岩盤斜面に生じる進行性変形挙動の解明

長崎大学工学部　学生会員　○山崎　崇正　正会員　蒋　宇静
長崎大学大学院　学生会員　李　博　九州電力(株)総合研究所　正会員　山下　裕司

1.はじめに

わが国では、崩壊が危惧される岩盤斜面は多数存在している。岩盤斜面が一旦崩壊し始めると、人命に関わる事故だけでなく社会的にも多大な影響を与える恐れがある。斜面崩壊による被害を軽減・防止するために、風化や強度低下による新規亀裂の発生と進展に伴う岩盤斜面の進行性変形挙動の解明が求められている。本研究では、まず、亀裂進展解析コードの検証を行うために、亀裂を有するテストピースを用いて一軸圧縮試験を実施し、亀裂進展解析コードを組み込んだ拡張個別要素法 (EDEM)[1)]を用いた数値解析の結果と比較する。次に、底面摩擦模型装置を用いて岩盤斜面の崩壊挙動を実験的に把握し、拡張個別要素法による数値シミュレーションと比較することにより、岩盤斜面に生じる進行性変形挙動を解明する。

2.亀裂進展解析コードの検証

2.1 要素試験の概要

本試験は、Tokuyama Dental 社製岩石模擬材（石膏）Rock-1 と豊浦標準砂、水を質量比で 1:3:0.4 の割合で配合し、図-1 に示すようなテストピースを作成した。その際、テストピース中にテフロンシートを挿入することで予め亀裂を再現した上で、一軸圧縮試験を行う。テストピースには長さ 2.82cm の既存亀裂を与えており、水平に対する傾斜角度を 45 ° とした。尚、テストピースの養生条件は、25℃で 1 昼夜自然乾燥した後、40℃の乾燥炉で完全乾燥させた。一軸圧縮試験での載荷速度は 0.25mm/min とした。

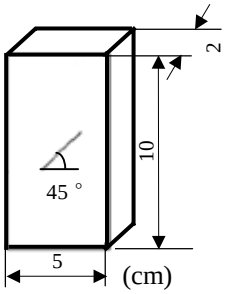


図-1 供試体サイズ

2.2 亀裂進展解析の概要

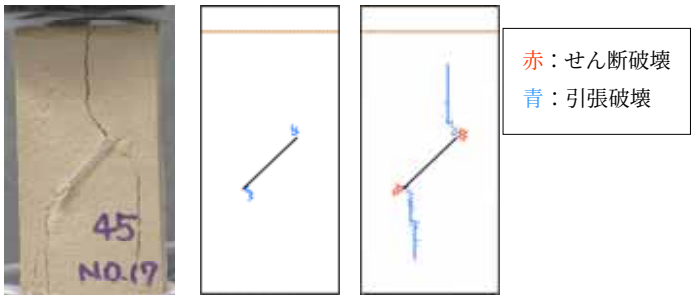
不連続面の分離や新規亀裂の発生、進展状況を表現することができる拡張個別要素法を用いて、テストピースにおける亀裂の発生と進展を解析的に考察する。テストピースの物性値は表-1 に示す。

表-1 テストピースの物性値

項目	値
密度(g/cm^3)	1.81
体積弾性係数(MPa)	1.93
せん断弾性係数(MPa)	16
粘着力 (MPa)	2.6
内部摩擦角 (°)	25.6
引張強度 (MPa)	1.5

2.3 亀裂進展の再現性

図-2(a)は試験結果(一例)を示す。新規亀裂が既存亀裂の両端から斜め方向に生じた後、上下方向に進展したことがわかる。また、既存亀裂の上端部では新規亀裂が既存亀裂とほぼ直角の方向に発生している。図-2(b)に拡張個別要素法を用いた解析結果を示す。試験結果と同様に、解析結果では、既存亀裂の両端から直角の方向に新規亀裂が発生した後、上下の方向に進展していくことがわかる。図-3 は応力－ひずみ関係の比較を示す。5 個のテストピースを用いた試験の平均最大応力は 6.33MPa に対し、解析の最大応力は 6.17MPa、試験の平均変形係数は 2506MPa に対し、解析の変形係数は 2254MPa で、ピーク値までの傾向がよく一致していることから拡張個別要素法は岩盤の変形、亀裂進展特性を捉える上で有効な手段であると考えられる。一方で、解析の残留強度が試験結果と大きく異なることから、今後は要素分割のサイズや接触面の剛性などについて再検討する必要がある。



(a) 試験結果　　(b) 解析結果
図-2 新規亀裂発生･進展の比較

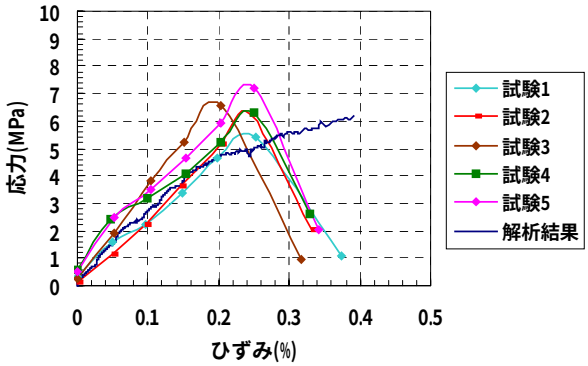


図-3 応力－ひずみ関係の比較

キーワード　岩盤斜面，拡張個別要素法，進行性変形挙動，底面摩擦模型実験
連絡先　〒852-8521　長崎県長崎市文教町 1 番 14 号　長崎大学工学部社会開発工学科　TEL 095-819-2618

3.岩盤斜面に生じる進行性変形挙動の解明

3.1 底面摩擦模型実験の概要

底面摩擦模型実験は、二次元の地盤モデルを水平に置き、重力に相当する応力を模型底面のプレートが水平に定速で移動する摩擦により作用させ、地盤内の変形や破壊の進行状況をシミュレートするものである[2)]。この方法は、安定した重力効果が得られ、模型の逐次的な亀裂の進展の観察が容易にできること、空気圧を段階的に変化させ、力学的縮尺を制御することにより、同一の模型材料を用いて、強度および大きさの異なる岩盤を模擬した実験ができるなどの特徴を有する。実験の材料はTokuyama Dental社製岩石模擬材（石膏）Rock-1 と消石灰、豊浦標準砂、水を質量比で 1:3:12:3.6 の割合で配合しており、その材料の一軸圧縮強度は 0.32MPa、変形係数は 52.14MPaである。図-4 に示す模型モデルはあるダム貯水池斜面を模擬し、斜面上の変位測点としてA、B、C、D点を設けた。幾何学的縮尺を 1/1000 とし、摩擦プレートの摩擦係数を 0.3、模型表面に作用する最大空気圧を 0.5MPaとした。また、実現場では点Bの下から断層が存在しているため、模型モデルでは切り欠きを設置して模擬した。

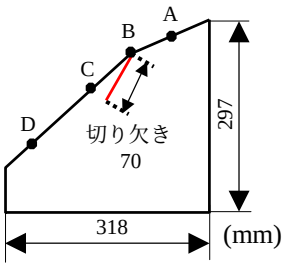


図-4 模型モデル

3.2 試験物性値と解析物性値

3.1 の結果を基に、実現場規模の斜面を想定したシミュレーションを行う。解析における強度特性は模型実験より得られた物性値を力学的相似則(1)[2)]に従い、現地盤に相当する値を算出した。ここで、tは模型の厚さ、γは単位体積重量、Λは幾何学スケール、μ_bは摩擦係数、P_{air} は模型表面に作用させる空気圧を表す。式(1)より模型の力学的縮尺Σが 1/1.67 となり、現地盤の一軸圧縮強度は 0.53MPaと求められた。

$$\Sigma = t\gamma\ \Lambda / (\mu_b P_{air}) \qquad (1)$$

3.3 進行性変形挙動の再現と安定性の検討

図-5 に模型実験結果を示す。新規亀裂が切り欠きの先端からのり先(1)、のり面中央付近(2)、供試体上部(3)に向かって順に進展していることがわかる。図-6 に解析結果を示す。図-6(a)では、最初に切り欠きの先端からのり先方向にせん断破壊が進展している。その後、のり面中央付近と斜面上部方向に進展していることから実験結果と解析結果の破壊形態が似ていることがわかる。図-6(b)から引張破壊による新規亀裂がのり先から顕著に発生し始め、斜面上部、のり面中央へと進展していった。図-6(c)ではのり先から斜面崩壊が発生しており、円弧状につながったすべり面が形成され、のり面中央で斜面の隆起が発生した。図-7 には各測点の変位の変化を示す。

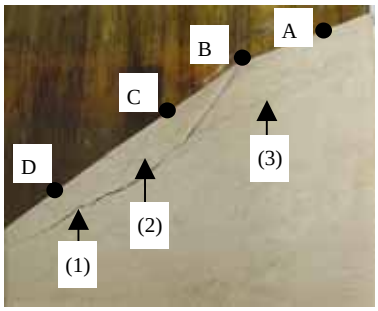


図-5 模型実験結果

図-6 の状態(b)から(c)にかけて変位が収束することなく急速に伸びており、変位速度が 3 倍以上になっている。このことから状態(b)は斜面が不安定になる臨界状態であると考えられる。また、変位速度は測点 A、D に比べ、測点 B、C の方が大きい。これは、切り欠きからのり先に円弧状に斜面崩壊が進むことに加え、切り欠きとのり面中央でも円弧すべりが生じたためと考えられる。A 点では著しい変位速度の上昇は見られなかったが、今後のり面が崩壊したことにより斜面上部が不安定化し、崩壊が起こることが危惧される。斜面における変位の変化や変位速度を求めることにより、斜面崩壊時間を予測し、岩盤斜面の維持管理に寄与することができると考えられる。

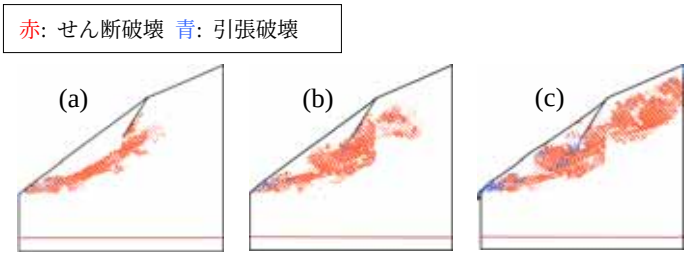


図-6 解析結果(新規亀裂の発生とすべり帯の形成)

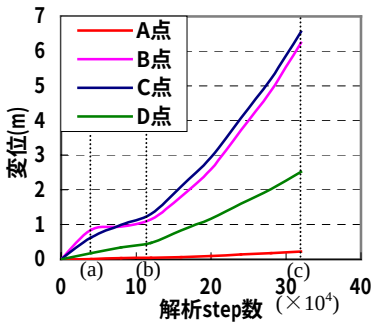


図-7 測点 A,B,C,D の変位

4.おわりに

本研究では、テストピースにおける亀裂進展特性を捉えることができ、拡張個別要素法の有効性を示した。また、底面摩擦模型装置を用いて岩盤斜面の崩壊を実験的に把握し、拡張個別要素法を岩盤斜面に適用することにより、崩壊部やすべり帯の発生プロセスを明らかにし、進行性変形挙動を再現することができた。

参考文献

1) 中川光雄，蒋宇静：亀裂発生・進展を考慮した拡張個別要素法の岩盤挙動解析への適用性について，土木学会論文集，No.673/III-54, pp.101-110, 2001

2) 蒋宇静：深部地下空洞の力学的安定に関する理論的および実験的研究，九州大学学位論文, pp.108-127, 1993