

レジン注入による単一亀裂岩体の亀裂開口幅測定について

MEASUREMENT OF APERTURE OF SINGLE FRACUTURE BY RESIN INJECTION

赤堀邦晃* 小坂修一** 内田雅大* 須藤 賢***

Kuniaki Akahori, Syuichi Kosaka, Masahiro Uchida, Ken Sudo

It is important to obtain aperture distribution of fractures to understand flow and mass transport processes in fractured rock, since processes are often coupled with pore structure of fracture planes. However, techniques for obtaining aperture distribution has not been established. Especially, aperture distribution under normal stresses needs to be developed. This paper addresses our result using epoxy resin injection technique. We utilized a low viscosity and longer hardening time epoxy resin. A suite of experiments including flow and tracer experiment followed by resin injection was conducted for a 50cm cube granite rock block containing an artificially made single rough fracture using LABROCK. Epoxy resin was impregnated under the same normal stress as flow and tracer experiment. The rock block was sawed into 16 slices. Aperture was measured at both sides of each slice. Aperture distribution over the fracture plane was constructed using linear interpolation technique. Flow simulations were conducted using estimated aperture distribution. Modification to the cubic law was required to explain the measured flux, which was 37 times smaller than simulated flux based on the cubic law. This disagreement could be attributed to poor representation of aperture closure as the aperture distribution for the whole fracture surface has not been measured.

1. まえがき

結晶質岩盤中を流れる地下水は、主に岩盤の亀裂中を流れると考えられている。地下水が亀裂中を流れる際、部分的流路(チャネリング)に沿って流れることが知られている。この現象は亀裂開口幅の不均質性が原因であると考えられている。単一亀裂中のチャネリングをモデル化する場合、亀裂面の亀裂開口幅の分布を測定する必要がある。Hakami¹⁾は、亀裂開口幅の測定法を以下の3種類に分類している：(1)試験岩体の亀裂上下面の凹凸を測定し、亀裂上下面を組み合わせることにより算出する方法、(2)試験岩体の亀裂中に充填物を注入し試験岩体を切断しその亀裂面の充填物の厚みを測定する方法、(3)充填物を試験岩体の亀裂内に注入し、充填物のレプリカを試験岩体より取り出しレプリカの厚さを測定する方法。(1)の方法では垂直荷重を負荷した時の亀裂開口幅を測定することは不可能である。また(3)の方法は、最も有望と考えられるが、垂直荷重を負荷した状態で充填物を注入した例はなく、なお課題が残されている。(2)の分類に属する方法としてレジン注入し、レジンが固化した後試験岩体をスライス片に切断し、その切断面の亀裂に充填されたレジンの厚さを測定する方法(以下レジン注入試験と呼ぶ)がある。新見ら²⁾は、釜石鉱山における原位置試験で流路の厚さ

* 動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

** 検査開発部

*** (株)大林組 技術研究所

2. レジン注入による亀裂開口幅の測定法の概要

パソコンに取り込んだ亀裂面の画像を示す。写真-1に示す様に亀裂中で硬化したレジン剤の上端と下端の座標値を読むことにより亀裂開口幅を1mm間隔で測定した。測定精度は約0.016mmである。測定断面は、各岩体スライス片の両側面について行い、計 32面の測定を行った。総計測点数は約16000点である。

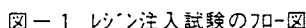


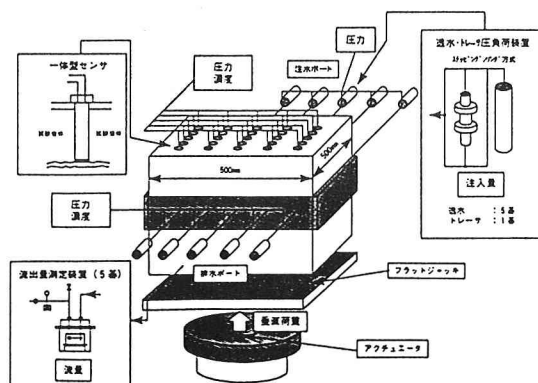
図-3 にレジン注入試験の亀裂開口幅の常用対数を横軸に

[illegible]

4. 水理試験および水理解析

レジン注入試験で用いた試験岩体の透水性を調べるためレジン注入試験の前に同一の人工割裂岩体を用い

おり、電子天秤により自動的に各排水ポートからの流量が測定される。垂直荷重は、最大15MPaの地圧を模擬した375tonfの垂直荷重が載荷可能である。透水試験は、単一割裂亀裂の透水性と垂直応力の依存性の関係を調べるため垂直荷重を5、10、15、20tonfと段階的に昇圧させた後降圧し各荷重段階で透水試験を行った。また、各注水ポートの圧力は一定となる様に各ポートの流量を調整した。



圖一7 LABROCK試驗裝置概要圖

水理試験によって得られた透水量係数と垂直荷重の関係から Witherspoonら⁹⁾が提案する次式にフィッティングさせた結果を図-8に示す。

$$\frac{Q}{\Delta h} = \frac{C}{f_c} (2b_0 - d)^3 \dots \textcircled{1}$$

Q：流量(m³/s)、Δh：圧力水頭差(m)、2b₀：初期開口幅(m)、

d：亀裂開含量(m)、f_c：抵抗係数、

C：流体の粘性、密度に関する定数(m⁻¹s⁻¹)

フィッティングを行った結果、抵抗係数f_c=6、初期開口幅2b₀=0.25mmが得られた。

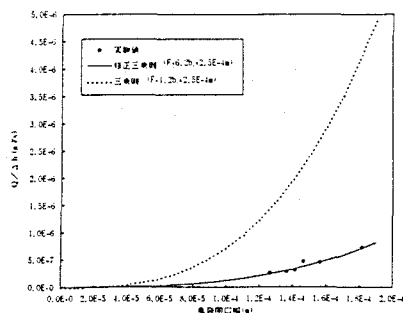


図-8 ①式へフィッティングした結果

4・2 水理解析

亀裂開口幅分布をモデル化し水理解析を行った。解析コードは、メッシュの各要素に異なった透水量係数を割り当てることが可能な亀裂ネットワーク解析コードFracMan/Maficを使用した。またメッシュは、L50cm×W50cmの亀裂平面を各辺の長さが5mmの直角二等辺三角形の要素に分割した。レジン注入試験で得られた亀裂開口幅は、透水方向に平行な方向には1mmピッチにて測定されているが、透水方向に垂直な方向には2～3cm間隔で測定されている。このため測定されなかった部分の亀裂開口幅を推定する必要がある。本解析では、次式を用いてメッシュの各要素に亀裂開口幅を平均化して割り当てた。

$$A_G = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Gn} D^{-1}}{\sum_{i=1}^n D^{-1}} \dots \textcircled{2}$$

A_G：各要素の亀裂開口幅、

A_{Gn}：測定点での亀裂開口幅

D：メッシュの各要素の重心より測定点までの距離

②式は距離に重み付けをした平均の式であり、要素に近い3点を平均化した。また亀裂開口幅と透水量係数の関係は、①式を変形して

$$T = X_0 \times A_G^3 = \frac{C}{f_G} \times A_G^3 \dots \textcircled{3}$$

T：透水量係数、X₀：定数、f_G：幾何学的な開口幅を使用した場合の抵抗係数

により付与した。図-9にメッシュの各要素に亀裂開口幅を割り当てた後の亀裂開口幅分布図を示す。

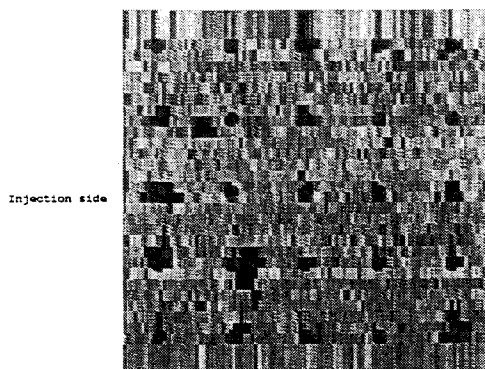
水理試験では、垂直荷重をレジン注入試験時と同じ15tonfで行った。その際の水理的境界条件を下記の様に設定した。

注水側境界条件：全水頭8.9m固定境界

排水側境界条件：全水頭0.0m固定境界

その他の境界：不透水境界

また計25ヶ所のセンサー孔では、センサー下面が亀裂下面より1mm上方に設置していること、およびセンサー孔の直径



Log(Aperture) [unit:m]

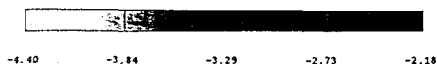


図-9 メッシュに割り当てた亀裂開口幅分布図

が20mmであることからセンサー孔の中心から直径20mm以内に要素の重心が入る要素に亀裂開口幅1mmを設定した。

表－1に水理解析により求めた③式の定数 X_0 の値と注水ポット全体の流量と水理試験で測定された流量の実測値を示す。この結果から注水ポットの全流量が実測値とほぼ等しくなるのは、①式の抵抗係数が $f=37$ となる時である。

表－1 X_0 と注水ポット全体の流量の関係

X_0	注水ポット全流量(m^3/s)
三乗則	9.73E-05
1/37 三乗則	2.65E-06
実験値	2.65E-06

4・3 考察

水理解析で使用した亀裂開口幅 A_G は、基本的に幾何学的な開口幅である。また①式で得られる A_c は亀裂面の凹凸の影響は考慮しているものの均一な開口幅での平行平板亀裂を考えている。 A_G と A_c と透水量係数 T の関係には次の様な関係が成立する。

$$T = \frac{C}{f_c} A_c^3 = \frac{C}{f_g} A_G^3 \cdots \textcircled{4}$$

④式において $f_c=6$ 、 $f_g=37$ である。 f_g の方が f_c より大きな値となった理由は、 f_c は①式において基本的に均一開口幅の平行平板亀裂を仮定しているため開口幅 A_c が小さく評価されたのに伴い、低く評価されたのに対し、 f_g については、水理解析を行った際に、図－4および図－9の亀裂開口幅分布図に示される様に亀裂中の閉塞部の開口幅が十分に取得されていないため A_G が実際より大きく評価され、これに伴い f_g が大きくなったものと考えられる。

5. まとめと今後の課題

原位置試験の場合と同じくレジン注入することによる亀裂開口幅の測定法は、レジン剤が微細な間隙まで浸透し、室内試験における垂直荷重を負荷した状態でも亀裂開口幅の測定が可能であることを確認した。しかし、今回の亀裂開口幅の測定では、スライス片内の亀裂開口幅が取得できなかったため、スライス片内の亀裂の開口幅分布を推定したことにより、亀裂の閉塞部を正確に表現していない結果となったと考えられる。今後は、亀裂面全体の亀裂開口幅の測定が可能な手法を開発し、水理試験を行った後、単一亀裂の亀裂開口幅分布取得とその数値化を行い、亀裂の透水性と亀裂開口幅の関係を確認していく予定である。岩体については、人工割裂亀裂岩体についての試験終了後、天然の単一亀裂岩体に移行していく予定である。

6. 参考文献

- 1) Eva Hakami他：Characterisation of Fracture apertures-Methods and parameters, Proc.8th ISRM Congr., Tokyo, In press, 1995.
- 2) 新見健・野口義文・堀田政国：花崗岩における割れ目内流れに関する基礎的研究，第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.21～25，1992.
- 3) Eva Hakami他：Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single Natural Fracture, Aperture Distribution of Rock Fractures(Doctoral Thesis), Division of Engineering Geology Department of Civil and Environment Engineering Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 1995.
- 4) P.A.Witherspoon他：Validity of Cubic Law for Fluid Flow in a Deformable Rock Fracture, Water Resour. Res., Vol.16,No.6,pp.1016～1024, 1980.