

地すべりダムの形成・破壊機構と決壊危険度評価法に関する研究

研究代表者 古谷 元¹⁾

研究分担者 王 功輝²⁾, 若井明彦³⁾, 渡部直喜⁴⁾, 王 純祥⁴⁾, 丸井英明⁴⁾

1) 富山県立大学工学部, 2) 京都大学防災研究所, 3) 群馬大学理工学研究院,
4) 新潟大学災害・復興科学研究所

研究要旨

本研究では、防災・減災面で社会問題化している地すべりダムの形成・破壊機構と決壊危険度評価法について、東竹沢地すべりを事例として物理探査、数値解析、および海外事例との対比より実施した。その結果、地すべりダム堤体の調査に表面波探査と微動アレイ探査の併用が有用であること、土の軟化ひずみ特性を考慮した FEM 解析よりダムの形成過程が再現できたこと、そして Ermini and Casagli (2003) の決壊危険度評価より東竹沢地すべりのダム堤体は安定ではないことを示した。

A. 研究目的

河川沿いで発生する地すべり、斜面崩壊は時として地すべりダムを形成・決壊し、発生箇所のみならず下流域へ甚大な被害が生じることがある。本研究では、地震時に発生した地すべりダムを対象として理学・工学分野を学際的に融合した観点より、このダムの形成機構の解明とその後起こりうる 2 次災害に対する危険度評価法の検討を目的とした。

B. 研究方法

本研究の試験地は、中越地震時に発生した東竹沢地すべり地（図 1）とし、研究は以下の 3 つの方法で実施した。

地すべりダム発生時に必要となる堤体構造の把握を詳細かつ迅速に実施する手法の確立とその構造解明のために、併用物理探査を実施した。具体的には、地すべり土塊の堆積域～ダム堤体において測点間隔が 2m の横断測線および縦断測線（計 5 測線）を設定し、高精度表面波探査（センサ：4.5Hz）と、これら測線上の 4 地点で微動アレイ探査（センサ：2Hz、三重正三角形配置）を展開し、土塊内部の S 波速度構造を推定した（以後、併用物理探査と称する）。

鵜飼、若井 (2004) の繰返し載荷モデル（UW 軟化モデル）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 次元モデルを新たに構築した（同 UW 軟化モデルによる解析と称する）。このモデルを用いて本地すべりに対して動的弾塑性 FEM 解析を実施した。

現地での調査結果を踏まえて、Ermini and Casagli (2003) が提案した地すべりダムの決壊危険度を予測する応急手法を本地すべりに適用し、地すべりダムの決壊危険度（同危険度評価と称する）の評価を実施した。



図1 東竹沢地すべりの平面図、物理探査測線、および微動アレイ観測点

C. 研究結果

【①併用物理探査】本地すべりは、その地質が砂質

シルト岩と細粒砂岩の互層で構成され、砂岩の固結度が低い。基岩の走向傾斜はN15° E20° Wとされている。すべり面の角度は15°程度である。すべりは概ね傾斜方向に規制されており（層すべり）、すべり土塊の末端部が芋川対岸に乗り上げたことが分かっている。

図2は、図1に示した測線のうち、地すべり縦断方向の測線①における高精度表面波探査結果である。この図よりダム堤体のS波速度(Vs)分布は全体的に低いものの、深層へ向かうにつれて、第1層(150m/s以下)、第2層(150-250m/s)、第3層(250m/s以上)の三層構造が明瞭に認められる。特に第2層と第3層の境界が芋川側へ向かって下向きに約8°傾斜している。このような傾向は、他の地すべり縦断方向測線でも確認された。

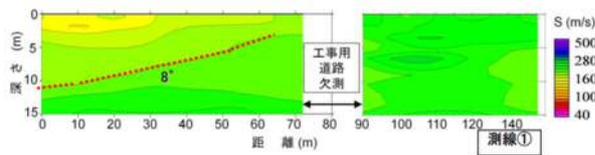


図2 測線①における高精度表面波探査結果

図3は、測線①付近に設定された微動アレイ探査測点A、およびBにおける結果である。図中の解析精度が落ちる箇所と記した部分は、一部のセンサーで微動を捉えられず上位に比べて精度がやや悪くなった箇所である。この図よりステップ状のS波速度の増加(200~250m/s→300m/s程度)が測点Aでは深度17m、測点Bでは深度12m付近であり、比高差は5mである。両測点の距離は約30m離れているので、この比高差を考慮するとステップ状にS波速度が増加する箇所を繋いだ傾斜は約9°である。この値は図2で示した傾向によく似ている。

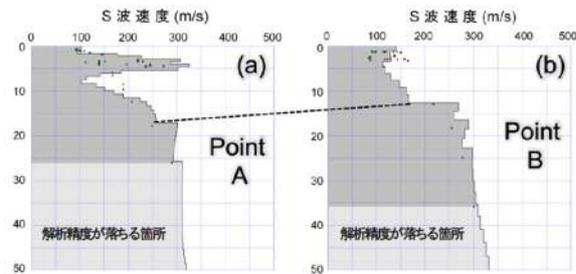


図3 微動アレイ探査結果(測点A, B)

【②UW軟化モデルによる解析】 UW軟化モデルとは、UWモデル中において骨格曲線の最大値を規定する非排水強度パラメータを塑性ひずみの

関数として漸減させる(若井他, 2005)ように修正したものである。実際の計算は、弾完全塑性モデルと同様にピーク強度に至るまでは土は弾性的性質を有するものとし、ピーク以降に関しては各強度定数(c,φ)の値を徐々に小さくしている。

解析時の地盤構造は3層とし、8節点アイソパラメック要素を組んだ。そして再滑動部はすでに残留状態であるとしてひずみ軟化はなし、末端部付近はピーク強度が発揮した後にひずみ軟化が生じたものとした。再滑動部の強度定数は $c=0\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=23.7^\circ$ とし、他の物性値は若井他(2008)等の文献の値を用いた。地震波形は、中越地震時に本地すべりに入射したと思われる波形(水平動)を入力した。この取り扱いの詳細については、若井他(2008)を参照されたい。水位条件は、通常時はすべり土塊の半分程度の深さとし、豪雨直後は地表面に一致するものとした。

図4および5は、地震時における土塊挙動についてシミュレートした結果の一部である。なお両図では、土塊挙動の代表として重心の移動を示しており、図4の水位条件が通常時として実測水位、図5が豪雨直後として地表面まで水位が到達しているものとした。両図より、通常の水位条件においては地震の終了とともに地すべり土塊は停止するが、降雨直後のそれにおいては地震が終了した後も移動が継続していることがわかる。

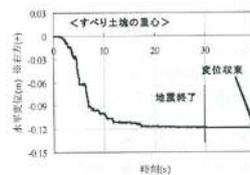


図4 通常の水位条件における土塊の移動

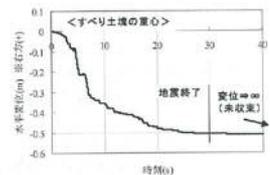


図5 豪雨直後の水位条件における土塊の移動

【③危険度評価】 従前の地すべりダムの決壊に関する危険度評価のほとんどは、単一粒径の非粘性土から構成されるダム堤体を仮定し、その中で侵食機構を主眼としている。一方、上述の物理探査結果より東竹沢地すべりのダム堤体は単層ではない。ここでは、Ermini and Casagli (2003)が地すべりダムの決壊危険度を予測する応急手法として提案した「流域集水面積と地すべりダム堤体の高さ」と量に基づいた指標(DBI)」に基づいて危険度評価を検討した。

$$DBI = \log (A_b \times H_d / V_d) \quad (1)$$

ここに、 A_b : 流域集水面積 (km^2); H_d : 地すべりダム高さ (m); V_d : 地すべりダム閉塞土量 ($\times 10^6 \text{m}^3$)

本地すべりダム堤体は、長さ 350m、幅 300m、高さ 28m、堤体体積 $1.30 \times 10^6 \text{m}^3$ 、およびダム上流域の集水面積が約 38.4km^2 である。これらを用いて式(1)で DBI を算出すると、2.92 になる (図 6)。

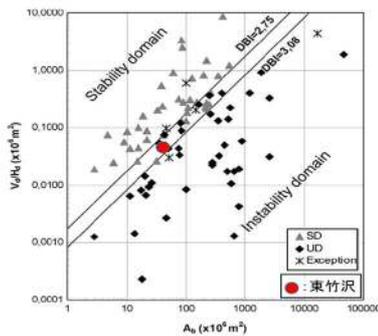


図 6 地すべりダムの安定性評価 (Ermini and Casagli (2003)に加筆)

D. 考察

【①併用物理探査】表面波探査結果 (図 2) から東竹沢地すべりの土塊 (ダム堤体) が、地震時にすべり土塊が比較的攪乱せず層すべりで移動したこと、このすべり土塊の末端部における速度構造の傾斜が移動域より緩く、すべり土塊が芋川対岸に乗り上げた影響が表面波探査で捉えられていることが確認できた。また図 2 と図 3 との比較でも速度構造分布の傾斜が類似していることより、S 波構造から不動域と移動域の判別が可能であることも確認できた。表面波探査の適用深度は一般的に 15~20m 程度とされ、微動アレイ探査のそれは探査深度がセンサ配置間隔に依存することが知られている。詳細な地すべりダムの堤体構造の調査において、両探査法を併用することが有効であることが明らかになった。

【②UW軟化モデルによる解析】図 4 と 5 から、水位条件の違いにより地震動の停止後に地すべり土塊の挙動が異なることが示された。中越地震の直前に台風 23 号による多量の降水が記録されている (長岡: 102mm/日 、栃尾: 92mm/日)。東竹沢地すべりが長距離移動した原因に多量の先行降雨が影響した可能性が指摘されているが、本モ

デルに基づいた数値解析より、その影響の可能性を支持する結果が得られた。

【③危険度評価】Ermini and Casagli (2003) によると (1) $DBI < 2.75$ の場合には地すべりダムが安定域、(2) $2.75 < DBI < 3.08$ の場合には地すべりダムの安定性が不確定域、そして (3) $3.08 < DBI$ の場合には地すべりダムが不安定域であるとされている。図 6 より東竹沢地すべりのダム堤体は、不確定域に属すると評価される。実際の地すべりダム形成後では、ダム堤体上の応急排水路からの流水により堤体脚部の侵食が生じていた。東竹沢地区の斜面は耐侵食性が小さい材料で形成されているためにダム堤体は、未対策のまま放置すると決壊する危険性があったと考えられる。

E. 結論

東竹沢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。

- 地すべりダムの堤体構造を調査する上で、表面波探査と微動アレイ探査の併用が有効であることが明らかになった。
- 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、天然ダムを形成する土塊の長距離移動を再現することができた。
- Ermini and Casagli (2003) が提案した地すべりダムの決壊危険度手法を適用した結果、本地すべりのダム堤体は安定ではなかった。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

深津、若井他: 凝灰質粘土の軟化特性を考慮した地震時地すべりの力学的検討, 第 52 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 74-76, 日本地すべり学会, 平成 25 年 8 月, 松江市。

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