

水資源開発施設の耐震性向上の検討

- ダムの耐震照査技術 -

野中 樹夫¹・佐藤 信光²・佐野 貴之³

概要：

ダムや堰等の耐震性能照査技術の向上を図ることを目的に、技術5カ年計画重点プロジェクトとして「水資源開発施設の耐震性向上の検討」(平成20年度～平成24年度)を実施した。本報告は本プロジェクトのうちダムに関して検討した耐震照査技術について述べる。大規模地震に対しては、ダムにおいても損傷する可能性があり、各型式のダムについて一部損傷を考慮した非線形動的解析技術を検討した。また、ゲート、門柱ならびに取水塔などの関連構造物について、鋼材や鉄筋コンクリートの各分野の最新知見を導入して耐震照査技術を検討した。さらに東北地方太平洋沖地震を踏まえ、南海トラフの巨大地震に対してダムサイトの強震動を検討した。そして、今後の各ダムの耐震性能照査に反映できるように、これらの耐震照査技術を「耐震性能照査の手引き(案)」としてとりまとめた。

キーワード：地震、堤体、FEM、動的解析、耐震性能照査

1. はじめに

水資源機構では、技術5カ年計画重点プロジェクトの一環として「水資源開発施設の耐震性向上の検討(平成20年度～平成24年度)」を実施した。その内容を表-1に示す。大規模地震による強震動に対する対策を主体に、地震動の作成、各型式のダムの動的解析手法ならびにゲートなどの関連構造物の照査手法を検討した。その途中で、東北地方太平洋沖地震が発生し、現地調査やこれを踏まえたリスク評価などについても検討した。本報告は、本プロジェクトのうち、水資源機構で主体となるダムに関する耐震性向上の検討成果をとりまとめて報告するものである。

2. 地震動

地震動の作成手法として、簡易法(ダム距離減衰式等)や詳細法(ハイブリッド法等)がある。簡易法は全国のダム地震記録を包括的に統計処理した手法であるため、容易に地震動を作成できるが、個別の震源断層特有の新たな知見を取り入れにくい面がある。詳細法は中央防災会議や地震調査研究推進本部が地震動を作成するときを使用している方法で、震源断層モデルにおけるアスペリティなどの新たな知見を容易に反映できる。

表-1 水資源開発施設の耐震性向上の検討の内容

検討項目	実施内容
地震動	ハイブリッド法による地震動作成の検討(岩手宮城内陸地震、東北地震の再現と適用性、南海トラフの巨大地震)
重力ダム	強震動に対するクラック進展解析の検討
アーチダム	強震動に対する3次元非線形動的解析手法の検討
ロックフィルダム	強震動の堤体応答の再現 堤体の変形動的解析の検討
アースダム	有効応力動的解析の適用性 堤体の変形動的解析の適用性
関連構造物	ゲート;シェルモデルの適用性及び対策の検討 門柱;非線形解析の適用性 取水塔;3次元非線形解析の検討
堰	液状化の有効応力動的解析手法の検討 液状化の対策工の効果検討 東北地方太平洋沖地震の現地調査
その他	リスクアセスメントによる施設の安全性評価(堰) 貯水池斜面安定性の検討

水資源機構ではダムの地震動設定に最新の知見を容易に取り込めるように、ハイブリッド法によるダムの強震動作成に取り組んできた。平成20年岩手・宮城内陸地震の荒砥沢ダムにおいてダム基礎で 1024cm/s^2 というこれまでにない地震動を観測したために、この強震動に対してハイブリッド法を用いて再現性を検討し、適用性があることを確認した。また、平成23年3月11日東北地方太平洋沖地震が発生したため、この巨大なプレート境界の地震に対して、草木ダムで観測された強震動をハイブリッド法で再現し、その適用性を確認した。

1.総合技術センター 試験・解析グループチーフ

2.総合技術センター マネージャー

3.中部地整企画部広域計画課地方計画第一係長

(前 総合技術センター試験・解析グループ)

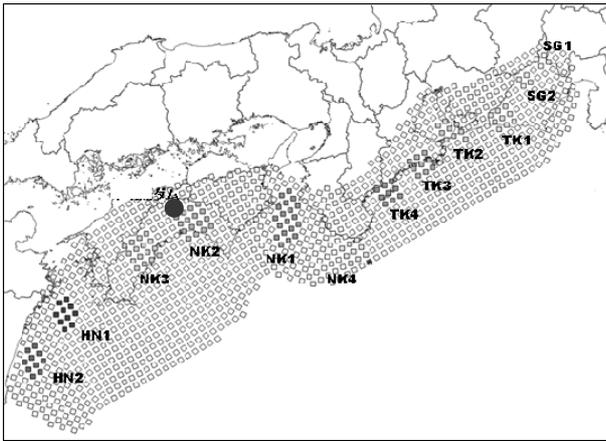


図-1 南海トラフの巨大地震の断層モデル¹⁾

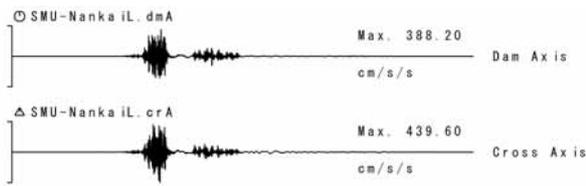


図-2 南海トラフの地震におけるダム基礎の強震動作成

さらに、中央防災会議では、将来発生すると想定される南海トラフの巨大地震（M9.0）を発表した。このため、内閣府南海トラフの巨大地震検討会¹⁾が公表した震源断層（図-1）などの最新の知見をハイブリッド法に取り入れて、強震動が想定される四国のモデルダムにおける地震動を評価した。（図-2）

今後の課題として、国ではさらに最新の知見を用いて活断層を含めた想定地震の再評価を行う動きがあり、これらに対応していく必要がある。

3．重力式コンクリートダム

重力式コンクリートダムの耐震照査では、従来は発生応力が許容値以下となるケースが殆どで、線形動的解析が主体であった。しかし、近年想定される強震動では発生応力が許容値を超える可能性があり、損傷を考慮したクラック進展解析を行う必要も生じている。

コンクリートダムにおけるクラック進展解析では、どこにひび割れが発生するかを予測することが困難なため、分布ひび割れモデル（スミアドクラックモデル）による動的解析が行われている。本検討では、強い地震動の下での動的解析をするため、コンクリートのひび割れ進展

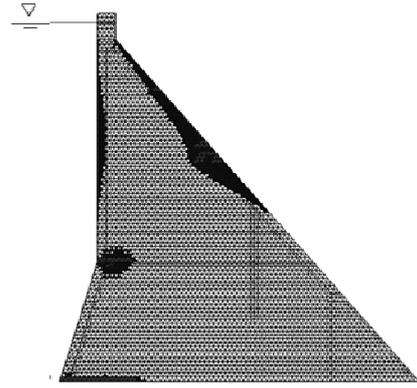


図-3 分散ひび割れモデルによるクラック進展解析結果

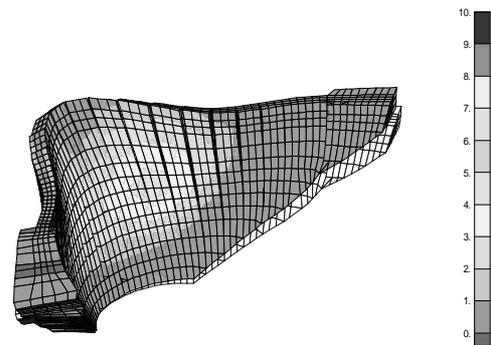


図-4 継目の開きを考慮したアーチダムの動的解析結果

の判定に用いる引張軟化曲線として、ひび割れ発生後に引張強度を1/4とする2直線型²⁾を適用した。この場合、1直線モデルよりひび割れ分布が線状化し損傷が明瞭になる。（図-3）

今後の課題として、より強い地震動の場合、コンクリートの堤体が分断する可能性もあるため、分断した場合における安定性照査手法を検討していく必要がある。

4．アーチ式コンクリートダム

アーチダムはアーチと片持ち梁の複合した構造であるため3次元モデルで動的解析を行う必要がある。従来のアーチダムモデルは、継目の無い、一体のコンクリート構造物として動的解析を実施していた。

本検討では、ブロック間の継目の開きを考慮し、強震動の下では継目の開閉などによって減衰が生じる解析モデルを作成し3次元動的解析を行った。アーチダムの継目は、キーブロックがあるため、上下流方向にずれにくい、アーチ方向には開きやすい。したがって、図-4に示すように、アーチ方向に伸びようとすれば引張応力が発生するのではなく、継目が開くように解析モデルを作成し、現実になる地震応答挙動の適用性の向上を

図った。

今後の課題として、国内のアーチダムはダム基礎で 300cm/s^2 を超えるような強震動を受けた事例がなく、強震動における堤体の応答特性（減衰特性）の評価が困難となっているため、今後とも検討を進めていく必要がある。

5. ロックフィルダム

ロックフィルダムの強震記録は、これまで平成7年兵庫県南部地震の箕面川ダムで観測された 135cm/s^2 が最大であったが、前出の荒砥沢ダムにおいて $1,024\text{cm/s}^2$ という極めて強い地震動を記録した。この強震動に対して従来から用いられてきた等価線形化法による動的解析手法が適用できるかを確認するために、再現解析を行った。その結果、図-5に示すように良好な再現結果を得ることができ、解析手法の適用性を確認した。そして、実際の非線形挙動を近似した修正 R0 モデルを用いた逐次積分による非線形動的解析の適用性も同様に確認した。

また、ロックフィルダムでは地震によって沈下する現象がよくみられ、荒砥沢ダムでも、天端において約40cmの揺すり込み沈下を生じた。本検討では、このロックフィルダムの揺すり込み沈下について再現を行った。フィル材料の繰り返し三軸試験結果を用いて、振動による応力-ひずみの軟化特性を定式化し、「累積損傷度理論でのひずみ軟化理論」³⁾を適用して残留沈下解析を実施したところ、実態に近い沈下現象を再現することができた。

なお、実際の地震による揺すり込み沈下のデータは、特に堤体内の沈下分布のデータが少なく、今後とも地震時の堤体の記録の収集に努める必要がある。

6. アースダム

東北地方太平洋沖地震では、福島県内の堤高17.5mの土堰堤が決壊し、下流に被害を及ぼした。この決壊の要因の一つとして、地震の揺れに伴う強度低下がある⁴⁾。従来、アースダムは全応力動的解析を用いたが、水機構では、この地震前からアースダムの耐震照査手法として、基礎地盤や堤体における過剰間隙水圧を考慮した有効応力法による非線形動的解析を検討してきた。

本検討では、材料および基礎地盤の物性値の設定のため、繰り返し三軸試験を行い、液状化強度特性を求め、過剰間隙水圧の上昇による有効応力の減少に伴う強度低下を考慮した有効応力非線形動的解析を実施した。その

水平最大加速度分布

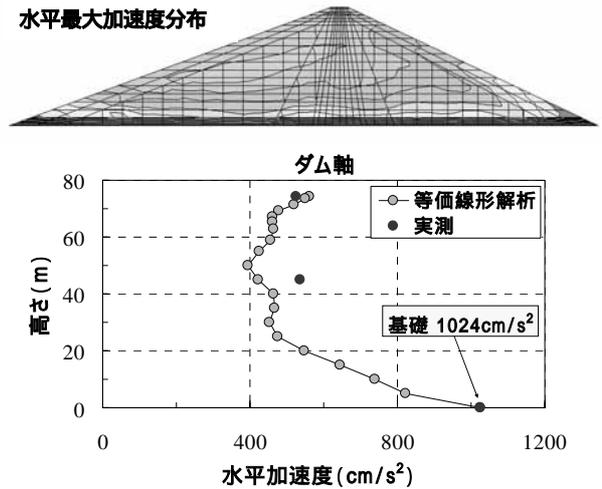


図-5 ロックフィルダムの強震動の再現解析

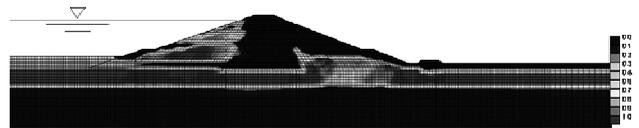


図-6 アースダムの有効応力動的解析



図-7 ラジアルゲートの3次元シェルモデルによる動的解析

結果、図-6に一例を示すようにモデルダムにおいて、基礎地盤ならびに上流側のフィル材に強度低下現象が想定される堤体変形を把握した。

なお、東北地方太平洋沖地震を踏まえて有効応力非線形動的解析に関する研究は各機関で進められているため、今後、これらの最新の知見の収集や対応を図っていく必要がある。

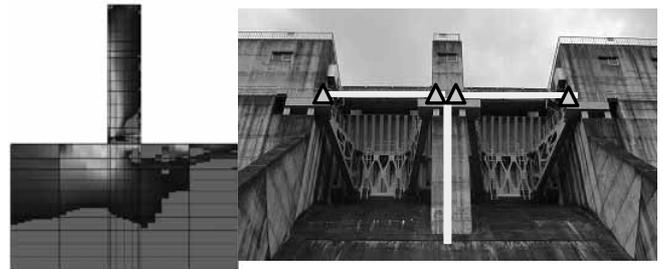
7. 関連構造物

7.1 ゲート

重力式ダムのクレストゲートは、耐震検討において、動水圧により発生する高い応力が留意点となる。このため、図-7に示すように複雑な鋼構造物であるゲート構造に近いモデル化ができる3次元シェルモデルによる動的

解析を行い、適用性の向上を図った。この結果、部材接合部などにおける発生応力を、骨組みモデルでは過大になりがちであるところ、実態に近い応力状態にすることができた。また、一部ゲートの補強方法の検討も行った。

なお、古いゲートでは現行の基準と比較して部材剛性が不足する事例もあり、耐震照査だけでなく、健全性評価の観点も考慮して対応していく必要がある。



2次元ソリッドモデル 上部工を含む3次元骨組みモデル

図-8 ダム門柱の耐震性能照査

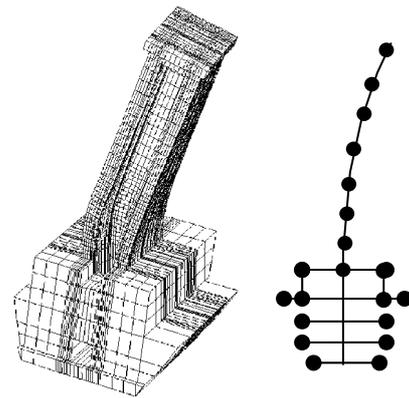
7.2 門柱

ダム門柱は低鉄筋な RC 構造物であるために、門柱の一部が損傷することを考慮した非線形動的解析について、1次元梁モデルや2次元ソリッドモデルの適用性を検討した。(図-8左)

ダム門柱は、最近の地震において、強い地震動を受けているにもかかわらず、損傷した事例が殆どみられない。この要因として管理橋などの拘束効果が考えられる。

このため、実際に強震動を受けたダム門柱で再現解析を行い、上部工の拘束効果を確認し、ダム門柱と上部工を3次元骨組みモデルで動的解析する手法の適用性の向上を図った。(図-8右)

今後の課題として、ダム門柱の補強工法として、上部工の拘束効果を用いた変位抑制工法の検討がある。



3次元ソリッドモデル 簡易モデル

図-9 取水塔の耐震性能照査

7.3 取水塔

鉄筋コンクリート式の独立取水塔は、取水口の関係でコ字型の構造となっているため、橋脚の類似構造ながら、その基準が用いにくい。強い地震動の下で生じる損傷を照査する手法は、3次元非線形ソリッドモデルにより取水塔の RC 構造部の耐震損傷形態を把握するとともに、簡易な梁モデルにて動的解析を検討した。(図-9)

しかし、取水塔には標準タイプがなく、各ダムで構造が異なっている。この複雑な構造に対する非線形動的解析手法の適用性の拡大は、今後の課題である。

8 . まとめ

平成 20 年度～平成 24 年度のダムに関する耐震技術の成果を列挙した。本検討で行った耐震性能照査手法は損傷を考慮した非線形動的解析など高度な解析技術を用いており、これらの解析を今後の各ダム耐震性能照査へ反映できるように「耐震性能照査の手引き(案)」をとりまとめた。これらの耐震技術は日々発展し続けることが期待され、本手引き(案)は現時点での耐震性能照査手法をとりまとめたものであり、この後の随時見直されるものである。

現在、各ダムで耐震性能照査が進められており、本成果を反映していくとともに、残された課題についてさらに検討を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1)内閣府南海トラフの巨大地震検討会：南海トラフの震源断層モデル,2012
- 2)(公社)土木学会,コンクリート標準示方書[構造性能照査編]
- 3) 龍岡文夫：講座”地震応答解析のための土の動的性質，土と基礎，33-9(322)，1985
- 4) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会：藤沼湖の決壊原因調査,2012