

岩盤既存亀裂を考慮した間隙水圧連成 DEM によるトンネル切羽安定解析

鹿島建設(株) 正会員 清水浩之 宇津野衛 大野進太郎
(株)地層科学研究所 正会員 ○関野真登

1. はじめに

大土被りトンネルの掘削において、切羽前方に断層破碎帯などの高圧湧水帯がある場合、切羽が高圧湧水帯に接近した際に水圧による突発的な崩壊が起こる可能性があることが既往の検討で示されている¹⁾。さらに岩盤中に多数の既存亀裂が存在する場合、既存亀裂内の高水圧により既存亀裂同士が連結し、切羽の崩壊が促進されることが考えられる。このような現象を精度よく評価するためには、岩盤内の既存亀裂と水圧による亀裂伸展の両方を考慮した切羽の安定性検討が必要である。しかし、従来多く用いられてきた FEM に代表される連続体解析手法では、個々の亀裂内部の水圧による亀裂伸展挙動を表現することは困難である。そこで、流体流動と破壊の連成挙動を詳細に表現可能となるように拡張した粒状体個別要素法 (Distinct Element Method, DEM)^{2), 3)}により、既存亀裂を含んだ高拘束圧、高水圧条件下における大土被りトンネル切羽の二次元断面を対象とした安定性解析を行い、高水圧が作用する既存亀裂がトンネル切羽の安定性に対して与える影響を検討した。

2. 間隙水圧連成型個別要素法の概要

本検討では、Shimizu *et al.*³⁾の DEM のモデル化手法および定式化を採用した二次元 DEM 解析コードを用いた。Shimizu らの手法では、粒子間を図-1に示すように法線方向ばね、接線方向ばね、回転方向ばねの3種類のばねで結合し、粒子の集合体を形成することで岩石を表現する。また、粒子間に作用する力が一定値に達した時にばねを破断させることにより亀裂を表現する。

さらに、水圧による亀裂伸展を考慮するため DEM へ流体流動モデルを導入した。図-1のようにある程度接近した粒子の中心間を結び、DEM モデル内部を多数の閉鎖領域に分割する。これらの領域は流体で満たされており、それぞれ間隙水圧を保持している。隣接する領域に水圧差がある場合、粒子の接触点を流路として水圧差に応じて流体を移動させる。このような操作を全ての領域について行うことにより、流体流動およびモデル内部の間隙水圧分布の変化を表現する。本検討では、既存亀裂内部および粒子間結合が破断した亀裂部分に流体流動を考慮し、その流量は亀裂の開口幅に応じて三乗則により算出した。

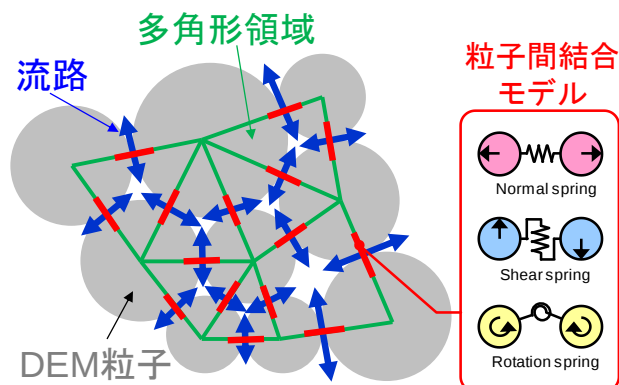


図-1 DEM 粒子間結合モデルおよび
間隙水圧の表現³⁾

3. 岩盤既存亀裂を考慮したトンネル切羽安定解析

解析に用いた岩盤モデルを図-2に示す。1辺 100m の正方形領域内は 69,637 個の粒子で満たされており、粒子半径は設定した最大粒子半径 0.25m と最小粒子半径 0.125m の間で、乱数により一様にばらつくように与えた。岩盤モデルには初期地圧として等方に 8MPa の圧力を作用させた。さらに切羽前方の高圧湧水帯を表現するためモデル右側に 7MPa の水圧一定境界を設けた。岩盤の物性値は、DEM による一軸圧縮試験、引張試験、二軸圧縮試験のシミュレーションを行うことにより一般的な岩盤相当のばね定数を設定した。トンネルの掘削は掘削範囲の粒子を削除することにより行った。トンネル径は 12m であり、1 ステップ当たりの掘削距離は 0.5m とした。各掘削ステップでは、掘削後の応力解放に伴い発生した岩盤内の亀裂の伸展が落ち着いた後、次の掘削を行うこととした。さらに、支保工を表現するために、掘削後のトンネル内空に面している粒子をローラー支持とした。

キーワード 個別要素法, トンネル切羽, 水圧破碎, 亀裂, 岩盤

連絡先 〒112-0004 東京都文京区後楽 2-3-25 金子ビル 6F (株)地層科学研究所 東京事務所 TEL.03-5842-7677

岩盤中の既存亀裂は、図-3に示すように粒子間のばねをあらかじめ切断しておくことにより表現し、今回の解析ではトンネル掘進方向に平行な既存亀裂が等間隔に存在するような岩盤を想定した。

DEMの解析結果を図-4に示す。同図は図-2の赤点線を拡大表示したものであり、トンネル

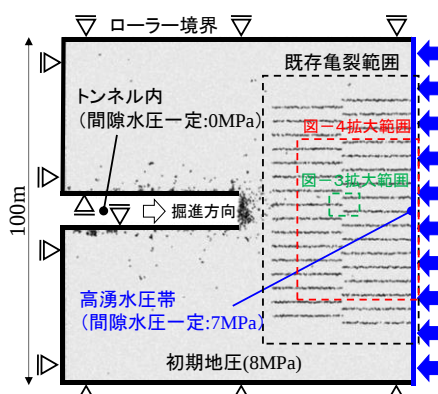


図-2 トンネル切羽安定解析モデル

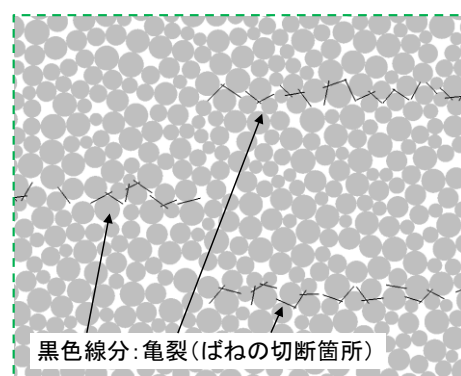
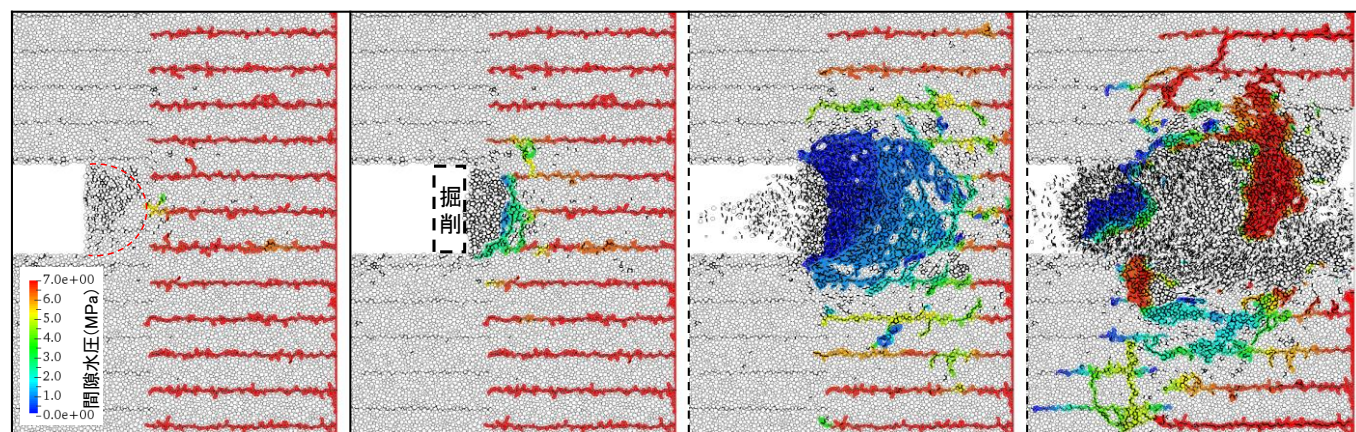


図-3 既存亀裂部拡大図

切羽が高水圧の作用した既存亀裂に近づき、最終的に崩壊に至る過程を時系列で示している。黒色の線分は亀裂を表し、色付きの領域は水圧の大きさを表す。トンネルを掘進すると切羽前面の圧縮応力が解放され、切羽を中心に半円状の領域に微小な亀裂が発生する（同図①赤点線内）。さらに掘進し、切羽前面の応力解放領域が高水圧の作用した既存亀裂に達すると、微小亀裂を介した水圧破碎により既存亀裂同士が連結する（同図②）。既存亀裂同士の連結部に流体が浸透し、水圧が作用することで切羽の剥離が起こり、崩壊が始まる（同図③）。こういった切羽の崩壊による応力解放が新たな崩壊を誘発し大規模な崩壊となる（同図④）。このように、DEMを用いることで既存亀裂と水圧の相互影響による切羽崩壊の過程を表現することができた。本検討においては既存亀裂を等間隔に配置したが実際の岩盤にはランダムに複数の既存亀裂が存在している。切羽安定解析のさらなる高精度化のためには、より現実的な亀裂配置を表現できるような解析を行う必要があると考えられる。



①切羽前方の応力解放

②既存亀裂の連結

③切羽の剥離と崩壊の開始

④崩壊の連鎖

図-4 既存亀裂と水圧の相互影響による切羽崩壊の過程

4. おわりに

DEM解析の結果、トンネルの掘進により切羽前面に微小な亀裂が発生し、高水圧の作用した既存亀裂に達すると、水圧破碎により既存亀裂同士が連結し、水圧による切羽の崩壊が始まる。さらに切羽の崩壊による応力解放が新たな崩壊を誘発し大規模な崩壊となるという過程を再現することができた。現実のトンネル切羽は三次元的な応力状態になっていることから、さらなるDEM解析精度向上のためには三次元への拡張が必要となる。前述した既存亀裂の配置の影響も含めて今後の課題とし、DEMによるトンネル切羽崩壊メカニズムの解明や対策工の設計に資する検討を続ける予定である。

参考文献

- 1) 清水浩之ら、岩盤亀裂伸展を考慮した間隙水圧連成DEMによるトンネル切羽安定解析、第54回地盤工学研究発表会、2019
- 2) P.A.Cundall and O.D.L.Strack, Geotechnique, 29, 47-65 (1979).
- 3) H.Shimizu et al. The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.48, No.5, pp.712-727, 2011.