

◆特集：大規模地震に対するダムの耐震性能照査◆

レベル2地震動に対するダム関連構造物等の耐震性能照査

安田成夫* 金銅将史** 佐々木 隆*** 高須修二****

1. はじめに

国土交通省は、レベル2地震動を想定して大規模地震に対するダムの耐震安全性を照査するための技術指針『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)』^{1),2)}(以下、指針(案))を示し、今般その試行が開始された。

指針(案)では、レベル2地震動に対してダムが確保すべき耐震性能を「貯水機能が維持されること」と「生じた損傷が修復可能な範囲にとどまること」の2点要求している。

わが国のダムは、地震によってこのような耐震性能を損なうような被害をこれまで受けたことはない。しかし、指針(案)で「当該ダム地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動」として定義されたレベル2地震動を想定した場合、ある程度の損傷も考慮した上で、所要の耐震性能は損なわれないことを確認しておく必要がある。

その際、ダムの貯水機能が維持される、すなわち下流に甚大な被害をもたらすような制御できない貯水の流出が生じるような事態とならないことを確認するためには、堤体等ダム本体の安全性照査はもとより、放流設備のゲート等、流水を制御する各種管理設備の安全性についても同時に照査しておく必要がある。

このため、指針(案)策定に向けた全般的な議論を行うダム耐震検討会(委員長：大町達夫東京工業大学大学院総合理工学研究科教授)の下に、ダムゲート等の鋼構造物の取り扱いを含めた各種管理設備等、ダムの関連構造物の照査法を検討するための分科会として、関連構造物耐震検討分科会(分科会長：藤野陽三東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻教授)が設けられた。

本稿では、同分科会およびダム耐震検討会を経ととりまとめられたダムの関連構造物等の照査の考え方(指針(案)4章)を紹介し、あわせて照

査にあたっての留意点について説明する。

2. 関連構造物等とは

指針(案)では、照査対象を大きく「ダム本体」(ダムの堤体および堤体と接する部分の基礎地盤)と「関連構造物等」(ダム本体またはその周辺に設置され、ダムの機能を担う各種の構造物や設備)に分けて取り扱っている。

具体的には、放流設備のゲートやその支持構造である門柱部(ピア)、ゲートを操作・制御するための機側操作盤や開閉装置等の電気・機械設備、天端橋梁、管理棟、取水塔などが「関連構造物等」に該当する(図-1)。

「関連構造物等」と「ダム本体」の照査と区別したのは、それぞれの構造や材質、想定される損傷形態などに応じ、適切に地震応答解析の手法による照査を想定したためである。

関連構造物等の中には、堤頂部に設置される門柱部のように、ダム本体の一部を構成する構造であると同時に、放流設備の支持構造であるという機能特性から、また、構造的に堤体全体の地震応答とは異なる応答が想定されることから、関連構造物等の範疇で扱ったものも含まれる。

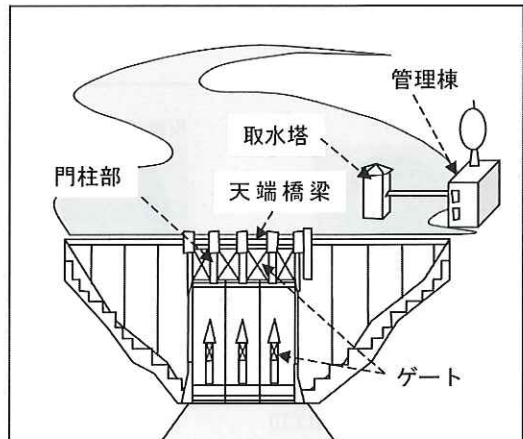


図-1 ダムの関連構造物等の例

3. 照査すべき関連構造物

関連構造物等には、その機能、構造、材質、設置条件等が様々に異なる各種構造物や設備が含まれる。ただし、指針（案）では、その全てについてレベル2地震動を想定した照査を求めているわけではない。

「関連構造物等の耐震性能の照査は、それが損傷した場合にダムの貯水機能が維持されないおそれがあるものについて行う」とし、「当該関連構造物等に損傷が生じたとしても、ダムの貯水機能が維持されることを、その機能や構造特性に応じた地震応答解析その他の適切な手法により確認する」こととしている。

関連構造物等は、ダム本体とは異なり、損傷した構造物等の全体の取替または再設置等を行えば、ダム全体として十分に継続使用が可能となると想定される。関連構造物等の照査では、耐震性能のうち貯水機能が維持されることを確認することが基本となる。

いずれにしろ、全ての関連構造物等を照査対象とする必要はなく、ダム全体としての貯水機能を損なうような損傷の原因となる可能性のあるものについて照査を行うことになる。

このため、地震応答解析等による個々の構造物や設備の照査を行う前に、それらの機能や能力、配置、損傷した場合に想定される事態等を勘案して照査対象を選定する必要がある。

選定は、個々のダムの特性に応じて実施することが必要となるが、一般的には、以下の2点に該当するものは、照査対象とすべきである。

- ①当該関連構造物等が損傷した場合、制御できない貯水の流出を生じるおそれがあるもの。
- ②ダム本体が損傷した場合、ダムの安全性を確保するために、緊急に水位を低下させたり、また低下させた水位の上昇を規制するために必要となるもの。

このうち①に相当するものとしては、主に非常用洪水吐きおよび常用洪水吐きの放流設備等、主要な放流設備の主ゲート等が想定される。これらは、洪水処理に利用されるため一般にその放流能力が大きく、常時は閉じた状態にあって貯水位を保持していることから、地震により重大な損傷を生じた場合、制御できない貯水の流出を生じるおそれが考えられるためである。

②については、緊急水位低下に必要な放流設備の主ゲート等が想定される。これは、ダム本体が損傷を受けた場合、ダムの安全性を確保するために緊急に貯水位を低下させるとともに、出水等による貯水位の上昇を規制しなければならない場合が考えられるためである。

これらの設備については、扉体等の構造部分だけでなく、それを操作・制御可能な状態に維持するために、閉閉装置や機側操作盤等についても照査しておく必要がある。

一般的な設備を有するダムを想定し、各種構造物や設備について照査対象として選定する際の考え方（問題となる損傷の例）を表-1に示す。

予備ゲート類は、常時は水圧を受けないために荷重条件が厳しくないこと、および主ゲートの安全性が確認されておれば地震時にダムの貯水機能は保持されることから、必ずしも同様の照査を行う必要性はないと考えられる。

4. 照査の方法

指針（案）では、照査対象として選定された関連構造物等について、「当該関連構造物等に損傷が生じたとしても、ダムの貯水機能が維持されることを、その機能や構造特性に応じた地震応答解析その他の適切な手法により確認する」こととしている。

以下、主な関連構造物等について、具体的な照査の考え方について述べる。

(1) 放流設備のゲート

ゲートは、図-2のような有限要素モデルを用い、レベル2地震動を想定した地震応答解析により、各部材に発生する応力や変形を求めることにより照査が可能と考えられる。

ただし、各ダムに設定されたレベル2地震動は、ダムの基礎岩盤におけるものである。したがって、堤体に設置されたゲートを抽出して照査解析を行う場合の入力動は、レベル2地震動そのものでなく、レベル2地震動を基礎に入力したときに、堤体の当該ゲート設置位置で出力される応答加速度（例えば、堤体に設置されているラジアル形式のゲートはトラニオン部、ローラー形式のゲートはローラー位置等）となる。

この応答加速度は、堤体を含むダム本体の地震応答解析により求めることができる。

照査にあたって考慮する水位は、堤体の照査と

表-1 ダムの貯水機能が維持されないおそれのある関連構造物等の損傷例

関連構造物等	摘要	ダムの耐震性能を確保できないおそれのある損傷の形態		その他
		①当該関連構造物等が損傷した場合、制御できない貯水の流出が生じるおそれのあるもの	②ダム本体が損傷した場合、ダムの安全性を確保するために、緊急に水位を低下させたり、また低下させた水位の上昇を規制することができなくなるおそれのあるもの ^{注1)}	
1 放流設備のゲート等	非常用洪水吐きの主ゲート 常時満水位が敷高より高い場合	<ul style="list-style-type: none"> 扉体の架構部または支承部の大变形 戸当り、固定部、または門柱の重大な損傷（ゲートが脱落するおそれがあるもの等） 	<ul style="list-style-type: none"> 扉体（架構部、支承部、受圧部）の変形で速やかな復旧が困難なもの 戸当り、固定部または門柱の損傷で速やかな復旧が困難なもの 開閉装置等の損傷で速やかな復旧が困難なもの 	
	常用洪水吐きの主ゲート	<ul style="list-style-type: none"> 扉体の架構部または支承部の大变形 戸当り、固定部または支持コンクリートの重大な損傷（ゲートが脱落するおそれのあるもの等） 	<ul style="list-style-type: none"> 扉体（架構部、支承部、受圧部）の変形で速やかな復旧が困難なもの 戸当り、固定部または支持コンクリートの損傷で速やかな復旧が困難なもの 開閉装置等の損傷で速やかな復旧が困難なもの 	
	その他のゲート等 ^{注2)}	<ul style="list-style-type: none"> 放流能力が大、または洪水処理に必要な放流設備 緊急時の水位低下機能を有する放流設備 張出し構造の開閉装置室 	<ul style="list-style-type: none"> 扉体の大变形 速やかな復旧が困難な損傷 *ゲート扉体等の变形 *開閉装置本体や機側操作盤の転倒等による損傷、開閉装置架台の損傷、開閉装置室の損傷等 *開閉装置がその支持を失うことにより扉体が落下し、洪水吐きを閉塞するおそれのあるような損傷 	
	取水塔	<ul style="list-style-type: none"> 倒壊時に堤体や主要な放流設備に重大な損傷を与えるおそれのある場合 緊急水位低下機能を担う設備を有する場合 	<ul style="list-style-type: none"> 堤体や主要な放流設備に重大な損傷を与えるおそれのある損傷（倒壊等） *緊急水位低下時に使用する構造部分の損傷 *開閉装置等の損傷 	
2 その他の関連構造物等	天端橋梁	<ul style="list-style-type: none"> 主要な放流設備のゲート等の上部に設置されている場合 公道として一般交通の用に供している場合 	<ul style="list-style-type: none"> 主要な放流設備のゲート等に重大な被害を与えるおそれのある重大な損傷（落橋等） 	<ul style="list-style-type: none"> 人的被害の発生や道路交通に支障をきたすおそれのある重大な損傷（落橋等）
	管理棟		<ul style="list-style-type: none"> 緊急時の管理体制に支障が生じるおそれのある重大な被害 	<ul style="list-style-type: none"> 人的被害のおそれのある重大な損傷（倒壊等）
	重要な電気設備等	<ul style="list-style-type: none"> ゲートを有するダムの場合 	<ul style="list-style-type: none"> 緊急時のゲート操作のための電力供給に支障を生じるような予備電源設備、配電設備、操作盤本体の損傷や装置の転倒等 	
	その他		<ul style="list-style-type: none"> 緊急時に操作する必要のある放流設備の開閉装置（機側操作盤）へのアクセスの遮断等 	

注1) うち、*印を付したものは、緊急に水位を低下させるのに支障を生じるもの。（その他は、低下させた水位の上昇を規制するのに支障を生じるもの。）

注2) 低水放流設備、水位維持放流設備、水位低下用放流設備の主ゲート等

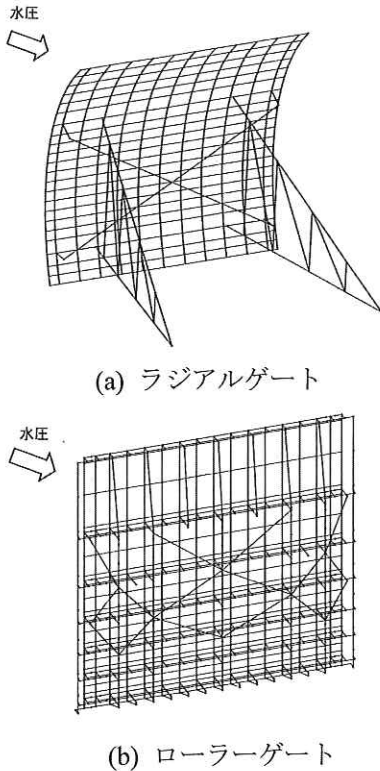


図-2 ゲートの解析モデルの例

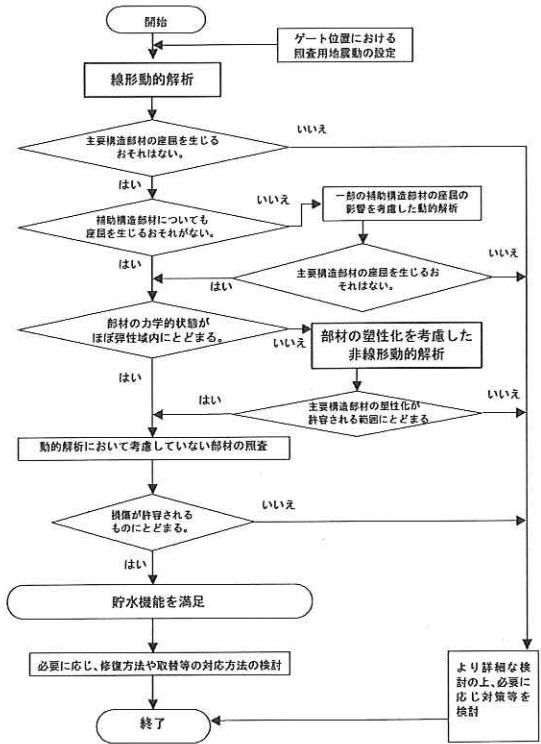


図-3 ゲートの照査フロー

同じで、常時（非洪水時）の状態における最高の水位である常時満水位が基本となる。

開閉状態は、常時の状態でゲートに対する影響が最も厳しいと考えられる全閉の状態が基本となる。

地震応答解析では、ゲート自重や静水圧を静的荷重として考慮するほか、ゲートに作用する動水圧の影響を適切に考慮する必要がある。

ゲートの設計では、堤体の設計と同様、設計震度で表現される静的な地震荷重（慣性力）や Westergaard の簡易式を用いて計算される動水圧を考慮するのが一般的であるが、今回のようなレベル2地震動に対する地震応答解析では、この動水圧の評価に注意が必要である。なぜなら、堤体の地震応答解析で得たゲート設置位置での最大応答加速度を用いて Westergaard の簡易式によりゲートに作用する動水圧を求めると、過大に算定される。これは、ゲートに作用する動水圧が、ゲート位置での加速度応答だけでなく、堤体全体の加速度応答の影響を受けるためである。また、ゲートに作用する動水圧は、ゲートと堤体の応答を考慮して求めることが必要となるのであるが、特にゲ-

トの固有振動周期が堤体の固有振動周期に対し十分に短いような場合、堤体応答のみを考慮して求める方法で良い近似ができることがわかってきている。

以上に基づき、ゲートに関する実際の照査は、図-3のような手順で行うことができる。

最初、ゲートの各構成部材に発生する応力を線形動的解析によって求める。その結果、ゲート全体構造の安定性を確保する上で必要な主要部材（主要構造部材）に座屈が生じるおそれがなく、かつ各部材の力学的状態がほぼ弾性域にあることが確認できれば、耐震性能上問題となるような損傷は生じないと考えてよい。座屈に対する安全性は、動的解析によって求まる各部材の応力度をゲートの設計に用いられている基準耐荷力曲線³⁾から求まる座屈応力度と比較すること等により判定することができる。ラジアル形式のゲートの脚柱等、構造上、大きな圧縮力を受ける可能性のある部材については、このように部材の降伏だけでなく座屈に対しても特に入念な確認が必要である。なお、主要構造部材以外の構造部材（補助構造部材）の一部において座屈を生じるおそれがある場

合には、当該補助構造部材の座屈の影響を考慮した動的解析を行って、ゲート全体構造の安定性が確保されることを確認することが必要となる。

次に、主要構造部材の座屈が生じるおそれはないものの、一部部材の力学的状態がほぼ弾性域にとどまることが確認できない場合には、当該部材の降伏による塑性化の影響を再現できる非線形動的解析を行う必要がある。その結果、主要構造部材の塑性化が限定的なものにとどまるとともに、塑性変形量がゲート操作に支障をきたすものとならない場合には、耐震性能上問題となるような損傷は生じないと考えてよいこととした。ここで、許容される塑性化の程度を具体的に設定するのは難しいが、類似の鋼材を用いた試験結果等を参照し、ラジアルゲートの脚柱や主桁等の主要構造部材では、降伏歪みに対し2～3倍程度、それ以外の補助部材では10倍程度までを一応の目安として想定することが考えられる。

有限要素モデルを用いた地震応答解析では、全ての構成部材をモデル化して解析に取り込むのはその煩雑さにおいて必ずしも得策ではない場合が多い。

ゲートの地震応答解析においても、扉体の脚柱や桁構造等以外の部材（ラジアル式ゲートのトラニオン部やローラー式ゲートのローラーおよびレール部、アンカレッジ、その他付随的な部材等）については、地震応答解析で得られる当該部材位置での応答値から等価な地震荷重を求め、それを外力として設計計算に準じた方法で応力照査等を行うのが現実的と考えられる。

ゲート本体のほか、それを操作・制御するための開閉装置（機械式の巻上げ機、油圧式の油圧ユニット等）や機側操作盤等についても、装置自体の移動もしくは転倒による破損が生じないことを基礎ボルトの応力照査等によって確認しておく必要がある。

(2) 門柱部および天端橋梁

主ゲートを支持する門柱部（天端橋梁の橋脚と一体構造のものを含む）は、構造的にはダム本体の一部であるが、重大な損傷により主ゲートの脱落等が生じないことを確認する必要がある。特に門柱部の照査における留意点は、ダム本体と異なり、ダム軸方向の地震動の影響が大きくなる可能性があることである。このため、門柱部の照査は、ダム軸方向と上下流方向の地震動を考慮して行う

必要がある。

門柱部を抽出した地震応答解析モデルを図-4に示す。

(3) その他の関連構造物等

指針（案）では、上記以外の主な管理設備等についても、照査を行う場合の基本的な考え方を示している。

取水塔については、必ずしも全ての場合、照査対象とする必要はない。配置上、塔体が倒壊するなどして、堤体や主要な放流設備に重大な損傷を与えるおそれがある場合等には、地震応答解析によりその安全性を確認しておく必要がある。特に貯水池内に設置される独立型の取水塔は、構造上、地震動による頂部の応答が大きくなる可能性があるため注意が必要である。

フィルダムの洪水吐きは、堤体と隣接するタイプについては、その損傷によりダム本体の貯水機能を維持する上で問題となる損傷を生じることがないかを確認しておく必要がある。

天端橋梁は、放流設備のゲート等に被害を与えて操作の支障となったり、添架電線の破断により開閉用電力の供給に支障を及ぼしたりしないよう、橋脚に相当する門柱部の照査結果（最大変位等）を参照し、上部構造が落橋しないことを確認しておく必要がある。

指針（案）では、その他にも重要な電気設備や管理棟等、主な管理設備等について、照査の考え方を示している。

5. おわりに

現在、ダムゲート等の設計は、河川管理施設等構造令⁵⁾に適合するものとして、『ダム・堰施設

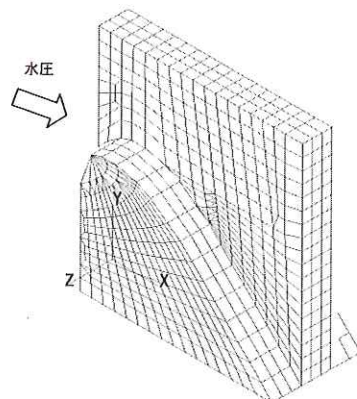


図-4 門柱部解析モデル

技術基準(案)』³⁾等の設計基準に基づいて実施されている。

その設計法は、震度法が基本となっており、ダム本体の場合と同様である。

指針(案)に示しているような地震応答解析による安全性照査は、レベル2地震動を想定した動的解析等の研究が盛んに行われるようになった現在でもごく限られている。

このため、今回の指針(案)策定にあたり、ダムゲートを含む関連構造物等の照査法を整理する際には、それぞれの構造物や設備が地震によってどのような損傷を生じうるか、またその場合、どのような事態が想定され、それがダム全体の耐震性能(特に貯水機能の維持)にどのような影響を及ぼすおそれがあるか等、具体的解析手法の検討はもとより、極めて基本的なレベルからの検討が必要となった。そこで、指針(案)では、照査の基本的な考え方を示すことに重点を置くことがまず必要と考え、具体的照査解析の手法等、さしあたり実務上必要となるとと思われる事項については、別途とりまとめた参考資料⁴⁾の中で、これまでの検討で得られた知見の範囲で可能な限り紹介することとした。

しかしながら、既往検討事例に限られていることもあり、現状では、できるだけ実際の構造を忠実にモデル化し、詳細な解析によって現象をできるだけ精度良く予測しようという検討姿勢を採らざるを得ない面がある。

今後、指針(案)の試行による照査事例の蓄積を通じて、簡便な解析モデルや解析法の適用性等、照査の合理化が期待される。一般に非常用洪水吐きに設置されるクレストゲートに比べ、高い水圧を受ける常用洪水吐きのゲート(コンジットゲ-

ト等)は、設計上、全体として相対的に剛性の高い構造となっているものと考えられる。このような構造系では、振動特性としての固有振動数は堤体に比べ十分に大きく、堤体の揺れに対する相対的な応答はあまり問題とならない可能性が高いことから、場合によっては動的解析を行うことなく、地震荷重を慣性力として考慮する静的解析によって評価できる可能性もあると考えられる。ローラー形式やスライド形式のように、全体構造が2次元形状のゲートについては、3次元モデル解析を行わなくとも2次元解析である程度の評価ができる可能性も考えられる。

今後一層増え続ける管理ダム、また小規模なダムも含め、耐震性能の合理的な評価を通じたダム全体としてのストック・メンテナンス水準の向上を目指す意味からも、今後の試行を通じた照査のノウハウの蓄積とその情報の共有化は極めて重要な課題と考える。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)』(2005)
- 2) 金銅将史・安田成夫：『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)の概要』、土木技術資料Vol.47, No.6, pp.28~33 (2005.6)
- 3) (社)ダム・堰施設技術協会：『ダム・堰施設技術基準(案)(基準解説編・マニュアル編)』(1999)
- 4) 永山 功、猪股純他：『大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料』、国土技術政策総合研究所資料244号/土木研究所資料3965号, (2005)
- 5) 建設省河川局：『河川管理施設等構造令・同施行規則』(1976)

安田成夫*



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室長, 工博
Dr. Nario YASUDA

金銅将史**



財団法人ダム技術センター企画部企画課長(前国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室主任研究官)
Masafumi KONDO

佐々木 隆***



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム主任研究員
Takashi SASAKI

高須修二****



財団法人ダム技術センター
参与
Shuji TAKASU