rb	C _{ng}	Rd
最終変位	61mm：右肩より崩壊		64mm：右肩より崩壊	
与変位後 模型				

図-5 与変位後の模型