

荒砥沢ダム上流部で発生した地すべりの滑動計算とその考察

東北大学 学○松井 哲志 正 風間 基樹・渦岡 良介・森 友宏

1. はじめに

2008年6月14日に発生した岩手宮城内陸地震において、荒砥沢ダム上流部巨大地すべりが生じた。この地滑りは幅900m、長さ1300m、移動距離は300mを超え、国内最大規模であった。さらに、すべり面傾斜角はきわめて小さく、すべり面の傾斜角は約2度である。日本の地震動で発生した地すべりの中でも有数の規模である。本研究ではこの地すべりの、質点モデルによる滑動解析を行い、緩い傾斜で地震時に300m滑動したことの原因を考察する。

2. 地すべりの影響因子

2.1 地震動

荒砥沢ダム監査廊で観測された地震動を図-1に示す。大きな特徴として鉛直方向の最大加速度が1000galを超えている点が挙げられる。

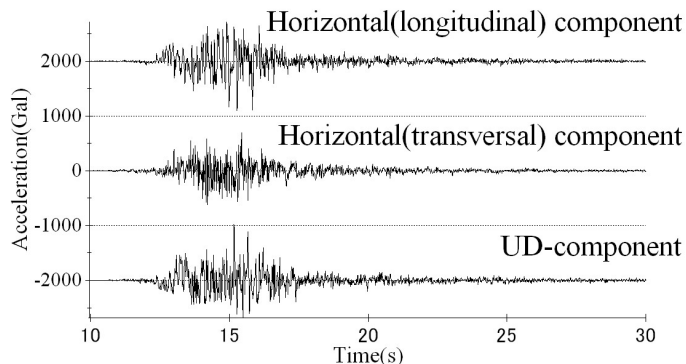


図-1 荒砥沢ダム監査廊で観測された地震動

図-2は荒砥沢ダム周辺の地震後の航空写真である。これより荒砥沢ダムと地すべり発生位置の位置関係、すべり方向がわかる。すべり方向はダム軸方向とほぼ直交していることがわかる。

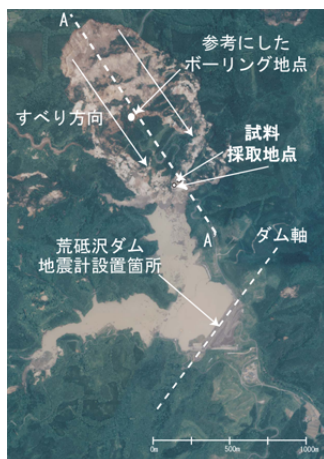


図-2 荒砥沢ダムと地すべり現場

2.2 すべり量に対する影響因子

この地震動の地すべりに対する影響因子としては次のものが考えられる。

(1) 地震動

- ・水平地震動の振幅レベル
- ・鉛直地震動の振幅レベル

なお、一般に地下水位以下の地盤においては、上下動が作用してもそれに応じて過剰間隙水圧が変化し有効応力は不変であると考えられている。その場合上下動がせん断抵抗に影響していないと考えられる。しかし本研究では上下動に伴う有効応力の低下も考慮した条件においても滑動計算を行った。

(2) 境界条件

斜面の傾斜角の大小：傾斜がある斜面では、土要素は静止状態においても自重による斜面方向に初期せん断応力を受けている。

(3) 土の性質

せん断強度（残留強度）、せん断剛性（初期剛性）、有効応力の低下量が影響因子である。

3. すべり面とされる土の力学的性質

図-2に示した、A-A'の断面が図-3である。さらに林野庁によるボーリング調査で図-3中のボーリング地点から、すべり面の地層は砂岩シルト岩と推定されている。

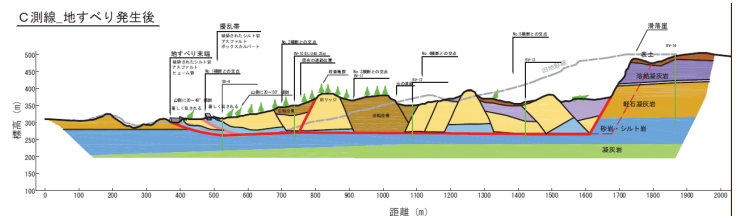


図-3 地すべり断面図（林野庁作成）

図-2に示した試料採取地点において、砂岩シルト岩層の土を採取した。その試料を用いて一面せん断試験を行った結果を図-4、図-5に示す。滑動計算に必要なせん断剛性、せん断ひずみに対する有効応力の変化はこの結果を参考にモデル化した。

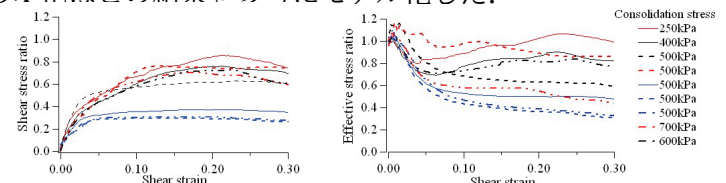


図-4 せん断応力比-せん断ひずみ 図-5 有効応力比-せん断ひずみ

4. 滑動計算モデル

4.1 モデル

すべり量にどの因子がどの程度影響するのかを検討するために図-6に示す単純な1質点モデルを考えた。角度 θ の基礎地盤とすべり土塊に斜面直角方向と斜面方向にそれぞればねとダッシュポットが連結され、さらにスライダーが設置されている。すべり土塊は質点として計算を行った。斜面直角方向、斜面方向

それぞれのばねの復元力については図-7に示すように閾値を設定した。なお図中の x_0 と y_0 はそれぞれ静的釣り合い位置である。

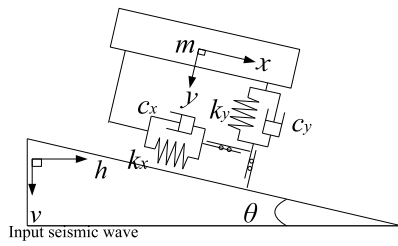


図-6 モデル

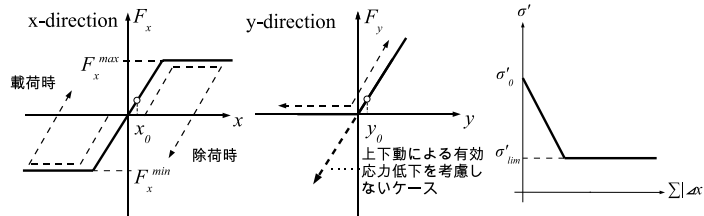


図-7 復元力特性（左と中）、有効応力と変位の関係（右）

4.2 支配方程式

図-6における斜面方向と斜面鉛直方向の釣り合い式を式(1)と式(2)に記す。

$$m\ddot{x}(t) = -F_x(t) - c_x\dot{x}(t) + mg\sin\theta + E_x(t) \quad (1)$$

$$m\ddot{y}(t) = -F_y(t) - c_y\dot{y}(t) + mg\cos\theta + E_y(t) \quad (2)$$

ここに $F_x(t), F_y(t)$: ばねの復元力, $c_x\dot{x}(t), c_y\dot{y}(t)$: ダッシュポットの減衰力, $E_x(t), E_y(t)$: 地震動による慣性力である。また、ばねの復元力特性として以下の式(3)と式(4)、閾値が上下動に寄らず一定の場合と、変化する場合の二つのケースを設定した。

$$F_x^{\max}(t) = -F_x^{\min}(t) = \mu(N) \quad (3)$$

$$F_x^{\max}(t) = -F_x^{\min}(t) = \mu(N + m\ddot{y}(t)) \quad (4)$$

ここに N : 斜面垂直方向の荷重成分, σ' : 有効応力, A を断面積として $N = A\sigma'$ 。ただし、有効応力は図-5の結果を元に式(5)、図-7-右のように設定した。

$$\sigma'_0 = mg\cos\theta$$

$$\sigma' = \sigma'_0 - a \sum |x| \geq \sigma'_{lim} = \alpha\sigma'_0 \quad (5)$$

ここでは、有効応力は累積変位量に比例して減少し、やがて残留強度を示すようなモデルとした。残留強度を初期鉛直応力の α 倍と設定し、 α : 残留強度比と定義した。ここに σ'_{lim} : 残留強度, σ'_0 : 初期鉛直有効応力, $\sum |x|$: 累積変位量, a : パラメータである。 a は図-5における、せん断ひずみ 0.05 までの有効応力比とせん断ひずみの関係から算出した。

5. 解析結果およびその考察

斜面角度 θ を 0, 2, 5, 10 度の 4 ケース、閾値を式(3)、式(4)の 2 ケース、入力地震動はダム軸垂直方向のみのケースと、上下動とダム軸垂直方向を入力したケースの 2 つについて、残留強度比を変えて解析を行った。なおそのほかのパラメータについては表-5に示す値を使用した。解析結果を縦軸に変位、横軸に残留強度比をとり斜面角度、入力地震動ごとに図-8に示した。

入力地震動として水平動のみを考えたとき、水平・上下両方を考えたときの閾値の違いですべり量を比べてみると、入力地震動が水平・上下動両方で、閾値が式(4)の可変のケースが最も滑りやすく、残りのケースはほとんど滑り量が変わらない。上下動の入力がない限り鉛直方向の応答加速度も小さいので当然閾値に与える影響も小さいためである。残留強度比が下がらない限り、斜面角度や鉛直動を考慮してもすべり量にほとんど影響がないことから、滑動に支配的なのは残留強度比であることがわかる。残留強度比 0.10 における、閾値が式(4)のときの変位と時刻の関係を斜面角度ごとに図-9にまとめた。主要動が終わった 20 秒以降も滑っていることから一度滑り出すとそのまま滑り出すことがわかる。

表-1 計算に用いた値

$m(kg)$	$k_x(N/m)$	$k_y(N/m)$	h_x	h_y	μ	a
1.55×10^5	3.36×10^6	1.67×10^8	0.02	0.10	0.80	21.8

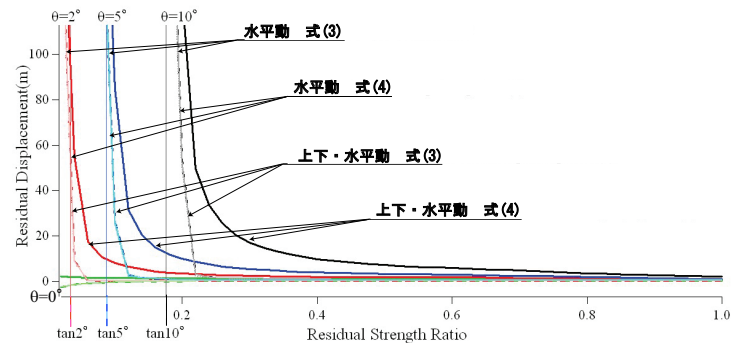


図-8 すべり量と残留強度、斜面角度の関係

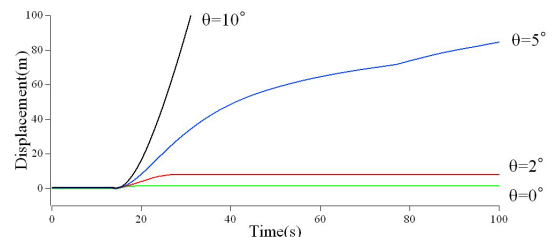


図-9 すべり量と時間の関係の例（残留強度比 0.1、上下・水平地震動入力）

6. 結論

以上の解析から、上下動の影響は小さく、地震動はすべり面の有効応力を減少させることに寄与するだけであり、一度有効応力が減少した後にそのまま有効応力が回復しないことによって 300m の滑動が生じたと考えられる。一方図-5に示した試験結果では残留強度比は最小でも 0.3 である。この条件では図-8に示したように 15m ほどしか滑動していない。今後はすべり面を形成した土材料の有効応力の低下を含むせん断特性の詳細な研究が必要である。

参考文献

- 平成 20 年岩手・宮城内陸地震 4 学協会東北合同調査委員会 編：平成 20 年岩手・宮城内陸地震災害調査報告書，2009。
- 風間基樹，鈴木崇，小濱英司，菅野高弘：初期土圧を考慮したケーソンの滑動解析，土木工学会地震工学論文集 Vol.28, pp.1-10, 2005。