

(73) 真空透気試験による発破掘削時のゆるみ領域調査

三井建設(株)	○山田	文孝
(株)奥村組	萩森	健治
神戸大学	中山	昭彦
神戸大学	櫻井	春輔

Detecting of Loosened Area Caused by Blasting Using Vacuum Permeability Test

Fumitaka YAMADA, Mitsui Construction Co., Ltd.
Kenji HAGIMORI, Okumura Co., Ltd.
Akihiko NAKAYAMA, Kobe University
Syunsuke SAKURAI, Kobe University

ABSTRACT

Vacuum permeability test of Jakubik and Kline is one of the method of detecting the loosened area in rock mass. We tried to conduct an on-site test in some fields to inspect the effect of blasting. We expressed the results of the test as an "intrinsic permeability" calculated by two independent methods calling as "Steady-State method" and "Pseudo-Steady-State method". We could get a loosened area in several sites and get a growth of it after blasting.

1. はじめに

岩盤中に地下空洞やトンネルを掘削する場合に、周辺地山に発生するゆるみは不可避のものであるが、このゆるみ領域を正しく把握することは、空洞の安定性のみならず、経済的な支保の決定にも重要なファクターとなる。特に近年、大規模地下発電所や地下運動場、地下コンサートホール等の大型岩盤構造物が計画あるいは施工されており、簡便でしかも信頼性の高いゆるみ領域評価法の確立が切望されている。

現在、ゆるみ領域の評価手法はさまざまであり、方法によって評価される領域も異なる。代表的な手法としては、弾性波探査による弾性波速度分布や変位計測、AE計測等があげられるが、最終的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しなくてはならない。

今回筆者らは、ゆるみ領域評価の一手法としてJakubick and Kilne¹⁾により提唱されている真空透気試験を、発破掘削によるゆるみ領域の進展を調査する目的で種々のトンネル・地下空洞に適用した結果を報告する。

2. 真空透気試験の概要

2.1 試験の概要

真空透気試験の概念を図-1に示す。まずボーリング孔にパッカーを一对セットし、ボーリング孔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。この時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定することが可能である。

ボアホールに沿ってパッカーを移動させながら測定を繰り返すことによって得られる透気性の相対的な変化から、ボ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の値を直接評価するものではなく、透気性の相対的変化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。

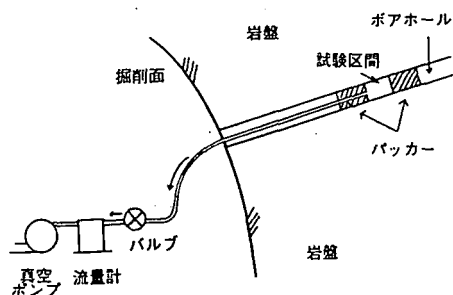


図-1 真空透気試験概要

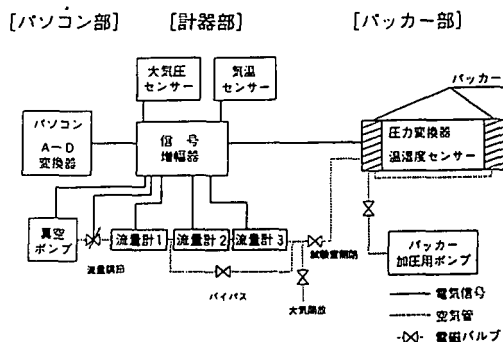


図-2 真空透気試験装置模式図

2.2 試験装置

本試験に用いた試験装置の模式図を図-2に示す。ここに示すとおり、真空透気試験装置は、1)ボーリング孔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、2)圧力、温度、湿度、流量を測定する計器部、3)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2~3m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パイプ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気圧であるためパッカー長は従来の透気試験よりも短くて良く、パッカーに加える圧力も20kgf/cm²程度で十分なため、岩盤を不要に傷めない。

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・表示されるため、測定中に透気性の変化を推定し測定区間の移動幅を決定し測定効率をあげることができる。

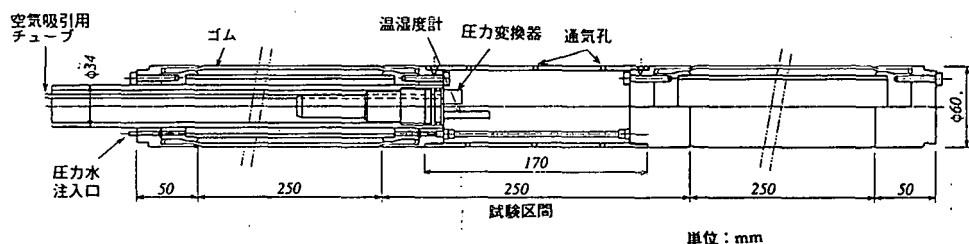


図-3 パッカー部の一例

2.3 試験データ解析

ここで実際の測定結果を紹介する前に、計測された圧力、流量等のデータから透気性を算定する方法について詳述する。

解析方法は2通りの独立した方法で行った。第1の方法は真空ポンプ稼働開始後定常状態が得られたときの測定部気圧、標準状態での体積流量より岩盤の透気性を算定する「定常法」。もう

1つの方法はポンプの停止後の測定部内圧力の回復特性より同じく透気性を算定する「非定常法」である。

尚、図-4に計測データの一例を示す。図-4(A)は試験実施中の吸引空気流量(q)、図-4(B)は大気圧(p_e)と測定部圧(p_t)、図-4(C)は準定常解で近似した圧力回復曲線である。

① 定常法

この方法では掘削面を境界にした均質な半無限領域内において、測定部にあたる場所に「吸い込み」があると仮定してダルシー則に基づく浸透式を円筒座標で説いた解を変形した式、

$$k_{ss} = \frac{\mu p_e q_{ss}}{2\pi(p_e^2 - p_{tss}^2)} \left\{ \frac{1}{r_{eq}^2} - \frac{1}{\sqrt{r_{eq}^2 + 4H^2}} \right\} \quad (1)$$

を用いる。ここで k_{ss} : 定常法で計算された固有透過度、 μ : 空気の粘性係数、 p_{tss} : 定常状態での測定部圧力、 p_e : 外気圧、 q_{ss} : 定常状態での流量、 H : 掘削面から測定部中心点までの距離、 r_{eq} : 測定部の形状を考慮にいたれた等価半径である。

{ } 内の項は掘削面からの空気進入の影響の補正である。亀裂性岩盤の場合、均質浸透場の仮定は正しくないが、薄い亀裂内の流れはダルシー則を満たすので、得られた固有透過度は等価な値と解釈でき、その相対的分布は亀裂数の変化、あるいは亀裂幅の変化、すなわち岩盤のゆるみに結び付けることが可能である。

パッカーにより測定区間を完全に密閉することは不可能である。通常真空透気試験を行う前には亀裂がなく剛な筒にパッカー部を挿入し「キャリブレーション」を実施してパッカー性能の確認を行う。

② 非定常法

この方法では上記の定常法と同じ浸透領域で定常状態を初期条件として非定常の浸透式を解いた結果に基づくものである。固有透過度の式は

$$k_{ps} = S_l \frac{\mu V_w}{4\pi p_e} \left\{ \frac{1}{r_{eq}^2} - \frac{1}{\sqrt{r_{eq}^2 + 4H^2}} \right\} \quad (2)$$

である。ここで k_{ps} : 定常法で計算された固有透過度 V_w : 測定部の容積 S_l : ポンプ停止後の圧力回復特性を次の準定常式で近似したときの勾配(3式)

$$\ln \left(\frac{p_e + p_t}{p_e - p_t} \right) = S_l \cdot t + C \quad (3)$$

ここで P_t : 測定部内圧力、 C : 定数 である。

その他の変数は(1)式での定義と同様である。

(2)式は(1)式と比較して測定部の掘削面からの距離に関する { } 内の補正係数は同じであるがその他の量は全く異なっており、この方法は定常法とは独立であることが分かる。よって上記

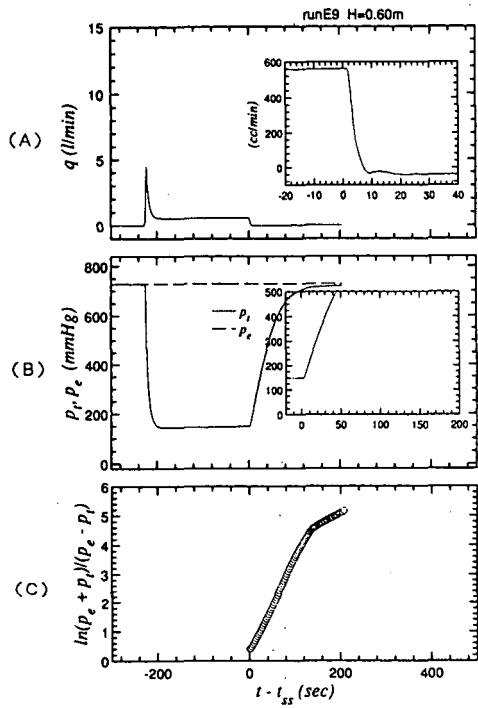


図-4 計測データ一例

の二つの方法で透気係数を算定する目的は、算定された固有透過度を互いにクロスチェックすることにより精度と信頼性を向上させる事にある^{2),3)}。

透気性は固有透過度 k の形で計算される。固有透過度は式4で定義される定数で、岩盤の流体に対する透過特性を表す。

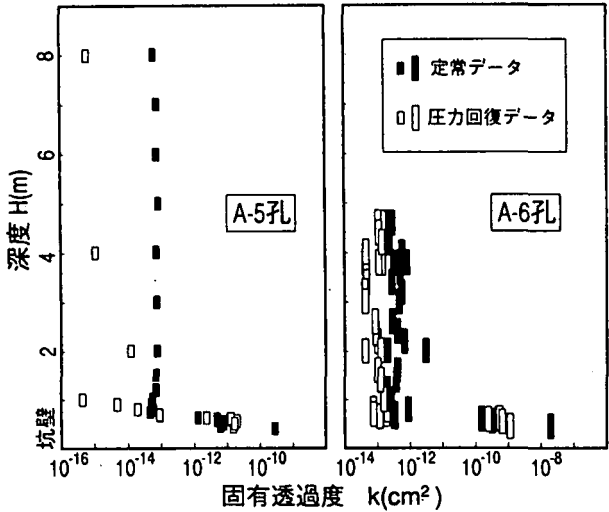
$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p \tag{4}$$

ここで v : 透過速度、 k : 固有透過度、 μ : 流体の粘性係数、 ∇p : 圧力勾配である。

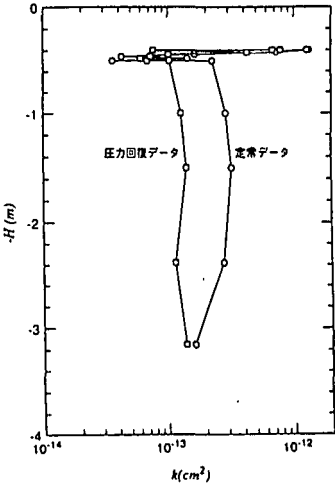
3. 試験結果

図－5は、岐阜県神岡鉱山茂住坑内の地下1000mの深さにある坑道で真空透気試験を実施した結果である。神岡鉱山は日本でも最古の岩石に当たる飛騨変成帯にあり、岩盤は節理も少なく非常に堅硬である。また土被りが大きいため初期地圧も非常に高い。この岩盤中に発破掘削によって直径約5mの坑道を掘削した。図－5には定常法と非定常法の結果を示しているが、両者の傾向はよく一致している。壁面から離れたところでは固有透過度が 10^{-13}cm^2 でほぼ一定しているが、掘削面から数10cmで $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{cm}^2$ のオーダーに急増している。この急増している領域がゆるみ領域であろう。

図－6は、層理が発達した第三紀の砂質泥岩中に掘削された直径5m程度の坑道における実施例である。坑道はロードヘッドによって掘削が行われた。ここでも定常法と非定常法の傾向はよく一致している。固有透過度が 10^{-13}cm^2 から 10^{-12}cm^2 へ急増する部分は壁面から50cm程度であり、これがゆるみ領域であると判断される。



図－5 試験結果一例(1)
片麻岩、発破掘削



図－6 試験結果一例(2)
第三紀砂質泥岩、ロードヘッド掘削

図－7は、兵庫県の舞子トンネルにおいて実施されたものである。このトンネルは堅硬な花崗岩中に2本のTBMで先進導坑を掘削し、その後制御発破によって切り抜けを行った。図－7では先進導坑から削孔されたボアホールを用いて発破掘削前後の比較を行っている。図中に太く示した線（発破掘削前の壁面から60～70cm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 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{cm}^2$ だが、発破後には掘削表面から約60cm

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と思われる。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は小さいこともあり、ゆるみ領域ははっきりと検出された。

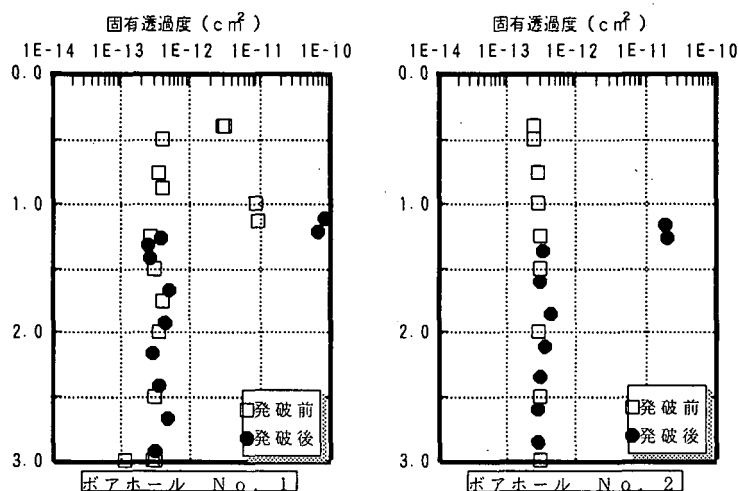


図-7 試験結果一例(3)

花崗岩、制御発破

4. おわりに

岩盤の性質や掘削方法の違いによって異なるゆるみ領域を真空透気試験でうまく調査できることが確認された。また、吹付けコンクリートによる透気性の改善は堅硬で亀裂の少ない岩盤では真空透気試験結果にさほど大きな影響は及ぼさないことがわかった。しかしながら、もともと透気性が良い岩盤では吹付けコンクリートの影響は未知数であり、これを定量的に評価するモデルの作成、確認のための実験等、残された課題は多いと考える。

参考文献

- 1) Jakubic, and Kline, R. ; Multiparameter Testing of Permeability by the Transient Vacuum Technique, in Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, edited by C.F. Testing, Academic Press, pp.473-484, 1987.
- 2) 中山、山中、川谷 ; 真空透気試験データ解析法について、神戸大学工学部土地造成研究施設報告第9号、pp117-131、1991.12.
- 3) A. Nakayama, T. Kawatani, S. Sakurai; Scrutinizing the vacuum permeability test as a method of detecting loosened area in rock mass, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ASSESSMENT AND PREVENTION OF FAILURE PHENOMENA IN ROCK ENGINEERING, pp271-276, 1993.4.
- 4) 中山昭彦、山田文孝、山地宏志、新宮和喜 ; 弾性波トモグラフィと真空透気試験によるゆるみ領域推定の差異について、土木学会第48回年次学術講演会、1993.