

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14238

研究課題名（和文）トンネル掘削に伴う崩壊の進行性を考慮した切羽安定性理論の開発

研究課題名（英文）Development of face stability theory considering progressive failure due to tunnel excavation

研究代表者

富樫 陽太（Togashi, Yota）

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：90753294

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：研究代表者らは、曲線状のすべり線を用い緩み土圧を考慮した切羽土圧の推定理論を提案している。本研究の実施により以下のことがわかった。

1. 提案理論により、摩擦性材料としての地山の性質を考慮した上で切羽土圧が適切に評価できることを確認した。滑り線の傾斜はあまり土圧特性に影響を与えないが、崩壊領域が大きい場合には切羽土圧が大きくなることを示した。
2. トンネル掘削に伴う応力解放を模擬できるトンネル引抜き実験を行い、LiDARやPIV解析を用いて崩壊領域形状の詳細な取得を行った結果、土被りなどによる摩擦抵抗の増加に伴って崩壊領域が局所的に生じることがわかった。この現象を記述可能な微分方程式も構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

切羽土圧の推定は非常に複雑な問題であり、トンネル技術が飛躍的に進んだ今日においても極めて重要な技術課題である。現在までで切羽土圧の推定で最も有力な方法は、鉛直なすべり線を想定したSiloの計算より地山の摩擦抵抗による鉛直土圧を考慮した上で切羽直前のくさびの釣合いを解くことで切羽土圧を得る方法だが、すべり線の形状が現実には直線とは言えない場面が多い。提案理論は未だ改良の余地があるが、既往方法よりも正確に切羽土圧を推定できる可能性を秘めており、建設実務に直結できる社会的意義の大きい成果と考えている。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a theory for estimating tunnel face pressure that uses a curved slip line and takes into account loosening earth pressure. The following findings were obtained through this study.

1. It is confirmed that the proposed theory can properly evaluate the face pressure by taking into account the nature of the ground as frictional material. It is shown that the slope of the slip line has little influence on the face pressure characteristics, but the face pressure increases when the failure zone width is large.
2. Tunnel pulling experiments were conducted to simulate the stress release associated with tunnel excavation, and LiDAR and PIV analysis were used to obtain detailed information on the shape of the failure zone. As a result, it was found that a failure zone is locally generated as frictional resistance increases due to soil cover and other factors. Differential equations that can describe this phenomenon were also constructed.

研究分野：トンネル

キーワード：トンネル 切羽土圧 シールド 極限釣合い 土圧理論

1. 研究開始当初の背景

トンネル掘削に伴う切羽安定性を精緻に予測する手法の開発が望まれている。しかしながら、切羽解放に伴う地山の挙動は非常に複雑で、これまで多くの研究が進められているものの未だ定説はない。地山挙動を複雑にする有力な原因は切羽崩壊の進行性である。これは切羽の解放に伴い、徐々にすべり線が前方に成長・進行していく現象である。既往の安定性評価で最も多いのは、Terzaghi の緩み土圧を境界条件として与え、切羽前方に「一定」のすべり領域を仮定した極限解析による方法である。Terzaghi の土圧は、土圧の算定位置から地表面に向けて 2 本のすべり直線を仮定するが、実際には、切羽の解放で生じるすべり線は垂直線とは言い難く、崩壊の進行に伴って、すべり線の傾きは小さくなり、すべり線に囲われる崩壊領域は拡大していく。このような崩壊の進行性は「一定」のすべり領域を仮定する既往の極限解析や、剛塑性有限要素法のような連続な解析領域の設定が必要な方法では表現できないため、今まで考慮されてこなかった。崩壊の進行性を考慮可能な切羽安定性の推定理論が構築できれば、施工時のトンネル安定性の評価精度を飛躍的に向上できる可能性が高い。

2. 研究の目的

本研究では、トンネル掘削に伴う切羽崩壊の進行性の特徴である、すべり領域の形状および変化を考慮可能な切羽安定性理論の開発を目的とする。当初は、主にすべり線の傾きの変化に着目していたが、次に説明するトンネル引抜き実験を実施していくなかで、地表面にほとんど変状が生じずに地盤の内部が局所的に崩壊する挙動が見られた(下の図8)。これはアーチ作用によるものと考えられるので、すべり領域の変化を把握するために崩壊領域の特に高さの評価方法の確立を目指した。

3. 研究の方法

研究代表者は、すでにすべり曲線(楕円弧)を用いた新しい切羽土圧理論(極限釣り合い法)を提案している(図1)。モルクーロンの破壊規準を想定すると、微小要素の周方向・半径方向の釣り合いから導く微分方程式は次式である。

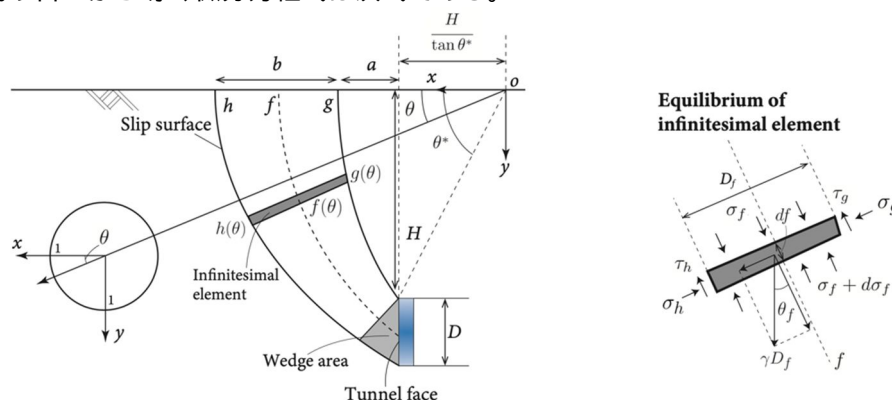


図1 すべり曲線を用いた切羽土圧の計算理論

$$\frac{d\sigma_f}{d\theta} + \frac{2\kappa(\theta)}{D_f(\theta)}(\sigma_f \tan \phi + c) = \gamma\kappa(\theta) \cos \theta_f \quad (1)$$

ここに、 f : 切羽土圧、 θ : せん断抵抗角、 c : 粘着力、 γ : 単位体積重量である。本研究では、この方法で適切な切羽土圧が推定できるかどうか確認するものである。本研究では、実験的検討としてトンネル引抜き実験(図2)も行っている。これは、地山内に設置したトンネル模型を徐々に引抜いていき、掘削に伴う応力解放とそれに伴う地山の変状を検討するものである。

4. 研究成果

図3には、提案理論による切羽土圧の計算結果の一例を示す($\gamma = 20\text{kN/m}^3$, $\phi = 30^\circ$, $c = 0$)。これは、土被りに伴う崩土内の周方向応力と深度の関係を示している。深度が大きくなると周方向の応力は地山の摩擦抵抗により減少する。また土被りが大きいほどその効果は大きい。摩擦性材料の特徴をよく表した結果が得られている。

図4には形状変化に関する提案理論の計算例を示す。崩土の位置・幅・高さについてさまざまな状況が検討可能である。内側のすべり曲線の位置はあまり結果に影響を与えないが、崩壊領域の幅 b については幅が大きいほど崩土重量が大きいため切羽土圧が大きく計算されている。このように力学的に解釈可能な結果が得られていることから妥当性を確認できたと言える。

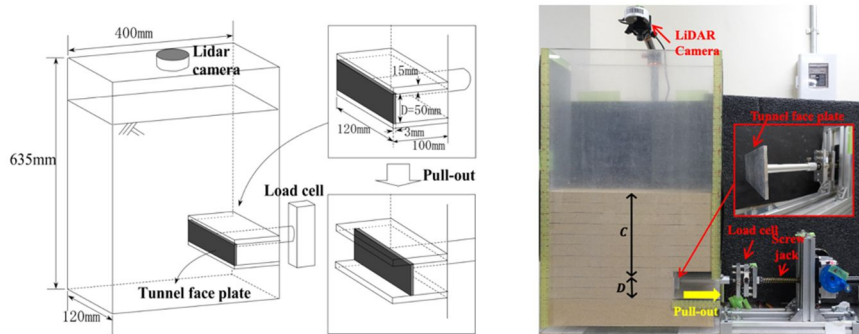


図2 トンネル引抜き実験装置

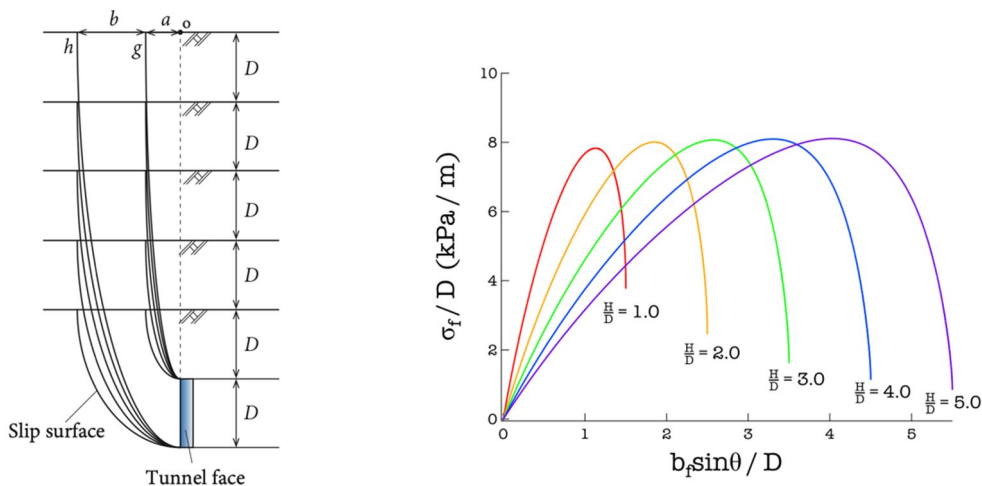


図3 提案方法による計算結果の一例
(左：検討した崩土形状，右：崩土の周方向応力と震度の関係)

図5には、トンネル引抜き実験で得られた地表面変位の分布より見られるアーチ作用の影響を考察する。このように、土被りが大きくなると崩壊領域が地中に局部的に生じ、地表面変位が生じない。

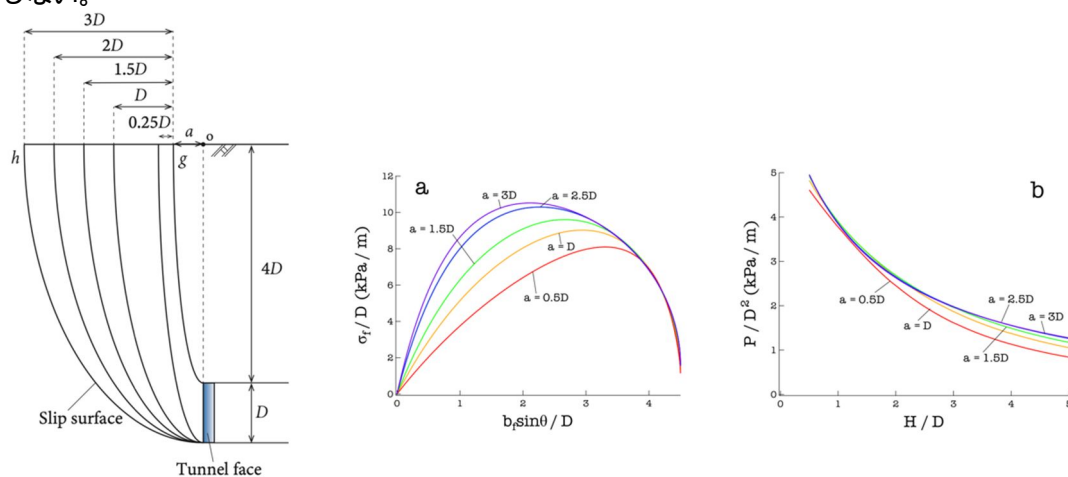


図4 崩壊領域を変化させた土圧特性
(左：解析領域，中：周方向応力の深度分布，右：切羽土圧Pと土被りの関係)

図6には土被りの変化に伴う地表面変位の変化を示す。土被りが大きくなるほど地山の摩擦抵抗が増加するため地表面変位が生じなくなる。特に土被り $C/D=6$ を境界値として地表面変位の有無が区別できる。

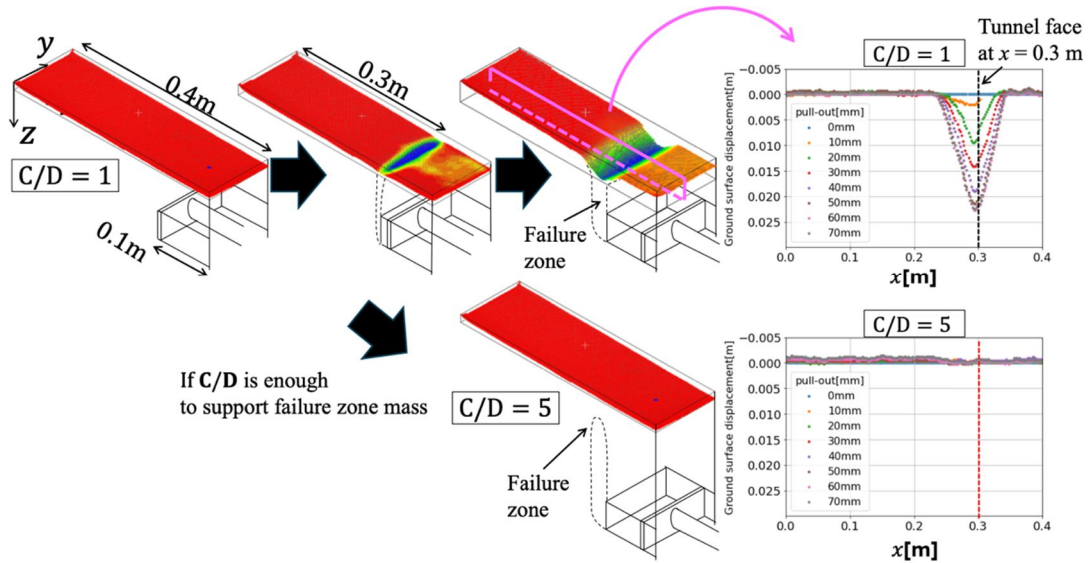


図5 アーチ作用による地表面変位への影響（珪砂5号）

また、土槽側面の画像解析による崩土形状の変化についても、図7のように検討している。崩壊領域は切羽から地表面の方向に向かって曲線形状を保ちながら進行的に拡大し、土被りが小さい場合には地表面までに変状がいたり、土被りが大きい場合には地中に局部的に生じる。このような状況をモデル化するため、本研究では、アーチ作用に伴う崩土高さの算定式を提案している。

$$\frac{H}{D} = \left(\frac{C}{D} + 1 \right) \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{C}{D} \exp(-r\frac{C}{D})} \right) \quad (2)$$

これは土被りの増加に伴って、崩壊領域上部の土塊の重量が変化するロジスティック方程式から導いたもので、土被りの増加に伴う崩土高さ（図8のプリズム上部）の変化を記述できる。

図9には各引き抜き段階において観察された崩土の幅と高さの関係を示す。崩土の幅についてはせん断抵抗角から推定される破壊面の角度と概ね調和する傾向を示すが、崩土高さについては予測が難しいことがわかる。

図10には、崩土高さの予測式(2)と実験値を比較している。このように、提案式(2)は実現象をよく予測できているといえよう。

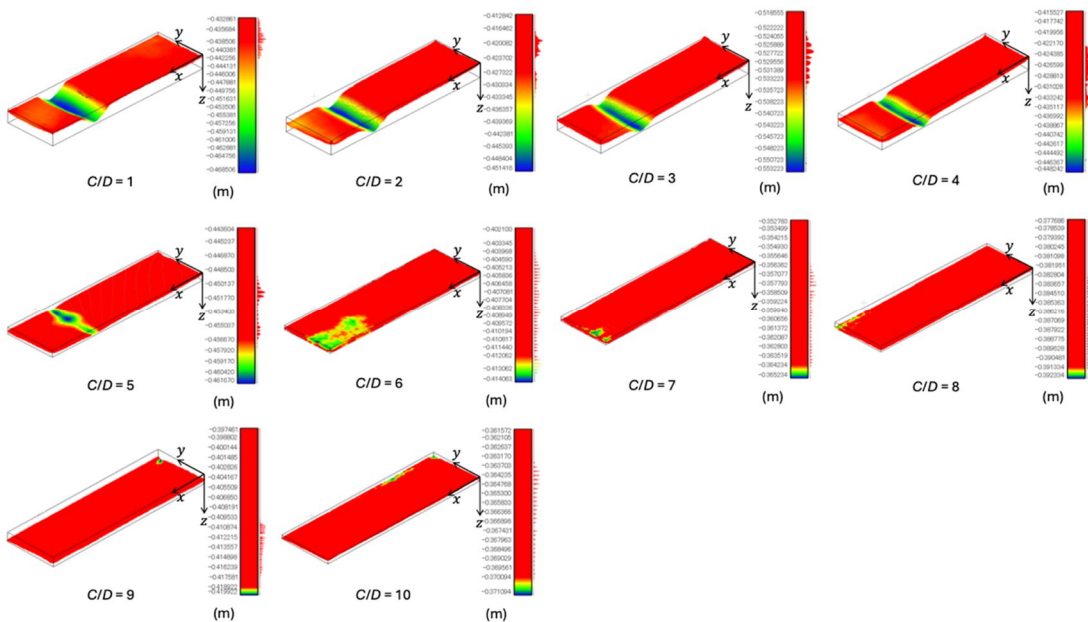


図6 土被り C/D の変化に伴う地表面変位の変化（珪砂5号）

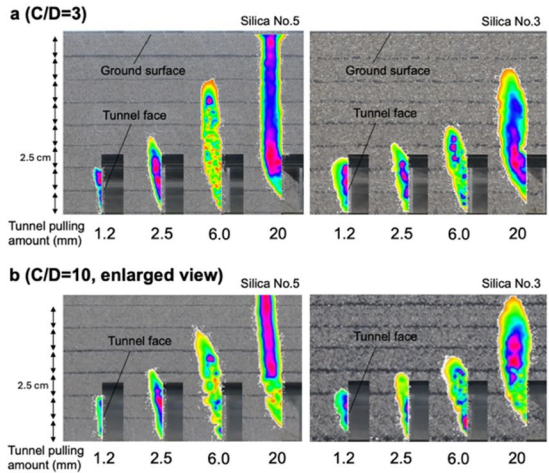


図7 局所的・進行的な崩壊領域

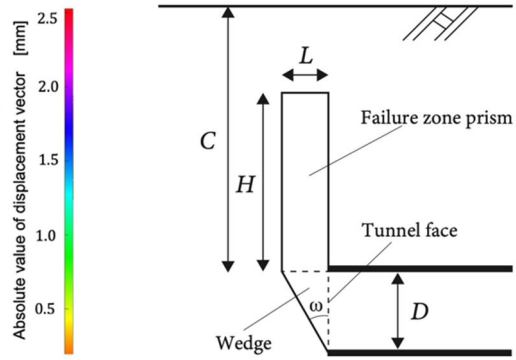


図8 崩壊領域の簡易形状

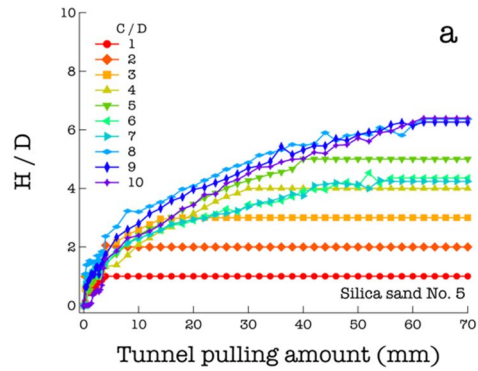
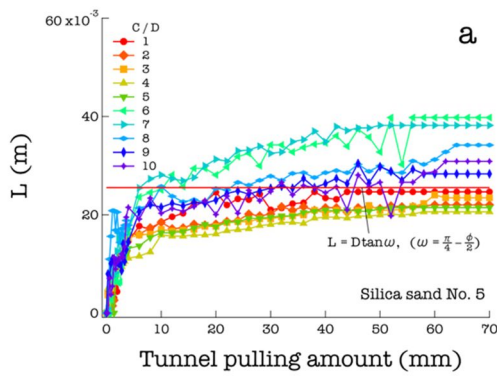


図9 トンネル引抜きに伴う崩壊領域の幅L(左)と高さH(右)の変化 (珪砂5号)

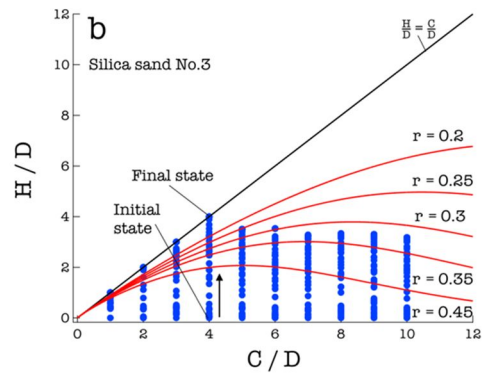
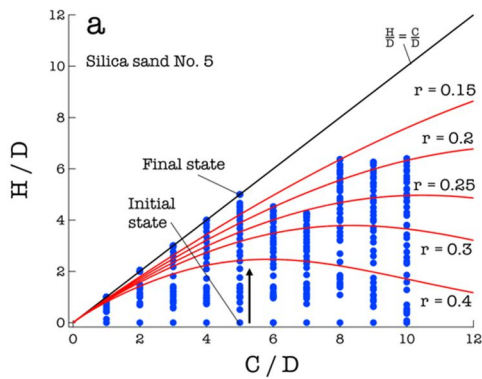


図10 崩土高さの予測式(2)と実験値の比較

以上のように、新しい切羽土圧理論を提案するとともに、崩壊領域の進行的な変化を実験的に捉えることができた。これは、シールド工法などにおける切羽土圧の推定に活用できる結果と考えている。今後は、崩土高さの予測と提案理論を合わせた切羽土圧の予測理論を構築したいと思っている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 川之上 諒, 富樫 陽太, 小林 祐貴, 長田 昌彦 | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 切羽崩壊の進行性に関するトンネル引抜き実験とすべり線の形状変化を考慮したアーチ作用のモデル化 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 第49回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 | 6. 最初と最後の頁 65-68 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Kawanoue R, Yagihashi T, Togashi Y, Osada M | 4. 巻 1124 |
| 2. 論文標題 Experimental study of frictional resistance influences on tunnel face stability | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Proc. EUROCK2022 | 6. 最初と最後の頁 12103 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/1124/1/012103 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Togashi Y, Iguchi S, Osada M and Kawanoue R | 4. 巻 833 |
| 2. 論文標題 Numerical method of tunnel face pressure estimation considering progressive failure due to excavation | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 ISRM, Proc. EUROCK2021 (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science) | 6. 最初と最後の頁 12157 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1755-1315/833/1/012157 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 川之上 諒, 八木橋辰紀, 富樫陽太, 長田昌彦 | 4. 巻 2022 |
| 2. 論文標題 地山のせん断抵抗角と土被りが切羽安定性に及ぼす影響の実験的検討 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 | 6. 最初と最後の頁 242-247 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 川之上諒, 富樫陽太 |
| 2. 発表標題 切羽崩壊の進行に伴うすべり線の形状変化を考慮したアーチ作用のモデル化と実験的検討 |
| 3. 学会等名 GeoKanto2022 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 川之上諒, 八木橋辰紀, 富樫陽太 |
| 2. 発表標題 トンネル引抜き実験による地山の摩擦抵抗が切羽安定性に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 第18回地盤工学会関東支部発表会（Geo-Kanto2021） |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|