

## 2.6.8 簡易揚水試験

### (1) はじめに

地すべり地内の地下水の賦存状態・分布を把握するための調査手法として、全国的には地下水検層が広く活用されているが、新潟県内に限定すると、1971（昭和46）年に簡易揚水試験が考案された後、この試験法が普及し、現在では地下水検層と同等、あるいはそれ以上に活用されている。新潟県内におけるこの試験法の普及は特筆すべき現象であるが、その背景は、この試験法が新潟県内の技術者によって考案されたことに加え、その後の現場技術者のとりくみによって活用方法が改善され、その長所が多くの技術者に認識されるようになったことが挙げられる。この試験法の起源と利用実態を調査した白石秀一<sup>2)</sup>によると、この試験法は長野県内でも普及したが、全国的に見ると活用頻度は著しく低い。このような全国的な活用が低い背景として、試験法を普及するとりくみが少なかったことが挙げられる。近年、建設省（1997）「河川砂防技術基準（案）同解説調査編」および林野庁（2002）「治山技術基準 解説 地すべり防止編」が試験法を規定したことにより、この事情に変化が生まれている。

試験法は、調査ボーリングと併行して比較的簡便に実施することが可能であること、また地すべり機構の解明あるいは対策計画の立案に有効な地下水に関する各種の情報を取得できること、等の長所を持っている。今後、試験法あるいは試験結果の活用方法に対する理解を広げることができれば、全国的に活用頻度が拡大すると考える。

なお、現行の試験法あるいは結果の整理方法等にはなお改善の余地があるため、これからの技術的とりくみも求められる。

ここでは、この試験法が考案された経過と、その後とりくまれた主な技術的改善内容を整理し、今後の課題と発展の可能性についてとりまとめる。記述に当たっては、試験法開発期のとりくみについては、過去の文献あるいは関係者からの聞き取りに基づいて記述し、また1978（昭和58）年以降のとりくみについては、体験と記録を重ね合わせ、試験法の発展過程をたどる。

現行の試験の実施手順を以下に略記する。

試験はボーリング掘削と併行して3～5m毎に実施し、掘削全延長にわたって繰り返して行うことが特徴である。ただし、試験区間長は各機関により3mあるいは5mと異なっている。作業手順は、まず試験区間上端部まで掘削し、孔底までケーシングパイプを挿入して孔壁部を遮水し、その後、孔底から試験区間長となる深さを掘削する。掘削した孔内を良く洗浄した後、水位の安定を待って孔内水位を測定・記録し初期水位とする。この後、孔内水位を試験区間の上端より1m高い位置に保ちながら40分間揚水をおこない、揚水量とその時の水位を記録する。その後、揚水を停止し、水位の回復状況を80分間にわたって測定・記録する。

以上の試験を3～5m掘削毎に繰り返し、試験区間毎の、①揚水量、②地下水位（初期水位および回復水位）とともに、③地盤の水利定数を求めるものである<sup>2) 3)</sup>。

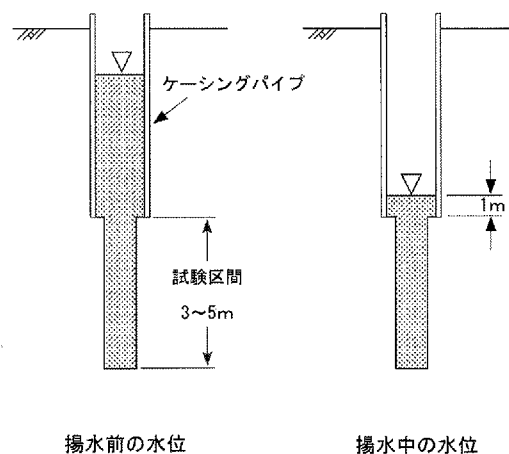


図2.6.34 簡易揚水試験 実施模式図

### (2) 簡易揚水試験法 開発期のとりくみ

前述のように、新潟県内における近代的な地すべり対策は、1947（昭和22）年に発生した能生町柵口地区の地すべり災害を契機として本格的に開始され、その直後は県職員技術者による、直営の調査活動が精力的に進められた。1949（昭和24）年には、西頸城郡根知村大久保地すべり地で、トンネルによる地下水排除が地すべりの安定化に有効であることが確認され、また、1950（昭和25）

年には、沖見地すべり地で、横ボーリングによる地下水排除が有効であることも確認された。この結果を受け、効率的な地下水排除を計画するための、地下水調査方法が模索された<sup>4)</sup>。

初期の段階では電気探査、電気検層（比抵抗検層）等が試みられた他、建設省土木研究所が1965（昭和40）年に開発した地下水検層（垂直検層）とともに、水井戸の分野で発展した技術である段階揚水試験法、連続揚水試験法等も試みられた。これらのとりくみでは必ずしも期待する結果がなかなか得られなかったと、その後報告されている<sup>5)</sup>。

このような模索の中で、1971（昭和46）年新潟県砂防課の技術者だった湊元光春氏らが、地すべり地内の地下水の賦存状態をより直接的に把握する手法として現行の簡易揚水試験法を考案し、松之山地すべり地において直営で実験した。なお、この時点では、試験法の名称は「揚水試験」とされた。実験結果を受け、県砂防課は翌1972（昭和47）年に地下水調査手法として正式に採用し、初めて仕様書に規定した。当時の規定は、試験の手順および試験結果の整理法等、現行規定の基礎となるものがほぼ全て簡潔に記述されている。なお、この規定では水理定数の算出が求められていないことが特記される<sup>6)</sup>。

この試験法を採用することになった背景を説明した布施（1975）<sup>7)</sup>によると、従来の調査では水理定数の算出を重視したが、その結果に基づいて地下水排除工を計画しても、必ずしも期待したとおりの結果が得られるとは限らなかったため、もっと直接的な地下水の情報を得て、横ボーリングを実施したときに排出され得る地下水量を予測することが必要であったと述べている。また、この試験法を採用した後の、1972（昭和47）、1973（昭和48）年の実績から、「地下水の絶対量を予測することは困難である」が、「地下水が豊富な位置や深さを推定できるようになった」と述べている。この記述から、実験の当初は地下水排除工による排出可能な地下水量を予想することを目的としたが、実験の結果、この試験が地下水の豊富な位置や深さを推察するために有効であることが解り、それが試験法を採用する目的であったことが読み取れる。この記述は、試験法を評価する上で現時点でも重要と考えられる。試験法が採用され始めた当時、このような試験目的が直ちに広く理解されることは困難であったようで、試験法に対して様々な評価が行われ、砂防課、農地課および治山課で仕様書の規定に差が見られる。この理由として、当時、水井戸の分野で発達した揚水試験に関する定量的解析手法が既に確立して広く普及していたため、新たに提出された簡易揚水試験法の定性的な調査目的を理解することを困難にしたと考えられる。このため、簡易揚水試験（当時「揚水試験」）を実施したものの、地下水排除計画の作成に当たって、この試験で得た揚水量の記録を重視しない事例も発生し、一方では解析によって求めた水理定数の真偽に関する議論が活発に行われた。このように、試験法が開発された直後は、その手法に対する評価は確定せず、技術者の間で試験法の評価に関する様々な議論が行われた。この状態は1970年代後半まで続いた。



写真2.6.42 県直営の調査ボーリングの様子

（杉野政三郎氏提供）

### （3）試験結果活用方法の改善と試験法の普及

試験法の有効性が広く理解される契機となったのは、試験結果の表示方法の工夫と考えられる。従来、試験結果は試験区間毎に個別の図表にまとめられ、断面図等に表示することは行われていなかった。その中で、試験目的である揚水量の変化を視覚的に理解できるようにするため、各調査孔で実施した全ての揚水量記録をグラフにまとめ、断面図上で柱状図に併記して表示する方法が採り

入れられた。この方法は1978（昭和53）年度の田之倉地すべり調査報告書で最初に試みられた。各試験区間の水理定数（透水係数）をグラフで表示する手法も比較検討されたが、布施が指摘する試験目的の「地下水が豊富な位置や深さを推定」するためには、揚水量あるいは注水量を直接表示する方が解りやすかった。この方法はその後広く普及し、現在では新潟県内で標準的な表示方法に発展した。なお、この表示方法は、後述するように仕様書等では規定されていないため、一部を除いて全国的には普及していない。

上記表示方法の採用により、揚水量の深度方向変化と断面分布を視覚的に理解できるようになり、断面図上で、揚水量・注水量分布に着目しながら、地下水排除工の配置の検討が可能となった。この方法はその後多くの現場で採用され、工事結果から有効性が確認されるようになり、次第にこの表示方法が新潟県内で定着することになった。

このようなとりくみと前後して、1979（昭和54）年に「新潟県土木部標準仕様書（一部改訂）」<sup>8)</sup>で、「簡易揚水試験」が新たに規定され、名称、試験法、結果の整理方法等が現在の規定とほぼ同じものが確立した。この段階で「簡易揚水試験」の呼称がはじめて用いられた。この後、若干の時間的遅れをもって、農地課、治山課も同様の規定を採用し、県内で共通の試験方法となった。

なお、上記の1979（昭和54）年に改訂された県土木部の試験法の規定には以下の記述があることが特徴である。①試験の目的として、土層の透水性を判断することが記述されたこと。②試験結果の整理方法として、地盤の透水係数を求める条項が追加されたこと。この2点は、その後、農地課および治山課の仕様書でも採り入れられ、現在活用されているほぼ全ての仕様書で共通している。なお、上記以外の試験結果の整理方法については、従来の規定と基本的に変わらず、断面図上の表示方法については定めていない。

このように、試験法の規定が定まり、揚水量に着目した試験結果の活用が定着した後も、透水係数の算出方法について議論が重ねられ、多くの現場で様々な試行が繰り返されてきた。その結果、現在では水位回復曲線にヤコブ式を適用する解析方法が多用されている。

簡易揚水試験の区間揚水量の分布に着目した地下水排除計画の事例を以下に示す<sup>9)</sup>。

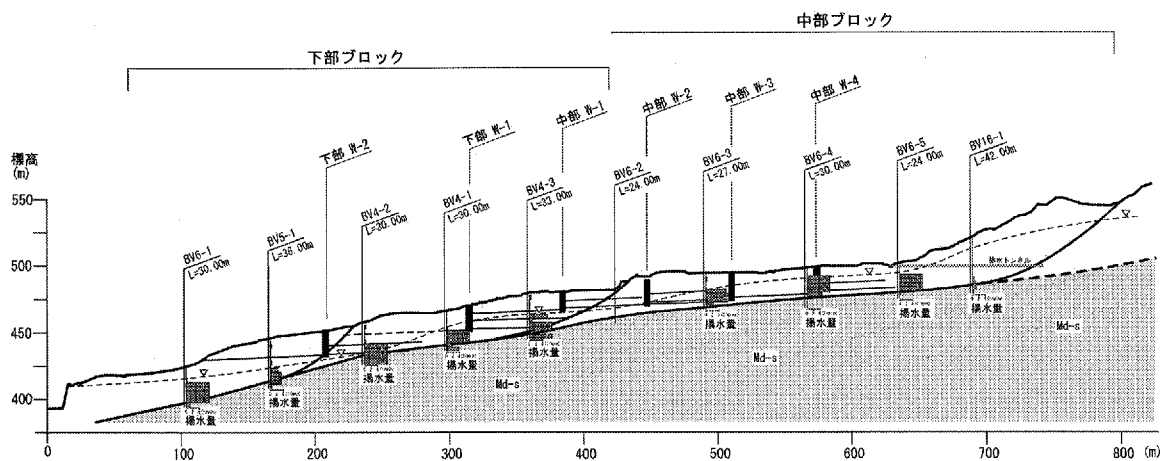


図2.6.35 簡易揚水試験の揚水量に着目した集水井の配置計画（大久保地すべり地）

#### (4) 帯水構造を識別する試み

簡易揚水試験の結果を、別の角度から活用しようとする試みがある。

地すべり対策では、滑動要因となっている地下水の賦存状態を正確に把握し、これを処理することが最も重要な課題であるが、地すべり地では地下水が単一の帯水層で賦存していることは希であり、多くの場合、複数の帯水層を形成し、複雑な形態で賦存する。対策計画の作成に当たっては、

このような地すべり地内の地下水の賦存構造を事前に把握し、すべり面に作用する地下水頭の中で、最も高い水頭を持つ地下水を把握することが重要である。対策計画の立案に当たっては、この最も高い圧力水頭をもつ地下水を対象に地下水排除工を計画することが効果的となる。

上記の課題を整理すると、対策計画を作成する場合には地下水に関する情報の中でも、①複数の帯水層の識別、②各帯水層の圧力水頭の把握、の2点が重要であることを示している。

新たな試みは、地下水に関する上記2点の情報を、簡易揚水試験の結果から読み解こうとするものである。その内容を以下に略記する。この手法は、簡易揚水試験の中でも揚水後の水位回復曲線に着目するもので、測定した回復曲線から試験区間毎の地下水位（収束水頭）を求め、各区間の圧力水頭を調査深度全体で比較し、圧力水頭の異なる地下水を識別・区分するものである。調査原理は試錐日報解析と同じであるが、以下の2点で試錐日報解析より優れている。第1は、一定区間毎に、掘削全延長にわたって地下水頭を求めることができること。第2は、回復水位を経時的に測定し、作成した回復曲線から収束水頭を求めるため、区間水頭に対する信頼性を確認できる。

なお、この方法では、異なる帯水層の地下水であっても圧力水頭が同じ場合あるいは近似する場合は、異なる帯水層の地下水として識別できないという限界があるが、地すべり対策に当たっては、上述のように高い圧力水頭をもつ地下水の存在を特定することが重要であるため、圧力水頭が近似する帯水層の場合は、区分できなくとも実務上の障害は少ない。

このとりくみは1985（昭和60）年に初めて試みられ、その後多くの地すべり地でデータが蓄積され、沖積平野地盤の帯水層区分でも有効性が確認された。以下に解析事例の一部を示す<sup>10) 11)</sup>。

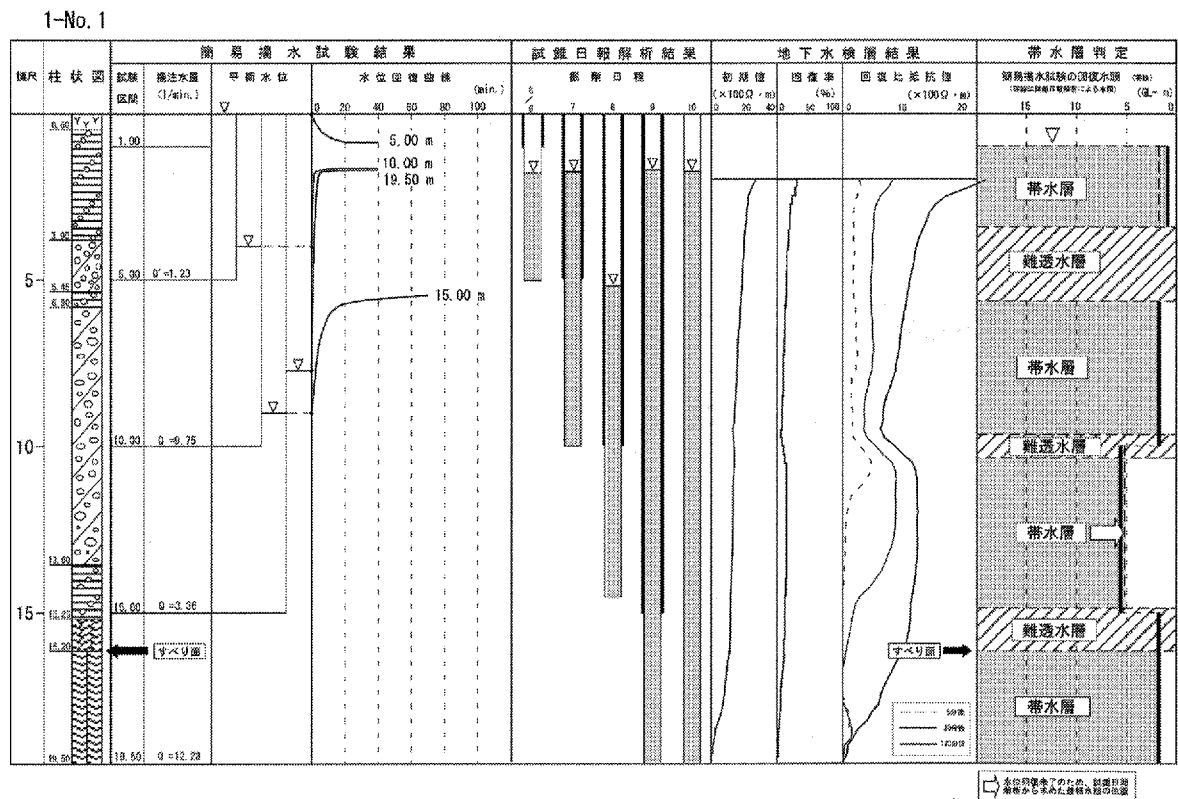


図2.6.36 簡易揚水試験の水位回復曲線に着目した帯水構造の識別（橋立地すべり地）

図は、ボーリング・コアの判定結果、簡易揚水試験結果、試錐日報解析結果、地下水検層結果を併記したものである。簡易揚水試験結果の内、揚水後の水位回復曲線に着目すると、曲線は3つの深度に収束する。曲線の収束深度は、その区間に伏在する地下水の圧力水頭を示すため、この地点の調査深度内に、3つの異なる水頭を持つ地下水が伏在すると判断できる。この結果と、ボーリング・コアの判定結果・試錐日報解析結果を総合し、3層の難透水層によって境される4層の帯水層を

区分した。同様の方法で、各地点で帯水層の区分をおこない、その結果から作成した地下水構造断面図を示す。

事例では、帯水構造を区分するために、①ボーリングで確認した地質構造、②ボーリング掘削中の朝に測定した孔内水位、③地下水検層結果、④簡易揚水試験の水位回復記録、の4点を検討しているが、その中で④簡易揚水試験の水位回復記録が最も重要な情報を提供しており、複数の帯水層を区分する上で有効な調査手段となっている。この結果から、試験区間毎に水位の回復を追跡し、その試験区間の地下水の圧力水頭を正確に求め、求めた各試験区間の水頭を、掘削全延長で比較対比することから、水頭の異なる地下水を容易に識別することができる。簡易揚水試験は地下水の賦存位置と地盤の概略的な水理定数を把握する目的で多用されているが、試験の回復曲線に着目すると、地下水の帯水構造を把握する手段として活用できることを示している。しかし、断面図に示すように、調査地点毎に帯水構造を識別しても、二次元的あるいは立体的な帯水構造の詳細が直ちに決定されるわけではなく、その他の地盤情報を総合して立体的な帯水構造を検討する必要がある。

なお、帯水構造を把握する目的で試験を実施する場合は、水位回復の観測時間を十分に確保することが必要であり、また、高い精度の解析をおこなう場合には、試験区間長を短くすると同時に、水位観測の精度を向上させることも必要である。

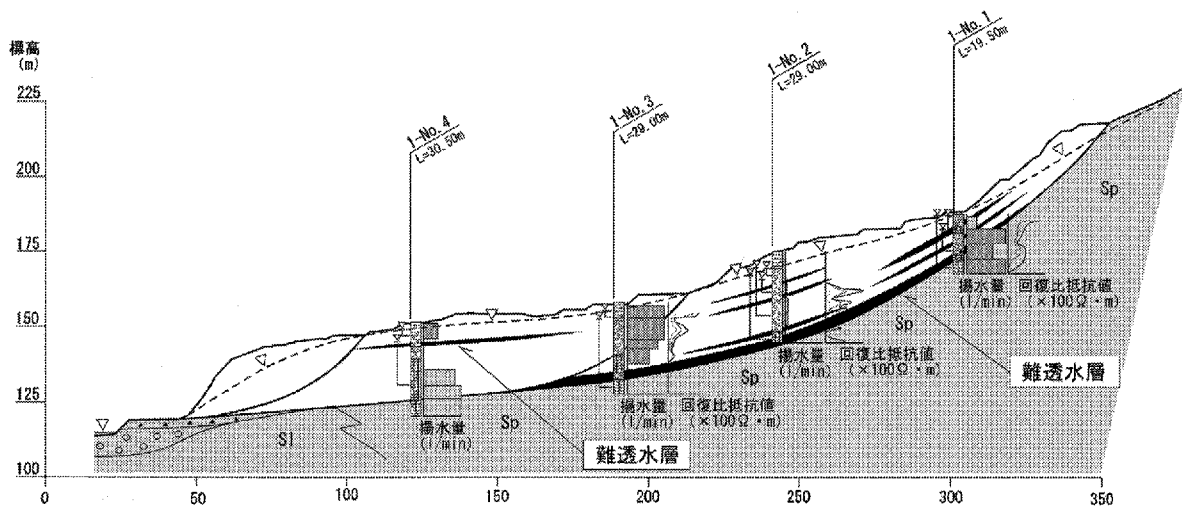


図2.6.37 簡易揚水試験の水位回復曲線に着目した帯水層区分（橋立地すべり地）

#### (5) 試験法発展に向けたとりくみ

簡易揚水試験は、これまで新潟県、長野県内での普及に留まっているが、建設省（1997）「河川砂防技術基準（案）同解説調査編」および林野庁（2002）「治山技術基準 解説 地すべり防止編」が試験法を規定したことにより、今後全国的に普及する可能性がある。

地すべり対策を効果的に行うためには、地すべり活動の直接的要因となっている地下水に関する正確な情報が不可欠であり、地すべりブロック内および周辺の地下水賦存構造・賦存形態および経時的な水頭変化を正確に把握することが必要である。「簡易揚水試験」は、比較的簡便に実施できるという特徴を持っていると同時に、上記の目的を達成するための手段として、これまで述べてきたように多くの有効性があり、今後のとりくみにより発展する可能性をもっている。一方、このような可能性を現実のものにするためには、現行の試験法がもつ課題を確実に解決することが必須条件である。

川上他（2006）<sup>12)</sup>は、長野県内3箇所の地すべり地で実施された簡易揚水試験の結果を詳細に検討し、その結果から、この試験によって得られた「揚水量の値そのものに実用的価値がある」と述べ、水位回復曲線を用いて地盤の透水係数を求める場合、「直線部の勾配の決定は、……技術者の

判断の影響が入りやすい」と指摘すると同時に、算式による「解析結果のばらつきは少なく、一致した結果が得られる」と述べている。また同時に、現行の簡易揚水試験の問題点として、以下の4点を指摘している。①試験精度の改善、②試験時境界条件の厳守、③揚水時間の検討、④透水係数算定法の検討。上記、①試験精度の改善の課題としては、遮水方法、揚水方法、水位観測・記録方法等が想定される。試験法を発展させるためには、これらの技術的課題を解決することが求められる。

以上述べてきたように、簡易揚水試験が活用されてきた方向は概ね以下の3つに大別できる。①揚水量に着目し、「地下水が豊富な位置や深さを推定」する。そのための手法として、試験で得た揚水量の記録を、同一の断面図・平面図あるいは立体図に表示し、この図から地すべり地内で地下水が豊富な位置を推定することである。②揚水量あるいは水位回復曲線から、算式を用いて地下水の賦存容器である地盤の透水性を求める。そのための算式としてヤコブ式等様々な算式が比較検討されている。③水位回復曲線の収束地下水位に着目し、試験区間毎の地下水の圧力水頭を求めると同時に、深度方向で水頭の異なる地下水を識別することによって、地すべり地内の帯水構造を判別し、すべり面に作用する圧力水頭を把握しようとする試みである。

簡易揚水試験法は、現段階でも多くの有効性を持つ調査手法である。同時に、この試験法によって地下水に関するより多くの情報を得る可能性も残されている。今後のとりくみによって試験法の改善が進み、多分野で活用できる技術に発展することを期待する。

(古川 昭夫)

#### 引用文献

- 1) 白石秀一：簡易揚水試験のはじまり、未発表資料
- 2) 建設省（1997）：河川砂防技術基準（案）同解説 調査編
- 3) 林野庁（2002）：治山技術基準 解説 地すべり防止編
- 4) 新潟県（1952）：地這り現象の研究、pp. 40～41
- 5) 地すべり学会新潟支部（1974）：新潟県の地すべり—調査と防止工事の問題点、課題、実行におけるかん所について—、地すべり、vol. 11、No. 2、pp. 39～40
- 6) 新潟県土木部（1978）：測量・設計・調査業務委託標準仕様書（昭和53年4月1日制定）、pp. 40～42
- 7) 布施 弘（1975）：新潟県の地すべり調査と防止工法について、全国地すべりがけ崩れ対策協議会、地すべり研究 第19集、pp. 7～9
- 8) 新潟県土木部（1979）：測量・設計・調査業務委託標準仕様書（昭和54年4月一部改訂）、pp. 18～20
- 9) 新潟県（1994）：大久保地すべり 調査報告書
- 10) 古川昭夫（1998）：橋立地すべり、地すべり学会新潟支部、新潟の地すべり'98、pp. 223～225
- 11) 新潟県（1989）：橋立地すべり 調査報告書
- 12) 川上浩、地すべり学会中部支部抑制工法研究委員会（2006）：地すべり地の簡易揚水試験の現状と活用、日本地すべり学会誌、vol. 42、No. 5、pp. 45～46