

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 25

担当チーム：水工構造物チーム
（水工研究グループ）

研究担当者：榎村康史（上席）、金銅将史、
佐藤弘行、小堀俊秀

【要旨】

供用開始後長期間経過したダムが増加する中であって、ダム本体における各種劣化・損傷事象の実態やその長期的な進行メカニズムに関する知見は十分でない。しかし、ダムを長期にわたり安全に供用していくためには、将来的な劣化・損傷の進行や、それがダムの安全性に与える影響度合いを考慮した合理的な維持管理が求められる。また、ダムの合理的な維持管理のためには、経験豊富な技術者の減少も踏まえつつ、長期供用に伴い挙動の安定化したダムにおける合理的な安全管理のための各種計測のあり方を検証するための考え方を明確化していくことも重要な課題である。本研究では、このような課題を解決するため、長期供用に伴うダム本体の劣化・損傷機構やそれを踏まえたダムの安全性への影響度の定量的な評価方法、また挙動が安定したダムでの計測を継続すべき基本計測項目・箇所等の考え方について、コンクリートダム本体を主な対象として検討した。

キーワード：コンクリートダム、劣化・損傷、健全度診断、安全性評価、安全管理

1. はじめに

わが国では、1900年以降、おおよそ2500基のダムが建設された。高度経済成長期の1960～1970年代に建設のピークを迎えたダムが供用開始後数十年を経過するなど、供用後長期間が経過するダムの数が急増しつつある。このような中、構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術を確立し、各種劣化・損傷が現状・将来的に構造安定性に与える影響度の定量的な評価を行い、適切な段階で、適切な補修を実施することで、安全性の確保を前提としたライフサイクルコストの縮減を達成できる合理的な維持管理が必要となってきた。また、ダム事業減少によりダムの設計・施工・構造に係る豊富な知識・経験を有する技術職員が減少し、技術的知識を必ずしも十分に有していない職員がダムの安全管理を行う場合も想定し、ダムの状態変化に応じた適切な維持管理を実現するため、長期供用ダムにおける安全管理のための計測の考え方を明確化することが求められている。

本研究は以上の課題解決に寄与することを目的とし、以下に示す3点を明らかにすることを目的として実施した。

① 各種劣化・損傷機構の類型化の提案

長期供用中のダム堤体に生じる様々な事象について、その形態や全国的な状況は必ずしも明らかでない。この

ため、国内外のダムの劣化・損傷事象の報告例等を調査・分析し、ダムの安全性に影響を及ぼす可能性のある各種事象を抽出した上で、健全性診断や安全性評価に際しての基礎情報としてその発生機構とともに類型化する。

② ダムの安全性に及ぼす影響度を踏まえた劣化・損傷評価方法

ダム本体の劣化・損傷機構による安全性への影響をダムの実測挙動解析や数値解析による分析により定量的に評価する方法を、定期点検や地震後臨時点検等での点検箇所や補修など対策箇所の優先度を検討する際の考え方として示す。

③ ダム管理技術者支援のための基本計測項目・箇所選定方法

挙動の安定した長期供用ダムにおける合理的な安全管理のための基本計測項目・箇所の考え方を明確化する。

なお、ダムはその堤体材料によりコンクリートダムとフィルダムに大別されるが、人工材料であるコンクリートはその長期的な劣化の進行や構造体としてのダムの安全性への影響において未解明の部分が多い。このため、本研究での各種調査・分析はコンクリートダムの堤体を主な対象とした。ただし、必要に応じてフィルダムの洪水吐きなどその他のコンクリート構造部分も対象に加えた。

研究の最終年度である平成 25 年度においては、以下の検討を行った。

上記①に関して、これまで実施してきたコンクリートダム本体等の劣化・損傷事象に関する調査・分析結果を踏まえ、長期供用に伴い想定すべき劣化・損傷機構についてその類型を整理しとりまとめを行った。

②に関しては、ダム堤体の健全性診断手法の1つとして、振動特性の変化に着目する方法の適用性（劣化・損傷による影響の検出可能性）を明らかにするため、貯水位や温度の変化による影響等についてダム堤体での常時微動計測のほか、地震動観測記録の分析により検討した結果について、ダムの健全度診断への適用の可能性を含めとりまとめた。また、ダム堤体の劣化・損傷による健全度の低下がダムの安全性（堤体の安定性）に及ぼす影響度を定量的に評価する方法として、構造設計上の安全率に及ぼす影響による評価の方法や大規模地震時におけるダム本体の損傷を考慮して評価する方法についてとりまとめた。

③に関しては、「長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方」について、過年度に実施したケーススタディーを踏まえ、とりまとめた。

以下では、以上の検討結果について、関連する過年度の主な検討結果を含めて示す。

2. 各種劣化・損傷機構の類型化

2.1 劣化・損傷事象の調査・分析

個々のダム施設の状態は、それぞれの施設管理者による日々の点検のほか、定期的な検査等によって把握され、その結果に応じ必要な対策が講じられている。しかし、ダムの長寿命化を考える上での基礎情報として、供用中のダムにおける経年劣化の兆候の有無や内容、発生傾向などについて全国的な状況の分析は十分ではない。このため、国内で供用中のコンクリートダム等の点検結果を調査し、報告された経年劣化の兆候と見られる事象の発生傾向などについて分析した。

対象は、1984年～2010年までの間に、通常の日常点検や定期検査とは別にダム全体にわたるより詳細な点検が実施された国内の約120のダムである。対象としたダムは基本的にはコンクリートダムであるが、フィルダムのコンクリート構造物である洪水吐を対象としたものも一部含まれている。調査対象ダムの竣工年は1960年以前、61～70年、71年以降が各約1/3ずつ、点検時点での経過年数で見ると、21～30年が最多で約45%、30年超が約40%、20年以下が約15%である。

対象ダムでは、詳細な点検によってもただちにダム堤体の安全性に影響を及ぼす事象は報告されていない。ただし、長期供用に伴うものと見られる堤体コンクリートの変状などいくつかの事象が報告されている。その代表的なものは表-2.1に示すとおりであり、①コンクリートのクラック（ひび割れ）、②継目の開き・ずれ ③漏水、④排水異常、⑤エフロッセンス、⑥鉄筋露出、⑦摩耗、⑧剥離・剥落などである。なお、これら以外に、ダム自体の変状ではないが、ダムの安全管理を目的として計測・監視される漏水量、揚圧力、変位等の計測用計器の不具合もしくは計測値に何らかの異常が認められた事例などが報告されている。これらは、⑨その他の異常として整理している。

表-2.1に挙げた各事象の報告件数の内訳を図-2.1に示す。事象別合計では、クラック（ひび割れ）に関する報告が最も多く、次いで漏水に関する報告が多くなっている。その他、遊離石灰（エフロッセンス）、剥離・剥落などが続き、供用開始からの経過年数が長いダムほど報告される比率が増加している。

報告件数が多かったクラックや漏水について、その状態の程度と供用年数の関係を図-2.2に示す。状態の程度は、評価A～Cで示している。評価Aは、緊急に対策を講じる必要性あり、評価Bは、現状では問題を生じていないが、数年のうちに対策の必要あり、評価Cは、評価AやBには該当しないが、何ら対策を講じなければ、将来、問題を生じる可能性ありとされたものである。なお、「—」は、将来的に何らかの対応を要することになる可能性があるものの、評価A～Cのいずれかに該当するものではないとされたものである。

同図からは、クラック・漏水とも類似する傾向が見られ、20年程度以上経過したダムでは、経過年数の増加に伴い、何らかの対策が必要とされる割合が増加している。なお、経過年数20年以下のダムでも何らかのクラック・漏水の報告事例があるが、この中には温度応力などに起因する初期ひび割れが含まれていることが一因と考えられる。

ダム堤体に生じるクラックは、その発生位置や範囲によっては、同時に漏水の発生経路となりうる。このように、変状として報告される個々の事象は必ずしも独立ではなく、ある事象が原因となって、他の事象としても報告されるケースも多いと考えられる。

また、例えば、寒冷地のダムにおいて何らかの原因により堤体表面付近に生じたクラックから水分が浸入し、経年的な凍結融解作用によってクラックが拡大ないし進


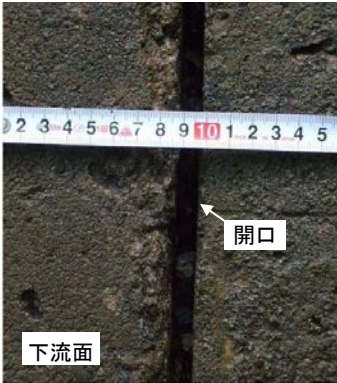






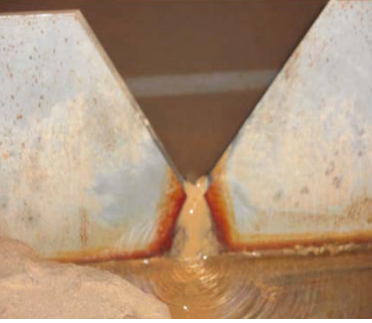
行することで漏水の発生に繋がる可能性、また、流水作用によって洪水（余水）吐き越流部の摩耗が進行し、表面コンクリートの剥離や鉄筋露出が生じるケースなど、初生的要因に、環境作用など他の要因が加わって変状を進行させるケースも考えられる。

このような個々の事象の変状の発生・進行の可能性は、ダムの置かれる環境条件や使用条件のほか、使用される

堤体材料や施工の状況など多くのによって異なると考えられる。このため、ダムの安全性や機能への影響の評価を含む健全度診断を的確に行うには、点検によって報告される事象の発生・進行のメカニズムおよびそれを考慮した将来的な影響の予測が重要となると考えられる。

2.2 劣化・損傷機構とその類型

表-2.1 コンクリートダムの点検で見られる劣化事象等の例¹⁾より作成

 <p>クラック (エフロレッセンスを伴う)</p> <p>クラック (監査廊内)</p>	 <p>開口</p> <p>下流面</p> <p>継目の開き・ずれ(横継目)</p>	 <p>水平打継目</p> <p>漏水</p> <p>クラック</p> <p>漏水(堤体下流面)</p>
 <p>排水異常(基礎排水孔からの流出物)</p>	 <p>揚圧力計測器</p> <p>エフロレッセンス</p> <p>エフロレッセンス(基礎排水孔内)</p>	 <p>鉄筋</p> <p>鉄筋露出(洪水吐きピア部)</p>
 <p>摩耗箇所</p> <p>摩耗(洪水吐き越流部コンクリート)</p>	 <p>剥離</p> <p>剥離・剥落(堤体下流面)</p>	 <p>その他の異常(漏水量計測用三角堰へのエフロレッセンス付着)</p>

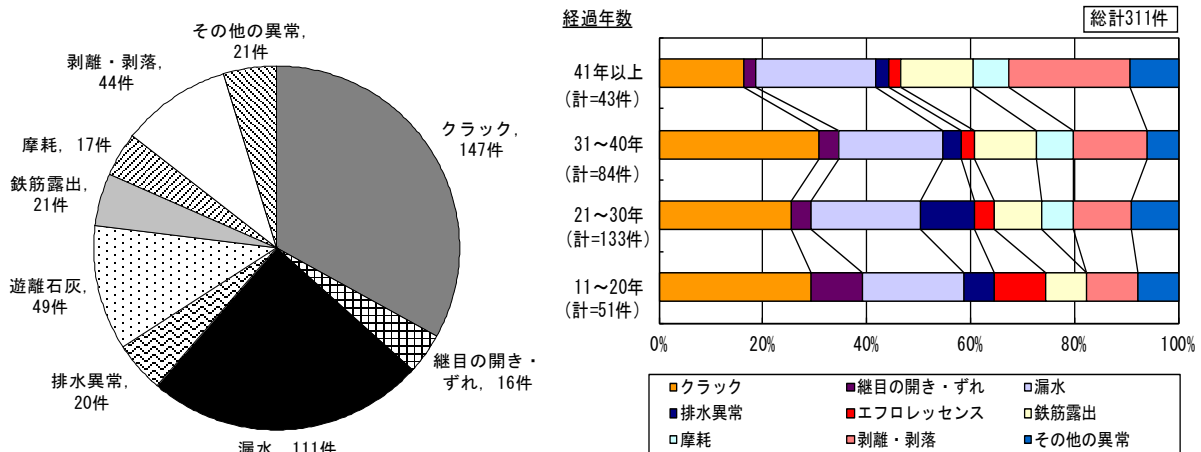


図-2.1 報告された事象の内訳 (左：事象別全体、右：経過年数別) ^{1), 2)}

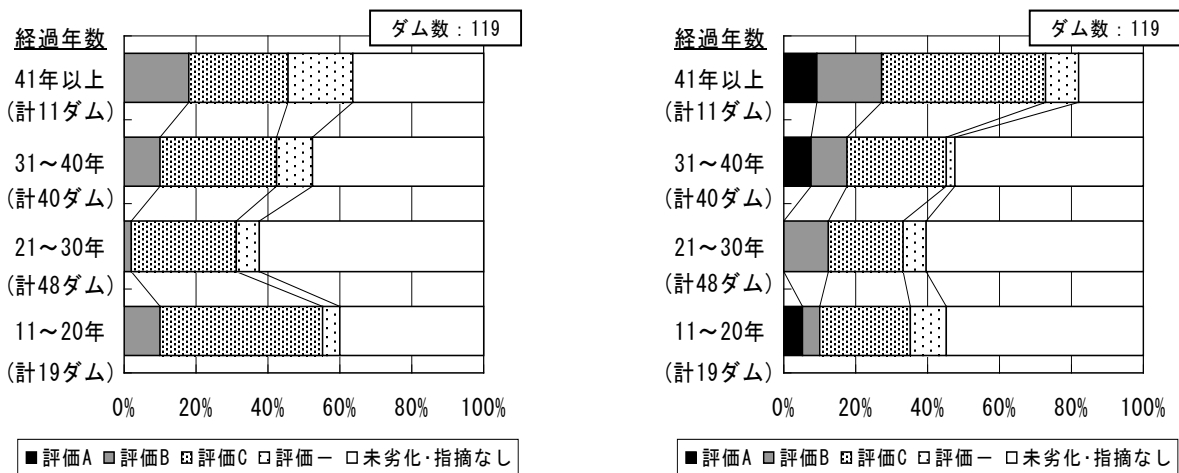


図-2.2 経過年数別に見た劣化事象報告数とその評価指標別内訳 (左：クラック、右：漏水) ^{1), 2)}

本研究では、長期的な劣化・損傷の進行がダムの安全性に及ぼす影響を定量的に評価する方法を明らかにすることを1つの目標としている。このような評価は、点検等で観察される劣化・損傷を単にその形態、状態、発生場所(部位)別で分類・定義される「事象」として捉えるだけでは困難である。それぞれの事象を生じさせることになった原因や時間的経過に伴う進行がどのような「機構」(メカニズム)によるものかを理解することが必要である。現状で観察される状態が劣化・損傷事象の発生・進展機構のどの段階にあるのかを診断によって明らかにすることにより、はじめて将来的にどのような状態変化が想定されるか及びそれによってダムの安全性にどの程度の影響を及ぼすかを定量的に評価することが可能になると考えられる。

そこで、図-2.1に示した各種劣化・損傷事象と、コンクリートダムにおいて想定すべき主要な劣化・損傷の発生・進展機構(各事象が生じる物理的・化学的な原理・現象及びそれらの発生原因または進行要因の代表的な例)との関係について考えられるものを整理すると表-2.2のようになる。

表-2.2より、各事象の発生原因・進行要因は、設計・施工・供用開始後初期、長期にわたる供用期間中の様々な段階に存在すること、1つの事象の中には複数の異なる機構によるものが混在していたり、ある事象が進行して他の事象の発生に繋がるものが少なくないことがわかる。各種劣化・損傷事象の発生・進行過程(機構)は複雑であるが、主要要因としては、温度応力、堤体材料、環境作用、流水作用、偶発外力などがあることがわかる。

よって、これらの要因に着目して各劣化損傷の主な発生進行過程（機構）を再整理すると、図-2.3のようになる。

さらに、図-2.3中に示される劣化・損傷の進行過程（機構）を、i)過去の点検等での報告例の多さや、ii)発生・進行のしやすさ及び進行した場合の影響の観点から、同図中に付記したⅠ～Ⅴに分け、これをコンクリートダム堤体等における劣化・損傷機構の類型として整理すれば表-2.3のようになる。Ⅱ～Ⅳは経年劣化に伴う進行性のもの、Ⅴは偶発的な外力による損傷である。

このうち本研究の主眼である、長期的にダム本体（堤体）の安定性に影響を及ぼす要因の定量的な評価方法を検討する上で着目すべき劣化・損傷機構の類型は、上記ii)の観点からその影響を検討する必要性が高く、かつ堤体安定性に関わるものであり、表-2.2のⅡ、ⅢおよびⅤ

がこれに該当する。

よって、3.に後述するダム本体（堤体）の劣化・損傷の進行度合いを診断する手法やその結果に基づくダム本体の安定性評価の方法についての検討は、これら3つの類型の劣化・損傷を想定して行うこととした。

なお、表-2.2において劣化・損傷事象の1つとした安全管理用計測計器の不具合については、それ自体ダム堤体自体の安全性を変化（低下）させるものではないが、劣化・損傷の兆候の検知や進行度の評価を困難にするものである。したがって、上記の検討とあわせ、これら計器の劣化（老朽化）等による問題が生じやすい長期供用ダムでの安全管理の在り方について明確化する必要がある。この検討については4.において述べる。

表-2.2 コンクリートダム堤体等において報告される各種劣化・損傷事象とその発生・進展機構

劣化・損傷事象	各事象の発生・進展機構		
	原理・現象	発生原因・進行要因の例	
クラック	温度応力	マスコンクリート内の熱膨張と表面温度低下による温度不均一による変形拘束（内部拘束）	温度変化（コンクリート内部と表面の温度降下の違い）
		基礎岩盤や既打設コンクリート等による変形拘束（外部拘束）	温度変化（新たに打設したコンクリート部の温度降下）
	乾燥収縮	コンクリート内の水分蒸発に伴う体積減少	コンクリート表面の養生不足
	堤体材料（骨材）	骨材の体積膨張・収縮	物理的に安定でない鉱物等を多く含む骨材の使用
		アルカリ骨材反応	化学的に安定しない反応性骨材の使用
	凍結融解作用	コンクリート中の水分の凍結融解繰り返しによる体積変化	継目や他原因のクラックからの水の浸入、吸水性の高い骨材の使用
	鋼材腐食	RC構造部における水分浸入による鋼材表面の不動態被膜の破壊	先行クラック、剥離、中性化等によるかぶりコンクリートの劣化
外力作用	コンクリート強度を上回る応力	大規模地震等の外力	
継目の開き・ずれ	相対変位の蓄積	堤体ブロックの相対変位	地形・基礎岩盤剛性急変部
	外力作用	堤体ブロックや基礎岩盤の変位	大規模地震等の外力
漏水	水みち	基礎岩盤内や着岩面沿いの水みち形成	基礎岩盤、着岩部の変状 等
		堤体内の水みち形成	止水板の劣化・損傷、堤体変位による継目の開き・ずれ、各種原因によるクラックの進行
排水異常	基礎排水や継目漏水等の過大な増加		クラック、継目の開き・ずれ等の増大
エフロレッセンス	コンクリート中のセメント由来石灰分等（水に溶解）の表面への移動・蒸発 等		継目や発生したクラック等への水分浸入
鉄筋露出	かぶり減少	かぶりコンクリートの劣化	表面コンクリートのクラック、剥離・剥落、中性化の進行
摩耗	流水作用	流水・土砂によるすり減り	出水、土砂流
剥離・剥落	表面コンクリートの劣化	表面コンクリートの不安定化	各種要因によるクラックの進行
	流水作用	表面コンクリートの不安定化	越流部の不陸等による不安定な水脈、大規模出水、土砂流 等
	外力作用	表面コンクリートの不安定化	地震等
その他（計器不具合など）	経年劣化	計測設備・機器の劣化・老朽化	計器の長期使用
	メンテナンス不足	計測設備・機器の点検・較正等の不足	計器の点検・較正・交換等の不備、経年ダムでの計測継続箇所等の基準の未整備

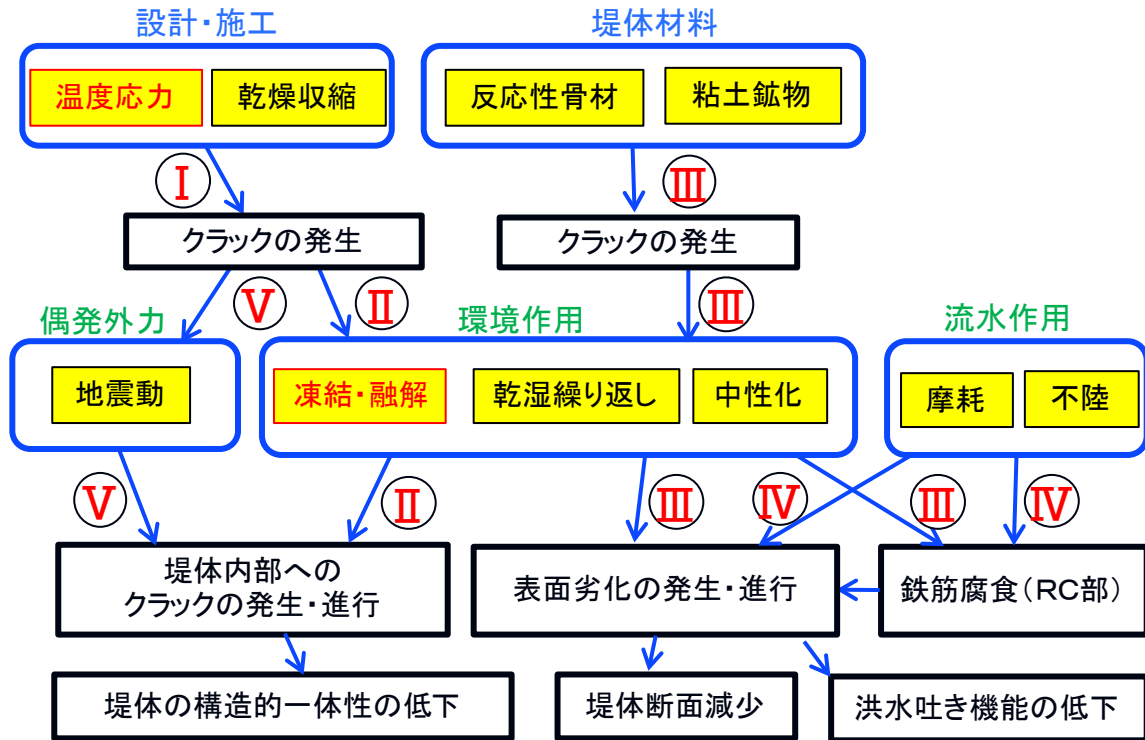


図-2.3 コンクリートダム堤体で想定される劣化・損傷の機構（I～Vは表-2.2に対応）

表-2.2 コンクリートダム堤体等において想定される主な劣化・損傷機構とその特徴

主な劣化・損傷機構の種類	i) 過去の報告例の多さ ◎：報告例が多い ○：一部のダムで報告例あり △：報告例が少ない		ii) 発生・進行しやすさ、 進行した場合の堤体安定性への影響の程度 ◎：堤体安定性への影響が大きい ○：短期間に堤体の安定性へ及ぼす影響は小さい △：直接は堤体へ及ぼす影響は小さい	
	I. 表面の温度クラック 竣工後初期の温度降下過程において、堤体表面に発生するクラック	◎	温度規制計画では内部クラックの防止に重点が置かれていることもあり、報告されるケースは多い。	△
II. 堤体内部の進行性クラック 堤体内部に及ぶ水平打継面沿いのクラックなど、温度応力等に起因して発生したクラックで、貯水の浸入や気象作用を受けて進行する恐れのあるクラック	○	一部のダムで、打継面沿いからの漏水が報告されるケースがある。	◎	長期放置リフト面など強度・水密性の面で連続性のある潜在的弱面に起因するクラックが含まれる。特に寒冷地では凍結融解作用による進行が問題となる可能性がある。
III. 堤体表面の進行性劣化 堤体材料（骨材）やコンクリートの乾燥収縮による堤体表面の劣化により発生・進行するクラック	△	問題となるケースは少ない。材料選定や配合設計、施工時に注意が払われている。	○	堤体表面から徐々に劣化が進行することにより長期的に断面減少を生じる可能性がある。ただし、堤体厚さを考慮すれば、安定性の低下への影響は緩慢と考えられる。
IV. 流水作用による劣化 摩耗や不陸に起因して生じる洪水吐きコンクリートのすりへりや剥離など	○	長期供用に伴い、一定の事例はある。	△	主として洪水吐き部で生じるものであり、堤体の安定性に影響を及ぼす可能性は低い。ただし進行性の劣化であり、放流機能に影響を及ぼす可能性がある。
V. 大規模地震による損傷 偶発外力の作用に伴う他原因による既発生クラック等の進行	△	天端高欄や張り出し部などを除き、国内ダムでは、堤体本体で大きな損傷が報告された事例はない。	◎	発生頻度は低いが、大規模な地震により、竣工後初期や供用中の経年劣化により発生した各種のクラックが、急激に進展すれば、堤体安定性に影響を及ぼすことも考えられる。

3. 劣化・損傷がダム堤体の安全性に及ぼす影響の定量的評価方法の検討

3.1 実測挙動解析によるダム堤体の健全度診断方法の検討³⁾

コンクリートダム堤体の健全度診断は、シュミットハンマーによるコンクリート表面の強度推定、赤外線による剥離等の劣化状況の調査、超音波によるクラック深さの調査等の非破壊による表面付近の調査法と、ボーリングやつば掘りなどコンクリート内部の状況を直接確認する調査法を必要に応じて組み合わせて行われている。なお、これらの調査手法は、いずれも局所的な劣化診断調査（詳細調査）であり、基本的に日常点検や定期検査⁴⁾などにおいて目視などでクラック等の変状が発見された箇所を対象に行われる調査である。今後、供用開始後長期間経過する管理ダムの数がさらに増加することを考えると、多くの管理ダムの健全度診断をより効率的に行うことが求められる。また、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震のように強い揺れが広範囲に及ぶ大規模地震時には、多数のダムの安全性をできるだけ早期にかつ定量的に把握することも重要となる。

このようなことから、定期的な点検の実施において、ダム堤体の経年的な状態の変化を継続的に監視したり、あるいは大規模地震動後の点検において、ダム堤体への影響を迅速に捉えたりするために、詳細調査の必要性を判断するための一次スクリーニング手法として、長期にわたって同一手法で継続して適用可能なダムの健全度診断手法を開発していく必要がある。

そこで、このような課題に対応する一つの方法として、常時微動の計測などにより、ダム堤体の劣化・損傷に伴う剛性の低下を振動特性の変化としてとらえる方法のダム堤体の健全度診断への適用可能性について検討した。

常時微動は、自然や人為による不確定な原因によって生じる地盤の雑振動である。近年、この常時微動をビルや家屋等構造物の振動として計測することにより、固有振動数などを指標として、その剛性の低下に伴う振動特性の変化から地震による被災レベルや老朽化による劣化度を評価しようとする試みが増えてきている。

ダムを対象として常時微動計測を行った例としては、アーチダムを対象としたものとして、その振動特性を詳細に分析した事例⁵⁾や、竣工時の振動特性実験結果と比較してダム堤体の健全性を評価した事例⁶⁾がある。また、地震により被災した海外の重力式コンクリートダムにおいて、各堤体ブロックの被災レベルと常時微動計測結果が対応していることが確認された報告⁷⁾がある。

なお、本研究では基本的に重力式コンクリートダムを対象とする。これは、同型式のダムがわが国の比較的大規模なダムとして建設事例が多いこと、及び一定の計測事例のあるアーチ式コンクリートダム（その構造上比較的振動特性の変化が検知しやすいと考えられる）と異なり先行研究がほとんどないことによる。

3.1.1 堤体の劣化・損傷に伴う振動特性の変化の推定

常時微動計測によりダム堤体の健全度診断を行うためには、堤体内の劣化・損傷の進行によってダムの振動特性（固有振動数等）がどのように変化するかを把握しておく必要がある。しかし、これまでに重力式コンクリートダムを対象に、その経年的な劣化や損傷の発生による健全性の変化をダム堤体の振動特性の変化から実際に捉えた例は見当たらず、実ダムにおける長期的な常時微動計測のデータの蓄積がない。そのため、本研究ではまず、ダム堤体における劣化・損傷がダムの振動特性に及ぼす影響を予測するための予備的検討として、2.で整理した劣化・損傷機構のうち、発生・進展した場合にダムの安定性への影響が特に大きいと考えられる打設面沿いの水平クラックのほか、長期的に進行する可能性のある堤体の表面劣化を想定し、ダム堤体の固有振動数の変化を数値解析により分析した。

(1) 水平クラック進展による振動特性の変化の推定

水平クラックを有する重力式コンクリートダム堤体（堤高100m）と貯水からなる2次元有限要素モデルを作成し、固有値解析を実施した。なお、堤体部の振動特性に着目するため、ここでは岩盤はモデル化していない。堤敷面の境界条件は、水平方向及び鉛直方向ともに固定とした。貯水位はダム高の90%とし、貯水は非圧縮性流体としてモデル化した。堤体内の水平クラックはEL.30m、EL.60m、EL.90m（EL.0mを堤敷面標高とする）の3標高のいずれかに想定した。図-3.1に解析モデルと想定する水平クラックの設定標高を示す。

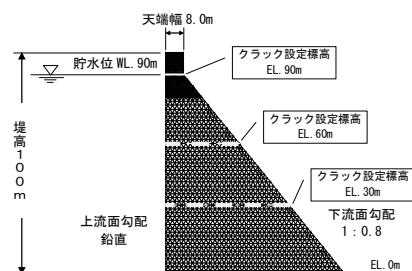


図-3.1 解析モデル（水平クラックを考慮）

堤体コンクリート部及び水平クラック部の物性値は表-3.1 に示すとおり設定した。堤体コンクリート部の物性値は、既設の重力式コンクリートダムに使用されている一般的な値に設定した。水平クラックによる影響については、水平クラック部にジョイント要素を設け、その剛性を低下させることにより考慮する方法を基本とした。なお、クラックのモデル化については、当該位置のコンクリート（ソリッド要素）の弾性係数を低下させる方法も考えられる。このため、代表的ケースについて、ジョイント要素を用いず、コンクリートの弾性係数を健全部より低下させる方法での解析も行った。

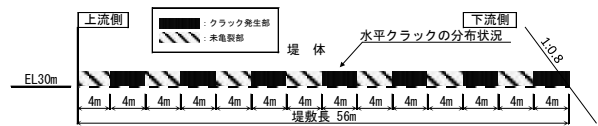


図-3.2 ミシン目状クラックの設定例（模式図）

各ケースの固有値解析結果から得られた上下流方向振動の主要な固有振動モードである一次モード、二次モード、及び四次モードの固有振動数をそれぞれ図-3.3 に示す。剛性低下させたジョイント要素によってクラック部をモデル化した各ケースの結果を比較すると、水平クラックによる堤体固有振動数への影響は、この3つの振動モードで異なることがわかる。また、低標高部にクラックを想定した場合にはより低次のモードにおいて、高標高部にクラックを想定した場合にはより高次のモードにおいて、その影響（固有振動数の減少）が相対的に顕著になる傾向がみられる。このため、低標高部にあるクラックは、重力式コンクリートダムの上下流方向振動モードとして一般的に卓越する一次モードの固有振動数の変化により捉えられる可能性が高く、他の振動モードとの分離は比較的容易と考えられるが、高標高部のクラックはより高次の振動モードのうち特定の振動モードの固有振動数を同定して、その変化を検知する必要があると考えられる。また、ミシン目状の断続的なクラックがある場合は、合計長さが同じ連続したクラックがある場合より固有振動数の減少量が小さくなり、断続的な水平クラックの間隔が短くなれば、その影響はさらに小さくなることもわかる。これより、常時微動計測により捉えることのできる堤体内部のクラックはある程度連続したものにに限られると考えられる。

また、図-3.3 から、クラック長さと同モードの固有振動数低下量の関係は、コンクリートの弾性係数の低下によりクラック部を考慮した解析でも、ジョイント要素を用いて剛性低下を考慮した場合と同様の傾向であることがわかる。

表-3.1 堤体コンクリート部の物性値

		項目	設定値
健全部	堤体部 ソリッド要素	弾性係数 $E_c(N/mm^2)$	29,000
		ポアソン比 ν	0.2
		単位体積質量 (kg/m^3)	2,300
クラック	ジョイント 要素	軸剛性 $kn(N/mm^3)$	2,900
		せん断剛性 $ks(N/mm^3)^*$	1,200
	クラック部 ソリッド要素	弾性係数 $E(N/mm^2)$	2,900
		ポアソン比 ν	0.2
		単位体積質量 (kg/m^3)	2,300

*せん断剛性は軸剛性 Kn の値から弾性論で求まる値とした。

解析ケースは、水平クラックの想定位置・形態、標高、深さの組合せにより、表-3.2 に示すとおり設定した。ケース 1、2 では表-3.2 中の位置・深さの連続したクラック、ケース 3 では表-3.2 中の位置・深さの断続的な（ミシン目状）クラックを想定した（

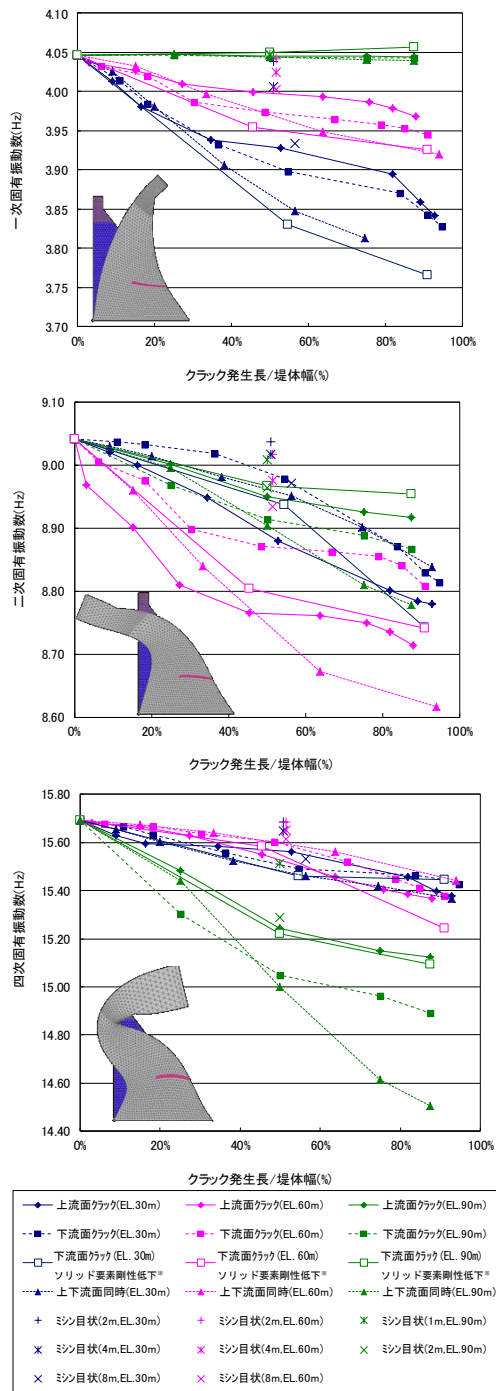
図-3.2）。なお、クラック部分を当該部のコンクリートの弾性係数の低下で考慮する方法では、EL.30 m、EL.60 m、EL.90 m の各標高に下流面からの連続した水平クラックを想定した 3 ケースで解析を実施した。

表-3.2 解析ケース

ケース 番号	クラック想 定位置・形態	クラック 想定標高	クラック深さ ○：クラック想定標高に おける堤体幅	クラックの 設定方法	
				ジョイント 要素 (剛性低下)	ソリッド 要素 (剛性低下)
1	上流面のみ	EL. 30m	0m~51m (56m)	○	—
		EL. 60m	0m~29m (32m)		
		EL. 90m	0m~7m (8m)		
	下流面のみ	EL. 30m	0m~52m (56m)	○	○
		EL. 60m	0m~30m (32m)		
		EL. 90m	0m~7m (8m)		
2	上・下流面	EL. 30m	0m~51m (56m)	○	—
		EL. 60m	0m~31m (32m)		
		EL. 90m	0m~7m (8m)		
3	断続 (ミシン目 状)	EL. 30m	2m, 4m, 8m 間隔 (56m)	○	—
		EL. 60m	2m, 4m, 8m 間隔 (32m)		
		EL. 90m	1m, 2m 間隔 (8m)		

*上流面と下流面のクラック深さは同一値とした
(表中の値はそれぞれの水平クラックの深さの合計)。

13.4 ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究



※凡例中白抜き口のみ、水平クラック想定標高のコンクリート部の弾性係数を低下させた解析結果。他はジョイント要素の剛性を低下させた解析結果。

図-3.3 水平クラックに伴う固有振動数の変化

(2) 表面劣化による振動特性の変化の推定

重力式コンクリートダム堤体と貯水からなる2次元有限要素モデルで、堤体表面からの劣化の進行を堤体表面付近のコンクリートの弾性係数の低下により考慮した場

合の固有振動数の変化について、固有値解析により検討した。解析モデル形状、入力物性値等は、前述のダム高100 mのモデルと同様とした。ただし、表-3.3左に示す堤体表面からの劣化深度を表現するためにメッシュの修正を行った。

ここで、堤体コンクリートの表面劣化は、表-3.3右に示すように堤体表面部のコンクリートの弾性係数を低下させることで考慮した。

表-3.3 解析ケース (表面劣化)

表面劣化深度※ ¹	劣化部弾性係数※ ²
1.0m	0.8E _c
3.0m	0.5 E _c
5.0m	0.1 E _c
10.0m	

※¹ 表面劣化深度は表面から直交方向とした。
 ※² E_cは堤体コンクリート(健全部)の弾性係数

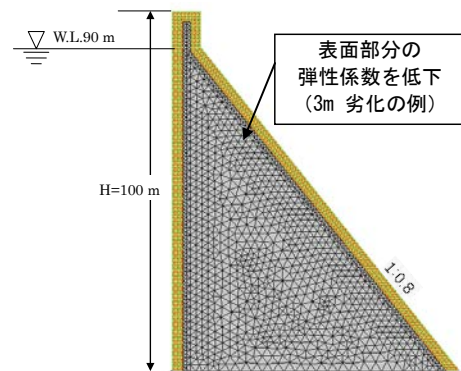


図-3.4 解析モデル (表面劣化を考慮)

図-3.5に解析の結果を示す。弾性係数の低下率が大きくなるほど、また弾性係数の低下を考慮する劣化深度が大きくなるほど固有振動数の低下が大きくなるのがわかる。なお、振動モードの次数別では、高次のほうが固有振動数の減少量が大きくなる。たとえば劣化部の弾性係数が健全な状態から80%まで低下したと想定した場合の一次の固有振動数の減少は、表面から3m劣化した場合に0.12 Hz、10m劣化した場合に0.3 Hzであり、同様の弾性係数における2次の固有振動数の低下は、表面から3m劣化した場合に0.36 Hz、10m劣化した場合に0.63 Hzである。よって表面劣化の進行度を振動特性の変化により捉えようとする場合には、比較的検出が容易な一次固有振動数だけでなく、より高次の振動モードの固有振動数についても検出できる精度での分析が必要になると考えられる。

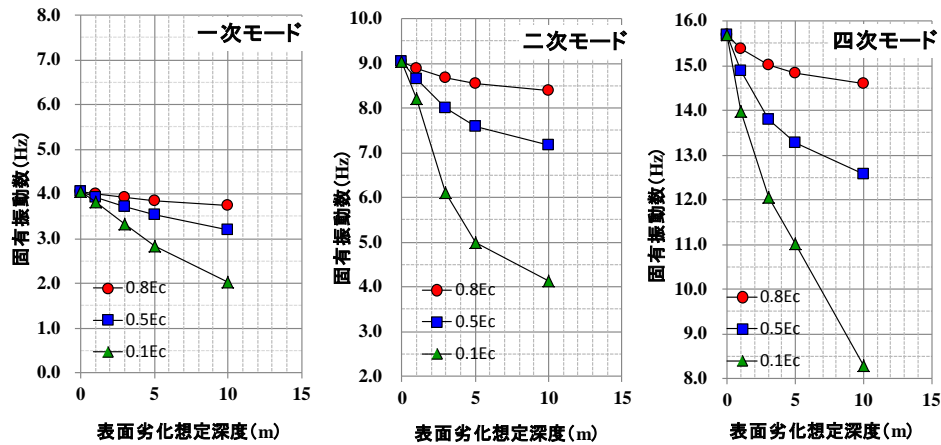


図-3.5 表面劣化に伴う固有振動数の変化（固有値解析）

3.1.2 実ダムでの常時微動計測によるダム堤体の振動特性の把握

(1) 計測の目的

ダム堤体の劣化・損傷の有無や程度をその振動特性(固有振動数)の変化によって捉えるためには、劣化損傷以外の要因によって生じる固有振動数の変化を分離する必要がある。このため、特にダムの振動特性に影響を与える可能性のある要因として、貯水位の変動と温度変化による影響を把握することを目的として、複数の重力式コンクリートダムにおいて常時微動計測を行った。なお、地震動観測記録との比較により、地震動観測記録の活用可能性についても検討した。

常時微動計測を行ったダムの諸元と各ダムでの主な計測目的(観点)を表-3.4に示す。

試験湛水中のAダムでは、貯水位が空虚の状態から最高水位まで連続的に変化する時期での計測により、貯水位の変動に伴うダムの固有振動数の変化を分析した。

年間の貯水位変動が比較的小さいBダム(供用後約45年)においては、年間の気温・水温変化に伴う堤体コンクリートの体積変化が継目の挙動に影響を及ぼすことを想定し、温度変化がダムの固有振動数に及ぼす影響を分析した。

東北地方太平洋沖地震をはじめとする比較的多くの地震動観測記録が残されているCダムでは、地震動観測記録から推定される固有振動数と常時微動計測から推定される固有振動数とを比較した。

表-3.4 常時微動計測実施ダムとその目的

ダム	構造型式	ダムの諸元				計測の目的
		竣工年	ダム高	堤頂長	堤体積	
Aダム	重力式コンクリートダム	2012	119m	320m	1,020,000m ³	貯水位変動が堤体の固有振動数等に及ぼす影響の把握。
Bダム	重力式コンクリートダム	1966	33.7m	140m	40,000m ³	年間の温度変化が堤体の固有振動数等に及ぼす影響の把握。
Cダム	重力式コンクリートダム	1998	65m	174m	195,000m ³	ダム堤体の過去の振動特性としての地震動観測記録の活用検討

(2) 常時微動の計測および計測データの分析方法

ダム堤体における常時微動の計測とその結果の解析は、①常時微動計測装置の設置、②常時微動計測の実施、③振動波形の抽出、④周波数スペクトル解析、⑤固有振動数の推定の手順で行った(図-3.6)。

なお、常時微動の計測には高精度サーボ加速度計(加速度センサー)及びバッテリーが内蔵されたポータブル型計測装置を使用した。本装置は、3成分型(垂直1成分、水平2成分)の振動を計測することができる。また、本装置は持ち運びが容易な構造となっており効率的に多数の計測を行うことができる。

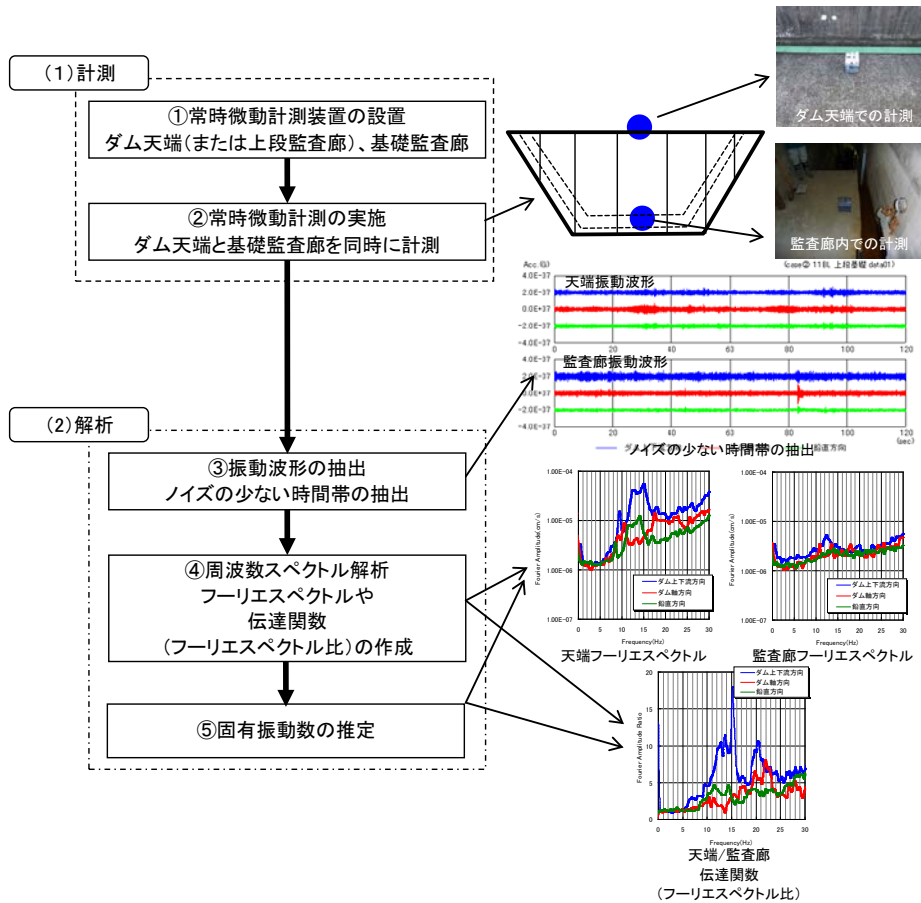


図-3.6 常時微動計測と解析の流れ

(3) 貯水位変動がダムの固有振動数に及ぼす影響の検討 (Aダム)

貯水位変動がダムの固有振動数に及ぼす影響を調べるため、試験湛水により急激な貯水位変動があった期間を含むAダムにおいて計21回の計測を実施した(表-3.5)。計測位置は、

図-3.7に示すとおり、ダム中央付近の上段監査廊と基礎監査廊であり、基礎岩盤からの高さは、上段監査廊が102m、基礎監査廊が7mである。

表-3.5 計測時の貯水位・気温 (Aダム)

日付	貯水位 (EL. m)	気温 [※] (°C)
2011/11/28	571.0	4.7
2012/2/10	627.0	-3.2
2012/3/2	631.5	0.6
2012/3/16	639.1	1.1
2012/4/11	652.8	9.1
2012/5/1	664.8	14.9
2012/6/15	680.7	16.2
2012/6/20	684.0 (S. W. L.)	20.8
2012/9/7	667.1	20.0
2012/10/31	634.7	6.6
2012/11/14	620.2	5.7
2012/11/29	613.0 (L. W. L.)	2.2
2013/1/29	621.8	-1.2
2013/2/13	624.5	0.0
2013/3/18	63.0	10.2
2013/4/4	73.3	10.4
2013/7/18	88.6	20.8
2013/9/27	96.2	13.8
2013/12/18	110.4	-0.1
2014/1/14	111.6	-4.3
2014/2/5	112.3	-7.7

※2012/5/1以前の気温は最寄りの気象観測地点の日平均気温以降、ダム地点日平均気温

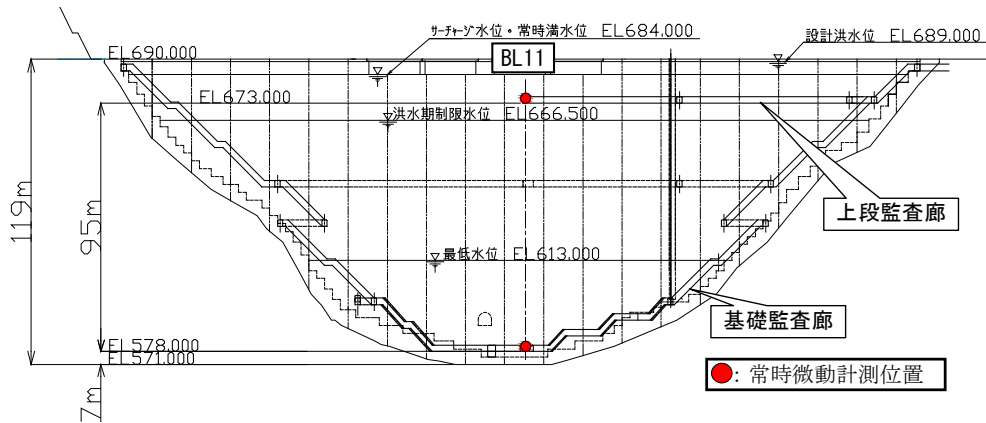


図-3.7 常時微動計測位置 (A ダム)

図-3.6 の手順に従い、上段監査廊、基礎監査廊それぞれで得られた常時微動（加速度時刻歴）データからフーリエスペクトルを算出し、上段監査廊／基礎監査廊の伝達関数（フーリエスペクトル比）を求めた。伝達関数は、基礎地盤に対する堤体の相対的な振動（即ち堤体そのものの振動特性）を示していると考えられる。

A ダムにおいて実施した計 21 回の計測結果で得られた最大断面 (BL.11) についての伝達関数（重力式コンクリートダムで卓越すると考えられる上下流方向振動成分）を図-3.8 に示す。

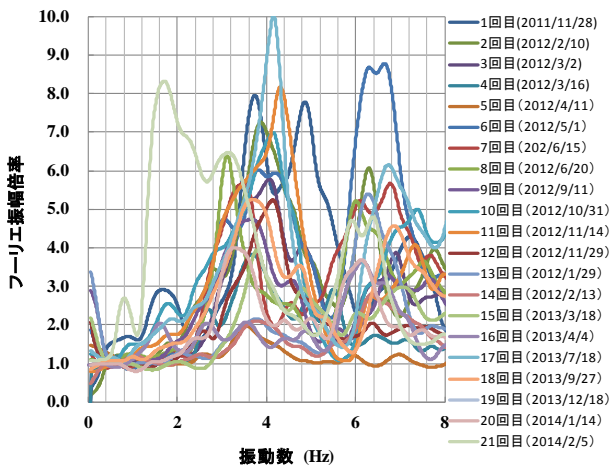


図-3.8 常時微動計測から求めた伝達関数 (A ダム 最大断面 上下流方向振動)

常時微動計測結果より推定した一次固有振動数（上下流方向）と計測時の貯水位の関係を図-3.9 に示す。図中には、A ダムと同一断面形状の 2 次元有限要素モデルによる固有値解析から得られた一次固有振動数の推定結果も示している。計測で得られた固有振動数にはばらつきがみられるものの、解析で得られた傾向と全体的には整

合しており、貯水位が満水位の 50%程度に相当する水位より上昇すると固有振動数比が次第に減少する傾向が見られる。

なお、計測による推定値には貯水位変動以外の各計測時の計測条件の違いによる影響も含まれている可能性もある。計測により推定した一次固有振動数と気温の関係を図-3.10 に示す。一般に、外気温が下がると堤体コンクリートが収縮し、横継目が開くことなどにより堤体の剛性が低下し、固有振動数は減少するも可能性も考えられる。しかし、同図からはその傾向は確認できない。この理由としては、試験湛水中のダムであり、貯水位条件が空虚から最高水位付近まで大幅に変化しているためその影響が支配的であること、また堤体コンクリート温度が最終安定温度に達しておらず、外気温変化による影響が表れにくいことなどが考えられる。

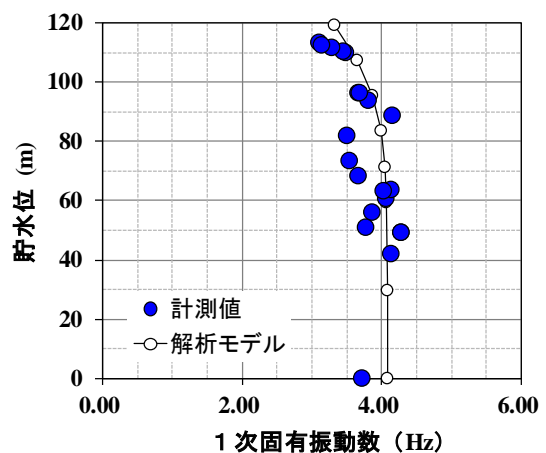


図-3.9 貯水位と固有振動数の関係 (A ダム)

表-3.6 計測時の貯水位・気温 (Bダム)

日時	貯水位 (EL.m)	気温 [*] (°C)
2011/9/12	274.46	28.1
2012/2/17	276.67	-0.7
2012/9/14	273.70	24.1
2012/10/19	275.54	12.0
2012/11/16	276.91	8.3
2012/12/14	277.32	3.1
2013/2/14	277.90	2.3
2013/3/15	277.43	3.3
2013/4/19	279.00	7.7
2013/5/17	277.30	11.8
2013/6/21	275.79	17.9
2013/7/19	273.99	20.9
2013/8/23	273.25	23.7
2013/9/20	274.68	19.9
2013/10/18	276.55	12.3
2013/11/15	277.03	10.6
2013/12/19	277.36	5.8
2014/1/15	277.92	-0.5
2014/2/21	278.52	0.2

^{*}2011/9/12 気温は気象庁最寄観測地点日平均気温以降、ダム地点での日平均気温

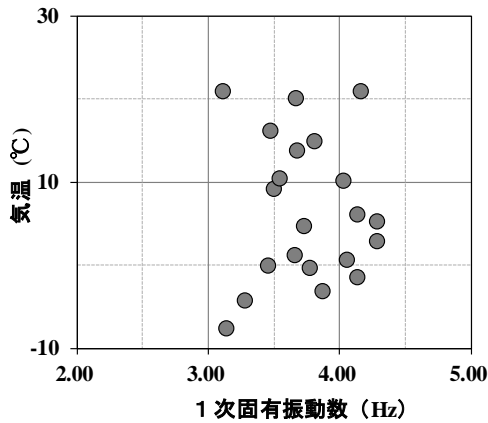


図-3.10 常時微動計測により推定した固有振動数と気温の関係 (Aダム)

(4) 温度変化がダムの固有振動数に及ぼす影響の検討 (Bダム)

堤体コンクリートは、外気温や水温の変化により体積変化を生じる。このため、堤体継目部などの挙動を通じ、常時微動として計測される堤体の固有振動数に影響を及ぼす可能性がある。そこで、貯水位とともに温度変化がダムの固有振動数に及ぼす影響を調べることを目的に、貯水池運用上、年間の貯水位変動が 6.7m と比較的小さい Bダムで常時微動計測を実施した。なお、温度としては、年間の変動幅が大きく計測データが得られる外気温を指標とした。

常時微動の計測位置を図-3.11 に示す。計測位置の基礎岩盤からの高さは、天端が 33.7 m、基礎監査廊が 3.2 m である。

計測は表-3.6 に示す日程で計 19 回実施した。

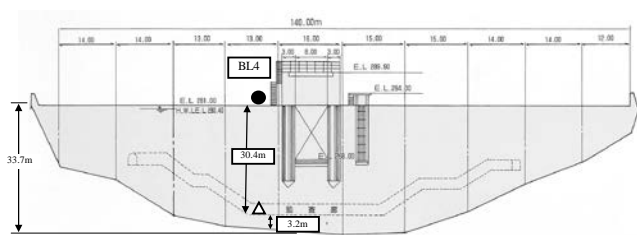


図-3.11 常時微動計測位置 (Bダム)

各計測回における計測結果より得られた上下流方向の伝達関数 (天端/基礎監査廊) を図-3.12 に示す。

いずれの計測結果についても、15 Hz 付近に一次固有振動数と推定される振動数のピークがみられる。なお、図-3.12 より一次固有振動数と推定される卓越振動数を時系列で整理した (図-3.13)。

常時微動計測から推定される上下流方向の一次固有振動数は、夏季では高く 16 Hz 程度 (図-3.13 (b) の橙点)、冬季は 15.0 Hz 程度 (図-3.13 (b) の青点) まで減少し、両者で 1.0 Hz の差が生じている。

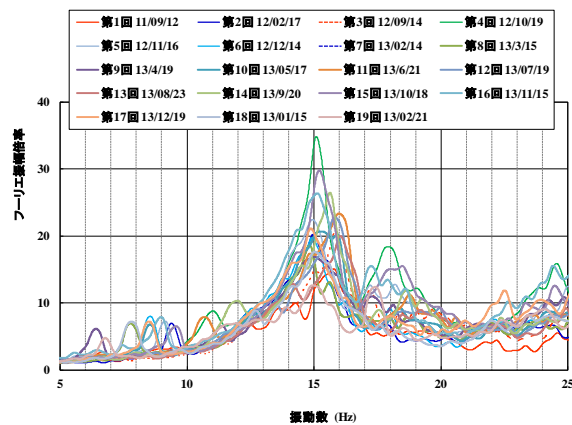


図-3.12 伝達関数 (Bダム 上下流方向)

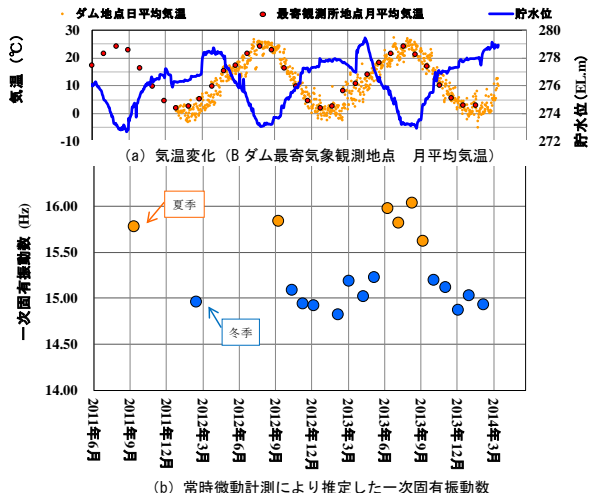


図-3.13 一次固有振動数の変化 (Bダム)

計測で得られた堤体の固有振動数の年間を通しての周期的な変化には、貯水位および外気温の変動の影響が含まれているものと考えられる。図-3.14、図-3.15に堤体の一次固有振動数と貯水位、外気温との関係をそれぞれ示す。図中青点は10月～5月、橙点は6月～9月の常時微動計測記録より推定した固有振動数を示している。このような変動を示す原因が貯水位変動によるものであれば、貯水位の上昇に伴う付加質量効果の増加によって固有振動数の低下が生じた可能性が考えられる。また、外気温の変化によるものであれば、気温の低下による堤体コンクリートの収縮に伴う横継目のわずかな開きによって構造体としての剛性低下により固有振動数が低下した可能性が考えられる。Bダムでの計測結果は、これらの影響によって考えられる変動傾向と一致する。

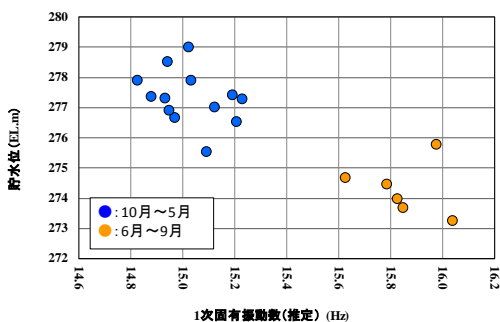


図-3.14 1次固有振動数と貯水位の関係 (Bダム)

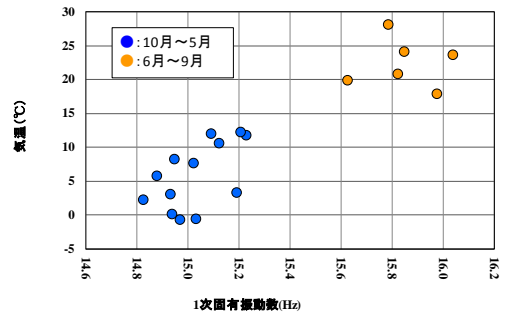


図-3.15 1次固有振動数と気温の関係 (Bダム)

なお、Bダムを含め、治水、利水機能を併せ持つ多くの多目的ダムでは、気温の高い夏季は洪水に備え貯水位を低く維持し、気温の低い冬季は貯水位を高く保っている運用となっているケースが多い。この場合、貯水位および気温の年間の周期変化は、堤体の固有振動数を同じ方向に変化させるものとなる。そこで、貯水位変動のみによる堤体の固有振動数の変化をAダムの検討と同様の固有値解析により推定した(図-3.16)。ここで解析に用いた弾性係数は、夏季の継目が密着していると考えられる時期の常時微動計測による固有振動数の推定値が、固有値解析によって再現されるよう設定した。

貯水位が高く、同時に外気温が低下する期間について、実測による固有振動数の推定値を貯水位変化のみ考慮した解析値と比較すると、実測による推定値が解析値より低くなる傾向、すなわち温度低下による影響は明確ではない。貯水位が高い時期は気温が低い時期でもあるが、貯水位変化に比べ温度変化による影響が小さいため、後者による影響が顕著に現れなかった可能性が考えられる。なお、固有値解析に用いた2次元モデルは横継目での拘束条件を直接考慮できるものでなく、同定したコンクリートの弾性係数はその影響を含んだものとなることから、ここでの固有値解析結果との定量的な比較には限界があることにも留意する必要があると考えられる。

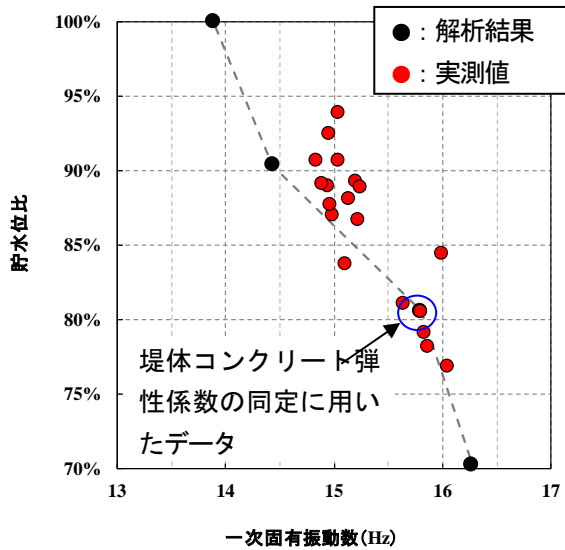


図-3.16 固有値解析結果と実測による推定値の比較 (Bダム)

(5) 地震動観測記録の活用検討 (Cダム)

ダム堤体の振動特性をもとに健全度をモニタリングしていく上では、比較対象として何らかの初期値となるデータが必要となる。このため、現時点でのデータだけでなく、過去のデータも活用できることが望ましい。しかし、常時微動計測データとしては、過去の記録の蓄積がないことが一般的である。そこで、ダム堤体への設置が一般的となっている地震計により得られた既往の地震動観測記録（加速度波形データ）の利用について検討を行った。

この検討では、比較的多くの地震動観測記録が得られ

ているCダムを対象とした。常時微動計測とあわせ、既往地震動観測記録の分析を実施し、貯水位変動、外気温変化による影響を含め、両データから推定される固有振動数の変化傾向について比較を行った。

Cダムでの地震計は最大断面（BL.6）の上部（ゲート室内）および下部（基礎監査廊）に設置されている（図-3.17）。サンプリング周波数は100 Hzである。分析の対象とした地震動観測記録は2008年6月～2013年10月までの計113データで、この中には2011年東北地方太平洋沖地震時の観測記録も含まれる。

常時微動計測の位置は地震計設置位置近傍とし、表-3.6に示す計6回実施した。計測で得られたCダムの1次固有振動数と推定される卓越振動数の時系列を図-3.18にしめす。同図より、CダムにおいてもBダムと同様の貯水位あるいは気温の変化に伴う周期的な変動が認められる。

表-3.7 計測時の貯水位・気温 (Cダム)

日時	貯水位 (EL.m)	気温 (°C)
2013/3/12	325.6	3.08
2013/6/20	317.79	20.5
2013/8/22	318.04	25.2
2013/10/17	316.94	11.5
2013/12/20	315.85	0.9
2014/2/20	320.19	0.0

※ダム地点での日平均気温

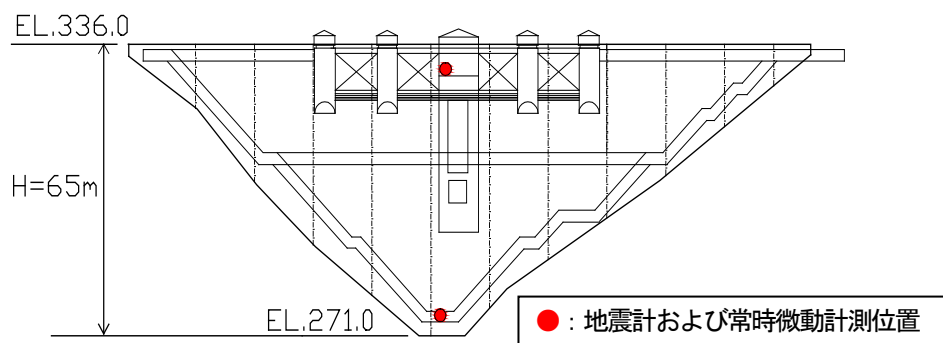


図-3.17 常時微動計測位置(Cダム)

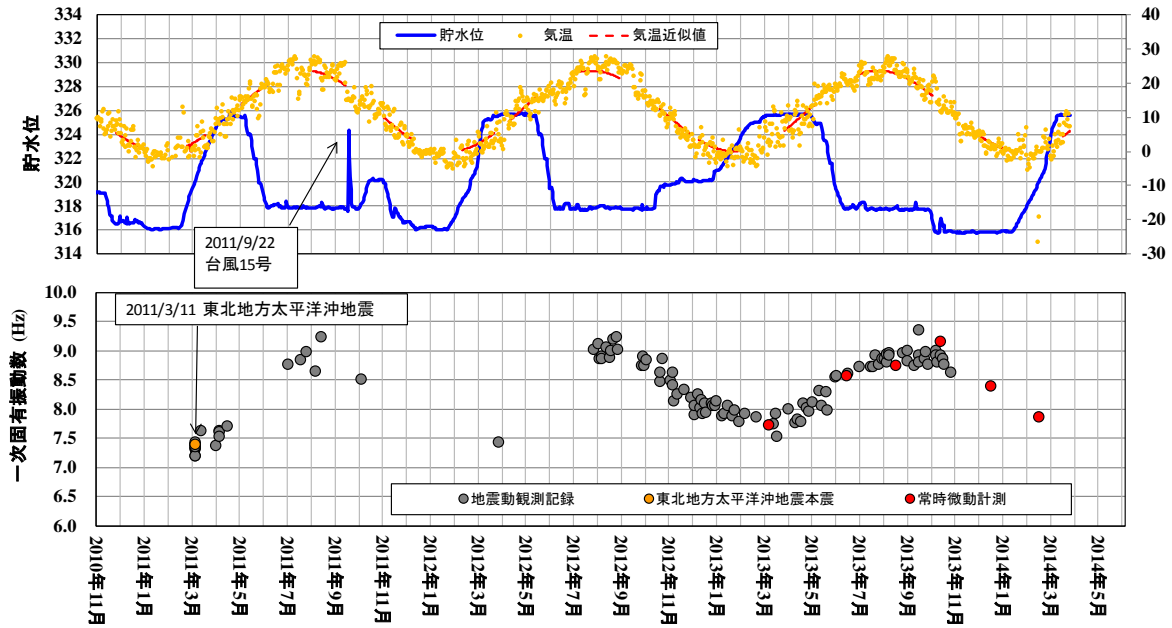


図- 3.18 地震動観測記録および常時微動計測から推定した固有振動数の変化(Cダム)

Aダム、Bダムと同様の方法(図-3.6)で推定したCダム堤体の一次固有振動数と貯水位の関係を図- 3.19に示す。他ダムでの常時微動計測記録の分析同様、貯水位の上昇に伴って固有振動数が減少する傾向が確認できる。但し、ほぼ同一貯水位であっても貯水位 EL.326m、EL.318m付近では1.0Hz程度、貯水位 EL.320m付近では1.5Hz程度のばらつき(変動)がみられるが、地震動観測記録からの推定値と常時微動計測結果の推定値及びその変化傾向に明確な差異はみられない。

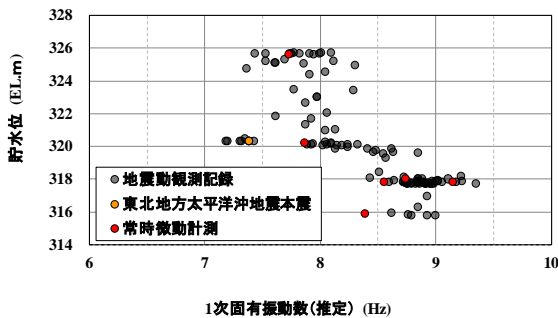


図- 3.19 貯水位と一次固有振動数の関係(Cダム)

一次固有振動数と外気温の関係を図- 3.20に示す。全体的にばらつきがあるものの、外気温の低い時期は一次固有振動数が減少する傾向が確認できる。地震動観測記録と常時微動計測結果からの推定値とその変化傾向に明確な差異はみられない。

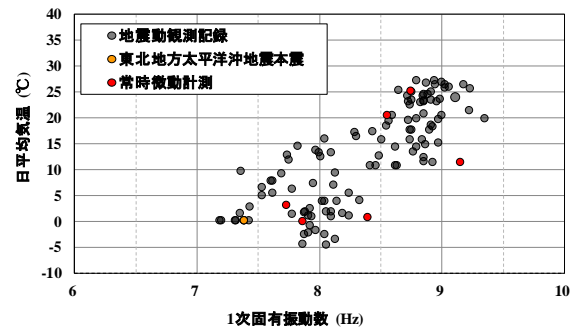


図- 3.20 気温と一次固有振動数の関係(Cダム)

以上のように、地震動観測記録から推定した固有振動数は常時微動計測記録から推定した固有振動数と概ね対応しており、ともに貯水位や外気温との間に一定の相関が認められる。

3.1.3 外気温変動による堤体の振動特性への影響

地震動観測記録および常時微動計測結果の分析により、貯水位とともに、外気温もダム堤体の固有振動数に影響を与えている可能性があることがわかった。そこで、この原因が、コンクリートの体積変化に伴う横継目の開閉によるものであるかどうかについて考察するため、コンクリート温度や継目変位が計測されているCダムを対象に、外気温のほか、堤体コンクリート温度と横継目変位の関係を調べた。さらに横継目を考慮した3次元FEM解析により、横継目の拘束条件の変化が堤体の固有振動数に及ぼす影響についても調べた。

(1) 実測挙動の分析

当該ダムでは、横継目計が上段監査廊の各ブロック間のジョイントに設置されており、これら横継目計には測温機能がある。最大断面付近では中段監査廊に、左右岸の端部ブロックでは上段監査廊に設置されている。さらに継目計とは別途堤体温度計が埋設されている。検討対象とした埋設計器位置図を図-3.21に示す。外気温の影響を直接受ける堤体表面（下流面）からの距離の異なる中段監査廊に位置するもの（5JD6）と上段監査廊に位置す

るもの（9JD10）に着目して整理した。継目変位および外気温、堤体温度の時刻歴を図-3.22に、継目変位計位置での堤体温度と継目変位との相関図を図-3.23に示す。比較的堤体表面に近い上段監査廊に設置された9JD10継目変位計位置では、堤体温度の下限値が高いが外気温とほぼ同位相で変動しており、継目変位も堤体温度が低い時期に開く挙動を示している。一方、堤体の中心付近に位置している5JD6でも温度、変位の周期的変動は認められるが、外気温変動から3か月程度遅れがあり、変動幅も小さい。このことは、図-3.23に示す継目計設置位置での温度と継目変位の関係からも読み取れる。

これらのことから、外気温の変化が堤体コンクリート温度を変化させ、横継目などの継目の挙動に影響を及ぼすことで、ダム堤体の固有振動数に変化をもたらす可能性が十分にあると考えられる。

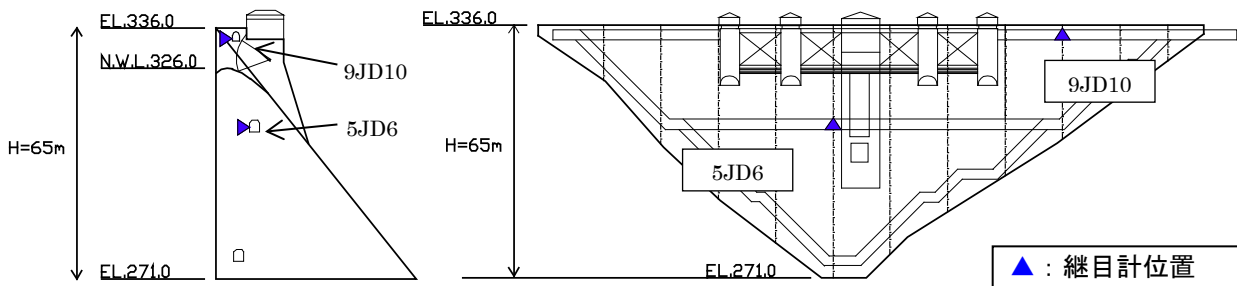


図-3.21 対象とした埋設計器位置図(Cダム)

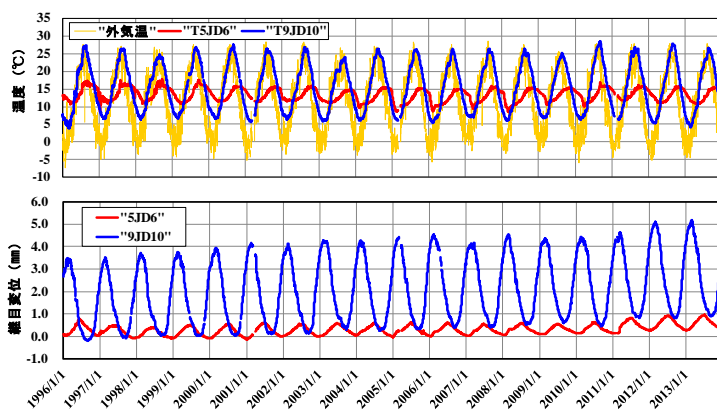


図-3.22 横継目変位時刻歴図(Cダム)

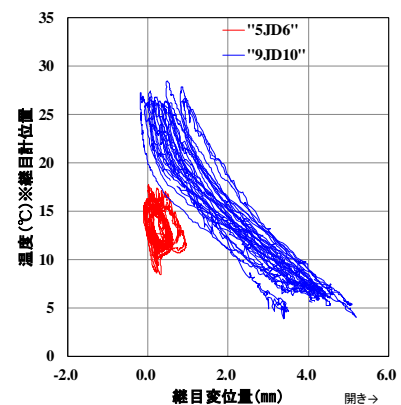


図-3.23 継目変位とコンクリート温度の関係(Cダム)

(2) 数値解析

横継目の拘束条件の変化が固有振動数に与える影響を把握するためにモデルダム（ダム高 100 m、貯水位堤高の 90 %）での、横継目を考慮した 3次元有限要素モデルを用いた数値解析（動的解析）を実施した。

解析条件は、堤体コンクリートが膨張し横継目が密着している気温の高い状態を想定し横継目を考慮していないモデル 1、気温が低く横継目が開いた状態を想定し横継目を考慮したモデル 2 およびモデル 3 の 3 ケースとした。横継目はジョイント要素によって考慮し、軸方向については引張応力を伝達しないものとし、せん断方向についてはせん断応力がせん断強度に達するまではせん断力応力を伝達するモデル 2（図- 3.25）と、せん断力応力を伝達しない（上下流方向には常に滑る）としたモデル 3 を設定した。解析モデルを図- 3.24、解析用物性値を表-3.8 に示す。入力地震動は内陸型地震と海溝型地震の 2 ケースとし、ダム基礎部で観測された加速度記録（水平 2 方向、鉛直 1 方向）を用いた 3 方向加振とした。

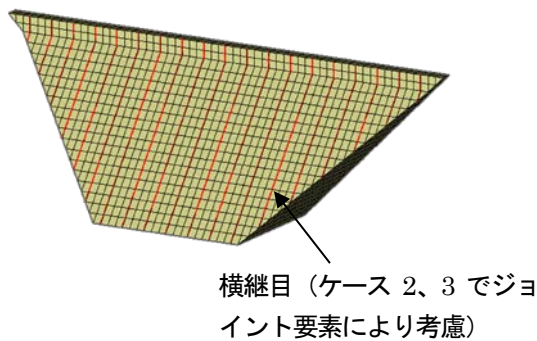


図- 3.24 解析モデル（堤体部）

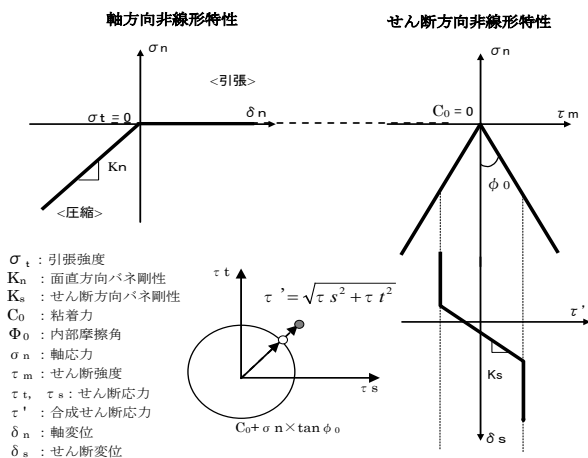


図- 3.25 ジョイント要素非線形特性（モデル 2）

表-3.8 入力物性値

項目	項目	値	
堤体	弾性係数 E_c	29,000 N/mm ²	
	ポアソン比 ν_c	0.2	
	単位体積重量 γ_c	2.3 t/m ³	
岩盤	減衰定数 h_c	10 %	
	弾性係数 E_r	40,000 N/mm ²	
	ポアソン比 ν_r	0.3	
横継目 非線形 ジョイント	単位体積重量 γ_r	2.3t/m ³	
	減衰定数 h_r	5 %	
	引張強度 σ_t	0 N/mm ²	
	Model2	面直方向バネ剛性 K_n	29,000 N/mm ³
		せん断方向バネ剛性 K_s	12,000 N/mm ³
		粘着力 C_0	0 N/mm ²
	Model3	内部摩擦角 Φ_0	45 °
		引張強度 σ_t	0 N/mm ²
		面直方向バネ剛性 K_n	29,000 N/mm ³
せん断方向バネ剛性 K_s		0 N/mm ³	
粘着力 C_0		0 N/mm ²	
内部摩擦角 Φ_0		0 °	

解析結果から得られた最大断面の天端と基礎部の伝達関数を図-3.26 に示す。入力地震動の違いによる伝達関数への影響は小さく、いずれの入力地震動においても、横継目を考慮することにより堤体の固有振動数が減少していること、また、継目の滑りを許容するとさらに固有振動数が低下することがわかる。これらのことから、外気温やコンクリート温度の低下により横継目に開きが生じると固有振動数が低下する可能性が高いと考えられる。

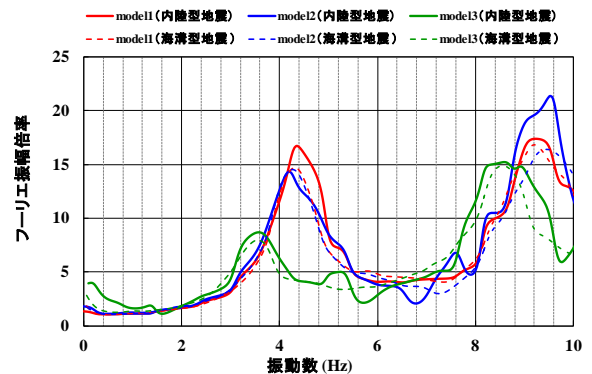


図-3.26 横継目の有無による伝達関数の違い

3.1.4 現時点までの知見および今後の展望

重力式コンクリートダム堤体の健全度診断手法の 1 つとして、常時微動計測による方法の適用可能性について、あらかじめ堤体に水平クラックおよび表面劣化を想定したモデルダムの数値解析によりダム堤体の劣化・損傷が振動特性（固有振動数）に与える影響を推定した。また、実ダムでの常時微動計測や地震観測記録、実測挙動データなどから、貯水位や温度の変化が堤体の固有振

動数に及ぼす影響を分析した。

数値解析結果の分析から、ダム堤体に劣化・損傷が生じた場合、振動特性に与える影響としては以下のことが推定される。

- 1) 堤体内に水平クラックがある場合、クラックが深くなるほど固有振動数が低下する。
- 2) 水平クラックによる固有振動数の低下傾向は、深さのほか、クラックの位置によっても異なる。低標高部にある場合は上下流方向振動の一次振動モードに変化が現れやすいが、高標高部にあるクラックではその影響は小さくなり、より高次モードの固有振動数にも着目する必要がある。
- 3) 水平クラックの影響は、その連続性の程度によっても異なる。ミシン目状の細かな断続的クラックは、合計クラック長が同じであっても連続性のあるクラックに比べてその影響は小さい。
- 4) 表面劣化に伴う堤体表面部付近のコンクリートの弾性係数の低下によっても固有振動数の低下が生じる。この場合の影響は、一次振動モードに比べより高次の振動モードのほうが大きい。

振動特性の変化をダム堤体の健全度の指標として活用しようとする場合、以上のような特性を踏まえる必要があると考えられる。

また、実ダムでの常時微動計測や地震観測記録、実測挙動データの分析により以下のことが分かった。

- 5) ダムの固有振動数は貯水位変動により影響を受ける。
- 6) ダムの固有振動数には年間の周期的変動が見られ、その変動は貯水位とともに外気温の変化とも対応している。両者の影響を分離するのが難しい場合もあるが、外気温変化の影響を受けて堤体コンクリート温度や横継目変位も変化することが実測データから確認できること、また数値解析による検討から、横継目での拘束条件がダムの固有振動数に影響を及ぼす結果が得られたことから、外気温やそれに伴うコンクリート温度の変化も、固有振動数を変化させる一因となっている可能性が高い。
- 7) 常時微動計測結果より推定される固有振動数は地震動観測記録より推定される固有振動数と概ね対応し、過去の振動特性との比較においては、地震動観測記録も活用できる。

以上のことを踏まえると、図-3.27 に示すように、ダムの振動特性に影響を与えると考えられる貯水位や温度

によるダム堤体の固有振動数の変動傾向を各ダムにおいて、あらかじめ1~2年程度の計測により定量的に把握しておくことにより、その後の定期的な常時微動計測により得られる固有振動数との比較によって、ダム堤体の健全性とその変化の有無を評価することが可能になると考えられる。

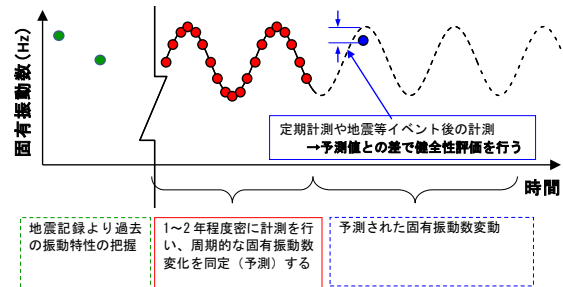


図-3.27 ダム堤体の健全度診断における常時微動計測の活用方法のイメージ

3.2 劣化・損傷を考慮したダム堤体の安全性評価方法の検討

ダム本体の長寿命化を実現する上では、点検によりダム堤体の状態を的確に把握するとともに、その結果を踏まえ合理的な維持管理方針を検討することが肝要となる。ダムの状態把握には、目視点検のほか漏水量、たわみ量、揚圧力など各種の安全管理用計測データの分析、また、前節で述べたような新たな手法の活用も含めて行い、詳細調査が必要な箇所を絞り込むこととなる。そして、把握されたダムの状態を踏まえ、各種対策の要否、実施時期、優先度の判断を行うこととなるが、これを合理的に行うためには、把握された劣化・損傷がダムの安全性(特に堤体の力学的安定性)に及ぼす影響度をできるだけ定量的に評価することが必要となる。このため、ダム堤体の劣化・損傷による健全度の低下がダムの安全性(堤体の安定性)に及ぼす影響度を定量的に評価する具体的な方法について、以下の2つの方法により検討した。

- ①構造設計上の安全率に及ぼす影響による評価
- ②大規模地震時における堤体の損傷を考慮した評価

3.2.1 構造設計上の安全率に及ぼす影響による評価方法の検討⁹⁾

劣化・損傷を考慮したダム堤体の安定性を評価する基礎的手法の検討として、2.で述べた重力式コンクリートダムにおける主な劣化損傷機構のうち、堤体安定性に及ぼす影響の大きな水平クラック及びその他の代表的な劣化損傷として堤体の表面劣化を想定し、その発生・進行

がダムの安全性に及ぼす影響について、河川管理施設等構造令⁹⁾に基づく断面設計時の安定計算法（震度法）により、滑動（せん断摩擦安全率、式（1）および転倒に対する安全率（式（2））への影響を調べた。

せん断摩擦安全率

$$F_s = \frac{f \times \sum V + \tau_0 \times B}{\sum H} \dots (1)$$

ここに、

- F_s : せん断摩擦安全率、
- f : 内部摩擦係数、
- $\sum V$: せん断面に作用する鉛直力(kN/m)、
- τ_0 : せん断強度(kN/m²)、
- B : せん断抵抗を考慮する長さ(m)、
- $\sum H$: せん断面に作用するせん断力(kN/m)

転倒安全率

$$N_t = \frac{M_R}{M_T} \dots (2)$$

ここに、

- N_t : 転倒安全率、
- M_R : 抵抗モーメント*(kN・m)、
- M_T : 転倒モーメント*(kN・m)

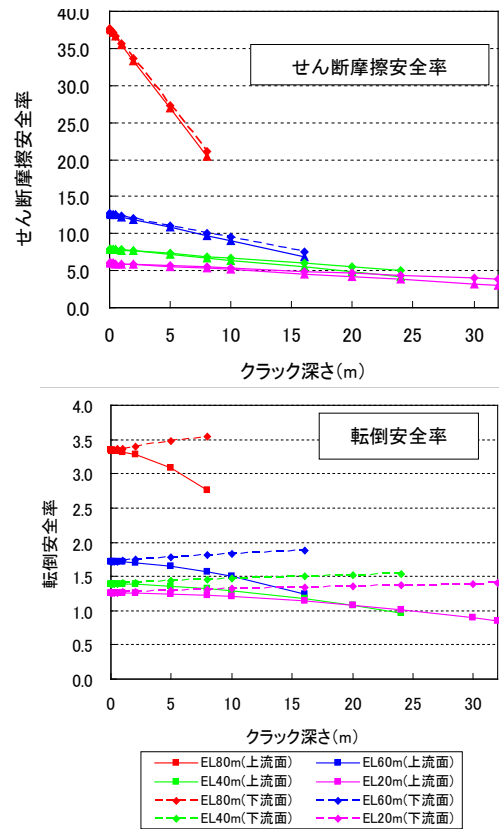
※モーメントの基準は下流端とした

その結果を図-3.28、図-3.29 に示す。これらの図から、以下のことが言える。

- 1) 一般的な断面形状の重力式コンクリートダムにおいて水平打継面沿いのクラックを考慮した場合、滑動に対する安全率はクラックが深くなるほど低下する。ただし、高標高部のクラックは安全率の低下度は大きいがもともとの安全率が大きく、低標高部のクラックはもともとの安全率は高標高部ほど大きくないが、クラックが深くなってもその低下度合いが小さいため、滑動により堤体の安定性が損なわれる可能性はほとんどない（図-3.28）。
- 2) 転倒に対する安全率は上流面の低標高部のクラックが深くなると安全性に影響を及ぼす可能性がある（図-3.28）。
- 3) 表面劣化による断面減少を考慮した場合は、考慮しない場合に比べ滑動・転倒に対する安全率はやや低下するが、外部コンクリート厚に相当する比較的深い劣化を想定した場合でも堤体の安定性が損なわれる可能性は低い（図-3.29）。

ただし、本検討において考慮している地震力は、構造令に規定されている設計震度相当のものである。大規模

地震に対する安定性は別途検討する必要があると考えられる。



※解析モデルの諸元は次の通りとした。堤高：100m、上流面勾配：鉛直、下流面勾配：1：0.8、設計震度 0.12、貯水位：90m、岩盤せん断強度：2.16MPa+tan45°、コンクリート単位体積重量：22.56kN/m³
 ※水平打継面沿いのクラックの設定標高は、岩岩からの高さ 20m(図中では EL20m と表記した) 同 40m,60m,80m(同じく図中では EL40m,EL60m,EL80m とそれぞれ表記した)の 4 ケースを設定した。各標高をダムの底面と仮定して下流側への滑動・下流端を基準とする転倒の安定計算を行った。
 ※水平打継面沿いのクラックの設定位置は、上流面・下流面とした。
 ※上流側クラックには静水圧と同等の揚圧力を作させた（揚圧力係数 1.0）。下流側水位は 0 とした。未亀裂部の揚圧力係数は 1/3 とした。

図-3.28 重力式コンクリートダム堤体に水平クラックがある場合のクラック上部の転倒・せん断摩擦安全率（震度法）

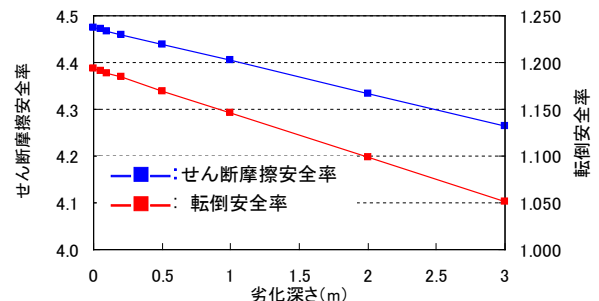


図-3.29 重力式コンクリートダム堤体下流面の表面劣化を断面減少として考慮した場合の転倒・せん断摩擦安全率（震度法）

3.2.2 大規模地震時における堤体の損傷を考慮した評価方法の検討³⁾

前節に述べた安定計算による検討では、ダム堤体に作用する荷重条件は通常的设计で考慮されるものと同等とし、地震荷重については設計震度相当の水平地震力を考慮した。しかし、この水平地震力は、断面設計上考慮される一定の安全率と組み合わせる用いられるものであって、実際の地震時にダムに作用する地震力と必ずしも対応しない。また、極めて長期にわたる供用を想定すると、ダムの耐震性能照査¹⁰⁾で想定されるような大規模地震動を受けた場合に劣化・損傷がどの程度進行する可能性があるかについても重要である。それは、2.で示したように、ダム堤体の安定性を低下させる劣化・損傷機構の1つである偶発外力としての大規模地震動は、さまざまな要因で生じた各種の劣化を急激に進行・拡大させる可能性があるためである。よってここでは、ダム堤体の安定性に及ぼす影響が最も大きいと考えられる劣化・損傷として、3.1.1での検討と同様、あらかじめ堤体内に水平クラックがある重力式コンクリートダムを想定し、大規模地震動に対する耐震性能照査¹⁰⁾と同様の方法(引張クラックの進展を考慮した非線形動的解析)を用いた以下の検討を行い、劣化・損傷の有無、程度が堤体の安定性に及ぼす影響を定量的に検討した。

- ・一定の地震動による既存のクラックの進展範囲の推定
- ・クラックが堤体を貫通しない限界の地震動強さの推定

(1) 一定の地震動による既存のクラックの進展範囲の推定

本検討は図-3.30に示す重力式コンクリートダム(堤高H=100m)の二次元有限要素モデル(堤体内にあらかじめ打継面沿いの一部に水平クラックを想定したケースと想定しないケース)を用いて行った。

堤体部分の断面形状は一般的な重力式コンクリートダムを参考に上流面勾配を鉛直とし、下流面勾配は上流端鉛直応力が圧縮側となる条件から1:0.8に設定した。解析モデル上のクラックは、図-3.31に示す通り、あらかじめ堤体内に水平クラックを想定するケースについては、当該クラック部分に非線形ジョイント要素を想定することにより考慮している。また、水平クラックを想定する打継面のクラック部以外の同一標高面全体が強度的に弱部となっていることを想定し、同水平面内の引張強度を周囲より20%低下させている。解析モデルの貯水池部分は非圧縮性流体とした。貯水位は常時満水位状態を

想定して堤高の90%相当とした。

基礎岩盤部分については、モデル境界での反射波の影響を除くため側面に自由地盤を設け、境界条件を仮想仕事の原理に基づく粘性境界¹¹⁾とした。モデル化範囲は同様の境界条件に基づく既往の解析事例¹²⁾を参考に設定した。

設定した物性値を表-3.9、表-3.10に、考慮した引張軟化特性を図-3.32に非線形ジョイント要素の概念図を図-3.33に示す。入力地震動(最大加速度450gal)を図-3.34に示す。なお、同地震動は平成7年兵庫県南部沖地震の際、震源近傍の重力式コンクリートダム基礎監査廊で観測された波形をダムの耐震性能照査に用いられる下限加速度応答スペクトル¹⁰⁾の1.5倍の周波数応答となるように振幅調整した波形である。

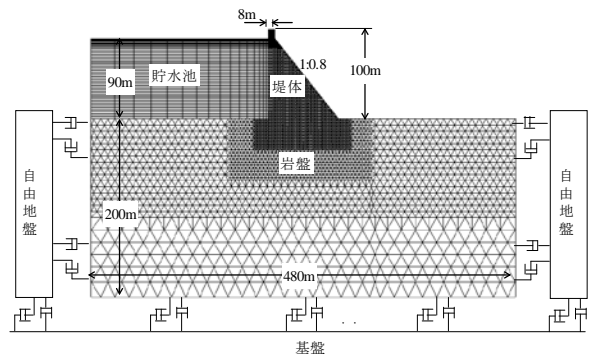


図-3.30 解析モデル(全体)

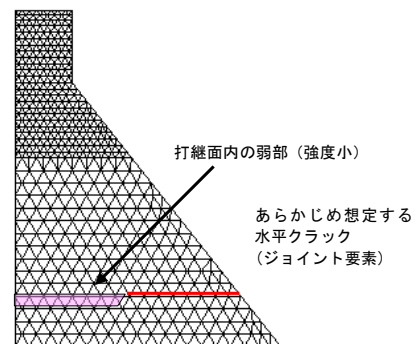


図-3.31 クラック部のモデル化

表-3.9 物性値(堤体・岩盤)

項目	堤体	基礎岩盤
弾性係数 E(N/mm ²)	29,000	40,000
ポアソン比 ν	0.2	0.3
単位体積質量(kg/m ³)	2,300	2,300
減衰型	レイリー型	レイリー型
引張軟化特性	図-3.25	—
減衰定数 h(%)	10	5

表-3.10 あらかじめ想定するクラック部
(ジョイント要素)の物性値

項目	クラック部	備考
軸剛性 k_n (N/mm ²)	0 (開口時)	—
	290,000 (閉口時)	堤体(健全部)の弾性係数の10倍相当と設定
せん断剛性 k_s (N/mm ²)	0 (開口時)	—
	110,000 (閉口時)	堤体(健全部)の弾性係数及びポアソン比より算出
引張強度 σ_t (N/mm ²)	0	—

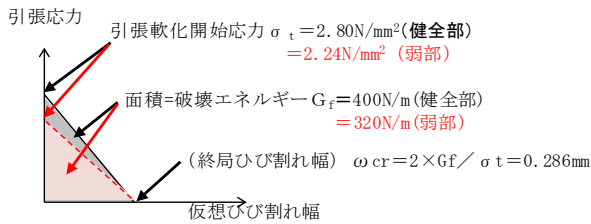


図-3.32 コンクリートの引張軟化モデル(単直線型)

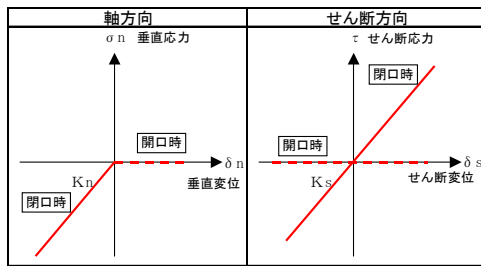


図-3.33 ジョイントの構成モデル

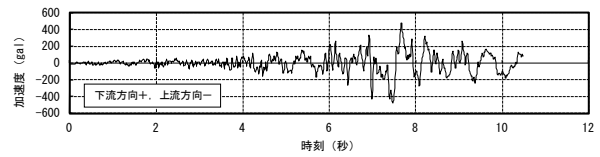


図-3.34 入力地震動(水平方向)

解析結果を図-3.35に示す。同図の(a)は、地震前には劣化・損傷がないモデルダム、(b)は、同様の条件での解析をあらかじめ堤体の一部に水平クラックがある状態を想定した場合の結果である。両ケースとも、クラックが堤体を貫通する状態には至っていない。しかし、明らかにケース(a)よりもケース(b)の方がより堤体の安定性の低下度合いは大きい。このことから、長期供用ダムや地震により被災したダムで仮に、堤体内に連続するクラックが想定されるなど顕著な健全性の低下が示唆される場合には、より詳細な劣化・損傷範囲の調査を行ったうえで、上記のようにその結果を適切に反映した数値解析的検討の結果も踏まえダムの安全性を評価する必要があると考えられる。

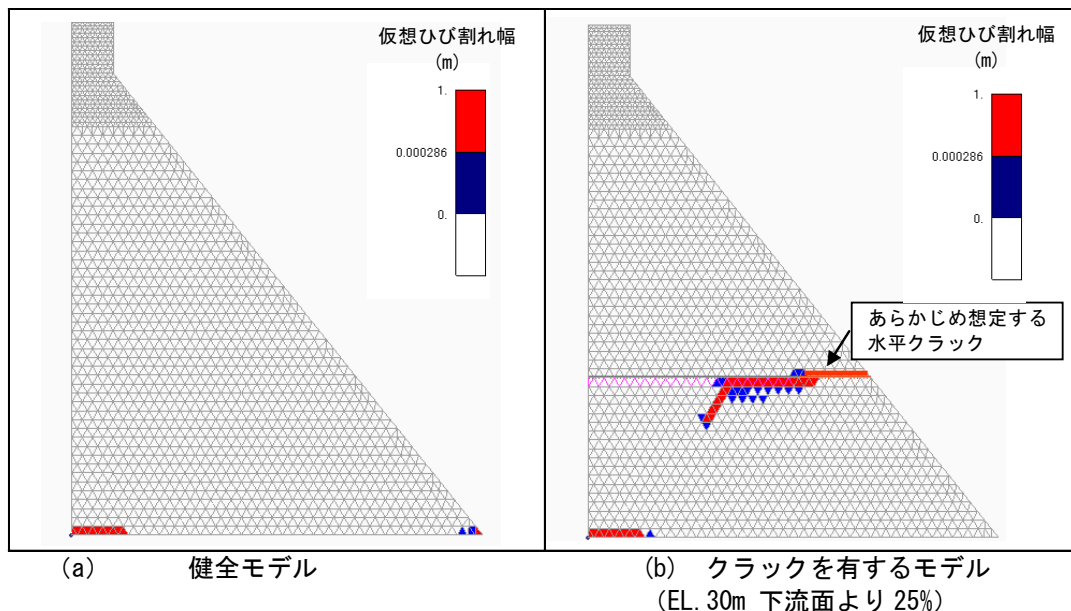


図-3.35 大規模地震による堤体の損傷範囲推定の例(最大加速度 450gal)

(2) クラックが堤体を貫通しない限界の地震動強さの推定

図-3.36は、図-3.35に示した解析と同様の手法の解析をあらかじめ想定する水平クラックの位置・範囲と入力地震動の加速度レベルの種々変えた組み合わせについて行い、その結果から、地震動によって進展したクラックが堤体を貫通するに至る地震動レベルを求めたものである。クラックを想定した位置・範囲は図-3.36の着色部分であり、各着色部の色は、当該箇所の既存クラックが大規模地震により堤体を貫通するものとなる地震動の最大加速度を示している。入力地震動は図-3.34の波形の振幅を図-3.36の凡例に示す各加速度レベルまで一律に引き延ばして作成した。限られたケースの解析結果であるが、予め生じているクラック範囲が広い(深い)ほど、また、堤体上部に位置するものであるほど、より小さな加速度の地震動でクラックが貫通に至る結果となった。

このような分析をあらかじめ行っておけば、健全度診断の結果推定されるクラックの位置や範囲に応じて、それがダムの安全性(堤体の安定性)に及ぼす影響を評価することができ、点検や対策の検討をすべき箇所の優先度を判断するための情報として活用できるものと考えられる。

表-3.11 クラック想定ケース

クラック標高	クラック位置	クラック延長
EL.0m EL.15m EL.30m EL.45m EL.60m EL.90m	上流面 下流面	当該標高の堤体幅の 25% 50% 75%

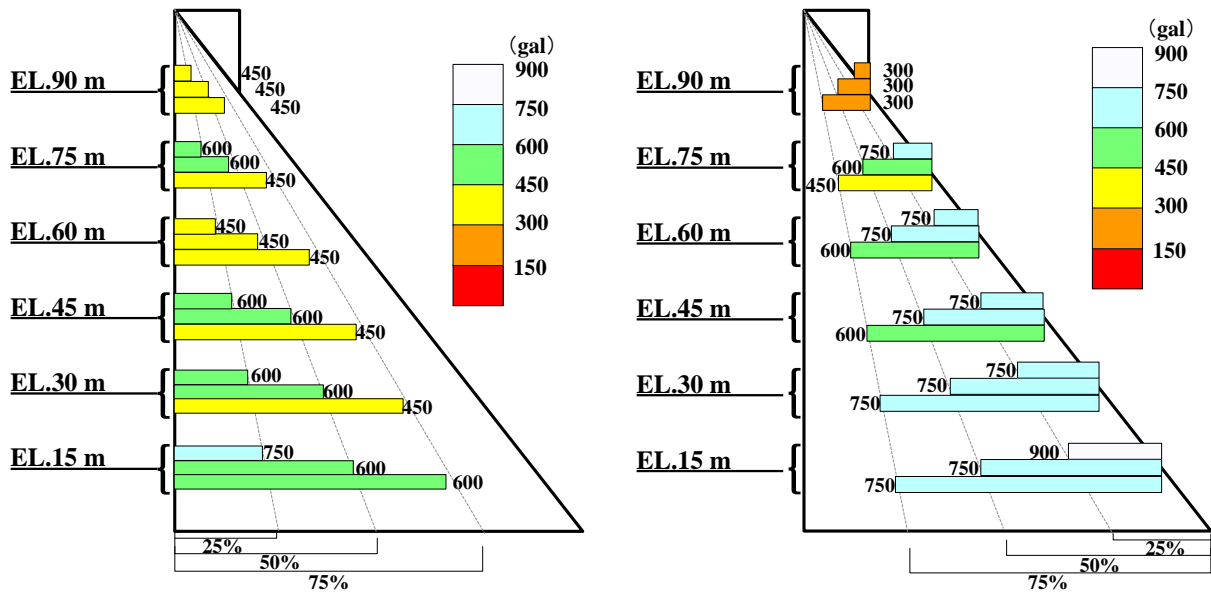


図-3.36 予め想定した水平クラックの位置・深さと貫通クラックが生じる限界の地震動強さ(最大加速度)の関係

4. 長期供用ダムにおける安全管理のための計測（維持すべき箇所判断方法）に関する検討

4.1 概要

ダムの安全性を監視するため、河川管理施設等構造令⁹⁾ではダムの種類等に応じた計測装置を設置することが定められている。この計測の基本的な考え方は、これまでダムの湛水開始以降、その挙動が安定化するまでの初期段階では密に行い、挙動の安定が確認されれば、以降の計測頻度を減じてよいとする考え方が基本となっている。しかし、挙動が安定したと判断されたダムにおいて、計測装置の老朽化に伴う故障等を契機として一部の箇所での計測を中止している事例もみられる。これは、挙動が安定した長期供用ダムにおいても計測を継続すべき項目や計測箇所の存続・中止の考え方について明確な判断基準が整理されていないことが一因と考えられる。

供用開始後一定期間の密な計測により、ダムの挙動の安定性がいったん確認された後においても、長期に及ぶ供用期間中には経年的な劣化の発生・進行や、発生頻度は低いが規模の大きな地震などにより何らかの変状が発生する可能性も想定される。ダム本体の長寿命化を実現していくには、それらによるダムの安全性への影響を的確に把握できるよう、ダムの状態に応じた適切な管理水準を維持する必要があると考えられる。そこで本研究では、挙動が安定した長期供用ダムにおいて、必要な管理水準を継続するための合理的な計測項目・箇所の存続・中止の判断方法について検討した。

すなわち、ダム堤体および基礎地盤の挙動が安定した重力式コンクリートダムを対象として、河川管理施設等構造令で規定されている計測項目（漏水量、揚圧力、変形）について、実ダムでのケーススタディーを含めて検討した。平成 25 年度は、必要な管理水準を維持するために計測を継続すべき箇所の考え方について、長期供用ダムにおける計測装置の状態に関する調査結果とともにとりまとめた。

なお、平成 25 年 10 月に、国土交通省においてダム総合点検^{13)、14)}が制度化された。ダム総合点検は、長期的な経年変化の状況や構造物の内部の状態等に着目し、築堤後 30 年程度経過したダムの健全度について総合的に調査及び評価するもので、その結果得られる維持管理方針を日常管理や定期検査等に反映させ、効果的・効率的なダムの維持管理を実現することが目的である。このため、本検討でとりまとめたにあたっては、このダム総合点検における維持管理方針の策定において必要となる安全管理のための計測についての検証・見直しにも活用でき

るものとなることを目指した。

4.2 計測に関する現行基準

ダムは長期間供用することを前提に建設される重要構造物であるため、ダム管理者が日常的に点検・巡視することで安全性及び機能の保持を図っている。安全管理のための計測はこの一環として位置づけられる。その基本原則として、計測項目については、構造令に表 4.1 に示すダムの安全管理上必要な計測事項（計測項目）がそのための計測装置の設置を定める形で規定されている。ここに規定されているのはダムの安全管理にとって必要最小限の重要な計測項目である。これらの計測頻度は、従来、『ダム構造物管理基準』などにその標準的な考え方が示され、各ダムで運用されてきたが、国土交通省による『河川砂防技術基準 維持管理編（ダム編）』¹⁵⁾において改めて規定された。表 4.2 に同基準によるダムの安全管理上の期間の区分に応じた標準的な頻度を示す。

なお、同表において第 1 期とはダムの試験湛水中の期間、第 2 期は第 1 期の終了からダムの挙動が安定した状態に達するまでの期間、第 3 期はダムの挙動が安定状態に達した後の期間を指す。計測の頻度は、安全管理の期間の区分段階が進むに従い、つまりダムの挙動が安定するに従い頻度を低減させてよいことになっている。

このように、計測項目や計測の頻度については一定の考え方が共有されているが、実際に個々の項目の計測を実施すべき箇所についての標準的な考え方はこれまで必ずしも明確にされていない。これはダムの挙動を左右する地質条件や堤体の構造がダム毎に様々である上、特に第 3 期のダムにおいて個々の計測箇所での計測を継続することの必要性は、それまでの供用中に得られた計測データの傾向を踏まえて判断すべきものであるなど、各ダムの特性に応じた総合的判断が求められ、一律の基準化が容易ではないためと考えられる。

表 4.1 河川管理施設等構造令⁹⁾における計測装置の規定（重力式コンクリートダム 抜粋）

ダムの型式	堤高	計測項目
重力式 コンクリートダム	50m 未満	漏水量、揚圧力
	50m 以上	漏水量、揚圧力、 変形量

表-4.2 河川砂防技術基準 維持管理編（ダム編）¹⁵⁾ における計測頻度の規定（重力式コンクリートダム抜粋）

計測項目		50m 未満	50m 以上 100m 未満	100m 以上
漏水量	第1期	1回/日		
	第2期	1回/週		
	第3期	1回/月		
変形	第1期	-	1回/週	1回/日
	第2期	-	1回/月	1回/週
	第3期	-	1回/3月	1回/月
揚圧力	第1期	1回/週		
	第2期	1回/月		
	第3期	1回/3月		

4.3 長期供用ダムにおける計測装置の状態調査

2.で述べたように、長期供用ダムを含む国内のダムの点検結果の調査^{16)、17)}では、ただちにダム堤体の安全性に影響を及ぼす事象は見当たらなかった。しかし、長期供用によるものと見られる堤体コンクリートの変状などいくつかの事象の他、計測装置の老朽化や故障などが見られた。そこで、計測装置の状態についてより詳細に把握するため、国土交通省が管理する全国のダムを対象に河川管理施設等構造令に定められている計測装置の状態について調査を行い、うち、最も多数を占める重力式コンクリートダム（66ダム）での計測状況を分析した。分析対象とした同型式ダムの築堤後の年数とダムの規模の関係を図-4.1に示す。

分析対象とした重力式コンクリートダムでの計測は、一般に漏水量は三角堰等、揚圧力はダム堤体監査廊内の基礎排水孔に設置されたブルドン管等、変形はプラムライン等によっている。このため、分析項目は以下の3項目とした。なお、揚圧力の計測は、基礎排水孔で計測を行う兼用孔と、揚圧力のみを計測する専用孔の両方を含んでいる。

- ①全漏水・区間漏水（三角堰等）計測状況
- ②揚圧力・個別漏水（基礎排水孔）計測状況
- ③変形（プラムライン、測量）計測状況

安全管理の区分の第2期及び第3期に該当する重力式コンクリートダムに設置されている計測装置の状態（不具合の有無等）を図-4.2に示す。なお、「不具合」とはこれら計測装置の経年的な汚れや錆、故障等により正確に計測が行われていない可能性のある場合を指している。また、同図で第3期のダムは数が多いため、河川管理施設等構造令が制定された1976年前後で分けている。

図-4.2より、漏水量については第3期のうち供用年数が長い一部のダムで不具合のある計測装置がある。揚圧

力については経過年数に応じて不具合のある計測装置があるダムの割合が増加する傾向が見られる。揚圧力は計測箇所が多く、計器の更新が進まず経年的に不具合の発生する箇所が増えていると考えられる。変形については不具合の割合は多くないが、供用年数の長い一部のダムで不具合が見られる。計測装置に不具合のあるものがないダムは28ダム（42%）、何らかの不具合のある計測装置があるダムは38箇所（58%）であった。

次に、それぞれの不具合の内容について整理を行った。全漏水・区間漏水を計測している三角堰の不具合の内容を図-4.3、揚圧力・個別漏水を計測している基礎排水孔の不具合の内容を図-4.4、変形を計測しているプラムラインの不具合の内容を図-4.5に示す。計測機器はダム内に複数箇所設置されており、不具合の箇所は延べ数となっている。

図-4.3に示す三角堰の不具合の内容は、交換が必要なナイフエッジの腐食が41%、その他は清掃などの日々のメンテナンスで対応できるものであった。図-4.4に示す基礎排水孔の不具合の内容は交換が可能な圧力計の不具合が25%であるが、その他はパイプの目詰まりや、き裂・錆の発生等の大掛かりな修理が必要になる不具合が多くみられた。図-4.5に示すプラムラインの不具合の内容には計測そのものができないものではないが、そのまま放置すれば将来的に機器が故障しやすくなり、計測結果に影響を及ぼす可能性のあるものが見られる。

これらの結果から、計測機器そのもののメンテナンスとともに、長期供用ダムにおいて計測装置の老朽化等により不具合が生じた場合の対応の基本的な考え方を明確にしておくことの重要性が示唆される。

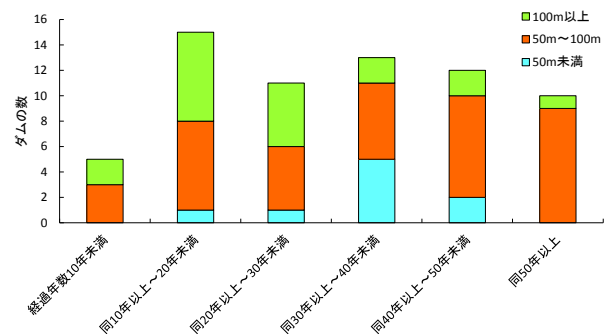


図-4.1 築堤後の年数とダムの規模の関係（重力式コンクリートダム）

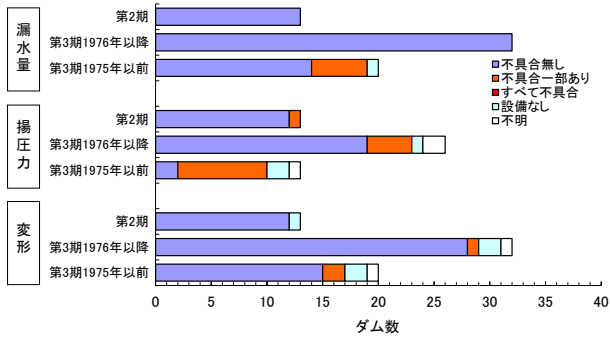


図-4.2 計測装置の不具合の有無
(重力式コンクリートダム)

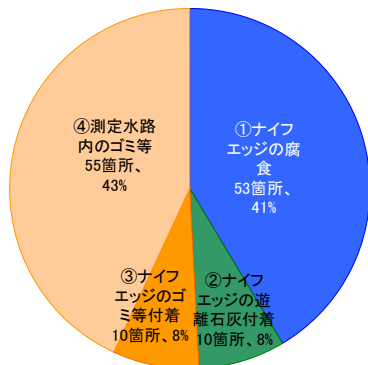


図-4.3 三角堰の不具合の内容

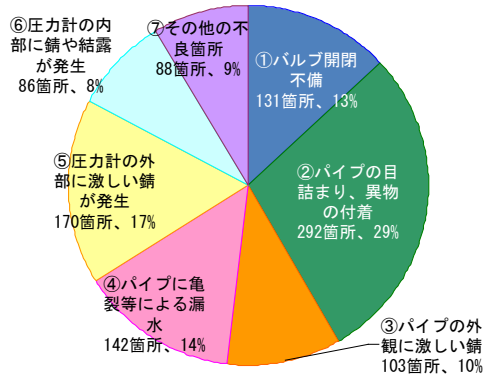


図-4.4 基礎排水孔の不具合の内容

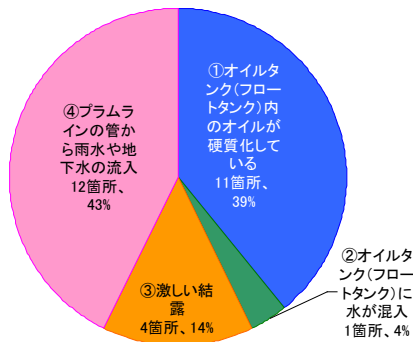


図-4.5 プラムラインの不具合の内容

4.4 実ダムを対象とした計測箇所の考え方の分析

前節の調査結果を踏まえ、本節ではより具体的にダムの計測状況について調査を行い、長期供用ダムにおいても計測を維持すべき箇所の考え方について検討を行った。検討は、挙動が安定した第3期の2つダム(Xダム、Yダム)を対象事例として分析した。

Xダムは第3期のダムの中でも、供用期間15年と比

較的新しく、現状でも供用開始当初とほぼ同程度の多数の計測が行われているダムである。Yダムは供用期間が58年とわが国コンクリートダムの中でも比較的早く、当初から計測項目・箇所が限定されているダムである。

それぞれのダムの計測状況を表-4.3と表-4.4に、堤体計測設備の配置を図-4.6と図-4.7に示す。

表-4.3 堤体計測状況 (Xダム)

項目	計測設備	計測箇所	観測方法
①漏水量(三角堰等による計測)	三角堰	右岸:1ヶ所 左岸:1ヶ所	自動計測
②基礎排水孔による排水量・揚圧力	基礎排水孔、 (排水量、ブルドン管圧力計)	52ヶ所	手動計測
③継目排水孔からの漏水量	継目排水孔 (漏水量、ブルドン管圧力計)	27ヶ所	手動計測
④変形	プラムライン	1か所	自動計測

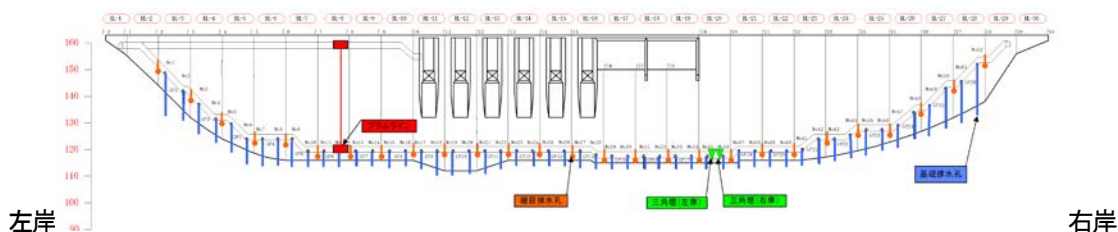


図-4.6 堤体計測設備の配置 (Xダム)

表-4.4 堤体計測状況 (Yダム)

項目	計測設備	計測箇所	観測方法
①漏水量(三角堰による計測)	三角堰	右岸:1ヶ所 左岸:1ヶ所	自動計測
②基礎排水孔による排水量・揚圧力	基礎排水孔、 (排水量、ブルドン管圧力計)	最大断面付近基礎:1ヶ所	手動計測
③継目排水孔からの漏水量	継目排水孔 (排水量、ブルドン管圧力計)	計測箇所なし	計測箇所なし
④変形	プラムライン	エレベーターシャフト付近:1か所	自動計測

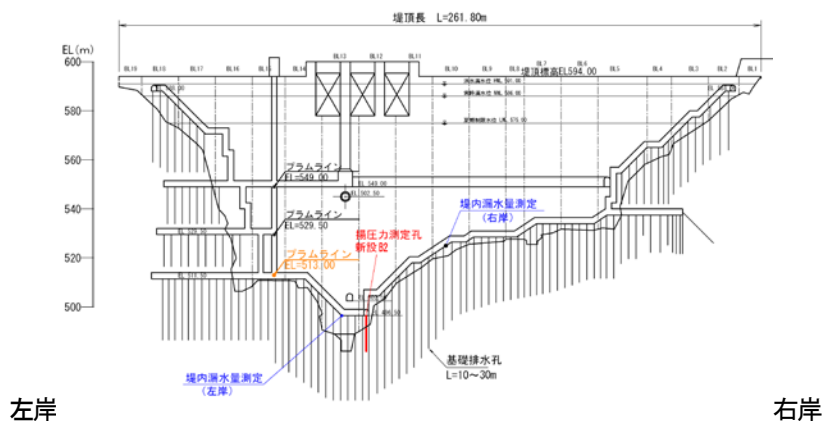


図-4.7 堤体計測設備縦断配置 (Yダム)

これら2つのダムにおける計測状況を分析し、長期供用ダムにおいても恵贈すべき計測箇所の検討の観点について整理した。なお、この計測箇所の検討は、表-4.3と表-4.4に示す①～④の項目ごとに行った。

① 三角堰等による全漏水量・区間漏水量の計測

三角堰等による全漏水量及び区間漏水量の計測では、ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所の観点から検討を行った。

○全漏水量の計測

全漏水量は、ダムの安全管理における最も基本的データとなるものの1つである。Xダム、Yダムでも、全漏水量の計測が行われている。このため、全漏水量の計測はダムの状態の長期的な変化を把握する上でどのダムにおいても例外なく継続して実施すべきものと考えられる。

○漏水量の左右岸の分離計測

Xダム、Yダムともに、左右岸の漏水量を分離して計測している。仮に漏水量の計測箇所を1箇所（全漏水量のみ）とした場合には、Xダムは堤頂長が長いこと、現状よりも異常個所の特定に時間を要することになる。Yダムでは堤高が高い上、基礎監査廊は延長が長くかつ急勾配であること、また各ブロック孔別の基礎排水量等の計測が行われていないことから、全漏水量が増加した場合には目視により異常個所の特定を行う必要が生じ、時間を要することになる。このように堤頂長の長さは漏水量の計測箇所の考え方として考慮すべき1つの指標となると考えられる。

○漏水量の高標高部と低標高部での分離計測

Xダムでは高標高部と低標高部での分離計測は実施していない。Xダムの堤高は50m程度とそれほど高くない、また堤頂長に対する比は小さい。このため、ダム軸沿いの堤体・基礎の縦断形状の観点からは、標高別に漏水量を計測する必要性は余り高くないと考えられる。

一方、Yダムは、堤高が112mと高い。また、基礎岩盤の地形が非対称で左岸側が急峻、右岸側は比較的緩勾配となっており、基礎岩盤の範囲が広い。このためYダムでは、右岸側のみ中標高部で漏水量の計測を行い、高標高部と低標高部の漏水を分離して把握している。このような形での分離計測も異常個所の特定には友好と考えられる。よって堤高や斜面部の勾配に応じた基礎岩盤の範囲の大小も漏水量の計測箇所を考える上での重要な指標となるものと考えられる。

○漏水量の地山漏水量と堤体漏水量の分離

Xダムでは、基礎監査廊に接続するグラウトトンネル等は設置されておらず、三角堰で計測される漏水量に地

山からの漏水が流入して大きく影響を与える可能性は低い。

一方、Yダムでは、基礎処理のために左右岸地山内にグラウトトンネルが掘削されており、当該トンネル部からの地山漏水は、堤体漏水と合流する構造になっている。このため、三角堰で計測される漏水量には、降雨等の影響を強く受ける可能性のある地山漏水の影響が含まれていることになる。また、建設時の調査では特に右岸アバット部は、空洞性亀裂が分布し、相対的に透水性が高い可能性がある。このため、ダム堤体や基礎岩盤の安定性を評価する上では、グラウトトンネルと基礎監査廊の接続部に三角堰を増設することなどにより、堤体漏水と地山漏水を分離して計測したほうが良いと考えられる。

このように地山漏水と堤体漏水とを分離して計測する必要性の有無も、継続的な漏水量の計測箇所の考え方として考察すべきと考えられる。

○既往計測結果等を踏まえた特定箇所（区間）での計測箇所

Xダム、Yダムとも、供用開始以降、経年的に全漏水量は減少しており、近年のデータでは、Xダムでは90/min、Yダムでは200/minで安定している。しかし、試験湛水や過去の大規模地震時などの漏水が発生、増加した箇所など全漏水量や区間漏水量と区別して特段重点的な監視を要すると考えられる箇所があれば、そのような箇所での漏水量の変化を把握できるようにしておくことも考えられる。

②基礎排水孔での排水量・揚圧力の計測

基礎排水孔での排水量・揚圧力の計測については、ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所、基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる箇所、既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所の観点から検討を行った。

○ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所

・最大断面ブロックでの計測

Xダムでは、最大断面ブロックで基礎排水量と揚圧力の計測が実施されている。

Yダムでは揚圧力の計測は、当初は最大断面付近のクロスギャラリーにて揚圧力計測を実施していた。その後も供用開始後約27年間は計測を実施していたが、それ以降は計測を行っていない。近年に最大断面ブロックに1孔削孔を行い、計測を実施しているが、新設孔での計測データは、経年的に減少かつ安定傾向にある。

基礎排水量や揚圧力は、作用する浸透圧に連動するも

のと考えられ、水圧が最大となる最大断面位置での計測データは、ダムの安定性を評価する上で最も基本的なデータの1つとなるものと考えられる。

○基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる箇所

・基礎岩盤の地質上注意すべき箇所での計測、基礎岩盤の変形性の相違の観点から注意すべき箇所での計測

X ダムの基礎岩盤では、その一部にやや透水性が高い砂岩層など地質的に注意すべき箇所が分布している。仮に異常が生じた場合にその箇所を早期に特定するためには、当該地質の範囲では、各ブロックの計測を継続するのが良いと考えられる。なお、X ダムでは、現状で各ブロック2孔程度の計測が行われている。なお、X ダムでは、ダム軸上において岩盤の変形性が大きく異なる箇所は想定されておらず、長期的に堤体の不等沈下などの問題が生じることは考えにくいが、このような箇所があるダムでは、基礎岩盤の変形性の相違の観点から基礎排水孔を用いた計測を継続することも考えられる。

○既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所

X ダムの基礎排水量は経年的に減少傾向を示しており、全孔において最大約1ℓ/min以下と安定している。また、年間変動としては、基礎排水量は概ね貯水位と比例して増減する一般的な傾向を示す。このように、特段注意すべき兆候は見られないが、基礎排水量が相対的に多い孔については継続して計測を実施するのがよいと考えられる。また、揚圧力についても経年的に減少傾向を示し、全孔において0.6kgf/cm²以下に安定している。ただし、揚圧力が相対的に大きくかつ継目排水孔からの漏水が認められる孔があり、また継目排水孔からの漏水量が多い孔では、継目排水孔からの漏水量と同様に12~1月に揚圧力が高まる傾向を示すことから、これらの孔については継続して計測を実施するのがよいと考えられる。

なお、X ダムとY ダムは数回の地震を経験している。

X ダムは、2003年の地震（ダム基礎部での最大加速度12.9gal）の際に2箇所の孔で、基礎排水量がそれぞれ約1ℓ/min（約2.5倍）、約0.5ℓ/min（約1.5倍）増加した。その量及び増加量とも少量であった。

Y ダムでは、既往地震のうち2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、ダム基礎部での加速度が29.7galと比較的小さい値であったが、既設の最大断面基礎部の揚圧力は1.02kgf/cm²（0.10MPa）から1.12kgf/cm²（0.11MPa）と僅かながら増加した。

大規模地震の際にはより大きな揚圧力の変化が生じる可能性も考えられることから、将来的に大規模地震が発生した際にも迅速に安全性を確認する観点からひつような箇所も考慮しておくのが良いと考えられる。例えば、当該箇所を含め各ブロック1孔程度は長期的に計測を継続することが考えられる。

③継目排水孔からの漏水量

継目排水孔からの漏水量の検討では、既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所の観点から検討を行った。

○既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所

X ダムでは、各横継目に対応する位置で継目排水孔からの漏水量が計測されている。各孔からの漏水量は全般的に減少傾向を示し、最も多い孔でも最大約3ℓ/min以下であり、安定している。また、継目排水孔からの漏水量の年間変動としては、図-4.8に示すように貯水位や外気温との相関がみられる。ただし、2003に発生した地震（基礎部での最大加速度12.9gal）時には複数（河床部付近8箇所）の横継目からの漏水量が増加している。当該箇所での漏水量はその後減少・安定しているものの、再度の地震の際に再び変化が見られる可能性もあることから、これらの箇所については計測を継続するのがよいと考えられる。

なお、XダムやYダムの例以外に2011年東北地方太平洋沖地震など過去の地震時や地震後に重力式コンクリートダムの継目排水孔からの漏水が見られた事例が法億されている¹⁸⁾。

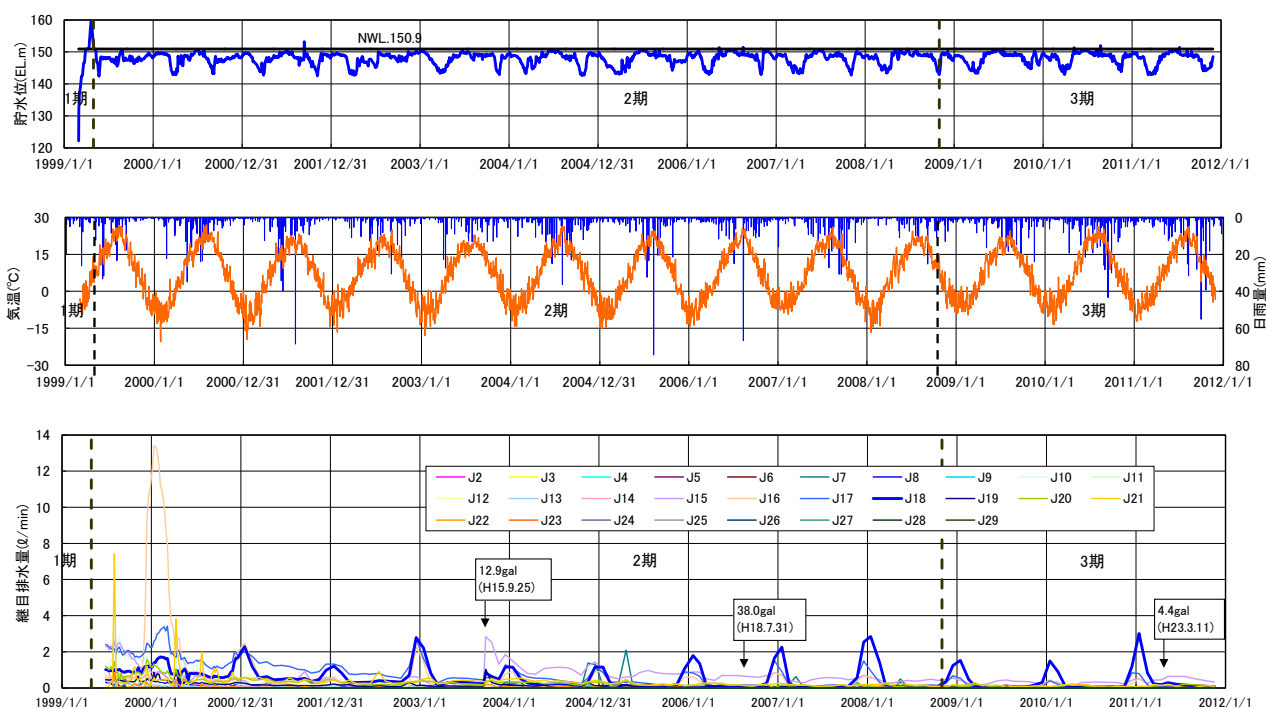


図-4.8 継目排水孔からの漏水量計測結果 (X ダム)

④変形

50m以上の重力式コンクリートダムでは、表-4.1に示すように、変形が計測項目として挙げられている。重力式コンクリートダムの変形の測定方法としては、視準測量による方法とプラムラインによる方法がある。前者は、測定が容易であるが測定誤差が比較的大きいこと、積雪の多い所では冬期の測定が困難であることなどから、堤体内にプラムラインを設置してたわみ量を計測する方法が一般的である。プラムラインによる変位(たわみ量)の計測は極めて高精度な計測方法であるが、その設置のための費用や施工への影響が大きい。このため、上記①～③の項目と違いその設置箇所が限られており、ダム天端と基礎部の相対変位量が大きく検知が容易な最大断面付近に設置されるのが一般的である。しかし、XダムやYダムでは最大断面は越流部となっており、プラムラインを設けることが困難なため、非越流ブロックの最大断面にプラムラインを設置し、堤体変位の計測が行われている。

Xダムではプラムラインで計測された変位量のデータは、主に貯水位や外気温と相関を有する弾性的な年間変動を示しており、経年的な変位振幅の増大も認められない。Yダムにおいてもプラムラインで計測された変位量のデータは、主に貯水位や外気温と相関を有する弾性的

な年間変動を示している。

このような計測データの安定性を踏まえ、またダムの変状は最終的には堤体の変位に現れると考えられることを考慮し、堤体にプラムラインが設置されているダムでは、プラムラインによる堤体変位の計測を基本計測項目の1つとして長期的に継続していくべきものと考えられる。

なお、工事誌等設計・施工に関する記録及び供用開始後の安全管理における計測データから、長期的に堤体の変位を監視すべき箇所が別にある場合、または、現在プラムラインにて変位計測が行われていないダムにおいては必要に応じプラムラインの新設の他GPS等による堤体変位の追加計測を行うことも考えられる。

4.5 挙動が安定した長期供用ダムでの計測の考え方

重力式コンクリートダムの計測項目や計測頻度は、表-4.1、表-4.2 に示すように定められている。しかし、具体的な計測箇所についての規定はない。完成後長期間経過した挙動の安定したダムの中には、4.2 で述べたように計測装置に老朽化等に伴う不具合がある例が少なくない。これらの箇所の多くでは計測が中止されているものと考えられる。しかし、完成後長期間を経過し、挙動が安定していることを踏まえ、計測装置の不具合のみを契機に当該箇所での計測を中止した場合、中止箇所によっては、ダム堤体等の経年的な劣化の発生・進行や大規模地震による影響など、長期供用の中で当該ダムの安全性を監視していく上で重要な箇所での計測データが得られなくなる可能性がある。

このため、前述 4.3 ではダム堤体および基礎地盤の挙動が安定した安全管理の第3期に入った重力式コンクリートダムを対象として、河川管理施設等構造令で規定されている計測項目（漏水量、揚圧力、変形）について、計測を継続すべき箇所を検討する際に必要な観点について実ダムの事例を分析することで検討を行ってきた。その結果を踏まえると、挙動が安定した長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所の候補を河川管理施設等構造令で定められた計測項目の計測を実施するための計測設備（①三角堰等、②基礎排水孔、継目排水孔、③プラムライン）ごとに抽出する際の流として示せば図-4.9 のように整理できる。また、計測設備ごとに計測を継続すべき箇所の考え方を整理すると以下ようになる。

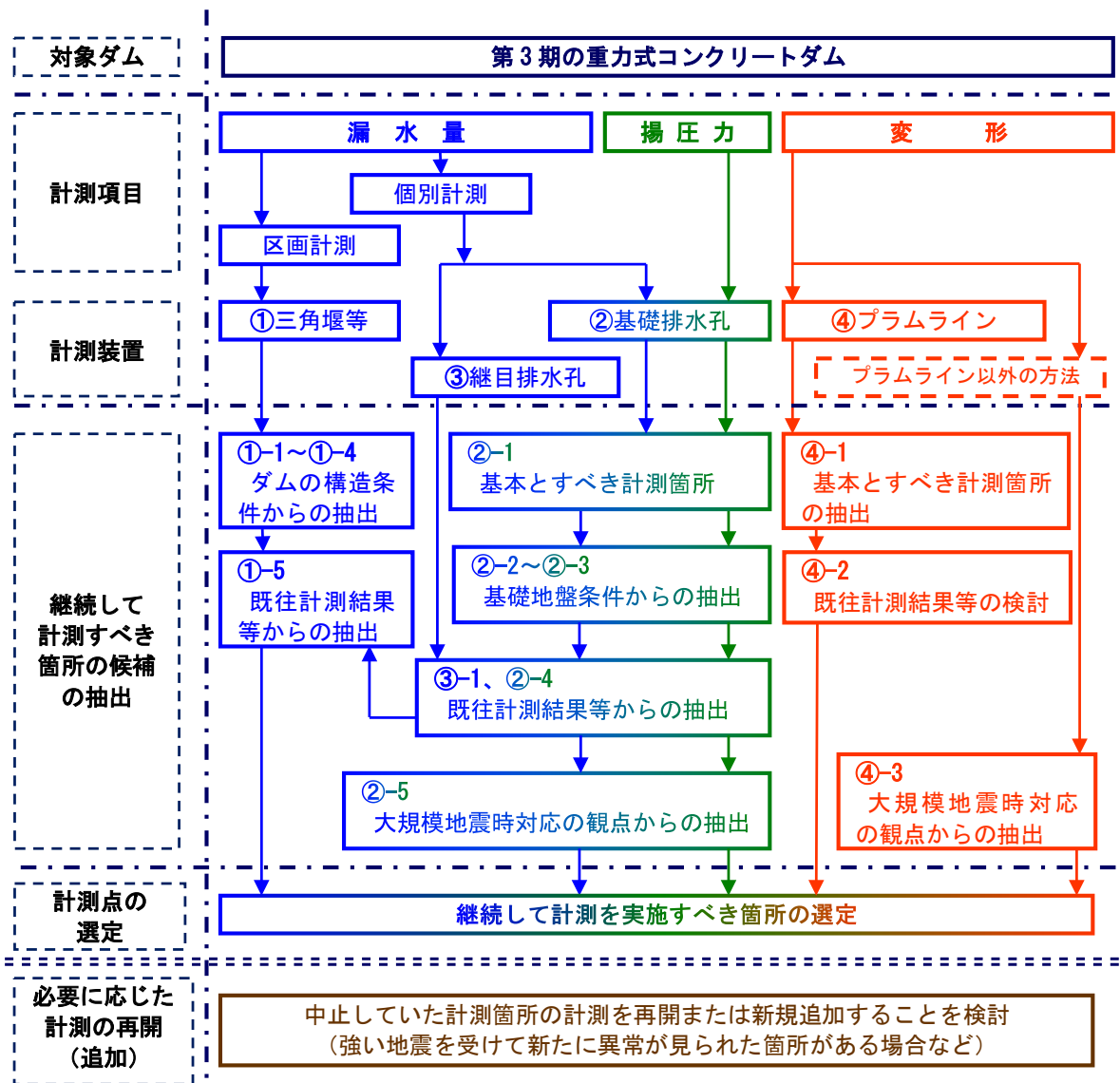


図-4.9 計測継続箇所の選定の考え方（案）（第3期の重力式コンクリートダム）

①区間漏水量

全漏水量等のある区画（広がりのある範囲）を対象とした漏水量の測定には、一般的には三角堰による方法が用いられる。三角堰等を用いた重力式コンクリートダムにおける漏水量の測定について、継続して計測すべき計測箇所は以下の観点から検討する必要があると考えられる。

○ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所

- ①-1：ダムの安全性を把握するための最も基本的な計測として、ダム全体の漏水量を計測する。全漏水量は、個々の基礎排水や継目漏水などを監査廊の底部で集水し計測する。なお、異状箇所の早期特定のため、必要に応じて、次の①-2～①-4に示すように計測範囲を分離して計測する。
- ①-2：堤頂長が長いダムの場合は、異状箇所が左右岸のいずれか大まかに判断できるよう、左右岸監査廊への漏水量を分離して計測する。また、河床部が幅広いダムでは、左右岸の漏水量に加え、河床部も分離計測できるようにする。
- ①-3：堤高が高いダムの場合は、標高別に異状箇所が検知できるよう、たとえば中間標高部などに漏水量

測定箇所を設置して標高に応じた分離計測を行う。

- ①-4：ダム堤体監査廊からグラウチング等の目的で地山内へのトンネルが設置されている場合などで、地山からも漏水が発生しており、全漏水量に対する影響が大きい場合は、堤体漏水と地山漏水を分離計測する。

- ①-5：試験湛水時や既往地震時の計測・巡視記録等から漏水量の追加の計測が必要と考えられる箇所があるダムは計測箇所を追加する。

以上の漏水量の計測を継続すべき箇所の考え方を表-4.3に示す。なお、このように、漏水量をある程度分離して計測することは、大規模地震時などの非常時に漏水量が急増した場合などにおいて、基礎排水孔や継目排水孔の箇所での孔別計測を実施する前に、変状箇所のおおまかな範囲を早期に把握するのに有効と考えられる。また、基礎排水孔や継目排水孔などからの漏水が多い箇所がある場合、当該箇所を含むブロックを常時から明確に分離して計測することも非常時の漏水量増加箇所の早期把握に繋がると考えられる。

その他、基礎排水孔や継目排水孔以外からの相当量の

表-4.4 漏水量（区間計測）の継続すべき箇所の考え方

計測項目	分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方
①漏水量(三角堰等による計測)	ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所	すべてのダム	①-1 全漏水量を一括計測(基本)
		堤頂長が長いダム	①-2 左右岸の漏水量計測を分離して計測 河床部の幅が広いダムでは左右岸に加え、河床部の漏水量も分離して計測
		堤高の高いダム	①-3 高標高部と低標高部で漏水量を分離して計測
		地山からの漏水の影響が大きいダム	①-4 地山漏水量と堤体漏水量を分離して計測
		既往管理記録等から追加の計測が必要と考えられる箇所があるダム	①-5 試験湛水時や既往地震時の計測・巡視記録等から注意すべき箇所(範囲)

漏水がある場合、その近辺に新たに三角堰を設ける等、必要に応じ、着目したい漏水量を分離して計測できるようにするのがよいと考えられる。

②基礎排水孔での孔別排水量と揚圧力

重力式コンクリートダムでは、基礎排水孔を設けて岩盤内の浸透水を排水することで、ダム底面にかかる揚圧力が低減されるものとして設計されている例が多い。この基礎排水孔を用いて基礎岩盤からの排水量（本来は揚圧力を低減させる目的で排水するものであり、このように呼ぶべきものであるが、河川管理施設等構造令の規定上は「漏水量」に含まれる）や揚圧力の計測を行っている。なお、揚圧力の計測は、基礎排水孔を兼用し、その一時閉塞により行われる場合と、揚圧力計測用の専用孔が設けられる場合がある。これら個別の基礎排水孔などで計測する排水量や揚圧力について、計測を継続すべき箇所の考え方を表-4.5に示す。

○ダムの構造上計測が必要と考えられる箇所

②-1：最大断面ブロック付近の基礎排水量と揚圧力

安全管理の第3期においても、貯水深が最大で浸透圧（揚圧力）が最大となる可能性がある最大断面等の代表断面ブロックでの計測は継続して行い、経時的な変化に着目して、ダムや基礎地盤が安定した状態であるか監視する必要があると考えられる。なお、比較的大規模な重力式コンクリートダムなど、常にバルブを閉塞して揚圧力のみを計測する揚圧力専用孔を基礎排水孔と別に基礎監査廊内に設置している場合、揚圧力の上下流方向分布を計測するためにクロスギャラリーに揚圧力専用孔を設置している場合などにおいては、これら専用孔で計測される揚圧力は構造計算上の設計値との比較が可能となることから、当該ダムの安定性を監視する上で重要な計測箇所になると考えられる箇所については、継続して計測を行うのが良いと考えられる。

なお、完成後長期経過したダムにおいては、基礎排水孔がエフロレッセンスなどにより閉塞し、正確な基礎排水量の計測が行えない場合がある。この場合は、必要に応じ基礎排水孔のリボーリング（再削孔）を検討することも考えられる。基礎排水孔のリボーリングの方法としては、既存の基礎排水孔を拡孔する方法と、近傍に新設する方法がある。既存の基礎排水孔を拡孔する場合は閉塞が顕著になる前の過去のデータとの厳密な比較が可能であるが、新設する場合は厳密には同じ位置でのデータ

ではなくなるため、過去のデータとの比較に当たっては注意が必要である。

○基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる箇所

②-2：規模の大きな弱層（断層など）上の基礎排水孔を含むブロック

基礎地盤内の弱層沿いに新たな水みちが形成された場合などにこれを検知する上で継続して計測する必要性が高い箇所と考えられる。ただし試験湛水中や過去の大規模地震時などに漏水（排水）に土粒子の混入がみられたことなどにより、基礎排水孔を閉塞したまま揚圧力の計測のみを実施している基礎排水孔は、計測のため開栓すると弱層内の土粒子が流出するなどとして再び水みちになる恐れがあることに注意が必要である。

②-3：基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所上の基礎排水孔を含むブロック

このような地盤条件の箇所では、大規模地震時にダムと基礎岩盤の挙動が異なる可能性があるため、その付近にある基礎排水孔では、過去の計測で問題が無い場合でも継続して継続する必要性が高いと考えられる。また、重力式コンクリートダムの安定性がブロック単位で検討されていることも考慮して、上記の考え方は孔別ではなく、ブロック単位で適用することが適切であると考えられる。

○既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所

②-4：試験湛水時や過去の地震時などに排水量が多いか揚圧力が高い基礎排水孔がみられたブロック

対象とすべき排水量や漏水量、揚圧力の値について一定の定量的基準を示すのは難しいが、当該ダムでの相対的に大きな値が計測されたことがある箇所は、継続して計測を行う箇所として検討することが考えられる。

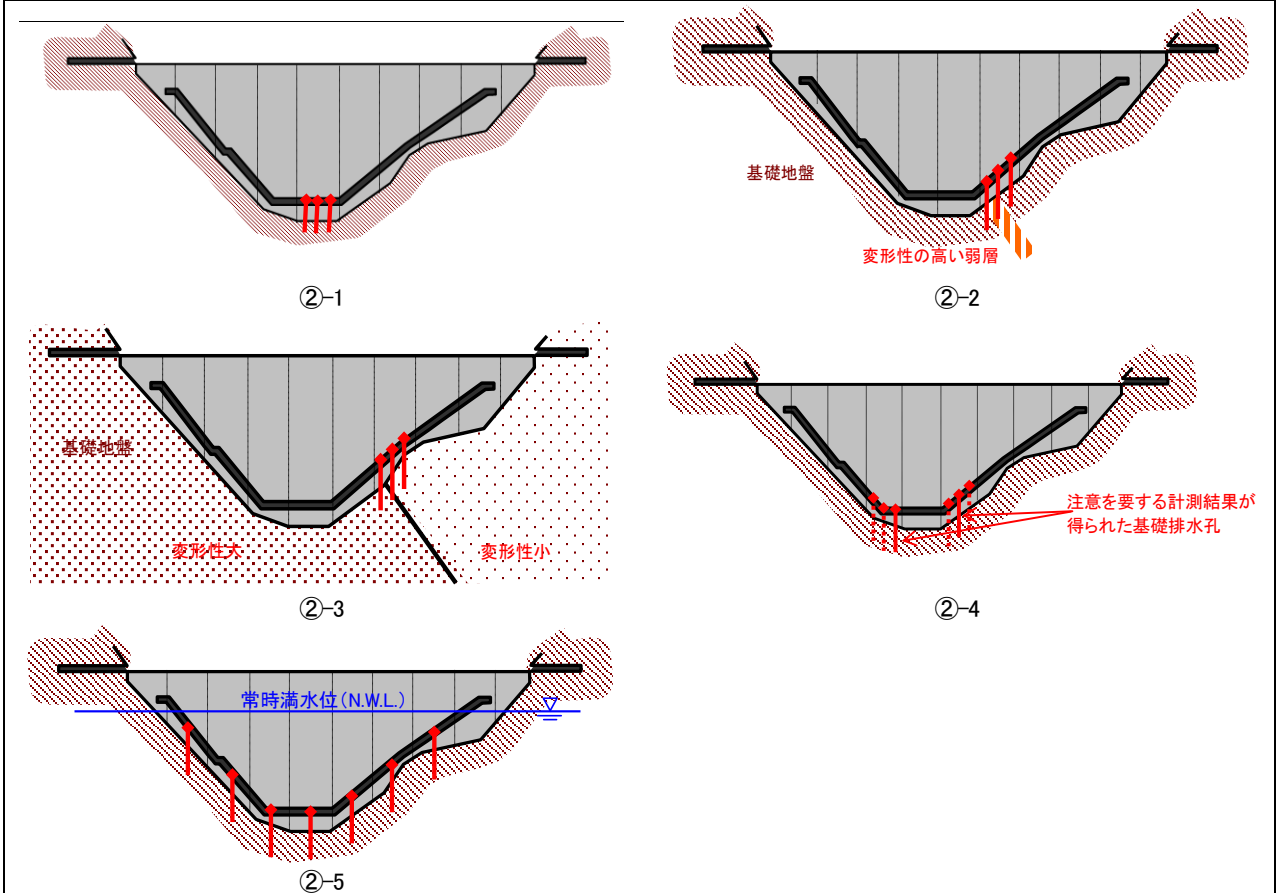
○大規模地震後の迅速な安全性評価のために計測が必要と考えられる箇所

②-5：大規模地震後の迅速な安全性評価のための各ブロック1箇所の基礎排水孔

上記の計測箇所に加えて、大規模地震発生時に即座に堤体や基礎岩盤の異状の有無の判断や異状発生箇所の特定ができるように、常時満水位以上にその基礎を有する堤体の低いブロックを除いた堤体の各ブロックに少なくとも1箇所の基礎排水孔を閉塞の無い健全な状態に保ち、基礎排水量の計測、また揚圧力計を設置して揚圧力の計測を行うことが考えられる。

表-4.5 個別漏水量（基礎排水孔）と揚圧力の継続すべき箇所の考え方

計測項目	分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方
②基礎排水孔での孔別による排水量・揚圧力	ダム構造上計測が必要と考えられる箇所	全てのダム	②-1 最大断面ブロック付近の基礎排水孔
	基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる箇所	規模の大きな弱層(断層など)を基礎岩盤に有するダム	②-2 規模の大きな弱層(断層など)付近の基礎排水孔を含むブロック 注) 試験湛水中に漏水(排水)に土粒子の混入がみられたため、基礎排水孔を閉塞したまま揚圧力の計測のみを実施している基礎排水孔はこの限りではない。
		基礎岩盤の変形性の差が極端に大きい箇所を基礎岩盤に有するダム	②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所の基礎排水孔を含むブロック
	既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	試験湛水時や地震時などに注意を要する計測結果が得られたブロックがあるダム	②-4 試験湛水時や過去の地震時などに排水量が多いか揚圧力が高い基礎排水孔がみられたブロック ・排水量が多い ・揚圧力が高い ・排水量が多く揚圧力が高い ・濁水、土粒子の流出
大規模地震後の迅速な安全性評価のために計測が必要と考えられる箇所	全てのダム	②-5 大規模地震後の迅速な安全性評価のための各ブロック1箇所の基礎排水孔 ※常時満水位以上に基礎を有するブロックを除く	



③継目排水孔からの孔別漏水量

ダム堤体内の横継目の貯水池側に設置される止水板の下流側には、止水板の止水機能の監視とその他何らかの浸透経路により横継目内に浸入した漏水の排除を目的と

して、継目排水孔が設置されている。この継目排水孔での孔別漏水量の計測を継続すべき箇所の考え方を表-4.6に示す。

○既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所
 ③-1：試験湛水時や地震時に漏水量が多くなった継目排水孔

試験湛水や過去の地震時などに注意を要する計測結果が得られた継目排水孔は継続して計測を行う必要がある。また、監査廊内や下流面の亀裂などからの漏水がある場合も必要に応じてその量を分離計測（孔別計測）することを検討する。

④変形

挙動の安定した第3期のダムで変形（変位）が問題となる例は少ないがダムは基礎岩盤の変状は最終的には変位に現れると考えられる。このため安全管理による変位計測は極めて重要と考えられる。

変形の継続すべき箇所の考え方を表4.7に示す。

○計測を行うべきと考えられる箇所

④-1：プラムラインによる変形（たわみ量）計測

コンクリートダムでの変位計測として最も一般的なプラムラインについては、基本的に挙動が安定したダムでも計測が継続できるようにしておく必要があると考えられる。このため、仮に老朽化等により計測が困難となった場合には、復旧もしくは次に述べる他の方法など何らかの方法により、ダム堤体の変形が計測できるよう対応

を検討すべきと考えられる。

④-2：各ブロックでのGPS等による変位計測

プラムラインによる変形（たわみ量）計測は極めて高精度な計測方法であるが、箇所が限られる。一方、フィルダムにおいては時間の経過や地震などにより堤体の圧落や沈下が生じることや築堤材料の物性のばらつきがコンクリートダムに比べて大きいことなどから、大規模なダムでは20~30箇所の測点を設置して、GPSを用いた変位計測を実施している例がある。

重力式コンクリートダムはフィルダムのような沈下や堤体材料のばらつきに着目する必要はほとんどないが、横継目によりブロックを区切った構造になっているため、隣同士のブロックであっても基礎岩盤や地形の条件によっては、大規模地震などにより異なる変位挙動を示す可能性がある。また、GPSを用いた重力式コンクリートダムの変位計測については、これまでの試験的計測例では、比較的簡易な設置方法でもブロックごとの変位を計測でき、かつ、プラムラインと同程度の精度が確保されることが確認されている¹⁹⁾。プラムラインが設置されていないダムやプラムライン設置箇所以外での変形計測を検討する場合には、このような新たな計測技術も積極的に活用することが有効である。

表-4.6 個別漏水量（継目排水孔）の継続すべき箇所の考え方

計測項目	分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方
③継目排水孔からの漏水量	既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所	試験湛水や地震時などに注意を要する計測結果が得られた横継目のあるダム	③-1 試験湛水時や地震時に漏水量が多くなった継目排水孔

表-4.7 変形の継続すべき箇所の考え方

計測項目	分類	適用条件	計測を継続すべき箇所等の考え方
④変形	ダムの構造上計測に適した箇所	全てのダム	④-1 最大断面付近のブロック(基本)でのプラムラインによる変形(たわみ量)計測
		必要に応じて(プラムライン未設置または設置が困難なダムで、変位計測が必要な場合等)	④-2 各ブロックでのGPS等による変位計測

5. まとめ

供用開始後長期間経過したダムが増加する中において、ダム本体における各種劣化・損傷事象の実態やその長期的な進行メカニズムに関する知見は十分でない。しかし、ダムを長期にわたり安全に供用していくためには、将来的な劣化・損傷の進行や、それがダムの安全性に与える影響度合いを考慮した合理的な維持管理が求められる。また、ダムの合理的な維持管理のためには、経験豊富な技術者の減少も踏まえつつ、長期供用に伴い挙動の安定化したダムにおける合理的な安全管理のための各種計測のあり方を検証するための考え方を明確化していくことも重要な課題である。

本研究は、このような課題を解決するため、長期供用に伴うダム本体の劣化・損傷機構やそれを踏まえたダムの安全性への影響度の定量的な評価方法、また挙動が安定したダムでの計測を継続すべき基本計測項目・箇所等の考え方を明らかにすることを目的とし、特にコンクリートダム堤体の維持管理を対象として実施した。本研究により明らかになった点は以下のとおりである。

①ダム本体等の劣化・損傷事象の類型化

- ・劣化・損傷事象の報告例を既往の点検結果報告の調査により抽出・分類した。
- ・各事象がダムの安全性に及ぼす影響について定性的に整理した。
- ・各事象の発生傾向を、事象の種類、発生箇所（部位）、供用年数と進行度の関係などについて分析した。
- ・各事象の発生原因や複数事象間の関係性に基づき、ダム堤体の劣化・損傷の発生・進行機構として想定すべきものを抽出した。
- ・長期供用に伴い特にダムの安全性に影響を及ぼすものとして想定すべき劣化・損傷機構についてその類型を整理した。

②ダム本体の劣化・損傷が堤体の安全性に及ぼす影響度の定量的評価方法

- ・ダム堤体内部も含む効率的な健全度診断技術の1つとして、常時微動などダム堤体の振動計測によりその振動特性の変化から劣化・損傷による影響を検出する手法について、実ダムでの計測と数値解析を通じてその適用性を検討した。その結果、貯水位や温度の変化による影響を適切に分離することで、ダムの健全度診断に適用できる可能性があることを示した。
- ・①で抽出した劣化・損傷の類型のうち、ダム堤体の安全性に影響が大きいと考えられる水平打継面のひび割れを対象とした検討により、ダム堤体の安全性に

及ぼす影響を定量的に評価する手法として、ダムの基本設計要件となっている転倒や滑動に対する安定性への影響を構造計算で用いられる安定計算法によって評価する方法、および大規模地震に対する耐震性能照査で適用されるひび割れ進展を考慮した非線形動的解析によってダムの貯水機能への影響を評価する方法を示した。

③長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方

- ・長期供用ダムでは、安全管理のための計測計器の劣化・故障により一部箇所での計測を中止している例がある現状を踏まえ、挙動が安定したダムでも、長期的に安全管理上計測を継続すべき箇所の考え方について、実ダムでのケーススタディー結果も踏まえて示した。

なお、国土交通省では、25年度にダム総合点検¹³⁾が制度化された。これにより、概ね30年を経過したダムなどでは、設計・施工から供用後の維持管理で得られた計測データや点検・検査記録等の分析や個々のダムの技術的課題に応じた調査の結果に基づき、ダムの健全度評価が行われる。また、ダムの安全性・機能に及ぼす影響度を踏まえ、今後の中長期的な維持管理方針をダムの長寿命化計画として立案されることとなる。これらの仕組みは、ダムの点検・整備に関する技術基準として、河川法改正に伴い新たに制定された河川・砂防技術基準維持管理編（ダム編）¹⁵⁾にも盛り込まれたところである。

このように、ダムの長寿命化に向けた一定の仕組みが整備されつつあるが、その実行にあたっては、各種の状態把握、影響評価および対策技術が不可欠である。本研究での個々の成果は、図-5.1に示すように、維持管理の計画、状態把握、分析・評価、対策を含む一連の流れの各段階において、その活用が期待されるものである。

すなわち、総合点検やその中でレビューされることとなる日常・定期の各種点検や検査では、各種劣化や損傷事象をその発生原因や進行の機構を含めて理解することで、現状及び将来におけるダムの安全性や機能への影響予測が可能となる。

また、ダム堤体の構造体としての健全度やその変化の有無を長期的にモニタリングするには、従来の各種計測・調査技術に加え、本研究で示したような新たな診断技術が、詳細調査箇所の抽出のためのスクリーニング手法の1つとして有効と考えられ、健全度診断の効率化に寄与すると期待される。

点検等でいくつかの変状の発生や進行が認められた場

合、個々の変状がダム堤体の安定性に及ぼす影響を大規模地震時の損傷程度や一定の損傷を生じさせる外力規模などの指標を用いて定量評価することで、その程度に応じ対策の優先度を割り当てることにより、安全性と機能維持、また経済的にも合理的な維持管理が実行可能になると考えられる。これには、本研究で示したような安全性への影響評価手法もその手法の1つになると考えられる。

さらに、挙動が安定した長期供用ダムでの安全管理計測箇所への考え方は、総合点検などの機会に既往の計測体制の妥当性を見直すための一定の考え方を明らかにしたことで、計器の老朽化や人員的制約のみを理由とした計測の中止などによる安全管理水準の低下を防ぎ、長期供

用ダムでの安全管理水準を合理的なレベルに維持する効果が期待される。

本研究で整理したこれら個々の知見は、ダムの長寿命化を実現する上で必要な全ての課題を解決するものではない。しかし、長期供用ダムで生じる事象の理解から、同事象を含めた状態把握とその結果に基づく合理的な維持管理の立案・実行に繋がる一連の維持管理技術の体系の中でこれらを捉え、他の研究による知見とあわせ、各ダムの状況に応じてそれぞれのステップにおいて有効に活用することで、より効率的・効果的な維持管理及びこれを通じたダムの長寿命化の実施に寄与することを期するものである。

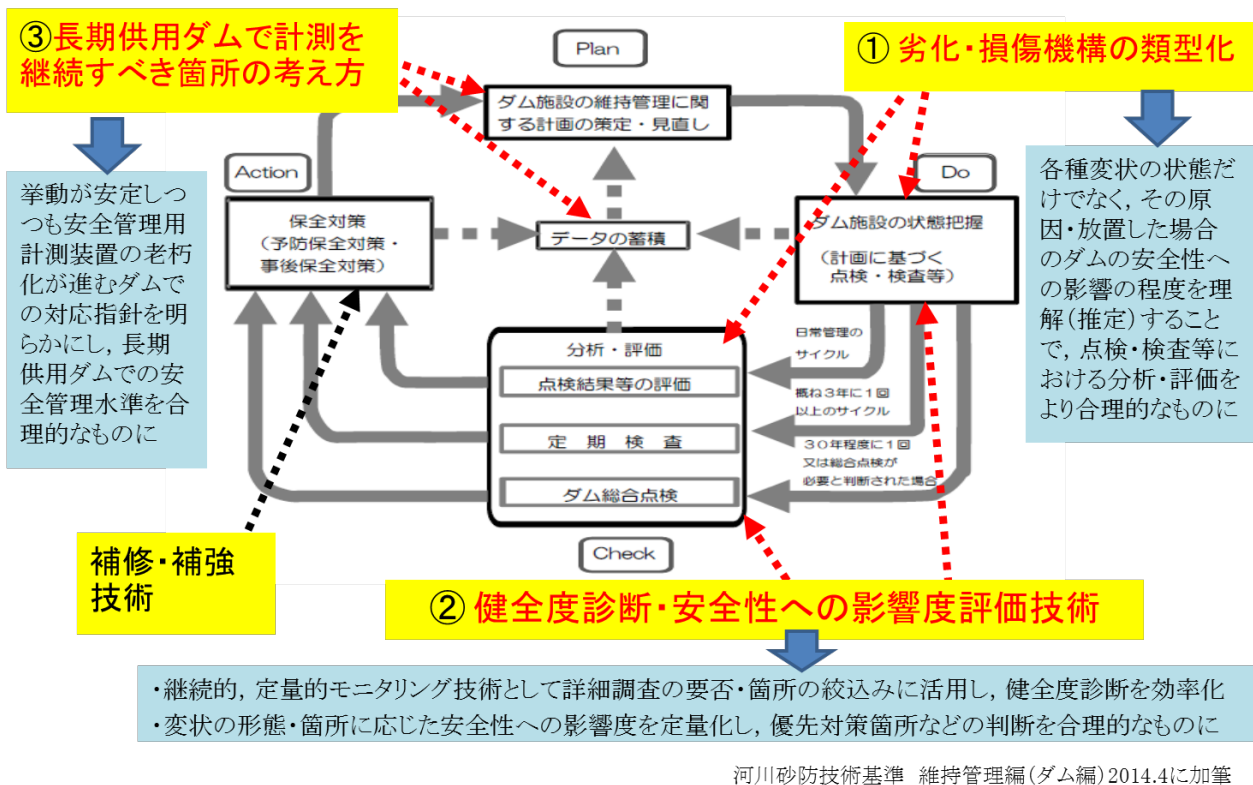


図-5.1 ダムの維持管理におけるPDCAサイクルと長寿命化のための本研究成果の活用

参考文献

- 1) 山口嘉一、金銅将史、小堀俊秀、大館 渉：コンクリートダムの劣化・損傷事象の調査・分析、ダム技術、No.304、pp.31-44、2012.1
- 2) 山口嘉一、金銅将史、佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹：ダムの長寿命化のためのダム本体の維持管理技術に関する研究、平成 23 年度土木研究所重点プロジェクト研究報告書 13-4
- 3) 佐々木隆、金銅将史、佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹：ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究、平成 24 年度プロジェクト研究報告書、独立行政法人土木研究所、2013.5.
- 4) ダムの定期検査の手引き（国土交通省河川局河川環境課監修）、2002.2.
- 5) 上島照幸、金澤健司、村上弘太、仲村成貴、塩尻弘雄、有賀義明：常時微動・地震動の長期継続観測による高経年化したアーチダムの振動特性同定と 2011 年東北地方太平洋沖地震時のダムの振動挙動、土木学会論文集 A1（構造・地震工学）、Vol.68、No.4（地震工学論文集第 31-b 巻）、I 186-I 194、2012
- 6) 大熊信之、畑元浩樹、金澤健司：常時微動計測データから明らかとなった高経年大規模アーチダムの動的特性、電力土木、341 号、pp.9-17、2009.5
- 7) 大町達夫：1999 年台湾集集地震によるダムの被害について、ダム工学 Vol.10 No.2、pp.138-150
- 8) 山口嘉一、岩下友也、佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹：ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究、平成 22 年度戦略研究報告書、独立行政法人土木研究所、2011.5.
- 9) 財団法人国土技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令、山海堂、2000.
- 10) 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、2005.3.
- 11) 三浦房紀、沖中宏志：仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法、土木学会論文集、第 404 号/I-11、1989、3.
- 12) 岩下友也、原 基樹、吉永寿幸、山口嘉一：短周期成分が卓越する地震動のダムに及ぼす影響、地震工学論文集、Vol.66、No.1、115-134、2010
- 13) 国土交通省 水管理・国土保全局：ダム総合点検実施要領について、2013.
- 14) 松本徳久：ダムと安全-第 3 期の管理-、ダム技術、No.328、pp.4-12、2014.
- 15) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 維持管理編（ダム編）、2014.
- 16) 山口嘉一、金銅将史、佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹：ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究、平成 23 年度プロジェクト研究報告書、2012.
- 17) 山口嘉一、金銅将史、小堀俊秀、大館 渉：コンクリートダムの劣化・損傷事象の調査・分析、ダム技術、No.304、pp.31-44、2012.
- 18) 独立行政法人土木研究所：土木研究所資料第 4202 号平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、2011.7.
- 19) 山口嘉一、小堀俊秀、矢沢賢一、斉藤明、岩瀬秀一：GPS を用いた重力式コンクリートダムの変位計測、ダム技術、No.294、pp.8-18、2011.3.

MAINTENANCE TECHNOLOGY FOR EXTENSION OF LIFESPAN OF DAMS

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2009-2013

Research Team : Hydraulic Engineering Research
Group (Dam and Appurtenant Structure
Research Team)

Author : ENOMURA Yasufumi
KONDO Masafumi
SATOHI Hiroyuki
KOBORI Toshihide

Abstract : In view of the effective use of existing stocks, appropriate management and maintenance of dams structures for their long-term use considering actual status of a dam and its influence on the safety of dam are very important. However, our knowledge about ongoing or potential aging of dam body is not sufficient. This study aims to solve this problem by investigating long-term deterioration or damaging process of dam body, developing a quantitative method to evaluate the safety of dam considering the effect of aging or damages and clarifying how to continue measurement for safety management at long-used dams.

In this fiscal year, 1) typical mechanisms of deterioration or damaging process of a dam body were identified by analyzing inspection records of aging concrete dams. 2) As a method to evaluate the soundness of dam body by focusing on the change of vibration characteristics, probability of using microtremor measurement were studied by numerical simulations and measurement at several actual dams. A Methods to evaluate the safety of dam considering deterioration or damages are also discussed. 3) Case studies to verify the applicability of proposed draft for selecting measurement points at long-used dams are carried out.

Key words :concrete dam, deterioration and damage, soundness evaluation, safety evaluation, safety management