

## ダムの耐震性能の評価に関する一考察

電源開発株式会社 フェロー会員 有賀 義明

### 1. はじめに

兵庫県南部地震を契機に、既設ダムの地震時安全性を動的解析によって照査する取り組みが実施されるようになってきている。土木構造物の耐震設計法は、兵庫県南部地震以降、仕様規定型から性能照査型へと移行しつつあり、将来的には、ダムに関しても性能規定型の設計法へと移行して行くことが自然な流れであると考えられる。ここでは、世界の既設ダムの地震損傷事例、これまでに実施した既設ダムの三次元動的解析等の知見に基づき、ダムの耐震性能とその評価技術についての一考察を記述する。

### 2. 既設ダムの地震損傷事例

過去に大きな地震を経験したダムの事例は、国内では1891年の濃尾地震、米国では1906年のSan Francisco地震以降に報告事例がある<sup>1)</sup>。

コンクリートダムに関しては、地震時に決壊した事例としては、ダム底部の断層変位によって破壊した石岡ダム（台湾、重力式：堤高25m、台湾集集地震：1999、M7.7）の事例があるが、地震動によって決壊した事例は報告されていない。決壊までには至らなかったが、貯水機能に損傷を生じた事例としては、豊稔池ダム（日本、マルチプルアーチ：堤高32.3m、南海地震：1946、M8.0）、Koynaダム（インド、重力式：堤高103m、Koyna地震：1967、M6.5）、Pacoimaダム（米国、アーチ：堤高113m、Koyna地震：1967、M6.5）等がある。貯水機能には損傷を受けなかったが、クラックの発生等の地震損傷を受けた事例としては、Blackbrookダム（英国、重力式：堤高30.5m、地震：1957、M6.4）、新豊江ダム（中国、バットレス：堤高105m、地震：1962、M6.1）、Shefid Rudダム（イラン、バットレス：堤高106、Manjil地震：1990）等がある。過去の地震損傷事例から、コンクリートダムに関しては、堤体や基礎岩盤におけるクラックの発生が主たる地震損傷であることが分かる。

フィルダムに関しては、地震時に重大な損傷を受けた事例としては、Sheffieldダム（米国、アースフィル：堤高8m、Santa Barbara地震：1925、M6.2）、Lower San Fernandoダム（米国、アースフィル：堤高12m、San Fernando地震：1971、M6.5）、Van Normanダム（米国、アースフィル：堤高43m、Santa Barbara地震：1925、M6.2）、大野ダム（日本、アースフィル：堤高37.3m、関東地震：1923、M7.9）、丹羽生嶺ダム（日本、アースフィル：堤高15m、1927年竣工、北海道南西沖地震：1993、M7.8）等がある。古い小規模なアースフィルダムに地震損傷事例が多く報告されている。

### 3. ダムの耐震性能について

既設ダムの地震損傷事例を集約してみると、コンクリートダムにクラックが発生した事例、フィルダムに沈下や残留変形が生じた事例が、幾例も報告されている。これらの事例は、ダムの耐震性能評価の精度・信頼性を向上させ、より合理的な評価手法を確立するためには、強い地震動を受けた際のダムの損傷過程・損傷様式を明確にし、クラックや残留変形等の損傷量を定量的に評価することが必要であることを明示するものである。また、地震で損傷を受けた際のダムの貯水機能についても照査することが必要であることを示唆するものと考えられる。これらを踏まえ、ダムの耐震性能の設定について考えをまとめてみたものを表-1に示す。図-1には、耐震性能と地震荷重との関連性の概念を示した。

表-1 ダムの耐震性能の設定について

区分	耐震性能	備考
	構造的な損傷が生じないこと	構造的：無被害
	構造的には損傷が生じるが貯水機能には損傷を生じないこと	構造的：損傷 貯水機能：無被害
	構造的に損傷が生じ、貯水機能にも軽微な損傷が生じるが貯水機能は保持されること	構造的：損傷 貯水機能：損傷
( )	貯水機能に損傷を生じるが、二次災害の安全性は十分に保持されること	安全性：保持 防災性能：保持

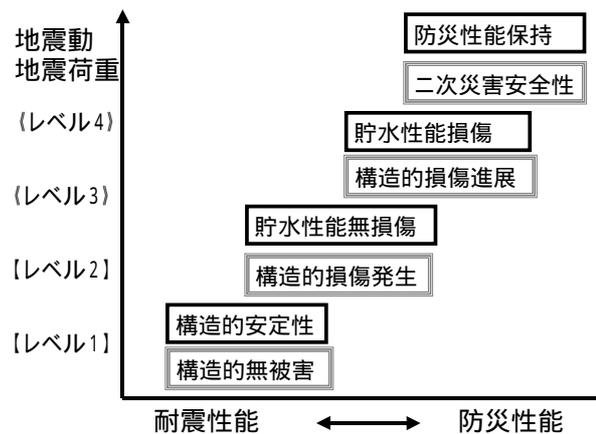


図-1 ダムの耐震性能と地震荷重の関連性概念

ダムの耐震性能については、1つの考え方として、想定される地震動等の強さに応じて、構造的な損傷が生

キーワード：ダム、耐震性能、三次元、動的解析、防災性能

連絡先：茅ヶ崎研究所 〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88, TEL: 0467-87-1211, FAX: 0467-82-4003

じないレベル，構造的には軽微な損傷が生じるが貯水機能には全く損傷を受けないレベル，構造的に重大な損傷が生じるが貯水機能は保持されるレベル，貯水機能に損傷を生じるが二次災害（地震水害等）は派生しない，という4段階に区分して設定することが可能ではないかと考えられる。ダムのもっと重要な機能は貯水機能であり，非常に強い地震動に対する耐震性能としては，貯水機能の保持が要求性能であると考えられる。また，ダムの防災性能として，万が一貯水機能に支障が生じた場合でも二次災害が派生しないことを設定しておくことも，地震防災の観点からは重要ではないかと思われる。

#### 4. ダムの耐震性能の評価技術に関する重要点

ダムの耐震性能評価技術の精度・信頼性の向上を図るために，これまでに，糠平ダム（重力式ダム）<sup>2)</sup>，新豊根ダム（アーチダム）<sup>3)</sup>，池原ダム（アーチダム）<sup>4)</sup>等の既設ダムを研究対象に，三次元動的解析による実地震時挙動の再現解析および非常に強い地震動に対する地震時安全性の評価を実施して来た。これらの研究結果等を踏まえ，非常に強い地震動に対するダムの耐震性能を評価する際の評価法に要求される要件について知見をまとめてみたものを表-2に示す。

表-2 非常に強い地震動に対するダムの耐震性能を評価する際の評価技術の要件

項目	内容
解析次数	・三次元
解析モデル	・ダム～基礎地盤～貯水池の連成系
基礎地盤	・波動エネルギーの伝搬の考慮
貯水池	・離散化モデルの活用 ・波動エネルギーの伝播の考慮
動的変形特性	・コンクリートダムの引張領域での非線形特性 ・ロックフィルダムの大ひずみ領域での非線形特性
動的強度特性	・地震時に引張強度、破壊ひずみ（地震動に対する動的強度の定量評価）
非連続的挙動	・コンクリートダムでのジョイント、クラックの非連続的挙動（開口・滑動を考慮した応力評価） ・ロックフィルダムにおける粒子間の非連続的挙動（残留変形量の評価）
＜今後の技術的課題＞	
断層変位	ダム直下の断層変位に対する安全性評価技術および対策技術の確立
防災性能	ダム関連施設を含めた，防災性能の評価技術および防災性能向上技術の開発

現在，我が国には，高さ15m以上の既設ダムが約2800あり，これら既設ダムは，震度法に基づいて耐震設計されている。したがって，既設ダムの耐震性能の照査に関しては，震度法によって“形状設計”がなされたダムに対して，動的解析によって“耐震性能照査”を行うことになる。兵庫県南部地震以降，動的解析によるダムの耐

震性能の評価が多く行われるようになってきているが，動的解析によってダムの耐震性能の精度良く評価するためには，ダムと基礎地盤と貯水池の動的相互作用の考慮，波動エネルギーの逸散の考慮，ダム・基礎岩盤の非線形特性や非連続的挙動特性，クラックや沈下等の定量的評価等が重要な要件となる。

耐震性能の評価に関しては，何ら損傷が生じない段階の評価と何らかの損傷が生じた後の評価とに大別して考えることができる。前者は，構造的な安定性評価の領域であり，基本的に“応力評価”の範囲で対応可能である。動的解析を実施する場合，堤体の地震時応力やひずみの算出結果は，ダムと基礎岩盤の地震時変形特性の値によって大きく変化するため，この段階の耐震性能評価の精度を向上させるためには，ダム・基礎岩盤の地震時変形特性の定量評価が大変重要である。後者は，構造的な安定性が損なわれた後の評価であり，“損傷過程評価”や“残留変形評価”の領域の問題となる。そのため，非常に強い地震動を受けた際のクラック、沈下、残留変形等を定量的に評価することが要求されるようになる。これからの研究課題としては，断層変位に対する既設ダムの安全性評価および対策技術の開発，非常に強い地震動に対する既設ダムの防災性能の評価および向上技術の開発等が重要であると考えられる。

#### 5. あとがき

ダムの地震時安全性に対する社会的要求度は，自然条件や社会条件等の国情に応じて変化するが，4つのプレートが複雑にぶつかり合う環太平洋地震帯に位置し，国土が狭い上に可住地面積が少なく，河川流域の土地利用が高密度に進んだ我が国では，ダムの地震時安全性に対する社会的要求度は非常に高く，念には念を入れた耐震性能と防災性能の確認が重要であると思われる。

将来的には，ダムに関しても性能照査型の耐震設計法を取り入れて行くのが技術的流れであり，高レベル地震動に対する耐震性能評価技術の高度化・合理化を目指した調査研究を今後も進めて行く予定である。

#### 【参考文献】

- 1) International Congress on Large Dams: Historic performance of dams during earthquakes, *Design features of dams to resist seismic ground motion (Guidelines and case studies)*, Bulletin 120, 2001
- 2) 渡邊啓行, 有賀義明, 曹増延: 三次元動的解析による非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性能評価について, 土木学会論文集 No. 696/L-58, pp. 99 ~ 110, 2002. 1
- 3) 有賀義明, 曹増延, 渡邊啓行: 大地震時の構造継目の影響を考慮したアーチダムの耐震性能の評価, 土木学会第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, d-17, pp. 255-260, 2001. 3
- 4) 有賀義明: 既設アーチダムの実地震時挙動に関する再現解析, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集 -194, 2003. 9