

孔間透水試験圧力応答パターンの 水みちネットワークモデル 数値実験による検討

杉村淑人¹・森田豊²・渡辺邦夫³

¹正会員 工博 水資源開発公団 試験研究所 (〒338-0812 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) (〒166-0011 杉並区梅里1-7-7)

³正会員 工博 埼玉大学 工学部 (〒338-0825 浦和市下大久保255)

筆者らは、ダム基礎の浸透流を把握し、安全かつ合理的に浸透流を制御するためには、主要な浸透流の経路となっている水みち構造の把握が重要であると考えている。そのため水みち構造と割れ目の水理機構を表現することができる浸透流解析モデルとして、水みちネットワークモデルを提案している。本論文では、まず、この解析で問題となる水みちネットワークモデルにおける貯留効果のモデル化、割れ目の水理モデルとしての「開口性割れ目モデル」と「充填性割れ目モデル」の透水係数の扱い、それらを基礎とした各種水みち構造のモデル化について論述した。次に、風化花崗岩サイトで実施した孔間透水試験結果を分析し、圧力応答パターンを5つに分類した上で、水みちネットワークモデルを用いて孔間透水試験の数値実験を行い、水みち構造が圧力応答パターンに与える影響を明らかにした。

Key Words : fractured rock, hydrogeological structure, channel network model, cross hole test, coefficient of storage, groundwater

1. 序論

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、浸透流の制御の観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。また、過去の経験を基にした現行のダム基礎のグラウチングの技術基準¹⁾について部分的に異論が出されており²⁾、筆者らもダム基礎の水理地質に適合した合理的な遮水計画のあり方について、再検討を行う必要があると考えている。このようなダム基礎の浸透流の制御に関する課題を解決するには、浸透流の性質を的確に把握し評価する技術の確立が極めて重要である。

岩盤中の地下水の流れは、割れ目系に大きく支配される。地下水流れの「場」の把握に当たっては、直接には目に見えない地下の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)系の形態や透水性、およびそれらによる地下水の流動状況をどのように的確に把握・評価し、これをどのようにモデル化するかが最大の課題となる。ダム基礎の水みちの取り出しに

関する研究は、従来からその必要性が多く指摘されているものの、これまであまり取り組まれていない。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は、その適用にあたって技術上多くの問題があることが指摘されているながら³⁾、これに代わる手法が開発されていない現状にある。

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(Channel Network Model)によりモデル化し、浸透流解析を行う手法を研究している^{4),5),6),7)}。

これらの研究の中で、まず割れ目系岩盤の水みち構造調査法を提案した。また、この調査法を風化花崗岩サイトに適用し、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た。さらに、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、水みち構造の抽出がある程度可能なことを示した⁸⁾。

本論文では、まず、水みちネットワークモデル解析で

問題となる貯留係数と透水係数の取り扱いについて検討する。その中で貯留モデルを提案し、また、割れ目について開口性割れ目モデル、充填性割れ目モデルに分け、各々の透水係数の扱いを述べる。さらに、各種水みち構造のモデル化法について論述する。次に風化花崗岩サイトで実施した孔間透水試験結果を基に圧力応答パターンを分類した上で、規則的な水みちネットワークモデルを用いた数値実験により、各種水みち構造と圧力応答パターンや応答値の関係の把握を試みた。

2. 水みちネットワークモデル

(1) 水みちネットワークモデルのコンセプト

水みちネットワークモデルでは、水みち構造調査に基づき取り出された割れ目系を決定論的に水みちとして管路でモデル化することを最大の特徴とし、この管路網が流れの場を構成すると考えている。構造運動の履歴を受けた岩体では、割れ目交差部、ステップ、スプレー構造がより大きな水みちとなることがスイス⁹⁾、スウェーデン¹⁰⁾での研究で明らかにされ、筆者らも釜石鉱山¹¹⁾、Hダム¹²⁾での割れ目系に関する研究で明らかにした。

図-1(a)は、Hダムの風化花崗岩からなる掘削面の同一場所で認められる2種類の割れ目系、すなわちE-W系とNE-SW系およびNW-SE系から成る共役割れ目系を示したものである。同図には、強風化部(割れ目の集中箇所を中心にマサ化が一部進行している部分)の分布が示されており、網掛け部は強風化部の面積が2m²以上、●は2m²以下の風化部を意味する。また、同図には共役割れ目の変位の方向も併記してある。図-1(b)は、図-1(a)からE-W系割れ目およびこれに関連して発達している割れ目構造のみを分離して示したものである。同図には、雁行するE-W系割れ目群および左づれの変位に伴うこれらの雁行割れ目の間に発達するステップ構造、割れ目の端部に発達するスプレー構造が示されている。これらのステップ構造は、その成因から引張り割れ目の性格を有し、同図に示すように、風化が集中しており水みちとなることが示唆される。また、割れ目の交差部も図-1(a)に示すように風化が集中している。筆者らは、割れ目自体も水みちとなるが、これらの割れ目の交差部、ステップ、スプレー構造は、大きな水みちとして線状に伸びていると考えている。

次に、水みちネットワークモデル構築の考え方を述べる。図-2(a)は、4面の割れ目とその一つの中に発達するステップ構造を示すもので、図-2(b)は大きな水みちを成すステップと割れ目相互の交線を示す。さらに割れ目面の透水性を表現するため、仮想的な管路網を図-2(c)に示すように設定する。これらの割れ目交線やステップ構造などによる管路および割れ目面上の仮想的な管路網

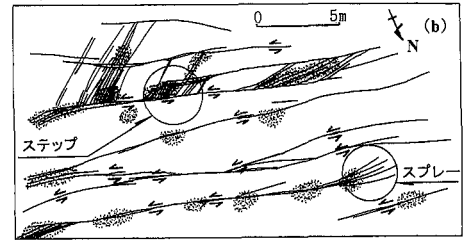
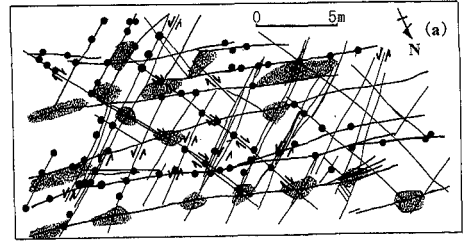


図-1 割れ目系と水みち構造の例

が全体系に組み込まれて、管路網系が構築される。

水みちネットワークモデルでは、割れ目に管路を配しているため、割れ目系を基礎とした解析モデルの設定が容易なこと、および基本的に一次元流解析であるため計算速度が速いことを特徴とする。原位置試験結果と想定した割れ目構造モデルをフィッティングさせる作業では、この特徴を活かし、割れ目の構造を変化させたり、後述する貯留モデルの比貯留係数や割れ目の水理モデルの水理パラメータを変えて、トライアル・アンド・エラー解析を行う。また、筆者らは水みちネットワークモデルの水理パラメータを逆解析により求める検討も行っている¹³⁾。

(2) 貯留モデル

水みちネットワークモデルは、水みち構造調査結果に基づき構築される3次元の管路網で構成され、管路方向には一次元流で、管路の交点で圧力損失が無いことを仮定し、連続式をたて、ダルシー則により管路網の流れを解くものである。図-3は、管路網の交点部付近を取り出して示したもので、各交点B_mで非常定項を取り入れれば、基礎式は式(1)となる。

$$\sum_{j=1}^{N_m} \left[T_{mj} \frac{h_{mj} - h_m}{\Delta L_{mj}} \right] + Q_m = S_m \frac{h_m - h_m^{time-1}}{\Delta time} \quad (1)$$

ここで、N_mは交点B_mに隣接する交点の数、h_mは交点B_mにおける全水頭[L]、h_{mj}は交点B_mに隣接するj番目の交点B_{mj}における全水頭である。また、T_{mj}は交点B_mとB_{mj}を

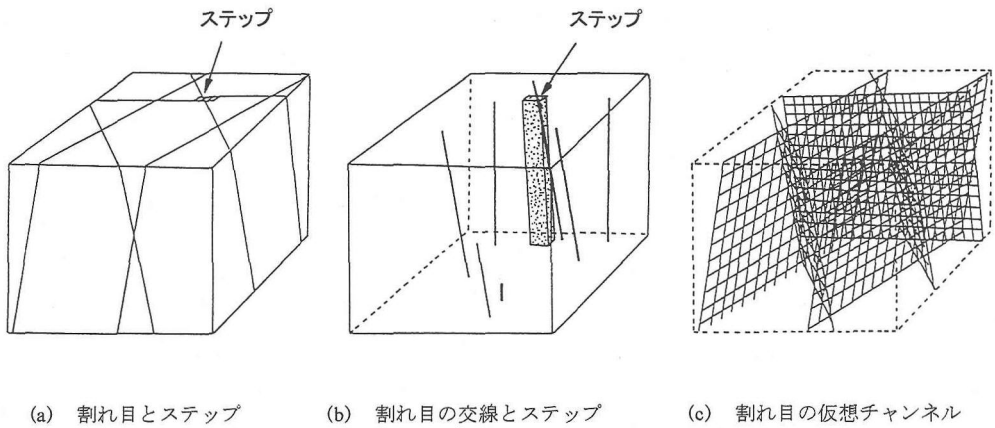


図-2 水みちネットワークモデル構築の考え方

結ぶ管路の透水量係数 $[L^3/T]$ 、 Q_m は交点 B_m に外部からの流出，流入量 $[L^3/T]$ 、 S_{m1} は交点 B_m が受け持つ貯留量係数 $[L^2]$ 、 Δt は計算上の時間ステップ間隔 $[T]$ である。また、添字 $time-1$ は、前の時間ステップにおける値を示す。なお、透水量係数 T_{mj} は、透水係数 k_{mj} と管路断面積 A_{mj} の積で示される。

まず、式(1)中の貯留量係数 S_{m1} の設定の考え方を述べる。 S_{m1} については、田中ら¹⁰⁾が報告しているが、今回はこの考えを発展させ、以下のように取り扱った。 S_{m1} は、式(1)の右辺に関して、単位体積中の流体体積の得失が全水頭の時間変化に比例すると仮定したときの比例定数で、 $[L^2]$ の次元を持つ。一方、比貯留係数 S_s は、単位体積の圧力水頭が単位量だけ変化しただけ、その単位体積が放出したり、貯留に取り込む水の体積を決定するもので $[L^{-1}]$ の次元を持つ¹⁰⁾。本モデルにおいて、貯留効果を管路自体ではなく管路の交点に代表させて持たせる理由は、解析値である全水頭を交点で求めている解析上の理由によっているが、管路の途中に未知点を設定すれば管路にも設定可能である。

解析領域を図-3に示すように単位ブロック（以下、単位貯留ブロックと呼ぶ）の集合体に分割し、管路網が存在する単位貯留ブロックに岩盤の変形係数等を考慮して、比貯留係数 S_s を設定する。この場合、前述の割れ目の交線やステップ、スプレー構造など貯留効果の高いと考えられる構造はそれを考慮して設定する。水みちネットワークモデルの貯留モデルは、単位貯留ブロックがチェーン状に連結した形態となり、これらの単位貯留ブロックは互いに重なり合うことはない。管路網の交点が受け持つ比貯留係数 S_{m1} は、当該単位貯留ブロック内に複

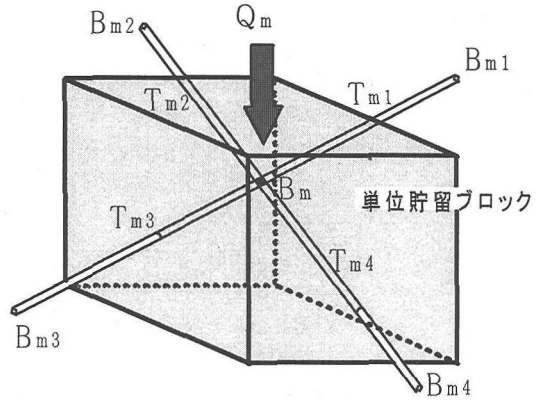


図-3 管路モデルと単位貯留ブロック

数の交点が存在する場合は、交点数で S_s を除いた値を各交点に与える。管路が通過するだけで交点が存在しない単位ブロックは、その貯留分を関連する交点の S_{m1} に割り振ることで考慮するものとし、交点、管路が存在しない単位ブロックはモデルの対象外とする。管路網の交点が受け持つ貯留量係数 S_{m1} は、単位貯留ブロックの体積を V_s $[L^3]$ として、次式で表す。

$$S_{m1} = V_s S_s \quad (2)$$

単位貯留ブロックの概念を用い、この中に存在する管路網の交点に貯留効果を持たせる考え方を導入した理由は、比貯留係数は単位体積に対して定義されており、従来のように単純に管路交点に貯留効果を持たせた場合、

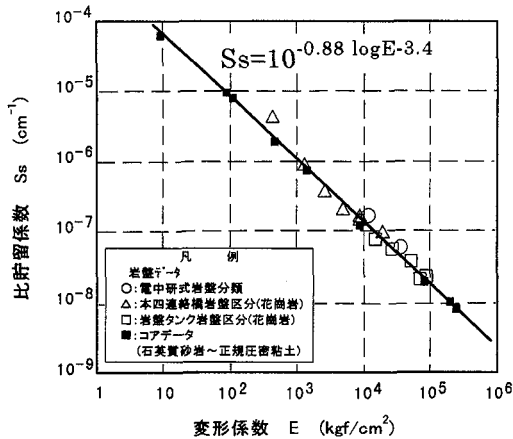


図-4 比貯留係数と変形係数の関係

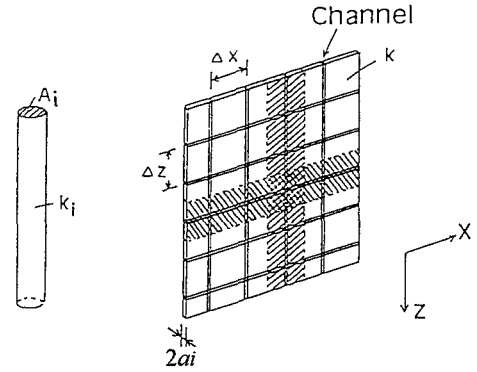


図-5(a) 割れ目に設定する仮想チャンネル

交点の空間密度が考慮されないことによる。

次に、比貯留係数 S_s の設定の考え方を述べる。大津ら¹⁶⁾は、Biotの多次元圧密方程式と等価な地下水挙動を与える連続式を基に比貯留係数を定義した上で、これにデータを当てはめて、図-4に示すように両対数紙上で変形係数 E が数 10kgf/cm^2 の土質材料から数 10万kgf/cm^2 の硬質岩を含めて、 S_s と E がほぼ直線的な関係になることを示した。同図に示す各プロットは、各種地盤、岩盤材料のコアの圧縮率に加えて、電中研式岩盤分類、本州四国連絡橋建設時の花崗岩の岩盤区分および、大規模地下空洞建設時の岩盤区分での巨視的変形係数を用いて算定した結果である。比貯留係数 S_s の一次近似値としては、この大津らが提示した S_s と E の関係図を基に、筆者らが求めた次式を用いる。

$$S_s = 10^{-0.88 \log E - 3.4} \quad (3)$$

ここに、 S_s は比貯留係数 ($1/\text{cm}$)、 E は変形係数 (kgf/cm^2) を示す。

(3) 割れ目の水理モデル

前述したように本モデルでは、水みちは岩盤の不連続面内に存在するか、それらの交線に沿って存在すると考えている。割れ目内に存在する水みちとして、まず、図-1(a), (b)で示した割れ目の交線やステップ、スプレーのような特殊で大きな構造がある。さらに、割れ目はそれ自身高い透水性を有している。その透水性を表現するために、図-5(a)のように仮想チャンネルを仮定する。図中に示すように仮想チャンネルの断面積 A_i と設定するピッチ Δx 、 Δz は、割れ目幅 $2a_i$ と設定する管路のピッチで決まる割れ目の断面積が等価となるようまず設定する。これは、平行平板の流れを想定していることになる。

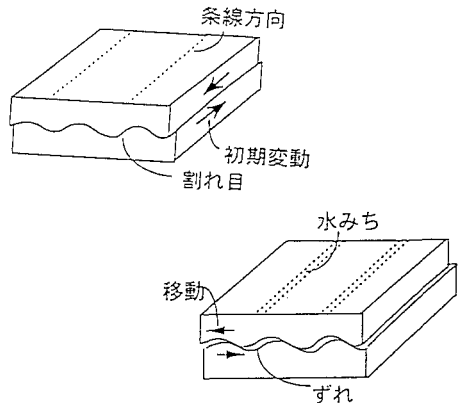


図-5(b) 割れ目断面のずれによる条線方向の水みち

割れ目中の流れは第三紀、第四紀の火山岩類の冷却節理のようにある程度平行平板流れに近いと考えられる引張り節理も存在するが、多くは割れ目中にチャンネル状の水みちを形成しているものと考えられる¹⁷⁾。一般にせん断割れ目には条線などが見られ、図-5(b)に示すようにその形成時において平面ではなく凹凸の断面を持つ。その後、異なる方向に少しでも割れ目がずれることにより、同図に示すように条線方向に開口部が線状に広がる。このような場合は、仮想チャンネルの水理パラメータは異方性を持たせるように設定する。

次に、仮想チャンネルの透水性 k_i の評価が問題となる。この評価のためには、まず、不連続面そのものの透水性の評価を行うことが必要である。水みちのモデル化においては、この不連続面の幾何学的特性を表現するパラメータとしてISRMの指針¹⁸⁾に定義されている10個のパラメータのうち、方向 (Orientation)、間隔 (Spacing)、連続性 (Persistence)、セット数 (Number of Sets)、間

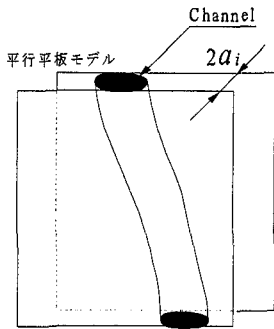


図-6 水理的断面積率 γ_i の概念

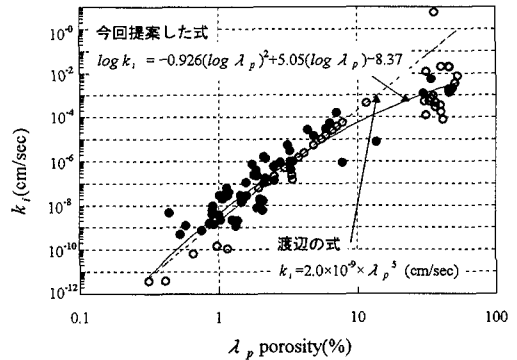


図-7 花崗岩の透水係数と間隙率の関係

隙幅 (Aperture), 粗さ (Roughness), 充填物 (Filling) の7個に着目した。これら7個のパラメータのうち、方向、間隔、連続性、セツト数は、水みちを構成する主要な割れ目系の構造把握のため必要となる。割れ目の透水性は、割れ目の充填物の有無により、開口性割れ目と充填性割れ目の2つに大別してモデル化した。前者には、間隙幅と粗さを、後者には、間隙幅と充填物の透水性を考慮することとし、以下に述べる方法で水理パラメータの一次近似値を求める。以下、本論文では、前者を開口性割れ目モデル、後者を充填性割れ目モデルと呼ぶ。

単一割れ目の流れの抵抗則に関する研究には、C.Luis¹⁹⁾、Lomize²⁰⁾、渡辺ら²¹⁾の室内試験に基づく研究があるが、開口性割れ目モデルの層流抵抗則については、C.Luisの層流条件の適用式に、後述の割れ目の水理的断面積率 γ_i を導入し、次式で示した。

$$q_i = \gamma_i \frac{g}{12\nu \{1+8.8(\delta_i/D_h)^{1.5}\}} (2a_i)^3 J_i \quad (4)$$

ここに、 q_i は単位幅当たりの割れ目内流量、 ν は動粘性係数、 g は重力加速度、 δ_i は割れ目の絶対粗度、 D_h は水理径、 δ_i/D_h は相対粗度、 $2a_i$ は水理的開口幅、 J_i は動水勾配を示す。

式(4)の右辺の γ_i を除いた式は、C.Luis²⁰⁾が280cm (長さ) × 70cm (幅) × 8cm (厚さ) の2枚のコンクリートスラブに3~4mmの絶対粗度をつけ、流れに直交する方向の幅を50cmとして、スパーサで開口幅 $2a_i$ を変化させる平行平板モデルを使用し、動水勾配をピエゾメータで測定することにより求めたものである。

図-6に水理的断面積率の概念を示す。実際の割れ目中の流れは、前述のようにC.Luisの実験式の前提となっている平行平板流れではなく、割れ目中にチャンネルを形成しているケースが多いと考えられる。そこで、水理的開口幅 $2a_i$ で規定される単位長さ当たりの平行平板の断面積に対するチャンネルの断面積の割合を水理的断面積

率 γ_i で定義する。 $2a_i$ は、ボーリング孔壁の見掛けの割れ目幅をポアホールテレビ検層等により求め、この値を第一次近似値として用いる。 γ_i は、ルジオンテストで得られる有効注水圧力 p (kgf/cm²) と単位注水量 q (ℓ/min/m) の関係 (以下、 p - q 曲線と呼ぶ。) の直線部分を水みちネットワークモデルを用いてトライアル・アンド・エラーでフィッティングすることにより求める。なお、 γ_i については、平行平板流れを前提とするC.Luisの式には考慮されていない実際の割れ目の連結性や割れ目面の曲がりなどの抵抗を含ませて表現している。なお、 p - q 曲線が下に凸の放物線型を描く場合は、乱流が発生しており、式(4)は適用できない。開口性割れ目モデルでは、仮想チャンネルの断面積 A_c は、 $2a_i$ と設定したチャンネルピッチに対し、 p - q 曲線をベストフィッティングする γ_i で規定される。

充填性割れ目モデルについては、充填物の透水性をその間隙率から求めるものとした。ここではその事例として、花崗岩の間隙率より透水係数を求める実験式について以下に述べる。ここで風化した花崗岩中の割れ目の充填物は、粘土化した薄いせん断面を除いて、マサ化した部分より成ると考えている。従って、ここでいう充填物とは、割れ目に沿って風化の進んだ部分を主に指している。図-7は、渡辺ら²¹⁾が行った既往の試験データ (図中の●) に、今回現地から採取した様々な風化の程度の花崗岩のサンプリング試料、原位置のマサの不攪乱試料について、室内試験で透水係数と間隙率の関係を求めたものの (図中の○) を加えて作成したものである。この結果、渡辺らが●で示すデータに対して求めた図中に示す花崗岩の透水係数 k_i と間隙率 λ_p の関係式を、今回の間隙率の大きいデータを加えることにより、次式で表現した。

$$\log k_i = -0.926(\log \lambda_p)^2 + 5.05 \log \lambda_p - 8.37 \quad (5)$$

ここに、 λ_p は%表示の間隙率である。実際のフィールド

ドでは、開口性と充填性の両方の性格を持つ割れ目が存在し、充填性割れ目の透水性を基本にして、これに開口性を加味して透水係数を設定することになる。その方法として、充填割れ目内の開口部の平均幅や平均的な開口部の割合などを考えて、充填物の透水係数に開口部の透水係数を加味し、p-q曲線をフィッティングすることにより透水係数を補正する。充填物がマサ以外の場合は、透水係数 k と間隙率 λ_p の関係式が得られていないため、p-q曲線を直接フィッティングすることにより透水係数を求める。なお、充填割れ目モデルの仮想チャンネルの断面積は、ボアホールテレビ検層や掘削面等の情報から割れ目幅を求め、設定したチャンネルピッチから平行平板流れと等価な断面積を求めることにより設定する。

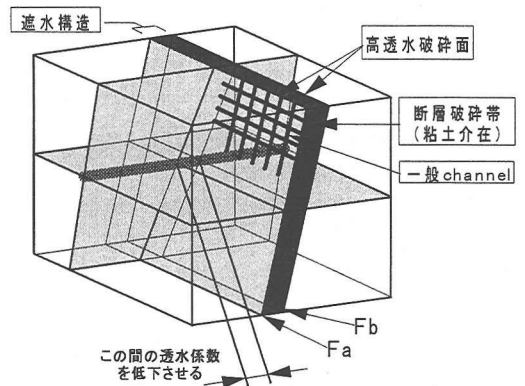


図-8 遮水構造を考慮した割れ目モデル

(4) 各種水みち構造の表現と遮水割れ目

次に各種の水みち構造の水みちネットワークモデル上での取扱い方法について述べる。筆者らは、長い地質年代下で様々な応力履歴を受けた岩盤では、割れ目と割れ目の交線部、ステップ構造、スプレー構造などが大きな水みちを形成していることを、風化花崗岩を主体とするHダムの掘削面の割れ目系の風化部の分布調査から明らかにした。これらの水みちには、独自に透水係数とその断面積を設定出来るようにしている。線状構造で伸びるこれらの水みちの断面積は、掘削面の実測により風化してマサ化したこれらの箇所を円で近似して求める。Hダムの場合この数値は対数正規分布によく適合する結果が得られた²⁴⁾。従って、断面積としては、一つの対象岩盤に対して求められたその分布に従って与えることができる。また、透水係数は、風化花崗岩で緩みなどによる開口性がない割れ目に対しては、マサの充填した割れ目として、間隙率から式(5)により見積もりうる。

以上示した手法により、高透水性割れ目系をチャンネル網によってモデル化できるが、実際の岩盤では別の構造がある。それは難透水性の断層粘土を含む断層破砕帯である。これは特に破砕帯直交方向の浸透流に対して遮水性を持つことになる。また断層破砕帯は、その両側もしくは内側に断層粘土が少なく、岩が破砕しただけの高透水ゾーンを発達させることも多い²⁵⁾。つまり、破砕帯直交方向には止水性を持ち、破砕帯に沿った方向には高透水性を持つ異方性を示すことが多い。そのため、解析モデルでは図-8に示すように高透水ゾーンを模擬した2枚の割れ目面Fa、Fbを考え、この面を通過する割れ目(管路)のこの間の透水係数を小さくする。断層破砕帯の遮水効果を表現するモデルでは、破砕帯部を通過する部分の割れ目のチャンネルの透水係数を元の透水係数に対し一定の割合で透水係数を減じる遮水係数 α を導入する。高透水ゾーンは、同図のFaおよびFbで表す割れ目面の仮想チャンネル透水係数を大きくすることで表現し

た。

以上をまとめると、水みちネットワークモデルでは、上述の水みち構造に応じて設定した高透水性チャンネルと難透水性チャンネルを組み合わせ、岩盤内の浸透流を解析することになる。

3. 孔間透水試験の圧力応答パターンと水みち構造の関係に関する数値実験

(1) 圧力応答パターンの分類

孔間透水試験は、複数のボーリング孔間の圧力応答特性を調べるものである。亀裂性岩盤を対象として孔間透水試験を実施した場合、様々な圧力応答パターンが観測される。そのパターンと応答値が試験エリアの水みち構造を反映していると考えられることから、筆者らは圧力応答パターンと水みち構造の関係を把握することの重要性を指摘している²⁶⁾。圧力応答の実測結果を、前述した方法で作成したチャンネルネットワーク内の浸透流解析結果と比較して、より、現実的なチャンネルの水理パラメータを求めていく。この作業をここではフィッティングと呼ぶ。水みちネットワークモデルで孔間透水試験結果をフィッティングする作業の中で、各割れ目の一般チャンネルや割れ目の交線の水理パラメータを効率よく検討するには、あらかじめチャンネルの水理的性質とその応答特性との関係を把握しておくことが必要不可欠となる。孔間透水試験の圧力応答パターンは、試験エリアの水みち構造(遮水構造、水みちの連結構造)、水みちの透水性、自然状態の地下水流動条件(地下水の水頭分布、飽和・不飽和条件)、注水時間等の影響を受ける。水みちの構造とその透水性を把握する場合、注水圧力に対する注水量、観測孔の最大応答値は重要な指標である。ここでは、孔間透水試験の圧力応答パターンと水みち構造の関連に主として着目して、前述の充填割れ目モデルを用いた数値実験により解釈を試みる。ここで、実際に行

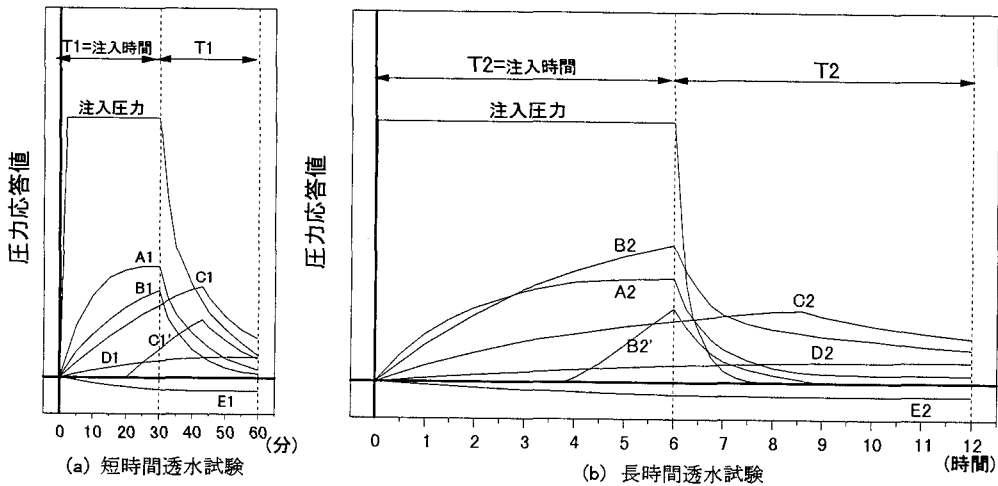


図-9 孔間透水試験圧力応答パターンの分類

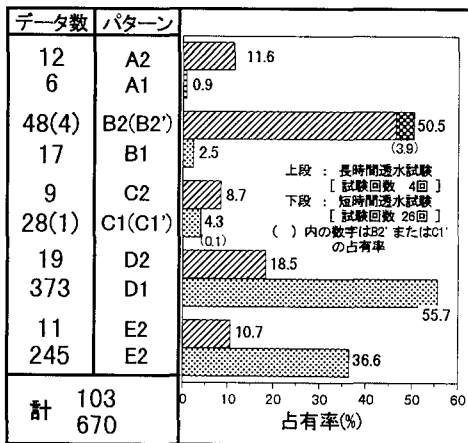


図-10 Hダムの孔間透水試験に見られた圧力応答パターンの占有率

われた試験のうち、注水時間が30分程度の試験を短時間透水試験、5時間程度以上のそれを長時間透水試験と呼ぶ。

図-9は、既に報告している風化花崗岩サイトであるHダムにおいて実施した孔間透水試験²⁾において、短時間透水試験（注水回数：26回、延べ受信点データ数670）と長時間透水試験（注水回数：4回、延べ受信点データ数103）時の受信区間の圧力応答パターンをA, B, C, D, Eの5つに分類したものである。添字1は短時間透水試験, 2は長時間透水試験の結果である。この分類は、注水時間の2倍程度の観測時間中に観測された圧力応答値を注水停止時の時間と圧力応答のピーク時間との関係、圧力上昇速度がほぼゼロになったか否か、圧力応答の立ち上がりの時間に注目して分類したものである。図中、Aは注

水開始とともに圧力が上昇した後、ほぼ一定値となり、注入終了とともに圧力低下を示すパターンである。Bは、Aに対し、注入時間内に圧力が一定値に達しないものである。C, Dは、注入終了後に圧力がピークに達するものであり、Dは、所定時間内にピークが認められないものである。極めて長時間観測を続ければ、DパターンはCになると思われるが、圧力応答が極めて遅いという意味で、ここでは別のパターンに分類した。一方Eは、全く圧力応答が認められないものである。このパターンは、当該試験の前の注水の影響が残っていたり、試験前の降雨の影響が残っている場合などに生じる。

図-10は、この孔間透水試験において観測された各圧力応答パターン発生累計の延べ受信点数に対する割合（以下、占有率と呼ぶ）を、短時間透水試験と長時間透水試験に区分して示したものである。後述するように、一般的に注水孔と観測孔の連結する経路が相対的に高透水の順に、A1, B1, C1, D1, E1のパターンとなると考えられる。なお、生起率は低いが、図-10に示すように一定時間経過した後、急激な圧力応答を示すB2'とC1'が稀に存在するが、表では各B2, C1に一括して分類した。今回の試験では、2Lu程度未満の低透水を示す区間からの注水は、周辺観測孔にはほとんど応答が認められないD1, D2パターンに属することが多い。図-10において、短時間透水試験では、A1, B1, C1の占有率が小さく、D1の占有率が多いが、長時間にわたって注水するとそれらのパターンが移行し、A2, B2, C2の占有率が増加する傾向を示す。今回の研究では、それらのパターンの発生理由について数値解析により検討した。

(2) 圧力応答パターンの数値解析

各種の圧力応答パターンの発生理由については、当該

表-1 検討ケース

ケース	一般チャンネル		高透水割れ目					高透水交線		遮水構造		試験時間 区分
	k=1.0×10 ⁻⁶	k=5.0×10 ⁻⁶	F ₁₁	F ₁₂	F ₂	F ₃	F ₄	低角度	高角度	高角度	低角度	
								C ₁₁ , C ₁₂	C ₂	S ₁	S ₂₁ , S ₂₂	
Case-B1	○											短時間
Case-B2		○										短時間
Case-F1		○	○	○								短時間
Case-F1'	○		○	○								短時間
Case-F2		○	○	○	○							短時間
Case-F3		○	○	○		○						短時間
Case-F4		○	○				○					短時間
Case-FC1		○	○	○				○				短時間
Case-FC2		○	○	○					○			短時間
Case-FS1		○		○						○		短時間
Case-FS2		○		○						○	○	短時間
Case-F4L		○	○				○					長時間
Case-SS		○										短時間

注) (単位) k : m / s

岩盤の割れ目系を水みちネットワークモデルで再現し、解析する必要がある。しかし、今回は圧力応答パターンの発生理由を検討するため、モデル的な規則的割れ目系を仮定して検討した。モデル的な検討を行った理由は、下記の3点である。

- ・簡単な割れ目系、水みちネットワーク網を仮定することにより各圧力応答パターンの発生理由が、よりよく把握し得る。
- ・規則的な割れ目系を仮定することにより、地下水流動パターンがよく把握しえ、水みちネットワークモデルを用いた解析の利点、欠点が検討し得る。
- ・従来の孔間透水試験の圧力応答パターン解析は、有限要素法など均質多孔媒体モデルを用いて行われることが多かった。今回はそれと比較し易い、規則的な割れ目モデルを導入する。

今回の解析では、このように仮想的な割れ目等を仮定し、圧力応答パターンや応答値の各ケース間の相対的値に着目しているため、実際の応答値とは異なることになる。

図-11(a)～(d)は、今回用いた数値実験のモデルを示すもので、Hダムの風化花崗岩からなる孔間透水試験サイトを想定している。図-11(a)において、30m×30m×30mの領域に水平、鉛直の互いに90°で交わる割れ目を

図のように5mピッチで設定した。解析場の大きさや、注水孔の位置は実際の試験に則し、割れ目系のみ規則的なネットワークとしている。これらの割れ目面上に仮想チャンネルを1mピッチ(以下、一般チャンネルと呼ぶ)で格子状に発生させ、5本のボーリング孔を同図のように配置し、地表より5mの等間隔でステージ分割を行った。境界条件は、A面でGL-1m、B面でGL-3mの一定水頭を与え、C面、D面と底面は閉境界とした。注水区間は、BHNo.3孔第3ステージ(GL-10～15m)とし、注水圧力は0.3Mpa(3kgf/cm²)とした。注水時間は30分間を基本とし、その後の応答状況を把握するためさらに90分間計算した。

表-1は、数値実験を行った検討ケースを示す。着目した要素は、一般チャンネルの透水係数の差異、高透水割れ目(F₁₁, F₁₂, F₂, F₃, F₄)、高透水交線(C₁₁, C₁₂, C₂)、遮水構造である垂直遮水(S₁)、2枚の水平遮水構造(S₂₁, S₂₂)、注水時間(30分注水、6時間注水)、比貯留係数の分布の影響である。これらの各検討ケースで着目した要素について、高透水割れ目の位置を図-11(a)に、高透水交線の位置を図-11(b)に、遮水構造の位置を図-11(c)に、比貯留係数の分布に変化を持たせた領域を図-11(d)に示す。なお、チャンネルの透水係数は、表-1で指定する

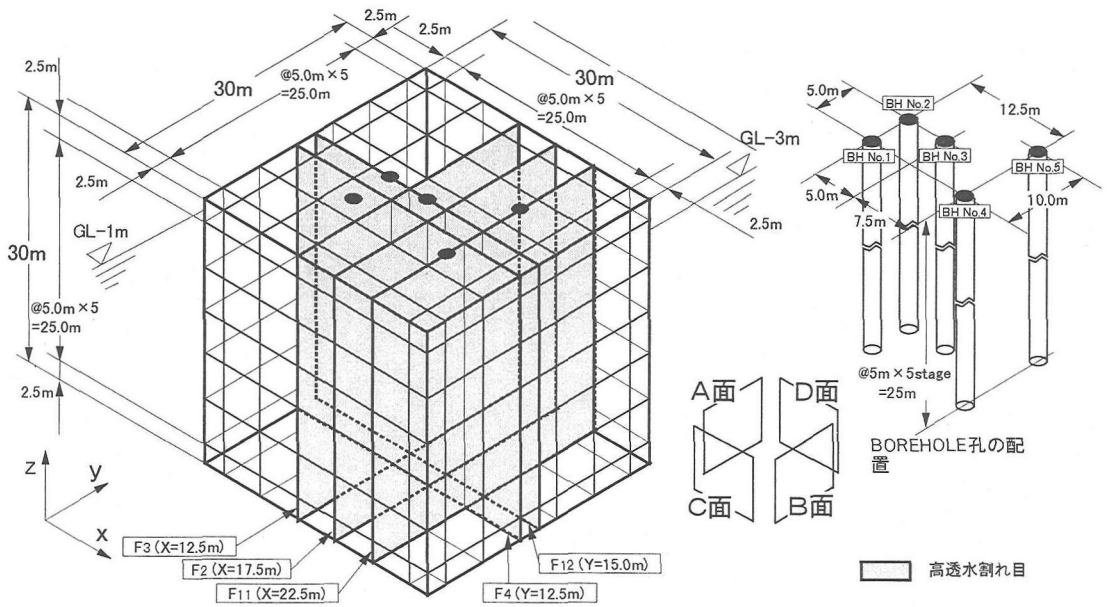


図-11(a) 一般割れ目と高透水割れ目のモデル

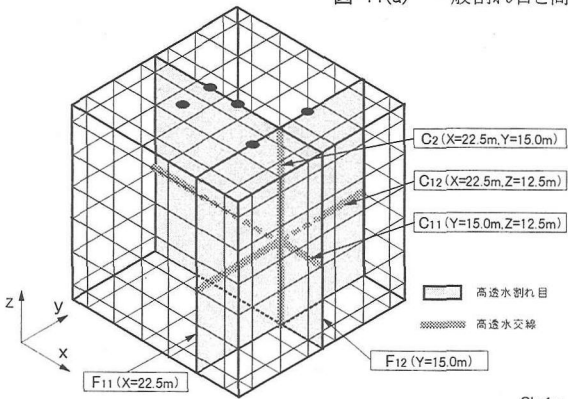


図-11(b) 一般割れ目と高透水割れ目と高透水交線のモデル

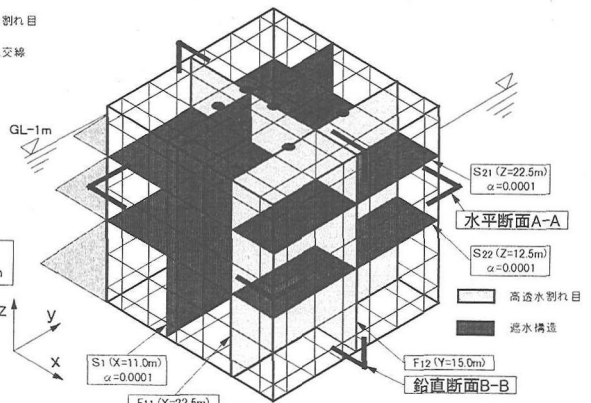


図-11(c) 一般割れ目と高透水割れ目と遮水構造のモデル

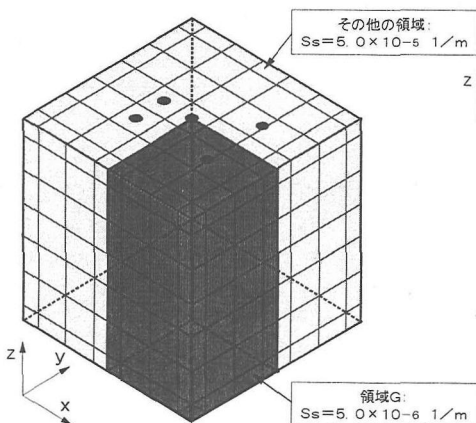


図-11(d) 比貯留係数の分布に変化を持たせたケース

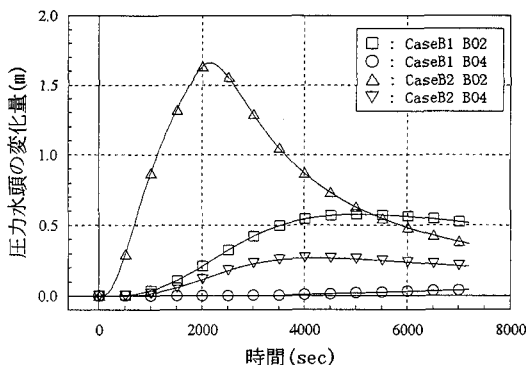


図-12 一般チャンネルの透水係数の差異

場合以外は一般チャンネルおよび交線とも同じ透水係数を与えた。チャンネルの断面積は、割れ目の交線を含め全て 0.05m^2 とした。これは、前述のHダムの掘削面の割れ目交差部のマサ化した箇所を円で近似して求めた直径の実測の最頻値が 30cm (断面積で 0.07m^2)であった²⁴⁾ことを参考にして設定した値である。なお、一般チャンネルの断面積を 0.05m^2 と設定することは、一般チャンネルのピッチを 1m で設定しているの、割れ目幅 5cm の平行平板流れを想定していることに相当する。Hダムの風化花崗岩のサイトの掘削面では、この程度マサを介する割れ目幅は一般的なものであることから、この値を採用した。また、比貯留係数は、その分布に着目するCase-Ssを除き、 5×10^{-5} / mとした。この値は、図-4によれば変形係数で約 $3,000\text{kgf/cm}^2$ の岩盤に相当している。

図-12は、一定の透水性を持つ割れ目が一定のパターンで分布している場合、一般チャンネルの透水性が圧力応答パターンに与える影響を検討したもので、Case-B1とCase-B2の比較である。同図には、BHN0.2およびBHN0.4の第3ステージ (GL-10~15m) の圧力応答の初期値からの変化分を示している。以下の検討でも、同様に両孔の第3ステージに代表させて応答を評価している。圧力応答パターンは、一般チャンネルの透水性が $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ (Case-B1) から $5 \times 10^{-6} \text{m/s}$ (Case-B2) に5倍大きくなると、注入孔に近いBHN0.2はD1からC1に変わる。注入孔から遠いBHN0.4は両ケースともパターンはD1であるが、Case-B2は注水開始後約5,000秒経過した時点で圧力応答のピークに達しており、一方Case-B1は7,000秒でも上昇傾向を示している。最大圧力応答値は、Case-B2がCase-B1に比較してBHN0.2で約2.8倍、BHN0.4で約6倍程度大きい。水みちの経路が短いBHN0.2がBHN0.4より圧力応答値が大きい。

図-13は、図-11(a)に示す高透水割れ目 ($5 \times 10^{-5} \text{m/s}$: F₁₁, F₁₂) が注入孔と観測孔 (BHN0.2, BHN0.4, BHN0.5) とを直結する場合の影響を検討したもので、Case-B2とCase-F1を比較している。高透水割れ目が直結する

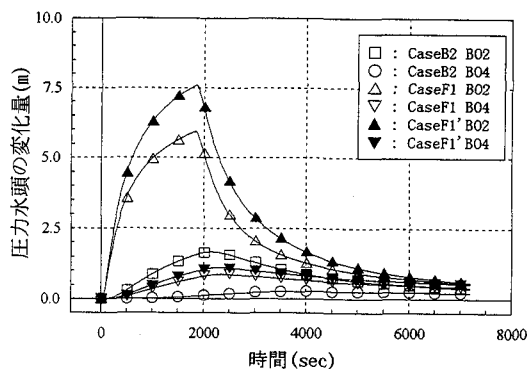


図-13 高透水性割れ目と一般チャンネルの透水性の差異の影響

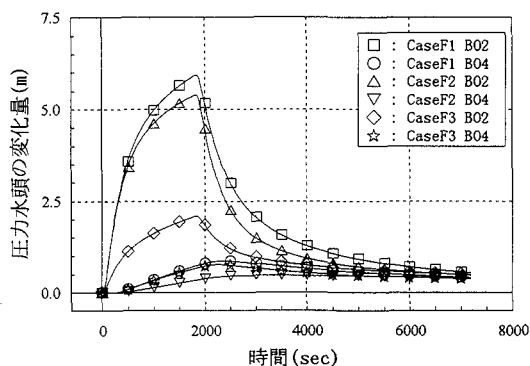


図-14 非直結性高透水割れ目の影響

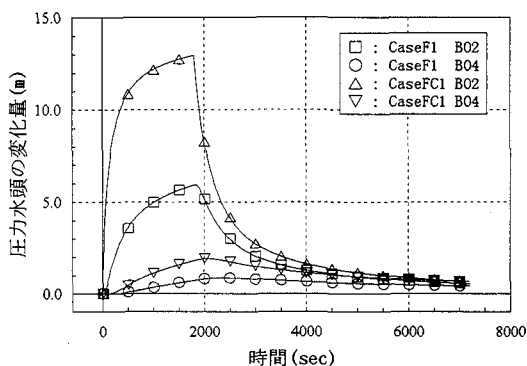


図-15 高透水性低角度交線の影響

Case-F1は、Case-B2に比較し最大圧力応答値は、BHN0.2で約3.5倍、BHN0.4で約2倍大きくなっている。また、圧力応答パターンは、BHN0.2はD1からB1に、BHN0.4ではD1からC1に変化している。同図にはCase-F1で一般チャンネルの透水性を $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ にしたCase-F1'も併せて示している。このように圧力応答パターンおよび応答値は、基本的に領域の高透水性割れ目の存在に影響を大きく受ける。

図-14は、図-11(a)に示す注水孔と観測孔とは直結しない高透水割れ目 (以下、非直結性高透水割れ目と呼ぶ)

の影響を評価したものである。ここでは、非直結性高透水割れ目が存在しないCase-F1と、それが存在するCase-F2、Case-F3を比較している。Case-F2とCase-F3の非直結性割れ目の位置は、図-11(a)に示されている。この図から、非直結性高透水割れ目が存在する場合は、観測孔の圧力応答が低下することが判る。その低下の度合は、注水孔および観測孔と非直結性高透水割れ目の位置関係により大きな影響を受ける。例えば、BHNo.2の応答に着目すると、注水孔とBHNo.2の間に非直結性高透水割れ目F₃が存在するCase-F3の最大圧力応答値は、それが存在しないCase-F1、Case-F2に比較し、約1/3強程度低下している。

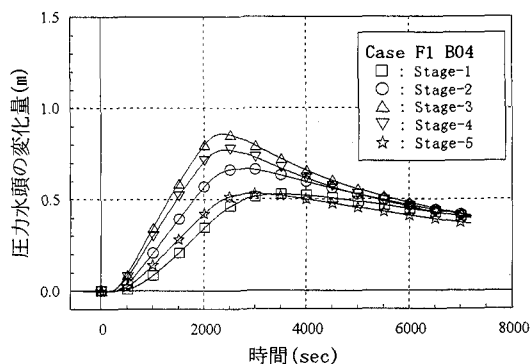
図-15は、高透水割れ目(F₁₁、F₁₂)に、図-11(b)に示すこれらの割れ目と交差する水平割れ目の交線C₁₁、C₁₂(透水性： 5×10^{-4} m/s)を介して注水孔と観測孔が直結する場合(Case-FC)の影響を、Case-F1と比較したものである。前述のように割れ目が集中する割れ目の交線は、周辺よりさらに透水性が高い。つまり、透水性分布の局所性が大きい。図中にみられるように、最大圧力応答値はCase-FCはCase-F1に比較し2倍程度大きく、パターンも高透水性割れ目モデルでみられたパターンが顕著となる。

図-16(a)、(b)は、それぞれCase-F1、Case-FC2におけるBHNo.4の各ステージの圧力応答を示したもので、この両者を比較することにより図-11(b)に示す鉛直割れ目の交線C₂(透水性： 5×10^{-4} m/s)の影響を評価する。この図から、経路の途中に存在する高透水性の高角度割れ目の交線は、ステージ間の圧力応答値の差を縮小する方向に機能することが判る。

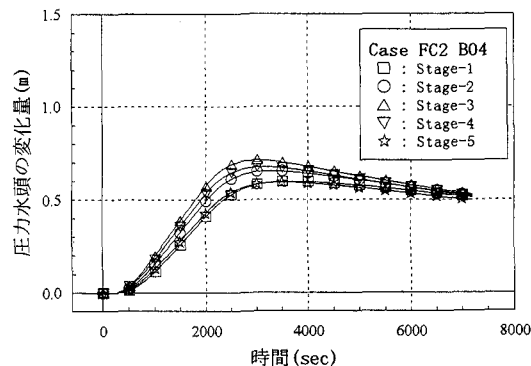
次に、遮水構造と高透水割れ目の影響について検討する。遮水構造は、図-11(c)に示す垂直遮水層(S₁)と2枚の水平遮水層(S₂₁、S₂₂)の2ケースを設定した。Case-FS1は、遮水層S₁に加えて高角度割れ目F₁₁、F₁₂が存在し、Case-FS2はこれらに加えてS₂₁、S₂₂が存在するモデルである。これらの遮水層の厚さは全て10cmとし、遮水係数 α は0.0001とした。

図-17(a)、(b)、(c)は、Case-FS1についてそれぞれ注水前、注水開始後30分、注水停止後30分の時点の図-11(c)に示す水平断面A-Aの圧力水頭分布を示したものである。注水前には、垂直遮水層(S₁)により地下水流れが遮水され、地下水面が階段構造になっていること、注水開始後には垂直高透水割れ目沿いに圧力が上昇するものの、S₁で遮断されること、注水停止後は垂直割れ目沿いに急速に圧力低下が生じ、その周辺は注水時に上昇した圧力が残存し、垂直割れ目に向かって徐々に排水されるに従って、圧力低下を生じていることが判る。

図-18(a)、(b)、(c)は、Case-FS2について同様な時点の図-11(c)に示す鉛直断面B-Bの圧力分布を示したも



(a) 高透水性高角度交線無し

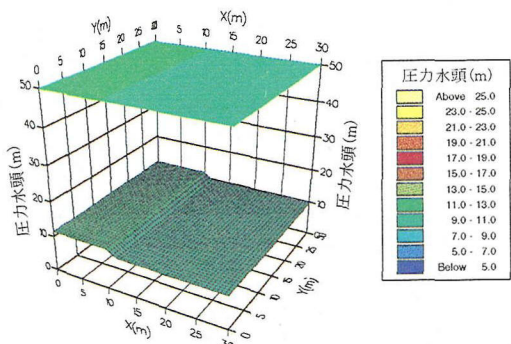


(b) 高透水性高角度交線有り

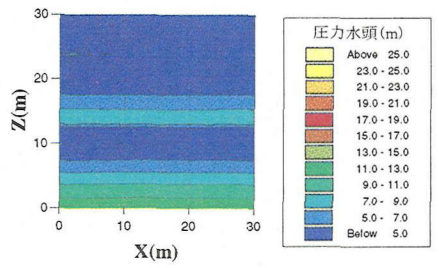
図-16 高透水性鉛直交線の影響

ので、境界条件は同図のA面およびB面において水平の遮水層S₂₁、S₂₂で遮水された3層の地下水構造を与えた。これらの図から、層状の地下水構造と、遮水層に囲まれた領域での注水は、その領域外に影響がおよぼしく、一方領域内では圧力が上昇する現象が生じていることが判る。遮水構造に関する2ケースの検討結果から、前述の遮水モデルの有効性が示されている。なお、Case-FS2は、Hダムの孔間透水試験サイトの遮水構造を模擬したものであり、実際の試験でも前述の解析結果のような現象が生じている²⁰⁾。

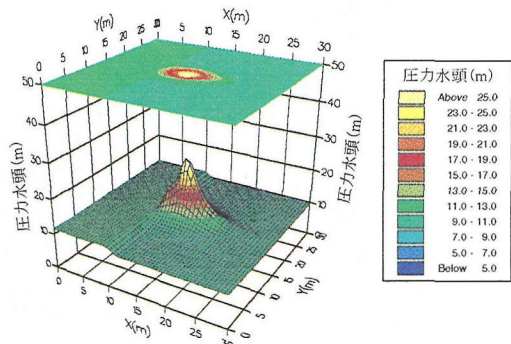
次に、図-11(a)に示す注水孔BHNo.3が高透水割れ目に直接交差していないCase-F4の応答について検討する。Case-F4では、一般チャンネルの透水性を 5×10^{-6} m/sとし、高透水割れ目としてF₁₁、F₄(両割れ目の透水性： 5×10^{-4} m/s)が存在する。図-19は、Case-F4と注水孔が図-11(a)に示す高透水割れ目(F₁₂)中に存在するCase-F1について、BHNo.2とBHNo.4の第3ステージの圧力応答を比較したものである。同図が示すように注水ステージが高透水割れ目と直接交差していないCase-F4はCase-F1と比較して圧力応答は極端に小さく(このケー



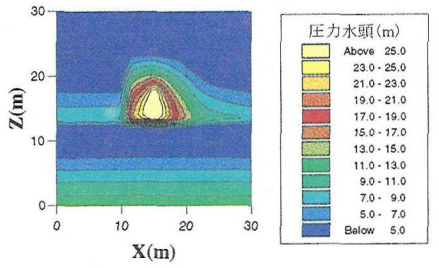
(a) 注水前



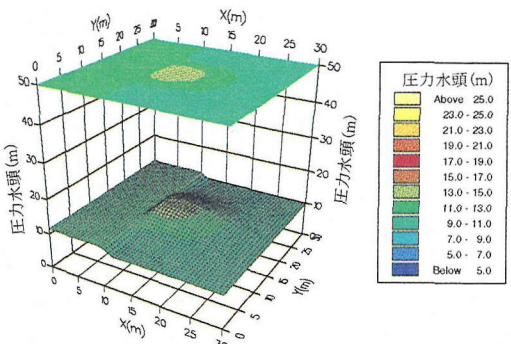
(a) 注水前



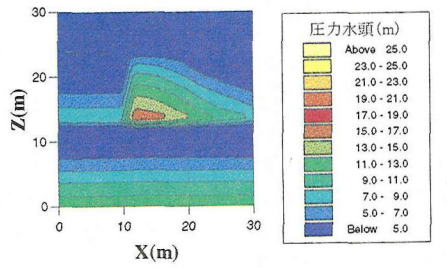
(b) 注水開始後 30 分



(b) 注水開始後 30 分



(c) 注水停止後 30 分



(c) 注水停止後 30 分

図-17 遮水構造(S_1)と高透水割れ目(F_{11}, F_{12})が存在する場合の圧力応答の分布 (A-A 断面)

図-18 遮水構造(S_1, S_{21}, S_{22})と高透水割れ目(F_{11}, F_{12})が存在する場合の圧力応答の分布 (B-B 断面)

スでは1/8~1/10)、圧力応答パターンも前者が前述の高透水パターンであるのに対し、後者は低透水パターンを示している。注水量については、前者が1.0 l/min、後者が11.7 l/minとなり、水みちが存在しても注水区間と直結していないと、注水量が激減し、その結果観測孔への圧力応答も大きく低下する。

前述の高透水性水みちに関する検討結果を以下にまとめる。注水区間と観測区間を連結する高透水性水みちが存在する条件は、両者の透水性が高いことが前提となる。この場合、圧力応答値が大きくなり、注水開始後の圧力上昇速度が大きく、注水停止後圧力は急低下する。すなわち、A1やB1の高透水性パターンとなる。注水区間と観測区間を連結する経路の長さも影響し、経路が短いほど圧力応答値は大きく、高透水性のパターンとなる。但し、注水区間と観測区間を連結する高透水性水みちが存在しても、その経路の途中に非直結性の高透水性割れ目が存在すると、その影響を受けて圧力応答値は低下し、圧力応答パターンも変わってくる。また、高透水性水みちが存在しても、注水区間に直結していなければ、注水量が小さくなり、周辺観測孔の圧力応答値は小さく、圧力応答パターンもA1やB1などの高透水性のパターンは出現しない。孔間透水試験は、水みちの経路を把握するためのものであり、これらのことから、ボーリング孔は水みち構造を支配していると考えられる割れ目を的確かつ、効率的に貫くよう配置することが重要であることがわかる。

次に、注水時間が圧力応答パターンに与える影響について検討を行う。ここでは、Case-F4の注水時間30分のケースに対し、注水時間を6時間としたケースをCase-F4Lとし、両者を比較することにより検討を行った。図-20にCase-F4LのBHNo.2およびBHNo.4の第3ステージ圧力応答を示す。図-19に示すCase-F4との比較において、このケースではともに短時間透水試験でC1やD1パターンであったものが長時間注水するとA1パターンに変化している。図-10に示した短時間透水試験と長時間透水試験で圧力応答パターンが、C1、D1が減少しA1、B1が増加する現象は、長時間の注水により観測孔の圧力が次第に定常状態に近づいていく現象を示している。

次に、岩盤の変形係数の分布、即ち比貯留係数の分布が圧力応答に与える影響を評価してみる。図-11(d)において、領域Gの比貯留係数を 5×10^{-5} /m、その他の領域は 5×10^{-4} /mとした。図-21は、比貯留係数以外の条件はCase-B2と同じとしたCase-Ssについて、Case-B2のBHNo.4とBHNo.5の圧力応答を比較したものである。同図が示すように、式(5)からみて、岩盤の変形係数が10倍程度小さい岩盤が領域Gに分布すると、領域Gのみならず、その周辺域も含めて圧力応答値が高くなる現象が

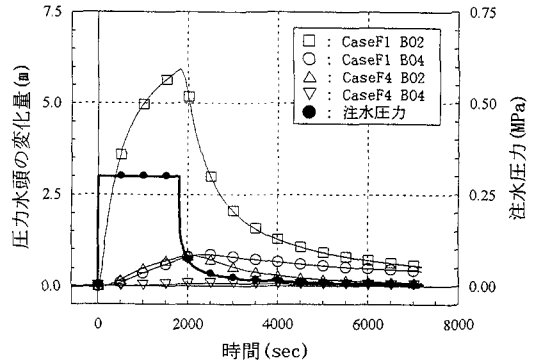


図-19 注水孔と高透水割れ目の位置 (短時間透水試験)

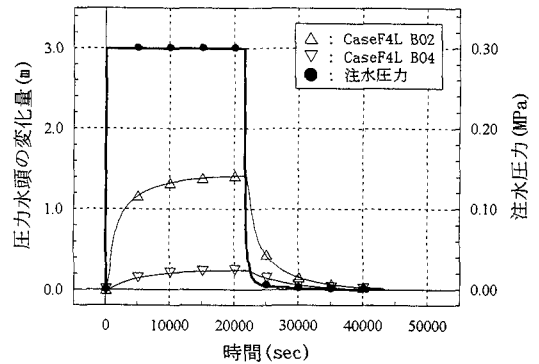


図-20 長時間透水試験

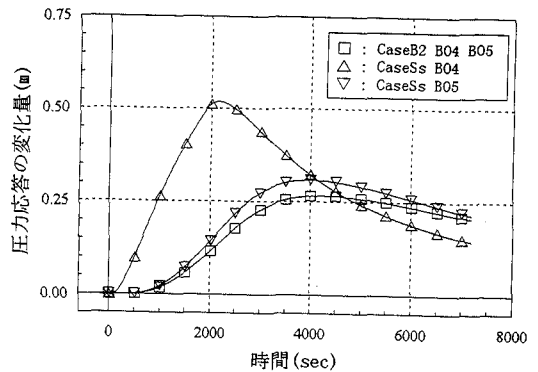


図-21 岩盤の変形性 (比貯留係数) の分布の差異

生じることが判る。

このように、水みちネットワークモデルを用いることにより、圧力応答パターンの違いが岩盤の水みちや遮水構造の特徴から説明ができる。これはこの解析法の一つの特徴であり、大きな利点といえる。また、どの割れ目や構造が、水みちとなっているかを評価することができる、といえる。しかしながら、今回の解析では、パターンのみに着目し、応答量や各パターンの現れる場所などについては検討していない。今後は実際の割れ目系を考

慮した解析が必要である。

4. まとめ

筆者らは、目に見えない地下の岩盤の浸透流の把握の困難性により、従来経験に依存する部分が多かったダム基礎の浸透流の制御に新たな科学的ツールを与えるため、水みち構造の把握とこれを表現可能な水みちネットワークモデルの開発を進めている。本論文は、その一環として水みちネットワークモデルのモデル化の改善に関する提案と同モデルによる孔間透水試験解析を行う上で必要不可欠な圧力応答パターンと圧力応答値の水みち構造との関係の把握の試みを行ったもので、その結果は以下のとおり要約される。

- 1) 水みちネットワークモデルにおける貯留モデルとして、単位貯留ブロックに比貯留係数を設定し、これを管路網の交点が受け持つ比貯留係数に割り振る方法を提案した。
- 2) 割れ目の水理モデルとして、開口性割れ目モデルと充填割れ目モデルを提案した。前者については、割れ目中の流れはチャンネル流れであると考え、C.Luisの層流公式に水理的断面積率 γ を導入した。水理的断面積率 γ は、水理的開口幅 $2a$ で規定される単位長さ当たりの平行平板の断面積に対するチャンネルの断面積の割合とした。
後者については、充填物の透水係数を求める方法として、風化花崗岩について不攪乱試料等の室内試験より求めた透水係数と間隙率の関係式を示し、それにより評価する考えを示した。
- 3) 水みちネットワークモデルにおける水みち構造のモデル化と断層破碎帯の遮水・透水構造のモデル化方法等を示し、後者についてはその有効性を数値実験で示した。
- 4) 風化花崗岩サイトにおける孔間透水試験結果（総注水回数30回、延べ受信点773）の圧力応答パターンを分析した結果、5つのパターンに大別された。
- 5) 仮想的な水みちネットワークモデルを用いた数値実験により、割れ目の一般チャンネルの透水性の差異、高透水性の高角度割れ目、高透水性低角度交線、高透水性高角度交線、遮水構造、変形係数（比貯留係数）が異なる岩盤の分布などの水みち構造が、上記の圧力応答パターンおよび圧力応答値に与える影響が把握された。

今後、今回得られた知見を基に、風化花崗岩サイトで実施した孔間透水試験結果を水みちネットワークモデルで再現することにより、水みち構造モデルの妥当性と浸透流解析手法としての水みちネットワークモデルの有効性を検討する考えである。

参考文献

- 1) グラウチング技術指針・同解説、国土開発技術研究センター、pp.50-51、1983.11.
- 2) 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.
- 3) 野瀬正儀、横田殉、大長昭雄：ダム建設におけるカーテングラウチング並びに岩盤内ドレイン設備の設計の合理化に関する一考察、発電水力、No.61、pp.34、1962.12.
- 4) WATANBE KUNIO, SUGIMURA YOKITO, MORITA YUTAKA, TANAKA TATSUYA: Channel network modelling of the fractured granite in the Hinachi area, Japan, Developments in Geotechnical Engineering, 81 *Earthquake Proof Design and Active Fault*, pp.247-262, 1997.
- 5) 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.
- 6) 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講演概要集第3部、pp.624-625、1996.
- 7) 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.
- 8) 杉村淑人、森田豊、渡辺邦夫：ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み、土木学会論文集、No.582/III-41、pp.229-246、1997.12.
- 9) Munier,R.: Four dimensional analysis of fracture at Äspö hard rock laboratory, *Engineering Geology*, Vol.33, pp.159-175、1991.
- 10) Mazurek,M., Bossart,P., EliassonT.: Classification and characterization of water conducting features at Äspö, Results of Phase I investigations, Progress Report259503, SKB, pp.1-73、1995.
- 11) 三枝博光、渡辺邦夫、大沢秀昭：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、土木学会年次学術講演会講演概要集第3部、pp.710-711、1995.
- 12) 杉村淑人、森田豊、渡辺邦夫：ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み、土木学会論文集、No.582/III-41、pp.233-236、1997.12.
- 13) 杉村淑人、松田育子、富森勲、増本清、渡辺邦夫：水みちネットワークモデルを用いた浸透流逆解析に関する数値実験、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.371-376、1998.1.
- 14) 田中達也、三上哲司、永久和正、渡辺邦夫：Don-Chanモデルを用いた非定常浸透流解析の試み、土木学会年次学術講演会講演概要集第3部、pp.236-237、1995.

- 15) P.A.ドミニコ, F.W.シュワルツ: 地下水の科学 I - 地下水の物理と化学 -, 地下水の科学研究会 (大西有三監訳), 土木工学社, pp.89, 1995.
- 16) 大津宏泰, 安達哲也: 比貯留係数の物理的特性に関する一考察, 第28回土質工学発表講演集, Vol.28th, No.2-2, pp.2193-2194, 1993.6.
- 17) 杉村淑人, 森田豊, 山口昌広, 渡辺邦夫: 室内および原位置試験による岩盤の層流・乱流抵抗則, 岩盤構造物の設計法に関する研究報告書 (付: シンポジウム発表論文集), (財) 日本学術協力財団, (社) 地盤工学会, pp.43, 1997.12.
- 18) 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.
- 19) C.Luis: A Study of groundwater flow in jointed rock and its influence on stability of rock mass, Imperial College Rock Mechanics Report No.10, pp.49, 1969.9.
- 20) Lomize, G.M.: Water flow in joints, Science Academy of Arm. SSR, 1947.
- 21) 渡辺邦夫: 岩盤割れ目系の諸地質量を考慮した岩盤浸透流の解析に関する基礎的研究, 埼玉大学学位論文, pp.124-130, 1983.4.
- 22) C.Luis: A Study of groundwater flow in jointed rock and its influence on stability of rock mass, Imperial College Rock Mechanics Report No.10, pp.34-49, 1969.9.
- 23) WATANBE KUNIO, SUGIMURA YOKITO, MORITA YUTAKA, TANAKA TATSUYA: Channel network modelling of the fractured granite in the Hinachi area, Japan, Developments in Geotechnical Engineering, 81 *Earthquake Proof Design and Active Fault*, pp.256, 1997.
- 24) 杉村淑人, 森田豊, 渡辺邦夫: ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み, 土木学会論文集, No.582/III-41, pp.235, 1997.12.
- 25) 志田原史子, 渡辺邦夫, 森田豊: トンネル内湧水地点の水理地質構造と割れ目交線分布の特徴, 第32回地盤工学会発表会講演論文集, pp.271-272, 1997.
- 26) 杉村淑人, 森田豊, 渡辺邦夫: ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み, 土木学会論文集, No.582/III-41, pp.240-243, 1997.12.

(1997. 7. 25受付)

CHANNEL NETWORK ANALYSIS ON THE PRESSURE RESPONSE PATTERN OBSERVED IN A CROSS-HOLE TEST

Yokito SUGIMURA, Yutaka MORITA and Kunio WATANBE

The cross-hole test is useful for evaluating the channel system developing in a fractured rock mass. The pressure responses observed in a series of cross-hole test that is carried out at a dam site were analyzed. The rock of the site was mainly composed of the mixture of weathered granite and gneiss and had many fractures in it. Some channels of high permeability are existing in this weathered fractured rock mass. Also, some major fractures that are filled with fault clay have low permeability and act as the barrier interrupting groundwater flow. The patterns of the pressure response observed in the test were divided into 5 types. These types are closely related to the geometry of channels with high permeability and barriers existing in the rock mass. The effect of those channels and barriers on the pressure response are analyzed by using an idealized channel network model.