

徳島大学工学部 正員 ○堀田政國

京都大学工学部 正員 大西有三

京都大学大学院 学生員 村上 毅

1. 序 地盤内の浸透流がその地盤の変形挙動に種々の影響を与えるため、地盤内の浸透現象と変形問題の相互作用（いわゆるカップリング問題）が議論されはじめた。従来の解析では、浸透に関して地盤の変形を無視した浸透解析を行なって間げき水圧分布および浸透力を求め、変形に関して応力解析を行なう際に前述した浸透力を外力として取扱い、変位分布を求める手法をとっている。今回の解析においては、地下水の移動に対する連続式と応力の釣合式を連立させることにより、土の変形と浸透が同時に起こるような非定常問題に関する土の支配方程式を導き、F.E.M.にて数値計算を行なった。なお浸透による力が働く場合、ダムの下流の圧縮側では透水性が悪くなり、その上流側では引張り状態となって透水性がよくなるという報告がある。そこでグラウトを有するダムモデルを用い、応力状態に依存して透水係数が変化する場合と非定常状態および定常状態にかかわらず透水係数は一定である場合について解析を行なった。

2. 土の支配方程式 浸透流の支配方程式は、飽和-不飽和浸透流の連続式および Darcy の法則により、

$$\text{div } k(\psi) \cdot \vec{\nabla}(\psi + z) = (C(\psi) + \alpha S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで $C(\psi) = d\theta/d\psi$ (θ : 体積含水率), $S_s = dn/d\psi$ (n : 間げき率), ψ : 圧力水頭, z : 位置水頭
 不飽和領域では $\alpha = 0$, 飽和領域では $\alpha = 1$

また応力の釣合式は次式で表わされる。

$$\left\{ \frac{1}{2} C_{ijkl} (\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i}) + \alpha \delta_{ij} \bar{w} \right\}_{,j} + \rho_s b_i = 0 \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここで C_{ijkl} : 弾性係数テンソル, $\bar{u}_i$: 変位, $\bar{w}$: 水の単位体積重量, ρ_s : 材料密度, b_i : 物体力

Bardeen の不飽和圧密論における飽和度 S_w の分類より $0.9 \leq S_w \leq 1$ では $\alpha = 1$, $0 \leq S_w < 0.9$ では $\alpha = 0$

(1) 式を変位 $\bar{u}_i$ と ψ を未知数とする方程式に変形すると

$$\left\{ k(\psi) \cdot (\psi + z)_{,i} \right\}_{,i} = (C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} - \alpha \bar{u}_{i,i} \frac{\partial S_w}{\partial t}) \quad \text{-----} \quad (3)$$

よって (2), (3) 式を連立させ $(\bar{u}_i, \psi)$ について解くことにより飽和-不飽和土の挙動も知るこができる。

次に応力状態に依存する透水係数と間げき比の間に片対数紙上での直線関係が認められる事実 (Lamb, 1969) より透水係数の評価を次のように考えた。

$$e = a \log k + b \quad (e: \text{間げき率}, k: \text{透水係数}) \quad \text{-----} \quad (4)$$

すなわち圧密計算の各段階ごとに体積ひずみ $\bar{e}_w$ を求め、その結果から間げき比、さらに (4) 式により透水係数の更新を行ない、次の段階の圧密計算を行なうような繰り返し計算をした。

3. 解析例 今回の報告では、カップリング問題の適用例として、Fig-1 に示すダムモデルを用い、ダム基礎部の浸透現象および変形問題の相互作用を解析した。解析例として Case (a); 透水係数が一定である場合および Case (b); 透水係数が応力状態に依存する場合のみケースを行なった。Case (b) において (4) 式の係数は、 $a = 0.05$, $b = 0.97$ また初期間げき比は、地盤に対して $e_{in} = 0.77$, グラウトに対して $e_{in} = 0.67$ とした。なお両ケースとも瞬時に $2m$ の貯水がなされ、非排水状態の等体積変化をおこした後、排水が始まるとしている。Fig-2, Fig-3 はそれぞれ Case (a), Case (b) の間げき水圧分布を示している。非排水状態では透水係数は両ケースとも全領域にわたり一定であり、初期 (3hr.) における間げき水圧分布はほとんど同じ形状を示す。しかし非定常浸透から定常浸透に移る過程において間げき水圧分布は Case (a) および Case (b) で異なってくる。これは透水係数が変化する浸透状態が異なってくるため、非定常浸透では透水係数が上流側では堰体方向に小さくなり、下流側では地盤の上層に近づくほど小さくなっていく。定常状態では堰体から離れた領域ではもはや透水係

数値変化せず上流側で初期の1.6倍、下流側で0.6倍の値を示し、その間の領域では上流側から下流側にその値は小さくなっていく。ただ、堤体の側方水圧により堤体近傍の上流側では初期の透水係数の2.5倍、下流側で0.5倍の値があらわれる。定常状態において Case (a) に比べて Case (b) の等ポテンシャル線は下流側に移行していることがわかる。Fig. 4 は有効応力 σ_v の分布であるがかなり複雑なものとなっている。定常状態において Case (a), Case (b) とともに堤体近傍の σ_v の初期の地盤内応力にもとより、堤体近傍では堤体への側方水圧の影響が残っている。(Fig. 4 の Case (b)) 定性的に述べると堤体下流側では σ_v の増加とともに σ_h の増加は小さく、載荷初期が危険であるように思われるが、本解析においては引張り領域を許容しているので上流側について議論は控えたい。Fig. 5 は垂直変位を示したもので、初期の変形は盛土荷重による載荷した変形と同じであるが、時間の経過とともに安定状態(定常浸透状態)に移行するため、沈下および隆起量が小さくなっていく。ただし堤体付近の隆起量は定常時の方が大きくなっている。また、Fig. 6 はグラウト部分にかかる水圧の時間的変化を概念的に説明したもので、各時間ステップの水圧曲線と破線で囲まれた部分がそれぞれ水圧に相当する。よって1~4にかかる水圧と6~9にかかる水圧がグラウトに作用し、その差がグラウトへの水平荷重としてとらえられる。そこで各時間ステップの水平荷重の増分 $\Delta P/\Delta t$ を考えると、比較的初期に大きな水圧増分がグラウトにかかることがわかる。

4. おわりに ダムモデルを用いて浸透現象と変形問題の相互作用を解析し、非定常状態から定常状態にわたって浸透および変形の両面から、概念的にダムの安定に関する検討を加えた。今後は不飽和浸透領域を考慮した問題を考えていきたい。

参考文献

- 1) 赤井, 大西, 西垣; 有限要素法による飽和-不飽和浸透系の解析, 土木学会論文報告集, (1977)
- 2) T. William Lambe, Robert V. Whitman; Soil Mechanics, (1969)

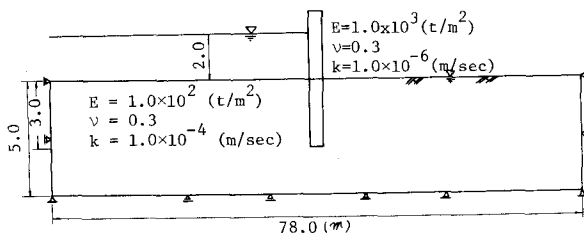


Fig. 1 ダムモデル基本図

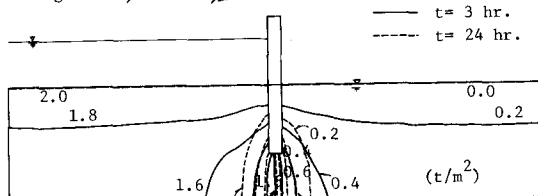


Fig. 2 開けき水圧分布図

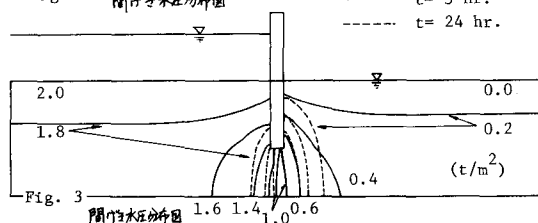


Fig. 3 開けき水圧分布図

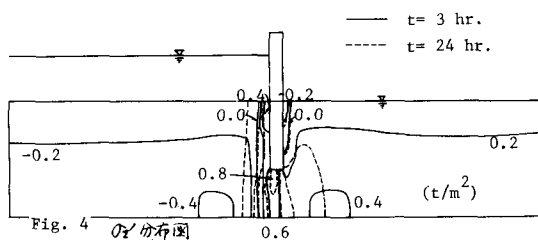


Fig. 4 σ_v 分布図

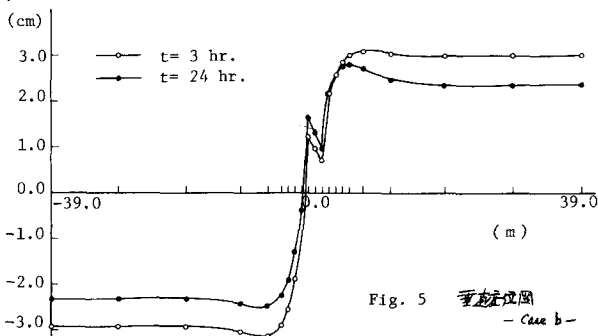


Fig. 5 垂直変位図 - Case b -

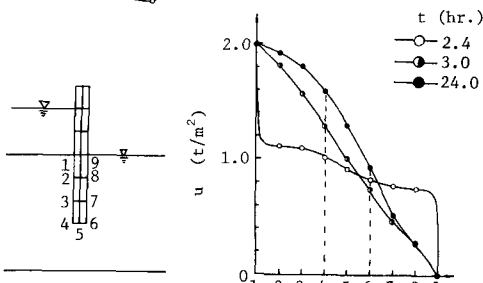


Fig. 6

グラウト部の水圧 (概念図) - Case b -