

(41) 神岡岩盤試験場での割れ目系特性調査と

クロスホール透水試験へのDon-Chanモデルの適用

Fracture characterization in Kamioka underground laboratory and analysis of cross-hole hydraulic tests using Don-Chan

田中達也*・三上哲司*・渡辺邦夫**・三枝博光***

Tatsuya TANAKA, Tetsuji MIKAMI, Kunio WATANABE, Hiromitsu SAEGUSA

Ground water flow in a fractured rock mass is dominated by fracture characteristics. Realistic hydrogeological model should be constructed from detailed investigation of fracture geometry. In this modelling process, fracture or channel in the fracture system is a promising candidate of seepage way. In recent, fracture and fracture geometry have been extensively investigated in the field of nuclear waste disposal. It was pointed out that fracture zone, which is one of the main candidates of seepage way, can be classified into two simple geostructural features, that is, Step and Splay. The first part of this report will describe the result of fracture characterization carried out in Kamioka underground laboratory. Some splays, steps and intersections between fractures were selected as the seepage ways. Then, the analysis of cross-hole hydraulic tests carried out in this laboratory was conducted using three-dimensional channel network model named Don-Chan.

1. はじめに

不連続性岩盤の浸透流は、主要な透水経路となる割れ目系の形態に大きく影響される。そのため、対象岩盤の浸透流を解析・評価するためには、岩盤内に存在する割れ目系の性状・分布を把握し、水理地質構造をモデル化する必要がある。浸透流解析の従来の主要なコードでは、空洞壁面のスキャンライン調査やBTV(ボアホールテレビ)観察で得られたすべての割れ目について、その方向・傾斜・開口幅・半トレース長などの幾何学的な情報を統計的に処理することによりそのモデル化を行っている。これは対象岩盤に複雑かつ多数存在するすべての割れ目の中から、浸透経路となる割れ目の選択が困難であることによる。しかしながら、近年ヨーロッパにおける構造地質的な研究に関連して、割れ目系そのものの持つ規則性や、割れ目系の中に発達する高透水路(チャンネル)の規則性を見つける試みがなされている^{1) 2) 3)}。

本報告は、大林組神岡岩盤試験場にて実施されたクロスホール透水試験領域周辺において、割れ目系の特性調査を実施し、対象領域の割れ目系および高透水路(チャンネル)の評価を試みたものである。そして、チャンネル構造をモデル化に直接反映するDon-Chanモデルを用いて予察的なモデル化を行い、当領域で実施されたクロスホール透水試験をシミュレートした。

2. 割れ目系の規則性とステップ・スプレイ構造

割れ目系の規則性の構造地質的な検討は、高レベル放射性廃棄物処分場のサイト特性調査手法の開発・研究に関連して積極的に進められている。その最終的な目的は、多数の割れ目系が存在するある固有のサイト

* 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第二部

** 正会員 埼玉大学工学部

*** 学生会員 埼玉大学工学部

の、どの位置に、どのような形態で破碎度の高い割れ目系あるいはチャネルが存在しているかの把握である。従来までの研究により、以下のことが明らかとなっている。

- ① 地下水の経路となりうるのは、近年形成された新しい割れ目か、その時期に再動 (Reactivation) した古い割れ目である¹⁾。
- ② 割れ目系はその形成時期・深度により、ダクタイルな割れ目とブリットルの割れ目に分類でき、地下浅部でより新しい時期に形成されたブリットル割れ目が主要な地下水の浸透経路となる²⁾。

これらの研究結果により、対象岩盤における割れ目調査 (壁面調査・地表踏査) 時には、従来の幾何学的な情報に加えて、割れ目系の構造形態に関する情報の取得が重要視されている。Mazurek らは、対象岩盤の割れ目系が一般的な形態として、図-1(a) に示すステップ構造とスプレイ構造を有すると提案し、スウェーデン・エスポ HRL (ハートロックボラリ) にて割れ目系の調査を実施している³⁾。ここでは、個々の割れ目を、単一割れ目となる Master fracture (図-1(b))、割れ目の端部となる Simple fracture (図-1(c))、破碎帯部を形成する Complex fracture (図-1(d)) という名称により分類している。そして、従来平面 (2次元) 的に広がると考えられている Fracture zone (割れ目集中部) が、線的に伸びるステップ構造であると解釈している。

また、杉村らは割れ目系の構造と水みちとの関係を調査する目的で風化花崗岩の調査を実施し、割れ目系の交差部やステップ・スプレイ構造部がマサ土化し易い部分であることを示した⁴⁾。岩盤の風化過程では水が通り易い部分から岩盤が変質していく性質があり、変質が激しい部分は概略的に水の通り道と考えられる。

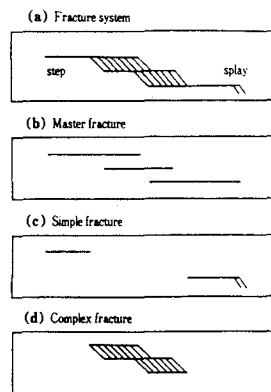


図-1 割れ目の一般的形状と各部名称

3. 神岡岩盤試験場におけるクロスホール透水試験と割れ目系特性調査

クロスホール透水試験は、3本の平行なボーリング孔を用いて神岡岩盤試験場で実施された。図-2に神岡岩盤試験場とクロスホール透水試験実施孔の位置を示す。3本のボーリング孔は長さ13mであり、坑道底盤から80度の傾斜で下向きに掘削されている。割れ目系特性調査はこれら3本のボーリング孔を中心として、縦6m・横10mの底盤および周辺の側壁と天盤で実施した。

割れ目系の特性調査では、対象岩盤の割れ目系の性状を把握することが重要である。そのためには、単に対象領域 (例えば底盤では6x10m領域) の割れ目の一つ一つの走行や傾斜を調べるだけではなく、割れ目相互のずれの方向や変位に注目して、より広い領域における割れ目系の構造を考慮する必要がある。そこで、まず坑道天盤と底盤に見られる割れ目系についてスケッチを行った。図-3にその結果を示す。天盤と底盤は約3m隔たっている。図から天盤においては、NW系とNNE系の割れ目系が卓越していることがわかる。また、いづれの系統の割れ目系も一つ一つ割れ目は短いが連結しており、小規模ではあるがいわゆるフラクチャーゾーン (断層帯) を形成していることがわかる。一方、底盤を見ると断層帯を形成するといった性質は大局的には認められるものの、以下の2点において天盤と異なる。

- ① NNE系の割れ目が天盤部に比べて多い。
- ② EW系の割れ目が数多く見られる。

これらの性質は、NNE系やEW系の割れ目系の中には、3m離れた底盤と天盤をつながないような短い割れ目が多いことを示している。しかしながら、天盤で見られた断層帯や枝分かれ構造を持った割れ目系については、底盤でもその延長をはっきりと確認でき、それらの連続性が良いことが分かる。図-4に底盤の割れ目系のスケッチを示す。特に割れ目が集中している地点 (合計30地点) を図中にプロットしている。図よ

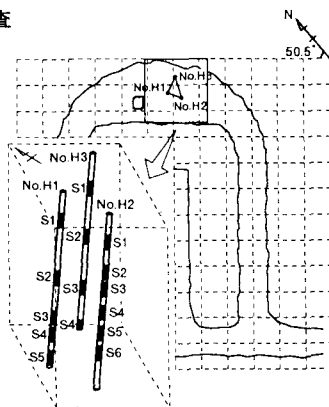


図-2 ボーリング孔の配置と試験領域

り特に NW 系、NNE 系の割れ目が顕著な断層帯を形成していることが分かる。EW 系の割れ目系については、底盤では数多くはつきりとしているため過度に評価しがちであるが、全体的な構造から見ると、特別大きなものとは言えない。評価においては大きな構造の調査・把握が重要であることが分かる。

次に、破碎度が高い構造の調査を目的として、特に割れ目が集中している地点の構造を調査した。図中手前の NW 系の断層帯に沿って、1～11までの割れ目集中帯が並んでいることが分かる。また、他の NW 系、NNE 系の断層帯上にも多くの点が並んでいる。これらの割れ目集中帯と、その構造の規則性を調べるため、各地点において詳細な調査を試みた。図-5に NW 系断層帯上にみられる11地点での詳細なスケッチと NW 系断層帯の構造の模式図を示す。図より NW 系の断層帯は図中で示すせん断帯、あるいは9地点に見られるステップ構造、10, 11地点で見られるスプレィ構造を持ちながら進んでいることが分かる。ここで、9, 10, 11地点はステップ・スプレィ構造というもともと破碎度の高い地点であり、3, 4, 6, 8地点はせん断帯であり、小さい割れ目が定方向に並んでいるゾーンとなる。一方、1, 2, 8地点はとくにこれらの構造を持たず、それぞれ余り大きくない割れ目との交差部、単一の大きな割れ目との交差部、せん断帯との交差部となり、その集中帯の大きさは、断層帯の構造よりも交差する割れ目のスケールに大きく影響されることが分かる。同様にその他の地点についての調査を行ったところ、NW 系と NNE 系の交差部 (12, 13, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 27, 16, 20, 23, 26地点)、スプレィ構造 (14, 15, 28, 29地点) および NNE 系の断層帯 (17地点) となる。

以上の結果により、本調査対象領域の割れ目集中帯と考えられる地点は、その破碎度についてはある程度の幅を持つものの、簡単な構造的な規則性をもって表すことが可能であることが分かる。これらのことは、対象岩盤の破碎度の高い地点あるいはそのような地点を含む割れ目の選択が、割れ目系の構造の規則性を調査・把握することにより、可能であることを示唆している。

4. Don-Chan モデルによるクロスホール透水試験の評価

4・1 Don-Chan モデルの考え方

前述した割れ目系の特性調査結果から、高透水路と予想される破碎度の高い構造はステップやスプレィ、また割れ目相互の交差部に位置しており、割れ目面上に1次元的に分布することがわかる。図-6にステップ構造と割れ目交差部の3次元的な模式図を示す。このことは、従来より割れ目内の流れが一様ではなく、割れ目面内の特定の部分を経路とする(チャンネリング)考え方⁵⁾と一致しており、対象岩盤の割れ目系を再現するモデル化においても、その位置・その形態が明らかであればそれらの情報を取り入れることが必要で

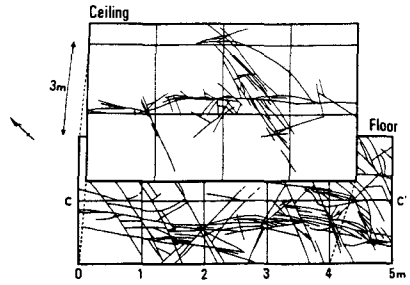


図-3 坑道天井と底盤の割れ目系

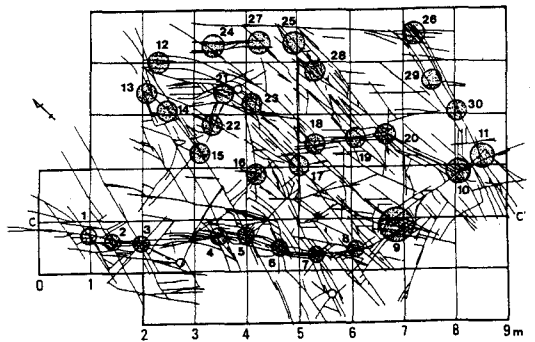


図-4 坑道底盤の割れ目系と割れ目集中地点

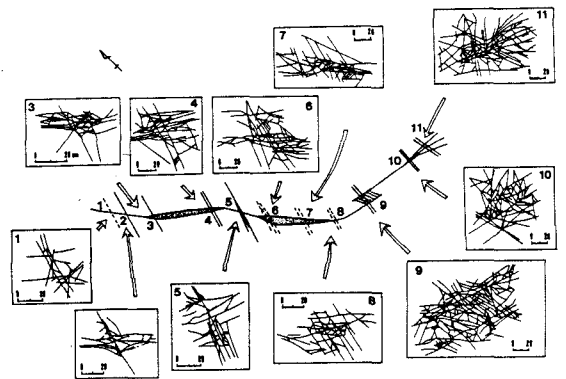


図-5 断層帯上に並ぶ11個の割れ目集中地点と解釈

あると考える。もちろん、地質的な情報には不確定性を伴うが、それらの情報を取り入れた解析結果と地質的な調査結果を比較することにより、地質量をパラメータとしたモデル化(キャリブレーション)が可能であると考えている。そのため、Don-Chan モデルは対象岩盤に発達する高透水路(チャンネル)を可能な限り直接再現することを目的としている⁶⁾。このモデルの特徴は、対象岩盤の割れ目をその位置・方向をデータとして領域内に入力し、それらの割れ目面上に直接高透水路となるチャンネルを再現することである。それらチャンネル内の流れは、3次元管路網としてダルシー則と連続式を用いて解析される。チャンネルは、割れ目面内に任意の間隔で2方向、そして入力した割れ目の交差部に再現するとしている。

また、このモデルでは、管路交点となる各節点において貯留量(Sf)を設定することにより、時間項を考慮した非定常解析を実施することができる⁷⁾。クロスホール透水試験のシミュレートでは、定常解析後に注入区間に交差する割れ目上のチャンネルの交点に注水量を加えることにより、観測区間の経時圧力変動を解析するとしている。

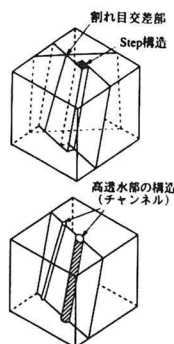


図-6 ステップ構造と割れ目交差部の模式図

4・2 クロスホール透水試験への適用

今回モデルを適用した解析領域は、3本のボーリング孔(H1～H3孔)口元の重心を上面の中心とした12x12x12mの立方体領域である。各ボーリング孔は事前のコア観察結果等により、長さ1mの注入・観測区間(S1～S6)に分けられている(図-2参照)。クロスホール透水試験はH1～H3孔のS2区間を注入区間とし、合計5回実施された。

入力する割れ目は、図-4に示した坑道底盤上の高透水路を含む割れ目16面と3本のボーリング孔で実施したBTV観察で開口(幅5mm以上)と認められた割れ目11面の合計27面とした。図-7に入力した割れ目の分布を示す。また、図-8にこれらの割れ目内に再現したチャンネル網を示す。本解析ではチャンネル間隔は1mで一定とし、その方向は面内に90度と180度の2方向と仮定した。チャンネル交点である節点総数は、約16,000節点となった。境界条件については、クロスホール透水試験前に実施した各区間での間隙水圧測定結果から設定した。各チャンネルに与える断面積は 0.01m^2 と一定とした。また、各チャンネルの透水量係数(断面積x透水係数)は、クロスホール透水試験前に実施された単孔式透水試験により得られた透水係数値を参考として、それぞれの観測区間に交差する割れ目上のチャンネルについては、試験により得られた値、それ以外の割れ目内のチャンネルについては、全区間で得られた計測値の対数平均値を便宜的に与えた。

表-1に定常解析により求めたクロスホール試験シミュレート前の各観測区間の圧力水頭の解析値と試験による計測値を示す。表より、間隙水圧が静水圧分布に近い観測区間においては、概ね一致しているものの、分布が複雑なH2孔S6区間、H3孔S4区間については

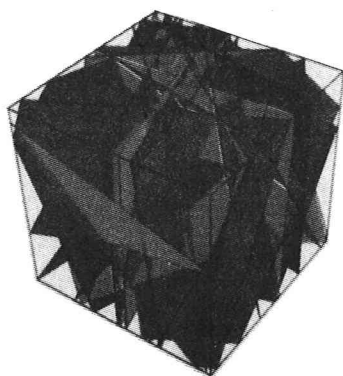


図-7 再現した割れ目分布図

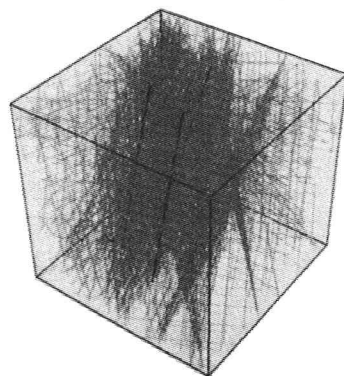


図-8 再現したチャンネル網

その再現がなされていない結果となることが分かる。

非定常解析ではH1孔S2区間での注水を模擬し(注水量 100cc/min)、観測区間(H2孔S2, S4, S6、H3孔S2, S3, S4区間)の圧力上昇をシミュレートした。ここで、解析一結果出力はPC(パーソナルコンピュータ, 90MHz Pentium)を用いて実施可能であり、要する時間は約1.5時間である。図-9(a)にH2孔、(b)にH3孔の圧力応

答曲線の計測値と解析値を示す。このとき、設定した貯留量(Sf)は $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ である。H2孔についてはその応答の順序、初期応答時間については概ね一致しているもののH2孔の各区間の最終圧力上昇量、H3孔については初期応答時間も含めて一致しない結果となる。H2孔 S3, S4区間の最終圧力上昇量はS2区間よりも1.2m程度大きく、実際には注水区間であるH1孔 S2区間からH2孔 S2区間への流れの経路と、H2孔 S3, S4区間の流れの経路の透水性には、大きな違いがあることを示している。これらの不一致は、定常解析結果からも分かるように境界条件の複雑さを原因とするものもあるが、その最も大きな要因は各チャンネルの断面積および透水係数の不一致によるものと考えられる。

表-1 各観測区間の圧力水頭(試験値と解析値)

区間	区間深度 (m)	間隙水圧 (試験値(m))	圧力水頭 (解析値(m))
H1-S1	3.0	1.8	1.0
H1-S2	6.3	5.9	5.9
H1-S3	9.3	8.6	8.9
H1-S4	10.5	11.9	8.9
H1-S5	12.3	11.7	10.9
H2-S1	2.0	1.7	1.9
H2-S2	4.3	3.8	4.9
H2-S3	5.5	6.6	5.0
H2-S4	7.3	7.1	6.8
H2-S5	8.8	8.4	8.2
H2-S6	10.3	6.9	9.7
H3-S1	2.5	2.3	2.9
H3-S2	6.1	6.4	5.8
H3-S3	9.9	9.1	9.0
H3-S4	12.7	5.9	10.9

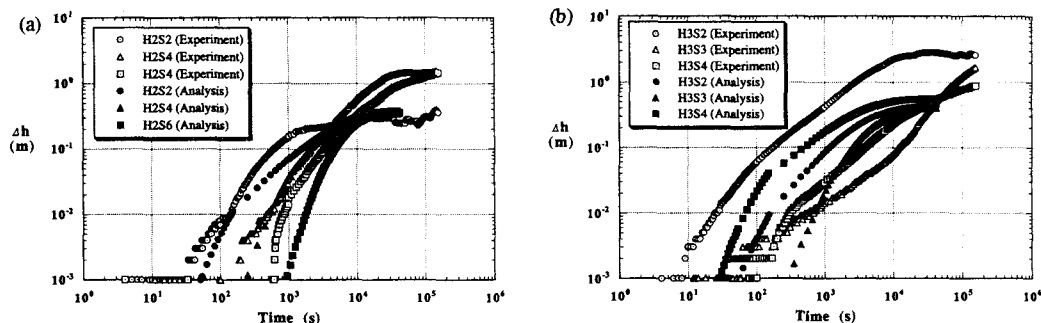


図-9 クロスホール透水試験時の圧力応答(試験値と解析値)

当クロスホール試験場周辺の割れ目系の特性調査結果からも示されているように、個々の割れ目集中帯の大きさは、それぞれの構造形態により大きく異なる。また、各チャンネルの透水係数についても今回は単孔式透水試験の結果を入力した参考値としており、現実的ではない。これらの定量的な評価は今後の課題である。しかしながら、断面積の評価については、割れ目集中帯の大きさの分布の把握により、ある程度定量的な値は決定できる。また、各チャンネルの透水係数についても、各区間における単孔式透水試験をモデルにおいてシミュレートすることにより、推定が可能と考えている。今後、クロスホール透水試験結果を用いたキャリブレーションと地質情報の定量的な評価を実施することにより、モデル化におけるチャンネルの入力物性値のリアリティを高めていく予定である。

5. まとめ

- ① 神岡岩盤試験場での割れ目系特性調査により、当試験場の割れ目集中帯(破砕度の高い地点)をステップ・スプレィ・割れ目交差部という簡単な構造で表現することができた。
- ② 高透水路と予想される割れ目集中帯の破砕度は幅をもって分布するが、構造的な規則性の調査により、ある程度分類が可能であると考えられる。
- ③ Don-Chan モデルによるクロスホール透水試験のシミュレートにより、流れの経路(チャンネル)を限定した透水性の評価が、定性的に可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Munier, R.: Four dimensional analysis of fracture at Aspo hard rock laboratory, Engineering Geology, Vol. 33, pp. 159~175, 1993.
- 2) Bossart, P., Mazurek, M.: Structural geology and water flow paths in the migration shear zone, TR91-12, NAGRA, pp. 1~55, 1991.
- 3) Mazurek, M., Bossart, P., Eliasson, T.: Classification and characterization of water conducting features at Aspo: Results of Phase 1 investigations, Progress Report 25-95-03, SKB, pp. 1~73, 1995.
- 4) 杉村他: ダム基礎の水みちネットワークモデル構築の試み, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム, 投稿, 1996.
- 5) 例えば, Abelin, H., Birgersson, L., Widen, H., Neretnieks, I.: Channeling experiment, Stripa project TR90-13, 1990c.
- 6) 渡辺他: 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発(その2), 応用地質, Vol. 35, pp. 132~142, 1994.
- 7) 田中他: Don-Chan モデルを用いた非常定浸透流解析の試み, 第50回年次学術講演会, III -A, pp. 236-237, 1995.