

トンネル切羽安定対策工への SPH 法解析の適用に関する一考察

ケー・エフ・シー	正 会 員	○松尾	勉
立命館大学	フェロー	森	邦夫
立命館大学	正 会 員	平岡	伸隆
立命館大学	学生会員	孫	夢霞
立命館大学	フェロー	深川	良一

1. 目的 トンネルの切羽安定性の評価方法としては、対数らせんや直線のすべり線での極限つり合い法や FEM 解析等から得られる発生ひずみを限界ひずみと比較する方法等が用いられている。本報告では、切羽安定対策工の効果に関して、大変形から崩壊挙動まで表現できる粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法解析を用いて検討する。本報告で使用する SPH 法解析は、Bui ら¹⁾により土の弾塑性～崩壊後挙動に適用でき粘着力を有する地盤についてもその妥当性が確認されているものである。また、著者ら²⁾は、切羽の崩壊時挙動に関してアルミ棒積層体を用いた模型実験結果との整合性を確認している。

2. 解析モデル 坑口部を想定した傾斜地表面を有する小土被りトンネルの切羽において鏡補強工を施工した場合の挙動について検討する。解析モデルの概要を図 1 に示す。地表の傾斜角度を $\theta=15^\circ$ ，トンネル高さを $D=6\text{m}$ ，切羽での土被り高を $H=6\text{m}$ (土被り比 $H/D=1.0$) とした。地盤条件は切羽の自立性が困難であるような未固結地山を想定し、図 1 中に示すとおり設定した。なお、この条件でのランキン土圧から求められる自立高さは $H_c=2.6\text{m}$ ，真下ら³⁾による自立性指標 (砂質土では $c/\gamma D=1.3\sim 1.7$ で自立) は $c/\gamma D=0.125$ である。天端部を固定条件とした 2 次元モデルとし、切羽面を拘束して初期応力解析を行ったのち、切羽の拘束を外して応力解放させた。

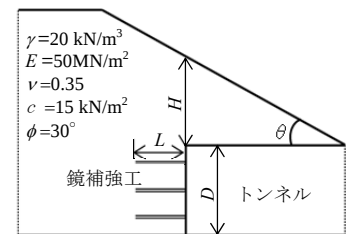


図1 解析モデル概要図

3. 解析結果

(1) 補強工がない場合の崩壊挙動 図 2 に、切羽で応力解放した直後のひずみ分布を示す。図 2(a)では、切羽下端から前方上方に直線状～曲線状の領域、および天端から鉛直上方の領域にひずみが集中し、すべり線が形成されていることが確認できる。これは村山ら⁴⁾による対数らせん形状のすべり線と類似の形状である。図 2(b)では、図 2(a)で形成されたすべり線に沿ってさらにひずみが増大するとともに切羽のさらに前方にもひずみ集中域が形成されるなど、すべり線が拡大していることが確認できる。図 3 に崩壊後の形状を示す。図より切羽では最大 5m の変位が生じ地表面まで沈下していることが確認できる。なお、この条件による極限つり合い法での安全率は $F_s=0.8\sim 0.7$ 以下であり自立性が悪い地盤条件での解析結果となっている。SPH 法による解析では、崩壊時 (崩壊が始まる時) の状態だけでなく、崩壊が止まるまでの進行状況を視認できるとともに、崩壊後の形状 (崩壊土の移動範囲等) を予測することができる。

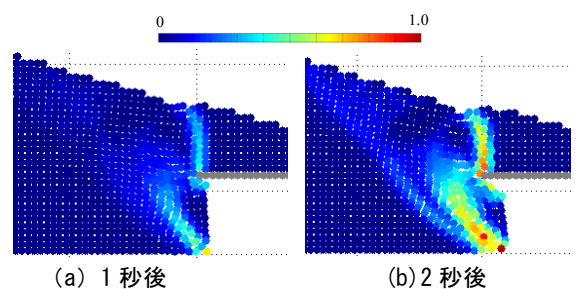


図2 解析結果 (崩壊開始直後のひずみ分布)

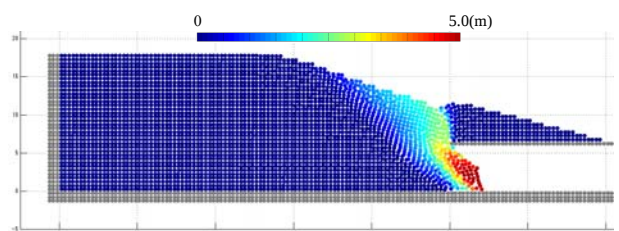


図3 解析結果 (崩壊後の形状と変位分布)

(2) 鏡補強工がある場合の挙動 切羽安定対策工として、図 1 に示した長尺鏡補強工 (長さ $L=5\text{m}$) をモデル化した。本報告では鏡補強工の効果は、補強材が保有する強

キーワード トンネル, 切羽安定対策工, SPH, 粒子法, 崩壊

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

度、断面性能に応じたせん断強度相当分が地盤のすべり抵抗に付与されるものとした。図4に地盤物性改良効果の概念図を示す。改良ゾーンを SPH 法モデルの粒子間隔 d × 単位奥行長の領域とし、換算物性値は補強材のヤング係数 E_s 、断面積 A_s 、せん断強度 τ_s をもとに図中に示した式により求めた。補強工の奥行方向配置間隔を $a=1.5\text{m}$ とし、2次元モデルの単位奥行あたり本数で換算した値は、 $E_I=320\text{MN/m}^2$ 、 $c_I=185\text{kN/m}^2$ となる。高さ方向間隔(段数)はパラメータとした。表1に解析ケースを示す。

解析結果として、表2に切羽面の水平変位、ひずみと変位収束時間、図5に相対ひずみの分布を示す。ここで、相対ひずみとは、Case-2 と Case-3,4 で1オーダー異なるひずみ分布を比較しやすいように各点のひずみをそれぞれの最大値で除した値である。表2、図5より、Case-2では、変位、ひずみともに大きく、切羽の安定性は十分ではない。Case-3,4では、変位は小さくひずみの集中も局部的である。変位の収束時間も1秒以内と短く、切羽が安定していることが確認できる。

図6には、切羽全体の補強効果は変えずに本数だけを減らした場合として、Case-3の条件に対して補強工1本あたり換算値を2倍、補強工段数を半分(1段)にした結果を示す(Case-5)。図では、補強工の間から粒子が抜け落ちるような挙動も現れている。すべり線全体ではCase-3と同じせん断抵抗力増分があるが、配置間隔が広くなることで補強工間の自立性が悪くなり不安定化している。これにより、補強工の配置間隔も安定性に影響を及ぼすことが直接的に視認できる。また、図では、補強工先端部を通るひずみ集中領域が形成されており、これに沿ってすべり線が形成されれば補強工の長さが不足する可能性があることも推察できる。

4. まとめ SPH法を用いて鏡補強工を施工したときの挙動を解析し、その効果を確認した。また、鏡補強工により、すべり線全体に必要なすべり抵抗力が確保されても、補強工の配置によっては局所的な不安定化が生じ全体の安定性も損なわれる危険性があることを視認することができた。今後、局所的な危険箇所を含む不安定化の予測、補強工の配置検討、および補強工の効果をよりわかりやすく視覚化できる一方法としてのSPH法の有効活用が期待される。

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) 松尾勉,森邦夫,平岡伸隆,孫夢霞,深川良一: SPH法を用いたトンネル切羽の崩壊挙動解析, 土木学会第69回年次学術講演会, III-202, pp.403-404, 2014. 3) 真下英人,鈴木正彦,猪熊明: トンネル切羽安定性の簡易評価法の提案, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.117-129, 1999. 4) 村山朔郎,遠藤正明,橋場友則: 機械化シールドの掘削性能に関する土質力学的考察, 第1回土質工学研究発表会, pp.75-79, 1966.

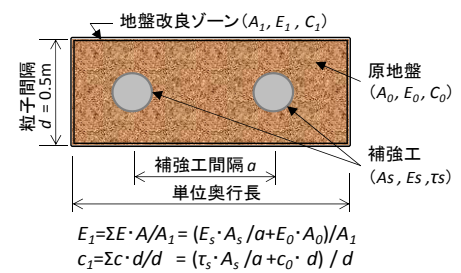


図4 補強工による地盤物性値の換算

表1 補強工の配置パラメータ

解析ケース	段数	位置: 下端からの高さ (m)	せん断抵抗力の増分 (kN/m)
Case-1	0	— (補強工なし)	—
Case-2	1	4.3	85
Case-3	2	1.8, 4.8	170
Case-4	3	1.3, 3.3, 5.3	255
Case-5	1	4.3	170

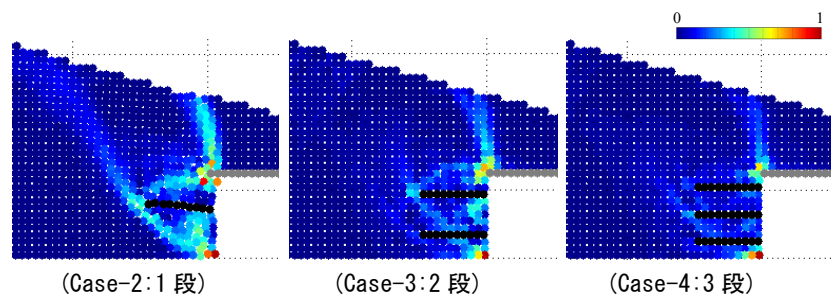


図5 補強工の配置段数ごとの相対ひずみ分布

表2 切羽面の水平変位とひずみ、および変位収束時間

項目	水平変位 (m)			ひずみ (%)		
	Case-2	Case-3	Case-4	Case-2	Case-3	Case-4
位置						
天端部	0.559	0.087	0.058	14.4	2.3	1.6
中間部*1	0.813	0.089	0.042	45.5	2.9	1.6
下端部	0.273	0.111	0.062	36.5	6.5	3.9
変位収束時間	6.0sec	0.5sec<	0.5 sec<			

*1: 中間部の値は: 天端と下端を除く中間部の各点における値のうちの最大値を示す

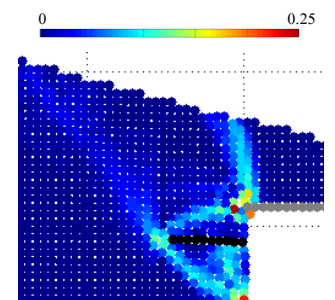


図6 Case-5のひずみ分布