

(96) 積層岩盤モデルのDDA解析

京都大学工学部	正会員	大西有三
鹿島建設	正会員	佐々木猛
京都大学大学院	学生会員	○荻田倫之

Modeling of Stratified Jointed Rock by DDA

Yuzo OHNISHI and Noriyuki Ogita

Kyoto University

Takeshi SASAKI

Kajima Corporation

ABSTRACT

Discontinuous deformation analysis (DDA) was carried out test the ability of simulating the discontinuous jointed rock mass. The DDA models of stratified jointed rock were made and evaluated in comparison with the laboratory triaxial tests. A spectrum of different failure patterns and deformation characteristics was obtained depending on the stratified joint configuration. Discrepancy between the DD analysis and the experiment results was discussed in order to improve the numerical technique.

1. はじめに

不連続変形法(DDA)はG.H.Shiによって開発された新しいブロックシステムの解析手法である。本手法は岩盤のような不連続性体の解析手法として優れたものであり、任意の弾性体の多角形で構成されるブロック相互の運動を動的、準静的に解析することができる。この手法に用いる要素は既存の不連続面で区切られた定ひずみのブロックである。有限時間におけるブロックの運動によって要素間に貫入が生じると変位を押し戻すために非常に強いバネが設置され、全ての地点で貫入がなくなるまでイタレーションが更新される。この方法によってこれまで最も困難であったブロック要素間の接触状態の問題を上手く解決することができるようになった。

本研究ではDDAを用いて積層岩盤のモデルの解析を行った。その際、ブロックの摩擦特性についての改良を行った。

2. DDA理論の概要

DDAは有限要素法(FEM)の一種であるのでその定式化もFEMと同様の手順を踏む。ただし未知数は、要素の剛体変位、剛体回転、ひずみである。個々のブロックに対して変位、変形、ひずみが許され、ブロックシステムにおいてはブロック間相互のすべり、分離、接触が可能である。要素の剛性はひずみエネルギーを最小化することによって得られる。ブロック間の接触は、辺と隅角が接した場合ペナルティ法が導入され、辺に垂直な法線方向バネと辺に平行なせん断バネが設定される。これらバネによる接触マトリックスは、バネのひずみエネルギーを最小化することによって得られ、これらは剛性マトリックスに重ね合わせられる。これによってブロック間の貫入量を一定の誤差範囲内に収める解を能率よく求めることができる。以下にDDAの特徴を述べる。

- (1) ひずみエネルギーの最小化原理を用いているのでFEMと同様に解の唯一性が保証される。
- (2) 順解析および逆解析ができる。
- (3) 動的、静的問題が同じ定式化で計算される。
- (4) ブロック要素に任意の構成則が導入できる。(弾性、非線形、弾塑性、粘性など)
- (5) 任意の接触条件(Mohr-Coulomb則など)、境界条件(強制変位など)、荷重条件(熱応力、初期ひずみ、慣性力、線分布荷重など)、ロックボルト要素などが設定できる。

3. 表面摩擦力への工学的バネの導入

従来、ブロックの貫入が生じると、ブロックの接触面に対して法線方向および接線方向の両方にペナルティ法が適用されてきた。この時ブロックの表面の摩擦力が強度以下の場合、Lock条件とよび変形は元の位置に戻している。しかしこの方法では要素間の力の伝達と計算の収束性が悪く、正しいと思われる結果は得られにくいと思われる。そこで本研究においては法線方向のみにペナルティ法を用い、接線方向には工学的なバネを与えることを試みた。ここではFig.1に示すMohr-Coulombの摩擦特性を用いている。

Fig.2に示すように、法線方向の貫入量を s_1 、接線方向の変位を s_2 、接線方向に与える工学的バネの剛性を K_s とすると、法線方向の圧縮力 R_n および接線方向のせん断力 R_s はそれぞれ

$$R_n = p \cdot s_1, \quad R_s = K_s \cdot s_2$$

で表すことができる。ここに p ：ペナルティ法による接触ばね剛性である。

ここで接線方向に与えられる工学的バネの条件として以下のように場合分けを行う。

- (1) R_n が圧縮で、 R_s がMohr-Coulombの摩擦則よりも小さいとき、すなわち

$$R_n < R_s \tan \phi + c$$

この時 K_s を与える。

- (2) R_n が圧縮で、 R_s が滑動をひきおこすに十分大きいとき、すなわち

$$R_n \geq R_s \tan \phi + c$$

この時 $K_s = 0$ とする。即ちこの場合、釣り合い式の係数マトリックスや外力ベクトルに対してバネによる荷重は加算されなくなる。

4. 新しい手法の適用性

今回改良を行った手法によるプログラムを用い、簡単なモデルの解析を行った。その結果、従来の手法で解析した結果に比べ明らかに接触点においてすべりが生じやすくなった。その結果をFig.4に示す。Fig.4-aは従来の手法で解析した結果で、Fig.4-bは K_s バネ導入後のプログラムで解析した結果である。その他の解析条件は全く同一である(Table 1)。解析のステップ数はともに100ステップであるが、変更前のプログラムでの結果はトータルタイムが約2.4秒で変更後の解析

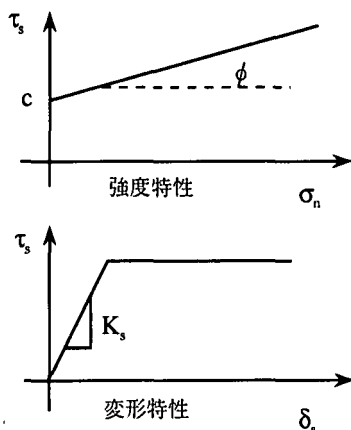


Fig.1 ブロック表面の摩擦条件

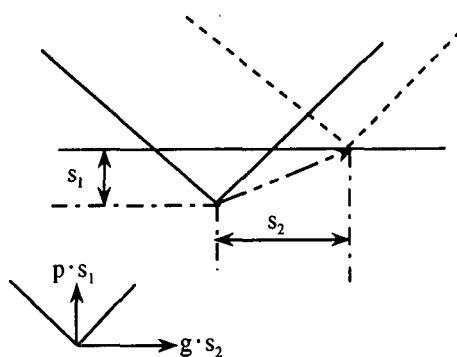


Fig.2 ペナルティ法

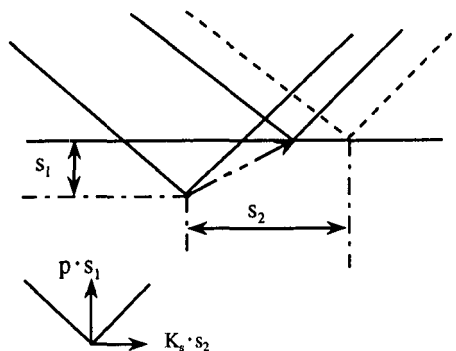
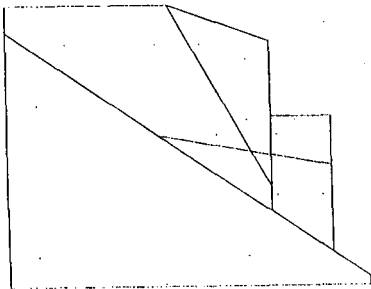


Fig.3 工学的バネの導入

は約1.3秒である。しかも時間が短いにもかかわらずブロックの変位は後者の方が大きくなっている。この結果から見る限り、すべり摩擦力が減少していることは明らかで、プログラムの変更点は正しく機能していると思われる。要素間のすべりに関する問題を含む複雑なモデルであればより早く実際に近い解が得られるようになるであろう。



解析モデル

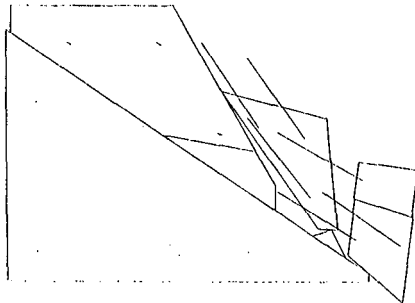
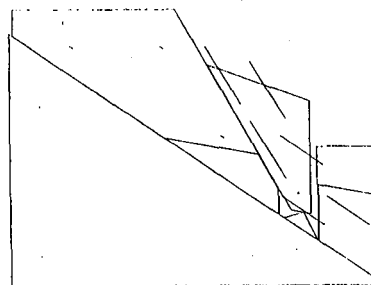
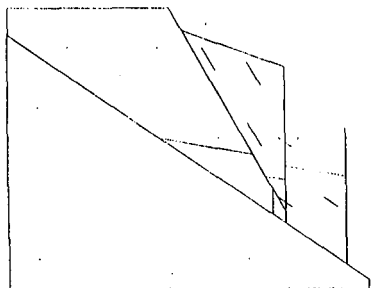


Fig.4-a 従来の方法での解析

Table 1 斜面変形の解析条件

解析方法	動的解析
時間ステップ数	100
最大許容変位比	0.01
単位面積質量	2500 kg/m ²
単位面積重量	24500 N/m ²
ヤング率	2.15×10 ⁹ N/m ²
ポアソン比	0.2
接触摩擦角	40 deg.
粘着力	3×10 N/m ³
せん断バネ剛性	Ks =2.0×10 ¹⁰

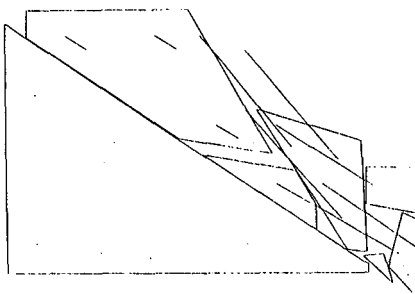
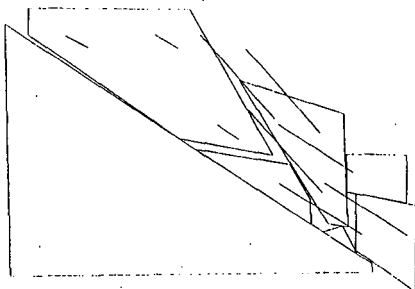
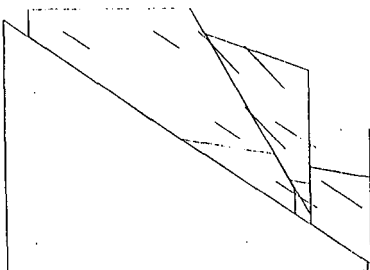


Fig.4-b Ksバネを導入した解析

5. 積層岩盤の解析

1) 解析に用いたモデル

Fig.5に示すようなモデルを用いて解析を行った。積層部分の大きさは60cm(幅)×130cm(高さ)である。卓越節理面が水平面となす角度を β として $\beta=60^\circ$ の場合の解析を行った。解析条件をTable 2に示す。ここで今回新たに導入した接触点における接線方向摩擦力を示す工学的バネの剛性 K_s はヤング率とほぼ同じ値を便宜的に用いた。左右に置かれた載荷用ブロックを用いて拘束圧をかけた。このブロックは岩盤ブロックに比べ十分に柔らかくし、さらに岩盤モデルと接する部分は全く摩擦力がはたらないものとしてブロックの変位に対して拘束圧の変化が極力小さくなるようにした。四隅の三角形のブロックは左右の荷重用ブロックが上下に大きく変位するのを防ぐための固定ブロックである。圧縮荷重については、一番下の大きなブロックを固定して最上のブロックの重心に下向きに点荷重をかけた。

2) 解析結果

まず静的解析を行った。このときの応力とひずみの関係図をFig.6に示す。静的解析の場合、すべり破壊の発生する圧縮荷重の大きさがわかりづらい。これはステップ毎に要素の速度が0に更新されるので、1ステップの間の変位が非常に小さくなってしまったため、どの時点で破壊が始まったのか判定できないからである。また現在のプログラムでは、接触時のすべり摩擦力がステップ更新毎に0に更新されてしまうためある程度の圧縮荷重がかかるといつまでも少しずつせん断変位が進行していく。Fig.5は200ステップ(トータルタイムはおおよそ0.02秒)までの変位を示す。なお圧縮荷重を4 MN/m²で5000ステップ(約0.5秒)まで計算した結果200ステップに比べ約2倍の変位しかおきていなかったため圧縮荷重の大きい場合でも図の値の2倍程度で収束するものと思われる。

Fig.5で示された変位量は実験¹⁾で求められた実際の変位量に比べると圧縮荷重が小さい間は差は小さいが、荷重が大きくなるとかなり小さな値となる。完全に収束させたとしても実験値よりも小さな値となることが予想される。

動的解析では変位が振動するため収束するまでにかなりの時間がかかるため小さな圧縮荷重でも正確な応力変位関係を得ることはできなかった。しかし圧縮破壊の始まる軸差応力は、実験値(約1.7MN/m²)に比べてかなり小さい値ではあるが、 $\beta=60^\circ$ ではおおよそ $\sigma_z=0.65$ MN/m²であり、はっきりとした境界が現れた。この境界はこれまでのDDAプログラムでは求まらなかったものであり今回接触部分に工学的バネを導入した結果うまく求められるようになった。値が小さいこ

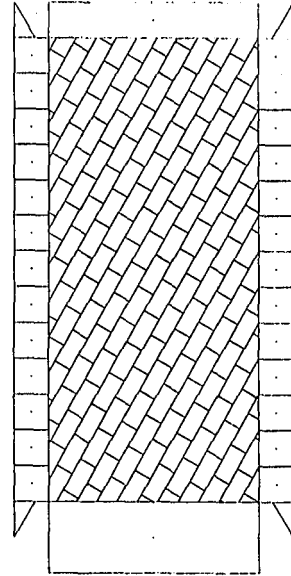


Fig.5 解析モデル

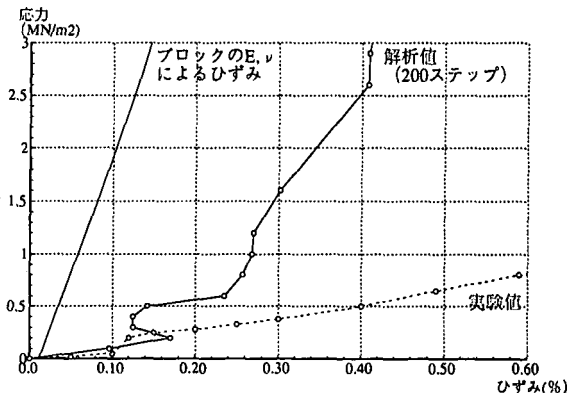


Fig.6 応力と変位の関係 $\beta=60^\circ$ 静的解析

Table 2 二軸試験の解析条件

解析方法	動的解析
時間ステップ数	1000
最大許容変位比	0.001
単位面積質量	2500 kg/m ²
単位面積重量	24500 N/m ²
ヤング率	2.15×10^9 N/m ²
ポアソン比	0.2
接触摩擦角	42 deg.
粘着力	0
せん断バネ剛性	$K_s = 2.0 \times 10^9$ MN/m ²
拘束力	4.0×10^5 N/m

とに関しては要素間の接触時に設定される接線方向バネの剛性 K_t の値を変えることによって適性化できるのではないと思われる。

Fig.7は完全に圧縮破壊をおこした後のモデルを示している。このときの圧縮荷重は 1.6 MN/m^2 である。動的解析を行うと、実験でおきたような一本のすべり線が発生するのではなく節理線が全体的にすべりだして潰れてしまうようである。これは全ての節理線が全く同じ特性を持っており、少しのばらつきもないものとして解析を行っているからではないかと考えられる。卓越節理線のうち一本のせん断強度をやや弱くしておくとその線に沿ってすべりが生じるのではないだろうか。

5. 結論

1) 要素間に接触、貫入が生じた場合に要素間の摩擦条件にMohr-Coulombの摩擦則を適用することによって、大きなすべりが生じる様なモデルの場合より現実に近いブロックの挙動解析が行えるようになった。

2) 現在のプログラムでは静的解析を用いると破壊強度を知ることはやや困難であると言える。この点については、すべり摩擦力をステップ毎ではなく、すべりが生じたときのみ更新を行うようにプログラムの変更を行う必要がある。

3) 動的解析を用いると圧縮応力が小さいうちは変位が振動してしまうので応力変位関係は求まりづらいが、 K_t バネを導入することによっておよその破壊強度は求めることが可能となった。

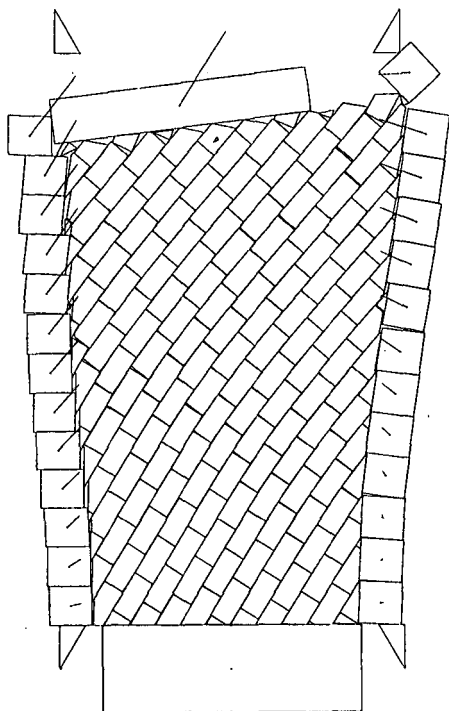


Fig.7 圧縮破壊したモデル

参考文献

- 1) Reik, G., Zacas, M.: Strength and Deformation Characteristics of Jointed Media in True Triaxial Compression, Int J. Rock Mech. Mn. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 15, pp. 295-303, 1978
- 2) 佐々木猛, 大西有三, 吉中龍之進: 不連続変形法(DDA)とその工学への適用に関する研究, 土木学会論文集 No.493 / III-27, pp.11-20, 1994.6
- 3) (社) システム総合研究所: DDA(discontinuous Deformation Analysis) 解説書, 1993