

地質的類似性に基づく亀裂連続性の客観的推定法

AN OBJECTIVE APPROACH FOR DEFINING THE FRACTURE CONNECTIVITY BASED ON THE GEOLOGICAL SIMILARITY

山本 肇*・下茂道人*・澤田 淳**

Hajime Yamamoto, Michito Shimo and Atsushi Sawada

Abstract

Fracture connections between boreholes, which is one of the most important measures affecting the groundwater flow and mass transport in fractured rocks, have been usually evaluated by geologists based on their experiences. For objective evaluation of fracture connectivity between a pair of boreholes, the authors have developed a systematic approach based on quantitative criteria, i.e., geometrical proximity and geological similarity. This paper describes the methodology and the results of application at Kamaishi mine where detail fracture mapping and hydraulic monitoring during drilling were routinely conducted at seven semi-parallel boreholes. It was recognized that the fracture connections estimated by the proposed method agreed well with hydraulic responses during the drilling and also pressure profile within the test area.

1. はじめに

ボーリング孔間や併設した坑道間の亀裂の連続性は、通常、地質専門家の経験に基づいて推定されることが多い。従って、その結果は、判断する地質専門家毎に異なる。そこで、筆者らは、より客観的かつシステムチックに調査エリア内の亀裂連結構造を推定する手法として、亀裂同士の地質的類似性に着目した推定法を考案した。

同手法では、亀裂の位置的關係と地質的特徴（充填物、変質度等）を数量化し、その差の二乗和により亀裂同士の類似性を定義する。そして、隣接する2孔間において、幾何学的に同一平面上にある可能性が高く、かつ地質的にも最も類似性の高い亀裂の組み合わせを決定する。ボーリング孔が2本以上ある場合には、この操作を全ての対のボーリング孔について行う。

本論では、花崗岩中の7本のボーリング孔の亀裂データに本手法を適用し、亀裂の連結性を推定した。その結果、得られた亀裂連結構造は、水圧観測から示された水理構造と整合的であることが分かった。

2. 対象岩盤の概要

核燃料サイクル開発機構の釜石鉱山原位置試験場は、地表より深部300mの花崗閃緑岩体内に位置する。筆者らは、同試験場内のKD-90坑道の北側約100m四方の領域（Task3.2 エリア）において、ほぼ水平に削孔された7本のボーリング孔（KH-19孔～KH-25孔）を用いた詳細な水理地質構造調査を行ってきた（図-1）。

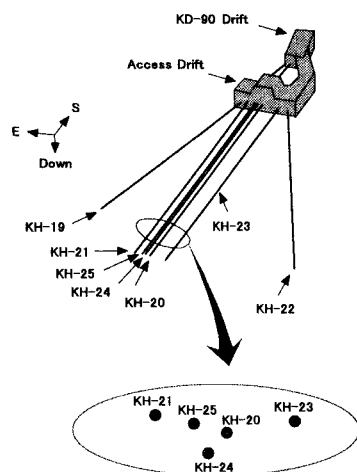


図-1 ボーリング孔レイアウト

* 正会員 大成建設株式会社

** 正会員 核燃料サイクル開発機構

調査では、全ての孔内において亀裂観察（ボアホールTVおよびコア観察）を実施し、亀裂の孔内深度、方位、開口の有無、充填鉱物種と充填幅、変質度や変質幅などの詳細な亀裂データを取得した。開口性の有無については、コア観察においてコアが分離するものを開口亀裂であると判定した。

当試験場周辺の亀裂は、複数の構造運動や熱水活動に伴う鉱物充填や熱水変質を繰り返し受けていることが地質調査から明らかとなっている。また、別途実施した統計分析結果によれば、本エリア内の亀裂の透水性は、熱水変質度あるいは充填鉱物の幅と相関が強く、過去の熱水活動時に水みちとなった、規模の大きな亀裂が、現在も水みち形成に寄与しているものと考えられる。

各ボーリング孔では、亀裂観察の後、流量検層（区間流量測定）を行い、間隙水圧と排水量の関係から1m区間毎の透水量係数を算定

した。その後、マルチパッカーを設置して水圧分布を定常観測した。次の新規孔の掘削時には、掘削が透水性亀裂に達した時の排水によって生じる水圧低下を観測した。その測定結果の一例を図-2に示す。なお、パッカー区間名は、孔名-北側からの通し番号で表示している。図中の水圧低下を生じた掘削深度から掘削孔内の透水性亀裂の存在深度を特定するとともに、他孔のパッカー区間への連結性を明らかにした。一例として、KH-21孔掘削時に水圧応答の生じた箇所ならびに経路を図-8(a)に示す。このような削孔時の水圧観測は、全てのボーリング孔掘削時において実施した。

以上の観測の結果、水圧分布や水圧応答経路から、当エリア内は水理的な干渉の乏しい7つの独立したゾーン（水理学的コンパートメント）に分けられることが明らかとなった²⁾（図-3）。隣接するゾーン間の水圧差が1MPa以上の場合も観測されており、一部の例外を除き、水圧応答はそれぞれのゾーン内部でのみ生じている。

削孔時の水圧応答観測結果により、掘削孔内においては既存孔へ水理的につながっている亀裂の位置を決定することが可能であるが、一方の観測孔では、水圧応答があったパッカー区間内に複数の亀裂が存在しており、その内のどの亀裂が掘削孔と連結しているかの情報がない。したがって、地質的あるいは幾何学的な基準に基づき、水圧応答結果を満足するような透水性亀裂の連結構造を推定する必要がある。

このような推定は、通常、地質技術者の経験的な判断により行われることが多く、定量的なもしくは一般的な指標や方法がないため、技術者毎に結果が異なる可能性がある。そこで、亀裂の地質的特徴の類似性を定量化し、亀裂面相互の幾何学的関係と合わせた客観的な基準により亀裂の連続性を推定した。

3. 亀裂連続性の推定

3.1 推定方法

地質技術者による本エリア内の亀裂の連結性の推定結果を図-4に示す。この推定では、流量検層時の湧水位置や掘削時の水圧応答位置などの水理的な情報、および、亀裂の方位、開口の有無、変質度

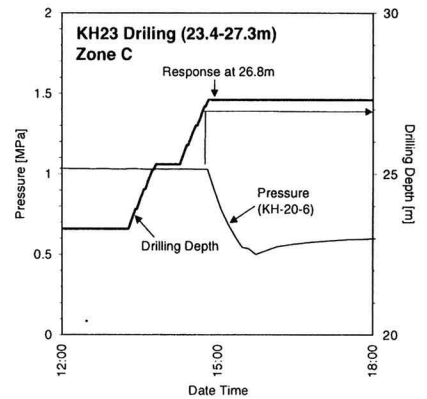


図-2 削孔時水圧応答観測結果の一例

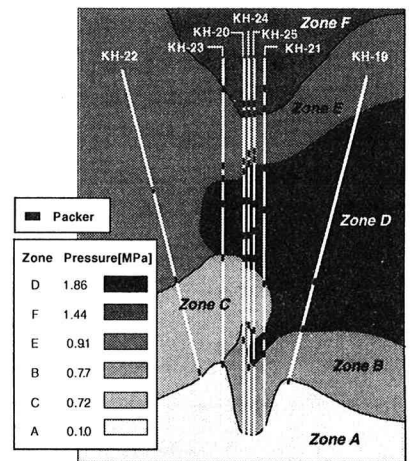


図-3 コンパートメント構造と水圧分布

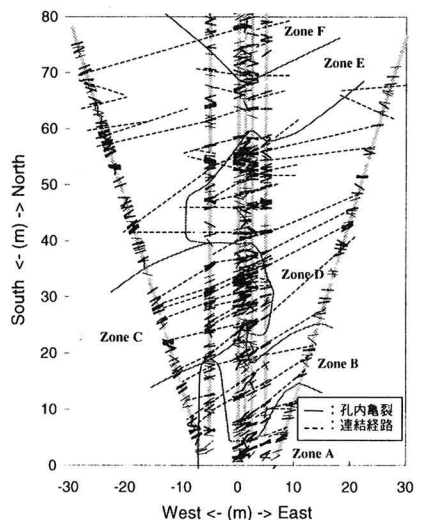


図-4 地質技術者による連結結果

や充填鉱物の幅などの地質情報を総合的に判断したものである。しかしながら、膨大な数の亀裂の中から連続性を推定する作業には多大な労力を必要とし、また、地質技術者の直感的な判断を重視しているため、定量的な意味で連続性の判断基準が明確でない。

ここでは、上記とは別のアプローチとして、判断基準を定量的に定義した数値的手法により連続性の推定を行う。手順としては、亀裂の方位や位置から、幾何学的に同一平面上にある可能性の高い候補亀裂を抽出した後、地質的特徴の類似性に基づいて最終的な亀裂を選定する。具体的には、図-5 に示すように、まず、隣接する2孔（ボーリング孔 A、B）を選び、ボーリング孔 A のある亀裂に対し、ボーリング孔 B の亀裂のうちから、候補亀裂を次の2つの幾何学的基準をともに満たす条件により複数抽出する。ここで、複数抽出するのは、亀裂面が必ずしも平面でないため、ある程度の許容差を考慮したためである。

基準1：亀裂面の法線ベクトルの方位差 $< d\theta$ 、

基準2：亀裂面の延長位置の深度差 $< \epsilon \times L$

ここに、 L =孔間距離[m]であり、 ϵ は孔間距離1 m当たりの許容深度差[m/m]である。今回は $d\theta=20^\circ$ 、 $\epsilon=0.05$ [m/m]とした。次に、候補亀裂の中で、次式で定義される類似性距離 D を最小とする亀裂を最終的な連結先に決定した。

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (a_{ki} - a_{kj})^2}$$

ここに、 D_{ij} は i 番目の亀裂と j 番目の亀裂の類似性距離であり、 a_k は k 番目の地質パラメータを表す。地質パラメータとしては、亀裂幅などの定量的なデータと、変質、風化などの定性的なデータに分けられる。後者について

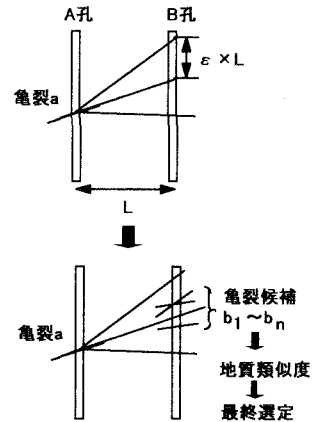
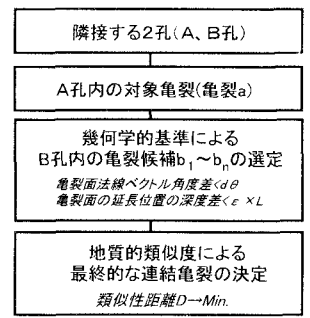


図-5 亀裂連結操作の流れ

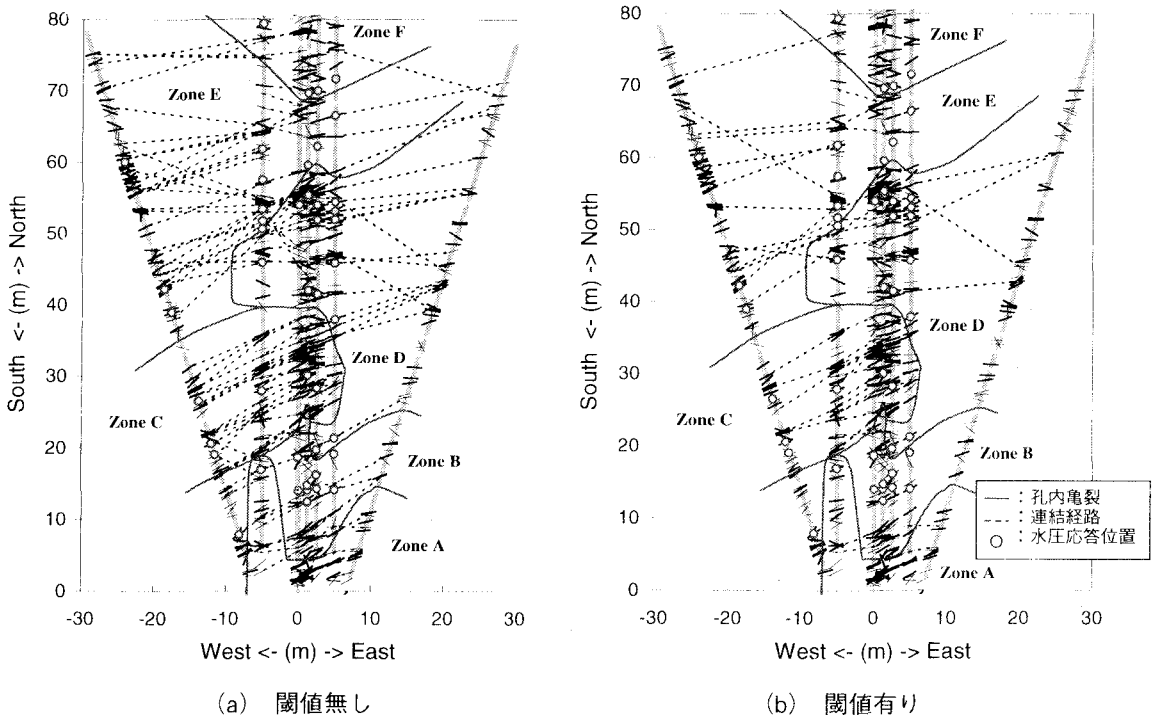


図-6 提案した手法による亀裂の連結結果

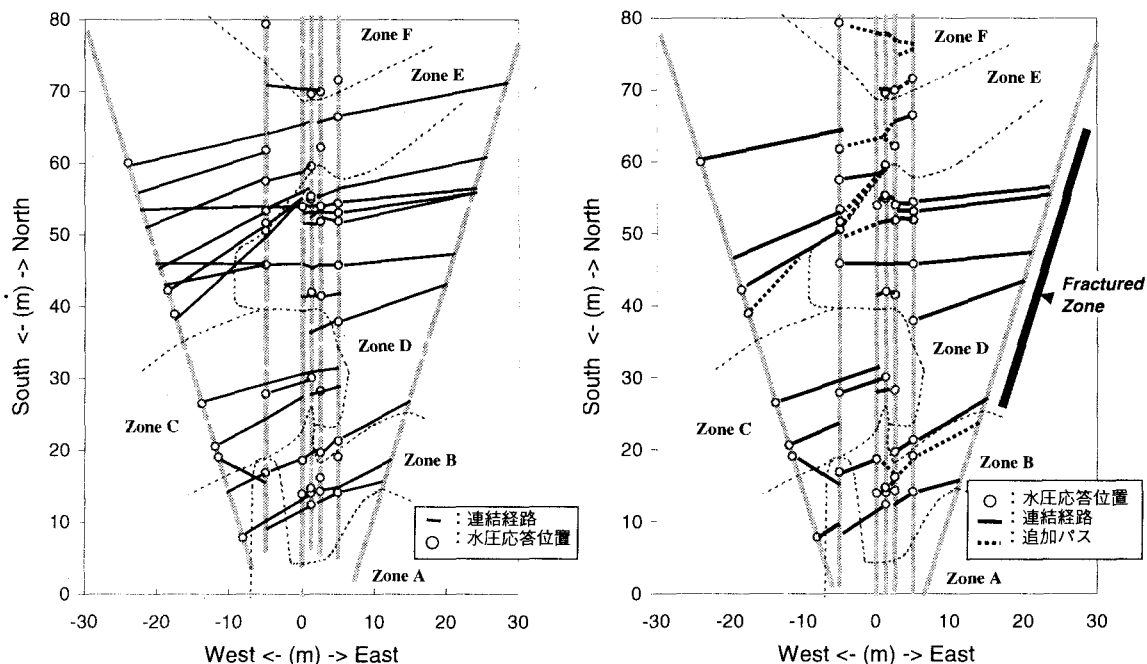
ては、変質度などのランク順に数値を割り振ることで定量化する。各地質パラメータの平均値が異なるため、単純に差をとると平均値による重み付けが生じる。そこで、各パラメータの分布の平均が0、標準偏差が1になるように正規化する。

今回は、亀裂の水理的な連続性の把握を目的としているので、開口亀裂のみを対象とした。地質パラメータとして、充填鉱物幅、変質幅、変質度を対象とした。変質度は、新鮮、微弱変質、弱変質、中変質、強変質、全体変質の6段階に分類し、各ランクに対して0～5の値を割り当てた後、正規化した値を用いた。

3.2 推定結果

図-6 (a)に連結結果を示す。図中の破線で示したのが推定した連続性である。深度 40m 以浅では、NE 系の亀裂の連続性が卓越しているが、深度約 40m 以深では、NW 系の連続性が増加している。特に、D、E ゾーンの内においては、NW 系と NE 系の連続した亀裂が共存することにより、ゾーン内部における亀裂相互の連続性が良くなる傾向が見受けられる。また、C ゾーンと E ゾーンの境界や C ゾーンと D ゾーンの東側境界など、コンパートメントの境界部では連続性を有する亀裂が少ない。すなわち、亀裂の連続性の推定結果は、水压観測から示されたコンパートメント構造と整合的である。これを図-4 の地質技術者による推定結果と比較すると、図-4 の経路のうちの 70%程度が図-6(a)の経路と一致した。すなわち、本手法の連結結果が地質技術者による推定結果の多くを包含しており、両者がある程度対応していると言える。

上記の連結操作では、類似性距離が最小であれば、その絶対値に関わらず連結した。次に、類似性距離に閾値を設けて、閾値よりも距離が大きい場合には連結を行わない操作を試みた。その結果の一例として、地質類似性距離の閾値を $\sqrt{3}$ に設定した場合を図-6(b)に示す。これは、各パラメータについて同時に1 σ (=1)の差異を許容した条件である。この制約条件の付加によってコンパートメント境界にまたがるパスがさらに取り除かれていることが注目される。すなわち、地質的な類似度の高い亀裂を選ぶことによって、水理的に連続性の高い亀裂が抽出されたと考えられる。



(a) 透水性亀裂と連結する構造の抽出

(b) 水みち亀裂構造

図-7 水みち亀裂構造の推定結果

4. 水圧応答観測データを用いた水みち亀裂構造の推定

一般に、連結性の高い開口亀裂は水みちを形成する可能性が高い。ここでは、先に推定した開口亀裂の連結構造を、削孔時の水圧応答観測により求めた透水性亀裂の位置や水圧応答の経路と比較し、本手法の妥当性を検討した。図-6 (a)中に、削孔時に水圧低下の生じた位置（透水性亀裂位置）を○で示した。図から、透水性亀裂位置には連結性の高い亀裂が存在しており、孤立した亀裂が存在する場合は少ない、つまり、水圧応答には、連結が推定される開口亀裂群が関与していることが分かる。

図-6 (a)の構造中から、○の透水性亀裂と連結する亀裂群を抽出した結果を図-7 (a)に示す。しかし、この構造では水圧応答の経路までは十分に説明できない。それは、少数ではあるが、a) コンパートメント間にまたがる連結があること、b) 水圧応答位置の亀裂に他孔との連結が無いものがあること、等による。各々の理由として、a) 亀裂として連続していても亀裂面内の充填物による閉鎖あるいは開口幅の減少による不透水部が存在し、水理的な連結性が失われたこと、b) ボーリング孔間にコア観察で捉えられていない未知の亀裂構造が存在すること、が考えられる。

そこで、観測された水圧応答経路を制約条件として、図-7 (a)の連結構造から、応答の有無に応じて経路を除去または付加し、水みち亀裂構造を推定した結果を図-7(b)に示す。ここで、KH-19 孔のDゾーンは、全ての水圧観測を通じて、常に同時に応答しており、相互の連結性の高い亀裂ゾーンとなっていると推定した。

この水みち亀裂構造モデルの内部に実際の掘削と同じ配置でボーリング孔とパッカーを設定し、掘削時に生じる水圧応答経路を求めた結果の一例を図-8(b)に示す。ここでは、ボーリング孔内を通じて応答する場合も含めて考慮した（図中の破線）。実測結果（図-8(a)）と比較すると、モデルにより、実際に生じた応答の90%程度（モデルと観測との一致経路数/全観測経路数）が再現されている。一部再現できない応答経路が存在するが、その理由としては、3次元的に迂回する経路は2次元モデルでは表現できないことや、モデルでは応答の有無だけを考えているのに対して、観測では微小な水圧応答を捉えきれない場合があること、などが挙げられる。後者の場合、図-8中のモデルの応答(b)は観測の応答(a)を包含したものとなっていると考えられる。

このように、本手法で地質データから推定した連結構造を水理データから得られる拘束条件と対比することによって、精度の高い水理地質構造モデルの作成が可能となるものと考えられる。

5. おわりに

本文では、地質量の類似性に基づき亀裂の連続性を数値的に推定する手法について述べ、実際の岩盤亀裂データに適用した。その結果、推定した亀裂構造の形態は、水圧観測から示される水理構造（コンパートメント）と整合的であり、地質技術者による推定結果とも対応していることが分かった。この連結構造を基に、削孔時の水圧応答観測結果に基づいて水みち亀裂構造を作成した。その結果、地質情報が2次元的事であること等の限界があるものの、観察された水圧応答経路をほぼ再現できることが分かった。

今回のように詳細な亀裂・水理データが非常に狭い領域で得られることは希であるが、同様のアプローチは、より広域の場合や、3次元のモデル化についても適用可能と考えられるので、今後検討していく所存である。

参考文献

- 1) 澤田淳、内田雅大、仙波毅、下茂道人、トーマスドー：ボーリング削孔時の水理応答観測による透水性割れ目調査、第27回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.186-190, 1996.
- 2) Shimo, M., Yamamoto H., Uchida M., Sawada A., Doe, T. W., Takahara Y., In-situ test on fluid flow and mass transport properties of fractured rocks, Proc. of 9th. ISRM Congress, Vol. 2, pp.1401-1404, 1999.

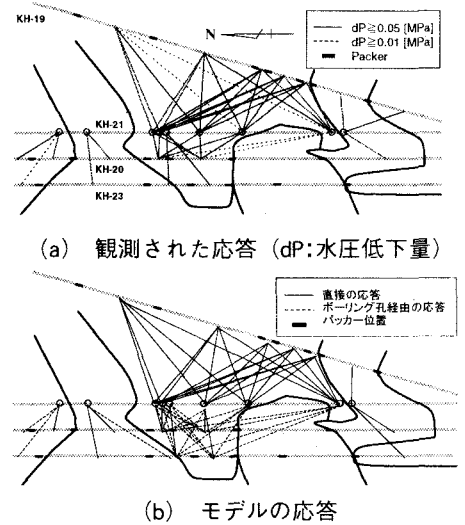


図-8 水圧応答経路の比較 (KH-21 削孔時)