

ダムの耐震設計法の変遷と現状

Transition and State-of-the-art of Seismic Design Method of Dams in Japan

岩 下 友 也 (いわした ともや)

国土木研究所水工研究グループ 総括主任研究員

1. はじめに

現在我が国のダムの耐震設計法は、河川管理施設等構造令（昭和51年政令第199号）によってその基本的な部分が定められている。また、大規模地震によるレベル2地震動に対するダムの耐震性能の照査について定めた技術指針「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」¹⁾が2005年に国土交通省河川局より公表され、現在試行中である。本稿では、我が国におけるダムの耐震設計法の変遷を概説するとともに、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」の内容について紹介する。

2. 我が国におけるダムの耐震設計法の変遷

我が国において、最初の重力式コンクリートダムである布引五本松ダムが完成したのが1900年である。ダムの設計に耐震設計法が取り入れられたのは1925年に遡る。佐野利器博士が1916年に発表した「家屋耐震構造論」²⁾において、構造物に作用する地震力を水平慣性力に置き換えて考慮する「震度法」が提唱された。1923年に関東大震災（M 7.9）が発生し、その2年後である1925年に物部長穂博士が「貯水用重力堰堤の特性並に其合理的設計方法」³⁾において、重力式コンクリートダムの設計に震度法の概念を取り入れ、等値水平震度0.10～0.20を提案した。ここに、等値水平震度とは、鉛直震度の影響を考慮した水平震度である。これが、ダムの近代的な耐震設計法の始まりであり、この考えを取り入れて設計されたダムが1930年に完成した小牧ダム（重力式コンクリートダム：堤高75 m）である。それ以降、現在に至るまで、我が国のダムは震度法に基づく擬似静的構造解析法を基本として耐震設計が行われてきている。

フィルダムについては、1934年に物部長穂博士が「地震に因する動水圧を考慮せる重力堰堤の断面決定法」⁴⁾においてダム種別の設計震度を提案している。その中で、フィルダム（土堰堤）の設計震度としては、ダム底部を0.15～、頂部を0.2～0.3とし、堤体の振動応答特性を考慮したものであった。これは、松村孫治博士による地震時における土堰堤の変形に関する研究⁵⁾に基づき設定されたものである。

それ以降、後述する国際大ダム会議日本国内委員会により「ダム設計基準」⁶⁾が制定されるまでは、上記の物部の方法や海外の事例を参考に個別ダムごとに耐震設計

がなされる時代が続いた。

統一的な国内のダム耐震設計法が採られるようになつたのは、1957年に国際大ダム会議日本国内委員会により制定された「ダム設計基準」⁶⁾が最初である。この設計基準は、法的拘束力こそ持たなかったものの、設計震度に強震帶地域および弱震帶地域の地域区分を導入し、フィルダムがロックフィルダムとアースダムに区分された。そして、ダム形式をコンクリートダム・ロックフィルダムとアースダムの2区分に分け、強震帶地域、弱震帶地域それぞれに対し設計震度が設定された。この設計基準では、フィルダムにおいて堤頂と底部の設計震度を同じとし、前述の物部博士のダム堤体の振動応答特性を考慮した震度の提案（1934）とは異なるものとなっていた。なお、物部博士の考え方は後に述べるフィルダムの修正震度法（1991）により再度考慮されることになる。

その後、アーチダム、重力式コンクリートダムおよび中空重力式コンクリートダム、フィルダムの各基準を改訂し、1971年に日本大ダム会議により「改訂ダム設計基準」⁷⁾が制定された。当該基準においては、地域別の地盤震度が設定され、アーチダム以外の堤体震度は、地盤震度と同じとしてよいとされている。ただし、堤高100 m以上のダムは堤体震度が地盤震度より大きくなるので動力学的検討を行うことが望ましいとされている。また、アーチダムの堤体震度は、動力学的検討を行って定める場合を除き、地盤震度の2倍以上とされた。さらにこの改訂では、地域区分の見直しなどがなされた。

1976年に河川法（昭和39年法律第167号）の政省令として、河川管理施設等構造令及び同令施行規則（昭和51年建設省令第13号）（以下、構造令等という。）が制定され、ダムの耐震設計法が初めて法的拘束力を持つ耐震設計基準として定められた。この構造令等は、ダムの基本的な断面を決める最低限の手続きを定めたもので、ダムの耐震設計についてはダムに作用する地震の影響を静的な慣性力で与える震度法を用いて検討するとともに、外力として、構造令施行規則第2条で設計震度の下限値がダムの種類および地域の区分に応じ規定され、当該ダムの実情に応じて定めることとしている。この施行規則は1981年に改訂され、設計震度の地域区分が2区分から3区分に見直された。現在においても構造令等が法的拘束力を持つダムの耐震設計基準であり、1981年の改訂以降、大きな改訂は行われていない。

その後、1991年に建設省河川局開発課監修として「フィルダムの耐震設計指針（案）」⁸⁾が出された。堤高100m程度以下のフィルダムを対象として、地震時における堤体のすべりに対する安定性の検討は、修正震度法によるものとしている。従来の震度法は、地盤の地震動と同じ作用力を基礎から天端まで高さ方向に一様に慣性力として加えて堤体の安定性を評価する。しかし、実際に観測された地震時の堤体挙動は、堤体上部で大きくなる傾向を示している。従来の震度法における慣性力の与え方は、これら実ダムの観測事実に適合していないことから、修正震度法では、従来からの震度法の特徴や簡便性を考慮にいれた上で、堤体の高さ方向の振動応答特性を考慮して地盤における設計震度に対して堤体の各部で增幅する地震時慣性力を堤体震力係数として定めている。堤体震力係数を設定するに当たっては応答スペクトル法やモーダル法および有限要素解析法を用いて堤体震力分布を試算し、それを実際のフィルダムで記録された堤体加速度応答記録を基に確認を行った上で設定している。この「フィルダムの耐震設計指針（案）」は、法的拘束力をもつ設計基準ではないが、構造令等により決定される設計断面等の照査指針として、設計の実務に活用されている。

1995年には、兵庫県南部地震（M7.3）が発生した。この地震の直後に、251ダムで臨時点検が行われたが、ダムの下流域に問題となるようなダムの安全性に関わる被害は発生しなかった。建設省（現国土交通省）は、この地震を受け、「ダムの耐震性に関する評価検討委員会」を設置し、ダムの耐震性について検討を行った。委員会では、兵庫県南部地震においてダムサイトで観測された地震動の特性を分析し、実測地震動のレベルを踏まえて実施されたダムの耐震性評価の結果、現行の設計基準である構造令等に基づき設計された我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⁹⁾。

兵庫県南部地震以降、各種の地震観測体制が強化されるようになり、ダムにおいても、「ダムの耐震性に関する評価検討委員会」の提言⁸⁾を受けて、建設省では全国の補助ダムも含めた所管の全ダムにおいて地震計の新規設置・更新を進め、1999年度末までに完了した。このように、ダムにおける地震観測体制が充実してきた2000年に発生した鳥取県西部地震では、震源の近傍に鳥取県が管理する賀祥ダムが存在しており、兵庫県南部地震時のダムにおける観測記録を上回る、国内のダム基礎の底部監査廊の観測記録としては最大となる最大加速度500 gal超の地震動を記録した。このような状況の中、土木学会から、1995年～2000年にかけ「土木構造物の耐震基準等に関する提言（第一次提言、第二次提言および第三次提言）」^{10)～12)}、2001年に「土木構造物耐震設計ガイドライン（案）」¹³⁾が出されるとともに、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。このような背景から、2005年3月に大規模地震に対するダムの耐震性能の照査方法を体系的に示した技術指針として、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」¹⁴⁾が、国土交通省河川局より公表されるとともに、国土交通省各地方整備局等に通知され、試行が開始された。

3. 「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」について

本章では「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」¹⁴⁾（以下、指針（案）という）について、紹介をする。この指針（案）は、性能照査型の設計指針であり、大規模地震に対するダムの耐震性能を適切に照査するために必要となる以下の三つの事項について、その基本的な考え方方が示されている。

- i) 大規模地震に対するダムの耐震性能照査において考慮すべき地震動の定義と設定方法
- ii) ダムの耐震性を評価するための判断基準として、大規模地震に対してダムが保持すべき耐震性能の定義
- iii) ダム本体およびその関連構造物等の具体的な耐震性能照査の考え方

3.1 照査に用いる地震動

指針（案）では、大規模地震に対するダムの耐震性能照査に用いる地震動として、「当該ダム地点において、現在から将来にわたって想定される最大級の強さを持つ地震動」と定義された「レベル2地震動」を考慮して大規模地震に対するダムの耐震性能を照査することとしている。このダムにおけるレベル2地震動は、土木学会の「土木構造物の耐震設計法に関する第三次提言」¹²⁾等の趣旨に沿ったものである。

照査に用いる地震動は、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、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。「想定地震」の選定は、調査によりダムに影響を及ぼすと考えられる複数の活断層やプレート境界等を震源とする地震の諸元（断層面の位置、活動した場合の地震の規模等）を求め、それらが個々の震源域の活動によって地震が生じた場合の当該ダムへの影響を比較し、その影響が最も大きいと考えられる地震として選定する。

レベル2地震動の設定に当たっては、こうした「想定地震」による地震動設定に加えて、照査を実施する際の最低限の地震動として、「照査用加速度応答スペクトル」を定めている。このスペクトルは、地震国である日本では、地震の震源となる活断層が地表面に現れていないても、ダム地点の直下で地震が発生する可能性を考慮して定められたものであり、その大きさは、ダム地点の直下の地殻内を震源とする地震による地表面で生じる地震動を試算した結果をもとに、ダムの固有周期帶等の応答特性を加味して設定されている。なお、このスペクトルは、気象庁マグニチュード Mj 6.5相当の地震が直下型で発生した場合に生じる地震動であり、発生する地震

論 説

動のばらつきを考慮して平均値+標準偏差に相当する84%のカバー率を考慮して設定している。また、平均値に相当する50%カバーで考えた場合では、気象庁マグニチュード Mj 7.3に相当している。

「想定地震」から設定された地震動スペクトルと、照査用下限加速度応答スペクトルを比較し、大きい方のスペクトルを照査に用いる地震動とする。つまり、照査用下限加速度応答スペクトルの方が大きい場合は、このスペクトルを採用することになる。よって、我が国のダムにおいてこの指針（案）に基づいて照査を行う場合、すべてのダムにおいて、照査用下限加速度応答スペクトル以上の地震動に対して耐震性能照査を行うことになる。

3.2 要求される耐震性能

指針（案）の中で、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、①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こと、および、②生じた損傷が修復可能な範囲にとどまることの2点が規定されている。

①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を意味している。このような耐震性能を規定したのは、万一地震によってダムに著しい損傷が生じ、制御できない貯水の流出が生じた場合には、下流域に対し社会的に許容されない甚大な被害を発生させるおそれがあると考えられるためである。

次に、②の「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、具体には「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」である。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」¹⁴⁾には、三つの限界状態（使用限界、修復限界、終局限界）が示されている。ダムの耐震要求性能②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方に基づき導入された。

3.3 耐震性能の照査手法

指針（案）の中では、レベル2地震動に対してダム本体および関連構造物等の耐震性能の照査の考え方方が示されている。

ダム本体の耐震性能の照査は、地震応答解析によることを基本としており、ダム本体に損傷が生じたとしても、その貯水機能が維持されることをダムの構造特性に応じた適切な地震応答解析により確認するとともに、生じた損傷が修復可能な範囲にとどまることを確認する。また、地震応答解析の結果からダム本体に何らかの損傷が予想される場合においては、解析結果から予想される損傷の

形態や程度を勘案し、適用可能と考えられる補修工法等を想定の上、所要の耐震性能を回復するのに要するものとして算定される経費、期間等が、当該ダムの状況に応じて妥当な範囲内であるどうかで修復可能性を判断することとしている。

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が特徴である。このような損傷過程を考慮した耐震性の検討は、現在では橋梁等他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、これまで我が国のダムでは下流域に人的・物的被害を及ぼすような大きな地震被害を被った経験がないこともあり、「2. 我が国のダムの耐震設計法の変遷」において述べたように、技術基準等においては取り入れられてこなかった。

ダム本体については、コンクリートダムとフィルダムが指針（案）の適用対象となっている。以下に、地盤構造物であるフィルダム本体の耐震性能の照査について概説する。

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、堤体材料の流出により貯水機能を損なう重大な事態に至る可能性がある。この点を考慮し、フィルダム本体の耐震性能照査は、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いことを確認するとともに、地震後において浸透破壊を生じるおそれがないことについても確認することによって行う。フィルダム

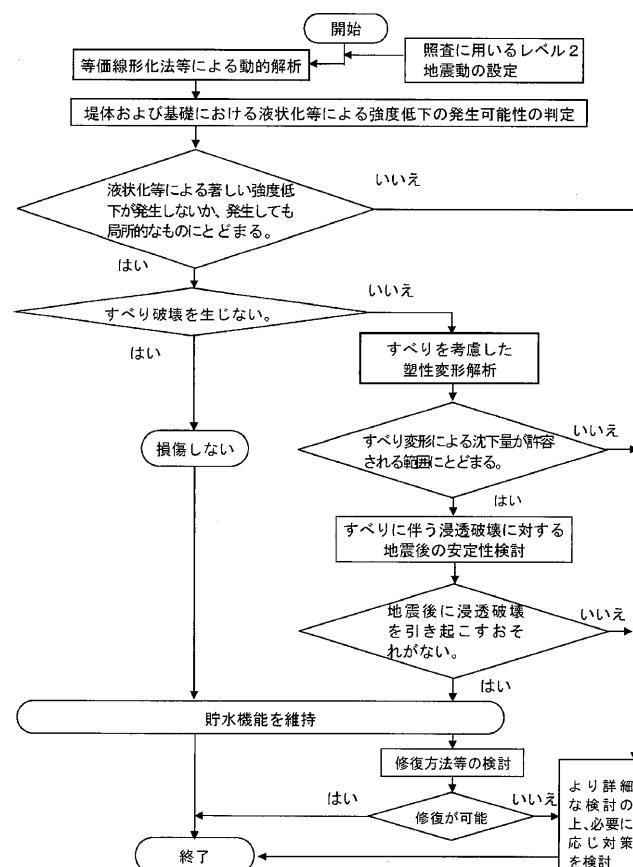


図-1 フィルダム本体の耐震性能照査の流れ図

ム本体の照査の流れを図一1に示す。

個々のダムサイトにおいて設定されたレベル2地震動を用いて、等価線形化法等による動的解析を行う。未固結の堆積層を基礎地盤とするロックフィルダム、堤体の締固めが十分でないか、もしくは地震動により液状化して著しくその強度が低下する可能性がある砂層を基礎地盤とするアースダム等、地震動により堤体材料や基礎地盤の強度が著しく低下する可能性のあるフィルダムについては、液状化に対する安全率(F_L 値)による液状化判定を行う。

液状化判定の結果、液状化等による著しい強度低下が生じるおそれがない、あるいは生じても局所的なものにとどまるフィルダムでは、引き続き試行的に設定したすべり面上のせん断力の総和がせん断抵抗力を超えない、あるいはすべり面上の土塊に作用するすべりモーメントが抵抗モーメントを超えない場合には、すべり破壊が生じるおそれはないため、ダムの貯水機能は維持されると考える。一方、ダム本体にすべり破壊が生じるおそれがある場合には、さらに等価線形化法等による動的解析の結果を用いたNewmark法等の塑性変形解析により、地震によるすべり変形を推定する。算定された変形量・沈下量が堤体からの越流に対して十分安全な程度に小さいものとして許容される範囲にとどまる場合には、越流が生じるおそれはないとしている。ここで、許容される範囲としては、設計上見込まれている付加高さ以内とし、構造令等に基づいて設計されたフィルダムは、同条件で算出されたコンクリートダムの付加高さにさらに1mを加えた高さが確保(構造令第5条規定)されているため、沈下量が1m以内であれば十分な余裕をもって許容されると考えられる。

また、土質遮水壁型ロックフィルダムで、遮水ゾーンを貫通する下流側へのすべりが生じるおそれがある場合、あるいは堤体全体が遮水材料で構築されているアースダムで、貯水位より低い位置を始点とする下流側へのすべりが生じるおそれがある場合には、貯水による浸透破壊に対する地震後の安全性を検討する必要がある。

指針(案)では、ダム本体以外のゲートや門柱等の関連構造物等についても照査の対象としている。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等の理由である。しかし、すべての関連構造物等を照査対象として義務付けているわけではなく、あくまで、「それが損傷した場合にダムの貯水機能が維持できないおそれがあるもの」に対して照査を行うこととし、照査方法も「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」としており、地震応答解析以外のその他の適切な手法でもよいとしている。

4. おわりに

我が国におけるダムの耐震設計法の変遷を概観し、また「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」をその策定背景とともに紹介した。指針(案)は、ダムごとに設定するレベル2地震動に対して、ダムに要求される耐震性能を規定し、その照査の方法の基本的考え方を示した性能照査型の設計技術指針である。これは、実務で使用するものであり、ある程度実績のある技術的手法で構成している。現在、「試行」という位置づけで、実際のダムをモデルとした指針(案)の適用性の検証を進めている。また、試行における検討を通して明らかとなつた、実務上の技術的課題についても検討が進められている。今後、実務上の課題を解決し、技術指針として確立させ、本運用に入ることとしている。

一方で、耐震性能の照査手法の高度化においては、地震動予測および材料の地震時強度評価の精緻化、ならびに地震損傷メカニズムの分析およびその再現解析法の高度化などといった今後の研究成果が期待される事項も多く、ダム現地や室内試験での一層のデータ集積を進めつつ、より合理的な照査手法を目指した調査研究を継続実施していくことが重要である。

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) 佐野利器：家屋耐震構造論，震災予防調査会，1916.
- 3) 物部長穂：貯水用重力堰堤の特性並に其合理的設計方法，土木学会誌，Vol. 11, No. 5, 1925.
- 4) 物部長穂：地震に因する動水圧を考慮せる重力堰堤の断面決定法，内務省土木試験所報告，No. 26, 1934.
- 5) 松村孫治：地震動による土堰堤の変形，内務省土木試験所報告，No. 28, 1934.
- 6) 國際大ダム會議日本国内委員会：ダム設計基準，1957.
- 7) (社)日本大ダム會議：改訂ダム設計基準，1971.
- 8) ロックフィルダム耐震調査委員会：フィルダムの耐震設計指針(案)，建設省河川局開発課監修，財国土開発技術研究センター，1991.
- 9) 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，財国土開発技術研究センター，1995.
- 10) (社)土木学会耐震基準等基本問題検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する提言(第一次提言)，1995.
- 11) (社)土木学会耐震基準等基本問題検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，1996.
- 12) (社)土木学会土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法に関する第三次提言，2000.
- 13) (社)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.
- 14) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.
(原稿受理 2008.4.28)