

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：野呂智之、丸山清輝、木村 諒、
中村 明

【要旨】

流動化する地すべりは、一度発生すると被害が広範囲に及ぶ可能性が高いことから行政も高い関心を持っている。そこで、H23 年度から 5 年計画で流動化する地すべりの発生箇所と到達範囲の予測法を提案するために地すべりチームと共同で本研究を開始した。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。H23 年度は①流動化する地すべりの要因分析と②発生誘因毎のメカニズム解明について検討するために、東北地方太平洋沖地震による地すべり地での地形解析と地すべり土塊の地震波载荷試験を実施した。

キーワード：流動化地すべり、発生要因、機構解明

1. はじめに

土砂災害防止法では、流動化する地すべり（地すべり土塊が原形を留めず流体運動をする地すべり）は一般的な地すべりに比べ、その発生や判別方法に不明な点が多いため区域指定の対象外となっている。また、流動化する地すべりは、一度発生すると被害が広範囲に及ぶ可能性が高いことから行政も高い関心を持っている。そこで、H23 年度から 5 年計画で流動化する地すべりの発生箇所と到達範囲の予測法を提案するために地すべりチームと共同で本研究を開始した。

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。そのため、本研究では、融雪、豪雨、地震などの誘因別に、流動化した地すべりの発生箇所の地形、地すべり土塊の土質、地すべり土塊への水の供給状況などを調査し、流動化する地すべりの発生要因を明らかにする。また、流動化する地すべりのメカニズムを分析し、流動化する地すべりの発生箇所の予測手法及び地すべり土塊の到達範囲の予測手法の開発を行い、警戒避難等の減災対策についても検討を行う。H23 年度は①流動化する地すべりの要因分析と②発生誘因毎のメカニズム解明について検討するために、東北地方太平洋沖地震による地すべり地での地形解析と地すべり土塊の地震波载荷試験を実施した。

2. 研究目的

本研究の目的は、激甚化・多様化する自然災害の防止、軽減を図るために、流動化する地すべりの発生箇所と到達範囲を予測する方法を提案することである。

3. 研究方法

流動化する地すべりの要因とメカニズムの解明として、東北地方太平洋沖地震により発生した 3 箇所の地すべり地を取り上げ、地震前後の地形分析と地すべり地で採取した攪乱試料の地震波载荷試験を実施した。なお、地すべり地は、栃木県那須烏山市藤田地区、福島県白河市の北ノ入地区と葉ノ木平地区である。

4. 研究結果

4.1 調査地すべり地の概要¹⁾

4.1.1 栃木県那須烏山市藤田地区

図-1には藤田地区の位置図を、写真-1には斜め写真をそれぞれ示した。地すべりの規模は、幅約 180 m、長さ約 280m、斜面平均勾配約 25 度である。地すべりは、2 つの谷が川岸で合流する地形で発生した。地すべり土塊は河道を閉塞し、谷の出口から対



図-1 藤田地区位置図

(数値地図 1/25,000 地図画像に加筆)

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



写真-1 藤田地区斜め写真

岸までの約 120mの範囲まで達している。なお、当該斜面には、治山堰堤と山腹工が配置されていた。今回の地震による地すべりは、地すべり地形の再滑動及び拡大によるものである。なお、地すべり斜面には中～後期中新世の堆積岩が分布し、前期更新世の堆積岩が覆っている。

4.1.2 福島県白河市北ノ入地区

図-2 は北ノ入地区の位置図、写真-2 は斜め写真をそれぞれ示したものである。地すべりは幅約 40



図-2 北ノ入地区位置図

(数値地図 1/25,000 地図画像に加筆)



写真-2 北ノ入地区斜め写真

m、長さ約 100m、勾配約 15 度の規模で発生した。また、地すべり土塊は東南から南の方向へと方向を変えながら谷筋を約 150m 流下し、平坦地の水田で停止した。なお、地すべり斜面の地質は、前期更新世の火砕流堆積物である。

4.1.3 福島県白河市葉ノ木平地区

図-3 には葉ノ木平地区の位置図を、写真-3 には斜め写真をそれぞれ示した。地すべりの規模は幅約 100m、長さ約 85m である。地すべりは尾根部から発生し、谷地形なりに東北東へ約 190m 移動して対岸の斜面に衝突した。なお、地すべり斜面の地質は、前期更新世の火砕流堆積物である。



図-3 葉ノ木平地区位置図

(数値地図 1/25,000 地図画像に加筆)



写真-3 葉ノ木平地区斜め写真

4.2 調査地すべり地の地形

表-1 は、地形判読に用いた資料を示したものである。地震前の微地形の判読では、空中写真が地震発生から約 35 年前の 1975 年に撮影されたものであり、その後の土地利用等で地形が変化している箇所があるため、空中写真と Googlemap による衛星写真を用いた。一方、地震で発生した地すべり地形は、地震後の DEM データ

により赤色立体地図を作成し判読した。

表-1 地形判読に用いた資料

地すべり名	地震前後	資料
藤田	地震前	空中写真 1/8,000 1975年撮影 Googlemapによる衛星写真
	地震後	斜め空中写真(土研撮影)
北ノ入	地震前	空中写真 1/10,000 1975年撮影 Googlemapによる衛星写真
	地震後	赤色立体図(DEM) オルソ画像
葉ノ木平	地震前	空中写真 1/10,000 1975年撮影 Googlemapによる衛星写真
	地震後	赤色立体図(DEM) オルソ画像

4.2.1 藤田

図-4には、地形判読結果を示した。地震による地すべりは急崖の同一標高を直線状に頭部として発生し、地すべり土塊は斜面途中から地表面を流下した

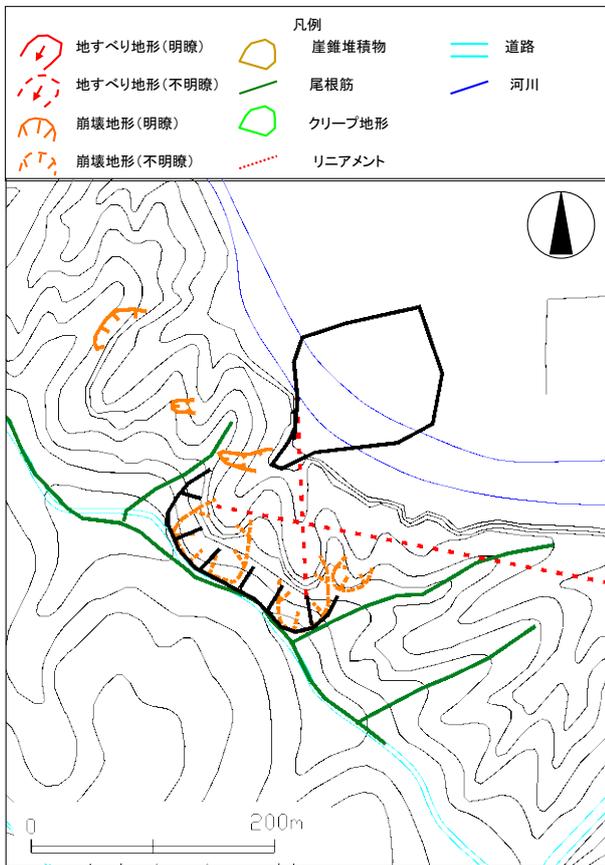


図-4 地形判読結果 (藤田)

後、河川を横断して平地部で広がっている。地すべりを起こした斜面は河川の攻撃斜面に相当し、河川と急崖間の距離が短く、谷斜面が急勾配を呈していた。また、この斜面には、1975年の空中写真にも小規模な崩壊地や崩壊跡地形が認められ、崩壊履歴がある。この他、この斜面内にはリニアメントが通過し、地すべりを起こした斜面上部は遷急線に相当するなど、地すべりを起こしやすい条件が揃っていた。

4.2.2 北ノ入

図-5は、地形判読結果を示したものである。地震による地すべりは、緩やかな谷斜面で発生している。地すべりは斜面の上部と下部で大きく方向を変え、上部では南東方向、下部では南方向に向かっている。現地調査では、斜面中間部の急斜面ですべり面が地表に露出している部分が認められた。これらのことから、上部斜面で地すべりが発生し、移動土塊は斜面中間部から斜面地表面を流下して斜面下の平地に達したものと推定される。

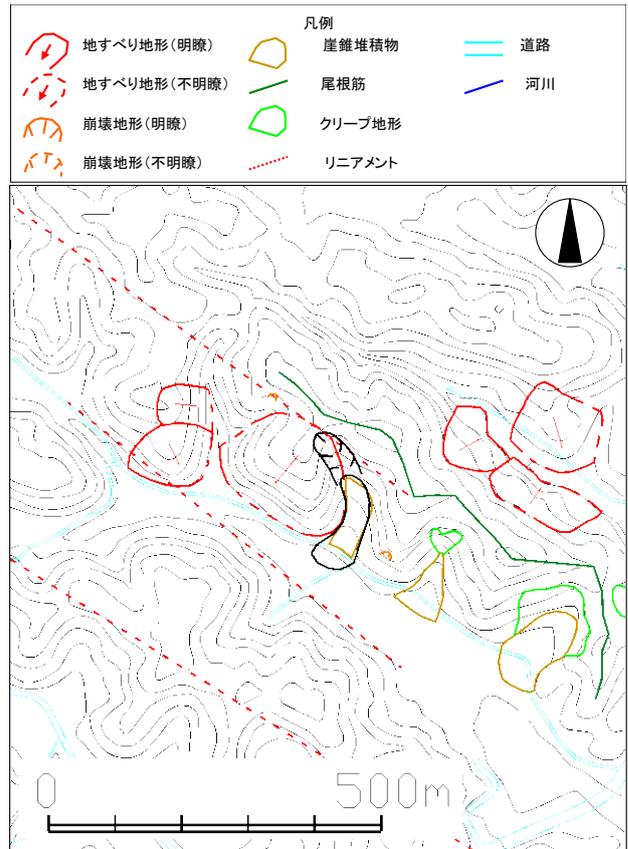


図-5 地形判読結果 (北ノ入)

地すべり発生箇所は西北西向き丘陵地であるが、丘陵地の尾根筋に並行してリニアメントが走っている。今回の地すべりは、凸状斜面(岩盤地すべりの可能性がある)測方谷部の頭部から発生した。凸状斜面測方は谷地形を呈しており、谷には崖錐堆積物が堆積している。地すべりは、リニアメントや岩盤地すべりで地盤が緩んでいた斜面で発生したと推定される。

4.2.3 葉ノ木平

図-6には、地形判読結果を示した。地震による地すべりは、尾根の東側の山頂付近から発生している。地すべり頭部は北東方向を向いているが、地すべり土塊は斜面途中から東方向に向きを変え、地表面を流下し斜面下の平地部に広がった。

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

地すべりを起こした斜面は台地状の尾根地形の一部であり、尾根軸は西北西方向に向いている。また、地すべり斜面には西北西方向のリニアメントが卓越し、このリニアメントの方向は尾根軸の向きと整合している。地すべり発生箇所の北東側は1975年時点の写真では谷地形となっており、谷軸に沿ってリニアメントが通過している。この谷軸方向のリニアメントとは別に、北北東向きのリニアメントが走っており、今回の地すべり斜面の北北西方向に位置する谷付近で交差している。このため、今回の地すべり斜面付近は、リニアメントに挟まれたクサビ状の低地を呈する。地すべりは、近隣にリニアメントが通過し地質的に脆弱であることや、横断方向・縦断方向ともに凸状斜面を呈すること（地震により揺れやすい）により発生したと推定される。

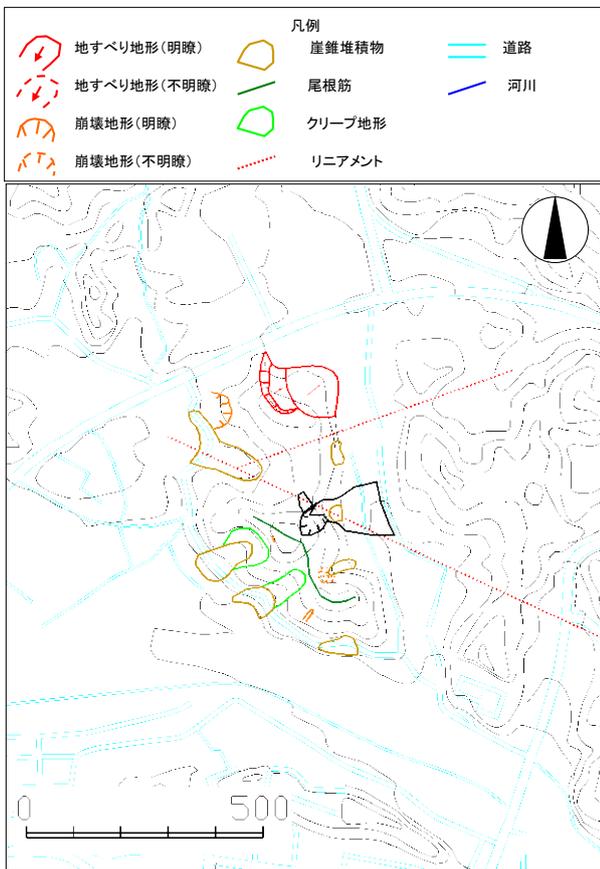


図-6 地形判読結果（葉ノ木平）

4.2.4 各地すべりの土砂移動形態に関する共通点

藤田では、地震による地すべりは急崖の同一標高を直線状に頭部として滑落し、斜面途中から地表面を流下した後、河川を横断して平地部で広がった。また、北ノ入では、上部斜面で地すべりが発生し、移動土塊は斜面中間部から斜面地表を流下して斜面下の平地に達した。この他、葉の木平では、地震による地すべ

りは尾根の東側の山頂付近から発生し、斜面途中から東方向に向きを変え、地表面を流下し斜面下の平地部に広がった。これらのことから、3箇所の地すべりでの土砂移動に関する共通点として、斜面の上部で地すべりが発生し、地すべり土塊が斜面の中間部から斜面地表面を流動化して、斜面下の平地部で堆積したことがある。

図-7は、各地すべりに共通する土砂移動形態を図で示したものである。各地すべりは上部斜面で発生し、その後地表面を流下した後に、斜面下の平坦部で堆積した。これらのことから、地すべり斜面は地すべり発生区、流下区、堆積区に分けられる。また、地すべり土塊が流下区で移動速度を増し流動化したため、堆積区では地すべり土塊の到達範囲が大きくなったと考えられる。

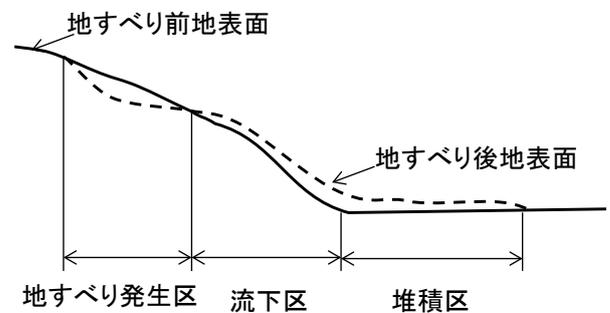


図-7 各地すべりに共通する土砂移動形態

4.3 地すべり土塊の地震波載荷試験

地震により流動化する地すべりのメカニズムを解明するために、地すべり土塊の地震波載荷試験を三軸試験機により実施した。

4.3.1 試料

表-2は、試料の物理試験結果を示したものである。試料は、滑落崖近くの推定すべり面付近で攪乱されたものを採取した。試料の地盤材料分類名は、藤田が砂質火山灰質粘性土、北ノ入と葉ノ木平が火山灰質粘性土である。なお、試験では試料に蒸留水を加えた後、礫分を取り除くために425 μ mのフルイを通過させスラリー化したものを用いた。

4.3.2 供試体の作成方法

供試体は、予備圧密した試料を整形して作成している。また、供試体の飽和化は二酸化炭素と脱気水により行い、間隙水圧係数 $B \geq 0.95$ 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に、滑動力が作用している状態での地震波載荷試験を実施した。また、地震で地すべりが発生した斜面は、地すべりの履歴がな

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

表-2 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

い斜面であると推定されることから、採取した試料を不攪乱の状態に近づけるため過圧密比を2.0として試験を実施することにした。そこで、圧密条件は、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、軸応力に初期せん断応力を加えた異方圧密とした。また、圧密で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。

4.3.3 試験方法

地震時の地すべり土塊内で生じているせん断挙動を調べるために、繰り返し三軸試験機により地震波载荷試験を行った。なお、せん断試験は、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」に準拠して行った。

表-3、4には、供試体圧密時及びせん断時の各応力条件を示した。

表-3 供試体圧密時の応力条件

地すべり名	鉛直応力 σ_{vc} (kPa)	水平応力 σ_{hc} (kPa)	圧密時平均有効主応力 ($\sigma_{vc}+2\sigma_{hc}$)/3 (kPa)	圧密時主応力比 σ_{vc}/σ_{hc}
藤田	300	150	200	2.0
北ノ入	300	150	200	2.0
葉ノ木平	332	134	200	2.5

表-4 せん断時の応力条件

地すべり名	鉛直応力 σ_{vc} (kPa)	水平応力 σ_{hc} (kPa)	圧密時平均有効主応力 ($\sigma_{vc}+2\sigma_{hc}$)/3 (kPa)	圧密時主応力比 σ_{vc}/σ_{hc}
藤田	150	75	100	2.0
北ノ入	150	75	100	2.0
葉ノ木平	166	67	100	2.5

図-8、9には試験に用いた地震波をそれぞれ示した。図-8は藤田地区の試料の試験に用いた東北地方太平洋沖地震波 TCGH13 N-S成分であり、図-9は北ノ入と葉ノ木平の試料の試験に用いたFKS016 N-S成分である。なお、地震波は、試料採取地すべりに近い観測地のものを用いた。

4.3.4 試験結果

図-10~12は、各地区試料における試験結果の繰り返し軸差応力、過剰間隙水圧比、軸歪みの各経時変化

をそれぞれ示したものである。過剰間隙水圧比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も最大値(最大値0.3~0.7)で推移している。軸ひずみは繰り返し軸差応力の最大値出現時付近で急激に増大し、この時点で供試体が破壊したことを示している。なお、繰り返し軸差応力が最大値を示した後に減少したのは、軸歪みが急激に増大

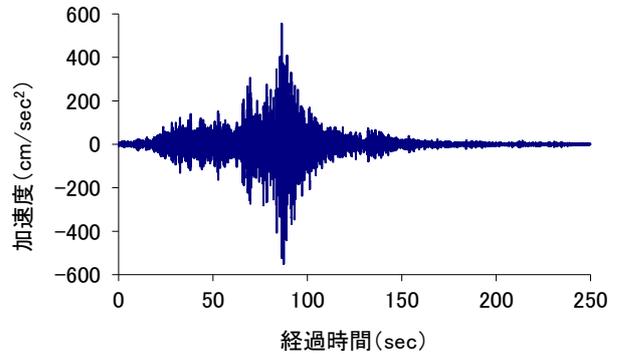


図-8 TCGH13 N-S成分

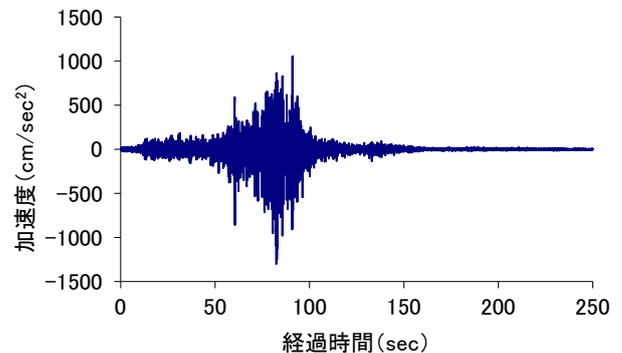


図-9 FKS016 N-S成分

した時点と一致することから供試体の破壊によるものと考えられる。また、繰り返し軸差応力(せん断強度)は、最大値の270~160 kN/m²から供試体破壊後の20~90 kN/m²程度まで低下し、せん断強度は地震波による過剰間隙水圧の増大に伴う平均有効応力の低下により最大値の10~40%程度になっている。

図-13~15には、各地区試料における試験結果を平均有効応力と繰り返し軸差応力の関係で示した。なお、図中の直線は限界状態線を示す。繰り返し軸差応力は平均有効応力の低下にともない限界状態線に近づき、その後限界状態線に接触した後、限界状態線から離れながら低下している。これらのことから、繰り返し軸差応力(せん断強度)はピーク強度を示した後、供試体の破壊によりせん断強度が急激に低下していることが分かる。

以上のことから、今回の地震により地すべりが発生した藤田、北ノ入、葉ノ木平地区では、地すべり土塊の地震波载荷試験により、過剰間隙水圧比の最大値が

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

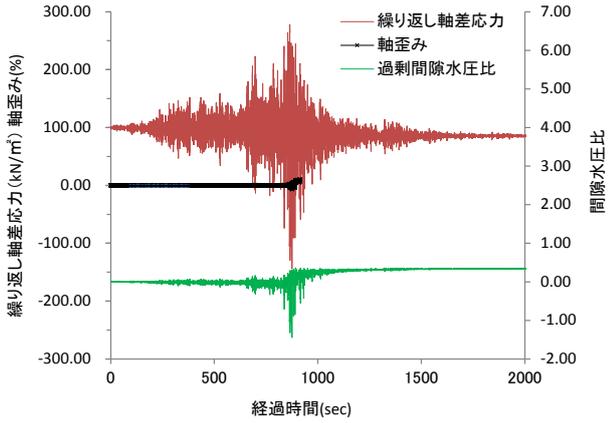


図-10 地震波载荷試験結果（藤田地区）

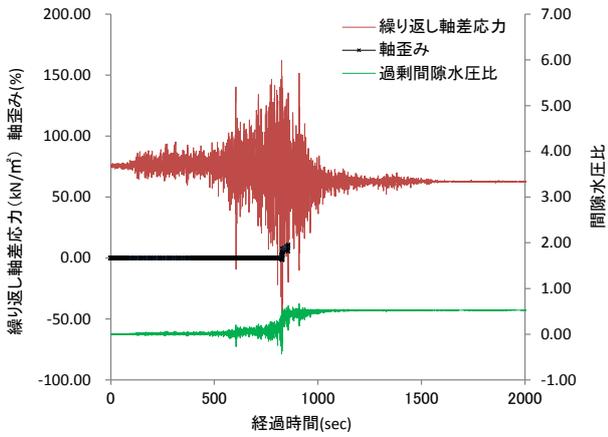


図-11 地震波载荷試験結果（北ノ入地区）

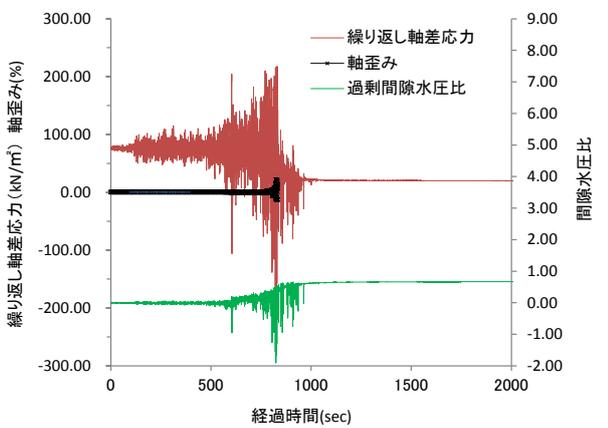


図-12 地震波载荷試験結果（葉ノ木平地区）

繰り返し軸差応力の最大値発生以後に出現すること、過剰間隙水圧比の最大値は繰り返し軸差応力が消滅した後も最大値の状態推移すること、せん断強度が地震波による過剰間隙水圧の増大により最大値の10～40%程度まで低下することなどがそれぞれ確認された。また、地すべりの発生と地すべり土塊の到達範囲が長く流動化した原因としては、地震により滑動力が増大したと斜面内の過剰間隙水圧の増大により土塊のせん断強さが低下したことが考えられる。

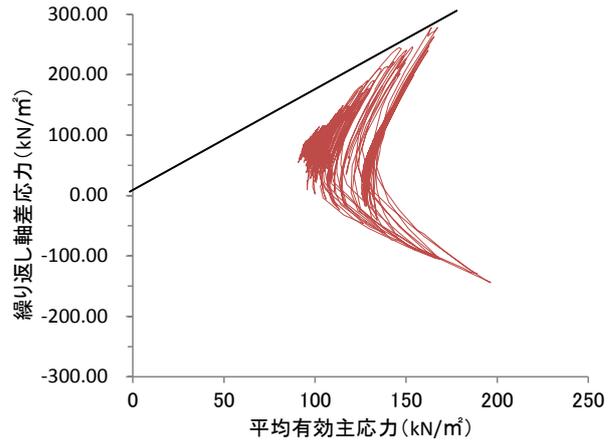


図-13 平均有効応力と繰り返し軸差応力との関係（藤田地区）

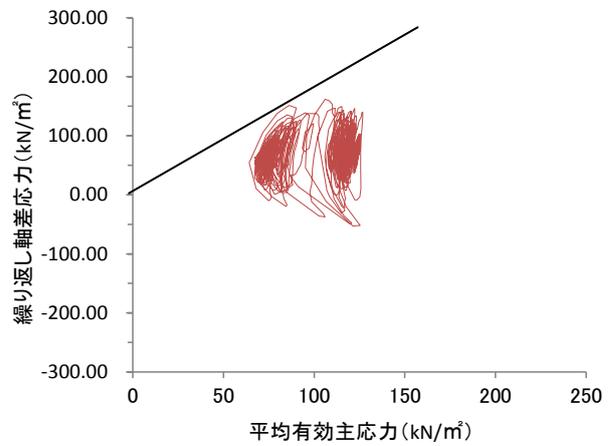


図-14 平均有効応力と繰り返し軸差応力との関係（北ノ入地区）

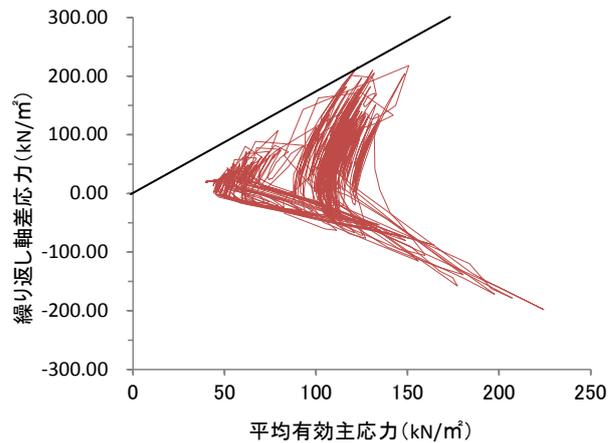


図-15 平均有効応力と繰り返し軸差応力との関係（葉ノ木平地区）

5. まとめ

流動化する地すべりの要因とそのメカニズムについて、東北地方太平洋沖地震により発生した栃木県那須烏山市藤田地区、福島県白河市の北ノ入地区と葉ノ木平地区の3箇所の地すべり地を取り上げ、地震前後の

地形分析と地すべり地で採取した攪乱試料の地震波載荷試験を実施した。以下に、その結果を示す。

- (1) 3箇所地すべりは上部斜面で発生し、その後地表面を流下した後に、斜面下の平坦部で堆積した。これらのことから、地すべり斜面は地すべり発生区、流下区、堆積区に分けられる。また、地すべり土塊が流下区で移動速度を増し流動化したため、堆積区では地すべり土塊の到達範囲が大きくなったと考えられる。
- (2) 地すべり土塊の地震波載荷試験により、過剰間隙水圧比の最大値が繰り返し軸差応力の最大値発生以後に出現すること、過剰間隙水圧比の最大値は繰り返し軸差応力が消滅した後も最大値の状態に推移すること、せん断強度が地震波による過剰間隙水圧の増大により最大値の10～40%程度まで低下することなどがそれぞれ確認された。また、地すべりの発生と地すべり土塊の到達範囲が長く流動化した原因としては、地震により滑動力が増大したと斜面内の過剰間隙水圧の増大により土塊のせん断強さが低下したことが考えられる。

6. 今後の課題

今後は、豪雨、融雪により流動化する地すべりのメカニズムの分析と流動化する地すべりの発生箇所の予測手法の開発を行う計画である。

参考文献

- 1) 笹原克夫、内村太郎、中井真司、向井信之、山部哲、柳崎 剛：東北地方太平洋沖地震による栃木県の斜面崩壊について、砂防学会誌、Vol. 64、No. 2、pp. 31-38、2011

RESEARCH ON RISK ASSESSEMENT FOR RE-ACTIVATING LANDSLIDE TRIGGERED BY EARTHQUAKE

Budged : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2008-2010

Research Team : Erosion and Sediment Control
Research Group (Snow Avalanche
and Landslide Research Center)

Author : Tomoyuki NORO

Kiyoteru MARUYAMA

HASIBATEER

Akira NAKAMURA

Abstract : A serious of strong reverse-fault earthquakes, such as Chuetsu earthquake, successively struck Japan, caused serious damage to the involved mountainous areas. To propose a risk evaluation for landslides triggered by earthquake, we started this 3-year research project from 2008.

The results of the project are:

- (1) In the cases of M7 reverse-fault earthquakes, the landslide risk evaluating area should be setting on the hanging-wall, an area of 15 km from the source fault and 15 km extension along the strike of the source fault.
- (2) We proposed a risk evaluation method for pre-existing landslide topographies, by using logistic regression model based on causative factors of surface roughness and marginal erosion ratio of the landslide topographies.
- (3) Based on the logistic regression model, we conducted the susceptibility map of pre-existing landslides topographies around the area of the Jyoetsu region, Niigata Prefecture.

Key words : earthquake, landslide, risk assessment