

III - A 324

繰り返し応力を受ける岩盤不連続面の非線形変形挙動解析

中部電力 三浦雅彦, 西村 均  
 埼玉大学 山辺 正, 小島美香子  
 清水建設 石塚与志雄, ○多田浩幸

1. はじめに

岩盤には断層、層理、節理などの不連続面が多数存在している。これらの不連続面に荷重が作用することにより、不連続面を含む岩盤が非線形な変形挙動を示すことは一般によく知られている。本研究では、不連続面が存在する岩盤に繰り返し荷重が加わった時の変形挙動をクラックテンソルの概念を用いてモデル化する。具体的には、亀裂部分の力学特性を支配する垂直剛性とせん断剛性のうち特に垂直剛性に着目した室内実験を実施し、その応力依存性を考慮した数値解析を実施した。

2. 解析手法

不連続面の幾何学性をテンソル量によって表す試みにクラックテンソルの理論<sup>1)</sup>がある。クラックテンソルとは、内部に節理群のような分布不連続面を含んだ岩盤において、その幾何学性を一般的かつ定量的に表現する偶数階のテンソルである。岩盤に含まれるクラックを図1のように二枚の平板で置き換え、その力学特性を垂直バネ・せん断バネで表せるものとする。その垂直剛性  $K$ 、せん断剛性  $G$  はそれぞれ次式となる。

$$K = \frac{K_0 + C\sigma_{ij}N_{ij}}{r} = \frac{K}{r}, \quad G = \frac{g_0 + g_1\sigma_{ij}N_{ij}}{r} = \frac{G}{r} \quad \dots(1)$$

ここで、 $r$  はクラックの代表長さ、 $N_{ij}$  はクラックの方向のみに依存したテンソルで、両者はクラックの幾何学的性質から決定される。垂直剛性パラメータ  $K_0$ 、 $C$  については、クラック部分における垂直方向の応力-変位関係において、ある応力レベルに対する割線の傾きがその応力状態  $\sigma_{ij}$  に対する垂直剛性  $K$  であることから決定できる。

$g_0$ 、 $g_1$  についても、クラック部分におけるせん断方向の応力-変位関係から決定できる。クラックテンソルの概念によると、亀裂を含んだ岩盤全体の変形は岩石の実質部分と亀裂部分の変形との和で表され、構成式は次の通りである。

$$\varepsilon_{ij} = (\bar{M}_{ijkl} + \bar{C}_{ijkl}) \bar{\sigma}_{kl} = \left\{ \left( \frac{1+\nu}{E} \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) + \left( \frac{1}{K} - \frac{1}{G} \right) F_{gh} + \frac{1}{4G} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{li} + \delta_{jl} F_{ik} + \delta_{jk} F_{li}) \right\} \bar{\sigma}_{kl} \quad \dots(2)$$

ここで、 $\bar{M}_{ijkl}$ 、 $\bar{C}_{ijkl}$  はそれぞれ岩石実質部分および亀裂部分の弾性コンプライアンス、 $E$  は弾性係数、 $\nu$  はポアソン比、 $\delta_{ij}$  クロネッカーのデルタである。また、 $F_{ij}$  および  $F_{ijkl}$  はそれぞれ2階、4階のクラックテンソルで、岩盤に含まれる亀裂群の幾何学性を定量的に表現したテンソル量である。これらの構成関係を組み込んだ非線形三次元有限要素解析コードを用いて荷重変位関係の非線形解析を実施した。具体的な解析では、応力レベルに応じた材料パラメータの変化によって非線形な挙動を表現している。その計算手法としては収束計算に要する時間を考慮して、いわゆる単純繰り返し代入法を用いている。荷重境界条件としては変形を与え、このときの要素内応力から式(1)の剛性を変更し次の解析ステップへ移行させた。

3. 割裂供試体による室内試験とその数値解析

室内試験に用いた供試体は、一軸圧縮強度が159.9MPa、ポアソン比が0.21、静弾性係数が101.9GPa（いずれも平均値で、岩石コアの一定方向から計測した結果）の花崗岩で、この岩石から220 x 200 x 100 mm のブロックを切り出し中央部分に割裂面を導入した。この不連続面の形状については別途報告している<sup>2)</sup>。本研究では、このようにして作成した岩石供試体の亀裂面に垂直応力を作用させて垂直剛性の応力依存性について検討した。同様の手法で準備した供試体の室内せん断試験も実施したが、ここでは垂直剛性にのみ着目して報告する。

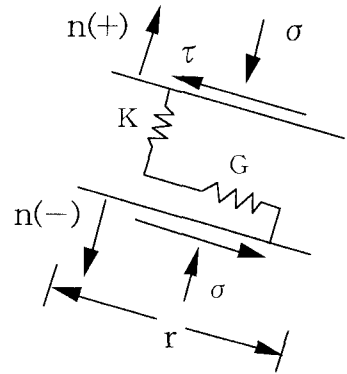


図1 クラックのバネモデル

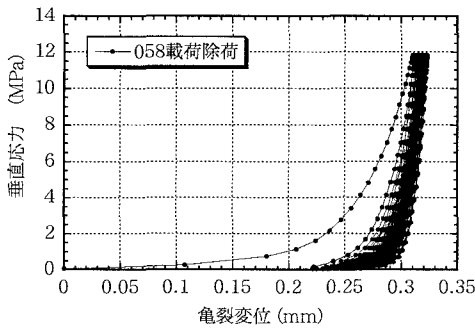


図2 室内実験による繰り返し載荷試験

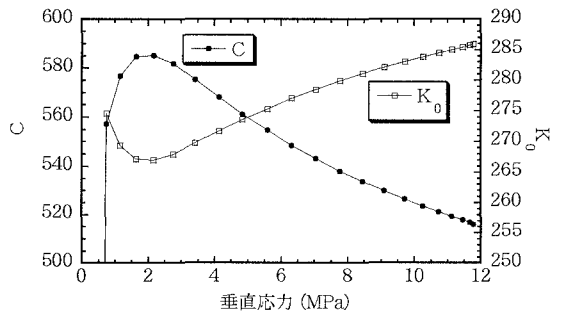


図3 垂直剛性パラメータの応力依存性(第一載荷)

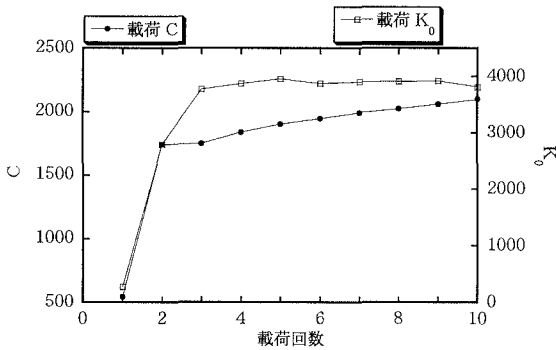


図4 垂直剛性パラメータの載荷回数依存性

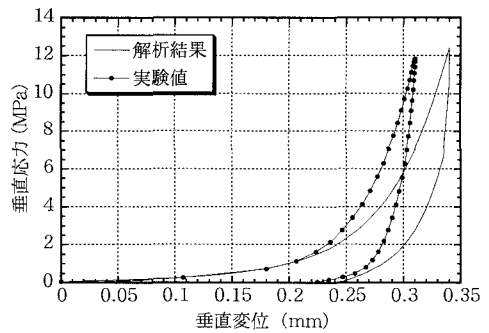


図5 第一載荷・除荷に対する実験値と解析値の比較

図2は、繰り返し載荷試験を実施した際に得られた垂直応力・変位関係で、最大垂直応力を11.8MPaとし載荷除荷を10回繰り返した時の結果である。この場合の変位とは、計測された全変位量から岩石実質部分に生じる変位量を差し引いた値であり、純粋に亀裂部分に生じた変位である。この垂直応力・変位関係の第一載荷において著しい変位が計測されるのは、亀裂部分の噛み合いが初期段階において急激に進行するためである。第一載荷過程に式(1)を適用して垂直剛性パラメータ  $K_0$ 、 $C$  を決定すると図3を得る。垂直応力レベルに依存して各パラメータが変化するが、この実験を数本の供試体を用いて実施しそれらの平均値を各載荷過程の値とした。第1載荷に対する平均値は、 $K_0=280\text{Mpa}$ 、 $C=600$ であった。載荷回数を順次増加させたときのパラメータ変化の一例を図4に示す。横軸の載荷回数が増加するにつれ各垂直剛性パラメータも増加するが、第3載荷以降の変化量は少ない。これは図2において垂直応力・変位関係が載荷回数の増加とともに同一の曲線上に近づき、不連続面の残留変位量が減少することを表している。これらの実験結果を数値解析によって表現するために、式(2)の構成則を適用した三次元非線形有限要素解析を実施した。図2の第一載荷・除荷に対する実験値と解析結果を比較すると図5となる。図3の平均値を用いているにもかかわらず解析値は実験値を表現できているといえる。

#### 4.まとめ

不連続面を導入した岩石供試体の垂直剛性を室内実験で計測するとともに、垂直剛性パラメータの応力依存性を考慮した数値解析を実施した。今回使用したような分離する不連続面のみならず、分離しない不連続面を内部に含む場合にも全く同様の手法を適用できることを別途確認した。

#### 参考文献

- 1) Oda, M., Yamabe, T., Ishizuka, Y., Kumasaka, H. & Tada, H. (1993), Elastic stress and ..., Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.26 No.2, pp.89-112.
- 2) 近藤, 上田, 西村, 若林, 石塚, 熊坂 (1995), 繰返し載荷に伴う不連続面の变形挙動, 不連続性岩盤と構造物に関するシンポジウム, pp.417-420.