

13.6 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：水工研究グループ（構造）

研究担当者：山口嘉一（上席）、金銅将史、
佐藤弘行、小堀俊秀、坂本博紀、切無沢徹

【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。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計画的な維持管理が求められる。また、長期供用ダムにおいては、その安全管理のための各種計測のあり方も重要な検討課題である。ダム管理に携わる実務者が、計測項目・箇所・箇所の存続・中止を的確に判断できるようその考え方を明確化していく必要がある。本研究は、このような課題の解決を目的として実施するものである。

今年度は、次に示す 3 点について検討を行った。①管理ダムで行われた総合点検結果の報告書等に基づく劣化・損傷事象の発生傾向や発生原因について分析した。②クラックや堤体の表面劣化がダムの安定性に及ぼす影響を数値解析により分析するとともに、堤体内部の劣化・損傷の検出するための 1 つの手法として、常時微動計測による方法の適用可能性について基礎的検討を行った。③長期供用ダムにおいて安全管理上計測を継続すべき計測項目や計測箇所の選定の考え方について基本案を作成した。

キーワード：ダム、劣化・損傷、健全性評価、常時微動、安全管理

1. はじめに

わが国では、1900 年以降、およそ 2500 基のダムが建設された¹⁾。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、供用後長期間経過するダムの数が急増しつつある。

このような中、ダム貯水池の堆砂に着目した取組み²⁾やゲート等各種機械設備の点検や維持更新の合理化に関する取組み³⁾が進んでいる。しかし、半永続的にその機能を維持・発揮することを期待して設計・施工されるダム本体に関しては、短期的には劣化・損傷の進行が実感しにくいこともあり、長期供用ダムにおける劣化・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。ダムを極めて長期にわたり安全に供用していくためには、大規模地震による影響を受ける可能性も想定しつつ、ダム本体の将来的な劣化・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想定した計画的な維持管理が求められるが、そのために必要な技術や仕組みが体系的に整備されていないのが現状である。

また、従来よりダムの安全管理を目的に計測されている漏水量等の計測データは、高経年化するダムの健全性

を評価する上で重要な情報となる。しかし、計測設備の老朽化等により計測データの信頼性を維持することが困難となるケースも生じてくる。一方で新規に建設されるダムの減少から、ダムの安全管理上必要なダムの構造に関する技術的知識を必ずしも十分に有しない職員がダム管理の実務を担う例が増えている。ダム管理に携わる実務者のための技術支援として、長期供用ダムにおける安全管理上の基本計測項目・箇所の存続・中止の考え方を明確化していくことも必要である。

本研究は以上の課題を解決することを目的とし、以下に示す 3 つの達成目標を掲げ研究を実施する。

- ① 各種劣化・損傷機構の類型化の提案
- ② ダムの安全性に及ぼす影響度を踏まえた劣化・損傷評価方法の提案
- ③ ダム管理技術者支援のための基本計測項目・箇所選定方法の提案

①に関しては、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事象を抽出した上でその発生機構について類型化する。②に関しては、類型化された劣化・損傷機構がダムの安全性に及ぼす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ことで、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を明確化する。③に関しては、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、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る。

平成 23 年度においては、上記①に関し、過去に実施された管理ダムの総合点検結果の報告書⁴⁾等に基づき各種劣化・損傷事象の発生状況等を調査分析した結果をとりまとめるとともに、ダム堤体の劣化・損傷機構の類型化に向けた検討として、確認された劣化・損傷事象と推定される発生原因との関係などについて分析した。②に関しては、ダム本体の劣化・損傷がダムの安全性に及ぼす影響を定量的に評価するため、堤体内クラックの存在や表面劣化を想定した場合の地震時応答への影響を数値解析により分析した。また、平常時における劣化・損傷の検出手法の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基礎的検討を行った。③に関しては、漏水量など安全管理のための計測について長期供用ダムにおいても計測を継続すべき計測項目や計測箇所の選定の考え方について基本案を作成した。

2. 劣化・損傷機構の類型化に向けた検討

2.1 各種劣化・損傷事象の調査・分析

2.1.1 概要

国土交通省が管理するダムと都道府県が管理する洪水調節を目的に含むダムでは、これまで、必要に応じ、ダムの安全性や機能について総合的に点検し、評価を行う「総合点検」⁴⁾を実施している。総合点検では、「河川管理施設等構造令」⁵⁾等ダムの設計に関する現行基準類との関係、維持・管理の記録、及び現地調査に基づくダム本体の施設点検やゲート関連設備も含めた機能点検が行われる。そして、実施時点におけるダム施設の安全性や機能に対する評価、今後必要と考えられる対応とその優先度など、ダム管理に対する各種の提言などが行われる。このため、本検討では具体的な劣化・損傷事象の発生例や対応の必要性・優先度に関する一定の技術的評価が示された資料として、総合点検結果の報告資料をもと

に分析を行うこととした。

分析対象としたダムは、総合点検が開始された 1984 年(昭和 59 年)から 2010 年(平成 22 年)までに総合点検が実施された計 119 ダムである。なお、総合点検を 2 回実施しているダム (10 基)があるため、これを考慮すると、延べ 129 ダムとなる。ダム型式等の内訳を総合点検実施時の供用年数及び竣工年別にそれぞれ表-2.1.1 及び表-2.1.2 に示す。

ダム型式別ではコンクリートダムが大半である。これはフィルダムのうち比較的新しい型式であるロックフィルダムの点検事例が少ないことや、これまでの総合点検が基本的に洪水調節を目的に有する堤高 15m 以上のダムについて実施されており、該当するアースフィルダムが少ないことによる。

フィルダムについては、コンクリート構造であるコンクリート表面遮水壁型フィルダムの表面遮水壁部や洪水吐部を対象に含めた。なお、コンクリートダムも含め、減勢工部は対象から除いた。

竣工年別では、高度経済成長期を含む 1950 年代から 1970 年代に建設されたものが多く、87%を占める。総合点検実施時における竣工後経過年数では、20~40 年のダムが 72%を占める。

2.1.2 劣化・損傷事象の抽出

分析対象ダムの総合点検結果の報告資料から、現にコンクリートダムの堤体などにおいて発生が報告された劣化・損傷事象を抽出した。なお、特に構造面から堤体の安定性に影響する可能性のある事象が含まれるように抽出する観点から、浅部の岩盤も含む堤体基本三角形断面に見られた事象を対象とし、減勢工や天端構造物、放流設備のゲートなどの管理設備に関する事象は含まないこととした。その結果、表-2.1.3 及び表-2.1.4 に示す 9 つに分類される事象が抽出された。表-2.1.3 中には、各事象についてダム堤体の安定性への影響について考えられる一般的事項も記載している。

なお、「(9) その他の異常」は、安全管理用の各種計器の不具合や計器に不具合は見られないものの、計測値に何らかの異常が認められたものである。したがって、ダム本体の直接的な劣化・損傷事象を確認したものではない。しかし、劣化・損傷に伴う異常の有無が検知困難となったり、間接的に何らかの異常の兆候を捉えている可能性を考慮する必要を生じたりするものである。このため、劣化・損傷事象に準じた事象として分析に加えた。

表-2.1.1 調査対象ダム内訳（点検時供用年数別）

点検時供用年数 ダム型式		～10年	11～20	21～30	31～40	41～	計 (%)	備考
コンクリート ダム	重力式	0	16	43	37	13	109 (84.5)	重力アーチ式 を含む
	中空 重力式	0	2	0	2	0	4 (3.1)	
	アーチ式	0	3	7	1	1	12 (9.3)	
フィルダム	ロック フィル	0	0	1	1	0	2 (1.6)	コンクリート 表面 遮水壁部
		0	1	0	0	0	1 (0.8)	洪水吐部 コンクリート
	アース フィル	0	0	1	0	0	1 (0.8)	
計(%)		0 (0)	22 (17.1)	52 (40.3)	41 (31.8)	14 (10.8)	129 (100)	

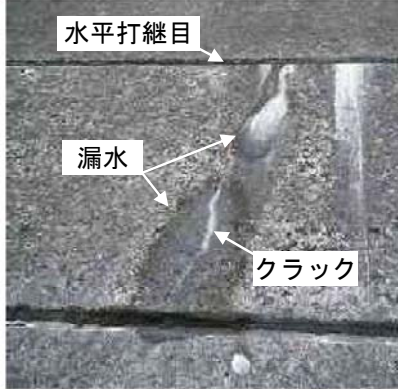
表-2.1.2 調査対象ダム内訳（竣工年別）

竣工年 ダム型式		～ 1950	1951～ 1960	1961～ 1970	1971～ 1980	1981～ 1990	1991～ 2000	2001～	計 (%)	備考
コンクリートダ ム	重力式	3	39	33	25	7	2	0	109 (84.5)	重力アーチ式 を含む
	中空重力式	0	1	3	0	0	0	0	4 (3.1)	
	アーチ式	0	2	8	1	1	0	0	12 (9.3)	
フィルダム	ロック フィル	0	1	1	0	0	0	0	2 (1.6)	コンクリート 表面 遮水壁部
		0	0	0	0	0	1	0	1 (0.8)	洪水吐部 コンクリート
	アース フィル	0	0	0	0	1	0	0	1 (0.8)	
計(%)		3 (2.3)	43 (33.3)	45 (34.9)	26 (20.2)	9 (7.0)	3 (2.3)	0 (0.0)	129 (100)	

表-2.1.3 総合点検結果報告書に記載のある劣化・損傷事象等の分類

事 象	主な発生（報告）箇所	堤体の安定性などへの影響
(1)クラック	堤体部 （マスコンクリート部）	・材料や環境条件に起因する表層付近のクラックは、直ちに堤体の安定性に影響を及ぼす可能性は少ないが、凍結融解作用を受ける寒冷地のダムなどでは、長期間放置すれば劣化が進み、将来的に堤体の安定性に影響を及ぼす可能性がある。 ・施工に起因するクラックの内、深部に及ぶものや上下流に連続するものは、堤体の安定性に重大な影響を及ぼすおそれがある。 ・地震によるクラックは極めて強い地震動により発生したり、既往クラックを進展させたりすることで、堤体の安定性を低下させるおそれがある。
	監査廊部、洪水吐き部 （鉄筋コンクリート部）	・放置すると、鉄筋の腐食を促進させ、かぶりコンクリートの剥離・剥落により安全性の低下や機能面での支障が生じるおそれがある。
(2) 継 目 の 開 き・ずれ	横継目 （堤体上下流面・監査廊）	・時間の経過とともに相対変位が顕著に増加する場合、堤体の安定性に重大な影響が生じるおそれがある。 ・相対変位の顕著な増加が見られない場合でも、止水板の損傷などにより管理上の問題となることがある。
(3) 漏水	横継目 （堤体下流面・監査廊）	・止水面で管理上の問題となる可能性がある。なお、重力式コンクリートダムの場合、堤体の安定性に影響するおそれは低い。
	堤体下流面（横継目以外）	・堤体の水平打継目の付着性の問題に起因する漏水の場合、堤体の安定性に重大な影響が生じるおそれがある。
(4)排水異常	基礎排水孔	・漏水の濁りや砂・泥分などの流出が孔壁の崩れによる場合、放置により基礎排水孔の閉塞が生じれば揚圧力が増加し、堤体の安定性に影響を及ぼすおそれがある。 ・地震時などに漏水の顕著な増加や濁りが発生し継続する場合、基礎岩盤内のパイピングにより、堤体の安定性に重大な影響を及ぼすおそれがある。
	監査廊内 （基礎排水孔以外）	・監査廊床面などに見られる水たまりが、基礎排水孔や継目部からの漏水の顕著な増加に起因する場合、堤体の安定性に影響を及ぼす問題が生じていないか注意を要する。 ・排水溝内の塵芥や排水機器の不具合が原因で水たまりなどが生じている場合、堤体の安定上問題となる可能性は低い管理上問題となることがある。
(5)遊離石灰	堤体コンクリート表面、 監査廊内	・遊離石灰の析出自体が、直接に堤体の安定性に影響するおそれは低い。
	基礎排水孔	・目詰まりによる揚圧力がダム本体の安定性に影響を及ぼすおそれがある。
(6)鉄筋露出	監査廊・洪水吐きピア部 など	・放置すれば、鉄筋の腐食が加速し破断に至ることで、構造体の強度を低下させるおそれがある。
(7)摩耗	洪水吐き越流部	・断面減少により堤体の安定性に影響を及ぼす可能性があるが、通常はそれ以前に機能面で不具合が生じる。
(8)剥離・剥落	堤体部 （マスコンクリート部）	・ただちに堤体の安定性に影響を及ぼす可能性は低い、放置することで断面欠損などが生じれば影響を及ぼす可能性がある。
	監査廊部、洪水吐き部 （鉄筋コンクリート部）	・構造体の強度や施設の機能を低下させるおそれがある。
(9)その他の異常（計器不具合・計測値異常など）	漏水量・揚圧力・変形量の計測設備、及び計測値など	・計器不具合は、直接は堤体の安全性に影響しないが、劣化・損傷の発生・進行に伴う安全性低下の兆候を検知する上で支障となる。 ・計測値異常は、ダムの劣化・損傷の発生・進行に伴う安定性低下の兆候である可能性がある。

表-2.1.4 総合点検結果報告書に記載のある劣化・損傷事象の例

 クラック (遊離石灰を伴う) クラック(監査廊内)	 開口 下流面 継目の開き・ずれ(横継目)	 水平打継目 漏水 クラック 漏水(堤体下流面)
 排水異常 (基礎排水孔からの流出物)	 揚圧力計測器 遊離石灰 遊離石灰 (基礎排水孔内)	 鉄筋 鉄筋露出 (洪水吐きピア部)
 摩耗箇所 摩耗 (洪水吐き越流部コンクリート)	 剥離 剥離・剥落 (堤体下流面)	 その他の異常 (計器異常, 三角堰への遊離石灰付着)

注) 写真は、各ダム総合点検結果報告書からの引用等による

2.1.3 各種劣化・損傷事象の発生傾向の分析

(1) 総合点検結果報告書の評価区分による分析

ダムの総合点検では、表-2.1.5 に示す定性的な評価指標（基本指標 A、B、C など）を用いて各点検項目に関する点検結果に対する評価がなされ、対応方法や対応時期に係る提言とともに示されている。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。

ここでは、分析対象とした延べ129ダムの総合点検結果について、報告された各劣化・損傷事象別の進行度合いや発生箇所の傾向を把握するため、まず各事象について報告資料に示されている上記の評価指標（A、B、Cな

ど)の傾向を分析することとした。なお、総合点検が開始された初期の報告では、表-2.1.5のような評価指標での評価が行われていないため、報告資料の記載内容を表-2.1.5の評価指標の定義を照らし、最も該当すると思われる評価値を便宜的に設定した。また、複数の劣化・損傷事象が原因となり劣化・損傷が発生している事例については、該当する劣化・損傷事象をすべて計上する。

表-2.1.5 総合点検の評価指標⁴⁾より作成

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以内にダム本体やゲート等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) 将来実施の可能性がある。
ー 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、「ー」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) 将来実施の可能性がある。

注1) 1984年度(昭和59年度)～1993年度(平成5年度)の実施ダムにおいては、上表に示す評価指標に基づく評価が行われていない。

注2) 1994年度(平成6年度)～1999年度(平成11年度)頃の総合点検は、上表のうち、基本指標の判定のみ実施され、対応方法・対応時期の評価は実施されていない。

注3) 評価「ー」は、1997年度(平成9年度)以降の総合点検において追加されている。

表-2.1.5に示す評価区分により総合点検結果報告書に記載のある各劣化・損傷事象の報告件数を分析した結果は以下の通りとなった。

① 評価「A」該当事象(図-2.1.1)

分析対象ダムの総合点検において報告された各種劣化・損傷事象のうち、最も対策の優先度が高い評価「A」に該当するものは計17件であった。事象別報告件数は「漏水」が最も多く6件で、堤体下流面、監査廊内などで報告されている。次いで多いのは、いずれも監査廊内における「その他の異常(計器不具合・計測値異常)」

(4件)や「排水異常」(3件)である。なお、前者は揚圧力計測値の異常、揚圧力計・三角堰の破損など、後者は主に基礎排水孔からの流出物(鉄さび)の発生といった内容である。

② 評価「B」該当事象(図-2.1.2)

評価「A」に次いで対策の優先度が高い評価「B」に該当する劣化・損傷事象の報告件数は、評価「A」に比べて大きく増加し、計89件であった。事象別で見た特徴は、「漏水」の件数が多い(19件)のは評価「A」と同様であるが、評価「A」に該当するものがなかった下流面や洪水吐きにおける「クラック」(10件)や「剥離・剥落」の報告件数(9件)が多く見られることである。

③ 評価「C」該当事象(図-2.1.3)

ただちに対策をとる必要はないが、今後問題が生じるおそれがある評価「C」に該当する劣化・損傷事象の報告件数は、評価「B」に比べさらに大きく増加し、計340件であった。評価「A」や「B」と同様、漏水の報告件数が多い(86件)が、「クラック」(129件)や「剥離・剥落」(35件)の報告件数がさらに大きく増加していること、「遊離石灰」の報告件数も比較的多い(42件)ことが特徴である。これらの事象の中には、現状(総合点検時点)では大きな問題となっていなくても、長期にわたり放置した場合、徐々にダムの安定性に影響するおそれのあるものも含まれていると考えられる。

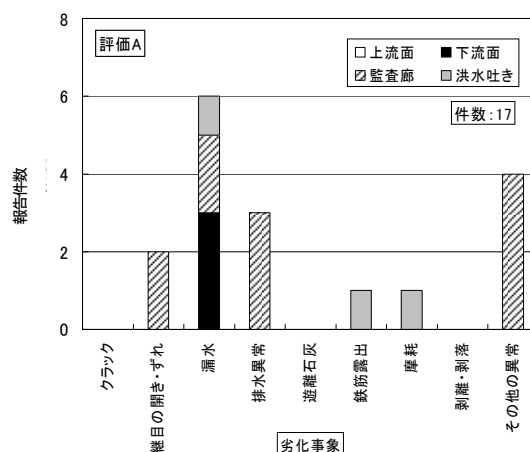


図-2.1.1 評価Aに該当する劣化・損傷事象の報告件数

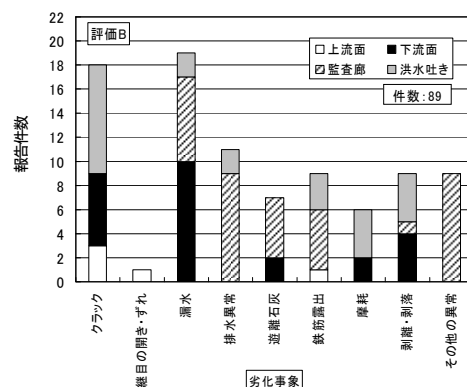


図-2.1.2 評価Bに該当する劣化・損傷事象の報告件数

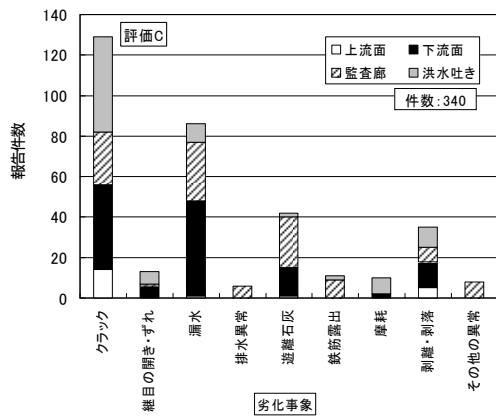


図-2.1.3 評価Cに該当する劣化・損傷事象の報告件数

(2) 竣工後の経過年数による分析

ダム竣工から総合点検実施時点までの経過年数に応じて劣化・損傷事象の発生傾向に違いがあるかを見るため、表-2.1.5 の評価区分によらず何らかの報告があった事象の発生傾向をダムの経過年数別 (10 年毎) に図-2.1.4 に整理した。なお、1つのダムで複数の劣化・損傷事象の報告がある場合、表-2.1.3 に示す9つの事象のうち同種のものはまとめて1件とし、同種でない事象 (例えばクラックと漏水) は同一の箇所で確認・報告されているものあってもそれぞれ1件として計上した。

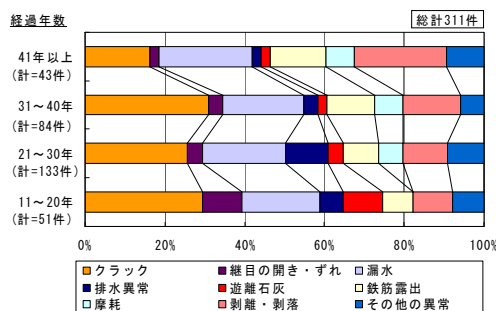


図-2.1.4 供用年数ごとの劣化・損傷事象の報告件数の比率

図-2.1.4 より、コンクリートの剥離・剥落や鉄筋露出、摩耗といった事象も経過年数が長いダムほど増加傾向にあることがわかる。全体的に件数の比率が大きいのはクラックや漏水であるが、その報告件数の比率は経過年数の増加に対して増大する傾向は見られない。ただし、図-2.1.4 では同一ダムでの同種の事象の報告は1件として計上しているため、クラックや漏水を含む各事象の延べ発生箇所数の内訳 (比率) は読み取れない。次に、供用年数の増加に伴い事象が進行する傾向があるかどうかを見るため、報告件数の多いクラックと漏水に着目して、総合点検報告書での評価区分別内訳の経過年数による傾

向を分析した。その結果を図-2.1.5、図-2.1.6 に示す。

① クラック

経過年数が 20 年を越えるダムでは、経過年数が長いほど何らかの対策を必要とするクラックが確認される割合が高くなる傾向が見られる。一方で、経過年数が 20 年以下のダムでも、半数以上のダムで今後対策を必要とするクラックが確認されている。これは、経過年数の増加とともにクラックが発生、進行することに加え、施工時の問題などに起因する初期欠陥によるクラックが一定数含まれているためと考えられる。

② 漏水

クラックの場合と同様に、経過年数が 20 年を越えるダムでは経過年数が長いほど、何らかの対策を必要とする漏水が確認される割合が高くなる傾向が見られる。一方で、経過年数が 20 年以下のダムでも、一定数のダムで今後対策を必要とする漏水が確認されている。これも、経過年数の増加とともに漏水の問題が生じていることに加え、初期欠陥に起因するものも含まれているためと考えられる。

なお、一般にクラック箇所は水みちとなって漏水の発生原因となりやすいと考えられるが、上記のように両者に類似の傾向が見られることから両事象間には一定の関係があるものと推察できる。

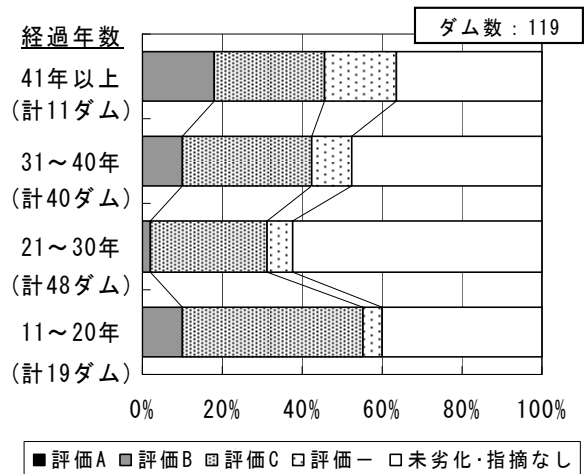


図-2.1.5 経過年数区分別の劣化・損傷事象の報告件数とその評価指標別内訳 (クラック)

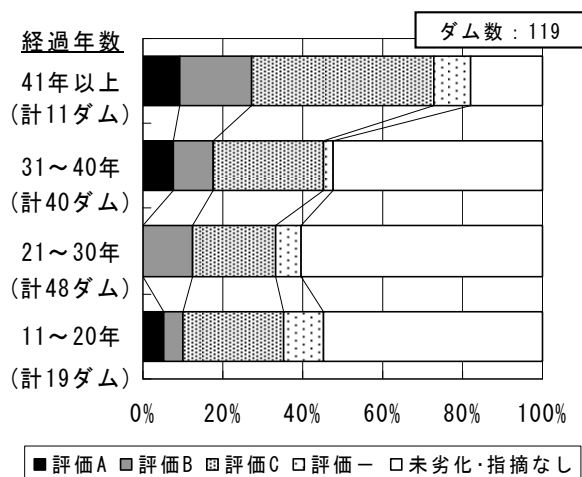


図-2.1.6 経過年数区分別の劣化・損傷事象の報告件数とその評価指標別内訳（漏水）

2.2 クラックに着目した発生傾向の分析

2.2.1 概要

2.1.3 の分析において、総合点検においてダム竣工後の経過年数によらず報告件数の比率が多い事象としてクラックや漏水が挙げられた。これらの事象は同一ダムで複数箇所報告されていてもそれぞれ1件として計上したが、実際には複数の箇所でも報告されているダムも少なくない。また、その発生箇所や形態も様々である。

一方、コンクリートダム本体に発生するクラックは、同様に多数の報告例がある漏水の原因にもなりうる。また、表面から徐々に進行する剥離・剥落や摩耗などの事象と異なり、地震などの外力を受ければ急激に進展する可能性もあり、大規模なものとなればダム堤体等の安定性に影響を及ぼすおそれもある。

これらのことから、ここでは、表-2.1.3 に示した各事象のうちクラックに着目し、特にコンクリートダム堤体で確認されたケースを対象に、その発生傾向をさらに詳細に分析することとした。本詳細分析対象は、前節の調査・分析の対象とした総合点検実施ダム（延べ129ダム）の内、コンクリートダム（延べ125ダム）である。なお、これとは別に、必要に応じてコンクリートダムのクラック発生状況に関する調査資料として、堤体補修に際してクラック調査が行われた事例に関する資料⁶⁾（計

9ダム）及び最近竣工したコンクリートダムにおける試験湛水に際してのクラック調査資料（計6ダム）も参照した。

2.2.2 クラックの分類及び分析の方法

各ダムの総合点検において確認されたクラックのうち、ダム堤体に発生が確認されているものについて、表-2.2.1 に示す整理項目（発生部位、発生形態（方向、形状）及び推定される主な発生原因）に従って分類した。なお、総合点検結果報告書におけるクラックの記載は点検の実施年代により差がある。初期の総合点検ではダムの構造安定上または管理上注意が必要なものに限って抽出されているのに対し、近年総合点検を実施したダムでは確認されたほとんどのクラックについて記載している場合がある。このため、クラックの報告件数に着目した分析では、個々のダムの総合点検報告書に記載のあるクラックの中から、表-2.2.1 に示す各整理項目での分類の組合せにより、それぞれ異なる分類となるクラックの中で最も規模の大きいものを「発生部位・形態毎に見た代表クラック」として抽出した。また、これとは別に、個々のダムの総合点検結果報告書に記載のあるクラックの中から、その評価区分での評価値が最も厳しいもの（A, B, C, -の順）を「評価区分でみた代表クラック」として抽出した。したがって、以降の分析におけるクラックの「件数」は報告されたクラックの「本数」を意味しないことに注意を要する。

なお、クラックの規模の指標としては長さ、開口幅、深さの3要素が考えられる。このため、クラックの規模に関する分析では、発生箇所、発生形態及び推定される発生原因が同一でも、長さ、開口幅、深さのいずれかが最大となるものをそれぞれ抽出している。

また、クラックの発生部位・形態と発生機構との関係性について把握するため、推定される発生原因（総合点検結果の報告書に記載のあるもの）について合わせて整理した。さらに、クラックと他の事象の関連性を把握するため、クラック発生が報告されている箇所において漏水など他の劣化事象（漏水、遊離石灰、剥離・剥落、鉄筋露出、摩耗等）が報告されているものについて、事象の種類や報告件数を整理した。

表-2.2.1 総合点検で確認されたクラックに関する情報の整理方法

整理項目	分類	
	大分類	詳細分類
発生部位	堤体部	上・下流面及び堤頂部。 洪水吐き部を除く
	監査廊部	監査廊内の床面、側壁部、天井部
	洪水吐き部 (マスコンクリート部)	越流部、導流部などの無筋コンクリート部
	洪水吐き部 (RC部)	門柱部、導流壁部などのRC構造部
発生形態 (方向、形状)	水平方向、鉛直方向、斜め方向、網目状、不規則	
推定される主な発生原因	設計・施工に起因するもの	温度応力、乾燥収縮、その他・不明
	経年劣化に伴うもの	凍結融解作用、反応性骨材、摩耗、その他・不明

2.2.3 クラックの発生傾向に関する分析結果

(1) 発生部位

クラックの発生部位別の報告件数の内訳を表-2.2.1の分類（大分類及び詳細分類）に基づき整理した結果を図-2.2.1に示す。各部位ともコンクリート面に発生したクラックが最も多い。また、堤体部及び洪水吐き（マスコンクリート部）では、コンクリート面に次いで水平打継面のクラックが比較的多い。

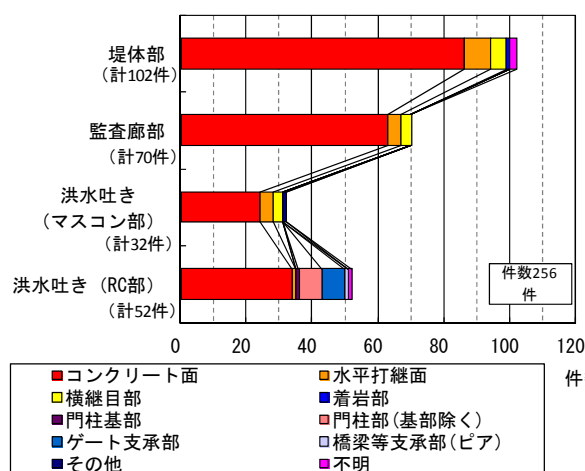


図-2.2.1 クラックの報告件数（発生部位別）

(2) 発生形態（方向、形状）

各部位とも報告件数が多いコンクリート面で発生したクラックについて、その発生形態（方向、形状）別報告件数の内訳を表-2.2.1の分類に基づき整理した結果を図-2.2.2に示す。同図より、「発生部位・形態毎にみ

た代表クラック」の報告件数としては、堤体部のコンクリート面に発生したクラックは鉛直方向のものが最も多いことがわかる。監査廊部も同様である。なお、洪水吐き（マスコンクリート部）ではコンクリート面に発生したクラックは水平方向の報告件数が多い。また、洪水吐きRC部のコンクリート面は斜め方向が最多である。これは堤体下流面上の導流壁に下流面と直交方向に生じたクラックが多く計上されているためである。

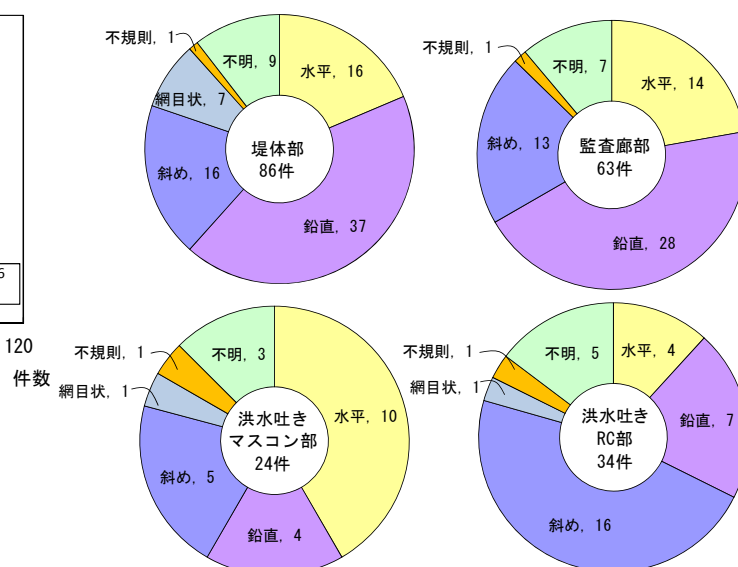
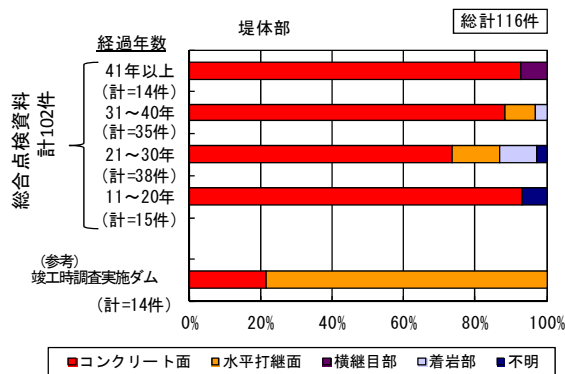


図-2.2.2 クラックの報告件数（コンクリート面、発生形態（方向、形状）別）

(3) 竣工後の経過年数による傾向（発生部位）

各ダムでの総合点検で報告されたクラックの発生部

位（表-2.2.1の詳細分類）ごとの内訳を竣工後の経過年数（10カ年毎）別に整理した結果のうち、表-2.2.1の「堤体部」についての結果を図-2.2.3に示す。同図中には比較のため、最近竣工したダムでのクラック調査により試験湛水開始前に確認されたクラックについて同様の整理を行った結果も参考として示している。これより、クラックの報告件数は供用中ダムでは竣工後の経過年数によらずコンクリート面に発生したものが大半であるのに対し、竣工したばかりのダムでは水平打継面に発生したクラックの報告件数が多いことがわかる。後者のクラックは明らかに施工中に発生した事例と考えられること、また最近の試験湛水前調査では供用中ダムでは視認困難な堤体上流面のクラックや微細なクラックも含めかなり詳細な調査が行われていることを考慮すると、長期供用ダムでも未報告の同種のクラックがある程度存在する可能性を考えておく必要がある。

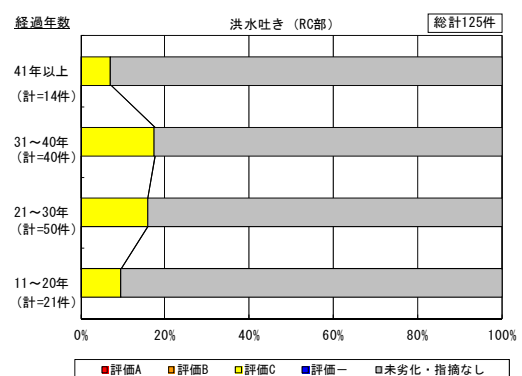
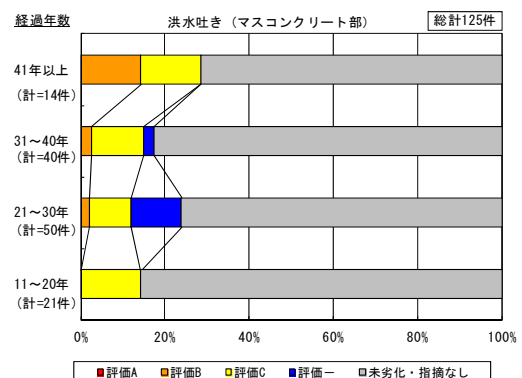
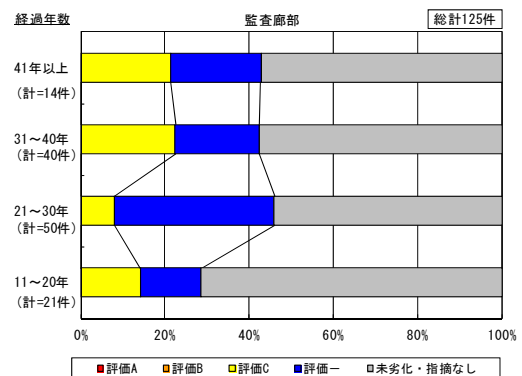
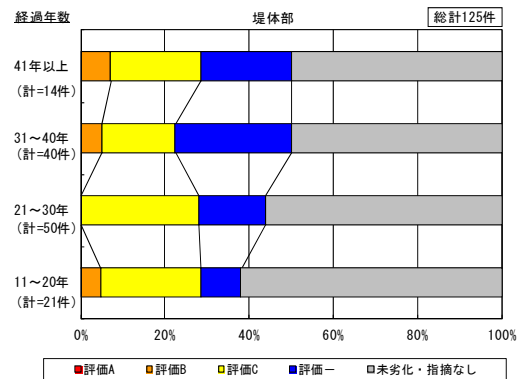


堤体部（詳細発生部位別）

図-2.2.3 竣工後の経過年数別クラックの報告件数

(4) 竣工後の経過年数による傾向（評価区分）

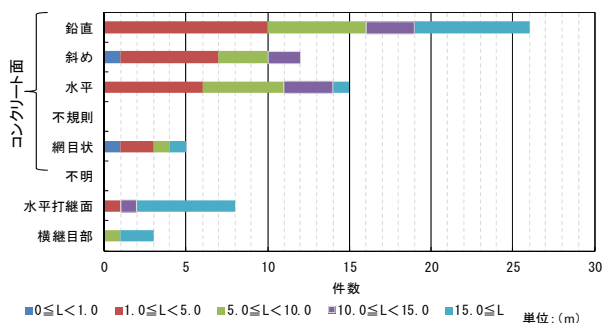
総合点検で報告されたクラックの評価区分（A, B, C, ー）別内訳の経過年数による傾向については既に図-2.1.5に示したが、その発生部位（表-2.2.1の大分類）毎の内訳を図-2.2.4に示す。各部位とも緊急に対策を要する評価区分Aのクラックは報告がないが、堤体部や洪水吐きのマスコンクリート部では僅かながら供用開始からの経過年数とともに報告されるクラックの評価区分が上昇（進行）する傾向にある。一方、監査廊部では経過年数による違いは見られない。これは外気に触れず環境変化による影響を受けにくいと考えられる。

図-2.2.4 竣工後の経過年数別クラックの報告件数
（堤体部、詳細発生部位別）

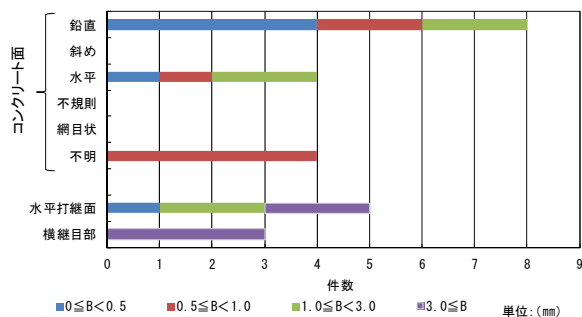
(5) クラックの規模

各ダムの総合点検において堤体や洪水吐きのマスコンクリート部でその発生が報告されたクラックのうち、「発生部位・形態毎にみた代表クラック」のうち、その規模（長さ、開口幅）の記載のあるものについて、整理した結果を図-2.2.5に示す。

クラックの長さでは、10m 以下が約 60%となり半数以上を占めるが、最大で 55m と非常に長い事例も見られる。これは水平打継面のクラックで、主に長期放置リフト面沿いに生じたものであると考えられる。クラックの開口幅では、その記載のある件数は限られるものの、コンクリート面に発生したクラックは、開口幅 1mm 以下のものが大半を占めること、水平打継面に発生しているものは 1mm 以上の比較的大きな開口幅のものの割合が大きくなることがわかる。なお、クラック深さについては、計測数が少ないため、ここでは分析対象としなかった。



(a) 長さ



(b) 開口幅

図-2.2.5 クラックの規模（発生部位・発生形態別）

2.3 クラックの発生機構に関する検討

2.3.1 クラックの発生原因の調査

長期供用ダムで見られるクラックの発生機構を把握するため、まず 2.1 及び 2.2 の分析に用いた総合点検報告書に記載がある各種クラックを対象に、その発生原因の推定に関する記述を調査した。

(1) 調査結果の概要（全体的傾向）

総合点検報告書でのクラック発生原因に関する記述

の調査結果を図-2.3.1 に示す。全体のクラック報告件数のうち発生原因について推定した何らかの記述があるものは 15%程度であった。推定された発生原因の主なものは、主として設計・施工に起因するものとして「温度応力」と「乾燥収縮」、経年的劣化に関わるものとして「凍結融解作用」、「反応性骨材」及び「流水等による摩耗」であった。このうち、件数としては温度応力によるものが最多であり、次いで凍結融解作用によるものが多い。なお、発生原因に関する記述が無いケースが全体報告件数の 85%程度あるが、この中には発生原因が特定困難な場合と原因が明らかであったり、ダムの安全性に問題を生じるものとして特に注意すべきものではないとの判断から、敢えて発生原因の推定に関する記述をしていない場合の両方のケースが考えられる。

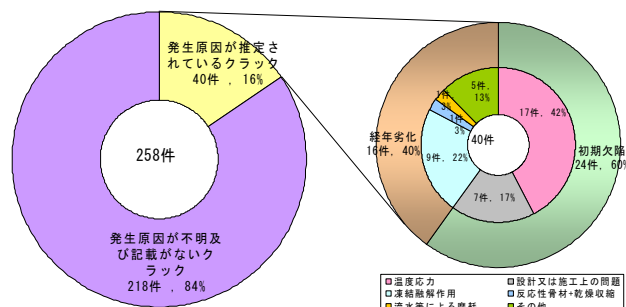


図-2.3.1 総合点検報告書におけるクラック発生原因に関する記述

(2) クラックの発生部位・発生形態と発生原因の関係

総合点検報告書に推定される発生原因について記述があったクラック（計 40 件）について、表-2.2.1 に示した発生部位に推定される発生原因の内訳を整理した結果を図-2.3.2 に示す。これより、報告されたクラックについて推定される発生原因としては「温度応力」や「凍結融解」が多く、その他初期欠陥に相当する設計・施工上の問題によると推定されるものがあることが分かる。なお、少数ながら反応性骨材や流水による摩耗としているケースがあった。また、「その他」には、縦断勾配が急な着岩部付近での応力集中によるクラック、天端橋梁上部工からピアに作用する荷重によるクラックなどと推定されたケースが含まれる。次に、特に堤体部において報告されたケース（計 21 件）について、推定される主な発生原因と発生部位・発生形態の相関を表-2.3.1 に示す。これより、設計・施工に起因するものとして推定された発生原因の代表的なものは「温度応力」であり、コンクリート面に鉛直に見られたクラックはすべて温度応力が原因として推定されていることがわかる。また、経

年的な変化によるものとして推定された発生原因の代表的なものは「凍結融解」であり、コンクリート面に水平、斜め、鉛直、網目状、など各種のクラックがこの原因によると推定されていることが分かる。

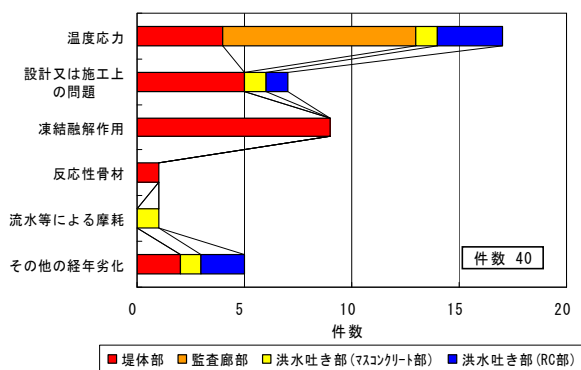


図-2.3.2 クラック発生原因（発生部位別）

表-2.3.1 堤体部クラックの発生原因と発生部位・発生形態の関係（総合点検報告書に推定原因の記載のあるもの）

発生部位・発生形態		コンクリート面					水平打ち継ぎ面	横継ぎ面	その他
発生原因(推定)		水平	鉛直	斜め	網目状	不規則			
設計又は施工に起因するもの	温度応力	0	4	0	0	0	0	0	0
	その他	2	1	0	0	0	0	0	2
経年劣化に伴うもの	凍結融解作用	1	3	2	3	0	0	0	0
	反応性骨材	0	0	1	0	0	0	0	0
	流水等による摩耗	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	0	1	0	1	0	0	0	0

2.3.2 クラックに関連する他の劣化・損傷事象

総合点検報告書では、クラックの発生が報告されている箇所において、クラックに関連する可能性のある他の劣化・損傷事象（以下「クラック関連事象」または「関連事象」という）が複合的に発生している事例も少なくない。このような事例の発生傾向を分析した。なお、できるだけデータ数を多く確保するため、総合点検結果報告書（延べ129ダム）に加え、堤体補修に際して詳細なクラック調査が行われた事例に関する資料⁶⁾にあるダム（9ダム）の事例も分析対象に加えた。

(1) クラック関連事象の種類

クラック関連事象の内訳をその発生部位別に図-2.3.3に示す。複数のクラック関連事象が同時に確認された事例はそれぞれ計上した。また、関連事象の発生の有無が不明なクラックは除外した。

図-2.3.3に示すとおり、各部位とも大半のクラック発生箇所では何らかの関連事象が同時に報告されている。このうち、漏水は約20%で報告されており、過去に漏水が生じていた形跡である遊離石灰の発生が報告されてい

る事例を加えるとかかなりの比率になる。少量の漏水はそれ自体ただちにダム堤体の安定性を損なうものとはならないが、寒冷地のダムでは、クラック内の水が凍結・融解を繰り返すと周辺のコンクリートの劣化を助長するおそれがあり、長期的には注意すべき事象である。

また、堤体部など外気に晒される部位ではクラック周辺コンクリートの約10%で剥離・剥落が報告されている。洪水吐きのRC部では少数ではあるが鉄筋露出の事例も見られる。一方、環境変化を受けにくい監査廊部ではクラックからの漏水の報告はあるが剥離・剥落等の報告はほとんどない。

これらのことから、ダム堤体等のコンクリート部における劣化・損傷事象の発生・進行には、クラックに起因する漏水や気温等の環境変化作用が密接に関係していると考えられる。

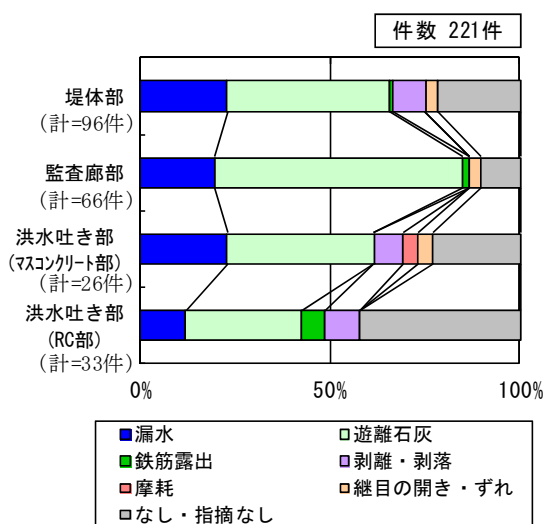


図-2.3.3 クラック関連事象の内訳（発生部位別）

(2) 竣工後の経過年数による傾向

堤体部及び洪水吐き（マスコンクリート部）について、竣工後の経過年数別にクラック関連事象の報告割合を整理した結果を図-2.3.4に示す。経過年数が長いダムほど漏水の発生割合が徐々に増加する傾向があることがわかる。一方、20年未満のダムでも一定の割合でクラックからの漏水が見られる。図-2.1.5に示したようにクラックは比較的早い時期に総合点検を実施したダムでも一定の報告件数がある。よって、クラック関連事象としての漏水は、経年的な劣化・損傷の進行により発生するものだけでなく、施工に起因するクラックを通じて供用開始後初期の頃から発生しているケースも少なくないと考えられる。

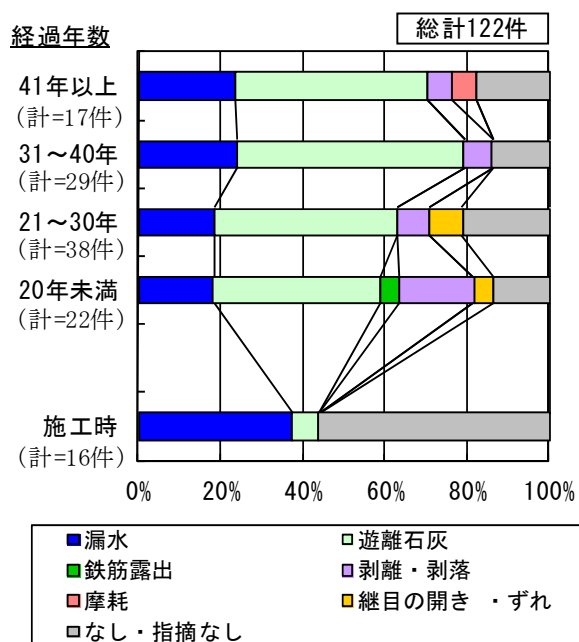


図-2.3.4 竣工後の経過年数別クラック関連事象の内訳 (堤体部と洪水吐き (マスコンクリート部) の合計)

2.4 ダム本体の劣化・損傷機構と代表的なクラック

2.3 において長期的に劣化・損傷が進行した場合にダムの安全性に影響を及ぼすおそれのある事象として、ダム堤体等に見られるクラックとその関連事象に着目し、その発生傾向を調査・分析した。その結果、2.1.2 において抽出した各種の劣化・損傷事象はクラックに起因すると考えられるものも少なくないことがわかった。これまでの検討から、ダム堤体等で見られる代表的なクラックについて、長期的な劣化・損傷機構との関係や堤体の安定性に及ぼす影響について整理する。なお、以下で参考に掲げた写真は、各ダムの総合点検結果報告書からの引用である。

(1) 堤体のコンクリート面に見られる鉛直方向のクラック (写真-2.4.1)

報告件数が多いこの種のクラックは、竣工後の経過年数が比較的短いダムでもある程度見られることから、温度応力によるクラックと考えられるものが多い。クラック深さに関するデータは少ないものの、堤体に作用する外力は水平方向のものが支配的であることから、特に上下流方向断面での二次元設計がなされる重力式コンクリートダムではその構造安定性に影響を及ぼす影響は小さいと考えられる。ただし、寒冷地のダムではクラック内に浸入した水が凍結・融解することにより長期的に周辺の劣化が助長される可能性があることに注意が必要と

考えられる。



写真-2.4.1 堤体のコンクリート面に見られる鉛直方向のクラック

(2) 堤体の水平打継面に見られるクラック (写真-2.4.2)

越冬面などの長期放置リフト面などで見られることがあるこの種のクラックは、水平打継面の打継処理が不十分であったなど施工中の問題に起因して発生した可能性があり、複数ブロックにまたがって確認されるケースもある。堤体上下流面間に連続する水平打継面自体が弱面となっている可能性があること、堤体の構造安定性の面から大きな問題となる可能性があること、また、水分が浸入すれば凍結融解作用によって劣化が助長される可能性があることなどから、ダム堤体に発生するクラックの中では最も注意すべきものの1つと考えられる。



写真-2.4.2 堤体の水平打継面に見られるクラック

(3) 堤体表面に見られるその他のクラック (写真-2.4.3)

堤体コンクリート面に網目状や斜め方向に見られるクラックがある。これらは、コンクリート中の水分の凍結融解作用などによるものと考えられる。なお、少数であるが反応性骨材の吸水反応によると見られるケースもある。いずれも、劣化・損傷の進行によって短期的にダ

ム堤体の構造安定性に影響を及ぼす可能性は低い。ただし、表面からの劣化が徐々に進行すれば健全な断面は減少することとなる。このため、長期的にはこの種の表面劣化による影響も考える必要があると考えられる。



写真-2.4.3 堤体表面に見られる網目状のクラック

以上から、ダム堤体に発生する代表的なクラックとその発生原因、構造安定性に対する影響についての評価の必要性を整理すると表-2.4.1のとおりとなる。

表-2.4.1 代表的なクラックの発生形態、発生原因、構造安定性に対する影響

発生形態	推定される主な発生原因	構造安定性に対する影響の評価の必要性	
		短期	長期
(1)鉛直方向クラック	温度応力	△	△
(2)水平打継面クラック	設計又は施工上の問題(打継面処理など)	○	◎
(3)網目状等のクラック	凍結融解作用 反応性骨材など	△	○

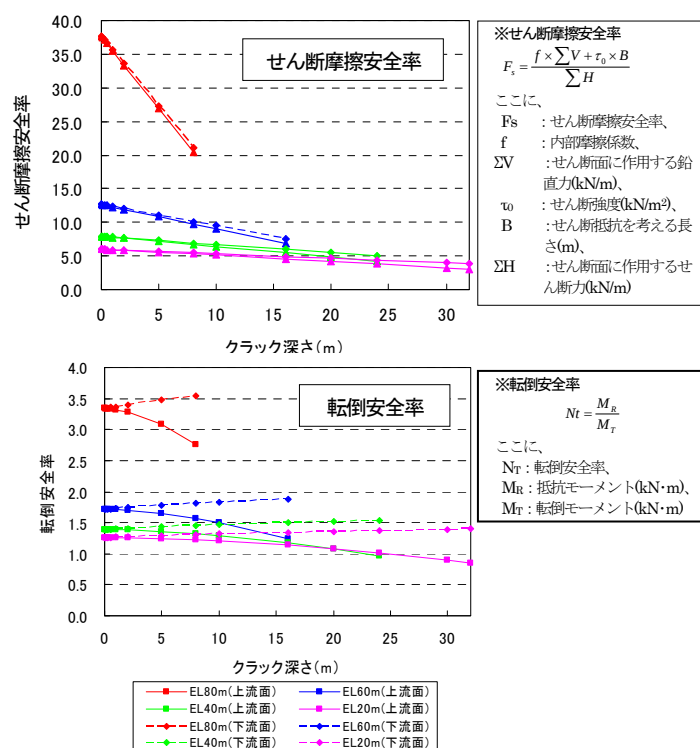
◎：考慮する必要性が特に高い
○：考慮する必要がある
△：考慮する必要性は低い

3. ダムの安定性に及ぼす影響度を踏まえた劣化・損傷の評価方法の検討

3.1 既往検討

本研究では前年度までに、各種劣化・損傷事象がダムの安定性に及ぼす影響度を定量的に評価する上での基礎的検討として、水平打継面沿いのクラックを有する重力式コンクリートダム、及び凍結融解作用などにより表面劣化が生じた重力式コンクリートダムを想定し、当該クラック及び表面劣化がそれぞれ堤体の安定性に与える影響について、河川管理施設等構造令⁵⁾(構造令)に基づく断面設計時の安定計算法(震度法)に準じた検討を行っている。その結果、前者の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深さの増加に伴い低下する。しか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。一方、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ことが分かっている(図-3.1.1)。また、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転倒・滑動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ことが分かっている(図-3.1.2)。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り、大規模地震に対する安定性は別途検討する必要がある。



※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、着岩からの高さ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滑動・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。

図-3.1.1 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転倒・せん断摩擦安全率(震度法)

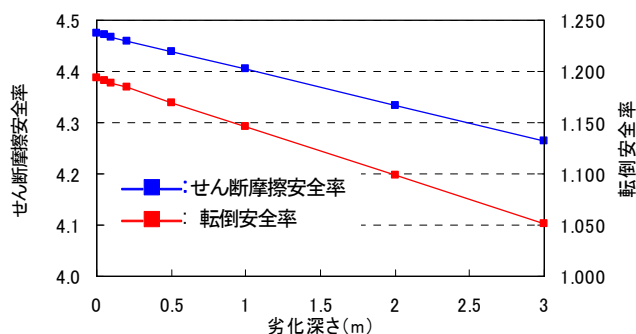


図-3.1.2 重力式コンクリートダム堤体下流面の表面劣化を断面減少として考慮した場合の転倒・せん断摩擦安全率（震度法）

3.2 劣化・損傷がダムの安定性に及ぼす影響度の解析的検討

3.2.1 概要

前節に述べた安定計算による基礎的検討では、ダム堤体に作用する荷重条件は、通常の設計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とした。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て用いられるもので、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⁷⁾で想定されるような大規模地震による地震動を受けた場合に劣化・損傷事象がどの程度進行する可能性があるかについても把握する必要がある。このため、本年度は、大規模地震に対するダムの耐震性能照査と同様の手法（クラックの発生・進展を考慮できる分布ひび割れモデルによる非線形動的解析）により、地震時の影響に着目して、重力式コンクリートダムに生じた劣化・損傷事象がダムの安全性に及ぼす影響について検討した。

なお、本解析的検討では、2.4での考察を踏まえ、クラックに関係する代表的な3種類の劣化・損傷事象のうち、以下の2つのケースについて検討した。

① 水平クラックを考慮したケース

特定標高の水平打継面沿いに堤体内部に連続するクラックが発生している状態を想定したケース（表-2.4.1の(2)に対応）

② 表面劣化を考慮したケース

堤体表面部の劣化進行を下流面に垂直な多数のクラックにより想定したケース（表-2.4.1の(3)に対応）

3.2.2 解析方法

(1) 解析モデル

本解析は図-3.2.1に示す二次元有限要素モデルを用いて行った。

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。なお、あらかじめ想定するクラックはジョイント要素により考慮した。①水平クラックを考慮したケース、及び②表面劣化を考慮したケースで想定したクラックの例を図-3.2.2及び図-3.2.3に示す。

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⁸⁾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⁹⁾を参考に設定した。

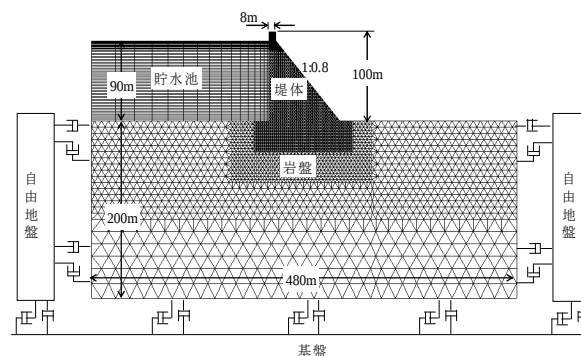


図-3.2.1 解析モデル(全体)

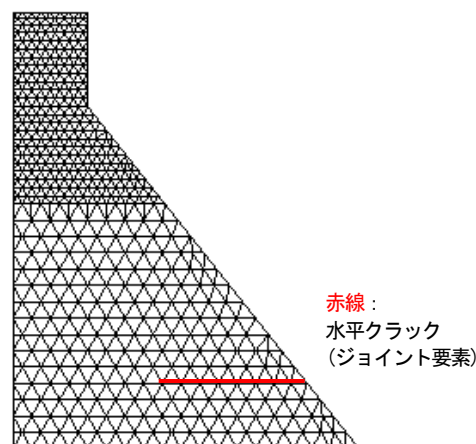


図-3.2.2 水平クラックのモデル化
(深さが堤体幅の1/2の下流面クラックを想定した例)

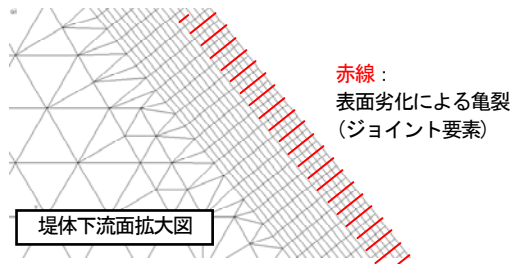


図-3.2.3 表面劣化のモデル化

（下流面において 50cm 間隔・深さ 1m の表面クラックを想定した例）

(2) 物性値

堤体（健全部）及び基礎岩盤の物性値は表-3.2.1、あらかじめ存在するクラックを想定したジョイント要素の物性値は表-3.2.2 に示すとおりそれぞれ設定した。なお、表面劣化を想定したケースでは、クラック面沿いのせん断変位は許容せず、クラック面直角方向の変位のみ許容することとした。地震動によるクラックの進展は分布ひび割れモデルで考慮することとし、コンクリートの引張軟化曲線は図-3.2.4 のように設定した。

表-3.2.1 堤体（健全部）・岩盤の物性値

項 目	堤体（健全部）	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
減衰定数 $h(\%)$	10	5

表-3.2.2 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 $kn(N/mm^2)$	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 $ks(N/mm^2)$	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 $\sigma_t(N/mm^2)$	0	—

注) 表面劣化を考慮したケースでは、クラック面方向のせん断変位は僅かと考えられること、及び計算の安定性の面から相対変位はクラック面直角方向のみ許容する条件とした。

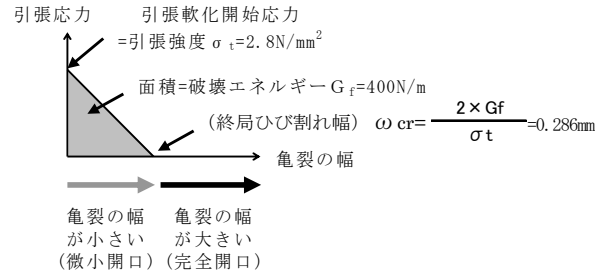


図-3.2.4 コンクリートの引張軟化曲線（単直線型）

(3) 入力地震動

解析では図-3.2.5 に示す加速度波形を用いた。なお、以下の地震動がダム堤敷で再現されるよう引延ばした波形を解析モデル底面に水平方向に入力した。

- ① 水平クラックを考慮したケース：図-3.2.5 の加速度波形の振幅を 1.4 倍に引延ばした波形
- ② 表面劣化を考慮したケース：図-3.2.5 の加速度波形

図-3.2.5 に示す加速度波形は、1995 年兵庫県南部地震時に震源近傍のダム底部で観測された加速度波形を大規模地震によるダムの耐震性能照査⁷⁾に用いられる照査用下限加速度応答スペクトル(最大加速度 300gal)に適合するよう振幅調整したものである。また、水平クラックを考慮したケースで図-3.2.5 に示す加速度波形の振幅をさらに引延ばした地震動を入力したのは、解析条件（クラック標高、位置、深さ）の違いによる影響をより明確にするためである。

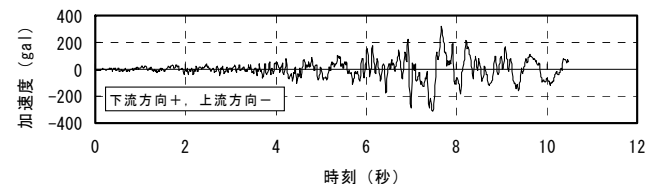


図-3.2.5 入力地震動（水平方向）の加速度波形

3.2.3 解析ケース及び解析結果（水平クラックを考慮したケース）

(1) 解析ケース

水平クラックを考慮した解析は、あらかじめ考慮するクラックの標高（ダム底面；EL. 0m）、位置及び深さの組合せにより、表-3.2.3 に示す各ケースについて実施した。なお、比較のため、クラックを考慮しないケース（健全モデル）についても実施した。

表-3.2.3. 解析ケース（水平クラックを考慮したケース）

クラック の標高	クラック の位置	クラックの深さ	
		外部コンクリ ート相当	堤体上下流面 厚さの 1/2 相 当
なし (健全モデル)	—	—	—
EL30m (低標高部)	上流面側のみ	3m	27m
	下流面側のみ	4m	28m
	上・下流面	上流面側 3m 下流面側 4m	上流面側 13m 下流面側 14m
EL60m (中標高部)	上流面側のみ	3m	17m
	下流面側のみ	4m	16m
	上・下流面	上流面側 3m 下流面側 4m	上流面側 7m 下流面側 10m
EL90m (頂部勾配変化 点付近)	上流面側のみ	4m	—
	下流面側のみ	4m	—

注) 水平クラック標高 EL.90m のケースでは、堤体厚が小さいため上・下流面両方に水平クラックを想定したケースは実施していない。

(2) 解析結果及び考察

あらかじめクラックを設定しないケース（健全モデル）での解析結果を表-3.2.4 に示す。この場合、地震動により、堤敷の上流端部のみにわずかな引張クラックが生じる結果となった。

次に、水平クラックを考慮した各解析ケースの解析結果を表-3.2.5～表 3.2.11 にそれぞれ示す。

上流面側のみに水平クラックを設定したケース（表-3.2.5, 表-3.2.8, 表-3.2.11）では、頂部の断面勾配変化点標高にあらかじめクラックを設定したケース（表-3.2.11）では僅かにクラックが進展した。しかし、低標高部（表-3.2.5）及び中標高部（表-3.2.8）にクラックを設定したケースでは、低標高部にクラックを想定したケースにおいて、健全モデルでは見られなかった下流端部に新たな引張クラックが発生しているが、設定したクラック深さの違いによらず地震動による顕著なクラック進展は見られなかった。ただし、今回の解析ではクラック内への貯水の浸入による揚圧力が発生する可能性があることの影響を考慮しておらず、より詳細にはこの点を考慮した検討が必要である。

下流面のみに水平クラックを設定したケース（表-3.2.6, 表-3.2.9, 表-3.2.11）では、いずれも地震動によりクラックが内部に向かって大きく進展し、上流面側にクラックを設定したケースに比べ堤体の安定性に及ぼす影響が大きい結果となった。これは表-3.2.4 に示した健全性モデルの引張応力分布からわかるように堤体下流面側には、広範囲に比較的大きな引張応力が発生していることと関係していると推察される。なお、水平クラッ

クの深さによる違いはほとんど見られない。

上・下流面側ともに水平クラックを設定したケース（表-3.2.7, 表-3.2.10）では、上・下流面両方のクラックを設定したことによる影響はほとんど見られず、下流面側のみにクラックを設定したケースとほぼ同様の結果となった。

以上の結果から、水平打継面沿いに深いクラックを有するダムでは強い地震動を受けることによりクラックが進展し、堤体の安定性に影響が生じる可能性についても考慮する必要があると考えられる。

表-3.2.4 解析結果（健全モデル）

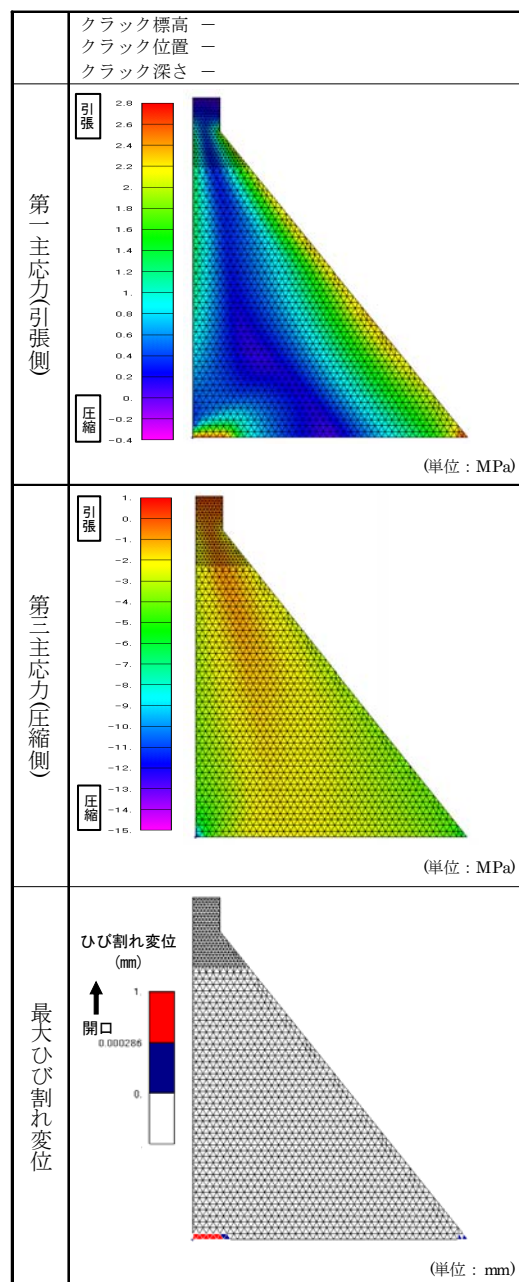


表-3.2.5 解析結果（水平クラック（EL30m、上流側）を考慮したケース）

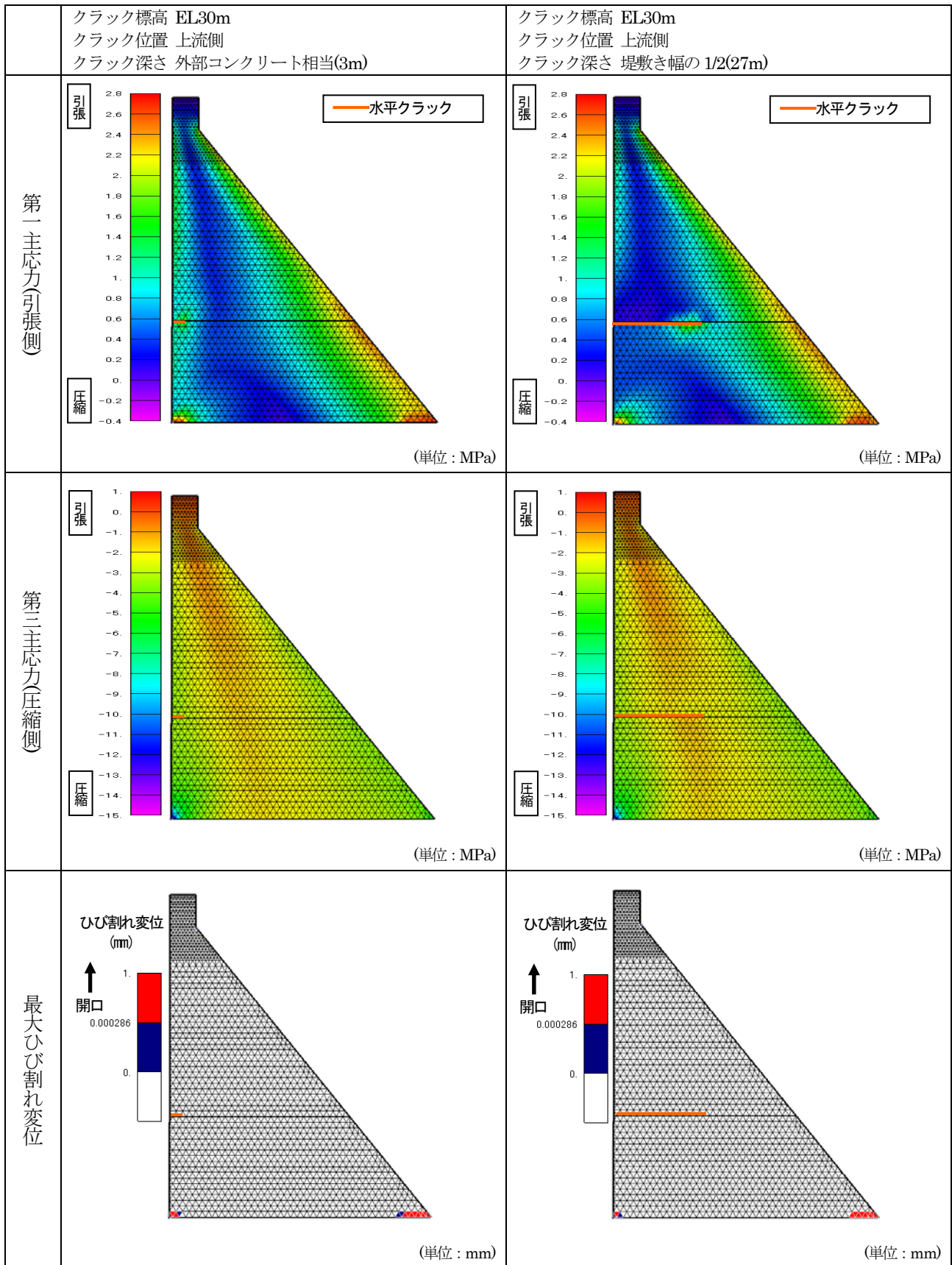


表-3.2.6 解析結果（水平クラック（EL30m、下流側）を考慮したケース）

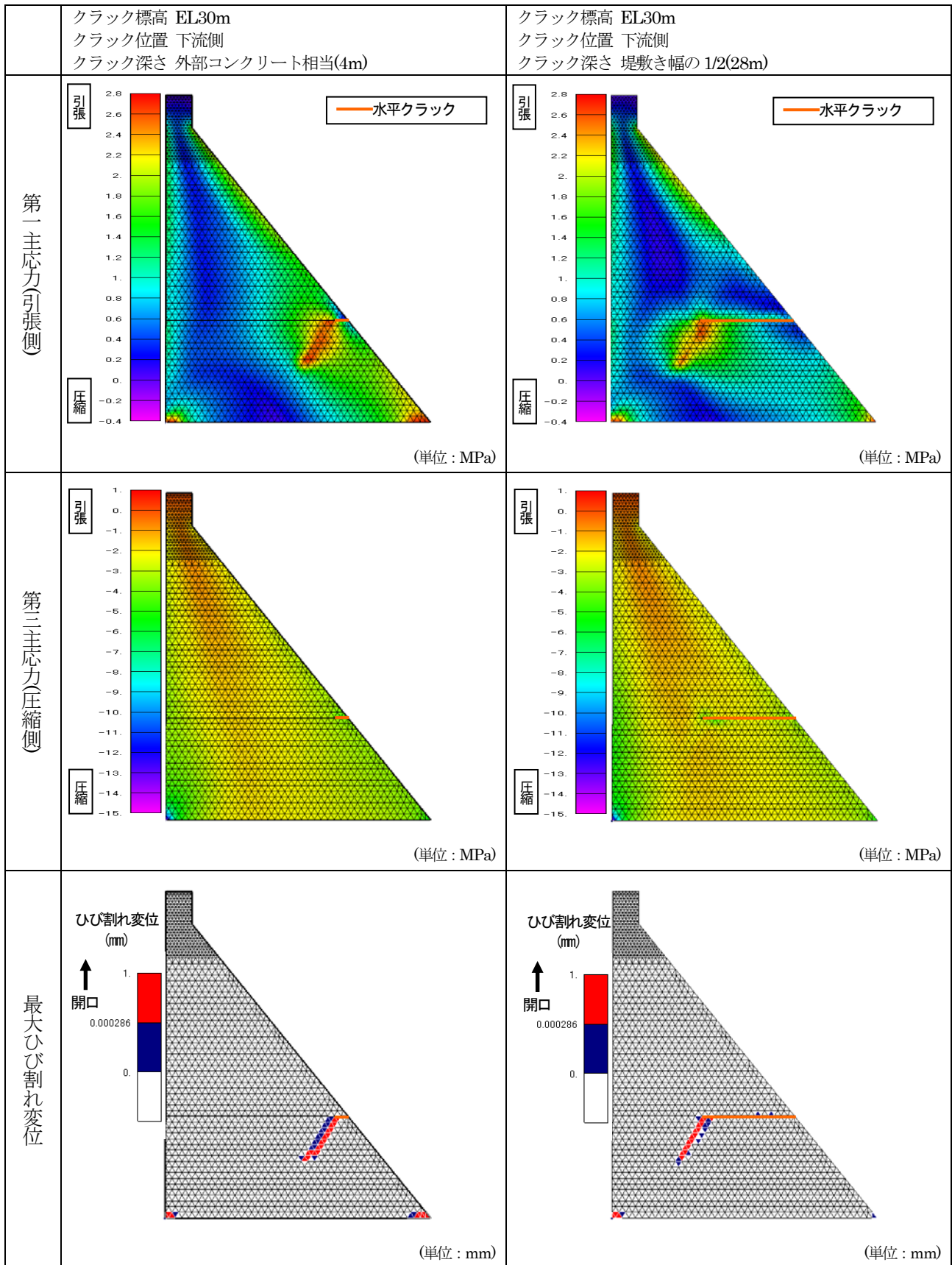


表-3.2.7 解析結果（水平クラック（EL30m、上・下流面）を考慮したケース）

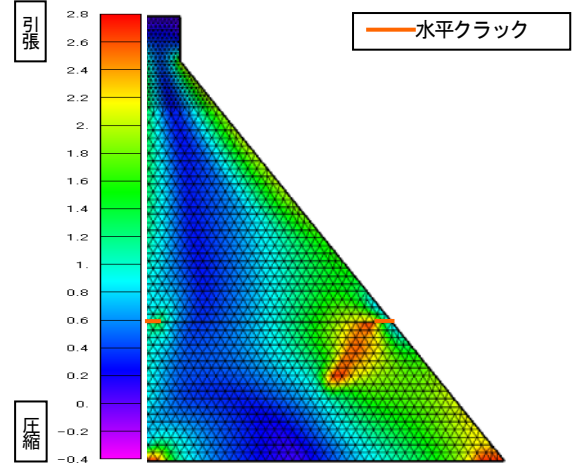
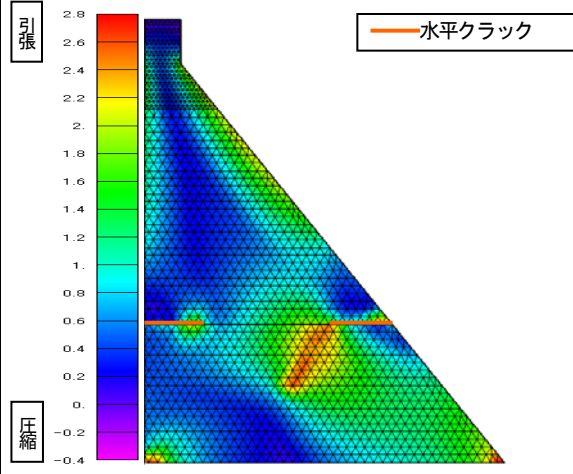
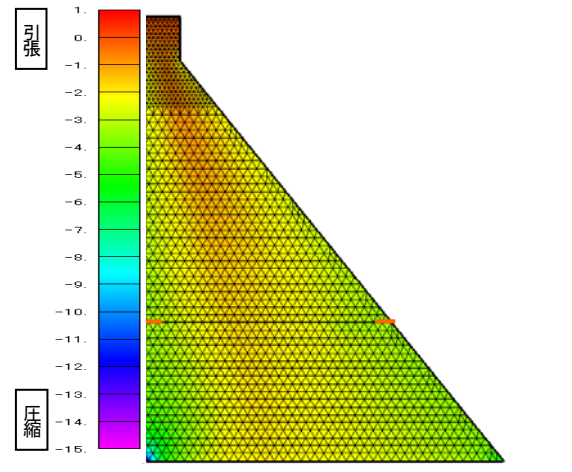
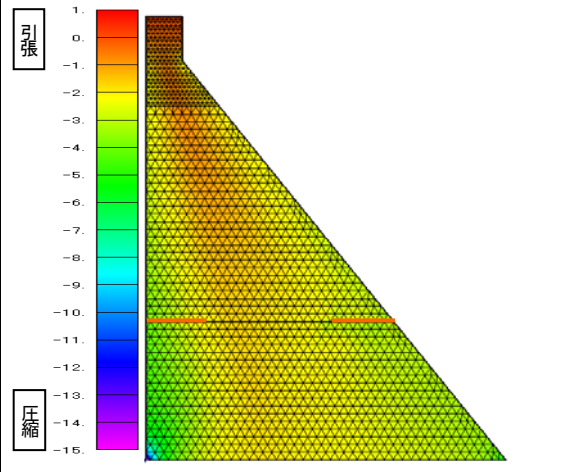
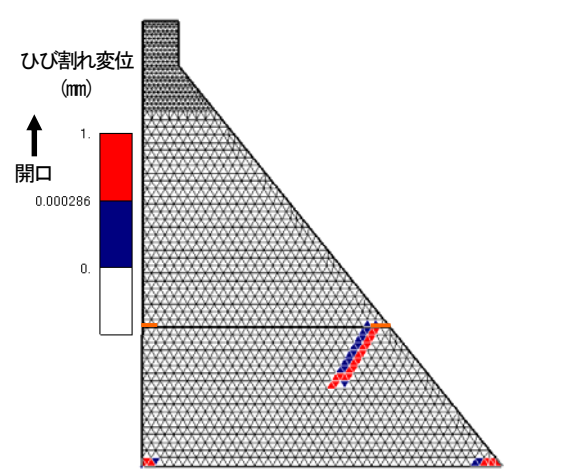
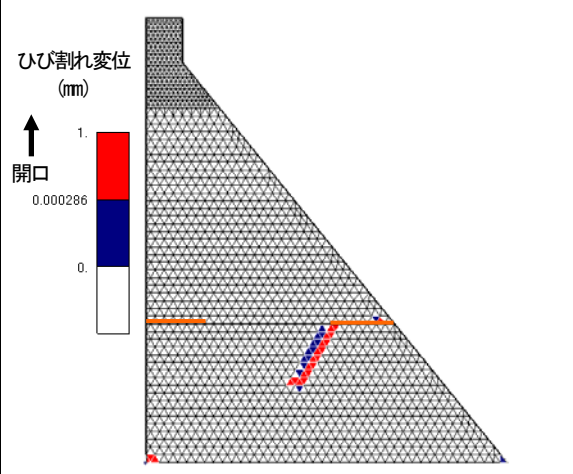
	クラック標高 EL30m クラック位置 上下流同時 クラック深さ 外部コンクリート相当 (上流 3m、下流 4m)	クラック標高 EL30m クラック位置 上下流同時 クラック深さ 堤敷き幅の 1/2 (上流 13m、下流 14m)
第一主応力(引張側)	 (単位 : MPa)	 (単位 : MPa)
第三主応力(圧縮側)	 (単位 : MPa)	 (単位 : MPa)
最大ひび割れ変位	 (単位 : mm)	 (単位 : mm)

表-3.2.8 解析結果（水平クラック（EL60m、上流側）を考慮したケース）

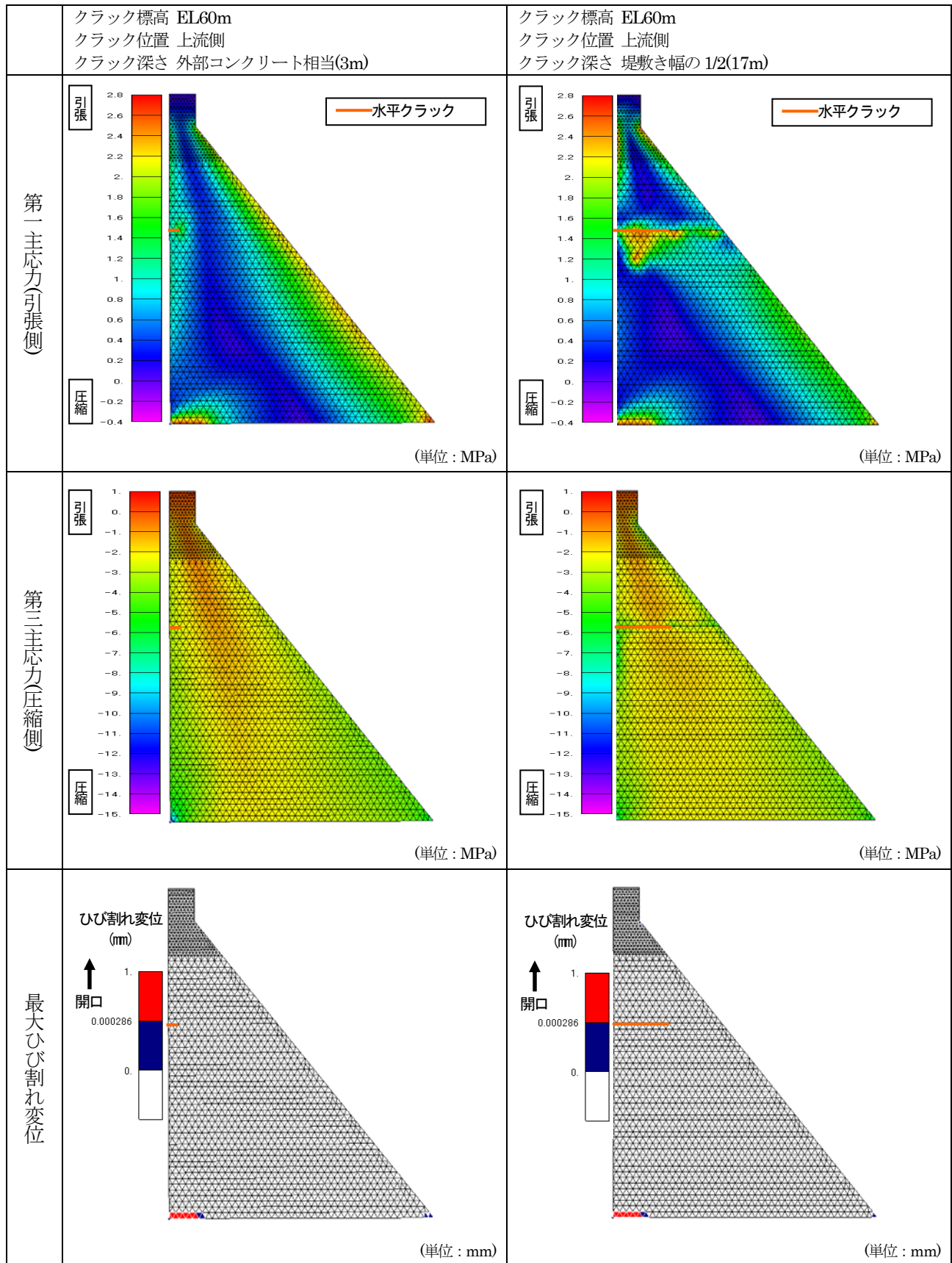


表-3.2.9 解析結果（水平クラック（EL60m、下流面）を考慮したケース）

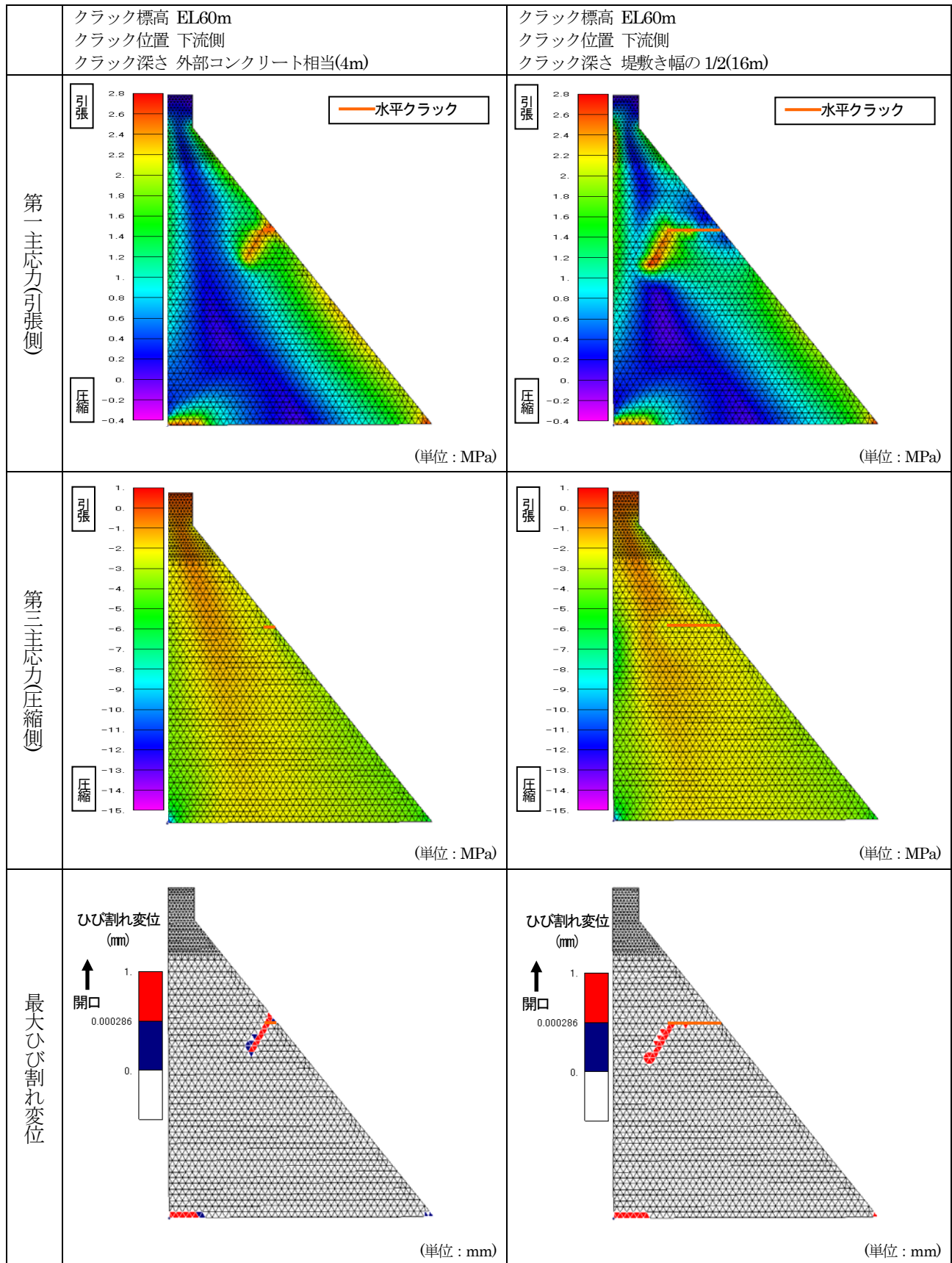


表-3.2.10 解析結果（水平クラック（EL60m、上・下流面）を考慮したケース）

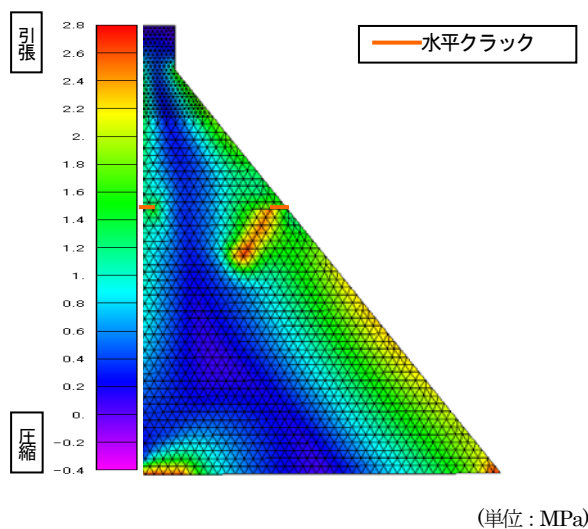
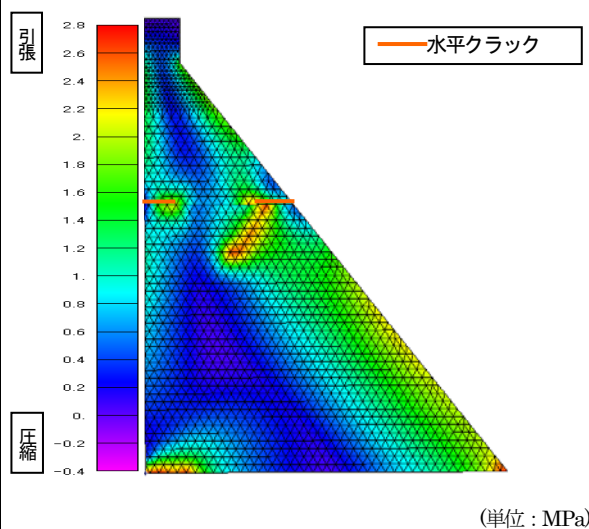
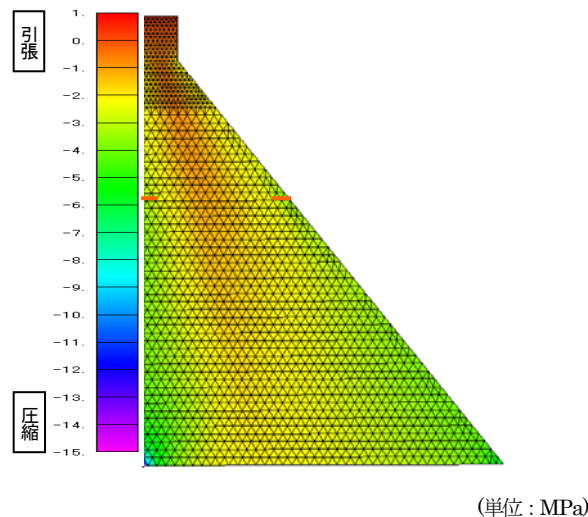
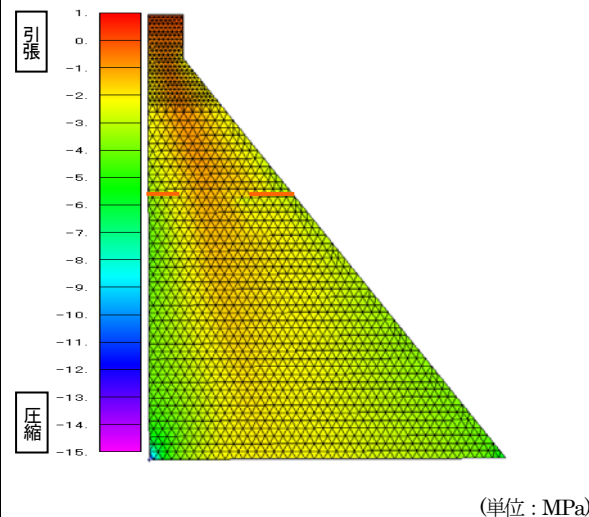
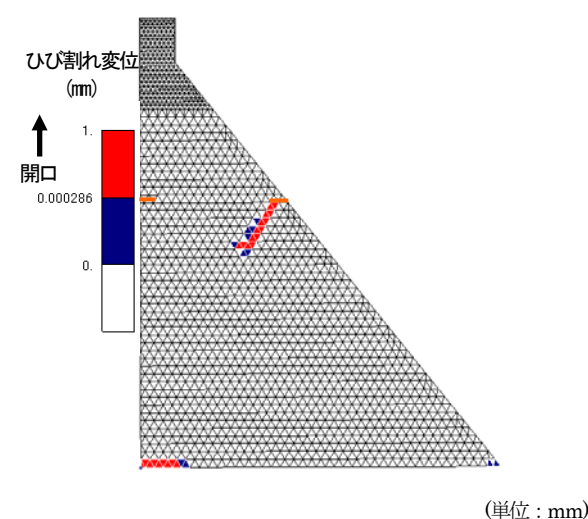
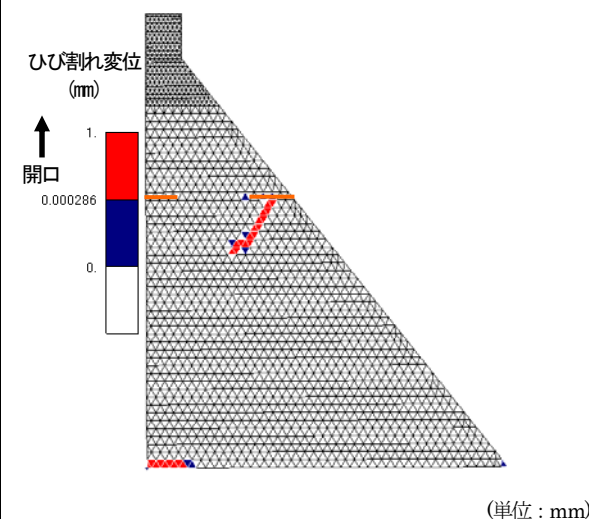
	クラック標高 EL60m クラック位置 上下流同時 クラック深さ 外部コンクリート相当 (上流 3m、下流 4m)	クラック標高 EL60m クラック位置 上下流同時 クラック深さ 堤敷き幅の 1/2 (上流 7m、下流 10m)
第一主応力(引張側)	 (単位 : MPa)	 (単位 : MPa)
第三主応力(圧縮側)	 (単位 : MPa)	 (単位 : MPa)
最大ひび割れ変位	 (単位 : mm)	 (単位 : mm)

表-3.2.11 解析結果（水平クラック（EL90m、上流面又は下流面）を考慮したケース）

	クラック標高 EL90m クラック位置 上流側 クラック深さ 堤敷き幅の 1/2(4m)	クラック標高 EL90m クラック位置 下流側 クラック深さ 堤敷き幅の 1/2(4m)
第一主応力(引張側)	(単位 : MPa)	(単位 : MPa)
第三主応力(圧縮側)	(単位 : MPa)	(単位 : MPa)
最大ひび割れ変位	(単位 : mm)	(単位 : mm)

3.2.4 解析ケース及び解析結果（表面劣化を考慮したケース）

(1) 解析ケース

表面劣化を考慮した解析は、あらかじめ考慮する表面劣化深さ（クラック深さ）と表面クラック間隔の組合せにより、表-3.2.12 及び図-3.2.6 に示す各ケースについて実施した。なお、クラック位置は全てのケースで下流面側とした。これは、日照や気温変化の影響を受けやすく、上流面側に比べ表面劣化が進行しやすいと考えられるためである。

表-3.2.12 解析ケース（表面劣化を考慮したケース）

解析ケース	表面劣化深さ (クラック深さ)	表面クラック間隔	クラック設定位置
1-1	1.0m	0.5m	下流面 図-3.2.6 参照
1-2		2.0m	
2-1	3.0m	0.5m	
2-2		2.0m	

(2) 解析結果及び考察

各ケースの解析結果を表-3.2.13 及び表-3.2.14 にそれぞれ示す。

地震動による引張クラックは、設定した下流面側の表面劣化深さ（あらかじめ設定したクラック深さ）や表面クラック間隔にかかわらず、堤頂部付近の勾配変化点標高付近で内部（上流側）に向かって進展する結果となった。これは勾配変化点に応力集中が起きやすいためと考えられる。また、あらかじめ想定した表面劣化深さの違いによる影響は、表面劣化深さを 1.0m と設定したケース（表-3.2.13）では地震動によるクラックの進展は僅かとなったが、表面劣化深さを 3.0m と設定したケース（表-3.2.14）では、地震動によりクラックが大きく進展する結果となった。

堤頂部付近の勾配変化点標高を除く下流面全体で見ると、地震動によるクラックの進展はわずかである。また、設定した表面クラック間隔による違いはほとんど見られない。

以上の結果から、表面劣化により堤体下流面に多数の表面クラックを有するダムでは、外部コンクリート厚程度の劣化では、下流面全体でみると強い地震動を受けた場合の影響は大きくないと考えられる。ただし、堤頂部付近の勾配変化点など応力集中が起きやすい箇所があり、当該箇所に表面クラックが生じている場合、地震動により当該クラックが堤体内部に進展することにより堤体上部の安定性に影響が生じる可能性を考慮することが重要であると考えられる。

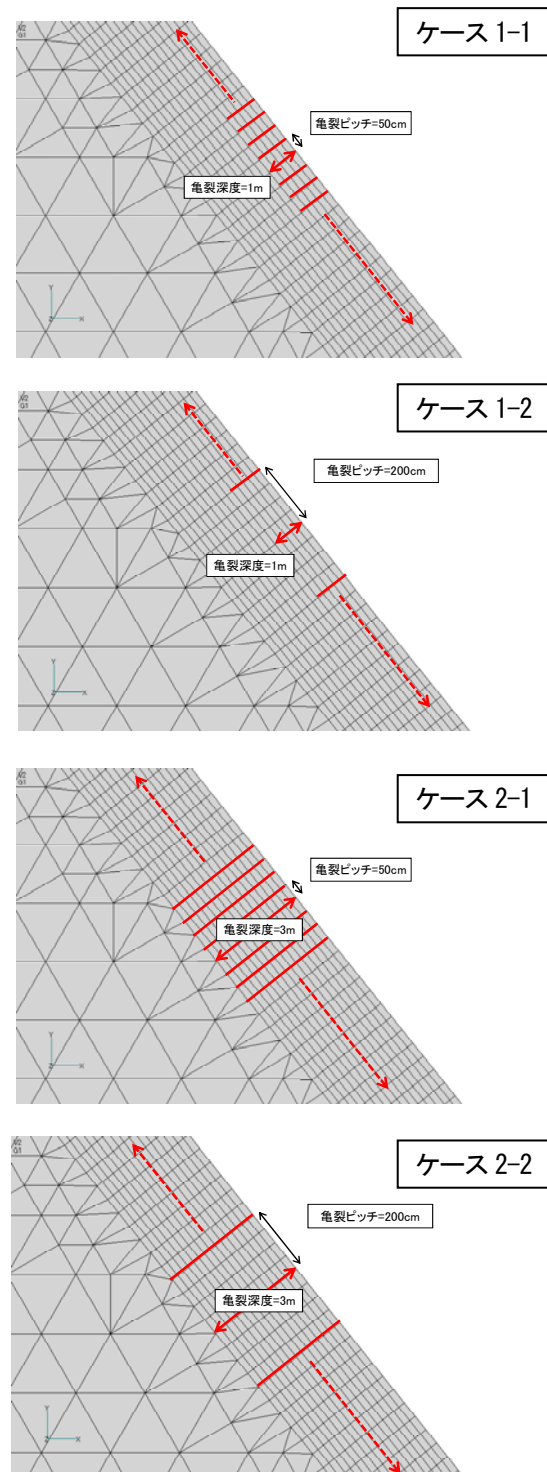


図-3.2.6 解析ケース（表面劣化を考慮したケースでの表面クラック設定範囲）

表-3.2.13 解析結果（表面劣化深さ 1.0m を考慮したケース）（ケース 1-1、1-2）

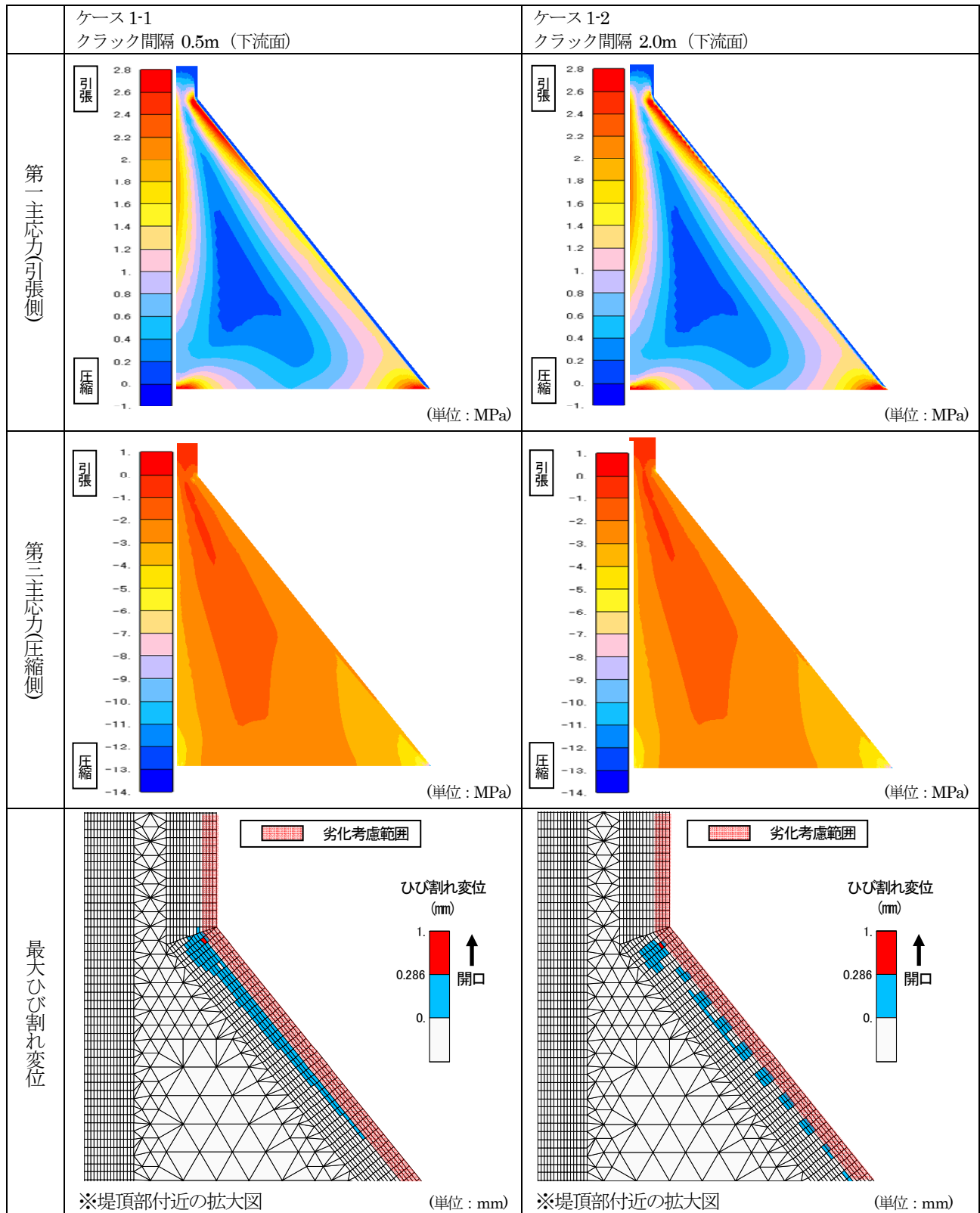
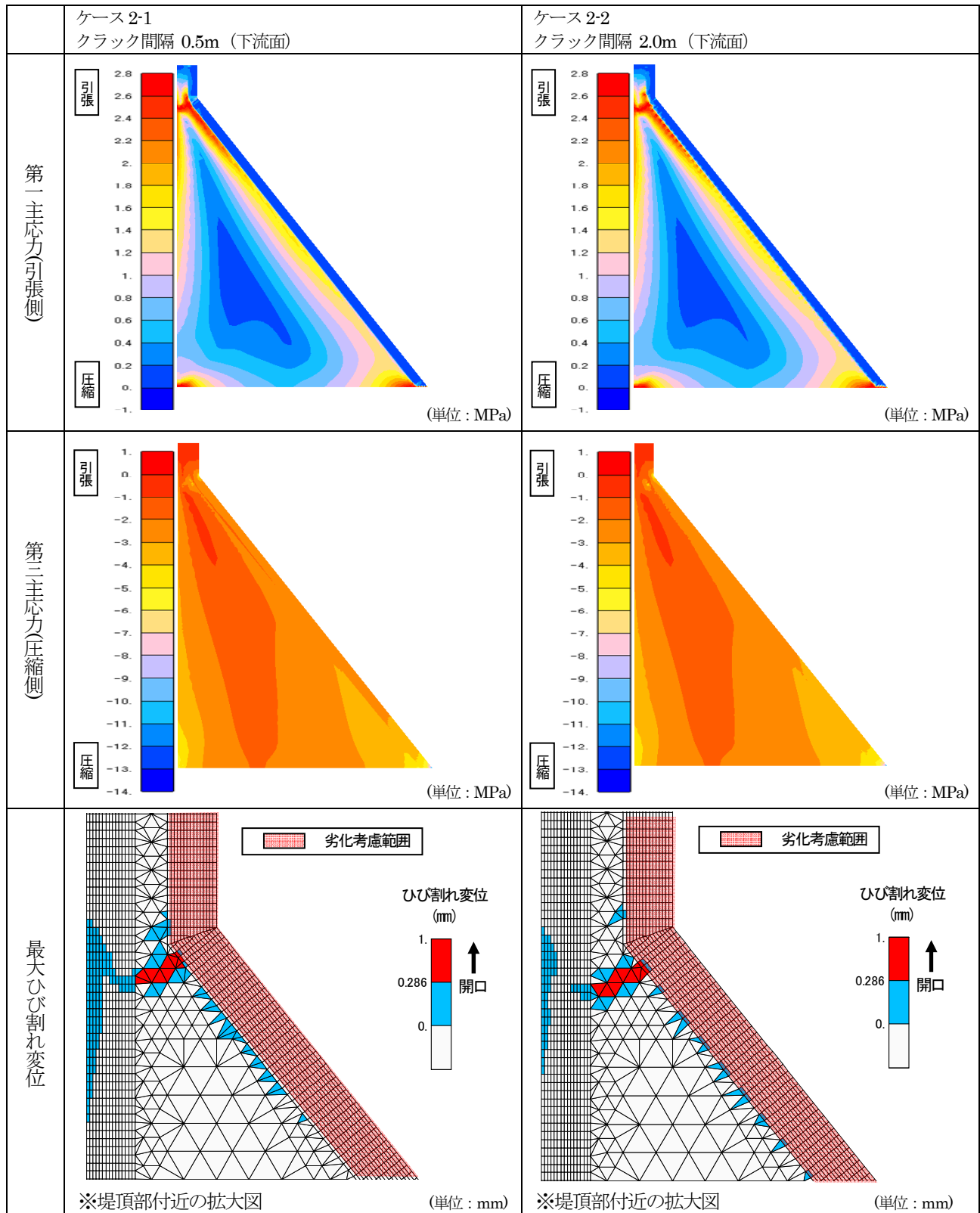


表-3.2.14 解析結果（表面劣化深さ 3.0m を考慮したケース）



3.3 安全性への影響度の実測挙動解析による分析

3.3.1 概要

コンクリートダムの健全度診断は、シュミットハンマーによるコンクリートの表面の強度測定、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、ボーリングやつぼ掘りによるひび割れ深さの確認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、局所的な劣化診断調査（詳細調査）であり日常点検や定期検査¹⁰などにおいて目視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な大規模地震時には、地震直後に多くのダムの安全性を早期に把握することも必要となる。このため、詳細調査に入る前に、一次スクリーニング的にダムの健全度診断を効率的に行う手法を開発していく必要がある。

地質調査で行う物理探査法の中で、常時微動を計測することにより、地盤の振動特性を把握する方法がある。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の構造物で計測することにより、固有振動数（または固有周期）などを指標として、その振動特性評価の変化から地震による被災レベルや老朽化による構造物の劣化度を評価しようとする試みが増えてきている。

ダムを対象としては、常時微動計測に基づくアーチダムの振動特性評価を行った事例¹¹や、海外の地震により被災したコンクリートダムにおいて、常時微動計測結果が被害の程度と対応していることが確認された報告¹²がある。

本研究は、このような動向を踏まえ、ダムにおける上記の課題を解決する一つの方法として、ダムの常時微動を計測することにより、その振動特性（固有周期）の変化などを基にダムの健全性の評価が可能か検討を行うものである。

3.3.2 コンクリートダム堤体の劣化損傷が堤体の振動特性に与える影響（解析的検討）

常時微動計測によるダムの健全性評価の可能性を検討する上で予備的な検討として、コンクリートダム堤体に劣化・損傷が発生した場合、その状況に応じて、ダムの振動特性にどの程度影響を受けるか検討した。ただし、

国内のコンクリートダムでは地震発生等による被災により甚大な損傷を受けた事例がないことから、この検討は数値解析によって堤体に生じた劣化・損傷が堤体の固有振動数に及ぼす影響度を把握することにより行うこととした。すなわち、ここでは、コンクリートダムに生じている劣化・損傷事象として、堤体の安定性への影響が大きいと考えられる水平クラックを想定し、水平クラックをジョイント要素により表現した2次元有限要素モデルを作成し、固有値解析を行うことでクラック位置や深さによる固有振動数の変化を調べた。

1) 解析条件

① 解析モデル・クラック設定標高

固有値解析用モデルは3.1の検討で作成したのと同じ堤高100mの解析モデルを用いた。ただし、堤体部の振動特性に着目するため、ここでは堤体のみをモデル化し、岩盤は考慮しないこととした。貯水位は堤高の90%とし、貯水池を非圧縮性流体としてモデル化した。堤敷き面の境界条件は、水平方向及び鉛直方向ともに固定とした。

堤体内の水平クラックはEL30m, EL60m, EL90mの3カ所のいずれかにジョイント要素を設けることで想定することとした。図-3.3.1に解析モデルと水平クラックの設定位置を示す。

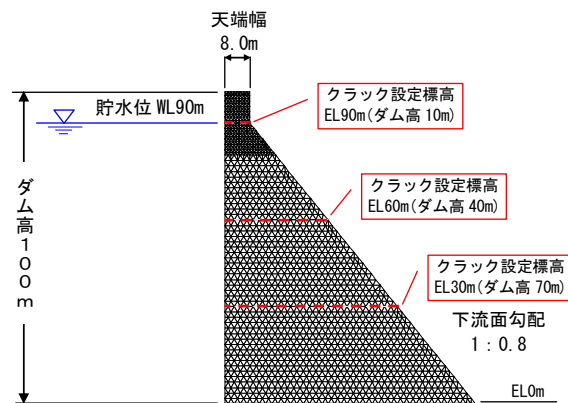


図-3.3.1 解析モデル

② 物性値

堤体部及び水平クラック部の物性値は表-3.3.1、表-3.3.2に示すとおり設定した。なお、引張強度を持たないジョイント要素により考慮した水平クラック部の軸剛性 K_n の値は、クラックの発生によりコンクリートのクラック面周辺が劣化していると考えて、健全な状態のコンクリートの弾性係数 E の1/10と仮定した。せん断剛性 K_s はこの K_n の値から弾性理論によって求まる値とした。

表-3.3.1 堤体コンクリート部の物性値

項 目	設定値
弾性係数 $E(N/mm^2)$	29,000
ポアソン比 ν	0.2
単位体積質量 (kg/m^3)	2,300
引張強度 $\sigma_t(N/mm^2)$	2.8

表-3.3.2 水平クラック部（ジョイント要素）の物性値

項 目	設定値
軸剛性 $kn(N/mm^2)$	2,900
せん断剛性 $ks(N/mm^2)$	1,200
引張強度 $\sigma_t(N/mm^2)$	0

③ 解析ケース

解析ケースは水平クラックの発生標高、位置、深さの組合せにより、表-3.3.3 に示すとおり設定した。なお、水平クラックの深さは、最大で、水平クラックが内部コンクリート部分をほぼ貫通する深さ程度まで達する場合を考慮した。

水平クラックの分布範囲は水平クラックを連続して設けるケース1,2と一定間隔で断続的（ミシン目状）に分布させるケース3を設定した。なお、ケース3の断続的な水平クラックは図-3.3.2 に示すように設定することとした。

表-3.3.3 解析ケース

ケース番号	クラック発生位置・分布位置	クラック発生標高	クラック深さ
1	上流面のみ	EL30m	0m~51m
		EL60m	0m~29m
		EL90m	0m~7m
	下流面のみ	EL30m	0m~52m
		EL60m	0m~30m
		EL90m	0m~7m
2	上・下流面	EL30m	0m~51m※
		EL60m	0m~31m※
		EL90m	0m~7m※
3	断続（ミシン目状）	EL30m	2m, 4m, 8m 間隔
		EL60m	2m, 4m, 8m 間隔
		EL90m	1m, 2m 間隔

※上流面と下流面のクラック深さは同一値とた（表中の値はそれぞれの水平クラックを合計した深さ）。

2) 解析結果

各ケースの固有値解析結果から得られた、上下流方向振動の卓越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-3.3.3 に示す。解析結果より、この3つの振動モードの中では低標高部に発生する水平クラックは低次モード、高標高部に発生する水平クラックは高次モードにおいて、それぞれ水平クラックの影響が相対的に顕著になる傾向が見られた。具体的には、水平クラック標高 EL30m のケースでは一次モード、同 EL60m のケースでは二次モード、同 EL90m のケースでは四次モードで、それぞれ水平クラック発生による固有振動数の低下幅は大きくなる。

すなわち、常時微動計測では低標高部にあるクラックは一次固有振動数の変化により捉えられる可能性があるが、高標高部のクラックは四次モードなどより高次の固有振動数の変化を検知する必要があることになる。

また、図-3.3.3 からは、各標高のケースについて固有振動数の低下幅が最も大きくなる振動モードでみると、想定する水平クラックの合計長さが堤体幅の 40%程度より大きくなると、上下流面の片側一方に水平クラックを想定したケースより、上下流面同時に水平クラックを想定したケースの方が、固有振動数の低下幅が大きくなる傾向があることや、ミシン目状の断続的なクラックがある部分は合計長さが同じ連続したクラックがある場合より、やや固有振動数の低下幅が小さくなり、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からわかる。なお、2m 間隔のクラックでは、クラックの合計長は堤体幅の半分程度であったとしても、固有振動数は、クラックがない状態とほとんどかわらない。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限られると考えられる。

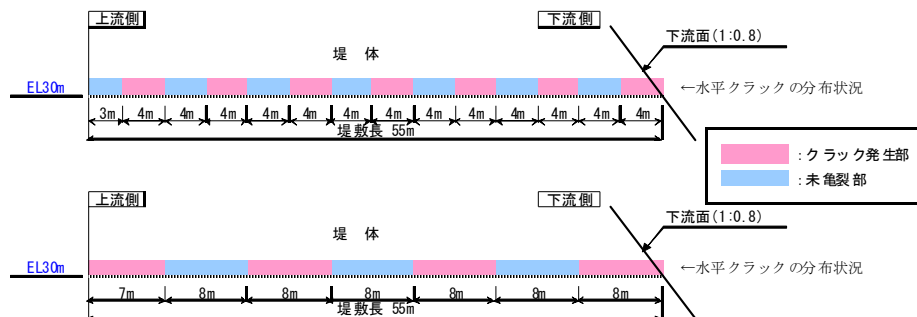


図-3.3.2 断続的クラックの配置パターン（解析ケース3）

（上図はクラック間隔4m、下図は同8mとした例）

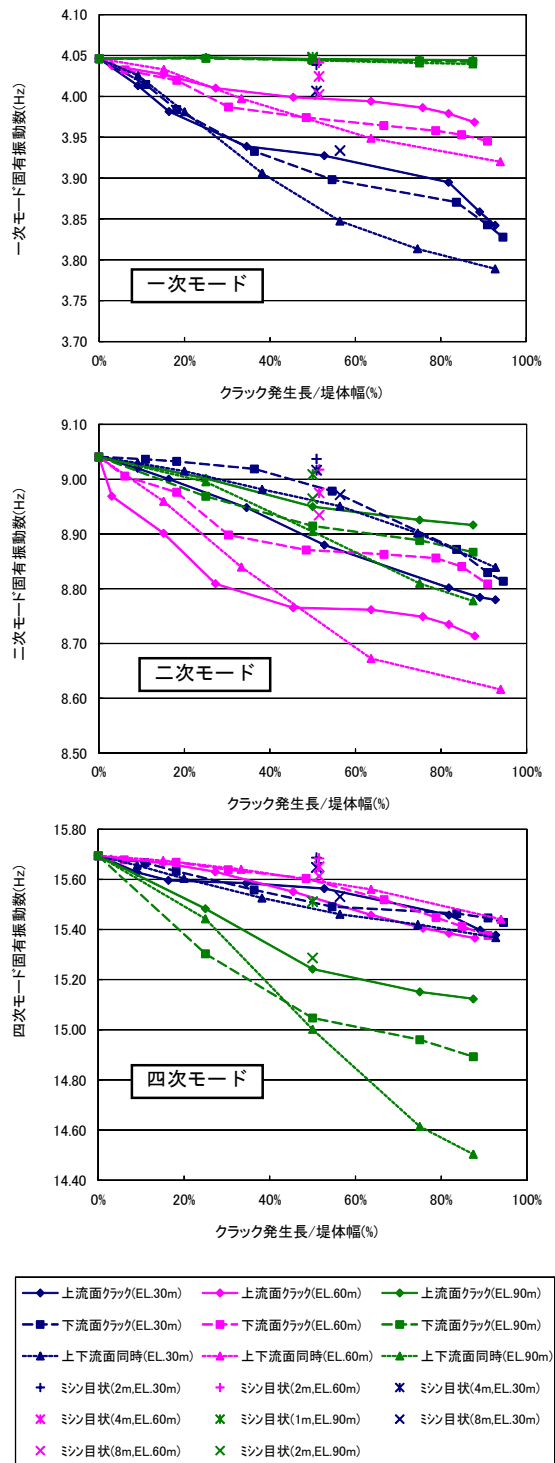


図-3.3.3 固有値解析結果

3.3.3 常時微動計測の概要

常時微動とは、構造物や地盤中を伝播する種々の振動のうち、特定の振動源の影響を受けない状態で、さまざまな振動によって発生する微小な振動である。この常時微動を測定することにより、構造物や地盤の振動特性を知ることができる。

本研究では、常時微動計測を行うために、高精度サーボ加速度計及びバッテリーが内蔵されたポータブル型計測装置（応用地質（株）製、McSEIS-MT NEO）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。機器の仕様を表-3.3.4に、機器の外観を図-3.3.4に示す。

また、本装置は、持ち運びが容易な構造となっており、移動が容易しながら、効率的に多数の計測を行うことができる。

表-3.3.4 機器仕様

センサー形式	サーボ型加速度計
分解能	1 μ G
測定レンジ	$\pm 4G$
サンプリング周波数	500・250・100・50・20Hz
データ記録容量	最大 連続15時間
寸法	220mm(W)×245mm(D) ×250mm(H)
重量	約7.5kg



図-3.3.4 常時微動計測装置の外観

今年度実施した、重力式コンクリートダムにおける常時微動計測の流れを図-3.3.5に示す。常時微動計測は、①計測機の設置、②常時微動計測の実施、③振動波形の出力、④周波数スペクトル解析、⑤固有振動数（固有周期）の同定の手順で行った。以下に、概要を説明する。

①計測機の設置

常時微動計測箇所のイメージを図-3.3.6に示す。計測は、ダム全体の状況を把握するために、複数ブロックで実施した。また、計測は各ブロックにおいて、同時に天端付近と、基礎岩盤に近い基礎監査廊で同時に計測を実施した。基礎監査廊での計測は、計測するブロックの基礎部の振動を計測することで、ダム天端での計測結果と比較することによって堤体部での応答を把握しやすくするためである。常時微動計測の実施状況を図-3.3.7～図-3.3.9に示す。図-3.3.7は、監査廊内での計測状況であるが常時微動計測装置の奥はダムにもともと設置されている地震計である。常時微動計測は、地震動観測結果との比較を行えるよう、必ず1ヶ所は地震計が設置さ

れているブロックでの計測を行った。図-3.3.8 はダム天端における計測状況である。天端での計測時に風が吹

いている場合は計測機器自体が風の影響を受けるため、図-3.3.9 に示すようにカバーを設置し計測を行った。

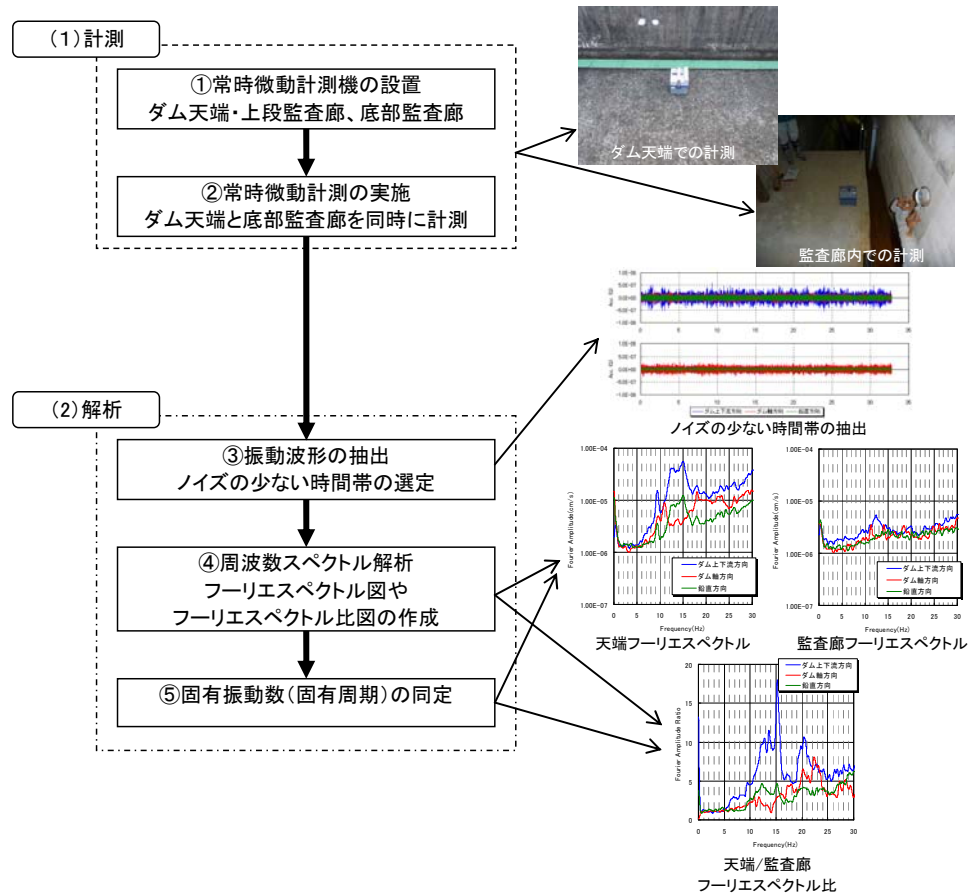


図-3.3.5 常時微動計測・解析の流れ

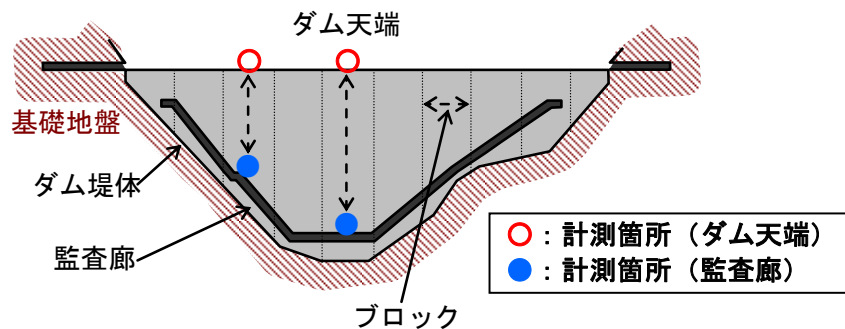


図-3.3.6 計測箇所のイメージ



図-3.3.7 監査廊内での計測状況



図-3.3.8 天端での計測状況

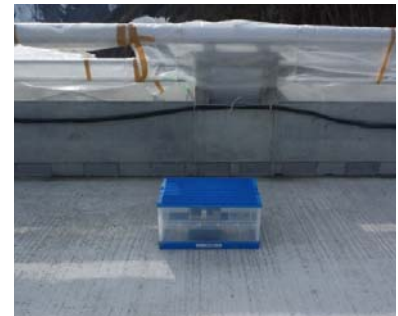


図-3.3.9 強風時の測定状況 (カバー設置)

②常時微動計測の実施

常時微動計測機2台を用いて1ブロックあたり30～40分程度計測を実施した。天端付近と基礎監査廊付近で同時刻の静穏な時間帯の計測結果を得るためである。

常時微動計測のサンプリング周波数は、250Hzで行った。既往の地震観測記録の分析事例¹³⁾よりダムの固有振動数が4～20Hzと考えられることから、その10倍程度の周波数としたものである。

③振動波形の出力

②常時微動計測で得られた加速度時刻歴波形データから、計測箇所、計測成分（ダム上下流方向、ダム軸方向、鉛直方向）ごとに振動波形を出力した。その上で、波形の中から突発的なノイズを含まない安定した部分を、解析区間として抽出した。解析時間としては、基本120秒程度の解析時間を確保した。

④周波数スペクトル解析

③振動波形の抽出で述べた解析区間毎に周波数スペクトル解析を行い、各ブロックの天端付近のフーリエスペクトル、基礎監査廊のフーリエスペクトルを求め、各計測点における3成分（ダム上下流方向、ダム軸方向、鉛直方向）の卓越周波数を把握した。

なお、卓越周波数を把握し易くするために、パルゼン窓関数を用いて、スペクトルを平滑化した。さらに、同一ブロックでの天端付近での計測データと、基礎監査廊での計測データからフーリエスペクトル比（伝達関数）を求めた。

⑤固有振動数（固有周期）の同定

ダム天端での計測データから得られたフーリエスペクトル及び、ダム天端と基礎監査廊での計測データから得られたフーリエスペクトル比をもとに、これまでの地震動観測記録の分析事例¹³⁾も参考に、各計測対象ブロックの固有振動数を推定した。

3.3.4 実ダムにおける計測

H23年度に常時微動計測を行ったダムの諸元とその目的を観点とともに表-3.3.5に示す。

いずれも、常時微動計測結果で得られダムの振動特性に影響を与えと考えられる因子（水位、気温）について、その影響を把握することで、これらの影響を分離してその変化を捉える方法を見出すための基礎データを得ることが目的である。

Aダムでは、試験湛水を利用して、貯水池が空虚の状態から、水位が上昇するのに伴うダムの固有振動数の変化を調査した。ただし、H23年度内には最高水位（サーチャージ水位）まで到達しておらず、H24年度も継続して計測を行う予定である。

Bダム、Cダムでは、築堤後長期間経過したダムにおいて季節（外気温）変化がダムの固有振動数に及ぼす影響を調査した。Bダムは、夏季（9月）と、冬季（2月）に計測を実施した。Cダムでは冬季（2月）に計測を実施した。各ダム、各季節1回の計測のみとなっており、H24年度も引き続き計測を行う予定である。

3.3.5 常時微動計測結果

H23年度に得られた計測結果及びこれに基づき貯水位の変動や季節（外気温）の違いがダムの固有振動数に及ぼす影響についての考察を以下に述べる。

(1) 水位変動がダムの固有周期に及ぼす影響

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、試験湛水により水位上昇中のAダムにおいて5回の計測を実施した。一例として、貯水位が、EL. 631.5m（貯水深60.5m）の時に実施した計測の結果を以下に示す。

計測位置は図-3.3.10に示すとおり、Aダム中央付近の上段監査廊と基礎監査廊で実施した。基礎岩盤からの高さは、上段監査廊が95m、基礎監査廊が7mである。

計測時間は40分程度とし、その中からノイズの少ない120秒間のデータを抽出した。抽出した加速度時刻歴波形を図-3.3.11に示す。

抽出した波形を用いて、周波数スペクトル解析を行った。上段監査廊と基礎監査廊のフーリエスペクトルを図-3.3.12に示す。これまでのダムの地震動観測記録の分析事例¹³⁾を参考に、上下流方向成分と鉛直方向成分の低周波域でのピークに着目すると、上段監査廊での計測データからは当該ブロックの上下流方向の一次固有振動数は3.50Hzと推定される。なお、上段監査廊と基礎監査廊の計測データから求めたフーリエスペクトル比（図-3.3.13）から求まる周波数のピークは4.06Hzとなり、上段監査廊の計測データから得られた結果とやや異なる。この違いは前者堤体とその基礎を含めた振動に対応しているのに対し、後者が堤体のみの振動に対応しているためだと考えられる。

表-3.3.5 常時微動計測実施ダム

ダム	ダムの諸元 堤高／堤頂長／堤体積	計測の目的（観点）
Aダム	119m／320m／1,020,000m ³	水位変動とダムの固有振動数の関係の把握。
Bダム	33.7m／140m／40,000m ³	築堤後長期間経過したダムの、季節（外気温）とダムの固有振動数の関係の把握。
Cダム	37.5m／90m／48,000m ³	

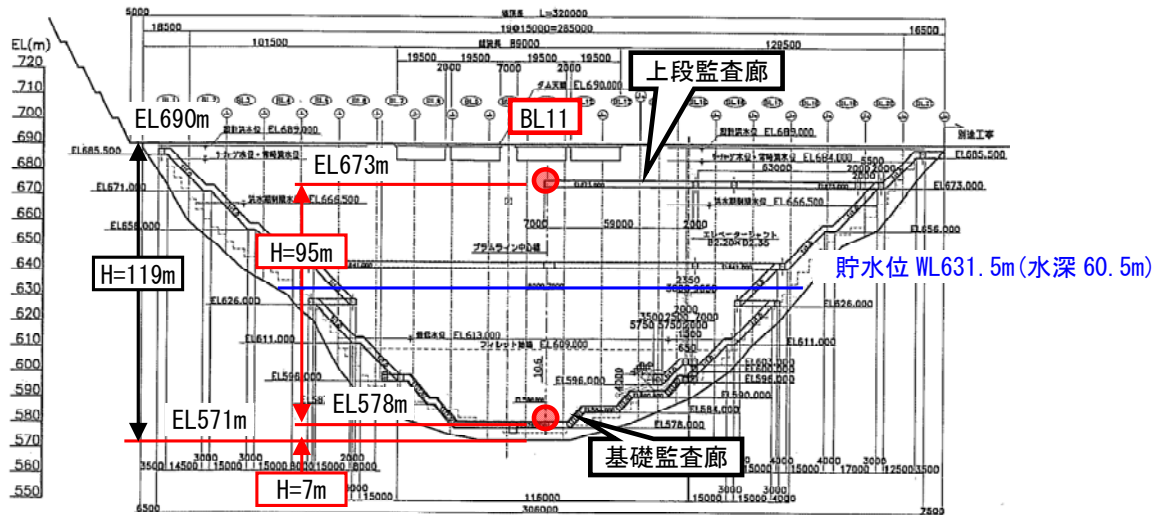


図-3.3.10 常時微動計測位置 (Aダム)

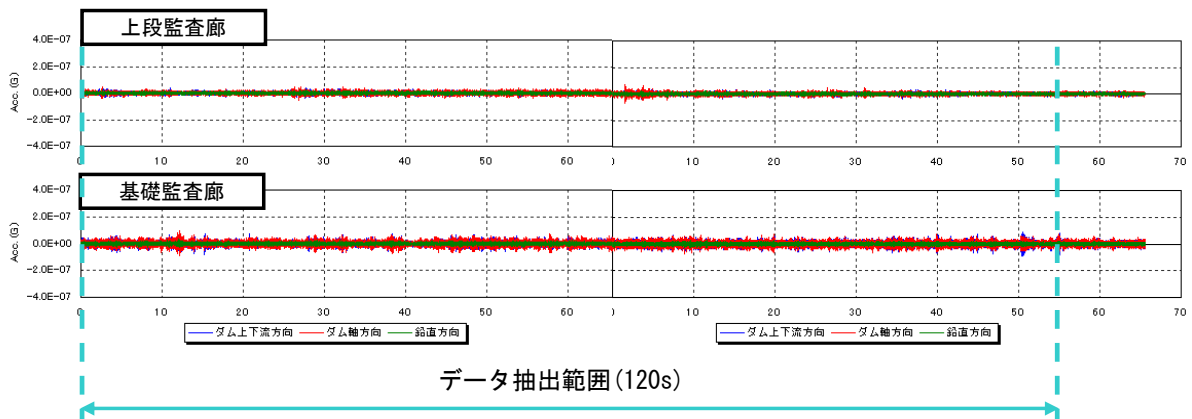
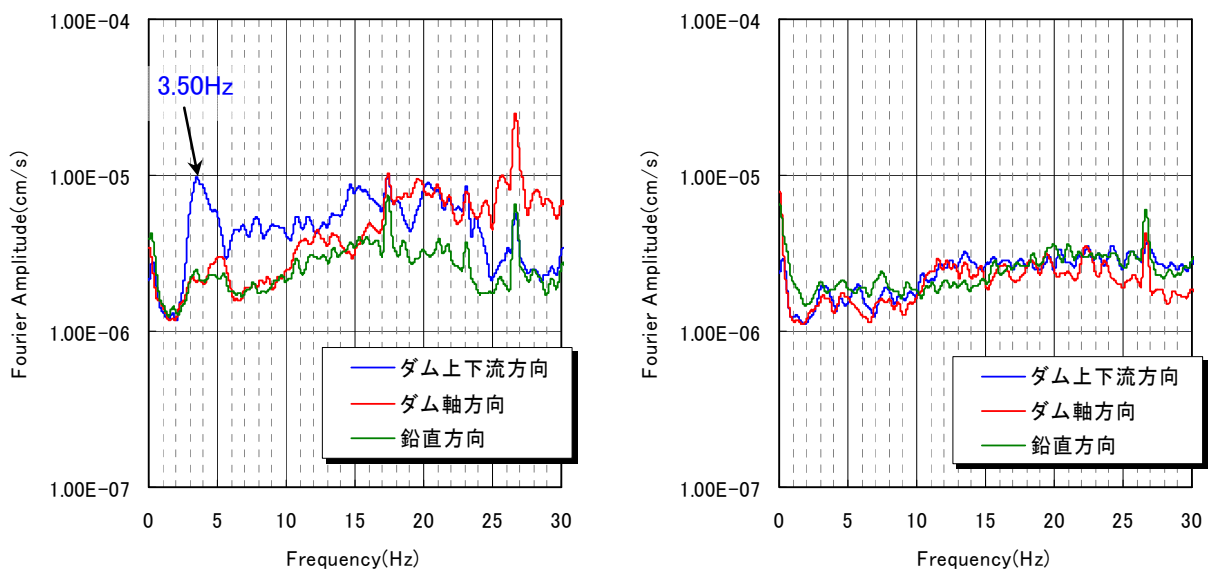


図-3.3.11 常時微動計測結果 (加速度時刻歴波形) (Aダム)


(a) 上段監査廊
(基礎岩盤から計測地点までの高さ H=102m)

(b) 基礎監査廊
(基礎岩盤から計測地点までの高さ H=7m)

図-3.3.12 常時微動のフーリエスペクトル(Aダム)

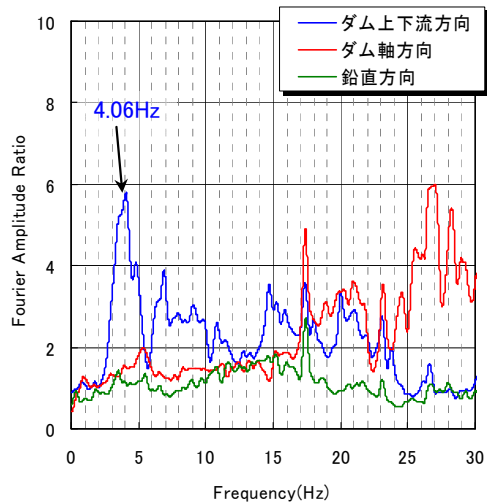
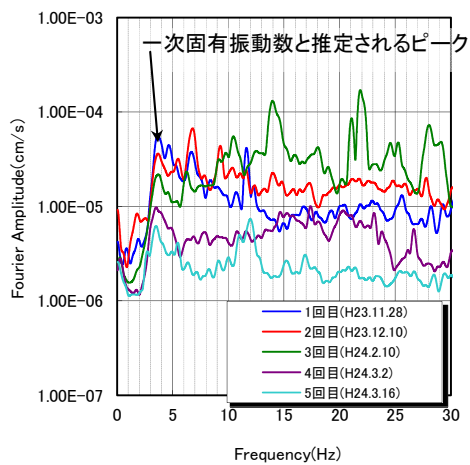
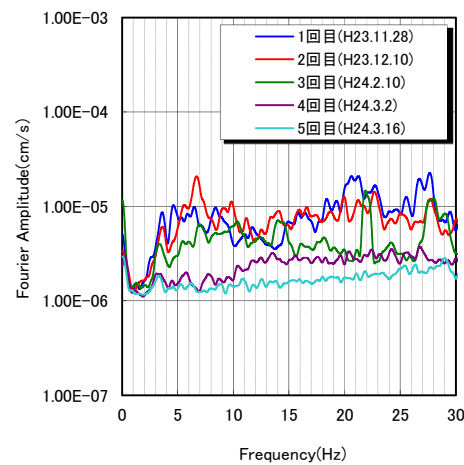


図-3.3.13 常時微動のフーリエスペクトル比
(A ダム)
(上段監査廊/基礎監査廊, 標高差 H=95m)

次に、A ダムにおいて H23 年度に実施した 5 回の計測結果 (11 ブロック、上段監査廊での計測データ) で得られた上下流方向のフーリエスペクトルを重ね書きして図-3.3.14 に示す。また、それぞれの計測で推定した固有振動数を表-3.3.6 に示す。計測時点での季節 (外気温)



(a) 上段監査廊
(基礎岩盤から計測地点までの高さ H=102m)



(b) 基礎監査廊
(基礎岩盤から計測地点までの高さ H=7m)

図-3.3.14 フーリエスペクトル(1 回目～5 回目、11BL 上下流方向重ね図)

表-3.3.6 常時微動計測により推定した一次固有振動数 (A ダム)

計測回	計測日の水深※	一次固有振動数(Hz)
1 回目(H23.11.28)	0(試験湛水開始前)	3.64
2 回目(H23.12.10)	38.3m(32.2%)	3.69
3 回目(H24.2.10)	56.0m(47.1%)	3.71
4 回目(H24.3.2)	60.5m(50.8%)	3.50
5 回目(H24.3.16)	68.1m(57.2%)	3.49

※()内の数値は水深÷堤高を表す。

の影響も含まれているものの水位が上昇するに従い、一次固有振動数がわずかに下がる傾向が見られるが、これまでの水位上昇範囲ではその減少幅は 0.15Hz 程と小さい。

今後の貯水位上昇による堤体の固有振動数への影響を予測するために、感度分析として堤高 100m のダムをモデルに固有値解析をおこなった。堤体形状、物性値及び境界条件は前述した水平クラックを考慮した解析モデル (図-3.3.1) と同一である。ただし、本解析ではクラックを考慮せず、天端幅が 10m である点が異なっている。

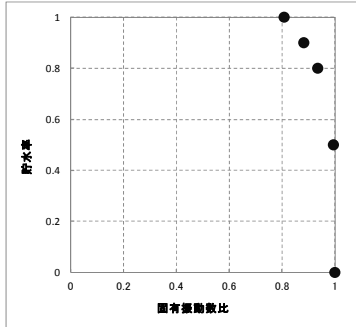
貯水位は空虚 (0m) , WL50m, WL80m, WL90m, WL100m (堤高に一致) の 5 ケースとした。

堤高 100m のモデルダムの固有値解析で得られた貯水位と固有振動数の関係を図-3.3.15 に示す。解析結果より、空虚から WL50m までの低水位状態では固有振動数はほとんど変化しないが、WL50m (堤高の 1/2 に相当) 以上では固有振動数の変化 (減少) が大きくなり、WL80m から WL100m への水位上昇により小さくなることがわかる。

前述した水平クラックを考慮した解析モデルによる固有値解析により得られた一次固有振動数と比較すると、堤体をほぼ水平に貫通するクラックが低標高部 (EL30m)

で生じることによる固有振動数の低下幅は 0.25Hz 程度であるので、貯水位がかなり高くなると劣化の進行に伴う固有振動数変化よりも貯水位変動による影響の方が大きくなる可能性があることが分かった。

解析の結果より判断すると、A ダムでは今後の最高水位（サーチャージ水位）までの水位上昇によりダムの固有振動数が大きく低下することが予想される。



※縦軸と横軸はそれぞれ満水位、空虚時固有振動数を基準とした

図-3.3.15 貯水位と一次固有振動数の関係
(堤高 100m のモデルダム解析)

(2) 季節（外気温）がダムの固有振動数に及ぼす影響

季節（外気温）がダムの固有振動数に及ぼす影響を調べるために、B ダムでは、H23 年度は夏季（9 月）と、冬季（2 月）の 2 回計測を実施している。なお、計測時点での貯水位は夏季 EL. 274.46m、冬季 EL. 276.67m でありほぼ同程度であった。計測結果の例として、左岸側最大断面である 4 ブロックの計測結果を示す。

計測位置を図-3.3.16 に示す。計測位置の基礎岩盤からの高さは、天端が 30.4m、基礎監査廊が 3.2m である。

計測は、図-3.16 に示す位置で、40 分程度実施し、その中からノイズの少ない 120 秒間のデータを抽出した。その抽出した波形を用いて、周波数加速度スペクトル解析を行った。

夏季と冬季に計測した、天端のフーリエスペクトルの比較を図-3.3.17 に示す。

計測結果より、夏季の天端の上下流方向の卓越振動数は 13.70Hz と 15.81Hz で鉛直方向もほぼ同じであった。また、冬季の天端の上下流方向の卓越振動数は 12.44Hz

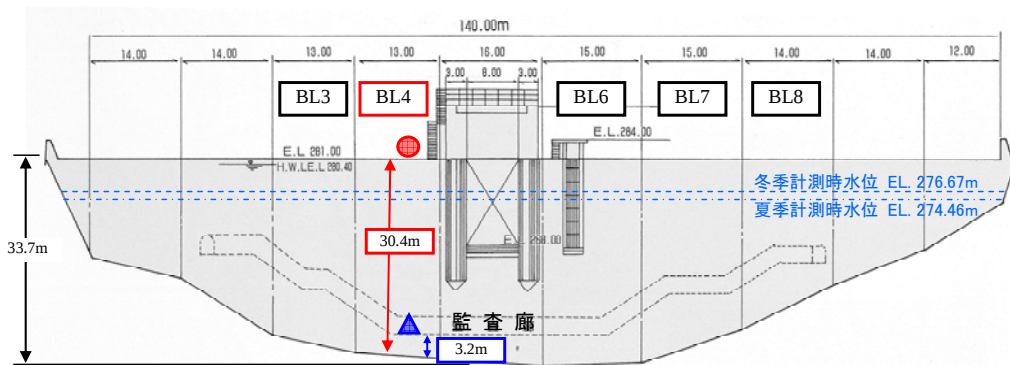


図-3.3.16 常時微動計測位置(B ダム)

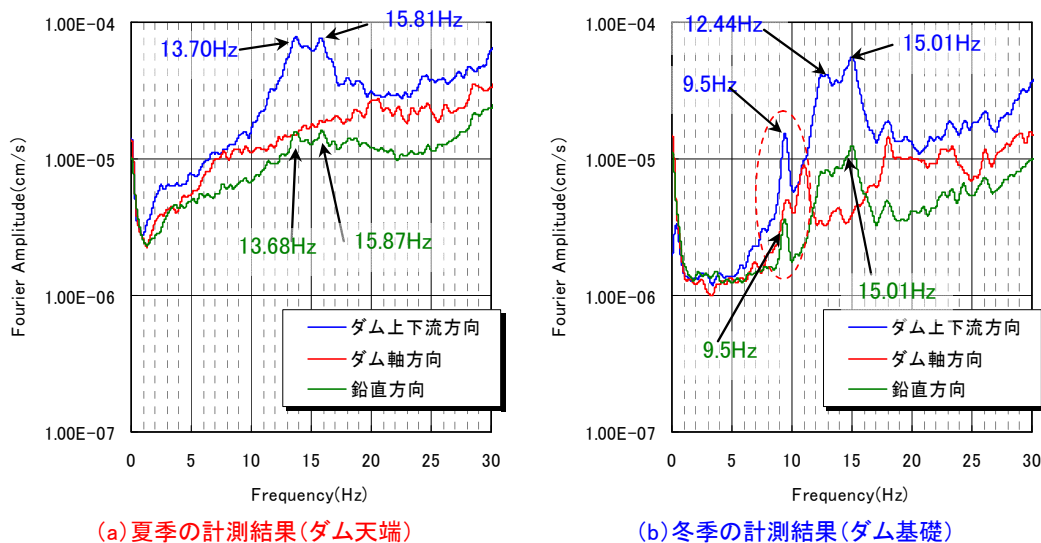


図-3.3.17 常時微動のフーリエスペクトル(B ダム)

と 15.01Hz で鉛直方向卓越振動数はやはりこれらとほぼ同じであった。

また、B ダムでは、冬季のフーリエスペクトルでは、ダム上下流方向、鉛直方向の 9.5Hz 付近に夏季には見られない周波数のピークが見られた。この原因として冬季の温度低下による、コンクリートの収縮によりブロック間の横継目がわずかに開くなどして、振動特性が変化している可能性がある。今後、引き続き計測を行い、季節（外気温）の違いがダムの振動特性に与える影響について検討を進める。

(3) 地震動観測記録との比較

表-3.3.5 に示したダムの計測結果と、ダムでの地震動観測記録を分析した既往の研究¹³⁾との比較を図-3.3.18 に示す。なお、同図中に示す今回の常時微動計測により得られた一次固有周期は、ダム上部（ダム天端又は上段監査廊）で計測した加速度波形より推定した値である。既往の研究は、日本大ダム会議の強震記録データを用いて堤体の一次固有振動数を推定したものであり、重力式コンクリートダム 34 か所の観測データを用いている。今回、実施した常時微動計測結果と比較すると、よく一致していることがわかる。

上記のことから、地震動観測記録が得られているダムでは、位置は限られるものの過去の地震観測で得られた加速度波形データも長期的なダムの振動特性の変化を捉えるために活用できる可能性がある。

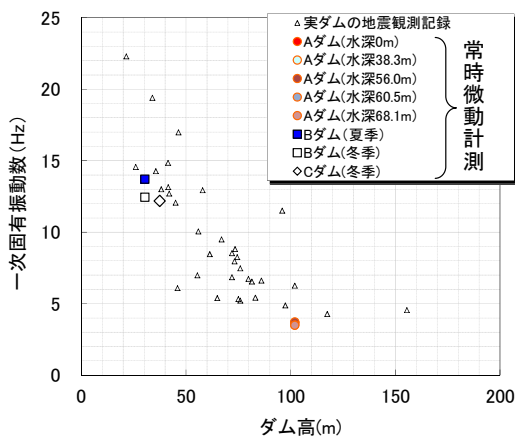


図-3.3.18 重力式コンクリートダムにおける常時微動計測結果と地震動観測記録との比較
(上下流方向一次固有振動数)

4. ダム管理技術者支援のための基本計測項目・箇所選定方法の検討

4.1 概要

近年、新規に建設されるダムの減少に伴い、ダムの構

造に関する技術的知識を必ずしも十分に有しない職員がダム管理を行う事例も多く、その技術的支援が必要となる機会が増えている。特に、完成後長期間経過したダムが増加する中、その安全管理を合理的に行っていく上で、「河川管理施設等構造令」⁵⁾や「ダム構造物管理基準」¹⁴⁾などに定められている、安全管理上の各種基本計測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課題となっている。本検討は、このような背景のもと、供用開始後長期間経過したダムの安全管理を適切かつ効率的に行えるように、安全管理上の基本計測項目・箇所の存続・中止の判断方法を明確にすることを目的とする。

平成23年度は、国土交通省が建設したダムのうち60%を占める重力式コンクリートダムを対象に、河川管理施設等構造令で定められている安全管理のための各計測項目について、第Ⅲ期のダムにおいても計測を継続すべき箇所の選定の考え方について検討した。

4.2 重力式コンクリートダムの安全管理

ダムの安全管理上、必要最小限の計測項目は、河川管理施設等構造令⁵⁾の第13条においてダムの型式と堤高に応じて定められている。重力式コンクリートダムの計測項目は、堤高が100m程度以下で地質やダム構造上の課題から特殊な設計を行っていないコンクリートダムの場合、表-4.2.1のように定められており、安全管理上計測しなければならない項目は、漏水量、変形、揚圧力の3項目である。なお、上記3項目以外に平成7年(1995年)の兵庫県南部地震以降、ダムサイトにおける地震動観測網の充実を図る目的から地震動の観測が事実上の必須項目となっている¹⁵⁾。地震観測記録はまた、大規模地震に対するダムの耐震性能照査⁷⁾の上でも極めて重要なデータとなる。

表-4.2.1 に示した各計測項目の測定頻度は、一般的には、日本大ダム会議が定めた「ダム構造物管理基準」¹⁴⁾、土木研究所¹⁶⁾で提案した安全管理のための計測頻度や「ダム管理の実務」¹⁷⁾に掲載されているダムの安全管理の段階と計測、巡視の標準的な頻度に従って行われている。「ダム構造物管理基準」による計測頻度の規定を表-4.2.2 に示す。同表において第Ⅰ期はダムの試験湛水中の期間を、第Ⅱ期は第Ⅰ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を、第Ⅲ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。

表-4.2.1 河川管理施設等構造令⁵⁾における計測装置の規定（重力式コンクリートダム 抜粋）

基礎地盤から堤頂 までの高さ（単位 m）	計 測 事 項
50 未満	漏水量 揚圧力
50 以上	漏水量 変形 揚圧力

表-4.2.2 「ダム構造物管理基準」¹⁴⁾における計測頻度の規定（重力式コンクリートダム 抜粋）

		堤高 50m 未満	50m 以上 100m 未満	100m 以上	備 考
漏水量	第Ⅰ期	1 回 / 日			
	第Ⅱ期	1 回 / 週			
	第Ⅲ期	1 回 / 月			
変形	第Ⅰ期	-	1 回/週	1 回/日	30m 以上のアーチダムを除くコンクリートダムで、計測による変形にほとんど変化が認められないものは、第Ⅲ期の計測を省略してもよい。また高さ 70m 未満のフィルダムについては、第Ⅲ期は半年ごとに 1 回としてもよい。フィルダムの上流側のり面については、貯水位が低下したときに行えばよい。
	第Ⅱ期	-	1 回/月	1 回/週	
	第Ⅲ期	-	1 回/3 月	1 回/3 月	
揚圧力	第Ⅰ期	1 回 / 週			漏水量が比較的少なく、かつ揚圧力が小さいものについては、第Ⅲ期の計測を省略してもよい。
	第Ⅱ期	1 回 / 月			
	第Ⅲ期	1 回 / 3 月			

4.3 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に関する検討

重力式コンクリートダムの計測項目や計測頻度は、表-4.2.1、表-4.2.2 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は規定はない。完成後長期間経過した挙動の安定したダムの中には、2.1.2 で述べた計測設備の老朽化や故障などに伴い、一部の箇所での計測が中止されている事例が少なくない。完成後長期間を経過したダムにおいても、安全管理上計測を継続すべき箇所と、ダムの挙動の安定性の観点から必ずしも継続を要しない箇所の区別の考え方が明確化されていないことが一因と考えられる。

このため、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Ⅲ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の選定の考え方について検討した。

計測箇所選定の流れは図-4.3.2 に示す通りであり、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ブラムライン）ごとに継続して継続を実施すべき箇所の候補を抽出し選定する流れとなっている。なお、各計測項目と計測設備との対応は図-4.3.1 に示す通りである。以下で各計測設備について具体的な継続計測箇所の考え方を述べる。

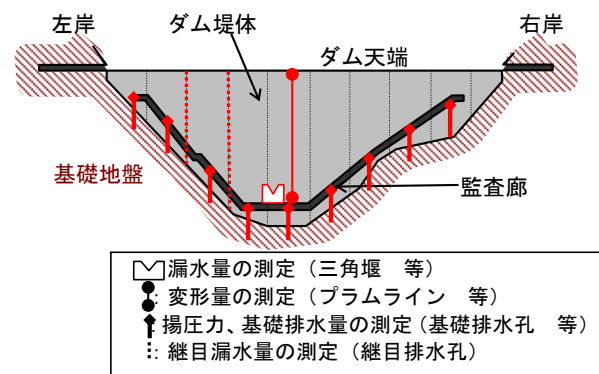


図-4.3.1 安全管理上の計測項目と計測設備

①三角堰等による漏水量の計測

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。

ダムの構造条件（堤体の形状のみならず、基礎地盤の地形・地質条件も含めたもの）の観点から漏水量の計測が必要と考えられる箇所の例を表-4.3.1 に示す。

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、異常箇所の早期特定

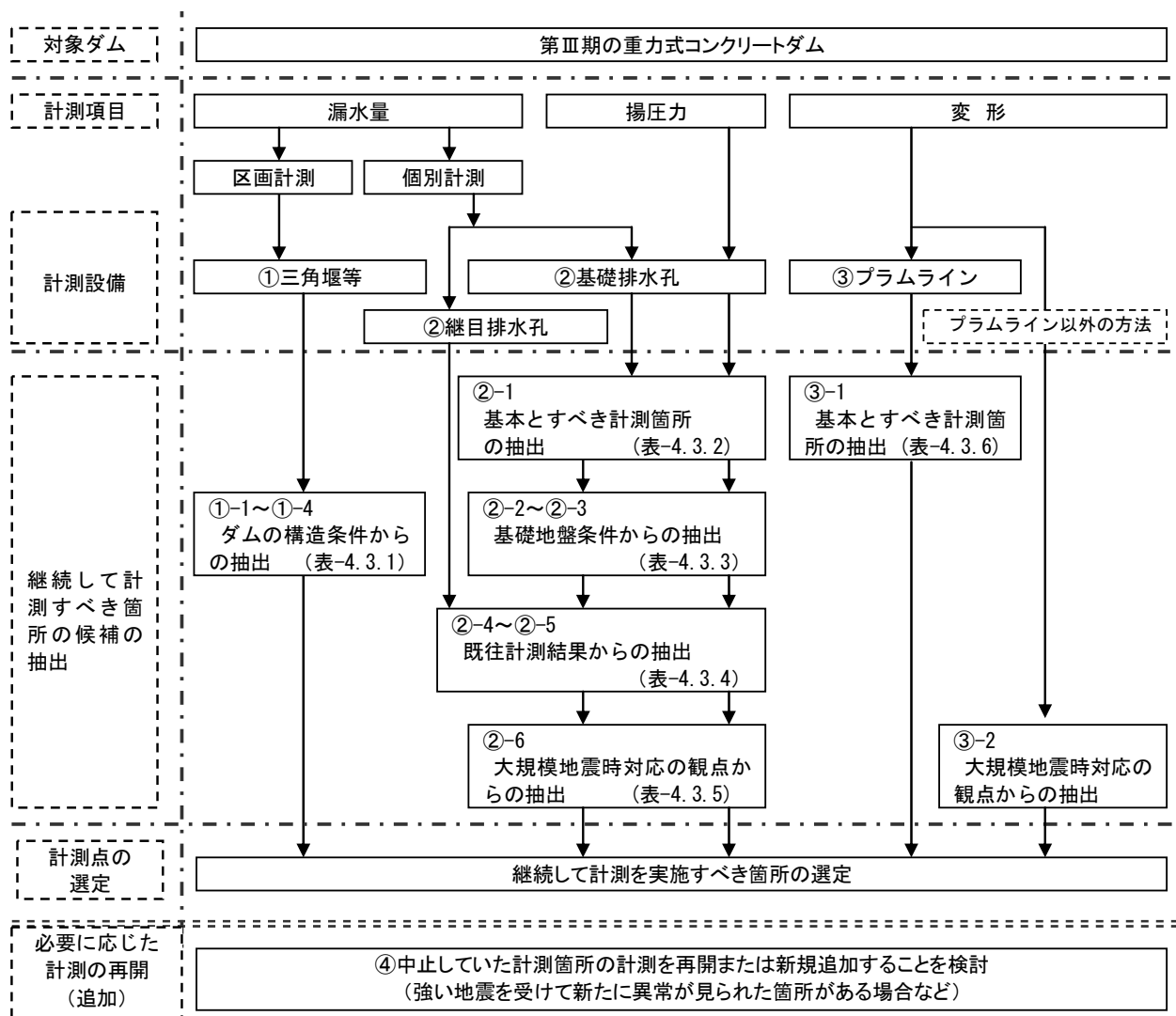


図-4.3.2 計測を継続すべき箇所の選定の流れ（第Ⅲ期の重力式コンクリートダム）（案）

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、異常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、標高別に異常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。

このように分離計測を実施することは、地震時などの非常時に漏水量が急増した場合など、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、その箇所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。

また、基礎地盤の条件によっては漏水量の計測箇所を追加する必要も考えられる。これは、個別の基礎排水孔における排水量の計測データを合計することにより代用できる。そのため、漏水が増加した区画と基礎排水孔の

位置の関係を明確にしておく必要がある。

②基礎排水孔と継目排水孔による排水量と揚圧力の計測

河川管理施設等構造令に基づき設計・建設された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させることで、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や揚圧力の計測を行っている。

また、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、止水板機能の監視と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。

基礎排水孔と継目排水孔の計測箇所を選定は以下の観点から検討される必要があると考えられる。

○基礎排水孔による排水量と揚圧力の計測をすべきと考えられる箇所（最も基本的な場合）（表-4.3.2）

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Ⅲ期においても、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、大規模な重力式コンクリートダムの中には、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設置しているダムもある。また、クロスギャラリーにおいても揚圧力の上下流方向分布を計測するために揚圧力専用孔を設置しているダムもある。これらの専用孔についても、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必要がある。

表-4.3.1 計測が必要と考えられる箇所（三角堰 等）

計測項目	計測箇所/適用条件	説明図
①-1 漏水量	◎すべてのダム ⇒全漏水量を一括計測（基本）。	
①-2 漏水量	◎堤頂長が長いダム ⇒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。	
①-3 漏水量	◎堤高の高いダム ⇒高標高部と低標高部で漏水量を分離して計測。	
①-4 漏水量	◎地山からの漏水の影響が大きいダム ⇒地山漏水量と堤体漏水量を分離して計測。	

なお、完成後長期経過したダムにおいては、基礎排水孔が遊離石灰などにより閉塞し、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ポーリングを検討することも考えられる。基礎排水孔のリポ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候補（表-4.3.3）

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の基礎排水孔と揚圧力

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、強い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

表-4.3.2 計測が必要と考えられる箇所（基礎排水孔）

計測項目	計測箇所/適用条件	説明図
②-1 基礎排水量 揚圧力	◎全てのダム ⇒最大断面ブロック付近の基礎排水孔（基本）。	

表-4.3.3 基礎地盤の条件によっては計測をすべきと考えられる基礎排水孔

計測項目	計測箇所/適用条件	説明図
②-2 基礎排水量 揚圧力	◎規模の大きな弱層（断層など）を基礎岩盤に有するダム ⇒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。 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。	
②-3 基礎排水量 揚圧力	◎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 ⇒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。	

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。

○既往計測結果より計測が必要と考えられる箇所（表-4.3.4）

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

②-5：試験湛水時や過去の地震時などに漏水量が多い継目排水孔

上記の排水量や漏水量、揚圧力について定量的な基準がある訳ではないが、既往の同規模ダムでの実測値やブロックの安定解析の結果などを参考に判断することになる。

なお、その他、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（個別計測）することを検討する。

○大規模地震後の安全管理上有効な計測箇所（表-4.3.5）

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常の有無の判断や異常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高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。

③プラムラインによる変形計測

50m以上の重力式コンクリートダムでは、表-4.2.1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）

表-4.3.4 既往計測結果を踏まえて計測が必要と考えられる箇所（基礎排水孔・継目排水孔）

計測項目	計測箇所/適用条件	説明図
②-4 基礎排水量 揚圧力	◎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 ⇒以下の基礎排水孔を含むブロック。 ・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	
②-5 継目漏水量	◎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 ⇒排水量が多くなった継目排水孔。	

表-4.3.5 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（基礎排水孔）

計測項目	計測箇所/適用条件	説明図
②-6 基礎排水量 揚圧力	◎全てのダム ⇒各ブロック1箇所の基礎排水孔。 ※常時満水位異常に基礎を有するブロックを除く	

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く、一般的には代表 1～2 断面に設置されているのが現状である。

○計測を行うべきと考えられる箇所 (表-4.3.6 ③-1)

前述したように、プラムラインによる変形(たわみ量)の計測は行える箇所が限られること、また、仮に変形(たわみ量)に何らかの以上が検知された場合、他の計測項目の場合以上に、ダムの安全性に影響を生じる事象が発生していると可能性があるため、プラムライン等の変形計測を行える箇所については、確実に計測を実施する必要がある。ただし、大規模ダムにおいて、ノーマルプラムラインに加えて設置されることのあるリバースプラムラインについては、湛水に伴う基礎岩盤の挙動を計測することが主な目的であるため、時間の経過とともに基礎岩盤の変形が一定の値に収束した段階で計測を終了することも考えられる。

○大規模地震後の対応が可能な計測箇所 (表-4.3.6 ③-2)

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縮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、堤体の挙動が大規模なダムでは 20～30 箇所の測点を設置して、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。このため筆者らは、GPS を用いた重力式コンクリートダムの変位計測を試みており、簡易な設置方法で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を確認している¹⁸⁾。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。

④その他必要に応じた計測

比較的大きな地震動を受けた場合等の非常時において、何らかの異常が認められ、かつ既存計測項目、箇所では十分な異常の把握が困難と考えられる場合には、計測設備の老朽化などで計測を中止していた箇所の計測の再開やとともに必要に応じて新たに計測箇所の追加を行うことも検討する必要がある。

5. まとめ

ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理手法の確立に向けて、①劣化・損傷機構の類型化に向けた検討、②ダムの安定性に及ぼす影響度を踏まえた劣化・損傷の評価方法の検討、③ダム管理技術者支援のための基本計測項目・箇所選定方法の検討を行った。今年度の検討で得られた成果について以下に示す。

① 劣化・損傷機構の類型化に向けた検討

管理ダムで行われた総合点検結果の報告書等に基づく劣化・損傷事象の発生傾向や発生原因について分析したその結果、コンクリートダムの堤体に見られる劣化・損

表-4.3.6 変形(たわみ量)の計測箇所(プラムライン 等)

計測項目	計測箇所/適用条件	説明図
③-1 変形	◎全てのダム ⇒最大断面付近のブロック(基本)での変形(たわみ量)計測	
③-2 変形	◎全てのダム (必要に応じて活用) ⇒各ブロックでの GPS による変位計測	

傷事象としてはクラックや漏水が多いことがわかった。なお、供用開始からの経過年数別にみると、経過年数が長いほど何らかの対策を行う必要とするものの割合が高くなる傾向があるものの、比較的経過年数の短いダムでも一定の報告例があることがわかった。理由としては、初期欠陥に起因するものが少なくないためと考えられる。なお、ダムの安定性に影響を及ぼす可能性のある主要な劣化・損傷事象と考えられるクラックに着目した分析では、発生形態としてはコンクリート面に鉛直方向に生じたものや水平打継目沿いに発生するものが多く、後者では複数ブロックにまたがる事例もあることがわかった。また、発生原因としては、温度応力によると推定されるものや、凍結融解作用によると推定されるものが多いことがわかった。このうち、水平打継面に見られる規模の大きなクラックは、堤体の構造安定性の面から問題となる可能性について検討する必要があると考えられる。

② ダムの安定性に及ぼす影響度を踏まえた劣化・損傷の評価方法の検討

ダム堤体に見られる代表的な劣化・損傷事象であるクラックや堤体の表面劣化がダムの安定性に及ぼす影響について数値解析により分析を行った。水平クラックを考慮した解析結果からは、水平打継面沿いに深いクラックを有するダムでは強い地震動を受けることによりクラックが進展し、堤体の安定性に影響が生じる可能性についても考慮する必要があることがわかった。表面劣化を考慮した解析結果からは、外部コンクリート厚程度の劣化では、下流面全体でみると強い地震動を受けた場合の影響は大きくないが、堤頂部付近の勾配変化点など応力集中が起きやすい箇所では、地震動により当該クラックが堤体内部に進展し、堤体上部の安定性に影響が生じる可能性があることがわかった。

また、堤体内部の劣化・損傷の検出手法の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検討するため、ダムの振動特性に影響を与えられとされる因子（貯水位、気温）について、その影響の把握を目的として、実ダムでの計測を実施した。その結果、ダムの固有振動数は貯水位や気温（季節）により影響を受ける傾向が見られた。引き続き計測を行い、水位などの因子がダムの振動特性に与える影響について整理し、本手法の適用可能性や適用条件について検討を進める。

③ ダム管理技術者支援のための基本計測項目・箇所選定方法の検討

供用開始後長期間経過したダムにおいても計測を継続すべき箇所の選定の考え方について、重力式コンクリー

トダムを対象に検討を行い、河川管理施設等構造令で定められている、安全管理のための計測項目について堤体の規模・形状、基礎岩盤の条件、試験湛水時や過去の地震時の計測記録、大規模地震時の観測記録、大規模地震時の対応等の観点から計測を継続すべき箇所の例を抽出した。今後は、この考え方の実ダムの適用性を検証するため、いくつかのケーススタディを行う必要がある。

参考文献

- 1) (財) ダム協会：ダム便覧
<http://damnet.or.jp/Dambinran/binran/TopIndex.html>
- 2) 小林潔司,角哲也,森川一郎：堆砂対策に着目したダムにおけるアセットマネジメントの適用性検討,河川技術論文集,第13巻,2007.6.
- 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・更新検討マニュアル（案）：2011.3.
- 4) 例えば、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.
- 5) 改定 解説・河川管理施設等構造令財団法人国土開発技術研究センター編：山海堂、2000.1.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所ダム研究室：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、No.262、2005.6.
- 7) 国土交通省河川局治水課：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説、2005.4.
- 8) 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.
- 9) 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
- 10) 国土交通省河川局河川環境課監修：ダムの定期検査の手引き、2002.2.
- 11) 金澤健司、平田和太、大熊信之、畑元浩樹：アーチダムに適した常時微動計測に基づく震度特性評価法の開発、電力中央研究所報告 No.08040、2009.6.
- 12) 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
- 13) 松本徳久、大町達夫、安田成夫、山口嘉一、佐々木隆、倉橋 宏：ダムで観測された強震記録の解析、大ダム、No.193、pp.88-94、2005.10.
- 14) (社) 日本大ダム会議：改定 ダム構造物管理基準、

1986.5

- 15) Tamura, T., Takemura, K., Fujisawa, T., Nagayama, I., Nakamura, A. and Suzuki, A., : Behavior of Dams During The Hyogoken-Nambu Earthquake on January 17,1995 in Japan, 19th ICOLD Congress,Q.74-R.60,1997.5.
- 16) 建設省土木研究所ダム部：ダムの安全管理、建設省土木研究所資料、第 1834 号、1982.5.
- 17) : ダム管理の実務、ダム管理研究会編著：(財) ダム水源地環境整備センター、1999.3.
- 18) 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 : YAMAGUCHI Yoshikazu

KONDO Masafumi

SATOH Hiroyuki

KOBORI Toshihide

SAKAMOTO Hiroki

KIEINASHIZAWA Toru

Abstract : In view of the effective use of existing stocks, appropriate management and maintenance of dams are essential. However, there is not enough information about the aging of actual dams. Towards the long-term and safe use of existing dams, it is very important to realize systematic management and maintenance considering future progression of deterioration and damage as well as their degree of impact on the safety of dams. It becomes also important to specify where to focus and how to continue monitoring for the safety of aged dams.

In this fiscal year, firstly, we investigated features and probable causes of deterioration and damage found at existing dams in Japan. Secondly, we performed numerical analysis of a concrete gravity dam assuming existing cracks and surface deterioration to examine their influence on the stability of dam, as well as a basic study for soundness evaluation of dams by using ambient vibration test to examine and evaluate the influence of long-term deterioration and damage on the safety of dams. Finally, a basic concept of selection of monitoring points where measurement for safety management should be continued at aged dams was proposed.

Key words : dam, deterioration and damage, soundness evaluation, ambient vibration test, safety management