

## II-4 ダム基礎等におけるゆるみ岩盤の評価に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平11～平17

担当チーム：地質チーム

研究担当者：佐々木靖人、倉橋稔幸

### 【要旨】

本研究は、ダム基礎におけるゆるみ岩盤の発生機構解明と地質調査手法の提案を目的として、ゆるみ岩盤の事例分析と、定量的な地質調査手法の開発をおこなったものである。そのためにまず、全国におけるゆるみ岩盤196事例を収集し、ゆるみ岩盤の地形・地質・形状・物性等の傾向や共通事項を分析し、ゆるみ岩盤の発生機構を三つに分類した。次に、ゆるみ岩盤が開口亀裂を有する特徴に着目し、その開口量やずれの分布からゆるみに関する亀裂の定義および指標試案、ならびに横坑や露頭等におけるゆるみ性状の分類試案を作成した。また、ゆるみの進行に伴う岩盤物性や性状の変化を利用した、ゆるみ指標や岩盤の区分・計測方法を提案した。

キーワード：ゆるみ岩盤、発生機構、開口亀裂、分類試案、地質調査

### 1. はじめに

岩盤の中には、応力解放などによって開口亀裂が発達して岩盤が変形しやすくなり、もともとの岩盤の諸性質が大きく損なわれた領域がしばしば存在する。本研究ではこのような岩盤を「ゆるみ岩盤」として取り扱い、「応力解放・重力作用・風化作用等に起因した変形・体積増加・密度減少などにより、亀裂の発生・開口・ずれなどを生じ、岩盤の状態を保ちつつも全体として変形しやすかつ非弾性的性質が大きくなった状態」と定義した。

開口亀裂を伴うゆるみ岩盤は、低い力学強度と高い透水性を有し、ダム基礎や貯水池の器に好ましくないため、これまでダム基礎からゆるみ岩盤を避けたり掘削除去することで対処してきた。しかし近年、諸般の事情から地質的に不良なサイトが増加するのに伴い、ダム基礎周辺にゆるみ岩盤の分布する事例が多くなってきた。しかも、コスト縮減や環境保全等の観点から、ゆるみが軽微で基礎等として問題のない場合には掘削量を抑制したいという要請が急増している。またその一方で、貯水池の斜面変動など、ゆるみ岩盤に起因する問題も発生しており<sup>1)</sup>、慎重な対応が必要である。しかし、これまでにゆるみ岩盤の統一された定義や分類さえもなされず、ゆるみ岩盤の実態や性状は十分に解明されていない。

そこで本研究では、ダムのゆるみ事例を分析し、ゆるみ岩盤の実態と性状を明らかにし発生機構を解明したほか、亀裂に着目したゆるみ指標やゆるみ岩

盤の定量的な区分・計測方法を提案した。

### 2. 研究方法

#### 2.1 ゆるみ岩盤の事例分析

昭和50年から平成11年の約30年間に旧土木研究所地質研究室が関与した856ダムの記録について、「ゆるみ」、「オープクラック」、「開口亀裂」、「クリープ」、「シーティング(ジョイント)」、「低角度節理」、「トップリング」、「岩すべり」、「やせ尾根」、「高透水ゾーン」、「低地下水位」、「流入粘土」などのキーワードを含み、それがゆるみを伴うまたはゆるみに起因すると判断され、かつそれがダム築造上、多少なりとも課題となっているダムの事例を検索した。その結果、196の事例を抽出した。これは全記録の22.9%にあたる。このうち、地質や所在の明らかな、81ダム(90件)について、ゆるみ岩盤の発生部位やゆるみ域の地質を分析した。さらに、事例も多く問題となりやすい「斜面のゆるみ」のうち、地形・地質・物性などの調査資料が特に整っている40件の事例(地質との関係については52事例)について、地形・地質・地域・形状・地質性状の特徴を分析した。

#### 2.2 ゆるみ岩盤の地質調査方法の提案

##### 2.2.1 ゆるみ岩盤の分類試案

前述の40事例におけるゆるみ評価基準を分析し、共通事項をまとめ、ダムにおけるゆるみに関する亀裂の定義および指標試案、ならびに、横坑や露頭等

におけるゆるみ性状の分類試案を作成した。

### 2. 2. 2 ゆるみ岩盤の定量的な区分・計測方法

地表露頭やボーリングコア、横坑で観察されるゆるみ岩盤の亀裂は、重力作用等の変形による破壊面としてよりも、節理・層理・片理・破碎帯・断層など既存の亀裂を分離面として開口していることが多く、もとの岩盤に比べ、①密度低下、②開口亀裂の発生・拡大、③低強度、④非弾性的性質、⑤高透水性、⑥不均質性（二次的な性質）、⑦不安定性（二次的な性質。主に斜面の場合）等の性状・物性を示す。そこで、これらの性状や物性変化に注目し、ゆるみの定量的な区分・計測方法を開発した。

## 3. 研究結果

### 3. 1 ゆるみ岩盤の発生機構の解明

#### 3. 1. 1 ゆるみ岩盤の発生部位と問題

196件の事例から、調査資料が比較的整っている81ダム（90件）の事例を抽出し、ゆるみ岩盤の発生部位を分析した。その結果、全体の約7割にあたる64件がダム基礎のアバットメントや、のり面等の斜面部のゆるみである（図-1）。さらにそのうち、45件におけるダム築造に伴う問題を調べたところ、高い透水性、地下水位の低下、のり面の安定性、岩盤強度等の問題が認められた。このうち、のり面の安定性の問題が全体の4割強を占め、最も多い（図-2）。

(11) 12.2%	(64) 71.1%	その他 5.6%	(10) 11.1%
河床	斜面部	(5)	不明

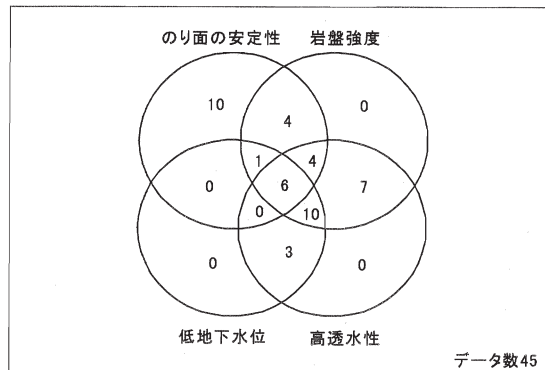


図-1 ゆるみの発生部位

図-2 ダム築造におけるゆるみ岩盤の問題の集合図

#### 3. 1. 2 ダムにおけるゆるみ岩盤の出現頻度

地域別に見ると、突出して多いのは広島県（70%）ないし中国地方（50%）である。これは主に広島型花崗岩のシーティングジョイントによるところが大きい。このほかにもゆるみが問題になりやすい地域として、中生代層が広く分布する地域（中国地方、岩手、岐阜、福井、熊本など）があげられる。ただし花崗岩や中生代層が分布していても、山地の起伏量が大きくない地域では、必ずしもゆるみの発生率が高くない傾向にある。また、新第三紀～第四紀の比較的新しい火山岩や凝灰岩の分布域、特にグリーンタフ地域などでもゆるみが多く生じている地域がいくつか見られる（山形県、46%など）。逆に新第三紀～第四紀の堆積岩で水成堆積岩の地域は問題にならない箇所が多い（千葉県、0%など）。

#### 3. 1. 3 ゆるみ岩盤の発生機構

ゆるみが課題となっている（いた）45件のゆるみ事例から、その発生機構は以下の三つに分類される。

- ① 浸食に伴う応力解放（シーティングジョイントなど）
- ② 重力変形作用（主に斜面でのクリープなど）
- ③ 風化による作用（低強度化・膨張収縮による亀裂の発生など）

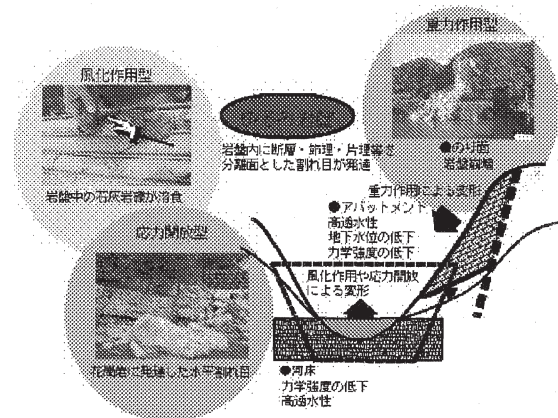


図-3 ゆるみ岩盤発生機構の分類

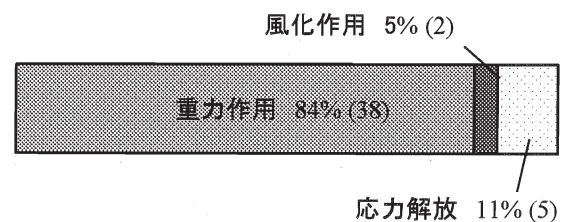


図-4 ゆるみ岩盤発生機構の割合

まず①応力解放により形成されるゆるみは、主に地表の岩盤の長期的な浸食作用により、上方や側方

からの岩盤への荷重が減少しての岩盤が浮き上がることで、層理面や節理面が分離したり、新たな解放節理が発生したりして生じる。一部には基礎岩盤の掘削中に生じた事例もある<sup>2)</sup>。

次に②重力作用によるゆるみは、斜面部で「トップリング」や「岩盤クリープ」などの変形形態を示し、全体の約8割を占める(図-4)。

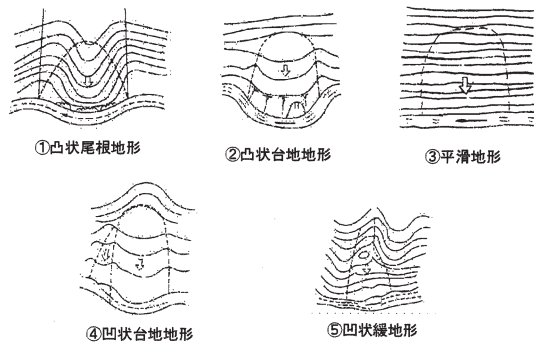
最後に③風化作用により形成されるゆるみは、乾湿の繰り返しによる物理的風化、方解石の溶脱、膨潤性粘土による化学的風化を原因とし、風化に弱い岩盤が選択的に隙間を生じたり膨張したりすることにより亀裂を発達させる。

### 3. 1. 4 斜面におけるゆるみ岩盤の性状

#### (1)地形

前述のように、ゆるみ岩盤の多くは斜面部で発生し、重力作用に伴う変形により面やアバットメント等の斜面安定性等の問題を生じる。そこで斜面部における52事例に焦点をあて、地形・地質・すべり形状の特徴を分析した<sup>34)</sup>。

ゆるみ域の地形を図-5のように区分したところ、半数以上が凸状尾根型地形であった(図-6)。凸状台地地形とあわせると、約6割がこのような凸状地形に属する。また、斜面の頂部付近に緩斜面や平坦面・二重(多重)山稜などが見られることもある。その他、いったんゆるみが発生すると雨水がゆるみ岩盤内に浸透しやすくなるため、地表では水の流れが乏しくなり、沢の発達が乏しいのっぺりとした斜面を形成することも多い。しかし、地すべりと比べて過去の変動量が微小なことや、ゆるみ領域と周辺の岩盤との差異も大きくないことなどから、地形にも現れにくいと考えられ、空中写真の地形判読からも判



別しにくい。

図-5 地形区分

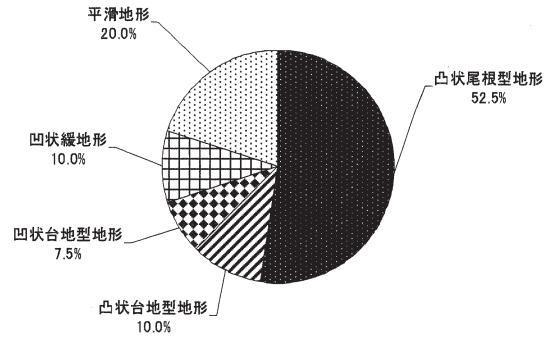


図-6 ゆるみ域の地形頻度分布

#### (2)地質

図-7は、ダム基礎の地質別割合(国土交通省(旧建設省)・水機構(旧水公団)・地方自治体の治水関係ダムのうち数値国土情報に登録されているダムならびに平成13年度までに土木研究所地質研究室で技術指導がなされたダムのうち位置データがあったダム計1142ダムが対象)と、ゆるみのあるダムの地質別割合(ゆるみがあることが明らかで52事例が対象)を比較したものである。なお、参考として日本の表層地質の割合も示した<sup>7)</sup>。その結果、ゆるみ事例は中生代の堆積岩で最も多く(36%)、次いで凝灰岩と深成岩(いずれも17%)である。特に中生代の堆積岩と凝灰岩は、ダム基礎の地質割合(中生代の堆積岩が18%、凝灰岩が9%)と比較していずれもほぼ2倍であり、これらの岩質でゆるみが顕在化しやすい傾向にある。中生代の堆積岩や凝灰岩は一般に塊状・硬質で層理面をもち、この層理面に沿って粘土化した脆弱層を挟んでいることがあり、この脆弱層がゆるみ拡大に関与していると考えられる。

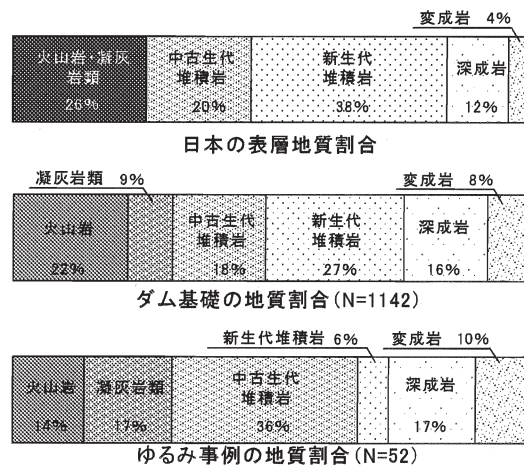


図-7 ゆるみ域の地質頻度分布

(3)形状

図-8は、ゆるみ域の中心幅(ほぼ最大幅に相当)、頭部から末端部までの長さ、代表部の最大深さ、平均斜面勾配を読み取り、平均化して整理したイメージ図である。参考として、統計<sup>9)</sup>による平均的な地すべりの形状も示した。40事例のゆるみの平均的な形状は、幅142m、長さ186m、深さ37m、勾配36°であった。一方、地すべりの平均的な形状は、幅180m、長さ295m、深さ18.5m、勾配16°である。各数値のゆるみ岩盤/地すべり比は、幅0.79、長さ0.63、深さ2.01、勾配2.25(tanで比較すると2.53)である。これによると、ゆるみ岩盤は、同程度の幅・長さの地すべりに比べ、深さが2.5~3倍深く、また、斜面勾配も2.5倍程度大きい。なお、幅/長さ比についても、地すべりが0.61程度に対してゆるみは0.76であり、ゆるみ岩盤は25%程度幅広である。

次にゆるみ岩盤の形状を地質毎に比較すると、地すべりの形状に最も近いのは凝灰岩類であるが、それでも勾配は26°である。火山岩類では勾配は44°と非常に大きく、変成岩や堆積岩も37°程度である。

このようなゆるみ形状の違いは、ゆるみ岩盤の地質構造や物性に起因していると推定される。

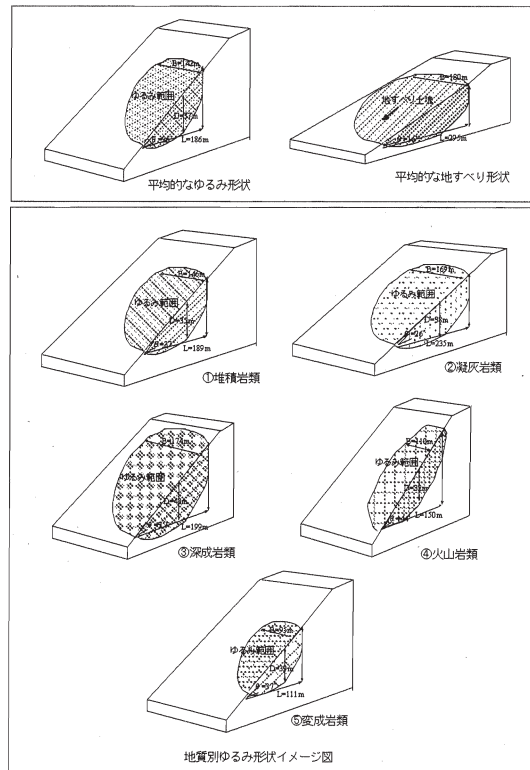


図-8 ゆるみ形状イメージ図

(4)ゆるみ境界部付近の地質性状

ゆるみ域と非ゆるみ域の地質性状(割れ目の開口性、岩

級、弾性波速度、ルジオン値)のコントラストが比較的明瞭なものは全体の37.5%であり、残り62.5%は漸移的である。前者は地形的には凹状緩地形に多く、後者は凸状台地地形に多い。

ゆるみ境界部付近の弾性波速度は図-9のように1.0~2.8km/sの範囲にある。非ゆるみ域とゆるみ境界部の弾性波速度比は、ばらつきはあるがおおよそ2:1であった。

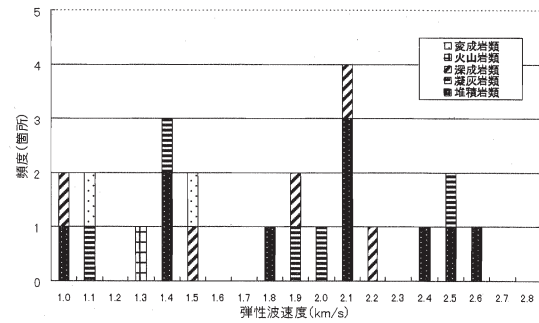


図-9 ゆるみ域の弾性波速度頻度分布

ゆるみ域の最小ルジオン値(ゆるみ境界付近のルジオン値)は図-10のように、10ルジオン~50ルジオン以上までばらつくが、全体の75%が10~30ルジオン程度である。また、その際にはアバットメントの横坑やボーリング孔に地下水位が認められないことが多い。

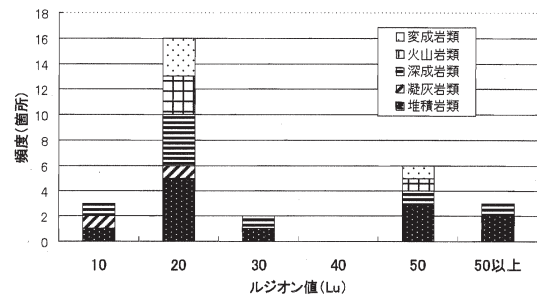


図-10 ゆるみ域のルジオン値頻度分布

3.2 ゆるみ指標の実態と試案

3.2.1 斜面におけるゆるみ評価基準の実態

(1)ゆるみ評価基準とその指標

斜面でのゆるみ実態調査を行った40箇所のダムのうち、個別のゆるみ評価基準を有する箇所は12箇所(30%)であった。このような基準のあるダムでは、ゆるみの程度に応じてゆるみ域内を複数区分している箇所もあり、4区分もしている箇所が5事例あった。いっぽう、明確なゆるみ評価基準がない箇所28箇所のほとんどは、ゆるみ域は1区分であった。

ゆるみ評価基準のあるダムにおけるゆるみ評価指標をまとめたのが表-1である。これを見ると、下記の順に良く用いられている。ゆるみの程度とこのようなゆるみ指標の関係は、ダムにより異なっており、一概に整理することはできないが、概略的にまとめると表-2のようになる。

- ① 横坑内の岩盤性状（岩級、石積状などの表現）
- ② ボーリングコア形状や風化状態
- ③ 亀裂の開口性
- ④ 流入粘土
- ⑤ 亀裂の酸化・褐色化（亀裂内粘土やその連続性を含む）
- ⑥ ルジオン値等(PQ曲線、地下水位を含む)
- ⑦ 弾性波速度
- ⑧ 変位量
- ⑨ その他(せん断試験や変形試験などの試験によるものなど)

ただし、このうち⑧「変位量」については、今回調査したダムの多くは現在顕著な動きがないと判断されているゆるみであったためか、ゆるみの基準には取り上げられていない。しかしゆるみの安定度評価においては最も重要な指標であり、また、一見動きのないゆるみについても、精密な観測を行えば微小な変動がとらえられる可能性もあることから、微小な変動を精度よく計測することでゆるみの評価を行うことも今後の展望として考えられる。

表-1 独自の評価基準を有するダムにおけるゆるみ評価指標項目一覧

ダム名	ゆるみ評価指標	評価項目キーワード
Aダム	横坑・ボーリングコアの岩盤性状（割れ目状況及び傾斜角） 上下部間の割れ目の観察 開口割れ目線の計測（開口割れ目線間距離） 弾性波速度、透水性状（ルジオン値）	横坑内観察（割れ目開口量） ボーリングコア観察 （コア形状、流入粘土） 弾性波速度、ルジオン値
Bダム	岩盤の酸化程度 流入粘土の有無 割れ目面の状態	横坑内観察 （酸化・流入粘土）
Cダム	ボーリングコア形状 割れ目面の褐色化の有無、流入粘土の付着の有無 透水性状（ルジオン値）	横坑内観察 ボーリングコア観察 （酸化・流入粘土・コア形状） ルジオン値
Dダム	割れ目の開口程度および割れ目沿いの褐色化 ボーリングコア形状 ポアホール観察による亀裂開口量、亀裂のかみ合わせ 横坑内の岩盤性状（風化程度、流入粘土の有無） 透水性状（ルジオン値） 弾性波速度	横坑内観察 ボーリングコア観察 （酸化・流入粘土・コア形状・亀裂開口） ルジオン値 弾性波速度
Eダム	横坑内の亀裂開口の程度、流入粘土の有無 ボーリングコア形状 透水性状（ルジオン値、P-Q曲線の立ち上がり具合）	横坑内観察 ボーリングコア観察 （亀裂開口程度、流入粘土・コア形状） ルジオン値・P-Q曲線
Fダム	横坑内の岩盤性状、風化状態	横坑内観察（風化）
Gダム	岩盤性状、開口亀裂の程度 ボーリングコア形状	横坑内観察 ボーリングコア観察 （亀裂開口程度・コア形状）
Hダム	岩盤性状、亀裂開口量	横坑内観察（亀裂開口量）
Iダム	岩盤性状、開口亀裂の程度、開口亀裂の連続	横坑内観察（亀裂開口程度）
Jダム	横坑内の岩盤性状、亀裂開口量 ボーリングコア形状、かみ合わせと透水性（ルジオン値）の組み合わせ	横坑内観察 ボーリングコア観察 ルジオン値
Kダム	岩盤性状、割れ目の開口程度 割れ目面の褐色化、割れ目沿いの流入粘土の有無	横坑内観察 ボーリングコア観察
Lダム	割れ目酸化、割れ目沿い粘土 ボーリングコア形状 透水性状（ルジオン値、P-Q曲線形状）	横坑内観察 ボーリングコア観察 ルジオン値

表-2 ゆるみ岩盤の評価基準の実態

区分	ゆるみ評価指標とされている主な項目				物理探査 （弾性波速度）	透水性状 （ルジオン値）
	横坑内岩盤性状	亀裂の開口性	亀裂開口状態	ボーリングコア形状		
ゆるみ（ゆるみ）	石積み状（岩盤性状）	亀裂が不明瞭（土砂の混入） 開口が小さい コア形状の開口		土砂状 亀裂状		
ゆるみ（ゆるみ） 高移等 （ゆるみ）	ブロック状 安定した 岩盤性状	開口している コア形状の開口	流入粘土を介する 褐色化が著しい		1.0~2.8km/sの範囲	平均的に20~50μの範囲
ゆるみ	実位無し	開口が小さい 開口が多い		浸透状		
ゆるみ	堅密	密着している ほとんど開口してない	流入粘土を介しない 褐色化が著しい 一部褐色	浸透状		

(2)ゆるみ評価指標の試案

前節のゆるみ基準やゆるみ指標ならびにその表現例には、ゆるみ評価において重要な指標として、「開口亀裂」、「横坑等でのゆるみ性状」、「コア形状」等がある。このほかに「ずれを有する亀裂」も重要である。このうち、「コア形状」は、調査の結果、従来のコア形状区分（JACIC様式）でも、基本的に必要最小限の分類はできるが、それ以外の指標は、通常の岩盤分類方法などで岩盤性状を正確に記載できないため、「ゆるみ岩盤」に特化した標準的な記載方法や分類方法を提示する必要がある。そこでここでは、「開口亀裂」、「ずれを有する亀裂」、「横坑等でのゆるみ性状」のみを取り上げ、それらの定義・定量的な指標・分類方法等の試案を表-3に提案する<sup>6)</sup>。

たとえば開口亀裂に対しては、調査すべき開口亀裂そのものの定義とともに、ゆるみの程度と関係があると思われる定量的指標として、開口亀裂数、開口亀裂出現率、開口量、累積開口量、最大開口量などを定義・提案した。このような複数の定量的指標を提案する理由は、ゆるみの評価を多面的に行うためである。また、表-3で提案しているゆるみ岩盤の定性的な岩盤分類については、まず最大開口量（ずれ量）、ついでその出現頻度に着目している。この理由は、既往ダムの調査事例において最も重要な指標とされていることもあるが、ゆるみという現象の性格から見ても、最大開口量がゆるみの程度を第一に決定づける指標であるためである。すなわち、開口（ないしずれ）という現象は、マスとしての岩盤から、その一部分が、分離していく状況を端的に示しており、最大開口（ずれ）量は分離の程度を端的に表すと考えられるからである。

以上のように、表-3にもとづき岩盤性状を客観的ないし定量的に記載することで、ゆるみの状況が正確に表現できる。これにより、ゆるみの分布やゆるみの程度が三次元的に正確に把握され、後の調査、ゆるみのメカニズムの解明、安定度評価、対策の立案などに役立つものと期待される。

表-3 ゆるみに関する亀裂の定義および指標試案、  
ならびに、横坑や露頭等におけるゆるみ性  
状の分類試案

ゆるみにより開口やずれを生じた亀裂の定義試案
<p><b>開口亀裂</b>：亀裂（ないし弱層）の内部が主として空隙（水）からなるもの。ただし、流入粘土*1で充填された開口亀裂も原則として開口亀裂の一種として扱い、その際は「<u>開口亀裂（流入粘土）</u>」などと表示して区別できるようにする。</p> <p><b>ずれ亀裂</b>：亀裂面（ないし弱層）に沿ってずれ変位の見られるもの。厳密には断層と同じ変形モードであるが、地殻変動による断層（テクトニックな断層）とは異なり、重力変形などのノンテクトニックな変動に伴ってずれ変位を生じている可能性のあるものについて用いる。</p> <p>*1 流入粘土：地下水などにより運搬された粘土が岩盤中の開口した割れ目等の空隙に沈積・充填したもの。多くは、褐色～黄褐色で非常に細粒の粒子からなる。</p>

開口亀裂の出現率や開口量を示す指標試案
<p><b>開口亀裂数</b>：横坑（ボーリング孔）の特定区間長（1m、5m、10m、横坑全区間など）における開口幅 0.25～0.3mm 以上の開口亀裂の本数。「<u>1m 当たり開口亀裂数</u>」を標準とする。</p> <p><b>開口亀裂出現率</b>：横坑（ボーリング孔）の特定区間長（1m、5m、10m、横坑全区間など）における（測線上の）全亀裂（本数）に対する開口幅 0.25～0.3mm 以上の開口亀裂（本数）の割合（%）。「<u>1m 当たり開口亀裂出現率</u>」を標準とする。</p> <p><b>開口量</b>：（測線などに沿った開口量ではなく）割れ目の面と面に対する垂直な距離で定義する。単一の開口亀裂の中でも開口量が場所によって異なるときは、測線上で計測している際は測線にかかっている部分の開口量で定義する。なお、横坑内など、観察できる範囲の中で単一亀裂における最大の開口量については、<u>最大開口部開口量</u>と呼ぶ。また、流入粘土が充填している場合も原則として開口量に含める。</p> <p><b>累積開口量</b>：横坑（ボーリング孔）の特定区間長（1m、5m、10m、横坑全区間など）における累積開口量。「<u>1m 当たり累積開口量</u>」を標準とする。また、区間長に対する区間当たり累積開口量の割合（%）を<u>区間開口率</u>とよぶ。</p> <p><b>最大開口量</b>：横坑（ボーリング孔）の特定区間長（1m、5m、10m、全区間など）における単一亀裂の最大開口量。「<u>1m 当たり最大開口量</u>」を標準とする。</p> <p><b>開口量区分</b>：区間当たりの「<u>累積開口量</u>」や「<u>最大開口量</u>」に関する大まかな区分。次の区分による表示を参考とするが、現場状況や目的に応じて一部省略ないし変更して用いても良い。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 1m 以上</li> <li>② 30cm 以上</li> <li>③ 10cm 以上</li> <li>④ 3cm 以上</li> <li>⑤ 1cm 以上</li> <li>⑥ 2.5～3mm 以上</li> <li>⑦ 1mm 以上</li> <li>⑧ 0.25～0.3mm 以上</li> <li>⑨ 上記未満（開口亀裂に含めなくてもよい）</li> </ol>

ずれ亀裂の出現率やずれの量を示す指標試案
<p><b>ずれ亀裂数</b>：横坑（ボーリング孔）の特定区間長（1m、5m、10m、横坑全区間など）におけるずれ幅 0.25～0.3mm 以上のずれ亀裂の本数。「<u>1m 当たりずれ亀裂数</u>」を標準とする。</p> <p><b>ずれ亀裂出現率</b>：横坑（ボーリング孔）の特定区間長（1m、5m、10m、横坑全区間など）における（測線上の）全亀裂（本数）に対するずれ幅 0.25～0.3mm 以上のずれ亀裂（本数）の割合（%）。「<u>1m 当たりずれ亀裂出現率</u>」を標準とする。</p> <p><b>ずれ方向</b>：上盤側の岩体の移動方向を方向・傾斜の順に（NOOW・OOS など）で示す。横坑の坑壁などで真の方向が半別できない場合は、見かけ方向（見かけNOOW・OOS など）として示す。</p> <p><b>ずれ量</b>：ずれの方向が確認できる場合には真のずれの量で定義する。真のずれの方向が確認できない場合は、<u>見かけずれ量</u>として定義する。</p> <p><b>累積ずれ量</b>：横坑（ボーリング孔）の特定区間長（1m、5m、10m、全区間など）における複数の亀裂の累積ずれ量。「<u>1m 当たり累積ずれ量</u>」を標準とする。</p> <p><b>最大ずれ量</b>：横坑（ボーリング孔）の特定区間長（1m、5m、10m、全区間など）における単一亀裂の最大ずれ量。「<u>1m 当たり最大ずれ量</u>」を標準とする。</p> <p><b>ずれ量区分</b>：区間当たりの「<u>累積ずれ量</u>」や「<u>最大ずれ量</u>」に関する大まかな区分。「<u>開口量区分</u>」と同じ境界値区分を標準とするが、現場状況や目的に応じて一部省略ないし変更して用いても良い。</p>

横坑や露頭等におけるゆるみ性状の分類試案
<p><b>ゆるみ性状区分</b>：ゆるみと判断される岩盤について、ゆるみの程度を定性的に示す区分。ゆるみの程度の強い順に以下の通りを標準とする。実際の現場では、現場状況に応じて工夫・変更を行っても良い。また、<u>風化の状態（岩芯まで風化、亀裂面周辺のみ風化や酸化、など）、流入粘土の有無、なども加味して整理するとよい。</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① <u>土砂状</u>（ゆるみに伴う変形・破碎・風化により、岩盤が細粒化・軟質化し土砂化したもの）</li> <li>② <u>崖錐状</u>（多くの岩塊が堆積し岩塊群状ないし土砂混じり岩塊状をなしているもの）</li> <li>③ <u>石積み状、ないし極大ゆるみ</u>（多くの岩塊に約30cm以上の大きなずれや開口を生じ、全体としておおよそ数10cm～数m程度の石を積み重ねたような状態を示す岩盤）</li> <li>④ <u>ブロック状、ないし強ゆるみ</u>（数m～10m程度の範囲の中に約30cm以上の大きなずれや開口が見られ、全体として岩盤が数m～10数m程度のブロックに分けられるような状態を示す岩盤）</li> <li>⑤ <u>中ゆるみ</u>（数m～10m程度の範囲の中に1～3cm程度の亀裂の開口やずれが見られる岩盤）</li> <li>⑥ <u>弱ゆるみ</u>（数m～10m程度の範囲の中に3mm～1cm程度の亀裂の開口やずれが見られる岩盤）</li> <li>⑦ <u>微小ゆるみ</u>（数m～10m程度の範囲のところで2.5～3mm未満の亀裂の開口やずれが見られる岩盤）</li> <li>⑧ <u>前ゆるみ</u>（数m～10m程度の範囲のごく一部に2.5～3mm未満の亀裂の開口やずれが見られる岩盤、数m～10m程度の範囲のところで1mm未満の亀裂の開口やずれが見られる岩盤、亀裂の開口やずれはほとんどないし確認できないが応力解放などの作用により軟質化・弾性疲速度の低下・透水性の向上などのゆるみの兆候と思われる性状を示す岩盤）</li> </ol>

### 3. 3 ゆるみ岩盤の定量的な区分・計測方法の開発

#### 3. 3. 1 開口亀裂に着目した区分法

##### (1)横坑等における開口亀裂観察による区分法

亀裂の累積開口量の曲線形状から、ゆるみ範囲を抽出し、強～弱に区分できる<sup>8)</sup>(図-11)。横坑や露頭などではラインスキャン法により測線上に位置する亀裂の幅を計測し、1m 単位ごとの累積開口量をプロットする。また、ボーリング孔を用いたボアホールカメラの計測でも同様に可能である。通常、累積開口量は曲線を描き、ゆるみ範囲から非ゆるみ範囲に向かうにつれ、累積開口量は次第に収束する。ゆるみ範囲と非ゆるみ範囲との境界は平均開口量 10mm/m が目安としていることが多い。計測には、流入粘土を介在する亀裂も含めるべきである。前述のように流入粘土は、亀裂が開いていたことを示すものであるからである。

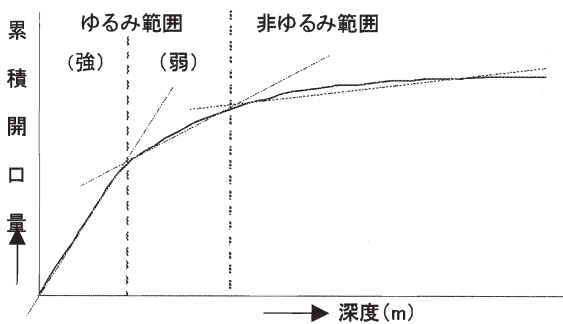


図-11 亀裂の累積開口量とゆるみ程度

##### (2) 地中風速測定

本研究において、新たな調査法として地中風速測定法を開発した。地中風速測定は、調査坑やボーリング孔より深度別に風速を測定し、自然状態の深度別の風速分布または強制送気した際の風速分布から、ゆるみ範囲を推定するものである<sup>9)10)</sup>。風速センサーによりボーリング孔や横坑における各深度の風速を測定し、深度別の風速測定値と開口亀裂の分布状態の関係から、孔内におけるゆるみ領域や開口割れ目の連続性を把握する。これまでの調査によると、外気温と岩盤内の温度差がわずか2～3℃であっても、外部と連続する開口亀裂内には空気の流れが発生し、地中風速測定が可能である。一般に気温の日変動は10℃程度あるので、外気温と岩盤内部の温度差が大きい時間帯を選べば、自然状態による地中風速測定は年間を通じて実施できる。

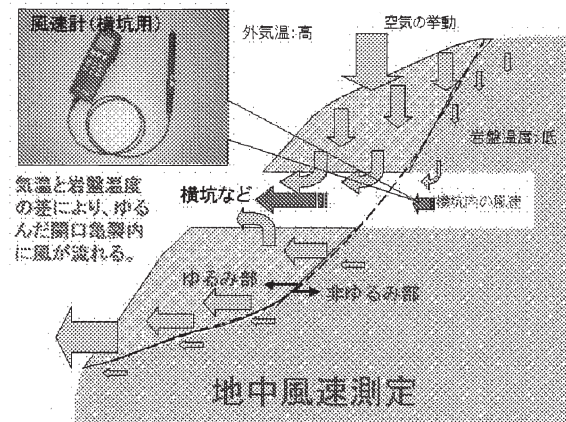


図-12 地中風速測定概念図

##### (3) エアートレーサー試験

エアートレーサー試験は空気の流れを利用した岩盤内部の亀裂の調査方法で、送風機でトレーサーを混ぜた空気を亀裂に挿入し、トレーサーの流出地点と移動速度から亀裂の分布と連続性を推定する方法である<sup>11)12)</sup>。トレーサーとして煙を使うことにより、開口亀裂の連続性を目視により確認することができる。本研究では、ボーリング孔だけではなく、横坑でも実施できる機器を開発した。

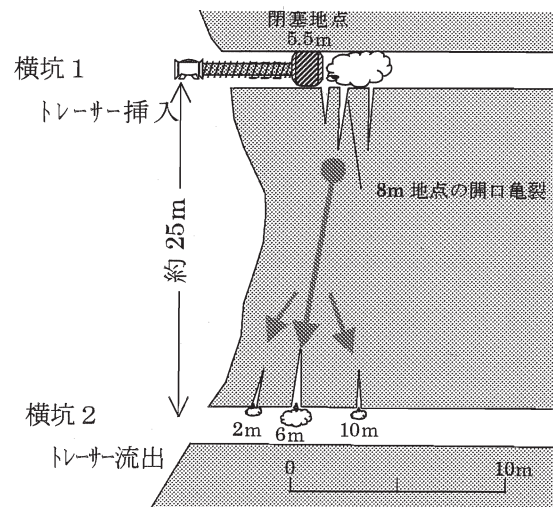


図-13 エアートレーサー試験概念図

#### 3. 3. 2 弾性波を利用した計測法

従来の弾性波探査と比べて、10 倍の密度で横坑内に地震計を配置し、屈折法による地震探査を実施するものである<sup>13)14)</sup>。横坑の坑壁を伝播する P 波が、亀裂の多いゆるみ範囲を避け、亀裂の少ない非ゆるみ範囲の岩盤を選択的に透過し伝播することにより、ゆるみ範囲やゆるみ程度を定量的に評価するものである。横坑内の坑壁に震計を配置することで、ゆるみ岩盤を

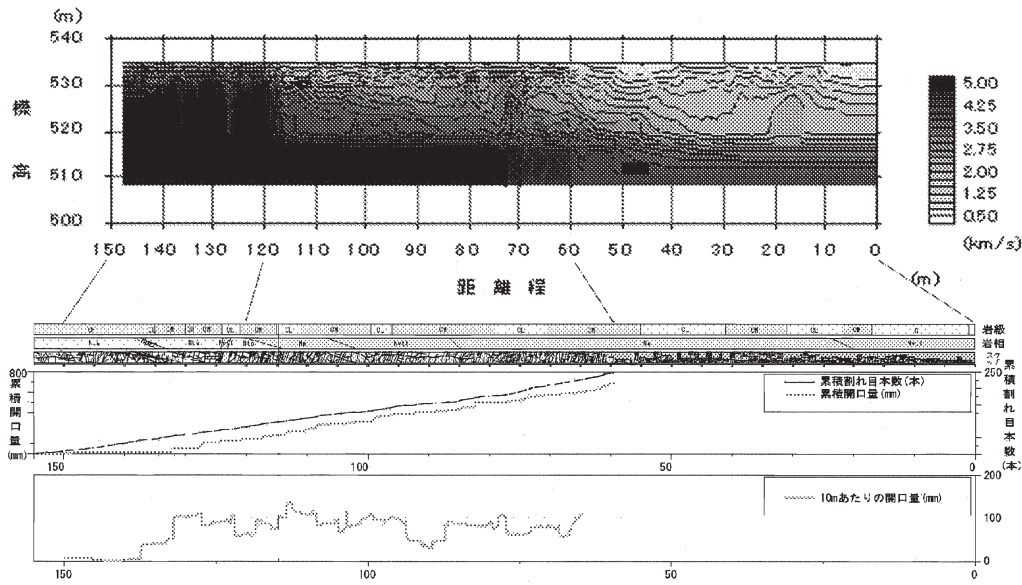


図-14 横坑観察結果と弾性波トモグラフィ解析断面との対比図

直接に計測し、探査結果を地質観察と対比できることに利点がある。また、電気など他の物理探査手法と違い、P波速度から弾性係数などの力学的強度へ変換することができる点において優れている。弾性波探査のトモグラフィ解析結果を図-14に示す。弾性波速度( $V_p$ )は150m~120m区間で4.0~5.0km/sを示した。一方、120mよりも手前で $V_p$ は4.0km/s以下で、坑口に向かうにつれ次第に低下した。特に60mよりも手前で、著しく $V_p$ が低下し、2.0km/s以下となった。このことから、 $V_p$ は坑口から120m区間の泥岩で遅い傾向にあり、特に坑口から60mまでの区間でゆるみが著しく進行していると考えられる。

### 3. 3. 3 密度を利用した区分法

本手法は、ゆるみ岩盤の開口亀裂の発達に伴う岩盤密度低下に着目し、岩盤およびボーリングコアの密度を計測し、密度比を算出することにより、ゆるみを区分するものである<sup>15)</sup>。

岩石の密度が同じと仮定すると、開口亀裂を含んだ岩盤の密度は、開口亀裂のない岩盤の密度よりも小さいはずである。そこで、以下に示す密度 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ を求め、 $\rho_1/\rho_2$ (以下密度比と表記)を算出した。

$$\rho_1 = \frac{\text{ボーリングコアの重量}}{\text{直径を実測し円柱と仮定し求めた体積}}$$

$$\rho_2 = \text{岩石物理試験から求めた密度}$$

$\rho_1$ は、ボーリングコアが収納されているコア箱の

重量を現地で計量し、コア形状を円柱と仮定し、算出した。一方、 $\rho_2$ は、各岩相において、現地でメスシリンダーと台はかりを用

表-4 各岩相の密度

岩相	記号	密度(g/cm <sup>3</sup> )
凝灰角礫岩(白色)	Tb1	2.18
軽石凝灰岩	Ptf	2.42
泥岩	Ms	2.43
砂岩	Ss	2.37
火山礫凝灰岩	Vtf	2.46
凝灰角礫岩(緑色)	Tb2	2.30

いて簡易的に求めた。表-4にその結果を示す。1つのコア箱に複数の岩相が混在する場合には、割合を考慮し密度を算出した。なお、ゆるみ岩盤は多くの場合、地下水位が低く乾燥状態にあることが多いので、密度は自然状態(コア観察時の状態)で測定した。

理想的には、 $\rho_1$ は実際の開口亀裂を含んだ岩盤の密度を表し、 $\rho_2$ は同一の岩相で開口亀裂が無い堅硬な岩盤の密度を表す。よって、両者の密度比は開口亀裂による岩盤の密度の低下を表すこととなり、ゆるみの程度を示すことができる。密度比は、概ね0.95以上の値を示した。一方、ゆるみ域に該当するコアの密度比は、強ゆるみでは大多数が0.9を下回り、弱ゆるみでは概ね、1~0.9の値を示した。平均値では、非ゆるみはほぼ1.0を示した。ゆるみ域では、強ゆるみでは0.8前後であるのに対し、弱ゆるみは0.95前後の値を示し、明瞭な差が認められた。

表-5 ゆるみ区分と密度比の平均

	崖錐	強ゆるみ	弱ゆるみ	非ゆるみ
A孔	0.66	0.83	0.96	0.98
B孔	0.71	0.76	0.95	1.00
C孔	0.76	-	0.92	0.99



### 3. 3. 4 変形性を利用した区分

高精度傾斜計は、ダム基礎の調査横坑底面や地表面に高精度傾斜計を設置し、ゆるみ岩盤に荷重を加えた際に生じる微細な傾斜変化から、ゆるみ岩盤の変形性を推定するものである<sup>16)17)</sup>。開発した手法は、傾斜計より遠方から一定重量の錘(著者らは錘として「人間」を用いている)を段階的に近づけ、錘の荷重による傾斜変動を観測し、その後有限要素法などで測点付近の変形性を解析する。傾斜計を順次ずらして繰り返し測定することで、測線沿いの変形性の分布を短時間に測定できる。傾斜計は、通常の土木分野で使用されるもの(傾斜分解能 1~10 秒)より高精度のものを用いる。傾斜分解能1ナノラジアン(約  $2 \times 10^{-4}$  秒)のもの(米国 Pinnacle 社製 5500 シリーズ)<sup>4)</sup>を用いている。本機器は  $\pm 10^\circ$  の大変動までを一連で測定でき、機器内部で A/D 変換と多量のデータ記録ができる。試験値からの変形性算出法としては理論式による計算と有限要素法による解析が考えられる。例えば荷重  $P$  が地表の1点に作用する場合に距離  $r$  離れた地表面の深度方向の変位量  $Z$  は、ポアソン比  $\nu$ 、弾性係数  $E$  として Boussinesq により次式のように与えられる<sup>18)</sup>。

$$Z = P(1 - \nu^2) / (\pi Er) \quad (1)$$

式を  $r$  について微分すると傾斜量となり、傾斜量は  $r$  の 2 乗に反比例する。ポアソン比を仮定すれば傾斜量から弾性係数が求まる。

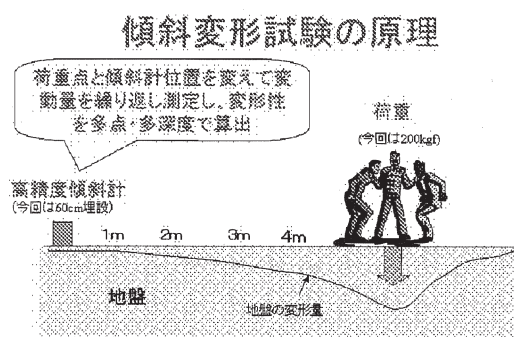


図-15 高精度傾斜計による測定原理

### 4. まとめ

本研究の成果は、以下にまとめられる。

1) 全国におけるダム基礎のゆるみ岩盤事例 81 ダム (90 件) を分析した結果、ゆるみ岩盤の発生機構は①応力解放、②重力変形作用、③風化変形作用の 3 つに区分できる。そのうち、重力変形作用が全体の 8

割強を占め、それを構成する地形・地質・地域・形状・地質性状との相関を明らかにした。

2) ゆるみ岩盤は開口亀裂を伴うことにより特徴づけられ、ゆるみ進行に伴い、①密度低下、②開口亀裂の発生・拡大、③低強度、④非弾性的性質、⑤高透水性、⑥不均質性(二次的な性質)、⑦不安定性(二次的な性質。主に斜面の場合)等の性状・物性を示す。

3) 横坑やボーリング孔における重要な開口亀裂等の観察方法や横坑での岩盤状態の分類方法の試案を作成した。提示した項目を観察・計測することで、ゆるみの範囲や 3 次元的な構造、また、ゆるみの程度などを客観的に把握することができる。

4) ゆるみ進行に伴う密度低下、弾性波速度の低下、開口亀裂の拡大等の性状や物性変化を利用した区分・計測方法を開発した。

5) 上記の観察手法や計測手法は、あくまで基本的な項目であり、ダムのアバットメント、のり面、河床では、力学的強度、透水性、斜面安定性など、基礎岩盤として要求される機能が異なるので、利用目的に応じて使い分けることが必要である。また実際のゆるみ岩盤は、発生機構が複合していることから、今回示した項目を組み合わせたり、それ外の項目に着目し、観察や計測を行う必要がある。

### 参考文献

- 1) 渡正亮：山腹のゆるみと地すべりの初生について、日本地すべり学会誌、41-5、pp.57~66、2005。
- 2) 吉井智治：甲口太郎：魚切ダムにおける基礎岩盤変状および岩盤の地圧測定について、ダム日本、No.441、pp.5-25、1981。
- 3) 佐々木靖人：ゆるんだ岩盤の調査方法(建設技術 Q and A)、土木技術資料、41-2、pp.8-9、1999。
- 4) 片山弘憲・佐々木靖人・脇坂安彦：「ダムにおけるゆるみ岩盤の実態—資料調査による形状、地形、地質の統計を中心に—」、平成 14 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp.363-366、2002。
- 5) 国立天文台編：理科年表 平成 10 年(机上版)、丸善、1054p、1997。
- 6) 建設省土木研究所砂防部地すべり研究室：地すべり実態統計(その 2)、土木研究所資料、第 1121 号、pp.8-39、1976。
- 7) 佐々木靖人・片山弘憲・倉橋稔幸：「ダムにおけるゆるみ岩盤の実態と分類試案」、ダム技術、ダム技術センター、no.228、pp.9-21。

- 8) 片山弘憲・佐々木靖人・福田徹也・桑野 健：「横坑内割れ目計測に基づくゆるみの実態と評価」, 日本応用地質学会平成 15 年度研究発表会講演論文集, pp.49-52., 2003.
- 9) 佐々木靖人・阿南修司・片山弘憲・柴田光博・脇坂安彦：「地中風速測定と高精度傾斜変動測定によるゆるみ岩盤の調査技術の開発」, 土木学会第 57 回年次学術講演会, III-468, 2002.
- 10) 片山弘憲・佐々木靖人・阿南修司・柴田光博：「地中風速測定によるゆるみ岩盤の調査技術の開発」, 第 29 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.510-511, 2002.
- 11) 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, 2000.
- 12) 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., 2003.
- 13) 山脇雄一, 倉橋稔幸：「中生代付加体堆積岩の硬質岩盤のゆるみ調査事例」, 日本応用地質学会平成 16 年度研究発表会講演論文集, pp.393-394., 2004.
- 14) KURAHASHI, T., YAMAWAKI, Y. and ITO, K : "A Narrow-spaced Seismic Refraction Survey for a Loosened Rock-mass in a Landslide Area", Proceedings of 19<sup>th</sup> Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problem, EEGS, CD-ROM, 2006.
- 15) 伊藤和伯・倉橋稔幸・佐々木靖人：「コア密度等によるゆるみ岩盤の定量的な区分の試み」, 日本応用地質学会平成 17 年度研究発表会講演論文集, pp.239-242, 2005.
- 16) 佐々木靖人・阿南修司・片山弘憲・柴田光博：「高精度傾斜変動測定によるゆるみ岩盤の変形性推定法の開発」, 平成 14 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.219-222, 2002.
- 17) 佐々木靖人、阿南修司、片山弘憲、柴田光博：「高精度傾斜変動測定によるゆるみ岩盤の変形性推定法の開発」, 第 29 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.426-427, 2002.
- 18) 土木学会岩盤力学委員会編：「原位置岩盤試験法の指針－平板載荷試験法－ せん断試験法－ 孔内載荷試験法－」, 土木学会, 249p., 2000.