

# 旭ダムおよび関連構造物のレベル2地震動に対する耐震性能照査

## 1 はじめに

旭ダムは昭和10年（1935年）に建設された重力式コンクリートダムである。当該ダムがレベル2地震により損傷した場合、貯水の流出や発電の長期停止が懸念されることから、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」を利用して当該ダムのレベル2地震動に対する耐震性の確認を行った。本報告では、実施した耐震性能照査の方法を示す。

## 2 調査概要

以下に示す内容の調査を実施した。

- 1) ダム基礎岩盤のボーリング調査
- 2) レベル2地震動の設定
- 3) 解析用物性値の設定
- 4) ダム本体の耐震性能照査
- 5) ゲート構造物の耐震性能照査
- 6) ピアの耐震性能照査

## 3 調査対象設備

調査を行った旭ダムの構造図を図-1に、旭ダムおよび関連設備の諸元を表-1に、旭ダムの写真を図-2に示す。

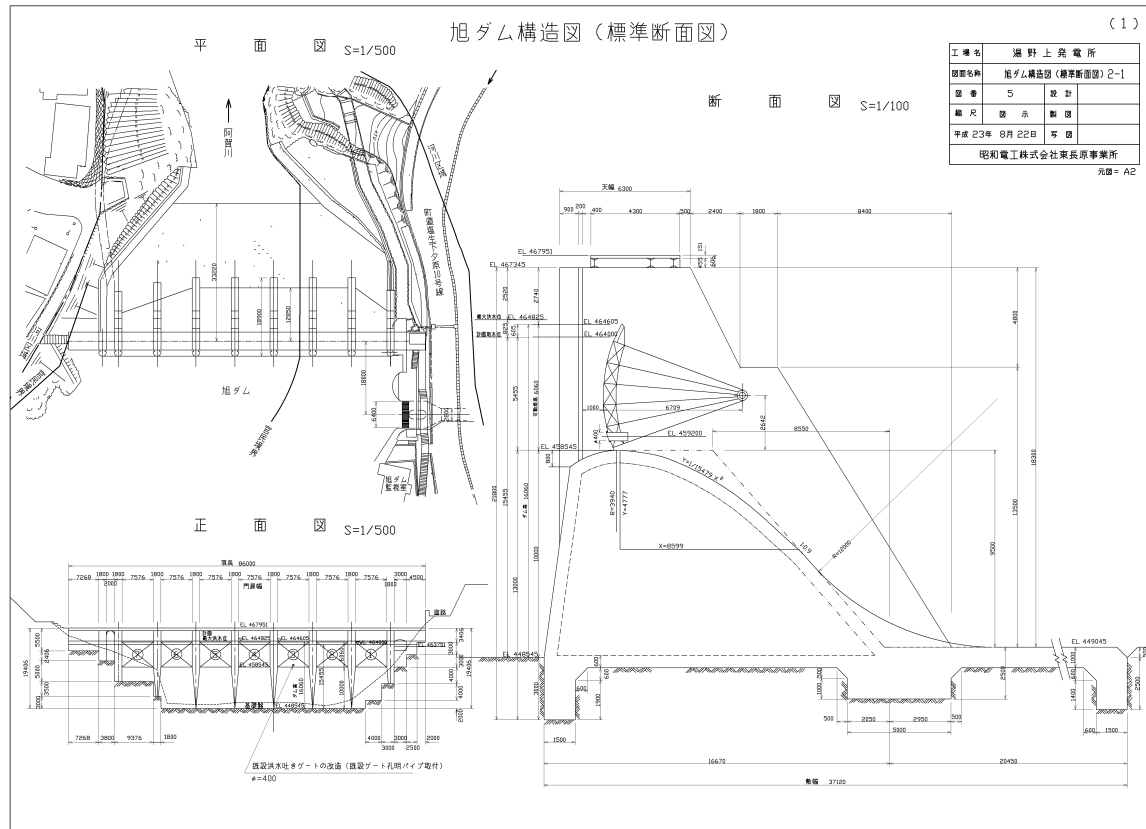


図-1 旭ダムの設備図面

表－1 旭ダムの諸元

| 構造物 | 項目        | 諸元                    |
|-----|-----------|-----------------------|
| ダム  | 名称        | 旭ダム                   |
|     | 所在地       | 福島県南会津郡下郷町            |
|     | 型式        | 重力式越流型可動扉付コンクリートダム    |
|     | 堤頂長       | 86.00m                |
|     | 天幅        | 6.30m                 |
|     | 敷幅        | 37.12m                |
|     | ダム高       | 16.06m                |
|     | 堤体容積      | 9,126m <sup>3</sup>   |
|     | 越流堤長      | 53.032m               |
|     | 竣工年       | 昭和10年（1935年）          |
| 貯水池 | 直接集水地域の面積 | 438km <sup>2</sup>    |
|     | 湛水区域の面積   | 0.2225km <sup>2</sup> |
|     | 最大背水距離    | 1,125m                |
|     | 設計洪水水位    | EL：464.825m           |
|     | 常時満水位     | EL：464.000m           |
|     | 予備放流水位    | EL：461.800m           |
|     | 最低水位      | EL：461.500m           |
|     | 有効貯水量     | 334,242m <sup>3</sup> |
| ゲート | 純径間×扉高    | 7.567m×6.060m         |
|     | ゲート種類     | ラジアルゲート               |
|     | ゲート門数     | 7門                    |
|     | 扉体重量      | 19.0t                 |
|     | 製造年       | 昭和10年10月（1935年）       |



(a) 上流側



(b) 下流側

図－2 旭ダムの写真

## 4 調査内容

### 4.1 ダム基礎岩盤のボーリング調査

ダムの耐震性能照査を実施する上で、ダム基礎岩盤の岩種、岩盤等級、弾性波速度等の情報を把握することが重要である。当該ダムに関する既往資料（ダムの建設前に行われた地質踏査記録）からダム基礎岩盤の岩種は特定できたものの、岩盤等級や弾性波速度等を把握するには至らなかったことから、ダム基礎岩盤のボーリング調査、標準貫入試験、PS 検層を実施した。

ボーリング調査は図-3 に示すダムの左岸側と右岸側の2箇所で実施した。ボーリング機械の概要図を図-4 に示す。孔径は $\phi 66\text{mm}$ とした。ダム底面から約5m下方まで掘削することを目標に、B-1 孔は地表から23m、B-2 孔は地表から27m掘削した。

標準貫入試験は主として地表面から基礎岩盤までの地盤の硬軟、地盤の締まり具合の相対値であるN値を求めるために行った。標準貫入試験の概要図を図-5 に示す。試験はJIS A 1219の基準に適合した試験器具により行い、深度間隔は1mとした。標準貫入試験の打撃回数は貫入量10cm毎に記録し、50回を越える場合は貫入長を測定し試験を終了した。

PS 検層はボーリング孔を利用し、基礎岩盤内を伝播する弾性波（P波およびS波）を測定した。PS 検層の概要図を図-6 に示す。検層方法はJGS1122-2003に従い、起振位置を地表面に置くダウンホール方式とした。

本調査より得られたボーリングコア写真の一部を図-7 に示す。当該ダムの基礎岩盤は、亀裂の少ない良好な火山礫凝灰岩である。

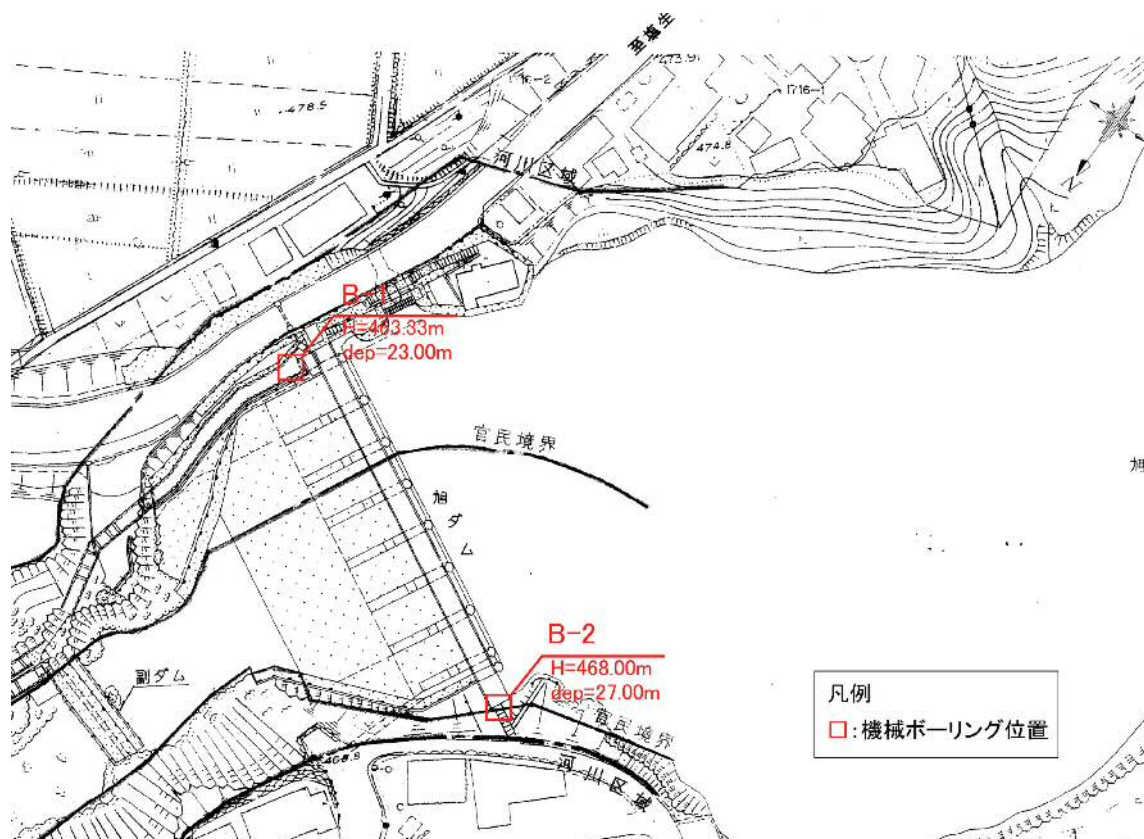
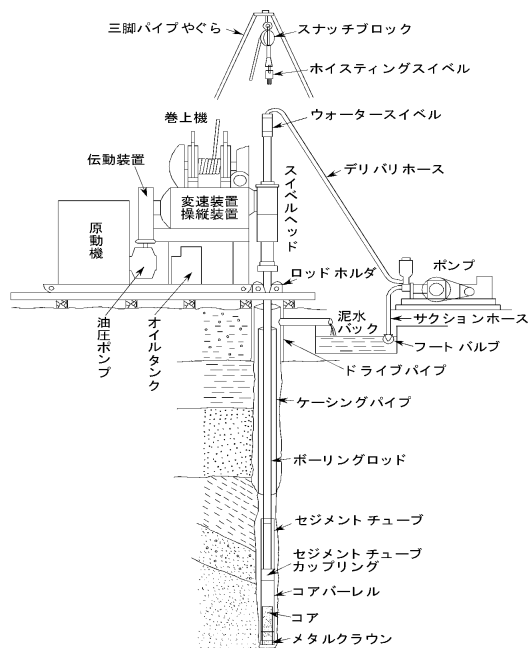


図-3 ボーリング調査位置



| 区分      | 名 称                | 型 式           | 仕 様     | 数 量 |
|---------|--------------------|---------------|---------|-----|
| 機械ボーリング | ロータリー式<br>ボーリングマシン | 東邦地下工機社製 D-B型 | 100.0m  | 1   |
|         | エンジン               | ヤンマー社製 ND 12型 | 12.0ps  | 1   |
|         | ポンプ                | 東邦地下工機社製 B33型 | 54l/min | 1   |

図-4 ボーリング機械概要図

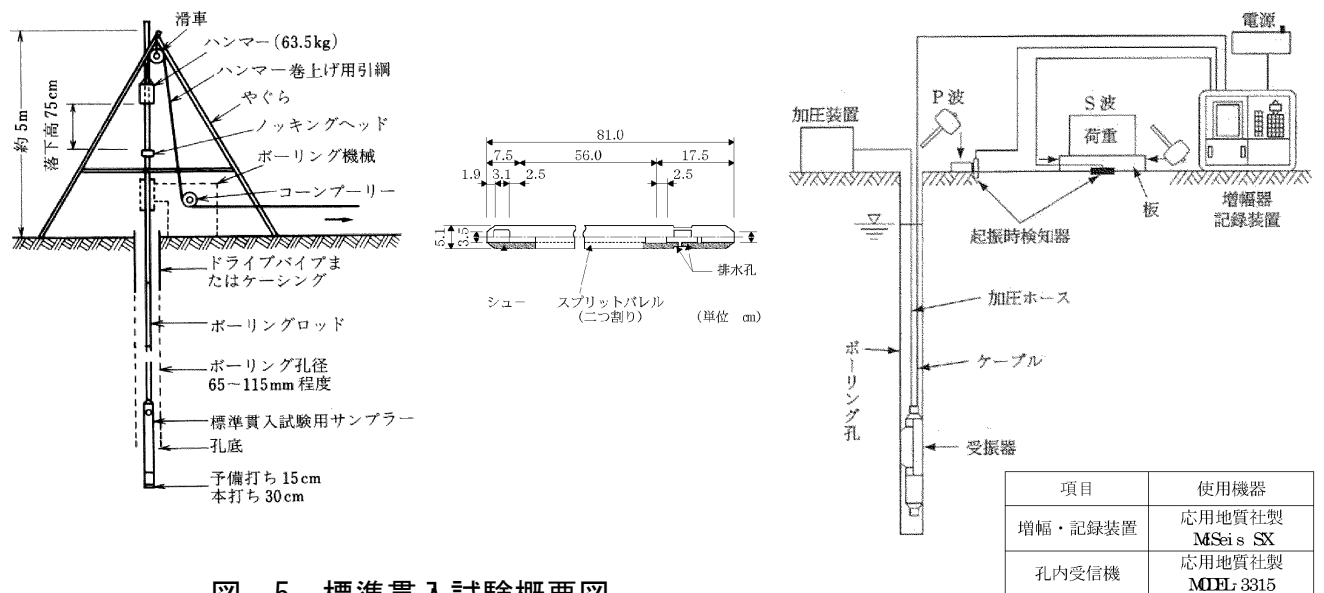


図-5 標準貫入試験概要図

図-6 PS 検層概要図



図-7 ボーリングコア写真

## 4.2 レベル2地震動の設定

現在から将来にわたって旭ダム地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動を、「水力発電設備の耐震性能照査マニュアル」や「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」等に準拠し、以下の手順で設定した。

### (1) 地震動の調査

J-SHIS（防災科学研究所）、中央防災会議、産総研活断層データベース等を調査し、旭ダム近傍の断層・プレートに関する情報（マグニチュード、震源までの距離、断層の大きさ等）を収集した。旭ダムと周辺の主要な活断層の分布を図-8に、断層情報を表-2に示す。なお、旭ダムは海岸線から100km程度離れており、海溝型地震については図-8に示す地震動と比較して影響が小さいものと判断した。

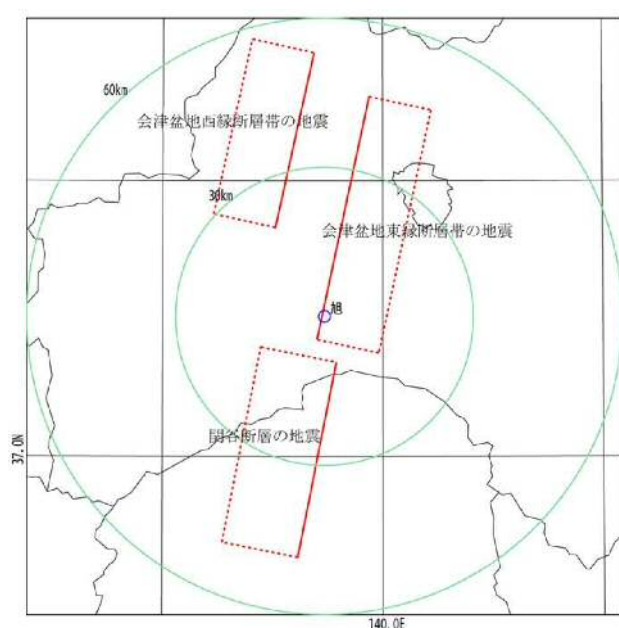


表-2 断層情報

| 地震            | 基準点                     | 上縁<br>深さ | 走向     | 傾斜  | 長さ   | 幅    | $M_0$ | $M_J$ |
|---------------|-------------------------|----------|--------|-----|------|------|-------|-------|
| 会津盆地<br>東縁断層帯 | 37.212° N<br>139.851° E | 2km      | 12.1°  | 45° | 54km | 18km | 7.0   | 7.7   |
| 会津盆地<br>西縁断層帯 | 37.732° N<br>139.844° E | 2km      | 192.5° | 45° | 36km | 18km | 6.8   | 7.4   |
| 関谷断層          | 37.171° N<br>139.895° E | 2km      | 191.3° | 30° | 40km | 18km | 6.9   | 7.5   |

図-8 ダム周辺の主な活断層

### (2) 距離減衰式による加速度応答スペクトルの推定

ダム距離減衰式 (H23 式) より、各地震動によるダム地点の加速度応答スペクトル（揺れの強さ）を推定し、ダム等に影響が大きいと考えられる地震動を選定した。

ダム周辺の主な活断層が活動した場合に想定されるダム地点の加速度応答スペクトルを図-9に示す。加速度応答スペクトルを作成した3つの地震動のうち、全ての周期帯で加速度応答スペクトルが大きくなる会津盆地東縁断層帯の地震を旭ダムのレベル2地震動として選定した。なお、この地震動は国土交通省が定める最低限考慮すべきレベル2地震動（下限スペクトル）を全周期帯で上回っている。

### (3) 時刻歴波形の作成

会津盆地東縁断層帯の地震に適合する位相特性を経験的グリーン関数法により作成し、図-10に示すレベル2地震動の時刻歴波形を作成した。

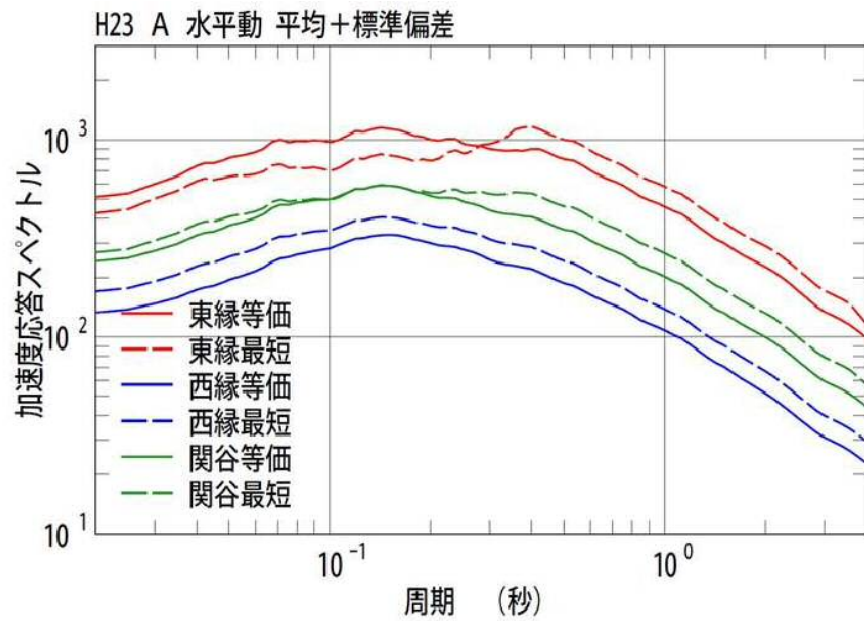


図-9 想定地震の加速度応答スペクトル

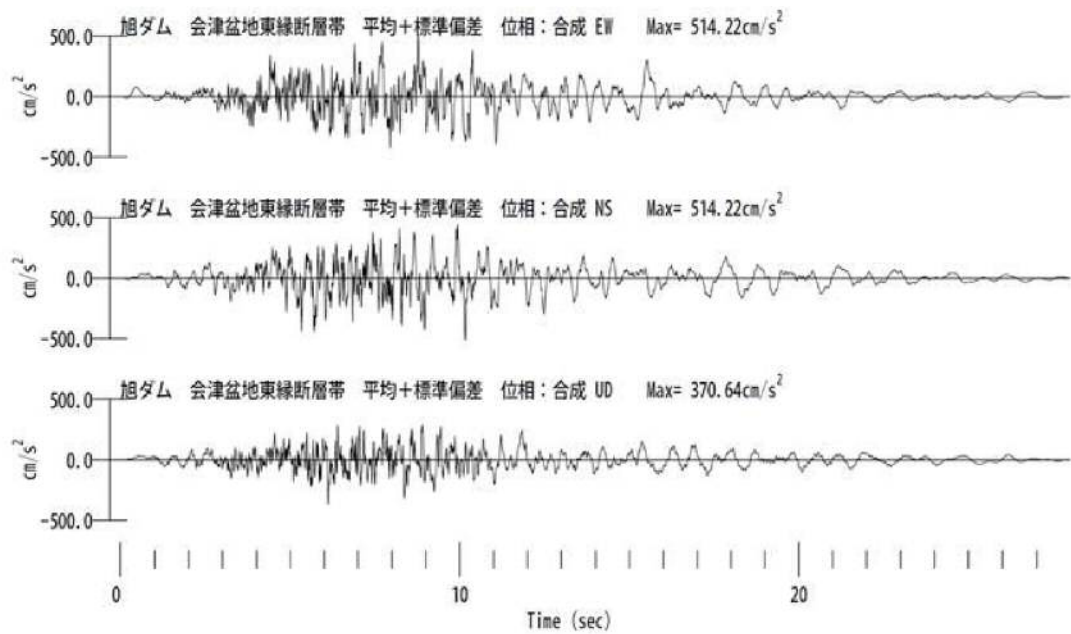


図-10 作成したレベル2地震動の時刻歴波形

### 4.3 解析用物性値の設定

解析に使用するコンクリート・岩盤・鋼材等の物性値（単位体積重量・弾性係数・ポアソン比）、強度、ゲートの腐食量等を既往調査記録や各種基準類を参考に設定した。

#### (1) コンクリートの物性値

コンクリートの物性値は、既往調査記録等から単位体積重量と圧縮強度を推定し、圧縮強度を基にコンクリート標準示方書等に記載されている推定式より弾性係数、引張強度を推定した。なお、ダムコンクリートはピア等の構造コンクリート、ダム本体の外部コンクリート、ダム本体の内部コンクリート等で強度が異なることから、図-11 に示す区分に応じた物性値を設定した。

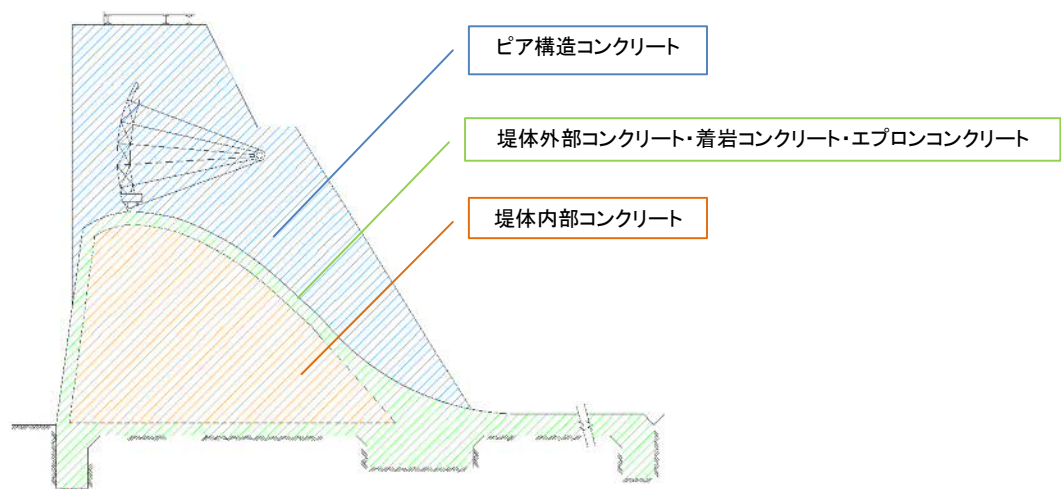


図-11 コンクリートの物性区分

#### (2) 岩盤の物性値

岩盤の物性値のうち、岩盤の弾性波速度はダム基礎岩盤の調査（PS 検層）より設定した。その他の物性値（単位体積重量、変形係数、強度定数等）は、ボーリングコアより判定した岩盤等級を参考に一般的な値を適用した。なお、当該地点の岩盤等級は  $C_M$  級～ $C_H$  級程度と評価できるが、安全側の配慮より一般値は  $C_M$  級相当の値とした。

#### (3) 鋼材の物性値

鋼材の物性値は既往の強度計算書より現行の SS400 相当であると判断し、SS400 の一般値を使用した。

#### (4) ゲートの板厚

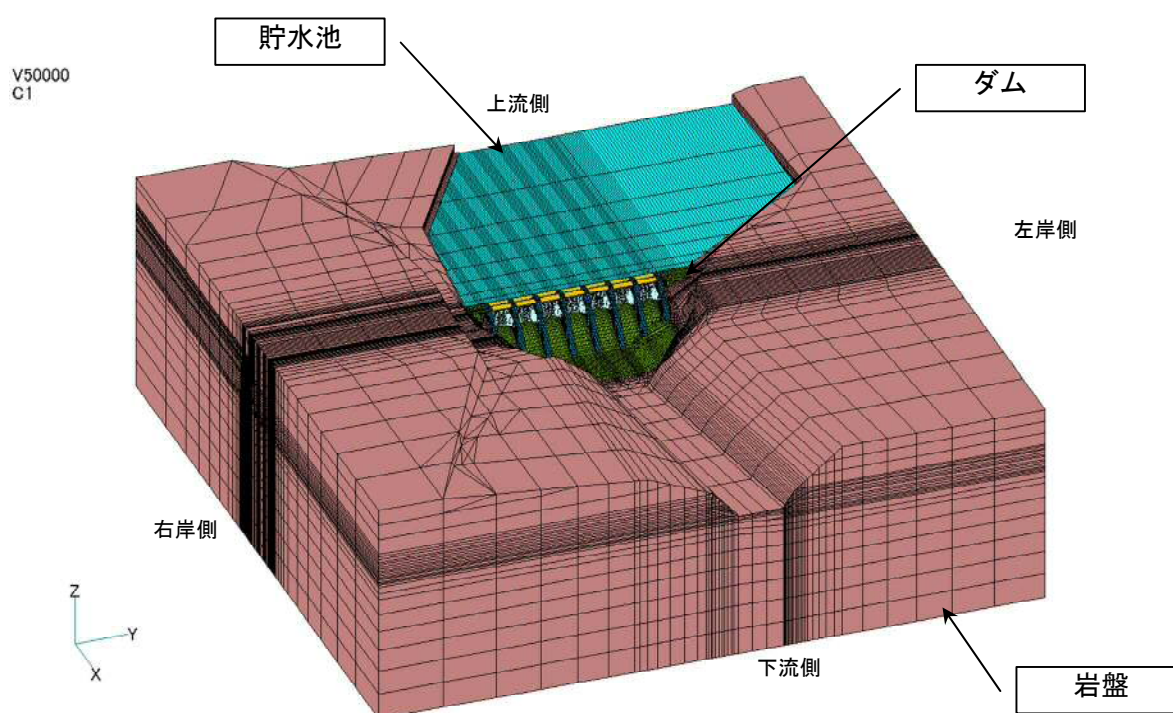
耐震性能照査に用いるゲートの板厚は、既往の板厚調査記録より年間腐食速度を求め、設定板厚から現在に至るまでの腐食量（年間腐食速度×製造からの経過年数）を減じて求めた。

#### 4.4 ダム本体の耐震性能照査

ダム本体の耐震性能照査は、「水力発電設備の耐震性能照査マニュアル」や「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」等に準拠して行った。

##### (1) 解析モデル

図－12 に示すダム－ゲート－貯水－岩盤を連成した三次元全体モデルを作成した。このモデルはダム本体の耐震性能照査を行うことに加え、ゲートやピアに作用する地震荷重を求めることを目的としたモデルである。



図－12 旭ダムの三次元全体モデル

##### (2) ダム本体の耐震性能照査

三次元全体モデルの線形動的解析を行い、ダムに発生する地震時の応力を算定した。これらの応力に対して表－3 に示す項目を検討し、レベル2地震動に対するダム本体の耐震性能を照査した。

表－3 ダム本体の照査項目

| 照査項目        | 照査基準                   |
|-------------|------------------------|
| 引張破壊に対する照査  | 引張応力 $\leq$ コンクリート引張強度 |
| 圧縮破壊に対する照査  | 圧縮応力 $\leq$ コンクリート圧縮強度 |
| せん断破壊に対する照査 | 局所せん断摩擦安全率 $\geq 1.0$  |
| 引張破壊に対する照査  | 引張亀裂がダム上下流面間に連続しない     |
| せん断破壊に対する照査 | 圧縮破壊、せん断破壊が局所的なもの      |

## 4.5 ゲート構造物の耐震性能照査

ゲートの耐震性能照査は、「水力発電設備の耐震性能照査マニュアル」や「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」等に準拠して行った。

### (1) 解析モデル

図-13 に示すゲートの三次元モデルを作成した。このモデルはゲートの塑性化や座屈を照査することを目的としたモデルであり、設備図面を参考にできる限り構造部材をモデル化している。

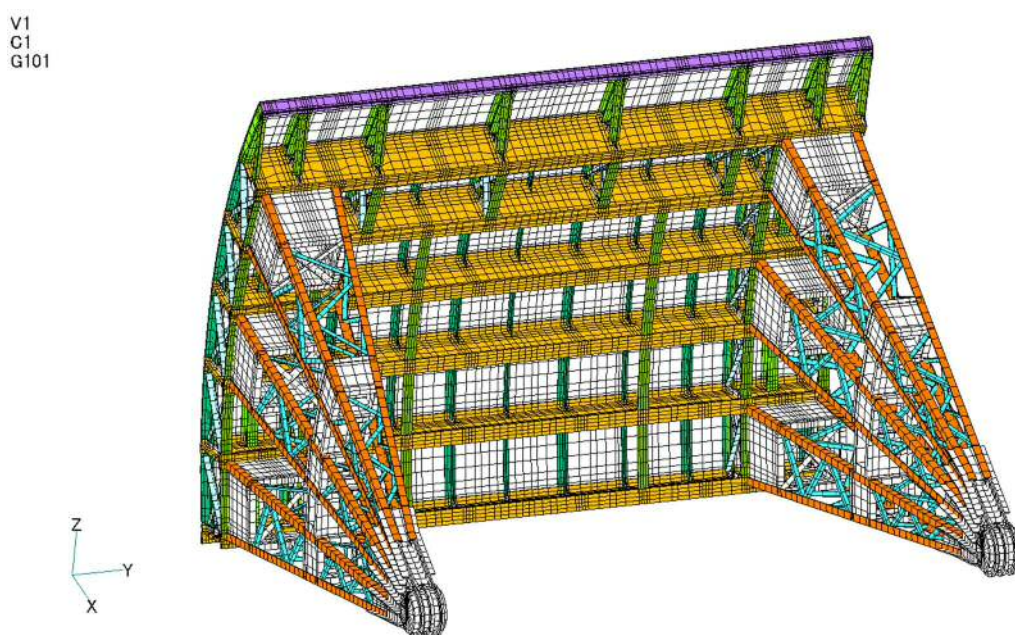


図-13 旭ダム洪水吐ゲートの解析モデル

### (2) ゲートの耐震性能照査

ゲートの解析モデルの線形動的解析を行い、ゲートに発生する地震時の応力を算定した。これらの応力に対して表-4 に示す項目を検討し、レベル2 地震動に対するゲートの耐震性能を照査した。構造部材以外にも、解析モデルの固定部に作用した荷重を用いて構造計算により表-5 に示すゲート固定部の照査を行った。また、三次元全体モデルのピア天端の応答加速度を用いて、安定計算により表-6 に示すゲートの開閉装置の照査を行った。

表－4 ゲートの照査項目

| 限界状態                                               | 照査基準                                                                                                      |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主要構造部材が座屈しない状態                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主要構造部材の応力<br/> <math>\leq</math> 許容座屈応力</li> </ul>               |
| 補助構造部材が座屈しない、または座屈してもその影響により主要構造部材が座屈しない状態         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 補助構造部材の応力<br/> <math>\leq</math> 許容座屈応力</li> </ul>               |
| 主要構造部材のひずみが弾性域内にとどまる状態                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主要構造部材のひずみ<br/> <math>\leq</math> 降伏ひずみの 2 倍程度</li> </ul>        |
| 補助構造部材のひずみが限定的な塑性化にとどまる状態                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 補助構造部材のひずみ<br/> <math>\leq</math> 降伏ひずみの 10 倍程度</li> </ul>       |
| 主要構造部材および補助構造部材のひずみがほぼ弾性域内にとどまる状態（洪水吐）             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主要構造部材・補助構造部材のひずみ<br/> <math>\leq</math> 降伏ひずみの 2 倍程度</li> </ul> |
| 主要構造部材および補助構造部材のひずみが弾性域内にとどまる状態（放流管） <sup>注)</sup> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主要構造部材・補助構造部材のひずみ<br/> <math>\leq</math> 降伏ひずみ</li> </ul>        |
| ゲートと戸当り金物との水密性が確保される状態                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ゲートのたわみ<br/> <math>\leq</math> 許容変位</li> </ul>                   |

注) 降伏ひずみを超過してもゲートが開閉可能であれば、限界状態を「ほぼ弾性域内にとどまる状態」とすることができる。

表－5 ゲート固定部の照査項目

| 限界状態             | 照査基準                                                                                          |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| トラニオンピンが損傷しない状態  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 発生ひずみ<br/> <math>\leq</math> 降伏ひずみの 2 倍程度</li> </ul> |
| アンカーレーズ等が損傷しない状態 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 発生応力<math>\leq</math>コンクリートの強度</li> </ul>            |

注) ゲート固定部の鋼材の照査基準は、ゲートの主要構造部材と同様の基準とした。

表－6 開閉装置の照査項目

| 限界状態                 | 照査基準                                                  |
|----------------------|-------------------------------------------------------|
| ボルトがせん断破壊し、設備が移動しない  | 水平せん断応力<br>$\leq$ せん断降伏応力度<br>水平せん断応力<br>$\leq$ せん断強さ |
| ボルトに引き抜きが生じ、設備が転倒しない | 引き抜き力<br>$\leq$ 引き抜き耐力                                |

## 4.6 ピアの耐震性能照査

ピアの耐震性能照査は、「水力発電設備の耐震性能照査マニュアル」や「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」等に準拠して行った。

### (1) 解析モデル

図-14 に示すピアの三次元モデルを作成した。当該ピアの操作橋梁はピアコンクリートに埋め込まれている構造であることから、操作橋梁がピアの地震時応答を抑制する効果を期待し、操作橋梁もモデル化した。このモデルは、ピアの曲げ破壊やせん断破壊に対する照査ならびに変形量の照査を行うこと、操作橋梁の照査を行うことを目的としたモデルである。

ピア部は鉄筋コンクリートの非線形挙動を考慮できる非線形解析モデルとし、操作橋梁は線形解析モデルとした。

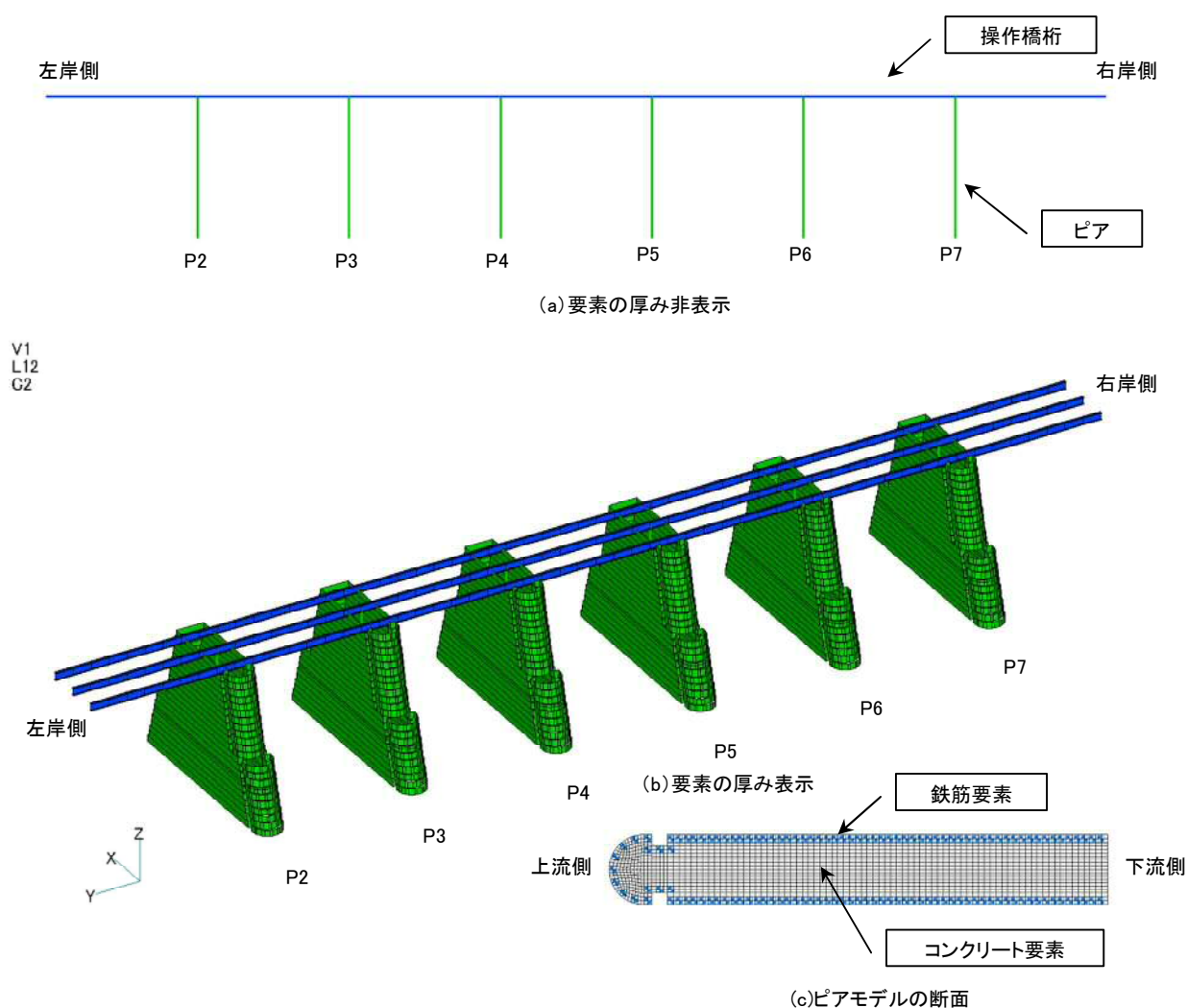


図-14 ピアの解析モデル

## (2) ピアの耐震性能照査

ピアの解析モデルの非線形動的解析を行い、ピアに発生する地震時の断面力や変形、ならびに操作橋梁に発生する応力を算定した。これらの応答値に対して表－7、表－8に示す項目を検討し、レベル2地震動に対するピアおよび操作橋梁の耐震性能を照査した。

表－7 ピアの照査項目

| 限界状態                                                                                                                                                                                                         | 照査基準                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ピアの損傷によりゲートが脱落しない状態                                                                                                                                                                                          | (曲げ破壊に対する照査)<br>コンクリート圧縮ひずみ $\leq 2,000\mu$ (0.2%)<br>鉄筋引張ひずみ <sup>注1)</sup> $\leq 30,000\mu$ (3%) |
|                                                                                                                                                                                                              | (せん断破壊に対する照査)<br>作用せん断力 $\leq$ 許容せん断耐力                                                             |
| ピアの変形によりゲートが崩壊しない状態                                                                                                                                                                                          | ゲート位置におけるピアの最大応答変位<br>$\leq$ ゲートの可動範囲                                                              |
| 操作架台の脱落によりゲートが崩壊しない状態                                                                                                                                                                                        | ピアの最大応答変位 $\leq$ 桁かかり長の 1/2                                                                        |
| ゲートが設計洪水位以上まで開閉可能な状態                                                                                                                                                                                         | ピアの残留変位 $\leq$ ピアの高さの 1/100                                                                        |
|                                                                                                                                                                                                              | ピアの残留変位 $\leq$ ゲートの可動範囲                                                                            |
|                                                                                                                                                                                                              | ピアの残留変形 $\leq$ 許容残留変形角                                                                             |
| 「水力発電設備の耐震性能照査マニュアル」では、鉄筋の引張ひずみの許容値は $100,000\mu$ (10%)と記載されているが、このひずみレベルに達した鉄筋コンクリートは、形を維持できずにコンクリートが粉々に砕けているような状態であり、解析精度が担保できない。そこで、本検討では、Shawky、Maekawa らの研究論文に記載されている引張破壊ひずみ $30,000\mu$ (3%) を照査基準とした。 |                                                                                                    |

表－8 操作橋梁の照査項目

| 限界状態           | 照査基準                                                       |
|----------------|------------------------------------------------------------|
| 操作橋に損傷が生じない状態。 | 発生応力 (N/mm <sup>2</sup> ) $\leq$ 降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |

## 5 まとめ

以上の耐震性能照査の結果を基に、大規模地震が発生した場合でも公衆災害を防止し、発電機能が維持できるよう、適切な維持管理を行っていく予定である。