

(53) 節理系岩盤の応力・変形・破壊挙動

三井建設㈱ ○鈴木隆次 埼玉大学 浜島良吉
㈱情報数理研究所 中井仁彦 埼玉大学 鈴木 禎

Deformation and Failure of Jointed Rock Mass

Takatsugu SUZUKI, Mitsui Construction Co., Ltd
Ryokichi HAMAJIMA, Saitama University
Yoshihiko NAKAI, Info. and Math. Sci. Lab., Inc.
Tadashi SUZUKI, Saitama University

Abstract

Rocks generally contain numerous discontinuities such as faults and joints. In the construction of structure within a rock mass, it is therefore essential to predict deformation and failure of the rock mass with due consideration of discontinuities. The authors analyzed deformation and failure of a jointed rock model using the discontinuous analysis method considering the elemental deformation (FESM). The results were compared with those obtained in the photo-elastic experiment. Intra-element yield was not considered in the present study because the focus was on the inter-element yield and tensile failure, although it is possible do so.

1. はじめに

岩盤には一般に、断層、節理等の不連続面が多く含まれる。したがって岩盤内構造物の建設に際しては、不連続性を考慮に入れた上で、岩盤の応力、変形、破壊挙動を予測することが必要である。筆者らは、要素変形を考慮した不連続体解析手法 F E S M を用いて節理系岩盤モデルの変形-破壊挙動を解析し、光弾性実験より得られた結果^{(1)・(2)}と比較した。解析に用いた節理系岩盤モデルは光弾性実験と同一条件とし、節理面の引張り強度=0、粘着力=0、内部摩擦角=15°とした。節理面の角度は水平面に対して0°、45°、90°とした。荷重は変位制御法で載荷し、地表面に置いた剛な載荷板を介して鉛直下向きに加えた。節理面の降伏条件はモールクーロンの降伏条件とし、引張り破壊および再接触を考慮した。要素内部での降伏も考慮可能であるが、要素境界でのせん断降伏、引張り破壊に注目するため、今回は考慮しなかった。

2. 節理系岩盤モデル

2.1 要素間・要素内剛性の配分調整

F E S M では要素内のひずみ場を一樣としているため、三角形要素以外の要素を用いた場合、厳密な意味で要素の変形を表現することができないので、要素間・要素内の剛性の配分を調整して近似的に変形場を表す必要がある。図1に示すように要素1、2を考え、要素2の上端面にせん断断力 τ が作用した場合を考え

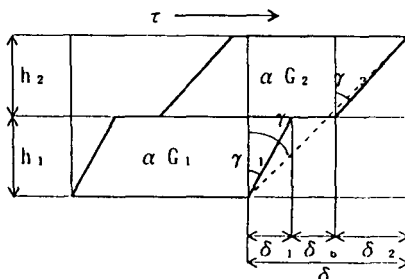


図1 2要素のせん断

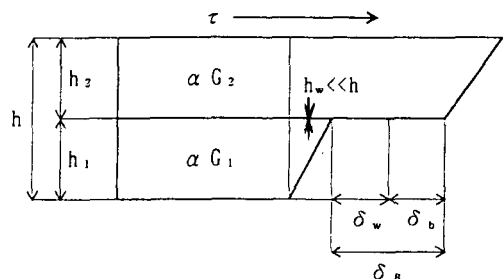


図2 弱面をはさむ2要素のせん断

る。全体のせん断剛性を G 、要素1、2の要素内剛性を G_1 、 G_2 、要素境界部のせん断剛性を G_b とする。同様に全体のせん断変位を δ 、要素1、2のせん断変位を δ_1 、 δ_2 、要素境界部のせん断変位を δ_b とする。また、 $h=h_1+h_2$ とする。要素間・要素内の剛性の配分を調整するために、要素1、2の要素内剛性を α 倍し、要素境界の剛性を β 倍すると、全体のせん断変形 δ は $\delta=\delta_1+\delta_2+\delta_b$ で表されるから

$$\frac{h}{G}=\frac{h_1}{\alpha G_1}+\frac{h_2}{\alpha G_2}+\frac{h}{\beta G_b} \tag{1}$$

$$\alpha=\frac{\beta}{\beta-1} \tag{2}$$

$\beta=1$ とおけば $\alpha=\infty$ となり、要素内剛性を剛としたRBSMに対応する。また、 $\beta=\infty$ とすれば $\alpha=1$ となり、これは要素間剛性を剛とした解に対応する。表1に α 、 β の設定と通称との対応を示す。なお、FEMによる解析結果との比較より、FESM10による解析結果の誤差は数%であることがわかっている。

2.2 要素境界が弱面をはさむ場合

次に、要素境界に節理などの弱面が存在する場合に拡張する。図2において、要素1、2の要素内剛性を αG_1 、 αG_2 、要素境界部の剛性（弱面を含まない）を βG_b とし、要素境界部のせん断変位を δ_b とする。ここで G_b は要素1・2の平均的な剛性を用いて、

$$G_b=\frac{h G_1 G_2}{h_1 G_2+h_2 G_1} \tag{3}$$

とする。また弱面の剛性を G_w 、厚さを h_w （ $\ll h$ ）とする。弱面を含む要素境界部の等価剛性を G_b とすれば次の関係式が得られる。

$$\frac{h}{G_B}=\frac{h}{\beta G_b}+\frac{h_w}{G_w} \tag{4}$$

式(3)を用いて整理すれば次式が得られる

$$G_B=\frac{1}{\frac{1}{\beta G_1}\left\{\left(\frac{h_1}{h}\right)+\left(\frac{h_2}{h}\right)\left(\frac{G_1}{G_2}\right)\right\}+\frac{1}{G_w}\left(\frac{h_w}{h}\right)} \tag{5}$$

$h_1=h_2$ 、 $G_1=G_2$ のとき

$$G_B=\frac{1}{\frac{1}{\beta G_1}+\left(\frac{h_w}{h}\right)\frac{1}{G_w}} \tag{6}$$

ここで $G_w\rightarrow\infty$ のとき、すなわち弱面をはさまない場合には $G_B=\beta G_1$ となる。弱面の厚さを h_w としているが、実験等でshear bandの幅が既知であればこれを用いればよい。ただし弱面のせん断剛性がせん断応力-せん断変位関係で得られる場合には、 δ_w は次式となる。

$$\delta_w=\tau / G_w \quad\left(G_w=\tau / \delta_w \text { kgf/cm}^2 / \text { cm}\right) \tag{7}$$

この場合には式(5)、(6)において $h_w=1$ と置けばよい。

表1 要素内・要素間剛性の配分

α (要素内)	β (要素間)	通称
∞	1.0	lim RBSM
2.0	2.0	FESM2
1.11	10.0	FESM10
1.0	∞	lim FESM

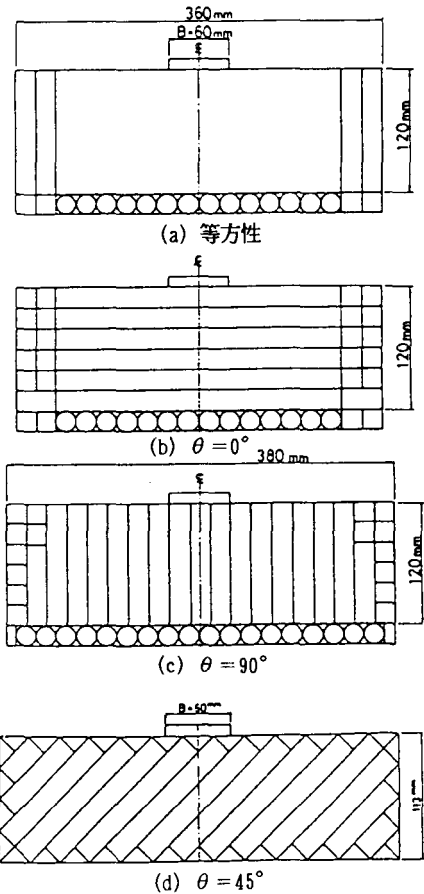


図3 光弾性実験モデル

3. 数値解析結果

解析は表1に示すF E S M10で行い、荷重制御は変位制御法とした。

図3(a), (b), (c), (d)はそれぞれ、等方性(節理を含まない)、節理角度 $\theta = 0^\circ \cdot 90^\circ \cdot 45^\circ$ の4つの条件における光弾性実験モデルである。板厚はすべて1cmとし、上面中央部の幅6cmの載荷板により、鉛直下向きの荷重を載荷した。図4はメッシュ分割図である。メッシュ分割図には、節理以外の要素分割線を含んでいる。 $\theta = 45^\circ$ のメッシュ分割図に拘束条件を示す。 $\theta = 0^\circ \cdot 90^\circ$ のモデルに関しては側方から拘束圧を作用させるため、側方境界は荷重境界条件とした。光弾性実験における材料物性は、ヤング率 $= 5500 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $= 0.37$ であり、節理面のせん断剛性 $= 282 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $= 15^\circ$ 、粘着力および引張り強度 0.0 kgf/cm^2 であった。図5は光弾性実験結果であり、底面の円盤の縞模様から反力を算出した。実験は節理でのすべり、亀裂の発生に着目して実施したので、解析においても要素を弾性体として扱い、要素の降伏は考慮しなかった。

図6(a), (b)は、解析および実験それぞれについて、節理角度と底面の反力分布の変化の様子を示す。底面反力は、載荷荷重を載荷板面積で割った載荷荷重強度 q で除して正規化してある。また、反力分布はすべて、載荷面の鉛直変位 0.008 cm の時の値である。節理角度の変化によって反力の分布が大きく変化するが、 $\theta = 90^\circ$ 以外では解析結果と実験結果は良い一致を示していることがわかる。 $\theta = 90^\circ$ では載荷点直下での反力において相違が見られるが、載荷板直下の σ_v/q の値は理論的にはほぼ1に等しいと考えられ、解析結果の方が正しい値と考えられる。

図7は $\theta = 0^\circ \cdot 45^\circ \cdot 90^\circ$ における荷重変形曲線を示す。 $\theta = 0^\circ \cdot 90^\circ$ の場合には弾性的な挙動を示すが、 $\theta = 45^\circ$ においては引張り破壊に伴う構造的なひずみ軟化特性を示すことがわかる。

図8の(a), (b), (c)はそれぞれ $\theta = 0^\circ \cdot 90^\circ \cdot 45^\circ$ の場合の要素間の降伏、引張り破壊の発生状況を示す。これらは、図5で示される応力伝達状況をよく再現している。

図9は、図7に対応した変形図である。おおむね妥当な変形を示しているといえる。

図10(a), (b)は $\theta = 0^\circ \cdot 90^\circ$ の場合における、拘束圧の変化と底面反力分布の関係を示す。 $\theta = 0^\circ$ では拘束圧の影響はほとんどないが、 $\theta = 90^\circ$ においては、拘束圧が増加するにつれ載荷板直下の反力が低下し、その周辺の反力が幾分増加するという結果となり、これは力学的に妥当な結果といえる。

4. まとめ

F E S Mは、要素内での降伏・除荷、要素間での降伏・除荷・引張り破壊・再接触を同時に扱うことができる解析手法である。要素境界の降伏によるすべりと、引張り破壊による亀裂が同時に発生する節理系岩盤モデルの応力解析を行い、光弾性実験の結果と比較した。その結果、反力分布、変形、破壊状態とも解析結果は実験結果と良い一致を示した。これによりF E S Mは、節理系岩盤の最も基本的な力学特性である、要素境界面でのすべりおよび引張り破壊を、精度よく再現し得る解析手法であることが示された。

参考文献

- 1) R. HAMAJIMA, T. KAWAI, "On the Discrete Analysis of the Jointed Rock Media", 応用地質22巻2号, pp. 15-22(1981)
- 2) R. HAMAJIMA, T. KAWAI, "Stress Transfer Mechanism of the Jointed Rock Media with Strong Anisotropy", 応用地質22巻3号, pp. 1-8(1981)

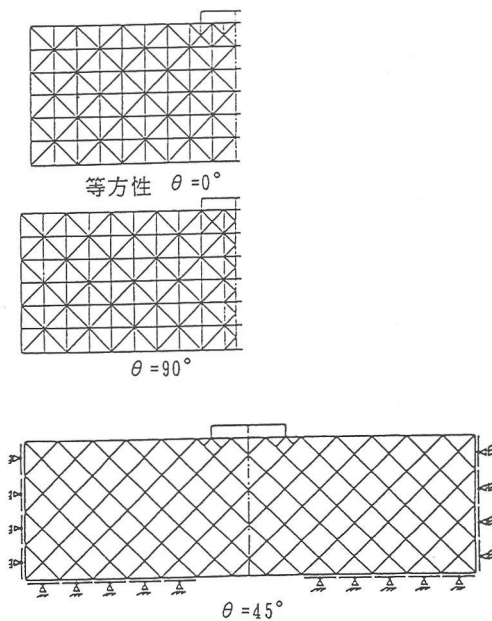
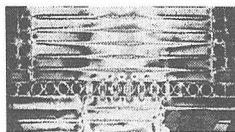


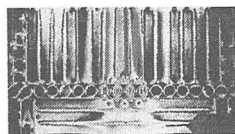
図4 メッシュ分割図



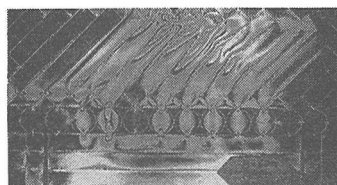
(a) 等方性



(b) $\theta = 0^\circ$



(c) $\theta = 90^\circ$



(d) $\theta = 45^\circ$

図5 光弾性実験結果

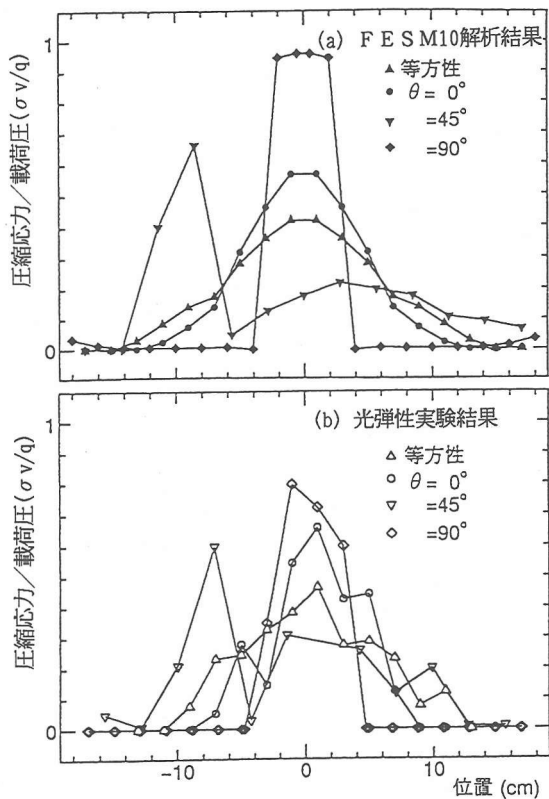


図6 節理角度の変化と底面反力分布

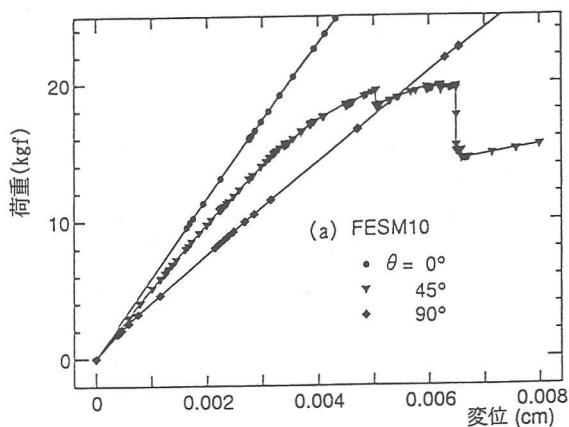
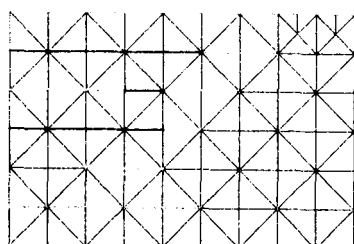
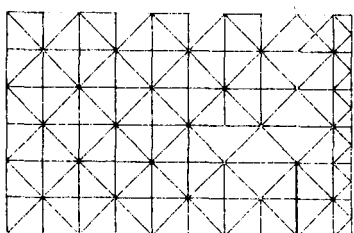


図7 FESM10による荷重変形曲線

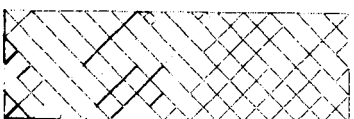
降伏
 引張り破壊
 除荷
 再接触弾性
 再接触降伏
 再接触除荷



(a) $\theta = 0^\circ$

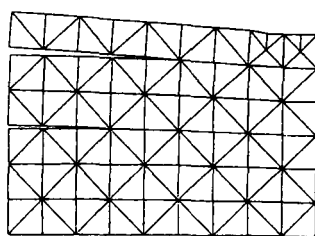


(b) $\theta = 90^\circ$

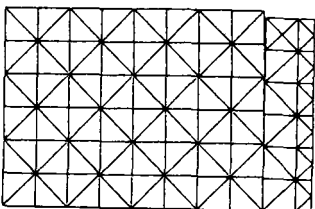


(c) $\theta = 45^\circ$

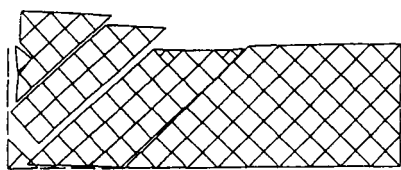
図8 FESM10による破壊進展図



(a) $\theta = 0^\circ$

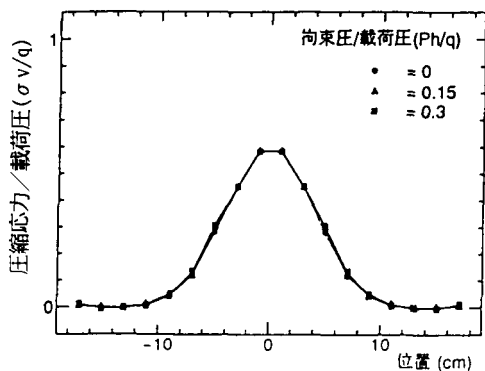


(b) $\theta = 90^\circ$

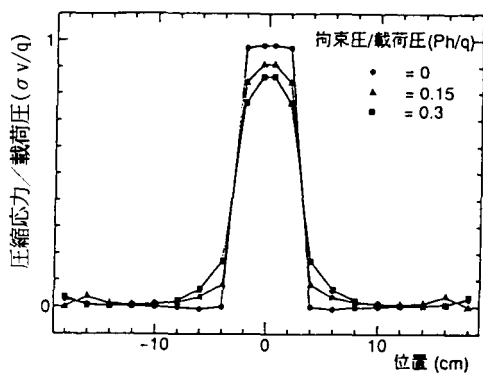


(c) $\theta = 45^\circ$

図9 FESM10による変形図



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 90^\circ$

図10 FESM10による拘束圧の変化と底面反力分布