

トンネルの大変形破壊挙動に関する実験的研究

東京都立大学大学院
東京都立大学大学院
東京都立大学

学生会員 ○森田 倫先
正会員 砂金 伸治
正会員 西村 和夫

1. はじめに

これまで大規模な地震の発生や膨張性地山に位置することなどにより山岳トンネルに大きな外力が作用し、トンネルが大変形・破壊した事例が散見されている。しかし、その破壊のメカニズムや大変形から破壊に至るまでの挙動は明らかになっていない部分が多い。そこで、本研究ではこのような挙動やメカニズムを簡易に把握出来ることを目的とした模型材料および載荷方法を開発し、模型実験手法として提案することを試みた。また、本手法を用いてトンネルに大きな外力が作用したと想定した場合の実験を行い、トンネルが大変形し、破壊時およびそれに至るまでの挙動や耐荷力の差異を検討した。

2. 実験装置および実験材料

模型実験では図-1に示す装置を用いた。本装置は、反力フレーム側板に取り付けられた載荷棒による土槽の変位が、模擬地山を通してトンネル模型に単純せん断変形を与える構造となっている。

模擬地山には、物性の変化がなく再現性が高いことや一般の砂の内部摩擦角に近いことなどから表-1に示す諸元のアルミ棒積層体を使用した。

実験装置の載荷力の制約から、トンネル模型は低強度な材料で作製する必要があったため、木粉や砂、接着剤などを含有する塗壁材に、豊浦砂と水を質量比 1:8:4 で混合したものを模型材料として用いた。材料試験によって算定した模型材料物性を表-2に示す。

3. 実験条件

実験ケースは、トンネルの破壊挙動に影響すると考えられるインバート部の構造半径比（インバート部 R/上半アーチ部 R）とインバート厚をパラメータとして表-3に示す6ケースとした。図-2に示す寸法のケース1は一般的な2車線道路トンネルの約1/100スケールであり、インバート部の構造半径比は3.0Rとした。トンネル模型の巻厚は5mmを基本とし、ケース2と4はインバート部のみ巻厚8mmとした。奥行きはいずれも100mmで、側壁とインバートの間の打継ぎ目は無いものとした。

4. 実験方法

最初にアルミ棒を土槽に底板から20cmまで積み、ひずみゲージを貼り付けたトンネル模型を土槽側板から2D（D：トンネル径）、底板から模型天端まで3Dとなる位置に設置、その後アルミ棒を土槽天板まで積み上げた。載荷は変位制御と考えることができ、載荷棒で1mm（地山のせん断ひずみ $\Delta/H=0.22\%$ 、定義を図-3に示す）の変位を30秒間隔で与えた。変位は最大で65mm（ $\Delta/H=14.4\%$ ）まで与え、模型が途中で崩壊した場合はそれ以上の変位は与えなかった。実験では、目視によるひび割れの観察、模型のひずみ計測、画像解析による模型の変形量を計測した。

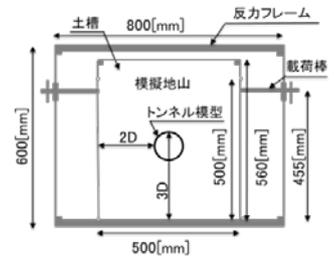


図-1 実験装置概要

表-1 模擬地山の諸元

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/mm ²)	0
内部摩擦角(°)	30

表-2 模型材料の物性

圧縮強度(MPa)	0.4
引張強度(MPa)	0.06
弾性係数(MPa)	41

表-3 実験ケース

ケース	インバート構造半径比	インバート厚
1	3.0R	5mm
2	3.0R	8mm
3	2.0R	5mm
4	2.0R	8mm
5	1.5R	5mm
6	1.0R	5mm

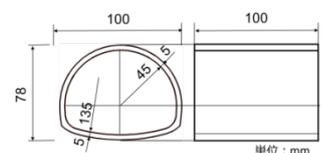


図-2 トンネル模型寸法

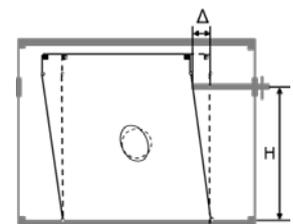


図-3 Δ/Hの定義

キーワード トンネル, 耐荷力, せん断変形, 模型実験

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

5. 実験結果

図-4 に各ケースのひび割れ発生箇所を示す。地山にせん断ひずみを与えると、ケース 1~3 は上半アーチの 45 度方向に曲げ引張ひび割れが発生するとともに盤ぶくれが発生し、インバート中央部にもひび割れが発生した。ケース 4~6 は、盤ぶくれは発生せず、地山の変形に追従して模型もせん断変形したため、45 度方向に曲げ引張ひび割れが発生した。地山にさらに大きなせん断ひずみを与えると、ケース 1~3 は、上半アーチに発生したひび割れ幅が拡大するとともに盤ぶくれも進行し、インバート中央部が内空側に跳ね上げられるように崩壊した。盤ぶくれが発生しなかったケース 4~6 は、模型中心から 45 度方向に発生したひび割れ幅が拡大し、模型内側に発生したひび割れから崩壊した。図-5 にケース 1 およびケース 6 の崩壊後のトンネル模型を示す。

図-6 に各ケースの変状発生時の地山のせん断ひずみを示す。図より、インバートの構造半径比を小さくし、真円に近づけるほどひび割れおよび崩壊の発生時の地山のせん断ひずみが大きくなり、耐荷力が向上していることが実験からも分かる。また、インバートの増厚を行ったケースは、増厚をしていないケースと比べてひび割れの発生時の地山のせん断ひずみが大きくなっている。これは、インバート部の剛性が向上することにより、構造全体の剛性が向上しており、変形が抑制されているためと考えられる。

アルミ棒積層体で模擬した未固結粒状体地山においてせん断変形を受けるトンネルの場合、インバートの構造半径比を小さくし真円に近づけることや、インバートの増厚を行うことによって盤ぶくれが発生する変形モードから、せん断変形し 45 度方向にひび割れが発生する変形モードへと変わることが確認できた。インバートの構造半径比を小さくする、もしくはインバートの増厚を行うことでトンネルの耐力は向上し、大変形したのちに崩壊に至るまでにより大きな外力を要する。ただし、ケース 4 はケース 2 に比べて崩壊時の地山のせん断ひずみが小さくなっており、インバートの構造半径比を小さくするとともに増厚し、インバートの剛性のみが局所的に上がった場合、上半アーチや隅角部など他の箇所が相対的に弱部となり、トンネルの耐荷力の向上につながらない可能性がある。そのため、インバートの剛性を上げる場合、トンネル構造全体の剛性を上げることを検討する必要があることが本実験結果からも裏付けられたと考えられる。

なお、本実験では、通常地震では起こり得ないと考えられるせん断ひずみ 14.2% を模擬地山に与え、模型がひび割れたのちに大変形し、崩壊に至るまでの過程を全ケースで確認した。相似則等の課題はあるものの、これまでの実績等によって得られているトンネルが破壊した結果とも定性的に一致していると考えられ、本実験手法を用いることによりトンネルの破壊時およびそれに至るまでのメカニズム等を把握することが可能であると考えられる。

6. まとめ

本研究では塗壁材等の材料を模型材料として開発し、使用したところ、ひび割れや崩壊といった変状のメカニズムを簡便に再現し、確認できたことから、この材料は簡易なトンネル模型材料として適用可能なものであると考えられる。また、アルミ棒積層体の模擬地山に単純せん断変形を与える実験装置を使用したところ、地震時や膨張性地山によりトンネルに生じる外力を模擬することができ、トンネルが大変形から破壊に至るメカニズムを把握することができた。しかし、実際のトンネルはアルミ棒積層体で模擬する未固結粒状体地山に限らず存在しており、また、鉛直方向や側方からの外力も作用するため、地山条件を変更した場合、他の外力が作用した場合の挙動についても検討する必要がある。

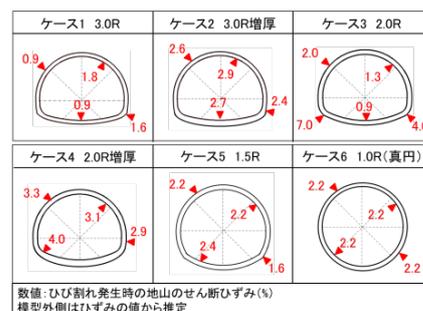


図-4 ひび割れ発生箇所

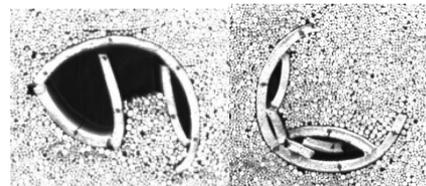


図-5 崩壊後のトンネル模型
(左:ケース 1, 右:ケース 6)

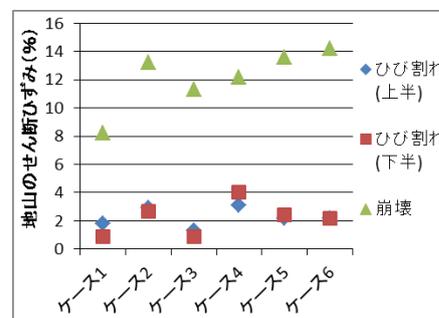


図-6 変状発生時期