

1. 概要

本資料は、重力式コンクリートダム地震時における挙動の再現性を、多数の地震計が配置され、地震記録を豊富に有する札内川ダムをモデルダムとして三次元地震応答解析を実施したものである。実際に観測された加速度時刻歴波形から、地震時における構造物－貯水池－基礎岩盤の相互作用を考慮して実施した三次元応答解析の結果と実際の地震時の観測結果を比較することで当該ダムの地震時の物性値を同定した上で、地震時のダムの挙動について考察するものである。

1.1 解析手順

ダム三次元応答解析および地震時挙動の再現性について、以下の手順にて行った。

1) 解析条件

①解析コード

エネルギーの吸収効率のよい境界条件の設定法である「三浦の粘性境界の理論」¹⁾を用いた、解析コードUNIVERSE²⁾を用いた。

②入力地震動

地震波形は、三次元引き戻し計算を実施しモデル底面から地震動として入力した。

2) モデル作成条件

作成するモデルの概要を図 1-1 と図 1-2 に示す。モデルは、ダムおよび基礎岩盤を有する三次元モデルとし、堤体三面図、ダム周辺地形図、貯水池を含む平面図等の資料に基づいて、適切に簡略化した。

①要素

地震計設置位置近傍が節点となり、地震時の貯水位を設定した。

②物性値

工事誌等から物性値を整理して初期値として用いるものとする。

③基本境界条件

モデル底面と側面を「三浦の粘性境界の理論」¹⁾を用いた粘性境界とした。

④荷重条件

初期応力解析および固有値解析を行った上で、動水圧を考慮した三次元応答解析を行う。

3) 解析

重力式コンクリートダムの 3 次元モデルにより観測記録の再現解析を行う³⁾。

4) 考察

再現解析結果と実測記録を比較し、地震時のダムの挙動を考察する。

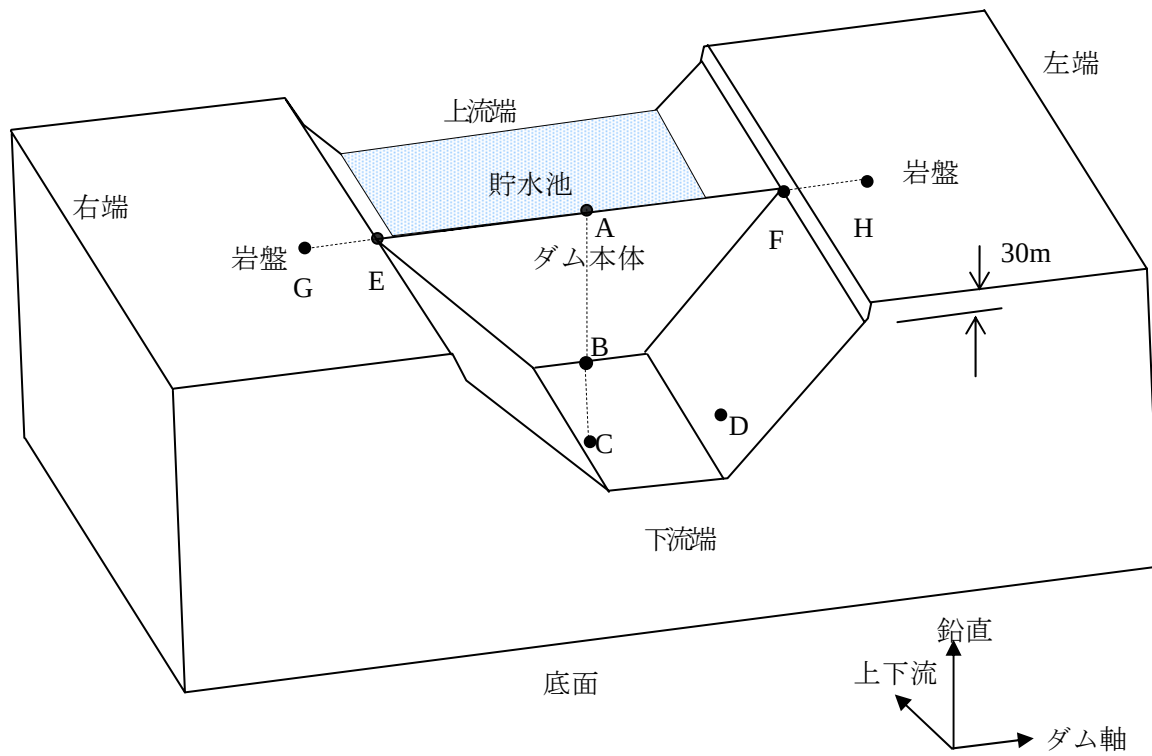


図 1-1 解析モデルのイメージ図

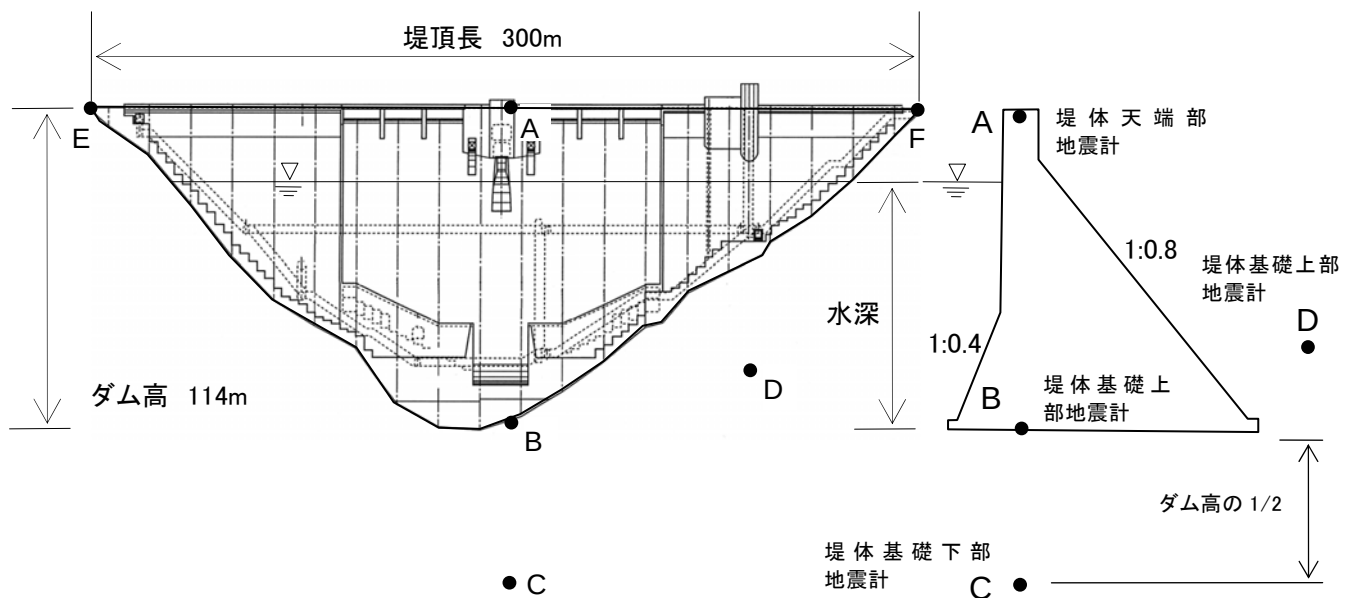


図 1-2 地震計の設置位置図

1.2 検討内容

1.2.1 ダムの解析モデルの作成

汎用ソフトFEMAP（Ver.9.0）を用いて、ダムおよび基礎岩盤の有限要素メッシュを8節点要素により作成する。また、貯水池の基本寸法および分割数を規定し、UNIVERSE²⁾により差分メッシュを作成する。

（１） 堤体

堤体の三面図に基づき、堤体の有限要素モデルを作成する。モデル化に伴い以下の点に着目した。

- [堤体の詳細形状]：堤体の地震時挙動の再現性に着目し、地震観測記録に影響を与える要因を分析した上で、考慮すべき堤体の詳細形状をモデルに導入する。常用洪水吐およびゲート操作室は複雑な構造であるが、天端中央の地震時挙動に対する影響が大きいと考えられ、詳細な構造（ゲート操作室、上段オリフィス空洞、下段オリフィス空洞、呑口部、吐口部等）を最大限にモデル化する。一方、エレベーターおよび取水塔などはダム堤体の地震時挙動に対する影響、特に観測された地震記録に対する影響は小さいと考え、モデル化はしない。
- [岩着部]：堤体と基礎岩盤との結合面については、後述する（式（１）参照）基準により定められたサイズの要素で反映し得る詳細な岩着部形状をモデル化する（要素毎の直線からなる線で岩着部の形状とする）。
- [その他]：モデル化の際に、貯水池の水面に合わせて有限要素のメッシュ線を、地震観測位置の節点に一致するように配置する。

（２） 基礎岩盤

[範囲]：

UNIVERSE²⁾を用いた解析では、基礎岩盤周辺の自由地盤が解析に取り込まれているため、基礎岩盤のモデル化範囲を堤体と基礎岩盤の相互作用領域より大きく取った場合、解析結果の精度が保証されると考え、地震観測位置および地震動レベルを考案して、以下の範囲をモデル化した（図1－1参照）。

- 左端　　：ダム天端の左端よりダム高さの1.5倍（左岸側の岩盤範囲を左岸リムトンネル内の地震観測点より70m奥までの範囲とする。）。
- 右端　　：ダム天端の右端よりダム高さの1.5倍（右岸側の岩盤範囲を右岸リムトンネル内の地震観測点より80m奥までの範囲とする。）。
- 下流端　：ダム底部下流端からダム高さの2.0倍（下流開放基盤面の地震観測点Dはダム上流面より約260mのところにあるため、下流側の岩盤範囲をこの観測点より75m大きなものにする。）。
- 上流端　：ダム底部上流端からダム高さの1.0倍。
- 地山　　：ダム天端より高さ30m（リムトンネル内の地震挙動を再現するため、観測点上方の地山をできるだけモデル化する）上端面を高くする。
- 底面　　：ダム底部からダム高さの1.0倍（岩盤下部地震観測点Cはダム底部よりダム高さの1/2下方にあり、この点よりさらにダム高さの1/2、深い範囲とする。）。

[地形]：

ダムに接する上下流方向の地形の変化はあまりなく、本業務ではチャンネル状の単純な谷形状とする。

(3) メッシュサイズと時間刻みの設定基準

解析結果の精度を確保するために、式(1)に示すような物性値（せん断波速度 V_s ）、要求される解析精度（解析結果に含まれる振動成分の最小周期 $T_{\min}$ ）と要素サイズとの制約条件を用い、最大許容メッシュサイズ（ ΔL ）を決定する。

$$\frac{\Delta L}{V_s} \leq \frac{T_{\min}}{\pi} \quad (1)$$

時間領域における地震応答解析の時間刻みは式(2)により設定する。

$$\Delta t < \frac{T_{\min}}{\pi} \quad (2)$$

ダムサイトにおける2003年9月26日の十勝沖地震観測結果を基に得られたダム底面(岩盤上部)に対する天端中央の加速度の伝達関数から、本ダムの7次、又は8次モードの固有周期は約0.06秒であると判断できる。この振動成分まで解析の精度を保証するため、本解析で $T_{\min} = 0.05$ 秒、即ち、精度保証最大周波数は20Hzとした。

ダム本体について、せん断波速度 V_s を3200 m/sと仮定し（弾性係数は約25000 MPa）、式（1）により求められたダム本体の最大メッシュサイズは50.9m、式（2）により得られた時刻歴解析の時間刻みは0.0159秒であるが、より精度の高い解析結果を得るために、ダム本体の最大メッシュサイズを10m、時刻歴解析の時間刻みを0.01秒と定めた。

次に、基礎岩盤のメッシュについては、上述手順と同じ、式（1）により定めた要素サイズを用いて、モデル化を行う。後述する物性条件でわかるように、基礎岩盤のせん断波速度 V_s は3060 m/sであるので、堤体と同じ解析精度（最大振動数20Hz）を維持するために、式（1）により得られた基礎岩盤の最大許容メッシュサイズは48.7mである。そこで、基礎岩盤の最大メッシュサイズを25mと設定した。

よって、ダム本体および基礎岩盤のメッシュ分割ならびに時刻歴解析の時間刻みは、表1-1に示す仕様となる。

表 1-1 メッシュ分割および時刻歴の時間刻み

	FEM メッシュサイズ(m)		時間刻み(秒)	
	理論の許容値	実際使用値	理論の許容値	実際使用値
ダム本体	50.9	10	0.0159	0.01
基礎岩盤	48.7	25		

(4) 貯水池

貯水池のダム軸方向断面の形状は、堤体上流面のダム軸方向断面への投影形状と同じとし、上流側へは水深の3倍の範囲（メッシュサイズ10.0m）とした。貯水池のモデル化は差分法に基づき、プログラムUNIVERSE²⁾により解析の際に自動的に行われる。

(5) 境界条件

【ダム堤体】：上流面は連成条件を介して貯水池と連成し、岩着部は基礎岩盤と剛結とした。

【基礎岩盤】：初期応力解析では基礎岩盤の側方境界は鉛直ローラー、底面では固定条件とした。動的解析では側方境界および底面境界では粘性境界とした。さらに、基礎岩盤の周辺に自由地盤をモデル化する。

【貯水池】：底面および両側の地山斜面では部分吸収条件、上流端は完全吸収条件、表面は表面波条件を用いる。ただし、貯水池と基礎岩盤との連成は考慮していない。

(6) 物性条件

観測されたダム底部の最大地震加速度は 70 gal 以下であるので、ダム堤体および基礎岩盤は線形弾性材料と仮定した。物性値は、工事誌および地震観測結果により、基礎岩盤並びにダム堤体の弾性係数および減衰係数を推定し、再現解析の初期物性とした。

ボーリングコアを利用した岩石試験（工事誌：表-2・2・6 岩石試験結果総括表）によると、ダムサイトの岩盤は主に砂岩と泥質岩であり、平均値として、密度 2.74 g/cm^3 、せん断波速度 $V_s 3060 \text{ m/s}$ である。基礎岩盤の減衰係数としては、地震観測結果を基にハーフパワー法により求める（ただし、このように求められた減衰係数には岩盤および貯水池へのエネルギー逸散が含まれていることを踏まえる必要がある。）。

ダムコンクリートについては、コンクリート配合区分として外部コンクリートやRCD用コンクリートなどに区分されているが、RCD用コンクリートの体積の割合が圧倒的に大きいため、再現解析に用いる初期物性値として、RCD用コンクリートの試験値を用いた。その密度は 2.44 g/cm^3 （材齢 28 日）である（工事誌：表-4.6.22 品質管理結果一覧表）。ダムコンクリートの弾性係数については、固有値解析の 1 次固有振動数と地震観測結果から得られた天端中央のダム底部に対する加速度伝達関数の 1 次ピーク振動数とが一致するように調整する。堤体の減衰係数については、地震観測結果を基にハーフパワー法により求めた。

1.2.2 固有値解析

ダム本体の弾性係数および固有振動特性を把握するために、固有値解析を行う。固有値解析の 1 次固有振動数と地震観測結果から得られたダム本体の加速度伝達関数の 1 次ピーク振動数が一致するように、ダム本体の弾性係数を調整する。ただし、観測結果により得られた伝達関数のピーク振動数が貯水池の影響を受けていることを考慮した。ダム本体の弾性係数を同定した上、空虚状態のダム堤体の 1 次～10 次の固有振動数と固有振動モードを求める。そのうちの 1 次固有振動数は地震応答解析におけるレーリー型の減衰評価に用いた。

1.2.3 静的応力解析

地震時のダムの応力状態を把握するために、初期の静的応力解析を行う。その際に、ダム本体の築堤過程を数ステップに分けた逐次築堤過程解析および地震時水位の静的水圧を考慮した。

1.2.4 地震時挙動の再現性解析

(1) 再現性解析

上述した解析条件を用い、三次元ダム本体－基礎岩盤－貯水池連成系の地震応答解析を行い、2003年9月26日4:50に発生した地震時のダムの挙動を再現する。

解析に用いる入力地震動は、岩盤下部の地震観測点で計測された地震動を三次元引き戻し計算を実施し、解析モデルの底面で得られた地震動とする。引き戻し計算は三次元動的解析に基づく伝達関数法により行う。

再現性解析結果について、以下の項目を出力する。

- ① 地震観測点の加速度時刻歴。
- ② 地震観測点の加速度時刻歴のフーリエスペクトル。
- ③ 基礎下部観測点に対する基礎上部観測点およびリムトンネル内の観測点における加速度の伝達関数。
- ④ 基礎上部に対する天端中央および堤体両端観測点の加速度の伝達関数。
- ⑤ 最大加速度応答分布。
- ⑥ 地震時の応力状態。

(2) 考察・検討

解析結果に対して以下の項目に着目し、考察・検討する。

- ① 地震時において、ダム本体および基礎岩盤の物性値の設定について。
- ② 地震計設置位置の妥当性。
- ③ 再現解析手法の妥当性。

1.3 主な成果

札内川ダムの堤体－基礎岩盤－貯水池を対象にして、解析プログラムUNIVERSE (Ver.5.1)²⁾を用い、2003年9月26日に発生した十勝沖地震時のダムの動的挙動を再現解析した。解析により以下の観測結果が概ね再現された。

- ① ダム天端中央および底部の加速度応答並びにダム底部から天端までの加速度の増幅率。
- ② 基礎岩盤の下部観測点から上部観測点までの加速度の増幅率。
- ③ ダム本体の一次固有振動数。

これにより、観測点のみでなく、地震時当該ダムの動的挙動（加速度応答、応力応答など）を詳細に把握することができた。

しかし、ダム天端の両端および両岸地山の観測点における解析結果と観測結果の差が比較的大きく、基礎岩盤の地質構造を反映したモデル化手法等が今後の課題として考えられる。