

III-565 不均質地盤の透気性測定データの解析について

神戸大学大学院 学生会員 池宮 俊二
 神戸大学工学部 正会員 川谷 健
 神戸大学工学部 正会員 中山 昭彦

1. はじめに 亀裂性岩盤の緩みの度合いや範囲を判定する指標として透気性を用いることが考えられ、ボーリング孔を利用して現場透気試験が実施されている¹⁾。しかし孔内気圧の回復速度から固有透過度を算定する方法は必ずしも確立されていない。それゆえ、データ解析に先立って、気圧回復過程が透気性の異なる領域の広さや測定位置によってどのように変わるかを調べ、算定された固有透過度が何を代表するかを把握することが重要となる。本研究では不均質な多孔質地盤での透気試験をとりあげ、数値解析によって、透気性の空間分布による気圧回復過程の違いを調べ、また固有透過度の逆解析を行った。

2. 解析モデル 透気試験は乾いた岩盤で行う。解析モデルは現場試験¹⁾を参考に設定した。図-1に模式図を示す。地盤への空気侵入は掘削面からだけとし、ボーリング孔は掘削面に垂直で、流れ場は孔軸について対称とする。解析領域は奥行き7m、掘削面の半径5mの円柱形であり、ボーリング孔径は4cm、測定区間は $z=3\sim 3.25$ m（掘削面 $z=0$ m）である。掘削面の気圧はつねに1気圧、地盤内の初期気圧は1気圧、測定区間の気圧は真空ポンプ稼動中は0.1気圧とする。ポンプ停止で測定区間の気圧は回復（上昇）過程にはいる。測定孔壁と掘削面を除くすべての境界は不透性境界とする。

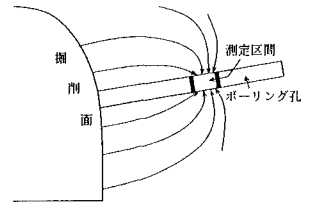


図-1 流れ場の模式図

3. 解析方法 連続の式および Darcy 則を適用し、空気密度の等温変化あ

$$\text{あるいは断熱変化を仮定すると} \quad \phi \eta r \frac{1}{p} \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k_r}{\mu} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{k_z}{\mu} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

が得られる²⁾。ここに、 $\Psi = p^{\eta+1}$ であり、 p は間隙空気圧、 z 軸は対称軸、 r 軸は半径軸、 t は時間、 ϕ は有効空隙率、 k_r と k_z は固有透過度、 μ は空気の粘性係数である。また η は等温変化のとき 1.0、断熱変化のとき 1/1.4 である。一方、測定区間への単位時間の空気流入量を M_B とすれば、測定区間の空気密度 ρ_B は Δt 時間後 $\rho_B(t + \Delta t) = \rho_B(t) + M_B \Delta t / V_B$ になる。ここに $\rho_B(t)$ は時刻 t のときの密度、 V_B は測定区間の容積である。このとき測定区間内の気圧 p_B は、 p_0 を大気圧、 ρ_0 を大気圧下の空気密度とすれば $p_B(t + \Delta t) = \{\rho_B(t + \Delta t) / \rho_0\}^{1/\eta} p_0$ である。式(1)を Galerkin法で有限要素定式化し、時間積分は Three time level の差分法で行った²⁾。

表-1 緩み範囲の設定条件

4. 解析条件と順解析の結果 緩み範囲を表-1のとおり設定した。固有透過度は $k_r = k_z = 10^{-11} \text{ cm}^2$ とし、緩み領域ではもとの値の3倍とした。空気の粘性係数は $\mu = 1.84 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$ ，有効空隙率は緩みに無関係に $\phi = 0.1$ ，空気密度は等温変化とし、 $\eta = 1.0$ とした。時間積分は $\Delta t = 10$ 秒とした。

ケース	緩み範囲（固有透過度3倍の領域）
C0	緩みなし
C1	$z \leq 2.75\text{m}$ の領域
C2	$z \leq 3.00\text{m}$ の領域
C3	$z \leq 3.50\text{m}$ の領域
C4	全解析領域が緩み域
C5	$2.50\text{m} \leq z \leq 3.75\text{m}$ ， $r \leq 0.5\text{m}$ の領域

測定区間を 0.1気圧に保つときの真空ポンプの排気量を算定した。その結果、測定位置が緩み域内の場合（C3,C4,C5）と非緩み域内の場合（C0,C1,C2）とで、排気量（測定区間への流入空気量）に大きな差が見られた。特に、C5は緩み範囲が測定区間周辺に限られているのに、ポンプ排気量の経時変化は、全域が緩んだ場合（C4）とほぼ同じであった。一方、測定位置が非緩み域にあれば、掘削面から測定区間の一端まで緩んでいる場合（C3）でも、排気量は、全く緩みのない場合（C0）とほとんど同じであった。図-2に、ポンプ始動 90分後の地盤内の気圧分布を示す。緩み域が広いほど気圧低下の範囲は広い。緩みが測定区間周辺のみの場合（C5），

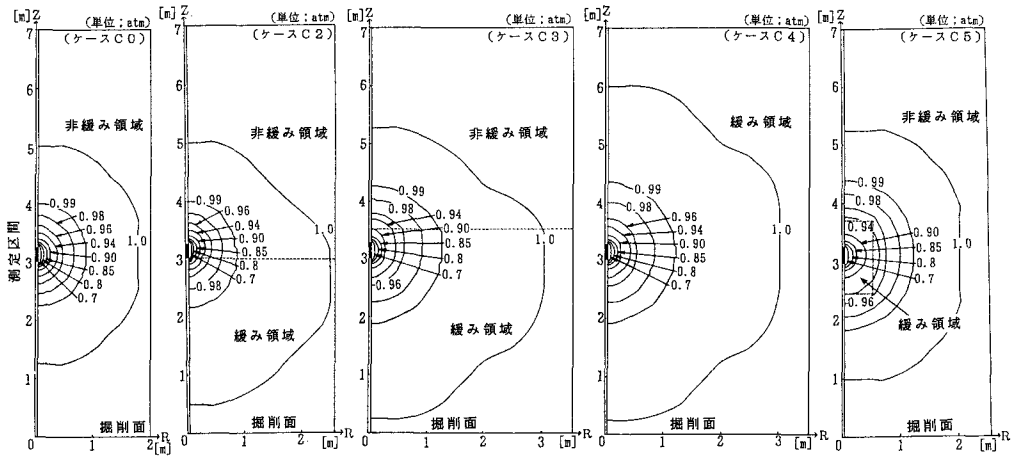


図-2 地盤内の気圧分布（真空ポンプ始動後 90分）

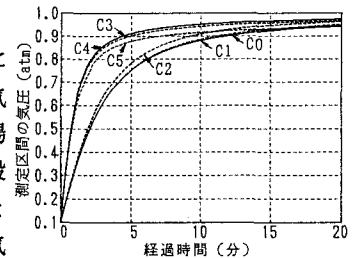


図-3 測定区間の気圧回復曲線

他と比べ、圧力勾配は緩み域内でゆるく、非緩み域で急である。図-3に測定区間内の気圧を0.1気圧に90分間保った後の気圧回復過程を示す。気圧の回復は、測定区間が緩み領域内の場合（C3, C4, C5）と非緩み域内の場合（C0, C1, C2）で明かに異なり、前者で早い。よって、回復過程の初期段階での気圧上昇速度を比べれば、測定位置での緩みの有無を判定できると考えられる。測定区間の気圧が0.6気圧以上になると、緩み範囲による気圧上昇速度の違いが現れる。この違いは、真空ポンプの移動時間を長くして初期の気圧低下範囲を広くするほど明確になる。緩みが測定位置の周りだけの場合（C5）の気圧上昇速度はC3, C4の場合と比べて遅くなっている。一方、測定区間が非緩み域にある場合（C0, C1, C2）、緩み領域が測定区間に近いほど気圧上昇速度が大きい。それゆえ、ポンプの吸気時間を長くして地盤内気圧の低下範囲が十分に広がってから気圧回復試験をすれば、測定位置まわりの緩み範囲をある程度推定できるであろう。

5. 逆解析の方法と結果 表-1の各ケースについて順解析で得られた気圧回復曲線を観測値と考え、制約付きシンプレックス法に基づく逆解析で、等方・均質な地盤としての固有透過度を算定した。目的関数値を算定する観測点は、気圧回復開始後30秒、1分、2分、3分、4分、5分の6点とした。目的関数は、
$$F = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{P_i - P_i^*}{P_i} \right\}^2$$
 とする。ここに N ≡ 観測点の数、 P_i ≡ 観測点 i での観測値、 P_i^* ≡ 観測点 i での計算値である。制約条件は、固有透過度の上限値を $1.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ 、下限値を $1.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2$ とし、その範囲でシンプレックスの初期頂点を4つ設定した。固有透過度の推定結果を表-2に示す。ここに、標準誤差は

表-2 固有透過度の推定値（逆解析）

ケース	推定値 (cm^2)	標準誤差
C0	1.00×10^{-11}	0.001
C1	1.06×10^{-11}	0.007
C2	1.16×10^{-11}	0.015
C3	2.89×10^{-11}	0.009
C4	3.01×10^{-11}	0.002
C5	2.28×10^{-11}	0.048

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - P_i^*|}{P_i}$$
 である。緩み領域が測定位置の周囲に限られる場合（C5）、推定値が緩み域の真値よりかなり小さいが、標準誤差は大きくなっており、後者は緩み範囲の指標として利用できると思われる。

- 参考文献： 1) Jakubick, A and R. Klein: Permeability assessment in cavern TK-102C of underground oil storage facility in KUSIKINO, JAPAN, Rept. No. 90-158-p, Ontario Hydro Research Division, 1990
2) 川谷ほか：真空透気試験による不均質地盤の透気性測定について，水工学論文集(36)，pp. 471-476, 1992