III－67　不連続性岩盤変形解析の一つ近似方法

名古屋大学大学院　○学生会員　呉　旭
名古屋大学工学部　正会員　市川康明
名古屋大学工学部　正会員　京谷孝史
愛知工業大学　正会員　川本眺万

１．はじめに

言うまでもなく断層など大きな不連続性は岩盤構造物の変形挙動の支配的な要因であるが構造物の規模が大きくになると節理やクラックなどの分布不連続面も岩盤の変形挙動に無視できないほどの影響を与えることは多くの現場計測からよく知られている[1]。支保工の設計また構造物安定性を検討する際に、ジョイント要素を用いて大きな不連続性(もし有れば)を代表させ、なんとか工夫し分布不連続面を等価的に有限要素法などの数値解析に取り組み、岩盤の変形挙動を予測(順、逆解析)することは一般的なやり方である。いままで多くの研究[2)3)4)]があったにも拘わらず、分布不連続面の力学効果の評価にはまだいくつかの問題が残っていると思われる。例えば、地下空洞壁面の膨み出しに見られるように圧縮応力と平行分布している節理の開口変形、また直接剛性よりせん断剛性の低減の表現などがその例である。本文では、この二つ問題点を念頭において、損傷力学のアプローチを取り岩盤の等価線形連続モデルを構築することを試みた。

２．近似方法の構成

2.1 一般の説明　岩盤の等価連続モデルを構築する際に二つグループがある。一つは岩盤を大きな岩石に節理やクラックがたくさん分布しているものと見直し、もう一つは岩盤を節理による分割された各岩石ブロークからなる集合体とする。前者は不均質材料の平均物性評価問題に属し多くの理論結果を利用できる。ここではクラックの変形ギャップの理論解を必要としていない現象学方法である損傷力学理論を用いて、J.Lemaitre(1978)のひずみ等価仮説の代わりにF.Sidoroff(1981)のエネルギ等価仮説を採用し、また異方損傷主値間の相互作用を考慮している。

2.2 定式化　N組み分布不連続面（平均面積欠損率 ω_i,方向ベクトル n_i i=1,N）を有する岩盤の損傷テンソル $\mathbf{\Omega}$ は(1)式で、実質応力 $\boldsymbol{\sigma}^*$ は(2)式で定義する。エネルギ等価により岩盤の等価コンプライアンス C^* は(3)式で求められる　。δ_{ij} はKronecker deltaであり、C は岩石のコンプライアンスである。

$$\Omega_{ij} = \Sigma^{N}_{K=1}\,[\omega_{(k)}\, n_i^{(k)} n_j^{(k)}] \;, \qquad \Phi_{ij} = (\delta_{ij} - \Omega_{ij})^{-1} \quad \text{...... (1)}$$

$$\sigma^*_{ij} = M_{ijkl}\,\sigma_{kl} \;, \qquad M_{ijkl} = 1/2\,(\delta_{ik}\,\Phi_{lj} + \delta_{jk}\,\Phi_{li}) \quad \text{...... (2)}$$

$$C^*_{ijkl} = \Gamma_{ijklpqst} C_{pqst} \;,$$

$$\Gamma_{ijklpqst} = 1/4\,(\delta_{pi}\delta_{sk}\,\Phi_{jq}\Phi_{lt} + \delta_{pi}\delta_{tk}\,\Phi_{jq}\Phi_{ls} + \delta_{qi}\delta_{sk}\,\Phi_{jp}\Phi_{lt} + \delta_{qi}\delta_{tk}\,\Phi_{jp}\Phi_{ls}) \quad \text{...... (3)}$$

こうして求めた岩盤の変形特性はほかの方法の結果と同じように直交異方性的なものであるが圧縮応力方向と平行に分布しているクッラクの圧縮応力による開口変形を表現できた(図1)。また、損傷主値座標において岩盤と岩石のコンプライアンス変換テンソル $\mathbf{\Gamma}$ のマトリックス形式が対角形となって、(4)式で表される。ここで、異方損傷主値間の相互作用を考慮するために、各損傷主値に対して順次（順番とは関係ない）に等価コンプライアンスを求めて行くと $\mathbf{\Gamma}$ は(5)式になる。ここで $\alpha=1/(1-\omega_1)$, $\beta=1/(1-\omega_2)$, $\gamma=1/(1-\omega_3)$; ω_1 , ω_2 , ω_3 は損傷主値である。

$$\mathbf{\Gamma} = \mathrm{Dig}\{\,\alpha^2,\ \beta^2,\ \gamma^2,\ (\alpha+\beta)^2/4,\ (\beta+\gamma)^2/4,\ (\gamma+\alpha)^2/4\,\} \quad \text{...... (4)}$$

$$\mathbf{\Gamma} = \mathrm{Dig}\{\,\alpha^2,\ \beta^2,\ \gamma^2,\ (1+\alpha)^2(1+\beta)^2/16,\ (1+\beta)^2(1+\gamma)^2/16,\ (1+\gamma)^2(1+\alpha)^2/16\,\} \quad \text{...... (5)}$$

こうして、直接剛性は変わらないがせん断剛性はトータル損傷から得られたものと比べもっと小さくになる(図2)。これが実際の岩盤に合うものではないかと考えている。

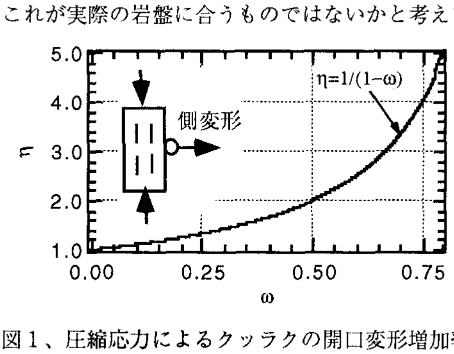

図１、圧縮応力によるクッラクの開口変形増加率

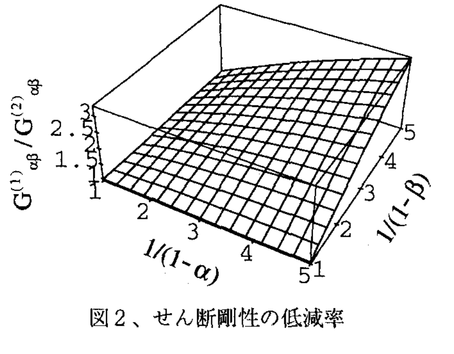

図２、せん断剛性の低減率

３．近似方法の応用

3.2 簡単応力状態での例　(a)等方損傷、等方応力下での体積変形係数の評価[5] は図3に示し、一例だけであるが提案式は実験値にかなに合っている。(b)片岩の一軸圧縮変形係数の層理面方向による変化に関して提案式も実験値に一致している[6] (図4)。

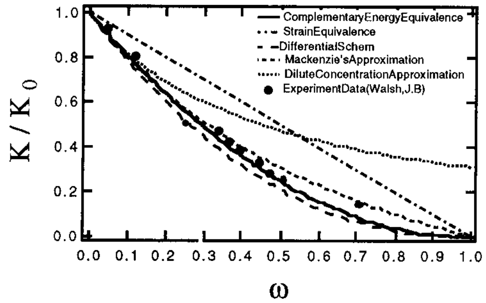

図３、体積変形係数の損傷量依存性

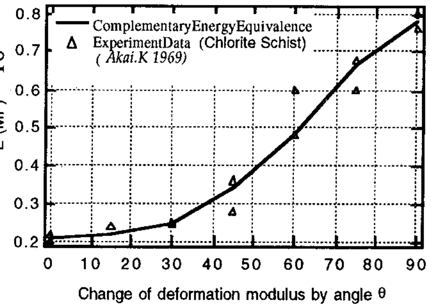

図４、一軸圧縮変形係数の損傷方向依存性

3.2 地下空洞掘削への応用　圧縮応力によるクッラクの開口変形が大規模地下空洞壁面の膨み出しに大きな寄与を与えることを認識し上述の手法を提案したわけであるがその適用性を検討するために、文献[7] を参考して一つ地下空洞の逐次掘削問題の有限要素法解析を行なった。解析条件は以下の通りである。岩石の弾性係数 $E=2.57*10^5$ (kgf/cm^2),ポアスン比 $\upsilon=0.28$；分布不連続面の損傷分量　$\Omega_{xx}=0.607, \Omega_{xy}=0.073=\Omega_{yx}$, $\Omega_{yy}=0.309$。また地山の初期応力分量　$\sigma_{xx}=50.9, \sigma_{xy}=2.6=\sigma_{yx}$, $\sigma_{yy}=43.5$　応力の単位：kgf/cm^2。空洞長軸はZ方向、断面水平方向はX軸、垂直上向きはY軸をとして、X-Y 面内の平面ひずみ、四段階掘削の解析をした。その結果の一部を図５に示しておく。図から分かるように、壁面とほぼ平行に卓越分布している不連続面があるために、本手法はほかの方法と比べ壁面の膨み出し量を大きく予測している同時、頂部岩盤の沈下勾配も最大に予測している。

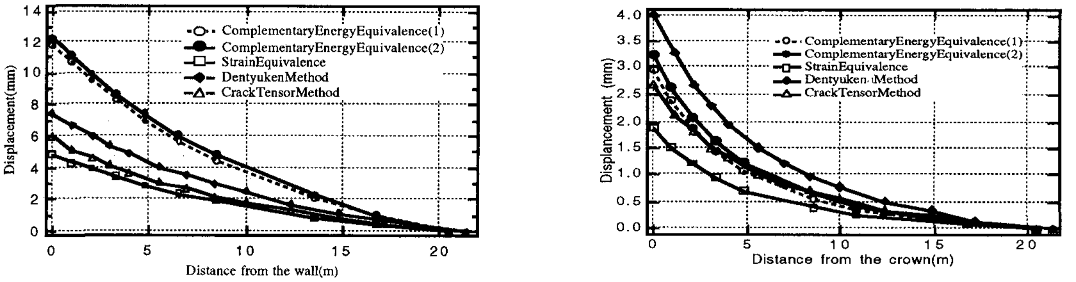

図５、地下空洞周辺岩盤内の変形（有限要素法による逐次掘削解析結果）

４．結論

エネルギ等価仮設を用いた損傷力学方法を簡述し、その不連続性岩盤の変形予測への適用性を検討した。不連続性岩盤の変形挙動を定性的にうまく表現できれば、調査また施工の初期段階の現場変位計測データを利用し逆解析を通じて損傷量、損傷主方向などのモデルのパラメータを同定し不連続性岩盤の変形挙動を定量的に把握できる可能性があると考えられる。今後、パラメータの確定方法や損傷量の応力依存性などの問題を追究して本手法の実用性を計りたい。

５。参考文献

1).日比野:土と基礎 pp.5-8,1987.　2).桜井ほか:土木学会論文集no.403,pp.75-84,1989.　3).M.Oda,et.al: S&F(3) pp.96-108,1984.　4).京谷ほか:土木学会論文集no.358,pp.27-35,1985.　5).Walsh.J.B:ASCE(EM)pp.1005-1019,1980.　6).赤井ほか:土木学会論文集no.170,pp.13-26,1969.　7).山辺ほか:日科技連資料 pp.11-35,1991.