

(39) モザイク紋様モデルを用いた
個別要素解析について

京大 正 大西有三
正 堀田政國
○学 青木謙通

1. まえがき

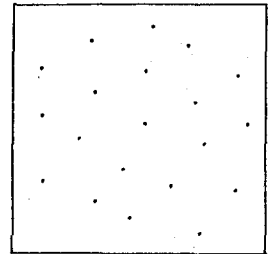
亀裂性岩盤の応力・変形・強度特性は岩盤中の亀裂の状態に大きく影響を受ける。しかし、強度を支配する岩盤の崩壊時の亀裂状態は推測が非常に困難である。したがって、従来のFEM解析、RBSM解析、個別要素法等で人為的に不連続面を設定することは非常に困難であり、ひいては、全体的な岩盤の応力・変形・強度特性を誤って設定することにもなりかねない。

本研究では岩盤亀裂特性の不規則性を取り入れるためモザイク紋様モデル（ポロノイ・モデル）を用いた要素分割を行い、個別要素法（DEM）と組み合わせることにより亀裂の不規則性を考慮した岩盤の応力・変形・強度特性を解析している。解析例としては一軸圧縮試験の二次元モデルを取り上げている。この一連の解析は岩盤の応力・変形・強度特性におよぼす要素細分化の影響、要素の幾何学形状による歪硬化・軟化特性、歪速度の影響、拘束圧の影響を顕著に表している。

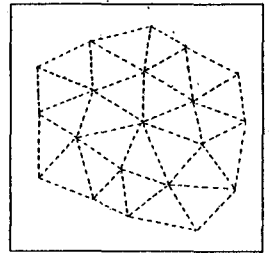
2. 解析手法

2. 1 解析領域の分割

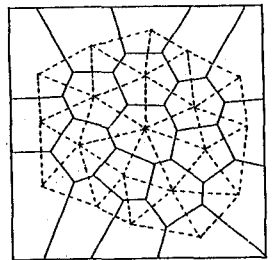
二次元一軸圧縮試験のシミュレートのため、縦横2対1の長方形領域を亀裂のランダム性を考慮してモザイク紋様に分割（ポロノイ分割）する。この分割は図1に示すように、まず、a) 乱数の発生により領域内に特定の数（要素数に相当）の核を発生させる。つづいて、b) 各点を結び三角形網を作る。これをデロネイ三角形網という。つぎに、c) 各辺の垂直二等分線により領域を多角形に分割する。この分割をポロノイ分割という。図2には長方形領域をそれぞれ25、50、100個の要素に分割したものを示している。この分割はここに示したような乱数によるものの他に、核を均質に配置したり、統計的手法により配置するなど、実際の亀裂特性に対応させることが可能である。



a) 核の設定

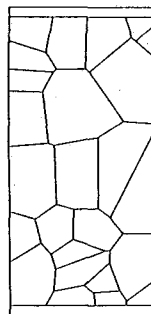


b) デロネイ三角形網

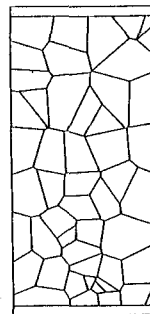


c) ポロノイ分割

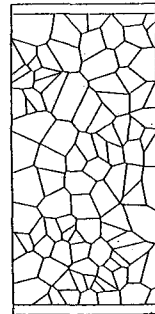
図1 ポロノイ分割の手法



a) 要素数25個



b) 要素数50個



c) 要素数100個

図2 要素分割

2. 2 応力・変形解析

応力・変形解析にはCundall²⁾により提案された個別要素法 (DEM) が用いられた。この手法は各要素ごとにたてられた運動方程式を時間差分法にて解くことにより全体的な挙動を解析するものである。ポロノイ分割により得られる多角形要素のように任意形状の要素に適用できることも個別要素法の特徴である。

2. 3 岩盤モデル

岩盤は上述のようにポロノイ分割によりモザイク状に分割される。各要素は剛体としてとりあつかわれ、変形しない。各要素の接点においては、a) 圧縮力に対しては弾粘性モデルであるホークト (Voigt) モデル、図 3. 1 (a)、を適用し、b) せん断力に対してはスライダ・ホークト・モデル (弾粘塑性モデル)、図 3. 1 (b)、を用いた。また、c) 引っ張り力に対しては各要素は自由に運動する。本解析で用いられた材料定数は表 1 にまとめられている。これらの値は従来の研究をもとに経験的に設定されたものであり、その決定手法に関してはまだ研究が始まったばかりである。³⁾

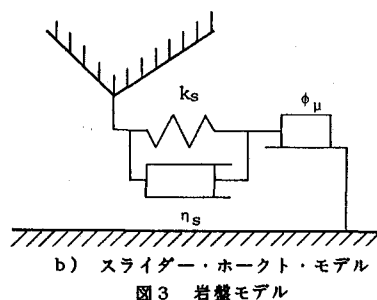
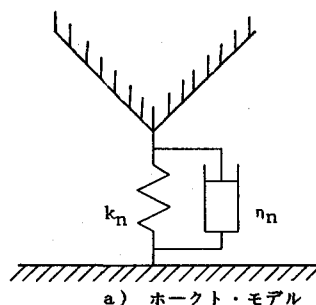


図 3 岩盤モデル

3. 解析結果および考察

解析モデルは前述のような二次元一軸圧縮試験をシミュレートしたものである。側方は無拘束であり、下端を固定し、上端から圧縮変形 (歪制御)、もしくは圧縮応力 (応力制御) を加えている。

3. 1 要素細分化の影響

要素細分化の影響を調べるために図 2 で示された 25、50、100 個の要素分割に対して歪み制御の解析を行った。歪み速度はいずれも 0.83%/sec である。図 4 はそれぞれの要素分割に対する応力・歪み曲線を示している。分割数 100 個のものが最も変形しやすく、強度も最小となる。直感に反して、分割数 50 個のものが 25 個のものよりも高い強度を示したのは要素形状と配列等により変形過程でアーチング現象を生じたものと考えられる。一般に、分割数が多くなると変形しやすく強度も低くなると考えられるが、この解析例は要素形状や配列の影響を無視できないことを示唆している。

解析に用いられた力学モデルには歪み軟化を示す構成式は用いられていないにもかかわらずこの解析例は歪み軟化特性を示している。これは各要素間のすべりにより全体として歪み軟化を示したものであり、

表 1 材料定数

k_n (kN/m ²)	1.0×10^8
η_n (kN/m ² ·s)	3.0×10^4
k_s (kN/m ²)	1.0×10^8
η_s (kN/m ² ·s)	3.0×10^4
ϕ_μ (deg.)	30
Δt (s)	1.0×10^{-4}

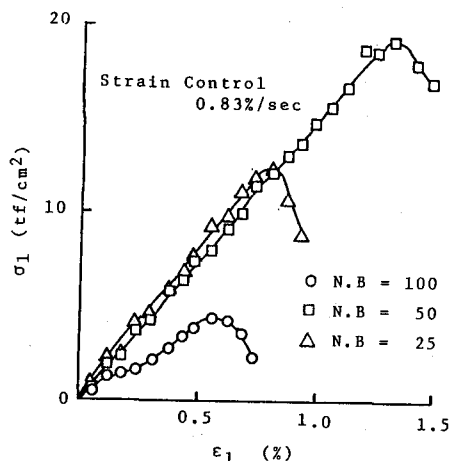
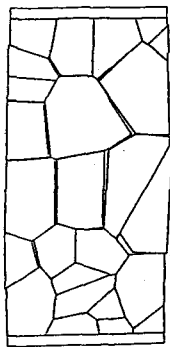
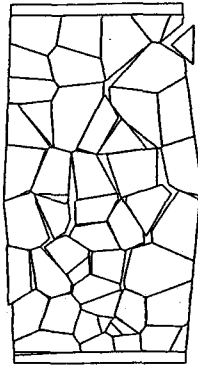


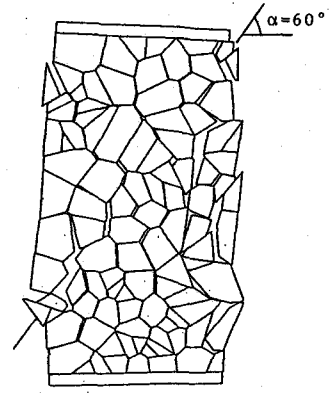
図 4 要素細分化の影響



a) 要素数25個



b) 要素数50個



c) 要素数100個

図5 破壊モード

幾何学的歪み軟化と考えられる。それぞれの分割における破壊時の状態は図5に示されており、要素の変形自由度の影響が顕著に認められる。

3.2 歪み速度の影響

岩の強度は、歪み速度に大きな影響を受ける。図6は分割数100個のモデルに0.42、0.83、1.66%/secなる異なる歪み速度で載荷した場合の解析結果を示している。これは歪み速度が小さくなる程亀裂性岩盤は強度が低く変形しやすいことをしめしている。このようにこの解析例では岩の強度や変形の時間依存性をも考慮できる。

3.3 歪み制御と応力制御

図7は載荷方式の違いにより亀裂性岩盤の応力-変形特性の解析値を比較したものである。一方は定歪み速度で載荷した歪み制御、他方は定応力増加で載荷した応力制御である。歪み制御に対する応力-歪み曲線は歪み硬化軟化型特性を示すのに対して、応力制御に対するものは歪み硬化型となり大きな歪みを示す。また、応力制御において初期の歪み速度が歪み制御のものとはほぼ等しく応力増分を設定したにもかかわらず、両者の強度は非常に異なったものとなった。これは亀裂性岩盤は応力制御による圧縮せん断に対してアーチングを起こしやすく、より安定な状態となり、歪み制御のものより高い強度を示したものと考えられる。

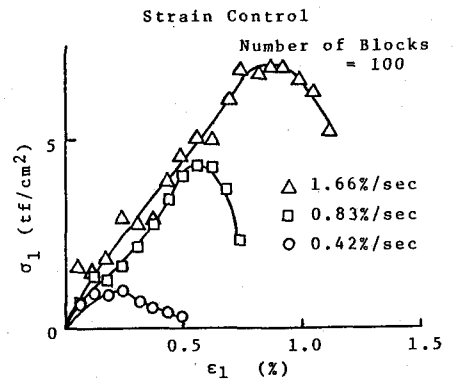


図6 歪み速度の影響

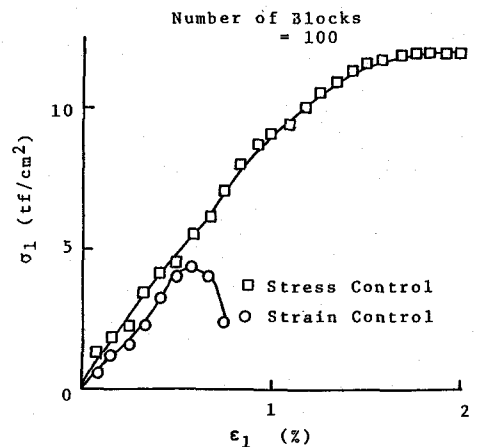


図7 歪み制御と応力制御

3. 4 拘束圧の影響

上述の一軸モデルの側方に拘束圧を加えて解析を行い、拘束圧の影響を検討した。ここで用いられたものは分割数100個のものであり、拘束圧としては一軸圧縮強度 q_u の1/8と1/2が用いられた。解析された応力・歪み曲線の比較が図8に示されている。この図より拘束圧が大きくなるほど強度は高くなり、初期のヤング係数も大きくなるが示されている。図9には破壊時のモールの応力円が示され、その包絡線より内部摩擦角 $\phi = 45^\circ$ となる。パットン(Patton)の法則によれば

$$\tau = \sigma_n \cdot \text{TAN}(\phi + i) \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 τ :せん断強度、 σ_n :垂直応力、 ϕ :ジョイント面の摩擦角、 i :せん断方向とジョイント面のなす角(図10参照)である。そして、全体的なジョイントの摩擦抵抗角は $(\phi + i)$ となり、本解析では $\phi = 30^\circ$ であることを与え合わせると $i = 15^\circ$ と推定される。破壊モードは前述の図5(C)であり、水平面と約 60° でせん断面が卓越している。

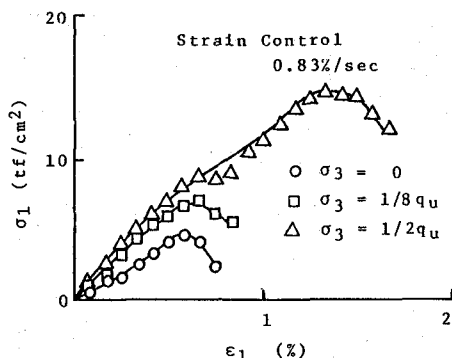


図8 拘束圧の影響

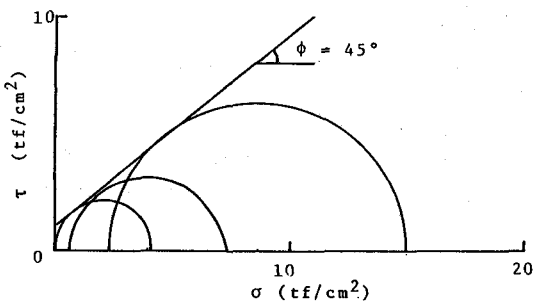


図9 破壊時のモールの応力円

4. 結論

本報告は亀裂性岩盤の不規則な亀裂特性をポロノイ分割というモザイク模様分割手法によりシミュレートし、個別要素法により応力・変形解析を試みた。この結果、本解析手法は岩盤の応力・変形・強度特性におよぼす亀裂の密度変化特性幾何学的な歪み軟化特性、歪み速度の影響、載荷方式の違い、拘束圧の影響など定性的挙動の解析に非常に有用であることが

示された。ポロノイ分割はその核の発生方式を検討することにより岩盤亀裂のモデル化に有用な手法となりうるし、また、要素形状に関わらない個別要素法は不規則形状の亀裂性岩盤の解析には非常に便利である。しかし、亀裂性岩盤の定量的解析のためには、亀裂の描写方法時間差分法、材料定数の決定法などにさらなる研究が必要とされている。

謝辞

本研究中、ポロノイ分割に関して、コンピュータ・プログラムの提供や種々の助言をいただいた文部省統計数理研究所の種村正英氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 小川泰 「空間内の点の配置をどう特徴づけるか」、数理科学、NO.231, September, 198pp. 7-16.
- 2) Cundall, P.A. "The Measurement and Analysis of Accelerations in Rock Slopes," Ph.D. Thesis, Imperial College, London, 1971.
- 3) 大西有三, 河野正雄 「個別要素法による単体ブロックの挙動解析と解の安定性について」、第20回土質工学研究発表講演集、1985、pp.935-938.
- 4) Goodman, R.E. "Introduction to Rock Mechanics," John Wiley & Sons, 1980, pp.158-161.

(39) DISTINCT ELEMENT ANALYSIS ON FRACTURED ROCK
MODELED BY VOLONOI TESSELLATION

Yuzo Ohnishi
Masakuni Horita
and
Kanemichi Aoki
(School of Civil Eng., Kyoto Univ.)

The stress-deformation-strength characteristics of fractured rocks are highly affected by the condition of fractures in the rocks. It is very difficult, however, to estimate the condition of fractures in a rock at failure. Therefore, it is hard to decide how to divide an analytical region into elements in any numerical method like FEM, RBSM, DEM, etc. Any wrong element discretization leads to wrong setting of the stress-deformation-strength characteristics of a fractured rock.

This paper proposes a method to analyze the behavior of a fractured rock using the Volonoi tessellation for element discretization and the distinct element method (DEM) to analyze the motion of these rock elements. The Volonoi tessellation can divide an analytical region into elements in consideration of random fractures in a rock mass. The DEM has a merit to handle any shape of elements and fits for the Volonoi tessellation which creates convex polygons, mainly, pentagons and hexagons.

Uniaxial compression tests on a fractured rock were simulated in different conditions in order to demonstrate the capability of this method. A series of analyses clearly showed 1) the effect of fine element discretization, 2) the characteristic of geometrical strain softening, 3) the effect of strain rate, 4) the difference between a strain-controlled test and a stress-controlled test, and 5) the effect of confining pressure on the stress-strain-strength characteristics of a fractured rock.