

◆ 報 文 ◆

残留間隙水圧推定時の透水係数設定に関する調査

鈴木将之* 江田充志** 石井靖雄*** 藤澤和範****

1. はじめに

貯水池周辺地すべり対策を実施する際には、一般の地すべりとは異なり、貯水位下降時の残留間隙水圧の発生を考慮した安定解析により対策が計画される。このため、残留間隙水圧の設定をより合理的に行い、地すべり斜面の安定性を的確に評価できる手法が望まれている。そこで、浸透流解析等を用いて残留間隙水圧を算定する手法を提案することを目的として、調査を実施している。

残留間隙水圧の残留率には、貯水位下降速度や水際から自然地下水位までの距離等のほかに、地すべり土塊の性状、すなわち透水係数や有効間隙率等が影響を及ぼすと考えられている¹⁾。対策工の設計にあたり、これらのデータが十分得られていない場合、安全側の判断として残留率を50%とすることが一般的である²⁾。

しかし、貯水位降下時の斜面地下水位・水圧の観測値をまとめた報告¹⁾³⁾によると、実測に基づく残留率は、設計上一般的に用いられている50%を下回る事例が多い。このため、残留率を、対象地区の地形・地質条件、地すべり土塊の土質特性に応じて設定する手法の開発が求められている。

貯水池周辺斜面の地下水を対象に2次元非定常飽和不飽和浸透流解析を用いる場合、通常のボーリング調査による測線断面の土質・地質区分に対応する飽和透水係数と不飽和特性を割り当てる。しかしながら、解析結果に及ぼす飽和透水係数設定値の影響はきわめて大きく、例えば均質傾斜地盤のモデルにおいても1オーダーの透水係数の違いが残留率の数10%の違いをもたらす⁴⁾ことが知られている。したがって、湛水前に残留率を的確に予想するためには、現場透水試験の精度向上が欠かせない。

現在基準化されている現場透水試験では、注意深く実施すれば単孔式でも局所的な地盤の透水性を評価できるとされている⁵⁾。しかしながら、その適用範囲は平地の均質とみなせる地盤を前提としている。

本調査ではまず、試験方法を検討するための基礎資料として、飽和地盤における現場透水試験を実施し、現場透水試験による透水係数を用い飽和・不飽和浸透流解析を行った。本報告では、試験・解析の再現性の検討と透水係数設定を行う上での課題について述べる。

2. 調査対象地区の概要

調査は、運用段階にある宮ヶ瀬ダムKR-8地区を検討対象にして実施した(図-1)。

KR-8地区では、深礎杭が施工済みで現在孔内傾斜計等に累積的な変動はなく、BVKR8-1孔において孔内水位計1基、BVKR8-2孔において孔内傾斜計1基と地盤傾斜計2基により観測を行っている。図-1中のBV7-1、7-2、7-3は過去に実施された地質調査ボーリングの箇所を示したものであり、孔は現存しない。

地質は、泥岩(W3)、弱風化泥岩(W2)、中風化泥岩(W1)、および被覆層の礫混じり砂質ローム(Dt)から構成される。風化区分の考え方は⁶⁾による。風化泥岩(W1、W2)は、すべり面を境

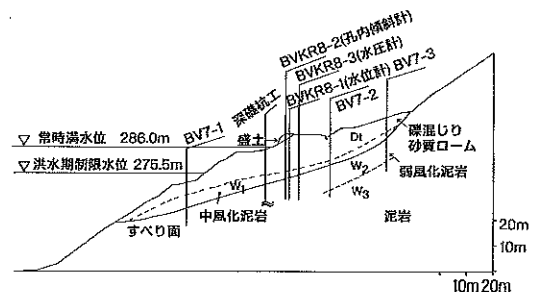


図-1 KR-8地区の断面図

界に、上部が中風化泥岩 (W1)、下部が弱風化泥岩 (W2) に区分される。

3. 調査方法

3.1 現地試験と観測

調査を開始した平成15年度は、新規にBVKR8-3孔 (25.0m) を掘削して試験と観測を行った。

透水試験は6深度7回実施し、区間をいずれも裸孔とし区間長を50cmとした。透水試験は8.0~8.5m、9.0~9.5m、11.0~11.5m、14.0~14.5m、15.0~15.5m、18.0~18.5mの各深度において実施した。各深度で定常法と非定常法の両方を実施し、定常法として8.0~8.5m、14.0~14.5m、18.0~18.5mでは注水法、9.0~9.5m、11.0~11.5mでは揚水法、15.0~15.5mでは注水法と揚水法の両方を実施し、試験方法の適用性を検討した。定常法の定常水位と非定常法の初期水位はボーリング孔の孔口とした。

BVKR8-3孔掘削にあたり、既往BVKR8-1、8-2のボーリング柱状図に基づき、礫混じり砂質ローム層 (Dt) と中風化泥岩層 (W1) の境界を16.0mと見込んでいた。礫混じり砂質ローム層では揚水法透水試験も実施することを予定し、大きな孔径を準備することにした。そこで、地表~16.0mまではまず径86mmで掘削し、16.0~25.0mの区間は注水法透水試験のみを実施することを予定して、径66mmで掘削した。さらに、86mm掘削区間については、試験区間外から水が流入することを防ぐため、試験区間下端まで径86mmで掘削後、試験区間上端まで径116mmに拡孔して内径100mmのケーシングを建て込んだ。

透水試験後、試験区間の孔径を確認するため、試験区間ごとにキャリパープローブを用いて孔径を測定した。なお孔底から17cmまでの区間は孔径を測定できず、試験区間上部0~33cmの部分については、それぞれ3回ずつ測定した。図-6のエラーバーは3回の標準偏差を示す。

透水試験後、貯水位の変動に伴う残留間隙水圧の発生状況を詳細に調べるため、8.0m、11.0m、14.0m、23.0mの各深度に間隙水圧計を埋設し、毎時観測を開始した。

3.2 浸透流解析

前述の現場透水試験による透水係数を用いて、貯水位降下時の孔内地下水位変化が再現可能かを検証するため浸透流解析を実施した。解析期間は、貯水位標高283.58mから標高259.80mまで24日間で降下 (平均貯水位降下速度0.99m/日) させた平成10年9月16日から10月10日までである。解析には飽和-不飽和浸透流解析^{7),8)} プログラムUNSAFを使用した。基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} + R$$

ここで、 $K_x(\phi)$: 水平方向の飽和透水係数、 $K_z(\phi)$: 鉛直方向の飽和透水係数、 ϕ : 圧力水頭、 θ : 体積含水率、 R : 単位長当たりの涵養量、揚水量、 t : 時間である。

浸透流解析における初期条件としては、主に①各地質の透水係数、②各地質の不飽和特性、③計算開始時の水頭分布があり、それぞれ以下のように与えている。

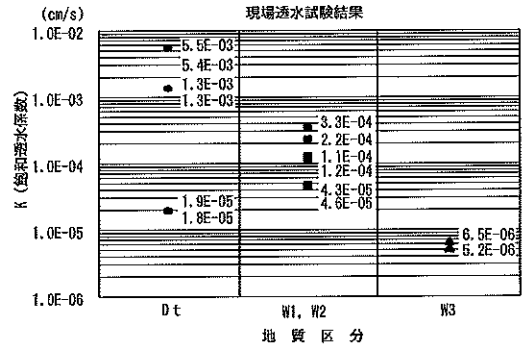


図-2 現場透水試験結果

表-1 現場透水試験結果

NO	試験深度 (GL,-m)	地質・土質区分	透水試験結果 (cm/sec)		
			試験方法	定常法	非定常法
I	8.0~8.5	礫混じり砂質ローム	注水法	2.06×10^{-5}	1.96×10^{-5}
II	9.0~9.5	礫混じり砂質ローム	揚水法	1.37×10^{-3}	1.42×10^{-3}
III	11.0~11.5	礫混じり砂質ローム	揚水法	5.70×10^{-3}	5.78×10^{-3}
IV	14.0~14.5	中風化泥岩	注水法	1.14×10^{-4}	1.25×10^{-4}
V	15.0~15.5	中風化泥岩 (一部未風化)	注水法	4.74×10^{-5}	4.43×10^{-5}
VI			揚水法	3.33×10^{-4}	2.28×10^{-4}
VII	18.0~18.5	弱風化泥岩	注水法	7.07×10^{-6}	5.32×10^{-6}

①各地質の透水係数

現場透水試験により算出された透水係数(表-1、図-2)の範囲付近で、半オーダーずつ変化させた値をモデルに入力した。なお、礫混じり砂質ローム(Dt)の試験値のうち、 10^{-5} cm/secオーダーの試験値は、コア性状の観察および実測孔内水位変化が貯水位変化によく追従するところから、礫混じり砂質ローム(Dt)全体の透水性を示したものではないと判断し、計算に用いなかった。

②各地質の不飽和浸透特性

不飽和浸透特性については試験値がないため、文献によった。礫混じり砂質ローム(Dt)のコア性状が礫混じりシルトの細粒土主体であるところからHerathによる $\theta-\psi$ の関係⁹⁾(図-3)の粘土タイプを用いることにし、不飽和透水係数はIrmayの関係式¹⁰⁾により算出している。

③計算開始時の水頭分布

後述する境界条件での定常解析を行い、得られた水頭分布をモデルに入力した。

境界条件として、斜面の水没部分を対象に貯水位変動データから算定した水頭値を与えている。また、斜面上部には固定水頭を設定し、斜面上方からの地下水流入を擬似的に発生させている。こ

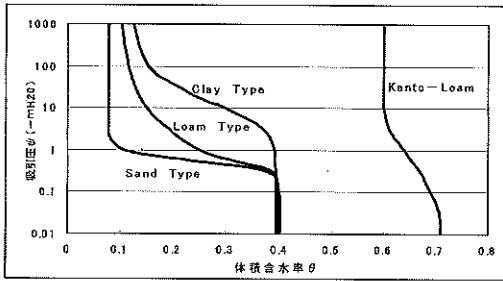


図-3 不飽和領域における $\theta-\phi$ の関係⁹⁾

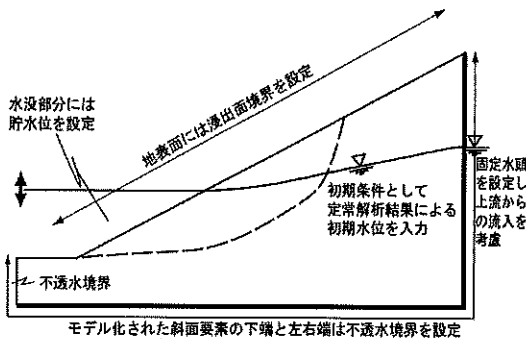


図-4 モデルの境界条件

の地下水流入量は未知量であるが、本解析においては上方斜面長と降雨量を参考に $0.5\sim 3.0$ m³/日(平均 1.5 m³/日)に設定した。モデルの外縁部については不透水境界として設定した(図-4)。

4. 調査結果

4.1 BVKR8-3孔掘削結果

柱状図を図-5に示す。掘削期間中、毎日の作業開始前時点の孔内水位は7.75m付近ではほぼ一定であった。礫混じり砂質ローム層(Dt)と風化泥岩層(W1)の境界は12.15mであった。

4.1.1 礫混じり砂質ローム層(Dt)のコア状況

深度3.30~12.15mに分布する礫混じり砂質ローム層(Dt)は、スコリア礫を含む砂質シルトを主体とする。礫混じり砂質ローム層の砂粒子は原形を保っているものの、風化により粘土化が進んでいる。

4.1.2 泥岩層(W1~W3)のコア状況

風化泥岩層(W1, W2)は、深度12.15~15.20m

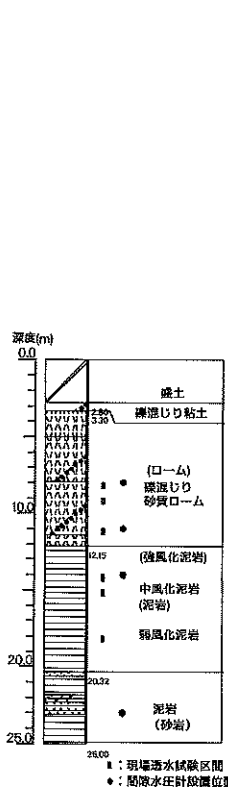


図-5 BVKR8-3柱状図

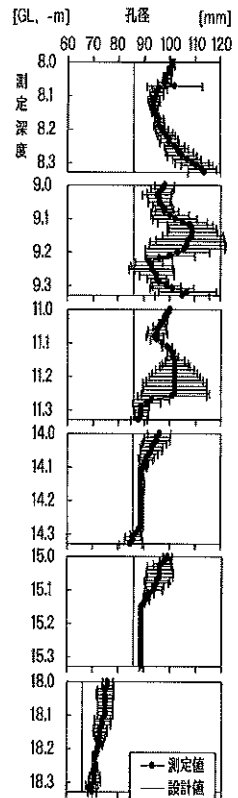


図-6 孔径検層結果

表-2 解析条件の各ケース

case	飽和透水係数 (cm/sec)				涵養量 (m ³ /day)	DT, W1の 不飽和特性 type	※残留率	備考
	Dt	W1	W2	W3				
1	5.E-03	1.E-03	5.E-04	1.E-05	0.5	Clay	5%	
2	5.E-03	1.E-03	1.E-04	1.E-05	0.5	Clay	5%	
3	5.E-03	1.E-03	5.E-05	5.E-06	0.5	Clay	5%	
4	5.E-03	5.E-04	1.E-04	5.E-06	0.5	Clay	7%	
5	5.E-03	5.E-04	5.E-05	5.E-06	0.5	Clay	7%	
6	1.E-03	1.E-03	5.E-04	5.E-06	0.5	Clay	36%	
7	1.E-03	1.E-03	5.E-05	5.E-06	0.5	Clay	39%	
8	1.E-03	5.E-04	5.E-05	5.E-06	0.5	Clay	42%	
9	1.E-03	1.E-03	5.E-05	5.E-06	1.5	Clay	50%	case7の涵養量を変更
10	5.E-03	5.E-04	5.E-05	5.E-06	3.0	Clay	13%	case5の涵養量を変更
11	1.E-03	1.E-03	5.E-05	5.E-06	0.5	Sand	45%	case7の不飽和特性typeを変更

*残留率は、BVKR8-1孔位置の鉛直線分上で、11日目で算出。実測孔内水位による残留率は20%。

に分布する。コア長1~5cm程度の片状コアを主体とし、亀裂沿いに褐色化および軟質化が認められる。また、岩片も風化によりやや軟質化している。

泥岩層 (W3) は、深度15.20~25.00mに分布する。棒状コアを主体とし、一部片状部分を挟在する。亀裂沿いの風化は軽微もしくは認められない。岩片は風化によりやや軟質化している箇所が多い。

4.2 飽和地盤における現場透水試験結果

現場透水試験結果を表-1および図-2に示す。中風化泥岩中の同一深度で注水・揚水の両法によって試験を行った1深度 (15.0~15.5m) を含め、注水法による透水係数は揚水法による透水係数に比べ小さな値である。

4.3 孔径検層結果

透水試験後の6区間の孔径は、深さ順に、100 ± 6mm、100 ± 6mm、97 ± 5mm、89 ± 3mm、91 ± 3mm、72 ± 2mmであり、いずれも呼び径より大きい (図-6)。孔径のばらつきは中風化泥岩 (W1) ~泥岩 (W3) に比べ礫混じり砂質ローム層 (Dt) で大きく、礫混じり砂質ローム層の注水法実施区間・揚水法実施区間を比較すると同程度である。

4.4 深度別間隙水圧観測状況

平成16年2月21日から6月22日までの深度別間隙水圧と3月31日までの貯水位・BVKR8-1孔内水位の時系列を図-7に示す。深度8.0mの間隙水圧計では水圧が観測されていない。これは観測開

始時点でBVKR8-3孔内水位がすでに8.0mを下回っていたことが影響していると考えられる。その他の間隙水圧計では概ね貯水位降下に追従して地下水頭が低下している。深度11.0m、14.0mの間隙水圧計では、4月27日以降一時的に地下水頭が観測されている。

台風6号により、アメダス相模原で雨量50mmを観測した降雨があった6月21日には、深度23.0mの地下水頭は15時に15.76mであったが、23時に15.15mまで上昇した。一方、深度11.0mの地下水頭は変化がなく、他の深度では地下水頭が観測されなかった。

4.5 地下水位計算結果

表-2に解析条件の各ケースと図-8に地下水位変化図を示す。1日目の実測地下水位の上昇は、2日前にあたる9月15日の降雨 (降雨量231mm) によると考える。

case1から8のうちでは、case6が11日目までの

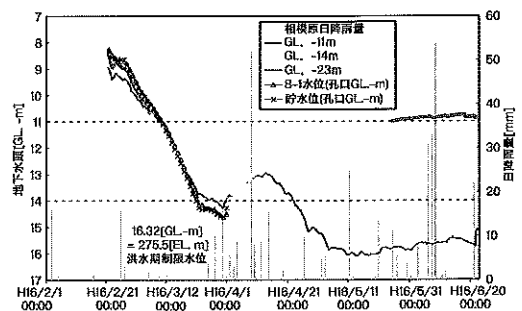


図-7 深度別間隙水圧、貯水位および孔内地下水位

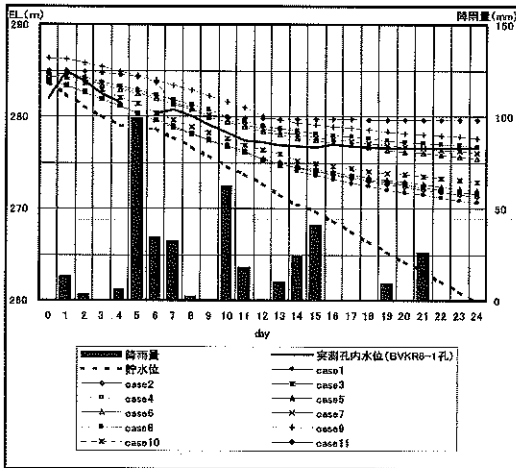


図-8 孔内地下水位変化図

実測孔内水位に近い。実測地下水位の低下が止まる11日目において、case9以外の計算孔内水位は、実測地下水位と±2m程度の範囲で収まっており、現場透水試験による透水係数を用いた浸透流解析で貯水位に追従した孔内地下水位の低下を概ね再現できることが判明した。検討対象地区全体の地下水水面が不明なので、孔位置1点における鉛直地下水位から残留率を算出すると、実測水位では20%であるのに対し、case6の計算水位では36%である。

また、同じ透水係数を設定して、斜面上方からの地下水涵養量を変化させたcase5とcase10、case7とcase9を比較すると、涵養量を増加させたcaseで残留率にして10%程度高い結果となっている。

case7の不飽和浸透特性を砂タイプに変更したcase11では、粘土タイプに比べ地下水位が解析全期間にわたって高い結果を得た。1事例に過ぎないが、有効間隙率の設定によっては、涵養量を数倍変化させた場合に匹敵する計算水位のばらつきが生じることがわかる。

5. 考察

5.1 揚水・注水による透水試験法の適用性

揚水・注水による現場透水試験の結果によれば、単孔式注水法による透水試験は過小な透水係数値を与えていることを示唆する。一般に、この傾向は目詰まりによって引き起こされると解釈されている⁵⁾。なお、揚水法実施に伴う孔形変化による

透水試験値への影響⁵⁾は認められなかった。

湛水前の、自然地下水位が低い状況では注水法によらざるを得ない。注水法によるのであれば、目詰まりを解消するため透水試験前に揚水洗浄を行う必要がある¹¹⁾が、揚水により孔内に引き込むべき地下水がないので、洗浄の効果が懸念される。孔内温度検層による検討結果¹²⁾によれば、最適な孔内洗浄の方法は地盤条件や水理条件によって異なると考えられており、未確立である。結果論で目詰まりを指摘するのではなく、透水試験前に孔内状況を確認する事例の蓄積が必要と考える。

5.2 深度別間隙水圧

泥岩層内 (GL. -23m) の間隙水圧に基づく地下水頭と礫混じり砂質ローム層内の2深度の間隙水圧に基づく地下水頭は、最大0.4m程度異なり、水頭低下速度も異なる。水頭差は水位計算の精度に比して小さいので、顕著な被圧地下水はなく浸透流解析は可能であると判断されるものの、ローム層と泥岩層の2層の地下水層を有する可能性はある。

6月21日15時以降の、深度23.0mにおける地下水頭の上昇は、貯水位操作の影響による可能性がある。風化泥岩層の現場透水試験では、 10^{-4} ~ 10^{-6} cm/sのオーダーの透水係数を得ているので、貯水位をはじめとするデータを得次第、このような速やかな地下水頭の上昇を可能にする透水性について再検討したい。

5.3 斜面上方からの地下水涵養量

礫混じり砂質ローム (Dt) 層の飽和透水係数によって差は異なるが、斜面上方からの地下水涵養量設定値の数倍の変化に対し、残留率で10%程度の差が生じる結果となっている。湛水前に地下水水面を予想するにあたっては、地すべり地外を含めた水文状況の検討が必要である。

5.4 不飽和浸透特性

同じ透水係数を設定して不飽和浸透特性を粘土タイプから砂タイプにすると、計算される地下水位の低下と残留の状況は異なる。表-2を一見するとDtの飽和透水係数が最も大きく計算水位に影響するよう見えるが、実際は貯水位降下に伴いあらたに不飽和領域となる部分から飽和領域への流量も計算水位に影響する。このため不飽和浸透特性についても、現地地盤の状況に適合する値

を用いる必要がある。

6. おわりに

現場透水試験により得られた透水係数を用いて浸透流解析を行い、貯水位降下時における地すべり地の地下水位の予測がある程度の精度で可能であるという結論を得た。

飽和-不飽和浸透流解析の基礎方程式はダルシー則と質量保存則を合わせたものなので、地下水位を推定する際の精度は、地盤全体の飽和透水係数のみならず地下水涵養量、対象地盤の体積含水率、不飽和浸透特性にも依存する。したがってこれらの精度を、残留率を算定する目的に対し十分なものとする必要がある。

従来から注水法単孔式現場透水試験の問題点は指摘されているので、水文状況の的確な把握に向けて現場における計測を充実することとし、間隙水圧観測の継続と水位観測孔の増設、および現場透水試験の追加実施を行い、湛水前の現場透水試験法の提案に向け検討を行っていきたい。

謝辞

現地試験・観測にあたりご協力いただいた関東地方整備局相模川水系広域ダム管理事務所、神奈川県厚木土木事務所に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 網木亮介：貯水池周辺の地すべり地における残留間隙水圧の実態と解析事例、ダム工学、Vol.10, No.1, pp.33-41, 2000.
- 2) (財)国土開発技術センター：貯水池周辺の地すべり調査と対策、山海堂、1995.
- 3) 貞弘丈佳、平野 勇、阪元恵一郎、小池淳子：ダム貯水池周辺地すべりの貯水位変動による残留間隙水圧の実態、ダム工学、Vol.10, No.2, pp.116-127, 2000.
- 4) 貞弘丈佳、平野 勇、小池淳子、上原芳久：ダム貯水池周辺地すべりの浸透流解析による残留間隙水圧の検討、ダム工学、Vol.11, No.1, pp.5-13, 2001.
- 5) 地盤工学会：地盤調査法、1995.
- 6) 藤原明敏：地すべり機構解明のための地質判定について、地すべり、Vol.8, No.2, pp.11-15, 1971.
- 7) 西垣 誠：地下水数値計算法(3)1-2.有限要素法による不飽和浸透流の解析、地下水学会誌、Vol.32, No.3, pp.163-171, 1990.
- 8) 西垣 誠：地下水数値計算法(4)1-3.有限要素法の局所的な地下水流動解析への応用、地下水学会誌、Vol.32, No.3, pp.173-182, 1990.
- 9) Herath, S.: Unsaturated Zone Hydraulic Property Estimation and Application to Infiltration Facility Analysis, Doctoral dissertation submitted to Univ. of Tokyo, p.305, 1987.
- 10) Irmay, S.: On the hydraulic conductivity of unsaturated soil, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol.35(3), pp.463-467, 1954.
- 11) 例えば、平田洋一：最近の地下水調査方法と計測技術5.1 単孔式現場透水試験、地下水学会誌、Vol.35, No.3, pp.247-254, 1993.
- 12) 円藤洋之・中山健二・竹内篤雄：孔内洗浄に伴う地下水流動層の変化について—大阪層群を対象とした地下水観測孔—、第39回地すべり学会研究発表会講演集、pp.455-458, 2000.

鈴木将之*



独立行政法人土木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)
Dr. Masayuki SUZUKI

江田充志**



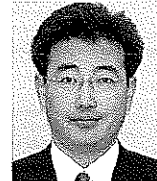
独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム交流研究員
Atushi KOUDA

石井靖雄***



独立行政法人土木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土砂管理研究グループ地すべりチーム、上席研究員
Kazunori FUJISAWA