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構造同定と ICT グラウチング現場品質管理システムの構築
—クラウド型現場グラウチング品質管理システム「Grout Twin」—

前田建設工業 ICI テクノロジーセンター　正会員　○石黒 健　平田昌史
前田建設工業 鵜川ダム作業所　古川無何有　中島秀樹
前田建設工業 鵜川ダム作業所　武田智治
新潟県柏崎地域振興局　片山幸也

1．背景および目的

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，基礎岩盤の水理構造（層序と透水性）に関する情報が必要となるが，通常は事前に行われる離散的な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構造は空間的に複雑な様相を呈することが多く，設計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鵜川ダム建設工事（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，その水理構造の同定を試みた．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の品質（遮水性能）の現地確認に応用することを試み，現場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（仮称）」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を示す．以下，①鵜川ダムの概要と基礎岩盤の水理構造特性　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構造同定　③クラウド型現場グラウチング品質管理システム「Grout　Twin（仮称）」の構築　④終わりに：今後の試験湛水に向けて，の順に実施結果を報告する．

2．　鵜川ダムの概要と基礎岩盤の水理構造特性

鵜川ダムは新潟県柏崎市で建造中の中央コア型ロックフィルダム（堤高 55m）であり，2023 年度で盛立てを完了する予定である．本ダムでは，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 [1)2)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，走査型 RI（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

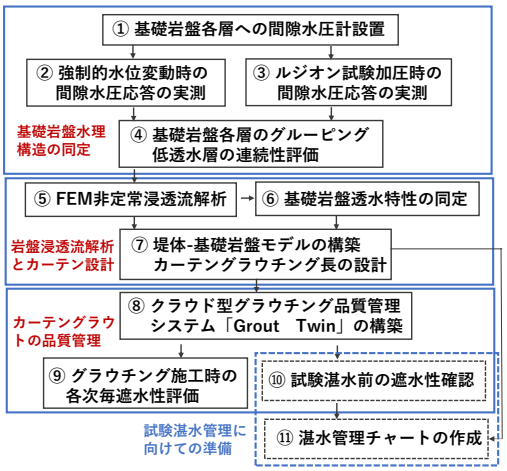


図-1　本研究開発のフレームワーク

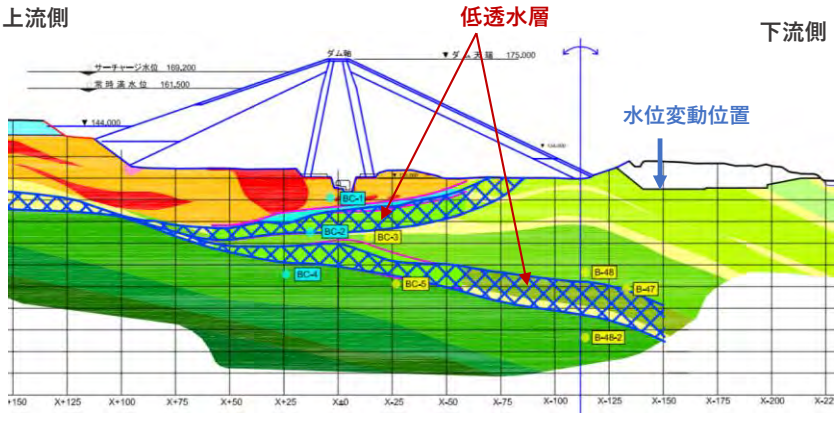


図-2　鵜川ダム標準断面および岩盤内間隙水圧計の設置状況

キーワード　フィルダム，基礎岩盤，水理構造，間隙水圧モニタリング，ICT グラウチング管理，業務の DX 化
連絡先　〒302-0021　茨城県取手市寺田 5270　前田建設工業 ICI 総合センター　TEL 0297-85-6171

必要となるが,本論文は上述の堤体物性情報に加え,基礎岩盤の物性情報,水理構造をターゲットとしたものである.**図-2** に鵜川ダム標準断面図を,**図-3** に左右岸方向の断面図を示す.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.鵜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（黄色や赤・ピンク色）,凝灰岩（緑色）,深部玄武岩（茶色）などが複雑に入り組んでいる.さらに,図中に示したように,緑色の凝灰岩層は,その上部および中間部に介在する 2 つの低透水層（網掛け部）により凝灰岩上部層と下部層の 2 種類に層別される.カーテングラウチングの設置深度の決定に際しては,この 2 つの天然低透水層の遮水性能が面的・空間的な連続性を安定的に保持しているか否かが重要なポイントとなった.事前の地盤調査結果（Lu 値含む）も参考としたが,離散的なボーリング結果のみからは低透水層の連続性を確認することが難しく,このため,基礎岩盤各層内に間隙水圧計を設置し,岩盤内の水位や水圧を強制的に変動させた際の間隙水位応答を実測することにより,その評価を試みた.

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構造同定

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.この位置には凝灰岩上部層が露頭しており,**図-4** にはこの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,図中の①→③の水位変動履歴に即時的に対応する形で間隙水圧が綺麗に応答していることが分かる．岩盤間隙水圧の一部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）での間隙水圧値を採用した.**図-5** は,③の水位再低下後の定常状態（かつ降雨 0）での各計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** は,①→③における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

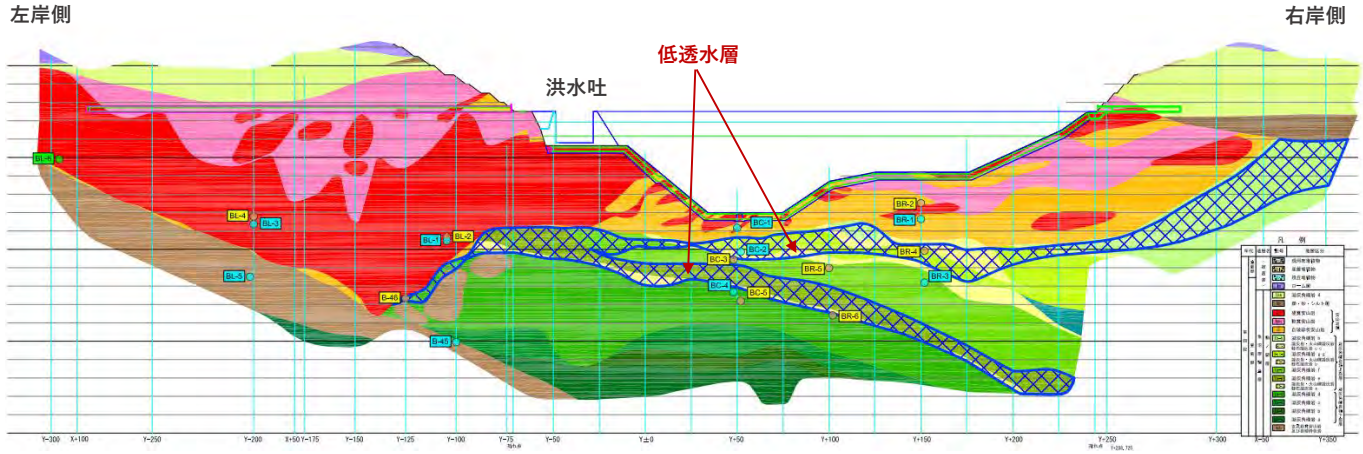


図-3　鵜川ダム左右岸方向断面図および岩盤内間隙水圧計の設置状況

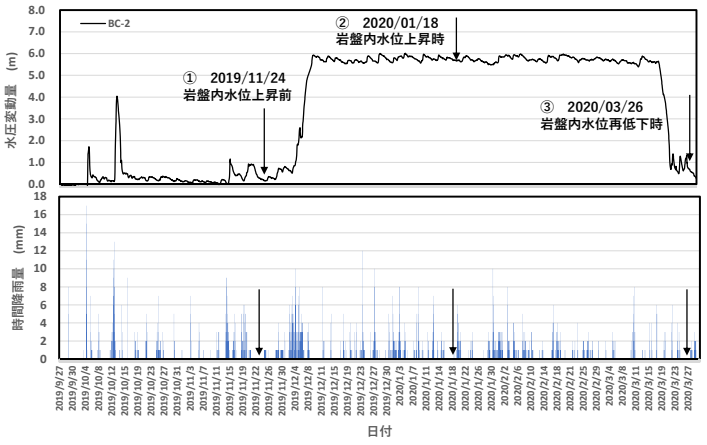


図-4　岩盤内水圧(BC-2)の変動履歴と着目ポイント

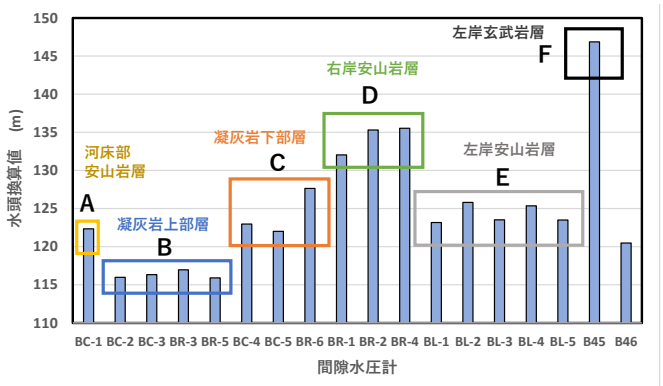


図-5　岩盤水頭値の比較（再低下後定常状態）

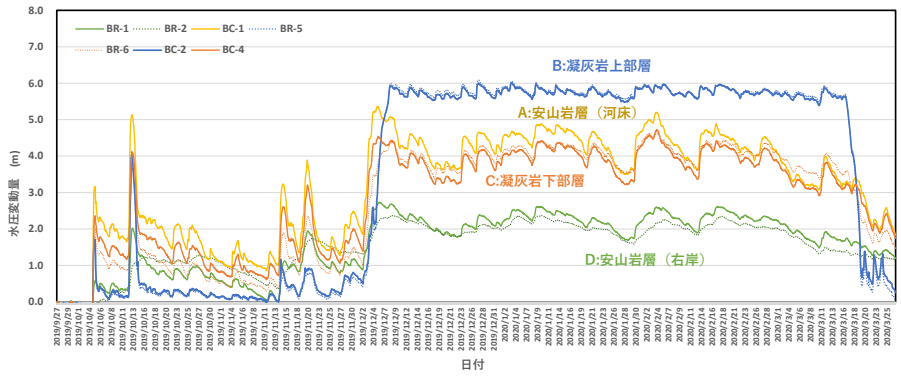


図-6　岩盤内水位変動時の間隙水圧変動量の時刻歴変化

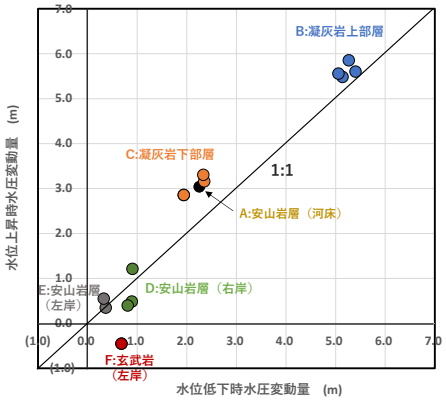


図-7 水位低下/上昇時の水圧変動量

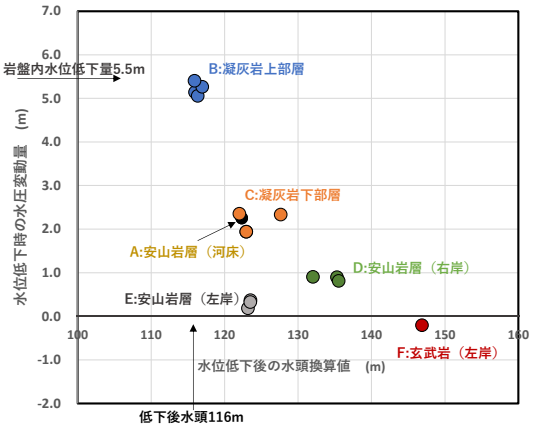


図-8　水位低下後水頭値と水圧変動量の関係

表-1　間隙水圧応答に基づく地層のグルーピング

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・左岸）
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）

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を確認できる. **図-7**, **図-8** は, 水位低下時（**図-4** 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, 図中および**表-1** 中に示したグループ毎に実測間隙水圧応答を明瞭に層別することが可能である. 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-8** 中に併記したポンプ位置での低下後水頭（横軸矢印）, 水位低下量（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（図中の D,E,F は右岸および左岸側の計器であり, これらもまた, 河床部とは異なる応答を示してる）.

以上の強制的水位変動に加えて, 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. 図は, グラウチング施工時の最初の水押し（Lu テスト）を行った際の岩盤間隙水圧計の応答を示している. 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, 加圧した層内の間隙水圧計だけが大きく反応し（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）, 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. 本結果もまた, 天然低透水層の安定した連続性（遮水性能）を裏付けるものと言える. 強制的な岩盤内水位変動および Lu テスト時の水押し加圧を対象として, FEM 非定常浸透流解析(DACSAR)を実施した結果の一例を**図-10** に示す. 左の水位変動時解析では, 低透水層を挟んでの間隙水圧応答の違いが解析でも再現されている. **図-5** に示した水位低下後の定常状態での水頭値の違いに対する再現解析（試解析）により各層の透水係数の比率を, **図-6** の水位変動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（この値はボーリング調査で得られた実測 Lu 値の範囲内にあった）. **図-10** 右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, 解析の両方で確認できる. 図中の間隙水圧コンターを見る

と，天然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（低透水層の連続性が確保されない条件での試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)5)] を実施した．また，確定

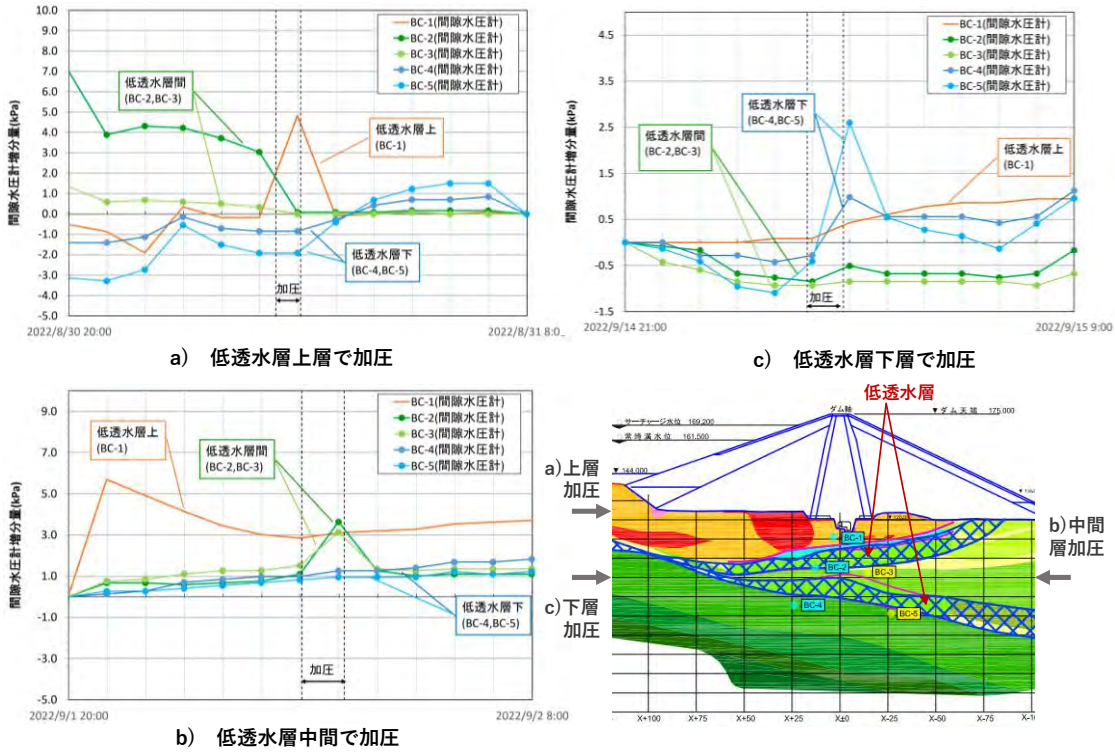
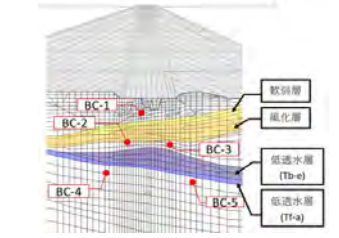
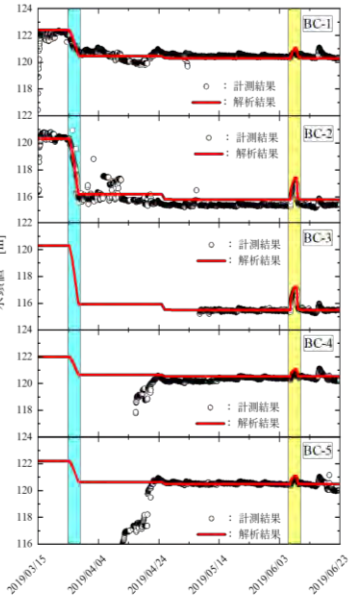


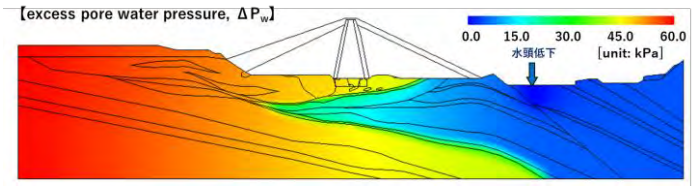
図-9　グラウチング施工時（水押し時）の岩盤間隙水圧計応答（低透水層上層/中間層/下層での加圧別）



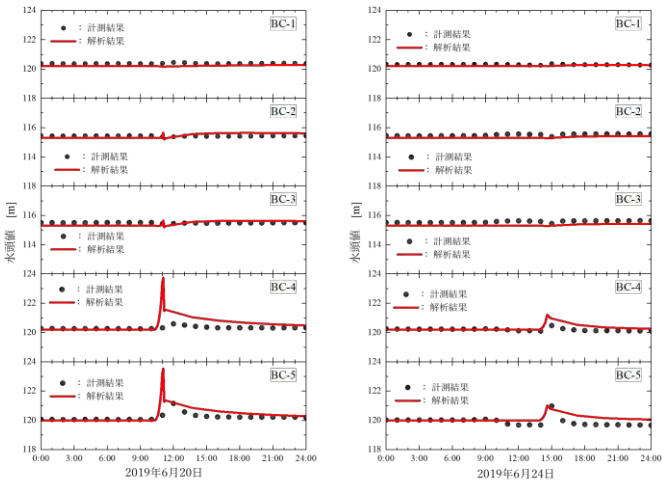
材料名	岩区分	岩級区分	ルジオン値 Lu	透水係数 k [m/day]
dt	崖錐堆積物	-	1000.0	8.64E+00
tr	段丘堆積物	-	1000.0	8.64E+00
WAn	安山岩類	CL～CM	1000.0	8.64E+00
An	安山岩類	CM	1000.0	8.64E+00
Ab	安山岩類	CL	100.0	8.64E-01
Tf-c	凝灰角礫岩類	D～CL	250.0	2.16E+00
Tb-g	凝灰角礫岩類	CL	250.0	2.16E+00
Tf-b	凝灰角礫岩類	CL	2000.0	1.73E+01
Tb-f	凝灰角礫岩類	CL～CM	2000.0	1.73E+01
Tb-e	凝灰角礫岩類	CL	10.0	8.64E-02
Tf-a	凝灰角礫岩類	CL	1.0	8.64E-03
Tb-d	凝灰角礫岩類	CL～CM	1000.0	8.64E+00
Tb-c	凝灰角礫岩類	CL	500.0	4.32E+00
Tb-b	凝灰角礫岩類	CL～CM	2500.0	2.16E+01
Tb-a	凝灰角礫岩類	CL～CM	1000.0	8.64E+00
軟弱層			1.0	8.64E-03
風化層			2.0	1.73E-02



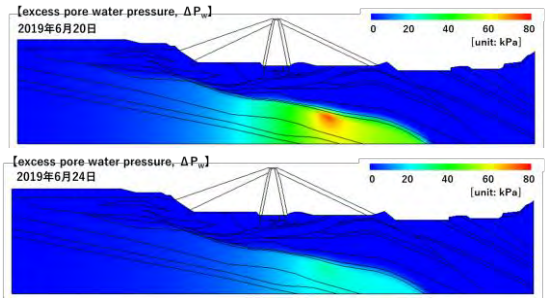
① 岩盤内水位低下解析結果と実測値の比較



② 岩盤内水位低下時の間隙水圧コンター



① ルジオンテスト加圧時の再現解析（凝灰岩下部層で加圧）



② ルジオンテスト加圧時の岩盤内間隙水圧コンター

図-10　FEM 非定常浸透流解析例（左：岩盤内水位低下時　右：グラウチング施工（加圧）時）

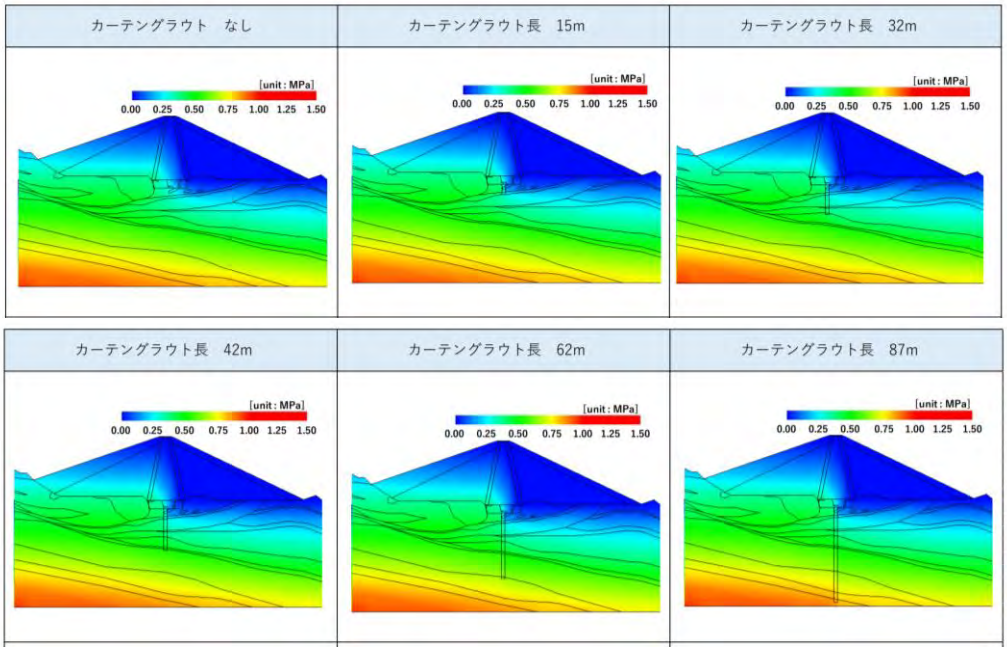


図-11(a)　カーテングラウチング長を変えたパラメトリックスタディの結果

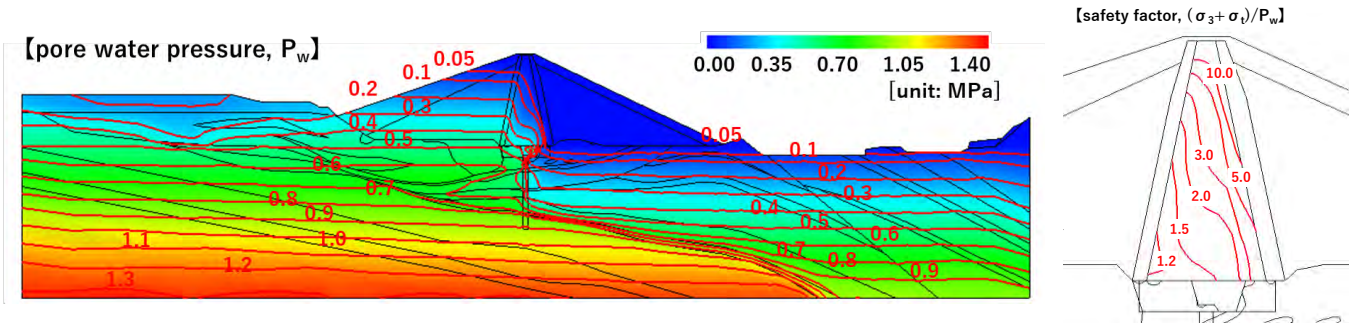
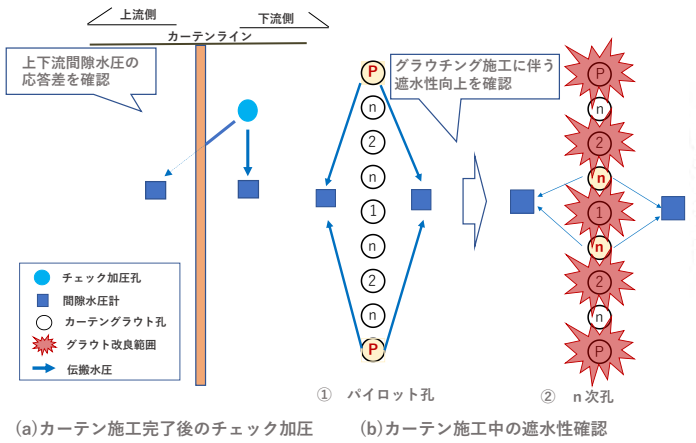


図-11(b)　湛水完了時の堤体～基礎岩盤間隙水圧コンターおよびコアゾーンの HF 安全率コンター

した基礎岩盤水理構造に対して，図-11(a)に示すようなカーテングラウト長を変化させた試解析（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を決定した．図-11(b)には，最終決定されたカーテン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．図の右側には，湛水完了時のコアゾーンの水理的安定性を示す HF（ハイドロリックフラクチャリング）安全率のコンターを併記しており，コアゾーンが十分な水理的安定性を有することを確認できる[3)～5)]（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）．

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

図-9 では，グラウチング施工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-12 にその概念図を示す．(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を設け（例えば管理用計器の埋設孔を利用），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．なお，カーテングラウチングの施工が進むと上流側仮締切標高付近まで上流側水位が自然に上昇する（水位差は 10m 強）．この際の上下流岩盤間隙水圧計に生ずるギャップもまた，貴重な参考データとなり，そのまま試験湛水時の計測管理に移行することができる．図(a)は，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加えるための一つのアイデアとして示してみた．さらに，図(b)に示すようなカーテングラウチング施工中の品質管理への応用の可能性を検討した（なお，



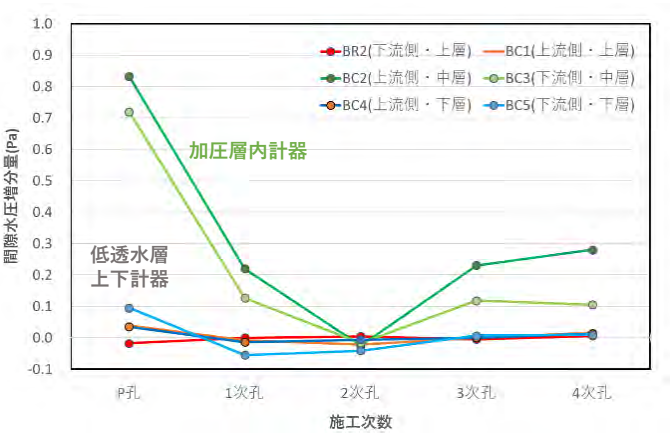


図-12　カーテン遮水効果確認方法の概念図　**図-13　カーテングラウト施工次数と間隙水圧応答の関係例**

(a) はカーテングラウチング施工を地中横から，(b)は上から見た図であることに留意). グラウ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 次孔と施工次数が増えるにつれ, 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, 同じ間隙水圧計の応答が低下していくことが想定される. **図-13** は, 河床部でのカーテングラウチング試験施工時にこれを確認した例であり, 凝灰岩上部層内で水押し加圧した際の間隙水圧応答を, 施工次数に対して整理したものである. 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（天然の低透水層の遮蔽効果）. このように, 天然の水平方向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, **図-12**(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が増加しているが, これは, この際に間隙水圧計周辺で複数の施工（地中加圧）が同時に行われた結果である. 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, グラウトの施工位置と間隙水圧計設置位置の三次元的な離隔, 施工次数, 加圧量, 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する必要があり, 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（仮称）」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今年度本格化するため, 本システムを用いて今後**図-13** のような実現象の確認と分析を継続的に進めて行く予定である.

図-14 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, 一方, 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-14** 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-15** には「Grout　Twin（仮称）」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応答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-16** 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おり, 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関わらず，間隙水圧応答が大きいほど連続した水みち，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 次孔施工時の最初の間隙水圧応答から一つ前の n 次孔の空間的なグラウト効果を確認し，n+1 次孔の適切な打設手順を検討する，追加グラウト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，最終的なグラウトの打止めを判断する等，現場でより適切，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．

5. 終わりに：今後の試験湛水に向けて

図-17 は，試験湛水前に下流側チェック孔より凝灰岩上部層内で加圧を行うこと（図-12(a)）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（カーテングラウトの有無や Lu 値を変えて試算）．解析で加えた圧力 0.41MPa は湛水時の水頭差に相当し，Lu テスト水押し時の最小圧力に近い．図

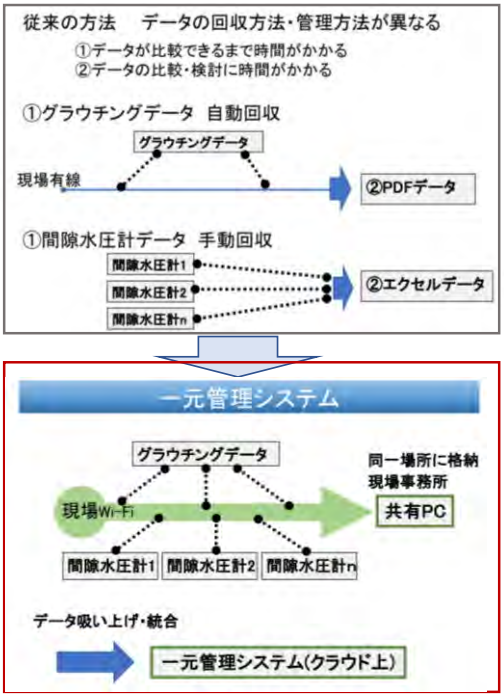


図-14　データ回収の自動化と一元管理

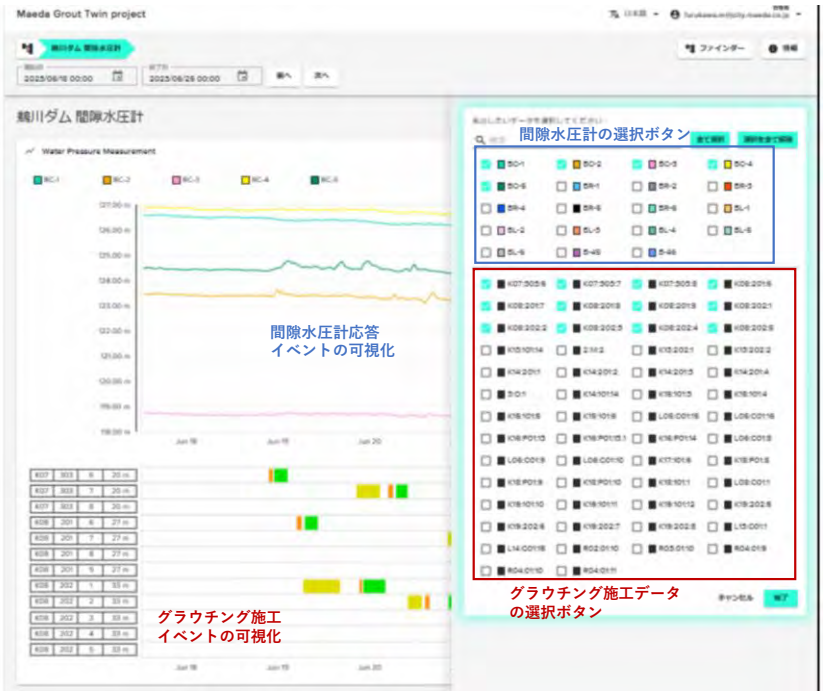


図-15「Grout　Twin（仮称）」操作画面

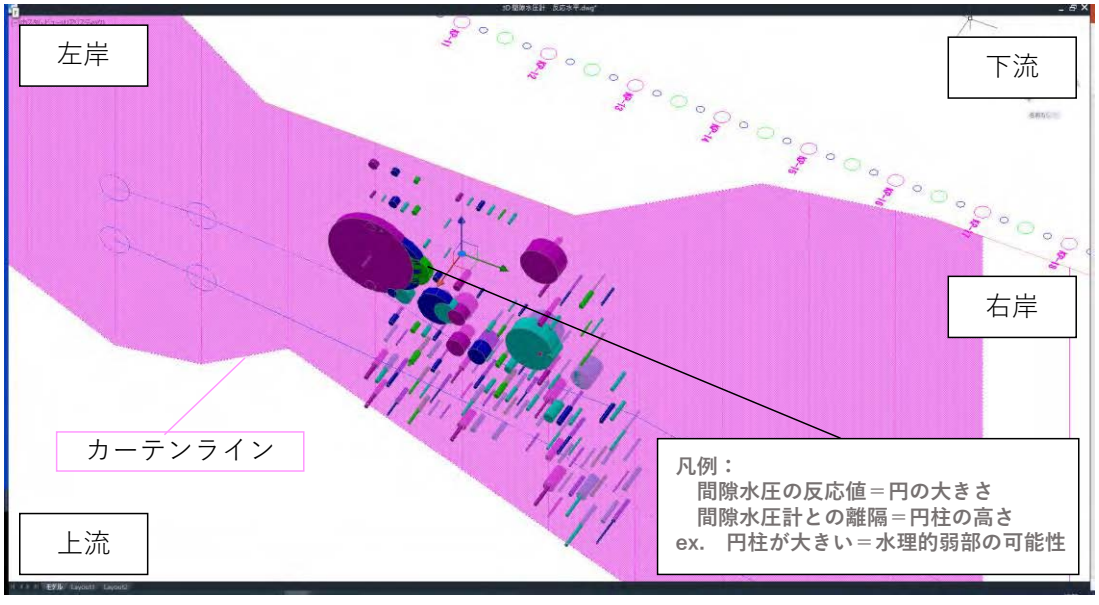


図-16　岩盤間隙水圧計応答の三次元可視化例

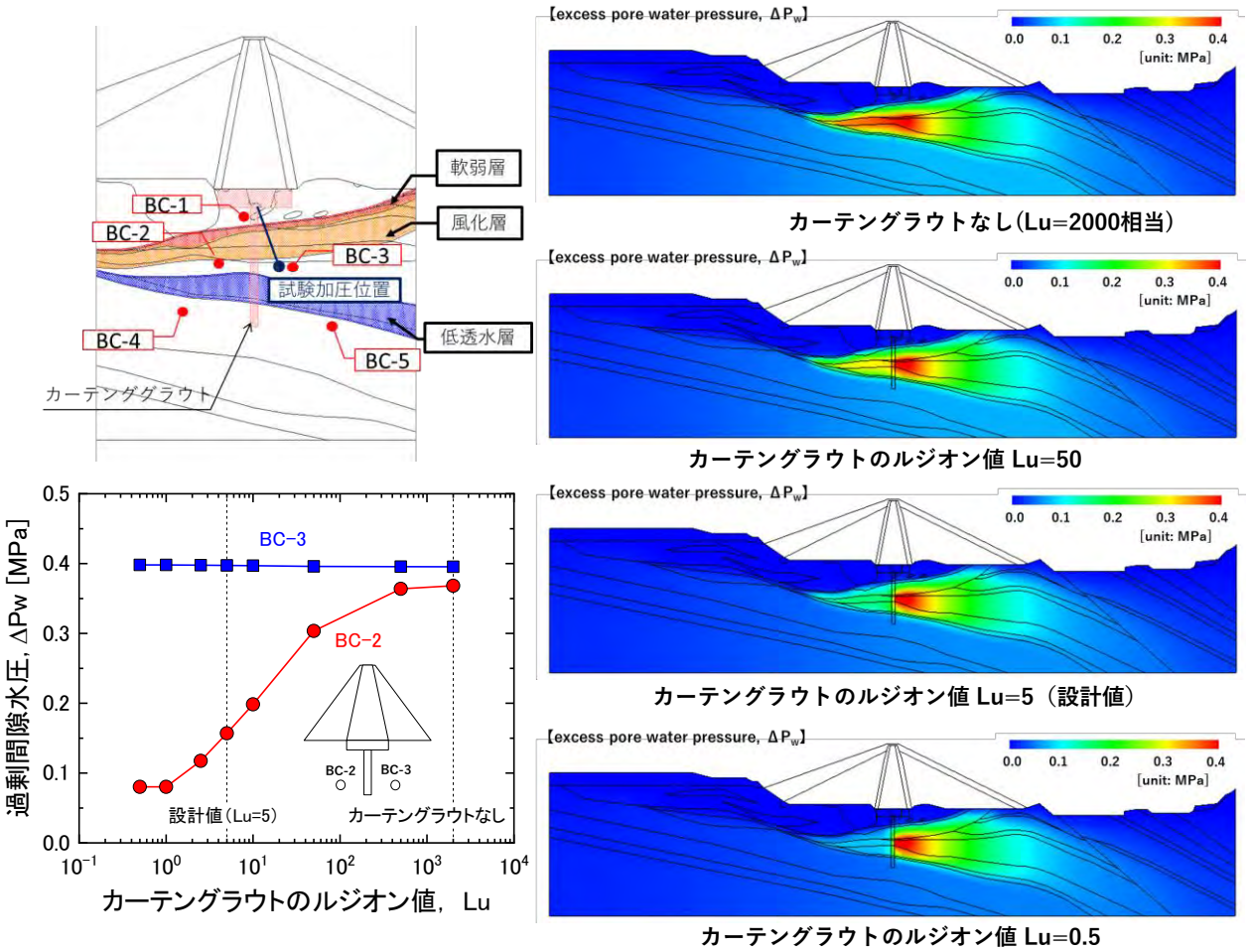


図-17　下流側チェック孔からの加圧時シミュレーション結果

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，その上下流で岩盤内間隙水圧にギャップが生ずること，カーテン Lu 値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．この際の三次元可視化結果の中に「大きな円柱がないこと」を確認できれば，安心して試験湛水に進むことができよう．図中にはカーテンの Lu 値（透水係数）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を実測間隙水圧値に基づき同定し，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（ただし地中の点加圧は湛水時の加圧条件とは異なるため，あくまで目安値と考えている）．

【謝辞】一般財団法人ダム技術センター山口嘉一理事より，本研究開発やその現場適用方法に関して貴重なご意見を多数頂戴した．末尾ながら記して謝意を表する次第である．

【参考文献】1）石黒他：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 2019．2）石黒他：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的現場管理の試み，地盤工学会土の締固め合理化に関するシンポジウム，2022．　3）石黒他：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，2023．4）平田他：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，2023．5）森他：中央土質遮水壁型ﾛｯｸﾌｨﾙﾀﾞ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.