

第1章 研究の背景と目的, 概要

1.1 研究の背景

ダムは土木工学の粋を集めて建設される構造物のひとつであり、我が国の国民生活を支える重要な基盤施設である。また、21世紀は水の世紀(1995, イスマル・セラゲルディン(当時, 世界銀行環境担当副総裁))とも言われ、世界的な人口の増加とこれに伴う生活用水の確保ならびに食糧生産, 地球規模の急激な気候変動などへの対応策として、これからのダムが担う役割は大きい。

ダムにはいくつかの形式があるが、これらのうち岩石・砂礫・土質材料などを盛り立てて建設するダムの総称をフィルダムという。我が国では古くから農業用水と生活用水の供給, 水力発電, 洪水調節などに使われてきた¹⁻¹⁾。2013年の統計¹⁻²⁾によると、我が国の既設ダムの総数 2,642 基(建設中を除く)のうち、フィルダムは 1,542 基で全ダムの約 60%を占めている。我が国最古のフィルダムとされ、万葉集にも登場する狭山池(616年頃, 大阪府)は我が国最古の土木構造物のひとつである。このような灌漑用ため池の堤体としてのフィルダムは、人力を主として建設された均一型のアースダムであり、江戸時代末期まで各地で建設された。アースダムは我が国の既設ダムの約 50%(1,244 基)を占めており、このうち約 60%(734 基)が第二次世界大戦以前に建設されている。第二次世界大戦以降、建設機械の目覚ましい発展とともにロックフィルダムの建設が本格化し、1960年以降、我が国の経済成長に伴うスケールメリットの追求からダムの堤高と堤体積は大型化した。現在では、堤高 150m, 堤体積 1,000 万 m³を超える大型のロックフィルダムが建設されている¹⁻³⁾。

また、大量の貯水を使命とするフィルダムは最重要構造物のひとつであり、要求される品質レベルも高いものとなる。このため、フィルダムの設計, 施工, 維持管理は細心の注意を払ってなされている。フィルダム建設工事に行う施工・品質管理は、基礎岩盤または地盤の管理, 工法管理, 出来形管理, 品質管理など多岐に亘っており、これらは何一つ欠けることがあってはならない。

本研究では、フィルダム建設工事における施工・品質管理技術に着目し、下記の4つの視点から課題を抽出した。その結果、新たなニーズである①リニューアル工事への対応(耐震性向上などのフィルダムリニューアル工事における施工管理技術)および②今後の品質管理の方向性(施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理技術)を研究対象とした。

なお、本研究では、政令「河川管理施設等構造令」の規制を受ける堤高 15m 以上のダムを対象とした。

(1) 我が国フィルダムの耐震性と耐震補強の必要性

我が国のフィルダムは、兵庫県南部地震(1995年)ならびにそれ以前の著名な地震

(新潟地震など)では、大規模な被災には至らなかった¹⁻⁴⁾。しかし、東北地方太平洋沖地震(2011年)での藤沼ダム¹⁻⁵⁾(福島県, 1949年, E, 堤高 18.5m)堤体の決壊は、第二次世界大戦以降、供用中だった堤高 15m 以上のダムが決壊した初の事例である。第二次世界大戦以前に建設されたダム(895 基, フィルダム 734 基, コンクリートダム 161 基)は我が国の既設ダムの 34%程度を占めており、これらは基準が未整備だったために耐震設計が実施されていないと考えられる。このような既設ダムの耐震性照査は急務であり、この結果に基づいた耐震補強を推進する必要があると考える。

(2) フィルダムリニューアルの技術的課題

フィルダムの安全性と機能の維持, 向上のためには、耐震補強や嵩上げなどのリニューアル(再開発)が必要である。一方、フィルダムリニューアルでは、ほとんどの場合既設堤体が存在し、かつこれを有効利用することが求められる¹⁻⁶⁾。つまり、フィルダムリニューアルでは、新設部分だけでなく、既設堤体を考慮することが必要である。特に、既設堤体の強度, 変形に関する物性値の効率的な調査技術や、施工中の既設堤体安定性確保技術など、従来のダム新設工事にはないリニューアル特有の新しい技術的課題がある。

なお、ダムリニューアルとは既設ダムの機能の保全, 拡充のための事業全般を指しており、再開発とも称される。

(3) フィルダムの施工・品質管理の現状と課題

フィルダム建設工事中に実施する品質管理試験は、試験結果が即時的に得られるものはほとんどなく、試験結果に応じた対策を講じることができるのは試験実施 1 日後以降となる。このことを鑑みると、フィルダム施工中の品質管理は実質的には“品質確認”に位置付けられる。また、現在のフィルダム品質管理基準は、類似ダムなどの事例が流用されたと考えられるものが多く¹⁻⁷⁾、品質管理項目や試験頻度が合理的であるか疑問が残る。

一方、近年ではフィルダム建設工事における工法管理(施工プロセス管理)に ICT (*Information and Communication Technology*)が導入され、大きな効果を発揮している¹⁻⁸⁾。フィルダムをはじめとする土木構造物の品質は材料管理と工法管理を両輪として確保されるが、ICT によって飛躍的に発展しつつある工法管理に対して、材料管理は従前からの定時または定量毎に行う抜取試験に依っている。ICT によって施工上のミスを防止あるいは発見できる現状を踏まえれば、より高度かつ合理的な施工・品質管理について議論が必要であると考ええる。

(4) 台形 CSG ダムにおける施工・品質管理の新しい考え方

台形 CSG (*Cemented Sand and Gravel*)ダムは、我が国発の新しいダム形式として、

近年実績を挙げつつある。台形 CSG ダムは、現在のところ河川管理施設等構造令第73号(適用除外)の「特殊な構造の河川管理施設」として取り扱われている¹⁻⁹⁾。このように台形 CSG ダムはフィルダムとは明確に区別されているが、設計ならびに材料、施工、品質管理などについて、新しい考え方と先駆的な取り組みが提案、実践されている。このため、台形 CSG ダムならびに CSG 工法も本研究の対象とした。

CSG 工法の品質管理¹⁻¹⁰⁾は、「通常の品質管理」と「施工初期に行う確認作業」から成っている。「通常の品質管理」での管理項目や試験頻度などは、「施工初期に行う確認作業」を通じて実際に得られたデータを分析して合理的に設定している。また、品質管理に「品質変動傾向監視」という考え方を導入している。これらの考え方は、従来のフィルダムの品質管理にはなかった新しい考え方である。

1.2 研究の目的

本研究では、フィルダム建設工事における施工・品質管理技術の新しいニーズである下記2項目に関する研究、開発、実施工現場への導入と検証を行い、今後の施工・品質管理技術の高度化に資することを目的とした。

研究フロー図を図-1.1 に、本論文の構成を図-1.2 に示す

(1) フィルダムリニューアル工事における既設堤体安定性管理手法(第5章)

将来の巨大地震などが懸念されている現在において、強靱な社会資本の実現に向けて耐震補強などのフィルダムリニューアル工事が増加すると予想される。一方、フィルダムリニューアル工事においては新設部分だけでなく、既設堤体を考慮することが必要となる。特に、施工中の既設堤体安定性確保技術はフィルダム新設工事にはないリニューアル工事特有の新しい技術的課題である。

著者は、自身が携わった山王海ダム嵩上げ工事(2章(1)参照)で施工中の既設堤体の機能維持という技術的課題に直面した。そして、この経験を基に自身が従事した山口貯水池堤体強化工事(2章(2)参照)において「**既設堤体の安定性に着目した情報化施工管理**」を提案、実践し、この有効性を確認した。

(2) 施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法の提案(第8章)

フィルダムをはじめとする土木構造物建設工事の施工・品質管理において、材料管理と工法管理(施工プロセス管理)が品質確保の両輪である。ICTによって施工上のミスを防止あるいは発見できる現状において、リアルタイムな材料管理が実現できれば、品質変動に応じて試験項目や頻度を切り替えるより高度かつ合理的な品質管理が可能になると考える。

著者は、自身の施工経験などを通じて、フィルダムなどの土構造物の材料特性のうち、最も基本的であり、試験に時間と労力を要する粒度に着目し、粒度変動の監視が可能である「デジタルカメラ画像を用いた土質材料の粒度変動監視システム」(画像粒度モニタリング[®])を開発し、これを当別ダム(2章(7)参照)や殿ダム(2章(6)参照)へ導入して品質管理試験の合理化を図った。そして、フィルダム施工・品質管理方法の高度化技術として「**施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法**」を提案した。

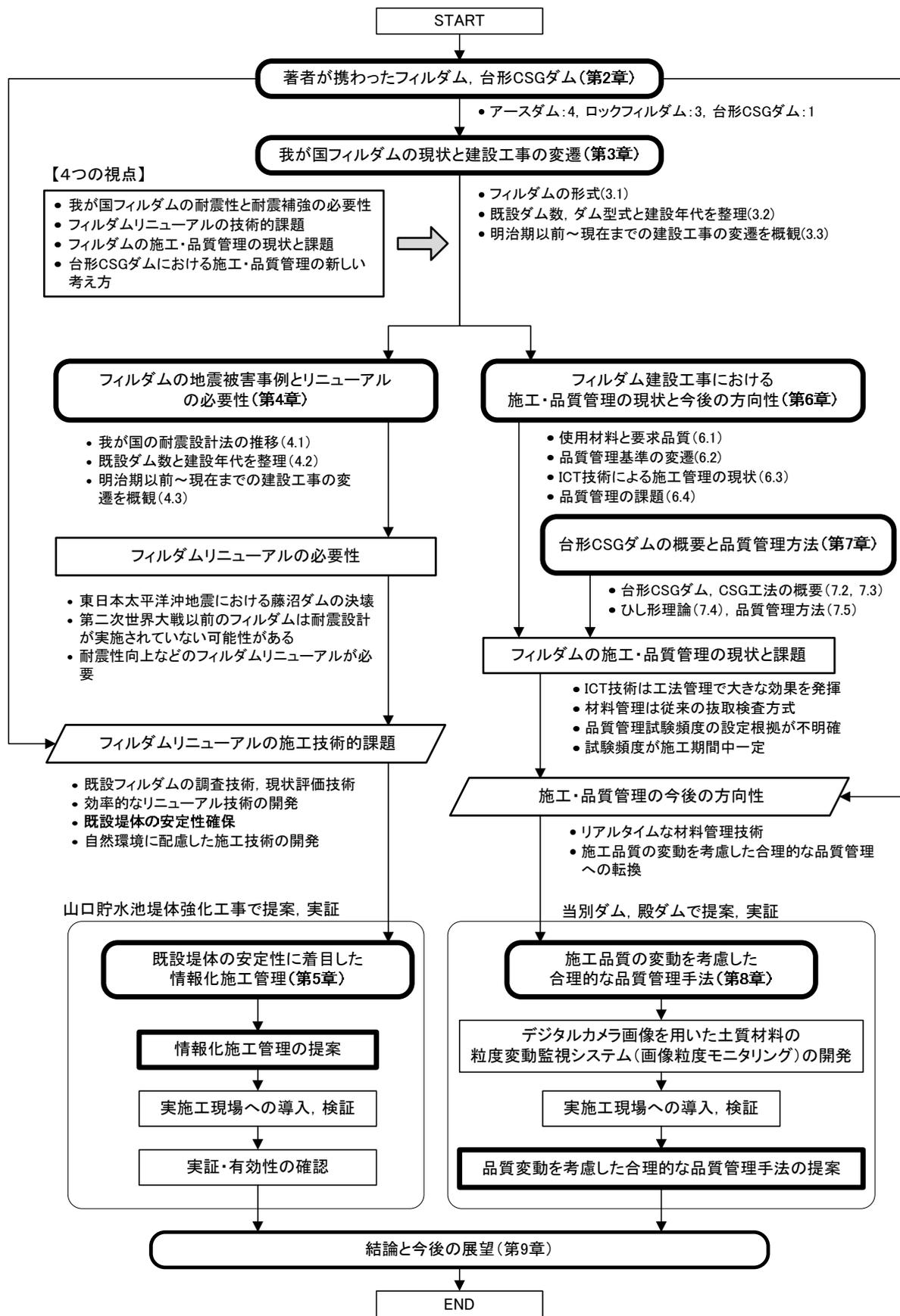


図-1.1 研究フロー

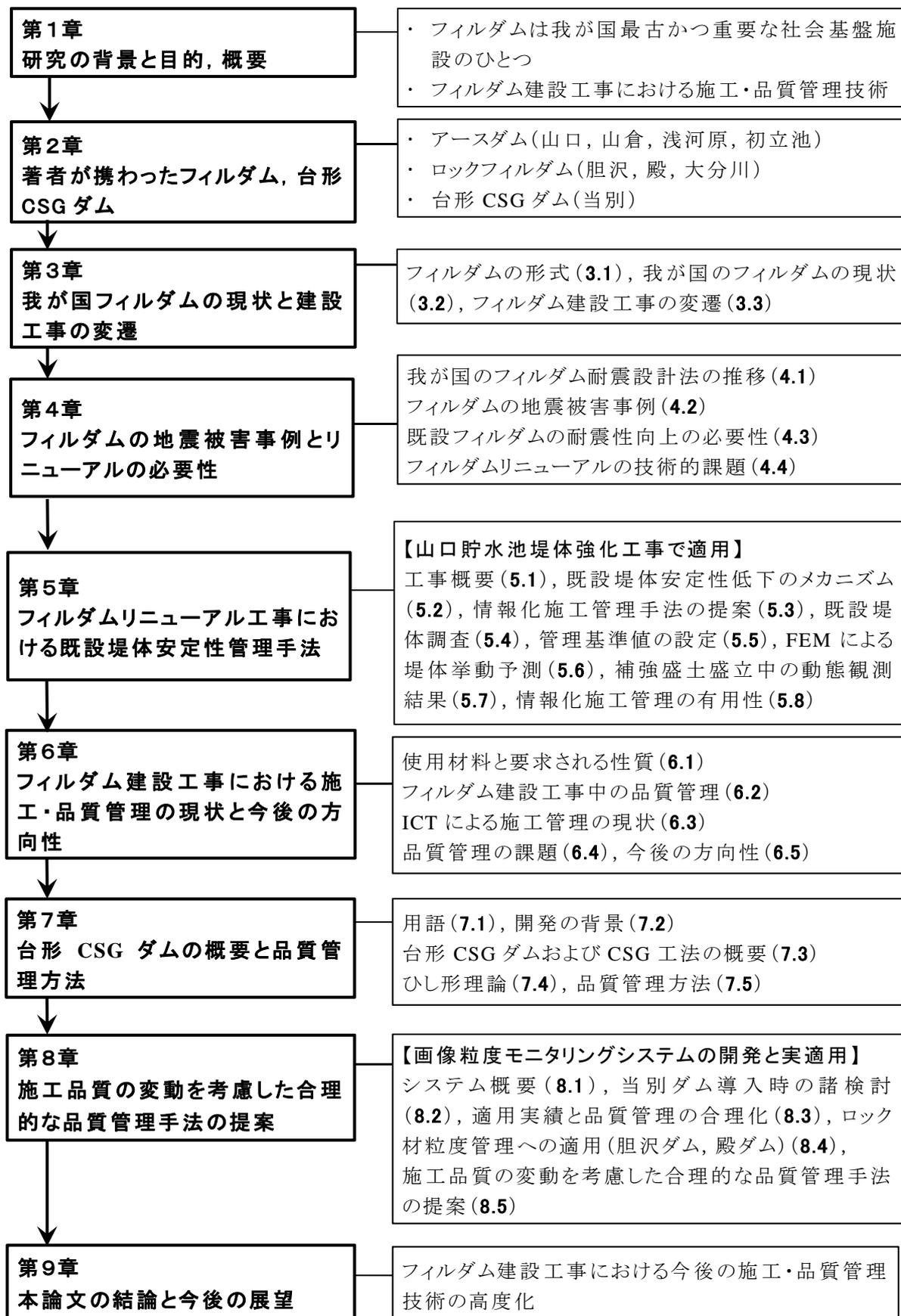


図-1.2 本論文の構成

1.3 研究の概要

本研究は、フィルダム建設工事における施工・品質管理技術の新たなニーズである下記の2項目に関する研究、開発、実施工現場への導入と検証を行い、今後の施工・品質管理技術の高度化に資することを目的とした。

① リニューアル工事への対応：

耐震性向上などのフィルダムリニューアル工事における施工管理技術

② 今後の品質管理の方向性：

施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理技術

本研究の概要と成果を以下にまとめる。

1.3.1 著者が携わったフィルダム、台形CSGダム(第2章)

第2章では、著者がこれまでに携わったフィルダムおよび台形CSG(*Cemented Sand and Gravel*)ダム建設工事の概要、諸元および業務内容などを取りまとめた。

1.3.2 我が国フィルダムの現状と建設工事の変遷(第3章)

第3章では、2013年度の統計に基づいて我が国フィルダムを現状を整理し、我が国の全既設ダム2,642基のうち第二次世界大戦以前に建設されたフィルダムが約30%(734基)を占めることなどを明らかにした。また、我が国最古の社会基盤施設のひとつであるフィルダムの建設工事の変遷を概観し、最近のロックフィルダムである胆沢ダム(2012年、岩手県)や殿ダム(2011年、鳥取県)などでは、ICT(*Information and Communication Technology*)の活用による施工管理技術の高度化が図られていることを示した。

- ・ 2013年の統計によると、我が国の既設ダムの総数は2,642基(建設中を除く)であり、そのうちフィルダムは1,542基で全既設ダムの約60%を占めている。また、我が国のダムの約50%はアースダム(1,244基)であり、アースダムのうち約60%(734基)が第二次世界大戦以前に建設されている。
- ・ 我が国最古のフィルダムである狭山池(616年頃、大阪府)の堤体には地震による墳砂やすべりの痕跡も確認されており、1,400年の間に6回の大改修をしている。明治期以降になると欧米の技術を取り入れたアースダムが上水道(村山、山口など)、発電(女子畑、大野など)を目的に建設されている。
- ・ 第二次世界大戦後、我が国におけるダム建設は本格化し、フィルダムでは山王海ダム(1953年、岩手県、2001年に嵩上げ工事が竣工)や石淵ダム(1953年、岩手県)が建設された。

- ・ 我が国の土質コア型ロックフィルダムは、御母衣ダム(1961年, 岐阜県), 牧尾ダム(1961年, 長野県)で現在の技術の礎を築いた。1970年代になると、堤高が150m, 堤体積が1,000万 m^3 を超える高瀬ダム(1979年, 長野県), 手取川ダム(1979年, 石川県)などの大型ロックフィルダムが建設されている。ロックフィルダムの堤体積は、奈良俣ダム(1990年, 群馬県)の1,310万 m^3 でほぼ頂点に達している。
- ・ 最近の胆沢ダム(2012年, 岩手県)や殿ダム(2011年, 鳥取県)では、GPSを使った測量システムやICTを活用し、施工管理の高度化と省力化が図られている。

1.3.3 我が国フィルダムの地震被害事例とリニューアルの必要性(第4章)

第4章では、フィルダム耐震設計法の変遷を整理し、建設年代と比較することでフィルダム耐震性について考察した。その結果、①第二次世界大戦以前に建設されたダム895基(フィルダム734基, コンクリートダム161基)は耐震設計が実施されていない可能性があること、②既設ダムの耐震性照査とこの結果に基づいたリニューアル(耐震補強)の推進が必要であることを示した。また、著者の施工経験を踏まえて、リニューアルに関する調査～設計～施工における技術的課題を抽出し、事例に基づいて「既設堤体の安定性に着目した施工管理技術」がリニューアル工事の施工管理技術として必要であることを示した。

- ・ 現在のダムの耐震設計法は、河川管理施設等構造令に定められている「震度法」が用いられている。
- ・ 我が国のフィルダムの耐震設計法は、1956年(昭和31年)の土地改良基準の改訂, ならびに1957年(昭和32年)のダム設計基準の刊行で基準化されている。このことから、第二次世界大戦以前に建設されたダム895基(全既設ダム数の約34%, アースダムが多い)は、基準が未整備だったため地震時の安定計算が実施されていない可能性が高いといえる。
- ・ 我が国の近代的な設計・施工によるフィルダムは1995年の兵庫県南部地震やそれ以前の著名な地震では、大規模な被害は生じていない。
- ・ 新潟中越地震(2004年)では浅河原調整池などが、宮城・岩手内陸地震(2008年)では石淵ダムや荒砥沢ダム, 建設中であった胆沢ダムなどが被災したが、人的ならびに物的な被害には至らなかった。
- ・ 東北地方太平洋沖地震(2011年)では供用中であった藤沼ダム(福島県, 1949年, E, 堤高18.5m)堤体が決壊し、甚大な被害をもたらした。第二次世界大戦以降、供用中だった堤高15m以上のダムが大規模に決壊した初の事例である。なお、藤沼ダムは1949年完成であり、我が国のフィルダム耐震設計法の基準化以前に設計, 施工されたアースダムに該当する。

- ・ 世界有数の地震国であり、かつその他の自然災害も頻発する我が国において、供用中のダム決壊による人的、物的被害は甚大であるため、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」(2005年、国土交通省河川局)に準拠した既設ダムの耐震性照査は急務であり、これに基づいた耐震補強を推進する必要がある。
- ・ フィルダムの安全性と機能の維持、向上のためには、耐震補強や嵩上げなどのリニューアル(再開発)が必要である。
- ・ フィルダムリニューアルは既設堤体が存在する場合がほとんどであり、かつこれを有効利用することが求められる。つまり、フィルダムリニューアルでは新設部分だけでなく、既設堤体を考慮することが必要である。特に、既設堤体の強度、変形に関する物性値の効率的な調査技術や、施工中の既設堤体安定性確保技術などはリニューアル特有の技術的課題である。
- ・ フィルダムリニューアル工事における施工管理技術として、「既設堤体の安定性に着目した施工管理技術」が必要である。

1.3.4 フィルダムリニューアル工事における既設堤体安定性管理手法(第5章)

第5章では、既設アースダムの耐震補強工事である山口貯水池堤体強化工事(東京都/埼玉県, 1934年)において実施した既設堤体の安定性に着目した情報化施工管理手法とこの有効性について論じた。当工事では、耐震補強を目的に既設堤体上下流側に補強盛土を施工するが、これによって既設堤体内に過剰間隙水圧が発生し、堤体安定性が一時的に低下する恐れがあった。このため、施工中の動態観測データとこれを反映させたFEM解析に基づいて、既設堤体の安定性を定量的に評価しながら施工を進める情報化施工管理を提案し、約3年間に亘って実適用した。その結果、既設堤体の安定性を損なうことなく補強盛土盛立を完了することができ、著者が提案した手法が既設堤体の安定性確保というリニューアル工事特有の施工技術的課題に対して有効であることを示した。

- ・ 山口貯水池堤体強化工事では、補強盛土盛立によって長期的な堤体の安定性は向上するものの、既設堤体内に過剰間隙水圧が発生すると、施工中の堤体安定性が一時的に低下する恐れがあった。
- ・ 既設堤体の安定性に関する施工管理として「**情報化施工管理**」を提案した。情報化施工管理とは、施工中の既設堤体ならびに補強盛土の動態観測結果に基づいて、安定性を定量的に評価、予測しながら施工を行うものである。
- ・ 事前検討として①RIコーンによる既設堤体の追加調査、②円弧すべり検討による間隙水圧の管理基準値の設定、③FEM解析による既設堤体ならびに補強盛土の挙動予測を行った。その結果、当初の施工計画に沿った施工を実施しても既設

堤体と補強盛土の安定性は確保できるとの結果を得たため、補強盛土盛立を開始した。

- ・ 補強盛土盛立中に動態観測結果を反映させた堤体安定性の再評価を3回実施したが、既設堤体および補強盛土の安定性が極端に低下するような結果は得られず、補強盛土盛立を中断することなく完了することができた。
- ・ 間隙水圧観測結果から求めた間隙水圧発生率 K は FEM 解析で事前に予測した値を下回る結果が得られた。これは FEM 解析において安全側を考慮して既設堤体内水位を既設堤体表面に設定したためである。一方、過剰に安全側の判断をした可能性もあり、今後の同種工事においては既設堤体内水位を詳細に調査することが重要であり、FEM 解析の予測精度向上に繋がるものと考えられる。
- ・ 施工中の既設堤体の安定性確保というフィルダムリニューアル工事の技術的課題に対する施工管理上の対策として、施工中に得られる動態観測結果に基づいて、既設堤体および補強盛土の安定性を定量的に評価、確認しながら施工を進める情報化施工管理は、有効な施工管理手法である。
- ・ 耐震補強などのフィルダムリニューアルの目的や方法は多岐に亘るものと考えられ、施工中の出水対策も含めて個別ダムの特성에応じた設計、施工技術が必要であると考えられる。一方、リニューアルの目的や方法に関わらず、可能な限り既設堤体を活用することが求められることから、設計や施工において既設堤体への配慮が必要であるとの考え方は共通した技術的認識であるべきである。

1.3.5 フィルダム建設工事における施工・品質管理の現状と今後の方向性(第6章)

第6章では、フィルダム建設工事に行う品質管理の現状を分析し、ICT 施工管理が工法管理として大きな効果を挙げている現状を踏まえて、今後の品質管理の方向性について考察した。その結果、ICT 施工管理などのリアルタイム管理技術を導入し、①品質が安定している場合は管理頻度を粗くする、②品質に変動が見られる場合は管理頻度を細かくするという「施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理」が今後の方向性であることを示した。しかし、現状の材料管理は従前の抜取検査方式に依っており、上記品質管理への転換を図るためにはリアルタイムな材料管理技術が必要であることを示した。

- ・ フィルダム建設工事中の試験による品質管理は第二次世界大戦以前のフィルダム建設工事で実践されていた。近代的フィルダムにおいては、盛立前の材料の確認、盛立後の性質の確認を基本としている。
- ・ フィルダム建設工事で実施する品質管理試験は、試験結果が即時的に得られるものはほとんどなく、実質的には“品質確認”に位置付けられる。

- 近年ではICTを用いた施工管理が、胆沢ダム(2章(5)参照)や殿ダム(2章(6)参照)などに導入されており、施工プロセスを管理する工法管理において大きな効果を発揮している。しかし、材料管理ではリアルタイムかつ全数の管理を行う技術は確立されておらず、従来と同様な抜取検査方式で確認している。
- (一社)ダム工学会施工研究部会は今後の品質管理の在り方として、①品質管理の目的の明確化、②品質管理方法の継続的見直し、③新技術の活用を提言している。
- 品質管理試験頻度などが他のダムの事例を流用している事例が多いとすると、現状の試験頻度は統計的に設定されていないこととなる。ダムを工業製品と捉えれば確率論に基づいて品質管理項目および頻度を設定するべきと考えるが、このような取り組みは現状なされていない。
- CSGの品質管理において、品質管理項目や試験頻度を画一的に設定せずに「施工初期に行う確認作業」を通じて実際に得られたデータに基づいて合理的に品質管理システムを構築すること、および品質管理における「変動傾向監視」という考え方を導入していることなどを踏まえれば、現在のフィルダムの品質管理試験頻度に時間的な規定がないことは合理的とはいえない。
- ICTによって施工上のミスを防止あるいは発見できる現状において、リアルタイムな材料管理技術が実現できれば、材料の品質変動傾向を監視して、品質変動に応じて試験項目や頻度を切り替える品質管理が可能になる。
- フィルダム施工・品質管理の今後の方向性は、材料管理ならびに工法管理にリアルタイムな管理技術を導入し、施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理への転換であると考えられる。

1.3.6 台形 CSG ダムの概要と品質管理方法(第7章)

第7章では、我が国発の新しいダム形式として実績を挙げつつある台形CSGダムで実践されている品質管理方法について整理した。その結果、CSGの品質管理は、①「通常の品質管理」と実際に得られたデータに基づいて品質管理項目や試験頻度を合理的に設定することを目的とした「施工初期に行う確認作業」から成っている、②「品質変動傾向監視」という考え方を導入しているなど、先駆的な取り組みが実践されていることを示した。

- 台形CSG(*Cemented Sand and Gravel*)ダムは、我が国発の新しいダム形式として、コスト削減と環境保全に配慮して、従来のダムよりも材料の合理化を図ったものであり、あわせて設計の合理化、施工の合理化にも資するものとされている。
- CSGとは、ダム建設現場周辺で得られる材料にオーバーサイズの除去や破砕など

のみを行い、これにセメント、水を添加し、簡易な設備を用いて混合して製造するものである。CSG 工法とは、CSG をブルドーザで敷き均し、振動ローラで転圧することによって構造物を造成する工法である。

- CSG 工法は高速大量連続施工を前提としており、連続的に材料を供給して CSG を製造することを基本としている。
- CSG 材の粒度、CSG の単位水量ならびに強度の変動を許容し、“ひし形理論”に基づいて管理することが CSG 工法の特長である。
- CSG の品質管理は、「通常の品質管理」と「施工初期に行う確認作業」から成っている。
- 「通常の品質管理」とは、施工初期から完了まで一貫して行う品質管理であり、①母材の品質管理、②CSG 材の品質管理、③CSG の品質管理の3項目の管理と、④品質管理システムの確認から成る。
- CSG の品質管理では、品質管理項目や試験頻度を画一的に設定せずに、「施工初期に行う確認作業」を通じて実際に得られたデータに基づいて合理的に品質管理システムを構築している。さらに、「変動傾向監視」という考え方を導入している。これらはフィルダムの品質管理にはない新しい考え方である。
- CSG の品質管理では、ICT などの最新の技術を品質管理手法に採用に努めることを推奨している。これは、「高速大量連続施工」を基本とする CSG 工法には従来よりも迅速かつ連続的な品質管理方法が必要であることを示唆している。

1.3.7 施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法の提案(第8章)

第8章では、フィルダムなどの土構造物の材料特性のうち最も基本的な粒度に着目して開発した「デジタルカメラ画像を用いた土質材料の粒度変動監視システム」(画像粒度モニタリング)と、これを用いた「施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法」を提案した。本システムを当別ダム(台形 CSG ダム)や殿ダム(ロックフィルダム)に導入した結果、①従前の抜取検査方式による粒度試験に比べて迅速かつ簡便に粒径加積曲線が推定可能、②粒度の変動傾向が把握可能であり、材料管理手法として十分に適用できることが分かった。そして、本システムをフィルダムや台形 CSG ダムの材料品質変動監視技術として導入することによって、上記品質管理手法が実現できることを示した。

- 著者は、近年飛躍的な発展を遂げている画像解析技術に着目し、デジタルカメラで撮影した土質材料の画像を解析して、粒度分布の変動傾向を迅速に監視するシステム(画像粒度モニタリング®)を開発し、実用化した。本システムはフィルダム施工・品質管理の高度化に資することができる。

- 本システムを CSG 材の粒度変動傾向監視手法として当別ダム CSG 施工当日の品質管理に本格的に導入し, RI 法含水率モニタリングシステムと併せて CSG 材の品質変動監視を行った。そして, 品質変動監視を併用した新しい CSG 材品質管理フローを構築し, これに基づいて品質管理を行った結果, 品質管理試験の回数を変動監視技術導入前に比べて約 40% 低減することができた。
- 本システムをロックフィルダム堤体で最大の体積を占め, 近年ダム堤体の地震時安全性の観点から粒度分布と締固めが重要とされているロック材の粒度変動傾向監視手法として, 殿ダム品質管理に試行的に導入した。その結果, 本システムが品質管理手法として十分に適用できることを確認した。
- 本システムは本論文での事例(当別ダム CSG 材, 殿ダムロック材)以降も, CSG 材の製造管理, セメント改良土母材の粒度管理, フィルタ材の粒度管理など, 実績を重ねつつある。本システムの導入によって対象材料の粒度変動を監視できるため, 粒度変動の有無に応じて粒度試験を実施できる。
- 本システムをフィルダムや台形 CSG ダムの材料管理にリアルタイム品質変動監視技術として導入することによって, フィルダム施工・品質管理方法のさらなる高度化技術である「施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理手法」が実現できる。
- ICT 技術による工法管理や本システムなどを導入して, 施工品質の変動を考慮した合理的な品質管理を実現するためには, 新技術の導入とその効果が仕様書などで規定される品質管理基準に反映されることが必要である。

1.3.8 本研究の結論と今後の展望(第9章)

第9章では, 本研究の結論と今後の展望を示した。

【参考文献】

- 1-1) 松本徳久:我が国フィルダム設計・施工の変遷, 土木学会論文中 F, Vol.65, No.4, pp.394-413, 2009.10.
- 1-2) (財)日本ダム教会:ダム年鑑 2013, pp.20-201, 2013.
- 1-3) 松本徳久, 藤崎勝利:フィルダムの設計と締固め, 基礎工, Vol.37, No.7, pp.61-65, 2009.
- 1-4) (財)ダム技術センター:多目的ダムの建設, 平成 17 年版, 第 4 巻, 設計 I 編, pp.185-189, 2005.
- 1-5) 田中忠次, 龍岡文夫, 毛利栄征:東北地方太平洋沖地震による藤沼湖の決壊原因調査について, ダム工学, Vol.23, No.2, pp.99-114, 2013.
- 1-6) 谷茂, 福島信二:老朽化フィルダムの堤体改修の事例調査, 農村工学研究所技報, 第 206 号, pp.1-24, 2007.
- 1-7) ダム工学会施工研究部会:ダム施工の品質管理合理化の提案, ダム工学, Vol.23, No.2, pp.121-163, 2013.
- 1-8) 例えば, 日下雅史, 後藤誠志, 山田啓一, 柴藤勝也, 伊藤文夫:殿ダム本体工事における情報化施工技術の導入, ダム技術, No.301, pp.79-86, 2011.10.
- 1-9) (財)ダム技術センター:多目的ダムの建設, 第 6 巻, 施工編, pp.267-285, 2005.
- 1-10) (財)ダム技術センター:台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料, 2012.6.

第2章 著者が携わったフィルダム, 台形 CSG ダム

著者は1993年4月に鹿島建設(株)に入社後、ダム建設工事に携わることとなった。入社後、主に地盤工学を主とした業務に従事したため、携わったダムのほとんどがフィルダムである。著者が携わったダムの諸元、工事内容および著者の業務内容を表-2.1 にまとめて示し、それぞれのダムを紹介する。なお、ダムの諸元などは(財)日本ダム協会編:ダム年鑑 2013 年に基づいた。

表-2.1 著者が携わった主なダム

No.	ダム名称	形式*	所在地	ダム事業者	工事名称	工期	工事内容	著者の担当業務	
1	山王海 (サンノウカイ)	旧:E 新:RF	岩手県 紫波郡	農林水産省 東北農政局	山王海ダム建設 工事	着手	1953年(昭和28年) 完成の旧山王海ダム の高上げ工事	1995~1998 技術研究所 研究員	新設堤体建設中の旧堤 体動態観測ならびに挙動 予測解析を実施
						竣工			
2	山口 (ヤマグチ)	E	埼玉県 所沢市 他	東京都 水道局	山口貯水池堤 体強化工事	着手	1934年(昭和9年)完 成の既設アースダム の耐震補強工事	1998~2002 工事係長 (現場従事)	施工管理, 品質管理業務 全般に加えて, 既設堤体 の安定性に着目した情報 化施工管理を提案し, 実 施
						竣工			
3	山倉 (ヤマクラ)	E	千葉県 市原市	千葉県 企業庁	山倉ダム第一堰 堤強化工事	着手	1964年(昭和39年) 完成の既設アースダ ムの耐震補強工事	2002~2004 工事課長 (現場従事)	施工管理, 品質管理業務 全般を担当
						竣工			
4	浅河原 (アサガワラ)	E	新潟県 十日町 市	東日本 旅客鉄道(株)	信発浅河原調 整池堤体他災 害応急(中越地 震)	着手	2004年新潟中越地 震で被災したアース ダム堤体の復旧工事	2004~2005 技術研究所 主任研究員	堤体の被災調査 (2004), 被災復旧計画 (2004), 復旧工事支援 (2005)を実施
						竣工			
5	胆沢 (イサワ)	RF	岩手県 奥州市	国土交通省 東北地方 整備局	胆沢ダム堤体盛 立工事	着手	日本最大クラスの堤 体積(1,350万 m^3)の RFダム盛立工事	2005~2013 技術研究所 主任研究員	各種技術支援を担当。 2008年岩手・宮城内陸地 震では堤体の被災調査, 復旧計画などを実施
						竣工			
6	殿 (トノ)	RF	鳥取県 鳥取市	国土交通省 中国地方 整備局	殿ダム建設工事	着手	堤体積211万 m^3 のRF ダム工事	2007~2011 技術研究所 上席研究員	各種技術支援を担当。 ロック材を対象に, デジタ ルカメラ画像による粒度 変動監視システムを導入
						竣工			
7	当別 (トウベツ)	CSG	北海道 石狩郡	北海道 空知総合振 興局	当別ダム建設事 業本体工工事	着手	日本発の本格的台形 CSGダム建設工事	2008~2011 技術研究所 上席研究員	各種技術支援を担当。デ ジタルカメラ画像による粒 度変動監視システムを実 用化
						竣工			
8	(施工中) 初立池 (ハッタチイケ)	E	愛知県 田原市	(独)水資源 機構	大規模地震対 策初立池耐震 補強工事	着手	1967年(昭和42年) 完成の既設アースダ ムの耐震補強工事	2013~ 技術研究所 /土木管理 本部	各種技術支援を担当。既 設堤体の安定性に着目し た情報化施工管理の実 施などを実施
						竣工			
9	(施工中) 大分川 (オオイタガワ)	RF	大分県 大分市	国土交通省 九州地方 整備局	大分川ダム建設 工事	着手	堤体積376万 m^3 のRF ダム工事	2013~ 土木管理本 部	各種技術支援を担当。 デジタルカメラ画像によ る粒度変動監視システム などを導入
						竣工			

*1: ダム形式 E:アースダム, RF:ロックフィルダム, CSG:台形CSGダム

(1) 山王海ダム 2-1),2-2),2-3)



写真-2.1 山王海ダム全景(堤体嵩上げ工事完了後, 2002年11月撮影)

- **ダム事業者** : 農林水産省東北農政局
- **所在地** : 岩手県紫波郡
- **工事名称** : 山王海ダム建設工事
- **施工者** : 鹿島建設(株)・三幸建設工業(株)・東急建設(株)共同企業体
- **工期** : 1990年10月～2001年3月
- **ダム形式** : 旧堤体 中央止水壁型アースダム, 新堤体 ロックフィルダム
- **諸元** :
 - ・有効貯水量(嵩上げ工事後) 3,760万 m³
 - ・旧堤体(1934年完成) 堤高 37.4m, 堤頂長 150m, 堤体積 27.6万 m³
 - ・新堤体 堤高 61.55m, 堤頂長 241.6m, 堤体積 129万 m³
- **工事内容** :
 - ・1953年(昭和28年)完成の旧山王海ダムの嵩上げ工事。旧堤体の利水機能を維持しながら, 旧堤体直下流に新堤体を建設。
- **著者の担当業務** :
 - ・技術研究所研究員として新堤体建設時(旧堤体法尻掘削時ならび新堤体盛立時)の旧堤体動態観測と挙動予測解析を実施。

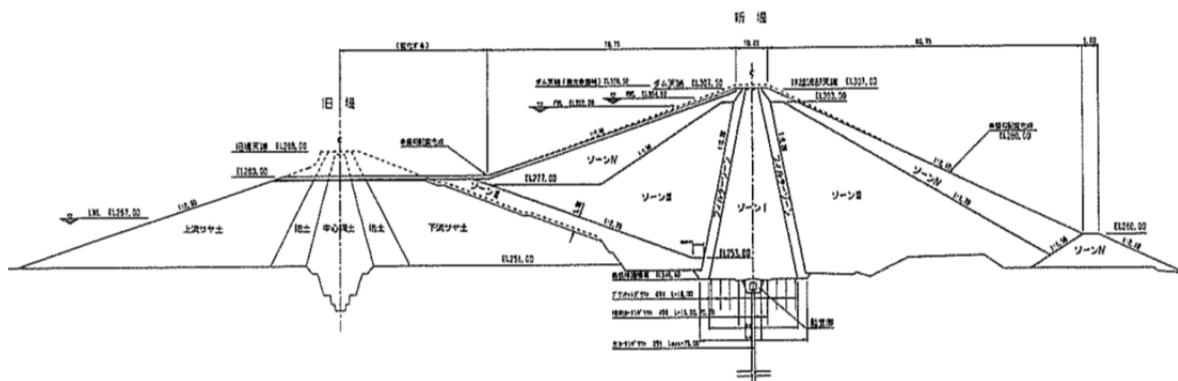


図-2.1 山王海ダム嵩上げ工事標準断面図 2-2)

(2) 山口貯水池 ^{2-4),2-5),2-6),2-7)}



写真-2.2 山口貯水池全景(堤体強化工事後, 2002年11月)

- **ダム事業者** : 東京都水道局
- **所在地** : 埼玉県所沢市, 入間市, 東京都武蔵村山市, 瑞穂町
- **工事名称** : 山口貯水池堤体強化工事
- **施工者** : 鹿島・間・清水建設共同企業体
- **工期** : 1999年4月~2002年11月(準備工事:1997年~1999年)
- **ダム形式** : アースダム
- **諸元** :
 - ・ 有効貯水量 1,953 万 m³ (水道専用貯水池, 東京都民の4日分の使用量)
 - ・ 既設堤体(1934年完成) 堤高 35m, 堤頂長 691m, 堤体積 140 万 m³
 - ・ 補強工事後 堤高 35.5m, 堤頂長 716m, 堤体積 243 万 m³
(上流補強盛土 54 万 m³, 下流補強盛土 44 万 m³, 下流ドレーン 5 万 m³)
- **工事内容** :
 - ・ レベル2地震動を対象とした既設ダムの耐震補強工事。既設堤体上下流側に補強盛土を施工。
- **著者の担当業務** :
 - ・ 工事係長として現場に従事し, 施工管理および品質管理業務全般を担当。
 - ・ 「**既設堤体の安定性に着目した情報化施工管理**」を提案し, 実施した。

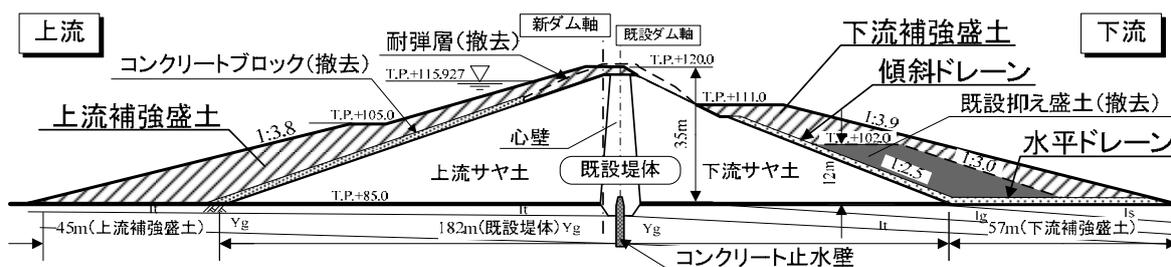


図-2.2 山口貯水池堤体強化工事標準断面図 ²⁻⁷⁾

(3) 山倉ダム (2-8), 2-9)



写真-2.3 山倉ダム第一堰堤全景(堤体強化工事後, 2004年5月撮影)

- **ダム事業者** : 千葉県企業庁
- **所在地** : 千葉縣市原市
- **工事名称** : 山倉ダム第一堰堤強化工事
- **施工者** : 鹿島・東亜特定建設工事共同企業体
- **工期** : 2000年12月～2004年3月
- **ダム形式** : アースダム
- **諸元** :
 - ・有効貯水量 440万 m³ (臨海工業地域への工業用水供給)
 - ・既設堤体(1964年完成) 堤高 22.5m, 堤頂長 420m, 堤体積 53万 m³
 - ・補強工事後 堤高 22.5m, 堤頂長 420m, 堤体積 69万 m³
 - 基礎地盤改良工: 上流側 深層混合処理工, 下流側 グラベルコンパクションパイル工
 - 上流復旧盛土 2.6万 m³, 下流押え盛土工 5.2万 m³, 下流グラベルマット 0.9万 m³
- **工事内容** :
 - ・レベル 2 地震動 (M8 クラス) を対象とした既設ダムの耐震補強工事。既設ダム基礎地盤の液状化対策として地盤改良と押え盛土などを施工。
- **著者の担当業務** :
 - ・ 工事課長として現場に従事し, 施工管理および品質管理業務全般を担当。

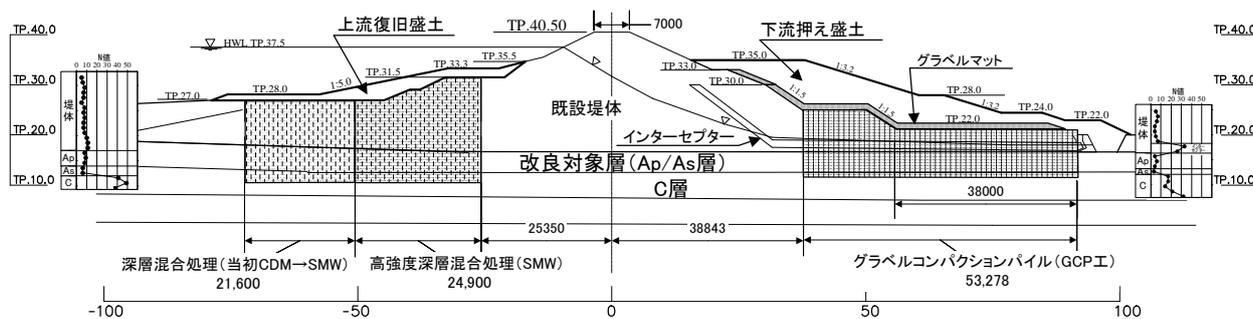


図-2.3 山倉ダム第一堰堤強化工事標準断面図 (2-9)

(4) 浅河原調整池 ^{2-10),2-11)}



写真-2.4 浅河原調整池全景(復旧工事後, 2006年6月撮影)

- **ダム事業者** : 東日本旅客鉄道㈱
- **所在地** : 新潟県十日町市
- **工事名称** : 信発浅河原調整池堤体他災害応急(中越地震)
- **施工者** : 鹿島建設㈱
- **工期** : 2005年3月~2006年2月(被災調査工事 2004.11~12月)
- **ダム形式** : アースダム
- **諸元** :
 - ・ 有効貯水量 85万 m³ (水力発電用貯水池)
 - ・ 復旧前(1945年完成) 堤高 37.0m, 堤頂長 291.8m, 堤体積 52万 m³
(第二次世界大戦前から建設が開始され, 大戦中に完成)
 - ・ 復旧工事 堤体掘削工:2.2万 m³, 盛立工:3.2万 m³
- **工事内容** :
 - ・ 新潟県中越地震(2004年10月)で被災した既設アースダムの復旧工事。
- **著者の担当業務** :
 - ・ 技術研究所主任研究員として被災状況調査(2004年11~12月), 復旧計画(2005年1~3月), 施工支援(2005年4月以降)などに従事。

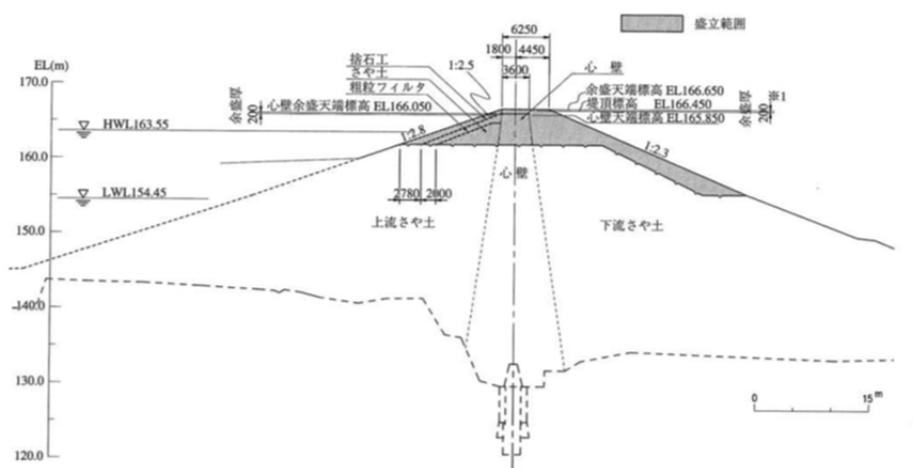


図-2.4 浅河原調整池災害復旧工事標準断面図 ²⁻¹⁰⁾

(5) 胆沢ダム (2-12), 2-13)



写真-2.5 胆沢ダム全景(2013年10月撮影)

- **ダム事業者**：国土交通省東北地方整備局
- **所在地**：岩手県奥州市
- **工事名称**：胆沢ダム堤体盛立工事
- **施工者**：鹿島・清水・大本特定建設工事共同企業体
- **工期**：2004年10月～2014年3月
- **ダム形式**：中央コア型ロックフィルダム
- **諸元**：
 - ・有効貯水量 13,200 万 m³
 - ・堤高 132m, 堤頂長 723m, 堤体積 1,350 万 m³(堤体積日本第3位)
- **工事内容**：
 - ・石淵ダム(岩手県, 1953年)の再開発事業として, 石淵ダム下流約2kmに建設された日本最大級のロックフィルダム。
 - ・盛立が最盛期を迎えていた2008年6月に岩手・宮城内陸地震が発生し, 堤体にクラックが生じるなどの被害を受けた。(2-13)。
- **著者の担当業務**：
 - ・技術研究所主任研究員として, 被災状況調査ならびに復旧計画(2008年6～7月)に従事。著者が開発した「**画像粒度モニタリング®**」をCSG材破碎製造時の粒度管理方法として導入(2011年9月～2012年9月)。

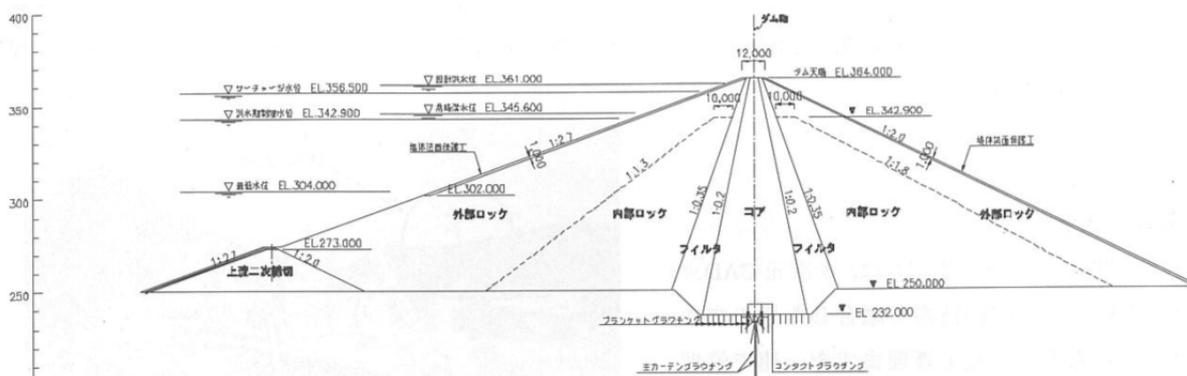


図-2.5 胆沢ダム標準断面図 (2-12)

(6) 殿ダム (2-14),2-15),2-16)



写真-2.6 殿ダム全景(2011年4月撮影)

- **ダム事業者**：国土交通省中国地方整備局
- **所在地**：鳥取県鳥取市
- **工事名称**：殿ダム建設工事
- **施工者**：鹿島・清水・大本特定建設工事共同企業体
- **工期**：2007年2月～2011年9月
- **ダム形式**：中央コア型ロックフィルダム
- **諸元**：
 - ・有効貯水量 11,200 万 m³, 堤高 75m, 堤頂長 294m, 堤体積 211 万 m³
- **工事内容**：
 - ・国土交通省中国地方整備局管内で初めての本格的ロックフィルダム。
 - ・平成 17 年 4 月に施行された「公共工事の品質確保の促進に関する法律」(品確法)に伴って, 本格的な総合評価方式入札が実施された。
- **著者の担当業務**：
 - ・技術研究所上席研究員として各種施工支援を実施。著者が開発した「**画像粒度モニタリング®**」をロック材の粒度変動監視方法として導入 (2-15)。

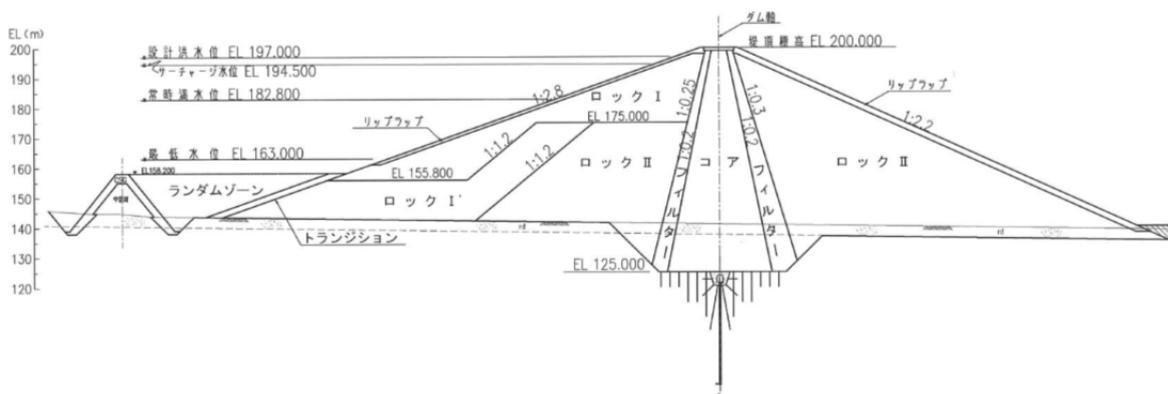


図-2.6 殿ダム標準断面図 (2-16)

(7) 当別ダム 2-17),2-18),2-19)



写真-2.7 当別ダム全景(2012年6月撮影)

- **ダム事業者**：北海道空知総合振興局
- **所在地**：北海道石狩郡
- **工事名称**：当別ダム建設事業本体工工事
- **施工者**：鹿島・竹中土木・岩倉特定建設工事共同企業体
- **工期**：2008年10月～2012年12月
- **ダム形式**：台形 CSG ダム
- **諸元**：
 - ・ 有効貯水量 6,650 万 m³, 堤高 52m, 堤頂長 432m, 堤体積 81 万 m³
- **工事内容**：
 - ・ 日本初の本格的台形 CSG (Cemented Sand and Gravel) ダム工事。
- **著者の担当業務**：
 - ・ 技術研究所上席研究員として各種技術支援を実施。CSG 製造時の品質管理に、著者が開発した「**画像粒度モニタリング®**」を初めて導入²⁻¹⁸⁾。

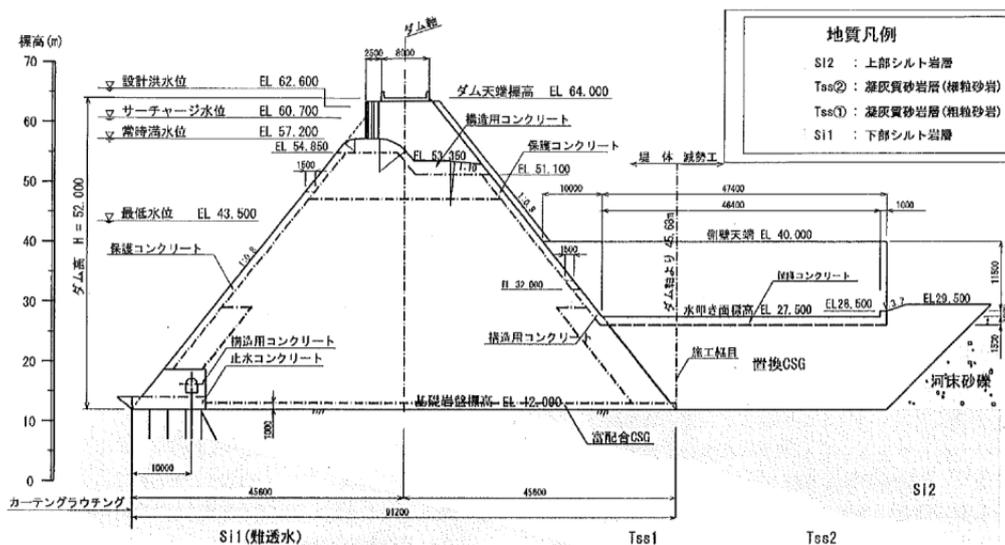


図-2.7 当別ダム標準断面図(常用洪水吐部)²⁻¹⁹⁾

(8) 初立池 (2014 年施工中)

- ダム事業者：水資源機構
- 所在地：愛知県田原市
- 工事名称：大規模地震対策初立池耐震補強工事
- 施工者：鹿島建設㈱
- 工期：2013 年 3 月～2015 年 5 月
- ダム形式：アースダム
- 諸元：
 - ・有効貯水量 160 万 m³ (灌漑用水)
 - ・既設堤体(1969 年完成) 堤高 22.5m, 堤頂長 346.5m, 堤体積 25 万 m³
 - ・補強工事後(設計時) 堤高 22.5m, 堤頂長 346.5m, 堤体積 42.5 万 m³
(上流補強盛土 6 万 m³, 下流補強盛土 9 万 m³, 下流ドレーン 2.5 万 m³)
- 工事内容：
 - ・旧愛知用水公団が豊川用水の最終調整池として渥美半島先端部に建設したアースダムの耐震補強工事。補強工法は、山口貯水池(東京都)と同様な押え盛土工法。
- 著者の担当業務：
 - ・技術研究所上席研究員, 土木管理本部土木技術部次長として, 入札段階から各種施工支援を実施。著者が提案, 開発した「**既設堤体の安定性に着目した情報化施工管理**」, 「**画像粒度モニタリング®**」を導入。

(9) 大分川ダム (2014 年施工中)

- ダム事業者：国土交通省九州地方整備局
- 所在地：大分県大分市
- 工事名称：大分川ダム建設工事
- 施工者：鹿島・竹中土木・三井住友特定建設工事共同企業体
- 工期：2013 年 7 月～2017 年度(予定)
- ダム形式：中央コア型ロックフィルダム
- 諸元：
 - ・有効貯水量 2,240 万 m³, 堤高 91.6m, 堤頂長 497.9m, 堤体積 389 万 m³
- 工事内容：
 - ・ダム事業再検証後, 初のダム建設工事。2014 年度から本格的着手予定。
- 著者の担当業務：
 - ・土木管理本部土木技術部次長として, 入札段階から各種施工支援を実施。著者が開発した「**画像粒度モニタリング®**」を導入予定。

【参考文献】

- 2-1) 豊島弘三, 森山信弘: 山王海ダムの再開発ーロックフィルダムの嵩上げー, ダム日本, No.629, pp.27-47, 1997.3.
- 2-2) 都築慶剛: 山王海ダムの再開発(嵩上げ)についてーゾーン型ロックフィルダムー, ダム日本, No.676, pp.39-70, 2001.2.
- 2-3) 【カラーグラビア】写真で見る山王海ダム, ダム日本, No.689, 2002.3.
- 2-4) 佐々木史郎, 村山眞: 既設アースダムの耐震強化工事ー山口貯水池堤体強化工事ー, ダム技術, No.227, pp.112-120, 2005.8.
- 2-5) 長岡敏和, 高田武, 田原功, 濱建樹, 菅原俊幸, 藤崎勝利, 神戸隆幸: アースフィルダム耐震補強工事の施工計画と実績ー山口貯水池堤体強化工事(その1)ー, 土木建設技術シンポジウム 2002 論文集, pp.267-274, 2002.
- 2-6) 長岡敏和, 高田武, 田原功, 濱建樹, 菅原俊幸, 藤崎勝利, 神戸隆幸: アースフィルダム耐震補強工事における技術的課題と環境保全への取り組みー山口貯水池堤体強化工事(その2)ー, 土木建設技術シンポジウム 2002 論文集, pp.275-272, 2002.
- 2-7) 藤崎勝利, 田原功, 加藤正樹, 岡本道孝, 村上武志: 既設アースフィルダムの安定性に着目した情報化施工管理事例, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.45-64, 2005.
- 2-8) 渡邊秀敏, 萩原茂雄: 地盤改良工法による山倉ダム耐震性強化工事, 工業用水, No.544, pp.14-36, 2004.1.
- 2-9) 鹿島建設(株): 山倉ダム第一堰堤強化工事工事誌, 2004.9.
- 2-10) 野澤伸一郎, 栗田敏寿, 齊藤誠, 島峰徹夫: 新潟中越地震における発電用調整池の被害と復旧, ダム技術, No.239, pp.29-48, 2006.
- 2-11) 滝沢聡, 島峰徹夫, 野澤伸一郎, 大町達夫: 2004年新潟中越地震による浅河原調整池ダムの被害とその原因に関する考察, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.2, pp.612-623, 2007.
- 2-12) 高田悦久, 品川敬, 菅原俊幸, 小林弘明: ITを活用した胆沢ダムの品質管理の合理化, ダム工学, Vol.18, No.3, pp.182-193, 2008.
- 2-13) 佐々木隆, 小山幸男, 宍戸善博, 伊藤武志: 岩手・宮城内陸地震による胆沢ダムフィル堤体の被災復旧概要, ダム工学, Vol.18, No.4, pp.251-262, 2008.
- 2-14) 日下雅史, 後藤誠志, 山田啓一, 柴藤勝也, 伊藤文夫: 殿ダム本体工事における情報化施工技術の導入, ダム技術, No.301, pp.79-86, 2011.10.
- 2-15) 川野健一, 藤崎勝利, 黒沼出, 上本勝広: ロック材を対象とした画像粒度モニタリングによる粒度変動監視システム, 第 48 回地盤工学研究発表会(富山), No.146, pp.291-292, 2013.7.
- 2-16) 坂田寛司: 殿ダムの設計と施工: ダム日本, No.811, pp.11-29, 2012.5.
- 2-17) 上野信二, 中瀬弓人, 佐藤裕之, 藤澤侃彦: 当別ダムの設計・施工(その 1)ー当別ダ

ムの設計一, ダム技術, No.284, pp.49-66, 2010.5.

- 2-18) 土井俊明, 赤間修二, 武井昭, 藤崎勝利: デジタルカメラ画像を用いたCSG材の粒度変動監視システムー当別ダム本体工事での適用事例ー, 平成 23 年度ダム工学会研究発表会・講習会講演集, pp.5-8, 2011.
- 2-19) 上野信二, 中瀬弓人, 佐藤裕之, 藤澤侃彦: 当別ダムの設計・施工(その2)ー発注前試験施工と発注後確認試験ー, ダム技術, No.286, pp.83-107, 2010.7.

第3章 我が国フィルダムの現状と建設工事の変遷

フィルダムとは、岩石・砂礫・土質材料などを盛り立てて築造するダムの総称である。我が国においてフィルダムは、最も古い社会基盤施設のひとつであり、農業用水と生活用水の供給、水力発電、洪水調節などに使われてきた。そして、現在においても我が国の国民生活を支える重要な基盤施設である。フィルダムは、アースダム、ロックフィルダム、表面遮水壁型ロックフィルダムの3形式に大別される。

第二次世界大戦以前に建設されたフィルダムのほとんどはアースダムであり、江戸時代末期までに灌漑用ため池の堤体として各地で建設された。我が国最古とされ、万葉集にも登場する狭山池(大阪府、**3.3.1** 参照)は616年頃に完成したアースダムである。また、弘法大師が改修したとの逸話が残る満濃池(香川県)も750年頃に完成したアースダムである。

第二次世界大戦後のフィルダム工事は、山王海ダム(1953年、**3.3.3(1)**参照)で幕を開け、御母衣ダム(1961年、**3.3.3(3)**参照)および牧尾ダム(1961年、長野県)で現在の技術の礎を築き、高瀬ダム(1979年、長野県)、寒河江ダム(1990年、山形県)および奈良俣ダム(1990年、群馬県)で技術が概ね完成の域に達した。

現在、我が国のフィルダムで最大堤高は高瀬ダム(1979年、長野県、堤高176m、堤体積1,159万 m^3)であり、アーチダムである黒部ダム(1963年、富山県、堤高186m)に続き第二位となっている。また、最大堤体積は徳山ダム(2008年、岐阜県、堤高161m、堤体積1,370万 m^3)であり、東京ドーム(容積124万 m^3)の11個分に相当する大きさである。

また、日本発の新しいダム形式として台形CSG(Cemented Sand and Gravel)ダムがある。本研究では台形CSGダムならびにCSG工法も研究の対象としており、台形CSGダムも紹介する。

第3章では、我が国のフィルダムの現状と建設工事の変遷を整理する。なお、本研究では政令「河川管理施設等構造令」の規制を受ける堤高15m以上のダムを対象とした。

3.1 フィルダムの形式

フィルダムの形式と特長を以下に示す。また、我が国発の新しいダム形式である台形CSGダムについても併せて示す。

(1) アースダム

- 土質材料を主体とした最も古い形式のダム。
- 我が国で最も数が多い。
- 材料によるゾーニングを行わない均一型、ゾーニングを行うゾーン型がある。近代では、下流側にドレーンを設けることが多い。
- 堤高 30m 以下の比較的小規模なダムが多い。

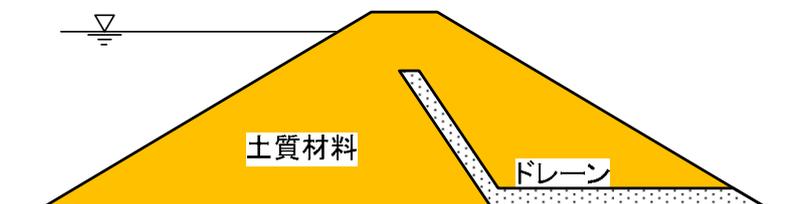
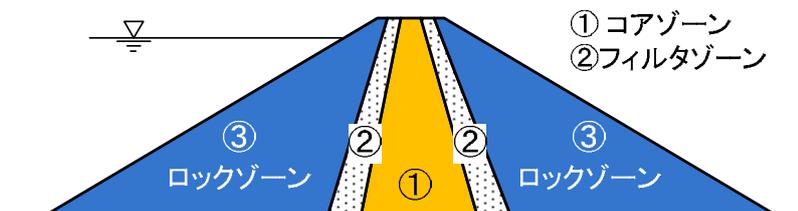


図-3.1 アースダムの模式図

(2) ロックフィルダム

- 土質材料と岩石材料を使用したダム。
- 建設機械が目覚ましい発展を遂げた第二次世界大戦後に建設が本格化。
- 遮水を担うコアゾーンを堤体中心に配置する中央コア型と、コアゾーンを傾斜させた傾斜コア型がある。

(a) 中央コア型



(b) 傾斜コア型

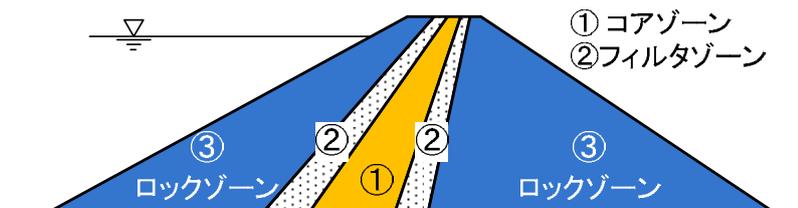


図-3.2 ロックフィルダムの模式図

(3) 表面遮水壁型ロックフィルダム

- 均一型のロックフィルダムの上流面にコンクリートやアスファルトによる遮水壁を設けたダム。コンクリート遮水壁型 (CFRD, *Concrete Face Rockfill Dam*) とアスファルト遮水壁型がある。
- 我が国の CFRD は第二次世界大戦後から 1970 年代にかけて数基建設されたが、堤体の長期的な沈下や地震などによって遮水壁にクラックが生じることが多く、一時採用されなくなった。現在ではロック材の締固め技術の進歩を反映し、再び建設の動きがある。
- 建設コストが比較的低いこと、工期が短いことなどから、現在、世界的には CFRD が主流のダム形式である。
- 我が国の CFRD は、以下に示す 7 事例(ダム 6, 締切堤 1)のみである。
 - ・ 小淵防災溜池(1951 年, 岐阜県)
 - ・ 石淵(1953 年, 岩手県, **3.3.3(2)**参照)
 - ・ 野反(1956 年, 群馬県)
 - ・ 皆瀬(1963 年, 秋田県)
 - ・ 荒沢 1 号(1972 年, 岩手県)
 - ・ 徳山(上流二次締切, 2002 年, 岐阜県)
 - ・ 苫田鞍部ダム(2004 年, 岡山県)
- アスファルト遮水壁型は、我が国では水力発電用ダムでの事例が多い。コンクリート遮水壁に比べて、変形追従性や修復性に優れている。我が国のアスファルト遮水壁型は以下に示す 16 事例(2014 年現在)。

<ul style="list-style-type: none"> ・ 大津岐(1968 年, 福島県, 電源開発株) (日本で最初の As フェーシングダム) ・ 赤川(1970 年, 栃木県) ・ 大平沼(1970 年, 福島県) ・ 二の倉(1970 年, 青森県) ・ 高野山(1971 年, 新潟県, 東京電力株) ・ 東富士(1971 年, 静岡県) ・ 深山(1973 年, 栃木県) ・ 沼原(1973 年, 栃木県, 電源開発株) (5.2.4(5)参照) ・ 多々良木(1974 年, 兵庫県, 関西電力株) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 時雨(1976 年, 東京都) ・ 双葉(1987 年, 北海道) ・ 南川鞍部(1987 年, 宮城県) ・ 八汐(1992 年, 栃木県, 東京電力株) (5.2.4(4)参照) ・ 万場調整池(1993 年, 愛知県) ・ 大瀬内(2007 年, 宮崎県, 九州電力株) (旧名:小丸川発電所上部ダム) ・ かなすみ(2007 年, 宮崎県, 九州電力株) (旧名:小丸川発電所上部副ダム)
---	---

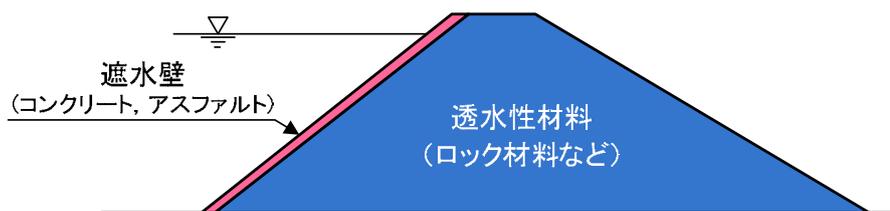


図-3.3 表面遮水壁型ロックフィルダムの模式図

(4) 台形 CSG ダム

- CSG (Cemented Sand and Gravel)とは、ダムサイト近傍で比較的容易に入手できる河床砂礫や掘削ずりなどの岩石材料にセメントと水を混合して製造する材料のことである。コンクリートに比べて強度は小さく、土質材料とコンクリート材料の中間的な力学的性質を持つ。
- 台形 CSG ダムは、河川管理施設等構造令にない新しいダム形式として 2002 年 6 月に国土交通大臣から特別認定を受けている。
- 我が国では、長島ダム上流仮締切堤(1992 年)で初めて採用。現在は、当別ダム(2012 年、北海道)や億首ダム(2014 年、沖縄県)など本格的なダムも建設されており、我が国発の新技术として普及が期待されている。
- 台形 CSG ダムのコンセプトや CSG 工法、品質管理方法などについては、**第 7 章**に記述する。

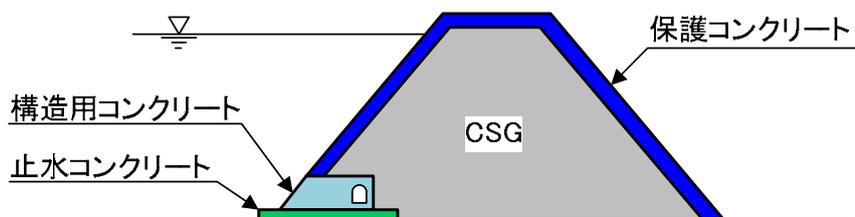


図-3.4 台形 CSG ダムの模式図

3.2 我が国のフィルダムの現状

2013年の統計³⁻¹⁾に基づいて、我が国のダムを形式と建設年代で整理したものを表-3.1に示す。これによると、既設ダムの総数は2,642基(建設中を除く)であり、そのうちフィルダムは1,542基で全ダムの約60%を占めている。また、我が国のダムの約50%はアースダム(1,244基)であり、このうち約60%(734基)が第二次世界大戦以前に建設されている。

ダムは永久的な構造物であり、特に重要性が高い構造物に位置付けられるため、地震などに対して甚大な被害を出さないように設計、施工しなければならない。我が国のダムの耐震設計法には河川管理施設等構造令に定められている「震度法」が用いられている。しかし、表-3.1に示すように、第二次世界大戦以前に建設されたダム895基(このうち、アースダムは734基)は耐震基準が未整備だったこともあり、安定計算が実施されていないものが多いといえる。

近年では、新潟中越地震における信濃川発電所ダム群の被災、東北地方太平洋沖地震における藤沼ダム(1949年、福島県、E、堤高18.5m)の決壊などが生じており、既設ダムの耐震性に注目が集まっている。

表-3.1 既設ダムの形式と建設年代³⁻¹⁾から作成

年代	備考	フィルダム			コンクリートダム			台形CSG	計
		アース	ロックフィル	表面遮水型	重力式	アーチ	バットレス		
1603以前	～安土桃山	35	734	0	0	0	0	0	895
1603～1867	江戸時代	319		0	0	0	0	0	
1868～1899	明治	35		0	0	0	0	0	
1900～1930	明治～大正	162		0	0	45	0	4	
1930～1945	昭和初期	183		0	0	107	2	3	
1946～1990	戦後・昭和	422	161	12	596	61	14	0	1266
1990以降	平成～現在	88	121	4	261	4	1	2	481
計		1244	282	16	1009	67	22	2	-
		1542 (全ダムの60%)			1098			2	-
		2642							

*堤高15m以上のダムを対象とし、堰を除く

3.3 フィルダム建設工事の変遷

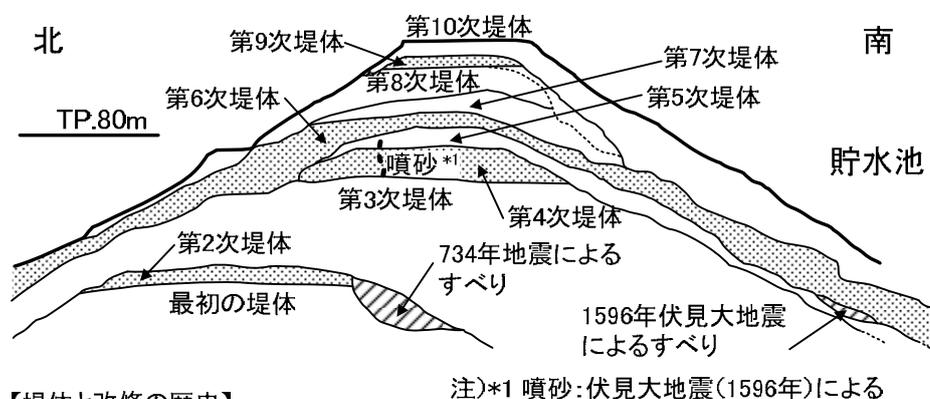
本節では、我が国において最も古い社会基盤施設のひとつであるフィルダムの建設工事の変遷を概観する。

3.3.1 明治期以前

明治期以前のフィルダムは、人力を主として建設された均一型のアースダムがほとんどである。

我が国最古のフィルダムとされている狭山池（616年頃、大阪府）は改修工事（2001年）の際に綿密な調査を実施し、かなり詳しい改修の歴史が判明している^{3-2),3-3),3-4)}。狭山池堤体の標準断面図を図-3.5に示す。取水設備に使われた木材は年輪年代法で616年に伐採されたものと判明し、堤体には厚さ10～15cm毎に広葉樹の葉が敷き詰められていた。これは敷葉工法と称されており、トラフィカビリティ確保と締固めのためと推定されている。また、堤体には地震による墳砂やすべりの痕跡も確認されており、大規模な改修だけでも6回実施されている。

弘法大師の伝説が残る満濃池（750年、香川県）も、何回かの決壊と補修を繰り返したことがわかっており、現在に至っている。



【堤体と改修の歴史】

- ・616年頃:最初の堤体
- ・行基の改修(731年):第2次堤体
- ・天平宝字の改修(762年):第3次堤体
- ・鎌倉～室町の改修:第4次堤体, 第5次堤体
- 重源の改修(1202年), 享徳の改修(1452年), 安見美作守の改修(1500年代前半)
- ・慶長の改修(1608年):第6次堤体
- ・江戸の改修:第7次堤体, 第8次堤体
- 元和の改修(1620年), 元禄の改修(1693年), 安政の改修(1858年)等
- ・明治, 大正, 昭和の改修:第9次堤体, 第10次堤体
- 1926～1931年の改修, 1962～1964年の改修

図-3.5 狭山池堤体標準断面図^{3-3), 3-4)}から作成

3.3.2 明治期から第二次世界大戦以前

明治期以降になると欧米の技術を取り入れたアースダムが上水道(村山, 山口など), 発電(女子畑, 大野など)を目的に建設されている。

通称, 狭山湖と呼ばれる山口貯水池(1934年, 東京都, 埼玉県, 2002年に堤体強化工事が竣工³⁻⁵⁾)は, 東京都武蔵村山市・瑞穂町, 埼玉県所沢市・入間市にまたがる水道専用の貯水池(有効貯水容量 1,953 万 m³)であり, 昭和 2 年(1927 年)から昭和 9 年(1934 年)にかけて建設された日本最大級のアースダム(堤高 35m, 堤頂長 691m, 堤体積 130 万 m³)である。隣接する村山貯水池(通称, 多摩湖)は昭和 2 年(1927 年)完成であり, 建設中に関東大震災(1923 年)を経験している。両貯水池は, 当時の東京市の急激な都市化に伴う給水量増加に対応するために計画されたものである³⁻⁶⁾。山口貯水池の旧堤体の標準断面図を図-3.6 に示す。ダム堤体は中央に粘性土コア(図-3.6 中では心壁と表記)が配置されており, フィルタはなく, コアの上下流側に位置するサヤ土には粘性土や砂質土等が使用されている。コア材料には, 粘土に砂利を混合(体積比で 50%程度)した材料が使用されており³⁻⁷⁾, 写真-3.1 に示すように蒸気ローラで転圧されている。村山・山口貯水池の粘土止水壁に対する当時の技術者の考え方は「東京市上水道拡張事業報告 第三回」に記載されている以下の文章に垣間見ることができる³⁻⁶⁾。

堰堤ニ堤心粘土壁ヲ造ルノ理由如何曰ク粘土ナルモノハ水ヲ飽和スレト一定水量ヲ飽和シ終レハ如何ニ多量ノ水ニ接スルモ之ヲ飽和セサルミナラス決シテ水ヲ浸透セシムルモノニアラス然ラハ之ヲ堰堤ニ用フルハ堰堤ノ一目的タル水ノ浸透ヲ防止スルニ叶ヘルモノト謂ウ可シ然レトモ粘土ノ性質トシテ一度乾燥スルコトアランカ実ニ破碎シ易ク如何ニ広大ナル粘土壁モ之ヲ堰堤ノ外部ニ露出セシメテ築造セハ水面以上ハ忽チ日光並ニ空気ノ作用ニ由リ乾燥破碎シ終ルコト明カナリ之レ粘土壁ヲ堤ノ中心ニ置ク所以ナリ

(堰堤に粘土止水壁を建設する理由は, 粘土は水で飽和すれば, その後多量の水に接しても水は浸透しないものであり, 堰堤の要求品質である遮水性が確保できるためである。しかし, 粘土は一度乾燥すると砕け易くなるので, 日光や空気に作用を受ける堰堤の表面に用いることはできない。このため, 粘土壁は堰堤の中心に置くのである。)^{注)}

注) 参考文献³⁻⁶⁾に記載されている原文から, 著者が解釈した。

この記載内容は, 現在の水浸される盛土の施工において基本とされている「最適含水比よりも湿潤側の含水比状態において締め固める」ことに通じている。また, 写真-3.1 に示すように, 盛立面を筵(むしろ)で覆っていることから, コア材料の乾燥に注意していたことが窺える。また, 山口貯水池の工事記録³⁻⁸⁾には, コア材料に関する品質規格値(含水率, 粒度など)と試験実績が掲載されており, 現在と同様にコア材料を対象とした品質管理試験を行いながら施工されていたことがわかる³⁻⁹⁾。山口貯水池の堤体材料は, 近郊に複数

設けた土取場から機関車で材料を運搬しており、約 140 万 m³ の盛立を 29 ヶ月（昼夜施工）で完了している。

この他、大野調整池（1936 年、京都府）のコア材は粗砂、細砂、粘土が使用されている。粘土は施工性を良くするために一度乾燥させて粉末状に砕いており、蒸気ローラを使って転圧している。また、台湾では八田與市が烏山頭ダム（堤高 61m、1929 年）という当時東洋一の水締め工法によるアースダムを完成させている³⁻¹⁰。

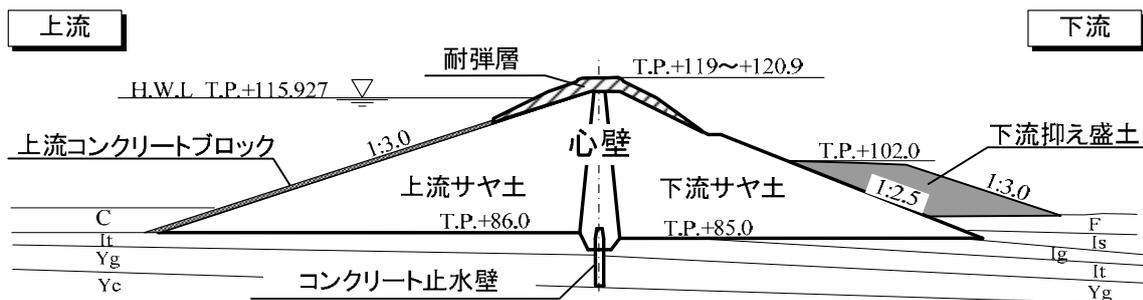


図-3.6 山口貯水池旧堤体標準断面図³⁻⁷⁾



写真-3.1 山口貯水池 10t 蒸気ローラによる転圧状況
(武蔵村山市立歴史民族資料館蔵)



写真-3.2 堤体強化工事以前の山口貯水池³⁻¹¹⁾

3.3.3 第二次世界大戦後

第二次世界大戦後、我が国のダム建設は建設機械の目覚ましい発展とともに本格化した。

(1) 我が国最初の近代的フィルダム:山王海ダム

我が国最初の近代的フィルダムは、山王海ダム(1953年,岩手県,2001年に嵩上げ工事が竣工³⁻¹²⁾である。山王海ダム旧堤体³⁻¹³⁾は図-3.7に示すように中央にコアに相当する鋼土,その両側に抱土,さらにその外側はサヤ土(図-3.7中では,雑土と表記)が配置され,施工途中の1949年からは土質試験および各種水位と地震を組み合わせた円形すべり面による安定解析が実施されている。また,転圧機械にもウェーブローラやシープスフトローラが使用されるなど,試験,設計,施工の各分野で主にアメリカ合衆国の技術が取り入れられている³⁻¹⁴⁾。堤体材料は,主に架空索道で運搬され(ダンプトラックは使用されていない),約28万 m^3 の盛立を35ヶ月(昼間施工,冬季施工休止期間を除く)で完了している。なお,月当たりの施工能力(堤体積/盛立月数)は1万 m^3 /月未満であった。

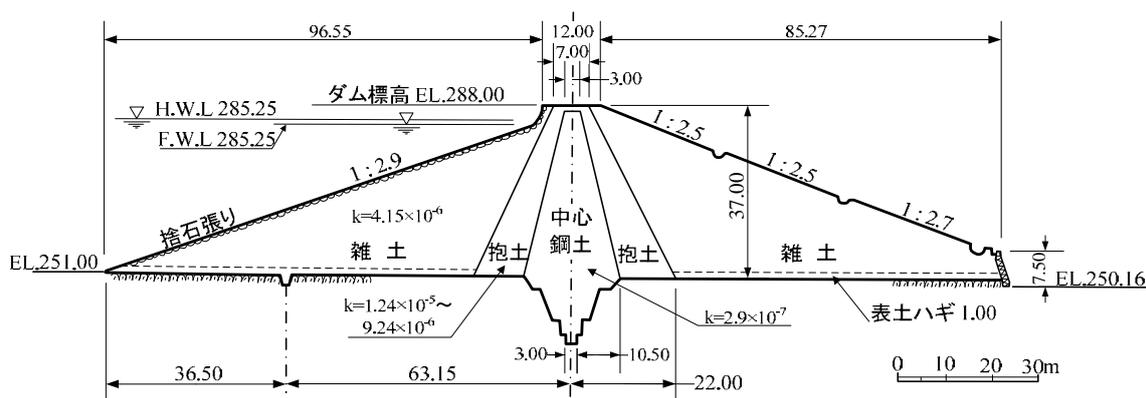


図-3.7 山王海ダム旧堤体標準断面図³⁻¹³⁾

(2) 我が国最初のロックフィルダム:石淵ダム

我が国初のロックフィルダムは,1953年に完成した石淵ダム(岩手県)である。ダム形式には,図-3.8に示すようにコンクリート表面遮水壁型ダム(CFRD)³⁻¹⁵⁾が採用されている。日本のTVA(Tennessee Valley Authority)とも呼ばれた北上川上流5大ダム計画に基づいて建設された5ダムのうち,最初に完成した。近年完成した胆沢ダム(2014年,岩手県)はこの石淵ダムの下流側に位置しており,胆沢ダムの完成とともにその姿を湖底に沈めた。

石淵ダムのロック材料の盛立は,現在の振動ローラによる締固め工法とは異なり,堅硬かつ大塊なロック材料を高所(石淵ダムは最高29m)から落下させ,高圧水を射水し

て締め固める「投石射水工法」が用いられた。なお、石淵ダムでは完成後 55 年を経ても堤体の沈下が継続しており、岩手・宮城内陸地震（2008 年）で再び沈下が生じたことが報告されている³⁻¹⁶⁾。

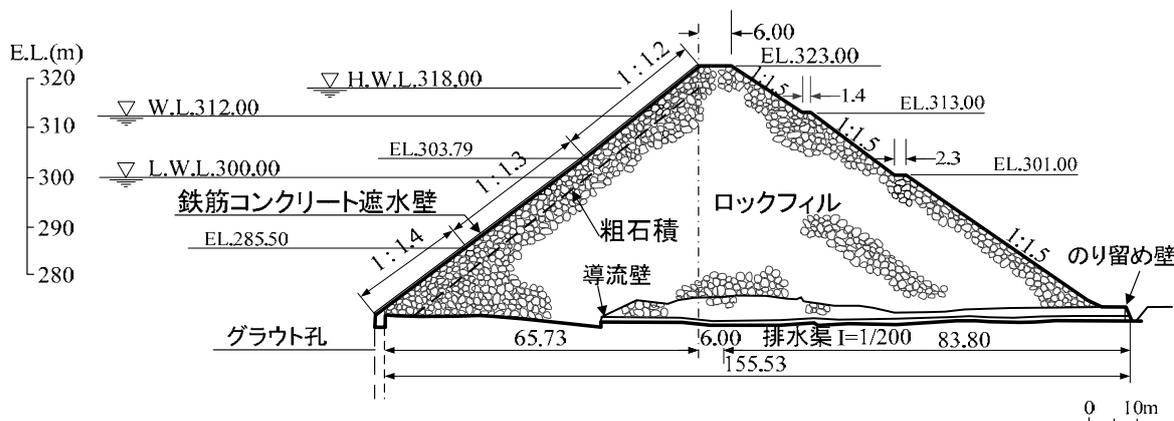


図-3.8 石淵ダム堤体標準断面図³⁻¹⁰⁾



写真-3.3 石淵ダム上流側全景（2005 年著者撮影）

(3) 土質コア型ロックフィルダムの礎：御母衣ダム

我が国の土質コア型ロックフィルダムは、御母衣ダム（1961 年，岐阜県），牧尾ダム（1961 年，長野県）で現在の技術の礎を築いた。

御母衣ダムは日本経済の高度成長に合わせて急増する電力需要を賄うために建設された発電用ダムであり，工期が短いのが特長である。御母衣ダムの堤高 131m は，当時の土質コア型ロックフィルダムとしてはスイスの Goscheneralp ダム（堤高 155m，1960 年）に次ぐ高さだった。コア材の締め固めには 20t シープスフートローラが使用され，ロックゾーンは石淵ダムと同様に「投石射水工法」が用いられている。なお，御母衣ダムは豪雪地帯に位置しており施工日数が限られるため，図-3.9 に示すようなロック材を先行し

て盛り立てられる傾斜コア型が採用されている。また、御母衣ダムでは約 795 万 m^3 の盛立を 25 ヶ月(昼夜施工, 冬季施工休止期間を除く)で完了している。つまり, 月当たりの施工能力(堤体積/盛立月数)は山王海ダムの完成(1953 年)から約 10 年を経た 1960 年代には 30 万 m^3 /月を実現していたことになる³⁻¹⁰⁾。

その後の魚梁瀬ダム(1965 年, 高知県)や九頭竜ダム(1968 年, 福井県)のロックゾーンは, 盛立面を走行するブルドーザとダンプトラックによる締固めを期待したブルドーザ・ダンプトラック転圧(層厚 2~4m)で盛り立てられている。

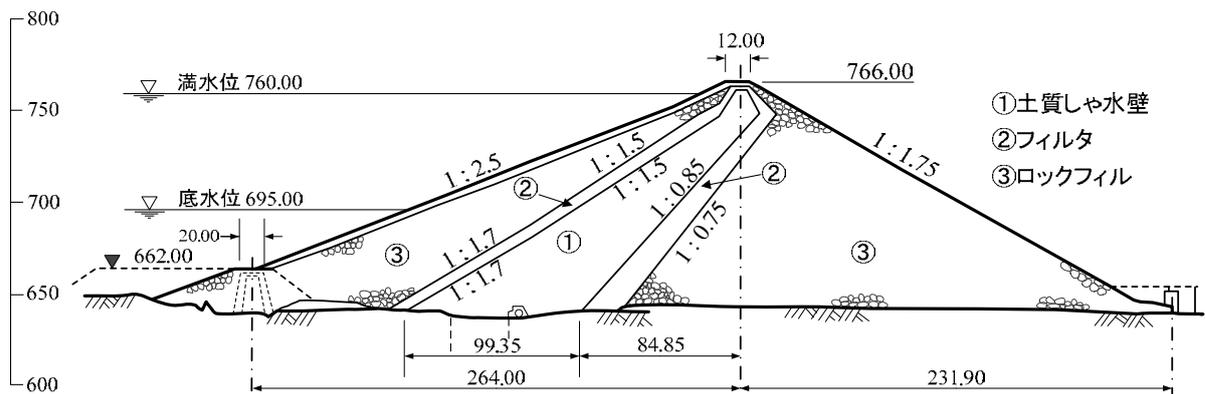


図-3.9 御母衣ダム堤体標準断面図³⁻¹⁰⁾

3.3.4 現在のロックフィルダム建設工事

1970 年代になると, 堤高が 150m, 堤体積が 1,000 万 m^3 を超える高瀬ダム(1979 年, 長野県), 手取川ダム(1979 年, 石川県)などの大型ロックフィルダムが建設されている。これらは, 主として発電を目的としたロックフィルダムである。高瀬ダムは堤高 176m であり, 現在でも我が国で最も堤高の高いロックフィルダムである。この高瀬ダム, 寒河江ダム(1990 年, 山形県)および奈良俣ダム(1990 年, 群馬県)で技術が概ね完成に達したといえる。

その後も味噌川ダム(2001 年, 長野県), 摺上川ダム(2006 年, 福島県), 徳山ダム(2008 年, 岐阜県), 胆沢ダム(2014 年, 岩手県)などの規模の大きなロックフィルダムが建設されている。

(1) 施工能力

ロックフィルダムの堤体積は, 奈良俣ダム(1990 年, 群馬県)の 1,310 万 m^3 でほぼ頂点に達しており, 徳山ダム(2008 年, 岐阜県)は 1,370 万 m^3 , 胆沢ダム(2014 年, 岩手県)は 1,350 万 m^3 である。これらの大型ロックフィルダム建設工事では, 大型ダンプトラックのうち最大クラスの積荷体積 40~45 m^3 (定格積載量 80~90t 程度)の大型ダンプト

トラックが使用されており、40～50 万 m^3 /月のペースで盛り立てられている。第二次世界大戦以前に建設された山口貯水池(1934年)や第二次世界大戦直後に建設された山王海ダム(1953年)の月当たりの施工能力は5万 m^3 /月未満であったことから、半世紀を経て月当たりの施工能力が10倍以上に向上したといえる。これは、ダンプトラックなどの建設機械の大型化、油圧化、メカトロニクス技術の導入などによる施工能力が向上したことが大きく関係している。なお、ダンプトラックのさらなる大型化(例えば、積荷体積 68m^3 、定格積載量 135t)は建設現場への回送や組立分解、さらに工事用道路の幅員拡大が必要であることなどを考慮すると経済的とは言えず、積荷体積 45m^3 (定格積載量 90t)クラスが最大とされている³⁻¹⁰⁾。

(2) ICT の活用

近年では、各種建設工事において、施工の効率化や精度の向上、品質管理の合理化などを目的に施工管理への ICT (*Information and Communication Technology*) の導入が推進されている。2008年(平成20年)7月には、国土交通省が「情報化施工推進戦略」³⁻¹⁹⁾を策定している。河川土工および道路土工などでは ICT を施工管理に導入して、まき出し厚(敷き均し厚)や締固め回数(転圧回数)などの施工プロセス管理の確実性を向上させ、このことによって現場密度試験などの締固め後の現場試験を省略する方針へ転換している³⁻²⁰⁾。このような動向に合わせて、建設業界全体として盛土工事の品質管理の合理化、省力化を推進している。

最近のダム建設工事においても、胆沢ダム(204年、岩手県)や殿ダム(2011年、鳥取県)では、GPSを使った測量システム³⁻¹⁷⁾や ICT による施工管理システム³⁻¹⁸⁾などを積極的に導入して、施工管理技術の高度化と省力化が図られている。

胆沢ダムの盛立状況である写真-3.4 に示すように、大型ダンプトラックを始めとする大型機械が使用されているが、測量用の丁張や測量実施者が見当たらない。なお、胆沢ダムの盛立場の1日当りの作業員は100人程度(昼夜延人数)であり、ほとんどが建設機械運転手である。つまり、盛立は建設機械と生身の人間が混在しない作業を主としており、建設災害の発生を抑制しているといえる³⁻¹⁰⁾。

フィルダム建設工事において、効率的な施工と安定した品質の確保を目的に導入されている ICT を活用した施工管理システムのイメージを図-3.10 に、ICT の活用事例として材料敷き均し厚管理システムを使った施工状況を写真-3.5 に、転圧回数管理システムを使った施工状況を写真-3.6 に、法面出来形管理システムを使ったリップラップ施工状況を写真-3.7 に示す。

建設機械運転手は、予め入力した3次元 CAD データと GPS でリアルタイムに取得する座標データを表示する指示画面(写真-3.5(b)、写真-3.6(b)、写真-3.7(b)参照)を見ながら機械を操作することで、所定の敷き均し厚さや転圧回数、法面出来形を遵守することが可能となる。また、夜間作業においても昼間作業と同等の施工精度と能力が

確保できることが特長である。

ICT を活用した施工管理システムで得られる各種施工データは、施工トレーサビリティとして記録することが可能だけでなく、データを事業者と施工者、設計者間で共有することが可能であり、施工管理の高度化と省力化が図られている。



写真-3.4 胆沢ダムの盛立状況(2009年)

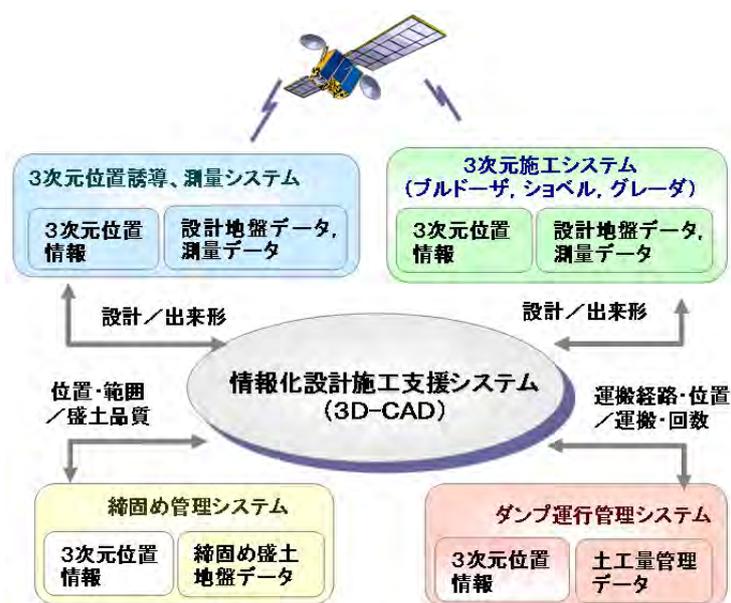
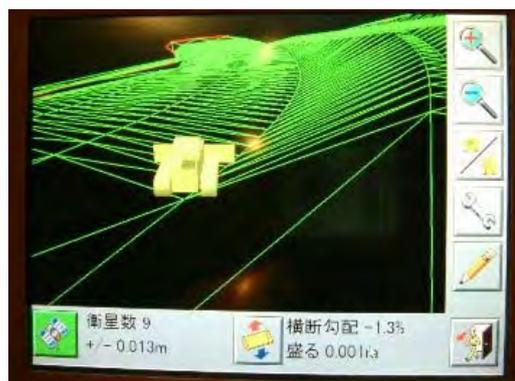


図-3.10 ICT 技術による施工管理システムのイメージ



(a) コア材料敷き均し状況



(b) オペレータ画面

写真-3.5 材料敷き均し厚管理システムを使った施工状況(胆沢ダム)



(a) コア材料転圧状況

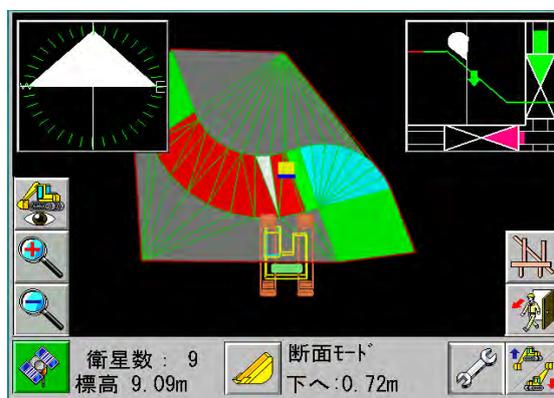


(b) オペレータ画面

写真-3.6 転圧回数管理システムを使った施工状況(胆沢ダム)



(a) リップラップ施工状況



(b) オペレータ画面

写真-3.7 法面出来形管理システムを使ったリップラップ施工状況(胆沢ダム)

3.4 第3章のまとめ

第3章では、河川管理施設等構造令の規制を受ける堤高 15m 以上のダムを対象に、我が国のフィルダムの現状と建設工事の変遷を整理した。

第3章の内容を以下にまとめる。

- 1) 2013 年の統計³⁻¹⁾によると、我が国の既設ダムの総数は 2,642 基(建設中を除く)であり、そのうちフィルダムは 1,542 基で全既設ダムの約 60%を占めている。また、我が国のダムの約 50%はアースダム(1,244 基)であり、このうち約 60%(734 基)が第二次世界大戦以前に建設されている。
- 2) 明治期以前のフィルダムは、人力を主として建設された均一型アースダムがほとんどである。我が国最古のフィルダムである狭山池(616 年頃、大阪府)の堤体には地震による墳砂やすべりの痕跡も確認されており、現在までの 1,400 年の間に 6 回の大改修をしている。
- 3) 明治期以降になると欧米の技術を取り入れたアースダムが上水道(村山、山口など)や発電(女子畑、大野など)を目的に建設されている。
- 4) 第二次世界大戦後、我が国におけるダム建設は本格化し、フィルダムでは山王海ダム(1953 年、岩手県、2001 年に嵩上げ工事が竣工)や石淵ダム(1953 年、岩手県)などが建設された。
- 5) 我が国の土質コア型ロックフィルダムは、御母衣ダム(1961 年、岐阜県)、牧尾ダム(1961 年、長野県)で現在の技術の礎を築いた。1970 年代になると、堤高が 150m、堤体積が 1,000 万 m³を超える高瀬ダム(1979 年、長野県)、手取川ダム(1979 年、石川県)などの大型ロックフィルダムが建設されている。ロックフィルダムの堤体積は、奈良俣ダム(1990 年、群馬県)の 1,310 万 m³でほぼ頂点に達している。
- 6) 最近の胆沢ダム(2012 年、岩手県)や殿ダム(2011 年、鳥取県)では、GPS を使った測量システムや ICT を導入し、施工管理の高度化と省力化が図られている。

【参考文献】

- 3-1) (財)日本ダム協会:ダム年鑑 2013, pp.20-201, 2013.
- 3-2) 大阪府:狭山池が語る歴史, 1994.
- 3-3) (財)ダム技術センター:多目的ダムの建設, 平成 17 年版, 第 1 巻, p.9, 2005.
- 3-4) 大阪府立狭山池博物館:常設展示案内, 大阪府立狭山池博物館図録 I, p.14, 2002.
- 3-5) 佐々木史郎, 村山眞:既設アースダムの耐震強化工事ー山口貯水池堤体強化工事ー, ダム技術, No.227, pp.112-120, 2005.8.
- 3-6) 東大和市:東大和市史資料編 2, 多摩湖の原風景.
- 3-7) 藤崎勝利, 田原功, 加藤正樹, 岡本道孝, 村上武志:既設アースフィルダムの安定性に着目した情報化施工管理事例, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.45-64, 2005.
- 3-8) 東京都水道局:山口貯水池, 1934.
- 3-9) 藤崎勝利:リニューアルという名の時間旅行(4)ー先達の構造物を未来に繋げるー, どぼく技師会東京, 第 24 号, pp.24-27, 2002.11.
- 3-10) 松本徳久:我が国フィルダムの設計・施工の変遷, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.4, pp.394-413, 2009.10.
- 3-11) 鹿島建設(株):山口貯水池堤体強化工事工事誌, 2003.4.
- 3-12) 豊島弘三, 森山信弘:山王海ダムの再開発ーロックフィルダムの嵩上げー, ダム日本, No.629, pp.27-47, 1997.
- 3-13) (社)農業土木学会:農業土木工事図譜, 第 2 集, フィルダム編, pp.123, 1973..
- 3-14) 河上房義:アースダムの科学的施工法, 鹿島建設技術研究所出版部, 1952.4.
- 3-15) (財)ダム技術センター:多目的ダムの建設, 平成 17 年版, 第 1 巻, pp.11-12, 2005.
- 3-16) 国土技術政策総合研究所, (独)土木研究所, (独)建築研究所:平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告, 国総研資料 486 号, 土研資料 4120 号, 建研資料第 115 号, 2008.12.
- 3-17) 高田悦久, 品川敬, 菅原俊幸, 小林弘明:ITを活用した胆沢ダムの品質管理の合理化, ダム工学, Vol.18, No.3, pp.182-193, 2008.
- 3-18) 日下雅史, 後藤誠志, 山田啓一, 柴藤勝也, 伊藤文夫:殿ダム本体工事における情報化施工技術の導入, ダム技術, No.301, pp.79-86, 2011.10.
- 3-19) 国土交通省国土交通省総合政策局公共事業企画調整課:情報化施工推進戦略, 2008.7.
- 3-20) 国土交通省:TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領, 2012.3.

第4章 フィルダムの地震被害事例とリニューアルの必要性

我が国のフィルダムは、兵庫県南部地震(1995年)やそれ以前の著名な地震(新潟地震など)では、大規模な被災には至らなかった。しかし、新潟中越地震(2004年)、宮城・岩手内陸地震(2008年)ではフィルダムに被害が生じた。そして、東北地方太平洋沖地震(2011年)では供用中であった藤沼ダム(福島県, 1949年, E, 堤高 18.5m)堤体が決壊し、甚大な被害をもたらした。これは第二次世界大戦以降、供用中だった堤高 15m 以上のダムが大規模に決壊した我が国初の事例であり、フィルダムの耐震性が社会的な注目を浴びる結果となった。

そこで、本研究ではフィルダムの耐震設計法の成立とフィルダム建設年代を整理することで、現状のフィルダムの耐震性について考察する。そして、フィルダムの耐震性照査とこの結果に基づいた耐震補強の推進の必要性を明らかにする。

また、フィルダムの安全性と機能の維持、向上のためには、耐震補強や嵩上げなどのリニューアルが必要である。しかし、フィルダムリニューアルでは、ほとんどの場合既設堤体が存在し、かつこれを有効利用することが求められるため、新設部分だけでなく既設堤体を考慮することが必要となる。このように、フィルダムリニューアルでは、ダム新設工事とは異なる新たな技術的課題に直面する。

なお、ダムリニューアルとは既設ダムの機能の保全、拡充などの事業全般を指しており、再開発と称されることもある。

第4章では、上記の整理と考察を通じて、フィルダムリニューアルの必要性と設計・施工における技術的課題を抽出する。

4.1 我が国のフィルダム耐震設計法の推移

松本⁴⁻¹⁾によると、我が国のダム耐震設計の体系的な著作の先駆けは、1925年(大正14年)、土木学会誌に発表された物部長穂の「貯水用重力堰堤の特性並びに其合理的設計方法⁴⁻²⁾」とされている。これでは、重力式コンクリートダムの設計震度は、水平方向0.10~0.15(鉛直方向はこの50%)としている。また、フィルダム(土堰堤)については、物部、松村らが1934年(昭和9年)に世界で初めて地震による動的変形を解析的に求めており、土堰堤の設計震度は沖積地に建設したときは底部で0.15、頂部で0.2~0.3になるとしている^{4-3),4-4)}。

現在のダム耐震設計法には、河川管理施設等構造令に定められている「震度法」が用いられている。フィルダムの堤体設計は、主に堤体のすべりを対象とする「力学的安定性」と、堤体ならびに基礎地盤の浸透水を対象とする「水理学的安定性」に大別される。耐震設計は「力学的安定性」の検討のひとつとして、震度法を用いたすべり検討で実施される。つまり、フィルダム耐震設計法の推移は、地震時のすべり安定計算に関する基準の推移であるといえる。

我が国のフィルダムのすべり安定計算に関する基準については、松本⁴⁻¹⁾が取りまとめしており、これを基に我が国のフィルダムの耐震設計法の推移を概観する。

我が国のフィルダム耐震設計法の推移を表-4.1に示す。これに示すように、1953年(昭和28年)に農林水産省から出された土地改良事業計画設計基準(以下、土地改良基準)では、堤体のすべり検討方法として円形すべり面による安定検討が掲載されているが、地震力は含まれていない。

地震力が付与されるようになったのは、1956年(昭和31年)の土地改良基準の改訂、ならびに1957年(昭和32年)のダム設計基準の刊行からであり、堤体完成後満水時において堤体下流側方向への地震力を考慮することとなった。つまり、すべり安定計算方法の詳細を除けば、我が国フィルダムの耐震設計法は1956年(昭和31年)に基準化されたといえる。

1966年(昭和41年)の土地改良基準の改訂、ならびに1971年(昭和46年)のダム設計基準の改訂では、地震力を堤体上下流方向に考慮し、貯水位などの外荷重の組み合わせ条件が規定された。現在の河川管理施設構造令は1971年(昭和46年)のダム設計基準を踏襲しており、これが現在でも使用されている。なお、2003年のアメリカ合衆国陸軍工兵隊の基準⁴⁻⁵⁾でも、荷重と材料のせん断強さ、貯水位など荷重条件に応じた安全率が示されているが、この基準では地震力は含まれていない。

その後、1991年(平成3年)に「フィルダムの耐震設計指針(案)」が旧建設省内で試行され、現在でも指針(案)として取り扱われている。

また、2005年(平成17年)には「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」が試行され、土木学会が提議したレベル2地震動に対するダムの安全性を照査することに

なった。本指針(案)では「フィルダムでは地震による沈下などの塑性変形が貯水の越流を生じない程度に小さく、地震後に堤体が浸透破壊が生じないこと」が、所要の耐震性能と規定された。本指針(案)によるダムの安全性照査方法は、国土交通省国土技術政策総合研究所の「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)に関する資料」の中に具体的に示されている⁴⁾⁶⁾。

我が国フィルダムの耐震設計法が1956年(昭和31年)に基準化されたとすると、表-3.1に示した我が国のダム建設年代によればダム総数2642基(2013年の統計、建設中を除く)のうち、第二次世界大戦以前(1945年)に建設された895基、つまり全ダムの約34%は耐震設計法が基準化される前に完成しており、震度法による耐震設計が実施されていない可能性があるといえる。

一方、ダムの耐震設計法については、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」が発せられたものの現在のところ基準化には至っていない。これは、1995年の兵庫県南部地震やそれ以前の著名な地震で近代的な設計・施工によるフィルダムに重大な被害が発生していないためであり、ダムの耐震設計法は現在でも基本的には1966年(昭和41年)の土地改良基準ならびに1971年(昭和46年)のダム設計基準に示された方法が用いられているといえる。

しかし、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」以降、新潟中越地震における信濃川発電所ダム群の被災、東北地方太平洋沖地震における藤沼ダム(1949年、福島県、E、堤高18.5m)の決壊などが生じており、ダムの耐震性と耐震設計法について注目が集まっている。

(再掲)表-3.1 既設ダムの型式と建設年代³⁻¹⁾から作成

年代	備考	フィルダム			コンクリートダム			台形CSG	計
		アース	ロックフィル	表面遮水型	重力式	アーチ	バットレス		
1603以前	～安土桃山	35	734	0	0	0	0	0	895
1603～1867	江戸時代	319		0	0	0	0	0	
1868～1899	明治	35		0	0	0	0	0	
1900～1930	明治～大正	162		0	0	45	0	4	
1930～1945	昭和初期	183		0	0	107	2	3	
1946～1990	戦後・昭和	422	161	12	596	61	14	0	1266
1990以降	平成～現在	88	121	4	261	4	1	2	481
計		1244	282	16	1009	67	22	2	-
		1542 (全ダムの60%)			1098			2	-
		2642							

*堤高15m以上のダムを対象とし、堰を除く

表-4.1 我が国のフィルダム耐震設計法の推移 ⁴⁻¹⁾から作成

西暦	基準名	掲載箇所	所管	検討方法	地震力の考慮	必要安全率	備考
1953	土地改良事業計画設計基準	第3部設計第1編土堰堤	農林水産省	円形すべり面安定検討	アースダム：考慮せず	1.3～1.5	・地震力と貯水の影響を考慮せず
1956	土地改良事業計画設計基準	第3部設計第1編アースダム(改定案)	農林水産省	同下	同下	同下	・下欄「大ダム設計基準」の内容と整合を図るために発刊 ・一部にロックフィルダムの記述あり
1957	ダム設計基準	-	国際大ダム会議日本国内委員会	円形すべり面安定検討	アースダム：考慮	1.5以上(すべての条件において1.2以上)	・検討条件は、①堤体完成直後、②堤体完成後水位急低下時、③堤体完成後満水時を規定 ・地震は堤体完成後満水時で考慮
				経験的に設定	ロックフィルダム(表面遮水壁型)：考慮せず	堤体用岩石の安息角程度(1:1.3～1:1.45程度)	・石淵ダム(1953年)の法面勾配は、海外の事例を参考に安息角に地震に対する余裕を持たせるといふ考えを基に決定
				円形すべり面安定検討	ロックフィルダム(内部遮水壁型)：考慮せず	-	・法面勾配を例示している 中央遮水壁型：1:2.0～1:2.5 傾斜遮水壁型：1:2.5～1:3.0
1966	土地改良事業計画設計基準	第3部第1編フィルダム	農林水産省	円形すべり面安定検討	フィルダム：考慮 ・均一型 ・ゾーン型 ・表面遮水壁型	1.2以上(満水位時)	◆アースダムの経験を踏まえ、ロックフィルダムにも対応 ◆外荷重の組み合わせ条件 ①完成直後(貯水池空虚)、地震なし($F_s=1.3$) ②完成直後、貯水池、地震なし($F_s=1.3$) ③水位急低下時、地震なし($F_s=1.2$) ④満水位+地震($F_s=1.2$) ⑤中間水位時+地震($F_s=1.15$)
1971	ダム設計基準	フィルダムの章の改訂版が刊行	国際大ダム会議日本国内委員会	円形すべり面安定検討	*アースダムとロックフィルダムが統合	1.1に所要の値(0.1)を加えた値	◆外荷重の組み合わせ条件 ①常時満水位、定常浸透流、地震力100% ②完成直後、間隙圧残存、地震力50% ③中間水位、定常浸透流、地震力100% ④水位急低下時、地震力100% ⑤サーチャージ水位、地震力50% ⑥異常洪水水位、地震力0%
1972	土地改良事業計画設計基準の追補	第3部第1編フィルダム	農林水産省	1966年の土地改良事業計画設計基準からの大きな変更なし			・円形すべり安定計算において上流側貯水面以下の地震慣性力を求めるとき、「飽和重量×震度として求める」と明記された
1976	河川管理施設等構造令	-	政令	ダム設計に関わる箇所は、1971年のダム設計基準を踏襲			・洪水吐の容量を決めるダム設計香水流量という概念規定が盛り込まれる
1978	第二次改訂ダム設計基準	-	(社)日本大ダム会議	河川管理施設等構造令(1976年)との整合が取られた			・付録として、フィルダムの動的解析の解説を掲載
1981	土地改良事業計画設計基準	設計ダム	農林水産省	河川管理施設等構造令(1976年)、第二次改訂ダム設計基準(1978年)との整合が取られた			・円形すべり安定計算に使用するせん断強さの設定方法について解説が掲載
1985	河川砂防技術基準(案)	-	旧建設省	河川管理施設等構造令(1976年)、第二次改訂ダム設計基準(1978年)からの大きな変更なし。			・建設省内の基準として制定
1991	フィルダムの耐震設計指針(案)	-	旧建設省	堤体の加速度応答とロック材の内部摩擦角の拘束圧依存性を考慮			・建設省内で試行
2003	土地改良事業計画設計基準	設計ダム基準書技術書(共通編)	農林水産省	1966年の土地改良事業計画設計基準からの大きな変更なし			・せん断強度設定方法、FEMなどの解析法を詳述
2005	大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)	-	国土交通省	土木学会が定義したレベル2地震動に対するダムの安全性照査を規定			・フィルダムでは地震による沈下などの塑性変形が貯水の越流を生じない程度に小さく、地震後に浸透破壊が生じない性能が所要の耐震性能と規定

4.2 フィルダムの地震被害事例

我が国では、1995年の兵庫県南部地震やそれ以前の著名な地震では、近代的な設計・施工によるフィルダムに重大な被害は生じなかった。しかし、新潟中越地震における信濃川発電所ダム群の被災、東北地方太平洋沖地震における藤沼ダム(1949年、福島県、E, 堤高 18.5m)の決壊などが生じており、今後、これまでの考え方が変化することが予想される。

新潟地震(1964年)から鳥取県西部地震(2000年)までのフィルダムの地震被害事例は、(財)ダム技術センターの書籍⁴⁻⁷⁾にまとめられている。さらに各種文献に基づいて新潟中越地震(2004年)、宮城・岩手内陸地震(2008年)、東北地方太平洋沖地震(2011年)の事例を取りまとめて、我が国のフィルダム地震被害事例を概観する。

4.2.1 新潟地震から鳥取県西部地震まで

(財)ダム技術センターの書籍⁴⁻⁷⁾にまとめられている下記の地震によるフィルダムの被害をまとめて表-4.2に示す。

- 新潟地震 (1964年6月16日, M7.5)
- 十勝沖地震 (1968年5月16日, M7.9)
- 大分中部地震 (1975年4月21日, M6.4)
- 宮城県沖地震 (1978年6月12日, M7.4)
- 日本海中部地震 (1983年9月14日, M6.8)
- 長野県西部地震 (1984年9月14日, M6.8)
- 釧路沖地震 (1993年1月15日, M7.8)
- 兵庫県南部地震 (1995年1月17日, M7.3)
- 鳥取県西部地震 (2000年10月3日, M7.3)

表-4.2に示すように、新潟地震(1964年)から鳥取県西部地震(2000年)まではフィルダムの被害のほとんどはダム堤体にクラックや小規模なすべりが生じるというものである。

しかし、河川管理施設構造令(1976年)適用以前のため池などの土堰堤では、地震による被害が報告されている。新潟地震では7基のアースダム(堤高15m未満のため池を含む)が決壊、7基が貯水不能に陥ったとの記録が記されている。これらは、堤体または斜樋、底樋のクラックからの漏水による堤体の浸食に起因したものが多い。

(財)ダム技術センターの書籍⁴⁻⁷⁾には、これらの土堰堤の多くは近代的なロックフィルダムとは異なり、①堤体に難透水性材料が使用されておりその大部分が飽和していた、②堤体に液状化を起こす材料が使用されていたなどの要因が挙げられている。

長野県西部地震(1984年)ではダムに被害はほとんどなかったが、第二次世界大戦後に初の本格的ロックフィルダムとして建設された牧尾ダム(長野県、1959年、RF, 堤高

表-4.2 フィルダムの地震被害(1964年～2000年)⁴⁻⁷⁾から作成

地震名	発生年月日	規模	近郊のダム数	被災数	フィルダムの主な被害の概要
新潟	1964年 6月16日	M7.5	約8700の アースダム (堤高15m未満のため池含む)	アースダム・土 堰堤: 被災146 決壊7 貯水不能7	・地震当時、地震地域には堤高が高いロックフィルダムは少なかった。 ・被災を受けたのはアースダムが大部分を占め、堤体にクラックが生じた。 ・アースダムの崩壊は、堤体または斜樋、底樋のクラックからの漏水による堤体の浸食に起因するものが多い。 ・震源から約145km離れた(CFRD)である皆瀬ダム(秋田県)は、漏水が一時的に増加したが、2日後には元の水量に戻っている。また、地震によって堤頂が26cm沈下し、15cm下流側に変位した。
十勝沖	1968年 5月16日	M7.9	—	アースダム・土 堰堤: 被災93 (堤高10m以上 10基)	・アースダム、土堰堤の93が被災し、このうち堤高が10mを超えるものは10ダム。 ・アースダムでは、堤体上流側のすべり、堤体にクラックが生じたもの、取水構造物が破損したものが多い。 ・山王海ダム(当時、E、岩手県)の堤頂部最大加速度(堤頂)は158Gal、四十四田ダム(GF複合、岩手県)の最大加速度(堤頂)は93Galであった。
大分中部	1975年 4月21日	M6.4	—	2	・山下池(大分県、1918、均一型E):地震時はほぼ満水位状態。堤体天端、堤体上流面、アバット部などに幅最大20cm程度、深さ1.5m以下のクラックが発生。地震後の浸潤面に異常なし。
宮城県沖	1978年 6月12日	M7.4	旧建設省管轄 198	6	①牛野ダム(宮城県、1972年、RF、堤高21.4m、震央から122km):堤体上流面にクラックが発生。ダム機能に問題なし。 ②蒜但木ダム(宮城県、1947年、E、堤高21.6m、震央から122km):堤体天端などにクラックが発生。クラックはダム軸方向最大で17m、幅4.5cmで深さは40～50cm。 ③皆瀬ダム(秋田県、1963年、CFRD、堤高66.5m、震央から167km):基礎部の最大加速度は48Galであり、漏水量が地震前後で約5%増加。 ④蛭沢ダム(山形県、1948年、E、堤高24m):堤体堤頂部にクラックが発生。(新潟地震でも同様の被害) ⑤樽水ダム(宮城県、1976年、RF、堤高43m):基礎部の最大加速度236Gal、堤体に被害なし。
日本海中部	1983年 5月26日	M7.7	—	ダム被害: ほとんどなし	①新小戸六ダム(青森県、1967年、E、堤高21.8m):堤体上流側捨石張りにクラックが発生。 ②湯の沢ダム(秋田県、1938年、E、堤高19.4m):堤体天端および上流捨石張部に長さ34m、幅15cm、深さ15m以上のクラックが発生。 ③八面沢ダム(秋田県、1951年、E、堤高16.5m):堤体天端に長さ34m、幅最大5cmのクラックが発生。(老朽化のため1970年に改修工事が実施されている。)
長野県西部	1984年 9月14日	M6.8	震央から100km 以内に堤高の高い ダム10数基	ダム被害: ほとんどなし	①牧尾ダム(長野県、1959年、RF、堤高105m、震央から約5km):堤体天端にダム軸方向、深さ約1.5mのクラックが生じたが、ダム機能に問題はなかった。ダムサイト近傍岩盤では余震(M5.3、1984/10/3発生)において最大加速度719Galを観測。
釧路沖	1993年 1月15日	M7.8	震央から50km以 内に堤高15m以 上のダムなし	ダム被害: ほとんどなし	①門別ダム(北海道、1971年、均一型E、堤高20.8m、震央距離から約180km):堤体上流側法面の張りブロックがダム軸全長にわたって10cm程度重なり合いめくれ上がった。地震時の最大加速度は不明。
兵庫県南部	1995年 1月17日	M7.3	251	規模の大きな 被害なし	①常盤ダム(兵庫県、1974年、E、堤高33.5m):淡路島の野島断層から約700mに位置しており、最も地震断層に近いダムである。堤体天端に長さ5m、幅2～3cmのクラックが発生したが、堤体の変状は認められず。 ②谷山ダム(兵庫県、1974年、E、堤高28.2m、淡路島の野島断層から約3kmに位置):堤体天端に長さ5m、幅2～3mmの小クラックが発生したが、堤体法面の変状は認められず。 ③北山貯水池第一ダム(兵庫県、1968年、均一型E、堤高24.5m):堤体上流法面の貯水位よりわずかに上の標高において、表層捨石部に浅い滑落(深さ1～1.5m、ダム軸方向延長100m)が生じたが、ダム堤体の安定性や機能に影響するものではなかった。
鳥取県西部	2000年 10月3日	M7.3	180	規模の大きな 被害なし	特になし

4.2.2 新潟中越地震(2004年)

新潟中越地震は2004年10月23日に新潟県中越地方を震源として発生したM6.8、震源の深さ13kmの直下型の地震である。新潟県川口町で震度7、小千谷市で震度6強、長岡市および十日町市、栃尾市、中里町で震度6弱を記録した。ダム管理者による臨時点検では全114ダムのうち111基のダムで変状はなかった。しかし、小千谷市、十日町市、川西町の3ダム(川西ダム、長福寺ダム、坪山ダム)と、これに加えて3貯水池で変状が報告されたが、人的ならびに物的な被害には至らなかった⁴⁻⁸⁾。3貯水池(浅河原、新山本、山本)は東日本旅客鉄道(株)が管理する河道外貯水池であり、発電用水を貯水している。発電所の全面的な復旧には約2年半(507日)を要した⁴⁻⁹⁾。

(1) 浅河原調整池⁴⁻¹⁰⁾

浅河原調整池(新潟県、1945年、E、堤高37.0m)は、新潟県十日町市に位置する第二次世界大戦中(1933年着工、途中中断あり、1945年供用開始)に建設されたアースダムである。本震震央からの距離は約22kmである。地震によって堤体天端、ダム軸方向に長さ200mの不連続のクラックが複数発生し、開口幅は最大40cmに達した。また、クラック群によって貯水池側に下がるような段差(合計最大約70cm)が生じたが、心壁部の地震による沈下量は5cm程度(堤高37mの0.1%程度)であった。

なお、堤体に地震計が設置されていなかったため地震記録は不明であるが、気象庁や防災科学技術研究所のK-NETの記録、さらに浅河原調整池から約7km離れた川西ダム(アースダム)の観測記録などを用いた分析によると、ダム堤体基盤面の最大加速度は400~500Galであった可能性が指摘されている。

地震直後の浅河原調整池の状況を写真-4.1~4.3に示す。堤体標準断面図である図-4.3に示すように、ほぼ同時期に建設された山口貯水池堤体(第2章(2)参照)と同様に、半透水(フィルタ)ゾーンがなく、基礎地盤の遮水を目的にコンクリート止水壁を設けている。心壁部分と上流さや土には細粒分が40%を超える材料を、下流さや土は付近で採取した最大粒径100mm程度の砂礫を使用している。締固めは人力を主体として質量2~10tの転圧機が使用されている。

地震直後から詳細な調査が実施され、ダム軸に平行な天端表面のクラックおよび段差は心壁には達しておらず、心壁は健全であることが確認された。また、さや土の深部および岩着部も健全であり、被害は堤体天端付近のみに限定されることがわかった。堤体天端のクラックや段差は、堤体上部高さ3m程度の部分の締固めが不十分であったことが主因であると報告されている。このため、堤体復旧は原形復旧を基本として、堤体上部の部分を一度除去し、再盛立を行っている。

筆者は、技術研究所主任研究員として、地震直後から現地に常駐し被災状況調査(2004年11~12月)、復旧計画(2005年1~3月)ならびに施工支援(2005年4月以降)に従事した。

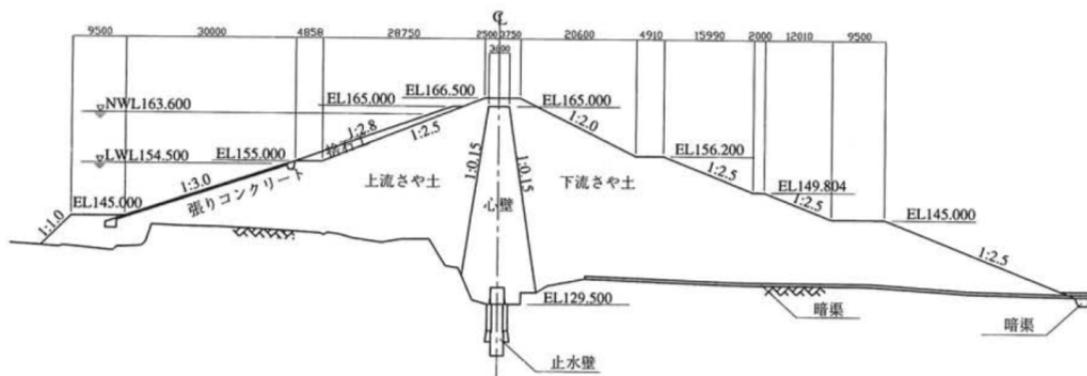


図-4.3 浅河原調整池堤体標準断面図⁴⁻⁹⁾



写真-4.1 地震後の浅河原調整池ダム堤体下流側全景(2004年著者撮影)



写真-4.2 地震後の浅河原調整池ダム堤体上流側全景(2004年著者撮影)



写真-4.3 地震後の浅河原調整池ダム堤体天端のクラック(2004年著者撮影)

(2) 山本調整池⁴⁻⁹⁾

山本調整池(新潟県, 1954年, E, 堤高 28.0m)は, 第二次世界大戦直後に着工した新潟県小千谷市に位置するアースダムであり, 我が国における大規模土工の草分けと言われている。ほぼ平らな河岸段丘面を掘り込み, 長さ 926.6m の堤体で囲んだ調整池である。本震震央からの距離は約 6km である。

地震によって, 堤体天端に短い縦断クラック, 貯水池法面のリップラップ部に小規模なすべり変状が生じた。また, 上流法面には噴砂が 7 箇所が発生していた。堤体の沈下量は堤体全体にわたり 0.1~0.2m と小さく, 堤高(28m)の 0.7%程度であった。堤体心壁部には最小幅 0.8m, 長さ 50m のコンクリート止水壁が配置されており, 心壁との間に 5~10mm の隙間が生じた。なお, 堤体に地震計が設置されていなかったため, 地震記録は不明である。

堤体のさや土には段丘堆積物の砂や砂礫, 信濃川河床の砂礫を用い, 心壁には粘性土に河床砂礫を混合した材料を使用している。締固めは機械土工となり, 心壁材はシープスフトローラで仕上り厚 0.1m 以下に, さや土材は平滑ローラにて仕上り厚 0.3m 以下に転圧した。これらの施工機械のほとんどはアメリカ軍からの払い下げ品である。

地震後の被災調査結果によると, 段差をもたらしたすべり面は最大深さ 0.5m, 噴砂の発生源は最大深さ 1m と堤体の表面に近い浅い部分の変状であることが確認され, 被害は限定的であるとされた。このため, 浅河原調整池と同様に原形復旧を基本とした復旧がなされている。

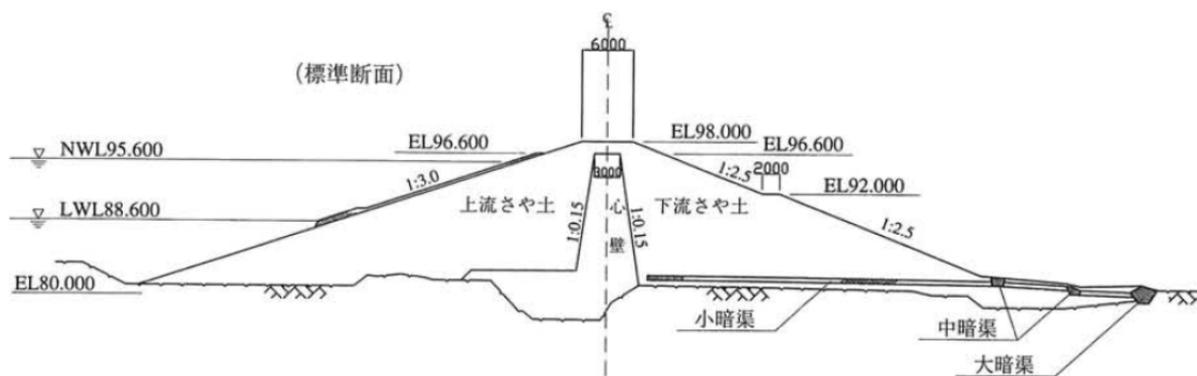


図-4.4 山本調整池堤体標準断面図 ⁴⁻⁹⁾

(3) 新山本調整池 ⁴⁻¹¹⁾

新山本調整池(新潟県, 1989年, RF, 堤高 42.4m)は, 新潟県小千谷市に位置するロックフィルダムであり, ほぼ平坦な河岸段丘面を掘り込み, 堤頂長 1,392m の堤体で囲んだ調整池である。本震震央からの距離は約 5km と非常に近かった。1985年着工, 1989年完成であり, 現行の技術基準に準拠した設計, 施工がなされている。

地震によって, 堤体天端アスファルト舗装に横断クラック(幅 3cm 以下)が数条発生した。堤体天端が沈下しており, 沈下量は貯水池側で大きかった。貯水池側のドレーン全面付近では, 左岸側堤体と堆泥の境界付近に噴砂が 12 箇所認められた。また, 堤体外側法面では一部に顕著なはらみ出しが認められた。

なお, 新山本調整池には地震計が設置されていたが, 余震が多くデータが上書きされてしまったため, 本震および余震の地震動の記録を得ることはできなかった。気象庁や防災科学技術研究所の K-NET の記録を用いた分析によると, ダム堤体基盤面での最大加速度は 507Gal(EW 成分)であった可能性が指摘されている。

発電のため毎日 13m の水位急低下が行われるため, 堤体内の残留間隙水圧対策として, 上流側にドレーン層が設けられている。コア材は 30t 級コンパクトドーザ, 仕上り厚 20cm 以下, シェル材およびドレーン材は 15.5t 級振動ローラ, 仕上り厚 1m 以下で締め固めた。

最も特徴的な被害は堤体の沈下であり, 沈下量は最大で約 0.85m と堤高(42.2m)の 2%近い値となった。この沈下量は山本調整池(堤高 28m の 0.7%程度)よりも大きい。既往の地震による堤体の沈下量は大きなものでも堤高の 0.5~1%程度であり, 新山本調整池の沈下量は近代的なダムとしては前例がない値である。

この原因として, 以下の可能性が挙げられている。

- ① フィルタによるコアの圧密沈下の拘束力が地震によって開放された。
- ② 建設時のシェル材は最大粒径 0.2~0.3m 程度の砂礫であり, 仕上り厚 1m で締め固めており各層の上部の密度は大きかったが, 下部では密度の小さな部分が

存在していた。

- ③ 繰り返される水位急低下時に上部側のシェルからドレーン層に細粒分が移動し、ドレーンの排水性が落ちていた。
- ④ 約 50m 高い段丘面に位置するため、山本調整池に比べて地震動の増幅があった。

松本⁴⁻¹⁾は、新山本調整池のロック材料には段丘砂礫(最大粒径 200~300mm)が使用され、これを仕上り厚 1m で施工していたことを要因として挙げている。多くのフィルダムの完成後の沈下実測事例によると、高リフト工法では堤体完成後の沈下量は堤高の 0.3~0.6% 程度、薄層で締め固めた場合 0.25% 以内であるとしており、これらと比較して新山本調整池の沈下量は明らかに大きいとしている。

さらに、上記②に関して、ロックゾーンという名称を理由に締め固め層厚(仕上り厚)を 1m とするのではなく、ロック材の最大粒径に応じて締め固め層厚を決めるべきとし、アメリカ合衆国の陸軍工兵隊マニュアルや開拓局のアースマニュアルの事例を紹介している。

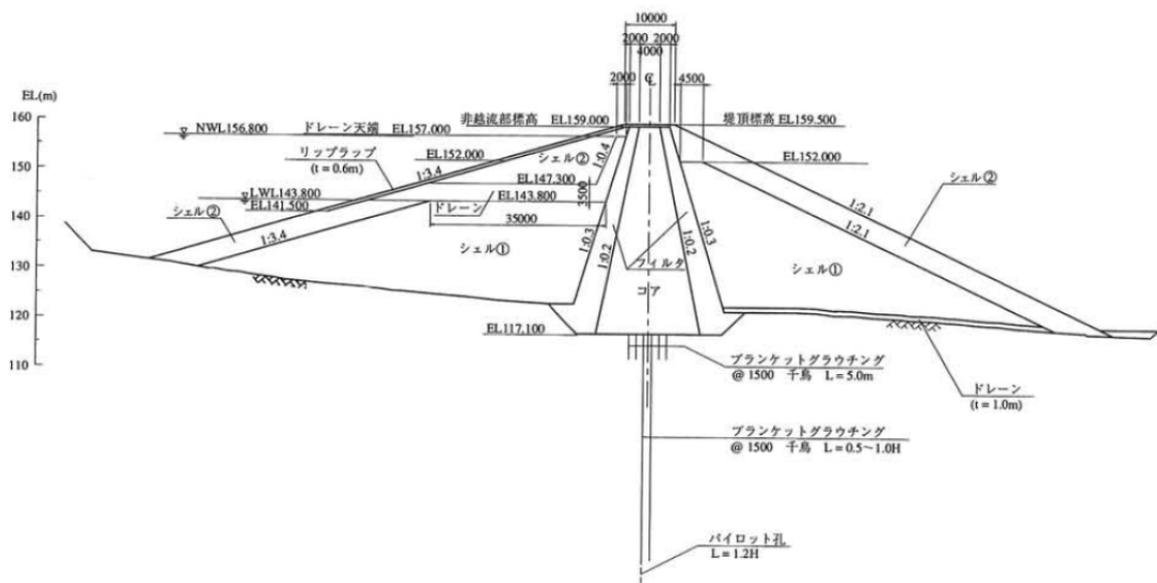


図-4.5 新山本調整池堤体標準断面図⁴⁻⁹⁾

4.2.3 宮城・岩手内陸地震(2008年)^{4-12),4-13),4-14)}

宮城・岩手内陸地震は2008年6月14日に岩手県内陸南部(仙台市の北、約90km)を震源として発生したM7.2の地震である。最大震度は宮城県栗原市ならびに岩手県奥州市での震度6強である。地震直後にダム管理者による付近のダムの点検(1次点検:134ダム, 2次点検:72ダム)が実施されており、安全性に関わる被害はなかった。震源断層付近には、我が国初のロックフィルダムでありコンクリート遮水壁型(CFRD)が採用されている石淵ダム, 上流貯水池側山体に大規模な崩壊が生じた荒砥沢ダム, 2008年当時建設中であった胆沢ダムなど8ダムがあった。

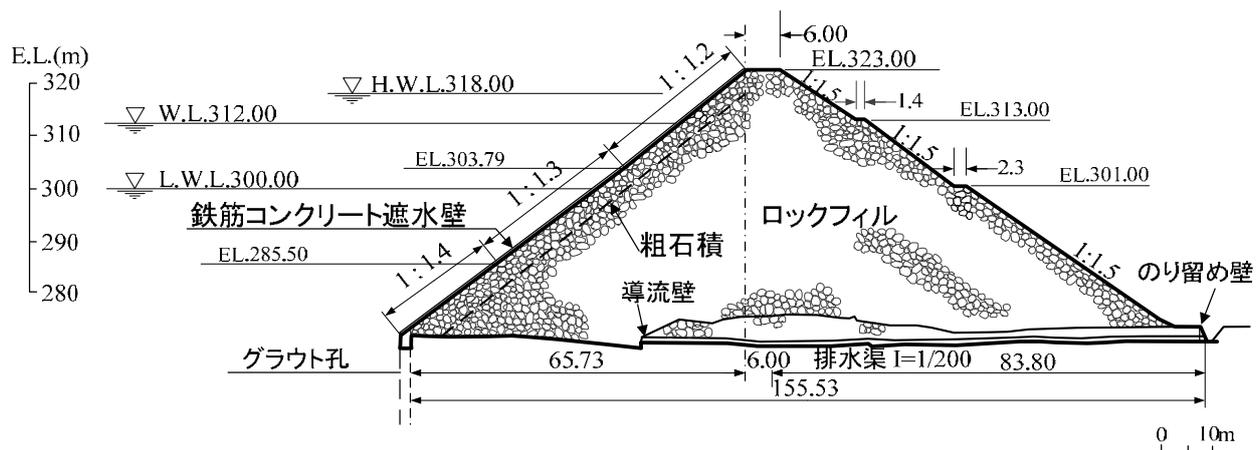
(1) 石淵ダム^{4-14),4-15)}

石淵ダム(岩手県, 1953年, CFRD, 堤高53m)は、岩手県奥州市に位置するコンクリート表面遮水壁型(図-3.4参照)が採用された我が国初のロックフィルダムである。地震によって、堤体天端道路のクラック, 天端高欄の傾き, 下流リップラップのゆるみなどが生じたが、上流側のコンクリート遮水壁にクラックなどの変状は生じず健全であった。また、洪水吐ゲートも正常に機能した。堤体天端と右岸側段丘で測定された最大加速度は2000Galであったが、右岸側段丘の加速度計は過去の地震においても他ダムの基礎岩盤の計測値よりも2倍程度大きな値を示しており、段丘堆積物の影響が含まれていると考えられる。このため、最大加速度は基礎岩盤で1000Gal程度で周期の早い(0.1~0.3秒)加速度波であったと推定されている。

地震後の石淵ダムの状況を写真-4.4~4.7に示す。

石淵ダムの盛立は、堅硬かつ大塊なロック材を高所(石淵ダムは最高29m)から落させ、高圧水を射水して締め固める「投石射水工法」が用いられている。これは、当時の施工機械の水準を考えれば止むを得ない方法であるが、完成後55年を経ても堤体の沈下が継続しており、岩手・宮城内陸地震で再び沈下が生じたことが報告されている⁴⁻¹⁴⁾。吉田ら⁴⁻¹⁵⁾は、地震時挙動について詳細な検討を行っており、大きな被害が生じなかった要因として、①上流側ロックゾーンに貯水圧による拘束力が作用していたため、②堤体上下流面にせん断強さが大きい粗石積部が存在し堤体の永久変形を抑制したためと論じている。松本⁴⁻¹⁾は、石淵ダムで生じた堤高の1%程度の沈下量がNewmark法による予測値よりも大きいことに着目し、この沈下は地震によってロック材料が繰返しせん断応力を受けて生じた体積ひずみによるものとしている。

また、松本⁴⁻¹⁾は2008年の四川大地震(中国, M8.0)において、石淵ダムと同様なCFRDである紫坪鋪ダム(Zipingpu, 堤高156m, 地震断層から9kmに位置)は天端で最大76cm沈下(堤高の約0.5%)し、遮水壁の継ぎ目が部分的に圧縮で損傷したものの貯水機能を保持し、地震に対して安全であった⁴⁻¹⁶⁾ことに触れ、CFRDが大地震に抵抗できた理由の解明と、紫坪鋪ダムの経験を今後の教訓にすることに、国際的な関心が寄せられているとしている。



(再掲)図-3.4 石淵ダム堤体標準断面図³⁻¹⁰⁾



写真-4.4 地震直後の石淵ダム全景(2008年著者撮影)



写真-4.5 地震直後の石淵ダムの堤体天端のクラック(2008年著者撮影)



写真-4.6 地震発生3ヶ月後の石淵ダム上流コンクリート遮水壁(2008年著者撮影)



写真-4.7 地震発生3ヶ月後の石淵ダム天端被災調査状況(2008年著者撮影)
(ダム建設時に使用した軌道の橋脚が堤体内に残置されており、その頭部付近を撮影したと思われる)

(2) 荒砥沢ダム^{4-13),4-14)}

荒砥沢ダム(宮城県, 1998年, RF, 堤高74.4m)は, 宮城県栗原市に位置するロックフィルダムである。地震によって, ダム基礎岩盤(底部監査廊内)で1024Galという国内で最大の加速度を記録した。兵庫県南部地震(1995年)の一庫ダムで183Gal, 箕面川ダムで135Gal, 鳥取県西部地震(2000年)の賀祥ダムで531Galを観測したが, これらを大きく上回った。しかし, ダム堤体は天端で198mmの沈下, 上流側に43mmおよびダム軸方向に60mmの堤体変形が確認されたのみで, 比較的軽微な変形に留まった。

一方, ダム堤体から左岸上流約800mの地点で発生した大規模な地滑りが特筆すべきである。最大の地滑りは, 長さ約1.3km, 幅約0.8km, 航空測量による崩壊土砂量は約6,700万 m^3 と見られている。ダム貯水池内に流入した土砂量は, 地震後の貯水位が2.4m上昇したことから, 約150万 m^3 と推定されている。

地震後の荒砥沢ダムの状況を写真-4.8~4.10に示す。

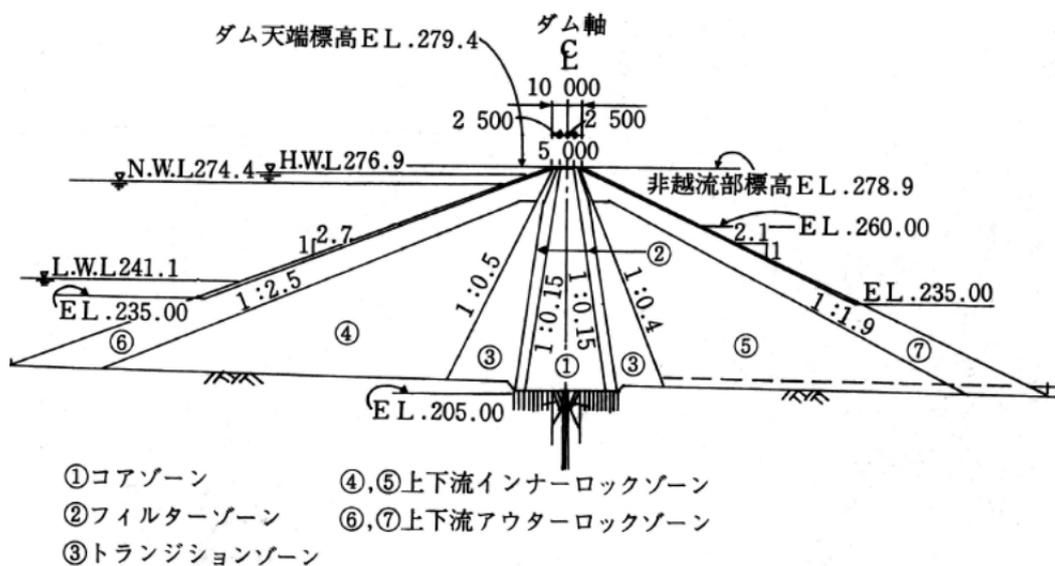


図-4.6 荒砥沢ダム堤体標準断面図⁴⁻¹⁷⁾



写真-4.8 地震発生 3ヶ月後の荒砥沢ダム堤体上流全景 (2008年著者撮影)



写真-4.9 地震発生 3ヶ月後の荒砥沢ダム堤体天端状況 (2008年著者撮影)



写真-4.10 地震発生3ヶ月後の荒砥沢ダム貯水池山体崩壊状況(2008年著者撮影)

(3) 胆沢ダム^{4-18),4-19)}

胆沢ダム(岩手県, 2014年, RF, 堤高132m)は, 岩手県奥州市に位置する堤体積1,350万 m^3 の我が国最大級のロックフィルダムである。2005年10月から堤体盛立に着手し, 堤高が約半分に達したところで被災した。施工中のロックフィルダムが大地震に遭遇した事例は稀有であり, 堤体盛立面全域でコア部ならびにコア, フィルタ境界付近で幅1~30mmのクラックが生じた。ただし, ロック盛立面には目立った変状は認められず, 測量の結果でも堤体の全体形状の変化はなかった。また, ロック材運搬道路の変状や洪水吐コンクリートのクラックなどが発生した。なお, 地震当日は土曜日であり盛立作業は休止していたが, 落石に巻き込まれた法面作業員1名が亡くなっている。

地震直後の胆沢ダムの状況を写真-4.11~4.13に示す。

胆沢ダムでは, 2004年の新潟中越地震における浅河原調整池などでの被災調査事例を参考にして, ①外観調査, ②クラック箇所のトレンチ調査, ③被災復旧方法の検討などを行い, 早期復旧に努めた。筆者は, 地震直後から現地に常駐し, 被災状況調査ならびに復旧計画(2008年6~7月)に従事した。

被災調査では, 地震の影響範囲の把握として予めクラックにトレーサを流入させた後, トレンチ掘削調査を行い, クラックの発生している深度を調査した。トレーサーには, コア部は水性ペンキ(10倍希釈, 赤色), フィルタ部はセメント系充填材「FSB[®]」⁴⁻²⁰⁾を使用した。調査の結果, クラックの最大深度はコア部で75cm, フィルタで260cmであった。さらに, 現場密度試験ならびに現場透水試験を実施し, 規格値を満足しない深度までを撤去し, 再盛立することとした。調査および撤去工, 復旧盛立に要した期間は3ヶ月となった。

なお, セメント系充填材「FSB[®]」は, 土構造物に生じるクラック補修材として, 著者が開発した材料である(特許04976073)。



写真-4.13 コアフィルタ境界部のクラック状況(2008年著者撮影)

4.2.4 東北地方太平洋沖地震(2011年)

東北地方太平洋沖地震は2011年3月11日に牡鹿半島の東南東約130km付近の太平洋三陸沖の海底、深さ約24kmを震源として発生した海溝型地震であり、Mw9.0と大正関東地震(1923年)のM7.9や昭和三陸地震(1933年)のM8.4をはるかに上回る規模であった。日本観測史上最大であるとともに、世界的にもスマトラ島沖地震(2004年)以来の規模で、1900年以降で4番目に大きな超巨大地震である。本地震が未曾有の人的ならびに物的被害をもたらしたことは記憶に新しい。

ダム管理者による地震後の臨時点検では400余のダムが対象となったが、ほとんどのダムで異常は確認されなかった。この臨時点検で異常が報告されたのは、以下のようなダムであるが、いずれも堤体に致命的な被害は生じていない^{4-21),4-22)}。

- ・ 堀川ダム (福島県, 2000年, RF, 堤高 57m)
- ・ 羽鳥ダム (福島県, 1956年, E, 堤高 37.1m)
- ・ 西郷ダム (福島県, 1955年, E, 堤高 32.5m)
- ・ 赤坂ダム (福島県, 1965年, E, 堤高 18.3m)
- ・ 矢の目ダム (栃木県, 1990年, E, 堤高 29m)
- ・ 南川ダム (宮城県, 1987年, G, 堤高 46m)
- ・ 化女沼ダム (宮城県, 1995年, RF, 堤高 24m)
- ・ 衣川1号ダム (岩手県, 1963年, E, 堤高 35.5m)

なお、堤高15m未満のため池も含めると、福島県を中心に合計745箇所ですべりやクラック発生などの被害が報告されている⁴⁻²³⁾。特に、藤沼ダム(福島県, 1949年, E, 堤高18.5m)では、地震によってダム堤体が決壊し、ダム下流の長沼地区および滝地区では死

者 7 名，行方不明者 1 名，流失もしくは全壊した家屋 19 棟，床上床下浸水家屋 55 棟という人的ならびに物的被害をもたらした^{4-24),4-25)}。また，羽鳥ダム(福島県，1956 年，E，堤高 37.1m)，西郷ダム(福島県，1955 年，E，堤高 32.5m)でも，致命的な被害ではないもののダム堤体方向のクラックが確認されている⁴⁻²⁶⁾。さらに，東京電力(株)塩原発電所(純揚水式)の上部調整池である八汐ダム(栃木県，1992 年，AFRD，堤高 90.5m)，ならびに電源開発(株)沼原発電所(揚水式)の上部調整池である沼原ダム(栃木県，1973 年，AFRD，堤高 38m)は，両者ともにアスファルト表面遮水壁型フィルダムであり，地震によってアスファルト表面遮水壁の一部にクラックが生じた^{4-27),4-28)}。

(1) 藤沼ダム

藤沼ダム(福島県，1949 年，E，堤高 18.5m)は福島県須賀川市に位置する灌漑用水用のアースダムであり，昭和 12 年(1937 年)に着工し，昭和 24 年(1949 年)に竣工している(第二次世界大戦による中断期間含む)。震央からの距離は 240km であった。藤沼ダムには本堤と副堤の二つの堤体があり，本堤は堤高 18.5m，堤頂長 133.2m のアースダムであり，副堤は堤高 10.5m，堤頂長 72.5m の土堰堤(堤高 15m 未満であり，河川管理施設等構造令の規制を受けるダムには該当しない)である。地震によって本堤は完全に決壊，副堤は致命的な被害を受け，貯水池から流出した大量の水が下流域の集落に達し，死者 7 名，行方不明者 1 名の大惨事を引き起こした。藤沼ダムの決壊は，第二次世界大戦以降，地震によって供用中だった堤高 15m 以上のダムが大規模に決壊した初の事例である。なお，藤沼ダムは 1949 年完成であり，我が国のフィルダム耐震設計法の基準化以前に設計，施工されたアースダムに該当する。

ダム管理者である福島県は，農業用ダム・ため池の耐震性検証を目的として「福島農業用ダム・ため池耐震性検証委員会」(委員長：田中忠次，(一社)地域環境資源センター理事長，元東京大学農学部教授)を設立し，藤沼ダム決壊の原因究明を目的とした調査・検討を行っている。同委員会による調査，検討の結果，下記のような見解が示されている^{4-24),4-25)}。

- 本堤は上部盛土(図-4.9 参照)の大部分が流出し，中部～下部盛土の下流側もほとんど流出した。本堤では大別して 7 段階の堤体すべりが発生しており，初期のすべりがその後の堤体越流，浸食を誘発し，堤体の決壊を引き起こした。
- 副堤では貯水池側へ幅 55m，長さ 25m，深さ 3m 以上の堤体すべりが発生し，さらに二次的なすべりが生じた。完全な決壊には至らなかったが，ダム堤体としては致命的といえる被害を受けた。
- 本堤堤頂部で最大 442Gal に達する強い地震動で，かつ「50Gal 以上の地震動が 100 秒間も継続した」過去に例の無い地震動であった。
- 本堤堤体上部には細粒分質砂材料が用いられていた。本材料は水で飽和され，地震動を受けると強度低下を起こす。

(2) 羽鳥ダム⁴⁻²⁶⁾

羽鳥ダム(福島県, 1956年, E, 堤高 37.1m)は, 福島県岩瀬郡天栄村に位置するアースダムである。震央からの距離は 260km であり, 地震時の震度は 5 強であったと推定されている。なお, 羽鳥ダムではダム堤体に地震計は設置されておらず, 地震記録は不明である。

ダム堤体は, 周辺地域の灌漑用水確保のために 1941 年(昭和 16 年)に国営白河矢吹開拓建設事業として建設に着手したが, 第二次世界大戦のために中断した。第二次世界大戦後, 1950 年(昭和 25 年)に建設が再開され, アメリカ軍から払い下げられたブルドーザなどの施工機械を導入し, 1956 年(昭和 31 年)に完成した。アースダムとしては湛水面積(2.01km²)と総貯水量(2,732 万 m³)は日本最大級である。なお, ダム堤体設計では, 現在のすべり安定計算より簡易な設計基準「土堰堤」(農林省農地局, 1953)の記述と同様の円弧すべり面法による法面の安定計算を実施している。

地震によって以下のような変状が生じたが, ダム堤体の安全性を喪失するような被害は生じなかった。

- ① 天端道路アスファルトの施工継目における離脱やクラック
- ② 堤頂上流法肩部の波返しの目地の開き, 段差(左右岸鉛直変位), ズレ(上下流方向水平変位)
- ③ 堤体下流法面の法肩直下の変状

なお, 上記①と②の変状に関しては, すべての変状が供用中に生じた長期的な変状であるか, 地震によって発生した変状であるかは特定されていない。

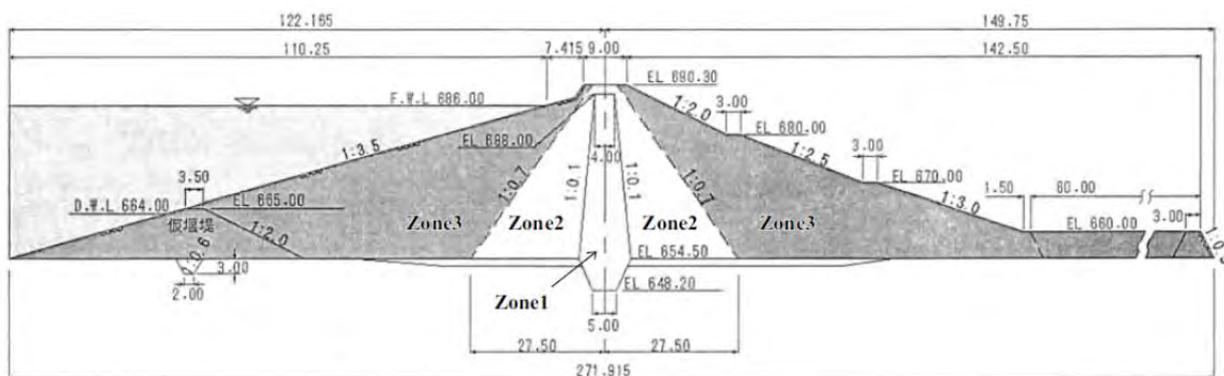


図-4.11 羽鳥ダム堤体標準断面図⁴⁻²⁶⁾

(3) 西郷ダム⁴⁻²⁶⁾

西郷ダム(福島県, 1955年, E, 堤高 32.5m)は, 福島県西白河郡西郷村に位置するアースダムである。震央からの距離は 265km であり, 羽鳥ダムと同程度である。

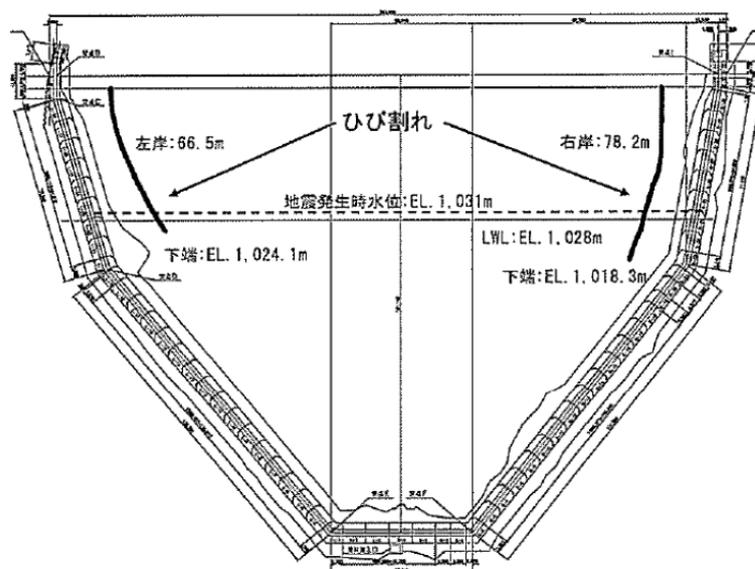


図-4.13 八汐ダム遮水壁クラック状況図(堤体正面図)⁴⁻²⁷⁾

(5) 沼原ダム

沼原ダム(栃木県, 1973年, 堤高 38m)は, 栃木県那須塩原市に位置するアスファルト表面遮水壁型フィルダムである。震央距離約 280km の栃木県北部の那須火山帯那須岳の西縁に位置する電源開発(株)沼原発電所(揚水式)の上部調整池であり, 掘込型である。地震記録はダム基礎で最大 210Gal, ダム天端で最大 382Gal を記録している。

地震によってアスファルト表面遮水壁の一部にクラックが生じ, 地震直後から監査廊内で計測している漏水量が増加した。このため, 緊急的に貯水位を低下させて, 表面遮水壁の点検調査を実施した。その結果, クラックは総延長 1,547m, 幅最大 2mm (ほとんどのクラック幅は 1mm 以下)であった。クラック発生位置は地山部と盛土部との境界付近が多く, ダム堤体については変状は生じていなかった。遮水壁の補修は約 2 ヶ月で完了している。⁴⁻²⁸⁾

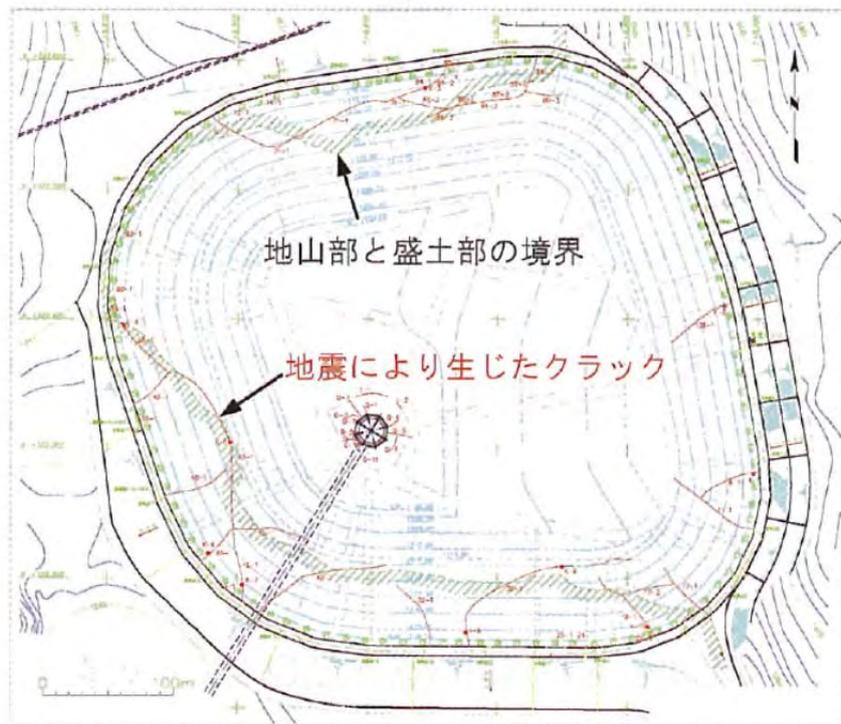


図-4.14 沼原ダム遮水壁クラック状況図(貯水池平面図)⁴⁻²⁸⁾

4.3 既設フィルダムの耐震性向上の必要性

本章では、我が国のフィルダムの耐震設計法の推移ならびに地震被害を概観した。その結果、我が国フィルダムの耐震設計法は1956年(昭和31年)に基準化されていることから、我が国のダム総数2,642基(2013年の統計、建設中を除く)の約34%を占める第二次世界大戦以前に建設されたダム895基については、耐震設計が実施されていない可能性があることがわかった。東北地方太平洋沖地震(2011年)で決壊した藤沼ダムは1949年完成であり、我が国のフィルダム耐震設計法の基準化以前に設計、施工されたアースダムに該当する。

世界有数の地震国であり、かつその他の自然災害も頻発する我が国において、既設ダムの約34%が耐震設計が実施されていない可能性があることは、由々しき状況であると言わざるを得ない。東北地方太平洋沖地震による藤沼ダムのように、供用中のダム決壊による人的、物的被害は甚大である。さらに、建設年代が古いダムの場合、ダム近傍にまで居住地区が発達している場合があることも併せて考えると、想定される被害はさらに甚大となる。このため、2005年に国土交通省河川局から発せられた「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」に準拠した既設ダムの耐震性照査は急務であり、この結果に基づいて耐震性向上を推進する必要があると考える。

我が国最古のフィルダムである狭山池は1,400年の間に6回の大改修をしている。このように、フィルダムの安全性と機能の維持、向上のためには、耐震補強などのリニューアルが必要である。

なお、ダムリニューアルとは既設ダムの機能の保全、拡充などの事業全般を指しており、再開発と称されることもある。

4.3.1 既設フィルダム堤体改修の事例

谷、福島は、農業用フィルダムを中心に、ダム堤体改修の事例調査結果をとりまとめている⁴⁻²⁹⁾。これによると、フィルダム堤体改修の理由として以下のようなものを挙げている。

- ① 堤体の断面不足、漏水、あるいは大規模地震動が想定される場合、堤体の補強や漏水防止が必要。
- ② 旧基準で築造された堤体は洪水容量や余裕高が不足し、現行基準に合致するように堤体嵩上げが必要。
- ③ 堤体下流域の市街化が進行し、より高い安定性や洪水調節機能が必要。
- ④ 用水需要の増加やその内容の多様化に対応して、貯水容量増加のための堤体嵩上げが必要。
- ⑤ 貯水池に堆積した底泥土や土砂が貯水容量の減少や、水質悪化の原因となる場合にはこれらの浚渫除去が必要。

このように、フィルダム堤体の改修の目的は、耐震性向上以外にも多岐にわたる。このため、本研究では耐震性向上や嵩上げなどの堤体改修や補強をフィルダムリニューアルとして捉えることとした。

既設フィルダムの耐震補強工事としては、山口貯水池(1934年、東京都、埼玉県、2002年に堤体強化工事が竣工⁴⁻³⁰⁾)や山倉ダム(1964年、千葉県、2004年に耐震強化工事が竣工⁴⁻³¹⁾)、村山下貯水池(1927年、東京都、2008年に耐震強化工事が竣工⁴⁻³²⁾)、大原ダム(1953年、滋賀県、2011年に堤体改修工事が竣工⁴⁻³³⁾)、初立池(1969年、愛知県、2013年に耐震補強工事に着手)などが挙げられる。

4.4 フィルダムリニューアルの技術的課題

松本⁴⁻¹⁾はフィルダムリニューアルは、ダム新設工事とは異なる個別ダムの特性に応じた設計・施工技術が必要であるとしている。

著者は、耐震性向上を目的としたフィルダムリニューアル工事である山口貯水池堤体強化工事(2章(2)参照)ならびに山倉ダム第一堰堤強化工事(2章(3)参照)に従事した。図-4.15は著者自身の施工経験に基づいて整理したフィルダムリニューアルの技術的課題である。図-4.15に示すように、フィルダムリニューアルの技術的課題には、調査～設計～施工の各段階においてフィルダム新設工事にはなかった新しい技術的課題がある。

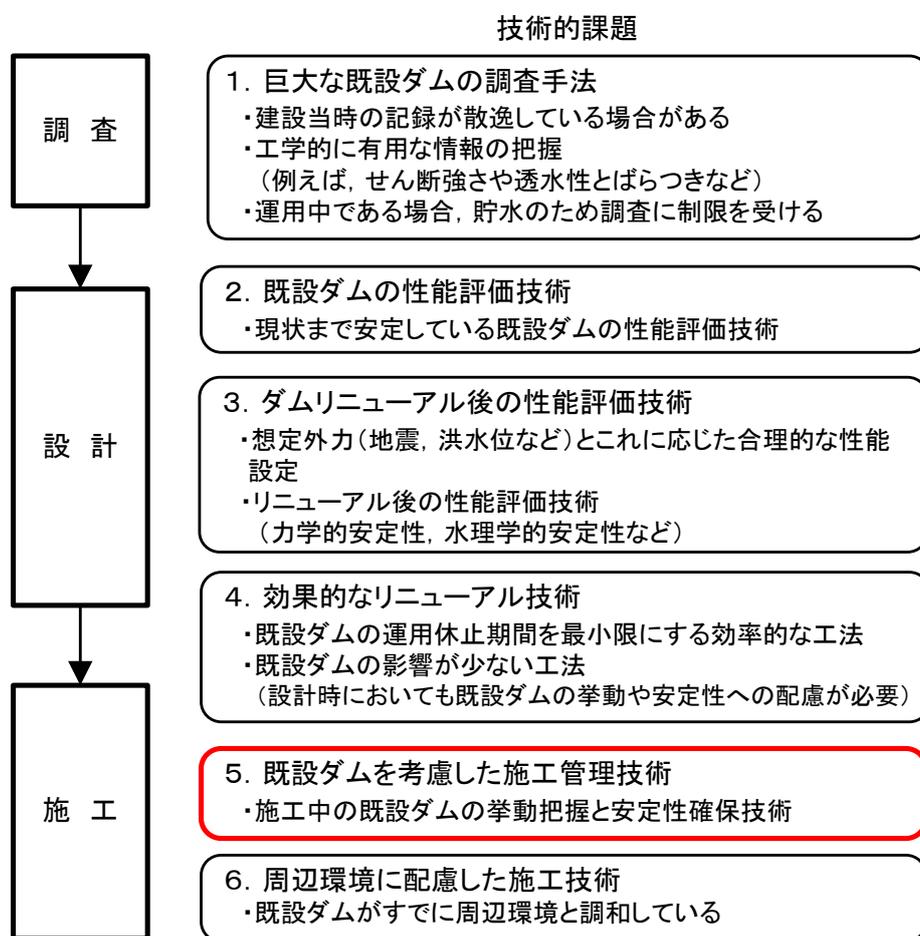


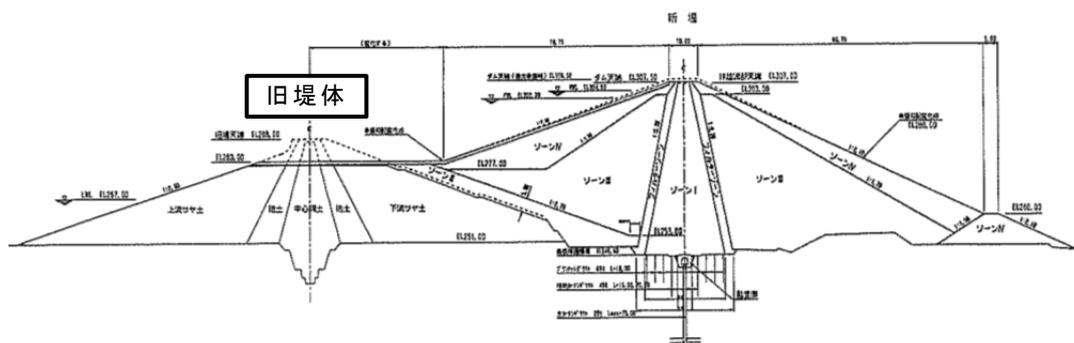
図-4.15 フィルダムリニューアルの技術的課題

また、谷、福島は、フィルダム堤体改修においては、改修目的に応じて可能な限り既設堤体を活用する必要があるとしている⁴⁻²⁷⁾。例えば、フィルダムリニューアルでは建築構造物のようにダム堤体全てを撤去し、その後新たにダム堤体を建設することは現実的とはいえず、既設堤体を有効利用するケースがほとんどであると考えられる。

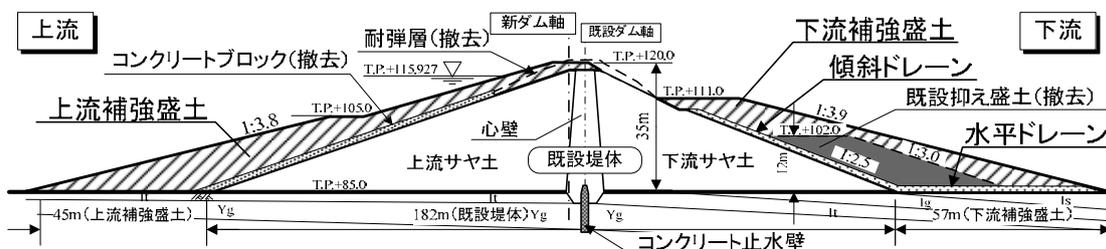
山王海ダム嵩上げ工事の標準断面図(図-2.1 参照)および山口貯水池堤体強化工事の標準断面図(図-2.2 参照), 山倉ダム第一堰堤強化工事の標準断面図(図-2.3 参照)に示すように, 全てにおいて既設堤体(旧堤体)が存在することがわかる。つまり, フィルダムリニューアルでは新設部分だけでなく, 既設堤体を考慮することが必要であり, リニューアル工事においては「既設堤体の安定性に着目した施工管理技術」が必要である。

著者は, 自身が携わった山王海ダム嵩上げ工事(2章(1)参照)で施工中の既設堤体の機能維持という技術的問題に直面した。この経験を基に, 自身が従事した山口貯水池堤体強化工事(2章(2)参照)における施工管理上の対策として「既設堤体の安定性に着目した情報化施工管理」を提案し, これを実践した。

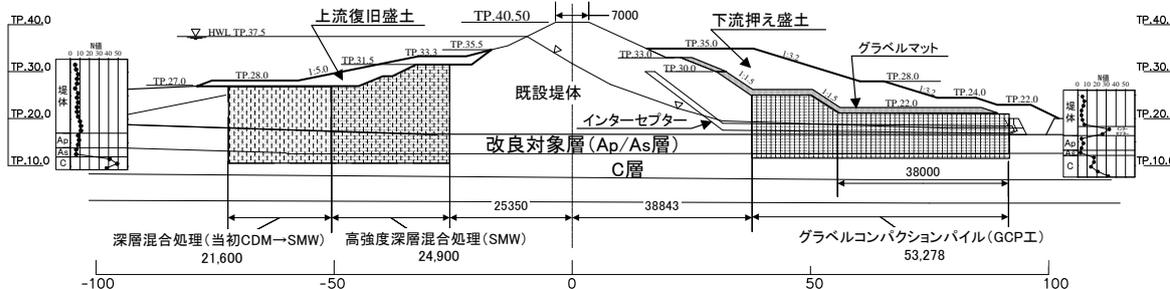
山口貯水池堤体強化工事での取り組みについては, 第5章で述べる。



(再掲)図-2.1 山王海ダム嵩上げ工事標準断面図 (2-2)



(再掲)図-2.2 山口貯水池堤体強化工事標準断面図 (2-7)



(再掲)図-2.3 山倉ダム第一堰堤強化工事標準断面図 (2-9)

4.5 第4章のまとめ

第4章では、我が国のフィルダム耐震設計法の推移と地震被害の事例を整理した。そして、現在においても早急な対応が必要であり、今後増加が予想される耐震補強などのフィルダムリニューアル特有の技術的課題について考察した。

第4章の内容を以下にまとめる。

- 1) 現在のダムの耐震設計法は、河川管理施設等構造令に定められている「震度法」が用いられている。
- 2) 我が国のフィルダムの耐震設計法は、1956年(昭和31年)の土地改良基準の改訂、ならびに1957年(昭和32年)のダム設計基準の刊行で基準化されている。以上のことから、第二次世界大戦以前に建設されたダム895基(全ダム数の約34%、アースダムが多い)は、基準が未整備だったため地震時の安定計算が実施されていない可能性が高いといえる。
- 3) 我が国の近代的な設計・施工によるフィルダムは、1995年の兵庫県南部地震やそれ以前の著名な地震(新潟地震、十勝沖地震、大分中部地震、宮城県沖地震、日本海中部地震、長野県西部地震、釧路沖地震)、鳥取県西部地震では重大な被害は生じていない。
- 4) 新潟中越地震(2004年)では信濃川発電所(東日本旅客鉄道株)の発電用水を貯水する3貯水池(浅河原、山本、新山本)が、宮城・岩手内陸地震(2008年)では石淵ダム、荒砥沢ダム、建設中であった胆沢ダムが被災したが、人的ならびに物的な被害には至らなかった。
- 5) 東北地方太平洋沖地震(2011年)では供用中であった藤沼ダム(福島県、1949年、E、堤高18.5m)堤体が決壊し、甚大な被害をもたらした。これは第二次世界大戦以降、供用中だった堤高15m以上のダムが大規模に決壊した初の事例である。なお、藤沼ダムは1949年完成であり、我が国のフィルダム耐震設計法の基準化以前に設計、施工されたアースダムに該当する。
- 6) 世界有数の地震国であり、かつその他の自然災害も頻発する我が国において、供用中のダム決壊による人的、物的被害は甚大であるため、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」(2005年、国土交通省河川局)に基づいた既設ダムの耐震性照査は急務であり、これに基づいた耐震補強を推進する必要がある。
- 7) フィルダムの安全性と機能の維持、向上のためには、耐震補強や嵩上げなどのリニューアルが必要である。
- 8) フィルダムリニューアルは既設堤体が存在する場合がほとんどであり、かつこれを有効利用することが求められる。つまり、フィルダムリニューアルは新設部分だけでなく、既設堤体を考慮することが必要である。特に、既設堤体の強度、変形に関する物

性値の効率的な調査技術や、施工中の既設堤体安定性確保技術などはリニューアル特有の技術的課題である。

- 9) フィルダムリニューアル工事における施工管理技術として、「既設堤体の安定性に着目した施工管理技術」が必要である。

【参考文献】

- 4-1) 松本徳久:我が国フィルダムの設計・施工の変遷, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.4, pp.394-413, 2009.10.
- 4-2) 物部長穂:貯水用重力式堰堤の特性並びに其合理的設計方法, 土木学会誌, Vol.11, No.5, 1925.
- 4-3) 松村孫次:地震動による土堰堤の変形, 土木試験所報告, 第 28 号, 1934.
- 4-4) Mononobe,N., Tahata.A. and Matumura,M. :Seismic stability of earth dams, *Proceedings,the 2nd Congress of Large Dams*,Washington,D.C.,pp.435_442,1936.
- 4-5) US Army Corps of Engineers: *Engineering and Design Slope Stability*,EM 1110-2-1902, Oct. 2003.
- 4-6) 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:大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料, 国土技術政策総合研究所資料, No.244, 2005.3.
- 4-7) (財)ダム技術センター:多目的ダムの建設, 平成 17 年版, 第 4 巻, 設計 I 編, pp.185-189, 2005.
- 4-8) 安田成夫, 佐々木隆, 松本徳久:平成 16 年(2004 年)新潟中越地震ダム調査速報, ダム技術, No.219, pp.73-75, 2004.
- 4-9) 野澤伸一郎, 栗田敏寿, 齊藤誠, 島峰徹夫:新潟中越地震における発電用調整池の被害と復旧, ダム技術, No.239, pp.29-48, 2006.
- 4-10) 滝沢聡, 島峰徹夫, 野澤伸一郎, 大町達夫:2004年新潟中越地震による浅河原調整池ダムの被害とその原因に関する考察, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.2, pp.612-623, 2007.
- 4-11) 滝沢聡, 島峰徹夫, 野澤伸一郎, 大町達夫:2004 年新潟中越地震を受けた新山本調整池ダムの被害とその原因に関する考察, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.532-543, 2008.
- 4-12) (財)ダム技術センター:速報ブン川地震と岩手・宮城内陸地震, ダム技術, No.262, pp.76-80, 2008.
- 4-13) 島本和仁, 佐藤信光, 大町達夫, 川崎秀明, 岩井慎治:2008 年岩手・宮城内陸地震によるダムの被害調査報告, ダム工学会災害調査委員会, 2008.
- 4-14) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人土木研究所, 独立行政法人建築研究所:平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告, 5. ダム, 国総研資料第 486 号, 2008.
- 4-15) 吉田等, 中村昭, 松本徳久, 葛西敏彦:2008 年岩手・宮城内陸地震による石淵ダムの被災と耐震性評価, 大ダム, No.216(2011.7), pp.39-44, 2011.
- 4-16) 松本徳久, 大町達男, 柏柳正之:2008 年汶川地震のダムへの影響, 大ダム, No.208-7, 2009.
- 4-17) 波多野圭亮, 佐藤信光, 富田尚樹:岩手・宮城内陸地震の強震動に対するロックフイ

- ルダムの地震応答挙動の再現解析, 平成 22 年度水資源機構技術研究発表会, 2010.
- 4-18) 佐々木隆, 小山幸男, 宍戸善博, 伊藤武志: 岩手・宮城内陸地震による胆沢ダムフィル
ル堤体の被災復旧概要, ダム工学, Vol.18, No.4, pp.251-262, 2008.
- 4-19) 品川敬, 菅原俊幸, 伊藤寧, 小林弘明: 岩手・宮城内陸地震による胆沢ダム堤体の災
害および復旧について, 平成 21 年度ダム工学会研究発表会・講演会講演集, 2009.
- 4-20) 鹿島建設(株): 空隙自己充填材「FSB[®]」
http://www.kajima.co.jp/tech/c_dam/investigation/index.html#body_03
- 4-21) 松本徳久, 佐々木隆, 雨宮宏文: 東北地方太平洋沖地震のダムへの影響－福島県南
部－, ダム技術, No.296, pp.48-54, 2011.
- 4-22) 入江洋樹, 柳川城二, 松本徳久, 佐々木隆, 佐藤信光: 東北地方太平洋沖地震のダ
ムへの影響(第 2 報)－宮城県, 岩手県－, ダム技術, No.297, pp.81-103, 2011.
- 4-23) 堀俊和, 上野和弘, 松島健一: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による福
島県のため池被害の特徴と応急対策, 農村工学研究所技報, 第 213 号,
pp.175-199, 2012.
- 4-24) 田中忠次, 龍岡文夫, 毛利栄征: 東北地方太平洋沖地震による藤沼湖の決壊原因
調査について, ダム工学, Vol.23, No.2, pp.99-114, 2013.
- 4-25) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会: 藤沼湖の決壊原因調査報告書,
2012.
- 4-26) 増川普, 田頭秀和, 黒田清一郎, 林田洋一: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖
地震による国営農業用フィルダムの被害, 農村工学研究所技報, 第 213 号,
pp.217-241, 2012.
- 4-27) 小長谷文彦, 渡部浩, 玉井猛: 東北地方太平洋沖地震に伴う八汐ダムの被災状況,
電力土木, No.362, pp.21-24, 2012.
- 4-28) 奥村裕史, 松本匡司, 小山喜久二: 平成 23 年東北地方太平洋沖地震による沼原発
電所沼原ダムへの影響およびその後の対応, 電力土木, No.362, pp.30-34, 2012.
- 4-29) 谷茂, 福島信二: 老朽化フィルダムの堤体改修の事例調査, 農村工学研究所技報,
第 206 号, pp.1-24, 2007.
- 4-30) 佐々木史郎, 村山眞: 既設アースダムの耐震強化工事－山口貯水池堤体強化工事
－, ダム技術, No.227, pp.112-120, 2005.8.
- 4-31) 渡邊秀敏, 萩原茂雄: 地盤改良工法による山倉ダム耐震性強化工事, 工業用水,
No.544, pp.14-36, 2004.1.
- 4-32) 田村聡志, 村山眞: 既設アースダムの耐震性強化－村山下貯水池堤体強化工事－,
ダム技術, No.242-11, pp.47-58, 2006.11.
- 4-33) 福島伸二, 谷茂: 大原ダムの砕・転圧盛土工法による堤体耐震補強の設計と施工, ダム
技術, No.812-6, pp.9-27, 2012.6.

