

### 令和6年度第1回 JAGREE セミナー

(一社) 農業土木事業協会では、本年7月12日に令和6年度第1回 JAGREE セミナーを開催し、ダム等の耐震照査をテーマとして、農研機構の研究者お二人にご講演をいただいた。

当協会は、その内容が会員企業の皆様に広くお役に立てるものと考え、この度、講演者にその概要をまとめていただき、本稿でご紹介するものである。

#### 講演①

## ダムの耐震性能照査手法と対策工法について (フィルダムを中心として)

農研機構 農村工学研究部門施設工学研究領域施設整備グループ  
グループ長 田頭 秀和

#### 1. はじめに

ダムは決壊に至ると膨大な貯水の流出によって下流域に甚大な被害を及ぼすことから、安全管理が極めて重要な施設である。南海トラフ地震や首都直下地震など、今後30年以内の高い確率での発生が予測される大地震が複数存在しており、その対策が急務となっている。

日本ではこれまでに数多くの大地震が発生しており、耐震工学は実際の地震被害と密接に関係しながら発展してきた。そこで本報では、最初にフィルダムとため池の違いを述べたあと、過去の地震でどのような課題が顕在化してどのように対応してきたのかについて簡単に振り返ったうえで、現在のフィルダムの耐震性能照査手法と対策工法について述べる。

#### 2. フィルダムとため池

両者を区別するための指標はいくつか存在する。規模や築造年代で区別する方法もあるが、工学的な観点からその設計方法と施工方法の違いによって区別する方法がある。つまり、ため池の場合は経験的であるのに対し、ダムの場合

は理論的であるということである。特に、最適含水比に基づいた締固め管理、安定計算、ドレーン等の有無が重要な差異と考えられる。

江戸時代に農村支配の手引書の役割を担った地方書(じがたしよ)の中には堤防やため池の築造方法を記したものがいくつかあるが、締固めに関しては、「盛土高さの1.5~2倍の土を用意して、よく練った土を厚さ2~3尺に築立てる」くらいのことしか書かれていない。注目すべきは、少なくとも戦前まではこれと似たような状況であったということである。最適含水比やD値による締固め管理を基準として最初に示したのは農林省農地局が1953(昭和28)年に発行した土地改良事業計画設計基準「土堰堤」になる。見方を変えれば、1953(昭和28)年以前に築造を開始したものについては、安定性に弱点があるのではないかと疑ってみる必要があるといえる。

#### 3. 国内の大地震で顕在化したフィルダムの耐震上の課題

1891(明治24)年の濃尾地震(M8.0)は一

定の記録が残っている国内で最初の巨大地震であり、マグニチュード8.0は現在でも内陸型地震で最大の値である。濃尾地震を含めた明治時代の大規模地震の被害調査は震度法<sup>1)</sup>のバックデータとなった。

耐震設計の普及に決定的な影響を与えたのは1923（大正12）年の関東大震災（M7.9）である。この震災を受けて、まず建築分野で震度法に基づいた耐震規定が定められ、ダム分野では1925（大正14）年に重力式コンクリートダムの設計への適用<sup>2)</sup>が、1934（昭和9）年にフィルダムの設計への適用<sup>3)</sup>が提案された（図-1(a)）。震度法によって設計された国内最初のダムは1930（昭和5）年に完成した小牧ダム（重力式コンクリートダム、堤高79.2m、富山県）である。震度法は、設定している地震慣性力が地盤で観測された最大加速度よりも小さいこと、堤体内の増幅を考慮していないことなど、実際の現象との矛盾点がいくつか指摘されている。一方で、安全率1.2以上で設計して適切に施工したダムでは過去の大規模地震でも致命的な被害は発生していないという実績がある。

1964（昭和39）年に発生した新潟地震（M7.5）では同年のアラスカ地震と並んで液状化現象が国際的に注目され、本格的な研究が進められる契機となった。農林水産省のダム設計基準で液状化の検討が記載されるのは1981（昭和56）年版まで待たねばならない。

耐震設計手法のターニングポイントになったのが、1995（平成7）年兵庫県南部地震（M7.3）である。最大観測加速度はダム基礎地盤では $1.83\text{m/s}^2$ であったが、他の地盤で $8.18\text{m/s}^2$ と

いう設定を遥かに超える値に達し、それまでに想定していなかったような被害が発生した。これを踏まえて、耐震設計は仕様設計から性能設計へ、言い換えると、「壊さない設計」から「ある程度の破壊を許容する設計」へと、大きく舵を切ることとなった。それに関連してレベル1地震動、レベル2地震動という概念も導入された。ダム分野では2005（平成17）年に「大規模地震に対する耐震性能照査指針（案）（国土交通省河川局）」が策定され、以後は基本的にはこの指針に沿った考え方で耐震性能照査が実施されている。

本地震の特徴のひとつとして、鉛直地震動の大きさがある。鉛直地震動のダム安定性への影響について様々な検討が行われた結果、基本的には水平地震動のみを考慮した照査で大きな問題はないという見解に至っている。また、震央からの距離ではなく断層からの距離による評価の重要性が認識されたことも特筆すべき事項といえる。さらに、農林水産省のダムでは、常盤ダム（アースダム、1974（昭和49）年竣工、堤高33.5m、兵庫県）の右岸側アバットメントで発生した上下流方向の亀裂が話題となった。

2008（平成20）年岩手・宮城内陸地震（M7.2）では大規模な山崩れが発生し、直下型地震の破壊力をまざまざと見せつけられた。震央から16kmの距離にあった荒砥沢ダム（ロックフィルダム、1998（平成10）年竣工、堤高74.4m、宮城県）では基礎地盤で $10.238\text{m/s}^2$ 、堤頂部で $5.25\text{m/s}^2$ の最大加速度が観測された。前者は地震計の計測範囲を超過していたために実際よりも小さい値であった可能性があるが、現在まで

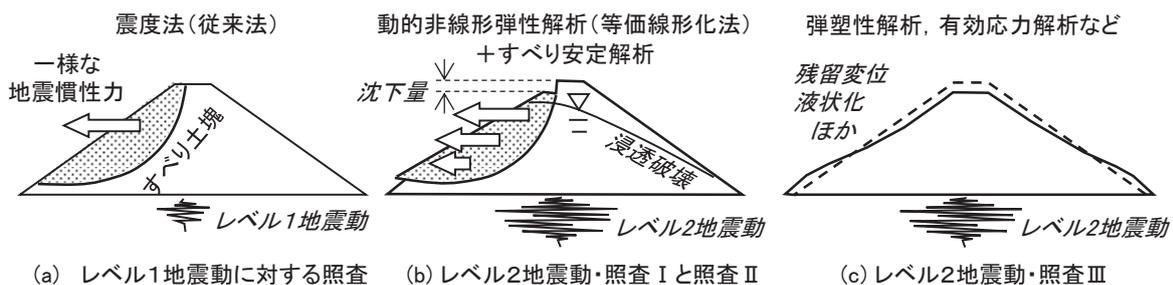


図-1 フィルダムの耐震性能照査手法の概要

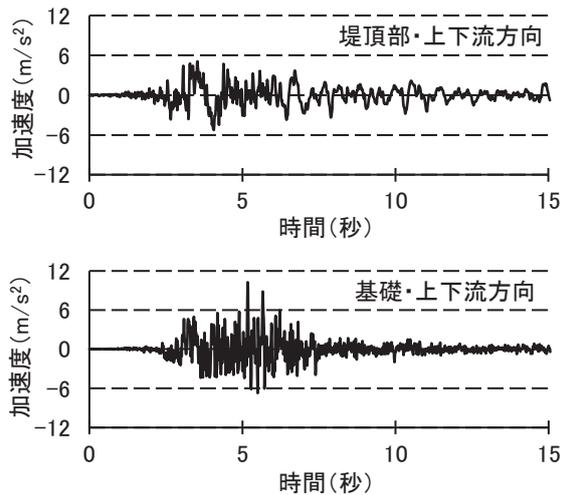


図-2 荒砥沢ダムにおける平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震の観測波形<sup>4)</sup>

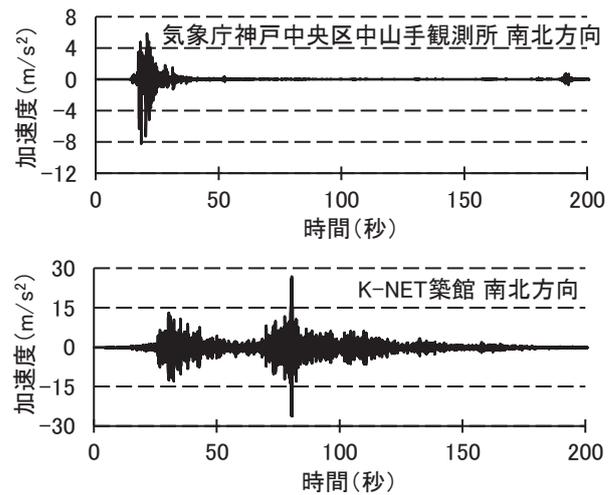


図-3 兵庫県南部地震(上図)と東北地方太平洋沖地震(下図)の観測波形例<sup>5)</sup>

に国内のフィルダム基礎で観測された最大値となっており、入力地震動の巨大さとともに、堤体内における減衰現象(図-2)が注目された。

2011(平成23)年東北地方太平洋沖地震(M9.0)は、長時間に渡って大きな揺れが続いたことが最大の特徴であり、それは兵庫県南部地震と比較すると一目瞭然である(図-3)。この地震により藤沼ため池の堤体(アースダム、1949(昭和24)年竣工、堤高18.5m、福島県)が決壊し、人命の喪失を含めて下流域に大きな被害を与える結果となった。この被害調査<sup>6)</sup>の過程で、地震動に伴う間隙水圧上昇によって液状化に至らなくても材料の強度が低下する現象が関心を集めた。

現在のダムの耐震性能照査では、大雨と大地震の同時発生や大地震の連続発生は原則的に検討対象としていない。これらの発生確率の低さと要求性能を満足する構造物の築造コストの膨大さを考慮すると妥当な判断といえる。ところが、2016(平成28)年熊本県熊本地方の地震(M7.3)では後者が現実のものとなった。その対策としては、特別な場合を除いてハード対策ではなくソフト対策に重点を置いて検討するのが現実的であろう。ただし、このような事態を想定した研究は積極的に実施されるべきであり、その成果を反映して対策を構築するのが理

想的である。

2018(平成30)年北海道胆振東部地震(M6.7)では、地山斜面の崩落によって厚真ダム(ロックフィルダム、1970(昭和45)年竣工、堤高38.2m、北海道)の洪水吐の一部が埋まり放流機能が喪失した。また、周辺地域全体に多数の斜面崩落が生じて交通網が寸断され、ダムに辿り着くことができなくなった。そのため、自衛隊がヘリコプターで現場に急行して手作業で洪水吐内の土砂を排除して事なきを得た。農業用ダム安全性評価事業はまず最重要の堤体を対象にして始められたが、事業を進める中で放流施設の機能確保や地震発生後のアクセス経路の確保の重要性が議題にのぼることがあった。残念ながら、検討に着手する前に実際に被害が発生してしまったわけだが、これが契機になることを期待したい。

#### 4. 現在の耐震性能照査手法の留意点

前章の兵庫県南部地震の段落で触れたように、現在の耐震性能照査では入力地震動をレベル1地震動とレベル2地震動に分け、前者は従来と同じ評価手法で評価している。後者は、液状化発生の可能性の確認と、すべり土塊に作用する地震慣性力を動的非線形弾性解析(等価線形化法)により算出してすべり破壊が生じるか

どうかの確認を行う照査Ⅰ、すべりが発生した場合に沈下量の算出や浸透破壊発生の確認を行う照査Ⅱ、これらの条件をクリアできなかった場合などに弾塑性解析や有効応力解析等により詳細な検討を行う照査Ⅲ、の三段階の構成になっている(図-1(b)、(c))。等価線形化法は、せん断ひずみを指標にして剛性低下や減衰増加を考慮してはいるが、地震の継続期間中は剛性や減衰率を一定値に設定しており、あくまで線形解析である。従って、残留変位(塑性変形)の評価は不可能であるし、間隙水圧上昇による強度低下のように、地震中に大きな物性の変化が生じる場合は挙動の再現性が著しく低下することに留意が必要である。

前章で述べた課題への現行の耐震性能照査手法の対応関係を表-1に示す。あくまで私見かつ概観であることをご容赦いただきたいが、適切な対策を講じるためには、評価の対象範囲や限界を把握しておくことが重要である。また、構成式やモール・クーロンの破壊基準のフィッティング状況(図-4)が少なからず再現挙動に影響すること、特に照査Ⅲでは解析コード(例

例えば、LIQCA、FLIP、MuDIANなど)によってシミュレーション結果に無視できない幅が生じることに留意が必要である。

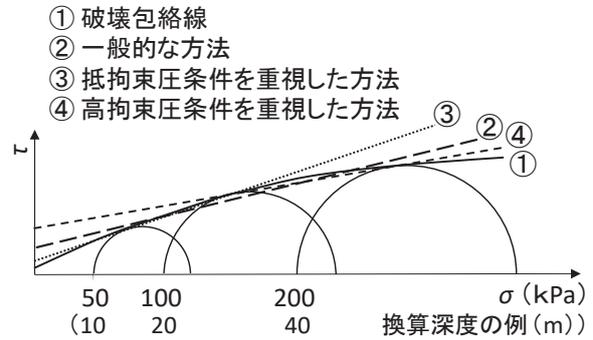


図-4 モール・クーロンの破壊基準の決定方法

### 5. 対策工法

フィルダムの対策工法では、点検や取り換えが比較的容易な表層と表層付近以外の箇所では、長期耐久性に不安が残る材料や剛性が著しく異なる材料はなるべく使用しないのが基本的な方針といえる。現在のフィルダムの耐震性能照査はすべり破壊を念頭に置いているので、対策の方向性は大きく分けて振動の抑制とすべり抵抗力の増加の二つに分類できる。一般的な工

表-1 顕在化した課題への現行の耐震性能照査手法の対応

発生年	地震名	特記事項、 顕在化した問題	等価線形化法 +すべり解析での評価
1923 (大正12)年	関東大震災	(震度法による設計へ)	○
1964 (昭和39)年	新潟地震	液状化	×
1995 (平成7)年	平成7年(1995年) 兵庫県南部地震	(性能設計、レベル2 地震動の導入へ)	○
		鉛直地震動	×
		断層からの距離	○ (J-SHIS 波形データ等)
		上下流方向の亀裂	×
2008 (平成20)年	平成20年(2008年) 岩手・宮城内陸地 震	堤体内での地震波の 減衰	○ (限界あり)
2011 (平成23)年	平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖 地震	間隙水圧上昇による 堤体材料の強度低下	△ (すべり解析で考慮) ○ (長時間振動時の間隙水 圧上昇については上記)
		長時間振動	○ (長時間振動時の間隙水 圧上昇については上記)
2016 (平成28)年	平成28年(2016年) 熊本地震	短期間で複数回の 強震動	×
2018 (平成30)年	平成30年北海道 胆振東部地震	放流施設の機能の 確保	— (取水塔や洪水吐ゲート については別途に実施)
		アクセス手段の確保	—

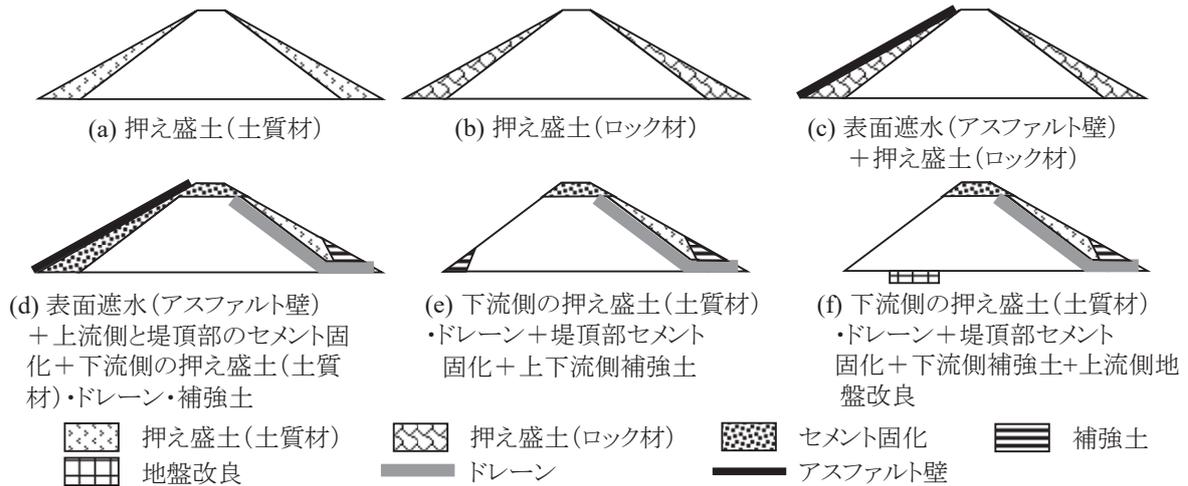


図-5 村山下貯水池の耐震補強工事で検討された標準断面の概念図

法として、前者は押え盛土、後者は押え盛土およびドレーンや表面遮水（刃金土を含む）等による堤体内水位の低下が挙げられる。図-5は村山下貯水池（アースダム、1927（昭和2）年竣工、堤高32.6m、東京都）の耐震補強工事において検討された標準断面<sup>7)</sup>の概念図である。同貯水池では下流側の用地の制約のため、固化、ジオテキスタイル補強土、地盤改良が検討されている。この例のように、基本方針を踏まえたうえで、最終的には個別の条件に応じた工法を採用することになる。

## 6. おわりに

所掌する業務の関係で、最近はため池の業務に従事する機会も頂戴している。フィルダムの安全性評価手法とため池のそれとは、根本的には同様といえるが、個別の事項では異なる場合があり、戸惑うことが少なくない。両者が現在に至るには、規模、個数、設計・施工方法の違い等を含めた歴史的背景があり、それぞれに合理性を有している。一方で、両者の整合性を検討して整理することは重要であり、今後の課題

としたい。

## 引用文献

- 1) 震災予防調査会、1916：震災予防調査会報告 83（甲）、1-15
- 2) 物部長穂、1925：貯水用重力堰堤の特性並びに其の合理的設計方法、土木学会誌、11（5）、995-1157
- 3) 物部長穂、1934：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、1-32
- 4) JAPAN COMMISSION ON LARGE DAMS, 2014: Acceleration records on dams and foundations No. 3
- 5) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019：NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004
- 6) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会、2012：藤沼ダム決壊原因調査報告書（要旨）
- 7) 東京都水道局、2012：村山下貯水池堤体強化事業誌



◆<sup>たがしら ひでかず</sup>田頭 秀和氏 略歴

<経歴>

1992（平成4）年 京都大学大学院（農学研究科修士課程）卒業

1992（平成4）年 農林水産省農村工学研究所 入省

2003（平成15）年度～2006（平成18）年度

独立行政法人北海道開発土木研究所および独立行政法人土木研究所寒地土木研究所

2007（平成19）年度～現在

（国研）農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究部門にて勤務

<業績（研究内容）>

- ・北海道での在任中は埋設管やコンクリート補修等の研究に取り組んだが、一貫してフィルダムの安全性や維持管理に関する研究に従事
- ・2012（平成24）年から農業用ダム安全性評価委員会やダム技術検討委員会などの委員を歴任

