

岩盤ゆるみ領域評価のための真空透気試験

中山昭彦¹・山田文孝²・打田靖夫³・川谷健⁴・櫻井春輔⁵

¹正会員 Ph.D 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 工修 三井建設株式会社土木本部署土木技術部 (〒101 東京都千代田区岩本町3-10-1)

³正会員 株式会社ニュージェック関電プロジェクト部 (〒540 大阪市中央区島之内1-20-19)

⁴正会員 Ph.D 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

⁵正会員 Ph.D 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

岩盤内に削孔されたボアホール内の空気を吸引し、周辺岩盤の透気特性分布からゆるみ領域を割り出す「真空透気試験」の実施法、データ解析法、及び結果の解釈法を詳しく検討し、実用性、信頼性のある方法を提案した。また様々な現場で行われた試験結果を従来調査法、既知データと比較評価することにより真空透気試験が岩盤のゆるみ領域の有効な評価法のひとつになり得ることを示した。

Key Words : vacuum permeability test, loosened area, rock permeability, analytic solution, field measurement

1. はじめに

岩盤構造物構築のために岩盤を掘削するとき、掘削により周辺岩盤の掘削面近傍に、いわゆるゆるみが生じる。ゆるみには種々の考え方があるが、ここでは掘削により周辺岩盤の既存亀裂が開いたり新たな亀裂が生じることにより岩盤がもともと有していた変形特性、透水特性等の諸物性が変化することと考える。地下構造物の安定を評価するにあたりゆるみを適切に評価することは重要な検討項目の一つとなっている。現状の岩盤工学では、このゆるみを設計段階で完全に予測することは不可能である。また近年ゆるみを抑制する工法が種々研究されているが、ゆるみの発生自体は避け得ない。このため実際の施工においては掘削の各段階で目的にかなった様々な調査手法を用いてゆるみを評価し、その結果を設計にフィードバックするという手法が用いられている。

ゆるみ調査の目的にはゆるみ領域の広がりやの把握と、ゆるみ領域内の物性変化の把握の二つがあるが、まず第一にゆるみ領域の広がりを捉えることが第一歩となることは論を待たないであろう。ゆるみ領域把握という目的のための調査法には(一部物性値把握も含むが)代表的なものに掘削時の地中内変位分布から推定する方法^{1),2)}、弾性波探査により弾性波速度分布を求める方法^{3),4)}、孔内載荷試験等により変形係数分布を求める方法^{4),5)}、AE計測によりAEの発生地点分布を求める方法⁶⁾、等があげられる。しかしながら、従来の手法の中には測定のため

に新たな計測器を設置する必要があったり、掘削との並行作業ができない、各種ノイズの影響を受けるなど調査にかなりの手間を要することが少なくない。また、方法によって評価される領域も異なる事が多く、最終的なゆるみの把握にはこれら種々の調査結果を比較検討した上で総合的に判断する必要があるため、判断材料は多ければ多いほどより正確なゆるみ領域評価につながることになる。

Jakubick and Kline⁷⁾は、ゆるみ領域では透気係数が顕著に増加することに着目し、岩盤の透気係数を求めることによりゆるみ領域を検出する真空透気試験を提案し測定を行った。また筆者らは、この真空透気試験の改良を進めてきた^{8),9)}。真空透気試験では、ゆるみ領域を測定しようとする地下空洞の壁面に削孔されたボアホール内に、通気孔の開いた円筒をはさんだ一對のパッカーを挿入し、これによって密封された測定区間より真空ポンプによって空気を吸引する。その時の吸引空気流量及び測定区間内圧力から測定区間周辺岩盤の透気係数を算定し、深さ方向の透気係数分布からボアホール周辺のゆるみ領域を推定するものである。この試験では亀裂や空隙に水が存在する場合、地下水が近くにある場合などでは特別な解釈が必要であるが、ボアホールさえあれば特別な計測機器の設置を必要とせず、測定自体も簡便で、かつ発破や重機走行による振動、電磁波等のノイズの影響を受けないという利点を有する。

坂口ら¹⁰⁾は室内試験を行い、岩石の透気性と高圧条件

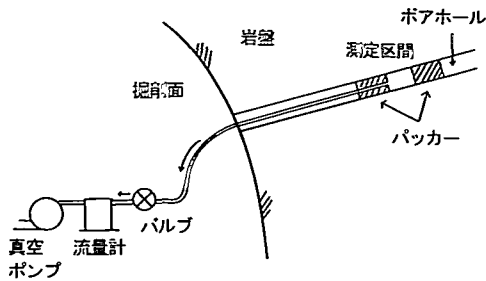


図-1 真空透気試験の概要

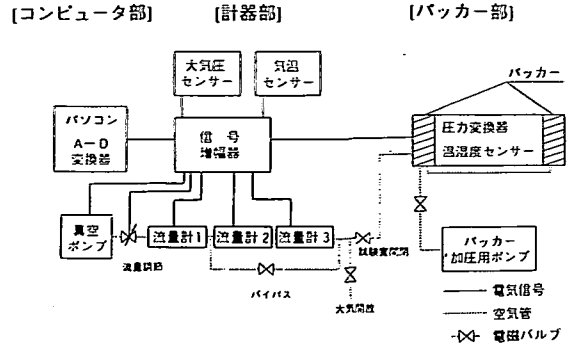


図-2 真空透気試験装置の模式図

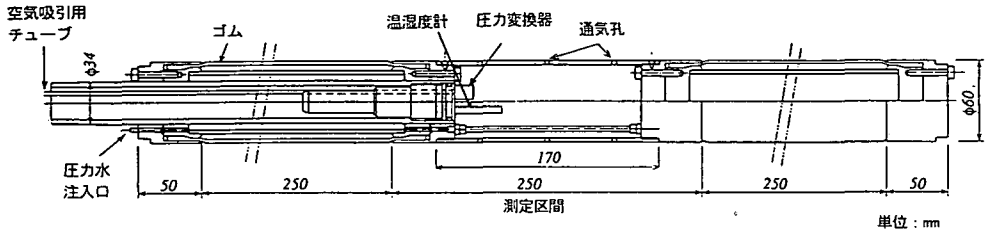


図-3 パッカー部詳細

下における開口割れ目中のガスの漏気条件を明らかにしているが、本試験は原位置岩盤の透気性を測定するところに大きな違いがある。

本論文では真空透気試験をゆるみ領域検出に応用するにあたり、試験機器の開発、試験の実施、データの解析、解釈方法、さらにはその精度、適用範囲について、室内試験と現場適用例を通じ、また他の方法との比較を通じて総括的に論ずる。

2. 真空透気試験

(1) 試験の概要

真空透気試験の概要を図-1に示す。この試験ではまず測定対象となるポアホールに、通気孔が開いた中空円筒をはさんだダブルパッカーをセットし、ポアホールの一部に両端を密閉した「測定区間」を設ける。この「測定区間」内の空気をパッカー内に通してある管を通じて真空ポンプにより排除する。測定区間の圧力は周辺岩盤の透気性の応じて徐々に低下し、やがて定常状態に達する。定常状態が得られたことを確認した後に真空ポンプを停止すれば、これも測定区間周辺岩盤の透気性に応じて測定部内圧力が大気圧に戻ってゆく。定常状態での吸引空気流量、測定区間内圧力、そしてポンプ停止後の圧力回復特性は、周辺岩盤の透気性に依存するため、試験中の

圧力と流量を連続的に計測することにより透気性を逆算することが可能である。

ポアホールに沿ってパッカーを移動させながらこのような測定を繰り返すことによって、ポアホール深さ方向に対する透気性の変化を捉えることが可能となる。この透気性の相対的な変化からポアホール周辺のゆるみ領域を捉えようとするのが真空透気試験である。

この手法は上述したように、算定された透気性そのものを正確に測ろうとするものではなく、むしろ透気性が位置により相対的に如何に変化するかを計測するものである。よって求められた透気係数の絶対値はさほど重要ではないことに注意されたい。

(2) 試験装置

真空透気試験装置の模式図を図-2に示す。ここに示すとおり、試験装置は、ポアホール内に設置する圧力変換器と温・湿度計を内装したパッカー部、圧力、温度、湿度、流量を測定する計器部、データを取り込み解析・表示するパソコン部よりなる。

パッカー部の一例を図-3に示す。長さ1m弱の円筒形のパッカー部は、数個の通気孔が開いたステンレス製の中空円筒で作られる測定区間と、その両端に取り付けられたゴム製のパッカーより成る。測定区間と外気との気圧差が最大1気圧であるため、必要なパッカー長は短く、パッカーに加える圧力は10kgf/cm²程度で十分なため、孔

内載荷試験等に比して岩盤を不要に傷めることがない。

計器部では測定区間の圧力、温・湿度、大気圧、気温等を測定する。また、流量は測定レンジの異なる3種類の流量計を直列に接続する事で幅広い計測が可能となっている。各計測データは計器部で連続的にデジタル表示されるとともに増幅器、高速高解度のA/D変換器を通じてパソコンにサンプリングされる。測定結果はパソコンによりその場で直ちに解析・表示される。これにより測定中に透気特性分布をある程度類推しながら測定深度を決定できるため、測定効率を上げることができる。

3. データ解析法

(1) これまでの研究

データの解析法としては、定常状態が得られた時の流量と圧力から透気係数を算出する定常法と、減圧後真空ポンプを停止した後の圧力回復曲線の特性を用いる非定常法がある。これら両手法は、試験操作が容易でデータ解析も簡単であるなどの利点があり、現場での活用が期待されている。しかしそのデータの解析法は十分に研究されていない。Jakubick and Kline⁷⁾は非常に簡便化された理論解を使っており、幾つかの疑問点、問題点を残している。例えば定常法では、不透水面で挟まれた厚さが一定の天然ガス田でのガス汲み出しに当てはめられる水平面内での放射方向浸透流¹¹⁾を仮定している。これは明らかに、三次元場における点的吸い込みに相当する真空透気試験の浸透流の場を近似しない。また測定区間が掘削面に近い場合では、掘削面からの浸透を考慮した三次元的な流れの場を考えなければならぬ。非定常法では、石油、天然ガス汲み出し後の圧力回復を求めるのに用いられる特性曲線法 (Horner法¹²⁾) を利用しているが、これでは圧縮性が一定と仮定されており、真空に近い低圧では、圧縮性が圧力に直接比例し大きく変化する真空透気試験での空気流れにはあてはまらない。試験結果のゆるみ判定の評価法には別の問題もある。例えば本来不均一性を検索するものであるにも拘らず均一な場を仮定した関係式を使用していたり、岩盤が多孔質というより亀裂性である場合、特にゆるみが少数の亀裂による場合、透気係数を求める事自体問題がある。川谷ら^{13), 14)}は、これらの問題点の幾つかの検討を数値解析で行っている。参考文献¹³⁾では岩盤を多孔質とみなし、ゆるみ領域で透過度を非ゆるみ領域の数倍として、ゆるみの位置と範囲の定常反応及び圧力回復過程へ及ぼす影響がシミュレーションされている。参考文献¹⁴⁾では岩盤が亀裂性で、ゆるみがその幅を広めると捉えた時の反応特性を数値計算している。

試験データの解析及び結果の評価という面からは、逆

解析の数値解法によらず完結的表現の解析解を求めることが必要である。そこで本論文では、出来るだけ実際の真空透気試験時の空気浸透流場に近い条件で、近似であっても解析解を求める。特に参考文献⁷⁾の方法で問題がある、掘削面の影響、及び非定常法の改良を検討する。また各々の方法の精度を検討する事も目的とする。尚、ここでは不均質な場での完結的解析解は非常に難しいという事もあり、透気係数は一定の仮定をすることにした。しかしこの解析結果による透気係数は試験部近傍の何らかの平均的値と見なす事が出来る。不均質性の影響に関しては4章でその解釈法を検討している。

(2) 基礎方程式

真空透気試験のような地盤内の空気流れ解析の基礎式は、質量保存則に基づく

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho q) \quad (1)$$

である。ここで ϕ は有効空隙率、 ρ は空気の密度である。 q は浸透流束ベクトルで、ここでは次の等方性媒体内のダルシー則を満足するものとする。

$$q = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (2)$$

k は固有透過度、 μ は空気の粘性係数、 p は空気圧力である。真空透気試験では圧力変化が絶対圧に比べ無視できない為、圧縮性を考慮にいれなければならない。一般に空気の密度 ρ は次の気体の状態方程式で与えられる。

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3)$$

ここで R は気体常数、 T は空気の絶対温度である。式(3)には新しい未知数 T があり、問題解決の為に上式以外にエネルギーの式が必要になる。このエネルギーの式は熱力学第二法則により、岩盤及び空気内の内部エネルギーの変化は、岩盤及び空気内の熱伝導、空気の粘性による運動エネルギーの熱への転換、流れによる移流、及び応力による仕事、の和で与えられる。しかし、岩盤の熱容量が空気のそれに対し非常に大きく、また浸透運動の時間のスケールが熱伝導のスケールと比べ大きい場合、運動の過程で熱は平衡状態にあると考えられ、温度 T は一定と考えてよい場合が多い。解析解という観点からは、次の疑似圧力 (pseudo pressure) m

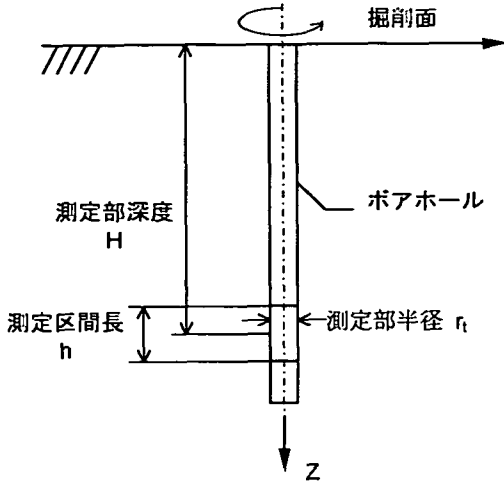


図-4 真空透気試験での空気浸透場

$$m = 2 \int_{p_e}^p \frac{RTp}{\mu} dp = \frac{p^2 - p_e^2}{\mu} \quad (4)$$

を定義すると

$$\nabla m = 2RT \frac{\rho}{\mu} \nabla p \quad (5)$$

であるので式(2)及び式(3)を式(1)に代入すると次のように右边が m について線形の形に変換され簡単化される。

$$\phi \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{k}{2RT} \nabla m \right) \quad (6)$$

式(4)の p_e は基準圧で任意に取つてよいが後で都合のよいように大気圧とする。この基礎式を図-4に示すような「掘削面」と測定部を密閉したボアホールを有する地盤について解析する事になる。座標は図のようにボアホールを z 軸にとつた円筒座標を用いる。

(3) 解析

a) 定常解

式(6)の左辺をゼロとした定常解は、地盤が均一で温度も一定の場合 m についてのラプラス方程式となり、簡単化した境界条件についての解析解を書く事が出来る。問題を標準化するため m を測定区間の値 m_t で無次元化した m^* を使って書くと

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial m^*}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 m^*}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

となり、図-4の場合に対する境界条件は

$$m^* = 0, \quad z = 0 \quad \text{and} \quad \sqrt{r^2 + z^2} \rightarrow \infty \quad (8)$$

$$m^* \Big|_{S_t} = 1 \quad (9)$$

となる。ここで S_t は測定部表面で図-4に示してあるように円柱形である。この無次元化された標準問題の解析解は測定部及び位置が特殊な場合、初等関数で完結解を書く事が出来、データ解析には有用である。そこで、 S_t の形をは与えず式(8)の境界条件を満たす解を書き、式(9)を満足する S_t を調べるという方法をとることにする。求められた S_t が実際の測定部の形に近ければよいのである。 S_t が球またはそれに近い形の時は、測定部中心 $z = H$ に置いた吸い込み点と掘削面に対してその鏡像の位置に置いた湧き出し点を重ね合わせた

$$m^* = \frac{M^*}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-H)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z+H)^2}} \right\} \quad (10)$$

は式(7)、(8)を満足する。ここで M^* は m^* の総フラックスで長さの次元をもつ。式(2)と(5)より $\rho q = k/(2RT) \nabla m$ であるので、 M^* と測定部に流入する総質量流量 G_t とは次の関係が成り立つ

$$G_t = \frac{k}{2RT} M^* m_t = \frac{k}{2RT} \frac{p_t^2 - p_e^2}{\mu} M^* \quad (11)$$

式(10)で与えられる S_t は $m^* = 1$ となる面で、第二項で表される鏡像の影響が小さい場合、すなわち H が大きい場合球形に近い。従つて、測定部が球形に近い場合式(10)は良い近似解になっている。しかし通常の装置の場合測定部は長さとの比が5以上の縦長になっている。このような場合、特に測定部が掘削面に近い程近似が悪くなる。そこで一点の吸い込みでなく二点の吸い込みとすれば S_t の形状は縦長の測定部を近似しやすい。 $z = H - e$ と $z = H + e$ に吸い込み点を置いた場合の m^* は

$$m^* = \frac{M^*}{4\pi} \cdot \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-H-e)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-H+e)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z+H-e)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z+H+e)^2}} \right\} \quad (12)$$

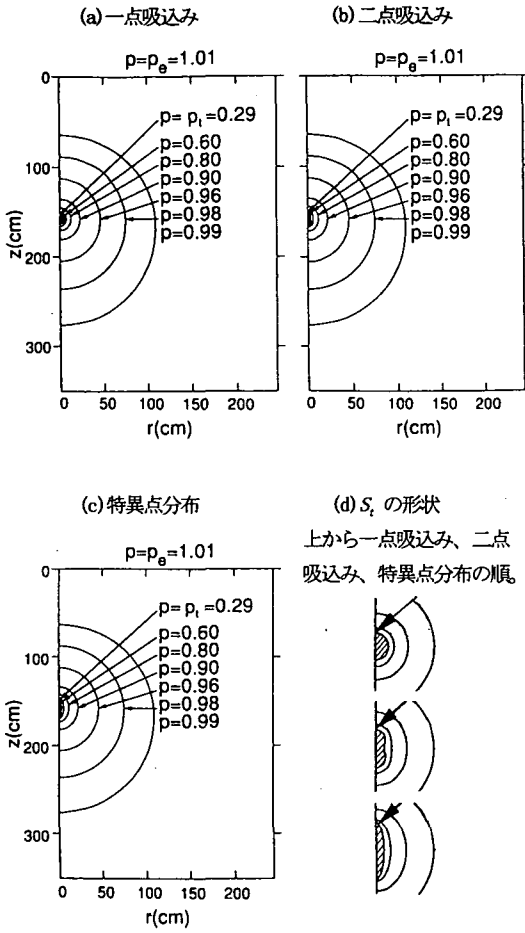


図-5 解析解による等圧線
測定部が深い場合、 $H=158$ cm

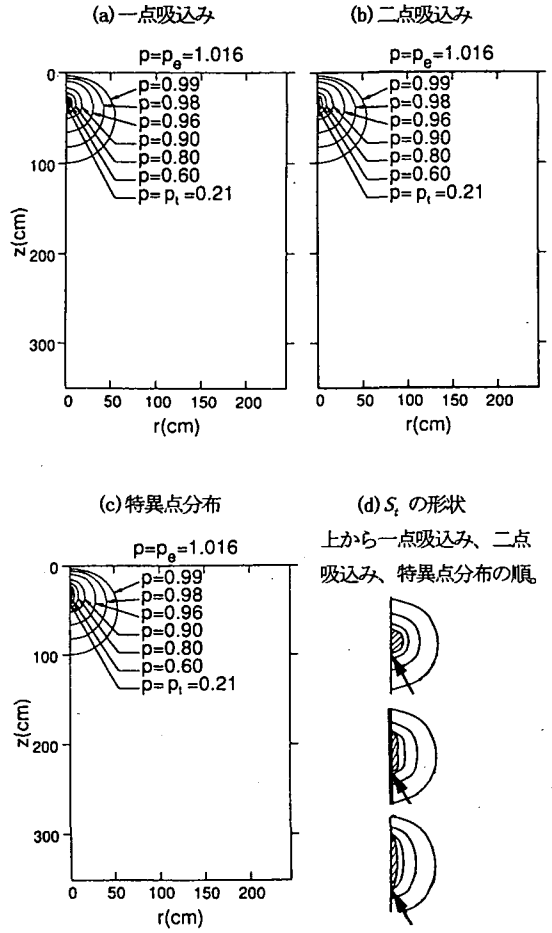


図-6 解析解による等圧線
測定部が浅い場合、 $H=32.5$ cm

で与えられる。さらに一般化させ、吸い込み点という特異点を測定区間内の z 軸上に分布させることにより、もっと一般的で縦に長い S_i の形状を近似できる。吸い込み点を $z=-e$ から $+e$ まで一様に分布させた場合 m^* は

$$m^* = \frac{M^*}{4\pi} \cdot \frac{1}{2e} \left\{ \int_{-e}^e \frac{dt}{\sqrt{r^2 + (z-H+t)^2}} - \int_{-e}^e \frac{dt}{\sqrt{r^2 + (z-H-t)^2}} \right\}$$

$$= \frac{M^*}{4\pi} \cdot \frac{1}{2e} \left\{ \ln \frac{\sqrt{r^2 + (z-H+e)^2} + (z-H+e)}{\sqrt{r^2 + (z-H-e)^2} + (z-H-e)} \right.$$

$$\left. - \ln \frac{\sqrt{r^2 + (z+H+e)^2} + (z+H+e)}{\sqrt{r^2 + (z+H-e)^2} + (z+H-e)} \right\}$$

(13)

となる。これらの式を式(4)を用いて式(10)を p^2 について書き直すと

$$p^2 = \frac{M^*(p_i^2 - p_e^2)}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-H)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z+H)^2}} \right\} + p_e^2$$

(14)

同様に二点吸い込みの式(12)より

$$p^2 = \frac{M^*(p_i^2 - p_e^2)}{4\pi} \cdot \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-H-e)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-H+e)^2}} \right.$$

$$\left. - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z+H-e)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z+H+e)^2}} \right\} + p_e^2$$

(15)

また特異点分布の式(13)より

$$p^2 = \frac{M^*(p_i^2 - p_e^2)}{4\pi} \frac{1}{2e} \left\{ \ln \frac{\sqrt{r^2 + (z-H+e)^2} + (z-H+e)}{\sqrt{r^2 + (z-H-e)^2} + (z-H-e)} - \ln \frac{\sqrt{r^2 + (z+H+e)^2} + (z+H+e)}{\sqrt{r^2 + (z+H-e)^2} + (z+H-e)} \right\} + p_e^2 \quad (16)$$

が得られる。正確な測定部の形状はそれぞれ式(12), (13)で $m^* = 1$, または式(16), (17)で $p = p_i$ と置いた式から求まる。

これらの近似解析解による圧力分布を Jakubick and Kline の実験⁷⁾ ($h = 25\text{cm}$, 測定部半径 $r_1 = 1.9\text{cm}$ の円柱) に当てはめた場合の等圧線を 図-5 及び 図-6 に比較してある。図-5 は測定部の深さ H が測定部の長さ h に比べ大きい場合で, $p_e = 1.01$ 気圧, $p_i = 0.29$ 気圧とし, m^* のフラックス M^* を 65cm にとってある。この M^* の値は一点吸い込みの解の S_i が実際の測定部の体積と等しい体積の球になるようにとった。図-6 は測定部の深さ H が h と同じ程度で浅い場合の例で, $p_e = 1.016$, $p_i = 0.21$, $M^* = 65\text{cm}$ にとってある。それぞれの場合で式(10), (12), (13)で $m^* = 1$ と置き解いて得られる測定部 S_i は斜線で示されてある。二点吸い込み点を置いた時の $2e$ は 8cm とし, 特異点分布の場合は測定部中心線に沿って 20cm ($2e = 20\text{cm}$) にわたり, 一様分布をさせた。二点吸い込みの場合 $2e$ を 8cm 以上にとると S_i が一体でなく二つに分かれるので, これて得られた縦横比は二点吸い込みのモデルでは最大である。特異点分布の場合 S_i の長さがなるべく 25cm 近くなるように 20cm とした。測定部から離れたところでは全ての解はほぼ一致しているが, 測定部に近いところではかなりの違いが見られる。測定部の形状は一点吸い込みで球形, 二点吸い込みで中心部が少しくびれた瓢箪形, 特異点分布で縦横比が実際の測定部にほぼ等しい楕円体に近い形になっている。測定部付近では等圧線の形状が異なるのみならず間隔も違ってきており流速が大きく変わっていると言える。

次に透気試験に必要な透過度 k の計算式を挙げておく。実際の透気試験では流量は大気圧での体積流量として計測されるので $G_i = p_e Q_e$ と置き直すと, 式(11)より

$$k = \frac{2\mu p_e Q_e}{(p_i^2 - p_e^2) M^*} \quad (17)$$

で M^* の値は吸込みモデルにより異なり測定部表面 S_i の座標と $m^* = 1$ を式(10), (12), (13)に代入したも

のより得られる。一点吸込みモデルでの S_i の最大半径を r_{e1} とすると

$$M^* = 4\pi \left\{ \frac{1}{r_{e1}} - \frac{1}{\sqrt{r_{e1}^2 + 4H^2}} \right\}^{-1} \quad (18)$$

二点吸い込みの場合 r_{e2} とすると, 式(12)より

$$M^* = 8\pi \left\{ \frac{2}{\sqrt{r_{e2}^2 + e^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_{e2}^2 + (2H-e)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_{e2}^2 + (2H+e)^2}} \right\}^{-1} \quad (19)$$

また特異点分布モデルの場合 r_{ed} とすると式(13)より

$$M^* = 8\pi e \left\{ \ln \frac{\sqrt{r_{ed}^2 + e^2} + e}{\sqrt{r_{ed}^2 + e^2} - e} + \ln \frac{\sqrt{r_{ed}^2 + e^2 + (2H+e)^2} + (2H+e)}{\sqrt{r_{ed}^2 + e^2 + (2H-e)^2} + (2H-e)} \right\}^{-1} \quad (20)$$

となる。ここで, p_e, p_i を atm , μ を cp (センチポアース), Q_e を cm^3/sec , $r_{e1}, r_{e2}, r_{ed}, H$ 及び e を cm で与えれば k は darcy の単位になる。なお $1\text{darcy} = 0.987 \times 10^{-6} \text{cm}^2$ である。これらの式中の r_{e1}, r_{e2}, r_{ed} は実際の測定部の半径ではなく, それぞれのモデルで近似する S_i の半径 (等価半径) であることに注意すべきである。これらの式は三次元解析の結果であるので Al-Hussaini¹¹⁾ の式と比べ異なる点は影響半径という任意パラメーターがない事と, 測定部の深さ H の影響が含まれている事である。任意パラメーターが無いと言うことは透気係数が一義的に求まると言うことである。測定部の深さの影響としては, 一点吸い込みモデルの式(17)では H が r_{e1} 程度でも H の影響は殆どない事を意味しているが式(18)または式(19)によると, 地表面の影響は $H \sim e/2$ から現われる事を意味している。式(18), (19), (20)を使ったデータ解析の例は次の非定常法と共に次節で説明してある。

b) 非定常解

次にポンプ流量をゼロにした後の圧力回復時の浸透を考える。非定常の場合の式(6)の左辺を m^* で書くと非線形となり解析解は困難になる。Horner¹²⁾ は圧縮性が一定という仮定のもとで式(6)の左辺を線形化し, 軸対称的流れの場で積分指数関数の形で解を書き, その近似と

して圧力回復の最終段階で漸近的に対数曲線的に減衰する事を見だしている。また Russell et al.¹⁵⁾も圧縮性一定及び流量一定の仮定で対数関数解を得ている。これらは比較的圧縮性の小さい常圧もしくは被圧下での天然ガスの浸透について実験的にも確認されているが、真空に近い低圧での適応は疑問である。Jakubick and Kline⁷⁾の報告ではこの対数曲線の変化を認めている。しかし、後述するように、実験データはむしろ下述の解析で得られる指数関数的になっているとも考えられる。

ここでは上の近似とは別の「準定常」の近似を考える。式(6)の左辺はある時間が経過した後では右辺の各々の項に比べ小さくなると考えられる。もちろん左辺が小さければ右辺も全体として小さくならなければならない。しかし流量はあっても岩盤内の貯留量の時間変化は小さい状態になる事は考えられる。とくに間隙率 ϕ が小さい密な岩盤では多少の密度変化はあっても体積としては無視できるとすれば、式は定常の場合と同じになり時間的変化は境界条件からのみ導入される事になる。このような近似を「準定常」近似と呼ぶことにする。準定常の場合の無次元疑似圧 m^* を $m/m(t)$ と置けば定常の式(7), (8), (9)を全て満足する。そして m^* の解も式(10), (12), (13)で与えられる事になる。 m^* の解より p の解を求めるには $m(t)$ を求めなければならない。 $m(t)$ を解くには測定部内での質量保存が必要になる。 $p_i(t)$, V_i および $G(t)$ をそれぞれ測定部内での空気密度、測定部体積、及び測定部内への質量流入量とすると、

$$V_i \frac{dp_i}{dt} = G_i(t) \quad (21)$$

ここで $G_i(t)$ は式(11)を任意の時間 t にあてはめたもの

$$G_i(t) = \frac{k}{2RT} M^* m_i(t) = \frac{kM^*}{2RT} \frac{(p_i^2(t) - p_e^2)}{\mu} \quad (22)$$

である。式(22)を式(21)の右辺に、式(3)を左辺に代入すれば

$$V_i \frac{dp_i}{dt} = \frac{k}{2\mu} M^* (p_i^2 - p_e^2) \quad (23)$$

となり、これを積分すると

$$\ln \left(\frac{p_e + p_i}{p_e - p_i} \right) = \frac{kp_e}{\mu V_i} M^* t + C \quad (24)$$

が得られる。ここで C は積分定数である。さらにこれを $p(t)$ について解くと

$$p_i(t) = \frac{K \exp \left(\frac{kp_e}{\mu V_i} M^* t \right) - 1}{K \exp \left(\frac{kp_e}{\mu V_i} M^* t \right) + 1} p_e \quad (25)$$

となり非定常の測定部圧の時間変化が得られる。この解は Horner¹²⁾, Russell et al.¹⁵⁾の解と異なり p_i は t の指数関数の比になっている。式(24)によると $\ln((p_e+p_i)/(p_e-p_i))$ は時間に対し直線的に変化するので、 $(p_e+p_i)/(p_e-p_i)$ の経時データを時間に対し片対数目盛りでプロットしたグラフの勾配 SI が求まれば k が次の式で決定できる

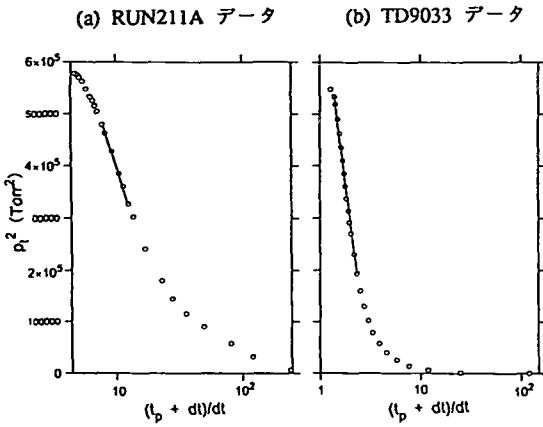
$$k = \frac{\mu}{p_e} \frac{SI V_i}{M^*} \quad (26)$$

単位は式(17)と同様 p_e は気圧、 μ は cp , SI は $1/sec$, V_i は cm^3 にとると k は darcy である。 M^* は式(18), (19), (20)で与えられる。この式では Horner式と違い透気試験の全過程によらず、圧力回復過程で SI の決定できる部分より k が決まる場所である。従って定常法による結果と非定常法による結果は独立で両者の結果を比較する事により各々の方法の妥当性を確かめる事が出来る。

4. データ解析法の検証

(1) 非定常データの圧縮性の影響

上述の準定常の近似が良い近似であるかどうかは実験結果で確かめるべきである。そこで、Jakubick and Kline⁷⁾のテストのRUN211Aデータ及びK空洞で得られたデータの代表的ケースTD9033とTD90327の異なった3つのケースについて圧力回復特性について詳しく調べてみた。RUN211Aは回復が非常に遅く100分以上かかっているのに対し、TD9033のデータは50秒程度、TD90327の場合は20秒程度で回復している場合である。これらの場合の透過度はそれぞれ $10^{-12} cm^2$, $4 \times 10^{-10} cm^2$, $10^0 cm^2$ で、亀裂のきわめて少ない火成岩、変成岩から亀裂が良く発達した第三紀の頁岩程度である。図-7にそれぞれの場合について p_i^2 を縦軸に、真空ポンプ始動時よりの経過時間 $t_p + dt$ とポンプ停止後の時間 dt の比を対数目盛りで横軸にプロットしてある。 t_p はポンプ稼働時間で、Horner法ではこのグラフが直線で近似できることが必要である。これは透気試験全過程に依存する事を意味する。図-8で



(c) TD90327 データ

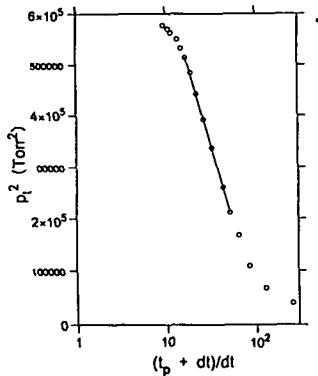
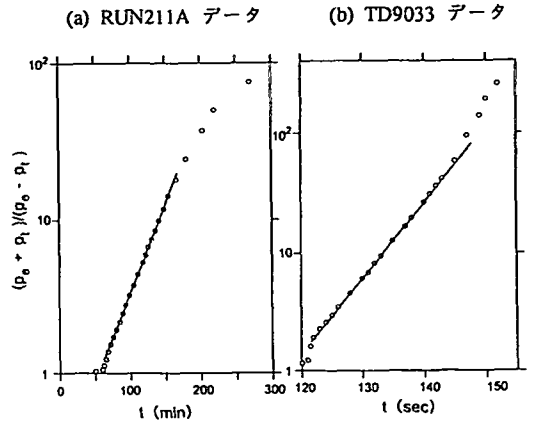


図-7 圧力回復特性, Hornerプロット



(c) TD90327 データ

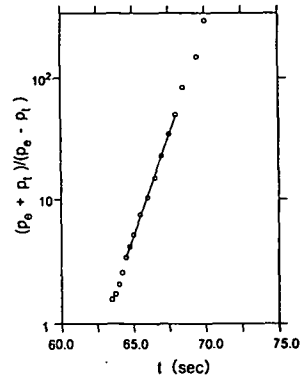


図-8 圧力回復特性, 準定常プロット

は同じデータを式(23)の左辺の $(p_e + p_i(t))/(p_e - p_i(t))$ を縦軸に、対数目盛りで、時間を普通目盛りで横軸にとつてある。 p_i が対数関数で近似出来る場合は図-7でデータが直線的に、上記の式(23)の近似が良い場合は図-8でデータが直線の変化になる。図-7によれば、RUN211Aデータは直線部がいくらか認められるがK空洞TD9033データでは直線部は1/3サイクル以下と非常に短い。これに対し、図-8では全ての場で1サイクル以上の充分な直線部がみられ式(20)で表される準定常の近似による圧力回復特性と一致していると言える。

Jakubick and Kline⁷⁾はコンクリートで作られた供試体を用い室内実験でデータを得ているがそのうちRUN211Aについて詳しい時系列データが発表されている。供試体は半径が23cmで測定部の長さ $h = 53\text{cm}$ より短い円筒形の供試体を使っているので境界条件は本解析で設定した半無限領域とはかなり違っている。従ってこのテストデータからは k の計算のモデルの精度は検証出来ない。しかし材質が一樣で等方であるので、上記の定常法、非定常法の妥当性の判定に用いる事が出来る。

k_{ss} を上記の定常法による透過度、 k_{tr} を非定常法により計算された透過度とすると、浸透領域の形状、境界条件に拘らずその比は

$$\frac{k_{ss}}{k_{tr}} = \frac{2Q_e}{S_l \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_e} \right)^2 \right] V_t} \quad (27)$$

となる。右辺が1に近ければ両法の結果が一致している事である。RUN211Aのデータ結果によるとこの比は1.8になっており双方の方法による k の値はほぼ一致していると言える。これに対しJakubick and Kline⁷⁾によるとHorner法と定常法による k の比は100程になっておりHorner法あるいは二次元放射流の仮定の妥当性は疑問である。

透過度は媒体の間隙率のみに依存するので、土質地盤の場合標準的に行われている透水試験による透過度と本透気試験による透過度は少なくともオーダーが同程度に

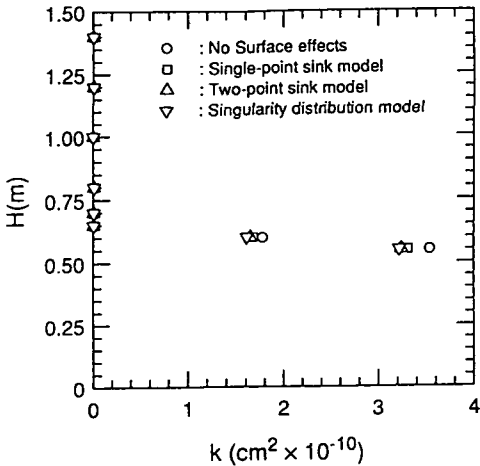


図9 一点吸い込み、二点吸い込み及び特異点分布モデルによる定常データ解析例

なるはずである。そこで本方法と透水試験を比較してみた。これには、まさ土を直径70cmのドラム缶につき固めパッカーを模擬した直径20mm長さ80mmの塩化ビニール管を埋設した。圧力変換器は供試体の外に置き硬質チューブで測定部につないだ。透水試験を行った後、標準透水試験を行い結果を比較した。透水試験では $5.0 \times 10^{-6} \text{cm}^2$ であったのに対し、透気試験の定常法では $1.8 \times 10^{-6} \text{cm}^2$ 、圧力回復過程からは $1.0 \times 10^{-6} \text{cm}^2$ が得られた。この場合非定常法による結果は小さくなっているがこれは土では間隙比が大きく準定常の仮定が良く満たされていない事によると考えられる。

(2) 掘削面の影響

本方法を実際の地下空洞の側壁に掘られたボアホールで得られたデータの解析に適応した。使用したパッカーは直径6.6cmで測定部長さは45cmと Jakubick and Kline⁹⁾のものより大型であるが縦横比はほぼ同じである。境界条件は図-4に示したものにあたり上記の k 計算式が正確に当てはまる。

図-9には定常データを用い3章で導かれた3種の吸込みモデル及び掘削面の影響を入れない一点モデルによる解析結果の掘削面に近い位置のものを示す。モデル間の差は最大9%で比較的小さいが、掘削面を考慮にいれない解析結果では k が掘削面近傍で過大評価されている。他の3つのモデルの差は少ないが、一点吸込み、二点吸込み、特異点分布の順に小さくなっている。本計測は密な火山岩性の母岩の発破による掘削が行われた空洞で、ゆるみ程度が顕著でゆるみ判定には解析法による影響は殆どないが、透気性の変化が掘削法によりゆるみが小さい場合差が出てくる。実際筆者らの経験ではTBMなどの掘削の場合微妙な差が出る事をたしかめている⁹⁾。

(3) 間隙水の影響

本解析では岩盤中の間隙水を考慮していないが、間隙水が存在する場合には試験データや固有透過度に以下に述べる影響を及ぼすものと考えられる。岩盤の飽和度が比較的小さく空気の浸透経路が確保され、かつ間隙水が静止している場合には、水は亀裂の形状を変え幅を狭めると考えられることから固有透過度を過小評価することになる¹⁰⁾。空気の浸透に伴い間隙水も同時に移動する場合には吸引を続けても定常状態は得られない。逆に言えば定常状態が得られ難いときには間隙水の影響の可能性が示唆される。間隙水が空気の浸透経路を一部遮断しているような状態が続くのであれば、水の粘性は空気のそれよりも一桁大きいので動きは遅く、徐々に空気の浸透経路を閉塞してゆく。このような場合には固有透過度は時間とともに低下するはずで、逆挿すれば間隙水が動く前の状態が推定できる。岩盤が完全に飽和している場合には透水試験と考えると良い。

(4) 不均一性の影響

川谷ら¹⁰⁾によれば浸透場が不均質な場合には圧力回復特性は経過時間に依存する可能性があり、圧力回復特性の初期は測定部近辺の透気係数に、圧力回復後期の特性は離れた広域にわたるところの透気係数に依存することが数値計算で見いだされている。従って浸透場が不均質であれば準定常プロットの回復曲線が必ずしも直線にならない可能性もある。しかし、準定常プロットで圧力回復初期の急変時に降の勾配の変化を見ることで測定部近傍と離れた広範囲の領域での透気係数の変化を見る事も出来ると言える。たとえば圧力回復特性がポンプ停止後 t_c で変化したとする。これは測定部から L_c だけ離れたところで透気性が変化していることを意味し、 L_c での圧力を p_c とすれば

$$L_c^2 \approx t_c g = t_c \frac{k_c}{\mu} (p_i - p_c) \quad (28)$$

であるので

$$L_c \approx \sqrt{t_c \frac{k_c}{\mu} (p_i - p_c)} \quad (29)$$

と推定できる。ここに k_c は L_c 以内の領域の平均的な固有透過度である。

図-8の例では、RUN211Aデータでは後半で勾配が下がる傾向が、またTD9033データでは後半で上がる傾向が見られ、測定部から離れた領域では近傍に比べRUN211Aデータでは透過度が小さく、TD9033データでは大きい事

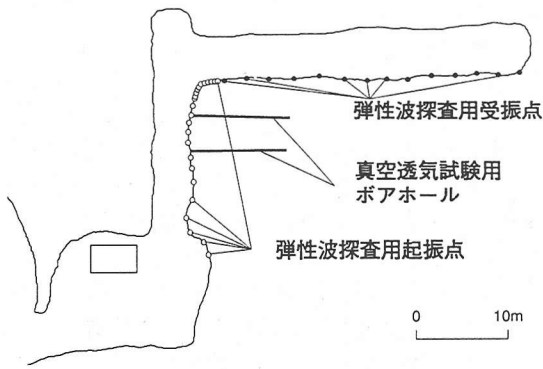


図-10 試験実施位置図 (片麻岩)

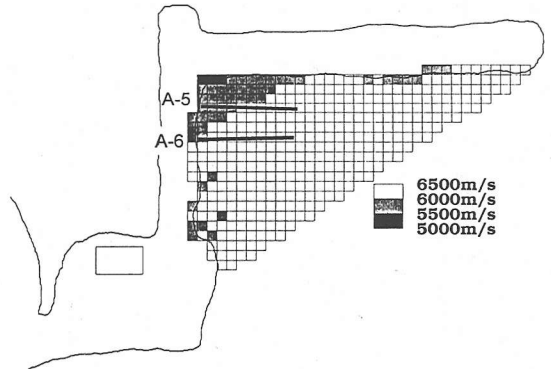


図-11 弾性波トモグラフィによる弾性波速度分布 (片麻岩)

が考えられる。

不均一性媒体の場合、厳密には透過度 k を位置の関数と見なした解析法が必要になる。本試験では掘削面垂直方向に沿って何点か計測するので k の変化が主にこの方向に顕著な場合、すなわち掘削面に平行な層状に分布する場合には k を H の関数で求めることは可能である。従って定常データと圧力回復データから不均一性の推定及びその影響の考察は可能であると言える。

5. 真空透気試験の実施例

以下に真空透気試験を用いた実際のゆるみ領域評価事例を紹介する。個々の事例の中で従来のゆるみ領域評価手法との比較も含めてこの手法の有効性や信頼性を検討した。

(1) 亀裂の少ない片麻岩—素掘り坑道—¹⁰⁾

a) サイト概要

当該サイトは、いわゆる飛騨変成帯に属し、岩質は緑泥化を受けた片麻岩・伊西岩・スカルンから成る。これら各岩質の岩石特性はいずれもコアの一軸圧縮強度で1,000~2,500kgf/cm²であり、岩石自体は非常に堅固である。また岩盤中の節理は少ない。RQDは概ね60%以上であり、全体的に非常に堅硬な岩盤といえる。ここでは本試験とは別の実験のために、幅4.5m、高さ3.5mの矩形断面の素掘り坑道がL字型に掘削された。この坑道の周辺岩盤では各種岩盤調査が実施されており、真空透気試験によって評価されるゆるみ領域と、他の手法によるものとの比較検討が可能であった。図-10には弾性波トモグラフィ用の起・受振点と、真空透気試験を実施したボアホールを併せて表示した。

b) 従来法によるゆるみ評価

弾性波トモグラフィによる調査領域の弾性波速度分布を図-11に示す。各メッシュは一辺が1mである。調査領域の弾性波速度は概ね5,500m/s~6,500m/sであり、速度分布を見る限りにおいては6,000m/s以下の速度領域において何らかのゆるみが生じているものと判断される。ゆるみ領域は主に連絡坑道屈曲部分に大きく現れており、その範囲は坑壁から1~3m、隅角部分で4~6mである。2本のボアホール周辺のゆるみ領域はA-5孔付近で約3~4m、A-6孔付近で約1mと判断される。

調査ボーリングA-5孔及びA-6孔におけるボーリングコアより得られたRQD分布、及びボアホールTV観察結果より得られた開口亀裂分布を図-12に示す。ボアホールTV観察では解像度の問題から開口幅が0.1mm以上のもののみをカウントした。

掘削による亀裂面の挙動を強く反映していると考えられる開口亀裂分布によって評価すると、ゆるみ領域はA-5孔付近では1m以内、A-6孔付近では1~2mであると判断される。一方RQDの分布からみると、両者とも坑道壁面から4~5mまでゆるみ領域が広がっていることを示唆する結果となった。しかしながらA-5孔では深度約3.5m、及び4.5mに、A-6孔では深度3.0m、及び5.0m付近にスカルンと片麻岩の岩相境界が存在し、さらにA-5孔においては深度7m付近に粘土化した鉱脈が存在する。これらの影響が付近のRQDの低下に表れていると考えて良からう。すなわちボーリング調査結果からはゆるみ領域はA-5孔付近では1m以内、A-6孔付近では1~2mと判断される。

c) 真空透気試験によるゆるみ評価

図-13はA-5孔及びA-6孔において実施した真空透気試験の結果から定常法、非定常法によって算定された透気係数を固有透過度の形で表し、坑道壁面からの深度に対してプロットしたものである。A-5孔の試験では測定区間の長さが250mmの試験器を用い、A-6孔の試験では

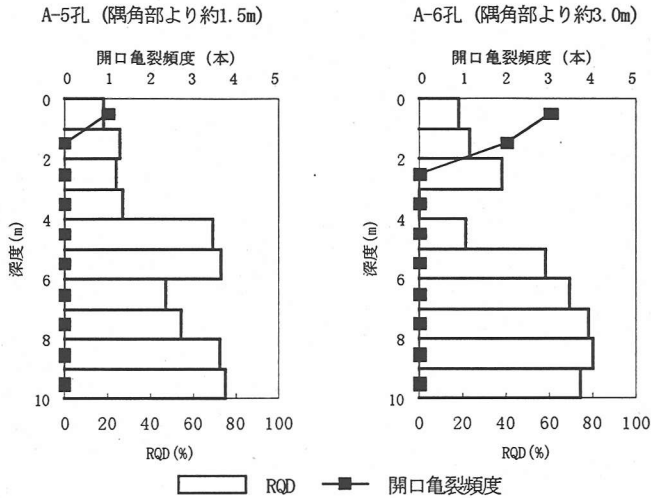


図-12 試験実施ボアホールのRQD, 開口亀裂分布 (片麻岩)

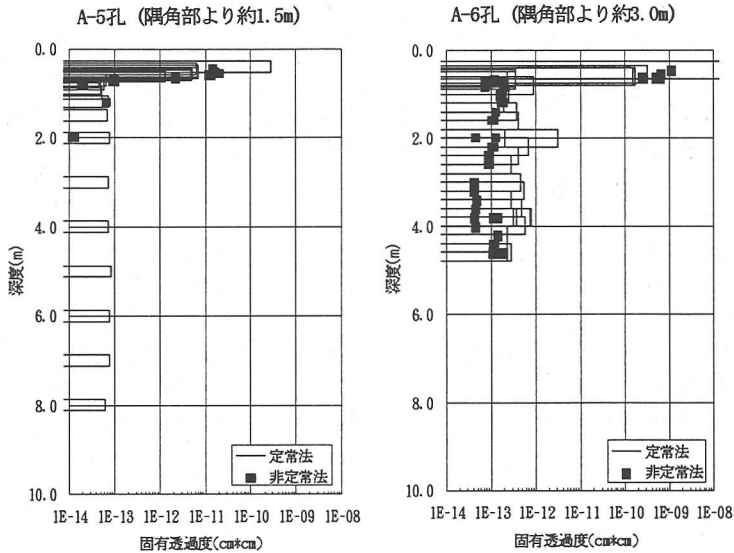


図-13 真空透気試験結果 (片麻岩)

400mmのものを使用した。

定常法と非定常法の結果は絶対値としては差がある。この原因はたとえば測定部の体積など、正確に計測できない量が計算式中に存在することなどによるが、透気特性の深度方向の相対的変化を求めるためには問題はない。定常法では値の小さな吸引空気流量・測定部内圧力を正確に測定する必要がありその精度のために結果にばらつきがでることは避けられない。しかしながら、両者の傾向は概ね一致しており、試験自体の信頼性は損なわれないと判断できる。

測定はA-5孔では深度8m以浅、A-6孔では深度5m以浅で実施した。両孔とも坑道壁面から1m以上の深さでは透過

度がほぼ一定の値をとる。これらは事前に行ったキャリブレーションの結果と同じオーダーである。測定区間の手前側(壁面側)が深度約50cmよりも浅くなる部分で固有透過度分布に明瞭な差異が存在する。この部分で測定区間がゆるみに寄与する開口亀裂に到達したのである。すなわち、坑道壁面より約50cm以深では透気性が非常に低い岩盤であるのに対しそれ以浅は何らかのゆるみが生じているものと判断できる。

弾性波トモグラフィと開口亀裂分布、真空透気試験の結果を比較すると、A-6孔周辺では弾性波トモグラフィの解像度も考慮して約50~100cmのゆるみ領域でほぼ同じ結果と見なせるが、A-5孔周辺では弾性波トモグラ

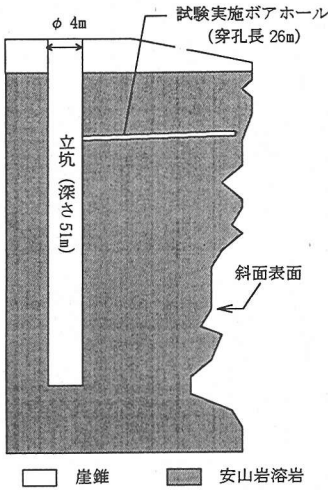


図-14 試験実施サイトの概況とボアホール位置 (安山岩)

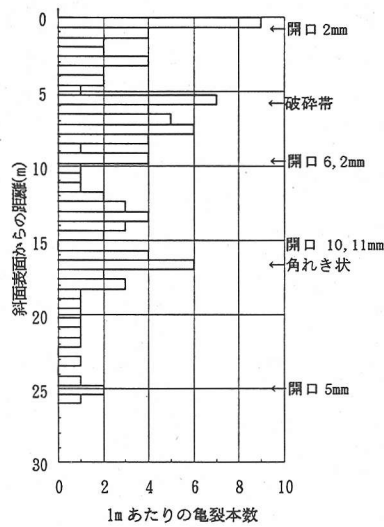


図-15 試験実施ボアホールの亀裂頻度と岩盤性状 (安山岩)

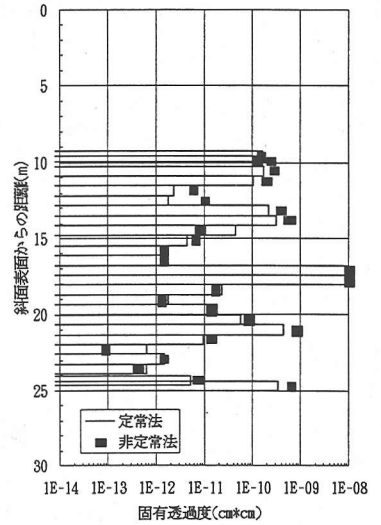


図-16 真空透気試験結果 (安山岩)

フィの結果がかなり大きなゆるみ領域を示す。これは、図-11に示す隅角部の応力集中による影響がさほど広範囲でなく局所的であるにもかかわらず、弾性波トモグラフィでは波線の分布が希薄だったために正確に表現できなかった可能性が考えられる。

また、A-5孔では深度1~2mに3本の開口亀裂が存在したが、真空透気試験における透過度の変化には表れなかった。開口している亀裂であっても連続性、連結性が悪ければ透過度は大きくなる。逆に、透過度が大きくなるような亀裂の存在はたとえその亀裂が開口していても連続性、連結性は悪く岩盤のゆるみには大きく寄与しないとと言えるだろう。

(2) 安山岩溶岩—自然斜面—

a) サイト概要

このサイトは、近くの第四紀火山より流出した安山岩溶岩が固結した後に、河川による侵食によって両岸に高さ数10mの急峻な、ところによってはオーバーハング状の斜面が形成された。安山岩は固結時の冷却によって、層状または柱状の節理が著しく発達している。河川による侵食は現在も継続しており、上記節理に沿った斜面崩壊がしばしば発生している。安山岩自体は非常に堅硬で、一軸圧縮強度は1,000~1,500kgf/cm²に達する。

b) ボーリング調査によるゆるみ予想

今回の試験は図-14に示すように、斜面背後に掘削された立坑からほぼ水平に削孔されたボアホールで実施した。図-15に水平ボーリングにおける亀裂分布の一例を示す。この図では斜面表面を0mとしており、約26mが立

坑の掘削面である。この情報だけでは斜面のゆるみ領域は判断できないが、節理の発達は斜面表面ほど著しくコアの状況等も考慮すると深度10mまでは確実にゆるんでいることが予想された。また区間によっては亀裂の全く存在しない部分もあるがその他の大部分では亀裂間隔は5cm以下である。開口幅が10mmを越える亀裂や明瞭な破砕帯も存在する。

c) 真空透気試験によるゆるみ評価

真空透気試験は諸般の事情から図-15に亀裂分布を示したボアホールから約1.5mほど離れた位置にあるものを利用した。尚、事前の調査から壁面から約10m程度は亀裂の発達が著しく、岩盤のゆるみが確実視されており、またボアホール内の孔荒れが著しくパッカーの破損が懸念されたことなどから、試験はそれ以深で実施した。

試験によって得られた透気特性を固有透過度として深さ方向に対してプロットした図を図-16に示す。固有透過度分布は10⁻¹³~10⁻⁸cm²/cmまでかなりのばらつきを示すが、定常法、非常法両者の傾向は概ね一致しており、試験自体の信頼性は損なわれないと判断できる。図-15と図-16ではボアホール自体に1.5mの離れがあるため単純な比較はできないものの、表面からの距離21m付近以外は透気性と亀裂本数および亀裂の性状は良く相関している。

試験孔付近のゆるみに関しては、岩盤内では立坑壁面から13, 17, 21m付近に亀裂の存在が推定され、このうち17m付近のものはかなり大きな破砕帯と考えられること、崖面から続くゆるみは少なくとも深度13m付近まで達していると推定される、という結果を得た。

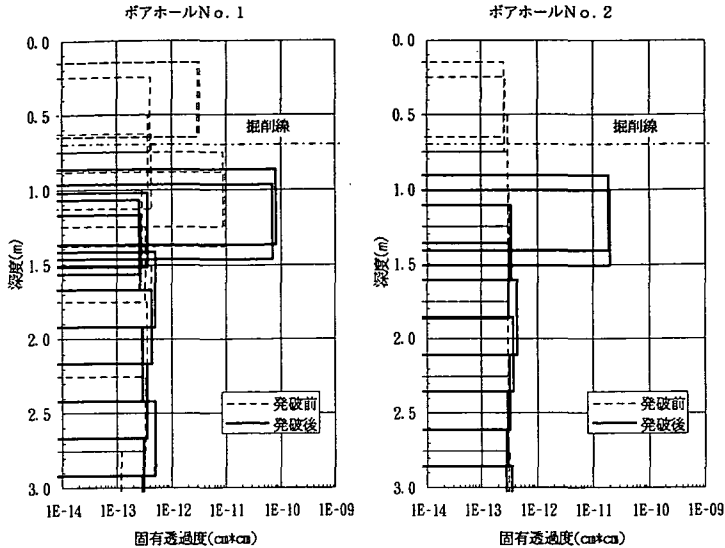


図-17 真空透気試験結果 (花崗岩)

(3) 花崗岩-TBM掘削と発破による切り上げ

a) サイト概要

当該トンネルは、堅硬な花崗岩中にTBMで直径5mの先進導坑を2本掘削し、その後制御発破によって掘削径約15mの本坑の切り上げを行った。この先進導坑から削孔されたボアホールを利用し、切り上げ部分のゆるみ領域の進展を評価するために掘削前後の比較を行った。

b) 真空透気試験によるゆるみ評価

図-17に真空透気試験結果を示す。図中の一点鎖線は(発破掘削前の壁面から約70cmの部分)が発破後の掘削ラインである。固有透過度は掘削表面から離れた部分では掘削前後とも 10^{-13} ~ 10^{-12} cm²/cmだが、発破後には掘削表面から約30~40cmの範囲で1オーダーから2オーダーの急増が見られる。この範囲が発破によってゆるんだ領域であると考えられる。ここでは掘削後に吹付けコンクリートが施工され、この影響による掘削表面の透気特性向上がゆるみによる透気特性の悪化を相殺し、真のゆるみ領域の検出が困難になることが懸念された。しかしながら、岩盤が堅硬な花崗岩でもともと透気係数が小さいこともあり、ゆるみ領域は明瞭に検出された。

(4) 第三紀堆積岩 (砂岩頁岩互層) 一矢板工法による掘削

a) サイト概要

当該サイト付近の地質は、基盤である白亜系堆積岩類を不整合に覆う古代三系の堆積岩であり、主に砂岩を挟在した泥岩及び頁岩より成る。頁岩は間隔数cm~十数cmの層理が発達し、層理と垂直の方向に容易に剥離する。一方砂岩は比較的massiveであり、亀裂も少ない。試験

を実施した坑道は、在来工法(矢板工法)により数十年前に掘削されたもので、坑道掘削時にはクリープによる考えられる盤膨れが発生している。試験はそれぞれ砂岩、頁岩を対象とした2本のほぼ水平なボアホールで実施した。両者の離間距離は20m程度である。

b) ボーリング調査によるゆるみ予想

図-18にコアのRQD分布を示す。

砂岩中には、深度10~11m付近にやや破碎したコアが観察される以外は口元から奥まで全て棒状の堅硬なコアが得られた。RQDは10m以深でやや小さい。一方頁岩では口元、深度3m付近、深度5.5m付近、及び深度10m付近に破碎部が存在し、10mより手前ではRQDが小さいが、それより奥では連続したコアが得られており、RQDも80以上と大きい。以上より、頁岩中では砂岩中に比べゆるみ領域が非常に大きい可能性が示唆された。

c) 真空透気試験によるゆるみ評価

各ボアホールにおける試験結果を図-19に示す。定常法、非定常法両者の傾向は概ね一致しており、試験自体の信頼性は損なわれないと判断できる。深度方向の固有透過度分布を見ると、砂岩では深度10m付近で固有透過度の顕著な増加(3~4オーダー)が見られる以外は、1~2オーダー程度のばらつきはあるもののほぼ全域にわたって 10^{-13} cm²/cmオーダーとなっている。特にボアホール口元から深度8m付近までは低い値で一定している。一方頁岩では深部は 10^{-13} cm²/cmオーダーで極めて一定している。深度3.5m付近から徐々に増加し、深度1.5m、0.8mに明確な変化点が存在する。また、不明確ではあるが、深度3.0mにも変化点が存在する。

砂岩部分では、壁面近傍から10mまではコア観察、RQD

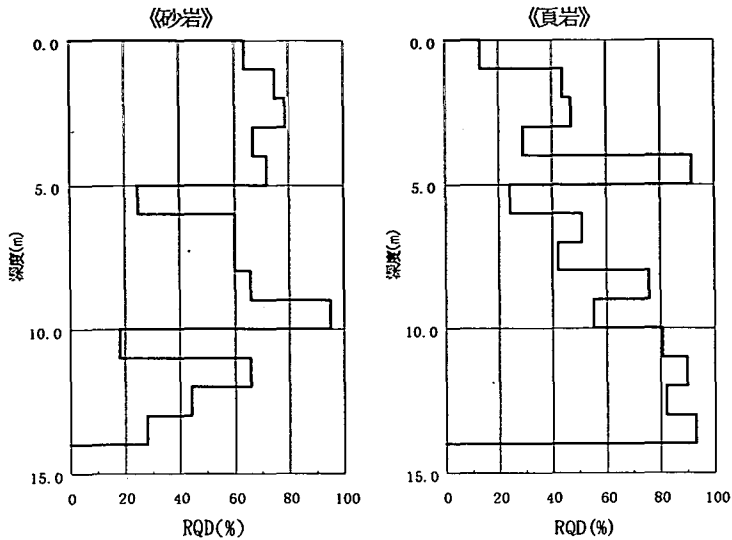


図-18 コアのRQD分布 (砂岩頁岩互層)

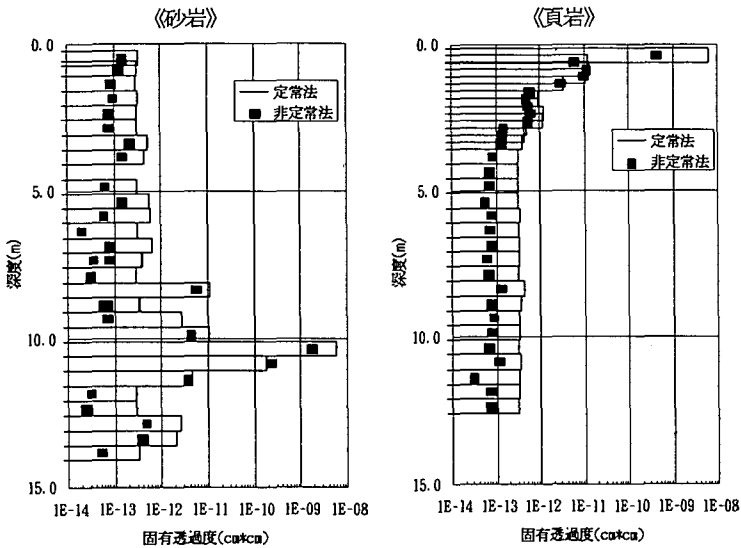


図-19 真空透気試験結果 (砂岩頁岩互層)

ともに、ゆるみは殆どなく堅硬な岩盤が予想されたが、真空透気試験においてもこの区間では固有透過度が低く予想は裏付けられた。10m付近では破砕部が存在しRQDも小さい。真空透気試験においてもこの破砕部は固有透過度の顕著な増加として検知された。この部分で透気性が良いと言うことは、破砕部が亀裂系を通じて何処かの自由面と連結していることを意味しているが、本サイト付近の砂岩はもともと亀裂が少なくmassiveなこと、10mより手前では固有透過度が極めて低いことなどから考えて、このボアホール周辺では上記亀裂系は断層などの比較的大きな既存断裂系であると考えられる。この断裂系が坑

道掘削によってある程度影響を受けているとしても、ゆるみ領域とは規定できない。したがって、このボアホール周辺のゆるみ領域は計測区間外の25cm以下であるとの結論を得る。

一方頁岩部分ではコア観察やRQD分布より、深部まで(最大10m)ゆるみ領域が広がっていると懸念されたが、真空透気試験結果から判断するとゆるみ領域は最大に見積もっても3.0m程度である。本サイト付近の頁岩はもともと層理がよく発達し、ボーリングコアに現れた亀裂が既存の亀裂なのか坑道掘削によって新たに発生したものかの判断ができなかった。また、岩盤中で開口して

いるのかどうかの判断も困難であった。真空透気試験によって初めて開口し坑道壁面まで亀裂系を通じて連続している亀裂のみが抽出され、3.0mより奥の亀裂は既存の層理であることが判明した。

今回の試験では固有透過度が相対的に大きく変化(1オーダー以上)している点、すなわち深度1.5mをもって、これより手前が坑道掘削によるゆるみ領域であると判断した。

砂岩層、頁岩層では離間距離がわずかであるにも関わらずゆるみ領域に大きな違いが現れた。また、頁岩層では深度3.0m～深度1.5mで顕著ではないものの固有透過度のわずかな増加が見られた。本サイト付近の頁岩層では、長期間のクリープによると考えられる坑道の変状が観察されており、このクリープによるゆるみ領域の進展が試験結果に現れた可能性も考えられる。詳細な検討は本報では行わないが、非常に興味深い現象である。

6. おわりに

本報では、ゆるみ領域評価法のひとつである真空透気試験を取り上げ、データの解析方法とその妥当性について詳しく検討するとともに、様々な現場で行われた試験結果を総括し、既知事実、従来調査結果等と比較することにより、真空透気試験法がゆるみ領域評価法の有力な新手法であることを実証した。

データ解析では、等方均質浸透場で温度一定という仮定の下で、大気と接する岩盤表面からの浸透を考慮し、吸引流量、測定部内圧力が定常状態に達したときのデータを解析する定常法、及びポンプを停止した後の圧力回復曲線を使う非定常法、双方に関して透気係数の算定式を誘導した。室内試験のデータを用いて検証を行った結果、以下の知見が得られた。

・測定部の形状を3種類の方法で近似した結果を比較したところ、特異点をボアホール中心線上に分布させたケースが、縦長の測定区間を近似するのに最も適しているという結論を得た。

・非定常の解析には「準定常」近似を取り入れ、室内実験データによって検証を行ったところ、その結果、非定常Horner法では定常法に比べてかなり大きい固有透過度が計算されるのに対し、今回導いた準定常仮定による固有透過度は定常法で得た値とほぼ一致する事が判明し、妥当性が確認できた。

・浸透場がボアホール近傍と遠くで異なっているような不均一な場合は圧力回復特性から判断可能であった。

また、現場試験の結果からは、試験の適用性、信頼性に関し、以下に列挙するような長所や問題点が明らかになった。

・一連の原位置試験が成功したことで真空透気試験は様々な種類の岩盤に対して十分に適用可能であり、ゆるみ領域の判定も比較的容易に行えることが確認された。

・真空透気試験において、連続性、連結性の良くない、すなわちゆるみに寄与しないと考えられる開口亀裂に対しては固有透過度の増大はみられないことから、この手法は、コア観察やボアホールTV観察等による方法よりも信頼性の高いゆるみ領域評価が可能であった。

・真空透気試験は、弾性波トモグラフィーなど、広範囲のゆるみ領域評価手法に比して、より局所特性を反映する精度の高い測定が可能であった。

・真空透気試験はボアホールさえ存在すれば、掘削の進行に伴うゆるみ領域変化を容易に追跡できる。

・真空透気試験は局所的なゆるみ領域の把握には有利であるがボアホールの存在が前提条件となるために広範囲な調査が難しい。ただし、試験方法は簡便であるため(1回の測定に要する時間はパッカー部の移動も含めて約5～10分である)、ロックボルト、あるいは諸計測用のボアホールが利用できれば比較的広い範囲のゆるみ領域の把握は可能である。

以上の知見を総合的に判断すると、真空透気試験によるゆるみ領域評価手法の信頼性はほぼ確認されたと言って良い。

謝辞：本研究は文部省科学研究費(No. 04555120、代表櫻井春輔)の援助を受けた。また実験、計算は神戸大学学生であった山中直、池宮俊二君の協力を得て行われた。また現場試験では三井建設株式会社技術研究所の山地宏志博士のご協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会編：トンネルの地質調査と岩盤計測, p103, 1983.
- 2) 櫻井春輔, 進士正人：マイクロコンピュータによる地下空洞掘削時の安定性の評価, 土木学会論文集, 第358号/Ⅲ-3, pp37-46, 1985.
- 3) 池田和彦, 桜井孝：トンネル周辺のゆるみ領域と評価, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp163-166, 1977.
- 4) 中田雅夫, 小瀬幸雄, 佐々木勝司, 福岡敏夫：岩盤空洞周辺のゆるみ領域の調査について, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp16-20, 1991.
- 5) 土木学会編：坑内載荷試験法の現状と課題—指針化の試み, p88-90, 1988.
- 6) 稲葉武史, 志水俊仁, 戸井田克, 青木謙治：A E計測による岩盤空洞周辺のゆるみ領域の評価, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp181-185, 1993.
- 7) Jakubick, A.T. and Kline, R. Multiparameter Testing of Permeability by the Transient Vacuum Technique, in Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, Ed. by C.F. Tsang, Academic Press, pp.473-484, 1987.
- 8) Nakayama, A., Kawatani, T. and Sakurai, S.: Scrutinizing the

- vacuum permeability test as a method of detecting loosened are in rock mass. *Proc. Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, pp.271-276, 1993.
- 9) 打田靖夫, 原田俊之, 金川忠, 中川加明一郎, 浦山克, 中村隆浩, 石田毅: 地下発電所空洞掘削における側壁岩盤の挙動, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.316-320, 1992.
 - 10) 坂口雄彦, 伊藤洋, 佐藤邦明, 清水昭男: 岩石及び開口割れ目における透気に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.445/Ⅲ-18, pp.17-25, 1992.
 - 11) Al-Hussainy, R., Ramey, H.J. and Crawford, P.B.: The Flow of Real Gases Through Porous Media, *J. Petroleum Technology*, Vol.18, pp.624-636, May, 1966.
 - 12) Homer, D.R. Pressure Build-up in Wells, *Proc. Third World Petroleum Congress*, Section II, E.J. Brill, Leiden, Holland, pp.503-521, 1951.
 - 13) 川谷健, 中谷元彦, 中山昭彦: 真空透気試験による不均質地盤の透気性測定について, 水工学論文集第36巻, pp.471-476, 1992.
 - 14) 川谷健, 中山昭彦, 石丸智基: 透気性を指標とする亀裂性岩盤の緩み領域判定に関する研究, 水工学論文集第36巻, pp.477-482, 1992.
 - 15) Russell, D.G, Goodrich, J.H., Perry, G.E. and Bruskotter, J.F.: Methods for Predicting Gas Well Performance, *J. Petroleum Technology*, Vol.18, pp.99-108, Jan., 1966.
 - 16) 山田文孝, 山地宏志, 中山昭彦: 真空透気試験を用いたゆるみ領域の評価, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.289-294, 1994.

(1995. 12. 18 受付)

VACUUM-PERMEABILITY TEST FOR ESTIMATION OF LOOSENED AREA IN ROCK

Akihiko NAKAYAMA, Fumitaka YAMADA, Yasuo UCHITA, Takeshi KAWATANI and Shunsuke SAKURAI

The practice, data-analysis methods and the data-interpretation techniques of the "vacuum-permeability test", which is a method of detecting the loosened zone in rock mass by evacuating air from a sealed section of a borehole drilled in the rock mass and obtaining the air permeability distribution characteristics, have been described and examined in detail. A practical and reliable approach is proposed, and is shown that it is a promising evaluation method of loosened zone by conducting fields tests at various sites and comparing the results of existing methods and already known data.