

Ⅲ-374

マニホールド法による斜面上岩塊の運動モードの予測

京都大学工学部	正会員	大西有三
京都大学工学部	正会員	○田中 誠
京都大学大学院	学生会員	伊藤崇博

1. はじめに

不連続性岩盤斜面の安定および破壊は、複数の不連続面によって形成される岩塊の移動可能性に支配され、土質斜面のようにすべり土塊が潜在的すべり面に沿って破壊するという考え方では説明できないことが指摘されている。一方、個々の岩塊の運動を逐一解析する手法として、近年不連続変形法や個別要素法等が開発されてきたが、メッシュ作成の煩雑さや岩塊自体の変形の表現等、問題点がないとはいえない。本研究では、新たに開発されたマニホールド法を用いて、簡単な斜面上岩塊の運動をシミュレートし、同手法の適用性と従来の解析手法に対する優位性の検討を行った。

2. マニホールド法について

マニホールド法は、1992年にShi¹⁾によって開発された新しい解析法である。この手法は、大まかに言えば、先に開発された不連続変形法(DDA)を改良したものである。不連続変形法はすでにいくつかの実際問題に適用されているが²⁾、ブロック自体の変形の近似精度が悪い、個々のブロックの大きさが極端に異なる場合解の収束が悪い、等の問題点を残している。

マニホールド法は、有限要素法(変位法)や不連続変形法と同じく、変位を未知関数として、局所的に定義される形状関数(近似関数)の重ね合わせによりこれを近似する。マニホールド法では、Fig. 1に示すような数学メッシュと物理メッシュと呼ばれる2種類の独立したメッシュを用いることを最大の特徴とする。ここで、数学メッシュは有限要素法におけるメッシュのような形状関数の定義域である。現状では、形状関数は座標の1次関数である。また、有限要素法等とは異なり、数学メッシュは互いに重なり合い、解析対象領域全体を覆う。このことから、数学メッシュは被覆(cover)と呼ばれる。一方、物理メッシュは形状関数の積分領域を定義するものであり、材料の体積、節理、ブロックおよび異なった材料の領域の接合部分を表現する。

各々の数学的被覆において個別に形状関数が定義され、被覆の共通領域においては各被覆の形状関数の重み付き和(加重平均)を解の近似として与える。そして、不連続変形法と同様にポテンシャルエネルギー最小化の原理に基づき、要素剛性行列が導かれ、各要素において初期応力、集中荷重、物体力、慣性力、固定点に関する行列およびベクトルが定義され、また要素間においては、垂直接触、せん断接触、摩擦力に関する行列およびベクトルが定義される。これらを重ね合わせて全体剛性行列および全体外力ベクトルを構成し、支配方程式を連立1次方程式に離散化する。これを、適当な時間ステップ間隔のもとで、剛性行列および外力ベクトルを時間ステップ毎に更新しながら解いていき、解析対象領域全体の挙動を求める。ここで、もしあるブロックが他のブロックに対して貫入を生じれば、ペナルティ法³⁾による修正を行う。なお、有限要素法による非定常計算と同様、解が収束しない場合は時間ステップを短縮して計算し直す。

3. 解析結果および考察

本解析では、Fig. 2に示すような斜面傾斜角30°の階段状を成す基盤上に10個の等幅の長方形ブロックが並ぶ不連続性岩盤斜面の2次元モデルを解析対象とした。接触摩擦角 $\phi=35^\circ$ とし、その他の条件はTable 1に示す通りに設定した。材料物性は岩塊と基盤とで同一とした。なお、各条件は次のような基準から設定した。

- 1ステップの時間幅は、小さくした方が精度を向上させることが可能だが、計算時間が長くなる。従って、なるべく1ステップの計算に要する時間が小さくなり、かつ結果の精度に影響を及ぼさない程度の値を用いる。
- ペナルティは、接触貫入判定を行う際に用いる接触パネの剛性のことで、ヤング率の100~1000倍を目安として設定する。これが大きすぎると解の修正量が過大になり、小さすぎると修正量が過小になる。また、現段階ではこのペナルティは法線方向、接線方向とも同じ値を用いている。
- 最大許容変位比は、1ステップにおいて許容される変位量をブロックの最大辺長に対する比率で表したものであるが、解析モデルに現れるブロックの最大辺長と最小辺長の比を基準として、接触貫入判定に支障をきたさない値を設定する。最大許容変位比を越える変位が生じた場合は、時間ステップを短縮して計算し直す。

解析に先立ち、ブロックと基盤との間や隣接するブロック間の抗力や摩擦力等の干渉を考慮して予備的考察を行った⁴⁾。その結果、ブロック1, 2はすべり出す状態に、ブロック3から7はトップリングを生じる状態にあり、最上部のブロック8, 9, 10の3つは静止、安定すると推定された。

次に、マニホールド法による解析結果をFig. 3に示す。本研究では、数学メッシュとして規則的な三角形分割を採用した⁵⁾。最上部から3つのブロック8, 9, 10は静止し安定した状態となり、ブロック7からトップリングが始まっている点は、予備的考察との一致が見られる。従って、このマニホールド法を用いた階段状の不連続性岩盤斜面の安定解析により、現実には起こりうる斜面の崩壊のモードをほぼ忠実にシミュレートでき、本手法の妥当性が確認された。しかし、ブロック2の崩壊モードが本解析結果と予備的考察とは一致しなかった。これは、現段階のマニホー

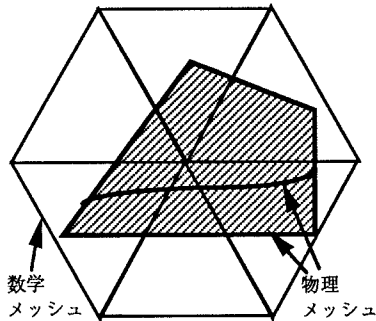


Fig. 1 マニホルド法のメッシュ分割

Table 1 解析の諸条件

解析法	静的解析
1ステップの時間	0.05 sec
時間ステップ数	3000
材料の単位質量	2551.02 kg / m ³
面積力	2.5×10^4 N / m ²
ヤング率	9.8×10^8 N / m ²
ポアソン比	0.24
ペナルティー	2.5×10^{11} N / m ²
最大許容変位比	0.001

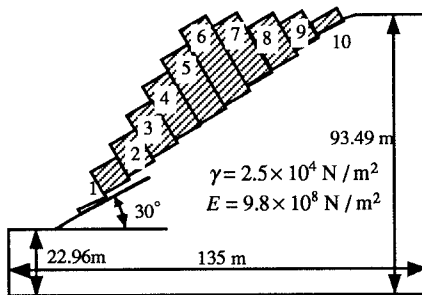


Fig. 2 不連続性岩盤斜面の安定解析モデル

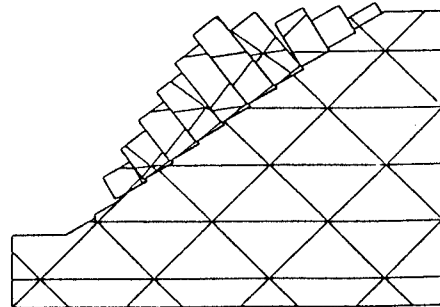


Fig.3 解析結果

ルド法の計算において、摩擦を剛性一定のせん断バネによって表現しているためブロックの相対変位が生じないと摩擦力が発生しないことと、接触貫入判定におけるペナルティに法線方向と接線方向で同じ値を用いていることが大きな要因であると考えられる。今後は、これらの点について改良を加える必要がある。

4. おわりに

本研究では、岩塊の集合体としての不連続性岩盤の運動力学的挙動の解析をマニホルド法によって行った。簡単な不連続性岩盤斜面の安定解析において、各ブロックの挙動、状態について予備的考察とある程度の整合性が認められ、マニホルド法の妥当性が確認され、地盤工学への適用性が示された。今後は、マニホルド法を用いて多くの地盤工学の実際問題を解析するとともに、特に不連続性岩盤の挙動をより忠実にシミュレートできるよう、高次の形状関数を用いる、弾性以外（例えば弾塑性）の構成式を導入する、摩擦の表現方法を再検討する、ペナルティに法線方向と接線方向で異なった値を用いる、等の改良を重ねる必要がある。

参考文献 1) Shi, G.-H.: Modeling Rock Joints and Blocks by Manifold Method, Proc. 33rd US Symp. Rock Mech., 639-648, 1992. 2) Ohnishi, Y., Sasaki, T. and Tanaka, M.: Modification of the DDA for Elasto-plastic Analysis with Illustrative Generic Problems, Proc. 35th US Symp. Rock Mech., 1995 (in printing). 3) 佐々木猛・大西有三・吉中龍之進：不連続変形法(DDA)とその岩盤工学への適用に関する研究、土木学会論文集、493, 11-20, 1994. 4) Hoek, E. and Bray, J., 小野寺進・吉中龍之進訳：岩盤斜面工学、朝倉書店、192-196, 1979. 5) 大西有三・G.-H. Shi・田中 誠：マニホルド法による岩盤斜面の運動力学的解析、第26回岩盤力学に関するシンポジウム、366-370, 1995.