

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研究

佐々木猛*・吉中龍之進**・永井文男***

岩盤内には、微小クラック、節理などの潜在的および顕在的な不連続面が存在する。これらは岩盤構造物の掘削面周辺岩盤の局所的な変形と安定性に支配的な影響を与える。本研究では、岩盤の変形を微小クラックを含む母岩と特定の方向を持つ節理群によるものの和として表した。また降伏モードは、その応力状態が各要素の降伏条件に最も早く達したものとす複合降伏モデルを提案した。以上の理論を地下空洞および斜面モデルへ適用し、その有用性を確認した。

Key Words : FEM, jointed rockmass, elastic-plastic analysis, slope stability

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、過去の原位置試験や計測結果などから知られている^{1)~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を評価することは難しい。

岩盤内に存在する不連続面の評価法として、吉中ら⁴⁾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、飯田ら⁵⁾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する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、京谷ら⁶⁾は連続体内の任意方向の不連続面による欠損の影響を損傷テンソルにより等価な外力として評価している。一方、小田⁷⁾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. Hadjassan⁸⁾は節理群の方向と強度

の関係をJRCで整理している。また、Singh⁹⁾, T. F. Cho¹⁰⁾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ことにより、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、吉中ら⁴⁾に従い、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。そして、前者を微小クラック、後者をクラックとジョイント(節理)と定義した。

本研究では、これらの不連続面を無指向性と指向性に分類し、有限要素法による岩盤安定解析における弾塑性降伏条件にこれらの要因を取り入れた、解析モデルとして、微小クラックの開口^{11),12)}と複数の節理群が存在する地下空洞および斜面を想定し、提案モデルの妥当性を検討した。

2. 岩盤の変形特性

ここでは、岩盤内に無指向性の微小クラックと指向性の複数の節理群の存在を仮定する。岩盤を掘削する場合、図-1に示すように掘削壁面付近の応力分布は、壁面の垂線方向では除荷、法線方向では荷重の二軸状態になる。掘削面付近の典型的な変形特性を表す試験方法として、図-2に平板荷重試験による壁面の荷重-変位関係²⁾の概念と、これを計算に使用するため単純模式化したものを示す。荷重の初期状態と除荷の最終状態で勾配が小さくなるのはトンネル規模における掘削による応力再配分でのクラックや節理群の閉合や開口の影響が主な原因として考えられる。特に、繰り返し荷重の第1回目の最初の勾配は、ある応力までは、開口しているクラックや節理群の閉合する影響が顕著であると推測される。

*正会員 鹿島建設株式会社 情報システム部 主査
(〒107 東京都港区元赤坂1-2-7)

**正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設基礎工学科

***正会員 鹿島建設株式会社 情報システム部開発課

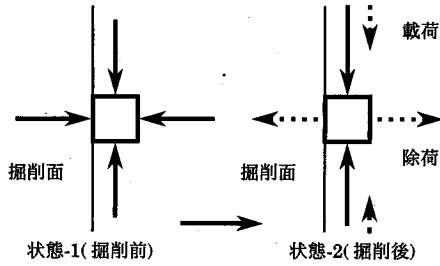


図-1 掘削面付近の応力変化

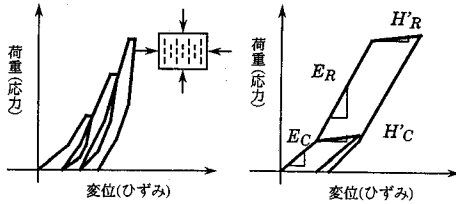


図-2 平板荷重試験の荷重変位関係とモデル化

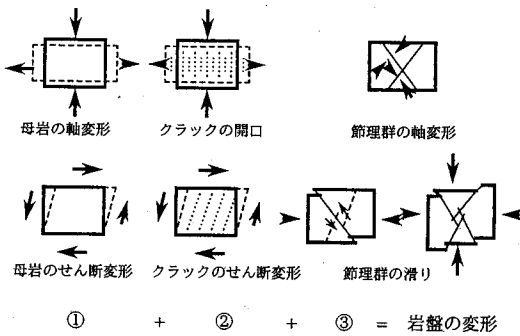


図-3 掘削による節理性岩盤の変形要因

このことは、除荷過程では岩盤内のクラックや節理群が開口し、また、荷重過程ではせん断応力の増加により、節理の滑りや母岩の降伏などの発生が考えられる。これらの変形要因として図-3に示すように、掘削による壁面の変形量は次の三つの要因の和として表されるものと仮定した。即ち、

- ① インタクトな母岩自身の変形(無指向性)。
- ② 岩盤内の潜在的なクラックの開口または閉合による変形(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・閉合および滑りによる変形(指向性)。

図-4は母岩の三軸試験による、応力-ひずみ関係の概念である。岩石コアやインタクトな母岩のように、変形特性を支配するような顕在的なクラックや不連続面が存在しない場合には、ある一定以上の拘束圧を与えた試験の結果はこのように等方的な特性が仮定できる。図-5は孔内荷重試験の荷重-変形関

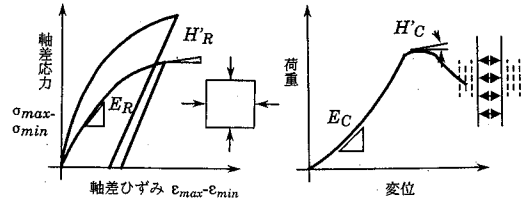


図-4 母岩の変形特性 図-5 孔内荷重試験の変形特性

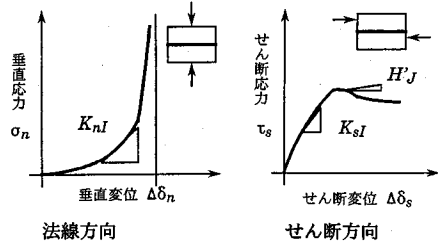


図-6 節理の変形特性

係の概念であるが、比較的インタクトな母岩のボーリング孔壁では、拘束圧が解放され円周方向に無指向性の微小クラックの発生する状態が想定できる。図-6は単一節理の法線およびせん断方向の変形特性の概念である。この場合、変形特性は軸変形バネに比較して、せん断方向の変形バネが小さくなり、節理のせん断変形が岩盤全体の挙動に与える影響は大きい。図-7は以上に示した岩盤の変形要因を直列の弾塑性力学モデルとして表現したものであり、節理性岩盤の変形特性は図中(1)~(5)の組み合わせとしてモデル化される。また、岩盤の降伏条件として、掘削によって生じる応力の再配分での①~③が持つ降伏条件にその応力状態が最も早く達したものと仮定した。これを以降、複合降伏モデルと呼ぶことにする。

3. 複合降伏モデルについて

複合降伏モデルは、岩盤の強度・変形特性を母岩、微小クラック、特定の方向を持つ複数の節理群に分けている。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。以下、それぞれの強度・変形特性について述べる。

(1) 母岩の強度・変形特性

図-8にクラックを含む母岩の変形特性を示す。母岩は等方性とし、ある拘束応力(S_3 : Seating stress)と降伏応力の間では、節理は閉合し、母岩は初期状態の変形係数(E_R)と強度を有するものとする(状態-1)。これらは弾塑性構成則として、図-9に示すDrucker-Prager¹³⁾の降伏条件式(1)に従うものとした。

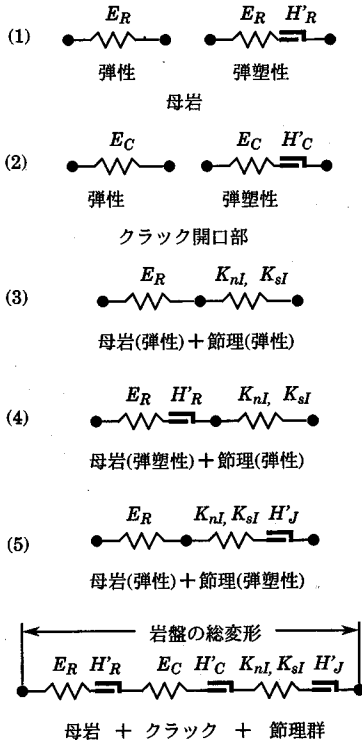


図-7 複合降伏モデル

$$F = \alpha J_1 + J_2^{1/2} - \bar{\sigma} / \sqrt{3} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$J_1 = \sigma_{ii}, J_2 = S_{ij} S_{ij} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sin^2 \Phi_R}{3(3 + \sin^2 \Phi_R)}}, \bar{\sigma} = C_R(3(1 - 2\alpha^2)) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

J_1, J_2 : 応力の不変量,

S_{ij} : 偏差応力,

C_R : 母岩の粘着力,

Φ_R : 母岩の内部摩擦角である。

応力-塑性ひずみ関係の硬化係数として、三軸試験の最終勾配 (H_R) を近似的に用いることとした。

(2) 引っ張り応力(指向性)に対する降伏条件

クラックの開口時や節理群の引っ張り応力に対しては Tension-cut¹⁴⁾の降伏条件式(4)を用いた。

$$F_t = S_1 - S_t = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$S_1 = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 4 + \tau_{xy}^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

S_t : 引っ張り強度である。

これらに、塑性ポテンシャルが降伏条件 F に等しいと仮定する関連流れ則を適用した。

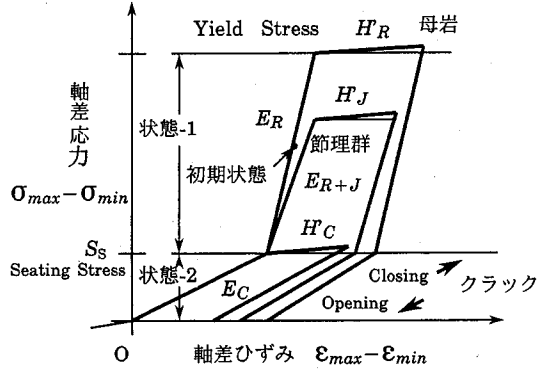


図-8 変形特性(母岩およびクラック)

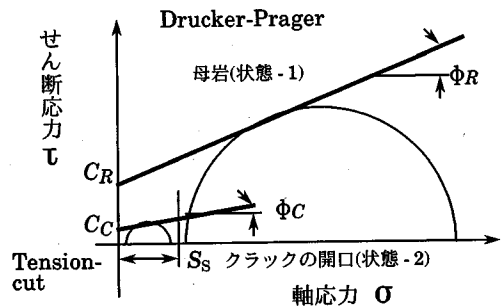


図-9 強度特性(母岩およびクラック)

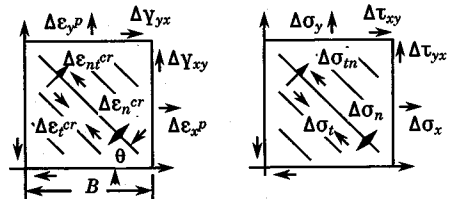


図-10 微小クラックの見かけの開口量

(3) 微小クラックの強度・変形特性

母岩内に含まれる微小クラックは、ある一定の最小主応力 S_S 以下で開口するものと仮定し(図-8の状態-2)、その時の変形特性は、図-5に示す孔内載荷試験の単調載荷の一回目の荷重-変位関係の勾配に近い母岩より小さい値 (E_2) を設定して表現した。強度特性として、図-9の状態-2に示すように母岩と同様に等方性を仮定したDrucker-Pragerの降伏条件を用いた。応力-塑性ひずみ関係の硬化係数として、同様に最終勾配 (H_C) を近似的に用いることとした。この場合、微小クラックが開口し、応力が塑性状態に達した時、クラックの開口量は塑性ひずみ増分から近似的に E.Oñate¹⁵⁾の式(6)によって求められる。図-10にこの概念を示す。この場合、微小クラックは増分応力の、最小主応力の方向に開口し、

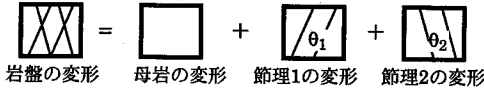


図-11 節理群を含む岩盤の変形特性

見かけの開口量は、その方向の塑性ひずみに要素の代表幅 B を乗じたものと仮定している。

$$\{\Delta e^c\} = B \cdot [T] \cdot \{\Delta e_p\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\{\Delta e^{cr}\} = \{\Delta e_n^{cr}, \Delta e_t^{cr}, \Delta e_{nt}^{cr}\}^T \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\{\Delta e_p\} = \{\Delta e_x^p, \Delta e_y^p, \Delta e_{xy}^p\}^T \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、

$\{\Delta e^{cr}\}$: 一要素のクラックの平均的開口量ベクトル、

$[T]$: クラックの方向余弦マトリックス、

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta & \sin 2\theta / 2 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta & -\sin 2\theta / 2 \\ -\sin 2\theta & \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad \dots\dots(9)$$

$\{\Delta e_p\} = \{\Delta e_T\} - \{\Delta e_e\}$: 要素の増分塑性ひずみベクトル、

$\{\Delta e_e\} = [D_e]^{-1} \{\Delta \sigma\}$: 要素の増分弾性ひずみベクトル、

$[D_e]$: 弾性応力-ひずみマトリックス、

$\{\Delta e_T\}$: 要素の増分総ひずみ増分ベクトル、

B : 要素の代表幅、

θ : x 軸からの最小主応力軸の角度、

n : クラックと法線方向、

t : クラックと平行方向、

nt : クラックのせん断方向である。

このようにすると、見かけのクラックの開口量を近似的に求めることができる。

(4) 節理群(指向性)の変形特性

岩盤内に存在する複数の節理群の変形特性は、コンプライアンスマトリックス^{9),10)}を導入することにより考慮した。節理群を含む岩盤の変形特性として、図-11に示すように岩盤の総ひずみ $\{e_T\}$ を母岩と各節理群のひずみの和と仮定する。これは母岩と各節理群の応力は等しく、節理群は周期的に存在し、かつ、節理群の体積が母岩に比較して無視できると仮定している^{9),16)}。

これらの関係を式(10)~(15)に示す。ある方向の節理群 I の局所座標系の剛性を全体座標系に変換する。

$$[F_I] = [T_I]^T \cdot [C_I] \cdot [T_I] \quad \dots\dots\dots(10)$$

節理群 I の局所座標系の剛性は式(11)で表される。

$$[C_I] = [K_I]^{-1} / S_I \quad \dots\dots\dots(11)$$

複数の方向の節理群を含む全体座標系のひずみは式(12)で表される。

$$\{e_T\} = \sum \{e_I\} + \{e_R\} = \sum [F_I] + [E] \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad \dots\dots(12)$$

節理群を含む全体座標系の応力-ひずみマトリックスは式(13)で表される。

$$[D] = [C]^{-1} \quad \dots\dots\dots(13)$$

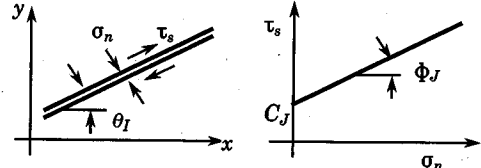


図-12 節理群の降伏条件(Mohr - Coulomb)

ここに、

$\{e_I\}$: 節理群 I のひずみベクトル、

$\{e_R\}$: 母岩のひずみベクトル、

$\{e_T\} = \{e_x, e_y, e_{xy}\}$: 総ひずみベクトル、

$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}\}$: 応力ベクトル、

$[E]$: 母岩のコンプライアンスマトリックス、

$[C]$: 節理群を含む岩盤のひずみの和のコンプライアンスマトリックス、

$[D]$: 節理群を含む岩盤の応力-ひずみマトリックス、

$[T_I]$: 節理群 I の座標変換テンソル、

$$[T_I] = \begin{bmatrix} \sin^2 \theta_I & \cos^2 \theta_I & -2 \sin \theta_I \cdot \cos \theta_I \\ \sin \theta_I \cdot \cos \theta_I & -\sin \theta_I \cdot \cos \theta_I & \cos^2 \theta_I - \sin^2 \theta_I \end{bmatrix} \quad \dots\dots(14)$$

$[K_I]$: 節理群 I の剛性マトリックスである。

$$[K_I] = \begin{bmatrix} K_{nI} & 0 \\ 0 & K_{sI} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここに、

S_I : 節理群 I の間隔、

θ_I : x 軸から反時計回りの節理群 I の角度、

K_{nI} : 節理群 I の垂直方向剛性、

K_{sI} : 節理群 I のせん断方向剛性である。

これらに用いる単一節理の変形特性は、図-6に示す法線方向剛性 K_{nI} 、せん断方向剛性 K_{sI} を用いる。また、節理群 I の応力とひずみは、式(16)~(19)で求められる。すなわち、局所座標系における節理群 I の応力ベクトルは式(16)で表される。

$$\{\sigma_I\} = [T_I] \cdot \{\sigma\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

局所座標系における節理群 I のひずみベクトルは

$$\{e_I\} = [C_I] \cdot [T_I] \cdot \{\sigma\} = [C_I] \cdot \{\sigma_I\} \quad \dots\dots\dots(17)$$

となり、これらの応力の成分は式(18)で表される。

$$\{\sigma_I\} = \{\sigma_{nI}, \tau_{sI}\} \quad \dots\dots\dots(18)$$

また、ひずみの成分は式(19)で表される。

$$\{e_I\} = \{e_{nI}, \gamma_{sI}\} \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここに、

σ_{nI} : 節理群 I の法線方向応力、

τ_{sI} : 節理群 I のせん断方向応力、

e_{nI} : 節理群 I の法線方向のひずみ、

γ_{sI} : 節理群 I のせん断方向のひずみである。

以上から各節理群の応力、ひずみが直接求められる。

(5) 節理群(指向性)の降伏条件

節理群などの指向性のものにはMohr - Coulomb⁵⁾の降伏条件式(20)を用いた。これらを図-12に示す。

$$F_s = \tau_s l - (C - \sigma_n \tan \phi_J) \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$\tau_s = \tau_{xy} \cos 2\theta_I - ((\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta_I) / 2 \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$\sigma_n = (\sigma_x + \sigma_y) / 2 - ((\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta_I) / 2 - \tau_{xy} \sin 2\theta_I \quad \dots\dots\dots(22)$$

ここに、

τ_s : 節理面のせん断応力、

σ_n : 節理面の法線応力、

ϕ_J : 節理面の内部摩擦角である。

節理群の応力が塑性状態の場合には、硬化係数として図-6に示すせん断応力-せん断変位関係の最終勾配(H_J)を用いることとした。複数の節理群が存在する場合、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した(状態-3)⁵⁾。以上の定式化の組み合わせは、図-7に示すように、原理的に各変形要因を直列的に重ね合わせたものである。

4. 適用例

ここでは、3.で提案したモデルを検証するため、被り200mを想定した中規模の空洞と斜面を掘削した場合について検討し、その適用性を確認する。

(1) 空洞モデル

一般に地下空洞の掘削では、その変形は岩盤内に存在する節理の影響などにより、掘削面近傍に集中することが計測などで知られている。しかし通常のFEM解析では、その影響が壁面からかなり深くまで及ぶ結果となる例が多い^{2),6)}。この原因として、岩盤の掘削面の変形量には、母岩自身の弾性的な変形のほかに、微小クラックの開口や節理群の滑りなどが含まれていることが考えられる。そこで本空洞モデルの解析では、これらに前述の複合降伏モデルを適用し、その妥当性を検討する。図-13に解析モデルおよび領域を示す。地山の初期応力を4.9MPa(500tf/m²)の静水圧状態とし、周辺固定のモデルについて、18m×12mの中規模程度の空洞を3ベンチで盤下げるものとした。図-14に要素分割および境界条件を示す。各ベンチでは掘削解放力を20増分で与えた。表-1に解析に用いた物性を示す。解析ケースを表-2に示す。これらは、

- ・Case-1: 母岩を等方弾性体とし、変形の基準とした。
- ・Case-2: 母岩は等方弾塑性体、弾塑性構成則は、せん断応力にDrucker-Prager、引っ張り応力にTension-cutのモデルを適用。
- ・Case-3: 母岩を等方弾塑性体とし、これにクラックの開口($S_S = 50\text{tf/m}^2 = 0.49\text{MPa}$)の影響を導入(クラックの開口の影響検討)。
- ・Case-4: 母岩を等方弾性体とし、30°の一つの節理群(弾性)を考慮(一つの節理群の弾性コンプライアンスの影響検討)。

表-1 解析に用いた物性

項目	母岩	クラック	節理群
単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	25.5	---	---
弾性係数 (GPa)	$E_R = 3.92$	$E_C = E_I / 5$	---
ポアソン比	$\nu_R = 0.25$	$\nu_C = 0.3$	---
せん断弾性係数 (GPa)	$G_R = 0.392$	$G_C = G_I / 5$	---
粘着力 (kPa)	$C_R = 980$	$C_C = 98$	$C_J = 196$
内部摩擦角 (rad)	$\phi_R = 0.872$	$\phi_C = 0.74$	$\phi_J = 0.611$
硬化係数 (MPa)	$H_R = 9.8$	$H_C = 1.96$	$H_J = 0.98$
初期応力 $\sigma_x = \sigma_y$ (MPa)	4.9	---	---
Seating Stress S_S (MPa)	---	0.49	---
垂直剛性 K_n (kN/m ³)	---	---	9.8×10^5
せん断剛性 K_s (kN/m ³)	---	---	39×10^3
節理間隔 S_I (m)	---	---	3

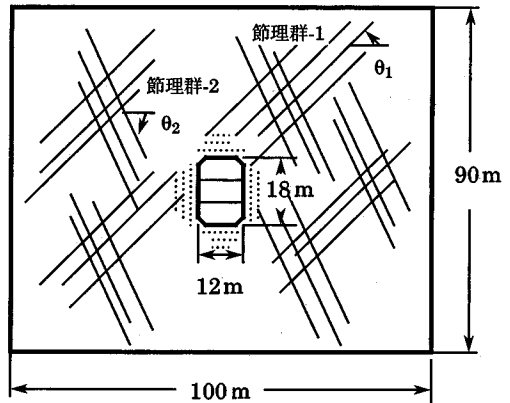


図-13 解析モデルおよび領域

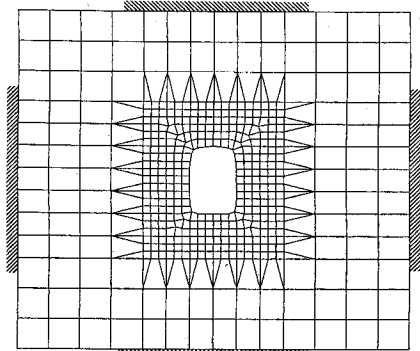


図-14 要素分割および境界条件

- ・Case-5: 母岩を等方弾性体とし、30°の一つの節理群(弾塑性)を考慮(一つの節理群の弾塑性コンプライアンスの影響検討)。
- ・Case-6: 母岩を等方弾性体とし、±30°の二つの節理群1, 2(弾性)の組合せを考慮(二つの節理群の弾性コンプライアンスの影響検討)。

表-2 解析ケース

解析ケース	母岩	クラック	節理群-1(30°)	節理群-2(-30°)	備考
Case-1	弾性	---	---	---	基本解
Case-2	弾塑性	---	---	---	弾塑性解
Case-3	弾塑性	弾塑性	---	---	クラックの影響
Case-4	弾性	---	$\theta_1 = 0.523\text{rad}$ (弾性)	---	母岩(弾性)+ 節理群(弾性)
Case-5	弾性	---	$\theta_1 = 0.523\text{rad}$ (弾塑性)	---	母岩(弾性)+ 節理群(弾塑性)
Case-6	弾性	---	$\theta_1 = 0.523\text{rad}$ (弾性)	$\theta_2 = -0.523\text{rad}$ (弾性)	母岩(弾性)+ 節理群(弾性)
Case-7	弾性	---	$\theta_1 = 0.523\text{rad}$ (弾塑性)	$\theta_2 = -0.523\text{rad}$ (弾塑性)	母岩(弾性)+ 節理群(弾塑性)
Case-8	弾塑性	弾塑性	$\theta_1 = 0.523\text{rad}$ (弾塑性)	---	複合降伏 (30°)
Case-9	弾塑性	弾塑性	$\theta_1 = 0.523\text{rad}$ (弾塑性)	$\theta_2 = -0.523\text{rad}$ (弾塑性)	複合降伏 (30°, -30°)

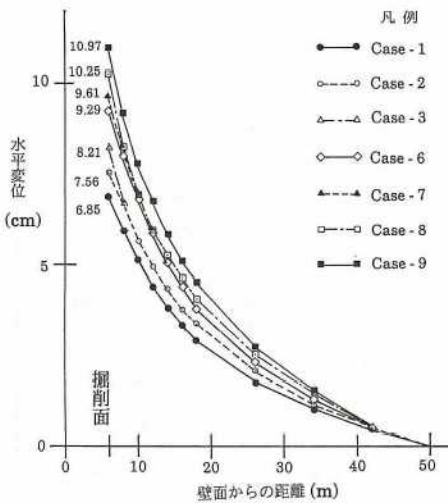
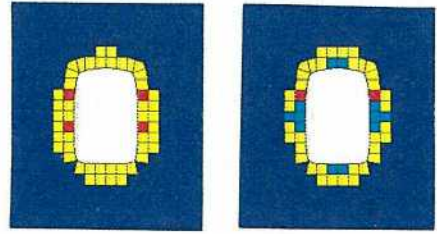


図-15 側壁の水平変位分布

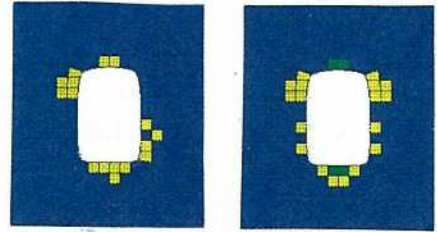
- ・Case-7: 母岩を等方弾性体とし、 $\pm 30^\circ$ の節理群1, 2(弾塑性)の組合せを考慮(二つの節理群の弾塑性コンプライアンスの影響検討)。
- ・Case-8: 母岩を等方弾塑性体、クラックの開口、 0° の一つの節理群(弾塑性)を考慮した(一つの節理群を含む複合降伏モデル)。
- ・Case-9: 母岩を等方弾塑性体、クラックの開口、 $\pm 30^\circ$ の二つの節理群1, 2(弾塑性)の組合せを考慮した(二つの節理群を含む複合降伏モデル)。

の9ケースである。Case-3, 8, 9では、最小主応力が S_S 以下になった場合、その方向の変形係数(E_C)、および粘着力(C_C)、内部摩擦角(ϕ_C)が当初の $1/5(E_R, C_R, \phi_R)$ になるものとした。また、節理群の組合せ角度の影響を見るために、水平軸から $\pm 30^\circ$ (0.523rad)のケースについて比較した。図-15は、空洞中央部の側壁表面から岩盤内部に沿う各距離での水平変位分布を示す。各ケースにおける掘削面の変形量は弾

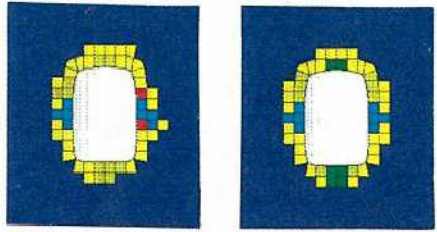


Case-2(弾塑性) Case-3(母岩+クラック)

図-16 各導入項目の違いによる塑性領域



Case-5(節理1-弾塑性) Case-7(節理1,2-弾塑性)



Case-8(母岩+クラック+節理1) Case-9(母岩+クラック+節理1,2)

図-17 各導入項目の違いによる塑性領域

- (赤)-等方引っ張り(Tresca)
- (橙)-節理群の引っ張り(Tresca)
- (黄)-等方降伏(Drucker-Prager)
- (淡緑)-節理群(単数)の滑り(Coulomb)
- (緑)-節理群(複数)の滑り(Coulomb)
- (青)-クラックの開口
- (紺)-弾性領域

凡例 複合降伏モデルの領域分類

性解と比較し、Case-2の塑性領域の影響は10%、Case-3のクラックの影響は9%程度、Case-4の一つの節理群(弾性)の影響は18%、Case-5の一つの節理群(弾塑性)の影響は21%、Case-6の二つの節理群(弾性)の影響は35%、Case-7の一つの節理群(弾塑性)の影響は40%、Case-8の母岩(弾塑性)、クラックの開口、一つの節理群(弾塑性)の影響は50%、Case-9の母岩(弾塑性)、クラックの開口、二つの節理群(弾塑性)の影響は60%程度多くなっている。各変形要因はそれぞれ10%程度である。また、これは全て各要因の重ね合わせの結果として表されている。

図-16に、節理群が無い場合の空洞周辺の塑性領

域分布を示す。Case-2の等方弾塑性解析では、一部に引っ張り降伏領域(赤)が発生している。これは、掘削ベンチ下部の応力集中の影響と思われる。

Case-3のクラックの開口を考慮したもので、天端と側壁の中央部にクラックの開口域(青)が現れている。図-17に、節理群を考慮した場合の空洞周辺の塑性領域分布を示す。Case-5は母岩を等方弾性体として節理群一つ、Case-7は節理群二つによる塑性領域分布を示す。Case-5の節理群一つの場合の塑性領域(淡緑)は、天端、下盤、側壁左上および右下に発生し非対称になっている。Case-7の節理群二つの場合の塑性領域は対称になっており、天端と下盤に節理群二つが同時に降伏した領域(緑)が現れている。Case-8の母岩、クラックの開口および節理群一つを考慮した弾塑性解析(複合降伏モデル)では、母岩の等方降伏領域(黄)、クラックの開口領域(青)、引っ張り降伏領域(赤)、節理群一つの場合の塑性領域(淡緑)が混在している。Case-9の母岩、クラックの開口および節理群二つを考慮した弾塑性解析(複合降伏モデル)では、母岩の等方降伏領域(黄)、クラックの開口領域(青)、節理群一つの塑性領域(淡緑)、節理群二つが同時に降伏した領域(緑)が対称に現れている。この場合、引っ張り降伏領域は現れていない。複合降伏モデルでは、このように岩盤の変形要因毎に強度特性を与え、降伏状態を分類することができる。したがって、この結果を利用して、空洞壁面の緩みに対する支保パターン等を岩盤の降伏状態に応じて適切に選択することが可能と考えられる。

(2) 斜面モデル

岩盤斜面では一般に、斜面の滑り方向に対する節理群の角度がその安定性に支配的な影響を及ぼす。しかし、これらの岩盤内に存在する節理群を全て調査することは不可能である。そこで設計的には、掘削前に斜面の滑りに対して力学的に最も危険な節理の角度を見出し、その角度を中心に主要な節理を調査し、安定性を検討しておくことが考えられる。また施工時には、掘削壁面の節理観察において、これらの角度を中心に重点的に調査し、その管理に役立てることが重要である。このような見地から、ここでは採石斜面の安定性を複合降伏モデルで検討した。図-18に斜面モデルの要素分割および境界条件を示す。解析領域の左右および下端をローラー支承とした。本斜面は、岩種(1)、岩種(2)、岩種(3)から構成されており、領域の左側の岩種(3)の斜面を3段階で掘削するものとし、解放力は各ステップで20増分とした。これらの物性を表-3に示す。岩種(1)と岩種(3)間に岩種(2)の弱層が存在している。図-19は各掘削ステップにおける節理群が無い場合の塑性領域を示す。塑性領域は岩種(2)の弱層と表面の応力低下

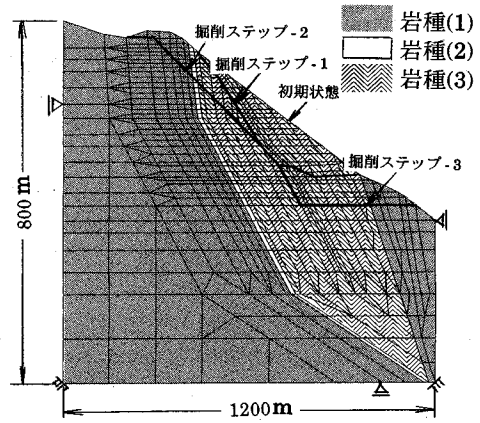


図-18 斜面モデルの要素分割および境界条件

表-3 斜面モデルの解析用物性値

項目	岩種(1)	岩種(2)	岩種(3)
単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	25.5	25.5	25.5
弾性係数 E_R (GPa)	3.92	0.98	2.94
ポアソン比 ν_R	0.25	0.25	0.25
せん断弾性係数 G_R (GPa)	0.392	0.392	0.117
母岩の粘着力 C_R (MPa)	2.35	0.245	1.66
母岩の内部摩擦角 ϕ_R (rad)	0.785	0.349	0.733
母岩の硬化係数 H_R (MPa)	3.92	0.98	2.94
クラックの粘着力 C_C (MPa)	$C_R/5$	$C_R/5$	$C_R/5$
クラックの内部摩擦角 ϕ_C (rad)	$\phi_R/2$	$\phi_R/2$	$\phi_R/2$
Seating Stress S_S (kPa)	98	98	98
クラックの弾性係数 E_C	$0.1E_R$	$0.1E_R$	$0.1E_R$
クラックの硬化係数 H_C (MPa)	0.392	0.098	0.294
節理の垂直剛性 K_n (kN/m ³)	---	---	29.4×10^5
節理のせん断剛性 K_s (kN/m ³)	---	---	11.7×10^3
節理の粘着力 C_J (MPa)	---	---	0.196
節理の内部摩擦角 ϕ_J (rad)	---	---	0.698
節理の硬化係数 H_J (MPa)	---	---	0.15
節理間隔 S_J (m)	---	---	10

域を除き、岩種(1)、岩種(3)ではほとんど現れない。図-20は各節理群の角度での塑性領域を示す。塑性領域は、節理群の角度が約80°~110°と-20°~-45°の場合に広がる傾向を示しており、これは図-24に示す本斜面モデルの共役なモービライズド面を中心とする角度に一致している。ここで、モービライズド面の角度 θ_m は、

$$\theta_m = \text{最小主応力の角度} \pm 45^\circ \pm (1/2)\phi_R \dots\dots(23)$$

で定義される。ここに、 ϕ_R :母岩の内部摩擦角である。式(23)から分かる通り、 θ_m はMohrの応力円上で応力状態が最も降伏状態に近づく面の角度である。したがって、節理群の角度が θ_m に近づくると塑性領域が現れやすくなる。

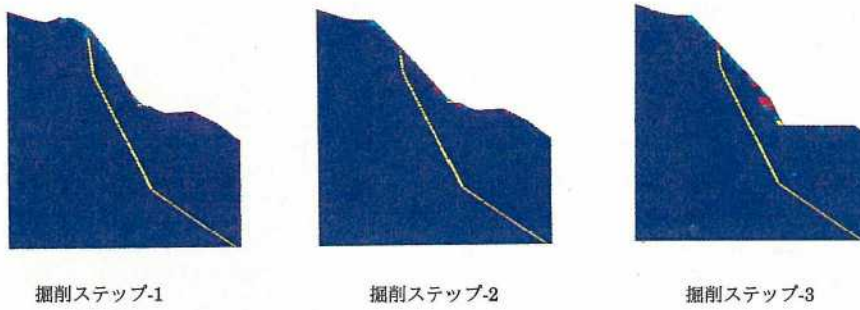


図-19 節理群を含まない場合の塑性領域

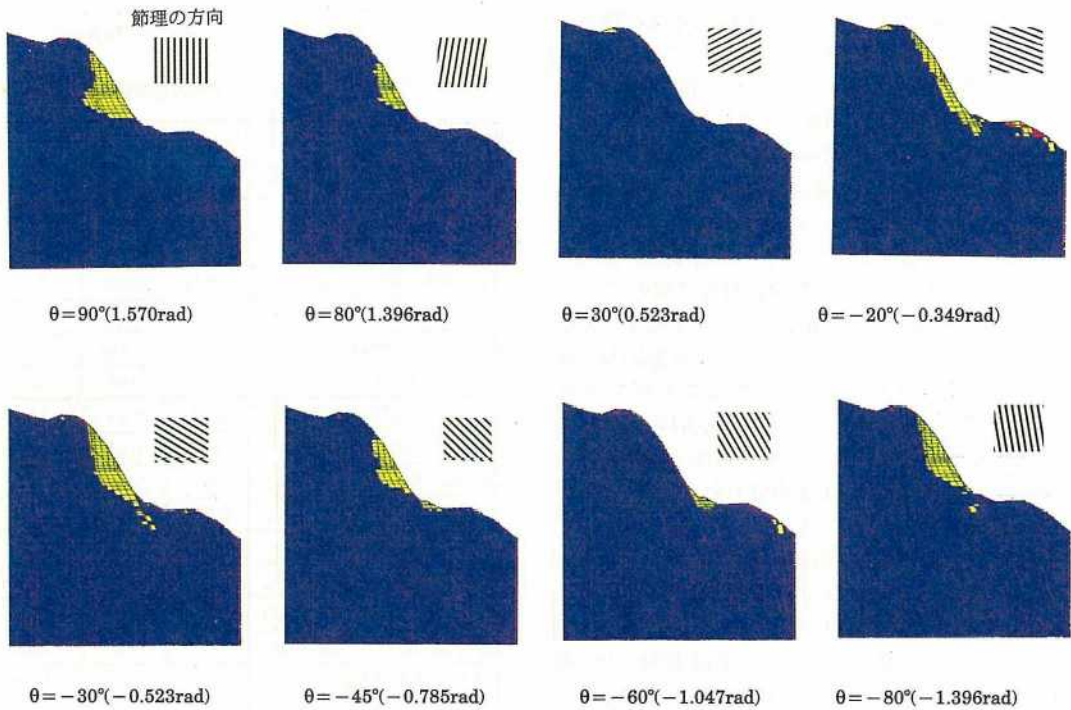


図-20 節理角度の違いによる塑性領域の変化(掘削ステップ-1)

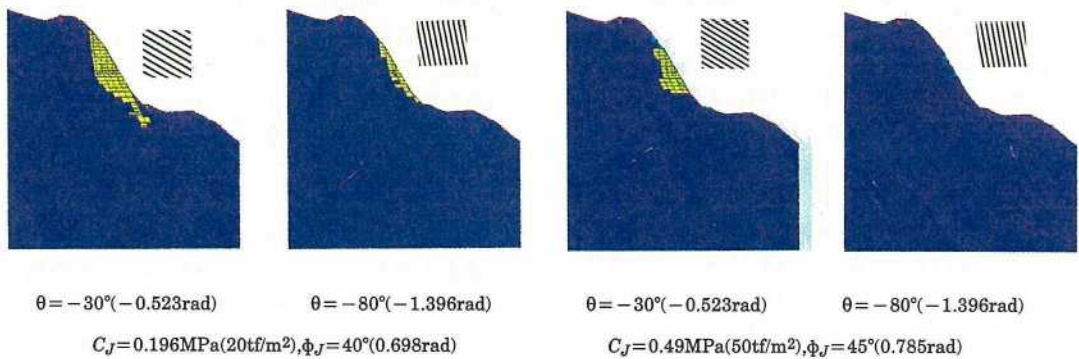
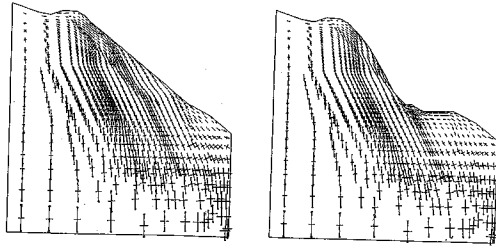
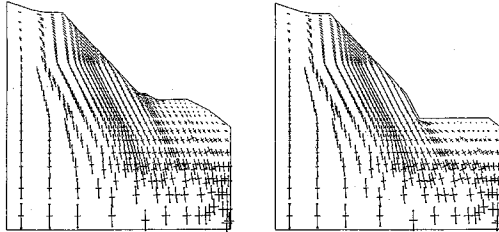


図-21 節理角度と強度の違いによる塑性領域の変化(掘削ステップ-1)

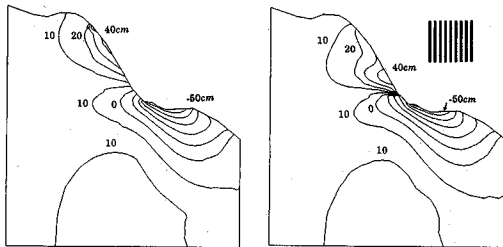


初期応力計算時 掘削ステップ-1

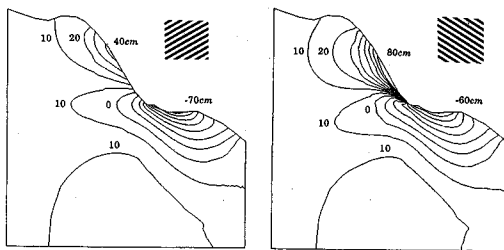


掘削ステップ-2 掘削ステップ-3

図-22 節理群を考慮しない場合の主応力分布



母岩 $\theta = 90^\circ (1.570\text{rad})$



$\theta = 30^\circ (0.523\text{rad})$ $\theta = -30^\circ (-0.523\text{rad})$

図-23 掘削ステップ-1での母岩と各節理角度での変形分布

θ_m は、各要素(場所)で異なる値となるが、斜面の表層付近では、主応力角度が斜面勾配と概ね平行になるため、近似的に式(24)で表すことができる。

$$\theta_m = \text{斜面角度} + 90^\circ \pm 45^\circ \pm (1/2)\phi_R \dots\dots\dots(24)$$

図-21は塑性領域が最も大きい、 $\theta = -30^\circ$ および -80° の場合の掘削ステップ-1における節理群の強度の違い、つまり、粘着力 $C_J = 0.196\text{MPa}(20\text{tf}/\text{m}^2)$,

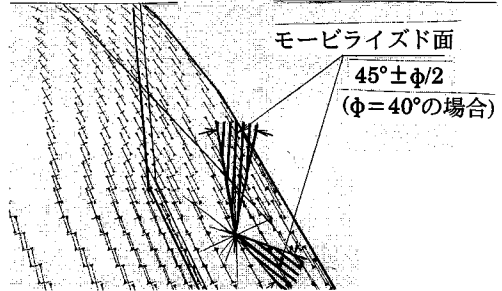


図-24 モービライズド面と塑性領域の関係

0.49 MPa(50tf/m²) および 内部摩擦角 $\phi_J = 40^\circ$ (0.698rad), 45° (0.785rad) の場合の各塑性領域を示す。これらを比較すると、 $\theta = -30^\circ$ の場合では強度増加に対して塑性領域の大きさは1/4程度になっているが、 $\theta = -80^\circ$ の場合は塑性領域が現れていない。このことは節理群の強度に対する塑性領域の感度が、各角度で異なることを示している。

図-22に各掘削ステップにおける主応力分布を示す。主応力の方向は斜面の角度と岩種(2)の弱層に沿っている。このように斜面の背面近くに弱層が存在する場合、斜面付近の応力は一軸的に分布している。図-23は掘削ステップ-1での、 $\theta = 90^\circ, 30^\circ, -30^\circ$ および母岩のみの場合の各水平変位分布を示す。これを見ると、掘削斜面上の最大変位の位置が節理群の角度で異なっていることが分かる。また、斜面に対して流れ目となる -30° の場合の最大変位は法尻部に集中しており、その値も他の2倍程度となっている。これは斜面の計測結果で見られる現象をよく表している。このように岩盤斜面では、その安定性に節理群の存在とその斜面に対する角度が重要な影響を与える。複合降伏モデルでは、設計的に節理群の角度を設定し、滑りに対する最も危険な節理群の角度を見いだすことが出来る。これらを利用し、その角度近傍の節理調査を重点的に実施することにより、その結果を斜面の安定性評価と施工管理に役立てることが可能と思われる。

5. 結論

本研究では、節理性岩盤の掘削解析において、岩盤の変形要因として母岩や微小クラックのような無指向性の変形と節理群のような指向性の変形に分類し、それぞれに強度・変形特性を設定した後、これらを直立的に重ね合わせる複合降伏モデルを提案した。これ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と節理群の影響による変形を求めることができる。複合降伏モデルの妥当性の検証を目的に空洞および斜面モデルの解析を実施し、以下の結論が得られた。

- (1) 複合降伏モデルを用いることにより、母岩、クラックの開口および複数の節理群の強度・変形特性の組み合わせを考慮することができる。その結果、塑性領域の物理的な意味づけや破壊のパターンが分類できる。また、これを利用することにより適切な支保工の対策を講じることが可能となる。
- (2) 複合降伏モデルによる空洞モデルの変位分布の比率は、掘削壁面近傍に集中し、実際に計測などで得られる傾向を示している。またこれは、節理群の角度によっても異なる。
- (3) 斜面モデルの塑性領域の大きさは、斜面内の主応力角度で決まるモービライズド面と節理群の角度の関係に依存している。
- (4) また、その安定性を左右する要因は、節理群の角度と強度(特に粘着力)が支配的である。さらに、強度に対する塑性領域の感度は、各節理群の角度で異なっている。したがって、これらの安定性評価にはモービライズド面付近の角度を持つ節理群の分布調査が重要な意味を持つてくる。

今回、著者らが提案する複合降伏モデルは、岩盤の変形と降伏要因を現象別に分類したものである。本モデルを用いて掘削壁面周辺岩盤の局所的な安定性評価を実施し、その結果に物理的な意味を与えることができる。本研究は節理性岩盤に関する力学モデルの一提案にすぎないが設計的な観点から、節理群を含む岩盤の安定性評価法として有効と考える。

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・桜井春輔・足立紀尚共訳：地盤力学の有限要素解析，pp.32~38，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) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) Hadjhasan, F., Finland, J. and Tinclin, E. : A continuum model for the mechanical behaviour of an oriented fractured rock mass, Proceedings of the 7th ISRM Congress, Aachen, pp.251~256, 1991。
- 9) Singh, B. : Continuum characterization of jointed rock mass, Part I - The constitutive equations, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 10, pp.311~335 , 1973。
- 10) Cho, T. F., Haimson, B. C. and Plesha, M. E. : 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。
- 11) 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。
- 12) 佐々木猛・吉清孝・安東伸康：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24回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.276~280, 1992。
- 13) 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。
- 14) 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。
- 15) Oñate, E., Oller, S., Oliver, J. and Lubliner, J. : A constitutive model for cracking of concrete based on the incremental theory of plasticity, Eng. Comput., Vol. 5, December, pp.309~319, 1988。
- 16) Hill, R. : Elastic properties of reinforced solids : Some theoretical principles, J. Mech., Phys. Solids, pp.357~372, 1963。

(1993.6.6 受付)

A STUDY OF THE MULTIPLE YIELD MODELS ON JOINTED ROCK MASS BY FINITE ELEMENT METHOD

Takeshi SASAKI, Ryunoshin YOSHINAKA and Fumio NAGAI

The authors classified discontinuous planes existing in rock mass for two types which are non oriented small cracks and the oriented joint sets presented by Yoshinaka et al. (1990). The total deformation of rock mass is assumed by superposing the elastic deformation of intact rock, the opening of non oriented small cracks, slip and the opening of oriented joint sets. The yield mode of the rock mass is selected that the stress conditions satisfy on yield surfaces at first in the three types as intact rock, cracks and joint sets. The excavated rock cavern and rock slope models are analyzed and the applicability of the presented method is examined.