

(株)奥村組 技術研究所 正会員 ○西村正夫
" " 北角 哲

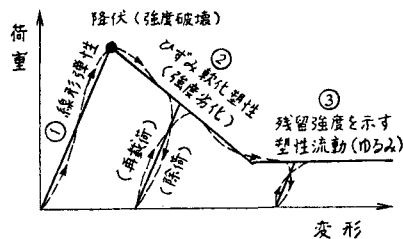
1. まえがき

山岳トンネル、地下発電所、地下貯槽など地下岩盤内に構築する構造物を対象とした、安全かつ合理的な設計および施工手法の確立が要請されている。そこで地山挙動や地圧現象を解明するため、岩盤力学に立脚した定量的予測を行う必要がある。その一つのアプローチとして、岩石材料の破壊変形特性を考慮した弾塑性解析プログラムの開発を行い、破壊後の応力経路や体積ひずみ変化の解析を試みた。

2. 材料特性モデルと解析手法

岩石やコンクリートなどのぜい性材料の剛性圧縮試験による強度破壊以後の変形挙動を求めると、ある拘束圧以下(土木分野で扱う範囲)のもとでは、図-1に示すような荷重-変形特性が得られる。このようなひずみ軟化および塑性流動特性から、パラメータとして塑性ひずみを導入して材料の応力-ひずみ関係を模式化し、数式モデルで表現した。すなわち、強度破壊(降伏)に至るまでは応力とひずみの関係が弾性定数で表わされる線形弾性過程とし、強度破壊後は強度と塑性ひずみの関係が負のこう配をもつ線形ひずみ軟化塑性(強度劣化)過程とした。さらに最終平衡状態として残留強度を示す塑性流動過程を加えた3過程で応力-ひずみ関係をモデル化した。一方、破壊強度、劣化強度、および残留強度の、拘束圧に依存した関係を示す応力条件(初期、後続降伏条件)式は、モールの2次包絡線(放物線)式で与えられるとした。これは、岩石やコンクリートなどのぜい性材料に特有な破壊様相として、引張り応力に起因するへき開性分離破壊(I型と呼ぶ)と、せん断応力に起因するせん断性すべり破壊(II型と呼ぶ)とを識別するのに都合がよいと考えたからである。

解析手法には、有限要素法による材料非線形な応力変形解析法の中で、材料が引張り力に抵抗できないものとして解析を行う零張力(No-tension, ただし、 $S_t \neq 0$)法と、数理塑性理論から導かれる弾塑性応力-ひずみの増分関係式で塑性域の非線形な応力挙動を表現し、それによる不平衡力を全体の系に再配分する初期応力(Initial Stress)法とを用いた。これら二法はいずれも与えられた条件に合うように応力を再配分する、いわゆる応力伝達(Stress Transfer)法であり、剛性マトリクスを変化させずに計算を行える利点がある。また、降伏して塑性状態になった要素が除荷(あるいは除荷後の再載荷)過程において弾性的に挙動すると考えられるが、このような過程をシミュレートする場合に都合がよい。一方、降伏関数と塑性ポテンシャル関数の相似性(Associated Flow Rule)を仮定した。このため、降伏関数を塑性ポテンシャル関数として応力とひずみ速度との関係を規定する場合、モールの放物線など2次元破壊に基づく降伏則における、これを3次元主応力空間に描いた降伏曲面は、一般に6個の異なる曲面(II型領域)で構成される。これらの交線上の応力状態に対して、ひずみ速度の方向は唯一ではないことには留意すべきである。次に、収束判定については、その過程までの最大変位量に対する、一反復計算における変位増分の最大量の割合の絶対値がある許容値以下になったとき、収束とみなした。しかし、応力増分やひずみ増分の変化も考慮した収束判定方法と解の安定性の検討が必要であることがわかった。



降伏条件 $F(\sigma, \epsilon_p) = F(\sigma, S_t) = 0$
i.e. $\tau^2 = (\sqrt{N+1} - 1)^2 S_t (S_t - \sigma)$

① $\epsilon_p = 0$ のとき、初期降伏条件であり、 $S_t = S_t$
 $\epsilon_p > 0$ のとき、後続降伏条件であり、 S_t について

② $0 < \epsilon_p < (1-\eta)/\xi$ のとき、
 $S_t/S_t = S_c/S_c = 1 - \xi \epsilon_p$

③ $\epsilon_p \geq (1-\eta)/\xi$ のとき、
 $S_t/S_t = S_c/S_c = \eta$

ここで、 S_t , S_c : 引張りおよび軸圧縮強度

ξ : ひずみ軟化係数 ($\xi \geq 0$)

η : 残留強度率 ($0 \leq \eta \leq 1$)

N : ぜい性度 ($N = -S_c/S_t$)

パラメータ $\epsilon_p = (\epsilon_1 - \epsilon_3)/\epsilon_p$
 $= (\epsilon_1 - \epsilon_3) - (\epsilon_1 - \epsilon_3)e$
 $= (\epsilon_1 - \epsilon_3) - \frac{1+\nu}{E} (\sigma_1 - \sigma_3)$

図-1 岩石の剛性一軸圧縮試験の模式化とその数式モデル

3. 解析例¹⁾

一軸圧縮応力 σ_1 を受ける円孔まわりの解析を2次元平面ひずみ状態で行った。モデルは1/4領域で要素数208, 節点数125であり, 条件は以下のである。

$$E = 1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\nu = 0.25$$

$$N = -Sc/St$$

$$= 60/6.5 = 9.2$$

$$\xi = 50, \quad \eta = 0.1$$

解析結果から, 円孔近傍要素の応力-ひずみ挙動と体積ひずみを図-2に, その応力経路を図-3に示した。要素が降伏してから荷重の増加に伴い, 応力が次第に減少し, 残留強度を示す塑性流動状態へ移行

する様子が伺える。図-4は荷重の増加に伴う要素の応力状態と, 塑性ひずみに依存する降伏曲線との関係を破壊限接近度(Stress Severity²⁾)で示したものである。これは降伏後の要素の応力についての収束状態を判断する一指標に使える。荷重の増加に伴う体積膨脹要素の進展を図-5の左に, I型を除くII型塑性域(せん断型破壊)要素の進展を同図の右に示した。

4. あとがき

有限要素法によるひずみ軟化挙動を表現

する解析を示したが, 今後さらに解の収束条件と安定性について検討したい。なお, 本研究に対して御協力いただいた日本IBM(株)浅井達雄氏に謝意を表します。

参考文献 1) 奥村組「技術研究年報」, No.4, (1978.9), pp.59-76. 2) Fairhurst, C., Int. Jour. Rock Mech. and Mining Sci., Vol.1, No.4, (1964), pp.536-546.

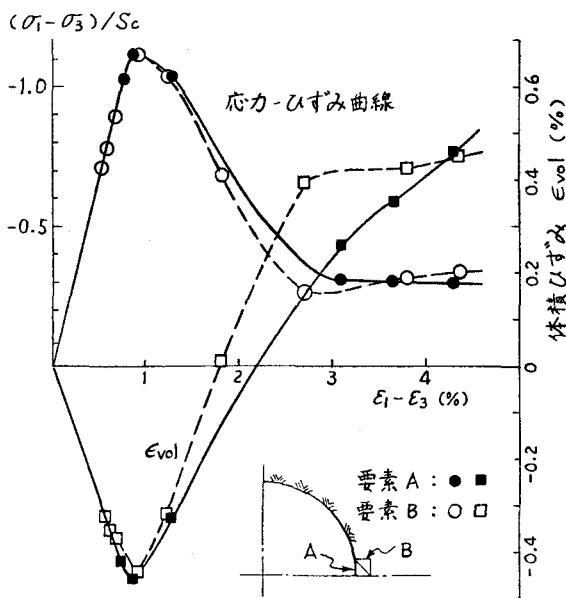


図-2 応力-ひずみ曲線と体積ひずみ

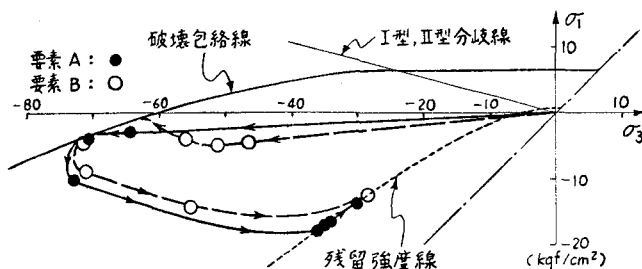
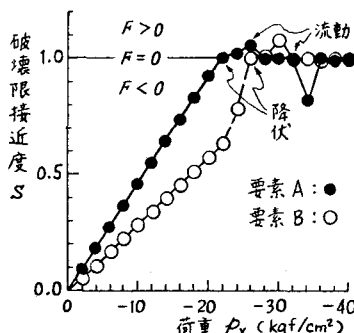


図-3 応力経路



注) S: 初期および後続降伏曲線 $F(\epsilon_p) = 0$ の応力の接近の度合を表わす指標

図-4 応力状態と降伏曲線の関係

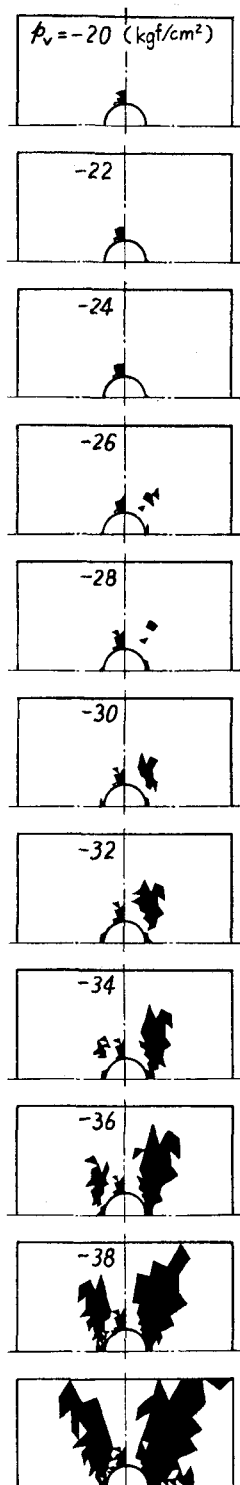


図-5 体積膨脹要素(左)とII型塑性域(せん断型破壊)要素(右)の進展