

地すべり斜面の地下水位観測手法の標準化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 25

担当チーム：土砂管理研究グループ（地すべり）

研究担当者：石井靖雄、杉本宏之

【要旨】

地すべりの機構解析や斜面安定解析を実施するためには、すべり面の間隙水圧の把握が必要である。特に、難透水層によって隔てられた複数の帯水層が地すべり地に存在する場合には、すべり面付近の帯水層の間隙水圧を観測する必要があるが、すべり面の間隙水圧を正しく観測できていないケースが少なくない。本研究では、地下水調査・観測における現状の問題点や課題の分析を行い、その結果をふまえて、地下水状況（帯水層や難透水層の分布）を的確に把握できる調査手法及びすべり面付近の間隙水圧の観測が可能な観測手法を提案した。

キーワード：地すべり、地下水観測、間隙水圧、斜面安定計算

1. はじめに

地すべりの機構解析や斜面安定解析を実施するためには、すべり面の間隙水圧の把握が必要である。特に、難透水層によって隔てられた複数の帯水層が地すべり地に存在する場合には、すべり面付近の帯水層の間隙水圧を観測する必要があるが、多くの現場では全区間ストレーナ孔（全孔ストレーナ孔ともいう）が採用されている。このような場合、全区間ストレーナ孔では他の帯水層への逸水や複数の帯水層の水位の合成により、すべり面の間隙水圧を正しく観測できないケースが多いとみられる。これらの課題を解決するために、埋設型間隙水圧計やすべり面付近のみストレーナ加工した部分ストレーナ孔による観測が提案されているが、これらの手法は普及には至っていない。

本研究では、まず、地下水調査・観測における現状の問題点や課題の分析を行い、その結果をふまえて、地下水状況（帯水層や難透水層の分布）を的確に把握できる調査手法及びすべり面付近の間隙水圧の観測が可能な観測手法を提案することを目的として、検討を行った。

2. 地下水調査・観測の実態と課題

2.1 検討方法

実態と課題の調査は、地すべり地における地下水調査・観測の実態と課題を把握することを目的として、平成 22 年度に直轄地すべりを対象とした資料分析等の調査¹⁾を行った。また、平成 23 年度に都道府

県、地すべり対策の経験を有する民間会社を対象としたアンケート調査²⁾を実施した。これらの調査結果から明らかになった地すべり地における地下水調査・観測の実態を基に、課題の整理と解決の方向性についての検討を行った。

2.2 資料分析調査による地下水調査の実態把握

全国 9 地区の直轄地すべりにおいて、長期間の地下水観測データがあり、機構解析を実施している地すべりブロックを各地区から 1 ブロックずつ選定して観測孔設置時の資料及び観測データの収集を行った。対象となった観測孔は約 170 孔となり、それらについて、観測方法、ストレーナ位置、地下水調査実施状況、試錐日報解析などの実施状況を整理した。また、資料が整っている 28 孔で試錐日報解析を改めて行い、観測結果と地すべり挙動との連動性、観測結果の妥当性を評価した。

(1) 地下水位観測方法

調査した 9 地区のうち 8 地区で、調査対象観測孔の全てにおいて、間隙水圧調査として、ボーリング孔内の地下水位観測が行われていた。間隙水圧計による観測が一部でも実施されている地区は 1 地区のみであった。

水位計センサ種別については、9 地区中 5 地区で水圧式水位計の使用割合が最多となっている（図 2.1）。ただし、本調査では長期間の観測データがあるブロックを選定したために、触針式の比率が高い箇所が

44%となった可能性はある。

観測方式は、半自動の使用割合が最多となっている地区が9地区中4地区と最も多い(図2.2)。

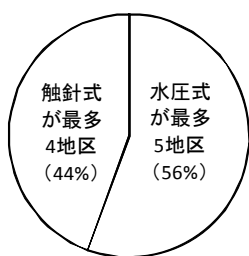


図 2.1 センサ種別

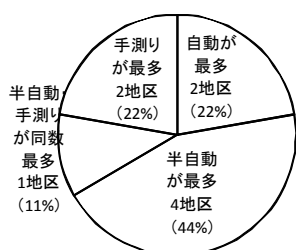


図 2.2 観測方式

(2) ストレーナ位置

すべり面を貫く全区間ストレーナ孔を最も多く採用している地区が5地区と最も多く、その他の地区では、すべり面を貫かない全区間ストレーナ孔を最も多く採用している地区が2地区、すべり面を貫かない部分ストレーナ孔を最も多く採用している地区が1地区、不動層の部分ストレーナ孔を最も多く採用している地区が1地区であった。すべり面を含めた部分ストレーナ孔の設置事例はみられなかった。

すべり面を貫く全区間ストレーナ孔は、地下水観測孔のみを設置する場合での採用事例が多い。すべり面を貫かない全区間ストレーナ孔は、先行して孔内傾斜計観測孔等を掘削し、すべり面位置や地下水状況を把握してから別孔ですべり面を貫かないように観測孔を設置している事例が多い。

観測孔設置の報告書ですべり面に関与する帯水層について言及しているのは1地区であり、それ以外の8地区ではストレーナの構造決定に関する記述が無く、ストレーナ構造決定までのプロセスは不明であった。また、ストレーナ構造や遮水方法等の情報が残っていない観測孔もみられた。

(3) 地下水調査実施状況

最も多く実施されているのは地下水検層(6地区)で、他に簡易揚水試験(2地区)、現場透水試験(1地区)、湧水圧試験(1地区)、微流速測定(1地区)が実施されていた。しかし、これらの地下水調査が実施されているにもかかわらず、多くの観測孔に全区間ストレーナ孔が採用されており、地下水調査結果がストレーナの構造決定に必ずしも活用できていないことが窺える。

(4) 試錐日報解析実施状況

試錐日報解析が一部でも実施されているのは2地区のみであった。解析に必要な水位記録が揃っていない地区もあり、試錐日報解析が地下水調査として活用されているとは言い難い状況である。

(5) 観測結果と地すべり挙動との連動性、観測水位の妥当性の評価

試錐日報解析を実施した28孔の地下水観測孔のうち、観測結果と地すべり挙動の連動性があると判断されるのが5孔(18%)、連動している期間と連動していない期間の両方があるのが5孔(18%)、連動性が低いと判断される観測孔が11孔(39%)、判断不能が7孔(25%)であった。

また、観測結果の妥当性の評価については、「(A) 地すべり挙動との連動が認められ、かつ、すべり面付近の帯水層の間隙水圧を良好に捉えている」と評価される観測孔は2孔(7%)のみであった。この2孔はすべり面を貫かない全区間ストレーナ孔であるが、すべり面の上位に帯水層が1層のみの単純な構造であるため、良好なデータがとれていると考えられる。

その他の観測孔は、「(B) 地すべり挙動との連動性がかならずしも明瞭ではなく、または、複数の帯水層の合成水位または部分的に漏水しているとみられ、すべり面付近の帯水層のみを良好にとらえているとはいえない」が14孔(50%)、「(C) 観測水位がすべり面より深い位置で変動しているか、漏水層の影響で水位変動がなく明らかにすべり面の水位ではない」が5孔(18%)、残りの7孔(25%)は判定困難であった(図2.3)。

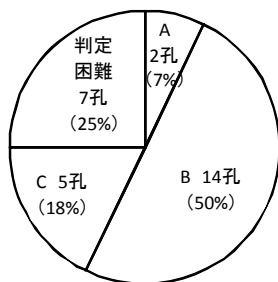


図 2.3 観測水位とすべり面との関係

2.3 アンケート調査による地下水調査の実態把握

都道府県、地すべり対策の経験を有する民間会社を対象としたアンケート調査の結果を 2.1 に整理した。その結果から明らかになった実態について、その概要を以下に述べる。

(1) 帯水層調査の実施状況

地下水観測孔を設置する際の帯水層調査は、必要に応じて実施する場合は 61%、特に定めていないが 27%で、標準仕様として必ず実施するが 7%程度であった (図 2.4)。この結果から、帯水層調査は必ずしも標準とされておらず、状況に応じて適宜判断されていることが伺える。

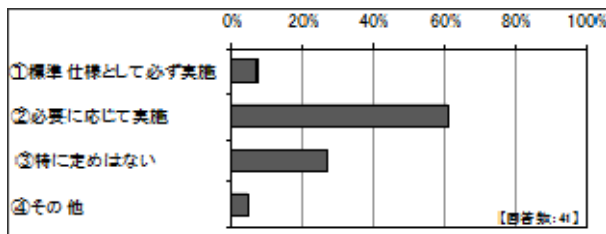


図 2.4 地すべり調査における帯水層調査の実施状況

(2) 地下水把握方法

地下水観測孔の構造を検討する上で有効と考えている調査は、試錐日報解析と食塩検層 (地下水検層) がそれぞれ約 28%と最多で、次いで簡易揚水試験が 12%、電気探査が 10%であった (図 2.5)。その中で最も有効と考えている調査を 1 つ選ぶ場合は、食塩検層 (地下水検層) が最多の 46%となり、試験が簡単で実績が多く、精度も高くわかりやすい等の意見が多数あった。

また、試錐日報解析は地下水把握に有効と回答し

た実施業者の技術者は 95%に達し、有圧地下水帯の位置、地層の透水性、地層毎の地下水位などの地下水情報の把握に利用されている。

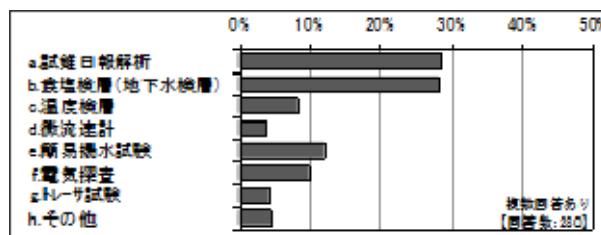


図 2.5 地下水の賦存状況を把握する有効な調査手法について

(3) 地下水観測孔の構造

都道府県の地すべり調査に用いられる地下水観測孔の頻度のうち約 80%の回答が、すべり面を貫く全区間ストレーナとしているとの回答であった (図 2.6)。部分ストレーナの設置については、55%がほとんどないと回答した。実施業者においても概ね同様の傾向にあり、部分ストレーナの有効性は多くの技術者が理解しているものの、実施されている例は少ない。

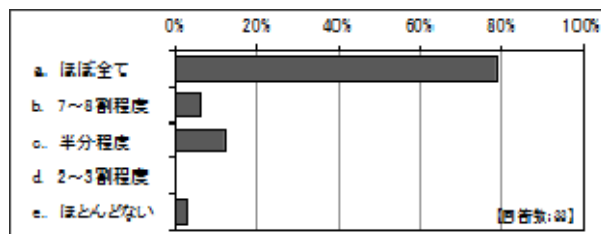


図 2.6 すべり面を貫く全区間ストレーナ孔としている頻度

2.4 地下水調査の課題

前節までに述べた調査結果を基に、地下水観測に関する課題を調査、計画等の段階に分けて表 2.1 に整理した³⁾。以下、各段階における課題について概説する。

(1) 地下水観測全般

地すべり対策で最も多く実施されている地下水排除工を検討するにあたり、地下水調査は非常に重要であるが、地下水調査の重要性が十分に理解されていないことが課題として指摘される。

また、すべり面付近の地下水を観測するための部分ストレーナ孔の構造や設置に関する具体的

な方法について整理されているものは少なく、調査を実施する各技術者の経験や判断に委ねられているのが現状である。地すべり対策を効果的に計画するためにも、部分ストレーナ孔による地下水観測の標準化や適用性の整理が重要である。

表 2.1 地すべり地における地下水調査の課題

段階	課題	原因	調査
全般	地下水調査、間隙水圧計測が実施されない	・間隙水圧計・部分ストレーナで水位変動を把握する重要性が理解されていない ・対策工計画における地下水調査結果の重要性が理解されていない	B
	掘進速度が速い場合やケーシングにより、細かな水位変化が把握できず、削孔水の影響もあって、本来の地下水水位を反映しない。	・掘進速度が速いとすべり面などの重要な地下水帯の水頭および透水性が判定できない ・作業後の地下水水位は削孔水の影響を受けている	B B
調査	試験日報解析の判定の個人差	・標準的な区分、どの程度の水位変動を有意とするかの評価基準がない	A
	全深度掘削後に検層をすることが多いため、逸水や複数の地下水帯の影響で、すべり面の地下水帯の状況が把握できない。	・逸水や優勢な地下水帯により地下水検層が不能となる ・優勢な地下水帯があると孔内水が低下しない ・食塩を均一に溶かすことが難しく、不均一だと検出精度が低下する	B B
	地下水検層等が実施されても観測孔構造に反映されない(全区間ストレーナになってしまう)	・調査時点では、すべり面位置が不明確 ・帯水層・逸水層が複雑すぎて確定できない ・オールストレーナでの観測を標準仕様としている	A A B
	部分ストレーナとする場合の基本的な作業手順・方法 ストレーナの仕様およびフィルターと間詰材の選定・使用方法 すべり面を掘り抜いた時の埋戻し方法	・決まった手法がなく、各技術者の経験や判断にゆだねられている ・帯水層から孔内への水の出入りが阻害されているのかわからない ・予定区間を正確に間詰めすることが難しい ・決まった手法がなく、各技術者の経験や判断にゆだねられている	B B B AB
設置	止水材の選定・使用方法	・地質や地下水条件に応じた確実性の高い止水をするための各種止水材の使用方法がわからない ・予定区間へ正確に止水材を設置することが難しい ・報告書に記載されていない	B A
	解析時に地下水観測孔の諸元が不明なことがある		A
観測	地下水位が設置した水位計の測定範囲に収まらない	・レンジオーバー ・測定間隔が粗いと水位変動のピークや周期を捉えきれない場合がある ・計器設置深度以下に水位が低下する場合がある	B
	計測機器の破損・故障	・動物によるケーブルの破損 ・バッテリー異常 ・落雷、湿気等による故障	B

調査A: 直轄地すべりを対象とした資料分析調査(H22調査)
調査B: 都道府県及び民間会社を対象としたアンケート調査(H23調査)

(2) 調査段階

試験日報解析と地下水検層が実施される機会の多さを反映してか、これらの調査手法に関する指摘が多い。

試験日報解析では、試験日報解析における判定

の個人差による評価のバラツキ、掘進速度とコストのバランス、削孔水による解析精度への影響などの課題があげられる。また、試験日報を作成するオペレータに重要性を理解してもらうことが課題とする意見も多く、それらのためのマニュアルの整備や啓発方法の検討を行う必要があると考えられる。

地下水検層(食塩検層)は帯水層の把握に最も多く利用されているが、その一方で課題も多く、塩分濃度を均一にする難しさ、劣勢な流動状態による検出限界、孔壁状態やストレーナの開口率による地下水流動への影響に関する検討の必要性などがある。

(3) 計画段階

計画段階では、試験日報解析や地下水検層の調査結果が地下水観測孔のストレーナ区間や構造の決定に活用されていないことが指摘される。地下水検層は多くの地区で実施されていたが、その結果を活用してストレーナ区間が設定されることがなされていないことが明らかとなった。また、試験日報解析でも地下水状況に関する情報が得られるが、これも活用されていない。その結果、すべり面に作用する地下水をうまく捉えられていないことが多いようである。もちろん、すべり面付近に複数の帯水層が存在するためにすべり面に作用する地下水帯を特定することが困難な場合や、地下水調査以外の要素として、ボーリング段階でコア判定等からすべり面を特定することが難しいという場合もある。しかし、そのような難しい状況でない限りは、地下水調査結果に基づいて、すべり面付近の地下水帯を観測出来るように検討すべきである。

地下水観測孔の構造の計画については、ストレーナや間詰め材、止水材等が仕様で定められていることは少なく、各現場で判断されていることが多いようである。そのため、今回のアンケートから判明した課題について、標準的手法やノウハウを整理し、普及を図っていくことが重要と考えられる。

(4) 設置段階

設置段階では、標準的手法がないことや現場作業の難しさが指摘される。ストレーナ構造を決定した根拠が報告書等に残されていない事例が多

かったが、機構解析や対策工の効果評価にあたっては、観測された地下水位がすべり面に作用する地下水帯の水頭を正しく表しているかを評価することも必要であり、地下水観測孔の設置に関する情報は重要である。

(5) 観測段階

観測段階では、観測不能となることを避けることが課題である。特に、動物によるケーブルの破損、バッテリー異常、落雷、湿気等により測定不能となった例が多い。これらの苦労・失敗事例とその対処のノウハウを継承していくことで、失敗の少ない計器設置につながると考えられる。

2. 5 地下水調査の課題解決の方向性について

前節で述べた課題に対して、それぞれの原因・背景を分析しながら解決の方向性を見いだしていくことが必要である。ここでは、いくつかの課題について具体的に解決の方向性を述べる。

(1) 地下水観測孔の設置手法の標準化

地下水調査に基づく地下水観測孔の設置方法の標準化（手引きの作成）が必要と考えられる。試錐日報解析や地下水調査等の結果をストレーナの位置の決定に反映させる手法やその際に注意すべき事項等が内容として必要であると考えられる。すべり面に関与する地下水位を捉えるためのストレーナの設置方法についても標準化または適用性の整理が必要であると考えられる。

また、試錐日報解析を地域差や個人差なく同じ指標・精度で行うための判定基準の作成や実例集の作成も有効と考えられる。

(2) 試錐日報解析と地下水検層等の総合的な解析と連続ステップ孔内試験

調査段階での課題解決の方向性として、試錐日報解析と地下水検層等の総合的な解析による水理地質調査が重要であると考えられる。

詳細な帯水層把握が必要な場合には、連続ステップ孔内試験によって計測区間を短く取りつつ、詳細に帯水層や逸水層を調査することが有効である。連続ステップ孔内試験では裸孔区間で孔内試験を行うため、地下水流動の検出精度の向上が期待できる。これに汲み上げ法を併用すれば、劣勢な流動層や地下水位が平衡状態になっている

場合でも、流動層の検出が出来る。また、連続ステップ孔内試験は掘進する過程で実施するため、掘進完了後にすべり面が特定できれば、部分ストレーナ孔を設置することが可能である。

試錐日報解析による流動層の判定は、どの程度の水位変動を有意とするのかの評価が難しい。しかし、孔内試験を実施する区間以外はケーシングで止水されている連続ステップ孔内試験であれば、前日作業後水位と翌日作業前水位の比較により、相当程度、流動層を区分することは可能と考えられる。

(3) 部分ストレーナ孔設置時における留意点

観測孔設置時における遮水材や間詰材の選定および充填方法は、担当技術者の経験によって、各現場で工夫されているのが現状である。そのため、設置手法と留意点を整理することは有用であると考えられる。

間詰めの際には、間詰材と保孔管に巻くフィルター材は地下水の流動性とフィルター効果（地山の細粒分や間詰材が保孔管内に入らないようにする効果）を両立する素材を選定する必要がある。特に砂など細かい間詰材の場合は、孔内水中での沈降に時間が掛かるため、充填しすぎないように投入後に時間をおいて次の投入を行う等の対応が必要である。

止水に際しては、実績のある材料があるので、適用条件、削孔径や地質・地下水状況に応じて適宜選定し、適切に組み合わせることも効果的である。

(4) 記録の様式化・施設台帳化

記録の様式化を図り、施設台帳として整備することも重要であると考えられる。特にストレーナ設置方法やその考え方を記録し、次の観測孔設置や観測水位の妥当性検証、対策工の効果検証の際にも活かすことが出来ると考えられる。

3. 3. ボーリング孔における地下水把握手法

3. 1 水理地質調査の必要性

すべり面付近の間隙水圧を観測する場合、観測孔とするボーリング孔におけるすべり面付近の水理地質（地下水の有無や地盤の透水性の状況）を調査し、すべり面付近の帯水層の間隙水圧のみを適切に計測できるよう、調査結果に基づいて観

測孔構造を計画する必要がある⁴⁾。

水理地質状況を把握するための調査としては、地下水検層が一般的に用いられているが、多くの場合、孔壁保護などの理由から掘削したボーリング孔を全孔ストレナ孔として仕上げた後に地下水検層を実施している。このため、部分ストレナ孔を設置するためには水理地質調査のためのボーリング孔が別に必要となり、コストや時間の点で不利である。この点も、部分ストレナが広く普及しない原因の一つであると考えられる。この問題を解決するためには、部分ストレナを設置するボーリング孔において、地下水観測孔を仕上げる前に水理地質状況を把握できる手法が必要と考えられる⁵⁾。

地下水観測孔を仕上げる前に水理地質状況を把握できる手法としては、試錐日報解析やステップ検層^{5,6)}等が考えられる。ここでは、試錐日報解析やステップ検層を組み合わせた水理地質調査方法を「連続ステップ孔内試験」として提案する。

3. 2 連続ステップ孔内試験による水理地質調査

3.2.1 概要

連続ステップ孔内試験における1ステップの実施例を図3.1示す。通常、1ステップを1日で実施する。掘削中のボーリング孔の先端に裸孔区間があり、この裸孔区間の水理地質の状態を把握するために、作業前水位の測定、地下水検層を行う。これらの調査が終われば、ケーシングを孔底まで挿入する。ボーリングの掘進を行い、作業終了時に作業後水位を測定する。そして、翌日も同じサイクルを繰り返す。

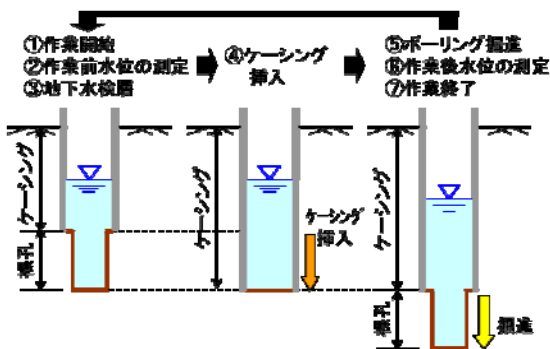


図 3.1 連続ステップ孔内試験における1ステップの実施例

部分ストレナ孔の構造検討を目的とする場

合の連続ステップ孔内試験の調査項目としては、試錐日報解析と地下水検層が最低限必要と考えられる。一方、地下水排除工の配置計画等の検討資料とするためにボーリング孔の全区間における水理地質の把握を目的とする場合などは、試錐日報解析と地下水検層だけでなく、簡易間隙水圧計測（湧水圧試験）やボアホールカメラ等の調査手法も同時に行ってデータを取得するのが望ましいと考えられる。

3.2.2 試錐日報解析

一般的な試錐日報解析は、ボーリング作業直後の水位（作業後水位）と翌日掘削日の作業前の水位（翌日水位）の水位変化の状況から裸孔区間の地盤の透水性と地下水の有無を判定する。ここでは更に、作業前水位の測定において、孔内水位を低下させて、その時の水位変化の状況も加味して判定する方法を提案する。

3.2.3 地下水検層

地下水検層は、ボーリング孔内の地下水の流動状況を把握する調査で、地下水の流動状況から試験区間の地盤の透水性と地下水の有無を判定する。地下水検層手法には、食塩検層、溶存酸素検層、（加熱式）温度検層、孔内流向・流速測定等がある。どの手法でも連続ステップ孔内試験に適用可能である。地下水検層には自然水位（平衡水位）で実施する方法と、孔内水を汲上げて地下水帯から孔内へ地下水が供給される状態で実施する方法がある。帯水層の検出精度を高めるために、両者を併用して実施することが望ましいと考えられる。

3.2.4 水理地質区分と判定

部分ストレナ区間、部分ストレナ孔の構造（止水区間、止水方法等）を検討するためには、観測孔とするボーリング孔におけるすべり面付近の水理地質（地下水の有無や地盤の透水性の状況）を調査し、すべり面付近の帯水層の間隙水圧のみを適切に計測できるよう、調査結果に基づいて観測孔構造を計画する必要がある。

水理地質調査の結果は、地下水の有無と地盤の透水性を組み合わせた表3.1の水理地質区分を用いて、帯水層、漏水層、非透水層（いわゆる難透水層および不透水層に相当）を判定する。その結

果から、すべり面付近の帯水層を観測対象とし、かつ、観測対象以外の帯水層から地下水がボーリング孔内に流入しないようにストレーナ区間を設定する。また、ストレーナ区間の上下の非透水層において止水処理を行う。なお、ここでは、部分ストレーナ孔の構造を計画することを主眼として、単純化した水理地質区分とした。

表 3.1 水理地質区分

		地盤の透水性	
		高い	低い
地下水	有り	帯水層	非透水層
	無し	漏水層	

試錐日報解析のみを実施する区間では、試錐日報解析結果から、裸孔区間ごとに水理地質区分の判定を行う。試錐日報解析と地下水検層を実施する区間では、地下水検層と試錐日報解析を組み合わせ、地下水検層による流動状況から、裸孔区間内をさらに細分して判定することが可能である。

1) 試錐日報解析のみを実施する区間

水理地質区分の判定(表 3.2)は、裸孔区間ごとに、全漏水の有無、汲み上げ後の水位上昇の有無、翌日水位の低下量の組み合わせによって、帯水層・漏水層・非透水層の判定を行う。翌日水位の低下量の大小を分ける基準は地下水の賦存状態や地盤状況によって異なると考えられるため一律に決めることは難しいが、1~3m 程度としている例が多いようである。

表 3.2 試錐日報解析(汲み上げ)を用いた水理地質区分の判定

水位の変化の特徴			試錐日報解析判定	水理地質区分		記号
全漏水	汲み上げ後の水位上昇	翌日水位の低下量				
有り	-	-	全漏水	漏水層	裸孔区間に透水性が著しく高い漏水層が存在する	□
無し	有り	-	流入	帯水層	裸孔区間に帯水層が存在する	→ 水頭高さ GL-12.45m
	無し	大	逸水	漏水層	裸孔区間に透水性が比較的高い漏水層が存在し、帯水層は存在しない	□
		小	変化なし	非透水層	裸孔区間全体が透水性の低い地盤からなる	■

2) 試錐日報解析と地下水検層を実施する区間
水理地質区分の判定(表 3.3)は、地下水検層の結果を、流入、全漏水、逸水(流入なし)、非検出(一部)、上昇流・下降流、非検出(全区間)、逸水(流入不明)に区分し、全区間非検出の場合に試錐日報の判定を併用する。この判定では、裸孔区間内をより細分した判定が可能である。

表 3.3 地下水検層・試錐日報解析を用いた水理地質区分の判定

地下水検層判定 (自然・汲み上げ併用)	試錐日報解析判定 (作業前後比較)	水理地質区分	凡例	
流入	↙	帯水層	→ 水頭高さ GL-12.45m	
全漏水		漏水層	□	
逸水 (流入がないことを確認)		非透水層	非透水層	■
非検出 (一部区間(P))				
上昇流・下降流	変化なし			
非検出 (全区間)	全漏水	漏水層	□	
逸水 (流入の有無は不明)	↘	漏水層あるいは帯水層	□→	

3.3 連続ステップ孔内試験の適用性

国土交通省の直轄地すべり対策事業を実施している地すべり地において、連続ステップ孔内試験が試みられている(5,7,8)。

図 3.2 は、善徳地すべりにおいて実施された連続ステップ孔内試験の結果⁵⁾である。ステップ式地下水検層では、すべり面直上付近において、全区間ストレーナ孔での通常の地下水検層では検出されなかった、やや優勢(準確定流動)な GL-30.0m 付近の流入を検出することが出来ている。また、それ以外にも、GL-30.5-31.0m 区間の流入など、優勢でない(潜在流動)流入も検出できている。

このように、連続ステップ孔内試験では、ボーリングの掘進に合せた短い裸孔区間を試験区間として孔内試験を実施することから、優勢でない帯水層の把握を可能にするなどの検出精度の向上が期待できる。また、ステップ間隔を小さくして高密度に調査を行えば、帯水層や流入区間の検出が高い分解能で可能になる。

ただし、ステップ間隔を小さくして高密度に調査を行った場合、費用面では不利となる。部分ストレーナ区間の決定に目的を絞る場合、分解能は低下するものの、地下水検層の実施区間をすべり面の上部 10m と下部 5m に絞ることや、ステッ

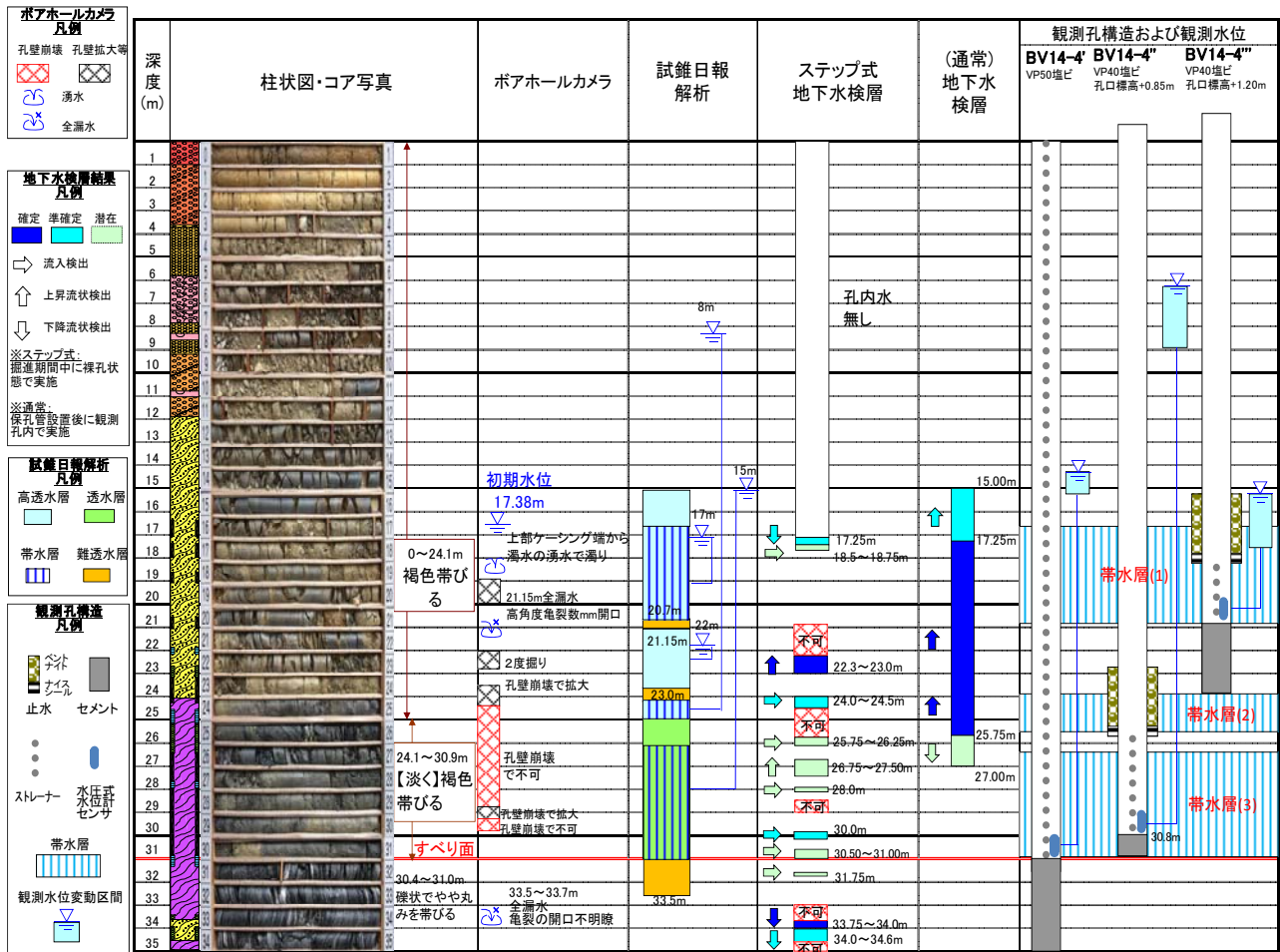


図-3.2 地下水調査および観測孔設置図⁵⁾

ブ間隔を日掘進量（地すべり地においては 3～5 mが多い）にあわせる等の工夫で、より効果的に実施することが可能となる。

4. すべり面付近の間隙水圧の調査手法

4.1 部分ストレーナ孔の設置

4.1.1 間隙水圧観測の観測手法の整理

間隙水圧観測で得られたデータは、地すべりの機構解析、安定解析、対策工の配置計画等を行うために用いられる。これらの解析等を精度良く行うためには、適切に観測されたすべり面付近の間隙水圧を用いる必要がある。そのため、複数の帯水層が存在する場合には、部分ストレーナ孔または間隙水圧計による計測を行うことが望ましい。現在、地すべり地で行われている間隙水圧観測の方法には、主に以下の3種類がある。

(1) 全区間ストレーナ孔

全区間ストレーナ孔による観測は簡便である

ものの、地すべり土塊内に複数の帯水層が存在している場合は、これら複数の帯水層が合成されたものとして観測されることから、対象とする帯水層の間隙水圧を正しく観測できない。

(2) 部分ストレーナ孔

部分ストレーナ孔による観測は、複数の帯水層がある場合や逸水層がある場合でも、目的とする深度にストレーナ区間を限定することで、すべり面付近の間隙水圧を観測できる利点がある。

(3) 埋設型間隙水圧計

埋設型間隙水圧計による調査は、間隙水圧を直接計測できる利点があるが、測定区間の上端を完全に遮水する等の設置が技術を要することや、計測機器が故障した場合は観測孔の再設置を行う必要がある⁹⁾など、技術的・費用的に難しい面がある。

このような観測手法の特性を踏まえ、すべり面付近の間隙水圧を観測する手法として、部分ストレーナ孔を中心に検討することとした。

4.1.2 部分ストレーナ観測孔の計画

部分ストレーナ孔による間隙水圧観測では、すべり面付近の帯水層の水頭高さをすべり面の間隙水圧とする。そのため、ストレーナ区間を適切な位置に設置することが必要である。

ストレーナ区間の上部及び下部は、他の帯水層からの水の回り込みや漏水が生じないように確実な止水を行う。すべり面まで掘り止めた調査孔（ストレーナ区間の下部で漏水がない観測孔）では、止水処理はストレーナ区間の上部のみで行う。すべり面を貫通する観測孔の止水は、上部及び下部について検討しなければならない。

ストレーナ区間および止水区間の設定の考え方を表 4.1 に示す。

表 4.1 部分ストレーナ区間および止水区間の設定

種別	設定の考え方
ストレーナ区間	<ul style="list-style-type: none"> ストレーナ区間は、すべり面を含むか、または、その直上に位置する帯水層区間とする。 すべり面の近くに複数の帯水層がある場合、それらの水頭高さがすべり面付近の帯水層と同じであれば、それを含めてストレーナ区間としてもよい場合がある。しかし、帯水層間に漏水層がある場合や、すべり面直上の帯水層とは異なる水頭高さをもつ帯水層である場合は含めてはならない。
上部止水区間	<ul style="list-style-type: none"> 上部止水区間は、ストレーナ区間より上部にあり、十分な厚さを有する非透水層とする。
下部止水区間	<ul style="list-style-type: none"> 下部止水区間は、すべり面以深まで掘削した孔で、すべり面に深に漏水層や水頭高の低い帯水層があり、漏水が懸念される場合に設ける 下部止水区間は、ストレーナ区間より下部にあり、十分な厚さを有する非透水層とする。 すべり面直下に漏水層がある場合は、埋め戻しを行う。

部分ストレーナ観測孔は、保孔管、止水材、間詰材およびフィルター材等の設置資材から構成され、止水材の種類に応じて3つの標準的な構造に分けられる。設置資材は、地盤状況や水理地質区分に応じて適切に選定する必要がある。

4.2 記録の様式化・施設台帳化

4.2.1 部分ストレーナ孔及び観測機器の点検

地下水調査の実態と課題について検討した結果、課題の一つとして、ストレーナ構造を決定した際の考え方が報告書等に残されていない事例が多く、機構解析や対策工の効果評価の際に、地下水観測孔の設置に関する情報を参照できないことがあるということが明らかとなった。この課

題を解決するためには、設置時に観測孔や観測機器の仕様を記録し、また、点検した際には結果を記録する台帳を整備することが望ましいと考えた。そのような設置・点検台帳（案）として、表 4.2 と表 4.3 を提案した。

表 4.2 部分ストレーナ孔の設置・点検台帳（A票）

観測番号 A-

部分ストレーナ観測孔 設置・点検台帳（A票）

項目	内容
地区名/ブロック名	
ボーリング孔番号	
設置年月日	
ボーリング孔の緯度経度	
設置業務名/受注者	
保孔管/保孔径	
鉛直水理地質調査機括図および部分ストレーナ構造図	

表 4.3 部分ストレーナ孔の設置・点検台帳（B票）

観測番号 B-

部分ストレーナ観測孔 設置・点検台帳（B票）

項目	内容			
地区名/ブロック名				
ボーリング孔番号				
点検年月日				
点検者/所属				
高検時 種別 点検目的	観測機器・保護設備等の確認	点検方法 目視による外観チェック (保孔管/保孔径・保孔管/保孔径)	点検結果 ^(注) 良好・不良・その他	備考
	測定値の信頼性検証	観測動作試験1 (観測値と水位計との比較)	良好・不良・その他	
		観測動作試験2 (ポンプ停止時観測値と観測時の差)	良好・不良・その他	
異常等が認められる場合	1. 観測孔の形状・せん断による閉塞の確認	孔底深さの確認	良好・不良・その他	備考
	2. 観測孔内への土砂流入状況の確認	CCDカメラ等による内部確認	良好・不良・その他	
	3. ストレーナの目詰まり状況の確認	漏水による水位回復確認試験 横断による流動層確認試験	良好・不良・その他	
設置・施設時	水道計仕様			備考
	製造者/型式			
	計測範囲			
	データ貯蔵容量			
	保数/初期値			
	水圧センサー設置深さ			

(注) 「不良」・「その他」とした場合は備考に状況を記載する。

5. 安定計算に用いる間隙水圧

5. 1 検討方法

地すべり地の地質・水文条件は複雑で、複数の帯水層や逸水層が存在するケースが少なくない。そのため、安定解析に用いる間隙水圧の観測は、全区間ストレーナの観測孔より、個々の帯水層の地下水位をとらえることができる部分ストレーナによる観測孔のほうが望ましいと考えられる。

ここでは、善徳地すべり（徳島県）において全区間ストレーナ観測孔、すべり面付近の部分ストレーナ観測孔、浅層の部分ストレーナ観測孔の3孔を近接して設置し、得られた観測したデータを用いて、降雨応答特性の分析を行い、それぞれの観測データが捉えている地下水位の変動特性の解析を行い、安定解析に用いる間隙水圧としての評価を試みた¹⁰⁾。

解析対象の地下水観測孔は、同一箇所に設置された、構造・深度の異なる3孔である（図5.1及び図5.2）。これらの観測孔の1時間間隔の観測データを用いた。なお、地下水観測孔の設置時に連続ステップ孔内試験等の分析によって帯水層が3層確認されている⁵⁾。雨量は国土交通省の善徳観測所の1時間毎の観測データを用いた。解析期間は、2010年4月～2011年11月とした。実効雨量の解析¹¹⁾では、回帰計算で最も相関の高くなる半減期及び遅延時間を用いて実効雨量を計算した。

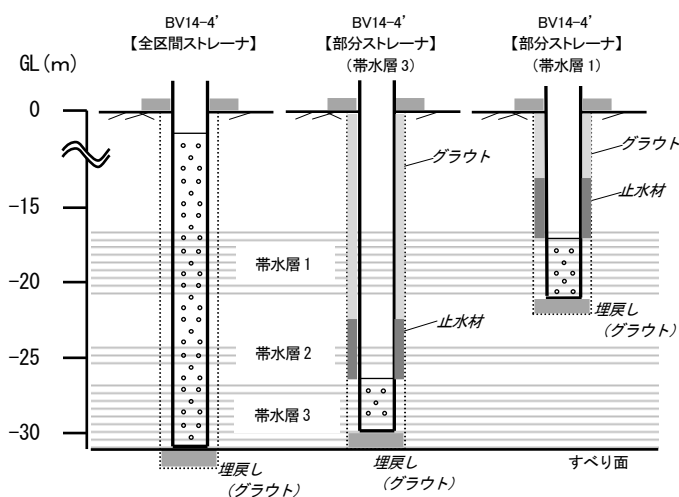


図 5.1 地下水観測孔の模式図

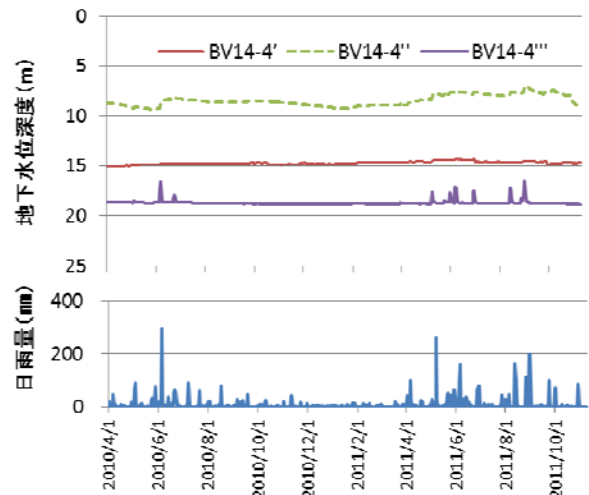


図 5.2 地下水観測結果（善徳地すべり 2010年4月～2011年11月）

5. 2 解析結果

実効雨量の解析結果から、各孔の最も相関の高くなる半減期を表5.1に示す。

表 5.1 実効雨量解析における地下水位半減期

孔番号		BV14-4'	BV14-4''	BV14-4'''
観測孔仕様		全区間ストレーナ	部分ストレーナ (すべり面付近)	部分ストレーナ (浅層地下水)
集水井	半減期	10年	43.75日	24時間
施工前	相関係数	0.705	0.861	0.830

BV14-4'（全区間ストレーナ孔）は、水位変動幅がごく小さく、観測期間中、ほぼ一定の水位であった（図5.2）。解析結果は、半減期が10年と非常に長くなっており、正しく解析できていないと考えられる。全区間ストレーナ孔のために複数帯水層の合成水位となり、更に逸水層からの流出もあることが原因と考えられる⁵⁾。図5.2の水位変動状況を見ても、降雨への応答は不明瞭であり、安定解析や対策工の効果判定に用いる地下水位としては適切でないと考えられる。

BV14-4''（帯水層3の地下水位を対象とした部分ストレーナ孔）はそれぞれの降雨と対応した水位変動が確認され、実効雨量と水位変動の相関性は良い。また、半減期は43.75日であり、すべり面直上の帯水層1の長期的な変動が再現されていると考えられる。また、地下水位は、深度7～10mとなっており、これら3つの観測孔の中で最も水頭が高い。帯水層3はすべり面の直上の帯水層であり、すべり面に作用する地下水であると推定される。

BV14-4”（帯水層1の地下水位を対象とした部分ストレーナ孔）もそれぞれ降雨と対応した水位変動が確認され、実効雨量と水位変動の相関性も良い。半減期は24時間であり、最も深度が浅い帯水層3の水位変動が再現されていると考えられる。

5.3 考察

構造・深度の異なる観測孔の地下水位データについて実効雨量解析を行い、それぞれの地下水変動特性の評価を行った。その結果、帯水層が複数ある場合には、全区間ストレーナ孔では正しく間隙水圧が計測できていないことが確認された。それに対して、部分ストレーナ孔では、対象とする帯水層の地下水位の変動を良くとらえられていた。浅層の帯水層3では、降雨に敏感に反応した地下水変動が捉えられていた。また、深層の帯水層1では、長期的な地下水変動が捉えられていた。

これらをふまえると、安定計算に用いる間隙水圧では、次の点に留意することが重要と考えられる。1点目は、部分ストレーナ孔等によって、すべり面に作用する帯水層のみを対象として観測することである。2点目は、観測された地下水変動が、観測している深度に見合った変動特性と水頭高さをもつことを確認することである。また、可能な場合は、地すべりの移動特性と地下水変動特性の対応関係についても確認することは重要である。

6. 地下水調査・観測の標準化（成果のまとめ）

本研究で得られた主な成果を以下にまとめる。

- ① アンケート等による実態調査の結果、多くの現場で全区間ストレーナ孔が用いられており、適切に間隙水圧が観測できていない現場が多いことが明らかとなった。また、地下水調査がなされていても、観測孔構造の計画には十分に活かされていなかった。
- ② 新たに検討した連続ステップ孔内試験は、水理地質調査（地下水の有無、地盤の透水性の状況の調査）と部分ストレーナ孔の設置を一孔で効率的に実施できることを現地で実証した。
- ③ 水理地質区分に基づく部分ストレーナ構造の計画方法を示すため、連続ステップ孔内試験の試行結果を踏まえ、新たに水理地質区分の判定基準を作成した。

- ④ 設置時に観測孔や観測機器の仕様を記録し、また、点検した際には結果を記録する台帳を整備することが望ましいと考え、設置・点検台帳様式（案）を提案した。
- ⑤ 部分ストレーナの観測孔と全区間ストレーナ孔の降雨応答特性の比較の結果、部分ストレーナ孔では、対象とする帯水層の地下水位の変動特性を良く捉えることが出来ていた。安定計算に用いる間隙水圧としては、部分ストレーナ孔等によって、すべり面に作用する帯水層を対象とし、適切に水頭高さ・水位変動を捉えることが重要である。

以上の成果を基に「部分ストレーナ孔による間隙水圧観測の手引き（案）」としてとりまとめた。目次構成は以下に示すとおりである。

1. 総説
 - 1.1 間隙水圧観測の目的
 - 1.2 部分ストレーナ孔による間隙水圧観測の適用
 - 1.3 部分ストレーナ孔による間隙水圧観測の手順
2. 水理地質調査
 - 2.1 概説
 - 2.2 連続ステップ孔内試験
 - 2.3 水理地質の鉛直分布の調査
3. 部分ストレーナ孔の設置計画
 - 3.1 部分ストレーナ区間の検討
 - 3.2 観測孔の構造の検討
 - 3.3 観測機器等の検討
4. 観測孔の設置
 - 4.1 部分ストレーナ孔の設置
 - 4.2 観測機器等の設置
 - 4.3 地下水観測孔の設置・点検台帳の整備
5. 観測及び観測孔等の点検
 - 5.1 観測データの回収と確認
 - 5.2 観測孔の点検
 - 5.3 観測機器等の点検

本研究を行うにあたり、国土交通省直轄地すべり担当事務所、都道府県、一般社団法人全国地質調査業協会連合会及び会員企業、一般社団法人斜面防災対策技術協会及び会員企業には、地下水調査・観測の実態把握のためのアンケート等の調査にご協力を頂いた。また、東北地方整備局新庄河川事務所、北陸地方整備局阿賀野川河川事務所、中

部地方整備局富士砂防事務所、四国地方整備局四国山地砂防事務所、千葉県には、現地調査等に関してご協力を頂いた。ご協力頂いた皆様に深く感謝いたします。

効雨量に基づく地下水位の降雨応答特性、地すべり、45 (3)、p219-226

参考文献

- 1) 杉本宏之・宇都忠和・本間宏樹・武士俊也・南澤正幸・栗真人・山本潤 (2011) 地すべり地における地下水観測の課題と改善について、第50回日本地すべり学会研究発表会講演集、p147-148.
- 2) 武士俊也・中野英樹・北原哲郎・古島広明・榎田充哉・樋口佳意 (2012) : アンケート分析による地すべり地の地下水調査の現状と課題、第51回日本地すべり学会研究発表会講演集、p244-245.
- 3) 武士俊也・中野英樹・北原哲郎・古島広明・榎田充哉・樋口佳意 (2013) : 地すべり地における地下水観測の課題と解決の方向性、平成25年度砂防学会研究発表会講演集、p372-373.
- 4) 檜垣大助・丸山清輝・吉田克美・吉松弘行 (1991) : 地すべり地における間隙水圧変動の観測, 地すべり, Vol. 28, No. 3, pp. 9-16.
- 5) 石田孝司・杉本宏之・武士俊也・高川智・二木重博・宇都忠和 (2012) : 善徳地すべりにおける高密度ステップ孔内試験結果と地下水観測結果との比較について、日本地すべり学会誌 Vol.49-6 p35-41.
- 6) 申潤植(1989) : 地すべり工学 ー理論と実践ー、山海堂, pp.419- 431.
- 7) 武士俊也・杉本宏之・宇都忠和・本間宏樹・佐藤俊英・帆苅正敏・井藤嘉教・高澤忠司 (2012) : 滝坂地すべりにおける高密度ステップ孔内試験実施による地下水状況の調査、第51回日本地すべり学会研究発表会講演集、p165-166.
- 8) 菖蒲幸男・浅野目和明・松村大志 (2013) : 志津地すべりでの高密度ステップ孔内試験、第52回日本地すべり学会研究発表会講演集、p175-176.
- 9) 社団法人斜面防災対策技術協会 地すべり観測便覧編集委員会 (2012) : 地すべり観測便覧, 社団法人斜面防災対策技術協会.
- 10) 杉本宏之・中野英樹・樽角晃・武士俊也・石井靖雄・北原哲郎 (2013) : 部分ストレーナ観測孔によって計測された地下水位の変動特性の評価、第52回日本地すべり学会研究発表会講演集、p245.
- 11) 海野寿康・中里裕臣・井上敬資・高木圭介 (2008) : 破碎帯地すべり地区における地下水位計測と実

Research on observation method of underground water level for landslides

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2010-2013

Research Team : Erosion and Sediment Control
Research Group (landslide)

Author : ISHII Yasuo

SUGIMOTO Hiroyuki

Abstract : Condition of the geological and hydrological features is very intricateness in the mountainous district slope. Furthermore, underground water condition is more complicated in landslide. So it is difficult to measure underground water level which is related to the water pressure fluctuation of slip plane. This study is aimed at standardizing the setting method of the underground water level observation that can apply to landslide analysis.

Key words : Landslide, Underground water observation, Pore-water pressure, Stability analysis