

地盤の変形を考慮したダム基礎岩盤の浸透流解析

Groundwater analysis in dam basement of deformable fractured rocks

(株)熊谷組(埼玉大学研究生) 正員 ○伊藤 洋
 埼玉大学工学部 正員 佐藤 邦明
 (株)熊谷組 正員 清水 昭男

1. はじめに

岩盤浸透流の解析は、かつてダム基礎岩盤を対象になされることが多かったが、近年においては地下発電所、燃料地下備蓄、放射性廃棄物空洞など新しくその利用範囲や重要性が増しつつある。しかしながら、ダム基礎岩盤における浸透現象においても、いまだ未解明のいくつかの問題が残されている。たとえば、ダム構築・湛水時における地山応力変化に起因する透水性への影響やそれと止水グラウト効果の関係、およびダムの地震時挙動といったものである。こういった問題を究明するに当たっては、従来の均質場における二次元流解析のみでは不十分であり、元来共存して挙動する岩盤地山と間隙水を一体化して取扱う必要がある。

本研究はこのような観点に立って、割れ目系岩盤を多数の岩ブロックと弾性介在物を有する間隙系の集合体としてモデル化し、地山応力と地下水運動を連成させて解析し得る理論を導びいて、ダム基礎岩盤の浸透流解析をいくつかの試み、透水特性に関していくつか新しい知見を得たのでここに報告する。

2. 岩盤モデルとその定式化、および流れの基礎式

岩盤地山は図-1に示したように一般に岩質(岩石)とその割れ目系により構成されており、元来二重空隙系と見れる。岩石はそれ自体の透水性は小さく、割れ目系は地山形成後の応力や風化によって後続作用により作られ、流路系空隙として浸透流を支配することになる。同時に、図中において各岩石の凹凸は互いに凸な部分で接触し、場合によって風化物を含む。この接触点は応力の変化に伴って変形し易く、割れ目幅も動的に変化するものと考えられる。

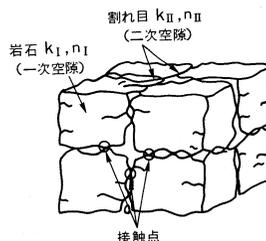


図-1 二重空隙岩盤モデル

図-2の岩ブロックモデルは、このような性質をもつ岩盤地山の割れ目系の流れに焦点を当て、岩石部は不透水性弾性立方体ブロック集合によって、また、各々の岩石は弾性介在柱をはさみ割れ目系を形成すると見なしてモデル化したものである。このような岩ブロックモデルによって岩盤地山の透水性がどのように表されるか、その定式化を行う。

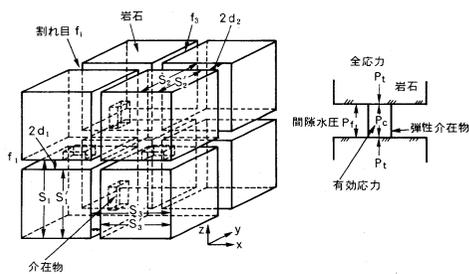


図-2 岩ブロックモデル

まず、透水係数 k_f は平行間隙内の粘性流の式より

$$k_f = \frac{2}{3} \cdot g \cdot \nu \cdot d^3 / s \quad \dots \dots \dots (1)$$

と表せる。ここに、 g : 重力加速度、 ν : 動粘性係数、 $2d$: 割れ目間隙幅、 s : 割れ目の分布間隔である。

つぎに、同図中左側に示したようにある深度における岩盤地

山の全応力を P_{ti} 、有効応力 P_{ci} 、間隙水圧 P_f とすると、これらの関係式は次のように書ける。

$$P_{ti} = P_{ci} + P_f, \quad \Delta P_{ti} = \Delta P_{ci} + \Delta P_f, \quad i = 1, 2, 3 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 i : 割れ目の方向成分、 Δ : 微小変化量、である。

また、図-2に示した任意割れ目の分布間隔 s_i 、および割れ目幅 $2d_i$ の関係は次のように表せる。

$$s_i = s'_i + 2d_i, \quad \Delta s_i = \Delta s'_i + \Delta 2d_i, \quad 2d_i = 2d_{oi} + \Delta 2d_i, \quad s_i = s_{oi} + \Delta s_i \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 s'_i : ブロックの辺長，であり，添字 0 は付加応力変化のない時（基準状態）の諸値を意味する。さらに，上述のように割れ目間隙内の介在物を近似的に弾性角柱であるとする， $\Delta 2d_i$ は次のようになる。

$$\Delta 2d_i = -2d_{oi}/a_i \cdot E_c \cdot \Delta P_{ci} + 2d_{oi} \cdot M_c/E_c \cdot \Delta P_f \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで， a_i : 介在物の断面積が割れ目の面積に占める割合 ($a_i \ll 1$)， E_c : 介在物の弾性係数， M_c : 介在物のポアソン比である。

同様に，ブロックの辺長 s'_i の変化量 $\Delta s'_i$ は，

$$\Delta s'_i/s'_{oi} = -1/E_r (\Delta P_{ti} - M_r \Delta P_{tj} - M_r \Delta P_{tk}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで， E_r : 岩ブロック部の弾性係数， M_r : 岩ブロック部のポアソン比である。

従って，式(1)~(5)より ΔP_{ci} を消去し， $a_i M_c \ll 1$ であるとする，全応力および間隙水圧の変化を考慮した岩盤の透水係数が次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} k_i &= k_{oi} \frac{\{1 + 1/a_i e_c (\Delta P_f/E_r - \Delta P_{ti}/E_r)\}^3}{1 + s'_{oi}/s_{oi} \{ \lambda_i \Delta P_f/E_r - (1 + \lambda_i) \Delta P_{ti}/E_r + M_r \Delta P_{ti}/E_r + M_r \Delta P_{tk}/E_r \}} \\ k_{oi} &= 2/3 \cdot g/\nu \cdot d_{oi}^3/s_{oi}, \quad \lambda_i = 1/a_i e_c \cdot 2d_{oi}/s'_{oi}, \quad e_c = E_c/E_r \\ k_x &= k_1 + k_2, \quad k_y = k_1 + k_3, \quad k_z = k_2 + k_3 \quad (i, j, k = 1, 2, 3, i \neq j \neq k) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

つぎに，流れの基礎式は微小直六面体のコントロールボリューム $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ における流体質量の収支から流れの連続方程式が次のように書ける。

$$-\left\{ \frac{\partial}{\partial x} (\rho q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho q_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho q_z) \right\} \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial}{\partial t} (\rho n \Delta x \Delta y \Delta z) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに， ρ : 水の密度， q_x, q_y, q_z : x, y, z 方向流速， n : 空隙率， t : 時間である。

式(7)の右辺各項は水頭で書き，式(2)~(5)およびダルシーの式に基づいて整理すれば，流れの基礎式は最終的に次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_f \frac{\partial h}{\partial t} - S_{ta} \frac{\partial h_{ti}}{\partial t} - S_{tb} \frac{\partial h_{tj}}{\partial t} - S_{tc} \frac{\partial h_{tk}}{\partial t} \quad \dots\dots (8)$$

ここに，

$$\begin{aligned} S_f &= \left\{ n/e_w + \sum_{i=1}^3 \lambda_i (s'_{oi}/s_{oi}) (1 + n \zeta_{ia} \cdot s'_{oi}/s_{oi}) \right\} \gamma_w/E_r, \\ S_{ta} &= \left\{ \sum_{i=1}^3 (s'_{oi}/s_{oi}) (\lambda_i s'_{oi}/s_{oi} \cdot \zeta_{ib} + n + n \lambda_i) \right\} \gamma_w/E_r, \\ S_{tb} &= S_{tc} = \left\{ \sum_{i=1}^3 (s'_{oi}/s_{oi}) (\lambda_i s'_{oi}/s_{oi} \zeta_{ic} - n M_r) \right\} \gamma_w/E_r, \quad e_w = E_w/E_r, \\ \zeta_{ia} &= (s'_{oi}/s_{oi} - a_i e_c \lambda_i - \gamma_w/E_r \Delta h_{ti} + M_r \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_{tj} + M_r \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_{tk})/\eta \\ \zeta_{ib} &= \{ s'_{oi}/s_{oi} - a_i e_c (1 + \lambda_i) - \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_f + M_r \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_{tj} + M_r \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_{tk} \}/\eta \\ \zeta_{ic} &= M_r (a_i e_c + \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_f - \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_{ti})/\eta, \quad n = \sum_{i=1}^3 n_i \\ \eta &= [1 + s'_{oi}/s_{oi} \{ \lambda_i \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_f - (1 + \lambda_i) \gamma_w/E_r \Delta h_{ti} + M_r \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_{ti} + M_r \gamma_w/E_r \cdot \Delta h_{tk} \}]^2 \\ n_i &= 2d_{oi}/s_{oi} \cdot \{ 1 + 1/a_i e_c (\Delta P_f/E_r - \Delta P_{ti}/E_r) \} / [1 + s'_{oi}/s_{oi} \{ \lambda_i \Delta P_f/E_r - (1 + \lambda_i) \Delta P_{ti}/E_r \\ &+ M_r \Delta P_{ti}/E_r + M_r \Delta P_{tk}/E_r \}], \quad (i, j, k = 1, 2, 3, i \neq j \neq k) \end{aligned}$$

γ_r : 岩ブロックの単位体積重量， E_w : 水の体積弾性係数， γ_w : 水の単位体積重量， h_f : 間隙水圧 P_f の水頭値 ($h_f = P_f/\rho g$)， h_t : 全応力 P_t の水頭換算値， h : ピエゾ水頭 ($h = h_f + z$) である。

結局，式(8)が岩ブロックモデルによる岩盤地山の流れの支配方程式となるが，右辺の非定常項は各々の応力成分 $P_f, P_{ti}, P_{tj}, P_{tk}$ によって変わることになる。

3. ダム基礎岩盤浸透解析への適用

2. で得られた理論をダム基礎岩盤の浸透流解析に適用し，ダム建設後湛水による地山応力や間隙水圧の変化に伴う透水係数変化が岩盤浸透流に及ぼす影響について検討することとする。ここでは，コンクリートダムのような場合を想定し，ダム基礎岩盤には基本的にカーテングラウトを設けるものとするが，比較検討の

ためそれを設けない場合、さらに岩盤地山を不変形等方均質地山と考えた流れについても解析を行う。

(1) 解析モデルと条件

解析モデルは、上述したコンクリートダムを考慮して図-3のように設定する。このモデルは、不透水性基盤上に無数の割れ目系をもつ岩ブロック集合地山があってその上にダムを建設後湛水したものである。また、ダム底の上流側には、止水工としてのカーテングラウトを設けるものとする。また、ダムは奥行方向(y方向)には十分長く弾性理論における平面ひずみ状態にあるとする。

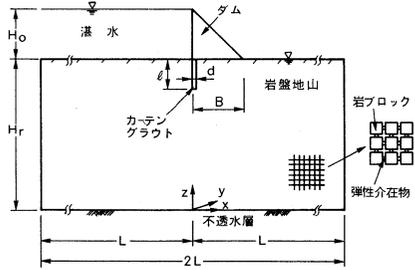


図-3 解析モデル

表-1には解析条件を示してある。ダム寸法は、底面幅 $B=100$ m、高さ $H_0=100$ m (湛水深に同じ)、グラウト長さ $\ell=60$ m、幅 $d=5$ m、地山厚さ $H_r=300$ m、水平境界長さ $2L=1000$ mとする。また、地山応力に係る物性は岩盤分類上C級程度の岩盤を

表-1 解析ケースと条件

地盤	ケース	aEc (MN/m ²)	基準状態の値				諸条件およびパラメータ
			ブロック 辺長 s ₀ (m)	間隙幅 d ₀ (×10 ⁻⁵ m)	空隙率 n ₀ (%)	透水係数 k _{ox} (=k _{oz}) (m/s)	
変形 地山	Run-1-1 [Run-1-2]	5.88	0.1	4.25	0.128	1.0×10^{-5}	$H_0=100$ m, $H_r=300$ m, $\ell=60$ m $B=100$ m, $d=5$ m $E_r=3.92$ GN/m ² , $M_r=0.3$, $\gamma_r=21.56$ kN/m ³ , $\gamma_w=9.8$ kN/m ³ $K=1.0$, $E_d=19.6$ GN/m ² , $M_d=0.2$ $\gamma_d=22.54$ kN/m ³ , $E_g=3.92$ GN/m ² $\gamma_g=21.56$ kN/m ³ , $\nu_g=0.3$, $\gamma_g=21.56$ kN/m ³ $k_g=1.0 \times 10^{-7}$ m/s, $\nu=1.0 \times 10^{-6}$ m ² /s
	Run-2-1 [Run-2-2]	3.92	0.1	4.25	0.118	1.0×10^{-5}	
	Run-3-1 [Run-3-2]	3.92	0.1	1.97	0.128	1.0×10^{-6}	
不変形 地山	Run-4-1 [Run-4-2]	—	—	—	—	1.0×10^{-7}	

* 表中、ケース欄の()はカーテングラウトの無い場合である。

想定し、岩石の弾性係数 $E_r=3.92$ GN/m²、ポアソン比 $M_r=0.3$ 、単位体積重量 $\gamma_r=21.56$ kN/m³、水の単位体積重量 $\gamma_w=9.8$ kN/m³、岩盤初期地山の側圧係数 $K=1.0$ とする。一方、岩盤の透水性に係る値としては、基準状態の透水係数 $k_{ox}=k_{oz}=1.0 \times 10^{-5}$ 、 1.0×10^{-6} m/s、ブロックの辺長 $s_0=0.1$ m 介在物に係る定数 $aEc=3.92$ 、 5.88 MN/m²、間隙幅の1/2、 $d_0=1.97 \times 10^{-5}$ 、 4.25×10^{-5} m、空隙率 $n_0=$

0.118 、 0.128 %、水の動粘性係数 $\nu=1.0 \times 10^{-6}$ m²/sとする。また、ダム本体は十分透水係数は小さいと考えられるので、不透水堤体と見なすが、力学定数は $E_d=19.6$ GN/m²、 $M_d=0.2$ 、 $\gamma_d=22.54$ kN/m³ととる。他方、カーテングラウトの力学定数は岩盤地山と同じとするが($E_g=3.92$ GN/m²、 $M_g=0.3$ 、 $\gamma_g=21.56$ kN/m³)、透水性は $k_g=1.0 \times 10^{-7}$ m/s (=グラウトの目標値1ルジオン⁵⁾)、 $\nu_g=0.1$ %に改良されたとする。解析は、地盤の変形を考慮し(以下変形地山と称する)かつカーテングラウトの有る場合はRun-1-1~Run-3-1と呼び、その無い場合Run-1-2~Run-3-2、他方不変形等方均質地盤の場合(不変形地山)は各々Run-4-1、Run-4-2とする。

(2) 解析方法と手順

解析は基礎式(6)、(8)を用いた浸透流と応力を連成して計算することになる。浸透流解析はGalerkin有限要素法によって、応力解析は等方性体におけるHookeの法則、および微小弾性変形理論に基づく線形弾性解析を同じく有限要素法によって行う。この場合、ダム湛水後の流れの非定常性は弱いこと、式(8)を厳密に解くには地山応力の非定常変化を知る必要があることからここでは湛水後の定常流に限定して解析を行う。

図-4は、その解析フローを示したものである。解析手順は、初期地山における透水係数分布を設定し、つぎにダム湛水後の応力分布より新たな透水係数分布を計算し、必要な境界条件下でピエゾ水頭分布を求める。解析はピエゾ水頭分布と透水係数が同時に収束するまでくり返し計算によって行われる。こうして透水係数分布、およびピエゾ水頭分布が決まると、湧水量、流速ベクトル分布を求めることができる。本モデルの解析においては、要素形状は四角形で要素数253、節点数288とした。

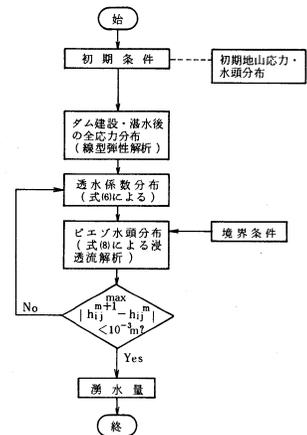


図-4 解析フロー

(3) 解析結果と考察

表-1に示した解析条件に従って全8ケースの解析を行い、ダム基礎岩盤地山周辺の透水性の変化を吟味する。

まず、図-5はダム建設・湛水後の x ($i=3$), z ($i=1$)方向成分全応力の分布を示したものである。図中の実線の長さは応力値の大きさを示しているが、この場合には引張応力は生じない。応力は湛水側およびダム底下で大きくなっている。

つぎに、図-5で示した応力場および図-7(後述)の水頭分布をもつ場合の岩盤地山透水係数分布に着目しよう。図-6は、(a) Run-1-1、(b) 2-1、3-1、(c) 2-2、における透水係数 k_x , k_z を基準状態(初期地山の地表面における値)のそれ k_{ox} , k_{oz} で除した比で示したものである。(a)、(b)はカーテングラウトの有る場合で、(c)は無いそれである。まず、3者に共通していることは、基本的に透水係数は深度が増すに伴って小さくなるが、湛水側の地山表面付近では逆に基準状態のそれに比べて大きくなっている。ダムより下流側遠方では地下水流の影響を受けにくいので初期地山における透水係数分布と同じであり、側圧係数 $K=1.0$ であるから k_x と k_z は等しくなっている。また、湛水側の地山では間隙水圧(圧力水頭)の増大によって透水係数は下流側に比べて大きくなり、さらに k_z が k_x より小さくなるといったことが伺える。一方、カーテングラウトの有る場合の(a)、(b)の k_x , k_z に目を転じると、それらはグラウト壁近傍の湛水側で急変し、いずれも減少するといった傾向が見られる。さらに(a) Run-1-1と(b) 2-1、3-1を比較すると(b)の k_x/k_{ox} , k_z/k_{oz} の変化量が(a)のそれより大きくなっていることが認められる。これは、介在物に係る定数 aE_c が小さいために応力変化が大きくなることに起因する。

ここで、このような透水係数分布をもつ岩盤地山に

における無次元ピエゾ水頭分布がどうなるか、変形地山のRun-1-1、2-1と不変形地山としたRun-4-1のそれらを(a)カーテングラウトの有る場合と(b)無い場合について示した図-7について見てみよう。まず、(a)図においてピエゾ水頭分布は、変形地山で特に aE_c の小さいRun-2-1の場合、不変形地山のRun-4-1(図中実線)と比べてその広がり小さく、ダム底直下地山に集まるような形状を呈していることが分かる。つまり、水頭はダム底直下地山を中心として急激に変化する。また、ダム底近傍の水頭分布は湛水側に進むことも認められる。一方、グラウト壁の無い場合の(b)図においてもグラウト壁周辺を除いて水頭分布は(a)のそれと類似の形状・傾向を示している。

つぎに、図-8は上述した透水係数および水頭分布での圧力水頭分布と流速ベクトルをRun-2-1とRun-4-1の場合について示したものである。流れはいずれもダム底を中心グラウト壁を回り込むように湛水側から

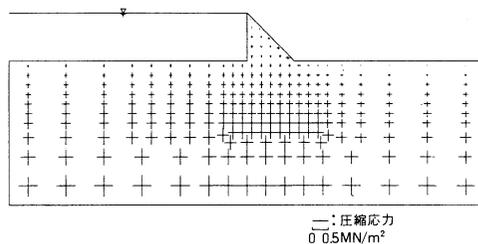
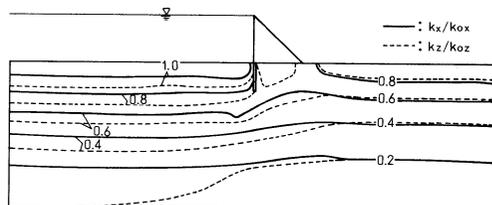
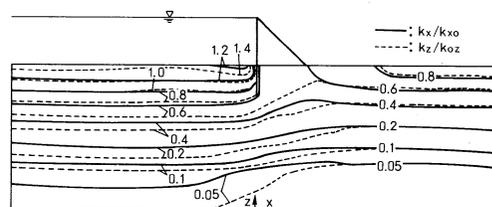


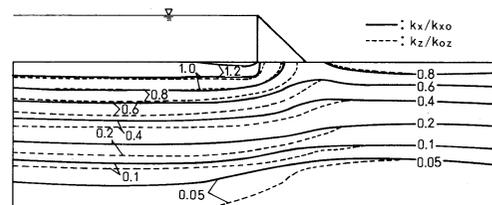
図-5 全応力(P_{tx} , P_{tz})の分布



(a) Run-1-1の場合



(b) Run-2-1, および Run-3-1の場合



(c) Run-2-2の場合

図-6 無次元透水係数 k_x/k_{ox} , k_z/k_{oz} の分布

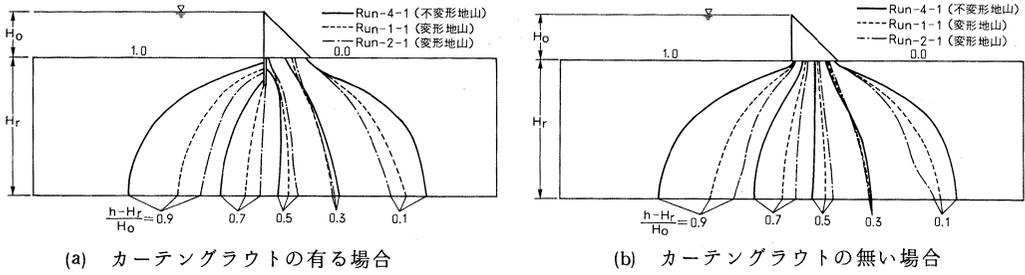


図-7 無次元ピエゾ水頭 $(h-H_r)/H_o$ の分布

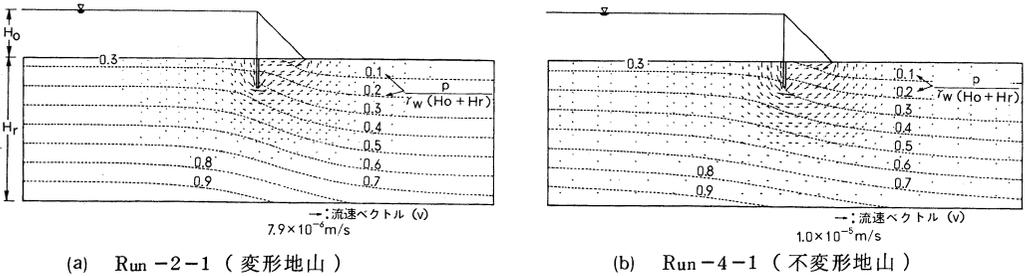


図-8 流速ベクトル, および無次元圧力水頭 $p/\gamma_w(H_o + H_r)$ の分布

下流側へ向かうが、両者を比較すると Run-2-1 の場合、つまり変形地山での流れの場はダム底下地山の比較的狭い領域に限られていることが分かる。これは図-7で示した水頭分布がダム底下地山で急変し、かつ全体的な深さ方向の透水係数の減少と湛水側地表面近くでのその増大等による結果であると考え得る。一方、圧力水頭を比較してみると、(a) Run-2-1の方が(b) Run-4-1に比べてダム底下地山でやや大きくなっており、変形地山では湛水によって一層間隙水圧が上昇する可能性を示唆しているものと思われる。

図-9は、グラウト壁の有る場合の下流側地表面における鉛直上向き流速ベクトル v をダム底のA点におけるそれ v_A との比で示したものである。図中の実線は不変形地山の v/v_A 分布で Run-4-1 の場合である。 v/v_A (湧水量) はいずれもダムから離れるにつれて急激に減少する。各々を比較してみると、ダム近くでは変形地山の Run-1-1, 2-1 の v/v_A が不変形地山の Run-4-1 のそれに比べてやや大きくなるが、ダムよりある程度離れると逆に Run-1-1, 2-1 の方が小さくなっていることが判読できる。これらの結果は図-8の流況からも伺え十分納得できる。つぎに、参考のため下流側湧水量 q_t と①カーテングラウトの有る場合と②無い場合の湧水量比①/②をまとめたものが表-2である。①/②はグラウト壁による湧水量低減効果を表す。同表から単純に透水

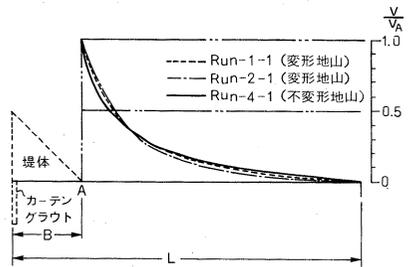


図-9 カーテングラウトの有る場合の下流側地表面における無次元鉛直上向き流速 v/v_A の分布

係数が変化する変形地山とその変化しない不変形地山の q_t 、あるいは①/②を比較することはできないが、いま Run-4-2 を基準にして湧水量が透水係数に比例するとして変形地山が不変形地山で代表されたときの平均透水係数を求めると、各々 Run-1-2 で $k_x = k_z = 6.6 \times 10^{-6}$ m/s, Run-2-2, 5.3×10^{-6} m/s, Run-3-2, 5.3×10^{-7} m/s となる。そこでこれらの透水係数を図-6で示した透水係数分布と比べるといずれもグラウト壁下端付近、あるいはダム幅Bと同程度の深度におけるそれに近い値となっていることが認められる。

一方、この場合におけるグラウト壁の湧水低減効果①/②は、15～30%程度である。また、表中Run-4-2の〔 〕内の値は従来の映像解より参考までに求めたものであるが、⁶⁾数値解析によるそれと比較的よく一致している。

つぎに、ダム底における揚圧力 P_v の無次元分布を示したものが図-10である。図中の(a)はカーテングラウトの有る場合で(b)はその無い場合を示す。これより、(b)図から変形地山Run-1-2, 3-2の $P_v/r_w H_0$ が不変形地山Run-4-2のそれをやや上回っていることが分かる。一方、(a)図の場合は、揚圧力 P_v が基本的にグラウト壁の透水係数と地山のその差に依存して変わり、地山の透水係数が小さくなってグラウト壁のそれに近づくと P_v は大きくなるという性質をもつので、上述した表-2の場合と同様に透水係数の評価の異なる両者を等価なものとして単純に比べることはできない。ただ、変形地山の場合、透水係数は深度方向に低下するので、同時にグラウト壁のそれとの差も小さくなり、グラウト壁による湧水および揚圧力低減効果が乏しくなってくることは確かであろう。

4. むすび

本研究は、ダム基礎岩盤において地山の変形を考慮した場合の透水特性の基本的性質について明らかにするため、岩ブロックモデルを導入して地山応力と浸透流の連成解析を行って不変形地山のそれと比較・検討したものである。その結果、ダム建設後の湛水によって地山透水係数は特に湛水側地山とグラウト壁周辺で大きく変化し、湛水側地表付近では基準状態の透水係数より大きくなるのが判明した。また、水頭も急激に変化することとなって、流れの場はダム底下の比較的狭い領域に限られ、そのため下流側湧水もダム近くで大きくなりそれより離れるに伴って急激に減少してくることも分かった。これらの結果は、ダム基礎岩盤に係る諸問題を考える上で有用と思われる。最後に本計算を進めるに当たって協力していただいた榊熊谷組新井、坂口、西山の3氏、および資料を提供していただいた同技研の佐藤英明氏にお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 大長昭雄：アーチダムの基盤内の浸透流に関する実験的研究，土木学会論文集，第97号，1963.9
- 2) 宮田美幸：高瀬ダム基礎岩盤のグラウティングの検討（第一報），発電水力，No.149，1977.7
- 3) D.T. Snow：Hydrogeology of induced seismicity and tectonism：Case histories of Kariba and Koyna，The Geological Society of America，Special Paper 189，1982
- 4) K. Sato et al.：Groundwater analysis of underground cavern by means of rock block model，Soils and Foundations，Vol. 22，No. 4，1982
- 5) 建設省河川局開発課監修：グラウティング技術指針・同解説，（財）国土開発技術研究センター，1983.11
- 6) P. YA. Polubarinova-Kochina：Theory of Ground Water Movement，Translated from Russian by J. M. Roger De Wiest，Princeton Univ. Press.，1962

表-2 下流側湧水量

ケース	総湧水量 (m^3/d)	① ②
Run-1-1	① 25.3	0.746
Run-1-2	② 33.9	
Run-2-1	① 19.0	0.701
Run-2-2	② 27.1	
Run-3-1	① 23.2	0.859
Run-3-2	② 27.0	
Run-4-1	① 41.6	0.813
Run-4-2	② 51.2 〔53.6〕	

()：映像解による値⁶⁾

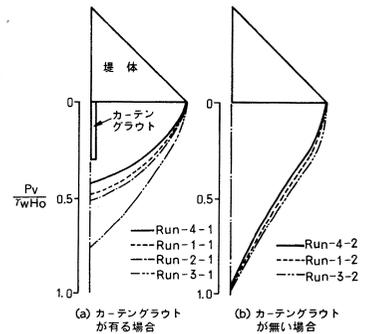


図-10 無次元揚圧力 $P_v/r_w H_0$ の分布