

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 7 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 埼玉大学

氏 名 : 富樫 陽太

研究課題名 : トンネルの切羽安定問題におけるアーチ作用の予測法の開発

助成金額 : 1 0 0 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

トンネルの切羽安定問題におけるアーチ作用の予測法の開発

Development of estimation method for tunnel face stability and arching effect

埼玉大学 准教授 富樫 陽太

（研究計画ないし研究手法の概略）

トンネル掘削において切羽安定性の評価は極めて重要である。切羽安定性は、切羽から地表面にいたる崩壊領域の緩んだ崩土に対しどの程度地山の摩擦抵抗が期待できるか、極限釣合いをとることで評価できる。しかし、崩壊が進行的なことに加え、地山の摩擦に起因するアーチ作用により緩み高さが変化することが問題をさらに難しくしている。これに対し研究代表者らは、この緩み高さを予測する全く新しい微分方程式を次式に提案している。

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

これは図1に示すように、土被り C と緩み高さ H の関係をロジスティック方程式で表したものである。 D はトンネル径、 r は地山のせん断抵抗に応じた比例定数である。

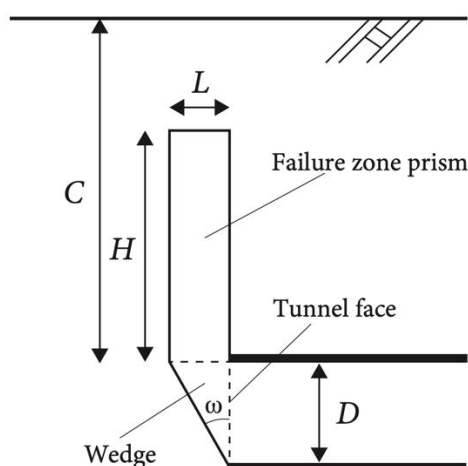


図1 トンネル掘削における崩壊領域のモデル

本研究の目的はこの式を用いた緩み高さの予測方法の確立である。新たに作製した三次元半断面土槽の納期が2024年度後半となった関係でやや計画と異なるが次に示す様に研究を遂行したので報告する。

- 研究代表者等のグループで蓄積してきた二次元トンネル引抜き実験のデータ分析をさらに進め、式(1)の妥当性を確認した。
- 式(1)を既往の極限釣合い計算に組み込み、切羽土圧を推定する新しい方法を開発し、その妥当性を実験データから検証・確認した。
- 三次元半断面モデルの実験土槽およびトンネル模型を作製し、空中落下法を用いて緩い模型地盤を作製する方法を検討し、地山の変形挙動を分析した。

なお、研究経費は三次元半断面トンネル実験、学会発表と同分野が専門の研究者との研究討議に関わる旅費、学生の実験補助に対する謝金、汎用マイコンや試料形成等に必要な消耗

品の購入で使用させていただいた。研究代表者の富樫は、解析を含む研究全般を統括するとともに、実験は埼玉大学富樫研究室の学生2名の協力の下に実施した。

（実験調査によって得られた新しい知見）

1. 二次元トンネル引抜き実験のデータ分析

研究代表者らは図2に示す二次元トンネル引抜き実験を行ってきた。これはトンネル模型を徐々に引抜くことで掘削時の地山の応力解放を模擬する実験で、土槽側面の土粒子の動きをPIV解析（OpenPIV）を行うことで崩土の形状を把握するとともに、土槽直上のLiDARカメラ（Intel L515）で地表面変位分布を取得することで図1の地表面変位を伴わない地山内部における局所崩壊を判別できる。また、トンネル模型の後方にロードセルを設置して土圧を計測している。ここでは、硅砂3号（平均粒径 $D_{50} = 1.4 \text{ mm}$ ，せん断抵抗角 $\phi = 38.2^\circ$ ）を用い、土被り比 $C/D = 1 - 10$ までの結果の分析を示す。地山の作製については 2.5 cm づつ砂を敷きならして締固めを行い、相対密度が約75%の模型地盤を作製した。

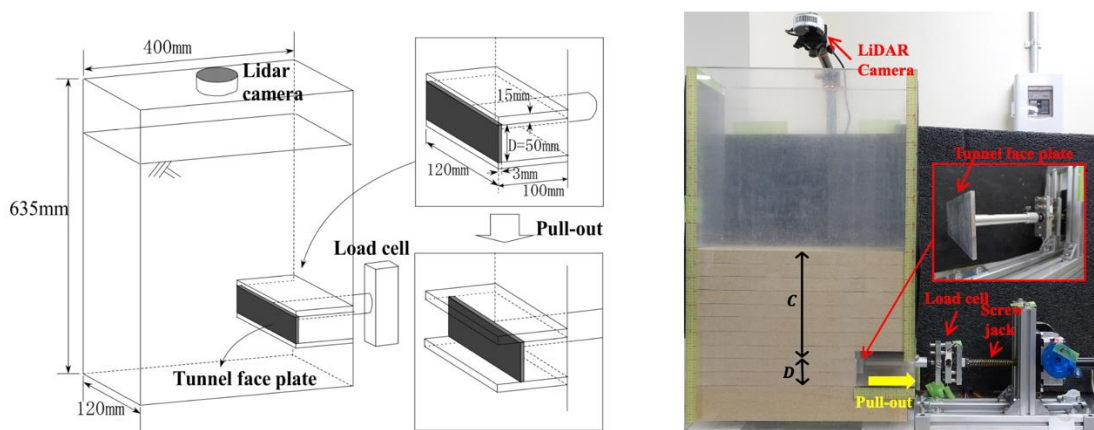


図2 二次元トンネル引抜き実験

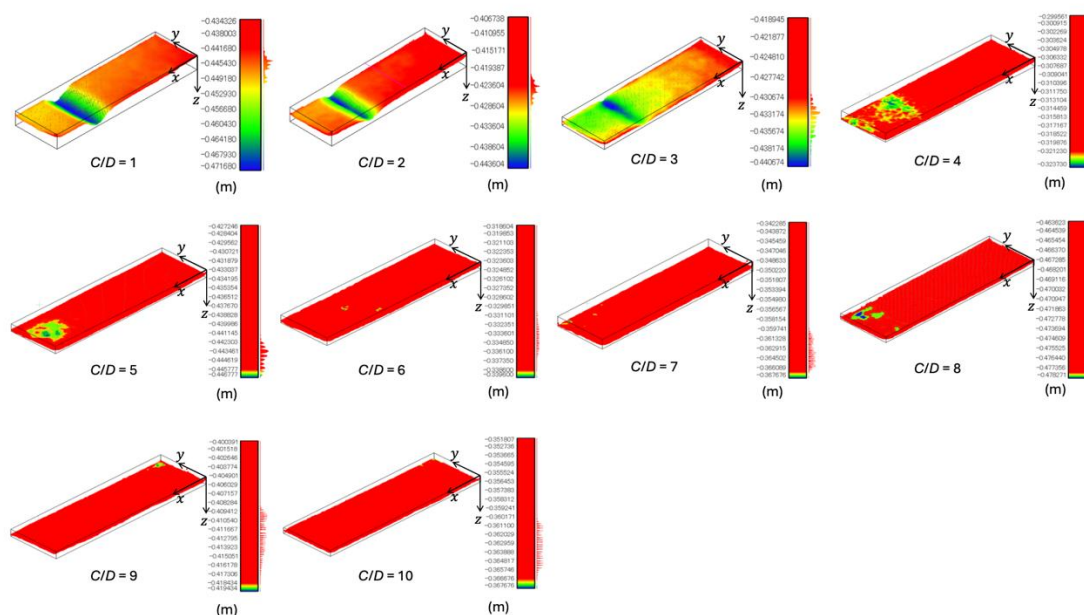


図3 硅砂3号のトンネル引抜き実験における終局状態の地表面変位分布

図3には土被り比ごとのトンネルトンネル引抜き実験における終局状態の地表面変位分布を示す。図の左側にトンネル模型が位置しており、土被りが浅い時 ($C/D < 6$) は地表面まで崩壊領域が到達するため沈下が生じているが、土被りが深い時 ($C/D > 5$) は地表面が変状しない。これは、地山内部に局所的な崩壊領域が生じるためである。ここで、図4のようにPIV解析で取得した崩壊高さ H と土被りの関係を調べると、土被りの増加に伴い崩壊高さ H と土被りが徐々に乖離していくことがわかる。図の赤線は提案する崩壊高さ予測式の計算値であり、局所崩壊のメカニズムをよく捉えていることがわかる。

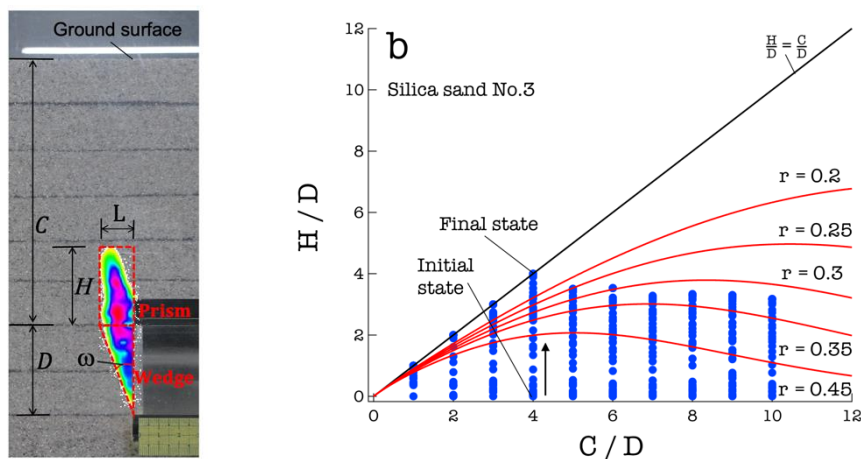


図4 PIVによる崩壊高さ H の推定と珪砂3号の崩壊高さ H と土被り C の関係

2. アーチ作用による崩壊高さの予測式の切羽安定問題への応用

図5に示す様に、局所崩壊における崩壊領域の上端から上部には鉛直土圧が作用する境界条件で、崩壊領域について Silo 効果 (Terzaghi の緩み土圧) を採用する。

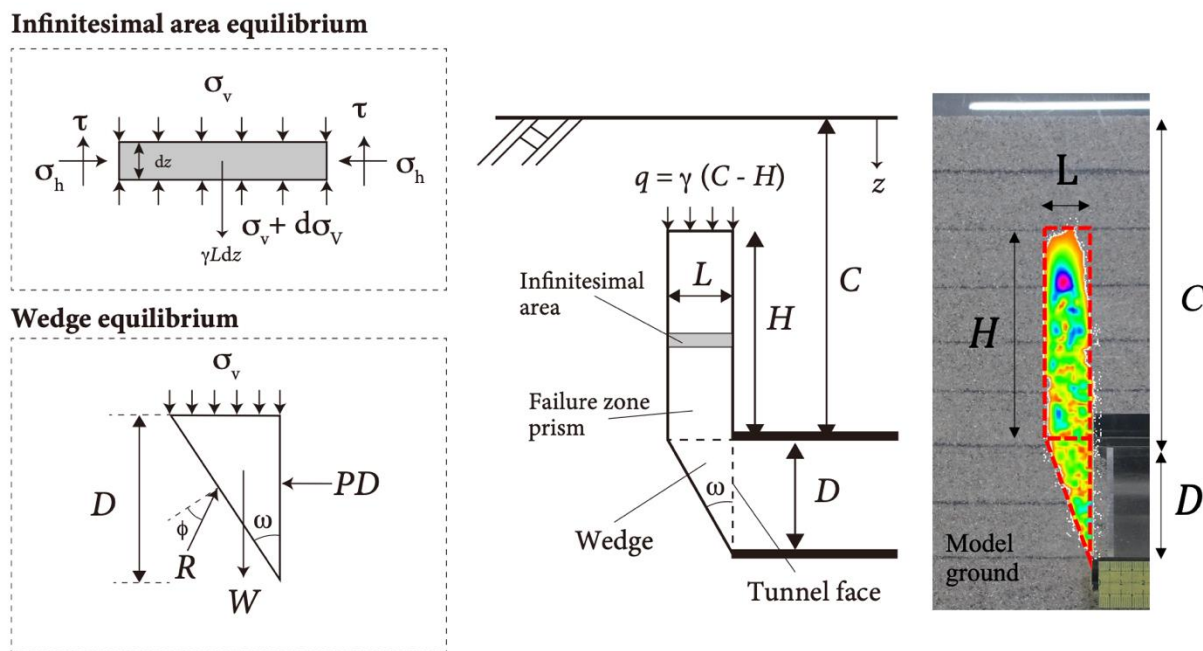


図5 局所崩壊における切羽土圧の推定

この境界条件で計算すれば、くさび上端の鉛直土圧 σ_v は次式である。

$$\sigma_v = \frac{\gamma L}{2K_h \tan \phi} \left(1 - \exp \left(-\frac{2C}{L} K_h \tan \phi \right) \right) + \gamma(C - H) \exp \left(-\frac{2C}{L} K_h \tan \phi \right) \quad (2)$$

これを下に、くさびの釣り合いを解いて切羽土圧 P を推定すれば次式の様になる。

$$P_f = \frac{\tan \omega}{\tan(\phi + \omega)} \left(\frac{\gamma D}{2} + \sigma_v \right) \quad (3)$$

式(2)の H の推定に式(1)を用れば、アーチ作用に伴う崩壊領域の変化を加味することができる。図6には、終局状態における土圧 P_f と土被り C の関係を提案方法による推定値（赤線）を比較している。実験結果をよく表現できていることがわかる。

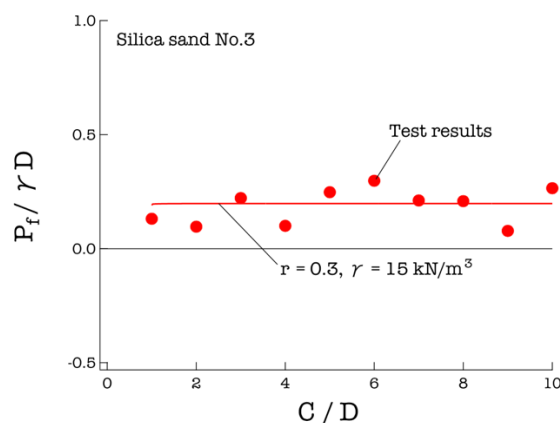


図6 硅砂3号の終局状態における切羽土圧と推定値（赤線）の比較

3. 三次元半断面モデルを用いた緩い地山の変形挙動

本研究では、図7に示す三次元半断面トンネル模型および実験土槽を作製し、トンネル引抜き実験を実施して3次元的な地山の変形挙動も検討している。このモデル地盤には豊浦砂（最大間隙比 $e_{\max} = 0.957$, $e_{\min} = 0.611$ ）を用い、漏斗を用いた空中落下法で相対密度が15% - 45%の地山の実験を行って結果を比較した。なお、計測に関しては、図2の二次元モデルと同様の測定を行っている。

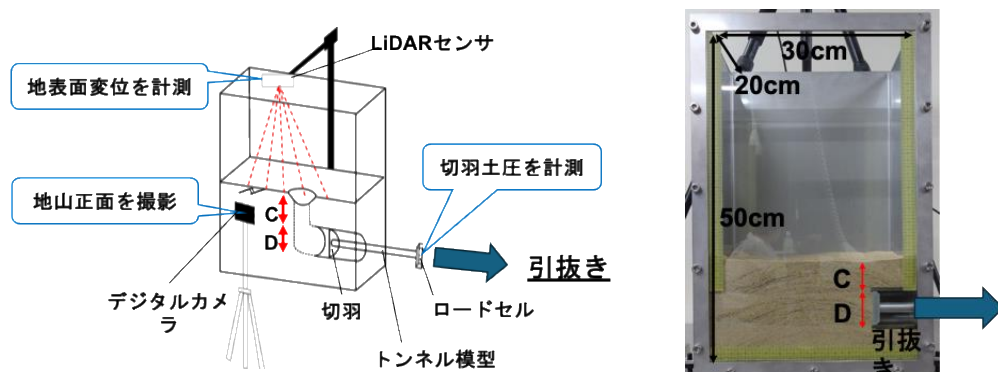
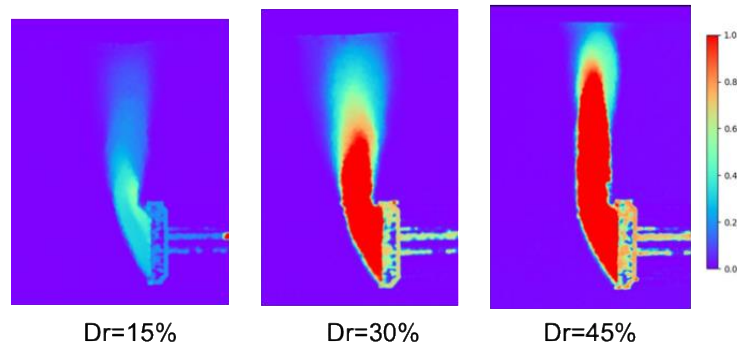


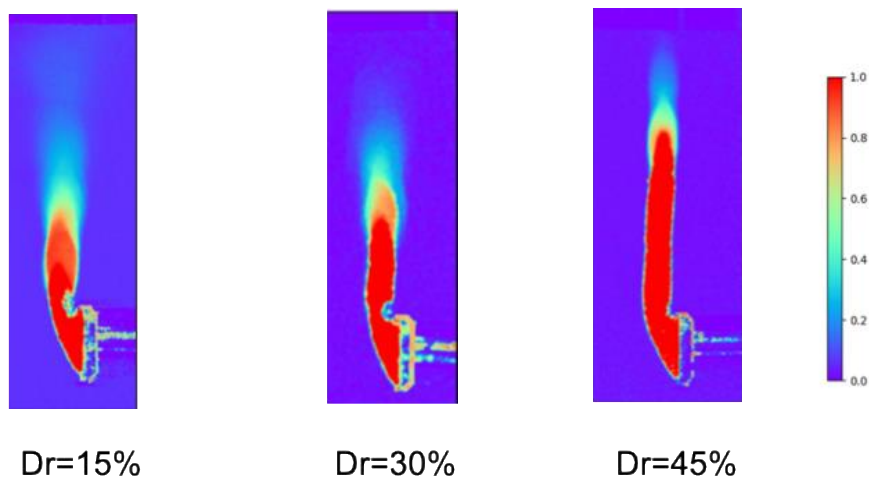
図7 三次元トンネル引抜き実験

図8には、土被り比 $C/D = 2$ と $C/D = 4$ の場合における崩壊領域の変化を比較する。緩い

地山の方が崩壊領域が小さい。これは相対密度が低い地山の方が崩土の重量が小さいためと考えられる。今後の課題として、相対密度に応じたアーチ作用に伴う崩壊領域の変化もモデル化していきたいと考えている。



(a) 土被り比 $C/D = 2$ のケースにおけるトンネル引抜き量 5 mm 時点の崩壊領域の形状



(b) 土被り比 $C/D = 2$ のケースにおけるトンネル引抜き量 5 mm 時点の崩壊領域の形状

図 8 トンネル引抜き量 5 mm 時点の崩壊領域の形状の比較

(発 表 論 文)

1. 小林祐貴，富樫陽太，長田昌彦（2024）非対称要素を用いたすべり曲線における切羽安定問題の土圧理論，土木学会全国大会年次学術講演会，III-157.
2. 小林祐貴，富樫陽太（2024）非対称要素を用いた楕円弧及び対数螺旋状のすべり曲線における切羽安定問題の土圧理論，地盤工学会関東支部 GEO KANTO 2024.