

水～土連成解析を用いたロックフィルダムの地震応答解析および基盤上昇波の推定

地震波, 材料非線形, 多次元波動伝播

名古屋大学 国際会員 ○山田正太郎 野田 利弘
 地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 颯 澤田 義博
 名古屋大学 非会員 阪口 崇博

1. はじめに

著者らはこれまでに地盤材料のおよび幾何的な非線形性を考慮可能な有限要素解析コード¹⁾と粘性境界条件を活用して, 基盤における地震観測記録から同地点における上昇波を推定する手法を提案している²⁾. 同手法を用い, 顕著な非線形応答が生じたと考えられるロックフィルダムの地震観測記録³⁾を元に地震応答解析を行い, 同記録の特徴の再現と基盤上昇波の推定を試みたので以下に報告する.

2. 対象とする強震観測記録の特徴

2008年岩手・宮城内陸地震において, 荒砥沢ダムでは特徴的な強震動が記録されている³⁾. 図1と2に, 同サイトの地震計設置位置とその強震観測記録をそれぞれ示す. 特徴的な点として, まず, ダム底部の監査廊において, 最大加速度が1024Galを記録している点が挙げられる. ダム基礎における国内の地震観測記録で1000Galを超える記録は現時点において他にない. ダム底部でこのような記録的な加速度が観測された一方で, 監査廊の上部に位置するコア中央部とさらに上方の天端部において観測された最大加速度は, それぞれ535Galと525Galとなっている. 図3は, 波多野ら⁴⁾がまとめた国内のロックフィルダムにおける基礎の最大加速度と天端部/基礎部の応答倍率の関係を示している. この図から, 基盤に対する応答倍率が大きく1を下回るという点も他に例を見ない特徴であることが分かる. 同図において, 同じダムにおける他の地震観測記録は, 基盤に対する応答倍率が1を上回り, 他の地点の観測記録と同様な値を示していることから, 上記の特徴は大規模地震時であったが故に生じたと考えられる.

3. 強震観測記録の再現と基盤上昇波の推定

さて, 当然のことながら, 上記のダム基礎における1000Galを超える強震観測記録には, ダム表面等における反射波の影響が多分に含まれているものと考えられる. また, その反射波は, ダム堤体材料の非線形性やダム内で生じる複雑な反射・屈折の影響を直接的に受けていると考えられる. 以下では, 同サイトにおける観測記録の特徴の数値的再現結果と, これらの影響を加味した基盤上昇波の推定結果を示す.

3-1 解析条件 解析には, 著者らの研究グループが開発した水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**¹⁾を用いた. 同コードは, 速度型の運動方程式を逐次時間積分する有限要素解析コードである. 構成式には, 著者らが提案する複合負荷弾塑性構成式⁵⁾を採用した. この構成式は, **SYS Cam-clay model**と非関連 **Drucker-Prager model**が複合的な負荷状態を示し得るモデルであり, 砂質土が液状化時に示すサイクリックモビリティをも再現可能である. また, 同コードに, 著者らが提案する粘性境界条件を利用した基盤上昇波の推定手法²⁾を適用した. これは, 基盤における観測記録を入力条件に, 解析対象の応答と同時に, 基盤上昇波を推定する手法であり, 解析コードの特徴を活かした推定結果が得られる.

図4に有限要素メッシュと境界条件を示す. 2次元平面ひずみ条件を適用し, ダム堤体だけを解析対象とした. 堤体を砂礫・石等からなる部分と, 粘性土からなるコア部分に分けた. 堤体全体を水～土二相系の材料として扱い, 堤体表面は排水境界, 底面は非排水境界とした. また, 天端より15mの深さまでは不飽和領域にあるものとして, 簡易的に同領域にある要素の全ての面を排水境界とした. 図5に複合負荷弾塑性構成式を用いて模

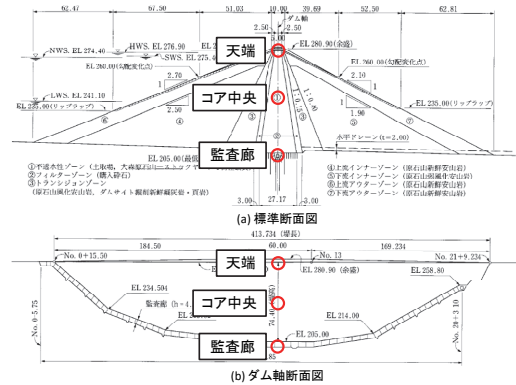


図1 荒砥沢ダムの断面図と地震計設置箇所

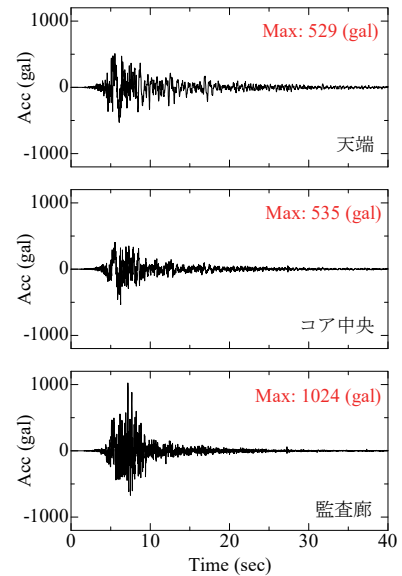


図2 観測波形(上下流方向)

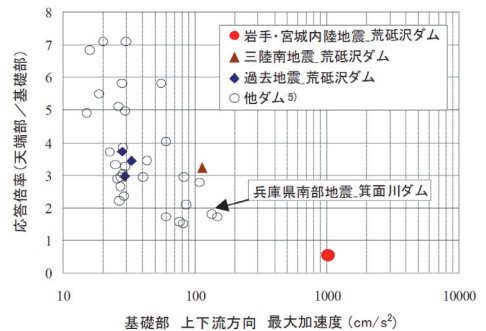


図3 ロックフィルダムの基礎における最大加速度と天端/基礎の応答倍率(波多野ら⁴⁾)

擬した堤体材料の動的変形試験のシミュレーション結果を示す。それぞれの材料に対する材料定数および初期値は、典型的な砂と粘土に対する値を元に、図5に示す動的変形特性が、佐藤ら⁶⁾が示したロックフィルダム堤体材料のそれに近くなるように与えた。底面は水平・鉛直共に粘性境界条件を採用し、 $\rho=2.5\text{g/cm}^3$,

$$V_s=1,000\text{m/sec},$$

$$V_p=2,000\text{m/sec}$$

とした。地震に関する入力条件として、図2に示すダム監査廊における実観測記録（上下流方向の水平成分）を用い、堤体全体の応答と同時に基盤上昇波を求めた。

3-2 解析結果 図6に解析によって得られた加速度応答を示す。図2に示す実観測記録と同様に、ダム基礎（監査廊）における応答よりもコア中央や天端における応答の方が小さくなっていることが分かる。解析によるコア中央や天端における応答は、実観測記録に比べて大きめの値を示しているが、基盤に対する応答倍率は1を明らかに下回っている。単純化した解析条件を与えていることを考えれば、観測結果の特徴を十分に捉えていると言える。図7に観測点近傍の要素挙動を示す。監査廊近傍の要素において顕著であるが、最大で0.4%程度のせん断ひずみが生じ、履歴ループを描いている。このループから見て取れる履歴減衰が、基盤に対する応答倍率を低下させたと考えられる。また、剛性劣化による固有周期の低下が、入射波の卓越周期と固有周期のずれを引き起こし、共振を生じにくくさせた可能性もある。

図8に、解析によって推定された基盤上昇波と監査廊における観測記録を示す。基盤上昇波は観測記録の約半分程度である。このように入射波に比べて、基盤での応答が倍近くまで大きくなるのは、繰返し負荷によって堤体下部で特に顕著に剛性が劣化し、観測点近傍で全反射的な現象が生じるためであると考えられる。

なお、紙幅の都合上、結果は割愛するが、小規模地震を対象にした場合には、剛性劣化や履歴減衰の影響が表れにくいために、コア中央や天端の加速度応答はダム基礎よりも大きくなる。また、このようなケースで推定される基盤上昇波は、観測波の0.7~0.9倍程度である。

4. おわりに 3.11以降、設計地震外力は増大の一途を辿り、耐震設計をより難しいものになっている。このような状況に、本解析結果が一石を投じることができれば幸甚である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（挑戦的萌芽研究：課題番号16K14303、基盤研究(A)：課題番号25249064）の補助を受けて実施した。

参考文献 1) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, *Soils and Foundations*, 45(6), 771-790. 2) 山田正太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博, 永田優 (2017): 表層地盤の非線形性および多次元波動伝播の影響を考慮した基盤入射波の推定法の提案, 第52回地盤工学研究発表会講演概要集, 1589-1590. 3) 国総研資料, 第734号, 国土交通省所管ダムの地震加速度記録, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0734DL.htm>. 4) 波多野圭亮, 佐藤信光, 富田尚樹 (2010): 岩手・宮城内陸地震の強震動に対するロックフィルダムの地震応答挙動の再現解析, 平成22年度水資源機構技術研究発表会. 5) Yamada, S. and Noda, T. (2013): Proposal of a new double hardening elasto-plastic constitutive model of soil skeleton based on integration of associated and non-associated flow rules, *Proc. of 15th ARC*, JPN-128. 6) 佐藤信光, 曾田栄揮, 斎秋夫 (2015): ロックフィルダムの地震記録による実測動的変形特性の推定と適用性, *ダム工学*, 25(4), 230-239.

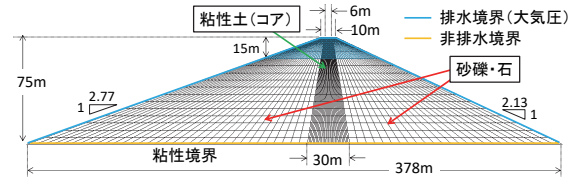


図4 有限要素メッシュと境界条件

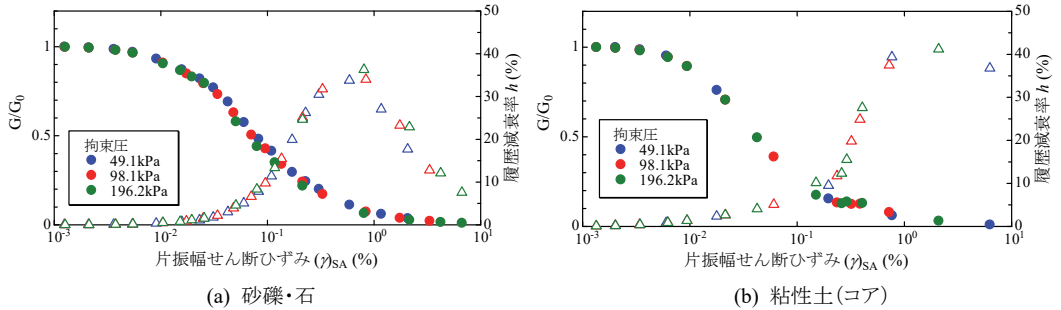


図5 複合負荷弾塑性構成式による動的変形試験のシミュレーション結果

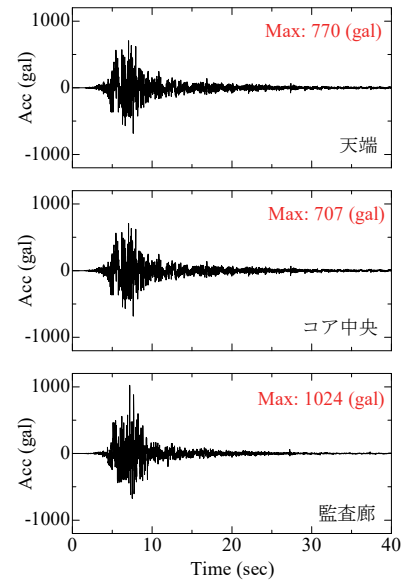


図6 水平加速度応答(計算結果)

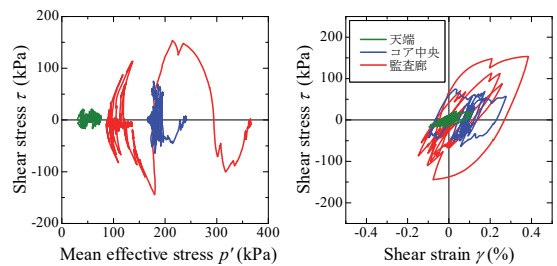


図7 要素挙動

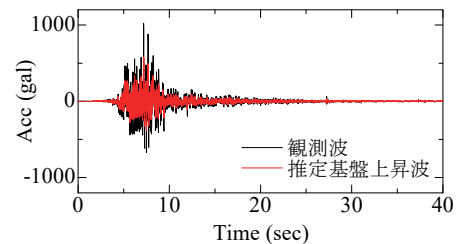


図8 推定基盤上昇波と観測波