

資料 2-2 ダム本体の照査例

ダム本体の照査は指針（案）3章に基づき行う。貯水機能が維持されることを確認するために必要となる地震応答解析の実際を、本指針（案）の対象となる各ダム形式の場合について、以下の例により示す。

- 【資料 例 2-1】 重力式コンクリートダム本体の照査例
- 【資料 例 2-2】 アーチ式コンクリートダム本体の照査例
- 【資料 例 2-3】 土質遮水壁型ロックフィルダム本体の照査例
- 【資料 例 2-4】 アースダム本体の照査例

【資料 例 2-1】 重力式コンクリートダム本体の照査例

1. ダム概要

表-例 2.1.1 に、対象ダムの諸元を示す。

表-例 2.1.1 ダム諸元

堤高	常時満水位
115m	107.1m

2. 照査に用いるレベル 2 地震動^{注)}

図-例 2.1.1 に示す加速度時刻歴波形を、照査用地震動とした。

注) 重力式コンクリートダムの地震応答解析は、一般に 3. で述べるような 2 次元解析によることができ、考慮する地震動の成分としては、水平成分のうちの上下流方向成分および鉛直成分が考えられる。ただし、事前検討により、重力式コンクリートダムでは、一般に水平地震動（上下流方向成分）の影響が支配的となり、鉛直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ため、本資料では水平成分（上下流方向成分）のみを入力地震動として考慮する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。

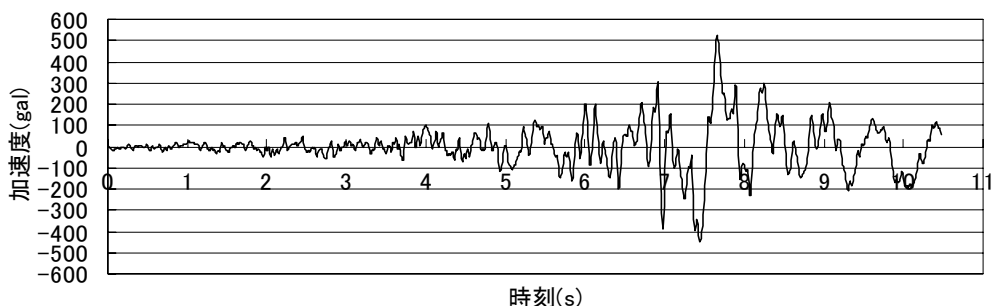


図-例 2.1.1 照査に用いたレベル 2 地震動の加速度時刻歴波形

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

本ダムの照査は、その堤体形状や構造上、横断面形状を考慮した 2 次元解析により行うことができると考えられることから、図-例 2.1.2 に示す 2 次元有限要素（平面ひずみ要素）解析モデルを作成した^{注 1)}。なお、モデル化は、一般に地震時に最も厳しい条件となると予想される最大断面等を対象とする必要がある。

解析に用いる堤体および基礎地盤の材料物性を表-例 2.1.2 に示す。なお、堤体コンクリートの弾性係数と減衰定数については、ある重力式コンクリートダムでの実測地震時挙動を良く再現できた物性値の組合せを用いた。

貯水位は、通常時の水位として最もダムに影響が大きいと考えられる常時満水位とする。なお、貯水是非圧縮性流体とみなして付加質量マトリクスによりその影響を考慮した。また、堤体底面の境界条件は、剛結（固定境界）とした。揚圧力は考慮していない。

以上の条件のもとで、解析モデル底面から図-例 2.1.1 に示す加速度時刻歴波形を入力地震動として入力した^{注 2)}。

注1) 重力式コンクリートダム解析に用いる有限要素モデルの作成にあたっては、ダム堤体のほか基礎地盤（岩盤）も含めてモデル化した方がより実条件に忠実な解析が可能と考えられる。ただし、対象ダムの基礎地盤が良好な岩盤である場合には、基礎地盤の変形性を考慮しなくても必要な精度の解析結果が得られること、また、一般に堤体のみをモデル化した場合には、堤体と基礎地盤をあわせてモデル化した場合に比べ、解析上堤体内の発生応力は大きく算定されることを考慮して、堤体のみを対象とした解析モデルとすることが可能な場合も多い。ここではそのような場合の例を示す。

注2) 本事例では、解析用プログラムとして汎用有限要素解析コード“DIANA”を用いた。

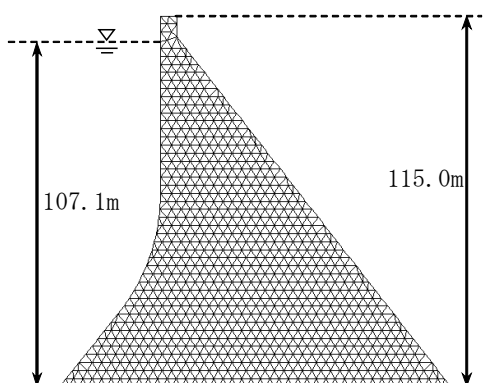


図-例 2.1.2 有限要素モデル

表-例 2.1.2 材料物性

	堤体	基礎地盤（岩盤）	貯水
弾性係数 E (MPa)	27,000	—	—
ポアソン比 ν	0.2	—	—
単位容積質量 ρ (kg/m ³)	2,300	—	1,000
減衰定数 h (%)	15 (レイリー減衰 1,3 次)	—	—
せん断強度 τ_0 (MPa)	—	2.31	—
摩擦係数 f	—	1.0	—

(2) 解析結果とその評価の考え方

堤体コンクリートの損傷過程を考慮しない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所的なものにとどまる。

① 引張破壊に対する照査

ダム堤体内に最も大きな応力が発生する可能性のある時刻（ダム堤体の天端が下流側または上流側に最も変位する時刻に一致）における堤体内の発生応力のうち、引張側主応力の分布を図-例 2.1.3 に示す。同図より、本ダムでは、天端の下流側への最大変位時に、上流面勾配変化点付近において最大 4.05MPa の引張応力が発生している。ダムコンクリートの静的な引張強度を 2.5MPa とすると、この応力は堤体材料の引張強度を超えるものであるため、堤体の当該箇所付近に引張亀裂が生じる可能性がある。

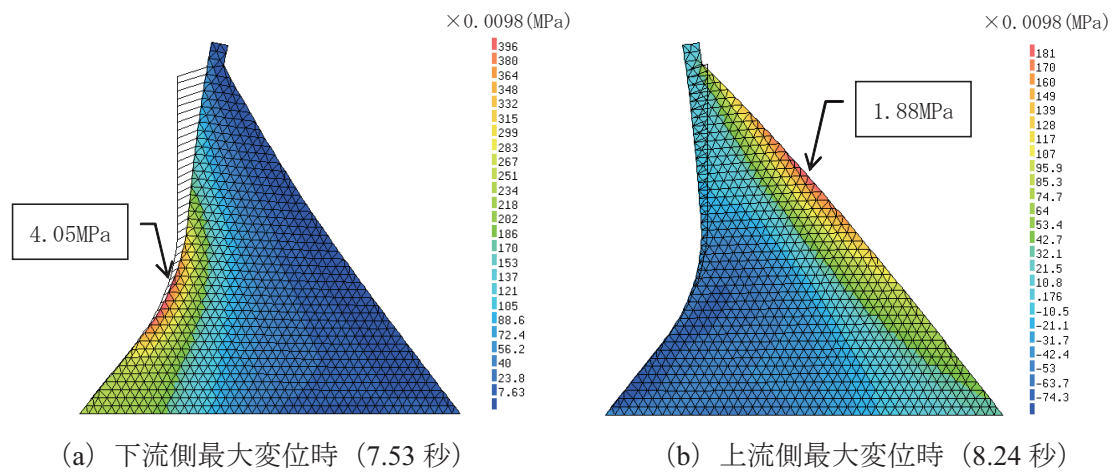


図-例 2.1.3 引張側主応力分布（線形動的解析）

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

堤体内に最も大きな応力が発生する可能性のある時刻（ダム堤体の天端が下流側または上流側に最も変位する時刻に一致）における堤体内の発生応力のうち、圧縮側主応力の分布を図-例 2.1.4 に示す。同図より、本ダムでは、天端の下流側への最大変位時に、下流面において最大 4.85MPa の圧縮応力が発生している。しかし、ダムコンクリートの圧縮強度を 25.0MPa とすると、発生圧縮応力は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。

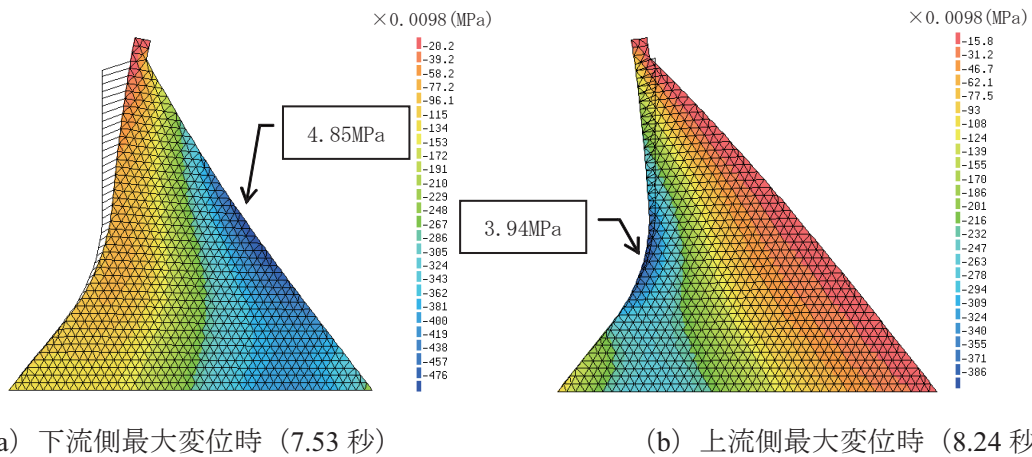


図-例 2.1.4 圧縮側主応力分布（線形動的解析）

(b) せん断破壊に対する照査

特にせん断破壊に対する安全性を確認する必要があると考えられる堤体底面（堤敷）を対象として、線形動的解析の結果算定されるせん断応力、垂直応力の時刻歴から、式（例 2.1.1）により局所せん断摩擦安全率を求めた。なお、発生応力としてはダム堤体側で代表し、強度としては表-例 2.1.2 に示す基礎地盤の強度を用いた。

$$f'_s = \frac{\tau_0 + f\sigma}{\tau} \quad \text{----- (例 2.1.1)}$$

ここに、

f_s' : 局所せん断摩擦安全率

τ : せん断面に作用するせん断力

τ_0 : せん断面のせん断強度

f : せん断摩擦係数

σ : せん断面に作用する垂直応力

底面内でその最小値が生じる時刻における局所せん断摩擦安全率の分布を図-例 2.1.5 に示す。堤体底部上流端から底敷長の 1/4 程度までは局所せん断摩擦安全率が 1.0 を下回っており、この範囲ではせん断破壊が生じるおそれがあることがわかる。なお、これは、線形動的解析の結果、底面付近に大きな引張応力が発生することが原因と考えられる。

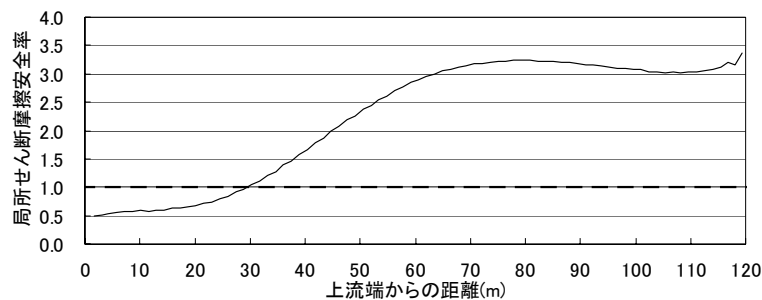


図-例 2.1.5 堤敷における局所せん断摩擦安全率分布（線形動的解析、7.51 秒）

(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ことから、ダム本体に損傷が生じるおそれがあると判断される。よって、引き続き堤体コンクリートの引張破壊による損傷過程を考慮した地震応答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非線形動的解析

(1) 解析条件等

解析モデル形状、基本的な材料物性および入力地震動は 3.1 と同様である。

堤体コンクリートの引張損傷による亀裂の発生については、分布型ひび割れモデルを用いて評価し、コンクリートの引張損傷に関わる材料物性は、表-例 2.1.3 のように設定した。また、引張軟化曲線は図-例 2.1.6 に示す単直線近似を用いた。なお、亀裂発生後、地震中に貯水が亀裂内に瞬時に浸入して間隙水圧の上昇が生じることはないと考え、地震継続中の亀裂内における揚圧力の発生は考慮しない。

表-例 2.1.3 コンクリートの引張損傷に関わる材料物性

項目	設定値
一軸引張強度 f_t （一軸引張軟化開始応力）[MPa] 注1)	2.5
破壊エネルギー G_f [N/m] 注2)	300

注 1) 一軸引張強度は、照査上安全側の立場から一般的なダムコンクリート静的荷重条件下での値を想定して設定した。

注 2) 破壊エネルギーについては、粗骨材最大寸法 150mm のダムコンクリートに対応した値としている。

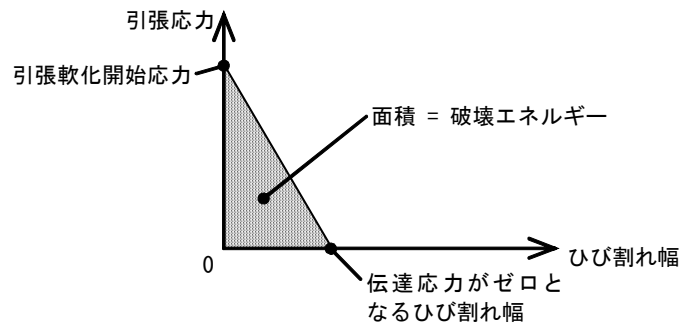


図-例 2.1.6 引張軟化曲線

(2) 解析結果とその評価の考え方

分布型ひび割れモデルを用いて引張破壊による損傷過程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。

① 引張亀裂に対する照査

分布型ひび割れモデルを用いて引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析により得られた地震終了時における最終的な引張亀裂の発生範囲を、図-例 2.1.7 に示す。色付き要素が、最終的に引張亀裂が発生した要素である。同図より、堤体に引張応力に起因する引張亀裂が、堤体底部および上流面勾配変化点付近から生じる可能性があることがわかる。しかし、堤体を上下流方向に貫通するような引張亀裂が生じていないことから、上下流面間に連続する引張亀裂の発生によって、堤体の分断が生じるおそれはないと考えられる。^{注)}

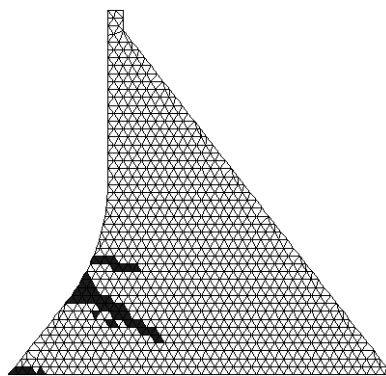


図-例 2.1.7 最終的な引張亀裂発生範囲

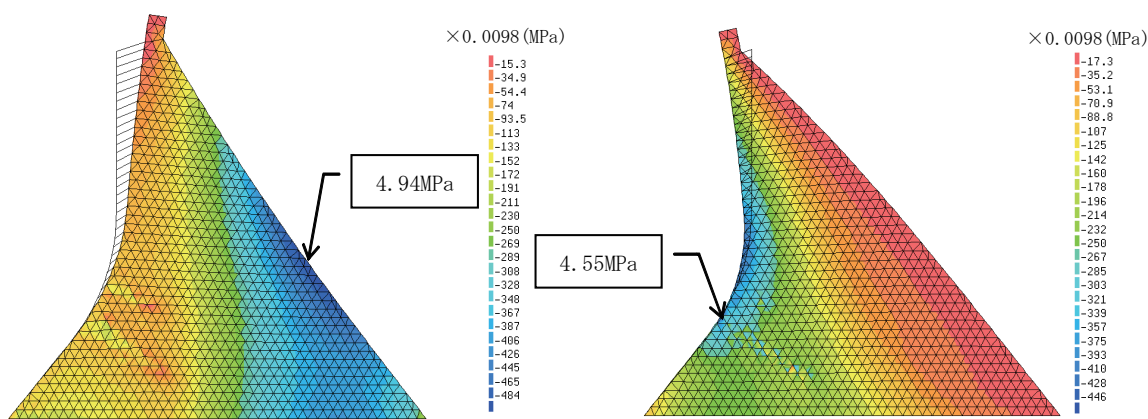
(引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析)

注) 上下流面間に連続する引張亀裂が生じるような解析結果となる場合、上記のような堤体だけのモデル解析を行っている場合には、基礎地盤を含めたモデル化を行う等、より実際に近い条件で再度解析を行う等の検討も必要である。なお、そのような検討によっても上下流面間に連続する引張亀裂により堤体の分断が生じるおそれがあると考えられる場合には、仮にそのような亀裂により堤体が分断された場合を想定して地震に伴う上部の堤体ブロックの安定性を検討するなど、さらに詳細な検討を行う必要があると考えられる。

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

ダム堤体内に最も大きな応力が発生する可能性のある時刻（ダム堤体の天端が下流側または上流側に最も変位する時刻に一致）における堤体内の発生応力のうち、圧縮側主応力の分布を図-例 2.1.8 に示す。同図より、本ダムでは、天端の下流側への最大変位時に、堤体下流面において最大 4.94MPa の圧縮応力が発生している。しかし、ダムコンクリートの圧縮強度を 25.0MPa とすると、発生圧縮応力は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。



(a) 下流側最大変位時(7.53 秒)

(b) 上流側最大変位時(7.74 秒)

図-例 2.1.8 圧縮側主応力分布（引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析）

(b) せん断破壊に対する照査

特にせん断破壊に対する安全性を確認する必要があると考えられる堤体底面（堤敷）を対象として、局所せん断摩擦安全率を求めた。底面内でその最小値が生じる時刻における局所せん断摩擦安全率の分布を図-例 2.1.9 に示す。引張亀裂が発生していない堤体底面部位で局所せん断摩擦安全率が 1.0 を下回るのは、引張亀裂の発生範囲から下流方向に 6m 弱の区間であり、またその継続時間は 0.05 秒以下であることから、堤体全体の安定性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

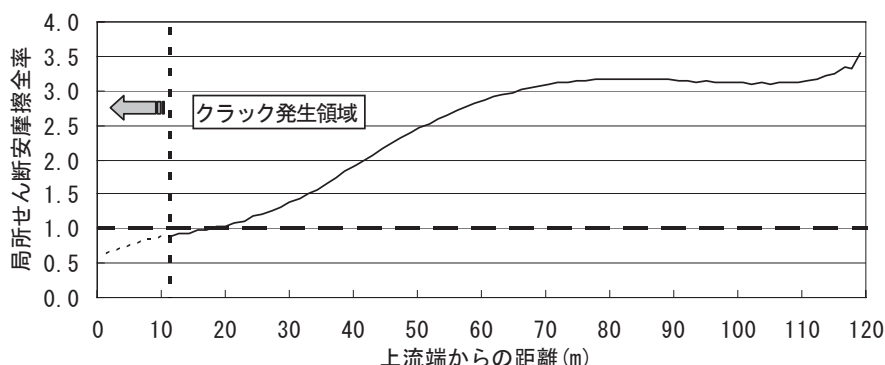


図-例 2.1.9 堤敷における局所せん断摩擦安全率分布

(引張破壊による損傷過程を考慮した非線形動的解析、7.48 秒)

(3) 損傷過程等を考慮した非線形動的解析による照査結果のまとめ

損傷過程等を考慮した非線形動的解析による検討の結果から、本モデルダムでは地震時において堤体の一部に引張亀裂が発生する可能性があるが、その範囲は堤体を上下流に連続するものとならず、また圧縮破壊やせん断破壊は発生しないと判断される。

3.3 地震後における安定性検討

(1) 検討方法

地震動により引張亀裂が生じるおそれがあると判断されたことから、地震後に亀裂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 の検討による解析から得られた引張亀裂の発生範囲において、貯水による静水圧に相当する圧力を作用させ、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。図-例 2.1.10 に亀裂内水圧载荷節点位置を示す。なお、水圧は図-例 2.1.11 に示すように引張亀裂の進展方向と直角方向に作用すると考え、引張亀裂が発生した要素と発生していない要素の境界節点上に水圧に相当する力を点荷重として载荷した。

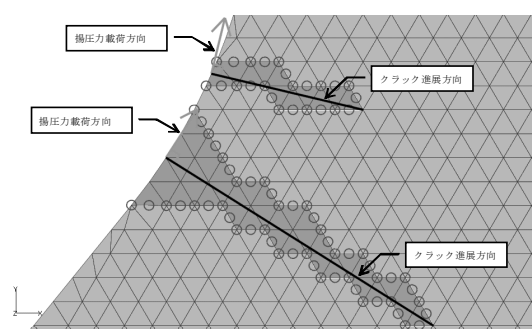
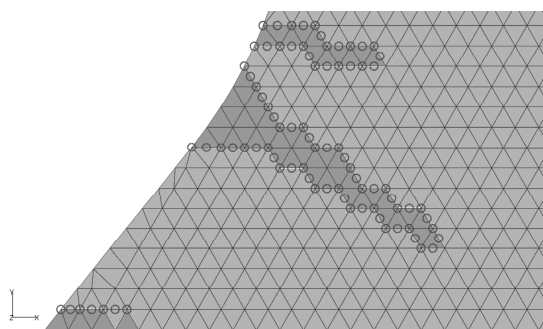


図-例 2.1.10 亀裂内水圧载荷節点位置 (丸印節点) 図-例 2.1.11 亀裂内水圧载荷方向

(2) 検討結果とその評価の考え方

引張亀裂に、常時満水位に相当する全水圧を作用させ、自重と静水圧を荷重として考慮し静的解析を実施した。その結果から、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2条件により確認する。

① 引張亀裂に対する照査

地震時に生じた引張亀裂範囲の周辺に引張亀裂を発生させる引張応力は生じず、図-例 2.1.12 に示すように引張亀裂発生範囲は地震時の引張亀裂発生範囲から拡大していない。すなわち、地震時に生じた引張亀裂が地震後の貯水の浸入によって進展するおそれはないと考えられる。

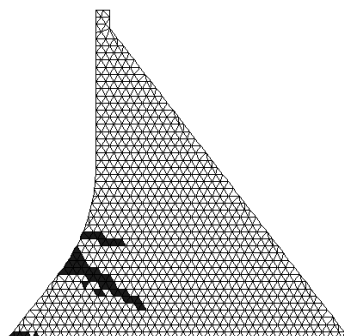


図-例 2.1.12 地震後の引張亀裂範囲 (引張亀裂内への貯水浸入を考慮した安定性検討)

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

引張亀裂に全水圧を作用させ、自重と静水圧を荷重として考慮した場合の圧縮側主応力分布を、図-例 2.1.13 に示す。勾配変化点付近からの引張亀裂先端に最大 2.83MPa の圧縮応力が発生しているが、ダムコンクリートの圧縮強度を 25.0MPa とすると、発生圧縮応力は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。

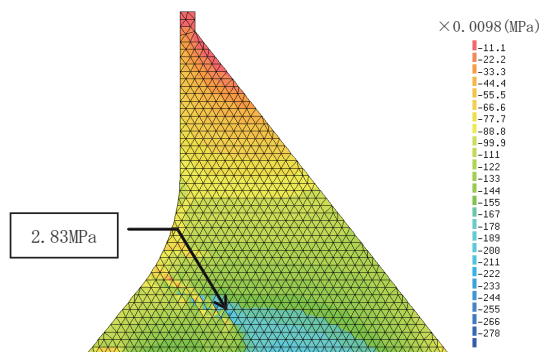


図-例 2.1.13 地震後の圧縮側主応力分布（引張亀裂内への貯水浸入を考慮した安定性検討）

(b) せん断破壊に対する照査

堤体底面（堤敷）の引張亀裂が発生していない領域における地震後の局所せん断摩擦安全率の分布を図-例 2.1.14 に示す。同図より、底面内の引張亀裂が発生していない領域では、局所せん断摩擦安全率は 1.0 を下回っていないことから、地震後にせん断破壊が生じるおそれはないと考えられる。

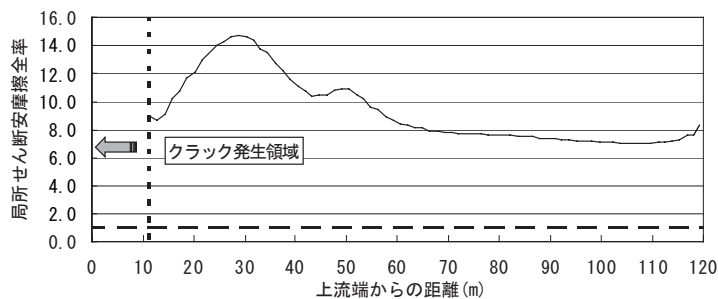


図-例 2.1.14 堤敷における局所せん断摩擦安全率分布

(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堤体の一部に発生した引張亀裂内に地震後貯水が浸入しても、その亀裂が拡大するおそれはないと判断される。

3.4 地震応答解析による照査結果のまとめ

以上の照査結果を総合すると、本ダムではレベル 2 地震動を考慮した場合、地震時に堤体の一部（上流面の勾配変化点付近および堤体底面上流端付近）に引張亀裂が発生する可能性がある。しかし、その範囲は堤体を上下流面間に分断するおそれはないこと、また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とから、生じる損傷は限定的なものにとどまると考え

られる。したがって、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。