

◆特集：自然災害に対応する危機管理技術◆

地すべりの発生場条件と移動形態の統計的關係

野村康裕* 森下 淳** 藤澤和範**

1. はじめに

経験上、地すべり土塊の到達距離は地すべりブロックの長さと同程度と一般的に言われているが、実際にはまれにブロック長さを超えて移動する流動化傾向の強い地すべりが発生している。このような地すべりについて、簡易な手法によって地すべり土塊の移動距離を事前に予測することができれば、地すべり災害に対する安全性を格段に向上させることが可能となる。

近年、地すべり調査技術や数値解析技術には大きな進展が見られる。しかし、滑動し始めた地すべりの移動到達範囲を予測する簡易な手法や土塊の移動距離の大きな地すべりの事前把握については、地形的要因の統計整理¹⁾、判別分析による事例解析²⁾、地すべり土塊の性状と運動形態の關係に着目した統計整理³⁾など、統計的視点から多くの研究が行われているものの、有効な検討方法は確立されていないのが現状である。

本研究では、全国の地すべり事例を対象に、まず土塊の移動形態により分類し、それぞれの地すべりの発生場条件についてデータの収集整理を行った。さらに、多変量解析によって地すべりの移動形態とその発生場条件との關係について検討を加えた。

2. 事例の収集と整理

収集した全国の地すべり事例のうち、データがあまりに不足するもの、地震が原因のもの、人為的なもの、崖崩れ、移動なし（移動が観測されていないもの）、等を除いた205事例についてデータ収集を行った。また、各地すべりについて空中写真判読等を行い、表-1、図-1に示す移動形態に分類した上で、地すべり危険箇所調査要領⁴⁾をもとに移動形態の決定に寄与すると考えられる要因（図-2、表-2）に着目してデータの整理を行った。なお、表-1に示す移動形態の分類で言う「押し出し」とは、地すべり土塊が原形に近い形のまま移動した状態を示し、「流動化」とは地すべり

表-1 地すべり移動形態

移動形態	箇所数
1. わずかに移動	72
2. 移動したが土塊はほぼ発生域内に残存	44
3. 土塊のほぼ半分が発生域外に押し出し	38
4. 土塊のほぼ半分が発生域外に押し出し流動化	26
5. 土塊のほぼ半分が発生域外に押し出し流動化して沢を流下	11
6. 土塊のほとんどが発生域外に押し出し流動化	12
7. 土塊のほとんどが発生域外に押し出し流動化して沢を流下	2
合計	205

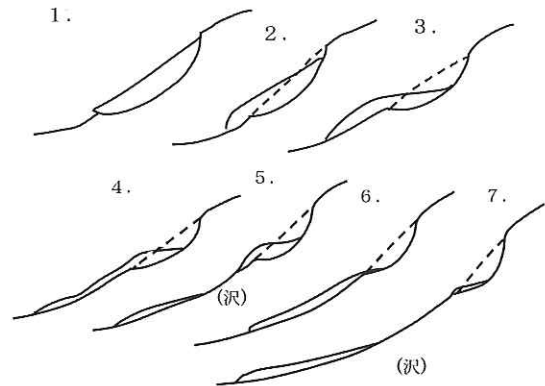


図-1 地すべり移動形態

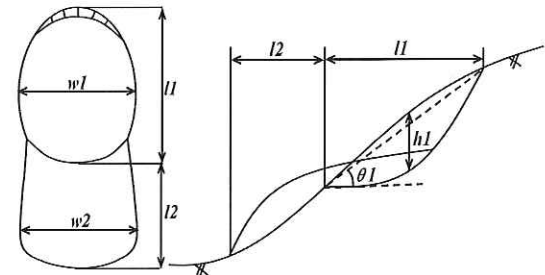


図-2 地すべり移動前後の諸元

土塊が原形を留めず流体運動をした状態であることを示している。

Study on the Statistical Relation between Landslide Occurrence Condition and Movement Type

表-2 整理項目一覧

要因	細目
移動土塊の性状	1. 粘土質土砂 4. 風化した岩 2. 砂礫質土砂 5. 新鮮な岩 3. 巨礫混じり土砂
地すべり発生誘因	1. 豪雨 3. 融雪 2. 長雨
下方斜面の地形	1. 河川、沢に面する 2. 末端が斜面途中 3. 末端が平坦面に面する
基盤岩の地質年代	1. 中生代 3. 新第三紀 2. 古第三紀 4. 第四紀
基盤の種類	1. 堆積岩 3. 深成岩 2. 火山岩 4. 変成岩
地質構造	1. 断層・破碎帯 2. 火山変質帯、温泉余土 3. 流れ盤 4. 受け盤 5. キャップロック構造
地下水	1. 高水位 2. 低水位
地すべり幅	w1 (m) (図-2)
地すべり長さ	l1 (m) (図-2)
地すべり深さ	h1 (m) (図-2)
斜面傾斜	$\theta 1 (^{\circ})$ (図-2)

表-3 出現頻度の高い要因

地すべりの性状	割合
基盤岩の地質年代	新第三紀 70%
基盤の種類	堆積岩 68%
地質構造	断層・破碎帯 51%
地下水	高水位 62%
地すべりの誘因	豪雨 45%

3. 移動特性と発生場条件の傾向

3.1 全体的な傾向

事例収集、データ整理の結果、地すべりの質的要因（定性的な要因）のうち、地すべり発生要因としての出現頻度の高い細目を表-3に示す。これは多くの文献、論文等⁵⁾においても地すべり発生素因として挙げられる地質や年代的偏りとほぼ一致するものである。

3.2 要因ごとの傾向

3.2.1 定性的な要因

質的要因のうち、地すべり土塊の移動形態によって細目の出現頻度に偏りのある要因については、その傾向を表-4に示す。移動土塊の性状については、風化岩よりも粘土質土砂、砂礫質・巨礫混じ

り土砂が比較的流動化しやすい⁶⁾ ために、地すべりの流動化傾向が強くなるとともに後者の出現頻度が増加していると考えられる。下方斜面の地形については、地すべり末端部が河川・沢に面するものは地すべりの移動が対岸により抑止される、もしくは河川の流水により流出するために、地すべりの移動形態の流動化傾向が強まるとともに出現頻度が減少しているものと考えられる。

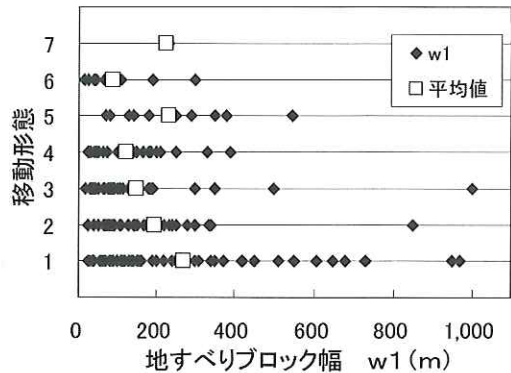


図-3 移動形態と地すべり幅の関係

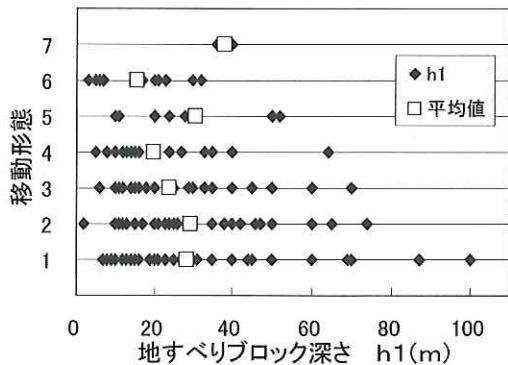


図-4 移動形態と地すべり深さの関係

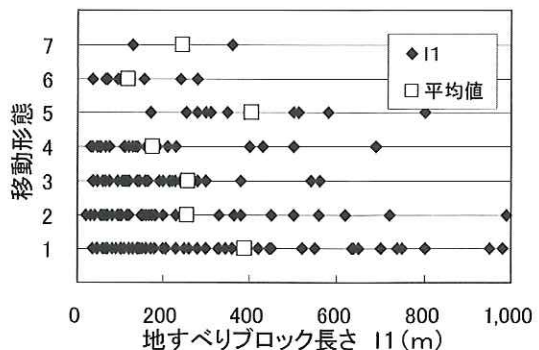


図-5 移動形態と地すべり長さの関係

表-4 地すべり流動化に伴う質的要因の傾向

要因	移動形態						流動化に伴う傾向 (移動形態1→7)
	1	2	3	4	5	6,7	
	移動形態ごとの各細目の出現頻度						
移動土塊の性状	新鮮岩 5%			0%			「風化、新鮮岩」より「粘土質土砂」、 「砂礫質、巨礫混じり土砂」の割合が多くなる。
	風化岩 35～40%			10～30%			
	巨礫、砂礫質土砂 20～30%			30～35%		70%	
	粘土質土砂 25→50%へ上昇傾向 (移動形態1→5)					15%	
下方斜面の地形	河川、沢に面する 30～50%			10～20%			「河川、沢に面する」より「末端が斜面途中」、 「末端が平坦面に面する」が多くなる。
	末端が斜面途中、平坦面 55～65%			80～90%			
基岩盤の種類	堆積岩 65～80%			45～60%			全体的に堆積岩が多い中で火山、 深成岩、変成岩の割合が多くなる。
	火山岩、変成岩、深成岩 20～35%			36～55%			
地質構造	断層・破碎帯 37～49%		55～66%				全体的に断層・破碎帯が多い中で火山 変質帯、貫入岩が多くなる。
	受け盤、流れ盤(移動形態2,5,8以外)20～25%				11%	0%	
	貫入岩、火山変質帯 5～25%				33～38%		

表の左側は、移動状況毎に要因の占める大まかな割合の変化を示している。例えば、「移動土塊の性状」で風化岩は移動状況1～3では35～40%を占めるが、移動状況4～7では10～30%と占める割合が低下することを示す。

3.2.2 地すべり規模

地すべり規模を表す要因（ブロック幅：w1、ブロック深さ：h1、ブロック長さ：l1）については、図-3～5に示すように地すべりの流動化傾向が強くなるにつれて、概ね平均値が減少する傾向が見られた。すなわち、大規模な地すべりでは流動化傾向が弱いと言える。

ただし、移動土塊が河川・沢に流下した事例である移動形態5,7では全体的な傾向から外れる結果となった。これは前述のように、河川・沢の流水もしくは地形的規制等による外力が加わっていること、また、移動形態7については事例数自体が少なく、移動形態7の事例のみでの統計的評価は困難であることなどが原因として考えられる。

3.2.3 斜面傾斜 ($\theta 1$)

図-6に示すように、地すべりの流動化傾向が強くなるにつれて、地すべり斜面の傾斜角 $\theta 1$ の

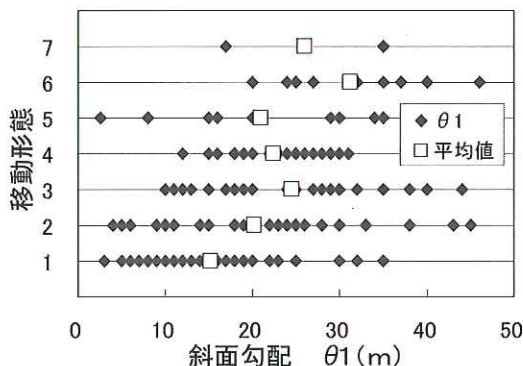


図-6 移動形態と斜面勾配の関係

平均値が大きくなる傾向が概ね認められた。

なお、移動土塊が河川に流下した事例の移動形態5,7について、全般的な傾向から外れているのは前述の地すべり規模についてと同様であった。

4. 数量化II類による多変量解析

4.1 解析モデル

解析は、移動形態毎に細目の出現頻度に偏りのある4つの要因（表-4に示した要因）について全てのデータのそろった132事例で行った。解析にあたり移動形態の統合、簡略化を行い、表-5に示す2つのモデルを設定した。モデル1では、移動土塊の地すべり発生域からの流出程度、すなわち、「ほとんど残存」、「ほぼ半分残存」、「ほとんど流出」を目安にそれぞれ微動型、押出型、流出型とした3つの移動形態に区分した。モデル2では、「ほとんど残存」、「約半分以上流出」を目安に、モデル1の押出型と流出型を統合して新たに押出型として、微動型、押出型の2つの移動形態

表-5 解析モデル

移動形態	箇所数	モデル1	モデル2
1	51		
2	22	微動型	微動型
3	29		
4	14	押出型	
5	8		押出型
6	6	流出型	
7	2	流出型	
合計	132		

に区分した。

4.2 解析条件

解析を行うにあたり、本研究では下記の事項を考慮して、ケース①：132事例（対象となる全事例）、ケース②：移動形態5,7を除いて「下方斜面が平坦面」に限定した37事例、ケース③：移動形態5,7を除いて「下方斜面が傾斜地」に限定した40事例、の計3ケースを対象に解析を行った。

- ・移動形態5,7は移動土塊が沢や川を流下する事例であり、移動距離が河川の掃流力や対岸の地形的制約等の外力により左右されるため、移動形態が過大もしくは過小に評価されている可能性がある。
- ・「下方斜面が傾斜地」と「平坦地」では、規模や斜面傾斜の条件が同程度の移動土塊でも土塊が保持する重力に起因するポテンシャルエネルギーが大きく異なる可能性がある。下方斜面が急勾配で長い場合には流動化傾向が大きくなると推測でき、一方、下方が平坦地の場合には斜面の場合よりも土塊の運動が抑止されていると考えられるため、下方斜面を傾斜地と平坦地によりケース分けすることとした。

4.3 カテゴリ分割

質的変数（定性的な要因）のカテゴリには表-2における細目を使用した。

量的変数 $w1$, $l1$, $h1$, $\theta 1$ については、移動形態間で変数値に有意な差があるかどうかの検定を分散分析により行った。その結果を表-6に示す。 $\theta 1$ と $w1$ についてはモデル1, 2の両方において移動形態間で有意な差があると検定されたが、 $l1$, $h1$ については有意差は認められなかった。この結果から $\theta 1$, $w1$ が移動形態に比較的大きな影響を与えていることが示され、今後の解析では $w1$, $\theta 1$ を用いることとする。

しかし、 $w1$ と $\theta 1$ は χ^2 乗検定で1%有意水準

表-6 量的変数の分散分析結果

	モデル1	モデル2
$w1$	有意差あり (0.016)	有意差あり (0.016)
$l1$	有意差なし (0.084)	有意差なし (0.084)
$h1$	有意差なし (0.072)	有意差なし (0.072)
$\theta 1$	有意差あり (5.20E-09)	有意差あり (5.20E-09)

「有意差なし(P値)：移動形態間で有意な差がない。
「有意差あり(P値)：5%有意水準以上で有意差がある。

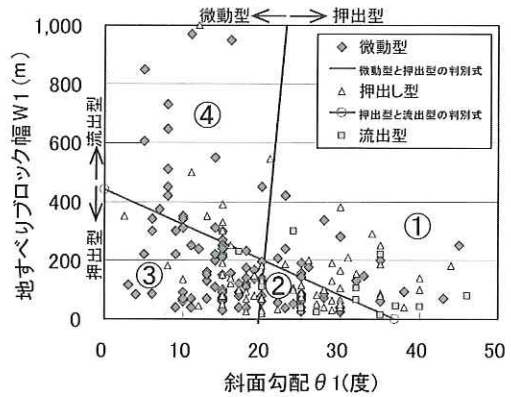


図-7 194事例の $w1$ と $\theta 1$ 関係図

の相関が確認されており、相互の相関が高いと考えられるため、同時に分析に用いると多重共線性の問題⁷⁾が発生し解析精度が低下する恐れがある。そこで、本研究では、 $w1$ と $\theta 1$ を同時に個別の解析変数として利用することはせず、以下の手法を用いることで新たなカテゴリ変数を創出し解析に用いることとする。 $w1$ と $\theta 1$ について分類モデル1での判別分析を行い、微動型と推出型、推出型と流出型を判別する2つの判別式によって分割される4つの象限をカテゴリとする新たな変数 $w1-\theta 1$ を設定した(図-7)。図-7中の①~④の4つのカテゴリは、それぞれ①：「流出型と推出型」、②：「推出型」、③：「微動型と推出型」、④：「微動型と流出型」の事例がそれぞれ集まる傾向にある(つまり流動化傾向で概ね、強、中、弱、例外的)ことを意味する。

4.4 解析結果

今回、表-2の項目について考えられる様々な組合せについて解析を行ったが、その結果、地すべり移動形態との相関比、的中率の高かったものについて以下述べる。

モデル1について、移動土塊の性状、地質構造、 $w1-\theta 1$ を説明変数として数量化Ⅱ類による解析を行った結果を表-7に示す。今回の分析では、地質構造、 $w1-\theta 1$ の2アイテムについてアイテムレンジと偏相関係数の大小が一致せず、本解析の妥当性は確保できなかった。これは用いた事例数が少なく、特に流出型の事例が少なかったためと考えられる。今後、流出型の事例を追加することで解析の妥当性を向上させる必要がある。

モデル2について、同様に数量化Ⅱ類による解析を行った結果を表-8に示す。解析対象を「下方斜面が平坦地」の地すべり事例に限定したケース②では、相関比0.56、判別率83.8%となり、やや良く判別できている⁷⁾結果となった。また、

表-7 モデル1 解析結果

ケース	アイテム	相関比		的中率	事例数
		1軸	2軸		
①	移動土塊の性状 地質構造 w1-θ1	0.96	2.48	60.6%	132
②	移動土塊の性状 地質構造 w1-θ1	1.57	2.14	78.4%	37
③	移動土塊の性状 地質構造 w1-θ1	1.97	0.51	75.0%	40

表-8 モデル2 解析結果

ケース	アイテム	相関比	的中率	事例数
②	移動土塊の性状 地質構造 w1-θ1	0.56	83.8%	37
③	移動土塊の性状 地質構造 w1-θ1	0.37	77.5%	40

モデル1、ケース②解析結果

アイテムレンジ	偏相関係数			
	1軸	2軸	1軸	2軸
移動土塊の性状	2.79	4.09	0.51	0.50
地質構造	1.45	3.11	0.35	0.36
w1-θ1	2.16	1.11	0.72	0.32

1軸、2軸とは前者が地すべり移動形態の微動型と押出型、後者が押出型と流出型の判別式を示している。

モデル2、ケース②解析結果

アイテムレンジ	偏相関係数	
	1軸	2軸
移動土塊の性状	1.05	0.25
地質構造	0.61	0.24
w1-θ1	2.36	0.71

このケース②について、流動化傾向に最も強く寄与している要因は、アイテムレンジ、偏相関係数ともに高い値を示したw1-θ1であることが分かった。なお、アイテムレンジと偏相関係数の大小が一致することから本解析の妥当性は保たれていると考えられる。

これらの結果から、下方の斜面傾斜が平坦な場合においては地すべりブロックの規模 (w1) と地すべりブロックの存在する斜面傾斜 (θ1) によって、地すべりの移動形態が大きな影響を受けていると言える。

なお、モデル1、2のケース①～③それぞれで用いているアイテムの組合せについては、アイテム間でχ²乗検定を行い互いに相関関係が高い (5%有意水準) ものを事前に避け、多重共線性の問題を回避した上で選定した。

5. 判別分析

4. の数量化Ⅱ類による多変量解析 (モデル2) の結果、地すべりの移動形態に大きな影響を与えていると考えられる因子はw1、θ1であることが分かった。そこで、次にw1、θ1による地すべり移動形態 (モデル2：微動型と押出型) の判別分析を行った。

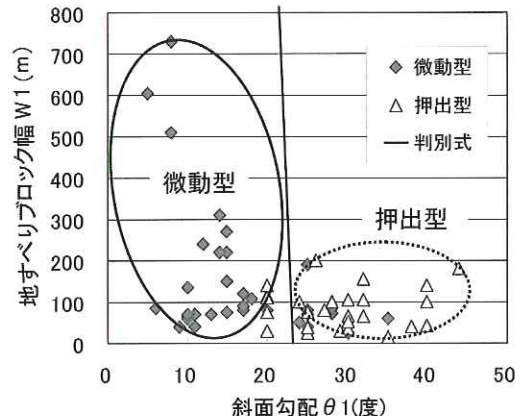
w1、θ1が明示される全ての地すべり事例のうち、ケース②に該当する事例 (移動形態が5,7以外で下方斜面が平坦面である事例) についての判別式は次式のとおりとなる。

$$w1 = -481.4 \theta 1 + 11146$$

本判別分析に用いた全事例のw1とθ1の関係および判別式の直線を図-8に示す。本直線より左

側は微動型、右側は押出型に判別されていることを示す。判別が的中したのは全62事例中47事例 (的中率75.8%) でありやや良く判別できる⁸⁾ という結果を得た。

しかし、判別式および図-8からも分かるように、判別式の直線は垂直に近いものとなっており、地すべりの移動形態の判別にはw1はあまり影響を与えておらず、θ1が支配的である結果となった。また、その閾値は約23°であった。なお、w1については、約200mを超えると地すべりの移動形態は微動型だけとなり、押出型はw1<約200mに限定される特徴は見て取れる。



モデル1、下方斜面が平坦なケース②(62事例)

図-8 w1とθ1の関係

6. まとめ

今回の検討を通して以下のことが言える。

- a) 過去の地すべり事例におけるデータ整理を行った結果、地すべりの発生段階の素因として質的要因が大きく関与していることが示された(表-3)。しかし、河川・沢に面さず下方斜面が平坦な地すべり事例に限定した場合の数量化Ⅱ類による多変量解析の結果、地すべり滑動後の移動形態決定には地形的要因の $w1$ 、 $\theta 1$ が大きく関わっている可能性が高いことが示された。
- b) $w1$ 、 $\theta 1$ が判明しており、下方斜面が平坦で河川・沢に面していない全ての事例について、微動型と押出型(4.におけるモデル2)への判別分析を行った。その結果、判別の中率は75.8%であり、やや良く判別できた。しかし、判別に $w1$ はほとんど寄与しておらず、 $\theta 1$: 約 23° が閾値になっていることが分かった。ただし、押出型地すべりは $w1 < 200m$ のみで見られ、 $w1$ によって規制されている特徴は見取れる。
- c) 地すべりの移動形態に対して、移動土塊の性状、下方斜面の地形、基盤の種類、地質構造(表-4)、地すべり規模、斜面傾斜との間にそれぞれある特定の傾向が認められた。

7. おわりに

本研究を通して得た結論から、今後検討すべき課題について以下述べる。

- 1) モデル1における流出型の実例が非常に少なく、統計解析結果の妥当性を確保することが出来なかった。今後は事例を増やしてモデル1に関して再検討を実施する必要がある。
- 2) 今回、地すべりの移動形態への外力による影響を極力排除するため、下方斜面の状態を平

坦地に限定した事例を使って解析を実施した。しかし、大きく変位する地すべりの発生場条件をより明確にするためには、下方斜面地形も1つの地形要因として解析に組み込む必要がある。また、汎用性や判別精度を高めたいためには、土塊の性状、地質構造等の要因についてもより客観的に表現することが求められる。

- 3) 今回、地すべりに多変量解析を適用した結果、本手法は目的変数に対する寄与度の概要を掴むのには適したが多重共線性の問題等を含むため、要因を全て同列にした評価には適さなかった。今後は、精度向上のため解析手法についても検討する必要がある。

最後になりましたが、本報文をまとめるに当たり、全国の各都道府県の関係各位にはご多忙の中、地すべり事例の収集にご協力いただきました。ここに記してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 網木亮介、藤澤和範、小野田敏、村中亮太：地すべり土塊の到達範囲の事例検討、第36回地すべり学会研究発表会講演集、p429-432、1997年
- 2) 森下 淳、小山内信智、石井靖雄、仲野公章：大変位する地すべりに関する地形的条件の検討、第42回地すべり学会発表講演集、p331-334、2003年
- 3) 水山高久、白杵伸浩、田中善成：移動距離の長い地滑りに関する考察、平成15年度砂防学会研究発表会概要集、p184-185、2003年
- 4) 建設省：地すべり危険箇所点検要項、1998年
- 5) たとえば渡正 亮、中村浩之、板垣 治：土木研究所資料987号 地すべりの実態統計(その1)、p33-34、1975年
- 6) TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES: LANDSLIDES Analysis and Control Special Report 176, P.17, 1978
- 7) 菅 民郎：多変量解析の実践(下)、現代数学社、1993年
- 8) 菅 民郎：多変量解析の実践(上)、現代数学社、1993年

野村康裕*



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
Yasuhiro NOMURA

森下 淳**



国土交通省近畿地方整備局国営明石海峡公園事務所調査設計課長(前 地すべりチーム研究員)
Atsushi MORISHITA

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