

空気吸引による岩盤空隙容積評価

山田文孝¹・中山昭彦²・櫻井春輔³

¹正会員 工修 三井建設株式会社土木本部土木技術部 (〒261-0023 千葉市美浜区中瀬 1-9-1)

²正会員 Ph.D 神戸大学教授 大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³正会員 Ph.D 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

岩盤の透気性分布から地下空洞周辺のゆるみ領域を判定する「真空透気試験」の測定データ、特に試験中に吸引する空気の挙動を評価し、岩盤中に連続して存在する空隙の容積を算定する手法を提案した。原位置測定に先立ってポアホールと同径の鉄管内で事前試験を実施するが、このときの吸引空気流量から測定区間の容積が計算できる。原位置測定で測定区間と連結する空隙があれば、事前試験よりも吸引する空気が多くなるためにポンプ吸引開始直後の測定区間内圧力変化が鈍くなる。したがって事前試験と原位置測定で圧力変化を比較すれば岩盤内に存在し測定区間と連結する空隙容積が評価できる。本論文では簡単な室内試験によってこの手法の妥当性を検証し、いくつかの原位置測定結果について計算を行い、実岩盤の空隙分布の評価を試みた。

Key Words : vacuum permeability test, rock permeability, pore volume, laboratory test, field measurement

1. はじめに

岩盤内は様々な形の空隙が存在する。これは多くの中硬岩のように開口した不連続面として存在するもの、あるいは熔岩や石灰岩内に分布する大小の空洞等、様々な形態をとる。これらは互いに連結することで、岩盤の透水特性や強度、変形特性に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

たとえば岩盤中にトンネルなどの地下空洞を掘削すると、応力の再配分によって掘削壁面近傍の亀裂状態が変化することで岩盤の力学特性が変化することがある。これは一般にゆるみと呼ばれ、空洞の安定に影響を与えるため支保の設計や施工において大きな問題となる。地下発電所などの大空洞では、亀裂によって力学的に周辺岩盤と縁の切れた岩石ブロックの安定が問題となる。また水封式の石油・LNG地下備蓄や地熱利用の分野では、水の通り道である岩盤の空隙構造を把握し、あるいは積極的にコントロールすることが施設を成立させるために不可欠の要素となっている。一方、近年特に注目されている岩盤斜面の問題でも、越前海岸や豊浜トンネルの例を引くまでもなく、亀裂の分布や開口量、岩盤中の空洞の状態が斜面の安定性に重要な役割を果たしていることは論を待たないであろう。

このように、岩盤内部の亀裂構造、あるいは空隙構造を明らかにすることは極めて重要な問題であるにもかか

わらず、その全てを直接観察することは物理的に不可能である。そのため、露頭や調査横坑における限られた調査結果をもとに確率論的に三次元の情報を組み立てる方法¹⁾や、ポアホール内の亀裂情報をテレビカメラを通じて取り出すことでたとえ一次的な線の情報でも、得られる情報量を増やすといった手法が研究され²⁾、利用されている。また、原位置岩盤にグラウチングを行った後に岩盤をはぎ取り、実際のグラウト浸透経路を目視で特定する試みもなされている^{3),4)}が、その報告例は稀である。一方岩石レベルでは、X線等の非破壊検査手法を用いて岩石内部の空隙構造を映像化する試み^{5),6)}や、空隙に蛍光染料を浸透させることで岩石内部の空隙を直接観察するといった試み⁷⁾がなされており、一部は原位置の岩盤に直接適用されている⁸⁾。しかしながら、三次元的な空隙構造を明らかにするまでには至っていない。

筆者らはこれまで、岩盤のゆるみを評価する真空透気試験を提案し、原位置での測定を続けてきた⁹⁾。地下空洞掘削により生じる周辺岩盤のゆるみは亀裂構造の変化であり、これを岩盤の透気特性の変化としてとらえるのが真空透気試験である。この試験では、ポアホール中に設けた測定区間から空気を吸引することで岩盤の透気特性を求めるが、この際、岩盤内に測定区間と連続した空隙がある場合にはこの空隙内の空気も吸引している。試験中には吸引空気流量と測定区間内圧力を連続的に測定しているため、吸引した空気量や圧力状態から測定区間

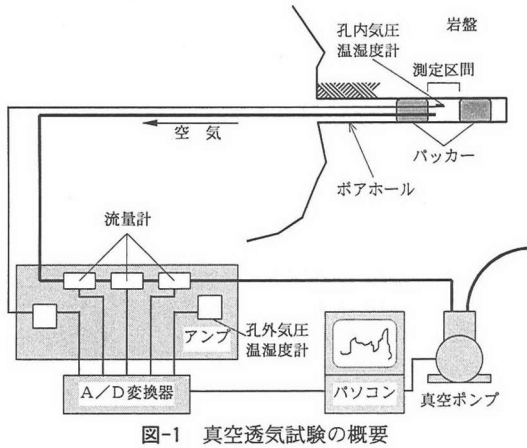


図-1 真空透気試験の概要

と連続した空隙の容積を定量的に評価できる可能性がある。

本研究は、肉眼では観察の困難な岩盤内部の空隙構造を把握するための第一歩として、岩盤内の空隙、特に連結して岩盤の透水特性や強度、変形特性に影響を及ぼしていると考えられる空隙の容積を定量的に評価することを目的とする。ただし本手法では連結せずに単独で孤立して存在する空隙は検出不可能である。本手法ではまず、岩盤内部から吸引された空気から測定区間と連続した空隙の容積を算出する手法を検討し、簡単な室内試験でその妥当性を検証する。またいくつかの原位置測定結果にこの手法をあてはめ、実岩盤の空隙評価を試みる。

なお、岩盤中の空隙は一般に空気と水によって満たされていると考えられるが、掘削により水が排出されれば掘削壁面近傍岩盤はドライになる。本研究ではこのような状況を想定しており、地下水が豊富に存在する条件では別途検討が必要となる。

2. 真空透気試験の概要

真空透気試験は、ポアホールを用いて空洞周辺岩盤の透気性を測定し、その透気性分布からゆるみ領域を捉えようとする試験である。概要を図-1に示す。岩盤の透気性は、ダブルパッカーで密閉した測定区間から真空ポンプにより空気を吸引したときの吸引空気流量と測定区間内圧力から、流れる流体の種類によらない岩盤固有の透過係数である固有透過度が計算される。深度を離れた数点の測定から岩盤の固有透過度分布が得られる。

ゆるみ領域内では亀裂開口のために新鮮部に比べて固有透過度は高いはずである。したがって、ポアホールに沿った深度方向の固有透過度分布はゆるみ領域の範囲を教えてくれる。

試験装置は大きく分けてポアホール内に設置するパッ

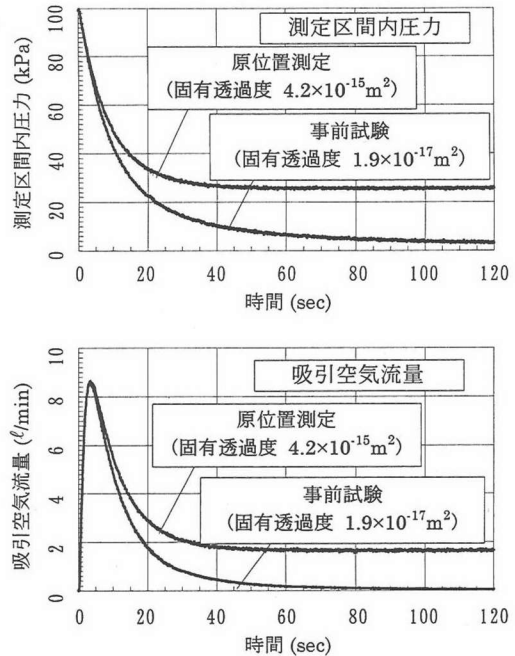


図-2 測定区間内圧力と吸引空気流量変化

カーと孔外の諸装置よりなる。測定区間の圧力・温湿度はパッカーに内蔵したセンサーによって、また孔外の圧力・温湿度は別の独立したセンサーで測定される。真空ポンプの直前にはレンジの異なる熱線式流量計が三台直列に配置され、吸引する空気の1気圧下における流量が100ℓ/min～0.01ℓ/minの広いレンジで測定される。詳細は文献⁹⁾を参照されたい。

3. 岩盤中の空隙容積評価手法の検討

(1) 基本的な考え方

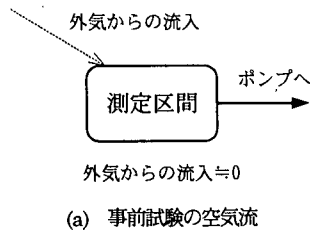
真空透気試験では吸引空気流量(1気圧下における流量)を連続的に測定しているため、定常状態になるまでに吸引した総空気量を求めることができる。吸引空気は

- イ) 測定区間と連結した空隙内を満たしていた空気
- ロ) 様々な経路を通じた外気からの流入
- ハ) 測定区間に存在していた空気

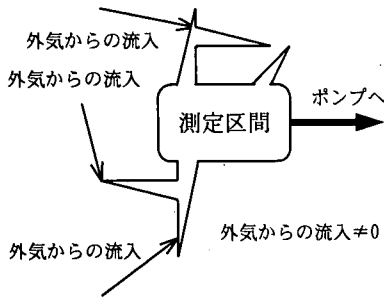
を含んでいる。よってこれらを分離することができれば、岩盤内において測定区間と連結している空隙の容積を推定することが可能である。

(2) 岩盤中の空隙と測定区間内圧力・吸引空気流量の関係

真空透気試験ではポアホール内で測定を行う前に、パッカーを含めた測定システム全体が正常に作動することを確認するためにポアホール径と同じ内径を持つ鉄管



(a) 事前試験の空気流



(b) 原位置測定の空気流

図-3 事前試験と原位置測定における空気流の違い

内で事前試験を実施している。図-2に事前試験（固有透過度は 10^{-17}m^2 オーダー）と原位置測定（同 10^{-15}m^2 オーダー）の測定例を示す。吸引開始後測定区間内圧力は徐々に低下するが、原位置測定では固有透過度が大きいので事前試験よりも高い圧力で定常となる。吸引空気流量はポンプスタートと同時に大きくなり、最大値を示した後で徐々に減少する。しかし圧力と同様に原位置測定では事前試験よりも大きな値で定常に達する。

事前試験ではほぼ定常になった状態において吸引空気流量は 0.01l/min 程度と非常に小さい。したがって測定区間の密閉度は高く、吸引空気はほぼ全て密閉された測定区間内に存在していた空気であると考えて良い（図-3(a)）。

一方原位置の測定において、測定区間と連続した空隙が存在すれば図-3(b)に示すように見かけ上測定区間の容積が大きくなる。また測定区間が亀裂を介して外気とつながっていることに起因する流入等のために定常状態における空気流量は大きくなる。

いま図-3(a)と図-3(b)の状態において、吸引空気流量の経時変化を考える。吸引を開始すると(a)(b)いずれの状態でも同様に真空ポンプの回転数が上昇する。しかしながら(b)の状態では測定区間が岩盤中の空隙と連結しているため、見かけ上測定区間の容積が大きい。このため一回のポンプ回転で低下する測定区間内圧力は小さく、圧力低下は(a)よりも遅い。吸引開始から数秒で真空ポンプは一定回転数に達するが、この時点で(b)は(a)の状態よりも高い圧力にあるため、一回の回転で真空ポンプが排除する空気の種類が大きい、言い換えれば吸引空気流量が大きいことになる。

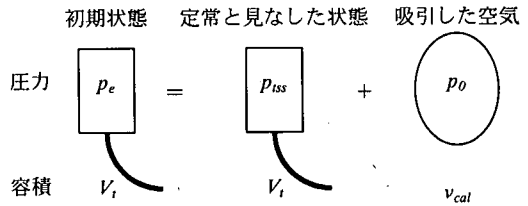


図-4 事前試験における初期状態と定常状態の比較

その後は(a)(b)いずれの状態も測定区間内圧力が徐々に低下するにしたがって吸引空気流量も低下するが、(b)のように外気からの流入がある場合には圧力低下、流量低下ともに遅く、定常に達したときの測定区間内圧力、吸引空気流量は(a)よりも大きくなる。

以上の考察をもとに、岩盤中の空隙の容積を評価する手法を論じる。

(3) 測定区間の容積 V_i の算定

岩盤の空隙容積を評価するために、まず測定区間の容積を計算する。ここで言う測定区間の容積とは吸引用のホースや流量計内部の容積を含んだ値である。

事前試験においては、無限時間吸引を続ければ理論的には測定区間内圧力・吸引空気流量双方とも零で定常となり、吸引した空気の総量が測定区間の容積と等しいはずである。しかし実際の測定では、ある時間吸引を続けた後に圧力・流量の変化率が十分小さくなった時点をもって定常状態と見なす。したがってこの状態では測定区間にはある圧力を持った空気が存在する。測定区間の容積を正しく計算するには、この残った空気を評価する必要がある。

いま、事前試験の試験開始時と定常と見なした状態を図-4のように比較する。質量保存則は気体の状態方程式

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (1)$$

を考慮して以下のように書ける。

$$\frac{P_e}{RT} V_i = \frac{P_{tss}}{RT} V_i + \frac{P_0}{RT} v_{cal} \quad (2)$$

P_e : 大気圧

P_0 : 標準状態の圧力 (101.3kPa)

P_{tss} : 定常状態と見なした時点の測定区間内圧力

V_i : 測定区間容積

v_{cal} : 事前試験において定常状態と見なすまでに吸引した空気総量

R : 気体定数

T : 空気の絶対温度

ただし空気の絶対温度 T は、実際の試験では常にほぼ一定の値を示すため、ここでは一定値であるとする。式

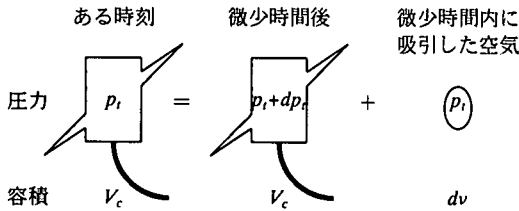


図-5 原位置測定における空気の変化

(2)より以下の関係を得る。

$$V_i = \frac{p_o}{p_e - p_{iss}} v_{cal} \quad (3)$$

試験中に測定している吸引空気流量は1気圧下における流量であるため、試験開始から定常までの吸引空気流量を単純に時間積分すれば、 v_{cal} を得る。

以上のように、事前試験では、定常時の圧力データと総吸引空気量を用いて測定区間の容積が算定できる。

(4) 岩盤中の空隙容積 V_p の算定

原位置測定において外気からの流入がなければ、吸引空気流量の経時変化は事前試験と同様な変化を示し、最終的には零となる。ただし、総吸引空気量は測定区間の容積 V_i と岩盤中の空隙容積 V_p の和 V_c となる。このときの V_i は前項の式(3)と同様に計算できる。しかし原位置測定では外気からの流入があることが普通である(図-2参照)。正しく V_c を求めるためにはこの流入の影響を除く必要がある。 V_c が正しく計算できれば、測定区間の容積 V_i が前項で計算されているので、岩盤中の空隙容積 V_p は次式によって計算できる。

$$V_p = V_c - V_i \quad (4)$$

ここでは事前試験と原位置測定ではポンプの吸引力が等しいと仮定し、事前試験により得た V_i と測定区間圧力より V_p の値を計算する。

いま、原位置測定において外気からの流入がないと仮定すると、吸引開始後のある時刻の状態と微小時間後の状態を図-5のように比較できる。微小時間後には圧力 p_i の空気を dv だけ吸引したことで測定区間の圧力状態が変化する。外気からの流入がないので質量保存則は式(1)の気体の状態方程式を考慮して以下のように書ける。

$$\frac{p_i}{RT} V_c = \frac{p_i + dp_i}{RT} V_c + \frac{p_i}{RT} dv \quad (5)$$

p_i : 測定区間内圧力

dp_i : 微小時間の測定区間内圧力変化

V_c : 測定区間の容積 V_i +岩盤中の空隙容積 V_p

dv : 微小時間に吸引した空気の容積

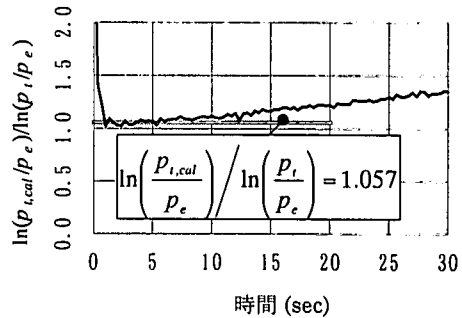


図-6 $\ln(p_{i,cal}/p_e)/\ln(p_i/p_e)$ の求め方

ただし空気の絶対温度 T は事前試験と同様一定値であるとする。式(5)より以下の関係を得る。

$$\frac{dp_i}{p_i} = -\frac{dv}{V_c} \quad (6)$$

単位時間にポンプが排除できる空気の容積(標準状態、吸引能率と呼ぶ)を V' とする。 V' は式(7)のように定義され、ポンプの回転数や効率の影響を受けるので一定ではない。

$$V' = \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

これを式(6)に代入すると、

$$\frac{dp_i}{p_i} = -\frac{V'}{V_c} dt \quad (8)$$

となる。両辺をポンプ吸引開始時点($t=0$)から時刻 t まで積分すると

$$\int_0^t \frac{dp_i}{p_i} = [\ln p_i]_0^t = -\frac{1}{V_c} \int_0^t V' dt \quad (9)$$

となり、 $t=0$ で右辺の積分は0、 $p_i=p_e$ (大気圧)だから、

$$p_i = p_e \exp\left(-\frac{1}{V_c} \int_0^t V' dt\right) \quad (10)$$

を得る。よって、測定区間の圧力変化はポンプの吸引能率 V' と時間の関数となる。前述のようにこの吸引能率が事前試験と原位置測定で同一であるとすると、事前試験では $V_c=V_i$ であるから、その測定区間内圧力 $p_{i,cal}$ は

$$p_{i,cal} = p_e \exp\left(-\frac{1}{V_i} \int_0^t V' dt\right) \quad (11)$$

となる。式(10)、式(11)より以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} -\int_0^t V' dt &= V_i \ln\left(\frac{p_{i,cal}}{p_e}\right) = V_c \ln\left(\frac{p_i}{p_e}\right) \\ \therefore \frac{V_c}{V_i} &= \ln\left(\frac{p_{i,cal}}{p_e}\right) / \ln\left(\frac{p_i}{p_e}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

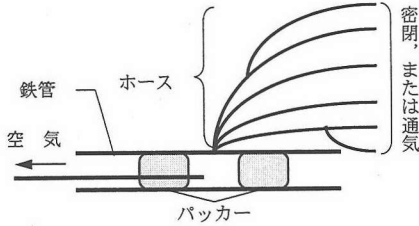


図-7 岩盤中の空隙容積を求めるための室内試験概念図

表-1 岩盤中の空隙容積を求める室内試験ケース一覧

case	概要	接続状態 ←測定区間側 大気側→
case0	鉄管のみ, 外気からの流入なし	——
case1	長さ50m内径約2.5mmのホース	——
case2	長さ100m内径約4mmのホース	——
case3	長さ10m内径約2.5mmのホースを5本並列に接続	
case4	長さ20m内径約4mmのホースを5本並列に接続	
case5	長さ50m内径約2.5mmのホースと長さ20m内径約4mmのホースを直列に接続	——
case6	長さ20m内径約4mmのホースと長さ50m内径約2.5mmのホースを直列に接続	——

岩盤内の空隙が小さく空気の流れに対する抵抗が十分にあれば、ポンプが吸引を開始してからしばらくは事前試験でも原位置測定でも外気からの流入はないとみなすことができよう。したがって、吸引開始後すぐ、外気からの流入がまだ無いと考えられる範囲の圧力データを用いると、式(4)を考慮して岩盤中の空隙容積 V_p が以下のよう計算できる。

$$V_p = \left[\ln \left(\frac{p_{t,cal}}{p_e} \right) / \ln \left(\frac{p_t}{p_e} \right) - 1 \right] \cdot V_t \quad (13)$$

実際には、図-6に示すように、 $\ln(p_{t,cal}/p_e) / \ln(p_t/p_e)$ を吸引開始後の経過時間に対してプロットすると、吸引開始直後に一定値を示す。この値を式(13)に代入することで V_p を計算する。

4. 室内試験

(1) 試験概要

前項の検討を確認するために簡単な室内試験を実施した。この試験では、事前試験に用いる鉄管に細いホースを取り付け、このホースを岩盤中の空隙に見立てて真空

表-2 室内試験における空隙容積一覧

case0(鉄管内で漏れはない)					
case	k_{ss} (m ²)	V_p^* (ℓ)	V_p (ℓ)	誤差 (%)	条件
a	1.9E-17	0.00			外気からの流入なし
b	1.9E-17	0.00	-0.02		外気からの流入なし
c	2.3E-17	0.01	-0.03		外気からの流入なし
d	2.0E-17	-0.02	-0.01		外気からの流入なし
e	2.1E-17	0.00	-0.04		外気からの流入なし
case1(長さ50m内径約2.5mmの管)					
case	k_{ss} (m ²)	V_p^* (ℓ)	V_p (ℓ)	誤差 (%)	条件
a	2.6E-17	0.27	0.23	-12	外気からの流入なし
b	1.2E-16		0.27	0	若干の流入あり
c	1.9E-15		0.25	-8	かなりの流入あり
d	4.2E-15		0.27	2	端部開放
case2(長さ100m内径約4mmの管)					
case	k_{ss} (m ²)	V_p^* (ℓ)	V_p (ℓ)	誤差 (%)	条件
a	2.2E-17	1.64	1.55	-5	外気からの流入なし
b	1.8E-16		1.54	-6	若干の流入あり
c	9.1E-15		1.56	-5	かなりの流入あり
case3(長さ10m内径約2.5mmの管を5本並列)					
case	k_{ss} (m ²)	V_p^* (ℓ)	V_p (ℓ)	誤差 (%)	条件
a	1.9E-17	0.26	0.23	-13	外気からの流入なし
b	2.9E-16		0.26	-1	若干の流入あり
c	2.1E-15		0.30	12	かなりの流入あり
d	7.5E-15		0.29	11	端部開放
case4(長さ20m内径約4mmの管を5本並列)					
case	k_{ss} (m ²)	V_p^* (ℓ)	V_p (ℓ)	誤差 (%)	条件
a	2.4E-17	1.62	1.64	1	外気からの流入なし
b	2.2E-15		1.73	6	若干の流入あり
c	1.0E-14		1.85	14	かなりの流入あり
d	6.6E-14		2.24	38	端部開放
case5(長さ50m内径約2.5mm+長さ20m内径4mm直列)					
case	k_{ss} (m ²)	V_p^* (ℓ)	V_p (ℓ)	誤差 (%)	条件
a	2.7E-17	0.59	0.22	-63	外気からの流入なし
b	1.6E-16		0.27	-55	若干の流入あり
c	1.9E-15		0.25	-59	かなりの流入あり
d	4.1E-15		0.26	-57	端部開放
case6(長さ20m内径4mm+長さ50m内径約2.5mm直列)					
case	k_{ss} (m ²)	V_p^* (ℓ)	V_p (ℓ)	誤差 (%)	条件
a	2.2E-17	0.57	0.53	-6	外気からの流入なし
b	3.7E-16		0.52	-9	若干の流入あり
c	1.9E-15		0.58	1	かなりの流入あり
d	4.2E-15		0.57	0	端部開放

注) 測定区間の容積 V_t は2.18 ℓ

k_{ss} : 固有透過度

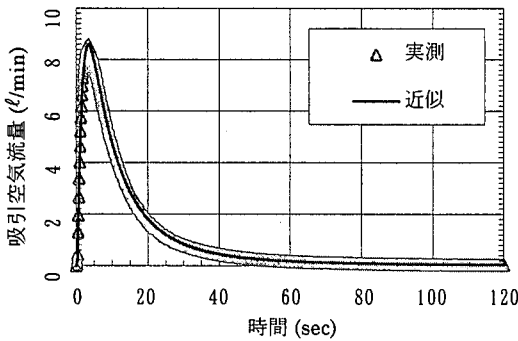
V_p^* : 総吸引量から計算した空隙容積

V_p : 式(13)の方法で圧力を使って求めた V_p

$$\text{誤差} = \frac{V_p - V_p^*}{V_p^*} \times 100$$

透気試験を実施した(図-7)。ホースの先端を加工することで外気からの空気流入の程度、すなわち固有透過度を様々に変えたシミュレーションができる。

表-1に室内試験の概念図と試験ケース一覧を示す。



$$V' = \{A + B \exp[-C(t - E)]\} [1 - \exp[-D(t - E)]]$$

$$p_t = p_e \exp\left(-\frac{1}{V_c} \int_0^t V' dt\right), \quad q_c = \frac{p_t}{p_0} V'$$

図-8 事前試験の吸引空気流量近似

(2) 結果評価

表-2に試験結果を示す。表中には、固有透過度とともに式(13)により計算した空隙の容積を一覧表示した。また外気からの流入がないケースでは吸引空気量から求めた真の空隙の容積も同時に示した。なお表中の誤差は総吸引量から求めた空隙容積に対する差を百分率で示した。

鉄管のみの場合、数回の測定でほぼ同じ値が得られ、これは総吸引空気量から計算した測定区間容積と等しい。

内径約2.5mmの管(case1, case3)では、管の接続状態に関わらず誤差10%程度でほぼ正しい値が評価できる。

内径約4.0mmの管では経路が長く抵抗が大きい場合(case2)ではほぼ正しい値を評価できるが、外気までの経路が短い場合(case4)では、外気からの流入が相対的に小さい場合(a, b)は誤差10%程度でほぼ正しい値を評価できているのに対し、流入が大きく固有透過度が 10^{-14}m^2 オーダーとなる場合は若干過大評価となっている。

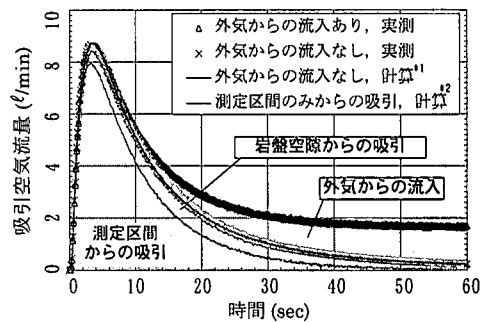
管径が大きく変わるcase5では径の広がった場所が外気と判断され、case2と同じ値が計算された。ただし外気からの流入が変わっても評価された値はほぼ同じである。一方逆に管径が小さくなるcase6では誤差10%以内でほぼ正しい値が評価できている。

この結果、外気からの流入が相対的に小さく固有透過度が 10^{-14}m^2 オーダー以下であれば、上記の手法によって空隙の容積を誤差±10%以内でほぼ正しく評価できることが確認された。

5. 吸引空気流量の詳細検討

(1) 外気からの流入がない場合の吸引空気流量

外気からの流入がないと仮定すると式(10)が成り立つ。このとき、適切なポンプの吸引能率 V' 、ならびに測定区



#1: 式(15)、式(10)、式(14)を用いて計算、 V_c は式(12)による。
#2: 式(25)を用いて計算。

図-9 流量データの詳細検討

間の容積 V_t と岩盤中の空隙容積 V_p の和 V_c を与えれば、測定区間の圧力 p_t の変化が計算できる。さらに実際に測定される吸引空気流量 q_c は1気圧下における流量であり、圧力 p_t の空気を吸引能率 V' で吸引するのであるから次式により計算できる。

$$q_c = \frac{p_t}{p_0} V' \quad (14)$$

この q_c は外気からの流入のみを除いた量であるから、

イ) 測定区間と連結した空隙内を満たしていた空気

ロ) 測定区間に存在していた空気

を合わせたものと考えることができる。

いま、 q_c を近似するために、図-2の吸引空気流量経時変化を考慮し、 V' を以下のような条件を満たす関数として式(15)のように仮定する。

- ・吸引開始後急激に立ち上がり最大値に達する。
- ・圧力が低下するにしたがって差圧が大きくなり、徐々に効率が低下する。

$$V' = \{A + B \exp[-C(t - E)]\} [1 - \exp[-D(t - E)]] \quad (15)$$

A, B, C, D, Eは定数

事前試験の結果を以上の式で近似できるならば、先に求めた V_c と式(10)、式(14)を用いて、原位置測定で外気からの流入がないと仮定した場合の吸引空気流量変化が計算できる。

図-8に、事前試験において測定された吸引空気流量を式(15)、式(10)、式(14)によって近似した結果を示した。また図-9では、これを用いて外気からの流入がない場合の吸引空気流量を計算したものと、室内試験で実際に測定したデータ(同じ条件で外気からの流入がある場合と無い場合の両者)を比較した。

図を見ると、上記の式により事前試験の吸引空気流量はよく近似でき、これを他の測定データに当てはめれば、外気からの流入がない場合の吸引空気流量をよく予測できることが示されている。

(2) 岩盤中の空隙内の空気流

真空透気試験においてポンプで吸引を開始すると、空気は測定区間と連結した岩盤空隙内をDarcy則に従って流れ、測定区間に流入するものと考えられる。この空気流は

- イ) 測定区間と連結した空隙内を満たしていた空気
- ロ) 様々な経路を通じた外気からの流入により構成されると考えることができる。

ここでは、岩盤中の空隙内の圧力分布を仮定してこの空気流量を評価する。

a) 岩盤中の空隙内の圧力状態

試験中における岩盤中の空隙内圧力状態を考える。

空隙内の空気流はDarcy則に従うと仮定する。流量ベクトル \mathbf{q} は、固有透過度 k 、空気の粘性係数 μ 、空隙内の空気圧力 p を用いて以下のように書ける。

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (16)$$

また、連続の式は岩盤の空隙率 ϕ 、空気密度 ρ を用いて以下のように書ける。

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) \quad (17)$$

状態方程式は気体定数 R と絶対温度 T を用いて以下のように書ける。

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (18)$$

定常状態を考えると式(17)の左辺は0となり、式(16)～式(18)より以下の式を得る。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(\frac{p}{RT} \frac{k}{\mu} \nabla p \right) &= 0 \\ \nabla \cdot (p \nabla p) &= 0 \\ \nabla^2 \cdot p^2 &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

岩盤空隙内の水の流路はチャンネリングの形態を示すとの報告がある^{9),10)}。空気の場合も同様であると考えられる。ここでは最も単純な場合を想定し、一次元の管内流として近似した。

ここで大気圧を p_e 、測定区間内圧力を p 、外気から測定区間までの距離を L とし、一次元の問題として式(19)を解くと、空隙内の圧力 p は外気からの距離 x を用いて以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} p^2 &= p_e^2 - (p_e^2 - p_i^2) \frac{x}{L} \\ p &= \sqrt{p_e^2 - (p_e^2 - p_i^2) \frac{x}{L}} \end{aligned} \quad (20)$$

b) 空隙を通過する空気

岩盤中の空隙内を流れる空気の体積流量を Q_i をDarcy則にしたがって書くと以下ようになる。

$$Q_i = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (21)$$

体積流量 Q_i と1気圧下における流量 q_i は標準状態の圧力 p_0 を用いて以下のように書ける。

$$q_i = \frac{p}{p_0} Q_i \quad (22)$$

式(20)、式(21)、及び式(22)より、次式が導かれる。

$$q_i = -\frac{k}{2\mu L p_0} (p_e^2 - p_i^2) \quad (23)$$

定常状態では q_i と計測された流量 q_{ss} は等しい。よって

$$q_{ss} = -\frac{k}{2\mu L p_0} (p_e^2 - p_{iss}^2) \quad (24)$$

p_{ss} : 定常時の測定区間内圧力
式(23)と式(24)より、

$$q_i = \left(\frac{p_e^2 - p_i^2}{p_e^2 - p_{iss}^2} \right) q_{ss} \quad (25)$$

を得る。

したがって、定常状態の測定区間内圧力 p_{ss} と吸引空気流量 q_{ss} 、及び大気圧 p_e ならびに測定区間内圧力 p_i を用いれば、岩盤中の空隙をDarcy則にしたがって流れて測定区間に流入する空気流量 q_i を計算することができる。

この q_i は、

- イ) 測定区間と連結した空隙内を満たしていた空気
- ロ) 様々な経路を通じた外気からの流入により構成されると考えることができる。

さて、原位置で実際に測定される吸引空気流量 q はそのほかに

- ハ) 測定区間に存在していた空気

を含んでいる。したがって、 $q - q_i$ により空隙を通らずに吸引される空気、すなわち測定区間のみから吸引される空気の流量が計算できる。

(3) 吸引空気の分解

前項及び前々項の検討の結果、試験中に測定される吸引空気流量を前項のイ)～ハ)に分解することができる。このうちイ)とロ)は岩盤中の空隙をDarcy則に従って流れる。

図-9中にこれら各流量の変化を示した。

この図によると、吸引開始後の数秒間は測定区間からの吸引がほぼ全てであるが、徐々に岩盤空隙からの吸引が増加し、やがて外気からの流入が発生する。吸引を続けると外気からの流入が大きくなり、定常状態に近くな

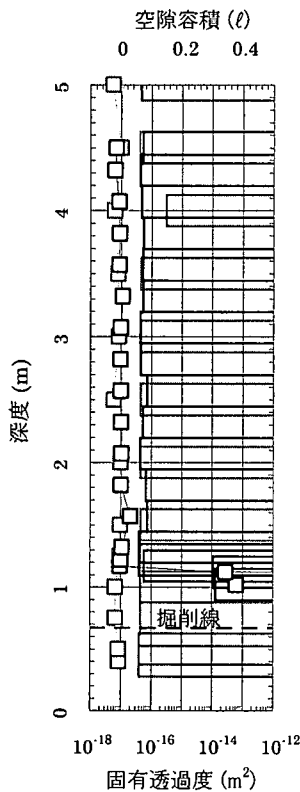


図-10 花崗岩における測定結果
棒グラフ：固有透過度
折線グラフ：岩盤内の空隙容積
淡色：拡幅前，濃色：拡幅後

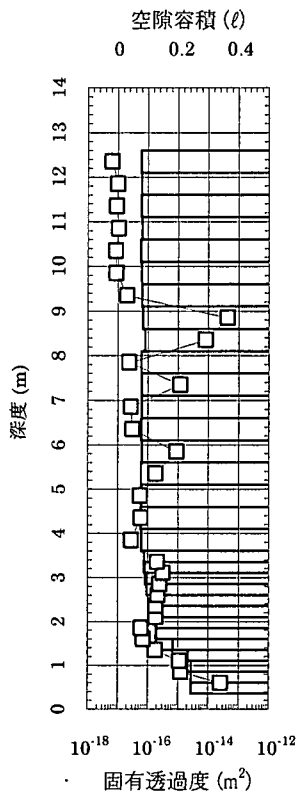


図-11 頁岩における測定結果
棒グラフ：固有透過度
折線グラフ：岩盤内の空隙容積

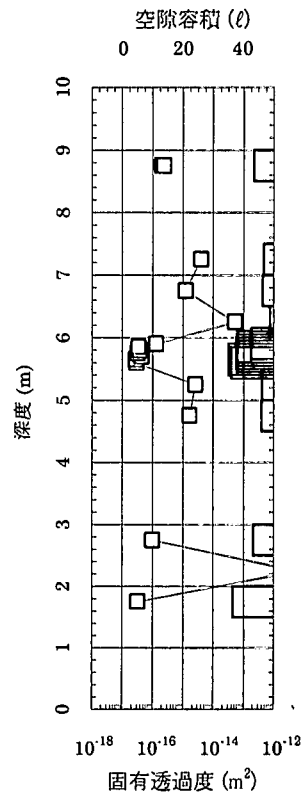


図-12 自然斜面における測定結果
棒グラフ：固有透過度
折線グラフ：岩盤内の空隙容積

ると外気からの流入が吸引空気のほぼ全てを占めるようになる。この事象は岩盤空隙内の空気の流れをよく説明することができる。

なお、 η を定常まで積分し、式(4)を用いて測定区間容積を計算すると2.20 ℓ となり、事前試験から求めた測定区間容積(2.18 ℓ)とほぼ等しくなることから、この考え方の妥当性が確認できる。

6. 原位置測定結果

(1) 測定結果の解釈

真空透気試験によるゆるみ領域評価はこれまで様々な岩盤構造物で実施されてきた。ここでは前項までに検討した手法をこれら原位置測定結果に適用して原位置岩盤の空隙容積を評価し、これまでに得られている結果と比較を行った。ここで用いる空隙容積とは、円柱状の測定区間と連結している岩盤内の空隙の容積である。

図-10は花崗岩中に建設された三車線の道路トンネルにおける測定例である。このトンネルでは導坑掘削後に拡幅が行われ、拡幅の前後に同一ポアホールで測定が実施

された。ポアホール径は66mm、測定区間長は25cmである。

ここでは拡幅後に掘削線より30cm～40cmの範囲で固有透過度の顕著な増大が見られ、ゆるみが生じたと結論された。この領域では空隙の容積も0であったものが0.4 ℓ 程度に増大しており、拡幅による影響で亀裂が開口していることが読みとれる。

また、深度1.5m付近では拡幅後固有透過度に変化はないものの空隙容積が若干拡大している(約40m ℓ)。この前後では拡幅後も固有透過度は 10^{-17} m 2 オーダーでかつ空隙がほとんどないことを考えると、拡幅による応力再配分の影響がこの深度に存在する孤立した小亀裂の開口幅を若干変化させた結果と考えられる。ただし固有透過度が低い、すなわち透気経路がないことから、この空隙は岩盤内に孤立していると考えられ、深度1.5m付近では岩盤は連続性を保っていると判断できる。

これ以外の部分では、空隙の容積はほぼゼロであった。

図-11は古第三紀砂岩頁岩互層の頁岩部において矢板工法で掘削された直径5m程度の坑道における測定例である。頁岩は数cm～10数cm間隔の層理が発達する。ポアホール径は66mm、測定区間長は50cmである。

固有透過度の分布をみると、壁面直近を除くと深度約1.5mと3.0mに変化点があり、それ以深では固有透過度は $10^{-17}m^2$ オーダーと低いレベルにある。空隙容積は深度1.5m以浅、約3m、8m~9mで0.2~0.5ℓと他の位置に比べて大きい。また深度3m~1.5m間は空隙容積が若干大きい(0.1ℓ程度)。

ボーリングコアの観察結果からは深度10m以浅で亀裂がよく発達していた。固有透過度分布にはその影響は見えないが、空隙容積は深度10m以浅では、相対的に容積が小さい部分でも10m以深と比べると若干大きく見える。その差は100mℓ程度であり、この測定における測定区間容積2.42ℓを考慮すると誤差の範囲内であるが、いずれも正の値であり、この傾向は岩盤の状態をある程度表現しているとして差し支えなからう。

固有透過度分布から深度1.5mまでは明確なゆるみ領域で、深度3mまでは掘削の影響が及んでいると考えられたが、この領域では亀裂の開口が、空隙容積という形でも固有透過度と同様に表現されている。深度3mは空隙容積が前後の区間に比べて大きい。ここは固有透過度の変化点にあたり、この位置に開口亀裂があったために掘削の影響がここまで及んだと考えることもできよう。これ以深では、亀裂はあるが密着して固有透過度、空隙容積ともに低い部分、固有透過度は低いが亀裂が開口しており空隙容積が大きい部分が存在していると推察できる。

図-12はゆるんだ自然斜面における測定例である。地質は第三紀中新世の凝灰角れき岩で、10~数10cm間隔の亀裂がよく発達しているうえ、表面では開口幅が数cmに達する亀裂も多い。斜面は10mの高さではほぼ垂直であり、斜面下には小崩落による10数cm大の岩塊が多数見られた。測定用のポアホールは斜面中ほどに位置し、水平に10mの長さである。直径は66mm、測定区間長は50cmである。

固有透過度は全長にわたり $10^{-14}m^2$ 以上と高く、表面から10m以上奥までゆるんでいると推察される。空隙容積は固有透過度が $10^{-14}m^2$ オーダーと最小の位置(深度1.5m~2m、5.5m~6m)で信頼性が高いと考えられるが、その値が5ℓ程度と前の2例に比べて一桁大きい。これ以外の場所でも計算値自体の信頼性は低いが非常に大きな値であることが示唆されている。したがってこの斜面では深部までかなりの亀裂開口が存在するものと考えられる。

以上、3例ではあるが、原位置岩盤の空隙容積を算定し、真空透気試験で得られた固有透過度等と比較することで岩盤の状況をより詳細に評価できる可能性を示した。

測定区間と連結している空隙の容積は、地下の岩盤に掘削されたトンネル周辺では、掘削によりゆるんだ領域以外でも堅硬な花崗岩と多亀裂性の頁岩ではどちらも1ℓ以下であるが、頁岩のほうが若干大きい傾向にあった。

一方自然の岩盤斜面においては、表面より10mの範囲では上記に比べて一桁大きな値が得られ、奥まで亀裂が

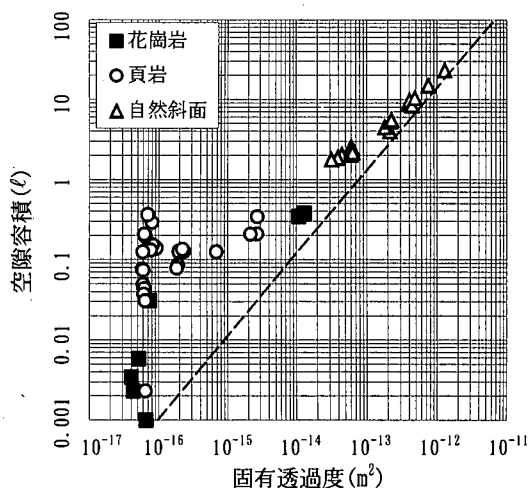


図-13 固有透過度と空隙容積の関係

開口していることが示唆された。

もちろん測定区間長や他の条件が異なるために単純な比較は危険であるが、興味深い測定結果といえよう。

(2)固有透過度と空隙容積の関係

図-13は、前項で取り上げた原位置測定結果のうち、0.001ℓ(1ml)以上の空隙容積が計算されたデータについて、固有透過度と空隙容積の関係を両対数グラフ上にプロットしたものである。測定場所の条件が異なるにも関わらず、プロットされた点は両対数グラフ上の直線(グラフ中に波線で示す)の上側のみに分布する。すなわち、固有透過度が大きければ空隙容積も大きいことを意味する。しかしながら、固有透過度が小さい地点では花崗岩よりも多亀裂性の頁岩でばらつきが大きく、固有透過度と空隙容積は1対1で対応しない。空隙容積という指標を用いることで固有透過度分布からは判別できない亀裂の多少あるいは開口量の違いを表現できていると考えられる。

7. 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の測定データを検討し、岩盤内の空隙容積を評価する手法を提案した。そして簡単な室内実験を行いその妥当性を確認した。また過去の測定結果に適用して原位置岩盤の空隙容積を評価した。その結果以下の知見を得た。

- ・事前試験と実際の測定における吸引開始直後の測定区間内圧力変化から、測定区間に連結する空隙の容積を算出する手法を提案した。
- ・簡単な室内試験を行った結果、固有透過度が $10^{-14}m^2$

オーダー以下で外気からの流入が相対的に小さければ、空隙の容積は誤差±10%以内でほぼ正しく評価できることが確認された。

・吸引空気流量時系列を詳しく解析したところ、吸引した空気を

イ) 測定区間と連結した空隙内を満たしていた空気

ロ) 様々な経路を通じた外気からの流入

ハ) 測定区間に存在していた空気

に分離できることがわかった。

・原位置測定結果を用いて原位置岩盤の空隙容積を算定し、真空透気試験で得られた固有透過度等と比較することで岩盤の状況をより詳細に評価できる可能性を示した。

・測定区間と連結している空隙の容積は、堅硬な花崗岩と多亀裂性の頁岩でいずれも1ℓ以下であったが、頁岩のほうが若干大きいという結果を得た。固有透過度分布のみからは判別できない亀裂の多少を空隙容積を計算することによってある程度表現した。

・自然の岩盤斜面では深度10mまで固有透過度、空隙容積ともに大きく、奥まで亀裂が開いているとが示唆された。

今後は、空隙容積と他の物性値との比較し、その意味をより明確にしてゆく所存である。また岩盤斜面等のゆるみの進行した岩盤に適用するためには、外気からの流入が大きい場合の空隙容積評価手法を確立する必要がある。

謝辞：室内実験にあたっては、サンコーコンサルタント株式会社萩原育夫氏に御協力頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 水戸義忠：節理分布性状の確率モデルを用いた節理性岩盤の解析に関する基礎研究，早稲田大学博士論文，1993.
- 2) 亀和田俊一，遠藤努，西垣好彦，杉江剛史：ポーリング孔壁画像処理手法とその解析について，*応用地質*，vol.36, No.6, pp.49-57, 1994.2.
- 3) 菊地孝吉，三室俊昭，小林隆志，水戸義忠：実岩盤の節理内流れに関する実験と考察，*土木学会第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集*，pp.381-385, 1989.
- 4) 寺戸康隆，中川誠司，米田俊一，塩崎功，大西有三，中川浩二：亀裂性岩盤におけるグラウト侵入状況のはぎ取り調査，*土木学会論文集*，第589号/III-42, pp.55-66, 1998.3.
- 5) Sugawara, K., Obara, Y., Kaneko, K. and Koike, K.: Visualization of three-dimensional structure of rocks using X-ray CT method, *Proc. of the 1st ARMS, Vol.2, Soeul, Korea*, pp.769-774, 1997.
- 6) Pyrak-Nolte, L. J., Montemagno, C. D. and Nolte, D. D.: Volumetric imaging of aperture distributions in connected fracture networks, *Geophysical Research Letters*, vol.24, no.18, p2343-2346, 1997.
- 7) 西山孝，楠田啓，北川元紀：蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出，*資源・素材学会誌* vol.106, No.10, pp.19-25, 1990.
- 8) 西山孝，楠田啓，陳友晴，寺田道直，蛭子清二，萩森健治：蛍光法とポアホールテレビジョンシステムを用いた孔壁の割れ目の抽出，*応用地質*，Vol.36, No.6, pp.46-51, 1996.
- 9) 中山昭彦，山田文孝，打田靖夫，川谷健，櫻井春輔：岩盤ゆるみ評価のための真空透気試験，*土木学会論文集*，No.575/III-40, 9-24, 1997.
- 10) Pyrak-Nolte, L.J., Nolte, D.D., Myer, L.R. and Cook, N.G.W.: Fluid Flow through Single Fractures, *Proceedings from Rock Joints, International Conference, Loen, Norway, Pubs. A.A. Balkema (Rotterdam)*, pp.405-412, 1990.

(1998.5.12 受付)

ESTIMATION OF THE PORE VOLUME IN ROCK MASS BY AIR VACUUMING

Fumitaka YAMADA, Akihiko NAKAYAMA and Shunsuke SAKURAI

Method of estimating the pore volume in rock mass has been described. The pore volume is obtained by using the data of the "vacuum-permeability test" which is a method of detecting the loosened zone in rock mass from the air permeability distribution characteristics. To get the pore volume, the airflow rate and the pressure reduction in test section are analyzed during the field measurements and the calibration test executed within the highly sealed steel pipe. The reliability of this method has been confirmed by laboratory test, and some examples of field measurement have been shown.