

軟岩の破壊挙動に対する解析と模型実験による検証

○ 東京大学大学院 工学系研究科 正会員 星谷 寛
東京大学大学院 工学系研究科 学生員 磯田 将
東京大学大学院 工学系研究科 正会員 堀井 秀之

1. はじめに

構造物の建設にあたって重要なことは、真に確保される安全率を定量化し、十分な安全性が確保されているのを確認することにあるが、そのためには終局限界状態を捉えた解析手法の確立が不可欠である。軟岩においては、変形の局所化、進行性破壊、すべり面の不安定進展といった破壊挙動を支配している現象を考慮する必要がある。変形の局所化の解析としては例えば井上の方法¹⁾があるが、局所化の過程を含めて解析を行なうことは工学的問題解決には現実的とはいえない。そこで、本研究では過去の研究²⁾に基づき軟岩材料の破壊挙動に対する簡便な解析手法を構築した。弾塑性解析の結果からすべり面のパスを予測する簡便な手法を提案し、予測されたパスにすべり面が発生・進展するという仮定のもとで有限要素解析を行ない、解析結果を模型実験の結果と比較検討することにより解析手法の妥当性を検証する。模型実験としては斜面破壊試験およびせん断試験を取り上げる。

2. 材料挙動のモデル化と解析手法

本研究では佐々木³⁾が提案した解析手法を用いることとした。ピーク前の弾塑性構成として Drucker-Plager の降伏条件、等方硬化、関連流動則を採用する。すべり面の発生条件としては、相当塑性ひずみが1%に達した時を考え、すべり面の特性はせん断変位-せん断応力関係により規定されるものとした。そして、次節の方法により予測したすべり面のパスにインターフェース要素を配置する。そして各インターフェース要素において、相当塑性ひずみが限界値に達した後は、図1の関係により規定されるせん断変位-せん断応力関係が満足されるものとした。

3. すべり面のパスの予測手法

本研究では以下の方法によりすべり面のパスを予測した。まず、すべり面を考慮せず、問題に対する弾塑性解析を行ない、任意の段階での応力場を抽出する。そこで得られた応力場から各要素における水平面から最大主応力面に至る角度 α を計算する。つぎに補間法を用いて角度 α の場を算出し、これと材料の内部摩擦角 ϕ により各点におけるすべり面の方向が定まるので、破壊の開始点を与えて、数値積分によりすべり面パスを追跡していく。

4. 斜面破壊試験

豊浦標準砂、石膏、水から作成した人工軟岩を用いて、平面ひずみ状態で試験を行った。実験の概略は図2の通りである。偏心量は1.0, 2.5cmの2通りとした。なお荷重変位曲線における実験結果の変位は、載荷点変位に含まれるベッディングエラーを除くために、マッチング法により載荷点直下で計測された供試体の変位を用いている。

(1) 偏心量 1.0cm のケース

すべり面のパスを図4に、荷重変位曲線を図6に示す。実験ではすべり面ははじめ円弧状に安定的に進展していくが、途中で右方に折れ曲がりほぼ直線状に不安定的に進展して供試体を上下に貫通し、同時に荷重が急落した。解析ではすべり面の不安定進展が生じるまでの現象を良好に再現できている。

(2) 偏心量 2.5cm のケース

すべり面のパスを図5に、荷重変位曲線を図7に示す。すべり面のパスの傾向は偏心量 1.0cm のケースとほぼ同じであるが、折れ曲がりの度合いが大きくなった。解析では偏心量 1.0cm のケース同様、すべり面の不安定進展が生じるまでの現象を良好に再現できている。

5. せん断試験

斜面破壊試験と同じ人工軟岩を用いて、平面ひずみ状態で試験を行った。実験の概略は図3の通りである。上載荷重は150,600kgfの2通りとした。ここでも実験結果の変位はマッチング法により載荷点直下で計測された供試体の変位を用いている。

(1) 上載荷重 150kgf のケース

すべり面のパスを図 8 に、荷重変位曲線を図 10 に示す。実験ではすべり面は載荷側で斜め下方に、反対側で斜め上方にそれぞれやや起伏しながら進展し供試体凸部中央で左右両方からのすべり面が貫通して、同時に荷重が少し急落した。解析ではすべり面の不安定進展が生じるまでの現象を良好に再現できている。

(2) 上載荷重 600kgf のケース

すべり面のパスを図 9 に、荷重変位曲線を図 11 に示す。すべり面のパスは上載荷重 150kgf のケースよりもさらに大きく起伏しており、左右それぞれからのすべり面は貫通せず最後まで安定的に進展した。解析ではピーク後の硬化挙動に至るまで、現象を良好に再現できている。

6. まとめ

提案する解析手法はすべり面が安定的に進展している範囲では有効であるが、すべり面の不安定進展に起因する荷重の急落は再現することができない。今後の課題は、すべり面の不安定進展発生の条件を明らかにすることである。すべり面の不安定進展はすべり面におけるせん断抵抗が不安定的に失われるために起こるものと考えられる。この現象を予測するためには、せん断抵抗が不安定的に失われる現象が生ずる条件を明らかにすることが必要である。

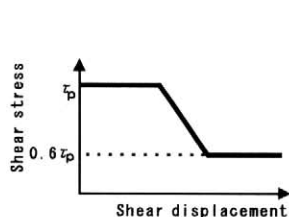


図 1 せん断応力-せん断変位関係

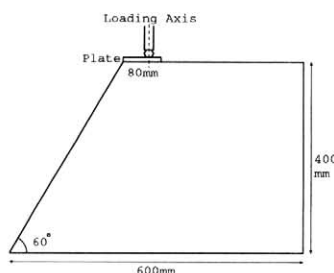


図 2 斜面破壊試験

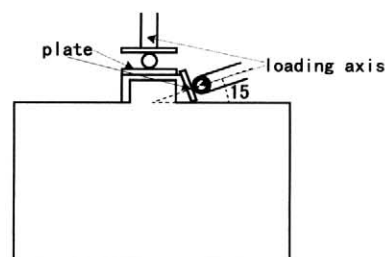


図 3 せん断試験

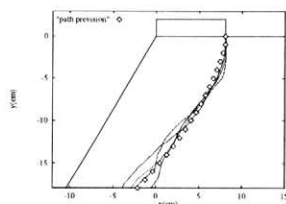


図 4 すべり面のパス
(偏心 10 mm)

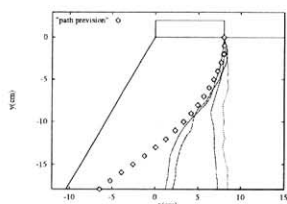


図 5 すべり面のパス
(偏心 25 mm)

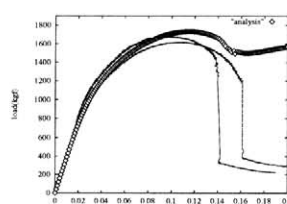


図 6 解析結果 (偏心 10 mm)

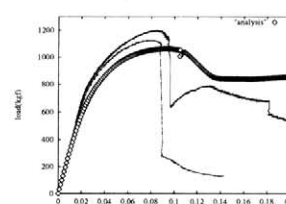


図 7 解析結果 (偏心 25 mm)

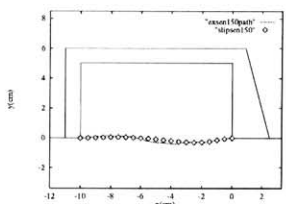


図 8 すべり面のパス
(上載 150 kgf)

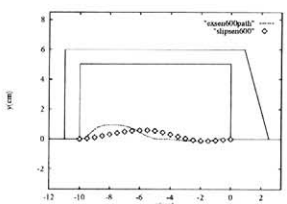


図 9 すべり面のパス
(上載 600 kgf)

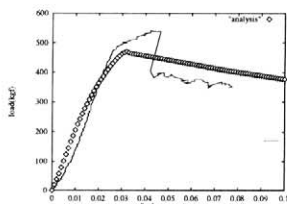


図 10 解析結果
(上載 150 kgf)

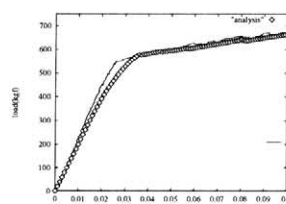


図 11 解析結果
(上載 600 kgf)

参考文献

- 1) 井上, 堀井: 熱力学的定式化に基づく変形の局所化理論と解析手法, 構造工学論文集 Vol41A, 1995.
- 2) 柳沢, 佐々木, 星谷, 堀井: 人工軟岩材料における進行性破壊の解析と模型実験による検証, 土木学会年次学術講演会, 1998.
- 3) 佐々木, 柳沢, 星谷, 堀井: 人工軟岩における軟化挙動のモデル化, 地盤工学研究発表会発表講演集, 1998.