# アスファルト表面遮水壁型ロックフィルダムにおける遮水壁の 地震時挙動および遮水壁復旧構造評価に関する耐震解析 第二段

# プロジェクト責任者

土居 賢彦 東京電力株式会社 技術統括部 技術開発センター

#### 著者

土居 賢彦\*1、山中 忠佳\*2、都築 峰幸\*2、安藤 知明\*2、廣川 雄一\*3、西川 憲明\*3

\*1 東京電力株式会社

\*2 株式会社先端力学シミュレーション研究所

\*3 独立行政法人海洋研究開発機構

**利用施設**:独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ 利用期間:平成 25 年 4 月 1 日~平成 26 年 3 月 31 日

# アブストラクト

長野県北部地震(平成23年3月12日)で堤体と調整池がアスファルト表面遮水壁(以下、遮水壁) で覆われた型式の高野山ダム調整池(新潟県)の遮水壁に損傷(亀裂)が発生した。そこで、遮水壁 に生じた損傷の発生メカニズムを解明するために、高野山地点の地震時挙動の再現を試みた。

解析的に遮水壁及びダムの挙動を求めることは、損傷発生のメカニズム解明につながるが、ダム周 辺域の地形(地層構成)が遮水壁及びダムの挙動に影響を与えることが懸念されたため、遮水壁+ダ ム+調整池+周辺地形の三次元モデルを作成し、動解析を実施することで、高野山地点の地震時挙動 を把握することを目指した。

この解析より、周辺地形(地盤)のサイトエフェクトを再現することができ、解析で得られた地震 波形は実測とよく一致し、解析で得られたひずみ分布の中で、遮水壁の損傷発生部分と一致する時刻 があった。これよりサイトエフェクトを想定したダムの耐震解析における周辺地形(地盤)の適用範 囲の重要性を示すことができた。

キーワード:大規模シミュレーション、アスファルト表面遮水壁、ダム、調整池、地震時挙動、三次元動解析、 サイトエフェクト

# 1. 目的

昨年度の成果<sup>1)</sup>をもとに、遮水壁の損傷発生の原因を究明するために、遮水壁+ダム+調整池+周 辺地形(地盤)をモデル化した三次元動解析を実施して、遮水壁の振動性状を把握する。

動解析結果より、ダムの地震波形、遮水壁の損傷発生時のひずみ分布等を求めて、高野山地点の損 傷発生状況の再現性を確認するとともに、周辺地形(地盤)の影響を考慮することの重要性を示すこ とを目的とした検討を実施した。

# 2. 解析によるアプローチ

アスファルト表面遮水壁型ダム調整池とは、図1に示した通り、堤体および調整池の貯水池面をアスファ ルト混合物で遮水したダムのことである。高野山地点は、遮水壁に単層構造が採用されている。各層の役 割等については文献<sup>2)</sup>等を参照されたい。

遮水壁の損傷原因の追及は、遮水壁の材料であるアスファルト混合物の力学的性状の検討だけでは困難 である。遮水壁の地震時挙動と遮水材料の双方を把握し、両者の比較・分析、即ち、遮水壁の地震時挙 動を解析から求めることが必要となる。



図1 アスファルト表面遮水壁と遮水構造

# 3. 周辺地形モデル化

# 3.1 周辺地形の物性値分布

高野山地点周辺の地表面の標高等の地形データは、国土交通省国土地理院基盤地図情報(10m-DEM) を(財)日本地図センターより入手して適用した。地盤の物性値分布は、独立行政法人防災科学技術 研究所が運営する J-SHIS より入手した。このデータは元々有限差分法を使用した広範囲にわたる地 震動予測に使用されているデータであり、地下 16,000m 程度までの P 波速度(*V<sub>p</sub>*)、S 波速度(*V<sub>s</sub>*) 及び密度分布のデータを入手した(図 2)。これらが判れば地盤のポアソン比及びせん断弾性係数も求 められるため、有限要素法による動解析に最低限必要な物性値が得られる。次節で詳細を述べるが、 図 2 にモデル化領域の大まかな位置を示した。



## 3.2 周辺地形モデル化領域

高野山地点を中心とした東西に 2.9km、南北に 2.4km を周辺地形のモデル化領域とした。その解析 範囲を図 3 に示す。



# 4. 解析モデル作成及び解析手法

# 4.1 堤体と遮水壁の物性値分布

堤体の物性値は不明なため、ロックフィルダム堤体の一般的な物性値分布を堤体表面からの深さの 関数として表した澤田らの式<sup>3)</sup>を用いた。この式を堤体に適用するために、堤体を表面からの深さ方 向に 5m 刻みで分割し(図 4)、物性値を与えた。

遮水壁に使用されているアスファルト混合物の材料物性値は、文献<sup>4</sup>を参考にしている。



# 4.2 境界条件及び解析モデル作成

解析モデル内での反射波の影響を抑制するために ALID<sup>5)</sup> (Absorbing Layer Increasing Damping) を採用した。ALID は、減衰を増加させた層(図 5)を解析モデルの外周に設け、解析領域に反射波が入っ てくるのを最小限に防ぐ方法である。本解析では、ALIDの外側の節点に全方向拘束条件を与えている。

3.1節で示した周辺地形のモデル化領域及び高野山地点の有限要素モデル(以下、全体系解析モデル)を作成した(図 6(a))。全体系解析モデルの要素長及び要素数を表1に示す。図 6(b)に全体系解析モデル中の高野山地点付近を示した。堤体はその形状再現性を考慮し、要素長2mのメッシュを用いてモデル化を行ったが、系全体をこの要素長でモデル化すると、要素数が増えすぎるため、調整池は5m、周辺地形は20mの要素長を用いた。要素長の異なる箇所は多点拘束を用いて結合した。





モデル名称	全体系解析モデル
周辺地形のモデル化範囲	$2.9 \mathrm{km}  imes 2.4 \mathrm{km}$
周辺地形の要素長 (m)	20
堤体の要素長 (m)	2
調整池の要素長 (m)	5
要素数	288 万

表1 全体系解析モデルの要素長及び要素数

# 4.3 入力地震動

高野山地点近傍の地中で観測された利用可能な地震波形はない。そのため、全体系解析モデルのモ デル化領域内にあり、高野山地点の振動を捉えている「ダム観測室」で観測された地震動の三次元加 速度応答倍率を基にした引き戻し<sup>6)</sup>を利用し、入力地震動を得ることも検討したが、本解析では、ダ ム観測室で観測された加速度の大きさを半分にした地震波形を入力として用いた。その結果得られた、 ダム観測室の地震波形の実測との周波数成分比較を図7に示す。これより、実測と動解析結果が概ね 一致していることがわかるため、これを入力地震動として採用することとした。



#### 4.4 解析コード及び解析手法

大規模並列計算、及びカスタマイズが可能な FrontISTR を解析ソルバーとして使用し、New-mark β法を用いた線形動解析を実施した。

# 5. 解析結果

#### 5.1 動解析で得られた地震動の再現性

堤体の天端で観測された地震波形と動解析の結果得られた地震波形の周波数成分比較を図8に示す。 この図に示した上下流方向及びダム軸方向の周波数成分は、実測と動解析結果が概ね一致しているこ とがわかる。この事実により、高野山地点の振動性状をおおよそ再現出来たとする。



### 5.2 堤体の振動性状

図9は、高野山地点に反射波が到達し、堤体遮水壁の主ひずみが最大となった時刻付近の遮水壁の 状況を示している。この時の主ひずみの分布と遮水壁に生じた亀裂の位置(堤体中央付近(図9(a))、 左岸側(図9(b)))が一致している。図10は高野山地点付近の最大主ひずみ分布の時間変化を示すと ともに、堤体遮水壁の主ひずみが最大となった時刻に高野山地点に達する高野山地点東に位置する崖 からの反射波を橙円で示す。この反射波は、地震動の継続中は繰り返し生じており、この反射波が遮 水壁の損傷発生要因であると考えている。



図10 崖からの反射波の伝播状況

#### 5.3 調整池の振動性状

図 11 に全体系解析モデルの解析により高野山地点の調整池で最大主ひずみが最大となった時刻の 最大主ひずみ分布を示す。

図13は高野山地点と高野山地点南東の崖を結んだ南東方向断面1(図12(a))における最大主ひず み分布の時間変化を、図14は高野山地点と高野山地点東側の崖を結んだ直線の東西方向断面2(図 12(b))における最大主ひずみ分布の時間変化を示す。図13、図14ともに、高野山地点周辺に届く崖 からの反射波を赤矢印で、高野山地点を桃色枠で示す。これらの崖で発生した反射波が最大主ひずみ 最大時刻付近に高野山地点に到達していたことが判る。

これより、震央から高野山地点に到達した地震波により生じるひずみと、高野山地点東側の崖、南 東の崖の二方向から来た反射波との重ね合わせによりひずみが増幅されたことがわかった。この崖に よる反射波というサイトエフェクトにより、ひずみが局所的に増幅され、調整池の遮水壁に損傷を生 じた可能性が示唆される。





図14 東西方向断面2の反射波の伝搬状況

### 6. まとめ

堤体の解析で再現された地震波形は実測とよく一致した。この地震波形比較から高野山地点の周辺 地形のサイトエフェクトを再現することができたと考えられる。解析で得られた遮水壁のひずみ分布 の中で、損傷発生部分と一致する時刻があった。

また、高野山地点付近の崖からの反射波というサイトエフェクトが高野山地点の最大主ひずみに影響を与えたことが示唆される結果が得られた。

#### 謝辞

地球シミュレータの利用ならびに解析コードの改良には、(独)海洋研究開発機構地球シミュレー タセンターシミュレーション応用研究グループの皆様にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表 する。

#### 参考文献

- 土居 賢彦 アスファルト表面遮水壁型ロックフィルダムにおける遮水壁の地震時挙動および遮水 壁復旧構造評価に関する耐震解析 地球シミュレータ報告書,2013.
- 2) 舗装工学ライブラリー8 アスファルト遮水壁工,土木学会,2012.
- 3) 澤田・高橋・桜井・矢島,ロックフィルダムの物性値分布特性および堤体の動的特性,電力中央 研究所調査報告,1977.
- 土居 賢彦,佐渡 守,アスファルト混合物における埋設型ひずみ計の適用性に関する検討,土 木学会第57回年次学術講演会,2002.
- 5) J. F. Semblat, L. Lenti, A. Gandomzadeh. A simple multi-direction absorbing layer method to simulate elastic wave propagation in unbounded domains. *Int. J. Numer. Meth. Engng, 2011.*
- 6) 安田 成夫,島本 和仁,筋野 晃司,佐野 貴之,吉岡 英貴,清水 康記,平田 俊二,重 力式コンクリートダムの三次元地震応答解析,国土技術政策総合研究所資料,2007.

#### 外部発表等

講演等

「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」成果報告会

"アスファルト表面遮水壁型ダムにおける遮水壁の地震時挙動解析"

(2014年6月7日、東京大学生産技術研究所)