

ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み

杉村淑人¹・森田豊²・渡辺邦夫³

¹正会員 工修 水資源開発公団 試験研究所 (〒338 浦和市大字神田936)

²正会員 アイドール・エンジニアリング(株) (〒166 杉並区梅里1-7-7)

³正会員 工博 埼玉大学 工学部 (〒338 浦和市下大久保255)

本論文は、筆者らが提案するダム基礎岩盤の浸透流解析のための水みちネットワークモデルの構築を目的とした割れ目系岩盤の水みち構造の抽出について論述したものである。まず、各種の水理調査法を水みち構造調査法として総合化し、この調査法をモデルサイトとして選定した風化花崗岩ダムサイトに適用した結果を述べる。特に水理地質構造の視点から既往地質調査結果を見直し、また掘削面の割れ目系構造調査、孔間透水試験等を加えて、当該岩盤中の水みちの構造の把握が可能であることを示した。これらの調査結果に基づきモデルサイトの水みち構造モデルの構築を試みた。

Key Words : fractured rock, hydrogeological structure, channelling, cross hole test, groundwater

1. 序論

国際大ダム会議の報告¹⁾によれば、1900年から1965年の間に発生したダムの事故は267を数えている。その約1/3が基礎岩盤の問題に起因しており、その大半が浸透流に関係するものとみられる。近年わが国では、良好な基礎岩盤を有するダムサイトが少なくなり、浸透流の制御の視点から見て問題の多いサイトにダム基礎を求めざるを得ない状況が顕在化している。このような状況にあって、ダム基礎の浸透流を的確に把握し評価する技術の確立が従前にも増して重要になっている。

ダム基礎岩盤中の地下水の流れの評価に当たっては、次の2点を総合的に把握することが重要である。その第1は、地下水が流れる「場」の性質を的確に捉えることである。第2はその流れが層流か乱流かといった地下水流れの水理機構を把握することである。後者についてはあまり検討されていないが、例えば乱流状態で計測すれば見掛け上透水性を小さく評価し、これにより遮水対策が根本的に異なってくる²⁾。上記二つの問題は共に重要であるが、特に前者が未解明で極めて困難な問題となっており、実務レベルでも重要度が高い。

本論文では、割れ目 (Fracture) を断層、節理などの破断面を総称した意味で用いる。岩盤中の地下水の流れは、割れ目系に大きく支配される。従って、

前述した前者の問題については、直接には目に見えない岩盤中の無数の割れ目の中から、主要な流れの経路となる水みち (Channel) の分布、その透水性、地下水の流動状況を的確に把握・評価し、これをどのようにモデル化するか最大の課題となる。

ダム技術の分野において、浸透流の把握と評価はダムの機能と安全性に直接係わる重要な課題である。しかし、これまでこのような視点からの研究は、その困難性のゆえにほとんど取り組まれていない。特に、上記の研究課題の中で最も重要な位置を占めると考えられる水みちの取り出しに関する研究は、その必要性は指摘されるものの皆無に近いと思われる。また、割れ目系岩盤を対象としたダム基礎の浸透流解析手法についても、均質多孔性媒体を前提とする有限要素法の適用には、技術上まだ多くの問題が指摘されている³⁾。しかしながら、これに代わる手法が開発されていない現状にある。

近年、岩盤の割れ目系の規則性を調べてそれを一般的な形で定式化する研究が、高レベル放射性廃棄物処理分野の研究に関連して国際的に進められている^{4), 5), 6)}。ダム基礎岩盤は、これらの研究の多くが対象としている地下深部の古い岩盤には見られない、以下のような特徴を有する。まず、ダム基礎岩盤の対象となる地質は広範で、一般に第四紀以前のあらゆる地質が問題となる。また地表付近が対象となるため、場の性質として緩み、風化を伴い、透水

性も地下深部に比べて数オーダー高く、水理機構については層流のみならず乱流も対象となり、場合によっては浸透破壊現象も扱う必要が生じる。しかしながら、割れ目の規則性を取り出すという視点から見れば、ダム基礎岩盤も地下深部のそれと同様に規則性を保持しており、この点両者は同じアプローチが可能であると考えられる。

筆者らは、割れ目系岩盤を対象として割れ目系の持つ規則性、あるいは割れ目系に発達する水みち系の規則性を把握・評価し、これを水みちネットワークモデルによりモデル化し、浸透流解析を行う手法を提案している^{7), 8), 9), 10)}。

本論文は、水みちネットワークモデルの構築において重要な割れ目系岩盤の水みち構造の抽出について論述するものである。まず、割れ目系岩盤を対象として、各種の水理地質調査法を水みち構造調査法として総合化した上で、この調査法をモデルサイトとして選定した風化花崗岩サイトに適用した。特に水理地質構造の視点からの既往の地質調査結果を見直し、これに掘削面の割れ目系構造調査、孔内微流速検層、孔間透水試験等を加えて、水みち構造の抽出を試みる。最後にこれらの結果を基にモデルサイトの水みち構造モデルの構築を試みる。

2. 水理地質構造と水みち構造調査法

本論文では、ダムを対象とする水理地質構造を次のように定義する。「水理地質構造」とは、基礎岩盤および周辺地山の自然状態ならびにダム湛水後の地下水流れを支配するすべての地質あるいは地質構造上の要因を指すものである。水理地質構造は、対象となる場の局部あるいは全体の透水性や主要な水みち経路、遮水構造、地下水流動とその水理機構、浸透破壊抵抗性等の要素からなる。ダム築造上、特に配慮すべき水理地質構造は、①水みち、透水性、その地質的要因および流れの水理機構、②浸透流の流動を阻害する遮水構造、③浸透破壊とこれに対する安全性に係わる構造、の3点である。ここでは、①と②を水みち構造と定義し、その調査法を水みち構造調査法と呼ぶ。

水みちネットワークモデルは、図-1に示す手順で水みち構造モデルを基に構築する。水みち構造モデルは、地質構造調査、水みち構造調査および浸透破壊に関する構造調査（必要に応じて実施）を基に作成する。以下に、水みち構造調査法について述べる。

水みち構造調査法は、割れ目系構造調査、透水性・透水経路調査、地下水流動調査および地下水流

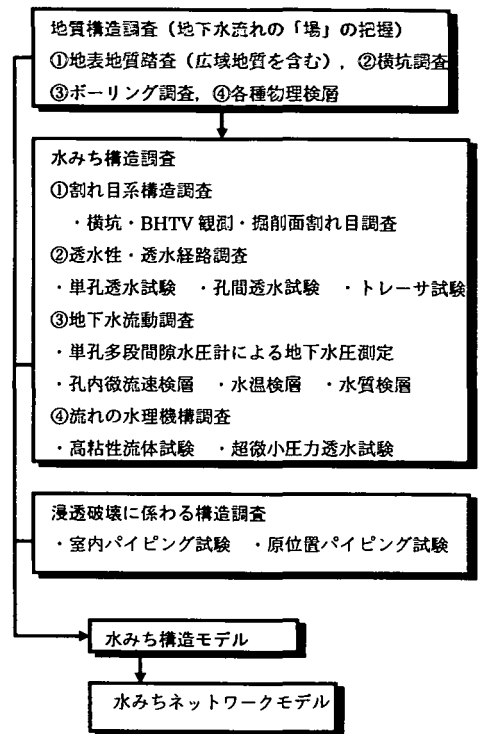


図-1 水みちネットワークモデル構築の流れと水みち構造調査の関係

れの水理機構調査から成る。ダムの水理地質調査においては、これまでこれらの調査は個別に行われ、総合化して水みち構造を明らかにするという視点での取り組みはあまり行われていない。ここでは、これらの調査を水みち構造把握という視点から、総合化して、水みち構造調査法とした。

(1) 割れ目系構造調査

割れ目系構造調査は、地質、地質構造、風化、変質、緩み等の視点から水みち構造や遮水構造を形成する割れ目系の構造を把握するものである。岩盤の割れ目には、地質と地質構造の持つ特性により様々な形態があり、水みちを特定するためにはその規則性を取り出すことが、キポイントとなると考える。横坑、ボーリング、ポアホールテレビ検層（以下、BHTV検層と呼ぶ）、掘削面の割れ目調査などの情報を基に、次に示す割れ目の要素の組合せ、特徴について分類し、割れ目系の形成過程等の検討を踏まえ、水みちとなると推定される割れ目系を抽出し、その空間分布を推定する。ISRM¹¹⁾の指針において

は、不連続面の幾何学的特性を表現する10個のパラメータが定義されているが、ここでは割れ目の要素として方向性、間隔、連結性、間隙幅、充填物に着目する。

(2) 透水性・透水経路調査

割れ目系構造が把握できたら、これらの割れ目系の透水性、水みちとしての連結性、遮水構造を把握する。調査法としては、単孔透水試験、孔間透水試験、孔内微流速検層、トレーサー試験などを組み合わせる。

(3) 地下水流動調査

自然状態および注水時の地下水流動状態を把握することを目的として実施するもので、単孔多段埋設式地下水圧測定システム¹²⁾、孔間透水試験時に多点間隙水圧計内蔵の多段パッカーシステムを利用した地下水圧測定、孔内微流速検層等の調査法を用いる。水温検層、水質検層も地下水の起源や岩盤内の滞留時間の分類を行うには有効な場合がある。

(4) 地下水流れの水理機構調査

割れ目系の構造如何によって、地下水の流れが乱流になることが懸念されるような場合は、割れ目系の層流・乱流抵抗則を把握する必要が生じる。調査法としては、渡辺ら¹³⁾、松本ら¹⁴⁾、岩本ら¹⁵⁾が提案している高粘性流体試験などを用いる。

3. 風化花崗岩サイトにおける水みち構造調査法の適用

ここでは、前述の水みち構造調査法のうち、割れ目系構造調査、透水性・透水経路調査、地下水流動調査を実際のサイトに適用し、ダム基礎岩盤の水みち構造を抽出することを試みる。

モデルサイトとして選定したHダムは、内帯の領家帯に属し、中央構造線の北方約20kmに位置し、花崗岩類と片麻岩類から成る領家複合岩類を基盤としている。調査対象エリアを以下に述べる調査目的により、図-2に示す全体をAとして、その部分領域をB、Cに区分した。

本論文では、Aエリアの水みち構造のモデル化を目標とする。まず、Aエリアの水理地質構造について大局的な視点から検討を行った結果を述べる。次に、Aエリアの中央部に近く、Aエリアの代表的な走向、傾斜を持つ割れ目が明瞭に発達しているBエリアについて、掘削面の割れ目系構造調査により、水みちとなる割れ目系の抽出と分類を行う。次に、

Cエリアにおいて、BHTV検層、孔内微流速検層、孔間透水試験等を実施し、水みちとして抽出した割れ目系の透水性、連結性の把握・評価を行う。最後に、これらの水みち構造調査結果を基にAエリアの水みち構造モデルの構築を試みる。

(1) 水理地質構造

Aエリアは、当ダムサイト左岸側の河床に向かって伸びるやせ尾根に位置している。地質調査として横坑7坑(総延長510m)、調査ボーリング35孔(総延長2,000m)、ルジオンテスト、ボーリング孔を利用した地下水位(孔内水位)調査が実施された。

図-2にはAエリアの掘削面以下の水理地質構造を模式図に示した。これは水理地質構造の視点から既往の地質調査結果の見直しを行い、後述する掘削面の割れ目系構造調査結果も加えて作成したものである。

地質は花崗岩と片麻岩から構成されている。花崗岩は中粒～細粒花崗閃緑岩質の様相を呈するものが主体で、領家帯の大局的な構造(ほぼEW方向)に調和的にへい入している。捕獲片麻岩体は、その片麻構造に調和的な方向に分布しており、図-2に示すように30°前後の傾斜で左岸からやや上流右岸に向けて差す傾向を示している。方向の走向を持つE-W系の川落ちの高角度断層系(F16)と低角度山差し断層系(F13)が存在する。さらに不連続面としての変位は明確でない、連続性のよくない雁行する低角度川落ちの節理帯が存在する。これらの節理帯は2系統に大別され、下位のものが図-2に示されている。上位の節理帯は同図の掘削線の上位に位置する(図-5、図-6参照)。ここでは、上位のものを節理帯C₁、下位のを節理帯C₂と呼ぶ。

図-3、図-4に、それぞれ左岸横坑側壁(ほとんど花崗岩)、全横坑の片麻岩の卓越節理の方向を測定し、統計処理した結果を示す。図中には計測した割れ目数も併記した。花崗岩の節理系のシステムは、N45° E90°(以下NE-SW系と呼ぶ)に極大集中を示し、第2次集中点としてN78° W80° S(以下E-W系と呼ぶ)のやせ尾根を上下流方向に切る系があり、第3次集中点としてN4° W84° Eが存在する。片麻岩の節理系システムはN50° W40° Nに極大集中を示し、この方向は片麻岩の片理構造に沿うものと一致する。また、掘削面の割れ目系調査から、これらの節理系以外に低角度のシーティングと思われる節理が発達していることが判っている。なお、図-2には、ここで述べた割れ目系のうち、連続性が10m程度以上のもの、割れ目の交線部や割れ目沿って風化が著しいもの、ステップ構造、スプレー構造を伴う

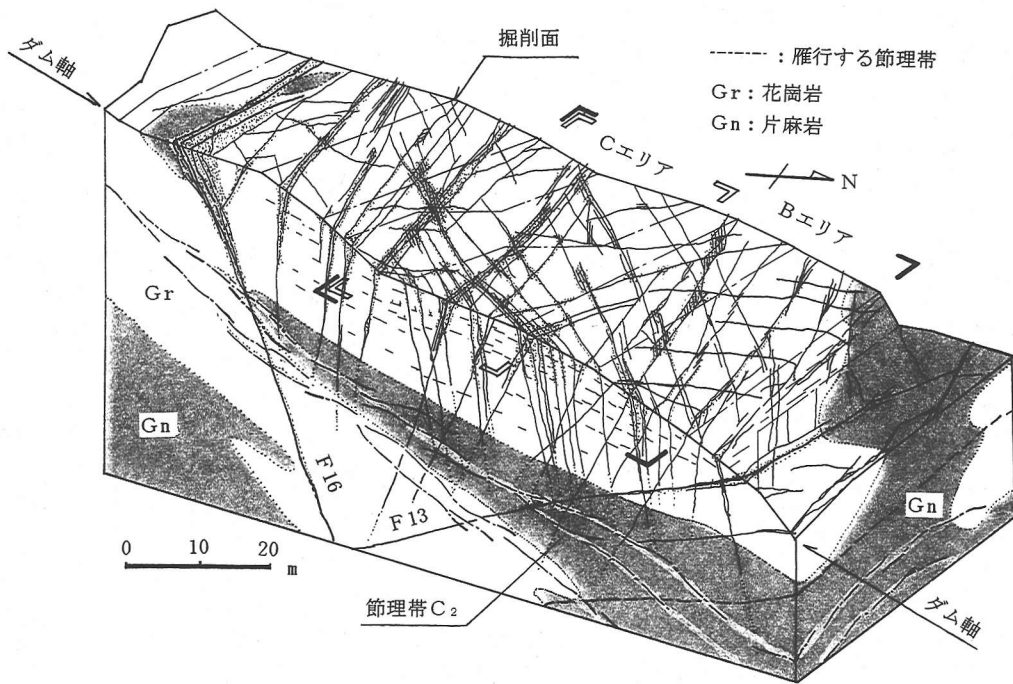


図-2 Aエリアの水理地質構造と細部調査対象エリア

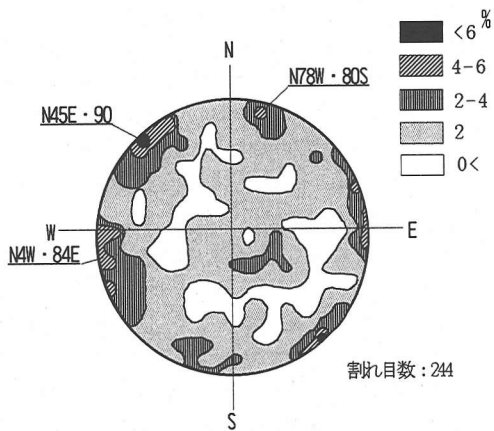


図-3 花崗岩割れ目系

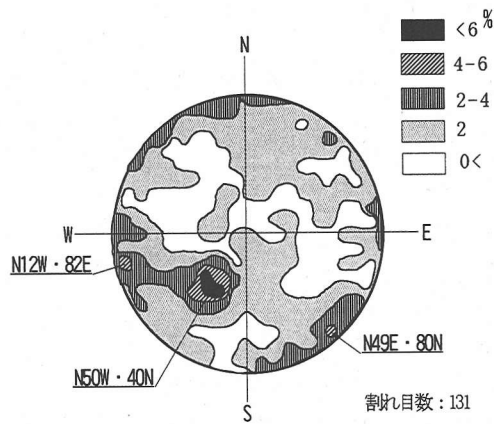


図-4 片麻岩割れ目系

ものを図示している。

図-5はAエリアの岩盤の風化構造を模式的に示したものである。左岸の岩体の緩みと風化の範囲に影響を与えている地質構造は、低角度川落ちの節理帯とF16であると考えられる。強マサ化・粘土化帯の下位の玉ネギ状風化帯の下部境界を節理帯C₂が位

置している。節理弛緩帯がその下位に存在し、深部になるに従って緩み・風化の程度が軽くなる。後述の透水性の分布状況から、節理帯C₂の上部部がこの緩み・風化の前線に影響を与えているものと考えられる。また、E-W系のような高角度節理沿いに局部的に風化が深部に及んでいる。

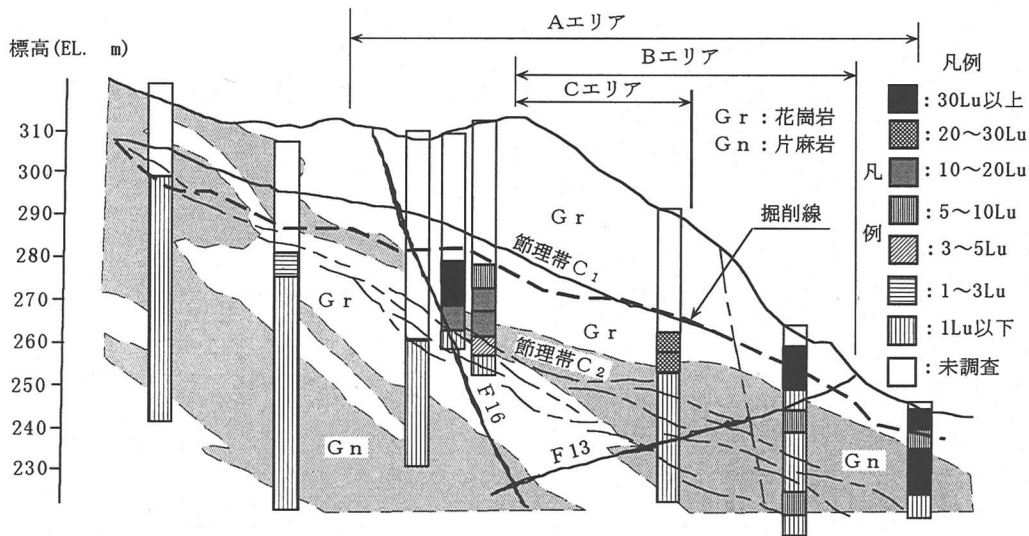


図-6 Aエリアの透水性の分布と地質構造の関係 (ダム軸断面)

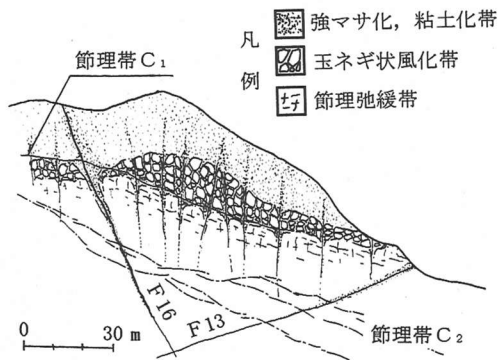


図-5 風化構造模式図 (Aエリア・ダム軸断面)

図-6は、ダム軸のルジオン値の分布と前述の断層系、節理帯、片麻岩と花崗岩の分布を示したものである。この図より、概略的に見て節理帯C₂の最上位が難透水(約1Lu)部と高透水部の境界にほぼ位置していることが特筆される。ここでは図示していないが、このことは、ダム軸下流30mの断面でも確認された。

遮水構造の原因となる地質要素は、先に述べた断層系のうちの、E-W系高角度断層である。このことは、後述する孔間透水試験時の圧力応答や、断層山

側に位置するボーリング孔の降雨後の地下水圧の上昇現象からも確認されている。これらの断層は川側への地下水の流れを遮断しており、特にF16は地下水面に数mの落差を生じさせている。低角度川落ちの節理帯C₂も、確認された4箇所横坑でいずれも粘土を介在しており、その上盤から滴水があり下盤は乾燥していることから、遮水性を持つことが推定される。この系統の節理帯は数枚あり、地下水面が複数存在する原因となっており、左岸の地下水流動を支配する要因の一つとなっている。低角度山差しのF13も川側への地下水の流れを遮断していると考えられる。

以上述べたように断層系と節理帯は、左岸部の水理地質構造に大きな影響を与えていることから、以下ではこれらのE-W系断層と節理帯C₂を水みち構造のメインシステムと呼ぶ。

(2) 掘削面の割れ目系構造調査に基づく水みち構造の推定

岩盤の割れ目には、地質と地質構造の持つ特性により様々な形態があり、水みちを特定するためにはその規則性を取り出すことが、キポイントとなる。ここでは、掘削面の割れ目系調査結果に基づき複雑な節理からなる割れ目系の中からサブシステムとしての水みちを抽出し、水みちの細部構造について論述する。

Aエリアにおいて、掘削面の割れ目系の詳細なス

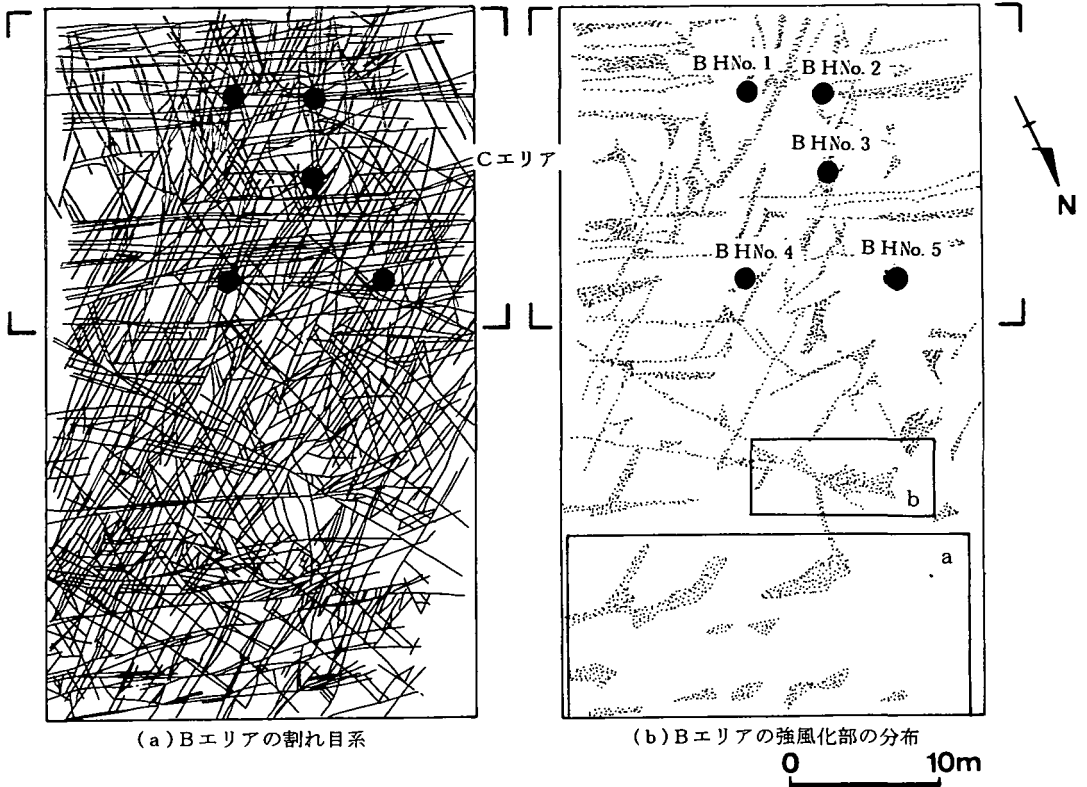


図-7 Bエリア掘削面割れ目系

ケッチを行った。図-7(a)はその一例で、図-2に示すBエリアの掘削面で観察された割れ目系を示したものである。また図中、Cエリアの位置と孔間透水試験を実施したボーリング孔の位置も併記してある。また、図-7(b)は同じ領域の強風化部を網掛けで示したものである。強風化部はマサ化して褐色酸化汚染を呈し、主要な割れ目沿いに発達している。部分的に風化が進行する現象はいくつかの化学的、物理的な原因があるが、通常は雨水の浸透・酸化に起因している。Davisら¹⁶⁾は、強風化部は高透水部と一致することを指摘している。これら強風化部は、主として高角度E-W系、NE-SW系の割れ目に関連して発達しており、全体的には高透水性の水みちを形成していると考えられるが、前節で述べたように断層を横切る流れに対しては遮水性も併せ持つ。

図-8は、Bエリアの割れ目系の走向・傾斜をステレオネット(南半球投影)に示したもので、NE-SW、E-W、NW-SEの高角度系の3つの割れ目系が顕著で

ある。また、低角度の割れ目系の存在も認められる。低角度節理は、花崗岩に顕著に発達するシーティング節理と片麻岩の片理構造に調和的なものの2種類が存在し、図-8に示したものは前者で、いずれも掘削面や横坑の観察から、節理の連続性は数mにとどまることがわかっている。また、高角度の割れ目にぶつかって終わる低角度節理も多い。

次に、図-7(b)に示す部分領域a、bについて強風化部の割れ目構造の詳細を検討する。図-9(a)は、図-7(b)の部分領域aの詳細な割れ目図を示したもので、高角度のE-W、NE-SW、NW-SEの方向を持つ3つの割れ目系が認められる。図-9(b)はこれらの割れ目系の主要なものと同強風化部の分布を示したもので、網かけは2m²以上の広い風化を伴うゾーン、●は2m²以下の風化面積を持つ領域を示し、後者は主としてNE-SW、NW-SEの交点に位置している。

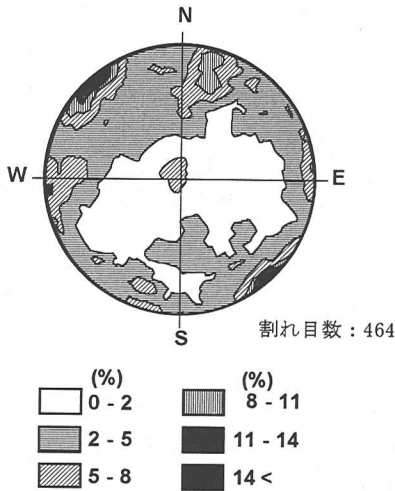


図-8 Bエリアの割れ目系のシュミットネット

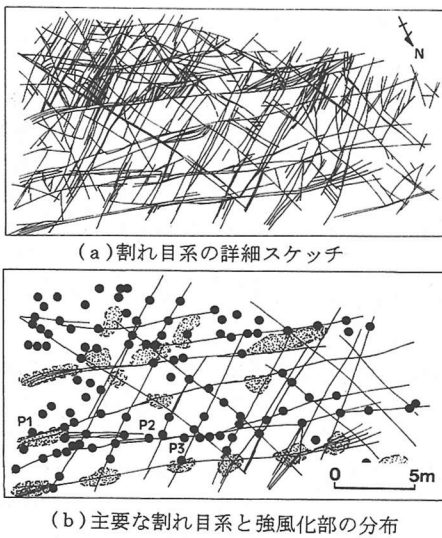


図-9 部分領域 a の割れ目系の水みち解析図

図-10 (a), (b), (c) は、図-9 (b) において P1, P2, P3 の 3 地点それぞれの割れ目交差部の強風化の状態をスケッチしたもので、網掛け部が強風化部を示している。また、変位の方向も矢印で併記した。強風化部はこれらの図が示すように複雑であるが、この強風化部の大きさを円で近似し、交差部 (図-9 (b)) ごとにその直径を測定した。なお、部分領域 a には、多くの小さな風化部が存在するが、ここでは概略直径 10cm 以上の風化部を対象とした。図-11 にその確率分布を示す。図中の曲線はその分布を対数正規分布で近似したものである。この図が示すように強風

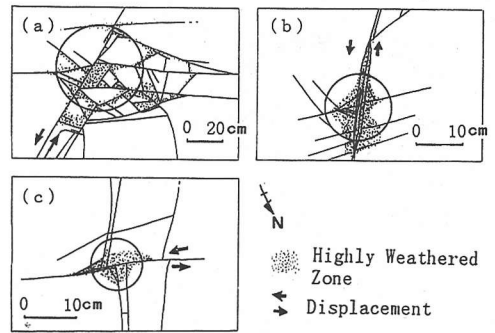


図-10 割れ目系交差部の強風化状況のスケッチ

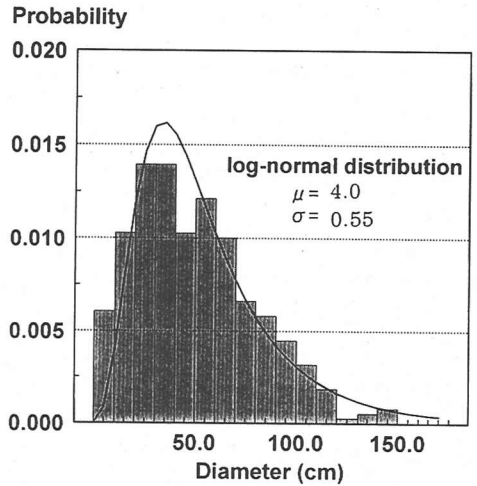
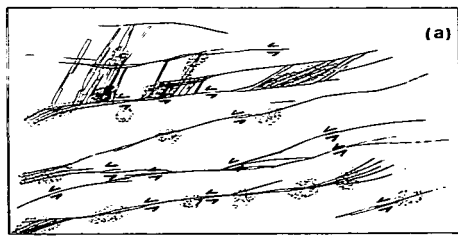


図-11 割れ目系交差部のスケールの確率分布

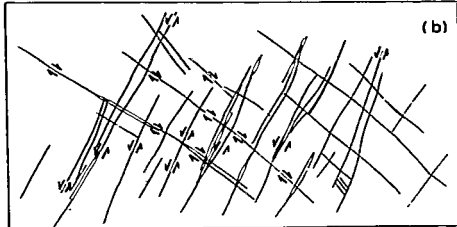
化部の大きさはほぼ対数正規分布をしていると見なすことができる。

図-9 (a) に示す割れ目系の構造は、割れ目の変位から図-12 (a), (b) に示す 2 つの割れ目系のパターンの組合せになっていると解釈できる。図-12 (a) のパターンは、主として E-W 系の割れ目系とこれらの割れ目系を繋ぐステップ構造および割れ目の末端から派生するスプレー構造から成っている。E-W 系の変位は図に示すように左横づれで、これは最も新しい変位のステージのずれの方向を示すもので、それ以前のステージでは逆方向にずれの時代も存在する¹⁷⁾。スプレー構造は右横づれの変位により生じたものと考えられる。これらのスプレー構造は、また E-W 系割れ目の端部にも集中している。

図-12 (b) は、NE-SW 系と NW-SE 系の割れ目を示しており、変位の方向を矢印で併記した。これらの



(a) E-W系とステップ、スプレー構造



(b) 共役割れ目 (NE-SW系とNW-SE系)

図-12 部分領域 a の割れ目系構造解析図

2つの割れ目系は、共役割れ目を成すと解釈される。図-9(b)で網掛けで示した強風化ゾーンに対応する風化ゾーンを図-12(a)に示してある。これらの強風化ゾーンはE-W系沿いに発達していることが判る。図-9(b)の規模の大きい強風化ゾーンの分布と図-12(a)のそれとの比較から、強風化ゾーンは2つのタイプに分類される。すなわち、第1のタイプはステップ構造またはE-W系割れ目の末端部のスプレー構造で、第2のパターンはE-W系とNE-SW系あるいはNW-SE系の割れ目の交差部である。一方、図-9(b)に示す小規模な強風化部はNE-SW系とNW-SE系の交差部に位置している。

構造運動を受けた岩体では、割れ目交差部、スプレー、ステップがより大きな水みちとなること、スイス⁴⁾、スウェーデン⁵⁾、釜石鉱山⁶⁾の割れ目系に関する研究でも明らかにされている。また、P.A.Domenicoらは、その著書^{1,8)}の中で、LattmanとParizek(1964)の研究を引用して、割れ目が発達した炭酸塩岩の割れ目の交差部が地下水の産出量が多いことを指摘している。これらの既往の研究は、前述の割れ目構造が水みちとなることを示唆している。

以上述べた割れ目系構造調査結果から、以下の結論が得られる。水みちを構成する割れ目系は、連続性のいい高角度のE-W系、NE-SW系が支配的であり、これに次ぐ節理系として、後者の節理系の共役節理をなすNW-SE系があげられる。ただし、前述したように、高角度割れ目は、それを横切る流れに対し

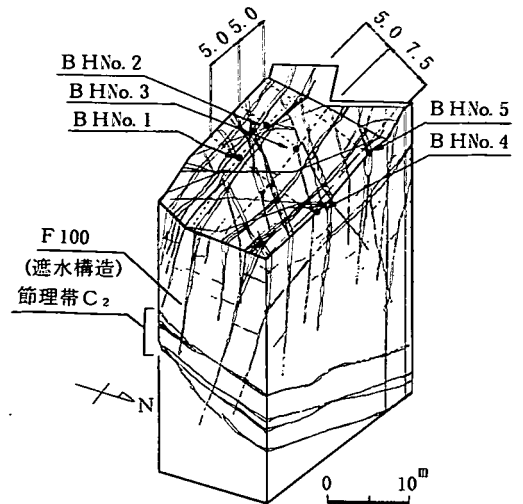


図-13 Cエリアの水理地質構造

ては遮水性を持つことがある。低角度の節理系はシーティング節理と片麻岩中に発達する片理構造に沿うものの2種類があるが、いずれも連続性は数m規模で、前述の3つの節理系を部分的に連結する形で発達している。また、これらの割れ目系の交差部、ステップ、スプレー構造が主要な水みちを形成し、空間的には線状に伸びていると考えられる。

(3) 地下水流動調査および透水性・透水経路調査

ここでは、図-2に示すCエリアで実施した孔内微流速検層、孔間透水試験等の結果を基に水みちの細部構造について論述する。先に述べたように、BエリアにはAエリアの代表的な割れ目系が顕著に発達しており、図-7(a)に示すように、CエリアはそのBエリアの約1/2を占める。試験の目的は、Aエリアの水理地質構造を代表すると考えられるCエリアにおける地下水流動性、水みちの透水性・連結性および遮水構造を把握することである。

a) 試験概要

試験エリアとして選定したCエリアの大略の水理地質構造の模式図と5本のボーリング孔(φ66mm, 孔長30m, 鉛直)の孔配置を図-13に示す。

ボーリング孔の削孔の進捗に合わせ、単孔透水試験としてルジオンテストを行った。次にBHTV検層で孔壁写真撮影を行った。また、水みちあるいは水みちと連結する割れ目系を把握するため孔内微流速

検層を行った。孔内微流速検層は、自然状態と各孔から注水したケースの2種類を実施した。注水は、リークを避けるため全て深度10mの位置にシングルパッカーをセット（注水区間20m）し、注水圧約0.3Mpa（3kgf/cm²）で注水し、周辺孔の水位が定常状態になるのを待って（注水時間7~11時間）、ヒートパルス式の微流速計（測定範囲0.2~5cm/s）を使用し計測を行った（以下、孔内微流速検層Aと呼ぶ）。不飽和部の計測は、孔口に水位を保持するよう注水し、プロペラ式の微流速計（測定範囲2~100cm/s）を用い測定した（以下、孔内微流速検層Bと呼ぶ）。

孔間透水試験は、深度9m以下の位置にマルチパッカーをセット（標準注水区間2~3m）して各孔で4~7区間注水し、4孔の受信孔には7~8段の多段パッカーに水頭で1cmの精度を有する水晶発振式間隙水圧計をセットした。注水時の圧力パターンは、パルステスト（約30分間注水）、長時間透水試験（各孔で最大の透水性を示す区間で実施、注水時間5~8時間）、の2種類を実施し、注水圧力は約0.3Mpa（3kgf/cm²）とした。なお、試験エリアの深度10m以深の限界圧力は0.3Mpa（3kgf/cm²）以上である。

b) 地下水流動と透水性から見た水みち構造の検討

ここでは、主として自然状態の地下水流動と各孔の透水性を基に、Cエリアの水みち構造について検討する。

単孔透水試験および孔間透水試験の結果に基づき各孔の透水性、自然状態の地下水圧の分布、割れ目系、孔内微流速検層で流速差が認められた深度（各孔から注水したケース、自然状態）を図-14(a)~(e)に示す。

各孔の自然状態の地下水圧の分布は、遮水構造をなす低角度川落ちの節理帯C₂の影響を受け複雑な様相を呈する。大局的に見た場合節理帯C₂は2枚存在し、図-14(d)に示すBHN₄以外の孔はここで上部よりA層、B層、C層と呼ぶ3層の地下水構造を示しており、各層は独立した水圧分布を示し、上部に不飽和部、下部に静水圧分布を成す帯水層を有している。BHN₄は、A層は不飽和状態、B層は飽和・不飽和状態、C層は飽和・被圧状態となっていると推定される。この地下水構造の地質的原因是、粘土を介在すると考えられる節理帯C₂で、遮水構造を面的に形成しており、水みち構造を大きく支配している。BHN₄以外に認められるB層、C層の不飽和部は遮水構造を成す2枚の節理帯C₂の下部に位置し、上位標高では地表に連続すると推定される。

次に透水性と割れ目系の関係について述べる。透

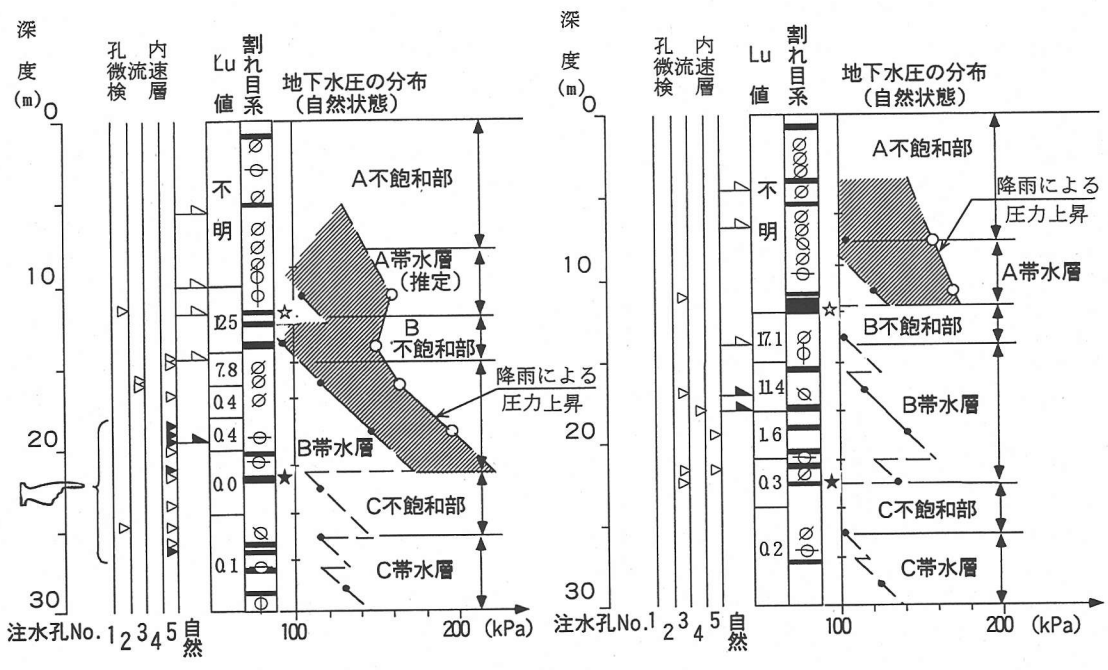
水性については、高透水ゾーンと難透水ゾーンの境界が明瞭であり、BHN₃を除きその深度は16m~20mに位置し、大局的には2枚の節理帯C₂の上位のものがその境界を成していると考えられる。高透水ゾーンの下面を形成する細部構造は、一つの連続する面ではなく、割れ目系の交差部やステップ、スプレーの構造を持ちながら、相互に連結する割れ目ゾーンが、高透水ゾーンと低透水ゾーンの境界の深度に影響しているものと考えられる。この結果は、図-6に示した既往の地質調査に基づく当該エリアの透水性の分布とほぼ一致する。

図-14(c)に示すように、BHN₃のみ5Lu~10Luの透水性を示すゾーンがGL-30mにおよんでおり、他の4孔に比較して特異な透水性の分布を示し、強風化の深度も孔底まで達している。この水理地質構造は、次のように考えられる。図-7(a)に示すように掘削面上で同孔の川側4m程度の位置にE-W系割れ目帯の強風化帯が上下流方向に走っている。E-W系の割れ目帯の傾斜は約80°の山差しで、この割れ目帯に沿う深層風化が主因と考えられる。

透水性の高い区間で、自然状態または他孔からの注水時に孔内微流速検層で流速差が認められる深度に存在する割れ目系は、水みちか、水みちと連結された割れ目系と考えられる。このような割れ目としては、BHN₃のGL-19.5m付近、GL-24m付近の低角度系、BHN₄のGL-14.5m付近、GL-15.5m付近に位置するNE-SW系、BHN₅のGL-17m付近に位置する低角度系に代表される。これらの割れ目系は、後述の孔間透水試験において、これらの割れ目系と連結する割れ目を含む区間から注水した場合は、大きな圧力応答を示す。

5Lu以上の透水性を示す区間について、ボーリング孔と交差する水みち、あるいは水みちと連結すると考えられる割れ目系とその深度、孔内微流速検層Aで流速差が認められた割れ目系を表-1に示す。これらの割れ目系としては、低角度系とNE-SW系の頻度が高く、次にNW-SE系、E-W系、N-S系の順に影響度は低下する。しかし、この評価は各割れ目系の水みちに対する影響の一部を捉えているに過ぎない。鉛直に配置されたボーリング孔を切る割れ目系は低角度のもの程大きい。従って、ほとんど鉛直に近いE-W系の影響が過小評価されていることに留意する必要がある。

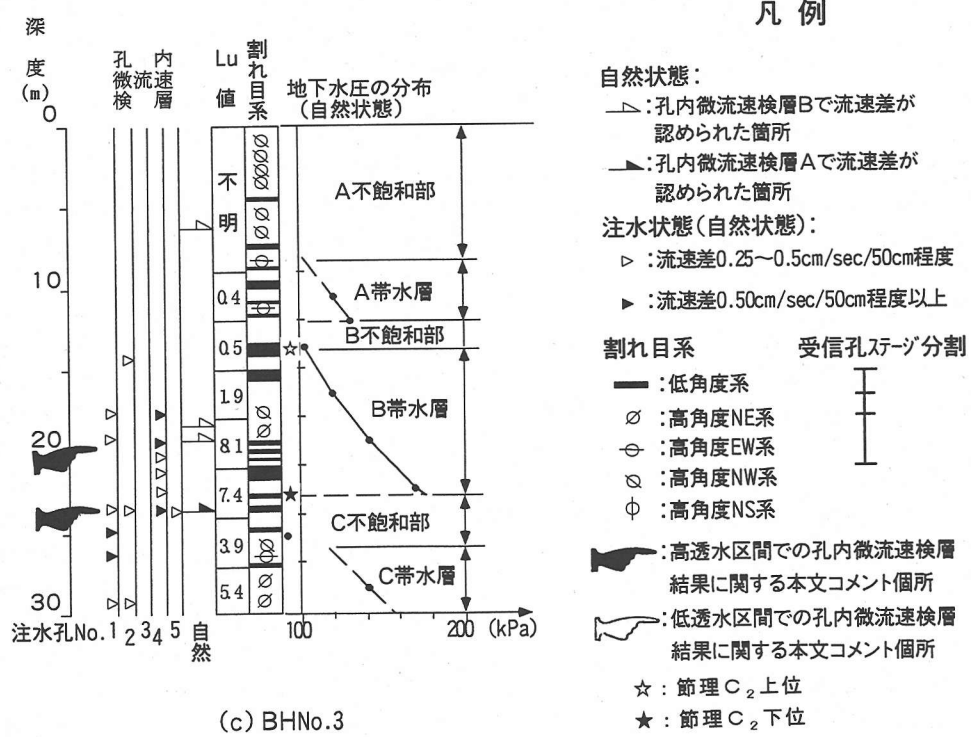
図-14(a)に示すBHN₅から注水した場合のBHN₁のように、孔内微流速検層で流速差が認められる割れ目であっても低透水区間に位置する割れ目は、孔間透水試験では圧力応答が顕著でない場合が多い。しかしながら、後述するように、BHN₄



(a) BHNo.1

(b) BHNo.2

凡例



(c) BHNo.3

図-14 Cエリアの透水性と地下水流動調査結果(その1)

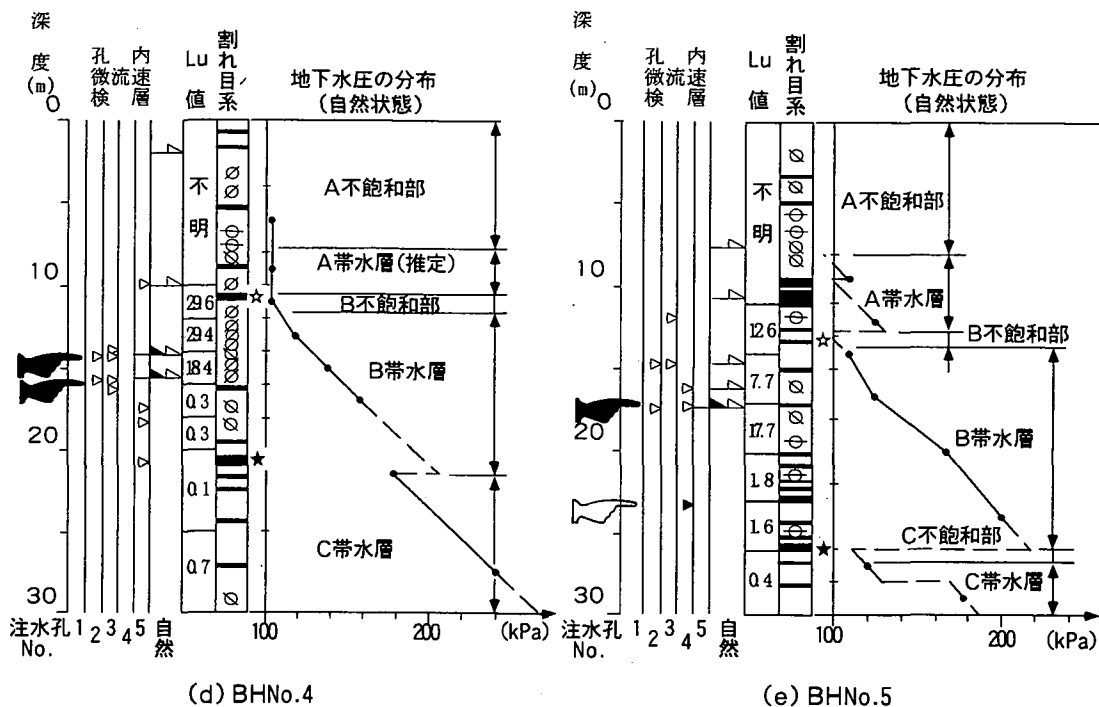


図-14 Cエリアの透水性と地下水流動調査結果 (その2)

のGL-14~16mから注水した場合のBHNo.5のGL-23m付近の低角度系のように、BHNo.3のB層内の区間から注水した孔間透水試験時に大きな圧力応答を示す場合もある (図-16(a)参照)。

c) 孔間透水試験結果による水みち構造の検討

ここでは、主として孔間透水試験結果を基にCエリアの水みち構造について検討する。まず、理解を容易にするため、Cエリアの水みち構造の概念を提示する。次に、注水量の多い試験の圧力応答、および、圧力応答パターンに着目して主要な水みちの構造について検討する。最後に、連続性の範囲が限られていたり、連続性はあっても透水性が小さい、主要な水みちを相互に連結する機能を持つ水みちについて検討する。

【Cエリアの水みち構造の概念】

図-15にCエリアのGL-8~22mの領域の主要な水みち構造を模式図で示した。これは、掘削面の割れ目調査、ボーリングコア、BHTV検層および、孔内微流速検層と以下に述べる孔間透水試験の結果を基に作成したものである。3。(1),(2)で述べたようにE-W系の割れ目には、割れ目の直交方向に遮水性を持つものと高透水性のものと2種類がある。

表-1 高透水区間の主要割れ目系と孔内微流速検層結果

BH No.	GL (m)	Lu	低角度系	NE-SW系	E-W系	NW-SE系	N-S系
1	10~14	13	2+1*				1
	14~16	7.8		1+1*			
2	12~15	17		1*			1
	15~18	11	1+1*				
3	18~21	8.1	2*+1	1*			
	21~23	7.4	2*+1				
	27~30	5.4		1+1*			
4	10~12	30	1	1+1*			
	12~16	29		3			
	16~18	18		1+1*		1*	
5	11~14	13	2		1*		
	14~17	7.7	1*			1*	
	17~20	18	1*		1	1	

(注) 上表の数字は割れ目の数を示す。

* は、孔内微流速検層で反応があった割れ目。

この図には、遮水構造を成すE-W系高角度断層(F100)、低角度川落ちの節理帯C₂ (主要なものは2枚)と主要な水みちを成す連続性のよいE-W系節

理、NE-SW系節理が示されている。また、面的な広がり規模は小さいと考えられるものの、ボーリング孔の試験区間と連結するシーティング節理(S1, S2, S3)が示されている。図中、F1, F2は、F100の延長上で、BHNo.1, BHNo.2と交差を示す。

〔注水量が多い試験の圧力応答と水みち構造〕

図-16(a)～(c)は、注水区間の透水性が高いパルス試験結果を示すもので、水みち構造を反映する代表的な圧力応答の事例である。これらの図は、注水開始時と注水終了時の各孔の水頭分布を示したもので、薄い網かけ部がこの間の水頭上昇を意味する。濃い網掛けは注水区間を示す。また、図中に注水圧力、注水量、およびこれらの値をもとに換算したルジオン値も併記してある。

図-16(a)は、BHNo.4孔GL-14～16mから注水した場合の周辺孔の圧力応答を示すもので、BHNo.3のB層内、BHNo.5のB層最下部への応答が顕著である。BHNo.1, BHNo.2に応答が認められない理由は、以下のように考えられる。まず、両孔の近傍に存在する図-15に示すE-W系高角度断層(F100)の遮水性について述べる。両孔とF100の位置関係は、図-15のF1, F2で表示されている。F100は横坑、掘削面でも確認された断層で、BHNo.1でGL-21m付近、BHNo.2でGL-10m付近でボーリング孔と交差する山差しの難透水の性質を持っている。

図-14(a), (b)に示すように降雨後、両孔の断層上盤で水頭が急上昇する現象によりその遮水性が確認された。BHNo.1については、F100が観測孔に対し注水孔側に位置し、注水孔と連結するチャンネルを遮断していて、圧力応答がほとんど認められないものと考えられる。BHNo.2については、図-15に示すようにB層(GL-12m～20m)では、観測孔はF100より注水孔側に位置するが、観測ステージに存在する割れ目と注水ステージのそれを連結する経路が、高透水経路となっていないため、注水時間が短いパルス試験では圧力が伝搬し難いことに起因すると考えられる。なお、図-15に示すB層の上部、下部の境界を成す2枚の節理帯C₂が遮水構造となっており、B層からの注水の影響はB層内に限定され、その上位のA層、下位のC層にはほとんど影響がおよばないことが特筆される。

図-16(a)において、BHNo.3のB層への応答が大きい現象は、BHTV検層、孔内微流速検層、掘削面の割れ目系の分布状況等から、図-15に示すNE-SW系の割れ目から低角度割れ目系(図中のS1)への経路が水みちとなっていることに起因すると推定される。また、この経路の途中に存在する図-15に示すE-W系を介する試験エリア外への経路、NE-SW系

を介する直接試験エリア外へ流出する流れも推定される。BHNo.5のB層下部への応答が大きい原因は、NE-SW系からE-W系を介し、低角度系(同図のS3)への水みちが考えられる。ここには示していないが、高透水を示すBHNo.4のGL-10～14m(2ステージ:注水区間2m)から注水した場合の周辺孔への圧力応答も前述と同様な結果となった。また、以上に述べたことは、図-16(b)に示すBHNo.3のB層(GL-18～21m)の注水結果からも裏付けられる。

図-16(c)は、注水ステージが高透水を示すにもかかわらず、パルス試験で周辺の観測孔にはほとんど圧力応答が見られないBHNo.5のGL-11～14m(12.6Lu)の注水事例である。このようなパターンは、図-14(e)に示す同孔のGL-14～17m(7.7Lu)、図-14(a)に示すBHNo.1のGL-10～14m(12.5Lu)の各ステージからの注水時に認められた。このような場合の水みち経路は、2つのケースが考えられる。一つは、注水区間と受信区間を連結する水みち経路が遮水構造により遮断され、試験エリアの外に向かう流れが卓越する場合であり、他の一つは、パルス試験の注水時間が短く、水みち経路を介し圧力が伝搬しない場合である。このような場合は、長時間透水試験結果により評価する必要がある。BHNo.1のGL-10～14mは前者の事例で、観測孔との水みち経路は難透水のF100で遮水されており、NE-SW系を水みちとして山側へ浸透しているものと考えられる。

〔圧力応答パターンと水みち構造〕

図-17は、パルス試験と長時間透水試験時に観測された注水圧力パターンと観測孔の応答パターンをA, B, C, Dの4パターンに分類して示したもので、添字の1はパルス試験、2は長時間透水試験を示す。

Aパターンは、注水に鋭敏な圧力応答を示し、高透水の水みちが直結しており、流れが短時間で定常状態に達するものである。図-18(a)に示すBHNo.4(GL-18～21m)の長時間注水時のBHNo.3B層への応答は、この事例である。高透水のNE-SW系から低角度系への水みち経路が考えられる。観測孔圧力上昇が比較的小さく(約20kPa)、注水孔からNE-SW系とNE-SW系からE-W系を介して試験エリア外に向かう水みちが推定される。

Bパターンは、パルス試験では圧力応答の経時変化が凸型放物線状の大きな応答を示し、注水停止後も圧力が上昇した後圧力が低下し、長時間注水でも凸型放物線状の圧力上昇を示すケースである。このパターンは、図-18(b)に示すBHNo.3(GL-18～21m)の長時間注水時のBHNo.4孔のB層の応答に認めら

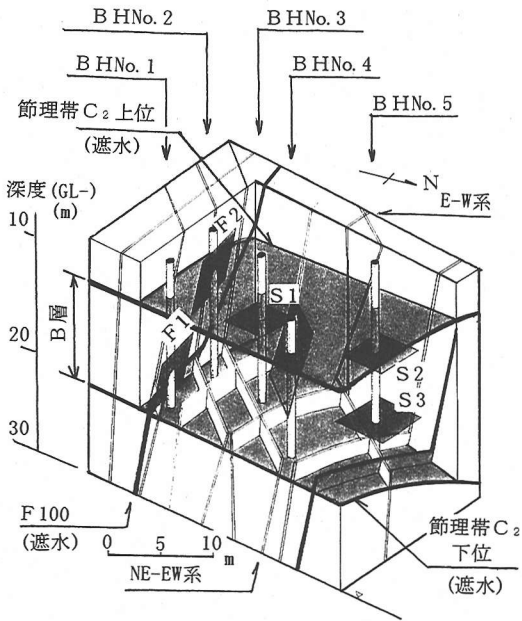
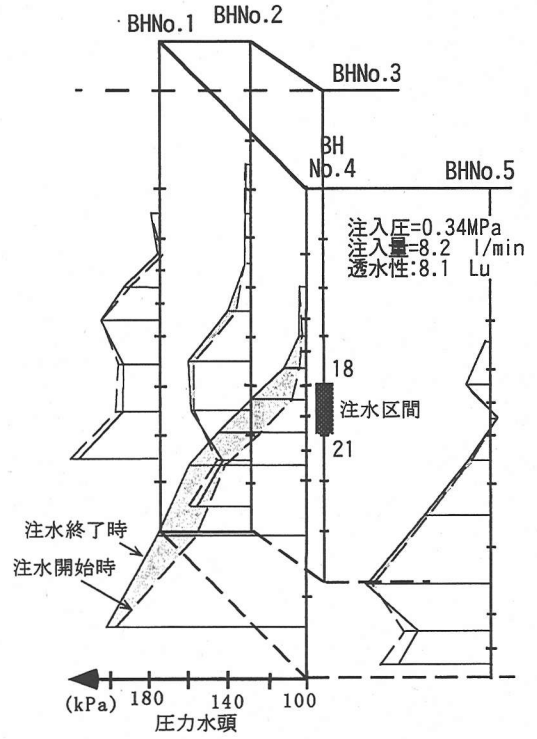
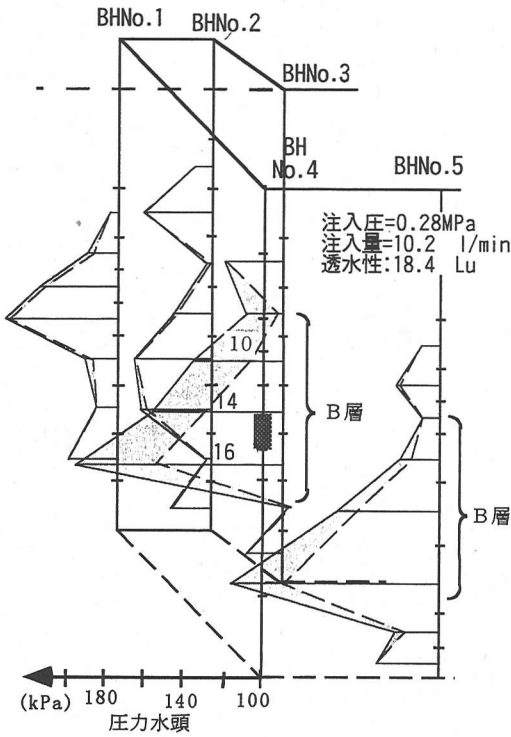


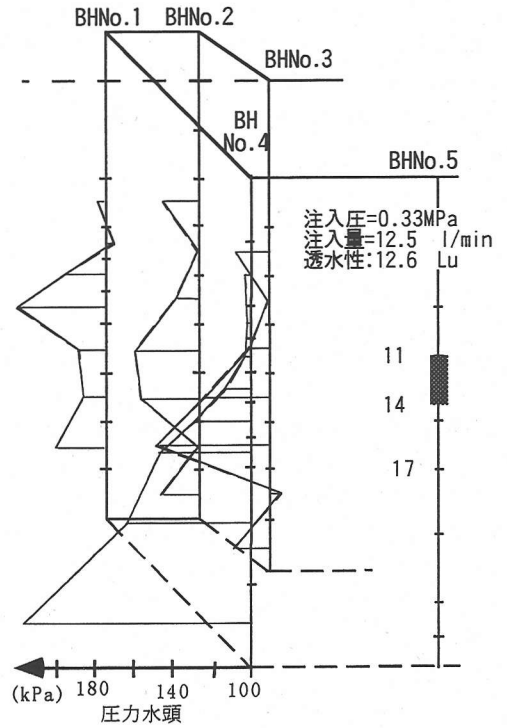
図-15 Cエリアの水みち構造模式図(GL-8~30m)



(b) BHNo.3 (GL-18~21m)注水



(a) BHNo.4 (GL-14~16m)注水



(c) BHNo.5 (GL-11~14m)注水

図-16 パルス試験時の圧力応答の分布例

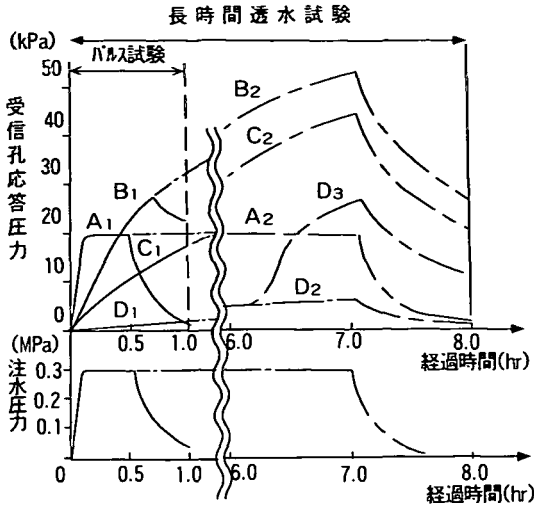


図-17 孔間透水試験における圧力応答パターン

れた。パルス試験時の周辺孔の応答は、図-16(b)に示すようにBHNNo.4孔B層への応答が顕著で、その他の観測区間はほとんど応答がない。注水区間は8.1Luとかなり透水性が高く、受信区間とは図-15中の低角度節理(S1)からNE-SW系への水みちで連結されているものと推定される。この水みち経路の途中で連結されるE-W系や受信区間よりもさらに川側に連続するNE-SW系への浸透により、水みち経路の流れが試験時間では定常状態に至っていないものと推定される。

Cパターンは、パルス試験での応答は小さいが、注水停止後も圧力上昇を続けるもので、長時間注水では凸型放物線状の大きな圧力応答を示す。このパターンが、前述の注水区間が高透水にもかかわらず、パルス試験では周辺孔の圧力応答が小さいケースの一つで、BHNNo.5孔GL-17~20mからの注水がその代表例である。図-18(c)は、同孔・同区間から注水した長時間透水試験時のBHNNo.4の圧力応答を示すもので、B層への顕著な応答が認められる。また、図示していないがBHNNo.3孔B層もBHNNo.4と同様な圧力応答が認められた。水みち経路としては、BHNNo.3孔B層に対しては、低角度系(図-15中にS2で表示)からE-W系、NE-SW系を介し低角度系への経路が、BHNNo.4孔B層に対しては低角度系からE-W系を介しNE-SW系への経路が推定される。また、E-W系を介する試験エリア外への流出が考えられる。

D₂パターンは、両試験を通じほとんど圧力上昇が観測されないものである。このパターンは、孔内

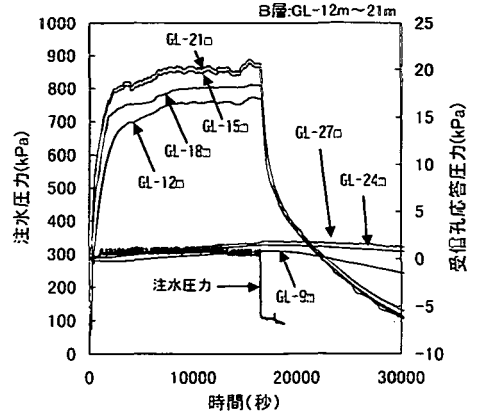


図-18(a) 圧力応答Aパターンの例
(BHNNo.4 GL-18~21m注水時のBHNNo.3の応答)

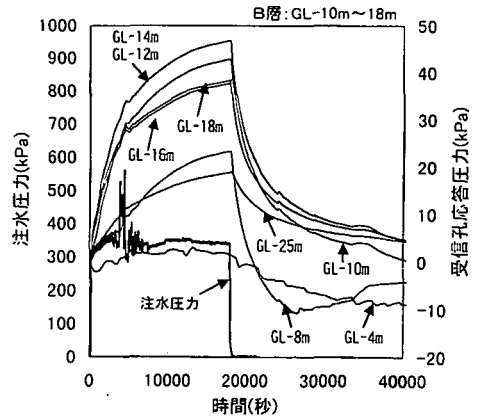


図-18(b) 圧力応答Bパターンの例
(BHNNo.3 GL-18~21m注水時のBHNNo.4の応答)

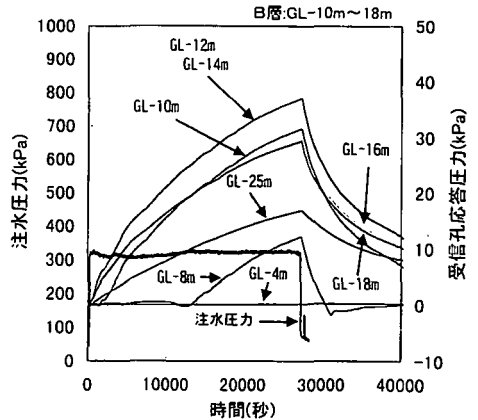


図-18(c) 圧力応答Cパターンの例
(BHNNo.5 GL-17~20m注水時のBHNNo.3の応答)

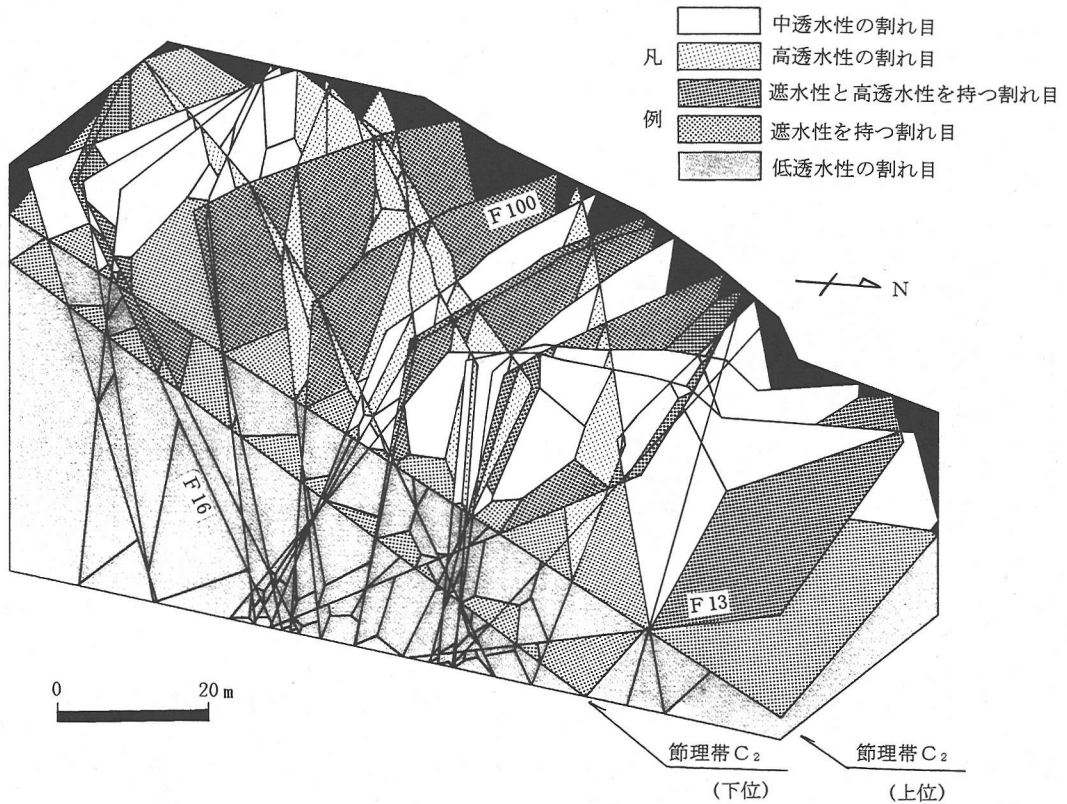


図-19 Aエリアの水みち構造モデル

微流速検層で孔内の流速差が観測されない場合、注水孔と観測孔の間に遮水構造が存在するケースや、水みちが連結していない場合に生じると考えられる。極めて稀にD₃パターンのように長時間注水すると水みちが連結し急激な圧力上昇を示す水みち構造も存在する（図-18(c)のGL-8）。

〔NW-SE系および低角度系に関する考察〕

次に、前述のように主要な水みちと考えられるNE-SW系およびE-W系割れ目に対し、これらを連結する連続性はあっても透水性が小さいと考えられるもの、高透水であっても連続性が小さいもの、を対象とした。前者としては、NW-SE系がある。後者としては、低角度系の節理としてのシーティング節理がある。

先ず、NW-SE系について考察する。孔間透水試験で注水対象となった高透水区間で、孔内微流速検層で流速差が観測されたNW-SE系は、表-1に示すBHN₄孔GL-16~18m区間とBHN₅ GL-14~17m区間の2点である。前者は周辺観測孔に対しては、試

験エリア外に向かう水みちを構成していると考えられる。後者はその位置から試験エリア外に向かう経路とBHN₃孔に向かう経路の両者が存在する。このケースにおけるBHN₃孔B層の圧力応答は、前述のとおりCパターンを示し、NW-SE系から低角度系への水みちも考えられる。この場合も経路の途中に存在するE-W系より試験エリア外への浸透も考えられる。NW-SE系は、図-7(a)に示すようにCエリアの掘削面ではあまり連続性がよくないことから、試験エリア内の水みちとしては、一般に透水性の高いE-W系とNE-SW系を連結する水みちとなっていると考えられる。

次に、水みちとしての低角度系について考察する。表-1に示すように高透水区間で、孔内微流速検層に流速差が認められる低角度系の割れ目は多い。しかしながら、低角度節理の大半はシーティング節理で連続性があまりよくないこと、孔間透水試験において周辺観測孔の同一深度付近で顕著な圧力応答が認められないことから、E-W系、NE-SW系を

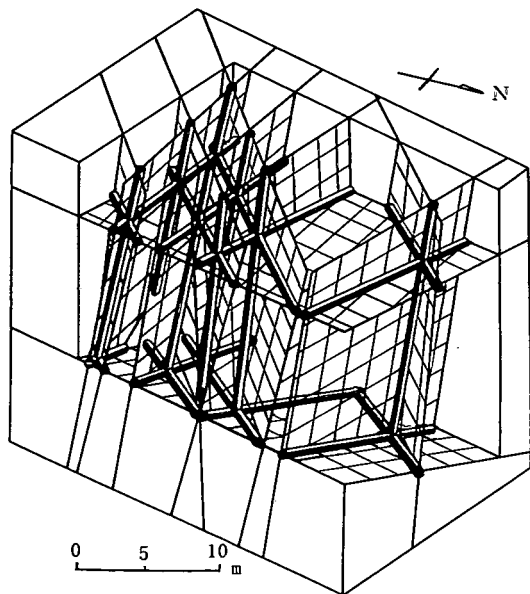


図-20 水みちネットワークモデル (図-15のエリア)

連結する水みちとして位置づけられると考えた。なお、個々のシーティング節理の連続性は、先に述べたように数m程度であるが、形成時期が新しく透水性が高いので、水みちとして相互に他のチャンネルを介して連結する機能があることに留意しておく必要がある。

d) まとめ

Cエリアにおける地下水流動調査、透水性・透水経路調査により、水みち構造のメインシステムとしてのE-W系高角度断層 (F100)と節理帯C₂からなる遮水構造が明らかにされた。主要な水みちとして、E-W系とNE-SW系が抽出され、これらを連結する水みちとして、NW-SE系と低角度系の割れ目が抽出された。各割れ目系の透水性、連結性などの水みちの細部構造も定性的であり、推論に留まる部分も残されたが、概ね把握できたと考える。

(4) 水みち構造モデル

(1)～(3)で述べたAエリアにおける水理地質構造、Bエリアにおける掘削面割れ目構造調査、Cエリアにおける地下水流動調査、透水性・透水経路調査結果を基に作成した大局的に見たAエリアの水みち構造モデルを図-19に示す。

水みち構造モデルでは、割れ目系を次のように分類して示した。遮水構造として、節理帯C₂、遮水と高透水の両者の性格を持つ断層として、F16、E-W

系高角度断層 (F100等)、F13断層、高透水の節理系として、NE-SW系、E-W系、数は少ないがNW-SE系を抽出した。Aエリアの高透水ゾーンは、緩み・風化の下限を成している節理帯C₂の最上位までおよんでいる。このため、本モデルでは、前述の高透水割れ目系は、2枚存在する節理帯C₂の上位のものまでとした。これより下位に伸びる割れ目系は、低透水の割れ目系としてモデル化した。なお、遮水と高透水の両方の特性をもつ断層は、断層面に沿った方向には高透水であるが、断層面を切る方向には遮水性を持つものである。

図-20は図-15に示すCエリアの水みち構造を管路のネットワークで示したものである。主要割れ目の交線を太いパイプ、割れ目面そのものは管路のネットワークで示した。この図が示すように、水みちの細部構造としては、高透水割れ目の交線が大きな水みちを形成すると考えている。また、図-19には示していないが、ステップ、スプレー構造も線状に伸びる水みちを形成する。

4. 水みち構造調査法の評価

提案した水みち構造調査法を風化花崗岩サイトに適用した結果を基に、その有効性についての評価と留意点・課題を以下に述べる。

割れ目系構造調査については、地質構造を基本思想とする掘削面の割れ目系調査が、水みち構造を明らかにする上で極めて大きな役割を果たした。掘削面は極めて多くの情報を提供してくれる。しかしながら、掘削面の割れ目系から水みち構造を取り出す作業は、相当な作業量と調査技術者の技量が要求される。水みちとなる割れ目を抽出する調査法の一般化が課題である。

孔間透水試験による透水性・透水経路調査は、遮水構造、水みちとしての割れ目系の透水性、連結性を把握する上で有効である。特に注水孔の透水性と圧力応答パターンが、連結する水みちの透水特性を把握する上で重要であると考えられる。水みちの構造やシミュレーション時に使用する境界条件を的確に把握するためには、観測孔の配置が重要である。今回の試験の孔配置については、前者については特に問題は無かったが、後者については観測孔の数が不十分であったと考えられる。パルス試験、長時間透水試験の使い分けは、水みちの透水性と連結性を考慮して選択する必要がある。孔間透水試験については、水みち構造とその透水性に応じた孔配置と、それらに関連する注水圧力や注水時間などの注水条件の決定方法が今後の課題である。

地下水流動調査としての孔内微流速検層は、ボーリング孔内の水みちを直接捉える有効な調査手法で、孔間透水試験と組み合わせて実施すべきである。孔間透水試験のみでは、水みちの把握と評価は困難である。

5. 結論

本論文は、ダム基礎の浸透流解析手法としての水みちネットワークモデル構築の基本となる水みち構造調査法を提案した上で、この調査法をモデルサイトとして選定した風化花崗岩サイトに適用し、水みち構造の抽出を試みたものである。得られた結果を以下に述べる。

1. 割れ目系構造調査、透水性・透水経路調査、地下水流動調査および地下水流れの水理機構調査からなる、各種水理地質調査法を総合化した、ダム基礎岩盤の水みち構造調査法の提案を行った。
2. 水みち構造調査法を風化花崗岩サイトに適用し、水みち構造の推定が概ね可能であることを示すことにより、その有効性を示した。また、調査法の留意点・課題を示した。
3. 風化花崗岩サイトの水みちを主として割れ目の方向性、連結性、風化度に着目して割れ目系を分類した。割れ目が集中し、それが線状に伸びる割れ目系の交差部、ステップ、スプレーが主要な水みち構造となることを掘削面の割れ目系構造調査により明らかにした。高透水の割れ目系は、これらの構造を多く持つことが考えられる。
4. 孔内微流速検層、孔間透水試験を主体とする地下水流動調査、透水性・透水経路調査により、モデルサイトの水みち構造のメインシステムとしての遮水構造とサブシステムとしての4つの割れ目系の水みち細部構造を明らかにした。

今回水みち構造調査法の適用を試みた花崗岩は、その水理地質構造が比較的把握し易い岩盤であった。火山岩類等の複雑な水理地質構造を有する岩盤、特にその地山深部の水みち構造を把握する調査手法の確立が今後の課題である。

今回の報告は、モデルサイトの水みち構造の把握に留まり、抽出した割れ目系の水理定数等の定量的評価が今後の課題として残された。今後、今回実施した孔間透水試験について、水みちネットワークモデルを適用し、水理パラメータの同定に関する検討を行い、水みち構造モデルの妥当性と解析手法の有効性について研究を進めていきたいと考えている。

謝辞：本研究を進めるに当たり、元水資源開発公団、松岡滋氏、水資源開発公団、西尾実氏、片山光也氏、小寺幸男氏、川地悟氏、大高英澄氏には現地調査において多大なご協力を頂き、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Lessons From Dam Incidents, International Commission on Large Dams, pp.169, 1974.
- 2) 飯田隆一：コンクリートダムの設計法, 技報堂出版, pp.264-268, 1992.4.
- 3) 飯田隆一：ダム基礎地盤の止水処理の変遷と問題点, ダム技術, No.125, pp.14-16, 1997.2
- 4) Munier,R.:Four dimensional analysis of fracture at Äspö hard rock laboratory, Engineering Geology, Vol.33, pp.159-175, 1991.
- 5) Mazurek,M.,Bossart,P. and Eliasson, T. : Classification and characterization of water conducting features at Äspö, Results of Phase1 investigations, Progress Report259503, SKB, pp.1-73.
- 6) 三枝博光, 渡辺邦夫, 大沢英昭：釜石鉱山での割れ目系特性調査とステップ・スプレー構造, 土木学会年講, 第3部, pp.710-711, 1995.
- 7) 杉村淑人, 木戸研太郎, 渡辺邦夫：フラクチャーネットワークモデルによるダム基礎浸透流解析の試み, 土木学会年次学術講演会論文集第3部, pp.234-235, 1995.
- 8) 杉村淑人, 森田豊, 三枝博光, 鈴木希, 渡辺邦夫：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講演論文集, pp.161-165, 1996.2.
- 9) 森田豊, 三枝博光, 杉村淑人, 渡辺邦夫：亀裂性岩盤の水みちに関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演会論文集第3部, pp.624-625, 1996.
- 10) 森田豊, 杉村淑人, 渡辺邦夫：ダム基礎岩盤を対象とした水みちネットワークモデル, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.234-238, 1997.1.
- 11) ISRM指針 Vol.3 岩盤不連続面の定量的記載法(日本語訳), 岩の力学連合会, 1985.
- 12) 山口嘉一, 鈴木健作, 太田直樹：複数の地下水層を有するダムサイトでの止水処理と漏水監視, ダム工学, pp.35-44, 1993.9.
- 13) 渡辺邦夫, 芦川亮一：割れ目岩盤の透水試験における乱流の影響評価の試み, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.161-165, 1987.2.
- 14) 松本徳久, 山口嘉一, 渋市秀雄：高粘性流体試験を用いた透水試験, 第23回土質工学研究発表会, pp.125-126, 1988.6.

- 15) 岩本忠信, 園元秀夫, 有門英幸, 上妻睦男: 高粘性流体を用いた岩盤透水係数の測定, 応用地質, Vol.31, No.2, pp.51-58, 1990.
- 16) Davis, S. N. and DeWiest, R. J. M. :Hydrogeology, John Wiley and Sons, pp463,1966.
- 17) Watanabe Kunio, Sugimura Yokito, Morita Yutaka and Tanaka Tatuya: Channel network modeling of the fractured granite in the Hinachi area, Japan. Engineering Geology,Special Publication, *Earthquake Proof Design and Active Fault*, pp.247-262, 1997.
- 18) P.A.ドミニコ, F.W.シュワルツ: 地下水の科学 I, 地下水の科学研究会, 大西有三監訳, 土木工学社, pp.21, 1995.7.
- (1997.2.6受付)

CHANNEL NETWORK MODELING FOR DAM FOUNDATION ROCK BASED ON THE HYDRO-GEOLOGICAL STRUCTURE AND RESULTS OF CROSS-HOLE TEST

Yokito SUGIMURA, Yutaka MORITA and Kunio WATANABE

The technique how to evaluate the channel network system on the basis of many hydro-geological data such as geometry of fracture system, hydraulic head distribution, BHTV logging, results obtained by cross-hole tests and so on, is applied to a dam site that is mainly composed of granite and gneiss was selected. The structure of channel network system was successfully constructed on the basis of these geological information and the results of some cross-hole test.