

◆特集：土砂災害対策◆

# 地すべり動態観測による地下水排除工の計画手法に関する調査

鈴木将之\* 石井靖雄\*\* 藤澤和範\*\*\*

## 1. はじめに

現在の地すべり対策計画において対策工の規模は、目標とする安全率と事前の調査結果に基づき決定される。対策工の効果が計画以上に発揮されていたとしても、地すべり現象に不明な点がある場合、その効果を必ずしも対策計画に反映することができず、その結果、全ての事例で対策工の計画が十分見直されているとは言いがたい。

これまで地下水排除工の効果評価に関しては、水収支の検討<sup>1)</sup> などさまざまな研究がなされてきた。しかし実務上は、地下水排除工による地下水排除効果を安定計算に織り込むための地下水位の計画低下高には、実態把握<sup>2),3)</sup> を通じて得られた経験的な値が用いられてきた。計画水位に到達させるための地下水排除工の数量が大きくなる大規模な地すべりでは対策工の施工期間が長くなる。このため、施工済の施設の効果を反映することなど、計画手法の一層の合理化が望ましい。

本調査は、規模が大きいなどの事情により長期間にわたり対策が行われている地すべりにおいて、動態観測結果に基づき地下水排除工の効果を評価し、地下水排除工の計画規模を逐次修正する手法について検討するものである。

本調査ではまず、地盤の歪量の管理基準を設定し、ある確率雨量に対し地すべりが滑落に至る状況を避ける水準に計画目標を置くことができるか、という点について、すなわち地盤の許容変位量というべきものについて検討した。

つぎに、観測結果に基づいて計画を再検討しようとした場合、地盤の変位量や地下水位には降雨量の影響があるから、地すべりの挙動を降雨量の条件がついた確率現象として取り扱うことによって合理的な計画を導けないか、という点について主に検討してきた。

これまでの検討結果と、地下水排除工計画の逐次修正に向けた、地下水排除工の効果評価指標についての考察を報告する。

## 2. 滑落限界歪量

### 2.1 滑落限界歪量の検討方法

地すべりの滑落限界歪量について検討するため、近年災害が発生した10地区（表-1）における資料の整理解析を行った。

災害資料により、降水量、地盤変位量および地下水位の観測結果の整理解析を行った。実効雨量の半減期と降雨からの遅れ時間をそれぞれ最大144時間までの値に設定し、実効雨量と地盤変位量および地下水位との相関を調べた。各地区近隣のアメダス降水量を用い災害発生時の確率日雨量を計算した。滑落した事例については、2次クリープ、3次クリープに至ったときの歪量を求め、森脇<sup>4)</sup>により整理されている歪量との整合性および斉藤<sup>5)</sup>、福園<sup>6)</sup>により提案されている既往崩壊予測式の適合性について検討した。

### 2.2 滑落限界歪量の検討結果

滑落した事例の歪量の検討結果を表-2に示す。限界歪<sup>4)</sup>の評価には崩壊の規模を把握するときの

表-1 歪量検討地区の地すべり諸元

地区名	所在	地すべりブロック諸元				
		地質	型	幅	奥行き	層厚
地附山	長野県長野市	-	-	500m	290m	50m
下の場	鹿児島県阿久根市	古第三紀層	流れ盤	40	30	8
山館	岩手県江刺市	新第三紀層	第三紀	125	270	25
椿山	高知県池川町椿山	-	強風化	240	450	30
地原	石川県鳳至郡門前町	新第三紀層	第三紀	116.5	40	5
伯母谷	奈良県吉野郡川上村	古第三紀層(四万十層群)	流れ盤	40	50	18
一之貝	新潟県栃尾市	新第三紀層	第三紀 単斜構造	100	140	12
細入	新潟県東頸城郡浦川原村	新第三紀層	第三紀 単斜構造	100	170	12
出雲崎	新潟県三島郡出雲崎町	新第三紀層	第三紀 背斜構造	30	40	4
柏尾	長野県東筑摩郡明科町	新第三紀層	第三紀 強風化	100	120	33

Study on Development of Planning Method for the Ground Water Drainage Works

表-2 滑落予測法の適用結果比較

出典 名称	森脇 (2001) 限界歪法	齊藤 (1987) セミログ法	福園 (1985) 表面移動速度逆数法
解析手法	滑落時の限界歪が地すべりによらず一定であることを利用。  滑落時刻の予測ではなく、危険度評価に利用	滑落時刻を想定したlog (tr-t) : 累積変動量グラフが直線になる時期を試行決定して滑落時刻を予測。 3次クリープ以降が対象	移動速度の逆数 (1/v) の経時変化グラフで滑落時刻を1/v = 0の時の時刻として予測
適用制限	特に無し。 ただし、実際には移動中の地すべりが対象となる	移動が加速中であること。 2次クリープ、3次クリープの識別ができること	移動が加速中であること
各地区の滑落状況への予測適用結果			
地附山地区	実際の滑落状況とよく一致している	・実際より若干 (1日以内) 早め ・1日前でも予測は微妙である	・実際より3日遅れ ・10日前から予測可能
山館地区	指標より小さい値で滑落発生	・実際より若干 (1日以内) 遅れ ・2日前でも予測は難しい	・実際とほぼ一致 ・10日前から予測可能
伯母谷地区	指標と比較的よくあっている	実際より若干 (1日以内) 遅れ	実際とほぼ一致
適用時に問題となった事項	・崩壊範囲がわからないと歪量が求まらない ・歪量蓄積開始時点の取り方が評価に影響する ・指標となる歪量より一桁小さい値でも滑落が発生する例がある。	・直線判定が微妙である  特に、滑落以前の判断は難しい  ・滑落後でない直線が確定できない ・滑落前ほどグラフが短いため、長期の予測は困難である ・3次クリープの取り方 (想定時刻) が予測に影響する可能性がある ・結果的には1日以内の幅で説明できる	・グラフが揺らぐことがあり、直線外挿に幅がある。 ただし、包絡線を利用すればある程度解決できる。 ・比較的实际に近い予測が得られるが、やや遅れることもある。
手法の利点、欠点	・定速移動でも適用可 ・危険度評価であり事前対策に利用可能 ・崩壊範囲の確定が必要	・事前判断は困難 ・3次クリープという微妙な判断を要する。	・個人差が入りにくい ・予測には移動量観測データ以外の想定が不要 ・比較的長期の予測ができる
適用性	○	×	◎

表-3 確率日雨量計算結果および滑落の有無

地区名	解析期間中日		日雨量の確率年		滑落の有無
	年月日	雨量mm/日	Thomas法	Hazen法	
地附山	S60.7.20	59	126.0	130.7	有
	S60.7.8	43	58.8	60.5	
下的場	H10.10.16	121	54.4	55.8	無
	H10.10.17	103	40.9	41.9	
山館	H10.10.1	33	29.0	29.5	有
	H10.10.8	31	25.7	26.2	
椿山	H14.8.31	324	240.3	249.1	無
	H14.8.30	158	60.0	61.5	
地原	H11.6.17.27	86	134.6	138.3	無
	H11.7.3	54	46.4	47.3	
伯母谷	H14.7.10	123	59.9	62.3	有
	H14.7.25	38	9.4	9.6	
一之具	H14.10.28	85	75.0	76.5	無
	H14.10.29	75	56.3	57.3	
細入	H14.7.10	78	58.5	59.7	無
	H14.10.1	65	39.6	40.3	
出雲崎	H14.11.13	50	25.9	26.3	無
	H14.11.14	48	24.0	24.3	
柏尾	H14.10.1	66	63.9	65.7	無
	H14.9.17	50	36.5	37.5	

誤差が影響する。また滑落時刻の予測<sup>5),6)</sup>には、地すべりが加速中という前提があるが、実際には一時減速することもあり誤差が生じる。これらの原因により、地盤の許容変位量を算出するのは、精度面で課題があるということがわかった。

また、観測データへの実効雨量のフィッティング残差はまちまちであった。同じ地すべりであっても地盤変位や水位変化の降雨からの遅れ時間や変化の速さが均一でないことが主な原因で、個々の計器について地盤変位量や水位変化量と実効雨量との関係式を求めても、地すべり地全域に対する予測の再現性は低いことがわかった。

そして、表-3によると、滑落の有無は日雨量確率年の大小に関連づけられないことがわかる。

これらの検討結果を見るかぎり、計画目標を、ある確率雨量に対し地すべりが滑落に至る状況を避けうる水準とするのは非現実的である。



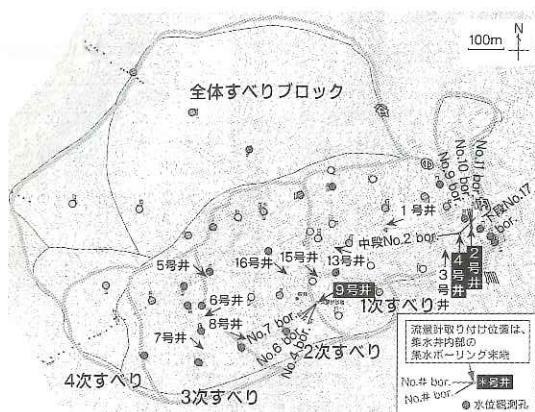


図-1 谷の内地すべり 対策工・観測位置図

### 3. 動態観測の対象地区

降雨・無降雨時における集水井の機能を評価し、対策工の効果評価指標を検討するため、これまで長期間観測が行われており、現在も対策工が施工中である、谷の内（たにのうち）地すべり防止区域（高知県高岡郡越知町）において、流量観測を行うとともに既往観測資料の整理を行った。

#### 3.1 谷の内地すべりの概要

谷の内地すべりは、1級河川仁淀川水系谷の内川右岸の標高250m付近を末端とする、比高450m、延長1200m、平均勾配23°、面積131.2haの南東向き斜面であり、斜面下部から上部にかけて順に1次から4次までのブロックと、最上部の全体すべりブロックとに区分される（図-1）。移動層厚は平均で60m、最深部で150m以上に達する。

谷の内地すべりにおける地質は秩父古生層（二畳系）北帯の白木谷層群に属し、チャートや苦鉄質凝灰岩などを挟む粘板岩を主とする。地質構造は、緩やかな流れ盤であると推定されている。

#### 3.2 谷の内地すべりにおける対策工の経緯

谷の内地すべりでは、昭和33年以來地すべり対策事業が行われている。現行の対策工全体計画は、平成11年度から平成13年度まで開催された委員会において検討された抑制工の計画に基づく。

平成15年度に13号集水井（深度34.5m）、平成16年度に16号集水井（深度48.0m）の施工が行われた。

### 4. 流量観測

#### 4.1 観測方法

降雨・無降雨時における集水井の機能を評価す

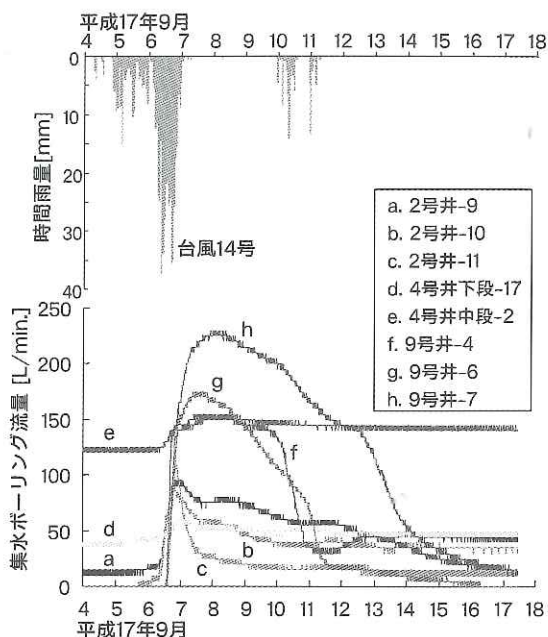


図-2 集水ボーリング流量観測結果

るため、谷の内地すべり2号集水井の集水ボーリング3本、4号集水井の集水ボーリング2本、9号集水井の集水ボーリング3本にそれぞれ流量計を設置し観測した（図-1）。

#### 4.2 観測結果

図-2に示す観測結果によれば、各ボーリングの流量は、降雨後数日間にわたって流量がはなはだ多い状態となるもの（図中のf、g、h）、降雨後1日以内に明瞭なピークを呈するもの（同a、b、c）、日常的に流量が多く降雨後の増加がほかより明瞭でないもの（同d、e）、と複数のパターンがある。さらに各ボーリングの最大流量の差のみならず降雨後の総流量の差も大きい。

#### 4.3 流量観測による集水井の機能評価

同じ集水井でも、集水ボーリングによって降雨後の総流量の差が大きいことがわかった。最大流量は地質調査や施工時の湧水状況などに基づきある程度予測可能としても、総流量を知るには観測によらざるを得ない。このため、降雨後の地下水排水量を極力多くする方法として流量観測結果に基づく追加施工が有効なものと推察される。

一般に行われている排水によってすべり面の間隙水圧をどの程度低下させているか確認がないという批判<sup>7)</sup>もあるが、滑動中の地すべりでも排水量は比較的安定した観測が可能と考えられるので、地下水排除工の設計を逐次修正するための指標を

得る方法として、集水ボーリングの流量観測は有望である。今後複数年度の流量観測を行い、排水量の水文流出解析<sup>8)</sup>によって、施工の前後で地下水流出に変化があったかという点を検討したい。

## 5. 既往観測資料整理

### 5.1 既往観測資料整理方法

地下水排除工の効果評価指標を検討するため、谷の内地すべりの10基の地盤伸縮計および22基の孔内水位計の観測データを収集整理した。データ期間は、地盤伸縮計と4基の孔内水位計が平成8～17年、その他18基の孔内水位計が平成14～17年である。

地すべりの挙動のしきいとなる実効雨量をしきい実効雨量と称し、以下3種類について述べる。なお前報<sup>9)</sup>に計算方法を詳述しているので参照願いたい。

地盤伸縮計で検知可能な0.1mm/日以上、地盤変位があった日および地盤変位がなかった日の実効雨量について、度数をそれぞれ実効雨量1mmから300mmまで1mm毎に集計した。地盤変位を観測した日の累積相対度数と観測日全体の累積相対度数との差が最大となる実効雨量を、地盤変位の発生確率が増加する実効雨量しきい値という意味で、①地盤変位しきい実効雨量と称する。

②地盤変位件数しきい実効雨量は、20mm/日以上の降雨後30日間における実効雨量最高値と0.1mm/日以上、地盤変位の件数との関係を調べたものである。20mm/日以上の降雨後30日間における地盤変位件数がn件以上の事例とn件未満の事例を抽出し(n=1～5)、30日間における実効雨量最高値について、度数をそれぞれ実効雨量1mmから300mmまで1mm毎に集計した。n件以上の地盤変位を観測した事例の累積相対度数と20mm/日以上の降雨事例全体の累積相対度数との差が最大となる実効雨量を、任意の地盤変位件数の実効雨量しきい値という意味で②地盤変位件数しきい実効雨量と称する。

③水位上昇しきい実効雨量は、①地盤変位しきい実効雨量と同様の計算手順により求めた。水位上昇を観測した日の定義は、0.1m/日、0.5m/日、1.0m/日以上、水位上昇を観測した日としそれぞれの水位上昇に対するしきい実効雨量を求めた。

対策工は現在も継続しているが、観測結果に基づく効果評価手法を検討する目的で、観測データを施工前後に区分した。13号井施工に伴い水位が低下した観測孔が多く、水位低下量が大きいため、平成15年9月10日までを施工前、平成16年3月23日からを施工後として取り扱った。

### 5.2 既往観測資料整理結果

図-3～5には各ブロックのしきい実効雨量の中央値を示す。

まず①地盤変位しきい実効雨量の計算により、地盤伸縮計で0.1mm/日以上、地盤変位を観測した日の実効雨量を調べた(図-3)。つぎに、②地盤変位件数しきい実効雨量を計算し、地盤変位の降雨からの遅れ時間を検討した(図-4)。

図-3、図-4によると、斜面下部の1次ブロックの地盤変位および地盤変位件数しきい実効雨量は斜面上部の3次ブロックのそれより低い。

図-4は、降雨後における地盤変位の発生時期について以下のことを示唆している。3次ブロッ

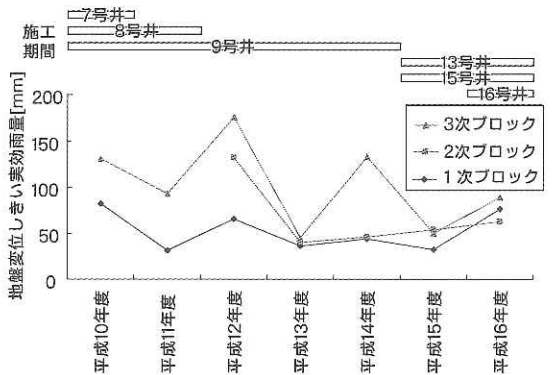


図-3 ブロック毎の地盤変位しきい実効雨量

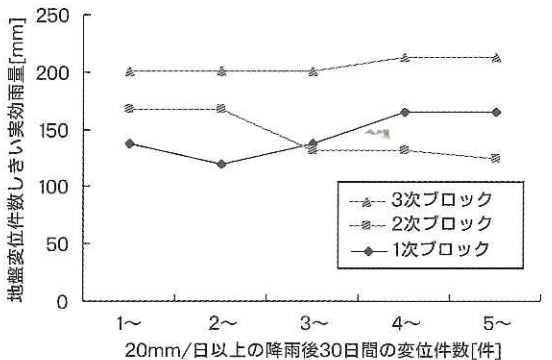


図-4 地盤変位件数しきい実効雨量と変位件数



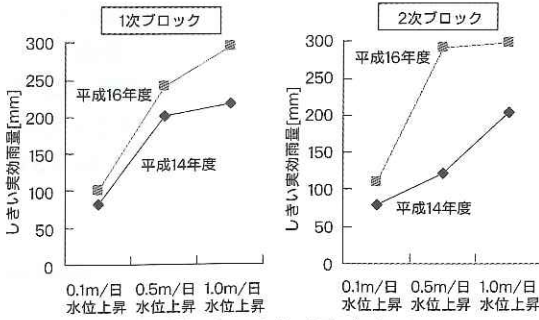


図-5 水位上昇しきい実効雨量 (3次ブロックは計算可能なケースが少なかったため省略)

くでは、降雨直後、実効雨量が高いうちに地盤変位が概ね連続して生じる。2次ブロックでは、降雨後30日間に5件以上の変位が生じる場合は1件以上の変位が生じる場合に比べ実効雨量が低い。つまり降雨ピークから時間が経過し実効雨量が大きく低下した頃に地盤変位が多発する。1次ブロックでは、実効雨量が比較的低いときでも1件以上の変位が生じ、実効雨量が高いときは5件以上の変位が生ずる。

これらの結果は以下のようにまとめられる。

- ・斜面の下部は上部より低い実効雨量でも地盤変位が生じやすい。
- ・斜面上部の3次ブロックでは、降雨ピーク付近で集中的に滑動する。
- ・2次ブロックでは、滑動のピークが降雨のピークからやや遅く発生している。
- ・斜面下部の1次ブロックでは、実効雨量が低いときも滑動が皆無になりにくく、かつ実効雨量が高いときも滑動する。

最後に③水位上昇しきい実効雨量の計算により、水位が上昇した日の実効雨量について調べた。その結果を図-5に示す。③水位上昇しきい実効雨量は、13号井施工前の平成14年度に比べ、施工後の平成16年度の方が全般に高い。

水位の時系列の一例としてBV6-5孔について示す(図-6)。この孔の場合、13号井施工の効果が平成16年度に明らかな水位低下として表れている。また、BV6-5孔水位が1.0m/日上昇する日の実効雨量は、施工前・平成14年度に比べ、施工後・平成16年度のほうが高い。その結果、平成16年度のBV6-5孔1.0m/日水位上昇しきい実効雨量は、平成14年度より76mm高い279mmと計算された。

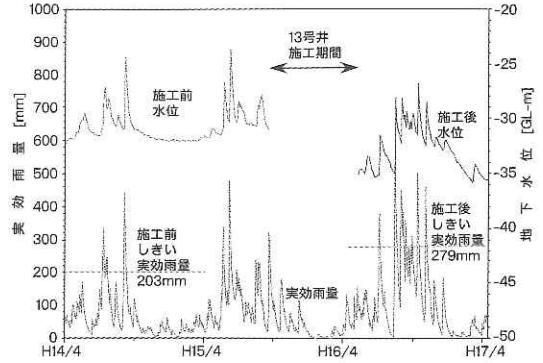


図-6 BV6-5孔の水位、実効雨量および1.0m/日水位上昇しきい実効雨量

## 6. 考察

### 6.1 地下水排除工の計画目標の検討

安定解析に基づく計画水位は、滑動時の水位を観測することによって容易に設定できる反面、地すべりの規模が大きくなると、実現性の面で制約がある。

一部の地すべりについては10年以上の期間の変位量と実効雨量との関係が得られている<sup>10)</sup>。しかし滑落した事例を含め降雨量確率を2.2節で検討した結果は、一般に変位量そのものを降雨量確率に関連づけることはできないというものであった。また地下水位そのものの度数分布を確率分布形にあてはめて評価するのも困難と指摘されている<sup>11)</sup>。

一方5章での検討の結果、地盤変位や水位上昇の頻度のしきい値は雨量で表現可能と考えられる。そこで、地下水排除工の計画目標は、観測に基づく指標の値を、保全対象の重要度や地域の実情を踏まえ、地すべりの挙動の頻度と雨量との関係の分析を反映した値にすることとするのが現実的である。なお、必要とする観測期間は、対策前後でほぼ同じ強度の降雨を複数経験している程度の長さが想定される。

### 6.2 地下水排除工効果評価指標の検討

地すべりの挙動を、誘因である雨量に着目して整理できれば、流量観測などの水文学的手法による検討と整合しやすい。

前報<sup>9)</sup>と本調査において地すべりの挙動のしきいとなる雨量の計算を試みた結果は、次のようにまとめられる。

- ①地盤変位件数の集計により、地すべりブロック毎に、降雨後遅れて生じる地盤変位の発生傾向

を把握できた。

②水位に関しては、降雨後の水位上昇量に着目すると各計器の比較分析が行いやすい。

5.2節では施工前のデータが多かったが、今後施工前後それぞれ数年間の観測データについてしきい実効雨量を計算し比較することにより、雨量の年較差の影響を消去した雨量指標値によって、地下水排除工の効果を評価できるものと考ええる。

これまでの検討は以下のようにまとめられる。

- ・動態観測による地下水排除工の効果の評価は、地すべりの挙動のしきいとなる雨量指標値によることができる。
- ・計画の達成状況は指標の上昇量として評価することが可能である。
- ・流量観測を行い流出解析を主とする分析によって設計を逐次修正し、当該雨量指標によって効果を確認し、計画規模を修正することが有望である。

## 7. おわりに

本調査は、観測結果に基づく計画のために、観測データから地下水排除工の効果の指標を構築することを目指した。今後の課題は、雨量指標値を用いた計画目標の設定方法の確立である。動態観測によって地下水排除工の計画目標を設定し効果を評価できるかは、さまざまな降雨強度を複数経験した対策前後のデータをそろえられるか、にかかっている。今後、地下水排除工の追加投資は年間平均何日の安全性向上にあたるか、といった観点から評価を行うためにも、観測データの整理解析手法についてさらなる検討が望まれる。

## 謝 辞

データ収集と現地調査にあたり、国土交通省砂防部保全課、高知県、長野県の関係各位のご協力をいただきました。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 寺川俊治、水谷宣明、西田彰一：谷地地すべり一とくに岩盤地すべり地における地下水の挙動一、地すべり, Vol. 19, No. 1, pp. 34-43, 1982
- 2) 奥園誠之、緒方春樹：地すべり地における地下水排除工の効果とその調査法、基礎工, Vol. 13, No. 9, pp. 33-39, 1985
- 3) 秦 耕二、丸山清輝、北島義則：集水井施工による地下水位低下量の実態、第34回地すべり学会研究発表会講演集, pp. 291-294, 1995
- 4) 森脇 寛：地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価、地すべり, Vol. 38, No.2, pp. 11-18, 2001
- 5) 斎藤迪孝：斜面崩壊時刻予測のためのクリーブ曲線の適用について、地すべり, Vol. 24, No. 1, pp. 30-38, 1987
- 6) 福園輝旗：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法、地すべり, Vol. 22, No. 2, pp. 8-13, 1985
- 7) 高野秀夫：地すべり活動に対する有害な水と無害な水、地すべり, Vol. 16, No. 4, pp. 33-34, 1980
- 8) 末峯 章、島 道保、小西利史：排水ボーリングからの排水の流出特性について、地すべり, Vol. 32, No. 1, pp. 41-45, 1995
- 9) 鈴木将之、藤澤和範：降水指標による地すべり警戒基準に関する調査（第2報）、土木技術資料, Vol. 47, No. 9, pp. 64-69, 2005
- 10) 北陸地方整備局阿賀野川河川事務所調査課：滝坂地すべりにおける地すべり対策効果の評価について、国総研資料, Vol.195, pp. 71, 72, 2004
- 11) 東北地方整備局新庄河川事務所：地下水観測手法と地すべりの長期安定性評価検討業務、国総研資料, Vol.220, pp. 97, 98, 2004

鈴木将之\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム研究員、博士（学術）  
Masayuki SUZUKI

石井靖雄\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム主任研究員  
Yasuo ISHII

藤澤和範\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム上席研究員  
Kazunori FUJISAWA