

めがねトンネル周辺の応力場と 安定性に関する検討

玉城道雄^{*1}・藍檀オメル²・渡嘉敷直彦³・富山潤⁴・堀内浩貴⁵

^{*1}琉球大学工学部 環境建設工学科(〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地)

E-mail: e165343@eve.u-ryukyu.ac.jp

²琉球大学工学部 工学科社会基盤デザインコース(同上)

³琉球大学 地殻工学防災研究所(同上)

⁴琉球大学工学部 工学科社会基盤デザインコース(同上)

⁵琉球大学大学院理工学研究科 環境建設工学専攻(同上)

近年、軟岩においてめがね(双設)トンネルの施工には無導坑方式の施工例が増加している。このめがねトンネルは、離隔距離を確保できない場合でも採用せざるを得ない事例が多数みられる。2本のトンネルの間の距離(以下ピラー幅と呼ぶ)が狭すぎる施工例が多数あり、地表面沈下の抑制や崩落防止を含め、トンネルの安定性を確保する観点から無導坑方式の設計の改善およびめがねトンネル周辺の応力場を調べることが重要視されている。今回、底面摩擦模型実験、光弾性試験および有限要素解析を行い、ピラー幅の違いから周辺の応力場とトンネルの安定性を検討した。その結果、底面摩擦模型実験では、先行研究と同様にピラーから破壊すること、光弾性実験では、ピラーの応力が他の部分と比べ大きいことが分かった。

Key Words : twin tunnel, model test, FEM, stability

1. はじめに

近年、岩盤においてめがねトンネルの施工には無導坑方式の施工例が増加している(写真-1)。しかし、ピラーを構築しない無導坑方式は、トンネル間の距離が狭すぎるとピラーが破壊し、地盤沈下や岩盤崩落といった岩盤の安定性に影響を与える可能性がある。しかし、現場によっては、2本のトンネル間の距離(以下ピラー幅と呼ぶ)を十分に確保できない状態で施工されている事例が多数存在する^{1) 2) 3)}。そのほとんどは、トンネル掘削前に施工したピラーを利用する導坑方式であり、ピラーを構築しない無導坑方式の設計・施工時に生じる問題点は未だに解明されていない。

一般的にピラー幅の安全を保つことができる離隔距離は、図-1に示すように、地質条件によって変化することを考慮し、掘削時の2倍(硬質な地山の場合)から5倍(軟質な地山の場合)程度と推奨されている⁴⁾。従来では、離隔距離を上手く確保できない場合、補助工法を採用して補強を行うが⁵⁾、無導坑方式は地山がそのままのピラーとして機能する。後藤ら⁶⁾はピラー幅に関する安定性の研究を行い、底面摩擦模型実験よ



(a) ひやごんトンネル (b) 織名トンネル
 写真-1 無導坑方式で施工されためがねトンネル

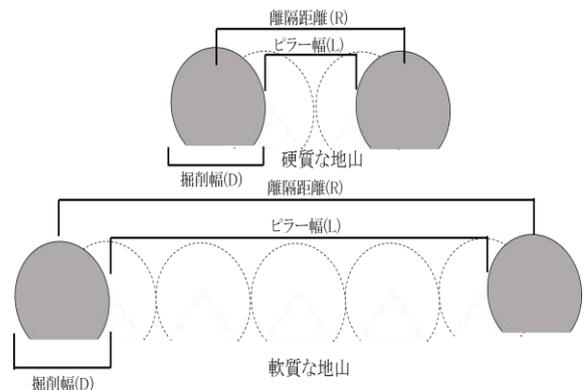


図-1 近接トンネルの離隔距離(文献⁴⁾を加筆)

り短形トンネルが崩壊しないための離隔距離は1.6D(Dはトンネルの掘削幅)以上必要であると報告している。

これまでの知見を踏まえ、従来までの沖縄県におけるトンネルの施工では、ピラー幅Lが1m前後(離隔距離 $R \approx 1.1D$)と狭小の施工が多数存在する。地表面沈下の抑制や崩落防止に努めることを踏まえ、トンネルの安定性を確保する観点から無導坑方式の設計の改善およびトンネル周辺の応力場を調べることが重要視されている。以上から、本研究では、底面摩擦模型実験、光弾性試験及び有限要素解析を行った。ピラー幅の違いからその周辺の応力場とトンネルの安定性に関する検討を行い、ピラー幅を十分に確保することの重要性を示した。

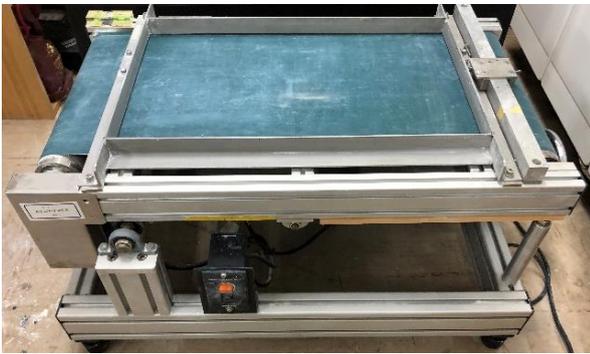


写真-2 底面摩擦模型実験装置

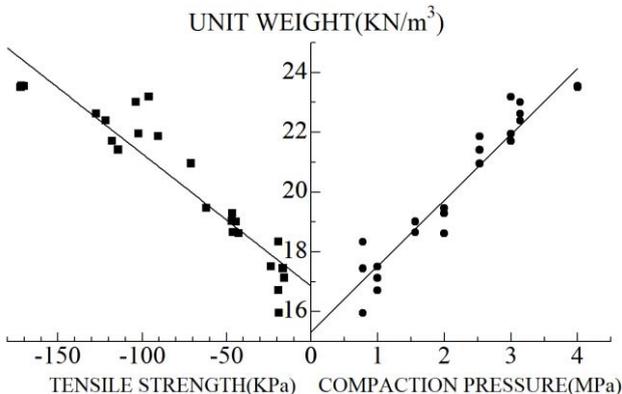


図-2 単位体積重量別による圧縮強度と引張強度の関係⁸⁾

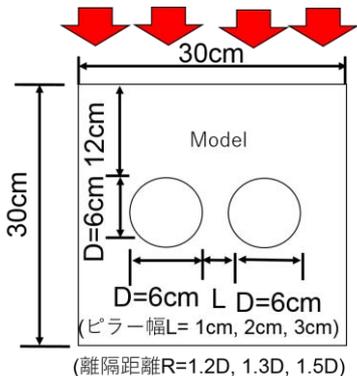


図-3 底面摩擦模型実験モデル

2. 模型実験

本章では、本研究で行った底面摩擦模型実験および光弾性実験の各実験概要、結果および考察を述べる。

(1) 底面摩擦模型実験

本実験では、ピラー幅を変更した場合におけるトンネルの崩壊形態を調べるため、底面摩擦模型実験装置を用いて模型実験を行った。

a) 底面摩擦模型実験の概要

本実験に用いる底面摩擦模型実験装置を写真-2に示す。この装置は模型とベルトとの間に摩擦力を発生させ、重力場を再現し様々な崩壊形態などを確認できる装置である。図-2に示すように、摩擦力によって、模型内の応力分布が重力場における応力状態と相似関係にある⁸⁾。本実験ではトンネルの破壊状況のみに注目するものとし、変形に対する相似性を考慮しない。

b) 模型材料・実験方法

ここでは、底面摩擦模型実験の模型材料および実験方法について説明する。

模型材料として、本実験では川本らが行った研究⁷⁾と同じ硫酸バリウム(BaSO₄)、酸化亜鉛(ZnO)、白色ワセリンを70:21:9の重量比で配合したものを用いる。この材料は図-2に示すように、強度が単位体積重量に依存しており、模型に要求されている強度を比較的容易に変化させることができる⁸⁾。

実験方法は、図-3に示すように、直径D=6cmの円形のトンネルを模擬した空洞を作製し、土被り厚を12cmとした。また実験パターンは、ピラー幅L=1cm/2cm/3cmとし、それぞれの離隔距離R=1.2D/1.3D/1.5Dになるように設定したものである。この3種類の実験パターンとし実験結果を比較した。

c) 底面摩擦模型実験の実験結果および考察

実験後の各パターンの破壊状況を写真-3-A - Cに示す。全ての実験パターンにおいて、ピラーから破壊し、二つのトンネルを含む地山が押しつぶす様子が確認できた。これは、後藤ら⁶⁾の実験パターン(1.1D/1.2D/1.4D/1.6D)の実験結果と比較し、1.6D以外、同様な破壊状況が観察された。すなわち、1.5D以下は同様の破壊状況になると考えられる。しかし、今回の実験で見られた破壊状況は模型側方の境界条件による影響も考えられる。また模型のトンネルの空洞部分を作成する際、実験前にひび割れが生じやすいことが観察された。そのため、模型材料の強度設定や側方の境界条件を考慮した型枠を作成することが課題に挙げられた。

(2) 光弾性実験の解析検討

本実験では、単一トンネルとめがねトンネルのトンネル周辺の応力場を調べるため、光弾性実験を行った。本節では光弾性実験により得られた結果を述べる。

a) 光弾性実験の概要

光弾性実験は、偏光の性質を利用し、等方等質の透明体をモデルに用いて、トンネルや斜面内部の応力場を目視観察できる実験である。本実験では、図-5 に示すように偏光レンズを付けたカメラと光源装置を用いて実験を行った。

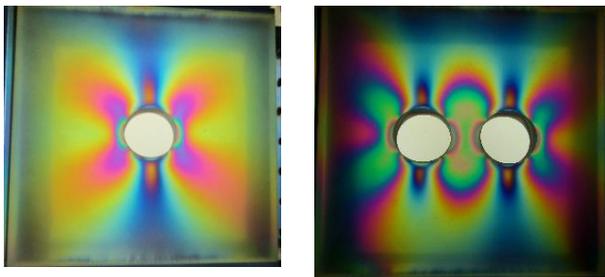
今回の実験では、材料としてゴム状のポリウレタン (polyurethane) を用いた。この材料は高反発弾性があり、硬度が広範囲に選択できる⁹⁾。供試体は、トンネルを模擬するため、単一トンネルとめがねトンネルの模型を用意した。単一トンネルは、直径 $D=40\text{mm}$ の孔にした。一方で、めがねトンネルは、 40mm の孔を二つと、ピラー幅 $L=20\text{mm}$ 、離隔距離 $R=1.5D$ とした。



A : L=1cm B : L=2cm C : L=3cm
写真-3 底面摩擦実験モデル



図-5 光弾性実験の概念図



(a) 単一トンネル (b) めがねトンネル

図-6 光弾性実験の結果

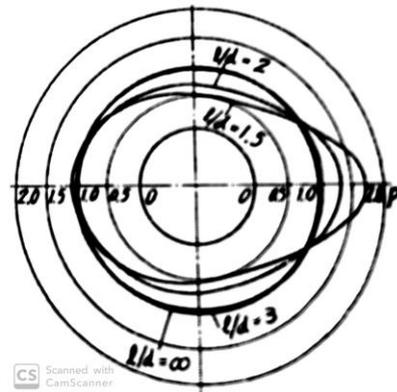


図-7 円孔周辺の切線応力分布¹⁰⁾

b) 光弾性実験の実験結果

図-6 に光弾性の実験結果を示す。(a)単一トンネルでは、左右対称に応力が表れており、最大せん断応力が両側方の一部で見られた。(b)めがねトンネルでは、ピラーに等色線縞が多く見られ、他の応力と比べ高いように見られる。底面摩擦模型実験で最初にピラーが破壊したことから、ピラーが他の応力と比べ高いことは関連していると考えられる。また、川本¹³⁾は、本研究の材料と実験方法は異なるが、光弾性実験で複数のめがねトンネルを用いて図-7 のように円孔周辺の切線応力を示している。図-7 からピラー付近の応力は接近すると増大するとの指摘がある¹³⁾。

今回の実験では、左右非対称的な応力が表れているのが見られた。ポリウレタンに荷重を正確かつ均等に加えていなかったことが左右対称にならない原因だと見込まれる。また、荷重を加える際、縞次数や等傾線は目視による誤差を起こす可能性がある。今後の課題として、自重場で観察ができるゼラチンを用いて光弾性実験を進めること、ゼラチンの材料配合については Richard, Jr. and Mark¹⁰⁾を参考にトンネル周辺の応力状態の検討することが挙げられる。

3. 有限要素解析による検討

トンネル周辺の応力場について、光弾性実験の結果と比較するために有限要素解析を行い、実験結果の妥当性を検証した。本章では、その比較結果について論述する。

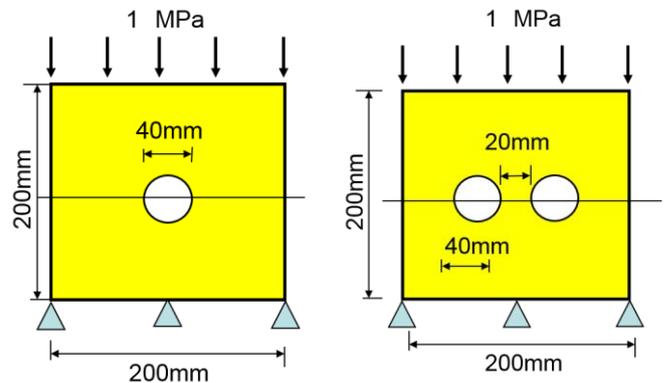


図-8 : 解析モデル(左)単一トンネル(右)めがねトンネル

表-1 ポリウレタン光弾性モデルに用いた物性値

荷重 (MPa)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
1	100	0.3

(1) 有限要素解析と光弾性実験結果の最大せん断応力分布の比較

通常の光弾性実験では、等色線や等傾線で最大せん断応力または主応力方向が得られるが、今回の実験は負荷を加えた時の記録を残していない。その結果、等色線から主応力の差の値を求めることができず、最大せん断応力を得られない。そこで、有限要素解析で求めた最大せん断応力図と比較する。今回の解析は free FEM++フリーソフトウェアを用いる。free FEM++は偏微分方程式を有限要素法を用いて数値的に解き、可視化することができる^{11), 12)}。そして、図-9 および図-11 に示すように定義した領域に対して、自動的に三角形要素分割を生成することが可能である。今回はトンネル周辺の応力場を調べるためにトンネル周辺を細かくメッシュ分割した。境界条件は、底面は、水平・垂直両方向拘束されているものとする。側方は拘束されていないものとする。残念なことに、この解析ではプロット(点)で荷重を与えることができない。そこで、等分布荷重を上部から 1(MPa)加えることにした。ポリウレタンの物性値を表-1 に示す。以上から、解析モデルを図-8 のように設定する。

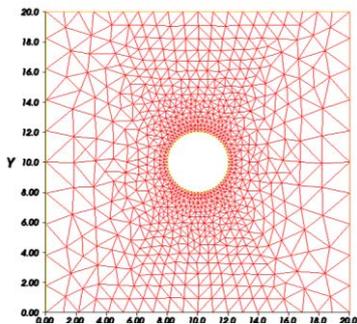


図-9：free FEM++を用いたメッシュ作成(単一トンネル)
(三角要素数：1628, 接点数；874)

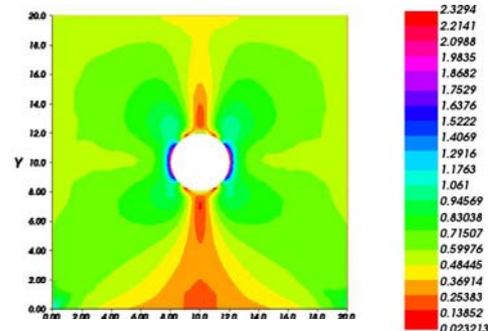


図-10：最大せん断応力図(単一トンネル)

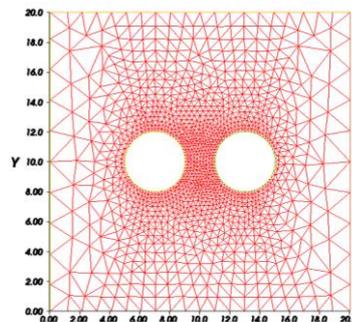


図-11：free FEM++を用いたメッシュ作成
(めがねトンネル)
(三角要素数：2584, 接点数：1381)

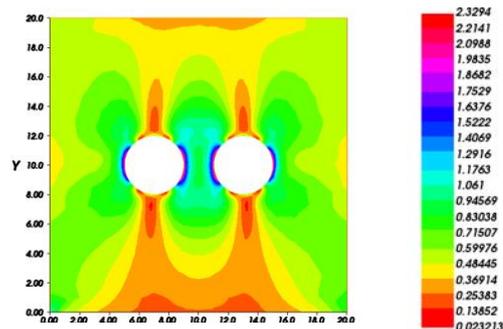


図-12：最大せん断応力図(めがねトンネル)

(2) 解析結果

図-10, 図-12 のようなせん断応力状態を得た。単一トンネルは対称的な最大せん断応力を得た。最大せん断応力は 1.999(MPa)で側方の一部に生じていた。めがねトンネルも左右対称の最大せん断応力を得た。最大せん断応力は 2.33(MPa)でピラー付近のトンネルに生じている。その他の部分は単一トンネルと類似的な値が出た。これらから、光弾性実験で得たピラーの応力が解析でも同様であることが確認できた。今回の解析で、トンネル全体の安定を保持するピラーの応力が他と比べて大きいことから十分な補強は欠かせないと考えられる。それ以外の部分は単一トンネルと同様に補強すれば良いと考えられる。

表-2 島尻層泥岩のトンネルモデルで用いた物性値

単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
0.02	100	0.3

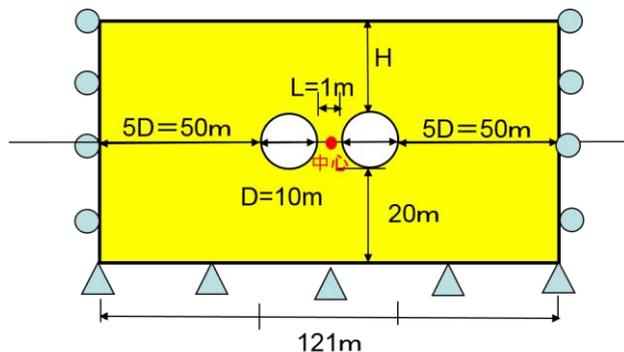
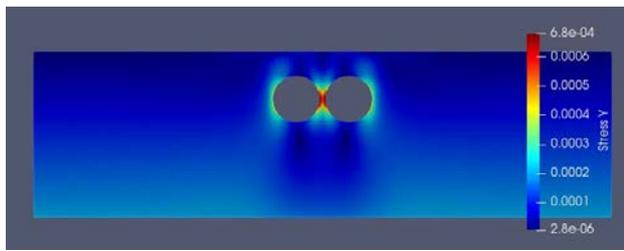
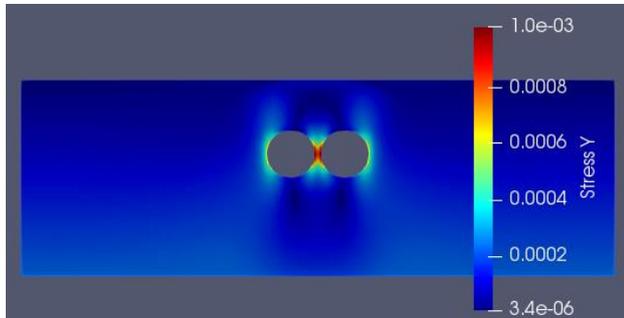


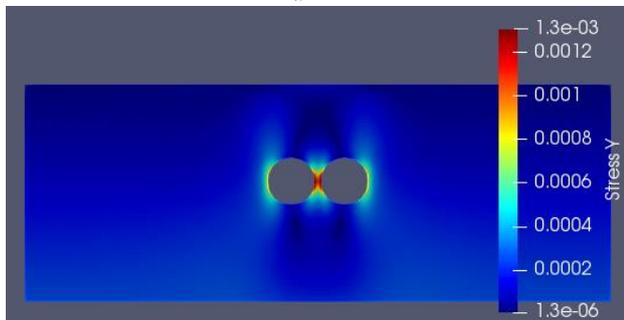
図-13 島尻層泥岩のトンネルモデル(ピラー幅 1m)



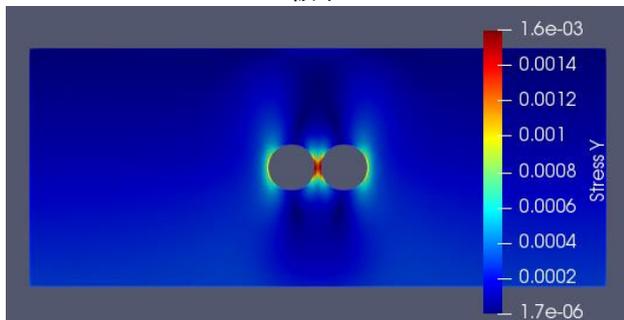
a 土被り 5m



b 土被り 10m



c 土被り 15m



d 土被り 20m

図-14 鉛直応力 σ_{yy} (a,b,c,d) ピラー幅 $L=1m$,

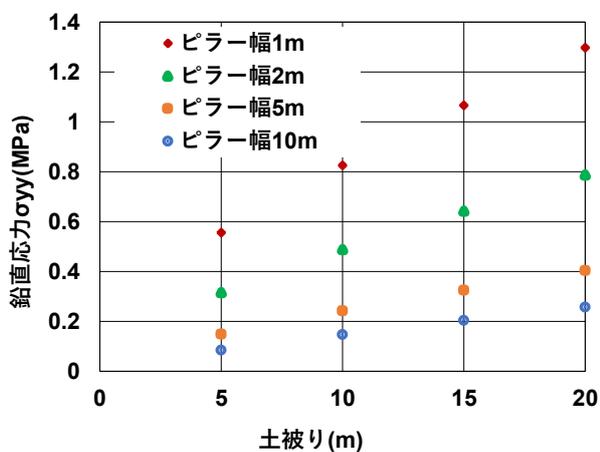


図-15 鉛直応力と土被りの関係 (中心)

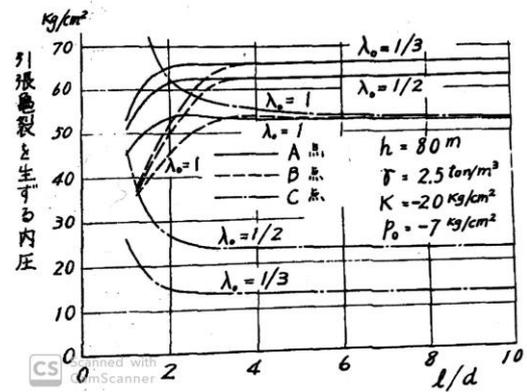


図-16 引張亀裂を生ずる内圧と ℓ/d の関係¹⁰⁾

4. ピラーの中心における最大応力をピラー幅の関係で検討

(1) 解析条件

近年、沖縄県ではピラー幅が 1m 前後の無導坑方式めがねトンネルの施工例が多い。しかしピラー幅の距離が狭すぎるとピラーが破壊し、岩盤の安定性に影響を与える可能性がある。この安定性を確保するために、地山の地盤改良を行うことが求められている。本検討では無導坑方式めがねトンネルの安定性を検討するために解析モデルを作成し解析を行った。ピラー幅および土被りの違いからピラー中心における最大鉛直応力を解析した。対象となる島尻泥岩の物性値は表-2 に示す。作成した解析モデルを図-13 のように示す。めがねトンネルは中心から等間隔に配置してある。境界条件は、側方において水平方向のみ拘束され、底面は、水平・垂直両方向拘束されているものとする。側方において解析領域に影響を及ぼさないように横幅をトンネル外側から 5D とすることにした。そして、掘削幅 $D=10m$ 、ピラー幅 $L=1m, 2m, 5m, 10m$ 、すなわち離隔距離 $R=1.1D, 1.2D, 1.5D, 2D$ の 4 パターンを土被り $H=5m, 10m, 15m, 20m$ と設け、合計 16 パターンについて行った。

(2) 解析結果

図-14 にピラー幅 $L=1m$ の 4 パターンの解析結果を示す。ピラー幅の違いから鉛直応力に違いが生じた。図-15 に土被りの相違による鉛直応力の変化を示す。ピラー幅 1m の鉛直応力は、土被りが増加するにつれて応力が増加し、土被り 20m では、ピラー幅 10m と比べ約 6 倍高い値が出ている。低土被りでも土被り 5m 間隔で生じる鉛直応力はピラー幅 2m 以下だと大きく増加している。

今回の解析では側圧係数 λ を 1.0 と統一し、間隙水圧を考慮していない。川本¹⁰⁾は、図-16 のように側圧係数の値によって、トンネル壁に引張亀裂を生ずるときの内圧は大きく変化することを述べている¹⁰⁾。今後の課題として、材料定義を詳細にできる解析ソフトウェアを活用し、結果を比較および水圧、側圧係数並びに水平応力によるめがねトンネルの影響を調

べることを課題とする。

5. まとめ

本研究では、底面摩擦模型実験、光弾性試験および有限要素解析を行い、ピラー幅の違いから周辺の応力場とトンネルの安定性を検討した。以下、得られた知見および考察を述べる。

(1) 底面摩擦模型実験では、後藤ら⁵⁾の結果と似たような破壊状況が見られた。加えて、トンネルの離隔距離が 1.5D 以下の時もピラーから破壊し、二つを含む地山が押しつぶす様子が見られた。今回の実験で見られた破壊状況は模型側方の境界条件による影響も考えられる。また模型のトンネル空洞部分を作成する際、実験前にひび割れが生じやすいことが観察された。その為、模型材料の強度設定や側方の境界条件を考慮した型枠を作成することが課題に挙げる。

(2) 光弾性実験からめがねトンネルはピラーの応力が他の部分より大きいことが確認できた。解析でも同様であることが確認できた。今回の解析で、トンネル全体の安定を保持するピラーの応力が他と比べて大きいことから十分な補強は欠かせないと考えられる。

(3) ピラー幅 1m の鉛直応力は、土被りが増加するにつれて応力が増加し、土被り 20m では、ピラー幅 10m と比べ約 6 倍高い値が出ている。今後の課題として、材料定義を詳細にできる解析ソフトウェアを活用し、結果を比較および水圧、側圧係数並びに水平応力によってめがねトンネルの影響を調べることを課題として挙げる。

参考文献

- 1) 青木宏一, 若狭紘也, 上村正人, 進士正人, 中川浩二: 現場計測データに基づくめがねトンネルへの作用荷重と周辺地山挙動への評価, トンネル工学研究論文・報告書集, 第 12 巻, pp371~376, 2002.11
- 2) 近内克夫, 小野幸男, 菅野嘉元: NATM のよる眼鏡トンネルの施工, トンネルと地下, 第 16 巻 2 号, pp17~23, 1985.2
- 3) 佐々木芳文, 廣谷繁樹, 山田光雄: 遺跡の下にめがねトンネルをつくる, トンネルと地下, 第 23 巻 7 号, pp19~26, 1992.7
- 4) 土木学会: トンネル標準示方書[山岳工法編], pp133, 2016
- 5) 土木学会: トンネル標準示方書[山岳工法編], pp140, 2016
- 6) 後藤有志, 壺内達也, 西岡哲: 土被りの薄い双設トンネルの模型実験: 第 18 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp91~95, 1986
- 7) 川本眺万, 尾原祐三, 市原康明: 底面摩擦模型実験装置および模型材料の力学特性—不連続面を有する岩盤構造物の力学特性に関する基礎的研究(第 1 報)—第 36 回年次学術講演会, 土木学会, pp1-6, 1982.
- 8) 堀内浩貴, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦: 海食崖の静的および動的安定性に関する模型実験による検討, 第 45 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp31-36, 2018
- 9) トーヨーウレタン株式会社 HP, <https://toyourethane.co.jp/technology.html>
- 10) 川本眺万: 双設圧力トンネルの応力状態について, 第 3 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp6-10, 1965
- 11) Richard, Jr. R. and Mark, R.: *Gelatin Models for Photoelastic Analysis of Gravity Structures, second SEGA International Congress on Experimental Mechanics held in Washington, D. C.*, pp.30-38, 1966.
- 12) Free FEM++HP, <https://www.freefem.org/>
- 13) Free FEM Documentation – Introduction, <https://doc.freefem.org/pdf/FreeFEM-documentation.pdf>

A Study on stress field and stability around Twin Tunnels

Michio TAMASHIRO, Ömer AYDAN, Naohiko TOKASHIKI, Jun TOMIYAMA, Kouki HORIUCHI

In recent years, there are an increasing number of examples for the construction of twin tunnels in rock, particularly soft rock. In Okinawa Prefecture, there are many construction examples of twin tunnels in Shimajiri formation, in which the distance between the two tunnels (hereafter referred to as the pillar width) is too narrow. From the viewpoint of ensuring the stability of the tunnels, in this study, we conducted model experiments and FEM analyses, and examined the stability of the stress field of tunnels, particularly, in their vicinity of pillars as a function of its width. In the photo-elasticity experiment and FEM analyses, the stress becomes higher as the width becomes smaller.