

# 地すべり地における地下水排除工 のための地下水動態調査の一事例

梶間厚邦<sup>1</sup>・竹本大昭<sup>2</sup>・春口孝之<sup>3</sup>・佐々木康<sup>4</sup>・奥園誠之<sup>5</sup>・古川浩平<sup>6</sup>

<sup>1</sup>修(工) 日本道路公団 中国支社 松江工事事務所 (〒690-0044 島根県松江市浜乃木 8-2-31)

<sup>2</sup>正会員 修(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>株式会社<sup>\*)</sup>イコンサルカント 四国支店 技術課 (〒790-0952 愛媛県松山市朝生田町 2-8-37)

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻  
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

<sup>5</sup>正会員 工博 九州産業大学教授 工学部土木工学科 (〒813-8503 福岡県福岡市東区松香台 2-3-1)

<sup>6</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

本調査地では、地すべり地内に道路盛土等を行うことにより、誘発される地すべり防止目的とした効果的な地下水位低下を図るために、地下水の流動状況を適確に把握する必要が生じた。そこで、本調査地では、ボーリング孔を利用した基礎調査をはじめ流向流速、トレーサー調査等の地下水動態調査を実施し、地下水の流動状況を把握した。これらの調査結果及び水質分析、間隙水圧測定等により明らかとなった被圧地下水を集中的に排除する方針を地下水排除計画に反映させた。その結果、地すべりブロック内の地下水位は大幅に低下し、効果的な地すべり対策を実施することができた。

**Key Words:** land slide, ground-water level survey, groundwater drainage works, confined groundwater

## 1. はじめに

国土の大部分が急峻な山地となっている日本列島では、いたるところに土砂災害危険箇所<sup>1)</sup>が分布し、梅雨期、台風期には土砂災害による被害が生じている。

土砂災害の中でも地すべり災害は、斜面崩壊や土石流等の災害と比較すると、突発的に発生する事例は少なく、地形、地質からある程度の災害発生位置を予測できる。したがって、地すべり災害の可能性のある地形、地質が確認できる場合、予め地すべり対策を行うことで、災害を未然に防ぐことが可能となる。

地すべり対策は、地すべり発生機構を十分に把握した上で、確実に地すべり土塊を安定させることが重要となる。しかしながら、地すべり発生機構は複雑であり、それらを把握するための調査費も高価であることから、対策工整備を効率的に実施することは容易ではない。また、地すべり発生機構は、地下水位の変動が支配的であることが多い<sup>2)</sup>。

このような背景から、多くの地すべり地では、発生機構を効率的に把握するための地下水調査が重要であり、その調査結果を的確に施工計画に反映させた効果的な地すべり対策事業が望まれている。

地すべり対策を効果的かつ効率的に実施するには、地下水の動態調査<sup>3), 4), 5), 6)</sup>等により、推定が困難とされる地下水の流動状況等を的確に把握し、その調査結果を踏まえた適切な施工計画の検討が重要である。

近年、地下水の動態調査法は、多様化しているが、従来行われているボーリング孔を利用した基礎調査でも様々な地下水の動態状況が把握できるため、基礎調査の重要性も再認識されてきている。

本報告では、中国横断自動車道計画路線に分布するI地区の地すべり指定地において、高速道路整備に対する地すべり対策のためのボーリング孔を利用した基礎調査、比抵抗二次元探査等の地下水動態調査を実施した。また、調査の過程で、地すべりブロック頭部で地下水が特に胚胎するゾーンが推定され、その主たる原因はすべり面下位の被圧地下水によるものと考えられた。

本調査地では、この被圧地下水が地下水位の上昇に大きく影響し、地すべり土塊の移動に影響を及ぼす原因と推察されたため、被圧地下水を集中的に排除する方針を取り入れた地下水排除計画を立案した。その結果、地すべりブロック内の地下水位を大幅に低下させることに成功し、効果的な地すべり対策を実施するこ

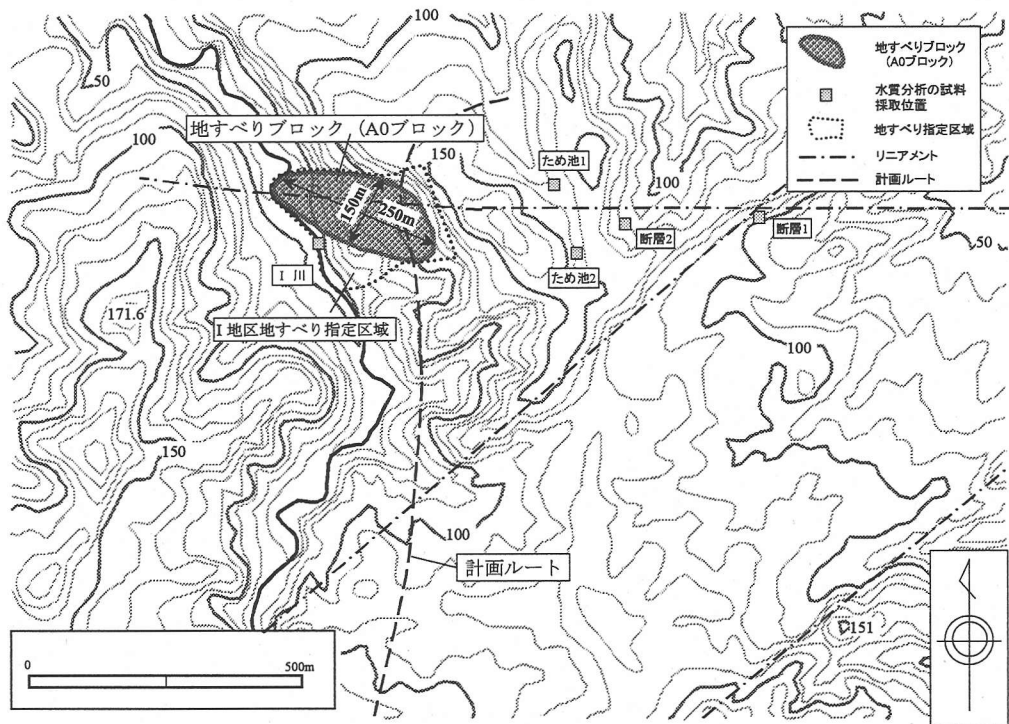


図-1 I地区周辺の地形

とができた。以下に、その事例を紹介する。

## 2. 対象地域の概要

### (1) 調査地周辺の地形・地質概要

本調査地は出雲平野の南側に隣接する標高 100～200mの丘陵性山地部に位置しており、その地質は第三紀の大森層、久利層の砂岩、礫岩、泥岩で構成され、上位の大森層は走向がほぼ東西方向で北側へ $10\sim 15^\circ$ で傾斜する単斜構造を呈している。このような地質状況から、本調査地周辺は地すべり地として有名であり、地すべり防止区域が集中的に存在している。本調査地はそのうちの一つであるI地区の地すべり指定地である。図-1にI地区周辺の地形図を示す。

I地区は典型的な凹状多丘型の明瞭な地すべり地形である。地形より推定される地すべりブロック（以下、「A0ブロック」と表記）の全体の大きさは、幅約150m、長さ約250mである。地すべり頭部には、馬蹄形の急崖からなる滑落崖が存在し、滑落崖の直下には頭部凹状地形が顕著に認められる。この滑落崖は北側に向かって $10^\circ$ 程度の勾配で傾斜する緩傾斜面の西側端部に位置する。中腹には台地状の緩傾斜面が広がり、竹林となっている。さらに末端部には急傾斜面が形成されている。

### (2) 地すべりブロックの状況

詳細な地形測量の結果、当初推定していた大きな地すべりブロックの末端付近に幅約90m、長さ約100mの新たな地すべりブロック（以下、「A1ブロック」と表記）の存在が明らかとなった。この地すべりブロック内では、表面排水用に施工された数箇所のコンクリート水路に切断、転倒、食い違いなどの変状が認められていることから、近年、移動したと考えられる。さらに、このブロックの前面にも、幅約70m、長さ約100mの地すべりブロック（以下、「A2ブロック」と表記）が存在することが判明した。このブロックの頭部には、水路の段差や食い違いが認められるため、不安定な状態であると考えられる。

調査位置と地すべりブロックの範囲を図-2に示す。図-2に示した縦断方向の弾性波探査主測線（D2-2測線）上では、過去にボーリング調査を2箇所実施している。2箇所ともに深層風化が著しいのが特徴である。また、2箇所のボーリング調査が近接しているにもかかわらず、B1-11に厚く分布する礫岩がB1-12には認められないなど地層は不連続となっている。この地層の不連続性は、地質的に断層により不連続となっている場合と、地すべり活動により異種の土塊が混合している場合の2通りが考えられる。

地すべり面は、ボーリングコアで確認されたすべり面粘土の位置、パイプ歪計で変位が確認された位置、

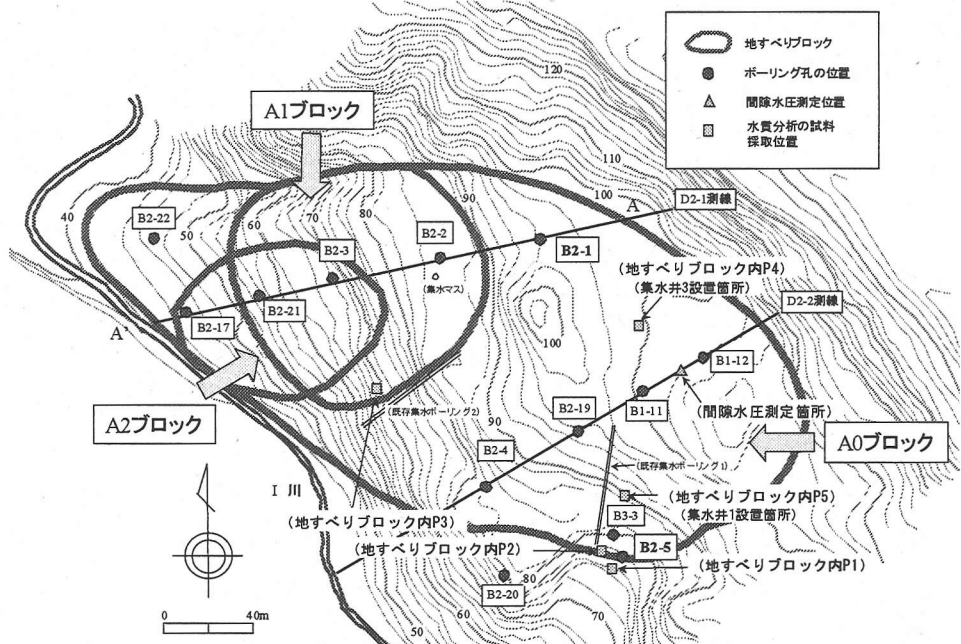


図-2 調査位置図と地すべりブロックの範囲

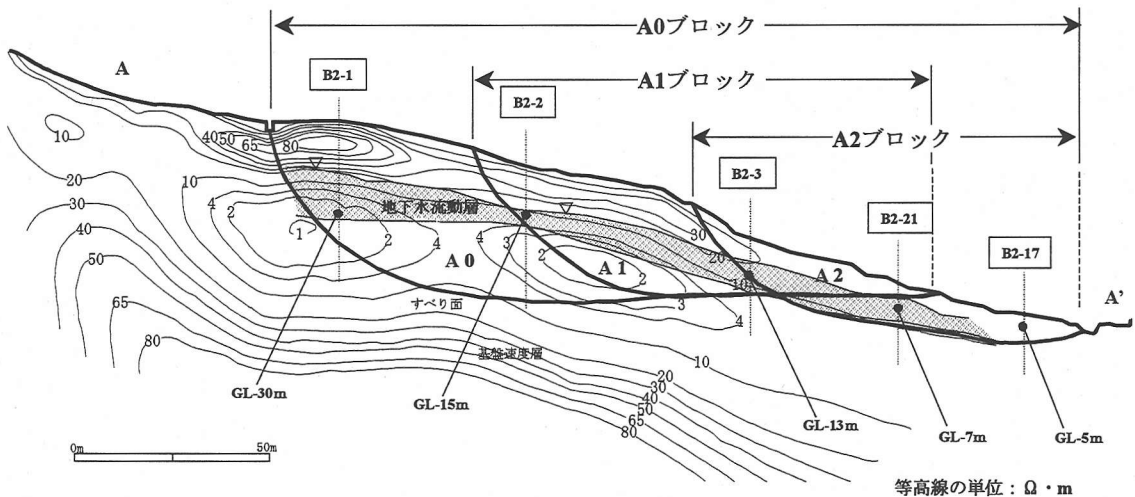


図-3 D2-1 測線の断面と地下水流動層の分布

強風化帯～風化帯の中に挟まれる粘土層の位置と弾性波探査結果による基盤速度層上面の位置等のデータを参考に図-3のように推定した。

弾性波探査の結果より、この地すべりブロック (D2-1 測線上) では、基盤速度層に低速度帯(幅 5～12.5m 程度)が数多く検出されている。これらの低速度帯はその平面的連続性からみて、N72° W～N75° W の破碎帯群と解釈できる。このような低速度帯が多く分布するという事は、元来この区域が地質的に劣悪であったことを意味しており、このことがこの区域に深層風化や比較的規模の大きい地すべりを発生させる要因にな

ったものと考えられる。

### 3. 地下水流動調査と地下水排除工の検討

#### (1) 地下水流動状況把握のための調査

本調査においては、A0 ブロックにおいて地下水の状況を把握するために表-1 に示されているボーリング調査、地下水検層、地下水位測定、弾性波探査、比抵抗二次元探査を行った。各々の観測結果から図-2 に示してある D2-1 測線の断面図を図示する(図-3 参照)。

表-1 各ボーリングと地下水観測結果

ボーリング 番号	掘削中の孔内水位	地下水検層結果	地下水観測結果			降雨と地下水 の関係
			最高水位	最低水位	変動幅	
B2-1 (D2-1測線)	すべり面を境に、水位が約 6.0m上昇	深度17m～28m、37～39mの間に比抵抗 が増大	GL-7.38m (89.58m)	GL-16.04m (80.92m)	8.66m	水位は降雨に対してよく 反応し上昇するが、 減衰傾向は緩やか
B2-2 (D2-1測線)	すべり面を境に、水位が 約5.0m上昇	深度15（地下水表面）～17mの間に比抵抗 が増大 流動層は地下水表面付近にあり、深度 18m以深では、比抵抗の変化なし	GL-9.67m (75.60m)	GL-15.15m (70.12m)	5.48m	水位は降雨に対してよく 反応、水位の昇降傾向 はシャープ
B2-3 (D2-1測線)	掘削中の水位は深度9.90m 前後にあり、ほとんど変 化しない	深度11（地下水表面）～15mの間に比抵抗 が増大、約60分でほぼ真水に近い状態に なる → 深度15m付近のすべり面以深は、比抵抗 の変化なし	GL-3.74m (62.04m)	GL-9.95m (55.83m)	6.21m	水位は降雨に対してよく 反応、水位の昇降傾向 はシャープ
B2-21 (D2-1測線)	水位は深度1.60m付近と高 く、ほとんど変化しない	深度6～10mの間に比抵抗が増大、約60 分で真水に近い状態になる すべり面は11.00～11.70m付近に想定さ れ、これ以深では比抵抗の変化なし	GL-1.32m (51.61m)	GL-1.72m (51.72m)	0.40m	水位は深度1.3～1.7mの 範囲でほとんど変化し ない
B2-17 (D2-1測線)	水位は深度2.25～3.26mと 高く変動は少ない	深度3～7mの間に比抵抗が変化 すべり面の真上に当たる深度5～6mの 間は特に比抵抗が変化	GL-2.88m (41.36m)	GL-3.48m (40.76m)	0.60m	掘削中及び定期観測の 結果、水位は深度2～4と 高い
B2-19 (D2-2測線)	水位は当初3.20mに有り深 度13.0mまで低下	深度13～22mの間に比抵抗が変化 → 24m以深（すべり面より深い）では比 抵抗の変化なし	GL-11.87m (83.00m)	GL-13.06m (81.81m)	1.19m	水位は、深度12～13m 付近にあり変動幅は小 さい、降雨に対するの反 応は鈍い
B2-4 (D2-2測線)	掘削中の水位は深度9.80m 前後にあり、ほとんど変 化しない	深度9（地下水表面）～10mの間に比抵抗 が変化 → 深度10m以深では、比抵抗の変化なし	GL-1.37m (81.92m)	GL-10.13m (73.16m)	8.76m	水位は降雨に対してよく 反応、水位の昇降傾向 はシャープ
B2-5	水位は深度2.25～3.25mと 高く変動は少ない	深度4～9mの間に比抵抗が変化 すべり面の真上に当たる深度4～6mの 間は特に比抵抗が変化	GL-0.88m (76.87m)	GL-3.18m (74.57m)	2.30m	水位は、深度1～3mの 範囲でほとんど変化し ない、降雨に対するの反 応も鈍い
B2-20	水位は深度3.01m付近と高 く、ほとんど変化しない	全体に比抵抗の変化なし →	GL-2.78m (69.00m)	GL-2.89m (68.89m)	0.11m	掘削中及び定期観測の 結果、水位は深度2.80m 付近でほとんど変化し ない
B2-22	すべり面を境にわずかな 水位の上昇が認められ、 その後水位は約1.5m低下	深度4（地下水表面）～9mの間に比抵抗 が増大 ↑ 深度10m以深では、比抵抗の変化なし	GL-3.49m (42.40m)	GL-4.84m (41.05m)	1.35m	水位は深度3.49～4.84m の範囲でほとんど変化 しない、降雨に対する反 応も鈍い

地下水位測定を実施した結果、各ボーリング孔のそれぞれで表-1に示すような特徴が見られた。その代表例として、以下に地すべりブロック頭部に位置するB2-1、B2-5における地下水位の変動状況を図-4に示す。図-4は、上からの棒グラフで降水量を示し、折れ線グラフで孔内水位を示している。

B2-1の地下水位は、降雨に良く反応して急激に上昇するが、降雨後の低下に際しては比較的緩やかである。特に地下水位のピークの遅れが平均して2日後であり、地すべりブロックだけではなく、その背後からの補給水の影響が考えられる。さらに、B2-1では、ボーリング掘削時において、すべり面を抜いた際に、地下水位が急激に上昇したことから、すべり面直下に被圧地下水が存在する可能性も考えられた。B2-5に関しては、降雨とは全く無相関に一定の状態を保っており、常時地下水が流入していると考えられる。

次に比抵抗二次元探査、地下水検層を行い、以下のよう  
に地下水流動層を推定した。まず、本調査地では、比  
抵抗二次元探査をD2-1、D2-2、D2-3 測線について行い、  
比抵抗値の差から透水層の分布を把握した。調査結果  
の一例として、地すべり主測線方向（D2-1 断面）の比  
抵抗値の分布を図-3に示す。図-3において比抵抗値  
の分布は、等高線（単位 $\Omega \cdot m$ ）で示しており、比抵抗値  
の低いゾーンが透水層と推定できる。透水層は、主に地  
表面から20m～40m付近に分布し、特にA0、A1ブロック  
のすべり面下位及び各地すべりブロックの背後に存在  
することが分かる。

上記で推定した透水層の中で、地下水が流動する層  
を明確にするため、各ボーリング孔で地下水検層を行  
った。調査結果の代表例（B2-1、B2-2、B2-3）を図-5に  
示す。図-5は、縦軸に深度、横軸に比抵抗値の変動量  
を示し、地下水が流動している深度を把握することがで

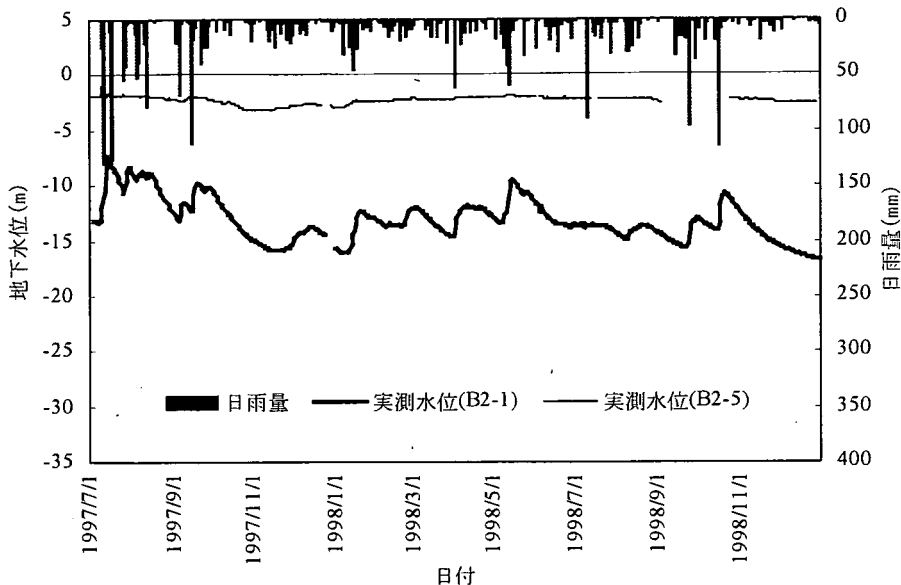


図-4 地下水位変動状況

きる。例えば B2-2 では、深度 15m~17m で比抵抗値が増大していることから、この深度で地下水の流動が著しいといえる。また、その他の地下水検層結果は、表-1 に示すとおりである。

これらの地下水検層結果から、地下水の流動速度は表-2 のようになった。表-2 から明らかなように、地下水の流動速度は、図-3 で示した比抵抗値が低い深度で大きいことが分かる。したがって、図-3 に示した透水層では、地下水が流動していると考えられる。以上より、地下水流動層を図-3 のように推定した。

## (2) 地下水排除計画の検討と追加調査の提案

本調査地では、地下水検層及び比抵抗二次元探査から、地下水帯水層が分布していることが確認された。また、地下水検層結果から地下水表面層部に分布する地下水は流動速度が速く、図-5 のグラフでも時間の経過に伴って、比抵抗値が大きくなっている。更に地下水位の変動状況から、降雨直後の急激な水位変動は、降雨の影響によるものと考えられる。これらの理由により、地すべりブロック内の地下水は、排除が可能な地下水と考えられる。したがって、本調査地では、地下水排除工を主体とした対策工を整備する案が最良の方法であると判断した。

ボーリング調査や比抵抗二次元探査の結果では、地すべりブロック頭部に地下水が胎していると推察される。本調査地のように表層の地形が平坦で地すべりブロックが大きい場合、地すべりブロック頭部の地下水は、地下水表面まで縦井戸を下げて、集水ボーリングを

実施することで、50~70m 程度の短い集水ボーリングで効率的な排除が可能である。仮に地表から地すべり頭部の地下水を排除するには、100m 以上の横ボーリングが必要であり、実用性は低い。したがって、本調査地では、集水井を整備する案が実用的かつ効果的であると考えられる。

そこで、集水井の効果を確認するため、試験的に地下水流動層に対して集水ボーリングを実施したところ、降雨時に 18ℓ/min の湧水を確認し、集水ボーリングの排水効果が期待できた。この結果より集水井を施工する配置計画の検討を行った。

集水井を計画に際して、本報告では地下水流動調査結果やボーリングコアの観察、水位観測結果を基に地下水位を推定し、安定解析を行った。本調査地は、地すべり指定区域であるため、集水井による地下水位低下は、設計上 3m とする必要があった。したがって、安定解析は水位低下 3m として行い、所定の安全率を満足する設計を行った。

次に、集水井の配置計画を立てる上での問題点とその解決策及び追加調査すべき項目を以下に示す。

### a) 地下水の起源の問題

ボーリング孔 B2-1 の掘削において、すべり面を抜いたときに水位が上昇したこと、比抵抗二次元探査結果より、すべり面下位及び背後の比抵抗値が低いことから、すべり面下位及び背後に被圧地下水の存在が考えられる。したがって、地すべり地内の地下水が降水起源であるか、地すべりブロックの背後からの地下水か、あるいは地下深部からの被圧地下水であるかを明らか

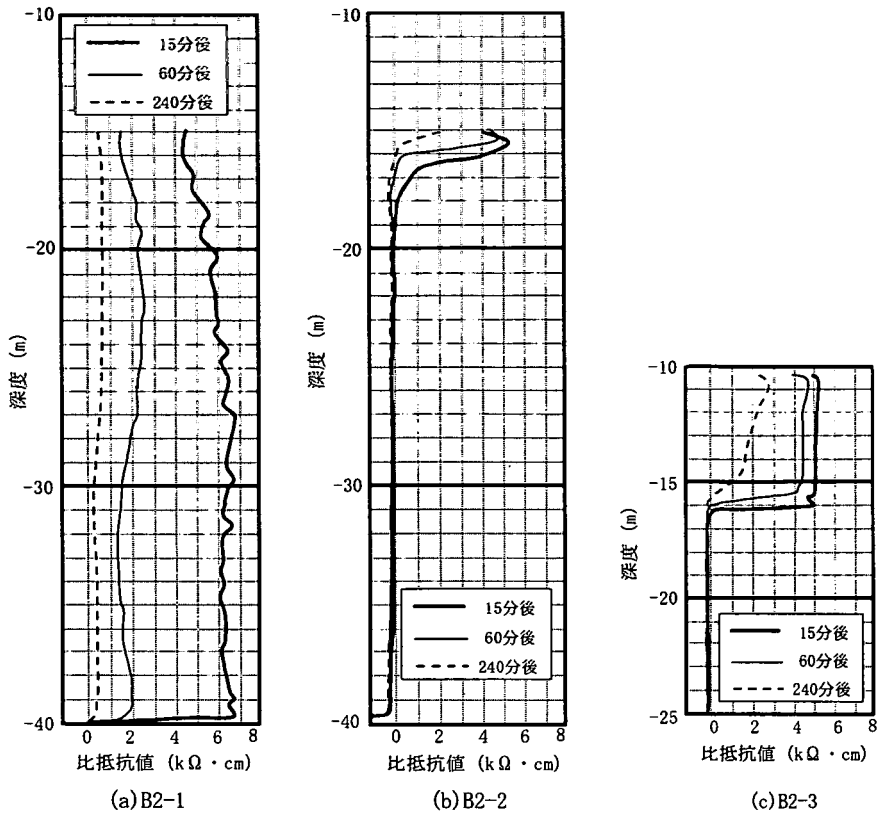


図-5 地下水検層結果 (B2-1, B2-2, B2-3)

表-2 地下水検層結果による地下水の流動速度

ボーリング及び計測深度	地下水の流動速度 (cm/sec)
B2-1 (GL-30m)	$3.2 \times 10^{-3}$
B2-2 (GL-15m)	$3.6 \times 10^{-2}$
B2-3 (GL-13m)	$1.4 \times 10^{-2}$
B2-21 (GL-7m)	$2.4 \times 10^{-2}$
B2-17 (GL-5m)	$1.4 \times 10^{-2}$

にする必要がある。

まず、地すべりブロック内の水収支の算定を行い、集水域からの水の供給量と、地下水位変動状況から地すべり地内の地下水量を比較し、水収支を降雨のみで説明できるかについて検討を行う。またそれに伴い、間隙水圧測定、水質分析、年代測定などの追加調査により地下水起源の解明を行うこととした。

#### b) 地下水の流動方向の把握

調査結果より、地下水流動層が存在することが明らかとなっており、流動速度も非常に大きい(表-2参照)。これに対して、ボーリング孔内水位の変動状況が位置によって著しく変わっていることから、地下水の流動方向を把握する必要がある。

追加調査としては、流向流速測定、トレーサー観測、比抵抗二次元探査を実施し、地下水の流動方向を把握することとした。

#### 4. 地下水起源の解明と地すべり発生原因と被圧地下水の関係

##### (1) 水収支からの地下水起源の推定

前章で問題となった地すべり地内の地下水が、周辺集水域の雨水による浸透水のみか、他の領域からの供給(深層地下水を含む)が関与するのかを確認する必要がある。そこで、本報告では、地すべりブロック内の水収支について、地下水位の上昇から推定される地下水体積と地すべりブロック内及び背後の急斜面に降った雨から供給される水の体積の差を算出することで検討した。なお、検討期間は観測期間中に本調査地において最も大きな降雨が発生した昭和39年7月7日～19日とした。

表-3 水位上昇による地下水体積の推定

A0ブロック 集水面積 $S_{A0}(m^2)$	ボーリング 番号	昭和39年7月7日～19日の期間		
		降雨前の 水位(m)	降雨後の 水位(m)	水位差(m)
36000	B2-1	-12.00	-3.52	8.48
	B2-2	-14.00	-0.62	13.38
	B2-3	-9.80	-1.04	8.76
	B2-4	-6.50	-0.73	5.77
	B2-19	-	-	-
	B2-21	-	-	-
	B2-22	-	-	-
	差の平均 $\bar{H}$			9.1
地すべりブロック内の空隙率 $n$				0.2
水位上昇から推定される地下水の体積 $V_a (m^3)$				65,520

表-4 降水量からの地下水体積の推定

集水面積 $S_{A0}, S(m^2)$		昭和39年7月7日～19日の期間	
A0 ブロック	36000	累積降水量 $R(m)$	0.673
A0 ブロック背面	34000		
降水量から推定される地下水の体積 $V_b (m^3)$			47,110

地下水位の上昇から推定される地下水の体積は、次式により算出した。算出結果を表-3に示す。

$$V_a = S_{A0} \times n \times \bar{H} \quad (1)$$

ここで、

$V_a$  : 地下水位の上昇から推定される地下水体積 ( $m^3$ )

$S_{A0}$  : A0ブロックの集水面積 ( $m^2$ )

$n$  : 空隙率

$\bar{H}$  : 各ボーリング孔の地下水位の平均 (m)

地すべりブロック内及び背後の急斜面に降った雨から供給される水の体積は、次式により算出した。算出結果を表-4に示す。

$$V_b = (S_{A0} + S) \times R \quad (2)$$

ここで、

$V_b$  : 地すべりブロック内及び背後の急斜面に降った雨から供給される水の体積 ( $m^3$ )

$S$  : A0ブロック背後の集水面積 ( $m^2$ )

$R$  : 累積降水量 (m)

表-3、表-4から明らかなように、水位上昇から推定される地下水の体積 ( $65,520m^3$ ) に対して、降水量から

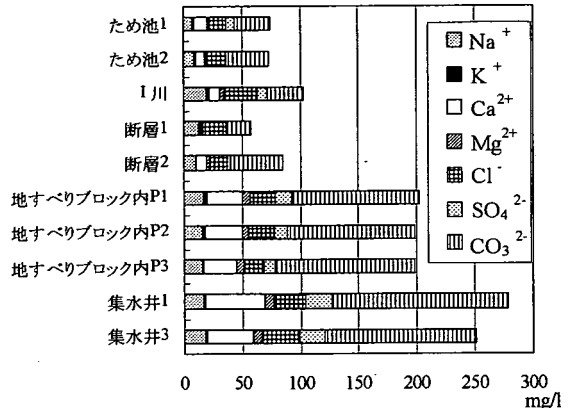


図-6 周辺地域との地下水の水質の相違

推定される地下水の体積 ( $47,110m^3$ ) は、 $18,410m^3$  も不足していることが分かる。すなわち、地すべりブロック内及び集水域に降った降雨のみでは、地すべりブロック内の地下水位の上昇に見合うだけの水量を補うことは不可能であることが判明した。したがって、地すべりブロック内の地下水は、集水域よりもさらに背後、あるいは深層地下水 (被圧地下水) からの供給が推定された。例えば、地すべり地の背後にあるため池 (図-1参照) は、地すべりブロックよりも高標高にあり、ため池からの地下水供給も一因として考えられた。

## (2) 水質分析等による地下水起源の推定

次に地すべり地内の地下水を用いて、水質分析<sup>4)</sup>と年代測定を実施し、地下水起源の解明を行った。水質分析で用いた試料は、地すべりブロック内5箇所、地すべり周辺部4箇所、I川の計10箇所から試料を採取した。試料採取位置は図-1及び図-2に位置を示している。分析結果を図-6に示す。図-6より、地すべりブロック内の試料とそれ以外の試料では溶存イオン量で明確に区別されることがわかる。特に  $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $CO_3^{2-}$  の溶存量の差異が顕著である。地すべりブロック内の湧水のイオン溶存量は、集水井の地下水とほぼ同等の値だが、少なくとも、ため池等の周辺地域に分布する表層水とは異なることが判明した。

更に、地すべり地内の地下水の年代測定を行った。この手法は、降水中に含まれるトリチウムの放射能濃度との比較によって分析する手法<sup>5)</sup>である。分析結果より地下水の年齢は約10年という結果となり、水質分析の結果とあわせて考えると、地すべり地内の地下水が、雨水の浸透水を主体とする浅層地下水とは考えにくい結果となった。これらの結果及びボーリング調査や比抵抗二次元探査結果より、地すべり地内の地下水は、地下深部に長期に滞留する深層地下水であることが判明した。

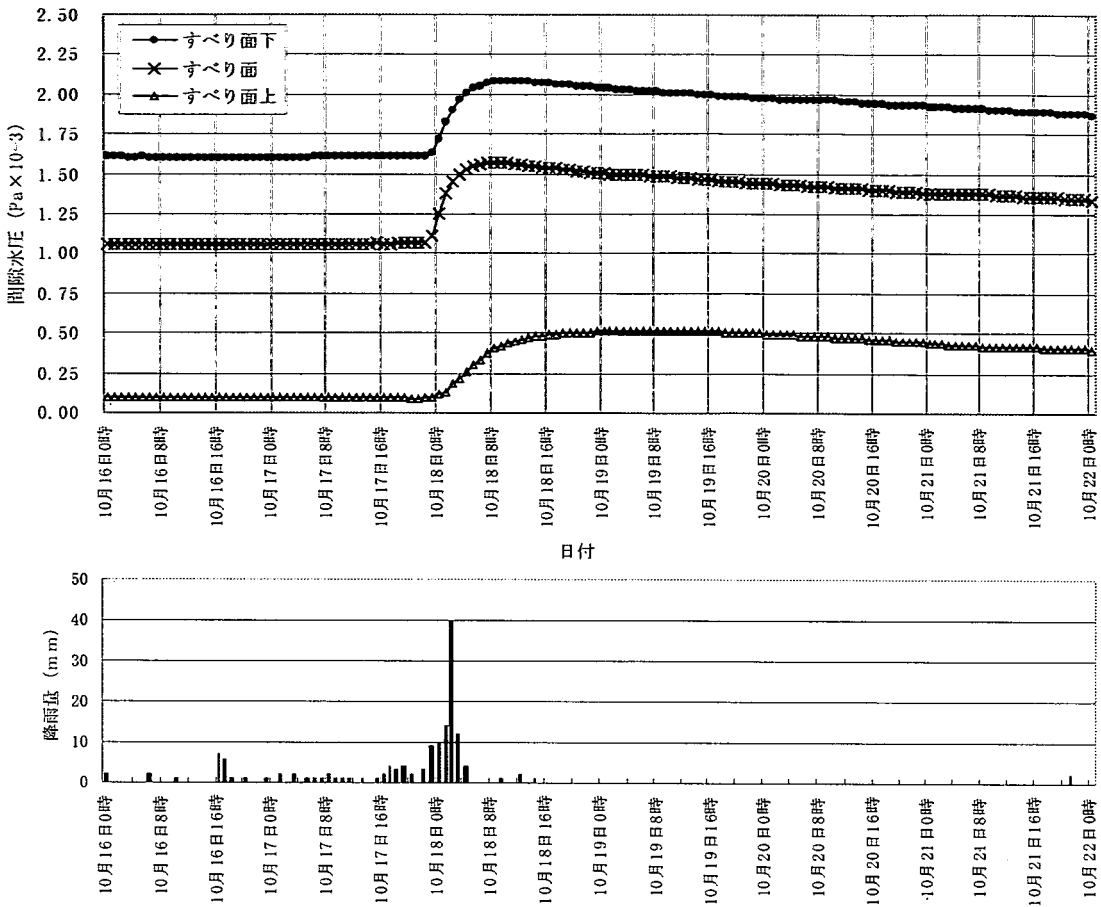


図-7 豪雨時のすべり面付近における間隙水圧の変動 (1998年10月16日0時～1998年10月22日0時)

### (3) I地区の地すべりの特徴と被圧地下水の関係

すべり面周辺で発生する間隙水圧の挙動を明確にする目的で、すべり面付近に3箇所(すべり面上位、すべり面、すべり面下位)間隙水圧計を設置し、その変化を調査した(観測位置は図-2)。図-7に間隙水圧の変動を示す。図-7より、普段は同じような変動を示していた間隙水圧が、100mm以上の豪雨時には3箇所の間隙水圧計の内、すべり面下位とすべり面の値が最初に反応し、ピークに達したのに対し、すべり面上位では遅れて反応した。また、降雨を経験してから間隙水圧がピークに達するまでの時間に着目すると、すべり面上位では16時間を要するのに対し、下位では8時間と2倍速く、間隙水圧の値も大きいことが分かる。これは、すべり面下位に滞留する深層地下水が、常に被圧されているためと考えられる。一般的に被圧地下水は、不圧地下水に比べて圧縮率が高いため、圧力水頭の伝播速度が速く、水の供給源が遠方でも影響が及ぶといわれ

ている<sup>5)</sup>。したがって、豪雨時に、供給域の水圧上昇が発生した場合、より圧縮されていたすべり面下位の被圧地下水が、すべり面上位の水圧より早く伝播し、急激な間隙水圧の上昇を招いたと考えられる。

本調査地域におけるすべての調査結果より、I地区における地すべりの特徴として次のことが挙げられる。

- この区域は、断層破砕帯が多く存在し、地下水等の影響により風化が著しいなど、地質的に劣悪である
- 地下水の分布が流動状況を複雑なものにしている
- 豪雨時には、すべり面下位の被圧地下水圧が急激に上昇し、すべり面に作用するため、すべり面のせん断抵抗力は大幅にかつ急激に低下する



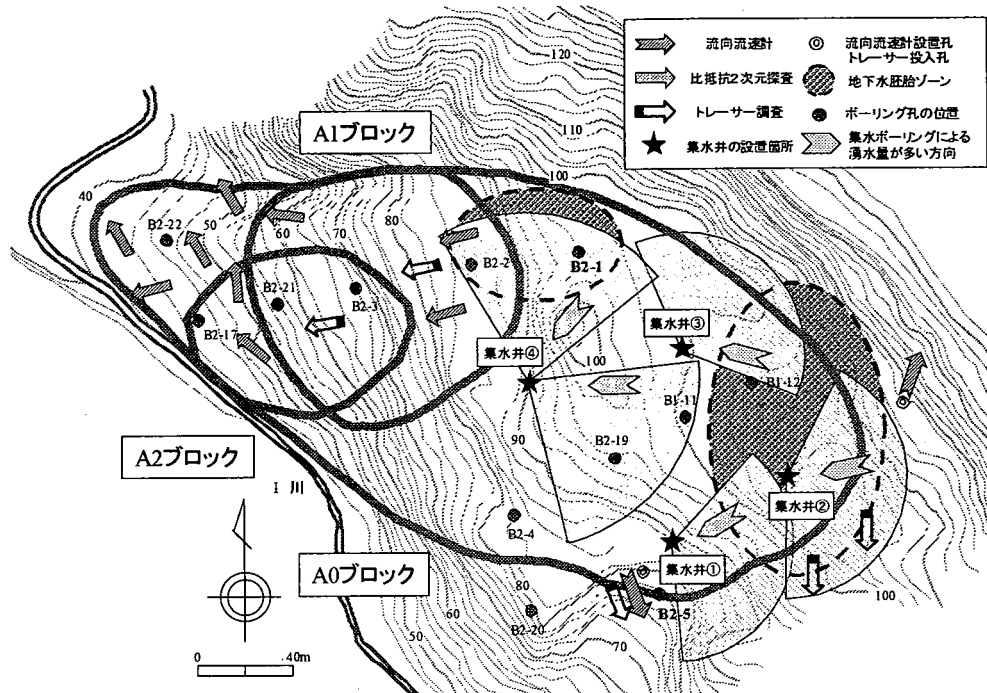


図-8 地下水流動状況と集水井の設置箇所

## 5. 地下水流動状況の把握と対策工の効果

本調査地域では、地下深部の被圧地下水が地下水位に影響し、地すべり発生の一因であると考えられるため、これらを取り除くことが、地下水位の低下（地すべりの安定化）に有効であると判断した。特に被圧の問題が明らかとなった A0, A1 ブロック頭部には、地下水を多く胚胎するゾーン（以下、「地下水胚胎ゾーン」と表記）が存在する。したがって、A0, A1 ブロック頭部では、集水井の深度を可能な限り深くし、すべり面を切って集水ボーリングを施工することにより、すべり面下位の被圧地下水を排除する必要がある。

したがって、地下水排除計画は、被圧地下水を集中的に排除できるように集水井の施工位置、施工深度を設定した。また、集水井は、上記の内容を踏まえて、平面的に見て地すべりブロック全体にまんべんなく配置を行うこととした。また、集水ボーリング（図-8 の扇形の範囲）は、地下水胚胎ゾーンが存在する方向とし、断面的には地下水流動層を狙って施工した。

### (1) 集水井①、集水井③の先行施工

まず、集水井の効果の確認と以下に示す理由により、A0 ブロック頭部で2箇所（集水井①と集水井③）先行して設置した。2基の集水井の位置を図-8 に示す。

集水井①は、ボーリング孔 B2-5 に近接している。B2-5 では、水位観測結果より降雨に関係なく常に高

い水位を維持していることから、谷部に地下水が集中していると考えられた。また、この領域は、道路計画では盛土区間となることから、盛土の安定には早急に地下水水位を低下させる必要があるため、設置を優先させた。集水井③に関しては、地すべり面までの深さが最も深い位置であり、集水井を最も深く施工できることから、被圧地下水を大幅に排除できると考え、先行して設置した。

集水井①、集水井③を先行して設置した結果、ともに集水ボーリングからの湧水が確認された。その水量は、掘削終了直後それぞれ 20～1000/min（集水井①）、10～800/min（集水井③）であり、特に地下水胚胎ゾーン（図-8 の点線の囲み）向きの集水ボーリングでは、湧水量が大であった。また、この2基の集水井掘削によって、地すべり頭部付近の地下水位は低下しており、集水井の効果は確認できたといえる。集水井設置後の地下水水位変動状況を図-9 に示す。図-9 には、A0 ブロック頭部付近のボーリング孔での水位変動を示している。図-9 より、B2-1 では、図-4 と比較すると、明確に地下水水位が低下しているのが分かる。しかし、B2-5 については、集水井①を施工したにもかかわらず、ほとんど水位に変化が見られなかった。

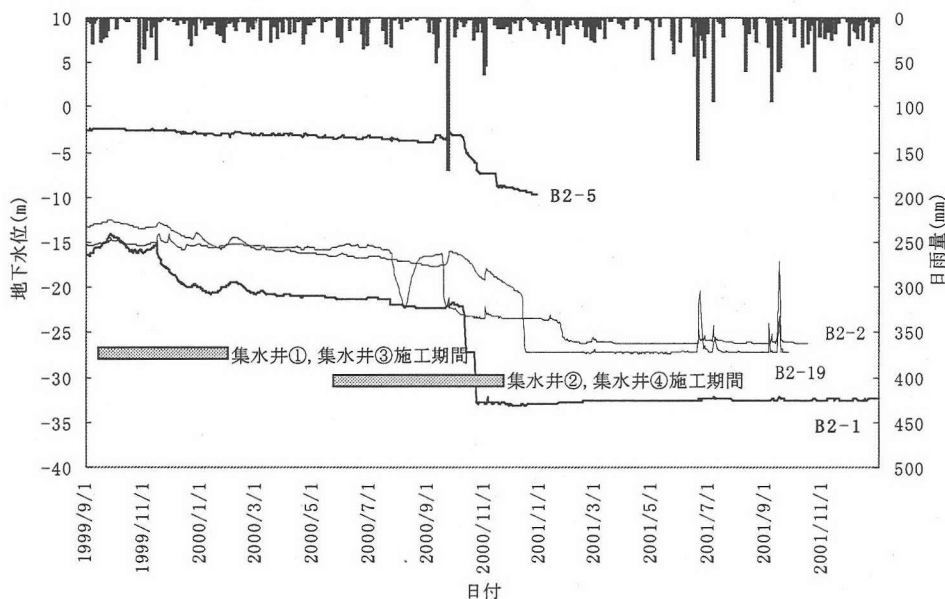


図-9 対策工の施工状況と地下水位変動の関係 (B2-1, B2-2, B2-5, B2-19)

## (2) 集水井②, 集水井④の整備

集水井①, 集水井③の地下水位の影響範囲等を踏まえて, もう2基の集水井の設置位置を検討した. A0ブロック頭部の地下水胚胎ゾーンに1基(集水井②), A1ブロック頭部の地下水胚胎ゾーンの地下水排除及びA0ブロック全域にかけての地下水排除を兼ねて1基(集水井④)集水井を設置する計画に修正した.

集水井設置箇所の選定は, ボーリングで観測された水位, 地下水検層結果等によって地下水が流動しているゾーン(図-3参照)を把握し, この流動層の水をもっとも効率的に抜くことができるような位置を抽出した.

また, 集水井①及び集水井③と同様に, すべり面を切って背後の地山まで集水井ボーリングを伸ばし, 被圧地下水を根底から排除することとした.

集水井②及び集水井④の効果は, 図-9に示した施工後の地下水位変化より確認できる. 集水井②及び集水井④の湧水量は, 掘削直後でそれぞれ100~220ℓ/min(集水井②), 200~320ℓ/min(集水井④)であり, 排水効果は十分であることがわかる. これらの集水井によって, ボーリングB2-1の地下水位は, 顕著にその影響を受けて, 大幅に低下している. また, B2-5については, 集水井③の施工で地下水位の低下が見られなかったが, 今回の集水井④の施工によって, 5m程度の地下水位の低下が確認できた. このことから, B2-5付近の地下水は, 地形の傾斜方向と異なる動きをしていると考えられる.

## (3) 地下水流動方向の把握と効率的な集水井の配置

地下水がどの方向に流動しているのかを確認するために, 流向流速調査<sup>4)</sup>, トレーサー調査<sup>4)</sup>, 比抵抗二次元探査を行った. また, トレーサーは, ボーリング孔だけでなく, 集水井ボーリングにおいても確認し, 地下水の流動方向の把握を行った. それらの観測結果は図-8の矢印で示している.

また, 図-8の地下水胚胎ゾーン(図-8の点線の囲み)は, 次の6点から推定を行った.

- ①地すべりブロック内で実施した比抵抗二次元探査で比抵抗値の低い範囲の面的断面的な分布状況
- ②集水井施工時の集水井ボーリングで湧水が多く確認された方向
- ③トレーサー調査や単孔での流向流速測定結果
- ④地下水検層で確認された地下水流動層の分布
- ⑤弾性波探査で確認された基板岩の形状

図-8より, 地すべり地内の地下水の流動方向は基本的にA0ブロック頭部の地下水胚胎ゾーンから地形に沿って南西から西に向かって流れ下っているが, 地すべりブロックA1末端部付近からI川の流下方向に向きを変えていることが分かる. また, A0ブロック頭部に設置した流向流速計では, 一部の地下水が山側に向かっており, 更に集水井②の南側の集水井ボーリングでトレーサーが確認されたことから, 地下水胚胎ゾーンから放射状に地下水位が流動していることが判明した. さらに, 流向流速計及びトレーサー調査結果, B2-5付近では, 流動方向が南向きであることが示された. このこ

とは、B2-5の孔内水位が集水井①の設置後にほとんど変動しなかったことと、集水井④の設置後に緩やかに地下水位が低下したことに一致している。

これらのことから、効率的に集水井を配置するには、地下水流動方向の把握が不可欠であることが改めて確認できた。

集水井を4基設置した後も、地下水位観測は引き続き行われているが、地すべり頭部では対策施工前と比較して10m以上もの地下水位低下の効果が確認されている(図-9参照)。計画されていた水位低下量は3mを目標としていたため、その目的は十分に達成されたといえる。また、本報告では、集水井の施工において、水位低下3mを目安としたが、実際の地下水位の低下状況は、事前の地下水観測により把握し、その結果を計画に反映させた。更には、集水井を試験的に実施するとともに、施工後の効果を水位観測で確認しながら、施工計画の見直しを行うことで、より効果的な配置計画につながったものと考えられる。

一部の観測孔で豪雨後に地下水位が急激に上昇するものの、地下水位のピーク値は集水井施工前に比べると低く、かつ短時間で基底水位まで低下することから、特に問題にはならないと考えている。

## 6. おわりに

本報告では地すべり地での詳細な地下水動態調査結果に基づいた集水井施工計画の検討事例を紹介した。ボーリング調査、地下水調査等の基本的な調査の重要性、そして効果的な集水井施工のためには地下水の分布と流動状況を把握する必要性が明らかとなった。以下に本報告において得られた結論をまとめる。

- 1) 本報告では、I地区の地すべりは劣悪な地質状況に加えて、地すべりブロック周辺の多量に存在する地下水の影響が原因であることを明確にした。特にすべり面下位の被圧地下水が、豪雨時にすべり面の急激なせん断抵抗力の低下を招くため、地すべり発生の主要因であることが判明した。
- 2) 本調査地では詳細な地下水調査結果から、地下水流動層及び被圧地下水の分布を十分把握した上で、集水井を配置した。その結果、地すべり頭部では、集水井施工前と比較して10m以上もの地下水位が低下し、地すべり発生の危険度が大幅に減少した。
- 3) 水収支、水質分析、年代測定、比抵抗二次元探査結果を総合的に判断した結果、本報告では、地すべり地内の地下水起源を被圧地下水と断定した。この結果を踏まえて、集水井の施工深度を被圧地下水

まで伸ばすことで、効果的な地下水排除が可能となった。

- 4) 本調査地では、集水井の施工において、集水井を試験的に実施するとともに、施工後の効果を水位観測で確認しながら、施工計画の見直しを行うことで、より効果的な配置計画とすることができた。
- 5) すべり面下位に被圧地下水が滞留する場合、遠方の供給域で発生した水圧が、圧縮率の高い被圧地下水を速く伝播するといわれている。しかし、実際にそのような現象が報告された例は少ない。本報告では、すべり面付近の間隙水圧を測定した結果、豪雨時にすべり面下位の間隙水圧が上位の水圧に比べて急激に増大した。このように間接的であるが前述した被圧地下水水圧が、降雨時に急上昇する現象の間隙水圧を通じて示すことが出来た。

謝辞：本研究を行うにあたり、JH松江工事事務所の村田一廣氏、寺本丈夫氏、藤沢茂樹氏にはデータの収集やとりまとめに際し、多大な貢献をいただきました。株式会社エイトコンサルタントの佐藤文晴氏には本論文のとりまとめに際して、多くのご意見をいただきました。ここに深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 建設省砂防部：砂防便覧(平成11年度版)、社団法人全国治水砂防協会、2000。
- 2) 池谷浩、吉松弘行、南哲行、寺田秀樹、大野宏之：砂防・地すべりがけ崩れ・雪崩防止工事ポケットブック、山海堂、2001。
- 3) 藤原明敏：地すべりの解析と防止対策、理工図書、1983。
- 4) 財団法人国土開発技術研究センター：地下水調査および観測指針(案)、山海堂、1996。
- 5) 山本荘毅：新版地下水調査法、古今書院、1983。
- 6) 寺川俊浩：地すべり地における地下水調査法と地下水排除工の設計(その1)、地すべり技術、Vol.24, No.1, 1987。

(2002.9.20 受付)

AN EXAMPLE OF GROUNDWATER SURVEY FOR GROUNDWATER  
DRAINAGE WORKS IN LANDSLIDE AREA

Atsukuni KAJIMA, Hiroaki TAKEMOTO, Takayuki HARUGUCHI,  
Yasushi SASAKI, Seishi OKUZONO and Kohei FURUKAWA

For the reason that geology condition is complicated, generally speaking, it is very difficult to understand streaming distribution and the condition of groundwater in landslide area. Construction of road in the landslide area has possibility to cause landslide disaster. It is very important for landslide investigation to understand the groundwater condition to prevent the area from landslide disaster.

An example of the most suitable planning for the countermeasure of landslide by the detailed groundwater survey is reported in this paper.