ロックフィルダムへの累積損傷解析の適用性の検討

独立行政法人土木研究所	正会員	〇下山顕治
独立行政法人土木研究所	正会員	山口嘉一
独立行政法人十木研究所	正会員	佐藤弘行

1. はじめに

大規模地震時におけるロックフィルダム堤体の永久変形としては「すべり変形」と「揺すり込み沈下」が考えられる。近年、大規模地震時におけるロックフィルダムにおいて、すべりを伴わない比較的大きな沈下の発生が確認 されており^{1),2)}、地震時における揺すり込み沈下に対する検討の必要性が高まってきている.

著者らは、ロックフィルダムの揺すり込み沈下を再現するための手法として、累積損傷解析の適用性について検 討してきた.累積損傷解析では、地震時に堤体に作用する不規則な荷重により発生した応力に基づき、繰返しせん

断応力比(以下, *SR*_dと呼ぶ)を定義する必要がある.本研究では,堤高 100m の中央土質遮水壁型ロックフィルダム(以下, ECRD と呼ぶ)モデルを対象 に静的,動的解析を行い,地震時の堤体内部の応力状態を推定し,得られた 応力から *SR*_dを算出する方法を検討する.

2. ECRD の地震時の応力状態の検討

2.1 解析の概要

解析に用いたモデルダムおよび解析手法は、山口ら³⁰の既往研究 と同じとした.物性値は山口ら³⁰の既往研究における物性の組合せ 4 と同一のものを用いた.入力地震動は兵庫県南部地震時に観測さ れた権現波を,最大上下流方向加速度が720galになるように引き伸 ばしたものとし,鉛直方向も上下流方向と同じ倍率で引き伸ばした ものを用いた.図-1に入力地震動の上下流方向成分を示す.

2.2 静的·動的解析結果

図-2 に堤体内各箇所における,常時の平均有効応力 σ_{m} 'で正規化 したせん断応力 τ_{xy}/σ_{m} 'と偏差応力($\sigma_{x}-\sigma_{y}$)/2 σ_{m} 'の関係の時刻歴を 示す.図中の円は,常時のせん断応力比($\sigma_{1s}-\sigma_{3s}$)/2 σ_{m} 'が一定とな る円である.地震による増分応力 τ_{xyd}/σ_{m} , ($\sigma_{xd}-\sigma_{yd}$)/2 σ_{m} 'は,常 時の応力を原点とした相対位置で表される.

地震による増分応力に着目すると、 $\tau_{xyd}/\sigma_{n}' k(\sigma_{xd}-\sigma_{yd})/2\sigma_{n}'k$, 時々刻々でばらつきはあるが、地震中においてある程度一定の比を 保って変動しており、地震時にせん断の卓越する軸が存在すること がわかる.これは、石原ら⁴⁾によるアースダムを対象とした動的解 析においても同様の傾向が得られている.ただし、要素 a のように、 $\tau_{xyd}/\sigma_{n}'k(\sigma_{xd}-\sigma_{yd})/2\sigma_{n}'$ の比が時々刻々で変化し、せん断の卓越 する軸が明確でない要素もある.また、常時における $\tau_{xys}/\sigma_{n}'k(\sigma_{xs}-\sigma_{ys})/2\sigma_{n}'$ の比を見ると、常時の最大せん断応力が作用する方 向は要素毎に異なっており、常時と地震時増分応力それぞれにおけ るせん断が卓越する軸の方向は必ずしも一致しないことがわかる.

3. 累積損傷解析

上述の応力の時刻歴を用いて累積損傷解析を実施した.解析方法 は山口ら³⁰の既往研究と同じとした.累積損傷解析に用いる *SR*_dは 表-1に示す2とおりの考え方に基づいて算出した.



キーワード ロックフィル,耐震,沈下,累積損傷度理論 連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 独立行政法人土木研究所 TEL:029-879-6781

図-3 に、代表的な要素について、各式により算出した SR_dの時刻歴を示す.式(2)を用いて算出した SR_dは、常時の応力に関わらず地震時の卓越したせん断応力の変動を再現している.ただし、せん断の作用方向がばらついている要素 a では、設定したβと異なる方向に作用するせん断応力成分を適切に評価できない場合がある.式(1)を用い

て算出した SR_d は、常時と地震時の主応力軸がほぼ一致する要素 d では、式(2)による SR_d にほぼ一致する.常時と地震時の主応力 軸が異なる要素gでは、式(2)による SR_d に対してかなり小さくな る.常時にせん断応力がほとんど発生していない要素bでは、地 震時のせん断応力が常時よりも小さくなる状態がほとんど生じず、 式(2)では負のピークとなる状態でも、式(1)では常に正のピークと なる.このため、式(1)を用いると、 SR_d の負のピーク値が小さく なり、また、 SR_d のパルスの判定基準となるゼロクロッシングの発生回 数も少ない.せん断の作用方向がばらついている要素aについては、正 の値は式(2)による SR_d と同等以上の値となるが、常時のせん断応力が小 さいため、要素 b と同様に、 SR_d の負の値が小さくなる課題が生じてい る.

図-4 に各式による SR_d パルスの最大値を示す.また,各要素における 両式による SR_d パルス最大値の比を図-5 に示す.式(2)による SR_d パルス は,常時の応力状態や地震時に作用する応力によって式(1)に対して同等 g~2 倍以上となる.特に,上流ロックゾーンとコアゾーンにおいて式間 の差が大きく,式(1)では,上述の課題が生じていると思われる.

図-6に累積損傷解析による残留変位を示す.式(2)による沈下量および ^g 水平変位量は,式(1)による変位よりも大きい.特に,*SR*_dパルスの最大 値の比が大きくなるコア部と上流ロックゾーンの表層においてその差が 顕著である.

4. まとめ

以上の検討より、ロックフィルダムに累積損傷解析を適用する場合、せん断応力の大きさのみに着目した式(1)では、必ずしも *SR*_dの大きさやゼロクロッシングを適切に評価できない可能性があることがわかった.一方、式(2)は、地震時に卓越するせん断応力を概ね再現できているが、せん断応力の方向にばらつきがある場合には *SR*_dを適切に評価できない可能性がある.また、地震時の増分応力のみを用いるため、初期応力の影響が反映されていない課題がある.

今後は、初期応力の影響を材料試験等により検討するとともに、 大規模地震時に変形した実際のダムの再現解析を行って、適切な *SR*_d計算式の検討を進めていく.

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道株式会社:信濃川発電所復旧工事技術専門委員会,委員会報告書, pp.69-101, 2006.5.
- 2) Yoshikazu Yamaguchi, Tomoya Iwashita and Shinya Mitsuishi: Preliminary Investigation of Dams Stricken By The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, Proc. The 5th EADC International Symposium on Co-existence of Environment and Dams, 2008.10.
- 3) 山口嘉一, 佐藤弘行, 林 直良: 大規模地震時におけるフィルダムの沈下 量の評価方法に関する研究, 土木研究所, 平成 21 年度重点プロジェクト 研究報告書, 2010.
- 4) Jiro Kuwano and Kenji Ishihara: Analysis of Permanent Deformation of Earth Dams Due to Earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 28, No. 1, pp.41-55, 1988.
- 5) 山田勝彦, 真鍋 進, 羽守紀幸, 龍岡文夫: 大型不攪乱砂礫試料の非排水 繰返し三軸試験結果の解析, 土の非排水繰返し試験-室内試験, 原位置試 験および試験結果の利用-に関するシンポジウム論文集, pp.175-184, 1988.



 $SR_d: 繰返しせん断応力比, \sigma_1, \sigma_3: 地震時の主応力, \sigma_{1s}, \sigma_{3s}: 常時の主応力, \sigma_{xd}, \sigma_{yd}, \tau_{xyd}: 地震による増分応力, \sigma_m': 常時の平均有$

効応力, β:せん断が最も卓越する軸と 鉛直方向 (y軸)のなす角 1.5 (a) 要素a(上流ロック) 式(1) 式(2) 0.5 SRd 0 -0.5 -1.5 1 (b) 要素b(コア) 式(1) 式(2) 0.5 W/WWWWW Mar SRd 0 -0.5 -1 式(1) 式(2) (c) 要素d(下流ロック) 0.5 0 -0.5 -1 0.4 (d) 要素g(上流ロック) 式(1) 式(2) 0. 2 AAAA 0 -0.2 -0.4 l 図-3 せん断応力比 SR_dの時刻歴



図-4 *SR*_aパルスの最大値 ^{1.9} 1.7 1.5

