

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 学生員 ○伊藤 崇博

1. はじめに

岩盤としての力学特性は岩実質部（母岩）の特性のみならず、不連続面の特性にも支配される。そこで、岩盤斜面の安定解析を行う際には個々の不連続面の方向や大きさの分布特性や力学的・水理学的性質を正確に把握した上で、不連続体としての岩盤全体の力学的挙動を解析しなければならない。本研究では、1991年にShi¹⁾によって開発された新たな数値解析法であるマニホールド法を用いて、不連続性岩盤斜面の崩壊するモデルについて解析を行い、この手法の妥当性を確認し、地盤工学への適用性を検討した。

2. マニホールド法の概要

マニホールド法も有限要素法と同様に、対象領域を分割し、部分（要素）の挙動を求めることによって全体（全対象領域）の挙動を求めようとするものである。変位を未知関数として、形状関数（近似関数）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。ここで、数学メッシュは形状関数の定義域であり、解析者が独自に設定することができる。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ものである。このことから、数学メッ

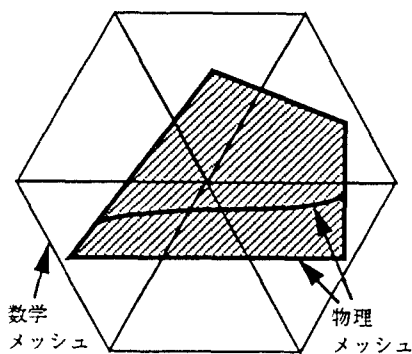


Fig.1 マニホールド法のメッシュ分割

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。これは、対象領域の形状に依存し、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もので、人為的に選択することができない。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、各物理的被覆において形状関数が支配方程式を近似的に満たしながら互いに連結し合い、全体近似関数を構成する。

マニホールド法の定式化は、不連続変形法²⁾と同様にポテンシャルエネルギー最小化の原理に基づいている。応力—ひずみ関係からひずみのポテンシャルエネルギーが求められ、これを最小化することにより要素剛性行列が導かれる。同様にポテンシャルエネルギー最小化の原理より、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。そして、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、解析対象領域全体の挙動を求める。ここで、1つの時間ステップにおいて変位が求められるが、あるブロックが他のブロックに対して貫入を生じることがある。このような場合には、ペナルティー法³⁾による修正を行う。このペナルティー法では、貫入が発生する位置に剛性の大きいバネを設け、貫入によるポテンシャルエネルギーを最小化することによって貫入に関する剛性行列および外力ベクトルを求め、全体剛性方程式に重ね合わせる。そして、全てのブロックの貫入発生位置において貫入と引張りが生じないと

いう条件が満たされるまで繰り返しこの計算を行い、解を修正する。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。まず解析に先立ち、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考察した³⁾。 $\phi=35^\circ$ の場合を考えるとブロック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る。次に、解析結果をFig.3に示す。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について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ー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

本研究において、従来の有限要素法等の手法では成し得なかった岩石ブロック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ールド法によって行うことができた。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、マニホー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、マニホールド法を用いて、多くの地盤工学の実際問題を解析し、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に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 U. S. Symp. on Rock Mech., A. A. Balkema, pp. 639-648, 1992. 2) Shi, G.-H.: Discontinuous Deformation Analysis: a New Numerical Model for the Statics and Dynamics of Deformable Block Structures, Engrg. Comp., Vol.9, pp. 157-168, 1992. 3) Hoek, E. and Bray, J., 小野寺・吉中訳：岩盤斜面工学、朝倉書店、pp. 192-196, 1979.

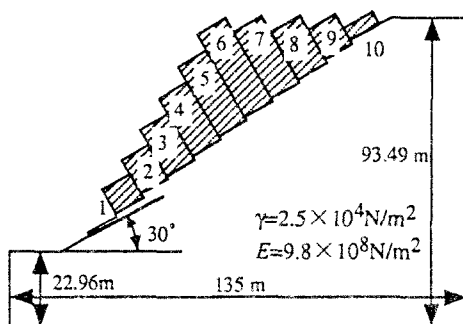


Fig. 2 不連続性岩盤斜面の安定解析モデル

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

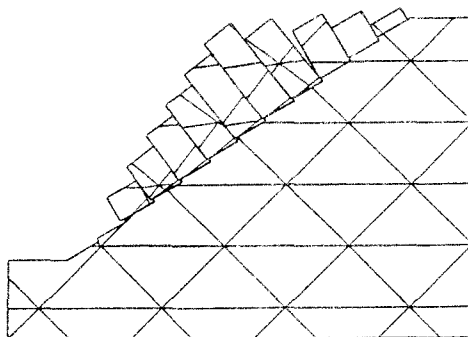


Fig.3 解析結果