

◆ 特集：道路斜面崩壊のリスクマネジメント技術 ◆

エアートレーサー試験による岩盤斜面の亀裂調査

阿南修司* 佐々木靖人** 大谷知生***

1. はじめに

岩盤崩壊の対策は道路防災上の重要な課題である。岩盤斜面の安定度評価においては、岩盤崩壊の原因となる斜面内の亀裂や節理等の不連続面の分布とその連続性を把握することが重要である。これまでの岩盤斜面の崩壊規模の推定や安定度の評価は、目視観察を主体とした専門家の経験によるところが多く、岩盤斜面の安定度に関する評価方法は、十分に確立していない。

このため本研究では、岩盤内不連続面の状態を効率的に調査する手法および安定度の評価手法を提案することを目的として、新たな試験方法の開発を行った。

2. エアートレーサー試験の開発

2.1 トレーサーによる亀裂調査

岩盤中の亀裂の分布と性状の調査に類似したものとして、地下水調査の中に地下水にトレーサーを混入して地下水の流路を求める試験がある。この方法では、トレーサーの到達範囲や移動速度、濃度分布を測定することで地下水系の流動特性や連続性を知ることが可能である。崩落が懸念される岩盤斜面において特に問題となる開口亀裂のほとんどは地下水位より上にあり、空気が満たされていることから、水の代わりに空気を利用したトレーサー試験を開発し、現場適用試験を行った。

この調査法は、空気にトレーサーを混入して亀裂内に強制的に送り込むことにより、亀裂内の空気の流れをつくり、移動経路、開口亀裂の連続性やゆるみの状況を確認するものである。空気の特徴を利用したトレーサー試験なので、「エアートレーサー試験」と名づけた。

2.2 エアートレーサー試験のしくみ

(1) 試験機器の構成

エアートレーサー試験に用いる装置は図-1に示

すとおり、①送風機、②トレーサー混合器、③計測装置、④送風管、⑤岩盤表面やボーリング孔等の開口亀裂への挿入部分（ロッド、パッカー等）より構成される。

①送風機

送風機によって開口亀裂内に空気を強制的に送り込み、空気の流れを発生させる。現場適用実験においては送風量ならびに送風圧力を確保するため、エンジン式送風機（農業散布機を改造したもの）を用いた。使用したエンジン式送風機の最大流量と最大圧力は、それぞれ $7\text{m}^3/\text{min}$ 、 8.5kPa 程度であった。

②トレーサー混合器

送風機から送られる空気を混合するための部分である。混合装置は、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を取り付けたものを製作した。煙や熱気をトレーサーとする場合は、耐熱性を有する材料で製作する必要がある。

③計測装置

トレーサー流入部の圧力・流量等を測定するために計測装置を設けた。トレーサーの流出範囲だけを調査する場合には、計測装置（図-1の点線部分）を省略することも可能である¹⁾。

④送風管

トレーサーを混合した空気を、市販のダクトホースなどを用いて岩盤まで移動させた。煙を利用する場合には管内が高温になるため、耐熱性・難燃性の材質のものを用いた。

⑤トレーサーの挿入部分

岩盤表面の開口亀裂にトレーサーを挿入する場合は、扁平なノズルを用い、ノズル周辺を油粘土などで閉塞した。ボーリング孔で試験する場合は、パッカーを用いて閉塞したが、孔口から直接トレーサーを投入する場合には開口亀裂と同様に油粘土などで閉塞した。ダブルパッカーは、適当な構造のものが市販されていないので、エアートレーサー試験用に機器を製作した。

Development of the Air Tracer Test, New Survey Method for Fissures in a Rock Mass.

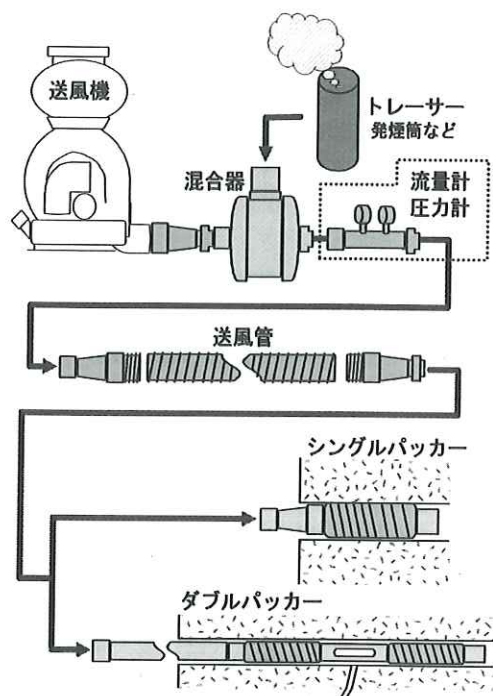


図-1 機器の構成 (ボーリング孔を利用する場合)

(2) トレーサーの挿入方法

実験の目的、実験サイトの岩盤のタイプ、ボーリング孔の有無、足場の有無などの諸条件に応じて、次のような方法でトレーサーを挿入した。

1) 開口亀裂にトレーサーを直接挿入する方法

この方法は、ボーリング孔のない岩盤斜面などで概略的に調査するために用いた。岩盤表面の開口亀裂の形状は様々なので、挿入部分は形状に合わせて取り替えが可能なものとした。岩盤表面の亀裂に送風してトレーサーを挿入し、地表およびボーリング孔内でトレーサーの流出地点と移動時間を観測した。

2) ボーリング孔を利用する方法

ボーリング孔を利用して調査をする場合には2通りの方法を用いた。1つはボーリング孔口をパッカーで塞ぎ、ボーリング孔内全体にトレーサーを挿入する方法で、流出する亀裂箇所の大まかなチェックを行う場合に実施した。もう1つはボーリング孔内の開口亀裂の位置をボアホールカメラで確認した後に、ダブルパッカーで前後を閉塞してトレーサーを挿入する方法であり、特定の亀裂の連続性をチェックすることを目的に実施した。

3) 岩盤斜面内部の空気の流れを利用する場合

開口幅が大きく連続性の良い亀裂では、開口亀

裂の断面積が大きいために送風機で亀裂内に空気の流れを起こすことは限度がある²⁾。しかし、このような規模の大きな開口亀裂内部では岩盤斜面内外の気温差によって自然に空気の流れが発生していることがあり³⁾、その流れを利用して調査することが可能である。

(3) トレーサー

トレーサーとして利用できるものは、煙、ガス、熱などがある。予備実験により、これらのトレーサーの適用性を確認した結果、以下の理由により煙による方法がもっとも効率的であった。

①煙

トレーサーの流出は目視（ビデオカメラ等で撮影）で確認できる。煙の発生源として、発煙筒が利用でき、装置も簡易な設計が可能。

②粉体

煙と同様目視により観察する。重炭酸カルシウムなどが利用できるが、粉体の凝集による目詰まりがあり扱いがやや難しい。

③ガス

不活性ガスによる透気試験や匂い付きのガスによるトレーサー試験が考案されているが、検出にはセンサーが必要である。定量的な試験が可能な反面、センサーの配置数やセンサーの価格といった制約条件が多い。

④熱

熱赤外線映像によって観察する。温度変化として、定量的な観測も可能であるが、岩盤による吸収が大きく、十分な熱源を準備することは難しい。

3. エアートレーサー試験の現地適用試験事例

全国10箇所以上の岩盤斜面において現地実験を行った。ここでは、送風機をもちいてトレーサーを挿入する一般的な試験事例と規模の大きい緩みがあり、開口亀裂内に空気の流れがある場合の試験事例について記載する。

1) 一般的な試験事例

調査地は、比較的軟らかい凝灰角礫岩の海食崖で、写真-1の開口幅10cmほどの亀裂①、亀裂②が上部で結合しており、両者に囲まれた高さ8m、幅5m、奥行き3mの範囲が不安定岩塊と考えられる。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発達状況を調査した。

亀裂①および亀裂②からトレーサーを挿入した

場合、それぞれ亀裂②と亀裂①からトレーサーの流出量が多く、短い時間で到達した(写真-1)。亀裂③にトレーサーを挿入した場合は、亀裂①、亀裂②いずれとも流出するまでの時間が長く、流出量も少なかった。一方、ボーリング孔においてダブルパッカーにより深度を区切ってトレーサーを挿入した場合、ボーリング①(鉛直)の深

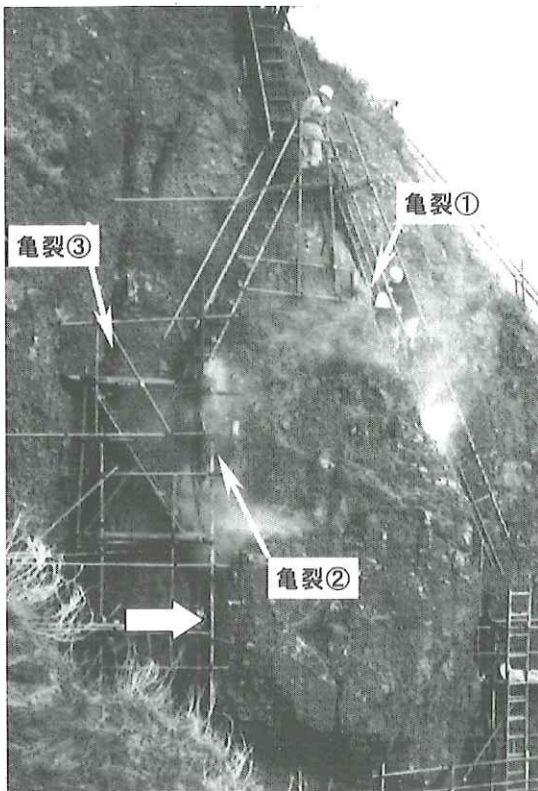


写真-1 送風機によるエアートレーサー試験
矢印の位置から亀裂②にトレーサーを挿入した。亀裂①からは多量に流出するが亀裂③からは流出はみられない

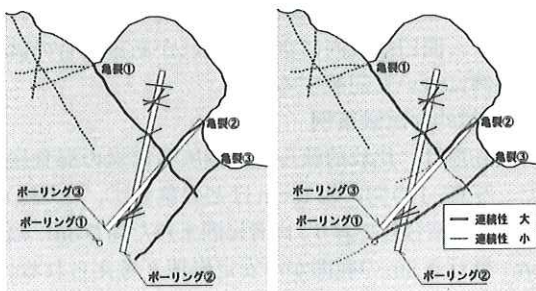


図-2 エアートレーサー試験によって推定された亀裂の連続性(水平断面)

度9.0~11.5mの破碎帯と亀裂③の亀裂の連続性が高いことがわかった。

図-2は、既往の調査手法のみとエアートレーサーの試験を併用した場合、それぞれによる亀裂分布と連続性の推定結果を比較したものである。図のように、エアートレーサー試験を行うことで、岩盤表面やボアホールカメラのデータだけでは把握が困難な、岩盤中の亀裂の連続状況を把握することができた。

2) 規模の大きい緩み箇所での試験事例

調査地は流紋岩の貫入岩体で、突出した地形を形成している。この斜面には図-3に示すように下位からA風穴群、B風穴群、S風穴と尾根をはさんでC風穴群の4箇所を中心として空気の流れが見られる風穴が点在する。中間に位置するS風穴とB風穴は、岩盤が1m程度開口しているのが観察され、この岩盤斜面の中では最も緩んだ箇所となっている。一方、C風穴には最大30cm程度、A風穴には最大5cm程度の穴が存在する。これらの穴は連続した開口亀裂の一部と考えられたが、崩れた岩塊や表土に覆われており、岩盤の規模も大きいことから表面からの調査では連続性は確認できなかった。

S風穴およびB風穴において、岩盤中の空気の流れを用いてトレーサーを挿入した。その結果、図-3のように季節によって異なる範囲でトレーサーの流出がみられ、流出地点を結ぶと100m以上連続する開口亀裂であることが判明した。

温度のモニタリングを行った結果から、亀裂内の空気の流れは、亀裂内の温度と外気温の差に関係し(図-4)、温度差が大きくなると移動速度が

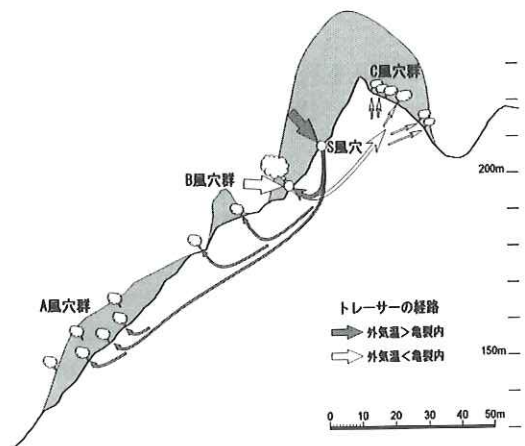


図-3 岩盤内の空気の流れによるトレーサーの移動

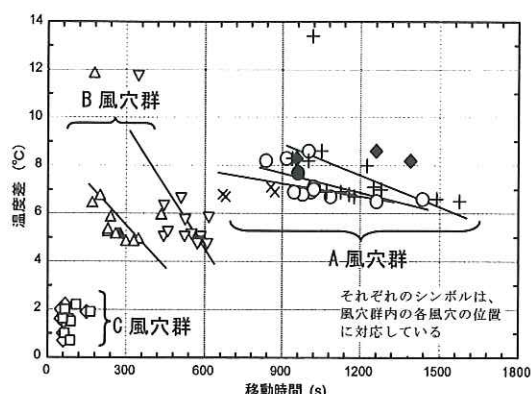


図-4 気温と各風穴内部の温度差とS風穴から各風穴までのトレーサーの移動時間速度の関係

速くなり、温度差が小さくなると移動がほとんど見られなくなった。また、内外の気温が逆転すると亀裂内の空気の流れの方向も逆転し、季節によって流出範囲が異なった。外気温より亀裂内の気温が低い時期（夏）には下向き、亀裂内の気温が高い時期（冬）は上向き、昼夜で岩盤内外の気温が逆転する時期（春・秋）には、気温の変化にしたがって流れが逆転する現象が確認できた。

4. エアートレーサー試験結果の評価方法の検討

ここでは、トレーサーの移動距離・移動時間・流出パターンなどから開口亀裂の性状を解釈する方法について考察する。

4.1 送風機を用いたエアートレーサー試験

トレーサーの移動速度について検討するために、平板を重ねた模型による室内実験を行った結果では、図-5のように、開口幅が5mm以下では壁面の抵抗が増大するため空気が流れにくくなり、移

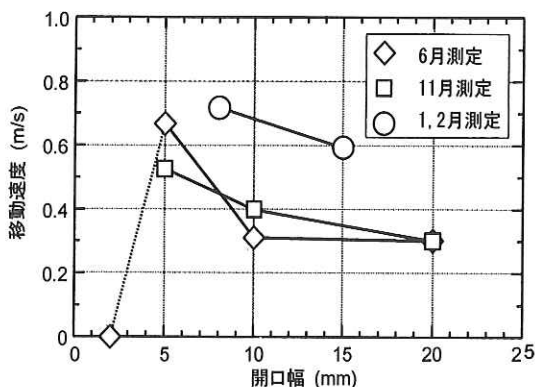


図-5 室内試験による開口幅とトレーサーの移動速度の関係（人工亀裂による実験、移動距離9.49m）

動速度が小さくなった⁶⁾。逆に、10mm以上であれば壁面抵抗の影響が小さくなるが、亀裂の断面積が大きくなるため移動速度は再び小さくなった。すなわち、トレーサーの移動速度は開口幅5mm～10mmのときに極大となる。

一方、図-6は現地適用実験における、エアートレーサーの移動時間と移動距離とトレーサーの関係を示したものである⁷⁾。図には、一定の厚みの亀裂内をトレーサーが同心円状に広がる場合の計算値も示した。これによると、トレーサーの移動速度はいずれの岩盤でも、0.05～0.2m/sの範囲であり、移動距離が大きくなると移動速度が低下している。現地実験では、亀裂の開口度が大きいほど流出までの時間が短い傾向が見られ、大きな移動速度を示すものは開口幅数cm程度の相対的に大きな開口亀裂である。

現地試験で室内試験のような開口幅の増加による移動速度の低下がみられないことの原因としては、現地試験では開口亀裂に沿う流出よりも亀裂の交差箇所などからスポット的に流出することが多いことから、実際の岩盤中においては亀裂の断面が複雑であることやネットワーク状になった亀裂が管状の形状となることが考えられる。この場合、移動距離の増大にともなう断面積の増大が起きないため、速度低下が小さくなると思われる。

送風機を利用する方法では、図-6のように移動距離が10mを超えると、移動速度は急激に低下する。このため、大規模に開口したゆるみ岩盤に対し送風機で送風した場合、挿入口から10mを超える範囲では自然の空気の流れに逆らってトレー

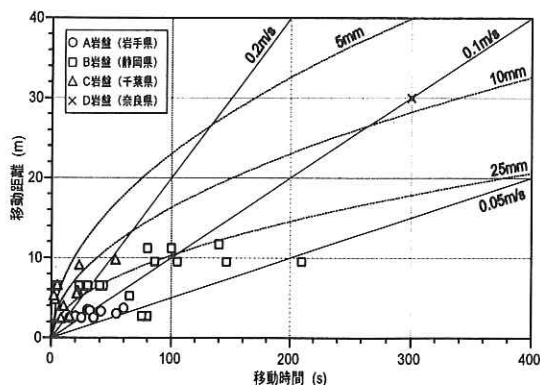


図-6 トレーサーの移動距離-移動時間の関係

点線：5、10、25mmの厚みの亀裂中を煙が同心円状に広がる（壁面抵抗と重力の影響を無視した）場合

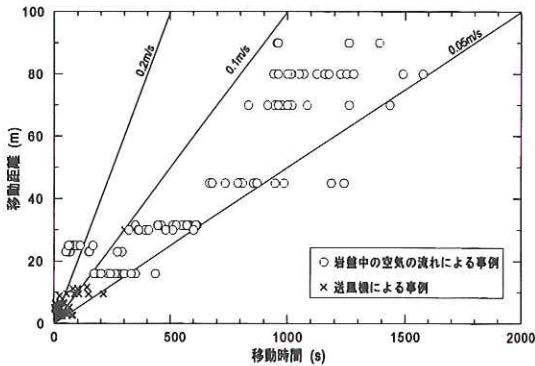


図-7 岩盤内部の空気の流れによるトレーサの移動距離と移動時間の関係

サーを到達させることは難しい。したがって、人工的な方法による調査限界は10m程度、条件の良い場合（自然の空気の流れが小さい場合）でも20～30m程度と考えられる。

4.2 岩盤内部の空気の流れを利用する試験

図-7は現地実験から得られた移動時間と移動距離の関係を示したものである。図-7の様に、大規

模に開口したゆるみ岩盤における自然の空気の流れは0.05～0.1m/sの速さで、移動距離による速度の変化は少ない。すなわち、自然の空気の流れを用いた場合、トレーサは送風機を用いた場合と比べ安定的に遠方まで到達するということである。このように、大規模な岩盤斜面では亀裂内の空気の流れを利用するエアートレーサー試験が有効である。

空気の流れを利用し、広がり大きい開口亀裂によるゆるみを把握するためには、温度差による空気の移動を有効に利用することが必要である。夏期には斜面上部から、冬期には斜面下部からトレーサを挿入することで岩盤斜面全体の開口亀裂の分布を調査する事ができる。春・秋の時期には昼と夜で岩盤内外の気温が逆転するので、内外気温を観測しながら試験を実施すれば、一日のうちに開口亀裂を調査することが可能である。

4.3 エアートレーサーによる岩盤の安定度評価

送風機を用いた現地適用試験では、広い範囲に開口亀裂が分布する岩盤において、大量のトレー

表-5 エアートレーサー試験の試験結果による岩盤の評価（送風機を利用する場合、挿入量5～7m³/sec）

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	ゆるみの性状
広い 10m以上	面的	大量	多様 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 評価：特大のゆるみ。要注意。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
	スポット的	煙突の煙のように流出			内部の平均開口幅数cm以上 複数の亀裂系の複合、ないしは亀裂に凹凸がある、開口亀裂の一部が土壌に覆われている、など	
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 評価：広範囲に開口亀裂が分布するゆるみ。要注意
	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、ないしは亀裂に凹凸がある、開口亀裂の一部が土壌に覆われている、など	
	面的	小～中量	中程度～薄い	一般に速い 概ね 0.05m/sec以上	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：中 評価：広範囲に開口亀裂が分布するゆるみ。要注意
	スポット的				内部の平均開口幅数cm程度 複数の亀裂系の複合、ないしは亀裂に凹凸がある、開口亀裂の一部が土壌に覆われている、など	
	面的				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 評価：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、ないしは亀裂に凹凸がある、開口亀裂の一部が土壌に覆われている、など	ゆるみ範囲：大～中 ゆるみ程度：小 評価：亀裂の方向性やゆるみの形態によっては要注意
狭い 1～2m程度	面的	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 評価：落石等要注意
	スポット的	小～中量	中程度～薄い	一般に速い	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 評価：流出個所がブロックを取り囲む形状でなければ問題は少ない
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

サーが小さな移動速度で広範囲に流出することが観察された。逆に開口亀裂の分布が少ない岩盤ではトレーサーの移動速度が小さく、ごく少量のトレーサーが狭い範囲で流出した。中程度のゆるみではトレーサーの移動速度が大きく中程度の量のトレーサーが流出した。このようなトレーサーの流出形態と岩盤状況の関係をまとめると、表-1のようになり、流出特性の相違を判別することにより、ゆるみ性状を推定することができると考えられる⁸⁾。ただし、表-1については、これまで行った現地適用試験の結果に基づいたものであり、今後のデータの蓄積により修正される可能性がある。

岩盤内の空気の流れを利用する試験の結果の解釈は、送風機を用いる方法(表-1)とほぼ同じとなるが、岩盤内の空気の流れは、開口亀裂の規模が大きいほど速いことに注意する必要がある。また、岩盤内の空気の流れを測定する場合は、亀裂周辺の風の状況や岩盤内の温度などに注意しなければならない。

5. まとめ

岩盤亀裂の新たな調査法として、エアートレーサー試験を開発して現地適用試験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 新たに開発したエアートレーサー試験は、亀裂間の連続性とゆるみの範囲を推定できる。
- (2) 岩盤の安定度調査法については、エアートレーサー試験におけるトレーサーの移動距離や移動時間とともに、流出量や濃度等を解析することで、岩盤の安定度をある程度推定できる。

岩盤斜面の対策の立案や危険度判定を的確に行うためには、岩盤の状態を定量的に評価するとともに、三次元的に岩盤の状況を把握する必要がある。今後は本研究で検討した亀裂の分布と連続性

の調査方法を定量的な評価に結びつける方法について、検討する必要がある。

なお、本研究で開発したエアートレーサー試験は「岩盤中の亀裂探査法(特許第3433225号)」として特許を取得した。

参考文献

- 1) 大谷知生、佐々木靖人、脇坂安彦：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, 平成10年10月。
- 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：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, 平成11年9月。
- 3) Yasuhito Sasaki, Tomoo Ohtani, Yasuhiko Wakizaka: Air tracer test - a new method for investigating crack persistence and loosening -, International conference on geotechnical and geological engineering (GeoEng 2000), Melbourne, Australia, Volume 2 (Extended Abstract), p.15. 2000, 11.
- 4) 大谷知生、佐々木靖人、脇坂安彦：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, 平成11年10月。
- 5) 大谷知生、佐々木靖人、大神昭徳、脇坂安彦：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, 平成11年10月。
- 6) 高橋伸尚、大谷知生、佐々木靖人、脇坂安彦：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, 平成12年10月。
- 7) 大谷知生、佐々木靖人、脇坂安彦：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, 平成12年10月。
- 8) 脇坂安彦、佐々木靖人、阿南修司、大谷知生、高橋伸尚：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)、土木研究所資料、第3878号、56p, 平成15年1月。

阿南修司*



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主任研究員
Shuji Anan

佐々木靖人**



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上席研究員
Yasuhito SASAKI

大谷知生***



国土地理院地理調査部防災地理課技術専門職(前地質チーム研究員)
Tomoo Ohtani