

(III-117) 軟岩における進行性破壊と変形の局所化に関する研究

○ 千葉工業大学 学生員 瀬戸 彰 正員 清水 英治, 渡辺 勉
東京大学 正員 堀井 秀之, 吉田 秀典

1. はじめに

地盤材料・岩盤の特性において力学的特性(変形特性および強度特性)を把握することは、土木構造物を建設する際に重要なことである。ここで、材料の強度も重要であるが、多くの場合は変形が局所的に集中し、すべり面が形成されて材料は破壊に至るため、構造物の設計には終局限界状態を捉えた解析手法が必須となる。変形が局所化し、すべり面の進行・成長に現象が支配されるような場合、不連続面の幾何学的特性、変形特性、強度特性を把握し、それを解析手法に反映させる必要がある。こうした局所化およびすべり面の進行性現象を把握する目的で、佐々木ら¹⁾は人工軟岩の平面ひずみ試験を行ない、実験を基に、ピーク前の構成則、破壊条件、そして破壊後のすべり面のモデル化を行なっている。さらに、人工軟岩によるせん断試験を行ない、構築したモデルを考慮に入れた解析による結果と実験結果を比較を通して、モデルの妥当性の検証をしている。結論として、変形の局所化およびすべり面の進行性現象が、材料全体の挙動を支配している現象であり、提案したモデルは実現象をある程度再現できるとしている。しかしながら、進行性破壊は不安定に進展する可能性があること、そして材料の挙動は、発生したすべり面の寸法や形状など幾何学的特性や強度特性にも強く依存する可能性があることと指摘されている。そこで本研究では、すべり面の幾何学的特性と強度特性に着目し、それらが材料全体の挙動にどのような影響を及ぼすかを解析的検討することを目的とする。

2. 材料挙動のモデル化と解析方法

図1は佐々木ら¹⁾が行なった平面ひずみ圧縮試験より得られた、典型的な応力-ひずみ曲線の一例である。図より、載荷直後は弾性的な挙動を呈し、その後材料基質部が降伏して、ピークまでややひずみ硬化的な挙動をしていることが分かる。そこで佐々木らは、ピーク前の変形挙動に関しては Drucker-Prager 型の降伏関数、等方硬化、流れ則を採用し弾塑性構成式を導いている。

また実験より、材料はピークに達してもすぐに破壊に至ったり、軟化挙動を生じず、荷重(応力)を一定に保ったまましばらく変形が進行し、その後軟化現象を伴って残留状態に至ることが確認されている。これをモデル化するために、実験において生ずるすべり面とはほぼ同じ位置にせん断すべりを生ずる要素(以降、インターフェイス要素と呼ぶ)を導入している。この要素の構成関係(せん断応力-変位関係)は図2の通りで、この要素はある応力 f_p に達すると変形を開始し、しばらくピーク応力を保持したまま変形(図中の L)が進み、その後、負の勾配も有して残留状態($u, 0.6f_p$)まで除荷するものとしている。

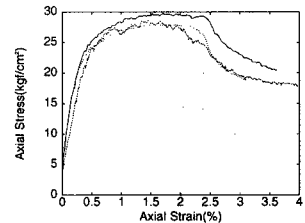


図1 応力-ひずみ曲線(実験結果)

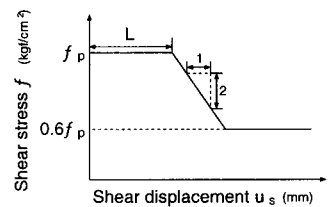


図2 インターフェイス要素の構成関係

この要素は厚さを有せず、かつ法線方向には変形しない。また、すべり面の変形が、それを拘束している垂直応力に依存するものとしている。こうした要素を節点間に導入することで、すべり面の変形を表現することが可能になる。本研究においても、解析の対象を人工軟岩とし、その挙動を再現するモデルとして、佐々木らが提案しているモデルを採用し、すべり面の幾何学的特性および強度特性が材料全体の挙動にどのような影響を及ぼすかを検討する。

まず本研究では、すべり面の幾何学的特性と材料全体の挙動の関係を調べるために、すべり面形状が直線的なもの(図3)および曲線的なもの(図4)という二種類の解析メッシュを用意した。いずれの解析において、材料基質部の弾性係数を $7,603.7 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比を 0.1544 とし、インターフェイス要素の特性は、表1のように3通りを設定した。また、比較解析として、すべり面を考慮しない単なる弾塑性解析も施した。尚、材料基質部は、全ての解析におい

キーワード: 軟岩, 地盤破壊, 進行性破壊, 変形の局所化, 平面ひずみ圧縮試験, 有限要素解析

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL:03-3812-2111 FAX:03-3812-4977

て Drucker-Prager 構成則を適用し、ピーク前の挙動が合致するように、そのパラメータである粘着力を 2.5 kgf/cm^2 、内部摩擦角を 37° と設定した。載荷は実験と同様、変位制御で行なった。有限要素解析の solver としては、汎用有限要素コード Marc（日本マーク社）を採用し、これに佐々木らの提案しているモデル（user subroutine）を組み込んで、二次元平面ひずみの条件下で解析を行なった。

3. 解析結果

図 5 から図 7 にそれぞれ弾塑性解析、直線のすべり面を仮定した解析、曲線のすべり面を仮定した解析の応力-ひずみ曲線を、実験結果と併せて示した。これらより、すべり面の発生・進展を考慮しない弾塑性解析では、実験結果で見られるようなピーク後の軟化現象を再現できていない。ピーク後の挙動を再現するために、軟化構成則を用いた場合、ピーク後にやや軟化するものの、解が収束せずに発散してしまった。これに関しては、solver の精度を上げることで問題解決は可能かもしれないが、汎用有限要素コードの書き換えが可能でない場合、他の手段を取らざるを得ない。一方、インターフェイス要素を導入して、陽な形で不連続面を解析に取り込んだ解析では、ピーク後の軟化現象を再現できていることが判る。すべり面を直線とした解析では、全ての解析ケースにおいて、材料巨視の挙動においてもピーク応力が一定に保持され、さらに軟化勾配も比例的となっている。実験では、ピークを保持をしていると見なされる範囲においてもやや応力の増減がみられ、また軟化勾配も一定ではない。すべり面を曲線とした解析では、解析ケースによってバラツキが見られるが、実現象に極めて近いものが存在している。

次に、すべり面の特性を変化させた場合について考察を加える。図 6 に着目すると、軟化勾配を変化させた場合、材料の巨視的挙動も顕著に変化し、すべり面の軟化勾配に適当な値を選ぶことで、実際の軟化現象はある程度までは再現することが可能であることが判る。一方、すべり面の鉛直剛性を変化させた場合、例えば Case2 と Case3 の解析を比較すると、両者にほとんど差がない。つまり、すべり面が直線的であれば、ピーク後の挙動は、すべり面の特性の一つである軟化勾配に支配されると言える。しかし、すべり面が曲線的になると、すべり面の特性としては同じ値を用いても、巨視的な挙動は大きく異なる。したがって、すべり面の幾何学的特性は、ピーク後の材料を挙動に大きな影響を与える因子であることが判明した。

4. まとめ

本研究では、すべり面の幾何学的特性と強度特性に着目し、それらが材料全体の挙動にどのような影響を及ぼすかを解析的に検討を行なった。解析より、すべり面の強度特性が材料のピーク後の挙動に影響を与える因子であるということは従来より認識されているが、本解析によって、材料のピーク後の挙動はすべり面の幾何学的特性にも強く依存することが判明した。今後は、ピーク後の複雑な挙動とすべり面の幾何学的特性にどのような関係があるのかを明らかにしていくことが必要である。

参考文献

1) 佐々木, 柳沢, 星谷, 堀井: 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, pp1205-1206, 1998

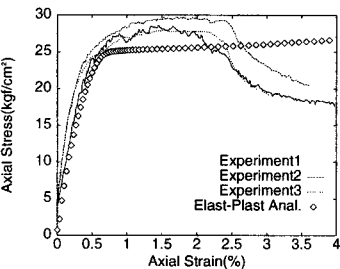


図 5 応力-ひずみ曲線（弾塑性解析）

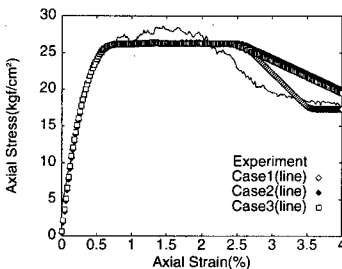


図 6 応力-ひずみ曲線（直線すべり面）

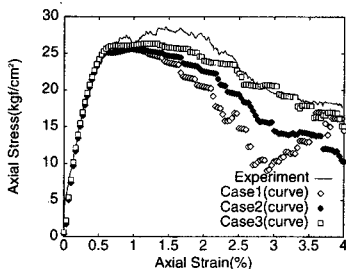


図 7 応力-ひずみ曲線（曲線すべり面）

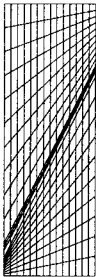


図 3 直線メッシュ



図 4 曲線メッシュ

表 1 インターフェイス要素の特性

Case	軟化勾配 (kgf/cm^2)	垂直剛性 (kgf/cm^2)
Case1	-20	1.8×10^5
Case2	-10	1.8×10^5
Case3	-10	3.6×10^5