

(26) 亀裂性岩質材料の亀裂伝播特性について

埼玉大学 工学部 浜島良吉
研問組 技術研究所 草深守人

1. まえがき

岩盤においては節理、亀裂の存在が力学的特性に大きな影響を及ぼすことから、これらについての実験的研究及び解析的研究がこれまで数多くなされている。しかし、こうした節理及び亀裂を有する岩盤の解析的取り扱いについては必ずしもまだ十分とはいえない。特に多数亀裂が入った場合の亀裂伝播による不安定破壊挙動については解析的に取り扱われた例はない。しかし岩盤掘削の際に観察される掘削周辺部のはりみ出しが計算結果の数倍の大きさを観察している事実は掘削周辺部の亀裂の進展が大まな一要因と考えられる。こうした現象を正しくだけ正確に把握するためには亀裂及び節理を含む不連続体としての岩盤の力学的特性を調べる必要がある。本研究はこのうち特に亀裂の伝播を追跡し得る解析手法の足がかりを得ることを目的として基本的実験（亀裂を含む円板の圧裂試験、多数亀裂を含む一軸、二軸試験）を行い、これらの数値解析を行った。

2. 解析手法

不連続部を含む岩盤の解析についてはこれまでいくつかの方法が提案され、浜島、川井は剛体バネモデルを用いて節理を有する強異方性岩盤の応力伝達特性について調べ、節理間のスリップがこうした節理系岩盤の力学的挙動に大きく影響し強い異方性としての特性を示すことを明らかにした。この場合図-1に示される境界一稜モデルを使用しているため、モーメントにより生ずる応力が十分考慮できない。そこで亀裂進展の解析精度を高めるため図に示されるような境界二稜モデルを用いて解析を行う。

今、稜 m_1 , m_2 の相対変位 $\delta'^T = [\delta_{d1}, \delta_{s1}, \delta_{d2}, \delta_{s2}]$ と、中稜 M の相対変位 $\delta^T = [\delta_d, \delta_s, \varphi]$ との関係が次式で与えられる。

$$\delta' = \begin{Bmatrix} \delta_{d1} \\ \delta_{s1} \\ \delta_{d2} \\ \delta_{s2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & l_{m1}/4 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & l_{m2}/4 \\ 0 & 1 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_d \\ \delta_s \\ \varphi \end{Bmatrix} = B' \delta \quad (1)$$

ここで、 δ は重心稜の変位 $U_j^T = [u_x, u_y, l_x, u_x, u_y, l_x]$ を用いることにより

$$\delta = B U_j \quad (2)$$

これより

$$\delta' = B' B U_j = \bar{B} U_j \quad (3)$$

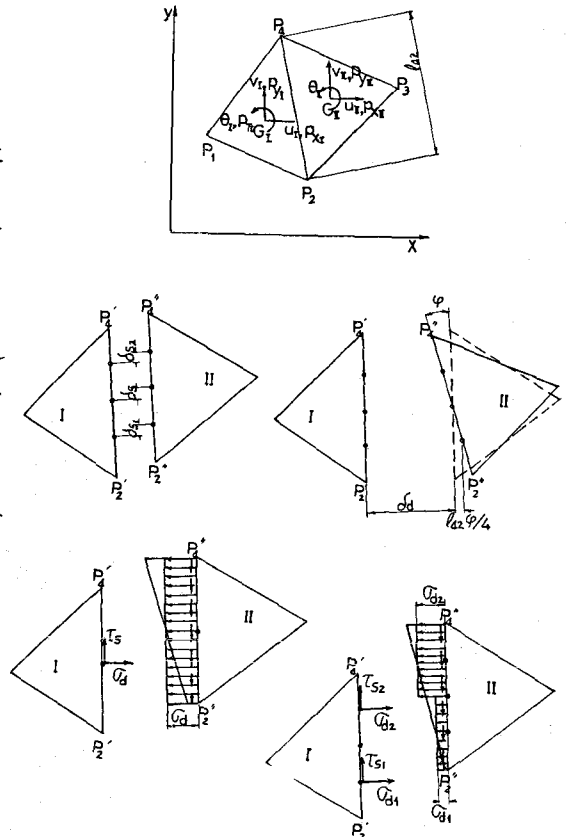


Fig. 1 Two Points Boundary Element

境界边上の点 m_1, m_2 を中心として、各々半分の辺に作用する応力を $\sigma^T = [\sigma_{d1}, \tau_{s1}, \sigma_{d2}, \tau_{s2}]$ とし、各々のバネ定数を $k_e = [k_{d1}, k_{s1}, k_{d2}, k_{s2}]$ とすると、

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{d1} \\ \tau_{s1} \\ \sigma_{d2} \\ \tau_{s2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{s2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{d1} \\ \delta_{s1} \\ \delta_{d2} \\ \delta_{s2} \end{Bmatrix} \frac{1}{h} = D \frac{\delta'}{h} = DE' \quad (4)$$

今、要素重心に作用する力を $\pi^T = [P_{xI}, P_{yI}, P_{xII}, P_{yII}, P_{xIII}, P_{yIII}]$ として仮想仕事の原理より

$$\{U_i^*\}^T \pi = \iiint \{E^*\}^T \sigma dV$$

これより

$$\pi = B^T K B U_i, \quad K = \frac{t \cdot k_{s2}}{2h} D \quad (5)$$

解放力の計算

境界辺での解放応力を σ 、重心点における解放力を π とすれば、仮想仕事の原理より

$$\{U_i^*\}^T \pi = \iiint \{E^*\}^T \sigma dV$$

これより

$$\pi = \frac{t k_{s2}}{2} B^T \sigma \quad (6)$$

3. 構成方程式

母材（連続部）に対しては Drucker-Prager 則を用い、さうに関連流れ則を仮定する。

$$f = \alpha J_1 + J_2^{1/2} - K = 0 \quad (7)$$

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$J_2 = \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

今、平面応力状態について

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

であり、さらに要素は剛であると仮定し、関連流れ則を仮定していることから境界辺方向の伸びがずみが零である条件は

$$\delta f / \delta \sigma_y = 0 \quad (8)$$

で与えられる。これより修正された Drucker-Prager 則は以下のようになる。

$$f = \frac{3}{2} \alpha (\sigma_x + \sqrt{1 - 3\alpha^2} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}) - K = 0 \quad (9)$$

これは以下のように変換される。

$$\frac{(\sigma_x + \frac{6\alpha K}{1-12\alpha^2})^2}{\frac{4K^2(1-3\alpha^2)}{(1-12\alpha^2)^2}} + \frac{\frac{\tau_{xy}^2}{K^2}}{1-12\alpha^2} = 1 \quad (10)$$

これは楕円を表わし、楕円の中心は原点より

$-6\alpha K / (1-12\alpha^2)$ だけ離れている。

ここで、 α, K は Mohr-Coulomb 基準から次式のように入力される。

$$\alpha = \tan \phi / \sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi} \quad (11)$$

$$K = 3C / \sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}$$

又、粘着力 C 、内摩擦角 ϕ については圧縮試験から得られる引張応力 σ_t および一軸圧縮試験から得られる一軸圧縮応力 σ_c を用いて次式で与えられる。

$$C = |\sigma_c| / (2\sqrt{m-3}), \quad \phi = \sin^{-1} \{ (m-4) / (m-2) \}$$

$$m = |\sigma_c / \sigma_t| \quad (12)$$

次に亀裂部に対する構成式としては

$$f = |\tau| + \sigma \tan \phi_2 = 0 \quad (13)$$

を用いる。

4. 実験結果及び解析結果

図-2 は亀裂の入っていない円板（直径 10 cm、厚さ 3 cm）に対する解析結果である。解析は初期応力法を用いているが、変位増分量及び解放力の収束限界を大きく取りすぎたため、鉛直断面上の応力分布が理論値と相当異なり、又実験においては中央断面

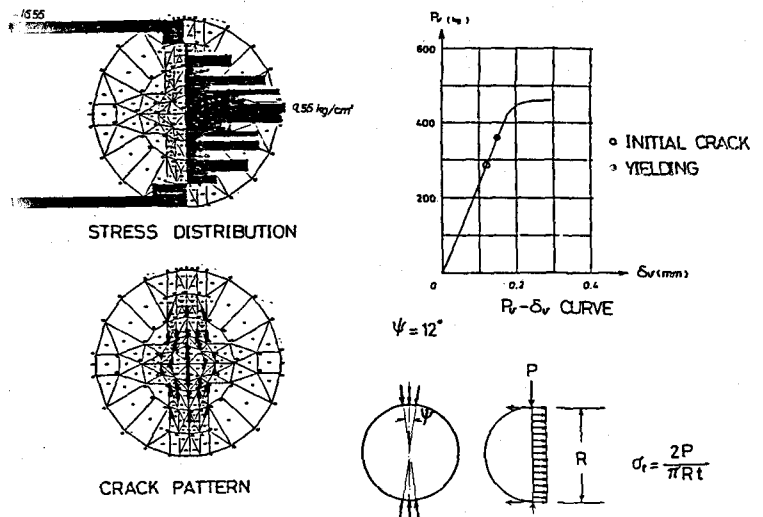
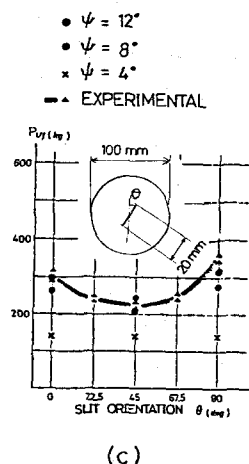
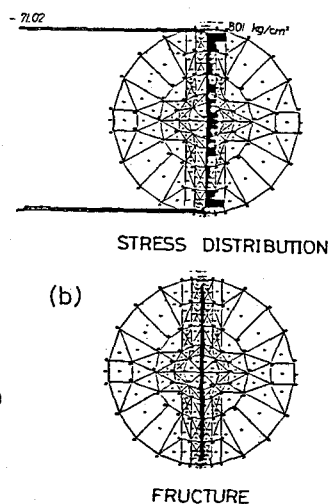
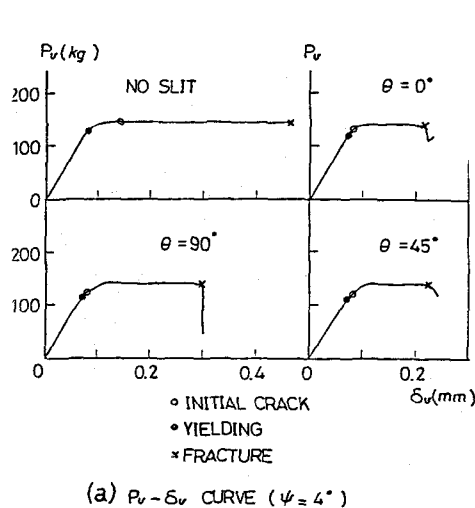


Fig.2 Numerical Result for Splitting Tensile Test



上で一直線上に分離するが、断面全体に亀裂が入った結果になっている。そこで、載荷幅を挟む角度 ψ を 12° から 4° に減らして収束条件を厳しくすることにより図-3bの結果が得られる。これにより鉛直断面上の割裂が生じ実験で得られる現象と一致する。但し図-3aに示されているように $\psi = 4^\circ$ の場合スリット角度の変化によらず圧裂強度は一応となってしまう。これは載荷幅が狭いことにより引張破壊よりむしろ載荷部の材料の降伏によって支配されると考えられる。そこで、 $\psi = 8^\circ, 12^\circ$ についてその結果を図-3dに示す。これは実験結果と比較的良好に一致する。図-3eは荷重変形曲線であるが載荷幅が小さい場合、まず載荷部から降伏を生じその後亀裂が生じ割裂が生ずる。いずれも亀裂は一瞬の内に全断面に生ずる。但し注目すべきことは載荷角度が小さいものについては載荷部分から亀裂が発生し、載荷角度が大きくなるに従い中央部から生ずるようになる。図-3fはスリット角度 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の場合における亀裂のパターンを示したものであり、実験結果と比較的良好に対応を示しているといえる。以上より圧裂試験における不安定破壊現象を本解析法は比較的良好に表現し得るといえる。スリットが入ったものについては混合破壊モードとなっているが、これらについても良好に追従し得るといえる。

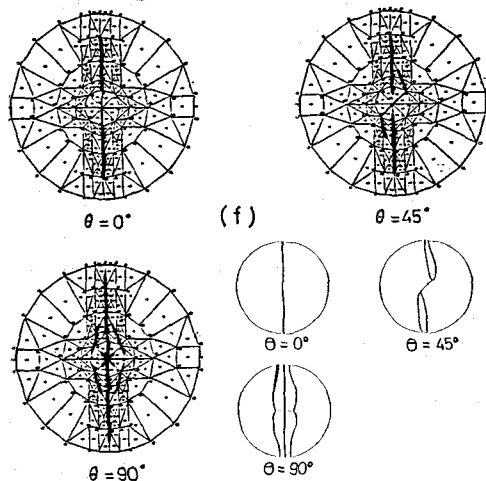
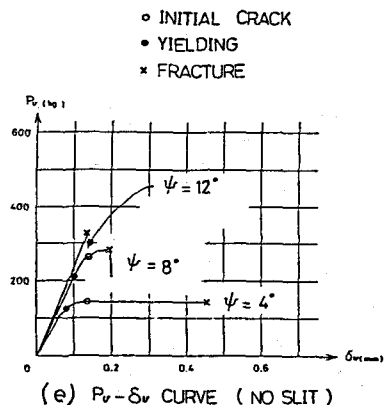
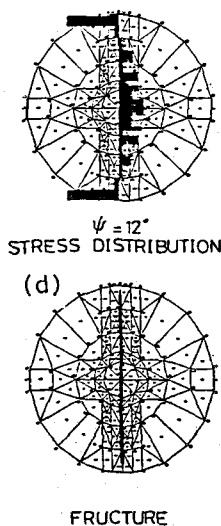


Fig. 3 Results for Splitting Tensile Test

次に図-4は多亀裂

を有する石膏材料(一軸圧縮強度 $\sigma_c = 140 \text{ kgf/cm}^2$ 、

圧裂による引張強度

$\sigma_t = 16 \text{ kgf/cm}^2$) に対する

一軸圧縮試験及び解析

結果である。実験結果

はピーク荷重が 32 kgf/cm^2

であり、ピーク後完全

弾塑性的挙動を示し、

およそ軸方向ひずみ ϵ_1

が1%のところで早速

に見られるような破壊

を生ずる。これに対し

て図-4bは解析結果で

ある。ここで実線Aは

亀裂部分の構成式とし

て式(13)を用いたもの

であり、破線Bは、亀

裂部においては応力を

受け持たないと仮定し

た結果である。case A

はBよりも幾分滑めの

値となっている。case A

の場合について亀裂進

展状況を示したが、メッシュ分割があまり割には実験結果

と良い対応を示し、圧裂と異なり亀裂が徐々に進展して

ゆく特徴をとらえている。又横方向への変形についても解析

結果は実験と比較的よく対応し、亀裂進展と共に横方向へ

の大きな変位を示している。図-5は母材に対する降伏関

数と亀裂部の降伏関数を示したものである。ここで変位増

分を与えることによりA点からB点に応力が増加しこれを

降伏曲面上まで応力解放を行う様子を示したものである。

亀裂部については一担 $\tau = -\sigma \tan \phi_0$ 線上に収束させ、こ

れが、母材の降伏曲面の外に出た場合には、次に母材降伏曲面上まで応力解放を行う。但しcase Aに示した解析結

果はstep1で終了させており、そのためピーク後硬化を示す性状を示している。

5. 結語

本解析法は亀裂の急激な進展による不安定破壊性状及び亀裂が比較的ゆるやかに進展する安定破壊性状及び亀

裂進展に伴う横方向の大きな変位も比較的良く表現し得るといえる。

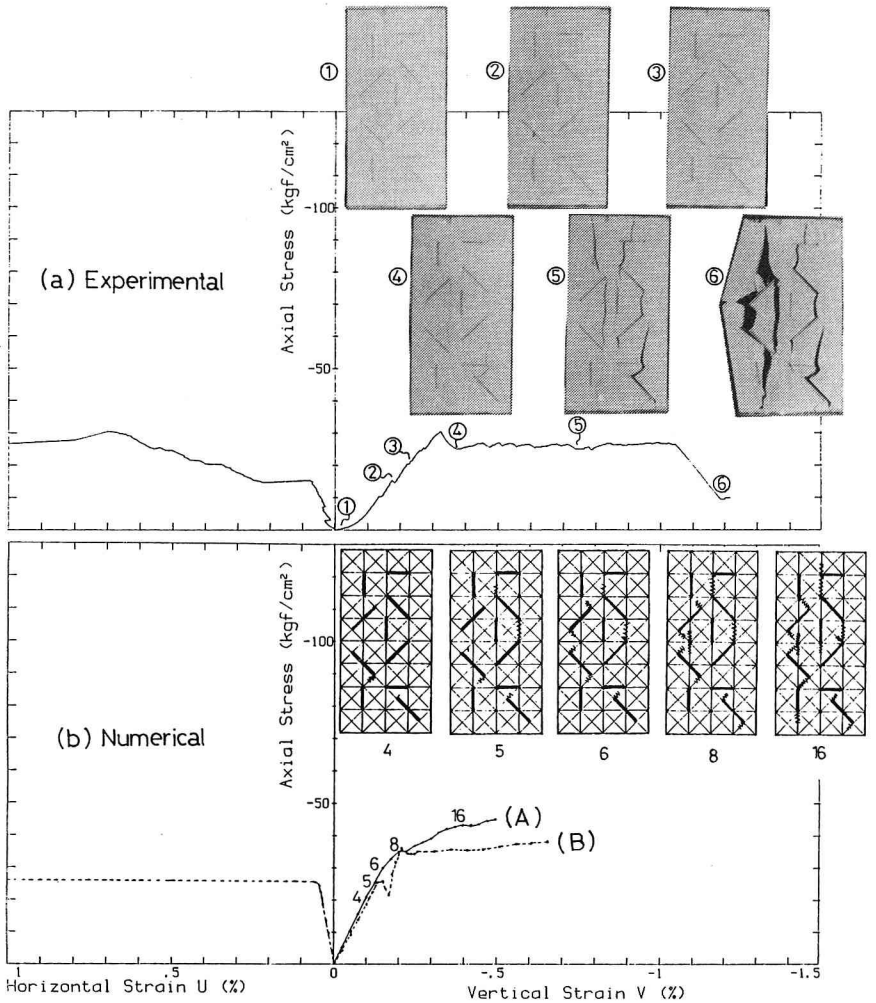


Fig. 4 Uniaxial Compression Test for Random Crack

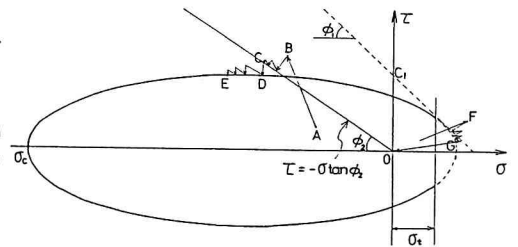


Fig. 5 Yield Curve

果はstep1で終了させており、そのためピーク後硬化を示す性状を示している。

5. 結語

本解析法は亀裂の急激な進展による不安定破壊性状及び亀裂が比較的ゆるやかに進展する安定破壊性状及び亀裂進展に伴う横方向の大きな変位も比較的良く表現し得るといえる。

(26) CRACK PROPAGATION CHARACTERISTICS OF CRACKED ROCK MEDIA

by

Ryokichi HAMAJIMA* and Morito KUSABUKA**

ABSTRACT

Rock media usually have cracks and joints, and show the mechanical characteristics as an anisotropic body. Many numerical and experimental studies have been made on them. However the method of numerical analysis which can fully express the mechanical characteristics of anisotropic rock media having such discontinuities has not yet been developed. Recently the necessity of large excursions has increased and the establishment of such an analysis method is urgent to clarify the mechanical behaviour of jointed and cracked rock media with strong anisotropy.

In this paper a experimental and numerical study was made on the models having several basic crack patterns in order to clarify the mechanical characteristics of based on the "rigid body spring models" proposed by Kawai. In these models it is assumed that the elements themselves are rigid and they are connected by two types of springs distributed over their interface boundaries. Using the Mohr-Coulomb's failure criterion and considering the effect of contact as well as separation on the two points of interface boundaries of each elements, the elasto-plastic analysis was carried out by basing on the initial stress method. It has been presented that calculated results for the stress distribution of jointed rock media were in fairly good agreement with the results of the photoelastic experiment and that it was considerably different from that of the compressed homogeneous continuous media.

In this study splitting tensile test and uniaxial compression test were carried out on gypsum models of cracked rock media, and this numerical analysis was examined with regard to the rock strength that changes due to the direction and distribution characteristics of cracks. In the splitting tensile test, cracks instantaneously propagate, while in the uniaxial compression test, they gradually propagate as the load increases. Further in a splitting tensile test on rock media having no cracks which was made to determine its tensile strength, the strength varied remarkably with the change of loading plate width. When the loading plate width is small, cracks occur at the loading point and when the width is large, cracks occur at the center of disc and propagate instantaneously all over the surface. It was made clear that this analysis method can comparatively well express the above-mentioned unstable crack propagation characteristics and gradual crack propagation characteristics of cracked rock media.

* Associated Professor, Department of Construction Engineering, Saitama University.

** Chief Engineer, Technical Research Institute, HAZAMA-GUMI, LTD.