

真空透気試験による不均質地盤の透気性測定について

On Permeability Measurement of Inhomogeneous Ground
by a Vacuum Permeability Test

川谷健*・中谷元彦**・中山昭彦***・池宮俊二**

By Takeshi KAWATANI, Motohiko NAKATANI, Akihiko NAKAYAMA and Shunji IKEMIYA

The permeability may be one of useful indices when determining the excavation-loosened zone of fractured rock mass. The permeability of dry rock mass is measured by a vacuum borehole logging test which is similar to the standard gas well buildup test used in the petroleum industry. The permeability is calculated from the pressure recovery in the borehole. Then, it is important to know the change in the pressure recovery process due to the size and/or position of the loosened zone.

In this study, numerical analyses were performed to find out the relationship between the pressure recovery process and the loosened zone. The results indicate that the vacuum test provides the useful information on the degree of looseness and the size of loosened zone.

Keywords: vacuum permeability test, loosened rock mass, numerical analysis

1. はじめに

亀裂性岩盤内に大規模な空洞を施工すると、掘削時の衝撃・振動や応力解放によって掘削面周辺の亀裂が開口し、岩盤に緩みが生じる。その結果、岩盤の透水性・透気性が増加するので、緩みの度合いや範囲を判定する指標として透水性・透気性を用いることが考えられる。Jakubickら¹⁾は、この考えのもとに、以下のような岩盤の現場透気試験を行っている。掘削面にほぼ垂直なボーリング孔の一部区間(測定区間)の両端をパッカーで密閉し、真空ポンプで区間内の気圧を下げ、ほぼ定常になってからポンプを止める。そして、測定区間の気圧が、亀裂をとおつての空気流入によって大気圧まで回復する過程を測定する。測定データから測定区間の固有透過度(Intrinsic Permeability)を算定し、亀裂開口幅を求める。固有透過度の算定に、Jakubickらは、均質な一定厚さの多孔質被圧層に設けた完全貫入井へのガス流入に対する理論式を用いている。しかし実際の流れ場は、この理論式の前提とはかなり違っていると考えられる。実際には、掘削面付近は緩みが大きく、亀裂が開口しているので、測定区間が掘削面に近い場合はとくに、測定区間に流入する空気の大部分は掘削面から供給されていると考えられる。それゆえ、データ解析に先立って、測定区間の気圧回復過程が透気性の異なる領域の広さや測定区間との位置関係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どの領域を代表する値であるかを把握しておくことが重要となる。

本研究では、上述の観点から、不均質な多孔質地盤において透気試験を行う場合をとりあげ、透気性の空間分布による測定区間の気圧回復過程の違いを数値解析によって調べた。

* 正会員 Ph.D 神戸大学教授 工学部土地造成工学研究施設 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

** 学生員 神戸大学大学院 土木工学専攻

*** 正会員 Ph.D 神戸大学助教授 工学部土地造成工学研究施設

2. 透気試験方法と解析モデル

現場透気試験は、地下水などの影響を受けない乾いた岩盤で行う。実施例として Jakubick¹⁾の試験をあげると、次のとおりである。試験は掘削面にほぼ垂直なボーリング孔で行う。Jakubickらの場合、ボーリングの孔径は 37.72 mm、長さは 6 m である。その測定区間の両端をパッカーで密閉する。測定区間の長さは、彼らが用いたパッカーの仕様では 10cm, 25cm, 50cmのいずれかに設定できるが、この場合は 25cmである。密閉後、真空ポンプで測定区間の気圧を下げ、気圧と排気量が安定してからポンプを止める。ポンプの稼動中および停止後とも区間内気圧、外気圧、外気温を連続して計測し、稼動中はポンプの排気量も測る。測定区間を移してこの計測を行い、ボーリング孔に沿っての透気性の分布を測る。データの解析では、彼らは、ボーリング孔への流れが均質、等方性の一定厚さの多孔質被圧層に設けた完全貫入井への水平放射流であると仮定している。この仮定では、測定区間長が 25cmの場合、岩盤ないし地盤は厚さ 25cmの累層をなしており、空気は各層ごとに独立に無限遠からボーリング孔に向かって流れていることになる。一方、実際の流れは、図-1に模式的に示すように、掘削面から地盤内に侵入し、ボーリング孔の測定区間に流入するものと考えられる。すなわち、掘削面付近は緩みが大きく、透気性が高いので、測定区間に流入する空気は、大部分が掘削面から亀裂に侵入したもので、極くわずかが岩盤自体の空隙から供給されたものと考えられる。したがって、解析モデルは以下のように設定した。

岩盤の亀裂密度はきわめて高く、多孔質地盤として扱えるものとする。地盤内への空気侵入は掘削面からだけとする。測定用ボーリング孔は掘削面に垂直とし、流れ場は孔軸について対称とする。すなわち、解析領域はボーリング孔を中心軸とする円筒形領域で、掘削面はその一端の円形面とする。数値解析では、解析領域の奥行きを 7 m、掘削面の半径を 5 m とした。ボーリング孔径は 4 cm、測定区間の長さは 25 cm とした。

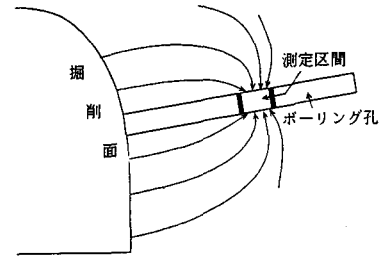


図-1 流れの模式図

3. 解析方法

3.1 基礎式

地盤内の空気の流れに対する連続の式は、軸対称流のとき

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho q_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho q_z) = 0 \quad (1)$$

である。ここに、 z 軸は対称軸、 r 軸は半径方向の軸、 t は時間、 ρ は空気の密度、 q_r と q_z は比流束の r 成分と z 成分、 ϕ は有効空隙率である。Darcy 則が適用でき、座標軸が固有透過度の主軸と一致するとき

$$q_r = -\frac{k_r}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad q_z = -\frac{k_z}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2)$$

である。ここに、 p は間隙空気圧、 k_r と k_z は r 方向と z 方向の固有透過度、 μ は空気の粘性係数である。

状態方程式として、空気に対しては理想気体に対する式がよい近似で成り立つので²⁾、 $\rho = p/RT$ を用いる。ここに、 T は温度、 R は気体定数である。断熱変化のとき $p/\rho^\kappa = \text{const.}$ である。ここに、 κ は定熱比熱と定積比熱の比であり、乾いた空気では $\kappa = 1.40$ である。したがって、等温変化あるいは断熱変化のとき、状態方程式は

$$\rho = C p^\eta \quad (3)$$

と書ける。ここに、 $\eta = 1.0$ (等温変化) あるいは $1/1.4$ (断熱変化) であり、 C は定数である。

式(1)に式(2)を代入し、さらに等温変化あるいは断熱変化として式(3)を用いると

$$\phi \eta r \frac{1}{p} \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{k_r}{\mu} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{k_z}{\mu} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

が得られる。ここに、 $\Psi = p^{n+1}$ である。

一方、測定区間の気圧上昇は以下のように算定する。測定区間に単位時間に流入する空気量を M_B 、ボーリング孔の半径を r_B 、測定区間の長さを Z_B とすれば

$$M_B = -2\pi r_B Z_B \rho q_r \Big|_{r=r_B} = 2\pi r_B Z_B \frac{C k_r}{(\eta+1)\mu} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \Big|_{r=r_B}$$

である。この空気流入によって、測定区間内の空気の密度 ρ_B は、 Δt 時間後には

$$\rho_B(t+\Delta t) = \rho_B(t) + M_B \Delta t / V_B$$

となる。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。そして、このとき測定区間内の気圧 p_B は、等温変化または断熱変化の場合

$$p_B(t+\Delta t) = \{\rho_B(t+\Delta t) / \rho_0\}^{1/\eta} p_0 \quad (5)$$

である。ここに、 p_0 は大気圧 (1 atm.) であり、 ρ_0 は大気圧のもとでの空気の密度である。

3.2 有限要素定式化

式 (4) を Galerkin 法によって離散化する。そのとき境界条件は、境界上の既知の気圧を P_0 、境界を横切る既知の流量を Q_0 とすれば、

$$\Psi = P_0^{n+1} \quad \text{あるいは} \quad -\left(r \frac{k_r}{\mu} \frac{\partial \Psi}{\partial r} n_r + r k_z \frac{\partial \Psi}{\partial z} n_z \right) = Q_0$$

で与えられる。ここに、 n_r と n_z は境界の外向き単位法線ベクトルの r 成分と z 成分である。

離散式は

$$[A] \left\{ \frac{d\Psi}{dt} \right\} + [B] \{\Psi\} = \{D\} \quad (6)$$

となる。ここに、 $A_{nm} = \sum \int_{R_e} \alpha_p I_n I_m dR$

$$B_{nm} = \sum \int_{R_e} \left(r \frac{k_r}{\mu} \frac{\partial I_n}{\partial r} \frac{\partial I_m}{\partial r} + r \frac{k_z}{\mu} \frac{\partial I_n}{\partial z} \frac{\partial I_m}{\partial z} \right) dR$$

$$D_n = -\sum \int_{S_e} Q_0 I_n ds$$

である。また、 $\alpha_p = \phi \eta r / p$ であり、 I_n は補関関数、 R_e と S_e は要素 e の領域と境界、 Σ は全要素にわたる総和を表す。式 (6) の時間積分を Three time level の差分法³⁾ によって行うと

$$[E] \{\Psi^{(t+\Delta t)}\} = \{F\} \quad (7)$$

となり、ここに $E_{nm} = \frac{3}{2\Delta t} A_{nm}^{(t)} + B_{nm}$

$$F_n = -B_{nm} \Psi_m^{(t)} + \left(\frac{3}{2\Delta t} A_{nm}^{(t)} - B_{nm} \right) \Psi_n^{(t-\Delta t)} + 3D_n^{(t)}$$

である。 $\Psi_n^{(t)}$ などは時刻 t における値を表す。式 (7) はつねに安定である。

一方、式 (6) の時間積分を前進差分法で実行すると

$$[E'] \{\Psi^{(t+\Delta t)}\} = \{F'\} \quad (8)$$

が得られる。ここに $E'_{nm} = A_{nm}^{(t)}$

$$F' = (A_{nm}^{(t)} - \Delta t B_{nm}) \Psi_m^{(t)} + \Delta t D_n^{(t)}$$

である。

4. 解析条件

解析領域は、前述のとおり半径5 m、長さ7 mの円筒形である。掘削面の気圧はつねに1気圧とし、地盤内の気圧も初め全域で1気圧とする。測定区間の気圧は、真空ポンプの始動で瞬時に0.1気圧に下がり、ポンプ稼動中は0.1気圧とする。ポンプ停止後、測定区間の気圧が回復（上昇）過程にはいると、測定区間の気圧は式（9）によって算定し、それを測定区間の孔壁における境界条件として用いる。測定区間の孔壁と掘削面を除くすべての境界は不透性境界とする。

地盤の固有透過度は $k = k_r = k_z = 10^{-11} \text{ cm}^2$ とした。この値は透水係数ではおよそ 10^{-6} cm/s に相当し、透気係数では大気圧のもとで $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ に相当する。緩み領域の固有透過度はもとの値の3倍とした。空気の粘性係数は $\mu = 1.84 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$ とした。有効空隙率は緩みの有無にかかわらず $\phi = 0.1$ とした。空気の密度変化は等温変化とし、式（5）で $\eta = 1.0$ とした。

解析領域は四辺形要素に分割した。要素数は680、節点数は738である。要素の大きさは、最大のものが $50 \text{ cm} (\Delta r) \times 25 \text{ cm} (\Delta z)$ 、最小が $2 \text{ cm} (\Delta r) \times 5 \text{ cm} (\Delta z)$ である。時間積分では $\Delta t = 10$ 秒とした。

掘削面半径（解析領域の半径）に関しては、掘削面の広さが測定区間の気圧回復に及ぼす影響を調べるため、半径3.5 mの場合についても予備的解析を行い、半径5 mの場合と比較した。掘削面の面積は前者が後者の約1/2である。また、測定位置による気圧回復過程の違いを調べるため、測定区間が $z = 3 \sim 3.25 \text{ m}$ の場合と $z = 6 \sim 6.25 \text{ m}$ の場合を比較した。その結果、掘削面の広さおよび測定位置による気圧回復過程の違いは小さいことがわかった。そこで以下の解析では、掘削面半径は5 m、測定区間は $z = 3 \sim 3.25 \text{ m}$ とした。

5. 解析結果

緩み領域の位置や範囲による測定区間の気圧回復過程の違いを、表-1に示すケースについてしらべた。真空ポンプを稼働させ、測定区間の気圧を0.1気圧に保ったときのポンプ排気量の経時変化を図-2に示す。この結果から、測定区間が緩み領域内にある場合（C3, C4, C5）と非緩み領域にある場合（C0, C1, C2）とでは、ポンプ排気量（測定区間への流入空気量）に大きな差のあることがわかる。特に、C5の場合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、緩みが解析領域全域に広がった場合（C4）とほとんど同じである。一方、緩みが掘削面から測定区間の一端にまで達しているものの測定区間が非緩み域にある場合（C2）、ポンプ排気量の経時変化は、全く緩みのない場合（C0）の変化とほとんど同じである。

ポンプ排気量は、緩みの有無にかかわらず、ポンプ始動後45分ほどでほぼ一定になる。ただ、緩みが局所的である場合（C5）、45分以後も排気量はゆるやかに減少し、ポンプ始動後70分程度で一定になる。

図-3に、真空ポンプ始動から90分後の地盤内の気圧分布を示す。いま $\lambda = (k/\mu) / \phi n p$ とすれば、式（4）

より λ は Ψ の拡散係数と見なせるので、これをここでは「気圧拡散率」と呼ぶ。この解析では有効空隙率を一定としているので、気圧拡散率は固有透過度に比例する。したがって、図-3に示すとおり、緩み範囲

表-1 緩み範囲の設定条件

ケース	緩み範囲（固有透過度3倍の領域）
C 0	緩みなし
C 1	$z \leq 2.75 \text{ m}$ の領域
C 2	$z \leq 3.00 \text{ m}$ の領域
C 3	$z \leq 3.50 \text{ m}$ の領域
C 4	全解析領域が緩み域
C 5	$2.50 \text{ m} \leq z \leq 3.75 \text{ m}$, $r \leq 0.5 \text{ m}$ の領域

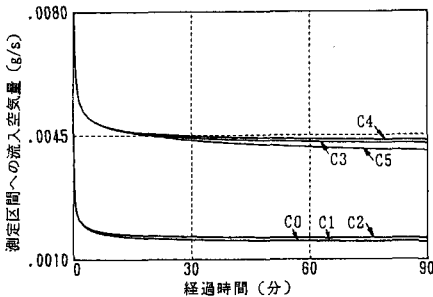
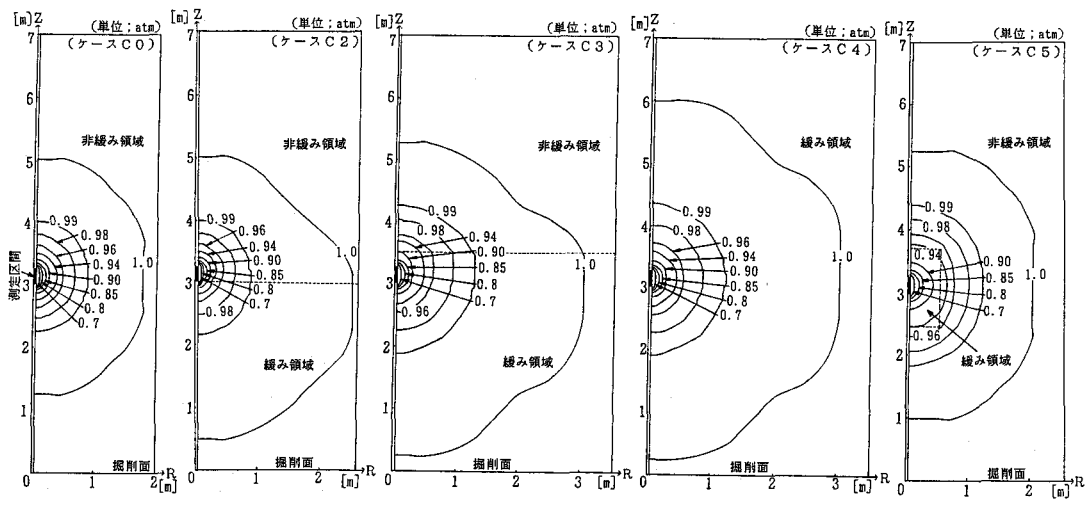


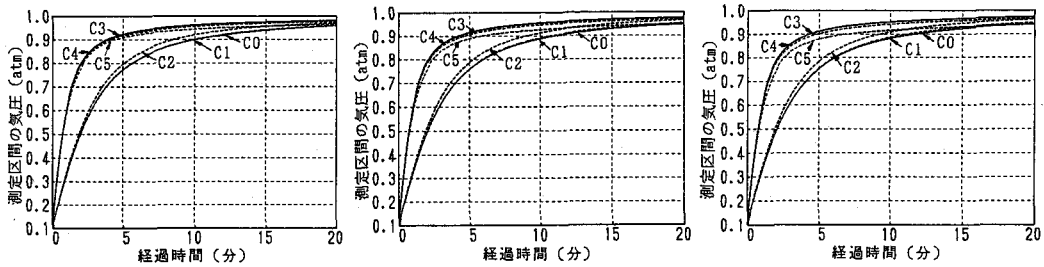
図-2 流入空気量の経時変化

が広いほど、気圧低下の領域は広がっている。緩みが測定区間周辺のみの場合（C5），他の場合と比べて相対的に、圧力勾配は緩み域内でゆるく、非緩み域で急である。緩みが掘削面から解析領域の半分にまで及んでいる場合（C3），緩み域内の圧力分布は全域が緩んでいるとした場合（C4）の分布とほとんど同じであるが、非緩み域（ $z \geq 3.5\text{m}$ ）では圧力低下の範囲はC4の場合より小さい。



図－3 90分後の地盤内の気圧分布

測定区間の気圧を 0.1 気圧に30分間保った後の気圧回復過程を図－4に，60分間保った後の気圧回復過程を図－5に，90分間保った後の回復過程を図－6に示す．気圧の回復は，測定区間が緩み領域にある場合（C3,C4,C5）と非緩み域にある場合（C0,C1,C2）とで明かな違いがあり，前者で早い．したがって気圧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．



図－4 測定区間の気圧回復曲線 図－5 測定区間の気圧回復曲線 図－6 測定区間の気圧回復曲線
 (ポンプ始動30分後) (ポンプ始動60分後) (ポンプ始動90分後)

緩み範囲による気圧上昇速度の違いは，測定区間の気圧がある程度上昇した後に現れる．その違いは，真空ポンプの稼動時間が長く，地盤内の気圧低下範囲が広がるほど明らかになる．図－6の気圧回復過程を見ると，測定区間の気圧が 0.6 気圧以上になると，緩みが測定位置の周りだけの場合（C5）の気圧上昇速度は，緩みが測定位置以深に達している場合（C3,C4）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。そして, C2 の場合には, 気圧回復過程に入って12分以後, 測定区間の気圧がC5の場合より高くなっている。これについては次のように考えられる。

測定区間の気圧がある程度上昇し, 周辺地盤内の気圧との差が小さくなると, 測定区間の気圧がさらに上昇するには周辺地盤内の気圧も共に上昇しなければならない。そのため, 地盤内気圧の低下範囲が広いほど, 気圧上昇のためにその範囲の地盤の空隙を満たすに要する空気量は多くなる。ケースC3やC4では, 気圧低下の範囲は広いけれども, 透気性が高いので, 気圧低下域への空気流入は速やかであり, 測定区間の気圧も早く回復する。ところがC5 (局所的な緩み領域) の場合, 気圧が0.99 atm 以下である範囲が最も広く, しかもその範囲は緩み領域外にまで広がっている。緩み領域外では透気性が小さく, そこへの空気流入が小さいので, 気圧の上昇は遅くなる。一方, C2 の場合 (緩み領域 $z \leq 3.0$ m), 気圧低下の範囲はC5の場合より狭い。緩み領域を含んでいる。したがって, 測定孔内の気圧が周辺地盤の気圧とはほぼ等しくなった状態では, 地盤内気圧の上昇はC2の方がC5より早く, 結果として測定区間の気圧も高くなる。

以上の結果から, 真空ポンプの稼動時間を長くし, 地盤内気圧の低下範囲が十分に広がってから測定区間の気圧回復過程を測定すれば, 測定位置まわりの緩み範囲をある程度推定できると考えられる。

6. おわりに

真空透気試験は, 亀裂性岩盤の透気性を測ることで掘削などによる岩盤の緩み度合いと範囲を判断しようとするものである。本研究では, 亀裂密度の高い岩盤において透気試験を行う場合を想定し, 解析モデルを不均質な多孔質地盤として, 不均質性が透気試験結果に及ぼす影響を数値解析によって調べた。その結果をまとめると以下のとおりである。

1) 緩みの度合いは, 測定区間内の気圧回復過程における初期段階の気圧上昇速度から判断できると考えられる。また, 真空ポンプによって測定区間内の気圧を下げ一定に保つとき, ほぼ定常になったときのポンプ排気量からも判断できであろう。

2) 緩み範囲を推定するためには, 真空ポンプの稼動時間を長くし, 測定区間周りの地盤内の気圧低下範囲が十分広がるようにする必要がある。これが満たされたときには, 測定区間内の気圧がほぼ大気圧にまで回復して収束する値から, 緩み範囲をある程度推定できる。また, 測定区間内の気圧上昇速度の経時変化も緩み範囲の推定に有用と考えられる。

今後, 実測データを対象に, ここで述べた数値解析法を用いて逆解析を行い, データ解析の精度, ひいては岩盤緩み領域の判定精度の向上を図りたい。

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) 椿東一郎: 水理学 I, 森北出版, p. 5, 1973
- 3) Comini, G., S. D. Guidice, R. W. Lewis, and O. C. Zienkiewicz: Finite element solution of non-linear heat conduction problems with special reference to phase change, Int. J. Num. Meth. Engr., vol. 8, pp. 613~624, 1974