



Title	非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の性能評価に関する研究
Author(s)	市川, 滋己
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/77500
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の
性能評価に関する研究

市 川 滋 己

2020年6月

大阪大学大学院工学研究科

非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の性能評価に関する研究

目 次

第1章 序論

1. 1 研究の背景と目的	1
1. 2 本論文の内容と構成	3
参考文献	6

第2章 コンクリートダムの維持管理の現状

2. 1 本章の概要	7
2. 2 コンクリートダムの維持管理の状況	8
2. 3 維持管理結果から見るコンクリートダム堤体の変状	18
2. 4 本章のまとめ	27
参考文献	28

第3章 コンクリートダムの水平打継目の変状

3. 1 本章の概要	29
3. 2 コンクリートダムの構造的な特徴	30
3. 3 水平打継目の変状とダム機能の低下	36
3. 3. 1 水平打継目の変状の発生機構	36
3. 3. 2 水平打継目の変状発生によるダム機能低下	39
3. 3. 3 水平打継目に変状が発生したダムの事例	43
3. 4 ダム堤体の水平打継目の変状把握	48
3. 4. 1 既往の水平打継目変状の把握方法とその課題	48
3. 4. 2 新たな水平打継目変状の把握手法の検討	52
3. 5 本章のまとめ	56
参考文献	57

第4章 衝撃弾性波法による堤体内部の水平打継目の状態把握

4. 1 本章の概要	59
4. 2 衝撃弾性波法によるコンクリートダム堤体の計測	61
4. 2. 1 衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の内部欠陥の把握	61
4. 2. 2 衝撃弾性波法によるコンクリートダム堤体の計測	63
4. 3 大型供試体を用いたダムコンクリート中の 弾性波の透過・反射特性の検討	69
4. 3. 1 検討概要	69
4. 3. 2 検討方法	69
4. 3. 3 計測結果と考察	72
4. 3. 4 まとめ	83
4. 4 供用中のコンクリートダム堤体中の弾性波伝播特性の検討	84
4. 4. 1 検討概要	84
4. 4. 2 検討方法	85
4. 4. 3 計測結果と考察	86
4. 4. 4 まとめ	104
4. 5 ダム堤体の水平打継目の状態と 計測波形の通過・反射特性との関係設定	105
4. 6 衝撃弾性波法による計測結果からの水平打継目状態の推定	120
4. 7 衝撃弾性波法による堤体調査の適用性拡大に関する検討	147
4. 7. 1 堤体調査への適用を妨げる要因	147
4. 7. 2 堤体監査廊からの堤体内部計測方法の検討	151
4. 7. 3 堤体天端アスファルト舗装面からの 堤体内部計測手法の検討	160
4. 8 本章のまとめ	166
参考文献	168

第5章 赤外線サーモグラフィ法を用いた堤体水平打継目状態把握

5. 1 本章の概要	170
5. 2 赤外線サーモグラフィ法による堤体水平打継目の調査手法の検討	171
5. 2. 1 赤外線サーモグラフィ法の適用について	171
5. 2. 2 検討方法	173
5. 2. 3 計測結果と考察	177
5. 3 本章のまとめ	197
参考文献	198

第6章 非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体 の水平打継目状態把握方法の提案

6. 1 本章の概要	199
6. 2 衝撃弾性波法と赤外線サーモグラフィ法 を併用した水平打継目状態把握	200
6. 3 水平打継目補修工事における施工の確実性確認への適用	202
6. 3. 1 変状が生じた水平打継目の補修工法	202
6. 3. 2 非破壊試験を用いた施工の確実性の確認	209
6. 4 本章のまとめ	214
参考文献	215

第7章 コンクリートダム堤体の性能評価手法

7. 1 本章の概要	216
7. 2 非破壊試験結果を用いた堤体安定性 に係る構造性能評価手法の提案	217
7. 2. 1 コンクリートダム堤体に要求される構造性能	217
7. 2. 2 滑動に対する安定性の評価	220
7. 2. 3 転倒に対する安定性の評価	236
7. 3 非破壊試験結果を用いた貯水性能の評価手法の提案	240
7. 3. 1 コンクリートダム堤体に要求される貯水性能	240
7. 3. 2 貯水性能の評価	242
7. 4 本章のまとめ	245
参考文献	246

第8章 結論	247
--------	-----

謝 辞

第1章 序論

1. 1 研究の背景と目的

コンクリートダムは、単体のコンクリート構造物としては、最大級の規模を有する構造物である。また、言うまでもなく、洪水調節、利水補給、河川環境の維持、あるいは発電等の多くの機能を有する、現代を生きる我々の安全・安心な生活のためには欠くことのできない重要な社会インフラ施設となっている。現在、我が国には約 1000 基のコンクリートダムが存在しているが、そのうち、約半数は完成後 50 年以上を経過している¹⁾。また、残りのダムについても戦後の高度経済成長期に建設、あるいは計画されたダムが多いことから、老朽化が進んだダムが今後、急増する状況にある。一方で、少子・高齢化による税収の減少や社会保障関係費の増加による財政状況の悪化に伴い、公共事業費は減少することはあっても増加することを期待することはほとんどできない。このような状況であったとしても、社会インフラ施設によって生み出される便益は変わりなく、提供し続けられる必要があることから、既存の施設に対して、補修や設備の更新等を適切に実施し、機能を長期的に保持することが求められている。

この状況から、平成 24 年 8 月に閣議決定された、第 3 次社会资本整備重点計画²⁾では、施設の適切な維持管理・更新について、早期発見・補修により施設全体の長寿命化を図る「予防保全的管理」の導入をはかりつつ、計画的に施設の長寿命化や更新を図っていくこととあわせて、的確な記録を蓄積するとともに、長寿命化に関する計画を策定し、適切な維持管理を行うこととなった。これを受け、国土交通省においてダムの管理を所管している水管理・国土保全局河川環境課流水管理室からは、平成 25 年 10 月、「ダムの長寿命化計画の策定について」³⁾が発出された。これには、長期的視点を踏まえたダムの維持管理及び設備の更新等をより効果的・効率的に推進していくため、ダムごとに点検結果や健全度の評価等を踏まえた長寿命化計画を策定し、この長寿命化計画に基づき、ダムの計画的な維持管理及び設備の更新を行うこととされている。

ダムの機能を長期的に保持するために実施する維持管理及び設備更新の基となっているのは長寿命化計画であるが、この長寿命化計画の策定、あるいは見直しは、各種点検や健全度の評価の結果に基づいて行われる。したがって、言い換えれば、ダムの機能を長期的に保持するためには、点検や健全度の評価が的確に実施される必要がある。

また、平成 27 年 9 月に閣議決定された、第 4 次社会资本整備重点計画⁴⁾における重点目標 1 は「社会资本の戦略的維持管理・更新を行う」とされており、そのため、「1-1 メンテナンスサイクルの構築による安全・安心の確保とトータルコストの縮減・平準化の両立」と「1-2 メンテナンス技術の向上とメンテナンス産業の競争力強化」という具体的な

目標が定められている。「1-1」のメンテナンスサイクルの構築とは、各施設（ダム）の長寿命化計画を核として、点検・診断、維持・更新、情報の記録・活用といったメンテナンスサイクルを構築するという意味であり、ここでも点検・診断の重要性が謳われている。また、「1-2」のメンテナンス技術の向上については、研究実施等による技術力向上のほか、新技術の開発・導入の推進として、インフラメンテナンス国民会議の設置等により、センサー、ロボット、非破壊検査等の技術研究開発や異業種からの新規参入促進が行うという目標が定められている。

以上のようなダムの維持管理を取り巻く社会情勢に対応するため、すなわち、ダムによって確保されている国民の便益と安全・安心を長期にわたって保持していくためには、ダムにおける維持管理・設備更新の実施において重要な意味を持つ「点検・健全度評価」を適切に実施することが必要である。

一方で、コンクリートダム堤体の「点検・健全度評価」として通常実施されている計測や調査は、外観目視のほか、堤体の変形量の計測、堤体及び基礎の漏水量の計測、ならびに基礎の浸透流に起因して堤体に作用する揚圧力の計測のみである。また、特に変状が進んだ場合に実施されている調査もクラックマップの作成や堤体へのボーリング調査、コア採取程度であり、構造物の状態を直接的に把握する方法が多々準備されている橋梁に代表される一般のコンクリート構造物に比べて、堤体の状態を把握する点検・調査方法の整備が不十分であることは否めない。これはコンクリートダム堤体が土木学会コンクリート標準示方書においてもダムコンクリート編⁵⁾として別の編として構成されているように、橋梁等の一般のコンクリート構造物と同じコンクリート構造物ではあるものの、構造、材料・配合、施工という基本的な面で大きく異なっているためであり、維持管理面でも異なっている。例えば、一般のコンクリート構造物の点検では非破壊検査の一種である弾性波法が多用されているが、コンクリートダム堤体はその部材厚さなどが橋梁などと比べて著しく大きく、弾性波の減衰などの影響のため、従来法をそのまま適用することが困難であるなど、点検・調査方法に課題が山積している。コンクリートダム堤体に発生したひび割れの深度調査に、一般のコンクリート構造物に用いられている方法が適用されている事例もあるが、目的を十分に満たす成果が得られていないことが多いと推定される。目的を十分に満たす成果を得るためにには、対象構造物に適した点検・健全度評価方法が必要である。

そこで、本論文においては、従来手法に比べて構造物に与える影響が少なく、また、コスト面でも有利なことが多く、技術開発が近年盛んに行われている非破壊試験分野に着目し、非破壊試験を用いてコンクリートダム堤体の健全度、すなわち性能を評価する手法についての検討を行うものである。

1. 2 本論文の内容と構成

本論文は、コンクリートダム堤体の性能評価を非破壊試験により実施する手法について論じたものであり、全8章から構成される。本論文の構成を図-1.2.1に示す。

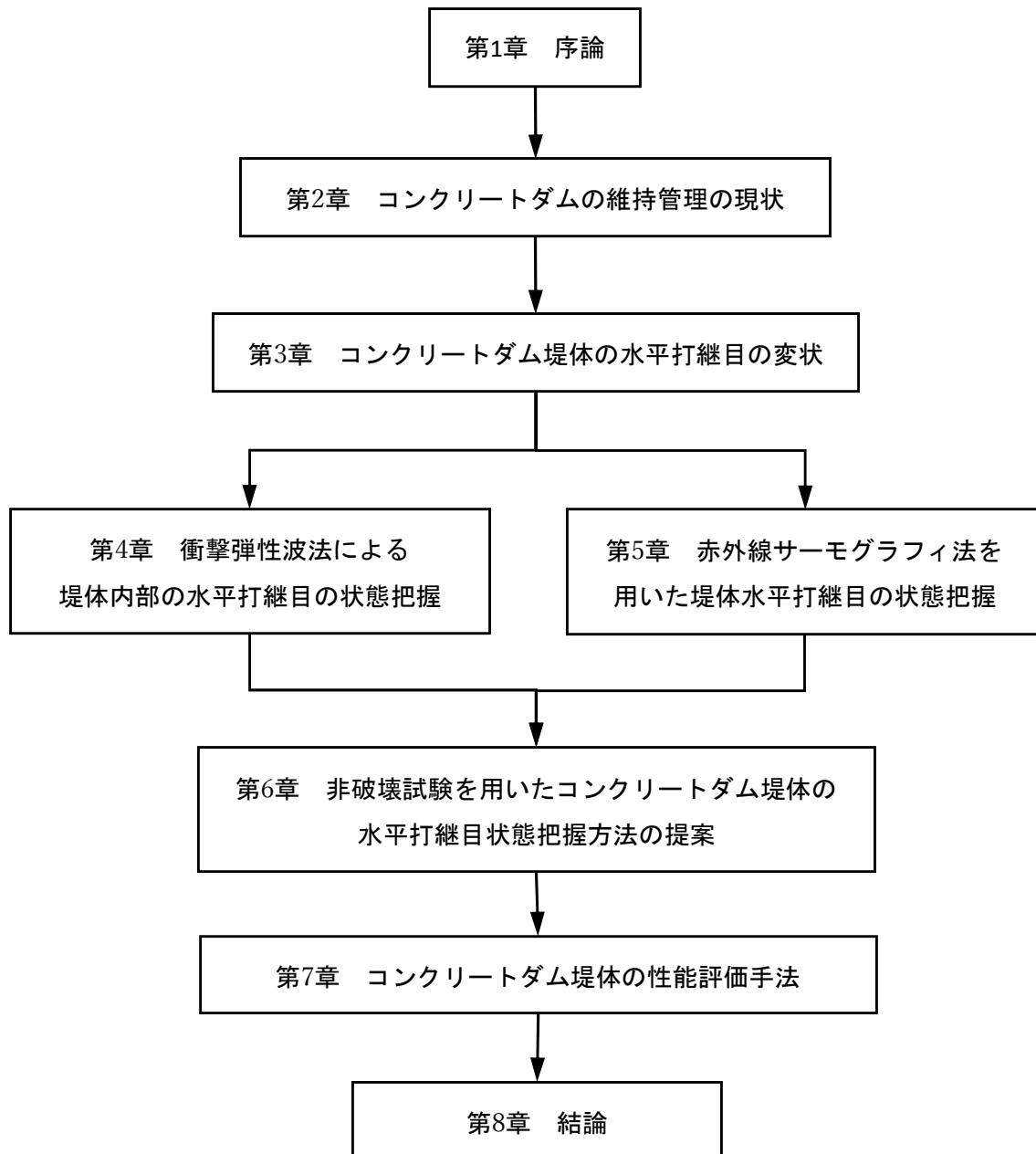


図-1.2.1 本論文の構成

第1章は序論であり、研究の背景と目的及び論文の構成と内容を述べる。

第2章においては、コンクリートダムの維持管理の状況として我が国におけるコンクリートダムの設置状況と性能維持のための維持管理システムを述べる。そして、我が国のダムの維持管理システムの一環で行われている「ダム定期検査」と同様の着眼点でコンクリートダム堤体の変状について概観する。

第3章においては、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状に関して着目し、検討した結果を述べることとする。まず、水平打継目における変状発生の一因であるとも推察されるコンクリートダム堤体の構造的な特徴について述べる。次に、水平打継目の変状の発生機構、及び水平打継目に変状が生じた際に低下が懸念されるダム機能について述べるとともに、水平打継目に変状が生じたダムの事例について述べる。さらに、このダム堤体の水平打継目の変状を把握する方法について、これまで一般的に用いられている既往の方法とその課題について述べるとともに、既往方法の課題を解消する新たな変状の把握手法について検討した結果を述べる。

第4章においては、衝撃弾性波法を用いてコンクリートダム堤体の水平打継目の状態を把握する手法について検討を行う。まず、コンクリート基礎杭の損傷調査に用いられた実績がある、弾性波の高周波数領域の成分を用いて、数mオーダーを超える距離に存在する欠陥を把握可能な調査手法を重力式コンクリートダムのモデルダムに適用した計測について述べる。次に、一般のコンクリートに比較して、大粒径骨材を使用し、不均一な傾向があるダムコンクリート中の弾性波の透過・反射特性は、一般コンクリートの特性とは異なる可能性があることを踏まえ、大型供試体を用いた室内試験で弾性波の伝播特性を確認した結果を述べる。そして、本手法適用時に精度確保の上で重要なコンクリートダム堤体における弾性波の伝播速度の特性について、供用中のコンクリートダム堤体に対する計測波形を基に分析検討した結果を述べる。次に、衝撃弾性波法により計測された弾性波波形と打継目状態との関係についてボーリング調査の結果から関連付けを行った結果を述べる。そして、大型供試体試験の結果、堤体中の弾性波の伝播特性の検討結果、波形データと打継目状態の関連付けの検討結果を踏まえた、衝撃弾性波法を用いたダム堤体の水平打継目の状態推定方法を述べる。その上で更に、この衝撃弾性波法を用いた水平打継目の状態調査手法のダム堤体への適用性を拡大する手段として検討した堤体監査廊からの計測手法及び天端アスファルト舗装面からの計測手法を述べる。

第5章においては、赤外線サーモグラフィ法を用いて計測された水平打継目周辺の熱画像から水平打継目の変状状態を把握する手法について、堤体下流面から漏水が生じ、水平

打継目に変状が生じている供用中のコンクリートダム堤体に対する計測結果を基に検討した結果を述べる。

第6章においては、調査の合理化、精度向上を目的として、衝撃弾性波法と赤外線サーモグラフィ法の2種類の非破壊試験方法を組み合わせて実施する、コンクリートダム堤体の水平打継目の状態把握手法について述べる。さらに、非破壊試験を用いた水平打継目の状態把握手法のその他の適用先として想定される、水平打継目への注入工による補修効果の確認検証への適用性について、実際の補修後への適用結果を踏まえて述べる。

第7章においては、非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目の状態把握手法を実施して得られる結果である打継目変状状況図を用いて、コンクリートダム堤体の性能（滑動に対する安定性、転倒に対する安定性、貯水性能）を評価する手法について述べる。

第8章は本論文の総括であり、本研究の結果をとりまとめる。

参考文献

- 1) 日本ダム協会：ダム便覧 2019
<http://damnet.or.jp/Dambinran/binran/TopIndex.html>
- 2) 第3次社会資本整備重点計画、平成24年8月31日閣議決定
<https://www.mlit.go.jp/common/001104757.pdf>
- 3) 国土交通省大臣官房技術調査課電気通信室長、総合政策局公共事業業企画調整課施工安全企画室長、水管理・国土保全局河川環境課流域水管理室長：ダムの長寿命化計画の策定について、平成25年10月1日
- 4) 第4次社会資本整備重点計画、平成27年9月18日閣議決定
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/sosei_point_tk_000003.html
- 5) 土木学会編：2013年制定コンクリート標準示方書[ダムコンクリート編]、2013年10月

第2章 コンクリートダムの維持管理の現状

2. 1 本章の概要

コンクリートダムは、住民が安心安全な社会生活を送るために重要な社会インフラ施設の一つである。その一方で、コンクリートダムを含むダム施設を新たに建設・設置するためには、その規模が大きいことによる建設に要するコストが多大になるだけでなく、新規建設に伴う社会環境、ならびに自然環境に及ぼす影響が非常に大きいことによる関係者間の諸調整に多大な時間を要することが一般的であり、計画から実際にその機能が発揮されるまでに四半世紀から半世紀以上を要することも珍しくはない。また、その規模は大きく、通常は多量の水を貯水していることから、万が一にも構造的安定性を損ない、決壊することがあれば、ダム下流の多くの人命、ならびに財産を損なわせてしまうことも十分想定可能な構造物であることが、道路、鉄道や橋梁などの一般の社会インフラ施設とは異なる。したがって、便益に対する需要があったとしても新たに建設・設置することが非常に困難であること、ならびに構造的な安定性の低下は人命財産の危機に直結すること、また、ダムにより得られている便益については可能な限り低コストで長期間維持されることが要求されていることから、現存するコンクリートダムの性能を維持するための活動、すなわち維持管理は非常に重要である。

本章においては、まず、コンクリートダムの維持管理の状況として、我が国におけるコンクリートダムの設置状況と性能維持のための維持管理システムを2. 2に述べる。つぎに、2. 3では、我が国のダムの維持管理システムの一環で行われている「ダム定期検査」と同様の着眼点で供用中のコンクリートダム堤体の変状について概観することとする。

2. 2 コンクリートダムの維持管理の状況

我が国において、ダムとは水の貯留を目的として設置された、基礎地盤から堤頂までの高さが15m以上の構造物のことを示すことが一般的である。2013(平成25)年3月末時点における我が国のダムの総数は、約2,600基となっている¹⁾。我が国の既設ダムの完成後経過年数区分についての経年推移を図示したものを図-2.2.1に示したが、完成後50年以上経過したダムは、現時点において全体のおよそ6割に及ぶことがわかる。また、ダムには、堤体材料の種類により、コンクリートダムとフィルダムの二つに大別され、コンクリートダムは重力式コンクリートダムやアーチ式コンクリートダム等に、フィルダムはロックフィルダムやアースダム等に細別される。ダム全体に対する型式別で、アースダムが46%，コンクリートダムが38%，ロックフィルダムが11%を占めている。完成後50年以上経過したコンクリートダムの基数を図-2.2.2に示す。現在、およそ500基のコンクリートダムが完成後50年以上経過している状況であるが、40年後には1000基をやや下回る程度のコンクリートダムが完成後50年以上経過しているような状況になる。ダムの堤体に対しては、基本的に供用年数という概念がなく、設置目的を失い、撤去された事例も我が国においては荒瀬ダムの事例がある程度であり、完成後の長時間が経過したダムの数は減ることはなく、増加していくことになる。また、我が国ではダム建設に適したダムサイトはほとんど枯渇した状況にあり、新規のダム建設事業は非常に少なくなっている。完成後、長時間が経過したダムの比率が増加する状況にある。このような状況において、重要な社会インフラ施設であるダム機能の長寿命化を図るために、適切な維持管理が必要となっている。

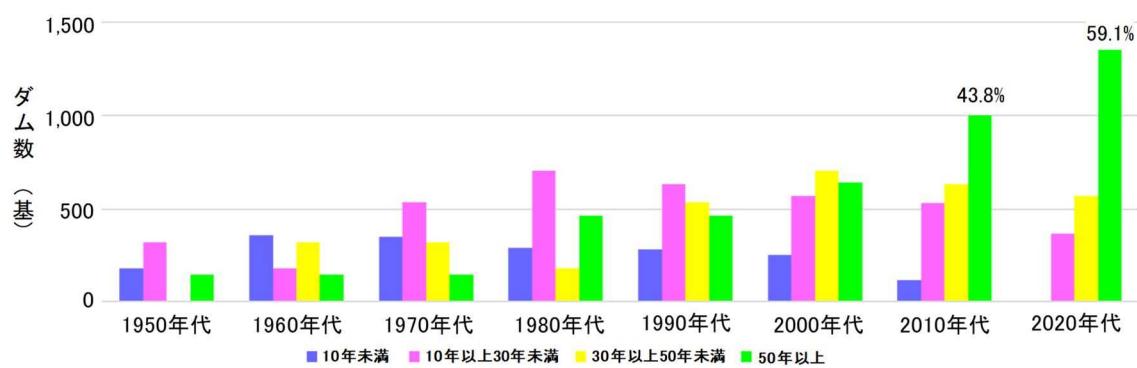


図-2.2.1 既設ダムの完成後経過年数区分の経年推移²⁾

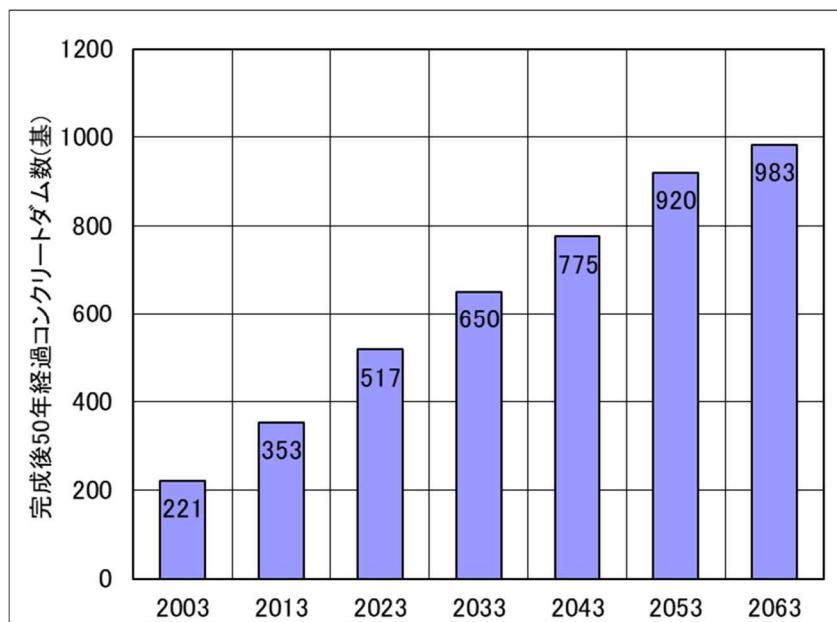


図-2.2.2 完成後 50 年経過コンクリートダム数の経年推移³⁾

また、ダムは大量の水を貯留するため、万が一、ダムが破壊した場合、人的・経済的な損失は甚大なものとなる。したがって、「ダムの安全」は「公共の安全」に直結することになり、他のインフラ施設に比較して、ダムの安全管理、すなわち維持管理の重要性は必然的に高くなると言える。

このようなインフラ施設であるダムに対しては、法令および国の定める技術基準で維持管理のシステムが定められている。まず、河川法⁴⁾第十五条の三では、「河川管理者または許可工作物の管理者は、河川管理施設又は許可工作物を良好な状態に保つように維持し、修繕し、もって公共の安全が保持されるように努めなければならない。」とダムの管理者に対して維持管理の実施を求めている。また、河川法施行令⁵⁾第九条の三においては、「一 河川管理施設等の構造等を勘査して、適切な時期に、河川管理施設等の巡回を行い、及び草刈り、障害物の処分その他の河川管理施設等の機能を維持するために必要な措置を講ずること。」「二 河川管理施設等の点検は、河川管理施設等の構造等を勘査して、適切な時期に、目視その他適切な方法により行うこと。」「三 前号の点検はダム、堤防その他の国土交通省令で河川管理施設等にあっては、一年に一回以上の適切な頻度で行うこと。」「四 第二号の点検その他の方法により河川管理施設等の損傷、腐食その他の異状があることを把握したときは、河川管理施設等の効率的な維持及び修繕が図られるよう、必要な措置を講ずること。」と、ダムの維持管理の具体的な方法として、点検の方法や頻度、あるいは異状把握時に必要な措置を行うことについて規定されている。

なお、これらの法令におけるダムとは、図-2.2.3に示すように、堤体や洪水吐き等の土木構造物、放流設備等の機械設備及び電気通信設備というダム施設を直接構成するものほかに、管理用道路、貯水池の周辺斜面、観測・計測設備あるいは管理用建物等を含む、ダムの設置目的を發揮するための複数の設備から構成されるものである。

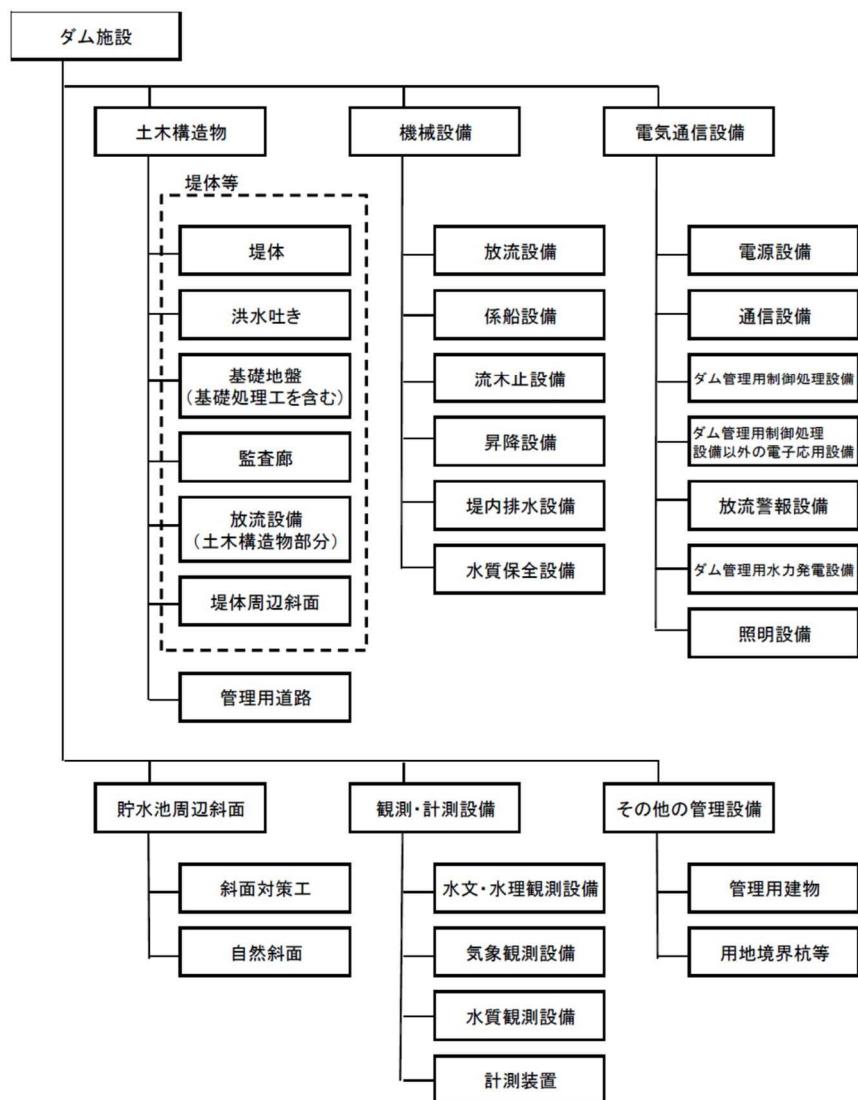


図-2.2.3 ダム施設の一般的な構成⁶⁾

施設の維持管理を実施するに当たっては、点検の計画や保全の計画を策定する必要がある。ダム施設においては、表-2.2.1に示す点検や保全に関する計画が策定されることになっている。

表-2.2.1 ダム施設の維持管理に関する計画

ダム点検整備基準	<ul style="list-style-type: none"> ダム施設及びダム施設を操作するために必要な機械、器具等の点検及び整備に関する事項を定めたもの。 ダム管理者は、これに基づき、ダム施設の日常管理における巡視・点検、維持・修繕等を行う
ダム長寿命化計画	<ul style="list-style-type: none"> ダムの安全性及び機能を長期にわたり保持するため、点検結果や健全度の評価等を踏まえ、ダムを構成する設備毎の維持管理に係る中長期的な維持管理方針を定めたもの。 ダム総合点検実施要領、ダム用ゲート設備等点検・整備・更新検討要領、電気通信施設維持管理計画指針(案)の考え方方に沿って作成する。

また、ダム施設に対して実施する点検・検査については、図-2.2.4に示すような構成に整理されるが、このうち、ダム施設の状態把握を目的として日常管理の中で行われている巡視・点検を表-2.2.2に示す。また、日常の点検以外には表-2.2.3に示すような、ダム管理者が30年に1回以上の頻度で専門家の意見を聴きながら実施するダム総合点検とダム管理者以外の専門家が3年に1回以上の頻度で実施する定期検査の2種類のダム状態の状態評価を行うシステムが整備されている。

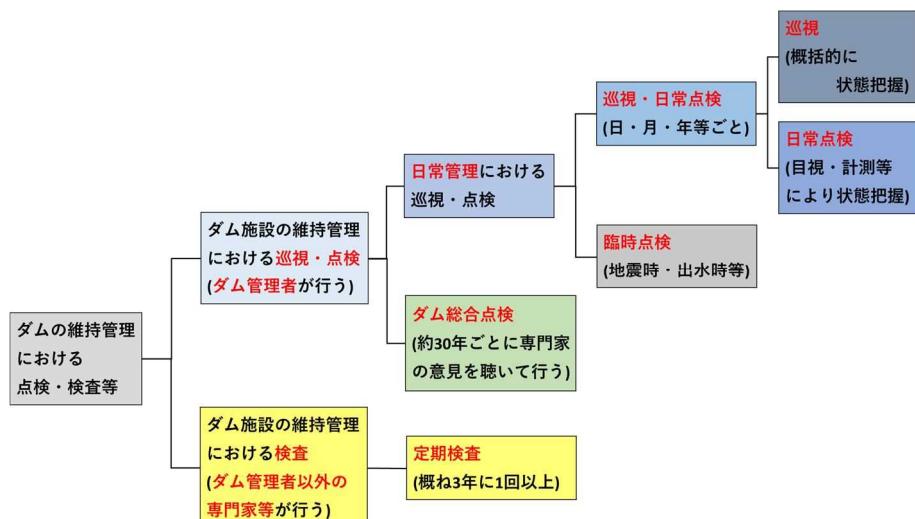


図-2.2.4 ダム施設の維持管理における点検・検査等の構成⁶⁾

表-2.2.2 ダム施設の日常管理として行われている巡視点検

巡視・日常点検		<ul style="list-style-type: none"> ・ダム点検整備基準やダム長寿命化計画に基づき行う。 ・目視や計測等により、構造上の安全性を確認することを基本とする。 ・堤体等の計測においては、貯水位等の荷重条件の変化と併せて、漏水量、変形、揚圧力の経時的な変動を把握することを基本とする。 ・建設時に課題となった点、巡視・日常点検、臨時点検、ダム総合点検及び定期検査で把握した着目ポイントを明確にし、実施する。
臨時点検	地震時臨時点検	<ul style="list-style-type: none"> ・一定の強さ（ダム基盤に設置された地震計により観測された地震動の最大加速度が 25gal、または最寄りの観測点において震度 4）以上の地震が発生した場合に実施する。
	出水時臨時点検	<ul style="list-style-type: none"> ・一定の規模（3 年に 1 回程度発生する規模を目安）以上の洪水または降雨が発生した場合に実施する。 ・主として放流設備、堤体周辺斜面及び貯水池周辺斜面を対象に行う。

表-2.2.3 ダム総合点検と定期検査の概要

ダム総合点検	<ul style="list-style-type: none"> ・専門家の意見を聴きながら、ダム管理者が 30 年に 1 回以上の頻度で実施する。 ・長期的な経年変化の状況や構造物の内部の状態等に着目し、ダムの健全度について総合的に調査及び評価し、効果的・効率的な維持管理を目的とする。 ・図-2.2.5 に示す基本フローで実施する。
定期検査	<ul style="list-style-type: none"> ・ダム管理者以外の視点から、ダム施設及び貯水池の機能が良好な状態に保持されているかを定期的に確認することを目的として実施する。 ・3 年に 1 回以上の頻度で行うこと基本とし、次回の検査時期については検査結果を踏まえて決定することを基本とする。 ・定期検査の結果を踏まえ、必要に応じて、日常点検における点検項目や頻度、管理基準値、臨時点検における経路や計測項目等について見直しを行うことを基本とする。 ・検査結果は A、B1、B2、C の 4 段階で総合判定する。（表-2.2.4）

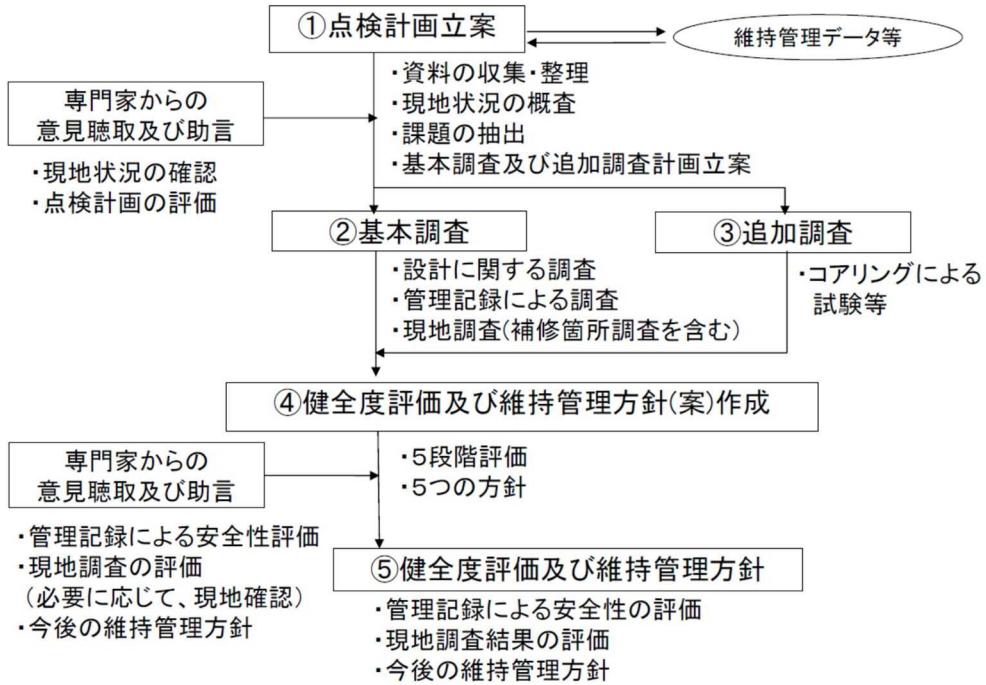
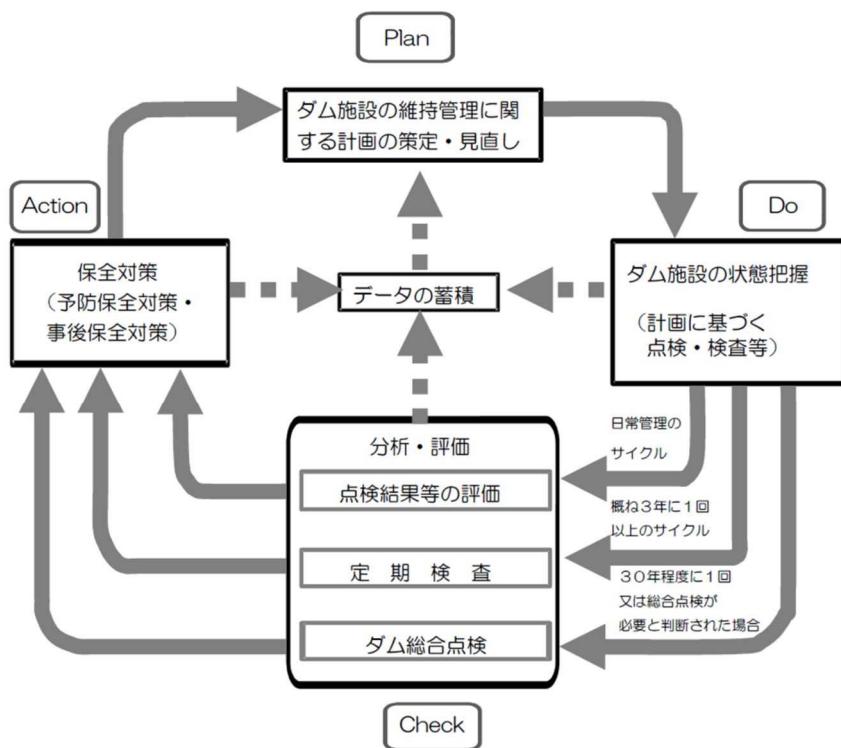


図-2.2.5 ダム総合点検の実施基本フロー⁷⁾

表-2.2.4 定期検査におけるダム施設及び貯水池の状態の総合判定区分⁸⁾

総合判定区分	状 態
A	ダムの安全性及び機能への影響が認められ、直ちに措置を講じる必要がある。
B1	ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、速やかに措置を講じる必要がある。
B2	ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、必要に応じて措置を講じる必要がある。
C	ダムの安全性や機能に影響を及ぼすおそれがないと判断され、状態監視を継続する。

ダム施設の維持管理のマネジメントサイクルとして、図-2.2.6に示すPDCAサイクルが河川砂防技術基準には示されている。すなわち、Plan：ダムの維持管理に関する計画の策定を行い、Do：計画に基づく点検や検査を行い、状態を把握し、Check：点検や検査結果に基づく分析や評価を行い、Action：分析・評価結果に基づく保全対策を実施し、再びPlan：状態、分析・評価結果及び保全対策実施状況に基づく維持管理計画の見直しの実施というサイクルでダム施設の維持管理は行われている。

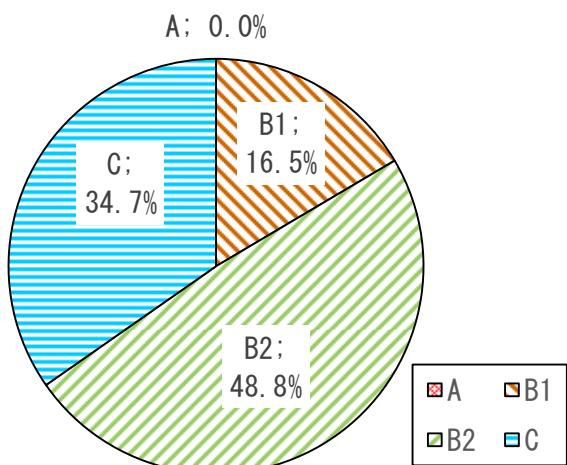


注:ダム施設の維持管理に関する計画には、ダム点検整備基準及びダムの長寿命化計画を含む

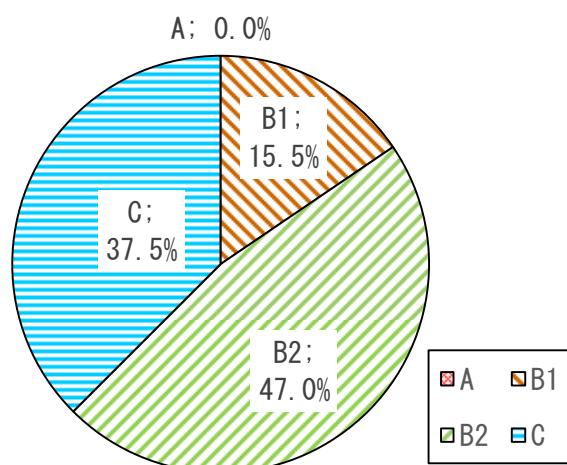
図-2.2.6 ダム施設の維持管理におけるマネジメントサイクル⁶⁾

我が国におけるダム施設の健全度について、ダム定期検査の結果⁹⁾を基に概観することとする。図-2.2.7に、国土交通省所管の558ダムに対する平成31年3月時点における最新の定期検査でのA, B1, B2, Cの4段階の判定区分の比率を整理した結果を示す。また、図-2.2.8に国土交通省の直轄管理（水資源機構管理を含む）の123基のダムに対する判定区分の組織別比率を、図-2.2.9に都道府県の管理する435基のダムに対する判定区分の組織別の比率を示す。

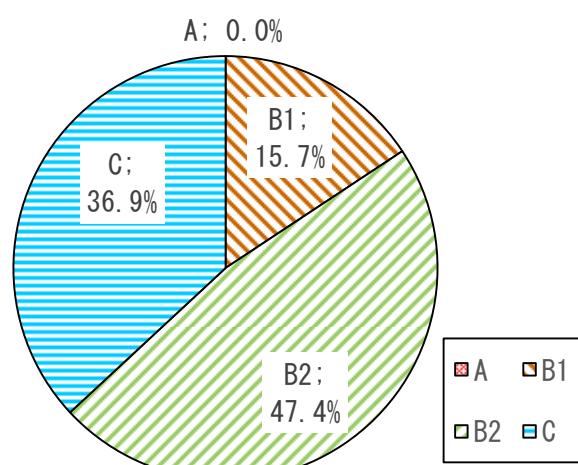
これらの結果によると、我が国のダムの健全度は、国土交通省の直轄管理（水資源機構管理を含む）ダムと都道府県管理ダムとの間で大きな違いは無く、判定Aの所謂、直ちに措置を講じる必要があるダムは存在しないが、判定B1の所謂、速やかに措置を講じる必要があるダムは全体の15%強となっている。すなわち、速やかに措置を講じないと、ダムの安全性や機能に影響が及ぶようなダムが全体の15%強は存在していることを示している。なお、各ダム管理者別の判定区分比率に差が生じているが、これは管理者によってダムの健全度自体に差があるのでなく、同一の状態に対する判定に差があるためと推察されるものである。



a) 直轄・水機構ダム健全度評価結果



b) 都道府県管理ダム健全度評価結果



c) 国土交通省所管ダム健全度評価結果

図-2.2.7 定期検査による健全度の判定比率

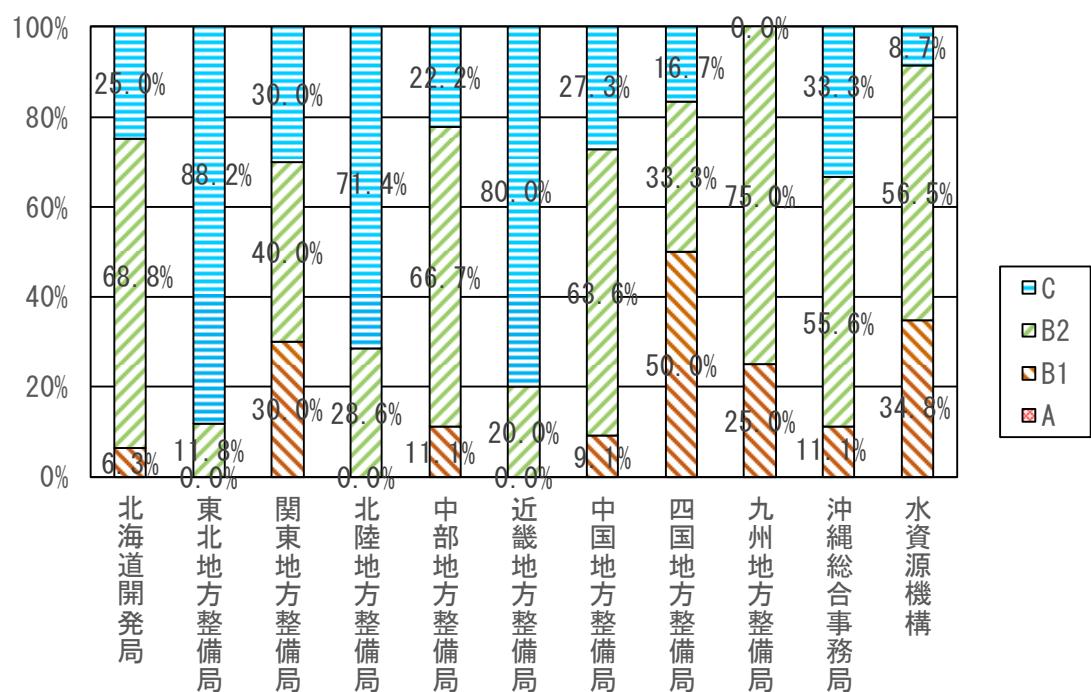


図-2.2.8 定期検査による健全度の判定比率(直轄・水資源ダム(管理機関別))

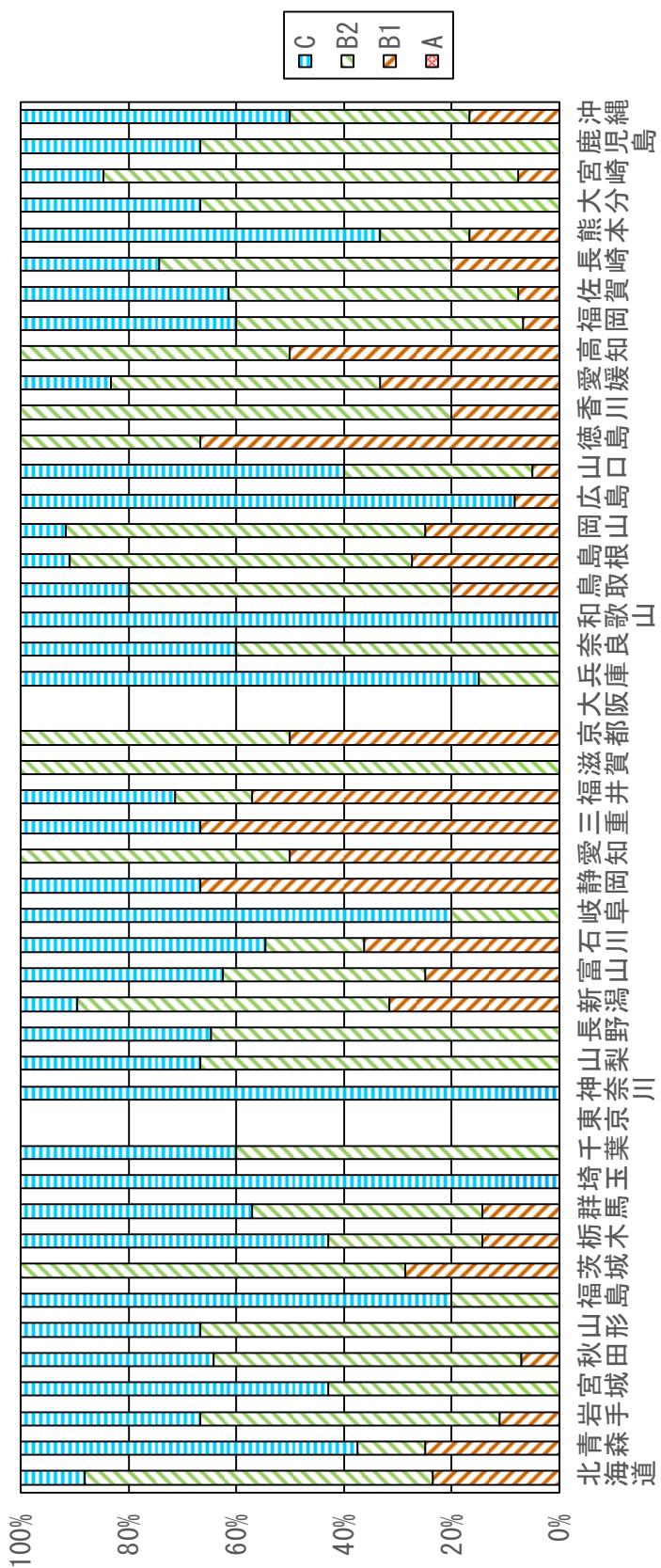


図-2.2.9 定期検査による健全度の判定比率(都道府県管理ダム(都道府県別))

2. 3 維持管理結果から見るコンクリートダム堤体の変状

我が国の供用中のコンクリートダム堤体に生じている変状について、完成年が1967年～2013年、堤高が24m～156m、堤体積が52千m³～1,750千m³、型式が重力式とアーチ式という様々な完成後の経過年数、規模、及びダム型式である17基のコンクリートダムに対して定期検査と同様の着眼点で分析整理を行うこととする。なお、定期検査は、ダム施設及び貯水池が適切に維持管理され、良好な状態に保持されているか、また流水管理が適切に行われているかについて確認するため、3年に1回以上の頻度で実施されるものであり、図-2.3.1に示すような検査の種類及び検査項目で実施される。このうち、維持管理状況検査は定められた計画に基づく維持管理の実施状況等の主にソフト面に対する検査であり、一方、ダム施設・貯水池の状態検査が施設の健全性に対する検査である。ここではダム施設・貯水池の状態に対しての検査である検査項目2と同様の区分で分析整理することとする。検査項目2の内容は、土木構造物の状態に関するものに限定しても計測結果、基礎地盤、あるいは堤体周辺斜面等の多岐に亘るが、コンクリートダム堤体に生じている変状が対象となる表-2.3.1に示す、堤体（コンクリートダム）と洪水吐き（土木構造物部分）を対象とした。なお、定期検査では、各項目に対して表-2.3.2に示すa, b1, b2, cの4段階での判定を行うことになっている。

17基のコンクリートダムの各部位の状態を表-2.3.3に示す。

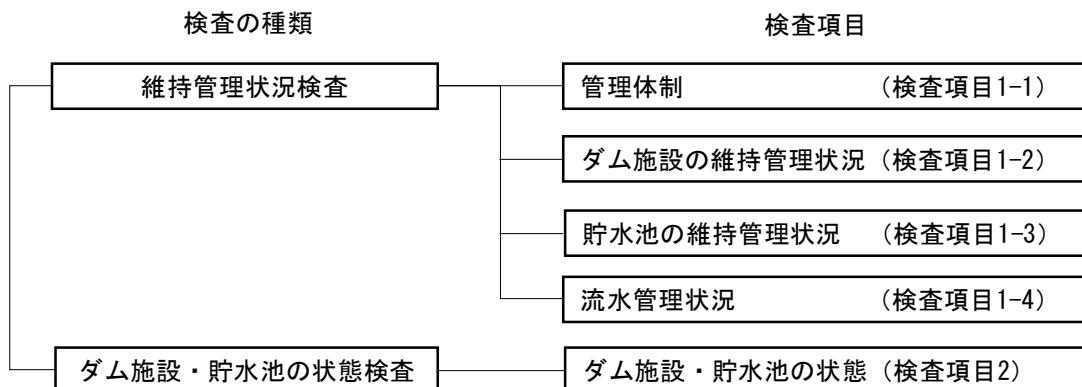


図-2.3.1 ダム定期検査における検査の種類及び検査項目⁸⁾

表-2.3.1 堤体・洪水吐き（土木構造物部分）の検査事項及び検査箇所等⁸⁾

検査事項	検査箇所		検査の着眼点	検査方法
土木構造物	堤体 (コンクリート)		<ul style="list-style-type: none"> ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすようなコンクリートの劣化・損傷等がないか 天端, 監査廊, 下流面直線部, 継目及び高欄部等の状態に異常がないか その他, 何らかの劣化・損傷等の異状がないか 	<ul style="list-style-type: none"> 巡視・点検の記録の確認 計測の記録の確認 目視や簡易計測等による構造物の状態確認
	上流面			
	下流面			
	堤頂部			
	監査廊			
	洪水吐き (土木構造物部)		<ul style="list-style-type: none"> ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすようなコンクリートの劣化・損傷等がないか その他, 何らかの劣化・損傷等の異状がないか 	
	流入部			
	越流部			
	導流部			
	減勢工			
	放流管			

表-2.3.2 判定の基準⁸⁾

判定	判定の基準
a	劣化・損傷等により、ダムの安全性及び機能への影響が認められ、直ちに措置を講じる必要がある状態
b1	ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、異状の兆候が認められることから、速やかに措置を講じる必要がある状態
b2	ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、劣化・損傷等の状態から、必要に応じて措置を講じる必要がある状態
c	劣化・損傷等が認められない、又は軽微な劣化・損傷等は生じているが、ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすおそれがないと判断され、状態監視を継続することで良い状態

表-2.3.3(1) コンクリートダムの状態(その1)

ダム名	Aダム	Bダム	Cダム	Dダム	Eダム	Fダム	
ダム型式	アーチ式	重力式	重力式	重力式	重力式	重力式	
管理開始	1967年9月	1977年3月	1999年3月	2008年3月	1969年3月	1974年3月	
所在地	群馬県	群馬県	埼玉県	埼玉県	埼玉県・群馬県	奈良県	
堤高	131m	140m	156.0m	132.0m	129.0m	63.5m	
堤頂長	352m	405m	372.0m	424.0m	605.0m	175.0m	
堤体積	571千m ³	1,321千m ³	1,750千m ³	1,670千m ³	1,193千m ³	153千m ³	
打設工法	柱状工法	柱状工法	面状工法(RCD工法)	面状工法(RCD工法)	柱状工法	柱状工法	
材料・配合 (アーチ式を除き、内部コンクリート配合)	中庸熱ボルトランジメント C=20kg/m ³ 、 Gmax=150mm ホルンフルックス、Gmax=150mm	高炉セメントB種 C=160kg/m ³ 、 砂岩、Gmax=80mm	中庸熱フライッシュセメント C=130kg/m ³ 、 砂岩、Gmax=150mm	中庸熱フライッシュセメント C=120kg/m ³ 、 砂岩、Gmax=80mm	高炉セメントB種 C=160kg/m ³ 、 砂岩、Gmax=150mm	高炉セメントB種 C=160kg/m ³ 、 安山岩、Gmax=150mm	
ダム施設・貯水池の状態検査	上流面	堤体上流面においては、ひび割れの大さな進展等の異常は確認されていません。なお、ブロック中央の横方向のひび割れと水平打継目における微量のエコフレッセンスの滲出、ならびに施工不良より剥離のひび割れを確認している。凍害劣化については、表面から少しだけ劣化が進展していくものもあることがあるから、早急な対策は必要ないが、劣化の進展状況については、把握する必要がある。	堤体上流面は、ひび割れの大さな進展等の異常は確認されていません。なお、ブロック中央の横方向のひび割れと水平打継目の滲出が確認されているが、いずれも軽微な変状である。左岸及び右岸上流から観察の結果、大きなクラックや、コンクリートの剥離・欠損、エコフレッセンスの析出及び漏水等変状は確認されず、堤体安定上、特に問題ないと考えられる。	堤体上流面の横継目および水平打継目における微量のエコフレッセンスの滲出があり、いずれも軽微な変状である。左岸及び右岸上流から観察の結果、大きなクラックや、コンクリートの剥離・欠損、エコフレッセンスの析出及び漏水等変状は確認されず、堤体安定上、特に問題ないと考えられる。	堤体上流面の横継目および水平打継目における微量のエコフレッセンスの滲出があり、いずれも軽微な変状である。左岸及び右岸上流から観察の結果、大きなクラックや、コンクリートの剥離・欠損、エコフレッセンスの析出及び漏水等変状は確認されず、堤体安定上、特に問題ないと考えられる。	BL12右岸側壁面上に漏水を伴うひび割れが確認されている。このひび割れは、現時点において堤体の安全性に影響を及ぼすレベルのものではない。今後においても、経過観察を継続していく。	
	下流面	堤体下流面には凍害等によるコンクリートの劣化が認められることから、引き続き状態監視を強めておく必要があります。必要に応じて補修を実施していく必要があります。下流面高欄部の水平打継目からの漏水について引き続き状態監視を強化しておく必要があります。ひび割れ、水平打継目および横縫の石灰痕等の変状が確認でき、既存の定点等真や目視確認では大きな変化は見られない。	堤体下流面の横継目および水平打継目等に漏水が観測される場合は、経年による大きさの変化が認められる場合に点観測による記録を残すなどして、常に状況の変化の有無を把握するようにしておこなうなど、注意深い監視が必要である。	堤体下流面の横継目および水平打継目等に漏水が観測される場合は、経年による大きさの変化が認められる場合に点観測による記録を残すとともに、常に状況の変化の有無を把握できるようにしておこなうなど、注意深い監視が必要である。	堤体下流面の横継目および水平打継目等に漏水が観測される場合は、経年による大きさの変化が認められる場合に点観測による記録を残すとともに、常に状況の変化の有無を把握できるようにしておこなうなど、注意深い監視が必要である。	堤体下流面に貯水位の上昇、冬季の気温低下に伴い漏水を伴うひび割れが確認されている箇所で下流フランジで漏水量を継続して計測している点観測がある。また、プローブ全線に渡って連続するうなクラックが確認されている。このため、引き続き、漏水について、真撮影による定期的な状況の観察等漏水量を計測している横縫目による計測を行うとともに、クラックについても進展等を把握することが必要である。	
	堤頂部	堤頂部については、スラストブロック(右岸)のワイングダム側の天端舗装及びひびきだみ(ワイングダム)の境界部の天端舗装において確認されたクラックについては、堤体下流面まで延展していることが確認できなかったため、ただらかに対策が必要となる状況ではないと考えられるが、クラックの基長、開き等について経過観察を行う必要がある。	堤体天端高欄の見通し線にはすべり変形は確認されていない。天端の横縫目部において、高欄地覆やインターロッキングブロックや歩道橋のコンクリートブロックの浮き上がりが見られる。これらの変状は、天端横梁の温度膨張及び収縮によるもの。日常の巡視、点検による監視を継続していくことと想定している。	堤体天端高欄の見通し線にはすべり変形は確認されていない。天端の横縫目部において、高欄地覆やインターロッキングブロックが浮きや横生が見られる。角部分の縁石破損が見られる。これらの変状は、天端横梁の温度膨張及び収縮によるもの。日常の巡視、点検による監視を継続していくことと想定している。	堤体天端高欄の見通し線にはすべり変形は確認されていない。天端の横縫目部において、高欄地覆やインターロッキングブロックが浮きや横生が見られる。角部分の縁石破損が見られる。立ったひび割れは確認されず、安定した状態にあると考えられる。	天端天端、天端高欄等の堤頂部コンクリートにおいて、すべり変形は確認されていない。 ・高欄及び歩道において、ひび割れ、エコフレッセンスの析出などが確認されているものの、ひび割れ幅については、大部分が0.2mm程度であり、現時点において堤体の安全性に影響を及ぼすレベルのものではない。	
	監査廊	ジョイントや水平打継目における変状、コンクリートの剥離が確認されたが、堤体の安定性、健全性への影響を危惧するるる量、表面の漏水あるいはひび割れ等の変状が発生するが、どの箇所で確認されなかつた。他の箇所で確認されなかつた。鉄筋の腐食については、腐食の進行によるコンクリートの剥離等が懸念されるところから、経過観察を行う必要がある。	監査廊内に微細なクラックや水の浸出し等が発生するが、部分的な劣化・損傷等は見られるが、どの箇所で確認されなかつた。他の箇所で確認されなかつた。日常の巡視、点検による監視を継続すれば問題のない状態である。	クロスギャラリーのフレーキャストの縫合部等から漏水が発生しているが、日常の巡視、点検により状況を監視すれば問題のない状態である。	横縫目の開き及びひび割れ、ならびにエコフレッセンスの漏出が確認されない。また通廊で計測されているジョイントのデータで増加傾向は見られないことから、現時点では特に問題とはならないと思われる。	かぶり不足による内部鉄筋の腐食と共に伴うコンクリートの剥離が確認されている。引き続き監視を強化し、必要に応じて措置を講じる必要がある。	ジョイント(横縫目)、水平打継目、監査廊面のひび割れから漏水漏出及びエコフレッセンス析出、補材の剥離、ジョイントの開き、階段部のコンクリートのひび割れとひび割れからのエコフレッセンスの析出が確認されている。各々の状態としては軽微な劣化変状であり、早急に何らかの措置を執る必要があるものではない。
土木構造物の状態	流入部	ゲート門柱においては、凍害によると推察される劣化が生じている。門柱は付近については補修が行われるが、再劣化し、ひび割れ、ボックアウトが確認された。全体としては、早急な対策が必要となるのではないかと考えられる。	流入部には軽微なひび割れが確認されているが、日常の巡視、点検により状況を監視すれば問題のない状態である。	定期的な目視確認の結果、クランクの進行、コンクリートの剥離・剥落、エコフレッセンス及び漏水などの拡大による経年的なコンクリートの劣化は確認されず、安定した状態にあると考えられる。	定期的な目視確認の結果、大規模な目視確認の結果、大きなクラック、コンクリートの剥離・剥落、エコフレッセンス及び漏水などのコンクリート劣化は確認されていないことから、安定した状態にあると考えられる。	目視確認の結果、特段の変状はみられないことから、日常の巡視、点検により状況を監視すれば問題のない状態と判断され、状態監視を継続することで良い状態と評価される。	目立ったひび割れは確認されず、特に変状は認められない。
	越流部	越流部コンクリートの状態確認としては、範囲はわざかであるが、エコフレッセンスの析出を伴うひび割れ、コンクリートの剥離等が確認されない。軽微な劣化・損傷等は生じているが、ダムの安全性及び機能性を及ぼすそれがないと判断され、状態監視を継続することで良い状態である。	越流部においてはひび割れが確認されているが、堤体の剥離等によつて、大規模な劣化及び漏水が確認されないといふ状況である。経年的に見て大きな変化は確認されずとも、常に状況の変化の有無を把握できるように注视しておこなうことが必要である。	定期的な目視確認の結果、クランクの進行、コンクリートの剥離・剥落、エコフレッセンス及び漏水などの拡大による経年的なコンクリートの劣化は確認されず、安定した状態にあると考えられる。	定期的な目視確認の結果、大きなひび割れ、コンクリートの剥離・剥落、エコフレッセンス及び漏水などのコンクリート劣化は確認されていないことから、安定した状態は確認されていない。以上の状況から、日常の巡視、点検により状況を監視すれば問題のない状態と判断され、状態監視を継続することで良い状態と評価される。	クレストゲート戸当たり金物の上下流側でコンクリートの欠損、下流側で部分的な鉄筋の露出、腐食が見られる。高速の流水に晒される場所であるため、ゲート下流側のコンクリートの欠損、部分的な鉄筋の露出について、非洪水期に状態の変化を把握し、劣化・損傷に着しい変化が見られた場合には、措置を講じる必要がある。	ひび割れのほか、ひび割れや水平打継目からの漏水、エコフレッセンスの漏出が確認される。これらの変状はいずれも軽微であり、ダムの安全性に影響を及ぼすものではない。
	導流部	導流部の境界部においては、漏水によるひび割れが発生し、順次補修対策が進められている。今後とも、計画的に補修対策を進める必要がある。	導流部の横縫目および水平打継目等に漏水が確認されていることから、引き続き経過観察と定点観測による記録を残すとともに、常に状況の変化の有無を把握できるように注视しておこなうことが必要である。	導流部の横縫目および水平打継目等に漏水が確認されていることから、引き続き経過観察と定点観測による記録を残すとともに、常に状況の変化の有無を把握できるように注视しておこなうことが必要である。	ひび割れやエコフレッセンスの析出が確認されるが、経年に大きな変化は見られず、安定した状態にある。ひび割れから鉄筋の剥出は確認されておりながら、内部鉄筋の腐食進展は構造物としての機能に影響を及ぼす程度まで進んでいないと考えられる。	導流壁の打継面から地山湧水が滲出する状況については、確認されるが、その他の機能に影響を与えるような変状は発生していないことから、日常の巡視、点検により状況を監視すれば問題のない状態であると判断される。	ひび割れ、および背ダム越流部には、摩耗による不陸(コンクリートの剥離、粗骨材の露出)が確認された。いずれの変状も軽微であり、ダムの安全性に影響を及ぼすものではない。
洪水吐き(土木構造物部分)	減勢工	導流壁に堤体導流部の境界から伸びる緩方向のひび割れが発生し、補修が行われている。現状では舗装の発生等の変状は確認されていない。また、遮離石灰を伴うひび割れは多数見られる。以上より、日常の巡視・点検により状況を監視すれば問題のない状態である。	導流壁の横縫目および水平打継目等に漏水が確認されていることから、引き続き経過観察と定点観測による記録を残すとともに、常に状況の変化の有無を把握できるように注视しておこなうことが必要である。	ひび割れやエコフレッセンスの析出が確認されるが、経年に大きな変化は見られず、安定した状態にある。ひび割れから鉄筋の剥出は確認されておりながら、内部鉄筋の腐食進展は構造物としての機能に影響を及ぼす程度まで進んでいないと考えられる。	導流壁の打継面から地山湧水が滲出する状況については、確認されるが、その他の機能に影響を与えるような変状は発生していないことから、日常の巡視、点検により状況を監視すれば問題のない状態であると判断される。	ひび割れのほか、ひび割れや水平打継目からの漏水、エコフレッセンスの漏出が確認される。これらの変状はいずれも軽微であり、ダムの安全性に影響を及ぼすものではない。	
	-	-	-	-	-	-	

表-2.3.3(2) コンクリートダムの状態(その2)

ダム名	Gダム	Hダム	Iダム	Jダム	Kダム	Lダム	
ダム型式	重力式	アーチ重力式	重力式	アーチ式	重力式	重力式	
管埋開始	1992年3月	1969年3月	1998年3月	1970年7月	1999年3月	1984年4月	
所在地	奈良県	京都府	京都府	三重県	三重県	兵庫県	
堤高	72.0m	67.0m	67.4m	82m	70.5m	75.0m	
堤頂長	322.0m	208.7m	438.0m	275m	355.0m	285.0m	
堤体積	331千m ³	214千m ³	670千m ³	175千m ³	426千m ³	441千m ³	
打設工法	面状工法(拡張レア工法)	柱状工法	面状工法(RCD工法)	柱状工法	面状工法(拡張レア工法)	柱状工法	
材料・配合 (アーチ部除き、内部コン クリート配合)	中庸熱フライッシュセメント $C=130kg/m^3$ 花崗岩、Gmax=150mm	中庸熱フライッシュセメント $C=165kg/m^3$ 花崗岩、Gmax=80mm	中庸熱フライッシュセメント $C=120kg/m^3$ 砂岩、貝岩、Gmax=80mm	中庸熱ボルトランドセメント $C=230kg/m^3$ 花崗岩片麻岩、Gmax=120mm	中庸熱フライッシュセメント $C=130kg/m^3$ 花崗岩・片麻岩、Gmax=150mm	高炉セメントB種、 $C=140kg/m^3$ 花崗岩閃雲岩、Gmax=150mm	
ダム施設・貯水池の状態検査	堤体(コンクリートダム)	上流面	目立ったひび割れは確認されず、特段の変状は認められない。	高標高部にアルカリシリカ反応(ASR)によるものと推定される亀甲状の微細ひび割れらエロソリエンスが確認されているが、ダム堤体の安定性に影響を及ぼすような変状にはなっていない。右岸スラストコック上流面のひび割れについて、表面に限定期でおり直ちにダム堤体の安定性に影響を及ぼすような変状にはなっていないため、今後も引き続き、定期巡回等において状況を監視していく。	目立ったひび割れ等は確認されないが、多くの水平打継縫にエロソリエンスが確認される。また、ダム堤頭部の高欄に堤体コンクリートの境界部付近からのエロソリエンスと、漏水の滲出しが確認される。これでの変状については、堤体の安全性及び機能に影響を及ぼすおそれはないと考えられる。	堤体下流面およびブリッジング主な変状としては、J1からJ2のエロソリエンスの析出、J2からD2の漏水による滲みとD2の水平打継縫からのエロソリエンスである。 いれども堤体の安定上、直ちに問題となる変状ではない。	目視確認では、堤体上流面に問題となる変状は確認されていない。
		下流面	堤体下流面にエロソリエンスの析出、漏水が見られ、気温が低下する冬季に漏水を経験している箇所がある。また、堤頭部にロック全体に蒙る現象が確認されている。	堤体下流面の水平打継縫により、部分的にアルカリシリカ反応(ASR)によるものと推定される亀甲状の微細ひび割れ及び軸方向に沿ったひび割れが確認される。これが堤体の構造強度に影響を及ぼすおそれはない。	堤体下流面の水平打継縫等から季節的に滲水が確認されている。その後も必要に応じて、この他の業界の実績検証も含めた堤体の把握と、漏水量の低減に向けた取り組みが必要である。	堤体下流面の概ねブロック中央の軽微なひび割れ、横縫自らの漏水が生じており、状態監視強化を継続する必要がある状態である。	ブロックの中央付近において堤体基部もしくはブリッジングから底面鉛直方向に進展する外部荷重による過度ひび割れが確認される。これらのひび割れが長時間で進展して、堤体深部まで進展していないことを確認する。水平打継縫自らから析出するエロソリエンス(漏出)がD2の範囲を280m以下に多く確認されている。
		堤頭部	ダム軸が曲線部分の堤頭部でアーチ部と舗装面に上り下り方向のひび割れが確認されている。幅の拡大傾向がある。	天端道路の見通しにおいて、変位は認められない。	天端橋梁支承の下流側の側壁において、エロソリエンスの析出、コンクリート表面の剥落が確認されている。これらは鉄筋の錆等は剥離が確認されない。天端橋梁支承におけるエロソリエンスは錆汁を持っており、天端橋梁支承部に沿っておらず、剥離したコンクリート部では錆筋の露出が確認されていなければ、構梁の構造上、直ちに問題となる変状ではないと考えられる。	天端側水路の底面と連なるダム軸方向(維持方角)のひび割れが確認されたため、数年間、大幅傾向は見られなかったことから、延性は無く、堤体コンクリートへの影響はないと判断され、補修が行われている。その後、変形は認められていない。	天端高欄コンクリートでの筋露出や天端コンクリートの目地先端でのコンクリートの剥落が挙げられるが、直ちに堤体安定性に問題となる変状にはなっていない。
		監査廊	クロスギャラリーにエロソリエンスの析出、水の滲み出し等が見られる経目がある。また、ダム軸が曲線部分の監査廊の経目でコンクリート角部の剥離や隙間の発生が見られる。	監査廊内には所々でひび割れが確認される状況はあるが、ひび割れかの錆汁については確認されていない。天井の横縫目、水平打継縫あるいは天井のひび割れからのエロソリエンスが確認される。	B24天井部にダム軸方向のひび割れが確認されるほか、エンドモルタルによる補修跡、ひび割れ天井に及ぶたひび割れ等からエロソリエンスが析出している。ひび割れについて、錆筋等は錆汁を持っておらず、剥離したコンクリート部では錆筋の露出が確認されていなければ、構梁の構造上、直ちに問題となる変状ではないと考えられる。	横縫目や水平打継縫からエロソリエンスの析出および漏水の滲みがある。また、ひび割れから漏水の滲みを伴うエロソリエンスが確認されている。錆筋腐食に伴うひび割れの発生やコンクリート剥離・剥落は確認されなかった。変状について、進展は見られない。	基盤監査廊の隅角部の壁面上に生じているひび割れから、錆汁が滲出していることから、必要に応じて措置(補修)を講じる必要がある。
		流入部	非常用洪水吐き流入部は、コンクリートの状態確認としては、コンクリートの浮き、欠落、剥離及び目立つたクラックは確認されず特に変状は認められない。	非常用洪水吐き流入部は、コンクリートの浮き、欠落、剥離及び目立つたひび割れが確認されず、ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすおそれのある変状は認められない。	コンクリートの浮き、欠落、剥離及び目立つたひび割れが確認されない。	横縫目や水平打継縫からエロソリエンスの析出および漏水の滲みがある。また、ひび割れから漏水の滲みを伴うエロソリエンスが確認されている。錆筋腐食に伴うひび割れの発生やコンクリート剥離・剥落は確認されなかった。変状について、進展は見られない。	部分的な劣化・損傷等はみられるものの、日常の巡視・点検により状態を監視すれば問題のない状態である。
	洪水吐き(土木構造物部分)	越流部	目立ったひび割れ、コンクリートの剥離、鉄筋の露出は確認されず特に変状は認められない。	目立ったひび割れ、コンクリートの剥離、鉄筋の露出は確認されず、ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすおそれのある変状は認められない。	非常用洪水吐き越流部の戸当り近傍の次の2次コンクリートで構成される斜面上に問題となる変状は確認されない。	天端側水路底面のダム軸方向にひび割れについては、拡大傾向は見られないが、局所的な劣化・損傷が見られる。引き継ぎ計測・監視を行うとともに、劣化・損傷に対しては必要に応じて措置を講じる必要がある状態である。	部分的な劣化・損傷等はみられるものの、日常の巡視・点検により状態を監視すれば問題のない状態である。
		導流部	導流部は、ひび割れとひび割れからのエロソリエンス析出、漏水が確認される。ただし、ひび割れの幅はとても微細であり、漏水についても滲み出し程度である。そのままは浮き、欠落、剥離及び目立つたクラックは確認されず特に変状は認められない。	導流部は、コンクリートの剥離、鉄筋の露出は確認されず、ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすおそれのある変状は認められない。	非常用洪水吐き導流部において、コンクリートの浮きの目立つ部分があるのに、剥離が拡大しないよう必要に応じて修復が必要がある。	天端側水路底面のダム軸方向にひび割れについては、拡大傾向は見られないが、局所的な劣化・損傷が見られる。引き継ぎ計測・監視を行うとともに、劣化・損傷に対しては必要に応じて措置を講じる必要がある状態である。	部分的な劣化・損傷等はみられるものの、日常の巡視・点検により状態を監視すれば問題のない状態である。
		減勢工	左岸側減勢工側壁の一部に水平打継縫からひび割れ、エロソリエンス析出、漏水が確認される。たゞし、ひび割れの幅はとても微細であり、漏水についても滲み出し程度である。そのままは浮き、欠落、剥離などは認められない。	左岸側減勢工側壁の一部に水平打継縫からひび割れ、エロソリエンス析出やひび割れが確認されるが、錆汁は確認されない。錆汁は浮き、欠落、剥離及び目立つたひび割れの確認される。近年の進歩においては剥離欠損、コンクリート表面の摩耗による不陸、錆筋露出が確認される。現時点においては補修を必要とするものではないが、今後の経過を把握する必要がある。	導流壁では、横縫目あるいは水平打継縫からひび割れからエロソリエンスが確認されるが、いわゆる錆汁は伴っていない。左岸側導流壁の水平打継縫において、漏水が確認される。これら変状は、ダムの安定性及び機能に影響を及ぼすものではないと考えられる。	左岸導流壁下部の鉛直方向に確認されるエロソリエンスは、導流天端付近で確認されていることから、内部鉄筋の腐食によっておらず、構造上問題となる変状には至っていないと考えられる。	部分的な劣化・損傷等はみられるものの、日常の巡視・点検により状態を監視すれば問題のない状態である。

表-2.3.3(3) コンクリートダムの状態(その3)

ダム名	Mダム	Nダム	Oダム	Pダム	Qダム		
ダム型式	重力式	重力式	重力式	重力式	重力式		
管理開始	1978年3月	1975年3月	2001年3月	1975年10月	2013年3月		
所在地	徳島県	高知県	愛媛県	愛媛県	大分県		
堤高	24.0m	106.0m	106.0m	42.0m	94.0m		
堤頂長	247.0m	400.0m	250.0m	138.0m	370.0m		
堤体積	52千m ³	1,139千m ³	510千m ³	80千m ³	580千m ³		
打設工法	柱状工法	柱状工法	面状工法(RCD工法)	柱状工法	面状工法(拡張アーチ工法)		
材料・配合 (アーチ式を除き、内部コンクリート配合)	普通ポルトランドセメント、 C=150kg/m ³ , 角閃岩, Gmax=150mm -,-	中庸熟フライアッシュセメント、 C=120kg/m ³ , 角閃岩, Gmax=80mm	中庸熟フライアッシュセメント、 C=150kg/m ³ , 砂質片岩, Gmax=120mm 安山岩, Gmax=80mm	中庸熟フライアッシュセメント、 C=140kg/m ³			
ダム施設・貯水池の状態検査	上流面	亀甲状の微細なクラックが確認されており、初生的な乾燥収縮ひび割れの可能性はあるが、7か月以内では現れないと判断される可能性もある。また、水平打継目及びひび割れから部分的にコロナースの折れ込みによる剥離、粗骨材の露出が確認されている。以上から軽微な劣化・損傷等は生じているが、ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすおそれがないと判断される。	上流面に異常はみられず、状態監視を継続することで良い状態である。	部分的かつ軽微な劣化・損傷等はみられるものの、日常の巡視・点検により状態を把握すれば問題はない状態である。	堤体上流面・フランジにひび割れが生じている。現状では深さ1mmまでひび割れの進展、水平打継目の劣化による剥離が確認される。また、下部門柱基部附近に水平打継目から剥離がありひび割れが複数見られる。以前と比べてひび割れの増加・伸長は確認されているが、現状で周辺設備やゲート操作等への影響は感じていない。ダムの機能は保持されていると判断されるものの、速やかに対策を講じる必要がある。	上流面に異常は見られず、状態監視を継続することで良い状態である。	
	下流面	ビアに縦方向の微細なひび割れなどの軽微な変状が確認されるが、状態監視で問題ない状態である。	堤体下流面に漏水がみられ、貯水位により、漏水量が増減する箇所が数か所みられる。引き続き状態監視を強化しておく必要がある。	ひび割れ及びエプロレッセンスがみられ、引き続き状況を経過観察し、マップ等記録を残し、必要に応じて措置を講じる必要がある。	堤体下流面の漏水は、時期(貯水位・温度)により漏水箇所及び程度(量・範囲)が変化するが、いずれの箇所も少量かつにじみ程度である。漏水箇所の増加傾向は見られない。	堤体下流面において漏水が確認されており引き続き状態監視が必要である。	
	堤頭部	ダム天端の天端道路路面、高欄、地覆にズレや変形等は見られない。地覆において若干開きがあるが、擴大傾向は見られない。したがって、状態監視で問題ない状態である。	堤頭部に異常はみられず、状態監視を継続することで良い状態である。	左右岸における、上下流高欄には歪みは見られない。一部の天端部高欄継目とのズレ及び継目の開きはあるが堤頭部については、安定していると考えられる。	堤頭道路部の暫定対策後、現時点では段差を伴う下流側のひび割れは発生していないが、道路部のコンクリートにひび割れが発生・進展している。また、堤頭部の高欄でジョイント部の数箇所で見られる開きやすさは、堤体の谷側への累積的な変形の影響とみられる堤体上流面で確認されているひび割れが進展する可能性があり、速やかに対策を講じる必要がある。	軽微なひび割れは生じているが、状態監視を継続することで良い状態である。	
	監査廊		監査廊の壁面、頂部に発生したひび割れからの漏水が継続的にみられている。引き続き状態監視を強化していく必要があります。また、ケーブルラックにエプロレッセンスの塊がみられ、状態を記録したうえで、速やかに除去する必要がある。	エプロレッセンスの発生箇所が増えているが安定した状態にある。部分的かつ軽微な劣化・損傷等はみられるものの、日常の巡視・点検により状態を監視すれば問題はない状態である。	ひび割れやエプロレッセンスが多数確認されている。BL10付近のひび割れの発生位置は堤体の上下流面に発生しているクラックと概ね整合しており、堤体の挙動と関連していることが想定されることから、ダムの機能は保持されていると判断されるものの、速やかに措置を講じる必要がある。	軽微な劣化・損傷は生じているが、状態監視を継続することで良い状態である。	
	流入部	過年度にゲート上流側のコンクリートの劣化・損傷等の潜水面調査及び応急対策を実施しているが、その後の状態把握が行われていない。ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、今後とも計画的に調査を実施し、必要に応じて措置を講じてい必要がある。	ひび割れやそれに沿ったエプロレッセンスなど、劣化・損傷がみられ、引き続き状況を観測し、必要に応じて措置を講じる必要がある。	ひび割れやそれに沿ったエプロレッセンスなど、劣化・損傷がみられ、引き続き状況を観測し、必要に応じて措置を講じる必要がある。	軽微な劣化・損傷等は生じているが、ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすおそれがないと判断され、状態監視を継続することで良い状態	流入部に異常は見られず、状態監視を継続することで良い状態である。	
	越流部	近年、ゲート整備時に越流部コンクリートに洗浄が確認され、補修を行ってきている。ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、引き続き、ゲート整備に合わせて、劣化・損傷の状況を計画的に把握し、必要に応じて措置を講じる必要がある。	軽微なクラックが確認できるが、状態監視を継続することで良い状態である。	軽微な劣化・損傷等は生じているが、ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすおそれがないと判断され、状態監視を継続することで良い状態	越流部は、劣化や損傷等によるゲート閉開機能への支障等は認められない。しかし、越流部の門柱側面については、堤体の谷側への累積的な変形の影響とみられる門柱の基面や側面にみられるクラックが進展する可能性がある。ダムの機能は保持されていると判断されるものの、速やかに措置を講じる必要がある。	越流部に異常は見られず、状態監視を継続することで良い状態である。	
土木構造物の状態	洪水吐き(土木構造物部分)		高速な流水にさらされる底面にグラウトバイパの間接合コンクリート、水平打継目等の二次コンクリートの剥離がみられる。ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、損傷の程度が進行していることから、速やかに劣化・損傷部分を補修する必要がある。	高速な流水にさらされる底面にグラウトバイパの間接合コンクリート、水平打継目等の二次コンクリートの剥離がみられる。ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、損傷の程度が進行していることから、速やかに劣化・損傷部分を補修する必要がある。	高速な流水にさらされる底面にみられるひび割れ、剥離等は確認される。引き続き状況を経過観察し、記録を残し、必要に応じて措置を講じる必要がある。	現状では放流に影響を及ぼすような規模ないひび割れ、剥離等は確認されていない。目視調査の結果では、軽微な変状(ひび割れや水平打継目からのエプロレッセンス等)が見られた。	導流部に異常は見られず、状態監視を継続することで良い状態である。
	導流部	流水のエネルギー消費にさらされる側壁にコンクリートの剥離がみられ、鉄筋が露出している。このため、ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、損傷の部分を補修する必要がある。	ひび割れ及びエプロレッセンスがみられる。また側壁に隅角部におけるひび割れが確認される。	ひび割れ及びエプロレッセンスがみられる箇所のクラック、コンクリートの剥離等は確認されている。放流操作に影響を及ぼすような大規模な側壁のクラック等は確認されていない。	放流操作に影響を及ぼすような大規模な側壁のクラック、コンクリートの剥離等は確認されていない。	軽微なひび割れ等は生じているが、状態監視を継続することで良い状態である。	
	減勢工						

17基のコンクリートダムの部位ごとの状態について概説すると、以下のとおりである。

(1) 堤体上流面

堤体上流面に確認される変状として、温度応力あるいは乾燥収縮によるひびわれ、ならびにひび割れや打継目からのエフロレッセンスの滲出など、軽微で進展性の低い変状が多くのダムで確認されている。一部のダムにおいては、進展性の高い変状である、凍結融解作用による変状、アルカリシリカ反応によると推察される変状も確認されている。

(2) 堤体下流面

堤体下流面における変状としては、上流面と同様に温度応力あるいは乾燥収縮によるひび割れ、ならびにひび割れや水平打継目からのエフロレッセンスの滲出のほか、水平打継目からの漏水現象が多くのダム(17ダム中16ダム)で確認されている。この下流面漏水は、多くのダムにおける主な変状となっている。一部のダムでは凍結融解作用、アルカリシリカ反応によると推察される変状も確認されている。

(3) 堤頂部

ほとんどのダムにおいては、高欄コンクリートの収縮ひび割れ等の軽微な変状のみが確認される。一部のダムにおいてはアルカリシリカ反応によるものと推察されるひび割れや変形の進展が確認されている。

(4) 監査廊

監査廊内面には微細な収縮ひび割れ、及びひび割れや継目からの漏水やエフロレッセンスの滲出がほとんどのダムで確認される。一部のダムにおいては、監査廊屈曲部における開口ひび割れからの漏水、鉄筋腐食による錆汁やかぶりコンクリート剥離が確認されている。また、堤体上流面のひび割れに対応するひび割れが監査廊において確認されたダムも確認されている。

(5) 洪水吐き流入部

多くのダムにおいては微細なひび割れ等の軽微な変状以外の変状については確認されない。一方で、一部のダムにおいては摩耗やひび割れの進展による内部鉄筋腐食等の進展性の高い変状が確認される。

(6) 洪水吐き越流部

目立ったひび割れは無い、もしくは微細なひび割れが生じている等の軽微な変状のみが確認されるのが、多くのダムの状況である。一部のダムにおいてはゲート戸当り付近の欠損や越流部の浸食等の変状、あるいはアルカリシリカ反応によると推察される進展性の高いひび割れが確認される。

(7) 洪水吐き導流部

約半数のダムにおいては、微細なひび割れ、水平打継目からのわずかな漏水滲み、あるいはエフロレッセンスの滲出などの軽微な変状のみが確認される状況である。残りの半数については、凍結融解作用によるひび割れ、流水による導流部の打継目付近や二次コンクリートの剥離欠損が確認される。

(8) 洪水吐き減勢工

多くのダムにおいては、軽微なひび割れやエフロレッセンス等、ダム機能への影響はほとんど無い軽微な変状が確認される程度である。一部のダムにおいては、放流水によるコンクリートの摩耗が進展し、鉄筋が露出している状況にある。

次に、17ダムのコンクリートの状態と（1）立地環境、（2）施工、（3）材料・配合、（4）経過年数との関係について分析するとつぎのとおりである。

（1）立地環境：17ダムのうち、冬季に数mの積雪のある寒冷地に唯一、所在するAダムにおいては凍結融解による変状が確認されている。その他のダムの所在地も冬季には気温は氷点下に下がる箇所がほとんどであるものの、堤体あるいは洪水吐に凍結融解による変状が確認されているダムは無い。

（2）施工：堤体の打設方法は、従来工法である柱状工法で施工されたダムと、近年の合理化施工法である面状工法で施工されたダムに大別される。面状工法で施工されたダムの変状が若干少ないものの、完成後の経過年数は面状工法ダムが相対的に短いため、施工方法の違いに因るものか否かは評価できない。

（3）材料・配合：近年の面状工法で施工されたダムで使用されている結合材は、中庸熱ポルトランドセメントをフライアッシュで一部置換している中庸熱フライアッシュセメントである。それ以前の柱状工法ダムにおいては前期には中庸熱ポルトランドセメント、後期には高炉セメントB種が使用されている傾向がある。また、単位結合材量は、面状工法のダムでは、柱状工法のダムに比較して少ない。また、いくつかのダムではアルカリシリカ反応の可能性もある変状が確認されているが、使用骨材の岩種との間には

明確な関係は認められない。一方、中庸熱フライアッシュセメントを使用しているダムにはアルカリシリカ反応の可能性がある変状は確認されていない。このアルカリシリカ反応によると推察される変状以外には、材料・配合とコンクリート状態との間には明瞭な関係は認められない。

(4) 経過年数：全体的な傾向として、完成後の経過年数が少ないダムは、変状が相対的に少ない傾向が認められる。

これらの状況をまとめ、我が国の供用中のコンクリートダムの状態を述べると次のとおりである。

(1) ほとんどのコンクリートダムにおいて、コンクリートの乾燥及び温度低下による収縮ひび割れが数多く確認されている。このひび割れは、初期欠陥であり、経時的な進展性はが小さいと考えられるが、漏水やエフロレッセンスの滲出の原因ともなっている。

(2) ひび割れ及び水平打継目からの堤体下流面漏水は、ほとんどのコンクリートダムにおいて確認され、コンクリートダムにおける主要な変状である。また、水平打継目からの下流面漏水には、経年的に増加する傾向が見られる。

(3) ダム貯留水の放流時に使用する洪水吐きは、高速で土粒子等を含む放流水による表面コンクリートの摩耗や欠損が多くのコンクリートダムで確認される。ほとんどのダムにおいては、ダムの機能にすぐに影響が及ぶものではないが、確実に進展する変状であり、注意が必要である。

(4) 道路構造物等の一般的な土木構造物において、早期劣化の要因とされる、凍結融解作用やアルカリシリカ反応によると推察される変状についても確認されている。これらの変状の事例は少なく、劣化グレードについても一般土木構造物に比較して軽微であるが、劣化グレードが低くてもダム機能への影響は決して小さくはない。

(5) 極めて厳しい寒冷地等の立地環境条件の影響は受けるが、アルカリシリカ反応が疑われる変状を除き、材料・配合、あるいは施工法は、変状発生の明確な要因となっていない。

(6) コンクリートダム堤体の完成後の経過年数が大きくなると、懸念される変状が多くなる関係が認められる。

以上のコンクリートダム堤体の変状の状態を考慮すると、現状において、直ちに何らかの措置を講じる必要がある状態ではないが、変状は経年的に増加している傾向が見られ、決して維持管理を疎かにしても良い状態では無いと言える。

2. 4 本章のまとめ

本章では、コンクリートダムの維持管理の現状を示すものとして、我が国におけるコンクリートダムの設置状況と性能維持のための維持管理システムをとりまとめるとともに、ダムの規模や完成後の経過年数等が多様な17のコンクリートダムにおける変状の状況についてダム定期検査と同様の方法で、我が国におけるコンクリートダムの変状を分析・検討した。結果をとりまとめると以下のとおりである。

- (1) 我が国におけるコンクリートダムの設置数は約1000基であり、2020年時点において、設置後50年が経過したコンクリートダム数は約500基弱である。
- (2) 我が国において、法令である「河川法」及び「河川管理施設等構造令」、ならびに技術基準である「河川砂防技術基準 維持管理編（ダム編）」によって、ダムの維持管理システムは定められている。
- (3) ダムの維持管理システムの一環で行われているダム定期検査の結果によると、ダムの状態として、直ちに措置を講じる必要のあるダムは存在しないが、速やかに措置を講じる必要のあるダムが全体の16%程度、必要に応じて措置を講じる必要のあるダムが48%程度存在する。
- (4) コンクリートの乾燥や温度低下による収縮現象に起因すると推察されるひび割れ、ならびに堤体下流面で確認されるひび割れや水平打継目からの漏水がほとんどのコンクリートダムにおいて確認される主要な変状である。また、コンクリートダム洪水吐の越流部あるいは導流部における放流水による摩耗やキャビテーションによる変状多くのコンクリートダムで確認される状況にある。これらの変状については、現時点ではダムの安全性及び機能は保持されていると判断されているが、維持管理を適切に実施しなければならない状況にある。
- (5) コンクリートダムの変状の中でも洪水吐きの摩耗やキャビテーションによる変状、ならびに堤体下流面漏水として確認される水平打継目の変状は、経年的な進展が確認されるものであり、状態を把握すべき変状である。特に、水平打継目の変状は、ほとんどのダム堤体で確認されるものであるが、変状が堤体内部で進展するため、状態の把握が容易に行えないこと、変状が進展した場合、直接、堤体の機能低下に影響することから、特に状態の把握を留意して実施すべき変状である。

参考文献

- 1) 橋本鋼太郎, 菊川滋, 二羽淳一郎編:社会インフラメンテナンス学, II工学編第5章
社会インフラ部門別のメンテナンス 5.1 ダム, pp. 363, 土木学会, 2015年12月
- 2) 橋本鋼太郎, 菊川滋, 二羽淳一郎編:社会インフラメンテナンス学, III部門別編(ダム編), pp. 18, 土木学会, 2015年12月
- 3) 日本ダム協会編:ダム年鑑 2013 を基に作成
- 4) 河川法:昭和39年法律第百六十七号, 最終改正:令和二年四月一日施行
- 5) 河川法施行令:昭和40年政令第十四号, 最終改正:令和元年十二月十六日施行
- 6) 国土交通省河川砂防技術基準 維持管理編(ダム編), 2016年3月
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課:ダム総合点検実施要領・同解説, 2013年10月
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課:ダム定期検査の手引き [河川管理施設のダム版], 2016年3月
- 9) 国土交通省HP:ダム健全度評価結果(平成30年度)

第3章 コンクリートダムの水平打継目の変状

3. 1 本章の概要

コンクリートダムの堤体における変状として、堤体下流面において水平打継目からの漏水現象がほとんどのコンクリートダムで確認されていることは前章において述べたとおりである。コンクリートダムの水平打継目で確認される漏水は、何らかの要因によって水平打継目の遮水性能が低下し、ダムの貯留水が水平打継目を通じて下流面に到達することを生じる現象である。したがって、ほとんどのコンクリートダムにおいて、水平打継目に漏水が確認されるということは、ほとんどのコンクリートダム堤体の水平打継目に変状が生じているということである。

そこで、本章においては、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状に関して着目し、以下に示す事項について述べることとする。まず、3. 2においては水平打継目における変状発生の一因であると推察されるコンクリートダム堤体の構造的な特徴について述べることとする。次に、3. 3においては水平打継目の変状の発生機構、及び水平打継目に変状が生じた際に低下が懸念されるダム機能について述べるとともに、水平打継目に変状が生じたダムの事例について述べる。さらに、3. 4においては、このダム堤体の水平打継目の変状を把握する方法について、これまで一般的に用いられている既往の方法とその課題について述べるとともに、既往方法の課題を解消する新たな変状の把握手法について検討した結果を述べることとする。

3. 2 コンクリートダム堤体の特徴

コンクリートダムの堤体は、一般的なコンクリート構造物とは多くの相違点を有している。そのため、土木学会コンクリート標準示方書においてもダムコンクリート編¹⁾として一般的なコンクリート構造物とは一線を画して、一つの編の中で、コンクリートダムに要求される構造性能を確保するためにダムコンクリートが有していない品質、及びダムコンクリートがそれを有していることを確認する方法を、設計、施工、維持管理の基本原則とともにまとめて記載されている。

コンクリートダム堤体は、①構造、②材料・配合、③施工、という3つの観点において、一般的なコンクリート構造物とは異なっている。

① 構造の観点での特徴

一般的なコンクリート構造物は鉄筋コンクリート構造として設計されているが、中空重力式コンクリートダム型式やバットレスダム型式を除いては、コンクリートダムの堤体は重厚な無筋コンクリート構造として設計されている。コンクリートダムの型式を図-3.2.1に示す。

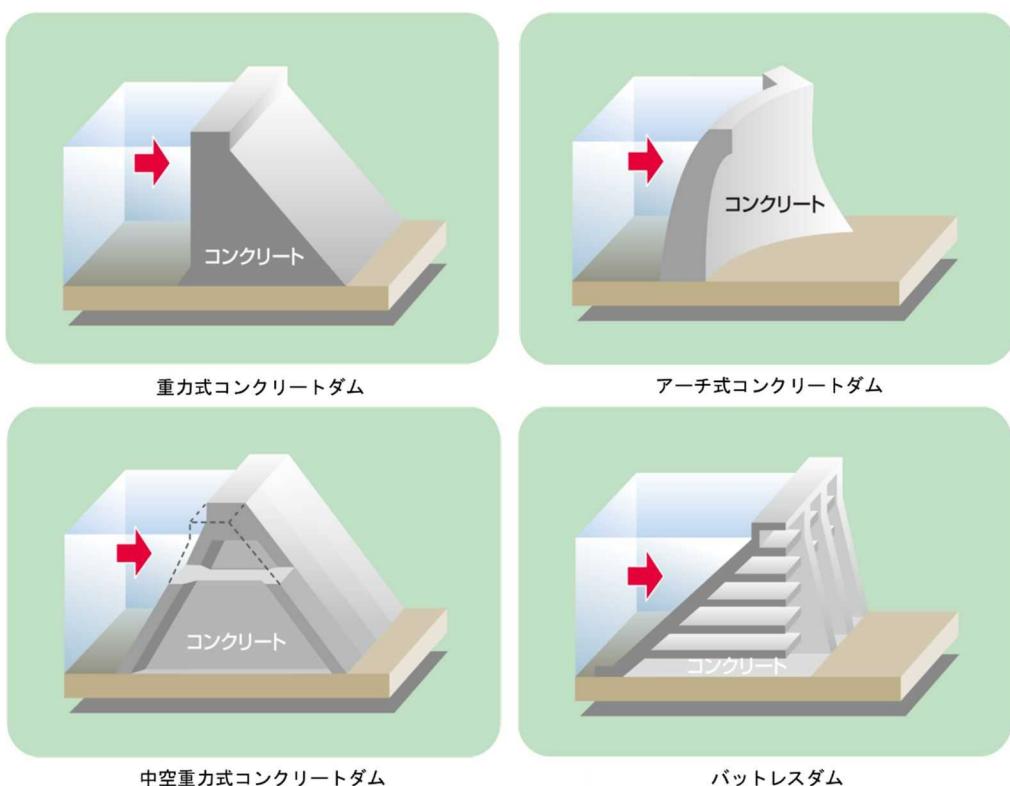


図-3.2.1 コンクリートダム型式²⁾

② 材料・配合の観点での特徴

堤体の構築に用いられているダムコンクリートは一般の構造物に使用されるコンクリートとは大きく異なっている。コンクリートダム堤体はマスコンクリートであり、温度応力によるひび割れ発生を抑制するため、ダムコンクリートはセメントの水和反応熱による温度上昇を極力低減することが求められる。そのため、ダムコンクリートに使用する結合材（セメント）には低発熱性のものを使用するほか、単位結合材量（単位セメント量）を極力減らした貧配合コンクリートを用いている。所要の発現強度、耐久性及び水密性を確保した上で貧配合とすることを実現するため、さまざまな配合上の工夫を行っている。まず、無筋コンクリート構造であり、部材寸法が大きいことから、一般コンクリート構造物では配置鉄筋や部材寸法によっては、その寸法に上限を設けなければならない粗骨材の最大寸法をダムコンクリートでは大きくすることが可能となる。そこで、ダムコンクリートでは粗骨材の最大寸法を80mm～180mmと、一般のコンクリートに使用する粗骨材に比較して大きな粒径の粗骨材を使用し、所要のワーカビリティを確保するのに必要なモルタルの量を低減させている。また、更に、スランプが3cm程度、あるいはゼロというような硬練りコンクリートとすることを許容することで単位水量の低減、ひいては単位結合材量（単位セメント量）の低減を図っている。ダムコンクリート配合の事例を表-3.2.1に示す。

また、このような大粒径骨材を使用し、貧配合で、硬練りであるダムコンクリートは、一般的なコンクリートに比較して材料分離が生じやすい傾向を有し、打設時には細心の注意が必要なコンクリートであるとも言える。さらに、大粒径骨材を使用することでブリーディング水が骨材下面に溜まり、粗骨材とモルタルとの界面の付着強度が低下する傾向を示す可能性も一般的なコンクリートに比較して大きくなると推察できる。

表-3.2.1 ダムコンクリートの配合事例 3)

配合種類	ダム名	粗骨材 Gmax(mm)	スランプ(VC 値)の範囲 (cm or 秒)	空気量の 範囲 (%)	単位結合材量 C+F (kg/m ³)	フライアッシュ 置換率 F/C+F(%)	単位水量 W(kg/m ³)	水結合材比 W/(C+F) (%)	細骨材率 S/a (%)	骨材微粒分 置換量 (kg/m ³)	備考
外部 コンクリート	布目ダム	150	3±1	3±1	200	35	114	57.0	25	-	打設前期
	浦山ダム	150	3±1	3±1	220	30	114	52.0	26	-	打設後期
	日吉ダム	80	3±1	3.5±1	220	30	115	52.3	30	-	
	比奈知ダム	150	3±1	3±1	220	30	108	49.1	26	-	
	富郷ダム	150	3±1	3±1	210	30	108	49.0	25	-	一般期 夏期
	滝沢ダム	150	3±1	3±1	210	35	109	51.9	-		
	大山ダム	80	3±1	3.5±1	220	30	100	47.6	28	-	
	布目ダム	150	3±1	3±1	180	35	114	63.0	25	-	
	浦山ダム	150	3±1	3±1	180	30	106	58.9	30	-	
	日吉ダム	80	3±1	3.5±1	180	30	113	62.8	30	-	
岩着 コンクリート	比奈知ダム	150	3±1	3±1	180	30	109	60.6	26	-	
	富郷ダム	150	3±1	3±1	180	30	101	56.1	25	-	
	滝沢ダム	150	3±1	3±1	180	30	97	53.9	28	-	
	大山ダム	80	3±1	3.5±1	180	30	105	58.3	28	-	
	布目ダム	150	20±10	1.5±1	120	35	95	79.0	27	-	
	浦山ダム	150	10~20	1.5±1	130	30	85	65.4	27	-	
	日吉ダム	80	20±10	1.5±1	120	30	83	69.2	30	100	打設前期
	比奈知ダム	-	-	-	-	-	75.5	-	110	-	打設後期
	富郷ダム	80	20±10	1.5±1	120	30	93	77.5	30	-	一般期 夏期
	滝沢ダム	80	20±10	1.5±1	120	40	94	78.3	-	-	一般期 夏期
内部 有スランプ コンクリート	大山ダム	-	-	-	-	-	85	70.8	32	-	
	布目ダム	150	3±1	3±1	130	35	115	68.0	26	-	
	浦山ダム	150	3±1	3±1	160	30	106	66.3	27	-	
	日吉ダム	80	3±1	3.5±1	140	30	110	67.9	26	-	
	比奈知ダム	150	3±1	3±1	130	30	114	87.7	26	-	
	富郷ダム	150	3±1	3±1	140	40	101	69.3	25	-	一般期 夏期
	滝沢ダム	150	3±1	3±1	140	40	98	70.0	28	-	一般期 夏期
	大山ダム	80	3±1	3.5±1	140	35	107	76.4	28	-	一般期 夏期

③ 施工という観点での特徴

コンクリートダムは、大規模なマスコンクリート構造物であることから温度応力によるひび割れを抑制するため、堤体の構築にあたっては、左右岸（ダム軸）方向には10～15m程度、上下流方向には5～150m程度、厚さ0.75～2m程度の薄層の矩形ブロックを積み重ねるようにコンクリートを打設する。コンクリートダムの堤体下流面の写真に打設ブロック割を記入したものを参考に図-3.2.2として示す。なお、左右岸方向の10～15m間隔（図-3.2.2では15m間隔）に設置された縦目を横縦目、高さ0.75～2m間隔（図-3.2.2では2.0m間隔）に設置された打縦目を水平打縦目という。

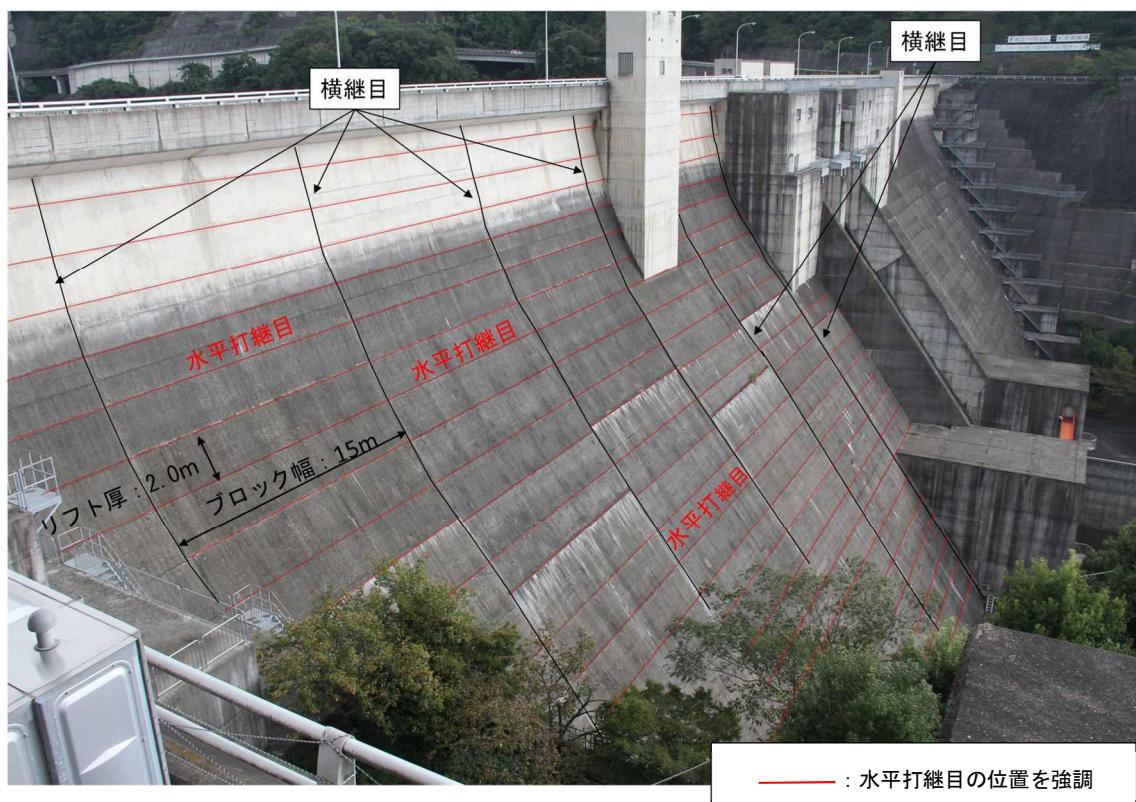


図-3.2.2 コンクリートダムの打設ブロック割の事例

（横縦目間隔15m、水平打縦目間隔（リフト厚）2.0m）

横縦目は温度変化によるコンクリートの容積変化に伴って開閉するため、上流端には打設時に、塩ビ製あるいは銅製等の止水板が埋設され、貯留水が開口した横縦目を通り、堤体下流面に流下することを防ぐ構造となっている。

一方、新旧コンクリート間となる水平打継目に対しては、水平打継目に生じたレイターンスを圧力水や電動ブラシを用いて除去するグリーンカットという作業を行った上で、1.5cmの厚さでモルタルを敷き込み、コンクリートを打設することが繰り返されることで、コンクリートダム堤体が構築される。このグリーンカットは、作業実施のタイミングが早過ぎると骨材を緩めたり、コンクリート表面を余分に取り除くおそれがある一方で、遅すぎると十分な処理ができなくなる。そのため、グリーンカットはコンクリートダムの構造の安全性および水密性を確保する上では非常に重要な作業となっている。また、一般的なコンクリートでは規定されていない⁴⁾、モルタルの敷き込みを「標準」としている⁵⁾ことも、コンクリートダムの構築方法における特徴の一つとなっている。グリーンカットおよびモルタルの敷き込み作業の状況の事例を図-3.2.3に示す。



図-3.2.3 グリーンカット作業状況とモルタルの敷き込み状況⁶⁾

以上に述べたコンクリートダム堤体の特徴を基に思慮すると、以下の点から水平打継目は、コンクリートダム堤体の水平打継目以外の部分である一般部に比較して強度特性や水密性で劣った構造的な弱部になる可能性がある。

- ① ダムコンクリートは大粒径骨材を使用、かつモルタル量が少ないため、材料分離傾向が大きくなり、旧コンクリートの上部に打設される新コンクリートの下部にはモルタルに比較して密度が大きな、大粒径骨材の比率が大きくなることが推察されること。
- ② 大粒径骨材下面にはブリーディング水が溜まり易いため、大粒径骨材下面界面の付着強度は小さくなる可能性のあることが推察されること。
- ③ 新コンクリート打設前には、旧コンクリートを湿潤状態にした上で、モルタルを1.5cm厚で敷き込むことが標準と定められているが、大粒径の骨材が分離して、水平打継目にほぼ直に接するような形態での打ち込みとなってしまう可能性も少なからず存在していると推察されること。
- ④ 打継目処理としてグリーンカットが行われるが、グリーンカット実施のタイミングの適切な判断や状態に応じた適切な施工を行うには熟練した経験が不可欠な上、打継目処理が新コンクリート打設工程のクリティカルとなることから、不十分な打継目処理となった部分が残っている懸念を完全に払拭できないということ。

3. 3 水平打継目の変状とダム機能低下

3. 3. 1 水平打継目の変状の発生機構

水平打継目がコンクリート堤体の一般部に比較して、強度特性等の性能で相対的に劣ると考えた場合、以下に示すような機構で水平打継目に変状が発生することが推察可能である。なお、この変状の発生機構としては、①日常的なコンクリートダム堤体の挙動（繰り返し作用）に起因するもの、②他の劣化原因に起因するものの大別して二つの発生機構があると考えている。

① 日常的なコンクリートダム堤体の挙動に起因した水平打継目の変状発生機構

コンクリートダムの堤体は、貯水位の変化、すなわち作用外力の変化、ならびに外気温の変化によって、変形する挙動を示す。コンクリートダムの変形挙動の事例として、図-3. 3. 1 及び図-3. 3. 2 に堤高 132. 0m の重力式コンクリートダムにおけるラムラインによる堤体頂部の上下流方向への変形量の計測結果を示したが、堤体頂部は貯水位上昇時には下流側に変形し、外気温上昇時には上流側に変形する挙動を示している。このダムにおいては上下流方向には約 18mm の幅で年周期の変形挙動が生じている。このような貯水位あるいは外気温の変化に対する堤体の変形挙動は、変形量に大小はあるとしてもすべてのコンクリートダムにおいて生じている現象である。このように、堤体が上下流の方向に変形することで、堤体の上下流端部にはひずみが生じ、引張ひずみ、すなわち引張応力が発生することとなる（図-3. 3. 3(a)）。この貯水位や外気温の変化による堤体の変形挙動は年周期の大きな変化であるが、これとは別により短い周期、例えば昼夜で生じる温度変化に伴うコンクリート収縮によっても堤体表面に引張応力が発生する（図-3. 3. 3(b)）。この昼夜の温度変化による引張応力の発生については、発生する引張応力は年周期の変形で生じる応力に比較すると小さいが、その発生頻度は遙かに多い。このように、堤体の上下流端部に引張応力が発生するような時、相対的に強度が低い水平打継目が存在すると、水平打継目にひび割れが発生する場合がある。この堤体の変形、すなわち引張応力は繰り返し発生するため、水平打継目のひび割れはミシン目が入ったように堤体深部へと進展し、水平打継目が剥離したような変状が生じることになる。

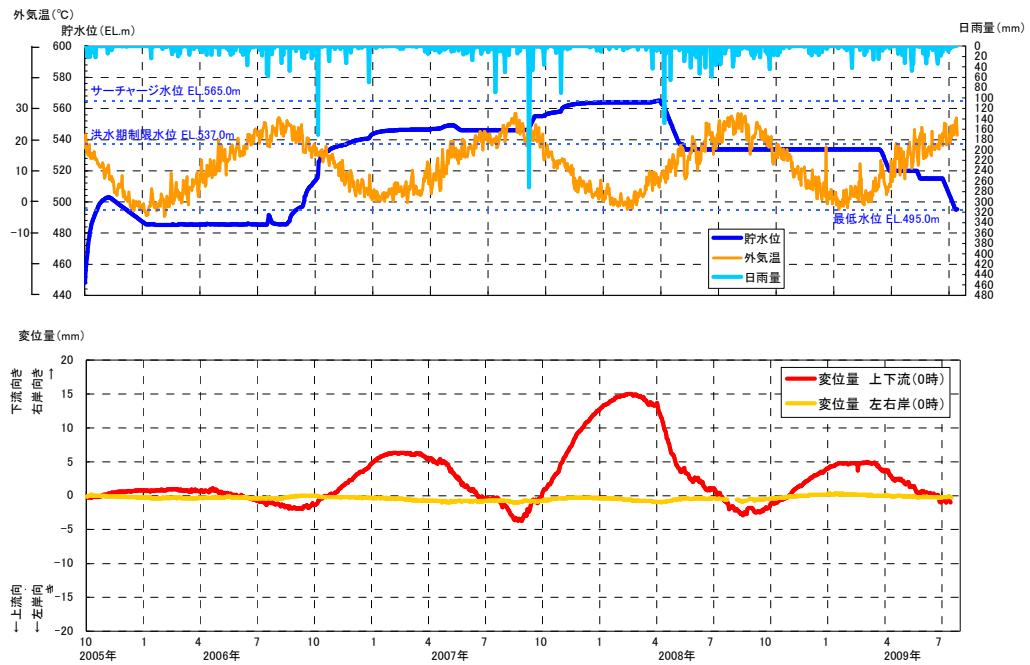


図-3.3.1 コンクリートダムの堤体(堤頂部)の変形量の経年変化傾向の事例⁷⁾

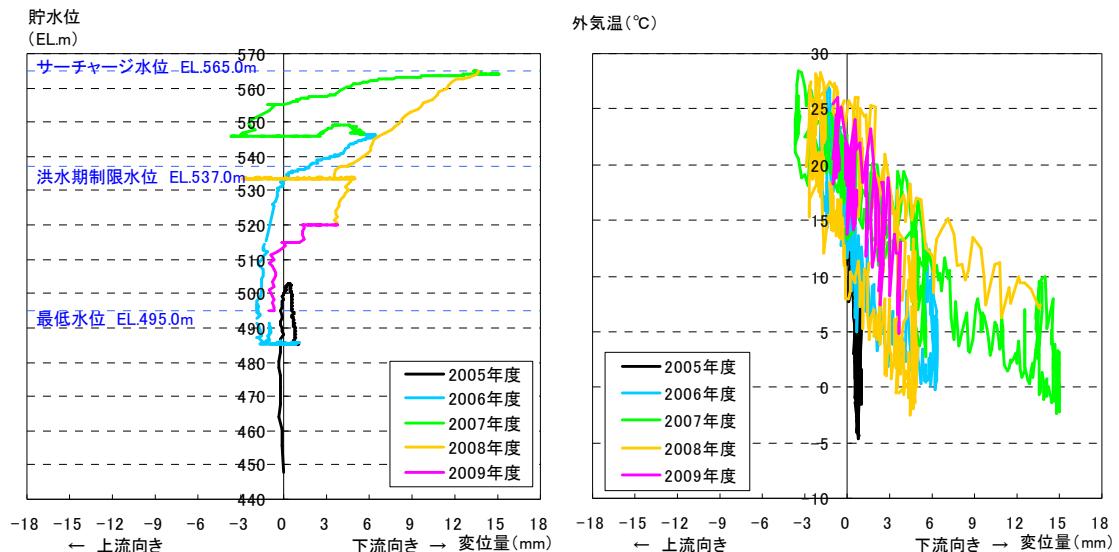


図-3.3.2 コンクリートダムの堤体(堤頂部)の上下流変形量
と貯水位・外気温との関係事例⁷⁾

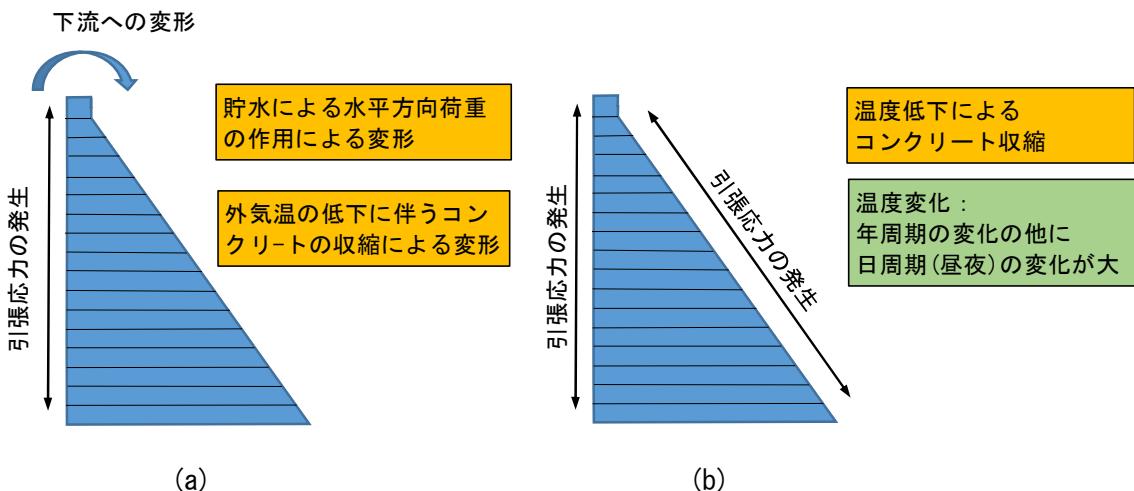


図-3.3.3 堤体への作用による堤体変形と引張応力の発生機構の模式図

② 他の劣化原因に起因した水平打継目の変状発生機構

コンクリートダム堤体において、アルカリシリカ反応等によるコンクリートの膨張が発生した場合、鉛直方向、あるいは上下流方向については膨張が拘束されることは無い。しかし、左右岸方向（ダム軸方向）への膨張については、左右岸の地山（アバットメント）で拘束されることから変形が抑制されることになる。その際、堤体全体の膨張量が均一であれば、左右岸方向の圧縮ひずみも均一となるが、アルカリシリカ反応の場合、その位置によって劣化度が異なるのが一般的であるため、堤体全体が均一の膨張量を示すことは稀であり、そのため、水平方向のひずみは高さ方向で見れば、差異が生じるのは普通である。例えば、上下2層のコンクリートリフトを考えた場合、上層コンクリートと下層コンクリートの膨張量に差があると、この境界にあたる水平打継目にはせん断力が発生する。このとき、水平打継目の強度が一般部に比較して小さければ、水平打継目にひび割れ等の変状が生じることになる。そして、コンクリートの膨張現象が継続すれば、この水平打継目の変状については経時に進展することになる。

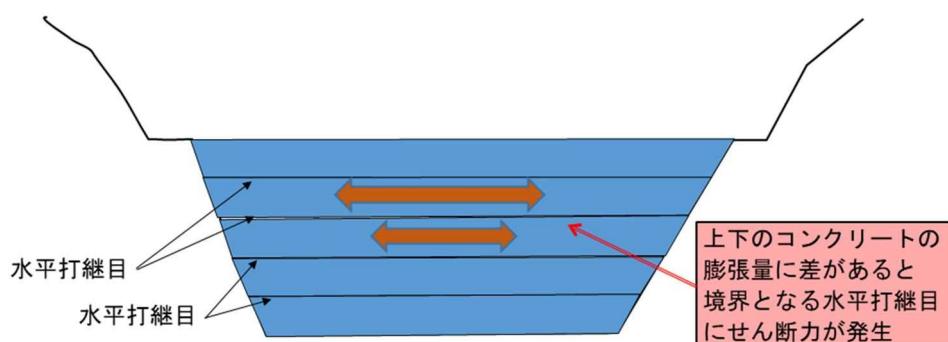


図-3.3.4 堤体コンクリートの膨張による水平打継目へのせん断力作用の模式図

3. 3. 2 水平打継目の変状発生によるダム機能低下

ダム堤体に求められる機能として、①堤体構造の安定性、②貯水機能という二つの機能がある。それぞれの機能について述べた上で、水平打継目に変状が生じた場合における機能への影響について述べるものとする。

①堤体構造の安定性

堤体構造の安定性とは設計荷重が作用した時においても堤体は損傷することもなく、貯水機能も保持された、安定した状態を保持することを示す。コンクリートダムの堤体は、設計荷重の作用時において安定した状態となるように設計が実施される。コンクリートダムの代表的な型式である重力式コンクリートダムの堤体は次のとおり設計されている。

重力式コンクリートダムの堤体設計は、堤体を上下流方向に切った断面を設計の対象とする二次元設計で実施しており、設計荷重（自重・水圧・揚圧力・地震時慣性力・動圧力等）の作用時に、所定の構造安定の条件を満足する、所要の断面形状で受け持たせることを行っている⁸⁾。重力式コンクリートダム堤体における構造安定の3条件は次のとおりであり、この3条件を満たす断面形状及びコンクリート強度を確保する必要がある。

- (a) 転倒に対する安定（転倒条件）：設計荷重が作用したときに、堤体の上流端に引張応力が発生しないこと。
- (b) せん断に対する安定（滑動条件）：設計荷重が作用したときに、堤体を滑動させようとするせん断力に対して、せん断に抵抗する力が十分な安全率を持って上回っていること。
- (c) 堤体内に発生する応力がコンクリートの許容応力を超えないこと。

この構造安定の条件のうち、転倒条件及び滑動条件の模式図を図-3. 3. 5に示す。

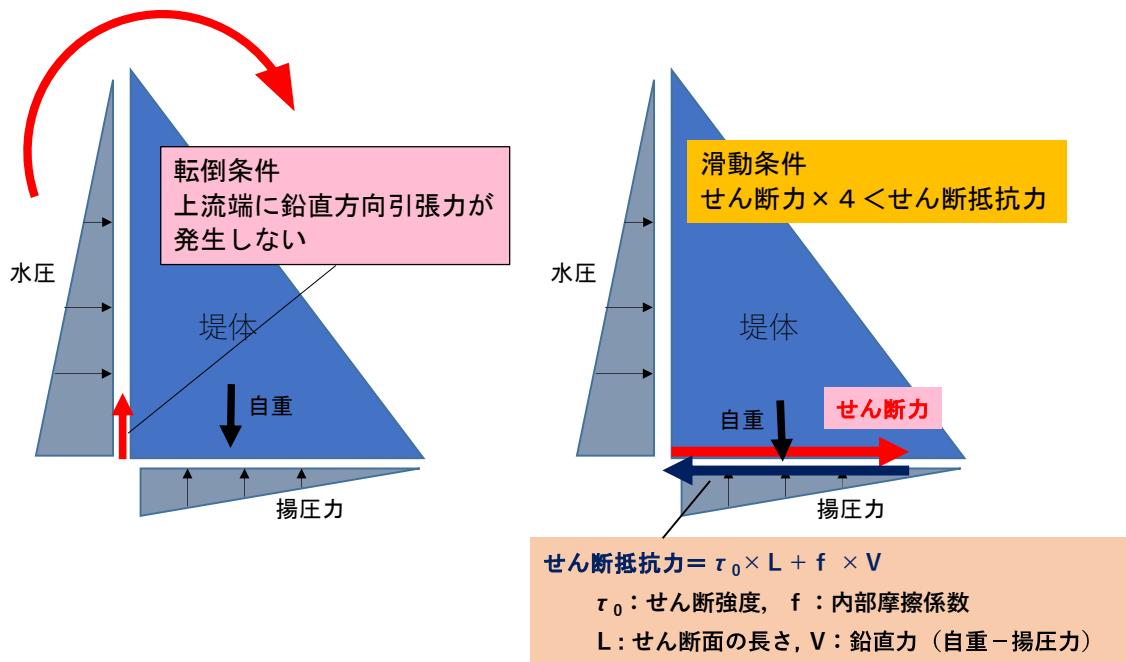


図-3.3.5 構造安定の条件（転倒条件・滑動条件）の模式図

このような構造の安定性が確保されたコンクリートダム堤体において、水平打継目に変状が発生、例えば、ひび割れが生じ、水平打継目が分離した場合には以下のような状態になる。

- ・ダム貯留水がひび割れ沿いに浸入し、水平打継目に作用する揚圧力が、変状の生じる前に比べて増加する。
- ・水平打継目の強度の低下、すなわちせん断強度 τ_0 及び内部摩擦係数 f の低下によって、水平打継目のせん断抵抗力が変状の生じる前に比べて低下する。
- ・水平打継目部にダム貯留水が浸入し、流水が生じることで、セメント水和生成物の溶脱現象が発生し、水平打継目の強度が更に低下することが懸念される。

以上のような状態となることは、転倒の条件及び滑動の条件ともに、不安定な状態に向かうこととなる。したがって、水平打継目に変状が生じることで、堤体構造の安定性の保持というコンクリートダム堤体の機能が低下することになる。

②貯水機能

貯水機能は言うまでもなく、ダムを建設する目的そのものであり、この機能が低下することは大きな問題である。そのため、漏水現象が発生した場合には速やかな対応が必要となるものであり、ダム定期検査における判定の基準においては堤体下流面にわずかな漏水が確認された場合においても「ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、劣化・損傷等の状態から、必要に応じて措置を講じる必要がある状態」として、何らかの対応が必要となる「b2」と判定されることとなっており、非常に重要な機能である。

水平打継目の変状が生じた場合に、堤体下流面に漏水が確認される形態としては、次のような二つの形態が考えられる。

(a) 水平打継目の変状（ひび割れ）が堤体の上流面から下流面まで貫通した場合

これは、上流面から下流面まで変状が連続した形態であり、水平打継目の変状の状態として、劣化がかなり進展したものであり、①の堤体の構造安定性にも影響する漏水形態である。

(b) 水平打継目の変状（ひび割れ）が堤体の上流面からで横継目に設置された止水板の下流側まで繋がっている場合

コンクリートダム堤体には、コンクリートの収縮によるひび割れを防止する目的で、堤体の左右眼方向に等間隔で設置された横継目が設置されているが、この横継目は気温の変化の変化に応じて開閉するため、堤体の上流面から1~2m程度の位置に止水板を設置してダム貯留水が下流に漏れることを防いでいる。図-3.3.6に、重力式コンクリートダムの横継目の配置図を、図-3.3.7に横継目への止水板の配置を上部から見た平面図を、図-3.3.8に止水板設置状況を事例として示す。堤体の上流面からこの止水板よりも深部まで水平打継目の変状が進展した場合には図-3.3.9に示すようにダム貯留水が上流面から止水板の下流側に浸入して、横継目を経由して堤体下流面に到達したところで再び下流面付近の水平打継目のひび割れに沿って下流面漏水として確認されることもある。このような形態で下流面漏水が確認される場合には、現時点においては水平打継目の変状は堤体の深部まで進展していないことから、①の堤体の構造安定性への影響は少ない。



図-3.8 横縫目止水板設置状況⁹⁾

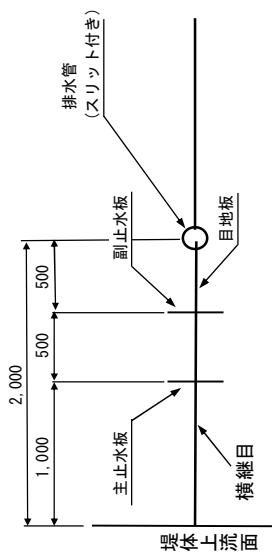


図-3.7 横縫目止水構造(鉛直方向に望む)

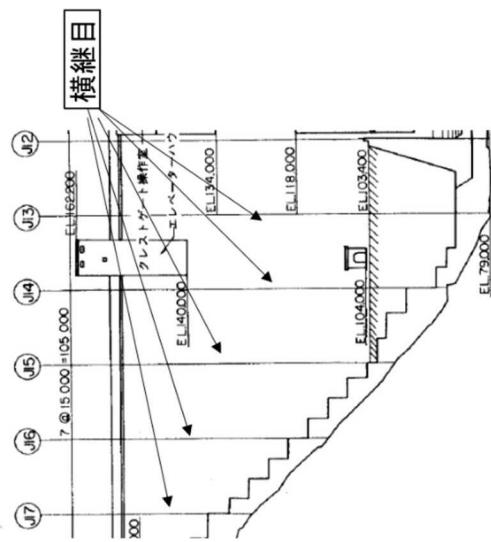


図-3.6 横縫目の配置事例(堤体下流面)

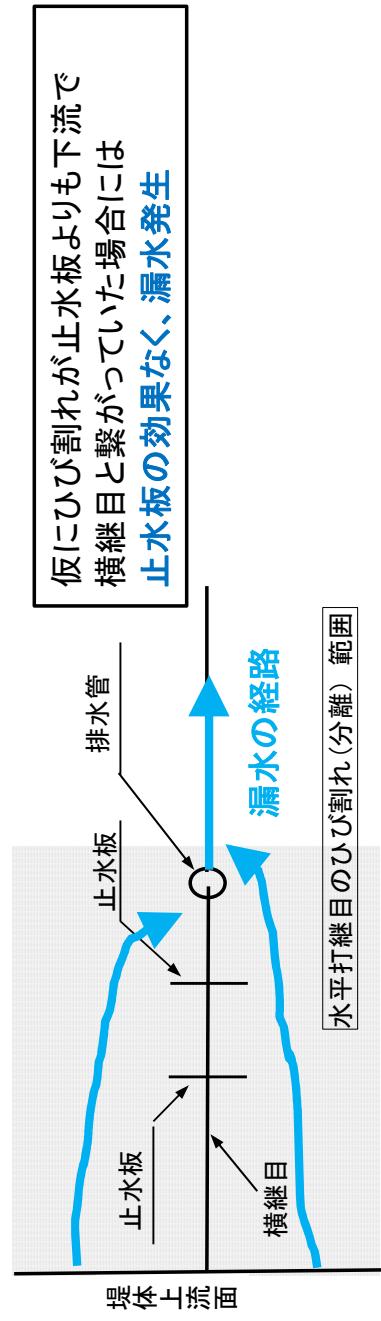


図-3.9 水平打縫目の止水板下流側までのひび割れ進展による漏水の発生

3. 3. 3 水平打継目に変状が発生したダムの事例

本項においては堤体の水平打継目に変状が発生した事例として、4ダムの事例を示すものとする。

(1) 事例 1

1975年に完成、管理に移行した堤高42mの重力式コンクリートダムである。このダムにおいては、管理移行後15年経過した時期までは堤体下流面に漏水は確認されなかったが、管理開始後23年経過した1997年には堤体左岸側の水平打継目からの漏水が確認された。その後、漏水箇所及び漏水量が増加したため、2011年6月から2012年8月にかけて、開口した水平打継目にセメントミルクを注入する漏水対策を行っている。この漏水対策後、しばらくの間、漏水の状況については安定していたが、2016年3月以降、新たな箇所からの漏水が確認されるようになっており、水平打継目の変状が継続して進展しているものと評価できる。図-3.3.10に、1977年1月、1997年12月、2011年6月、及び2019年11月の堤体下流面の状況写真を示す。また、図-3.3.11に2019年に作成した漏水箇所図を示す。



図-3.3.10 堤体下流面の漏水状況写真

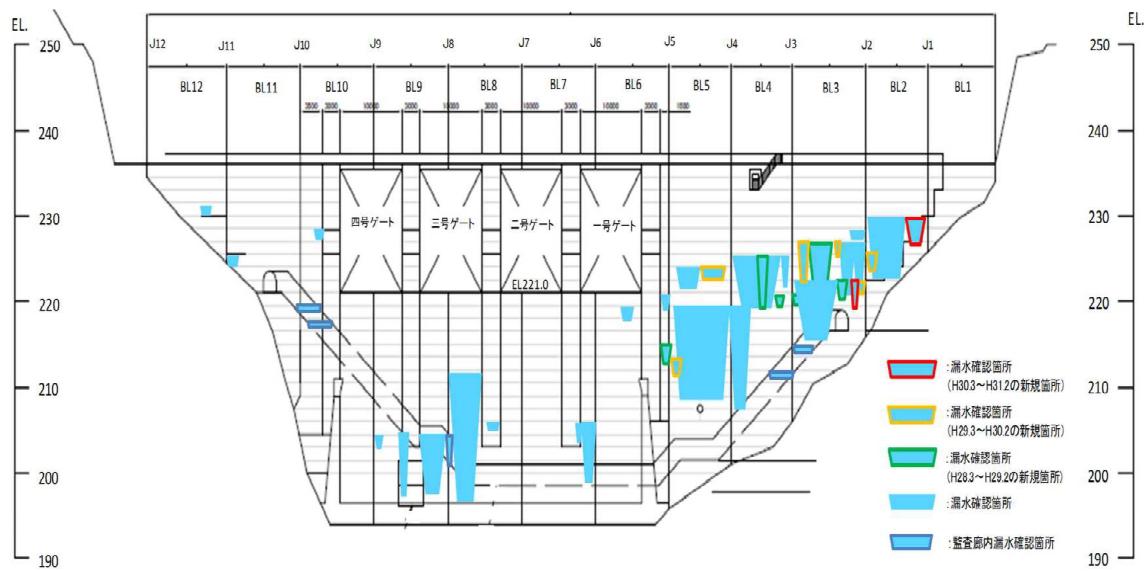


図-3.3.11 堤体下流面の漏水箇所

本ダムにおいては水平打継目のひび割れ範囲を確認するため、堤体上流面及び下流面から対象とする水平打継目に対しての斜めボーリング、堤頂部（天端）からの鉛直ボーリングを行った。その結果、上流面から下流面まで水平打継目が開口している箇所が存在することを確認している。

なお、本ダムにおける水平打継目変状の原因については、堤体及び地山等に対する様々な挙動の計測結果、各種の試験及び調査の結果から、コンクリート骨材に含まれる隠微晶質石英に起因する遅延膨張性のアルカリシリカ反応であると、消去法により推定されている。

(2) 事例 2

1984 年に完成、管理に移行した堤高 75m の重力式コンクリートダムである。このダムでは気温が低下し、貯水位が上昇した時期に多くの水平打継目からの漏水が確認されるが、下流面漏水がいつから確認されるようになったのかは不明である。2013 年 1 月に撮影した堤体下流面の漏水状況を図-3.3.12 に、堤体下流面の漏水箇所図を図-3.3.13 に示す。本ダムにおいては漏水、水平打継目変状の状態について把握する目的で堤体下流面の漏水状況に関する点検を 2013 年 4 月以降、1 回/月の頻度で実施しているが、漏水箇所、漏水量は特段増加する傾向は確認されておらず、漏水、ひいては水平打継目の変状については進展傾向が無く、状況としては安定しているものと評価されている。漏水の状況としては堤体の中央付近が多い傾向がある。また、図-3.3.13 の漏水の状況からわかるように、漏水は水平打継目の横継目付近で主に確認され、ブロックの中央付近では確認されないという状況であることから、漏水が確認される水平打継目においても変状の範囲は全面に及んでいないものと推察される状況にある。

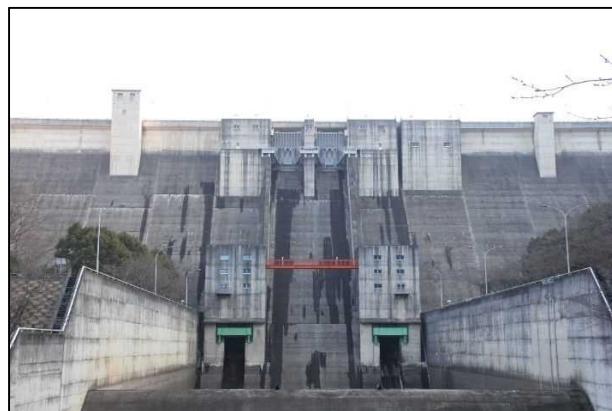


図-3.3.12 堤体下流面の漏水状況 (2013/1/31)

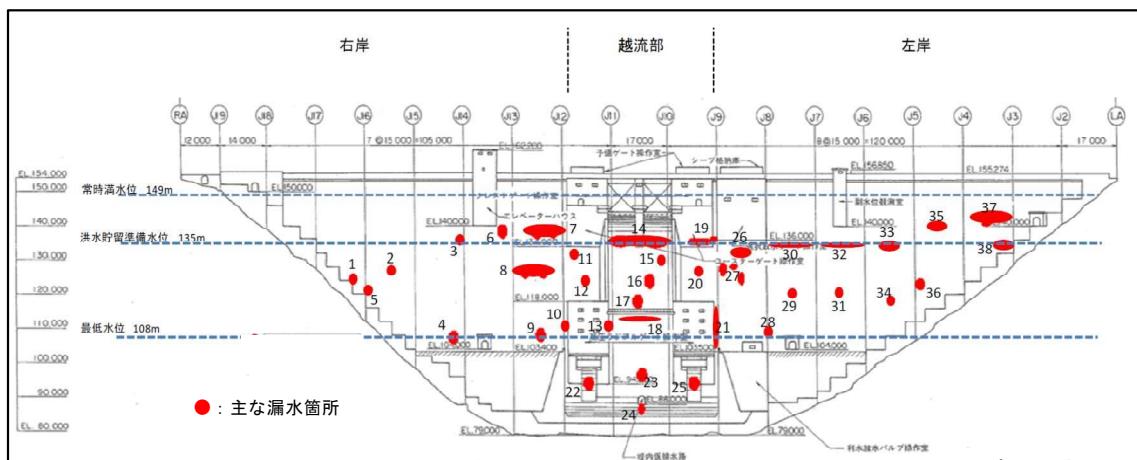


図-3.3.13 堤体下流面の漏水箇所図

(3) 事例3

このダムは、1998年に完成、管理に移行した堤高67.4mの重力式コンクリートダムである。気温が低下し、貯水位が上昇した時期に多くの水平打継目からの漏水が確認される。このダムの堤体下流面漏水については、管理移行直後から確認されている。2012年12月に撮影した堤体下流面の漏水状況を図-3.3.14に示す。本ダムの下流面漏水は、漏水箇所が中位の限られた標高の水平打継目のみで確認され、漏水のある水平打継目においては横継目から横継目までのブロック全幅で漏水が確認されることである。したがって、各水平打継目において変状が生じている範囲は広いと推察される。また、本ダムにおいては漏水、水平打継目変状の状態について把握する目的で堤体下流面の漏水状況に関する点検を冬期以外は1回/月、冬期は1回/週の頻度で実施しているが、漏水箇所、漏水量は特段増加する傾向は確認されておらず、漏水、ひいては水平打継目の変状については進展傾向が無く、状況としては安定している。



図-3.3.14 堤体下流面の漏水状況(2012年12月)

(4) 事例4

本ダムは、1967年に完成、管理に移行した堤高131mアーチ式コンクリートダムである。本ダムにおいては、貯水位が上昇した時期に高標高部の水平打継目からの漏水が確認される。本ダムの堤体下流面漏水については、いつ頃から確認されるようになったか明らかではない。2014年11月に撮影した堤体下流面の漏水状況を図-3.3.15に示す。

また、図-3.3.16に、堤体下流面でエプロレッセンス析出あるいは漏水が確認される、すなわち変状箇所を示したが、水平打継目の変状については高標高部に限られていることがわかる。また、漏水のある水平打継目においては横継目から横継目までのブロック全幅に近い広い範囲で漏水が確認されており、各水平打継目において変状が生じている範囲は広いと推察される。また、漏水が発生する時期として、コンクリートダムにおいては気温が高い夏期には貯水位が上昇したとしてもコンクリート膨張により水みちが閉塞するため、漏水が確認されないことが一般的であるが、本ダムにおいては夏期においても下流面漏水が確認されている。

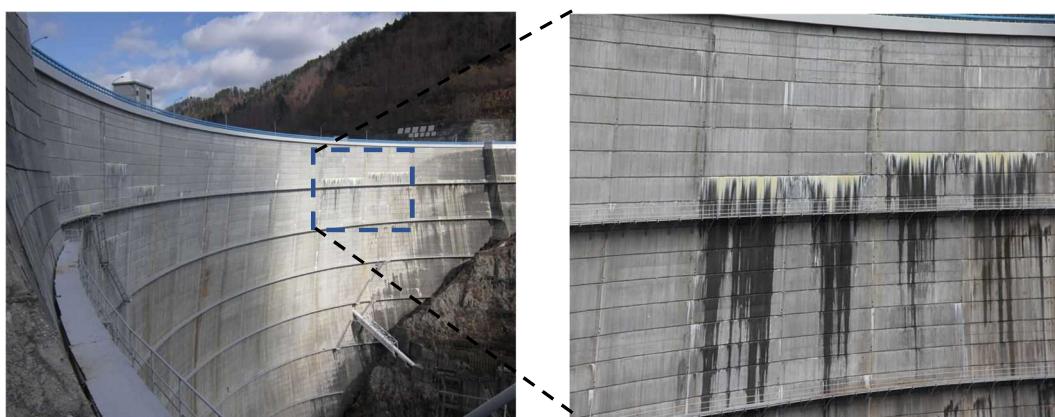


図-3.3.15 堤体下流面の漏水状況(2014年11月)

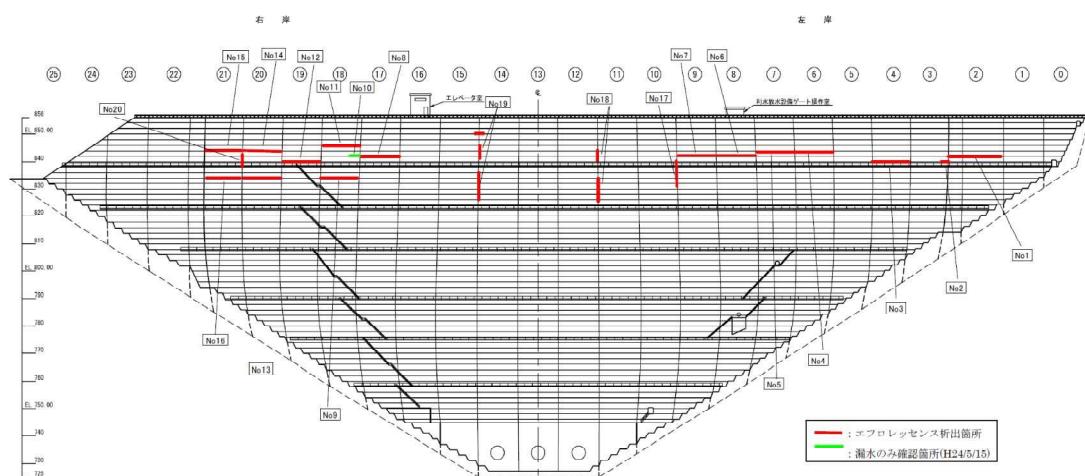


図-3.3.16 堤体下流面の変状箇所

3. 4 ダム堤体の水平打継目の変状把握

3. 4. 1 既往の水平打継目変状の把握手法とその課題

(1) 既往の水平打継目変状の把握手法

水平打継目の変状は前述のとおりダム機能に及ぼす影響があるため、変状の有無、どの程度の変状が発生しているかを把握することがダムの維持管理を適切に行うためには重要である。

コンクリートダム堤体の水平打継目の状態を把握する手法として、現在、一般的に用いられている調査手法は、ボーリング調査である。このボーリング調査による状態把握手法は、堤体からボーリングコアを採取し、水平打継目の位置によるコアの状態を確認し、変状の有無、状態を評価する方法である。また、ボーリング調査の方法としては、堤体天端（堤頂部）から削孔する調査、上下流面から削孔する調査がある。堤体天端から削孔する調査、及び堤体上下流面から削孔する調査の模式図を図-3. 4. 1に示す。なお、堤体上下流面から変状が懸念される水平打継目に対して、変状が生じた深さを把握するため、超音波法あるいは衝撃弾性波法を用いて打継目が開口している範囲の計測を行っている事例も存在するが、その精度は必ずしも高くない。

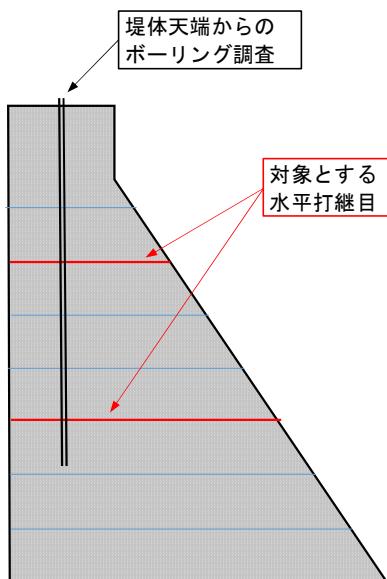


図-3. 4. 1(1) 堤体天端からの
ボーリング調査模式図

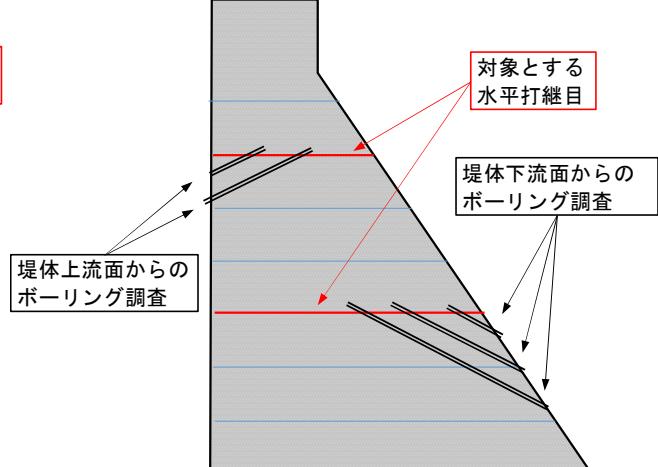


図-3. 4. 1(2) 堤体上下流面から
のボーリング調査模式図

堤体天端からのボーリング調査は1本のボーリングで複数の水平打継目に対する調査が可能であるが、調査に要する機材が大がかりで、調査にも時間を要し、上下流端付近

に対する調査ができない。一方、上下流面からのボーリング調査は端部付近の調査が可能で、ボーリング削孔機材自体は簡易なもので実施可能、削孔深さが短いため、調査時間も短時間という利点はあるが、一部を除き調査箇所へのアクセスには仮設が必要、上下流面から離れた位置の調査が困難、上流面からの調査は貯水位によっては実施不可という適用上の制約がある。そのため、これらの方法を組み合わせてボーリング調査が実施される。堤体天端からの調査ボーリングの実施状況の写真、及び堤体下流面からの調査ボーリングの実施状況の写真を図-3.4.2に示す。また、堤体天端からの調査に用いられる機材の構成事例を図-3.4.3に、堤体上下流面からの調査に用いられる機材の事例を図-3.4.4に示す。



図-3.4.2(1) 堤体天端からの
ボーリング調査の実施状況事例



図-3.4.2(2) 堤体下流面からの
ボーリング調査の実施状況事例

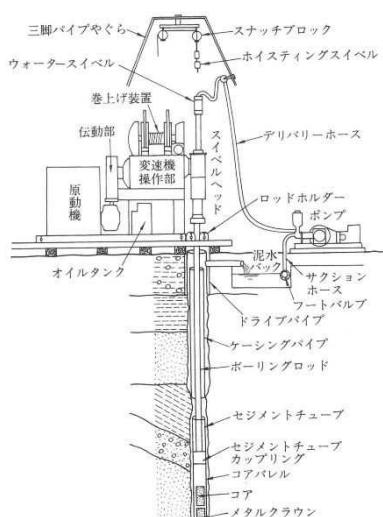


図-3.4.3 堤体天端からのボーリング
調査の機材構成図¹⁰⁾



図-3.4.4 堤体上下流面からのボーリング
調査に用いられる機材例¹¹⁾

コンクリートダム堤体天端からのボーリング調査で採取されたボーリングコア写真的例を図-3.4.5～図-3.4.6に示す。この例ではボーリングコアは深度14.69mに上下で一体化していない不連続面を有し、その面は茶褐色に変色していることが確認される。また、このボーリング孔の孔壁をボアホールカメラで撮影した画像を図-3.4.7に示すがこの孔壁画像でも不連続面の存在が確認できる。図-3.4.8には、堤体上流面から水平打継目に対して斜め上向きのボーリング調査を行った孔壁の画像を示すが水平打継目が分離開口している変状が確認できる。このように、ボーリング調査を行うことでコンクリートダム堤体の水平打継目の変状を把握することが可能となる。

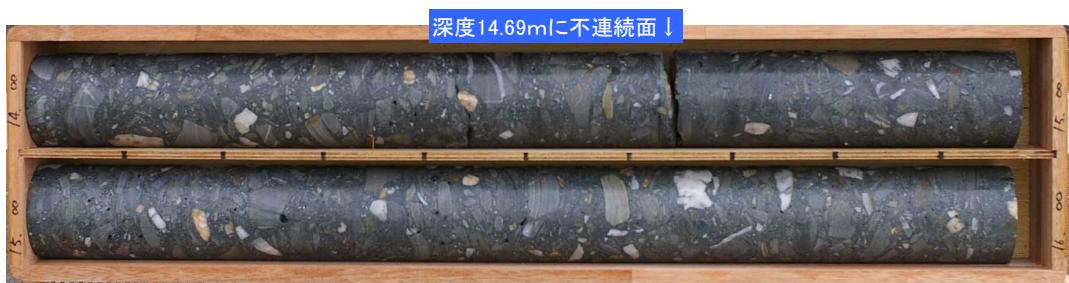


図-3.4.5 天端からのボーリング調査で採取されたボーリングコアの例



図-3.4.6 ボーリング調査で採取された
コアの不連続面(14.69m)の断面

図-3.4.7 ボーリング孔の孔壁画像
(不連続面(14.69m)付近)



図-3.4.8 堤体上流面からのボーリング孔の孔壁画像

(2) ボーリング調査による水平打継目変状把握手法の課題

変状の状態を直接確認できるボーリング調査によるコンクリートダム堤体の水平打継目の変状把握であるが、次に示す課題を有する。

- ①ボーリング調査によって得られるのは、点情報のため、面的な変状情報の取得のためには、多くの点に対するボーリング調査が必要となる。
- ②ボーリング調査は、小規模ではあるが、健全な部分を含めて堤体の一部を破壊する行為であり、そのため、ボーリング孔数をできる限り少なくする必要がある。
- ③採取及び孔壁画像取得を行う場合の調査には約10万円/mの費用が必要となるため、調査費用の面から多くのボーリング調査を行うことは困難である。また、堤体上下流面からの調査を行う場合には足場の設置等の多大な仮設費が必要となる。
- ④堤体天端からのボーリング調査を行う場合、数十mの深度までの削孔を行う場合、1孔あたり数週間を要する。そのため、多数の孔のボーリング調査は、堤体天端の車両通行を長期間にわたって不可能とするため、ダム天端を道路として一般供用している場合には実施が困難である。
- ⑤堤体上流面からのボーリング調査は、前述の通り、貯水位が上昇している期間には調査対象とする打継目に対して適用できず、調査を行うためには貯水位を下げるあるいは貯水位が上昇しないように貯水池運用を制限することが必要になり、ダムの貯水機能を低下させることになるので、適用機会は多くない。

以上のようにボーリングによる調査手法は課題を有することから、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状を把握する新たな調査手法が必要である。

3. 4. 2 新たな水平打継目変状の把握手法の検討

前項で述べたように、現在、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状を把握する手法として一般的に行われているボーリングによる調査手法は課題を有する。そのため、これらの課題を克服した、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状を把握する新たな調査手法が必要となっている。

コンクリート構造物に対する一般的な調査方法として、コンクリート標準示方書〔維持管理編：標準〕¹²⁾では、「書類等による方法(書類調査)」「目視による方法およびたたきによる方法」「非破壊試験機器を用いる方法」「局部的な破壊を伴う調査」「実構造物の載荷試験および振動試験による調査」「荷重および環境作用を評価するための調査」「センサを用いたモニタリングによる調査」について示しており、表-3.4.1として示した表に、調査方法と得られる情報について例示している。これらの調査方法のうち「局所的な破壊を伴う方法」については、既往の変状の把握手法であるボーリング調査手法における最大の課題となっている健全な堤体コンクリートを小規模ではあるが破壊するという点において同様の調査手法であることから除外して検討する。また、「書類等による方法(書類調査)」及び「環境作用等を評価するための調査手法」についても、水平打継目の変状の状態把握という目的には合致しないため、除外する。本研究においては、「目視による調査」「たたきによる調査」「非破壊試験機器を用いる方法」「実構造物の載荷試験および振動試験による方法」のなかから、「非破壊試験機器を用いる方法」に着目して、新たな手法について検討を行うこととする。

調査の対象が、大規模な無筋コンクリート構造物であるコンクリートダム堤体の水平打継目であること、その形状から堤体の上下流面に直接接近しての調査は困難であること、という条件から、「非破壊試験機器を用いる方法」のなかから「衝撃弾性波法」及び「赤外線法（サーモグラフィ法）」に着目し、新たな水平打継目の変状把握手法としての適用性についての検討を行う。

(1) 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法は超音波法と比較した場合、低い周波数成分の多い、すなわち波長の長いエネルギーの大きな弾性波を用いる方法である。そのため、コンクリート内部に入力した波の減衰が小さいため、コンクリートの深部にある欠陥に対しても適用可能な手法であると一般的に認識されている¹³⁾¹⁴⁾。そのため、トンネルの覆工、橋梁の床板、橋脚、防波堤等、様々な土木構造物の内部欠陥に対して、様々な手法を用いた調査に用いられている^{15) 16) 17) 18) 19)}。しかし、低周波数成分の多い弾性波を用いること

から超音波法で用いられるような高い分解能は有しておらず、数mオーダーを超える距離にあるような内部欠陥を対象とした調査には一般的には用いられていない。

このような衝撃弾性波法において、高い領域から低い領域までの周波数成分から構成される弾性波を入力し、反射波として戻ってくる弾性波の高周波数領域の成分を用いて、数mオーダーを超える距離に存在する欠陥を把握可能な調査手法が、コンクリート基礎杭の損傷調査に用いられているという事例もある²⁰⁾。ただし、この手法についてはあくまでも基礎杭という一次元の構造物に対する調査であり、三次元の構造物において変状が面的に広がりを有するような状態を把握する手法にはなっていない。

そこで、本研究においては、このコンクリート基礎杭の損傷調査に用いる衝撃弾性波法による調査手法をコンクリートダム堤体に拡張適用する手法について検討するものとする。

(2) 赤外線法（サーモグラフィ法）

サーモグラフィ法は、物体の表面温度分布を測定し、熱画像上に出現する表面温度異状部から、構造物の内部欠陥の存在を推定する方法として一般的に用いられている。サーモグラフィ法が適用されている対象とする主な変状は、部材表面のコンクリート等の剥離・浮きである。また、水分を含有することによる温度差に着目した漏水調査にも適用されている。一方で、コンクリート構造物の主要な変状であるひび割れに対しては、ひび割れが内部でどの方向に向かっているかを推定することに対しての研究は行われている²¹⁾が、目視でも確認できるような構造物表面のひび割れの開口状況の推定・評価には用いられていない。

本研究においては、サーモグラフィ法が離れた位置から構造物の状態を計測できること、ならびに本研究で対象としている水平打継目が開口しているような状態においては開口の状態によって水分の含有状況に差異があり、表面温度にも差異があることが推察されること、ということからサーモグラフィ法に着目して、水平打継目の変状把握手法への適用性を検討するものとする。

以上のことから、本研究においては、主に堤体内部からの情報を基に変状状態を推定する衝撃弾性波法による手法と、主に堤体表面からの情報を基に変状の状態を推定するサーモグラフィ法による手法とを組み合わせて、コンクリートダム堤体の水平打継目の状態を合理的に精度良く把握する手法を検討する。

表-3.4.1(1) 調査方法と得られる情報の例(その1)¹²⁾

調査方法		得られる情報の例																								
書類等による方法 (書類調査)	図書収集 ヒアリング(聞き取り調査)	<ul style="list-style-type: none"> ・使用した示方書、設計基準 ・設計図書、竣工時期 ・施工記録、検査記録 ・維持管理記録(点検記録、補修、補強履歴等) 																								
目視およびたたき等による方法	目視等(近接、遠望) たたきによる方法	<ul style="list-style-type: none"> ・初期欠陥(ひび割れ、豆板、コールドジョイント、砂すじ、表面気泡等) ・コンクリートの変色・汚れ(さび汁の有無、かびの発生、ゲルの折出、エフロレッセンス、漏水等) ・ひび割れ(発生方向、パターン、本数、幅、長さ、さび汁の有無等) ・スケーリング、ポップアウト ・コンクリートの浮き(有無、箇所数、面積等) ・コンクリートの剥離・剥落の有無 ・鋼材の露出・腐食・破断の有無 ・変形の有無 ・水掛かり ・コンクリートの浮き(有無、箇所数、面積等) ・コンクリートの剥離・剥落の有無 																								
非破壊試験機器を用いる方法	反発度に基づく方法 電磁誘導を利用する方法 弾性波を利用する方法 電磁波を利用する方法 電気化学的方法 光を利用する方法 デジタル画像を利用する方法 その他	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">反発度法</td> <td>反発度法</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの強度 </td></tr> <tr> <td>電磁誘導を利用する方法</td> <td>電磁誘導法 漏洩磁束法 コンクリートの誘電性を利用する方法</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり ・鉄筋の破断 ・コンクリートの含水状態 </td></tr> <tr> <td>弾性波を利用する方法</td> <td>打音法 振動試験(加速度計による方法) 超音波法(反射法・透過法) 衝撃弹性波法 アコースティック・エミッション(AE)法 弾性波トモグラフィ法</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの表面性状、剥離、浅部の水平ひび割れ ・コンクリート部材の剛性(劣化) ・コンクリートの圧縮強度、弾性係数等の品質 ・コンクリートのひび割れ深さ(鉛直、水平) ・コンクリート中の浮き、剥離、内部欠陥 ・コンクリート厚さ等の部材寸法 ・グラウトの充填状況 ・コンクリートの進行中のひび割れ評価(発生場所、規模、形態(引張/混合/せん断型)) ・コンクリートの劣化進展のリアルタイム評価 ・コンクリート内部の劣化・損傷分布 </td></tr> <tr> <td>電磁波を利用する方法</td> <td>X線法 赤外線サーモグラフィ法 (パッシブ法・アクティブ法) 電磁波レーダ法 核磁気共鳴法</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり、空隙 ・コンクリート中の浮き、剥離、空隙 ・コンクリートのひび割れの分布状況 ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり ・コンクリート中の空洞(または空洞内の水分) </td></tr> <tr> <td>電気化学的方法</td> <td>自然電位法 分極抵抗法 電気抵抗を利用する方法</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の腐食傾向 ・コンクリート中の鋼材の腐食速度 ・コンクリートの電気抵抗 </td></tr> <tr> <td>光を利用する方法</td> <td>光ファイバ法 点計測(FBG法) 分布計測(OTDR法、BOTDR法、PPP-BOTDA法)</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中のひずみ、温度など ・コンクリート中のひずみ分布 </td></tr> <tr> <td>デジタル画像を利用する方法</td> <td>デジタル写真測量 デジタル画像相関法 蛍光剤含浸法 モアレ法</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート表面の変位 ・コンクリート表面のひずみ分布や経時変化 ・コンクリート内部のひび割れ ・コンクリート表面の変位 </td></tr> <tr> <td>その他</td> <td>表面吸水試験 表面透気試験</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの透水性 ・コンクリートの透気性 </td></tr> </table>	反発度法	反発度法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの強度 	電磁誘導を利用する方法	電磁誘導法 漏洩磁束法 コンクリートの誘電性を利用する方法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり ・鉄筋の破断 ・コンクリートの含水状態 	弾性波を利用する方法	打音法 振動試験(加速度計による方法) 超音波法(反射法・透過法) 衝撃弹性波法 アコースティック・エミッション(AE)法 弾性波トモグラフィ法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの表面性状、剥離、浅部の水平ひび割れ ・コンクリート部材の剛性(劣化) ・コンクリートの圧縮強度、弾性係数等の品質 ・コンクリートのひび割れ深さ(鉛直、水平) ・コンクリート中の浮き、剥離、内部欠陥 ・コンクリート厚さ等の部材寸法 ・グラウトの充填状況 ・コンクリートの進行中のひび割れ評価(発生場所、規模、形態(引張/混合/せん断型)) ・コンクリートの劣化進展のリアルタイム評価 ・コンクリート内部の劣化・損傷分布 	電磁波を利用する方法	X線法 赤外線サーモグラフィ法 (パッシブ法・アクティブ法) 電磁波レーダ法 核磁気共鳴法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり、空隙 ・コンクリート中の浮き、剥離、空隙 ・コンクリートのひび割れの分布状況 ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり ・コンクリート中の空洞(または空洞内の水分) 	電気化学的方法	自然電位法 分極抵抗法 電気抵抗を利用する方法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の腐食傾向 ・コンクリート中の鋼材の腐食速度 ・コンクリートの電気抵抗 	光を利用する方法	光ファイバ法 点計測(FBG法) 分布計測(OTDR法、BOTDR法、PPP-BOTDA法)	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中のひずみ、温度など ・コンクリート中のひずみ分布 	デジタル画像を利用する方法	デジタル写真測量 デジタル画像相関法 蛍光剤含浸法 モアレ法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート表面の変位 ・コンクリート表面のひずみ分布や経時変化 ・コンクリート内部のひび割れ ・コンクリート表面の変位 	その他	表面吸水試験 表面透気試験	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの透水性 ・コンクリートの透気性
反発度法	反発度法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの強度 																								
電磁誘導を利用する方法	電磁誘導法 漏洩磁束法 コンクリートの誘電性を利用する方法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり ・鉄筋の破断 ・コンクリートの含水状態 																								
弾性波を利用する方法	打音法 振動試験(加速度計による方法) 超音波法(反射法・透過法) 衝撃弹性波法 アコースティック・エミッション(AE)法 弾性波トモグラフィ法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの表面性状、剥離、浅部の水平ひび割れ ・コンクリート部材の剛性(劣化) ・コンクリートの圧縮強度、弾性係数等の品質 ・コンクリートのひび割れ深さ(鉛直、水平) ・コンクリート中の浮き、剥離、内部欠陥 ・コンクリート厚さ等の部材寸法 ・グラウトの充填状況 ・コンクリートの進行中のひび割れ評価(発生場所、規模、形態(引張/混合/せん断型)) ・コンクリートの劣化進展のリアルタイム評価 ・コンクリート内部の劣化・損傷分布 																								
電磁波を利用する方法	X線法 赤外線サーモグラフィ法 (パッシブ法・アクティブ法) 電磁波レーダ法 核磁気共鳴法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり、空隙 ・コンクリート中の浮き、剥離、空隙 ・コンクリートのひび割れの分布状況 ・コンクリート中の鋼材の位置、径、かぶり ・コンクリート中の空洞(または空洞内の水分) 																								
電気化学的方法	自然電位法 分極抵抗法 電気抵抗を利用する方法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中の鋼材の腐食傾向 ・コンクリート中の鋼材の腐食速度 ・コンクリートの電気抵抗 																								
光を利用する方法	光ファイバ法 点計測(FBG法) 分布計測(OTDR法、BOTDR法、PPP-BOTDA法)	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート中のひずみ、温度など ・コンクリート中のひずみ分布 																								
デジタル画像を利用する方法	デジタル写真測量 デジタル画像相関法 蛍光剤含浸法 モアレ法	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート表面の変位 ・コンクリート表面のひずみ分布や経時変化 ・コンクリート内部のひび割れ ・コンクリート表面の変位 																								
その他	表面吸水試験 表面透気試験	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの透水性 ・コンクリートの透気性 																								

表-3.4.1(2) 調査方法と得られる情報の例(その2)¹²⁾

調査方法		得られる情報の例
局所的な破壊を伴う方法	コア採取による方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ深さ ・コンクリートの圧縮強度, 引張強度, 弹性係数 ・コンクリートの中性化深さ ・コンクリートの分析(化学分析, 蛍光X線分析, X線回析, 熱分析, 光学顕微鏡, 偏光顕微鏡, 走査型電子顕微鏡, EPMA) ・塩化物イオンの状況(塩化物イオン量および分布) ・配合分析 ・コンクリートの解放膨張量および残存膨張量 ・細孔径分布 ・コンクリートの気泡分布
	はつりによる方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れ深さ ・コンクリートの分析 ・コンクリートの中性化深さ ・塩化物イオンの状況(塩化物イオン量および分布)
	小径コア法	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼材の腐食状況 ・コンクリートの中性化深さ
	ドリル削孔による方法	<ul style="list-style-type: none"> ・塩化物イオンの状況(塩化物イオン量および分布) ・コンクリート強度
	鋼材を採取する方法	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼材の腐食状況 ・鋼材の引張強度
	ファイバスコープを用いる方法 孔内画像	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート内部の状況 ・コンクリート内部の詳細状況
載荷試験および振動試験	載荷試験および振動試験	<ul style="list-style-type: none"> ・部材の断面剛性(静的, 動的)
	車上感覚試験	<ul style="list-style-type: none"> ・振動特性
作用を評価するための調査	直接測定する方法 既往の記録に基づく方法 気象庁等から公表されているデータに基づく方法	<ul style="list-style-type: none"> ・気象条件(気温, 最低気温, 湿度, 降水量, 日射量) ・水分の供給(雨掛けの状況, 地盤からの水の供給条件, 防水層や排水設備の状況) ・塩分の供給(飛来塩分量, 海水の影響, 凍結防止剤の散布量等) ・荷重条件(通行する車両等の状況) ・河川水等のpH ・下水道関連施設における水質 ・土壤汚染の状況 ・酸性雨, 酸性霧の発生状況

3. 5 本章のまとめ

本章では、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状について整理を行った。

まず、一般のコンクリート構造物と比較して、コンクリートダム堤体は、①大規模で重厚な無筋コンクリート構造物であること、②大粒径骨材を使用して、材料分離が生じやすく、骨材下面界面の付着強度が相対的低くなる可能性があるダムコンクリートを使用していること、③堤体は薄層厚の矩形ブロックを積み重ねていき構築していくため、打継目が構造的に相対的に弱部となる可能性がある構造物であること、という特徴があることを示した。

次に、水平打継目の変状の発生機構として、①日常的なコンクリートダム堤体の挙動（繰り返し作用）に起因するもの、②ASR 等の他の劣化原因に起因するもの、という大別して 2 種類のものがあることについて述べた。

そして、水平打継目に変状が発生することによって、①堤体構造の安定性、②貯水機能、というダム堤体の主要な機能に、どのような影響がどのように及ぶかということについて述べた。

その上で、水平打継目に変状が生じて、堤体下流面漏水が確認されているダムの事例として 4 ダムを示し、明らかになっている範囲で、変状の発生時期、発生要因、及び進展状況について概説した。

最後に、ダム機能に影響が及ぶ水平打継目の変状の状態を把握する手法として、現在、一般的に行われている調査ボーリングを用いた手法について、その方法及び得られる結果を示した上で、調査ボーリングを用いる手法を用いて変状を把握しようとした場合には①健全な堤体コンクリートを小規模ながら破壊すること、②変状の状態把握に要するコストが多大になること、③変状を把握するために必要な現地作業に長期間を要することがあるため、調査の実施が困難となることがあること、④変状を把握するためには、一時期にダムの貯水機能を低下させる措置を執らなければならないことがあること、という課題を有しており、水平打継目の変状を把握する新たな手法が必要であることを述べた。そして、既存の変状把握手法における課題を克服する手法としては、衝撃弾性波法とサーモグラフィ法という非破壊試験の手法を用いることが有望であるとして、これらを用いた水平打継目の変状の把握を行う新たな手法について取り組むこととした。

参考文献

- 1) 土木学会編：2013年制定コンクリート標準示方書〔ダムコンクリート編〕，2013年10月
- 2) 国土交通省：目で見るダム事業2007, pp. 53～54, 2007年
- 3) 原稔明, 市川滋己：水資源機構施工の面状工法による7コンクリートダムの特徴, ダム技術, No. 339, pp. 23～53, 2014年12月
- 4) 土木学会編：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕, pp. 129～132, 2018年3月
- 5) 土木学会編：2013年制定コンクリート標準示方書〔ダムコンクリート編：標準〕, pp. 64～65, 2013年10月
- 6) 独立行政法人水資源機構：写真で見るダム施工要領—コンクリートダム編一, pp. 5-14～5-22, 2006年3月
- 7) 佐野貴之, 山本力, 高橋健一：コンクリートダム堤体の挙動解析, 独立行政法人水資源機構平成21年度関東ブロック技術研究発表会資料, 2009年9月
- 8) 国土交通省：河川管理施設等構造令施行規則第9条（コンクリートダムの安定性及び強度）
- 9) 独立行政法人水資源機構：写真で見るダム施工要領—コンクリートダム編一, pp. 5-8, 2006年3月
- 10) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会編：地盤調査の方法と解説—二分冊の1—, pp. 193, 2013年3月
- 11) 株式会社シブヤ：ダイモドリルシリーズ総合カタログ, 2020年4月
- 12) 土木学会編：2018年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編：標準〕, pp. 50～62, 2018年10月
- 13) コンクリート工学会編：コンクリート診断技術'14〔基礎編〕, pp. 112～119, 2014年2月
- 14) 鈴木哲也, 大野健太郎, 内田慎哉, 岩野聰史, 市川滋己：弾性波を用いたひび割れが顕在化したコンクリートダムの非破壊試験, 水土の知, Vol. 85, No. 4, pp. 335～338, 2017年4月

- 15) 片岡繁人, 岩野聰史, 坂本良憲, 審藤大夫: 衝撃弾性波法（多重反射法）の内部空隙探査を適用したシールドトンネルの維持管理, 衝撃弾性波法のコンクリート構造物への適用に関するミニシンポジウム, pp. 37～P40, 2019年6月
- 16) 大田一成, 山本雅行, 横山和昭: 衝撃弾性波法を用いた床板の水平ひび割れ検出精度の検証, 衝撃弾性波法のコンクリート構造物への適用に関するミニシンポジウム, pp. 41～44, 2019年6月
- 17) 一色智彦, 鈴木真, 藤原理恵, 鎌田敏郎: 衝撃弾性波法のコンクリート構造物への適用に関するミニシンポジウム, 供用中の鋼板接着補強RC床版における弾性波による内部損傷の非破壊調査, pp. 51～56, 2019年6月
- 18) 麻植久史, 塩谷智基, 古野昌吾: 3次元弾性波トモグラフィによるASR劣化したコンクリート橋梁の内部損傷評価, 衝撃弾性波法のコンクリート構造物への適用に関するミニシンポジウム, pp. 57～60, 2019年6月
- 19) 藤田孝康, 松本力, 斎藤将貴, 笠井哲郎, 奥野音正洋, 加藤広之: 透過衝撃弾性波法による漁港施設の内部欠陥診断手法の検討, 衝撃弾性波法のコンクリート構造物への適用に関するミニシンポジウム, pp. 31～35, 2019年6月
- 20) 永井哲夫, 中村敏明, 永野賢司: 高周波衝撃弾性波法による杭基礎の健全性評価, 地盤工学会誌, Vol. 61, No. 8, pp. 26～29, 2013年8月
- 21) 高羅信彦, 魚本健人: サーモグラフィ法によるコンクリート構造物の検査手法の開発, 生産技術, 54巻3号, pp. 242～245, 2002年

第4章 衝撃弾性波法による堤体内部の水平打継目の状態把握

4. 1 本章の概要

コンクリートダムの堤体における代表的な変状の一つとして、堤体下流面の漏水現象に進展する水平打継目の変状がある。変状の状態を的確に把握することは、コンクリートダム堤体の維持管理を適正に行う上、重要である。しかしながら、この変状の状態を把握する既往の調査手法には課題がある。この課題を克服する新しい手法として、本研究においては衝撃弾性波法と赤外線サーモグラフィ法の2種類の非破壊試験手法についての検討を行うこととした。

本章においては、このうち衝撃弾性波法を用いた手法について検討を行う。ここで、コンクリートダム堤体に対して適用する衝撃弾性波法は、コンクリート基礎杭の損傷調査に用いられた実績がある、高い領域から低い領域までの周波数成分を有する弾性波を入力し、反射波として戻ってくる弾性波の高周波数領域の成分を用いて、数mオーダーを超える距離に存在する欠陥を把握可能な調査手法である¹⁾²⁾。まず、4. 2において、この衝撃弾性波法を用いた、重力式コンクリートダムであるAダムをモデルダムとして実施した計測について述べる。一般のコンクリートに比較して、大粒径骨材を使用し、不均一な傾向があるダムコンクリート中の弾性波の透過・反射特性は、一般コンクリートの特性とは異なる可能性がある。そこで、ダムコンクリート中の弾性波の透過反射特性について大型供試体を用いた室内試験で確認しており、その結果を4. 3で述べる。更に、本手法では変状が生じた水平打継目からの反射波が戻ってくるまでの時間で変状打継目の位置を把握するため、コンクリートダム堤体における弾性波の伝播速度の設定が精度確保のためには重要なとなる。そこで、Aダムでの計測結果を基に、コンクリートダム堤体中の弾性波伝播速度の特性について検討を行っている。この結果を4. 4で述べる。また、本手法においては、衝撃弾性波法により計測された弾性波波形を基に、評価対象とする打継目の変状状態を4段階で判定することとしている。この判定に不可欠なものが、対象とする打継目における弾性波の透過反射特性と打継目の状態を関係づけた基準である。この基準を堤体で実施されたボーリング調査で得られた情報を基に設定を行っており、この結果を4. 5で述べる。次の4. 6においては、4. 3から4. 5までの検討結果に基づいた、衝撃弾性波法を用いたダム堤体の水平打継目の状態推定方法について述べる。4. 7においては、この衝撃弾性波法を用いた水平打継目の状態調査手法のダム堤体への適用性を拡大する手段として検討した堤体監査廊からの計測手法及び天端アスファルト舗装面からの計測手法について述べる。4. 8では、本章をとりまとめる。本章の内容フローを図-4. 1. 1に示す。

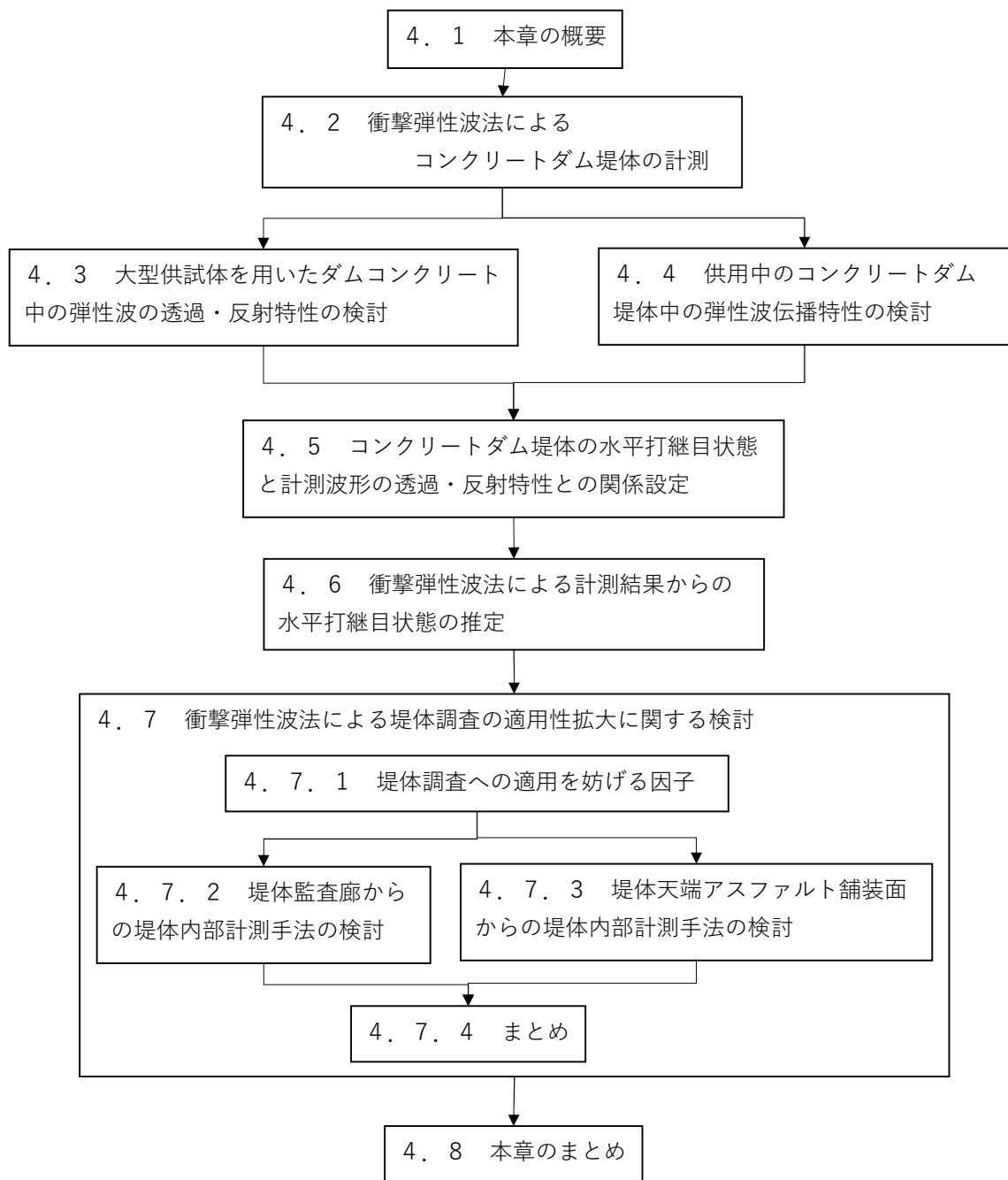


図-4.1.1 衝撃弾性波法による堤体水平打継目の状態把握の検討フロー

4. 2 衝撃弾性波法によるコンクリートダム堤体の計測

4. 2. 1 衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の内部欠陥の把握

一般的に、弾性波法とは、コンクリート構造物の表面に設置した発振子や衝撃を入力する装置によって構造物内部に弾性波を入力して、構造物表面に設置した受振子で、構造物内部の影響を受けた弾性波を受信して、構造物内部の変状の位置や寸法を測定する非破壊試験方法である。使用する弾性波の周波数領域や弾性波を発生させる方法によって、超音波法、衝撃弾性波法等に分けられる。超音波法は使用する周波数が 20kHz 以上の周波数帯を使用する方法であり、衝撃弾性波法は表面を打撃して弾性波を発生させて、これを受振子で測定する方法であり、20kHz 以下の超音波域よりも低い周波数成分の多い波を使用する方法である。超音波法のような利用する周波数範囲が高いものは、コンクリート中での減衰が大きいので、50kHz 以上の高周波数を利用する場合には部材の寸法、あるいは変状の発生している深さについては 2~3m 程度の範囲が限度であると言われている³⁾。一方、一般的な衝撃弾性波法で取り扱うような数 kHz 程度以下の低い周波数の波については、伝播距離を 10m 以上とすることことができ、深部の状態の把握が可能という特徴を持っている。しかしながら、低周波数の波は、幅が数 mm 程度の微細なひび割れに対してはひび割れを通過してしまうため、ほとんど反射せずに検知が困難である。この理由は波の周波数の大きさと不連続面の動的剛性及び幅の組み合わせによって不連続面での波の伝播特性が変化し、不連続面の幅の大きさによって、透過・反射する波が周波数で選択されるからと考えられている。そのため、コンクリート構造物に発生するひび割れのような幅が数 mm 程度の微細な変状を把握するためには高い周波数を用いた検知が必要となってくる。

このような弾性波法の中で、コンクリート構造物表面を打撃して、高い領域から低い領域までの周波数成分で構成される弾性波を入力し、低周波数領域の反射波と共に戻ってくる弾性波の高周波数領域の成分を用いて、数十m オーダーを超える距離に存在する 0.3mm 程度の開口幅を持つひび割れ等の欠陥を把握可能な調査方法「オーリス（非破壊探査システム）」¹⁾がある。また、この調査手法は、既設杭の杭長・亀裂調査、橋脚根入れ深さ調査への適用実績を多数有している²⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

このシステムは、高周波成分を多く含む弾性波を調査対象物に入射して、受振センサとして共振周波数 140kHz の AE センサを用いて反射波の高周波成分を受振し、さらに HPF（ハイパスフィルタ）をかけて特定範囲の高周波成分を抽出できるシステムである。この測定システムの仕様を表-4. 2. 1 に、調査装置の構成を図-4. 2. 1 に示す。調査方法の概念図を図-4. 2. 2 に示す。杭など一般の構造物においては、反射波が得られる時間から距離を算定し、ひび割れ等変状の位置を算出する。

表-4.2.1 衝撃弾性波法測定システムの仕様

■測定装置本体	
・周波数特性	1kHz～2MHz (-3dB)
・フィルタ特性	HPF(ハイパスフィルタ) : THRU, 50kHz 以下 カット～500kHz 以下カットの可変式
■デジタルオシロスコープ	
・サンプリングレート	100M Sample/sec MAX
・サンプリングタイム	10ns～10ms
・メモリ長	100kPoint/ch
■受振センサ (AE センサ)	
・共振周波数	140kHz, 感度-10dB 以上
・形状, 寸法	直径 12mm, 高さ 40mm
■プリアンプ	
・周波数特性	2kHz～1.2MHz (-3dB)
・入力形式	不平衡, BNC 接栓
■鋼製ハンマー	
・両口玄能	ヘッド重量 225g～460g



図-4.2.1 調査装置の構成(装置本体, 受信センサ, 鋼製ハンマー)

高周波衝撃弾性波調査パンフレット(株式会社ダイヤコンサルタント)から転載

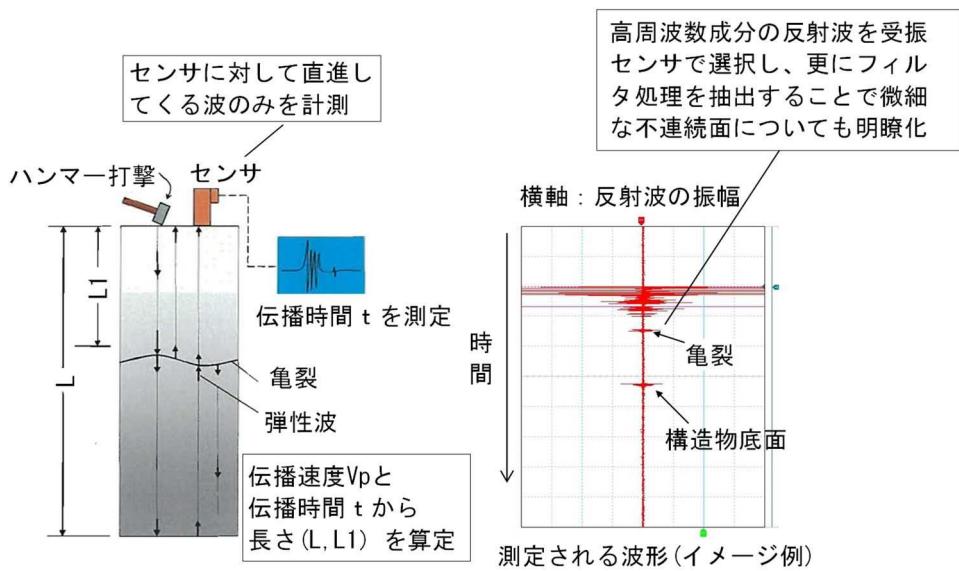


図-4.2.2 衝撃弾性波法調査の概念図²⁾

4. 2. 2 衝撃弾性波法によるコンクリートダム堤体の計測

本研究では、前項で示した調査手法「オーリス（非破壊探査システム）」をコンクリートダム堤体に適用し、堤体水平打継目の状態を把握する手法を検討することとした。そこで、まずモデルダムとして、重力式コンクリートダムであるAダムを選定し、計測を実施した。

(1) 計測対象ダム

計測の対象とするモデルダムは、四国地方に位置する、1974年に完成した堤高42m、堤頂長138mの重力式コンクリートダムである、Aダムとした。堤体の下流面図を図-4.2.3に、標準断面図を図-4.2.4に示す。このダムでは貯水位が上昇した際に、図-4.2.5のように下流面漏水が生じ、水平打継面の劣化が懸念され、状態の把握が必要となっていた。

Aダムの堤体コンクリートの打設方法は、柱状工法で行われており、1ブロック（ダム軸方向10～13m、上下流方向4.5～35.57mの広がりを持つ区画）毎に高さ1.5mでコンクリート打設を行い、硬化後にグリーンカット及びモルタル敷均しの打継面処理を行い、更に上部にコンクリートを高さ1.5mで打設することを繰り返して堤体が構築されているダムである。よって、Aダムの堤体の水平打継目は高さ1.5m毎に設けられている。

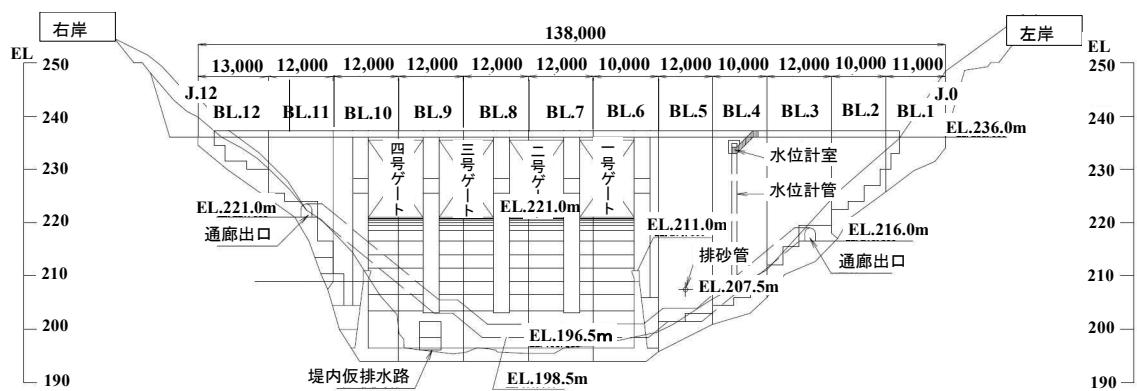


図-4.2.3 Aダムの堤体下流面図

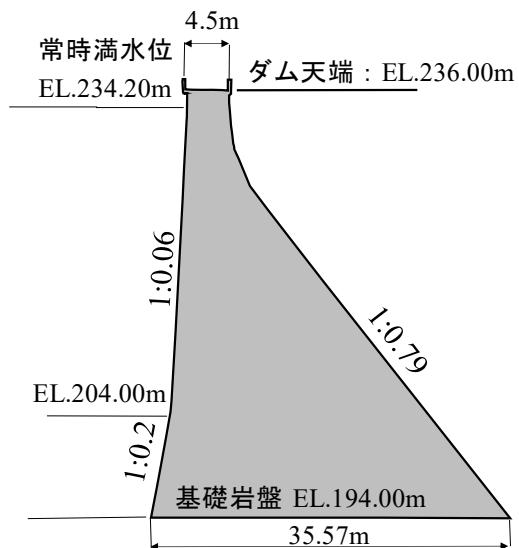


図-4.2.4 Aダムの標準断面図



図-4.2.5 Aダムの堤体下流面漏水状況

Aダムの堤体を構築しているコンクリートの配合を表-4.2.2に示す。また、2010年に堤体から採取・作製したコア供試体を用いて確認したコンクリート品質を表-4.2.3に示す。コア供試体は堤体のBL.6及びBL.10において、堤体天端から、孔径86mmで鉛直下方にボーリングを行い、採取したコアから作製を行ったものである。配合Aの供試体は、BL.10の天端から15~18m深度の高標高部の堤体内部から採取した3試料とBL.6の天端から38~41m深度の低標高部(岩着部付近)から採取した4試料である。配合Bの供試体は、BL.6及びBL.10の天端から22~38m深度の中低標高部の堤体内部から採取した12試料である。配合Cの供試体は、鉄筋コンクリート構造であるBL6及びBL.10のゲート門柱部から採取した4試料である。コア供試体には目立った変状は外観には確認できなかったが、コンクリート品質ではB配合に比較して、水セメント比が相対的に小さく、発現強度、静弾性係数や超音波伝播速度が相対的に大きな値となることが一般的であるA配合(高標高部)及びC配合においてそのような傾向が確認できず、特に静弾性係数及び超音波伝播速度が小さい値を示しており、堤体の高標高部に位置し、相対的に富配合のコンクリートで施工された箇所で何らかのコンクリート劣化現象が生じていることを示唆する状況であり、その結果としての圧縮強度等のコンクリート品質結果であると考えている。

表-4.2.2 堤体コンクリート配合⁷⁾

配合種類	粗骨材最大寸法 Gmax (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							使用箇所
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材			AE減水剤 Ad	
						120~60 G1	60~20 G2	20~5 G3					
A	120	3±1.5	4±1	51.4	26.7	113	220	570	630	545	390	0.55	高標高部堤体及び低~中標高部堤体外部
B	120			71.9	28.1	115	160	615	635	545	390	0.4	低~中標高部堤体内部
C	60			50.7	37.2	142	280	730	—	735	500	0.7	鉄筋部

表-4.2.3 堤体コンクリート強度特性⁷⁾

配合	採取位置	供試体数(本)	一軸圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数×10 ³ (N/mm ²)	超音波伝播速度(m/s)
A	高標高部(BL.10)	3	30.1	17.2	4300
	岩着部(BL.6)	4	29.1	27.7	4740
B	中低標高部(BL.6・BL.10)	12	29.2	24.0	4700
C	門柱部(BL.6・BL.10)	4	32.3	17.1	4390

(2) 計測の実施方法

Aダムの堤体に対する計測においては、堤体天端、あるいは越流頂部に1~2m間隔の格子状に、打撃点と受振点を近接して設置することとした。このように格子状に測点を設置する理由は、コンクリートダム堤体に対する計測の目的が水平打継目の変状が生じている範囲を面的に把握することに基づいている。また、測点の格子間隔は本調査システムにおける既往の基礎杭、埋設構造物に対する調査実績から、状態が探査できる範囲が測点の周辺1~2m程度であることに基づいて設定した。このように設置した各測点において打撃点からハンマーで衝撃を与え、堤体の底部及び分離した打継面等で反射した弾性波を打撃点に近接して設置した受振センサで計測し、これで天端の各計測点の鉛直下部の堤体内の打継目の状態を把握する。

前項で述べた調査方法をコンクリートダム堤体に適用するに当たって、以下に示すような手順で高周波成分をより多く含む波を発生させて、微細な劣化の検出に必要な反射波の高周波成分を抽出することとした。

①高硬度の鋼製ハンマーを使用して測定面を打撃することで、高周波成分をより多く含む衝撃波を調査対象物に入射する。予備測定において測定波形を観察しながら、調査対象とする打継目までの距離に応じて適切な重量の鋼製ハンマーを選定する。

②受信センサとしてAEセンサ（共振周波数140kHz）を用いて、反射波の高周波成分を受振する。本調査ではサンプリングタイムは500ns~ $2\mu s$ で、メモリサイズは10kpointとした。

③AEセンサにより受振した反射波に、測定装置本体でHPF（ハイパスフィルタ）をかけて特定範囲の高周波成分を抽出する。予備測定において、測定波形を観察しながら測定装置本体のHPFを調整し、調査対象とする打継目までの距離に応じて、微細な劣化の検出に適した周波数を70kHz以下カット~150kHz以下カットの間で選定した。

④本測定では、予備測定で選定した鋼製ハンマーとHPFの周波数を用いて測定を行う。

また、Aダムは堤高42mであり、重力式コンクリートダムとしては小～中規模ダムではありが、コンクリート躯体としては大きなものに該当する。そのため、堤体の天端から低標高部まで弾性波を到達させるためには大きな打撃エネルギーが必要となり、適切な打撃エネルギーでない場合にはノイズが卓越して、打撃部（堤体天端）付近の反射波の情報が明瞭に判らなくなる。そこで、コンクリートダム堤体の調査においては、対象とする打継目までの距離に応じて、例えば、高標高部用、中標高部用及び低標高部用の3水準の打撃

エネルギーに切り替えて、調査を実施することで堤体全体の情報が得られるようになるととした。

図-4.2.6にダム天端打撃点での打撃及び計測の状況を示す。また、図-4.2.7にダム天端の打撃点と状態推定を行う水平打継目、状態推定箇所(点)との関係の模式図を示した。この模式図は、ダム天端で打撃し、反射波を受振することで、打撃点鉛直下部の打継目の面内の点の情報を得られることを示したものである。



図-4.2.6 コンクリートダム天端での計測状況⁸⁾

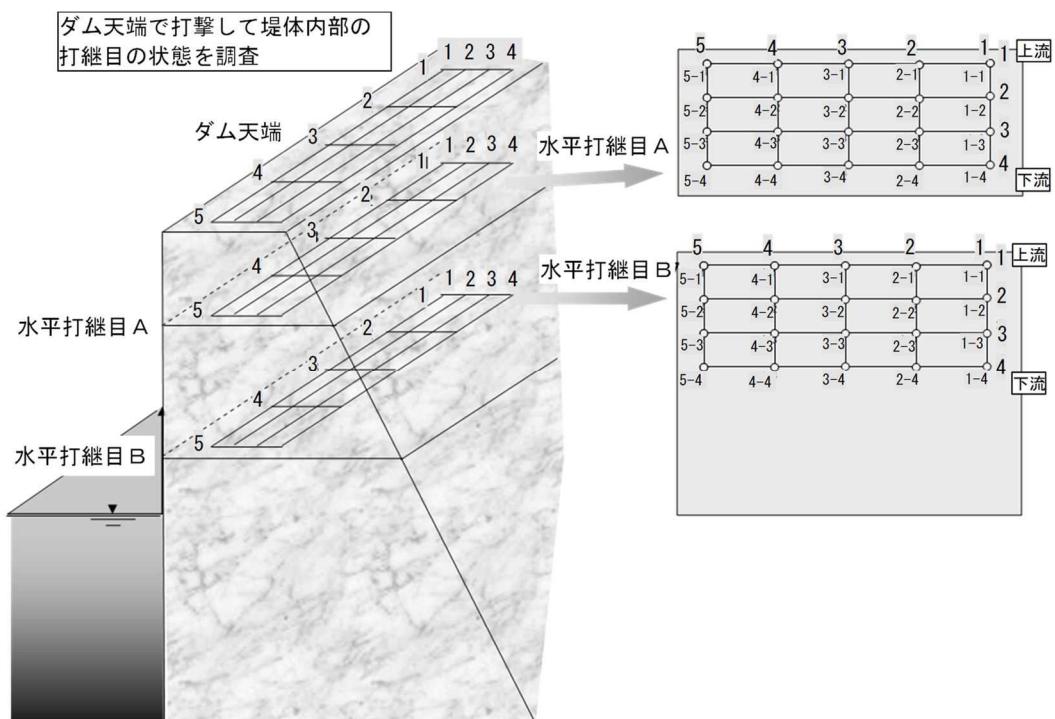


図-4.2.7 コンクリートダム天端の打撃点と対象打継目、状態推定箇所(点)⁸⁾

また、表-4.2.4にはAダムでの計測数量を示したが、各ブロックでの打撃点数の違いはブロック長、及びブロック頂部形状の違いによるものである。また、状態推定を行う水平打継目は、下流面の漏水状況、ならびに天端等からの打撃・反射波計測において当該打継目深度からの反射波発生の状況を基に、変状が懸念される打継目を対象とした

表-4.2.4 Aダムでの計測数量⁹⁾

BL.	打撃点数	状態推定		打撃点位置
		水平打継目数	箇所(点)数	
2	10	1	10	天端
3	24	7	168	天端
4	20	4	80	天端
5	20	6	120	天端
6	8	1	8	越流頂部
7	8	1	8	越流頂部
8	10	2	10	越流頂部
9	8	2	8	越流頂部
10	6	1	6	越流頂部
11	20	6	104	天端
12	16	4	32	天端
計	150	35	554	

4. 3 大型供試体を用いたダムコンクリート中の弾性波の透過・反射特性の検討

4. 3. 1 検討概要

コンクリートダム堤体の水平打継目の状態把握に用いる調査システムは、前節でも述べたとおり、杭基礎等の損傷を把握するために開発されたシステムである。しかしながら、杭基礎は比較的均質なコンクリートで構築されているのに対して、コンクリートダム堤体は粗骨材の最大寸法も大きく、粗骨材の比率も大きなダムコンクリートを用いていることから、杭に比較すると不均質なコンクリートであり、ダムコンクリート躯体中の透過・反射を含めた弾性波の伝播特性についても異なる可能性があると考えられる。また、本調査システムの計測波は高い指向性（どの程度の範囲の情報が得られるのか）を示すことが確認されている⁴⁾が、不均質なダムコンクリートにおいても同様な指向性を示すか否かについては明らかではない。

これらのこと踏まえ、コンクリートダム堤体の水平打継目の状態調査に本調査システムを用いるにあたって、ダムコンクリート躯体中の指向性や透過・反射特性を含めた弾性波の伝播特性に関する基礎的な知見が必要であることから、これらに関する検討として大型供試体を用いた室内試験を実施した。

4. 3. 2 検討方法

検討の方法としては、内部にひび割れ等を模した人工的な欠陥を設置した大型供試体を作製し、その供試体に対して、衝撃弾性波法を用いて計測を行い、計測された波形を基に検討を行った。

(1) 大型供試体作製

本検討に用いる供試体は、コンクリートダム堤体中を模したものである必要がある。そのため、ダムコンクリート配合のコンクリートを用いて供試体を作製した。ダムコンクリート配合の特徴としては、粗骨材の最大寸法が 150mm 程度と大きいこと、単位水量が少なく、硬練りであること、貧配合であること、低発熱型の結合材を使用していることがあげられる。そこで、実際のダムコンクリートを再現するものとして、表-4.3.1 に示す配合で供試体を作製した。なお、結合材には、計測時には十分な強度発現が行われていることが必要であることから、実際のダムコンクリートとは異なり、早強ポルトランドセメントをフライアッシュで 30% 質量置換したものをセメントとして使用した。

表-4.3.1 供試体作製コンクリート配合¹⁰⁾

粗骨材 最大寸法 Gmax (mm)	スランプ の範囲 SL (cm)	空気量の 範囲 Air (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)								
					水 W	結合材 C	細骨材 S 5~0	粗骨材				AE減 水剤 Ad1	AE剤 Ad2
								G1 150~80	G2 80~40	G3 40~20	G4 20~5		
150	3±1	3±1	75	27	120	160	585	378	378	378	378	0.4	0.016

供試体は、図-4.3.1に示した $0.5 \times 0.5 \times 2.6\text{m}$ の直方体で作製した。供試体は一旦 $0.5 \times 0.5 \times 1.75\text{m}$ の供試体として打設し、硬化させたのち、最も早い場合、中2日程度で打継ぐ、ダムでの施工と同等の3日後に長さ 0.85m 分の供試体を打継いで完成させた。なお、打継目については実際のダムで実施しているグリーンカットを模擬したワイヤーブラシによる目粗しで表面のモルタルを除去したのち、モルタルを塗布する他、内部欠陥を模擬する表-4.3.2に示す形状寸法の樹脂シートを貼付する処理を行った後に打設を行った。検討を行った内部欠陥のシリーズは、樹脂シートの厚み(欠陥の幅)に着目したシリーズと、樹脂シートの大きさ(欠陥の範囲)に着目したシリーズとに分けられる。なお、樹脂シートは力を受けると変形する性状のため、樹脂シートの厚みは分離面の厚さという視点でなく、接触している面積の割合が少なくなるという考え方で、厚みを変化させたシリーズを設定した。

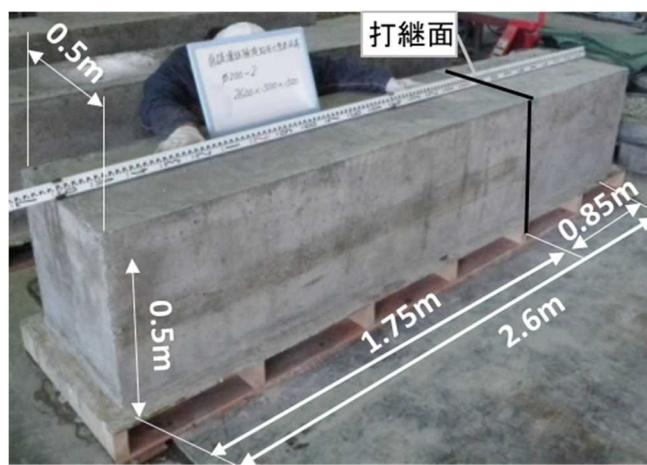


図-4.3.1 大型供試体の形状寸法¹⁰⁾

表-4.3.2(1) 内部欠陥形状の種類（シリーズ1）¹⁰⁾

ケース	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E
形状					
寸法 (mm)	欠陥部なし (打継目あり)	$\phi 200$	$\phi 200$	$\phi 200$	$\phi 200$
厚さ (mm)		約1	約2	約3	約5

内部欠陥：大きさを一定($\phi 200\text{mm}$)として厚さを変化(約1~5mm)

表-4.3.2(2) 内部欠陥形状の種類（シリーズ2）¹⁰⁾

ケース	2-A	2-B	2-C	2-D	2-E
形状					
寸法 (mm)	欠陥部なし (打継目あり)	$\phi 100$	$\phi 200$	$\phi 300$	$\phi 400$
厚さ (mm)		約1	約1	約1	約1

内部欠陥：厚さを一定(約1mm)として欠陥径($\phi 100\sim 400\text{mm}$)

(2) 計測手順

大型供試体に対する計測は、①測定箇所の整形・研磨、②受信センサの設置、③周波数・ハンマー選定のための予備測定、④本計測の実施（反射法で計測）（波形データの記録）という流れで実施した。計測された波形データを基に、打継目(内部欠陥)、ならびに供試体端部からの反射波の計測の有無および伝播時間について整理を行った。なお、本計測では、同一供試体に対して10回の波形を計測・記録した。

4. 3. 3 計測結果と考察

(1) 計測結果

計測された代表的な波形データを図-4.3.3に示す。打継面での反射・透過の有無から3種類の波形パターンに大別される。

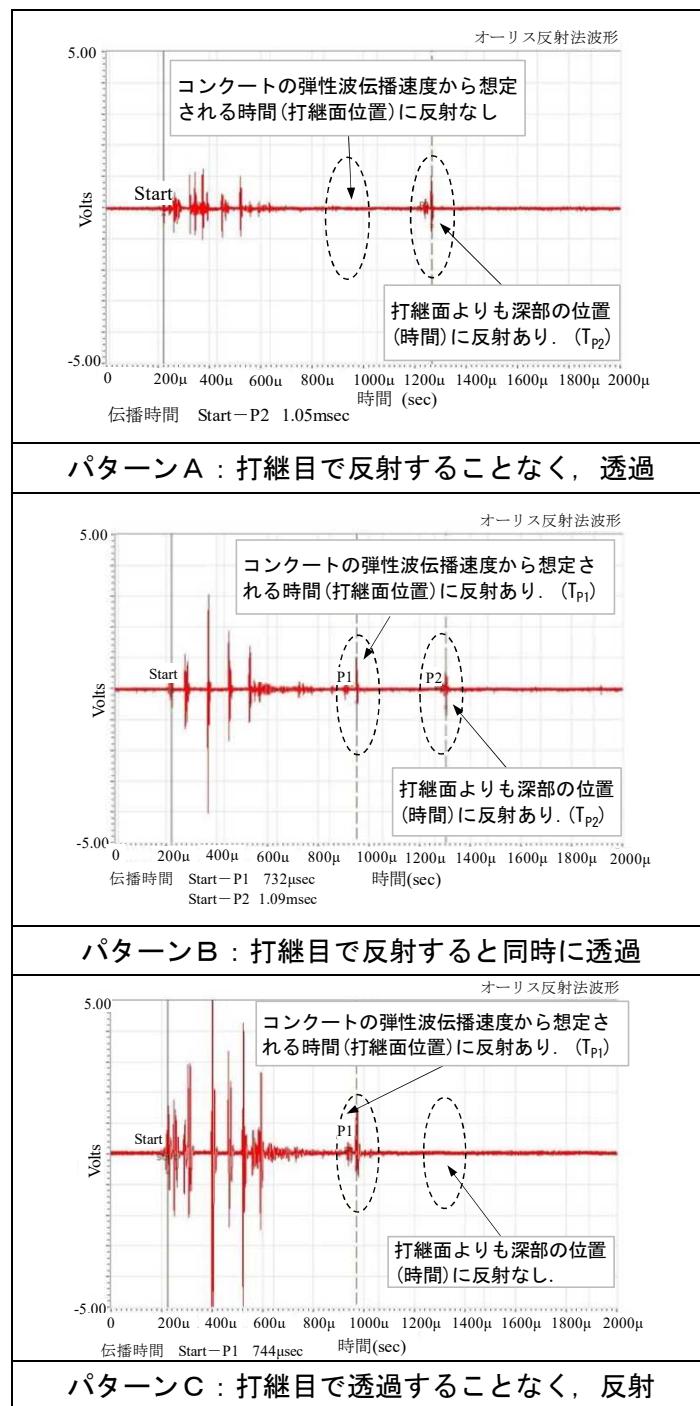


図-4.3.3 計測された波形パターン¹⁰⁾

シリーズ1及びシリーズ2の各供試体に対する10回の計測波形を基に、 t_1 ：打継目で反射して戻ってくるまでの経過時間、 t_2 ：供試体端部で反射して戻ってくるまでの経過時間、 V_{P1} ：打撃面(計測面)から打継目までの弾性波伝播速度 ($V_{P1}=2\times L_1 \div t_1$)、 V_{P2} ：打撃面(計測面)から供試体端面までの弾性波伝播速度 ($V_{P2}=2\times L_2 \div t_2$) を算定した結果を表-4.3.3及び表-4.3.4に示す。なお、 L_1 は打撃面(計測面)から打継目までの実際の長さ、 L_2 は打撃面(計測面)から打継目を挟んで供試体端部までの実際の長さである。

表-4.3.3(1) 計測結果（シリーズ1_供試体1-A, 供試体1-B, 供試体1-C）

供試体	計測名	L ₁ (m)	L ₂ (m)	t ₁ (sec)	V _{P1} (km/s)	t ₂ (sec)	V _{P2} (km/s)	パターン
1-A (2-A)	1-A-1	1.742	2.578			1.12	4.60	A
	1-A-2					1.13	4.56	A
	1-A-3					1.11	4.65	A
	1-A-4					1.12	4.60	A
	1-A-5					1.12	4.60	A
	1-A-6					1.12	4.60	A
	1-A-7					1.12	4.60	A
	1-A-8					1.12	4.60	A
	1-A-9					1.12	4.60	A
	1-A-10					1.12	4.60	A
1-B	1-B-1	1.745	2.586	0.722	4.83			C
	1-B-2			0.727	4.8			C
	1-B-3			0.726	4.81			C
	1-B-4			0.732	4.77	1.09	4.74	B
	1-B-5			0.711	4.91	1.09	4.74	B
	1-B-6			0.723	4.83	1.09	4.74	B
	1-B-7			0.742	4.7	1.09	4.74	B
	1-B-8			0.729	4.79	1.1	4.7	B
	1-B-9			0.732	4.77	1.1	4.7	B
	1-B-10			0.726	4.81	1.09	4.74	B
1-C	1-C-1	1.743	2.587	0.723	4.82	1.08	4.79	B
	1-C-2			0.726	4.80	1.09	4.75	B
	1-C-3			0.73	4.78			C
	1-C-4			0.718	4.86	1.07	4.84	B
	1-C-5			0.732	4.76			C
	1-C-6			0.726	4.80	1.09	4.75	B
	1-C-7			0.72	4.84			C
	1-C-8			0.72	4.84	1.08	4.79	B
	1-C-9			0.722	4.83	1.1	4.7	B
	1-C-10			0.738	4.72	1.1	4.7	B

表-4.3.3(2) 計測結果（シリーズ1_供試体1-D, 供試体1-E）

供試体	計測名	L ₁ (m)	L ₂ (m)	t ₁ (sec)	V _{P1} (km/s)	t ₂ (sec)	V _{P2} (km/s)	パターン
1-D	1-E-1	1.749	2.591	0.715	4.89			C
	1-E-2			0.731	4.79			C
	1-E-3			0.713	4.91	1.07	4.84	B
	1-E-4			0.727	4.81	1.08	4.80	B
	1-E-5			0.702	4.98	1.06	4.89	B
	1-E-6			0.693	5.05	1.06	4.89	B
	1-E-7			0.697	5.02	1.06	4.89	B
	1-E-8			0.720	4.86	1.08	4.80	B
	1-E-9			0.714	4.90	1.07	4.84	B
	1-E-10			0.723	4.84			C
1-E	1-F-1	1.747	2.589	0.743	4.70			C
	1-F-2			0.745	4.69			C
	1-F-3			0.742	4.71			C
	1-F-4			0.737	4.74			C
	1-F-5			0.748	4.67			C
	1-F-6			0.737	4.74			C
	1-F-7			0.746	4.68	1.06	4.88	B
	1-F-8			0.753	4.64			C
	1-F-9			0.744	4.70	1.08	4.79	B
	1-F-10			0.744	4.70			C

表-4.3.4(1) 計測結果（シリーズ2_供試体2-A, 供試体2-B, 供試体2-C）

供試体	計測名	L ₁ (m)	L ₂ (m)	t ₁ (sec)	V _{P1} (km/s)	t ₂ (sec)	V _{P2} (km/s)	パターン
2-A (1-A)	2-A-1	1.742	2.578			1.12	4.60	A
	2-A-2					1.13	4.56	A
	2-A-3					1.11	4.65	A
	2-A-4					1.12	4.60	A
	2-A-5					1.12	4.60	A
	2-A-6					1.12	4.60	A
	2-A-7					1.12	4.60	A
	2-A-8					1.12	4.60	A
	2-A-9					1.12	4.60	A
	2-A-10					1.12	4.60	A
2-B	2-B-1	1.745	2.583	0.78	4.49	1.16	4.45	B
	2-B-2			0.78	4.49	1.16	4.45	B
	2-B-3					1.16	4.45	A
	2-B-4					1.17	4.42	A
	2-B-5			0.78	4.49	1.16	4.45	B
	2-B-6			0.77	4.55	1.15	4.49	B
	2-B-7					1.16	4.45	A
	2-B-8			0.77	4.55	1.16	4.45	B
	2-B-9					1.16	4.45	A
	2-B-10					1.15	4.49	A
2-C	2-C-1	1.741	2.527	0.80	4.38	1.15	4.39	B
	2-C-2			0.79	4.43	1.14	4.43	B
	2-C-3			0.79	4.43	1.14	4.43	B
	2-C-4			0.77	4.55	1.13	4.47	B
	2-C-5			0.8	4.38	1.16	4.36	B
	2-C-6			0.78	4.49			C
	2-C-7			0.79	4.43	1.15	4.39	B
	2-C-8			0.7	4.49	1.14	4.43	B
	2-C-9			0.80	4.38			C
	2-C-10			0.79	4.43	1.15	4.39	B

表-4.3.4(2) 計測結果（シリーズ2_供試体2-D, 供試体2-E）

供試体	計測名	L ₁ (m)	L ₂ (m)	t ₁ (sec)	V _{P1} (km/s)	t ₂ (sec)	V _{P2} (km/s)	パターン
2-D	2-D-1	1.754	2.589	0.79	4.43			C
	2-D-2			0.78	4.49			C
	2-D-3			0.78	4.49			C
	2-D-4			0.78	4.49			C
	2-D-5			0.79	4.43			C
	2-D-6			0.78	4.49			C
	2-D-7			0.79	4.43	1.79*		B
	2-D-8			0.80	4.38			C
	2-D-9			0.79	4.43	1.79*		B
	2-D-10			0.78	4.49			C
2-E	2-E-1	1.748	2.587	0.74	4.73			C
	2-E-2			0.77	4.55			C
	2-E-3			0.75	4.67			C
	2-E-4			0.78	4.49	1.14	4.54	B
	2-E-5			0.79	4.43			C
	2-E-6			0.79	4.43			C
	2-E-7			0.79	4.43			C
	2-E-8			0.79	4.43	1.16	4.46	B
	2-E-9			0.78	4.49			C
	2-E-10			0.79	4.43			C

*2-D-7 および 2-D-9においては伝播時間 1.79sec の波が確認されたが、伝播速度を 4.46km/sとした場合、その伝播距離は約 4.0mとなり、供試体端部と打継目を反復したものと推定されるため、VP2 算定の対象としない。

また、表-4.3.3 及び表-4.3.4 に示した結果をもとに、供試体ごと、すなわち、打継目の欠陥状態ごとで、整理した結果を表-4.3.5 及び表-4.3.6 に示す。なお、各伝播速度の欄における波形数とは、伝播速度の平均値、標準偏差及び変動係数の算定のもとになった波形、すなわち、伝播速度のデータ数を示す。また、変動係数は標準偏差を平均値で除したものを作成率表示したものである。

表-4.3.5 計測結果（シリーズ1）¹⁰⁾

ケース名		1-A (2-A)	1-B	1-C	1-D	1-E
内部空隙の厚み		0mm	1mm	2mm	3mm	5mm
波形パターンの比率	A	100%	0%	0%	0%	0%
	B	0%	70%	70%	70%	20%
	C	0%	30%	30%	30%	80%
伝播速度 V_{P1}	波形数	0	10	10	10	10
	平均値	—	4.80km/s	4.81km/s	4.91km/s	4.70km/s
	標準偏差	—	0.053km/s	0.042km/s	0.087km/s	0.030km/s
	変動係数	—	1.12%	0.88%	1.78%	0.64%
伝播速度 V_{P2}	波形数	10	7	7	7	2
	平均値	4.60km/s	4.73km/s	4.76km/s	4.85km/s	4.84km/s
	標準偏差	0.021km/s	0.020km/s	0.051km/s	0.041km/s	0.064km/s
	変動係数	0.46%	0.41%	1.07%	0.84%	1.32%

表-4.3.6 計測結果（シリーズ2）¹⁰⁾

ケース名		2-A (1-A)	2-B	2-C	2-D	2-E
内部空隙の直径		0mm	100mm	200mm	300mm	400mm
波形パターンの比率	A	100%	50%	0%	0%	0%
	B	0%	50%	80%	20%	20%
	C	0%	0%	20%	80%	80%
伝播速度 V_{P1}	波形数	0	5	10	10	10
	平均値	—	4.51km/s	4.44km/s	4.46km/s	4.51km/s
	標準偏差	—	0.033km/s	0.056km/s	0.040km/s	0.110km/s
	変動係数	—	0.73%	1.26%	0.89%	2.43%
伝播速度 V_{P2}	波形数	10	10	8	0	2
	平均値	4.60km/s	4.46km/s	4.41km/s	—	4.50km/s
	標準偏差	0.021km/s	0.021km/s	0.035km/s	—	0.057km/s
	変動係数	0.46%	0.46%	0.79%	—	1.26%

なお、表-4.3.6に示したシリーズ2におけるケース2-Dにおいて10回打撃中2回の打撃で、打継目と想定される距離で反射したと想定される波と、打継目よりも深部(遠方)で反射したと想定される波が計測されたことから、波形パターンBの比率を20%としている。しかし、反射が生じた深度(距離)が供試体端面までの距離(約2.6m)よりもかなり深部(約4.0m)であることから、供試体端部と打継目との間を反復したものであると想定した。そこで、ケース2-Dでは V_{P2} 算定の対象となる波形は記録されなかったとして、波形数を0とした。なお、ケース2-Dのみ、このような供試体端部と打継目との間での反復現象と推察される波形が計測された原因については明言できないが、コンクリートの不均質によって往復経路が異なり、8割が反射してしまう打継目状態の条件において往路では透過したが復路では透過しなかった可能性もあると考えている。

つぎに、表-4.3.5及び表-4.3.6に示した内部欠陥の各ケースの波形パターンの比率を図化したものを、図-4.3.4及び図-4.3.5に示す。また、伝播速度の変動係数をシリーズ毎に比較したものを図-4.3.6及び図-4.3.7に示す。

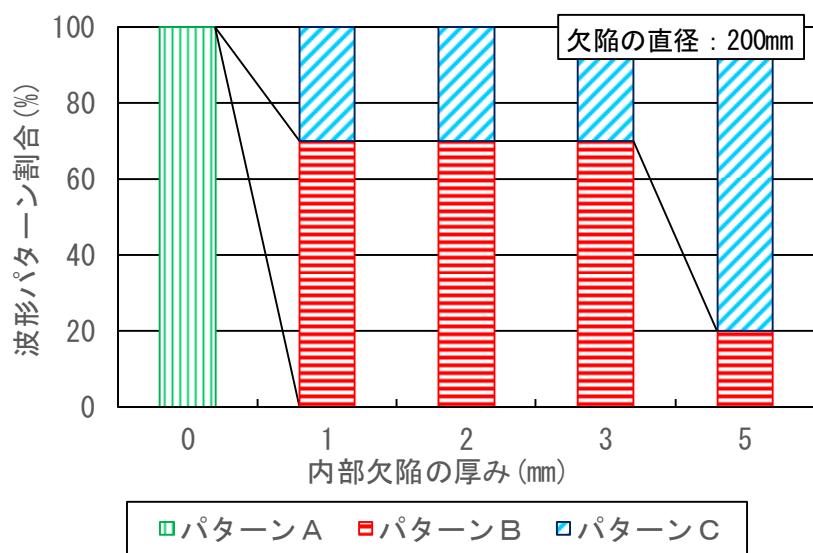


図-4.3.4 内部欠陥の厚みと波形パターン比率の関係¹⁰⁾

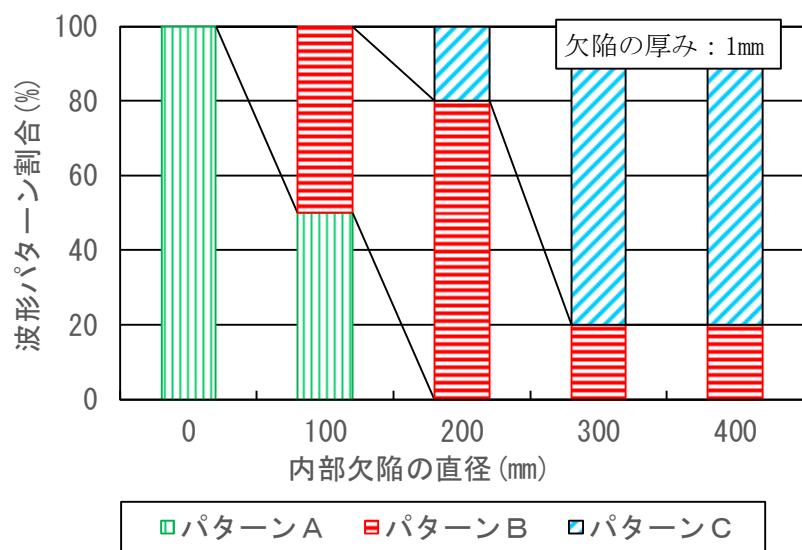


図-4.3.5 内部欠陥の直径と波形パターン比率の関係¹⁰⁾

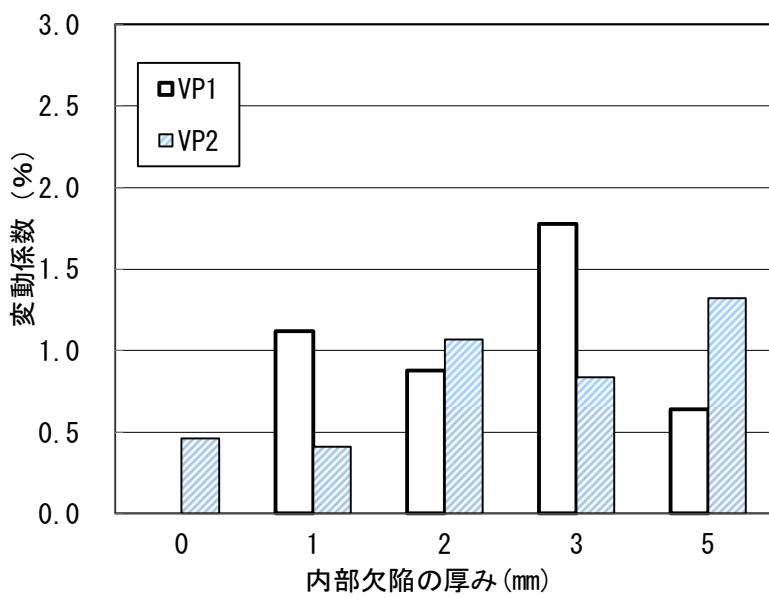


図-4.3.6 内部欠陥の厚みと伝播速度の変動係数との関係¹⁰⁾

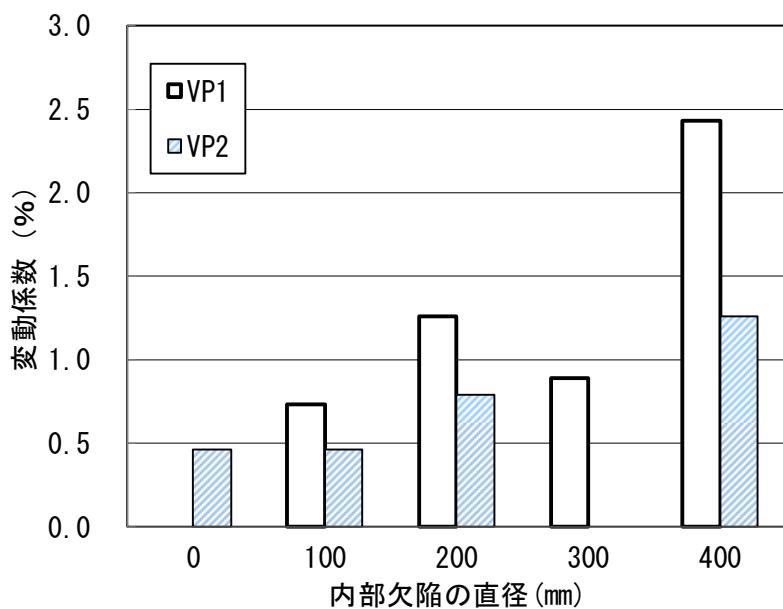


図-4.3.7 内部欠陥の直径と伝播速度の変動係数との関係¹⁰⁾

(2) 考察

表-4.3.2～表-4.3.6、及び図-4.3.4～図-4.3.7に示した人工的な欠陥を内部に設けた大型供試体に対する計測結果から、以下のことが分かる。

①打継目が十分に接合（密着）している場合、反射波は当該位置には確認されず、供試体端部のみで確認される。一方、接合が不十分（空隙が存在）する場合、当該位置にも反射波が確認される。

②内部欠陥の寸法（直径）を200mm一定として、その厚さ（幅）を変化されたシリーズ1の結果からは直径200mm以上の欠陥が存在していれば、欠陥部で弾性波が全反射し、欠陥部より深部には弾性波が到達しないケースが発生すること、そして、欠陥の厚さが大きくなると全反射の割合も大きくなることが分かる。なお、欠陥の厚さと全反射の割合との関係が一定の関係に無い理由としては、内部欠陥を再現するものとして用いた樹脂シートの圧縮時の変形特性によって、シートの厚みと接触面積（分離面積）との間に一次線形の関係が成立していないことによると考えている。

③内部欠陥の厚さを1mm一定として、その直径を変化させたシリーズ2の結果から、欠陥の直径は欠陥部での反射波の発生割合に影響していること、欠陥部の直径がφ200mm以下であれば欠陥部の周囲に存在している健全部の影響を受けて打継目を透過する波もあるが、φ300mm以上になると弾性波のほとんどが欠陥部で反射され、φ300mmとφ400mmの結果には差異が無い結果となっている。これについて、深度方向に対してどの程度の広がり（範囲）に対して状態把握が可能かという観点から、指向角（=arctan（任意の深さでの状態が把握できる範囲（直径）／任意の深さ））というものを定義して、本検討の結果を基に算定すると、指向角は6.5°（=arctan(20/175)）～9.7°（=arctan(30/175)）の範囲内に存在すると考えられる。この指向角の値は、ダムコンクリートに比較してより均質と推定される粗骨材最大寸法8mm、スランプ20cmのコンクリートで構築された躯体を用いて指向性の検討を行った既往の研究⁴⁾において確認された指向角7.7°とほぼ同一であると言える。このことから、使用骨材の最大粒径が大きく、一般のコンクリートに比較して、不均質であると想定されるダムコンクリートで構築された構造物における本手法による弾性波の指向性は一般コンクリートを用いた構造物に対して、大きく異なることは無いと考えられる。

④打継目（内部欠陥）あるいは供試体端部までの距離と伝播時間から算定した弾性波伝播速度のばらつきを示す変動係数は最大1.78%であった。この変動係数は、適用実績の多い杭基礎に対して本手法を適用した際の誤差（変動係数）（±5%程度）¹¹⁾に対して、十分小

さい。このことから、一般のコンクリート構造物に比較して内部が不均質であると想定されるコンクリートダム堤体内部においても、本手法での弾性波の伝播（透過・反射）特性は、一般コンクリート構造物のそれと同等であると判断される。

4. 3. 4 まとめ

基礎杭等の損傷調査等に用いられている衝撃弾性波法を用いた調査システムのコンクリートダム堤体の水平打継目の状態調査への適応性を確認するため、ダムコンクリート躯体中の指向性や透過・反射特性を含めた伝播特性に関する基礎的な知見の取得を目的として、内部にひび割れ等を模した人工的な欠陥を設置した大型供試体を用いて衝撃弾性波法による計測を行った。その結果、一般的なコンクリートに比して不均質であると推定されるダムコンクリートで構築された躯体中においても、弾性波の指向性及び弾性波の透過・反射という伝播特性は、一般コンクリートの躯体に対するものとほぼ同様であることが確認された。

4. 4 供用中のコンクリートダム堤体中の弾性波伝播特性の検討

4. 4. 1 検討概要

本手法は、弾性波（高周波成分）の評価対象深度における透過・反射特性に着目して、打継目の状態推定を行うものである。そのため、深度（距離） L 、弾性波伝播速度 v と当該深度（距離）からの反射波の伝播時間 t との間に、 $L = v \times t/2$ の関係があるため、時間 t で置き換えることになる。そのため、弾性波伝播速度の設定値を誤ると、深度（距離）に誤差が生じることになり、対象とする打継目の評価を適正に行なうことが困難となる。

しかしながら、コンクリートダム堤体を構築しているダムコンクリートは、使用されている粗骨材の最大寸法が80～150mmで、コンクリート中の粗骨材の容積割合も一般的な構造物に使用されているコンクリートに比較して大きいという特徴を持っている。このため、大粒径の骨材分級で骨材の材料分離現象が発生し易かったり、大粒径骨材の下面にはブリーディング水が留まつたりするなど一般のコンクリートに比較して不均質なものとなり易いと言える。また、ダム堤体の構築方法も高さ0.75～2.0mのコンクリートを打設し、硬化後、レイターンス処理及びモルタル敷き均し等の打継目処理を行い、次リフトのコンクリートを打ち継ぐという、平面的な広がりに対して薄いコンクリートを重ねていく打設方法を採用しており、一般的なコンクリート構造物とは異なっている。このような構築材料ならびに構築方法を考慮すると、一般的なコンクリート構造物に比較して、コンクリートダム堤体は不均質であると推察される。

前述のとおり、ダム堤体の水平打継目状態の評価手法は、杭基礎の損傷を把握するためを開発された手法を基としているが、杭基礎のコンクリートは一般コンクリート構造物のコンクリートに比較して均質の程度はほぼ同等以上であると考えられる。そのため、相対的に不均質と考えられるコンクリートダム堤体に対する本手法の適用においては、このコンクリートの不均質さが及ぼす影響が懸念される。特に、コンクリートダム堤体中を透過・伝播する弾性波伝播速度については、堤体コンクリートが不均質であることに起因して計測毎に変動することが想定される。弾性波伝播速度の変動は、評価深度の分析に影響を及ぼし、ひいてはダム堤体の水平打継目状態の推定精度にも影響を及ぼすと考えられる。

これらのことからコンクリートダム堤体の水平打継目状態の推定精度向上を図るために、ダム堤体中の弾性波伝播速度の特性に関する基礎的な知見が必要であることから、実際のコンクリートダム堤体で計測した弾性波伝播速度に対する分析・考察を行った。

4. 4. 2 検討方法

検討の方法としては、モデルダムであるAダムの堤体において、衝撃弾性波法を用いて計測を行った計測波形を基に、弾性波伝播速度について分析・検討を行った。

(1) 計測方法

計測は、ダム非越流部（BL. 2～BL. 5, BL. 11～BL. 12）については堤体天端に、あるいはダム越流部（BL. 6～BL. 10）については越流頂部において、ダム軸（左右岸）方向に2m間隔で、上下流方向に1m間隔で、格子状に設置した測点で鉛直下方に対して反射波を計測した。Aダムの堤体下流面図（図-4.2.3）、測点の配置模式図（図-4.2.4）を再掲する。各測点においては、再現性の高い反射波形が20回程度計測されるまで計測した。各ブロックに設置した測点の数は、表-4.4.1に示すとおりであり、全体で150測点を設置した。

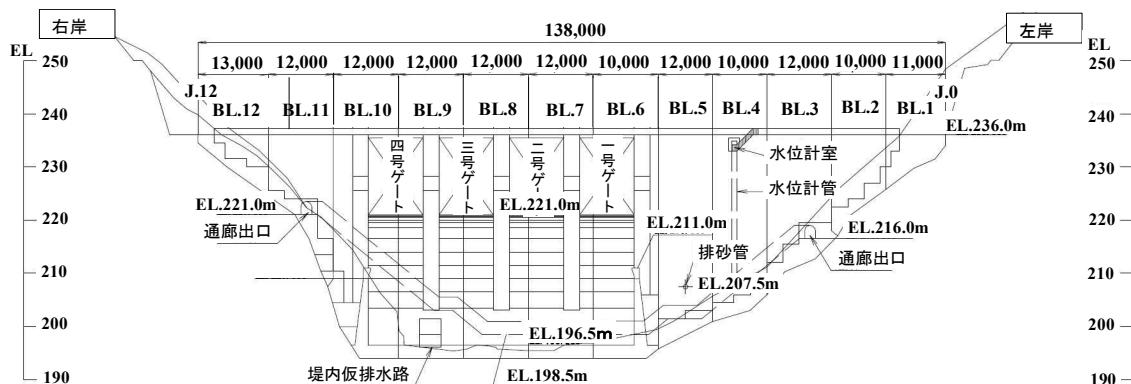
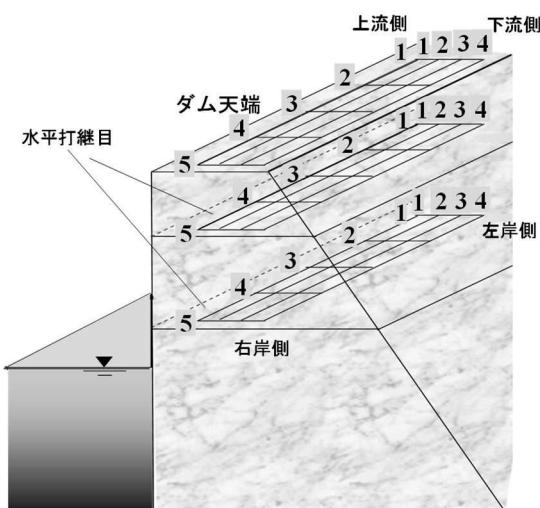


図-4.2.3 Aダムの堤体下流面図(再掲)

表-4.4.1 弾性波伝播速度の算定区間数⁷⁾



ブロック	格子点数 (左右岸×上下流)	測点数 (点)	算定対象とした 水平打継目(面) の数	弾性波 伝播速度 算定区間数
BL.2	—*	10*	8	80
BL.3	6×4	24	7	168
BL.4	5×4	20	7	140
BL.5	5×4	20	8	160
BL.6	4×2	8	6	48
BL.7	4×2	8	6	48
BL.8	5×2	10	6	60
BL.9	4×2	8	6	48
BL.10	3×2	6	6	36
BL.11	5×4	20	8	160
BL.12	4×4	16	7	112
合計	—	150	75	1060

図-4.2.4 測点配置の模式図(再掲)

(2) 弹性波伝播速度の算出と検討

各区間の弹性波伝播速度は、以下のような手順で算定を行った。ここでは、ある深度(L_1)に存在する打継目 No. 1 を想定して説明する。

- ・予備計測として、堤体天端の任意の 2 測点間の表面透過波を計測し、堤体コンクリートのおおよその弹性波伝播速度を算定する。
- ・各天端測点で鉛直下方への反射波計測の測定を行い、その波形から予備計測結果で算定した弹性波伝播速度に基づき、打継目 No. 1 のおおよその深度に該当する反射波の伝播時間 (t_1) を読み取る。
- ・次式を用いて、各測点の打継面 No. 1 に対して弹性波伝播速度 (V_1) を算定する。

$$V_1 = 2 \times L_1 / t_1$$

4. 4. 3 計測結果と考察

(1) 計測結果

Aダムの堤体において衝撃弹性波法によって計測を行い、得られた波形データを基に算出した弹性波伝播速度の結果として、各ブロックの各打継目までの各測点の弹性波伝播速度の平均値、及び変動係数（標準偏差／平均値）を表-4.4.2～表-4.4.12 に示した。予備計測としてダム堤体天端で計測した表面透過波の速度は 4.43km/s であった。なお、測点・深度(打継目)によっては、弹性波伝播速度が算出されていない箇所も存在しているが、これは当該打継目が健全であり弹性波が全て透過してしまった、あるいは当該打継目よりも浅部が開口しており弹性波が全て反射してしまい、当該打継目まで弹性波が到達していない状態となっていることを示している。

表-4.4.13～表-4.4.14 は、各測点で計測した全ての弹性波伝播速度から算出した平均値を、ブロック・測点ごとに整理を行ったものである。

また、表-4.4.15～表-4.4.18 は、打継目までの弹性波伝播速度について、各ブロックでの平均値、標準偏差及び変動係数を算出し、整理したものである。

表-4.4.2 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 2)

打継目の標高 頂部からの距離	項目	測点No.									
		BL.2_1-1	BL.2_1-2	BL.2_2-1	BL.2_3-1	BL.2_4-1	BL.2_5-1	BL.2_6-1	BL.2_6-2	BL.2_7-1	BL.2_7-2
EL.231.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	2.07	2.03	2.06	1.97	2.02	2.08	2.07	1.96	2.00	2.05
	データ数(個)	9	4	6	6	18	8	20	2	17	19
	変動係数(%)	1.45	2.60	3.56	2.29	2.64	1.36	1.42	1.44	3.34	2.10
	平均伝播速度(km/s)	4.35	4.44	4.38	4.58	4.45	4.33	4.35	4.59	4.49	4.38
EL.230.0 6.00 (m)	平均伝播時間(ms)	2.67	2.71	2.66	2.69	2.70	2.75	2.71	2.70	2.65	2.73
	データ数(個)	7	12	3	9	5	3	19	8	3	17
	変動係数(%)	3.26	2.54	1.99	2.81	3.60	3.03	2.11	3.63	2.85	2.46
	平均伝播速度(km/s)	4.49	4.44	4.51	4.46	4.44	4.37	4.42	4.44	4.52	4.40
EL.228.5 7.50 (m)	平均伝播時間(ms)	3.26	3.37	3.34	3.36	3.37	3.50	3.33	3.40	3.37	3.38
	データ数(個)	4	9	11	17	15	2	13	13	3	10
	変動係数(%)	1.12	2.95	2.68	2.55	2.12	0.00	1.89	1.72	3.95	1.91
	平均伝播速度(km/s)	4.60	4.45	4.50	4.46	4.45	4.29	4.51	4.42	4.45	4.43
EL.227.0 9.00 (m)	平均伝播時間(ms)	3.96	4.00	4.05	4.09	4.08	3.91	3.96	3.97	4.09	4.12
	データ数(個)	7	3	13	4	3	6	10	13	2	10
	変動係数(%)	2.07	0.87	2.70	1.71	4.19	2.16	2.72	2.21	2.42	2.29
	平均伝播速度(km/s)	4.54	4.50	4.44	4.41	4.41	4.60	4.55	4.53	4.40	4.37
EL.225.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)	4.56	4.63	4.84	4.78	4.75	4.63	4.68	4.76	4.65	4.66
	データ数(個)	2	3	5	7	7	2	2	5	3	12
	変動係数(%)	0.62	1.09	2.88	2.57	3.03	3.36	0.00	2.76	1.99	2.33
	平均伝播速度(km/s)	4.61	4.53	4.34	4.39	4.42	4.54	4.49	4.41	4.52	4.51
EL.224.0 12.00 (m)	平均伝播時間(ms)			5.17	5.36	5.41	5.45	5.66	5.36	5.32	5.50
	データ数(個)			2	9	5	3	2	6	2	2
	変動係数(%)			0.82	3.11	2.89	4.30	0.50	2.08	4.78	2.06
	平均伝播速度(km/s)			4.64	4.48	4.43	4.41	4.24	4.48	4.51	4.36
EL.222.5 13.50 (m)	平均伝播時間(ms)	6.14		6.18	5.89		5.93	5.97	5.82	6.17	6.00
	データ数(個)	2		2	2		4	4	1	6	3
	変動係数(%)	0.92		4.12	1.68		1.73	2.59		3.43	3.46
	平均伝播速度(km/s)	4.40		4.37	4.58		4.56	4.53	4.64	4.37	4.50
EL.221.0 15.00 (m)	平均伝播時間(ms)	6.79	6.76	6.92			6.46	6.54			6.67
	データ数(個)	4	1	2			1	1			2
	変動係数(%)	3.18		2.45							3.60
	平均伝播速度(km/s)	4.42	4.44	4.34			4.64	4.59			4.50
平均伝播速度(km/s)		4.49	4.47	4.44	4.48	4.43	4.47	4.46	4.50	4.47	4.43
標準偏差(km/s)		0.10	0.04	0.11	0.08	0.01	0.14	0.12	0.09	0.06	0.06
変動係数(%)		2.23	0.90	2.40	1.68	0.33	3.03	2.59	1.96	1.35	1.43

表-4.3 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 3)

打撃目の標高 頂部からの距離		項目	測点No.																							
			BL_3_1-1	BL_3_1-2	BL_3_1-3	BL_3_1-4	BL_3_2-1	BL_3_2-2	BL_3_2-3	BL_3_2-4	BL_3_3-1	BL_3_3-2	BL_3_3-3	BL_3_3-4	BL_3_4-1	BL_3_4-2	BL_3_4-3	BL_3_4-4	BL_3_5-1	BL_3_5-2	BL_3_5-3	BL_3_5-4	BL_3_6-1	BL_3_6-2	BL_3_6-3	BL_3_6-4
EL.231.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	2.01	2.04	1.98	2.05	1.97	2.00	2.02	1.99	2.05	2.05	2.02	1.98	1.98	2.05	2.04	2.02	2.02	2.08	2.00	1.97	2.02	2.05	2.05	2.05	2.07
	データ数(個)	17	9	17	20	5	14	6	5	11	17	16	13	7	19	4	14	4	3	12	7	14	18	15	15	
	変動係数(%)	2.48	2.43	2.11	3.06	1.16	2.65	1.08	1.35	3.09	1.15	2.55	2.14	3.03	2.93	4.16	0.91	1.88	0.00	1.65	2.46	3.01	3.24	2.45	1.19	
EL.230.0 6.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.47	4.40	4.54	4.39	4.56	4.50	4.46	4.53	4.40	4.39	4.45	4.55	4.55	4.40	4.41	4.45	4.47	4.33	4.50	4.56	4.45	4.38	4.38	4.34	
	伝播時間(ms)	2.74	2.69	2.64	2.79	2.71	2.72	2.79	2.65	2.64	2.70	2.71	2.73	2.69	2.72	2.72	2.73	2.74	2.73	2.84	2.72	2.69	2.74	2.66	2.65	
	データ数(個)	16	18	10	7	11	19	10	8	7	3	12	2	3	17	6	11	13	19	2	9	6	19	15	7	
EL.228.5 7.50 (m)	変動係数(%)	0.60	1.57	2.08	0.35	2.45	1.33	0.50	2.24	1.52	1.28	2.54	0.52	1.13	1.66	0.30	2.64	2.70	1.23	0.00	1.60	1.46	1.47	0.92	2.17	
	伝播速度(km/s)	4.38	4.47	4.55	4.29	4.44	4.41	4.30	4.52	4.55	4.44	4.44	4.40	4.46	4.42	4.42	4.39	4.37	4.40	4.23	4.42	4.46	4.39	4.51	4.53	
	平均伝播時間(ms)	3.30	3.29	3.33	3.33	3.22	3.39	3.32	3.37	3.34	3.28	3.36	3.24	3.41	3.34	3.29	3.32	3.30	3.32	3.50	3.40	3.32	3.39	3.41		
EL.227.0 9.00 (m)	データ数(個)	11	6	3	11	6	7	7	18	11	1	12	9	7	11	10	9	16	12	10	19	12	11	11	11	
	変動係数(%)	0.80	3.78	1.93	1.94	0.25	4.24	2.56	1.79	1.60	2.11	0.41	3.58	2.31	1.22	2.98	1.26	1.83	1.76	1.54	0.43	2.95	2.46	2.46		
	平均伝播速度(km/s)	4.54	4.55	4.51	4.51	4.65	4.43	4.51	4.45	4.49	4.57	4.46	4.64	4.40	4.49	4.56	4.52	4.54	4.52	4.28	4.42	4.52	4.43	4.39		
EL.225.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)	3.93	3.96	4.10	4.01	4.00	3.98	3.90	4.08	3.86	4.26	3.95	4.26	3.86	4.19	3.94	4.19	4.01	4.25	4.07	4.11	4.18	4.11	3.88	4.00	
	データ数(個)	6	9	1	3	7	2	8	12	1	5	9	1	4	3	1	5	15	12	10	3	7	2	4	8	23
	変動係数(%)	1.89	1.86		1.60	2.44	0.71	0.70	0.95		0.00	0.95		0.00	1.54		2.69	1.81	0.33	2.04	1.01	0.68	3.80	0.33	1.36	
EL.224.0 12.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.58	4.55	4.39	4.49	4.50	4.52	4.62	4.41	4.66	4.23	4.56	4.23	4.66	4.30	4.57	4.30	4.49	4.23	4.42	4.38	4.31	4.64	4.50		
	平均伝播時間(ms)	4.71	4.69		4.92	4.62	4.58	4.69	4.68	4.60	4.66	4.69	4.69	4.81	4.72	4.78	4.64		4.75	4.70					4.59	
	データ数(個)	5	2		4	12	4	10	5	4	4	9		2	1	1	1	1	1	2	1			1	13	
EL.222.5 13.50 (m)	変動係数(%)	2.52	2.71		0.20	1.49	0.87	0.85	1.11	1.74	0.21	1.54		0.29				3.87							2.90	
	平均伝播速度(km/s)	4.46	4.48		4.27	4.55	4.59	4.48	4.48	4.57	4.51	4.48		4.37	4.45	4.39	4.53		4.42	4.47					4.57	
	平均伝播時間(ms)	5.35	5.14		5.67									5.48	5.43	5.42	5.43								5.42	
EL.222.5 13.50 (m)	データ数(個)	5	10		7									1	3	1	5								1	13
	変動係数(%)	3.95	0.16		0.19									3.32		1.18									3.07	
	平均伝播速度(km/s)	4.49	4.67		4.23									4.38	4.42	4.43	4.42								4.43	
EL.222.5 13.50 (m)	平均伝播時間(ms)	6.07	6.36		6.10	5.93	6.08							6.04	6.00	6.01	5.96	6.38							5.92	
	データ数(個)	4	1		3	1								1	1	2	2	1			3	2	2	1	4	
	変動係数(%)	4.52													3.06	0.95					2.52	2.87	5.79	0.18		
EL.222.5 13.50 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.45	4.25		4.43	4.56	4.44							4.47	4.50	4.49	4.53	4.23							4.56	
	標準偏差(km/s)	4.48	4.45	4.53	4.42	4.48	4.45	4.50	4.44	4.48	4.46	4.49	4.41	4.48	4.44	4.45	4.37	4.36	4.46	4.46	4.40	4.48	4.44			
	変動係数(%)	0.06	0.11	0.10	0.14	0.06	0.11	0.09	0.14	0.05	0.16	0.10	0.07	0.07	0.06	0.13	0.13	0.07	0.09	0.02	0.10	0.12				

表-4.4.4 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 4)

打継目の標高 頂部からの距離		項目		測点No.																			
				BL.4_1_1	BL.4_1_2	BL.4_1_3	BL.4_1_4	BL.4_2_1	BL.4_2_2	BL.4_2_3	BL.4_2_4	BL.4_3_1	BL.4_3_2	BL.4_3_3	BL.4_3_4	BL.4_4_1	BL.4_4_2	BL.4_4_3	BL.4_4_4	BL.4_5_1	BL.4_5_2	BL.4_5_3	BL.4_5_4
EL.231.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	2.00	2.12	2.06	2.02	2.08	2.02			2.04	2.04	2.12	2.04	2.03		2.12	2.07	2.05	2.00			2.04	
	データ数(個)	1	1	2	10	1	4			13	9	1	2	6		1	9	5	2			7	
	変動係数(%)		4.12		2.18		3.79			2.65	2.48		0.00	2.39			3.21	3.49	5.66			1.60	
	平均伝播速度(km/s)	4.50	4.25	4.37	4.46	4.33	4.46			4.41	4.40	4.25	4.41	4.44		4.25	4.35	4.39	4.50			4.41	
EL.230.0 6.00 (m)	平均伝播時間(ms)	2.74	2.71	2.60	2.73	2.80	2.76			2.76	2.72	2.75	2.77	2.70		2.70	2.76	2.69	2.69	2.81	2.79	2.71	
	データ数(個)	8	3	1	11	6	11			11	6	9	6	10		8	1	11	13	12	5	8	
	変動係数(%)	3.02	3.08	3.22	1.81	1.18				2.47	3.60	3.15	2.49	1.59		2.63	2.33	2.28	1.19	0.64	3.35		
	平均伝播速度(km/s)	4.38	4.43	4.62	4.39	4.29	4.35			4.35	4.41	4.36	4.34	4.45		4.44	4.35	4.46	4.46	4.28	4.30	4.44	
EL.228.5 7.50 (m)	平均伝播時間(ms)	3.35	3.40	3.38	3.34	3.37	3.36			3.44	3.41	3.45	3.38	3.41		3.40	3.39	3.36	3.35	3.30	3.41	3.45	
	データ数(個)	5	7	9	9	15	10	7	7	12	15	13	13	11		14	14	13	9	17	14	9	
	変動係数(%)	3.20	1.66	2.45	1.70	1.92	2.75	2.83	3.97	2.30	1.20	2.96	1.74	1.90		2.16	2.54	2.15	1.50	0.62	2.22	1.68	
	平均伝播速度(km/s)	4.47	4.41	4.44	4.49	4.44	4.44	4.46	4.36	4.40	4.35	4.44	4.40	4.41		4.42	4.47	4.48	4.55	4.40	4.35	4.51	
EL.227.0 9.00 (m)	平均伝播時間(ms)	4.16	4.12	4.07	4.03	4.12	4.19	4.07	4.14	4.03	4.01	4.02	4.00	4.06		4.04	4.02	4.11	4.05	3.98	4.12	4.00	
	データ数(個)	3	8	7	17	5	11	13	12	5	11	13	12	16		16	10	12	13	5	19	7	
	変動係数(%)	0.96	3.22	2.32	2.76	1.94	1.23	3.59	2.20	2.26	3.63	1.80	3.33	1.15		3.73	2.31	2.45	2.68	3.99	2.42	1.41	
	平均伝播速度(km/s)	4.33	4.37	4.42	4.47	4.37	4.30	4.42	4.35	4.46	4.49	4.48	4.50	4.44		4.45	4.48	4.48	4.44	4.52	4.36	4.50	
EL.225.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)	4.70	4.82	4.69	4.60	4.78	4.62	4.71	4.68	4.85	4.58	4.85	4.71	4.67		4.81	4.63	4.73	4.80	4.76	4.75	4.79	
	データ数(個)	5	5	7	16	6	7	9	17	6	13	7	15	10		9	7	18	16	11	14	15	
	変動係数(%)	2.45	1.72	3.87	1.46	3.44	0.84	2.29	2.26	1.84	1.36	1.03	2.03	1.75		2.59	1.85	0.80	2.71	2.90	1.01	1.14	
	平均伝播速度(km/s)	4.46	4.36	4.48	4.57	4.40	4.54	4.46	4.49	4.33	4.58	4.33	4.46	4.49		4.37	4.54	4.44	4.38	4.41	4.42	4.39	
EL.224.0 12.00 (m)	平均伝播時間(ms)	5.40	5.34	5.39	5.38	5.53	5.36	5.31	5.38	5.48	5.38	5.45	5.57	5.36		5.31	5.51	5.48	5.52	5.37	5.21	5.18	
	データ数(個)	8	4	7	16	3	5	13	10	1	2	7	7	16		9	11	11	4	10	6	13	
	変動係数(%)	2.87	1.78	3.20	1.51	2.74	1.29	2.07	1.00	5.78	0.76	3.54	0.76	2.48		2.58	3.39	2.96	3.07	2.48	0.40	0.68	
	平均伝播速度(km/s)	4.45	4.49	4.45	4.46	4.34	4.48	4.52	4.46	4.38	4.46	4.40	4.31	4.48		4.52	4.36	4.38	4.35	4.47	4.60	4.63	
EL.222.5 13.50 (m)	平均伝播時間(ms)	5.99	6.09	5.92	6.04	6.16	6.20	6.08	5.96	5.97	6.26	6.08	6.28	6.18		6.17	6.04	6.11	5.90	5.96	5.96	5.84	
	データ数(個)	6	3	3	3	4	3	4	3	6	3	4	6	9		5	5	3	3	8	11	15	
	変動係数(%)	2.91	2.65	1.79	1.32	5.07	2.74	1.32	2.40	2.05	1.22	1.77	0.45	2.81		3.65	0.66	1.89	1.70		1.92	0.75	
	平均伝播速度(km/s)	4.51	4.43	4.56	4.47	4.38	4.35	4.44	4.53	4.52	4.31	4.44	4.30	4.37		4.38	4.47	4.42	4.58	4.53	4.63		
平均伝播速度(km/s)		4.44	4.39	4.48	4.49	4.40	4.39	4.44	4.41	4.43	4.39	4.44	4.43	4.42		4.45	4.43	4.43	4.43	4.43	4.50		
標準偏差(km/s)		0.07	0.08	0.04	0.04	0.10	0.05	0.08	0.09	0.06	0.09	0.04	0.06	0.10		0.05	0.09	0.09	0.12	0.10			
変動係数 (%)		1.48	1.79	1.88	0.96	0.99	2.24	1.19	1.79	1.47	2.03	1.83	1.73	0.93		1.26	2.30	1.05	1.93	2.00	2.63	2.19	

表-4.4.5 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 5)

打継目の標高 頂部からの距離 (m)		項目	BL.5_1 BL.5_1-2 BL.5_1-3 BL.5_1-4 BL.5_2-1 BL.5_2-2 BL.5_2-3 BL.5_2-4 BL.5_3-1 BL.5_3-2 BL.5_3-3 BL.5_3-4 BL.5_4-1 BL.5_4-2 BL.5_4-3 BL.5_4-4 BL.5_5-1 BL.5_5-2 BL.5_5-3 BL.5_5-4	測点No.														
EL.23.0 3.00 (m)	平均伝播時間(ms)	1.34	1.36	1.38	1.34	1.30	1.37	1.38	1.33	1.29	1.36	1.32	1.40	1.35	1.34	1.31	1.36	1.36
	データ数(回)	7	5	12	2	2	7	5	6	3	2	2	4	4	5	6	3	4
	変動係数(%)	3.90	4.32	3.25	2.11	2.18	3.94	1.21	2.95	0.89	4.16	0.00	0.00	2.84	4.13	2.10	3.89	2.21
	平均伝播速度(km/s)	4.49	4.40	4.35	4.48	4.62	4.38	4.34	4.50	4.64	4.41	4.55	4.29	4.44	4.46	4.58	4.41	4.43
EL.23.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	2.12	2.05	2.12	1.96	2.08	1.96	1.98	2.02	2.04	1.99	2.00	2.00	2.04	2.12	1.96	2.03	2.08
	データ数(回)	1	10	1	1	2	9	2	13	18	4	5	4	12	1	1	13	6
	変動係数(%)	2.98				2.72	3.06	4.29	4.23	1.50	4.14	2.62	2.16	0.00	1.99	2.69	2.91	0.57
	平均伝播速度(km/s)	4.25	4.38	4.25	4.59	4.33	4.59	4.55	4.45	4.41	4.52	4.53	4.49	4.50	4.40	4.25	4.59	4.43
EL.23.0 6.00 (m)	平均伝播時間(ms)	2.60	2.66	2.64	2.67	2.62	2.75	2.63	2.74	2.68	2.75	2.60	2.84	2.60	2.71	2.70	2.66	2.81
	データ数(回)	1	2	7	4	11	14	10	13	12	12	2	1	2	2	5	14	5
	変動係数(%)	1.06	0.68	2.90	1.43			2.72	1.73	1.85	1.80	1.21	0.00	0.00	1.92	1.62	3.11	0.84
	平均伝播速度(km/s)	4.62	4.51	4.55	4.49	4.58	4.37	4.57	4.38	4.48	4.36	4.62	4.23	4.62	4.42	4.44	4.50	4.27
EL.22.5 7.50 (m)	平均伝播時間(ms)	3.40	3.34	3.30	3.47	3.30	3.34	3.49	3.47	3.36	3.34	3.43	3.31	3.38	3.30	3.48	3.31	3.34
	データ数(回)	1	8	9	5	2	17	7	15	4	6	12	11	4	13	10	6	8
	変動係数(%)	4.09	0.86	0.96	2.57	1.53	1.23	2.04	0.97	3.10	1.68	1.33	4.16	2.65	1.37	1.25	3.34	0.62
	平均伝播速度(km/s)	4.41	4.49	4.55	4.32	4.55	4.49	4.30	4.32	4.46	4.49	4.38	4.54	4.44	4.54	4.31	4.54	4.49
EL.22.0 9.00 (m)	平均伝播時間(ms)	4.12	4.25	4.06	4.13	4.07	4.13	4.00	4.00	3.92	3.94	3.92	3.99	4.16	4.04	4.13	4.00	4.10
	データ数(回)	1	2	8	4	12	7	7	2	2	13	2	15	16	9	4	4	18
	変動係数(%)	0.33		3.16	0.48	1.39		1.44	1.41	0.00	1.21	0.00	0.99	2.14	1.98	1.65	2.94	1.31
	平均伝播速度(km/s)	4.37	4.24	4.43	4.36	4.43	4.35	4.50	4.59	4.57	4.59	4.51	4.33	4.46	4.36	4.50	4.39	4.36
EL.22.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)	5.43	5.83	4.83	4.74	4.72	4.52	4.96	4.65	4.60	4.59	4.80	4.96	4.84	4.73	4.69	4.72	4.81
	データ数(回)			2	2	3	1	2	5	10	3	15	1	4	12	6	3	7
	変動係数(%)	1.46	5.37	0.85		0.00	1.76	0.00	0.50	0.94		3.51	2.11	3.17	4.72	2.31	3.28	1.27
	平均伝播速度(km/s)	4.35	4.43	4.45	4.55	4.23	4.32	4.57	4.58	4.38	4.23	4.34	4.44	4.47	4.45	4.44	4.38	4.36
EL.22.0 12.00 (m)	平均伝播時間(ms)	5.45		5.52	5.64			5.58	5.24	5.28	5.51	5.40	5.24					5.30
	データ数(回)	4		2	4			2	1	10	15	3	1	6	13	3	1	5
	変動係数(%)	2.19			2.05	0.00		1.52		1.69	0.59	2.96		0.47	1.99	3.23		2.81
	平均伝播速度(km/s)	4.40			4.35	4.26			4.30	4.58	4.54	4.36	4.44	4.58	4.44	4.39	4.44	4.65
EL.22.5 16.50 (m)	平均伝播時間(ms)	7.49		7.62	7.36	7.32		7.60	7.68	7.56	7.24	7.54						7.72
	データ数(回)	3			4	2	1		1	1		2	2	1	1	3	5	1
	変動係数(%)	3.55				1.63	2.31					0.00	4.88			3.05	1.86	
	平均伝播速度(km/s)	4.40			4.33	4.48	4.51		4.34	4.30	4.37	4.56	4.38	4.23	4.41	4.42	4.41	4.53
平均伝播速度(km/s)		4.45	4.46	4.41	4.47	4.42	4.47	4.37	4.36	4.48	4.51	4.46	4.43	4.49	4.41	4.42	4.45	4.43
標準偏差(km/s)		0.11	0.07	0.16	0.11	0.10	0.12	0.10	0.15	0.07	0.09	0.10	0.11	0.15	0.10	0.15	0.09	0.06
変動係数(%)		2.54	1.58	3.70	2.37	2.15	2.80	2.13	3.42	1.67	2.10	2.13	2.50	3.43	2.33	3.30	1.98	1.18
																		2.77
																		2.40

表-4.4.6 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 6)

打継目の標高 頂部からの距離	項目	測点No.							
		BL.6_1-1	BL.6_1-2	BL.6_2-1	BL.6_2-2	BL.6_3-1	BL.6_3-2	BL.6_4-1	BL.6_4-2
EL.218.0 3.00 (m)	平均伝播時間(ms)			1.34	1.40	1.29			1.28
	データ数(個)			2	1	8			1
	変動係数(%)			2.11		1.44			
	平均伝播速度(km/s)			4.48	4.29	4.65			4.69
EL.216.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)		2.05		2.07	2.03	1.97	2.06	2.04
	データ数(個)		3		5	6	10	12	13
	変動係数(%)		1.12		1.62	3.82	1.92	3.93	3.43
	平均伝播速度(km/s)		4.38		4.34	4.43	4.56	4.38	4.41
EL.215.0 6.00 (m)	平均伝播時間(ms)	2.73		2.64	2.77	2.68	2.75		
	データ数(個)	8		3	3	8	6		
	変動係数(%)	2.65		2.62	1.67	1.25	1.93		
	平均伝播速度(km/s)	4.40		4.55	4.33	4.49	4.36		
EL.213.5 7.50 (m)	平均伝播時間(ms)			3.51				3.48	
	データ数(個)			2				2	
	変動係数(%)			0.66				1.63	
	平均伝播速度(km/s)			4.28				4.31	
EL.212.0 9.00 (m)	平均伝播時間(ms)			4.08	4.13		4.16	4.05	4.08
	データ数(個)			10	7		1	3	1
	変動係数(%)			0.31	1.34			3.01	
	平均伝播速度(km/s)			4.42	4.36		4.33	4.44	4.41
EL.210.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)	4.72				4.56	4.80		
	データ数(個)	2				1	3		
	変動係数(%)	1.20					3.82		
	平均伝播速度(km/s)	4.45				4.61	4.38		
平均伝播速度(km/s)		4.43	4.38	4.43	4.33	4.54	4.41	4.38	4.50
標準偏差(km/s)		0.03		0.11	0.03	0.10	0.11	0.07	0.16
変動係数(%)		0.73		2.58	0.71	2.29	2.43	1.49	3.58

表-4.4.7 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 7)

打継目の標高 頂部からの距離	項目	測点No.							
		BL.7_1-1	BL.7_1-2	BL.7_2-1	BL.7_2-2	BL.7_3-1	BL.7_3-2	BL.7_4-1	BL.7_4-2
EL.218.0 3.00 (m)	平均伝播時間(ms)		1.36	1.32	1.37	1.33	1.35	1.33	1.34
	データ数(個)		1	1	4	7	6	12	5
	変動係数(%)				2.80	3.67	2.43	2.95	3.41
	平均伝播速度(km/s)		4.41	4.55	4.38	4.53	4.46	4.50	4.49
EL.216.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	2.10	2.01	2.00	1.93	2.06	2.06	2.04	2.07
	データ数(個)	5	11	12	8	8	5	4	8
	変動係数(%)	2.56	3.54	3.57	0.96	3.11	3.79	3.92	2.30
	平均伝播速度(km/s)	4.29	4.48	4.51	4.66	4.37	4.38	4.41	4.36
EL.215.0 6.00 (m)	平均伝播時間(ms)	2.65		2.67	2.77	2.70	2.83	2.62	2.68
	データ数(個)	15		19	8	16	3	9	1
	変動係数(%)	1.60		2.34	2.62	2.53	0.82	1.11	
	平均伝播速度(km/s)	4.54		4.50	4.34	4.44	4.25	4.58	4.48
EL.213.5 7.50 (m)	平均伝播時間(ms)		3.33	3.42	3.34	3.38	3.27	3.50	3.46
	データ数(個)		3	12	9	11	3	4	5
	変動係数(%)		2.50	3.32	1.71	2.44	0.71	0.66	1.32
	平均伝播速度(km/s)		4.50	4.38	4.49	4.44	4.59	4.29	4.34
EL.212.0 9.00 (m)	平均伝播時間(ms)	4.16	4.12	3.92		3.97	3.92	4.24	
	データ数(個)	1	1	3		6	1	1	
	変動係数(%)			1.02		1.62			
	平均伝播速度(km/s)	4.33	4.37	4.59		4.54	4.59	4.25	
EL.210.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)				4.64			4.52	4.69
	データ数(個)				1			1	4
	変動係数(%)								3.64
	平均伝播速度(km/s)				4.53			4.65	4.48
平均伝播速度(km/s)		4.39	4.44	4.50	4.48	4.46	4.45	4.44	4.43
標準偏差(km/s)		0.13	0.06	0.08	0.13	0.07	0.15	0.16	0.07
変動係数(%)		3.00	1.36	1.74	2.86	1.57	3.32	3.59	1.65

表-4.4.8 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 8)

打継目の標高 頂部からの距離	項目	測点No.									
		BL.8_1-1	BL.8_1-2	BL.8_2-1	BL.8_2-2	BL.8_3-1	BL.8_3-2	BL.8_4-1	BL.8_4-2	BL.8_5-1	BL.8_5-2
EL.218.0 3.00 (m)	平均伝播時間(ms)	1.30			1.36			1.39			
	データ数(個)	5			1			6			
	変動係数(%)	2.74						1.49			
	平均伝播速度(km/s)	4.60			4.41			4.33			
EL.216.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	1.93	2.04	2.06	2.03	2.12	2.02	1.96	2.04	2.10	2.00
	データ数(個)	8	10	7	9	5	2	4	2	2	3
	変動係数(%)	1.47	3.96	2.72	3.23	0.00	7.00	1.67	2.77	1.35	4.00
	平均伝播速度(km/s)	4.66	4.40	4.38	4.43	4.25	4.46	4.59	4.41	4.29	4.50
EL.215.0 6.00 (m)	平均伝播時間(ms)	2.65	2.77	2.69	2.63	2.62	2.72	2.84	2.65	2.81	2.78
	データ数(個)	6	16	16	8	5	7	1	14	10	12
	変動係数(%)	1.49	2.04	1.74	1.77	1.37	0.85		2.15	1.75	1.67
	平均伝播速度(km/s)	4.53	4.34	4.47	4.56	4.59	4.41	4.23	4.53	4.27	4.31
EL.213.5 7.50 (m)	伝播時間(ms)		3.32	3.30	3.26	3.24	3.33	3.36	3.33	3.43	3.33
	データ数(個)		1	15	5	1	6	1	4	14	12
	変動係数(%)			1.44	0.67		0.91		1.80	1.80	3.00
	伝播速度(km/s)		4.52	4.55	4.61	4.63	4.51	4.46	4.50	4.38	4.50
EL.212.0 9.00 (m)	伝播時間(ms)	3.98	4.24	3.91	4.08	4.11	4.17	3.93	4.06	4.06	3.90
	データ数(個)	5	1	12	1	7	5	9	2	15	11
	変動係数(%)	1.15		0.67		2.60	2.29	2.59	4.88	3.43	0.96
	伝播速度(km/s)	4.53	4.25	4.61	4.41	4.38	4.32	4.58	4.43	4.43	4.61
EL.210.5 10.50 (m)	伝播時間(ms)	4.64	4.67	4.76	4.73			4.76	4.60	4.52	
	データ数(個)	1	6	2	14			1	1	1	
	変動係数(%)			1.26	1.19	0.87					
	伝播速度(km/s)	4.53	4.49	4.41	4.44			4.41	4.57	4.65	
平均伝播速度(km/s)		4.57	4.40	4.48	4.48	4.46	4.42	4.43	4.49	4.40	4.48
標準偏差(km/s)		0.06	0.11	0.10	0.08	0.18	0.08	0.14	0.06	0.15	0.13
変動係数(%)		1.33	2.55	2.14	1.89	4.06	1.82	3.22	1.45	3.43	2.79

表-4.4.9 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 9)

打継目の標高 頂部からの距離	項目	測点No.							
		BL.9_1-1	BL.9_1-2	BL.9_2-1	BL.9_2-2	BL.9_3-1	BL.9_3-2	BL.9_4-1	BL.9_4-2
EL.218.0 3.00 (m)	平均伝播時間(ms)	1.40	1.40	1.38	1.35	1.34	1.36	1.37	1.34
	データ数(個)	1	1	8	9	5	1	8	9
	変動係数(%)			2.10	2.47	2.66		3.30	3.70
	平均伝播速度(km/s)	4.29	4.29	4.34	4.44	4.46	4.41	4.40	4.49
EL.216.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	2.12	2.04	2.11	2.05	2.03	2.04	1.94	2.02
	データ数(個)	3	8	10	8	5	11	2	9
	変動係数(%)	0.00	1.63	1.23	3.42	4.49	1.96	1.46	3.45
	平均伝播速度(km/s)	4.25	4.42	4.27	4.39	4.43	4.41	4.64	4.46
EL.215.0 6.00 (m)	平均伝播時間(ms)	2.72	2.71	2.75		2.74	2.76	2.68	2.68
	データ数(個)	19	4	16		4	2	18	3
	変動係数(%)	3.27	3.69	2.75		4.38	2.05	1.92	2.99
	平均伝播速度(km/s)	4.41	4.43	4.36		4.38	4.35	4.48	4.48
EL.213.5 7.50 (m)	平均伝播時間(ms)	3.26	3.52	3.27	3.28	3.27	3.41	3.24	3.38
	データ数(個)	2	1	15	15	5	10	1	4
	変動係数(%)	0.87		0.72	2.36	1.53	2.93		5.86
	平均伝播速度(km/s)	4.60	4.26	4.59	4.57	4.59	4.39	4.63	4.44
EL.212.0 9.00 (m)	平均伝播時間(ms)	4.22	3.92	4.05		3.96			
	データ数(個)	2	1	6		1			
	変動係数(%)	0.67		2.24					
	平均伝播速度(km/s)	4.27	4.59	4.45		4.55			
EL.210.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)	4.68	4.60	4.76		4.54	4.71		
	データ数(個)	3	1	1		2	3		
	変動係数(%)	2.96				0.62	1.77		
	平均伝播速度(km/s)	4.49	4.57	4.41		4.63	4.46		
EL.209.0 12.00 (m)	平均伝播時間(ms)	5.28	5.42	5.32	5.58		5.38		5.68
	データ数(個)	1	2	1	2		2		1
	変動係数(%)		3.65		2.53		4.73		
	平均伝播速度(km/s)	4.55	4.43	4.51	4.30		4.46		4.23
EL.207.5 13.50 (m)	平均伝播時間(ms)	6.06			5.98		6.04	6.16	5.84
	データ数(個)	4			2		2	2	1
	変動係数(%)	2.93			3.31		1.87	2.00	
	平均伝播速度(km/s)	4.46			4.52		4.47	4.38	4.62
EL.206.0 15.00 (m)	平均伝播時間(ms)		7.04	6.88	6.60		6.71	7.04	6.82
	データ数(個)		1	5	2		3	1	2
	変動係数(%)			2.25	1.71		4.40		5.39
	平均伝播速度(km/s)		4.26	4.36	4.55		4.47	4.26	4.40
EL.204.5 16.50 (m)	平均伝播時間(ms)	7.30	7.31	7.80		7.24	7.20	7.40	7.62
	データ数(個)	2	3	1		1	1	1	2
	変動係数(%)	3.49	2.76						1.86
	平均伝播速度(km/s)	4.52	4.52	4.23		4.56	4.58	4.46	4.33
平均伝播速度(km/s)		4.42	4.42	4.39	4.46	4.51	4.45	4.46	4.43
標準偏差(km/s)		0.13	0.13	0.11	0.09	0.09	0.06	0.13	0.11
変動係数(%)		2.96	2.86	2.48	2.11	1.89	1.43	2.87	2.51

表-4.4.10 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 10)

打継目の標高 頂部からの距離	項目	測点No.					
		BL10_1-1	BL10_1-2	BL10_2-1	BL10_2-2	BL10_3-1	BL10_3-2
EL.218.0 3.00 (m)	平均伝播時間(ms)	1.35	1.36	1.30	1.39	1.35	
	データ数(個)	4	12	5	16	3	
	変動係数(%)	3.73	3.55	2.74	1.16	1.71	
	平均伝播速度(km/s)	4.44	4.41	4.60	4.31	4.46	
EL.216.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	2.00	2.07	1.93	1.98	1.99	2.02
	データ数(個)	6	9	3	20	4	22
	変動係数(%)	2.19	1.37	1.19	1.66	4.14	1.70
	平均伝播速度(km/s)	4.50	4.35	4.66	4.55	4.52	4.45
EL.215.0 6.00 (m)	平均伝播時間(ms)	2.61	2.60	2.72	2.73	2.69	2.80
	データ数(個)	5	1	7	11	6	8
	変動係数(%)	0.69		4.25	2.95	3.83	1.87
	平均伝播速度(km/s)	4.60	4.62	4.41	4.39	4.46	4.29
EL.213.5 7.50 (m)	平均伝播時間(ms)			3.38	3.33	3.31	3.44
	データ数(個)			2	17	13	1
	変動係数(%)			0.84	1.50	2.21	
	平均伝播速度(km/s)			4.44	4.51	4.53	4.36
EL.212.75 8.25 (m)	平均伝播時間(ms)						
	データ数(個)						
	変動係数(%)						
	平均伝播速度(km/s)						
EL.212.0 9.00 (m)	平均伝播時間(ms)		4.20		3.94	4.22	
	データ数(個)		1		2	5	
	変動係数(%)				0.72	0.85	
	平均伝播速度(km/s)		4.29		4.57	4.26	
EL.210.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)	4.64	4.52	4.72		4.52	4.96
	データ数(個)	1	1	1		1	1
	変動係数(%)						
	平均伝播速度(km/s)	4.53	4.65	4.45		4.65	4.23
EL.209.0 12.00 (m)	平均伝播時間(ms)		5.16		5.56		
	データ数(個)		1		1		
	変動係数(%)						
	平均伝播速度(km/s)		4.65		4.32		
EL.207.5 13.50 (m)	平均伝播時間(ms)	5.98				6.28	
	データ数(個)	2				1	
	変動係数(%)	4.26					
	平均伝播速度(km/s)	4.52				4.30	
EL.206.0 15.00 (m)	平均伝播時間(ms)	6.76		6.78		6.60	
	データ数(個)	1		5		1	
	変動係数(%)			4.20			
	平均伝播速度(km/s)	4.44		4.42		4.55	
平均伝播速度(km/s)		4.50	4.49	4.50	4.44	4.48	4.36
標準偏差(km/s)		0.06	0.15	0.10	0.12	0.12	0.12
変動係数(%)		1.31	3.37	2.30	2.66	2.60	2.67

表-4.4.11 弾性波伝播速度計測結果 (BL.11)

打撃目の標高 頂部からの距離		項目											
		BL11_1-[BL11_1-2]BL11_1-3]BL11_1-4]BL11_2-1]BL11_2-2]BL11_2-3]BL11_2-4]BL11_4-1]BL11_4-2]BL11_4-3]BL11_4-4]BL11_5-1]BL11_5-2]BL11_5-3]BL11_5-4]BL11_5-5]BL11_5-6]BL11_6-2]BL11_6-3]BL11_6-4]											
EL.231.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	2.12	2.04	2.02	1.99	2.06	2.10	2.00	2.05	2.07	1.93	2.01	2.03
	データ数(個)	1	8	11	4	5	5	6	9	9	3	3	6
	変動係数(%)	3.27	1.65	2.39	1.77	2.07	1.95	3.90	2.98	0.77	1.15	4.10	2.60
EL.230.0 6.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.25	4.42	4.46	4.52	4.37	4.29	4.51	4.39	4.35	4.66	4.47	4.43
	平均伝播時間(ms)	2.76	2.69	2.73	2.70	2.63	2.66	2.71	2.80	2.67	2.72	2.68	2.70
	データ数(個)	18	10	11	15	18	12	13	25	3	16	19	19
EL.228.5 7.50 (m)	変動係数(%)	1.04	2.41	3.33	3.10	1.88	2.58	3.21	2.87	1.24	2.06	2.76	1.27
	平均伝播速度(km/s)	4.35	4.46	4.40	4.30	4.45	4.56	4.51	4.43	4.29	4.49	4.41	4.49
	平均伝播時間(ms)	3.29	3.31	3.33	3.34	3.46	3.42	3.38	3.33	3.31	3.33	3.42	3.32
EL.227.0 9.00 (m)	データ数(個)	18	3	14	22	18	11	18	17	8	18	16	10
	変動係数(%)	1.84	4.37	3.06	2.11	1.66	3.28	0.56	2.13	1.99	2.50	1.42	2.37
	平均伝播速度(km/s)	4.56	4.53	4.50	4.49	4.34	4.38	4.44	4.50	4.54	4.51	4.39	4.40
EL.225.5 10.50 (m)	平均伝播時間(ms)	3.96	4.01	4.00	4.04	4.04	4.11	4.10	4.09	4.09	3.88	4.06	3.95
	データ数(個)	2	17	18	9	10	17	10	16	12	1	2	14
	変動係数(%)	2.86	1.34	1.50	1.73	2.23	1.44	3.09	1.50	0.90	3.48	6.27	1.36
EL.224.0 12.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.55	4.49	4.51	4.45	4.45	4.38	4.38	4.39	4.41	4.40	4.52	4.46
	平均伝播時間(ms)	4.74	4.76	4.71	4.69	4.72	4.60	4.76	4.78	4.73	4.89	4.73	4.89
	データ数(個)	2	14	5	24	15	19	15	2	2	15	10	5
EL.222.5 13.50 (m)	変動係数(%)	6.56	1.51	3.14	0.97	1.00	0.73	0.87	0.59	6.88	1.93	1.69	3.11
	平均伝播速度(km/s)	4.43	4.41	4.46	4.48	4.45	4.56	4.41	4.39	4.44	4.30	4.44	4.30
	平均伝播時間(ms)	5.36	5.54	5.29	5.26	5.37	5.64	5.32	5.52	5.36	5.32	5.35	5.22
EL.219.5 16.50 (m)	データ数(個)	2	2	13	17	19	1	8	14	10	1	12	5
	変動係数(%)	0.00	2.56	1.71	1.19	2.92	1.97	0.50	4.14	0.58	1.16	3.21	0.55
	平均伝播速度(km/s)	4.48	4.33	4.53	4.56	4.47	4.26	4.51	4.35	4.48	4.51	4.49	4.60
EL.219.5 16.50 (m)	平均伝播時間(ms)	5.93	5.98	5.94	5.90	6.36	6.36	6.16	5.88	5.96	6.11	6.04	6.15
	データ数(個)	4	5	2	15	11	1	1	4	1	2	3	2
	変動係数(%)	2.61	0.60	1.43	2.40	2.76		0.53	3.80	3.80	3.72	0.00	0.38
測点No.													
平均伝播速度(km/s)		4.45	4.46	4.48	4.47	4.39	4.40	4.41	4.46	4.47	4.43	4.49	4.46
標準偏差(km/s)		0.12	0.07	0.10	0.09	0.08	0.12	0.10	0.07	0.09	0.11	0.09	0.10
変動係数(%)		2.68	1.54	2.12	1.94	1.72	2.69	2.20	1.65	2.13	2.08	2.50	2.06
		平均伝播速度(km/s)	4.41	4.25	4.40	4.37	4.33	4.53	4.46	4.25	4.40	4.46	4.37
		標準偏差(km/s)	0.11	0.07	0.10	0.09	0.08	0.12	0.10	0.07	0.09	0.10	0.06
		変動係数(%)	2.68	1.54	2.12	1.94	1.72	2.69	2.20	1.65	2.13	2.08	2.50

表-4.4.12 弾性波伝播速度計測結果 (BL. 12)

打継目の標高 頂部からの距離		項目		測点No.					
		平均伝播時間(ms)		BL12-1 BL12-1-2 BL12-1-3 BL12-1-4 BL12-2-1 BL12-2-2 BL12-2-3 BL12-2-4 BL12-3-1 BL12-3-2 BL12-3-3 BL12-3-4 BL12-4-1 BL12-4-2 BL12-4-3 BL12-4-4 BL12-5-1					
EL.234.5 1.50 (m)	平均伝播速度(km/s)	0.69	0.66	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64	0.68
	変動係数(%)	3	1	3	1	2	2	2	1
EL.233.0 3.00 (m)	平均伝播時間(ms)	4.35	4.55	4.64	4.69	4.69	4.69	4.69	4.41
	平均伝播速度(km/s)	1.38	1.37	1.36	1.37	1.35	1.34	1.37	1.40
EL.231.5 4.50 (m)	平均伝播時間(ms)	6	4	2	4	15	2	17	1
	変動係数(%)	0.73	3.46	0.90	1.55	2.64	7.33	1.90	0.73
EL.230.0 6.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.34	4.40	4.40	4.41	4.65	4.38	4.45	4.48
	平均伝播時間(ms)	2.03	2.05	2.03	1.95	1.97	2.01	2.07	2.06
EL.228.5 7.50 (m)	平均伝播速度(km/s)	2	3	6	7	4	8	2	1
	変動係数(%)	6.27	11.12	4.16	0.77	1.74	2.49	0.68	0.00
EL.227.0 9.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.43	4.38	4.43	4.61	4.58	4.47	4.35	4.37
	平均伝播時間(ms)	2.66	2.76	2.74	2.81	2.71	2.65	2.70	2.62
EL.225.5 10.50 (m)	平均伝播速度(km/s)	15	6	10	11	10	12	4	1
	変動係数(%)	1.64		2.63	1.21	0.66	2.07	1.42	0.86
EL.228.5 7.50 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.51	4.35	4.38	4.27	4.43	4.53	4.44	4.58
	平均伝播時間(ms)	3.50	3.52	3.38	3.30	3.31	3.26	3.22	3.26
EL.227.0 9.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	5	1	10	10	2	14	1	5
	変動係数(%)	0.48	1.41	2.73	1.28		0.55	0.27	0.49
EL.225.5 10.50 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.29	4.26	4.44	4.55	4.53	4.61	4.66	4.31
	平均伝播時間(ms)	3.97	3.88	3.92	4.01				
EL.227.0 9.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	9	8	3	14				
	変動係数(%)	0.36	0.43	0.00	1.36				
EL.225.5 10.50 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.54	4.64	4.59	4.49				
	平均伝播時間(ms)	4.93	4.90	4.79	4.70				
EL.228.5 7.50 (m)	平均伝播速度(km/s)	8	5	3	11				
	変動係数(%)	0.31	0.34	2.30	0.71				
EL.227.0 9.00 (m)	平均伝播速度(km/s)	4.39	4.39	4.43	4.49	4.51	4.48	4.47	4.56
	標準偏差(km/s)	0.12	0.14	0.09	0.08	0.17	0.11	0.16	0.05
EL.225.5 10.50 (m)	変動係数(%)	2.64	3.12	1.93	1.80	3.70	2.53	2.94	3.45
						1.97	3.60	3.52	1.15

表-4.4.13 各計測点の弾性波伝播速度(BL. 2~BL. 6)

			弾性波伝播速度(km/s) 左右岸方向測線							変動 係数 (%)		
			7	6	5	4	3	2	1			
BL 2	上 下 流 方 向	1	4.47 (36)	4.46 (71)	4.47 (29)	4.43 (53)	4.48 (54)	4.44 (44)	4.49 (35)	0.52		
		2	4.43 (75)	4.50 (48)					4.47 (32)			
	平均値		4.46							0.88		
BL 3	上 下 流 方 向	1	4.46 (37)	4.45 (51)	4.49 (23)	4.50 (36)	4.48 (33)	4.48 (64)	0.88			
		2	4.40 (54)	4.37 (46)	4.41 (56)	4.44 (30)	4.48 (54)	4.45 (45)				
		3	4.48 (40)	4.36 (27)	4.48 (24)	4.48 (53)	4.48 (36)	4.53 (41)				
		4	4.44 (86)	4.46 (47)	4.44 (52)	4.46 (34)	4.45 (63)	4.42 (41)				
	平均値		4.45							0.04		
BL 4	上 下 流 方 向	1	4.45 (68)	4.44 (66)	4.41 (51)	4.40 (53)	4.44 (36)	0.74				
		2	4.43 (57)	4.43 (61)	4.43 (60)	4.39 (44)	4.39 (31)					
		3	4.43 (69)	4.42 (47)	4.39 (56)	4.44 (60)	4.48 (36)					
		4	4.50 (74)	4.42 (47)	4.39 (77)	4.44 (52)	4.49 (61)					
	平均値		4.43							0.03		
BL 5	上 下 流 方 向	1	4.45 (51)	4.43 (26)	4.36 (66)	4.44 (36)	4.45 (18)	0.85				
		2	4.48 (41)	4.49 (42)	4.48 (40)	4.42 (24)	4.46 (17)					
		3	4.45 (61)	4.41 (55)	4.51 (42)	4.47 (54)	4.41 (30)					
		4	4.43 (39)	4.42 (49)	4.46 (62)	4.37 (32)	4.47 (18)					
	平均値		4.44							0.04		
BL 6	上 下 流 方 向	1	4.38 (17)	4.54 (23)	4.43 (17)	4.43 (10)	1.56					
		2	4.50 (15)	4.41 (20)	4.33 (16)	4.38 (3)						
		平均値		4.42							0.07	
		標準偏差		0.07								

※()は各測点における弾性波伝播速度の算出に用いた波形のサンプル数

表-4.4.14 各計測点の弾性波伝播速度(BL. 7~BL. 12)

			弾性波伝播速度(km/s) 左右岸方向測線							変動 係数 (%)	
BL 7	上下 流 方 向	1	7	6	5	4	3	2	1		
		2				4.44 (31)	4.46 (48)	4.50 (47)	4.39 (21)	0.79	
						4.43 (23)	4.45 (18)	4.48 (30)	4.44 (16)		
			平均値								
			標準偏差								
BL 8	上下 流 方 向	1				4.40 (42)	4.43 (22)	4.46 (18)	4.48 (52)	4.57 (25)	1.14
		2				4.48 (38)	4.49 (23)	4.42 (20)	4.48 (38)	4.40 (34)	
			平均値								
			標準偏差								
BL 9	上下 流 方 向	1				4.46 (33)	4.51 (23)	4.39 (63)	4.42 (37)		0.83
		2				4.43 (31)	4.45 (35)	4.46 (38)	4.42 (22)		
			平均値								
			標準偏差								
BL 10	上下 流 方 向	1				4.48 (32)	4.50 (23)	4.50 (19)			1.21
		2				4.36 (34)	4.44 (67)	4.49 (25)			
			平均値								
			標準偏差								
BL 11	上下 流 方 向	1				4.42 (63)	4.46 (64)	4.46 (47)	4.47 (95)	4.45 (47)	0.63
		2				4.46 (78)	4.48 (50)	4.47 (61)	4.39 (61)	4.46 (52)	
		3				4.48 (83)	4.43 (66)	4.49 (67)	4.40 (79)	4.48 (72)	
		4				4.43 (66)	4.46 (108)	4.46 (55)	4.41 (71)	4.47 (125)	
			平均値								
			標準偏差								
BL 12	上下 流 方 向	1				4.42 (7)	4.58 (32)	4.57 (20)	4.51 (21)	4.39 (45)	1.45
		2					4.47 (15)	4.41 (39)	4.48 (36)	4.39 (24)	
		3					4.56 (25)	4.51 (24)	4.47 (18)	4.43 (32)	
		4					4.40 (22)	4.42 (13)	4.54 (20)	4.49 (55)	
			平均値								
			標準偏差								

※()は各測点における弾性波伝播速度の算出に用いた波形のサンプル数

表-4.4.15 各打継目までの弾性波伝播速度(BL. 2~4)

BL.名	打継目 深度 (m)	弾性波伝播速度			
		サンプル 数	平均値 (km/s)	標準偏差 (km/s)	変動係数 (%)
BL.2	4.5	109	4.43	0.09	2.13
	6	86	4.45	0.05	1.09
	7.5	97	4.45	0.08	1.78
	9	71	4.48	0.08	1.77
	10.5	48	4.48	0.08	1.82
	12	31	4.44	0.12	2.63
	13.5	24	4.49	0.10	2.28
	15	11	4.49	0.11	2.54
	平均値(km/s)	—	4.46	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.02	—	—
BL.3	4.5	282	4.45	0.07	1.59
	6	250	4.42	0.08	1.78
	7.5	230	4.50	0.08	1.82
	9	156	4.45	0.14	3.13
	10.5	80	4.47	0.08	1.79
	12	46	4.44	0.12	2.62
	13.5	29	4.44	0.11	2.53
	平均値(km/s)	—	4.45	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.03	—	—
	変動係数(%)	—	0.58	—	—
BL.4	4.5	74	4.39	0.08	1.92
	6	140	4.39	0.08	1.85
	7.5	223	4.43	0.05	1.17
	9	215	4.43	0.06	1.44
	10.5	213	4.44	0.08	1.70
	12	168	4.45	0.08	1.90
	13.5	103	4.45	0.09	2.04
	平均値(km/s)	—	4.43	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.03	—	—
	変動係数(%)	—	0.58	—	—

表-4.4.16 各打継目までの弾性波伝播速度(BL.5~BL.7)

BL.名	打継目 深度 (m)	弾性波伝播速度			
		サンプル 数	平均値 (km/s)	標準偏差 (km/s)	変動係数 (%)
BL.5	3	79	4.46	0.10	2.20
	4.5	112	4.43	0.12	2.60
	6	141	4.48	0.12	2.64
	7.5	159	4.45	0.09	1.95
	9	129	4.43	0.10	2.27
	10.5	84	4.43	0.11	2.53
	12	70	4.45	0.12	2.60
	16.5	29	4.40	0.10	2.16
	平均値(km/s)	—	4.44	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.03	—	—
BL.6	3	12	4.53	0.18	4.07
	4.5	49	4.42	0.08	1.75
	6	28	4.42	0.09	2.04
	7.5	4	4.29	0.02	0.54
	9	22	4.39	0.05	1.07
	10.5	6	4.48	0.12	2.63
	平均値(km/s)	—	4.42	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.08	—	—
BL.7	3	36	4.47	0.06	1.35
	4.5	61	4.43	0.12	2.60
	6	71	4.44	0.12	2.60
	7.5	47	4.43	0.11	2.37
	9	13	4.44	0.15	3.36
	10.5	6	4.55	0.09	1.91
	平均値(km/s)	—	4.46	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.05	—	—
	変動係数(%)	—	1.04	—	—

表-4.4.17 各打継目までの弾性波伝播速度(BL.8~BL.10)

BL.名	打継目 深度 (m)	弾性波伝播速度			
		サンプル 数	平均値 (km/s)	標準偏差 (km/s)	変動係数 (%)
BL.8	3	12	4.45	0.14	3.16
	4.5	52	4.44	0.13	2.86
	6	95	4.42	0.13	2.95
	7.5	59	4.52	0.08	1.66
	9	68	4.45	0.12	2.80
	10.5	26	4.50	0.09	1.92
	平均値(km/s)	—	4.46	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.04	—	—
	変動係数(%)	—	0.86	—	—
BL.9	3	42	4.39	0.08	1.76
	4.5	56	4.41	0.12	2.76
	6	66	4.41	0.05	1.21
	7.5	53	4.51	0.13	2.90
	9	10	4.46	0.14	3.24
	10.5	10	4.51	0.08	1.88
	12	9	4.41	0.12	2.82
	13.5	11	4.49	0.09	1.97
	15	14	4.38	0.11	2.60
	16.5	11	4.46	0.13	2.91
BL.10	平均値(km/s)	—	4.44	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.05	—	—
	変動係数(%)	—	1.11	—	—
	3	40	4.44	0.11	2.36
	4.5	64	4.51	0.10	2.24
	6	38	4.46	0.13	2.87
	7.5	33	4.46	0.08	1.71
	9	8	4.37	0.17	3.91
	10.5	5	4.50	0.17	3.80

表-4.4.18 各打継目までの弾性波伝播速度(BL.11～BL.12)

BL.名	打継目 深度(m)	弾性波伝播速度			
		サンプル 数	平均値 (km/s)	標準偏差 (km/s)	変動係数 (%)
BL.11	4.5	113	4.41	0.10	2.19
	6	285	4.42	0.08	1.74
	7.5	284	4.46	0.07	1.53
	9	231	4.47	0.08	1.72
	10.5	200	4.43	0.06	1.38
	12	173	4.48	0.09	2.07
	13.5	103	4.48	0.11	2.56
	16.5	21	4.37	0.09	2.03
	平均値(km/s)	—	4.44	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.04	—	—
BL.12	1.5	13	4.57	0.14	3.11
	3	102	4.44	0.11	2.51
	4.5	99	4.47	0.11	2.44
	6	101	4.45	0.10	2.14
	7.5	65	4.48	0.15	3.24
	9	34	4.56	0.07	1.48
	10.5	34	4.40	0.14	3.20
	平均値(km/s)	—	4.48	—	—
	標準偏差(km/s)	—	0.06	—	—
	変動係数(%)	—	1.40	—	—

(2) 考察

表-4.4.2～表-4.4.18に示したコンクリートダム堤体中の弾性波伝播速度の計測結果から、以下のことが分かる。

①同一測点での複数回計測による弾性波伝播速度の変動係数は概ね3%以下であること。(表-4.4.2～表-4.4.12)

②測点別の弾性波伝播速度のばらつきは、変動係数で1%を下回る程度であること。
(表-4.4.13～表-4.4.14)

③同一打継目までの弾性波伝播速度の面内のばらつきは、大きくないこと。(表-4.4.15～表-4.4.18)

④弾性波伝播速度の全体平均値に対する各打継目の弾性波伝播速度のばらつきを示す変動係数は1%程度であること。(表-4.4.15～表-4.4.18)

⑤各打継目での弾性波伝播速度の平均値、あるいは変動係数は、打継目までの深度に応じて減少あるいは増加するような明瞭な傾向は認められない。(表-4.4.15～表-4.4.18)

以上のことから、コンクリートダム堤体中の弾性波伝播速度の特性について述べると以下の通りである。

- ・弾性波伝播速度はほぼ一定であり、ばらつきを示す変動係数は概ね3%以下である。これは、適用実績の多い杭基礎に対して本手法を適用した際の誤差(変動係数)($\pm 5\%$ 程度)¹¹⁾に比較して小さい。したがって、内部が不均質であると想定されたコンクリートダム堤体内部においても一般のコンクリート構造物とほぼ同等の伝播特性を示すと考えられる。

- ・反射波が生じるような劣化部が複数存在するようなコンクリートダム堤体の状態においても、弾性波伝播速度は、伝播距離に応じて速度が低下する、あるいは変動係数が大きくなるような傾向はなく、この点においても一般のコンクリート構造物とほぼ同等の伝播特性を示すと考えられる。

4. 4. 4 まとめ

衝撃弾性波法を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目の状態推定の精度向上に資するため、供用中のコンクリートダム堤体中の弾性波伝播速度の計測を行った。その結果、一般的なコンクリートに比して不均質であると推定されるコンクリートダム堤体の中における弾性波伝播速度の特性は、一般的なコンクリートで構築された躯体におけるものとほぼ同様であることが確認された。

4. 5 ダム堤体の水平打継目の状態と計測波形の透過・反射特性との関係設定

コンクリートダム堤体において計測される波形は、ある深度（打継目までの深さ）に着目して見ると、図-4.5.1に示すように、A：想定深度において反射波が確認されず、ほとんど透過していくもの（より深部で反射波を確認），B：想定深度において反射波が確認されるが、一部、透過もしているもの（より深部でも反射波を確認），C：想定深度で明瞭な反射波が確認され、より深部の情報（反射波）がないもの、の3つのパターンに分けられる。このうち、Aのパターンは想定深度において弾性波の反射を生じさせるひび割れ等の劣化が無い状態であると推察され、一方、Cのパターンは想定深度にはより以深に波を伝播させないひびわれ等の劣化が存在していると推察される。また、Bのパターンは波を反射させるひび割れ等の劣化が部分的に存在し、透過する部分も存在していることを示している。また本調査で用いた衝撃弾性波法は高い指向性を有し⁴⁾、打継面における打撃点直下近傍の限られた範囲内の情報が得られているものと考えられるが、コンクリートの不均質性により、弾性波の伝播経路には、打撃入力ごとにばらつきが生じる。さらに、微細なひび割れの場合には面として完全に分離していないため、部分的に波が透過する。このことから同一の状態推定箇所(点)で複数回計測した場合に計測される波形パターンは必ずしも一つではない。そのため、同一の状態推定箇所(点)で10波形程度を計測し、その得られた波形パターンの割合から、対象箇所の状態を推定（分類）することを試みた。

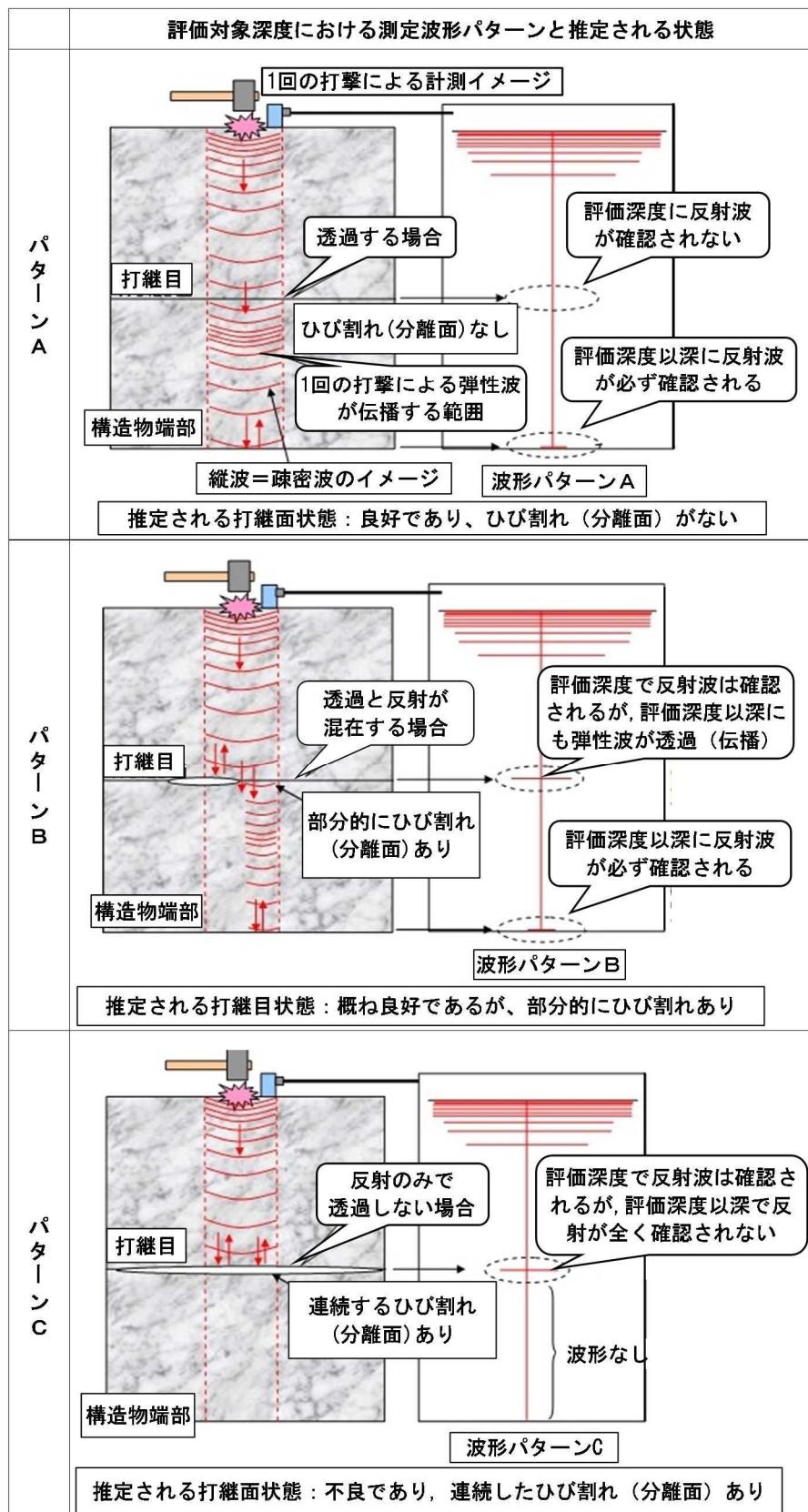


図-4.5.1 評価対象深度における測定波形パターン⁸⁾

衝撃弾性波法による調査の結果（計測結果）と堤体の打継目状態との関係については、Aダムの堤体のBL.2, BL.3及びBL.5にて実施されたボーリング調査の結果と衝撃弾性波法による調査結果とを対比させて設定することとした。なお、この堤体で実施されたボーリングは堤体補修を目的とした工事の一部として実施が計画された削孔であるが、本検討に資する目的から、一部の孔についてはボーリングコアの採取を行うとともに、全孔に対して孔壁のボアホールカメラ観察を行い、打継目状態の情報提供に資する調査項目を追加し、対応した。ボーリングのブロック別の孔数、ならびに衝撃弾性波法による計測結果と打継目状態との関係設定に用いた対比箇所（点）数を表-4.5.1に示す。なお、ボーリングの孔径は ϕ 66mmである。

表-4.5.1 ボーリング孔数と対比箇所（点）数⁹⁾

BL.	ボーリング孔数	対比した打継目数	対比箇所（点）数
2	10	1	10
3	7	4	28
5	4	6	24
計	21	11	62

設定手順は次のとおり。

（1）打継目状態の分類実施

ボーリング調査結果に対して打継目の状態を、表-4.5.2に示す4つの状態に区分した。表-4.5.1に示した箇所の打継目状態について整理した結果を表-4.5.3～表-4.5.7に示す。

表-4.5.2 ポーリング調査で確認された水平打継目の状態の分類⁹⁾

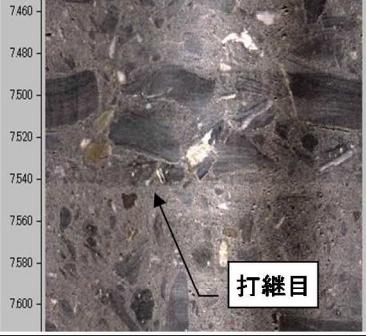
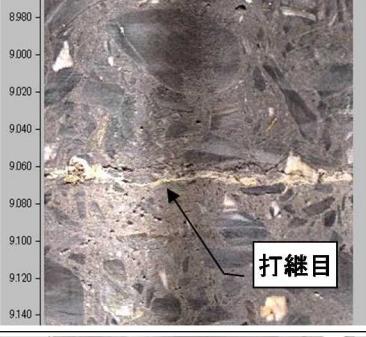
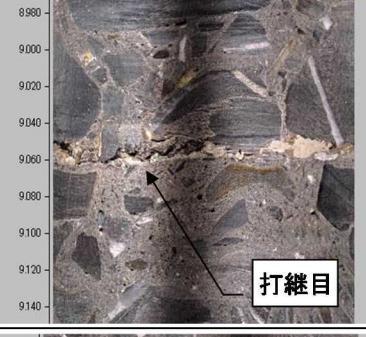
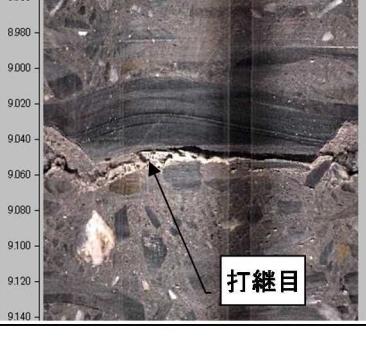
状態分類	状態	ポーリング調査による観察結果	代表的なボアホールカメラ画像
イ	分離面(ひび割れ)が無い	<ul style="list-style-type: none"> 打継目に分離面(ひび割れ)は認められない。 打継目が面として認められるが一体化している。 	 <p>7460 7480 7500 7520 7540 7560 7580 7600</p> <p>打継目</p>
ロ	分離面が完全に閉塞	<ul style="list-style-type: none"> 打継目に明瞭な分離面(ひび割れ)が認められる。 分離面(ひび割れ)は完全に閉塞されていると推測できる(挟在物または止水材により閉塞)。 	 <p>8980 9000 9020 9040 9060 9080 9100 9120 9140</p> <p>打継目</p>
ハ	分離面(ひび割れ)が有る	<ul style="list-style-type: none"> 打継目に明瞭な分離面(ひび割れ)が認められる。 分離面(ひび割れ)は部分的に閉塞されていると推測できる(挟在物または止水材により部分的に閉塞)。 	 <p>8980 9000 9020 9040 9060 9080 9100 9120 9140</p> <p>打継目</p>
ニ	分離面が全体的に閉塞	<ul style="list-style-type: none"> 打継目に明瞭な分離面(ひび割れ)が認められる。 分離面(ひび割れ)は全体的に開口している。 	 <p>8980 8980 9000 9020 9040 9060 9080 9100 9120 9140</p> <p>打継目</p>

表-4.5.3 ポーリング調査で確認された水平打継目の状態(BL. 2)

2BL EL.230m		2BL EL.230m	
測点	ポアホールカメラ観察結果 孔壁展開画像 打継目付近拡大画像	コア観察結果 コア観察結果による打継目の測点周囲の状態 打継目状態分類	ポアホールカメラ観察結果 コア観察結果 コア観察結果による打継目の測点周囲の状態 打継目状態分類
1-1		 コア観察 ・打継目に止水材が確認できる ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる	□
1-2		 コア観察 ・打継目に止水材が確認できる ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できる	△
2-1		 コア観察 ・打継目に止水材が確かに確認できる ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる	□
3-1		 コア観察 ・打継目に止水材が確認できる ・打継目周囲に空隙あり(1cm × 4cm) ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できる	△
4-1		 コア観察 ・打継目に止水材が確認できる ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる	□
5-1		 コア観察 ・打継目に止水材が確認できる ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる	□
6-1		 コア観察 ・打継目に止水材が確かに確認できる ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる	□
6-2		 コア観察 ・打継目に止水材は確認できない ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できる	△
7-1		 コア観察 ・打継目に止水材は確認できない ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる	□
7-2		 コア観察 ・打継目に止水材が確認できる ポアホールカメラ観察 ・ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる	□

表-4.5.4 ポーリング調査で確認された水平打継目の状態(BL. 3_(1-2, 2-1, 3-2, 4-1))

3BL 溝点1-2				3BL 溝点2-1				
打継目 深度	ボアホールカメラ観察結果		コア観察 & ボアホールカメラ観察結果による打継目の測定回りの状態	打継目 状態分類	ボアホールカメラ観察結果		コア観察 & ボアホールカメラ観察結果による打継目の測定回りの状態	打継目 状態分類
	孔壁展開画像	打継目付近拡大画像			孔壁展開画像	打継目付近拡大画像		
EL_230m			-打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない	イ			-打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない	イ
			-打継目が面として認められる(面を境として色調が明確に異なる) -打継目にひび割れは認められない				-打継目が面として認められる(面を境として色調が明確に異なる) -打継目にひび割れは認められない	
EL_227m			-打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは部分的に大きく開口している	ハ			-打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により部分的に閉塞されていると推測できる	ハ
			-打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により全体的に閉塞されていると推測できる				-打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により部分的に閉塞されていると推測できる	
3BL 溝点3-2				3BL 溝点4-1				
打継目 深度	ボアホールカメラ観察結果		コア観察 & ボアホールカメラ観察結果による打継目の測定回りの状態	打継目 状態分類	ボアホールカメラ観察結果		コア観察 & ボアホールカメラ観察結果による打継目の測定回りの状態	打継目 状態分類
	孔壁展開画像	打継目付近拡大画像			孔壁展開画像	打継目付近拡大画像		
EL_230m			-打継目が面として認められる(面を境として色調が明確に異なる) -打継目にひび割れは認められない	イ			-打継目が面として認められる(面を境として色調が明確に異なる) -打継目にひび割れは認められない	イ
			-打継目が面として認められる(面を境として色調が明確に異なる) -打継目にひび割れは認められない				-打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない	
EL_227m			-打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは部分的に大きく開口している	ニ			-打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により全体的に閉塞されていると推測できる	口
			-打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により全体的に閉塞されていると推測できる				-打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により全体的に閉塞されていると推測できる	

表-4.5.5 ボーリング調査で確認された水平打継目の状態(BL. 3_(4-2, 5-1, 6-2))

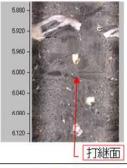
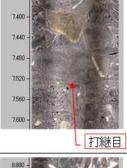
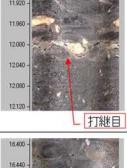
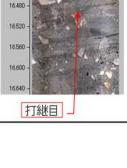
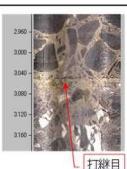
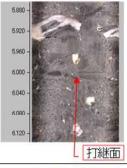
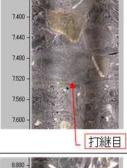
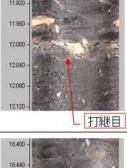
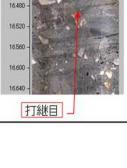
3BL 測点4-2				3BL 測点5-1					
打継目 深度	ボアホールカメラ観察結果		コア観察＆ボアホールカメラ観察結果による打継目の測点回りの状態	打継目 状態分類	打継目 深度	ボアホールカメラ観察結果		コア観察＆ボアホールカメラ観察結果による打継目の測点回りの状態	打継目 状態分類
	孔壁展開画像	打継目付近拡大画像				孔壁展開画像	打継目付近拡大画像		
EL_230m			<ul style="list-style-type: none"> -打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない 	イ	EL_230m			<ul style="list-style-type: none"> -打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない 	イ
			<ul style="list-style-type: none"> -打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない -打継目の上側に粗骨材が集まり、一部に粗骨材に沿う連続的なひび割れが認められる 					<ul style="list-style-type: none"> -打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない 	
EL_227m			<ul style="list-style-type: none"> -打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により全体的に閉塞されていると推測できる 	ロ	EL_227m			<ul style="list-style-type: none"> -打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは部分的に開口している 	ハ
			<ul style="list-style-type: none"> -打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により部分的に閉塞されていると推測できる 					<ul style="list-style-type: none"> -打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により全体的に閉塞されていると推測できる 	

3BL 測点6-2							
打継目 深度	ボアホールカメラ観察結果		コア観察＆ボアホールカメラ観察結果による打継目の測点回りの状態	打継目 状態分類			
	孔壁展開画像	打継目付近拡大画像					
EL_230m			<ul style="list-style-type: none"> -打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない -打継目の上側に粗骨材が集まり、一部に粗骨材に沿う連続的なひび割れが認められる 	イ			
			<ul style="list-style-type: none"> -打継目が厚みを有するゾーンとして認められる(厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) -打継目にひび割れは認められない -打継目の上側に粗骨材が集まり、一部に粗骨材に沿う連続的なひび割れが認められる 				
EL_227m			<ul style="list-style-type: none"> -打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により部分的に閉塞していると推測できる 	ハ			
			<ul style="list-style-type: none"> -打継目に明瞭なひび割れが認められる -ひび割れは介在物により部分的に閉塞していると推測できる 				

表-4.5.6 ポーリング調査で確認された水平打継目の状態(BL. 5_(2-2, 3-1))

5BL 激点2-2		5BL 激点3-1		
打継目 深度	ボアホールカメラ観察結果		コア観察&ボアホールカメラ観察結果による打継目の測定周りの状態	打継目 状態分類
	孔壁展開画像	打継目付近拡大画像		
EL.233m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目に明瞭なひび割れが認められる ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できる（画像では打継目の状態の判定は困難） 	ハ
EL.230.0m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目に明瞭なひび割れが認められる ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる（画像では打継目の状態の判定は困難） 	口
EL.228.5m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目に明瞭なひび割れが認められる ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できる（画像では打継目の状態の判定は困難） 	ハ
EL.227.0m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目が厚みを有するゾーンとして認められる（厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在） 打継目にひび割れは認められない 	イ
EL.224.0m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目に明瞭なひび割れが認められる ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できる 	ハ
EL.219.5m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目が面として認められる（面を境として色調が明確に異なる） 打継目にひび割れは認められない（画像では打継目の状態の判定は困難） 	イ
EL.233m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目が厚みを有するゾーンとして認められる（厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在） 打継目にひび割れは認められない（画像では打継目の状態の判定は困難） 	イ
EL.230.0m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目が面として認められる（面を境として色調が明確に異なる） 打継目にひび割れは認められない 	イ
EL.228.5m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目が厚みを有するゾーンとして認められる（厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在） 打継目にひび割れは認められない 	イ
EL.227.0m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目が面として認められる（面を境として色調が明確に異なる） 打継目にひび割れは認められない（画像では打継目の状態の判定は困難） 	イ
EL.224.0m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目に明瞭なひび割れが認められる ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる 	口
EL.219.5m			<ul style="list-style-type: none"> 打継目が面として認められる（面を境として色調が明確に異なる） 打継目にひび割れは認められない（画像では打継目の状態の判定は困難） 	イ

表-4.5.7 ポーリング調査で確認された水平打継目の状態(BL. 5_(3-4, 4-2))

5BL 測点3-4		5BL 測点4-2	
打継目 深度	ポアホールカメラ観察結果 孔壁展開画像	コア観察＆ポアホールカメラ観察結果による打継目の割点周りの状態	打継目 状態分類
打継目 深度	ポアホールカメラ観察結果 孔壁展開画像	コア観察＆ポアホールカメラ観察結果による打継目の割点周りの状態	打継目 状態分類
EL.233m		 打継目に明瞭なひび割れが認められる ・ひび割れは止水材により全体的に充填されていると推測できる	口
EL.230.0m		 打継目が面として認められる (面を境として色調が明暗に異なる) ・打継目にひび割れは認められない (画像では打継目の状態の判定は困難)	イ
EL.228.5m		 打継目が厚みを有するゾーンとして認められる (厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) ・打継目にひび割れは認められない	イ
EL.227.0m		 打継目が面として認められる (面を境として色調が明暗に異なる) ・打継目にひび割れは認められない (画像では打継目の状態の判定は困難)	イ
EL.224.0m		 打継目に明瞭なひび割れが認められる ・ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できる	ハ
EL.219.5m		 打継目が面として認められる (面を境として色調が明暗に異なる) ・打継目にひび割れは認められない (画像では打継目の状態の判定は困難)	イ
EL.233m		 打継目には明瞭なひび割れが認められる ・ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できるある	ハ
EL.230.0m		 打継目が厚みを有するゾーンとして認められる (厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) ・打継目にひび割れは認められない	イ
EL.228.5m		 打継目が面として認められる (面を境として色調が明暗に異なる) ・打継目にひび割れは認められない (画像では打継目の状態の判定は困難)	イ
EL.227.0m		 打継目が厚みを有するゾーンとして認められる (厚さ数cmで色調が明らかに異なる領域が存在) ・打継目にひび割れは認められない (画像では打継目の状態の判定は困難)	イ
EL.224.0m		 打継目に明瞭なひび割れが認められる ・ひび割れは止水材により部分的に充填されていると推測できる (画像では打継目の状態の判定は困難)	ハ
EL.219.5m		 打継目が認められない ・打継目深度にひび割れは認められない (画像では打継目の状態の判定は困難)	イ

(2) ボーリング調査による打継目状態と衝撃弾性波法調査で計測された波形パターンとの対比実施

ボーリング調査によって打継目状態が確認された表-4.5.1に示した62の対比箇所(点)について、衝撃弾性波法による計測で得られた波形パターン(図-4.5.1)の比率との関係を整理したものを表-4.5.8に示す。また、計測された3種類の波形パターンの一例を図-4.5.2に示す。

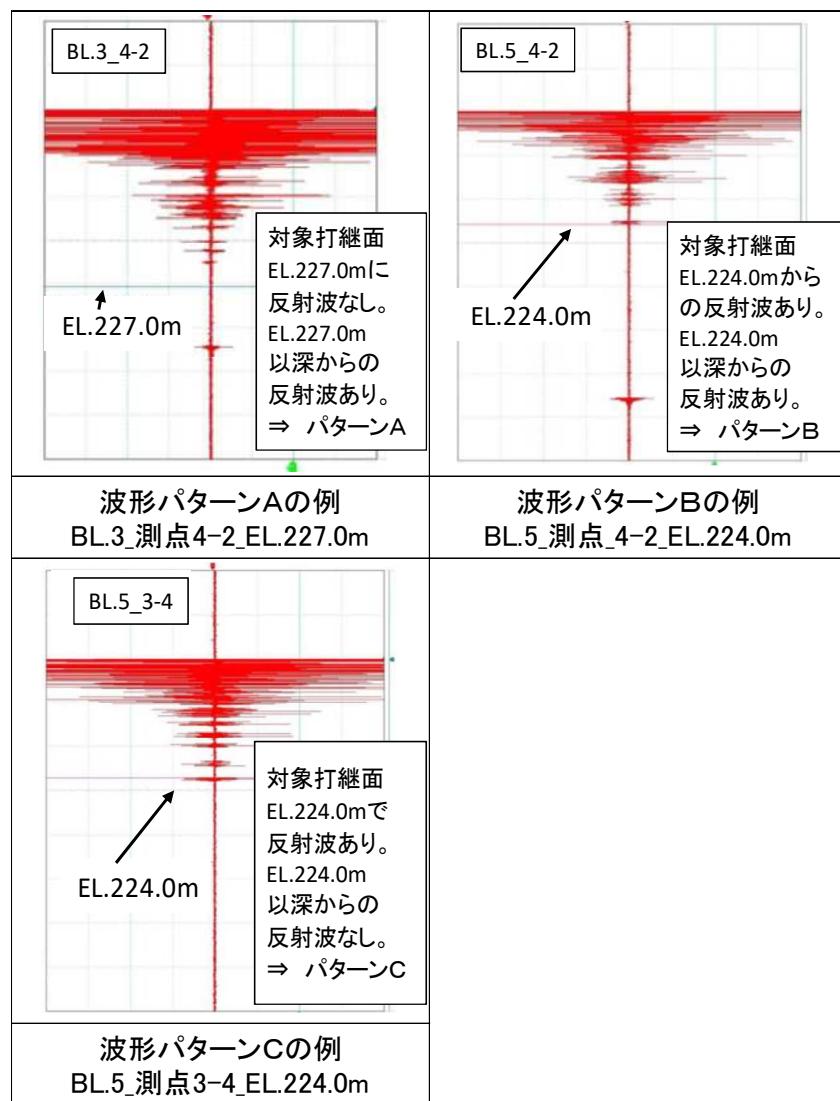


図-4.5.2 衝撃弾性波法による波形計測パターンの1例⁹⁾

表-4.5.8 ボーリング調査から得られた情報と衝撃弾性波法による計測結果との関係⁹⁾

BL.	打継面 標高 (EL.m)	測点	ボーリング 結果からの 状態区分	衝撃弾性波法による計測結果(パターン比率)(%)		
				パターンA	パターンB	パターンC
2	230.0	1-1	口	90.9	9.1	0.0
		1-2	ハ	50.0	50.0	0.0
		2-1	口	90.0	10.0	0.0
		3-1	ハ	60.0	40.0	0.0
		4-1	口	90.0	10.0	0.0
		5-1	口	90.0	10.0	0.0
		6-1	口	0.0	100.0	0.0
		6-2	ハ	50.0	50.0	0.0
		7-1	口	90.0	10.0	0.0
		7-2	口	40.0	60.0	0.0
3	230.0	1-2	イ	0.0	100.0	0.0
		2-1	イ	44.4	55.6	0.0
		3-2	イ	80.0	10.0	10.0
		4-1	イ	84.6	15.4	0.0
		4-2	イ	0.0	100.0	0.0
		5-1	イ	0.0	84.2	15.8
	228.5	6-2	イ	0.0	78.9	21.1
		1-2	イ	100.0	0.0	0.0
		2-1	イ	100.0	0.0	0.0
		3-2	イ	100.0	0.0	0.0
		4-1	イ	33.3	66.7	0.0
		4-2	イ	0.0	66.7	33.3
4	227.0	5-1	イ	0.0	76.9	23.1
		6-2	イ	18.2	45.5	36.4
		1-2	ハ	0.0	28.6	71.4
		2-1	ハ	33.3	50.0	16.7
		3-2	二	0.0	0.0	100.0
		4-1	口	80.0	20.0	0.0
		4-2	口	80.0	20.0	0.0
		5-1	ハ	0.0	44.4	55.6
		6-2	ハ	28.6	0.0	71.4
	222.5	1-2	口	100.0	0.0	0.0
		2-1	ハ	69.2	30.8	0.0
		3-2	口	100.0	0.0	0.0
		4-1	口	100.0	0.0	0.0
		4-2	ハ	46.2	38.5	15.4
		5-1	口	100.0	0.0	0.0
5	233.0	6-2	口	100.0	0.0	0.0
		2-2	ハ	10.0	90.0	0.0
		3-1	イ	0.0	100.0	0.0
		3-4	口	57.1	42.9	0.0
	230.0	4-2	ハ	0.0	100.0	0.0
		2-2	口	40.0	60.0	0.0
		3-1	イ	10.0	90.0	0.0
		3-4	イ	20.0	80.0	0.0
	228.5	4-2	イ	40.0	60.0	0.0
		2-2	ハ	90.0	10.0	0.0
		3-1	イ	20.0	80.0	0.0
		3-4	イ	20.0	80.0	0.0
	227.0	4-2	イ	70.0	30.0	0.0
		2-2	イ	70.0	30.0	0.0
		3-1	イ	60.0	40.0	0.0
		3-4	イ	30.0	70.0	0.0
	224.0	4-2	イ	10.0	90.0	0.0
		2-2	ハ	33.3	66.7	0.0
		3-1	口	100.0	0.0	0.0
		3-4	ハ	0.0	33.3	66.7
	219.5	4-2	ハ	30.0	70.0	0.0
		2-2	イ	100.0	0.0	0.0
		3-1	イ	75.0	25.0	0.0
		3-4	イ	100.0	0.0	0.0
		4-2	イ	90.9	9.1	0.0

(3) 打継目の分離状態のタイプ分類実施

打継目が劣化した状態として打継目分離を想定すると、その健全度は分離が全く無い状態から全体的に分離した状態までにグレード分類できる。分離状態は分離している広さ、あるいは分離距離(開口幅)によってグレード分けが可能であるが、一般的には分離距離(開口幅)が大きいほど、分離している範囲も広くなると想定される。そこで分離状態のタイプ(グレード)として、分離範囲で4段階のタイプを設定することとした。

衝撃弾性波法による調査箇所(点)の周りの打継目の状態イメージを示したものを見表-4.5.9に示す。なお、表-4.5.9においては打継目イメージ図として1辺が1~2mの矩形を示したが、これは本調査で用いた調査システムの既往の調査結果⁴⁾及び本章の4.3の室内試験結果に基づいたものであるが、情報収集範囲の形状としてはおおむね円形であると考えている。

表-4.5.9 想定する測点周りの打継目状態⁸⁾

タイプ区分	測点周りの打継面の状態イメージ	測点周りの打継目の状態推定	ボーリング調査結果による状態評価区分
タイプI		<ul style="list-style-type: none"> 打継目には分離が無い、あるいは分離してたが注入材等で完全に充填されている状態であり、間隙(空隙)は無い状態。 衝撃弾性波法による測定波形は「パターンA」に相当するもの。 	(イ) 及び (ロ)
タイプII		<ul style="list-style-type: none"> 打継目の大半はタイプIと同じ状態ではあるが、一部は分離し間隙(空隙)がある状態。 衝撃弾性波法による測定波形は「パターンB」に相当するもの。 	(イ) 及び (ロ) が過半数 一部は(ハ)及び(ニ)
タイプIII		<ul style="list-style-type: none"> 打継目の一部はタイプIと同じ状態であるが、過半は分離して間隙(空隙)が生じた状態。 衝撃弾性波法による測定波形は「パターンB」に相当するもの。 	一部は (イ) 及び (ロ) (ハ) 及び (ニ) が過半
タイプIV		<ul style="list-style-type: none"> 打継目の大半は分離し、連続的な面状の間隙(空隙)が生じている状態。 衝撃弾性波法による測定波形は「パターンC」に相当するもの。 	(ニ)

(4) 衝撃弾性波法による計測結果からの打継目状態タイプ推定手法の検討

衝撃弾性波法によって計測した当該打継目におけるパターンA, パターンB及びパターンCの比率は、対象とする打継目の状態から決定される。そこで、ボーリング調査によって実際の打継目状態が確認できている表-4.5.2に示した62箇所の打継目測点に対する衝撃弾性波法による計測結果を基に、各パターンの比率から各打継目状態のタイプ(I, II, III, IV)を推定する最適な関係指標を決定することとした。

この最適関係指標の検討は、表-4.5.10に示す閾値を数段階変化させた関係指標を基に推定した打継目状態と、実際の打継目状態とを比較して、整合性が高くなる関係を見出すことで行った。なお、波形パターンには、3種類のパターンが存在するにも関わらず、表-4.5.10においてA及びCの2種類の波形パターンのみの比率から決定しているのは、3種類の合計が100%であることからAとCの2種類のパターン比率を定めればBの比率は自明であること、Aは完全透過のパターンを、Cは完全反射のパターンを示していることから、対象箇所における反射・透過特性を示すものとして、これら2種類のパターン比率が適切であるという考えに基づいたものである。

表-4.5.10 関係指標設定のための検討ケース⁹⁾

(単位:%)

測点に関する状態区分	区分のための判定基準			
	閾値を90%	閾値を80%	閾値を70%	閾値を60%
タイプI	A>90 かつ C=0	A>80 かつ C=0	A>70 かつ C=0	A>60 かつ C=0
タイプII	①0<A≤90 かつC=0 または ②0<C≤10	①0<A≤80 かつC=0 または ②0<C≤20	①0<A≤70 かつC=0 または ②0<C≤30	①0<A≤60 かつC=0 または ②0<C≤40
タイプIII	①10<C<90 または ②C≥90 かつ0<A≤10	①20<C<80 または ②C≥80 かつ0<A≤20	①30<C<70 または ②C≥70 かつ0<A≤30	①40<C<60 または ②C≥60 かつ0<A≤40
タイプIV	A=0 かつC≥90	A=0 かつC≥80	A=0 かつC≥70	A=0 かつC≥60

※A、B、Cは、評価有効な測定波形総数に対するA、B、C各パターンの比率を表す。

閾値を変えた各ケースにおける打継目の推定状態と実際の打継目状態との関係を表-4.5.11に示す。

表-4.5.11 閾値を変化させた各ケースにおける推定結果
とボーリング調査結果との関係⁹⁾

打継目状態		閾値90%		閾値80%		閾値70%		閾値60%	
推定結果 (衝撃 弾性波法)	実際 (ボーリング 調査結果)	(箇所)	(%)	(箇所)	(%)	(箇所)	(%)	(箇所)	(%)
タイプI	イ	6	100.0	7	94.7	8	95.5	10	92.0
	ロ	7		11		13		13	
	ハ	0	0.0	1	5.3	1	4.5	2	8.0
	ニ	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
タイプII	イ	18	75.6	18	70.5	19	69.7	19	71.9
	ロ	10		6		4		4	
	ハ	9	24.3	10	29.4	10	30.3	9	28.1
	ニ	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
タイプIII	イ	5	45.5	4	50.0	2	40.0	0	0.0
	ロ	0		0		0		0	
	ハ	6	54.5	4	50.0	3	60.0	2	100.0
	ニ	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
タイプIV	イ	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	ロ	0		0		0		0	
	ハ	0	0.0	0	0.0	1	50.0	2	66.7
	ニ	1	100.0	1	100.0	1	50.0	1	33.3

表-4.5.9 に示すように、打継目が密着し、分離が存在しない状態であるタイプIと衝撃弾性波法によって推定された打継目が、実際に密着した打継目((イ)あるいは(ロ))である率(適合率)はいずれの閾値においても90%以上を示し、概ね良好な関係を示していることが判る。一般的に品質に優劣があるものに対して分類を行う際に、閾値を高く、品質が高くなる側に設定した場合、良い品質に分類されるものは減少し、品質に劣るものに分類されるものが増加する傾向を示すが、これと同様の傾向が表-4.5.11においても確認される。また、完全に分離した状態であるタイプIVの推定に関しては、ボーリング調査において(ニ)と判定された箇所が1箇所のみであり、その確度について検証するにはデータ数が少ないが、実際に分離している(ニ)の状態を十分検出できていると考えることができる。

この検討結果に基づき、以下の理由から衝撃弾性波法で計測されたパターン比率から打継目状態を推定する際の閾値は 80%とし、関係指標を表-4.5.12 に定める。

- ① 閾値を 90%とすれば、タイプ I と状態推定された箇所における適合率は 100%となる。しかし、タイプ I と推定された箇所は、全 62 箇所のうち 13 箇所のみであり、ボーリング調査の結果から確認された健全な打継目状態の確認数である 46 箇所((イ)+(ロ))に対して、かなり安全側の厳しい評価になっていると考えられたこと。
- ② 閾値が 80%のケースにおけるタイプ I の適合率は約 95%であり、閾値 90%のケースに比較して、工学的には決して小さくないと考えられること。
- ③ 閾値を 70%, あるいは 60%としたケースにおいて、本来はタイプ II あるいはタイプ III とすべき、ボーリング結果における打継目の状態(ハ)をタイプ IV と評価しており、そのため適合率が 50%を下回っていること。

表-4.5.12 衝撃弾性波法の計測結果からの打継目状態推定の関係指標⁸⁾

打継目状態区分	計測された波形パターンの比率
タイプ I	$A > 80\%$ かつ $C = 0\%$
タイプ II	① $0 < A \leq 80\%$ かつ $C = 0\%$ または ② $0 < C \leq 20\%$
タイプ III	① $20 < C < 80\%$ または ② $C \geq 80\%$ かつ $0 < A \leq 20\%$
タイプ IV	$A = 0\%$ かつ $C \geq 80\%$

※A、B、Cは、A、B、C各パターンの比率を表す。

4. 6 衝撃弾性波法による計測結果からの水平打継目状態の推定

衝撃弾性波法による計測の結果（計測結果）と表-4.5.12に示した打継目状態推定の関係指標を用いることで、対象打継目のグリッド各点の状態推定が可能となる。これを基に、モデルダムであるAダムにおいて、下流面で漏水が確認されるなど、打継目の変状が懸念される合計35箇所の水平打継目（図-4.6.1）の状態について、次のように推定した。

- (1) 各打継目の各測点における衝撃弾性波法での計測結果である波形パターンの比率（弾性波の透過・反射特性）を表-4.5.12に示した打継目状態推定指標に当てはめ、各点の状態の推定を実施する。35の水平打継目の各点の計測結果と状態推定結果を表-4.6.1～表-4.6.11に示す。
- (2) この状態推定を打継目の全ての測点に対して実施することで打継目上のグリッド交点の情報が得られる。今回使用した衝撃弾性波法システムについては、前述のとおり、測点を中心に1～2mの範囲内の情報が得られると考えられる。そこで、隣接するグリッド交点における状態推定結果を考慮しながら、水平打継目の状態を面的に推定した。推定した水平打継目の状態を表-4.6.12～表-4.6.19に示す。

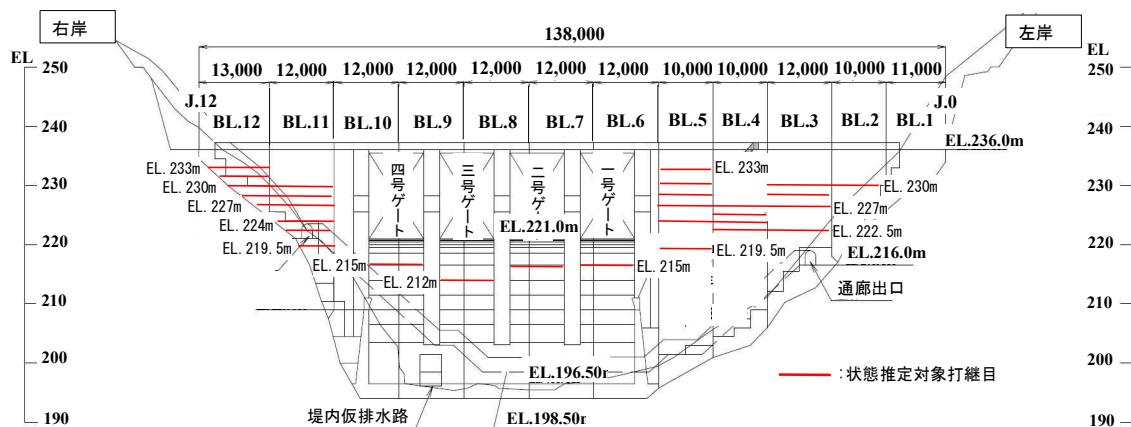


図-4.6.1 状態推定対象とした水平打継目 35 箇所

表-4.6.1 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 2_230m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計		
BL2	230.0	1 - 1	波形数	10	1	0	11	I
			%	90.9	9.1	0	100	
		1 - 2	波形数	5	5	0	10	II
			%	50	50	0	100	
		2 - 1	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		3 - 1	波形数	6	4	0	10	II
			%	60	40	0	100	
		4 - 1	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		5 - 1	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		6 - 1	波形数	0	11	0	11	II
			%	0	100	0	100	
		6 - 2	波形数	5	5	0	10	II
			%	50	50	0	100	
		7 - 1	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		7 - 2	波形数	4	6	0	10	II
			%	40	60	0	100	

表-4.6.2(1) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 3_230m, 228.5m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL3	230.0	1 - 1	波形数	6	4	0	10	BL3	228.5	1 - 1	波形数	0	10	0	10	II
			%	60	40	0	100				%	0	100	0	100	
		1 - 2	波形数	0	8	0	8				波形数	0	10	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		1 - 3	波形数	4	5	0	9				波形数	4	6	0	10	II
			%	44.4	55.6	0	100				%	40	60	0	100	
		1 - 4	波形数	6	2	0	8				波形数	6	7	0	13	II
			%	75	25	0	100				%	46.2	53.8	0	100	
		2 - 1	波形数	0	8	0	8				波形数	0	10	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		2 - 2	波形数	0	8	0	8				波形数	0	10	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		2 - 3	波形数	0	8	0	8				波形数	7	3	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	70	30	0	100	
		2 - 4	波形数	8	0	0	8				波形数	0	10	0	10	II
			%	100	0	0	100				%	0	100	0	100	
		3 - 1	波形数	8	0	0	8				波形数	10	0	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 2	波形数	9	0	0	9				波形数	0	10	0	10	II
			%	100	0	0	100				%	0	100	0	100	
		3 - 3	波形数	0	9	0	9				波形数	5	4	0	9	II
			%	0	100	0	100				%	55.6	44.4	0	100	
		3 - 4	波形数	8	0	0	8				波形数	5	3	0	8	II
			%	100	0	0	100				%	62.5	37.5	0	100	
		4 - 1	波形数	8	0	0	8				波形数	7	3	0	10	II
			%	100	0	0	100				%	70	30	0	100	
		4 - 2	波形数	8	0	0	8				波形数	10	0	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		4 - 3	波形数	9	0	0	9				波形数	8	2	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	80	20	0	100	
		4 - 4	波形数	4	5	0	9				波形数	9	0	0	9	I
			%	44.4	55.6	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 1	波形数	0	8	0	8				波形数	0	10	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		5 - 2	波形数	7	2	0	9				波形数	10	0	0	10	I
			%	77.8	22.2	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 3	波形数	0	3	5	8				波形数	0	9	0	9	II
			%	0	37.5	62.5	100				%	0	100	0	100	
		5 - 4	波形数	8	0	0	8				波形数	0	9	0	9	II
			%	100	0	0	100				%	0	100	0	100	
		6 - 1	波形数	4	5	0	9				波形数	6	4	0	10	II
			%	44.4	55.6	0	100				%	60	40	0	100	
		6 - 2	波形数	0	8	0	8				波形数	0	10	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		6 - 3	波形数	0	6	2	8				波形数	1	8	0	9	II
			%	0	75	25	100				%	11.1	88.9	0	100	
		6 - 4	波形数	4	4	0	8				波形数	4	4	0	8	II
			%	50	50	0	100				%	50	50	0	100	

表-4.6.2(2) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 3_227m, 222.5m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL3	227.0	1 - 1	波形数	7	3	0	10	BL3	222.5	1 - 1	波形数	1	9	6	16	III
			%	70	30	0	100				%	6.3	56.3	37.5	100.1	
		1 - 2	波形数	0	6	4	10				波形数	4	7	1	12	
			%	0	60	40	100				%	33.3	58.3	8.3	99.9	
		1 - 3	波形数	6	1	0	7				波形数	16	0	0	16	
			%	85.7	14.3	0	100				%	100	0	0	100	
		1 - 4	波形数	8	0	0	8				波形数	9	3	0	12	
			%	100	0	0	100				%	75	25	0	100	
		2 - 1	波形数	7	2	3	12				波形数	9	4	0	13	
			%	58.3	16.7	25	100				%	69.2	30.8	0	100	
		2 - 2	波形数	9	2	0	11				波形数	12	1	0	13	
			%	81.8	18.2	0	100				%	92.3	7.7	0	100	
		2 - 3	波形数	9	0	0	9				波形数	10	8	0	18	
			%	100	0	0	100				%	55.6	44.4	0	100	
		2 - 4	波形数	6	3	0	9				波形数	2	11	2	15	III
			%	66.7	33.3	0	100				%	13.3	73.3	13.3	99.9	
		3 - 1	波形数	6	0	0	6				波形数	5	4	5	14	
			%	100	0	0	100				%	35.7	28.6	35.7	100	
		3 - 2	波形数	4	3	0	7				波形数	15	0	0	15	I
			%	57.1	42.9	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 3	波形数	1	8	0	9				波形数	13	1	0	14	
			%	11.1	88.9	0	100				%	92.9	7.1	0	100	
		3 - 4	波形数	8	0	0	8				波形数	13	1	0	14	I
			%	100	0	0	100				%	92.9	7.1	0	100	
		4 - 1	波形数	8	2	0	10				波形数	13	0	0	13	
			%	80	20	0	100				%	100	0	0	100	
		4 - 2	波形数	1	7	6	14				波形数	6	5	2	13	II
			%	7.1	50	42.9	100				%	46.2	38.5	15.4	100.1	
		4 - 3	波形数	6	1	0	7				波形数	4	10	1	15	
			%	85.7	14.3	0	100				%	26.7	66.7	6.7	100.1	
		4 - 4	波形数	0	9	0	9				波形数	10	5	0	15	II
			%	0	100	0	100				%	66.7	33.3	0	100	
		5 - 1	波形数	2	6	0	8				波形数	13	0	0	13	
			%	25	75	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 2	波形数	8	2	0	10				波形数	13	1	0	14	I
			%	80	20	0	100				%	92.9	7.1	0	100	
		5 - 3	波形数	9	0	0	9				波形数	15	1	0	16	
			%	100	0	0	100				%	93.8	6.3	0	100.1	
		5 - 4	波形数	2	2	5	9				波形数	2	12	2	16	II
			%	22.2	22.2	55.6	100				%	12.5	75	12.5	100	
		6 - 1	波形数	2	4	2	8				波形数	14	0	0	14	
			%	25	50	25	100				%	100	0	0	100	
		6 - 2	波形数	5	8	0	13				波形数	13	0	0	13	I
			%	38.5	61.5	0	100				%	100	0	0	100	
		6 - 3	波形数	2	4	3	9				波形数	2	8	7	17	III
			%	22.2	44.4	33.3	99.9				%	11.8	47.1	41.2	100.1	
		6 - 4	波形数	5	1	0	6				波形数	0	13	0	13	
			%	83.3	16.7	0	100				%	0	100	0	100	

表-4.6.2(3) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 3_219.5m, 218m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL3	219.5	1 - 1	波形数	10	0	0	10	BL3	218.0	1 - 1	波形数	8	2	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	80	20	0	100	
		1 - 2	波形数	10	0	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	90	10	0	100	
		1 - 3	波形数	13	2	0	15				波形数	14	1	0	15	I
			%	86.7	13.3	0	100				%	93.3	6.7	0	100	
		1 - 4	波形数	11	2	0	13				波形数	12	1	0	13	I
			%	84.6	15.4	0	100				%	92.3	7.7	0	100	
		2 - 1	波形数	11	2	0	13				波形数	13	0	0	13	I
			%	84.6	15.4	0	100				%	100	0	0	100	
		2 - 2	波形数	13	0	0	13				波形数	12	1	0	13	I
			%	100	0	0	100				%	92.3	7.7	0	100	
		2 - 3	波形数	12	3	0	15				波形数	14	1	0	15	I
			%	80	20	0	100				%	93.3	6.7	0	100	
		2 - 4	波形数	12	0	0	12				波形数	12	0	0	12	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 1	波形数	9	0	0	9				波形数	8	1	0	9	I
			%	100	0	0	100				%	88.9	11.1	0	100	
		3 - 2	波形数	13	0	0	13				波形数	13	0	0	13	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 3	波形数	13	1	0	14				波形数	11	3	0	14	II
			%	92.9	7.1	0	100				%	78.6	21.4	0	100	
		3 - 4	波形数	11	2	0	13				波形数	13	0	0	13	I
			%	84.6	15.4	0	100				%	100	0	0	100	
		4 - 1	波形数	12	1	0	13				波形数	12	1	0	13	I
			%	92.3	7.7	0	100				%	92.3	7.7	0	100	
		4 - 2	波形数	10	1	0	11				波形数	11	0	0	11	I
			%	90.9	9.1	0	100				%	100	0	0	100	
		4 - 3	波形数	5	3	0	8				波形数	8	0	0	8	I
			%	62.5	37.5	0	100				%	100	0	0	100	
		4 - 4	波形数	6	1	0	7				波形数	7	0	0	7	I
			%	85.7	14.3	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 1	波形数	12	1	0	13				波形数	12	1	0	13	I
			%	92.3	7.7	0	100				%	92.3	7.7	0	100	
		5 - 2	波形数	14	0	0	14				波形数	15	0	0	15	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 3	波形数	13	0	0	13				波形数	13	0	0	13	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 4	波形数	6	0	0	6				波形数	6	0	0	6	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		6 - 1	波形数	8	2	0	10				波形数	11	0	0	11	I
			%	80	20	0	100				%	100	0	0	100	
		6 - 2	波形数	10	0	0	10				波形数	11	1	0	12	I
			%	100	0	0	100				%	91.7	8.3	0	100	
		6 - 3	波形数	7	0	0	7				波形数	5	2	0	7	II
			%	100	0	0	100				%	71.4	28.6	0	100	
		6 - 4	波形数	7	0	0	7				波形数	6	1	0	7	I
			%	100	0	0	100				%	85.7	14.3	0	100	

表-4.6.2(4) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 3_216.5m)

BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	
			A	B	C	合計		
BL3	216.5	1 - 1	波形数	5	2	3	10	I
			%	50	20	30	100	
		1 - 2	波形数	6	1	0	7	I
			%	85.7	14.3	0	100	
		1 - 3	波形数	10	0	5	15	I
			%	66.7	0	33.3	100	
		1 - 4	波形数	6	0	3	9	I
			%	66.7	0	33.3	100	
BL3	216.5	2 - 1	波形数	12	0	0	12	I
			%	100	0	0	100	
		2 - 2	波形数	9	0	3	12	I
			%	75	0	25	100	
		2 - 3	波形数	9	1	2	12	I
			%	75	8.3	16.7	100	
		2 - 4	波形数	11	0	0	11	I
			%	100	0	0	100	
BL3	216.5	3 - 1	波形数	6	1	0	7	I
			%	85.7	14.3	0	100	
		3 - 2	波形数	8	3	2	13	I
			%	61.5	23.1	15.4	100	
		3 - 3	波形数	9	1	1	11	I
			%	81.8	9.1	9.1	100	
		3 - 4	波形数	10	0	3	13	I
			%	76.9	0	23.1	100	
BL3	216.5	4 - 1	波形数	11	0	0	11	I
			%	100	0	0	100	
		4 - 2	波形数	9	0	1	10	I
			%	90	0	10	100	
		4 - 3	波形数	7	0	1	8	II
			%	87.5	0	12.5	100	
		4 - 4	波形数	7	0	0	7	I
			%	100	0	0	100	
BL3	216.5	5 - 1	波形数	10	1	0	11	I
			%	90.9	9.1	0	100	
		5 - 2	波形数	12	0	1	13	I
			%	92.3	0	7.7	100	
		5 - 3	波形数	12	0	0	12	I
			%	100	0	0	100	
		5 - 4	波形数	6	0	0	6	I
			%	100	0	0	100	
BL3	216.5	6 - 1	波形数	9	2	0	11	I
			%	81.8	18.2	0	100	
		6 - 2	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100	
		6 - 3	波形数	6	0	0	6	I
			%	100	0	0	100	
		6 - 4	波形数	7	0	0	7	I
			%	100	0	0	100	

表-4.6.3(1) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 4_217m, 225.5m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL4	227.0	1 - 1	波形数	9	1	0	10	BL4	225.5	1 - 1	波形数	10	2	0	12	I
			%	90	10	0	100				%	83.3	16.7	0	100	
		1 - 2	波形数	3	7	0	10				波形数	8	7	1	16	II
			%	30	70	0	100				%	50	43.8	6.3	100.1	
		1 - 3	波形数	7	3	0	10				波形数	10	4	0	14	II
			%	70	30	0	100				%	71.4	28.6	0	100	
		1 - 4	波形数	0	10	0	10				波形数	5	9	0	14	II
			%	0	100	0	100				%	35.7	64.3	0	100	
		2 - 1	波形数	8	2	0	10				波形数	10	2	0	12	I
			%	80	20	0	100				%	83.3	16.7	0	100	
		2 - 2	波形数	1	9	0	10				波形数	6	5	1	12	II
			%	10	90	0	100				%	50	41.7	8.3	100	
		2 - 3	波形数	1	9	0	10				波形数	6	7	0	13	II
			%	10	90	0	100				%	46.2	53.8	0	100	
		2 - 4	波形数	3	7	0	10				波形数	0	10	0	10	II
			%	30	70	0	100				%	0	100	0	100	
		3 - 1	波形数	8	2	0	10				波形数	9	4	0	13	II
			%	80	20	0	100				%	69.2	30.8	0	100	
		3 - 2	波形数	1	9	0	10				波形数	4	9	0	13	II
			%	10	90	0	100				%	30.8	69.2	0	100	
		3 - 3	波形数	3	7	0	10				波形数	3	8	0	11	II
			%	30	70	0	100				%	27.3	72.7	0	100	
		3 - 4	波形数	0	10	0	10				波形数	3	9		12	II
			%	0	100	0	100				%	25	75	0	100	
		4 - 1	波形数	0	10	0	10				波形数	8	5	0	13	II
			%	0	100	0	100				%	61.5	38.5	0	100	
		4 - 2	波形数	1	9	0	10				波形数	8	5	0	13	II
			%	10	90	0	100				%	61.5	38.5	0	100	
		4 - 3	波形数	4	6	0	10				波形数	10	3	0	13	II
			%	40	60	0	100				%	76.9	23.1	0	100	
		4 - 4	波形数	2	8	0	10				波形数	0	10	0	10	II
			%	20	80	0	100				%	0	100	0	100	
		5 - 1	波形数	6	4	0	10				波形数	8	4	0	12	II
			%	60	40	0	100				%	66.7	33.3	0	100	
		5 - 2	波形数	8	2	0	10				波形数	9	4	0	13	II
			%	80	20	0	100				%	69.2	30.8	0	100	
		5 - 3	波形数	0	10	0	10				波形数	3	10	0	13	II
			%	0	100	0	100				%	23.1	76.9	0	100	
		5 - 4	波形数	1	9	0	10				波形数	0	10	0	10	II
			%	10	90	0	100				%	0	100	0	100	

表-4.6.3(2) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 4_224m, 222.5m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL4	224.0	1 - 1	波形数	7	3	0	10	BL4	222.5	1 - 1	波形数	8	2	0	10	I
			%	70	30	0	100				%	80	20	0	100	
		1 - 2	波形数	7	3	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	70	30	0	100				%	90	10	0	100	
		1 - 3	波形数	9	1	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100				%	90	10	0	100	
		1 - 4	波形数	4	6	0	10				波形数	8	2	0	10	I
			%	40	60	0	100				%	80	20	0	100	
		2 - 1	波形数	9	1	0	10				波形数	10	0	0	10	I
			%	90	10	0	100				%	100	0	0	100	
		2 - 2	波形数	7	3	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	70	30	0	100				%	90	10	0	100	
		2 - 3	波形数	3	7	0	10				波形数	8	2	0	10	I
			%	30	70	0	100				%	80	20	0	100	
		2 - 4	波形数	4	6	0	10				波形数	6	4	0	10	II
			%	40	60	0	100				%	60	40	0	100	
		3 - 1	波形数	10	0	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	90	10	0	100	
		3 - 2	波形数	10	0	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	90	10	0	100	
		3 - 3	波形数	8	2	0	10				波形数	7	3	0	10	II
			%	80	20	0	100				%	70	30	0	100	
		3 - 4	波形数	2	8	0	10				波形数	4	3	3	10	III
			%	20	80	0	100				%	40	30	30	100	
		4 - 1	波形数	0	10	0	10				波形数	8	2	0	10	I
			%	0	100	0	100				%	80	20	0	100	
		4 - 2	波形数	10	0	0	10				波形数	8	2	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	80	20	0	100	
		4 - 3	波形数	6	4	0	10				波形数	8	2	0	10	I
			%	60	40	0	100				%	80	20	0	100	
		4 - 4	波形数	3	7	0	10				波形数	4	2	1	7	II
			%	30	70	0	100				%	57.1	28.6	14.3	100	
		5 - 1	波形数	9	1	0	10				波形数	7	3	0	10	II
			%	90	10	0	100				%	70	30	0	100	
		5 - 2	波形数	5	5	0	10				波形数	10	0	0	10	I
			%	50	50	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 3	波形数	5	5	0	10				波形数	5	2	3	10	III
			%	50	50	0	100				%	50	20	30	100	
		5 - 4	波形数	9	1	0	10				波形数	9	0	0	9	I
			%	90	10	0	100				%	100	0	0	100	

表-4.6.4(1) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 5_233m, 230m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL5	233.0	1 - 1	波形数	0	7	4	11	BL5	230.0	1 - 1	波形数	7	3	0	10	II
			%	0	63.6	36.4	100				%	70	30	0	100	
		1 - 2	波形数	0	8	0	8				波形数	0	5	0	5	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		1 - 3	波形数	3	8	0	11				波形数	0	10	0	10	II
			%	27.3	72.7	0	100				%	0	100	0	100	
		1 - 4	波形数	3	6	0	9				波形数	0	8	0	8	II
			%	33.3	66.7	0	100				%	0	100	0	100	
		2 - 1	波形数	7	6	0	13				波形数	3	7	0	10	II
			%	53.8	46.2	0	100				%	30	70	0	100	
		2 - 2	波形数	1	9	0	10				波形数	4	6	0	10	II
			%	10	90	0	100				%	40	60	0	100	
		2 - 3	波形数	1	7	0	8				波形数	2	8	0	10	II
			%	12.5	87.5	0	100				%	20	80	0	100	
		2 - 4	波形数	0	8	0	8				波形数	2	8	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	20	80	0	100	
		3 - 1	波形数	0	11	0	11				波形数	1	9	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	10	90	0	100	
		3 - 2	波形数	0	10	0	10				波形数	0	8	0	8	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		3 - 3	波形数	0	10	0	10				波形数	0	10	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		3 - 4	波形数	4	3	0	7				波形数	2	8	0	10	II
			%	57.1	42.9	0	100				%	20	80	0	100	
		4 - 1	波形数	4	7	0	11				波形数	2	8	0	10	II
			%	36.4	63.6	0	100				%	20	80	0	100	
		4 - 2	波形数	0	8	0	8				波形数	4	6	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	40	60	0	100	
		4 - 3	波形数	0	8	0	8				波形数	7	3	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	70	30	0	100	
		4 - 4	波形数	0	10	0	10				波形数	5	5	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	50	50	0	100	
		5 - 1	波形数	0	9	0	9				波形数	2	8	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	20	80	0	100	
		5 - 2	波形数	0	10	0	10				波形数	5	5	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	50	50	0	100	
		5 - 3	波形数	0	7	0	7				波形数	0	10	0	10	II
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100	
		5 - 4	波形数	0	7	0	7				波形数	1	8	0	9	II
			%	0	100	0	100				%	11.1	88.9	0	100	

表-4.6.4(2) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 5_228.5m, 227m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL5	228.5	1 - 1	波形数	9	1	0	10	BL5	227.0	1 - 1	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100				%	90	10	0	100	
		1 - 2	波形数	1	0	0	1				波形数	1	0	0	1	-
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		1 - 3	波形数	8	2	0	10				波形数	2	8	0	10	II
			%	80	20	0	100				%	20	80	0	100	
		1 - 4	波形数	3	7	0	10				波形数	10	0	0	10	I
			%	30	70	0	100				%	100	0	0	100	
		2 - 1	波形数	7	3	0	10				波形数	6	4	0	10	II
			%	70	30	0	100				%	60	40	0	100	
		2 - 2	波形数	9	1	0	10				波形数	7	3	0	10	II
			%	90	10	0	100				%	70	30	0	100	
		2 - 3	波形数	2	8	0	10				波形数	2	8	0	10	II
			%	20	80	0	100				%	20	80	0	100	
		2 - 4	波形数	3	7	0	10				波形数	8	0	0	8	I
			%	30	70	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 1	波形数	2	8	0	10				波形数	6	4	0	10	II
			%	20	80	0	100				%	60	40	0	100	
		3 - 2	波形数	4	6	0	10				波形数	8	2	0	10	I
			%	40	60	0	100				%	80	20	0	100	
		3 - 3	波形数	7	3	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	70	30	0	100				%	90	10	0	100	
		3 - 4	波形数	2	8	0	10				波形数	3	7	0	10	II
			%	20	80	0	100				%	30	70	0	100	
		4 - 1	波形数	4	5	0	9				波形数	9	1	0	10	I
			%	44.4	55.6	0	100				%	90	10	0	100	
		4 - 2	波形数	7	3	0	10				波形数	1	9	0	10	II
			%	70	30	0	100				%	10	90	0	100	
		4 - 3	波形数	6	4	0	10				波形数	2	8	0	10	II
			%	60	40	0	100				%	20	80	0	100	
		4 - 4	波形数	4	6	0	10				波形数	3	4	0	7	II
			%	40	60	0	100				%	42.9	57.1	0	100	
		5 - 1	波形数	5	5	0	10				波形数	6	2	0	8	II
			%	50	50	0	100				%	75	25	0	100	
		5 - 2	波形数	7	3	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	70	30	0	100				%	90	10	0	100	
		5 - 3	波形数	1	9		10				波形数	10	0	0	10	I
			%	10	90	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 4	波形数	3	4	0	7				波形数	2	8	0	10	II
			%	42.9	57.1	0	100				%	20	80	0	100	

表-4.6.4(3) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 5_224m, 219.5m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL5	224.0	1 - 1	波形数	11	2	0	13	BL5	219.5	1 - 1	波形数	7	3	0	10	II
			%	84.6	15.4	0	100				%	70	30	0	100	
		1 - 2	波形数	5	3	0	8				波形数	-	-	-	0	-
			%	62.5	37.5	0	100				%				0	
		1 - 3	波形数	-	-	-	0				波形数	-	-	-	0	-
			%				0				%				0	
		1 - 4	波形数	7	0	0	7				波形数	4	0	0	4	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		2 - 1	波形数	8	2	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	80	20	0	100				%	90	10	0	100	
		2 - 2	波形数	3	6	0	9				波形数	6	0	0	6	I
			%	33.3	66.7	0	100				%	100	0	0	100	
		2 - 3	波形数	8	2	0	10				波形数	8	1	0	9	I
			%	80	20	0	100				%	88.9	11.1	0	100	
		2 - 4	波形数	5	0	0	5				波形数	5	0	0	5	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 1	波形数	10	0	0	10				波形数	9	3	0	12	II
			%	100	0	0	100				%	75	25	0	100	
		3 - 2	波形数	8	2	0	10				波形数	7	0	0	7	I
			%	80	20	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 3	波形数	6	3	0	9				波形数	8	0	0	8	I
			%	66.7	33.3	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 4	波形数	0	3	6	9				波形数	8	0	0	8	I
			%	0	33.3	66.7	100				%	100	0	0	100	
		4 - 1	波形数	5	4	0	9				波形数	5	1	0	6	I
			%	55.6	44.4	0	100				%	83.3	16.7	0	100	
		4 - 2	波形数	3	7	0	10				波形数	10	1	0	11	I
			%	30	70	0	100				%	90.9	9.1	0	100	
		4 - 3	波形数	0	4	2	6				波形数	4	0	0	4	I
			%	0	66.7	33.3	100				%	100	0	0	100	
		4 - 4	波形数	0	11	0	11				波形数	8	1	0	9	I
			%	0	100	0	100				%	88.9	11.1	0	100	
		5 - 1	波形数	8	3	0	11				波形数	10	0	0	10	I
			%	72.7	27.3	0	100				%	100	0	0	100	
		5 - 2	波形数	7	3	0	10				波形数	9	1	0	10	I
			%	70	30	0	100				%	90	10	0	100	
		5 - 3	波形数	6	2	0	8				波形数	6	1	0	7	I
			%	75	25	0	100				%	85.7	14.3	0	100	
		5 - 4	波形数	3	4	0	7				波形数	4	1	0	5	I
			%	42.9	57.1	0	100				%	80	20	0	100	

表-4.6.5 水平打継目各測点の
計測結果と状態評価(BL. 6_215m)

BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	
			A	B	C	合計		
BL6	215.0	1 - 1	波形数	0	4	2	6	III
		1 - 1	%	0	66.7	33.3	100	
		1 - 2	波形数	9	1	0	10	I
		1 - 2	%	90	10	0	100	
		2 - 1	波形数	4	10	0	14	II
		2 - 1	%	28.6	71.4	0	100	
		2 - 2	波形数	10	5	0	15	II
		2 - 2	%	66.7	33.3	0	100	
		3 - 1	波形数	0	9	4	13	III
		3 - 1	%	0	69.2	30.8	100	
		3 - 2	波形数	9	3	0	12	II
		3 - 2	%	75	25	0	100	
		4 - 1	波形数	9	1	0	10	I
		4 - 1	%	90	10	0	100	
		4 - 2	波形数	10	0	0	10	I
		4 - 2	%	100	0	0	100	

表-4.6.6 水平打継目各測点の
計測結果と状態評価(BL. 7_215m)

BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	
			A	B	C	合計		
BL7	215.0	5 - 1	波形数	0	11	3	14	III
		5 - 1	%	0	78.6	21.4	100	
		5 - 2	波形数	10	0	0	10	I
		5 - 2	%	100	0	0	100	
		1 - 1	波形数	0	10	0	10	II
		1 - 1	%	0	100	0	100	
		1 - 2	波形数	3	9	0	12	II
		1 - 2	%	25	75	0	100	
		2 - 1	波形数	2	8	0	10	II
		2 - 1	%	20	80	0	100	
		2 - 2	波形数	9	1	0	10	I
		2 - 2	%	90	10	0	100	
		3 - 1	波形数	0	6	4	10	III
		3 - 1	%	0	60	40	100	
		3 - 2	波形数	3	5	0	8	II
		3 - 2	%	37.5	62.5	0	100	

表-4.6.7 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 8_215m, 212m)

BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	
			A	B	C	合計		
BL8	215.0	4 - 1	波形数	9	1	0	10	I
		4 - 1	%	90	10	0	100	
		4 - 2	波形数	0	9	2	11	III
		4 - 2	%	0	81.8	18.2	100	
		5 - 1	波形数	0	10	0	10	II
		5 - 1	%	0	100	0	100	
		5 - 2	波形数	0	10	0	10	II
		5 - 2	%	0	100	0	100	

BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	
			A	B	C	合計		
BL8	212.0	1 - 1	波形数	0	1	9	10	IV
		1 - 1	%	0	10	90	100	
		1 - 2	波形数	0	2	6	8	III
		1 - 2	%	0	25	75	100	
		2 - 1	波形数	0	10	3	13	III
		2 - 1	%	0	76.9	23.1	100	
		2 - 2	波形数	0	5	2	7	III
		2 - 2	%	0	71.4	28.6	100	
		3 - 1	波形数	0	5	11	16	III
		3 - 1	%	0	31.3	68.8	100.1	
		3 - 2	波形数	0	2	12	14	IV
		3 - 2	%	0	14.3	85.7	100	

表-4.6.8 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 9_215m, 212m)

BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	
			A	B	C	合計		
BL9	215.0	1 - 1	波形数	9	1	0	10	I
		1 - 1	%	90	10	0	100	
		1 - 2	波形数	8	0	0	8	I
		1 - 2	%	100	0	0	100	
		2 - 1	波形数	0	10	0	10	II
		2 - 1	%	0	100	0	100	
		2 - 2	波形数	10	0	0	10	I
		2 - 2	%	100	0	0	100	

BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	
			A	B	C	合計		
BL9	212.0	4 - 1	波形数	7	3	0	10	II
		4 - 1	%	70	30	0	100	
		4 - 2	波形数	9	1	0	10	I
		4 - 2	%	90	10	0	100	
		5 - 1	波形数	0	1	5	6	IV
		5 - 1	%	0	16.7	83.3	100	
		5 - 2	波形数	10	0	0	10	I
		5 - 2	%	100	0	0	100	

表-4.6.9 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 10_215m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計		
BL10	215.0	3 - 1	波形数	0	1	9	10	IV
			%	0	10	90	100	
		3 - 2	波形数	5	0	6	11	III
			%	45.5	0	54.5	100	
		4 - 1	波形数	0	10	0	10	II
			%	0	100	0	100	
		4 - 2	波形数	8	1	0	9	I
			%	88.9	11.1	0	100	
		5 - 1	波形数	7	0	0	7	I
			%	100	0	0	100	
		5 - 2	波形数	10	0	0	10	I
			%	100	0	0	100	

表-4.6.10(1) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 11_230m, 228.5m)

BL	打継目 標高 (EL.)	測点		波形パターン分類				状態 評価	BL	打継目 標高 (EL.)	測点		波形パターン分類				状態 評価
				A	B	C	合計						A	B	C	合計	
BL11	230.0	1 - 1	波形数	4	6	0	10	BL11	228.5	1 - 1	波形数	0	10	0	10	II	
			%	40	60	0	100				%	0	100	0	100		
		1 - 2	波形数	1	9	0	10				波形数	5	5	0	10	II	
			%	10	90	0	100				%	50	50	0	100		
		1 - 3	波形数	0	10	0	10				波形数	0	10	0	10	II	
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100		
		1 - 4	波形数	1	9		10				波形数	0	10	0	10	II	
			%	10	90	0	100				%	0	100	0	100		
		2 - 1	波形数	0	8	0	8				波形数	0	9	0	9	II	
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100		
		2 - 2	波形数	0	9	0	9				波形数	3	6	0	9	II	
			%	0	100	0	100				%	33.3	66.7	0	100		
		2 - 3	波形数	0	10	0	10				波形数	0	10	0	10	II	
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100		
		2 - 4	波形数	2	8	0	10				波形数	0	8	0	8	II	
			%	20	80	0	100				%	0	100	0	100		
		3 - 1	波形数	-	-	-					波形数	-	-	-			
			%								%						
		3 - 2	波形数	-	-	-					波形数	-	-	-			
			%								%						
		3 - 3	波形数	-	-	-					波形数	-	-	-			
			%								%						
		3 - 4	波形数	-	-	-					波形数	-	-	-			
			%								%						
		4 - 1	波形数	5	2	0	7				波形数	0	10	0	10	II	
			%	71.4	28.6	0	100				%	0	100	0	100		
		4 - 2	波形数	0	8	0	8				波形数	1	7	0	8	II	
			%	0	100	0	100				%	12.5	87.5	0	100		
		4 - 3	波形数	3	7	0	10				波形数	1	8	0	9	II	
			%	30	70	0	100				%	11.1	88.9	0	100		
		4 - 4	波形数	2	7	0	9				波形数	5	1	0	6	I	
			%	22.2	77.8	0	100				%	83.3	16.7	0	100		
		5 - 1	波形数	0	10	0	10				波形数	3	7	0	10	II	
			%	0	100	0	100				%	30	70	0	100		
		5 - 2	波形数	0	8	0	8				波形数	0	8	0	8	II	
			%	0	100	0	100				%	0	100	0	100		
		5 - 3	波形数	0	6	0	6				波形数	2	7	0	9	II	
			%	0	100	0	100				%	22.2	77.8	0	100		
		5 - 4	波形数	3	6	0	9				波形数	0	7	0	7	II	
			%	33.3	66.7	0	100				%	0	100	0	100		
		6 - 1	波形数	3	7	0	10				波形数	0	10	0	10	II	
			%	30	70	0	100				%	0	100	0	100		
		6 - 2	波形数	4	1	0	5				波形数	8	0	0	8	I	
			%	80	20	0	100				%	100	0	0	100		
		6 - 3	波形数	6	0	0	6				波形数	0	7	0	7	II	
			%	100	0	0	100				%	0	100	0	100		
		6 - 4	波形数	0	4	0	4				波形数	2	4	0	6	II	
			%	0	100	0	100				%	33.3	66.7	0	100		

表-4.6.10(2) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 11_227m, 224.0m)

BL	打継目 標高 (EL.)	測点		波形パターン分類				状態 評価	BL	打継目 標高 (EL.)	測点		波形パターン分類				状態 評価
				A	B	C	合計						A	B	C	合計	
BL11	227.0	1 - 1	波形数	9	1	0	10	I	BL11	224.0	1 - 1	波形数	9	1	0	10	I
			%	90	10	0	100					%	90	10	0	100	
		1 - 2	波形数	0	10	0	10	II				波形数	9	1	0	10	I
			%	0	100	0	100					%	90	10	0	100	
		1 - 3	波形数	0	10	0	10	II				波形数	5	5	0	10	II
			%	0	100	0	100					%	50	50	0	100	
		1 - 4	波形数	4	6	0	10	II				波形数	1	9	0	10	II
			%	40	60	0	100					%	10	90	0	100	
		2 - 1	波形数	0	9	0	9	II				波形数	2	8	0	10	II
			%	0	100	0	100					%	20	80	0	100	
		2 - 2	波形数	2	7	0	9	II				波形数	10	0	0	10	I
			%	22.2	77.8	0	100					%	100	0	0	100	
		2 - 3	波形数	0	10	0	10	II				波形数	5	5	0	10	II
			%	0	100	0	100					%	50	50	0	100	
		2 - 4	波形数	1	9	0	10	II				波形数	2	8	0	10	II
			%	10	90	0	100					%	20	80	0	100	
		3 - 1	波形数	-	-	-	-					波形数	-	-	-	-	
			%									%					
		3 - 2	波形数	-	-	-	-					波形数	-	-	-	-	
			%									%					
		3 - 3	波形数	-	-	-	-					波形数	-	-	-	-	
			%									%					
		3 - 4	波形数	-	-	-	-					波形数	-	-	-	-	
			%									%					
		4 - 1	波形数	0	10	0	10	II				波形数	10	0	0	10	I
			%	0	100	0	100					%	100	0	0	100	
		4 - 2	波形数	7	3	0	10	II				波形数	10	0	0	10	I
			%	70	30	0	100					%	100	0	0	100	
		4 - 3	波形数	10	0	0	10	I				波形数	0	9	0	9	II
			%	100	0	0	100					%	0	100	0	100	
		4 - 4	波形数	6	4	0	10	II				波形数	10	0	0	10	I
			%	60	40	0	100					%	100	0	0	100	
		5 - 1	波形数	10	0	0	10	I				波形数	5	0	0	5	I
			%	100	0	0	100					%	100	0	0	100	
		5 - 2	波形数	2	7	0	9	II				波形数	9	0	0	9	I
			%	22.2	77.8	0	100					%	100	0	0	100	
		5 - 3	波形数	6	0	0	6	I				波形数	6	4	0	10	II
			%	100	0	0	100					%	60	40	0	100	
		5 - 4	波形数	0	8	0	8	II				波形数	2	8	0	10	II
			%	0	100	0	100					%	20	80	0	100	
		6 - 1	波形数	2	8	0	10	II				波形数	0	5	4	9	III
			%	20	80	0	100					%	0	55.6	44.4	100	
		6 - 2	波形数	4	6	0	10	II				波形数	5	5	0	10	II
			%	40	60	0	100					%	50	50	0	100	
		6 - 3	波形数	6	2	0	8	II				波形数	3	7	0	10	II
			%	75	25	0	100					%	30	70	0	100	
		6 - 4	波形数	0	10	0	10	II				波形数	8	0	0	8	I
			%	0	100	0	100					%	100	0	0	100	

表-4.6.10(3) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 11_222.5m, 219.5m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点		波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点		波形パターン分類				状態評価
				A	B	C	合計						A	B	C	合計	
BL11	225.5	1 - 1	波形数	10	0	0	10	I	BL11	219.5	1 - 1	波形数	10	0	0	10	I
			%	100	0	0	100					%	100	0	0	100	
		1 - 2	波形数	0	10	3	13	III				波形数	8	0	0	8	I
			%	0	76.9	23.1	100					%	100	0	0	100	
		1 - 3	波形数	10	0	0	10	I				波形数	9	0	0	9	I
			%	100	0	0	100					%	100	0	0	100	
		1 - 4	波形数	0	10	0	10	II				波形数	7	1	0	8	I
			%	0	100	0	100					%	87.5	12.5	0	100	
		2 - 1	波形数	0	10	0	10	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	100	0	100					%					-
		2 - 2	波形数	0	10	0	10	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	100	0	100					%					-
		2 - 3	波形数	0	10	0	10	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	100	0	100					%					-
		2 - 4	波形数	10	0	0	10	I				波形数	-	-	-	-	-
			%	100	0	0	100					%					-
		3 - 1	波形数	-	-	-	-					波形数	-	-	-	-	-
			%									%					-
		3 - 2	波形数	-	-	-	-					波形数	-	-	-	-	-
			%									%					-
		3 - 3	波形数	-	-	-	-					波形数	-	-	-	-	-
			%									%					-
		3 - 4	波形数	-	-	-	-					波形数	-	-	-	-	-
			%									%					-
		4 - 1	波形数	10	0	0	10	I				波形数	-	-	-	-	-
			%	100	0	0	100					%					-
		4 - 2	波形数	10	0	0	10	I				波形数	-	-	-	-	-
			%	100	0	0	100					%					-
		4 - 3	波形数	0	10	0	10	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	100	0	100					%					-
		4 - 4	波形数	0	7	3	10	III				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	70	30	100					%					-
		5 - 1	波形数	0	0	10	10	IV				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	0	100	100					%					-
		5 - 2	波形数	0	8	2	10	III				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	80	20	100					%					-
		5 - 3	波形数	0	8	0	8	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	100	0	100					%					-
		5 - 4	波形数	5	5	0	10	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	50	50	0	100					%					-
		6 - 1	波形数	2	8	0	10	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	20	80	0	100					%					-
		6 - 2	波形数	0	10	0	10	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	100	0	100					%					-
		6 - 3	波形数	3	7	0	10	II				波形数	-	-	-	-	-
			%	30	70	0	100					%					-
		6 - 4	波形数	10	0	0	10	I				波形数	-	-	-	-	-
			%	100	0	0	100					%					-

表-4.6.11(1) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 12_231.5m, 230m)

BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	BL	打継目標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL12	231.5	1 - 1	波形数	8	0	0	8	BL12	230.0	1 - 1	波形数	8	0	0	8	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		1 - 2	波形数	6	2	0	8				波形数	8	0	0	8	I
			%	75	25	0	100				%	100	0	0	100	
		1 - 3	波形数	0	8	0	8				波形数	5	3	0	8	II
			%	0	100	0	100				%	62.5	37.5	0	100	
		1 - 4	波形数	8	0	0	8				波形数	8	0	0	8	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		2 - 1	波形数	3	7	0	10				波形数	1	8	0	9	II
			%	30	70	0	100				%	11.1	88.9	0	100	
		2 - 2	波形数	0	6	3	9				波形数	0	6	3	9	III
			%	0	66.7	33.3	100				%	0	66.7	33.3	100	
		2 - 3	波形数	10	0	0	10				波形数	10	0	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		2 - 4	波形数	10	0	0	10				波形数	10	0	0	10	I
			%	100	0	0	100				%	100	0	0	100	
		3 - 1	波形数	3	4	0	7				波形数	-	-	-	-	-
			%	42.9	57.1	0	100				%					
		3 - 2	波形数	0	10	0	10				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	100	0	100				%					
		3 - 3	波形数	5	5	0	10				波形数	-	-	-	-	-
			%	50	50	0	100				%					
		3 - 4	波形数	5	5	0	10				波形数	-	-	-	-	-
			%	50	50	0	100				%					
		4 - 1	波形数	2	6	0	8				波形数	-	-	-	-	-
			%	25	75	0	100				%					
		4 - 2	波形数	5	2	0	7				波形数	-	-	-	-	-
			%	71.4	28.6	0	100				%					
		4 - 3	波形数	2	8	0	10				波形数	-	-	-	-	-
			%	20	80	0	100				%					
		4 - 4	波形数	5	5	0	10				波形数	-	-	-	-	-
			%	50	50	0	100				%					

表-4.6.11(2) 水平打継目各測点の計測結果と状態評価(BL. 12_231.5m, 230m)

BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	BL	打継目 標高 (EL.)	測点	波形パターン分類				状態 評価	
			A	B	C	合計					A	B	C	合計		
BL12	228.5	1 - 1	波形数	5	4	0	9	BL12	227.0	1 - 1	波形数	0	8	0	8	II
			%	55.6	44.4	0	100				%	0	100	0	100	
		1 - 2	波形数	0	10	0	10				波形数	6	0	0	6	I
			%	0	100	0	100				%	100	0	0	100	
		1 - 3	波形数	0	3	6	9				波形数	2	1	0	3	-
			%	0	33.3	66.7	100				%	66.7	33.3	0	100	
		1 - 4	波形数	3	6	0	9				波形数	0	9	0	9	II
			%	33.3	66.7	0	100				%	0	100	0	100	
		2 - 1	波形数	-	-	-	-				波形数	-	-	-	-	-
			%								%					
		2 - 2	波形数	-	-	-	-				波形数	-	-	-	-	-
			%								%					
		2 - 3	波形数	0	0	10	-				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	0	100	-				%					
		2 - 4	波形数	0	0	5	-				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	0	100	-				%					
		3 - 1	波形数	-	-	-	-				波形数	-	-	-	-	-
			%								%					
		3 - 2	波形数	0	0	9	-				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	0	100	-				%					
		3 - 3	波形数	-	-	-	-				波形数	7	0	0	7	-
			%								%	100	0	0	100	
		3 - 4	波形数	0	0	4	-				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	0	100	-				%					
		4 - 1	波形数	-	-	-	-				波形数	-	-	-	-	-
			%								%					
		4 - 2	波形数	-	-	-	-				波形数	-	-	-	-	-
			%								%					
		4 - 3	波形数	0	0	4	-				波形数	-	-	-	-	-
			%	0	0	100	-				%					
		4 - 4	波形数								波形数	-	-	-	-	-
			%								%					

表-4.6.12 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 2)

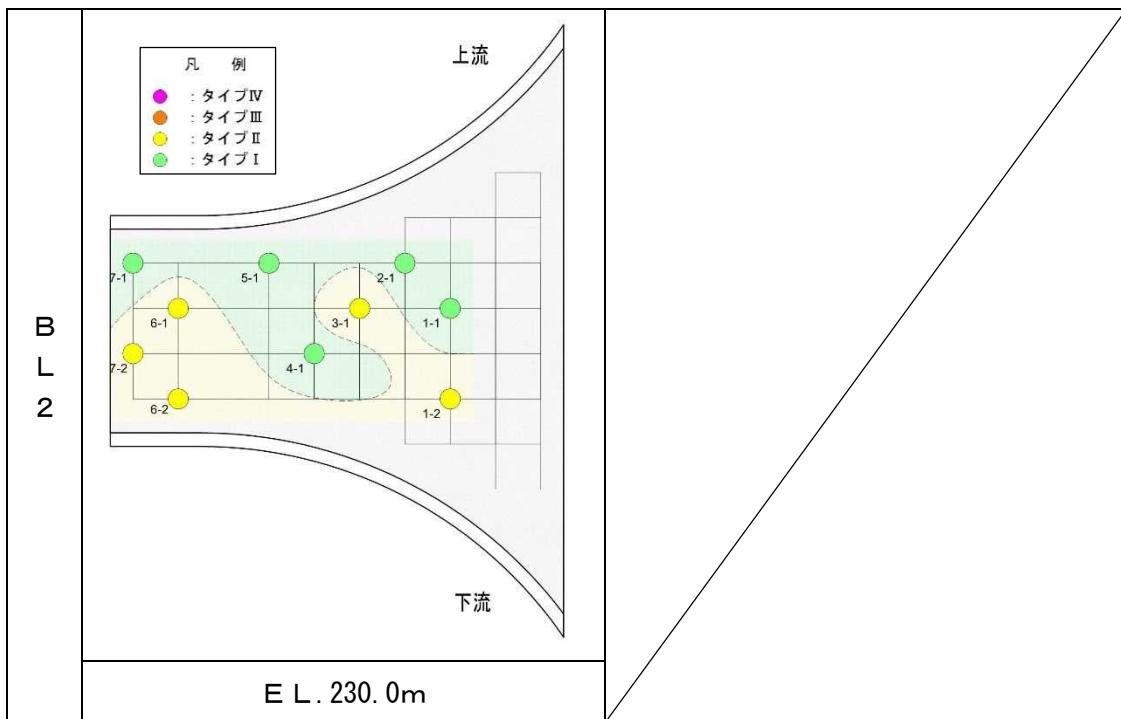


表-4.6.13(1) 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 3(1))

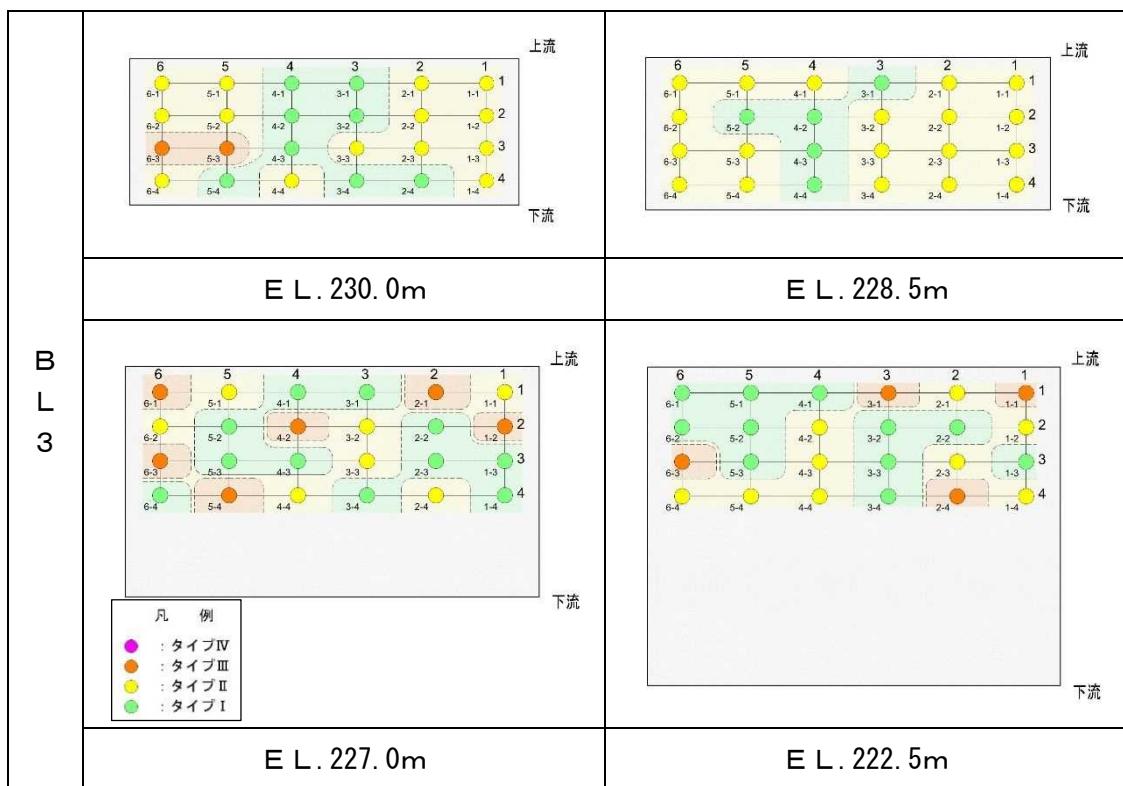


表-4.6.13(2) 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 3(2))

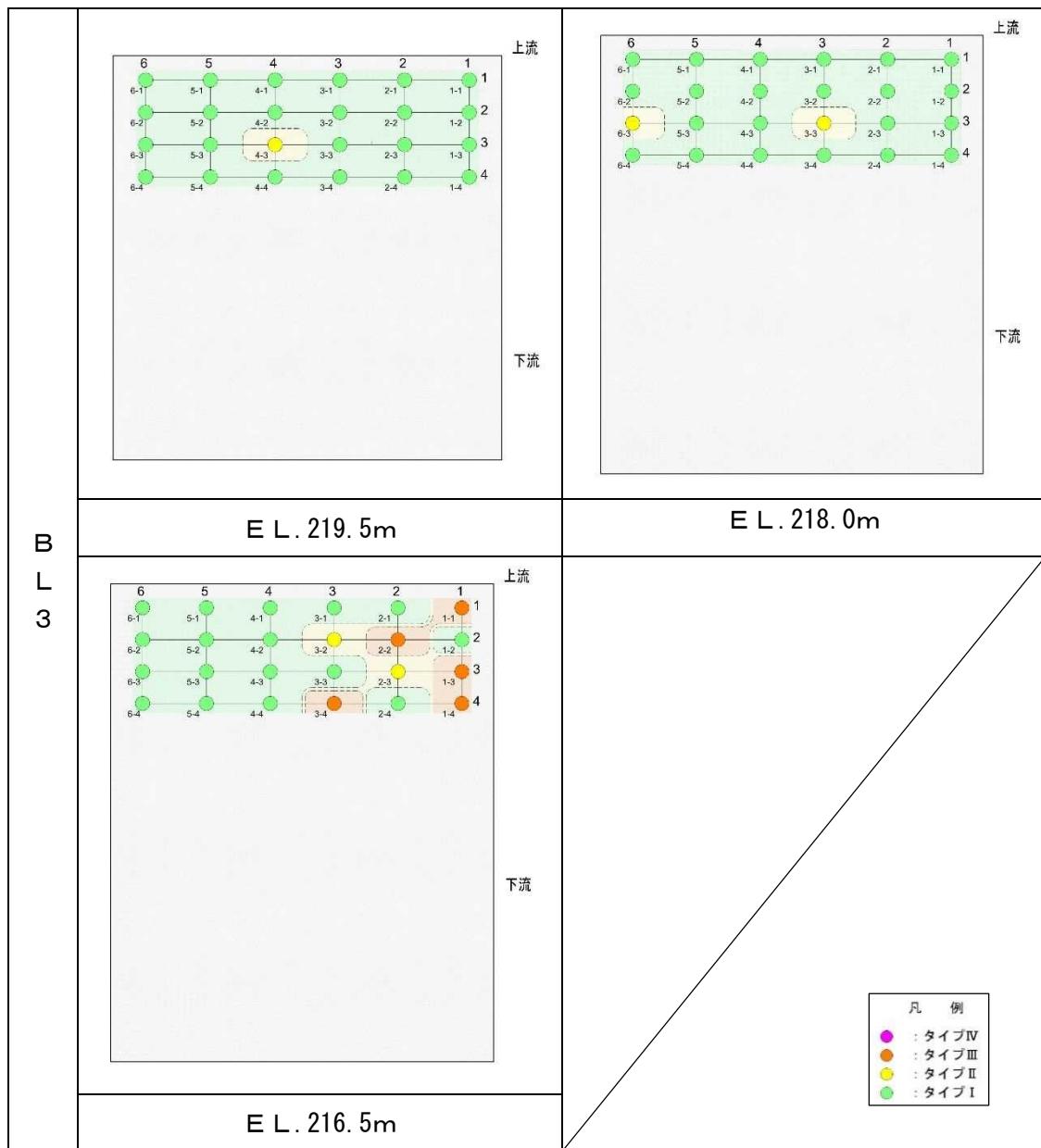


表-4.6.14 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 4)

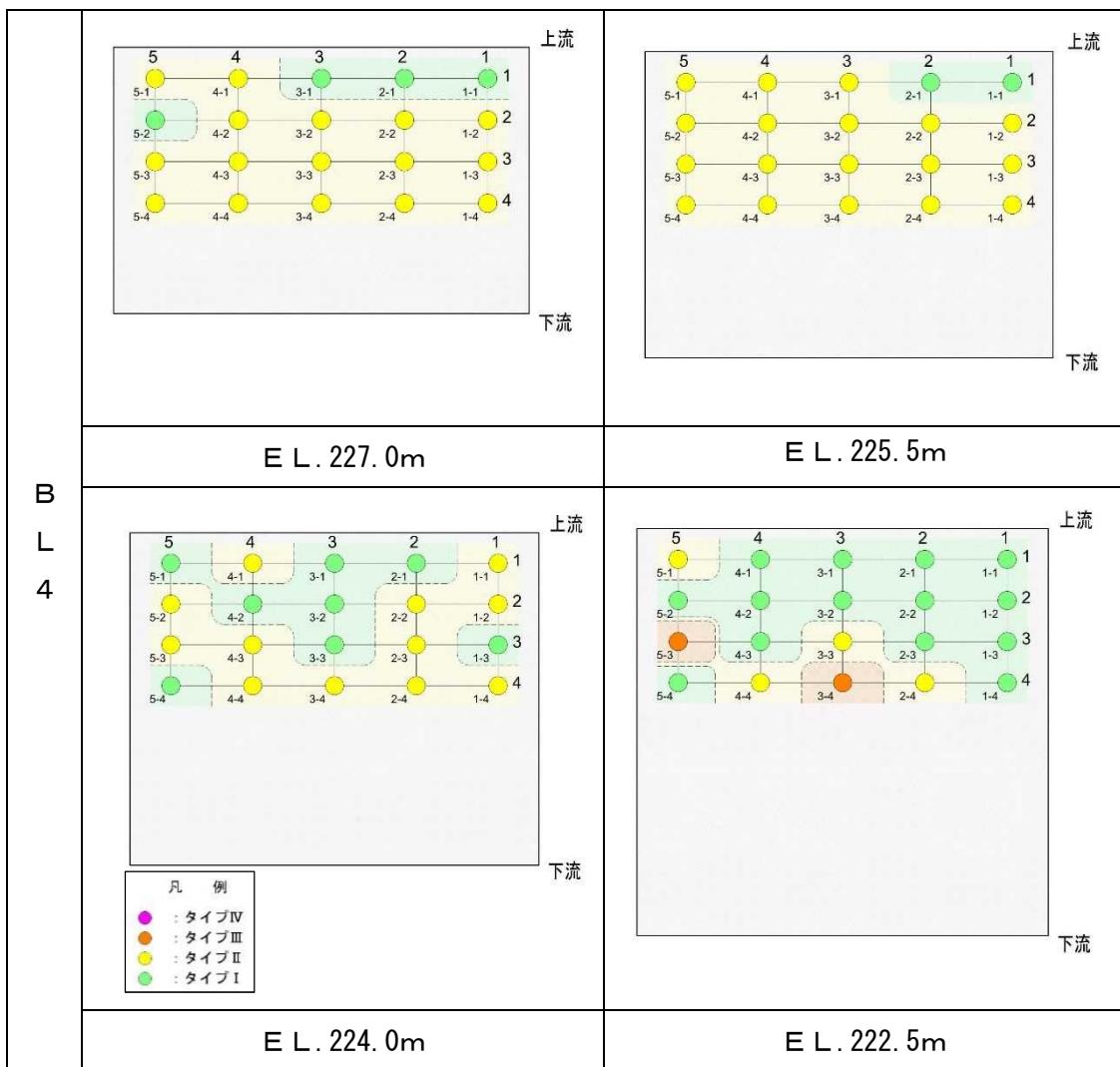


表-4.6.15 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 5)

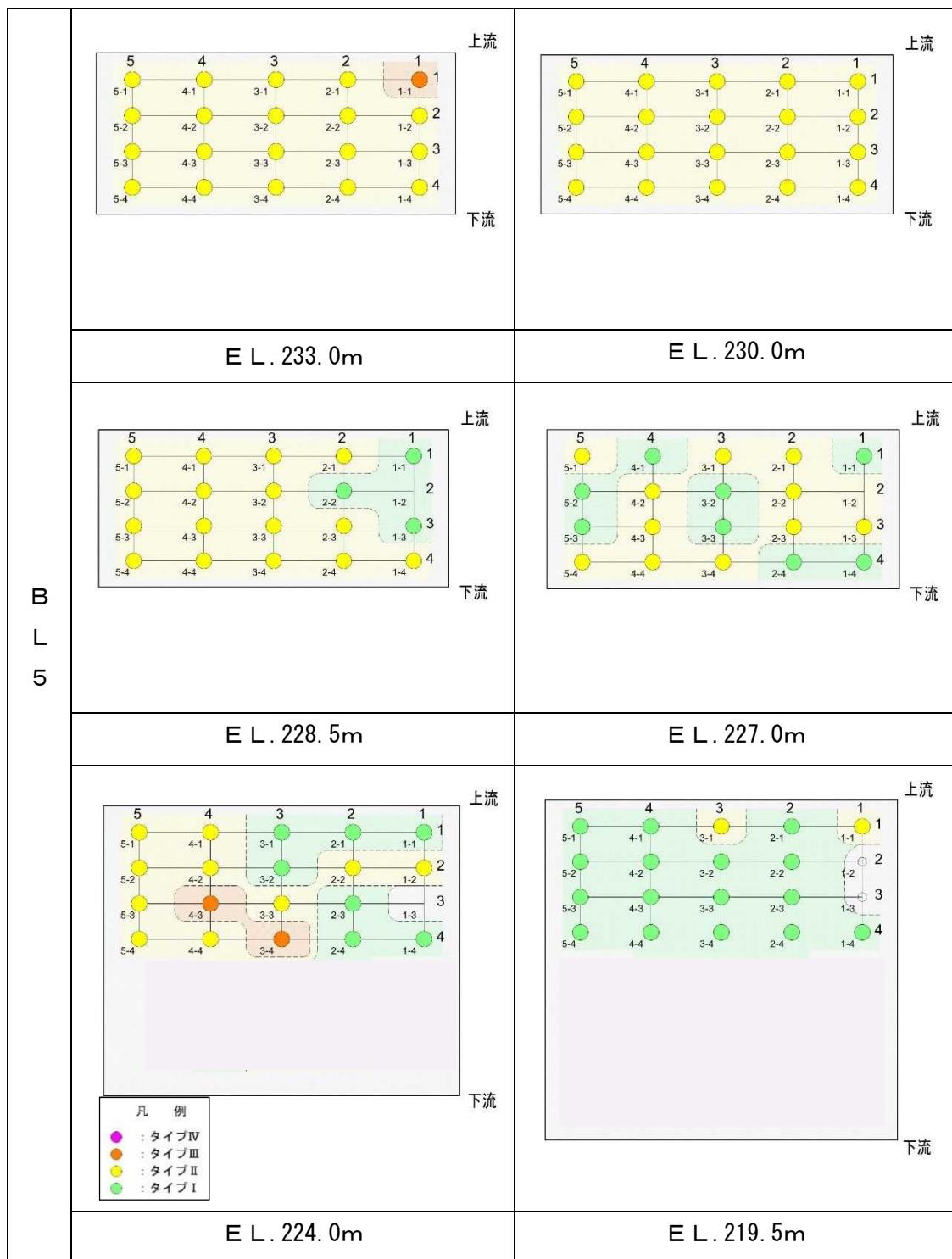


表-4.6.16 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 6~BL. 8)

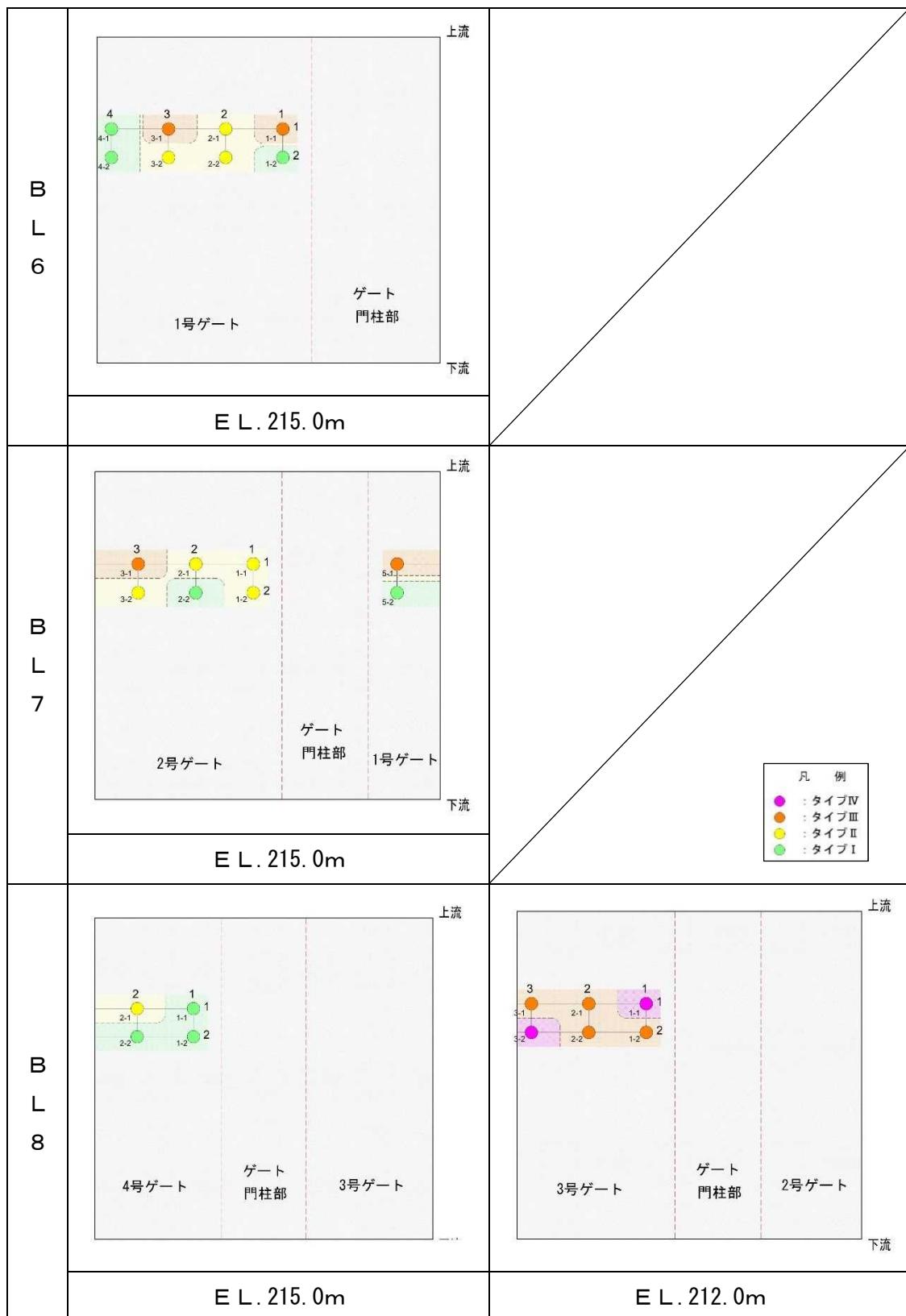


表-4.6.17 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 9～BL. 10)

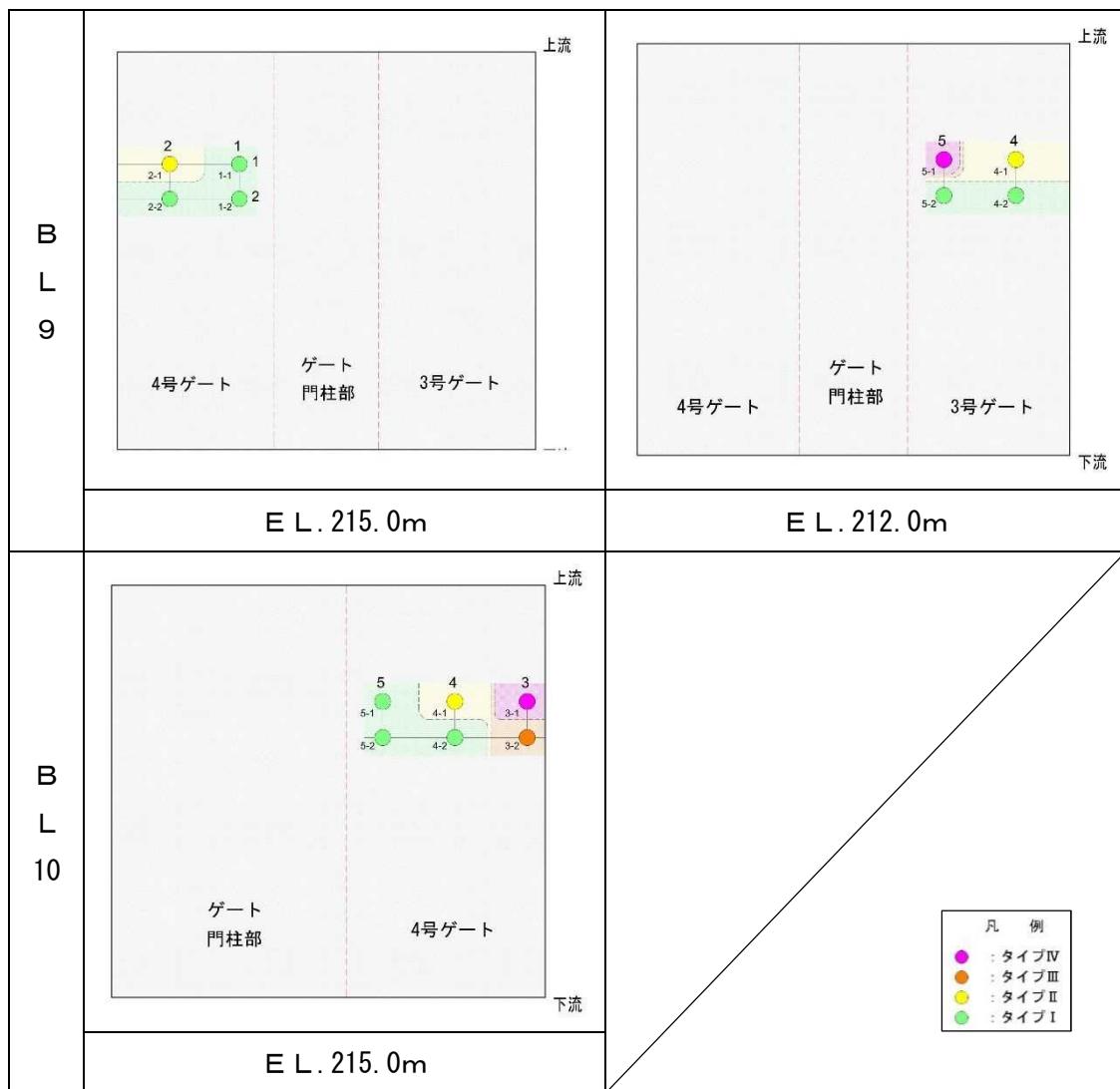


表-4.6.18 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 11)

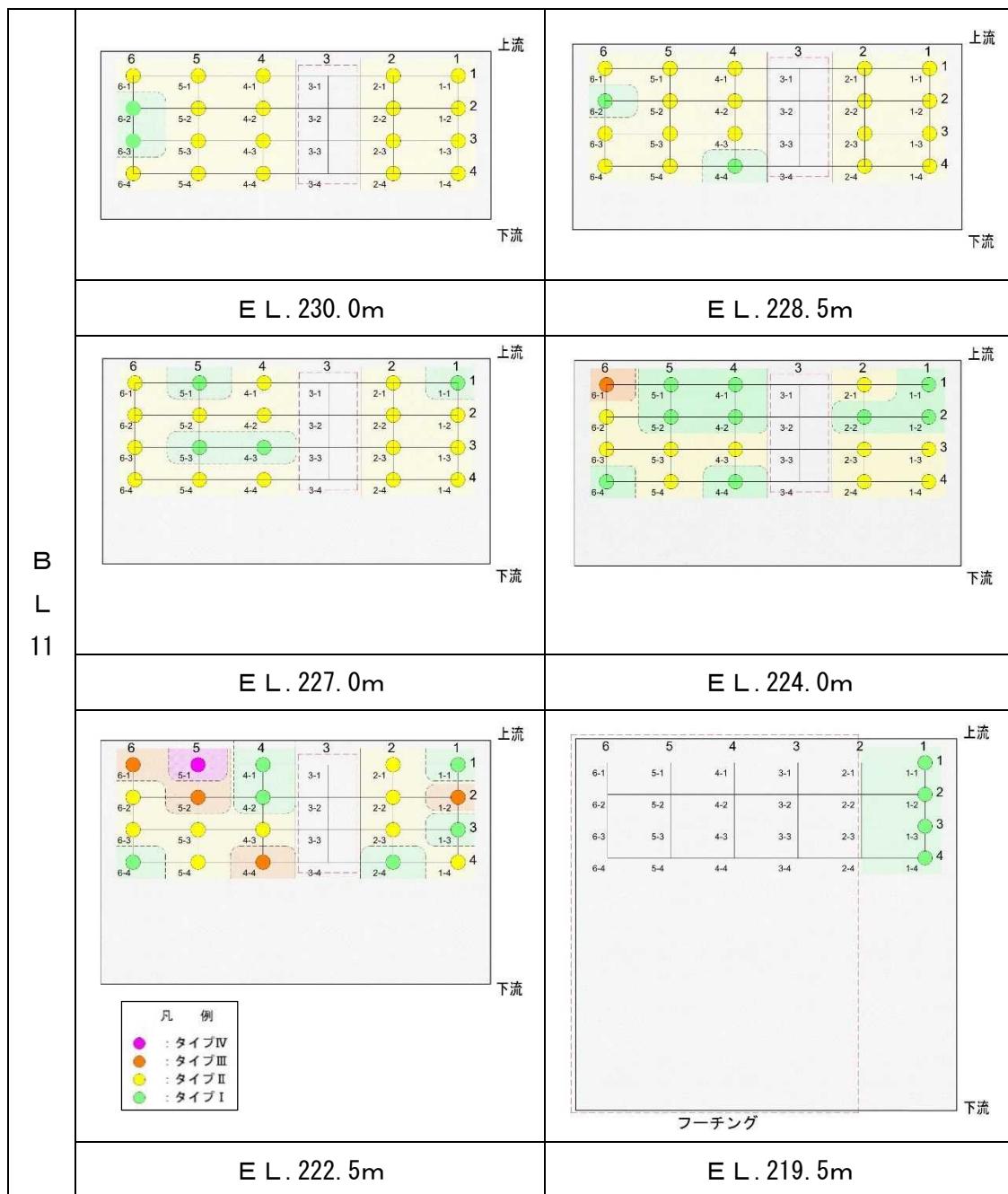


表-4.6.19 計測結果に基づく打継目状態推定結果(BL. 12)

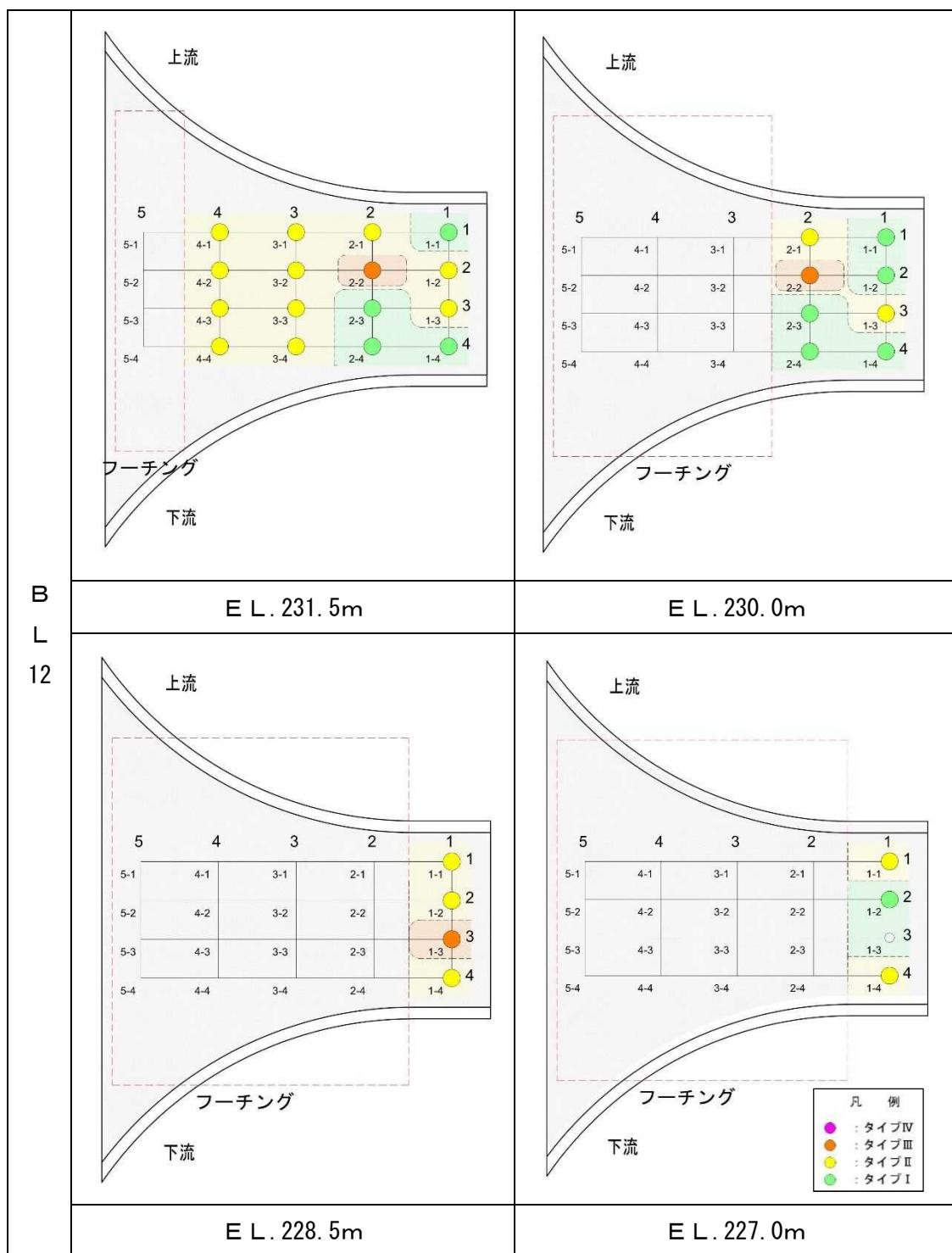


表-4.6.12～表-4.6.19 に示された結果のとおり、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状程度の面的な分布状況は、衝撃弾性波法を用いた本手法によって把握することが可能であると言える。

なお、これらの結果は、同時に、本手法における二つの課題も示唆している。1点目の課題は、堤体天端からの鉛直下方向の計測となるため、天端幅の範囲しか状態が把握できないことである。例えば、**表-4.6.13(2)** の EL. 216.5m 打継目では堤体の上流側の 1/4 程度しか状態が推定されていない。2点目の課題は、変状が進展した打継目が存在し、その面で弾性波が全て反射した場合、その面よりも深部（下位標高）には弾性波が到達しないため、状態を推定することが不可能になることである。例えば、**表-4.6.15** の BL. 5_EL, 224 m 打継目の測点 1-3 及び EL. 219.5m 打継目の測点 1-2 と測点 1-3 については、弾性波が届かず、透過反射特性が不明であるため、評価できていない。

コンクリートダム堤体への本手法の適用性を向上させるためには、これらの課題に対して何らかの対応を行うことが不可欠であるが、対応策については、次節で検討を行うこととする。

4. 7 衝撃弾性波法による堤体調査の適用性拡大に関する検討

本章でこれまで述べてきた、衝撃弾性波法を用いてダム堤体天端から弾性波を入射して対象とする水平打継目での弾性波の透過・反射特性を基に変状の程度を把握する手法については、ダム堤体の健全性評価に対する一定の適用性があると考えている。しかしながら、4. 6 の最後に述べたようなものを含めた課題を有していることも事実である。そこで、本節においては、ダム堤体調査に対して本手法の適用性を拡大するための方策について述べることとする。

4. 7. 1 堤体調査への適用を妨げる要因

構造物調査を行う場合、一般的には、調査結果の信頼性、構造物への影響、調査コスト、得られる情報量、及び調査実施に当たっての事前調整・準備の量及び実現可能性を総合的に判断して、調査方法を決定することが多い。コンクリートダム堤体の水平打継目調査に対して本研究で検討した衝撃弾性波法を用いる場合においては、調査結果の信頼性については精度向上に向けての継続した検討は必要であるが、大きな問題は存在しないと考えている。また、構造物への影響、及び調査に要するコストに関しても従来方法であるボーリング調査に比較して、衝撃弾性波法が有利であると考えている。一方で、衝撃弾性波法を用いた堤体調査の適用を妨げる要因としては、(1) 4. 6 でも述べたダム堤体の形状、及び打継目の状態に起因した情報が得られる範囲の限界、(2) 堤体天端からの計測を行う際に必要な準備作業の存在、が想定できる。本項ではこれらについて述べるものとする。

(1) ダム堤体の断面形状、及び打継目の状態に起因した情報が得られる範囲の限界

重力式コンクリートダムの断面形状は、一般的に三角形である。そのため、計測実施場所へのアクセスから計測が実施可能な場所は限定され、計測実施箇所としてダム天端が一般的には想定される。しかしながら、計測面に対して鉛直（垂直）方向の情報が卓越して取得される、すなわち、指向性が高い情報が得られる本手法を用いて、ダム天端からの計測を行った場合には、図-4.7.1(a)に示すように天端の鉛直下方の範囲の情報しか得ることができない。図-4.7.1(b)には、天端幅が4.5mで上流面勾配が1:0.06、下流面勾配が1:0.79の堤体形状をしたモデルダムを例として、天端からの計測で、天端から30mの距離にある水平打継目で情報が得られる範囲を図示したものである。すなわち、天端からの計測では対象とする打継目が深部になればなるほど、全体に対する情報が得られる範囲の割合が小さくなる。

また、本調査手法は、対象とする打継目での弾性波の透過・反射特性から状態を推定する。そのため、図-4.7.2に示すように、上位の打継目が下方に弾性波を透過させないような状態である場合には、下位の打継目には弾性波が届かず、打継目状態の推定ができない、すなわち、情報が得られる範囲が小さくなってしまうことが起こりうる。

このように、堤体天端からの計測を行っている限り、情報が得られる範囲に限りがあるという課題がある。

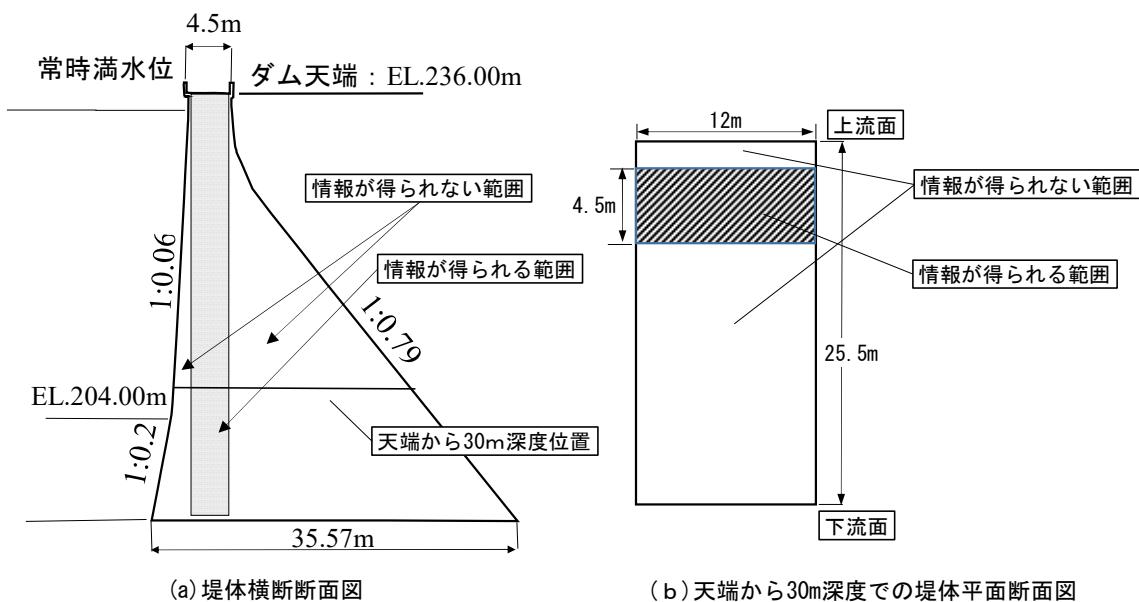


図-4.7.1 天端からの計測で情報が得られる範囲の模式図

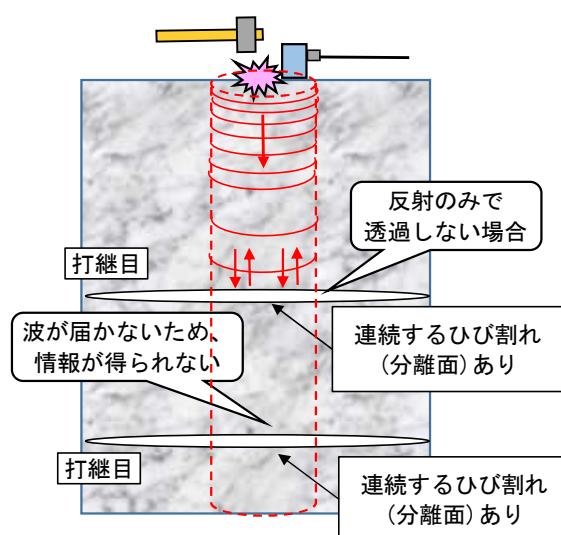


図-4.7.2 上位に開口したひび割れが存在する場合の弾性波の伝播状況の模式図

(2) 堤体天端からの計測を行う際に必要な準備作業の存在

コンクリートダムの堤体天端は、道路として一般車両の通行への供用、一般車両への供用がないとしても管理用車両及び一般歩行者の通行に供用されている。そのため、堤体コンクリートの保護を目的としてアスファルト舗装が施工されていることが一般的である。堤体天端のアスファルト舗装の施工事例を図-4.7.3に示す。



(a) Bダム堤体天端のアスファルト舗装

(b) Cダム堤体天端のアスファルト舗装

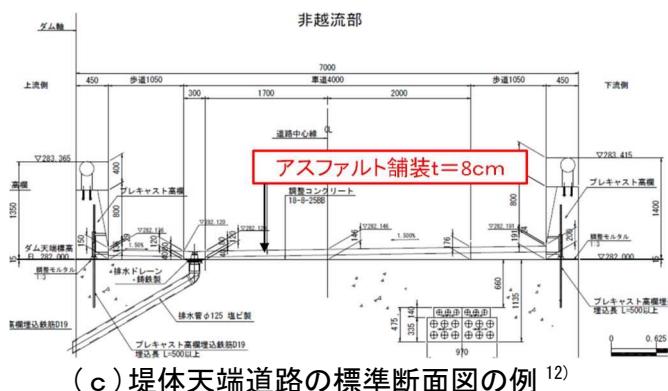


図-4.7.3 コンクリートダム堤体天端のアスファルト舗装の実施事例

アスファルトコンクリートは、硬化したセメントコンクリートに比較して弾性波の減衰が大きいという特性を有する。更に、衝撃弾性波法で計測するため、アスファルト舗装面をハンマーで打撃した場合には舗装表面に塑性変形が生じ、同一のエネルギー、方向で弾性波を入射することが困難となる。

そのため、アスファルトコンクリートで舗装されている場合において衝撃弾性波法での計測を行う場合には、舗装を一旦取り壊し除去し、計測を実施した後、再度、舗装を復旧することが、高い精度で調査を行うためには、最良の方法とされている。舗装を撤去した堤体天端の状況を図-4.7.4に示す。この舗装の撤去、復旧は、コスト増に繋がり、堤体天

端を通行止めにする期間が長期化するとともに関係機関との協議も必要になる。そのため、堤体の劣化が著しく、状態把握のための調査の必然性が明瞭であるケースを除いては、舗装の撤去・再復旧を避けたいというダム管理者としての想いがある。これは、舗装を撤去しなければならない調査手法の選定・適用に対するモチベーションが低下することになる。したがって、アスファルト舗装面、そのままで調査が実施可能であれば、衝撃弾性波法による堤体調査の適用も増加するものと想像される。



図-4.7.4 アスファルト舗装が撤去されたコンクリートダム堤体天端の状況

以上のことから、次項以降に、情報が得られる範囲を拡大する方策、及びアスファルト舗装面からの計測方策について述べる。

4. 7. 2 堤体監査廊からの堤体内部計測手法の検討

ダム堤体の断面形状及び打継目の開口状態に起因して、堤体天端からの計測では、情報の得られる範囲が限られ、堤体全体の情報が得られないという課題に対する対応として、コンクリートダム堤体の内部に、堤体の健全性の点検、あるいは洪水放流用のゲート設備までのアクセス等に用いられる目的で一般的に設置されている監査廊の内壁から弾性波を入射し、受信し、計測することを検討した。重力式コンクリートダムにおける監査廊の設置事例として、Bダムの事例を図-4.7.5に示す。監査廊を利用した衝撃弾性波法による堤体調査のイメージ図を図-4.7.6に示す。監査廊の配置については、ダムによって相違があり、中段及び上段監査廊が配置されていない事例も多い。

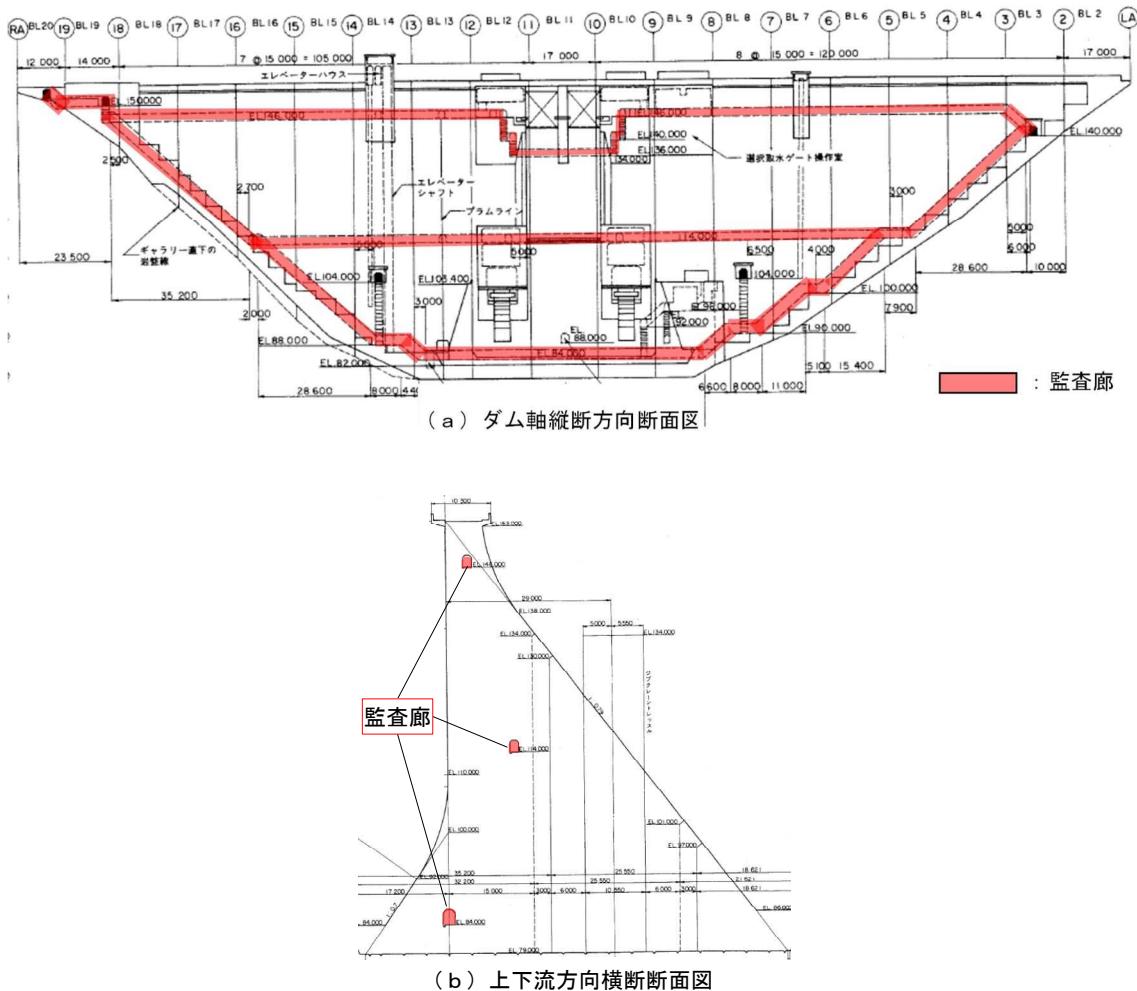


図-4.7.5 重力式コンクリートダムの監査廊の配置事例（Bダム）

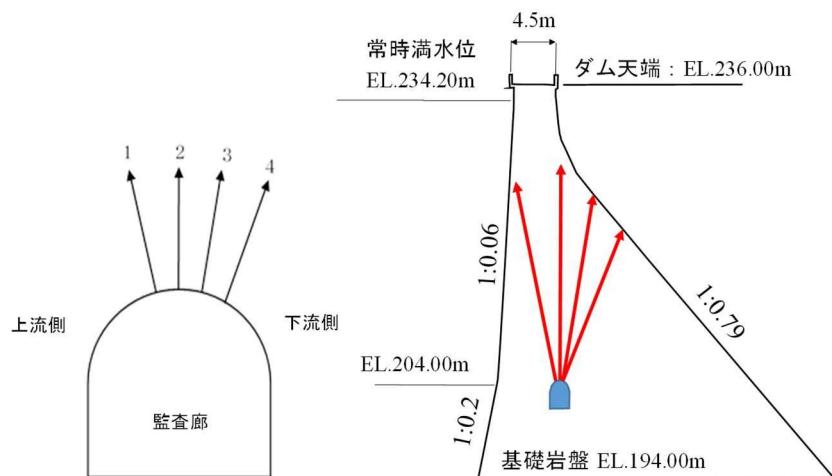


図-4.7.6 監査廊壁面からの堤体内部への弾性波の入力・受信のイメージ

(1) 監査廊利用における課題

監査廊壁面を利用して堤体内部全体を把握するまでの課題として、監査廊の断面形状、配置（縦断形状）に起因する課題があると考える。

①監査廊の断面形状

コンクリートダム堤体内部に配置されている監査廊の断面形状には、上面が円形タイプのものと、上面が矩形タイプのものの2種類がある。内壁を利用して、衝撃弾性波法で計測を行う場合、それぞれに特徴と課題がある。整理結果を表-4.7.1に示す。

表-4.7.1 監査廊の断面形状別の特徴と課題

タイプ名	上面円形タイプ	上面矩形タイプ
断面模式図		
特　徴	<ul style="list-style-type: none"> 放射状に発受信が可能であり、広い範囲の状態把握が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 定まった方向のみ発受信であり、状態把握は限られた範囲のみ
課　題	<ul style="list-style-type: none"> 曲面を打撃することから入力方向が安定しない→安定化の必要あり 	<ul style="list-style-type: none"> 広い範囲の状態把握ができない→放射状に発受信できる必要あり

②監査廊の縦断配置形状

コンクリートダム堤体内部の監査廊は、左右岸のアバットメント付近に配置された基礎監査廊はアバットメント形状に合わせて斜めに設置されている。一方、河床部の基礎監査廊あるいは中段、上段に配置されている監査廊は水平に配置されている。ダム左右岸方向（ダム軸方向）の縦断形状が斜めの場合に、監査廊の上面（天井）から発信・受信することで、斜め上方の範囲の情報が取得可能である。一方、ダム左右岸方向（ダム軸方向）の縦断形状が水平の場合には、監査廊の上面（天井）から発信・受信することで、鉛直上方の情報が取得可能となる。監査廊の縦断配置形状による探査可能な範囲のイメージを図-4.7.7に示した。

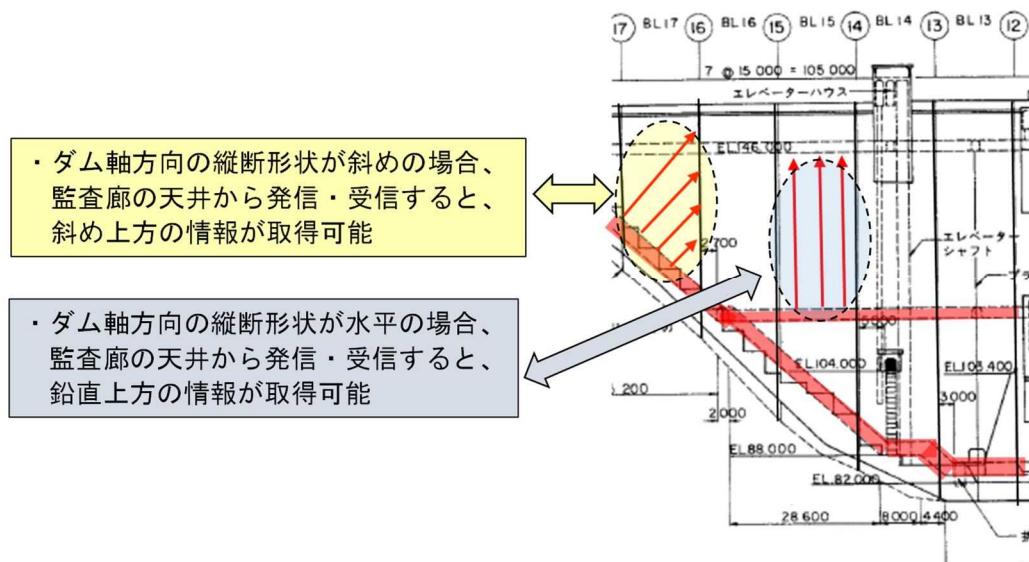


図-4.7.7 監査廊の縦断配置形状による探査可能な範囲のイメージ図

これらのように、ダム堤体内に配置された監査廊壁面から計測できる方向、すなわち情報が取得可能な範囲は、監査廊の配置、縦断配置、断面形状によって制限を受ける。したがって、堤体内部全体の状態を把握するためには、監査廊の内壁面から任意の方向に弾性波を発信し、受信することが必要となる。

(2) 任意方向への弾性波の発信受信の方策

監査廊の壁面から任意方向へ弾性波を発信し、受信するための方策として以下の方法を用いることとした。

- ・計測用アタッチメント ($50 \times 50 \times 16\text{mm}$, 材質: SS400) を作製し、金属補修剤を用いて監査廊壁面に接着する。アタッチメントを図-4.7.8に示す。
- ・金属補修剤(デブコンA¹³⁾)：金属含有のパテ状のエポキシ系補修剤(比重: 2.3)。主剤と硬化剤を混合すると、化学反応により硬化する(可使時間: 45min/25°C, 硬化時間: 1~6mm厚みの場合, 16hour/25°C)。硬化後は非常に硬質な硬化物となり、金属全般、コンクリートに対する接着力が強いという特徴を有する。主な用途は配管、タンク等の修理、鋳物の穴埋め、肉盛り修正等である。
- ・金属補修剤はパテ状であり、肉盛りも可能なため、アタッチメントに対して肉盛りを行うことで、アタッチメントを任意の方向(角度)に設置することが可能となる。
- ・発信はアタッチメントの中心部をアタッチメント平面($50\text{mm} \times 50\text{mm}$)に垂直となる方向に鋼製ハンマーで打撃して行い、受信センサはアタッチメントの近傍にパテ材により設置して反射波の計測を実施。



図-4.7.8 アタッチメント

(3) 監査廊からの衝撃弾性波法による堤体水平打継目状態調査手法の適用性確認

Aダムにおいて、堤体監査廊の壁面からアタッチメントを使用して任意方向へ弾性波を発信し、堤体内部の水平打継目の状態を把握する調査手法の適用性の確認を実施した。Aダムでは図-4.7.9に示す、5箇所（測点8-1、測点8-2、測点9-1、測点9-2、測点12-1）に測点を設定し、この5箇所において、図-4.7.10に示すように、上下流方向に5度ずつ変化させた4つの方向に対して計測を実施した。なお、5箇所の測点のうち、測点8-2については監査廊の斜路部に位置し、そのままアタッチメントを貼り付けると、図-4.7.7における縦断形状がダム軸方向に斜めになる状態と同じであり、左岸側に傾斜した方向に弾性波が発信されることになるため、金属補修剤を肉盛りしてアタッチメントの方向を調整してダム軸方向に対しては鉛直上方に弾性波が発信されるようにした。その他の4箇所の測点については水平部であるため、ダム軸方向に対する方向調整は実施していない。測点9-2における計測用アタッチメントを用いた計測状況を図-4.7.11に示す。

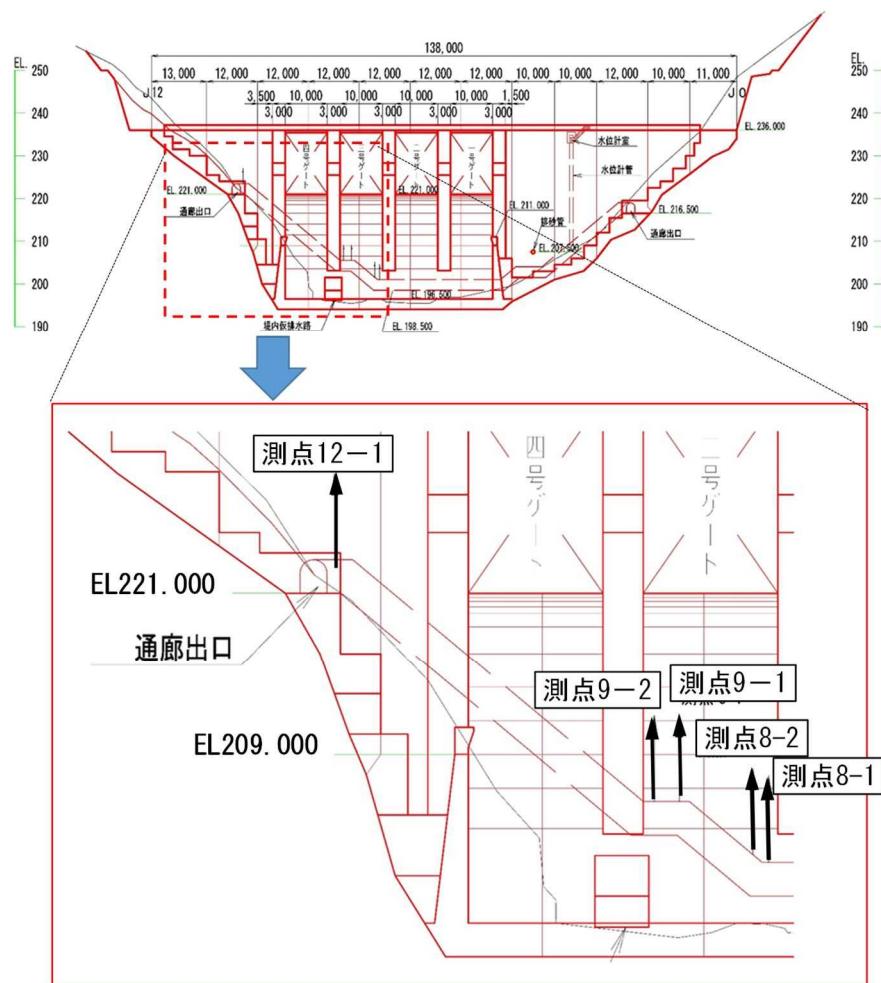


図-4.7.9 モデルダム Aダムの監査廊内からの計測測点5箇所

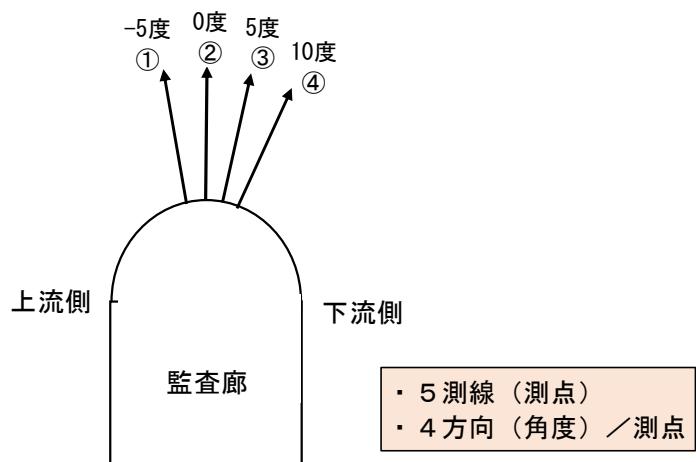


図-4.7.9 モデルダム Aダムの監査廊内各測点での計測4方向



図-4.7.11 計測用アタッチメントを用いた計測状況(測点 9-2)

【計測結果】

計測用アタッチメントを設置して、監査廊壁面から堤体に対して計測を行った場合の代表的な測定波形を示し、本対応方策の適用性について示すこととする。

図-4.7.12 に、測点 8-1-2、及び測点 9-2-2 における再現性の高い代表的な計測波形を示す。これによると、測点 8-1-2 における計測波形から、監査廊上面 (EL. 201.0 m) から 3.5m の距離、すなわち、EL. 204.5m の水平打継目に對応する位置で反射が明瞭に生じ、打継目の状態としてはタイプIVに分類される状態であることがわかる。なお、測点 8-1-2 の上位標高については、表-4.6.16 に示したように洪水吐き越流頂部からの計測によって EL. 212m にはタイプIVに分類される、変状が非常に進んだ状態の水平打継目があり、そのため、EL. 212m よりの低い標高の情報は得られていなかったが、監査廊内からの計測によって EL. 212m よりも低標高部の打継目状態が確認されたと言える。また、測点 9-2-2 における計測波形から、監査廊上面 (EL. 205.5m) から

3.5m, 5.0m, 6.5m, 8mの距離, すなわち, EL. 209m, EL. 210.5m, EL. 212m, EL. 213.5m の水平打継目において反射が生じる状態であると言える。このBL. 9の計測結果に関しても表-4.6.8あるいは表-4.6.17に示されているように, 洪水吐の越流頂からの計測結果であるでは情報が得られていなかったEL. 212mよりも低標高部の打継目状態が確認されたと言える。

次に, 図-4.7.13に, 測点12-1-1, 測点12-1-2, 測点12-1-3及び測点12-1-4における再現性の高い代表的な計測波形を示す。また, 図-4.7.14に, 測点12-1-1～測点12-1-4からの各測線と堤体下流面が交差されるおおよその標高を示したが, それぞれの測線と堤体下流面と交点の標高を示す伝播時間に反射波を示す波形が確認されることが, 図-4.7.13に示した計測波形から読み取れる。したがって, 監査廊の壁面から任意の方向に対して計測を実施する方法の有効性が確認されたと言える。

今回, 限られた計測点での限られた方向に対する計測を実施したのみであるが, コンクリートダム堤体の内部に配置された監査廊の壁面からアタッチメントを用いて様々な方向に対して弾性波を発信・計測することで, 堤体天端からの計測では確認できなかった範囲についても状態が確認できる。例えば, BL. 3に対して監査廊を利用して図-4.7.15のように計測した場合, 新たに情報が得られる範囲は表-4.7.2のようになる。

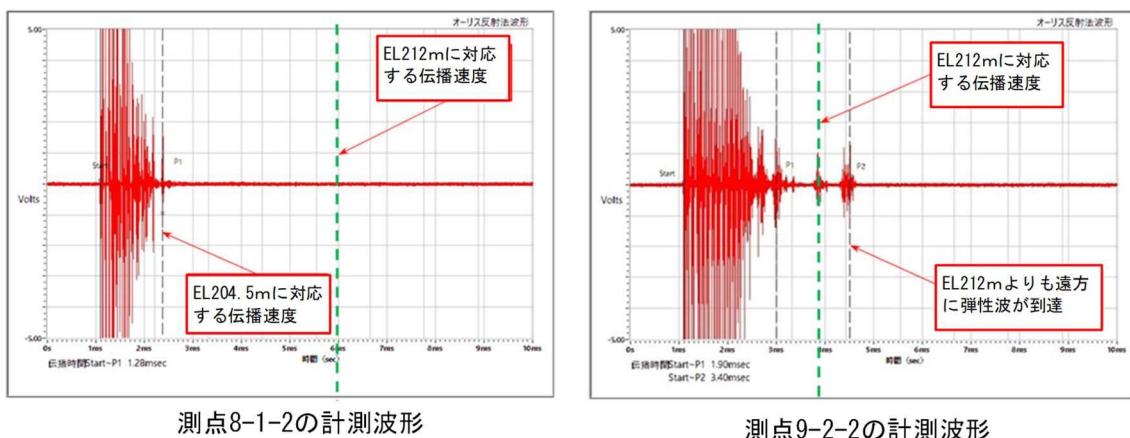


図-4.7.12 測点8-1-2 および 測点9-2-2における代表的な計測波形

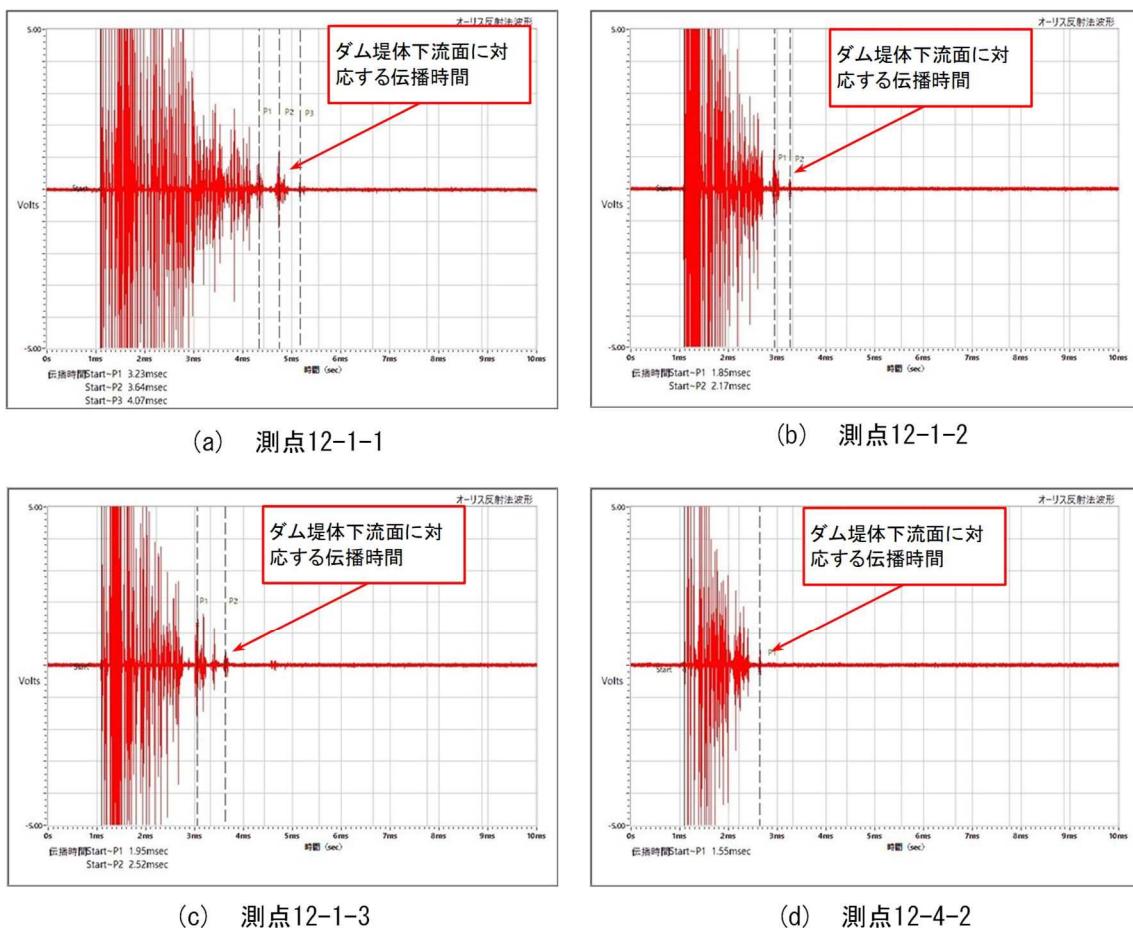


図-4.7.13 測点12-1-1～測点12-1-4における代表的な計測波形

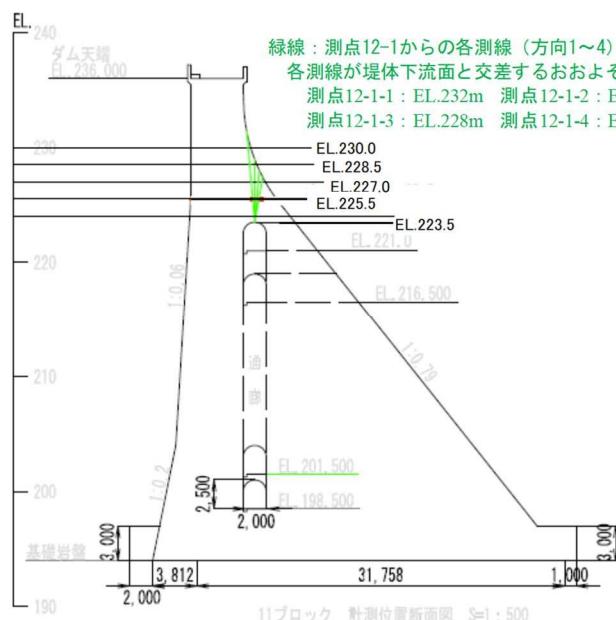


図-4.7.14 測点12-1-1～測点12-1-4からの計測測線と堤体形状との関係

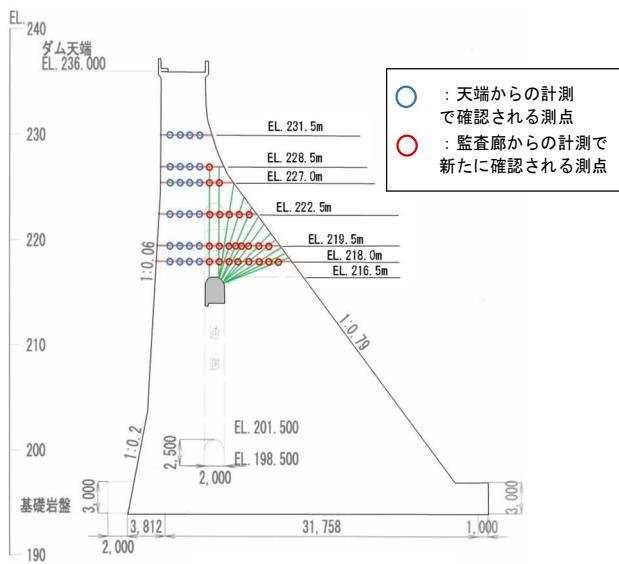
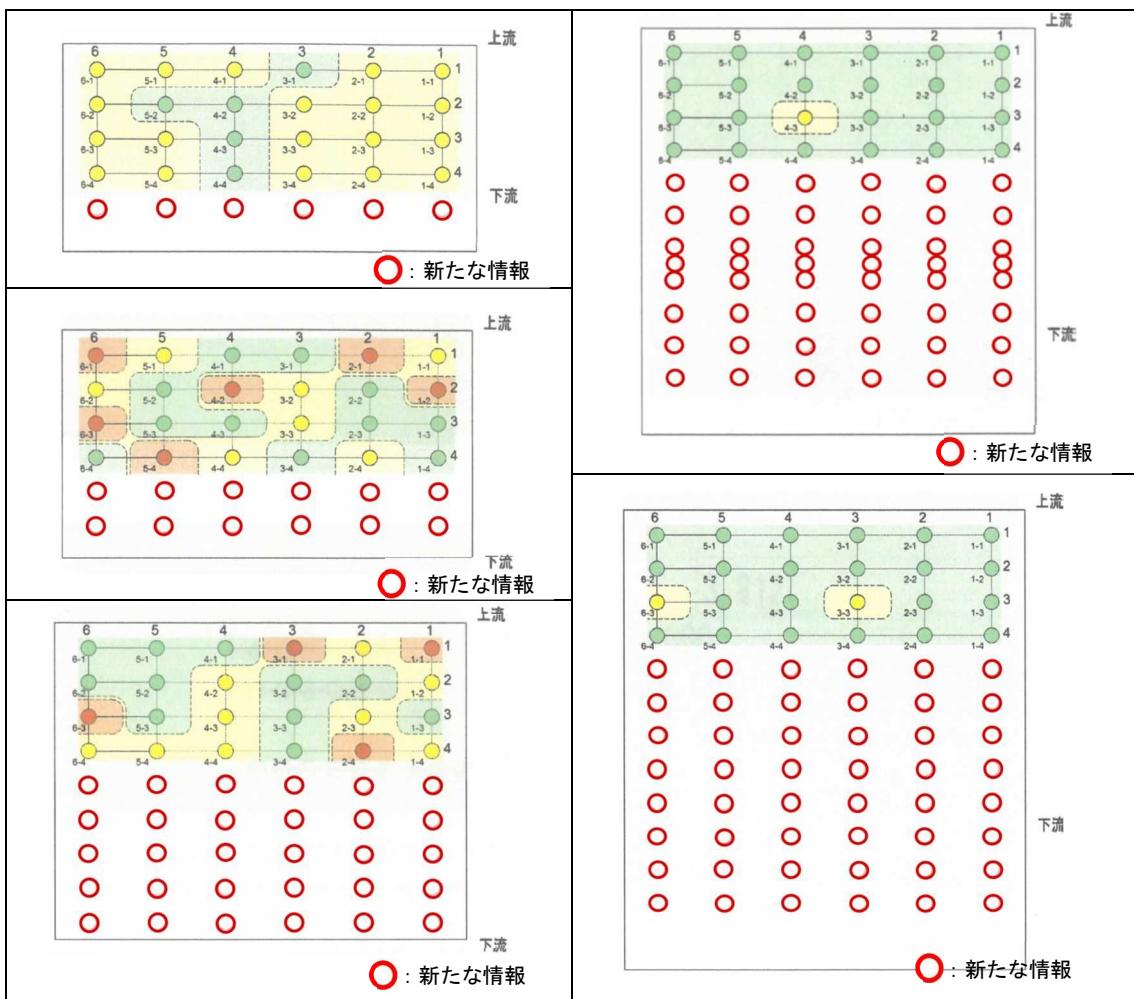


図-4.7.15 監査廊を利用した堤体内部の計測計画事例(Aダム-BL. 3)

表-4.7.2 監査廊を利用した堤体内部の計測による新たな情報確認測点(Aダム-BL. 3)



4. 7. 3 堤体天端アスファルト舗装面からの堤体内部計測手法の検討

堤体天端のアスファルト舗装面は、強度も弱く、弾性波を発生させるためのハンマーによる打撃に対して脆く、複数回の打撃により測定面が破損し、的確に弾性波を発信・受信することが困難となる。このような状況に対して、アスファルト舗装面を補強することで、舗装を一時撤去することなく、衝撃弾性波法による計測を可能とするものとする。舗装面の補強方法としては、監査廊内からの計測において計測用アタッチメントを壁面に貼り付ける際に使用した金属用補修剤をアスファルト舗装面に塗布することによるものとして、この方策の妥当性について検討を行った。

(1) 検討方法

モデルダムであるAダムの天端における同一箇所で、①アスファルト舗装面からの計測、②金属用補修剤で補強した舗装面からの計測、③舗装を撤去した堤体コンクリート面からの計測、という3条件での計測を行い、その計測波形等を比較することとした。

(ア) 計測測点の配置

AダムのBL. 11の天端に図-4. 7. 16に示す配置で測点を設置して計測した。

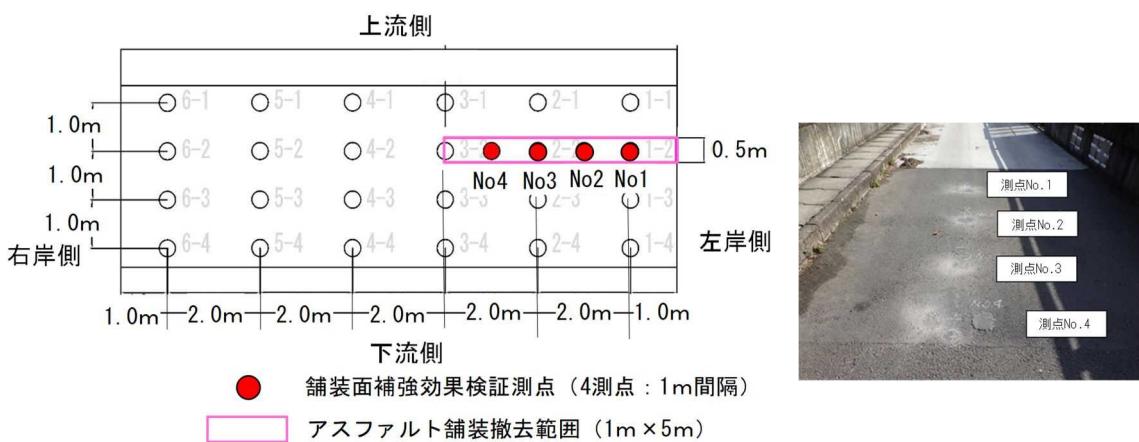


図-4. 7. 16 計測測点の配置

(イ) 舗装面の補強方法

金属補修剤をアスファルト舗装面の表面に塗布することで補強する。

金属補修剤（デブコンA）：鉄粉含有のパテ状のエポキシ系補修剤（比重：2.3）。

主剤と硬化剤を混合すると、化学反応により硬化する（可使時間：45min/25°C、硬化時間：1~6mm厚みの場合、16hour/25°C）。硬化後は非常に硬質な硬化物となり、金属全般、コンクリートに対する接着力が強いという特徴を有する。¹³⁾ 主な用途は、配管、タンク等の修理、鋳物の穴埋め、肉盛り修正等である。



図-4.7.17 使用した金属補修剤（金属含有エポキシ系補修剤）¹³⁾

（2）検討結果

①アスファルト舗装面からの計測

アスファルト舗装面をそのままハンマーで打撃し、衝撃弾性波法によってダム堤体を計測した。ハンマー打撃後のアスファルト舗装面の状況を図-4.7.18に示すが、ハンマーによる打撃で測定面が崩れ、再現性の高い弾性波を発信させることができない状態となった。また、アスファルト舗装面を直接打撃・計測した波形を図-4.7.19に示す。



図-4.7.18 ハンマー打撃後のアスファルト舗装面

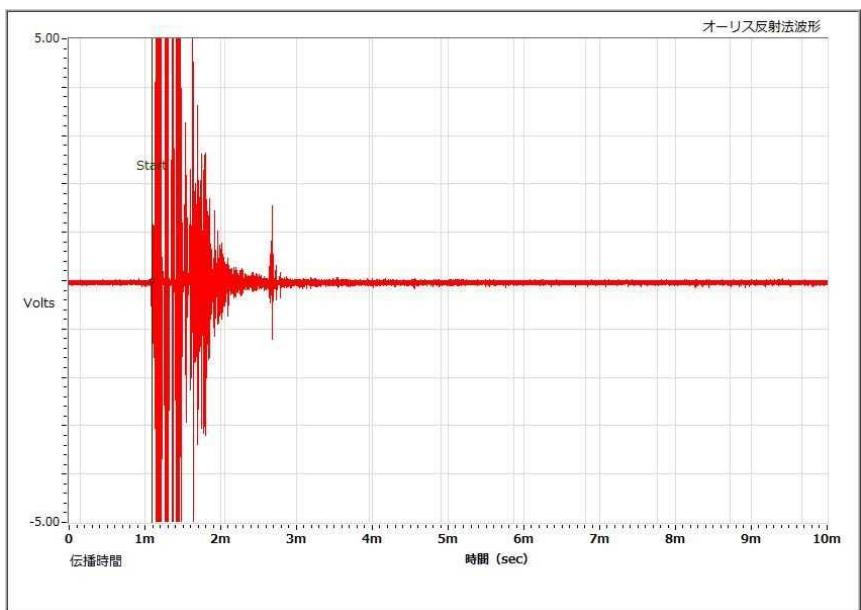


図-4.7.19 アスファルト舗装面を直接打撃・計測した波形(測点 No. 1)

②金属用補修剤で補強した舗装面からの計測

アスファルト舗装面に金属補修剤を塗布、補強し、その面に対してハンマーで打撃し、衝撃弾性波法によってダム堤体を計測した。金属補修剤の塗布状況及び計測状況を図-4.7.20に示す。



金属補修剤（2剤混合）



金属補修剤の塗布（舗装面の補強）状況



金属補修剤で補強した面での計測

図-4.7.20 金属補修剤の塗布状況及び補強面での計測状況

また、計測後に金属補修剤を剥離除去した状況を図-4.7.21に示す。金属補修剤は、ノミ等で側方から力を加えることで容易に剥離除去が可能であることが確認された。除去後、舗装面も薄層の剥離が生じたが、道路供用には支障が無い程度であり、許容範囲内である。



図-4.7.21 計測実施後の金蔵補修剤の撤去後状況

補強したアスファルト舗装面から打撃・計測した波形を図-4.7.22に示す。

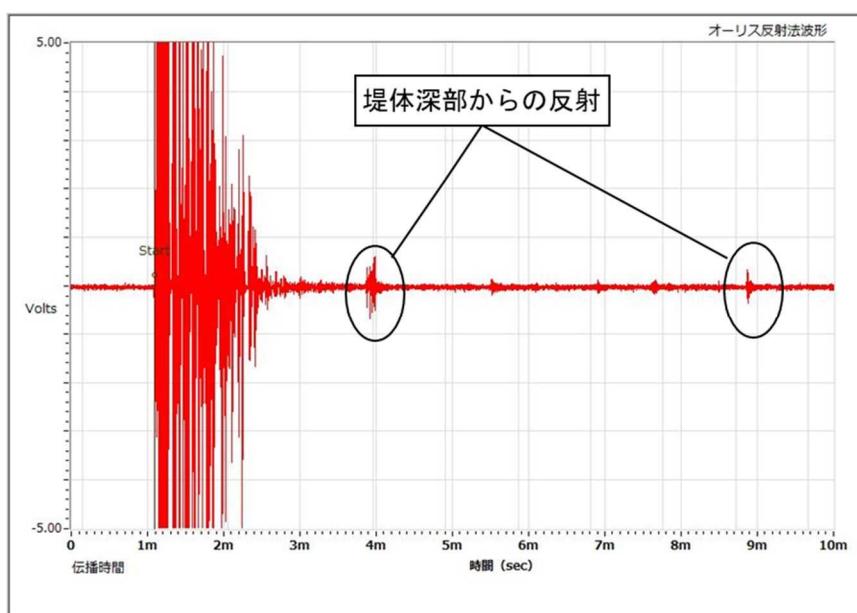


図-4.7.22 補強したアスファルト舗装面から打撃・計測した波形(測点 No. 1)

③舗装を撤去した堤体コンクリート面からの計測

測点部分のアスファルト舗装を $0.5\text{m} \times 5\text{m}$ の範囲で撤去し、堤体コンクリートを露出させ、コンクリート面から打撃し、計測を実施した。アスファルト舗装の撤去状況及び堤体コンクリート面からの計測状況を図-4.7.23に示す。堤体コンクリート面から打撃・計測した波形を図-4.7.24に示す



図-4.7.23 アスファルト舗装撤去状況と堤体コンクリート面からの計測状況

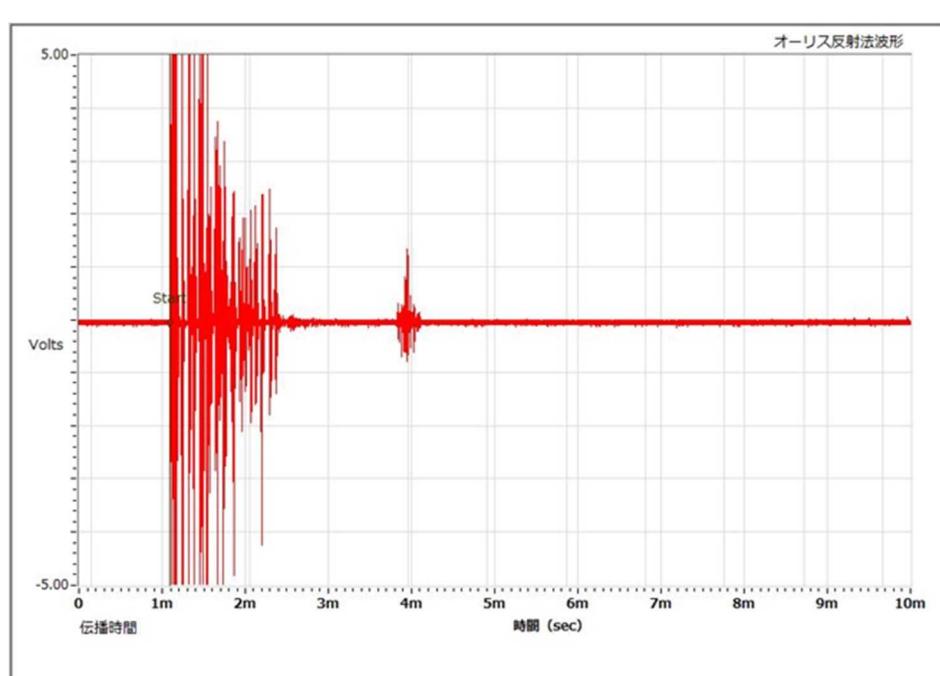


図-4.7.24 舗装を撤去し、堤体コンクリート面から打撃・計測した波形(測点 No. 1)

3条件での計測の結果について、舗装撤去後の堤体コンクリート面からの打撃・計測を基準としてとりまとめると以下のとおり。

- ・アスファルト舗装面からの打撃計測では、弾性波は堤体深部まで伝播されない。
- ・金属補修剤を用いて補強したアスファルト舗装面からの打撃で計測される波形は堤体コンクリート面から打撃・計測した波形にはほぼ類似しており、堤体深部まで伝播している。波形から、伝播した深度はコンクリート面から打撃・計測したものと同等またはそれ以上である。
- ・金属補修剤を用いたアスファルト舗装面の補強は、ハンマーによる打撃に対する耐久性を有し、計測に特段の支障が生じることも無かった。また、計測後、ノミ等で側方からの力を加えることで容易に金属補修剤を剥離撤去可能であり、撤去後の舗装面には道路供用の支障となるような損傷は生じなかった。

以上のことから、アスファルト舗装面を今回使用した金属補修剤を用いて補強することは、舗装を撤去することなく、同等の計測結果が得られることから、衝撃弾性波法のダム堤体への適用拡大に向けての有効な方策であると言える。

4. 8 本章のまとめ

本章では、衝撃弾性波法を用いて、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状を把握する手法についての検討を行った。

まず、コンクリート基礎杭の損傷調査等にこれまで用いられてきた、高い領域から低い領域までの周波数成分を有する弾性波を入力し、反射波として戻ってくる弾性波の高周波数領域の成分を取り出すことで、数mオーダーを超える距離に存在する微細な欠陥を把握可能なシステムに着目して、この計測システムをコンクリートダム堤体に対して適用するとした。

手法の検討に当たっては、モデルダムとして、水平打継目に劣化変状が進展している、四国地方に位置するAダムを選定し、Aダムに対する計測、検討及び評価の実施を通じて手法の定型化の検討を実施した。

利用した衝撃弾性波法の計測システムは、一般的なコンクリート構造物に対する適用事例しかないことから、コンクリートダム堤体の調査に適用するためには、コンクリートダム堤体中の弾性波の伝播特性及び透過反射特性を把握する必要があった。

そこで、まず、ダムコンクリートを用いて作製した大型供試体に対して、衝撃弾性波法の計測システムを用いて計測を行う室内試験を実施し、一般的なコンクリートに比較して、使用骨材が大きく、材料分離が生じ易く、不均質になりやすいダムコンクリートで構築された構造物中の弾性波の透過・反射特性について検討を行った。この室内試験の実施によって、ダムコンクリートの構造物においても、弾性波伝播速度のばらつきの程度は最大1.78%と一般的なコンクリート構造物におけるばらつきの程度5%に対して十分小さいことが確認されるとともに、弾性波の指向性についても一般的なコンクリート構造物と同等の $6.5^\circ \sim 9.7^\circ$ であることが確認された。

また、Aダム堤体に対する衝撃弾性波法による計測の結果から、供用中のコンクリートダム堤体における弾性波の伝播特性について検討を行った。その結果、供用中のコンクリートダム堤体中の弾性波伝播速度のばらつきは3%程度であり、室内試験で確認された値に比較するとやや大きいが、一般的なコンクリート構造物における弾性波伝播速度のばらつきと同程度であることが確認された。また、反射波が生じるような劣化部が複数存在するようなコンクリートダム堤体の状態においても、弾性波伝播速度は、伝播距離に応じて速度が低下する、あるいは変動係数が大きくなるような傾向はないことも確認され、一般的なコンクリート構造物と同様であることが確認された。

これらの大型供試体を用いた試験及び供用中のコンクリートダム堤体における弾性波伝播速度特性の検討結果から、コンクリートダム堤体においても、弾性波の透過反射特性に関する一般的なコンクリート構造物と同様に取り扱う事が可能であることが確認された。

衝撃弾性波法によって計測された堤体打継目での弾性波の透過反射特性である計測波形パターンと打継目状態との関係については、Aダム堤体で別途行われていた調査ボーリングの結果との対比によって設定することとし、同一点での10回程度の計測における波形パターンの比率から4段階の打継目状態区分を推定する方法を提案した。これによって、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状を非破壊試験によって、面的な分布を含めて状態を推定することが可能となった。

衝撃弾性波法による計測を行い、コンクリートダム堤体の水平打継目状態を推定する手法を多くのコンクリートダムに対して広く実施するための障壁としては、堤体天端からの鉛直下方向の計測では、情報が得られる範囲が限定的であること、計測実施するためには天端のアスファルト舗装を一旦撤去する必要があること、の2点が存在した。この障壁の対処方策として、前者については、堤体監査廊から計測用アタッチメントを用いて計測を行う手法について提案し、これによって堤体内部のより広い範囲の状態が把握できる可能性があることを示した。後者に対してはアスファルト舗装面を金属補修材の塗布によって補強することで、舗装を撤去して堤体コンクリート面を直接打撃し、計測を行った場合と、ほぼ同様の計測結果を得ることが可能になることを確認した。これら2点の対処方策によって、衝撃弾性波法を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目状態の把握が、より多くのダムで適用される機会が増加するものと考えている。

参考文献

- 1) 財団法人先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明報告書「オーリス（非破壊探査システム）」，1997年3月
- 2) 永井哲夫，中村敏明，永野賢司：高周波衝撃弾性波法による杭基礎の健全性評価，地盤工学会誌，Vol. 61, No. 8, pp. 26～29, 2013年8月
- 3) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術‘14〔基礎編〕，pp. 112～119, 2014年2月
- 4) 永井哲夫，小泉和広，永野賢司，北澤浩二：高周波衝撃弾性波法による岩塊や転石の形状寸法調査，第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 140～145, 2015年1月
- 5) 永井哲夫，中村敏明，岡田哲美，中村大史：高周波衝撃弾性波法による岩盤内の不連続面分布の把握，第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 131～136, 2016年1月
- 6) 塩月隆久，孫建生：地震被害等を受けたコンクリート構造物への非破壊探査の適用事例，土木学会第2回耐震補強・補修技術及び耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集，pp. 217～224, 1998年7月
- 7) 市川滋己，永井哲夫，鎌田敏郎：供用中のコンクリートダム堤体における弾性波伝播速度の特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41, No. 1, pp. 1769～1774, 2019年7月
- 8) 市川滋己，鎌田敏郎，杉浦友宣，林直良：衝撃弾性波法を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目調査，大ダム，No. 241, pp. 117～122, 2017年10月
- 9) 市川滋己，新屋敷隆，鎌田敏郎：衝撃弾性波法を用いたダム堤体の打継面調査，ダム工学，27(1), pp. 16～25, 2017年3月
- 10) 市川滋己，永井哲夫，鎌田敏郎：衝撃弾性波法によるコンクリートダム打継面評価のための基礎的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第18巻，pp. 373～378, 2018年10月
- 11) 坂本浩之，吉川正浩：高周波衝撃弾性波法（オーリス）を用いた調査事例，電力土木，No. 343, pp. 112～114, 2009年9月
- 12) 独立行政法人水資源機構：川上ダム本体建設工事設計図，2017年4月

13) (株) I T W パフォーマンスポリマーズ&フルイズジャパン：D e v c o n 総合カタログ，2017年4月

第5章 赤外線サーモグラフィ法を用いた堤体水平打継目状態把握

5. 1 本章の概要

コンクリートダム堤体の維持管理に対して懸念をもたらす変状として、コンクリートダムの堤体下流面の漏水現象に進展する水平打継目の変状がある。この水平打継目の変状の状態を把握するために、一般的に実施されている調査手法には課題があり、変状が懸念されるダム堤体に対する必要な調査が十分に実施されていないことは否めない。

本章においては、必要な調査が十分に実施されていないという課題に対して、非破壊試験を用いた新たなコンクリートダム堤体の水平打継目の状態調査手法の提案による課題の解消を目的とした検討の一環として、赤外線サーモグラフィ法を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目状態把握手法について検討した結果について述べることとする。

検討内容としては、水平打継目に顕著な変状が発生し、堤体下流面漏水が確認される重力式コンクリートダムを赤外線サーモグラフィ装置で撮影し、取得した熱画像を分析し、その分析結果を基にして、打継目の変状の有無、ならびに変状の程度を判定する手法に関する提案である。

5. 2 赤外線サーモグラフィ法による堤体水平打継目の調査手法の検討

5. 2. 1 赤外線サーモグラフィ法の適用について

コンクリートダム堤体の水平打継目が劣化、すなわち上下層のコンクリートの一体性や密着度が低下すると下流面漏水が発生する。水平打継目の劣化が進展すると、下流面で確認される漏水量も増加すると推定されることと、あるいは開口した水平打継目には多くの水が滯水しやすいことに着目し、下流面で確認される漏水の状態、すなわち、濡れている範囲で、水平打継目の状態を点検・判定することは、ダム堤体の維持管理においては一般的に実施されていることである。点検・判定の参考事例として、ダム定期検査の手引き

【河川管理施設のダム版】ダム施設・貯水池の状態検査－個別判定例－¹⁾に示された判定の基準を表-5. 2. 1 に示す。

表 5. 2. 1 コンクリートダム堤体の状態（上流面・下流面）の判定基準¹⁾

判 定	判 定 の 基 準
a	劣化・損傷等により、ダムの安全性及び機能への影響が認められ、直ちに措置を講じる必要がある状態 【例】 <ul style="list-style-type: none">・堤体コンクリート深部までのクラックの進行や水平打継目の劣化・剥離により、多量の漏水が生じるとともに漏水量に増加傾向がみられるなど、堤体の安定性及び止水機能の著しい低下が認められる状態
b 1	ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、異状の兆候が認められることから、速やかに措置を講じる必要がある状態 【例】 <ul style="list-style-type: none">・堤体コンクリートにクラックが発生したり、水平打継目の劣化・剥離や漏水量が増加するなど、異状の兆候が認められ、今後、堤体の安全性及び止水機能に影響を及ぼすおそれがあると判断される状態
b 2	ダムの安全性及び機能は保持されていると判断されるものの、劣化・損傷等の状態から、必要に応じて措置を講じる必要がある状態 【例】 <ul style="list-style-type: none">・手摺り、排水溝等において、劣化・損傷等による変状の発生が認められる状態・構造物の劣化・剥離等の状態から、状態監視を強化する必要がある状態
c	劣化・損傷等が認められない、又は軽微な劣化・損傷等は生じているが、ダムの安全性及び機能に影響を及ぼすおそれがないと判断され、状態監視を継続することで良い状態 【例】 <ul style="list-style-type: none">・堤体コンクリートに軽微なクラックが発生したり、水平打継目の劣化・剥離、漏水等が発生するなど、部分的かつ軽微な劣化・損傷等はみられるものの、日常の巡視・点検により状態を監視すれば問題のない状態

ただし、下流面漏水の状態で判定を行うとしても、実際に漏水が堤体下流面を濡らす面積は、同一の漏水量があったとしても日射や湿度等の環境条件によって差異が生じることが想定できる。また、堤体下流面の漏水状態の把握は、遠方からの目視によるのが一般的であるため、堤体下流面にはエフロレッセンスの析出跡や経年による表面汚れ等が存在す

ることから、漏水の有無を目視あるいは可視画像で確認することは困難であると言つても過言ではない。

一方で、堤体から滲出する漏水の温度は、堤体下流面の温度と同一であるということは極めて稀であると推察されるため、漏水滲出部、すなわち劣化が進展した打継目部と堤体一般部、健全な打継目部との間には温度差が生じると考えられる。したがって、このコンクリートダム堤体表面の温度差に着目することで、水平打継目の変状状態を把握・判定することが可能になるとえた。

赤外線サーモグラフィ法は、離れた位置から対象物の表面温度を精度良く計測できる非破壊試験手法²⁾³⁾⁴⁾であり、接近することが困難な堤体下流面にも対応可能な手法である。この離れた位置から対象物が計測可能という特徴は、コンクリートダム堤体の形状及び規模に起因した、接近しての計測は困難であるという計測条件に対しても適合する。赤外線サーモグラフィ法を用いたコンクリートダム堤体の変状調査に関する既往研究として、小堀らの研究⁵⁾が存在するが、この研究においては堤体表面のコンクリート剥離を主たる対象としており、水平打継目の変状については対象としていない。

そこで、コンクリートダム堤体の水平打継目の健全部と劣化部との温度差に着目し、この温度差を赤外線サーモグラフィ法による計測・分析することで、水平打継目の変状状態の分類判定を行う手法について検討することとした。

5. 2. 2 検討方法

赤外線サーモグラフィ法を用いた堤体の水平打継目の状態把握手法の検討については、漏水が確認される供用中のコンクリートダムをモデルダムとして選定し、堤体下流面の熱画像を計測し、その計測された温度を基にして水平打継目の劣化程度の分類評価を実施することを行った。

(1) モデルダム

本検討においてモデルダムとして、赤外線サーモグラフィ法を用いて水平打継目からの漏水部を含めて堤体下流面の表面温度を計測したのは、第4章でモデルダムとした、四国地方に位置する、1974年に完成した堤高42m、堤頂長138mの重力式コンクリートダムである。Aダムの下流面漏水状況写真を図-5.2.1に示す。Aダムの堤体下流面図、堤体平面図及び堤体標準断面図を図-5.2.2～図-5.2.4に示す。このダムの左岸側のBL.2～BL.5の下流面を対象として計測を行った。

また、堤体下流面は南南西を向いているが、ダムサイトは谷地形に位置することから早朝には左岸の尾根によって日射が遮られ左岸側のブロック(BL.2～BL.3)が日陰になるとともに、夕方にはゲート門柱によって日射が遮られ右岸側のブロック(BL.4～BL.5)が日陰になるという日射条件にある。



図-5.2.1 Aダムの漏水状況

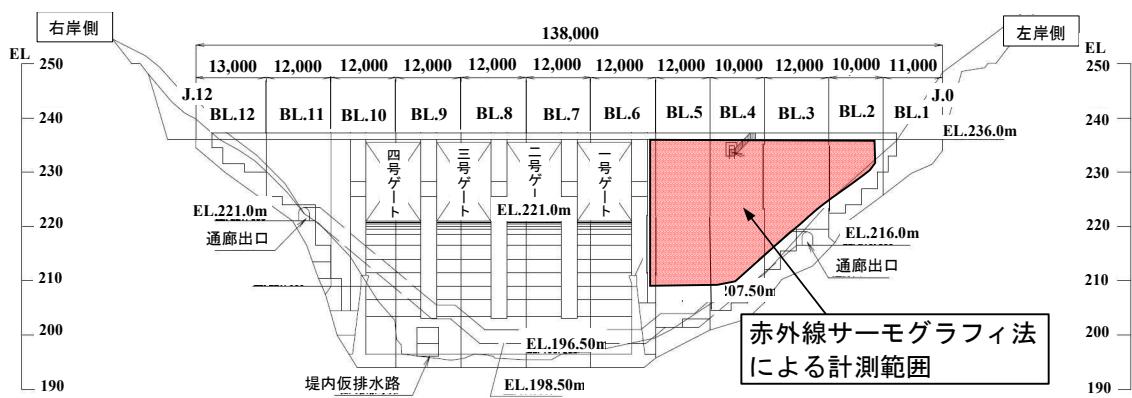


図-5.2.2 Aダムの堤体下流面

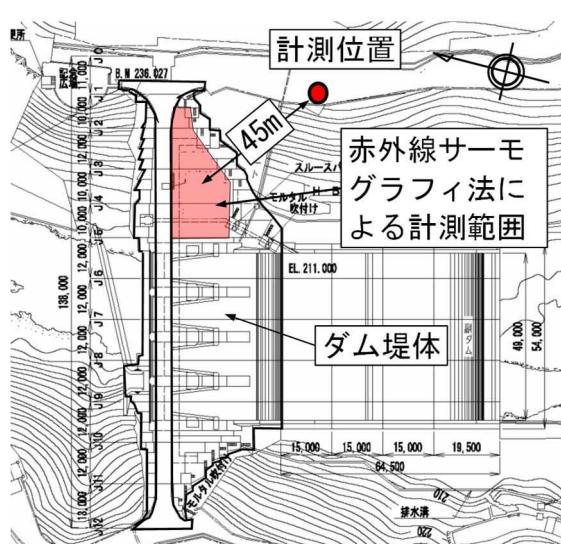


図-5.2.3 Aダムの堤体平面図

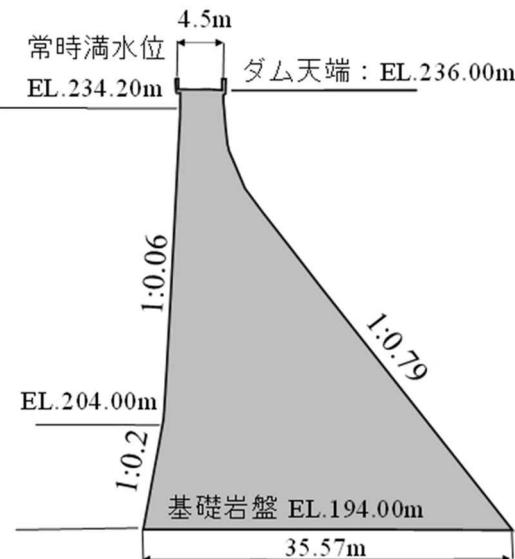


図-5.2.4 Aダムの堤体標準断面図

(2) モデルダムの計測方法

赤外線サーモグラフィ法による温度測定は、表-5.2.2に示す仕様の赤外線サーモグラフィ装置(図-5.2.5)を用いて、図-5.2.3にも示したAダムの堤体左岸天端下流側の駐車場から行った。赤外線サーモグラフィの設置状況を図-5.2.6に示す。計測位置からの堤体下流面までの距離は約35~60mで、計測対象面に対する撮影角度は水平方向で約30~60°、鉛直方向で約57~75°である。なお、距離と視野角の関係から、対象とする計測範囲全体を1回で撮影できないため、図-5.2.7に示すように水平方向に4回、鉛直方法には3回~4回に分けて計測を行った。

計測の時期は、気温が高く、かつ日射量も多いため、堤体コンクリートへの熱供給が多い夏季と、堤体表面コンクリートが収縮し、漏水が増加する冬季に実施することとして、令和元年9月4日～5日と令和元年12月10日～11日に実施した。

表-5.2.2 赤外線サーモグラフィ計測装置の性能仕様

項目	仕様
型式	日本アビオニクスR300SR(60Hz)
センサ	2次元非冷却センサ(マイクロポロメータ)
センサ解像度	320(H)×240(V)
温度測定範囲	-40°C ~ 500°C R1 : -20°C ~ +60°C R2 : -40°C ~ +120°C R3 : 0°C ~ +500°C
測定波長	8.0~14.0 μm
温度分解能(NETD) ※[波形ノイズ/10]で定義	R1 : 0.05°C (at30°C, 60Hz) 0.03°C (アベレージング:強の場合) R2 : 0.08°C (at30°C, 60Hz) R3 : 0.3°C (at30°C, 60Hz)
温度指示精度	R1: 環境温度 10~40°C : ±1°C 環境温度 10°C未満 : ±2°C 環境温度 40°C超 : ±2°C R2、R3: 環境温度-15~50°C : ±2°C 又は 読み値の±2%のいずれか大きい方
瞬時視野角	通常熱画像 : 1.21mrad
焦点範囲	10cm ~ ∞ (標準レンズ搭載時)
視野角	水平22° × 垂直17°, 精度 : ±10%
フレームタイム	60Hz



図-5.2.5 使用した赤外線サーモグラフィ計測装置⁶⁾



図-5.2.6 計測対象（Aダム下流面）と撮影位置との関係

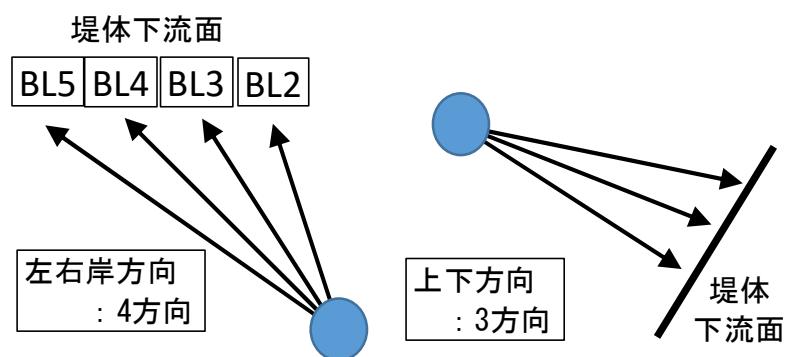


図-5.2.7 計測対象（Aダム下流面）に対する赤外線サーモグラフィ計測装置の視野切換

5. 2. 3 計測結果と考察

(1) 夏季計測

夏季計測時における環境条件として、Aダム管理所で計測している外気温とダム貯水位の9/4の0時から9/5の12時までの変化を図-5.2.8に示すが、外気温は21.4~30.5°Cの間で、貯水位についてはEL.225.76~226.06mの間で変動した。また、計測時の天候は概ね晴れであったが、計測を開始した9/4の7時の12時間前までにダム地点では累加雨量で6mmの降雨があり、加えて、Aダムでは通常の堤体の維持管理として夏季の晴天日にはBL.4及びBL.5において堤頂部から下流面に対する撒水を概ね10時から17時の間実施しており、堤体が全体的に湿潤な状態から計測を開始している。図-5.2.9に、計測開始時(9/4:7時)における堤体下流面の状況写真を示す。

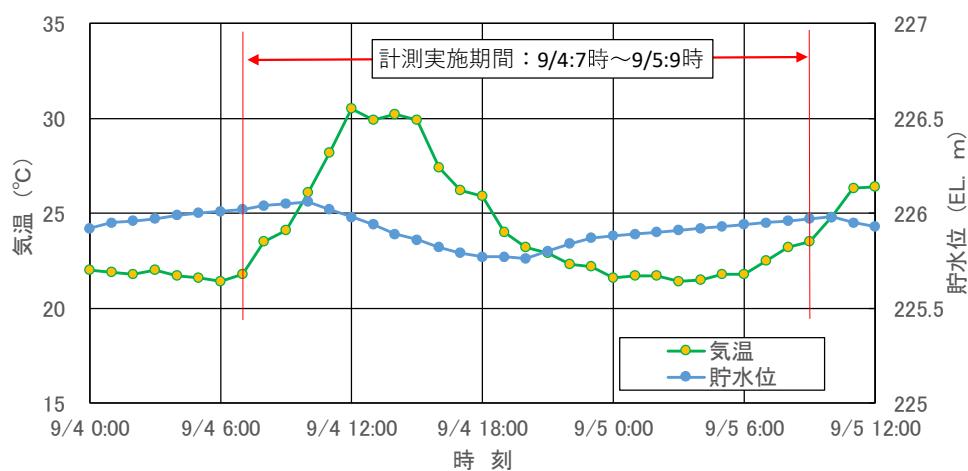


図-5.2.8 計測実施期間の気温と貯水位



図-5.2.9 夏季計測開始時(9/4:7時)の堤体下流面状況

夏季計測の結果として、9/4の7時、10時、13時、16時、18時、及び9/5の6時におけるBL.3, BL.4, 及びBL.5のEL.224.0m付近の熱画像とその範囲を含む可視画像を表-5.2.3～表5.2.5に示す。

これらの熱画像から、①堤体の水平打継目部は水平打継目の上下の一般部のコンクリート表面に比較して低温である、②漏水による滲みが生じている箇所、あるいは降雨や人工的な撒水によって湿潤状態になっている箇所は、乾いている箇所に比較して明らかに低温である、ということが確認される。

①の現象が発生するのは、Aダムにおいては図-5.2.10に示すように、下流面と打継目との交点が面木によって三角形に面取りされているため、他の部分に比較して、日射エネルギーが当たりにくく位、放熱しやすいことに起因したものと推察される。一方、②については夏季には堤体表面よりも温度が低い降雨水及びダム貯留水、ならびにダム貯留水が透過する堤体も夏季には表面より内部の方が低温であることに起因したものと推察される。



図-5.2.10 面木によって面取りされた堤体下流面と打継目の交点

表-5.2.3 BL.3の熱画像と可視画像（夏季計測）

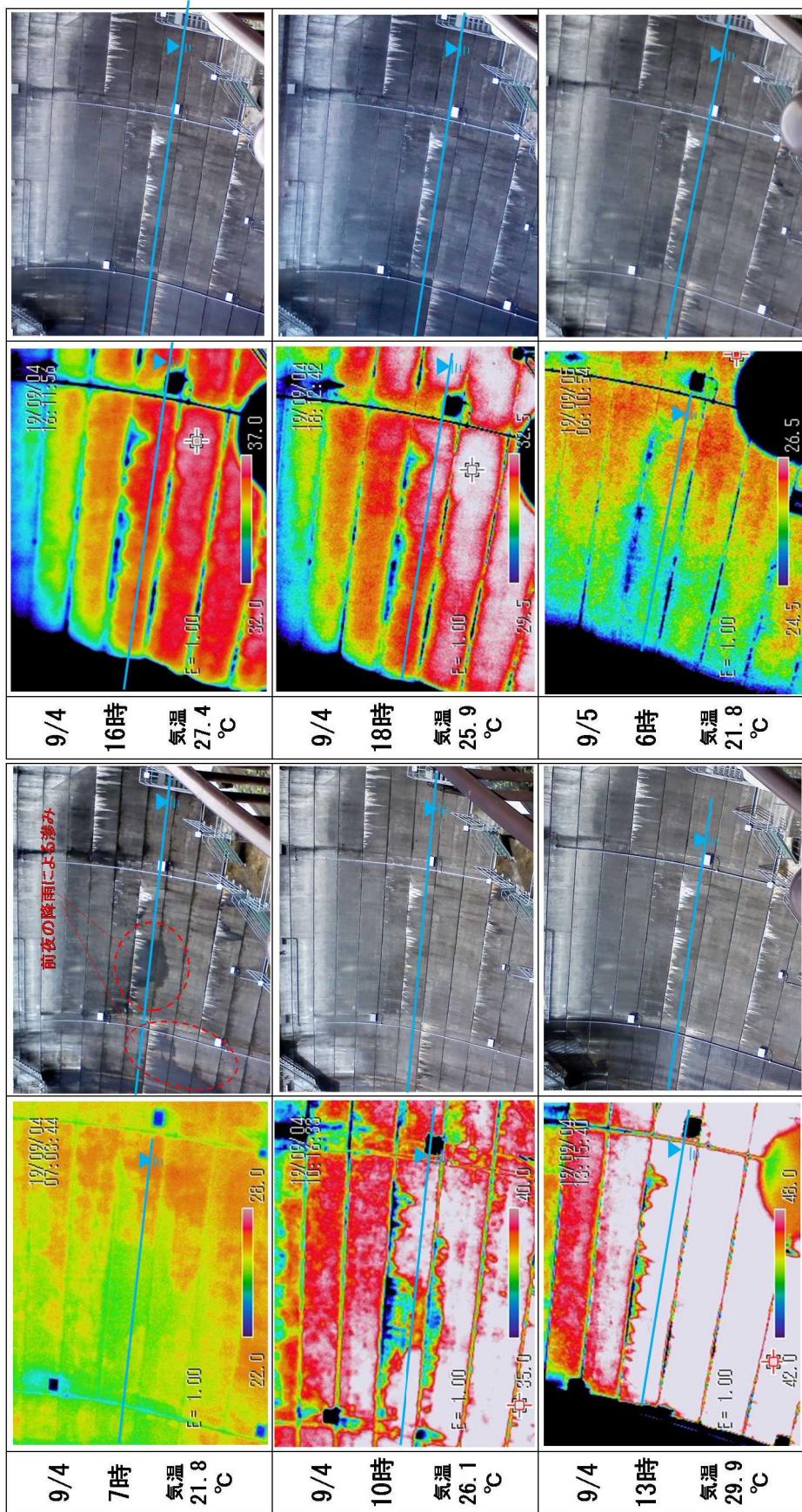


表-5.2.4 BL.4 の熱画像と可視画像（夏季計測）

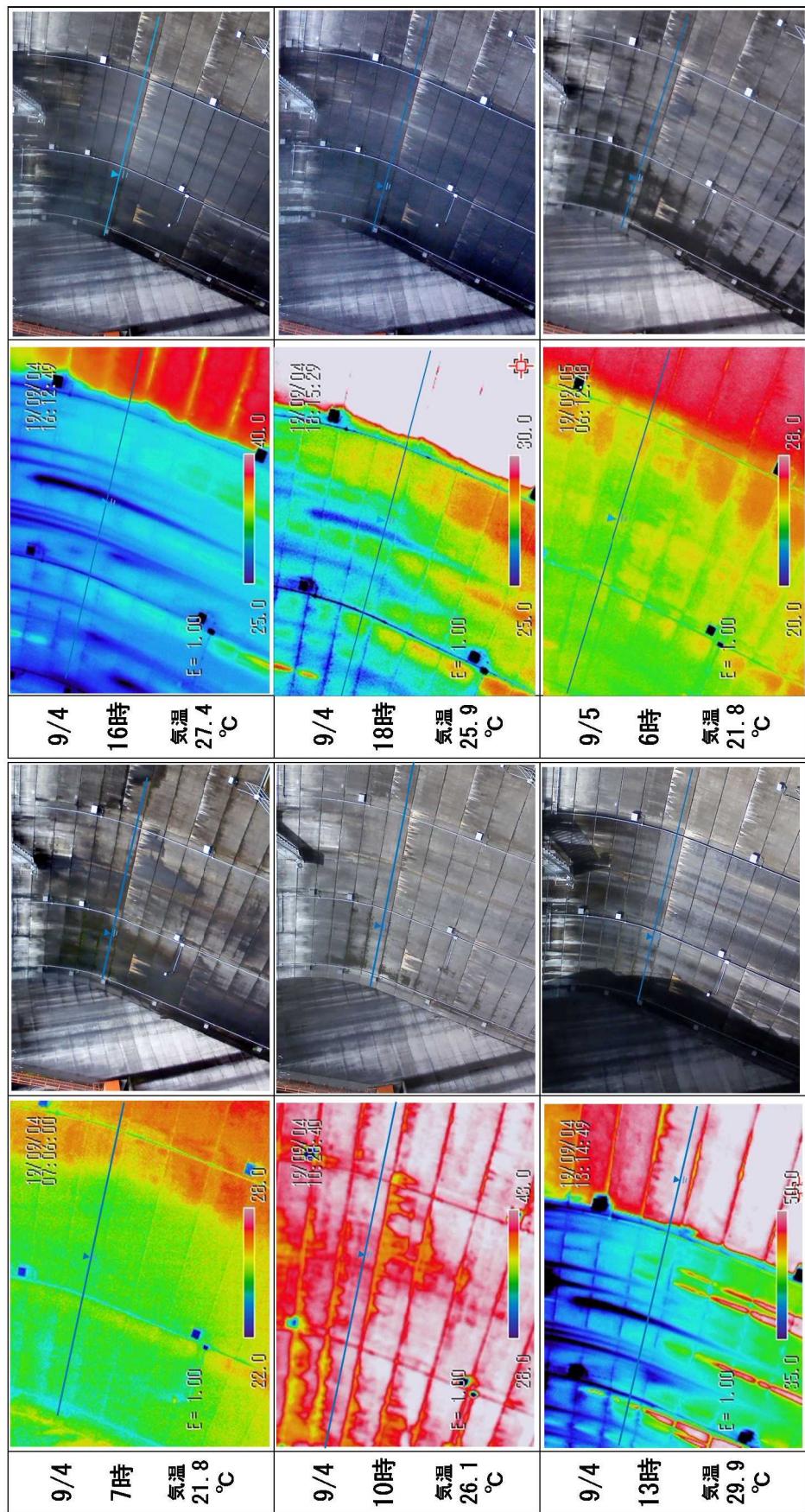
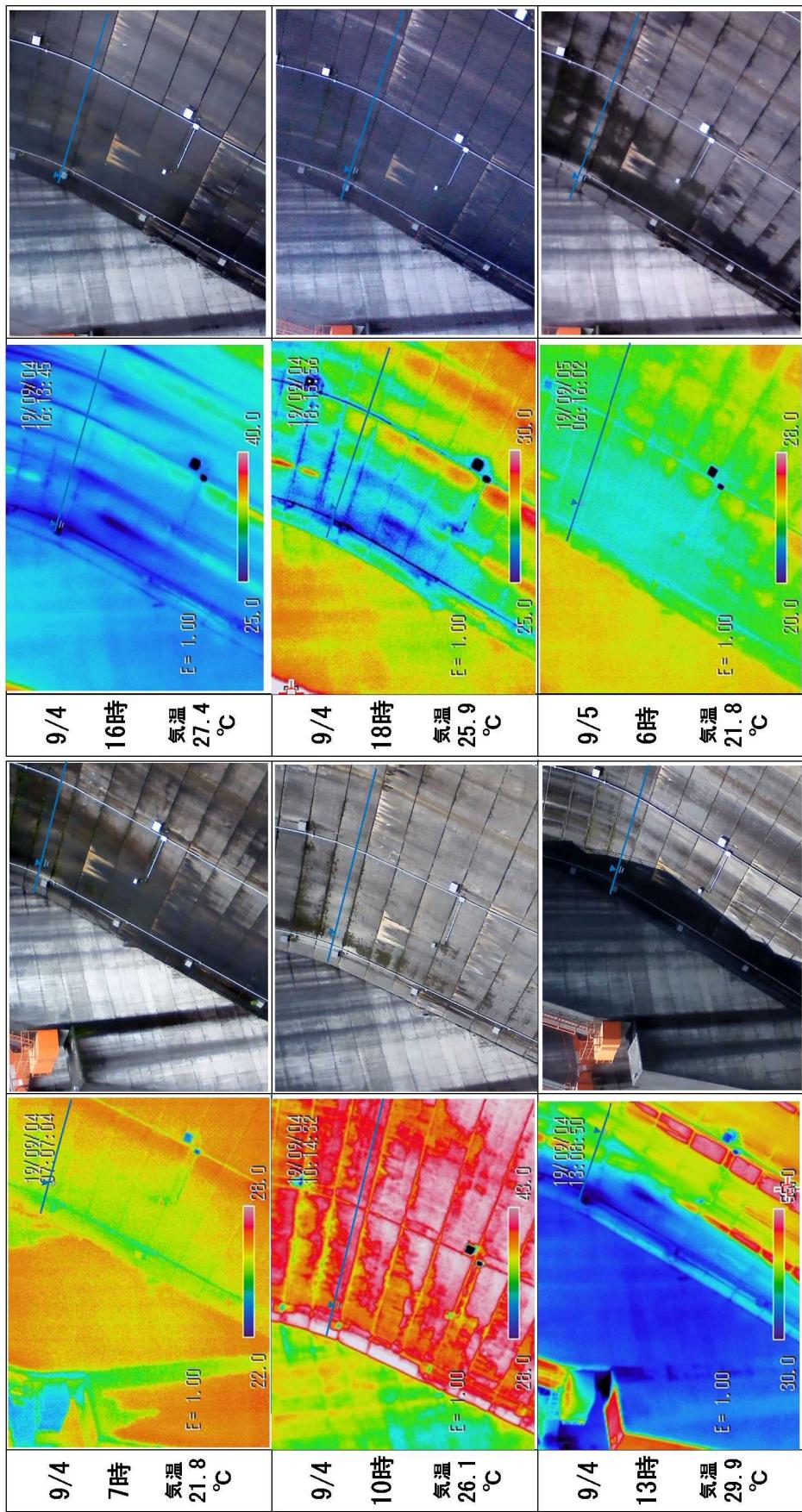


表-5.2.5 BL.5の熱画像と可視画像（夏季計測）



つぎに、下流面への撒水の無い BL.3において、計測当日の貯水位よりも高標高に位置する EL.228.5m と EL.227.0m の水平打継目、ならびに貯水位よりも低標高に位置する EL.225.5m と EL.224.0m の水平打継目に着目して、日射及び気温が変化する環境状態における、打継目及びその周辺温度について分析した。なお、9/4 の計測開始の時点において、EL.227.0m の打継目及び EL.225.5m の打継目には、前日の降雨によると推定される滲みが可視画像(目視)で確認される状態であった。

表-5.2.6 に、BL.3 の EL.224.0m, EL.225.5m, EL.227.0m, EL.228.5m 水平打継目の計測時間毎の熱画像と 4m 区間 (J.3-2m～J.3-6m) の表面温度分布を示す。また、図-5.2.11 には、各打継目の 4m 区間 (J.3-2m～J.3-6m) における平均温度と最低温度の経時変化を示す。

表-5.2.6(1) BL.3 の EL.224.0m, EL.225.5m, EL.227.0m, EL.228.5m 水平打継目の J.3-2m～J.3-6m の表面温度分布 (9/4 : 7時～12時)

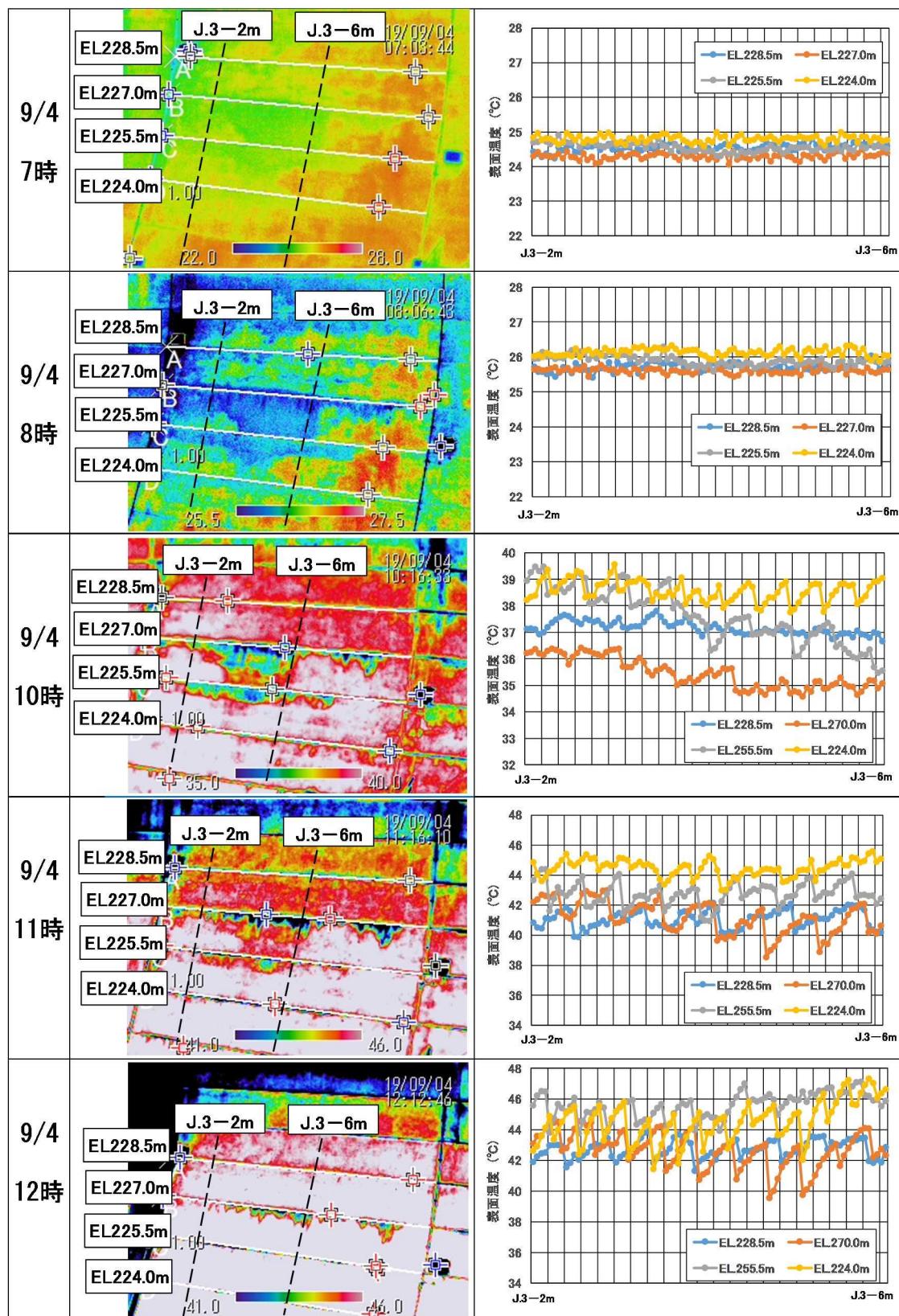


表-5.2.6(2) BL.3 の EL.224.0m, EL.225.5m, EL.227.0m, EL.228.5m 水平打継目の J.3-2m~J.3-6m の表面温度分布 (9/4 : 13時~18時)

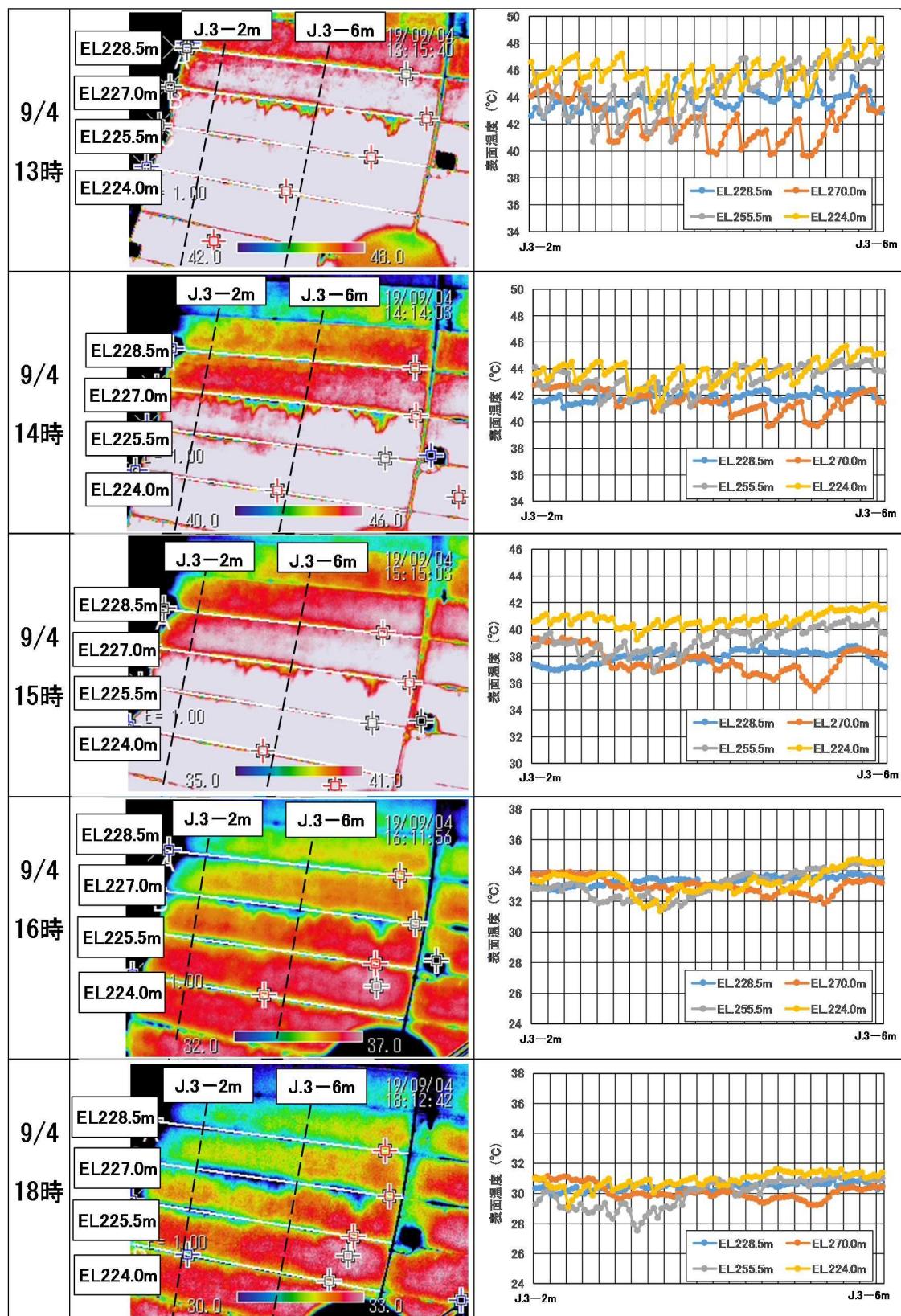
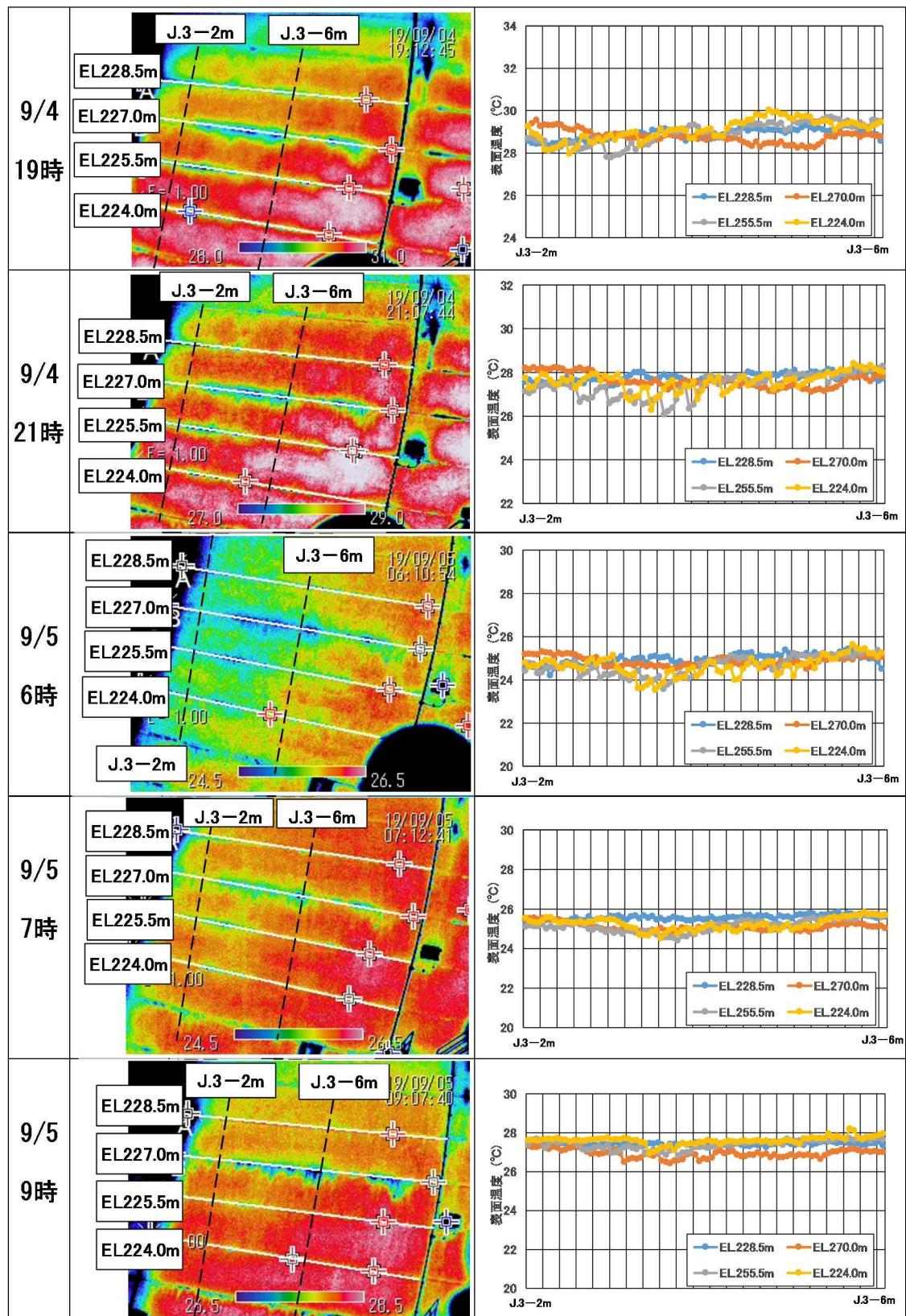


表-5.2.6(3) BL.3 の EL.224.0m, EL.225.5m, EL.227.0m, EL.228.5m 水平打継目の J.3-2m ~ J.3-6m の表面温度分布 (9/4 : 19時 ~ 9/5 : 9時)



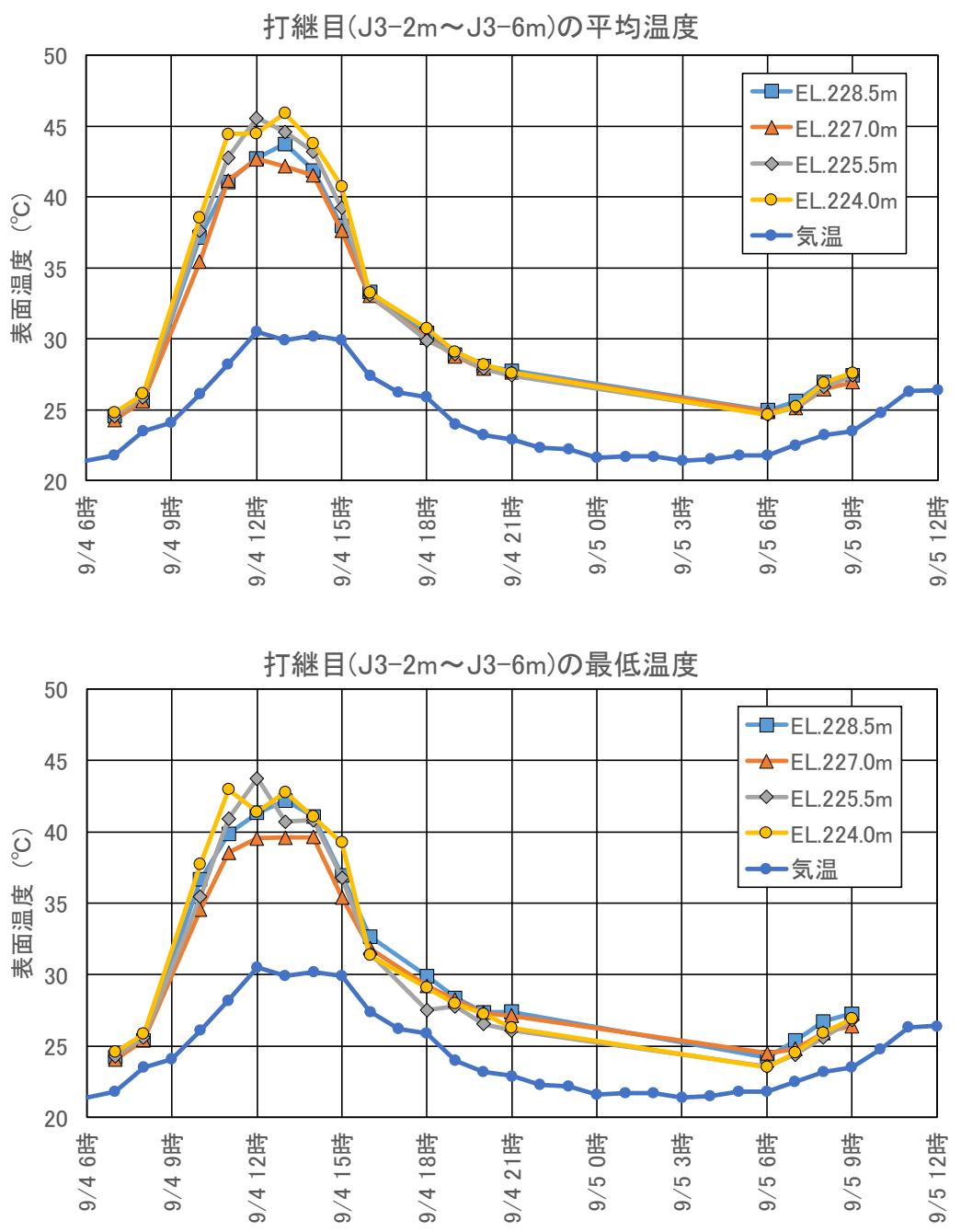


図-5.2.11 BL.3 の 4 つの水平打継目の平均温度及び最低温度の経時変化

これらの表および図から、以下のことがわかる。

- ①可視画像で濡れていると判断される部分については、熱画像においては低温域として計測されている。
- ②可視画像では濡れていると確認されるだけであっても、熱画像では 0.1°C オーダーの小さなものであるが濡れている範囲には面的には温度差の発生が確認され、中心から外に向かって温度が高くなる傾向が確認される。
- ③可視画像では濡れている判断ができない範囲の一部には、熱画像ではある程度の広がりを持った低温域として計測される範囲が含まれる。また、この低温域についても中心から外に向かって温度が高くなる傾向が確認される。
- ④打継目部の温度は、気温の上昇・低下に応じて、変化していることが確認される。
- ⑤日射による熱供給に起因するものと推察されるが、9~16 時の打継目温度の上昇・下降は、気温の上昇・下降に比して大きく変化している。
- ⑥計測開始時に降雨による濡れ滲みが最も確認され、最も変状が進んだ打継目であると推察される EL. 227.0m 打継目に着目すると、他の打継目に比較して温度上昇量は小さく、気温低下に伴う温度下降期においては温度下降量が小さく、夜間には最も温度が高くなる傾向が確認される。すなわち、外部からの熱供給に対して遅鈍な変化を示している。この傾向は、一般的なコンクリート構造物において表層部に欠陥がある場合に計測される、欠陥部の表面温度は、周囲に比較して、上昇時には高温であり、下降時には低温であるという特徴⁷⁾⁸⁾ (図-5.2.12) と異なるものである。このような温度上昇・下降傾向を示す要因は、明確では無いが、変状部には一般部よりも多く存在していると推察される、比熱がコンクリートの約 4 倍である水による影響があると考える。

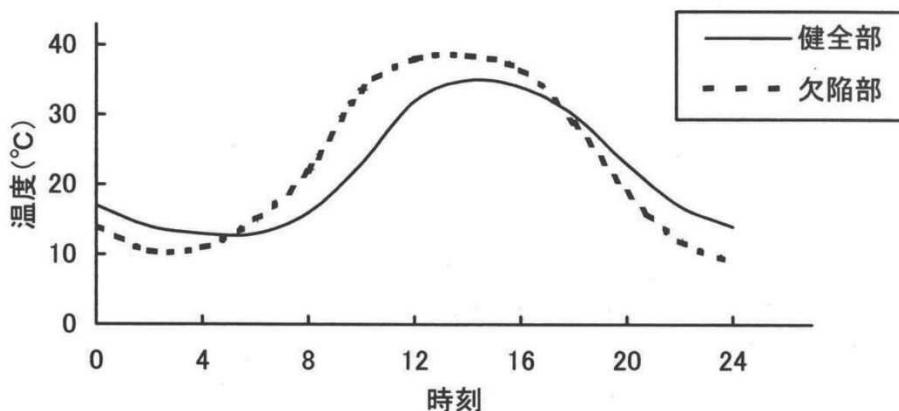


図-5.2.12 一般的なコンクリート構造物の健全部と欠陥部の表面温度変化モデル⁷⁾

以上に示した夏季計測における、水平打継目の劣化度と堤体下流面の漏水(・滲み)の温度との関係を整理すると、劣化度は、打継目温度－堤体表面温度との間に図-5.2.13に示すような関係にあると考えることができる。

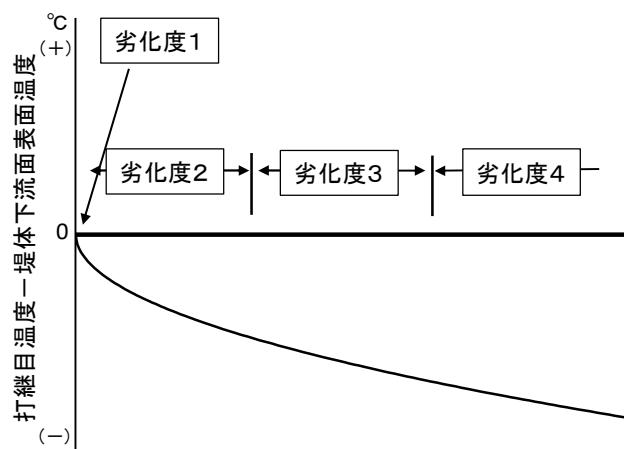


図-5.2.13 夏季における劣化度と温度差(打継目温度-堤体表面温度)との関係(イメージ)

(2) 冬季計測

冬季計測時における環境条件として、A ダム管理所で計測している外気温とダム貯水位の 12/10_0 時から 12/12_0 時までの変化を図-5. 2. 14 に示すが、外気温は 2.4~15.0°C の間で、貯水位については EL.228.10~228.09m の間で変動した。また、計測時の天候は概ね晴れであった。図-5. 2. 15 に計測開始時(12/10 : 12 時)における堤体下流面の状況写真を示す。

冬季計測の結果として、12/10 の 12 時～12/11 の 12 時における BL.3, BL.4, 及び BL.5 の EL.224.0m 付近の熱画像とその範囲を含む可視画像を表-5. 2. 7～表 5. 2. 9 に示す。

また、漏水が生じている打継目から、BL.3 の EL.227.0m の打継目、BL.4 の EL.225.5m の打継目、BL.5 の EL.219.5m の打継目、の 3箇所を抽出し、12/11 日の 8 時の状況について、可視画像、熱画像、及び打継目の温度分布を表-5. 2. 10 に示す。

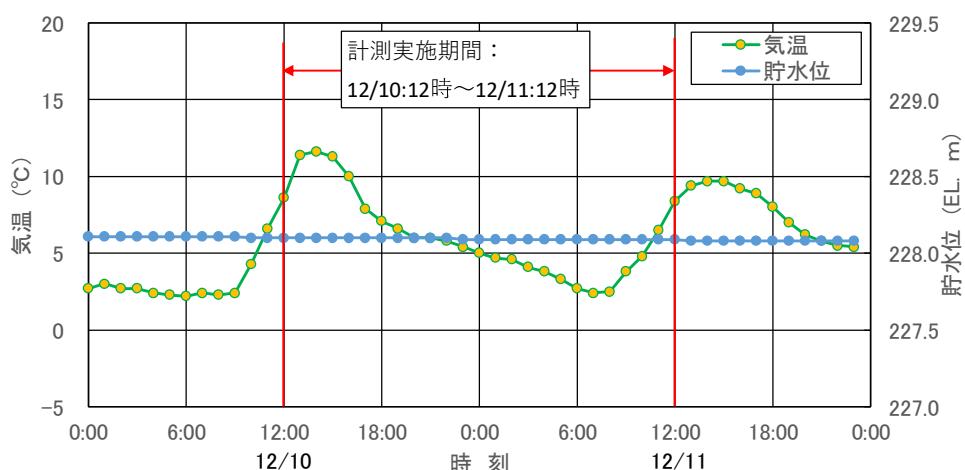


図-5. 2. 14 計測実施期間の気温と貯水位



図-5. 2. 15 冬季計測開始時(12/10:12 時)の堤体下流面状況

表-5.2.7 BL.3 の熱画像と可視画像（冬季計測）

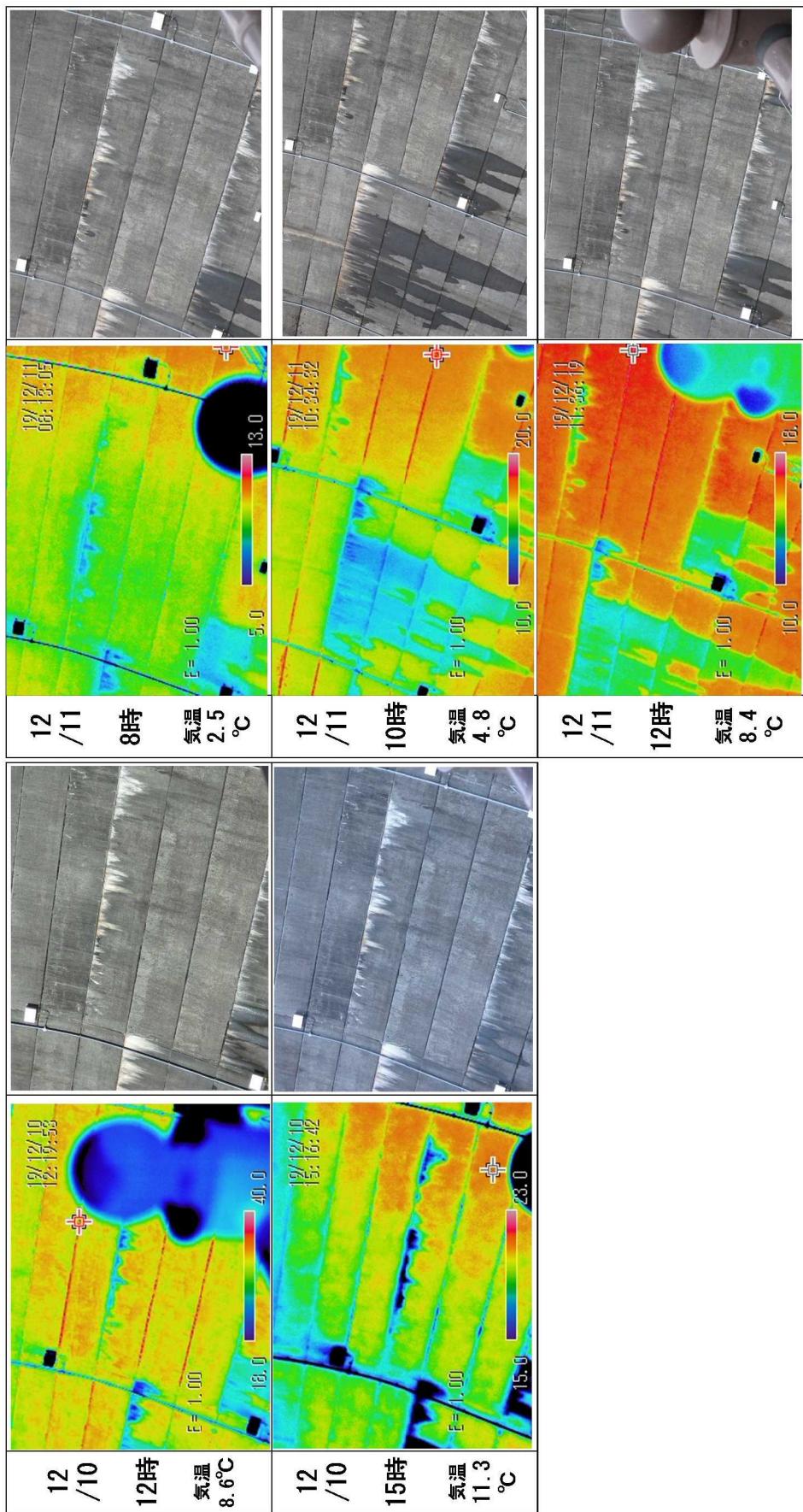


表-5.2.8 BL.4 の熱画像と可視画像（冬季計測）

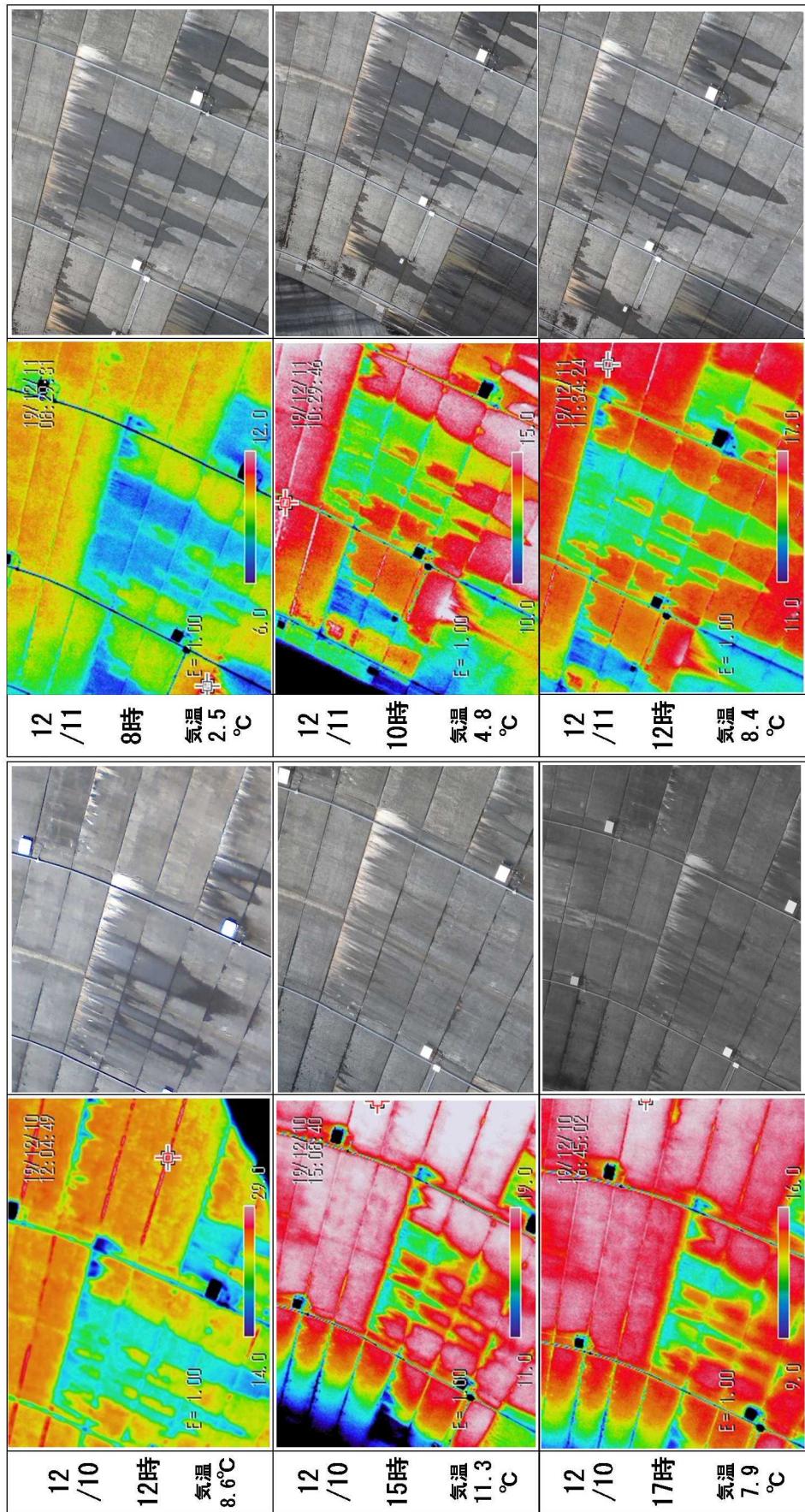


表-5.2.9 BL.5 の熱画像と可視画像（冬季計測）

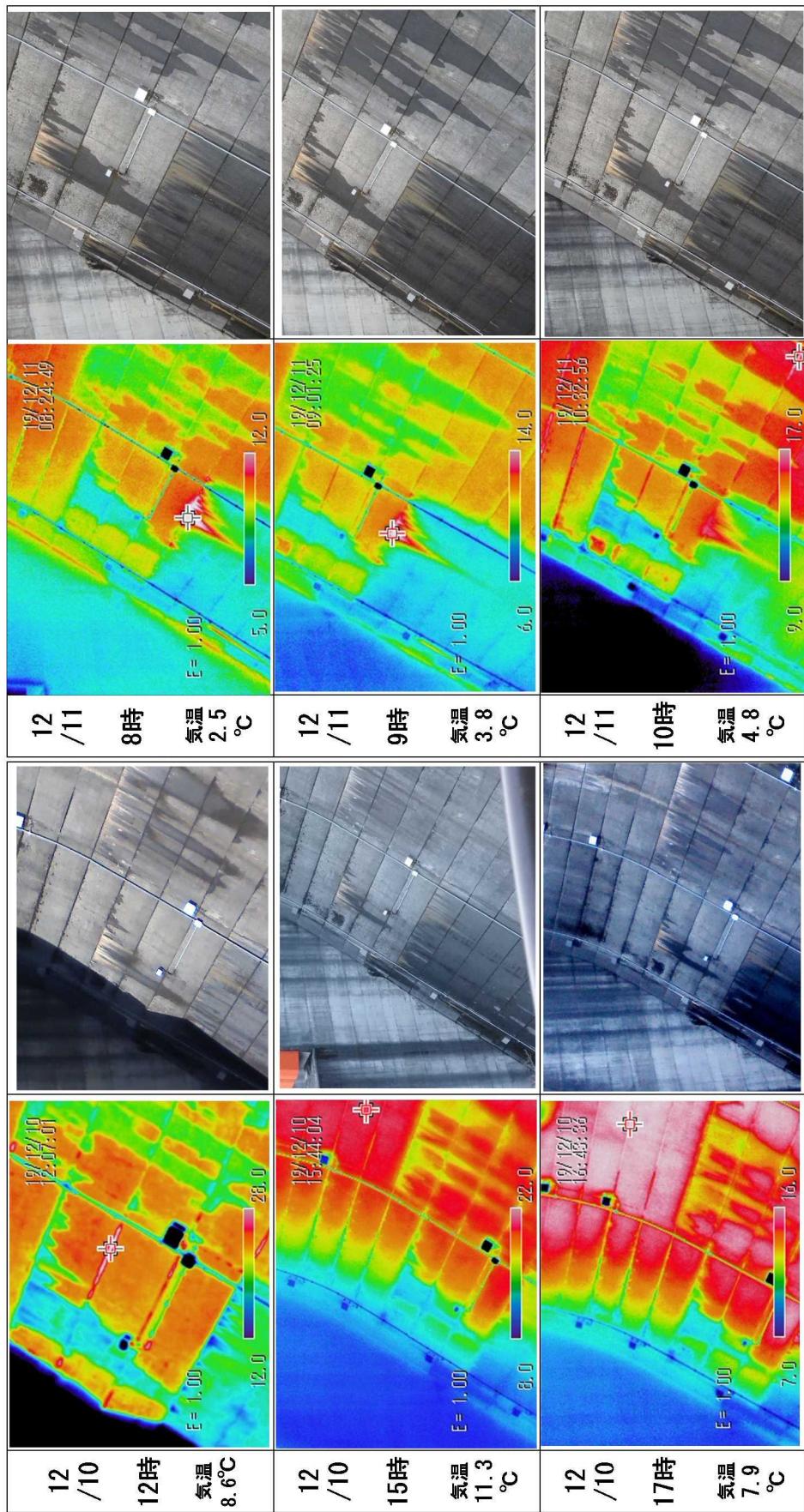
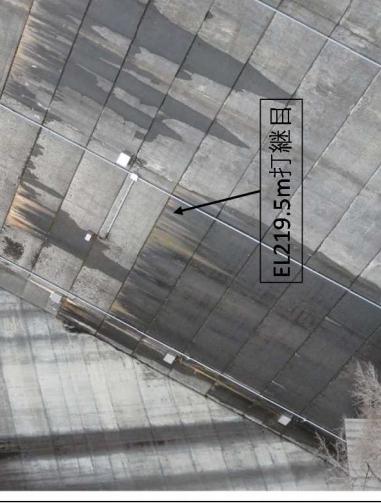
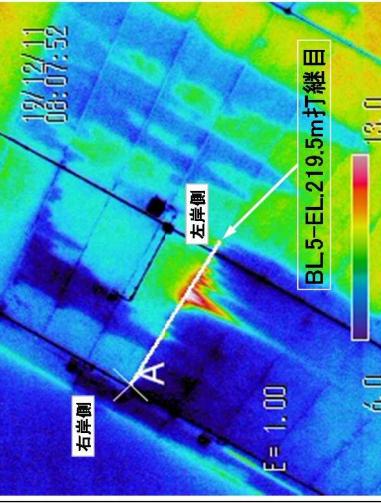
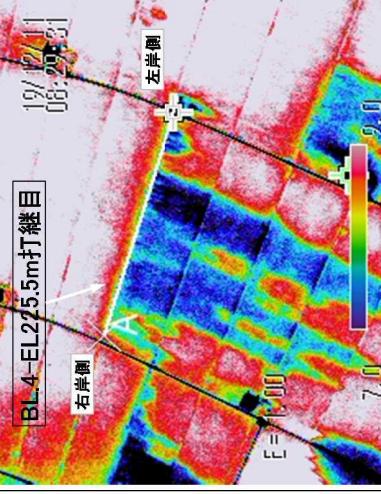
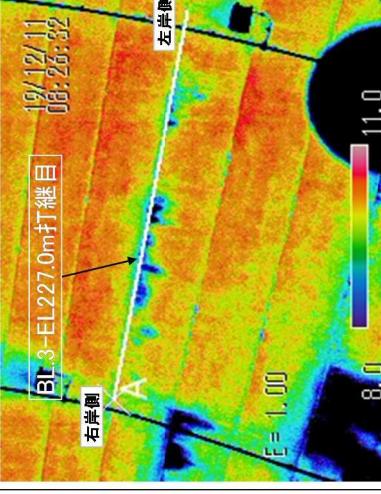
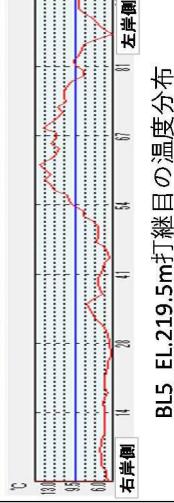
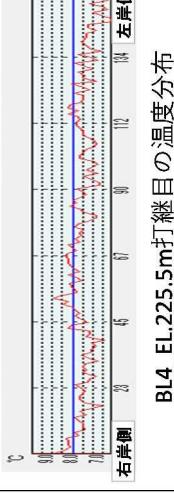
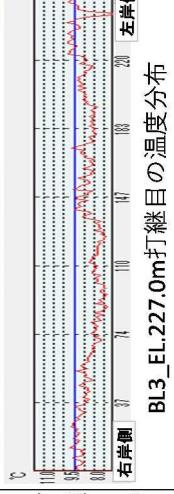


表-5.2.10 漏水の生じた打継目(BL.3-EL.227.0m, BL.4-225.5m, BL.5-219.5m)の可視画像、熱画像並びに打継目の表面温度(12/11, 8時)

	BL3-EL227.0m打継目	BL4-EL225.5m打継目	BL5-EL219.5m打継目
可視画像	 BL3-EL227.0m打継目	 BL4-EL225.5m打継目	 BL5-EL219.5m打継目
熱画像		 BL4-EL225.5m打継目 12/11 06:07:52 E = 1.00 6.0 12.0 右岸側 左岸側 A	 BL5-EL219.5m打継目 12/11 06:07:52 E = 1.00 8.0 11.0 右岸側 左岸側 A
温打継目分布			 BL4_EL225.5m打継目の温度分布  BL3_EL227.0m打継目の温度分布  BL5_EL219.5m打継目の温度分布

冬季計測において得られた熱画像では、①漏水によって濡れている部分については周辺部に比較して、明確な温度差がある、②漏水で濡れている下流面及び水平打継目は中が低温で外側に広がる（乾いている範囲に向かう）ほど、徐々に温度が上昇する、③熱画像で確認される温度差から、水平打継目の変状の大小が概ね把握できる、という夏季計測で確認された特徴が確認された。

しかし、その一方で、夏季計測において確認された変状の発生有無に関わらず、すべての水平打継目の温度は周囲の温度に比較して低温であるという傾向は認められず、その傾向は漏水滲み、あるいは他から供給された水によって湿潤状態であると推定される水平打継目のみ認められる。そして、乾いた水平打継目の温度は、温度上昇期には周囲に比較して高温であるという傾向を示しており、これは一般のコンクリート構造物で表層部に空隙等欠陥がある場合に確認される現象⁷⁾⁸⁾（図-5.2.12）と同じ傾向である。夏季計測実施日の前日に降雨があり、堤体が湿った状態であったことを考慮すると、堤体が乾いた条件においては、一般のコンクリート構造物で表層部に欠陥があるのと同一の温度変化特性を示すと考えることができる。

また、漏水が確認された箇所の温度は多くの箇所では周囲よりも低温であるが、BL.5のEL. 219.5m水平打継目の左岸側端部付近においては漏水の温度が周囲よりも高温となる現象も確認されている。このBL.5のEL. 219.5m水平打継目の左岸側からの漏水は、他の箇所に比較して多いと認識されてきた箇所であることから、他の漏水箇所で計測される温度の傾向と異なる要因について以下に検討する。

冬季計測を実施した期間(12/10～11)における貯水池中（EL. 215.18～227.68m）の水温は概ね12.6°Cであり、堤体内部のコンクリート温度についてもほぼ同程度であると考えられる。したがって、堤体の水平打継目を滲出経路として堤体下流面に滲出した時点における漏水の温度は貯水池の水温と同程度の温度であると推察できる。一方で、外気温は2.5°C(12/11 8:00)であり、堤体下流面の温度については9～10°Cである。

一般的に、温度差のある物質が接触した場合には、物質との間で熱交換が生じ、高い温度の物質は温度が低下し、温度の低い物質は温度が上昇する。また、液体の気化のために気化熱が必要となるため、その場合にも温度は低下する。

以上のことから、冬季計測において堤体下流面で計測された漏水箇所による、周辺との温度差の違いは次に示すロジックによって生じているものと考える。

①水平打継目の劣化度：大(→開口幅：大)

→ 漏水量：大

→ 下流面に流出しても外気あるいは下流面コンクリートあまり冷やされない。

→ 漏水の温度は貯水池水温と差が無い。

②水平打継目の劣化度：小(→開口幅：小)

→ 漏水量：小

→ 漏水量が少ないため、外気あるいは下流面コンクリートで冷やされる。

→ 漏水の温度は、低下する。

③水平打継目の劣化度：微小

→ 漏水量：滲み程度

→ 漏水の気化

→ 下流面コンクリートよりも温度は低下する。

以上に示した水平打継目の劣化度と堤体下流面の漏水(・滲み)の温度との関係を整理すると、劣化度は、打継目温度－堤体表面温度との間に図-5.2.16に示すような関係にあると考えることができる。

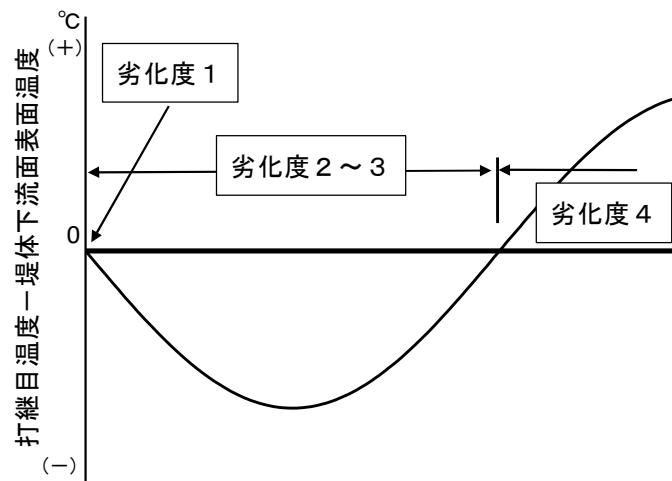


図-5.2.16 劣化度と温度差(打継目温度-堤体表面温度)との関係(イメージ)

(3) 打継目状態の分類区分

夏季計測及び冬季計測において確認した堤体下流面表面における温度分布から推定した図-5.2.13 及び図-5.2.16 の関係を基に、貯水池水温、堤体の表面温度、及び打継目温度との関係から水平打継目の変状の程度を分類する、表-5.2.11 に示す区分を提案する。

表-5.2.11 打継目状態の分類区分

劣化度	損傷程度	$T_A < T_B$	$T_A > T_B$
		堤体表面温度と打継目温度との関係	
1	健全 ↓ 損傷大	打継目温度 \leq 堤体表面温度	打継目温度 \leq 堤体表面温度
2		打継目温度 < 堤体表面温度	打継目温度 < 堤体表面温度
3		打継目温度 << 堤体表面温度	
4		打継目温度 <<< 堤体表面温度	打継目温度 > 堤体表面温度

ここに、 T_A ：貯水池水温 T_B ：堤体表面温度

5. 3 本章のまとめ

供用中のコンクリートダム堤体において、水平打継目からの漏水、あるいは水平打継目での滯水現象に着目し、赤外線サーモグラフィ法による計測を夏季及び冬季に実施し、計測結果を用いて水平打継目の状態についての評価を試みた。この結果、堤体コンクリートや水平打継目の状態と赤外線サーモグラフィ法によって計測される温度との間には、以下の関係があることが確認された。

- (1) コンクリートダム堤体表面が湿潤状態にあるとき、水平打継目の温度は周囲の一般部の表面温度に比較して低い。このとき、水平打継目の劣化が進んでいる箇所の方がより低温として計測される。
- (2) コンクリートダム堤体表面が湿潤状態にあるとき、気温あるいは日射エネルギーの変化に伴う、水平打継目部の温度変化は、堤体表面温度の変化に対して遅延し、その温度変化の遅延程度は変状が進展した水平打継目のほうが大きい。これは一般のコンクリート構造物の表層部に欠陥がある時に確認される温度変化の傾向とは異なる。
- (3) コンクリートダム堤体表面が乾燥状態にあるとき、気温の上昇、あるいは日射エネルギーによって堤体表面の温度が上昇する際には水平打継目の温度は周囲の一般部の堤体表面温度に比較して高温となる。しかし、温度上昇が収束、あるいは降下過程においては水平打継目の温度の方が低温となる。これは一般のコンクリート構造物の表層部に欠陥がある場合の温度変化の傾向と同一である。
- (4) 下流面コンクリート温度に対して貯水池水温が低く、水平打継目からの漏水が確認される場合、水平打継目の変状が進んでいる方が水平打継目での温度は低い。
- (5) 下流面コンクリート温度に比較して貯水池水温が高く、水平打継目からの漏水が確認される場合、変状が進展しておらず漏水量も少ない状態では水平打継目付近の温度は一般部に対して低くなるが、水平打継目の変状が進んでいる場合には高くなる。

このように、堤体表面温度と水平打継目付近温度との関係は、水平打継目の堤体表面付近の変状に関係することが確認された。今後、異なった環境条件や貯水位条件、あるいは他のダムへの適用等の行い、計測データを蓄積することで精度をより向上させることが可能になるが、Aダムに対する今回の計測で確認された事項は、水平打継目間、あるいはある水平打継目のある範囲に対する変状の状態の相対的な評価を行うことを可能にする。

したがって、赤外線サーモグラフィ法によるコンクリートダム堤体の調査は、変状が生じている水平打継目、あるいは水平打継目の範囲の抽出に資するものと考える。

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局河川管理課流水管理室：ダム定期検査の手引き〔河川管理施設のダム版〕ダム施設・貯水池の状態検査一箇別判定例一, pp. 16, 2016年3月
- 2) 例えば社団法人日本非破壊検査協会編：新コンクリート非破壊試験, pp. 99～104, 2010年3月
- 3) 例えば公益社団法人日本コンクリート工学会編：コンクリート診断技術‘14[基礎編], pp. 109～112, 2014年2月
- 4) 例えば阪上隆英：赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査, 溶接学会誌, 第72巻, 第4号, pp. 251～255, 2003年
- 5) 小堀俊秀, 富田尚樹, 佐々木隆, 山口嘉一：赤外線カメラを用いたコンクリートダム堤体の健全度診断手法の提案, 土木学会第59回年次学術講演会概要集VI, pp. 389～390, 2004年9月
- 6) 日本アビオニクス(株)：インフレック R300SR 製品カタログ
- 7) 一般社団法人日本非破壊検査協会：NDIS3428:2009「赤外線サーモグラフィ法による建築・土木構造物表層部の変状評価のための試験方法」, pp. 8, 2009年9月
- 8) 土木コンクリート構造物のはく落防止用赤外線サーモグラフィによる変状調査マニュアル作成委員会編：土木コンクリート構造物のはく落防止用赤外線サーモグラフィによる変状調査マニュアル, pp. 47～49, 2005年3月

第6章 非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目状態把握方法の提案

6. 1 本章の概要

コンクリートダム堤体において経年によって生じる変状のひとつである水平打継目の変状を的確に把握することは、コンクリートダムの長寿命化を図るうえで重要であるが、この堤体の水平打継目の変状の状態を把握する方法として、第4章においては衝撃弾性波法、第5章においては赤外線サーモグラフィ法について検討を行った。

6. 2においては、この2種類の非破壊試験方法を組み合わせて、コンクリートダム堤体の水平打継目の状態について非破壊試験を用いて把握する合理的な方法について、検討し、提案を行う。

堤体の水平打継目に変状が確認され、堤体の性能に影響があると判断された場合には、補修が行われるのが一般的である。6. 3においては、この水平打継目の変状に対して実施されている補修工法について概説したのち、補修工法のうちの注入工法に着目して、注入工法の効果について本研究で提案を行った非破壊試験方法によって検証・確認する方法について述べる。

6. 2 衝撃弾性波法と赤外線サーモグラフィ法を併用した水平打継目状態把握

本研究においては、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状の状態を把握する方法として、衝撃弾性波法を用いる方法、及び赤外線サーモグラフィ法を用いる方法について、検討を行ってきた。それぞれの方法についての概要を表-6.2.1に示す。すなわち、衝撃弾性波法による方法については堤体内部の水平打継目の状態を面的に把握することが可能である。ただし、これを実現するためには従来から調査手法であるボーリング調査に比較すると、工期の短縮及びコスト縮減はされているものの、時間とコストを要する。一方、赤外線サーモグラフィ法については、短時間・低成本での調査が可能となるがあくまで堤体の上下流面の付近のみが対象範囲という課題を有する。

表-6.2.1 本研究で提案する2種類の堤体水平打継目状態把握調査手法

	衝撃弾性波法	赤外線サーモグラフィ法
状態把握の方法	対象打継目での弾性波の透過反射特性に基づき状態を推定	堤体下流面の表面温度を計測し、打継目部と周辺部との温度差を基に状態を推定
対象とする打継目の範囲	天端及び監査廊内からの計測を組み合わせて行うことで、広い範囲な状態の把握が可能。上下流端部の評価は不可能	堤体の上下流面付近のみ。
調査に要する時間とコスト	ボーリング調査に比較すると、省力化及び低成本化を図ることは可能であるが、現地作業には複数名体制で1h/計測点程度を要する(内業(分析評価)は別途)。	現地作業は1名体制で、数日程度/ダムで実施可能(内業(分析評価)は別途)。

この2種類の手法、それぞれの得失、ならびに、一般的な経年的な水平打継目の変状は堤体の上下流端から堤体に内部に向かって進展していくという劣化メカニズムを考慮して、図-6.2.1のフローに示す、赤外線サーモグラフィ法を概略調査、すなわちスクリーニングを目的として実施し、その上で詳細調査として衝撃弾性波法を実施する、2種類の非破壊試験方法を併用する調査方法を提案する。

これによって、詳細調査である衝撃弾性波法による調査の合理化と、衝撃弾性波法による調査結果に対して赤外線サーモグラフィ法による調査結果を加味した最終とりまとめを行う事で水平打継目状態推定の精度向上も期待される。

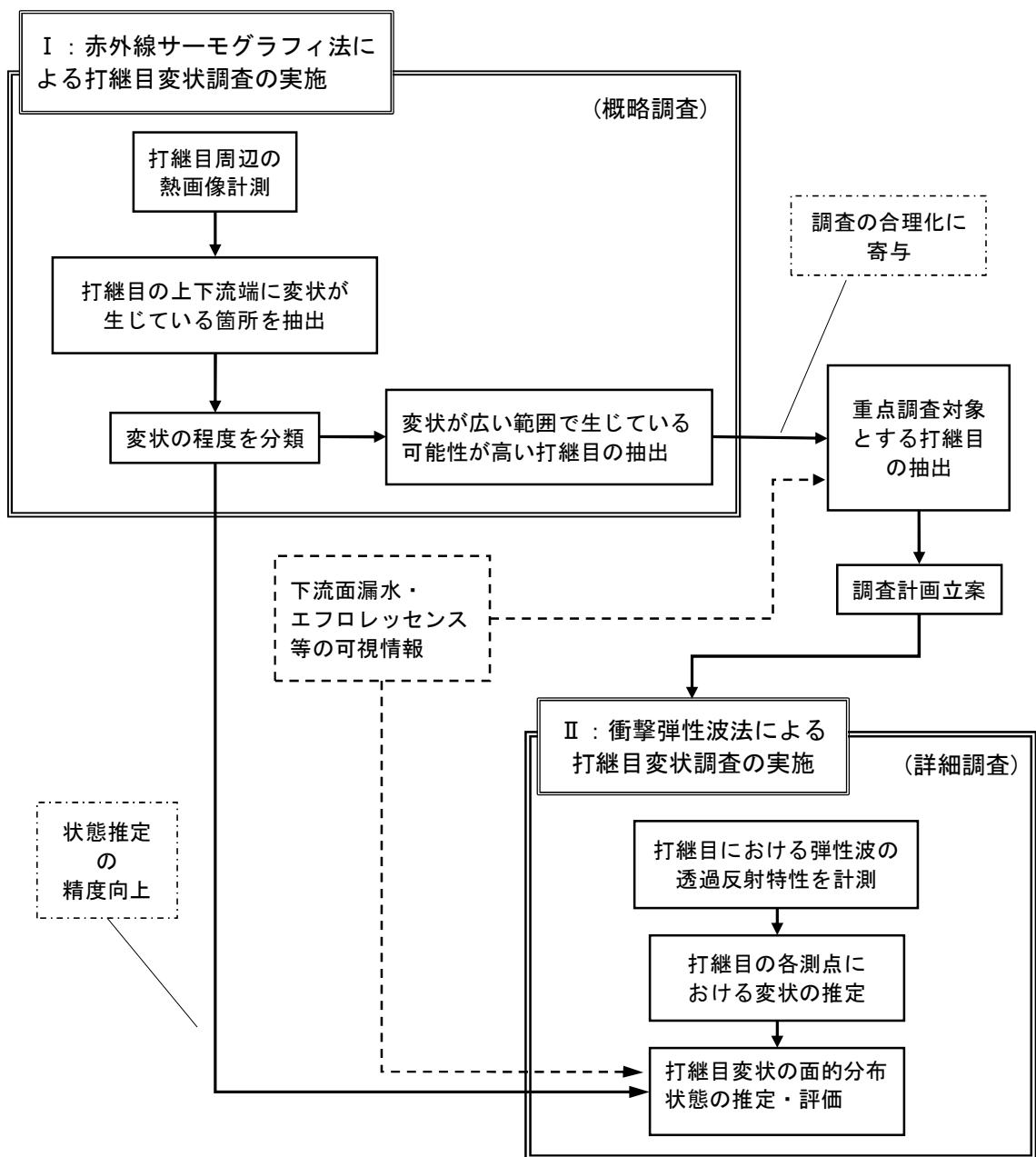


図-6.2.1 非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目の状態把握方法(案)

6. 3 水平打継目補修工事における施工の確実性確認への適用

6. 3. 1 変状が生じた水平打継目の補修工法

コンクリートダム堤体の水平打継目に変状、すなわち上下の打設リフトの一体性が低下した場合、3. 3. 2 でも述べた通り、打継目部の水密性が低下して漏水が発生、あるいは打継目部のせん断抵抗力が低下して堤体の安定性に影響が生じることとなる。なお、下流面漏水が生じているような状態の場合には、貯水機能の低下だけでなく、美観の低下、打継目を水が透過することによるセメント水和物の溶出、あるいは打継目への揚圧力の作用による堤体安定性の低下の原因となる。このような状況から、水平打継目に変状が生じた場合には必要に応じて補修が行われる。以下に、コンクリートダムで行われている補修工法について、主に漏水対策として行われる工法と堤体安定性低下対策として行われる工法に分けて概説する。

(1) 漏水に対する補修工法

コンクリートダム堤体の水平打継目の変状により下流面漏水が生じている場合の補修においては、堤体下流面からは施工しないという大原則がある。これは下流面で止水措置を行った場合には水平打継目への揚圧力の作用が継続する可能性があるからである。ダムの漏水対策として基準あるいは指針で定められた対策は存在せず、ダム毎にその対策をし、最適な対策を選定している¹⁾²⁾³⁾。ダム堤体に対して実施される対策について、大別すると以下の2種類の方法がある。

①変状が生じた水平打継目に対して、上流面、すなわち水の浸透経路の入り口を表面被覆や充填工法によって遮断する方法。

②水平打継目の開口部に、注入材を注入することで、水の浸透経路を閉塞してしまう方法。

このうち①の方法については補修材料が露出していることから、材料の劣化が早いことが懸念されるとともに、外観的にも補修の実施が明瞭になってしまいうとい課題を有している、①の方法については表面だけを補修、すなわち、欠陥が残置することを許容する補修方法であることから、選定を避けることがある。また、②の方法においても注入材料には、無機系あるいは有機系の2種類に大別できるが、無機系の注入材料を使用することが多い。以下に適用実績の多い、無機系材料を使用した注入工法を用いた漏水対策の方法について示す。

・注入材料

注入に用いる材料としては一般的には微細な間隙に対しても注入可能な微粒子セメントあるいは超微粒子セメントを用いたセメントミルクを用いることが多い。注入対象の間隙が広く、多量の材料が注入されるような場合には、ベントナイト、セメント及び水を混合したミルクに吸水性ポリマーを加えた注入材を使用することもある。

・注入方法

注入は図-6.3.1に示すような、上流面の水平打継目を覆うように設置した注入プレートから実施、またはより確実な注入を行うために対象の水平打継目と交差するように削孔した孔から実施することもある。これらの注入は図-6.3.2に示すように堤体上流面から実施することもあるが、貯水位が高い場合には水中からの作業となるため、図-6.3.3に示すようにダム天端から鉛直方向に削孔して注入することもある。

注入はグラウトポンプを用いて対象とする水平打継目に対して注入材の濃度を少しずつ濃くしながら行う。注入材の配合事例を表-6.3.1に、注入量の管理状況を図-6.3.4に、注入時の圧力管理状況を図-6.3.5に示す。注入時に注入圧力が高すぎると水平打継目に生じている間隙が開口する恐れがあることから、この面に作用する堤体自重以下とする必要があり、実際には注入材自重+0.01MPa程度による注入とすることが多い。そのため、間隙が確実に閉塞されないまま、注入を終了してしまう可能性がある。

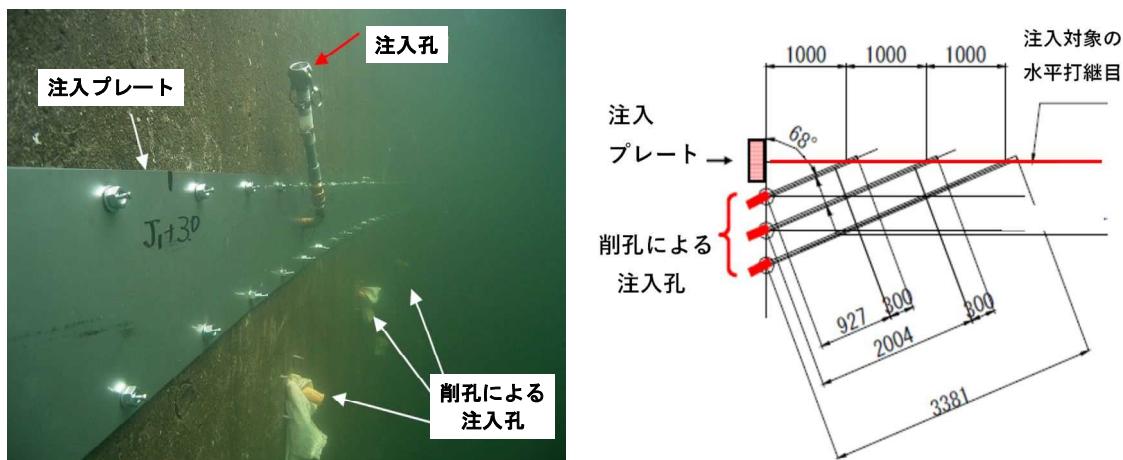


図-6.3.1 堤体上流面の注入プレート・注入孔の事例⁴⁾



図-6.3.2 堤体上流面からの注入作業状況の事例(ゴンドラからの作業)

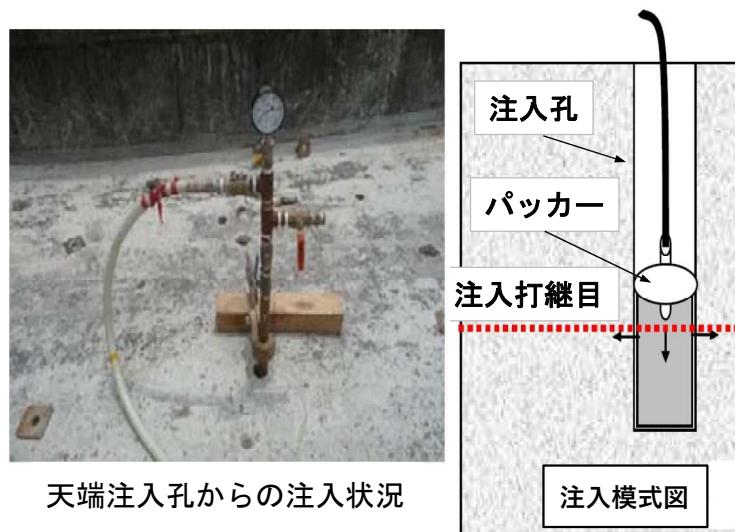


図-6.3.3 堤体天端からの注入作業状況の事例⁴⁾

表-6.3.1 注入材配合の事例

配合	超微粒子セメント	水	練り上がり量
A配合	15kg	30kg	35L
B配合	30kg	30kg	40L
C配合	40kg	30kg	43L



図-6.3.4 注入材の混合の状況例



図-6.3.5 注入量管理状況の事例



図-6.3.6 注入圧管理状況の事例

(2) 堤体安定性低下に対する補修工法

水平打継目に変状が生じ、上下リフト間に間隙が生じたような場合には打継目のせん断強度は低下していることが想定される。この場合、間隙にセメントミルク等を注入したとしても当初のせん断強度に回復させることは困難である。そのため、堤体の安定に対して不足するせん断抵抗力を補うため、堤体に鉛直方向に削孔を行い、変状が生じた打継目を縫うように鉄筋を挿入してせん断補強を行うこともある。以下に鉄筋挿入により補修を行った事例を示す。

鉄筋挿入により補修を行ったダムとして、第4章及び第5章でモデルダムとした、Aダムの事例を示す。Aダムにおいては堤体左岸側のBL.2のEL.230.0m打継目のせん断強度の低下が懸念された。そこで、当該打継目を縫う形でD32, L=4mの鉄筋を52本、堤体に鉛直方向に挿入している。補修工事の概要図として、堤体下流面図(BL1～BL.5)を図-6.3.7に、堤体断面図を図-6.3.8に、鉄筋挿入配置平面図を図-6.3.9に、詳細断面図を図-6.3.10に示す。また、図-6.3.11には鉄筋挿入工の施工フローを図-6.3.12には施工状況を示す。なお、図-6.3.11のフローにおける孔内注水、水位観測、水押し試験、及び超微粒子セメント注入は、鉄筋挿入工に先立って、水平打継目の透水性(水密性)の確認及び補修として行ったものである。

なお、この堤体安定性低下に対する補修工法のうち、鉄筋挿入工 자체は確実な施工が問題なく実施できることが推察される。しかし、水平打継目への注入については、(1)漏水に対する補修工法においても述べたとおり、注入圧を高くすることができないため、空隙が残置されたまま、工事が終了してしまい、下流面漏水が残る可能性がある。

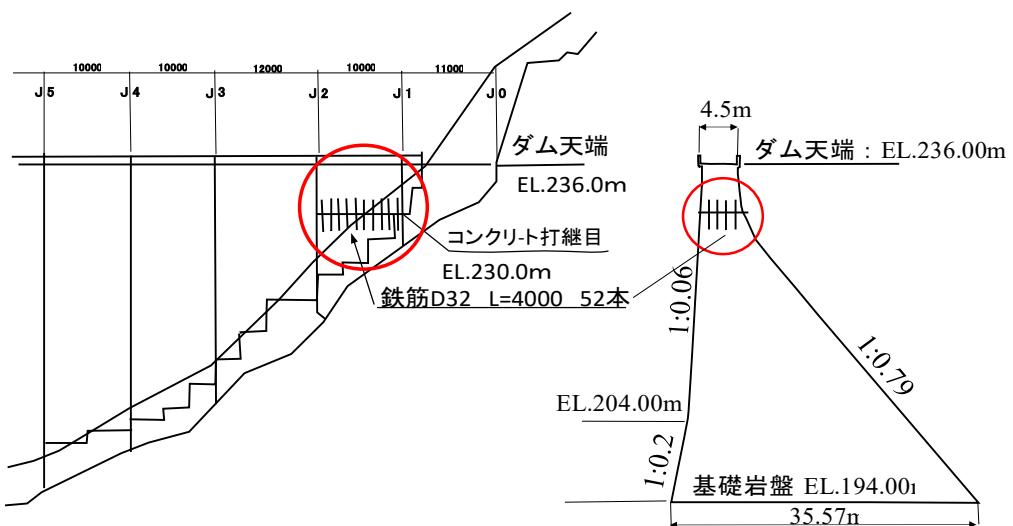


図-6.3.7 BL2 補修工事(下流面図) 図-6.3.8 BL2 補修工事(堤体断面図)

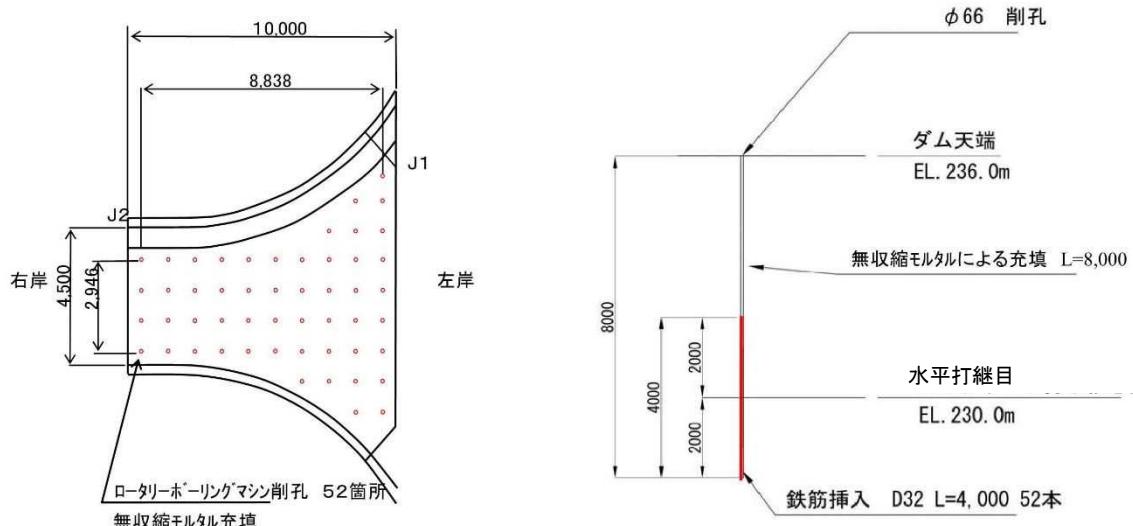


図-6.3.9 鉄筋挿入配置平面図

図-6.3.10 鉄筋挿入詳細断面図

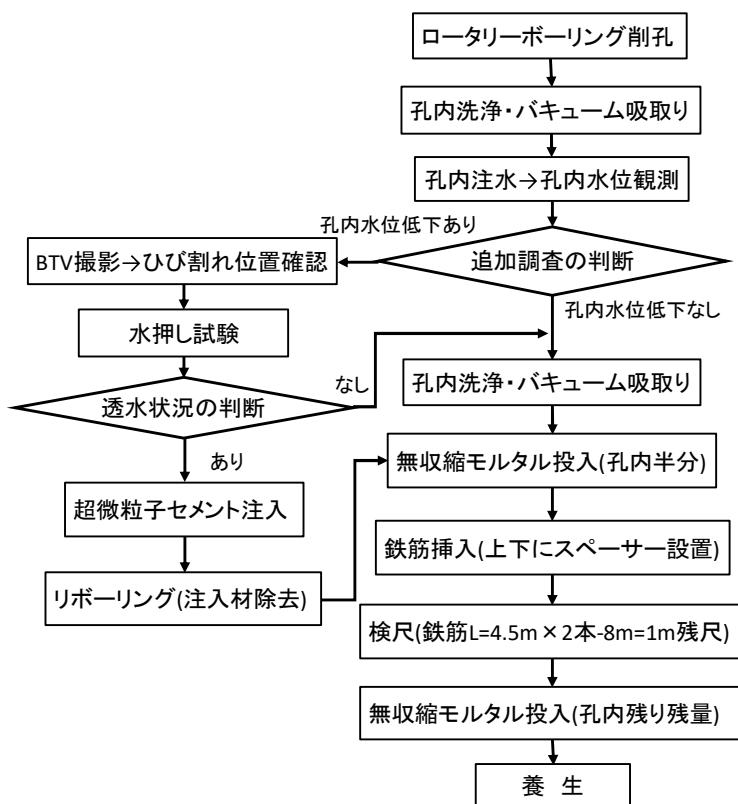


図-6.3.11 鉄筋挿入工の施工フロー

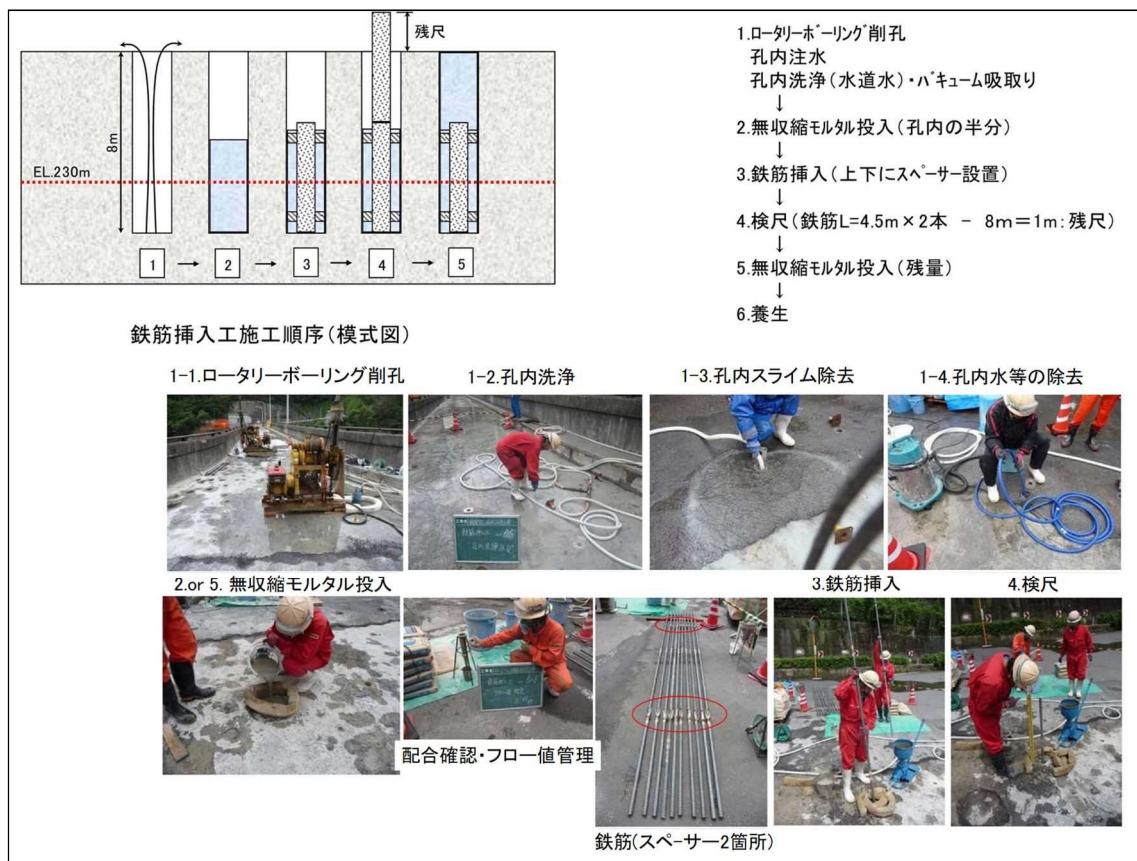


図-6.3.12 鉄筋挿入工施工状況

6. 3. 2 非破壊試験を用いた施工の確実性の確認

水平打継目に変状が生じた時に行う補修のうち、セメントミルクを水平打継目の間隙に注入する工法は、注入圧が過大であると間隙が拡大する可能性があるため、大きな注入圧を作用させることができず、そのため、間隙を完全に充填できないことがある。すなわち、不完全な状態で作業を終えてしまう恐れがあるということである。注入工は、漏水対策が主目的であることから、補修による効果が十分発揮されないとということになる。

一方で、この打継目への注入による漏水量の低減効果は、貯水位が上昇、あるいは気温が低下してコンクリートが収縮するような漏水量が増える条件になるまで、確認することができない。そのため、ダムの貯水池運用によっては補修を行って数年後に初めて補修効果の検証が可能となる場合がある。仮に、注入後、時間を置くことなく、その効果について検証することが可能となれば、仮に注入不足で水みちが残っていた場合には追加注入を行うことが可能となり、確実な漏水対策の実施、すなわち合理的な補修の実現に寄与することができると考えられる。

水平打継目への注入は開口した間隙に対して充填・閉塞することを期待するものであることから、開口部に注入材が確実に充填されたことを確認することができれば、漏水対策として効果があることを確認したことになる。

そこで、この注入による漏水補修の施工の確実性を確認する手法として、第3章で述べた衝撃弾性波法を用いることができると考え、その適用性について検証した。

(1) 検証の方法

注入による補修効果の確認に前節で述べた手法が適用可能かの検証として、実際のダム堤体への注入工法による補修工事の前後に、衝撃弾性波法での計測を行い、計測結果に注入前後の打継目状態の変化が反映されているか否かを確認することとした。

検証に用いたのは、本研究でモデルダムとして取り扱ってきた、堤高42mの重力式コンクリートダムのAダムである。AダムのBL.3においては、下流面漏水対策としてダム天端から鉛直方向に削孔($\phi 66\text{mm}$)し、下流面で漏水が確認されていた標高(EL. 230.0m, EL. 228.5m, 及び EL. 227.0m)の水平打継目に対して超微粒子セメントと水とを混合したセメントミルクを注入する漏水対策を行っている。このセメントミルク注入作業の前後に、衝撃弾性波法を用いて堤体天端から計測を行い、対象となる水平打継目における弾性波の透過・反射特性の変化について分析し、注入の効果が確認できるかについて検証を行った。なお、BL.3における衝撃弾性波法の測点はダム軸方向に2m間隔、上下流方向に1m間隔のダム軸方向×上下流方向： 6×4 の合計24点を配置している。注入孔の位置につ

いては対策前に計測した結果に基づいた3層の打継目の状態を総合的に考慮し、測点1-2、測点2-1、測点3-2、測点4-1、測点4-2、測点5-1、及び測点6-2の7箇所とした。なお、注入孔を設けた測点における注入後の計測については注入孔から少しずらした位置に計測点を設けて計測した。衝撃弾性波法を用いて注入効果の検証を行ったAダムの水平打継目の位置を図-6.3.13に示す。

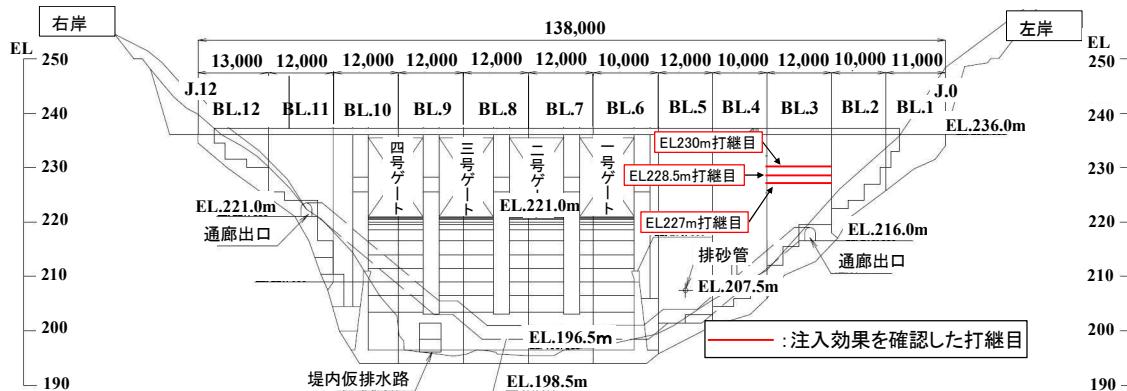


図-6.3.13 衝撃弾性波法を用いた注入効果の検証を行った水平打継目の位置

(2) 計測結果と考察

注入前後に衝撃弾性波法によって計測した波形を基に推定した、水平打継目の各測点の状態変化を水平打継目別に、表-6.3.2～表-6.3.4及び図-6.3.14～図-6.3.16に示す。

表-6.3.2～表-6.3.4及び図-6.3.14～図-6.3.16に示した結果によると、一部の測点を除き、注入によって概ね1～2ランク改良されていることが分かる。状態の改良は注入孔近傍だけでなく、周辺の測点においても改良は確認され、注入の効果が衝撃弾性波法を用いた計測で確認できると言える。一部の測点については変化なし、場合によっては状態が悪くなっていることを示す結果が得られている。変化無しの結果については注入が不十分であること、状態が悪くなった箇所については何らかの要因(例えば注入圧力が過大等)によって劣化したことを示すものであり、これらの情報についても注入の結果の評価、すなわち補修効果の検証、追加施工の判断においても有益なものとなる。

表-6.3.2 注入前後の状態評価の変化(BL3_EL. 230m)²⁾

対象 打継目	測点	測点の状態評価		備考
		注入前	注入後	
BL3 EL.230m	1-1	III	II	1ランク改良
	1-2	III	II	注入孔
	1-3	III	II	1ランク改良
	1-4	II	II	変化なし
	2-1	III	II	注入孔
	2-2	III	II	1ランク改良
	2-3	III	II	1ランク改良
	2-4	II	I	1ランク改良
	3-1	I	I	変化なし
	3-2	II	I	注入孔
	3-3	III	II	1ランク改良
	3-4	III	I	2ランク改良
	4-1	I	I	注入孔
	4-2	II	I	注入孔
	4-3	I	I	変化なし
	4-4	II	II	変化なし
	5-1	III	II	注入孔
	5-2	III	II	1ランク改良
	5-3	I	III	2ランク劣化
	5-4	II	I	1ランク改良
	6-1	I	II	1ランク劣化
	6-2	III	II	注入孔
	6-3	III	III	変化なし
	6-4	I	II	1ランク劣化

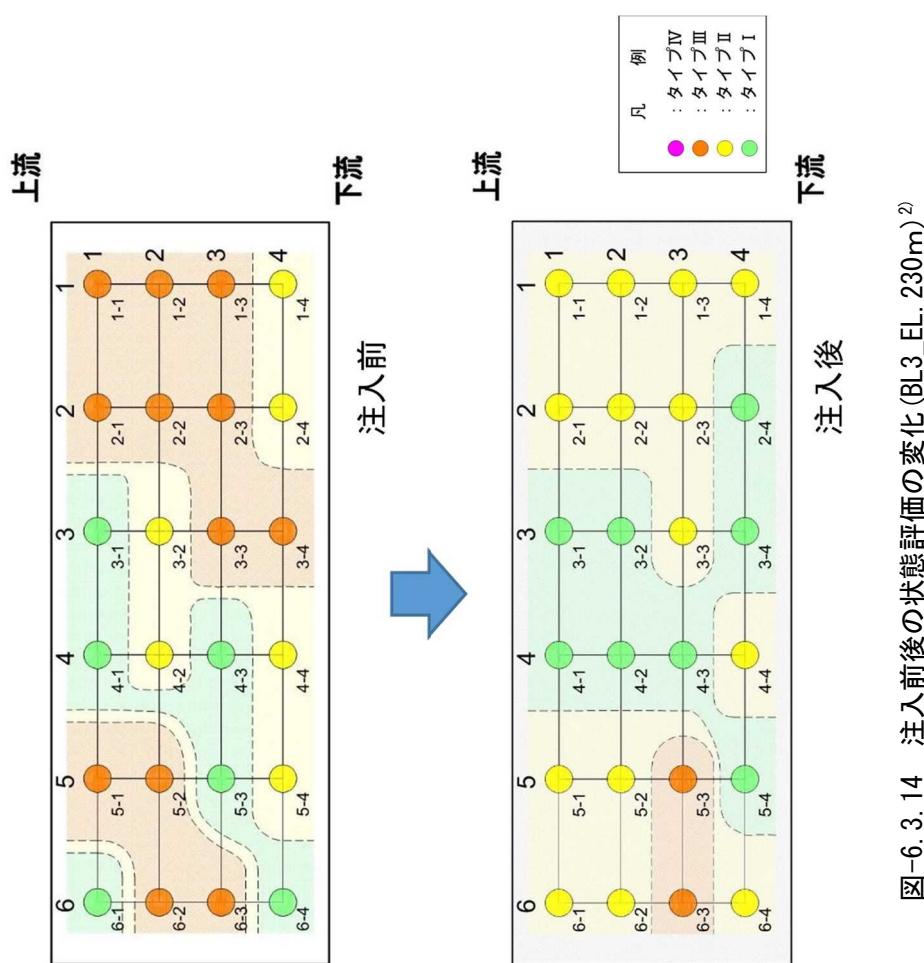


図-6.3.14 注入前後の状態評価の変化(BL3_EL. 230m)²⁾

表-6.3.3 注入前後の状態評価の変化(BL3_EL. 228. 5m)²⁾

対象 打継目	測点	測点の状態評価		備考
		注入前	注入後	
BL.3	1-1	II	II	変化なし
EL.228.5m	1-2	I	I	注入孔 1ランク劣化
	1-3	I	I	1ランク劣化
	1-4	III	II	1ランク改良
	2-1	I	I	注入孔 1ランク劣化
	2-2	II	II	変化なし
	2-3	III	II	1ランク改良
	2-4	III	II	1ランク改良
	3-1	III	I	注入孔 2ランク改良
	3-2	I	II	1ランク劣化
	3-3	III	II	1ランク改良
	3-4	III	II	1ランク改良
	4-1	III	II	注入孔 1ランク改良
	4-2	IV	I	注入孔 3ランク改良
	4-3	III	I	2ランク改良
	4-4	I	I	変化なし
	5-1	III	II	注入孔 1ランク改良
	5-2	III	I	2ランク改良
	5-3	III	II	1ランク改良
	5-4	III	II	1ランク改良
	6-1	III	II	1ランク改良
	6-2	III	II	注入孔 1ランク改良
	6-3	I	I	1ランク劣化
	6-4	I	I	1ランク劣化

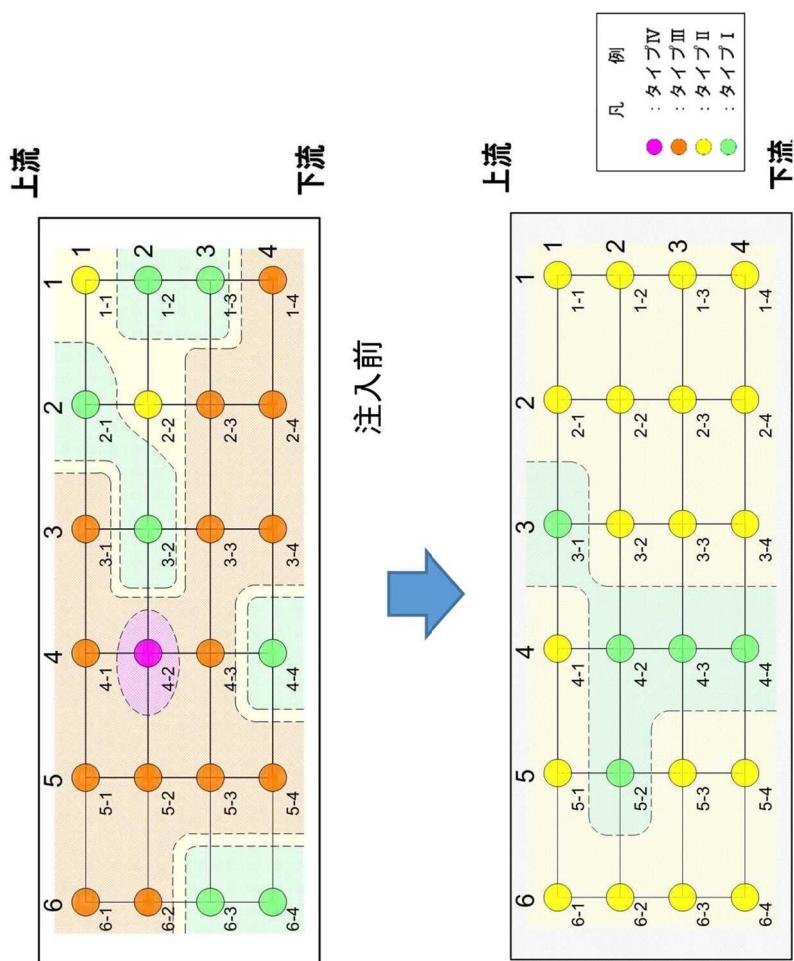


図-6.3.15 注入前後の状態評価の変化(BL3_EL. 228. 5m)²⁾

表-6.3.4 注入前後の状態評価の変化 (BL3_EL. 227.0m)²⁾

対象打継目	測点	測点の状態評価		備考
		注入前	注入後	
BL3_EL.227.0m	1-1	I	II	1ランク悪化
	1-2	IV	III	注入孔
	1-3	I	I	1ランク改良 変化なし
	1-4	-	I	評価できず
	2-1	III	III	注入孔
	2-2	I	I	変化なし
	2-3	I	I	変化なし
	2-4	III	II	1ランク改良
	3-1	I	I	注入孔
	3-2	IV	II	変化なし
	3-3	III	II	2ランク改良
	3-4	I	I	1ランク改良 変化なし
	4-1	-	I	注入孔
	4-2	I	III	評価できず 注入孔
	4-3	I	I	2ランク悪化 変化なし
	4-4	III	II	1ランク改良
	5-1	III	II	注入孔
	5-2	III	I	1ランク改良 2ランク改良
	5-3	I	I	変化なし
	5-4	III	III	変化なし
	6-1	I	III	2ランク改良
	6-2	III	II	注入孔
	6-3	IV	III	1ランク改良
	6-4	III	I	2ランク改良

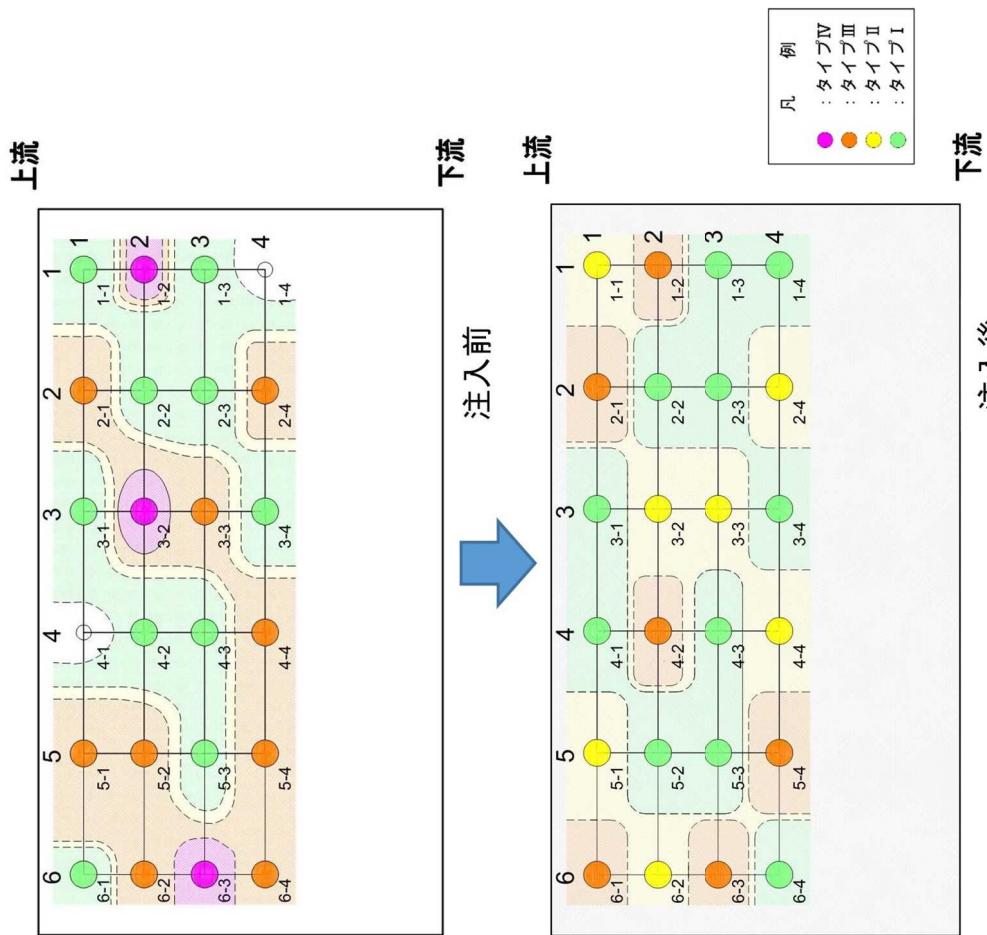


図-6.3.15 注入前後の状態評価の変化 (BL3_EL. 227m)²⁾

6. 4 本章のまとめ

本章においては、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状の状態を把握する方法として、非破壊試験である衝撃弾性波法と赤外線サーモグラフィ法を併用して実施する方法を提案した。具体的な併用方法としては、赤外線サーモグラフィ法を概略調査として用い、衝撃弾性波法による調査を詳細調査として位置づけるものである。すなわち、得ができる変状の情報が水平打継目の端部にあたる上下流面付近に限定されるものの、調査に要する外業時間が短く、かつ省力化を図った調査が可能である、赤外線サーモグラフィ法による調査を概略調査として実施する。そして、赤外線サーモグラフィ法による調査で抽出された変状が懸念される水平打継目に対して衝撃弾性波法による計測を重点的に実施するという手順で実施するものである。これによって、衝撃弾性波法による調査の効率化が期待できる。さらに、赤外線サーモグラフィ法で得られる上下流面付近の情報を加味することで水平打継目の状態把握の精度向上を図ることができる方策である。

また、本章では併せて、提案した非破壊試験を用いた堤体の打継目状態を把握する技術を活用するものとして、貯水機能補修、すなわち漏水対策として実施される水平打継目へのセメントミルク注入の効果確認への衝撃弾性波法の活用について述べた。モデルダムにおいて実施された打継目への注入前後の状態評価への適用の結果から、提案した衝撃弾性波法は、注入の効果を確認する方法としても有効であることを示した。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：ダム補修事例に関する調査，国土技術政策研究所資料第 262 号，2005 年 6 月
- 2) 藤田将司，市川滋己，田野弘明：既設コンクリートダムの長寿命化に向けた新工法による漏水対策の検討，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，VI-012，2017 年 9 月
- 3) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2013-, pp. 344～349, 2013 年 4 月
- 4) 市川滋己，鎌田敏郎：コンクリートダムの漏水対策の評価方法に関する研究，「非破壊手法を用いたコンクリート構造物の補修評価」に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学会，pp. 159～164, 2018 年 9 月

第7章 コンクリートダム堤体の性能評価手法

7. 1 本章の概要

本章においては、前章までに提案した、非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目の状態把握手法を実施して得られる結果である打継目変状状況図を用いて、コンクリートダム堤体の性能を評価する手法について述べる。

コンクリート堤体に要求される性能については、河川管理施設等構造令¹⁾の第四条（構造の原則）に、「必要な水密性を有し、及び予想される荷重に対し必要な強度を有するものとするものとする。」「予想される荷重によって滑動同士し、又は転倒しない構造とするものとする。」と定められている。すなわち、コンクリートダム堤体に対しては、堤体の安定性に関わる構造性能とダム設置の目的に関わる貯水性能が求められている。そこで、7. 2においてはコンクリートダム堤体の安定性に関わる構造性能の評価手法について述べることとし、構造性能の要求事項を概説したのち、滑動に対する安定性、及び転倒に対する安定性という二つの構造性能の要求事項について、非破壊試験を用いた打継目状態の把握結果を利用して評価する手法について述べる。続く7. 3においてはコンクリートダム堤体の貯水性能について非破壊試験を用いた打継目状態の把握結果を利用して評価する手法について述べる。

7. 2 非破壊試験結果を用いた堤体安定性に係る構造性能評価手法の提案

7. 2. 1 コンクリートダム堤体に要求される構造性能

コンクリートダム堤体に要求される堤体安定性に係る構造性能は、設計荷重が作用した時に、堤体が損傷することなく、安定した状態を保持することである。河川管理施設等構造令施行規則の第九条¹⁾においては、コンクリートダムの安定性及び強度については次のように定められている。

①コンクリートダムは、ダムの堤体と基礎地盤との接合部及びその付近におけるせん断力による滑動に対し、必要なせん断摩擦抵抗力を有するものとする。(図-7. 2. 1)

②重力式コンクリートダムの堤体は、その上流面に引張応力を生じないものとする。(図-7. 2. 2)

③コンクリートダムの堤体に生じる応力は、標準許容応力を超えてはならないものとする。標準許容応力は、ダムの堤体の材料として用いられるコンクリートの圧縮強度を基準とし、安全率を四以上として定めるものとする。(図-7. 2. 3)

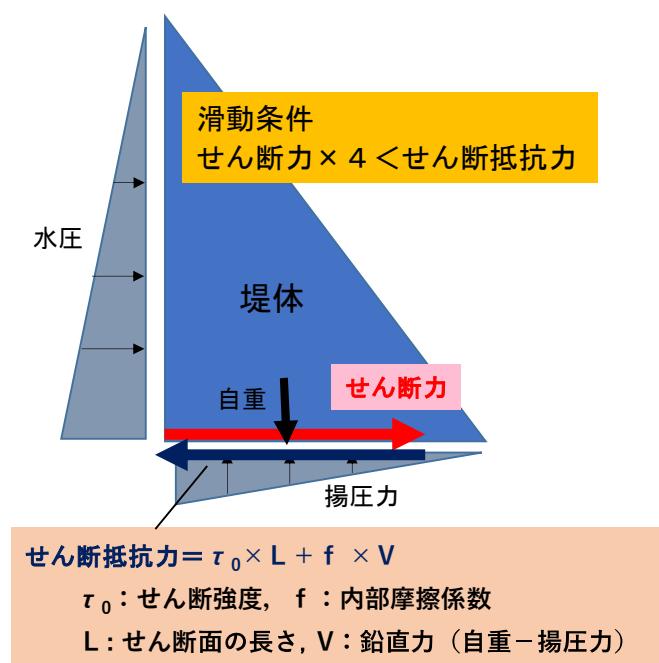


図-7. 2. 1 ①滑動に対する安定条件

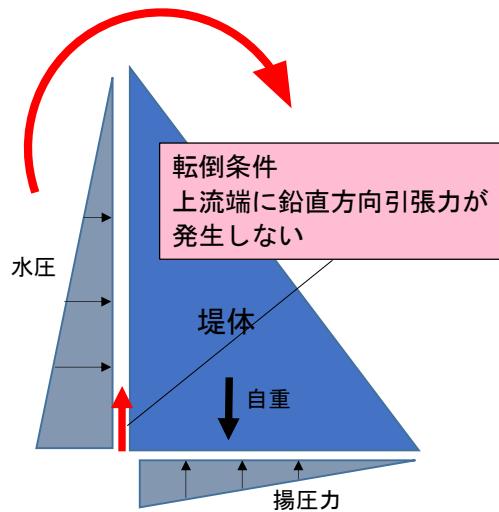


図-7.2.2 ②転倒に対する安定条件

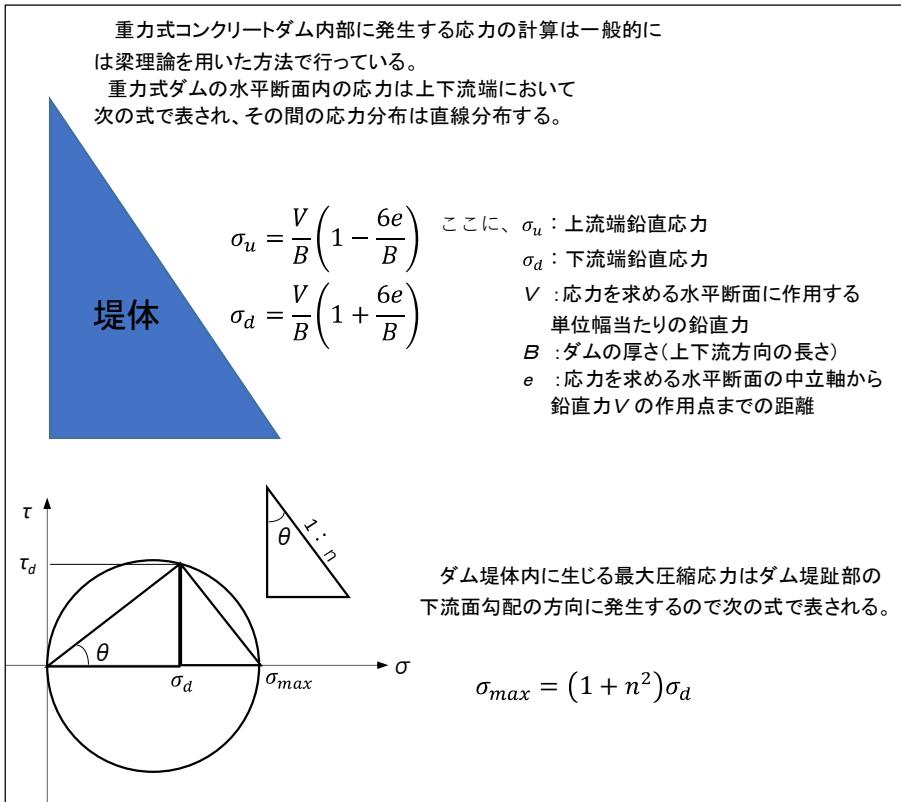


図-7.2.3 ③堤体内部発生応力に対する安定条件

コンクリートダム堤体のある水平打継目に変状が生じ、打継目を境として堤体の一体性が低下した場合を想定すると、このうち③については水平打継目の変状の影響は無い。また、①及び②の条件については、堤体が剛体として一体的に挙動するという前提で堤体と基礎岩盤との関係で設定されたものであるが、ここでは、水平打継目に変状堤体の水平打継目とその上位の堤体との関係で考えるものとする。（図-7.2.4）

以上のことから、水平打継目に変状が生じた場合における、堤体の安定に関する構造性能に関しては、①滑動に対する安定性と②転倒に対する安定性を対象として評価を実施するものとする。

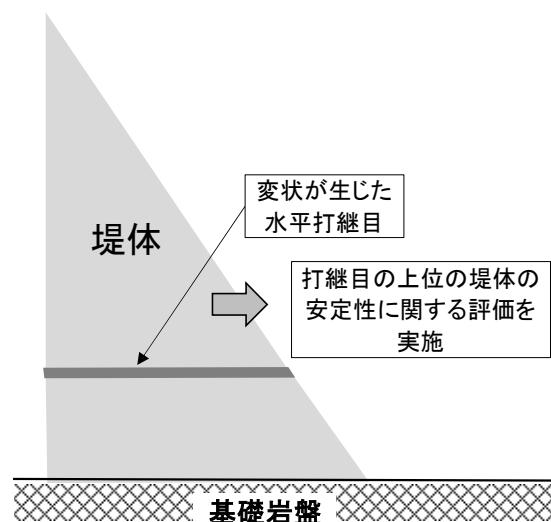


図-7.2.4 堤体安定性に関する構造性能の評価対象

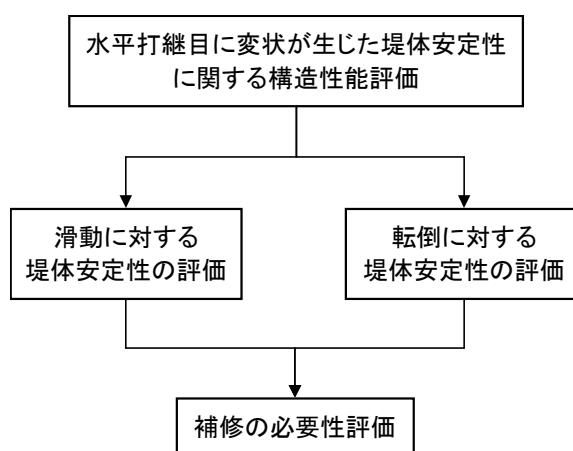


図-7.2.5 水平打継目に変状が生じた堤体安定性に関する構造性能評価のフロー

7. 2. 2 滑動に対する安定性の評価

水平打継目に変状が生じたコンクリートダム堤体の滑動に対する安定性に対しては、その変状の範囲と変状の程度、ならびに変状が生じた時の強度特性の変化が影響する。そこで、図-7.2.6に示す手順で安定性を評価することを提案する。

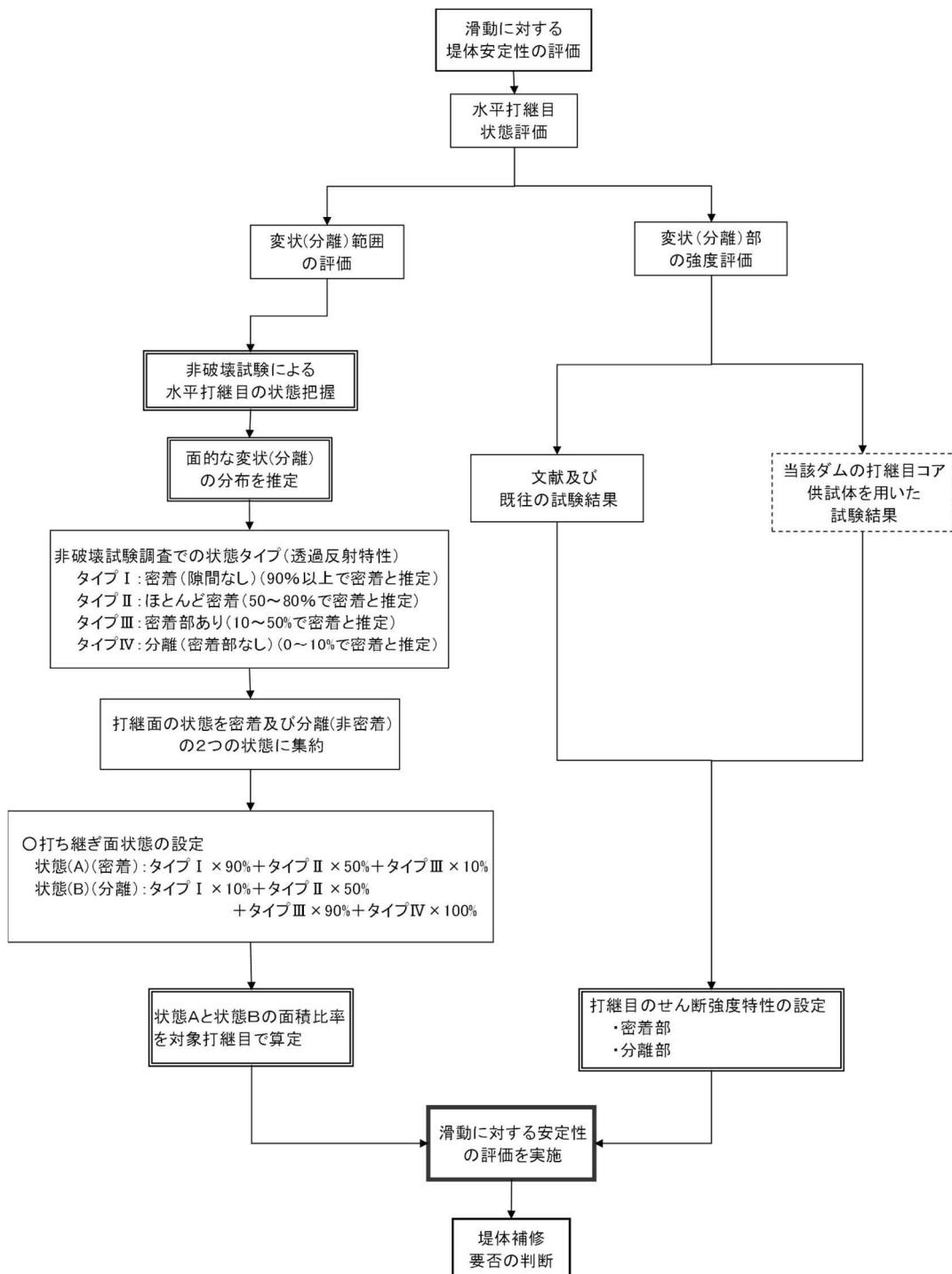


図-7.2.6 水平打継目に変状が生じた堤体の滑動に対する安定性評価フロー

ここで、安定性評価フローの（1）変状（分離）範囲の評価、（2）変状（分離）部の強度評価、（3）滑動に対する安定性評価、に分けて実施手順を説明する。

（1）変状（分離）範囲の評価

第6章で述べた非破壊試験による水平打継目状態の把握手法を用いて、対象とする水平打継目の変状状態を推定する。状態の推定結果は、タイプIからタイプIVの4段階のタイプ区分（表-7.2.1）の分布図として得られる。このタイプ別の分布図からは、タイプ別の面積比率が算定可能である。しかし、このタイプ区分は、弾性波の透過反射特性を基に分類したタイプ分けであり、タイプII～タイプIIIと評価した範囲にも密着した健全な部分が含まれていることから、堤体安定性への影響においては、あまり意味を為さない。そこで、表-7.2.1～表-7.2.3に示した各タイプの打継目状態を基に、より直接的な密着した状態（A）と非密着の状態（B）の2区分に、再区分することとした。

表-7.2.1 打継目状態の4段階のタイプ区分
(表-4.5.9再掲)

タイプ区分	測点周りの打継面の状態イメージ	測点周りの打継目の状態推定	ボーリング調査結果による状態評価区分
タイプI		・打継目には分離が無い、あるいは分離していたが注入材で完全に充填されている状態であり、間隙(空隙)は無い状態。 ・衝撃弾性波法による測定波形は「パターンA」に相当するもの。	(イ) 及び (ロ)
タイプII		・打継目の大半はタイプIと同じ状態ではあるが、一部は分離し間隙(空隙)がある状態。 ・衝撃弾性波法による測定波形は「パターンB」に相当するもの。	(イ) 及び (ロ) 過半数 一部は (ハ) 及び (ニ)
タイプIII		・打継目の一部はタイプIと同じ状態であるが、過半は分離して間隙(空隙)が生じた状態。 ・衝撃弾性波法による測定波形は「パターンB」に相当するもの。	一部は (イ) 及び (ロ) (ハ) 及び (ニ) が過半
タイプIV		・打継目の大半は分離し、連続的な面状の間隙(空隙)が生じている状態。 ・衝撃弾性波法による測定波形は「パターンC」に相当するもの。	(ニ)

表-7.2.2 ボーリング調査での打継目状態区分(表-4.5.2再掲)

状態分類	状態	ボーリング調査による観察結果	代表的なボアホールカメラ画像
イ	分離面(ひび割れ)が無い	・打継目に分離面(ひび割れ)は認められない。 ・打継目が面として認められるが一体化している。	
ロ	分離面が完全に閉塞	・打継目に明瞭な分離面(ひび割れ)が認められる。 ・分離面(ひび割れ)は完全に閉塞されていると推測できる(挿在物または止水材により閉塞)。	
		・打継目に明瞭な分離面(ひび割れ)が認められる。 ・分離面(ひび割れ)は部分的に閉塞されていると推測できる(挿在物または止水材により部分的に閉塞)。	
ハ	分離面(ひび割れ)が有る	・打継目に明瞭な分離面(ひび割れ)が認められる。	
		・打継面(ひび割れ)は全体的に閉口している。	
ニ	分離面が全般的に閉塞	・打継目に明瞭な分離面(ひび割れ)が認められる。 ・分離面(ひび割れ)は全般的に閉口している。	

表-7.2.3 打継目状態評価区分とボーリング調査による確認状態との対比関係

打継目状態評価区分		タイプI				タイプII				タイプIII				タイプIV			
ボーリング調査による状態	状態	イ	ロ	ハ	ニ	イ	ロ	ハ	ニ	イ	ロ	ハ	ニ	イ	ロ	ハ	ニ
確認箇所数	13 15 3 0	11	2	9	0	5	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1
百分率(%)	90.3 9.7 0.0	59.1	40.9	0.0	62.5	37.5	0.0	0.0	100.0								

タイプI～タイプIVの4段階のタイプから密着した状態(A)と非密着の状態(B)に、再区分するための関係付けを表-7.2.4に示す。

表-7.2.4 堤体安定性評価用の打継目状態区分と非破壊試験による状態推定で分類したタイプとの関係

水平打継目の状態分類区分	
設 定	状態(A): 密着
	タイプI × 90% + タイプII × 50% + タイプIII × 10% + タイプIV × 0%
状態(B): 非密着	タイプI × 10% + タイプII × 50% + タイプIII × 90% + タイプIV × 100%

表-7.2.4の関係から、安定性評価対象打継目における状態(A)と状態(B)との面積比率が算定され、この面積比率を用いて安定計算に用いる。

(2) 変状(分離)部の強度評価

健全部(密着部)及び変状(非密着)部のせん断強度(純せん断強度 τ_0 、摩擦係数 f)については、文献、既往の室内試験結果等を参考にして基本的には設定することとするが、対象ダムのコア供試体等を用いた強度特性試験結果がある場合にはそれらの値を総合的に評価して、せん断強度を設定する。

以下に、文献、既往の室内試験結果からの強度特性を設定した結果を示す。

ア) 文献

文献①：多目的ダムの建設²⁾

「コンクリートの水平打継面のせん断摩擦安全率を検討する必要がある場合は、一般に打継面の強度低下を考慮してせん断強度は圧縮強度の1/7～1/10、内部摩擦係数は0.65～0.8が用いられる。」

文献②：ダム設計基準³⁾

「内部摩擦係数 f については、Henny が引用した実験の例では0.70、米国開拓局の設計基準では0.65となっているが、畠野正の実験によってみても若干これを増大し得るものと思われる所以、一般に0.65～0.80とする。 τ_0 の値は岩盤とコンクリートのせん断抵抗強度のうち、小さい方の値をとらなければならない。」

文献③：畠野正の研究⁴⁾

二面せん断試験装置を用いて以下の5種類の摩擦抵抗試験を実施し、その結果は次のとおり。

a) 平滑な石材の面とコンクリートの面との摩擦抵抗試験

(試験結果) $\tau = 0.65 \sigma$

b) 粗な石材の面とコンクリートの面との摩擦抵抗試験

(試験結果) $\tau = 0.80 \sigma$

c) 平滑な石材の面にコンクリートを打継ぎ、その面のせん断摩擦抵抗試験

(試験結果) $\tau = \tau_0 + 0.80 \sigma$

コンクリート配合 C=250kg/m³, W/C=68%のとき $\tau_0 = 25\text{kgf/cm}^2$

d) 粗な石材の面にコンクリートを打継ぎ、その面のせん断摩擦抵抗試験

(試験結果) $\tau = \tau_0 + 0.90 \sigma$

コンクリート配合 C=250kg/m³, W/C=68%のとき $\tau_0 = 25\text{kgf/cm}^2$

e) コンクリート供試体のせん断摩擦抵抗試験

(試験結果) $\tau = \tau_0 + 1.15 \sigma$

コンクリート配合 C=250kg/m³, W/C=68%のとき $\tau_0 = 55\text{kgf/cm}^2$

イ) 既往のダムコンクリート打継目せん断試験結果

水平打継目のせん断強度把握や、合理化施工における水平打継目処理の簡略化等を目指した検討として、簡易一面せん断試験等を用いた数々のせん断試験⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾が実施されており、これらの試験結果を表-7.2.5に示す。

これらによれば、以下のことがいえる。

純せん断強度 τ_0 は、打継目処理方法(特に敷モルタルの有無)の影響を受けており、たとえば、室内供試体の試験結果では、グリーンカット、打設面清掃、敷モルタルすべてを省略した場合、 τ_0 は均一部圧縮強度の 4~7%程度の値となっている。

摩擦係数 f には打継目処理方法の簡略化の影響は認められず、 f の値はコア供試体では 0.7~1.0 程度、室内供試体では 0.8~1.20 程度である。

ウ) ひび割れが生じた面に対するせん断試験結果¹⁰⁾

岩手・宮城内陸地震によって、施工中であった胆沢ダムの洪水吐き導流壁は、水平方向の貫通ひび割れが生じたため、洪水吐き補修方法の検討に資する目的で、コア試料を採取し、ひび割れ面での一面せん断試験を実施している。試験の結果は、見かけの摩擦係数(=せん断応力/垂直応力)について、水平変位と摩擦係数の関係を整理すると、最大荷重時点では見かけの摩擦係数は 2~3 程度の値を示すが、最大荷重直後は水平変位に伴って摩擦係数が大きく低下していき、水平変位 20mm では摩擦係数が 0.65 まで低下したとなっている。

表-7.2.5 既往のダムコンクリート打継目せん断試験結果

供試体	配合等	打継目処理方法			試験材齟	t_0 (N/mm ²)	打継目せん断強度 (N/mm ²)	備考	出典	
		グリーンカット	打設面清掃	敷モルタル						
現場コア供試体	布目ダム試験施工	ポリッシャー ^{なし}	水洗い	レーキ敷均し	3日	2.13 2.19 1.24	1.02 1.04 1.05	RCD用コンクリート採取コアによる簡易一面せん断試験	参考文献5)	
	境川ダム試験施工	ポリッシャー ^{なし}	水洗い	ポリッシャー塗布		1.34	1.04	RCD用コンクリート採取コアによる簡易一面せん断試験	参考文献6)	
Dダム試験施工	Aダム	スイーバー ^{あり}	高压水洗浄	あり	不明	5.79 2.54	0.73 1.09	RCD用コンクリート採取コアによる簡易一面せん断試験	参考文献6)	
		スイーバー ^{なし}	高压水洗浄	あり	不明	約6ヶ月	3.4(※) 0.7(※)	1.04(※) 1.13(※) 1.11(※)	原位置ロックせん断試験をRCD用コンクリート施工部に対して実施。 (※)図からの読み取り値	参考文献6)
室内試験用供試体	布目ダムRCD用コンクリート配合	ワイヤブラシ ^{なし}	水洗い	0.5cm	3日	1.62 2.14 1.99 1.92 0.38	1.02 0.95 0.83 0.88 1.23	RCD用コンクリート採取コアによる簡易一面せん断試験。 (※)図からの読み取り値	参考文献6)	
	RCD用コンクリート配合	ワイヤブラシ ^{なし}	水洗い	なし		28日	8.29	室内外試験用供試体による簡易一面せん断試験	参考文献5)	
内部有スランプコンクリート用配合	内部有スランプコンクリート用配合	ワイヤブラシ ^{なし}	なし	24時間	91日	0.83	1.12	20.1	室内外試験用供試体による簡易一面せん断試験	参考文献7)
		セメントミルク配合2種類×施工厚2種類	高压水洗浄	24時間	91日	2.98 2.01 ~2.54 1.00 1.93 1.09			室内外試験用供試体による簡易一面せん断試験。 結果はf = 1.00の条件で t_0 を算出	参考文献8)

エ) 分離した打継目を模擬した供試体に対するせん断試験結果

分離した(非密着の)打継目のせん断強度の概要を把握する目的で、分離した打継目を模擬するものとして、様々な方法で打継ぎ部に弱部を設けた供試体を作製し、簡易一面せん断試験を実施した。打継目の状態を模擬したケースは、表-7.2.6に示す6ケースとした。供試体作製に使用したコンクリートの配合を表-7.2.7に、コンクリート材料を表-7.2.8に示した。なお、実際のダムコンクリートではセメントには中庸熱ポルトランドセメントが使用されているのが一般的であるが、本試験では、強度発現までの材齢を短縮する目的で早強ポルトランドセメントを使用した。使用コンクリートの一軸圧縮強度試験結果を表-7.2.9に示す。この一軸圧縮強度試験結果から、材齢7日であれば、一般的なダムコンクリートの材齢91日時点における発現強度があると判断し、材齢7日で簡易一面せん断試験を実施した。簡易一面せん断試験機の模式図と試験状況を図-7.2.7に示す。簡易一面せん断試験用供試体の寸法は $\phi 200\text{mm} \times h200\text{mm}$ であり、打継目を設ける場合には下層を高さ100mmにおいて打ち止めて打継目処理を行い、上層を打設する。なお、本試験でのグリーンカットは、ワイヤーブラシを用いて粗骨材が露出程度まで上面のモルタル分を除去した。また、打設直後のコンクリートには凝結遅延剤を散布してグリーンカットを容易としている。

簡易一面せん断試験の結果を表-7.2.10及び図-7.2.8に示す。また、各ケースのせん断試験後の供試体を表-7.2.11に示す。簡易一面せん断試験の結果からは、完全に分離した打継目では純せん断強度 τ_0 はほぼ 0N/mm^2 となるが、摩擦係数 f は一般部と同等である $f=1.0$ 以上が期待できることが分かる。

表-7.2.6 分離した打継目を模擬した供試体の試験ケース

ケース名	ケース概要
一般部	打継なし
健全な打継目	下層コンクリート打設18時間後に、グリーンカットを実施。その後、モルタルを敷き、上層コンクリート打設。
打継処理無し	下層コンクリート打設硬化後、グリーンカットを施工せず、敷モルタルが無い状態で上層コンクリートを打設。
グリーンカット+剥離剤	下層コンクリート打設18時間後にグリーンカットを実施し、打継目に剥離剤を塗布したのち、敷モルタルが無い状態で上層コンクリートを打設。
グリーンカット+ラップフィルム	下層コンクリート打設18時間後にグリーンカットを実施し、打継目にラップフィルムを敷設した後、敷モルタルが無い状態で上層コンクリートを打設。
グリーンカット+凝結遅延剤	下層コンクリート打設18時間後にグリーンカットを実施し、打継目に凝結遅延剤を散布した後、敷モルタルが無い状態で上層コンクリートを打設。

表-7.2.7せん断試験用供試体作製コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 Gmax (mm)	水結合材 比 W/C+F (%)	混和材率 F/C+F (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)								
				水 W	結合材 C+F	細骨材 S 5~0	粗骨材				AE減 水剤 Ad1	AE剤 Ad2
							G1 150~80	G2 80~40	G3 40~20	G4 20~5		
150	51.4	30	26.7	108	210	540	372	372	372	372	0.84	0.034

表-7.2.8供試体作製コンクリートの材料

種類	名称
セメント	早強ポルトランドセメント
フライアッシュ	中部電力碧南火力発電所産
粗骨材	秩父産砂岩碎石
細骨材	秩父産砂岩碎砂
AE減水剤	ヴィンソル80
AE剤	ヴィンソル

表-7.2.9供試体作製コンクリートの圧縮強度

材齢 (日)	No.	一軸圧縮強度 (N/mm ²)		動弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
		1	2	
1	1	7.78	7.8	1.788
	2	7.99		1.836
	3	7.63		1.794
5	1	28.4	28.4	2.904
	2	29		2.937
	3	27.8		2.907
7	1	32.8	32.3	3.024
	2	32.1		3.049
	3	31.9		3.043

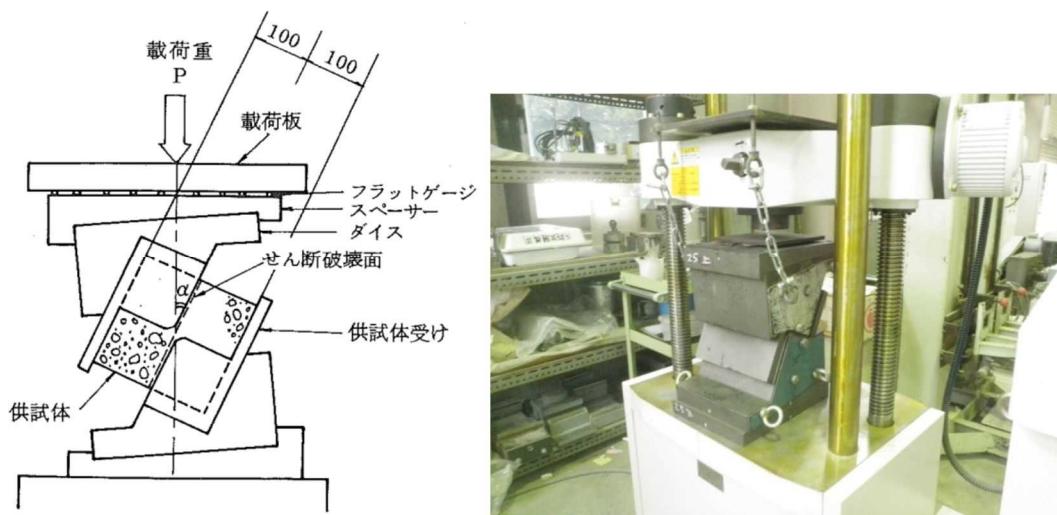


図-7.2.7 簡易一面せん断試験装置の模式図と試験状況

表-7.2.10 模擬打継目供試体を用いたせん断試験結果

傾斜角 (°)	供試体 No.	一般部		健全な打継面		打継処理なし		グリーンカット +剥離剤		グリーンカット +ラップフィルム		グリーンカット +凝結遮延剤	
		直応力 σ (N/mm ²)	せん断 応力 τ (N/mm ²)	直応力 σ (N/mm ²)	せん断 応力 τ (N/mm ²)	直応力 σ (N/mm ²)	せん断 応力 τ (N/mm ²)	直応力 σ (N/mm ²)	せん断 応力 τ (N/mm ²)	直応力 σ (N/mm ²)	せん断 応力 τ (N/mm ²)	直応力 σ (N/mm ²)	せん断 応力 τ (N/mm ²)
35	①	9.73	13.9	11.3	16.1	7.23	10.3	4.29	6.12	0.44	0.63	3.11	4.45
	②	10.1	14.5	9.90	14.1	7.76	11.1	4.54	6.48	0.71	1.01	1.21	1.73
	③	9.48	13.5	11.1	15.9	6.72	9.60	5.53	7.89	2.95	4.21	1.74	2.48
30	④	5.98	10.4	5.31	9.19	3.53	6.12	2.04	3.54	0.55	0.95	1.88	3.25
	⑤	5.46	9.47	5.60	9.70	4.49	7.77	2.86	4.95	1.34	2.31	1.88	3.25
	⑥	6.32	10.9	6.68	11.6	3.71	6.42	2.14	3.70	0.14	0.23	0.86	1.49
25	⑦	3.02	6.47	3.91	8.39	2.64	5.65	1.17	2.52	—	—	0.34	0.72
	⑧	3.28	7.04	3.69	7.91	2.25	4.82	1.55	3.32	—	—	0.42	0.90
	⑨	3.17	6.80	—	—	2.02	4.33	1.51	3.23	—	—	0.97	2.07
$\bar{\tau}$ (N/mm ²)		3.52		3.97		2.37		1.34		0.10		0.38	
f		1.08		1.06		1.11		1.16		1.43		1.3	

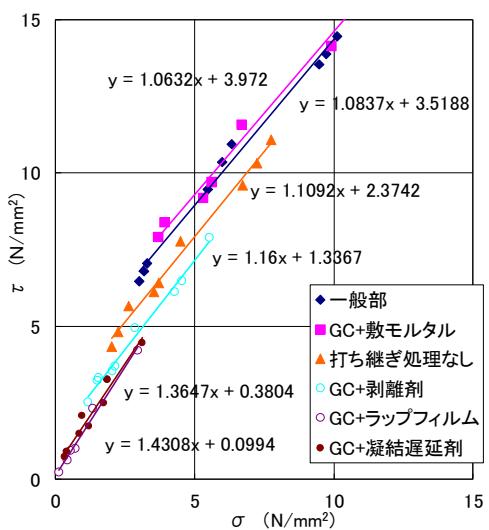


図-7.2.8 試験結果（直応力とせん断応力との関係）

表-7.2.11 せん断試験後供試体せん断面



既往の文献及び室内試験結果である、以上のア)～エ)を基に、打継目におけるせん断強度を再整理したものが、表-7.2.12である。

表-7.2.12 文献及び既往せん断試験結果におけるせん断強度

せん断面 の状態	出典・根拠	純せん断強度 τ_0	内部摩擦係数 f
健全な 打継目	多目的の建設 ²⁾	圧縮強度 の1/7～1/10	0.65～0.80
	ダム設計基準 ³⁾	—	0.65～0.80
	畠野の研究(粗な石材の面にコンクリートを打継ぎ、その面のせん断摩擦抵抗試験) ⁴⁾	2.5N/mm ²	0.90
	既往試験結果 ⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾	5.7～1.1N/mm ²	0.73～1.13
ひび割れ面 ・ 分離打継目	畠野の研究(粗な石材の面とコンクリートの面とのせん断摩擦抵抗試験) ⁴⁾	0 N/mm ²	0.80
	胆沢ダム洪水吐貫通ひび割れ面における試験結果 ¹⁰⁾	0 N/mm ²	0.65～2程度
	模擬分離供試体のせん断試験結果	0.1 N/mm ²	1.43

既往の文献及び室内試験結果をもとにして、密着した(健全な)打継目と非密着(分離)した打継目でそれぞれせん断強度を設定するが、以下の点に配慮して、表-7.2.12に示した値に対して十分に安全側に考慮して、表-7.2.13に示した値を設定することとした。

- 変状が生じたものに止水材等の注入・充填等の補修が行われた場合のせん断強度の回復等の効果は限定的であると推察されるが、打継目自体は密着した(健全な)打継目と推定される可能性があり、健全と推察される面積が実際よりも大きく推察される可能性があること。
- 非密着(分離した)打継目の状態についても、その状態が不明確なこと。
- 水中の摩擦係数は気中の摩擦係数に比較して低下する傾向を有すること。¹¹⁾

表-7.2.13 打継目のせん断強度設定値

打継目状態		設定値
状態(A) 密着打継面	純せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	2.0
	摩擦係数 f	0.65
状態(B) 非密着打継面	純せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	0.0
	摩擦係数 f	0.65

(3) 滑動に対する安定性の評価

(1) 変状（分離）範囲の評価、並びに（2）変状（分離）部の強度評価を行った結果に基づいて、滑動に対する安定性を評価する方法について、事例として本研究におけるモデルダムとして取り扱っているAダムに対する照査を行い、説明に代えることとする。

ア) 変状(分離)範囲の評価

変状が懸念される打継目の状態は、非破壊試験を用いた堤体の水平打継目状態把握手法を用いて、表-4.6.12～表-4.6.19のように、面的に変状の分布状況が推定される。

各打継目の変状の分布状況図から各打継目(BL. 3～BL. 12)の状態タイプの面積百分率は、表-7.2.14及び図-7.2.9のように算出される。

表-7.2.14 水平打継目の状態タイプの面積百分率

ブロック	標高	名称	各タイプ別面積率(%)				非調査範囲の百分率(%)
			I	II	III	IV	
3	230	左岸2-1	35.6	57.3	7.0	0.0	18.5
	228.5	左岸-2	22.7	77.3	0.0	0.0	18.5
	227	左岸-3	44.1	35.2	20.6	0.0	45.3
	222.5	左岸-4	47.5	40.0	12.5	0.0	65.6
	219.5	左岸4-1	95.0	5.0	0.0	0.0	74.6
	218	左岸4-2	91.7	8.3	0.0	0.0	76.9
	216.5	左岸4-3	70.2	13.7	16.1	0.0	78.8
4	227	4B-1	19.3	80.7	0.0	0.0	43.8
	225.5	左岸-5	9.7	90.3	0.0	0.0	52.0
	224	4B-2	40.2	59.8	0.0	0.0	55.8
	222.5	4B-3	68.4	22.3	9.3	0.0	63.6
5	233	左岸-6	0.0	95.9	4.1	0.0	20.0
	230	5B-1	0.0	100.0	0.0	0.0	20.0
	228.5	5B-2	18.0	82.0	0.0	0.0	20.0
	227	5B-3	38.3	61.7	0.0	0.0	20.0
	224	左岸-7	41.5	51.1	7.4	0.0	37.9
	219.5	左岸-8	91.0	9.0	0.0	0.0	49.9
6	215	6B-1	30.9	45.2	23.9	0.0	89.8
7	215	7B-1	23.5	49.8	26.8	0.0	84.0
8	215	8B-1	16.3	69.0	14.7	0.0	83.8
	212	(左岸-12)	38.9	0.0	43.0	18.1	87.0
9	212	(左岸-12)	73.1	21.6	0.0	5.3	87.0
	215	9B-1	69.0	31.0	0.0	0.0	86.9
10	215	10B-1	49.1	20.9	16.1	13.9	86.8
11	230	11B-1	8.2	91.8	0.0	0.0	41.7
	228.5	11B-2	9.5	90.5	0.0	0.0	47.4
	227	11B-3	20.4	79.6	0.0	0.0	52.8
	224	11B-4	45.3	50.9	3.9	0.0	67.2
	222.5	右岸-13	28.2	47.9	19.0	4.9	60.0
	218	右岸-14	100.0	0.0	0.0	0.0	92.9
12	231.5	12B-1	23.4	71.9	4.7	0.0	53.7
	230	右岸-15	60.6	29.4	10.1	0.0	78.2
	228.5	12B-2	0.0	75.7	24.3	0.0	90.0
	227	12B-3	49.8	50.2	0.0	0.0	90.1

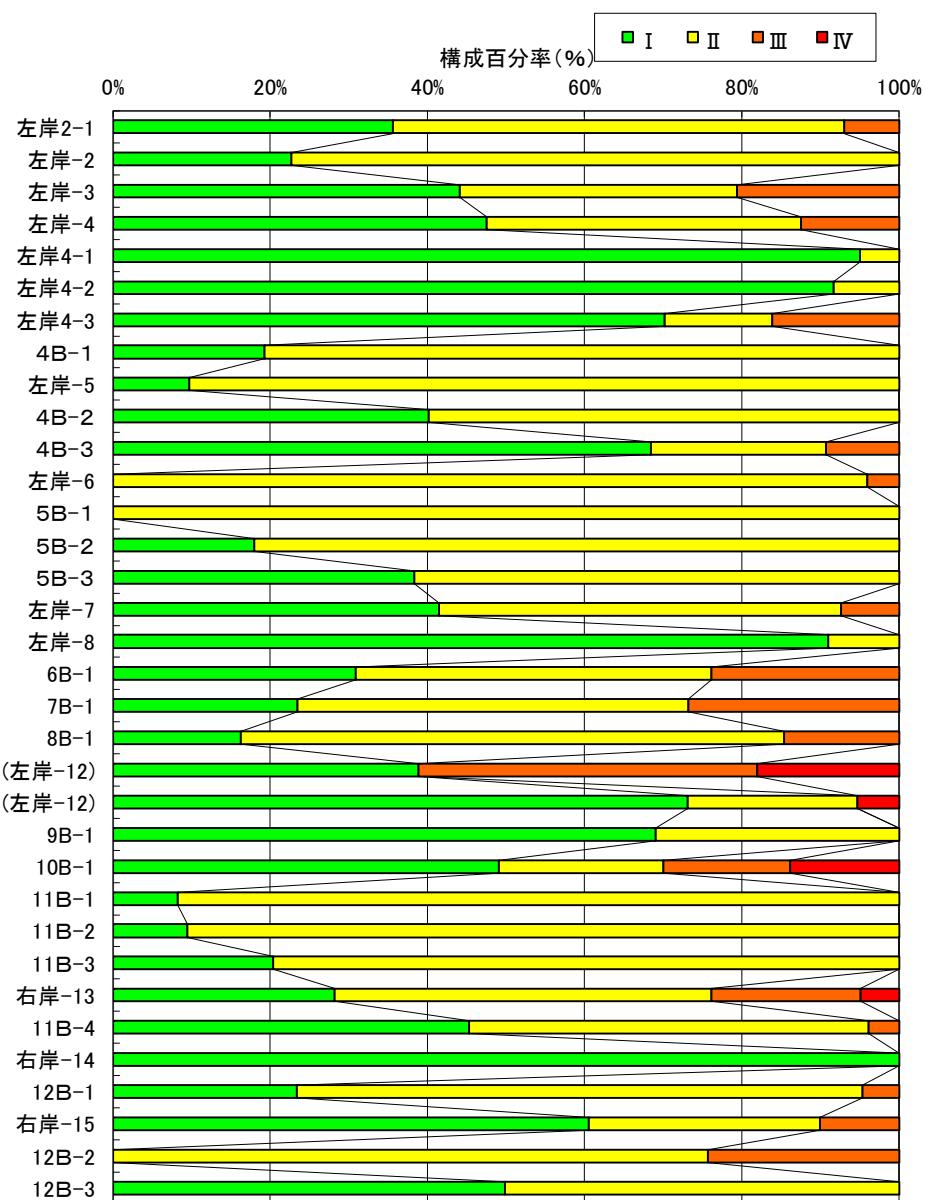


図-7.2.9 水平打継目の状態タイプの面積百分率

次に、表-7.2.4に基づき、打継目の状態を状態(A)(密着)と状態(B)(非密着)の2区分に変換する。変換した結果を表-7.2.15及び図-7.2.10に示す。

表-7.2.15 水平打継目の状態推定結果

ブロック	標高 (EL. m)	打継目 名称	打継目状態(安定計算用)	
			A ₁ (%)	B ₁ (%)
3	230	左岸2-1	61.4	38.5
	228.5	左岸-2	59.1	40.9
	227	左岸-3	59.4	40.6
	222.5	左岸-4	64.0	36.0
	219.5	左岸4-1	88.0	12.0
	218	左岸4-2	86.7	13.3
	216.5	左岸4-3	71.6	28.4
4	227	4B-1	57.7	42.3
	225.5	左岸-5	53.9	46.1
	224	4B-2	66.1	33.9
	222.5	4B-3	73.6	26.4
5	233	左岸-6	48.4	51.6
	230	5B-1	50.0	50.0
	228.5	5B-2	57.2	42.8
	227	5B-3	65.3	34.7
	224	左岸-7	63.6	36.4
	219.5	左岸-8	86.4	13.6
6	215	6B-1	52.8	47.2
	215	7B-1	48.7	51.4
	215	8B-1	50.6	49.4
	212(左岸-12(8B))		39.3	60.7
	212(左岸-12(9B))		76.6	23.4
	215	9B-1	77.6	22.4
	215	10B-1	56.3	43.8
7	230	11B-1	53.3	46.7
	228.5	11B-2	53.8	46.2
	227	11B-3	58.2	41.8
	224	11B-4	66.6	33.5
	222.5	右岸-13	51.2	48.8
	218	右岸-14	90.0	10.0
8	231.5	12B-1	57.5	42.5
	230	右岸-15	70.3	29.9
	228.5	12B-2	40.3	59.7
	227	12B-3	69.9	30.1

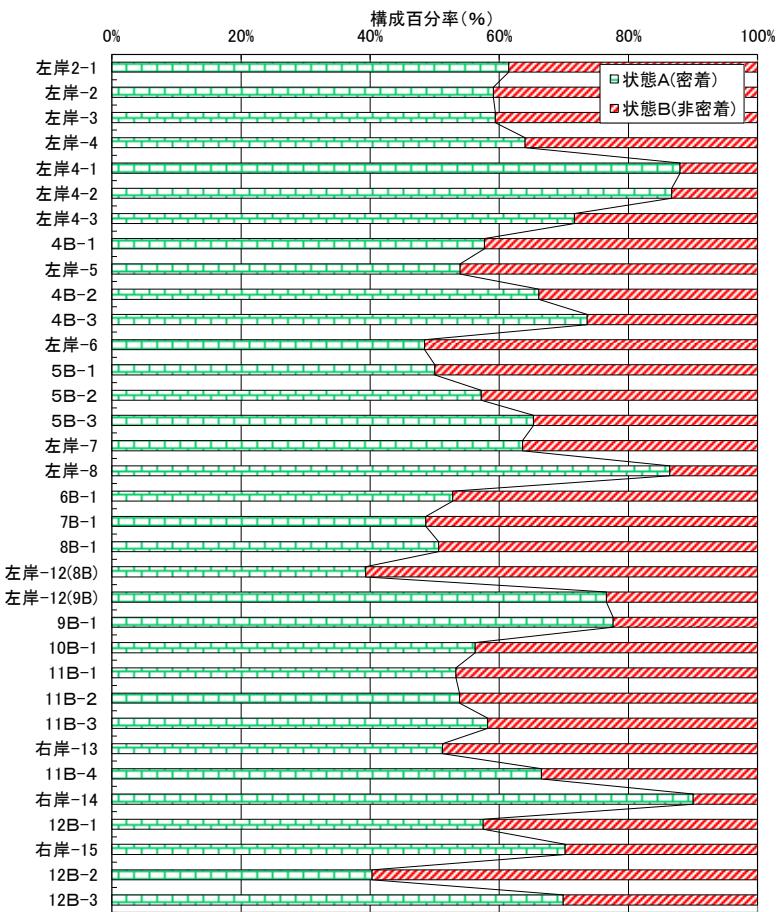


図-7.2.10 水平打継目状態推定(密着・非密着の区分)

イ) 変状(分離)部の強度評価

Aダムにおいては堤体から採取したコア試料を用いたせん断試験は実施しておらず、かつ、分離した、すなわち変状が生じた打継目に対して注入を行っているため、変状部の強度評価については、表-7.2.13をそのまま用いることとする。なお、対象ダム堤体の状況に応じて、強度評価については見直すことが必要である。

ウ) 滑動に対する安定計算

滑動に対する安定については、対象とする水平打継目の上位の躯体に対して、以下のHennyの式による安全率を算定して、評価を行う。

$$F_s = (\tau_0 \times L + f \times V)/H$$

ここに、 F_s : Henny の安全率、 τ_0 : 純せん断強度、 L : 打継目の上下流方向長さ
 f : 摩擦係数、 V : 鉛直方向断面力、 H : 水平方向断面力

このとき、鉛直方向断面力及び水平方向断面力については、基本的には河川管理施設等構造令施行規則及び河川砂防技術基準に定められた方法で算定を行うものとするが、揚圧力についてはこれらの基準に依らずに算定する。これらの基準では、堤体は基礎に完全に密着している状態として揚圧力は上流側： $1/3 \times H$ (水深)、下流側： 0 の三角形分布で堤体底面に作用することとしているが、水平打継目に変状が生じ、非密着状態にあることを前提にしている本検討においては上流側： H (水深)、下流側： 0 の三角形分布で作用するものとして設定する。そして、非密着の比率が $\alpha\%$ の場合には上流側： $\alpha/100 \times H$ (水深)、下流側： 0 の三角形分布で底面に揚圧力が作用するものとして算定する。

Aダムの場合、表-7.2.15あるいは図-7.2.10から分かるように非密着の比率は概ね50%以下であることから、ここでは非密着率を50%として、各水平打継目の上位の堤体に対する作用する断面力を算定し、表-7.2.13に示したせん断強度を用いて、安全率を算定した結果を表-7.2.16に示す。この結果によると、滑動に対する安全率は、河川管理施設等構造令施行規則第9条に定められた安全率=4以上を十分上回っていることが確認され、この場合、滑動に対する安定性に関する構造性能を満足しており、補修の必要は無いと評価される。

表-7.2.16 堤体安定性（滑動）の検討結果

ブロック	標高 (EL. m)	打継目 名称	滑動安全率 (Hennyの安全率)	ブロック	標高 (EL. m)	打継目 名称	滑動安全率 (Hennyの安全率)
3	230	左岸2-1	28.6	6	215	6B-1	8.5
	228.5	左岸-2	19.4	7	215	7B-1	8.0
	227	左岸-3	17.0	8	215	8B-1	8.2
	222.5	左岸-4	12.9		212	左岸-12(8BL)	6.2
	219.5	左岸4-1	14.4	9	212	左岸-12(9BL)	10.9
	218	左岸4-2	13.1		215	9B-1	12.0
	216.5	左岸4-3	10.2	10	215	10B-1	9.0
4	227	4B-1	16.5	11	230	11B-1	25.1
	225.5	左岸-5	13.7		228.5	11B-2	17.8
	224	4B-2	14.7		227	11B-3	16.7
	222.5	4B-3	14.6		224	11B-4	14.8
5	233	左岸-6	79.9		222.5	右岸-13	10.5
	230	5B-1	23.6		218	右岸-14	13.6
	228.5	5B-2	18.8		231.5	12B-1	45.6
	227	5B-3	18.5		230	右岸-15	32.4
	224	左岸-7	14.2		228.5	12B-2	13.7
	219.5	左岸-8	14.1		227	12B-3	19.8

7. 2. 3 転倒に対する安定性の評価

水平打継目に変状が生じたコンクリートダム堤体の転倒に対する安定性に対しては、その変状の範囲と変状の程度が影響する。そこで、図-7.2.11に示す手順で安定性を評価することを提案する。

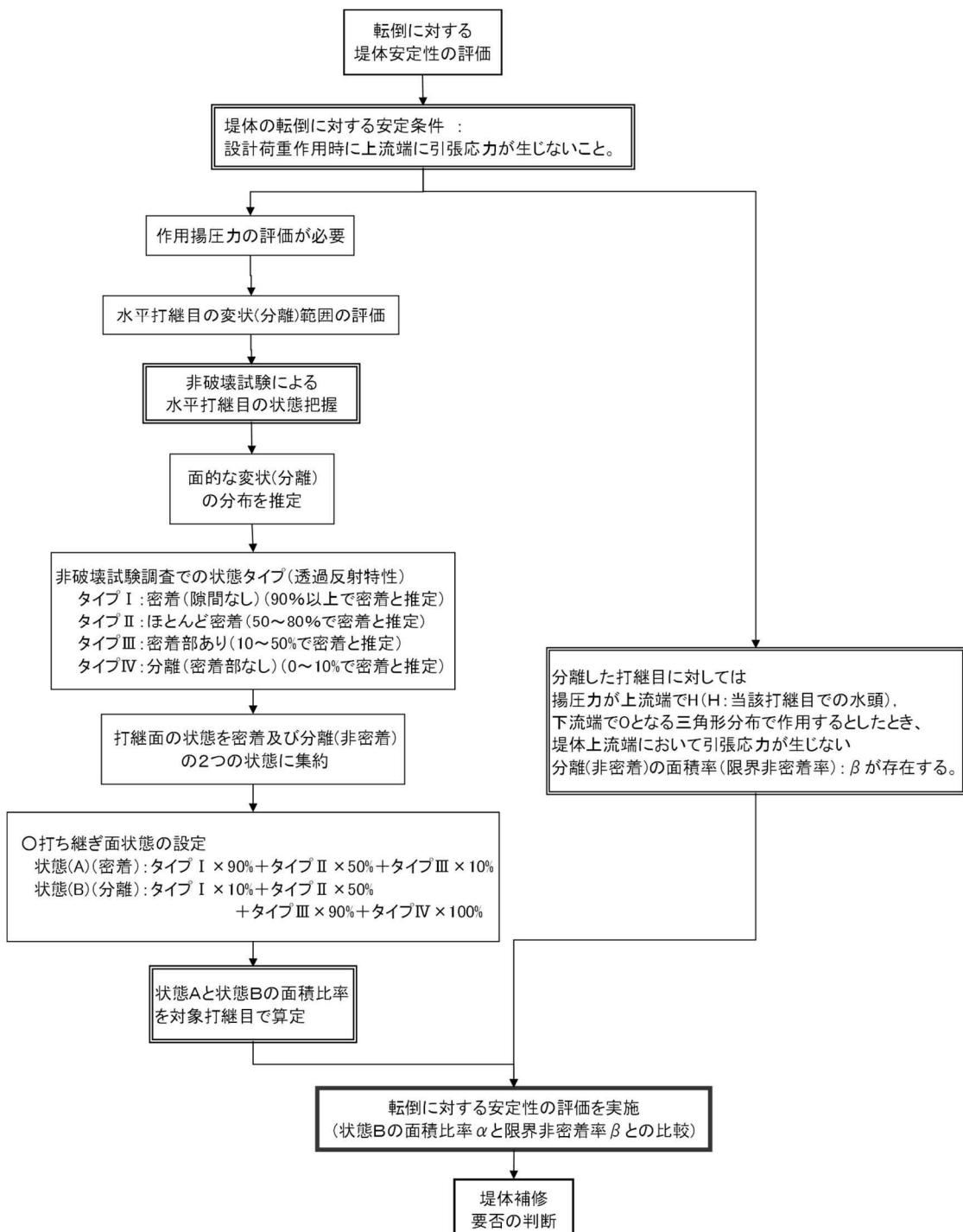


図-7.2.11 水平打継目に変状が生じた堤体の転倒に対する安定性評価フロー

ここで、安定性評価フローの（1）変状（分離）範囲の評価、（2）転倒に対する安定性評価、に分けて実施手順を説明する。

（1）変状（分離）範囲の評価

変状（分離）範囲の評価については、7.2.2（1）と同一である。

（2）転倒に対する安定性評価

堤体の転倒に対する安定性については、設計荷重作用時に、対象とする水平打継目の上位の躯体の上流端に生じる応力を算定して、評価を行う。

堤体の上流端に生じる応力は、図-7.2.3にも示したが

$$\sigma_u = \frac{V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B} \right)$$

ここに、 σ_u ：上流端鉛直応力

V ：応力を求める水平断面に作用する単位幅当たりの鉛直力

B ：ダムの厚さ（上下流方向の長さ）

e ：応力を求める水平断面の中立軸から鉛直力 V の作用点までの距離

で算定する。

このときの鉛直方向断面力 V 及び中立軸から鉛直力の作用点までの距離 e については、基本的には河川管理施設等構造令施行規則及び河川砂防技術基準に定められた方法で算定を行うものとするが、揚圧力についてはこれらの基準に依らずに算定する。これらの基準では、堤体は基礎に完全に密着している状態として揚圧力は上流側： $1/3 \times H$ （水深）、下流側： 0 の三角形分布で堤体底面に作用することとしているが、水平打継目に変状が生じ、非密着状態にあることを前提にしている本検討においては上流側： H （水深）、下流側： 0 の三角形分布で作用するものとして設定する。そして、非密着の比率が $\alpha\%$ の場合には上流側： $\alpha/100 \times H$ （水深）、下流側： 0 の三角形分布で底面に揚圧力が作用するものとして算定することとする。

このとき、非密着の面積比率 α が増加すると作用する揚圧力が増加するため、圧縮側を正の値とすると堤体上流端応力 σ_u は減少することとなる。堤体上流端に引張応力が生じない非密着面積比率の最大値を非密着限界面積比率 $\beta\%$ とすると、上流端応力が $\sigma_u = 0\text{N/mm}^2$ となる非密着面積比率が $\beta\%$ となる。

したがって、堤体の転倒に対する安定性に関する構造性能は、非破壊試験方法で推定把握した非密着面積比率： α とそれぞれの打継目に対する非密着限界面積比率 β との間に、 $\alpha \leq \beta$ の関係となっているときに満足していることになる。

ここで、Aダムにおける水平打継目標高毎に上位の堤体に対する断面力から算定された非密着限界面積比率 β と、非破壊試験を用いて推定された非密着面積比率 α との関係を、非越流部ブロック(BL. 3～BL. 5, BL. 11～BL. 12)と越流部ブロック(BL. 6～BL. 10)とに分けて示したものを、図-7.2.12と図-7.2.13に示す。この結果によると、変状が懸念された水平打継目における非密着面積比率 α は、いずれも限界面積比率 β を下回っており、Aダム堤体においては転倒に対する安定性に関する構造性能を満足しており、補修の必要は無いと評価される。

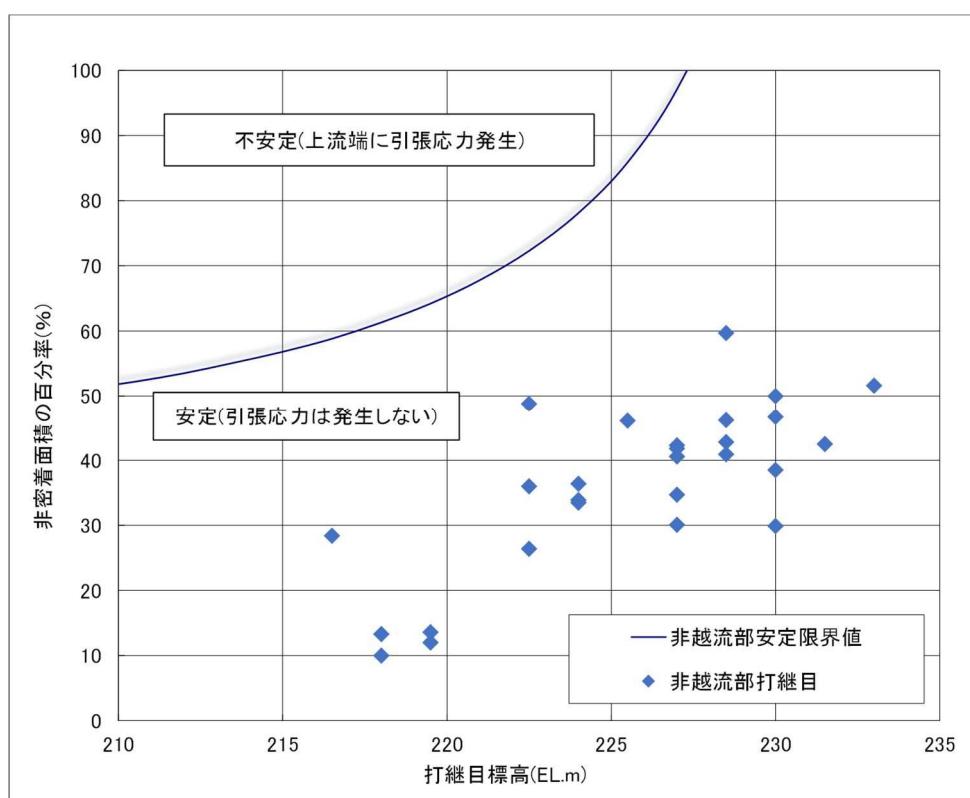


図-7.2.12 転倒条件の検討結果(Aダム非越流ブロック)

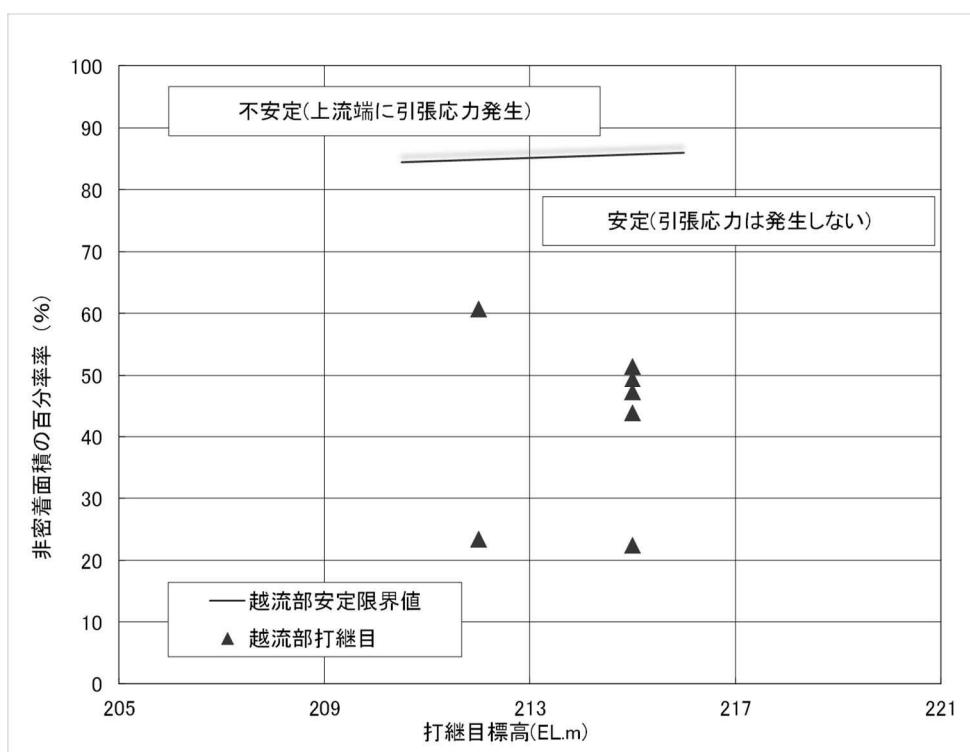


図-7.2.13 転倒条件の検討結果(Aダム越流ブロック)

7. 3 非破壊試験結果を用いた貯水性能の評価手法の提案

7. 3. 1 コンクリートダム堤体に要求される貯水性能

コンクリートダム堤体に要求される貯水性能とは、堤体の持つ遮水性能によって、水を堤体の下流側に漏らすことなく、貯水する性能である。堤体から下流側に水が漏れる現象は、形態別に分けると次の5つの形態が想定される。漏水現象の形態模式図を図-7.3.1～図-7.3.2に示す。

- ①堤体の上下流面に貫通する縦方向ひび割れが発生した場合
- ②堤体の上下流面に貫通する水平方向のひび割れが発生した場合
- ③堤体の上下流面がつながった、水平打継目の分離等の変状が発生した場合
- ④堤体の横継目に設置された止水板に損傷が生じた場合
- ⑤堤体の上流面から、縦方向ひび割れ、水平方向ひび割れあるいは水平打継目の変状によって形成される漏水経路が横継目に設置された止水板の下流側に繋がった場合

これらの発生形態のうち、①②③の3形態については、堤体下流面で漏水が滲出～流出という形態で確認される。一方、④及び⑤の形態については、①～③と同様に、堤体下流面で確認される場合もあるが、横継目に設置された継目排水孔で排水される漏水量の増加という形で漏水が確認されることもある。

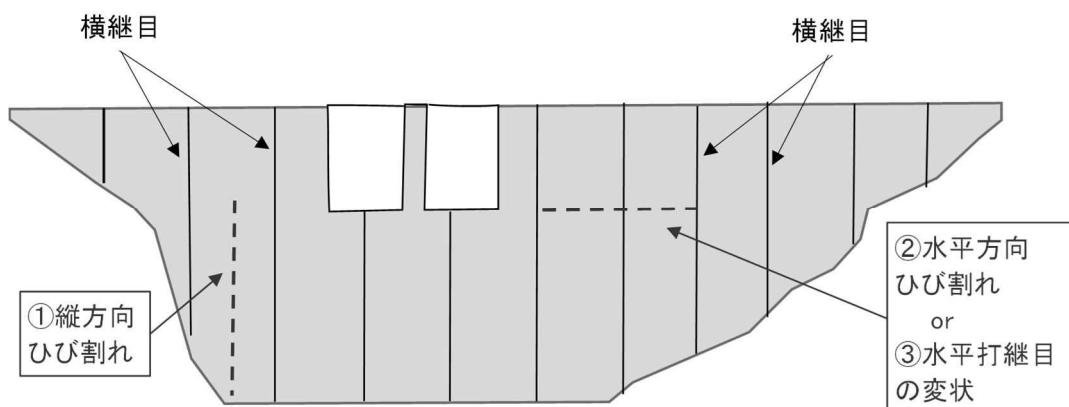


図-7.3.1 漏水発生形態模式図(①～③)(堤体を下流側から見た図)

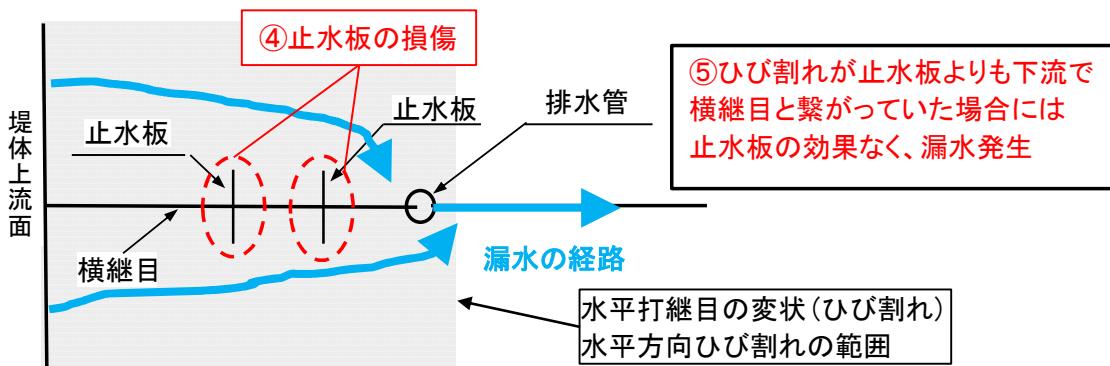


図-7.3.2 漏水発生形態模式図(④～⑤)(横縫目止水板付近を上部から見た図)

これらの変状が発生したときに堤体の貯水性能が低下したことになるが、この貯水性能の低下は、地震による堤体の損傷等によって突然、発生することもあるが、経年的な変状の進展によって貯水性能の低下が潜伏期、進展期、加速期という形で徐々に進展することが多いと推察される。そのため、コンクリートダム堤体に要求される貯水性能を適切に維持していくためには、下流面の漏水現象や継目排水孔で計測される漏水量の増加という目に見える形での貯水性能の低下が発生したときは基より、潜伏期の段階においても変状の状態を的確に把握することが必要である。

コンクリートダム堤体の貯水性能に影響を及ぼす形態としては、前述のとおり、5つの形態が存在するが、ここでは、本研究で主として検討を行ってきた、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状発生に起因して生じる③あるいは⑤の形態による貯水性能の低下を対象としてその性能評価を実施するものとする。

7. 3. 2 貯水性能の評価

水平打継目に変状が生じた場合のコンクリートダム堤体の貯水性能の評価は、基本的には水平打継目に、堤体下流面あるいは止水板の下流側の横継目まで連続した漏水経路が形成されている、あるいは形成されつつあるか、否かという評価を行うことになる。したがって、図-7.3.3に示す手順で貯水性能を評価することについて提案する。

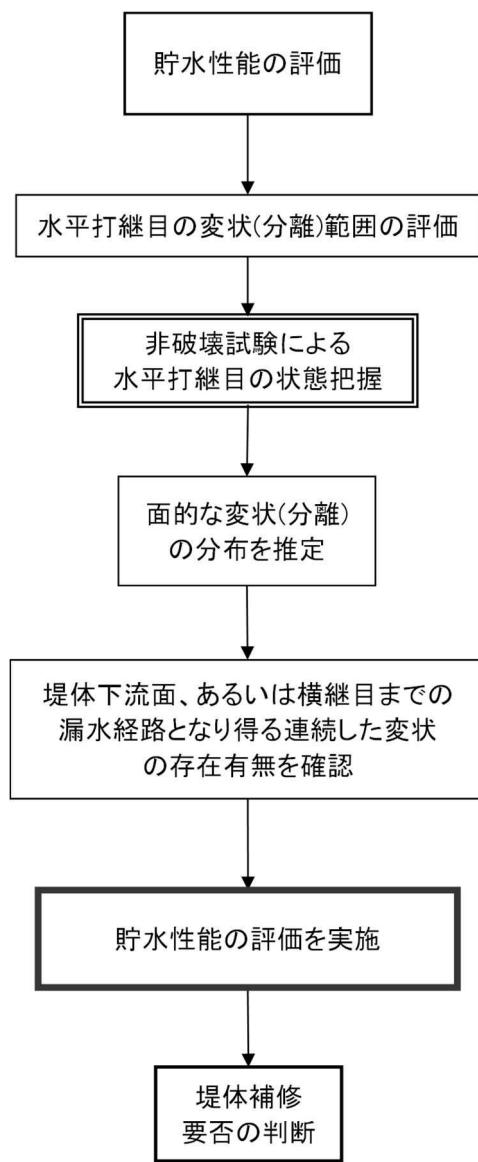


図-7.3.3 水平打継目変状が生じたコンクリートダム堤体の貯水性能の評価手順

ここで、貯水性能の評価フローの（1）変状（分離）範囲の評価、（2）漏水経路となり得る連続した変状の存在有無の確認、に分けて実施手順を説明する。

（1）変状（分離）範囲の評価

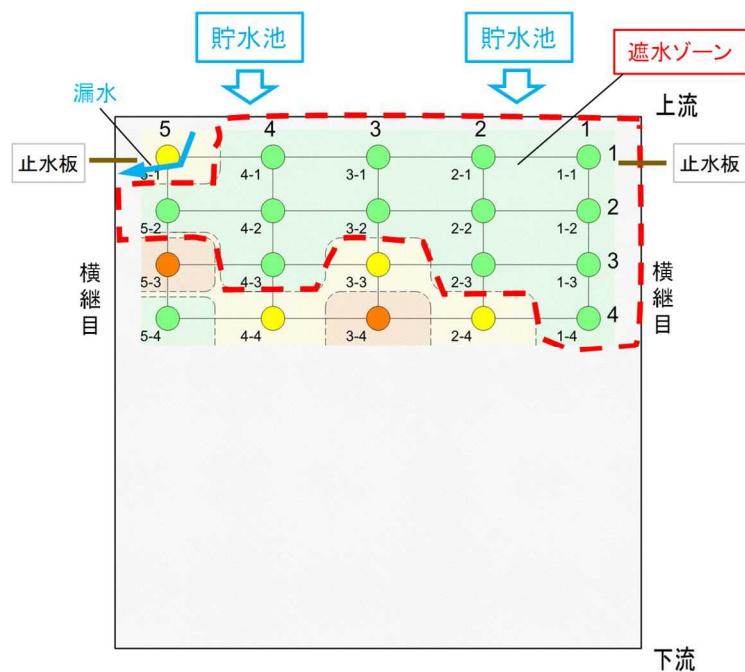
変状が懸念される打継目の状態は、非破壊試験を用いた堤体の水平打継目状態把握手法を用いて、表-4.6.12～表-4.6.19のように、面的に変状の分布状況が推定される。貯水性能の評価においては、構造性能評価で行ったような面積比率を算定するような定量的な評価は行わず、変状（タイプI～タイプIV）の分布状況を確認するところまで実施する。

（2）貯水性能の評価

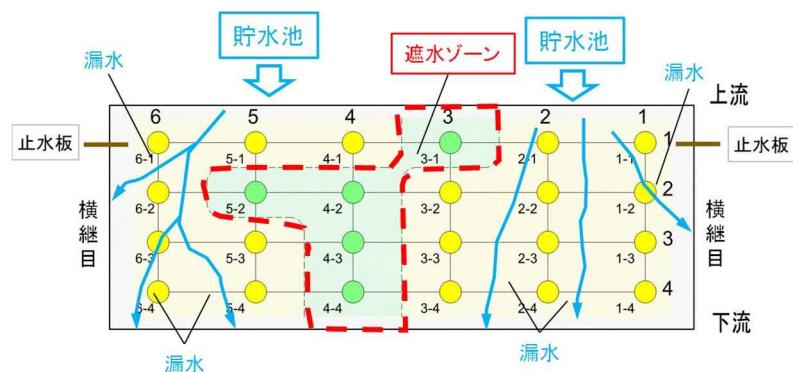
表-7.2.1～表-7.2.4に示したように、変状状態のタイプ分類において、タイプIは、打継目がほぼ密着している状態を想定しており、タイプII、タイプIII、タイプIVと少しずつ非密着の部分が多くなることを想定している。したがって、タイプIは遮水層となり、タイプII、タイプIII、タイプIVとなるに従い、透水性が高くなると考えることができる。したがって、次のように、打継目の状態と漏水経路、貯水性能との間には関係が成立すると考える。

- ① 水の浸入口となる堤体上流面から、堤体下流面、あるいは横継目までの間に、タイプIが連続して分布し、漏水経路を遮断していれば、漏水は発生せず、貯水性能を有する。
- ② タイプII、タイプIII、タイプIVのいずれかが堤体上流面から下流面、あるいは横継目まで連続している場合、漏水の経路となる可能性がある。
- ③ タイプIVが上流面から堤体下流園あるいは横継目まで連続している場合、漏水が発生する状態である可能性が高く、貯水性能は低い。
- ④ タイプII、タイプIII、タイプIVが連続している場合、漏水量の大小は、連続した漏水経路上において状態が良いタイプの影響を受ける。

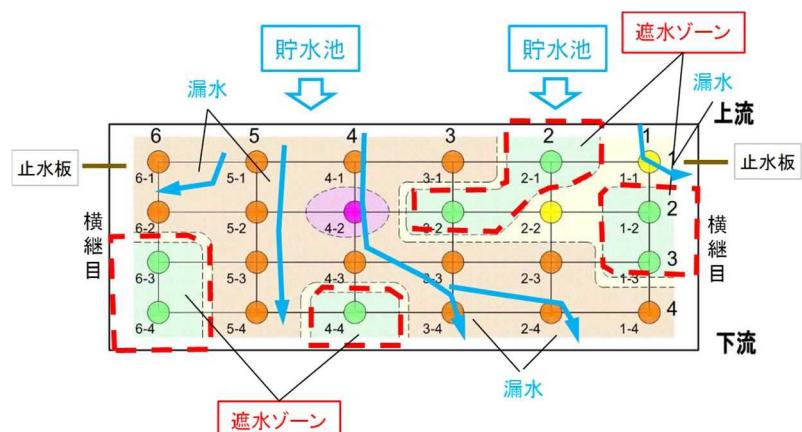
図-7.3.4にモデルダムであるAダムの打継目の貯水性能を事例として示した。タイプIからタイプIVの分布状況から貯水性能は(a)→(b)→(c)の順序で低くなっていると評価できる。このように、非破壊試験の結果を用いて貯水性能を評価することが可能となる。また、これは予防保全対策の実施時期等の判断においても資するものである。



(a) 打継目(a)の貯水性能の評価 (Aダム_BL.4_EL. 222.5)



(b) 打継目(b)の貯水性能の評価 (Aダム_BL.3_EL. 228.5m(補修後))



(c) 打継目(c)の貯水性能の評価 (Aダム_BL.3_EL. 228.5m(補修前))

図-7.3.4 非破壊試験結果に基づく水平打継目の貯水性能の評価事例

7. 4 本章のまとめ

本章においては、非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目の状態把握手法の実施結果である打継目変状状況図を用いて、コンクリートダム堤体の性能を評価する手法について述べた。コンクリートダム堤体に要求される主な性能は、堤体の安定性に関する構造性能と水を貯める性能である貯水性能の二つに大別される。

まず、堤体の安定性に関する構造性能において、水平打継目に変状が生じた場合に影響を受けるのは、滑動に対する安定性すなわち抵抗性能、ならびに転倒に対する安定性、すなわち抵抗性能であることを示し、これらについて概説した。

その上で滑動に関しては、①非破壊試験を用いた打継目の変状の状態区分であるタイプI～タイプIVの4段階から、打継目の密着と非密着の2区分に再区分を実施する。②文献及び既往の試験結果等から、密着した状態と非密着状態での打継目のせん断強度を設定する。③河川管理施設等構造令の規定に準拠した方法で①②の結果を用いて堤体の滑動に対する安全率を算定する、という3段階で滑動に対する抵抗性能を評価する手法を提案した。

つぎに、転倒に対する抵抗性能には、揚圧力が作用する面積、すなわち水平打継目の非密着の部分の比率が影響することに着目して、堤体が転倒に対して安定な状態である上限の非密着の面積比率を非密着限界面積比率 β と定義して、各打継目の非密着部分の面積比率 α との大小関係から、転倒に対する抵抗性能を評価する手法を提案した。

貯水性能については、貯水性能が堤体上流面から下流面、あるいは横継目に連続的に繋がった非密着状態の打継目によって形成された漏水経路の有無に因って影響を受けることに着目し、打継目の変状の状態分布から評価することとした。具体的には、非破壊試験手法によって推定された打継目の変状分布において、ほぼ密着していると評価可能なタイプIの分布が、遮水領域として堤体上流面から下流面あるいは横継目までの漏水経路を遮断するように分布している際は、貯水性能に優れると評価するという手法を提案した。

この提案したコンクリートダム堤体に要求される性能の評価手法によって、堤体の水平打継目に変状が発生した堤体に対する補修の可否判断を的確に実施することが可能になると考える。

参考文献

- 1) 河川管理施設等構造令：昭和五十一年政令第百九十九号，最終改正：平成二十五年七月十一日施行
- 2) 財団法人ダム技術センター編：多目的ダムの建設－平成17年版，第5巻設計II編，pp. 16，財団法人ダム技術センター，2005年6月
- 3) 国際大ダム会議日本国内委員会：昭和三十二年制定ダム設計基準，pp. 21，社団法人日本大ダム会議，1957年9月
- 4) 畑野正：コンクリートダムの滑動安定度について，土木学会論文集第6号，pp. 6～13，土木学会，1951年8月
- 5) 瀬古育二，山口温朗，自閑茂治：RCDコンクリートのせん断強度に関する検討，ダム技術，No. 26，pp. 56～65，1988年10月
- 6) 中村信悟：境川ダムにおけるRCD用コンクリートの性質について-より高く(安全性)，より楽に(施工性)，より優れた(品質)，RCD工法をめざして-，ダム技術，No. 26，pp. 199～206，1988年10月
- 7) 永山功，渡辺和夫，田中靖：重力式コンクリートダムの設計におけるコンクリートのせん断強度について，ダム技術，No. 26，pp. 48～55，1988年10月
- 8) 鈴木敦，加納茂紀，原稔明：RCD工法における連続打設に向けた基礎的研究，ダム工学，12(1)，pp. 4～16，2002年3月
- 9) 大藪勝美，木戸研太郎，鈴木敦，中村武：重力ダム高位標高部の施工の高速化のための基礎的検討，ダム工学，19(3)，pp. 151～164，2009年9月
- 10) 佐々木隆，小山幸男，佐藤彰，宍戸善博：岩手・宮城内陸地震による胆沢ダム洪水吐き被害の調査・分析，ダム工学，19(2)，pp. 76～93，2009年6月
- 11) Mathieu Rochon-Cyr, Pierre Leger : Shake table sliding response of a gravity dam model including water uplift pressure, Engineering Structures 31, pp.1625-1633, 2009

第8章 結論

本論文では、コンクリートダムを長寿命化するための維持管理に必要不可欠な点検・健全度の評価に用いる堤体の水平打継目の状態把握について非破壊試験を用いて実施する手法について検討した。そして、更に、この手法によって実施された状態評価結果を用いて、コンクリートダム堤体の性能を評価する方法について検討を行った。

以下に、本論文で得られた結果を各章毎に要約し結論とする。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的、及び本論文の構成と内容を述べた。

第2章においては、コンクリートダムの維持管理の現状を示すものとして、我が国におけるコンクリートダムの設置状況と性能維持のための維持管理システムをとりまとめるとともに、ダムの規模や完成後の経過年数等が多様な17基のコンクリートダムにおいてダム定期検査と同様の着眼点での状態判定の結果を基に、我が国におけるコンクリートダムの変状を分析・検討した。コンクリートダムの変状を分析・検討した結果、(1)ダムの状態として、直ちに措置を講じる必要のあるダムは存在しないが、速やかに措置を講じる必要のある状態が確認されるダムが存在するとともに、ほとんど全てのダムにおいて必要に応じて措置を講じる必要のある状態となっている部分が存在すること、(2)コンクリートの乾燥や温度低下による収縮現象に起因すると推察されるひび割れ、ならびに堤体下流面で確認されるひび割れや水平打継目からの漏水がほとんどのコンクリートダムにおいて確認される主要な変状であること、コンクリートダム洪水吐の越流部あるいは導流部における放流水による摩耗やキャビテーションによる変状も多くのコンクリートダムで確認される状況にあること、これらの変状については、現時点ではダムの安全性及び機能は保持されていると判断されているが、維持管理を適切に実施しなければならない状況にあること、(3)コンクリートダムの変状の中でも洪水吐きの摩耗やキャビテーションによる変状、ならびに堤体下流面漏水として確認される水平打継目の変状は、経年的な進展が確認されるものであり、状態を把握すべき変状であり、特に、水平打継目の変状は、ほとんどのダム堤体で確認されるものであるが、変状が堤体内部で進展するため、状態の把握が容易に行えないこと、変状が進展した場合、直接、堤体の機能低下に影響することから、特に状態の把握を留意して実施すべき変状であること、を指摘した。

第3章においては、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状について整理・分析を行い、さらに水平打継目の状態を把握する方法について検討した。まず、コンクリートダム堤体は、一般のコンクリート構造物と比較して、①大規模で重厚な無筋コンクリート構造であること、②大粒径骨材を使用して、材料分離が生じやすく、骨材下面界面の付着強

度が相対的低くなる可能性があるダムコンクリートを使用していること、③堤体は薄層厚の矩形ブロックを積み重ねていき構築していくため、打継目が構造的に相対的に弱部となる可能性がある構造物であること、という水平打継目に変状が生じやすい構造物であるということを示した。

次に、水平打継目の変状の発生機構として、①日常的なコンクリートダム堤体の挙動（繰り返し作用）に起因するもの、②ASR 等の他の劣化原因に起因するもの、という大別して 2 種類のものがあり、水平打継目に変状が発生することによって、①堤体構造の安定性、②貯水機能、というダム堤体の性能にどのような影響がどのように及ぶかということについて述べた。そして、水平打継目に変状が生じて、堤体下流面漏水が確認されているダムの事例として 4 ダムを示し、明らかになっている範囲で、変状の発生時期、発生要因、及び進展状況について概説した。

更に、ダム性能に影響が及ぶ水平打継目の変状の状態を把握する手法として、現在、一般的に行われている調査ボーリングを用いた手法については、①健全な堤体コンクリートを小規模ながら破壊すること、②変状の状態把握に要するコストが多大になること、③変状を把握するために必要な現地作業に長期間を要しことがあるため、調査の実施が困難となることがあること、④変状を把握するためには、一時期にダムの貯水機能を低下させる措置を執らなければならないことがあること、という課題を有しており、水平打継目の変状を把握する新たな手法が必要であることを述べた。そして、現行の変状把握手法における課題を克服する手法としては、衝撃弾性波法とサーモグラフィ法という非破壊試験の手法を用いることが有望であるとして、これらを用いた水平打継目の変状の把握を行う新たな手法について取り組むこととした。

第 4 章においては、衝撃弾性波法を用いて、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状を把握する手法についての検討を行った。まず、コンクリート基礎杭の損傷調査等にこれまで用いられてきた、高い領域から低い領域までの周波数成分を有する弾性波を入力し、反射波として戻ってくる弾性波の高周波数領域の成分を取り出すことで、数mオーダーを超える距離に存在する微細な欠陥を把握可能なシステムに着目して、この計測システムをコンクリートダム堤体に対して適用するとした。手法の検討に当たっては、モデルダムとして、水平打継目に変状が進展している、四国地方に位置するダムを選定し、このダムに対する計測、検討及び評価の実施を通じて手法の定型化の検討を実施した。

しかし、利用した衝撃弾性波法の計測システムは、一般的なコンクリート構造物に対する適用事例しかないことから、コンクリートダム堤体の調査に適用するためには、コンクリートダム堤体中の弾性波の伝播特性及び透過反射特性を把握する必要があった。そのため、まず、ダムコンクリートを用いて作製した大型供試体に対して、衝撃弾性波法の計測

システムを用いて計測を行う室内試験を実施し、一般的なコンクリートに比較して、使用骨材が大きく、材料分離が生じ易く、不均質になりやすいダムコンクリートで構築された構造物中の弾性波の透過・反射特性について検討を行った。この結果、ダムコンクリートの構造物においても、弾性波伝播速度のばらつきの程度は最大 1.78%と一般的なコンクリート構造物におけるばらつきの程度 5%に対して十分小さいことが確認されるとともに、弾性波の指向性についても一般的なコンクリート構造物と同等の $6.5^\circ \sim 9.7^\circ$ であることを確認した。さらに、モデルダム堤体に対する衝撃弾性波法による計測の結果から、コンクリートダム堤体中の弾性波伝播速度のばらつきは 3%程度であり、室内試験で確認された値に比較するとやや大きいが、一般的なコンクリート構造物における弾性波伝播速度のばらつきと同程度であることを確認した。また、反射波が生じるような劣化部が複数存在するようなコンクリートダム堤体の状態においても、弾性波伝播速度は、伝播距離に応じて速度が低下する、あるいは変動係数が大きくなるような傾向はないことも確認され、一般的なコンクリート構造物と同様であることを確認した。これらの結果から、コンクリートダム堤体においても、弾性波の透過反射特性に関しては一般的なコンクリート構造物と同様に取り扱う事が可能であることを確認した。

衝撃弾性波法によって計測された堤体打継目での弾性波の透過反射特性である計測波形パターンと打継目状態との関係については、A ダム堤体で別途行われていた調査ボーリングの結果との対比によって設定することとし、同一点での 10 回程度の計測における波形パターンの比率から 4 段階の打継目状態区分を推定する方法を提案した。これによって、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状を非破壊試験によって、面的な分布を含めて状態を推定することが可能となった。

衝撃弾性波法による計測を行い、コンクリートダム堤体の水平打継目状態を推定する手法を多くのコンクリートダムに対して広く実施するための障壁としては、堤体天端からの鉛直下方向の計測では、情報が得られる範囲が限定的であること、計測実施するためには天端のアスファルト舗装を一旦撤去する必要があること、の 2 点が存在するものとかんがえられた。そこで、対応策として、前者に対しては堤体監査廊から計測用アタッチメントを用いて計測を行う手法について提案し、これによって堤体内部のより広い範囲の状態が把握できる可能性があることを示した。また、後者に対してはアスファルト舗装面を金属補修剤の塗布によって補強することで、舗装を撤去して堤体コンクリート面を直接打撃し、計測を行った場合と、ほぼ同様の計測結果を得ることが可能になることを確認した。これら 2 点の対応策によって、衝撃弾性波法を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目状態の把握が、より多くのダムで適用される機会が増加するものと考えている。

第5章においては、赤外線サーモグラフィ法による水平打継目の変状状態の把握について、供用中のコンクリートダム堤体に対する計測データに基づき検討を行った。その結果、次に示す5つの事項を確認した。(1)コンクリートダム堤体表面が湿潤状態にあるとき、水平打継目の温度は周囲の一般部の表面温度に比較して低い。このとき、水平打継目の劣化が進んでいる箇所の方がより低温として計測される。(2)コンクリートダム堤体表面が湿潤状態にあるとき、気温あるいは日射エネルギーの変化に伴う、水平打継目部の温度変化は、堤体表面温度の変化に対して遅延し、その温度変化の遅延程度は変状が進展した水平打継目のほうが大きい。これは一般的なコンクリート構造物の表層部に欠陥がある時に確認される温度変化の傾向とは異なる。(3)コンクリートダム堤体表面が乾燥状態にあるとき、気温の上昇、あるいは日射エネルギーによって堤体表面の温度が上昇する際には水平打継目の温度は周囲の一般部の堤体表面温度に比較して高温となる。しかし、温度上昇が収束、あるいは降下過程においては水平打継目の温度の方が低温となる。これは一般的なコンクリート構造物の表層部に欠陥がある場合の温度変化の傾向と同一である。(4)気温に比較して貯水池水温が低く、水平打継目からの漏水が確認される場合、水平打継目の変状が進んでいる方が水平打継目での温度は低い。(5)気温に比較して貯水池水温が高く、水平打継目からの漏水が確認される場合、変状が進展しておらず漏水量も少ない状態では水平打継目付近の温度は一般部に対して低くなるが、水平打継目の変状が進んでいる場合には高くなる。

これらの5つの事項は、水平打継目の堤体表面付近の変状の状態が、表面温度によって把握可能ということを示唆しており、すなわち赤外線サーモグラフィ法を用いることで水平打継目の状態把握が可能であることが確認された。

第6章においては、第4章と第5章で述べた、非破壊試験である衝撃弾性波法と赤外線サーモグラフィ法を併用して、コンクリートダム堤体の水平打継目の変状の状態を把握する方法を提案した。具体的には、概略調査として赤外線サーモグラフィ法によって変状の進展が懸念される水平打継目をスクリーニングした上で、詳細調査として衝撃弾性波法により打継目の状態を定量診断するための、異種の非破壊試験を組み合わせて実施するものである。これによって必要な部分への重点的な詳細調査の実施が可能になり、調査全体の合理化、効率化が可能となる。さらに、衝撃弾性波法による状態把握が困難な上下流面付近に赤外線サーモグラフィ法で得られる情報を加味することで水平打継目の状態把握の精度向上を図ることが可能となる。

また、さらに、提案した非破壊試験を用いた堤体の打継目状態を把握する技術を活用するものとして、貯水機能補修、すなわち漏水対策として実施される水平打継目へのセメントミルク注入の効果確認への衝撃弾性波法の活用について述べた。モデルダムにおいて実

施された打継目への注入前後の状態評価への適用の結果から、提案した衝撃弾性波法は、注入の効果を確認する方法としても有効であることを示した。

第7章においては、非破壊試験を用いたコンクリートダム堤体の水平打継目の状態把握手法の実施結果である打継目変状状況図を用いて、コンクリートダム堤体の性能である、堤体の滑動に抵抗する構造性能、堤体の転倒に抵抗する構造性能、及び貯水性能について評価する手法について提案を行った。滑動に関しては、①非破壊試験を用いた打継目の変状の状態区分であるタイプI～タイプIVの4段階から、打継目の密着と非密着の2区分に再区分を実施する。②文献及び既往の試験結果等から、密着した状態と非密着状態での打継目のせん断強度を設定する。③河川管理施設等構造令の規定に準拠した方法で①②の結果を用いて堤体の滑動に対する安全率を算定する、という3段階で滑動に対する抵抗性能を評価する手法を提案した。

転倒に対する抵抗性能には、揚圧力が作用する面積、すなわち水平打継目の非密着の部分の比率が影響することに着目して、堤体が転倒に対して安定な状態である上限の非密着の面積比率を非密着限界面積比率 β と定義して、各打継目の非密着部分の面積比率 α との大小関係から、転倒に対する抵抗性能を評価する手法を提案した。

貯水性能については、貯水性能が堤体上流面から下流面、あるいは横継目に連続的に繋がった非密着状態の打継目によって形成された漏水経路の有無に因って影響を受けることに着目し、打継目の変状の状態分布から評価することとした。具体的には、非破壊試験手法によって推定された打継目の変状分布において、ほぼ密着していると評価可能なタイプIの分布が、遮水領域として堤体上流面から下流面あるいは横継目までの漏水経路を遮断するように分布している際は、貯水性能に優れると評価するという手法を提案した。

第8章は結論であり、本研究の内容を総括し、各章で得られた知見、提案内容を簡潔に要約した。

謝辞

本研究の実施及びとりまとめにおいて、大阪大学大学院工学研究科教授鎌田敏郎先生からは、ひとかたならぬご指導とご鞭撻をいたいたことを厚くお礼申し上げます。鎌田敏郎先生には、以前から、水資源機構のあるダムにおける技術検討会の委員としてご指導を頂くというご縁を持たせて頂いておりましたが、コンクリートダムの維持管理に関する研究を行いたいという突然のお願いに対しても、暖かく門戸を開いていただき、大学での研究の機会を頂きましたことを改めて深く感謝申し上げます。この3年間は自分の人生の中でも非常に充実した期間であり、鎌田敏郎先生には心より感謝申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科教授乾徹先生、ならびに大阪大学接合科学研究所准教授堤成一郎先生には、本学位論文の審査を快く引き受けいただき、本論文をまとめるに当たり貴重なご指導、ご指摘、ご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科助教寺澤広基先生には、研究に対する暖かい助言を頂くほか、様々なご支援を頂きまして、心より感謝申し上げます。

大阪大学大学院特任研究員服部晋一氏、(一財)沿岸技術センター秋山斉氏、ならびに西日本本高速道路エンジニアリング関西(株)鈴木真氏には、研究に対するご助言の他、社会人の博士後期課程学生の先輩として様々なアドバイスを頂き、心から感謝しております。また、社会基盤設計学領域の学生の皆さんには、ゼミや交流会等において、父親のような年齢である私に対しても友人のように自然に接していただいたことを感謝いたします。

水資源機構総合技術センター元所長桜井力氏、ならびに水資源機構総合技術センターダムグループ長木戸研太郎氏には、大学院博士後期課程への入学のきっかけを作って頂いた、あるいは背中を強く押して頂きました。このお二人が居なかつたら、本研究はまとまることは無く、深く感謝しております。

また、本研究で用いた衝撃弾性波法調査システムの開発者の一人である、永井哲夫氏には、計測された波形の解釈等のアドバイスを頂きましたことを感謝申し上げます。

最後になりましたが、本研究は、水資源開発公団入社後、現在に至るまでの多くの時間をコンクリートダム及びダムコンクリートに関する技術や研究開発に携わってきた著者が、独立行政法人水資源機構に勤務しながら大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻に在籍した3年間で、それまでの業務のなかで実施してきた内容を改めて深く分析検討を行ったもの、ならびに大学院において新たに取り組んだ内容についてとりまとめを行ったものです。そのため、現地計測等でお世話になった水資源機構の現場事務所の職員の皆様に厚くお礼を申し上げると共に、水資源機構のコンクリートダムの維持管理の記録、ダム堤体に対する非破壊試験による計測データ等を数多く使用させていただいたことについてこの場を借りて感謝の意を表します。