

SPH 法を用いたトンネル切羽の崩壊挙動解析

(株)ケー・エフ・シー 正会員 ○松尾 勉
立命館大学 学生会員 孫 夢霞
立命館大学 学生会員 平岡 伸隆
立命館大学 フェロー 深川 良一

1. 目的

トンネル切羽およびトンネル坑口部付近の斜面の崩壊現象に関して、大変形～崩壊挙動を表現できる粒子法の一つである SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) の適用性を確認する目的で、解析および実験を行って検証する。本研究ではその第一段階として、2次元 SPH 法を用いて、水平な地表面下で小土被りのトンネルにおける切羽崩壊時の解析を行い、アルミ棒積層体による模型実験との整合性を確認する。

2. SPH 法による数値解析

SPH 法は、斜面安定性やすべり解析にも使用されるなど、地盤を対象とする問題においても実績のある解析手法¹⁾である。本研究では、SPH 法をトンネルの掘削に関する問題にも適用できるか、また、トンネル内という閉空間へ崩壊する現象を再現できるかを見極める目的で、①2次元モデル、②一括掘削(初期応力状態で均衡した状態から切羽で瞬時に応力解放する)の条件で解析を行った。解析条件は、アルミ棒積層体の物性として、単位体積重量 $\gamma_s=21.7\text{kN/m}^3$ (実測値)、粘着力は $c=0$ とし、内部摩擦角と弾性係数は既往の研究²⁾より、それぞれ $\phi=21.9^\circ$ 、 $E=5,840\text{kN/m}^2$ を用いた。また、ダイレイタンシー角は $\psi=0^\circ$ とした。

2. アルミ棒積層体による模型実験

実験に使用する材料は、長さ 50mm で直径が 1.6mm と 3.0mm の 2 種類を重量比 3:2 で混合したアルミ棒で、トンネル高さ(D)を 80mm とし土被り(H)が $H/D=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ となるように積層体を作成した。積層体の全長は 420mm、トンネルの長さを 120mm としてトンネル天端は鉛直方向固定条件とするために厚さ 5mm のカバーを設置した。実験はトンネル切羽位置に押さえ板(ストッパー)を設置してアルミ棒を所定の高さまで積み上げた後、ストッパーを瞬時に除去してアルミ棒が切羽面から崩壊する挙動を観察した。なお、アルミ棒の表面には 20mm 間隔で格子状にラインを入れて変位を確認するほか、挙動の詳細を PIV 解析するための連続写真撮影も行った。

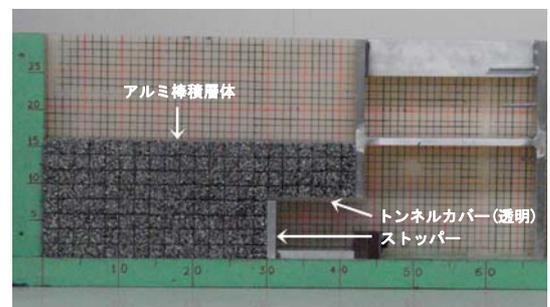


図1 アルミ棒積層体を用いた模型実験装置

4. 実験結果と解析結果

図2に、実験結果と解析結果の崩壊後の形状を比較して示す。実験、解析ともに、土被りが小さい場合には、切羽直上の地盤が抜け落ち、直線状のすべり線が形成されるが ($H/D=0.5\sim 1.0$)、土被りが大きくなるにつれ、切羽前方上部にアーチ状の移動領域が形成され、すべり線も曲線状になる ($H/D=1.5\sim 2.0$)。各ケースごとに細部では異なる点があるものの、解析結果と実験結果は概ねよく一致していることが確認できた。

5. パラメータスタディ

$H/D=1.0$ のケースにおいて、粘着力を変化させ、切羽が崩壊～安定へ変化する状況について解析を行った。図3に示すように、粘着力が増えると崩壊する粒子の移動距離が短くなり、地表面の沈下も小さくなると同時に、切羽前方のすべり線形状も鉛直方向に立ち上がり、らせん状のすべり線が形成されているのがわかる。また、 $c=0.5\text{kN/m}^2$ のケースでは、切羽面の変位がなく、切羽が完全に自立することが確認できた。

キーワード トンネル, 切羽, 崩壊, 粒子法, SPH, アルミ棒積層体

連絡先 〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1 芝パークビル B 館 11F TEL. 03-6402-8257

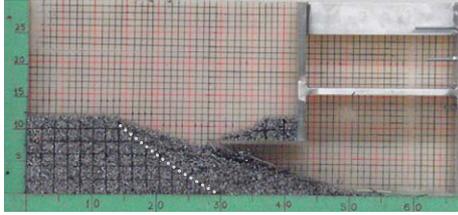
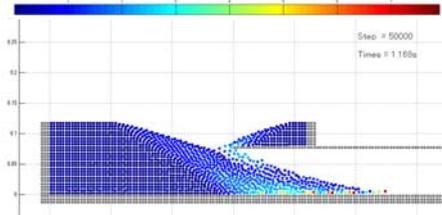
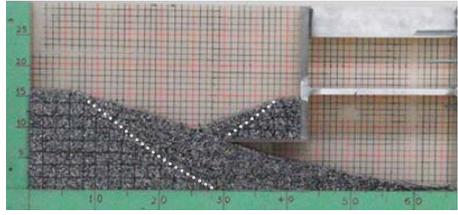
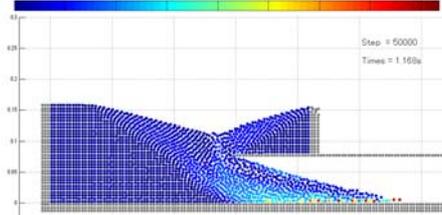
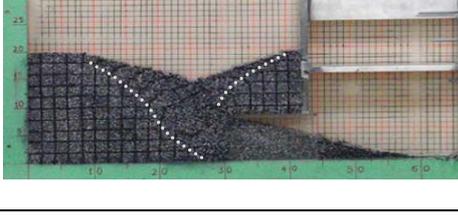
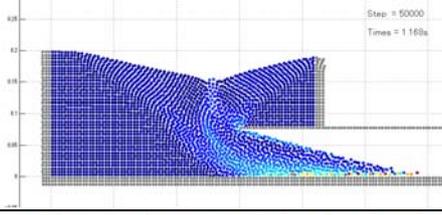
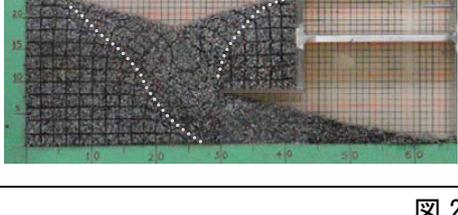
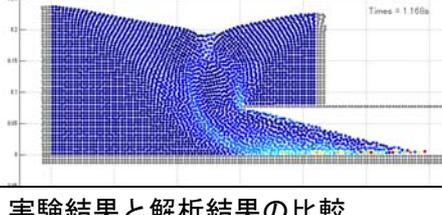
	実験結果	解析結果 (ひずみコンター図)	考察
(a) $H/D=0.5$			実験結果では、切羽前方(左側)の積層体の表面勾配およびすべり線とも直線状で崩壊している。トンネル内へ崩壊してアルミ棒の堆積勾配もほぼ同じで、切羽後方(右側)の積層体はトンネル天端先端に向かって崩れ、前方から崩壊してくる積層体に向かって落下している。解析結果も同様の挙動を示しているが、実験結果より粒子は滑らかに流動している。
(b) $H/D=1.0$			$H/D=0.5$ とほぼ同様の形態で崩壊している。実験結果では切羽後方と切羽前方から崩壊するアルミ棒が干渉し合うことは少ないが、解析結果では両方の粒子が切羽前方直上で衝突して双方の動きを緩め合う様子が見られ、やや曲線的なすべり線が形成される。
(c) $H/D=1.5$			実験結果では、切羽後方のアルミ棒が、トンネル内へ移動する切羽前方のアルミ棒を抑える動きを呈している。 解析結果でも、切羽前方上部で双方の粒子が干渉し合う挙動を示し、すべり線形状もより曲線的になっている。
(d) $H/D=2.0$			実験結果、解析結果ともに切羽前方からのアルミ棒または粒子の動きを切羽後方からのアルミ棒または粒子が衝突するように干渉し合うことで、地表面の沈下が抑制されるとともに、切羽前面の曲線状のすべり線がさらに上方へ伸びて、アーチ状にせり持つような領域が形成されている。

図2 実験結果と解析結果の比較

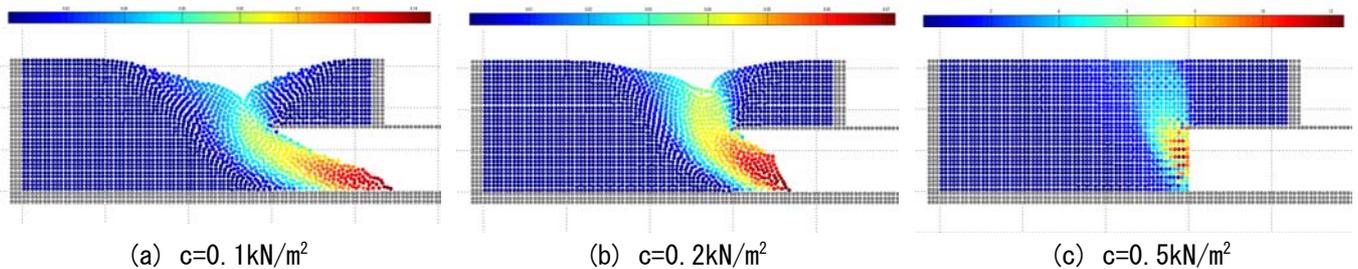


図3 パラメータ解析結果 ($H/D=1.0$: 変位コンター図)

6. まとめ

トンネル切羽の崩壊挙動について SPH 法を用いた解析を行い、アルミ棒積層体の実験結果と整合性のある結果が得られ、SPH 法がトンネル掘削時の崩壊や安定に関する解析に適用性のあることが確認できた。今回の検討は水平な地表面直下でのトンネル掘進という条件に限定されており、今後、斜面の場合の検討も含め SPH 法の適用性の拡大に取り組む予定である。

参考文献

- 1) H.H.Bui, R. Fukagawa, K. Sako and S. Ohno: Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32, pp.1537-1570, 2008.
- 2) 梅崎健夫,河村隆,落合英俊:補強材の引抜きに伴う拘束圧の増加特性と補強メカニズムのモデル化,ジオシンセティックス論文集, 第 20 巻,pp.241-248, 2005.