等価体積欠損に基づく岩盤変形挙動の数値解法*

金子勝比古¹ 柴 拓 海²

[UDC 624, 121]

Numerical Method for Rock Deformation Analysis Based on Equivalent Volume Defect

by Katsuhiko KANEKO¹ and Takumi SHIBA²

1. Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto 860
2. Nippon Boring LTD.

A new method, Equivalent Volume Defect Method (EVD), to estimate the deformability of jointed rock is proposed. Equivalent Volume Defect (EVD) is theoretically defined in this paper as its effect on the deformability is equivalent to the effect of joint. Basing on EVD concept, stress/strain relationship of jointed rock is simply formulated as it can be treated in a framework of continuum mechanics.

A stress/strain relationship of the elastic body which contains many cracks is theoretically analyzed in consideration of mechanical interaction of cracks. It is made clear that EVD is determined by the length and the orientation of each crack, and the effective elastic compliance of the body is expressed as a function of EVD and intrinsic elastic moduli of the body. Furthermore, a numerical procedure for Finite Element Analysis based on EVD is presented.

In order to examine the proposed method for its validity, model calculations have been performed. The result obtained by EVD agrees fairly well with that by Displacement Discontinuity Method, hence it is confirmed that EVD gives a good approximation for deformation behavior of jointed rock.

KEY WORDS: Discontinuous Rock, Deformation, Crack, Finite Element Method

1. 緒 言

不連続性岩盤の変形挙動の予測法としては種々の方法が提案されてきているが、それらは不連続性の取り扱い方により確率論的手法と決定論的手法に大別される。前者は、岩盤の不連続性に関する統計データに基づいて不連続面分布特性を確率的に与え、不連続性岩盤をそれと等価な連続体で近似する方法であり、クラック理論¹⁾やクラックテンソル²⁾に基づく変形性評価法などがある。特に、これらの方法では、不連続面の空間分布は確率的に一樣なものであると仮定されている。この意味で、損傷理論に基づいた有限要素解析³⁾も前者の分類に属する。後者は、岩盤の不連続性をそのままの幾何形状でモデル化し解析することが可能な手法であり、ジョイント要素を用いた有限要素解析⁴⁾、剛体バネモデル⁵⁾、変位くい違い法⁶⁾などがある。筆者等は、先に、変位くい違い法に基づいて亀裂性材料の変形挙動を数値解析し、亀裂性材料の変形性は不連続面の量および方向とともにそれらの幾何学的配置と密接に関係することを明らかにした⁷⁾。確率論的手法は、岩盤の巨視的な変形性評価には有用であるが、この不連続面の幾何学的配置の取り扱いに難があることは否めない。それに対し、決定論的手法は、この不連続面の幾何学的配置の扱いは容易であるが、これにより、岩盤の巨視的挙動を推定するためには極めて膨

大な計算量を必要とする。

本論文では、岩盤の巨視的変形挙動から局所的変形挙動までも統一的概念の基に表現可能な新しい解析モデルを提案する。具体的には、まず、クラック理論に基づいてクラックの存在が周囲弾性体に及ぼす影響を分析し、クラックを有する材料の応力ひずみ関係の近似定式化を行う。次に、新たに等価体積欠損の概念を導入して、上記の応力ひずみ関係の算定法を明らかにするとともに、その離散定式化法について論ずる。さらに、いくつかの例題に基づいて本解析法の妥当性を確認する。

2. 不連続体の応力ひずみ関係の近似定式化

図1に示すように厚さ h 、体積 V の等方弾性体中にクラック長さ $2a^m$ ($m=1\sim N$)の N 個の2次元開口型クラックが分布する場合を考える。特に、クラック面の変位量はクラック開口幅に比較して小さく、クラックの閉合が無視可能な応力範囲を問題の対象とする。さらに、以下では、個々のクラックをクラック m と呼び、それに付随した諸量には上付き添え字 m を付すことにする。上記の前提に基づくと、この弾性体の外部境界に応力 σ_{ij} が作用した場合のひずみ ε_{ij}^* は(1)式で与えられる⁸⁾。

$$\varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} + \sum_{m=1}^N \Delta \varepsilon_{ij}^m \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $\sum_{m=1}^N$ は $\sum_{m=1}^N$ を示し、以下も同様な表記を行うものとする。また ε_{ij}^m はクラックが存在しない場合に弾性体に生ずるひずみであり、弾性体実質部のコンプライアンス λ_{ijkl} を用いて(2)式で表され、 $\Delta \varepsilon_{ij}^m$ はクラック m によるひずみ増分であり、(3)式で与えられる。

* 1989年5月25日受付 12月7日受理

1. 正会員 工博 熊本大学助教授 工学部材料開発工学科

2. 正会員 熊本大学大学院博士課程(日本ボーリング(株))

キーワード: 不連続性岩盤, 変形, 亀裂, 有限要素法

Fig. 1 Analytical model for the elastic body which contains N cracks.

$$\varepsilon_{ij} = \lambda_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij}^m = 1/V \cdot \partial \Delta W^m / \partial \sigma_{ij} \quad (3)$$

ただし、 ΔW^m はクラック m によるコンプリメンタリエネルギー増分であり、クラック m のモードI、モードIIの応力拡大係数 K_I^m 、 K_{II}^m を用いて(4)式で与えられる。

$$\Delta W^m = 2\alpha h \int_0^{a^m} \{ (K_I^m)^2 + (K_{II}^m)^2 \} da \quad (4)$$

ただし、 α は定数であり、弾性体実質部のヤング率、ポアソン比を E 、 ν とおくと、平面ひずみの場合 $\alpha = (1-\nu^2)/E$ 、平面応力の場合 $\alpha = 1/E$ となる。ここで、クラック相互間の力学的干渉を考慮すると、(4)式中の応力拡大係数は一般に(5)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_I^m &= F_I^m \sigma_{22}^m \sqrt{\pi a} \\ K_{II}^m &= F_{II}^m \sigma_{21}^m \sqrt{\pi a} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、 F_I^m 、 F_{II}^m はクラック m と周囲のクラックとの幾何学的関係により定まる応力拡大係数の補正項である⁹⁾。また、 σ_{ij}^m はクラック m の法線方向を x_2 軸とする局所座標 x^m 上の応力であり、全体座標 x と x^m との方向余弦 d_{ij}^m を用いて $\sigma_{ij}^m = d_{ki}^m d_{lj}^m \sigma_{kl}$ で与えられる。従って、(5)式、(4)式を(3)式に代入し、偏微分を実行すると $\Delta \varepsilon_{ij}^m$ は(6)式となる。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{ij}^m &= 4\pi\alpha h/V \cdot d_{i2}^m d_{k2}^m \left\{ d_{j2}^m d_{l2}^m \int_0^{a^m} (F_I^m)^2 a da \right. \\ &\quad \left. + d_{j2}^m d_{l1}^m \int_0^{a^m} (F_{II}^m)^2 a da \right\} \sigma_{kl} \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、(6)式は(7)式のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{ij}^m &= 4\pi\alpha h/V \cdot d_{i2}^m d_{k2}^m (d_{j2}^m d_{l2}^m \bar{F}_I^m \\ &\quad + d_{j2}^m d_{l1}^m \bar{F}_{II}^m) \sigma_{kl} \int_0^{a^m} a da \quad (7) \end{aligned}$$

ただし、 $\bar{F}_I^m$ 、 $\bar{F}_{II}^m$ は a^m と F_I^m 、 F_{II}^m 、すなわち、クラック m と周囲のクラックとの幾何学により定まる定数であり、(6)式と(7)式が同値となるように与えられるものとする。ここで、(7)式の近似のために $\bar{F}_I^m = \bar{F}_{II}^m$ と仮定してこれらを $\bar{F}^m$ とおき、さらに、方向余弦の性質を考慮すると(7)式は(8)式となる。

$$\Delta \varepsilon_{ij}^m = \alpha \sigma_{kl} \omega_{ik}^m \bar{F}^m \delta_{jl} / V \quad (8)$$

ただし、 δ_{jl} はクロネッカーのデルタであり、 ω_{ik}^m はクラックの単位法線ベクトル $n_j^m (= d_{j2}^m)$ を用いて(9)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \omega_{ik}^m &= n_i^m n_k^m \\ \omega^m &= 2\pi(a^m)^2 h \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

従って、(8)式を(1)式に代入すると、問題とする弾性体の応力・ひずみ関係式が誘導される。ここで、応力 σ_{ij} およびひずみ ε_{ij}^* をマトリックス表現して $\sigma = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$ 、 $\varepsilon^* = (\varepsilon_{11}^*, \varepsilon_{22}^*, \varepsilon_{12}^* + \varepsilon_{21}^*)^T$ とおき、この場合のコンプライアンスマトリックスを D^* と表すと $\sigma = \varepsilon^*$ 関係は(10)式となる。

$$\varepsilon^* = D^* \sigma \quad (10)$$

ただし、コンプライアンスマトリックス D^* は、(2)式および(8)式から(11)式となる。

$$D^* = \alpha \begin{bmatrix} 1 + \sum \omega_{11}^m \bar{F}^m / V & \beta & \sum \omega_{12}^m \bar{F}^m / V \\ \beta & 1 + \sum \omega_{22}^m \bar{F}^m / V & \sum \omega_{12}^m \bar{F}^m / V \\ \sum \omega_{12}^m \bar{F}^m / V & \sum \omega_{12}^m \bar{F}^m / V & \gamma + \sum \omega^m \bar{F}^m / V \end{bmatrix} \quad (11)$$

ただし、 β および γ は、それぞれ平面ひずみの場合、 $\beta = -\nu/(1-\nu)$ 、 $\gamma = 2/(1-\nu)$ 、平面応力の場合、 $\beta = -\nu$ 、 $\gamma = 1+2\nu$ である。

3. 等価体積欠損に基づいたコンプライアンスの算定法

(11)式は $\bar{F}^m$ が既値となれば D^* が定まることを示しているが、一般のクラック配置について $\bar{F}^m$ を解析的に与えることは極めて困難である。そこで、次に、簡便な D^* の近似算定法について検討を加えることにする。

まず、 D^* を(12)式に示すように、2つのマトリックス Ω 、 R に分解して表すことを考える。

$$D^* = \alpha (\Omega + R) \quad (12)$$

特に、 Ω はクラックの影響を表すものであり、その非零成分をすべて同形式で与えることを考える。すなわち、 Ω および R を、それぞれ(13)式および(14)式に示すように与えるものとする。

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 + \sum \omega_{11}^m \bar{F}^m / V & 0 & 1 + \sum \omega_{12}^m \bar{F}^m / V \\ 0 & 1 + \sum \omega_{22}^m \bar{F}^m / V & 1 + \sum \omega_{12}^m \bar{F}^m / V \\ 1 + \sum \omega_{12}^m \bar{F}^m / V & 1 + \sum \omega_{12}^m \bar{F}^m / V & \gamma (1 + \sum (\omega^m / \gamma) \bar{F}^m / V) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & \beta & -1 \\ \beta & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

(12)~(14)より D^* の評価がマトリックス Ω の評価に置き換えられることがわかる。

この様な前提のもとに、まず、クラック相互の離間距離に比較してクラック長 a^m が充分小さな場合の Ω の算定法について検討する。この場合には、互いのクラックの干渉効果が無視できるため $\bar{F}^m = 1$ となり、また、 $\sum \omega_{ij}^m / V \ll 1$ 、 $\sum \omega^m / V \ll 1$ となるため、 Ω は(15)式で近似できることになる。

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1/(1 - \sum \omega_{11}^m / V) & 0 & 1/(1 - \sum \omega_{12}^m / V) \\ 0 & 1/(1 - \sum \omega_{22}^m / V) & 1/(1 - \sum \omega_{12}^m / V) \\ 1/(1 - \sum \omega_{12}^m / V) & 1/(1 - \sum \omega_{12}^m / V) & \gamma/(1 - \sum (\omega^m / \gamma) / V) \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで(15)式の解釈のために、例えば、 $\sigma = [p, 0, 0]^T$ なる条件を考えると、この場合の X_1 方向の直ひずみ ε_{11}^* は、

$$\varepsilon_{11}^* = \alpha \cdot p / (1 - \sum \omega_{11}^m / V) \quad (16)$$

となる。ここで、 $\alpha = \lambda_{1111}$ であることを考慮すると、ひずみ ε_{11}^* は弾性体実質部に $pV/(V - \sum \omega_{11}^m)$ なる応力が作用した場合のひずみと等しくなることがわかる。これは、損傷理論³⁾の考えによれば、力が作用する有効断面積が $(V - \sum \omega_{11}^m)/V$ 倍となったことと等価である。また、この有効断面積の変化は次のように解釈することもできる。

今、図2に示すように X_1 面の断面積 S 、体積 v_0 の物体を考える。この物体中の体積 v_d の領域が欠損した場合の $X_1 = \xi$ における X_1 面の有効断面積 $S_1(\xi)$ を考えると、 $S_1(\xi)$ の平均値 $\bar{S}_1$ と S との比率 $\bar{S}_1/S$ は $(v_0 - v_d)/v_0$ と等しくなる。従って、この関係は、上記の有効断面積の変化はそれと等価な体積の欠損により表現されることを示し、(16)式における欠損部の体積は $\sum \omega_{11}^m$ で与えられることを示している。そこで、以下では $\sum \omega_{ij}^m$ 、 $\sum \omega^m / \gamma$ を等価体積欠損と呼ぶことにする。ここで、等価体積欠損の欠損域の形状には

Fig. 2 Relation between the volume defect and the effective cross sectional area.

任意性があるが、

$$\begin{aligned}\Sigma \omega_{11}^m &= \Sigma 2\pi (a^m)^2 n_1^m h \\ &= \Sigma \pi \cdot 2n_1^m a^m \cdot n_1^m a^m \cdot h \quad \dots\dots\dots (17)\end{aligned}$$

なる関係に着目すると、 ω_{11}^m は長径 $2n_1^m a^m$ 、短径 $n_1^m a^m$ 、厚さ h の楕円板の体積として表現されることになる。また、この楕円板の長軸方位の決定に際しては、後述するようなクラック相互干渉の影響の表現を考慮し、楕円板領域をクラック周囲の免圧圏に対応させることを考える。すなわち、クラック m の等価体積欠損 ω_{11}^m を図3(a)に示すような楕円板領域で表現することを考える。同様な考えに従うと ω_{22}^m は、図3(b)に示すような、長径 $2n_2^m a^m$ 、短径 $n_2^m a^m$ の楕円板で表現されることになる。また、 ω^m/γ は方向余弦成分を有しないため、方位に対して独立なものと考え、図3(c)に示すように半径 $\sqrt{2/\gamma} a^m$ の円板で表現することを考える。また、上記の考えを拡張し、図3(d)に示すように、 ω_{12}^m をそれぞれの径が $\sqrt{2} n_1^m a^m$ 、 $\sqrt{2} n_2^m a^m$ となる楕円板で与えることにする。なお、 ω_{12}^m はクラックの方位によっては負の値を示すことがあるが、このような場合には、それらは負の体積欠損、言い換えれば、体積の増分として取り扱うものとする。

次に、以上の前提のもとに、クラック干渉効果が無視できない場合の Ω の算定法を検討する。ここで、上記の等価体積欠損の考えを拡張すれば、(13)式中のクラック干渉効果 $\bar{F}^m$ は互いの等価体積欠損の干渉であり、言わば、互いの等価体積欠損の重なりの影響を表現すると解釈することができるであろう。そこで、(13)式が(19)式と同様な形式で表現され、この場合の等価体積欠損が、個々のクラックによる等価体積欠損の和集合として与えられるものとする。すなわち、以上の考えに基づくと、(13)式に示したマトリックス Ω は(18)式で近似算定されることになる。

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1/(1-\tilde{\omega}_{11}/V) & 0 & 1/(1-\tilde{\omega}_{12}/V) \\ 0 & 1/(1-\tilde{\omega}_{22}/V) & 1/(1-\tilde{\omega}_{12}/V) \\ 1/(1-\tilde{\omega}_{12}/V) & 1/(1-\tilde{\omega}_{12}/V) & \gamma/(1-\tilde{\omega}_\gamma/V) \end{bmatrix} \dots\dots (18)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \omega_{ij}^m &= \cup \omega_{ij} \\ \omega_\gamma &= \cup (\omega^m/\gamma) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

であり、 $\cup$ はそれぞれのクラックの等価体積欠損の和集合の体積を表す。従って、(19)式、(18)式より、 Ω が算定され、これにより応力ひずみ関係(12)式が定められることになる。なお、以上の議論は、大胆な仮定のもとにすすめられてきているが、それら仮定の妥当性は、解析結果の妥当性を評価することにより検証されるものと思われる。

4. 解析法の検討

提案した解法の妥当性を検討するために、まず、図4に示すようなクラック配置の異なる2種の不連続体モデル(平面ひずみ状態を仮定)を例にとり、本手法による解析値と変位くい違い法(DDM)による解析値とを比較検討する。なお、以下では、提案した方法を等価体積欠損法(Equivalent Volume Defect Method: EVD M)と呼ぶことにする。解析モデルのクラック数はともに24であり、クラック長 $2a$ を一定として、クラック角度 θ 、クラック中心の水平離間距離 $2b$ 、およびクラック中心の垂直離間距離 $2c$ を変化させ、クラック密度 $\Phi(=\Sigma (a^m)^2 h/V)$ の異なるいくつかのモデルを与えた。また、DDM解析における要素分割数はクラックが各10、外周が80であり、クラックの要素分割は先に報告した最適分割法を採用している⁷⁾。

解析結果の一例として、図4に示す2つの亀裂配置パターンに

Fig. 3 Definition of equivalent volume defects for single isolated crack.

Fig. 4 Models for the discontinuous material.

ついて、 $\theta=0^\circ$ 、 $b/a=3.0$ の条件で c/a の値を変化させた場合のY方向の縦弾性係数 $\bar{E}$ とクラック密度 Φ との関係を示すと図5のようである。ただし、 $\bar{E}$ の値はクラックが存在しない場合の縦弾性係数 E_0 ($=E/(1-\nu^2)$)により正規化した値で示し、図中の実線

Fig. 5 Relation between the crack density Φ and the effective elastic coefficient $\bar{E}$, where $\Phi = \sum_{m=1}^N (a^m)^2 h/V$; $E_0 = (1-\nu^2)/E$; $2a^m$: length of each crack; N : the total number of cracks; E , ν , V and h : intrinsic Young's modulus, intrinsic Poisson's ratio, Volume and thickness of elastic body, respectively. Solid lines: EVDM proposed in this paper; open and closed circles: Displacement Discontinuity Method; Broken line: Damage Theory; Regular and Alternative: regular stacking model and alternative stacking model shown in Fig. 4, respectively.

はEVDMの結果、白丸および黒丸はDDMの結果⁷⁾を示している。また、図には比較のため損傷テンソル³⁾により求められた同様な関係を破線で示している。さらに、一例として、両モデルについて $\Phi=0.1$ ($b/a=3.0$, $c/a=0.612$)の場合の等価体積欠損 $\tilde{\omega}_{22}$ を図示すると図6のようである。図5よりEVDMとDDMの結果は若干の値の差はあるものの、その傾向は一致し、EVDMによりほぼ良好な近似解が得られていることがわかる。特に、EVDMの近似精度は損傷テンソルによる値と比較すればより明瞭となるであろう。また、EVDMは極めて簡単な計算にもかかわらず、クラ

Fig. 7 Relation between the dip angle θ of cracks and the effective elastic coefficient $\bar{E}$. Other representations are same as explained in caption for Fig. 5.

Fig. 6 Equivalent volume defect ω_{22} in the case of $b/a=3.0$, $c/a=0.612$ and $\Phi=0.1$.

Fig. 8 Comparison between deformation behaviors obtained by the proposed method (heavy solid lines) and Displacement Discontinuity Method (dotted lines). Fine solid lines represent cracks and the outline of the model.

Fig. 9 Comparison between deformation behaviors obtained by Finite Element analysis based on Equivalent Volume Defect Method (solid lines) and Displacement Discontinuity Method (dotted lines).

ック配置による変形性の違いを良く表現していることがわかる。これは、図6に示すように、クラック配置の差が等価体積欠損の差として表現され、これによりクラックの相互干渉効果が近似的に表現されていることを示している。

次に、同様なモデルの $\Phi=0.1$ ($b/a=3.0$, $c/a=0.612$) の条件について、クラック角度 θ が変化する場合のY方向の縦弾性係数 $\bar{E}$ とクラック密度との関係を示すと図7のようである。図より、このような条件下においても、EVDMとDDMの結果はほぼ良い対応を示していることがわかる。

さらに、図4(a)のクラック配置について、クラック密度が一定 $\Phi=0.074$ ($b/a=2.0$, $c/a=1.285$, $l_x/l_y=1$) で、応力およびクラック方位の異なる種々のモデルを考え、EVDMおよびDDMにより解析されたモデル外形の変形状態を示すと図8(a)~(e)と

なる。図中、細実線は解析モデルを示し、太実線および点はそれぞれ $\nu=0.25$ の条件におけるEVDM、およびDDMの結果を示している。図より、すべての例において、EVDMとDDMの結果は良く対応していることがわかる。特に、クラックの傾斜角によっては直応力応荷によりせん断ひずみが生ずること、せん断応力応荷により直ひずみが生ずることが確認され、EVDMによりこれらの変形挙動が良く表現されていることがわかる。

5. 有限要素解析

亀裂性材料の巨視的変形性評価におけるEVDMの有用性は4に示したとおりであるが、ここでは、EVDMによる亀裂性材料の局所変形の予測法について検討を加える。今、図9(a)に示すように、クラックが局所集中した不連続体モデルを考え、このモデル

の上部境界に一樣な応力 σ が作用する問題を考える。このモデルについて、(12)式、(18)式から決定される応力ひずみ関係式を用いて、モデル外形の変形を描くと図9(a')のようになる。ただし、実線はEVDM、点はDDMによる要素中心点の変形を示している。

ここで、EVDMでは問題とする領域に対して等価体積欠損が定まれば、その領域の応力・ひずみ関係が与えられるため、図9(b), (c)に示すようにモデルを要素分割した場合にも、それぞれの要素ごとに応力・ひずみ関係式が与えられることになる。すなわち、(18)式が、各要素について成立するものと仮定し、各要素のコンプライアンスマトリックスを(12)式で与えれば、各要素の弾性率マトリックスはこの逆行列として求められることになる。従って、上記の関係をもとにして、有限要素定式化を行えば、モデル全体としての変形挙動の解析が可能となる。なお、この定式化は、個々の要素の応力ひずみ変換マトリックスが(12)式から算定されることを除けば、異方弾性体に対する有限要素定式化となら差はない。

図9(b'), (c')は上記の考えによる有限要素解析の結果とDDM解析の結果とを比較したものである。なお、有限要素としては4節点四角形要素を用い、(b')は要素数2、(c')は要素数8の場合を示し、図中の点はDDM解析により求められた変形を示している。図9(b'), (c')より、EVDMとDDMの結果はよく対応することがわかる。また、図9(a)は、有限要素分割数が1の場合に対応すると考えれば有限要素分割が細かくなると、局所変形がよく表現されてくることがわかる。また、上記の解析のCPU時間は、FACOM M360を用いた場合、DDMで1020秒、EVDMの8要素で1秒であった。すなわち、計算効率の点からもEVDMは極めて実用的手法であると考えることができる。

6. 結 言

本論文では、亀裂性岩盤の変形挙動を予測するための新しい数値解法として等価体積欠損法を提案し、具体例に基づいてその実用性を確認した。

まず、線形破壊力学に基づいた理論解析により、亀裂性材料の応力ひずみ関係の近似定式化を行った。特に、亀裂を有する材料のコンプライアンス評価のためには、クラック干渉効果の評価が不可欠であるが、一般の問題においてその解析的評価は極めて困難であることを示した。そこで、等価体積欠損の概念に基づいて

クラックの存在が変形性に及ぼす影響を考察し、極めて簡単なコンプライアンスの近似算定式、(18)式、を提案するとともに、これにより亀裂性材料の応力ひずみ関係が算定されることを示した。また、本手法の妥当性を幾つかの数値計算例に基づいて確認するとともに、提案した手法は通常のクラックモデルと異なり、クラックの空間配置が変形性に及ぼす影響をも表現可能であることを示した。さらに、本手法の有限要素法への適用法と適用例を示し、本手法により不連続面配置に関係した岩盤の局所変形挙動が予測されることを示した。

なお、本論文では、不連続面はすべて開口型不連続面とした取り扱いを行ったが、閉合型不連続面に対しても本手法を拡張することは可能である。この問題に関しては次報に詳述する予定である。

参 考 文 献

- 1) 金子勝比古・柴 拓海・尾原祐三・大見美智人：岩盤の変形性に関する理論的研究 — 岩盤の変形性の評価法に関する基礎的研究（第1報）—，日本鉱業会誌，101〔1173〕，699～700，（1985）
- 2) Oda, M.: Fabric tensor for discontinuous geological materials, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 4, pp. 96～108, (1982)
- 3) Kyoya, T., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: A damage mechanics theory for discontinuous rock mass, Proc. 5th int. conf. on Numerical Method in Geomechanics (Nagoya), Vol. 1, pp. 469～480, (1985)
- 4) Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L.: A model for mechanics of jointed rock, ASCE, Vol. 94 (SM3) pp. 637～659, (1968)
- 5) Kawai, T.: Some considerations on the finite element method, Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 16, October, (1980)
- 6) Crouch, S.L. and Starfield, A.M.: Boundary element method in soil mechanics, George Allen & Unwin Ltd. (London), pp. 79～109, (1983)
- 7) 柴 拓海・金子勝比古・尾原祐三・菅原勝彦：変位くい違い法のき裂問題への適用性について，資源・素材学会誌，105〔No.13〕，981～986，（1989）
- 8) 岡村弘之：線形破壊力学入門，培風館（東京），pp. 59～100，（1976）
- 9) 石田 誠：き裂の弾性解析と応力拡大係数，培風館（東京），pp. 132～204，（1976）