

# 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

## プロジェクト責任者

土居 賢彦 東京電力株式会社 技術開発研究所

## 著者

土居 賢彦<sup>\*1</sup>、山中 忠佳<sup>\*2</sup>、安藤 知明<sup>\*2</sup>、廣川 雄一<sup>\*3</sup>、西川 憲明<sup>\*3</sup>

\*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 24 年 4 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日

## アブストラクト

東北地方太平洋沖地震で八汐ダム（栃木県）のアスファルト表面遮水壁（以下、遮水壁）が損傷（亀裂）した。八汐ダムでは二次元動的解析で遮水壁の安全性を確認していた。しかし、当該地震波が遮水壁に損傷を及ぼす規模ではなかったにも係らず損傷を生じたため、損傷発生メカニズムを解明する必要がある。

そこで解析的に遮水壁及びダムの挙動を求めことになるが、ダム周辺域の地形の影響が懸念されたため、遮水壁+ダム+周辺地形の全体を三次元でモデル化し、観測された地震動を入力波とした全体系解析で地震時挙動を把握する。

この解析より、既存の二次元動的解析では得られなかった、ダム周辺地形のサイトエフェクトを再現することが出来たばかりでなく、そのひずみ分布は遮水壁の損傷発生箇所と一致した。

従って、今回の地震の様な長周期地震動を想定した、ダムの動的解析における周辺地形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、地震時挙動、三次元動的解析

## 1. 目的

遮水壁+ダム+周辺地形の全体系の三次元動的解析を実施すると言っても、莫大な範囲を無駄に解析対象とすることや、計算資源や実用的な解析時間（1回の解析に要する時間）も考慮しなくてはならない。そこで、

- ① 広域のダム周辺地形を設定した大規模モデルを地球シミュレータ（以下 ES2）で解析した結果を、周辺域の影響が含まれた遮水壁・ダムの挙動を期待通りに把握できた結果と考える。

そして、

②①に比して狭い範囲を設定した中規模モデルの解析結果と、①の解析結果を比較する。

これで周辺地形を含む実務上適正な中規模モデルの解析範囲を導くことができる。

この中規模モデルの動的解析結果から遮水壁の損傷発生時の応力状態等を求めて、損傷発生状況の再現性が確認できる。そのために周辺地形の適用範囲の重要性を示すことを目的とした検討を実施した。

## 2. 解析からのアプローチ

アスファルト表面遮水壁型ダムとは、図1に示した通り、ダム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。八汐ダムは、遮水壁に複層構造が採用されている。各層の役割等については文献1)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。

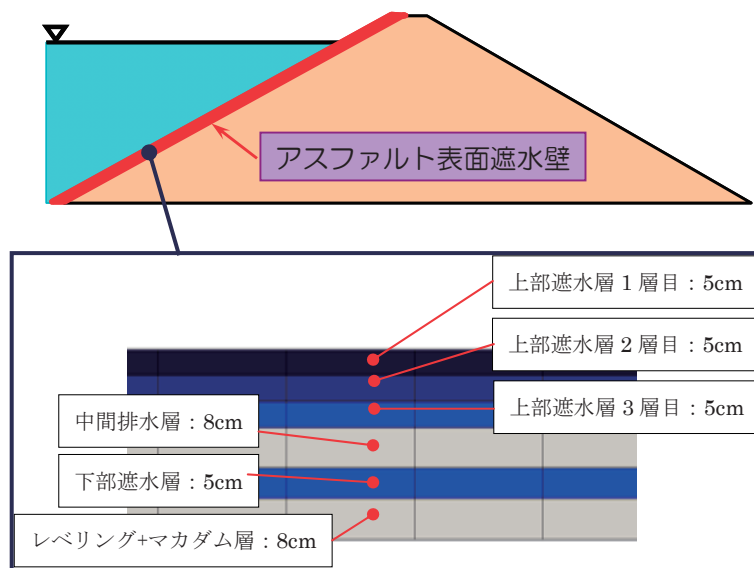


図1 アスファルト表面遮水壁と遮水構造

## 3. 解析モデル

解析にあたり諸物性を設定した。

### 3.1 解析範囲とモデル

解析対象範囲が異なる2種類のモデルを作成し、遮水壁・ダムの地震時挙動を把握する。モデルの概要は次の通りである。

- ① 大規模モデル：ES2で解析するモデル。
- ② 中規模モデル：ES2以外の計算機で解析するモデル。

最終的に中規模モデルで、遮水壁・ダムの地震時挙動を評価することになる。

### 3.2 大規模モデルと中規模モデル

それぞれの解析範囲を図2、並びに解析規模を表1に示す。但し、中規模モデルの解析範囲は第一次の設定であり、複数の範囲を設定し評価することになる。

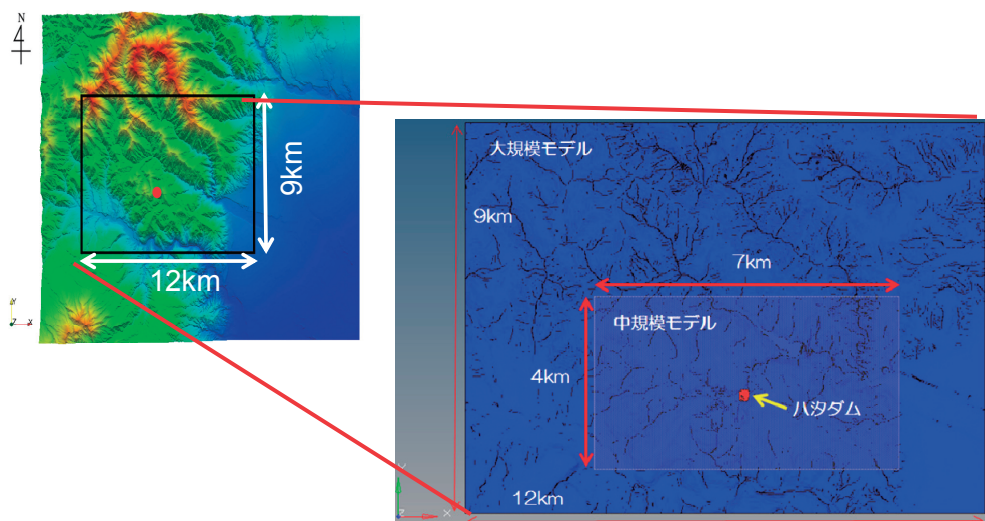


図2 大規模・中規模の解析範囲

表1 解析規模

	大規模モデル	中規模モデル
解析領域 (南北x東西x鉛直)	9km x 12km x 2.7km	4km x 7km x 2.7km
節点数	1181万	308万
要素数	1154万	300万

### 3.3 中規模モデル

中規模モデルでは、地形の影響を把握する比較的広い領域を解くことに加えて、解析規模から薄膜とみなせる遮水壁（構成厚さ36cm）の挙動を解くことが重要であり、遮水壁を詳細にモデル化した。そこで密度が異なる要素で作成した堤体と周辺地形の界面を多点拘束（Multiple Point Constraints = MPC）を採用して結合し、約20mの大きさの要素で周辺地形の広い領域を効率良くモデル化しながら、堤体では詳細な解析が可能なモデルを作成した（図3）。

図中の、緑色の要素は遮水壁を赤色は堤体を表す。白及びグレーは周辺地形を表している。モデルの要素規模は表2に示す通りとなる。

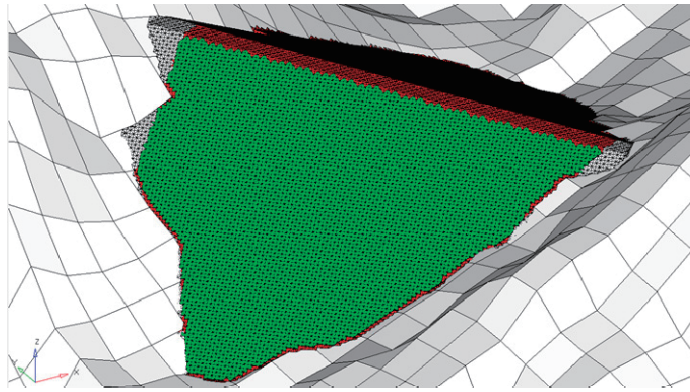


図3 堤体+遮水壁+周辺地盤動解析モデル

表2 中規模モデルの要素規模

	堤体と遮水壁	中規模モデル
要素サイズ	2m	20m
節点数	8.7万	308万
要素数	42万	300万

#### 4. 解析モデルの基本データ

解析モデル構築のための諸条件を整備した。

##### 4.1 解析コード

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た。

##### 4.2 周辺地形・地盤

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。

地盤のモデル化のための地層データは、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 8,000m 程度までの P 波速度 ( $V_p$ )、S 波速度 ( $V_s$ ) 及び密度 ( $\rho$ ) 分布のデータを入手した。これらが判れば地盤のポアソン比 ( $\nu$ ) 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的解析に必要な情報が得られる。

検討モデルでは、図 4 に示す通り、L1 から L4 までの 4 種類の地層データを設定した。

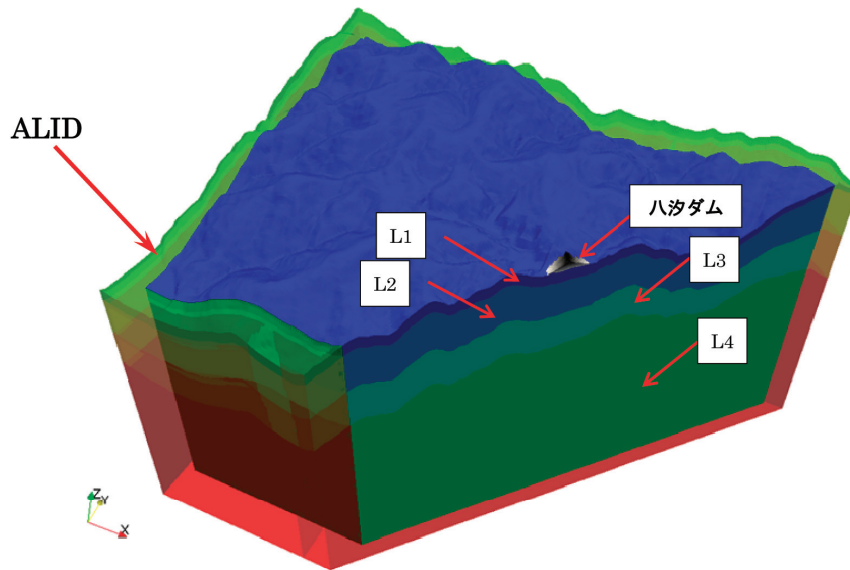


図4 周辺地盤の地層データ

#### 4.3 遮水壁と堤体

遮水壁に使用されているアスファルト混合物の物性値は、現地の遮水壁から採取したアスファルト混合物の力学試験結果を適用している。また、堤体のモデル化は段階的に変化する材料物性値を与えるために18分割し、堤体の表面からの深さ方向に5m刻みで物性値を澤田らの式<sup>2)</sup>に基づいて変更している。

#### 4.4 境界条件

境界条件は、解析モデル内での反射波の影響を消去するためにALID (Absorbing Layer Increasing Damping) を採用した。ALIDは、減衰を増加させた層(図4)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の外側の領域は静止していると仮定し、ALIDの外側の節点は全方向拘束条件を与えている。

#### 4.5 入力地震動

入力地震動はKiK-netのTCGH17における地下100mに設置された地震計の加速度を使用した。また、TCGH17は八汐ダムより西方に14.3km離れた地点にあり、地表面の観測ポイントの標高は635m。地下100mの観測ポイントの標高は535mである。一方、TCG002は西に4.4km離れた地点で観測ポイントは標高617.8mである。

そこでEA2(ダム基盤に設置した地震計)は標高962mであることから、TCGH17の地下100mに設置された地震計は地表面の影響を受け難く、TCG002のようなローカルサイトエフェクトの影響を受けていると考えられないことから、TCGH17の地下100mの地震計で観測された地震波を入力地震動として使用した。

## 5. 解析結果

ES2で実施した大規模モデルの解析結果のスナップショットを図5に示す。山脈の谷間に引張方向(赤色)、並びに圧縮方向(青色)のひずみが生じている様子が再現されている(例えば黄色の囲み箇所)。つまり、周辺地形でも山脈の地震時挙動が谷間に影響を及ぼし、その影響が堤体にも及んでいると判断できる。

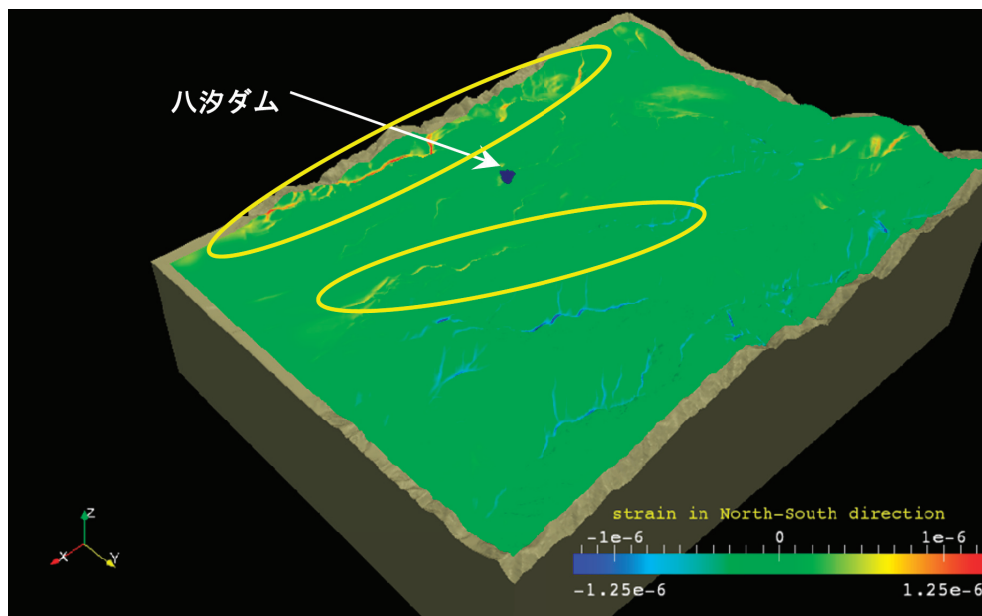


図5 大規模モデルの解析結果

次に中規模モデルの解析結果を図6に示す。大規模モデルの解析結果(図5)と同様に、周辺地形のダムへの影響を比較するために、南北方向のひずみ分布図とした。ここではダム調整池からダム上流方向の谷間に沿って生じた南北方向のひずみが、時間の経過とともにダムにまで伸びて行くことが表現されている。

つまり、大規模モデルの解析結果と同様に、谷間の両側に位置する山脈の挙動が、谷間のひずみを増大させており、その影響を堤体が受けていると判断できる。

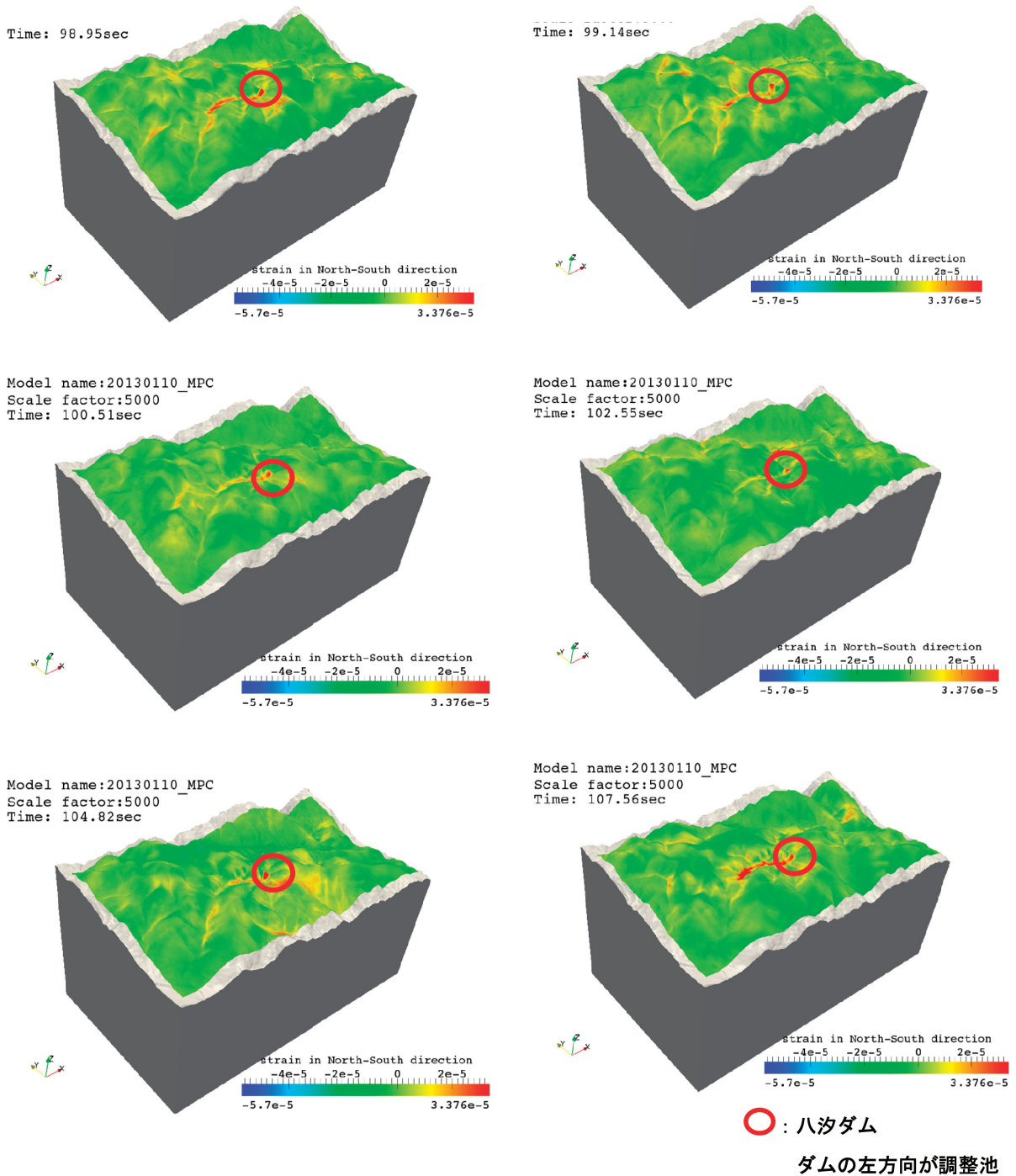
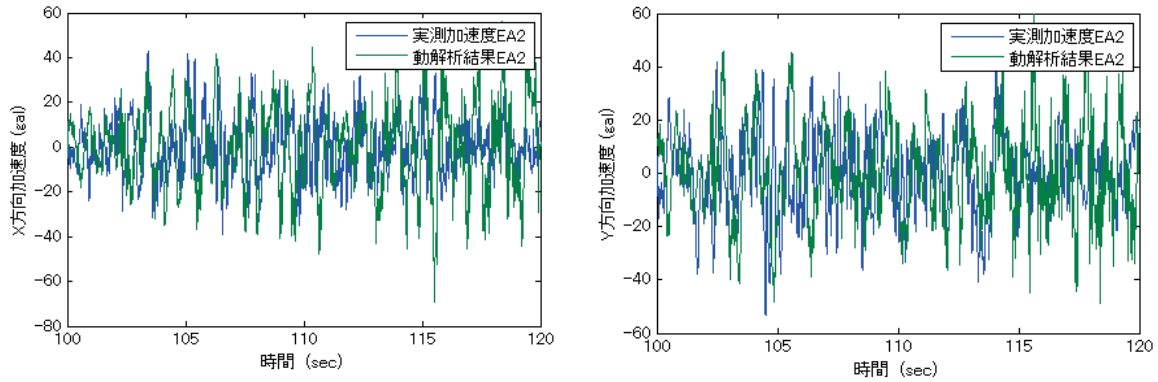


図6 中規模モデルの解析結果

また、地震の主要動における加速度波形を比較した。

図7に、ダム上下流方向（X方向）及びダム軸方向（Y方向）の中規模解析結果と実測の比較、及びES2大規模解析結果と実測を示す。両解析結果ともに実測値に近い値を出している。大規模モデルと中規模モデルの解析結果が完全に一致しているわけではないが、中規模モデルの解析では、実務を考慮し効率的な解析が可能であり、大規模モデルの解析結果と同様な結果を得られることがわかった。



中規模モデルの解析結果と実測の比較

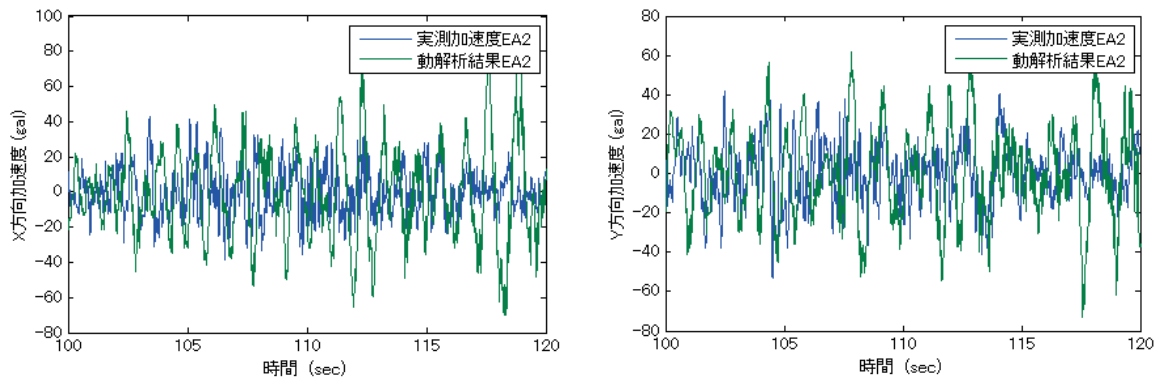


図7 解析結果と実測の加速度の比較

この中規模モデルの解析結果の一例（左岸の亀裂と引張ひずみの発生状況）を図8に示す。この図より遮水壁に生じた損傷の発生箇所へのひずみの集中する状況が一致した。

従って、遮水壁・ダム地震時挙動が再現できたと考える。

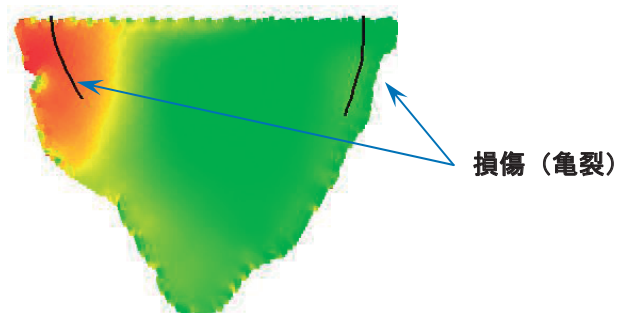


図8 遮水壁のひずみ発生状況

## 6. まとめ

一連の解析結果から、既存の二次元動的解析では得られなかった、ダム周辺地形のサイトエフェクトを再現することが出来た。また、再現されたひずみの分布は、遮水壁の損傷箇所と一致した。これより長周期地震動を想定したダムの振動性状解析における周辺地形の適用範囲の重要性を示すことができた。



## 謝辞

地球シミュレータの利用には、(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

- 1) 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.
- 2) 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.

## 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”

(2013年6月7日、東京大学生産技術研究所)