

# ダム本体の耐震性能照査について

(平成27年4月)



春の高遠ダム(ダム湖左岸から望む)



しあわせ信州

長野県企業局

## 実施した耐震性能照査について

- ◆耐震性能照査は下記指針等に基づき実施
  - ①「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説(以下「指針」という)」(国土交通省河川局)
  - ②「大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料(国土技術政策総合研究所資料)」
- ◆照査結果等については、学識経験者から助言・評価を受ける。
- ◆照査に用いる物性値の設定に際しては、下記調査を実施し適正かつ安全側であることを確認する。
  - ①コンクリートテスターによる非破壊検査(圧縮強度)
  - ②常時微動計測(固有周期)



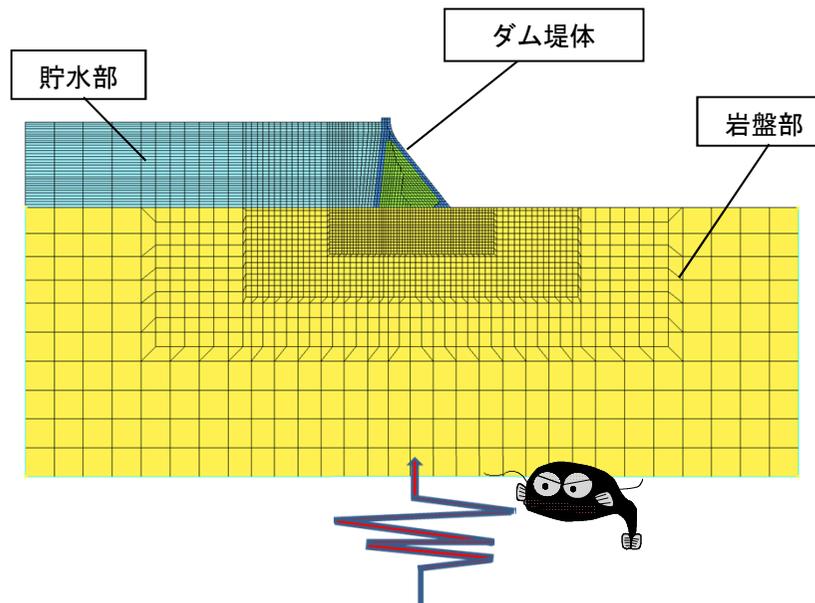
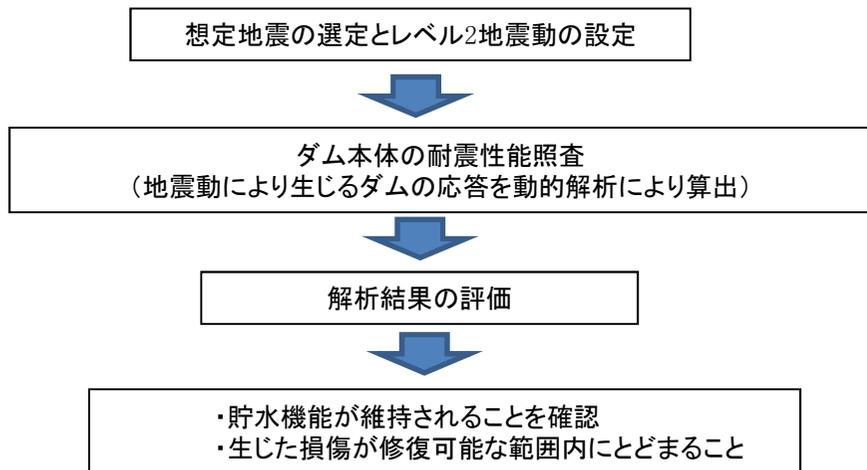
# 対象ダムについて

- ◆名称 高遠ダム
- ◆所在地等  
長野県伊那市高遠町  
天竜川水系三峰川
- ◆ダム形式  
重力式コンクリートダム
- ◆ダム規模  
堤高 30.9m  
堤頂長 76.1m
- ◆竣工年 1958年(昭和33年)
- ◆目的 発電、かんがい

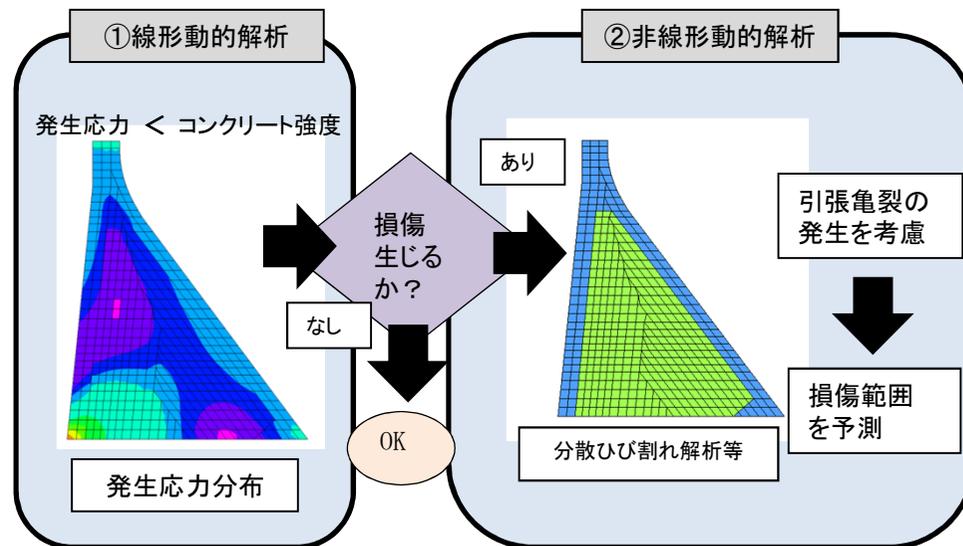


# ダム耐震性能照査の考え方

## 耐震照査の基本的な流れ



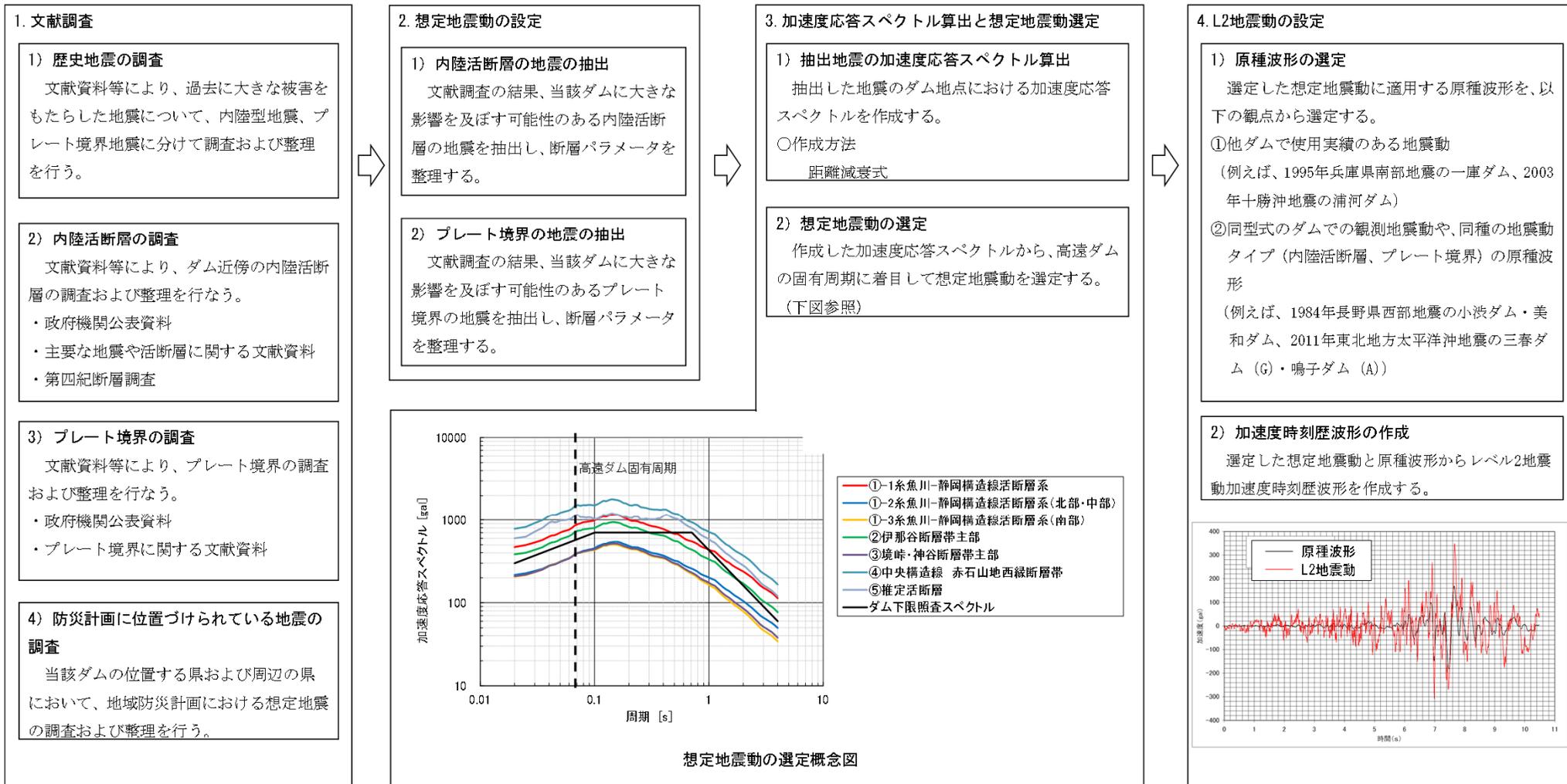
- ダム耐震性能照査に用いるレベル2地震動  
ダム地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の地震動
- ダム照査に用いる解析手法  
動的解析によることを基本とし、損傷過程を考慮した解析
- 照査すべき耐震性能  
レベル2地震動に対し、ある程度の損傷が生じることも想定した上で、以下の2つの耐震性能を満足することを確認する。
  - ①貯水機能が維持されること: 制御できない貯水の流出が生じないこと
  - ②生じた損傷が修復可能な範囲にとどまること: 適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で継続運用を可能とする損傷の範囲にとどまること。



重力式ダム堤体の耐震性能照査の流れ

# 想定地震の選定とレベル2地震動の設定

下記設定フローによりレベル2地震動を設定



# 想定地震の選定とレベル2地震動の設定

## 【想定地震の抽出と選定】

### (1) 内陸活断層

◆文献調査の結果より、当該ダムに大きな影響を及ぼす可能性のある内陸活断層の地震を抽出し、断層パラメータを整理する。

当該ダム周辺の内陸活断層地震の加速度応答スペクトルを、ダムの距離減衰式により算出する。

内陸活断層地震は、ダムサイトに影響を及ぼす可能性のあるものを以下の方法で絞り込む。

①:ダム地点から50km程度以内の活断層を、気象庁マグニチュードの大きい順に3つ程度抽出する。

なお、M6.8未満(断層長が15km未満)の活断層は、M6.8として取り扱う。

②:ダム地点までの距離の近い順に3つ程度抽出する。地図上で、等価震源距離の大小が判断できない場合は多めに抽出する。

◆距離減衰式による加速度応答スペクトルの算定

断層パラメータから、ダムの距離減衰式を用いて当該ダム地点での最大加速度、加速度応答スペクトルを算出する。

◆固有周期(またはその周期以下)で加速度応答スペクトルが最も大きくなる地震を想定地震として選定する。

### (2) プレート境界

◆プレート境界の地震は、地震規模が大きいことから、ダムから半径200kmの範囲を目安に調査する。



# 想定地震の選定とレベル2地震動の設定

## 【原種波形の選定】

当該ダムレベル2地震動の加速度時刻歴波形を作成する。

当該ダムにおける地震動の観測記録がないため、加速度時刻歴波形の作成に必要な原種波形は、同じ型式のダムで観測された地震動や、想定地震動のタイプ（内陸活断層、プレート境界）が同種である地震動の中から選定する。

今回の検討では、他ダムでの使用実績の多い実観測波形（同型式ダム）に加え、東北地方太平洋沖地震での同型式ダムで得られた実観測波を使用する。

作成するレベル2地震動は右のとおりとする。

作成するL2地震動（内陸活断層型）

想定地震	距離減衰式	原種波形	地震名	備考
中央構造線 赤石山地西縁 断層帯 (Mw7.4)	等価震源 距離式	一庫波(G)	1995年 兵庫県南部地震	使用実績の多い原種波形
		賀祥波(G)	2000年 鳥取県西部地震	使用実績の多い原種波形

作成するL2地震動（プレート境界型）

想定地震	距離減衰式	原種波形	地震名	備考
プレート境界 南海トラフ 全体 (Mw9.0)	最短 距離式	浦河波(G)	2003年 十勝沖地震	使用実績の多い原種波形
		三春波(G)	2011年 東北地方 太平洋沖地震	東北地方太平洋沖地震の コンクリートダムでの 観測波形



# 想定地震の選定とレベル2地震動の設定

## 【距離減衰式による加速度応答スペクトルの算定】

- ◆断層パラメータから、ダムの距離減衰式を用いて当該ダム地点での最大加速度、加速度応答スペクトルを算出する。
- ◆ダムの距離減衰式は、ダム基礎地盤（岩盤）に最も近い位置に設置された強震計により得られた多数の地震記録をもとに、各周波数の加速度応答スペクトル値について、断層までの距離、地震の規模（マグニチュード）、地表から断層中心までの深さをパラメータとして、統計解析により得られた回帰式である。

### ダムの距離減衰式の式型

#### 【最短距離式】

$$\log SA(T) = C_{m1}(T)M_w + C_h(T)H_c - \log(R + C_1(T) \cdot 10^{0.5M_w}) - (C_d(T) + C_{dh}(T)H_c)R + C_o(T) \quad (M_w \leq 5.0)$$

$$\log SA(T) = C_{m1}(T)M_w + C_{m2}(T)(M_o - M_w)^2 + C_h(T)H_c - \log(R + C_1(T) \cdot 10^{0.5M_w}) - (C_d(T) + C_{dh}(T)H_c)R + C_o(T) \quad (M_w > 5.0)$$

#### 【等価震源距離式】

$$\log SA(T) = C_{m1}(T)M_w + C_h(T)H_c - \log(X_{eq} + C(T)) - (C_d(T) + C_{dh}(T)H_c)X_{eq} + C_o(T) \quad (M_w \leq 5.0)$$

$$\log SA(T) = C_{m1}(T)M_w + C_{m2}(T)(M_o - M_w)^2 + C_h(T)H_c - \log(X_{eq} + C(T)) - (C_d(T) + C_{dh}(T)H_c)X_{eq} + C_o(T) \quad (M_w > 5.0)$$

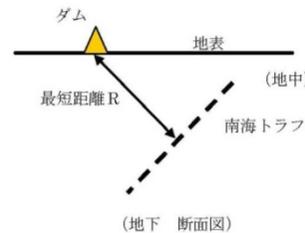
- T : 固有周期 (s)
- SA(T) : 減衰後加速度応答スペクトル (gal=cm/s<sup>2</sup>)
- M<sub>w</sub> : モーメントマグニチュード
- H<sub>c</sub> : 断層面中心深さ (km)
- R : 最短距離 (km)
- X : 等価震源距離 (km)
- C<sub>m1</sub>(T)、C<sub>m2</sub>(T)、C<sub>h</sub>(T)、C<sub>1</sub>(T)、C<sub>d</sub>(T)、C<sub>dh</sub>(T)、C<sub>o</sub>(T) : 回帰係数

### 震源からの距離の取り方

ダムの距離減衰式による地震動の推定では、震源までの距離を最短距離により評価する方法と、等価震源距離により評価する方法がある。

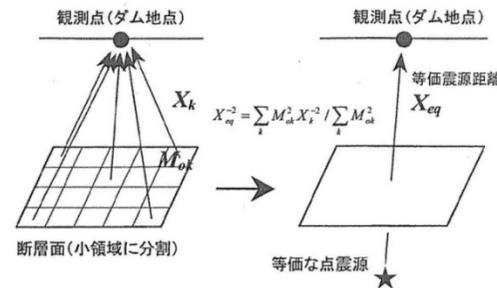
- 最短距離 : 断層面とダム地点の最短距離
- 等価震源距離 : 仮想的な点震源（断層面から発散される地震のエネルギーと等価となる点震源）とダム地点の距離

#### 【最短距離】



・最短距離 R は、対象とする断層面のうち、ダム地点から最も近い点とダム地点を結ぶ直線の長さとして求める

#### 【等価震源距離】



・等価震源距離 X<sub>eq</sub> は、断層面から発散される地震のエネルギーと等価となる点震源とダム地点の距離として求める

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum_k M_{ok}^2 X_k^{-2}}{\sum_k M_{ok}^2}$$

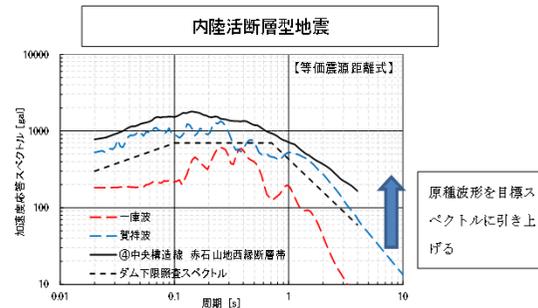
- X<sub>eq</sub> : 等価震源距離
- M<sub>ok</sub> : 断層面内の小領域kにおける地震モーメント
- X<sub>k</sub> : 断層面内の小領域kから観測点（ダム地点）までの距離

# 想定地震の選定とレベル2地震動の設定

## 【加速度時刻歴波形】

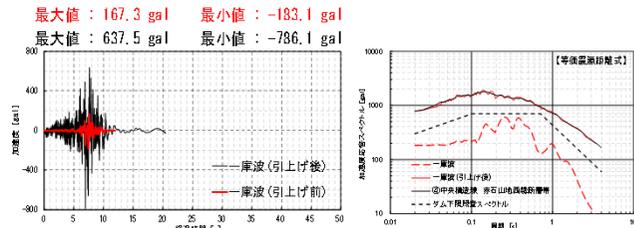
設定したレベル2地震動の加速度応答スペクトルに近似するよう原種波形を調整し、耐震性能照査に用いる加速度時刻歴波形を作成する。

高連ダムで使用するレベル2地震動を以下に示す。

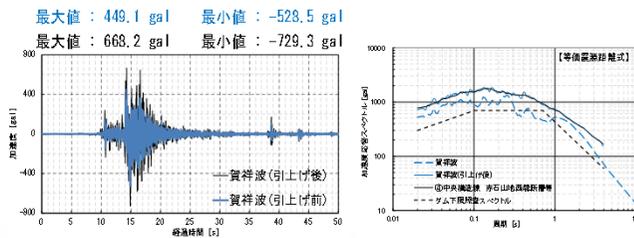


原種波形および目標スペクトルの関係

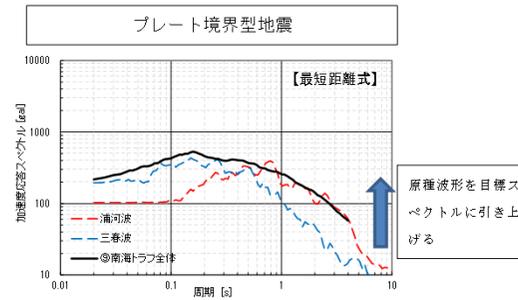
上記のスペクトルを基に原種波形を引き上げた結果を以下に示す。



加速度時刻歴波形(庫波)

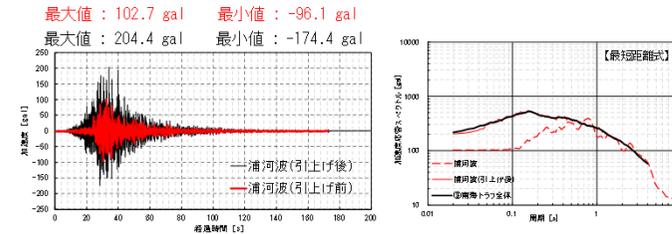


加速度時刻歴波形(賀祥波)

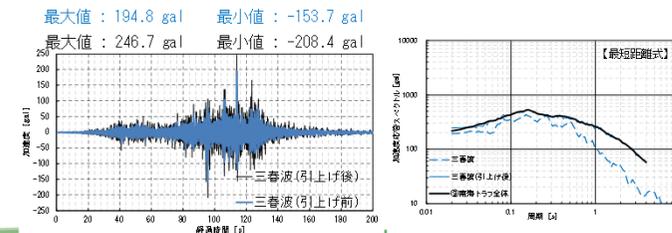


原種波形および目標スペクトルの関係

上記のスペクトルを基に原種波形を引き上げた結果を以下に示す。



加速度時刻歴波形(浦河波)

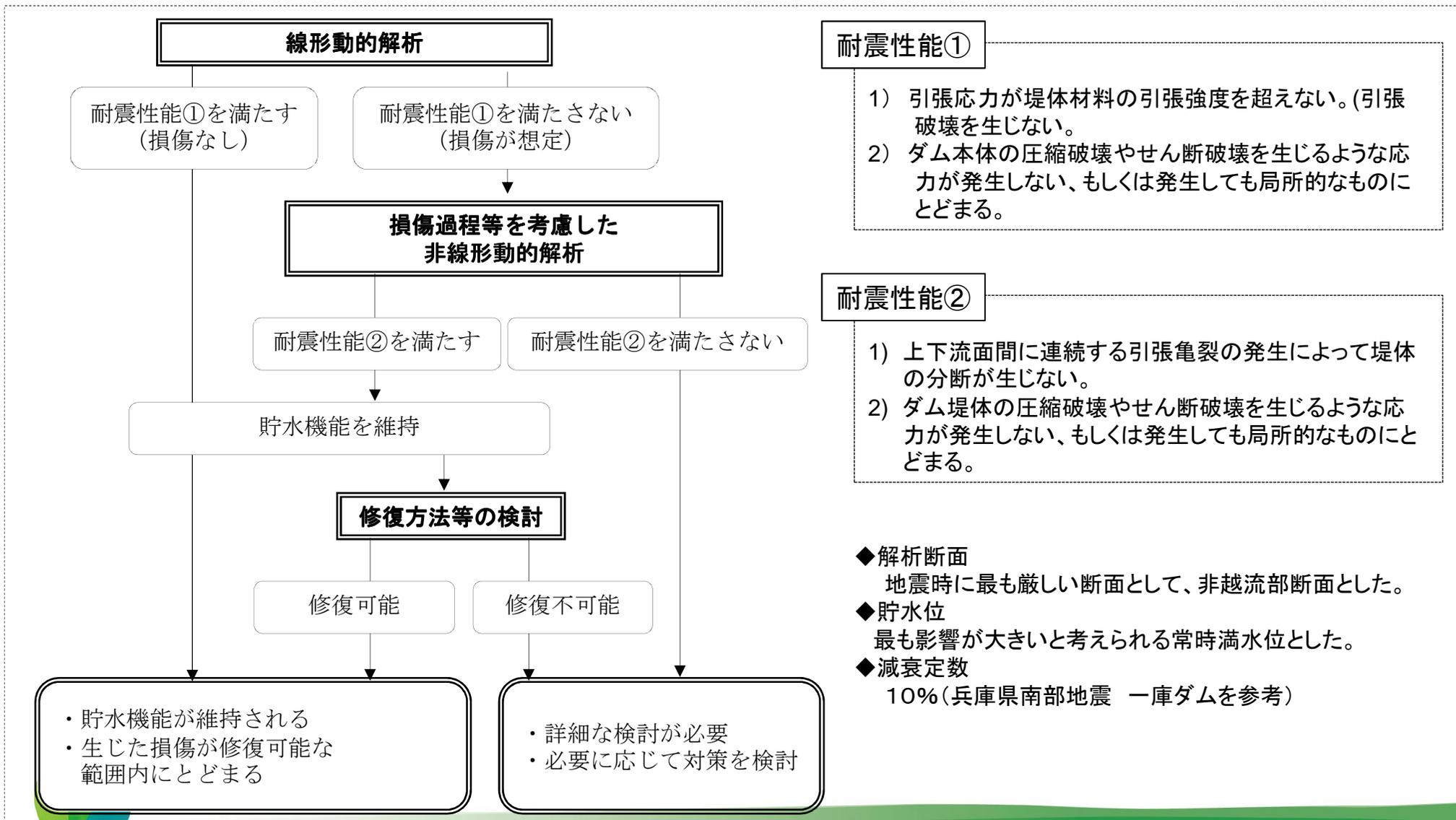


加速度時刻歴波形(三春波)



# ダム本体の耐震性能照

下記設定フローによりダム本体の耐震性能照査を実施



## 耐震性能①

- 1) 引張応力が堤体材料の引張強度を超えない。(引張破壊を生じない。)
- 2) ダム本体の圧縮破壊やせん断破壊を生じるような応力が発生しない、もしくは発生しても局所的なものにとどまる。

## 耐震性能②

- 1) 上下流面間に連続する引張亀裂の発生によって堤体の分断が生じない。
- 2) ダム堤体の圧縮破壊やせん断破壊を生じるような応力が発生しない、もしくは発生しても局所的なものにとどまる。

- ◆解析断面  
地震時に最も厳しい断面として、非越流部断面とした。
- ◆貯水位  
最も影響が大きいと考えられる常時満水位とした。
- ◆減衰定数  
10%(兵庫県南部地震 一庫ダムを参考)

# 解析物性値の設定

## ◆コンクリート圧縮強度

建設当時のダム設計数値から設定したが、この数値の適正性をコンクリートテスターによる非破壊検査で確認  
 設定したコンクリート圧縮強度 $26\text{N/mm}^2 < 34.5\text{N/mm}^2$ (非破壊検査平均値) ∴設定値は妥当な数値と判断

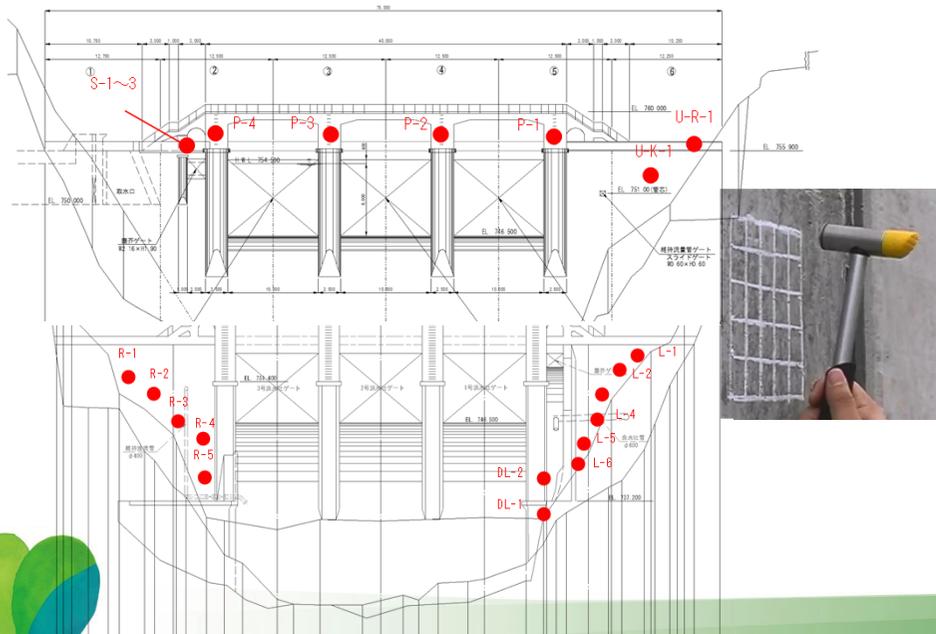
### 原位置コンクリート試験

コンクリートテスター (NETIS HK-060013-V) を用いた非破壊検査 (圧縮強度推定) を実施し、コンクリートの健全性を確認する。得られた結果と設計圧縮強度との比較を行い、耐震性能照査に用いるコンクリート強度 (物性値) を決定する。

### 解析方法

#### コンクリートテスター

- ハンマーでコンクリートを打撃した際に発生するコンクリート表面変形と反発を分離することで、コンクリートの表面劣化状況、圧縮強度、はく離などの有無を計測



コンクリートテスター計測箇所 (下流側)

測定箇所		STR ( $\text{N/mm}^2$ )	平均値 ( $\text{N/mm}^2$ )	INDEX	STA_A	STA_R
堤体部(右岸_下流側)	R-1	40.5	33.9	1.3	0	0
	R-2	26.8		1.4	0	0
	R-3	27.6		1.3	0	0
	R-4	31.8		1.5	0	0
	R-5	42.7		1.4	0	0
堤体部(右岸_上流側)	U-R-1	36.8	37.8	1.3	0	0
堤体の高欄部(右岸_上流側)	U-K-1	38.7		1.2	0	0
ピア部(上流部)	P-1	37.6	36.6	1.3	0	0
	P-2	42.4		1.2	0	0
	P-3	30.8		1.3	0	0
	P-4	35.5		1.2	0	0
導流壁(下流部左岸側)	DL-1	34.3	33.1	1.4	0	0
	DL-2	32.0		1.4	0	0
堤体部(左岸_下流側)	L-1	29.6	29.8	1.4	0	0
	L-2	26.3		1.5	0	0
	L-3	33.2		1.5	0	0
	L-4	28.8		1.4	0	0
	L-5	26.2		1.5	0	0
	L-6	34.5		1.5	0	0
取水口	S-1	31.3	36.1	1.4	0	0
	S-2	37.4		1.2	0	0
	S-3	39.7		1.2	0	0
全体平均		34.5				

INDEX < 0.9 : 測定がうまくいっていない  
 0.9 < INDEX < 1.3 : 表面劣化の可能性は少ないと評価  
 1.3 < INDEX < 1.5 : 表面劣化の可能性はあると評価  
 1.5 < INDEX < 2.0 : 表面劣化の可能性は高いと評価  
 2.0 < INDEX : 測定がうまくいっていない

STA = 0 : 表面剥離の可能性は少ないと評価  
 STA = 1 : 表面剥離の可能性はあると評価



# 解析物性値の設定

## ◆固有周期と弾性係数の設定

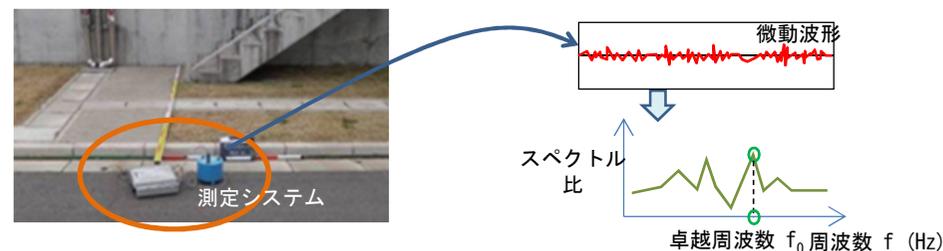
堤体の常時微動計測を行い堤体の固有周期を確認する。

常時微動計測結果と、文献から算出される固有周期概ね一致 ∴文献から算出した固有周期を物性値に設定  
固有値解析を実施し、弾性係数(E)を設定する。(設定した固有周期となるようEを設定)

### 1) 解析方法

#### 常時微動計測

- 各測定点における3成分(上下流、ダム軸、鉛直成分)の速度時刻歴波形(約30分)を観測する。それらの波形をスペクトル解析し、スペクトルの比から測定点の固有振動数を計測する。



常時微動計測の模式図

### 2) ダムの固有周期

(調査結果) ダム堤体の固有周期は

- ダム軸方向 : 0.06 ~ 0.09 s
- 上下流方向 : 0.05 ~ 0.07 s

に明瞭なピークを有しており、当該ダムの卓越周波数と推定した。

重力式ダムの固有周期は下式との対応があると言われている。

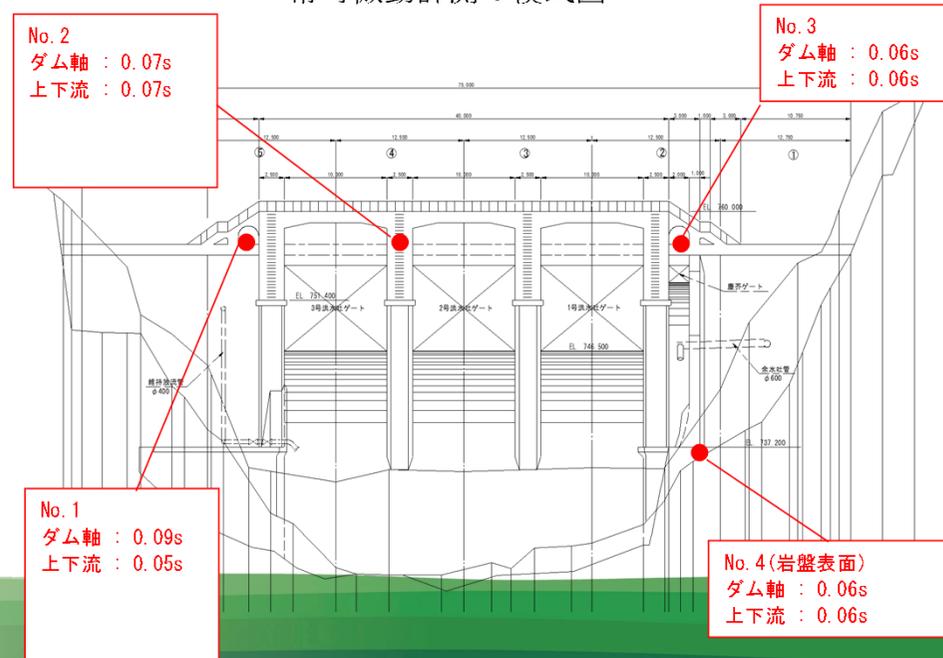
$$T = 0.22 \times H / 100 \text{ (s)}$$

(出典：多目的ダムの建設 第4巻 設計I編p.195)

当該ダムの高さから固有周期を算出すると、

$$T = 0.22 \times 30.9\text{m} / 100 = 0.068 \text{ s}$$

となり、常時微動計測結果とほぼ一致している。



# 学識経験者からの助言・評価

下記2段階で学識経験者から助言・評価を受けた。(一般財団法人 ダム技術センター)

- ◆対象地震動の選定・設定
- ◆ダム本体の耐震性能照査結果

## 【評価結果】

手法及び照査結果は概ね適正であるとの評価を受けた。

(おわりに)

今回実施したダム耐震性能照査は、経済産業省所管「平成26年度再生可能エネルギー発電設備耐力調査費補助金」による補助を受け実施したものです。本報告は、補助金の趣旨に従い、実施した手法等について報告するものです。

今後、関連構造物についても安全性を確認し、より安全な電力設備となるよう検討を進めてまいります。

