

◆特集：大規模地震に対するダムの耐震性能照査◆

『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）』の概要

安田成夫* 金銅将史** 山口嘉一*** 佐々木 隆****

1. はじめに

大規模地震による大地震動に対するダムの耐震性能の照査方法を体系的に示した『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）』（以下、「指針（案）」という）¹⁾が、2005年3月、国土交通省河川局治水課より各地方整備局等に通知された。指針（案）では、照査に用いる地震動やそれに対して確保すべき耐震性能、地震応答解析等による耐震性能照査の方法等、照査の基本的方法について規定されている。

ここで照査に用いる地震動は大規模地震によって想定されるレベル2地震動である。

ただし、指針（案）は、実ダムでの検証等、なお正式運用までに継続的に検討を要する課題も残されているため、今回の通知は「試行」という位置づけとされ、引き続き正式運用に向けた検討を進めることとしている。

2. 指針（案）策定の経緯

現在、わが国のダムの設計は1976年制定の『河川管理施設等構造令』²⁾（以下、「構造令」という）等に基づき行われている。

したがって、耐震設計の考え方についても、構造令に則り、地域ごとに定められた一定の設計震度により地震力を静的な水平荷重（慣性力）として考慮する方法（震度法）が基本となっている。

幸いわが国のダムは、これまで下流域に人的・物的被害を及ぼすような重大な地震被害を被っていない。

また、1995年の兵庫県南部地震後に実施されたダムの耐震性評価の結果、構造令に基づき設計されたわが国のダムは同地震クラスの地震に対して

十分な安全性を有していることが確認された³⁾。

このような事情もあり、ダムについては耐震設計基準の改訂はこれまで行われていない。

しかしながら、最近の地震観測体制の整備・充実に伴い、ダムサイトにおいて兵庫県南部地震時を上回る地震動も観測されるようになっている。大規模地震に対する土木構造物の安全性に対する社会的関心の高まりもあり、上述の設計基準とは別に、大規模地震に対するダムの耐震性能を合理的に説明できる技術指針を整備する必要性が高まってきた。

また、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定義されるレベル2地震動のような極めて強い地震動に対するダムの応答を予測するには、断層情報等を用いた地震動の予測技術や、場合によっては損傷過程まで含めてダムの地震応答を的確に予測するための地震応答解析技術が不可欠となる。

これらの解析技術は、課題も少なくないが、既往の調査研究のためめね努力により、耐震性能照査のツールとして実用化できる水準になりつつある。

指針（案）は、このような背景から、(財)ダム技術センターに設置されたダム耐震検討会（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）において検討を重ね、ダム技術会議での審議を経て、国土交通省がレベル2地震動に対するダムの耐震性能を照査するにあたって必要な技術的事項をとりまとめたものである。

表-1に同検討会の委員（学識経験者）を示す。

なお、指針（案）では、後述のように、ダム本体だけでなくダムゲート等関連構造物の照査方法についても対象とした。

このため、上記のダム耐震検討会の下に、ダム

Outline of "Guidelines for Seismic Safety Evaluation of Dams (Draft)"

表-1 ダム耐震検討会構成

委員長	大町達夫 (東京工業大教授)
委員	魚本健人 (東京大教授)
	小長井一男 (東京大教授)
	龍岡文夫 (東京理科大教授)
	藤野陽三 (東京大教授)
	渡辺啓行 (埼玉大教授)

(敬称略・委員は50音順)

ゲート等鋼構造物の照査方法を中心に検討する関連構造物耐震検討分科会(分科会長:藤野陽三東京大学教授)等を機動的に設け、地震動設定から各種形式のダム本体、多様な関連構造物等の照査方法まで、多岐にわたる検討事項について専門の見地から貴重な指摘や助言をいただきながら検討が進められた。

3. 指針(案)の構成

指針(案)の全体構成は図-1のとおりである。各章・節は、治水課長の通知文である本文およびその理解を助け、適切な運用を図るために必要と思われる事項を述べた解説文からなっている。

1章 基本事項	1.1 本指針の趣旨
	1.2 用語の定義
	1.3 適用範囲
	1.4 耐震性能の照査の基本
	1.5 耐震性能
	1.6 耐震性能の照査において考慮する貯水位
2章 耐震性能の照査に用いる地震動	2.1 想定地震の選定
	2.2 耐震性能の照査に用いるレベル2地震動の設定
3章 ダム本体の耐震性能の照査	3.1 ダム本体の耐震性能の照査方針
	3.2 コンクリートダム本体の耐震性能の照査
	3.3 フィルダム本体の耐震性能の照査
4章 関連構造物等の耐震性能の照査	4.1 耐震性能の照査の対象とする関連構造物等
	4.2 関連構造物等の耐震性能の照査

図-1 指針(案)の構成(目次)

以下、指針(案)本文の構成に沿って、基本的事項を中心に、適宜解説文に述べられた事項や委員会で議論になった内容にも触れながら各章の要点を紹介する。

なお、特に指針(案)本文からの引用箇所については「」付きで記すこととする。

1) 基本事項

第1章では、照査のための基本事項として、指針(案)の趣旨、用語の定義、適用範囲、レベル2地震動に対して要求する耐震性能、照査において考慮すべき水位条件等が示されている。

①指針(案)の趣旨等

指針(案)の冒頭、その趣旨について、「大規模地震を想定したレベル2地震動に対するダムの耐震性能を照査するための標準的な考え方を示したもの」とされている。前述のように、指針(案)によるダムの耐震性能照査において必要となる地震動予測技術や、数値解析による地震応答解析技術は日進月歩の分野である。よって、指針(案)の記述も現時点での知見に基づくものであって、今後新たな知見が得られ、より合理的な照査方法等が開発された場合には、その採用を妨げるものではない旨が解説文に明記された。

②用語の定義

「レベル2地震動」のほか、照査対象としての「ダム本体」や「関連構造物等」など、指針(案)中の基本的な用語の意味が定義されている。

このうち、レベル2地震動については、「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」とされているが、これは、兵庫県南部地震後に出された土木学会の第3次提言等^{4), 5)}の趣旨に沿ったものである。

③適用範囲

指針(案)の適用範囲は、今回の試行においては、わが国で施工事例の多いダム形式として、コンクリートダムのうち重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダム、またフィルダムのうち土質遮水壁型ロックフィルダムとアースダムのダム本体および関連構造物等とされた。

それ以外の形式のダムについては、その照査方法に関する今後の調査研究の進展を踏まえ、適用を検討する予定である。

なお、構造令と同じく、土砂の流出を防止、調節するために設けるダムや、基礎地盤から堤頂までの高さが15m未満のダムについては、対象としないこととされている。

④照査すべき耐震性能

指針(案)で示された最も重要な基本概念であり、同時に議論の対象となったもののひとつが、レベル2地震動に対して確保すべきダムの耐震性能をどのように定義するのかという点であった。

指針(案)では、レベル2地震動に対して照査すべきダムの耐震性能として、「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」の2点が示された。

なお、このうち前者の「貯水機能が維持されること」とは、「制御できない貯水の流出が生じないこと」とであるとされた。

これは、ダムは、著しい損傷などにより制御できない貯水の流出が生じた場合、下流域に対し甚大な被害を発生させるおそれがあるため、そのようなおそれがないことを確認する必要があると考えられたためである。

同様の基本概念は、国際的あるいは海外においてもダムの設計ガイドラインに記述されている。

例えば、国際大ダム会議(ICOLD)のガイドライン⁶⁾では、ほぼレベル2地震動の概念に近い最大設計地震(MDE: Maximum Design Earthquake)に対し、“It will be required at least that the impounding capacity of the dam be maintained when subjected to that seismic load”とされている。

また、米国陸軍工兵隊(USACE)のガイドライン⁷⁾では、MDEに対し、“The associated performance requirement is that project performs without catastrophic failure, such as uncontrolled release of a reservoir”と表現して

いる。

このような点も議論の参考とされた。

次に、もうひとつの耐震性能として定義された「生じた損傷が修復可能な範囲にとどまること」については、具体的に「適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲でダムの継続使用を可能とする範囲にとどまること」とされた。

ダムは流域の治水・利水上極めて重要な機能を有する構造物であるが、地震により、適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で継続使用するための修復が困難となるような損傷が生じた場合、その機能を他の構造物で代替したり、速やかに再建設したりすることは困難であるため、そのようなおそれがないことを確認する必要があるとされたためである。

国土交通省が、構造物全般を対象として構造設計に係わる技術標準の策定・改訂の基本的方向を示した『土木・建築にかかる設計の基本』⁸⁾には、3つの限界状態(使用限界、修復限界、終局限界)が示されている。ダムの耐震性能としての修復可能性は、レベル2地震動に対して修復限界状態以内にとどまることといった考え方にに基づき導入されたものである。

なお、この修復可能性に関しては、単にダムの損傷状態の評価にとどまらず、その修復工事において想定される工法や経費、修復に要する期間やその間の社会的・経済的影響やその措置等について検討することが必要となる。このため、修復可能性については、今後の試行期間における重要な検討課題の1つとなった。

⑤水位条件

貯水構造物であるダムの耐震性能照査において、照査時に考慮する貯水位は、極めて重要な前提条件となる。

現行の設計基準である構造令において、ダムの構造計算は通常時の最高水位である常時満水位のほか、洪水時に一時的に貯留する最高水位であるサーチャージ水位についても、常時満水位時の設計震度の1/2を想定し実施することとされている。

しかし、現実的に、サーチャージ水位が生じるような洪水と当該ダムにとって最大級の地震動であるレベル2地震動が同時に発生する可能性は極めて小さいと考えられる。

このため、通常時のダム運用にとって影響の大きな水位条件を考慮するのが妥当であるとの考えに基づき、「ダムの耐震性能の照査において考慮する貯水位は、常時満水位を基本とする」こととされた。

ただし、ダムの構造上、地震時におけるダムの応答が常時満水位時よりも大きくなる貯水位が想定される場合（例えば、アーチ式コンクリートダムの最低水位等）には、「なお、常時満水位より低い水位であっても、構造上、耐震性能を照査する上で別途考慮すべき水位条件を有するダムについては、常時満水位のほか当該水位についても照査を行う」こととされた。

2) 耐震性能の照査に用いる地震動

第2章では、耐震性能の照査に用いるレベル2地震動を具体的に設定するための考え方が示されている。

詳細は別稿⁹⁾に譲るが、ダムの耐震性能照査における照査用地震動設定の最も基本的な考え方は、ダムごとに過去の地震やダム地点周辺の断層情報等を考慮し、レベル2地震動を設定する点にある。

ダム地点に最も大きな影響を及ぼすと考えられる地震を「想定地震」として選定する。この「想定地震」によってダム地点に生じる地震動を適切な方法により推定することとなる。

地震動の推定には、これまでに全国のダムの基礎岩盤で観測された多数の地震動記録に基づく推定式（ダムの距離減衰式）等を用いる。

なお、レベル2地震動の設定では、地表に現れていない活断層によって生じる地震の影響をどのように考慮するかという課題があった。この点に関して、ダム周辺に活断層等の存在が知られていないところでも、少なくとも想定すべき地震動の下限を設定することとされた。

3) ダム本体の耐震性能の照査

第3章では、指針（案）の適用対象としているコンクリートダムやフィルダムのダム本体（主に堤体）を対象とした照査の考え方（地震応答解析による照査の方法やその結果の評価の考え方）が示されている。

指針（案）の最大の特徴は、レベル2地震動という極めて大きな外力に対しては、ダムが損傷することも考慮し、その損傷過程にまで立ち入って耐震性能を照査するという点である。

このような損傷過程を考慮した耐震検討は、現在では橋梁等の構造物で既に行われている。ダム分野では、一部研究レベルでの検討は行われてきたが、これまでわが国のダムでは地震時に安全上問題となるような被害を被った経験がないこともあり、技術基準等においては取り入れられてこなかった。

①コンクリートダムの照査

コンクリートダムでは、引張亀裂等の損傷、また特にアーチ式コンクリートダムでは構造上設けられている継目の開き等も考慮した地震応答解析を行う。その結果に基づき、レベル2地震動という極めて強い地震動に対するダムの安定性評価は、「ダム本体に損傷が生じたとしても、それが限定的なものにとどまる場合には、ダムの貯水機能は維持されるとしてよく、かつ修復可能な範囲にとどまる場合には、所要の耐震性能は確保されるとしてよい」こととされた。

なお、実際には、この「限定的」であるかどうかの評価が、技術的判断が必要な核心部分となる。この点について、「ダムの貯水機能が維持されること」という耐震性能の基本定義に照らし、引張亀裂等により「制御できない貯水の流出」を生じるようなダム堤体の分断が生じないか等の観点から判断するなど、具体的な考え方が示されている。詳細は別稿¹⁰⁾に譲る。

②フィルダムの照査

フィルダムは、その構造上、万一堤体からの越流が生じた場合には重大な事態に至る可能性がある。

この点を考慮し、レベル2地震動に対して、「変形に伴う沈下が貯水の越流を生じるおそれがないほどに小さく、かつ地震後において浸透破壊を生じるおそれがない場合には、ダムの貯水機能は維持されるとしてよく、かつ修復可能な範囲にとどまる場合には、所要の耐震性能は確保されるとしてよい」こととされた。

ダムは一般に堅固な岩盤上に建設されるが、「地震動によりその強度低下を生じる可能性のある堤体材料や基礎地盤を有するフィルダムについては、地震時における堤体材料や基礎地盤の強度低下について考慮する」として、液状化等の可能性がある場合には、必要に応じ、その影響等についても適切に考慮することとされた。

フィルダムの照査方法については、別稿¹¹⁾に譲る。

4) 関連構造物等の耐震性能の照査

第4章では、放流設備のゲート等、第3章で取り扱ったダム本体以外の関連構造物等の照査の考え方が示されている。

関連構造物等の照査は、「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」こととされた。

これは、各種の管理設備等を含む全ての関連構造物等を照査の対象とするのではない。あくまでもレベル2地震動によってダム全体の耐震性能が損なわれることがないかどうかを確認する意味で、ダム本体とは別途照査が必要な関連構造物等を対象とするものである。

たとえば、主要な放流設備のゲートは、その大規模な変形や脱落、流亡等、重大な被害を受けた場合、ダム本体が無損傷であっても制御できない貯水の流出が生じるおそれがある。関連構造物等の照査は、このような考え方によって、照査が必要な対象構造物等を選定した上で、地震応答解析等の適切な手法によって行うこととされた。詳細は別稿¹²⁾に譲る。

レベル2地震動に対するダム全体の耐震性能は、前述のダム本体の照査結果と、この関連構造物等

の照査結果を総合して評価されることとなる。

4. 指針（案）の試行と今後の展望

ダム耐震検討会での議論を通じ、ダムの照査におけるレベル2地震動の定義や設定方法、レベル2地震動に対して照査すべき耐震性能の設定、ダム本体や関連構造物等の照査の考え方等、大規模地震に対するダムの耐震性能を合理的に説明する内容について、一定の体系的整理がなされたことから、今般の指針（案）通知となった。

土木構造物等の耐震性能評価は、外力（地震動）—材料（強度）—解析法の三者について、相互に整合した捉え方が整理されて初めて確立するものである。

またダムコンクリートや土質材料の地震荷重に対する強度評価は、過去に数多くの研究がなされているが、今後とも継続的に検討する必要がある。

レベル2地震動に対する照査で想定されるような被災事例は、これまで世界的にもごく限られている。したがって、照査における地震応答解析が実際の損傷メカニズムをどの程度再現できているのかを検証しなければならない。このため、地震発生時には、ダムにおける地震動記録や変状等の詳細な分析調査を重ねるとともに、ダム構造物を対象とした模型実験等による破壊メカニズムの検討等を鋭意進めていく必要がある。

さらには、モデルダムによって検討を行ってきたとはいえ、指針（案）で示された耐震性能が実際のダムにおいて維持されることを確認するには、個々のダムの構造特性や、設定されたレベル2地震動の違いに応じ、詳細な検討を逐一行うことが必要になる。

今後の試行によって個別ダムを詳細に検討し事例を増やす一方、考慮すべき地震動のレベルや特性と、対象とするダムの規模その他構造上の特徴に応じて、ある程度耐震性能の判定が可能となるような簡易手法を整えていくことも期待されている。

指針（案）は、耐震検討会による広範な検討の

成果に基づき、国土交通省が試行案としてとりまとめたものであるが、今後の技術的發展による照査技術の向上を阻害しない趣旨から、できるだけ照査の基本的考え方に係わる事項に絞って示すこととされ、具体個別の解析手法等、詳細な点にはあまり立ち入らない形でまとめられた。

このため、指針(案)に基づく照査を行うに当たり、実務面で参考となるとと思われる技術的事項等については、ダム耐震検討会での議論を踏まえ、国土交通省国土技術政策総合研究所および独立行政法人土木研究所が別途参考資料¹³⁾としてとりまとめた。

この参考資料に収録した内容は、特に技術水準の向上が著しい地震工学やダム工学(数値解析技術)の分野において、現時点までの知見に基づき、照査に有用と思われる情報を一例示として紹介したものである。今後とも、調査研究成果に基づき新たな知見を、随時追加していくべきものと考えている。

最後に、指針(案)の策定に至る過程で熱心にご意見、ご助言をいただいた大町委員長をはじめとするダム耐震検討会の委員の方々、また関係の方々へ深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)(2005)
- 2) 建設省河川局：河川管理施設等構造令及び同施行規則(1976)
- 3) ダムの耐震性に関する評価検討委員会：ダムの耐震

- 性に関する評価検討委員会報告書(1995)
- 4) 土木学会(土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会)：土木構造物の耐震性能と耐震設計法等に関する第3次提言(2000)
- 5) 土木学会(地震工学委員会 耐震基準小委員会)：土木構造物耐震設計ガイドライン(案) - 耐震基準作成のための手引き - (2001)
- 6) International Commission on Large Dams : Selecting Seismic Parameters for Large Dams Guidelines (1989)
- 7) US Army Corps of Engineers : Response Spectra and Seismic Analysis for Concrete Hydraulic Structures, EM 1110-2-6050 (1999)
- 8) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本(2002)
- 9) 安田成夫、金銅将史、佐野貴之、松本徳久：ダムの耐震性能照査に用いるレベル2地震動の設定方法, 土木技術資料Vol.47, No.6, pp.34-39 (2005.6)
- 10) 山口嘉一、佐々木 隆、金繩健一、佐野貴之：レベル2地震動に対する重力式コンクリートダムの耐震性能照査, 土木技術資料Vol.47, No.6, pp.40-45 (2005.6)
- 11) 山口嘉一、佐藤弘行、富田尚樹、金銅将史：レベル2地震動に対するフィルダムの耐震性能照査, 土木技術資料Vol.47, No.6, pp.46-51 (2005.6)
- 12) 安田成夫、金銅将史、佐々木 隆、高須修二：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, 土木技術資料Vol.47, No.6, pp.52-57 (2005.6)
- 13) 猪股 純、安田成夫、金銅将史、佐野貴之、吉岡英貴、川崎秀明、平山大輔、稲垣謙司、永山 功、山口嘉一、佐々木 隆、富田尚樹、佐藤弘行、金繩健一：大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料(第Ⅱ編：参考資料), 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)

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部ダム研究室主任研究官)
Masafumi KONDO

山口嘉一***



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上席研究員, 工博
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

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