透気性を指標とする亀裂性岩盤の緩み領域判定に関する研究

Study on Determination of Loosened Zone of
Fractured Rock Mass Based on Permeability

川谷健*・中山昭彦**・石丸智基***

By Takeshi KAWATANI, Akihiko NAKAYAMA and Tomoki ISHIMARU

The permeability in fractured rock mass is expected larger in the excavation-damaged zone than in the non-damaged zone. Hence, it is possible to find out the damaged zone based on the permeability measured by the pressure recovery test in the borehole. In this case, it is important to know how the randomness of openings affects the results of pressure recovery test.

Numerical 2D-model of fractured rocks were used herein to study the variation in the pressure recovery process due to the randomness of openings. The results show that if the loosened zone extends beyond the test section the pressure recovery becomes definitely fast.

Keywords: permeability, fractured rocks, randomness, pressure recovery

1. はじめに

亀裂性岩盤を掘削すると、応力解放などの結果、それまで地圧によって密着していた亀裂が開口し、岩盤に緩みが生じる。緩み領域では、亀裂開口幅が相対的に大きいので、透水性・透気性も大きくなる。したがって、緩みの度合いと範囲を判断するために、透水性・透気性は1つの有用な指標と考えられる。この考えのもとに、Jakubickら¹⁾はボーリング孔を利用して気圧回復試験を行っている。その試験では、真空ポンプでボーリング孔の測定区間内の気圧を下げ、ほぼ定常状態が達せられた後ポンプを止めて、測定孔内の気圧が大気圧にまで回復する過程を測定する。測定データから固有透過度 (Intrinsic permeability) を算定し、測定孔壁の亀裂開口幅を求める。固有透過度の算定式として、Jakubickらは、一定厚さの多孔質被圧層における気体の水平放射流に対する理論式を用いている。しかし亀裂特性 (密度、開口幅、方向など) は確率変量であるから、亀裂密度が大きい場合、測定孔の位置によって孔壁の亀裂数や空気流入の経路となる亀裂の開口幅にばらつきがあり、気圧回復速度も大きく異なると考えられ、岩盤亀裂系を多孔質地盤として扱うことは必ずしも妥当といえない。

亀裂内の流れを2枚の平行板間の層流と考えると、流量は亀裂開口幅の3乗に比例するので、測定孔の気圧回復速度は主に空気流入経路を構成する亀裂の開口幅の大きさによると考えられる。ところで開口幅にはばらつきがあるから、経路となる亀裂の開口幅が緩み域で大きく、非緩み領域で小さいとは限らないので、緩み域での気圧回復がバックデータとして非緩み域で測定した気圧回復より常に早いとは限らない。したがって、気圧回復試験で岩盤の緩みを判定する場合、亀裂特性のばらつきを考慮することが重要である。

* 正会員 Ph.D 神戸大学教授 工学部土地造成工学研究施設 (〒657 神戸市灘区六甲台町)
** 正会員 Ph.D 神戸大学助教授 工学部土地造成工学研究施設
*** 学生員 神戸大学大学院 土木工学専攻

本研究では、上述の観点から、亀裂特性のばらつきを導入できる2次元の岩盤亀裂系モデルを用い、緩みによる開口幅の増加が気圧回復過程に及ぼす影響について調べた。そして、開口幅がどの程度大きくなり、また緩み範囲がどの程度に広がれば、気圧回復速度に緩みの有無による有意の差が認められるかを調べた。

2. 岩盤亀裂系の数値モデル

Longら²⁾は、亀裂の長さ、方向、開口幅を確率変数とする2次元の亀裂系モデルを示したが、ここでは、その手法で以下の亀裂系モデルを作った。亀裂は150本、それが12m×7.5mの矩形域内に一様に分布する。亀裂の方向は一様分布。亀裂長は指数分布で、平均値は3m、下限値は2.4m。開口幅は指数分布で、平均値は20μm、下限値は1μm。解析対象の試験片は上述の矩形域の中央部分6m×3mとし、その厚さは1cmとする。亀裂系モデルの1つを図-1に示す。辺ABの気圧は常に1atmで、ここから空気が亀裂に侵入する。以下、辺ABを掘削面と呼ぶ。辺BC, CD, DAは不透性境界とする。

図-1 岩盤亀裂系モデル (I)

一方、測定孔の境界条件として、測定孔への空気流入量を算定する亀裂交点を1つまたは2つ選び、その気圧を測定孔の気圧に設定する。解析では、この条件下で亀裂系の気圧分布が定常状態にあるとして、すべての亀裂交点での気圧を求め、その結果から測定孔への空気流入量を算定する。そして、この空気流入によるΔt時間後の孔内気圧を計算し、それを測定孔の新たな境界条件として上述の計算を繰り返す。このように気圧（あるいは後述の P^{1+n} ）の分布がΔt時間ごとに定常状態であるとする仮定は、この解析ではマッハ数、解析領域、亀裂密度のいずれもが小さいので、成立すると考えられる。なお、図-1で○印と●印の亀裂交点が孔内気圧を与えた交点である。

3. 基礎式

亀裂内の流れが平行板間の微小間隙を流れる層流とすれば、平均流速は $v = -(b^2/12\mu)(dP/dS)$ である³⁾。ここに、 P は圧力、 S は亀裂に沿って測った距離、 b は亀裂の開口幅、 μ は空気粘性係数である。断面積 $A = 1 \times b$ の間隙を流れる空気量は $Q = \rho A v = -(\rho b^3/12\mu)(dP/dS) \dots (1)$ である。ここに、 ρ は空気密度である。状態方程式は、空気については理想気体に対する式がよい近似で成り立ち⁴⁾、 $\rho = P/RT$ である。ここに、 T は温度、 R は気体定数である。また断熱変化のとき、状態方程式は $P/\rho^k = \text{const.}$ である。ここに k は定熱比熱と定積比熱の比であり、乾いた空気では $k=1.40$ である。それゆえ、等温変化または断熱変化のとき、状態方程式は $\rho = CP^n \dots (2)$ と書ける。ここに $n=1$ （等温変化）あるいは $1/1.4$ （断熱変化）であり、 C は定数である。流量は、等温変化または断熱変化の

とき、式(1)と(2)より $Q = -\frac{b^3}{12\mu} CP^n \frac{dP}{dS}$ である。いま、図-2の亀裂交点 i と j の圧力を

P_i と P_j 、2点間の距離を S_{ij} 、流量を Q_{ij} で表せば、 $Q_{ij} = \frac{Cb^3}{12\mu(1+n)} \frac{(P_i^{1+n} - P_j^{1+n})}{S_{ij}}$ である。

上式で P^{1+n} の2点間での線形的変化は、 P^{1+n} に関する拡散方程式の拡散係数と平均的な S_{ij} との比較から

妥当な近似と考えられる⁵⁾。交点 i での質量保存条件から $\sum_{j=1}^N Q_{ij} = \sum_{j=1}^N \alpha b^3 \frac{(P_i^{1+n} - P_j^{1+n})}{S_{ij}} = 0$

$\dots (3)$ である。ここに、 N は隣接する交点の数であり、 $\alpha = C/\{12\mu(1+n)\}$ である。全ての

亀裂交点に式(3)を適用すると、連立方程式 $[D]\{P^{1+n}\} = \{R\} \dots (4)$ が得られる。ここに、

$D_{ii} = \alpha b^3 \sum_{j=1, j \neq i}^N 1/S_{ij} \quad (i \neq j), \quad D_{ij} = -\alpha b^3 / S_{ij}$ である。式(4)を、その左辺 $\{R\}$ に境界条件

の既知圧力（掘削面と測定孔の圧力）を導入して解けば、亀裂交点と不透性境界上の気圧が P^{1+n} として求まり、亀裂内の流量が計算できる。

測定孔内の気圧の変化は次のように計算する。時刻 t の孔内気圧を $P_B(t)$ 、空気の密度を $\rho_B(t)$ 、測定孔への空気流入量を $M_B(t)$ で表せば、 Δt 後の孔内の空気密度は $\rho_B(t+\Delta t) = \rho_B(t) + M_B(t) \Delta t / V_B$ であり、その孔内気圧は $P_B(t+\Delta t) = P_0 \{ \rho_B(t+\Delta t) / \rho_0 \}^{1/n}$ である。ここに、 V_B は測定孔の容積、 P_0 と ρ_0 は基準の気圧とそのときの空気密度である。

図-2 亀裂と亀裂交点

4. シミュレーション I

4.1 解析条件

図-1に示す亀裂系で、開口幅の分布が平均値 $20\mu\text{m}$ 、下限値 $1\mu\text{m}$ の指数分布であるとして、乱数を用いて開口幅を決め、10個の亀裂系モデルをつくる。そして、まず緩みの無いケースとして、各モデルの測定孔内の気圧回復過程を算定する。つぎに、下記の2つの緩み条件で亀裂開口幅を増し、各モデルについて孔内気圧の回復過程を計算する。緩み条件は以下のとおりである。（ケース1）：亀裂線分の中点が辺ABから3m以内にある亀裂は、その開口幅をもとの値の2倍にする。（ケース2）：亀裂線分の中点が辺ABから3m以内にある亀裂は、その開口幅をもとの値の3倍にし、その他の亀裂開口幅をもとの2倍にする。

測定孔の容積は 157cm^3 、初期気圧は 0.5atm とする。測定孔への空気流入が1つの亀裂交点からだけの場合を(a)、2つの交点からの場合を(b)として、区別する。図-1に●印をつけた交点が(a)の場合の交点である。

4.2 解析結果

測定孔の気圧回復過程（気圧回復曲線）を図-3に示す。ケース1は、岩盤に緩みがあるものの、測定孔が緩み領域外にある場合である。このケースで、1つの交点から測定孔に空気が流入する場合、その気圧回復曲線群は緩みの無い場合の曲線群と入り混じっており、緩みによる差はほとんど見られない。2つの亀裂交点から測定孔に空気が流入する場合、緩みの影響が現れ、緩みのあるときの気圧回復速度が緩みの無いと

図-3 孔内気圧の経時変化

きの回復速度より平均的に早くなっている。しかしこの場合でも、緩みの有無による回復速度の差は、それによって緩みの判定ができるほど大きくない。ケース1の(a)と(b)を比較すると、後者の気圧回復に緩みの影響が認められる。これは、後者の方が掘削面と測定孔をつなぐ経路が多く、それだけ相対的に開口幅の大きな経路によって掘削面と測定孔のつながる確率が増えたためと考えられる。

一方、緩み範囲が測定孔の位置にまでひろがった場合（ケース2），気圧回復が著しく早くなっているのがわかる。とくに、2つの亀裂交点から測定孔に空気が流入するとした場合（ケース2(b)），緩みがあるときの気圧回復曲線群と緩まないときの曲線群とは明確に分かれている。

以上の結果から、気圧の回復が非緩み域で測定したバックデータと比較して明らかに早いとき、測定位置の岩盤が緩んでいる可能性は高いといえる。測定孔の孔壁に複数の亀裂が存在するように測定孔の長さを選べば、緩みの有無によって気圧回復速度にかなり大きな差が現れるようになると思われる。したがって、亀裂密度を考慮して測定孔の長さを設定することが、測定精度の向上に必要である。

5. シミュレーションⅡ

5.1 目的と解析条件

シミュレーションⅠの結果、非緩み領域で測定した気圧回復速度にもばらつきが大きいたことが明らかになった。したがって、例えば非緩み領域で測定した豊富なバックデータがあっても、1つの気圧回復曲線から緩みの有無を判定すれば、判定には常に過誤の可能性が伴う。一般に、確率変量に基づく判定では、変量の分布関数が既知であれば過誤の確率がわかる。しかし、ここで取り扱う「気圧回復速度」については、それに関わる変量の分布関数が未知である。それゆえ、ここでは気圧回復速度の指標となる変量について、その分布が緩みの度合および範囲によってどのように変わるかを調べる。

解析では、図-4に示す2つの亀裂系モデルを用いる。図中、●印の亀裂交点が測定孔への空気流入量を算定する交点である。これらの亀裂系モデルは、亀裂の数、方向、長さについて統計的性質が同じである。各モデルで、亀裂の構成はそのまま、亀裂幅だけをシミュレーションⅠと同じ乱数を用いて変え、それぞれ100個、合計200個の亀裂系モデルをつくり、その各々について測定孔内気圧の回復過程を計算した。測定孔には2つの亀裂交点から空気が流入するものとし、測定孔の容積および境界条件はシミュレーションⅠと同じとする。測定孔の初期気圧は0.3気圧とし、時間間隔(Δt)は15秒とする。緩みによる亀裂開口幅の変化を次の4とおり設定する。（ケース1）：シミュレーションⅠのケース1と同じで、亀裂線分の中点が辺ABから3m以内にある亀裂は、その開口幅をもとの値の2倍にする。（ケース3）：亀裂線分の中点が辺ABから3m以内にある亀裂の開口幅をもとの値の10倍とする。（ケース4）：全亀裂の開口幅をもとの値の3倍とする。（ケース5）：亀裂線分の中点が辺ABから3m以上にある亀裂の開口幅をもとの値の10倍とする。

図-4 岩盤亀裂系モデル(Ⅱ)

5.2 解析結果

気圧回復速度の指標として、ここでは、孔内気圧が0.8気圧にまで上昇するに要する時間(0.8気圧到達時間)を採用した。図-5に、ケース1、ケース3、ケース4について、200個の計算結果から求めた0.8

気圧到達時間の頻度分布（15 秒間隔）を示す。また表－1 に、0.8 気圧到達時間によって緩みの有無を判定するとき、過誤の危険率が同程度となる 0.8 気圧到達時間の値（しきい値）と、しきい値前後の頻度を示す。

図－5 孔内気圧の0.8気圧到達時間の頻度分布（ケース1,ケース2およびケース3）

ケース1では、しきい値を 2.25 分にとると、緩み有無の判定の過誤の危険率はほぼ 0.3 である。しかし、図－5 の頻度分布を見ると、0.8気圧到達時間が1分以内のところでは緩みの有無による頻度の違いが認められるものの、1分以上のところではその違いはきわめて小さい。それゆえ、実際に「緩みあり」の判定をする場合を想定すると、実質的なしきい値として1分程度を採るのが妥当と思われる。すなわち、「緩みあり」と判定してよいのは、かなり気圧回復の早いものだけである。ケース3では、しきい値を2分に採ると、判定の過誤の危険率はほぼ 0.25 である。このケースでも、緩みの有無による頻度分布の差が大きいのは0.8気圧到達時間が1分以下のところであり、上述の意味での実質的なしきい値は1分である。0.8気圧到達時間が1分以上のところでは、ケース1の場合と比較すれば、緩みの有無による違いがやや大きい。しかし、実際の判定という観点からは、この違いは小さいと思われる。

表－1 判定過誤の危険率

0.8気圧到達時間（分）		2.25未満	2.25以上
頻度	緩みなし	5 9	1 4 1
	緩み（ケース1）	1 3 7	6 3
0.8気圧到達時間（分）		2 未満	2 以上
頻度	緩みなし	5 2	1 4 8
	緩み（ケース3）	1 5 1	4 9
0.8気圧到達時間（分）		0.75未満	0.75以上
頻度	緩みなし	1 4	1 8 6
	緩み（ケース4）	1 8 6	1 4

ケース1とケース3で、緩み領域の開口幅を比較すれば、後者の平均的な開口幅は前者の5倍である。したがって、亀裂を流れる空気流量については、ケース3の値はケース1の5³倍程度になる。しかし、測定孔の気圧回復速度にそれほどの差は生じておらず、また判定の過誤の危険率もそれほど小さくなっていない。これは以下の理由によると考えられる。掘削面と測定孔をつなぐ経路は、開口幅の異なる亀裂が主として直列的につながったものであり、その透気性は、経路を構成する亀裂のうち開口幅が小さい亀裂の透気性によく支配される。そのため、ケース1やケース3のように経路の一部区間の透気性が大きくなっても、測定孔近傍の亀裂開口幅にほとんど緩みの影響がなければ、経路全体としての透気性はそれほど大きくならない。

ケース4は、緩み領域が掘削面から測定孔まで広がった場合である。0.8 気圧到達時間の頻度分布は、緩みのない場合の分布とかなり違ったものとなっている。孔内気圧は、ほとんどの計算結果で 1.5 分以内に 0.8 気圧になっており、3分以内に全てそうになっている。しきい値を 45 秒に採ると、判定の過誤の危険率は 0.1 未満であり、このケースでは実質的なしきい値も上記の値が妥当と思われる。

図－6にケース3とケース4の 0.8 気圧到達時間の頻度分布を示し、図－7にケース3とケース5の頻度分布を示す。ケース3は主に掘削面から解析領域のほぼ中央までが緩んでいる場合で、ケース5は逆に中央

以深が緩んでいる場合である。両図の結果から、掘削面から測定孔までの経路の全区間で開口幅が大きくなった場合（ケース4）には、気圧回復は非常に早くなるが、経路の一部区間のみで開口幅が増えた場合（ケース3と5）では、気圧回復はそれほど早くならないことがわかる。また図-7に示すとおりケース3とケース5の頻度分布に違いが少ないことから、前述のように、経路全体としての透気性が主として非緩み域の開口幅によって決まることがわかる。

亀裂系に空気が流入する境界（例えば掘削面）と測定孔を結ぶ経路のうち、

緩みで開口幅が大きくなった亀裂で構成される経路があれば、孔内気圧の回復は著しく早くなる。しかし、経路の一部区間でのみ開口幅が増えても、孔内気圧の回復はそれほど早くならない。それゆえ緩みが局所的であれば、たとえ緩みの度合が大きく、また測定孔が緩み域にあっても、透気試験では緩みを見出せないことも多いと考えられる。

6. おわりに

本研究では、亀裂特性のばらつきを導入した2次元の亀裂系数値モデルを用いて、岩盤の緩みの影響が透気試験結果にどのように現れるかを調べた。結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) 測定孔への経路が、緩みで開口幅が大きくなった亀裂群で構成される場合、測定孔の気圧回復は早く、非緩み域での試験結果と比較できれば、高い確率で「緩みあり」と判定できるであろう。
- 2) 緩みが局所的であれば、緩み度合が大きくても、気圧回復はそれほど早くならないと考えられる。
- 3) 透気試験結果から緩みの有無は判断できても、緩みの度合と範囲を判定することは困難である。
- 4) 緩みに対する透気試験の応答をよくするためには、測定孔壁に一定数以上の亀裂が存在するよう亀裂密度を考慮して、測定孔の長さ（測定区間長）を設定することが必要である。

参考文献

- 1) Jakubick, A.T. and R. Klein : Permeability assessment in cavern TK-102C of underground oil storage facility in KUSIKINO, JAPAN, Rept. No. 90-158-p, Ontario Hydro Research Division, 1990
- 2) Long, J.C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson and P.A. Whitherspoon : Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resource Research, 18(3), PP. 645-658, 1982
- 3) Kovacs, G. : Seepage Hydraulics, Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 437-454, 1981
- 4) 椿東一郎 : 水理学 I, 森北出版, p. 5, 1973
- 5) Scheidegger, A.E. : The Physics of Flow through Porous Media (3rd ed.), University of Toronto Press, pp. 108-109, 1974

図-6 0.8気圧到達時間の頻度分布
(ケース3とケース4の比較)

図-7 0.8気圧到達時間の頻度分布
(ケース3とケース5の比較)