

(4) クラック・テンソルによる亀裂性岩盤の有限要素解析

埼玉大学工学部 正会員 山辺 正

1. はじめに

亀裂を含む岩盤の解析に関する従来の方法としては、主たる不連続面に Goodman らのジョイント要素を入れるなどの手法がとられてきた¹⁾が、多数の亀裂をそのまま解析にとり入れる手法は確立されていない。最近、damage mechanics の考え方を適用して不連続面以外の部分に作用している実質応力を考慮した解析が行なわれ、多数の亀裂の効果を表現しようとする試みもなされている。^{2), 3)}

本研究は多数の亀裂を含む岩盤を、それと等価な異方弾性体として評価するクラック・テンソル^{4)~7)}の手法を適用し、亀裂の幾何学的性と、亀裂そのものの形状をとり入れた形の有限要素解析を行ない、その妥当性を検討する。

2. クラック・テンソルによる定式化

小田らは、クラックを含む弾性体の平均応力、平均歪、クラック周囲の平均的な変位のジャンプ量を考え、等価な異方弾性体の弾性コンプライアンスとして次式を与えた。^{4), 5)}

$$\bar{D}_{ijkl} = \bar{M}_{ijkl} + \bar{C}_{ijkl} \quad (1)$$

$$\bar{M}_{ijkl} = \frac{(1+\nu)}{E} \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \delta_{kl} \quad (2)$$

$$\bar{C}_{ijkl} = \frac{1}{4D} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jl} F_{ik} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{il} F_{jk}) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{D}_{ijkl}$: クラックを含む異方弾性体の弾性コンプライアンス、 $\bar{M}_{ijkl}$: クラックを含まないマトリックスの弾性コンプライアンスで(2)式では、マトリックスを等方弾性体としている。 $\bar{C}_{ijkl}$: クラックによる弾性コンプライアンス、 E : マトリックスのヤング率、 ν : マトリックスのポアソン比、 D : クラックの形状とマトリックスの弾性におよぼす定数で、penny-shaped crack を考えると次式で表わされる。 $1/D = 8/3\pi E$, δ_{ij} : クロネッカーのデルタ、 F_{ij} : ニ階のクラック・テンソルで、次式のように定義される。

$$F_{ij} = \frac{\pi l}{4} \int_0^{\infty} \int_{\Omega} R^3 n_i n_j E(\eta, R) d\Omega dR \quad (4)$$

以上の諸量を用いて、実験と対比した結果については参考文献^{4), 5)}を参照されたい。なお、(1)~(4)式で得られる弾性コンプライアンスは、グリーンの弾性体⁸⁾の意味での対称性を満足している。

ここでは、岩盤中に存在する任意のクラックに注目し、そのクラックの一部が閉じている場合について考える。(4)式において、 R はクラ

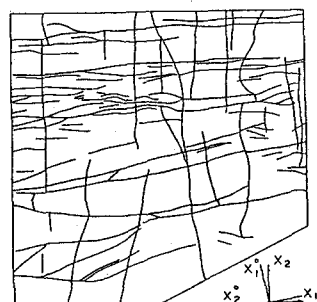


図1 ジョイントのトレース⁷⁾
(Picote Dam Site, Serafim, 1964)

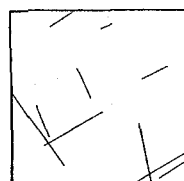


図2(a) $F_0 = 0.78$
 $R = 0.04$

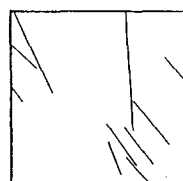


図3(a) $F_0 = 1.17$
 $R = 0.86$

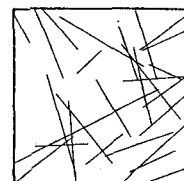


図2(b) $F_0 = 4.87$
 $R = 0.04$

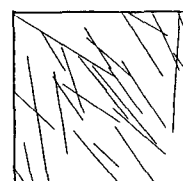


図3(b) $F_0 = 4.47$
 $R = 0.79$

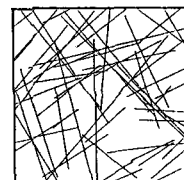


図2(c) $F_0 = 14.0$
 $R = 0.06$

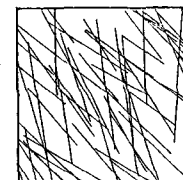


図3(c) $F_0 = 13.4$
 $R = 0.79$

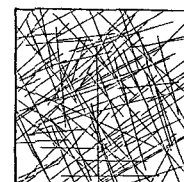


図2(d) $F_0 = 26.1$
 $R = 0.07$

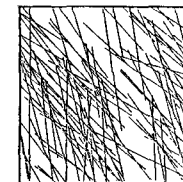


図3(d) $F_0 = 25.9$
 $R = 0.81$

ックを用で置換えた時の半径を表わしているが、クラックの一部が閉じている効果を半径 R の減少と考へ、その減少を考慮した半径 r を、 $r = \lambda R$ ($0 \leq \lambda \leq 1$)と表わすと(付)式から次式を得る。

$$f_{ij} = \lambda^3 F_{ij} = \lambda F_{ij} \quad (5)$$

(5)式で与えられる f_{ij} は、associated fabric tensorと呼ばれる量であり⁷⁾、以下の解析では $\lambda (= \lambda^3)$ を用いた解析を行なう。このパラメータ λ を岩盤の原位置大型二軸応荷試験⁹⁾に対して求めた例⁷⁾もある。一般に、クラックを含む材料に応力が作用すると、クラック相互間の弾性干渉、クラックの開塞や開口、新たなクラックの進展などが生ずるが、本研究では初めに与えたクラックの諸性質は応力に伴って変化しないとし、上述のパラメータ λ および構造異方性などの影響を調べることにする。その意味で、本研究における解析は全て弾性解析である。なお、クラックの開口幅が応力に依存するとし、透水性の評価も含めた一般化されたクラック・テンソルによる定式化も行なわれている。¹⁰⁾

3. クラック・パターン

図1は、Serafimの報告¹¹⁾にある花崗岩の露頭における写真から、ジョイントを全てトレースした結果であり、これを基にクラック・テンソルを決定した報告⁷⁾によると、0階のクラック・テンソル F_0 は、 $F_0 = 11.5$ 、異方性の程度を表わすパラメータ R ¹²⁾は、 $R = 0.46$ となる。 R は、 $0 \leq R \leq 1$ で、0の時には完全な等方性を、1の時には完全な異方性を表わす。この場合、得られたクラック・テンソルは、2次元の情報を与えるだけであるが岩盤調査から3次元の情報を得るクラック・テンソルを決定した実例もある。¹³⁾ 以後の解析では、2次元の場合に限るが、2次元的な情報から3次元的な亀裂分布を推定する研究が、小田⁶⁾、金谷¹⁴⁾らによって行なわれている。

本研究で検討したモデル岩盤のクラック・パターンを図2、3に示す。上述の F_0 と R も併記してある通り、図2は等方的、図3は異方的な構造を有し、いずれの場合にも α から d に向うにつれて F_0 を大きくしてある。

4. 解析方法と解析結果

4.1 解析方法

本研究の解析に用いたクラック形状は、全て penny-shaped crack である。図2、3に与えたクラック・パターンについて(1)~(5)式を適用して等価な異方弾性体の弾性コンプライアンスを求め、二次元平面歪状態の有限要素解析を行なった。

4.2 要素試験結果

図4は、等方的な亀裂を有する供試体を一軸圧縮した時の実験結果であり、小田らの報告⁴⁾による。実験が(1)~(4)式で得られる理論曲線

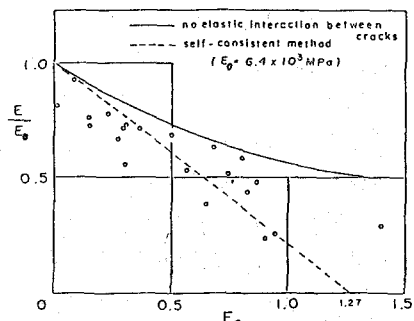


図4 等方的な亀裂を有する供試体の一軸圧縮試験結果(小田他, 1984⁵⁾)

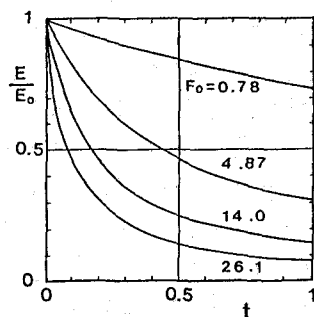


図5 等方的な亀裂を含む供試体の一軸圧縮試験に対する解析結果

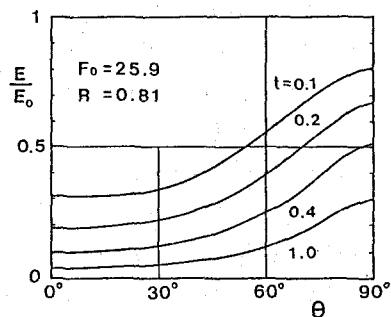


図6 異方的な亀裂を含む供試体の一軸圧縮試験に対する解析結果

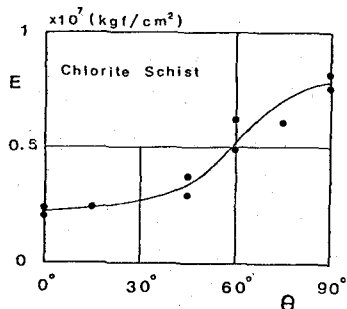


図7 緑泥片岩の試験結果(赤井他, 1969)

で、○印の実験値に対して上限を与える事がわかる。同図には、いわゆる self-consistent method による計算値も示されているが、ここでは論じない。図9は、実験供試体と同様の形状を有し等方的な亀裂を含む供試体(図2 a~d)の一軸圧縮試験を有限要素法により解析した例である。供試体の下辺を固定し、上辺に単位の変形($\delta=1$)を与え、等変位載荷した時の反力から求まる弾性定数 E を、亀裂のない供試体に対する弾性定数 E_0 で無次元化して図中の縦軸としてある。横軸は、各亀裂の亀裂面における接触の程度を表わす前述のパラメータ α である。 α が0の時には、亀裂のない等方弾性体を意味し、 E/E_0 は1である。図9から、 F_0 および α が増大するにつれ、無次元化した弾性定数 E/E_0 が非線形に低下することがわかる。 α の増大は、 F_0 の増大と同じ意味をもち、図9の傾向は図4と直接比較でき、解析結果は実験結果と同一の傾向を示す。

次に、異方性を有する供試体(図3 d)を同様に、一軸圧縮した場合も解析した結果が図6である。図の横軸は、 F_{ij} の最大主軸方向と鉛直方向のなす角度 θ であり、縦軸は図9と同様の E/E_0 である。解析にあたっては、 θ を与えた時の異方弾性体の弾性コンプライアンスを求めた後に有限要素解析を行なった。図6から、 E/E_0 は $\theta=0^\circ$ で最小、 $\theta=90^\circ$ で最大となり、 α が増大するに伴い E/E_0 は減少することがわかる。図7は、赤井ら¹⁵⁾が緑泥片岩の異方性を実験的に調べた結果の一部であるが、論文(15)では θ のとり方が本報告とは異なるために、論文中のグラフからデータを読みとりプロットし直している。図6と図7は、直接比較することはできないが、定性的な傾向はよく一致している。

4.3 平板載荷試験結果

図3 dで示されるクラック・パターンを有する岩盤に、原位置で平板載荷試験を実施する事を想定して、図8に示すメッシュ分割のモデル岩盤で上辺中央の点に単位の変形($\delta=1$)を与えた場合の解析を行なう。

図9は、 $\theta=60^\circ$ 、 $\alpha=1$ の場合の主応力図であるが等方性地盤の場合($\alpha=0$)の図10と比較すると、応力伝播の様子が著しく異なる事が明らかである。パラメータ α の影響を調べると、図11となる。図中の縦軸は、クラックを含む岩盤に対して得られる地盤反力係数 K を、クラックを含まない岩盤の地盤反力係数 K_0 で無次元化した量 K/K_0 であり、横軸はパラメータ α である。図中には、クラックを回転させた時の K/K_0 の変化もプロットしてある。クラックが水平に近くなり($\theta \rightarrow 0^\circ$)、 α が大きくなるにつれ K/K_0 は大きく低下し、特に $\theta=0^\circ$ 、 $\alpha=1$ では K/K_0 が、0.05にまで低下する事がわかる。次に、 θ と K/K_0 の関係を図12に示す。要素試験の場合(図6)と同様の関係が得られるが、平板載荷試験の場合には図9、10に見られるように内部

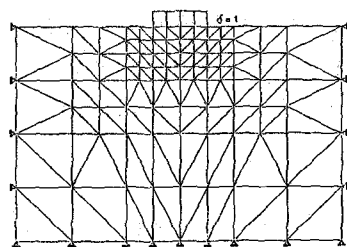


図8 平板載荷試験のメッシュ分割

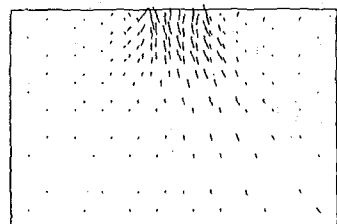


図9 異方性クラックを含む地盤の解析結果 (主応力図)

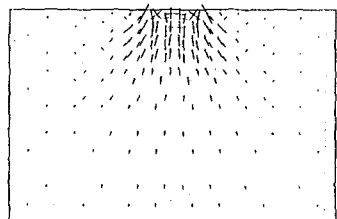


図10 等方性地盤の解析結果 (主応力図)

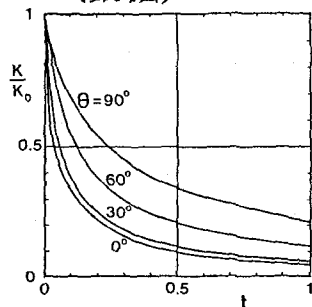


図11 地盤反力係数の α に伴う低下

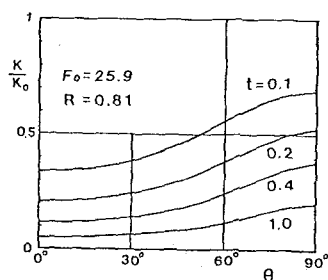


図12 地盤反力係数の異方性

での主応力の回転の影響により $\theta = 90^\circ$ のにおける K/K_0 値が、要素試験の場合に比べて小さい値となっており、その傾向を図13にまとめて示す。図中の縦軸は、要素試験に対する E/E_0 と、平板載荷試験に対する K/K_0 の比であり1からのズレが、主応力の回転の影響を表わしており $\theta = 90^\circ$ の場合が特に、その影響が大きいことがわかる。

最後に、新鮮なコアの弾性的性質(ヤング率, ポアソン比)と、対象とする岩盤の F_{ij} が判明している時に、平板載荷試験結果からパラメータを推定する方法について検討する。図14に示すように、与えられた F_{ij} に対する K/K_0 と t の関係を本研究の手法を用いて計算し、実測された地盤反力係数から①, ②の経路をたどり、対象とする岩盤の t を求める事が原理的に可能である。この t を用いて、岩盤上の構造物に対する有限要素解析を行なうことにより地質情報を直接とり入れた、第1次近似としての岩盤の解析が実施できると考えられる。

5. あとがき

多数の亀裂を含む岩盤を等価な異方弾性体と評価するクラック・テンソルの手法を適用した有限要素解析を行なった。解析にあたっては亀裂の接触の程度を表わすパラメータ t を用い、 t が結果に与える影響を調べ、さらに原位置岩盤への適用性についても検討した。

謝辞：本研究を進めるにあたり埼玉大学工学部、小田匡實先生に貴重な御討議をいただきました事を記して深く感謝いたします。また、クラック・パターン作成にあたっては、埼玉大学大学院、前波卓郎君にお世話になりました。

参考文献

- 1) 例えば Goodman, R.E. (1977) "Analysis in Jointed Rocks", in Finite Elements in Geomechanics Chap.11, Wiley.
- 2) 高橋 孝一・大橋 孝深 提出 (1984) "岩盤内地下空洞の静的挙動に与える節理分布の影響に関する考察", 6th 岩の力学国内シンポジウム, pp. 269-274
- 3) Kyoya, T., Y. Ichikawa & T. Kawamoto (1985) "A damage mechanics theory for discontinuous rock mass", 5th Int. Cong. on Num. Meth. in Geomech.
- 4) Oda, H., K. Suzuki & T. Maeshibu (1984) "Elastic Compliance for Rock-like Materials with Random Cracks", Soils & Foundations, vol. 24, no. 3, pp. 27-40.
- 5) 小田 錦・前波 (1984) "不連続性材料弾性コンプライアンス", オイル岩盤工学に関するシンポジウム, pp. 6-10
- 6) Oda, H. (1984) "Similarity Rule of Crack Geometry in Statistically Homogeneous Rock Masses", Mechanics of Materials, vol. 3, pp. 119-129
- 7) Oda, H. & T. Maeshibu (1984) "Characterization of Jointed Rock Masses by Fabric Tensor", 埼玉大学工学部建築学研究所報告, vol. 14, pp. 25-47
- 8) 例えば Chou, W.F. & A.F. Saleeb (1982) "Constitutive Equations for Engineering Materials vol.1", p.150, Wiley-Interscience
- 9) Pratt, H.R. et al. (1977) "Elastic and Transport Properties of an In Situ Jointed Granite", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 14, pp. 35-45
- 10) 小田 (1985) "一般化されたクラック・テンソルとその応用", オイル岩盤工学に関するシンポジウム, pp. 611-645
- 11) Serafini, J.L. (1964) "Rock Mechanics Consideration in the Design of Concrete Dams", in State of the Stress in the Earth's Crust (ed. by Judd)
- 12) 前波・小田 教納 (1985) "クラック・テンソルを用いた異方不連続性材料の破壊規準", オイル岩盤工学に関するシンポジウム
- 13) 小田 前波 教納 羽山 (1984) "クラック・テンソルによる岩盤透水係数の評価", 6th 岩の力学国内シンポジウム, pp. 121-126
- 14) 金谷 (1984) "岩盤中のクラック分布の表面観察による測定法", 6th 岩の力学国内シンポジウム, pp. 115-120
- 15) 折井・山本・有岡 (1969) "結晶片岩の構造異方性に関する実験的研究", 土木学会論文報告集, No. 170, pp. 23-26

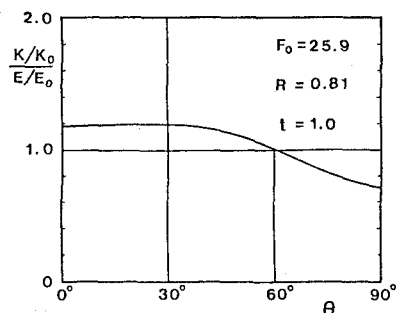


図13 要素試験と平板載荷試験における異方性の差

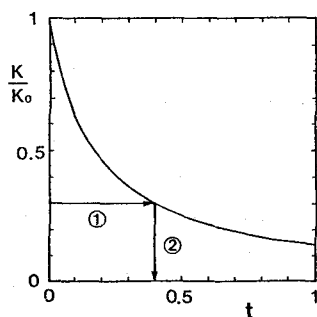


図14 原位置岩盤におけるパラメータ t の決定方法

(4) Finite Element Analysis of Discontinuous Rock Masses by Crack Tensor Theory

Saitama University

Tadashi Yamabe

ABSTRACT

Finite element analyses on cracked materials like rocks and rock masses are performed by using the elastic compliance in terms of "Crack Tensor" proposed by Oda (1983), which has been proved to be useful for approximating the elastic behaviour of cracked materials. In this paper, the compliance is slightly modified by a new parameter " t " in order to take into account the effect of substantial contact condition between crack surfaces on the elasticity.

The conclusions are summerized as follows:

- 1) Overall elastic moduli of cracked materials calculated by FEM show a substantial accordance with the experimental results of uniaxial compression tests.
- 2) Subgrade reaction for rock masses can be expected to be considerably influenced by the parameter " t " as well as the crack tensor.
- 3) A method to estimate the parameter " t " is proposed by using the stress-deformation curves of plate bearing tests in situ together with the crack tensor and the elastic constants of intact rock.