

立命館大学	学生会員	○孫 夢霞	立命館大学院理工研究科	学生会員	鳥居 文也
立命館大学院理工研究科	正 会 員	松尾 勉	立命館大学	正 会 員	藤本 将光
立命館大学院理工研究科	正 会 員	平岡 伸隆	立命館大学	フェロー	深川 良一

1. はじめに

トンネルが斜面に与える影響を考える上で、施工対象斜面の状態および、トンネル切羽近傍の挙動を把握することが重要である。トンネルの影響を受ける斜面として、土被り（トンネルの天端と地表面との距離）の小さいトンネルを施工した状態について検討する。トンネル切羽の安定性に関する研究は数多く行われているが、そのほとんどが崩壊時の切羽安定性に関する研究である。ここでは、切羽が崩壊していくときの挙動自体に焦点をあてて研究する。本研究では、アルミ棒積層体を用いた 2 次元模型実験によりトンネルの切羽が崩壊するときの基本的な挙動を把握するとともに、大変形から崩壊までの現象を表現できる数値シミュレーション手法として、粒子法の 1 つである SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) を用いて数値解析を行い、実験結果との整合性を検証した。

2. アルミ棒積層体による模型実験方法

実験は、土被りの条件によって 4 ケースを実施する、即ち土被り (H) とトンネル外径 (D) の比 $H/D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ を設定して実験を行った。アルミ棒は、直径 1.6mm と 3.0mm の 2 種類のアルミ棒（長さ 50.0mm）を重量比 3:2 で混合したものを用いた。アルミ棒積層体には鉛直・水平に 20mm 間隔で格子状に黒線を引いておく(図 1 参照)。

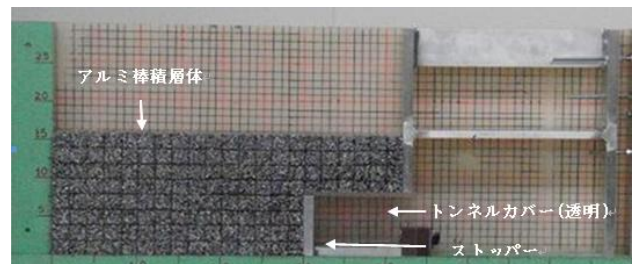


図 1 アルミ棒積層体を用いたモデル実験装置

実験では最初に初期状態の写真を撮影した後、水平に瞬間的にストッパーを取り外し、最後に崩れた積層体を写真撮影した。

3. SPH 法による数値解析方法とモデル¹⁾

研究では SPH 法による崩壊現象解析が、トンネル掘削問題でも適用できるかどうか、また、トンネル内部の閉空間へ崩壊していく現象を再現できるかどうかの確認を主眼にして、以下に示すようなモデル化を行って検証した。

① 二次元モデル

② 一括掘削解析（初期応力でバランスしている状態から、切羽を瞬時に開放する）

解析条件は、アルミ棒積層体の物性として粘着力 $c=0$ 、内部摩擦角 $\phi = 21.9\text{deg}$ 、ダイレイタンシー角 $\psi = 0$ とした。アルミ棒積層体の単位体積重量は $\gamma_s = 2.17\text{kN/m}^3$ （実測値）を用い、実験条件と同じ土被り条件を設定した。

4. 実験結果と解析結果

図 2 に、各ケースの実験結果と解析結果として、崩壊後の形状を示す。各ケースともに、解析結果は実験結果と同一ような性状を示した。

(a) 実験結果 $H/D=0.5$ では、左側(切羽前方)の積層体部が表層崩壊する形態で表面形状の勾配およびすべり面がともにほぼ直線状で崩壊している。トンネル内へ流出して堆積した積層体の形状も左側と同じような勾配になっている。解析結果では、右側(切羽後方)の積層体部のアルミ棒はトンネル天端の先端位置に向かって崩れ、先に崩壊、流出した。左側から崩れてくる積層体に向かって落下している。解析結果も同じような動きを示しているが、実験結果では右側からのアルミ棒はトンネルカバーの先端から落下してバラバラに乱れているのに比べ、解析結果ではトンネル上方の粒子はスムーズに流動している。

(b) $H/D=1.0$ では、 $H/D=0.5$ とほぼ同様に表層崩壊の形態で崩れており、切羽後方のアルミ棒積層体が前方からの崩壊と干渉し合うような挙動は少ない。解析結果と実験結果は全体的によく合っているが、解析結果の方が実験結果に比べて左右からの粒子同士の衝突の度合いが大きくて互いに動きを緩め合って沈下量が小さくなっている。また、やや曲線状のすべり面が形成されている。

(c) $H/D=1.5$ では、右側から崩壊したアルミ棒が左側のアルミ棒がトンネル内に向かって崩壊を抑えるような動きをしている。とくに解析結果では、トンネル切羽の前方上部で相互に粒子が干渉し合ってトンネル縦断方向にアーチ状のすべり面が形成されつつ、切羽前面のすべり面形状もより曲線的になっている。

(d) $H/D=2.0$ では、解析結果、実験結果ともに切羽前方（左側）からの崩壊粒子の動きを切羽後方（右側）からの粒子が衝突するように干渉し合うことで、トンネル切羽前方に縦断方向の曲線状～アーチ状のすべり面が形成され、いわゆるアーチ効果がえられ、地表面沈下の増大が抑制されている傾向を示している。

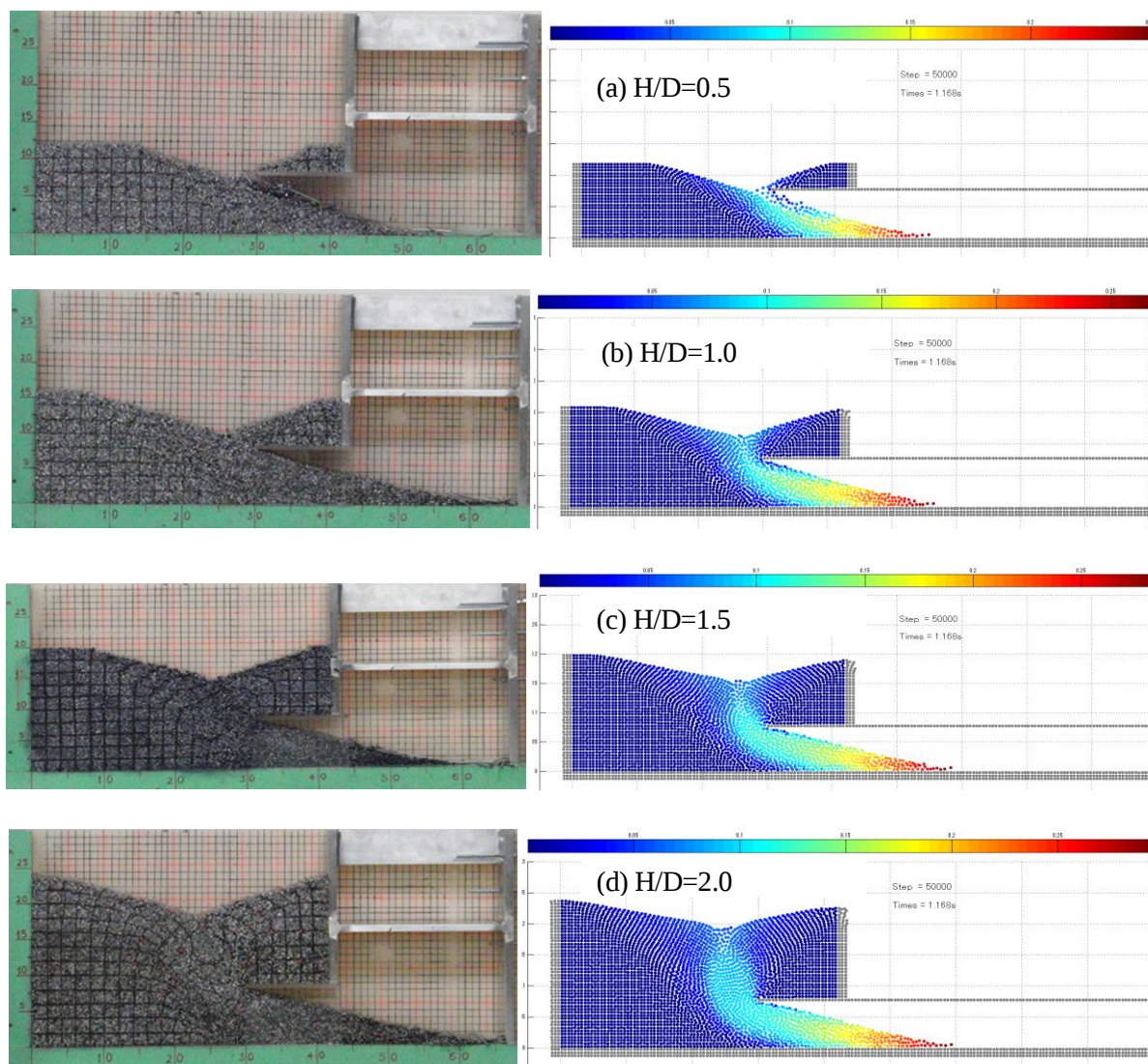


図2 SPHによる解析結果と実験結果の比較

5. まとめ

トンネル切羽の崩壊挙動について、アルミ棒を用いた二次元静的挙動に関する実験の結果と解析結果との比較を行った。その結果、土被り厚を変更した各ケースにおいて、実験結果とSPH法による計算結果が概ね一致しており、SPH法を用いた解析の妥当性を確認した。

参考文献

- 1) Bui, H.H., Fukagawa, R., Sako, K. and Ohno, S.: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32, pp. 1537-1570, 2008.