

間隙水圧モニタリングによるフィルダム基礎岩盤の水理地質構造同定と ICT グ라우チング現場品質管理システムの構築

古 川 無何有*¹ 武 田 智 治*¹
中 島 秀 樹*² 石 黒 健*³
平 田 昌 史*³

要 旨

複雑な層序と透水特性を有するフィルダム基礎岩盤の水理地質構造の同定、カーテングラウチングの現場品質管理および原位置カーテングラウチングの遮水性能評価を試みた鵜川ダムの現場事例を報告する。岩盤内に間隙水圧計を設置し、岩盤内水位を人為的に変動させた際、およびカーテングラウチング施工時の水押し（地中加圧）時の実測応答と FEM による再現解析により、基礎岩盤の地層の層序や透水性の識別、グルーピングを試みた。同じ岩盤間隙水圧計をカーテングラウチング施工時および完成後の品質（遮水性能）の現地確認に応用した。現場品質管理業務の効率化と生産性向上、DX 化を達成すべく、クラウド型グラウチング品質管理システム「Grout Twin」を現場に構築、運用した結果も併せ報告する。

キーワード ロックフィルダム／基礎岩盤／水理地質構造／カーテングラウチング／FEM解析／
間隙水圧モニタリング／クラウド型現場品質管理システム

目 次

- | | |
|--|---|
| 1. はじめに | 4. クラウド型現場グラウチング品質管理
システム「Grout Twin」の構築 |
| 2. 鵜川ダムの概要と基礎岩盤の水理地
質構造 | 5. 原位置カーテングラウチングの遮水性評価と
試験湛水に向けての諸準備 |
| 3. 間隙水圧モニタリングによるフィルダ
ム基礎岩盤の水理地質構造同定 | 6. おわりに |

IDENTIFYING THE HYDROGEOLOGICAL STRUCTURE OF ROCK FOUNDATION FOR FILL DAM BY PORE WATER PRESSURE MONITORING AND ESTABLISHING THE ICT GROUTING SITE QUALITY CONTROL SYSTEM

Mukau FURUKAWA Tomoharu TAKEDA
Hideki NAKAJIMA Takeshi ISHIGURO
Masafumi HIRATA

Synopsis:

An attempt for identifying the complex hydrogeological structure of rock foundation for fill dam by installing the pore water pressure gauge in rock layer, measuring its behavior during artificial change of underground water level with support of FEM analysis is reported. For evaluating the quality of curtain grouting and its in-situ impermeability before test reservoiring using installed pore water pressure gauge, ICT grouting site quality control system enabling the three-dimensional visualization including the relationship between pore water pressure behavior and grouting execution history is also introduced.

* 1 北陸支店 鵜川ダム作業所 * 2 中部支店 鳥羽河内作業所
* 3 本店 ICI テクノロジーセンター 地盤グループ

1. はじめに

ダムの施工においては、湛水時に基礎岩盤中を迂回して浸透する漏水の量を低減するためにカーテングラウチングが構築される。その設計に際しては、基礎岩盤の水理地質構造（層序と透水性）に関する情報が必要となるが、通常は調査数量に制限を受ける事前の調査ボーリングとルジオンテストの結果が用いられる。一方、ダム基礎岩盤の水理地質構造は空間的に複雑な様相を呈することが多く、例えば、カーテングラウチングの検討を行う際の浸透流解析のモデル化やカーテン深度の決定等を困難なものとしている。

今後試験湛水を迎える鶴川ダム建設工事（新潟県柏崎市）では、基礎岩盤内の各層に予め間隙水圧計を設置し、人為的に岩盤内水位（水頭）を変動させた際、およびグラウチング施工時の水押し（加圧）時の基礎岩盤内各層の間隙水圧応答を実測することで、その水理地質構造の同定、すなわち地層の層序や透水性の識別、グルーピングを試みた。さらに、同じ岩盤間隙水圧計をカーテングラウチング施工時および完成後の品質（遮水性能）の現地確認に応用することを試み、同時に現場品質管理作業の効率化と生産性向上、DX化を達成すべく、クラウド型グラウチング品質管理システム「Grout Twin」を構築、運用している。

図-1 に本研究開発のフレームワークと論文構成を示す。以下、①鶴川ダムの概要と基礎岩盤の水理地質構造特性 ②間隙水圧モニタリングによるフィルダム基礎岩盤の水理地質構造の同定 ③クラウド型現場グラウチング品質管理システム「Grout Twin」の構築 ④原位置カーテングラウチングの遮水性評価と試験湛水に向けての諸準備、の順に実施結果を報告する。

2. 鶴川ダムの概要と基礎岩盤の水理地質構造特性

鶴川ダムは新潟県柏崎市で建造中の中央コア型ロック

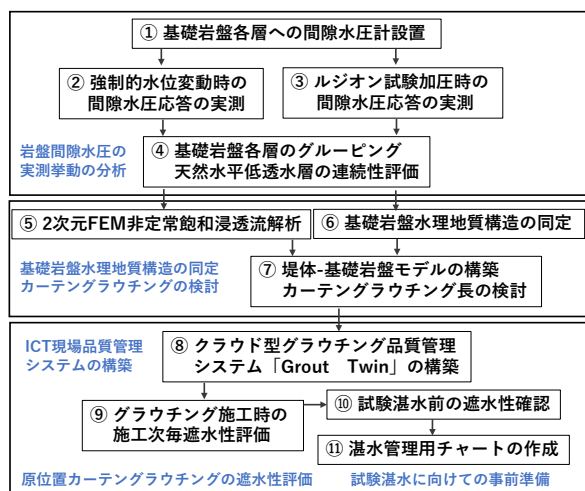


図-1 研究開発のフレームワークと論文構成

フィルダム（堤高 55m）であり、2023 年度に堤体の盛立てを完了している。図-2 に鶴川ダム堤体の標準断面（Y+50 断面）における地質図を、図-3 にダム軸縦断面図と地質図を示す。図中には、基礎岩盤内への間隙水圧計の設置状況を併記した（間隙水圧計の色は、後出の表-1 中のグルーピングに対応させた）。

鶴川ダムの基礎岩盤は、図に示す如く複雑な地層構造を呈しており、表層付近の安山岩（An 層：オレンジ色や赤・ピンク色）、凝灰岩（Tb 層：緑色）、深部玄武岩（Anb 層：茶色）などが複雑に入り組んでいる（図中の地質凡例参照）。さらに、緑色の凝灰岩層（Tb 層）は、その上部および中間部に介在する 2 つの天然水平低透水路（青色網掛け部以降、低透水路と略称）により凝灰岩上部層と下部層の 2 種類に層別される。図-4 に、事前の調査ボーリングにより得られた地層毎の Lu 値の深度方向分布を示す。図中、低透水路に該当する 3 つの地層データを青破線で囲んだ。図より、表層付近の An 層下位に分布する凝灰岩層（Tb 層）は、深部においても Lu 値の低減傾向が見られず高透水性を示しており、止水設計上の大きな課題となった。そこで、Tb 層を被覆する低透水路を有効活用してカーテングラウチングの合理化を図ることが議論されたが、ここで重要となったのは、低透水路の遮水性の面的、空間的な安定性が確保されるか否か、これを如何にして現地確認すればよいか、という技術的課題であった。図-4 中に示すように、本地点の基礎岩盤の Lu 値のばらつきは低透水路も含めて非常に大きく、その空間的な不均一性を、数量に制限のある事前の調査ボーリングのデータのみで評価することには限界があった。このため、基礎岩盤内に間隙水圧計を多点的に配置し、岩盤内の水位や水圧を強制的に変動させた際の間隙水圧応答を実測することによりその評価を試みた。間隙水圧計の実測応答が、空間的な不均一性を包含した基礎岩盤の巨視的、等価な透水特性を反映したものとみなすとの実務的なアプローチである。

なお鶴川ダムでは、堤体コア材の現場品質管理に飽和度管理が導入されており、ダムの概要や堤体の材料特性を、飽和度管理の実施状況とともに既報告^{1)~3)}に取りまとめている。飽和度管理では、従来の現場透水試験に加え、自動走査式 RI 密度水分計（SRID）と GNSS を組み合わせた迅速・面的管理手法を導入しており、堤体物性情報の統計的な集積を進めている³⁾。湛水時のフィルダム浸透挙動の評価には堤体と基礎岩盤の両方の物性情報が必要となり、この際、上記の堤体物性情報に加え、基礎岩盤の物性情報、すなわち水理地質構造を精緻に評価する事は非常に重要な意味を持つ。

3. 間隙水圧モニタリングによるフィルダム基礎岩盤の水理地質構造の同定

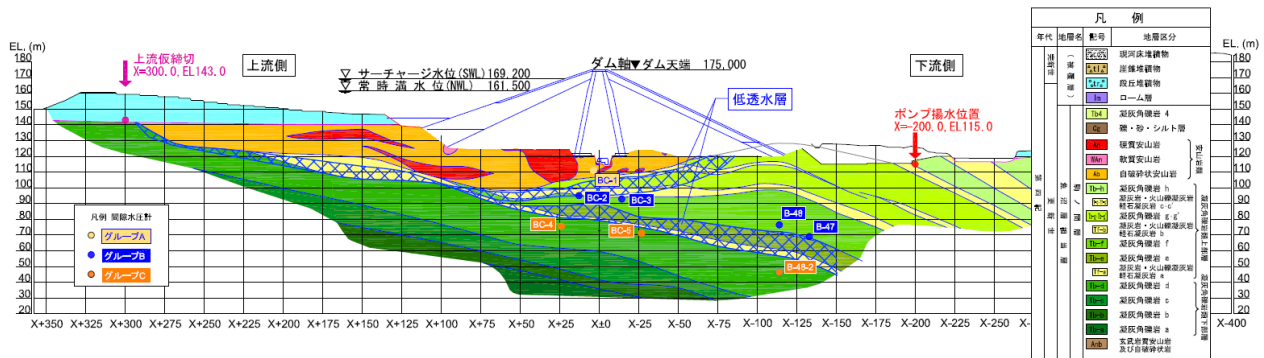


図-2 鵜川ダム標準断面（Y+50 断面）の地質図および岩盤間隙水圧計の設置状況

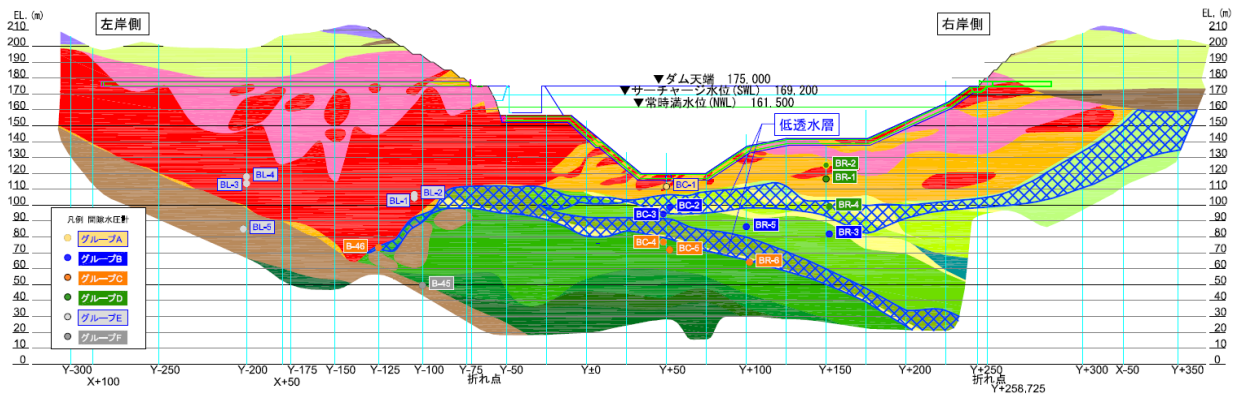


図-3 ダム軸縦断面図と地質図および岩盤間隙水圧計の設置状況

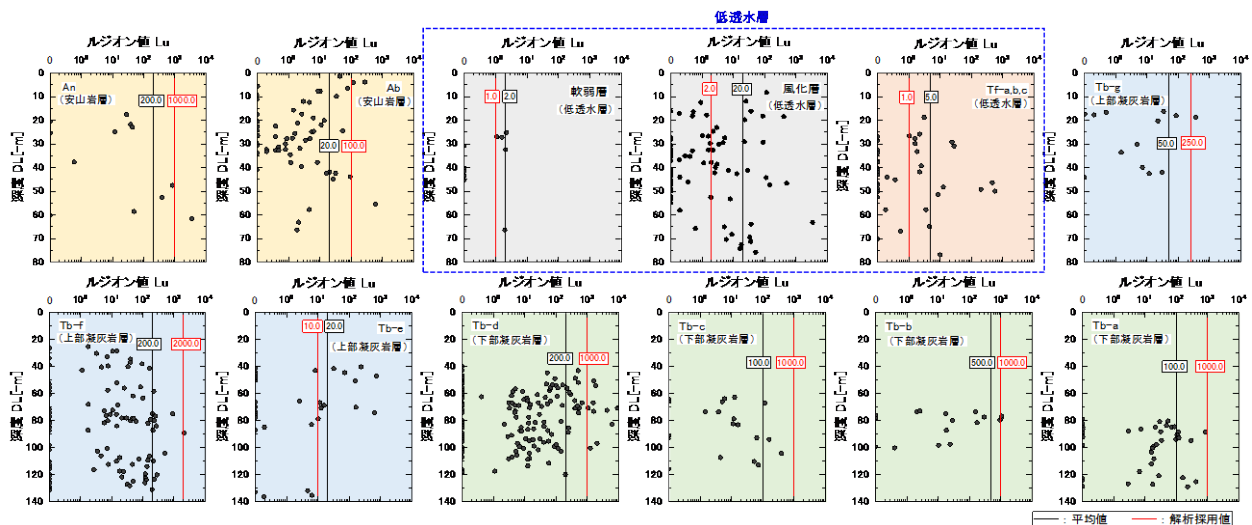


図-4 基礎岩盤のルジオンテスト結果

3.1 地下水位変動時の間隙水圧応答を用いた同定

図-2 中に示した位置（下流側減勢工付近）で、ポンプ揚水による強制的な水位変動を基礎岩盤内に加えた。水位変動は、2019 年 12 月にポンプ揚水を止め、約 6m の水位上昇（EL.115.0～EL.121.0 まで）の後、2020 年 3 月まで約 3 か月間これを維持し、その後、ポンプ揚水を再開し、前年の水位まで低下させた（図-5 参照）。揚水ポンプは、EL.115.0 盤から 0.5m 掘削した窠場に設置しており、容量 120m³/hr を 2 台使用し、揚水量は 120～240m³/hr の範囲にあった。この位置には凝灰岩上部層が露頭しており、図-5

には凝灰岩上部層の代表として間隙水圧計 BC-2 の時刻歴変化を示している。凝灰岩上部層は高透水性の地層であるため（図-4 や後述の図-10 中に示した FEM 試解析結果の Lu 値、透水係数一覧を参照）、図中に併記したポンプ揚水停止→揚水再開のアクションに即時的に対応する形で間隙水圧が綺麗に反応していることが分かる。岩盤間隙水圧の値は降雨の影響を強く受けたため、以下の図では図中の①～③時点（降雨量ゼロの日、図-5 下図の矢印参照）での間隙水圧値を採用した。図-6 は、図-5 中の③の時点（水位再低下開始の 10 日後、かつ降雨量ゼロ）での各計

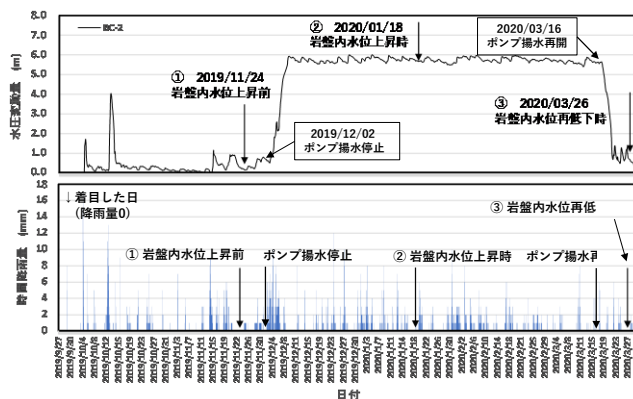


図-5 岩盤内水圧(BC-2)の変動履歴と着目ポイント

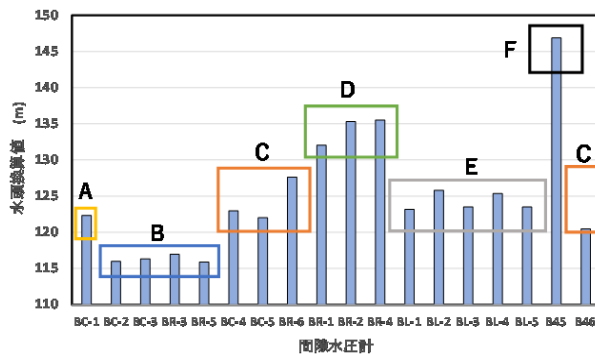


図-6 岩盤内水頭値の比較 (再低下後定常状態)

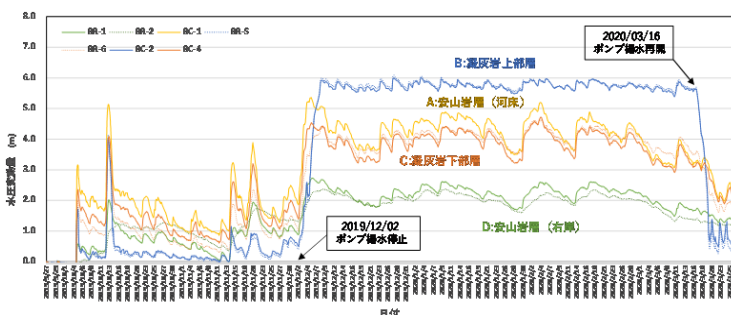
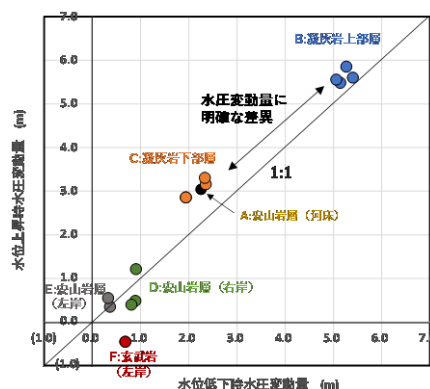
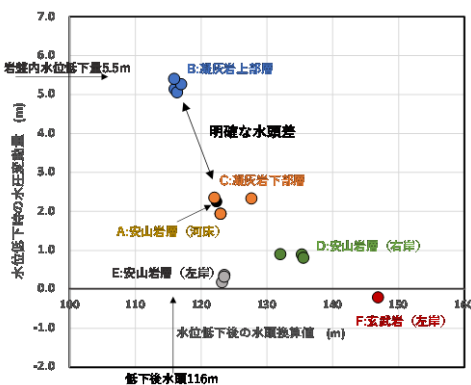


図-7 岩盤内水位変動時の間隙水圧変動量の時刻歴変化

表-1 間隙水圧応答による地層グルーピング

グループ	該当する間隙水圧計	該当する主な地層
A	BC-1	安山岩層 (河床部)
B	BC-2, BC-3, BR-3, BR-5, B-47, B-48	凝灰岩上部層 (河床・右岸・下流)
C	BC-4, BC-5, BR-6, B-46, B-48-2	凝灰岩下部層 (河床・右岸・左岸)
D	BR-1, BR-2, BR-4	安山岩層 (右岸)
E	BL-1, BL-2, BL-3, BL-4, BL-5*	安山岩層 (左岸)
F	B-45	玄武岩 (左岸)

*BL-5は、図-3では玄武岩層の中に設置されているが、間隙水圧挙動からグループEに配置



(b) 水位低下後水頭値と水圧変動量の関係

図-8 岩盤内水位変動量と間隙水圧変動量の関係

器の水頭換算値を示している。これより、水頭値は図中に示すA～Fの5つのグループに層別され、例えば同じ河床部のA(表層安山岩)、B(凝灰岩上部)、C(凝灰岩下部)を比較すると明瞭な水頭値ギャップを確認することができる。これはAとB、BとCの間に低透水層が連続して存在することを示唆する。図-6の水頭値には計器設置深度の影響も含まれるため、次の図-7、図-8を用いて別の観点で整理した。図-7は、図-5と同じ期間での各層間隙水圧計の時刻歴変化を重ね書きしたものであるが、この非定常応答においても地層A～Dで明瞭な差異を確認できる。同一地層内での間隙水圧応答はほぼ一致しており、各地層内の透水性は比較的均一であること、これらの層の境界部に低透水層が面的・空間的にも安定的に存在していることが確認できる。図中のグループDは水圧変動量が最も低い、低透水層の存在に加え、右岸側と河床部と

いう計器設置場所の違いの影響が含まれているものと想定される。また、左岸側のグループE、Fの間隙水圧計は図-8(a)(b)中に示すように変動量が非常に小さく、A～Dとは異なるメカニズムを有するものと想定されたため図-7中には併記していない。図-8(a)と図-8(b)は、水位低下時(図-5の②-③)および水位上昇時(②-①)の水圧変動量の関係、および水位低下後水頭値③と水位低下時の水圧変動量(②-③)の関係を一例として示しているが、図-7と同様、水圧変動量から見ても、AとB、BとCの間には間隙水圧応答のギャップがあり、2つの低透水層の連続性を示唆している。青のB凝灰岩上部層内で強制的な水位変動を加えているため、グループBの間隙水圧応答は図-2中に併記したポンプ位置での低下後水頭(図-8(b)の横軸矢印)、水位低下量(同図の縦軸矢印)とほぼ1:1に対応するが、低透水層を挟んだA上部安山岩層やC凝

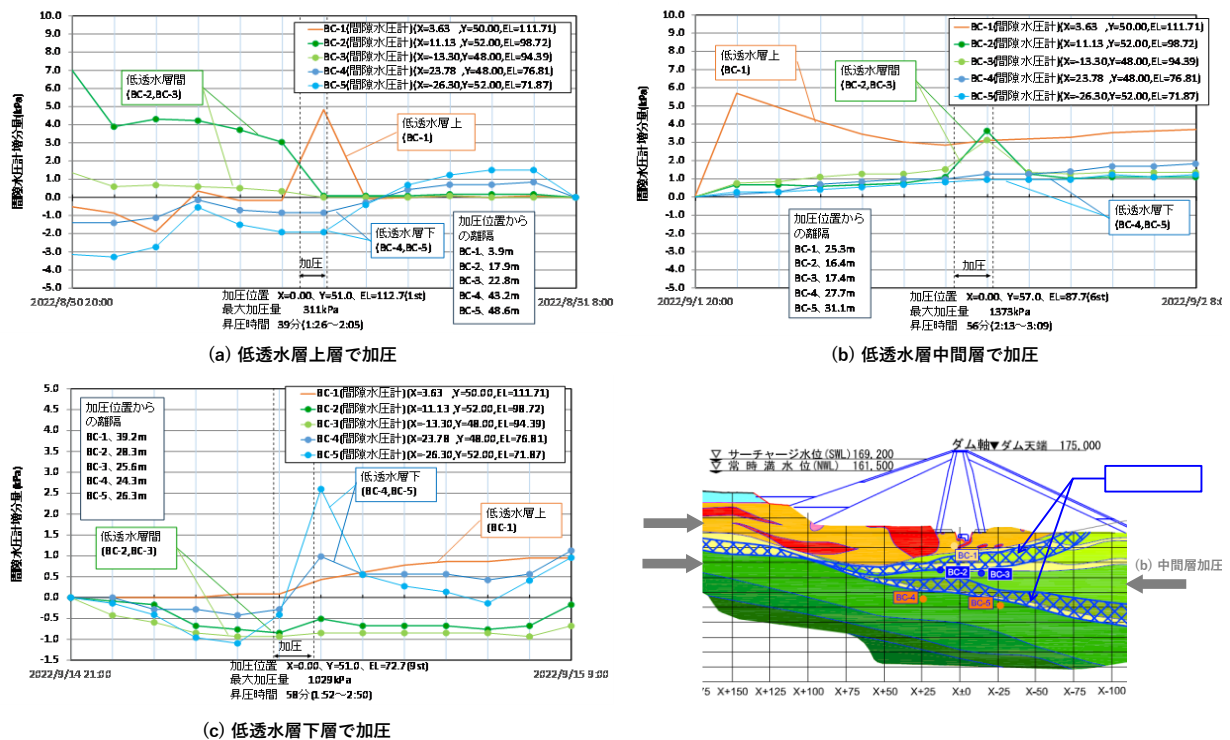


図-9 グラウチング施工時（水押し時）の岩盤間隙水圧計の応答例（低透水層上層/中間層/下層での加圧別）

灰岩下部層では、その影響を受けて間隙水圧の応答が鈍化していることが良く分かる。表-1 には、以上の検討結果に基づき、基礎岩盤の地層毎のグルーピングと該当する間隙水圧計の関係を整理した。2つの低透水層の連続性確認が目的であったため、ここまで、主として表-1中のグループA, B, C（河床部）の挙動の違いに着目した。一方、グループD, E, Fは右岸および左岸側に設置した計器に相当し、これらは図-6の水頭値や水圧変動応答共に河床部とは異なる応答を示したため、表-1では別グループに分類した。右岸及び左岸側は河床部とは水理地質構造が異なり（天然水平低透水層の分布や岩盤内水位の違いなど）、後述するようにカーテングラウチング長の設定に際しても異なる考え方が採用されている。B-45は玄武岩に分類され、図-6の水頭値も他と異なることから別とした。グループBのB-47, B-48、グループCのB48-2は、下流側層序の確認のために後日追加設置した間隙水圧計であり、図-5の水位変動履歴以降に別途短期間の水位変動を行ってデータ確認とグルーピングを行ったため、図-6～図-8には記載していない。

以上の検討結果より、これまでの調査数量に制限のある事前ボーリング調査結果のみでは評価が難しかったフィルダム基礎岩盤の複雑な水理地質構造、地層の層序や透水性の違い、天然水平低透水層の連続性やその遮水性能の安定性などを、岩盤内に設置した間隙水圧計の岩盤内での強制的な水位変動時の実測挙動データに基づき、定量的に判断・同定できることが分かった。

3.2 グラウチング施工時の間隙水圧応答を用いた同定

岩盤内での強制的な水位変動に加え、もう一つ、岩盤内間隙水圧応答の違いを抽出した事例を図-9に示す。この図は、グラウチング施工時の最初の水押し（ルジオンテスト）を行った際の岩盤間隙水圧計の応答例を示している。2層からなる低透水層の(a)上層（安山岩層）、(b)中間層（凝灰岩上部層）、(c)下層（凝灰岩下部層）内で加圧した際の間隙水圧応答を見ると、強制的な水位変動の場合と同様に、加圧した層内の特定の間隙水圧計だけが大きく反応し、低透水層を挟んだそれ以外の層では有意な反応が見られていない（これら加圧層以外の計器に見られる不規則な挙動には、降雨やグラウチング同時施工の影響など複数の要因が関与していると考えられ、明確な解釈は難しい）。加圧層内計器の反応の大きさは加圧量、および加圧点と間隙水圧計の離隔に依存しており、これらの現場条件を図中に併記した。図-5や図-7に示した広範囲な岩盤内水位変動時とは若干異なり、水押し時の加圧と連動してピーク値に至り、水押し終了と共に急速に減衰する、短時間内での間隙水圧応答となっている。

本結果もまた、低透水層の安定した連続性（遮水性能）を裏付けるものであり、3.1で示した岩盤内水位の強制的な変動に加え、ルジオンテストの水押し時の地中加圧時データを、基礎岩盤の水理地質構造の同定に利用可能であることが分かった。

材料名	岩区分	岩級区分	ルジオン値 Lu	透水係数 k [cm/s]
WAn	安山岩類	CL~CM	1000.0	1.00E-02
An	安山岩類	CM	1000.0	1.00E-02
Ab	安山岩類	CL	100.0	1.00E-03
Tf-c	凝灰角礫岩類	D~CL	1.0	1.00E-05
Tb-g	凝灰角礫岩類	CL	250.0	2.50E-03
Tf-b	凝灰角礫岩類	CL	1.0	1.00E-05
Tb-f	凝灰角礫岩類	CL~CM	2000.0	2.00E-02
Tb-e	凝灰角礫岩類	CL	10.0	1.00E-04
Tf-a	凝灰角礫岩類	CL	1.0	1.00E-05
Tb-d	凝灰角礫岩類	CL~CM	1000.0	1.00E-02
Tb-c	凝灰角礫岩類	CL	1000.0	1.00E-02
Tb-b	凝灰角礫岩類	CL~CM	1000.0	1.00E-02
Tb-a	凝灰角礫岩類	CL~CM	1000.0	1.00E-02
軟弱層	-	-	1.0	1.00E-05
風化ゾーン	-	-	2.0	2.00E-05

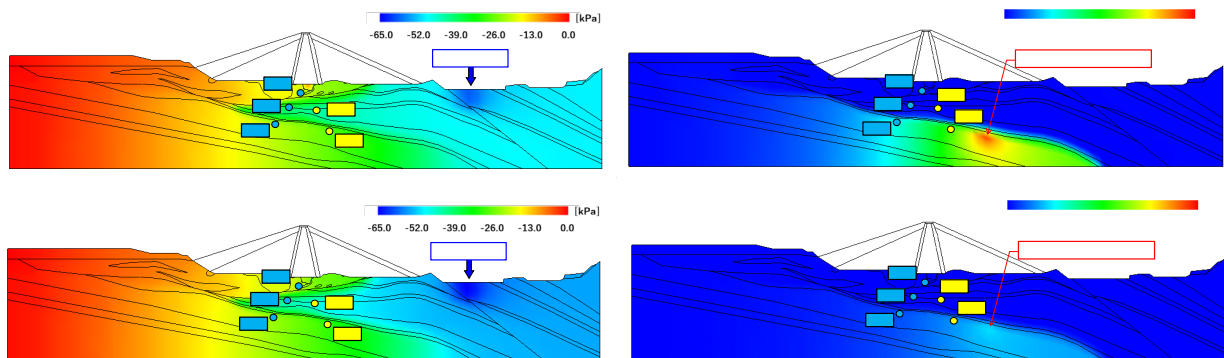
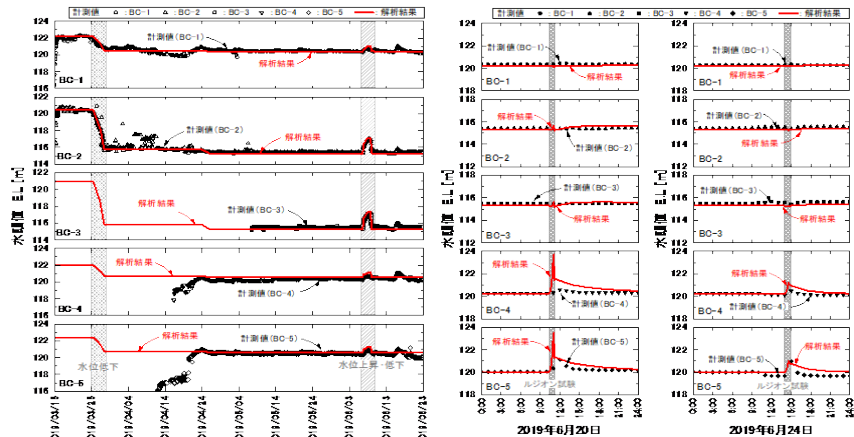


図-10 FEM 非定常浸透流解析例 (a), (b): 岩盤内水位低下時 (c), (d): ルジオンテスト (水押し) 時

3.3 FEM による再現解析と止水処理計画への展開

以上で示した強制的な岩盤内水位変動およびルジオンテスト時の水押し加圧を対象として、2次元 FEM 非定常飽和浸透流解析 (DACSAR) を実施した結果の一例を図-10(a)～図 10(d)に示す。解析では、図中に水位変動位置、ルジオン試験位置と記載した座標に相当する節点に、実際の水頭変化 (上昇, 低下, 加圧降圧) の経時的变化を与えて計算を行った。図-10(a)の解析では、図-5 に示した水位変動期間の 9 か月前に最初のポンプ揚水 (図-10(a)の左のハッチ部) を行った 2019 年 3 月～9 月までの間隙水圧挙動を対象とし、その後半の 2019 年 6 月中旬に試行的に行った短期的な水位変動履歴 (図-10(a)の右のハッチ部) も併せて解析で再現した。図-10(a)の水位変動時解析では、低透水層を挟んだ間隙水圧応答の違いが解析でも再現されている。図-10(a)の水位低下後の定常状態での水頭値の違いに対する試解析により各層の透水係数の比率を、同じく水位変動中やルジオンテスト時の非定常応答に対する試解析により絶対値を試算し、表中の Lu 値を同定した。Lu 値の同定に際しては、図-4 中に示す各岩盤層でのルジオンテスト結果の上下限範囲内で値を試行錯誤的に変え、非定常、定常挙動の両者を最も良好に再現可能な Lu 値として表中の値を得た。図-4 中に示すように、本地点の基礎岩盤の Lu 値のばらつきは低透水層も

含めて非常に大きく、図中に黒線で示した実測平均値は、事前調査ボーリングの実施場所の選定やその数に依存して変化する。FEM 解析では、このような岩盤層や低透水層の Lu 値の空間的な不均一性を巨視的、等価な一定の Lu 値に置き換えており、図中に赤線で示した解析採用値と黒線の実測平均値は必ずしも一致しない。

図-10(c), (d)の水押し時の再現解析結果からは、凝灰岩下部層内で加圧した時の間隙水圧の反応が、低透水層の遮水性によって、その上の凝灰岩上部層や表層安山岩層に及んでいないことが、実測および解析の両方で確認できる。また、ルジオンテスト時の加圧量の異なる 2 ケースを比較して示したが、その違いの影響も明瞭である。図-10(b), (d)中の間隙水圧コンターを見ると、低透水層の影響により水位低下や地中加圧を行った層内のみで間隙水圧の変動が生じ、低透水層を挟んだ他の層へはその影響が及んでいない状況を確認できる。なお、低透水層の連続性が確保されない条件での再現解析も別途実施したが、間隙水圧応答は全く異なるものとなった。このようにして同定した基礎岩盤の層序、透水係数値と、冒頭で述べた飽和度管理により求めた堤体コアの透水係数値を反映させて堤体～基礎岩盤を含む FEM モデルを構築し、土/水連成 FEM 解析コード DACSAR による築堤～湛水解析⁴⁾を実施した。また同じ FEM モデルを用いて、図-11 に示

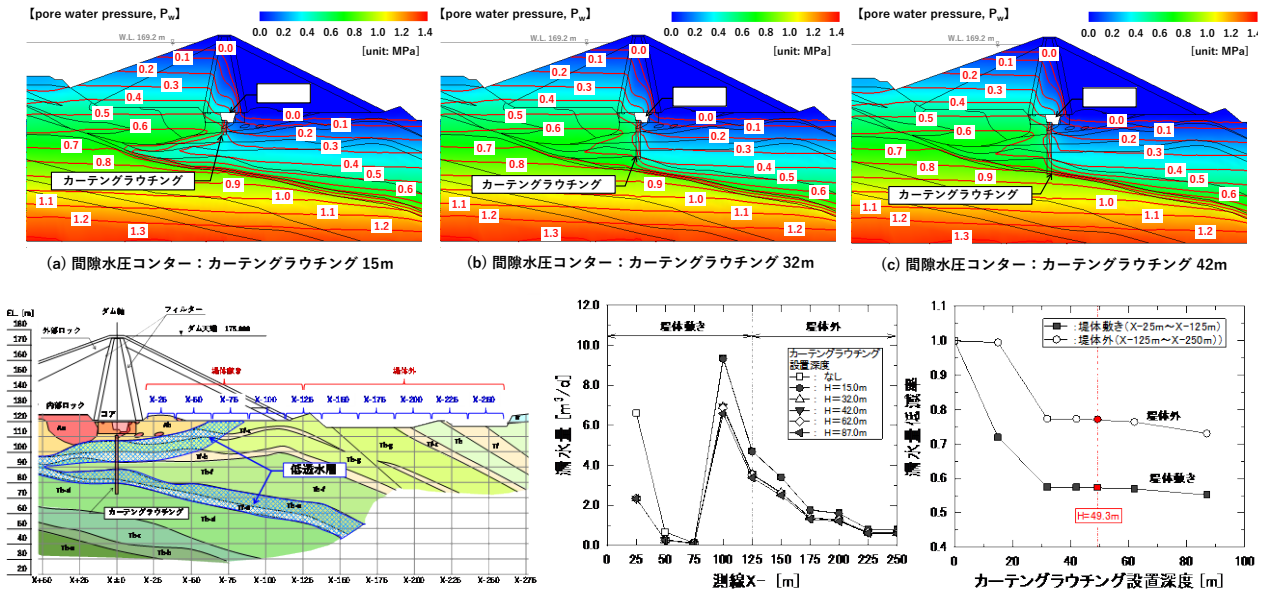


図-11 カーテングラウチング長を変えたパラメトリックスタディの結果

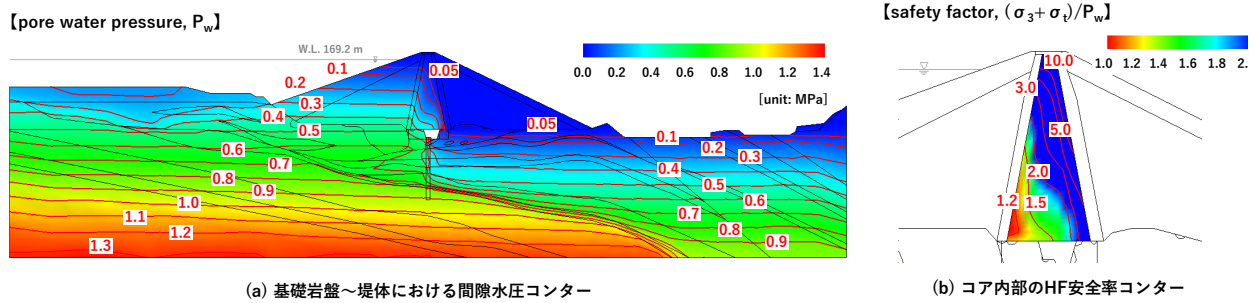


図-12 湛水完了時の堤体～基礎岩盤間隙水圧コンターおよびコアゾーンの HF 安全率コンター

ようなカーテングラウチング長を変化させた試験解析（パラメトリックスタディ）を実施し、基礎岩盤廻りの漏水量を低減するうえで最も効果的かつ経済的な設置深度（漏水量～カーテングラウチング長関係において漏水量低減効果が頭打ちとなるカーテン長に相当）を調べた。なおカーテングラウチングは、河床部深部の規定孔 2 次孔間隔が 3.0m であることを勘案し、グラウチング注入の影響幅を 3m と仮定して、設計 Lu 値（設置深度 25m までは $5Lu$ 、以深は $10Lu$ 、 $1Lu=1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ で透水係数に換算）に相当する透水係数を、その領域の岩盤要素に与える事で表現した。なお、基礎岩盤廻りの漏水量は、図-11 (d) に示した岩盤表面の要素境界からの浸出量を出力している。図-11 (f) に示した解析結果より求めた漏水量低減率から、カーテングラウト長が下層部の天然水平低透水層以深まで必要（42m 以上）であるとの本検討結果も参照し、カーテン設置深度は 49.3m（Y+50 断面）と最終決定された。図-12 には、そのカーテングラウチング設置深度での湛水完了時の間隙水圧コンターを示しており、堤体コアゾーンと基礎岩盤カーテングラウチングによる相乗的な遮水効果が見て取れる。右図には、この際のコアゾーンの水利的安定性を示す HF（ハイドロリックフラクチュ

ャリング）安全率^{3)～6)}のコンター（文献³⁾の結果を基に、湛水後のコア材の推定現場引張強度 σ_t を考慮）を参考に例示した。HF 安全率に直結する湛水時のコアゾーン間隙水圧分布は、コアの透水係数だけでなく、基礎岩盤の水利地質構造やカーテングラウチングの影響を受けて変化するため、堤体の安定性評価に際しても、これら基礎岩盤の特性や現場条件を精緻に再現する事が重要と考える。

以上、3.1 および 3.2 で示した岩盤間隙水圧計の実測データを対象とした FEM 再現解析や試験解析により、基礎岩盤各層の層序や透水性の同定が可能となること、これを反映させたダム堤体～基礎岩盤モデルを用いることで、様々な止水処理計画（カーテングラウチング長や漏水量低減効果、堤体の湛水時挙動や水利的安定性の評価など）に、これを応用可能であることがわかった。

4. クラウド型現場グラウチング品質管理システム「Grout Twin」の構築

以上の河床部に関する検討結果も勘案し、鶴川ダムでは最終的に図-13 に示すカーテングラウチング計画が策定され、グラウチング施工が進められている。なお、左岸側

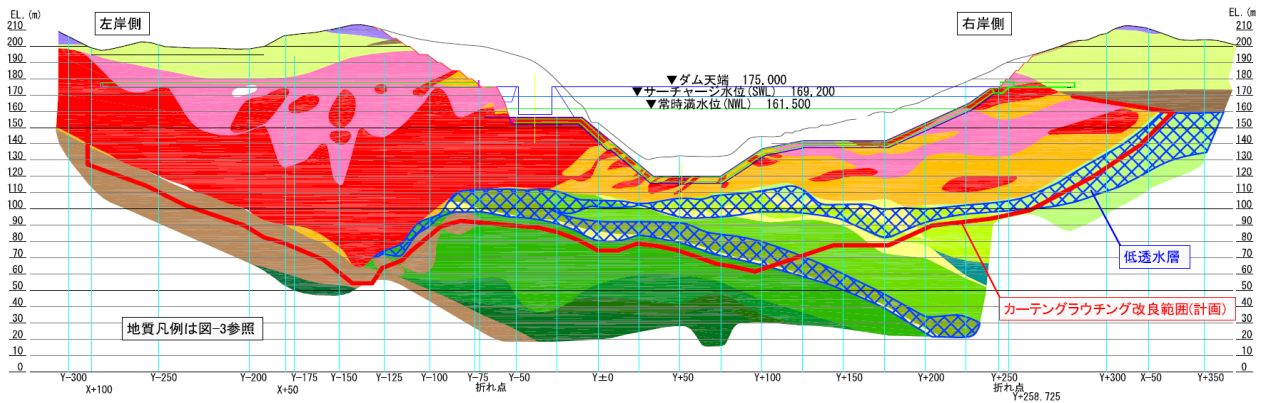


図-13 カーテングラウチング計画図

には河床部や右岸側のような低透水層は確認されておらず、カーテングラウチング長の検討に際しては河床部の浸透流速との比較や地下水位とサーチャージ水位との関係等を勘案し、図のように定められた。

4.1 カーテン遮水効果の原位置確認に関する一試案

図-9 では、ルジオンテスト時の水押しを岩盤内での強制加圧と見なし、その時の岩盤間隙水圧計の応答の違いから、基礎岩盤中に水平方向に分布している天然低透水層の遮水性能やその空間的な連続性（安定性）の確認を試みた。この考え方は、そのまま鉛直方向のカーテングラウチングにも応用可能ではないかと考えた。図-14 にその概念図を示す（図-14(a) はカーテングラウチングを地中横から、図-14(b) はその施工状況を上から見た図であることに留意）。図-14(a) は、カーテングラウチングの施工が全て完了した後を想定している。湛水圧の加わらない下流側岩盤内にチェック用の加圧孔（試験湛水時の管理用に計画されている下流側間隙水圧計の埋設孔等）を利用する事を想定）を設け、先端部で貯水圧相当の水圧を加える。この際の上下流間隙水圧計の応答の違いが、湛水完了時におけるカーテングラウチングの巨視的な遮水性能を直接指し示すものと考えられる（ただし地中の点加圧は湛水時の静水圧による水圧負荷条件とは異なるため、あくまで目安値と考えている）。試験湛水を開始する前に貯水位（40m）相当の水圧を基礎岩盤内に仮想的に加え、カーテングラウチングの遮水性能を事前確認するための一つのアイデアとして示してみた。さらに、カーテングラウチングの施工が進むと上流側仮締切り内の水位が自然に上昇する（図-2 中に仮締切り天端位置と標高を矢印で記載。河床部との水位差は約 13m）。この際の上下流岩盤間隙水圧計の値のギャップもまた、カーテングラウチングの遮水性能を原位置で確認するための貴重な参考データとなり、引き続き試験湛水時の計測管理へと移行することができる。

一方、図-14(b) はカーテングラウチング施工中の現場品質管理への応用の可能性を検討したものである。グラウ

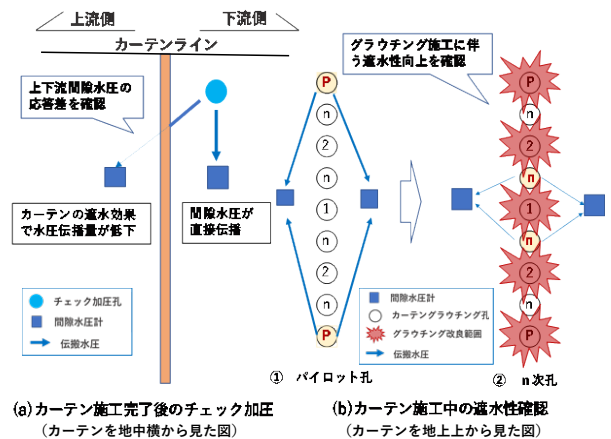
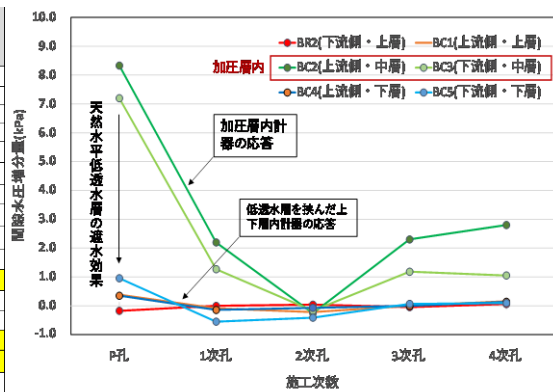


図-14 カーテン遮水効果確認方法の概念図

チング施工は、中央内挿法によって行われる。最初のパイロット孔（P 孔）では、カーテン構築前であるため水押し加圧時の周辺の間隙水圧計の応答は大きい。1 次→2 次→n 次孔と施工回数が増えるにつれ、周辺にはセメントミルクが岩盤亀裂中に浸透した遮水領域が次第に形成、相互連結されるため、同一の間隙水圧計において施工進捗と共に連続的に間隙水圧を計測しておけば、施工回数の増加に伴い次第に間隙水圧応答が低下していくことが予想される。この際、グラウチングのセメントミルクが岩盤内の間隙水圧計に回ると、固結後に計器の動作が不良となる可能性がある。本ダムではそのような状況は見られていないが、留意が必要と考える。図-15(a), (b) は、河床部でのカーテングラウチング試験施工時にこの間隙水圧応答の低下を実際に確認した例であり、凝灰岩上部層内で水押し加圧した際の間隙水圧応答を、施工回数に対して整理したものである。図-15(a) には、図-15(b) の作成に用いたデータの加圧時条件、計器 BC-2, BC-3 の反応値や加圧点からの離隔等を一覧にして示し、図-15(b) では表中の反応値の平均値をプロットした。P 孔では、加圧した凝灰岩上部層内に設置された間隙水圧計 BC2 と BC3 で大きな間隙水圧増分が観測され、低透水層の上の安山岩層、下の凝灰岩下部層の計器ではやはり顕著な反応が見られていない。P 孔ではカーテングラウチングはまだ形成され

施工日	BL	孔番	次数	ST	離隔 (m) BC-2	離隔 (m) BC-3	反応値 (kPa) BC-2	反応値 (kPa) BC-3	Lu値	水押開始 時間 (時分)	水押終了 時間 (時分)	注入 時間 (時分)	加圧値 (MPa)	同時 施工
2021/09/24	K11	P01	P	5	22.61	28.61	14.037	12.190	39.61	14.14	15.22	3.24	0.141	無し
2021/10/02	K12	P01		5	29.11	35.36	2.921	2.702	19.86	16.33	17.27	5.14	0.395	無し
2021/10/07	K11	101	1	5	25.36	31.60	2.199	1.270	10.16	16.41	17.32	2.33	0.730	無し
2021/10/16	K11	201	2	5	23.84	29.99	0.294	0.169	1.57	14.50	15.27	1.57	0.739	無し
2021/10/19	K11	202		5	27.13	33.40	-0.781	-0.508	17.58	10.34	11.19	2.59	0.339	無し
2021/11/05	K11	303	3	5	26.22	32.48	-0.592	-0.254	4.13	16.16	16.44	1.56	0.705	無し
2021/11/06	K11	304		5	28.10	34.36	3.298	2.371	6.48	22.10	23.06	2.07	0.908	無し
2021/11/06	K11	301		5	23.18	29.27	3.592	1.101	0.43	2.51	3.49	2.20	1.083	無し
2021/11/08	K11	302	4	5	24.56	30.77	2.980	1.524	2.91	14.29	15.14	1.21	1.198	無し
2021/11/20	K11	402		5	23.50	29.83	9.471	2.710	2.16	3.13	3.58	1.56	1.078	無し
2021/11/22	K11	406		5	26.67	32.93	1.778	0.553	1.14	21.44	22.35	1.45	1.191	有り
2021/11/23	K11	404		5	24.95	31.18	1.184	0.678	1.33	14.27	15.25	2.49	1.209	無し
2021/11/25	K11	408	4	5	28.60	34.86	0.338	0.085	2.59	16.59	17.43	2.23	0.711	無し
2021/11/25	K11	405		5	25.78	32.03	1.099	0.762	1.62	21.27	22.13	2.06	1.202	有り
2021/12/02	K11	401		5	22.88	28.93	3.298	1.270	0.70	22.26	23.14	2.13	1.189	有り
	K11	403		5	24.19	30.38	2.452	1.270	1.85	15.15	16.12	2.30	1.200	無し

(a) 施工状況の一覧



(b) 施工次数と間隙水圧計の増分量

図-15 カーテングラウチング施工次数と岩盤間隙水圧応答の関係図

ておらず、これは前述の低透水層の遮水効果と考えられる(図-15(b)中左側の縦の矢印)。このように、低透水層の連続性についても、グラウチング施工加圧時の間隙水圧計データを利用し、現在の施工進捗中も継続的な確認を進めている。一方、同じデータをグラウチング施工時の挙動として見直すと、1次孔、2次孔と施工次数が増えるにつれ、同じ凝灰岩上部層内での間隙水圧応答は次第に減少し、前出の図-14(b)に示すような遮水領域(カーテン)の形成効果が表れている。なお、3次孔と4次孔では再び間隙水圧応答が増加しているが、これは、図-15(a)中に示すように加圧値が他よりも大きい傾向にあることや、同じ間隙水圧計周辺で複数の同時施工(地中加圧)が行われた結果と考えられる。

以上、3章で述べた基礎岩盤の水理地質構造の同定に加え、岩盤間隙水圧計の更なる利用方法について検討を行った。従来の品質管理では困難であった施工完了後のカーテングラウチングの巨視的な原位置遮水性能の評価、カーテングラウチング遮水性能の形成状況に対する施工中のリアルタイム監視、の2つの観点から試案を示した。

4.2 現場グラウチング品質管理システムの構築

カーテングラウチング施工時の岩盤内間隙水圧応答の分析を精緻に行うためには、グラウチングの施工(加圧)位置と間隙水圧計設置位置の三次元的な離隔、施工次数、加圧値、複数並列施工の有無の影響などの諸条件を全て横並びにして整理・分析する必要がある。そのためには間隙水圧計データとグラウチング施工データを同一のDBに格納、事後に抽出・分析するシステムが必要となる。クラウド型現場グラウチング品質管理システム「Grout Twin」は、このような現場の要請により構築されたものである。なお、カーテングラウチングの施工は2023年度から本格化しており、本システムを用いて図-15(b)のような実現象の確認と分析を継続的に行っている。

図-16に、グラウチング施工データと岩盤間隙水圧計データ回収の自動化およびクラウド一元管理の状況を示す。図-16の上半分に示すように、当初グラウチングデータに

ついては現場有線を用いて事務所に送信、これをPDFファイルとして格納し、間隙水圧計データは手動で回収してエクセルファイルとして別保存する形を取った。このため、グラウチング施工加圧時の間隙水圧データを照合するために、両データを一旦印刷し、職員が目読みすることでデータの対応性を確認していた。この作業には極めて多くの労力と時間を要したため、これを図-16の下半分に示すような自動回収、一元的なDB蓄積に変更した。現場内にWi-Fi環境を構築し、グラウチングデータと間隙水圧計データをリアルタイムに自動送信、クラウド上のDBに格納した。図-17には「Grout Twin」の操作画面を示しているが、画面上で間隙水圧計の応答イベントを抽出し、計器が反応した時刻を選択すると、グラウチング施工履歴が間隙水圧計との距離が近い順番に自動的にリストアップされる。直観的かつ簡単なマウス操作のみでグラウチング施工と間隙水圧計の関連性を自動抽出し、施工位置と間隙水圧計の位置関係(離隔)をその場で確認できる。図-18は、岩盤内間隙水圧応答の三次元可視化例を示す。円柱の直径は間隙水圧応答の大きさ、高さは間隙水圧計と加圧点との離隔距離を表している。円柱が大きい、すなわち計器と加圧点の距離が離れているにもかかわらず間隙水圧応答が大きく、かつ上下流共に円柱が大きくなっているような場所は、カーテングラウチングの上下流で連続した水みち、すなわち水理的弱部が基礎岩盤内に残存していることを表している。現在、グラウチングの施工次数が増えると、次第に「大きな円柱」の出現比率が減少する傾向を確認しながら施工を継続している。このような三次元可視化により、例えば、 $n+1$ 次孔施工時の間隙水圧応答から1つ前の n 次孔の空間的なグラウチング効果を確認し、 $n+2$ 次孔の適切な施工配置を検討する、追加グラウチングを実施すべき点を空間的に特定し水理的弱部の残存箇所を集中的に遮水する、最終的なグラウチングの打止めを判断する等、現場でより適切で効果的かつ効率的なグラウチング施工方法を摸索・提案するための補助的手段になり得るのではないかと考えている。

以上、3章および4.1で述べた岩盤間隙水圧の様々な現

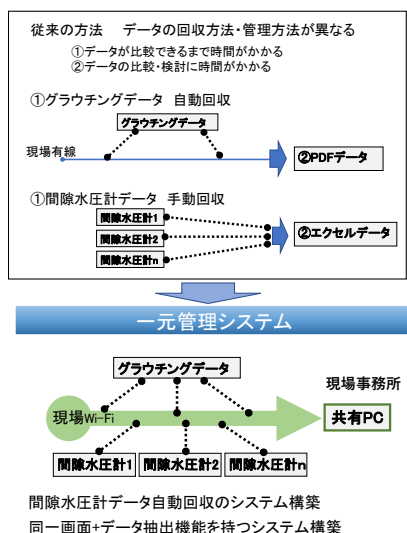


図-16 データ回収の自動化と一元管理



図-17 「Grout Twin」の操作画面

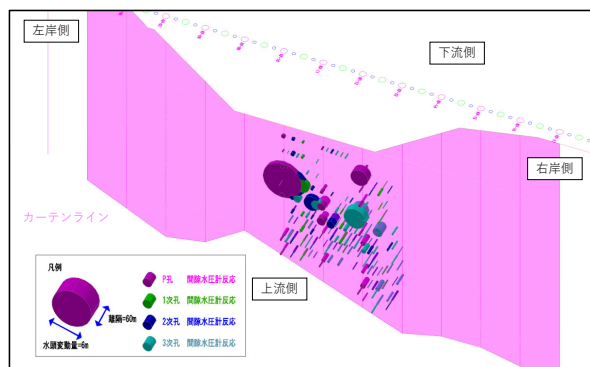


図-18 岩盤間隙水圧応答の三次元可視化例

場利用を可能とする現場グラウチング品質管理システムを紹介した。これにより、従来は実施困難であった現場データの自動取得と分析処理、データの三次元可視化等により、最適なグラウチング施工を模索するなど、現場実務の大幅な効率化と DX 化、現場施工の最適化を図ることが可能になるものと考えられる。

5. 原位置カーテングラウチングの遮水性評価と試験湛水に向けての諸準備

鵜川ダムでは、今後試験湛水が予定されている。これに先立ち、試験湛水に向けての事前準備として、以下に示すような一連の検討を試みた。

- ① 原位置カーテングラウチングの現状データ（上流側仮締切り水位の上昇）を用いた遮水性の評価
- ② 下流側チェック孔を利用した湛水压相当荷重下での岩盤内加圧（図-14(a)）の事前 FEM 解析
- ③ 堤体/基礎岩盤の湛水時管理用チャートの作成

5.1 原位置カーテングラウチングの遮水性評価

図-19～図-21 に、①の結果を示す。堤体の盛立て完了後、上流側仮締切り内の水位が 133.3m 付近まで上昇しており、下流側と約 13m の水頭差が生じている（図-19 中の解析

入力水位を参照）。これに対応して岩盤間隙水圧計の BC-2（上流側）と BC-3（下流側）にも水頭差が発生しており、カーテングラウチングによる遮水効果が実測値に現れている。図-19 および図-20 は、これを再現した FEM 解析結果を示しており、カーテングラウチングの透水係数を設計値（この深度では $Lu=5$ 、透水係数換算で $5 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ ）の 1/10 倍、1 倍、10 倍の 3 種類に変えた試験解析を実施し、間隙水圧の時系列変化とコンターを求めた。図-21 は、本解析結果と岩盤間隙水圧計 BC-2 および BC-3 の実測値（降雨時を除いた平均値）を比較しているが、計器 BC-2 の実測データは、原位置カーテングラウチングの透水係数が設計値に近い値となっていることを表している。このように、岩盤間隙水圧計は試験湛水に先立ちカーテングラウチングの原位置遮水性能の評価に利用することができる。

図-22 に②の結果を示す。図-22(a)には、試験湛水前下流側チェック孔（BC-3 付近の管理用計器の埋設孔を想定）より凝灰岩上部層内で加圧を行う（図-14(a)）ことを想定した FEM 解析結果を、基礎岩盤内の間隙水圧コンターとして示している（カーテングラウチングの有無や透水係数（ Lu 値）を変えて試算）。解析で加えた圧力 0.41MPa は湛水完了時の水頭差に相当し、ルジオンテスト水押し時の最小圧力に近い。図より、カーテングラウチングが地中鉛直方向に構築された結果、下流側からの加圧時に、その上下流で岩盤内間隙水圧の値にギャップが生ずること、カーテングラウチングの透水係数の違いによりその状況が次第に変化することを確認できる。①の仮締切り水頭差を利用した透水係数同定に加え、このようなチェック加圧を行い岩盤内間隙水圧を実測することで、湛水压相当の水頭差に対するカーテングラウチングの遮水性能を再確認したうえで試験湛水に臨むことも可能となる。この際の三次元可視化結果（図-18）の中に「大きな円柱がない（水理的弱部が存在しない）こと」を確認で

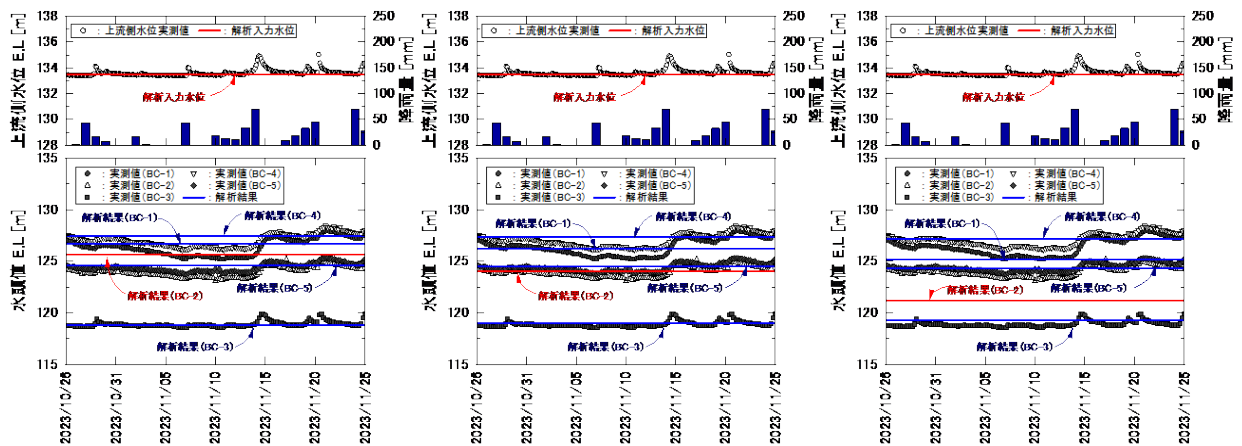


図-19 上流側仮締切りによる実測水頭差と解析結果の比較（左より設計値の0.1倍/1倍/10倍）

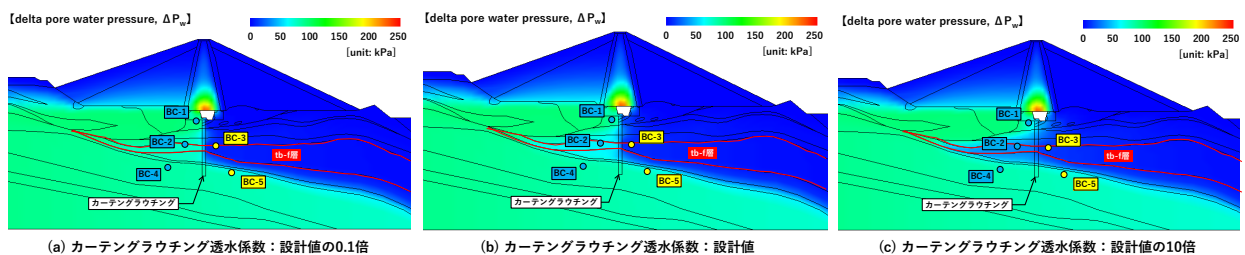


図-20 間隙水圧コンターの比較（左より設計値の0.1倍/1倍/10倍）

きれば、より安心して試験湛水に進むことができよう。図-22(b)には、カーテンの透水係数（ L_u 値）と上下流側間隙水圧計の応答値の関係を整理して示した。このような図を事前に準備することにより、カーテングラウチングの巨視的な透水係数（遮水性能）を岩盤間隙水圧計の実測値に基づき同定し、実際の湛水圧に対応する巨視的な遮水性能を定量的に評価することも可能になるのではないかと考えている。

以上、4.1で試案を示したカーテングラウチングの原位置遮水性能の巨視的把握手法について、上流側仮締切りによる岩盤間隙水圧計の水頭差の実データに基づく評価、および下流側からのチェック加圧を想定した数値解析事例を示した。これにより、従来は試験湛水を実施しなければ判断できなかったカーテングラウチングの現場遮水性能について、事前に確認、あるいは対策をとることができる。次の5.2に示す試験湛水時の管理用チャートを併せ作成しておけば、定量的な指標に基づいて試験湛水中の監視を行うことも可能となる。

5.2 湛水管理用チャートの作成

図-23に、以上のFEM解析結果を利用した湛水管理用チャートの一例を示す。解析で用いたカーテングラウチングの透水係数は、図-21に示す解析結果から実測値を再現可能な値を採用しているが、これに加え、図-22に示す下流側チェック加圧時の解析結果と実測値の比較なども行い、試験湛水までにその評価精度を高めることも可能と

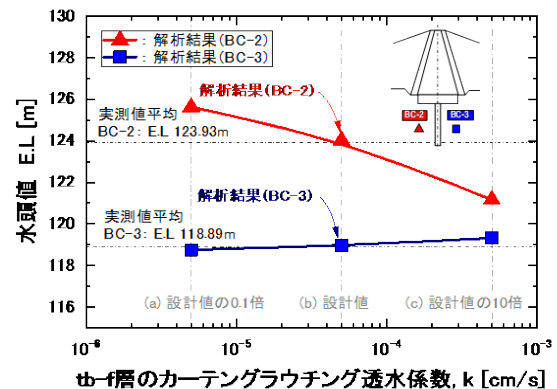
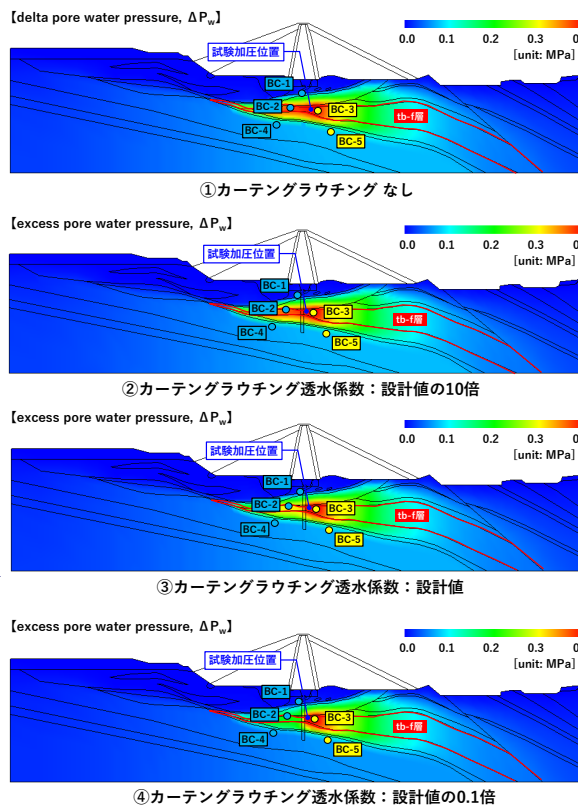


図-21 FEM解析による透水係数と水頭差の関係

なる。図-23(a)はカーテングラウチング上下流の岩盤間隙水圧計の予測値と湛水位の関係を、図-23(b)は堤体からの漏水量の予測値を示している。鶴川ダムの試験湛水は、現時点では湛水位を段階的に上昇させる計画となっており、図-23(b)中の水位保持期間はこれに相当する。試験湛水においては、岩盤間隙水圧計や漏水量の実測値がこれらの付近を推移することを適宜確認しながら貯水位を上げていくことが可能となる。

5.3 チェック加圧の実施結果

図-22のFEM解析では、下流側間隙水圧計であるBC-3付近の凝灰岩上部層内に湛水圧相当の水圧を与え、上流側間隙水圧計BC-2の応答を計算した。図-22で示したように、カーテングラウチングの遮水性能が安定したものであれ



(a) カーテングラウチング透水係数を変えた過剰間隙水圧コンタ

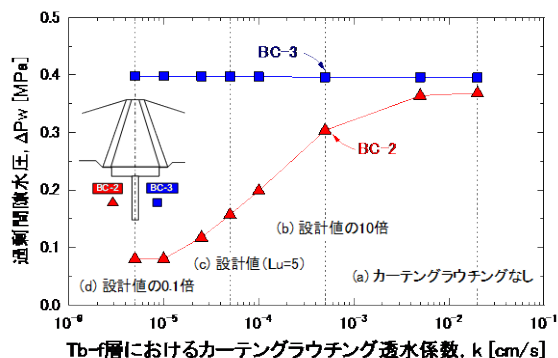
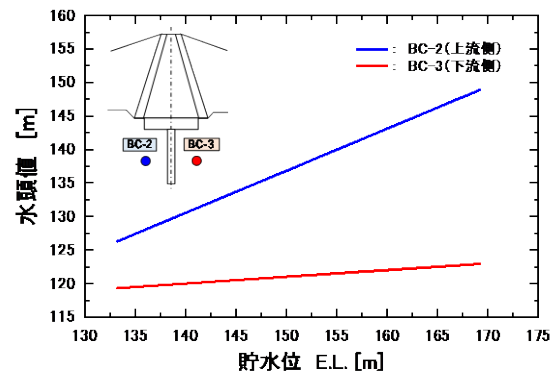


図-22 下流側チェック孔での加圧時解析結果

ば、下流側で発生した間隙水圧はカーテングラウチングにより遮断され、上流側間隙水圧計に伝達されにくくなる。このチェック加圧を、2025年6月に実施した。図-24(a)に示す通り、チェック加圧はカーテンライン下流側に配置する浸透流観測孔の削孔完了孔（計器設置前）を利用して行われた（図-22の事前FEM解析とは加圧する地層や深度が異なる）。図中に示すように、この加圧位置の周辺にはダム完成後の堤体の安全性を検証する観測設備の一つである間隙水圧計P1～P4がカーテングラウチングの上下流別に設置されており、今回のチェック加圧によりカーテングラウチングや天然水平低透水層の原位置遮水性能の確認に利用できるものと考えた。チェック加圧は、図中に「加圧位置」と記載した浸透流観測孔内の1m～10m区間に0.41Mpa（水圧40m相当）の圧力の水押しを約1時間加



(a) 岩盤基礎の湛水管理用チャート

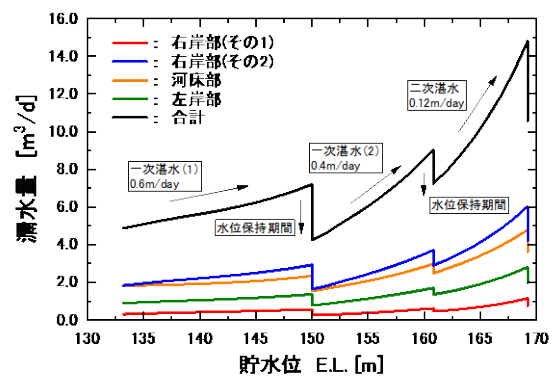
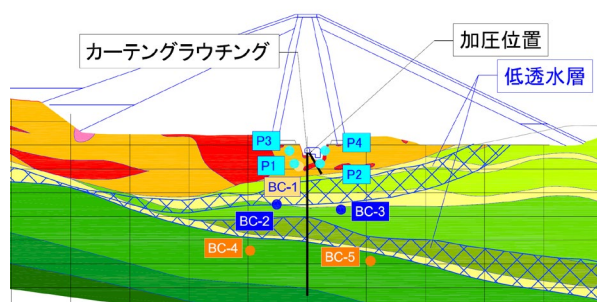


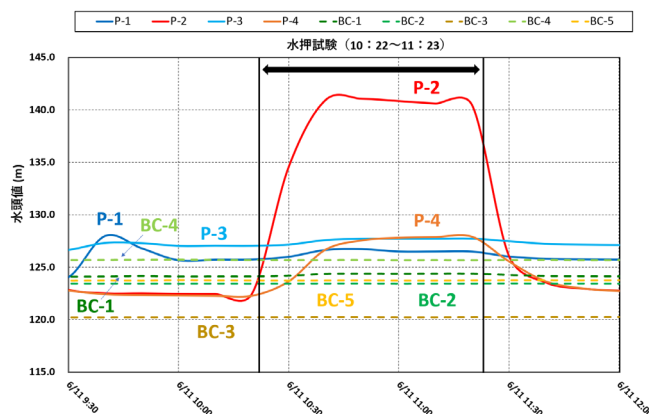
図-23 FEM解析による湛水管理用チャートの一例

えた。図-24(b)に、その際の周辺間隙水圧計の応答を示す。図より、加圧時に敏感な応答を示しているのはP-2、P-4の2計器であり、これらはカーテングラウチングの下流側、かつ天然水平低透水層の上方に位置する。P-4はP-2に比べて応答値が小さいが、P-4の位置にはブランケットグラウチングが施されており（コア敷き7m範囲を改良目標値10Luで施工済）、その影響を受けたものと考えられる。一方、カーテングラウチングの上流側に設置されたP-1、P-3は下流側での加圧に対して応答を示しておらず、カーテングラウチングの高い遮水性能を裏付けている。同じ下流側でもBC-3やBC-5もまた、全く応答していない。これにより、加圧点との間に存在する天然水平低透水層の安定した遮水性能を再び確認することができた。カーテングラウチングの上流側、かつ天然水平低透水層の下に設置されているBC-2やBC-4もまた応答は見られず、カーテングラウチングと天然水平低透水層の遮水効果が相乗して現れたものと考えられる。

以上の結果は、フィルダム基礎岩盤の湛水管理用計器を利用したチェック加圧により、カーテングラウチングや天然低透水層の原位置における巨視的な遮水性能を、湛水前に事前に確認可能であることを示すものである。



(a)チェック加圧位置と間隙水圧計配置



(b)チェック加圧時の間隙水圧計の実測応答

図 24 チェック加圧の条件と実測間隙水圧応答

6. おわりに

フィルダム基礎岩盤の複雑な水理地質構造の同定、天然水平低透水層を利用したカーテングラウチング合理化の検証、カーテングラウチングの施工時品質確認、完成したカーテングラウチングの巨視的な原位置遮水性能の評価、試験湛水管理等の技術的な諸課題は、フィルダムの設計・施工・施工管理上重要でありながら、合理的・定量的な評価がなかなか難しい現状にある。本文で紹介した基礎岩盤間隙水圧計データを用いた幾つかの試みが、これら諸課題の解決の一助となれば幸いと考える。なお紙面の関係から、FEM 解析のモデル化や解析条件の設定法（例えば、ルジオンテストの三次元的な点加圧を二次元モデルでどう表現するかなど）に関する詳細な説明を加える事ができなかった。ダム基礎岩盤の水理地質構造に対する解析的アプローチの詳細については、その解析手法や解析条件の設定方法の詳細を別報⁷⁾にて報告している。

謝辞：本研究開発を進めるにあたり、新潟県柏崎地域振興局地域整備部 片山幸也氏、奥泉楓氏より多大なるご支援を頂いた。また、一般財団法人ダム技術センター山口嘉一理事より、本研究開発や現場適用方法に関して貴重なご意見を多数頂戴した。前田建設工業土木技術本部佐藤健一氏、新屋敷隆氏、小熊登氏からは、岩盤間隙水圧計の現場適用に際して様々な助言を頂いた。末尾ながら記して謝意を表する次第である。

なお本著作物は、ダム工学 2025 年第 35 巻 1 号に掲載された論文をベースに、最新の現場計測結果（5.3 チェック加圧の実施結果）を追記したものである。5.3 以外の元論文の著作権は一般社団法人ダム工学会に帰属し、ダム工学会の承認を頂いたうえで掲載するものである。

参考文献

- 1) 石黒健,和田豊,貫井明,中島秀樹,武田智治,龍岡文夫：鵜川ダム建設工事におけるコア材の飽和度管理を重視した現場締固め管理,土木建設技術発表会 2019, VI-9, 2019.
- 2) 石黒健,中島秀樹,武田智治,川村亘輝,和田豊,貫井明,龍岡文夫：鵜川ダムコア材の飽和度管理を重視した締固め管理基準の策定と効率の現場管理の試み,地盤工学会 土の締固め合理化に関するシンポジウム, No.1-2, 2022.
- 3) 石黒健,平田昌史,中島秀樹,武田智治,川村亘輝,片山幸也,貫井明,龍岡文夫：フィルダムコア材の現場転圧面の諸物性と設計余裕度に関する検討,第 58 回地盤工学研究発表会, No.11-2-5-02, 2023.
- 4) 平田昌史,石黒 健,中島秀樹,武田智治,片山幸也,貫井明,龍岡文夫：基礎岩盤を考慮したロックフィルダムの築堤・湛水 FEM 解析,第 58 回地盤工学研究発表会, No.11-2-5-01, 2023.
- 5) 森吉昭,内田善久,鶴田滋,高橋章,石黒健,太田秀樹：中央土質遮水壁型ロックフィルダムの湛水時安定性評価,土木学会論文集, No.764/III-67, pp.69-84, 2004.
- 6) 山口嘉一,富田尚樹,水原道法：水圧破碎に着目したロックフィルダムのコア幅設計に関する研究,第 50 回地盤工学シンポジウム論文集, 2005.
- 7) 平田昌史,石黒健,古川無何有,武田智治,中島秀樹,奥泉楓：基礎岩盤の水理地質構造を考慮したロックフィルダム築堤・湛水時 FEM 解析,土木学会論文集投稿中.