

◆特集：大規模地震に対するダムの耐震性能照査◆

ダムのレベル2地震動対策のすすめ

大町達夫*

1. はじめに

早いもので、1995年1月の兵庫県南部地震から、既に10年が過ぎた。この地震では、6000人を超える多くの犠牲者が出るとともに、道路、鉄道、港湾などの交通施設のほか、地下埋設管、堤防など、多種多様な土木施設や構造物が大被害を被り、近代都市の機能が長期間にわたり麻痺した。この深刻な震災状況に直面し、あるいはその報道に接し、再びこのような災害を起こしてはならないとの思いが、日本中に広く深く浸透していった。

このような状況を背景に、土木学会では1995年3月、「耐震基準等基本問題検討会議」が設置され、白熱した議論が展開された。最初に、兵庫県南部地震の評価について意見が交換され、このような地震は極めて稀に起こる特殊な地震では決してないこと、したがって今後、わが国の耐震設計では、直下地震も検討対象に含めるべきであることが、委員全員の共通基本認識となった。その後、この会議での審議結果をもとに、1995年5月と1996年1月の2回にわたって「土木構造物の耐震基準等に関する提言」¹⁾が出された。これらの提言内容は、震災後の復旧過程で実務にも適用され、各種構造物の基準改訂作業の指針として活用された。しかし、これらの提言内容を実務分野で実現するには多くの解決を要する課題も残されていたため、1996年9月、土木学会に「土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会」が設置され、広範囲にわたり詳細な議論が行われた。そして、2002年6月にその成果が第三次提言²⁾として公表された。

以上の経緯から明らかなように、一口に土木学会提言と言っても、第一次から第三次までである。しかも次数が増すにつれて、提言内容は拡大・洗練されただけでなく、内容が明らかに変化してい

る部分もある。たとえば、「レベル2地震動」という用語の意味は、第一次提言と第三次提言とではかなり異なっている。そこで、レベル2地震動に関する土木学会提言の内容について、小文の前半で簡単な解説を行う。

わが国の多くの土木構造物の設計基準は、阪神淡路大震災後に見直され、レベル2地震動対策が導入されたが、構造種別ごとに内容が相違している部分がある。一方、近年、国際的には構造的共通部分については、共通標準化しようとする動向がある。このような周辺状況をみれば、わが国のダムのレベル2地震動対応は、国内的に出遅れの感が否めないばかりか、国際的に見ても国益を損なう恐れがある。さらに近年の地震被害の発生状況からも、早急にダムのレベル2地震動対策に着手する必要性が高いことを、後半で述べる。

2. 土木学会提言におけるレベル2地震動

2.1 第一次提言

土木学会による第一次提言の骨子は、

1-1) 土木構造物の耐震性能は、レベル1およびレベル2の2段階の地震動強さを想定して照査すべきである、

1-2) これらの地震動を受けたときの構造物の挙動は、その構造物の重要度を考慮して決める、

1-3) 震害の状況に照らして現行の耐震基準を見直すべきである、

1-4) 既存構造物の必要な補強を早急に推進する、

1-5) 基準の見直しに必要な研究開発を促進する、などであり、いわゆる「2段階設計法」と「性能規定型設計法」を基本方針とすることが提唱されたのであった。この基本方針は以降の提言内容にも堅持されたが、第一次提言の内容全てが厳密に継承されたわけではない。その一例が、極めて強い設計地震動、すなわちレベル2地震動である。

第一次提言が出された当時、2段階設計法は既に一部の構造物^{3),4)}の耐震設計に、以下のような

Imperative Measures for Dams Subjected to the Level 2 Earthquake Motions

目的や性格で取り入れられており、この提言も、それを踏まえたものであった。

1-6) レベル1地震動は、原則としてそれが作用しても構造物が損傷しないことを要求する水準を示す。

1-7) レベル2地震動は、きわめて稀であるが、非常に強い地震動を想定したもので、構造物が損傷を受けることを考慮して、その損傷過程にまで立ち入って、構造物の耐震性能を照査する水準を示す。

第一次提言では、上記の2段階の設計地震動は、次のように表現されている。

1-8) レベル1地震動は、構造物の供用期間内に1~2度発生する確率の強さをもつ地震動、

1-9) レベル2地震動は、直下地震による地震動のように供用期間中に発生する確率は低いが極めて強い地震動。

土木構造物は多種多様であり、構造種別ごとにその特性を反映した設計法の体系とノウハウが発達してきた経緯があり、設計法の一部を変更する際には、体系全体への影響やバランスにも十分な配慮が必要である。このため、2段階設計法と性能規定型設計法をいかに実現していくかが、重大課題として残された。

2.2 第二次提言

従来の耐震設計で使用されてきた地震荷重は、おおまかに1-6) で述べている無損傷を保証する水準にある。しかし厳密には、1-8) のように地震動の発生確率を根拠に設定されたわけではなく、主として1891年濃尾地震以降における地震被害の教訓を生かすため、直観的あるいは試行錯誤的に定められてきた側面が強い。ただし当面は、レベル2地震動対策を優先的に実施する必要性が高いことから、第二次提言ではレベル1地震動に関しては次のように述べ、以降の内容は、レベル2地震動に限定されている。

2-1) レベル1地震動に関しては、当面は従来から設定されていた地震外力を準用する。

2-2) レベル2地震動については、脅威となる活断層を同定し、その破壊過程を想定して地震動を評価することを基本とする。

2-3) レベル2地震動を受けた場合、構造物が損傷することを前提として、その程度に立ち入って

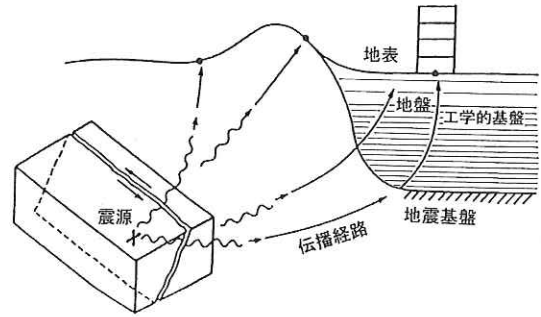


図-1 地表における地震動の支配要因⁵⁾

耐震性能を照査する。このための合理的な耐震設計法を確立しなければならない。

2-4) 一次および二次の2段階の耐震診断を行って、補強を必要とする構造物を選び、適切な優先順位に基づいて補強を行う。なお目標とする耐震性能は、新設構造物と同等とする。

地表での地震動は、①震源特性、②伝播特性、③地盤特性、の3要因に支配されると考えられている(図-1参照)⁵⁾。①震源特性は、震源断層の破壊様式によって決定される。②伝播特性は、地震波が地殻内を伝わるにつれて振幅が減衰する特性であり、主として震源からの伝播距離によって定まるので、距離減衰とも呼ばれている。一方、③地盤特性は、表層地盤の振動特性に大きく依存し、地表における地震動の周期特性に強い影響を及ぼす。地震動は①~③の3要因に支配され、構造物の地震時挙動は構造物ごとに大差がある。したがって、設計地震動を設定する際には、震源(source)と対象地点(site)、それに構造物(structure)を特定することが基本的に重要である。

対象地点と構造物の特定は、従来から当然のように行われていたが、震源の特定について2-2)のように記述するとともに、既存構造物の補強水準を2-4)のように明記したところが、第二次提言の特筆すべき点と言える。

2.3 第三次提言

第三次提言に盛り込まれた、レベル2地震動の内容は、概略、次のようである。

3-1) レベル2地震動は、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動である。

3-2) レベル2地震動の評価に際しては、震源断

層の破壊過程や地盤条件などに多くの不確実性が残されていることを十分認識し、適切な地震動予測手法を用いる。

3-3) 伏在断層に起因するマグニチュード6.5程度の直下地震が起こる可能性に配慮し、これによる地震動をレベル2地震動の下限とする。

3-4) レベル2地震動で対象とする地震は単一に限定せず、複数を選定してもよい。また同一地点でも、構造物の動的力学特性の相違によって対象地震が異なることもありうる。

「レベル2地震動」という用語におけるレベルは、3-1) のように第三次提言では地震動強さのレベルを指すものとし、地震危険度のレベル（再現期間や年超過確率）とは必ずしも一義的に対応させていない。第一次提言でレベル2地震動は、「極めて稀であるが非常に強い地震動」と表現され、頻度と強さの両方を含めているのと対照的である。日本の陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震と主要な活断層による内陸直下の地震は、大きな地震動強度を示す点では共通性があるが、再来期間は前者が100年オーダー、後者が1000年オーダーと大幅に異なっている。しかも全般的に特定の地震の発生頻度に関する情報は現時点では極めて不足しているため、発生頻度の点では両者を同列に扱いにくいことなどから、レベル2地震動の尺度として地震動強度が採用された。設計地震動は、耐震機能と経済性のバランスのもとで合理的と判断される地震動強度を選定することが必要である。その場合、レベル2地震動は物理的に発生可能と考えられる極限としての最大の地震動強さを下回ることもありうるので、「最大級の強さをもつ地震動」と再定義されたのである。これらの点と、3-3) のように下限強さを定めた点が、レベル2地震動に関する第三次提言の眼目といえる。

3. レベル2地震動への対応

3.1 各種基準等におけるレベル2地震動

1995年兵庫県南部地震により大被害を受けた、道路、鉄道、港湾、高圧ガスやLNGなどの危険物設備、上下水道などの地下埋設物に関しては、震災直後から、土木学会の提言を積極的に取り入れる方向で耐震基準の見直しが精力的に行われた。



図-2 耐震補強工事中の布引ダム上流面
(2003年6月27日撮影)

また、それと歩調を合わせて、実在構造物の補強工事も徐々に実施されていった。

一方、ダムは全般に、1995年兵庫県南部地震で貯水機能が問題視されるような重大な損傷は受けなかった。1900年に建設された、わが国最古の重力式コンクリートダムである布引ダムも、地震後に漏水量が増加したものの致命的な被害は免れた(図-2参照)。布引ダムの設計計算書では、洪水時水位の状態で外力の作用点が底面のミドルサードに入るように設計されているが、地震力は特に考慮されていない⁷⁾。兵庫県南部地震では震源域内のダム基礎で強震記録が入手できなかったため、正確な地震動強さは不明であるが、最大加速度は0.25g程度と推定された⁸⁾。そして、この程度の入力地震動であれば、コンクリートダム、フィルダムともにおおむね弾性範囲にあり、重大な損傷がないことが解析的に導かれた。そのため、ダムの耐震設計法に関しては、他の土木構造物のような見直しや変更は特に行われなかった。

兵庫県南部地震から5年後の2000年ごろまでには、多くの耐震基準の改訂作業が一段落を迎え、日本国内では各種の基準を横並びにしてレベル2地震動に関する規定を比較できるまでになった。次に、二、三の基準類におけるレベル2地震動の扱い方を紹介する。

1996年版道路橋示方書⁹⁾では、耐震設計で考慮する地震動として、1-8) と1-9) で述べた2段階の地震動を考慮することを要求している。このうち1-9) に対応する、橋の供用期間中に発生す

る確率は低いが大きな強度をもつ地震動としては、1990年の道路橋示方書で使われた1923年関東地震による東京周辺での地震動のようにプレート境界型の大規模地震による地震動(タイプⅠ)と1995年兵庫県南部地震による神戸での地震動のようにマグニチュード7級の内陸直下の地震による地震動(タイプⅡ)を考慮することとし、Ⅰ種からⅢ種の地盤に対応する加速度応答スペクトルを与えている。

1999年版鉄道構造物等設計標準¹⁰⁾でも、道路橋と同じく、2段階の設計地震動を1-8)と1-9)のように定義している。ただし、設計地震動の設定位置を、基本的に耐震設計上の解放基盤面としている点が、道路橋と異なる。ここでの基盤面とは砂質土でN値50以上、粘性土でN値30以上の連続地層、あるいはせん断波速度が400m/s以上の連続地層である。震源として、対象とする震源断層が特定できる場合と特定できない場合に分類し、それぞれの場合に対応する加速度応答スペクトルを提示している。

港湾施設¹¹⁾については、レベル2地震動は、1-9)とほぼ類似の定義がされているが、主として耐震強化施設に対する設計地震動として位置づけられている。基本的に基盤で設定されるのは鉄道施設の場合と同じであるが、基盤の定義には違いがある。ここでの基盤は、岩盤、N値50以上の砂質土層、一軸圧縮強度が650kN/m²以上の粘土層、あるいはせん断波速度が300m/s以上の土層である。港湾では、多数の強震記録が蓄積されているので、各地点でレベル2地震動の最大振幅を定め、既往の強震記録の振幅を調整して照査用の設計地震動として用いる、とされている。

以上に紹介した基準類では、先ずレベル2地震動の定義が第三次提言でなく第一次提言に倣っている点が注目されるが、阪神淡路大震災後の比較的早い時期に見直されたことを考えれば当然でもある。それよりも注意すべきは、各基準ごとに異なる設定手順から導かれるレベル2地震動には相当の差異が生じる可能性である。この点は、ISO(国際標準化機構)による国際規格あるいはEU域内の統一規格など、技術の国際的な標準化への対応を考えると、障害になる可能性があるからである。

日本では、土木・建築といった分野の違い、

鋼・コンクリート・基礎といった各構造物ごとに技術標準が発達してきた。一方、国際的には分野や構造種別の違いに関係なく、共通する事項は共通的に扱い、個別に扱うべき部分は個別規定として扱うという方向性が見られるので、その方向性に適切に対応して国益を守る必要があると考えられ、1998年12月、このための取り組みが開始された¹²⁾。この取り組みでは国内外の動向を参照し、構造物の要求性能は、供用期間における、安全性、使用性、修復性であることを基本として定め、それぞれの限界状態を終局限界状態、使用限界状態、修復限界状態として、各状態や関連用語を詳細に定義しているのが特徴である。この標準化の枠組みは、土木学会提言の基本方針と整合しているが、要求性能や限界状態を2段階でなく3段階としている点で、より高度な構造設計を志向していると言える。

ダムの耐震技術は、世界中から日本の技術者に期待されており、日本が世界へ貢献できる分野である。ただし世界的技術競争の有力な武器とするためには、国内外での最近の動向をよく見据えた上で、現行技術の高度化を推進する必要がある。

3.2 ダムのレベル2地震動をめぐる動向

ダムの設計基準は、1995年兵庫県南部地震直後に見直しが行われなかった。しかし、現行の設計法は無損傷限界のみを基準化していることから、地震動強さのレベルと限界状態の関係を明確化し、設計法を高度化することが望ましいことは、多くの専門家に認識されていた。2002年6月に出された土木学会第三次提言²⁾には、ダムが保有すべき耐震性能に関して、次のような記述がある。

「レベル1地震動に対しては、無損傷限界を確保するよう、現行の手法により設計し、レベル2地震動については、貯水機能を失うことはないが多少の永久変形・変位を許容する設計とする。」すなわち、レベル2地震動に対するダムの耐震性能は、貯水機能の維持を主眼とし、貯水機能に影響を与えない変形・変位は許容される、との提言であり、前述の1-7)や2-3)の主旨にも合致する合理的な内容と思われる。同様な主旨の提言は、2002年9月、ダム工学会フィルダム研究部会からも出されている¹³⁾。

2000年鳥取県西部地震(M7.3)の際、震源断



図-3 賀祥ダムの補助ゲート操作室

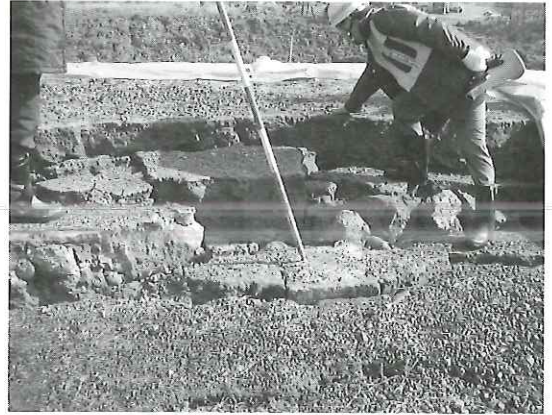


図-4 浅河原調整池のダム天端の亀裂

層の直上に位置していた賀祥ダムでは、ダムの上部で2051galという非常に強い強震動が観測された¹⁴⁾。幸い、ダム本体への損傷は無かったものの、補助ゲート操作室の床や壁のコンクリートには亀裂が発生した(図-3参照)。一方、賀祥ダム下部での強震記録の最大加速度は、531galであり、兵庫県南部地震の震源近傍におけるダム基礎での最大加速度推定値0.25gの約2倍であった。

米国ロサンゼルスにあるパコイマダムは、1928年に完成した高さ113mのアーチダムである。ここでは1994年ノースリッジ地震(M6.7)の際、左岸アバットでは水平1.5g、鉛直1.4g、ダムから130m下流の岩盤上ではそれぞれ0.4gと0.2gの加速度が観測されている¹⁵⁾。左岸地山の強震計は、やせ尾根部の風化の進んだ亀裂性岩盤上に設置されていた影響で過大な加速度値を記録したと推定されるが、下流岩盤での強震記録の信頼性は高い。

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震(M6.8)では、上述の賀祥ダムでの観測値を上回る地震動加速度が川西ダムで観測された¹⁶⁾。川西ダムは1978年に完成した、高さ43mのかんがい用フィルダムであり、最大加速度は下流法尻で558gal、左岸地山で546gal、ダム天端中央で582galであった。この地震では、川西ダムのほか、震源域のフィルダムはかなりの被害を受け、水位を緊

急低下させる事態が発生した。発電用施設の浅河原調整池、山本調整池、新山本調整池を構成する各フィルダムでは、それぞれ堤頂の全長にわたる縦断方向の開口と亀裂の発生、上流側石張りにおけるすべり亀裂の発生、ダム全体の大きな沈下と上流側一部の液状化による噴砂の発生、などの変状が生じた(図-4参照)。

新潟県中越地震は、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」¹⁷⁾の雛形がほぼ完成した矢先の時期に発生した。この指針(案)は、上記の土木学会第三次提言のように、レベル2地震動に対するダムの耐震性能は貯水機能の維持を主眼とし、損傷が修復可能な範囲にとどまることを要求している。また、貯水機能が維持されるとは、制御できない貯水の流出が生じないこととも述べている。この指針(案)の考え方によれば、新潟県中越地震では制御できない貯水の流出が生じたわけではないので、各ダムは必要最低限の耐震性能を満たしたものと判断され、関係者は比較的冷静沈着に応急対応をとることができたものと思われる。この点で、本指針(案)は試行実施前であったが、既にその有用性を実証したとも考えられる。また、新潟県中越地震では、レベル2地震動に対して耐震補強の必要なダムが、わが国に実在することがはからずも実証されたわけであり、この点は本地震の最大の教訓ではないかと筆者は考えている。

4. おわりに

一般に、ダムがレベル2地震動に相当する強大な地震動を受けることは、極めて稀であると言える。しかし極めて稀であることをもって、レベル2地震動への対応を漠る、消極論ないし慎重論があるとすれば、それは自己矛盾と言わざるをえない。そもそもレベル2地震動とは、前記の1-9)や3-1)のように、極めて稀であるが非常に強い地震動なのであり、そのような地震動に対しても構造物の耐震性を確保することが、現代の責任ある土木技術者に求められているのである。このような時代の潮流の中であって、ダム分野だけが例外ではありえない。

新潟県中越地震による土木構造物の被災状況には、レベル2地震動への現在までの対応の差異が如実に表れたと、筆者は受け止めている。10年前の阪神淡路大震災では、多数の橋梁で橋脚の転倒や橋桁の落下などの重大被害が生じ人命を奪う事態に至ったが、新潟県中越地震ではこのような橋梁被害は報告されていない。一方、ダムは10年前には重大被害は免れたが、この地震では幾つかのフィルダムに深刻な被害が生じた。このように明暗を分ける結果になったのは、橋梁分野では阪神淡路大震災後、いち早くレベル2地震動が設定され必要な耐震補強が実施されてきたのに対して、ダム分野ではそれが遅れていたためと思われるからである。

多くの関係者の努力を結集して作成された指針(案)¹⁷⁾の試行により、ダムのレベル2地震動対策が本格的に大きく進展することを衷心より願う次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：耐震基準等に関する提言集, 1996年5月.
- 2) 土木学会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説, 2000年6月
- 3) 高層建築物構造評定委員会：高層建築物の動的解析用地震動について、ビルディングレター '86.6, pp.49-50, 1986年6月.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1990年2月.
- 5) 地盤工学会：地震動、ジオテクノート⑨, 1999年3月.
- 6) 土木学会地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会：レベル2地震動研究小委員会の活動成果報告書, 2000年3月.

- 7) 物部長穂：神戸市上水道、堰堤耐震調査書 第二巻, 1924年.
- 8) 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年11月.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説, 1996年.
- 10) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説一耐震設計、丸善株式会社, 1999年.
- 11) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会, 1999年4月.
- 12) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本, 2002年10月.
- 13) ダム工学会フィルダム研究部会：フィルダム耐震設計における課題と提言, ダム工学 Vol.12, No.3, 2002年9月.
- 14) 日本大ダム会議: Acceleration Records on Dams and Foundations, No.2, 2002年4月.
- 15) 大町達夫：1994年ノースリッジ地震をどう見るか—地震防災と災害管理—、土木学会論文集, No.492/VI-23, pp.1-12, 1994年6月.
- 16) 新潟県中越地震ダム工学会災害調査団：新潟県中越地震に関するダム工学会災害調査団調査報告, ダム工学 Vol.14, No.4, pp.285-296, 2004年.
- 17) 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)・同解説, 2005年3月.

大町達夫*



東京工業大学大学院総合理工学
研究科人間環境システム専攻
教授工学博士
Dr. Tatsuo OHMACHI