

鹿島建設(株)正会員 庄子 幹雄

" 佐々木 猛

" 森川 誠司

1. はじめに

地盤内に建設される大規模な地下空間(地下発電所、地下備蓄等)の解析手法として、現在、二次元有限要素法が一般的に用いられている。また、トンネルの切羽の効果やトンネルの交差部等の解析については、一部三次元弾性解析も適用されている。ここでは、比較的大規模な空洞を複雑な地層と節理のある地点に建設することを想定し、これらをジョイントを考慮して三次元弾塑性有限要素法で解析し、その有用性について概要を述べる。

2. 解析法の概要

岩盤一般部の降伏条件は、次の2種類とした。

2. 1 Drucker-Pragerの条件(図-1)

$$F = \alpha J_1 + J_2^{1/2} - k = 0 \quad (1)$$

ここに、 F : 降伏曲面、 J_1 、 J_2 : 応力の第1, 第2不変量

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{(9 + 3 \sin^2 \phi)^{1/2}}, \quad k = \frac{3c \cdot \cos \phi}{(9 + 3 \sin^2 \phi)^{1/2}}$$

ϕ : 内部摩擦角、 C : 粘着力

2. 2 Parabolic Mohr-Coulombの条件(図-2)

$$F = (3J_2' + \sqrt{3} \beta k J_1)^{1/2} - k = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\beta = \frac{a}{\sqrt{3}}$, $k = 3(c^2 - \frac{a^2}{3})$, $a = \frac{c^2}{p}$

P : 引張強度、 C : 粘着力

また、弾塑性構成方程式は関連流れ則に従うものとした。¹⁾

2. 3 平面ジョイントによる不連続面のモデル化²⁾

ジョイント要素の厚みは小さいと仮定し、変位の形状関数を

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i) \quad (3)$$

(3)式とした。図-3に示すジョイント上部の変位を

$$w_{sx}^{top} = N_i u_i + N_j u_j + N_k u_k + N_l u_l \quad (4)$$

下部を $w_{sx}^{bottom} = N_m u_m + N_n u_n + N_o u_o + N_p u_p$

とし、上-下部の相対変位は、 $\{w\} = \{w_{sx}^{top} - w_{sx}^{bottom}\}$ (5)

で表される。ジョイント要素の相対変位-応力関係は(6)式

$$\{p\} = [k] \{w\} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_n \end{bmatrix} \{w\} \quad (6)$$

k_x : X方向のせん断バネ、 k_y : Y方向のせん断バネ、

k_n : ジョイント面に鉛直方向のバネを表す。これらから、

ジョイント要素内の仕事は、 $v^* = \iint \frac{1}{2} \{w\}^T \{p\} dx \quad (7)$

となり、ジョイントの剛性マトリックスは(8)式で表される。

$$[K] = \iint [N]^T [k] [N] dx dy \quad (8)$$

また、ジョイントの降伏条件は(9)式を用いた。³⁾

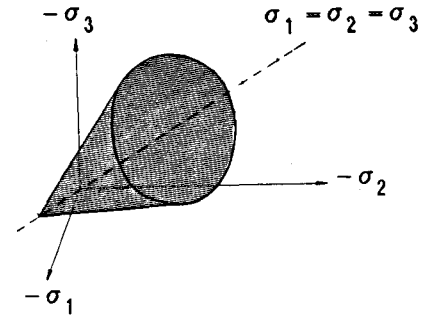


図-1 Drucker-Pragerの降伏条件

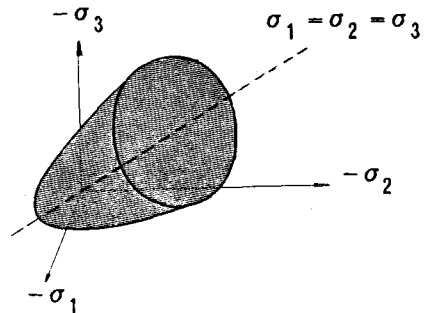


図-2 Parabolic Mohr-Coulombの降伏条件

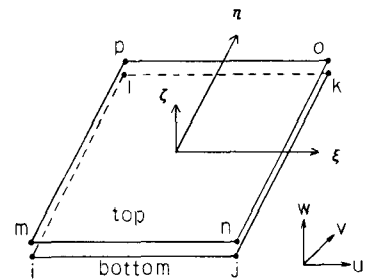


図-3 平面ジョイント要素

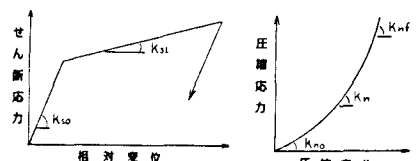


図-4 ジョイントの変形特性

$$F = \sigma_n \tan \phi + c - |\tau| = 0 \quad (9)$$

ジョイントの弾塑性構成則についても、一般要素と同様に
関連流れ則を適用し、弾塑性バネマトリックスを

$$[k]^{ep} = [k] - ([k] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [k]) / (k_{sr} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [k] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}) \quad (10)$$

とした。ここに k_{sr} : 滑り後のせん断バネ (図-4)

さらに、ジョイント面の法線方向バネは (11) 式で与えた。

$$\frac{k_n}{k_{nf}} = R^{n1} + (1 - R^{n1}) \frac{k_{n0}}{k_{nf}} \quad (11)$$

$$R^{n1} = \frac{\text{圧縮変位}}{\text{最大圧縮変位}}$$

3. 解析例

図-5に解析に用いたモデルの一例を示す。解析領域を、
2(L):1.2(W):10(H) の比率とし、対称形を考慮した1/4モ
デルを仮定した。本報告のものは、初期地圧 P_0 を静水圧とし
た場合の結果である。岩盤の降伏条件は (1) 式を用い、内
部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ ひずみ硬化係数 $H' = 1/200$ とし、変形係数
 $D_0 = 3 \times 10 \text{ t/m}$ 、粘着力 $C = 100 \text{ t/m}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.25$
を用いた。解析ステップとして空洞の掘削を3段階とし、各
ステップでの掘削による解放力は、更に3分割して与えた。
図-6は、横断面の各ステップにおける変形を示す。特に
天端の沈下に着目すると、ステップ1が最大となっており、
掘削の進行に従って戻る傾向がある。また小段等の断面急
変部は塑性領域に入っているため変形が大きくなっている。
図-7は、各断面で弾性解析と変形を比較したものである。
天端では、塑性領域に入っていないため弾性解とほぼ同じ
であるが、側壁部、ストラッド部では特に塑性領域になっ
ている場所で10~40% 程度弾塑性解の変形が大きくなっている。
図-8は最終掘削時の塑性領域を示す。ストラッド部、側壁
部の空洞中心付近の塑性領域が大きく、妻壁に近づくにした
がって小さくなっており、三次元効果が見られる。

1) J.L.Meek, "Excavation in Rock,

An Appreciation of the Finite
Element Method of Analysis"

Univ. of Tokyo Press, pp. 195~ 214 1973

2) M.A.Mahtab, R.E.Goodman, "Three

Dimensional Finite Element
Analysis of Jointed Rock

Slopes" I.S.R.M pp.353 ~ 360 1970

3) K.H.Jun, "Non-linear Analysis of

the mechanical properties of
Joint and weak intercalation

in rock" 3rd, ICNM, pp. 523~532, 1979

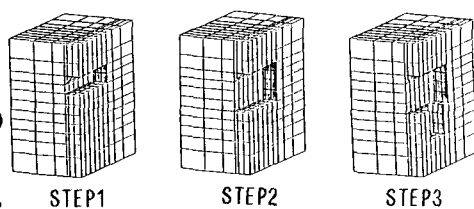


図-5 掘削ステップ

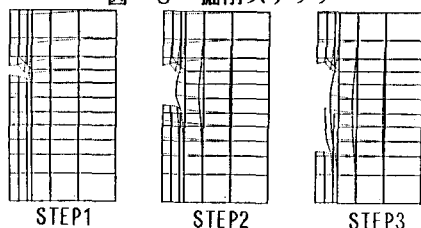
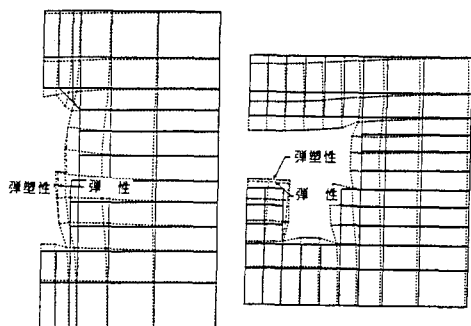


図-6 横断面の各ステップにおける変形



(a) (b)

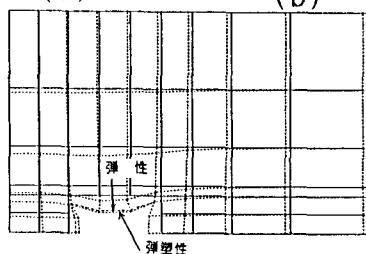


図-7 弾性解析との比較

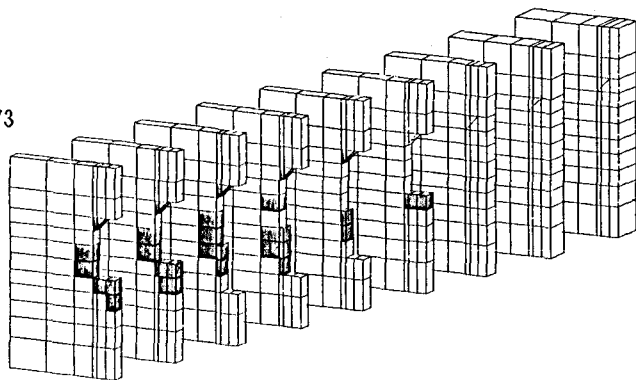


図-8 第3掘削終了時の塑性解