

(7) 実岩盤の計測結果から見た節理性岩盤の三次元掘削解析

埼玉大学大学院 ○ 多田 浩幸

埼玉大学工学部 山辺 正・小田 匡寛

清水建設技術研究所 石塚 与志雄

清水建設技術本部 熊坂 博夫

Three Dimensional Excavation Analyses of Anisotropic Jointed Rock Masses by Crack Tensor Theory

Saitama Univ. Hiroyuki TADA, Tadashi YAMABE, Masanobu ODA
Simizu Construction CO. Yoshio ISHIZUKA, Hiroo KUMASAKA

ABSTRACT

In planning a large-scale underground excavation in jointed rock masses, it is essential to three factors at least ; that is , 1) the geometry of geological discontinuities such as faults and joints ; 2) the direction of excavation ; and 3) the principal directions of in-situ stresses and their magnitudes. This study is to represent, in general, the influence of these factors on the elastic deformation behavior of jointed rock masses. To this end, three dimensional finite element analyses were performed with the following result : The elastic response of jointed rock masses cannot be successfully predicted without thinking of the interrelation among these three factors.

1. はじめに

岩盤内に大規模な地下空洞を掘削する場合には、初期地圧や地質構造など多くの計測結果と共に、数値解析を通じて事前の精度良い予測が的確に行われることが必要となる。この予測を行う際には、不連続面の規模、初期地圧、地下空洞の方向が相互に影響を及ぼしあっていることが知られている。本研究は、①岩盤内に存在する不連続面群から形成される幾何学形状を表現するクラックテンソル、②初期地圧としての応力テンソル、③地下空洞の幾何形状としての長軸方向に注目し、これら三者の影響を一般的に表現することを目的としている。具体的な解析においては、不連続面による力学的異方性の効果をクラックテンソルの概念を適用して等価な異方線形弾性体で表し、三次元掘削変形解析を実施した。解析結果から、クラックテンソルの意味での亀裂の主軸方向と空洞位置との相互関係は、不連続性岩盤の弾性変形挙動に重要な影響を与えることを示す。

2. 解析手法

クラックテンソルによる不連続性岩盤に対する構成式は、式(1)～(4)によって表される。^{1)～4)}式(1)はクラックを含む岩盤の巨視的なひずみ $\bar{\epsilon}_{ij}$ が基質部分に生ずる弾性ひずみとクラックに生ずる付加的な弾性ひずみとの線形和であることを示している。(但し、巨視的な応力 $\bar{\sigma}_{ij}$ 、ひずみ $\bar{\epsilon}_{ij}$ は、それぞれ局所的な応力とひずみを平均化したものである。)式(2)で定義される $\bar{M}_{ijkl}$ は基質部分の弾性コンプライアンスを示し、 E 、 ν はそれぞれ基質部分のヤング率、ポアソン比である。尚、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号で

ある。また、 $\bar{C}_{ijkl}$ はクラックの存在による付加的な弾性コンプライアンスであり、式(3)で与えられる。式(3)中の F_{ij} 及び F_{ijkl} はそれぞれ二階、四階のクラックテンソル(式(4))であり、クラックの幾何学性を表現している。式(4)で、 ρ は単位体積あたりのクラック数、 Ω は全立体角、 $\mathbf{n}$ はクラックの法線方向を向く単位ベクトルで、座標軸 x_i に対し n_i の成分を持ち、 $E(\mathbf{n}, r)$ はクラックの方向 $\mathbf{n}$ 、及び大きさ(直径) r の分布を記述する密度関数を、 r_m は r の最大値を、それぞれ意味している。また、 $\bar{h}$ 、 $\bar{g}$ はクラックの垂直剛性、セン断剛性であり本来応力に依存している。ここでは、材料定数の応力依存性を考慮しないで $\bar{h} = \bar{g} = \text{const}$ と仮定すると、式(1)中の $\bar{T}_{ijkl}$ は線形異方弾性体の巨視的弾性コンプライアンスを与える。今、特別な場合として、一軸圧縮応力 $\bar{\sigma}_{11}$ を考えると($\bar{\sigma}_{11} \neq 0$, $\bar{\sigma}_{22} = \bar{\sigma}_{12} = 0$)、クラックを含む巨視的弾性定数 E' は式(5)で与えられる。式(5)中の α は式(6)で定義され、バネ定数のヤング率に対する相対的な剛性を与えるパラメータを意味する。尚、 $\alpha = 8/3\pi$ とすれば、三次元の領域においてクラックの形状をpenny-shapeに仮定した弾性解と一致する。

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \bar{T}_{ijkl} \bar{\sigma}_{kl} = (\bar{M}_{ijkl} + \bar{C}_{ijkl}) \bar{\sigma}_{kl} \quad (1)$$

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

$$\bar{C}_{ijkl} = \left(\frac{1}{g} - \frac{1}{h}\right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (F_{ik} \delta_{jl} + F_{jk} \delta_{il} + F_{jl} \delta_{ik} + F_{il} \delta_{jk}) \quad (3)$$

$$F_{ijkl} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j \cdots n_k n_l E(\mathbf{n}, r) d\Omega dr \quad (4)$$

$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + \alpha F_{11}} \quad (5) \quad \alpha = \frac{E}{g} \quad (6)$$

3. 数値実験

3.1 実験概要

式(1)~(4)の構成関係を有限要素解析に導入し、三次元領域内中央に図1に示した地下空洞を掘削することを想定した数値実験を実施した。空洞部分は幅4.7m、高さ5.5mの馬蹄形であり、座標系については図1に示すように空洞長軸方向にY、上方をZとした右手系を採用した。この解析領域に対して、予め初期地圧を与えておき、その後掘削相当外力を作用させ変形解析を行う。本研究の目的より、クラックの幾何学性と空洞の長軸方向と初期地圧の主応力方向とその大きさとの三者の相互関係を一般的に表現するための数値実験を行う。ここで、初期地圧については水平平均地圧を鉛直地圧で除した値 k を導入し鉛直地圧を一定の490tf/m²(土盛り相当)とし、 k を変えて種々の応力状態をつくった。今回は、 $k = 1.0$ とする等方応力状態、 $k = 0.5$ 、 1.5 とする異方応力状態を採用した。さらに、上述の実験結果を踏まえ、本解析を実岩盤について適用してみた。尚、具体的な入力パラメータについては以下に示すこととする。

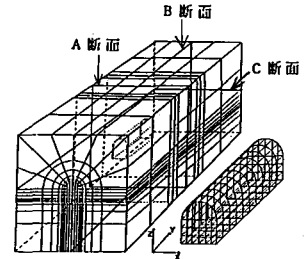


図1 要素分割と座標系

クラックの幾何学性と空洞の長軸方向と初期地圧の主応力方向とその大きさとの三者の相互関係を一般的に表現するための数値実験を行う。ここで、初期地圧については水平平均地圧を鉛直地圧で除した値 k を導入し鉛直地圧を一定の490tf/m²(土盛り相当)とし、 k を変えて種々の応力状態をつくった。今回は、 $k = 1.0$ とする等方応力状態、 $k = 0.5$ 、 1.5 とする異方応力状態を採用した。さらに、上述の実験結果を踏まえ、本解析を実岩盤について適用してみた。尚、具体的な入力パラメータについては以下に示すこととする。

3.2 入力パラメータの決定

クラックテンソルを用いた定式化に必要なパラメータは式(1)~(4)に示したとおりで、次の3種類に分けられる。

- (1) 基質部分の変形性を示す(E , ν): 実岩盤の孔内載荷試験及び室内試験の結果より $E = 1.94 \times 10^6 \text{tf/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.21$ とした。
- (2) クラックの幾何学性から決定される F_{ij} : クラックの配向方向の異方性が変形に与える影響を調べるために、クラックが全て同一の方向に配列している $F_0 = 1.0$ の場合を採用した。ここで、 F_0 は F_{ij} の跡(trace)であり、その値が大きいほどクラックの密度が高いことを示す。クラックの配向方向については、クラックテンソルの意味でクラックに立てた法線方向の主軸を、X, Y, Zそれぞれの軸の回りに回転させ、反時計方向の回転角を用いて表現した。ここで、クラックテンソルの基底については右手系を採用し、 e_1 , e_2 , e_3 方向は、それぞれX, Y, Z方向に一致させた。採用した F_{ij} は、表1に示す3ケースである。尚、表中の図は空洞の展開図であり、点線は空洞の底盤、側壁、天盤の境界を示し、実線は各々の F_{ij} に対応したクラック群を表している。3ケースの具体的な特徴を、次のようにまとめた。

ケース①：主軸がX軸に一致する場合を0°として、Y軸回りに30°回転させたケース

ケース②：主軸がY軸に一致する場合を0°として、X軸回りに30°回転させたケース

ケース③：主軸がX軸に一致する場合を0°として、Z軸回りに60°回転させたケース

また、実岩盤の F_{ij} については、原位置で実施されたクラックの調査結果から次のように決定した。

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} 14.16 & 4.03 & 6.03 \\ & 2.67 & 1.75 \\ \text{Sym.} & & 2.94 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F_0 = 19.77, A^{(F)} = 1.23$$

ここで、 $A^{(F)}$ は異方性の指標である。

(3) クラックの力学性から決定される $\bar{g}$ ： $\bar{g}$ を決定するには、適切な α （式(6)）を選ばなければならない。ここでは、異方性岩盤供試体における割線弾性係数の変化についての既報³⁾を参考にして α を求める。図2は大西山のミロナイトの応力-ひずみ曲線において、破壊強度の10%の応力レベルに対する割線弾性係数を求め E_{10}' とし、これを基質部分の弾性係数 E で無次元化して縦軸にとり、 F_{ij} の11成分を横軸とした図である。図中の測点②-⑨はミロナイトの結果、曲線は式(5)の E'/E と F_{11} との関係をそれぞれ表している。ここで、 E' を E_{10}' に代えて表し、 α はミロナイトの実験結果を最もよく説明する値を選んでいる。本数値実験の対象とする応力状態も低応力レベルであると考え、この報告より $\alpha = 1.5$ を採用した。したがって、式(6)より $\bar{g} = 1.29 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ と決定した。

ケース	F_{11} Sym.	F_{12} F_{22}	F_{13} F_{23} F_{33}	空洞展開図にみるクラックの配列状況
ケース①	7.50 Sym.	0.00 0.00	4.33 0.00 2.50	Y軸回り30°回転
ケース②	0.00 Sym.	0.00 7.50	0.00 4.33 2.50	X軸回り30°回転
ケース③	2.50 Sym.	4.33 7.50	0.00 0.00 0.00	Z軸回り60°回転

表1 クラック分布の主軸の回転の影響を調べるための F_{ij}

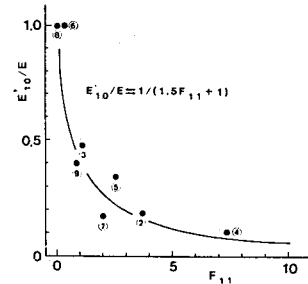


図2 ミロナイト供試体(②-⑨)における破壊応力の10%レベルに対する割線弾性係数の変化と式(5)による比較

3.3 結果及び考察

得られた数値実験の結果を図3、図4に示した。図3は、初期地圧を等方応力状態($k = 1.0$)とした場合の数値実験の結果をもとに掘削前後の変形状態を重ねて描いた図である。それぞれ表1の3ケースについて、上述の特徴が明らかに観察される断面を選んでいいる。尚、図中の点線は掘削前、実線は掘削後の状態を示し、ケース①は実変位を50倍、ケース②とケース③は150倍にして作図した。

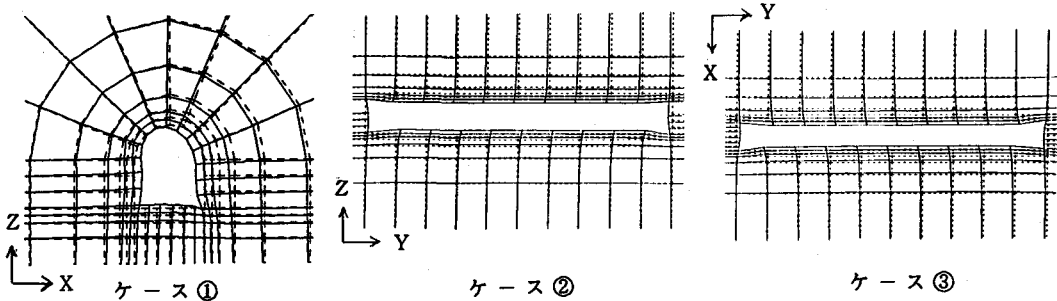


図3 空洞断面にみる変形

図の見方について、ケース①は図1中のA断面をY軸正方向に、ケース②はB断面をX軸負方向に、ケース③はC断面を鉛直下方にそれぞれ見た様子を示している。同図は3ケースの各断面において、それぞれのケースの特徴であるクラックの主軸方向に、変位が卓越することを明瞭に表している。図4は、空洞周辺の変形を評価するために、変位のコンターを空洞の展開図上に作成した図である。但し、ここで言う変位とは掘削によって空洞壁面に生じた実変位の絶対量を意味している。図中の矢印はY軸方向を示し、等高値の単位はmmである。また、●印は空洞の壁面上で最大変位が出現した位置を示し、括弧内の値は最大変位を、同解析領域に対して、別途実施したクラックを含まない等方弾性体の同じ部分の実変位で無次元化した値である。(a)～(c)は $k = 1.0$ の場合の3ケースについての結果を表し、それぞれクラックの幾何学性から生じる異方性の効果が明確に現れている。(a)においては左右非対称な変位分布が観察され、特に右肩部分(●印)に変位の最大値(13.9mm)が出現しており、等方弾性体に比べて約1.2倍もの変位が生じている。この傾向は、実岩盤内に掘削された大規模地下空洞においても観察されており、本解析の適用性に関する可能性を示唆している⁵⁾。(b)では●印に最大6.7mm、(c)では●印に対角的に最大7.4mmの変位がそれぞれ出現している。また、等方応力状態($k = 1.0$)で実岩盤に適用した結果(f)についても、式(7)に見られるような異方性の影響がでている。次に、初期地圧の影響について(a), (d), (e)を比較してみる。これらはいずれもケース①の F_{11} を用いた実験結果であり、(d), (e)は初期地圧がそれぞれ $k = 0.5$, 1.5 の異方応力状態の場合である。これらのコンター図から、初期応力状態の異方性は変位分布に影響を及ぼしていることが理解できる。例えば、(d)では(a)よりも天端に近い部分に最大変位が生じ、(e)では側壁部分に(a)の約1.5倍の変位が発生している。この結果は、クラックの幾何学的特性が同じでも初期の応力状態が異なれば、その変形特性も変わってしまうことを意味している。以上の結果より、次のような知見が得られた。

- i) クラックの幾何学性は空洞の弾性変形挙動に大きな影響を及ぼす。
- i i) クラックの幾何学的異方性に初期応力の異方性が加わると、空洞はより複雑な弾性変形挙動を示す。

4. まとめ

不連続性岩盤を、等価な異方線形弾性体で表すクラックテンソルの概念を用いた三次元有限要素変形解析を実施し、クラックの幾何学性と空洞の方向と初期地圧との相互関係が、不連続性岩盤の弾性変形挙動に重要な影響を与えることを示した。

参考文献

- 1) M.Oda : An Equivalent Continuum Model for Coupled Stress and Flow Analysis in Jointed Rock Masses, Water Resources Reserches, Vol.22, No.13, pp.1845-1856, December 1986.
- 2) 山辺, 原, 小田, : クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメータの決定に関する研究, 土木学会論文集, 第382号, III-7, PP.121-130.1987年, 6月.
- 3) M.Oda : An Experimental Study on Elasticity of Mylonite Rock with Random Cracks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.2, pp.59-69, 1988.
- 4) M.Oda, K.Suzuki, T.Maeshibu : Elastic Compliance for Rock-Like Material with Random Cracks, Soil and Foundations, Vol.24, No.3, pp.27-40, September, 1984.
- 5) 御牧, 蔵持, 工藤, : 今市地下発電所の施工と空洞周辺岩盤の挙動について, 電力土木, No.185, pp.47-63, 1983.

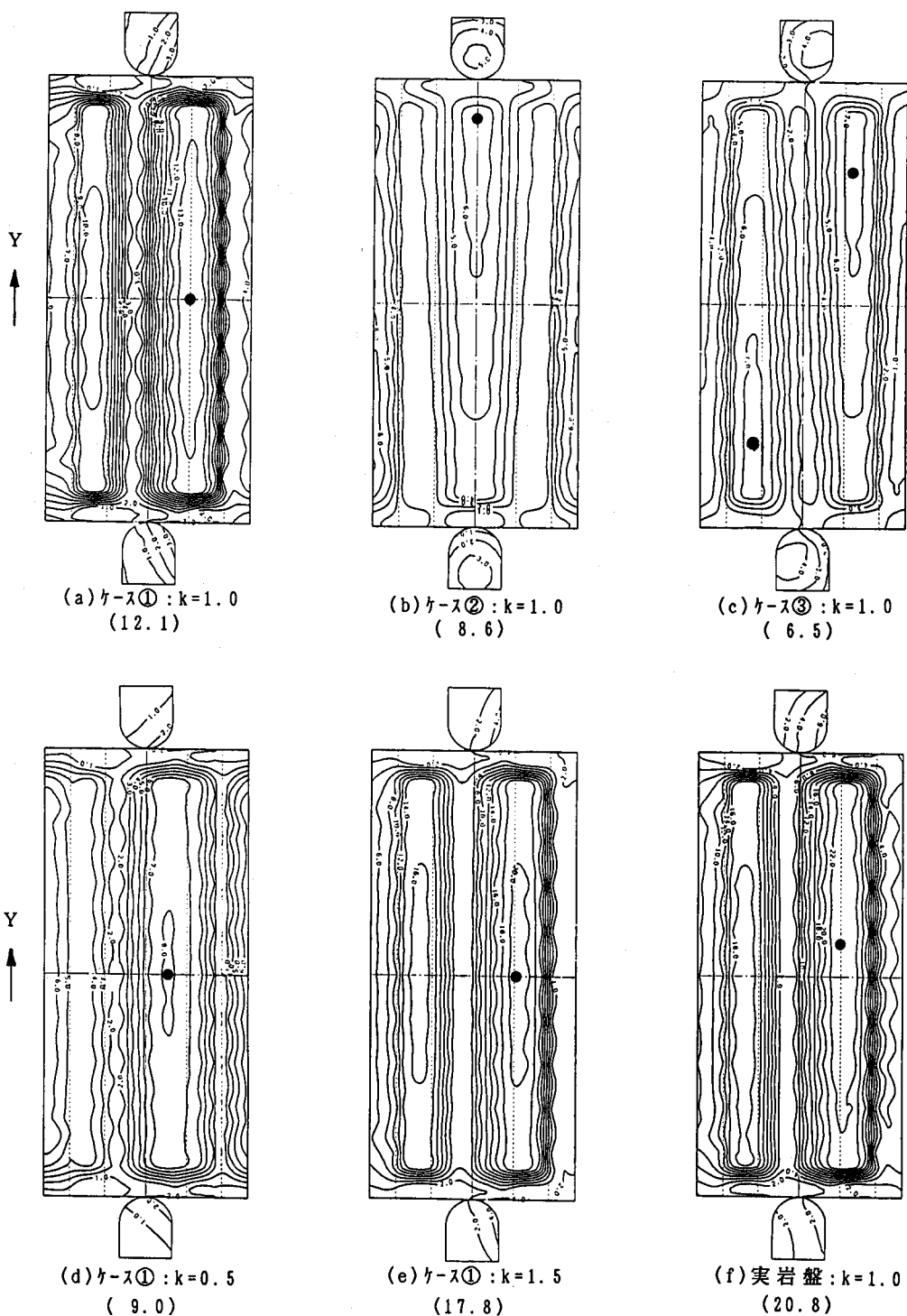


図4 空洞展開図にみる変位のコンター図
(等高値の単位はmm, ()の値は●での変位を等方弾性体解析結果で無次元化した量)