

㈱間組技術研究所 向上拡美、○北村孝海、笠 博義
日本技研コンサルタント㈱ 安井義英

1. まえがき 岩盤中の地下水は、節理や断層によって構成された複雑な経路を辿って岩盤中を移動する。こうした岩盤浸透流について、これまでも多くの研究が行われて来たが、フィールドでの岩盤浸透流が十分に調べられ、また解明された事例はほとんどない。本事例は、初期湛水時のフィルダムに着目し、周辺地山とダム堤体基礎岩盤を通る岩盤浸透流を、地下水中に含まれる自然トレーサ(^{222}Rn ; ラドン)を利用して観測し、岩盤露頭の観察結果、節理調査結果などを用いて、ダム岩盤浸透流の場を簡単な等価節理体モデルに置き変える際に必要な諸パラメータ、およびその浸透経路の推定を試みたものである。

2. 調査の対象と計測結果 調査の対象としたダムは多目的ロックフィルダムで、本ダムでは初期湛水時から地下水位、漏水量、水質などを計測している¹⁾。ダムの左岸地山および堤体基礎岩盤は新第三系の流紋岩・凝灰岩を主体とし、右岸地山は第四系の安山岩溶岩と凝灰角レキ岩、湖沼堆積物(砂レキ、軽石混り火山灰、泥岩)、産錐堆積物などが不整合に覆っている。流紋岩には、左岸から旧河床にかけて数条の断層が存在する。左岸地山は節理に富んでおり、旧河床から右岸は節理が少ない(図-1、2参照)。遮水工は、基礎岩盤と左右岸ダム軸沿い、および左岸洪水吐周辺のカーテン、右岸安山岩露出部では土質ブランケットとカーテン、端部より地山へ伸張したリムグラウトから成っている。ダム基礎岩盤および周辺露頭の節理分布と節理の開口幅分布を図-3~5に示す。また、岩盤浸透流の追跡指標として計測した ^{222}Rn 濃度の変化を図-6に示した。左岸地山、基礎岩盤の断層部分、右岸に浸透水の侵入に伴う濃度低下が見られる。図-7は湛水時の浸透流を知る目的で実施した準三次元非定常解析の結果(満水時)で、貯水池から外部に向かう流れは、堤体近傍の地山の一部(右岸迂回流:30m幅、左岸:100m幅)に限られ、それ以外では地山地下水の貯水池側への流れが優勢である。なお、地下水位の実測値と計算値の差は $\pm 5\text{m}$ 以内であった。

3. ^{222}Rn の濃度解析法 ボアホール中の ^{222}Rn 濃度計算法²⁾を用いて濃度解析を実施した。濃度の保存則

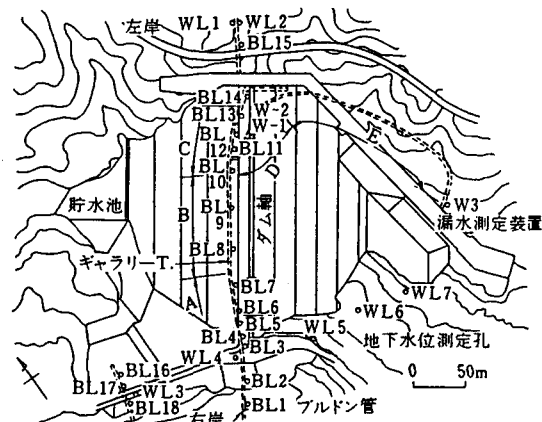


図-2 平面位置図

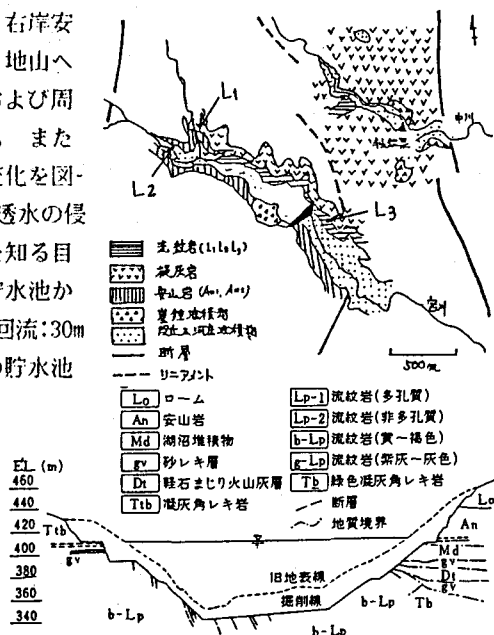


図-1 地質分布図

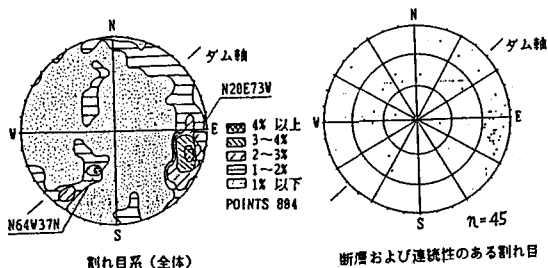


図-3 基礎岩盤の節理分布

には、放射性同位体の崩壊による減衰を考慮し、流れ則については、節理もしくは多孔質体の流れを考慮する。図-8(a)は端部における流入、(b)は流路に沿った流入を受ける一次元流れである。このとき、(a)に対して式(1)、(b)に対して式(2)が成り立つ。

$$C_1(z) = C_{01} \cdot \exp(-\lambda \cdot A \cdot z / Q_1) \quad (1)$$

$$C_2(z) = C_{02} \cdot (1 - \lambda \cdot A \cdot q)^{-1} \quad (2)$$

ここに、 C_{01} ：端部より流入する地下水中の ^{222}Rn 濃度(pCi/l)、 C_{02} ：流路に沿って流入する地下水中の ^{222}Rn 濃度(pCi/l)、 z ：流路に沿った軸上の距離(m)、 λ ： ^{222}Rn の崩壊定数($\ln 2/T$ ：Tは半減期、 min^{-1})、 A ：流路の断面積(m^2)、 Q_1 ：端部より流入する流量(m^3/min)、 q ：流路に沿って流入する単位長さ当りの流量($\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$)である。両式を次式に代入すれば、一次元流路の端部および流路に沿って ^{222}Rn を含む地下水の供給を受ける流れにおける ^{222}Rn 濃度 $C(z)$ が求められる。

$$C(z) = \{C_1(z) \cdot Q_1 + C_2(z) \cdot q \cdot z\} / (Q_1 + q \cdot z) \quad (3)$$

以上は濃度計算地点 z における完全混合を仮定している。流れ場を節理(平行平板間)の流れ、または多孔質体の層流流れと考え、実流速を考えると、

$$k_r = m \cdot g \cdot d^3 / (12 \nu \cdot a), \text{ または } g \cdot ka / \nu \cdot \beta a \quad (4)$$

ここに、 k_r ：実流速を与える透水係数(cm/sec)、 m ：単位長さ当りの節理の数(本)、 g ：重力加速度($980 \text{ cm}/\text{sec}^2$)、 d ：平行平板間の距離(cm)、 ν ：流体の動粘性係数(cm^2/sec)、 a ：単位長さ(cm)、 ka ：物理的透水性(cm^2)、 βa ：面積間隙率(間隙率 n のとき、 $1 - \{1 - n\}^{2/3}$)である。鉛直流入 q 、端部流入 Q_1 を持つ水平流れを考えると平均通水面積 A は、

$$A = d \cdot h, \text{ または } \beta a \cdot h \quad (5)$$

$$h = (1/4) \cdot (q \cdot z^2 / k_r)^{1/2} \quad \dots Q_1 = 0$$

$$((Q_1 \cdot z / k_r + 5 q \cdot z^2 / 4 k_r)^{1/2} \quad \dots Q_1 \neq 0) \quad (6)$$

湛水流入前の流量 Q_{pre} を用い、 $C(z)$ が湛水流入前の ^{222}Rn 濃度 C_{pre} と一致する条件で d (または βa)と z を変化させれば、 C_{02} が求まる。この C_{02} を用いると、流路端部より Q_1 なる供給が生じた場合の下流側での値、すなわち Q_{post} とそのときの濃度 C_{post} を説明し得る解として、 d と z と h の組がいくつか求められる。節理分布(開口幅と連続性)、湛水深などから d 、 z 、 h の範囲をある程度絞ることができれば、湛水時の岩盤浸透流の場を代表する等価節理体として図-8のような簡単なモデルを考える場合のパラメータが

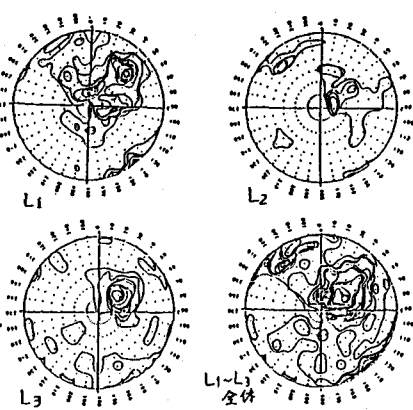


図-4 周辺露頭の節理分布

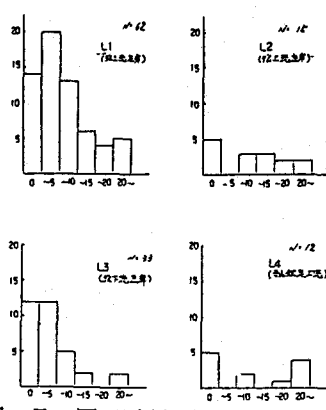


図-5 周辺露頭の節理開口幅分布

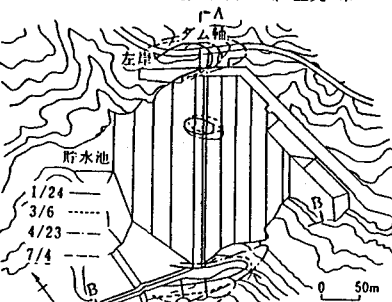


図-6 ^{222}Rn の濃度変化にみる浸透水の侵入状況

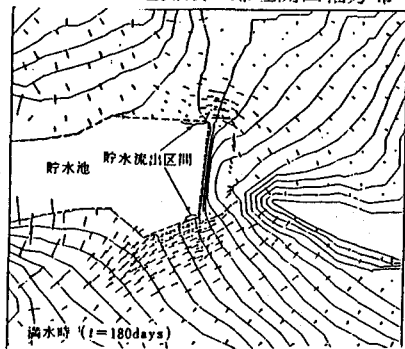


図-7 準三次元非定常解析結果(満水時)

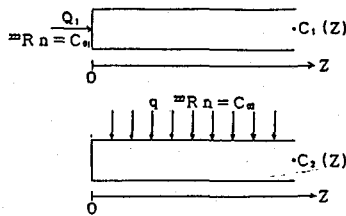


図-8 等価節理体の濃度解析モデル

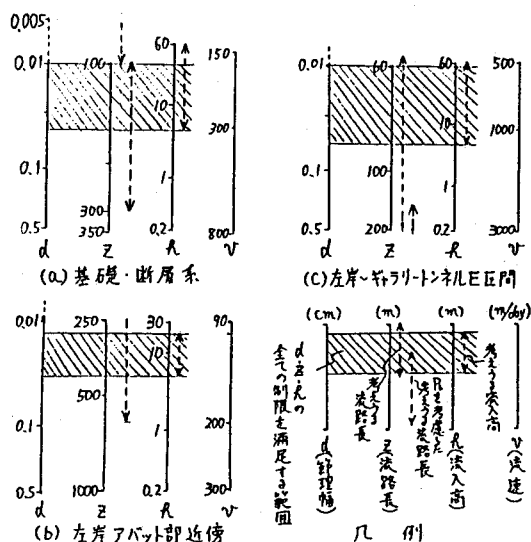


図-9 等価節理体パラメータ

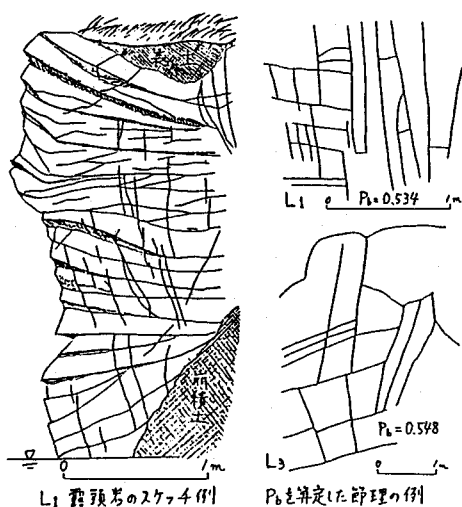


図-10 露頭のスケッチ

求められたことになり、地形・地質上の制約などを考慮して漏水経路の位置や規模、流下平均速度などが概略求められる。また等価節理体のパラメータが与えられれば、濃度変化 $C_{posit}(t)$ の実測値から付近の流量変化 $Q_{posit}(t)$ が推定できることになる。式(1)~(6)を用いて、①実測値から C_{O2} を求め、②得られた C_{O2} から d 、 z 、 h の組を求め、③節理データや湛水深などから絞られた d 、 z 、 h を用いて $C_{posit}(t)$ から $Q_{posit}(t)$ を求める簡単なプログラムを作成した。

4. 等価節理体パラメータと浸透経路の推定

4.1 等価節理体パラメータの推定方法

- ①左岸の地山区間とギャラリーE区間および堤体基礎の区間は節理を通る流れとみなし、右岸区間は有効間隙率相当の流管を流路と考える。
- ②湛水前の $^{222}R_n$ 濃度 C_{pre} の最も大きいものを既存(地山)地下水のみの定常的な濃度と考え、これを下回る C_{pre} については、既存地下水に表流水が混入しているものとする。
- ③湛水により既存地下水の押し出しが生じて観測濃度に増加が見られたと考えられる区間については、これを漏水に換算して濃度計算を行う。
- ④表流水および貯水池の $^{222}R_n$ 濃度 C_{10} は、実測値をもとに $1pCi/l$ とする。
- ⑤等価節理体パラメータ d の制約条件として以下を用いる。
 - イ) Bianchi and Snow³⁾ によれば、節理開口幅は深度に応じてほぼ指数関数的に減少し、最大1オーダー程度まで小さくなる。
 - ロ) Barton⁴⁾ によると、節理面の曲がり・粗度による実際の開口幅と等価なスムーズな平行平板間の距離には差があり、その比は最大1オーダー程度(ただし開口幅による)となる。
 - ハ) 従って、開口幅の制約として、[実測値~実測値の1,2オーダー小さい値]を考えるものとする。なお実測値として、分布の最頻値を用いる。
- ⑥パラメータ z については、渡辺⁵⁾ の与えた節理体の連続性パラメータ p_b を平面から三次元に拡張し、さらに連続性パラメータ p_b を節理に沿う実流路長さに対する見掛けの流路長さの比と解釈する。このとき、計算上の流路長さ z は見掛け(実際の流入地点から流出地点まで)の長さ z_0 を p_b^2 で除した値となる。 p_b は、露頭のスケッチから求め、 $p_b=1$ の場合と比較する。また各区間の見掛けの流路長さの制約条件として、左岸地山区間:30~200m(準三次元解析結果より)、左岸ギャラリー区間:50~250m(位置的関係より)、堤体基礎の断層区間:30~100m(断層の方向および位置的関係より)とする。

- ⑦パラメータ h は、濃度観測地点から湛水深までの標高差を上限とする。
- ⑧得られたパラメータを用いて $Q_{post}(t)$ を計算する際、 $C_{post}(t)$ は実測値を平均的な曲線で近似して計算し、測定誤差はないものとする。
- ⑨ $Q_{post}(t)$ の計算値と実測値が妥当な範囲で一致すれば、このときのパラメータ d 、 z 、 h を等価節理体パラメータとする、
- ⑩得られた等価節理体パラメータを用いて地形・地質上の制約を加味して浸透経路を推定する。

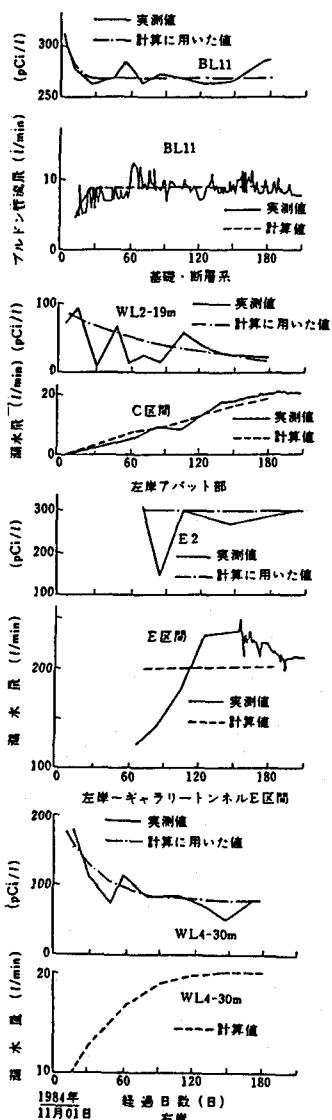


図-11 $Q_{post}(t)$ の実測値と計算値

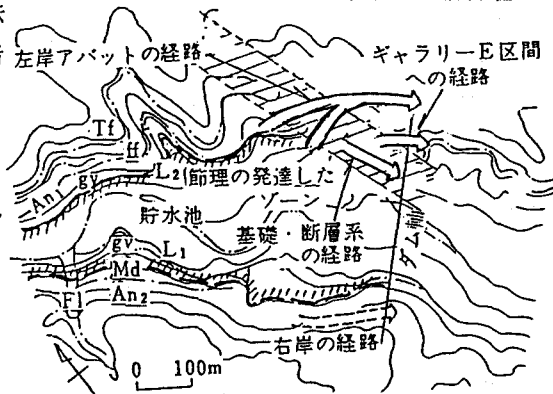


図-12 浸透経路の推定結果

4.2 等価節理体パラメータの推定 各区間毎に C_{02} 、 (d, z, h) の区間を求め、各制約条件を満足する区間に絞ると、図-9に示すような結果が得られた。図-10に示したスケッチは、露頭とこれらを多少デフォルメしたもの、図中の数値はこれに対する p_b 値である。これらを検証するために、各区間毎に濃度 $C_{post}(t)$ を与えて $Q_{post}(t)$ を計算し、実測値と比較してみた。結果を図-11に示す。いずれもほぼ良い一致を示している、これらを等価節理体のパラメータとした。なお、右岸地山区間については流量の実測値がない。従って本方法により、未計測区間の浸透量(漏水量)を推定することができる。

4.3 浸透経路の推定 得られた結果を用いて地形図上に当てはめた浸透経路の位置と長さを図-12に示した。なお、右岸地山については、 C_{02} として左岸・基礎の平均値 $340 pCi/l$ を用い、ブラケットを回り込む流路長 $z=150m$ 、有効間隙率 $n=0.15$ より面積間隙率 $\beta a=0.1$ 、迂回流の幅を $30m$ として漏水量を約 $20 l/min$ と計算した。この漏水量は他の実測漏水量の合計の約 $5\sim 10\%$ に相当する。得られた結果は、地形、地質分布、準三次元解析の結果などと比べて、ほぼ妥当なものと考えられる。

5. あとがき 岩盤浸透流の観測事例および等価節理体・浸透経路の推定事例として、今後の参考になれば幸いである。なお、節理面の粗度や曲がり・挟在物、およびその深度分布に関する実測データの蓄積、節理開口幅の深度分布とその地質構造・岩種による違い、これらを考慮した場合の節理体の透水テンソルの決定方法の開発などが今後の課題である。最後に、 ^{222}Rn 分析に関する助言、指導をいただいた農林水産省農業土木試験場水利第2研究室、木村重彦室長に謝意を表す。また、本観測に対する許可ならびに資料・管理測定結果の提示をいただいた栃木県那珂川水系ガム建設事務所の関係者の方々に対し、深く謝意を表す次第である。

〔参考文献〕 1)北村, 弘末, 向上, 安井: 原位置透水試験法と地下水調査に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.167-174, 1985. 2)Nelson et al.: Tech. Infor. Rep. No. 30, LBL-11180, SAC-30, UC-70, Sep. 1980. 3)Bianchi, L. and Snow, D.T.: Annals of Arid Zone 8(2), pp.231-245, 1968. 4)Barton, N.: Office of Nuclear Waste Isolation, Columbus, Ohio, ONWI-308, p.96, 1982. 5)渡辺, 石山: 日本応用地質学会, 昭和61年度研究発表会予稿集, pp.135-138, 1986.

(37) ESTIMATION OF SEEPAGE PATHS IN A FILL-DAM ROCK MASS
DURING THE INITIAL RESERVOIR FILLING BY ^{222}Rn TRACING

HAZAMA-GUMI, LTD. Hiromi KOJO

Takaomi KITAMURA

Hiroyoshi KASA

NIHON GIKEN CONSULTANT CO. Yoshihide YASUI

For the purpose of investigation of real seepage phenomenon in rock mass, measurement of Radon (^{222}Rn), an environmental radio isotope in underground water was performed at the time of the initial filling of a fill-dam. At the same time the rate of water leakage, or pouring through the dam and the water level of underground water were measured. Consequently the leakage through the dam was confirmed by the fact that ^{222}Rn concentration in leakage and underground water decreased as the initial filling started.

The theory is based on the law of concentration conservation considering the natural decay of radio isotope, the mixture law and the kinematic law with the assumption that the fluid flow in fractures can be approximated by a flow between parallel planar plates.

The emitting ratio of ^{222}Rn from rock to pore fluid was obtained by using measured ^{222}Rn concentration and leakage amount, and the paths and the velocity of leakage water were estimated by referring to observed results of fracture distribution.

As an application of this method, the water leakage amount was estimated by measuring only the ^{222}Rn concentration.