

フィルダム耐震性能照査に対する弾完全塑性地震応答解析の適用 Seismic Performance Evaluation of Fill Dams Using Elasto-Perfectly-Plastic Dynamic Analysis

坂井 孝太郎

SAKAI Kotaro

1. はじめに レベル 2 地震動（現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動）に対するフィルダムの耐震性能照査手法として、堤体材料の応力ひずみ関係を線形弾性と近似して堤体加速度時刻歴を求める等価線形化法と、仮定したすべり面に対して塑性すべり量を計算する塑性すべり解析を組み合わせる方法（以下、現行解析手法）が一般的に用いられている。このような現行解析手法において、入力地震動が大きく、堤体材料の応力ひずみ関係が線形性を失い、非線形性が大きくなる場合に、ダムの沈下量を適切に計算できない事例が見られる。このような場合における国営造成農業用ダム安全性評価は、「一定の安全性を有するものの、応答解析手法については今後の課題である」とされている。坂井ら（2024）はこのような課題を解決する実践的な方法として弾完全塑性モデルによる全応力弾塑性地震応答解析（以下、弾完全塑性解析）を提案している。

本論文では、すでに現行解析手法による安全性評価が実施された 85 基のフィルダム解析結果の傾向を分析し、ダム型式（アースダム及びロックフィルダムの 2 タイプ）による課題の違いを示す。また、解析結果がアースダムとして典型的な傾向を示した T ダムに対して弾完全塑性解析を適用した場合の安全性評価を試行し、その評価結果について考察する。

2. 現行解析手法によるフィルダム安全性評価 現行の耐震性能照査では、堤体の応答加速度と塑性変形量は等価線形化法と塑性すべり解析により別々に計算される。このような現行解析手法による安全性評価が実施された 85 基のフィルダム解析結果について、沈下量及び堤敷き最大加速度を整理した。堤敷き最大加速度はフィルダム堤体に入力した地震動の大きさの指標であり、入力地震動レベルが上がることで一般に構造物は損傷を受けて変形が大きくなる。ロックフィルダムの沈下量は堤敷き最大加速度に比例して大きくなり、一般的な構造物の変形傾向と一致する。しかし、300 gal 程度を超えると 1.0 m 以上の沈下が生じる結果が得られており、実現象としてこの程度の地震動でロックフィルダムが大きな損傷を受けていないことを鑑みると安全側の設定がなされているものと想定される。これに対し、アースダムは堤敷き最大加速度が大きくなっても沈下量が 0.5 m 程度以下であり、典型的なケースとして最も大きい入力地震動であった T ダムで沈下が発生していない。

3. T ダムの安全性評価 等価線形化法のせん断強度 τ_{\max}^{eq} は Hardin-Drnevich モデル（Hardin and Drnevich, 1972）（以下では H-D モデルと称する）により初期せん断弾性係数 G_0 と基準ひずみ γ_r から下式で与えられる（Fig. 1 参照）。

$$\tau_{\max}^{eq} = G_0 \gamma_r \quad (1)$$

一方、塑性すべり解析のせん断強度 τ_{\max}^{sl} は粘着力 c と内部摩擦角 ϕ によって下式で与えられる。

$$\tau_{\max}^{sl} = c + \sigma'_v \tan \phi \quad (2)$$

ここに、 σ'_v はすべり面に垂直な有効応力（上載圧）である。

T ダムでは入力地震動が堤敷きで最大 1,700 gal 程度と非常に大きい、 $\tau_{\max}^{eq} < \tau_{\max}^{sl}$ であるため、今度は τ_{\max}^{eq} に対応する加速度は τ_{\max}^{sl} の降伏に対応する加速度よりも必ず小さくなる設定であった。すなわち、どれほど入力地震動を大きくしても全てのすべり円弧に対して安全率が 1.0 を上回る結果となり、レベル 2 地震動に対する安全性を有するものと評価されてしまう。一方で、せん断強度 τ_{\max}^{sl} を用いた弾完全塑性解析では地震応答と塑性変形を一貫して解析することで、現行解析手法で過小評価される沈下量を適切に評価できる。T ダムの弾完全塑性解析を実施した結果、

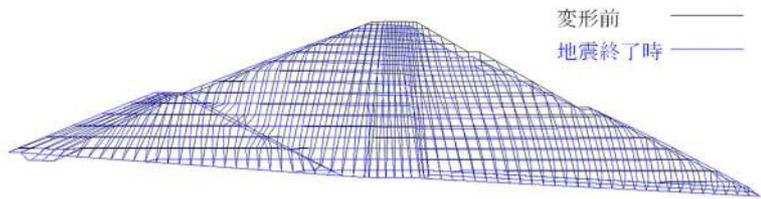


Fig. 2 弾塑性解析の最終時刻変形図（変形倍率 10 倍）
Deformation diagram at the end of elasto-plastic analysis (Magnification: 10×)

Fig. 2 に示す塑性変形が得られた。その沈下量は 0.08 m となり、地震による損傷を受けるものの許容沈下量の目安である 1.0 m を下回ることから、レベル 2 地震動に対する安全性を有するものと評価できる。

4. 結論 現行解析手法による沈下量について既往の解析結果からデータを整理し、ロックフィルダムとアースダムとで異なる傾向が得られることを示した。特にアースダムでは沈下量が過小評価されている可能性があり、その事例として堤敷きで最大レベルの入力地震動が与えられた T ダムについて現行解析手法と弾完全塑性解析による評価を検証した。その結果、現行解析手法で沈下が生じず、弾完全塑性解析では沈下が生じる計算結果が得られた。また、T ダムは現行解析手法で沈下が計算できない条件（塑性すべり解析のせん断強度 $\tau_{\max}^{sl} >$ 等価線形化法のせん断強度 τ_{\max}^{eq} ）であることが確認された。弾完全塑性解析は破壊時の強度として適すると考えられる τ_{\max}^{sl} により地震応答と塑性変形を一貫して解析できる。ただし、入力地震動が小さく地震応答が τ_{\max}^{sl} に至らない範囲では、弾性解析となるためにこのような低ひずみ領域における沈下量が計算できない。このような特徴から、弾完全塑性解析をフィルダム耐震性能照査に用いる用途としては、現行解析手法による精度が低くなるような大ひずみが生じている場合の補助的な詳細解析手法であると考えており、すべてのひずみ領域に適用できる手法ではないことに注意が必要である。

謝辞 データを提供頂いた農林水産省農村振興局整備部設計課に感謝する。

参考文献 1) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972) : Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves, *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, **98**(7), 667-692., 2) 坂井孝太郎, 藤澤和謙, 村上 章 (2024) : フィルダムに対する現行の耐震性能照査手法の課題と弾完全塑性地震応答解析, *農業農村工学会論文集*, **92** (2), 1_243-I_250.