

III-266

クラックテンソルによる亀裂性岩盤モデルの力学特性に関する考察

大成建設(株) 正会員 岩野 政 浩
 同 上 羽出山 吉 裕
 (株) 新日本技術コンサルタント 正会員 北 條 明
 同 上 平 川 芳 明

1. はじめに

岩盤全体としての変形・破壊挙動は、岩盤内に存在する節理、層理、亀裂といった不連続面の力学特性や空間分布特性に強く支配される。このような不連続面を含む岩盤のモデル化については種々の方法が提案されているものの、実用に供する手法の確立には至っていない。亀裂性岩盤のモデル化の第一ステップは、個々の亀裂のモデル化であり、次に亀裂システムとしての幾何学的構成・空間分布特性のモデル化である。さらに岩盤の力学的特性を評価するには、基質部分の力学特性、亀裂の力学特性及び亀裂間の干渉効果を評価する必要がある。現在、この種の研究で総合的検討が成されているものに小田(1987,1988)によるクラックテンソルに関する研究がある。クラックテンソルによる亀裂性岩盤の力学挙動の評価は、連続体力学に基づく岩盤の変形挙動解析を行う上で、岩盤の等価連続体へのモデル化の有効なアプローチではあるものの、現状では実構造の設計・解析への適用例も少なく、その実用化が強く望まれている。本報告では、ランダムに分布する亀裂を有する岩盤モデルを検討対象とし、亀裂密度をパラメーターとしてその構造的・力学的特性(異方性)をクラックテンソルにより定量的に評価する。さらに亀裂の影響を考慮するためジョイント要素を用いたF.E.M.解析結果との比較を行い、クラックテンソルによる力学特性評価の有効性、妥当性について考察を加え、実設計への適用の糸口を探ったものである。

2. ボロノイ分割法によるクラック構造

ランダムに分布する亀裂を有する岩盤モデルを幾何学的平面分割手法のひとつであるボロノイ分割法により作成する。本検討においては、分割セルの核の密度を変化させて、一辺20mの正方形領域に亀裂を発生させ、図-1に示す3種類のクラック構造を作成した。本構造に対するクラックテンソル (F_0, F_{ij}, F_{ijke})を算定し、一覧表にして表-1に示す。分割数が多くなるにつれ、 F_0 が増加し等方的なモデルにより近くなっていく。これは本来ボロノイ分割法がランダムな構造を表現するための手法であるため、分割密度の増加に伴い、亀裂方向の均等性が明瞭となり、分割法の特徴が顕著となってくる

表-1 クラックテンソル一覧表

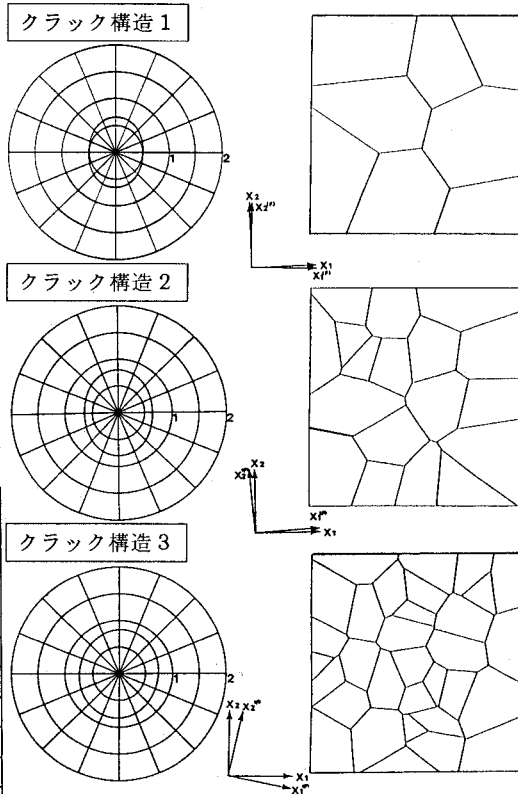


図-1 岩盤モデルのクラック構造

	クラック構造1	クラック構造2	クラック構造3	
F_0	1.163	1.446	1.572	
$A^{(r)}$	0.123	0.107	0.059	
F_{ij}	$\begin{pmatrix} 0.510 & 0.007 \\ 0.007 & 0.653 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.646 & -0.006 \\ -0.006 & 0.800 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.743 & 0.018 \\ 0.018 & 0.829 \end{pmatrix}$	
F_{ijkl}	F_{1111}	0.386536	0.492724	0.554011
	F_{1112}	0.005498	-0.014305	-0.031272
	F_{1122}	0.113836	0.153719	0.189107
	F_{1222}	0.001558	0.008763	0.048973
	F_{2222}	0.538849	0.645887	0.639986
平均節理長	5.6971(m)	3.424 (m)	2.5863(m)	

めである。亀裂性岩盤の巨視的な力学特性を評価する上で基本となるRepresentative Elementary Volume (R.E.V.)について小田ら(1988)は数値実験結果より、R.E.V.の寸法は少なくとも亀裂の代表寸法の3倍を必要とすると結論づけている。この結論は、亀裂の分布に偏りがなく、岩盤が全体として統計的に均一であるとの前提条件付きで適用すべきものであるが、代表寸法として平均節理長を考えれば、3つのクラック構造とも上記の条件を満足している。しかしながら、図-1に示すように3構造ともある程度の異方性を示していることから、ポロノイ分割法を用いている以上力学的R.E.V.とは考え難い。これは、本構造モデルにおいては、亀裂密度が小さく亀裂分布の統計的均一条件が満足されていないためである。

3. 弾性コンプライアンスの算定

図-1に示す3つのクラック構造に対して、亀裂を弾性ジョイント要素でモデル化した二次元有限要素法による変形解析を実施した。本解析に用いている物性値は次に示す通りである。

基質部分: $E = 150,000 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.15$ 亀裂部分: $K_n = 3,000 \text{ kg/cm}^2$, $K_s = 1,000 \text{ kg/cm}^2$

クラックテンソルによる異方弾性コンプライアンスは、二次元平面歪問題としてマトリックス表示すれば

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1-\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1+\nu)/2 \end{bmatrix} + \frac{1}{\bar{g}} \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & F_{12}/2 \\ 0 & F_{22} & F_{12}/2 \\ -F_{12}/2 & F_{12}/2 & (F_{11}+F_{22})/4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & & \\ & -1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ F_{2211} & F_{2222} & F_{2212} \\ F_{1211} & F_{1222} & F_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ 2\sigma_{12} \end{bmatrix}$$

ここで、 F_{ij}, F_{ijke} は各々2階、4階のクラックテンソル、 \bar{h} , \bar{g} は個々の亀裂の垂直剛性、せん断剛性に方向に対する平均化を施して算定された亀裂群全体の变形性を表す等価垂直剛性、せん断剛性である。

上式に表-1に示されたクラックテンソルの値及び山辺ら(1987)による入力パラメーター決定手法を用いて算定された \bar{h} , \bar{g} を代入し、得られたコンプライアンスをマトリックス表示したものを下に示す。また、3種類のクラック構造に対して、一軸圧縮、単純せん断時の巨視的弾性定数を算定し、F.E.M.による解析結果と併せて表-2に示す。亀裂密度が大きくなるにつれて巨視的弾性係数が低下し、力学的異方性の度合いが小さくなるといった定性的傾向は両者で良好な一致を示している。しかしながら、定量的には、弾性係数値でクラックテンソルによる算定値がF.E.M.結果の66~78%程度の値となる。クラック

クラック構造1

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 7.634 & -2.147 & -0.004 \\ \text{Sym} & 8.696 & 0.065 \\ & & 6.250 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ 2\sigma_{12} \end{bmatrix}$$

クラック構造2

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 14.925 & -4.645 & 0.287 \\ \text{Sym} & 17.241 & -0.388 \\ & & 11.981 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ 2\sigma_{12} \end{bmatrix}$$

クラック構造3

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 22.727 & -7.452 & 1.729 \\ \text{Sym} & 24.390 & -1.370 \\ & & 15.974 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ 2\sigma_{12} \end{bmatrix}$$

表-2 岩盤モデルの巨視的弾性係数

	F ₀	A ^{0.75}	E _v /E		E _s /E		G ₁₁ /G		E _v /E _r	
			35°	FEM	35°	FEM	35°	FEM	35°	FEM
構造1	1.163	0.123	0.131	0.167	0.115	0.147	0.092	0.178	1.144	1.136
構造2	1.446	0.107	0.067	0.100	0.058	0.080	0.048	0.090	1.153	1.250
構造3	1.572	0.059	0.044	0.067	0.041	0.060	0.036	0.066	1.069	1.111

参考文献)

1)大西,河野(1986):土木学会論文集,第376号,PP.231-239
 2)山辺,原,小田(1987):土木学会論文集,第382号,PP.121-130
 3)Oda,M.(1988):Int.J.Rock Mech.Min.Sci,Vol.25(2),PP.59-69
 4)小田,羽出山,高野(1986):第18回岩盤力学シンポジウム,PP.126-130

また、3種類のクラック構造に対して、一軸圧縮、単純せん断時の巨視的弾性定数を算定し、F.E.M.による解析結果と併せて表-2に示す。亀裂密度が大きくなるにつれて巨視的弾性係数が低下し、力学的異方性の度合いが小さくなるといった定性的傾向は両者で良好な一致を示している。しかしながら、定量的には、弾性係数値でクラックテンソルによる算定値がF.E.M.結果の66~78%程度の値となる。クラック構造1の場合に弾性係数、力学的異方性共に両結果の差異が最も小さい。これはクラックテンソルによるコンプライアンス算定時に、岩盤モデル内で考えた測線に沿って、亀裂部分に生じる垂直な相対変位及びせん断方向の相対変位を考慮して、測線方向の亀裂変位の総和を求め、それと等価な歪テンソルよりコンプライアンスを求めるので、巨視的弾性係数の理論的下限値を与える可能性があるためである。

4. おわりに

簡略化された岩盤モデルによる検討ではあるものの、亀裂の幾何学的構成・分布特性・力学特性をクラックテンソルを用いて評価することで、亀裂性岩盤の巨視的弾性係数の下限値を推定できうることを示した。今後は、本手法に基づく実設計への適用に向けて、さらに詳細な検討を加えていく予定である。