

裾花ダム・湯の瀬ダムにおけるダム本体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について

1. はじめに

裾花ダムは、裾花川総合開発事業の一環として建設されたダムで、洪水調節を主な目的とし、併せて発電および上水道用水の供給を行うダム高 83m のアーチ式コンクリートダムである。湯の瀬ダムは、裾花発電所の逆調整地として、裾花ダムの下流約 1.3km に建設されたダム高 18m の重力式コンクリートダムであり、裾花ダムと一体となり電気の安定供給に供している。

両ダムがレベル 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 27 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。

裾花ダムおよび湯の瀬ダム及び裾花発電所の位置は図 1.1 に示すとおりである。また、裾花ダムおよび湯の瀬ダムの写真、図面および諸元を以下に示す。



裾花発電所概略図

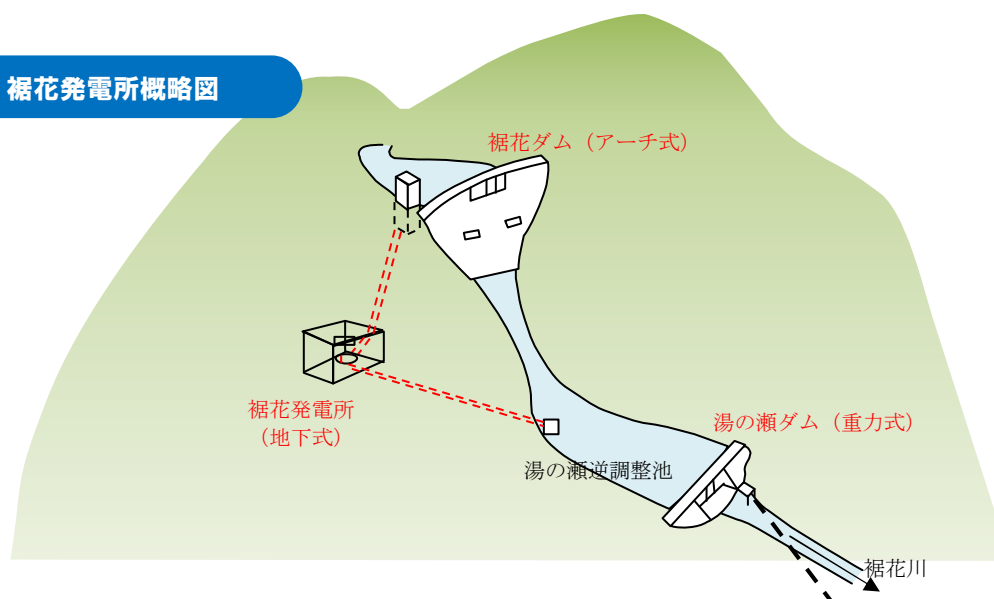


図 1.1 裾花ダム・湯の瀬ダム及び裾花発電所 位置図



(a) 全景



(b) 近景

写真 1.1 裾花ダム

表 1.1 裾花ダムの諸元

区分	細区分		当該項目	備考
ダム名			裾花ダム	
河川			一級河川信濃川水系裾花川	
所在地			長野県長野市大字入山字岩戸南沖4553	左岸
緯度、経度			北緯 36 度 40 分 06 秒, 東経 138 度 07 分 12 秒	世界測地系
目的			F,W,P	
所管			長野県	
段階			管理Ⅲ期	
貯水池	集水面積	km ²	250	
	湛水面積	km ²	0.58	
	総貯水量	m ³	15,000,000	
	有効貯水量	m ³	10,000,000	
計画高水量	計画高水流量	m ³ /s	1,250	
	調節流量	m ³ /s	530	
	洪水調節方法		一定率調節方式	
ダム	ダム型式		アーチ式コンクリートダム	
	堤高		83.0	
	堤頂長		211.2	
	堤頂標高	EL.m	563.0	
	堤体積	m ³	131,000	
	常時満水位	EL.m	560.0	
	制限水位	EL.m	537.5	
	基礎標高	EL.m	480.0	
	下流法面勾配	1 : m	—	
	上流法面勾配	1 : m	—	
	フィレット勾配	1 : m	—	
河床部岩盤	岩種		安山岩および凝灰角礫岩	
	岩級		—	
	弾性波速度	P 波(km/s)	3.5	
洪水吐き	常用洪水吐き		ラジアルゲート (クレスト) B=9.0m×H=6.80m×3 門	
	非常用洪水吐き		ローラーゲート (コンジット) B=3.5m×H=3.546m×2 門	
発電・放流設備	発電設備		ローラーゲート B=3.0m×H=3.15m×1 門	発電用取水口
	利水放流		ジェットフローゲート Φ0.15m	



図 1.2 裾花ダム 平面図

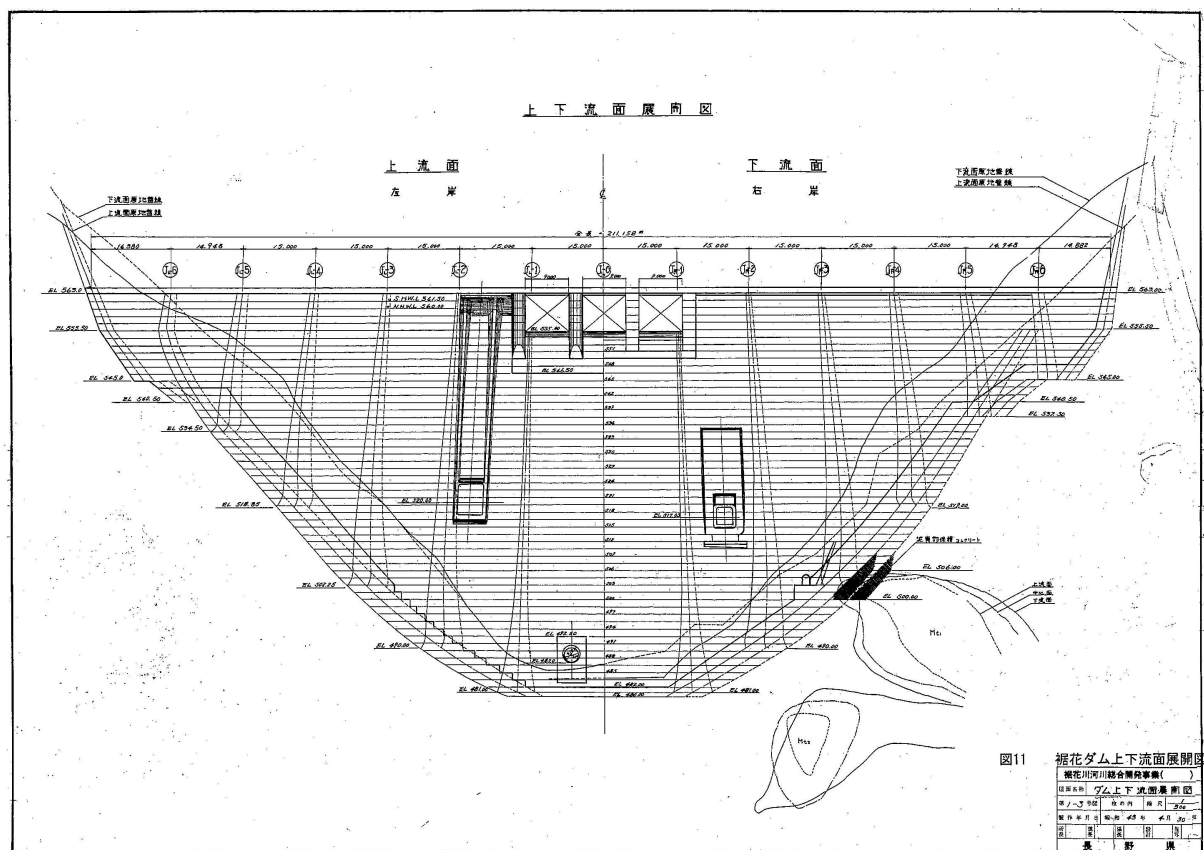


図 1.3 裾花ダム 上下流展開図

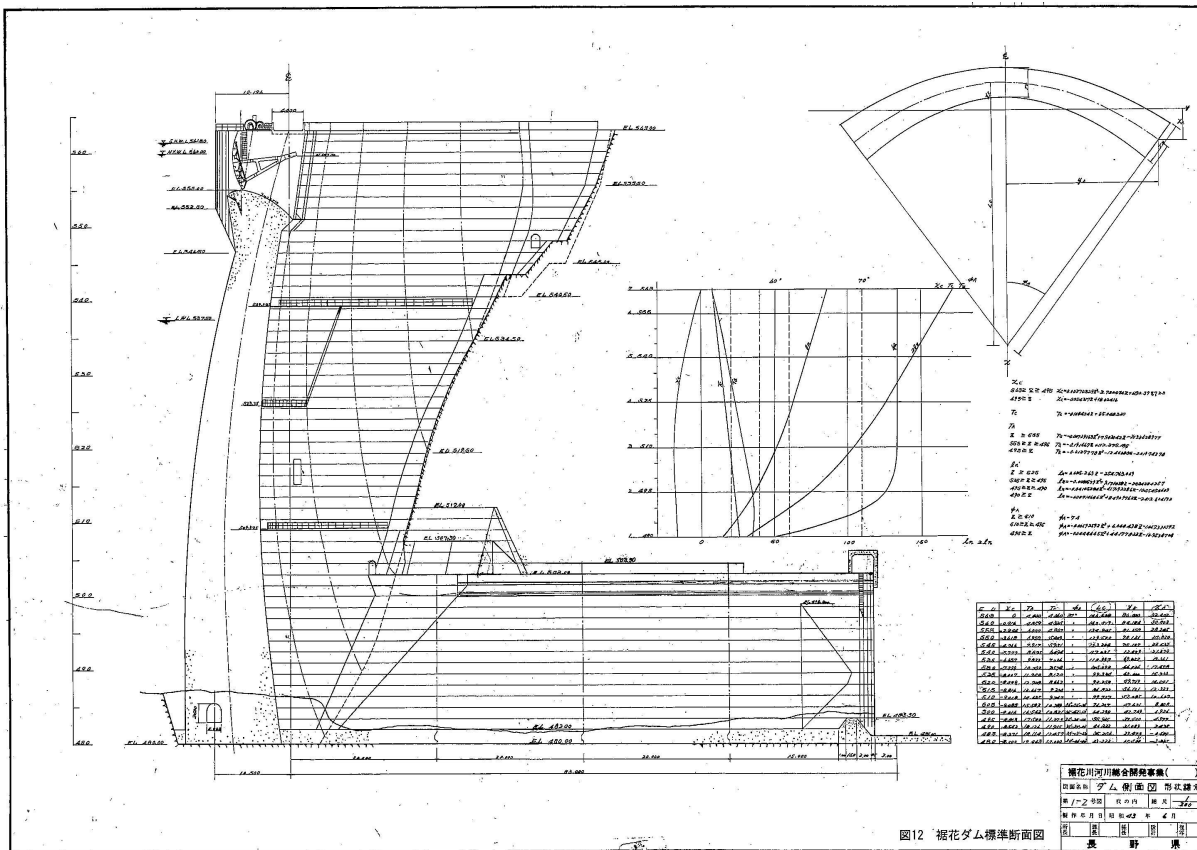


図 1.4 裾花ダム 標準断面図



(上流側)



(下流側)

写真 1.2 湯の瀬ダム

表 1.2 湯の瀬ダム 諸元

区分	細区分		当該項目	備考
ダム名			湯の瀬ダム	
河川			信濃川水系裾花川	
所在地			長野県長野市大字入山	
緯度、経度			北緯 36 度 39 分 50 秒，東経 138 度 08 分 00 秒	世界測地系
目的			W,P	
所管			長野県企業局	
段階			管理Ⅲ期	
貯水池	集水面積	km ²	256.5	
	湛水面積	km ²	0.07	
	総貯水量	m ³	330,000	
	有効貯水量	m ³	290,000	
計画高水量	計画高水流量	m ³ /s	565	
	調節流量	m ³ /s	345	
	洪水調節方法		一定率調節方式	
ダム	ダム型式		重力式コンクリートダム	
	堤高	m	18.0	
	堤頂長	m	140.0	
	堤頂標高	EL.m	460.0	
	堤体積	m ³	15,000	
	計画高水位	EL.m	458.5	
	最低水位	EL.m	451.3	
	基礎標高	EL.m	442.0	
	下流法面勾配	1 : m	0.75	
	上流法面勾配	1 : m	1:0.0 (直)	
	フィレット勾配	1 : m	1:0.1 (始点 EL.455.7m)	
河床部岩盤	岩種		砂岩および泥岩	
	岩級		—	
	弾性波速度	P 波(km/s)	—	
洪水吐き	非常用放流設備		ラジアルゲート B=8.0m×H=9.778m×3 門	
	常用放流設備		スライドゲート B=2.0m×H=1.8m×1 門	

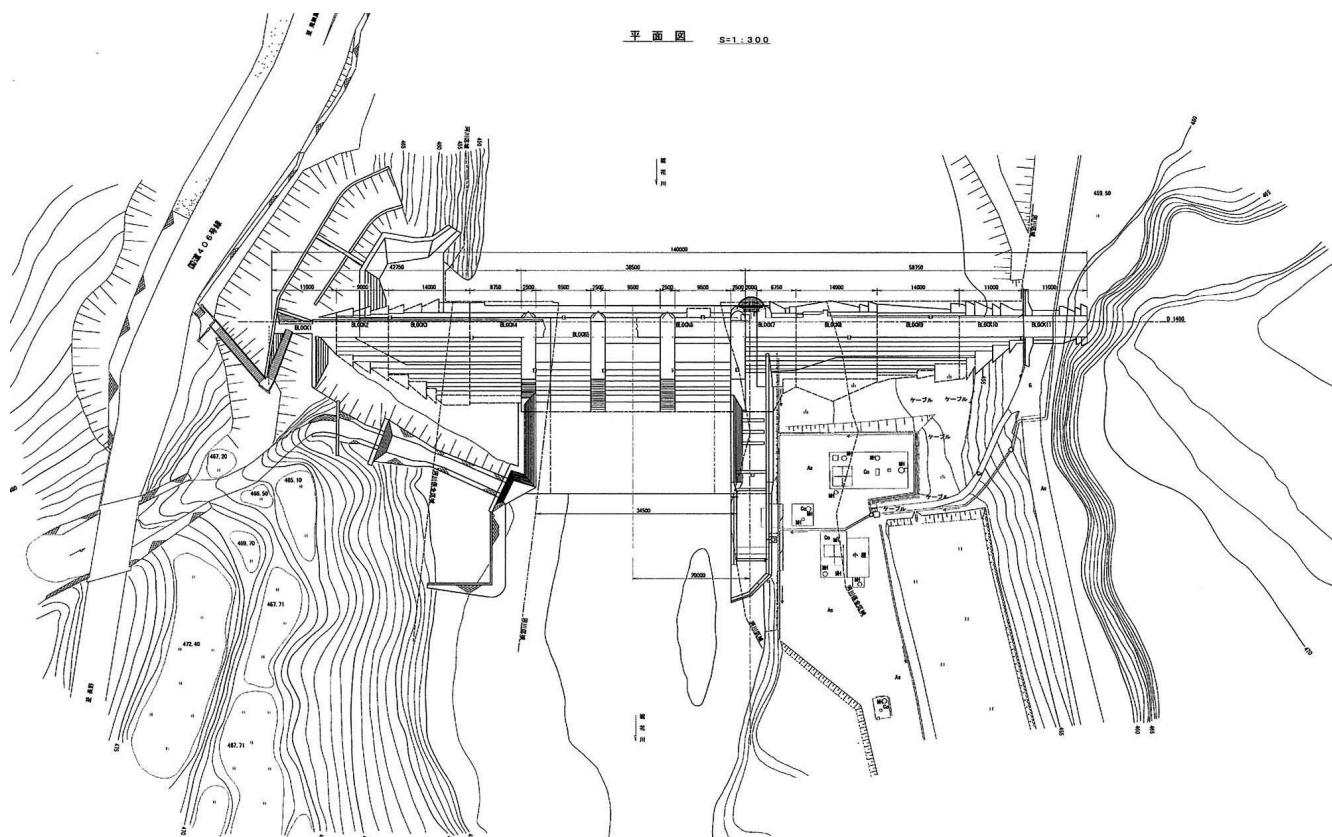
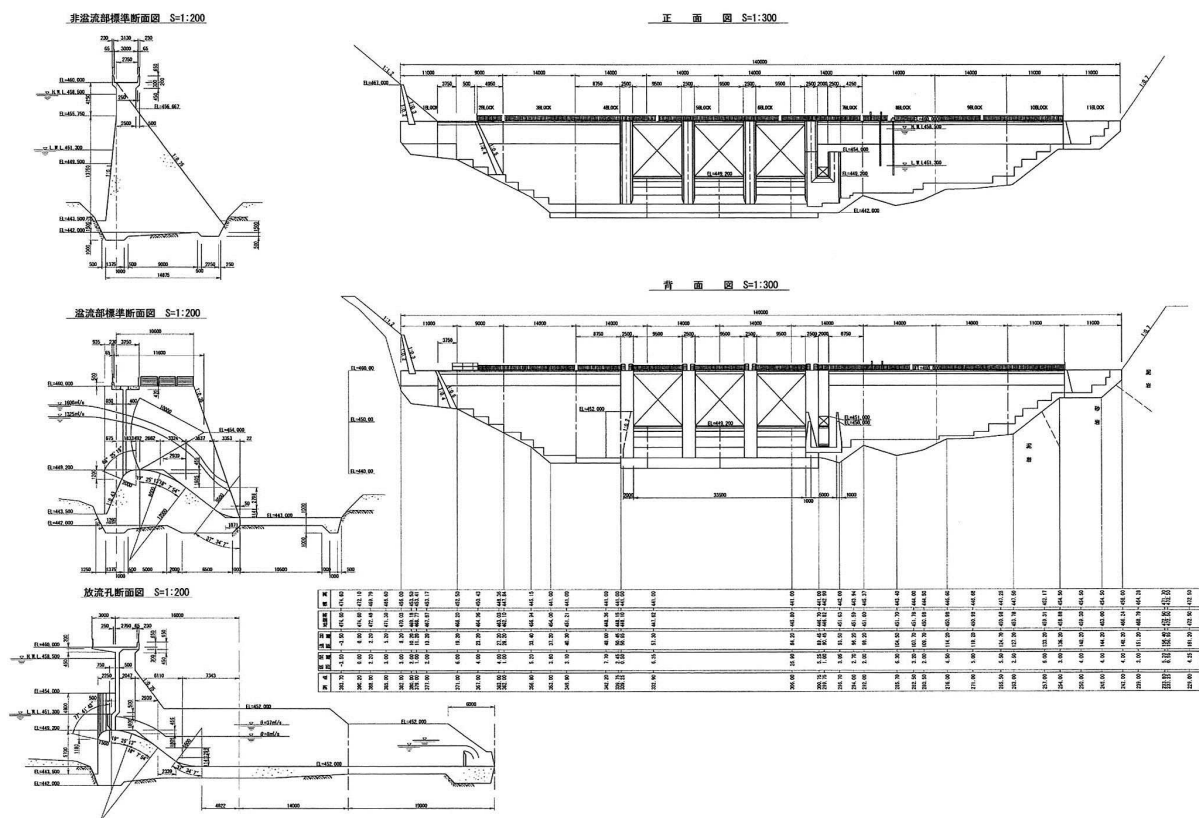


図 1.5 湯の瀬ダム 平面図



2. 照査項目

耐震性能照査の照査項目は以下に示すとおりである。

表 2.1 照査対象内容

No.	裾花ダム	湯の瀬ダム
1	レベル 2 地震動の設定 (1) 文献調査等および想定地震動の選定 (2) レベル 2 地震動の設定	レベル 2 地震動の設定 (1) 文献調査等および想定地震動の選定 (2) レベル 2 地震動の設定
2	ダム本体の耐震性能照査 (1) 計算モデルの作成 (2) 3 次元動的解析	ダム本体の耐震性能照査 (1) 計算モデルの作成 (2) 2 次元動的解析
3	ダム関連構造物の耐震性能照査 (1) 照査対象構造物の選定および解析手法の検討 (2) クレストゲートの耐震性能照査 (3) コンジットゲートの耐震性能照査 (4) 取水塔の耐震性能照査 (5) 発電用制水バルブの耐震性能照査 (6) 門柱の耐震性能照査 (7) その他の関連構造物の耐震照査	ダム関連構造物の耐震性能照査 (1) 照査対象構造物の選定および解析手法の検討 (2) クレストゲートの耐震性能照査 (3) スライドゲートの耐震性能照査 (4) 門柱の耐震性能照査 (5) その他の関連構造物の耐震照査

3. レベル 2 地震動の設定

「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」（以下、指針（案））にもとづき、裾花ダムと湯の瀬ダムの耐震性能照査に用いるレベル 2 地震動設定のために必要となる想定地震の文献調査を実施し、想定地震および断層パラメータの設定を行った。

耐震性能照査に用いるレベル 2 地震動の設定にあたっては、文献調査で整理した情報にもとづいて想定地震を設定し、適切な観測地震動（原種波形）を用いてダムの距離減衰式により加速度時刻歴波形を作成した。

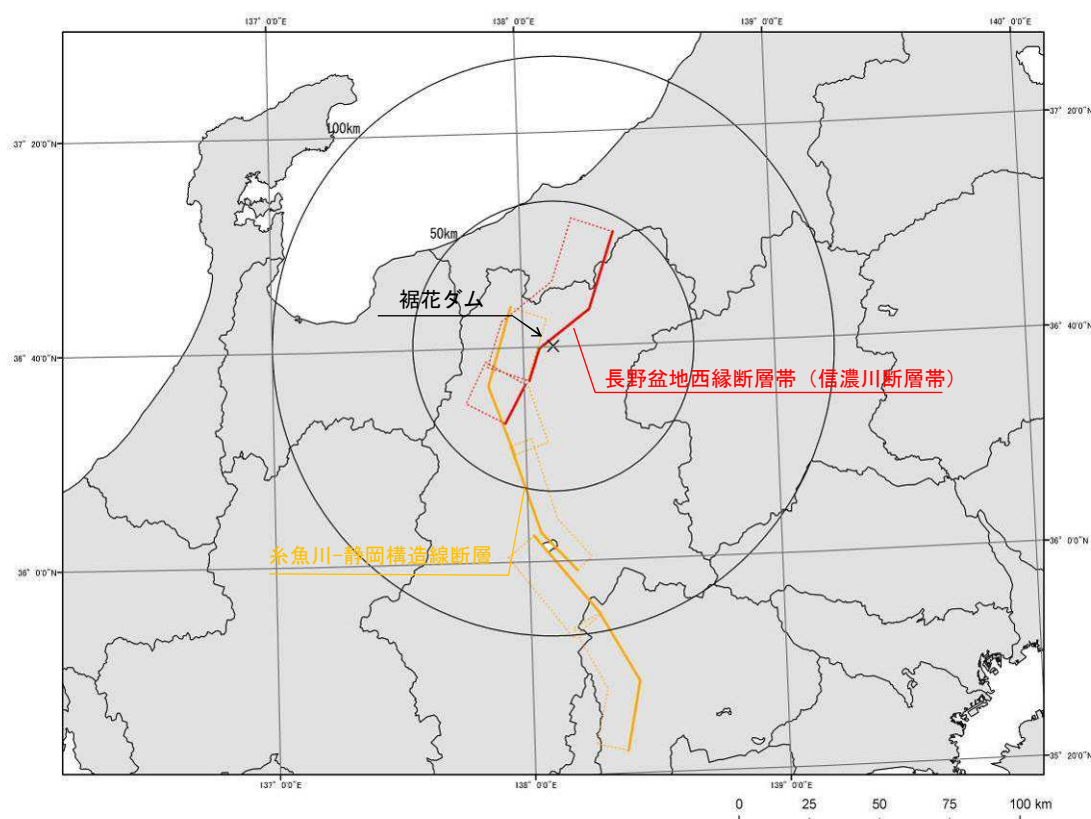
レベル 2 地震動の選定および設定の概要は以下に示すとおりである。なお、レベル 2 地震動設定は、裾花ダムと湯の瀬ダムで同じ手順で行う。ここでは裾花ダムの検討内容を示す。

3.1 文献調査等および想定地震動の選定

指針（案）にもとづき、裾花ダムの耐震性能照査に用いるレベル 2 地震動設定のために必要となる想定地震の文献調査を実施した。調査した文献を表 3.1 に示す。

裾花ダム近傍には、図 3.1 に示すように内陸活断層として長野盆地西縁断層帯（信濃川断層帯）や糸魚川-静岡構造線断層帯がある。近傍活断層に対しダムの距離減衰式により最大加速度を算定した結果、裾花ダムにおいて最も影響が大きくなるのは長野盆地西縁断層帯（信濃川断層帯）となったため、これを裾花ダムの想定地震として選定した。

なお、プレート境界の地震においても同様に調査・検討を行ったが、裾花ダムは内陸活断層の地震に比べて、プレート境界の地震は裾花ダムに与える影響が小さくなった。そのため、プレート境界の地震は裾花ダムの想定地震として選定しないこととした。



※ 上図の断層モデル位置は断層上端深さを考慮した位置を投影したものであり、地表断層位置を示したものではない。

図 3.1 裾花ダム近傍の内陸型地震の断層モデル位置図

表 3.2 調査文献

項目	文献資料等の名称	出典先・発行年
歴史地震 の調査	新編日本被害地震総覧[増補改訂版 416-1995]	東京大学出版会 1996 年
	日本被害地震総覧[599-2012]	東京大学出版会 2013 年
	日本の地震断層パラメーター・ハンドブック	鹿島出版会 1989 年
	気象庁震度データベース	気象庁ホームページ(2015 年 5 月 31 日時点)
内陸 活断層 の調査	新編 日本の活断層	東京大学出版会 1991 年
	活断層詳細デジタルマップ	東京大学出版会(活断層研究会編)2002 年
	全国地震動予測地図	地震調査研究推進本部ホームページ
	全国を概観した地震動予測地図報告書	地震調査研究推進本部ホームページ
	長期評価 (活断層の長期評価)	地震調査研究推進本部ホームページ
	地震ハザードステーション	防災科学技術研究所ホームページ (2014 年 12 月更新)
	活断層データベース	活断層研究センター(産業技術総合研究所)
	都市圏活断層図	国土地理院
	ダム地点の地質調査報告資料	報告書等
プレート 境界 の調査	長期評価 (海溝型地震の長期評価)	地震調査研究推進本部ホームページ
	全国地震動予測地図	地震調査研究推進本部ホームページ
	全国を概観した地震動予測地図	地震調査研究推進本部ホームページ
	地震ハザードステーション	防災科学技術研究所ホームページ (2014 年 12 月更新)
	南海トラフの巨大モデル検討会	内閣府公表資料
	東海地震に関する専門調査会	内閣府中央防災会議公表資料
	東南海・南海地震等に関する専門調査会	内閣府中央防災会議公表資料
	【参考】日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書 (平成 26 年 9 月)	国土交通省 日本海における大規模地震に関する調査検討会
防災計画	長野県地域防災計画	長野県ホームページ (平成 27 年 3 月)
	新潟県地域防災計画	新潟県ホームページ (平成 26 年 3 月修正)
	群馬県地域防災計画	群馬県ホームページ (平成 26 年 12 月)
	埼玉県地域防災計画	埼玉県ホームページ (平成 26 年 12 月)
	山梨県地域防災計画	山梨県ホームページ (平成 26 年 3 月)
	静岡県地域防災計画	静岡県ホームページ (平成 26 年 6 月)
	愛知県地域防災計画	愛知県ホームページ (平成 26 年 5 月修正)
	岐阜県地域防災計画	岐阜県ホームページ (平成 27 年 3 月)
	富山県地域防災計画	富山県ホームページ (平成 26 年 4 月)

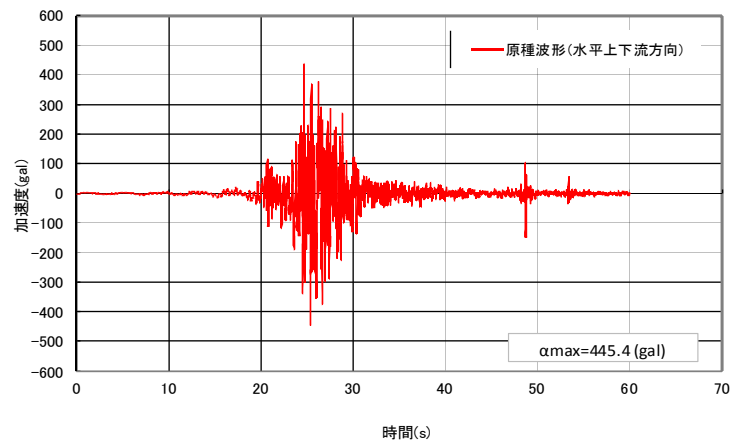
3.2 レベル 2 地震動の設定

ダム距離減衰式により、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、選定した想定地震および断層パラメータにもとづいて、観測地震動（原種波形）を用いた加速度時刻歴波形を作成した。

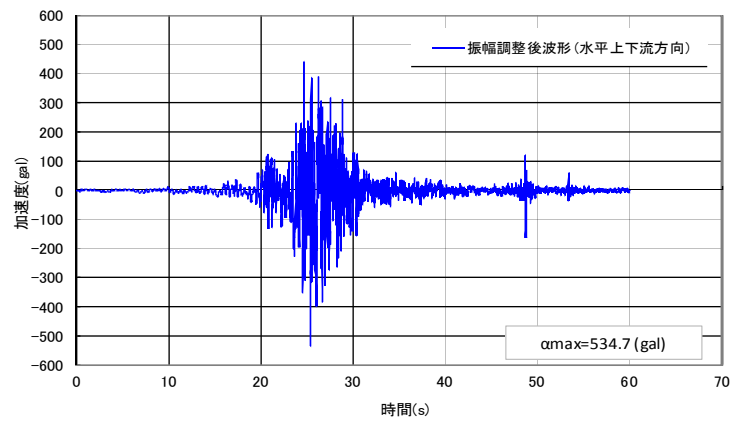
原種波形としては、以下の観点から一庫波、賀祥波、栗駒波を選定した。

- ①観測記録に不具合がないこと（波形の乱れ、極端な片振れ、途中で途切れている等）
- ②コンクリートダムで観測された地震動であること
- ③基礎での最大加速度が極力大きいこと（一般に 100gal 以上）
- ④断層タイプが同じこと
- ⑤継続時間が長いこと
- ⑥原種波形としての採用事例が多いこと

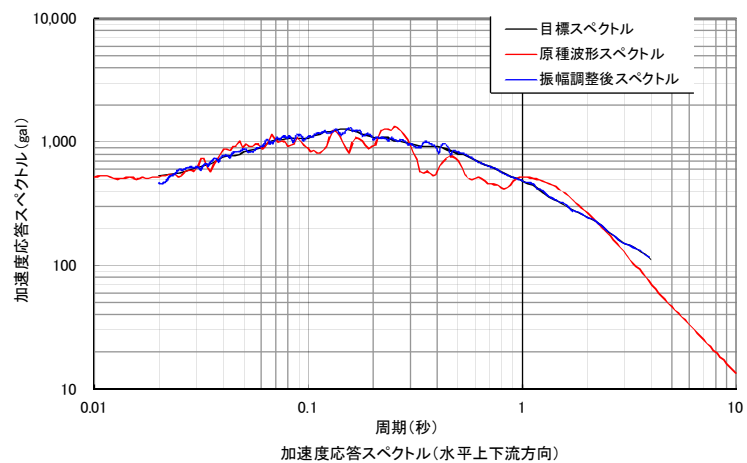
レベル 2 地震動の加速度時刻歴は、原種波形の加速度応答スペクトルを選定した想定地震の加速度応答スペクトルに合うように、原種波形の振幅を調整して作成した。作成した加速度時刻歴の一例として、賀祥波上下流方向の加速度時刻歴および加速度応答スペクトルを図 3.2 に示す。



(賀祥波 原種波形)



(レベル 2 地震動)



(加速度応答スペクトル)

図 3.2 裾花ダムにおける想定地震の加速度応答スペクトル（賀祥波、上下流方向）

4. 裾花ダムの耐震性能照査

4.1 解析に用いる物性値の設定

裾花ダムは、本体の照査はアーチ式コンクリートダムであることから 3 次元モデルによる動的解析によって耐震性能照査を実施した。

(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力強度を推定し、圧縮強度をもとにコンクリート標準示方書に記載されている推定式より弾性係数、引張強度を設定した。

なお、H25 年に堤体左右岸 2 ヶ所ずつ（計 4 資料）コンクリートコア（ $\phi 20 \text{ cm} \times H30 \text{ cm}$ ）を採取し圧縮強度試験を実施しており、それらの結果もコンクリートの物性値設定の参考とした。

表 4.1 堤体コンクリートの力学物性値

項 目		摘 要
1.単位体積質量 γ_c (kgf/m^3)		裾花ダム完成検査表
2.圧縮強度 σ_c (N/mm^2)		コンクリート品質管理試験結果 $\sigma_{1 \text{ 年半}}$
3.引張強度 f_t (N/mm^2)		圧縮強度と引張強度の関係から設定
4.弾性係数 E (N/mm^2)	静弾性係数	圧縮強度と静弾性係数の関係から設定 (コンクリート標準示方書)
	動弾性係数	静弾性係数と同値
5.ポアソン比 ν	静ポアソン比	コンクリート標準示方書に示される一般値 0.20
	動ポアソン比	静ポアソン比と同値
6.減衰定数 h (%)		指針（案）※ ¹ に示される一般値 h=5%を基本とする

(2) 岩盤の物性値

岩盤の物性値のうち、単位体積重量、弾性係数、強度定数等は、建設時の調査結果をもとに設定し、ポアソン比と減衰定数は、一般的な値を適用した。

表 4.2 基礎岩盤の力学物性値

項 目		摘 要
1.単位体積質量 γ (kgf/m^3)		参考資料※ ² に示される一般値
2.弾性係数 E (N/mm^2)	静弾性係数	力学試験（ジャッキ試験）結果
	動弾性係数	施工時の弾性波探査試験より算出
3.ポアソン比 ν	静ポアソン比	指針（案）※ ¹ に示される一般値 0.25
	動ポアソン比	同上
4.減衰定数 h (%)		指針（案）※ ¹ に示される一般値 h=5%を基本とする
5.せん断強度 (N/mm^2)	EL530 以上	裾花ダム設計値
	EL530 以下	裾花ダム設計値
6.せん断摩擦強度		裾花ダム設計値

4.2 本体の耐震性能照査

ダム本体の耐震性能照査は、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」に準拠して行った。

4.2.1 解析モデルの作成

ダム本体の耐震性能照査を行うために、計算モデル（3次元モデル）の形状検討およびモデル作成を行った。裾花ダムの3次元モデルは図 4.1 に示すとおりである。モデル化範囲は堤体、基礎岩盤、貯水池とし、裾花ダムの周辺地形とダム本体の構造を反映したモデルを作成した。水位条件は常時満水位と最低水位とし、貯水位に合わせて要素分割を行った。

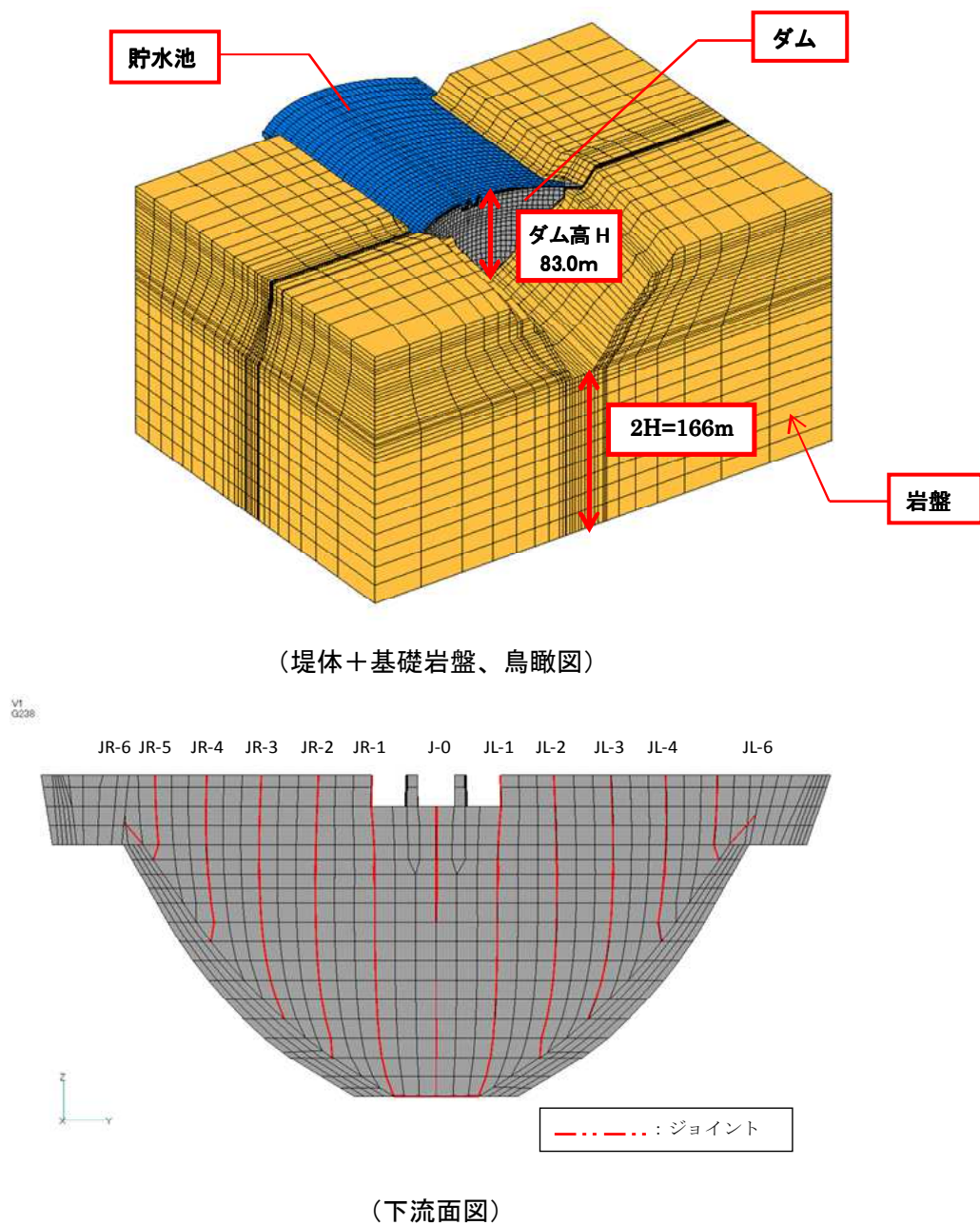


図 4.1 裾花ダム 解析モデル（3次元モデル）

4.2.2 ダム本体の耐震性能照査

ダム本体の耐震性能照査は、3次元全体モデルの線形動的解析を行い、堤体に発生する応力と堤体材料の強度等を比較し、評価を行った。ダム本体の照査項目は以下のとおりである。

表 4.3 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 ≥ 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

4.2.3 固有値解析および同定解析

(1) 固有値解析

堤体の応答特性を確認するため固有値解析を行った。その結果、堤谷の上下流方向の固有周期は $T=0.22\text{sec}$ となった。

(2) 同定解析

同定解析は裾花ダムで観測された平成 26 年 11 月 22 日の長野県神城断層地震の実測波を用いて行った。同定解析結果は、以下に示すとおりである。初期物性値 Case1 に対して Case3 では、基礎の弾性係数と堤体動弾性係数を同様に大きくした結果、解析と実施の卓越振動数の再現性が良いこと確認した。よって、Case3 の値を用いて動的解析を実施することとした。なお、上下流方向の最大加速度は、Case3 の解析値と実測値が同程度であり、減衰定数 5% の場合に再現性が高いことを確認した。

表 4.4 同定解析結果

	物理条件		卓越振動数 [Hz]	最大加速度 [gal]		
	動弾性係数 [N/mm ²]		天端中央/ 基礎監査廊	天端中央/基礎監査廊		
	堤体	岩盤	上下流方向	上下流方向	ダム軸方向	鉛直方向
実測地震動 (長野県神城断層地震)	—	—	4.16	+182.2 (15.4s) -165.7 (15.8s)	+33.1 -49.3	+31.4 -39.7
Case1 (初期物性値)	34,000	27,000	3.93	+238.5 (16.4s) -236.1 (16.0s)	+50.0 -42.9	+40.0 -50.7
Case2 (堤体の剛性の調整)	38,000	27,000	4.09	+148.1 (16.3s) -165.7 (15.4s)	+48.2 -40.7	+38.1 -51.4
Case3 (堤体と基礎の剛性を調整)	38,000	30,000	4.11	+153.6 (14.8s) -159.0 (15.4s)	+46.1 -37.7	+36.2 -53.8

4.2.4 線形動的解析

線形動的解析の解析ケースは、表 4.5 に示すとおりである。線形動的解析の結果、3 波形とも発生応力が引張応力を超えることから、各ケースで引張応力が最大となるケースについて継目の開きを考慮した非線形動的解析を行った。

なお、最低水位による線形動的解析も実施し、常時満水位に比べて発生応力が小さいことを確認している。

表 4.5 線形動的解析結果一覧表

ケース	入力波	上下流方向	ダム軸方向	貯水位
1	一庫波	正転・反転	正転・反転	常時満水位
2	賀祥波	正転・反転	正転・反転	常時満水位
3	栗駒波	正転・反転	正転・反転	常時満水位

4.2.5 継目の開きを考慮した非線形動的解析

継目の開きを考慮した非線形動的解析の継目の物性値を表 4.6 に、解析ケースを表 4.7 に示す。
継目の開きを考慮した非線形動的解析の結果、堤体の横継目及び周辺継目の一部は開口するが、その範囲は堤体の上流から下流まで連続するものではないことを確認した。

表 4.6 継目非線形モデルにおける鉛直継目と周辺継目の物性値

対 象		鉛直継目	周辺継目	備 考
軸剛性 (N/mm ²)	圧縮時(密着時)	コンクリートの弾性係数(同定解析による)と同じ		
	引張時 (開口時)	≒0.0	≒0.0	
せん断剛性 (N/mm ²)	圧縮時(密着時)	コンクリートの弾性係数(同定解析による)と同じ		
	引張時 (開口時)	コンクリートの弾性係数(同定解析による)と同じ	≒0.0	鉛直継目はキーによって拘束されていると考え、せん断破壊が生じるまではせん断は線形
引張強度 (N/mm ²)		0.0	コンクリートの引張強度相当	
減衰定数 h (%)		h _v =1	h _s =10	既往の解析事例参考文献 1)による

参考文献 1) : 強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダムの三次元動的解析に関する研究
土木学会論文集、No.759/ I -67,53-67, 2004.4

表 4.7 解析ケース（継目の開きを考慮した非線形動的解析）

ケース	地震タイプ 想定地震動	原種波形	入力波 上下流 方向	入力波 ダム軸 方向	貯水位	堤体の 減衰定数	鉛直継目 の 減衰定数	周辺継目 の 減衰定数
1-2-1	内陸活断層 の地震 (長野盆地 西縁断層)	一庫波	正転	反転	常時満水位	h=5%	h _v =1%	h _s =10%
2-1-1		賀祥波	正転	正転	同 上	同 上	同 上	同 上
3-3-1		栗駒波	反転	正転	同 上	同 上	同 上	同 上

4.3 関連構造物の耐震性能照査

4.3.1 関連構造物の選定方法

指針（案）では、照査対象とする関連構造物の選定の考え方を下記のように示している。

関連構造物等の耐震性能の照査は、それが損傷した場合にダム貯水機能が維持されないおそれがあるものについて行う。

すなわち、以下のいずれかに該当するものは、それが損傷した場合にダム貯水機能が維持されないおそれがあると考えられるため、「大規模地震に対するダム耐震性能照査について」（ダム技術 No.274）では照査対象とすべきであるとしている。

- ① 制御できない貯水の流出を生じるおそれがあるもの
- ②-1 地震後に、ダムの安全性を確保するために緊急に水位を低下させるために必要となるもの
- ②-2 地震後に、ダムの安全性を確保するために低下させた水位の上昇を制御するために必要となるもの

また、ダム技術 No.274 では、①、②-1、②-2 のそれぞれの項目に対応させて、関連構造物を選定する際の視点と求められる性能、照査の確認事項を表 4.8 に示すように整理している。

表 4.8 の照査の考え方にもとづき、耐震性能照査が必要な関連構造物の選定を行う。

表 4.8 関連構造物等の耐震性能の照査の考え方

			関連構造物等を選定する視点		
			①当該関連構造物等が損傷した場合、制御できない貯水の流出を生じるおそれがあるもの	②-1 地震後に、ダムの安全性を確保するために緊急に水位を低下させるために必要となるもの	②-2 地震後に、ダムの安全性を確保するために低下させた水位の上昇を規制するために必要となるもの
関連構造物等に求められる性能			貯水機能の維持	地震直後に水位を低下できるように、地震直後にゲートを開けることが可能	地震後の出水に対して、水位の上昇を規制できるように地震後の出水時までゲートを開けることが可能
照査の確認事項	ゲート	部材の座屈	・主要構造部材が座屈しない ・補助構造部材が座屈しない、又は、一部の補助構造部材が座屈しても、その影響により主要構造部材が座屈しない		
		部材の塑性化	主要構造部材がほぼ弾性域内にとどまるとともに、補助構造部材が限定的な塑性化にとどまる	主要構造部材および補助構造部材ともにほぼ弾性域内にとどまる	
		開閉装置等の状態		開閉装置等が、ほぼ健全な状態を維持（ほぼ健全とは、すみやかに必要な補修や取替え等の対応で健全な状態を維持する状況）	
	門柱	門柱全体の損傷状態	重大な損傷による主ゲートの脱落等により貯水機能が維持できない状態にならない		
		門柱の変形がゲートに与える影響	損傷しても、その変形による影響でゲートが変形して貯水機能が維持できない状況にならない	損傷しても、その変形がゲートとの遊間長に収まり、ゲートを開けることができる	

出典：三石真也、島本和仁：大規模地震に対するダム耐震性能照査について、ダム技術、No. 274、2009. 7.

4.3.2 照査対象構造物の選定

照査対象構造物の選定結果は、表 4.9、図 4.2 に示すとおりである。

表 4.9 裾花ダムの照査対象構造物

設備名	名称・区分	諸 元	放流量 (m ³ /s)	選定理由
洪水き 常用・非常用 放流設備	クレスト 主ゲート	ラジアルゲート B9.0m×H6.8m×3門	900	・損傷時に制御できない貯水の放流が生じる 可能性がある。
	コンジット 主ゲート	高圧ローラーゲート B3.5m×H3.546m ×2門	650	・損傷時に制御できない貯水の放流が生じる 可能性がある。 ・緊急時水位低下、水位上昇抑制に使用する 設備である。
取水設備	取水塔	独立塔×1基	18.0	・万一転倒した場合、堤体に影響がある。
	発電機入口 制水バルブ	バタフライ弁 φ1.9m	18.0	・発電機の流量調整が不可能となった場合、 制水バルブが損傷すると制御できない貯 水の放流が生じる可能性がある。
その他の 関連構造物	門柱および 天端橋梁	—	—	・損傷（転落）した場合、クレストゲートの 操作が不可能となる可能性がある。
	管理庁舎 電気設備等	—	—	・損傷した場合、照査対象ゲートの操作が不可能 となる可能性がある。

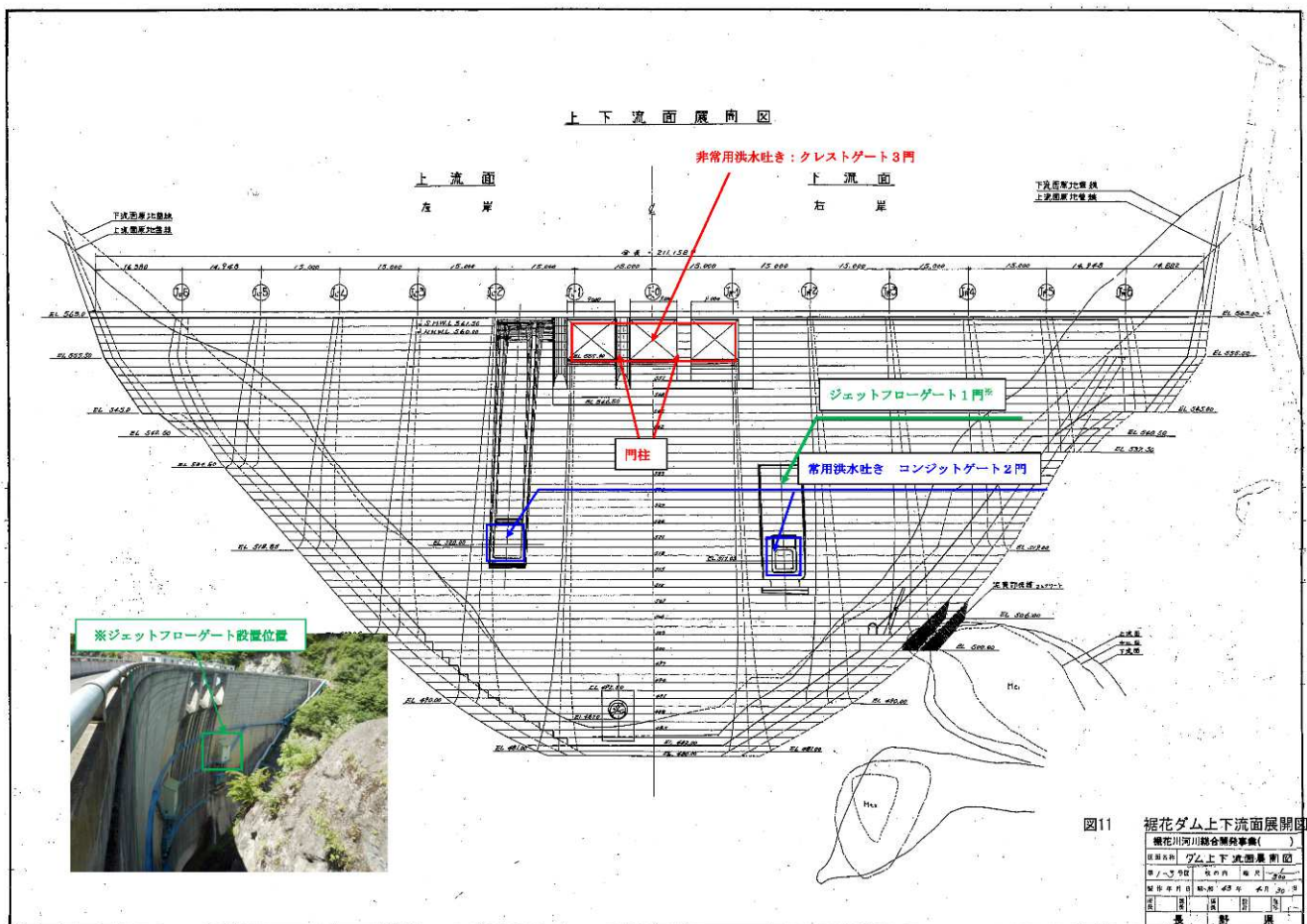


図 4.2 裾花ダム照査対象構造物 位置図

4.3.3 ゲートの耐震性能照査

(1) 照査項目

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 4.10 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。構造計算により表 4.11 に示すゲート固定部の照査を行った。また、三次元前提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 4.12 に示すゲートの開閉装置の照査を行った。

表 4.10 ゲートの照査項目

限界状態	照査基準
主要構造物が座屈しない状態	・ 主要構造部材の応力 $\leq$ 許容座屈応力
補助構造部材が座屈しないか、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	・ 補助構造部材の応力 $\leq$ 許容座屈応力
主要構造部材のひずみが弾性域内にとどまる状態	・ 主要構造部材のひずみ $\leq$ 降伏ひずみの 2 倍程度
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	・ 補助構造部材のひずみ $\leq$ 降伏ひずみの 10 倍程度
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（洪水吐き）	・ 主要構造部材・補助構造部材のひずみ $\leq$ 降伏ひずみの 2 倍程度
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 ^{注)}	・ 主要構造部材・補助構造部材のひずみ $\leq$ 降伏ひずみ
ゲートの戸当り金物との水密性が確保される状態	・ ゲートのたわみ $\leq$ 許容変位

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 4.11 ゲートの固定部の照査項目

限界状態	照査基準
トラニオンピンが損傷しない状態	・ 発生ひずみ $\leq$ 降伏ひずみの 2 倍程度
アンカーレージ等が損傷しない状態	・ 発生応力 $\leq$ コンクリートの強度

表 4.12 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 $\leq$ せん断降伏応力度 水平せん断応力 $\leq$ 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 $\leq$ 引き抜き耐力

(2) 解析モデル

解析モデル図 4.3、図 4.4 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。

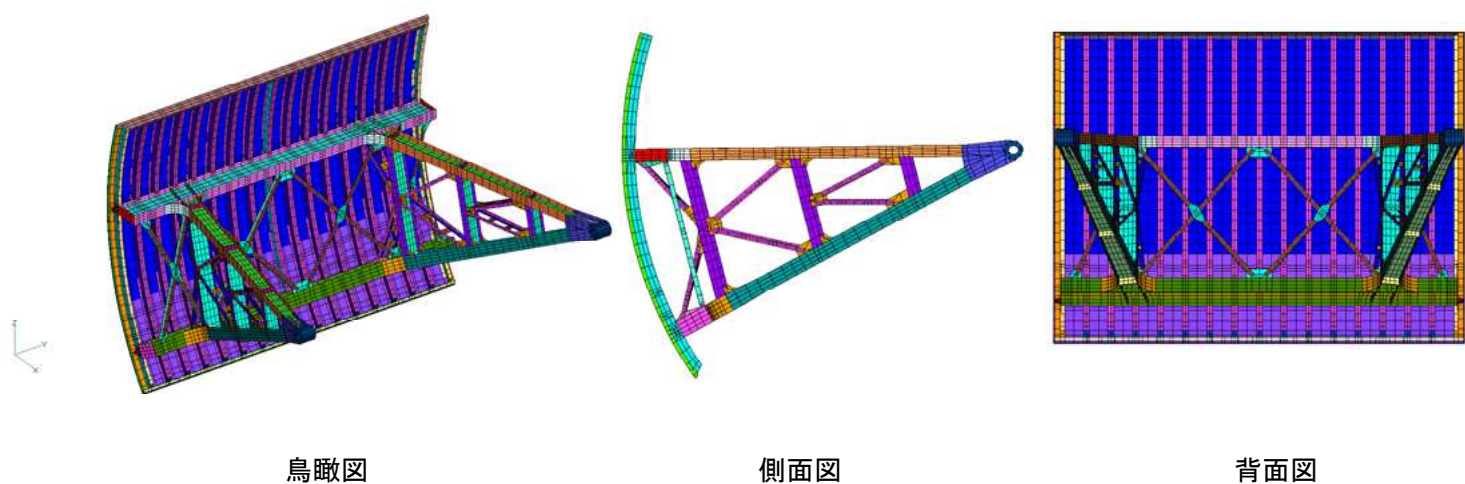


図 4.3 裾花ダム クレストゲート解析モデル図

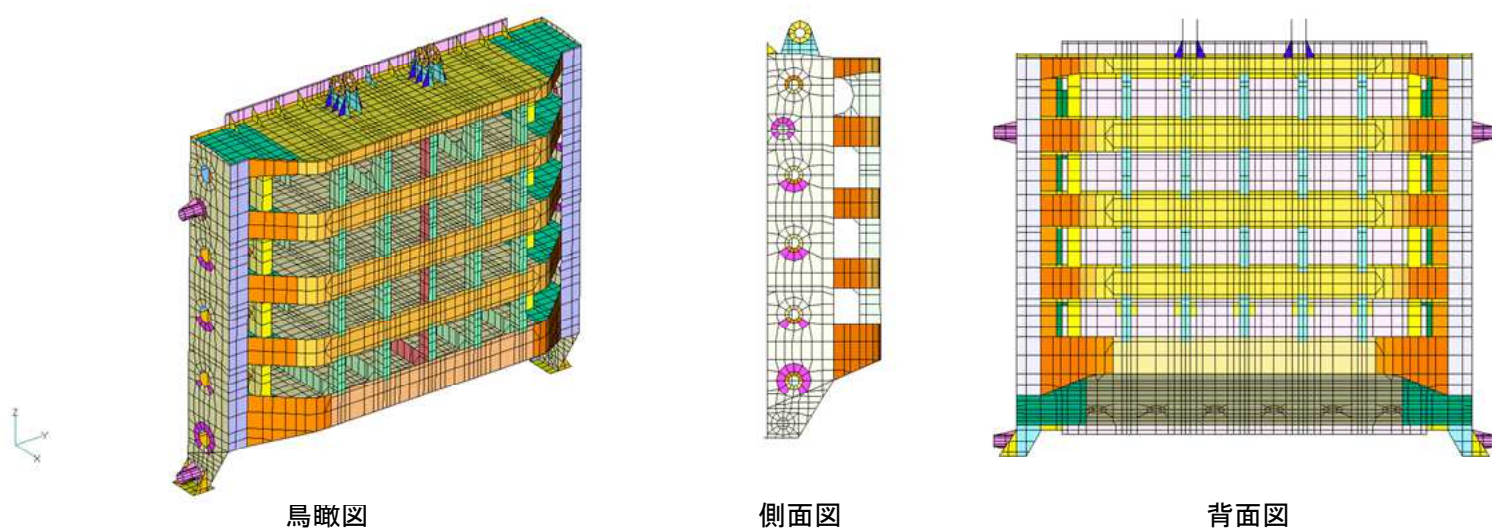


図 4.4 裾花ダム コンジットゲート解析モデル図

(3) 解析内容

裾花ダムクレストゲート、コンジットゲートの耐震性能照査の内容は以下のとおりである。

a) 塑性化の照査

主要構造部材、補助構造部材、スキンプレートにおける合成応力度が降伏応力を超えるか、また、降伏応力を超えた場合、塑性率が 2～3 でほぼ弾性領域内にとどまるかを確認した。

b) 座屈の照査

全体座屈の照査においては、脚柱、脚柱トラス、背面トラスにおいて限界座屈・横倒れ座屈の発生の有無、および、安定照査の条件を満足するかどうか確認した。

局部座屈の照査においては、必要板厚を満足するか、必要板厚を満足しない場合は発生応力が座屈応力度を超えていないか確認した。

c) 固定部の照査

ゲート線形動的解析による固定部位置の反力と設計時荷重を比較し、固定部において損傷が発生する可能性の有無を確認した。

4.3.3 取水塔の耐震性能照査

取水塔の動的解析モデルは、2次元もしくは3次元のFEM解析モデルとして扱うケースと次元せん断梁としてモデル化し多質点系に分割するケースが考えられる。本検討では、取水塔の最大加速度、変位、断面力等を算出することを目的として、せん断梁として取扱うことで解析が可能であることから、1次元の多質点系モデルで動的解析を行い、曲げ破壊、および、せん断破壊の可能性の有無を確認した。

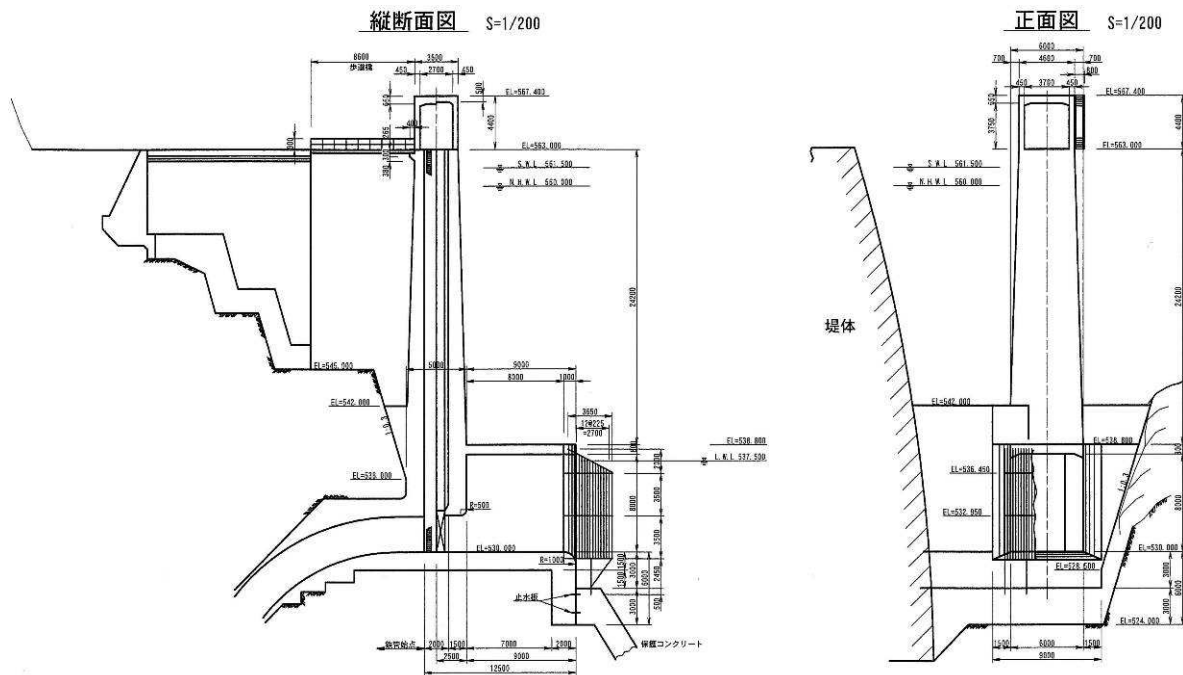


図 4.5 裾花ダム 取水塔 縦断面図・正面図

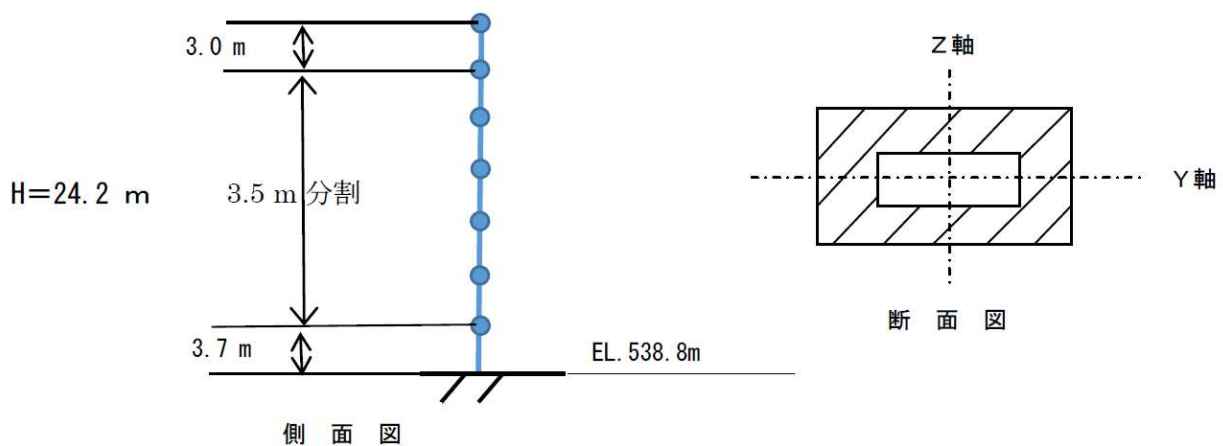


図 4.6 裾花ダム 取水塔 解析モデル

4.3.4 門柱の耐震性の照査

(1) 検討方法

裾花ダムの門柱・門構の耐震性能照査は、道路橋の耐震設計で採用されている橋脚のレベル 2 地震動に対する耐震設計法である地震時保有水平耐力法に準じて行う。照査内容は、表 4.13 に示すとおりである。

表 4.13 門柱の耐震照査内容

照査項目		照査内容
曲げ損傷 先行型	終局限界状態に対する照査	門柱に生じる最大応答変位が、終局変位以下にとどまるかを照査する。
	曲げ降伏後のせん断破壊の照査	曲げ降伏後に地震によって生じるせん断力が、せん断耐力以下となるか（せん断破壊しないか）を照査する。
	桁落下に対する照査	門柱に生じるダム軸方向最大応答変位の 2 倍の変位が生じても門柱から桁が逸脱しないことを照査する。
	残留変位量に関する照査	門柱に生じる地震後の残留変形量が許容変形量以下にとどまるかを確認する。
	ゲートへの影響に関する照査	門柱に生じるダム軸方向最大応答変位が、門柱とゲートの遊間長以下にとどまるか確認する。
せん断損傷 先行型	せん断破壊の照査	地震によって生じるせん断力が、せん断耐力以下となるかを照査する。

(2) 検討条件

門柱の標準断面図を図 4.7 に示す。検討対象とする門柱は、クレストゲートの中央設置ピアとする。コンクリートの物性値は裾花ダムの鉄筋コンクリートの設計値を使用し、鉄筋の物性値は一般値（SD295）を使用した。

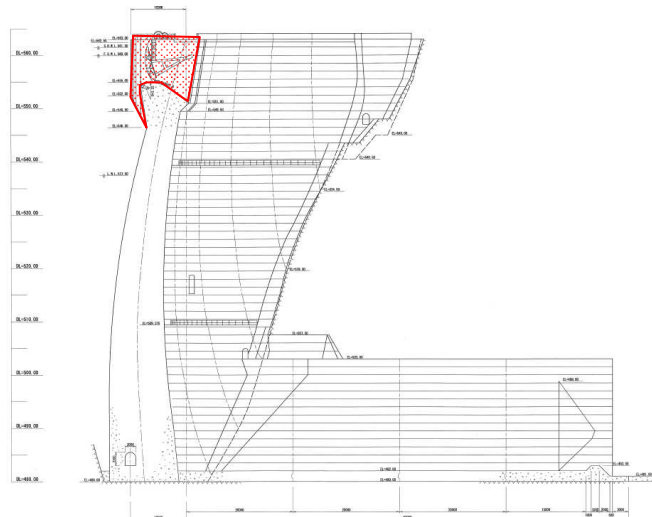


図 4.7 裾花ダム門柱 標準断面図

5. 湯の瀬ダムの耐震性能照査

5.1 解析に用いる物性値の設定

解析に用いる物性値は、堤体コンクリートの品質管理試験結果、基礎の調査結果等をもとに設定した。

具体の物性値は、湯の瀬ダム調査、設計時資料および施工時の情報を基本とし、それらの資料に記載されていない事項については、各種基準等を参照して設定した。

表 5.1 堤体および基礎の物性値一覧

	項目	設定方法
堤体	単位体積重量 γ_t	コンクリートの品質管理試験結果
	圧縮強度 f_{cm}	コンクリートの品質管理試験結果 σ_{91}
	引張強度 σ_t	圧縮強度の 1/10 (指針(案)・同解説参考資料)
	静的弾性係数 E_c	圧縮強度と静弾性係数の関係から推定 (コンクリート標準示方書)
	動的弾性係数 E_d	静的弾性係数と同値
	静的ポアソン比 ν_c	コンクリート標準示方書 0.2
	動的ポアソン比 ν_d	一般値 0.2
	減衰定数 h	一般値 $h=10\%$
	破壊エネルギー G_{FS}	$G_{FS}=(0.79d_{max}+80) \times (f_{cm}/10)^{0.7}$ (研究論文)
基礎	単位体積重量 γ_t	比重試験結果
	静的弾性係数 E_c	力学試験結果 (弾性係数)
	動的弾性係数 E_d	試験結果
	静的ポアソン比 ν_c	一般値 0.3
	動的ポアソン比 ν_d	一般値 0.3
	減衰定数 h	一般値 5%
	せん断強度 τ	設計値
	せん断摩擦係数 f	設計値

5.2 本体の耐震性能照査

5.2.1 計算モデルの作成

湯の瀬ダムは重力式コンクリートダムのため、2次元上下流断面モデルの形状検討を行い、計算モデルを作成した。なお、堤体形状は、非越流部標準断面とした。

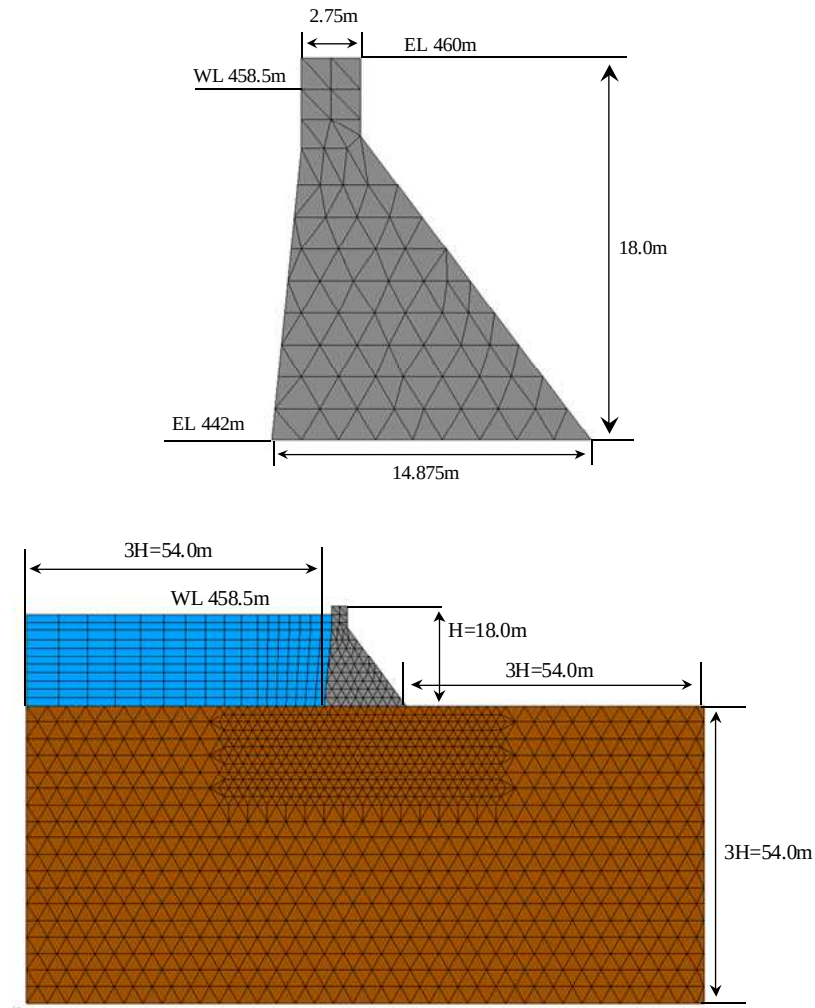


図 5.1 湯の瀬ダム 解析モデル（2次元モデル）

5.2.2 ダム本体の耐震性能照査

ダム本体の耐震性能照査は、2次元上下流断面モデルの線形動的解析を行い、堤体に発生する応力と堤体材料の強度等を比較し、評価を行った。ダム本体の照査項目は以下のとおりである。

表 5.2 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 ≤ コンクリート引張強度
圧縮破壊に対する照査	圧縮応力 ≤ 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 ≥ 1.0

5.2.3 固有値解析

堤体の応答特性を確認するため固有値解析を行った。堤体の上下流方向の固有周期（固有振動数）は 0.045sec となった。

湯の瀬ダムには地震計が設置されておらず、同定解析ができないため、固有周期の妥当性は重力式コンクリートダムの固有周期と堤高に関する研究成果により確認した。湯の瀬ダムの固有値解析による一次卓越周期は 0.045sec(堤高 H=18.0m)であり、既設ダムの強震記録に基づく堤高と固有周期の関係と同程度となった。

5.2.4 線形動的解析

(1) 解析ケース

線形動的解析は、レベル 2 地震動 3 波の上下流の方向を 2 ケース(正転、反転)ずつの 6 ケースについて実施した。

表 5.3 解析ケース

ケース 1 (正)	長野盆地西縁断層帯（一庫波）
ケース 2 (反)	
ケース 3 (正)	長野盆地西縁断層帯（賀祥波）
ケース 4 (反)	
ケース 5 (正)	長野盆地西縁断層帯（栗駒波）
ケース 6 (反)	

(2) 解析内容

1) 発生応力

線形動的解析により発生する最大引張応力、最大圧縮応力が引張強度、圧縮強度以下となるか確認した。

2) せん断安全率

線形動的解析により算定されるせん断応力、垂直応力の時刻歴から、平均せん断摩擦安全率および平均せん断摩擦安全率が最小となった時刻の局所せん断摩擦安全率を求め、地震中にせん断破壊が生じるおそれがあるか確認した。

5.3 関連構造物の耐震性能照査

5.3.1 照査対象構造物の選定

湯の瀬ダムの照査対象構造物を選定した結果は、表 5.4、図 5.2 に示すとおりである。

表 5.4 湯の瀬ダムの関連構造物一覧

設備名	名称・区分	諸 元	放流量 (m ³ /s)	選定理由
洪水き 常用・非常用 放流設備	クレスト 主ゲート	ラジアルゲート B9.0m×H9.778m ×3 門	553	・損傷時に制御できない貯水の放流が生じる 可能性がある。
	常 用 主ゲート	スライドゲート B=2.0m × H=1.8m×1 門	18	・損傷時に制御できない貯水の放流が生じる 可能性がある。 ・緊急時水位低下、水位上昇抑制に使用する 設備である。
その他の 関連構造物	門柱および 天端橋梁	—	—	・損傷（転落）した場合、クレストゲートの 操作が不可能となる可能性がある。
	管理庁舎 電気設備等	—	—	・損傷した場合、照査対象ゲートの操作が不可能 となる可能性がある。

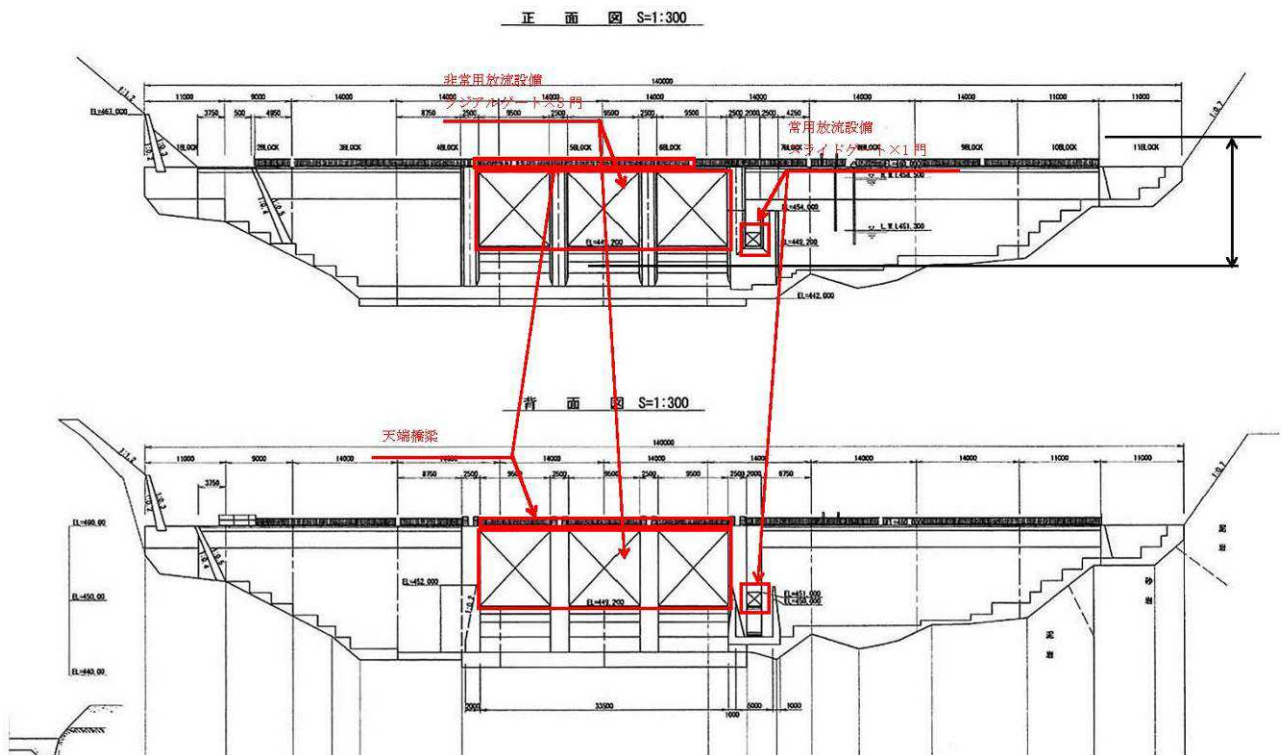


図 5.2 湯の瀬ダム関連構造物位置図

5.3.2 クレストラジアルゲートの耐震性能照査

湯の瀬ダムのクレストラジアルゲートの耐震性能照査は、裾花ダムのゲート（クレストゲート、コンジットゲート）の耐震性能照査と同様の手法で実施した。

湯の瀬ダムのクレストラジアルゲートの三次元モデルは図 5.3 に示すとおりである。裾花ダムと同様に、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。

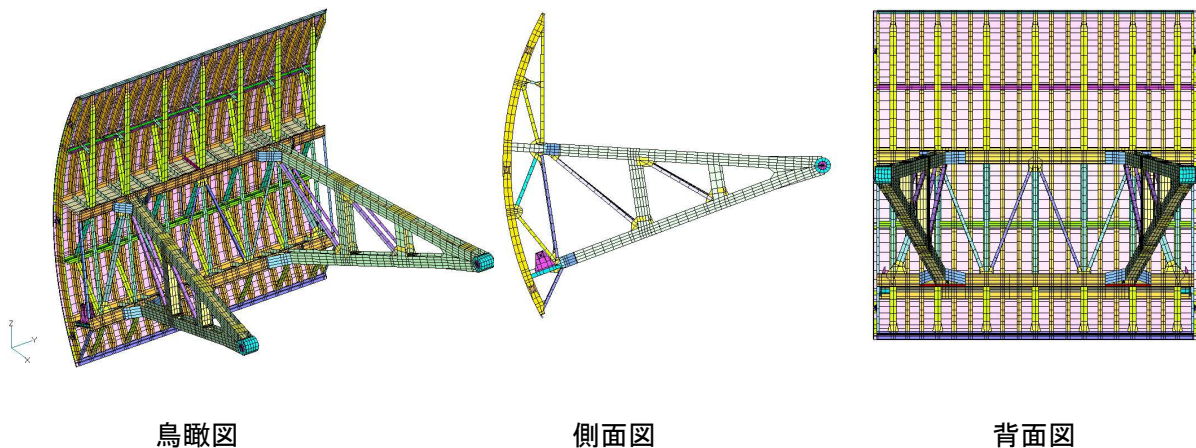


図 5.3 湯の瀬ダム クレストラジアルゲート解析モデル図

5.3.3 常用放流設備の耐震性能照査

常用放流設備（スライドゲート）の耐震性能照査では、設計荷重とレベル 2 地震時荷重の比較により行った、照査の考え方を表 5.5 に示す。また、スライドゲートの配置は図 5.4 に示すとおりである。

表 5.5 ゲート照査の考え方

条 件	判 定
設計荷重 > レベル 2 地震時荷重 ÷ 非地震時換算係数	ゲート部材は降伏しない
設計荷重 < レベル 2 地震時荷重 ÷ 非地震時換算係数	ゲート部材は降伏の可能性がある

※非地震時換算係数は設計基本強度に対する許容応力の安全率と同値（安全率：2.0）

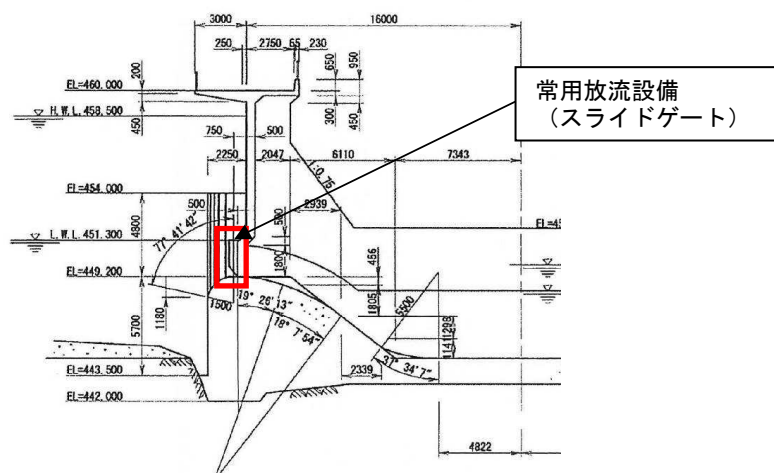


図 5.4 常用放流設備（スライドゲート）の配置

5.3.4 門柱の耐震性能照査

湯の瀬ダムの門柱の耐震性能照査は、裾花ダムの門柱の耐震性能照査と同様に地震時保有水平耐力法に準じて実施した。湯の瀬ダム門柱の標準断面図を図 5.5 に示す。

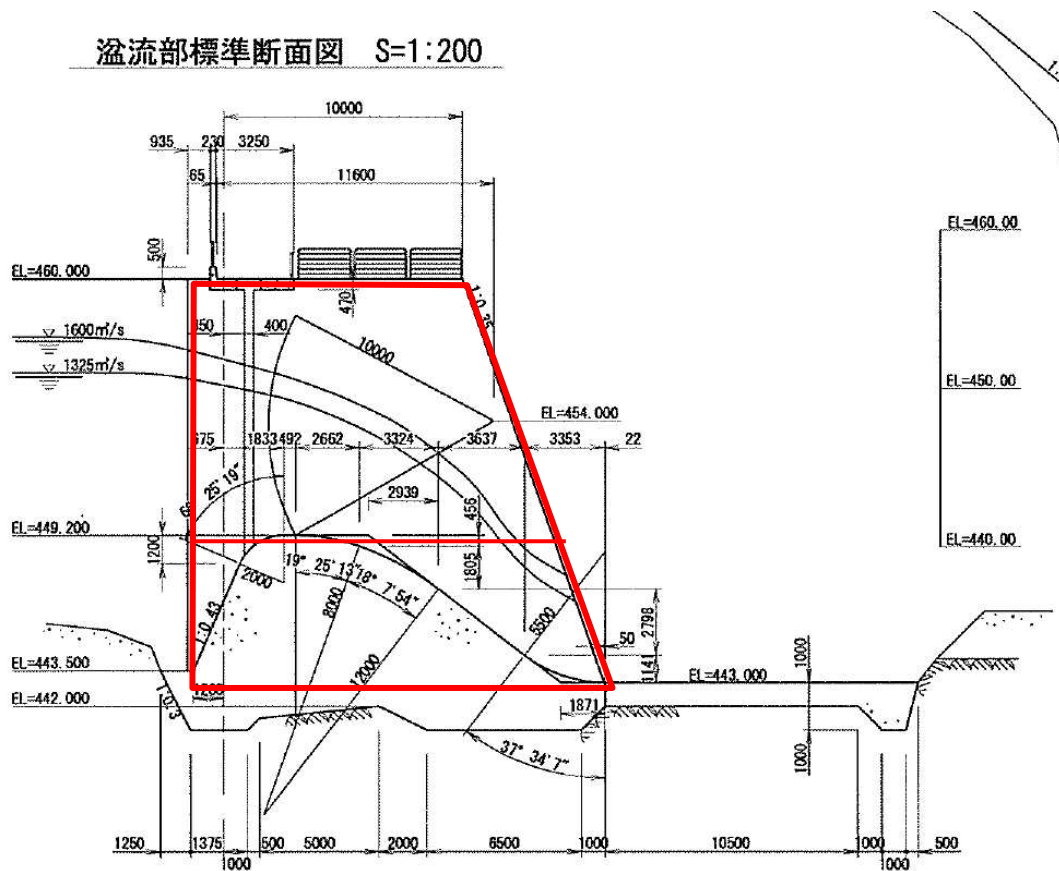


図 5.5 湯の瀬ダム門柱 標準断面図

6. まとめ

上述した検討方法により裾花ダムおよび湯の瀬ダムの耐震性能照査を実施し、当該施設の強地震（レベル2地震動）に対する耐震性能を確認することが出来た。

今回の照査結果を基に、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。