

個別要素法と底面摩擦試験を用いた不連続性岩盤におけるトンネルの変形特性評価

長崎大学工学部 学生会員 ○又丸 聖史 長崎大学大学院 フェロー会員 蔣 宇静
長崎大学大学院 正会員 李 博 長崎大学大学院 学生会員 王 肖珊

1. 研究の背景と目的

日本の国土は広く軟岩で覆われており、道路トンネルや鉄道トンネルの多くが軟岩の地山中に施工されている。これらの岩盤は、掘削後十分な支保工を設けなければ安定状態を保つことができない。そのため、破壊が生じやすい箇所をあらかじめ予測することで、適切な支保工を施す等の対策を行うことができる。数値解析は、物性値やパラメータを変えての考察が容易であるが、適切なモデル構築がされなければ正しい解析結果が得られない。この点、模型実験では対象物が起こる物理現象を直接観察・理解することが相対的に容易であるため、両者の手法を併用し互いの短所を補うことが望まれる。そこで本研究では、層理面の傾斜角がトンネルの変形特性に及ぼす影響を考察することを目的とし、模型実験と個別要素法を用いた弾塑性解析を実施する。また、岩盤にトンネルを掘削する場合、不連続面の分布がその変形特性に大きな影響を与えるが、分布状態を完璧に再現するのは困難であるため、本研究では不連続面を平行した規則正しい分布を取り扱う。

2. 底面摩擦試験の概要

本研究では、重力場にある空洞の挙動を表現するため底面摩擦試験装置¹⁾を用いて実験を行う。本実験では、二次元モデルを水平に置き、模型底面プレートを水平に低速で移動させ、その摩擦によって重力に相当する応力を模型に与える。模型の寸法と供試体の概略図を表-1と図-1に示す。本試験では空気圧を供試体に一様に作用させるため、厚さ0.45mmのビニールシートを供試体の表面に一様に覆い試験を行った。実験に用いる供試体は、既往研究に基づき、石膏、標準豊浦砂、水、遅延材を重量比2:3:0.83:0.02で配合し、24時間自然状態で完全乾燥させて作成した。一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強度、変形係数、ポアソン比を表-2に示すように求めた。また、層理面の傾斜角とトンネル周辺地山の安定性との関係を考察するため、傾斜角を30°、45°、60°の3パターンと設定して供試体を作成した。模型とプレートとの間の摩擦係数は0.42、空気圧は0.15MPaである。

3. 解析モデルの概要

本解析では、層理面の多い不安定な岩盤を対象とするため、個別要素法(Distinct Element Method)を用いて不連続岩盤をモデル化した。個別要素法は、岩盤を完全に切り離したブロック集合体として取り扱うので、亀裂性岩盤や粒状体等の破壊を解析的に模擬することが可能である。また、この手法では、各ブロックの境界部分に作用する接触力及びそれによって引き起こされる要素変位を運動方程式の時間差分によって時間ごとに追跡していくため、時間の経過によって生じる問題に有効である。

本研究ではトンネル周辺岩盤における破壊の進行を評価するため弾塑性モデルを用いた数値解析を行った。解析の境界条件については、底面はヒンジ、上面は自由状態で、側面は底面摩擦実験と同様にローラーとした。解析モデルの大きさ、物性値、層理面の状態は全て実験と同様に設置した。また層理面の物性値を表-3に示す。

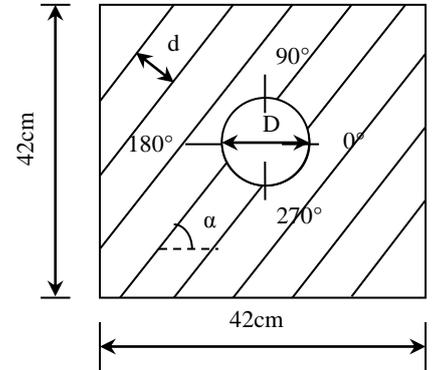


図-1 模型実験モデルの概要

表-1 模型の寸法

不連続面の間隔 d (mm)	19.9
模型の縦の長さ(mm)	42
模型の横の長さ(mm)	42
空洞の直径(mm)	85
不連続面の角度 α (°)	30,45,60

表-2 解析モデルの物性値

密度 ρ (g/cm ³)	1.81
ポアソン比 ν	0.18
変形係数 E (MPa)	870.9
内部摩擦角 Φ (°)	18.6
粘着力(MPa)	0.68
引張強度(MPa)	0.03

表-3 層理面の物性値

せん剛性(MPa/m)	0.03
垂直剛性(MPa/m)	10
内部摩擦角 Φ (°)	18.6
粘着力(MPa)	0.68
引張強度(MPa)	0.05

4. 実験結果と考察

4.1 実験結果

底面摩擦試験後の地山の変形と破壊を図-2(a)に示す。本実験はトンネル周辺における変形・破壊を対象とするため、空洞周辺の挙動について考察する。右水平方向を 0° として反時計回りに角度を正とすると、 $\alpha=30^\circ$ の場合亀裂がトンネル上端から 120° の方向に進展していく。一方、 $\alpha=45^\circ$ の場合は 135° の方向に、 $\alpha=60^\circ$ の場合、 150° の方向に進展していることがわかる。これらの結果より、傾斜した層理面を有する不連続性岩盤においては、その層理面の法線方向に亀裂が生じやすいことがわかる。亀裂の発生・進展²⁾によって変形が著しくなるブロックはキープロックと呼ばれ、実際の施工中にロックボルトを設置するなどの特別な対策を施す必要がある。

4.2 数値解析結果

底面摩擦試験と同じ条件でDEMを用いて数値解析を行った。図-2(b)中のピンクの点はブロックの塑性破壊が発生した箇所を示す。計算結果と実験結果は類似しており、層理面の傾斜角の違いに起因する塑性破壊の箇所も同様である。

図より、各傾斜角における破壊発生箇所はトンネル左上となっている。実験結果を数値計算結果と比較すると、左上の破壊発生箇所が類似していることが明らかである。

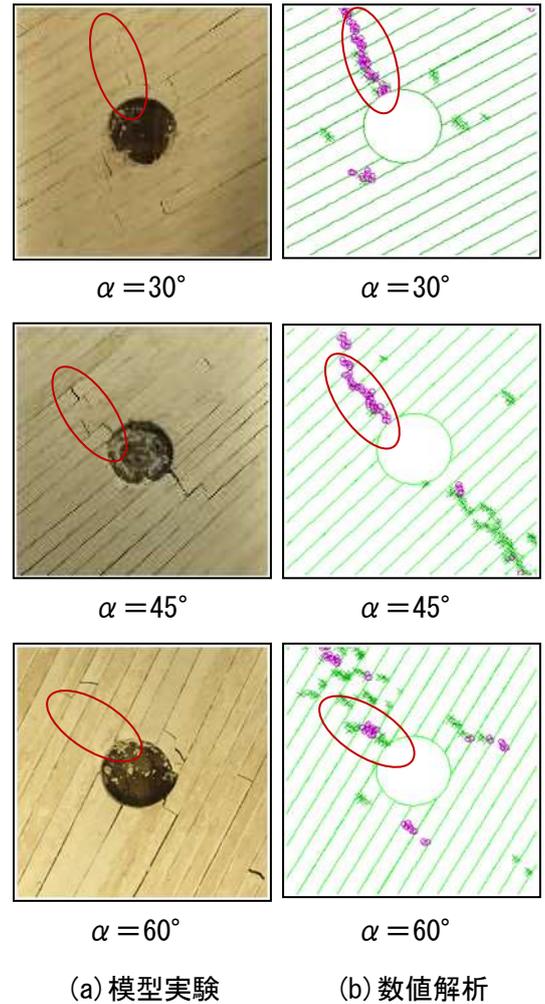
図-1に示すように、トンネル空洞を円と見立てたとき、空洞の中央を中心とし、右水平方向を 0° として反時計回りに角度を正とすると、図-3のように各傾斜角における岩盤の変位を示すことができる。図より、右上($0^\circ\sim 90^\circ$)においては傾斜角 45° のモデルの変位が最も大きくなっている。一方、左上($90^\circ\sim 180^\circ$)においては傾斜角 30° のモデルの変位が最も大きくなっている。また、天端部においては傾斜角 45° における変位が傾斜角 60° の場合と比較して約1.7倍になっていることがわかる。下部($180^\circ\sim 360^\circ$)においては全体の変位量と比較して小さくなっていることがわかる。

5. おわりに

本研究では底面摩擦模型実験と個別要素法による数値解析により、層理面の傾斜角がトンネルの変形特性に与える影響を考察した。傾斜角が変化する場合に、トンネル周辺岩盤の変形モードや破壊箇所などの変化を評価することができた。今後は異なるトンネル形状や層理面間隔、拘束圧を考慮した数値解析を実施し、最適な支保設計を考案していく。

6. 参考文献

- 1) 棚橋由彦, 熊川貴伯, 才本明秀他: 個別要素法・体積力法と底面摩擦試験による浅所地下空洞の安定性評価. 長崎大学工学部研究報告, 1999, 29(52): 125-131.
- 2) 中川光雄, 蔣宇静, 江崎哲郎: 個別要素法を用いた不連続性岩盤における亀裂発生・進展のモデル化, 土木学会論文集, 1999 (631): 397-410.
- 3) 棚橋由彦, 足立順一, 神薮大介他: 底面摩擦模型とDEMに基づく不連続性岩盤内矩形空洞の変形・崩壊挙動予測. 長崎大学工学部研究報告, 2000, 30(54): 67-74.
- 4) Jiang Y, Li B, Yamashita Y: Simulation of cracking near a large underground cavern in a discontinuous rock mass using the expanded distinct element method, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 97-106.



○, × : 塑性破壊箇所

図-2 模型実験と解析結果の比較

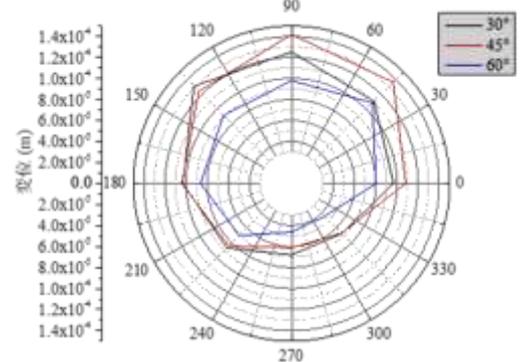


図-3 トンネル周囲における変位コンター