

戦-28 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 24

担当チーム: 水工研究グループ (水工構造物)

研究担当者: 山口嘉一、岩下友也、佐藤弘行、
小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹

【要旨】

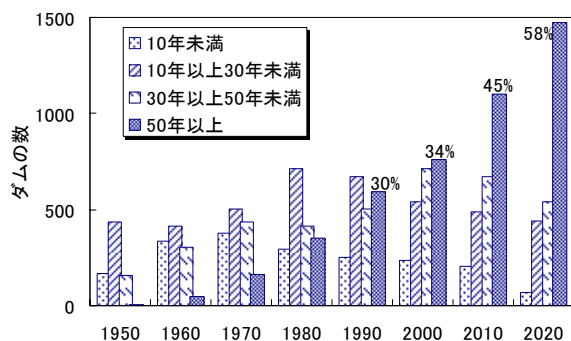
わが国のダムの総数は 2010 年までにおよそ 2700 に及ぶ。ダムの建設は、1960 年代から 1970 年代にピークを迎えており、これらのダムが今後一斉に完成後 50 年を迎え、老朽化に伴う機能低下等の問題の発生が予想される。現在、ダムは、日常点検や 3～5 年毎に行う定期検査によりダム機能の維持・確認を行っている。また、国土交通省では新規施策「ダムドック制度」を検討しており、完成後 30～50 年経過したダムの「総合点検」の実施と必要に応じた「リフレッシュ計画 (仮称)」を策定し、ダム機能にかかわる根本的改修等を計画的かつ効率的に行い、ダムの長寿命化による長期的な効用の発揮を目指している。

しかし、ダム本体における各種劣化・損傷のパターン、その将来的な劣化・損傷進行度、さらには劣化・損傷進展が安全性能低下に与える影響度合い等を踏まえた、実務的な維持管理技術がないのが現状である。そのため、本研究においては、実際のダムにおける劣化・損傷機構についての調査、類型化、発生原因とその後の進行についてのメカニズムの分析、ダム本体の安全性に与える影響度分析解析を行い、ダム長寿命化のための維持管理技術の提案を行う。

キーワード: ダム、長寿命化、維持管理、安全管理、点検、補修

1. はじめに

わが国のダム建設は、戦後の 1960 年代から 1970 年代にかけてピークを迎え、これらのダムが今後一斉に完成後 50 年を迎える。今、1900 年以降に建設された既設ダム (完成予定を含む) の完成後の経過年数区分の経年推移を図-1.1 に示す。この図より、完成後 50 年以上経過したダムは、2010 年には全完成ダムの 45% に達し、2020 年には 58% と過半数を超えることが分かる。



※本図は、1900 年以降の日本のダム数 (2007 年 12 月 ICOLD (International Commission on Large Dams、国際大ダム会議) ダム台帳・文書委員会提出) ①に 2008 年以降のデータとして、ダム便覧 2009 ダム集計表 (竣工年別型式別ダム数) のダム数 (予定も含む) ②を加えて作成したものである。

図-1.1 既設ダムの完成後経過年数区分の経年推移

今後は、完成後 50 年を超えるダムが急増するため、劣化・損傷の状態、分布、ダム機能や安全性への影響度合い等を総合的に調査・点検し、適切な段階で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計画的かつ最適化された維持管理が必要となってきた。現時点においても、ダム本体や基礎地盤に関して、経年的な劣化や損傷により直ちに安全性をおびやかすものではないが、予防保全の観点から、堤体表面の劣化や下流面からの漏水を補修する等の事例が見受けられようになってきている。今後、このようなダム数が増加し、安全性にも大きな影響を与える事例が発生する可能性が高まってくることは容易に推察できる。

しかし、ダム本体における各種劣化・損傷のパターン、その将来的な劣化・損傷進行度、さらには劣化・損傷進展が安全性低下に与える影響度合い等を踏まえた、実務的な維持管理技術がないのが現状である。そのため、実際のダムにおける劣化・損傷機構についての調査、類型化、発生原因とその後の進行についてのメカニズムの分析、ダム本体の安全性に与える影響度分析解析等による、ダム長寿命化のための維持管理技術に関する研究を実施する必要がある。この研究の成果をダムの点検方法に組み込むことにより維持管理の

体系化に貢献し、ダムの長寿命化を図ることができる
と考える。

本研究では、国内外のダムの劣化・損傷事例やこれまでの国内ダムの点検結果等を調査分析し、ダムの健全性に及ぼす各種劣化・損傷の抽出、発生機構及び劣化進行度の評価・類型化を実施する。次に、類型化した劣化・損傷機構が、ダムの安全性に及ぼす影響を、劣化・損傷を有するダムの実測挙動解析や数値解析により分析し、定量的に評価する。この結果に基づき、補修等の対策の優先度、定期点検、地震後臨時点検等における点検優先箇所を明確にし、各種劣化・損傷機構の類型化の提案、ダムの安全性に及ぼす影響度を踏まえた劣化・損傷評価基準の提案を行う。

平成 22 年度は、前年度に実施した総合点検資料による劣化・損傷事例の調査分析に、新たに 25 ダム（2 回目の点検を実施したダムを含む）のデータを加えて再整理・分析を行い、併せて、海外ダムの劣化・損傷事例も整理分析し、国内ダムの劣化事象との比較を行った。これらの分析結果に基づき、注目すべき劣化事象を抽出し、その劣化を考慮した解析モデルによる数値解析を実施し、ダムの安全性への影響を評価した。さらに、堤体の安全性に影響を及ぼす可能性の高い劣化事象を対象として、劣化進行予測に関する一手法の検討を実施した。

2. ダムに発生した各種劣化・損傷の抽出と整理

2.1 検討対象のダム型式

ダムはその建設材料により、コンクリートダムとフィルダムに大別できる。このうちフィルダムは土や岩石といった自然材料のみで築造される。一方、コンクリートダムはセメントの化学反応により一体化・強度発現した人工材料であるコンクリートを用いているため、温度応力や凍結融解等により発生した亀裂、打継目部の施工不良箇所等といった局所的な弱部において、その劣化が選択的に深部に及ぶ可能性がある。よって、フィルダムの完成後の耐久性は、コンクリートダムに比べて相対的に低下しにくいと考える。さらに、維持管理、補修等に関わる費用が大きいこと、社会的な影響度合いが高いこと、加えて、ある程度規模の大きいダムはコンクリートダムの数が多いことから、本研究ではコンクリートダムを検討の主対象とする。

2.2 分析対象ダム

国土交通省が管理する直轄ダムと都道府県が管理する補助ダムの一部では、これまで、建設当時の設計、

施工、試験湛水、日常の管理点検を含めて、ダムの挙動等について総合的に点検を行う「総合点検」³⁾を実施している。

総合点検では、現行の設計方法を規定する「河川管理施設等構造令」⁴⁾に照らした安定解析、管理記録に基づく点検及び解析、現地調査に基づく点検やゲート関連設備の点検を行い、構造物の安全度の評価や危険が想定される場合の事故防止対策及び管理への提言等が行われている。この総合点検による堤体、基礎及びゲート部等における点検の実施状況や指摘事項を抽出分析し、ダム経過年数やダム型式等のダムの特性に応じた整理を行う。

データの抽出・整理は、総合点検が開始された昭和 59 年度から平成 22 年度までに実施された事例のうち、118 ダム(複数回総合点検を実施しているダムが 10 基あるため、延べ 128 ダム)の総合点検結果資料を対象とする。

分析対象ダムの状況を把握するために、ダム型式、竣工年、総合点検実施時の竣工後経過年数を指標に頻度分布をまとめる。ダム型式による分類を図・2.1 に示す。図中の型式略字は以下に示すとおりである。

G : 重力式コンクリートダム

R : ロックフィルダム(CFRD の遮水壁、洪水吐きコンクリート)

A : アーチダム

HG : 中空重力式コンクリートダム

GA : 重力式アーチダム

GF : 重力式コンクリート・フィル複合ダム

MA : マルティプルアーチダム

E : アースダム (洪水吐きコンクリート)

分析対象ダムは、重力式コンクリートダムが 82% と最も多い。これは総合点検の対象とする目安の経過年数を有するダムが、同型式の建設が多かった時期にあたるためである。また、ロックフィルダム 2 基、アースダム 1 基が含まれているが、前者は CFRD の遮水壁と洪水吐き部コンクリート、後者は洪水吐き部コンクリートを対象としている。

竣工年による分類を図・2.2 に示す。分析対象ダムは、主に高度経済成長期を含む 1950 年代から 1970 年代に建設されており、87% を占めている。

総合点検実施時の竣工後経過年数による分類を図・2.3 に示す。分析の対象となったダムは、竣工後 20 ～40 年経過したダムが 72% を占めている。なお、総

合点検の実施時期として竣工後経過年数に明確な規定はないが、長期経過したダムの機能の維持及び安全性の確保の観点から、今後の適切な維持管理の推進とダムの安全性確認のために、竣工後 20～40 年経過したダムで多く実施されている。

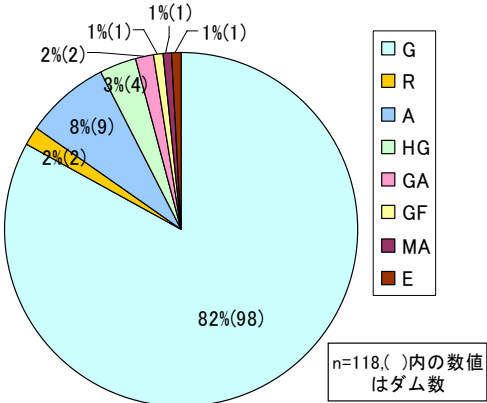


図-2.1 分析対象ダムのダム型式による分類

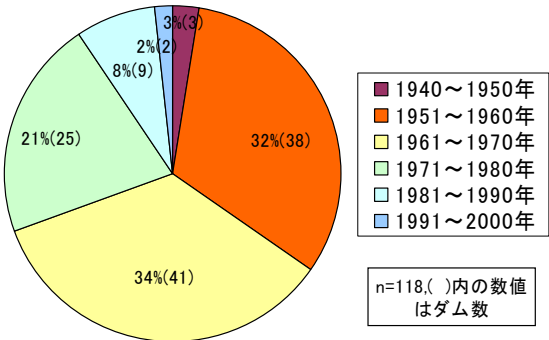


図-2.2 分析対象ダムの竣工年による分類

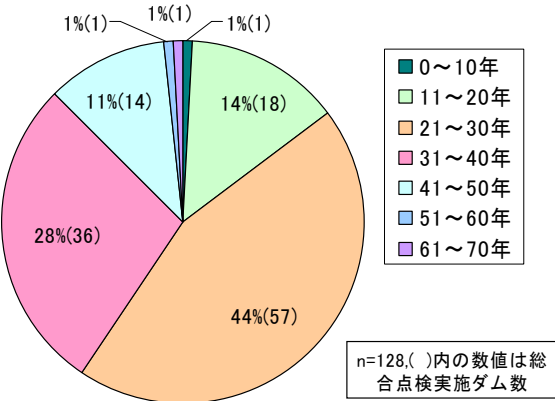


図-2.3 竣工から総合点検実施までの経過年数による分類

2.3 劣化事象の抽出

2.3.1 評価指標^{3),5)}

近年の総合点検で使用されている評価指標（表-2.1）に基づき、延べ 128 基のコンクリートダムの劣化事象

を劣化の進行程度別に整理する。

評価指標は劣化事象を A, B, C の 3 段階に分けている。なお、平成 20 年度には、異常が見られず、今後の留意事項として提言すべき内容であるが、A～C に該当しないものを「－」とする 4 段階評価に改訂されている。

評価 A は構造上の安全性や設備の機能低下から、緊急に対策の必要性があるものであり、“警告や注意”に該当する。評価 B は現在は支障がないが、数年で安全性や機能低下に影響を及ぼすことが予想され、対策が必要なものであり、“忠告”に該当する。評価 C はこのまま放置すると将来安全性や機能低下に影響を及ぼす可能性のあるものや間接的に影響を及ぼすと思われるものであり、“助言や推奨”に該当する。

昭和 59 年度～平成 5 年度の総合点検では、表-2.1 に示す評価そのものが行われていないため、本研究においては、点検結果に記載されている内容から、同表の指標にあてはめて評価したうえで整理を行った。平成 6 年度～平成 11 年度頃の総合点検は、同表のうち、基本指標の判定のみ実施し、対応方法・対応時期の評価が実施されていないため、点検結果に記載されている内容から、同表の指標にあてはめて評価したうえで整理を行った。

表-2.1 総合点検の評価指標⁵⁾

基本指標	対応方法	対応時期
A 現在支障が生じており、緊急に対策を講じないと、ダム本体やゲート等の安全性、機能が確保できないもの。	1 原因調査・解析を実施し、対策を実施する。	イ) 緊急に対策を講じる必要がある。
B 現状では支障は生じていないが、早急に対策を講じないと数年の内にダム本体やゲートなどの安全性や機能に支障が生じるおそれがあるもの。	1 原因調査を行って、対策を行う。 2 補修・修繕を実施する。 3 計測・測量を追加して継続的に観測する。	ロ) 早急に対策を講じる必要がある。
C 現状では支障は生じていないが、このまま放置すると将来、ダム本体やゲート等の安全性や機能および日常管理業務に直接または間接的に影響を及ぼすと思われるもの。	1 補修・修繕を実施する。 2 清掃を実施する。 3 監視を継続する。	ハ) 数年の内に対策を講じる必要がある。 ニ) 現状の維持管理を継続する。 ホ) 将来実施の可能性はある。
－ 今後の留意事項等として提言すべき内容で、上記評価基準に該当しない事項については、「－」記載とし、結果報告のみにとどめることとする。	異常なし	ホ) 将来実施の可能性はある。

2.3.2 劣化事象の整理結果

総合点検資料から得られたダムの劣化事象を事象毎に分類した結果を表-2.2 にまとめる。ダム本体の安全

性に直接影響しないゲート設備、各種操作室、ダム管理設備、及びダム天端構造物等は検討対象から除外した。

表-2.2 点検結果の分類

事 象	備 考
漏水	排水構造下でない状況での漏水（壁面等）、あるいは排水構造下の状況で定量的・構造的に問題となる漏水
排水異常	排水構造下の状況で排水状態に問題がある場合（水たまり等）、排水の水質的な問題、排水状態の異常等
開き・ずれ	主に継目部の開き・ずれ
クラック（遊離石灰）	クラック、ヘアクラック、ひび割れ及びそれに伴う遊離石灰
遊離石灰	施工継目等上記クラックに伴わない場合
鉄筋露出	
摩耗・洗掘	
剥離・剥落	
計器異常	計器の取り替え等ハード面での対応が必要な場合
観測値異常	観測計器類による計測値が異常値を示す（漏水は除く）

(1) 評価Aに関する劣化事象の傾向整理

評価Aの劣化事象の発生頻度を図-2.4に示す。発生頻度は「漏水・湧水」が最も多く、発生箇所は主に下流面、監査廊部である。また、監査廊においては「排水異常」、「計器・観測値異常」が認められるが、前者は主に基礎排水孔からの流出物（鉄さび）の発生、後者は揚圧力計測値の異常、揚圧力計・三角堰の破損等といった内容である。

評価Aの対象箇所の頻度を図-2.5に示す。対象箇所については、「監査廊」が多く、「計器・観測値異常」、「排水異常」といった事象が大きな割合を占める。

(2) 評価Bに関する劣化事象の傾向整理

評価Bの劣化事象の発生頻度を図-2.6に示す。発生頻度は「漏水・湧水」、「クラック（遊離石灰）」が最も多く、発生箇所は、前者は下流面・監査廊、後者は上下流面・洪水吐きが多くを占める。続いて、「鉄筋露出」、「剥離・剥落」の事象が多い傾向となる。また、監査廊において「排水異常」、「計器・観測値異常」が認められ、前者は主に基礎排水孔からの流出物（鉄さび）の発生、後者は揚圧力計測値の異常、基礎排水孔の目詰まり、三角堰エッジ部の腐食等といった内容である。

評価Bの対象箇所の頻度を図-2.7に示す。対象箇所については「監査廊」が多く、評価Aと同様、「計器・観測値異常」、「排水異常」といった事象が大きな割合を占める。続いて「下流面」、「洪水吐き」の頻度が多い傾向となる。

(3) 評価Cに関する劣化事象の傾向整理

評価Cの劣化事象の発生頻度を図-2.8に示す。評価Bと同じく「クラック（遊離石灰）」の事象が最も多く、下流面部・洪水吐きでの発生事象が大きな割合を占める。続いて、「漏水・湧水」、「遊離石灰」及び「剥離・剥落」の事象が多い傾向となる。

評価Cの対象箇所の頻度を図-2.9に示す。対象箇所については「下流面」、「監査廊」が多く、続いて「洪水吐き」の頻度が多い傾向となる。

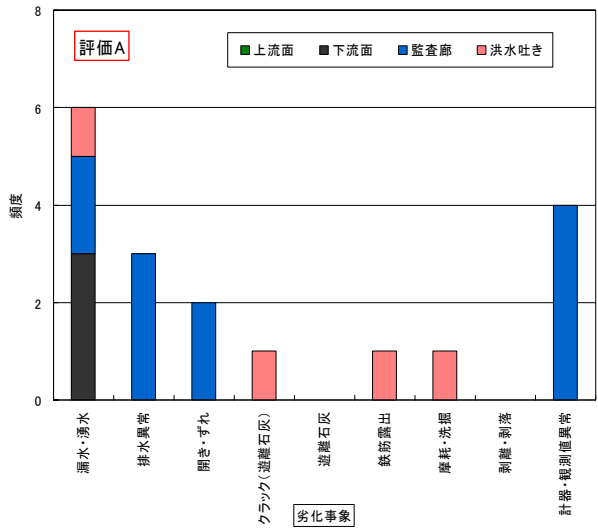


図-2.4 評価Aの劣化事象発生頻度

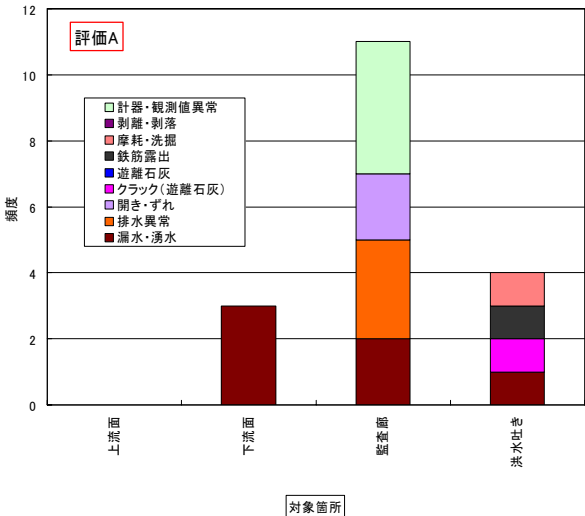


図-2.5 評価Aの対象箇所頻度

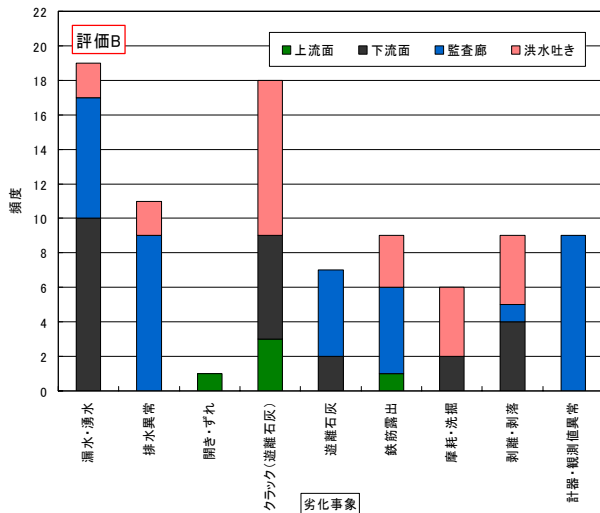


図-2.6 評価Bの劣化事象発生頻度

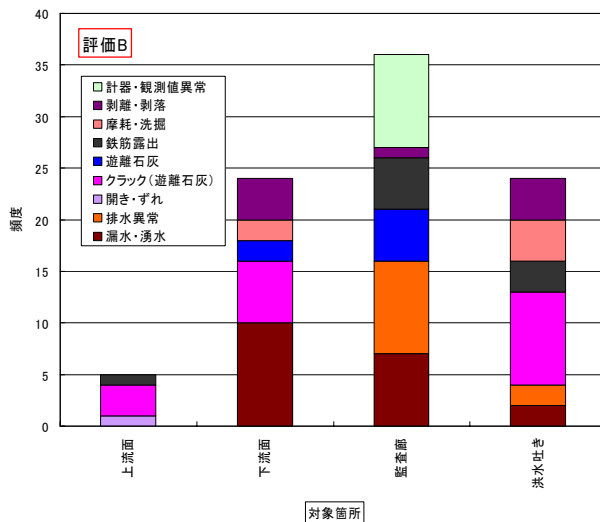


図-2.7 評価Bの対象箇所頻度

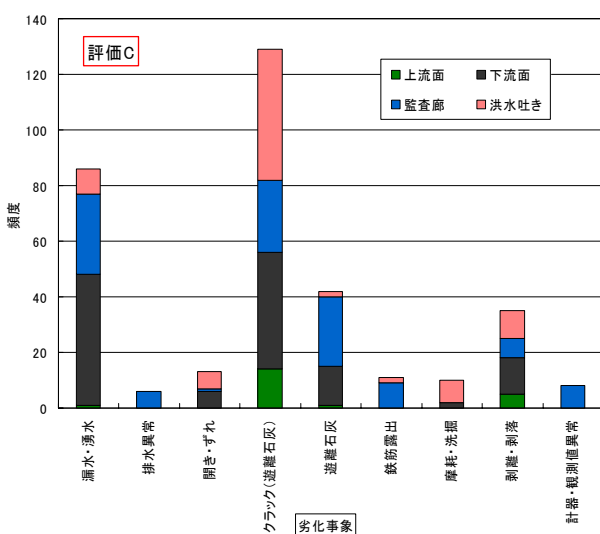


図-2.8 評価Cの劣化事象発生頻度

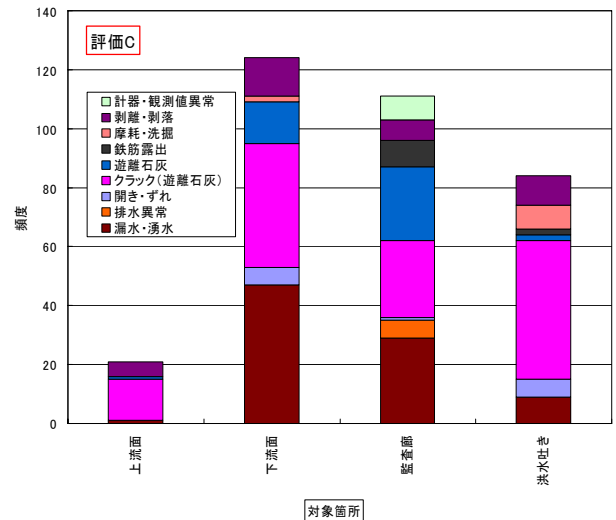


図-2.9 評価Cの対象箇所頻度

2.3.3 計器異常

評価 A, B の発生頻度が最も多い対象箇所は「監査廊」である。この理由として、監査廊については他の箇所にはない「計器・観測値異常」が含まれており、これらの事象の発生頻度を含んでいることによる。

「計器・観測値異常」以外の事象は、ダム本体そのものに発生した事象を示しているのに対して、「計器・観測値異常」はダムの挙動を計測するための計器またはその計器が示した値の異常である。ダムの計測は、河川法の規定に基づき制定された「河川管理施設等構造令」⁴⁾で定められており、ダムの安全管理にとって必要な計測事項を規定しているが、その項目はダムの安全管理にとって必要最小限の項目、換言すれば最も重要な計測項目を示したものである。

長期経過したダムの中には、重要な計測項目・箇所であっても、計器の異常により計測をとりやめた後復旧していない等、安全管理上適切ではないと考えられる計測箇所の削減が行われている事例もあると考えられる。

今後は、河川管理施設等構造令で定められている各計測項目について、どの場所をどの程度の数で計測する必要があるのか、つまりダムの安全管理における必要最小限、必要最低限の計測についても、本研究において検討を進めていく計画である。

2.4 海外ダムの劣化事象の整理

参考文献 6)において、邦文の文献により海外ダムの劣化事象の調査を実施しており、「亀裂」、「表面劣化」の事例が多い結果を得ている。ここでは、英文の文献

を収集し、劣化事象の調査を実施することとした。

国内ダムの竣工から総合点検実施までの経過年数は40年未満が全体の約90%を占めることから、これ以上の長期間経過した海外ダムの劣化事例に特に着目し、経過年数40年未満のダムも含め、劣化事象・劣化進行規模等を調査し、国内ダムとの比較を行う。

2.4.1 調査ダム概要

海外のコンクリートダム及びフィルダム洪水吐き部の劣化事例について記述されている以下の文献をもとに、劣化事象とその劣化規模等を抽出・整理する。

- ① ICOLD(International Commission On Large Dams) Bulletin93 (1994)⁷⁾
- ② ICOLD Bulletin119 (2000)⁸⁾
- ③ USCOLD(United States Committee On Large Dams) Dealing with ageing dams (1999)⁹⁾
- ④ ICOLD 第21回大会提出課題論文 課題82¹⁰⁾

抽出したダム数は121、抽出したダムがある国は20カ国（文献中に記述のあるもの、121ダムには国名記載のない25ダムを含む）である。抽出したダム数は国別に分類すると、米国22ダム、イタリア、スイスそれぞれ12ダム、フランス9ダム等である(図-2.10)。また、竣工年代別に見ると、1911年～1980年に竣工したダムが全体の約62%を占め、1920年代と1950年代が特に多い結果となった(図-2.11)。なお、嵩上げ等の再開発時の完了年が確認できるが、建設当初の竣工年が不明の場合は、便宜上、再開発完了時の年を竣工年として計上した。

抽出したダム型式は、重力式34ダム（複合ダムの重力式コンクリートダム部を含む）、アーチ式29ダム（マルチプル、重力式アーチを含む）とコンクリートダムが全体の約52%と半数以上を占める。その他の少数のダム型式として、バットレス式12ダム、粗石積み重力式12ダム、フィルダム洪水吐き6基等がある。

2.4.2 劣化事象の整理結果

(1) 劣化事象の抽出

121ダムでの劣化事象は245事例となり、抽出した事例を劣化事象毎に整理し、割合を図-2.12に示す。同図より、割合の大きい「漏水」、「クラック」を合わせると43%と全体の半数近くを占め、国内ダムと同様の傾向を示す。次いで、「剥離・剥落」13%、「摩耗・浸食等」11%であり、概ね国内ダムでも漏水、クラッ

クに次いで事例の多い劣化事象である。また、各劣化事象の概要を表-2.3に示す。

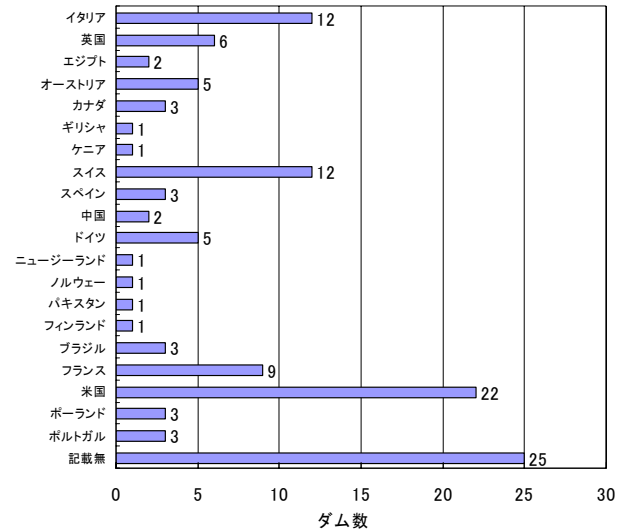


図-2.10 抽出ダム（国別）

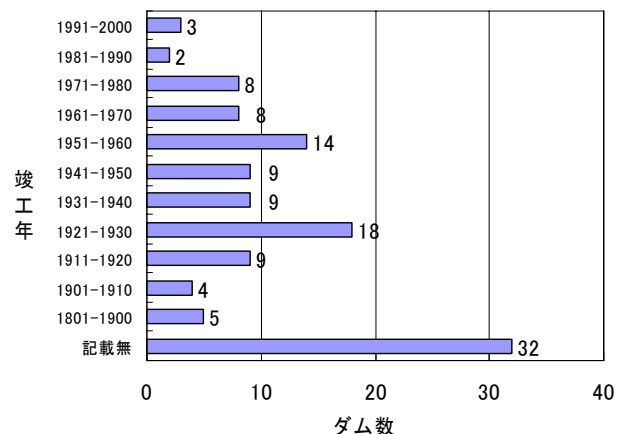


図-2.11 抽出ダム（竣工年別）

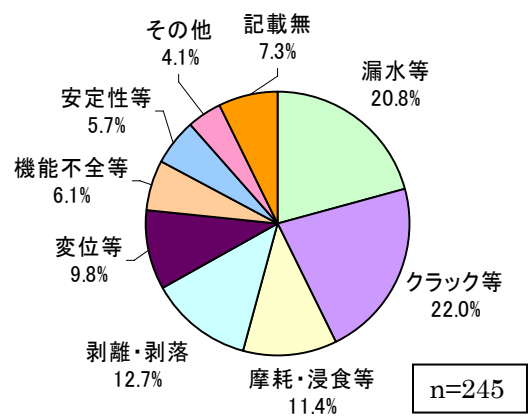


図-2.12 劣化事象の内訳

表-2.3 劣化事象の概要

劣化事象	概 要
漏水等	
クラック等	
摩耗・浸食等	主に洪水吐き減勢工での流水によるコンクリート面の摩耗であり、ダム本体以外の事象
剥離・剥落	主に凍結融解作用、アルカリシリカ反応によるコンクリートの剥離・剥落
変位等	
機能不全等	ゲート等の設備の劣化
安全性等	現行の安定基準を満足していない等
記載無	補修内容の記載はあるが、補修の原因となった劣化事象の記載がない

(2) 劣化事象別の傾向

事例数の多い「漏水」と「クラック」について、10年毎に区分した竣工年代別の事例数を整理し、図-2.13、図-2.14 にそれぞれ示す。なお、1910 年以前と 1990 年以降は抽出できたダム数が少ないことから、各劣化事象数も少ないため、以下の分析は 10 ダム程度以上抽出できた 1911 年～1980 年を対象に行う。

図-2.13 より、「漏水」は竣工年代別の事例数のバラツキが見られ、最大で 7 ダム、9 事例である。劣化の内容、規模等については、国内事例と有意な差が生じた事例は認められない。図-2.14 より、「クラック」は抽出したダム数が各竣工年代でそれぞれ 5 ダム以下と少ないこともあり、劣化事例数に大きなバラツキは見られない。事例数は 1950 年代で若干多いが、5 事例となる。劣化の内容、規模等については、バットレス式ダムで堤体厚さの 1/3 程度、及び上下流に貫通したクラックが確認された事例や堤体下流面において深さ 30cm 程度、幅数 m オーダーで局所的に剥落した事例等が確認できたが、国内事例と有意な差が生じた事例は認められない。

(3) まとめ

文献に記載されている劣化事例の報告という、限定された情報から抽出した海外ダムの劣化事象ではあるものの、国内ダムの劣化事象及び劣化規模と異なる結果は認められなかった。したがって、国内ダムにより得られた事例がコンクリートダムに生じる劣化事象を概ね網羅していると考えても問題はないと言える。

3. 各劣化事象がダムの安全性に与える影響の解析的検討

3.1 ダムの安全性に影響を与える劣化事象の選定

2 章の分析結果より、発生頻度が高い劣化事象をも

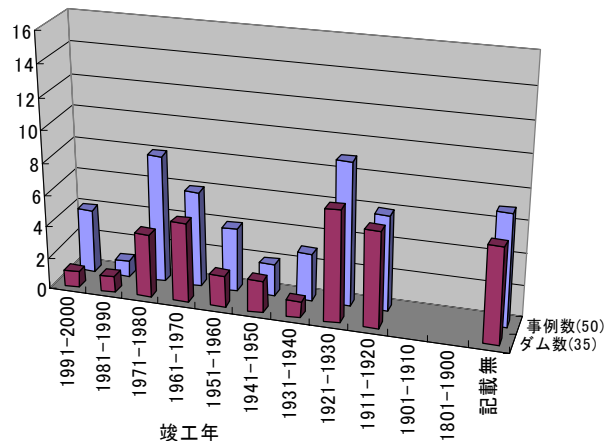


図-2.13 竣工年代別劣化事象（漏水）

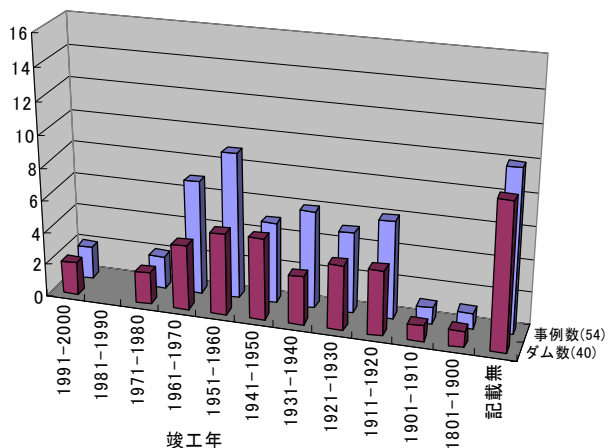


図-2.14 竣工年代別劣化事象（クラック）

とに、ダムの安全性に影響を与える劣化事象として、以下に示す 3 事象を選定する。

- ① 堤体上下流面の水平打継目沿い等のクラック：「クラック（遊離石灰）」より
- ② 凍結融解作用等によって生じる堤体表面の剥離等による表面劣化：「剥離・剥落」より
- ③ 基礎排水孔の劣化による揚圧力低減効果の低下：「計器・観測値異常」より

また、国内ダムの総合点検による劣化事象として報告はないが、堤体と岩盤の接合面における劣化として、岩着面の漏水（浸透）によりコンクリートのカルシウム分等が溶脱され、岩着面のコンクリートの強度が低下することが考えられる¹¹⁾。本事象によるダムの安全性への影響については、参考文献 6) において検討されているので参照されたい。

以上より、上記①～③の 3 劣化事象を反映した解析モデルを設定して安定解析を実施し、それぞれの劣化事象がダムの安全性に与える影響度の分析を行う。

3.2 解析基本条件・解析モデル

実際のダムには、天端に管理用道路の拡幅部等が設けられるが、本解析モデルには重力式コンクリートダムの特性を端的に表すために基本三角形(直角三角形)を用いる。解析に用いる堤体モデル形状は堤高 100m、上流面勾配は鉛直でフィレットは設けないこととし、下流面勾配は滑動安全率 4 程度(ただし、4 以上)、かつ上流端鉛直応力が圧縮側となるように 1:0.8 に設定する。図-3.1 に解析モデルの基本形状を示す。この際、岩盤のせん断強度は既往ダムの事例より、2.16MPa(220tf/m²)、内部摩擦係数は 1.0、同様にコンクリートのせん断強度は 2.45MPa(250tf/m²)、内部摩擦係数は 1.0 とする。主な解析条件を表-3.1 に示す。

解析結果に対する評価は、「河川管理施設等構造令」⁴⁾に準じた「(1)せん断に対する安全性」、「(2)上流面における鉛直応力」によることとし、さらに(2)は引張応力の発生を把握するための強度に対する条件で安全率としては表されないため、転倒に対する評価として「(3)堤体の転倒に対する安全性」を加えることとする。

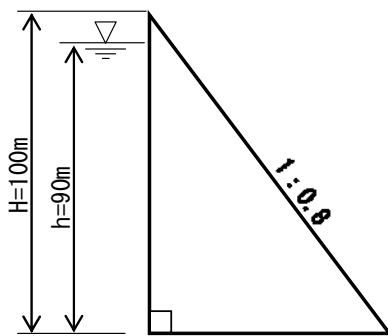


図-3.1 解析モデル

表-3.1 解析条件

項 目	設定値
堤 高	100m
設計震度	0.12 (強震帯)
対象水位	常時満水位 NWL90.0m
波 浪 高	考慮しない
下流水位	地表面に一致 (WL0m)
堆 砂	考慮しない
揚圧力	基本的にドレーン効果 考慮しない
岩 盤 せん断強度	せん断強度 2.16MPa 内部摩擦係数 1.0
コンクリート 単位体積重量	22.56kN/m ³
コンクリート せん断強度	せん断強度 2.45MPa 内部摩擦係数 1.0

(1) せん断に対する安全性 (Henny の式)

$$F_s = \frac{f \times \Sigma V + \tau_0 \times B}{\Sigma H} \geq 4.0$$

ここに、 F_s :せん断摩擦安全率、 f :内部摩擦係数、 ΣV :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)、 ΣH :せん断面に作用するせん断力(kN/m)

(2) 上流面における鉛直応力 (ミドルサードの条件)

$$e = \frac{\Sigma M}{\Sigma V} - \frac{B}{2}$$

$$\sigma_u = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B} \right), \quad \sigma_d = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right)$$

ここに、 e :応力を求める水平断面の中心軸から鉛直力 ΣV の作用点までの距離(m)、 σ_u :上流端鉛直応力(kN/m²)、 σ_d :下流端鉛直応力(kN/m²)、 ΣM :底面中心軸に作用するモーメント(kN・m)

※1MPa = 1,000kN/m²

(3) 転倒に対する安全性 (転倒安全率)¹²⁾

$$N_T = \frac{M_R}{M_T} \geq 1.0$$

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)

3.3 クラック (水平打継目沿い等)

3.3.1 検討条件・クラックを反映した解析モデル

ダム本体の水平打継目沿い等に上下流方向のクラックが発生する場合を想定し、そのクラックが堤体の安全性に与える影響を検討する。

クラックの発生標高は、地盤面から高さ 0m(着岩周辺とし、岩盤とコンクリートの境界面ではない)～80m(20m 間隔)の 5 箇所とし、クラックの発生位置は上流側のみ、下流側のみ、及び上下流同時の 3 ケースを設定し(図-3.2)、クラック深さやクラック部分のせん断強度を変化させ、安全性の評価を行う。

上流側のクラックは、クラック部分に作用する揚圧力が上昇する可能性を考慮し、堤体上流端に作用する静水圧と同じ揚圧力、すなわち揚圧力係数 1.0 を作用させる。未亀裂部分の上流端部の揚圧力はコンクリート内部となることを考慮し、「河川管理施設等構造令」に示される現行設計法を踏まえ、堤体上流端に作用している静水圧の 1/3 を作用させる。堤体下流端及び下流側のクラック先端の静水圧は 0 とする。なお、未亀裂部上下流端の揚圧力は直線変化とする(図-3.3)。

クラック面のせん断強度は、平成 18 年～22 年に土

本研究で実施した、予め亀裂を入れ分断させたコンクリート供試体(20cm×20cm×20cm)によりコンクリートのせん断面（亀裂面）のせん断強度を求めた一面せん断試験結果（図-3.4）^{13,14)}を用いて、最小値程度となる0.10MPaと最大値程度となる1.15MPa（内部摩擦係数は1.0とする）を採用する。さらに、クラック面の劣化が進んだ場合を想定して、せん断強度0MPa、内部摩擦係数0のケースも加えることとする。各計算断面のせん断強度は、クラック部分と未亀裂部分のせん断強度を加重平均した値とする。なお、クラックの分布範囲内に引張応力が発生した場合は、その範囲のせん断強度は考慮しないこととする。

堤体のクラック深さについての調査報告は少ないが、竣工33年経過した堤体上流面の継目部で約50cmの凍害劣化、完成直後で施工に起因し堤体上流面の水平打継目部で最大2.2m程度のクラックが発生した事例等が確認されている¹⁵⁾。本解析では、施工不良に起因するクラックは深部まで影響を及ぼす可能性が高いことに着目し、最大クラック深さは各計算断面の堤敷長の1/2の深さに設定する。

これより、解析ケースは、クラック発生標高、発生位置、せん断強度及びクラック深さを表-3.2に示すケースの組合せにより設定する。

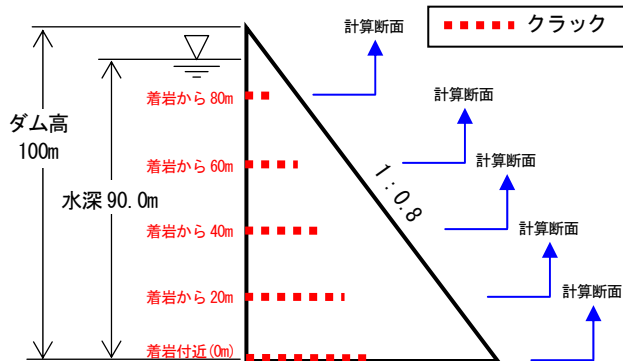


図-3.2 クラックを考慮した解析モデル
（クラック深さは一例）

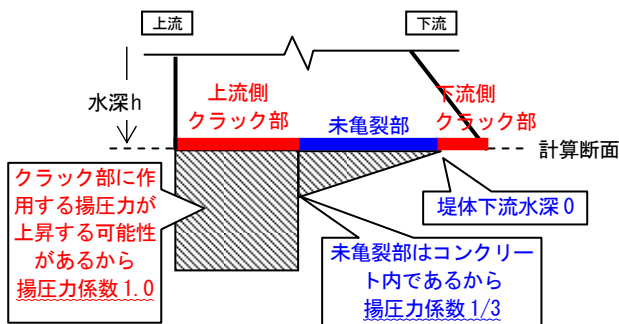
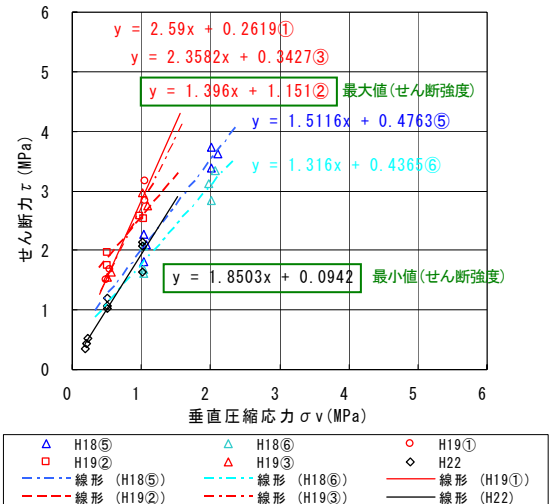


図-3.3 揚圧力の作用イメージ図
（上下流同時クラックの例）



※本図は既往試験データ^{13,14)}を加工したものである。

図-3.4 一面せん断試験結果

表-3.2 解析ケースの組合せ

発生標高	堤敷長 (m)	せん断強度		発生位置・深さ(m)		
		せん断強度 (MPa)	内部摩擦 係数	上流側 のみ	下流側 のみ	上下流 同時※
着岩より80m	16.0	$\begin{pmatrix} 0.0 \\ 0.10, 1.0 \\ 1.15, 1.0 \end{pmatrix}$	1.0	0.1	0.1	0.1
着岩より60m	32.0			～	～	～
着岩より40m	48.0			～	～	～
着岩より20m	64.0			～	～	～
着岩付近	80.0					

※上下流のクラック深さは同一とする。

3.3.2 解析結果

(1) せん断に対する安全性

図-3.5にクラック深さと正規化したせん断摩擦安全率（以下、Fsとする）の関係を示す。

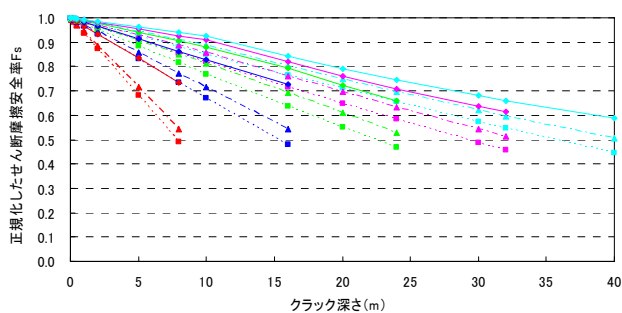
- ・クラック発生位置について比較すると、“着岩付近”や“着岩から20m”の堤高が高いケースの上流側クラックのFsは45～60%程度まで、下流側クラックと上下流同時クラックでは50～83%程度まで低下し、上流側クラックの影響が最も大きい。これは、クラック面のせん断強度の低下よりも揚圧力係数100%の作用する範囲が広がることによる影響の方が大きいためである。
- ・クラック発生標高について最大クラック深さ（堤敷長の1/2）の条件で比較すると、上流側クラックでは“着岩から80m”のFsは約49～74%、“着岩付近”は約45～59%、上下流同時クラックでは“着岩から80m”のFsは約50～75%、“着岩付近”は約48～71%までそれぞれ低下し、クラック発生標高が低いほどFsの低下への影響が大きいと考えられる。ただし、下流側クラックでは、“着岩から80m”のFsは約50～75%、“着岩付近”は約51～83%までの低下となり、

他ケースより F_s の低下幅が低い傾向を示す。これは、上流端の揚圧力を水深の $1/3$ とした三角形分布として与えていることから、上流側クラックに比べて揚圧力の増加率が小さいため、自重と揚圧力のかね合いによるものである。

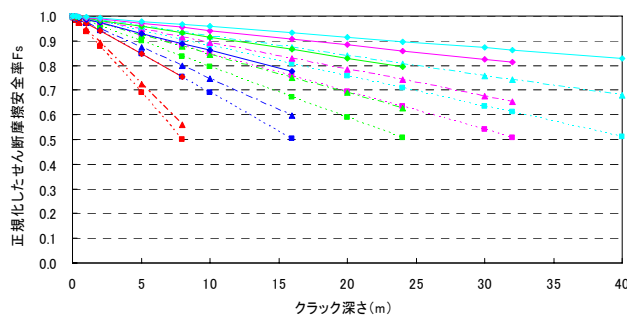
(2) 上流面における鉛直応力

図-3.6 にクラック深さと上流端鉛直応力（以下、 σ_u とする）の関係を示す。なお、 σ_u 値の“正”は圧縮応力、“負”は引張応力を示す。

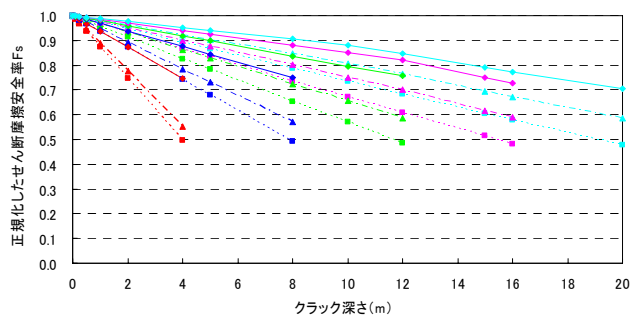
- 上流側クラックのクラック発生標高とクラック深さの関係について比較すると、“着岩から 80m”のクラック無し(0m)、最大クラック深さ（堤敷長の $1/2$ =



(a) 上流側クラック



(b) 下流側クラック



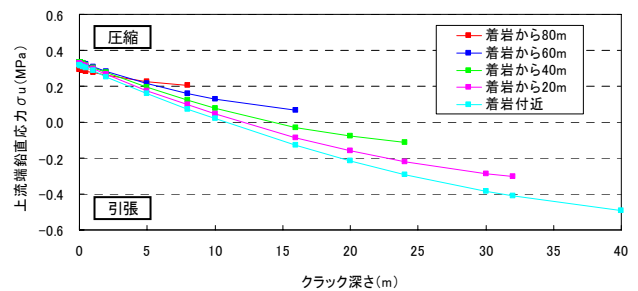
(c) 上下流同時クラック



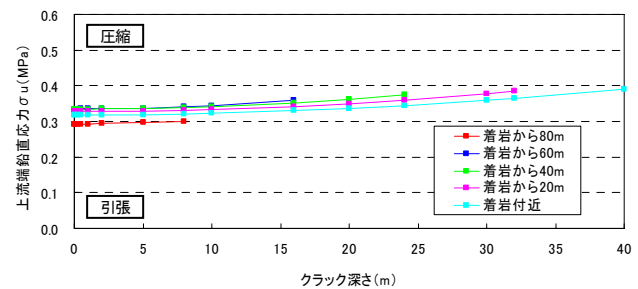
図-3.5 クラック深さと正規化したせん断摩擦安全率 F_s の関係

16.0m) の σ_u はそれぞれ 0.29MPa、0.20MPa、“着岩付近”のクラック無し(0m)、最大クラック深さ(同 40.0m)の σ_u はそれぞれ 0.32MPa、-0.49MPa、となり、クラック発生標高が低いほど、 σ_u は圧縮応力でも引張側に近づくか引張側の値となり、安全性に及ぼす影響は大きいと考えられる。

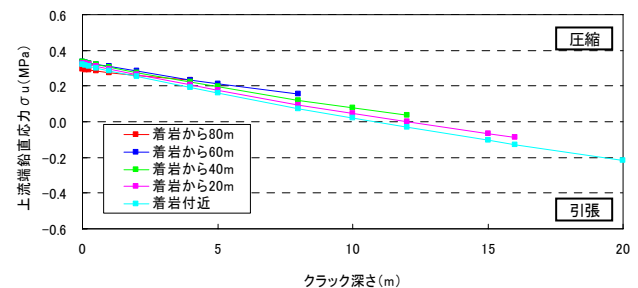
- 同様に下流側クラックでは、“着岩付近”のクラック無し(0m)、最大クラック深さ(同 40.0m)の σ_u はそれぞれ 0.32MPa、0.39MPa となり、クラック深さが大きいほど、 σ_u は圧縮側の値となり、“着岩付近”以外のケースでも同様の傾向を示す。これは、下流側のクラック深さが大きくなるほど、揚圧力の作用幅が狭くなるためである。
- 上下流同時クラックについては、上流側クラックと同様の傾向を示す。



(a) 上流側クラック



(b) 下流側クラック



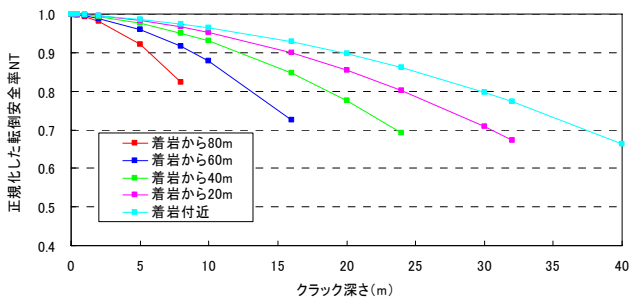
(c) 上下流同時クラック

図-3.6 クラック深さと上流端鉛直応力 σ_u の関係

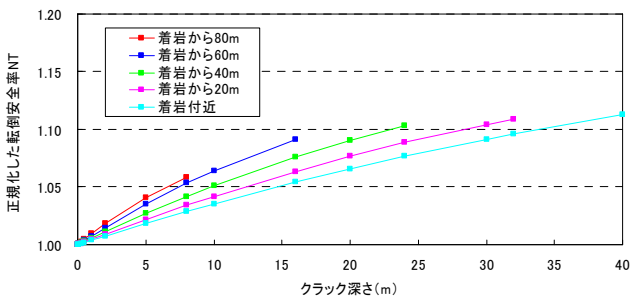
(3) 転倒に対する安全性

図-3.7 にクラック深さと正規化した転倒安全率（以下、 N_T とする）の関係を示す。

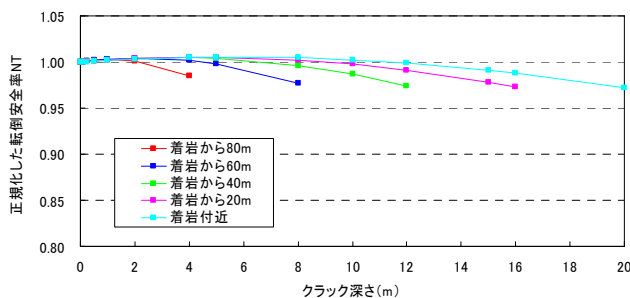
- ・クラック発生位置について比較すると、上流側クラックの N_T は概ね 70～80%程度まで、上下流同時クラックでは 97～98%程度までそれぞれ低下し、下流側クラックは前述した σ_u の分析結果と同様の理由により、クラック深さが大きくなると N_T は上昇する。以上より、上流側クラックの影響が最も大きい傾向となる。
- ・上流側クラックのクラック発生標高とクラック深さの関係について比較すると、“着岩から 80m”以外の N_T は約 70%前後までの低下、一方、“着岩から 80m”では約 80%までの低下となり、クラック発生標高が低いほど、 N_T の低下への影響は大きいと考えられる。



(a) 上流側クラック



(b) 下流側クラック



(c) 上下流同時クラック

図-3.7 クラック深さと正規化した転倒安全率 N_T の関係

・同様に下流側クラックでは、クラック発生標高が低いほど、クラック深さが大きいほど、 N_T は上昇する傾向を示す。

・同様に上下流同時クラックでは、前述した上流側と下流側のクラックの影響を受けて、クラック発生標高による差は小さく、最大クラック深さでも N_T は 97～98%程度までの低下となる。

(4) クラックのまとめ

クラックの発生標高が低いほど、またクラックの発生位置が上流側の条件において、ダム本体の安全性への影響が大きいことが分かった。

3.4 表面劣化（断面欠損）

3.4.1 検討条件・表面劣化を反映した解析モデル

凍結融解作用による凍害等に起因する堤体表面のコンクリートの剥離・剥落による劣化（断面欠損）を想定し、その断面欠損が堤体の安全性に与える影響を検討する。

断面欠損位置は、上流面のみ、下流面のみ、上下流面同時の3ケースを設定し、安全側の検討となるように一様の深さで断面欠損することを前提条件とする（図-3.8）。上下流面同時の劣化深さは同一値とする。

安定解析条件は前述した表-3.1 に準拠することとし、表面劣化の深さは堤体面の直交方向に設定する。

表面劣化深さは、ダム本体の機能に重大な影響を与えると考えられる、次の条件を満足するように上下流面それぞれ 3.0m に設定する。越流ブロックの上下流面は横継目の主止水板までの厚さを対象とすると、既設ダムの採用実績は 1.0m が最も多い¹⁶⁾。また、非越流ブロックの下流面は外部コンクリートの厚さを対象とすると、採用実績は 3.0m が最も多い¹⁶⁾。

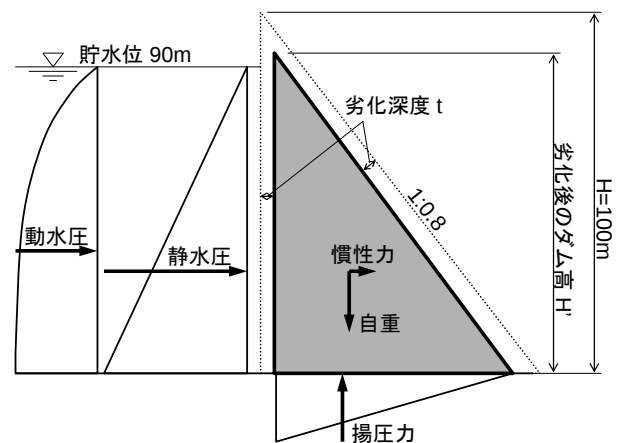


図-3.8 表面劣化を考慮したモデル・荷重条件（上下流面が劣化する場合の例）

3.4.2 解析結果

(1) せん断に対する安全性

図-3.9 に劣化深さと正規化した F_s の関係を示す。

- ・上流面のみ欠損の場合、劣化深さ 1.0m（主止水板による条件）において F_s は約 99%までの低下となり、わずかに低下する程度である。
- ・下流面のみ欠損の場合、劣化深さ 3.0m（外部コンクリートによる条件）において F_s は約 95%までの低下となり、わずかに低下する程度である。
- ・上下流面同時欠損の場合、劣化深さ 3.0m において F_s は約 92%までの低下となり、上下流面ともに劣化させることから、他ケースより F_s の低下は大きくなる。

(2) 上流面における鉛直応力

図-3.10 に劣化深さと σ_u の関係を示す。

- ・上流面のみ欠損の場合、劣化前の σ_u は 0.32MPa、劣化深さ 1.0m の σ_u は 0.26MPa となり、上流端部に引張応力は発生しない。
- ・下流面のみ欠損の場合、劣化前の σ_u は 0.32MPa、劣化深さ 3.0m の σ_u は 0.09MPa となり、上流端部に引張応力は発生しない。
- ・上下流面同時欠損の場合、劣化深さ 3.0m の σ_u は -0.10MPa となり、上下流面ともに劣化させることから、上流端部に小さいが引張応力が発生する結果となる。

(3) 転倒に対する安全性

図-3.11 に劣化深さと正規化した N_T の関係を示す。

- ・上流面のみ欠損の場合、劣化深さ 1.0m において N_T は約 97%までの低下となり、 F_s （約 99%までの低下）より安全性に及ぼす影響が大きい傾向となる。
- ・下流面のみ欠損の場合、劣化深さ 3.0m において N_T は約 88%までの低下となり、 F_s （約 95%までの低下）より安全性に及ぼす影響が大きい傾向となる。
- ・上下流面同時欠損の場合、劣化深さ 3.0m において N_T は約 79%までの低下となり、上下流面ともに劣化させることから、他ケースより N_T の低下は大きくなる。また、 F_s （約 92%までの低下）に比べ安全性に及ぼす影響が大きい傾向となる。

3.4.3 表面劣化速度の推定

コンクリートダムの表面劣化の調査報告として、凍害による事例が報告されている^{17),18)}。これらの劣化深度は堤体表面から 5cm,15cm 程度（経過年数 10 年・祐延ダム）、10cm,50cm 程度（同 33 年・祐延ダム）、3cm,10cm 程度（同 45 年・遠野ダム）、劣化位置が記

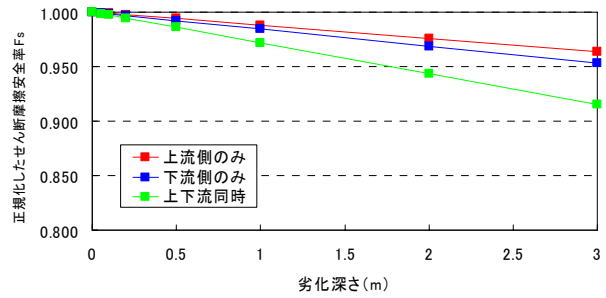


図-3.9 表面劣化深さと正規化したせん断摩擦安全率 F_s の関係

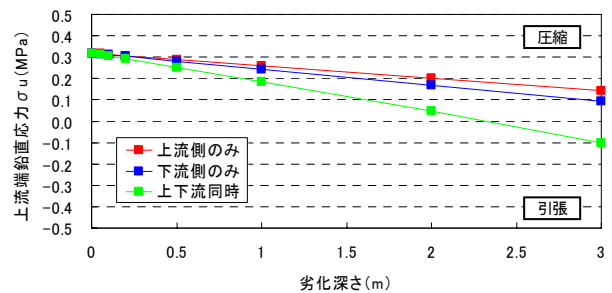


図-3.10 表面劣化深さと上流端鉛直応力 σ_u の関係

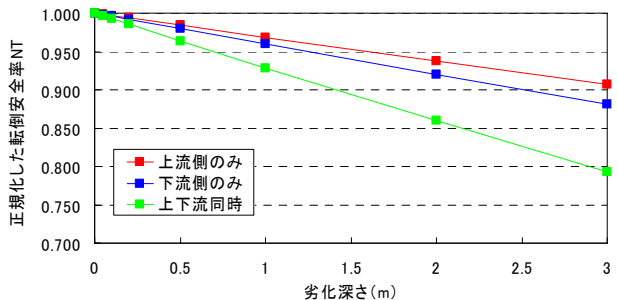


図-3.11 表面劣化深さと正規化した転倒安全率 N_T の関係

載されていない事例で 3～35cm 程度（同 12 年・雨竜第一、第二ダム）とある。

ここでは、これらの事例を参考に凍害による劣化速度を推定し、前述したコンクリートダムの上下流面の着目すべき劣化厚さとの関係を求める。調査データを劣化深度（横軸）と竣工後経過年数（縦軸）の関係によって整理した結果を図-3.12 に示す。なお、安全性の評価上、安全側の検討となるように、劣化位置が記載されていない事例も含めて検討する。

同図より、データのバラツキが大きいことから、全データの平均として算出した推定式(1)と全データのうち、劣化深度が最大付近、かつ経過年数が 10 年と 33 年の 2 点を有する「祐延ダム」のデータを用いて算出した推定式(2)を以下にそれぞれ示す。なお、凍害の影響を受け劣化したコンクリートは常に剥落していく

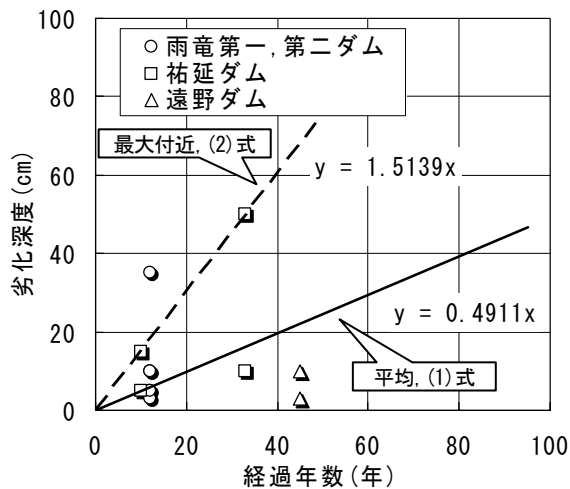
ものと考えて、推定式は切片を 0 とする直線式により算定する。

$$\text{劣化速度推定式 } y = 0.4911x \cdots (1)$$

$$y = 1.5139x \cdots (2)$$

ここに、 y ：劣化深度(cm)、 x ：竣工からの経過年数

(1)式によれば、劣化深さ 1.0m、3.0m に達する年数はそれぞれ約 200 年、約 610 年を要する。また、(2)式によれば、同様に約 70 年、約 200 年となり、最大値から算出した推定式(2)により年数を算出しても、長期間を要する結果となる。



※本図は参考文献 17),18)のデータを加工したものである。

図-3.12 経過年数と劣化深度の関係

3.4.4 表面劣化のまとめ

ダム本体の止水性や耐久性といった機能に重大な影響を与える劣化深さに達した場合の安全性の低下は小さいことが分かった。また、通常のダムコンクリートであれば、表面劣化が竣工後短期～中期でダムの安全性及び機能に重大な影響を及ぼす可能性は少ないことも、少ない事例からの推定ではあるが明らかになった。

3.5 揚圧力低減効果の低下（計器の劣化）

3.5.1 検討条件・計器劣化を反映した解析モデル

基礎排水孔の排水機能低下に伴う揚圧力の増加による、堤体の安全性への影響を検討する。

劣化の進行度合いは揚圧力の低減効果の低下によって表す。排水機能が健全な状態の基礎排水孔位置での揚圧力係数は“ $1/5 \times$ 上流水深 h ”、劣化の進行につれて“ $2/5 \times$ 上流水深 h ”、“ $3/5 \times$ 上流水深 h ”、“ $4/5 \times$ 上流水深 h ”としてそれぞれ揚圧力を与え、堤体の安全性検討に反

表-3.2 各ケースの揚圧力値

	$1/5 \times h$	$2/5 \times h$	$3/5 \times h$	$4/5 \times h$
揚圧力 (kN/m)	9,270.45	16,333.65	23,396.85	30,460.05
比率	1.000	1.762	2.524	3.286

h : 上流水深

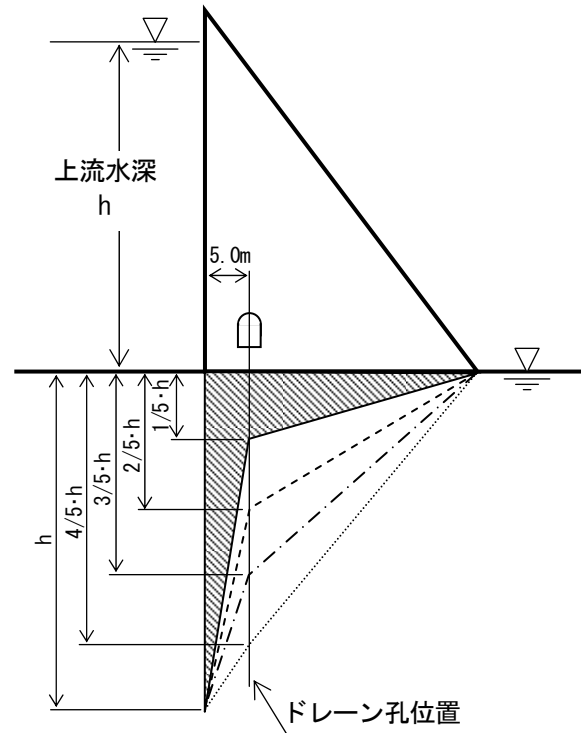


図-3.13 揚圧力の低減効果を考慮した解析モデル

映させる（図-3.13）。各ケースの単位幅当たりの揚圧力と“ $1/5 \times$ 上流水深 h ”を基準とした揚圧力値の比率を表-3.2 に示す。

3.5.2 解析結果

(1) せん断に対する安全性

図-3.14 に各揚圧力値と正規化した F_s の関係を示す。

・ F_s は最も劣化が進んだ状態の揚圧力係数 $4/5 \cdot h$ で、約 92%までの低下となる。

(2) 上流面における鉛直応力

図-3.15 に各揚圧力値と σ_u の関係を示す。

・健全な状態である揚圧力係数 $1/5 \cdot h$ の σ_u は 0.38MPa、最も劣化が進んだ状態である同 $4/5 \cdot h$ の σ_u は 0.11MPa となり、上流端部に引張応力が発生する結果となる。

(3) 転倒に対する安全性

図-3.16 に各揚圧力値と正規化した N_T の関係を示す。

・ N_T は最も劣化が進んだ状態の揚圧力係数 $4/5 \cdot h$ で約 70%までの低下となり、 F_s （約 92%までの低下）に比べ安全性に及ぼす影響が大きい傾向となる。

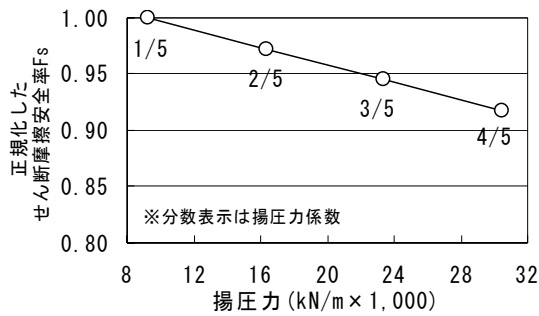


図-3.14 揚圧力と正規化したせん断摩擦安全率Fsの関係

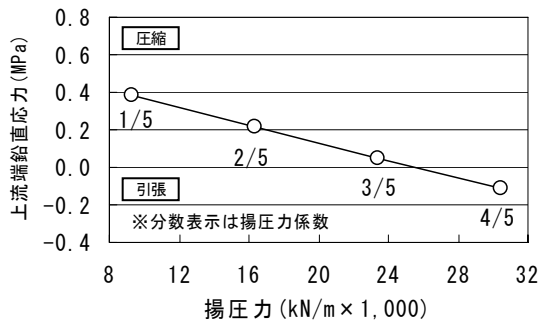


図-3.15 揚圧力と上流端鉛直応力σuの関係

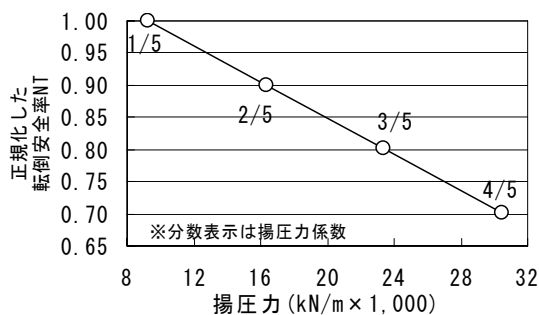


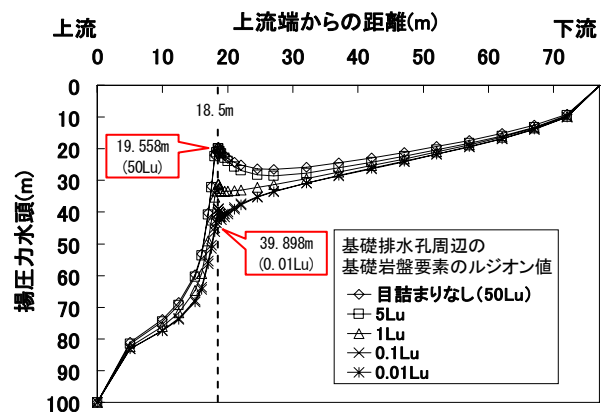
図-3.16 揚圧力と正規化した転倒安全率NTの関係

ここで、土木研究所の既往研究¹⁹⁾において、本研究と概ね同規模のダム（堤高100m）の1ブロック幅15mのモデルを用いた三次元浸透流解析により、基礎排水孔周辺の基礎岩盤に目詰りが生じた場合の揚圧力の影響について研究されている。この研究の前段で、排水孔が目詰まりした場合と基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合の揚圧力への影響について比較し、同様の傾向が得られていることを確認している。

これより、基礎排水孔の目詰まりにこの研究成果を適用できると考え、目詰まりが生じたときの解析結果と前述した揚圧力係数(1/5～4/5)を対応させ、目詰まりが生じた場合の揚圧力係数がどの程度であるのかを検討する。

図-3.17 に示す上下流方向のダム軸方向平均揚圧力分布によると、基礎排水孔設置位置（上流端からの距

離18.5m）での揚圧力水頭は“目詰まりなし”（50Lu）に設定）で19.558m、完全に“目詰まりした状態”（0.01Lu=1×10⁻⁷cm/sに設定）で39.898mであった。これより、劣化していない状態を表す“目詰まりなし（50Lu）”の揚圧力係数は1/5(0.2)、劣化が進んだ状態を表す“0.01Lu”の揚圧力係数は2/5(0.4)に相当すると言える。ここで、前述した揚圧力係数2/5の安定解析結果より、正規化したFsは約97%までの低下、同NTは90%までの低下、上流端鉛直応力は0.22MPaであった。



※本図は参考文献19)の図を一部加工したものである。

図-3.17 上下流方向の平均揚圧力分布（基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合）

(4) 揚圧力低減効果の変動のまとめ

完全に目詰まりした状態に相当する揚圧力係数は三次元浸透流解析による検討結果によれば、2/5程度であることが分かった。この検討結果によれば、完全に基礎排水孔が目詰まりしても、ダムの安全性に及ぼす影響は小さいと言える。しかし、実際のダムにおいては、何らかの原因により基礎排水孔の目詰まりが生じた場合には、原因究明や適切な対応等が必要と考えられる。また、実際のダムの基礎地盤は、数値解析モデルのような均一な透水性分布ではないため、建設直後から設計揚圧力以上の揚圧力値が作用する場合がある。そのため、詳細な検討は個別ダム毎に実施する必要がある。

4. 劣化予測手法の考察

4.1 検討対象とする劣化事象の選定

2章で述べた劣化事象の整理結果より、コンクリートダム本体では、「漏水」及び「クラック」（水平打継目の劣化も含む）の劣化事象が最も多く確認された。これらの劣化事象のうち、「漏水」は堤体ジョイント部

周辺で発生する他、十分な打継目処理を実施しなかった水平打継目や堤体の上下流に連続するクラック等に起因して発生することが多いことを踏まえて、本研究において「漏水」は「クラック」に含まれる劣化事象として取り扱う。

また、3章で述べたダムの安全性に与える影響は、「表面劣化」、「揚圧力低減効果の変動」に比べて、「クラック」が大きいことが分かった。さらに、「クラック」は経年劣化以外の要因、例えば施工不良等で劣化・損傷が生じることがあり、他の劣化事象に比べるとダムの安全性に及ぼす影響が大きくなる可能性を有するものと考えられる。

これより、本検討では複数ある劣化事象の内、「クラック」を対象として劣化進行予測に関する検討を行う。

4.2 クラック事象の詳細分析

4.2.1 評価対象の区分

総合点検の評価指標（表-2.1 参照）はダムの構造物全体で共通したものであるが、クラックの発生箇所は構造、設置位置及び機能等の違いにより、堤体上下流面部、監査廊部（堤体内）、洪水吐き越流部・減勢工部、放流設備等の基礎部等に大別される。これらの部位をダムの構造、機能等の違いを考慮して、①堤体部・監査廊部、②洪水吐き部 A（堤体越流部及び鉄筋コンクリート部）、③洪水吐き部 B（放流設備等基礎の鉄筋コンクリート部）の3つに分けることとし、それぞれの具

体的な位置等を表-4.1 に示す。なお、劣化の影響が直接ダム本体に影響しない減勢工部（側壁、水叩き等）は評価対象外とする。

4.2.2 各部位の評価指標の設定

総合点検の評価指標を基本としつつ、前述したそれぞれの部位に対する評価指標を設定し、すべてのクラック事例について評価区分を再整理する。部位毎のクラックの評価は、クラックの状況を規模（長さ、開口幅、深さ等）・状態（漏水の有無、変形の有無等）・発生位置に分けて、それぞれ表-4.2 に示す区分条件を設定して、当てはめることとした。なお、同表の区分条件の内容は、総合点検結果による評価区分（A,B,C）毎のクラックの状況を参考に設定した。

4.2.3 分析結果

（1）対象ダムのクラック発生内訳

対象ダムのクラック発生状況は、堤体部（監査廊部含む）及び洪水吐き部に生じたダムが 28%、堤体部（監査廊部含む）のみのダムが 25%、洪水吐き部のみのダムが 11%、クラックが発生しなかったダムが 36%となった（図-4.1）。

なお、分析対象となるダム数は、総合点検報告書入手した延べ 128 ダムのうち、クラックを劣化事例として抽出していても、クラックについて詳細な説明、図及び写真等がなくクラックの状況が判断できない 4 ダムを除く、延べ 124 ダム（10 ダムで総合点検を 2 回実施しているため、ダム数は 114）となる。

表-4.1 評価対象の区分

部 位	概 要	具体的な位置の例
①堤体部・監査廊部	マスコンクリート部、かつ越流水の影響がない非越流部	・ダム上下流面 ・監査廊壁面
②洪水吐き部 A※ （堤体越流部及び鉄筋コンクリート部）	堤体越流部である洪水吐き部のうち、放流水の流況（放流能力）に影響を及ぼす可能性がある部位	・越流部～シュート部の越流面 ・ピア部 ・堤体導流壁
③洪水吐き部 B （放流設備等基礎の鉄筋コンクリート部）	洪水吐き部のうち、放流設備等の機能に影響を及ぼす可能性がある部位	・ラジアルゲート等のトラニオンピン取付け部周辺 ・スライドゲート等の戸当たり部周辺 ・ゲート巻上げ機の基礎部 ・天端橋梁の基礎等

※劣化の影響が直接ダム本体に影響しない減勢工部（側壁、水叩き等）は評価対象外とする。

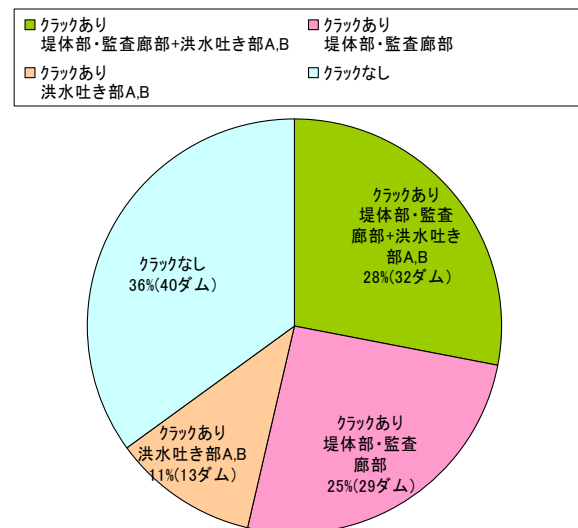


図-4.1 クラック発生状況

表-4.2 評価指標区分の概要

評価 区分	項 目	区分条件		
		①堤体部・監査廊内部	②洪水吐き部A	③洪水吐き部B
A	-	・下記条件が複合的に組み合わせり、明らかに緊急対策が必要と考えられるもの。	・同左	・同左
B	規模 (長さ、開口 幅等)	・幅数mオーダー、かつある程度の深さを有したコンクリート塊の剥落(表面のみの剥離程度ではないもの)が見られる。	・同左	・同左
		・水平方向のクラック長15m程度以上(監査廊部は1/2の7.5m程度以上)。鉛直方向も同程度の長さを目安とする。	・水平方向のクラック長15m程度以上。鉛直方向も同程度の長さを目安とする。	-
		・開口幅数mm～数cmオーダー	・同左	・同左
		・局所的なポップアウトは対象外。	・同左	・同左
	状態	・アーチダムで、クラックから漏水(滲み出し程度も含む)が確認される。	・同左	-
		・重力式ダムで、クラックから漏水(数リットル/min～数十リットル/minオーダー)が確認される。	・同左	-
		・上下流に連続している、または構造物が貫通している。	・同左	・同左
C	規模 (長さ、開口 幅等)	・複数のクラックが集中している(亀甲状等)。	・同左	・同左
		・堤趾部周辺(着岩部)	・堤趾部周辺(着岩部) ・放流水の流況に影響が生じる可能性がある(ピア部、越流部～シュート部の越流面、導流壁等)。	・洪水吐きゲートの固定部周辺(ラジアルゲートのトラニオンピン部(固定部)等)。 ・構造物(天端橋梁、巻き上げ機等)の基礎となるピア部等。
	状態	・水平方向のクラック長15m程度以上(監査廊部は1/2の7.5m程度以上)。鉛直方向も同程度の長さを目安とする。	・水平方向のクラック長15m程度以上。鉛直方向も同程度の長さを目安とする。	-
		・開口幅数mm未満	・同左	・同左
		・重力式ダムで、クラックから漏水(滲み出し程度)が確認される(アーチダムは漏水なし)。	・同左	-
	発生位置	・上下流に連続している、または構造物が貫通している。	・同左	・同左
		・複数のクラックが集中している(亀甲状等)。	・同左	・同左
D	規模 (長さ、開口 幅等)	・堤趾部周辺(着岩部)	・堤趾部周辺(着岩部) ・放流水の流況に影響が生じる可能性がある(ピア部、越流部～シュート部の越流面、導流壁等)。	・洪水吐きゲートの固定部周辺(ラジアルゲートのトラニオンピン部(固定部)等)。 ・構造物(天端橋梁、巻き上げ機等)の基礎となるピア部等。
		・水平方向のクラック長15m程度未満(監査廊部1/2の7.5m程度未満)。鉛直方向も同程度の長さを目安とする。	・水平方向のクラック長15m程度未満。鉛直方向も同程度の長さを目安とする。	-
		・開口幅概ね0mm(密着)	・同左	・同左
		・複数のクラックが集中していない。	・同左	・同左
	状態	・クラックから漏水(滲み出し)がない。	・同左	-
		・変形、ズレが生じていない。	・同左	・同左
		・補修されている。	・同左	・同左
E	発生位置	・区分A, B, C以外(非越流部の下流面中腹等)	・放流水の流況に影響が生じる可能性がある(ピア部、越流部～シュート部の越流面、導流壁等)。	・すべて対象とする。

注1) 「状態」について、遊離石灰の有無によって明瞭な傾向の違いが認められないことから、区分条件に考慮しない。

注2) 「発生位置」について、堤趾部周辺等は応力が集中する部位であり、重要度が高い箇所と判断した。

(2) 部位毎の分布状況

クラックは489事例確認されており、発生部位毎の割合は、堤体部 37%、監査廊部 34%、洪水吐き部 A,B 合わせて 29%となり、それぞれ 1/3 程度を占めた (図-4.2)。

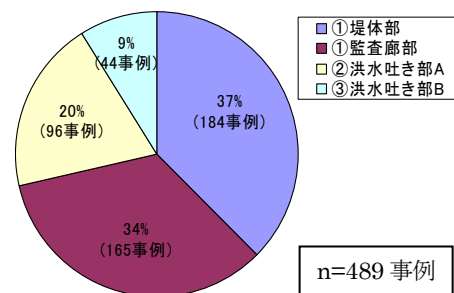
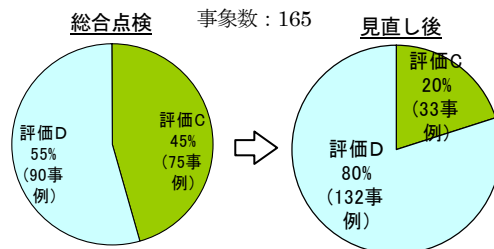


図-4.2 クラック発生部位の割合

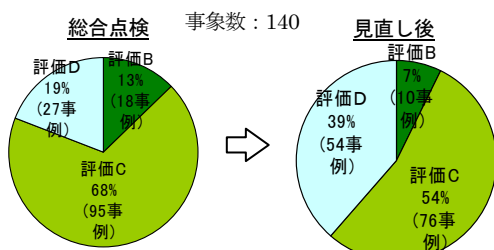
(3) 評価区分の割合・総合点検との比較

本研究により見直した、部位毎の評価区分割合（図-4.3 右列）によると、すべての部位で劣化進行度の低い区分 C,D が 90%以上を占め、劣化進行度の高い区分 A に該当する事例はなく、監査廊部では区分 A,B に該当する事例がない結果であった。

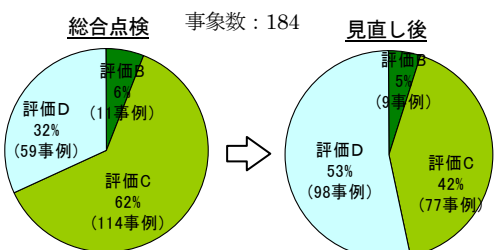
総合点検結果の評価区分割合（図-4.3 左列）と前述した見直し後の割合（同図 右列）を比較すると、見直し後がすべての部位において、区分 B,C の割合が減少傾向、区分 D が増加傾向となった。これは、近年実施されている総合点検の評価が、以前に比べて区分 D に相当するクラックをもれなく抽出し、さらにそれぞれ個別の劣化事例として計上することにより、区分 D の占める割合が増えたと考えられる。



(a) 堤体部



(b) 監査廊部



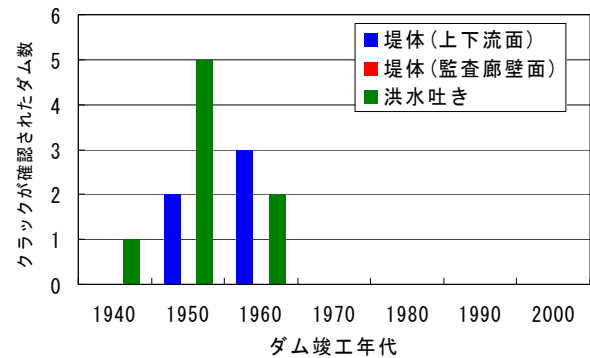
(c) 洪水吐き部 A・B

図-4.3 総合点検と見直し後の評価区分の比較

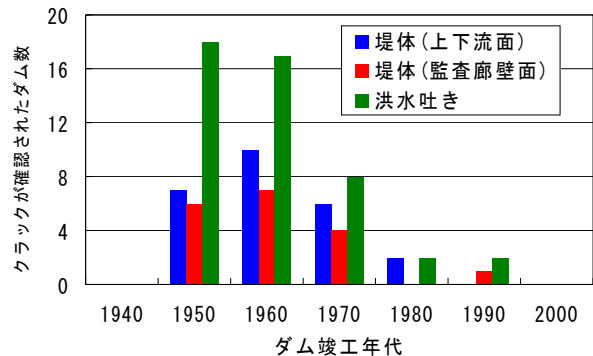
4.3 劣化進行予測に関する考察

4.3.1 クラックの劣化事例数の分布状況

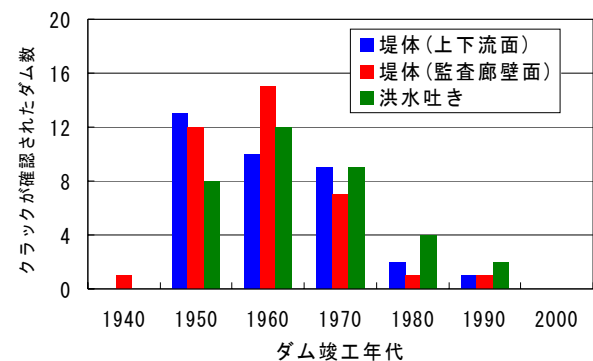
4.2 で整理した「クラック」の分布状況を以下で整理する。なお、一つのダムにおいて、発生位置が近接し同一原因により生じたと思われるクラックは一つの



(a) 評価区分 B



(b) 評価区分 C



(c) 評価区分 D

図-4.4 竣工年代別・評価区分別劣化事例数

劣化事例数とし、異なる部位に生じたクラックはそれぞれの部位で一つずつ計上することとした。例えば、同一ダムにおいて堤体上流面と洪水吐きピア部にそれぞれクラックが確認されるケースは、それぞれの部位でダム数を計上する。

(1) 竣工年代による評価区分毎のダム数

図-4.4 に 10 年間隔に竣工年代を区切って、評価区分毎にクラックが確認されたダム数（以下、単にダム数という）を整理した結果を示す。

総合点検を実施したダムの竣工年代は 1950 年代、1960 年代及び 1970 年代が多く、これらのダムが全体の約 90%を占めていることから（図-2.2 参照）、ダム数も同様の年代で多い傾向となる。

評価区分別に見ると、評価区分 B,C ではいずれの年代でも洪水吐き部のダム数が多く、劣化程度の軽微な評価区分 D ではいずれの年代でも各部位のダム数は同程度となる。

(2) 経過年数毎の劣化事例数

図-4.5 に 10 カ年間隔に竣工時から総合点検実施時までの経過年数を区切って、部位毎・評価区分毎にダム数を整理した結果を示す。

ダムの竣工から総合点検実施までの経過年数は 21 年～40 年が多く、全体の約 72%を占めていることから(図-2.3 参照)、ダム数も同様の年数で多い傾向となる。

部位別の整理結果を以下に示す。

・堤体部(上下流面)

評価 B は経過 11～50 年で 1～2 ダムずつ見られる程度で、区分年のピークはなくダム数は少ない。評価 C は経過 21～40 年でそれぞれ 9 ダムとなり、前後の区分年と比べ 5 事例程度多い傾向となるが、これは総合点検実施ダム数が多いことが影響していると考えられる。評価 D は経過 21～50 年でそれぞれ 10 ダム程度となり、経過 11～20 年と比べ 5 ダム程度多い傾向となる。

経過 11～40 年の区分年毎の評価 C,D のダム数は同程度で推移している。一方、総合点検実施ダム数が比較的少ない経過 41～50 年に着目すると、評価 B,C の事例数は少ないものの評価 D の事例数が多く、経過 40 年以前とは異なる傾向となる。

・監査廊部

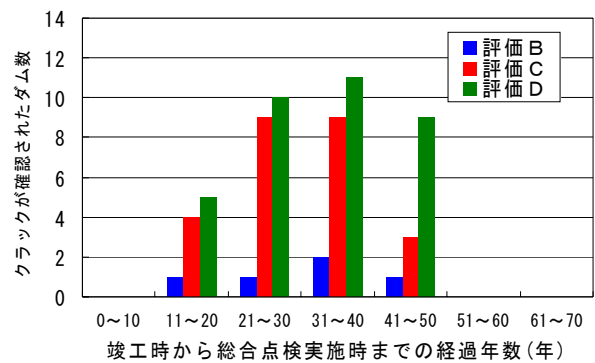
評価 B に該当するダムは見られなかった。評価 C は経過 11～50 年で 3～6 ダムずつ見られる程度で、区分年のピークは生じない。評価 D は経過 21～40 年でそれぞれ 15 ダム程度となり、前後の区分年と比べ 10 ダム程度多い傾向となるが、これは総合点検実施ダム数が多いことが影響していると考えられる。

総合点検実施ダム数が比較的多い経過 21～40 年に着目すると、評価 C に比べ評価 D のダムが約 2.5 倍多い傾向となる。

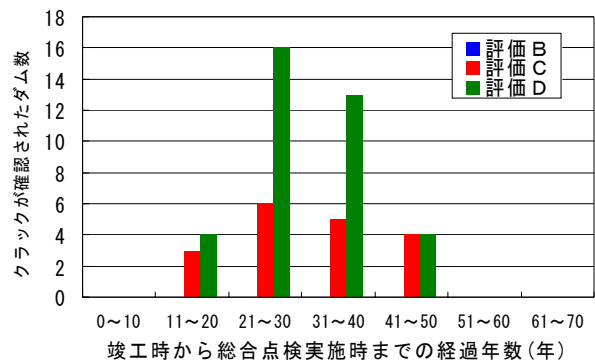
・洪水吐き部

評価 B は経過 41～50 年で 5 ダム、評価 C は経過 11～50 年でそれぞれ 10 ダム程度以上となり、他の部位と比べて事例数が多い傾向となる。評価 D は経過 11～50 年でそれぞれ 6 ダム程度以上である。

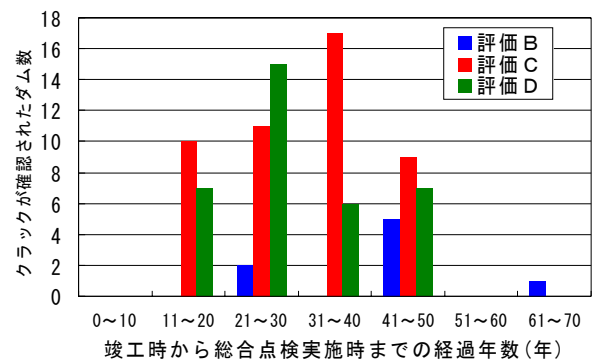
堤体部(上下流面)及び監査廊部は、データ数の偏り等も影響し、経過年数に関する明瞭なピークは生じなかったが、洪水吐き部については、評価 B で経過



(a) 堤体部(上下流面)



(b) 監査廊部



(c) 洪水吐き部

図-4.5 部位別・経過年数別劣化事例数

41～50 年、評価 C で経過 31～40 年、評価 D で経過 21～30 年にダム数のピークが生じ、劣化進行度が高いほど経過年数が大きい傾向となる。これは洪水吐き部が主に鉄筋コンクリート構造であるため、鉄筋の発錆による体積膨張によりクラックが生じていることが原因の一つであり、そのため経過年数と劣化進行度の関係が明瞭に確認できたと考えられる。

4.3.2 劣化進行度予測に関する検討

それぞれの同一ダムにおいて、竣工時からクラック(劣化)発生時期までの経過時間、定点観測によりクラック規模の進展等を管理していれば、これらのデータを用いて劣化進行度の予測を行うことになるが、実状ではこのような計測を継続された事例は見当たらない。

い。したがって、本研究において、総合点検により得られた劣化事例をもとに、本章で述べた評価区分毎・経過年数毎に整理した劣化事例数と総合点検実施時点の経過年数を用いて、クラックの劣化進行度の予測に関する検討を行う。

各評価に達する予測経過年数はパーセンタイル値を用いて算定することとし、中央値となる 50 パーセントの値により設定する（以下、50 パーセンタイル値という）。併せて、15,85 パーセンタイル値（標準偏差±1 σ に相当すると考える）についても算定する。

部位別の劣化進行度予測結果を図-4.6 にまとめ、検討結果を以下に示す。

・堤体部（上下流面）

50 パーセンタイル値による評価 B～D の劣化予測経過年数はいずれも 30 年前後となり、評価区分の差が生じない結果である。また、15 パーセンタイル値は約 20 年、85 パーセンタイル値は 40 年前後となり、50 パーセンタイル値と同様結果である。

・監査廊部

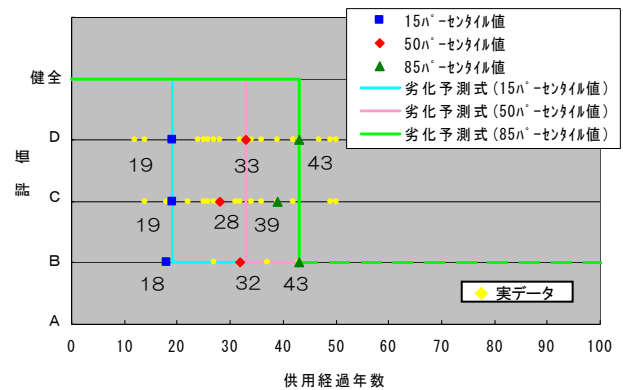
評価 B に該当するデータが無いため、評価 C～D までの予測となる。

50 パーセンタイル値による評価 C～D の劣化予測経過年数はいずれも 30 年となり、評価区分の差が生じない結果である。また、15 パーセンタイル値は 20 年前後、85 パーセンタイル値は 40 年前後となり、50 パーセンタイル値と同様の結果である。監査廊部の劣化進行度は堤体部(上下流面)と同程度の傾向となる。

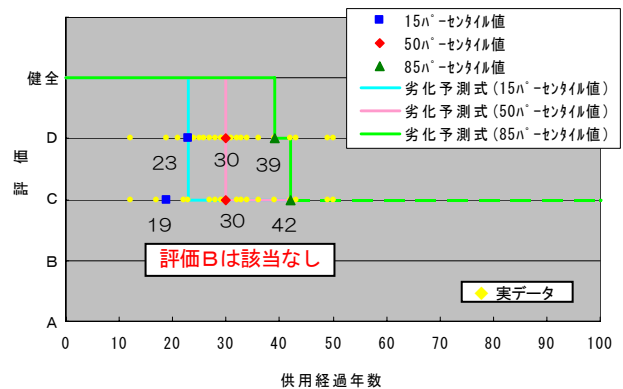
・洪水吐き部

50 パーセンタイル値では、健全な状態から評価 D に移行するのに要する経過年数は 27 年、評価 D から C で 5 年、評価 C から B で 10 年となり、経過年数により評価が移行する傾向が見られる。また、15 パーセンタイル値では、健全な状態から評価 D に移行するのに要する経過年数は 19 年、評価 C は評価 D と同程度の年数となり、評価 C から B で 10 年となる。85 パーセンタイル値では、健全な状態から評価 D に移行するのに要する経過年数は 42 年、評価 D から C で 7 年、評価 B は C より短くなり、D と同程度の経過年数となる。

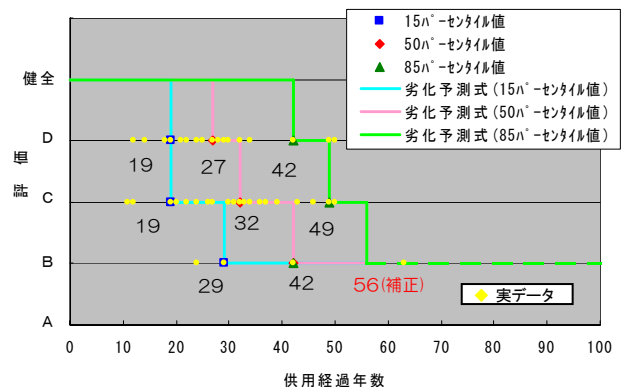
ここで、前述したように、本検討は総合点検実施により得られた劣化事例をもとにしていることから、健全な状態から各評価区分に達する経過年数は、実際の年数に比べて長くなっていると推定される。この課題を解消するためには、総合点検以外のダムの維持管理作業、例えば「定期点検」²⁰⁾の実施内容の拡充により



(a) 堤体部（上下流面）



(b) 監査廊部



(c) 洪水吐き部

図-4.6 部位別劣化進行度予測結果

劣化事象、事例のデータ蓄積を行うこと等が求められる。

5. まとめ

わが国では高度経済成長期である 1960 年代から 1970 年代に建設したダムの数が多く、今後これらのダムが完成後 50 年を超える。そのため、劣化・損傷の状態、分布、ダム機能や安全性への影響度合い等を総合的に調査・点検し、適切な段階で、部分的ないしは根本的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削減を達成できる維持管理が必要となる。

しかし、ダム本体における各種劣化・損傷のパターン、その将来的な劣化・損傷進行度、さらには劣化・損傷進展が安全性の低下に与える影響度合い等を踏まえた、実務的な維持管理技術がないのが現状である。そのため、実際のダムにおける劣化・損傷機構について調査及び類型化し、発生原因とその後の進行についてのメカニズムの分析を行い、ダム本体の安全性に与える影響度分析解析によるダム長寿命化のための維持管理技術を確立する必要がある。これらの維持管理技術をダムの点検に組み込むことにより維持管理の体系化を行い、ダムの長寿命化を図ることができると考える。

今年度は、①国内外のダムの劣化・損傷事例、各ダム点検結果の調査分析、②各種劣化事象を考慮したモデルによるダム本体の安全性の影響度分析解析、③劣化進行予測の一手法の検討を実施した。

①の調査分析では、国内ダムは前年度の調査分析に新たに 25 ダムのデータを加えて延べ 128 ダムについて、劣化事象の整理分析を行った。その結果、堤体部（上下流面）、洪水吐き部では「クラック」、「剥離・剥落」（表面劣化・断面欠損）、監査廊部では「計器・観測値異常」を注目すべき劣化事象として抽出した。また、海外ダムの劣化事象は国内ダムと同様の事例が確認されたことから、国内ダムで得られた知見に新たに加える劣化事象は確認されなかった。

②の安定解析では、①で抽出した 3 劣化事象について、河川管理施設等構造令に準じた擬似静的解析により、せん断、上流端鉛直応力、転倒に対する評価を行った。解析結果より、「表面劣化（断面欠損）」、「計器の劣化」に比べ、「クラック」がダムの安全性に及ぼす影響が大きくなる可能性を有することが分かった。また、クラックの発生標高が低いほど、ダムの安全性が低下する傾向を示すことが確認された。

③劣化進行予測では、②で着目した「クラック」について、まずクラックの発生位置の構造等の違いを考慮して、堤体部（上下流面）、監査廊部、洪水吐き部に分けて、それぞれの劣化進行程度の評価指標 A～D を設定し、各クラックを再評価した。その評価と経過年数の 50 パーセンタイル値を用いて、劣化進行予測の検討を行った。その結果、堤体部（上下流面）と監査廊部は各評価の劣化予測年数が同程度の 30 年となり、明瞭な傾向が生じなかった。また、洪水吐き部は 5～10 年で評価が下方（劣化が進行する方向）に移行する

傾向が見られた。これより、堤体部と監査廊部は経年劣化以外の要因（施工状況、気象状況等）の影響も含めて、劣化が進行すると考えられる。

今後は、補修対策の優先度や点検優先箇所を明確にする方法、及び効率的なダムの安全管理が行えるようにするための基本計測項目・箇所の存続・中止の判断方法を検討のうえ、提案する予定である。これらを実現するために、今年度までに実施した国内外ダムの劣化・損傷事例や総合点検結果等の調査・分析結果を踏まえて、各種劣化・損傷の抽出、発生機構の類型化、及び劣化進行度の評価方法の開発を行う必要がある。また、類型化した劣化・損傷がダムの安全性に及ぼす影響について、劣化・損傷を有するダムの実測挙動解析や数値解析（特に、大規模地震時の解析）によって分析し、定量的に評価する方法の開発が必要であると考える。

参考文献

- 1) 日本大ダム会議ホームページ 日本のダム数（2007 年 12 月 ICOLD ダム台帳・文書委員会提出）
<http://www.jcold.or.jp/dam/dam.html>
- 2) ダム便覧 2009 ホームページ ダム集計表（竣工年別型式別ダム数）
<http://www.soc.nii.ac.jp/jdf/Dambinran/binran/SyuukeiSyunKata/SyuukeiSyunKata.html>
- 3) 財団法人ダム技術センター：ダム総合点検検討業務報告書，1993.3.
- 4) 財団法人国土開発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，pp.95-97，pp.43-47，2000.1.
- 5) 財団法人ダム技術センター：管理提言の判断基準 平成 20 年度改訂（財団法人ダム技術センター：平成 20 年度利根川上流直轄ダム総合点検評価検討業務 報告書，p.6-1，2009.3.より）
- 6) 山口嘉一，林 直良：千年ダム構想実現のためのダム本体の管理・点検に関する研究，平成 20 年度土木研究所成果報告書，2009.4.
- 7) International Commission On Large Dams : Ageing of Dams and Appurtenant Works Bulletin93，1994.
- 8) International Commission On Large Dams : Rehabilitation of Dams and Appurtenant Works Bulletin119，2000.
- 9) United States Committee On Large Dams : Nineteenth Annual USCOLD Lecture Series Dealing with Aging Dams，Atlanta，Georgia，May，1999.

- 10) International Commission On Large Dams :
 QUESTION82 Ageing and Rehabilitation of Concrete
 and Masonry Dams and Appurtenant Works, June
 2003.
- 11) 内田善久, 蓮本清二, 橋本 淳, 新村 亮 : Q.82-R.32
 コンクリートダム着岩部の経年劣化に関する研究, 大ダ
 ム, No.185, pp.51-60, 2003.10.
- 12) 財団法人ダム技術センター編 : 平成 17 年版 多目的ダム
 の建設 第 4 巻 設計 I 編, pp.73-76, 2005.6.
- 13) 岩下友也, 倉橋 宏, 佐々木晋, 山口嘉一, 佐々木隆 :
 コンクリートダムの亀裂分離ブロックにおける地震時挙
 動の個別要素解析, 土木学会地震工学論文報告集 Vol.29,
 2007.8.
- 14) 山口嘉一, 岩下友也, 小堀俊秀, 佐々木晋 : コンクリー
 トダムの地震時終局耐力評価に関する研究, 平成 19 年度
 土木研究所重点プロジェクト研究報告書, 2008.4.
- 15) 国土交通省中部地方整備局 長島ダム工事事務所 : 大井
 川水系 長島ダム工事誌, pp.8-12~8-13, 2004.3.
- 16) 財団法人ダム技術センター編 : 改訂 3 版 コンクリート
 ダムの細部技術, pp.342-344, pp.76-79, 2010.7.
- 17) 国分正胤, 大橋康次, 武居省之, 金岩 明, 村田清逸 :
 コンクリートダム表面部の凍害による劣化の数例, 大ダ
 ム, No.36, pp.31-39, 1966.8.
- 18) 小田島公一, 及川 薫, 伊藤 博, 竹内幸紘 : 遠野ダムの
 堤体老朽化対策について, 大ダム, No.191, pp.27-35,
 2005.4.
- 19) 富田尚樹, 山口嘉一, 佐々木隆, 小堀俊秀 : 重力式コン
 クリートダムの揚圧力計測による安全管理の合理化に関
 する検討, 土木技術資料, Vol.47, No.1, 2005.1.
- 20) ダム管理研究会編著 : ダム管理の実務, 財団法人ダム水
 源地環境整備センター, pp.215-243, 1999.

MAINTENANCE TECHNOLOGY FOR EXTENSION OF LIFESPAN OF DAMS

Budget: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2009-2012

Research Team: Dam and Appurtenant Structures
Research Team, Hydraulic Engineering
Research Group

Authors: Yoshikazu YAMAGUCHI
Tomoya IWASHITA
Hiroyuki SATOH
Toshihide KOBORI
Hiroki SAKAMOTO
Toru KIRINASHIZAWA

Abstract: The total number of the Japanese dams completed increases to about 2,700 by 2009. The period from 1960's through 1970's is the golden age for the construction of the dams in Japan. These dams will greet 50 years old together in the near future. Therefore, we should prepare for the deterioration and the malfunction of these existing dams. For this propose, we should establish the appropriate maintenance technology for existing dams.

In this study, at first, we investigate deterioration in existing dams and the mechanism of damage to dams. Next, we perform analysis of later progress in deterioration and analysis of its sensitivity to the safety of dam bodies and their foundation, considering their seismic performance against large-scale earthquakes. Finally we make a proposal of maintenance technology for extension of lifespan for existing dams.

Key words: dam, extension of lifespan, maintenance, safety management, inspection, repair