

地震時高速再活動型地すべりの発生・運動機構と被害軽減 —中越地震と平成26年長野県北部地震による地すべりの比較研究—

研究代表者氏名：王功輝¹⁾

研究分担者氏名：渡部直喜²⁾，若井明彦³⁾，王純祥²⁾，古谷元⁴⁾，土井一生¹⁾

1) 京都大学防災研究所，2) 新潟大学災害・復興科学研究所，

3) 群馬大学理工学研究院，4) 富山県立大学工学部

研究要旨

北部フォッサマグナ地域において、平成16年新潟県中越地震と平成26年長野県北部地震により再活動型地すべりが発生したが、発生形態に大きな差異が生じていた。本研究では、これらの地すべりに対して、現地調査、地震観測、室内実験および数値解析などを行い、地震時高速再活動型地すべりの発生・運動機構を調べた。

A. 研究目的

近年、北部フォッサマグナ地域では規模の大きな内陸地震が発生している。平成16年新潟県中越地震では、1000箇所以上の斜面崩壊や大規模地すべりが発生した。そのうち東竹沢や寺野などをはじめとする複数の大規模な高速再活動型地すべりが発生し、河道を閉塞して大規模な天然ダムを形成した。一方、平成26年長野県北部地震（長野県神城断層地震）では、長野県北部において土石流、がけ崩れ、および地すべりなどの土砂災害が発生したものの、中越地震に比べて数が少なく、全般的に規模も小さかった。そのうちやや規模の大きい再活動地すべりが2箇所（土砂量160万 m^3 前後の八方岩，土砂量102万 m^3 前後のカクレ沢）発生したが、何れも移動距離が小さく、大きな災害に至らなかった。本研究では、これらの地すべりに対して、現地調査、室内実験および数値解析などを行い、北部フォッサマグナ地域西縁と東縁における地震時に再活動する地すべり土塊の運動機構の相違の原因を究明する。

B. 研究方法

本研究は、新潟県長岡市（旧山古志村）の東竹沢地区と長野県小谷村中谷東地区において発生地すべりを対象として、以下の方法で研究を行った。

- ① 地質・地形および気象情報を収集し、分析を行うとともに、現地調査、計測および地震観測を実施し、地すべり地の周辺地形、地質構造および地震前の降雨条件を調べた。
- ② 地すべりのすべり面および移動土塊の堆積特徴を調査し、地すべり面附近から土試料を採取し、地震時地すべり再現試験機を用いて、異なる載荷条件下で、土質実験を行い、そのせん断特徴を調べる。
- ③ 繰返し載荷モデル（UW軟化モデル）（Wakai et al., 2010）による動的弾塑性FEMを拡張し、岩盤（軟岩）等の一部が劣化することに伴い強度が徐々に低下する様（土のひずみ軟化特性）を表現できる2次元モデルを構築し、八方岩地すべりに対して動的弾塑性FEM解析を実施する。

C. 研究結果

【地質特徴】平成26年長野県北部地震時の八方岩地すべり（最大延長500m、幅500m）は、小谷村中土中谷西地区の八方岩地すべり防止区域において発生した流れ盤型の地すべりである。この地区の基岩は後期中新世前沢層の塊状砂質泥岩を主体とし、一部に中粒～粗粒砂岩層を伴う。カクレ沢地すべり（延長500m、幅200m）は、八

方岩地すべり防止区域の対岸、小谷村中土中谷東地区の市場1号地すべり防止区域において発生した受け盤型の地すべりである。地すべり移動土塊の上部の150m程度がブロックとして残存し、残りが流動化した。この地区の基岩は鮮新世雨中層の塊状砂質泥岩および泥質砂岩を主体とし、一部に中粒砂岩を伴う。新潟県中越地震時の東竹沢地すべりは、古い地すべり土塊の一部が再滑動し、高速で移動した流れ盤型の地すべりである。シルト岩と細粒砂岩との境界付近をすべり面として、上位の砂岩が滑動した。

【先行降雨】震源地域附近における地震発生直前の降雨状況を調べたところ、両地震においては大きな差があることが分かった。新潟県中越地震発生直前においては、台風23号が本州に上陸した影響により10月20日に日降水量で約100mmに達していた。これに対して平成26年長野北部地震発生直前においては、大きな降雨がなかった。

【土質試験】東竹沢地すべりでは、すべり面付近で採取した試料に対して地震時地すべり再現試験機による飽和非排水せん断実験が実施されている(佐々他, 2007)。この実験では、実地震波形載荷と繰り返し載荷が検討されており、前者はK-NET小千谷観測点(NIG019)での記録を用いられている。その結果、何れのケースにおいてもせん断破壊に至るまでのせん断挙動が異なるものの、せん断破壊が発生した後に、高い過剰間隙水圧が発生し、せん断変位の増加に伴ってせん断抵抗が大きく低下した。定常状態になった時に発揮された見かけの摩擦角度は約3度であり、極めて小さいことが分かった。

カクレ沢地すべり地の源頭部と移動土塊の中腹部および八方岩地すべり地の源頭部から採取した試料(それぞれ試料S1、S2、およびS3と呼ぶ)に対する飽和非排水静的載荷と繰り返し載荷せん断実験を実施した。これらの結果より何れのケースにおいても、せん断破壊が発生しても、せん断に伴って発生した過剰間隙水圧が低く、大きなせん断抵抗の低下が無かったことが分かった。

【数値解析】八方岩地すべりには幾つかの移動ブロックがあるが、その中で一番大きいもの(幅

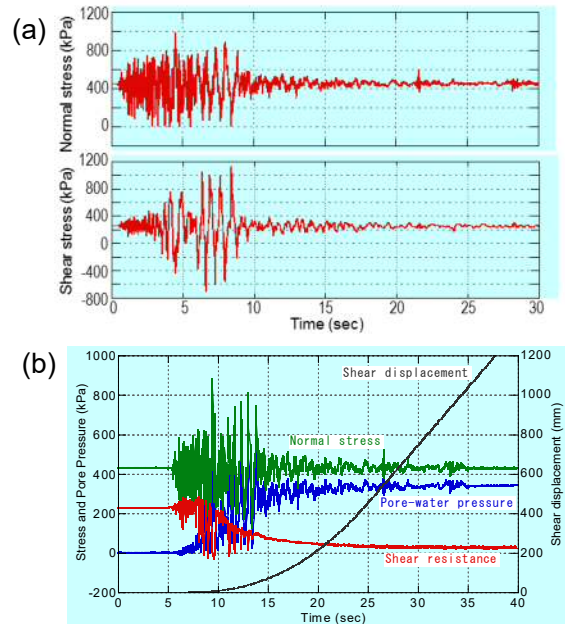


図-1 東竹沢地すべり地から採取した試料に対する実地震波を用いた地震時地すべり再現試験(佐々他, 2007)。(a) 実地震波により推測したすべり面における地震載荷、(b) 再現試験結果

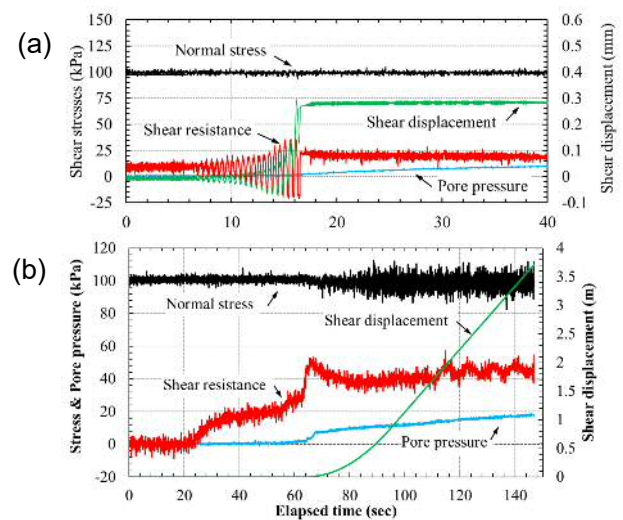


図-2 試料S1とS3に対するせん断実験結果。(a) 繰り返し載荷せん断。(b) 静的載荷せん断。

160m, 高さ30m, すべり面深さ10m)を対象とした。このブロックは、概略的に上層部から粘性土層、風化泥岩層、および基岩層から構成されており、すべり面付近の地質は主としてシルト質粘性土である。図-3に有限要素分割図を示す。想定すべり面は、地質調査の結果に基づいた土質区分より弱風化泥岩層、風化泥岩層と強風化泥岩層の境界部に設定した。斜面左右には底部と同じ幅の緩

衝領域を設けた。解析で使用する各種材料パラメータは、現地で採取した試料に対する各種物理試験結果から得られたものとした。地震動の繰返し载荷により強度が徐々に低下する挙動を再現するパラメータは、既往の研究で解析対象地区の地質と類似した地盤を対象に実施された繰返し一面せん断試験の結果を参考にして設定した。解析時の入力地震波形は、K-net（白馬）にて観測されたEW波とNS波の合成波（図-4）を使用し、解析断面方向に投影したものを有限要素分割図の下端全体に一様に入力した。

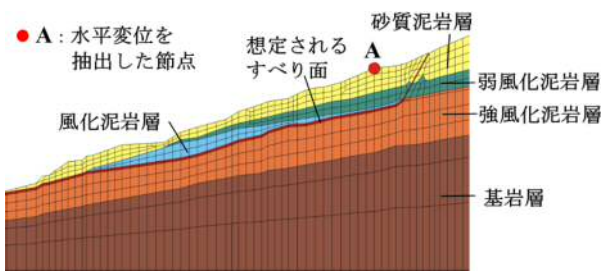


図-3 有限要素分割図

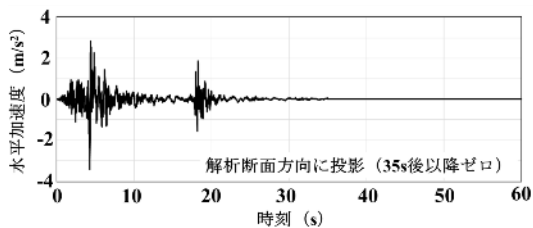


図-4 入力地震波形

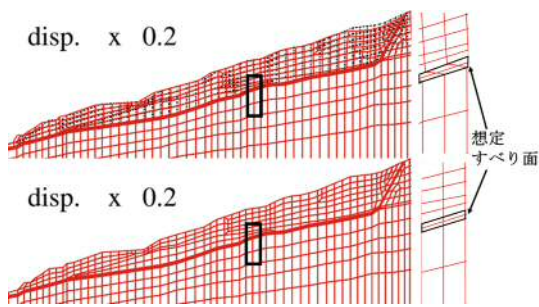


図-5 解析終了時の変形図と拡大図（強調倍率 0.2 倍）
（上：すべり面の強度低下を考慮 下：非考慮）

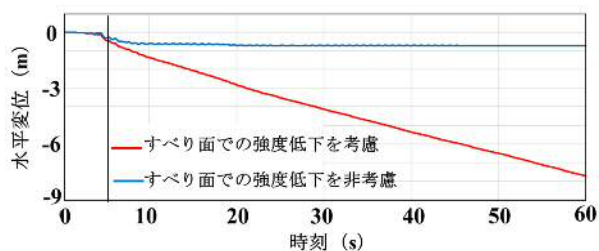


図-6 斜面上部（A点）における水平変位の時刻歴

図-5 は、地震時における土塊の挙動についてシミュレートした結果の一部である。この図は解析終了時の変形状況と図中の黒枠で示した範囲の拡大図を示しているが、上側はすべり面の強度低下を考慮したもの、下側はこの強度低下を考慮していないものになる（強調倍率 0.2 倍）。図中の上側では想定すべり面が大きく変形し、同下側では想定すべり面が大きく変形していない様子が確認できた。つまり、すべり面の強度低下を考慮したケースにおいて、上層の地盤が追従する形で斜面下部へ移動することが分かった。

図-6 に斜面上部（図-3 A 点）での水平変位の時刻歴を示す。この図より A 点では、地震動の加速度が最大値を迎える 5 秒付近で水平変位が増加を始め、その後も水平変位が増加し続ける結果となった。図-5、6 の結果より、すべり面で強度低下（ひずみ軟化）が発生したことで、応力がすべり面で集中的に発生し、上部の土塊を支えきれなくなって地すべりが発生したと推察される。

D. 考察

東竹沢地すべりは、シルト層とその上にある砂層の境界をすべり面として、発生したものである。地震前の降雨により、難透水層であるシルト層の上にある砂層が飽和されたと考えられる。地震時の地震载荷によるせん断応力の増加および飽和砂層における過剰間隙水圧の上昇により、地すべりが発生し、地すべり変位の増大に伴って過剰間隙水圧がさらに大きくなり、すべり面液状化が発生して高速地すべりが生じる。

一方、八方岩地すべりおよびカクレ沢地すべりは、強風化泥岩層において発生したものであり、せん断破壊後のすべり面せん断強度は飽和状態でも著しい低下がなかった。したがって、強い地震動によってせん断破壊が生じるが、地震終了後斜面下方へのせん断応力がせん断抵抗より小さいため、地すべりの滑動が停止する。

以上の結果から、再活動型地すべりにおいて高速地すべりの発生予測は、種々の境界条件を慎重に検討しなければならないが、該当斜面の地下構造と地下水賦存状況を調べ、採取したサンプルに対して地震時地すべり再現試験により可能である。

UW軟化モデルによる解析結果で示すように、

想定すべり面において、地震動の繰返し载荷によるひずみ軟化を考慮しない場合の解析を行ったところ、図-5 下、および図-6 より地震動の最大加速度が到来した時点で斜面下部方向へ 0.7m 移動したが、その後水平変位がほとんど変化せず、すべり面上の土塊が長距離移動しないことが示された。この結果より、すべり面でのひずみ軟化による強度低下を考慮しない場合では、すべり面上の土塊の滑動力に対する抵抗力が保持されて、変形が抑制されたと考えられる。

E. 結論

地震による再滑動の発生・運動機構を解明するために、東竹沢やカクレ沢、および八方岩などの地すべりを事例として本研究を展開した結果、以下の知見が得られた。

- ・東竹沢地すべりと八方岩地すべりは、流れ盤斜面において発生したものであり、すべり面は岩盤の層理面に沿って形成した。それに対して、カクレ沢地すべりは受け盤型のものである。
- ・東竹沢地すべりは、シルト層とその上にある砂層の境界をすべり面として、発生したものである。飽和砂層においてすべり面液状化現象が発生したことにより、地すべり土塊が高速で移動したと推察される。
- ・八方岩地すべりのすべり面附近の土層およびカクレ沢地すべり移動土塊の飽和非排水せん断強度は、せん断破壊後にも大きな低下はなかったため、何れに地すべりにおいても、強い地震動によって、せん断破壊が生じるが、地震終了後地すべりの滑動が停止すると考えられる。この点が新潟県中越地震時のケース（東竹沢）との違いである。
- ・UW軟化モデルを導入した2次元FEM解析法を開発してシミュレーションを実施した結果、解析対象とした八方岩地すべり地区では、すべり面と想定される箇所ではひずみ軟化による強度低下が発生したことにより、上部土塊を支えきれなくなったことで地すべりが発生した可能性があることが示唆された。ひずみ軟化のモデル化に必要なパラメータをより適切に決定するための試験等を今後実施することが望まれる。
- ・再活動型地すべりにおいて高速地すべりの発生

予測は、種々の境界条件を慎重に検討しなければならないが、該当斜面の地下構造と地下水賦存状況を調べることに、採取したサンプルの地震時地すべり再現試験により可能である。

F. 研究発表

1. 論文発表

G. Wang, G. Furuya, F. Zhang, I. Doi, N. Waranabe, A. Wakai, H. Marui (2016) : Layered internal structure and breaching risk assessment of the Higashi-Takezawa landslide dam in Niigata, Japan, *Geomorphology* (受理) .

2. 学会発表

大淵、佐竹、若井他：平成26年長野県北部地震により山地で発生した地すべりの機構解析。平成28年度全国大会第71回年次学術講演会講演集，2p，土木学会，平成28年9月，仙台

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得
2. 実用新案登録
3. その他
いずれもなし