

1

レベル2地震動に対するダムの動的応答解析

渡辺和夫 WATANABE Kazuo 株式会社 アイ・エヌ・エー/ 事業本部	千葉淳哉 CHIBA Junya 株式会社 アイ・エヌ・エー/ 河川第一部	中川 透 NAKAGAWA Toru 株式会社 アイ・エヌ・エー/ 河川第一部
--	--	--

1—はじめに

1995年1月17日に発生したM7.3の兵庫県南部地震によって、土木構造物が大きな被害を受けた。そして、2001年9月には、耐震基準作成のための手引きとして『土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)』(土木学会耐震基準小委員会活動報告)が出版された。

このような背景から、国土交通省では、これまでの設計基準に基づき設計されたダムを対象に、将来にわたって発生が想定される最大級の地震動(以下、レベル2地震動)に対応する耐震性能照査方法の原案『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説』(以下、照査指針(案))をとりまとめ、2005年3月から試行されている。照査指針(案)では、重力式コンクリートダム、アーチ式コンクリートダム、土質遮水壁型ロックフィルダムおよびアースダム本体および関連構造物が適用の対象となっている。

本稿では、国土交通省国土技術政策総合研究所から発注されたレベル2地震動によるダム堤体の動的応答解析業務を実施する際に考慮した解析時の着目点と解析条件の設定方法等について、事例的にとりまとめて紹介する。

2—照査指針(案)の概要

図1に、照査指針(案)に基づくダム耐震性能照査の概略フローを示す。照査指針(案)において、レベル2地震動に対するダムの耐震性能とは「地震時に損傷が生じたとしても、ダムの貯水機能が維持されるとともに、生じた損傷が修復可能な範囲にとどまることとする」と定義されている。

実務的には、フローに示した静的解析結果とレベル2地震動の動的応答解析結果をダム耐震性能の照査基準に照らしてダムの耐震性能の照査を行うことになる。

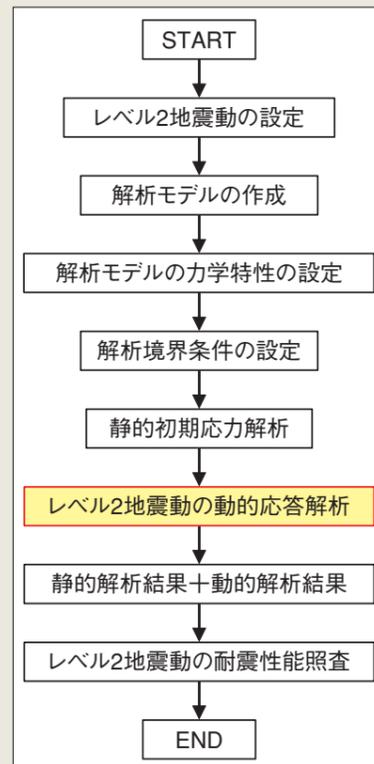
3—ダム堤体の動的応答解析時の解析条件等

以下に、重力式コンクリートダム、アーチ式コンクリートダム、ゾーン型ロックフィルダムの動的応答解析時における着目点と解析条件の設定方法等の事例について紹介する。

3.1 重力式コンクリートダム

1) 解析モデル

重力式コンクリートダム堤体は設計上、上下流方向の2次元断面で構造安定性を確認していることから、解析モデルは2次元モデルとするのが一般的である。



■図1—ダム堤体の耐震性能照査の概略フロー

解析モデルは、堤体と基礎地盤を考慮することが望ましいとされる(図2)。これは、堤体のみをモデル化した場合、堤体底面の境界条件を剛結(固定境界)とするため、堤体内の発生応力が実際より大きく評価されてしまうためである。

2) 解析条件

ダム堤体の基礎岩盤は、水平方

向に無限に連続している。また、地震動は基礎岩盤内を伝達し、地震動エネルギーが減衰する。従って、レベル2地震動の動的応答解析時には、ダム堤体基礎岩盤の水平方向の連続性を評価するための一方法として、自由地盤境界を設定する方法を採用した。また、自由地盤境界を設定した場合、基礎岩盤モデル側面との間には粘性境界を設定するのが一般的である。なお、基礎岩盤モデルの底面に対しても、固定基礎を設けて、その間に粘性境界を設定した。

また、地震時における動水圧は、貯水を非圧縮性流体と仮定して付加質量マトリクスで考慮した。

3) 地震動の入力方法

当該ダムで想定されるレベル2地震動は、ダム基礎上に設定されたものである。従って、基礎地盤を考慮した解析モデルでは、ダム基礎上でレベル2地震動が作用するように地震動を基礎地盤モデル底面から入力した。

なお、堤体のみを解析モデルにて解析を行う場合は、レベル2地震動を堤体底面より直接入力することになる。

4) クラック進展解析

レベル2地震動を用いた線形動的解析の結果、堤体内に発生する引張応力が堤体コンクリートの引張強度

を超えた場合は、損傷過程等を考慮した非線形動的解析を行い、生じる損傷が限定的なものにとどまるかを確認する必要がある。

大規模地震における重力式コンクリートダムの被害形態としては、クラックの発生が考えられることから、クラックの発生を考慮した非線形動的解析を行うことになる(図3)。

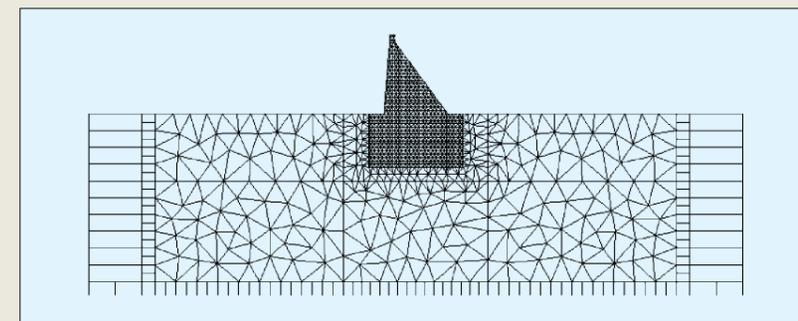
数値解析法により、コンクリートダム堤体内のクラックを考慮する主なモデルとして、離散型クラックモデルと分布型クラックモデルがある。

コンクリートダム堤体のクラック発生箇所を推定することは困難であることから、本業務ではあらかじめクラックが入る場所を特定する必要がない分布型クラックモデルを用いて非線形動的解析を行った。

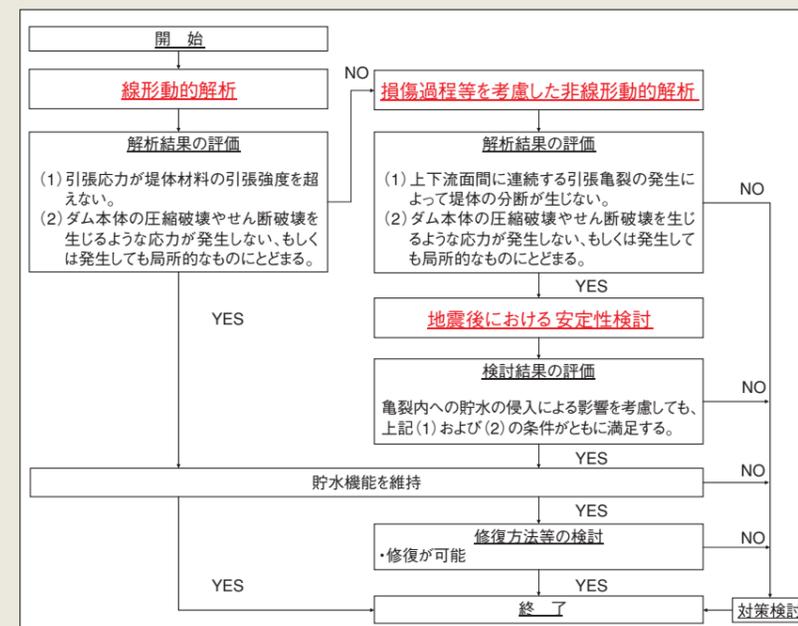
図4に、重力式コンクリートダムの標準的と考えられる解析モデルに、仮想のレベル2地震動を入力した時の分布型クラックモデルによる非線形動的解析結果の事例を示す。

図4中の青塗りの箇所がクラックの発生した位置を示している。

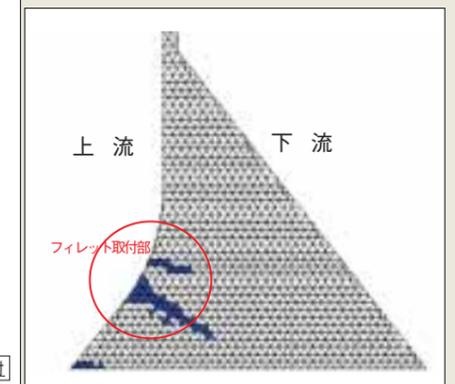
この解析モデルでは、レベル2地震動によりフィレット取付部と堤体上流面の下端部にクラックが発生しているが、上下流方向に分断する結果とはならなかった。



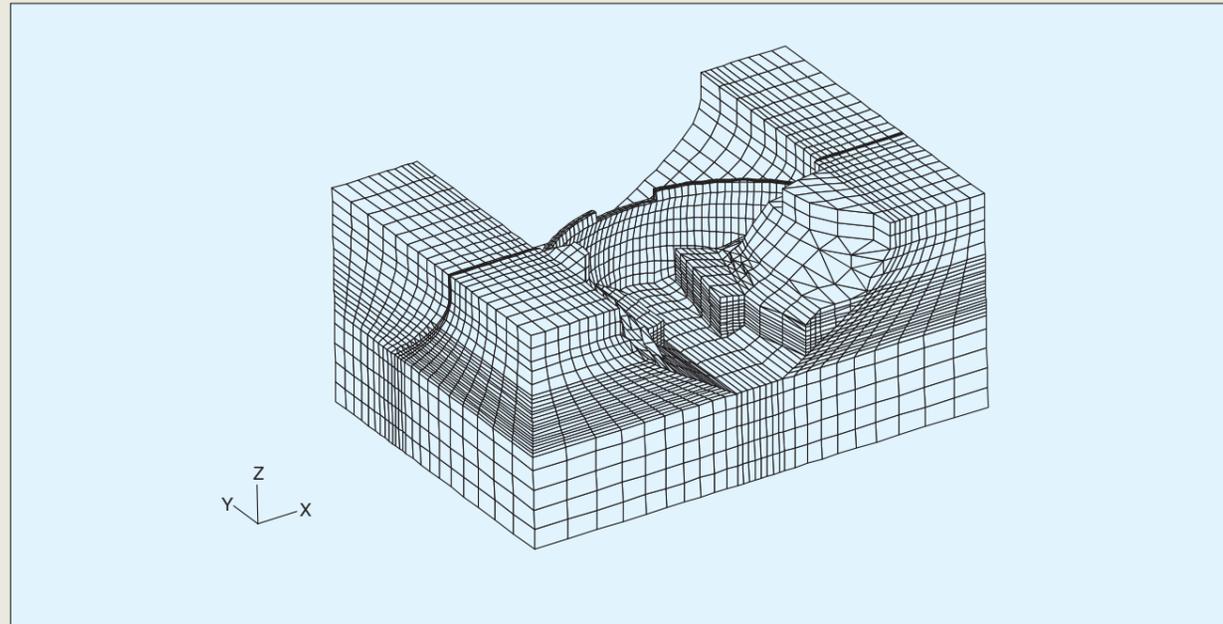
■図2—重力式コンクリートダム解析モデル(基礎地盤を考慮)²⁾



■図3—重力式コンクリートダムの耐震性能照査フロー



■図4—クラック発生範囲(文献2の図に一部加筆)



■図5アーチ式コンクリートダム3次元解析モデル例

3.2 アーチ式コンクリートダム

1) 解析モデル

アーチ式コンクリートダムの堤体は3次元構造物として設計され、ダム堤体上流面に作用する水圧と堆砂圧の外力に対し、ダム堤体内のダム軸方向力によって堤体と基礎岩盤で抵抗している。

従って、解析モデルはダム堤体とダム基礎を含めた3次元モデルとする必要がある。図5にアーチ式コンクリートダムの3次元解析モデルの一例を示す。また、解析モデルはダム堤体の構造特性を考慮して、ダム堤体の下流側の地形もモデル化している。なお、要素は動的応答解析時の最大周波数20Hzに対応した大きさに分割した。

2) 基礎岩盤側方の境界条件

基礎地盤の境界条件に対する考え方は、前述の重力式コンクリートダムと同様である。

3) 横継目と周辺継目の評価

アーチ式コンクリートダムの施工時には、コンクリートの温度応力を抑

制する目的で堤体に横継目が設置される。その横継目は施工の最終段階で、ジョイントグラウトを充填して堤体の一体化を図っている。なお、一体化を確実にするために、横継目には歯型のせん断キーが設置されている。

横継目面に圧縮応力が作用した場合には、横継目部は堤体コンクリートと同等の強度を発揮するが、引張応力が作用した場合には、引張強度を期待できないと考えられる。

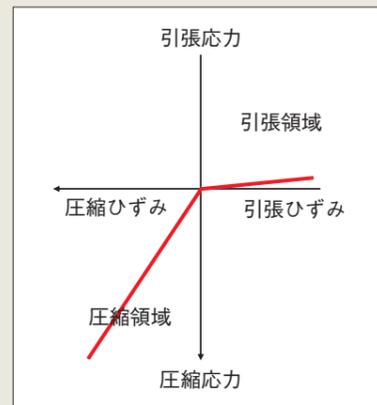
従って、堤体が上流側に変形した場合には、堤体のダム軸方向に直交している横継目面が開くことが考えられる。そこで、横継目には既往の解析実績において、図6に示す非線形条件を設定した。また、ダム堤体と基礎岩盤の接合部に設けてある堤体周辺継目には、図7に示す非線形条件を設定した。

その結果、アーチ式コンクリートダムの堤体構造特性である堤体の横継目と周辺継目の引張強度特性を評価した動的応答解析結果を得ることができた。

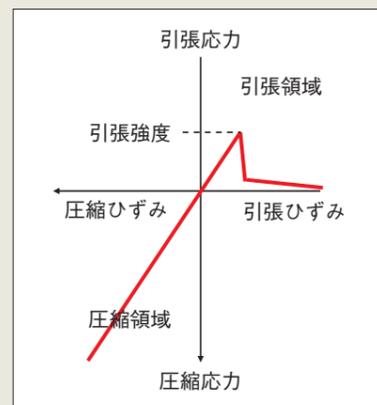
3.3 ゾーン型ロックフィルダム

1) 解析モデル

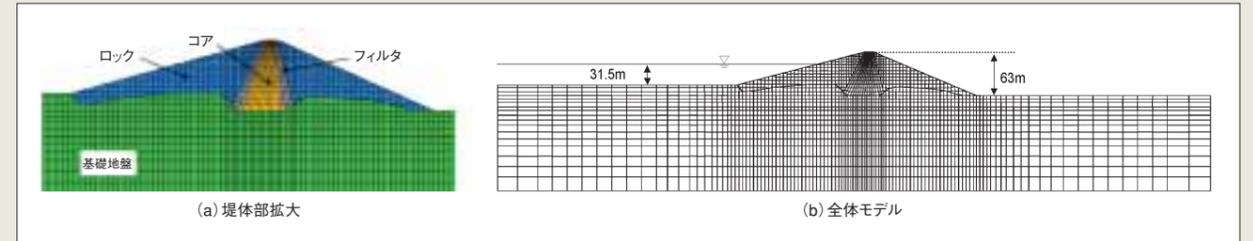
ゾーン型ロックフィルダムの堤体は上下流方向断面の2次元構造物とし



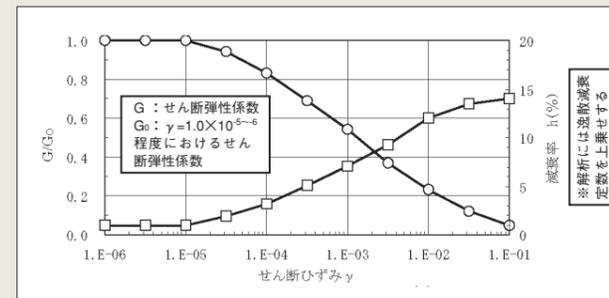
■図6一堤体横継目の非線形モデル(引張強度なし)



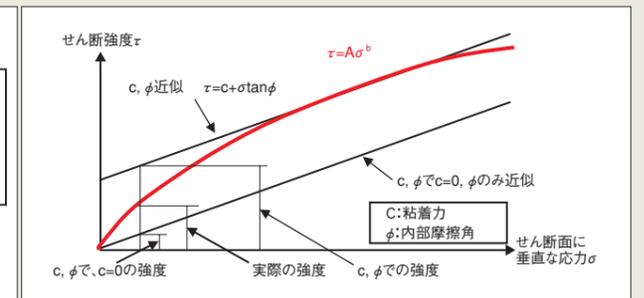
■図7一堤体周辺継目の非線形モデル(引張強度あり)



■図8一ゾーン型ロックフィルダム解析モデル例



■図9一堤体材料の動的変形特性の例



■図10一堤体材料のせん断強度(粗粒材)

て、円弧すべり面におけるすべり安全率が所定の安全率以上となるよう設計される。

解析モデルも同様に、上下流方向断面を用いた2次元モデルとし、堤体要素は周波数10Hzに対応した大きさに分割した。

図8に、ゾーン型ロックフィルダムの2次元解析モデルの一例を示す。

2) 境界条件

静的解析では、基礎岩盤が堤体に及ぼす影響を考慮し、基礎岩盤を含めた全体モデルを用いた。境界条件は基礎岩盤底面を固定、側面を側方変位拘束とした。

動的応答解析では堤体だけのモデルを用い、堤体底面の境界条件は剛結とした。なお、地震動は堤体底面より入力した。

3) 動的応答解析

動的応答解析は、土質材料の動的変形特性であるせん断弾性係数および減衰のせん断ひずみ依存特性(図9)を考慮した等価線形化法により行った。なお、本解析には堤体

のみのモデルを用いたため、基礎地盤への波動の逸散と等価なものとして、堤体材料の減衰に逸散減衰定数を上乘して解析を行った。

4) すべり安定性解析

堤体上下流に想定円弧すべり面を設定し、地震動が作用した際に発生するすべり変形量を下記の2つの手法により算定した。

① Newmark法

すべり土塊の重量とすべり土塊の平均加速度の時刻歴より、すべり変形量を算定する方法

② 渡辺・馬場法

すべり土塊の平均加速度の時刻歴、静的解析から得られる静的応力と動的応答解析から得られる地震時応力を重ね合わせたすべり面沿いの応力の時刻歴より、すべり変形量を算定する方法

なお、すべり変形量を算定する際に用いる粗粒材のせん断強度は、拘束圧の依存性を考慮した、 $\tau = A \sigma^b$ (A, bは定数)で表現される強度を用いた。(図10)すべり変形量算定の結果を許容

すべり変形量1.0mと比べて、堤体の越流に対する安全性を評価した。

5) 浸透破壊に対する検討

コアの浸透破壊に対する検討としては、コアのせん断強度に非排水強度を用いたすべり安定性計算と、Sherardらのフィルタ基準による照査を実施し、コア材に対する浸透破壊の進行の発生の有無について判断した。

4—あとがき

想定した最大級のレベル2地震動に対して、ダムの耐震性能照査を動的応答解析手法によって行う場合、堤体材料の特性評価(静的および動的的特性)が極めて重要である。従って、既設ダムの堤体材料の特性評価を行う場合には、材料試験データの他に当該解析対象ダムで得られた観測地震動(堤体と基礎)を用いた同定解析手法によってさらに検討する方法が有効であると考えられる。

<参考文献>

- 1) 「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説」国土交通省河川局、2005.3
- 2) 「大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料」国土交通省国土技術政策総合研究所資料第244号、2005.3