

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19580289

研究課題名（和文） 亀裂等による選択的地下水流動機構の解明

研究課題名（英文） Study on groundwater flow system through fractures

研究代表者

奥山 武彦（OKUYAMA TAKEHIKO）

山形大学・農学部・教授

研究者番号：20343767

研究成果の概要(和文):地盤中の地下水流動は連続した亀裂帯などによる選択的流動が卓越し、物質移動や斜面災害の誘因となる。地すべりや地震は地盤の緩みを誘起し、亀裂の発生と浸透量の増加を招いて災害を大きくする可能性が高い。既存のオールストレーナ型調査ボーリングを利用して深度別の水頭測定と採水を行うためのゾンデを開発して、七五三掛地すべり頭部における融雪期の地下水水頭の観測を実施した。館下地すべりにおける長期観測により、大地震後に水頭が増加する現象を把握することができた。

研究成果の概要(英文): Groundwater flowing through fracture zone with high rate often becomes the principal cause of material transfer and slope disaster. Landslides and earthquakes promote loosening of the ground with fractures and increase infiltration. The sonde system was developed to measure groundwater potential and water sampling at arbitrary depth in all-strainer type boreholes. Groundwater potential monitoring was conducted in snow melting season in upper area of Shimekake Landslide. Increase in groundwater pressure due to big earthquakes was observed in Tateshita Landslide.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：水循環・地盤工学・地下水・土砂災害

1. 研究開始当初の背景

地形が急峻で降水量が多く地殻運動や地震に見舞われる我が国では、土壌および表層地質が浸食作用や風化、応力作用等を受ける結果、水理地質構造が複雑化している。その結果、地下水や物質の移動現象が複雑化して、巨視的な見方が適用できないことが知られ

るようになった。地すべり斜面では側端部に大きな歪みが集中して弱部となり、崩積土層では巨礫がマトリックスを構成して大間隙が温存されやすい。このような高透水性の個所は地下水の選択的流路となりやすい。

地下水の選択的流動要因は流路となる地層構造と流動ポテンシャルである。広範囲の

地層構造調査には物理探査手法が有用であり、複雑化した地層内の流動ポテンシャルを把握するためには深度別（地層別）の地下水ポテンシャルを測定することが必要である。

2. 研究の目的

本研究は岩盤中に発達した亀裂系によって生じる選択的な地下水流動機構を検証し、それが水循環と物質移動、斜面災害等における役割を明らかにすることを目的とする。

地下水位の観測や水質指標を基にした地下水流動の研究は多く実施されているが、亀裂等の流動要素を直接対象にすることは一般的なボアホールでは不可能である。深度別の観測や採水が可能な区間遮断構造のボアホールを活用して、地下水や物質の移動、地すべり面の間隙水圧変動現象への亀裂流の関与を定量的に解明するために、以下の調査観測・分析を実施する。

(1)ボアホールにおいて個々の亀裂の採水を行うためのゾンデの開発と観測の実施

(2)周辺の土地利用を反映した水質指標を用いた選択的水循環の解明

(3)層別地下水頭の連続観測の実施

3. 研究の方法

(1)ボアホールの任意深度区間において採水を行うためのゾンデの開発

特定の深度の地下水を対象とするためには、一般的なオールストレナ構造のボアホールでなく、部分ストレナ構造が必要であることは、広く認識されるようになってきた。しかし、ほとんどの場合にオールストレナ型のボアホールが設置される。既設の孔を利用して任意深度の観測、採水を行うために、細径のパッカー付きゾンデを使用する観測システムを試作し、空間的に偏在する亀裂を流動する地下水の水頭観測ならびに採水可能にする。

(2)水質指標を用いた選択的水循環の解明

地下水の水質は接触する地層の化学的性質や循環速度の影響を受けて変化するため、水質は循環状況の指標となる。そこで、水質の空間的ならびに時間的変動を調べることにより、地下水の循環機構を解明する手がかりを得ることができる。このことは、地下水が誘因のひとつとなる地すべりの解明、対策の樹立に大きく寄与する。

(3)層別地下水頭の連続観測の実施

地下水頭の長期観測において、地震発生時に短周期の記録を行うことにより、降雨等と地下水循環との関係を明らかにするとともに、地震等の外力によって地盤に変状が生じて循環系が変化する現象を解明する。

4. 研究成果

(1)既存ボアホールを利用した任意深度の水頭測定および地下水採取

観測ゾンデの構造

既存オールストレナ孔は保孔管全長にわたって管表面面積率 0.5%程度に穿孔されているため、異なる水頭をもつ層間の地下水の交流を惹起し、そのバランスによって孔内水位が形成されることが欠点である。ベータタイプの採水器を孔内の任意深度に下ろして採水を行っても、交流した地下水を採取する可能性が高い。本研究によるゾンデを使用することで、全深度について観測を行うことができる。

水頭観測のためには、水圧センサーの上下にパッカーを配置して上下層との遮断を行う。遮断性を高めるためにパッカー長は1m、3mとした。採水は小型水中ポンプを使用して、地表からおよそ35mの深さの水頭まで揚水可能である。ゾンデは最も一般的な内径40mmの塩ビ製保孔管に挿入することが可能である。

現地観測結果

2009年春に山形県鶴岡市七五三掛地区で発生した地すべりは、大規模な地すべり地形が多数見られる斜面の下部にあたる最大400×700mの範囲で滑動した。近年は顕著な地すべり活動は起きていなかったことから、既往破碎層に存在する地下水流動系に何らかの変化が起きて融雪水が地すべりブロックに集中したことが誘因と考えられた。地すべりブロック内および後背斜面にあるボアホールにおいて深度別水頭測定を行った。実施位置は図1のA、B、Cである。



図1 地すべりブロックと観測地点

A地点が位置する後背山地南斜面は、地すべり地特有の急傾斜面と緩傾斜面との交互連鎖地形を呈している。B地点は頭部凹状地にあたり、地下水排除が施工される前は湿地状態であった。2010年2~3月における両地点の孔内水位は図2に示すように、気温が高くなった2月末からA孔の水位が急上昇した。地すべり斜面上部の地下水頭上昇は、地下水供給と上昇した間隙水圧の伝播の両面で地すべりの誘因となり、融雪期に崩壊が多発する原因になる。

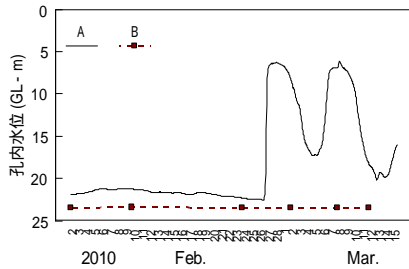


図2 A、B地点の孔内水位

A地点の掘削深度35mのオールストレナ孔を利用して観測した深度別水圧を図3に示す。孔内水位は-22.16mであったが、これ以浅の深度10m前後の砂質層と風化岩層の境界付近に正水圧が生じていることから、孔内水位とは別個に飽和層があることを示している。地形状況から、新しい変状は認められないものの、地層に緩みが生じて涵養が促進されていることが考えられる。

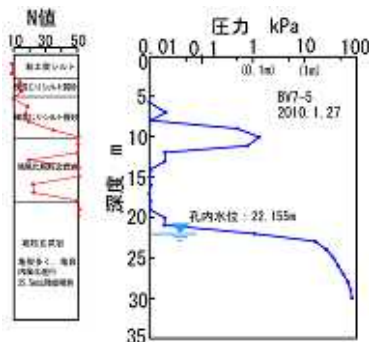


図3 A地点の深度別地下水水圧

本ゾンデシステムを使用してA地点の深度9.6mと27.1mで採水した水質の比較を図4に示す。水質分析は吸光光度計(DR2800)を使用して行った。

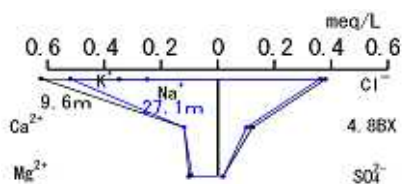


図4 A地点の深度別水質の比較

融雪期であるために、イオン濃度に大きな差異はないが、電導度、溶存酸素濃度、酸化還元電位に本方法による採水で明瞭な差が認められた。

B地点では、図5のように、風化が進んで砂状になった層の水頭がその下部の風化岩層より大きくなっており、孔底近くで水頭が低くなっている。融雪水の供給を受けていること、下部の多亀裂層を通じて地下水排除工への流動が促進されたことを反映してい

る。また、深度23.5~26、27.5~28.5mでは水圧に数秒~数十秒の周期の脈動が認められ、強風化砂状層に大きな振幅が見られた。透水性の大きな層での流動があることが考えられる。このような動的な現象の観測は通常の孔内水位測定では不可能であり、埋設型間隙水圧計では測定点数に限度がある。オールストレナ孔を利用する本方法ならではの結果である。

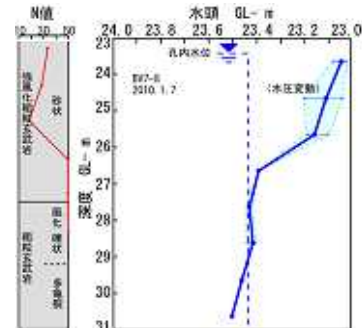


図5 A地点の深度別地下水水圧

当地すべり斜面の上部の断面を図6に示す。A地点は古い滑落崖の下部で引張り力が作用し、地盤の緩みや亀裂が発生しやすい領域、B地点付近は上部からの移動土塊の風化が進んだ領域にあたり、湧水により湿地化していた。

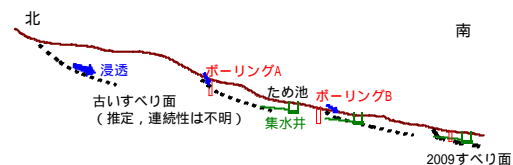


図6 A、B地点の縦断面図

C地点は活動したブロックの中下部に位置し、図7のパイプ歪計のデータが示すように、深度約27mのすべり面上部に大変位が生じるとともに、それに遅れて深度11mでも変位が発生している。深度11mを境として、上部は水頭が高く、下部は低下していることから、進行中の地すべりによってすべり面付近が破碎され、難透水層が形成されたことを示していると考えられる。

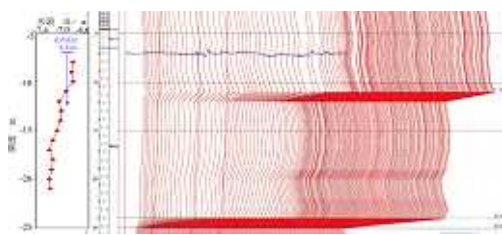


図7 C地点の深度別水頭

(2)水質指標を用いた選択的水循環の解明
地すべりブロックにおいて水質分布から

水循環の解明をめざすにあたっては、すべり面への影響が大きい深度の地下水を対象として採取する必要がある。また、前述のように卓越した流動経路が特定深度に形成されることが多いことに留意する必要がある。この点を考慮して、集水井の集水ボーリング等から採取した深い深度の地下水の水質分析を行った。代表的な水質指標である電導度の分布を図8に示す。

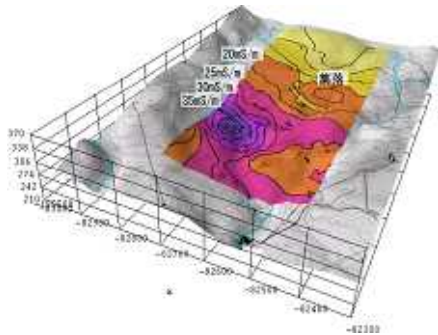


図8 地下水の電導度分布

活動ブロックの北方の電導度が低く、集落付近を通してブロックに舌状につながっていることから、前述のように、融雪水が上部の旧地すべりで形成されたと考えられる高透水帯を通してブロックに集まったことを裏付けている。地下水の重炭酸濃度も同様の分布を示している。また、ブロック南東域の低電導度帯が東方に隣接する地すべりブロックとつながっていることを示している。

(3) 層別地下水頭の連続観測

地震による亀裂等の発生

地すべりの誘因として、地下水とともに地震の影響が大きいことが、2004年の中越地震、2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震等で注目されるようになった。宮城県栗原市館下地区で2003年5月26日に発生した地すべりも宮城県沖地震によるものであった。同地区は火山灰質土からなる丘陵地の標高30~50mにある。滑落ブロック上方の地点で深度0.6、2.1、6.1mの間隙水圧の連続観測、各種水理地質調査、地下水の排除状況の調査等を実施した。すべり面相当深度の6.1m、表層土との境界にあたる2.1mの地下水水頭は図9のような経年変化をした。地下水排除工、地表排水工等による対策実施によって深度6.1mの水頭は恒常的に1m以上低下し、深度2.1mとは別個の変動パターンを示した。同地点の北北西約35kmを震央とする岩手・宮城内陸地震を契機として深度6.1mの水頭が上昇し、降雨への応答も顕著になった。

本観測地点では、地震発生時には加速度をトリガーとして水圧を4回/秒記録しているため、地震発生前後の水圧変化を詳細に把握

できる。

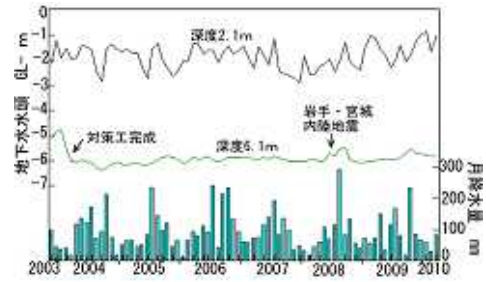


図9 地下水水頭の経年変化

同地震の際は図10のように、揺れ始めて6秒後から急上昇した水頭は4秒後に漸増状態に変わり、最大増大値は1.013mであった。水頭はその後低下するものの、地震後10日以上にわたって高い水準が続いた。

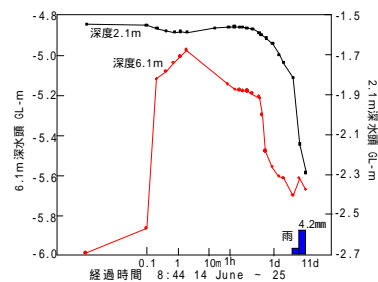


図10 地震直後の地下水水頭変化

深度2.1mの水頭はGL-1.55mから-0.03m低下したが、1時間ほどで回復した。その後の低下は地盤の乾燥によるものである。両深度の水頭の大小関係から、深度6.1mの水頭増大の原因として、地盤構造の微変化によって浅層の地下水の水頭が下層に伝播したことが考えられる。2003~2009年の間に水圧変化を観測した地震は3回あった。加速度と間隙水圧は図11のように、地震履歴によって間隙水圧が増大するヒステリシスを示している。このことは、地震動によって地盤の不可逆的圧縮が進むのではなく、間隙水圧が伝播しやすくなる構造変化が生じたことを示している。

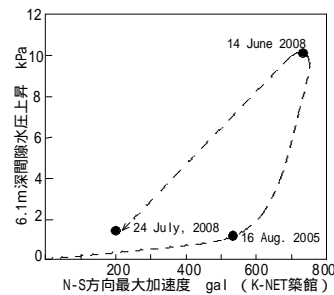


図11 地震加速度と間隙水圧増加量との関係

2003年の地すべり後に設定された主測線の再測量を2009年に実施して測点の変位を

検討した。図 12 のように、顕著な変位は認められなかったが、切盛り境界付近で 2 cm 程度の下方移動が生じた可能性が考えられた。

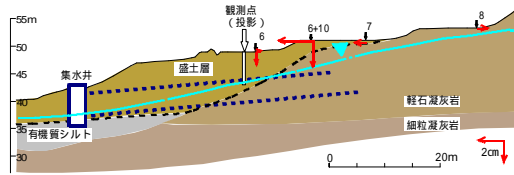


図 12 主測線の再測量結果

地下水水質の経年変化

集水井（図 12、深さ 8m）から排水される地下水の水量と水質は 17 本の集水ボーリングの位置によって大きな差異があった（図 13）。排水量は切土域中央に貫入しているボーリングが多く、盛土に貫入しているボーリングからの排水量は切土域中央の 60%程度と少なかった。水質の指標として電導度、重炭酸濃度は盛土部で高く、溶存酸素濃度と酸化還元電位は切土域が高かった。このことは、切土域は盛土部より地下水の循環速度が早いことを示している。岩手・宮城内陸地震の後に排水量が 1.5 倍程度に増えたことは地盤の緩みが生じて浅層地下水が集水ボーリングに補足され易くなったことを反映していると考えられる。

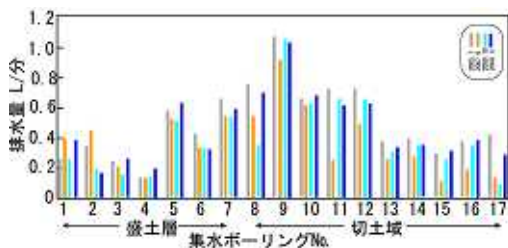


図 13 集水井排水量の経年変化

このように、地震は崩壊の直接的原因となるほかに、斜面に亀裂等の緩みを生じさせて浸透量や間隙水圧の増大を引き起こし、2 次的な崩壊の原因となりうる。地下水排除工によって間隙水圧を低下させておくことは防災効果が高いことが実証された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 2 件)

奥山武彦、黒田清一郎、地すべり対策集水ボーリング末端における閉塞の要因と対策、農村工学研究所技報、査読有、209号、2009、1 - 6

奥山武彦、地盤解体新書、地盤工学会誌、査読無、56(6)、2008、43 - 44

〔学会発表〕(計 4 件)

奥山武彦、中里裕臣、鶴岡市七五三掛地すべりについて、農業農村工学会東北支部第 52 回研究発表会、2009 年 10 月 29 日、青森市

奥山武彦、黒田清一郎、2008 年岩手・宮城内陸地震の際に観測された間隙水圧、第 48 回日本地すべり学会研究発表会、2009 年 8 月 27 日、新潟市

奥山武彦、黒田清一郎、地すべり対策集水井の排水状況調査事例、第 4 回地盤工学会関東支部発表会、2007 年 11 月 1 日、前橋市

奥山武彦、黒田清一郎、排水ボーリングの集水機能に関する現地観測、第 46 回日本地すべり学会研究発表会、2007 年 8 月 30 日、四日市市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥山 武彦 (OKUYAMA TAKEHIKO)

山形大学・農学部・教授

研究者番号：20343767