

III-265

亀裂性岩盤の非線形弾性変形に関する研究

埼玉大学工学部

学生会員 前川 恵輔

中野 敏雄

正会員 山辺 正

清水建設(株)技術研究所

正会員 石塚与志雄

1. はじめに

一般に、岩盤の変形挙動を推測する手段としては、岩盤試験から得られた弾性係数あるいは変形係数などの物性値を用いた線形弾性解析が利用されている。しかし、亀裂性岩盤においてはクラックの閉塞あるいは開口に伴った非線形な変形挙動が著しく、これを追跡するには非線形解析が望ましいことはいうまでもない。本研究は、亀裂を含む岩石供試体の一軸圧縮試験結果とクラックテンソルを導入した3次元非線形弾性変形解析プログラム(NEAC)による解析解との比較から、この解析手法の妥当性を検証し、更に実岩盤への適用の試みとしてモデル地盤を用いた平板載荷試験の解析例を示すものである。

2. 非線形解析手法について

図-1は、亀裂を含んだ安山岩の岩石供試体(直径5cm, 高さ10cmの円柱供試体)による一軸圧縮試験結果とその解析値の比較を示している。図から、低応力下において実験値の応力-ひずみ曲線は下に凸となる傾向が顕著である。これはクラックの閉塞に伴う剛性の増加によるもので、解析では岩盤に含まれるクラックを垂直方向とせん断方向にバネで連結された2枚の平板であると仮定し、その垂直剛性 $h$ およびせん断剛性 $g$ をそれぞれ(1), (2)式で近似した。

$$h = \frac{1}{r}(h_0 + C\sigma_{ij}N_{ij}) = \frac{1}{r}\bar{h} \quad (1)$$

$$g = \frac{1}{r}(g_0 + g_1\sigma_{ij}N_{ij}) = \frac{1}{r}\bar{g} \quad (2)$$

ここで、 $N_{ij}$ ,  $r$ はそれぞれ、クラックの方向のみに依存したテンソルおよびクラックの代表長さで、両者はクラックの幾何学的性質から決定される。 $h_0$ ,  $C$ については、クラック部分における垂直方向の応力-変位関係の、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 $h$ に相当することにより、(1)式から決定することができる。 $g_0$ ,  $g_1$ 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(2)式を用いて同様に決定できる。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变形は岩石実質部分と亀裂部分の变形の和で表され、構成式は次の通りである。

$$\varepsilon_{ij} = (M_{ijkl} + C_{ijkl})\sigma_{kl} \quad (3)$$

$$M_{ijkl} = \frac{1}{E}\{(1 + \nu)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu\delta_{ij}\delta_{kl}\} \quad (4)$$

$$C_{ijkl} = \left(\frac{1}{\bar{h}} - \frac{1}{\bar{g}}\right)F_{ijkl} + \frac{1}{4\bar{g}}(F_{ji}\delta_{ik} + F_{jk}\delta_{il} + F_{ik}\delta_{jl} + F_{il}\delta_{jk}) \quad (5)$$

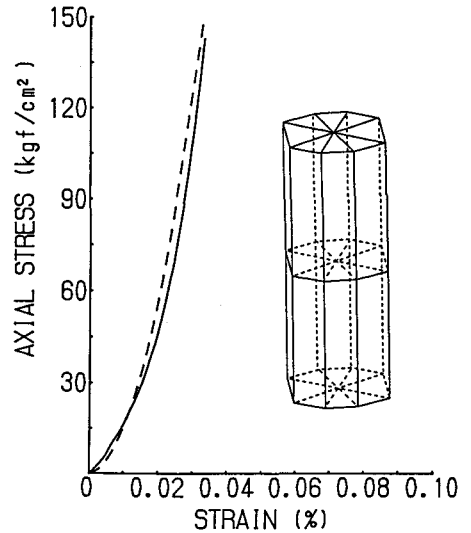


図-1 岩石供試体による一軸圧縮試験結果

\* 実線は実験値, 点線は解析値を表わす。

\* 図の角柱は、解析モデルを表わす。

表-1 解析に用いたパラメータ

弾性係数 $E$	$9.80 \times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup>
ポアソン比 $\nu$	0.25
$h_0$	$8.75 \times 10^4$ kgf/cm <sup>2</sup>
$C$	$3.20 \times 10^4$
$g_0$	$7.50 \times 10^4$ kgf/cm <sup>2</sup>
$g_1$	$1.30 \times 10^4$

ここで、 $M_{ijkl}$ ,  $C_{ijkl}$ 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、 $\delta_{ij}$ は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一般的かつ定量的に表現したテンソル量である。3次元非線形弾性変形解析プログラム(NEAC)は、以上の概念を取り入れた有限要素解析プログラムで、解析要素として四面体を用いている。解析は変位増分で行なうが、 $h$ および $g$ が応力に依存していることから収束のための反復計算を必要とする。

### 3. 一軸圧縮試験結果と非線形解析

解析に用いたパラメータ(表-1)は次のように決定した。前述の岩石供試体に、軸方向のひずみゲージとは別に、非線形挙動に支配的であると見られるクラック部分と岩石実質部分と見なせる箇所にそれぞれひずみゲージを貼付け、クラックの剛性および岩石実質部分の弾性係数、ポアソン比を求めた。またクラックテンソルは供試体の展開図から求めた。その $F_{ij}$ 及びトレス $F_0$ 、異方性の指標 $A^{(F)}$ を以下に示す。

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} 2.17 & -1.10 & 0.03 \\ & 2.42 & 0.65 \\ \text{sym.} & & 0.86 \end{bmatrix} \quad F_0 = 5.45$$

$$A^{(F)} = 0.69$$

図-1から、解析値は実験結果をかなりよく追跡できているものと思われる。

### 4. モデル地盤による平板載荷試験について

次に図-2に示すような実岩盤を想定した解析モデル(節点数144,要素数450)を作成し、平板載荷試験を行った。異方性のパラメータは、実際の岩盤から求めた値を用いている。例として、 $F_{ij}$ 及び $F_0$ ,  $A^{(F)}$ を以下に示す。

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} 14.16 & 4.02 & 6.04 \\ & 2.67 & 1.75 \\ \text{sym.} & & 2.93 \end{bmatrix} \quad F_0 = 19.77$$

$$A^{(F)} = 1.23$$

その他のパラメータは表-1のものとした。図-3から、平板載荷試験においても応力-変位関係に非線形な挙動が確認できた。図-4は解析モデルのX-Z断面における鉛直応力 $\sigma_z$ の分布を表している。これより、異方性の影響が認められる。

### 5. まとめ

今回の研究ではクラックに関する物性値と幾何学的な情報を用いることで、岩盤における非線形挙動を追跡できた。解析を実施する際には、クラックの幾何学性および力学性に関するパラメータの決定に注意が必要であるが、本解析手法の実岩盤への適用の可能性を示すことができたと考える。

#### 参考文献

- 1) 山辺・原・小田:土木学会論文集,第382号/Ⅲ-7,1987.
- 2) 山辺・小田・原:埼玉大学工学部建設系研究報告,第18巻,1988.

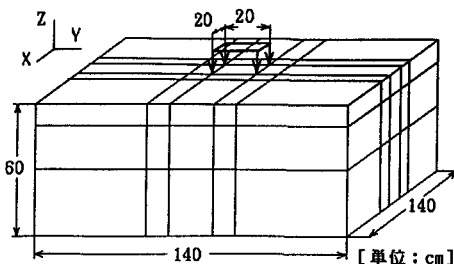


図-2 平板載荷試験に用いた解析モデル

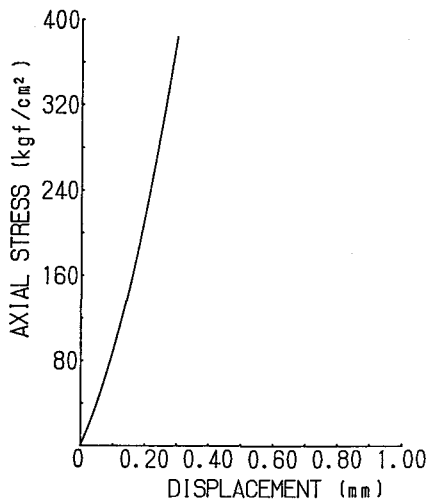


図-3 平板載荷試験における解析結果 (応力-変位関係)

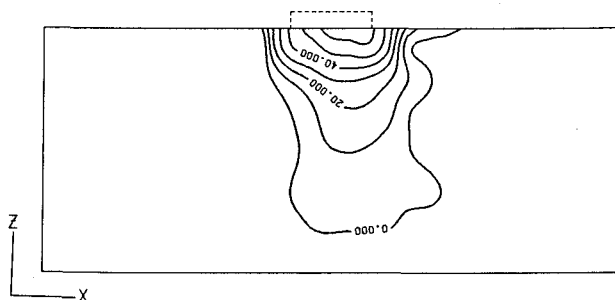


図-4 平板載荷試験における解析結果 (鉛直応力分布)