

重力式ダムにおける付加体堆積物地盤の処理 Treatment of accretionary prism for gravity dam

中尾 光宏*

Mitsuhiro Nakao

要 約

重力式コンクリートダムの建設では、基礎掘削により地山の脆弱部や高透水ゾーンを除去し、さらにグラウチングにより止水性や安定性を高めるのが一般的である。しかし公共工事に対する国民のコスト・環境意識の高まりを受け、昨今のダム建設では事業の妥当性を再検証し、工事量の縮小を図る例が多い。河内川ダムにおいても、設計段階で掘削線やグラウチング計画の見直しが行われたが、付加体堆積物からなる基礎岩盤の地質が複雑であったために設計段階で過小評価された懸案事項が施工中に顕在化することとなった。このため、基礎岩盤の状態を随時確認した上で、設計・施工計画の再見直しを行いながら地質の変化に対応した施工を慎重に進めた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 河内川ダム周辺の地形・地質
- § 3. 設計段階での計画変更
- § 4. 施工段階での計画再変更
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

河内川ダムは、福井県三方上中郡若狭町に建設されている福井県発注の多目的ダムである。当該ダムは、堤頂長 202.3 m、堤高 77.5 m、堤体積 25.8 万 m^3 、総貯水量 800 万 m^3 の重力式コンクリートダムである。図-1 にダム位置図、図-2～図-4 にダム三面図を示す。

当該ダムの基礎地盤は、海洋プレートの沈み込みにより日本列島に付加された付加体堆積物で構成されている。そのため、破碎帯や不連続面が発達しており地質構成は非常に複雑である。

本稿は、設計・計画段階では見極めが困難であった基礎地盤の諸課題に対する設計・施工面での対応について報告するものである。

§ 2. 河内川ダム周辺の地形・地質

2-1 広域の地形・地質

ダムサイト周辺地域は琵琶湖北西に連なる野坂山地（湖北山地）と、その南西方向に広がる丹波高原との境界にあたる。流域の山体は 900 m 以下の山頂標高を有し、

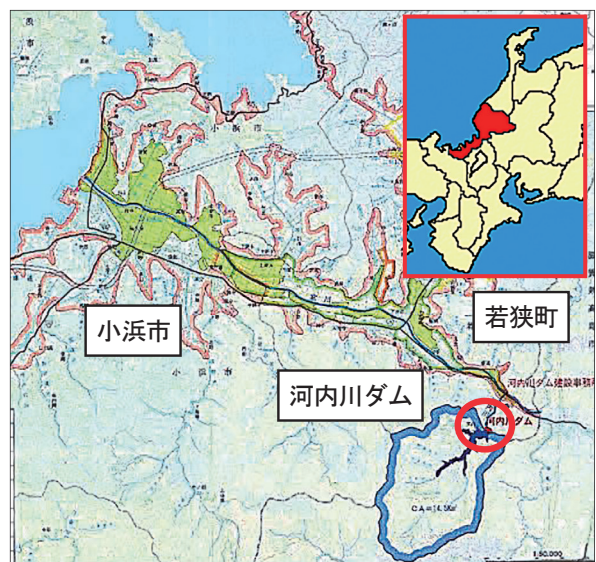


図-1 河内川ダム位置図

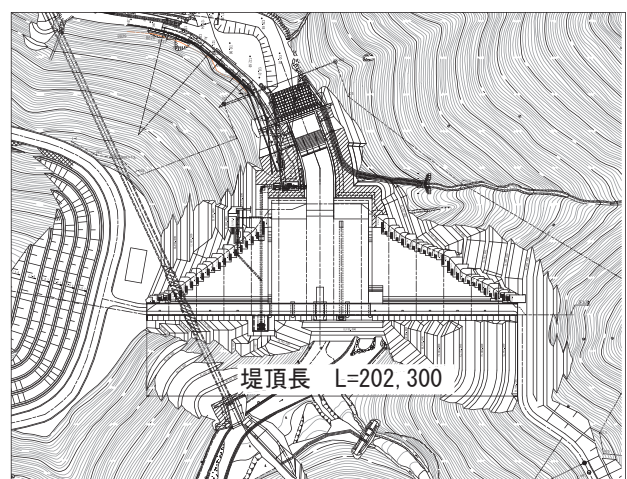


図-2 河内川ダム平面図

* 西日本（支）河内川ダム（出）

山体斜面は全般に急峻である。

河内川ダムは日本の地体構造区分のうち丹波帯に位置する。丹波帯は付加体堆積物を主体とした地質構造帯であり、中生代ジュラ紀の砂岩・泥岩などの陸源性積岩類と、それよりも生成年代の古い緑色岩（玄武岩起源の溶岩・凝灰岩など）、チャート、石灰石、玄武岩などの海洋性起源の岩石類から構成されている。

ダムサイト周辺の付加体堆積物は河内コンプレックスと称され、泥質岩（粘板岩・頁岩）を主体とし、この他チャート、石灰岩の岩帯が含まれる産状である。基質である泥質岩は中生代ジュラ紀に、それに取り込まれている緑色岩類、チャート、石灰岩はより古い三畳紀～石炭紀に生成したものであり、これらはオリストリス（外来岩片）であることが知られている。図一五に広域地形図を示す。

2-2 ダムサイトの地形・地質

河内川はダムサイト直上流までは北東に流下しているが、河道は二回の屈曲をもって北に蛇行する。全体として右岸側は攻撃斜面であり、左岸側は滑走斜面である。ダムサイトは上流側の屈曲部に位置し、直上流は開いた谷地形となる。河床幅は、段丘面も含めて概ね 40 m 以下であり、河床勾配は 1/50～1/60 である。

貯水池周辺及びダムサイト周辺の基盤岩は大小様々のチャート、砂岩、石灰岩、緑色岩（輝緑凝灰岩）をブロック状またはシート状に挟む粘板岩を主体とする地層である。ダムサイトは河内川とほぼ直交して延びる緑色岩分布域の上流端付近に位置し、これより上流側は粘板岩主体の地層が広く分布する。

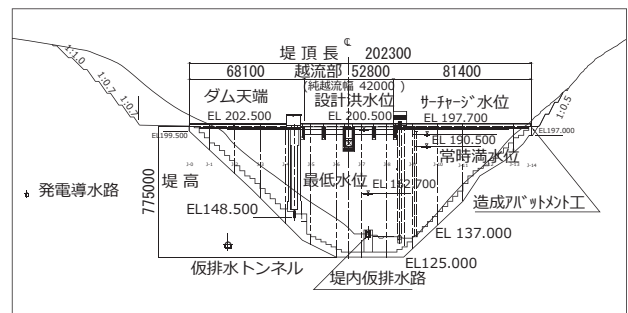
緑色岩は塊状の溶岩主体層（Lv）と層状構造やへき開構造が発達した火山碎屑岩主体層（Tf）を主体とし、一部に赤紫色凝灰岩層（r-tf）が狭在される。ダムサイト基盤岩の主体をなす緑色岩の新鮮部においては、溶岩主体層と火山碎屑岩主体層（赤紫色凝灰岩層を含む）に顕著な硬さや割れ目間隔の差は認められない。ただし、溶岩主体層の一部には、割れ目間隔が広く、硬質な箇所がみられる。

地層は概ね河川に直交する走向（WNW-ESE～WSW-ENE）で、全体としては北側に 70° 前後の高角度で傾斜しており、上流側ほど構造的に下位の地層が分布する。

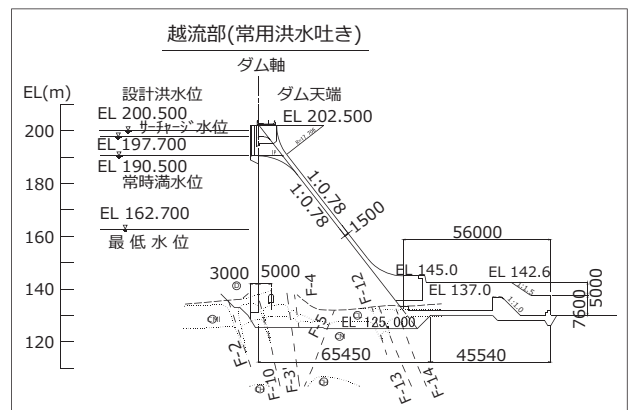
図一六にダムサイト地形概要図、図一七にダムサイト地質平面図を示す。

左岸部の緑色岩は硬質、堅固であるものの、割れ目はやや開口しており、地山深部にも粘土シームを挟む割れ目が存在するなど岩盤に緩みがあり、C_{ML} 級が分布している。また、劣化した粘板岩の深部での分布に伴って、C_L 級岩盤が一部分布している。

右岸部、河床部には緑色岩の露頭も確認でき、堅岩が分布すると想定できる。地下水位は左岸側では全般に低く、右岸側では岩盤の分布に調和的に山側で上昇する。



図一三 河内川ダム上流面図



図一四 河内川ダム標準断面図



図一五 ダムサイト周辺広域地形図

§3. 設計段階での計画変更

3-1 基礎掘削

(1) 当初計画

当ダムの基礎掘削での設計条件は以下の2点である。

- ①岩級区分別の所要せん断強度を満足
- ②20 Lu 以上の高透水部は掘削除去

基礎掘削面標高別の岩級区分と強度の設定を表一に示す。

(2) 見直し計画

コスト縮減を図るため、設計条件を以下の通り変更し、掘削範囲を縮小することとした(②が変更, ③が追加)。

- ①岩級区分別のせん断強度を満足
- ②20 Lu 以上の高透水部はグラウチングで対応
- ③造成アバットメントを配置し、D級を一部許容

上記変更により、掘削量および堤体積を減ずるとともに、右岸頂部の長大法面を縮小することが可能となった。

なお、左岸側については、所要の岩級区分までの掘削により高透水部は除去されること、造成アバットメントによるメリットが小さいことから、当初計画を踏襲することとした。

図一8に設計時の掘削計画を示す。

3-2 基礎処理

(1) 当初計画

コンクリートダム基礎処理は、大きくコンソリデーショングラウチング(以下、コンソリ)とカーテングラウチング(以下、カーテン)に二分される。前者はダムの着岩部付近の遮水性改良と、断層・破碎帯等の弱部の補強を目的とし、浅く面状の施工範囲となる。後者はダム基礎地盤・左右岸部から貯水池外へつながる高透水部の遮水性改良を目的とし、ダム上流面付近で深く列状の施工範囲となる。

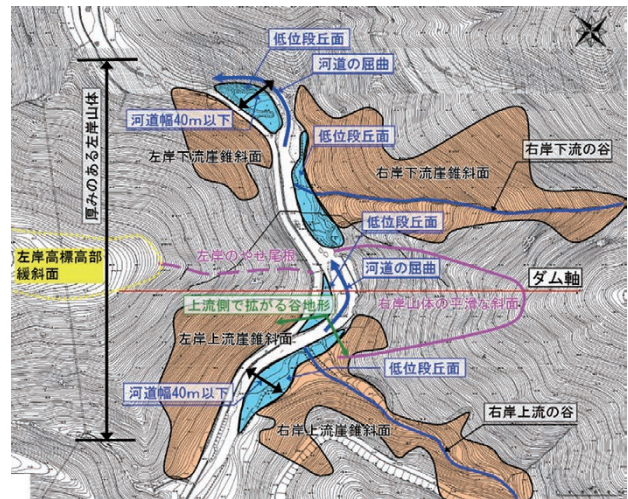
コンソリ計画は、改良目標値を5 Lu とし、施工範囲を堤敷全域、孔深を7 m (鉛直)、孔配置を2 m 間隔千鳥とした。

カーテン計画は、改良目標値を2 Lu、施工範囲を改良目標値以上の範囲、孔深を50~80 m (鉛直)、孔配置を1.5 m 間隔とした。また、カーテンの確実な施工を図るため、カーテン列の上流側に、孔深10~30 m、孔配置3 m の補助カーテンを一例施工することとした。

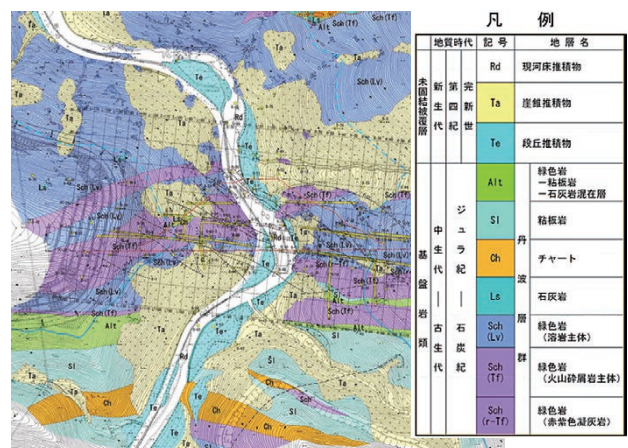
(2) 見直し計画

ダムの基礎グラウチングに関する指針として、(財)国土技術センターが編集した「グラウチング指針・同解説」があるが、施工目的・範囲の明確化、施工の最適化・効率化を図るべく、平成15年に大幅な改訂があった。

当ダムのグラウチング計画も、改訂版に準じて大きく見直され、コスト縮減が図られた。コンソリ計画は、改良目標値を5 Lu のままとし、施工範囲を堤体上流側(上流端~基礎排水孔)および左右岸部(C_{ML}級~C_L級分布



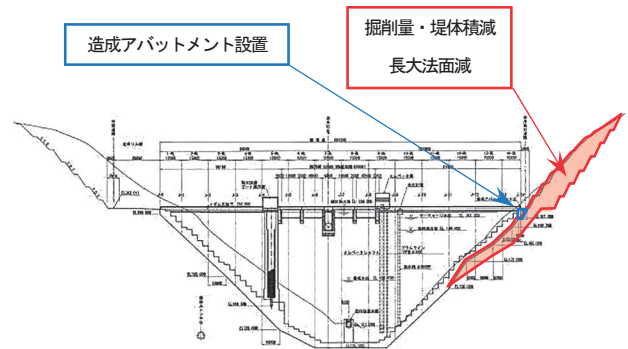
図一6 ダムサイト地形概要図



図一7 ダムサイト地質平面図

表一 標高別所要岩級区分

基礎面標高	岩級区分	せん断強度
EL. 125m	C _M 級	2.3MPa + tan50°
EL. 140m	C _{ML} 級	1.5MPa + tan45°
EL. 165m	C _L 級	0.6MPa + tan40°



図一8 工事着手時掘削計画(上流面図)

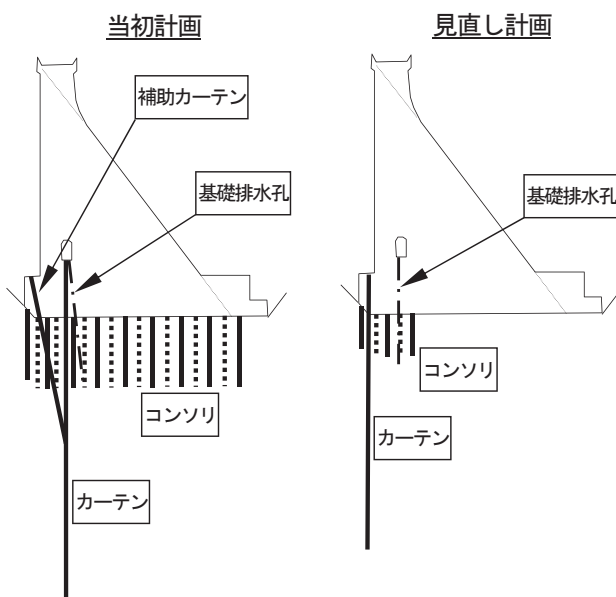
範囲)に縮小, 孔深を5m(掘削面に垂直)に短縮, 孔配置を3m間隔格子(上流部)と3m間隔千鳥(左右岸部)に拡大した。

カーテン計画は, 改良目標値を2~10Luに緩和し, 施工範囲を改良目標値緩和に伴い縮小, 孔深を20~40mに短縮した。孔配置は1.5m間隔のままとしたが, 施工場所を堤体部では監査廊から上流フーチングへ, 左右岸部ではトンネル内(一部)から明かり部へと変更した。また, 当初計画されていた補助カーテンは施工しないこととした。

上記計画は, ダムサイト近傍で実施した試験グラウチングの結果も考慮して決定されたものである。基礎処理の計画見直しの概要を表一2と図一9に, コンソリ・カーテンの見直し計画図を図一10と図一11にそれぞれ示す。

表一2 グ라우チング施工仕様比較表

項目	当初計画	見直し計画
コンソリ		
改良目標値	5Lu	2~10Lu
施工範囲	堤敷全域	上流部と左右岸部
孔深	7m(鉛直)	5m(斜面垂直)
孔配置	2m千鳥	上流部: 3m格子 左右岸: 3m千鳥
カーテン		
改良目標値	2Lu	2~10Lu
施工範囲	改良目標値以上の箇所	改良目標値以上の箇所
孔深	50~80m	20~40m
孔配置	1.5m間隔	1.5m間隔
施工箇所	監査廊内	上流フーチング上



図一9 基礎処理計画変更概略図

§4. 施工段階での対応

4-1 右岸頂部ゆるみ地盤への対応

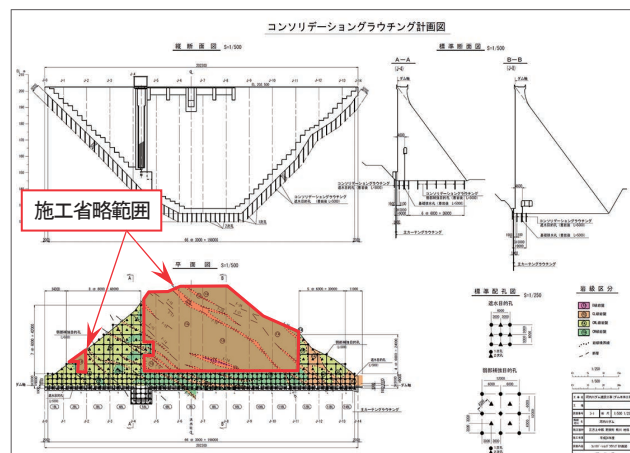
設計段階で右岸頂部の掘削形状を変更し, 施工量の低減を図っていたが, 実際の地山状況は想定よりもゆるみが多く, 崖錐堆積物も掘削面の一部に残る形となった。実施工から得られた情報をもとに実施した法面安定解析から, 右岸頂部のうち最上部の掘削勾配を1:0.5から1:0.7に変更して施工時の短期の安定を確保した。

また, 中段部の一部の吹付法枠をF300-2,000×2,000からF500-3,500×3,500に変更した上, グランドアンカーの施工範囲・数量・仕様を見直すことで供用開始後の長期の安定を確保することとした。

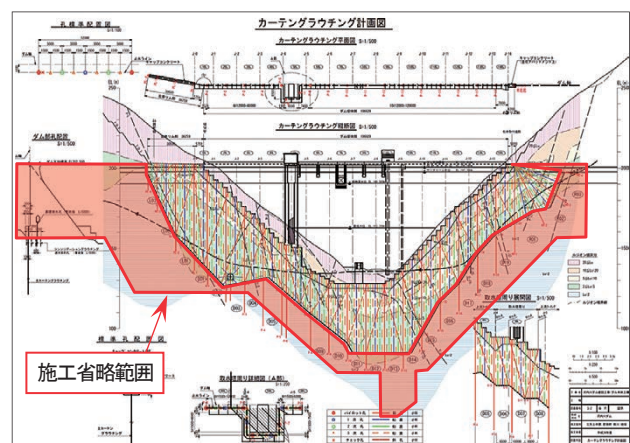
4-2 低角度・高角度断層への対応

設計段階での調査ボーリングや調査横坑により把握されていた断層は, いずれも活動性のない古いものと判断された。連続性のある低角度のものはなく, 走向は左右岸方向に卓越していることから, ダムの安定や止水性への影響はないと想定されていた。

しかし基礎掘削の進捗に伴って露呈した断層は, 想定よりも複雑に分岐・屈曲し, 中でも左岸部の比較的規模の大きな低角度断層(以下F-a断層)は上下流に連続し



図一10 工事着手時コンソリ計画図



図一11 工事着手時カーテン計画図

て分布し、堤体の安定性や遮水性への影響が懸念された。

また、上下流に連続する高角度断層が主として河床部に確認され、漏水量の増加を招く可能性があった。掘削後に確認された断層のうち、主なものを図-12に示す。

低角度のF-a断層に対しては、掘削勾配を立てて露呈面を小さくことで所要のせん断強度を確保することとした。また断層周辺のコンソリの孔間隔を小さくし、弱部の補強と止水性の向上を図った。F-a断層処理の概要を図-13に示す。

漏水リスクのある高角度断層に対しては、掘削面でのデンタルワーク（溝掘・モルタル充填）と、断層と交差するよう配置した特殊基礎処理削孔からの注入により、10 Lu程度を目標に止水性の改善を図った。

4-3 左岸リム部高透水・低地下水位ゾーンへの対応

設計段階では、左岸リム部の地下水位は高く、透水性は低いと想定され、当初計画から基礎処理改良範囲を縮小して設計されていた。しかし施工中に行った再調査の結果、前述のF-a断層を挟んだ二段水位が形成され、F-a断層以深では地下水位が低いことが確認された。また、孔内圧力センサーを用いた高精度透水試験の結果、100 Luを超える超高透水ゾーンが分布することも明らかとなった。

規定孔に先立って施工するパイロット孔では孔配置を見直した上で施工深度を延長し、より広い範囲でコア採取や孔内撮影、高精度透水試験を実施しながら、改良範囲を決定した。左岸リム部の改良範囲を図-14に示す。

4-4 左岸低標高部開口割れ目ゾーンへの対応

左岸低標高部の亀裂内に黄褐色粘土を介在するC_{ML}級岩盤が分布することは、調査段階から把握されていたが、その分布範囲までは確認されていなかった。

基礎掘削段階では掘削面の地質目視確認により分布範囲を特定し、掘削線を局所的に下げること、露呈した開口割れ目ゾーンを可能な限り除去することとした。

地山深部の分布に対しては、基礎処理段階で対応することとした。分布状況を正確に把握するためにコア採取を行い、削孔径をφ86（通常のダム工事基礎処理ではφ66）として、流入粘土の採取率の向上を図った。調査の結果、平面的にも深度的にも当初想定よりも広い分布が確認されたが、開口割れ目ゾーンを網羅するようコンソリ改良範囲を見直し、孔間隔を狭めて施工することで対応することとした。当該エリアでは低圧力での注入になり、改良効果を高めることは困難であったが、追加孔を多く施工することで、基礎岩盤の補強を行った。

4-5 河床部難改良性地盤への対応

設計段階の調査では、河床部基礎岩盤においては所要の強度を満足するC_M級が支配的であり、グラウチングによる改良性も高いと想定されていた。しかし、施工中

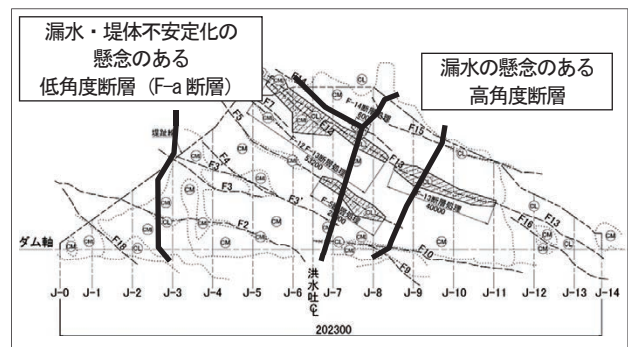


図-12 掘削後に確認された主な断層

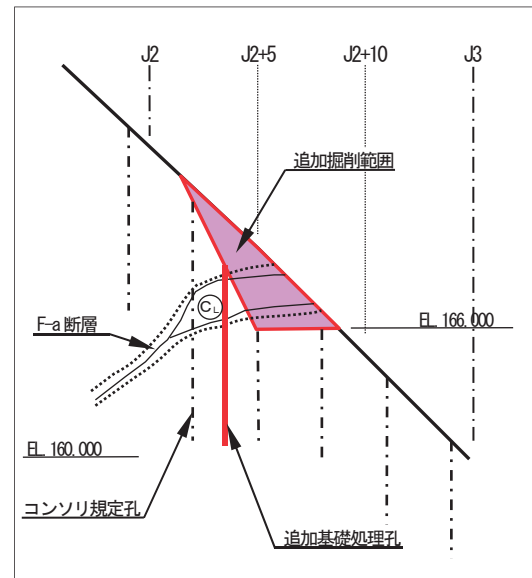


図-13 F-a断層処理概要図

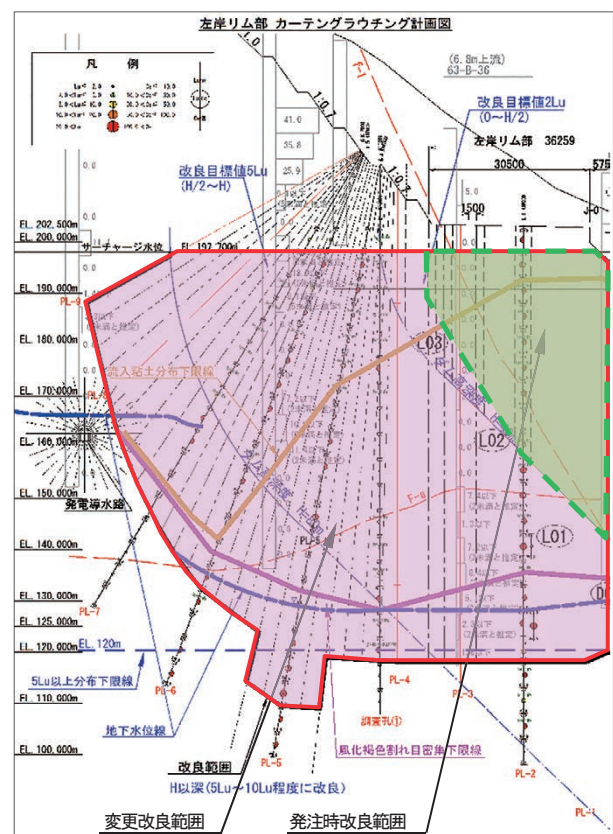


図-14 左岸リム部改良範囲図

に確認できた地質構造は複雑であり、低標高部に及ぶまで断層の条数も多く、亀裂の一部には粘土や砂状物質を介在していた。また、基礎処理本施工に先立って実施した試験施工では、計画されていた施工仕様では改良が困難であることが判明した。

難改良性地盤への対応は次のとおりである。

コンソリは、注入圧力を 0.3 MPa から 0.4 MPa に上げるとともに、セメントミルクの注入開始配合を 1:8 から 1:10 に薄め、注入中の配合切替基準も見直すことで改良性の改善を図った。また、特に C_{ML} 級の分布の多いエリアでは、通常の高炉セメントに代えて超微粒子セメントを使用した。これらの対応により、一部で追加孔の施工が必要となったものの、改良目標値 (5 Lu or 10 Lu) を満足することができた。

カーテンは、コンソリ同様の仕様変更を行いながら施工を行ったが、さらなる追加孔を施工しても改良目標値 (2 Lu) を満足することは困難であった。そのため、一部エリアの改良目標値を、注入による改良限界値と考えられる 3 Lu に緩和することとなったが、カーテンの上流側に補強カーテンを施工することで孔配置を複列化し、改良範囲に厚みを持たせることで基礎岩盤の止水性を確保することとした。複列化の範囲を図-15 に示す。

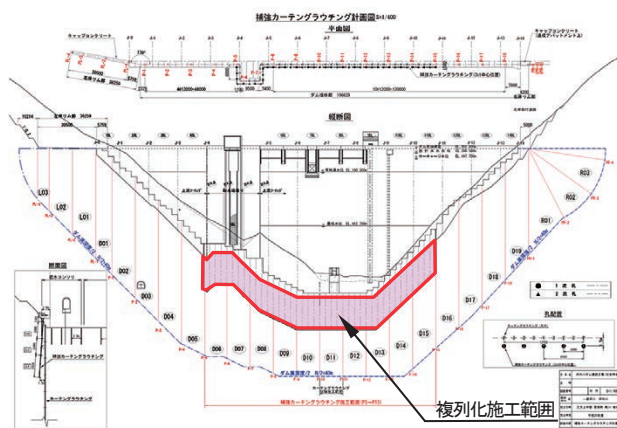


図-15 補強カーテン計画図

4-6 石灰岩介在への対応

地質の見地から、堤敷地盤の基岩は緑色岩であり、石灰岩の貫入はないとの報告がされていたが、基礎掘削面には、堤体下流の堤趾部から減勢部にかけての範囲で混在岩が分布し、石灰岩や方解石のブロックも確認された。これらのブロックには溶食による空隙があり止水性に影響するほか、圧縮応力の集中する下流堤趾部に位置することから基礎岩盤の弱部となることが懸念された。また、一部の溶食洞は流入粘土により充填されていた。

石灰岩介在への対応は、次のとおりである。

基礎掘削時に露呈した岩脈・ブロックや流入粘土は小型重機や人力により丁寧に除去することとした。また、地中に分布するものは、堤体コンクリートに悪影響を与えないように、通常のコンソリとは別に注入孔を配孔し、石

灰岩ブロックを貫く斜孔から注入を行った。注入は、削孔時のコアで分布位置を確認しながら慎重に施工した。

§ 5. おわりに

本工事の施工段階で明らかとなった技術的課題は、以下の対応によりダム基礎地盤の安定の確保と漏水リスク低減を図ることができた。

- ・掘削後に確認されたゆるみ地盤は、施工方法を変更して対応し、掘削面や堤体の安定を確保した。
- ・想定以上に複雑・大規模に発達した断層は、低角度・高角度に分けて対策を行った。
- ・基礎地盤の地質、透水性、地下水位は、施工段階で再評価し、適切に施工に反映させた。
- ・一般的なダムグラウチングでは改良困難な範囲は、施工仕様、使用材料の見直しを行いながら施工した。

河内川ダム周辺は付加体地質であり、その形成過程から複雑な地形・地質をなしている。計画段階から他ダムと比較して多くの調査ボーリングや横坑による調査が行われたが、施工段階に移ってなお、左右岸から河床部にかけての広い範囲で想定しない地質や断層に直面し、その都度対応を協議しながら工事を進めることとなった。

限られた工期、人的・物的資源の中、工事中に生じた技術的課題にその都度対応していくには困難を伴うが、ここで紹介した、河内川ダムでの基礎掘削・基礎処理での対応例が、他工事の参考となれば幸いである。

平成 31 年 2 月現在、河内川ダムは試験湛水中であり、常時満水位を超えサーチャージ水位に向けて水位を上昇させている (写真-1)。現在までのところ、堤体や基礎に特異な挙動はなく、揚圧力や漏水量も想定範囲内に収まっている。このまま無事に試験湛水を終え、供用開始に向かえるよう推移に留意しながら、試験湛水中に得られるデータから施工中の対応が適切であったかどうか検証し、知見を深めていきたい。



写真-1 上流より試験湛水中の河内川ダムを望む

謝辞. 工事にあたり多大なご指導・ご協力をいただきました関係各位に対し、厚く感謝の意を表します。