

(99) ダム基礎岩盤の変形を考慮した浸透流解析

日特建設(株) ○大西 朝晴
日特建設(株) 正会員 岡 孝夫
埼玉大学工学部 正会員 浜島 良吉

SEEPAGE FLOW ANALYSIS CONSIDERING THE DEFORMATION OF DAM BED ROCK MASSES

Tomoharu OHNISHI NITTOC Construction Co.,Ltd.
Takao OKA NITTOC Construction Co.,Ltd.
Yoshikichi HAMAJIMA Saitama University

Abstract

No weight of embankment dam was considered in the seepage flow analysis of dam bed rock masses in the past. It has however been reported that with the progress in the embankment construction, the bed rock masses are compacted to reduce the permeability. Then a new analysis method considering the stress has been developed by the combined use of the modified virtual displacement method and integral finite difference method. Firstly, comparison was made with the results of seepage flow analysis in the existing finite element analysis, with the stress term disregarded, concerning the seepage flow in the dam bed rock masses, assuming appropriate material constants based on uniform porous materials. Then the load from the dam embankment weight was considered and permeability changes were studied.

1. まえがき

岩盤に関する数値解析手法としてこれから要求されることとして

熱・応力・浸透の連成解析ができること

岩盤の不連続面を陽な形で表現できること

岩盤を構成する岩石の結晶構造を考慮できること

が挙げられる。これらすべてを考慮できる解析手法の開発を目指し研究が進められている。そこで本報では、これまでに開発されたプログラムの検証とその有効性を確認するためにいくつかの解析を実施した。

一般的にダム基礎岩盤の透水性と力学的検討が個々に論じられている。設計に際しても、浸透流解析と応力解析がそれぞれ独立に行なわれているのが通例である。しかし、これまでの研究によると、ダム堤体の施工が進むにつれて基礎岩盤の透水係数が低減していくという現象が報告されている¹⁾²⁾。これはダム堤体の自重による基礎岩盤内の応力が増加し、亀裂等が閉塞し間隙が減少することによるものであることが予想される。このような現象を確認するために、本解析手法を用いて検討を行なった。

2. 理論

(I) 応力・浸透の連成解析

多孔質媒体中での応力のつり合いとダルシー則を仮定した浸透流の連成関係を示す。

(応力関係)

Terzaghiの有効応力の原理から次式が得られる。

$$\{\sigma\} = -[m]\{P\} + \{\sigma'\} \quad \{\sigma\} : \text{全応力} \quad \{\sigma'\} : \text{有効応力} \quad (2.1)$$

$[m]$: 垂直応力成分に対しては1、せん断応力に対しては0

この有効圧力を粒子のひずみと関係づける構成則として、固相の圧縮性を考慮して増分形で書くと次のようになる。

$$\begin{aligned} \{d\sigma'\} &= [D^e]\{\{de\} - \{de_0\}\} & \{de\} &: \text{粒子の全ひずみ増分} \\ & & \{de_p\} &: \text{流体圧による全体積ひずみ増分} \\ \{de_p\} &= -\frac{1}{3K_s}[m]\{dP\} & K_s &: \text{固相の体積弾性率} \end{aligned} \quad (2.2)$$

有効応力について、物体力(b)と、境界表面力(t)についてつり合い関係を考え、仮想仕事の原理を適用すると以下のようにまとめられる。

$$\int_{\Omega} \{de\}^T \{d\sigma'\} d\Omega - \int_{\Omega} \{de\}^T [m] \{dP\} d\Omega - \{d\sigma\} = 0 \quad \text{ただし} \quad \{d\sigma\} = \int_{\Omega} \{\delta u\}^T \{d\sigma\} d\Omega - \int_{\Gamma} \{\delta u\}^T \{t\} d\Gamma$$

$\{\delta u\}$: 仮想変位 Ω : 領域 Γ : 境界

ここで、(2.2) 式の構成則を考慮すると、次の式が得られる。

$$\int_{\Omega} \{\delta e\}^T [D^e] \{de\} d\Omega - \int_{\Omega} \{\delta e\}^T [m] \{dP\} d\Omega - \int_{\Omega} \{\delta e\}^T [D^e] [m] \frac{1}{3K_s} \{dP\} d\Omega - \{d\sigma\} = 0 \quad (2.3)$$

流れ場において圧力Pが既知であるなら、この系内の変位と応力がこの方程式から得られる。

さらに、これを修正仮想変位法を用いて離散化すると、次の形式の連立方程式が得られる。

$$\begin{aligned} [k_{uu}]\{du\} + [k_{ue}]\{de\} &= \{F_u\} + \{\bar{P}_{du}\} \\ [k_{eu}]\{du\} + [k_{ee}]\{de\} + [L]\{dp\} &= \{F_e\} + \{\bar{P}_{de}\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

(浸透関係)

ダルシー則から次式が得られる。

$$\{v\} = -\frac{1}{\mu}[k]\nabla(p + \rho gh) \quad [k] : \text{浸透マトリックス} \quad \mu : \text{粘性係数} \quad p : \text{圧力} \quad (2.5)$$

ρ : 密度 g : 重力加速度 h : 水頭

領域V、表面積Sに対して質量保存則を適用すると、以下のように示される。

$$\text{質量保存則} \quad \frac{\partial}{\partial t} M = - \int_{\Gamma} \rho v \cdot n ds + \int_V q_n dV \quad M = \int_V \rho \phi dV : V \text{内の流体の全質量} \quad (2.6)$$

ρ : 流体密度 ϕ : 岩体間隙率

また、間隙率の変化は、次式で表せるものとする。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \phi_e}{\partial t} + \frac{\partial \phi_p}{\partial t} + \frac{\partial \phi_{\sigma}}{\partial t} \quad \frac{\partial \phi_e}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} : \text{全ひずみによる変化率}$$

$$\frac{\partial \phi_p}{\partial t} = \frac{(1-\phi)}{K_s} \frac{\partial P}{\partial t} : \text{圧力変化による粒子体積の変化}$$

$$\frac{\partial \phi_{\sigma}}{\partial t} = -\frac{1}{K_s}[m]^T \frac{\partial \{\sigma'\}}{\partial t} : \text{有効応力の変化による粒子サイズの変化}$$

これらに、IFD法（積分差分法）を適用して離散化すると、次の形式の方程式が得られる。

$$[RL]\left\{\frac{de}{dt}\right\} + [h]\{p\} + [PE]\left\{\frac{dp}{dt}\right\} = \{f\} \quad (2.7)$$

なお、この（2.7）式の時間に関しては、差分法を適用する。

最終的には、（2.4）、（2.7）の2式から変位、圧力（水頭）に関する連成解析として解いている。

(2) 変形による透水係数の低減

岩盤の変形による透水性の低減は、基本的には間隙率の減少が原因であると考えられる。

今回は、土の間隙モデルから導かれた次式を仮定し検討した。

（Kozeny-Calman 則）

$$k = k_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \left(\frac{1 - \phi_0}{1 - \phi} \right)^2$$

ϕ : 変形後の間隙率 ϕ_0 : 初期間隙率
 k : 変形後の透水係数 k_0 : 初期透水係数

3. 有限要素解析との比較と連成解析例

重力ダムをモデルとして既往の有限要素解析プログラムとの比較、及び本手法による連成解析結果を示す。なお、本手法は熱までも含めた連成解析が可能であるが、今回は応力と浸透流のみを考え熱は考慮していない。また、応力解析については弾性のみを対象とした。

図-1のようなモデルを設定し、岩盤は一樣な透水係数を持つ均質な多孔質体とした。解析領域は岩盤内だけに限り、ダム堤体の自重は分布荷重として与えた。また、本解析は非定常解析であるために十分な時間経過をとり、ステップ間での水頭差が一定値以下になったときに収束と判断し、最終ステップの値を採用した。境界条件は上部以外はすべてローラーで不透水とした。表-1に示す入力物性値を用いて次のような解析を行なった。

(1) 有限要素法による結果

解析プログラムはUNSAT2³⁾を用いた。これは通常の有限要素法による浸透流解析プログラムであり、各節点の水頭値を未知数として解くものである。解析結果の全水頭分布を図-2に示す。ダム堤体直下部から放射状に、ほぼ左右対称にコンター線が伸びている。

(2) 本解析手法の浸透のみの結果

有限要素法による結果と比較するためにダム堤体の自重による影響を無視し、透水係数 k を一定として解析した。したがって、ここでは本手法は単純な浸透流解析となる。しかし、本手法の相違点は、水頭値を節点ではなく要素内で一定にとることである。図-3に解析結果の全水頭分布を示しているが、図-2とほぼ同様な結果となり、この種の問題については、少なくとも有限要素法と同程度の有効性を持つといえる。

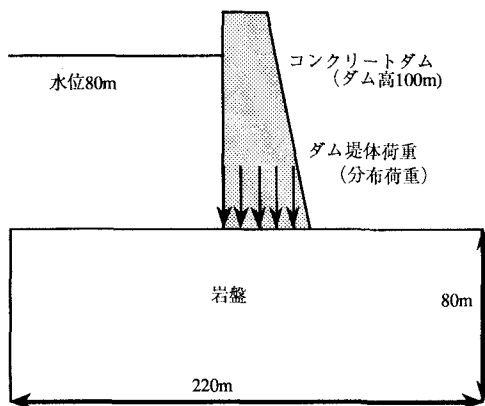


図-1 解析モデル

表-1 入力物性値

	岩盤	コンクリート
単位体積重量(tf/m ³)	2.0	2.3
ポアソン比	0.3	—
弾性係数(tf/m ²)	10000	—
透水係数(cm/sec)	1.0×10^{-4}	—
間隙率	0.1	—

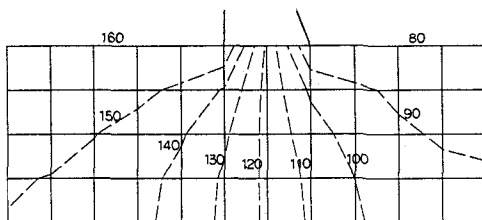


図-2 有限要素法による全水頭分布

(3) ダム堤体による透水係数への影響

次にダム堤体の上載荷重による透水係数への影響を見るために、飽和している岩盤にダムを築造した場合の透水係数の変化を図-4に示す。これからダム堤体直下で透水係数の低減が最も大きく、約25%減少している。

(4) ダム堤体と湛水を考慮する連成解析

ダム堤体による上載荷重を考慮し、かつ上流に水頭をかけた場合の透水係数 k の変化を考える。これはダム堤体と湛水によって岩盤中の応力状態が変化し、それによって透水係数が変化する応力浸透連成解析である。間隙率と透水係数の関係としては前述のKozeny-Calman則を採用した。図-5に全水頭分布を、図-6に透水係数の変化率分布を示す。湛水池側で透水係数が増加しているが、これは、湛水池側では80mの圧力水頭がかかることによって有効応力が減少し間隙率が大きくなるためと考えられる。また、堤体直下部は、堤体荷重の影響から透水係数の低減が見られる。ただし、この場合の低減率は、(3)に比べ小さく約20%である。

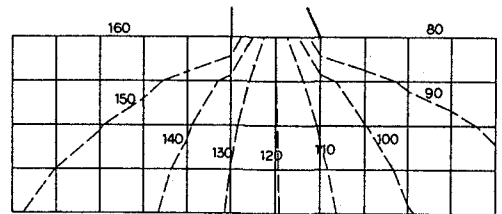


図-3 本手法 (k :一定) による全水頭分布

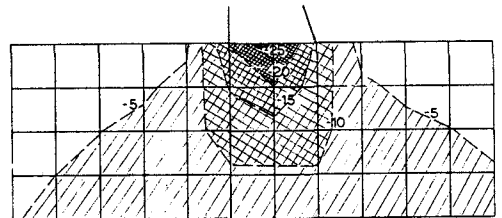


図-4 透水係数の変化率分布 (単位:%)

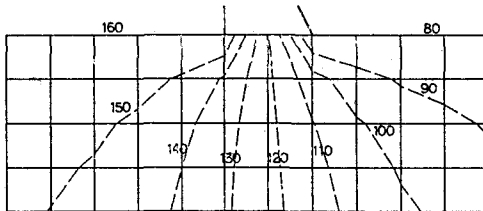


図-5 本手法 (k :変化) による全水頭分布

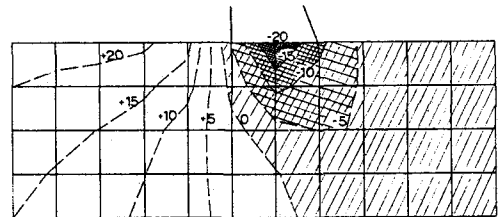


図-6 透水係数の変化率分布 (単位:%)

(5) 亀裂モデルの場合

ここまでは均一な多孔質体モデルを考えたが、本解析では図-7のような格子状の亀裂モデルを考えることができる。この例では、要素のマトリックス部は不透水とし、要素間の境界部に亀裂が存在すると考える。ここで、亀裂内の流れを平行板モデルと仮定し、この中をダルシー則にしたがって水が流れるとすれば亀裂内の透水係数 k は

$$k = \frac{g(2b)^2}{12\nu}$$

で与えられる。ここに、 g :重力加速度、 b :亀裂幅の1/2、 ν :動粘性係数である。

いま、亀裂部分の透水係数を5.7cm/sec (亀裂幅3mm) とした時の全水頭分布が図-7である。

岩盤全体を多孔質と仮定した場合の結果 (図-3) とほぼ一致する。

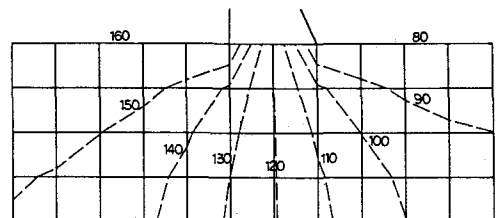


図-7 亀裂モデルの全水頭分布

4. 実測例との比較

本節では、ダム堤体の透水係数に及ぼす影響を実測した事例を取り上げ、解析の有効性を検討した。

(1)実測例

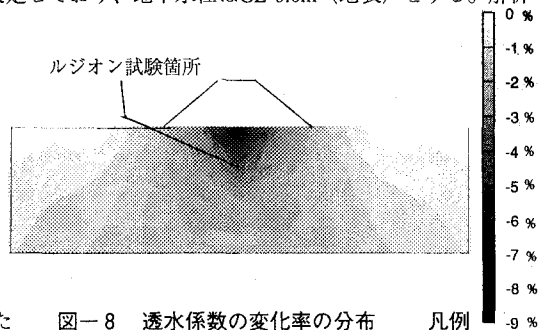
実測例は松本・山口の論文¹⁾から引用した。この現場試験は砂礫層に高さ7.5mの盛土をし、その前後で盛土下部のルジオン試験を行ない、透水係数の変化を調べている。結果は盛土前に40Lu（透水係数に換算すると 4.8×10^{-4} cm/sec）であったものが10Lu（ 1.2×10^{-4} cm/sec）にまで減少した。

表-2 入力物性値

	砂礫層	盛土
単位体積重量(tf/m ³)	2.0	2.0
ポアソン比	0.3	—
弾性係数(tf/m ²)	1000	—
透水係数(cm/sec)	4.8×10^{-4}	—
間隙率	0.38	—

(2)本手法による解析結果

解析に用いた物性値は前述の論文中で使われていたものと同一とし、表-2に示す。砂礫層は盛土前と同様な透水係数を持つ均質な多孔質体とした。解析領域は基礎地盤だけに限り、盛土による荷重は分布荷重として与えた。また、本解析では地盤は飽和と仮定しており、地下水位はGL-0.0m（地表）とする。解析結果として盛土後の透水係数の低減率の分布を図-8に示す。最も透水係数が低減した要素で8.7%、ルジオン試験を行なった箇所に相当する位置では5%の減少であった。実測値では透水性が1/4、つまり75%の減少であったのに対して、本手法による解析ではわずかに5%の減少だけであった。この原因として考えられることは



a) 地盤として多孔質体モデルを用いた

b) 間隙率と透水係数の関係則が不適切であった 図-8 透水係数の変化率の分布 凡例

などである。a)については、松本らが指摘しているように透水係数が 10^{-4} cm/sより大きい場合には亀裂のような卓越した水みちを含んでいることが推定され、今回の多孔質モデルでは十分シミュレートできなかったものと思われる。b)については、土粒子モデルから導かれたKozeny-Calman則を使用したのが、松本らが実測結果から求めた間隙比と透水係数の関係（ $e=a+b \log k$ ）を利用するとほぼ実測値と一致した結果が得られることを確かめた。

5. あとがき

不連続岩盤の連成解析の解析プログラムの検証の一環として、ダム基礎岩盤の応力・浸透連成解析を行なった。今回は主に岩盤を多孔質体と仮定して解析を行なったが、これまで報告されてきたいくつかの現象を定性的ではあるが確認することができた。さらに、今回の解析結果から、従来指摘されなかった湛水によるダム基礎岩盤の透水係数への影響も考え得ることを示した。しかし当然ながら、実際の岩盤は非常に複雑な構造を持ち、今回の解析が意味あるものかどうかはさらに検討の余地がある。

本解析の最終的な目標は、亀裂性岩盤の3次元連成解析である。今後の課題としては、以下のことを検討している。

- ① 岩盤中の微小亀裂は構成則で考慮し、大きな亀裂は要素境界として表現する方法
- ② 水・応力による亀裂への影響を考慮して、透水係数を算定する方法

<参考文献>

- 1) 松本、山口：砂礫層の応力と透水性の連成解析、土木学会論文集、No.430/III-15、pp.59～67、1991.6
- 2) 松本、山口：フィル堤体の盛土に伴う基礎岩盤の変形と透水係数の変化、土木学会論文集、No.370/III-5、pp.281～290、1986.2
- 3) Neuman S.P.：Saturated Unsaturated Seepage by Finite Elements、Proc.ASCE、Vol99、No.HY12、pp.2233～2250、Dec.1973