

土 木 研 究 所 資 料

エアートレーサー試験による 岩盤斜面の亀裂調査マニュアル(案)

平成15年 1 月

独立行政法人 土木研究所
材料地盤研究グループ 地質チーム

Copyright © (2003) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, not transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P. W. R. I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

エアートレーサー試験による 岩盤斜面の亀裂調査マニュアル (案)

材料地盤研究グループ 地質チーム	上席研究員	脇坂 安彦
	主任研究員	佐々木靖人
	主任研究員	阿南 修司
	研 究 員	大谷 知生*1
	交流研究員	高橋 伸尚*2

要旨

本報告は、土木研究所地質チームが開発したエアートレーサー試験による岩盤斜面の亀裂調査マニュアル(案)である。エアートレーサー試験とは、岩盤表面やボーリング孔などにある岩盤中の特定の開口亀裂に、煙・ガス・熱気・粉体などの空気を媒体とするトレーサー(追跡子)を、強制的に、または自然の空気の流れに任せて送り込み、そのトレーサーの流入・移動・流出状況を面的に計測・観察することにより、岩盤中の開口亀裂の分布や性状を評価する試験をいう(特許出願公開番号:特開2001-152778 岩盤中の亀裂探査方法)。本報告では、本試験の試験方法、試験結果の解析・評価方法等をマニュアル化するとともに、ケーススタディなどの参考となる資料をまとめた。

キーワード: エアートレーサー試験、岩盤斜面、岩盤崩壊、亀裂、開口亀裂、ゆるみ、斜面安定

*1 現 国土交通省国土地理院

*2 平成11年度建設省土木研究所環境部地質研究室交流研究員(現(株)荒谷建設コンサルタント,故人)

はじめに

本報告は、独立行政法人土木研究所地質チームが開発したエアートレーサー試験（特許出願公開番号：特開2001-152778 岩盤中の亀裂探査方法）の調査マニュアルである。

エアートレーサー試験とは、岩盤の開口亀裂の中に煙やガスなどの空気を媒体とするトレーサー(追跡子)を、強制的に、または自然の空気の流れに任せて送り込み、そのトレーサーの移動・流出状況から、岩盤中の開口亀裂の連続性・方向性・分布・開口度、ひいては岩盤全体のゆるみ状況や安定性などを面的に推定する手法である。

本試験の開発目的は、岩盤斜面の安定性調査を高度化することである。岩盤斜面の安定性は、岩盤内部の潜在的な開口亀裂の有無やその分布に支配される。過去に大惨事となった北海道の豊浜トンネル岩盤崩落事故においても、このような微細な亀裂の分離が原因の重要な素因であることが事故後に認められている。ところがこのような開口亀裂の多くは開口幅数mmから大きくても数cm程度で、通常の地質調査ではなかなかその分布を把握することは困難であった。最近よく用いられる調査にボーリング孔壁のテレビカメラ観察があるが、このような手法でも局所的に開口亀裂の存在が確認できるのみであり、開口亀裂の連続性を確認することは不可能であった。これに対しエアートレーサー試験は、岩盤斜面中の開口亀裂の連続性を実際に確認できるおそらく唯一の手法として位置付けられる。なお、本手法は、岩盤斜面以外にも、開口亀裂が関与する多くの問題、例えばダムの貯水に伴う地下水の挙動の推定などにも活用可能と考えられる。

本手法は原理的には非常に簡便な手法である。しかしその一方で、岩盤中の亀裂分布は複雑であるため、試験の結果を解釈するためには、総合的な地質的判断が必要とされる。そこでここでは本試験が現場において適切かつ効果的に活用されるように、エアートレーサー試験の実施方法や試験結果の解釈の方法を、マニュアルとして整理した。また、利用者の参考となるように、本マニュアルには過去のいくつかの調査事例も盛り込んだ。本マニュアルが様々な現場での岩盤調査の効率化や調査の確実性の向上に資することができれば幸いである。

本試験の事例は未だ限られており、また地質も多様であることから、本マニュアルが適用できないような現場もあると推定される。このような場合は、土木研究所地質チームに相談いただければ幸いである。

なお、本試験法のうち、煙・熱気・粉体などにより可視化可能な方法については特許公開中であり、試験の実施にあたっては手続きが必要である。受付は独立行政法人土木研究所技術推進本部（TEL:029-879-6800）において行っている。

目 次

はじめに

マニュアル（案）編

1. エアートレーサー試験の定義	1
2. エアートレーサー試験の目的	2
3. 対象岩盤	4
4. 試験法の細分類	5
5. 試験装置の構成	7
6. 試験手法	14
6.1 事前の留意事項	14
6.2 試験前の調査	14
6.3 試験法の選定方法と試験機器・観測機器等の配置方法	18
6.4 試験手順	26
6.5 試験中の調査	27
6.6 試験後の調査	28
7. 試験結果の整理	29
8. 解析・評価	32
8.1 解析・評価の目的と方法	32
8.2 地質図学的な評価法の手順	33
8.3 流速・流量等の解析による評価法の手順	34
8.4 地質総合解析的な評価法の手順	37
9. とりまとめ	38
9.1 とりまとめの項目	38
9.2 調査概要	38
9.3 試験対象岩盤の性状	38
9.4 試験位置および試験方法	39
9.5 試験結果	39
9.6 その他の調査結果	39
9.7 解析方法および解析結果	39
9.8 評価およびとりまとめ	40
参考文献	41
索引	42
参考資料編	
ケーススタディ	45
おわりに	

マニュアル（案） 編

マニュアル(案)は、以下の構成となっている。

1. 枠書き部

マニュアル部本文。

2. 【解説】部

マニュアルの解説。マニュアル本文の下に掲載。

3. (参考)部

マニュアルや解説部において示されている数値等の裏付けとなるデータや、試験実施において多少の参考となると思われる生資料等。各節の末尾に掲載。

1. エアートレーサー試験の定義

1. エアートレーサー試験の定義

エアートレーサー試験とは、岩盤表面やボーリング孔などにある岩盤中の特定の開口亀裂に、煙・ガス・熱気・粉体などの空気を媒体とするトレーサー(追跡子)を、強制的に、または自然の空気の流れに任せて送り込み、そのトレーサーの流入・移動・流出状況を面的に計測・観察することにより、岩盤中の開口亀裂の分布や性状を評価する試験をいう(特許出願公開番号:特開2001-152778 岩盤中の亀裂探査方法)。

【解説】

地下水を媒体とする手法にトレーサー試験があるが、エアートレーサー試験は空気を媒体とすることが特徴である。トレーサーとしては、煙・ガス・熱気(冷気)・粉体のいずれでもよいが、通常は煙を用いている。ダブルパッカーを用いて特定の亀裂にトレーサーを送り込めることも特徴である。

なお、本試験法のうち煙・熱気・粉体などにより可視化可能な方法については特許公開中であり、試験の実施にあたっては手続きが必要である。受付は独立行政法人土木研究所技術推進本部(または地質チーム)において行っている。

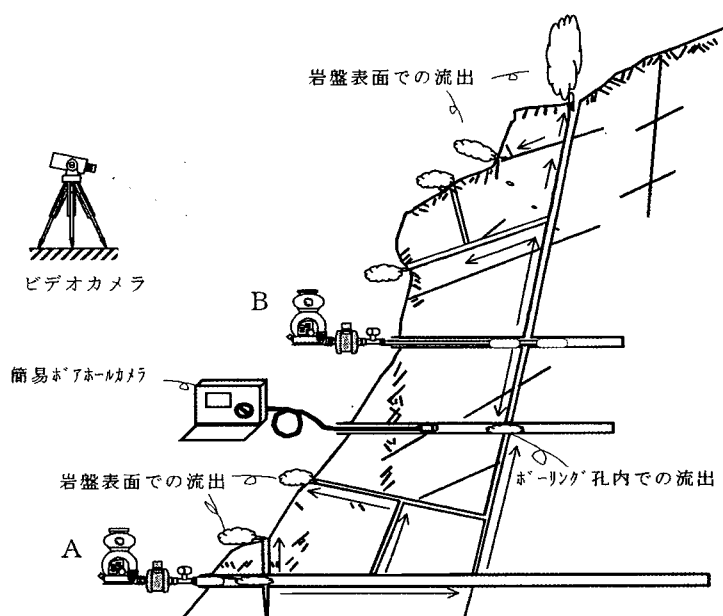


図1-1 エアートレーサー試験の概念図

(A: ボーリング孔口から圧入させている例)

(B: ダブルパッカーを用いて圧入させている例)

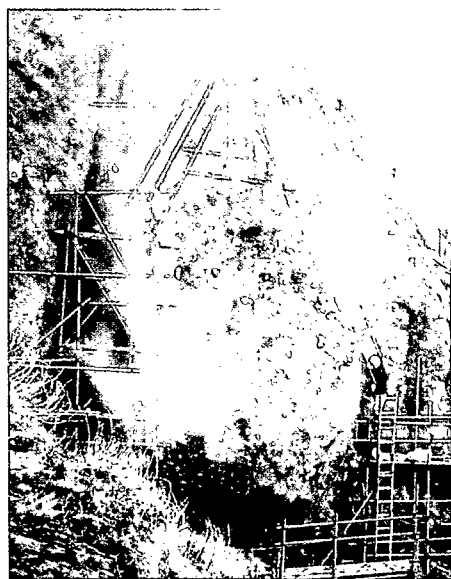


写真1-1 試験の状況

2. エアートレーサー試験の目的

2. エアートレーサー試験の目的

エアートレーサー試験の目的は以下のような段階に分けられる。

- ① 開口亀裂の連続性の確認ならびに開口亀裂の分布の推定
- ② 開口亀裂の規模や性状の推定
- ③ 岩盤（斜面）全体としてのゆるみの範囲、ゆるみの程度、安定性等の推定

【解説】

エアートレーサー試験の目的は、比較的単純な目的から、複合的・総合的な目的まで、順に①～③のような段階に分けられる。各目的の内容と、その目的を実現するための主な手法は以下のとおりである。

① 開口亀裂の連続性の確認ならびに開口亀裂の分布の推定

調査目的とする一つまたはいくつかの開口亀裂が、連続性を持っているかどうか確認するもの、また開口亀裂の3次元的な分布を推定するものである。

開口亀裂の連続性の確認方法は、基本的には流出箇所の目視確認による。具体的には、流出箇所の分布と、地質調査による岩盤表面やボーリング孔の亀裂分布の重ね合わせによって、地質図学的に開口亀裂の連続性を確認または推定する。また、3次元的な開口亀裂の分布の推定方法も同様であるが、場合により流入ポイントを少しずつ変えてエアートレーサー試験を繰り返す方法(エアートレーサー試験繰り返し法)によって、同じく地質図学的に推定するのが一般的である。

例えば、ボアホールテレビカメラで岩盤斜面の背後に高角の開口亀裂が確認されたような場合、これが上部や下部まで連続するかどうかによって岩盤斜面の安定度が大きく異なる。このような場合には、この特定の開口亀裂を対象にエアートレーサー試験を行って上部露頭などからトレーサーの流出があるかどうか目視などで確認したり、上方や下方に別なボーリング孔を掘削して類似の深度に開口亀裂が存在するかどうか確認した後にエアートレーサー試験でそれらの開口亀裂間にトレーサーが流出することを上記ボーリング孔内でボアホールテレビカメラなどで確認する、といった方法が考えられる。このような方法によって、開口亀裂が基本的に連続するかどうかを確認することができる。ただしその開口亀裂が単一の亀裂面をもって連続するのか、それとも複数の亀裂面が連結することによってトレーサーが流出しているのかの判断が難しい場合もある。このような場合は、エアートレーサー試験繰り返し法を用いたり、下記②の方法を併用するとよい。

② 開口亀裂の規模や性状の推定

開口亀裂の岩盤内部での規模・広がりや目詰まりの有無など、亀裂の性状を推定するものである。

①の方法に加えて、流速や流量を定量的に測定し、経験的・定性的に判断するか、流体力学的なシミュレーションを行う方法がある。後者の場合の最初のモデリングは、①の方法により行い、流量や流速を再現できるようにモデルを修正することで亀裂の性状を推定する。

③ 岩盤（斜面）全体としてのゆるみの範囲、ゆるみの程度、安定性等の推定

上記①～②の結果を総合的に考慮してゆるみの全体的な進行度、ならびに進行度から判断される斜面の安定性を推定するものである。

ゆるみの範囲は、ある程度以上の規模をもつ開口亀裂の分布により判断される。ゆるみには、図2-1のようないくつかのタイプがあるので、開口亀裂の分布パターンがこのようなゆるみタイプに合致するかどうかについても検討してゆるみ範囲を推定する必要がある。

ゆるみの程度は、一般には数 mm 程度の開口亀裂が散見される程度の場合はゆるみが比較的小さく、数 cm 以上の開口亀裂が散見される場合はゆるみの程度が大きいとみなされる場合が多いが、単純に開口亀裂の規模だけでなく、岩盤斜面の規模や変形モードなどによっても異なっており、幅 1 m を超える開口亀裂があっても現在は安定していると判断される場合もある。エアートレーサー試験のみではこのようなゆるみ全体の進行度や安定性を判断することはできないので、他の地質調査結果を含めて地質技術者が総合的に判断する必要がある。

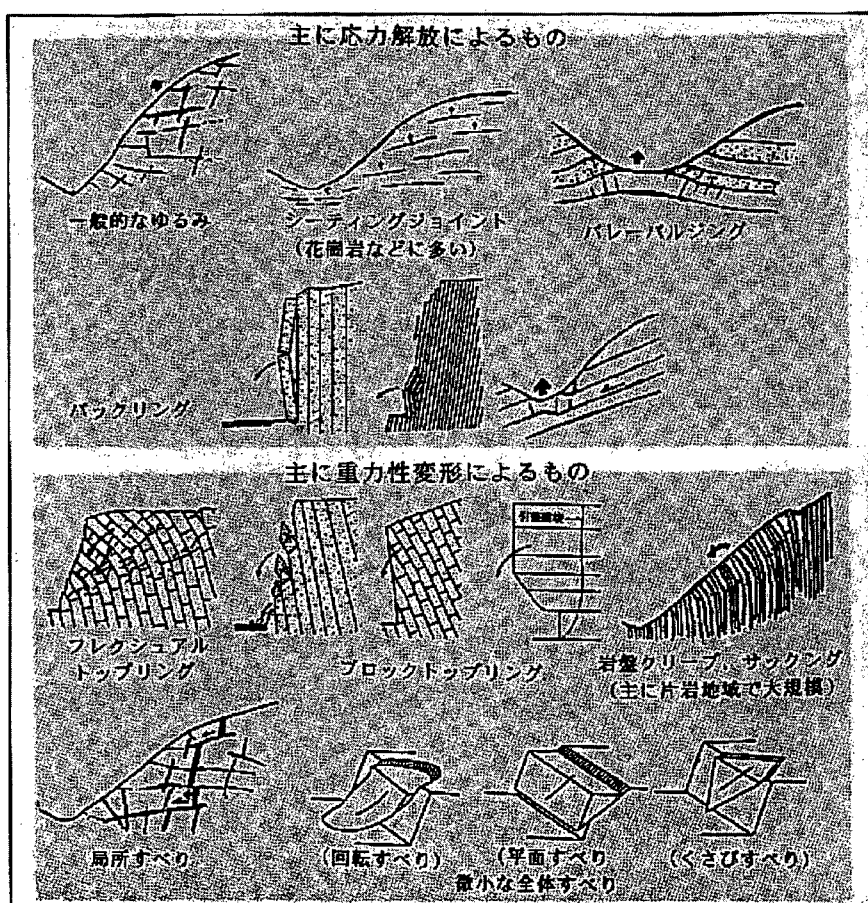


図2-1 ゆるみの分類例 (佐々木(1999)による)

3. 対象岩盤

3. 対象岩盤

対象岩盤は、亀裂の存在する岩盤、ないしは亀裂の存在する可能性のある岩盤とする。対象とする開口亀裂の規模は、一般に mm オーダーから数 m オーダーである。また、対象岩盤の規模は、数m～100 m 程度である。

【解説】

エアートレーサー試験は開口亀裂の連続性を調査する方法であるため、土質地盤や亀裂の存在しない軟岩には適していない。

開口亀裂の規模は、これまでの事例調査では幅 1～2mm 程度でも流出してきた事例がある。しかしその場合の移動距離は最大数 m 程度である。逆に開口幅数 10cm 以上の場合は、強制的にトレーサーを送り込む方法では試験困難な場合が多いので、一般には岩盤内外の温度差により発生する自然の空気の流れを用いて試験の方が良い。しかしこの場合でも過去の事例では開口幅 2 m 程度までしか経験しておらず、それ以上の幅を持つ開口亀裂での試験の可能性は不明である。

対象岩盤の規模については、過去の実施例は数 m～100 m 程度であるため、最大 100 m 程度としているが、条件によってはそれ以上試験可能な場合も考えられるので、適用の検討にあたっては現場の条件を十分観察の上判断する。

4. 試験法の細分類

4. 試験法の細分類

エアートレーサー試験は、トレーサーの流入方式（流入原理と流入位置）により細分類される。

まず、トレーサーの流入原理によって以下の方法に細分類される。

①圧入法

岩盤内に強制的にトレーサーを圧入させる方法。

②自然流入法

岩盤内外の温度差によって自然に発生している空気の流れに任せてトレーサー流入させる方法
また、トレーサーの流入位置によって、以下のように細分類される。

イ. 岩盤表面式

岩盤表面の亀裂に直接トレーサーを圧入または自然流入させる方式

ロ. 孔(坑)口閉塞式

ボーリング孔(または調査坑)の孔(坑)口を閉塞して圧入または自然流入させる方法。

ハ. ダブルパッカー式

ボーリング孔(または調査坑)の2箇所を閉塞し、その間の特定の区間(亀裂)のみに圧入または自然流入させる方法。

上記の中で、岩盤表面から圧入させる方法やボーリング孔口のみを閉塞させる方法を総称して「簡易エアートレーサー試験」といい、ダブルパッカー式で特定の区間・特定の亀裂に圧入させる場合を「区間エアートレーサー試験」という。

また、トレーサーの流入ポイントを段階的に変えながらエアートレーサー試験を繰り返す方法を「(エアートレーサー試験) 繰り返し法」という。

【解説】

試験法は、トレーサーの流入方式(流入原理、トレーサーの流入位置など)、トレーサーの種類などによって様々な分類が可能であるが、最も基本となるのはトレーサーの流入方式（流入原理と流入位置）である。これらの流入方式により、試験結果とその解釈方法が大きく異なる。トレーサーの種類については、試験結果や解釈方法が異なる場合もあるが、流入方式ほどの影響はもたないため、ここでは流入方式を基本に細分類を行った。



写真4-1 ボーリング孔を用いた圧入法による試験状況

細分類された試験法の名称は、流入原理と流入位置の名称を組み合わせ、たとえば、「ダブルパッカー式圧入法」

のように、用いるとよい。

なお、トレーサーの種類を明示したい場合は、トレーサーの種類を流入原理の前につけて、

「ダブルパッカー式煙圧入法」

「エアートレーサー試験(ダブルパッカー式煙圧入法)」

「ダブルパッカー式煙圧入法によるエアートレーサー試験繰り返し法」

のように用いるとよい。

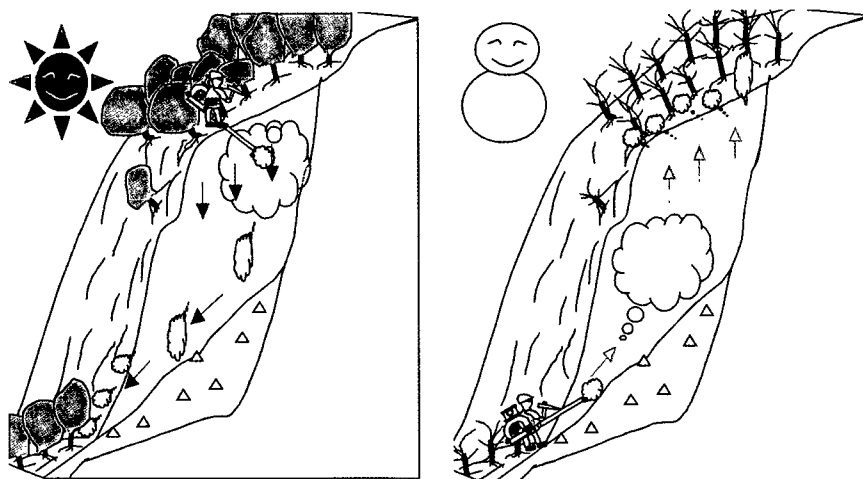


図4-1 自然流入法の概念図(内外温度差を利用)



写真4-2 自然流入法による試験状況

5. 試験装置の構成

5. 試験装置の構成

試験装置の構成は試験法の細分類により異なるが、一般的な構成は以下の部分からなる。

- ① 送風機
- ② トレーサーならびにトレーサー発生装置
- ③ トレーサー混成装置
- ④ 圧力・流量等計測装置
- ⑤ トレーサー移動管（パイプ、ホースなど）
- ⑥ トレーサー流出部及び岩盤取付器具（パッカーなど）

【解説】

試験装置の構成は、トレーサーの流入方式やトレーサーの種類により異なる。それぞれの機能や利用方法は以下の通りである。なお、いずれの場合も、トレーサーの性状（熱、煙、ガス、粉体等）によって、安全性と耐久性を損ねることのないような素材（耐熱性、耐燃焼性、防爆性など）を用いる必要がある。

① 送風機

空気を岩盤内に圧入するための機器。したがって自然流入法の場合には不要である。通常は送風量ならびに送風圧力の大きいエンジン式送風機（農業用薬剤散布機などを改造したものなど）を用いているが、出力の安定性が問題となる場合もあるため、必要に応じて電気式の送風機を用いてもよい。なお、送風機の送風量と静圧の関係は曲線で表され、抵抗が大きくなると静圧が上がり送風量が下がるという関係がある。エンジン式の場合、送風機のファンの回転数を制御すること

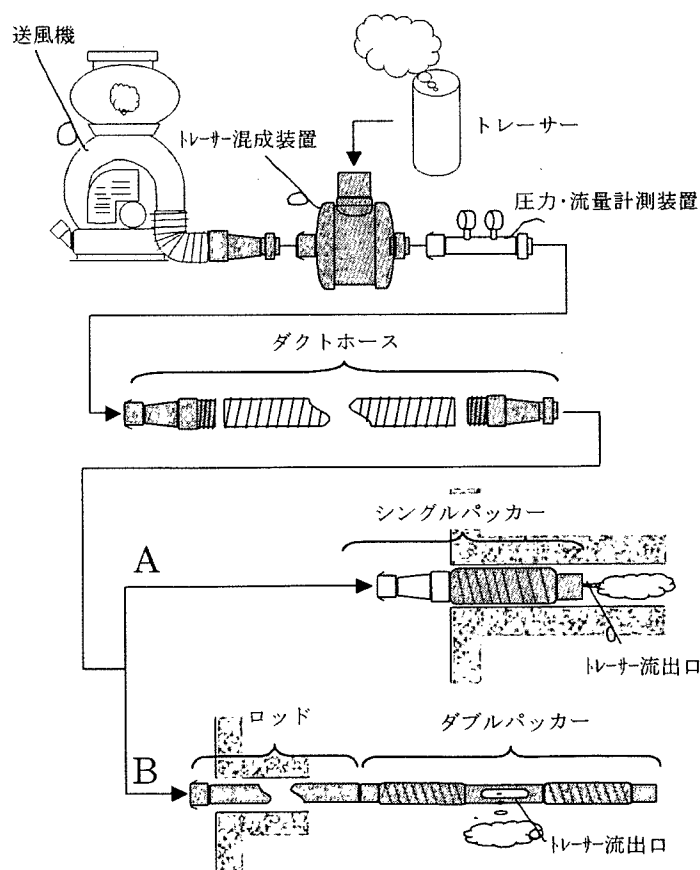


図5-1 エアートレーサー試験装置の構成の例

A：孔口閉塞式（簡易エアートレーサー試験）用
送風機、煙発生装置、シングルパッカー

B：ダブルパッカー式（区間エアートレーサー試験）用
送風機、煙発生装置、ロッド、ダブルパッカー
の組み合わせ

で出力を変更することができる。通常使用しているエンジン式送風機は最大流量と最大圧力がそれぞれ $7\text{m}^3/\text{min}$ 、 8.5kPa 程度である。

- ② トレーサーならびにトレーサー発生装置
 トレーサーそのもの（煙、特定のガス、熱気、粉体など）、およびトレーサーとなる物質等を発生させる装置である。例えば煙の場合は発煙筒などがそれにあたる。なお、トレーサーとなり得るものとして煙、熱、ガスなどがあげられる。これらについて予備実験等により評価したところ、一般的には煙が最も有利であることがわかった。各トレーサーの詳細、利用方法、利点ならびに欠点を参考 1 に示す。

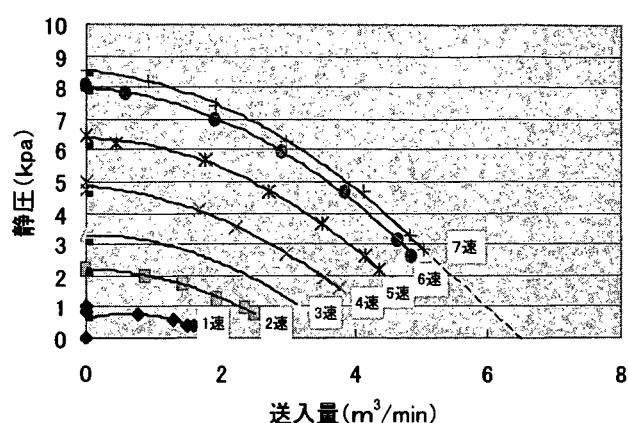


図 5-2 送風機の性能曲線の例

③ トレーサー混成装置

送風機から送られる空気を混合するための部分である。したがって自然流入法の場合は不要である。混成装置は、通常は金属性の容器に送風機からの空気の流入口と排気口、ならびにトレーサーの流入口が取り付けられているものを用いる。煙や熱気をトレーサーとする場合は、耐熱性容器を用いる。また容器にはトレーサーの逆流防止の蓋を設ける。なお、空気の流入口と排気口は直線状に配置し、また口元はできるだけ大きい方が送風における圧力減衰が少ない。

④ 圧力・流量等計測装置

トレーサー流入部の圧力・流量等の計測装置。自然流入法の場合は圧力・流量については不要であり、また、トレーサーの種類によってはこのほかに、ガス濃度や温度などの計測項目が必要である。これらの計測装置は、できるだけ正確に測定できるようにシステム構成の中で可能な範囲でトレーサー流出部（岩盤）の近くに配置するのがよい（図-3ではトレーサー混成装置の後に接続されているが、現場状況が許せば、パッカーの手前などのほうがよい）。ただしトレーサーの煙は計測機器を通過する際に付着し、計測値を狂わせることがあり、注意が必要である。

流量計や圧力計による測定の制約上、計測器の前後にある程度直線的な管路（2 m程度）が必要であることが多い（流量計はオーバル式、超音波式、差圧式など全ての形式において、直前に管口径の15倍以上、直後に5倍以上の整流区間が必要となる。ロッド径が10 cmの場合には前後で2 m以上となる）ので、トレーサー流出部の近くに配置することが困難な場合は、事前にシステムの圧力損失量などを測定して補正すると良い。煙や熱気をトレーサーとして用いる場合は耐熱性・耐燃焼性を考慮すること。

⑤ トレーサー移動管（ダクトホース、ロッドなど）

混成されたトレーサーを岩盤まで移動させる管路。移動管の空気抵抗は管径の2乗に反比例して大きくなるため、管径はできるだけ大きいほうがよい。また圧力損失の関係上、移動管はできるだけ短く、内壁が滑らかで、直線的な方がよい。さらに、移動管が測定途中で変形すると測定条件が大きく変化することがあるので、測定中はできるだけ変形しないようにする必要がある。煙や熱気をトレーサーとして用いる場合は耐熱性・耐燃焼性を考慮すること。

⑥ トレーサー流出部及び岩盤取付器具（パッカーなど）

トレーサーが流出するノズルと、それを岩盤に固定するとともにトレーサーの漏出を防ぐ器具である。岩盤表面の開口亀裂に圧入する場合は一般に扁平なノズルを用い、ノズル周辺の必要な範囲の開口亀裂を粘土などで閉塞する。ボーリング孔で試験する場合は、ボーリング孔用のパッカーで閉塞するのが一般的であるが、孔口閉塞式の場合はシングルパッカーではなく粘土などで簡便に閉塞する方法でもよい。ダブルパッカー式の場合は市販のダブルパッカーでは適当な構造のものがないので、エアートレーサー試験用に機器を製作する必要がある。参考2に標準的なダブルパッカーの仕様を示す。

(参考 1) 各トレーサーの利点と欠点

a. 煙

煙をトレーサーとした場合、流出地点の観察は目視やビデオカメラを用いて行う。トレーサーの流出状況を目で確認でき、機械構成も簡略で軽量化が図りやすいなどの利点がある。しかし煙の発生量や濃度を物理量として測定し難く、定量的な評価は難しい。また、発煙筒を用いる場合、熱や炎が発生するので耐火・耐熱構造の機械を製作しなければならないことなどの欠点があげられる。煙は、発煙筒が活用できるほか、煙状のものとしては重質炭酸カルシウムなどの超微粉体が活用できる。発煙筒は数社から様々な種類のもの発売されている。最も安価で入手しやすいものは自動車用緊急保安円筒である。しかし自動車用の発煙筒は遠くから視認するための赤色炎の発生が主目的であり煙の量は少ない。このほかに業務用のものがあり、発煙量が非常に多く視認性が高い一方、試験においては火災として誤認される可能性もあり注意が必要である。

b. 粉体

微粉体は無公害、粉塵爆発の起きないなどの要件を満たすものであれば、様々なものが利用可能である。比較的安価で安全なものとして重質炭酸カルシウムの超微粉体がある。しかしこれを用いて予備実験を行った結果、凝集しやすい欠点があるほか、発煙筒の煙と比較して流出地点の煙の濃度が薄く認識しづらく、実用上は発煙筒の方が有効であった。

c. ガス

ガスをトレーサーとする手法はエアートレーサー試験以外にも、不活性ガスをトレーサーとして用いる透気試験や、匂いガスを用いたトレーサー試験など、いくつかの方法が考案されている。ガスをトレーサーとした場合、ガスセンサーを用いて流出を確認するのが一般的である。予備試験として CO_2 を用いて試験した結果、利点として、濃度による定量的な測定ができること、トレーサーに空気との比重差がある場合にはこれを用いて特定方向の長距離の調査が可能な場合があることがわかった。しかし欠点として、ガスは目視できないので流出地点の探索は不可能で、あらかじめ別の方法（煙など）でセンサーの位置を決める必要があること、ガスを多量に供給することが困難なこと、ガスセンサーは高価であり多くの数を設置することは困難であること、センサーは亀裂に直接設置しなければならず測定範囲も限られること、トレーサーが直接亀裂を通じてきたものか地表面に沿って流れてきたものかを判断することが困難な場合があること、などがあげられる。

d. 熱・水蒸気

熱をトレーサーとする場合は、流出地点を熱赤外映像で観察する。利点としては面的にデータが得られることや、熱映像の変化として定量的な評価が可能なことが挙げられる。しかし欠点としては岩盤による熱の吸収が大きく、開口量の小さい亀裂への適用は容易でないことが挙げられる。例えば、予備実験でボーリング孔内に 80 度の熱風を 30 分間送り続けたが、熱映像の変化はボーリング孔周囲の数 10cm の範囲でしかあらわれず、煙をトレーサーとした場合に煙が盛んに流出した地点（ボーリング孔から 2 m 程度の地点）でもほとんど変化が認められなかった。

ボイラーで発生させた水蒸気を活用する方法では、熱風よりも熱赤外線映像装置で検出しやすく

有利であるが、10m³/min 程度以上の量で 120℃以上の飽和蒸気を発生させ続けるボイラーはいずれも 100kg 以上の重量があり、現地作業上適用できるものではなかった。

(参考2) ダブルパッカーの仕様の例 (土木研究所で試作した際の製作仕様)

1) ダブルパッカー部

φ66mm、φ77mmボーリング孔で利用できるものとする。

エアーパーカー方式で、孔口側より、パッカーA、ストレーナー、パッカーB よりなる。

接続は角ネジを用いる。

(パッカーの仕様)

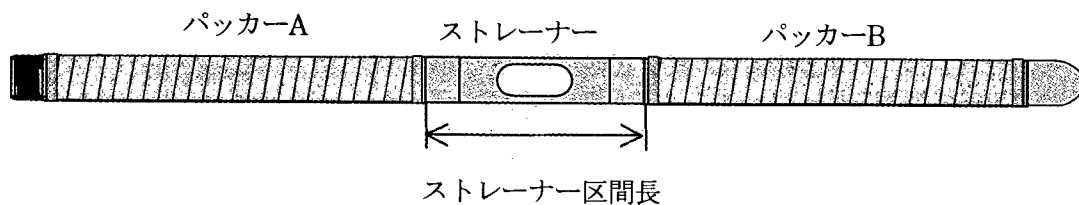
エアータ取入口は管内とする。

パッカーの膨張は圧縮空気を用いる。

パッカー長は 500mmとする。

外径 60mm、内径 50mm程度とする。

パッカーA、パッカーB は同一規格とする。



参考図 2-1 ダブルパッカーの仕様

(ストレーナーの仕様)

ストレーナーは 30cm用と 50cm用を各 1 本作る。

ストレーナー口は片側のみの一箇所であるべく大きな穴とする。

2) ロッド

1m、2mのものを各 10 本製作する。

本体はアルミ製とする。

ロッド接続部は真鍮製とし角ネジを用いる。

内径 50mm、外径 60mm程度とする。



参考図 2-2 ロッドの仕様

3) 接続管

試験装置側は2インチネジ、ダブルパッカー側は角ネジを用いる。



参考図 2-3 接続管の仕様

4) 付属品

エアパッカーを膨らませるために必要なエアチューブ、チューブ接続用に必要なユニオンよりなる。

6. 試験方法

6. 1 事前の留意事項

エアートレーサー試験の前には、地権者・地元消防機関と連絡を取り、山火事誤認防止に努めるとともに、安全に十分配慮する。

【解説】

煙を用いたエアートレーサー試験では、大量の煙が出ることがあるので、山火事と誤認されることがある。したがって、地権者や地元の消防機関に事前に連絡・説明を行っておく。また、試験時においても、発煙筒の火による火災や火傷などに対し、安全に十分配慮する。

6. 2 試験前の調査

エアートレーサー試験の前には、以下の①～③を、また必要に応じて④～⑦を行って、調査地の微地形及び地質状況（弱層や開口亀裂の分布と性状等）を明らかにした上で、⑧について取りまとめる。

- ① 測量及び基図の作成
- ② 微地形判読
- ③ 地表地質踏査
- ④ ボーリング調査
- ⑤ ボアホールテレビカメラ観察
- ⑥ 地中風速測定
- ⑦ その他の調査
- ⑧ 不安定な範囲や不安定機構の推定

【解説】

エアートレーサー試験は、ある程度不安定と推定される箇所について開口亀裂やゆるみの状況の確認・検証のために行われる試験である。そのため、試験前には、不安定と推定される範囲、不安定化機構等を大まかに推定しておき、適切な試験機器配置・観測配置を選定できるようにする必要がある。

① 測量及び基図の作成

測量については、当該推定不安定箇所よりもやや広めの範囲について、不安定箇所の3次元的な形状がわかるように測量する。測量方法には、垂直空中写真による測量、斜め空中写真による測量、航空機やヘリコプターからのレーザープロファイラによる測量、地表からの通常の測量、地表からのレーザーを用いた3次元測量等があるが、岩盤斜面の調査においては急峻な斜面やオーバーハングした部分があることが

多いので、垂直空中写真だけでなく他の方法も併用した精度の高い測量を行うべきである。測量の必要な範囲は不安定箇所規模にもよるが原則として斜面上部方向は尾根まで、斜面下部方向は崩壊岩塊の推定堆積範囲（ $\approx 2H$ ）以上、斜面左右側はそれぞれ不安定箇所の幅程度、広めに図化する。測量の縮尺は不安定箇所規模によって異なるが、一般には亀裂分布を図化できるように 1/50～500 程度の縮尺の平面図とし、斜面が急傾斜ないしオーバーハングがある場合は必要に応じて斜め航空写真等による立面図や鳥瞰図を作成する。また、代表断面については地形断面図を作成する。

② 微地形の判読

空中写真判読や目視観察等により、不安定箇所付近の微地形判読を行う。特に弱層や開口亀裂の存在を示唆する線状の凹部、不安定箇所の存在を示すオーバーハング部・急斜面部・岩塔部、崩壊岩塊の堆積地形等を判読する。また、類似の不安定箇所が周辺に存在する場合は必要に応じて参考のために判読しておく。

③ 地表地質踏査

地表地質踏査では、露岩部の地質分布、亀裂分布、弱層分布、亀裂や弱層の性状（開口幅、弱層の幅や硬さ、連続性、ずれの方向や程度等）について観察する。特に開口亀裂については岩盤表面における3次元的な分布と性状、他の亀裂等との関係（前後関係、切りあいの関係など）を見逃しなくスケッチして平面図や断面図上等に図化する。その他の亀裂や弱層についても、走向傾斜とそのばらつき、弱層や亀裂の相互関係等を確認し、目視で確認できない範囲の亀裂の推定モデルを構築できるように整理する。

④ ボーリング調査

不安定箇所の防災上の重要度が高い場合には、必要に応じてボーリング調査やその他の有効と考えられる調査を行う。ボーリング調査は通常不安定と考えられる箇所の主測線上の中央部、ならびに必要に応じて同じく主測線上の上部や下部で行う。岩盤斜面が大きい場合には必要に応じて横方向の測線や主測線と平行な副測線を設ける場合もある。ボーリング孔の掘削角度は、地すべりなどでは鉛直ボーリングが多いが、急峻な岩盤斜面の場合には経済性および有効性等の観点から斜めまたは水平方向に掘削されることも多い。ただし斜めまたは水平に掘削する場合には孔壁の崩壊を生じやすいので、調査の効率性、岩盤状況、その後のボーリング孔の使用予定等を勘案して決定する必要がある。ちなみにエアートレーサー試験は鉛直孔・斜孔・水平孔のいずれでも試験可能である。

掘削深度は想定される不安定範囲に応じて決定する必要があるが、地すべりなどでは一般に堅岩と考えられる深度よりも5m程度深く掘削しておく必要があるとされている。その上岩盤斜面の調査においてはボーリングコアのみではゆるみ領域と真の堅岩の区別ができないことも多い。このため、少なくとも地質状況から考えられる堅岩線に対して、地すべりと同程度（5m程度）以上の余裕深度を持って掘削しておくのが望ましい。またエアートレーサー試験上も、ダブルパッカーの長さを考慮すると、測定したい開口亀裂の深度よりも2m程度ボーリング孔が深く掘削されている必要がある。

ボーリング調査では、岩盤の状況(風化状況その他)や亀裂の分布などをコア観察で確認する。特にすべり面と推定される弱層や亀裂があるかどうかをコアの亀裂面の観察等を含めて入念に行う。また、分離面となり得る開口亀裂を推定するために、酸化(風化)亀裂や亀裂密集部の有無についても確認しておく。

⑤ ボアホールテレビカメラ観察

ボーリングコアの観察のみでは開口亀裂の状況は不明であることが多いため、ボーリング調査を行う場合は原則としてボアホールテレビカメラ観察を併用する。

⑥ 地中風速測定

エアートレーサー試験の実施箇所では、外部の気温と岩盤内の温度の差によって、自然に空気の流れが生じていることがある。場合によっては開口亀裂から空気が地表に流出する、いわゆる風穴現象が見られる場合もある。このような自然の空気の流れの有無を確認しておくことは、エアートレーサー試験の計画や試験結果の解釈において重要である。開口亀裂などに対して人間が手をかざして、わずかにでも恒常的に空気の流れが感じられる程度(0.1~0.5m/s程度であることが多い)であれば、自然の空気の流れが発生しているとみなしてよく、明らかに風を感じるようであれば風速は0.5~2m/s程度であることが多い。調査地においてこのような風穴現象が見られる場合は地中風速測定を行っておくほうが良い。なぜならば送風機による人工的な送気の手数はこれらの風速より一般に大きいものの、送風機から約10m~数10m離れると人工的な空気の流れは急速に低下し、これらの自然な風の流れにかき消されることも多いからである。

地中風速測定は、原則として風速計により行う。

まず、岩盤表面の開口亀裂については、空気の流出や亀裂内部への空気の吸い込みがないかどうか、一般的な風速計により測定する。流出や吸い込みが見られる場合は、測定時の気温、流出する空気の温度、風速、現象の見られる箇所の分布、などを確認しておく。

調査地にボーリング孔がある場合はボーリング孔型の風速計を用いる方法があるが、このような風速計は特注品となるので、あまり一般的ではない(ボーリング孔型の風速計については土木研究所で開発している)。

⑦ その他の調査

その他、物理探査や物理検層、リモートセンシングなど、多くの調査方法があるが、現段階では必ずしも精度が高くないので、上記の調査方法を実施した上でさらに必要と考えられる場合に行うほうがよい。

⑥ 不安定な範囲や不安定化機構の推定

以上のような調査を行った上で、不安定化機構を推定し、不安定と推定される範囲を図化する。

不安定な範囲の推定は、まず、開口亀裂や重力性の可能性のあるずれのある弱層・亀裂などの分布を図化・確認した上で、そのような開口亀裂・弱層等によって取り囲まれる範囲、ないしはそのような開口亀

裂・弱層等が主として分布する範囲を特定する。次に全体としての移動の方向や移動のモード(すべり、転倒など)を確認し、この範囲が全体として重力性の不安定化を示すかどうか検討する。その結果、この範囲が重力性の不安定化によるものである可能性がある場合に、この範囲を基本的な想定不安定範囲とする。次にそのような不安定な範囲が上方や側方に拡大する可能性(不安定な範囲の背後に同じような方向性の亀裂が多く分布しているなど)がある場合には、そのような範囲も潜在的な不安定領域として、図化しておく。

不安定化機構の推定は、前述した全体としての移動方向や移動モードを確認した上で、不安定な状態に至ったと考えられる要因(例えば脚部浸食、下部の切土など)、不安定な状態がさらに悪化する可能性(例えば最近の劣化や変状の存在、開口亀裂への樹木の根系発達など)について検討し、不安定化機構と今後の不安定化可能性について整理する。

6. 3 試験法の選定方法と試験機器・観測機器等の配置方法

試験法の選定ならびに試験機器・観測機器等の配置方法の決定にあたっては、①調査対象領域の規模、②開口亀裂の規模、③開口亀裂の分布と性状、④気象条件、等を総合的に勘案して最適な場所に設定する。

【解説】

試験においては、流入させた開口亀裂から想定している開口亀裂まで(それが連続しているのであれば)確実にトレーサーが到達できるように試験法の選定や機器配置を行う必要がある。不適切な試験法や機器配置の場合、開口亀裂の連続性が乏しいのかトレーサーが単に到達できなかったのかが判別できないことにもなりかねない。

このようなことのないように、特に以下の項目について留意する必要がある。

① 調査対象領域の規模

調査対象領域の規模によって試験方法が異なる。トレーサーを流入させる箇所と想定流出箇所の距離が10～30m 以上の場合は、大容量のエンジン式送風機を用いても圧入法でトレーサーを十分な範囲に拡散させることができない場合が多い(参考3参照)。特に岩盤内部の温度と外気温の温度差が大きい季節は、岩盤内部の空気の移動速度が大きいため、その傾向が強い。したがって調査しようとする岩盤斜面の規模が数10m 以上でしかも10～30m 以内の間隔でボーリングが掘削されていない場合は、新たにボーリングを計画するか、自然流入法を主体に試験を計画する方がよい。ただし圧入法の適用範囲は開口亀裂の規模によっても異なり、また自然流入法では流入・流出の経路がある程度限られるので、やや規模の大きな岩盤斜面の場合には現地で事前に簡便な圧入法でトレーサーの拡散状況を確認して圧入法の適用可能性がないかどうか確認してから本格的な試験法の選定を行うとよい。

試験機器や観測体制についても、トレーサーの到達可能範囲を考慮して適切な距離を保って配置する。

② 開口亀裂の規模

亀裂の開口幅が数 10cm 以上の場合は、空隙の容量が大きすぎるために、圧入法でトレーサーを効果的に拡散させることができない場合がある。このような場合、トレーサーは岩盤内外の温度差によって生じる自然の空気の移動に伴って下方または上方のみに移動することがある。また、亀裂の開口幅が大きくなると外の風の影響も受けやすくなるので、トレーサーは上方に舞い上がったり下方に下りたりを繰り返すこともある。このような状態では効果的な試験ができない。このような場合は、自然流入法を用いて岩盤内の空気の流れの風上側（一般に夏季は上部、冬季は下部）から、しかも開口亀裂のやや深部（風の影響を受けにくいところ）にトレーサーを流入させる必要がある。

また、開口幅が 2~3mm 以下と小さすぎる場合も、亀裂壁面の空気抵抗が大きくなり、トレーサーが遠方まで到達しない場合がある（参考 4 参照）。

③ 開口亀裂の分布と性状

開口亀裂には、非常に連続的かつ直線的に伸びるもの（火山岩の冷却節理など）と、複数の開口亀裂が複雑に交差しつつ全体としてゆるみを生じているもの（古い堆積岩類や火成岩類、変成岩類など）がある。前者ではトレーサーは比較的遠方まで到達しかつ流出パターンも比較的単純なのに対し、後者では流入口周辺のみで複雑に流出しやすい。したがって試験機器・観測機器の配置は、そのような亀裂状況に応じて配置する必要がある。いずれにしても、簡易エアートレーサー試験などで大まかに流出範囲を確認してから手間を要する区間エアートレーサー試験を行ったほうがよい。

また、古い開口亀裂の中には、流入粘土が充填され、目詰まりを起こしているものもある。新しい亀裂でも、不安定領域の下半部にあるものや低角の亀裂は開口せず弱層状となっているものが多い。このように、空気が通りやすい状況にある開口亀裂は岩盤斜面の中でも比較的限られているので、亀裂の状況を事前にボアホールテレビカメラなどで確認してから試験機器や観測機器の配置を決定することが望ましい。ボアホールテレビカメラで確認することができない場合は、主として不安定領域の上半部をエアートレーサー試験の調査領域とするのがよい。

④ 気象条件

気象条件も試験法や試験機器・観測機器の配置を左右する大きな要素である。特に気象条件の中で重要なのは温度と風である。

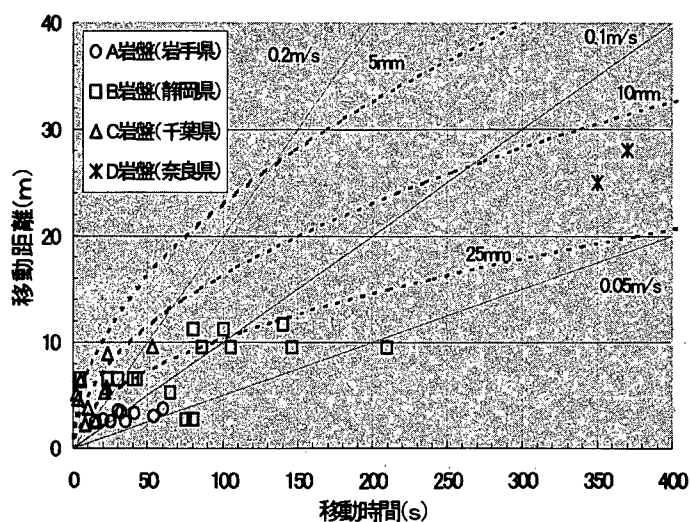
岩盤内部の温度は地域によっても異なるが平均して 6~15℃程度のことが多い。一方、外気温は 30℃以上からマイナスにまで大きく変化する。この内外温度差により、岩盤中には夏季には上部から下部へ、冬季は下部から上部への空気の移動（風）が発生する（参考 5）。この風は、大きい場合には風速 2~3 m/s に達することがある。このような風がトレーサーの運搬に大きな影響をもたらす。圧入法の場合は、このような風にトレーサーが対抗して周辺に拡散できるかどうかを検討して試験配置を決める必要がある。自然流入法の場合は岩盤内外の温度差を測定して、それに応じて流入口と想定流出領域（観測位置）

を設定する。なお、春季や秋季には、温度の日変化によって岩盤内の空気が昼間は下方に、夜は上方に移動することがあるので、このような日変化を利用して終日試験することによって効率的にデータを得ることもできる。

また、外部の風も、岩盤内の空気に影響を与える。経験的には、外部で風速数 m 以上の風が吹いているとき、岩盤表面付近の開口亀裂内の空気も相当の影響を受け、トレーサーが上方に舞い上がったり、下方に下りたりを繰り返すことがある。安定的な調査を行うためには、圧入法・自然流入法ともに風の弱い日に実施するのが望ましい。それが困難な場合は、自然流入法の場合には岩盤表面からある程度深い部分にトレーサー流入口を設置するのがよい。その方法としては発煙筒を棒や紐にくくりつけて岩盤中に下ろす方法や、圧入法を併用して強制的に開口亀裂奥に流入させる方法がある。

(参考3) 圧入法により調査できる範囲

参考図3-1は圧入法で行った主な現地適用実験の移動時間と移動距離の関係である(開口幅は数mm～数cm程度)。これによると、圧入法によるトレーサーの流速は移動距離が10m以下の場合はおおよそ0.1～数m/s程度であるが、移動距離が10mを超えるとおおよそ0.05～0.15m/s程度の速度に低下する。一方、自然の空気の流れは後述するように0.05～0.1m/s程度であることが多い。したがって、移動距離10m程度以上になると圧入法によるトレーサーの流速は自然の空気の流れよりも小さいものとなる可能性が高い。ただし一部の現場(奈良県)では移動距離30m近いにもかかわらず圧入法による流速が0.75m/s程度あるので、自然の空気の流れの状態によっては圧入法でも試験可能である可能性がある。このことから、圧入法により試験可能な調査領域の規模は10～30m程度と推定した。

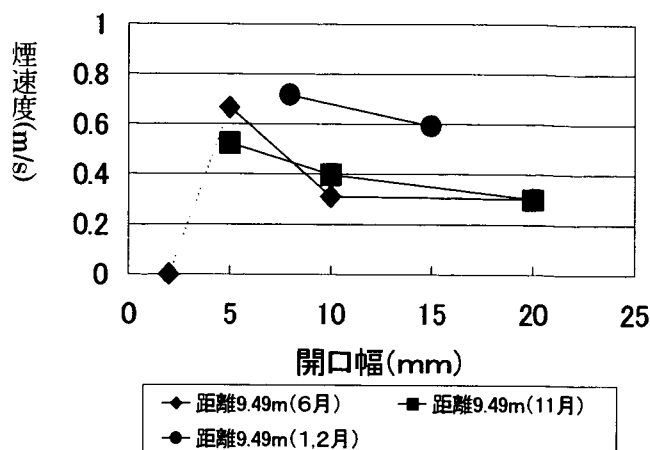


参考図 3-1 トレーサーを圧入する方法で得られた移動距離—移動時間の関係

この値はトレーサーを送る送風機の最大出力に相当する5～7 m^3/min とし、開口亀裂内の対流の少ない岩盤斜面での計測結果を使用した。点線は送風量の出力を5 m^3/min とし、移動距離に見合う円領域を仮定した場合の移動距離—時間の関係である。

(参考4) 開口幅と流速

室内模擬岩盤亀裂モデルを用いて平板モデルで開口幅と移動速度の関係を調べた結果(参考図4-1)では、開口幅が5mm~10mm以下では壁面抵抗により空気が流れにくくなり、開口幅が2~3mm以下では移動速度も小さくなった。また逆に5mm~10mm以上であれば逆に壁面抵抗の影響が小さくなるが開口亀裂内の体積が大きくなるため移動速度は再び小さくなる。その結果、トレーサーの移動速度は平均開口幅数5mm~10mm程度のときに最も速く、それ以外では開口幅が広い場合でも狭い場合でも遅くなった。



参考図4-1 室内試験による開口幅と煙の速度の関係

(木板を2枚重ねて高さ1.8m、長さ9.49m、開口幅可変の人工開口亀裂モデルを製作し、上下と左3方向をシールした上で左側の端部付近からトレーサーを流入したときの約9m先の右側の端部からの煙流出時間から煙速度を割り出した)

上記の結果は木板(コンパネ)を用いた室内実験の結果であるが、実際の岩盤ではどうであろうか。圧入法による現地調査の結果をみると、顕著にトレーサーが流出する箇所や流速の大きい亀裂はいずれも開口幅数 cm 程度の開口亀裂であった。すなわち室内実験よりもやや大きな開口亀裂で最大流速が生じているといえる。この理由として、実岩盤の開口亀裂面にはかなりの凹凸があり、これが空気抵抗になること、また単に亀裂面に凹凸があるだけでなくそのような面が左右ないし上下に多少ずれて存在することにより局所的に平均開口幅よりも極端に狭い部分が形成され、このような部分が大きな空気抵抗を持つこと、などが考えられる。また複数の亀裂の交差などにより空隙が平板よりもむしろチャンネル状になり、このチャンネルを大半のトレーサーが通過することにより、系全体としての空気抵抗が大きくなることも見逃せない。事実現地試験でのトレーサーの流出パターンは、開口亀裂に沿って面的に流出するというよりもむしろ、主として複数の亀裂の交差箇所からスポット的に流出することが極めて多い。この流出パターンは、岩盤中のトレーサーの流れの多くが、平板状ではなくチャンネル状になっていることを意味する。

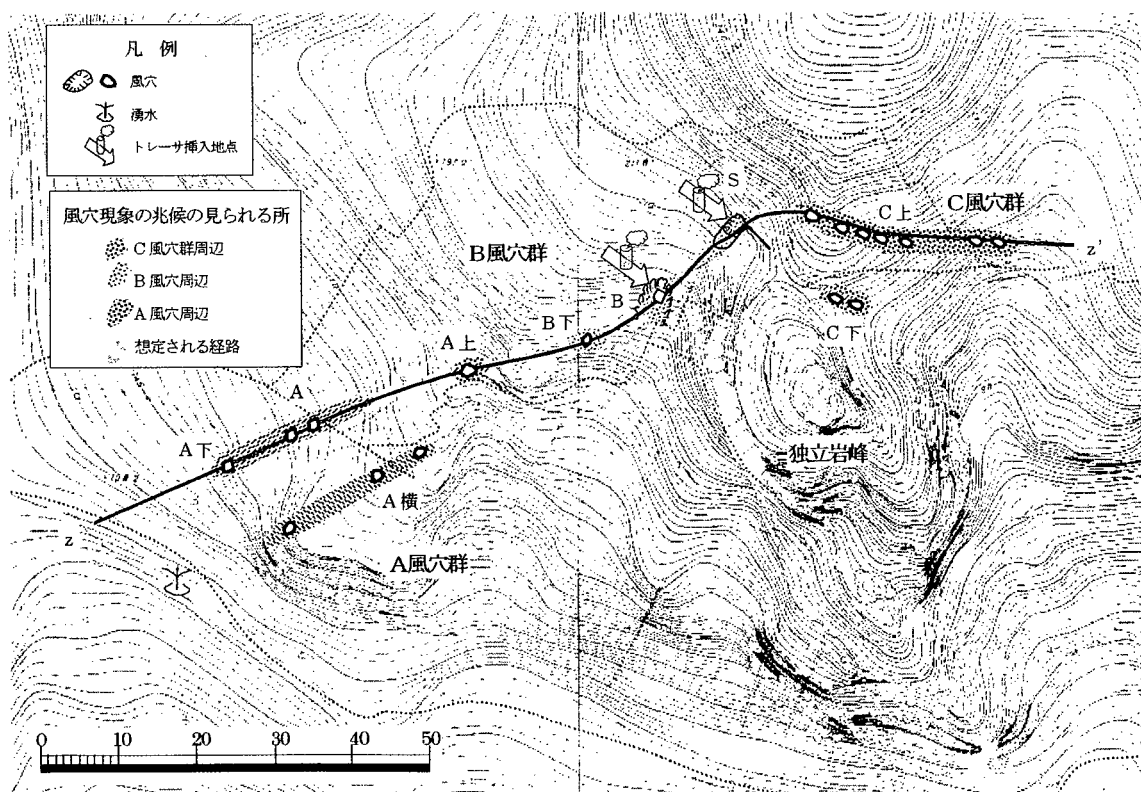
以上より実岩盤では、室内実験より大きな平均開口幅(平均開口幅数 cm 程度)で速度がピークになり、それより大きくても小さくても流速は小さくなると推定される。

(参考5)地中の風速

地中での自然の空気の流れについての観測例は非常に乏しい。ここでは新潟県にある岩盤斜面での例を示す。参考図5-1は新潟県にある岩盤斜面である。この岩盤斜面は新潟県阿賀野川沿いに存在する流紋岩の貫入岩体で、突出した地形を形成している。この岩体には独立岩峰、山腹の塔状や板状の突出岩体などが多数見られ、国道が直下を通過するため、危険箇所を指定し、各種のモニタリングや対策が施されている。

この斜面では比較的下位のA風穴群、中位のB風穴群、S風穴、上位のC風穴群があり、S風穴とB風穴は1m程度大きく開口しており、C風穴では30cm程度、A風穴は表土に覆われているものの数cm程度以上の穴が見られる。それぞれの風穴は季節によって空気の流入・流出が変化することが観測されており、風穴周辺では最大2~3m/sのかなり強い風も観測できる。風穴はその深部が開口亀裂になっていると考えられ、この風穴現象は大規模な岩盤ゆるみによって生じていると考えられる。

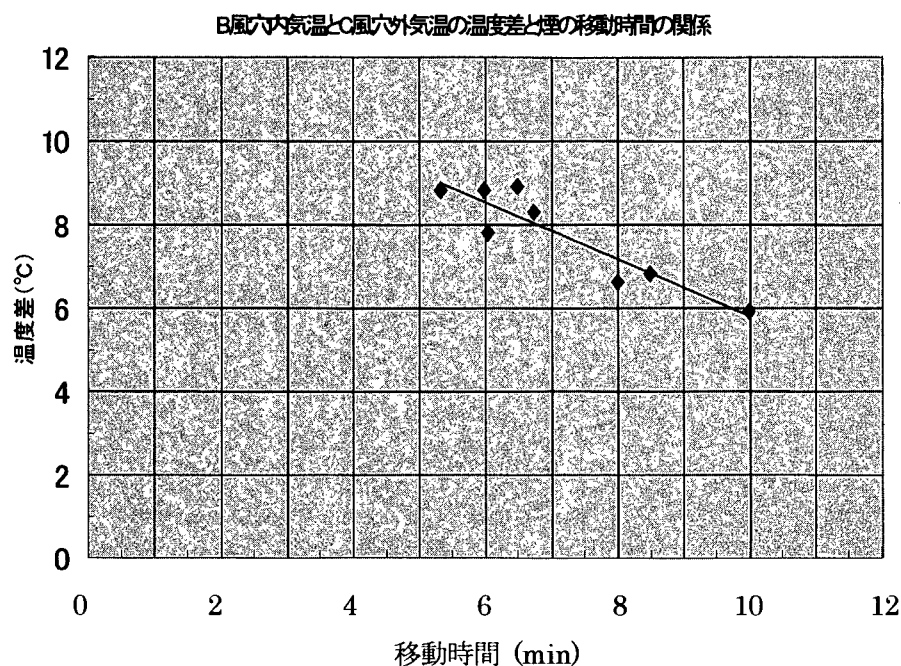
このそれぞれの風穴にトレーサーを流入させ、地中の空気の移動速度の推定を試みた。



参考図5-1 新潟県にある岩盤斜面の地形図

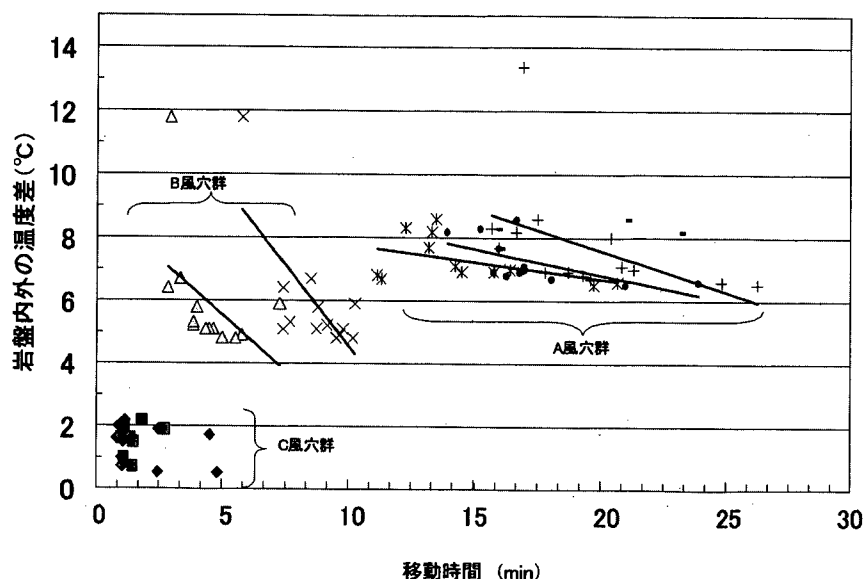
連続性の確認された流出入地点を結ぶと、独立岩峰を取り囲むように開口亀裂が存在する。

参考図5-2は1998年11月後半における実験結果である。試験時は寒冷なみぞれまじりの天候であった。この日はB風穴とS風穴で空気の流入現象が見られ、発煙筒を点火するとトレーサーの煙は風穴内に吸い込まれた。トレーサーは、斜面上側のC風穴に移動し流出した。4箇所の風穴で煙をトレーサーとした一昼夜の観測を行い、風穴内外の気温、風速などを計測した結果、トレーサーの移動は岩盤表面風には左右されず、むしろ岩盤内外の気温差に相関が見られた。



参考図5-2 移動時間と温度差の関係
(1998年11月のB風穴からC風穴へのトレーサー移動時間と岩盤内外気温差との関係)

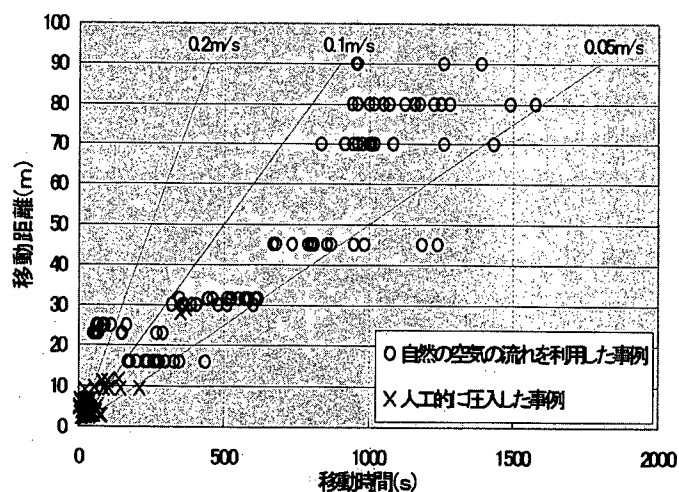
一方、参考図5-3は1999年4月後半の結果である。当日は天候も良く大変暖かい日であった。このときはS風穴のみで空気の流入が認められるため、トレーサーをS風穴より挿入したところ、トレーサーは主として下方向に移動し、B風穴群で大部分が流出した。A風穴群に到達したのはわずかであり、C風穴には風の影響を受けて時折到達した。このとき併せて9箇所の風穴において内外の気温、風速を観測した結果、トレーサーの移動は1998年11月後半の結果と同様に風穴内外の気温差に相関が見られた。



参考図 5-3 移動時間と温度差の関係

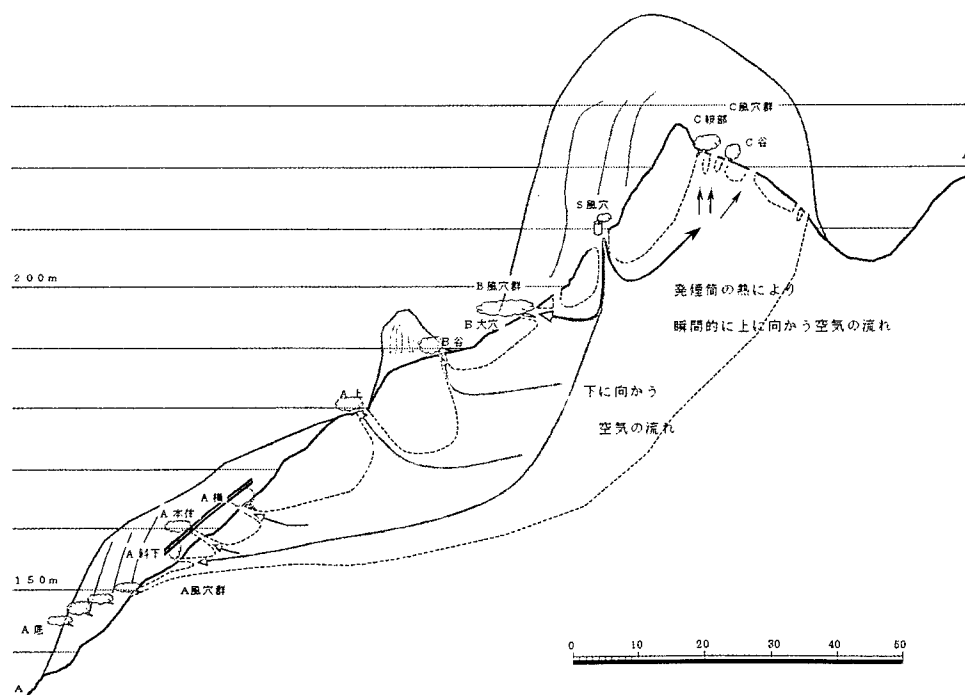
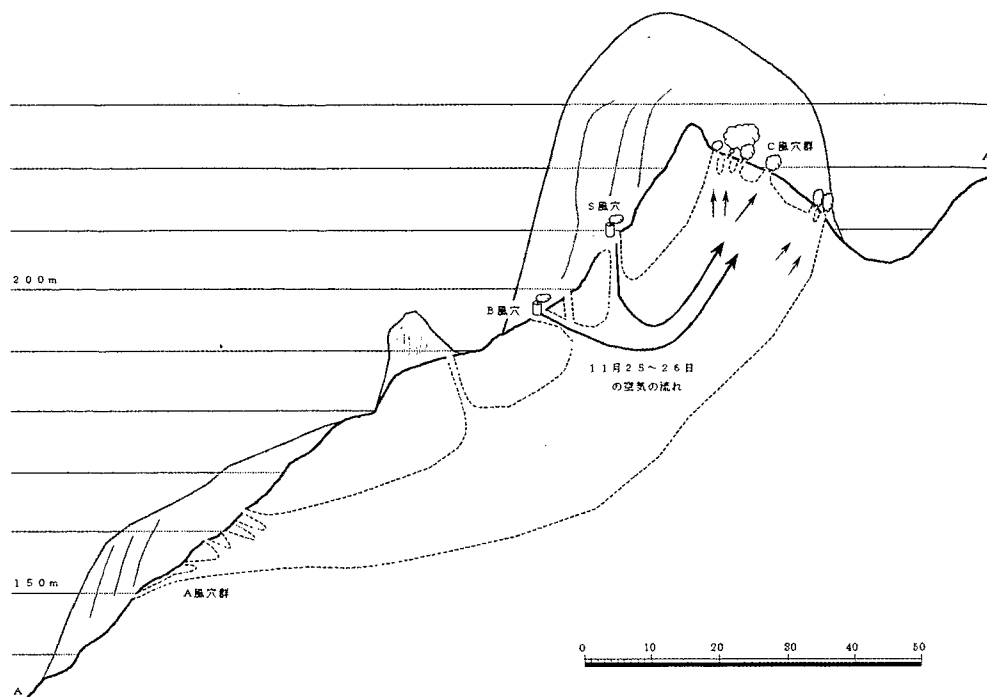
(1999 年 4 月の S 風穴から周辺の風穴への移動時間と岩盤内外気温差との関係)

以上の挙動を概念的に図化したのが参考図 5-4 である。地中の空気は図のように外気温が低いときは岩盤内を下から上に、また逆に外気温が高いときは上から下に流れ、しかもその到達時間は内外温度差に反比例（すなわち風速は内外温度差に正比例）する。このときの風速は、例えば参考図 5-3 の C 風穴から A 風穴への場合で、温度差が 8°C 程度するとき移動速度約 0.11 m/s 、温度差が 6°C 程度では移動速度約 0.067 m/s である。これまで実験した箇所移動距離と移動時間の関係(参考図 5-5)からも、岩盤内部では $0.05\sim 0.2\text{ m/s}$ 程度のゆっくりした移動速度を持っていることがわかる。風穴周辺では開口亀裂の断面が表土でほとんど閉塞されているために断面積が数十分の一となり、最大風速 $2\sim 3\text{ m/s}$ 程度になるものと思われる。



参考図 5-5 現地実験より得られた

移動時間と移動距離の関係



参考図5-4 1998年11月(上)と1999年4月(下)における空気の移動の模式図

6. 4 試験手順

試験は原則として以下の手順で行う。

圧入法の場合

- ① トレーサーの流入開口亀裂（流入区間）の選定
- ② 観測機器・観測体制の選定・配置・事前観測
- ③ 試験機器の組み立てと配置
- ④ 流入開口亀裂へのノズル接続とパッカー設置ないし周辺の見詰め
- ⑤ 試験機器・計測機器・観測機器等の作動確認
- ⑥ 予備試験
- ⑦ 本試験
- ⑧ トレーサーの強制排気

自然流入法の場合

- ① トレーサーの流入開口亀裂の選定
- ② 観測機器・観測体制の選定・配置・事前観測
- ③ 観測機器等の作動確認
- ④ 予備試験
- ⑤ 本試験
- ⑥ トレーサーの自然排気

【解説】

試験手順は圧入法と自然流入法で多少異なっている。

圧入法の場合、基本的に送風機やパッカーなどの機器を用いるので、これらが正常に機能することが必要である。例えばエンジン式送風機は、当日の気象条件や燃料の質や量等によって微妙に出力が異なってくる。そのため、予備実験を行い、エンジンを安定化させかつ当日の出力などを計測器で確認しておく必要がある。また、パッカー機能の確認も重要である。例えば亀裂が密に存在する場合は短いパッカーではトレーサーが細かな亀裂を伝ってすぐ漏出することがある。また、孔壁に凹凸が多い場合はパッカーと孔壁の隙間からトレーサーが漏出することもある。そこで予備実験によってパッカーの効き具合を確認し、必要に応じてパッカーの圧力を増したり、場合によっては長いパッカーを用いることも必要になる。

圧入法での試験機器の組み立てと配置においては、空気抵抗を少なくするために試験機全体ができる限り直線的に配置されることが望ましい。特にトレーサーの移動管に軟らかい素材を用いている場合は、トレーサーを圧入している途中で変形して流量などが変化することがあるので注意が必要である。

また、圧入法の場合、一度試験したときのトレーサーが岩盤内にとどまっていることが多い。そのため2

度目に試験するとトレーサーがすぐに流出してきて、見かけ上非常に高い流速でトレーサーが移動したと勘違いすることになる。このため、一度試験した後は、トレーサーを含まない空気を十分に送り込み、いったんトレーサーを全て排気しておく必要がある。自然流入法の場合はこのような強制的な排気は必要ないが、同じ理由から1度目のすぐ後で2度目の試験をすることはできない。

自然流入法の場合は、送風機や流量・圧力などの計測器は必要ないので、試験手順も比較的簡単である。ただし温度や風速などの気象状況を綿密に測定しておく必要がある。

なお、圧入法、自然流入法いずれの場合も、試験前に必要個所での事前観測(温度測定など)を行っておくとよい。

6. 5 試験中の調査

試験中は原則として以下の調査・観測を行う。

圧入法の場合

- ① 試験機器の正常な作動の監視
- ② 流入部における流入量・流入圧力等の計測
- ③ 流出部の有無、流出状況の監視・観測(流出位置や範囲、流出開始時間、流出速度、流出量、濃度など)
- ④ その他流出部付近の状況の調査観測(温度ほか)

自然流入法の場合

- ① トレーサーの正常な流入の監視
- ② 流入部の温度・風速等の観測
- ③ 流出部の有無、流出状況の監視・観測(流出位置や範囲、流出開始時間、流出速度、流出量、濃度など)
- ④ その他流出部付近の状況の調査観測(温度ほか)

【解説】

試験中の調査観測項目は圧入法と自然流入法で多少異なっている。

圧入法の場合、基本的に送風機やパッカーなどの機器を用いるので、これらの作動の監視や圧力・流量などの計測が必要である。

一方、自然流入法は温度や風などの気象条件を綿密に観測しておく必要がある。最近是非常に小型で大量のメモリー機能を持った2チャンネル～数チャンネルの温度計が安価で市販されているので、このような温度計を流入部や流出部の内外に設置しておくといよい。

なお、圧入法・自然流入法いずれの場合も、流入から流出までの時間や流出状況を正確に記録しておく必要がある。特に自然流入法は大規模な岩盤で行うことが多いので、流入部と観測部が長距離になりやすい。このため、流入時間や流出時間を正確に計測できるようにすることや、トランシーバーなどで流入担当者と観測担当者が密に連絡をとれるようにしておくこと、また、できれば同じ時間にセットしたビデオカメラなどで流出状況を記録しておくこと、などが必要である。なお、地表面での観察方法とボーリング孔内での一般的な観察方法は以下通りである。

a. 地表面での観察

煙をトレーサーとした場合の流出地点の確認は目視やビデオカメラを用いる。特にデジタル式のビデオカメラは映像が良好でタイムコードも付加されているため、このようなビデオカメラを複数箇所設置することが有効である。トレーサー到達地点における煙の流出濃度は、最初は非常に薄い状態で、徐々に濃い煙へと変化する。目視観察の場合、ビデオカメラの映像による流出の確認よりも早く確認される場合が多いので調整が必要である。また、日照、距離、ビデオカメラの種類、映像を再現するモニターの種類によっても異なるので観測の統一が取れるよう現地においてチェックを行う必要がある。トレーサーの流出量は、正確に測定することは困難であるが、流出口の断面積と平均流出速度の測定などによって大まかに試算することができる。

b. ボーリング孔内での観察

ボーリング孔内でのトレーサー流出の観察は、ポアホールテレビカメラを挿入して行う。しかし、ボーリング孔内に多数の亀裂がある場合、トレーサーの流出は連続性の高い亀裂より始まり、その煙で孔内は充満される。そこで観測においては、特定の亀裂の箇所にカメラを設置し、流出を個別に確認してはまた別の亀裂を観察するという作業を繰り返す必要がある。また場合によってはカメラの前後に煙を排除する必要がある。

6. 6 試験後の調査

試験後は原則として以下の調査観測を行う。

- ① 流出してきた亀裂の詳細な観察・スケッチ等（他の亀裂との関係も含めて）
- ② 流出してきた亀裂の内部での観測（温度、自然の風の有無など）

【解説】

試験後の調査項目は圧入法と自然流入法で大きな違いはない。基本的には、トレーサーが流出した亀裂について、その分布や性状を詳細に確認するとともに、温度や自然の空気の流れの有無および流速の観測などを行い、トレーサーを流入した亀裂との関係性を推定するために必要なデータを得るものである。

7. 試験結果の整理

7. 試験結果の整理

試験結果の解析の前に、調査地の状況、試験結果、および試験結果に影響を与える諸因子について整理しておく。主として整理すべき項目は以下の通りである。

- ① 地形図
- ② 地質図
- ③ 主な亀裂の分布図（地質図と同一図面でもよい）および亀裂状況の記載
- ④ 代表地質断面図（エアートレーサー試験箇所など）
- ⑤ ボーリング調査結果、ボアホールテレビカメラの結果等（代表地質断面図にも主な結果を記載する）
- ⑥ エアートレーサー試験の日時、方法や手順、流入位置およびパッカー位置、試験条件（送風機の流量や圧力、計測項目ほか）
- ⑦ 観測機器と観測体制
- ⑧ 試験時の気象条件（外気温、岩盤内の温度、風、降雨状況等）
- ⑨ エアートレーサー試験の結果（流出箇所分布や流出状況等を図化。また、各種計測、観測の結果を整理）
- ⑩ 考察結果（試験から大まかに想定される各亀裂の連続性、不安定と推定される範囲、不安定化機構の考察結果等の結果）
- ⑪ その他

【解説】

試験結果は、上記の項目について要領よく取りまとめておく。特に流入箇所、流出箇所、開口亀裂等の空間的な位置関係がわかるように3次元的な図面を作成しておくといよい。

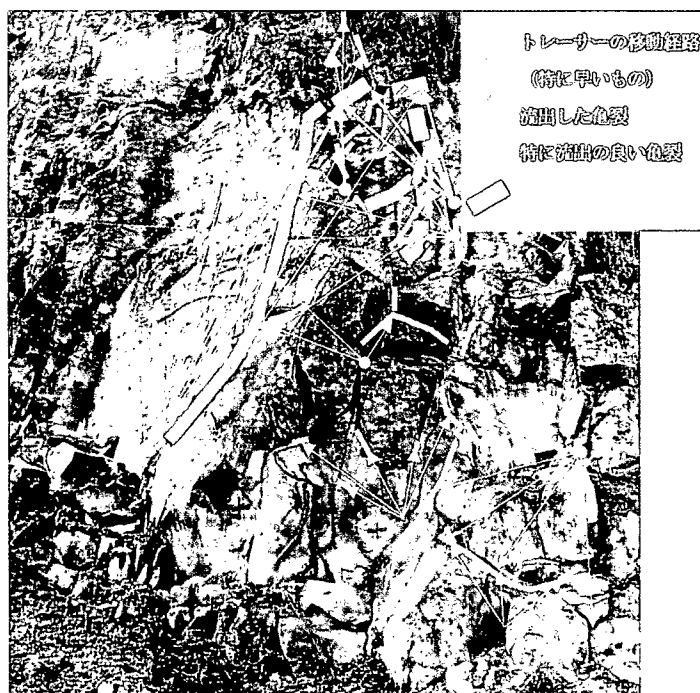


写真7-1 写真による試験結果の整理例（地表からの試験によるトレーサーの流出状況）

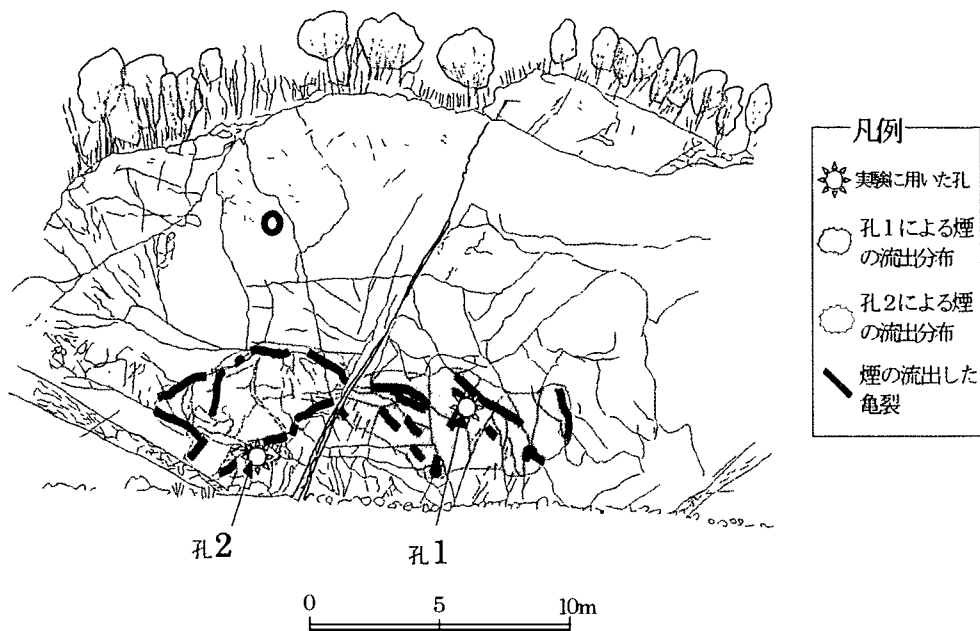


図7-1 立面図による試験結果の整理例（異なる試験区間での流出の表示）

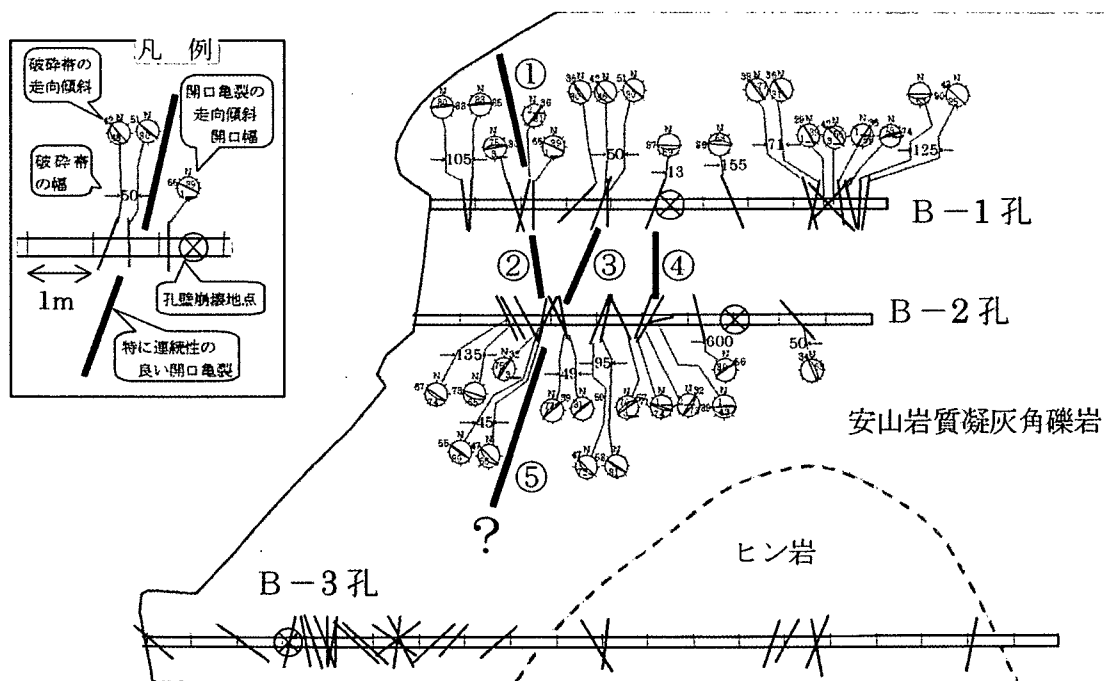


図7-2 断面図による試験結果の整理例（主な亀裂（赤線）とエアートレーサー試験により推定される連続性が高い亀裂）

表 7-1 表による試験結果の整理例(ボアホールテレビカメラ観察によるトレーサーの流出状況の確認結果の整理例)

時間は煙の挿入開始から流出までに要した時間を示す。

B-3孔簡易エアートレーサー試験による煙の濃度 ◎: 濃い、○: 中間、△: 薄い

B-1孔区間エアートレーサー試験による煙の流出確認 □: 確認、?: 不確定な確認

煙挿入地点	B-2孔内 簡易ボアホールカメラによるトレーサー流出の観察地点										
	2.005~ 2.139m 破砕帯	2.435m 開口亀裂	2.787~ 2.832m 破砕帯	3.144~ 3.193m 破砕帯	4.053~ 4.148m 破砕帯	4.432m 開口亀裂	4.983m 開口亀裂	5.117m 開口亀裂	5.301m 開口亀裂	6.20~ 7.35m 破砕帯(6.2m)	6.200~ 7.35m 破砕帯(6.6m)
B-3孔全体 簡易エアートレーサー	○		◎	△		○	○	○		○	
B-1孔(1.75~2.25m) 1.883、2.047、2.225m 開口亀裂			□ 15秒			□ 41秒				□	
B-1孔(2.7~3.0m) 亀裂のない区間のチェック	□		?			□ 37秒		?		□ 34秒	□ 45秒
B-1孔(3.5~4.0m) 3.759~3.809m破砕帯	?			□ 20~21秒		□ 35秒		?		□ 60秒	□ 76秒
B-1孔(4.75~5.25m) 4.917~5.3m破砕帯	?		□ 32秒?			□ 35秒?		□ 25秒		□ 54秒	□ 55秒

8. 解析・評価

8. 1 解析・評価の目的と方法

解析・評価の目的は2章「エアートレーサー試験の目的」と同様である。

- ① 開口亀裂の連続性の確認ならびに開口亀裂の分布の推定
- ② 開口亀裂の規模や性状の推定
- ③ 岩盤（斜面）全体としてのゆるみの範囲、ゆるみの程度、安定性等の推定

上記の①～③にそれぞれほぼ対応する解析・評価方法は以下のとおりである。

- ① 地質図学的な評価法
- ② 流速・流量等の解析による評価法
- ③ 地質総合解析的な評価法

【解説】

解析・評価の目的は、2章「エアートレーサー試験の目的」と同様である。

それに対し、それぞれの解析目的に対応する評価方法は以下のとおりである。

① 地質図学的な評価法

目視観察やボアホールテレビカメラ等で確認された開口亀裂を図化した地質断面図・地質平面図等に、エアートレーサー試験によるトレーサー流出箇所を重ね合わせ、地質図学的に開口亀裂の連続性を推定する方法である。

② 流速・流量等の解析による評価法

流速・流量・濃度等の定性的な比較(大小の比較や流出状態の定性的な区分など)を行ったり、流路モデル解析等の高度な定量的解析により開口亀裂の規模等を評価する方法である。なお、この方法は、解析目的①に対しても有効である。

③ 地質総合解析的な評価法

エアートレーサー試験によって得られた結果と、地質調査の結果、また場合によっては強度試験、安定解析等の結果を勘案して、地質技術者が地質総合解析的に評価する方法である。

8. 2 地質図学的な評価法の手順

地質図学的な評価法の手順は原則として以下のとおりである。

- ① 地質平面図や断面図等への事前調査（目視観察等）による開口亀裂の記載
- ② 地質図学的ないし地質学的知見に基づく上記開口亀裂の延長方向の推定と記載
- ③ トレーサー流出箇所の上記図面への記載
- ④ 開口亀裂の推定延長方向と流出箇所の図上での地質図学的な比較検討
- ⑤ 上記検討を踏まえた推定亀裂分布図の作成とこれによる評価

【解説】

地質図学的な評価法の手順は、地質技術者が通常の地質平面図や地質断面図を作成するのと大きな違いはない。特に上記①、③については、地質技術者による一般的な技能によって比較的容易に実施できる項目である。しかし②、および④～⑤の作業については、地層の分布を推定するのとは異なり、亀裂の分布を推定するという点で、より詳細な地質観察に基づき、かつ応用地質学的な知見を必要とする作業である。特に以下の点に注意が必要である。

②は、トレーサーの流出箇所をプロットする前に、あらかじめ地質踏査などから亀裂の延長方向を大まかに推定しておく作業である。このため、調査地域内の亀裂の分布・連続性・アンジュレーション（うねり）の程度・開口幅・ずれの有無や方向・挟在物の強度といった幾何学的・工学的な状況を詳細に観察するだけでなく、亀裂の地質学的な成因（冷却節理、断層に伴う亀裂、風化等に伴う亀裂、石灰脈が溶脱された開口亀裂、シーティングジョイント、重力性すべりによる亀裂、トップリングによる開口亀裂など）、亀裂挟在物の地質性状（断層ガウジ、流入粘土、変質粘土、風化に伴う粘土など）、また複数の亀裂がある場合は観察できる範囲内での亀裂の相互関係（前後関係、切りつ切られつの関係など）や交差部の状況（交差部はトレーサーの流路になりやすいので、特に挟在物や目詰まりの状況など）を明らかにし、さらに周辺の微地形との関係なども勘案して、その上でどの亀裂がどの程度連続しそうであるか、他の系統の亀裂に切られることはありそうか、亀裂が上下左右に延長するにしたがって性状がどのように変化しそうであるか（上部ほど開口する、目詰まりするなど）、といった項目に注意して亀裂方向を推定して図化する。図化する際は、確認できている亀裂の位置と、推定亀裂の位置を明確に区分しておく。

④～⑤では、開口亀裂の推定延長方向と流出箇所がほぼ一致した場合は、開口亀裂が連続すると解釈できる。しかし推定延長方向と流出箇所が不一致の場合や、不一致とはいえないものの推定延長方向のごく一部でしかトレーサーが流出しない場合、あるいは推定延長方向でトレーサーが全く流出しない場合などは、その原因を考察して、開口亀裂分布の推定を行う必要がある。推定延長方向にトレーサーが流出しない原因としては以下のようなものがある。

- イ. 推定方向の亀裂が他の亀裂や弱層で切られている場合
- ロ. 亀裂が流入粘土などで目詰まりしている場合
- ハ. 亀裂が途中で消滅する場合（亀裂がミ型や杉型に雁行している場合も含む）
- ニ. 亀裂に大きなうねり（アンジュレーション）がある場合

- ホ. 亀裂の開口幅が小さくなっている場合
- ヘ. その他(試験方法に問題がある場合など)

また、推定していない方向にトレーサーが流出する原因としては以下のようなものがある。

- イ. 推定方向の亀裂と他の開口亀裂が連結している場合
- ロ. 亀裂に大きなうねり(アンジュレーション)がある場合
- ハ. その他(試験方法に問題がある場合など)

これらのうちどのような原因であるのか確認するためには、エアートレーサー試験繰り返し法を用いて、複数の仮説の中から妥当なものを絞り込む方法が一般的である。そのほか、エアートレーサー試験以外の方法(ボーリングなど)で絞り込む方法もある。しかし、そのような方法によっても、原因が判明しない場合は、絞り込みが不可能であった旨とその理由等を記するとともに、絞り込みが不可能であった亀裂について図上に明示する。

8. 3 流速・流量等の解析による評価法の手順

流速・流量等の解析による評価法の種類と手順は原則として以下のとおりである。

① 流速・流量等と流路特性の対比による評価

- イ. 地質学的な解釈法による推定亀裂分布の図化と流路の推定
- ロ. 推定された流路の特性（観察できる部分の開口幅、流路長さなど）の整理
- ハ. 流路特性と流速や流量等の対比（各要素のグラフ化や表形式の整理）
- ニ. 上記による各流路の分類とこれによる開口亀裂の規模や性状の評価

② 流速・流量等の定量的な解析による評価

- イ. 地質学的な解釈法による推定亀裂分布の図化と初期モデルの作成
- ロ. 流体解析等によるモデルの修正とこれによる開口亀裂の規模や性状の評価

【解説】

亀裂の規模や性状の評価法は原則として定性的または半定量的な解釈によるものと、シミュレーションなどによる定量的な解析によるものの2つに分けられる。

① 流速・流量等と流路特性の対比による評価

流路特性（トレーサー流入部から流出部までの距離等）と、トレーサーの流出特性（流出までの時間・平均流速・流量・濃度等）を対比し、流出パターンを分類することで開口亀裂の規模や性状を大まかに推定するものである。

例えば、流路の距離が短いが出まで時間時間を要し、しかも流出量が少ない亀裂は、開口量が小さ

いだろう、というように、大まかな推定を行うものである。経験的には参考表6-1のように推定されているが、これはあくまでも数少ない現場での目安であり、実際には各現場毎に流速・流量等と流路特性をグラフや表などを用いて対比して、各流路をグルーピングするなどして亀裂の性状を推定する必要がある。

② 流速・流量等の定量的な解析による評価

定量的な解析方法としては、近年は3次元の流体解析がかなり一般化するようになったので、このようなシミュレーションシステムを用いて計算することもできる。ただし、初期モデルがある程度妥当なものである必要がある。

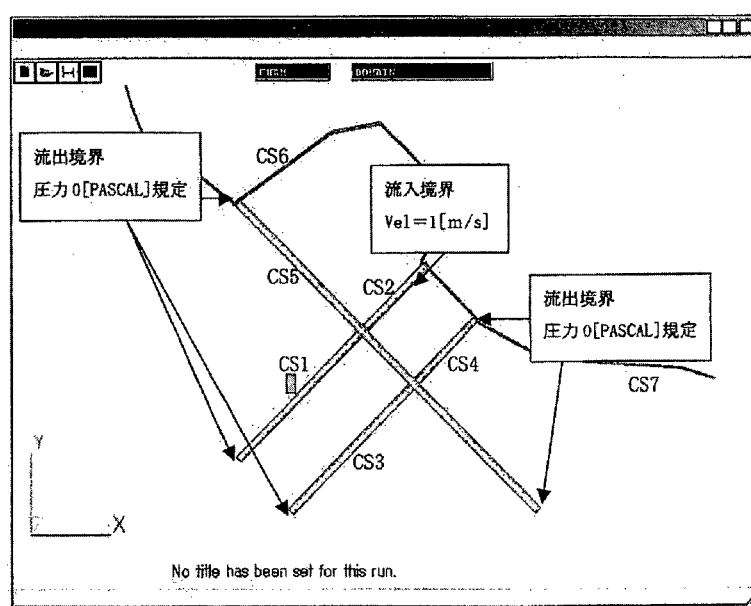


図8-1 三次元流体解析の例(岩盤の水平スライスのモデリング状況)

(参考6)エアートレーサー試験によるゆるみ評価

試験数は限られているが、これまでの例によると、本試験によるゆるみの評価の大まかな目安は以下のとおりである。

参考表6-1 圧入法によるゆるみの性状区分試案 (圧入量 5~7m³/min の場合)

エアートレーサー試験の結果					推定される開口亀裂とゆるみの性状	
最大の 流出範囲	流出の パターン	流出量	濃度	流出速度	開口亀裂の内部性状	ゆるみの程度
広い (10m 程 度以上)	面的	大量 (煙突 の煙の ように 流出)	様々(距 離によ る)	様々 (距離や流出 経路、自然の 空気の流れ の有無等によ る)	内部の平均開口幅数 cm 以上。 比較的単純な亀裂系。	ゆるみ範囲：特大 ゆるみ程度：大
	ス ポ ッ ト 的				内部の平均開口幅数 cm 以上。 複数の亀裂系の複合、ないし亀 裂に凹凸がある、開口亀裂の一 部が土壌に覆われているなど。	(特大のゆるみ。要注意。) (人工圧入法の測定限界のため必要 に応じ自然の空気の流れを用いるエ アートレーサー試験が必要)
中程度 (数 m～ 10m 程 度)	面的	大量	濃 い ～ 中程度	様々 (距離や流出 経路による)	内部の平均開口幅数 cm 以上。 比較的単純な亀裂系。	ゆるみ範囲：大～中 ゆるみ程度：大
	ス ポ ッ ト 的				内部の平均開口幅数 cm 以上。 複数の亀裂系の複合、ないし亀 裂に凹凸がある、開口亀裂の一 部が土壌に覆われているなど。	(ゆるみが発達しており要注意)
	面的	小～中 量	中 程 度 ～薄い	一般に速い (大 よ そ 0.05m/s 以 上)	内部の平均開口幅数 cm 程度。 比較的単純な亀裂系。	ゆるみ範囲：大～中 ゆるみ程度：中
	ス ポ ッ ト 的				内部の平均開口幅数数 cm 程度。 複数の亀裂系の複合、ないし亀 裂に凹凸がある、開口亀裂の一 部が土壌に覆われているなど。	(ゆるみが発達しており要注意)
	面的	小量 (タバ コの煙 程度)	薄い	一般に遅い (大 よ そ 0.05m/s 以 下)	内部の平均開口幅数 mm 程度。 比較的単純な亀裂系。	ゆるみ範囲：大～中 ゆるみ程度：小 (開口亀裂が連続しており要注意)
					ス ポ ッ ト 的	内部の平均開口幅数 mm 程 度。 複数の亀裂系の複合、ないし亀 裂に凹凸がある、開口亀裂の一 部が土壌に覆われているなど。
狭い (1～2m 程度)	面的 ない しス ポ ッ ト的	大量	濃い	一般に速い	内部の平均開口幅 1～数 cm 以 上。	ゆるみ範囲：小 ゆるみ程度：大 (落石等に注意)
		小～中 量	中 程 度 ～薄い	一般に遅い	内部の平均開口幅数 mm 以下 (通常 2～3mm 程度)。	ゆるみ範囲：小 ゆるみ程度：小 (流出個所がブロックを取り囲む形 状でなければ問題少ない)
流出ほとんどなし (または数 10cm 以内)					内部の亀裂はほぼ密着。	ゆるみなし

8. 4 地質総合解析的な評価法の手順

地質総合解析的な評価法の手順は、原則として以下のとおりである。

- ① 開口亀裂の分布・規模・性状等の図化と整理
- ② ゆるみ領域・ゆるみの成因・変形モード等の推定
- ③ ゆるみ状態の応用地質学的解釈、ならびに安定計算等による安定性の評価

【解説】

岩盤(斜面)全体としてのゆるみの進行度や安定性の評価は、エアートレーサー試験だけでなく他の調査結果も含めて総合的に判断すべきものである。

一般に、エアートレーサー試験等によって開口亀裂の分布・規模・性状等がある程度判明したら、そのデータをもとにゆるみ領域・ゆるみの成因・変形モード等を再度確認してゆるみの進行の度合いを判断する。また、現段階で相当程度不安定な状態にあるかどうか、また、さらに岩盤が劣化する要素を含んでいるかどうか等を応用地質学的に判断して安定性を定性的に推定し、場合によっては、ゆるみ状態をモデル化して安定計算・安定解析などによって安定性を定量的に判定する。このときの安定計算・安定解析の手法は、観察された変形モード(すべり、トップリングなど)をよく説明できる手法でなくてはならない。岩盤に対する安定計算・安定解析の手法については、以下のような参考文献を参照されたい。

(参考文献)

(社) 土木学会岩盤力学委員会(編)(1994): 岩盤斜面の安定解析と計測, 土木学会, 345p.

(社) 土木学会岩盤力学委員会(編)(1999): 岩盤斜面の調査と対策, 土木学会, 丸善(株), 376p.

9. とりまとめ

9. 1 とりまとめの項目

とりまとめは原則として以下のような項目について行う。

- ① 調査概要（調査位置、調査目的、地形地質概要など）
- ② 試験対象岩盤の性状
- ③ 試験位置
- ④ 機器の仕様および試験方法
- ⑤ 試験結果
- ⑥ その他の調査結果
- ⑦ 解析方法および解析結果
- ⑧ 評価およびまとめ

【解説】

一般的な取りまとめの項目については上記のとおりであるが、調査地によって様々な状況がありえるので、取りまとめの項目やその構成は、それぞれに適したものとする。

9. 2 調査概要

調査概要は調査位置、調査目的、地形地質概要、試験日時、気象条件、調査試験の概要などについてとりまとめる。

【解説】

調査概要の項目は通常の調査報告と同様である。

9. 3 試験対象岩盤の性状

試験前に判明している試験対象岩盤の微地形、地質、亀裂状況、変状や変動の有無などについて、平面図や断面図などを用いてとりまとめる。

【解説】

「6. 2 試験前の調査」などで判明した試験対象岩盤の諸性状を要領よくとりまとめるものである。

9. 4 試験位置および試験方法

エアートレーサー試験の位置(流入孔、流入区間など)、試験方法(圧入法など)、試験条件(圧力など)、観測部の配置などについて平面図や断面図などを用いてとりまとめる。

【解説】

試験位置や試験方法については「6.3 試験法の選定方法と試験機器・観測機器等の配置方法」、「6.4 試験手順」、「6.5 試験中の調査」、「6.6 試験後の調査」などに沿って整理するとよい。

9. 5 試験結果

試験結果は、流出箇所や流出状況がわかるように図面や表などを用いてとりまとめる。

【解説】

試験結果は、「7. 試験結果の整理」に基づき、流出箇所については平面図などを用いて、また流出状況などについては表形式ないしは図面上に併記するなど、わかりやすく整理する。また、断面図を作成する場合は、流出状況や開口亀裂の分布を勘案してゆるみに対して代表的な縦断面を選定し、解析・評価の項と整合をとれるように工夫する。

9. 6 その他の調査結果

岩盤の評価に関連するその他の調査の結果について、エアートレーサー試験の結果と対比検討しやすい様式でとりまとめる。

【解説】

その他の調査結果としては、変動計測や安定解析、各種気象観測などがある。

9. 7 解析方法および解析結果

解析目的、解析方法(解析手法、解析条件など)、解析結果について、図面や表、グラフなどを用いてとりまとめる。

【解説】

解析方法および解析結果は、「8. 解析」に沿って、図や表、グラフなどを用いてわかりやすくとりまとめる。

9. 8 評価およびまとめ

評価は、亀裂の連続性、亀裂分布、亀裂性状、岩盤斜面全体としてのゆるみの範囲・ゆるみの程度・安定度、ならびに不確定要素などについてとりまとめる。

【解説】

評価は、①亀裂の連続性、②亀裂分布、③亀裂性状、④岩盤斜面全体としてのゆるみの範囲・ゆるみの程度・安定度、などについてそれぞれ整理し、わかりやすくとりまとめる。また、これらの評価を行う上での不確定要素についても、①～④それぞれの項目について列挙し、評価の確実性を極力明示するように務める。

参考文献

- 1)大谷知生・佐々木靖人・脇坂安彦(1998): 空気を活用した岩盤斜面の亀裂の調査手法, 平成10年度応用地質学会講演論文集, pp.85-88.
- 2)佐々木靖人・大谷知生・村上隆・原田久也・高橋伸尚・人見美哉・脇坂安彦(1999): 岩盤斜面内の空気の流れを利用した開口亀裂の連続性調査法, 第38回地すべり学会研究発表講演集, pp.589-592.
- 3)大谷知生・佐々木靖人・脇坂安彦(1999): 空気の流動性を活用したトレーサー試験の開発と岩盤斜面の亀裂の調査, 第23回日本道路会議一般論文集(B), pp.40-41.
- 4)大谷知生・佐々木靖人・大神昭徳・脇坂 安彦(1999): 空気の流動性を活用した岩盤斜面の開口亀裂の連続性調査, 日本応用地質学会平成11年度研究発表会講演論文集, pp.73-76.
- 5)高橋 伸尚・大谷 知生・佐々木 靖人・脇坂 安彦(2000): 室内モデル実験によるエアートレーサー試験の定量的評価の試み, 日本応用地質学会平成12年度研究発表会講演論文集, pp.185-188.
- 6)大谷知生・佐々木靖人・脇坂 安彦(2000): 現地実験によるエアートレーサー試験の活用法の検討, 日本応用地質学会平成12年度研究発表会講演論文集, pp.189-192.
- 7)Sasaki, Y., Ohtani, T., and Wakizaka, Y.(2000): Air tracer test - a new method for investigating crack persistence and loosening-, International conference on geotechnical and geological engineering (GeoEng2000), Melbourne, Australia.
- 8) (投稿準備中) 大谷知生・佐々木靖人・脇坂 安彦(): 空気をトレーサーとした岩盤斜面の開口亀裂調査法の開発, 応用地質.
- 9) 佐々木靖人 (1999): ゆるんだ岩盤の調査法, 土木技術資料41-2, pp.8-9.

索引

圧入法	5
圧力計	8
アンジュレーション	33
移動距離(トレーサーの)	20
移動時間(トレーサーの)	20
エアートレーサー試験	1
エアパッカー	12
開口亀裂	2,4,18
簡易エアートレーサー試験	5
岩盤取付器具	7
岩盤斜面	3
岩盤表面式	5
切りつ切られつの関係	33
区間エアートレーサー試験	5
繰り返し法(エアートレーサー試験繰り返し法)	5
孔(坑)口閉塞式	5
シーティングジョイント	3
自然流入法	5
シングルパッカー	7,9
静圧	8
送風機	7,8
ダクトホース	7,9
ダブルパッカー式	7,9
地質図学	32
地中風速測定	16
トップリング	3
トレーサー(追跡子)	1
トレーサー移動管	7,9
トレーサー混成装置	7,8
トレーサー流出部	7,9
発煙筒	10
微地形	14
風穴	22

ボアホールテレビカメラ	14,16
ゆるみ	3
流速	21,34
流体解析	35
流量計	7,8
レーザープロファイラ	14
ロッド	7,9

参考資料編

ケーススタディ

エアートレーサー試験の現地適用性と適用方法を検討するためにこれまで 10 数箇所の岩盤斜面において現地適用実験を行った。それぞれの岩盤におけるゆるみの形態は様々であるが、特徴的な適用事例として、ゆるみの形態が単純な場合、やや複雑な場合、複雑な場合、特に大きなゆるみの場合、小規模なゆるみの場合について、5 例を紹介する。

1. 単純なゆるみ形状の事例

比較的新しい時代のやや軟質でマッシブな凝灰角礫岩や自破碎溶岩などは、テクトニックな亀裂が少なく、亀裂間隔の大きい比較的自然なゆるみ形状を示すことが多い。しかしそのため1個1個の岩塊が大規模で、大きな岩盤崩壊を発生させる素因ともなっている。豊浜トンネルの岩盤崩落事故の現場も、全体的に見るとこのような岩質に属している。著者らはこのように軟岩状でありながら亀裂性岩盤としての挙動を併せ持つ要注意岩盤を便宜的に「亀裂性軟岩」と称しているが、ここではそのような例として日本海に面した山形県の岩盤斜面での実験事例を示す。調査地は、比較的軟らかい凝灰角礫岩質よりなる海食崖の一部が緩んで、開口幅 10cm ほどの開口亀裂によって囲まれた高さ 8m、幅 5m、奥行き 3m の分離岩塊を形成している(図-1、図-2)。この岩盤表面の開口亀裂とボーリング孔にトレーサーを挿入して開口亀裂の連続性を特定し、分離する岩塊を調査した。

1) 岩盤表面からの調査

図-1に示す開口亀裂の各位置にトレーサーを挿入した。図-2は岩盤表面の開口亀裂②にトレーサーを挿入したとき(図-1の実験4)の周辺の流出状況の例である。流出は近い亀裂より始まり、順次亀裂全体へと広がった。調査結果から、亀裂①・亀裂②が連続した亀裂であり分離した岩塊を形成しつつあることを示している。各地点への移動速度は 0.2m/s 程度で、開口亀裂内がほぼ均一に開いていることを示している。ただし下部での流出は乏しかった。岩盤表面の開口亀裂の状況を含めて考えると、岩盤は全体としてトップリング状の変形をしていると考えられる。なお、トレーサーは最終的には亀裂③でも流出した。ただし、見かけ移動速度は 0.02m/s と亀裂①・亀裂②間と比較してはるかに時間を要し、流出量も少ないことから、直接の連続性はなく、複数の亀裂を経由して到達したものと解釈した。

2) ボーリング孔を利用した調査

ボアホールテレビカメラによる観察では、ボーリング孔 No.1 (図-2の鉛直孔) の深度 4.5~6.0m 区間、9.0~11.5m 区間に破碎帯が存在する。そこでダブルパッカーにより深度 4.5~6.0

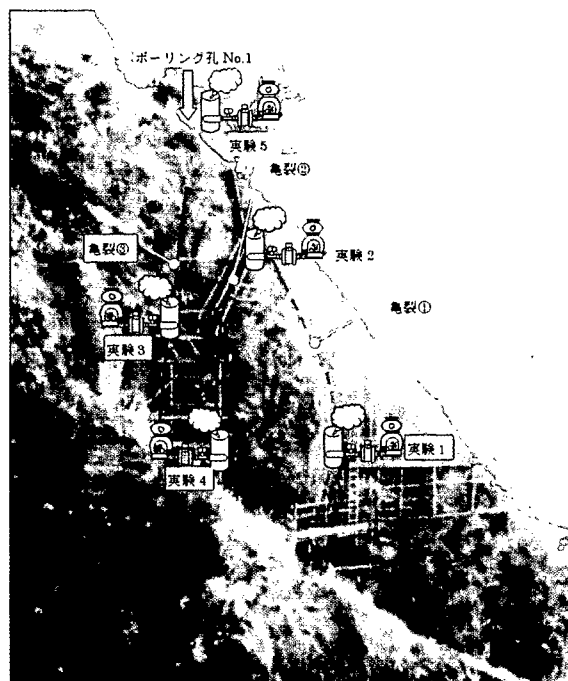


図-1 調査地の主な亀裂と試験位置

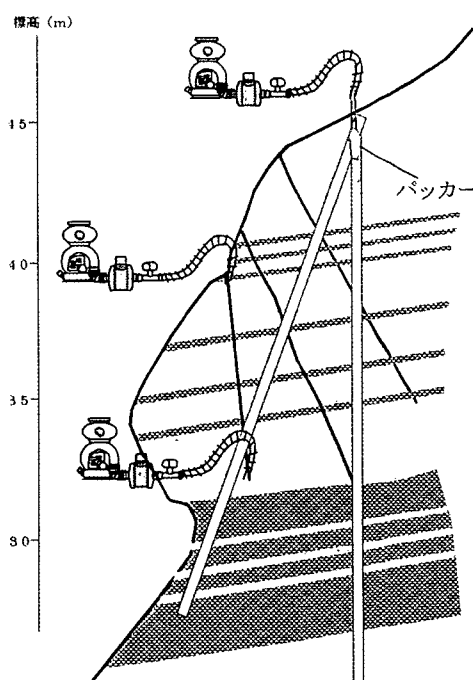


図-2 調査地の断面図

m区間、9.0~11.5m区間などを閉塞してトレーサーを挿入し、地表面の亀裂との連続性を測定した。

実験結果の結果、9.0~11.5m地点の破砕帯と亀裂③の亀裂の連続性が高いことが判明した。また、4.5~6.0m区間の破砕帯も亀裂①と間接的である可能性はあるものの連続していると推定された。また、それ以外にも亀裂はあるものの、その他の亀裂は地表への連続性は乏しいことがわかった。

これらの調査の結果、エアートレーサー試験前と試験後の推定亀裂分布を比較したのが図-4である。エアートレーサー試験前には、亀裂①と亀裂②で囲まれる不安定ブロックのほか、亀裂①と亀裂③で囲まれる不安定ブロックの存在も推定できた。また、他にも多くの亀裂があるため、その他の不安定ブロックの存在も否定できなかった。しかしエアートレーサー試験の結果、顕著にトレーサーの流出が見られたのは亀裂①と亀裂②を取り囲む不安定ブロックのみであり、他の不安定ブロックは想定する必要がないことがわかった。特に、当初想定されていた亀裂①と亀裂③に囲まれる大きなブロックについては、亀裂①と亀裂③の連続性は小さいことから、亀裂の開口は進行しておらず、この両者の亀裂で取り囲まれるブロックは当面安定である可能性が高いことが確認できた。

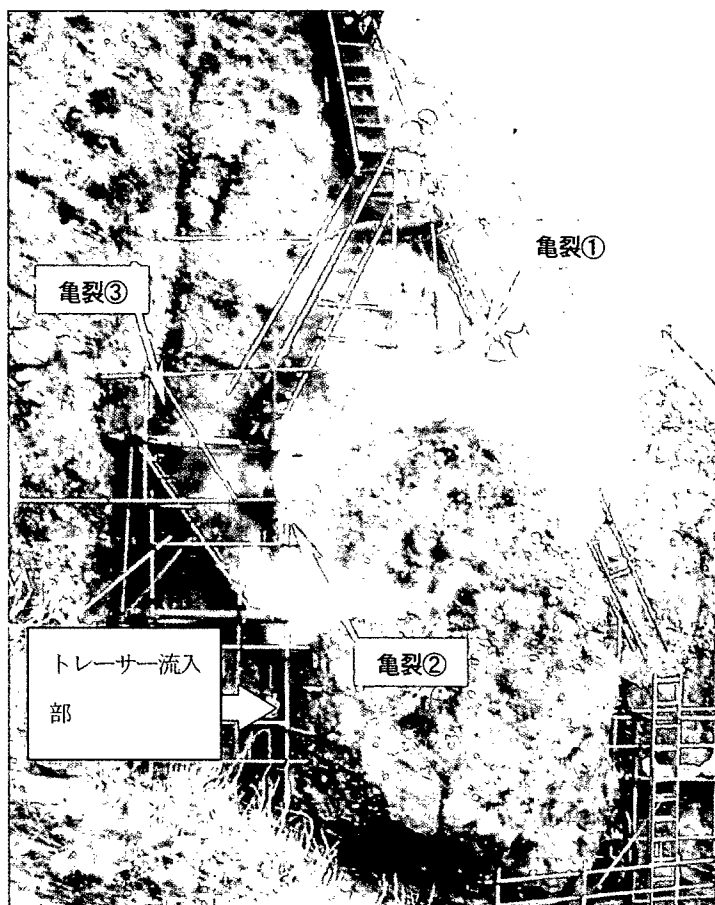
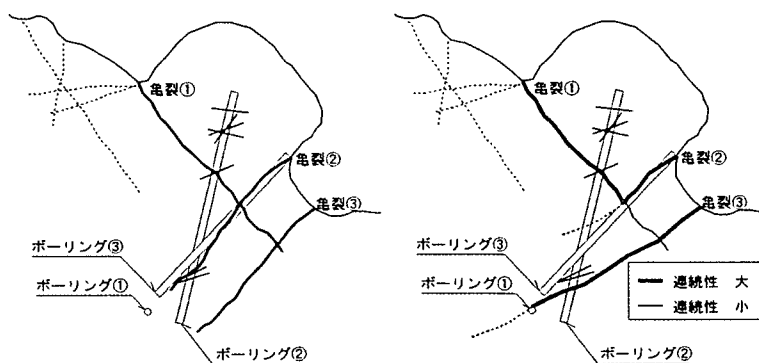


図-3 送風機によるエアートレーサー試験

亀裂②の矢印の位置からトレーサーを挿入、亀裂①からは多量に流出するが亀裂③から流出はみられない



既往の調査手法による推定

エアートレーサーによる推定

図-4 エアートレーサー試験によって推定された亀裂の連続性(水平断面)
(亀裂③がボーリング孔②まで連続するものの亀裂①と③の連続性は小さく、想定ブロックよりより大きな不安定ブロックはないことが確認できた)

2. やや複雑なゆるみ形状の事例

溶岩、溶結凝灰岩などの岩盤斜面では、冷却節理によって規則正しく、あるいは不規則に、やや複雑で多数の開口亀裂が発達する。ここでは、やや複雑なゆるみ形状の例として、大分県にある冷却節理の発達した溶結凝灰岩の岩盤斜面での実験例を示す。

調査地の溶結凝灰岩には、冷却による柱状節理と、それを胴切りするような亀裂などが分布する。柱状節理自体も湾曲が著しく、やや複雑な亀裂形となっている。実験を行った斜面にはボーリング孔はないが、足場があるため岩盤表面からそれぞれの開口亀裂にトレーサーを挿入することが可能である。そこで挿入量をほぼ一定にして図-1に示す多数の亀裂にトレーサーを挿入し流出地点を観察した。その結果、以下のようないくつかのタイプの亀裂ないしは亀裂間経路が観察された。

- ① 圧入部の開口量が小さくても流出地点が広く分布する亀裂
- ② 開口量が小さくても、どの地点から圧入しても流出する亀裂
- ③ 流出までの時間が比較的短い亀裂間の経路
- ④ 流出の見られた亀裂にトレーサーを圧入した場合に元の圧入地点に流出しない亀裂

④のケースは副次的な亀裂を表すものと考えられ、①～③のケースが連続性や内部での開口度の大きい亀裂を示しているものと考えられる（図-1の白線で示した亀裂）。これらの亀裂を詳細に観察すると、亀裂面も新鮮で流入物も見られないことから、比較的最近分離し開口したものが多くことが推定された。このことから、①～③のような亀裂で囲まれたブロックは、崩壊につながりうる不安定性の高い箇所と判断された。



図-1 地表からの試験によるトレーサーの流出
箇所

3. 複雑なゆるみ形状の事例

岩盤がテクトニックな作用を受けると、冷却節理などの初生的な亀裂のほかに、テクトニックな亀裂や断層が交差し、複雑な亀裂系を形成する。また、貫入岩などの影響を受けると亀裂系はさらに複雑化する。このような岩盤が重力の作用を受けるとゆるみ形状も複雑になり、メカニズムを推定し安定度を判断する上ではゆるみに対して主要な役割を果たしている開口亀裂と副次的な開口亀裂の見極めが重要になってくる。ここではそのような例として、岩手県の安山岩質凝灰角礫岩の例を示す。

調査地は岩手県の三陸海岸に面した急崖である。地質は新第三紀の安山岩質凝灰角礫岩で、ひん岩の貫入も見られる。岩盤斜面は高さ 100m、幅 500m に及ぶ。

傾斜は 50～70° で南に面している。水平ボーリングがこの斜面の縦測線に沿って B-1～B-3 孔まで掘削されている。図-1 に岩盤状況を示す。ボアホールテレビによるとボーリング孔内壁には多くの開口亀裂が認められ、主要な高角亀裂は 3～4 系統であることがわかった。B-1 と B-3 孔では走向が NW-SE、E-W、NE-SW のものが多く、B-2 孔では走向が NW-SE と NE-SW のものが多かった。開口亀裂は 1mm から一部 2～3cm のものが観察された。これらの開口亀裂は主に走向が E-W で N 方向に高角に傾斜するものが多く、これに加え B-3 孔では走向が NW-SE で N 方向に中程度傾斜したものも見られる。斜面は南向きであることから、

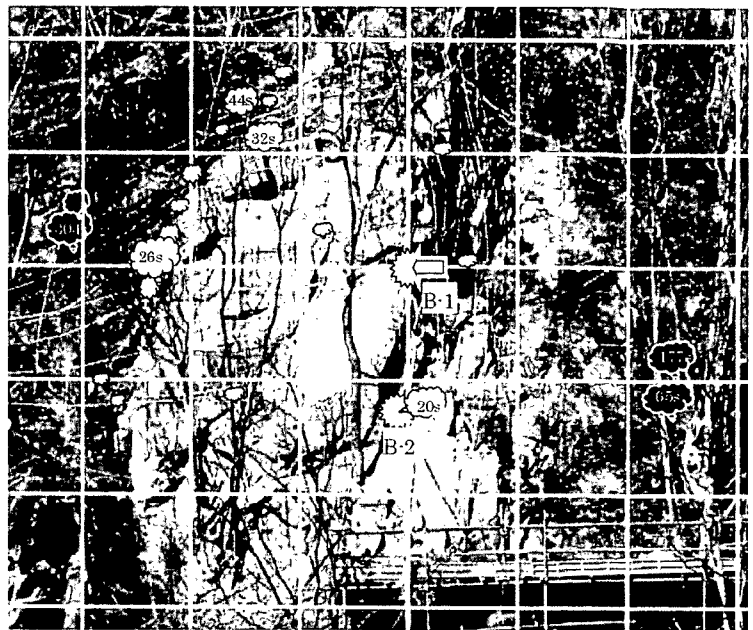


図-1 岩盤状況

煙マークの中の数字はトレーサーの移動時間、黒地の煙マークは簡易エアートレーサー試験のみで流出した地点（メッシュ間隔はおおよそ 2m）

表-1 ボーリング孔内での亀裂の連続性

時間は煙の挿入開始から流出までに要した時間を示す。

B-3 孔簡易エアートレーサー試験による煙の濃度 ◎：濃い、○：中間、△：薄い

B-1 孔区間エアートレーサー試験による煙の流出確認 □：確認、？：不確定な確認

煙挿入地点	B-2 孔内 簡易ボアホールカメラによるトレーサー流出の観察地点										
	2.005～ 2.139m 破砕帯	2.435m 開口亀裂	2.787～ 2.832m 破砕帯	3.144～ 3.193m 破砕帯	4.053～ 4.148m 破砕帯	4.432m 開口亀裂	4.963m 開口亀裂	5.117m 開口亀裂	5.301m 開口亀裂	6.20～ 7.35m 破砕帯(6.2m)	6.200～ 7.35m 破砕帯(6.6m)
B-3 孔全体 簡易エアートレーサー	○		◎	△		○	○	○		○	
B-1 孔(1.75～2.25m) 1.883、2.047、2.225m 開口亀裂			□ 15 秒			□ 41 秒				□	
B-1 孔(2.7～3.0m) 亀裂のない区間のチェック	□		?			□ 37 秒		?		□ 34 秒	□ 45 秒
B-1 孔(3.5～4.0m) 3.759～3.809m破砕帯	?			□ 20～21 秒		□ 35 秒		?		□ 60 秒	□ 76 秒
B-1 孔(4.75～5.25m) 4.917～5.3m破砕帯	?		□ 32 秒?			□ 35 秒?		□ 25 秒		□ 54 秒	□ 55 秒

このような開口亀裂の方向性は斜面のゆるみのメカニズムがトップリングであることを示唆している。しかし開口亀裂の幅が全体に狭く、開口亀裂の連続性が不明なため、ゆるみ岩盤が基盤からどの程度分離し不安定化しているのか不確かであった。

そこでこのボーリング孔を用いて、ダブルパッカーを用いたエアートレーサー試験を行った。B-1 孔を主な挿入孔、B-2 および B-3 孔を観測孔として選定した。主な挿入区間と観察区間における試験結果を表-1 に示す。事前に多くの開口亀裂がボアホールテレビで観察されていたが、エアートレーサー試験の結果、トレーサーの流出が観察されたのは限られたいくつかの開口亀裂だけであった。このことは、これらの限られた開口亀裂が他の開口亀裂よりも高い連続性を持ち、ゆるみに対して重要な役割を果たしていることを示している。連続性の高い開口亀裂を図-2 に示す。この結果、この岩盤斜面の不安定化のメカニズムは、深さ 3m、5m などの重層的な分離面を有するブロックトップリングであること、またそれらの主な分離面のうち一部は B-2 孔から上部の地表面に高角に確実に連続することなどが示された。

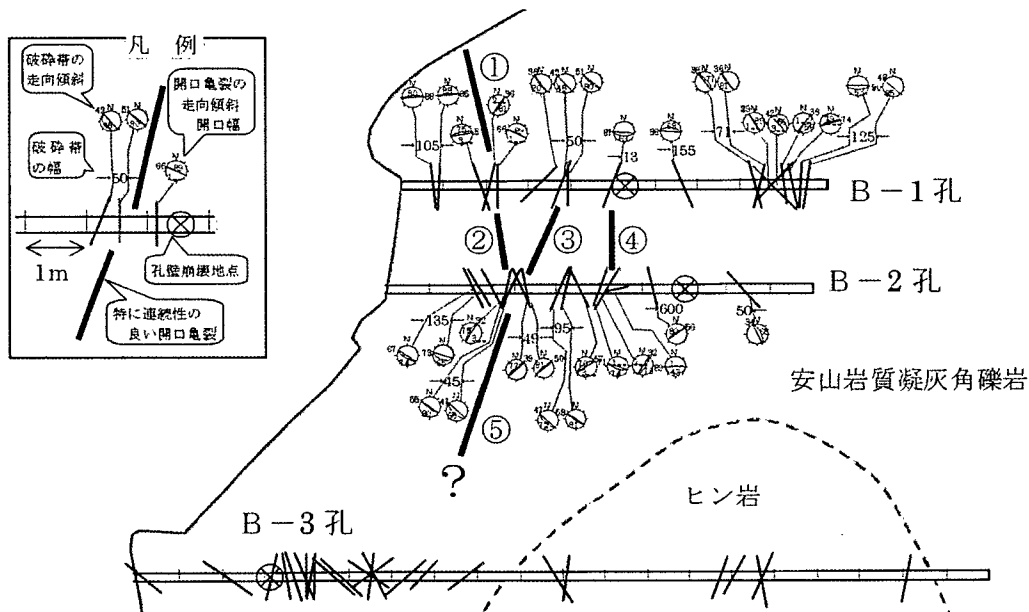


図-2 ボアホールテレビカメラによる主な亀裂（赤線）とエアートレーサー試験により連続性が高いと推定された開口亀裂（黒線）

4. 規模が大きい緩みの調査事例

大規模なゆるみの例として新潟県の岩盤斜面の例を示す。この岩盤斜面では、斜面各所に風穴が存在し、空気の入出が認められる。表面の多くは土壌・植生に覆われ、急傾斜であるため、これらの穴の関係はわからなかったが、エアートレーサー試験の実施によって100m以上連続する開口亀裂であることが判明した。

1) 岩盤の概要

この岩盤斜面は新潟県阿賀野川沿いに存在する流紋岩の貫入岩体で、突出した地形を形成している。この岩体には独立岩峰、山腹の塔状や板状の突出岩体などが多数見られ、国道が直下を通過するため、危険箇所を指定し、各種のモニタリングや対策が施されている。調査を行ったのはその一部分である。この斜面では図-1に示すように比較的下位のA風穴群、中位のB風穴群、S風穴、上位のC風穴群があり、S風穴とB風穴は1m程度大きく開口しており、C風穴では30cm程度、A風穴は表土に覆われているものの数cm程度以上の穴が見られる。

それぞれの風穴は季節によって空気の流入・流出が変化することが観測されていた。

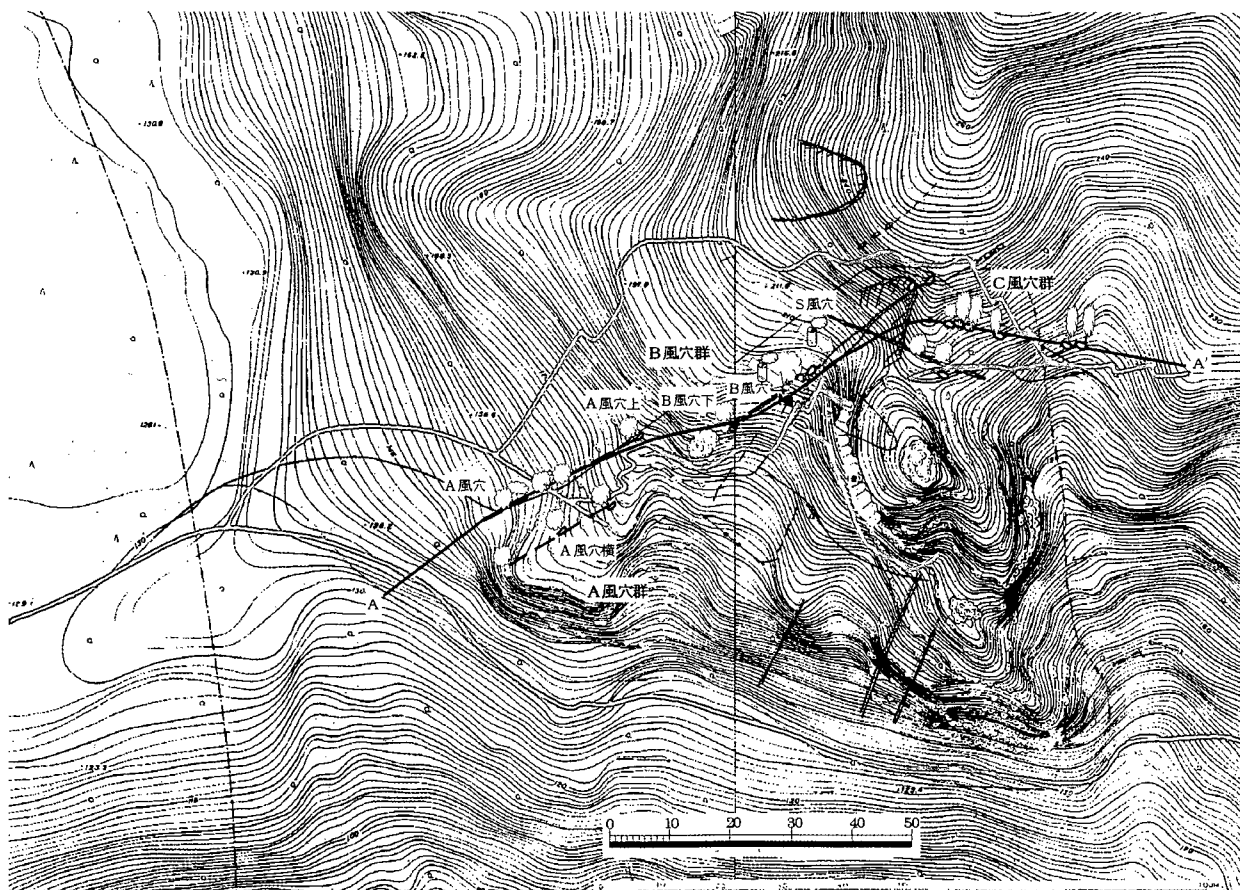


図-1 調査地の平面図

2) 調査の内容

この調査は1998年10月後半の暖かい秋晴れの日、風穴の近くの岩盤斜面において実験を行ったとき、簡易な送風機を利用しB風穴にトレーサーを挿入し、思わぬ結果が得られたことよりスタートした。挿入した

トレーサーは周囲に流出せず25分ほどしてから60mほど斜面下位のA風穴群に移動し流出していることを確認したからである。これほどまで大きな亀裂の連続性を確認した例が無かったためやや詳しく調査した。トレーサーの移動の詳細な調査は1998年11月後半、1999年4月後半に実施し、1999年9月、12月、2000年8月、10月、12月に補足的な調査を実施した。1999年9～12月、2000年8～12月に風穴内外の連続温度計測を実施した。また、風速等も測定した。

3) 調査の結果

<1998年11月後半の調査>

1998年10月後半の実験時と比較して寒冷なみぞれまじりの天候であった。このときはB風穴とS風穴で空気の流入現象が見られ、発煙筒を点火するとトレーサーの煙は風穴内に吸い込まれた。トレーサーは、昨月の実験時と異なり斜面上側に移動し流出した。4箇所風穴で煙をトレーサーとした一昼夜の観測を行い、風穴内外の気温、風速などを計測した結果、トレーサーの移動は岩盤表面風には左右されず、むしろ岩盤内外の気温差に相関が見られた(図-2)。

<1999年4月後半の調査>

当日は天候も良く大変暖かい日であった。このときはS風穴のみで空気の流入が認められるため、トレーサーをS風穴より挿入した。発煙筒の煙はまたたく間に吸い込まれ、トレーサーは98年10月同様に下方向に移動し、B風穴群で大部分が流出、A風穴群に到達したのはわずかであった。このとき併せて9箇所の風穴において内外の気温、風速を観測した結果、トレーサ

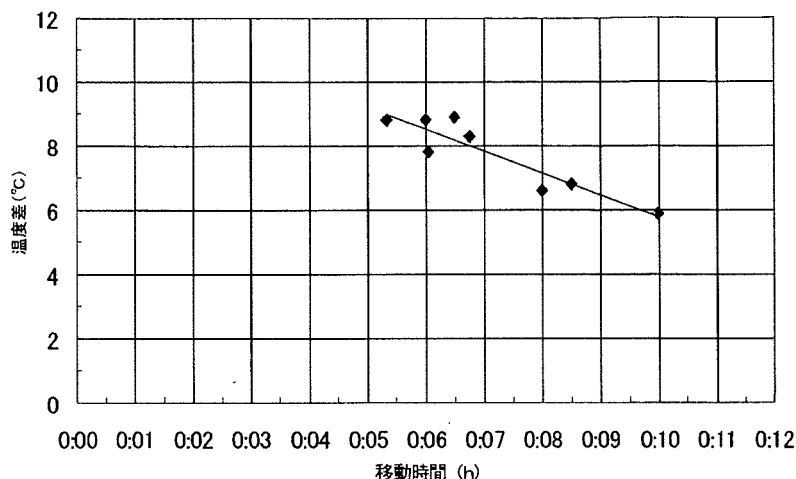


図-2 1998年11月の調査におけるB風穴からC風穴までのトレーサーの移動時間と風穴内外の温度差の関係

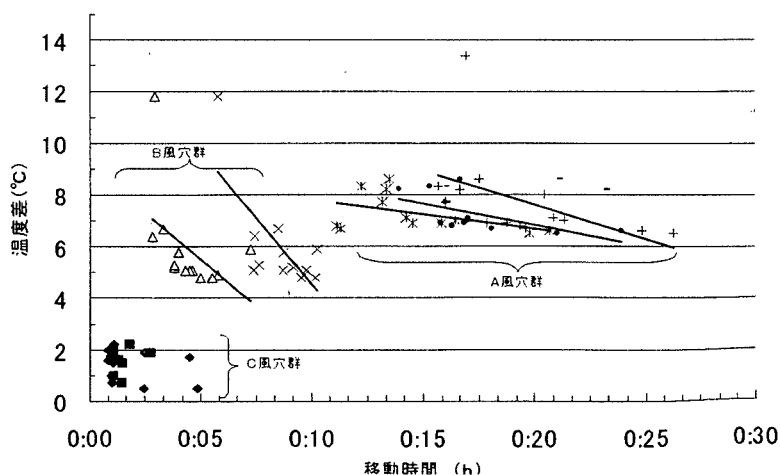


図-3 1999年4月の調査におけるS風穴から各風穴までのトレーサーの移動時間と、S風穴外部と各風穴内部の温度差

一の移動は1998年11月後半の結果と同様に風穴内外の気温差に相関が見られた(図・3)。

<1999年9月後半の調査>

天候は雨で、気温変化が少なく、風穴内外の気温差もほとんど見られなかった。A風穴群は常に流出、B～S風穴は流入と流出の繰り返し、C風穴群では流入出は見られなかった。トレーサーを利用した調査では、空気の流れは絶えず上下方向に変化した。

<2000年8月の調査>

天候は晴れで、最も内外の気温差が大きな時期に調査した結果、S風穴→A風穴間で20分と最も短時間で移動した。

<2000年10月の調査>

天候は晴れで、岩盤内外の気温が逆転する時期を狙って調査した結果、外気温が高い昼の時間はS風穴→A風穴へ空気は下へ向かって流れ、内気温が高くなる夜の時間はS風穴→C風穴へと上に向かう流れであった。

4) 判明した事項

試験の結果、点在する風穴は独立岩峰の北西側側面および北側鞍部を取り囲むように分布し、内部では100m以上連続していることが確認できた。またS風穴の開口亀裂面の観察によると独立岩峰は南方向(斜面下側)に傾動したような形で開口しており、独立岩峰の北西側側面が1m程度大きく開口しているのに対し南北方向に谷を形成している独立岩峰の東側面の開口量は30cm程度で北西側側面のそれに比較して小さいこと、すなわちトレーサーの流出が起こり難いことが推定された。このように開口亀裂の形態、周辺の地形、およびトレーサーの流出分布より、独立岩峰を含む三角形のブロックが斜面下側に傾動し緩んでいることが判明してきた。また、移動速

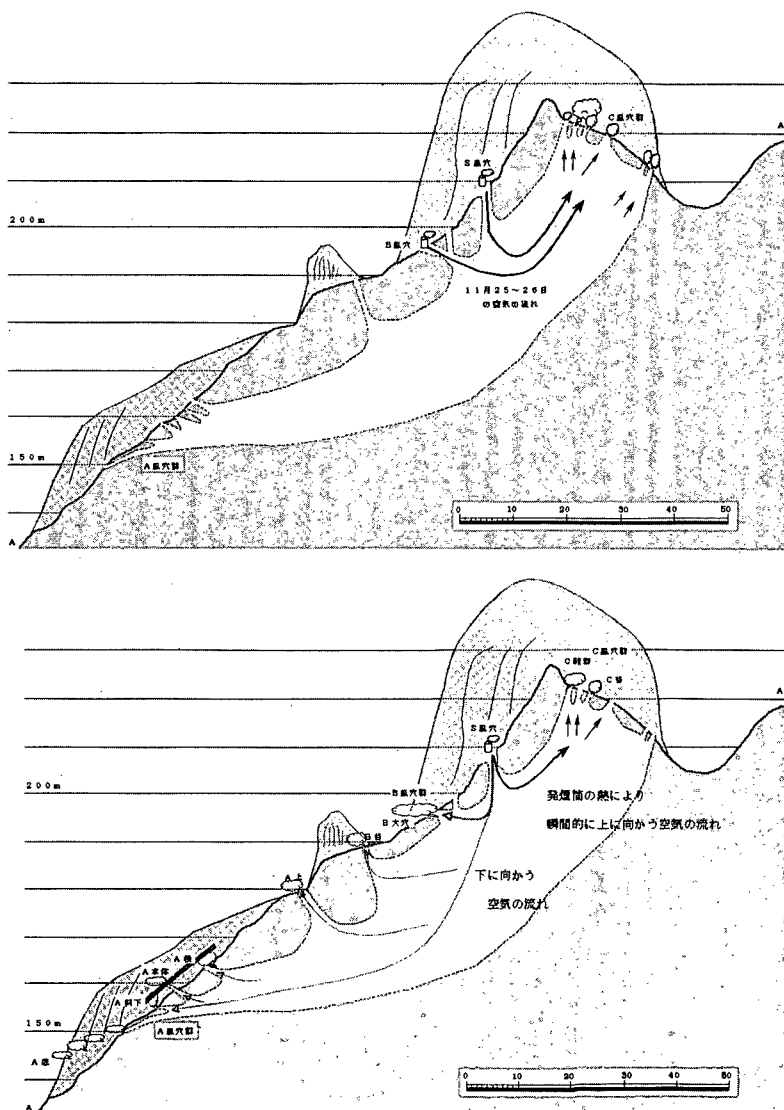
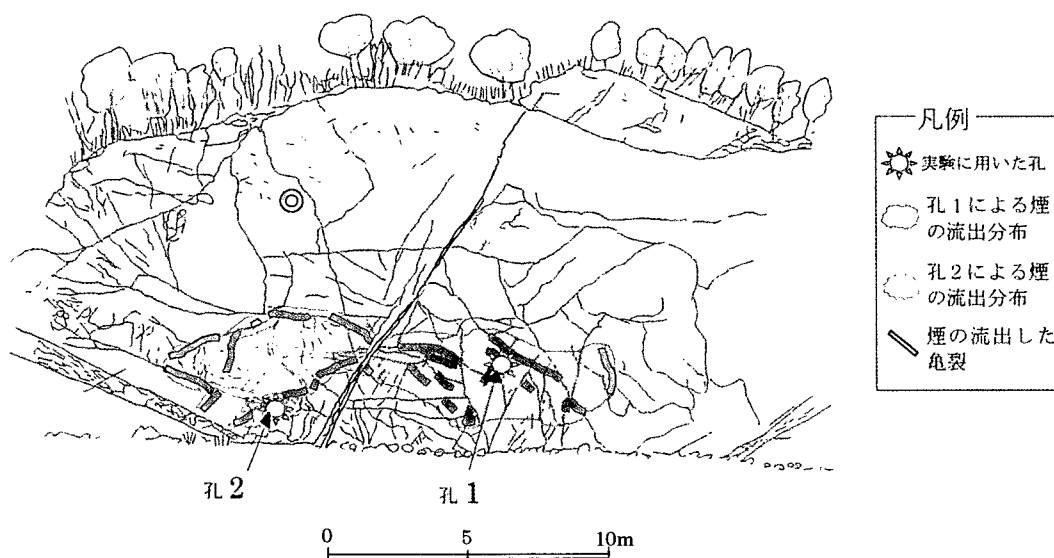


図-4 1998年11月(上)と1999年4月(下)における空気の移動の模式図

度と内外気温差に相関が認められたことから、岩盤内外の気温差により空気の対流が起こっていることが判明した。さらに、流れの方向は、岩盤斜面内部は年平均気温に近いので、夏の時期は岩盤斜面内部の重く冷たい空気が下部に位置する A、B 風穴群から流出し、最も大きく開口した S 風穴よりその量を補うように流入が起こること、逆に冬の時期には岩盤斜面内部の軽く暖かい空気が上部に位置する C 風穴群から流出し、その量は A、B、S 風穴群より流入が起こって補われることが推定される。春と秋には昼と夜で岩盤内外の気温が逆転するので、一昼夜でこの現象が繰り返されることがわかった。なお、このゆるみの原因は不明だが、伸縮計等でも全く動きが見られないことから、過去の大地震など、稀有な誘因で発生したやや古い時期のゆるみの可能性が高いと推定された。

5. 規模の小さいゆるみの調査事例

関東地方にあるこの岩盤斜面は凝灰角礫岩からなる。岩盤には細かい亀裂が発達し、数mm～数cm程度の開口亀裂が確認できる（図－1）。斜面の下部に長さ1m程度の短いボーリング孔がいくつかあり、この箇所のうち1箇所に煙を含む空気を送り込むと、ゆるんだ範囲を取り囲むように岩盤表面の開口亀裂から煙が流出した（図－2）。一方、隣接した別のボーリング孔（孔1）に煙を送り込んだところでは、煙の流出量が少なく、流出箇所も散在していることから、ゆるみが相対的に小さいことが明らかとなった。このように規模の小さいゆるみに対して落石や小規模岩盤崩壊につながりやすい不安定ブロックの範囲を判別する上で、本手法は非常に簡便に試験が可能であることがわかった。



図－1 規模の小さい岩盤斜面での試験例



図－2 試験の状況

おわりに

岩盤斜面中の開口亀裂の連続性やゆるみの性状を推定する方法として、空気を媒体として用いるエアートレーサー試験を開発し、マニュアル化した。本手法をいくつかの現地に適用した結果、これまで困難であった岩盤斜面内部の亀裂の連続性を確認することができた。

本調査法の利点をまとめると以下のとおりである。

- ①微細な開口亀裂から大きな開口亀裂までの連続性の検証が可能。
- ②ゆるみの分布や性状をトレーサー移動時間等の複数の観測要素から判断できる。
- ③機器構成が簡単で、短時間に試験可能。
- ④煙をトレーサーに活用した場合、流出を目視で迅速に確認できる。
- ⑤自然の空気の流れを用いると 100m 以上の亀裂の連続性を確認することができる。
- ⑥目詰め工などの施工の確認も可能。

しかし岩盤中の空気の流れは複雑であるため、試験結果を合理的に解析し、岩盤の安定度を適切に評価する方法については、今回のマニュアルでは十分な内容とすることができなかった。今後は、試験事例をさらに増やし、試験結果の解析方法に関して、マニュアルを充実させる必要がある。

なお、本マニュアルの作成にあたっては、国土交通省や JH の各現場事務所、大学や民間の様々な方々にお世話になった。

国土交通省新道路技術五箇年計画のもと「岩盤・斜面崩壊のリスク評価・マネジメント技術検討委員会（委員長：奥園誠之 九州産業大学教授）」の委員各位には、本試験の実用化に向けた様々なご意見をいただいた。

北海道開発局、東北地方整備局三陸国道工事事務所、北陸地方整備局新潟国道工事事務所、近畿地方整備局大滝ダム工事事務所、九州地方整備局大分工事事務所、JH 静岡建設局、JH 福知山管理事務所には現場をお借りした。平田和彦氏、大石博之氏、井上 亘氏（西日本技術開発㈱）には簡易ボアホールカメラ試作機を活用させていただいた。

梶川昌三氏（現 国土地理院）、品川俊介氏（現 長崎工事事務所）をはじめとする土木研究所諸氏、村上隆氏（復建技術コンサルタント㈱）、原田久也氏（サンコーコンサルタント㈱）、大神昭徳氏（国際航業㈱）、人見美哉氏（北海道開発コンサルタント）、小林豊氏、高木登氏（日本基礎技術）をはじめとする土木研究所交流研究員諸氏には室内実験や現地調査等で協力を受けた。著者の一人である高橋伸尚氏は、本試験法の実用化に向けた室内試験を研究課題として 1 年間交流研究員としてご尽力され、会社復帰後、不幸にして亡くなられた。ここで氏のご冥福を祈りたい。

最後に、土木研究所の中村康夫 地質官、三木博史 技術推進本部総括研究官（元 材料地盤研究グループ長）、萩原良二 材料地盤研究グループ長 には、研究全般に渡り常にご助言をいただいた。

以上の方々に感謝する次第である。