

III-263 修正仮想変位法による 3次元不連続体弾塑性解析

鹿島建設 正会員

○石井大介

埼玉大学大学院(情報数理研究所)

中井仁彦

埼玉大学 正会員

浜島良吉

1. はじめに

高温岩体地熱発電における水圧破碎や、高レベル廃棄物の地層処分等、地下深部における解析への関心が急激に高まっている。この場合、不連続性を考慮した不連続体解析が必要であると考えられる。また、今までは亀裂を伴う破壊の問題の解析については、2次元での数値解析によるものが中心であったが、実現象により近い解析を行うためには、3次元でかつ複雑な形状を扱えることが必要である。そこで、本報告では任意形状要素を有する3次元不連続体解析を行った。

2. 解析方法¹⁾

これまで不連続体に対する解析方法として要素内変形を考慮した解析手法である修正仮想応力法を考察してきたが、この手法は2次元の三角形要素しか適用が困難であり、また3次元への拡張も困難であることが判明した。そこで、本報告では修正仮想変位法によって3次元場への定式化を試みた。通常の有限要素法の三角形定ひずみ要素内の変位(U, V, W)を要素重心点の剛体変位($u_G, v_G, w_G, \theta, \phi, \psi$)と要素内ひずみ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$)との和によって以下の式のように表現できる。

$$\begin{Bmatrix} U \\ V \\ W \end{Bmatrix} = [N_u] \begin{Bmatrix} u_G \\ v_G \\ w_G \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{Bmatrix} + [N_\varepsilon] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

$$\therefore \{U\} = [N_u] \{u\} + [N_\varepsilon] \{\varepsilon\} \quad (1)$$

$$[N_u] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (z-z_0) & -(y-y_0) \\ 0 & 1 & 0 & -(z-z_0) & 0 & (x-x_0) \\ 0 & 0 & 1 & (y-y_0) & -(x-x_0) & 0 \end{bmatrix}$$

$$[N_\varepsilon] = \begin{bmatrix} x-x_0 & 0 & 0 \\ 0 & y-y_0 & 0 \\ 0 & 0 & z-z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (y-y_0)/2 & 0 & (z-z_0)/2 \\ (x-x_0)/2 & (z-z_0)/2 & 0 \\ 0 & (y-y_0)/2 & (x-x_0)/2 \end{bmatrix}$$

そして、最終的な全体系のつりあい式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} [K_{uu}]\{u\} + [K_{u\varepsilon}]\{\varepsilon\} &= \{F_u\} \\ [K_{\varepsilon u}]\{u\} + [K_{\varepsilon\varepsilon}]\{\varepsilon\} &= \{F_\varepsilon\} \\ \{u\}^T &= \{\{u\}_1, \{u\}_2, \dots, \{u\}_n\} \\ \{\varepsilon\}^T &= \{\{\varepsilon\}_1, \{\varepsilon\}_2, \dots, \{\varepsilon\}_n\} \end{aligned} \quad (2)$$

この手法の特徴として、要素間の相対変位を表現でき、さらにハイブリッドストレスモデルにはない任意形状の要素を扱うことができるという利点がある。上式において要素内の剛性を十分大きくし要素内ひずみを0と置くことにより、

$$[K_{uu}]\{u\} = \{F_u\} \quad (3)$$

という形で表される3次元RBSM解析の式と一致する。すなわち、RBSMはハイブリッド変位モデルの第一近似であるといえる。本報告では、まずこの第一近似としての3次元RBSM解析によりボロノイ分割による任意多面体要素を用いた解析を行った。要素境界面は任意多角形を有し、要素剛性マトリクスの積分を行う際には、図1のように積分点を設けて数値積分を行った。

3. メッシュ分割

岩石は結晶構造を有することから、結晶モデルとして表現できるボロノイ分割法によりメッシュ分割を行った。図2に3次元ボロノイ分割によるメッシュ図を示す。

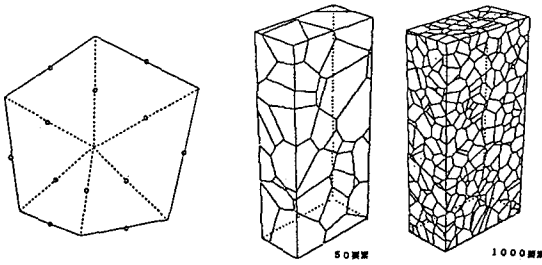


図1 N角形面の数値積分点 図2 3次元ボロイ分割

4. 解析結果

三主応力試験結果と本手法による解析結果の比較及び検討を行った。実験結果では図3に示す破壊状態図から判るように拘束圧0kgの時には、引っ張りにより縦割れに破壊し、拘束圧が増大するにつれせん断による破壊が生じている。図4は拘束圧20kgの場合の解析結果であるがせん断による破壊面の進展が観察される。破壊荷重の値は図5に示すように、2割から3割程度解析値が実験値を上回る結果となっている。ただし、用いた材料定数は表1に示すとおりであるが、まだ検討すべき余地があり、また本解析では荷重制御に基づく解析を行っており、ピーク以後の挙動の解析のためには変位制御解析が必要となる。

5. 結論

3次元ボロイ分割された要素を用いRBSM解析により3主応力実験のシミュレートを行った。本解析ではまだ実験を完全には検証していないが、こうした3次元場の破壊挙動を解明する一つの有効な手段となり得ることを示唆している。また、要素内変形をも考慮することにより、さらに一般的な解析方法となり得ると思われる。

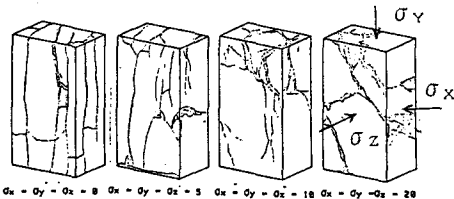


図3 拘束圧の異なる場合の破壊状態図(実験結果)

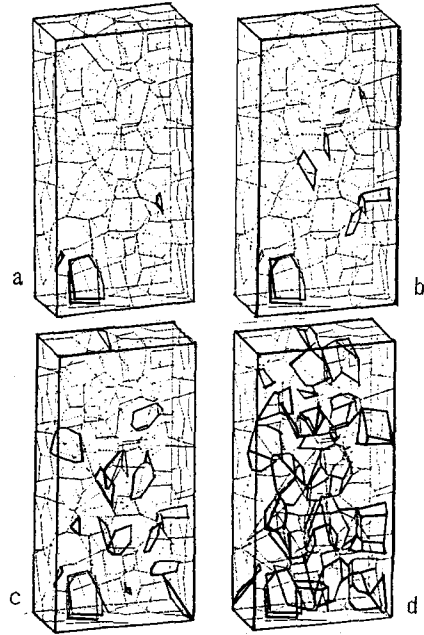


図4 せん断による破壊面の進展図

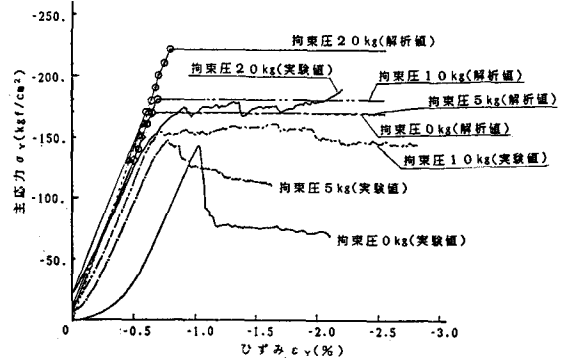


図5 応力ひずみ曲線の比較

表1 解析に用いた物性値

ヤング率	22800.0 kgf/cm ²
ポアソン比	0.25
引張強度	24.7 kgf/cm ²
内部摩擦角	27.0°
粘着力	43.0 kgf/cm ²

【参考文献】

- 1) 石井：埼玉大学修士論文, 1992