2.3 流動化する地すべりの発生箇所・到達範囲の予測に関する研究(1)

研究予算:運営費交付金(一般勘定) 研究期間:平23~平27 担当チーム:雪崩・地すべり研究センター 研究担当者:秋山一弥、桂 真也、丸山清輝、 木村 誇、畠田和弘

【要旨】

地すべり土塊が流動化した場合、被害が通常想定されているものよりも広範囲に及ぶことが予想されるため、行政の関心も高まっている。そこで、地すべりチームとの共同プロジェクトとして、流動化する地すべりの発生箇所と到達範囲の予測に関する研究を平成23年度から5カ年計画で開始した。平成25年度は、到 達距離の長い融雪地すべりの発生箇所の検討を進めるとともに、平成24年3月7日に発生した国川地すべり (新潟県上越市)の運動特性の詳細な解析と国川周辺の地すべり地形の解析、及び平成23年度に実施した地 震波載荷試験結果のさらなる検討を行った。

キーワード:流動化地すべり、発生箇所、到達範囲、発生機構

1.はじめに

地すべり土塊が流動化した場合、被害が通常想定 されているものよりも広範囲に及ぶことが予想され るため、行政の関心も高まっている。しかしながら、 その要因や発生機構に未だ不明な点が多いため、現 行の土砂災害防止法でも区域指定に関して流動化し た地すべりは考慮されていない。

そこで、地すべりチームとの共同プロジェクトと して、流動化する地すべりの発生箇所と到達範囲の 予測に関する研究を平成23年度から5カ年計画で開 始した。本研究の達成目標は、①流動化する地すべ りの発生要因の解明、②流動化する地すべりの発生 箇所と到達範囲の予測手法の提案である。本研究で は、まず過去に発生した地すべり事例から、流動化 した地すべりの事例を誘因(融雪、豪雨、地震)ご とに抽出する。抽出された事例について、発生箇所 の地質・地形的特徴から地すべり土塊の流動の要因 を明らかにする。さらに、これらの地すべりの発生 箇所および地すべり土塊の到達範囲の予測手法を開 発する。最後に、開発された手法を用いて警戒避難 等の対策について検討を行う。

初年度となる平成23年度は、地震が誘因となって 起こる地すべりについて、地すべりの流動性を規定 する要因と流動化する地すべりの発生機構を検討し た。平成24年度は、平成24年3月7日に発生した 融雪地すべりである国川地すべり(新潟県上越市) の事例調査と、融雪地すべりにおける地すべり土塊 移動距離の実態調査を実施した。平成25年度は、到 達距離の長い融雪地すべりの発生箇所の検討を進め るとともに、国川地すべりの運動特性の詳細な解析 と国川周辺の地すべり地形の解析、及び平成23年度 に実施した地震波載荷試験のさらなる検討を行っ た。

2. 研究目的

本研究の目的は、大規模な土砂災害の被害軽減と警 戒及び避難体制の拡充を図るために、流動化する地す べりの発生箇所と到達範囲の予測方法を提案するこ とである。

3. 到達距離の長い融雪地すべりの発生箇所の検討

地すべりの誘因の一つに融雪水の浸透があり、積雪 の多い日本海側を中心に融雪地すべりが多発してい る。地すべりの中には、地すべり土塊が長距離を移動 して、甚大な被害をもたらすものがある。このような 到達距離の長い地すべりの被害を軽減するためには、 そのような地すべりが発生する恐れのある箇所を抽 出する手法を開発する必要がある。そこで、平成 24 年度に実施した融雪地すべりの土塊移動距離の実態 調査に事例を追加した上で、到達距離の長い地すべり の発生箇所を抽出する手法を検討した。



図1 地すべり発生源斜面長と地すべり土塊到達距離の関係 (網掛けは、土砂災害警戒区域の指定基準に相当する範囲を示す) (a)全プロット、(b)原点付近を拡大

3.1 方法

3.1.1 事例の収集

1947~2012 年に日本国内で発生した融雪地すべり 77 事例を収集し、発生日時、発生位置、地すべりの発 生域と地すべり土塊の移送堆積域の範囲、地すべり発 生源斜面長、および地すべり土塊到達距離を、災害関 連緊急地すべり対策事業の報告書資料および国内学 術誌などに掲載された論文から収集・整理した。収集 した 77 事例の地すべり発生源斜面長は 30~3,600 m であり、地すべり土塊到達距離は 0~6,500 m であっ た。

3.1.2 地形的特徴の整理·分類

地すべりの発生箇所の地形的特徴が土塊の到達距 離に与える影響を調べるため、収集した 77 事例につ いて、地すべり土塊の移送堆積域の地形分類、地すべ り発生斜面の滑動履歴、および流入角度を整理・分類 した。

地すべり土塊の移送堆積域の地形分類については、 10m メッシュの数値標高モデル (DEM)を基に計算した 平面曲率と勾配から各メッシュを「谷」、「沖積平野」、

「斜面」のいずれかに分類した上で、各事例の土塊の 移送堆積域に対応するメッシュが主にどの分類に該 当するかを整理した(詳細は既往文献¹¹を参照)。

地すべり発生斜面の滑動履歴については、地すべり 地形分布図(防災科学技術研究所刊行)を用いて、地 すべり発生斜面が地すべり地形内かどうかを確認し た。すなわち、地すべり発生域の全体または一部が、 地すべり地形分布図の「移動体」の範囲に含まれる場 合は「再滑動」と分類し、それ以外は「初生」と分類 した。

流入角度については、上記でケース「谷」に分類さ れた事例について、地すべりの移動方向と移送堆積域 の「谷」が成す角度として求めた。

3.2 結果と考察

3.2.1 移送堆積域の地形分類

図1には、地すべり発生源斜面長と地すべり土塊到 達距離との関係を各ケース別に示した。図中の網掛け 部分は、土砂災害防止法に基づいて指定される土砂災 害警戒区域のうち、地すべり土塊の移動範囲に相当す る部分の指定基準(すなわち、地滑り区域下端から地 滑り地塊の長さに相当する距離(250 m を超える場合 は、250 m)の範囲内の区域)を満たす範囲である。 土砂災害警戒区域は、技術的に予知・予測が可能な土 砂災害が発生するおそれがある土地の区域として指 定されるものであることから、網掛けの範囲を逸脱し ている場合は、地すべり土塊が想定外に長距離移動し たと判断できる。図1から、ケース「沖積平野」およ び「斜面」に区分された 48 事例は、いずれも到達距 離が指定基準内であったことが分かる。一方、ケース

「谷」に区分された 29 事例のうち、14 事例は到達距 離が指定基準以上の地すべりであった。すなわち、到 達距離が指定基準以上となる可能性があるのは、土塊 の移送堆積域が「谷」である場合と言える。これら 14 事例は、地すべり土塊が流動化(場合によっては土石 流化)して渓流を流下し、到達距離が大きくなったも

表1 地すべり発生斜面の滑動履歴						
ケース	初生	再滑動	計			
谷	3 (10%)	26 (90%)	29			
沖積平野	7 (27%)	19 (73%)	26			
斜面	5 (23%)	17 (77%)	22			
計	15 (19%)	62 (81%)	77			



図2 流入角度の頻度分布

のであり、技術的に予知・予測が困難であることから、 土砂災害警戒区域の指定の対象外となっていると理 解できる。降雨によって発生した崩壊が土石流化した 事例は谷地形を呈しているところで発生したという 既往研究^{2)~3)}もあり、本研究の結果は降雨により発生 する地すべりにも適用できる可能性がある。

3.2.2 滑動履歴

移送堆積域の地形分類ごとに、地すべり発生斜面の 滑動履歴を表1に示す。いずれのケースにおいても、 再滑動地すべりが7割以上を占めており、特にケース 「谷」では90%が再滑動地すべりであった。

3.2.3 流入角度

ケース「谷」と分類された事例について、流入角度 の頻度分布を図2に示す。到達距離が指定基準以上で あった事例は、流入角度がいずれも70°以下であっ た。地震によって発生した崩壊が土石流化した事例 は、本研究と同様に流入角度が70°以下であったとい う既往研究⁴⁾もあり、本研究の結果は地震により発生 する地すべりにも適用できる可能性があると言える。

3.2.4 まとめ

以上から、到達距離の長い融雪地すべりが発生する 恐れがあるのは、①移送堆積域が「谷」に分類され、 ②地すべり地形を呈しており、③「谷」への流入角度 が70°未満である斜面と言える。これら3つの条件を すべて満たす斜面が危険であると事前に判定(予測) した場合に、実際の土塊の到達距離(土砂災害警戒区 **表 2** 予測及び実際の到達距離別に整理した事 例数

		予測		
		指定基準	指定基準	⊯
		以上	内	Π
実際	指定基準 以上	13	1	14
	指定基準 内	7	56	63
	計	20	57	77

域の指定基準内か以上か)を正しく予測できるかを77 事例について整理したのが表2である。到達距離が指 定基準以上の地すべり13事例と指定基準内の地すべ り56事例の計69事例(全体の90%)の到達距離を正 しく予測できていることから、上記①~③の条件は融 雪地すべりの到達距離の長短を判別する上で有効で あると言える。

4. 国川地すべりの運動特性

2012年3月7日に新潟県上越市で発生した国川(こ くがわ)地すべりは、平野部の水田上を約250m移動 し、家屋 11 棟を全半壊する被害を及ぼした。平成 24 年度に実施した事例調査により、国川地すべりの規模 と発生状況を整理した上で、既往の地すべり災害事例 に比べて移動距離の長い地すべりであったこと、地す べり土塊の運動が2週間以上継続したことを報告して いる⁵⁾。このような長距離かつ長期間の運動中に土塊 の移動方向や移動速度がどのように変化したかを明 らかにすることは、緊急時における被災想定範囲や被 災時期の予測に役立つ。そこで、ここでは現地調査、 航空レーザー測量データと空中写真画像の解析をも とに国川地すべりの運動特性を分析した。また、地す べり発生時に現地にあった積雪量の推定、運動停止後 の土塊と積雪の堆積構造の観察をもとに、土塊の運動 に対する積雪の影響について考察を加えた。

4.1 方法

4.1.1 地すべりによる地形変化と土塊の運動の解析

2007年8月26日と2012年4月19日に実施された 航空レーザー測量データより地すべり発生前後の数 値標高モデル (DEM)を作成した。2つのDEMをもとに 地すべり発生前後の地形図と標高差分図(図3)を作 成し、地すべりによる地形変化の判読と地形変化量の 計算を行った。



図3 国川地すべりの発生に伴う斜面の地形変化



図4 近傍の観測所における 2012 年 2-3 月の積雪深と 日降水量

2012年3月14日11時と3月16日11時に地すべり 斜面の垂直写真が撮影されており、地すべり土塊の運 動に伴った積雪の変状や立木の移動が判読可能であ った。そこで、ArcGISの画像分類ツール(対話的な教 師付き分類)を用いて、両日のオルソ画像を「積雪」、 「立木」、「地表面」の3領域に分類し、「積雪」と

「立木」の領域をポリゴン化した。全ポリゴンの中から大きさや形状で周囲のポリゴンとの区別が容易なものを29個(A1~A29)選び、14日から16日のポリゴン重心位置の変化から土塊の移動方向と移動量を計測した。この画像解析の結果に、新潟県が3月9日以降に実施した現地観測データ(移動杭 P1, P4~P9および GPS 観測点 G1~G4 の計11箇所)を加えて、地すべりが停止するまでの日平均移動速度の変化を解析した。

4.1.2 積雪量の推定

現地より 1.8 km 離れた上越市立針小学校における 毎日午前9時の積雪深記録と、7.0 km 離れた土木研究 所雪崩・地すべり研究センター構内における10分毎の



図5 3月14日11時~3月16日11時の土塊の移動量

積雪深と降水量の記録を収集し、2012年2-3月の日最 大積雪深と日降水量を計算した(図4)。現地の水田 上には3月16日時点で157 cmの積雪があったことが 確認されている⁶⁾。そこで、2観測所の3月7日から3 月16日までの積雪深低下量より地すべり発生時の積 雪深を逆算した。地すべり土塊の周囲に形成された雪 塊(図3)の積雪量を推定するため、上述した垂直写 真オルソ画像上で雪塊の外周縁を判読し、雪塊の底面 積を計測した。

4.1.3 地すべり土塊と積雪の堆積構造調査

運動停止後の2012年4月16日に土塊側部のトレン チ断面(TR-1:図3)で土塊と積雪の堆積構造を観察 した。また、同年11月16日に土塊末端部を掘削した 工事法面(TR-2:図3)で移動土塊による元地表面の 撹乱状況を観察した。

4.2 結果と考察

4.2.1 国川地すべりの運動特性

地すべり本体は、斜面中腹に形成された遷急線と斜 面脚部の遷緩線から、発生域、移送域、堆積域の3つ に区分された(図 5)。移送域から堆積域にかけて連 続した側方リッジが形成されており(図 5)、この区 間では運動形態の変化がなかったことが示された。

3月14日から3月16日までの期間、移送域(A8~ A18)から堆積域中央部(A19~24)では、斜面の傾斜 方向と同じ北西方向への運動が卓越していた(図5)。 3月10日に家屋に衝突した堆積域末端部(A25~ A29,P1,P7)では移動方向の偏向と減速が認められた ものの(図5)、土塊は堆積域に達した後も斜面の傾 斜方向に直進していたと考えられる。



図6 地すべり土塊各部における日平均移動速度の変化



図7 地すべり運動の最大速度と持続時間との関係 (水野(1989)⁷⁾の第2表に速度と持続時間が 記載された88事例と国川地すべりをプロッ トした。なお、最大速度は時速に換算した値 を示している。)

土塊の移動観測を開始した3月9日から運動が停止 した3月23日までの約14日間、土塊全体で日平均速 度 1.0 m/h 未満の運動が続いていた(図 6)。その一 方で、水田上に滑り出した土塊は3月8日夕刻から3 月9日早朝にかけて10~15 m/hの速度で家屋に接近 していたため⁵、土塊末端部の移動速度は3月9日か ら3月10日の間に大きく減速したと考えられる。国 内の地すべり120事例を分析した既往研究"では、地 すべり運動が最大速度 10-1.5 m/min (1.90 m/h) と持 続時間 32 時間を境界に 2 タイプに区分できるとして いる。この結果と比較すると、国川地すべりは最大15 m/h で移動したにもかかわらず、運動持続時間が約16 日間(384時間)に及んだ点で特徴的な地すべりであ ったことがわかる(図7)。3月10日から3月12日 に発生域(P4)で移動速度が増加したのに並行して、 堆積域(P7)の移動速度も増加していたことから(図 6)、土塊末端部では、高速運動が減速した後も、発



図8 調査範囲

生域での地すべり運動が推力となって緩慢な運動を 続けたと考えられる。

4.2.2 積雪が移動土塊の運動に及ぼした影響

3月7日から3月16日までに21~39 cmの積雪深低 下があったこと(図4)から逆算すると、3月7日時 点の積雪深は178~196 cmとなった。これより、堆積 域と雪塊が形成された範囲(底面積37,100 m²)の積 雪量は66,000~72,700 m³と推定された。一方、雪塊 (底面積9,600 m²)は土塊(堆積域の平均土層厚7.2 m) とほぼ同じ高さまで隆起していたため、雪塊の体積は 69,100 m³と推定され、堆積域と雪塊が形成された範 囲にあった積雪量とほぼ同等になった。土塊側部 (TR-1)では土砂と積雪が混合せずに堆積していた が、土塊は雪塊を除去するとすぐに崩落するほど不安 定な状態であった。土塊末端部(TR-2)では、元地表 面下1m程度の範囲の沖積粘土層が土塊の移動によっ

て削剥されていた。以上より、堆積域にあった積雪は 土塊内部や底面に巻き込まれることなく周囲に押し 出されたことが示された。その結果、移動土塊と積雪 が混合して多量の融雪水が発生することはなかった が、雪塊が形成されたことによって土塊の側方への拡 散が妨げられたと考えられる。

5. 国川地すべり周辺の地すべり地形の解析

平成 24 年度に実施した事例調査でも報告したよう に、2012 年 3 月に発生した国川地すべりの移動土塊の 到達距離は、土砂災害警戒区域の上限である 250 mに 達した⁵⁾。ここでは、国川地すべりのように沖積扇状 地面で停止する地すべり土塊の到達範囲を分析する ため、国川地すべりが発生した高田平野東縁部におい て実態調査を行った。

5.1 方法

図8に調査範囲を示す。調査地は東頸城丘陵の西縁 部、高田平野に接する標高 100~250 m の緩やかな丘



図9 沖積地で末端が停止する地すべり



陵地である。地質は、新第三紀の泥岩層(須川層等)か らなり、その上部に礫岩(第四紀更新世猿橋層)が分布 する。丘陵地と高田平野が接する高田平野東縁部では 丘陵地を流下する河川により沖積地が形成されてい る。調査範囲は地形・地質的にほぼ同等の条件と判断 される。

調査の手順は以下の通りである。

1) 空中写真判読による地すべり地形抽出

空中写真判読により沖積地で移動土塊末端が停止 する地すべりを抽出し、地形図(縮尺1:10,000地形図) に地すべり発生域、移送・堆積域の範囲を整理した。 写真判読には1975年9月撮影の空中写真を使用した。



図11 地すべり斜面長と移動量

2) 現地調査による地形確認

現地調査により地すべり地形の確認を行い、写真判 読結果を修正した。調査結果を図9に示す。

3) 地形量の計測

地すべり斜面長、移動量等を計測した。計測方法を 図 10 に示す。

4) 地すべりタイプの区分

沖積地で停止する地すべりを移動経路の地形の違いから、発生域から谷などの流送区間を経て沖積地に 到達する「流送区間があるタイプ」と、国川地すべり と同様に発生域から直接沖積地に到達する「流送区間 がないタイプ(国川地すべりタイプ)」の2タイプに区 分した(図 10)。

5.2 結果

5.2.1 地すべり地形の斜面規模と土塊の到達範囲

地すべり斜面長と移動量との関係を図 11 に示す。 流送区間のない地すべりの移動量は 250 m 以下であ り、移動量が最大となる地すべりは国川地すべりであ る。発生域の地すべり斜面長と堆積域の移動量は正の 相関関係にある。流送区間のある地すべりの移動量は 約 250~460 m である。

流送区間のある地すべりについて、移動量から流送 区間の距離を除くと、流送区間のない地すべりグルー プの範囲に含まれることがわかる。沖積地での移動量 は地すべり斜面長の約30%である。また、国川地すべ りは他の地すべりと比較して当移動量が大きい傾向 がうかがわれる。

5.2.2 地すべり移動と堆積域の横方向への拡散

国川地すべりの堆積域の形状における特徴の一つ に、横方向の広がりが比較的小さいことがある。移動 量と膨張指数(堆積域の最大幅と発生域の最大幅の 比)との関係を図 12 に示す。流送区間のある地すべり



図12 移動量と膨張指数

も流送区間のない地すべりも、膨張指数と移動量との 関係は認められない。今回の調査では堆積域の範囲を 地すべりブロックの性状を残す範囲としたため、移動 に伴う攪乱を比較的受けていないことが理由に挙げ られる。流送区間のある地すべりのある谷出口では、 土石流・泥流の氾濫域が地すべり土塊周辺に広範囲に 広がっていることを現地で確認している。国川地すべ りは同じ流送区間のない地すべりと比較して膨張指 数が小さい傾向にあることがわかる。

5.2.3 国川地すべりと周辺の地すべりとの比較

移動量は、流送区間のある地すべりの移動量は 280 ~460 m であり、国川地すべりの 250 m を最大とする 流送区間のないタイプと比較して到達範囲は長距離 であった。しかし、流送区間のある地すべりの移動量 から流送区間の距離を除いた移動量は、流送区間のな い地すべりグループとほぼ同等である。沖積地での移 動量では、国川地すべりの 250 m が最大となり他の地 すべりと比較して移動量が大きい傾向がうかがわれ る。

国川地すべりの堆積域の形状は、横方向の広がりが 比較的小さいことを特徴としているが、今回の調査で も他の地すべりと比較して膨張指数が小さい傾向に あることが明らかとなった。

5.3 考察

沖積地で停止する地すべり移動土塊の到達範囲に ついて、発生域からの移動量では、谷地形を経由する 流送区間のある地すべりの移動量が大きくなるが、沖 積地のみでの移動量の比較では当移動量と地すべり 発生域の地すべり斜面長とに相関関係が認められる。

地すべり移動土塊の拡散傾向については移動量と の関係は認められない。これは、著しく攪乱されなけ れば地すべり土塊は比較的拡散しにくいと考えられ

表3 試料の物理試験結果

地すべり名	藤田	北ノ入	葉ノ木平
土粒子の密度(g/cm ³)	2.694	2.614	2.666
自然含水比(%)	80.7	94.1	87.9
礫分(2~75mm)(%)	0.0	0.0	0.0
砂分(0.075~2mm)(%)	18.3	4.9	2.8
シルト分(0.005~0.075mm)(%)	36.9	27.0	24.3
粘土分(0.005mm未満)(%)	44.8	68.1	72.9
最大粒径(mm)	0.850	0.850	0.425
50%粒径(mm)	0.0070	0.0016	0.0016
液性限界(%)	118.6	88.4	97.3
塑性限界(%)	51.1	49.2	40.9
塑性指数	67.5	39.2	56.4
地盤材料分類名	砂質火山灰質 粘性土	火山灰質 粘性土	火山灰質 粘性土

ること、攪乱された土塊は泥流等の別形態で流出して いることが考えられる。

国川地すべりの到達距離は、他の地すべりと比較的 同じ傾向を示しながらも、到達距離が長い傾向、横方 向への広がりが小さい傾向が認められる。これは、地 すべり発生時に沖積地を覆っていた積雪の影響が大 きいことが考えられる。

既報告^{5),8)}の通り、沖積地での積雪は、移動土塊を 囲む雪壁となり、高地下水位の維持、土塊攪乱部の拡 散を抑制する働きをしたと考えられる。

積雪期の地すべりの到達距離は非積雪期の地すべ りよりも到達距離が長くなる可能性を考慮する必要 がある。

また、谷などの地形を経由して移動する地すべりに ついては発生域と堆積域が離れているため、発生域の 予測、移送条件の解明が重要である。

6. 地すべり土塊の地震波載荷試験

平成 23 年度に地震動による斜面内のせん断挙動を 明らかにするため、地震で地すべりを起こした斜面か ら試料を採取し、地震波を載荷した繰り返し三軸試験 を実施した。平成 25 年度は、その結果にさらなる検 討を加えた。

6.1 方法

6.1.1 試料

試料は、平成23年東北地方太平洋沖地震で地すべりが発生した3箇所(栃木県那須烏山市藤田地区、福島県白河市北ノ入地区、同葉ノ木平地区)の各地すべりにおける斜面上部のすべり面付近から採取した攪乱試料である。

表3には、各試料の物理試験結果を示した。試験で は、礫分を取り除くために 425µm のフルイを通過さ せスラリー化させたものを用いた。

6.1.2 供試体の作成



表4 試料の物理試験結果

供試体は、予備圧密した試料を整形して作成した。 二酸化炭素と脱気水により供試体の飽和化を行い、間 隙水圧係数B≧0.95を確認した。せん断試験では、地 すべり発生斜面における地震による土塊内の応力状 態について検討するため、滑動力が作用している状態 での地震波載荷試験を行った。地すべりが発生した斜 面は、地すべりの履歴がない斜面であると推定される ため、採取した試料が不攪乱の状態に近づくように、 過圧密比を2.0に設定した。滑動力が作用している状 態での圧密状態を再現するため、圧密条件は軸応力に 初期せん断応力を加えた異方圧密とした。なお、圧密 時には等方圧密後に初期せん断力を加えて異方圧密 状態にし、せん断試験時は過圧密比2.0の状態にする ため、圧密時の1/2の応力状態にしている。

6.1.3 試験

地震時に地すべり土塊内で生じているせん断挙動 を調べるため、JGS 0541-2000「土の液状化強度特性 を求めるための繰り返し非排水三軸試験」に準拠し て、繰り返し三軸試験機を用いた地震波載荷試験を行 った。表4は、せん断開始時の各応力条件を示したも のである。

載荷した地震波は、試料採取地最寄りの観測地のものを用いた。藤田地区が東北地方太平洋沖地震波 TCGH13 N-S成分(図13)であり、北ノ入と葉ノ木平 がFKS016 N-S成分(図14)である。

6.2 試験結果

図 15~17 には、各地区試料の試験結果における繰 り返し軸差応力、過剰間隙水圧、軸ひずみの各経時変 化を示した。過剰間隙水圧は繰り返し軸差応力の増大 とともに増大し、繰り返し軸差応力が減少した後でも



図17 地震波載荷試験結果(葉ノ木平地区)

最大値付近で推移している。繰り返し軸差応力が最大 となった付近から軸ひずみは急激に増大しており、こ の時点で供試体が破壊された。

図 18~20 は、各地区試料の平均有効応力経路を示 したものである。図中の直線は限界状態線を表してい る。平均有効応力経路は平均有効応力の低下に伴って 限界状態線に近づき接触した後、限界状態線上を沿わ ず、それから離れている。この一連の挙動は、繰り返 し軸差応力がピークに達した後に、供試体の破壊後の ひずみの進行により限界状態線の勾配(ϕ ')が低下 していることを示すものである。なお、破壊前はせん 断面が形成されていないため、 ϕ 'が低下することは ないと考えられる。

図 21~23 には、平均有効応力減少比の経時変化を 示した。平均有効応力減少比とは、初期平均有効応力 から現在の平均有効応力までの減少量を初期平均有 効応力で無次元化した指標であり、1 に近づくほど有



効応力はゼロに近く液状化していることを示す。平均 有効応力減少比は供試体の破壊前から生じており(せん断強さの低下が生じている)、破壊後に急激な増大 を示し、高い状態(せん断強さが低下した状態)が地 震後も続いている。

7.おわりに

流動化する地すべりの発生要因と流動化地すべり の土塊の到達範囲について検討するために、到達距離 の長い融雪地すべりの発生箇所の検討を進めるとと もに、国川地すべりの運動特性の詳細な解析と国川周 辺の地すべり地形の解析、及び平成23年度に実施し た地震波載荷試験のさらなる検討を行った。以下に、 その結果を示す。

(1) 地すべり土塊の到達距離が土砂災害警戒区域



図23 平均有効応力減少比の経時変化(葉ノ木平地区)

の指定基準以上であった融雪地すべり事例は、 いずれも移送堆積域が「谷」に分類され、地す べり地形を呈しており、「谷」への流入角度が 70°未満の斜面で発生していた。

- (2) 到達距離が警戒区域の指定基準以上であった 事例は、地すべり土塊が流動化(場合によって は土石流化)して渓流を流下し、到達距離が大 きくなったものであり、技術的に予知・予測が 困難であることから、土砂災害警戒区域の指定 の対象外となっていると理解できた。
- (3) 2012年に発生した国川地すべりは、土塊が堆 積域に達した後も斜面の傾斜方向に直進し、土 塊末端部では発生域での地すべり運動が推力 となって緩慢な運動を続けた。土塊は最大 15 m/h で移動したにもかかわらず、運動持続時間 が約 16 日間(384 時間)と長期に及んだ点で特 徴的であった。
- (4) 国川地すべりでは、堆積域にあった積雪は土 塊内部や底面に巻き込まれることなく周囲に

押し出された。そのため、移動土塊と積雪が混 合して多量の融雪水が発生することはなかっ たが、雪塊が形成されたことによって土塊の側 方への拡散が妨げられたと考えられた。

- (5) 国川地すべり周辺に分布する沖積扇状地面 で停止した地すべり土塊の到達範囲を解析し たところ、谷などの流送区間の有無で2タイ プに分けられた。流送区間のある地すべりの 移動量は、流送区間のない地すべりと比べて 大きかった。
- (6) 流送区間のない地すべりのうち、国川地すべりは移動量が最大で膨張指数が小さい傾向が認められた。これは、地すべり発生時に沖積地を覆っていた積雪の影響が大きいと考えられた。
- (7) 火山灰質粘性土を用いた地震波載荷試験の 結果、①過剰間隙水圧は繰り返し軸差応力が 減少した後でも最大値付近で推移すること、
 ②繰り返し軸差応力がピークに達した後、供 試体破壊後の軸ひずみの進行により限界状態 線の勾配(φ')が低下すること、③平均有 効応力減少比の増大は供試体の破壊前から生 じており、破壊後は急激に増大し、高い状態 が地震後も続くことが分かった。

今後は、降雨や地震により発生した地すべりについ ても、到達距離の長い地すべりの発生箇所や到達距離 の検討を進める必要がある。また、地震波載荷試験結 果をもとに、地震による地すべり発生機構についてさ らに検討する予定である。

参考文献

1) Kimura, T., Hatada, K., Maruyama, K. and Noro, T. (accepted): A probabilistic approach to predicting

landslide runout based on an inventory of snowmelt-induced landslide disasters in Japan, International Journal of Erosion Control Engineering

- 2) 塚本良則・竹下敬司・下川悦郎・谷口義信・地頭薗隆 (1993):平成5年豪雨による鹿児島県下の土砂災害につ いて、新砂防、Vol.46、No.4、23-35
- 3) 渡邊哲也・海堀正博(1999):崩壊発生場および崩壊土 砂の流動化に与える地形的特性-1988年広島県北西部 土石流災害地における事例-、広島大学総合科学部紀要 IV理系編、第25巻、103-116
- 石川芳治(1999):地震による土石流の発生に係わる地 形、地質条件、砂防学会誌、Vol. 51、No. 5、35-42
- ・島田和弘・木村誇・丸山清輝・野呂智之・中村明(2012)
 :平成24年3月7日新潟県上越市板倉区国川地区で発生し
 た融雪地すべり、日本地すべり学会誌、Vol.49、No.5、
 24-29
- 香月智・桜井正明(2012):上越地すべり災害調査報告、 http://www.jsce.or.jp/branch/kanto/index_topics/2 0120328_jishin_jouetsu.pdf(土木学会関東支部ホー ムページ)
- 7) 水野恵司(1989):速度と持続時間の頻度分布にもとづいたランドスライドの分類、地理学評論、Vol. 62、No. A-4、 320-331
- 8) 畠田和弘・木村誇・丸山清輝・野呂智之(2013):国川地 すべりの発生と運動の特徴、平成25年度砂防学会研究発 表会概要集、B-382~383

Research on prediction of occurrence sites and runout ranges of landslides with high mobility

Budged : Grants for operating expenses General account Research Period : FY2011-2015 Research Team : Erosion and Sediment Control Research Group (Snow Avalanche and Landslide Research Center) Author : Kazuya AKIYAMA Shin'ya KATSURA Kiyoteru MARUYAMA Takashi KIMURA Kazuhiro HATADA

Abstract: Because impacts of landslides with high mobility threaten to reach further than generally expected, the government's concerns for risks of such landslides has grown. Through the concern, 5-years collaborative research with the Landslide Research Team started in 2011. In the last year (FY2013), we analyzed features of location of past snowmelt-induced landslides with a long travel distance. We also conducted detailed analyses of landslide motion of the Kokugawa landslide and landslide deposit topography around the Kokugawa landslide. Furthermore, we examined the results of seismic loading test conducted in FY2011 in more detail.

Key words : landslide with high mobility, occurrence location, runout range, occurrence mechanism