

実測強震記録によるロックフィルダム堤体の動的変形特性および減衰定数の推定

水資源機構 正会員 佐藤信光

○正会員 曾田英揮

西日本技術開発 正会員 森 二郎

1. 目的

フィルダムの耐震照査における動的解析では、堤体材料の非線形性を有する動的な変形や減衰特性を材料試験から定式化して用いている。一方、頻発する地震においてフィルダム堤体及び基礎の地震計によって多くの地震記録が観測されている。堤体のみモデルで解析する場合、1995年兵庫県南部地震の箕面川ダム(基礎 135cm/s²)の再現解析において堤体材料の履歴減衰以外に15%の逸散減衰を上乗せして再現性の確認がなされている¹⁾。また、基盤もモデル化して解析する場合、箕面川ダムの再現解析において堤体に10%程度の付加減衰を上乗せすることが適切であるという試算が示されている²⁾。2008年岩手・宮城内陸地震において荒砥沢ダムの基礎において1024cm/s²が観測され、本研究では実測の強震記録を用いて堤体の動的な変形特性ならびに付加減衰を推定した。

2. ダムモデルと地震記録

荒砥沢ダムは堤高74.4mの中央コア型のロックフィルダムである。岩手・宮城内陸地震において天端部で最大加速度525cm/s²、基礎部で1024cm/s²を観測し、天端/基礎が0.5となる極めて大きい非線形特性を示した³⁾。その加速度時刻歴を図-1に示す。ダムモデルを図-2に示すが、等価線形化法による複素応答解析を用いて堤体+基盤モデルと堤体のみモデルを比較解析した。

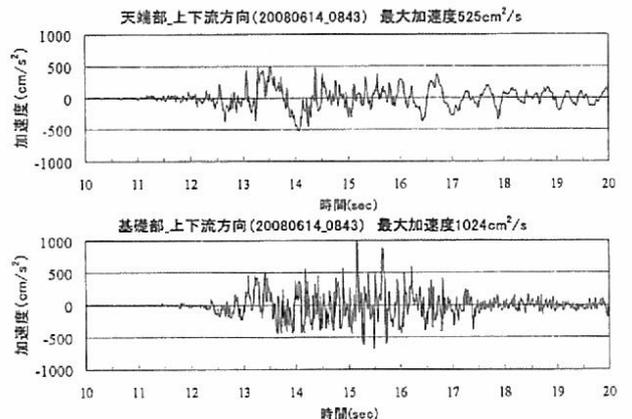


図-1 岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダムの地震記録

3. 動的な変形特性の推定

解析に用いた堤体材料の基本物性値は品質管理試験値から設定した³⁾。動的初期物性値については、sawada式で基本的な物性値を設定し、小地震における堤体の卓越振動数に適合する初期剛性G₀に補正した。岩盤の動的物性は地震調査推進本部が宮城県沖地震を対象とした地震動評価で設定した地盤構造モデルを基に、V_p=2,000m/s、V_s=700m/sとした。

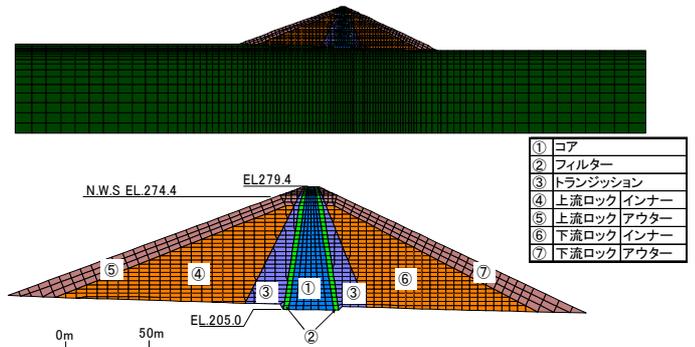


図-2 解析モデル

地震時の堤体材料の非線形特性(G_i/G₀~γ_i)は、岩手・宮城内陸地震(余震含む)と2003年三陸南地震における堤体の応答特性から設定した。具体的には、各地震の剛性G_iを各地震の堤体卓越周期T_iと三角形片持梁の(1)式から求めた。Hは堤高、ρは堤体密度である。なお、岩手・宮城内陸地震では堤体卓越周期の同定が難しかったために地震波形の伝達速度から直接V_sを求め、G=ρV_s²から推定した。

$$T_i = 2.61 \cdot H \sqrt{\rho/G_i} \quad (1)$$

各地震のせん断ひずみは、天端と基礎の加速度波形を変位波形に変換し、天端と基礎の相対変位と堤高との関係から堤体の平均的なせん断ひずみγ_iを求めた。両地震のせん断ひずみとG/G₀値は図-3に曲線と併せてプロットしている。G_i/G₀~γ_i曲線は式(2)を用いて観測値に合うようにフィッティングした。なお、図-3には強震動を観測した2004年新潟県中越地震の川西ダム(天端583cm/s²)と岩手・宮城内陸地震の石淵ダム(天端1461cm/s²)で同定した値も併記したが、荒砥沢ダムと同様の

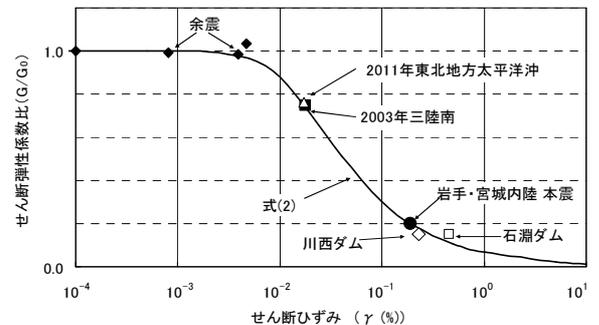


図-3 荒砥沢ダムの地震記録から定式化したG/G₀~γ曲線

キーワード ロックフィルダム, 等価線形化法, 付加減衰

連絡先 〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区大字神田936 (独)水資源機構 総合技術センター TEL048-853-1785

非線形性を示している。また、堤体材料の履歴減衰の $h \sim \gamma$ 曲線は式(3)を用いた。 h_{max} としては一般的な 0.166 とした。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha |\gamma \times G|^\beta} \dots (2) \quad h = h_{max}(1 - G/G_0) \dots (3)$$

4. 入力地震動

入力地震動は二次元モデルを用いて堤体監査廊位置をコントロールポイントとし、堤体底面での観測波形を引き戻すことにより作成した。引き戻しには伝達関数を用いた。岩盤部は線形(減衰 5%)とし、堤体部は付加減衰を 15%として、堤体のみ応答解析で求めた収束剛性と収束減衰を用いた。

5. 検討結果

基盤付きモデルによる堤体中央部での最大加速度と観測結果の比較を図-4 に示す。付加減衰を無視すると加速度は非常に大きく、観測値の 2 倍程度と堤体の加速度応答が過大になる。水平方向の堤体天端で $h=15\%$ が、中段部では 10% が合っている。しかし、加速度時刻歴(図-5)をみると、中段部の最大加速度は 14.2 秒付近のパルス波で生じており、その部分を除けば、15%と 10%は同等か 15%の方がやや整合性がよい。

堤体モデルと基盤付きモデルの応答を比較する。図-4 に堤体部の最大加速度を両モデルで比較したものを示す。最大加速度応答は、堤体モデルの方が基盤付きモデルよりやや小さい。中段部では基盤付きモデル $h=15\%$ は堤体モデル $h=10\%$ に近い値となっている。一般に基盤付きモデルでは堤体モデルより小さい付加減衰が適切であると言われているが、堤体モデルでも減衰として 15%を付加したケースで再現性があり、本検討では両モデルとも同じ付加減衰を用いる方が適切であると言える。図-6 は最大せん断ひずみを両モデルで比較している。同じ付加減衰で比較すると、堤体モデルの方が底面での最大せん断ひずみが大きい。それにより堤体モデルの応答が小さくなったものと思われる。図-7 は付加減衰 15%で天端の加速度時刻歴を両モデルで比較している。両モデルの波形はほとんど一致し、同一の付加減衰を用いることの妥当性を裏付けている。

7. まとめ

実測強震記録を用いて、動的な変形特性 ($G_i/G_0 \sim \gamma_i$) を推定し、他ダムと同程度であることを示した。また、基盤付きモデルを用いた再現解析の結果、基盤付きモデルにおいても堤体の付加減衰として堤体モデルと同様に 15%程度を用いると再現性がよいことを示した。この付加減衰の要因としては、3次元効果や貯水の影響が想定されるが、今後、3次元解析等で検討していく必要がある。

最後に、荒砥沢ダムの観測データ等を提供いただきました荒砥沢ダム直轄災害復旧事務所の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1)ダムの耐震性に関する評価検討委員会：ダムの耐震性に関する評価検討委員会 報告書, 1996.11
- 2)佐藤信光：1995年兵庫県南部地震における箕面川ダム堤体の減衰定数の考察, ダム技術 269号, pp23-32, 2009
- 3)荒砥沢ダム直轄災害復旧事務所：荒砥沢ダムの資料

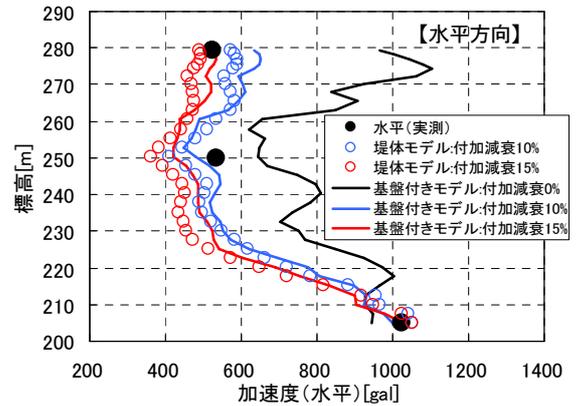


図-4 最大加速度分布 (水平方向)

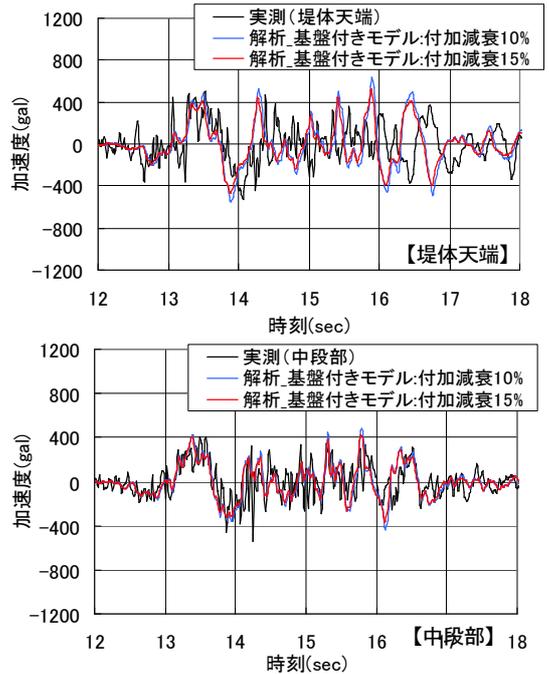


図-5 加速度時刻歴 (堤体天端、中段部)

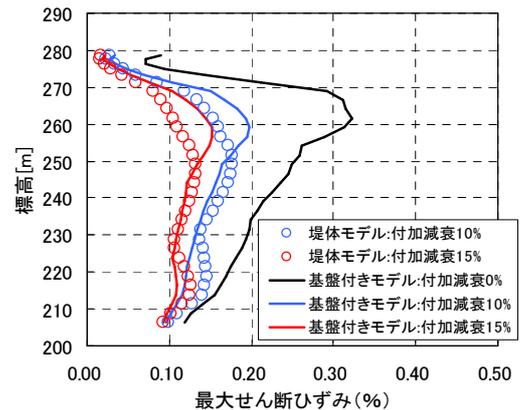


図-6 最大せん断ひずみ

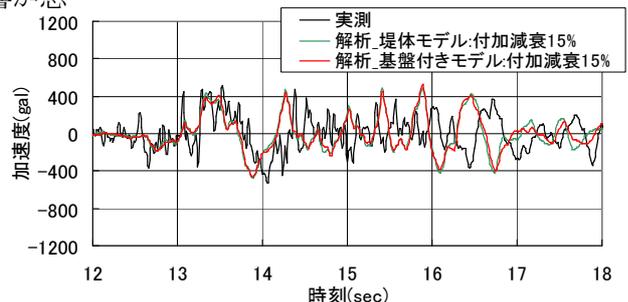


図-7 堤体天端の加速度時刻歴