

(33) 不連続面に注目し乱流領域の存在を考慮した岩盤浸透流解析

東電設計(株) 土木本部 正会員 ○ 宮田 美幸
同 上 高橋 信之
前田建設工業(株) 土木設計部 梨本 裕
同 上 電算センター 矢島 充郎

1 はじめに

岩盤内の浸透水の挙動が、節理、破碎帯などの不連続面に大きく影響されることは良く知られている。実際、不連続面のない母岩自体の透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-9} (cm/s)$ と非常に小さいので、岩盤浸透流は不連続面のみに存在すると言っても過言ではない。にもかかわらず、その挙動は、粘土や砂などの土中のそれと同様に不連続面を含む岩盤を巨視的に等価な連続体に置き換え、ダルシー則を適用して解析されている。

この連続体一層流解析では次のような点が問題になる。

- ① 極めて細かい不連続面が発達している場合は別だが、特定の不連続面が卓越している場合や、不連続面の間隔が構造物に較べて大きい場合、そして、不連続面群が斜交する場合などは、岩盤の連続体への置き換えは妥当ではない。
- ② 揚水試験や透水試験の際、孔壁付近では乱流状態になることが多いと考えられるが、このような乱流領域の存在が予想される場合、連続体一層流解析の妥当性が不明確である。

本文では、これらの問題の解決に少しでも役立てばと考え、まず乱流領域の存在が全体の流れに及ぼす影響を特殊な場合について理論解により検討する。次に乱流領域の存在が考慮できる不連続体解析(不連続面を不透水平行壁に置き換える数値解析)について述べ、解析例も併せて示すこととする。

2 不連続面の浸透流

不連続面内の浸透現象はLouis らにより理論的、実験的に検討されている。その報告に従うと、単一不連続面内の浸透則は次のように表わされる。

層流 $v = k_f \cdot I \cdots \cdots (1)$ v : 平均流速 k_f, k'_f : 不連続面の透水係数 I : 動水勾配

乱流 $v = k'_f \cdot I^\alpha \cdots \cdots (2)$ α : 非線形性の度合を表わす係数

このとき、不連続面の透水係数(k_f, k'_f)、抵抗係数(λ)、非線形係数(α)は、相対粗度(K/Dh)に応じて、表-1より求める。

表-1

K/Dh	L or T	k_f	λ	α
≤ 0.033	L	$k_f = g t^2 / 12 \nu$	$\lambda = 96 / Re$	1
	T	$k'_f = 2 \lambda_B \sqrt{g t}$	$\lambda^{-1/2} = -2 \log (K/Dh / 3.7) = \lambda_B$	1/2
$= 0$	T	$k'_f = \{ (2/\nu)^{1/4} t^{5/4} g / 0.079 \}^{4/7}$	$\lambda = 0.316 Re^{-1/4}$	4/7
> 0.033	L	$k_f = g t^2 / 12 \nu / \lambda_A$	$\lambda = 96 \lambda_A / Re$ $\lambda_A = 1 + 8.8 (K/Dh)^{3/2}$	1
	T	$k'_f = 2 \lambda_B \sqrt{g t}$	$\lambda^{-1/2} = -2 \log (K/Dh / 1.9) = \lambda_B$	1/2

g : 重力加速度、 t : 不連続面の開口値、 ν : 動粘性係数、 Re : レイノルズ数、 K : 絶対粗度

Dh : 水理学的半径 ($= 2t$)、 L : 層流、 T : 乱流

3 特殊な場合の理論解

3.1 対象モデル

水平不連続面における定常軸対称流を考え、開口値は場所によらず一定、 $r = Ri$ (Ri : 注入孔、あるいは排水孔の半径) において圧力 $P = Pi$ 、 $r = Ro$ (Ro : 影響半径) において $P = Po$ とする。

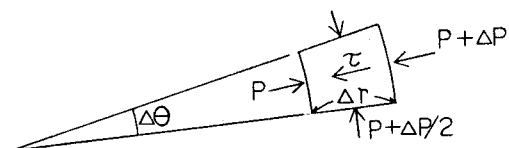


図-1

このとき、図-1に示すような微小部分の力のつり合いから、式(3)が得られる。

$dp/dr = -2\tau/t \dots\dots\dots (3)$ τ : 壁面の摩擦応力

3.2 各状態における理論解

壁面の摩擦応力 τ と平均流速 v の関係は式(4)で表わされるので、式(3)を式(4)、連続式(5)、および境界条件を満足するように解くと表-2に示すようになる。

$\tau = \lambda \rho v^2/8 \dots\dots\dots (4)$ ρ : 水の密度 V_0 : $r = R_0$ における流速、 R_c : 遷移限界円の半径
 $r v = R_0 V_0 = R_c V_c \dots\dots\dots (5)$ V_c : 限界流速 (= $Rec \cdot v/2t$, Rec : 限界レイノルズ数)

表-2

層流(L)	$V_0 = -a\Delta p / \ln(R_i/R_0) / R_0 / \lambda_A$	$P = P_i - \Delta p \cdot \ln(r/R_i) / \ln(R_0/R_i)$
乱流(T)	$V_0 = \Delta p^\alpha / (R_i^\beta - R_0^\beta)^{1/\alpha} / R_0 / b$	$P = P_i - \Delta p (R_i^\beta - r^\beta) / (R_i^\beta - R_0^\beta)$
層流+乱流 (L+T)	$\Delta p + C(V_c R_c)^{1/\alpha} (R_c^\beta - R_i^\beta) + \lambda_A V_c R_c \cdot \ln(R_c/R_0) / a = 0 \Rightarrow R_c \Rightarrow V_0$	$P = P_i + C(R_0 V_0)^{1/\alpha} (r^\beta - R_i^\beta) \quad R_i \leq r \leq R_c$ $= P_0 - \lambda_A R_0 V_0 \cdot \ln(r/R_0) / a \quad R_c \leq r \leq R_0$

$a = t^2/12/\mu$, $\Delta p = P_i - P_0$, $e = \rho^{4/7} v^{1/7} t^{-5/7}$, $f = \rho/4/t$, ($K/Dh \leq 0.033$ のとき $\lambda_A = 1$)
 $K/Dh = 0$ のとき $\alpha = 4/7$, $\beta = -3/4$, $b = 0.251e$, $C = 0.0888e^{3/4}$
 $K/Dh \neq 0$ のとき $\alpha = 1/2$, $\beta = -1$, $b = f^{1/2} / \lambda_B$, $C = f \lambda$ (乱流の λ を用いる)

3.3 例題

$K/Dh = 0.04$, $Rec = 2000$, $R_i = 0.05\text{ m}$, $R_0 = 150\text{ m}$, $P_i/\rho g = 100\text{ m}$, $P_0/\rho g = 0\text{ m}$ のときの t と R_c の関係を図-2、圧力分布を図-3、 t と V_0 の関係を図-4に示す。

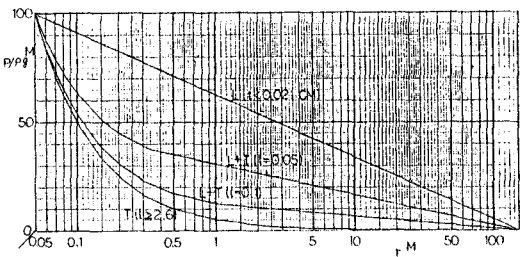


図-3

$t < 0.021\text{ cm}$ のとき全体が層流になり、 $t \geq 2.6\text{ cm}$ のとき全体が乱流になる。 $0.021 \leq t < 2.6\text{ cm}$ のときは遷移限界が存在し、 t が大きくなるに従い遷移限界円の半径 R_c が大きくなる(図-2)。これに伴い圧力分布は層流状態のそれから乱流状態のそれに近づいて行く(図-3)。

遷移限界が存在する場合の流量(Q_{L+T})は、全体を層流として求めた流量(Q_L)と全体を乱流として求めた流量(Q_T)の小さい方に近い($Q = 2\pi R_0 t V_0$, 図-4)。従って、流量は、どのような t に対しても、 Q_L と Q_T の小さい方を採用すれば“ほぼ正解”になり、そのようにしたときの最大誤差は約40%程度(表-3参照)である。

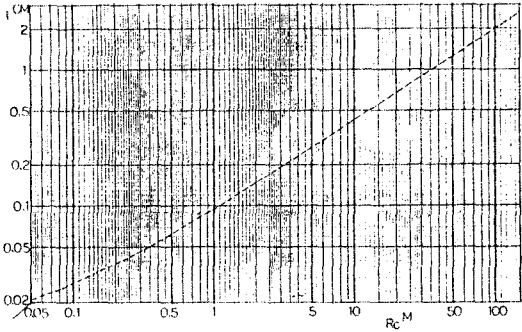


図-2

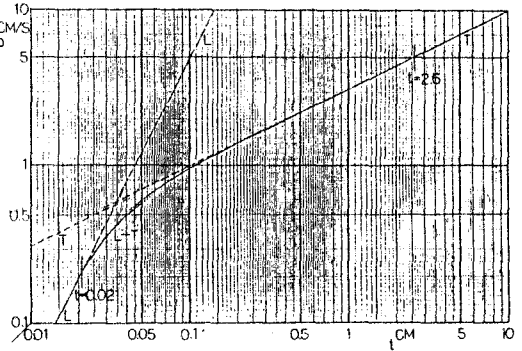


図-4

表-3

$t\text{ cm}$	0.025	0.03	0.035	0.04	0.05	0.07
Q_L/Q_{L+T}	1.07	1.20	1.38	1.57	2.02	3.11
Q_T/Q_{L+T}	1.75	1.50	1.36	1.27	1.17	1.09

4 数値解法(1)……単一不連続面の場合

4.1 解析方法の概要《差分法(F. D. M)による》

式(1), (2)と連続式(6)より, 2次元定常状態の基礎方程式は次のようになる。

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0 \cdots \cdots (6) \quad u, v: \text{流速の } x, y \text{ 方向成分}$$

$$\text{層流領域} \quad \partial^2 H / \partial x^2 + \partial^2 H / \partial y^2 = 0 \cdots \cdots (7) \quad H: \text{全水頭値}$$

$$\text{乱流領域} \quad |\partial H / \partial x|^{\alpha-1} \cdot \partial^2 H / \partial x^2 + |\partial H / \partial y|^{\alpha-1} \cdot \partial^2 H / \partial y^2 = 0 \cdots \cdots (8)$$

$$\text{遷移境界} \quad k_f (\partial H / \partial n)_L - k'_f (\partial H / \partial n)_T \cdot |(\partial H / \partial n)_T|^{\alpha-1} = 0 \cdots \cdots (9)$$

式(7), (8), (9)の3種類の式から成る連立方程式を直接解くことはできないので, 式(7)だけから成る連立方程式の解を出発値として, 逐次代入法による計算を遷移境界が変動しなくなるまでくり返す。

このフローチャートを図-5に示す。②で解析領域全体が層流状態にあると仮定してHを求め, ③で遷移境界を設定する。⑦で前回求めたH(H₀)を用いてA, B, Cを計算し, ⑧で式(i), (ii), (iii)の3種類の式から成る連立方程式を解いて新しいH(H_n)を求める。この⑦と⑧を $\Delta H = |H_0 - H_n| \leq \varepsilon_1$ (許容誤差)になるまでくり返し, さらに, ③から④を遷移境界が変動しなくなるまで($\Delta S \leq \varepsilon_2$)くり返す。

4.2 解析例 《理論解との比較》

3と同様に水平不連続面における軸対称流を想定し $K/Dh = 0, Rec = 2300, Ri = 11.3m, Ro = 150m, Pi/\rho g = 100m, Po/\rho g = 0m$ のときの速度分布を図-6に示す(ただしF. D. M. モデルは図-7に示すようになる)。

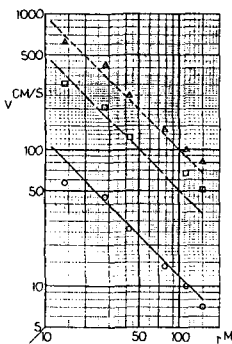


図-6

$t = 0.07 \text{ cm}$ のときは全体が層流, $t = 0.2 \text{ cm}$ のときは遷移境界が存在し, $Rc = 67.4m$ (理論解), $t = 0.5 \text{ cm}$ のときは全体が乱流になるが, 境界形状の差異やメッシュ分割の粗さを考慮すれば, どの場合も理論解と数値解は良く一致していると言える。

5 数値解法(2)……交差する不連続面群の場合

5.1 解析方法の概要

不連続面群の交点を節点, 節点間の不連続面を1本の線要素とし, 不連続面ネットワークの浸透流を扱う。層流状態の要素では式(1)より式(10)が, 乱流状態の要素では式(2)より式(11)が成立する(ただし, 開口値は各要素で一定とする)。

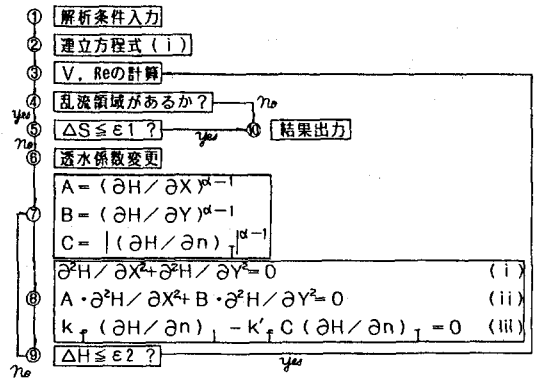


図-5

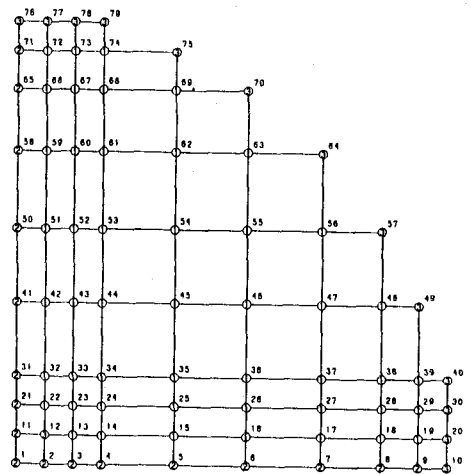


図-7

$$\begin{Bmatrix} q_i \\ q_j \end{Bmatrix} = \frac{A_m K_m}{L_m} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_i \\ H_j \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{Bmatrix} q_i \\ q_j \end{Bmatrix} = \frac{A_m K'_m}{L_m} \left| \frac{H_i - H_j}{L_m} \right|^{\alpha-1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_i \\ H_j \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

q_i, q_j : 節点 i, j から要素 m への流入量
 A_m, K_m, L_m : 要素 m の断面積, 透水係数, 長さ
 H_i, H_j : 節点 i, j の全水頭値

式 (10) と式 (11) を直接重ね合わせることはできないので、図-8 に示す手順に従い解を求める。②で全要素が層流状態にあると仮定し、式 (10) を重ね合わせて解析領域全体に対する連立方程式 (iv) を作成、解を求める。③で各要素の V, Re を計算し、乱流状態になっている要素があるかどうか判定する。あれば⑤でそれらの要素の D_m を前回求めた H (H_0) を用いて修正し、連立方程式 (iv) を再作成、新しい解 (H_n) を求める (乱流状態から層流状態に変化する場合も D_m を修正する)。この③から⑤を $\Delta H = |H_n - H_0| \leq \varepsilon$ (許容誤差) になるまでくり返す。

5. 2 解析例

図-9 に示すように、不連続面群がダム基礎周辺に格子状 (間隔 $10m$) に分布する場合を想定する。すべての不連続面の t と K/Dh が等しく、 $K/Dh = 0.04$ ($Re = 2000$) のとき、流出量は表-4 に示すようになる。

上記の条件では $t < 0.0016m$ のとき全体が層流、 $t > 0.022m$ のとき全体が乱流 (閉塞端を持つ要素は除く) になる。 $Q_L + T$ は、乱流の要素が少ない $t = 0.002m$ のとき Q_L と Q_T のほぼ中間値になるが、乱流の要素が多い $t = 0.01m$ のとき Q_T にほぼ等しくなる。3.3 の例題と傾向は少し異なるが、このような場合でも、流量は、どのような t に対しても、 Q_L と Q_T の小さい方を採用すれば“ほぼ正解”になると推定される。

6 おわりに

以上、2. 3 の理論解、数値解により、不連続面を水路とする岩盤浸透流を考える上で乱流領域の存在が無視できない場合もあり、そのような場合の解析方法として今回提案した数値解法がある程度有力であることが示せたと思われる。今後は、より実際的な問題に適用しながら改良を加え、充実した解法にしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 宮田美幸ら：乱流状態を考慮した岩盤浸透流解析、第39回土木学会年次学術講演会、1984
- 2) 川本眺万ら：亀裂性岩盤内の浸透流の解析について、発電水力 No147
- 3) 大西有三ら：有限要素法による不連続性体の応力・変形・浸透流解析、土木学会論文報告集 (322)
- 4) C.Louis : A study of groundwater flow in jointed rock, Imperial college R.M.R.R. No.10
- 5) 土木学会編：土木技術者のための岩盤力学

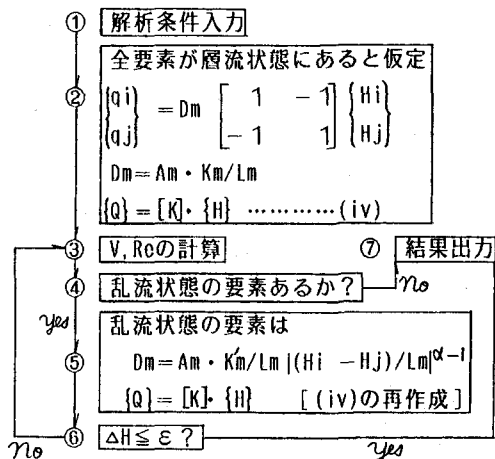


図-8

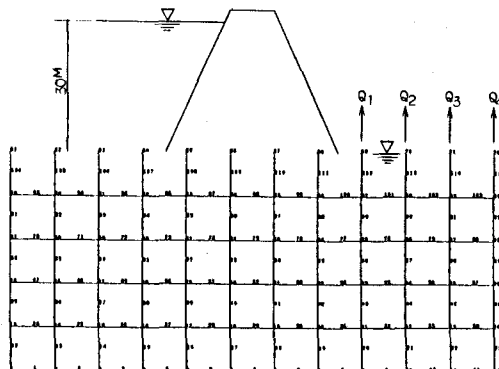


図-9

表-4

t/s x10 ⁻²	t = 0.002m			t = 0.01 m		
	L	L+T	T	L	L+T	T
Q1	0.240	0.148	0.142	30.0	1.59	1.59
Q2	0.157	0.155	0.121	19.6	1.35	1.35
Q3	0.120	0.123	0.112	15.1	1.25	1.25
Q4	0.106	0.119	0.110	13.3	1.23	1.23
ΣQ	0.623	0.545	0.485	78.0	5.42	5.42

(33) An Analysis of Water Flow Through Discontinuities in Rock Masses
Taking Account of Existence of Turbulent Flow Region.

Miyuki MIYATA Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

Nobuyuki TAKAHASHI "

Yutaka NASHIMOTO Maeda Construction Co., Ltd.

Mituro YAJIMA "

The simulation of water flow through rock masses is generally analysed with Darcy's Law by replacing the rock masses, in which discontinuities are developed, with the equivalent continuum like sandy or clayey ground, whereas the behavior of this flow may actually be governed by discontinuities such as joints, faults.

This solution, however, may contain several problems i.e. in the case that;

① particular discontinuities are dominant,

② and the turbulent flow region is expected.

For resolving these problems, the influence, which is caused by the existence of turbulent flow region to the whole flow, is examined by a theoretical solution.

And a method of analysis of water flow through discontinuities in rock masses taking account of the existence of turbulent flow region is also mentioned together with the analysis examples.