

(57) 有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する検討

鹿島建設(株) 正会員 佐々木 猛、吉清 孝、安東伸泰

A Study of the multiple yield models on jointing rock mass by finite element method

Takeshi SASAKI, Takashi YOSHIKIYO, Nobuyasu ANDO, Kijima Corporation

Abstract

Discontinuous planes of which cracks and joints existing in rock mass are given important influences for the evaluating local stabilities of the excavated rock surface of slopes and underground caverns. Yosinaka, Yoshida, Yamabe⁸⁾ classified it for five types which are small cracks, cracks, weak zones and faults from those length. Here, in this paper, the authors also classified it for two types which are the non oriented small cracks and the oriented joints sets and developed the elastic-plastic analysis of finite element method considering for the multiple yield models in which cracks and joint sets are opening and slipping by excavation¹²⁾. These are assumed that the total deformation of excavated rock surface is added elastic deformation of intact rock, opening of non oriented small cracks and slip and opening of oriented joint sets existing rock mass. The yield of rock mass is assumed that the stress conditions achieves at the first criterion of such three types of yield surfaces.

Consequently, the results of finite element calculations gives the physical meanings for the evaluate of stabilities on excavated rock surface by using its models.

1. はじめに

岩盤内には、潜在的または顕在的なクラックや節理などの不連続面が存在する。斜面や空洞の掘削工事でこれらは、掘削面周辺岩盤の局所的な安定性に重要な影響を与える。掘削面付近で発生する変形量は、母岩自身の弾性的なものに比較して、クラックの開口や節理の滑りに起因する比率の多いことが過去の現位置試験や計測結果から知られている^{1)、2)、3)}。従来、有限要素法を用いた掘削安定解析では、これらの要因を平均化した特性を与えることが多く、その結果は全体の平均的な挙動を示すものと判断される。しかし、実際の施工時に問題となるクラックや節理の存在に起因する局所的な挙動とその安定性評価をすることは難しい。

岩盤内に存在する不連続面の評価法として、吉中、吉田、山辺⁸⁾は、その長さによって、微小クラック、クラック、ジョイント、せん断帯、断層に分類している。このような不連続面の連続体力学への導入手法として、飯田、小林⁴⁾は、有意な走向/傾斜をもつ一つの不連続面群に対し、その面に沿ったMohr-Coulombの弾塑性降伏条件と不連続面に直交した方向に対してクラックの開口条件を与えている。また、その変形特性に関して、京谷、市川、川本⁹⁾は、連続体内の任意方向の不連続面による欠損を損傷テンソルによりその影響を等価な外力として評価している。一方、小田¹⁰⁾はクラックテンソルによりこれらを、応力-ひずみ構成則として直接求めている。F. Hajjassenら¹⁴⁾は節理群の方向と強度の関係をJRCで整理している。T. F. Choら¹⁵⁾は各節理群の変形性に対しそれらのひずみに関するコンプライアンスを重ね合わせるにより骨格と節理の平均的な応力-ひずみ構成則を求めている。著者らは、吉中、吉田、山辺⁸⁾の分類で、その長さにより不連続面の方向性に、無指向性、即ち、クラスター分析で有意な走向/傾斜が求まらないものと、指向性、即ち、有意な走向/傾斜が求まるものに分類できるものとした。即ち、前者を微小クラック、後者をクラックとジョイント(節理)とした。

本報告では、これらの不連続面を無指向性と指向性に分類し、有限要素法の弾塑性降伏条件にこれらの要因を取り入れた。また、せん断帯や断層はジョイント要素などで直接取り扱うこととした。解析モデルとして、微小クラックの開口¹¹⁾と複数の節理群が存在する地下空洞を想定し、これらの結果を従来のモデルと比較しその妥当性を検討した。

2. 複合降伏モデルについて

1節でも述べたように、岩盤内には無指向性の微小クラックと指向性の複数の節理群が存在するとし、掘削による壁面の変形量は、次の要因の和として表されるものとした。図-1にこれらの概念を示す。即ち、

- (1) 母岩自身の弾性および弾塑性な変形(無指向性)
 - (2) 岩盤内の潜在的なクラックのある一定の応力以下での開口またはある一定の応力以上での閉合による変形(無指向性)
 - (3) 複数の有意な走向/傾斜をもつ、層理、節理群の開口および滑りによる変形(指向性)
- である。また、掘削によって生じる応力の再配分での岩盤の降伏は、(1)~(3)が持つ強度にその応力状態が最も早く達したものの組み合わせとする。これを以降、複合降伏モデルと呼ぶことにする。

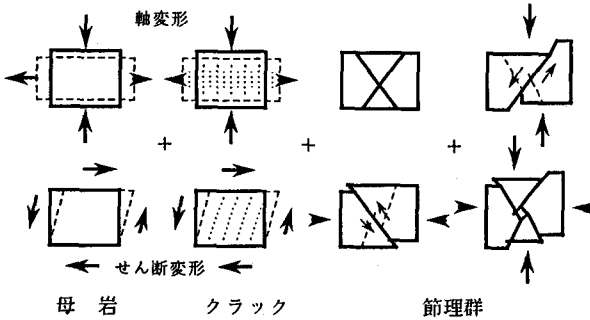


図-1 掘削による節理性岩盤の変形挙動のモデル化

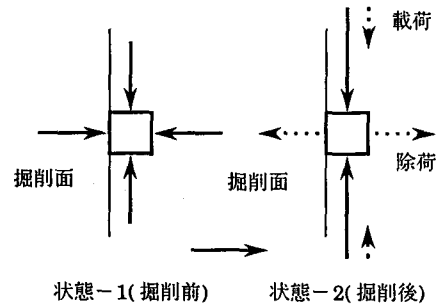


図-2 掘削面付近の応力変化

3. 解析の仮定および方法

クラックや節理を含む掘削面付近の岩盤の力学特性として、変形および強度が応力状態に依存するものとした。即ち、壁面周辺の応力状態は、掘削によって除荷(法線方向)と载荷(切線方向)同時に起こる二軸状態(2次元の場合)になる。図-2にこれらの概念を示す。これから、以下の事項を考慮した。

- (1) 岩盤内の潜在的なクラックは、ある一定以下の応力(S_2)で開口し、変形係数、強度が低下する。
- (2) ある一定以上の応力(S_2)では、クラックまたは節理は閉合し初期状態の変形係数、強度を有する。
- (3) ある一定以下の(S_2)二軸の応力状態に対して、直交異方性の変形係数、強度特性を持つ(2次元の場合)。
- (4) クラックの開口方向は、主応力の除荷方向とする。
- (5) 複数の節理群の走向/傾斜がクラスター分析などで既知の場合には、これらは、各節理群に対し応力状態が最も早く降伏面に達した節理面に平行な方向のせん断力で滑るものとする⁴⁾。図-3、図-4にこれらの変形特性および強度特性の概念を示す。

以上の仮定を、2次元平面ひずみの弾塑性構成則に導入した。弾塑性構成則として、母岩自身などの無指向性のものにはDrucker-Prager⁵⁾の降伏条件(1)式を用いた。

$$F = \alpha J_1 + J_2^{1/2} - \bar{\sigma} / \sqrt{3} = 0, \quad J_1 = \sigma_{ii}, \quad J_2 = S_{ij} S_{ij}, \quad \alpha = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\sin^2 \phi}{(3 + \sin^2 \phi)}}, \quad \bar{\sigma} = C(3(1 - 12\alpha^2)) \quad (1)$$

ここに、 J_1 、 J_2 ：応力の不変量、 S_{ij} ：偏差応力、 C ：粘着力、 ϕ ：内部摩擦角である。

また、節理群などの指向性のものにはMohr-Coulomb⁴⁾の降伏条件(2)式を用いた。

$$F_s = |\tau_s| - (C - \sigma_n \tan \phi), \tau_s = \tau_{xy} \cos 2\alpha - ((\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha) / 2, \sigma_n = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 - ((\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha) / 2 - \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (2)$$

ここに、 τ_s ：節理面のせん断応力、 σ_n ：節理面の垂直応力、 α ：節理群のx軸からの角度である。

クラックの開口時や節理群の引っ張り応力に対してはTresca(Tension-cut)⁶⁾の降伏条件(3)式を用いた。

$$F_t = S_1 - S_t, \quad S_1 = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

ここに、 S_t ：引っ張り強度である。これらに関連流れ則 $Q=F$ を適用した。

また、クラックの開口量は近似的にE.Oñate⁷⁾の(4)式によって求めることができる。

$$\Delta \epsilon^{cr} = T \Delta \epsilon_p B, \quad \Delta \epsilon^{cr} = \{\Delta \epsilon_n^{cr}, \Delta \epsilon_t^{cr}, \Delta \epsilon_{nt}^{cr}\}^T, \quad \Delta \epsilon_p = \{\Delta \epsilon_x^p, \Delta \epsilon_y^p, \Delta \epsilon_{xy}^p\}^T \quad (4)$$

ここに、 $\Delta \epsilon^{cr}$ ：一要素のクラックの平均的開口量、 T ：クラックの方向余弦マトリックス、 $\Delta \epsilon_p$ ：要素の塑性ひずみ、 B ：要素の幅、 n ：クラックの開口方向、 t ：クラックの滑り方向、 nt ：クラックのせん断方向である。これらの構成則を有限要素法に導入し、以降に示す空洞モデルに適用した。

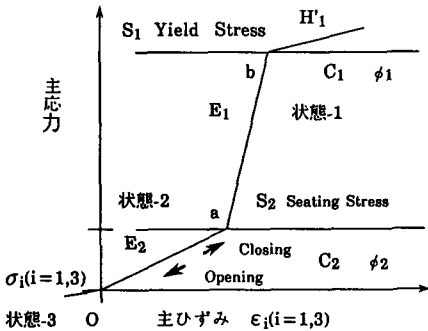


図-3 変形特性

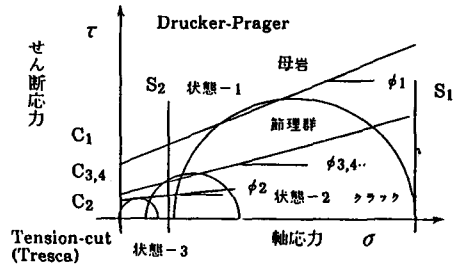


図-4 強度特性(複合降伏モデル)

4. 解析モデルおよびケース

図-5に解析モデルを示す。地山の初期応力を500tf/m²の静水圧状態とし、周辺固定のモデルについて、18×12mの中規模程度の空洞を3ベンチで盤下げするものとした。各ベンチでは掘削解放力を7増分で与えた。表-1、2に解析に用いた物性およびケースを示す。3節で提案したモデルを検証するため、解析ケースとして、1)弾性、2)等方性弾塑性(Drucker-Prager, Tension-Cutモデル)、3)等方-クラック($S_1=50\text{tf/m}^2$)、4)節理群1、2、5)等方-節理群1、2、6)等方-クラック-節理群1、2の組合せによる6ケースについて比較した。3)、6)のケースでは、最小主応力が S_2 以下になった場合、その方向の変形係数(E_2)、および粘着力(C_2)、内部摩擦角(ϕ_2)が当初の1/5(E_1 、 C_1 、 ϕ_1)になるものとした(図-2、3、4参照)。また、節理群の組合せ角度の影響をみるために、表-3に示すように節理群の角度が水平軸からそれぞれ $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 0^\circ$ および 90° の4ケースについて比較した。

5. 解析結果および考察

図-6に、空洞中央部の側壁からの水平変位分布を示す。ケース6の変位量は、ケース2に比較し、33%程度大きい。特に、ケース6では、その約30%が掘削壁面から4mの部分で占められる。これは、節理性岩盤の掘削による変位量の大部分が掘削壁面付近の節理の開口または、滑りによるとする現象を良く表現しているものと思われる。また、空洞周辺の変形の傾向をみると、ケース1、2では天端から上半で沈下を示すが、ケース3~6では天端から下端全体に渡って沈下(下向き)となっている。図-7に、空洞周辺の塑性領域分布を示す。特にケース6では、ケース2と比較して塑性領域に差はないが、降伏の要因が明確になっている。図-9はケース7~10の各節理群の組合せ角度の違いによる塑性領域を示す。これらを見ると、全体の塑性領域の大き

さは母岩の強度に依存しており、いずれも大きな違いはみられない。しかし、掘削面と節理群の角度の組合せの違いにより、節理群自身の強度に起因する塑性領域の大きさが異なっている。

表-1 解析に用いた物性

種 類	変形係数・その他	強度・降伏条件
母 岩	$E_x = E_y = 1 \times 10^5 \text{ t/m}^2$ $G_{xy} = 4 \times 10^4 \text{ t/m}^2$ $\nu_{xy} = \nu_{yx} = 0.25$ 初期応力、 $r_x = 0$ $\sigma_x = \sigma_y = 500 \text{ t/m}^2$	粘着力- $C_2 = 100 \text{ t/m}^2$ 内部摩擦角- $\phi_1 = 50^\circ$ 硬化係数 $H' = 1/1000E$ Drucker-Prager Tension-cut
クラック の開口	$S_1 = 50 \text{ t/m}^2$ 、異方性 $\sigma_{\min} < S_1 : E_{\min} = E_0/5$	粘着力- $C_2 = 10 \text{ t/m}^2$ 内部摩擦角- $\phi_2 = 10^\circ$
節理群-1	節理群角度+ 45° 他は岩石と同様	粘着力- $C_3 = 20 \text{ t/m}^2$ 内部摩擦角- $\phi_3 = 35^\circ$
節理群-2	節理群角度- 60° 他は母岩と同様	粘着力- $C_4 = 20 \text{ t/m}^2$ 内部摩擦角- $\phi_4 = 35^\circ$

表-2 解析ケースA

解析ケース	弾塑性 等方性	クラック 異方性	節理群 -1	節理群 -2	備 考
Case-1	-----	-----	-----	-----	等方弾性
Case-2	○	-----	-----	-----	等方弾塑性
Case-3	○	○	-----	-----	クラックの開口
Case-4	-----	-----	○	○	節理群の組合せ
Case-5	○	-----	○	○	複合降伏
Case-6	○	○	○	○	複合降伏

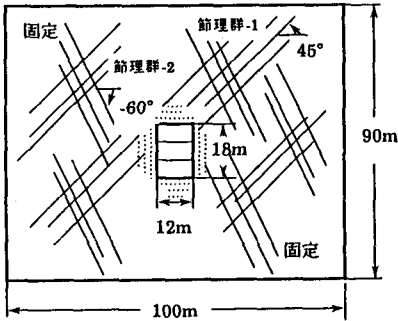


図-5 解析モデルおよび領域

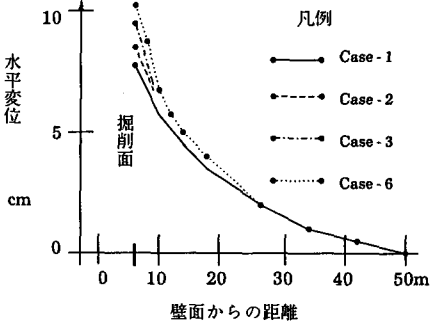


図-6 側壁の水平変位分布

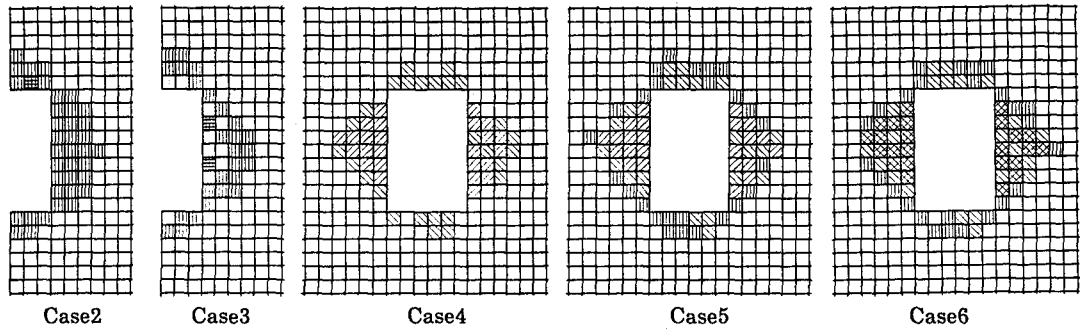


図-7 各導入項目の違いによる塑性領域

表-3 解析ケースB

解析ケース	弾塑性 等方性	クラック 異方性	節理群 -1	節理群 -2	備 考
Case-7	○	○	30°	-30°	複合降伏
Case-8	○	○	45°	-45°	複合降伏
Case-9	○	○	60°	-60°	複合降伏
Case-10	○	○	0°	90°	複合降伏

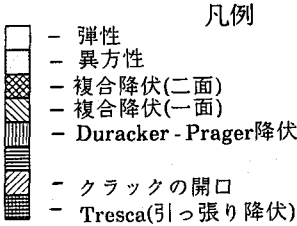
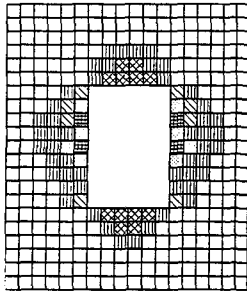
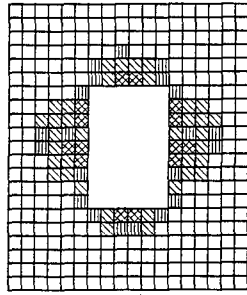


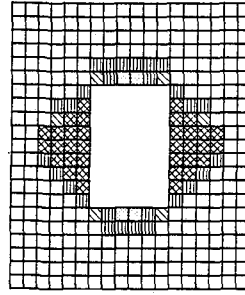
図-8 塑性領域の凡例



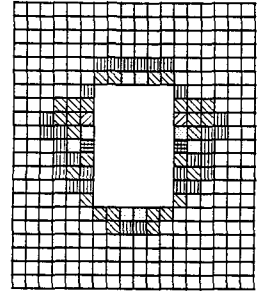
Case-7($\pm 30^\circ$)



Case-8($\pm 45^\circ$)



Case-9($\pm 60^\circ$)



Case-10($\pm 0^\circ, 90^\circ$)

図-9 節理群角度の組合せの違いによる塑性領域

6. むすび

本検討では、節理性岩盤の掘削解析において、岩盤の降伏条件に母岩、クラックの開口、節理群の滑りを取り入れた。また、これらを母岩や微小クラックのような無指向性のものと節理群のような指向性のものに分類し、それぞれに変形特性と強度特性を設定した。これらを有限要素法の弾塑性解析の構成則に導入することにより、平均的なクラックの開口量を求めることができる。このようにすれば、岩盤の変形要因をある程度明らかにすることができる。これらの観点から掘削壁面周辺岩盤の局所的な安定性評価に際し、その物理的な意味を与えることができる。

参考文献

- 1) 土木学会編、“土木技術者のための岩盤力学”、pp.145~157、1975
- 2) G. グーデフス編著、川本眺万、桜井、足立紀尚共訳、“地盤力学の有限要素解析”、森北出版、1981
- 3) 川本眺万、林正夫、“地盤工学における有限要素解析”、培風館、pp.252~287、1981
- 4) 飯田隆一、小林茂敏、“岩盤せん断試験に関する力学的な考察”、第3回岩の力学国内シンポジウム、pp.125~131、1970
- 5) 庄子幹雄、佐々木猛、森川誠司、“有限変形理論による不連続面を有する岩盤掘削モデルの弾塑性解析”、岩の力学連合会、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.449~454、1988
- 6) 佐々木猛、“有限変形理論による掘削地盤の弾塑性解析”、第25回土質工学研究発表会、pp.1181~1184、1990
- 7) E. Oñate, S. Oller, J. Oliver and J. Lubliner, “A constitutive model for cracking of concrete based on the incremental theory of plasticity”, Eng. Comput., Vol. 5, December, pp.309~319、1988
- 8) 吉中龍之進、吉田淳、山辺正、“岩盤不連続面分布の幾何学性とそのモデル化に関する考察”、土質工学会論文報告集、Vol. 30、No. 3、pp.161~173、Sept.、1990
- 9) 京谷孝史、市川康明、川本眺万、“岩盤の力学特性評価における損傷力学的アプローチ”、土質工学会、土と基礎、Vol. 35-3、pp.23~28、March. 1987
- 10) 小田匡寛、“不連続性岩盤の力学へのアプローチ”、土質工学会、土と基礎、Vol. 35-3、pp.29~34、March.、1987
- 11) 佐々木猛、“岩盤掘削における節理の開口・閉合モデルの一検討”、第26回土質工学研究発表会、pp.1157~1158、1991
- 12) 佐々木猛、“有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する検討”、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第3部、pp.550~551、1991
- 13) 山田嘉昭、“塑性・粘弾性”、培風館、昭和55年(1980)
- 14) F. Hadjassan, J. Finland, and E. Tinclin, “A continuum model for the mechanical behaviour of an oriented fractured rock mass”, Proceedings of the 7th ISRM Congress, Aachen, pp.251~256、1991
- 15) T. F. Cho, B. C. Haimson and M. E. Plesha, “Continuum modeling of porous rock with arbitrary joint sets including coupled deformation - diffusion behavior”, Proceedings of the 7th ISRM Congress, Aachen, pp.805~811、1991