

軟岩における破壊面・限界荷重の簡易予測評価手法の開発

○ 東京大学工学部 土木工学科 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
東京大学大学院 工学系研究科 正会員 星谷 寛

1. はじめに

阪神・淡路大震災により多くの構造物が倒壊したことをうけ、耐震設計基準の見直しが図られるなか、震災以前の耐震設計基準により作られた既存のダムを対象に改めてその耐震安全性を評価し直すべきだという社会的要請が近年高まりつつある。ダム基礎岩盤の耐震安定性評価にあたっては、真に確保される安定性を定量的に示すことが不可欠となる。

そこで本研究では岩盤のすべり面通過位置と最大荷重を評価することを最終的な目的とし、簡便で妥当性・工学的適用性をもった解析手法を開発・提案していくことにする。さらに、提案する解析手法の妥当性を検証するために模型実験を実施し、解析の結果と比較検討することにする。

2. 解析手法

既往の研究¹⁾²⁾においては、すべり面の想定位置にすべり面の幾何学的・強度特性を反映させた Interface 要素を導入して有限要素解析を行い、その結果ピーク荷重までの現象を概ね再現することができた。しかし Interface 要素の特性パラメータの設定が煩雑であったり、膨大な計算時間を要するなどの問題点が指摘される。

そこで本研究では、すべり面の発生・進展を考慮しない簡便な弾塑性解析を行うこととし、ピーク前の弾塑性構成としては Drucker-Plager の降伏条件、等方硬化、関連流動則を採用する。これに加えて Mohr-Coulomb の破壊基準より定義される局所的安全率に着目し、最大荷重を評価していくこととする。

3. 斜面破壊試験

模型実験として行う斜面破壊試験であるが、豊浦砂・石膏・水を材料として図1に示すような大きさの人工軟岩供試体を作成し、平面ひずみ条件下変位制御で載荷する。この試験はコンクリートアーチダムの基礎岩盤を模擬したものである。この際偏心量、すなわち載荷板中心から載荷点までの距離として 1.0cm, 2.5cm の2種類を採用した。

4. すべり面パスの計算手法

本研究では次に示す手法ですべり面の通過位置を予測する。まず弾塑性解析により応力場データを抽出し、水平面と最大主応力面とがなす角度 α を各要素において求める。次に補間法により角度 α の場を算出し、図2に示すようなすべり面と最大主応力面の位置関係があることに注目して、予め与えておいた破壊の開始点から材料の内部摩擦角 $\phi = 37^\circ$ を用いて数値積分を行い、すべり面を追跡することとする。

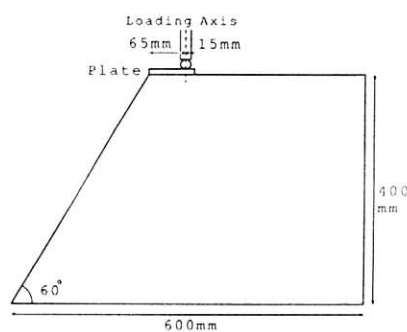


図1 斜面破壊試験供試体

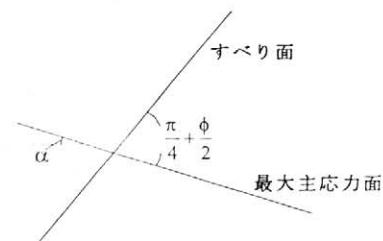


図2 すべり面の方向

5. すべり面パスの比較結果

すべり面のパスについて、解析結果と実験結果を比較したものを図3に示す。これより偏心量にかかわらず、パスが折れ曲がるまですなわちせん断破壊を起こしている領域においては良好な精度で追跡できていることが分かる。しかしパスが折れ曲がり、すべり面が不安定進展を起こして引張破壊へ移行した後は追跡不可能であることが分かる。

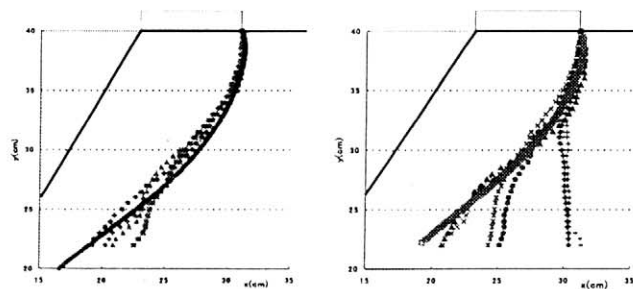


図3 パス比較結果 (偏心量: 左 1.0cm, 右 2.5cm)

6. 最大荷重の評価について

荷重変位曲線について、本研究で扱った弾塑性解析 (el-pl) 結果と不連続面を考慮した Interface 要素解析結果、実験結果とを比較したものを図 4 に示す。これより、Interface 要素解析においては実験結果とほぼ一致する最大荷重が存在するのにに対し、弾塑性解析では結果として最大荷重が求まらないことが分かる。そこでこの最大荷重に達した限界状態を判定する条件、すなわち尺度となる変位量の決定評価方法を提案していきたい。

そこで尺度 (パラメータ) として、Mohr-Coulomb の破壊基準 (図 5 参照) に則して定義される局所的安全率を導入する。図 5 より、安全率 s は次式で与えられる。

$$s = \frac{d}{r} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \cot \phi \right) \sin \phi / \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

そして、想定されるすべり面沿いの各点における安全率の値が載荷量の増加に伴いどのように変化していくか、すなわち安全率の分布形の変遷を捉えて、何らかの特徴を見出すことができるか検討していく。

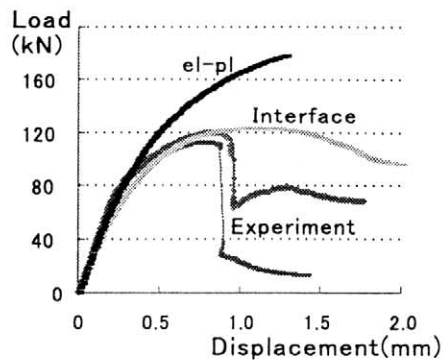


図 4 荷重変位曲線の比較結果

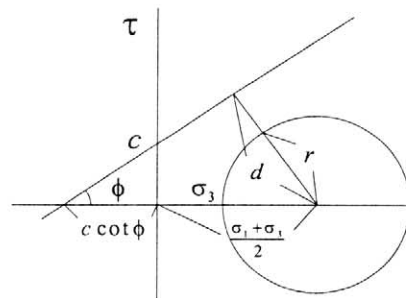


図 5 Mohr 円と破壊線

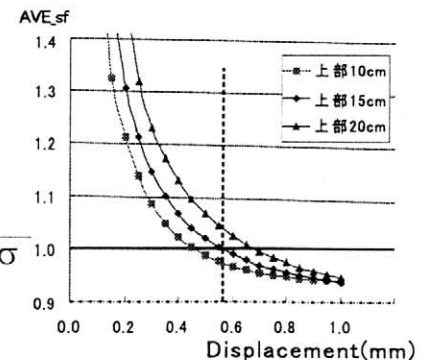


図 6 安全率平均値

7. すべり面平均安全率の導入

本研究では、限界状態の判定条件としてすべり面平均安全率を考える。これは供試体の上部に一定の深さを定め、その深さ以内にあるすべり面上の各点において安全率を計算し、その平均値をとって指標とするという試みである。

ここで、安全率平均計算の対象を上部 10cm, 15cm, 20cm と 3 種類設定して計算し、その平均値を変位量の増加に伴いプロットしたのが図 6 である。またこの図中で点線で示してある変位量が、弾塑性解析において実験のピーク荷重を与える、すなわち指標としたい値である。この結果、上部 15cm 程度を対象に安全率平均値の計算を行うと、ちょうどその値が 1 になる点を指標として概ね現実に近い結果が得られることが分かる。そこでこの安全率計算の対象領域をいかに設定するかが問題となるわけであるが、現在では経験や主観に頼らざるを得ず、客観的な算出方法の構築を今後の課題として残しているのが現状である。

8. まとめ

本研究では弾塑性解析のみを用いた最大荷重の評価手法を模索してきたが、これにより不連続面の発生・進展を考慮しない解析手法の限界が明らかになった。すべり面の通過位置は、パスが折れ曲がるまでは高い精度で予測可能であるが、最大荷重の評価に関しては Interface 解析を行った方が信頼性の高い結果を得られる、との結論に達した。

しかし、簡便に得られるこの弾塑性解析結果に別のパラメータを必要に応じて導入することにより、最終目標である限界荷重の評価ができる可能性は将来的に十分あると本研究を通して思われた。手法の一般性を高めるための課題も見えてくるので、今後の研究課題として取り組んでいければと考えている。

参考文献

- 1) 佐々木 規雄, 軟岩における進行性破壊と模型実験による検証, 東京大学修士論文, 1998
- 2) 柳沢 賢, 軟岩におけるすべり面の不安定進展基準の提案と模型実験における検証, 東京大学修士論文, 1999
- 3) 佐々木 規雄, 柳沢 賢, 星谷 寛, 堀井 秀之, 人工軟岩材料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