

## 【資料 例 2-2】 アーチ式コンクリートダム本体の照査例

### 1. ダム概要

対象ダムの諸元を表-例 2.2.1 に示す。

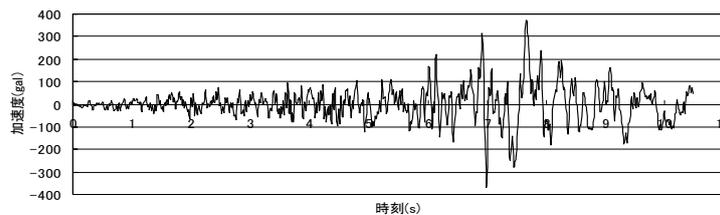
表-例 2.2.1 ダム諸元

堤高	堤頂長	常時満水位	最低水位
98m	248m	96m	50m

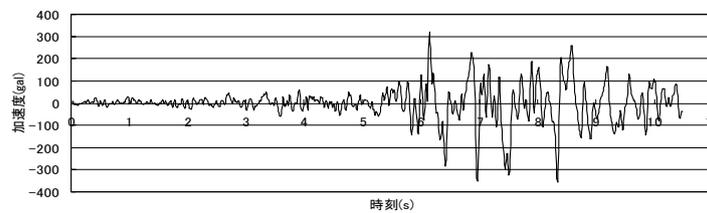
### 2. 照査に用いるレベル 2 地震動<sup>注)</sup>

図-例 2.2.1 に示す加速度時刻歴波形を、照査用地震動とした。

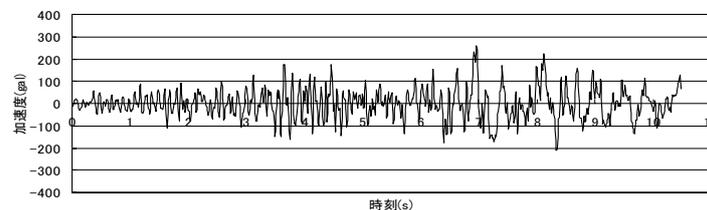
注)アーチ式コンクリートダムの地震応答解析では 3 次元解析が必要となり、考慮する地震動成分としては、上下流方向およびその直角方向(ダム軸方向)の水平方向 2 成分と鉛直方向成分の計 3 成分が考えられる。なお、事前検討により、アーチ式コンクリートダムでは水平方向地震動の影響が支配的であり、鉛直方向地震動の影響を考慮しても解析結果に大きな差がないことがわかっているが、ここでは 3 方向成分を同時に考慮した場合の例について示す。また、原種波形として他ダムでの強震記録を用いる地震応答解析では、一般に時刻歴波形の加速度振幅の符号を反転させたケースや、必要に応じ異なる原種波形を用いたケースについても検討対象とするのがよいが、以下では省略する。



(a) 上下流方向



(b) ダム軸方向



(c) 鉛直方向

図-例 2.2.1 照査に用いたレベル 2 地震動の加速度時刻歴波形

### 3. 地震応答解析によるダム本体の耐震性能の照査

#### 3.1 線形動的解析

##### (1) 解析条件等

まず、堤体コンクリートに生じる応力とひずみの関係を線形とし、継目の開きや堤体の損傷過程を考慮しない線形動的解析を 3 次元有限要素モデルを用いた時刻歴応答解析により行うため、図-例 2.2.2

に示す3次元有限要素解析モデルを作成した。

解析に用いた堤体および基礎地盤の物性値を、表-例 2.2.2 に示す。堤体材料や基礎地盤の減衰定数は、他のアーチダムでの実測地震時挙動の再現解析結果等を参考にして設定した。

貯水位は、通常時の水位として最もダムに影響が大きくなる可能性のある常時満水位および最低水位の場合について検討した。ここでは、堤体に発生する応力が厳しくなった常時満水位時の照査事例を示す。貯水は、圧縮性流体としてその影響を考慮した。貯水の物性値を、表-例 2.2.3 に示す。解析モデルの境界条件は、基礎地盤部側部および底部を粘性境界とした。基礎地盤部側方は粘性境界を通し、自由地盤モデルと接合されている。堤体に対する揚圧力は考慮していない。

なお、アーチ式コンクリートダムの動的解析に際しては、あらかじめ静的荷重作用下における初期応力状態を適切に再現しておく必要があるため、概略的な築堤過程を考慮した静的解析を実施した。

以上の条件のもとで、図-例 2.2.1 に示すレベル 2 地震動の加速度時刻歴波形が堤体底面においてほぼ再現されるよう調整した入力地震動を解析モデル底面から入力した。<sup>注)</sup>

注)本事例では、解析用プログラムとして、汎用非線形有限要素解析コード“ABAQUS”を用いた。

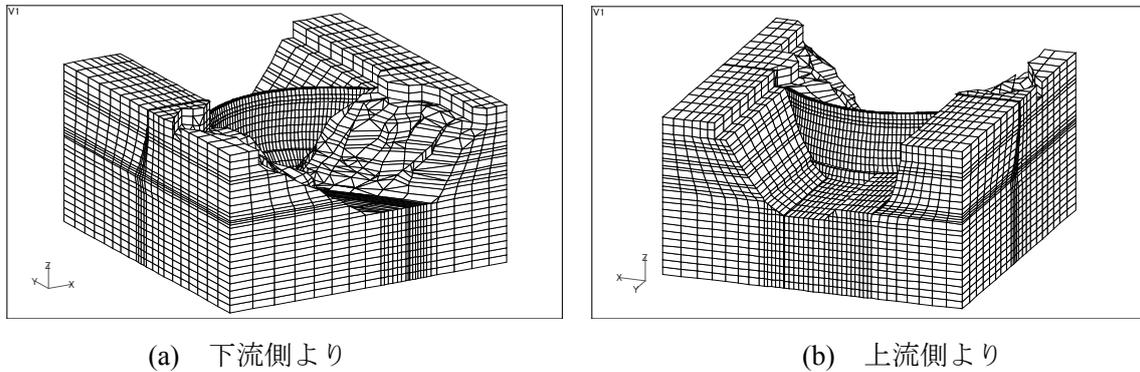


図-例 2.2.2 解析モデル

表-例 2.2.2 堤体と基礎地盤の材料物性

対象	弾性係数 [MN/m <sup>2</sup> ]	ポアソン比	単位体積重量[kN/m <sup>3</sup> ]	減衰定数
堤体	3.2×10 <sup>4</sup>	0.20	22.54	5% (剛性比例型)
基礎地盤	2.1×10 <sup>4</sup>	0.25	22.54	5% (剛性比例型)
自由地盤	2.1×10 <sup>14</sup>	0.25	22.54×10 <sup>10</sup>	5% (剛性比例型)

表-例 2.2.3 圧縮性流体の材料物性

注)水温 20℃、1 気圧時

対象	体積弾性係数[MN/m <sup>2</sup> ]	ポアソン比	単位体積重量[kN/m <sup>3</sup> ]
貯水	2.167×10 <sup>3</sup>	—	9.8

## (2) 解析結果とその評価

線形動的解析の結果から、ダム本体において損傷が発生しないことを以下の 2 条件により確認する。

- ① 引張応力が堤体材料の引張強度を超えない。(引張破壊が生じない。)
- 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部的なものにとどまる。

線形動的解析によるダム堤体内において発生する引張応力および圧縮応力の最大値の分布を図-例

2.2.3 に示す。

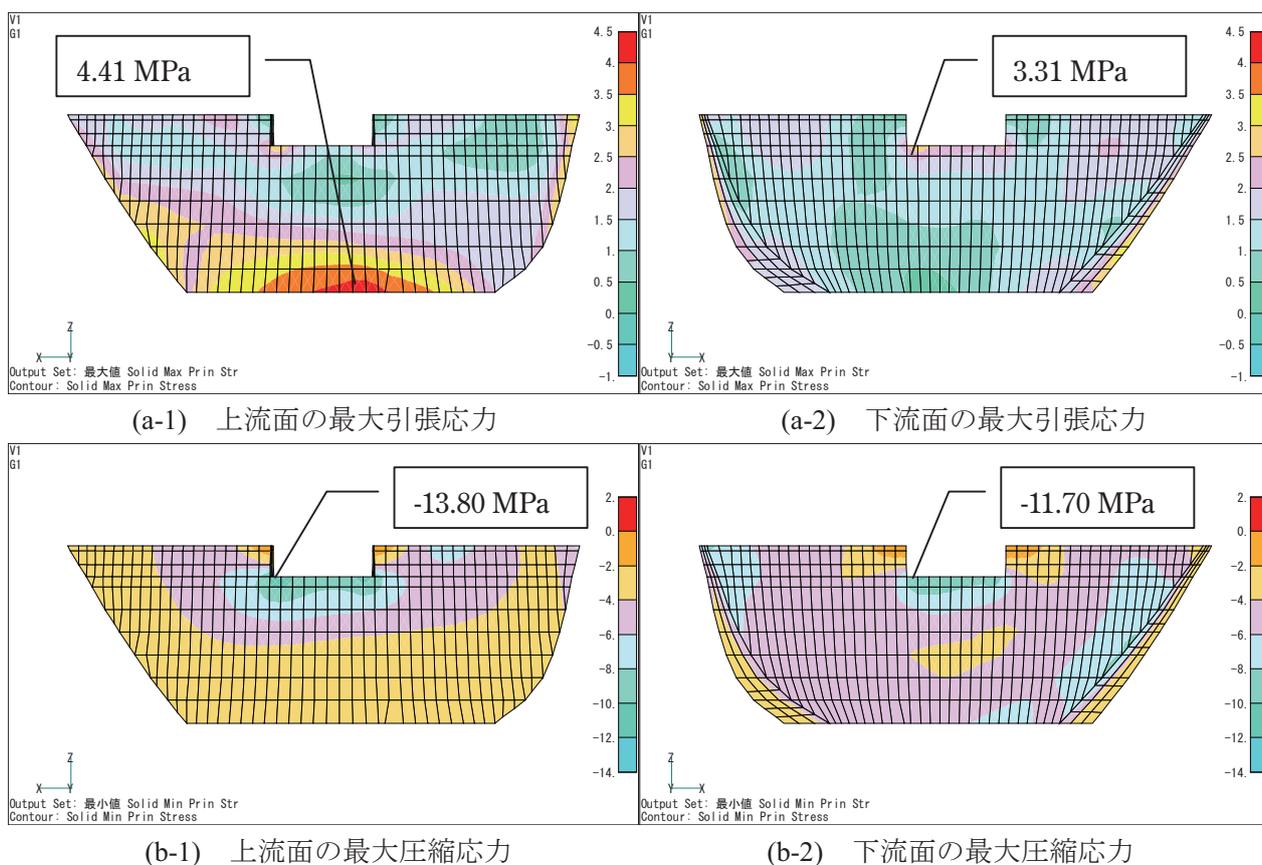


図-例 2.2.3 最大発生応力の分布(線形動的解析)

① 引張破壊に対する照査

図-例 2.2.3 より、上流面底部に最大約 4.4MPa の引張応力が発生している。本ダムの堤体コンクリートの引張強度を 3.2MPa とすると、この引張応力は堤体コンクリートの引張強度を超えるものであるため、さらに継目の開き等による応力再配分を考慮した非線形動的解析が必要になると考えられる。

② 圧縮破壊およびせん断破壊に対する照査

(a) 圧縮破壊に対する照査

図-例 2.2.3 より、上流面切り欠き部付近に最大約 13.8MPa の圧縮応力が発生している。本ダムの堤体コンクリートの圧縮強度を 45.0MPa とすると、この圧縮応力は堤体コンクリートの圧縮強度と比較してかなり小さく、圧縮破壊が生じるおそれはないと考えられる。

(b) せん断破壊に対する照査

「3.2 損傷過程を考慮した地震応答解析(継目の開き等を考慮した非線形動的解析)」が必要なことから、その結果により確認する。

(3) 線形動的解析による照査結果のまとめ

線形動的解析による検討の結果、本ダムでは地震時に材料の強度を超える引張応力等が発生する結果となった。よって、引き続き継目の開きや引張破壊による損傷過程を考慮した地震応答解析(非線形動的解析)による照査を行う必要があると判断される。

### 3.2 損傷過程等を考慮した地震応答解析(継目の開き等を考慮した非線形動的解析)

#### (1) 解析条件

解析モデル形状、基本的な材料物性及び入力地震動は、「3.1 線形動的解析」の場合と同様である。

非線形挙動として、堤体に設けられた横継目および周辺継目の開口挙動を考慮するため、解析モデルにおいてこれらの継目に相当する位置に接合要素を設け、その物性を表-例 2.2.4 のとおり設定した。

なお、ここでの検討では、堤体コンクリートの引張破壊等による損傷過程については考慮しない。継目の開きを考慮した非線形動的解析の結果を踏まえ、必要に応じて検討することとする。

また、継目の開口が生じた場合、その直後に瞬時に貯水が継目内に浸入することによって間隙水圧の上昇が生じることはないとし、地震継続中における継目内における揚圧力の発生は考慮しない。

表-例 2.2.4 横継目と周辺継目の材料物性

対 象		横継目	周辺継目(サドル境界)
軸剛性 [MN/m <sup>2</sup> ]	圧縮時(密着時)	$2.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$
	引張時(開口時)	0.0	0.0
剪断剛性 [MN/m <sup>2</sup> ]	圧縮時(密着時)	$2.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$
	引張時(開口時)	$2.0 \times 10$	0.0
引張強度		0.01(≒0.0)	3.2 (引張強度を超えた場合は 0.0)

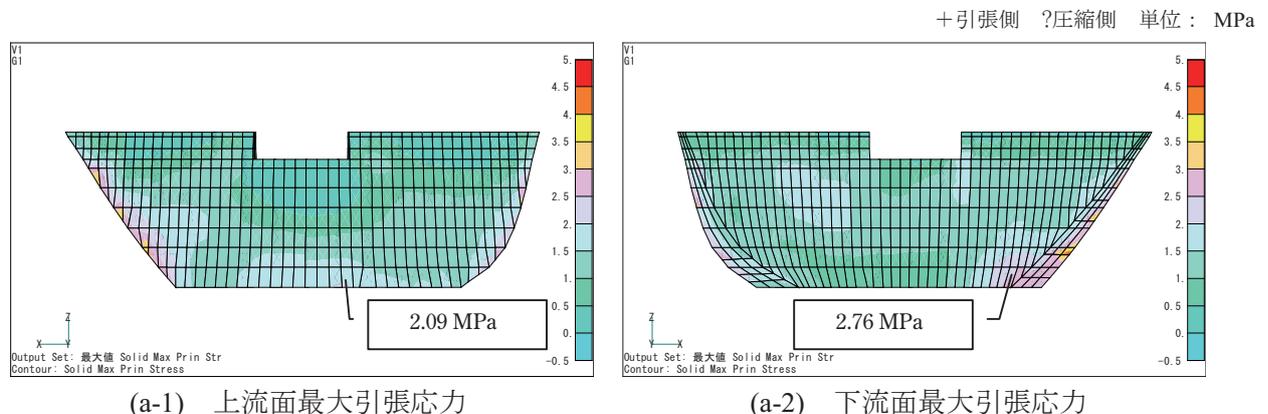
#### (2) 解析結果とその評価

横継目および周辺継目の開きを考慮した非線形動的解析の結果から、ダム本体に生じる損傷が限定的なものにとどまることを以下の2条件により確認する。

- ① 上下流面間に連続する継目の開きや引張亀裂の発生によって堤体の分断が生じない。
- 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。

なお、①については、まずは継目の開きについてのみ検討する。

横継目および周辺継目の開きを考慮した非線形動的解析によるダム堤体内において発生する引張応力および圧縮応力の最大値の分布を図-例 2.2.4 に示す。



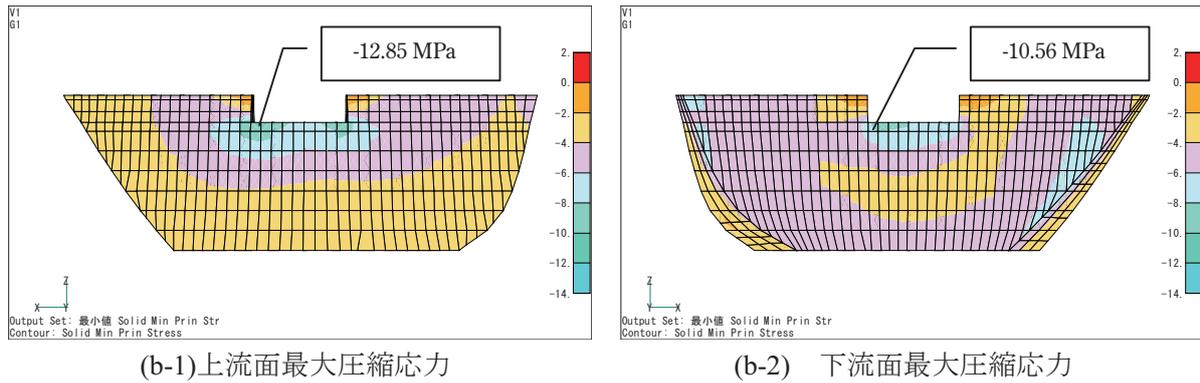


図-例 2.2.4 最大発生応力の分布(横継目および周辺継目の開きを考慮した非線形動的解析)

① 継目の開きに対する照査

図-例 2.2.4 より、下流面左岸側底部に最大約 2.8MPa の引張応力が発生している。本ダムの堤体コンクリートの引張強度を 3.2MPa とすると、この引張応力は堤体コンクリートの引張強度と比較して小さい。よって、横継目および周辺継目が一部開口することによる応力再配分を考慮すれば、堤体コンクリートに引張亀裂は生じるおそれはないと考えられる。

なお、継目の開口により堤体が上下流面間に分断されるおそれがないかどうかを確認するため、横継目の最大開口変位の分布を図-例 2.2.5 に、また周辺継目の最大開口範囲を図-例 2.2.6 に示す。これらより、横継目の開口は堤体上部の一部に限られており、その開口幅は最大 4mm 程度とキーや止水板の構造を考慮して十分許容できる範囲にとどまっていること、また周辺継目の開口範囲は上流側の一部範囲に限られていることがわかる。これより、横継目および周辺継目の開口が堤体の上下流面間に連続することにより堤体の分断が生じるおそれはないと判断される。

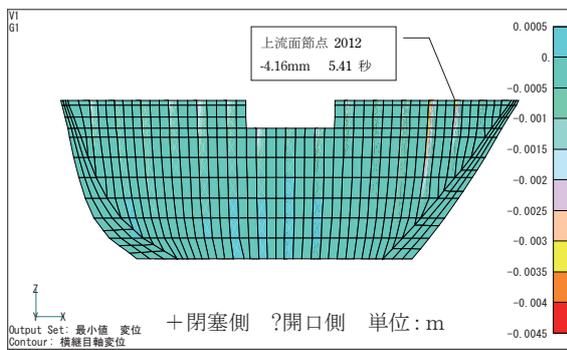


図-例 2.2.5 横継目の最大開口変位(地震時)

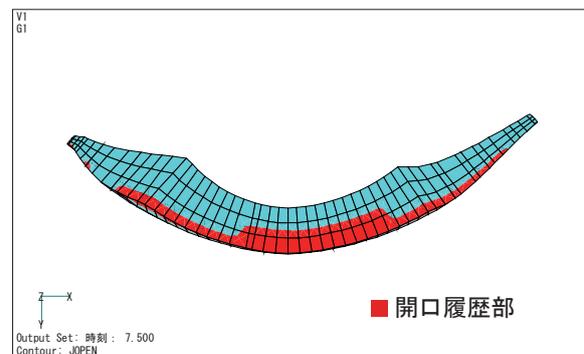


図-例 2.2.6 周辺継目の最大開口範囲(地震時)

② 圧縮破壊およびせん断破壊に対する照査

(a) 圧縮破壊に対する照査

図-例 2.2.4 より、上流面切り欠き部に最大約 12.9MPa の圧縮応力が発生している。本ダムの堤体コンクリートの圧縮強度を 45.0MPa とすると、この圧縮応力は堤体コンクリートの圧縮強度と比較してかなり小さく、圧縮破壊が生じるおそれはないと考えられる。

(b) せん断破壊に対する照査

1) 堤体底面(周辺継目沿い)のせん断破壊に対する安全性の検討

堤体周辺継目における局所せん断摩擦安全率の全時刻を通しての最小値の分布を、図-例 2.2.7

に示す。なお、局所せん断摩擦安全率  $S_f$  は式(例 2.2.1)により算出した。

$$S_f = \frac{\tau_0 + \sigma \times \tan \phi}{|\tau|} \quad \text{----- (例 2.2.1)}$$

ここに、 $S_f$ ：局所せん断摩擦安全率、 $\tau$ ：せん断面に作用するせん断応力、 $\tau_0$ ：せん断面のせん断強度、 $\phi$ ：内部摩擦角、 $\sigma$ ：せん断面に作用する垂直応力であり、せん断強度  $\tau_0$  は 1.96MPa、内部摩擦角  $\phi$  は 45 度と仮定した。図-例 2.2.6 および図-例 2.2.7 より、引張亀裂が発生していない箇所では局所せん断摩擦安全率が 1.0 を下まわっていないことが分かる。これより、堤体底面ではせん断破壊を生じるようなせん断力は発生しないことが確認できる。

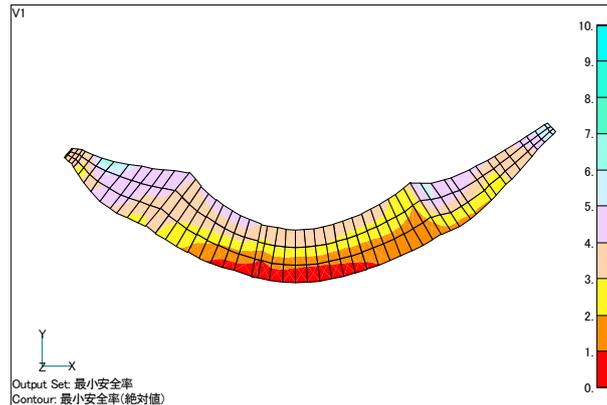


図-例 2.2.7 底面(周辺継目沿い)における最小局所せん断摩擦安全率分布(地震時)

## 2) 横継目のキーのせん断破壊に対する安全性の検討

最大のせん断応力が発生する堤体横継目の接合面(図-例 2.2.8)について、全時刻を通して最大となるせん断応力の分布を図-例 2.2.9 に示す。同図より、純せん断強度 4.5MPa<sup>注)</sup>を超えるようなせん断応力が発生しているため、せん断摩擦安全率を算出して横継目のキーのせん断破壊に対する安全性を検討することとした。

最大のせん断応力 5.30MPa が発生した時刻(4.58 秒)の周方向応力分布を図-例 2.2.10 に示す。最大のせん断応力 2.84MPa(=(2.43+1.90+5.30+1.74)/4)が発生している要素に着目すると、当該要素の周方向圧縮応力は 0.39MPa であることから、内部摩擦角 45 度を仮定するとせん断摩擦安全率は 1.7 となる。したがって、横継目のキーのせん断破壊は生じないと考えられる。

注) 圧縮強度に対する純せん断強度の比率は内部摩擦角 45 度を仮定した場合、過去の知見により 5 分の 1 程度とされている。よって、本ダムの堤体コンクリートの圧縮強度を 45.0MPa とすると、純せん断強度は 9.0MPa 程度と推定される。また、堤体横継目のキー構造の面積比率として 1/2 を考慮し、純せん断強度は 4.5MPa と設定した。

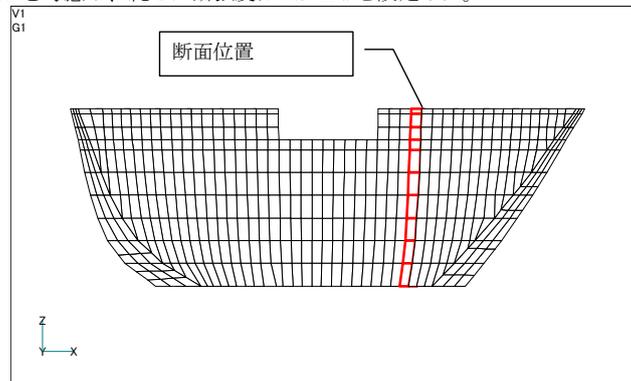


図-例 2.2.8 横継目のキーのせん断破壊に対する安定性を検討する断面位置(地震時)

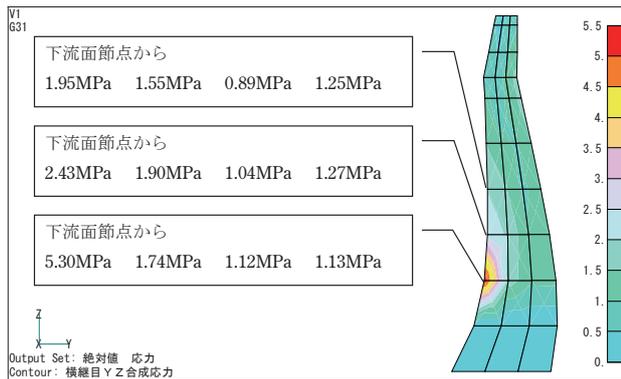


図-例 2.2.9 堤体横継目の接合面における最大せん断応力分布(地震時)

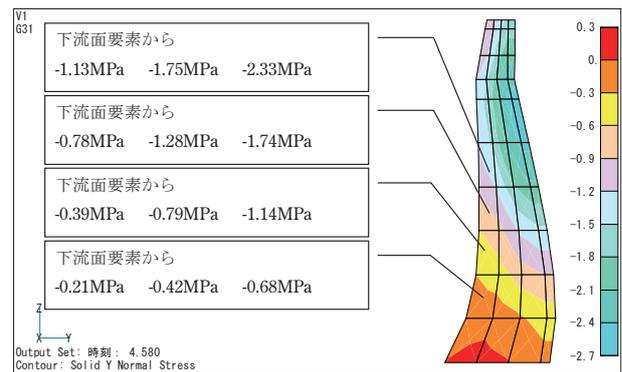


図-例 2.2.10 最大のせん断応力 5.30MPa が発生した時刻(4.58 秒)の周方向応力分布

### (3) 継目の開きを考慮した非線形動的解析による照査結果のまとめ

継目の開きを考慮した非線形動的解析による検討の結果から、本ダムでは地震時において堤体の横継目および周辺継目の一部が開くが、その範囲は堤体を上下流面間に分断するおそれはない。また、堤体コンクリートに引張亀裂が発生するおそれはなく、圧縮破壊やせん断破壊は発生しないか、発生しても局所的なものにとどまり、その影響は小さいと考えられる。これらのことから、本ダムは地震時に損傷を生じてもその損傷は限定的なものにとどまると判断される。

## 3.3 地震後における安定性検討

### (1) 検討方法

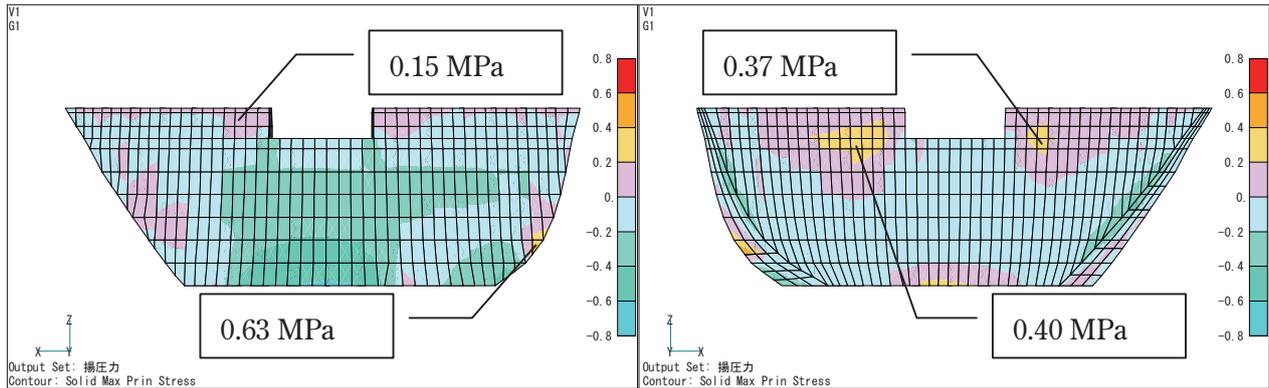
地震時に一部継目の開口が生じると判断された場合、地震後において、地震時に開口した継目内に貯水が浸入した場合の影響についてさらに確認する必要がある。そこで、3.2 の検討による解析の結果得られた周辺継目の開口範囲において、常時満水位時の水圧に相当する揚圧力を作用させ、堤体自重と静水圧を荷重として考慮した静的解析を実施した。

### (2) 検討結果とその評価

地震後の継目内への貯水浸入による揚圧力発生を考慮した静的解析の結果から、地震後もダム本体に生じる損傷が限定的なものにとどまることを、3.2 と同様の以下の条件により確認する。

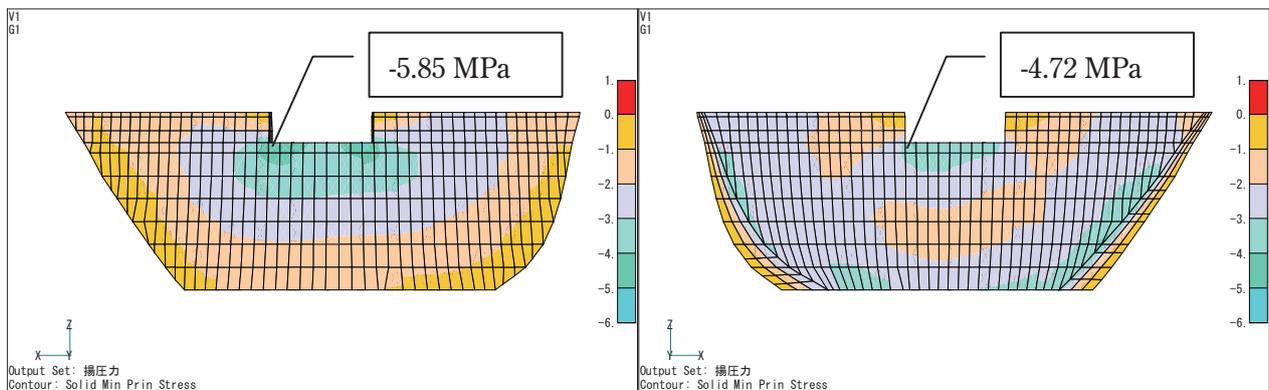
- ① 上下流面間に連続する引張亀裂の発生によって堤体の分断が生じない。
- ② ダム本体の圧縮破壊やせん断破壊を生じるような応力が発生しない、もしくは発生しても局所的なものにとどまる。

周辺継目の開口範囲に揚圧力を作用させた静的解析により、ダム堤体内において発生する引張応力および圧縮応力の最大値の分布を図-例 2.2.11 に示す。



(a-1) 上流面最大引張応力

(a-2) 下流面最大引張応力



(b-1) 上流面最大圧縮応力

(b-2) 下流面最大圧縮応力

図-例 2.2.11 最大発生応力の分布(地震後の継目内における揚圧力を考慮した静的解析)

① 継目の開きに対する照査

図-例 2.2.11 より、上流面右岸側底部に最大約 0.63MPa の引張応力が発生している。本ダム の 堤 体 コ ン ク リ ー ト の 引 張 強 度 を 3.2MPa と す る と、こ の 引 張 応 力 は 堤 体 コ ン ク リ ー ト の 引 張 強 度 と 比 較 し て 小 さ い。よ っ て、地 震 後 の 継 目 内 へ の 貯 水 浸 入 に よ り 堤 体 コ ン ク リ ー ト に 引 張 亀 裂 は 生 じ る お そ れ は な い と 考 え ら れ る。

な お、地 震 後 に 継 目 の 開 口 が 拡 大 す る こ と に よ り 堤 体 が 上 下 流 面 間 に 分 断 さ れ る お そ れ が な い か ど う か を 確 認 す る た め、地 震 時 に お け る 周 辺 継 目 開 口 範 囲 に 揚 圧 力 を 作 用 さ せ た 静 的 解 析 の 結 果 と し て、地 震 後 の 横 継 目 の 開 口 変 位 分 布 を 図-例 2.2.12 に、ま た 周 辺 継 目 の 開 口 範 囲 を 図-例 2.2.13 に 示 す。横 継 目 の 開 口 は、天 端 切 り 欠 き 部 左 岸 側 付 近 に お い て 最 大 0.25mm 程 度 と 小 さ く、キ ー や 止 水 板 の 構 造 を 考 慮 す る と 十 分 許 容 で き る 範 囲 で あ る。ま た、周 辺 継 目 の 開 口 範 囲 も 上 流 側 の 一 部 に と ど ま っ て お り、図-例 2.2.6 に 比 べ て 拡 大 し て い な い。こ れ ら の こ と か ら、地 震 後 に 継 目 の 開 口 範 囲 が 拡 大 し て 堤 体 の 上 下 流 面 間 に 連 続 す る こ と に よ り、堤 体 の 分 断 が 生 じ る お そ れ は な い と 判 断 さ れ る。

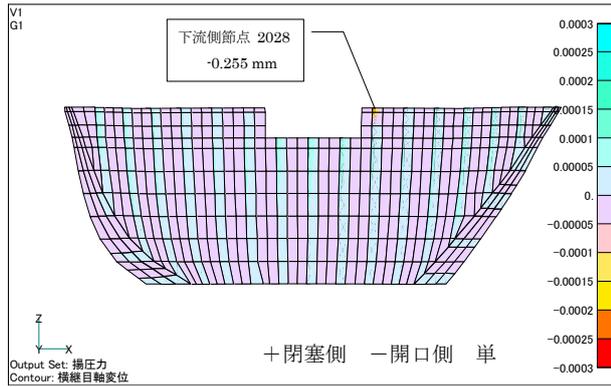


図-例 2.2.12 横継目の最大開口変位(地震後)

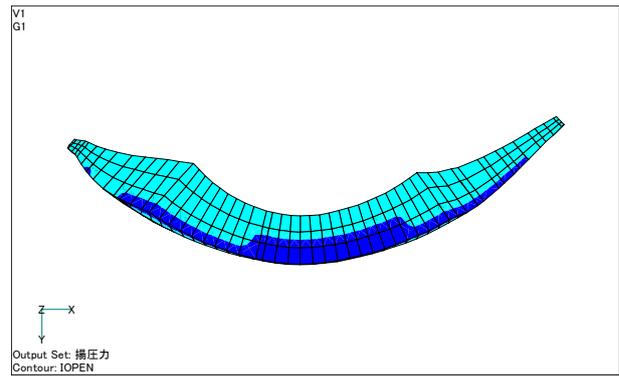


図-例 2.2.13 周辺継目の最大開口範囲(地震後)

① 圧縮破壊およびせん断破壊に対する照査

(a) 圧縮破壊に対する照査

図-例 2.2.11 より、上流面切り欠き部に最大約 5.9MPa の圧縮応力が発生している。本ダムの堤体コンクリートの圧縮強度を 45.0MPa とすると、この圧縮応力は堤体コンクリートの圧縮強度と比較してかなり小さく、地震後に圧縮破壊が生じるおそれはないと考えられる。

(b) せん断破壊に対する照査

1) 堤体底面(周辺継目沿い)のせん断破壊に対する安全性の検討

堤体周辺継目部における揚圧力載荷時の局所せん断摩擦安全率分布を図-例 2.2.14 に示す。同図より、局所せん断摩擦安全率は 1.0 を下まわっていないことがわかる。これより、堤体周辺継目部ではせん断破壊を生じるようなせん断力は発生しないことが確認できる。

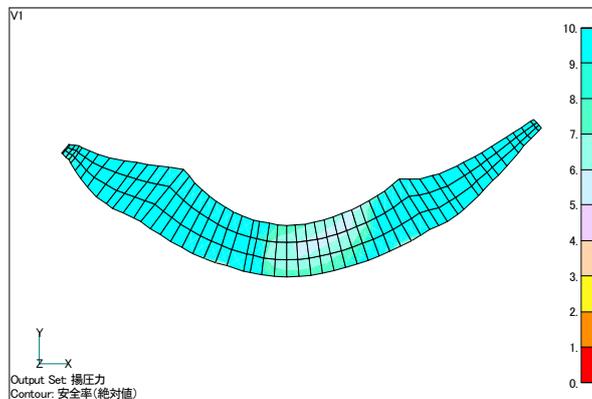


図-例 2.2.14 底面(周辺継目沿い)における局所せん断摩擦安全率分布(地震後)

2) 横継目のキーのせん断破壊に対する安全性の検討

最大のせん断応力が発生する堤体横継目の接合面(図-例 2.2.15)におけるせん断応力分布を図-例 2.2.16 に示す。これより、すべての堤体横継目において純せん断強度の 4.5MPa を超えるようなせん断応力は発生せず、せん断破壊は生じないと考えられる。

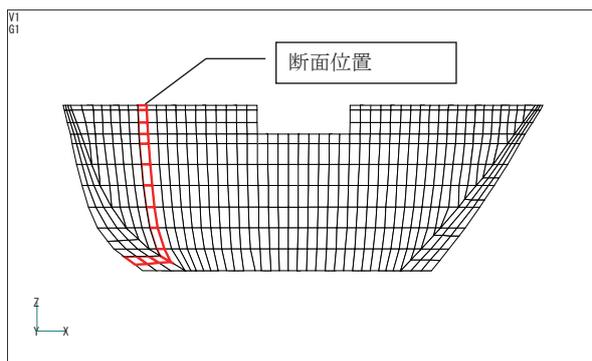


図-例 2.2.15 横継目のキーのせん断破壊に対する安定性を検討する断面位置(地震後)

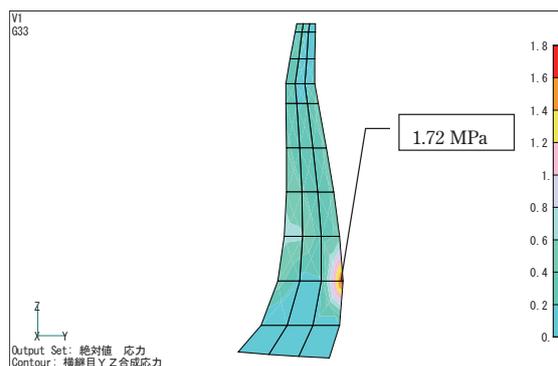


図-例 2.2.16 横継目の接合面におけるせん断応力分布(地震後)

### (3) 地震後における安定性検討結果のまとめ

地震後の安定性検討の結果から、本ダムでは地震時に一部開口する継目内への貯水浸入による揚圧力の発生を考慮しても、地震後にその開口範囲が拡大するおそれはなく、また引張亀裂等が発生するおそれもないと判断される。

### 3.4 地震応答解析による照査結果のまとめ

以上の検討結果を総合すると、本ダムではレベル2地震動を考慮した場合、地震時に堤体の横継目および周辺継目の一部が開口するが、その範囲は堤体を上下流方向に分断するものとなるおそれはない。また、堤体コンクリートの引張亀裂が生じるおそれはなく、圧縮破壊やせん断破壊は生じないか生じても局所的なものにとどまると考えられる。これらのことから、損傷は限定的なものにとどまると考えられ、本ダムではレベル2地震動に対してもダムの貯水機能は維持されると判断される。