

ダムの維持管理
— 堤体及び基礎地盤を中心として —

土木研究所 理事

山口 嘉一

国土交通省国土技術政策総合研究所
大規模河川構造物研究室長

金銅将史

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2017 年 8 月

ダムの維持管理—堤体及び基礎地盤を中心として—

Maintenance of Dams and Their Foundations

山 口 嘉 一 ・ 金 銅 将 史

Yoshikazu YAMAGUCHI ・ Masafumi KONDO

1. はじめに（概説）

ダムは河川流域の治水・利水を担う最も重要な社会資本の一つであるが、1960年代から1970年代にかけて多くの大規模ダムが建設されたわが国では、この時期に建設されたダムが一斉に完成後50年を迎えつつあり（図-1）、完成後50年以上経過したダムは2020年には59%と過半数を超える見込みである。このため、今後経年劣化等により設備の維持・修繕等が必要となるダムが増加するものと考えられるが、ダムはその規模や役割から機能停止を伴う全面更新が困難な構造物であるため、長期にわたって各々のダムが持つ洪水調節、流水の正常な機能の維持及び利水補給等の機能を確実に発揮していくことができるよう計画的に維持管理していくことの重要性がますます高まっている。

なお、ダムの維持管理にはダムの堤体や放流設備等の各種設備、貯水池なども含めた施設の機能維持のための維持管理（施設管理）と放流量の調節などダムの操作・運用を中心とする流水の管理が含まれる。本稿では、このうちダムの長期供用の観点から施設管理としての維持管理を取り上げ、点検・検査等の仕組みや実務におけるダム施設の維持管理の実際について紹介するとともに、長期供用に向けて求められる健全度診断、保全対策の技術のほか、供用中のダムの機能の向上や回復を図るダム再生の技術についても触れる。

なお、施設管理としてのダムの維持管理には、堤体などダム本体のほか機械設備や電気通信設備などの諸設備や貯水池及びその周辺斜面の管理なども含まれるが、本稿ではダム本体の維持管理を中心に著者らが土木学会刊行の『社会インフラメンテナンス学 III 部門別編（ダム編）』¹⁾に紹介した内容の要点を中心に述べる。ダム本体以外の諸設備や貯水池等も含めたダム施設全般の維持管理については同書をあわせてご参照いただきたい。

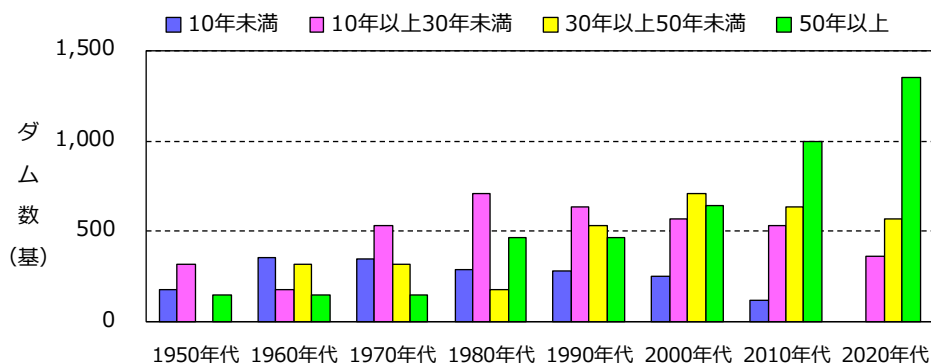


図-1 既設ダムの完成後経過年数区分の経年推移¹⁾

2. ダムの機能と維持管理の対象

2.1 ダムの機能・型式と維持管理

一般にダムの設置目的は大きく治水と利水に分けられ、それぞれの目的のために貯水容量を持っている。治水とは河川における洪水調節のことで、利水には、農業用水（灌漑）、水力発電、水道用水、工業用水などが含まれる。また、河川の良好な環境の維持を目的とした流水の正常な機能の維持のための容量も有している場合がある。ダムは1つの目的だけを有する場合と複数の目的を有する場合があり、治水を含めた複数の目的を有するダムを多目的ダムと呼ぶ。

また、ダムはその型式として、一般にコンクリートを主材料としたコンクリートダムと土石を主材料としたフィルダムに大別される。このうちコンクリートダムでは重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダムが主なものであり、その他少数ではあるが中空重力式コンクリートダム及びバットレスダムがある。また、フィルダムには土質材料を主として用いたアースダムとより大きな岩石材料を用いたロックフィルダムがある。アースダムは堤体材料がほぼ均一の均一型ダムとゾーンごとに異なる材料を用いるゾーン型アースダムがあり、ロックフィルダムには、堤体内部に土質材料等による遮水壁を有するゾーン型ロックフィルダムと堤体表面にアスファルトあるいはコンクリートによる遮水壁を有する表面遮水壁型ロックフィルダムがある。これらのうち代表的なダムの型式を図-2に示す。

このようにダムには種々の型式があるが、個々のダムの維持管理は、これらダムの型式によって異なる堤体材料や構造的特性の違いを十分に踏まえて行うことが重要である。また、ダム本体以外の各種設備や貯水池及びその周辺斜面など維持管理の対象は多岐にわたるため、土木、地質、機械、電気通信、環境など様々分野の知識と技術を総合的に活用して行っていく必要があることもダムの維持管理の大きな特徴である。



図-2 代表的なダムの型式²⁾

2.2 ダムの構成要素と維持管理の方針

ダムの維持管理の対象には、一般に堤体等のダム本体や洪水吐きのような土木構造物のほか、放流設備等の機械設備、電気通信設備、貯水池周辺斜面、流水管理や施設の安全管理のために設置される各種観測・計測設備などがある（図-3）。そして、これらはそれぞれその機能、構成材料、構造などが異なる要素から構成されている（図-4）。

ダムを適切かつ効率的に維持管理していくには、このような維持管理の対象を様々な構成要素に細分し、各々の重要度を適切に考慮し、重要度に応じた管理水準を設定することが合理的であると考えられる。このため、供用30年以上のダム等を対象として最近国土交通省のダムで制度化された「ダム総合点検」³⁾（3.2 参照）では、細分したダムの構成要素ごとに、求められる性能や劣化・損傷を受けた場合のダム自体の機能や安全性に及ぼす影響を考慮して必要な管理レベル（管理水準 H（高）、M（中）、L（低））を設定し、この管理レベルと健全度評価結果の両者を考慮して、構成要素ごとに予防保全、事後保全などの対処方針を作成する考え方が取り入れられている。

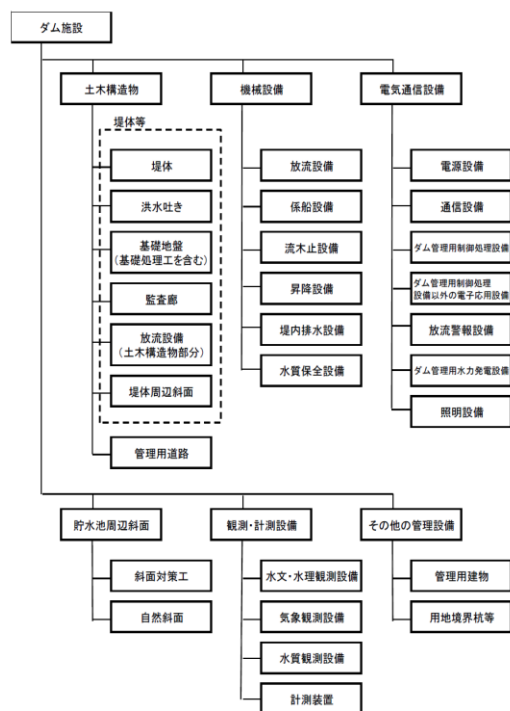


図-3 ダムの維持管理の対象 4)

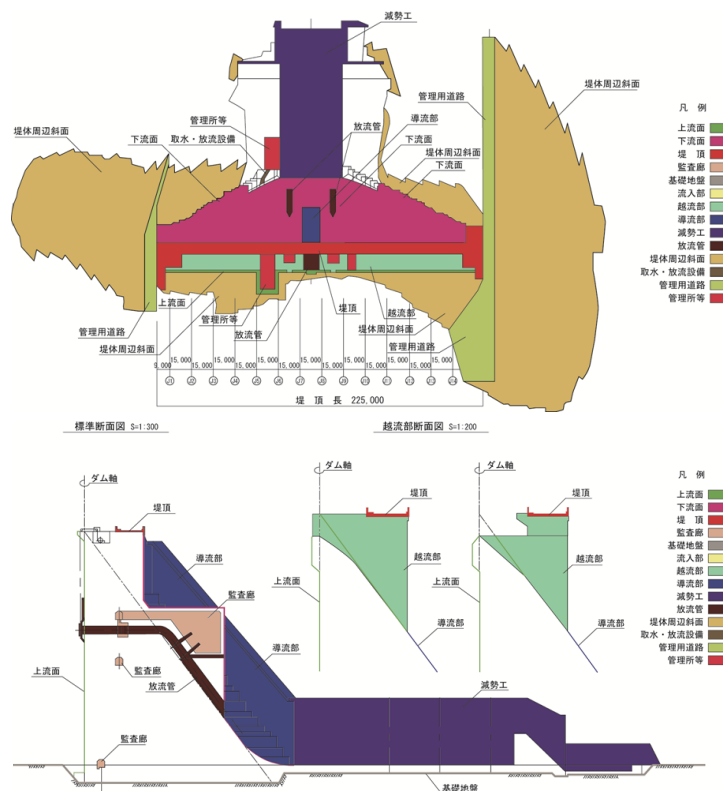


図-4 ダムの構成要素 3)

(重力式コンクリートダムの例、上：平面図、下：横断面図)

3. ダムの維持管理の制度

3.1 関係法令・技術基準

ダムでは従来から各種基準等に基づき維持管理が行われている。例えば河川法に規定される河川管理施設のダムでは、河川法施行令等の規定によりダムの操作規則等にダムの構造の特徴、環境条件、使用条件、試験湛水時の状況等を勘案して「ダム点検整備基準」を定め、これに基づき管理者による日常管理（巡視・点検、維持・修繕等）が行われている。また、河川法に基づく技術基準として、ダムの構造基準である河川管理施設等構造令（以下「構造令」）があり、ダムの完成後の管理に支障が生じないようにするため、新築または改築に際して、ダムの種類及びその規模に応じて漏水量、揚圧力、変形、浸潤線についての必要な計測装置を設置しなければならないことが定められている。

なお、ダムの維持管理に関係する法令改正の動きとして、2013年の河川法改正が挙げられる。同改正では、ダムを含む河川管理施設等の管理者が施設を良好な状態に保つように維持・修繕することで公共の安全が保持されるよう努めなければならないことが新たに法的に規定された。また、あわせて行われた河川法施行令の一部改正によって、ダムのほか堤防その他国土交通省令で定める河川管理施設等では、年1回以上の適切な頻度で適切な時期に目視その他適切な方法で点検し、異状を把握したときは必要な措置を講じる旨の規定も設けられた。

また、技術基準においても、ダムの維持管理に関する基本的な考え方や標準的な実施方法などを体系的に示した技術基準として、国土交通省による「河川砂防技術基準 維持管理編（ダム編）」⁴⁾ が定められた。同基準は上記の河川法改正を踏まえ、ダムの維持管理水準の維持・向上を図るため、従来から蓄積されてきたダムの維持管理に関する各種技術を体系化した基準として整備されたものである。同基準では、ダム施設の維持管理の計画や各種点検・検査の構成（図-5）やそれらによる状態把握の考え方や健全度診断、保全対策などダム施設のサイクル型維持管理の基本的な考え方（図-6）などが流水管理としてのダムの操作・運用や堆砂・水質管理など貯水池の維持管理の考え方とともに示されている。

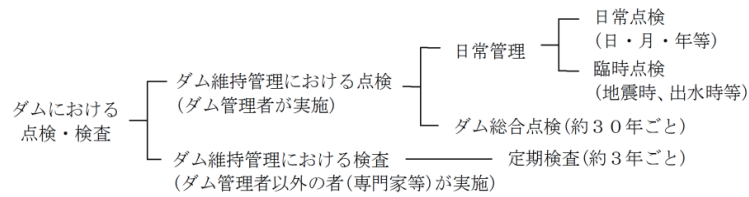


図-5 ダム施設の維持管理における点検・検査等の構成³⁾

3.2 ダム総合点検と関連指針等

ダム施設の長期供用を目指した維持管理に関する最近の取組みとして重要なものに国土交通省により制度化された「ダム総合点検」がある。

ダム総合点検は、供用開始から一定期間（30年程度）以上経過した同省管理のダムなどを対象としたもので、図-5や図-6に示すとおり、ダム施設の維持管理における各種点検・検査の1つに位置づけられており、その基本的な実施手順や考え方は「ダム総合点検実施要領」³⁾に示されている。ダム総合点検の目的は、「ダムの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、ダムの健全度について総合的に調査及び評価し、その結果得られる維持管理方針を日常点検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」（同要領）であり、供用開始以降の維持管理における各種記録・データの分析のほか、ダム施設の状態について通常の点検等では行わないような詳細な調査・試験・分析などによって行うダムの健全度診断と、その結果を踏まえて行う各種の保全対策などを含む今後の維持管理の方針の作成が大きな柱となっている。

実施要領によるダム総合点検の実施手順を図-7、健全度診断結果に応じた保全対策の考え方について表-1にそれぞれ示す。

なお、ダム施設の構成要素のうち、機械設備や電気通信設備の点検・診断などについては、それぞれの設備の特性を踏まえた専門的視点からの考え方が別途とりまとめられている^{5)、6)}。

ダム総合点検で作成されるダム施設全体についての維持管理の方針は、これら設備の点検・診断結果も反映して取り纏められることになる（図-8）。

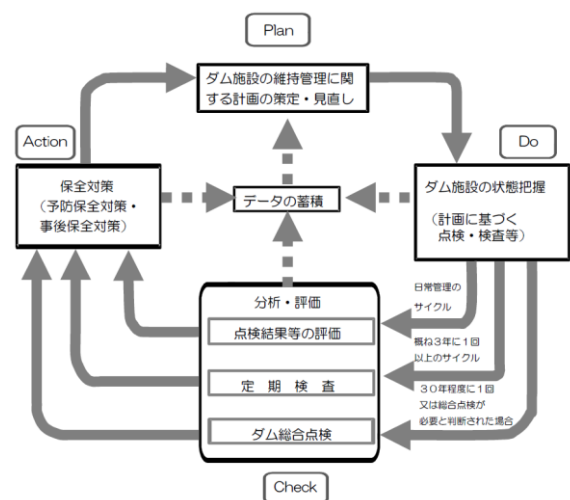


図-6 PDCAサイクルのイメージ(ダム施設の維持管理)⁴⁾

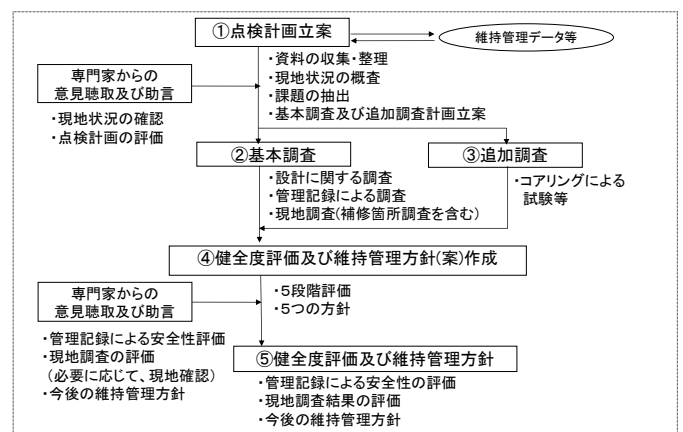


図-7 ダム総合点検の基本フロー³⁾

表一 ダムの構成要素の管理レベルと健全度区分の組合せに基づく保全対策の基本的考え方³⁾

施設の管理レベル及び健全度に対応する保全対策一覧表		構成要素（細別）の管理レベル		
		H	M	L
健全度の区分	a1	○機能低下により、緊急の措置が必要な状態 予防保全 (直ちに対策を実施)	予防保全 (直ちに対策を実施)	事後保全 (速やかに対策を実施)
	a2	○劣化・損傷により機能への影響が認められ、何らかの措置が必要な状態 予防保全 (直ちに対策を実施)	予防保全 (速やかに対策を実施)	事後保全 (重点状態監視) (必要に応じて対策を実施)
	b1	○現状では機能が維持されているが、劣化・損傷が認められ、近い将来、機能に影響を及ぼすと予見される状態 予防保全 (速やかに対策を実施)	予防保全 (重点状態監視) (必要に応じて対策を実施)	事後保全 (保全対象に至っていない)
	b2	○現状では機能が維持されているが、劣化・損傷が認められ、中長期的には機能に影響を及ぼす可能性がある状態 予防保全 (重点状態監視) (必要に応じて対策を実施)	予防保全 (状態監視)	事後保全 (保全対象に至っていない)
	c	○軽微な劣化・損傷が認められるが機能には支障がなく、将来的にも機能に影響を及ぼす恐れがない状態 ○劣化・損傷が認められない状態 予防保全 (状態監視)	予防保全 (状態監視)	事後保全 (保全対象に至っていない)

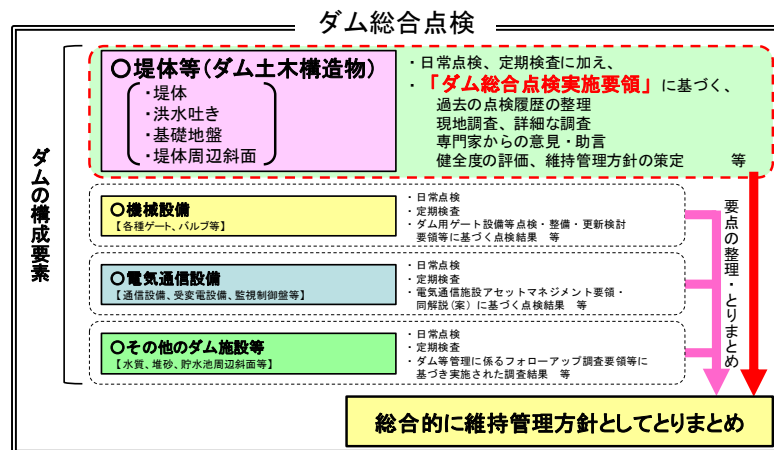


図-8 ダム総合点検の構成概念図³⁾

4. ダム本体（堤体等）の維持管理の実際

ダム本体（堤体及びその基礎地盤）を対象とした維持管理の実際として、維持管理の基本となる計測や巡視の要点、国内のダムで見られる代表的な劣化等の変状の形態、それらの変状に関わる健全度評価やその結果を踏まえた対策の考え方をコンクリートダムとフィルダムの場合について述べる。

4.1 コンクリートダムの維持管理

4.1.1 計測と巡視（コンクリートダム）

(a) 計測

コンクリートダムにおいては、構造令において、重力式コンクリートダムでは漏水量、変形（堤高50m以上の場合）及び揚圧力、アーチ式コンクリートダムでは漏水量、変形及び揚圧力（堤高30m以上の場合）の計測装置の設置が義務づけられている。ダム挙動の安定性はこれらの計測値の経時変化や貯水位と計測値の相関（図-9）などにより監視されている。

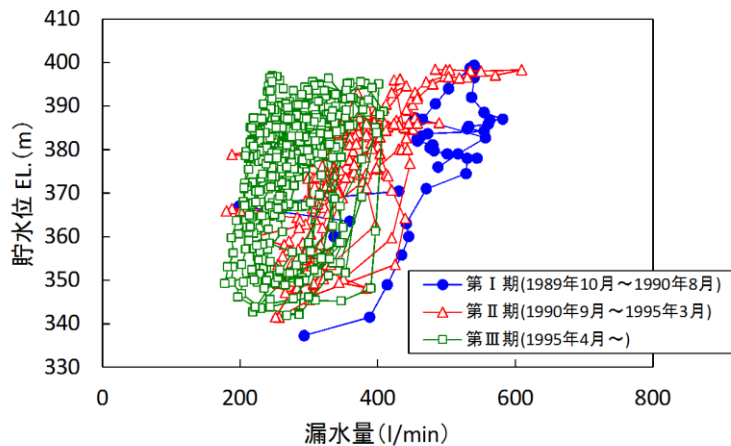


図-9 漏水量と貯水位の相関図の例³⁾



図-10 基礎排水孔と揚圧力計³⁾

このうち、コンクリートダムで漏水量として計測されるものには、基礎岩盤内の浸透流によって堤体に作用する揚圧力を軽減するために堤体内底部の監査廊内等にダム軸方向に設けられる基礎排水孔(図-10)からの排水と、マスコンクリートとしてのひび割れ防止のために設けられる堤体横継目(上下流方向に設けられる鉛直継目)を通じた浸透水を堤体内の監査廊内に導く継目排水孔(図-11)からの排水とがある。これらの漏水の量は、定期的に左・右岸ごとの合計や全体の合計を最下部に設けたピットの三角堰などで計測されるとともに、各基礎排水孔や相対的に漏水が多い継目排水孔で個別箇所毎の計測が行われていることも多い。

これらの漏水量は、貯水位と概ね一定の線形関係を保っていればダムの挙動は基本的に安定していると評価できる。ただし、継目排水管からの漏水はコンクリートが収縮する冬期に増加し、夏期に減少する季節変動が見られることが少なくないため、通常の季節変動で説明できない顕著な量の増加がないかにも注意して監視されている。

堤体に作用する揚圧力については、堤体内底部に設けられるダム軸方向の監査廊内に設置される基礎排水孔を用い、その口元に設けたバルブを閉めた状態で口元に作用する圧力を定期的に計測することでその監視が行われている。また、ダムによっては、上下流方向の揚圧力の分布を知るため、堤体内のクロスギャラリー(上下流方向の監査廊)でも揚圧力計測を行っている場合がある。

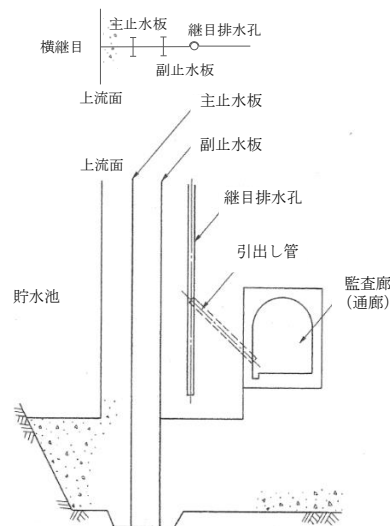


図-11 継目排水孔の構造(上: 平面、下: 断面)⁷⁾

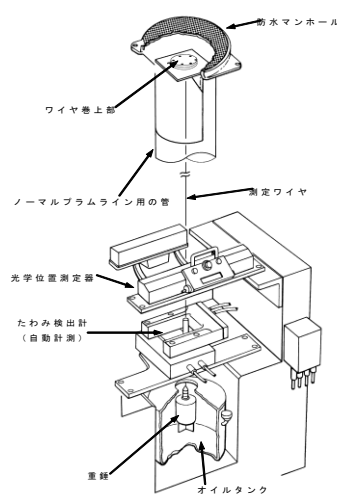


図-12 プラムライン(変位計測装置)⁷⁾

揚圧力の計測方法は、一孔おきに交互にバルブを閉めて一定時間経過後の圧力値を計測する隔孔閉塞法によることが多い。計測値の評価は漏水量の場合と概ね同様で、経時的な変化や貯水位との関係に着目して行われ、貯水位との関係が概ね同一の線形関係を保っていれば基本的にダムの挙動は安定していると評価される。なお、揚圧力の計測値は、上記の隔孔閉塞法によっても常時の状態（計測時以外の圧力開放状態）で堤体に作用している真の揚圧力より高い値が計測されることになるため、その絶対値を設計揚圧力と比較する際には留意が必要である。

変形については、コンクリートダムの場合、堤体内の豎孔に設置したプラムライン（図-12）により堤体変位（堤体上部と底部の相対変位）を定期的に計測することで監視するのが一般的である。なお、堤体変位を計測するためのプラムライン（ノーマルプラムライン）に加え、堤体と基礎地盤の相対変位を計測するためのプラムライン（リバーズプラムライン）が設置されているダムもある。これらのプラムラインにより計測される堤体変位は、試験湛水時にやや大きな値が計測されることがあるが、通常の場合、それ以降はほぼ貯水位の変動に対応した定常的な変動を示す。ただし、外気温などの温度条件によっても大きく影響を受けるため、計測値の評価は両者の影響を考慮して行う必要がある。そして、貯水位や温度条件の変動を考慮しても年間の変位の変動傾向が定常的なものであれば、ダムの挙動は基本的に安定していると評価できる。

(b) 巡視

コンクリートダムの挙動はこれらの各種計測により定量的に把握することができるが、ダムの維持管理では、各種計測装置自体の健全性の確認とともに、計測だけでは把握できないダムの状態変化を目視などにより直接把握するため、日常の巡視をあわせて行うことが基本となっている。日常の巡視により、例えば堤体内監査廊や堤体下流面、周辺地山などの予期しない場所からの漏水が発生していないか、また、監査廊内の巡視では、基礎排水孔からの漏水に基礎岩盤内からの土粒子の流出による水みちの拡大を示唆する濁りが生じていないかなども把握することができる。また、堤体のひび割れなどの変状を目視等で把握することも重要である。ひび割れの原因は次に述べるとおり種々考えられるが、対策の必要性を検討する上ではその進行性の有無を把握することが重要なため、継続的な観察の記録を残すことが肝要である。

4.1.2 主な変状の形態とその要因（コンクリートダム）

コンクリートダム本体の維持管理において把握される変状には様々なものがある。コンクリートダムの堤体表面で見られる変状のうち、下流面の横継目周辺での劣化状況の一例を図-13に示す。

コンクリートダム堤体等で見られる劣化等の変状の要因としては様々なものが考えられ、実際には単独の要因で生じるものだけでなく複数の要因によるものも多いと考えられる。なお、コンクリートダム堤体は基本的に無筋のマスコンクリートのため、一般のコンクリート構造物のような鉄筋腐食に伴うコンクリートの劣化が問題になることは少ないが、放流ゲートを支えるピア部や洪水吐きの導流壁などRC構造部分については鉄筋腐食による影響の観点からも状態把握が必要になる。

以下では、コンクリートダムの堤体や洪水吐きに見られることがある各種変状のうち代表的なものや重要なものを挙げ、その特徴やメカニズムについて述べる。

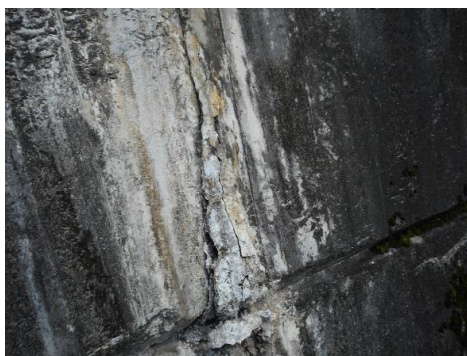


図-13 堤体横継目周辺での劣化事例 ¹⁾

(a) 温度ひび割れ

堤体コンクリートの打設後、温度変化によるコンクリートの体積変化が何らかの形で拘束されるとコンクリート内に温度応力が生じる。この温度変化による体積変化の拘束は、基礎地盤や既設コンクリートによって拘束される外部拘束と、コンクリートの内部と表面との温度降下の違いによって発生する内部拘束に分類される。このうち外部拘束による温度ひび割れは、コンクリートが冷却する過程で生じる拘束によるもので、基礎地盤上に打設したコンクリートや長期放置ブロック上に打設したコンクリートに発生する。また、内部拘束による温度ひび割れは、コンクリートの各部分が異なった温度変化を示す場合に生じるもので、1日の気温変化が大きくなる秋口や春先に越冬面での打設を再開したときなどに生じることがある。温度応力が原因となるひび割れは、ひび割れ幅が比較的大きく規則性がみられ、コンクリートを貫通する場合もある。

(b) 収縮によるひび割れ

コンクリート中の水分の蒸発に伴いセメントペースト部分が収縮することによって生じるひび割れ（乾燥収縮によるひび割れ）と、セメントの水和反応の進行によってコンクリート中のペーストの体積が減少することで生じるひび割れ（自己収縮によるひび割れ）があり、ダムの上流面などの表面ひび割れとして発生することがある。

(c) 凍結融解作用による劣化

寒冷地のダムでは、凍結融解作用による堤体コンクリートの劣化が見られることがある（図-14）。これは堤体表面付近のコンクリート中の水分が凍結した際の膨張作用によるもので、凍結と融解の繰返しによって変状が進行する。凍結融解作用による変状の形態としては、コンクリート表面が薄片状に剥げ落ちるスケーリング、微細なひび割れ、表層下の骨材の膨張による破壊でクレター状の凹みができるポップアウトなどがある。

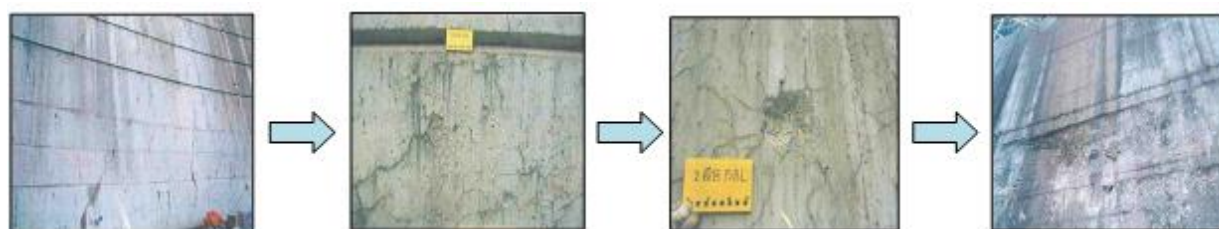


図-14 凍結融解によるコンクリートの劣化状況³⁾

(d) アルカリ骨材反応によるひび割れ

コンクリート用骨材にコンクリート中のアルカリ成分と反応する反応性骨材が含まれていると、生じたゲル状の物質が吸水膨張することでコンクリートにひび割れを発生することがある。国内のコンクリートダムでの報告例は少ないが、海外では比較的報告例が多い。

(e) 乾湿繰返しによる劣化

コンクリート用骨材に含有される粘土鉱物等の中には水と反応して異常な膨張を生じるものがある。例えば、ローモンタイトは、骨材中にある程度以上含有されていると、コンクリート表面が湿乾燥返しを受けることでポップアウトなどの劣化を生じることがある。

(f) 施工に起因する劣化

マスコンクリートとしての水和熱対策の一環として、コンクリートダムの堤体打設は幅15m程度のブロックに分割するための鉛直継目である横継目を設け、かつ数十cmの厚さごとに数日の打設間隔を開け、水平打継目を設けながら行われる。施工時に打継目処理が十分に行われなかった場合、その箇所が相対的な弱部となり、凍結融解作用等が加わって劣化が生じる可能性がある。また、型枠付近で適切な締固めが行われずに未充填箇所が生じたり、材料分離が生じたりすると、他の要因と相まって経年的に劣化が生じる可能性がある。

(g) 水流等による劣化・損傷

ダムに設置されるコンクリート構造の洪水吐では、水流の剥離に伴うキャビテーションが発生すると、大きな負圧

が作用して損傷が生じる場合がある。また、越流面等の流水に直接触れる部位での凍結融解作用などでコンクリート表面に不陸が生じると、キャビテーションによる損傷を助長する可能性がある。また、洪水吐きでは、水流だけでなく水に含まれる土砂分により摩耗が生じることもある。

4.1.3 対策（コンクリートダム）

各種点検・検査の結果、対策を講じる必要があると判断される変状については、変状の原因、程度、進行性の有無、環境条件などのほか、他ダムの事例も参考に必要に応じ試験的な施工を行ったうえで対策方法を選定し、補修などの対策を行うこととなる。コンクリートダム堤体表面のひび割れの補修は、注入工法などにより行われることが多い。注入材料にはエポキシ樹脂やセメントミルクなどが用いられる⁸⁻¹²⁾。なお、貯水池から堤体を通じた漏水への対策として堤体上流面で行われる浸入箇所への止水対策では、注入・充填工法が適用されることが多い⁸⁾。堤体表面の劣化に対しては、想定される原因に応じ、乾湿繰返しを防ぐための表面被覆工法や凍結融解で影響を受けた部分の打換え¹¹⁾などの例がある。また、近年では、乾湿繰返し・凍結融解作用を受ける箇所への高韌性セメント複合材料の吹付け工法もみられる¹²⁾。摩耗を受けた箇所へは、鋼板による保護工設置のほか、高強度コンクリート、繊維補強コンクリート⁹⁾の打設が代表的であるが、ポリマー系コンクリートによる断面修復、表面含浸剤による表面強化がなされる事例も見られる¹⁰⁾。

ダムは、非常に長い期間にわたって供用される構造物である。そのため、補修材料、工法の選定にあたっては、補修効果の長期安定性が重要視される。また、ダムの上下流面での劣化調査・劣化補修に際しては、特に放流の影響を受ける箇所の補修にあたっては、仮設足場・補修用機械等が放流の障害となることがあるので、ダムの貯水池運用を十分考慮のうえ、補修工法、補修時期、補修工程を検討する必要がある。

4.2 フィルダムの維持管理

4.2.1 計測と巡視（フィルダム）

(a) 計測

フィルダムの場合、構造令において計測装置の設置が義務づけられている計測項目は、堤体がおおむね均一な材料によるアースダムでは漏水量、変形及び浸潤線、ロックフィルダムなどそれ以外のフィルダムではこれらのうち漏水量と変形である。これらの計測値に基づくダムの挙動の安定性の監視が計測値の経時変化や貯水位との相関などに着目して行われる点はコンクリートダムの場合と同様である。ここでは、全てのフィルダムで必要となる漏水量と変形を取り上げる。

フィルダムにおける漏水量の計測は、堤体直下の監査廊に設置された浸透流観測孔及び堤体コア（比較的浅い基礎地盤を含む）を浸透してきた浸透水を漏水として監視することを目的としており、ダム下流に設けた観測室に集水し、三角堰などで計測する方法が一般的である。なお、近年建設された比較的大規模なロックフィルダムでは、堤体のどの部分からの浸透水かを把握できるようにするため、堤体の遮水ゾーン（コア）下流側のフィルタ敷にコンクリート製の堰を設け、堰により区分された各ブロックからの浸透水を分離して漏水として計測している例も多い。ただし、いずれの場合も堤体外の地山からの浸透水や遮水ゾーン（コア）より下流側の堤体表面から浸透した降雨も漏水の一部として計測されることになる。このため、フィルダムの漏水量の監視では、降雨に伴う影響（増分）を適切に分離し、堤体やその基礎を通じた浸透量の変化を適切に把握することが肝要である。降雨による影響を除いた浸透量（堤体やその基礎を通じた浸透量）が貯水位と直線関係にあれば、ダムの挙動は安定した状態にあると判断できる。

フィルダムにおける変形の計測は、堤体表面に設置された標的を用いた視準測量によることが一般的である。計測結果は水平変位や鉛直変位（沈下量）の経年変化を図化し、堤体の経年的なクリープ変形や圧密変形の傾向を把握することが重要である。なお、フィルダムにおける初期湛水後の堤体天端の沈下量が時間経過とともに収束傾向を示し、貯水位変動の影響を受ける水平変位も定常的な変動（弾性的挙動）を示すようになれば、ダムの挙動は安定化していると評価できる。ただし、大規模地震時には比較的大きな沈下量が計測されることがある。

(b) 巡視

フィルダムにおいても、計測装置自体の健全性の確認とともに、計測装置による計測では把握できないダムの状態

変化を把握するための巡視は重要である。例えば、コンクリートダムと同様、基礎地盤内の水みちの生成を示唆するような浸透水の濁りがないか、また監査廊が堤体直下に設置されているダムでは、基礎の不等沈下や局所的な過大な変形を示唆するような監査廊継目の開きやずれの有無、また次に述べるロックフィルダム堤体表面の保護を目的として設置されているリップラップ材の劣化（風化）の状況なども巡視により確認することができる。

4.2.2 主な変状とその要因（フィルダム）

フィルダムの堤体材料である土石は長い年月をかけて形成された天然材料であるため、人工材料であるコンクリートに比べると一般には安定しているものと考えられる。そのため、堤体材料の劣化がダム堤体自体の安定性を短期間で大きく低下させるような影響を生じる可能性は考えにくい。ただし、例えば、ロックフィルダムの表面保護工となるリップラップ材料に濁沸石など耐久性の低い材料が混在して用いられたような場合には、表層付近の凍結融解や乾湿繰返しによる細粒化など経年的な劣化（風化）を生じることがある（図-15）。このような変状が堤体内部に急速に進行することは考えにくい、長年放置した場合には表面保護層としての機能低下とともに、断面欠損や排水性の低下による堤体安定性への影響も可能性も考えられるため、継続的に状態の把握・監視を行っていく必要がある。このほか、フィルダムでも洪水吐きなどのコンクリート構造物については、コンクリート構造物としての維持管理が必要である。



図-15 粒化したリップラップ材料¹⁾



図-16 フィルダム上流面の補修工事状況¹⁾

4.2.3 対策（フィルダム）

各種点検・検査の結果、必要に応じ講じられる対策として、例えばロックフィルダムでは前述のリップラップ材料の劣化に対する補修の例がある（図-16）。この例では、水没や波浪の影響を受けない堤体下流面については劣化したリップラップ材料を残置した上で、堤体材料の雨水等による流出を防止する観点からリップラップ材料の上に岩砕材料を盛り立て、表層に客土と張り芝が施工されている。また、波浪による細粒分の流出が懸念された上流面は、リップラップ材料とその下のロック材料の表層を除去し、新たに耐久性に優れたロック材料とリップラップ材料が施工されている。

5 ダムの長寿命化技術

ダムがその機能を長期にわたって発揮していくためには、日常の維持管理や点検・検査の仕組みの整備だけでなく、新たな技術の開発・普及も重要である。以下では、特にダムの長寿命化を実現していくために求められる重要な技術として、ダムの状態把握のための健全度診断技術、経年に伴う変状等の進行を防止したり原状回復を図るための保全対策技術及び自然条件や社会経済条件の変化にあわせて既設ダムの機能を向上・回復するためのダム再生の技術について、それぞれ最近の動向を述べる。

5.1 健全度診断技術

日常の安全管理に加え、定期的または必要に応じてダムの状態を把握するために行われる健全度診断では、巡視記録やダムの状態監視に用いられる漏水量、揚圧力、変位などの計測データだけでなく、ダムの全体や各部の状態を把握するための様々な情報が必要となる。このような健全度診断のための各種技術を日常の安全管理に用いられるものとあわせて表-2に示す。なお、同表は、従来から安全管理での計測などに用いられている基本的な技術と、試験適用ないしは研究開発段階の新たな技術の両者を含め整理したもので、ダムの健全度診断に適用が考えられる技術の例をその特徴から以下の4つに分けて示している。

- ① ダムの表面状態を調べる技術（表面を診る技術）
- ② ダムの内部状態を調べる技術（内部を診る技術）
- ③ 変位や振動を捉えることでダムの状態変化を把握する技術（動きを診る技術）
- ④ 点検結果の記録や利用を効率的に賢く行うための技術（スマートに診る技術）

表-2 ダム本体（堤体等）を対象とした健全度診断の技術¹⁾

目的・対象		技術の例	
		従来技術	従来技術の改良・新たな技術
日常の安全管理	外観	・巡視 目視点検 ・写真撮影, CCTV	—
	漏水量 (浸透水)	・三角堰などによる計測 ・水質分析	・(漏水量や濁度の自動計測化) ・漏水探知センサー
	揚圧力	・ブルドン管式揚圧力計による計測	・(揚圧力計測の自動化)
	変形 (変位)	・プラムライン (コンクリートダム) ・視準測量 (主にフィルダム)	・光波測量 ・GPS ・衛星 SAR
健全度診断	表面(付近) の状態	・近接での目視, 写真撮影 ・コンクリートハンマーでの表面強度推定 ・コンクリート中性化深さの測定 ・暴露供試体等を用いた物性試験 (動弾性係数の測定等) ・フィルダム表面保護材の風化調査 (粒度, 密度, 吸水率等)	・デジタル光学機器等を用いたひび割れ調査 ・UAV を用いた高所等調査 ・赤外線サーモグラフィによるコンクリートの剥離・浮き調査
	内部の状態	・コア採取によるコンクリートの物性試験 (圧縮強度, 静弾性係数等) ・フィルダム堤体内埋設計器による間隙水圧, ひずみ等の計測 ※計器寿命有り	・衝撃弾性波を用いた内部欠陥 (ひび割れ, 打継面, 空洞等) の調査 ・各種トモグラフィ技術 (弾性波, 比抵抗等) による内部状態の面的・3次元の把握 ・サンプリングによる劣化要因・範囲等の分析 (EPMA など)
	ダムの挙動	・安全管理のための各種計測データ (漏水量, 揚圧力, 変位等) の変動傾向の分析	・GPS など新たな変位計測技術による計測データの分析 ・常時微動計測や地震動記録の解析等による堤体の振動特性とその変化の分析
維持管理業務の合理化		・点検様式への記入, 保管	・CIM の活用 ・維持管理データベースの整備

これらのうち、ダムの維持管理のための健全度診断やモニタリングに活用可能な新たな技術として筆者らが関わっているものを中心にいくつかの技術の概要を紹介する。

(a) 人工衛星を活用した新たなダムの変位計測技術

ダムの変形の計測は一般にコンクリートダムでは堤体内に設置されるプラムライン、フィルダムでは視準測量による例が多いが、特に視準測量の場合、設備が簡便な利点がある反面、連続的なデータ取得が難しく、大規模地震時の変状有無の把握など迅速な状態把握に制約がある。

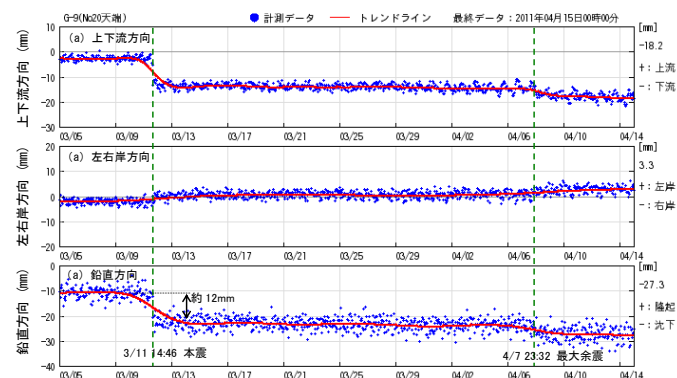
GPS (全地球測位システム) 衛星からの電波を利用する手法¹³⁾はこの点を補う新技術の1つとして期待され、ダムの変位モニタリングへの導入例も増えつつある。GPSを用いた変位計測によりダム近傍で発生した地震の際の変位を計測した例^{14), 15)}を図-17に示す。

また、衛星データの利用に関しては、地殻変動の監視や地盤災害の調査で活躍するSAR (合成開口レーダー) セン

サー搭載衛星を利用する技術（衛星SAR）もある。この方法で得られる変位データは、反射波の位相差の検出によるため視線方向に限られるが、地上受信設備が不要ことや広域での同時監視が可能な利点があり、ダムの変位監視への活用についての研究¹⁶⁾も行われている（図-18）。衛星SARでは面的な変位計測が可能なことからダムの安全管理の効率化だけでなく、複数の施設の同時観測など広域的な災害での迅速な被害把握など様々な場面でインフラモニタリングへの活用が期待される。

(b) 振動モニタリングによるダムの健全度診断技術

ダム堤体の固有振動数など構造物としての振動特性を常時微動計測や地震動観測により把握することで、その変化から健全度をモニタリングしようとする技術であり、建築など他分野では地震被災度の判定などに活用されている。重力式コンクリートダムでの固有振動数の測定例¹⁷⁾を図-19に示すが、ダム堤体の固有振動数は貯水位や温度とともに変化することがわかる。このような影響を適切に分離すればダムの健全度診断指標の1つとして活用できる可能性があり、詳細調査の必要性の判定など健全度診断でのスクリーニング手法の1つとして期待される。



* 変位は、2008年に発生した岩手・宮城内陸地震直後にGPSを設置した時点 zeroes としている。

図-17 GPSによる東北地方太平洋沖地震前後のロックフィルダムの堤体変位^{14), 15)}

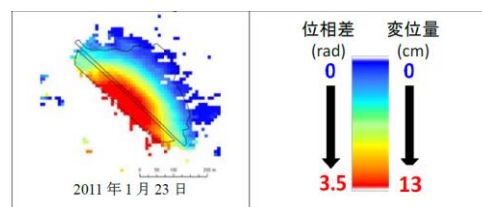


図-18 衛星SARによるフィルダムの変位量計測例（新設ダムでの竣工時からの沈下量）¹⁶⁾

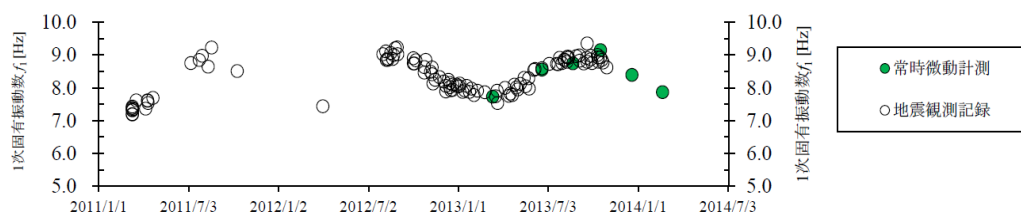


図-19 常時微動計測と地震観測記録の解析による重力式コンクリートダムの固有振動数変化¹⁷⁾

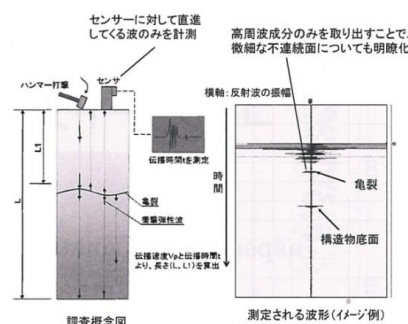


図-20 漏水が認められたダム（写真）での衝撃弾性波を用いた堤体内部（打継面）の調査¹⁸⁾

(c) 非破壊試験によるダム堤体内部の調査技術

多くのダムでは堤体の内部に通路（監査廊）が設置され、目視点検や各種計測装置の設置空間として利用されているが、監査廊内でも直接目視で確認可能なのはその壁面に限られる。堤体そのものの内部状態を把握するにはたとえばコア採取による方法があり、コンクリートダムでのひび割れ深さの調査や打継面の状態を確認する目的で従来から実施されている。しかし、このような調査で得られる情報は基本的に当該箇所での情報に限られる。このように堤体内部の状態を把握するための非破壊調査の1つとして、コンクリートダムでの衝撃弾性波を用いた内部状態の調査が試みられている。水平打継面からの漏水が課題となっているコンクリートダムにおいて同技術により水平打継面の状態を面的に調査した例¹⁸⁾（図－20）がある。

(e) CIMの活用

ダムは構造物としての規模が大きく点検対象も多岐にわたる。このため、ダム各部の構造や設備の配置に関する情報に加え、それらの施工時の記録や既往点検記録、過去の計測データなど、必要な情報を容易に参照できる環境を整備することは、日常点検の質を高めると同時に効率化・省力化の面でも大きな可能性を秘めている。産学官で構築が進むCIMは、3次元位置情報と属性情報を組み合わせることで維持管理業務での活用が期待され、ダムでも導入が始まっており^{19), 20)}、今後の普及が期待される。

なお、これら以外の各種診断・調査技術については『社会インフラメンテナンス学（Ⅲ 部門別編）』¹⁾を参照いただきたい。

5.2 保全対策技術

健全度診断の結果、ダムに何らかの変状が認められた場合には、当該変状がダムの安全性や機能に及ぼす影響の程度などを勘案し、保全対策の要否や実施内容が検討されることになる。その結果、大規模な対策が必要となる例は多くないが、必要と判断される場合には変状の進行抑制や健全性の回復を目的とした補修などの対策が実施されることになる。ダム本体を対象とした保全対策として国内での例を表－3に示す。

なお、このほかにも、海外においては、コンクリートダムの漏水対策としての堤体上流面全面への遮水幕（ジオメンブレン）の施工、アルカリ骨材反応（ASR）によるコンクリート膨張対策としての堤体の溝状切削、堤体安定性向上のためのグラウンドアンカーによる補強などの例がある¹⁾。

表－3 既設ダムの主な保全対策技術

対象施設 (ダム型式)	課題事象	保全対策の概要
重力式 コンクリートダム	堤体下流面からの漏水	堤体上からの止水グラウチングなど ²¹⁾
	堤体横継目からの漏水増加	堤体上流面からシリコン系コーキング材などを用いた止水対策 ²²⁾
	凍結融解による堤体劣化（既往補修で施工した被覆工の再劣化）	背面の既設堤体コンクリートを含む表層部をはつり取り、新コンクリートに打替え ^{11), 23)}
	乾湿繰返しに伴う堤体表面部の劣化	堤体下流面表層の打替え ²⁴⁾
アーチ式 コンクリートダム	堤体下流面からの漏水、凍結融解に伴う打継面の劣化	打継面の劣化進行抑制のため堤体上流面の打継面部にウレタン系シーリング材を充填 ²⁵⁾
	堤体下流面の微細ひび割れ	水の浸入を防ぐため表面含浸材を塗布 ²⁴⁾
フィルダム	堤体からの漏水	上流面側表層部を掘削除去して傾斜した遮水ゾーンを設置、下流側法先にはドレーンを設置 ²⁶⁾
	地震による被災（沈下等の変形）	被災部位を掘削・除去して再盛立により復旧 ^{27), 28)}

5.3 ダム再生技術

5.3.1 既設ダム有効利用

既に述べたとおり、ダムは極めて長期にわたりその役割を果たし続けることが期待される一方、その規模や役割から全面更新が難しい。このため、長期的に機能を発揮し続けられるよう適切な維持管理を行い、必要に応じ保全対策などを適切に行っていく必要がある。しかし、長期にわたる供用の中では、降雨・流出特性の変

化や水需要の変化などダム流域の自然条件や社会条件の変化などに対応していくことも求められる。このような中、既設ダムの改造や運用改善などを行うことで既存ストックの有効活用を図りながら流域の需要に応じていくことも重要である。このような取り組みには、新たにダム建設を行う場合に比べて短期間で効果が発現できることや自然環境に及ぼす影響の小ささ、経済性の面での利点などがあり、近年注目を集めるようになってきている。

5.3.2 ダム再生ビジョン

既設ダムを有効活用する各種取り組みの方向性は、「ダム再生ビジョン」として国土交通省によってその案²⁹⁾が示されている。同案では、「近年における厳しい財政状況等の社会情勢、洪水・渇水被害の頻発や気候変動の影響の懸念、ダムの有効活用の様々な特長やこれまでの事例の積み重ねによる知見の蓄積、これを支える各種技術の進展等を踏まえれば、ソフト・ハード対策の両面から既設ダムを有効活用することの重要性はますます高まっている」として、「流域の特性や課題に応じ、ソフト・ハード対策の両面から、既設ダムの長寿命化、効率的かつ高度なダム、機能の維持、治水・利水・環境機能の回復・向上、地域振興への寄与など、既設ダムを有効活用するダム再生を推進する」ことを打ち出している。また、同ビジョンには、ダム再生の基本的考え方として、「ダムを「永く使う」、「賢く使う」、「増やして使う」、「ネットワークで使う」³⁰⁾とともに、河川環境の改善や水源地域の活性化等もあわせて推進する」ことや、「ダム再生の推進により、顕在化する気候変動や再生可能エネルギーの積極的導入等の課題に対して、柔軟かつ迅速に対応する」ことも掲げられている。

5.3.3 ダム再生技術の例

ダム再生の具体的な手法（技術）には、その目的やサイトの条件等に応じて様々なものが考えられるが、現在までに国内で実施されている主なものとしては、①ダムの持つ治水・利水機能を強化するためのダムの嵩上げや放流設備の増設、②既設ダムの機能を保持し長寿命化させるための堆砂の排除や耐震補強、③複数のダム（ダム群）としての潜在的な機能を活用するためのダム群の再編成や連携運用などがある。このようなダム再生のための技術の概要と主な事例の一覧を表－4～表－6に示す。

表－4 ダム再生事業の例（貯水池容量の増加、放流能力の増強など）

目 的	手 法		主な事例
貯水容量の増加	堤体嵩上げ	洪水調節や利水補給に必要な貯水容量を増加させるため、既設ダム堤体の嵩上げを行う。嵩上げ方式としては、新旧堤体のダム軸を共通として既設ダム直上に嵩上げするケース（同軸嵩上げ）や、既設堤体上を取り込むようにその下流面側に新堤体の一部を乗座させる場合などがある。	【コンクリートダム】 萱瀬ダム、新中野ダム、新桂沢ダムなど 【フィルダム】 山王海ダム、狭山池ダムなど
	下流側に新堤体建設	既設ダムの下流側により堤高の高いダム（新堤体）を建設することで、貯水容量を増加させる。	夕張シューパロダム、津軽ダム、胆沢ダムなど
放流能力の増強	既設堤体の削孔	構造上、堤体内に放流設備の設置が可能なコンクリートダムにおいて、洪水調節時の放流量を増加させたり、より低い水位からの放流を可能としたりすることで洪水の貯留節能力を高めるため、既設堤体への削孔による放流管の増設や新設を行う。	鎧畑ダム、田瀬ダム、五十里ダム、鶴田ダムなど
	既設堤体の切り欠き	堤体削孔と同様、より低い水位からの放流を可能とすることで洪水の貯留能力を高めるため、既設堤体の一部を切削する。	長安口ダムなど
	トンネル洪水吐き新設	既設堤体の構造上、堤体の切削や切り欠きが難しい場合、堤体周辺の地山にトンネル型式の洪水吐きを新たに設ける。	天ヶ瀬ダム、鹿野川ダムなど
洪水調節操作の確実化・省力化	ゲートレス化	洪水吐きゲートが設置されているものの貯水容量の割に流域面積が小さく、降雨から洪水流入までの時間的余裕が少ないダムにおいて、洪水調節操作の確実化・省力化のためゲート設備を撤去する。また、必要に応じ所要の放流能力を確保するため堤体頂部の一部切削などの改造を行う。	美唄ダム、遠部ダムなど

表－5 ダム再生事業の例（既設ダム機能保持のための堆砂排除、耐震補強など）

目 的	手 法		主な事例
貯水池内堆砂の抑制	排砂バイパス	貯水池内に堆積する流入土砂を減らすため、洪水時の流入水を利用してダム下流に土砂を流下させるための水路（バイパストンネル等）を建設する。	旭ダム、美和ダム、小渋ダムなど
	土砂運搬	貯水池上流で流入土砂を掘削し、ベルトコンベア、ダンプトラック等によりダム下流まで運搬する。	長安口ダム（計画中）、高瀬ダム・大町ダム（同）など
耐震性の向上	堤体増厚	既設堤体の増厚による安定性の向上により、耐震性の向上を図る。	布引ダム、山口貯水池など

表－6 ダム再生事業の例（ダム群再編、連携運用）

目 的	手 法		主な事例
無効放流の解消、下流河道の流況改善	隣接流域のダムを結ぶ導水管路新設	貯水容量が少なく無効放流が生じやすかったダムと、近接する貯水容量が大きく短期間で水位回復が難しいダムを導水路で結び、効率的な水運用とともに下流河道の流況改善を図る。	鬼怒川上流ダム群連携事業（五十里ダム、川治ダム）
洪水調節機能の強化、堆砂対策	同流域の複数ダムの容量再編、堆砂対策	上流の発電用ダムや下流の多目的ダムの水道の利水容量を洪水調節容量に転換することで、流域における洪水調節機能を強化する。また、安定的にその効果が維持されるよう、上流ダムへの流入土砂対策をあわせて実施する。	大町ダム再編事業（高瀬ダム、七倉ダム、大町ダム）

図－22 堤体嵩上げの例¹⁾
(萱瀬ダム)図－23 既設堤体削孔による放流管増設例¹⁾
(鶴田ダム)

なお、これら各種ダム再生事業のうち国内で比較的大規模な施工例が多いのは、既設ダム堤体の嵩上げ（図－22）と放流機能を強化するための放流設備の増設（図－23）である。これらについて、以下にその技術的特徴を述べる。

(a) 貯水容量増加のための堤体嵩上げ

貯水容量を増加させるための代表的な手法でありコンクリートダムの場合、主に既設ダムと同じダム軸として下流側に堤体を嵩上げ・増厚する方法（同軸嵩上げ）と既設ダムの下流側に新堤体の一部を乗座させる方法（下流嵩上げ）がある。なお、堤体の上流側にも腹付けを行う事例もあるが、工事期間中に貯水池を空虚にできる特別なケースに限られる。一方、フィルダムの場合、既設堤体上への嵩上げは小規模なアースフィルダムの嵩上げ事例に限られ、大規模なロックフィルダムの嵩上げ事例はほとんどない。これは、既設ダムの洪水放流能力を維持しながら堤体の嵩上げや洪水吐きの改造を行うことが難しいことが一因である。なお、既設ダムとは独立して下流側に既設堤体より高い新堤体を建設することで貯水容量を増加させる方法もある。このような方法も広義では既設ダムの嵩上げに含まれる。

(b) 放流能力増強のための放流設備の増設

既設ダムに放流設備を増設する場合、主な手法としては堤体を削孔する方法、堤頂部を切り欠く方法、トンネル式洪水吐きを新設する手法などがある。このうち、堤体を削孔する方法を検討する場合、既設ダムの放流

設備配置や周辺地形との取り扱いによって、堤体に放流設備を増設できる場所は限られるため、ダム構造への影響を考慮の上、越流式洪水吐きの増設や堤体の削孔による放流管増設の可否を検討することとなる。なお、アーチ式コンクリートダムでは削孔に伴う堤体の応力状態への影響予測が難しいこともあり、国内での実績は基本的に重力式コンクリートダムに限られている。また、堤体削孔が可能な場合も構造上可能な削孔径に限界があり、かつ水理面では管内流速に限界があることから、放流管1条あたりの放流量は制約される。必要放流量を満たせない場合は条数を増やす必要があるが、配置できる放流管条数は削孔できる堤体ブロックが幾つあるかで決まる。なお、堤体における放流設備の増設が困難な場合は、トンネル式洪水吐きの新設を検討することとなる。トンネル式洪水吐きは、地形や地質条件によってトンネル線形やトンネル径等が制約を受ける。これらの各型式の制約条件を考慮しつつ、当該ダムに適した放流設備形式を選定することとなる。

5.3.4 ダム再生事業の技術的特徴

このような手法でのダム再生は、先に述べたような利点がある反面、調査・設計や施工における数々の制約条件など新規のダム建設にはない難しさもある。例えば、日夜流域の治水や利水を担っているダムの運用を一時的に休止するのは難しいことから、設計に必要な地質調査や既設堤体の状態把握のための調査ボーリングは、既設ダムを運用しながらの状態で行わなければならない。そのため、調査可能箇所や数量が限定され、既設ダム建設時の調査記録や施工記録も最大限活用したり、必要に応じ当時の関係者からのヒアリングを行ったりするなど、設計に必要な情報を収集するための工夫が必要となる。また、施工面においても、施工中の既設ダムの運用を考慮して施工計画を立案しなければならない難しさがある。例えば、既設堤体の嵩上げや放流設備増設のための削孔・切欠きなどの工事は貯水位が低いほど施工しやすいが、実際には既設ダムが持つ利水機能を維持するため、施工中の貯水位を大幅に低下させるのは困難な場合が多い。このような場合、貯水池内に設置する仮締切の構造が大規模になることがある。また、出水期においては既設ダムの機能として求められる洪水調節機能の発揮が優先されるため、堤体工事の施工は非出水期に限定されることが多く、施工時期の面でも制約がある。さらに、工事中の洪水処理のため必要となる転流規模も新設ダムの場合に比べ大きく、出水期は既設ダムの洪水吐きの放流能力、非出水期は非出水期における計画洪水規模相当の洪水が流下可能な規模が必要となる。既設ダムの改造を伴うダム再生事業では、その目的を達成するための設計を実現するために、これら諸条件を考慮していかに効率的な施工計画が立案できるか鍵となる。

ダム再生にはこのような難しさもあるが、前述のように既設ダムを有効活用できることの利点は大きく、国内のみならず海外においても、ダム再生技術へのニーズは今後ますます高まっていくものと考えられる。

6. おわりに

本稿では、ダムの維持管理に関わる制度や点検・検査等に関する基準など維持管理の仕組みとともに、それらに基づきダム管理の現場における維持管理の実際について紹介した。また、ダムの長寿命化に向けて近年ますます重要性が高まっている健全度診断や保全対策の技術とともに、既設ダムを有効利用して機能向上を図るダム再生の動向についても述べた。

予防保全を基調とした計画的な対応が特に求められるダム施設の維持管理では、長期供用等に伴う変状を早期に捉え、適切な対策（維持管理投資）を計画的に講じることで、はじめて技術的にも経済的にもその長寿命化を実現することが可能になる。多数のダムの健全性をより効率的に把握し、効果的な対策の実施につながる一層の技術開発が強く期待される場所である。

また、既設ダムが運用を続ける中でその大規模な改造等を伴うダム再生事業は、気候変動などの自然条件の変化や流域の社会・経済環境の変化に対応していくための抜本的な適応策の1つとして、今後更にニーズが高まっていくものと考えられる。

このように的確な維持管理と最大限の有効活用によってダムがその貴重な社会資産としての役割を永く発揮

し続けることができるよう、農業から水道、発電、治水を含む多目的へと拡大してきたわが国のダム建設の歴史を継承する全ての管理者・技術者が知恵を出し合うことが求められている。

参考文献

- 1) 土木学会：社会インフラメンテナンス学 III 部門別編（ダム編），2016
- 2) 土木学会：社会インフラメンテナンス学 II 工学編，pp. 362-365，2015
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説，2013
- 4) 国土交通省 河川砂防技術基準 維持管理編（ダム編），2014
- 5) 国土交通省総合政策局建設施工企画課・河川局河川環境課流水管理室：ダム用ゲート設備等点検・整備・更新検討要領（2011.4）3）国土交通省総合政策局建設施工企画課・河川局河川環境課流水管理室：ダム用ゲート設備等点検・整備・更新検討要領，2011
- 6) 国土交通省大臣官房電気通信室：電気通信施設アセットマネジメント要領・同解説（案），2012
- 7) 財団法人ダム技術センター：改訂3版コンクリートダムの細部技術，2010
- 8) 安田成夫，服部 敦，佐藤耕治，三沢輝芳：ダム補修事例に関する調査，国土技術政策総合研究所資料，第262号，2005
- 9) コンクリート工学文献調査委員会：ダムコンクリートの劣化と補修技術，コンクリート工学，Vol. 35，No. 4，pp. 31-34，1997
- 10) 舟川勲・牛島栄：表面保護工法の施工事例集，セメント・コンクリート，No. 713，pp. 75-87，2006
- 11) 小田島公一，及川 薫，伊藤 博，竹内幸紘：遠野ダムの老朽化対策について，大ダム，No. 191，pp. 27-35，2005
- 12) 児島茂春，坂田 昇，閑田徹志，平石剛紀：高靱性セメント複合材料を用いた吹付け補修工法の適用—三高ダム上流面への適用，コンクリート工学，Vol. 42，No. 5，pp. 135-139，2004
- 13) 山口嘉一，小堀俊秀，池澤市郎：フィルダムの安全管理におけるGPSの全面導入に関する研究，土木技術資料，Vol. 49，No. 7，pp. 11-12，2007
- 14) 一般社団法人ダム工学会：フィルダムの変位計測に関するGPS利用マニュアル，2014
- 15) 小堀俊秀，山口嘉一，中島伸一郎，清水則一：GPSを用いたロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測，ダム工学，25(1)，pp. 6-15，2015
- 16) 佐藤弘行，小堀俊秀，佐藤 渉，虫明成生，本田謙一，山口嘉一，清水則一：衛星SARによる斜面・のり面を含むインフラのモニタリング手法の提案 ～ロックフィルダム堤体表面の変位計測事例～，斜面・のり面の劣化モデルとLCC評価による斜面防災対策に関するシンポジウム，2014
- 17) 金銅将史，小堀俊秀，加嶋武志，佐々木 隆：重力式コンクリートダムの固有振動数変化とその重回帰分析，ダム工学，25(1)，pp. 16-28，2015
- 18) 市川滋己，新屋敷 隆，鎌田敏郎：衝撃弾性波法を用いたコンクリートダム堤体の水平打継面調査，平成26年度ダム工学研究発表会・講習会講演集，pp. 9-12，2014
- 19) CIM技術検討会：CIM 技術検討会平成26 年度報告，2015
- 20) 横山喜代太：胆沢ダム管理移行へのCIM の取組み，JACIC情報110号，pp. 40-45，2014
- 21) 佐渡谷伸夫，湊 隆，徳山 武，山本久五，甲斐正司：布引ダムの震災調査と災害復旧工事，水道協会雑誌，67(11)，pp. 22-28，1998
- 22) 槇 良和：神室(かむろ)ダム・高坂(たかさか)ダムにおける漏水調査と対策，ダム技術，No. 323，pp. 63-67，2013
- 23) 川崎秀明，伊藤 博，八重樫弘明：遠野ダム全面補修 10 年後における経年劣化に対する要因および対策のレビュー，大ダム，No. 230，pp. 83-92，2015

- 24) ダム工学会コンクリートダム研究部会：コンクリートダムの補修・補強(その2) ダムの補修事例, ダム工学, 21(4), pp. 278-296, 2011
- 25) 喜澤一史：アーチダム堤体の止水対策―豊平峡ダムの長寿命化対策―, 土木施工, 50(5), pp. 51-56, 2009
- 26) 谷 茂, 福島伸二：老朽化フィルダムの堤体改修(補強・漏水防止・嵩上げ)の事例調査, ダム工学, 17(1), pp. 5-26, 2007
- 27) 池田邦彦, 黒木 博, 太田宏通, 佐藤裕三：2004年新潟県中越地震によるフィルダム被害とその復旧工事, ダム日本, No. 758, pp. 9-28, 2007
- 28) 土木学会エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会：東日本大震災におけるエネルギー施設(火力・水力・送変配電・ガス)の被害状況と今後の展開について 報告書(最終報告), 2014
- 29) 国土交通省ホームページ(ダム再生ビジョン検討会), 第3回検討会資料, 2017
http://www.mlit.go.jp/river/sdahinnigikai_blog/dam_saisei_vision/index.html
- 30) ダム工学会：これからの成熟社会を支えるダム貯水池の課題検討委員会報告書, 2016