

# フィルダムの盛立ておよび初期湛水時における 間隙水圧挙動の解析

## ANALYSIS OF PORE PRESSURE BEHAVIOUR OF ROCKFILL DAM DURING CONSTRUCTION AND RESERVOIR FILLING

中川 加明一郎\*・駒 田 広 也\*\*・金 沢 紀 一\*\*\*

By Kameichiro NAKAGAWA, Hiroya KOMADA and Kiichi KANAZAWA

### 1. 序 論

フィルダムの土質遮水壁（コア）内の間隙水圧の変化はダムの安定性に影響を及ぼす要因の一つである。間隙水圧の増大は有効応力の減少をもたらす。材料のせん断抵抗を低下させることが考えられる。また、間隙水圧の消散は有効応力の増加に伴う土質遮水壁の沈下の進行としてダムの余裕高にかかわることも考えられる。さらに湛水過程での間隙水圧の挙動は、ダムの安定性に対する湛水速度の影響を評価するうえで重要な要素となるものである。したがって、土質遮水壁内の間隙水圧挙動を盛立段階から湛水過程まで計測により監視し、把握しておくことがダムの安定性評価にとって不可欠なこととなっている。そしてさらに、この挙動を予測し検討しておくことが、フィルダムの設計、施工および管理を通してより重要となる。

土質遮水壁内の間隙水圧挙動を予測するこれまでの手法としては、まず浸透流解析の適用を思いつくところである。しかし、盛立時の間隙水圧の発生や消散、あるいは残留間隙水圧が分布する状態での初期湛水時の間隙水圧挙動を解析することは、従来の浸透流解析の範ちゅうにはないことである。土質遮水壁内の間隙水圧の変化は、飽和地盤における圧密現象と同様の、間隙水圧挙動と変形との相互作用の結果であり、解析においてもこのことを直接考慮することがより論理的であると思われる。この観点より、Cavounidis と Höeg<sup>1)</sup> は、Biot<sup>2)</sup> の圧密方程式の Christian<sup>3)</sup> による解析手法を、アースダムの盛立時の解析に応用している。一方、Chang と Duncan<sup>4)</sup> は、締固め土の間隙水が空気を包み込んでいる場

合に、空気と水とをあわせて単一の間隙流体 (homonized fluid) として扱い、さらに盛立材料の非線形性を導入した形で Biot の方程式を適用した有限要素解析手法を開発している。しかしながら、これらの手法では、フィルダムの土質遮水壁内において当然現われることが予想される自由水面を表現することができず、次の段階である初期湛水過程の解析へと連続させることが困難となっている。自由水面の出現する場合を考慮したこの相互作用の解析手法として、大西と村上<sup>5)</sup> が地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析を提案し、適用例の一つとして、貯水池水位の上昇あるいは下降時のアースダムにおける浸透流と変形の数値解析を行っている。しかしながら、彼らの手法における、自由水面下では材料の単位体積重量を水中単位体積密度に置換するという操作は、浸透流下の有効応力の考え方で統一を欠くことになり、まだ十分な手法とするには至っていないようである。

フィルダムの安定性を検討するうえで、土質遮水壁内の間隙水圧挙動を予測する手法の確立は重要な課題である。これに答えることを目的として、本報告は、まず締固め土における間隙水圧挙動と変形との相互作用に関する支配方程式について述べる。次にこの支配方程式の有限要素法による解析手法を実際のロックフィルダムの盛立てから湛水過程までの一連の挙動解析に適用した結果について述べ、実測結果との比較から、その手法の有用性を確認しようとするものである。

### 2. 土質遮水壁内の間隙水圧挙動と変形との相互作用の解析法<sup>6)</sup>

#### (1) 支配方程式の誘導

##### a) 間隙水圧挙動

フィルダムの土質遮水壁において自由水面より上部では間隙は不飽和な状態となるものと予想される。このような自由水面の現われる浸透流の解析には、飽和・不飽

\* 正会員 工修 電力中央研究所土木研究所立地部地盤構造研究室

\*\* 正会員 工博 電力中央研究所土木研究所立地部地盤構造研究室

\*\*\* 正会員 電源開発(株)原子力部原子力土木建築課長

和浸透流の考え方を適用した有限要素法<sup>7),8)</sup>等の数値解析法が多く用いられるようになってきている。本報告において変形との相互作用を考える場合にも、不飽和領域を含めた土質遮水壁内の間隙水の挙動は基本的には飽和・不飽和浸透流の考え方によって表わされるものとする。

不飽和状態の間隙水の挙動を考えるとときには不飽和の形態<sup>9)</sup>に留意する必要がある。地盤の変形を考慮しない従来の飽和・不飽和浸透流解析では、間隙中の空気が常に大気と接続している一様不飽和状態が仮定されている。この場合の間隙水圧はサクシオンにより負圧となる。これに対して、細粒分を多く含み最適含水比付近で飽和度が100%近くに締固められた材料による土質遮水壁の間隙では、空気は大気と接続のない状態、すなわち、間隙水が空気を包み込んだ封入不飽和状態となる場合が考えられる。そして封入不飽和状態の間隙水は単一の圧縮性流体とみなすことができる。この場合の流体の密度  $\rho_m$  および圧縮率  $\beta_m$  は理論的にはボイルとヘンリーの法則より次のようにそれぞれ表わされる。

$$\rho_m = \frac{\rho_w S_{r0}}{\frac{u(a_s)}{u(a)} \{1 - (1-H)S_{r0}\} + (1-H)S_{r0}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\beta_m = -S_{r0}\beta_w B_{(wa)} + \frac{1}{u_a} \{1 - (1-H)S_{r0}\} \dots\dots\dots(2)$$

- ここで、 $\rho_w$ ；水の密度
- $u(a)$ ；間隙空気圧（絶対圧）
- $u(a_s)$ ；大気圧（絶対圧）
- $S_{r0}$ ； $u(a) = u(a_s)$  のときの飽和度
- $H$ ；ヘンリーの法則による水中の空気溶解度を表わす係数
- $\beta_w$ ；水の圧縮率
- $B_{(wa)}$ ；サクシオンに依存する量（サクシオンのない場合は  $B_{(wa)} = 1$ ）

この封入不飽和状態の間隙水の連続条件について考える。

質量保存則により、多孔質体中の間隙流体の連続条件は次式で表わされる。なお、次式およびこれ以降の式において「Index notation（和および微分の慣用記号法）」を用いることにする。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m n) + (\rho_m v_i^{(m)})_{,i} = 0 \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots(3)$$

- ここで、 $n$ ；間隙率
- $v_i^{(m)}$ ；流体のみかけ速度

封入不飽和状態の間隙は、先に述べたように、封入された空気と水とから成る単一の圧縮性流体とみなすと、

この流体の密度  $\rho_m$  は水の密度  $\rho_w$  と飽和度  $S_r$  から次のように表わされる。

$$\rho_m = \rho_w S_r \dots\dots\dots(4)$$

式(4)を式(3)に代入し、さらに

$$v_i = S_r v_i^{(m)} \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots(5)$$

とすると次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w S_r n) + (\rho_w v_i)_{,i} = 0 \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots(6)$$

式(6)は従来の飽和・不飽和浸透流解析法において適用されているRichardsによる連続式と同一のものであるが、一様不飽和と完全飽和だけでなく、封入不飽和状態についても成り立つことがわかる。

式(6)は、水の密度が時間および空間について不変であるとすれば、次式のように書き改めることができる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (n S_r) + v_{i,i} = 0 \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots(7)$$

そして、飽和度  $S_r$  と間隙水圧  $p$  の関係を考慮して間隙水の連続条件を次のようにすることができる。

$$S_r \dot{n} + n \frac{\partial S_r}{\partial p} \dot{p} + v_{i,i} = 0 \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots\dots(8)$$

ただし式(8)において、 $\dot{n} = \partial n / \partial t$ 、 $\dot{p} = \partial p / \partial t$ であり、また、間隙水圧  $p$  はゲージ圧とし、 $p < 0$  のときは間隙水のサクシオンであり、 $p \geq 0$  のときは単一の圧縮性流体としての間隙水の圧力とする。したがって、飽和度  $S_r$  と間隙水圧  $p$  との関係は、 $p < 0$  については飽和度とサクシオンの関係から、 $p \geq 0$  については飽和度と封入不飽和の間隙水圧との関係から求められる。 $p \geq 0$  については、理論的には、式(1)および式(4)から次の関係が得られる。

$$S_r = \frac{S_{r0}}{\frac{u(a_s)}{(p+u(a_s))} \{1 - (1-H)S_{r0}\} + (1-H)S_{r0}} \dots\dots\dots(9)$$

間隙水の運動方程式は飽和・不飽和浸透流解析においては次式で表わされている。

$$v_i = -k_{ij} h_{,j} \quad (i, j=1, 2, 3) \dots\dots\dots(10)$$

- ここで、 $v_i$ ；流速ベクトル
- $k_{ij}$ ；透水係数テンソル
- $h$ ；全水頭

なお式(10)では透水係数は飽和度に依存し、サクシオンも飽和度に依存するものであるとして、透水係数はサクシオンの関数とされている。間隙が封入不飽和状態の場合についても透水係数が飽和度の関数になることが予想されるが<sup>10)</sup>、ここに式(9)を考慮すれば封入不飽和状態での透水係数が間隙水圧の関数になるものができる。すなわち、間隙水圧・飽和度・透水係数間の関係が

定まれば、一様不飽和、封入不飽和および飽和状態のすべての形態の間隙水に関する運動方程式として式 (10) が適用できることになる。

b) 有効応力

軟弱地盤の圧密現象のように飽和領域での間隙水の挙動と地盤の骨格部分の変形との相互作用は有効応力の考え方に基づいて表現される。そしてこの場合の変形特性は有効応力・ひずみ関係として表わされる必要がある。同様に不飽和領域をも含む地盤での間隙水挙動と地盤の変形との相互作用を表わす場合も、不飽和土に関する有効応力の概念および有効応力・ひずみ関係を明らかにすることが必要となる。ただし、間隙中に水だけでなく空気も存在することにより、不飽和土の力学特性の解明が飽和土のそれより一層困難となっているのが現状である。

ここでは不飽和土の有効応力式として次式を考える。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}' + \alpha p \delta_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $\sigma_{ij}$ ; 全応力

$\sigma_{ij}'$ ; 有効応力

$\delta_{ij}$ ; クロネッカーのデルタ

$p$ ; 間隙水圧

$\alpha$ ;  $p < 0$  のとき  $\alpha = 0$ ,  $p \geq 0$  のとき  $\alpha = 1$

式 (11) は以下のような考え方に基づいている。

間隙水圧  $p$  が  $p < 0$  のとき、すなわちサクシヨンのとき、間隙は一様不飽和状態であるとし、 $p \geq 0$  のときは間隙水が単一の圧縮性流体であることを先に述べた。

間隙が一様不飽和である土が外力を受けた場合、間隙空気圧は通常大気圧に等しい状態を保持する。つまり、全外力（全応力）が変形に寄与する応力（有効応力）となる。すなわち、式 (11) における  $\alpha = 0$  はこの場合に対応する。一方、 $p \geq 0$  となる場合、すなわち間隙水が圧縮性流体であるときは、有効応力式としては飽和土における従来の有効応力式が適用でき<sup>11)</sup>、式 (11) での  $\alpha = 1$  がこれに対応することになる。

式 (11) は、Bishop<sup>12)</sup> の考え方とは異なり、飽和度の大きさの影響を考慮したものではなく、間隙の状態（間隙流体が単一の圧縮性流体とみなせるか否か）を  $\alpha$  によって表わしたものとなっている。飽和度あるいはサクシヨンの大きさの影響は、直接有効応力式にかかわるものではなく、土の応力-ひずみ関係すなわち構成関係にかかわるものと考えられる。ここで土の有効応力増分  $\delta\sigma_{ij}'$  とひずみ増分  $\delta\epsilon_{ij}$  との関係を

$$\delta\sigma_{ij}' = C_{ijkl} \delta\epsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (12)$$

として表わすことにすると、飽和度は係数  $C_{ijkl}$  に影響することになる。

c) 支配方程式

不飽和領域を含む地盤内の間隙水の挙動と変形との相互作用の問題（連成問題）の支配方程式は以下のように誘導される。

まず地盤材料の有効応力関係として式 (12) を仮定する。土塊に関するつり合い条件

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (13)$$

$f_i$ ; 物体力

と、有効応力式 (11)、応力-ひずみ関係式 (12) およびひずみ-変位関係

$$\epsilon_{ij} = -\frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (i, j = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (14)$$

$u_i$ ; 変位

から、さらに  $\dot{p} = (\dot{h} - \dot{x}_3) \rho_w g = \dot{h} \rho_w g$  (ただし  $x_3$  は鉛直方向の座標であり、 $g$  は重力の加速度) を考慮して次式が得られる。

$$(-\bar{C}_{ijkl} \dot{u}_{k,l} + \alpha \rho_w g \dot{h} \delta_{ij}),_j + \dot{f}_i = 0 \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (15)$$

ここで、

$$\bar{C}_{ijkl} = \frac{1}{2} (C_{ijkl} + C_{jilk})$$

一方、間隙水の連続条件式 (8) に  $\dot{n} = \dot{\epsilon}_{ii} = -\dot{u}_{i,i}$  および式 (10) を代入して次式が得られる。

$$-S_r \dot{u}_{i,i} + n \rho_w g \frac{\partial S_r}{\partial p} \dot{h} - (k_{ij} h_{,j}),_i = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (16)$$

支配方程式は、未知数を変位  $u_i$  および間隙水の全水頭値  $h$  とする式 (15) および (16) で表わされたことになる。

以上のように誘導された支配方程式を解くためには境界条件および初期条件の設定を必要とするが、変形に関するものと間隙水の運動に関するものとをそれぞれ個別に設定すればよい。境界条件としては、変形に関しては変位もしくは応力のいずれかが既知であり、間隙水挙動に関しては全水頭もしくは流量のいずれかが既知であるとして与えられる。また初期条件としては、初期変位と初期全水頭を設定する。

(2) 有限要素法の定式化

前節で誘導された支配方程式 (15), (16) における変数  $u_i$  および  $h$  を有限個の既知の関数の線形結合として次のように近似する。

$$u_i = N_k^{(u)} u_i^k \quad (i = 1, 2, 3; k = 1, 2, \dots, n_u) \dots\dots\dots (17)$$

$$h = N_k^{(h)} h^k \quad (k = 1, 2, \dots, n_h) \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 $N_k^{(u)}$ ; 変位に関する形状関数

$N_k^{(h)}$ ; 全水頭に関する形状関数

$u_i^k$ ; 第  $k$  節点の変位

$h^k$ ; 第  $k$  節点の全水頭

$n_0$ ; 有限要素の節点総数

Galerkin 法の適用により式 (15), (16) を近似し, Gauss の発散定理を適用し, さらに式 (17), (18) を代入して整理すると節点変位  $u_i^k$  および節点全水頭  $h^k$  に関する連立方程式が次のように求められる.

$$\begin{cases} K_{mn}^{ik} \dot{u}_k^n + L_{mn}^i \dot{h}^n = \dot{F}_m^i \dots\dots\dots (19) \\ A_{mn}^k h^n + G_{mn}^k \dot{u}_k^n + D_{mn} \dot{h}^n = E_n \dots\dots\dots (20) \end{cases}$$

ここで,

$$K_{mn}^{ik} = \int_V (-N_{m,j}^{(u)} \bar{C}_{ijkl} N_{n,l}^{(u)}) dv \dots\dots\dots (21)$$

$$L_{mn}^i = \int_V (N_{m,j}^{(u)} \alpha_{\rho w} g \delta_{ij} N_n^{(h)}) dv \dots\dots\dots (22)$$

$$\dot{F}_m^i = \int_S (N_m^{(u)} \dot{T}_i) ds + \int_V (N_m^{(u)} \dot{f}_i) dv \dots\dots\dots (23)$$

$$A_{mn} = \int_V (N_{m,i}^{(h)} k_{ij} N_{n,j}^{(h)}) dv \dots\dots\dots (24)$$

$$G_{mn}^k = \int_V (-N_m^{(h)} S_r N_{n,k}^{(u)}) dv \dots\dots\dots (25)$$

$$D_{mn} = \int_V (N_m^{(h)} n_{\rho w} g \frac{\partial S_r}{\partial p} N_n^{(h)}) dv \dots\dots\dots (26)$$

$$E_m = \int_S (N_m^{(h)} Q) ds \dots\dots\dots (27)$$

なお,

$$T_i = \sigma_{ij} n_j \text{ (traction)}$$

$$Q = -(k_{ij} h_{,j}) n_i \text{ (流入量)}$$

$V$ ; 要素の体積

$S$ ; 要素の表面積

連立方程式 (19), (20) の未知変数は節点変位  $u_k^n$  および節点全水頭  $h^n$  であるが,  $\dot{u}_k^n (= \partial u_k^n / \partial t)$ ,  $\dot{h}^n (= \partial h^n / \partial t)$  および  $h^n$  の形で含まれているので, 次のような時間増分  $dt$  に対する差分近似を行う.

$$\dot{u}_k^n = \frac{\Delta u_k^n}{\Delta t} = \frac{u_k^n(t + \Delta t) - u_k^n(t)}{\Delta t} \dots\dots\dots (28)$$

$$\dot{h}^n = \frac{\Delta h^n}{\Delta t} = \frac{h^n(t + \Delta t) - h^n(t)}{\Delta t} \dots\dots\dots (29)$$

$$h^n = \frac{1}{2} \{h^n(t) + h^n(t + \Delta t)\} \dots\dots\dots (30)$$

また  $\dot{F}_m^i$  および  $E_n$  についても次のように近似する.

$$\dot{F}_m^i = \frac{\Delta F_m^i}{\Delta t} = \frac{F_m^i(t + \Delta t) - F_m^i(t)}{\Delta t} \dots\dots\dots (31)$$

$$E_n = \frac{1}{2} \{E_n(t) + E_n(t + \Delta t)\} \dots\dots\dots (32)$$

これらを連立方程式 (19), (20) に適用し, ま

たマトリックス表示によって整理すると次式のような

$$\begin{bmatrix} [K] & [L] \\ [G] & [\frac{\Delta t}{2}[A] + [D]] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{du\} \\ \{h(t + \Delta t)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta F\} + [L]\{h(t)\} \\ [-\frac{\Delta t}{2}[A] + [D]]\{h(t)\} + \frac{\Delta t}{2}\{\{E(t)\} + \{E(t + \Delta t)\}\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (33)$$

この方程式 (33) を, 所定の境界条件および初期条件のもとに, 定められた時間間隔ごとに逐次解くことにより, 非定常な変位ならびに間隙水圧の挙動を明らかにすることができる.

### 3. 手取川ダムの解析

#### (1) 手取川ダムの概要

手取川ダムは手取川の総合開発の一環として電源開発株式会社により建設された多目的ダムである. 当ダムは, 最大出力 250 MW の発電だけでなく, 手取川下流域の水道用水や工業用水の供給および洪水調節にも利用されるものとして, 1974年に着工され, 1979年12月に完成をみている.

手取川ダムの標準断面図を図-1に示す. 当ダムは堤高 153 m, 堤頂長 420 m の中央遮水壁型ロックフィル

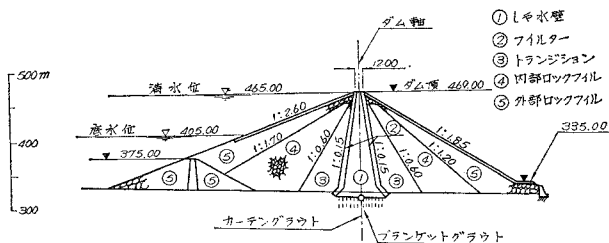


図-1 手取川ダム標準断面図

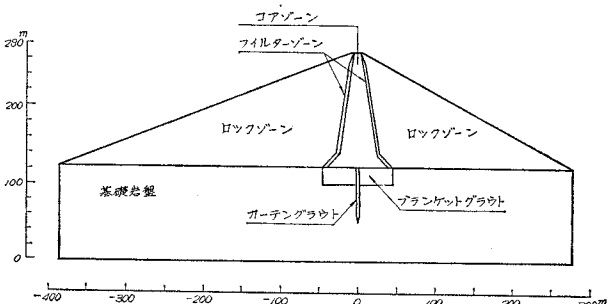


図-2 解析モデルのゾーン

表-1 入力物性値

項目	土質材料	コア	フィルター	ロック	カーテン グラウト	ブラケット グラウト	地盤
等方圧密曲線 $e \sim \ln \sigma_m'$ の膨張あるいは再圧密時の勾配 $\kappa$	0.0227	0.0114	0.016	—	—	—	—
ポアソン比 $\nu$	0.4	0.35	0.35	—	—	—	—
乾燥密度 $\gamma_d$ [t/m <sup>3</sup> ]	1.9	2.04	1.98	—	—	—	—
初期間隙比 $e_0$	0.33	0.32	0.36	—	—	—	—
飽和透水係数 $k$ [cm/s]	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	—
自然飽和度 $S_r$ [%]	80.0	10.0	9.0	—	—	—	—
最大毛管上昇高 $h_c$ [cm]	150.0	10.0	10.0	—	—	—	—
真比重 $G_s$	2.71	2.69	2.69	—	—	—	—

ダムで、図-1 に示すように、土質遮水壁（コア）、フィルター、トランジション、内部ロックおよび外部ロックの5つのゾーンからなっている。また、基礎岩盤にはグラウト処理によって改良されたゾーンがある。

(2) 有限要素解析<sup>13)</sup>

a) 解析モデル

解析断面として図-1の標準

断面を考える。ただし、解析モデルとしては、図-2 に示すように、コア、フィルターおよびロックの3つのゾーンによるダム本体と、グラウト処理による改良も考慮した基礎岩盤とに簡略化したものを用いることにした。この解析モデルに基づき、二次元有限要素に分割した(図-3)が、各ゾーンの三角形要素の数は、コアゾーンで307、フィルターゾーンで184、ロックゾーンで143そして基礎岩盤で120であった。要素総数は754で節点総数は399となった。

b) 入力物性値

各ゾーンの諸物性値を表-1に示す。これらのうち、等方圧密曲線、乾燥密度、初期間隙比、飽和透水係数および真比重は、室内試験および現場試験の結果<sup>14)</sup>に基づいて決定した。またポアソン比は手取川ダムとほぼ同規模の大型ロックフィルダムにおける物性値分布の実測結果<sup>15)</sup>を参考にした。なお材料の変形特性として、体積弾性係数  $K$  が、平均有効主応力  $\sigma_m'$ 、初期間隙比  $e_0$  および等方圧密膨潤曲線 ( $e \sim \ln \sigma_m'$ ) の勾配  $\kappa$  と、 $K = (1 + e_0) \sigma_m' / \kappa$  の関係にある非線形弾性を仮定した。不飽和透水特性に関しては、特に試験は実施されなかったため、飽和・不飽和浸透流解析の物性の決め方<sup>8)</sup>に基づいて仮定し適用した。

c) 解析条件

当ダムの盛立工程および湛水工程はそれぞれ図-4および図-5に示すものであった。今回の解析においては、盛立過程では7層に分割したフィルダムを順次盛り立てるものとした。そして盛り立てた要素に対して、設

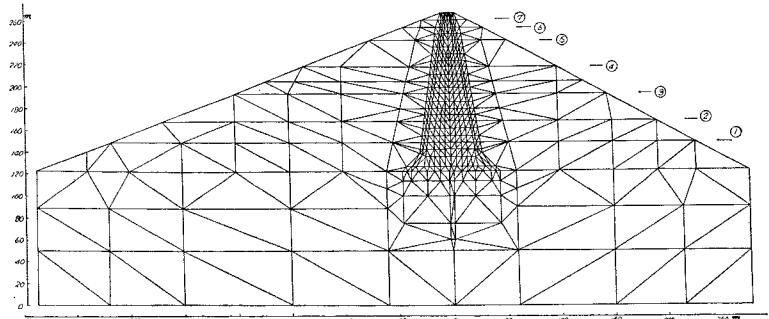


図-3 有限要素メッシュ

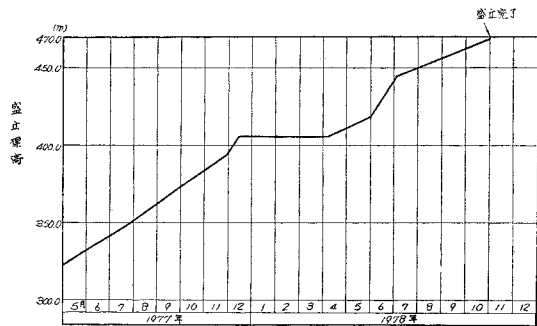


図-4 盛立て工程

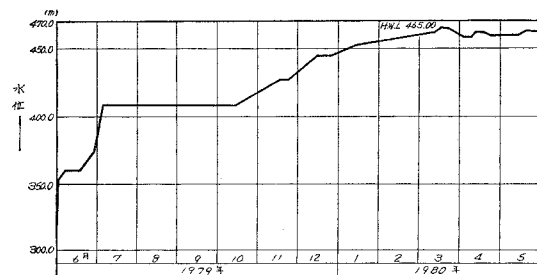


図-5 湛水工程

定された時間増分  $\Delta t$  に対応する自重増分を与える方法をとった。また湛水過程では設定された時間増分  $\Delta t$  に対応して貯水池の水位を上昇させることとした。盛立ておよび湛水過程の解析上の時間刻みの総数は、それぞれ95および112であった。

境界条件としては変形に関するものと間隙水挙動に關

するものと設定する必要がある。今回の解析においては、まず、変形に関し、基礎岩盤の変位が生じないものとした。また、間隙水挙動に関しては、基礎岩盤の底面で不透水とし、基礎岩盤の上流端、下流端およびロックゾーン内での静水圧分布を仮定した。したがって基礎岩盤では浸透流にのみ関する解析が行われ、また、ロックゾーンでは変形にのみ関する解析が実施されたことになる。

(3) 解析結果と実測値との比較

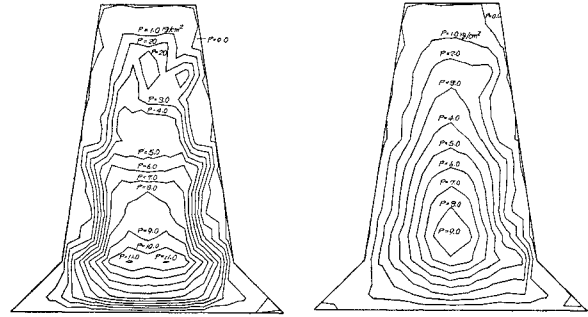
数値解析の結果のうち、盛立過程における間隙水圧のコアゾーン内での分布の様子を図-6に示す。

図-6 (a) は盛立ての進行に伴って発生した間隙水圧の分布を表わし、図-6 (b) は図-6 (a) から113日の盛立て休止による間隙水圧の消散状態を表わしている。また、図-6 (c) は盛立て完了時の間隙水圧分布である。間隙水圧の消散は、消散しやすいフィルターゾーンなどの境界面から始まり、しだいにコアゾーンの中心部へと進行する。したがって、コアゾーン内には中心部から球根状に間隙水圧が残留することになる。これらの解析結果は、従来のフィルダムのコアゾーンでの計測結果が示す傾向と同様のものといえる。

図-7 はコアゾーン内の間隙水圧の経時変化を示したものである。図中の実線は観測値であり、破線は計算値である。間隙水圧の実測値と計算値の比較をしてみると、完全に一致するものではないが、盛立ての進行に伴い間隙水圧が発生し、また盛立てが冬期間中断すると間隙水圧は消散が進んで減少するという、実測値にみられる全体の傾向を計算結果は比較的よく表わしているといえよう。

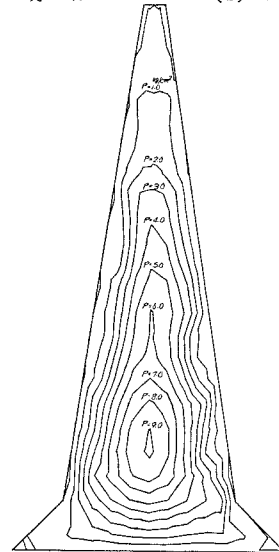
図-8 は盛立て過程におけるコアゾーンの沈下量の経時変化を示したものである。図中の実線は実測値を、破線は計算値をそれぞれ示している。盛立ての進行に伴い変形は進行するが、冬期間の盛立て中断時にも、間隙水圧の消散に対応して発生する沈下の様子がわかる。図-9 はコアセンターでの沈下量の分布を示したものである。コアゾーンの中央部で大きくなる傾向は、実測値および計算値とも同様であり、両者は比較的よく一致しているものといえよう。

盛立て完了後の応力状態、間隙水圧状態を初期条件として、湛水過程の解



(a) 1977年12月13日

(b) 1978年4月5日



(c) 1978年10月31日 (盛立て完了時)

図-6 コアゾーン内の間隙水圧 (単位は  $\text{kg/cm}^2 \{ \times 98 \text{ kPa} \}$ )

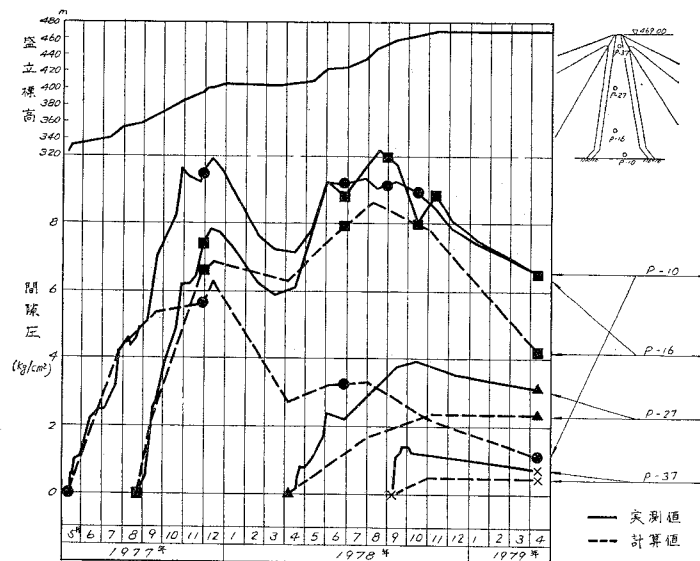


図-7 コアゾーン内の間隙水圧の経時変化

析を引き続き行ったが、**図-10**は堤体および基礎岩盤内の間隙水圧分布の変化の様子を示したものである。残留間隙水圧が分布する状態から、湛水の進行によって定常状態の間隙水圧分布へと移行してゆくコアゾーンでの間隙水圧の変化をうかがい知ることができる。これらの変化の様子は、定性的には従来よりいわれてきている現象を説明するものと思われる。また、これまでの浸透流解析においては、コアゾーン内の残留間隙水圧を考慮することが不可能であったのに対し、本解析手法により、盛立て完了後の残留間隙水圧の湛水過程に及ぼす影響を示すことが可能となることわがわかる。

4. 結 論

本報告において、まず不飽和領域を含む地盤の変形と間隙水挙動との連成問題に関する支配方程式の誘導と、有限要素法による数値解析手法について述べた。次にこの手法を実ダムの盛立てから湛水過程までの一連の数値解析に適用した結果を示し、また実測値との比較を行った。本報告の結論を要約すると以下のようである。

(1) 誘導した支配方程式は間隙水と地盤の骨格部分との相互作用を表現しており、地盤の変形と間隙水挙動に関して本質的な扱いをすることができる。また、支配方程式は、対象領域に飽和領域のみならず不飽和領域をも含むことにより、自由水面の現われる問題に適用できる。

(2) フィルダムの盛立て過程の解析結果として、盛立ての進行によりコアゾーン内に間隙水圧が発生し、盛立てを停止すると消散するという様子が示された。これによると間隙水圧の消散はフィルターゾーンなどの境界付近から始まり、その結果コアゾーンには球根状に間隙水圧の残留する状態が示された。これは従来のコアゾーンでの計測結果が示す傾向と同一のものである。また間隙水圧の分布および変化に関する数値解と実測値とは全体の傾向として比較的よい一致をみた。

(3) 盛立ての進行に伴いコアゾーンでの沈下は進行するが、盛立て中断時にも間隙水圧の消散に対応するコアゾーンでの沈下(圧密)の進行が解析結果として示された。コアゾーンでの沈下に関する計算結果と実測値との比較をみると両者は比較的よく一致していることが認められた。

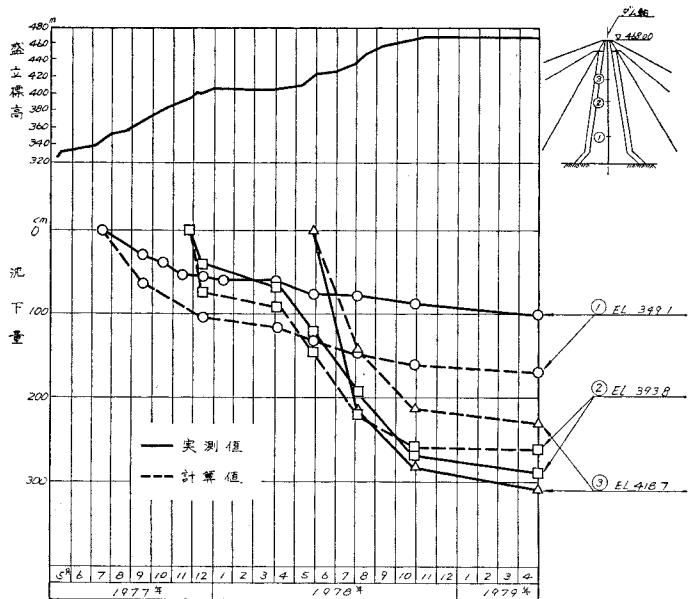


図-8 コアセンターの沈下量の経時変化

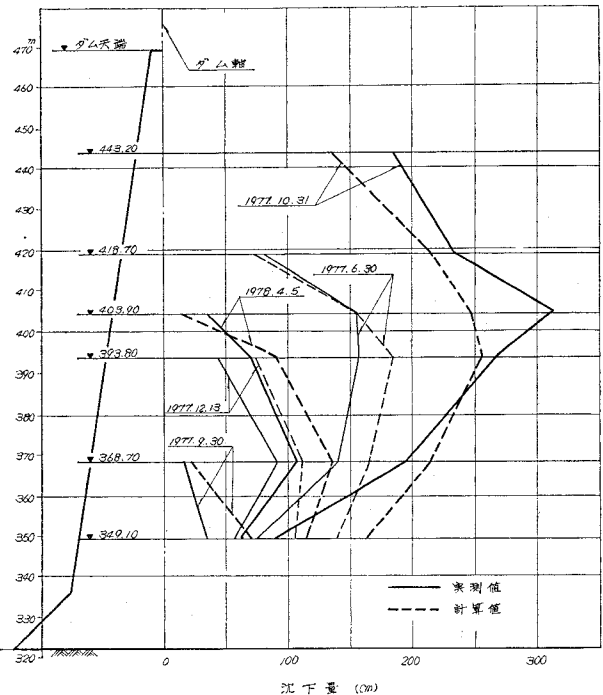
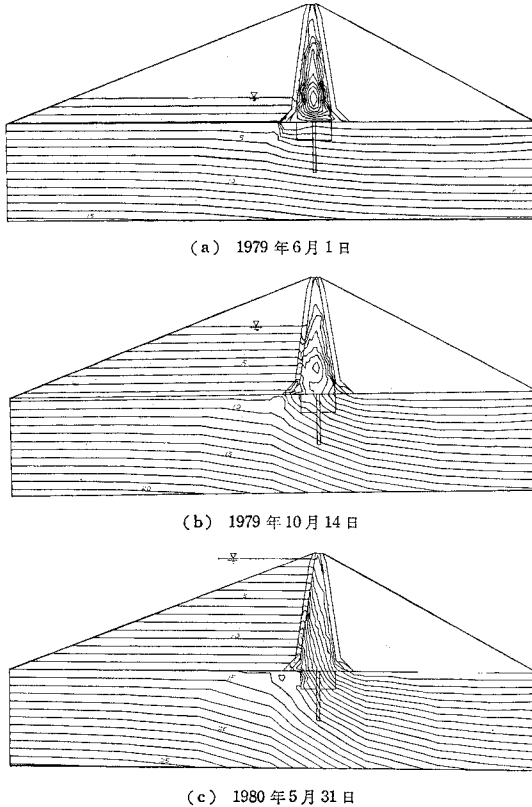


図-9 盛立て時のコアセンターの沈下量

(4) 盛立て完了後の応力状態および間隙水圧状態を初期条件として、湛水過程の解析を実施し、残留間隙水圧の分布する状態から湛水の進行に伴い定常状態へと移行してゆく間隙水圧の変化の様子を結果として得た。これは定性的に従来よりいわれてきている現象を説明するものと思われた。なお、この様子を示すことはこれまで



図一〇 灌水過程の間隙水圧分布 (計算結果: 等圧線の間隔は  $1 \text{ kg/cm}^2 \{98 \text{ kPa}\}$ )

の浸透流解析では不可能であった。

(5) 今回適用した解析手法は、以上のように実測値との比較検討から、フィルダムの盛立てから灌水過程までの一連の挙動の解析に有用であると思われる。ただし、解析結果は材料の物性値や境界条件などの入力条件に大きく依存するものであり、これらの精度を十分なものにすることが解析結果の信頼性を向上させるうえで必要である。特に、不飽和な材料の変形特性、透水特性とも未知のところが多く、これらの解明は急務でもある。

末筆ながら、本研究を進めるにあたり、ご協力をいただいた電源開発(株)土木部設計室の方々に深謝の意を表する次第である。なお、本報告での数値計算は、(株)

開発計算センターの井田文雄氏に負うところであり、あわせて感謝の意を表わすものである。

#### 参考文献

- 1) Cavounidis, S. and K. Höeg: Consolidation during Construction of Earth Dams, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT 10, pp. 1055~1067, 1977.
- 2) Biot, M.A.: General Theory of Three-Dimensional Consolidation, Journal of Applied Physics, Vol. 12, pp. 155~164, 1941.
- 3) Christian, J.T.: Undrained Stress Distribution by Numerical Methods, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, No. SM 6, pp. 1333~1345, 1968.
- 4) Chang, C.S. and J.M. Duncan: Analysis of Consolidation of Earth and Rock-fill Dams, Contract Report S-77-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1977.
- 5) 大西有三・村上 毅: 有限要素法による地盤の応力-変形を考慮した浸透流解析, 土木学会論文報告集, 第298号, pp. 87~96, 1980.
- 6) 中川加明一郎・駒田広也: 地盤の変形と間隙水挙動との相互作用の解析法, 電力中央研究所報告, 研究報告, 381031, 1982.
- 7) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠: 有限要素法による飽和不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, 第264号, pp. 87~96, 1977.
- 8) 駒田広也: 飽和-不飽和土中の非定常浸透流解析, 電力中央研究所報告, 研究報告, 377015, 1978.
- 9) 中野政詩: 土中水の不飽和流動, 2. 不飽和の水の流れ, 土と基礎, Vol. 29, No. 6, pp. 71~78, 1981.
- 10) Bjerrum, L. and J. Hunder: Measurement of permeability of compacted clays, Proc. 4th ICSMFE, Vol. 1, pp. 6~8, 1957.
- 11) 中川加明一郎: 間隙流体が圧縮性の土の有効応力について, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 207~208, 1982.
- 12) Bishop, A.W. and G.E. Blight: Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils, Geotechnique, Vol. 13, No. 3, pp. 177~197, 1963.
- 13) 中川加明一郎・駒田広也: フィルダムのコア内における盛立および初期灌水時の間隙水圧挙動の解析と実測値との比較, 電力中央研究所報告, 研究報告, 382007, 1982.
- 14) 電源開発株式会社: 手取川第一発電所新設工事工事記録, 1982.
- 15) 沢田・高橋・桜井・矢島: ロックフィルダムの物性値分布特性および堤体の動的特性——弾性波動に基づく考察, 電力中央研究所報告, 研究報告, 377008, 1977.

(1982.11.11・受付)