III-193　不連続岩盤に対する損傷理論の適用性について

清水建設㈱　（正）○中満　光広
名古屋大学工学部（正）　京谷　孝史
中部電力㈱　（正）　土山　茂希
名古屋大学工学部（正）　市川　康明
名古屋大学工学部（正）　川本　朓万

１．はじめに　岩盤に存在する節理群のよう分布不連続面に対しては損傷力学の方法が適用できる。本研究でわ，今までの損傷理論で十分に予測できなかった破壊現象を取り扱うために，破壊効果関数，損傷場の発展式を導入した損傷力学モデルを提案した。また，一軸圧縮試験のシミュレーションを行ってその適用性を検討した。

２．一軸圧縮試験　破壊の開始条件，亀裂の発生方向，亀裂の伝播過程を解明するために，人為的に不連続面を入れたモルタルモデルを用いて一軸圧縮試験を行った。試験には，重量比で，セメント：砂：水＝1:1:0.46のFig.1,Fig.2 に示すような亀裂面群を有する直方供試体を用いた。Tab.1 には，材料定数を示す。

2.1 単純載荷試験　Fig.1 に示す様な供試体において，亀裂のパターンを様々に変化させて試験を行った。結果の一例として，亀裂の長さ0.9cm,亀裂の個数52個の供試体の弾性係数，初期降伏強度を亀裂のない供試体が示すそれぞれの値で正規化したものをFig.3,Fig.4 に示す。図中，●は亀裂が方眼状，○は千鳥状に配置するものである。方眼型，千鳥型を比較してみると，弾性係数，初期降伏強度ともに方眼型の方が大きいが，その角度による変化の傾向は同じであった。亀裂の個数と角度の変化に対しては，弾性係数，初期降伏強度ともにその影響は亀裂の配置パターンに無関係であった。また，亀裂の進展を観察した結果，①新たなる亀裂が発生し始める荷重点と，供試体の応力－ひずみ曲線が線形からずれ始める点（初期降伏点）は一致する。②亀裂は最大実質圧縮主応力方向に進展する。③亀裂は主に，既存亀裂の先端から生じているとの知見を得た。

2.2 繰り返し載荷試験　Lee とLiebowitz は数値実験において，亀裂性材料に荷重を加えた際に，塑性仕事と亀裂進展長が比例関係にあると報告している。本研究では，この報告を基に，塑性仕事と亀裂進展長の関係を調べるためにFig.2 に示す供試体をもちいて繰り返し載荷試験を行った。Fig.5 には，実質応力がなす塑性仕事（塑性実質仕事）と全亀裂進展長に対する亀裂進展長の比率との関係を示した。実線及び点線は，各供試体ごとに得られたデータを原点を通る直線で最小二乗近似したものである。Fig.5 を基に，各直線の平均を取り，亀裂の進展長と塑性実質仕事との関係が次式で表される。

$$da = 0.476\ dW^{*p} \qquad (1)$$

ここに，ｄａは既存亀裂単位長さ当たりの進展長，dW^{*p}は塑性実質仕事増分である。

３．損傷場の発展式

3.1 亀裂進展開始条件　分布不連続材料の破壊強度を予測するためにわ，この破壊の引き金となる最初の亀裂進展が始まる条件を押さえておく必要がある。本研究の損傷理論では不連続性材料においてその挙動を支配するのは実質応力である。従って，実質応力$\underset{\sim}{\sigma}^*$が実質部の降伏関数 $f=0$を満足した時に，亀裂の進展が始まるとして

$$f(\underset{\sim}{\sigma}^*, \underset{\sim}{\varepsilon}^p) = 0 \qquad (2)$$

を亀裂進展の開始条件として，試験結果と比較してみる。実質応力$\underset{\sim}{\sigma}^*$によって計算された初期降伏強度を亀裂のない供試体の初期降伏強度によって正規化した値をFig.4 の実線で示した。（ここでは，試験事実より初期降伏強度が，亀裂進展開始強度に対応する事に注意したい。）実験値と解析値に大きな差が見られる。これは，亀裂の進展開始が亀裂周辺の応力集中や亀裂の相互干渉などの有効断面積の欠損だけでは

説明出来ない局所的な応力状態に支配される事による。そこで，本研究では実質応力$\underset{\sim}{\sigma}^*$がさらに応力集中の分だけ強く働くとして亀裂進展開始条件を次式で与える。

$$f\left(\frac{1}{R}\underset{\sim}{\sigma}^*, \underset{\sim}{\varepsilon}^p\right) = 0 \qquad (3)$$

ここに，Rは$\underset{\sim}{\sigma}^*$の亀裂進展に関する効果を拡大する係数で，破壊効果関数と呼ぶことにする。破壊効果関数Rは，亀裂の配置状態と，そこに働く応力によって定まると考えられ，一般的に損傷テンソル$\underset{\sim}{\Omega}$と実質応力$\underset{\sim}{\sigma}^*$の関数として，

$$R = R\,(\underset{\sim}{\Omega}, \underset{\sim}{\sigma}^*) \qquad (4)$$

と表されるであろう。このRの形を，Fig.4 の初期降伏強度を基に決定すると，

$$R = R(\underset{\sim}{\Omega}, \underset{\sim}{\sigma}^*) = a - b\left\{\frac{1}{l+L}\left(1-\frac{1}{3}\mathrm{tr}\,\underset{\sim}{\Omega}\right)^{-\frac{1}{2}}\right\}\sin\theta^* \qquad (5)$$

ここに，Lは平均亀裂長，lは最小構造単位，$(1-(1/3)\mathrm{tr}\,\underset{\sim}{\Omega})$は亀裂間の平均距離，$\theta^*$は実質応力の最大圧縮応力の方向と亀裂面の成す角度である。また，a,b は降伏条件式(3) に，このRを導入した時の初期降伏の予測値が実験値に一致する様に最小二乗法によって決定される定数である。破壊効果関数Rを用いて，降伏条件式(3) によって得られる初期降伏強度をFig.4 中に点線で示す。

3.2 損傷場の発展式　亀裂は最大実質圧縮主応力方向に進展し，その進展長は塑性実質仕事に比例するという事実より，損傷場の発展式を次式で提案する。

$$d\underset{\sim}{\Omega} = \Lambda\,\mathrm{tr}\,\underset{\sim}{\Omega}(\underset{\sim}{\nu}\otimes\underset{\sim}{\nu})dW^{*p} \qquad (6)$$

ここで，Λは実験より求まる定数，$\mathrm{tr}\,\underset{\sim}{\Omega}$は亀裂３次元面密度，$\underset{\sim}{\nu}$は最大実質圧縮主応力方向の単位ベクトル，$dW^{*p}$は塑性実質応力増分である。

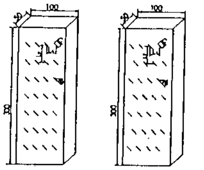
４．一軸圧縮試験のシミュレーション　一軸圧縮試験に対し，弾塑性損傷モデルを用いて，２次元平面応力解析を行った。解析の結果得られた弾性係数の変化を，Fig.3 の直線で示す。損傷効果係数Cn=１の時，実験値と解析値がよい一致をみせている。Fig.6 には，亀裂の角度45°，亀裂の長さ0.9cm，亀裂の個数52個，方眼型に配置した供試体の実験から得られた応力－ひずみ曲線と，先に定式化した破壊効果関数と損傷場の発展式を導入した弾塑性損傷解析の結果（○印）を示す。弾性係数，初期降伏強度，ピーク強度とも実験値とよい一致をみせている。

５．おわりに　破壊効果関数を用いて新たなる亀裂の発生条件を与え，亀裂は最大実質圧縮主応力方向に進展し，その進展長は塑性実質仕事に比例するという条件の基で定式化した損傷場の発展式を，損傷力学モデルに導入する事で破壊現象をよく表現し得た。

６．参考文献　1)Kyoya,T.,Ichikawa,Y.and kawamoto,T.:A Damage Mechanics Theory for Discontinuous Rock Mass,Proc,5th ICONMIG,Nagoya(1985)　2)Lee,J.D.and Liebowitz,H.:Consideration of Crack Growth and Plasticity in Finite Element Analysis,Computer and Structure,Vol.8(1978)

Table 1　Material Constants

γ_t (g/cm³)	2.06
ν	0.125
c (MPa)	11.0
φ (degree)	47
E (MPa)	14020



Atype　Btype

Fig.1 Typical Specimen (unit : m m)

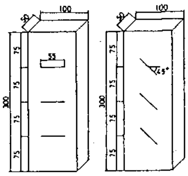
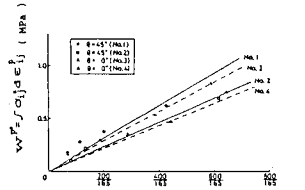
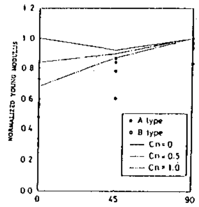


Fig.2 Specimen (unit : m m)



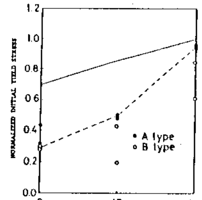
the Propagation Length to the Original Length of Crack

Fig.5　Relationship between Plastic Work and Rate of the Propagation Length to the Original Length of Crack



(a) Number of Cracks = 52

Fig.3 Variation of Young's Modulus with the Inclination of Cracks



(a) Number of Cracks = 52

Fig.4 Variation of Initial Yield Stress with the Inclination of Cracks

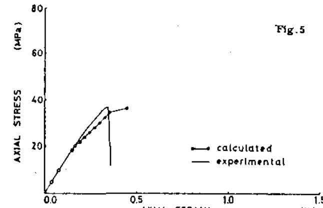


Fig.6 Comparison of Analysis and Experiment