

(17) 亀裂内透水特性・流動機構に関する研究

大成建設(株) 正会員 ○岩野 政浩
同 上 羽出山吉裕

A Study on the Flow Channeling through a Single Fracture as a Heterogeneous Permeable Media

Masahiro Iwano Taisei Corporation
Yoshihiro Hatsuyama Taisei Corporation

Fracture conductivity is one of the most important properties of jointed rock. In discrete modeling, the parallel plate model is most frequently used. Real fracture surfaces, however, are not smooth parallel surfaces. The surface roughness, asperity contact and infill material may retard flow and reduce the hydraulic conductivity of a fracture. In this study, a fracture aperture is conceptualized as a two-dimensional heterogeneous system with variable apertures in the fracture plane. Fracture apertures are generated using geostatistical methods. Fluid flow through a single fracture is simulated with constant hydraulic gradient in the two-dimensional flow region. The results show that the majority of flow tends to coalesce into certain preferred flow paths (channels) and that the representative elementary volume with respect to the equivalent hydraulic conductivity of a single fracture can exist. The relationships between aperture variation, flow rate variation and head variation are examined.

1. はじめに

地下深部に存在する硬質塊状岩盤の場合には、母岩基質部の透水性が岩盤内に存在する亀裂部の透水性に比較して低いため、岩盤 (Rock Mass) としての透水性は、亀裂内の透水特性、亀裂群の空間的分布性状及び相互の連結性状に強く支配される。亀裂内の透水特性については、Snow(1969)が提案した平行板モデルによる三乗則に基づいて評価する方法が従来より用いられているが、Louis(1969)の室内実験及びAbelinら(1988)、菊池ら(1990)の現位置試験結果より、亀裂内の水の運動は、二次元的な複雑な系路を取ることが明らかにされ、亀裂内透水特性の評価手法について新たな問題を提起している。Tsangら(1987, 1989)、Brown(1987)による解析的研究、Hakami(1988)、Morenoら(1988)による実験的研究より、亀裂内開口幅の分布状態、上下面の接触状況等が亀裂内の流動メカニズムに大きな影響を及ぼすことは明らかにされた。しかしながら、これら一連の研究は、三乗則の成立条件、水理学的有効開口幅と幾何学的平均開口幅の関係を議論しているに留まり、不均質な開口幅分布を対象とした亀裂の透水特性の評価・設定手法の提案までには至っていない。一方、亀裂内開口幅の分布状態は、亀裂の成因に由来するため、その状況を認識するのは極めて難しく、Gentierら(1989)、Pyrac-Nolteら(1987)は開口幅分布を直接計測することを試み、また、木村ら(1991)は亀裂表面形状の計測より間接的に開口幅分布を算定する手法を実施しているものの、開口幅の分布状況を結論づけるまでには至っていない。本研究では、これらの研究より得られた知見を踏まえ、不均質開口幅分布を有する亀裂の透水特性について、数値実験を基に、等価透水係数、水理学的有効開口幅について考察を加えるものである。

2. スペクトル法による亀裂内透水特性の評価手法

スペクトル法は、Buyerichtら(1969)が間隙率の三次元空間分布が定常浸透に与える影響を解析するのに地下水分野で初めて用いられ、Gelhar(1979)が透水係数の空間分布を考慮した滞水層の透水問題に適用して一般的に広められた。スペクトル法においては、水理学的パラメーターを空間的に分布する確率過程と考え、これらの確率変数が空間的にある相関 (Spatial Correlation) を有して存在すると仮定する。この相関性は、二次の定常性の仮定のもとで、自己相関関数 (Auto-Covariance Function) により表現され、自己相関関数のフーリエ変換として

スペクトル密度関数が定義できる。定常確率過程に対するFourier-Stieltjes表現を用いて、支配方程式より得られる確率微分方程式より、確率変数（水理学的パラメーター）と応答変数（水頭）のフーリエ振幅間の関係を定め、確率変数の分布状況が応答変数の分布にどのような影響を及ぼすかを解析的に定めていくことができる。スペクトル法を亀裂内透水特性評価に適用する場合、図-1に示すような開口幅の三次元分布を考え、開口幅分布はGentierらの観察結果を参考にして、対数正規分布に従うものとし、開口幅の空間的相関性は、自己相関関数によって表現し得るものと考ええる。また、亀裂内の全てのポイントで局所的に三乗則が成立するものと考え、定常状態での連続式、運動方程式より、平均流量を算定し、有効開口幅と等価透水テンソルを岩野(1991)が提案した評価手法に基づいて算定すると次式のようにになる。

$$\bar{Q} = \frac{g}{12\nu} b_l^3 \left[\left(1 + \frac{9}{2} \sigma_p^2 \right) J_i \delta_{ij} \int_k \frac{k_i k_j}{k^2} S_{pp}(k, \lambda) dk \right] = \frac{g}{12\nu} B_{ij} J_j = K_{ij} J_j$$

$$B_{ij} = b_l^3 \left[\left(1 + \frac{9}{2} \sigma_p^2 \right) \delta_{ij} - 9 \int_k \frac{k_i k_j}{k^2} S_{pp}(k, \lambda) dk \right] : \text{Effective aperture cubed tensor}$$

K_{ij} : Equivalent conductivity tensor δ_{ij} : Kronecker delta
 g : Gravitational constant ν : Kinematic viscosity
 b_l^3 : Geometric mean of aperture k_i : Wave number
 S_{pp} : Spectral density function of aperture k : $k^2 = k_1^2 + k_2^2$
 σ_p^2 : Variance of log-aperture process J_i : Hydraulic gradient

さらに、開口幅分布の自己相関関数として、指数形を考え、開口幅分布の相関構造(Correlation Scale, λ , で表現)として、図-2に示すような直交異方性を有する構造を仮定すれば、等価透水テンソルは次式のようにになる。

$$K_{11} = \frac{g}{12\nu} b_l^3 \left\{ 1 + \sigma_p^2 \left[\frac{9}{2} - 9 \left(\frac{\rho \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}{\rho + 1} \right) \right] \right\}$$

$$K_{22} = \frac{g}{12\nu} b_l^3 \left\{ 1 + \sigma_p^2 \left[\frac{9}{2} - 9 \left(\frac{\rho \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}{\rho + 1} \right) \right] \right\}$$

$$K_{12} = K_{21} = \frac{9g}{12\nu} b_l^3 \sigma_p^2 \left(\frac{\rho - 1}{\rho + 1} \right) \sin \alpha \cos \alpha$$

ρ : Ratio of anisotropic correlation scale $\rho = \lambda_1 / \lambda_2$
 α : Angle between mean hydraulic gradient and maximum correlation direction

上式より、亀裂内透水特性は、開口幅分布の相関構造を考慮して陽な形で表現され、開口幅分布の幾何平均 (b_l)、相関構造上の異方性の度合 (ρ) 及び対数開口幅の分散 (σ_p^2) によって評価可能となる。また、平行板モデル ($\sigma_p^2 = 0$) では開口幅分散の影響がなく、平均値のみを用いた等方モデルであることが理解できよう。

3. 開口幅分布の発生及び解析条件

不均質に分布する水理パラメーターを有する三次元構造の発生手法には、種々の方法が考察されているが、そのうち相関構造を考慮できる手法として、Mejia and Rodrigues-Iturbe (1985)によるスペクトル密度法、Journel and Huijbregts(1978)によるターニングバンド法、Bartlett (1975)によるNearest Neighbor 法等がある。本研究では、発生の簡便さ、及び発生グリッド数を考慮し、スペクトル密度法を用いて、対数正規分布を形成し、かつ指数形自己相関関数を有する三次元開口幅分布を発生させ、数値実験用のモデルとした。解析モデルは、表-1に示すような20ケースとし、メッシュサイズ、浸透解析領域、開口幅分散、相関構造の4つの要因に着目し、これらの亀裂内透水特性への影響について検討した。メッシュサイズの検討では、メッシュ長を0.2cmから1cmまで、浸透流領域の検討では対象領域を2cmから20cmまで、開口幅分散の検討では、標準偏差を $0 \mu m$

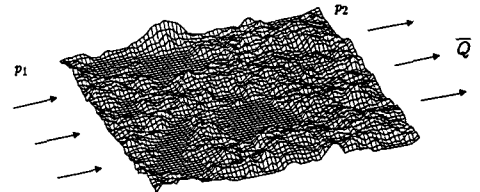
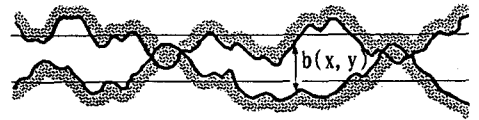


図-1 亀裂内開口幅の定義と三次元分布例

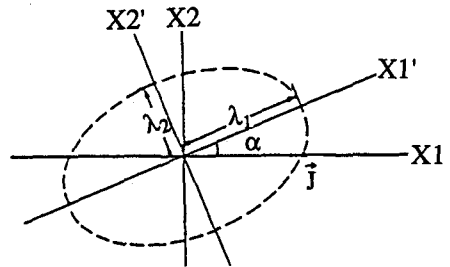


図-2 平均動水勾配と開口幅分布の相関

から80 μ mまで、相関構造の検討では、相関長を0cmから8cmまで、各々5段階に変化させてモデルを発生させた。図-3に、基本モデル (Case-05, Case-15, Case-23, Case-31) の開口幅分布例及びその頻度分布を示す。また、図-4に、開口幅分散の検討に用いた4つの開口幅分布の確率密度関数を示す。

4. 解析結果

解析は、亀裂内の全ポイントで局所的に三乗則が成立するものと仮定し、発生させた開口幅に対応する透水係数を有する要素の集合体として亀裂をモデル化したいわゆる Bed of Nails モデルの拡張として浸透流解析モデルを作成した。解析は、二次元定常有限要素法を用いて実施し、図-1に示すような相対するモデル境界は水頭固定境界、他の境界は不透水境界と境界条件を設定した。(LRモデル) なお、境界条件を90°回転させた場合(UDモデル)についても同様な解析を実施し、等方モデルとしての検証も併せて実施した。解析結果をまとめ、さらに総流出量及び平均流量より算定された水理学的開口幅(bf,bv)を併せて、表-2に示す。

i) メッシュサイズの検討

図-5は、解析より得られた総流量とメッシュサイズとの関係を示す。メッシュの分割数の増加に伴い、解析結果は一定値に近づく。本モデルで用いた分散構造の場合、メッシュ長0.2cmで等方的モデルとしての結果が得られ、メッシュ長として0.2cmを以後採用する。

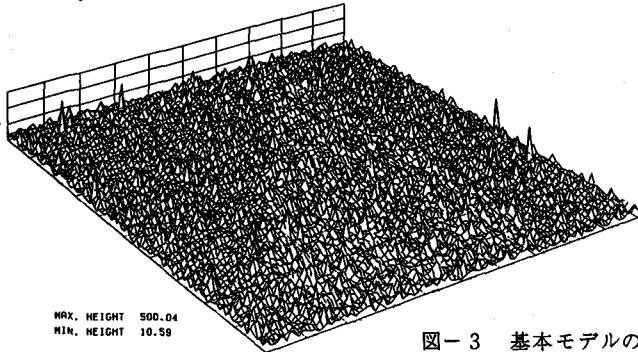
ii) 解析領域の検討

図-6は、総流量と解析領域の大きさとの関係を示したものである。Case11 (20cm×20cm) のモデルは水理学的等方モデルとして挙動し、また、解析領域の増大に伴い、ほぼ一定値に収束していることより、総流量の面からみれば、Case-15はR.E.V.として見成し得る。

表-1 解析モデル一覧表

		Number of Diving (N×N)	Mesh Size (cm×cm)	Flow Region Size (cm×cm)	Mean of Aperture $\bar{b}$ (μ m)	Standard Deviation of Aperture σ_b (μ m)	Mean of Log-aperture $\ln b$ (μ m)	Standard Deviation of Log-aperture $\sigma_{\ln b}$ (μ m)	Auto correlation Length λ_c (cm)
Mesh Size Study	Case-01	20×20	1.0×1.0	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	02	40×40	0.5×0.5	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	03	60×60	0.33×0.33	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	04	80×80	0.25×0.25	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	05	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
Flow Region Size Study	Case-11	10×10	0.20×0.20	2×2	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	12	20×20	0.20×0.20	4×4	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	13	40×40	0.20×0.20	8×8	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	14	60×60	0.20×0.20	12×12	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	15	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
Aperture Variation Study	Case-21	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	0.0	4.382	0.000	0.0
	22	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	20.0	4.352	0.246	0.0
	23	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	24	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	60.0	4.159	0.668	0.0
	25	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	80.0	4.035	0.833	0.0
Correlation Scale Study	Case-31	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	0.0
	32	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	1.0
	33	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	2.0
	34	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	4.0
	35	100×100	0.20×0.20	20×20	80.0	40.0	4.270	0.472	8.0

a) Bird-eye view



b) Histogram

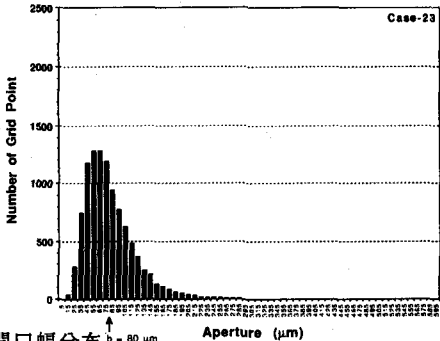
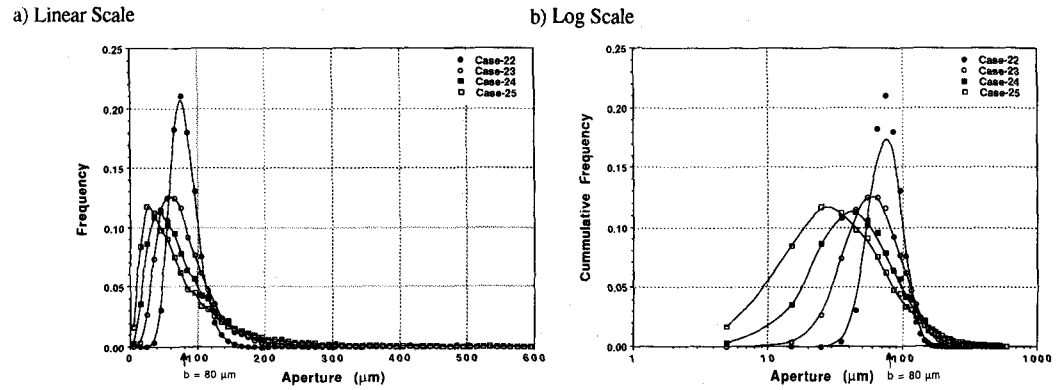


図-3 基本モデルの開口幅分布 $b = 80 \mu\text{m}$

iii) 開口幅分散の検討

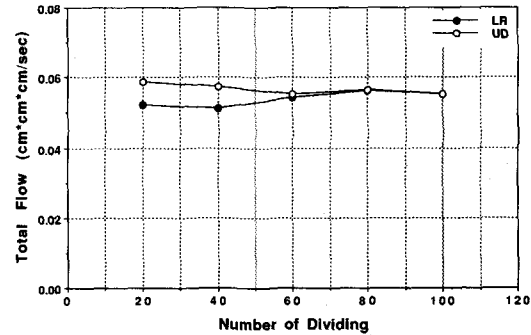
図－7は、開口幅分布の分散度が小さいCase-22と、逆に大きいCase-25の場合の流量ベクトル図を示したものである。Case-22では、流れがスムーズであるが、Case-25では、亀裂内の水の運動はチャンネリング現象を示し、透水性の高い部分を好んで流れる様子が良く理解できる。図－8は、総流出量と開口幅分散の標準偏差との関係を示す。開口幅分布が広がるにつれて総流出量は増加し、透水性が増大する様子が理解できる。開口幅分布の変動係数が1.0の場合（Case-25）、平行板モデル（Case-21）に比べて、総流出量で約1.59倍、平均流量（流速）で約1.82倍となっている。



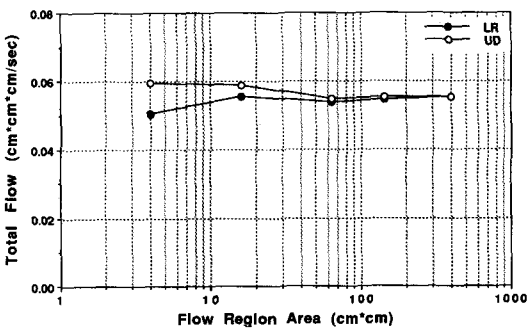
図－4 開口幅分布の確率密度関数

表－2 解析結果一覧表

		Arithmetic Mean Aperture b_a (μ m)	Standard Deviation of Aperture σ_b (μ m)	Total Flow Analysis				Flow Rate Analysis				$\frac{b_f}{b_a}$	$\frac{b_v}{b_a}$
				Q total ($\times 10^3$ cm ³ /sec)			Hydraulic Aperture for Flow b_f (μ m)	Mean Flow Rate ($\times 10^3$ cm ³ /sec)			Hydraulic Aperture for Velocity b_v (μ m)		
				LR	UD	Average		LR	UD	Average			
Aperture Variation Study	Case-21	80.000	0.0	4.140	4.140	4.140	80.00	2.070	2.070	2.070	80.000	1.000	1.000
	22	80.048	20.0	4.603	4.603	4.603	82.88	2.333	2.333	2.333	84.905	1.035	1.061
	23	80.051	40.0	5.516	5.516	5.516	88.03	2.906	2.901	2.904	94.726	1.100	1.183
	24	80.180	60.0	6.306	6.279	6.293	91.98	3.467	3.441	3.454	103.224	1.147	1.287
	25	80.179	80.0	6.645	6.518	6.582	93.37	3.793	3.734	3.764	107.758	1.165	1.344
Correlation Scale Study	Case-31	80.051	40.0	5.516	5.516	5.516	88.03	2.906	2.901	2.904	94.726	1.100	1.183
	32	80.025	40.0	5.504	5.531	5.518	88.04	2.899	2.914	2.907	94.790	1.100	1.185
	33	79.557	40.0	5.400	5.343	5.372	87.26	2.845	2.816	2.831	93.818	1.097	1.179
	34	80.144	40.0	5.530	5.503	5.517	88.04	2.914	2.900	2.907	94.720	1.099	1.182
	35	80.692	40.0	5.715	5.686	5.701	89.00	3.019	3.000	3.010	96.055	1.103	1.190



図－5 メッシュサイズ解析結果



図－6 解析領域検討結果

iv) 相関構造の検討

図-9は、開口幅分布の自己相関性と総流入量との関係を示したものである。本結果から、自己相関性の有無が、透水特性に及ぼす影響は小さいことが理解できる。この結果はTsang(1988)らも示唆しているように、等方的モデルにおいては、自己相関性の透水特性への影響が小さいことを確認するものである。しかしながら、彼らが示したChannelingの幅と自己相関長の等価性については、今回の検討では明瞭な結果が得られず、解析モデルの発生手法に依存するものと考えられ、今後議論が必要であろう。

v) 水理学的開口幅と幾何学的開口幅の関係

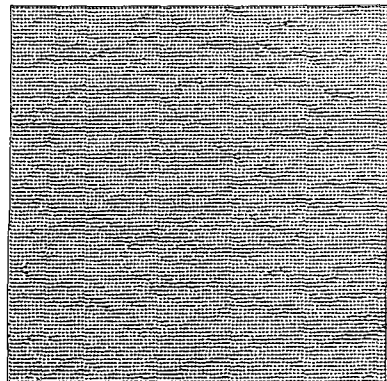
表-2に示す解析結果一覧より、平均流量(流速)より求められた水理学的開口幅は、総流量より算定された開口幅より大きく、両者とも幾何学的開口幅よりは大きい。また開口幅分散の度合が大きくなるにつれ、水理学的開口幅は増加し、開口幅分布の変動係数が1.0の場合(Case-25)、1.16~1.34倍になる。

5. まとめ

亀裂内の開口幅分布をスペクトル密度法に基づいて発生させ、種々の要因が亀裂内透水特性に与える影響について数値実験結果より考察を加えた。開口幅の分散度合が大きくなるにつれて、亀裂内流動は複雑なチャンネリング現象を示し、一様動水勾配の条件下では、総流入量、平均流速、水理学的開口幅は増大すること等が明確となった。今後は、開口幅分布の相関構造の異方性が透水特性に与える影響の検討、実測データに基づく検討、現位置への適用性の検討等を実施し、亀裂内透水特性の評価手法の確立を目指して研究を進めていく予定である。

Reference) 1)Snow(1969):W.R.R.,Vol.5(6)
2)Louis(1969):Rock Mechanics Rep.No.10,Imperial College of London 3)Abelin et al(1988):Proc.of Int.Conf.on Fluid Flow in Fractured Rock, Atlanta 4)Tsang & Tsang(1987):W.R.R.,Vol.23(3) 5)Tsang & Tsang(1989):W.R.R.,Vol.25(9)
6)Brown(1987):J.G.R.,Vol.92(B2) 7)Hakami(1988):Licentiat Thesis ,Lurea Univ. 8)Moreno(1988):W.R.R.,Vol.24(12)
9)Gentier(1989):Rock Mech. & Rock Eng.,Vol.22(3)
10)Pyrac-Nolte(1987):6th ISRM Conference 11)Buyericht & Leonov(1969):J. of Fluid Mech.,Vol.37 12)Gelhar(1979):W.R.R.,Vol.15(6) 13)Mejia & Rodrigues-Iturbe(1974):W.R.R.,Vol.10(4) 14)Journal & Huijbregts(1978):Mining Geostatistics,Academic 15)Barlett(1975):Statistical Analysis of Spatial Pattern,Chapman and Hall
16)菊地他(1990):第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
17)木村他(1991):応用地質学会平成3年度研究発表会講演集
18)岩野(1991):第23回岩盤力学シンポジウム講演論文集

Case-22



Case-25

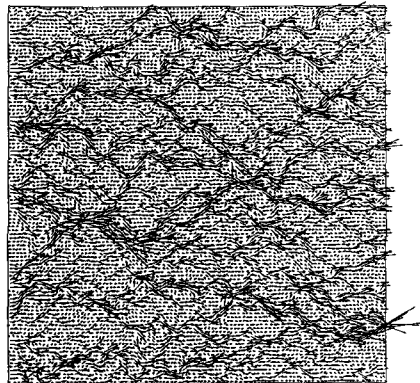


図-7 流量ベクトル図

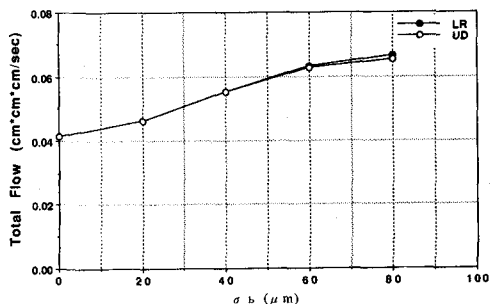


図-8 開口幅分散検討結果

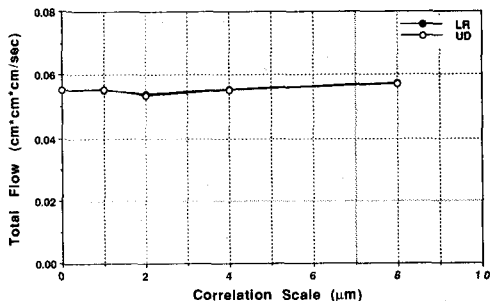


図-9 相関構造検討結果