

# 豊平峡ダム堰堤改良事業について(第1報)

## - L 2 耐震性能照査に基づくダム本体の耐震補強工事の紹介 -

札幌開発建設部 豊平川ダム統管理事務所 豊平峡ダム管理支所 ○上出 洋介  
北畑 大輔  
豊平川ダム統管理事務所 管理課 稲澤 豊

豊平峡ダムは、昭和 47 年に完成したアーチ式の多目的ダムである。大規模地震時の耐震性能を検証した結果、ダム堤体上部の耐震性能が不足していることが判明したことから、令和 3 年度から堰堤改良事業として事業を着手している。

アーチ式ダムでの耐震補強として初めての対策工法となるため、試験施工により検証しながら工事を進めている。本論文は、施工管理方法の検討結果を踏まえた試験施工概要について紹介する。

キーワード：防災、危機管理、維持管理

### 1. はじめに

豊平川は、石狩川水系南西端の札幌市北部において石狩川に合流する流域面積902.3km<sup>2</sup>、流路延長72.5kmの石狩川1次支川であり、その源を小漁(こいざり)山(標高1,235m)に発し、流域の大半が札幌市に位置する。

豊平峡ダムは昭和 36 年・37 年の洪水を契機として、都市化が進む札幌市を洪水から守るとともに、増加する水需要・電力需要に応えるため、昭和 47 年に完成した堤高 102.5m、堤頂長 305.0m、ダム集水域 159km<sup>2</sup>のアーチ式の多目的ダムである。

大規模地震時の耐震性能を照査した結果、ダム堤体上部の耐震性能が不足していることが判明し耐震補強対策が必要となった。アーチ式ダムでは初めての対策工法となるため、試験施工により検証しながら令和 3 年度から堰堤改良事業を進めている。

本論文は、施工管理方法の検討を踏まえた試験施工概要について紹介する。



図-1 豊平峡ダム流域図

### 2. 豊平峡ダム堰堤改良の概要

#### (1) 大規模地震に対する耐震性能照査

ダム下流域には197万人都市である札幌市民を抱え、安全(洪水防御)と水道用水・電力の安定供給を確保することを担っている。



写真-1 ダム全景

大規模地震時の安全性を評価するために、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」及び H23 年東北地方太平洋沖地震等の知見を踏まえて、耐震性照査を行った。照査は、『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説』に則り、アーチダムの耐震性能照査フローに基づいてレベル 2 地震動に対する耐震性能を照査した。(図-2)

線形動的解析で引張強度(4.8MPa)を超える応力が確認され、照査フローに従い、損傷過程を考慮した非線形動的解析を行った。解析の結果、局所的に引張強度と同程度の引張応力が計算されたが、堤体の分断に至るものではなかった。また、せん断破壊に対する安全性は、ブロック全体の安全率 1.0 以上となり、堤体の安全性は確保されていることが検証された。

ただし、ダム下流面の漏水箇所では、ボーリング調査等により、打継ぎ目に水平クラックが確認されているため、専門家の助言等を踏まえて、より詳細な検討(クラックを考慮した非線形動的解析)を必要とされた。

水平クラックを考慮した三次元解析モデルにより、設計地震時・レベル2地震時における安定性を評価した。

耐震性照査の結果、ダム地点における想定最大地震：(M6.5 相当(L2 地震))に対する安全性を担保するためには、ダム堤体上部の耐震補強が必要と判断された。

ダム堤体上部が被災した場合、洪水時にはゲート操作ができなくなることが想定され、貯留水が下流へ流出するおそれがあり、ダム下流の豊平川流域に広がる札幌市の洪水安全度が低下することから、ダム本体の堤頂において補強工事により耐震性能を向上させダム機能を確保することとした。

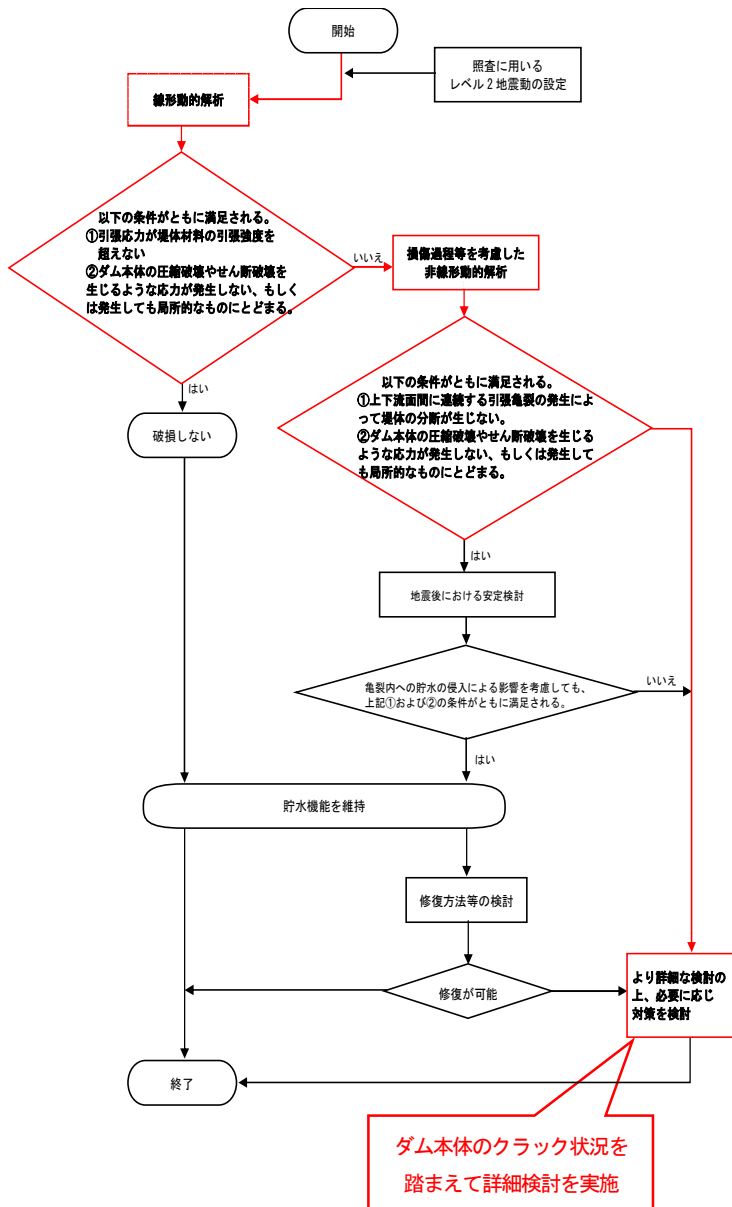


図-2 アーチ式ダムの耐震性能照査<sup>1)</sup>

## (2) 堤頂部の水平クラックを踏まえた検討

堤頂部の水平クラックを考慮した耐震性能照査は、下流面漏水調査及びボーリング等調査による水平クラックの評価を踏まえて、水平クラックの状態をランク分けしたものをベースとした。(表-1)ボーリング調査はランクAの水平打継面を対象として上流面及び下流面からコアを採取している。(図-3、写真-2)

この水平クラック区分を解析モデルへ反映し、耐震性能を照査したところ、中標高部において広範囲にひび割れの伸展が発生するおそれがある。しかし、アーチ推力が期待できるクレストゲート以下では、せん断破壊が起らない結果となった。

しかしながら、非常用洪水吐数高より上部では、三次元解析結果からアーチ作用を期待できる可能性があるが、水平クラックが無い健全な状態と比較して滑動に対する安全性が低下している計算結果であった。そのことを踏まえ、堤頂部ではレベル2地震動に対する耐震性能を確保するために必要となる補強規模を算出し、補強工法を検討した。

表-1 水平クラック区分図

ランクA	ランクB	ランクC
・密着部を期待できない可能性があるため、全面開口しているものと想定	・開口クラックは、表面付近のみと想定	・開口クラックは横継目付近の表面付近のみと想定

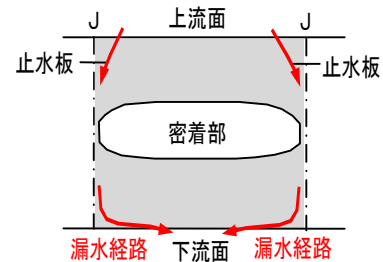


図-3 水平クラックの概要図(Aランク)



写真-2 下流面から採取したコンクリートコア

### 3. 事業の緊急性について

平成30年9月に発生した北海道胆振東部地震では、ダム天端にて553.4galの加速度が観測され、過去最大級の規模であった。このような巨大地震はいつでもどこでも起きうる可能性があり、耐震補強を施し地震に対する安全性を確保することが極めて重要である。(図-4)

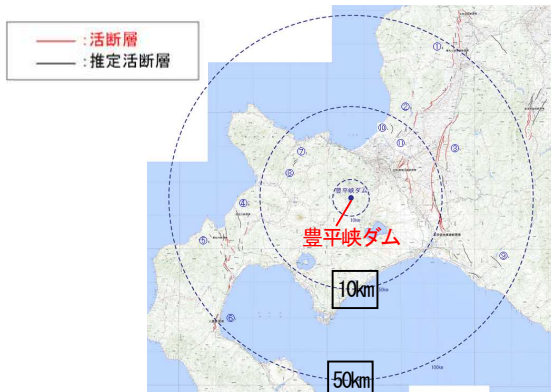


図-4 豊平峡ダム周辺の想定地震位置図<sup>2)</sup>

レベル2地震動に対する照査は、アーチダムの場合、常時満水位と最低水位を基本としている。豊平峡ダムは、常時満水位に最も堤体の安全率が低下し、最低水位時に損傷が生じないと解析された。常時満水位を維持する冬期間に大規模地震が発生した場合に、損傷を受ける可能性が高くなる。

損傷を受けた場合には、EL474.88m(常時満水位)から非常用洪水吐敷高上部(堤頂部破壊面EL468.0m)の貯水機能約9,600千<sup>3</sup>m(豊平峡ダム有効貯水容量の約1/3に相当)が消失する。(図-5)豊平峡ダムの直下には定山溪温泉街があり、この貯留水が一挙に流出した場合、被害は大きくなるとともに、札幌市民の洪水防御と水道用水、電力の供給確保に多大な影響が生じることから、緊急的な対策が必要となる。

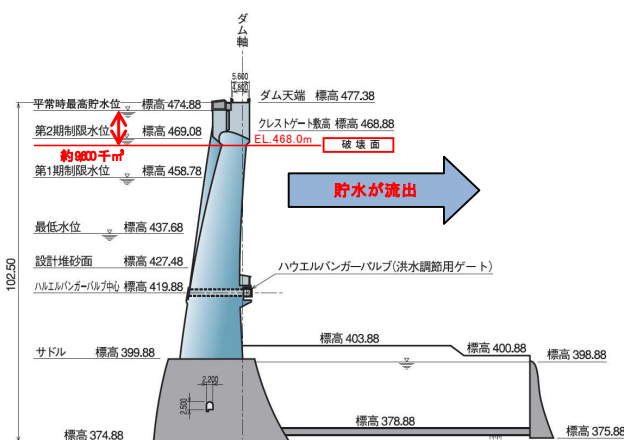


図-5 地震発生時における貯水の流出

### 4. 耐震補強工法の検討

#### (1) 耐震補強の条件設定

非常用洪水吐敷高より上部については、2. (2) 前述で述べたとおり安全性が低下する結果となっているため、横継目の抵抗を考慮しない安全側の二次元モデルによる安定計算し、滑動及び転倒に対する安全性を確認した。

この結果から安全性を確保するために必要となるせん断及び転倒に対する補強規模を算出する。

#### (2) 補強規模検討の流れ

設計地震に対する必要最小限の補強量を算出し、その補強規模を反映させた三次元FEMモデルによりレベル2地震動に対する非線形動的解析とする2段階の検証過程とした。(図-6)

解析結果は設定した設計地震に対する補強規模では、レベル2地震動に対して耐震性能を満足できないため、レベル2地震動での非線形動的解析より得られた堤頂部の加速度値を用い、二次元断面での安定計算により補強規模を再設定した。

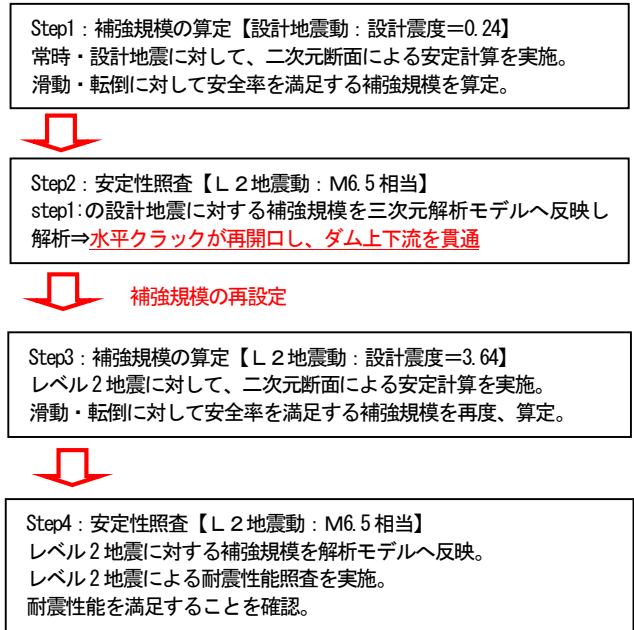
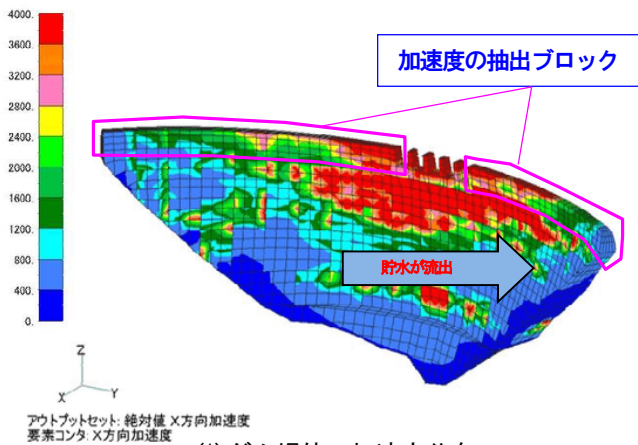


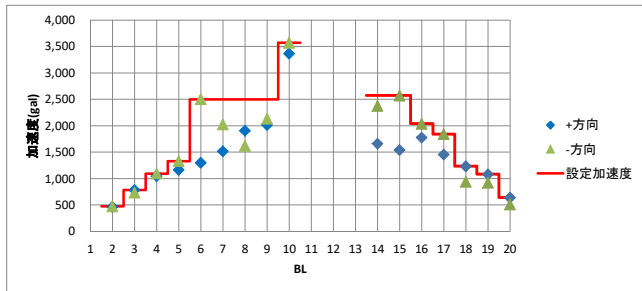
図-6 補強規模算定の流れ

#### (3) レベル2地震動に対する耐震補強量の検討

堤頂部の耐震補強規模は、ダム本体の3次元動的解析により計算される堤頂部各ブロックの最大加速度を震度換算し、その換算震度で作用する水平荷重を用いた2次元安定計算により、各ブロックにおける加速度応答値を整理した。(図-7)



(1) ダム堤体の加速度分布

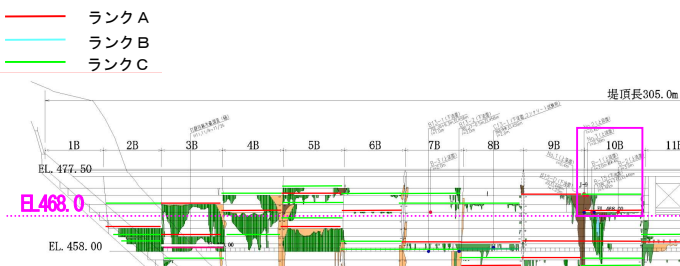


(2) 各ブロックにおける加速度の最大値

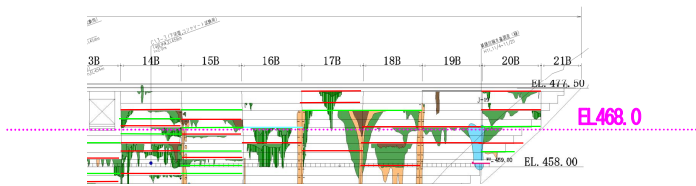
図-7 耐震補強に用いる加速度分布

レベル2地震動に対するダム堤体の加速度応答値を用いて、10BLを代表断面として補強規模を算出した。なお、補強対象となるEL468.0mの水平クラック区分は“ランクA”に該当し、ブロック全面が開口している結果から、ブロック内の全面を補強対象とする(図-8)。

補強の対象となる水平クラックはEL468.0mより上部とするが、下部の標高については三次元解析結果からアーチ推力が作用しており、ランクAの水平クラックがあっても、せん断破壊が生じない。二次元安定計算による必要強度の算出の概念図は(図-9)に示す。

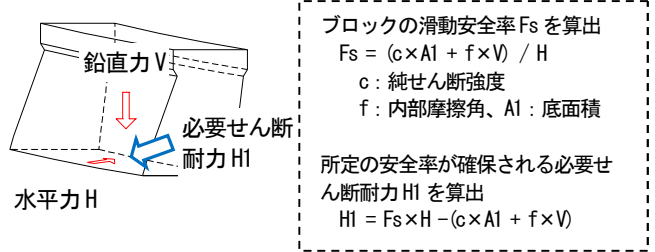


(1) 右岸側

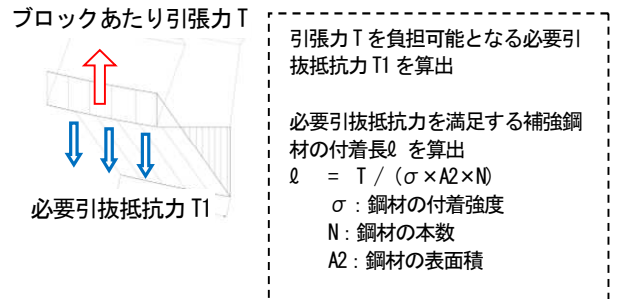


(2) 左岸側

図-8 補強対象とするブロック(下流面図)



(1) 滑动に対する必要せん断耐力の算出



(2) 転倒に対する引張抵抗力の算出

図-9 二次元安定計算による必要強度の算出

堤頂部の耐震補強は、せん断耐力を補強する鋼材をダム堤体内に挿入・定着させる。補強鋼材はダム天端からボーリング削孔し、鋼材を挿入後、セメントミルクを充填することでダム本体と一体化する工法を採用した。(図-10)

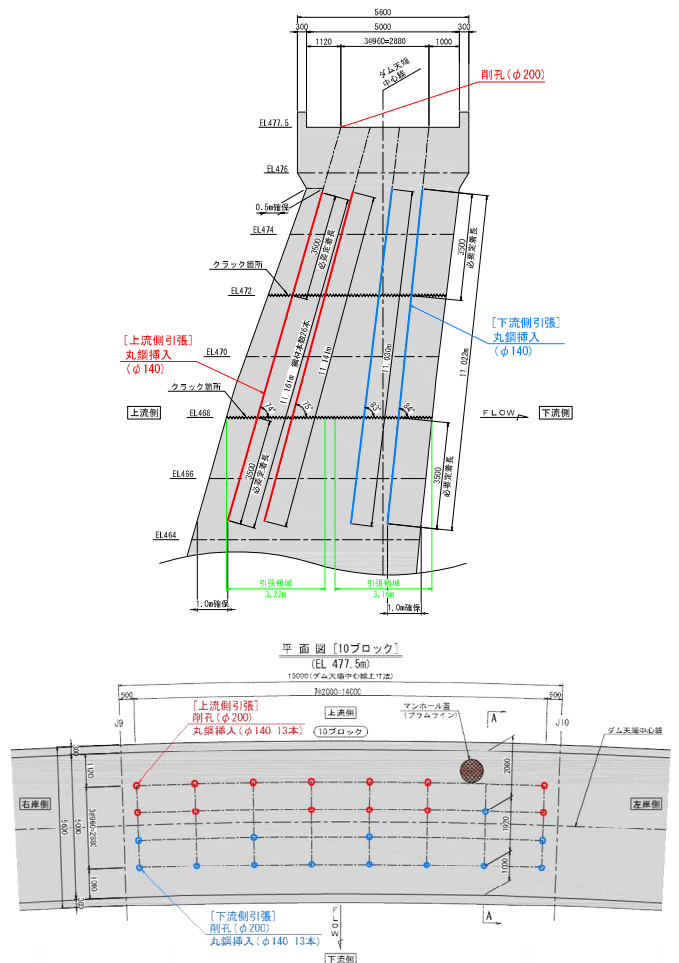


図-10 ダム堤頂部耐震補強断面図及び平面図

#### (4) 補強鋼材の検討

補強鋼材の配置条件、必要本数、延長等に基づき、堤体中部の10BLでの補強鋼材割付を検討し、各材料の適用性を検討した。規格及び鋼種による比較検討し、当ダムに適応する補強鋼材を選定した。

各工法の経済性、工事工程などによる比較結果により「丸鋼挿入工法 φ140」を選定することとした。(表-2)

表-2 補強鋼材比較

項目	異形鉄筋	丸鋼	H形鋼
規格	D51	φ140	150×150
鋼種	SD345	S45C	SMA490
補強材数量	総本数106本	総本数10本	総本数52本
概算工事費	76,700千円	14,400千円	81,100千円
概略工事工程	120日	20日	60日
評価	補強材の本数が最多となり、工事費は丸鋼に比べて高価になる。 【△】	補強材の本数が少なく、削孔径を小さくできるため、工事費は他案に比べて最も安価になる。 【○】	補強材の本数は異形鉄筋に比べて少ないものの、削孔径が大きくなることから、工事費は他案に比べ最も高価になる。 【△】

表-3 令和元年度及び令和3年度の引抜き試験

R元年度、R3年度付着強度試験結果(ジャッキ試験)			
R元年度		R3年度	
供試体 No	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	供試体 No	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )
No. 1	3.28	No. 1	4.07
No. 2	3.29	No. 2	3.82
No. 3	3.23	No. 3	4.11以上
平均値	3.27	平均値	4.00
全供試体の平均値			3.63
標準偏差σ			0.41
平均-σ			3.22
変動係数 CV(σ/平均値)			0.11
母平均の95%信頼区間			3.20~4.07

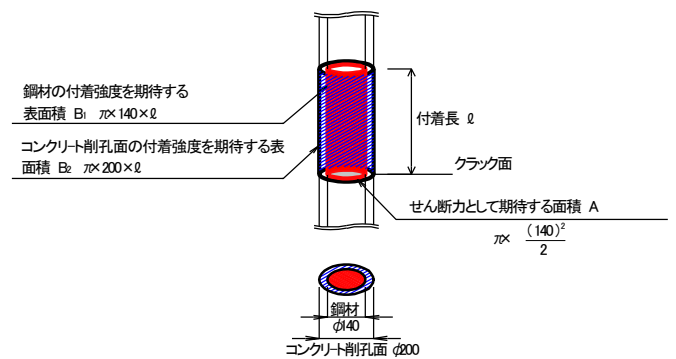


図-11 試験概要図

## 5. 現地確認試験

### (1) 付着強度試験

補強工法の検討では、削孔面の付着強度の確認が必要であることから現地での試験を実施した。

令和元年度は先行して実施した室内供試体試験の結果、丸鋼材に3mmのネジ加工したケースが最適と判断し、それを実機規模のジャッキ試験により付着強度を確認することを目的に実施した。ジャッキ試験結果から、削孔面で付着破壊を起こすことが確認された。(写真-3)



写真-3 引抜き状況



写真-4 現地試験状況

令和2年度は試験数を多く実施し、それを基に設計付着強度を設定することを目的に、比較的小規模な室内供試体試験による方法を立案し試験を実施した(供試体数12本)。令和3年度は、付着強度の設計値の妥当性を確認するために、現地のダム天端端部で付着強度のジャッキ試験により検証した。(写真-4)。試験の結果、比較的安定した値(3.82~4.11N/mm<sup>2</sup>)が得られており(表-3)令和元年度に設定した設計付着強度を上回る強度(平均値4.00N/mm<sup>2</sup>)であった。

### (2) 付着強度の設定

堤頂部の耐震補強設計に用いる付着強度は、令和元年度及び令和3年度のジャッキ試験で得られた付着強度を基に設計付着強度を設定する方針とした。令和3年度のジャッキ試験は、令和元年度に実施したジャッキ試験よりも大きな値が計測されたが、両者の試験はほぼ同条件下であったことを踏まえ、6供試体全ての試験結果を用いて設計付着強度を設定することとし、得られた付着強度の平均-σである3.2N/mm<sup>2</sup>(小数点第2位は切り捨て)を設計付着強度と設定した。

なお、ジャッキ試験の値を用いた平均-σとした場合でも、6本の最低値相当の3.23N/mm<sup>2</sup>と同等強度となるため妥当と判断した。

## 6. 試験施工

### (1) 堤頂部耐震補強工事の流れ

ダム天端における補強工事の流れを図-12に示す。φ200mmのボーリング削工、孔内洗浄、セメントミルク充填、φ140mmの補強材挿入(写真-5)後、セメントミルクの2次充填が一連の作業となる。ダム天端への搬入・搬出路は右岸側のみでダム天端通路幅は5.0mと狭いため引き抜いたコアチューブ、組み立て後最大15m程度となる補強鋼材、吊り上げ設置する20t級ラフテレーンクレーンが常

時稼働しており作業ブロック内では補強材等を組立、仮置き出来るスペースは確保出来ないことから、補強材の組立工(写真-6)と挿入工他は並行作業とする。

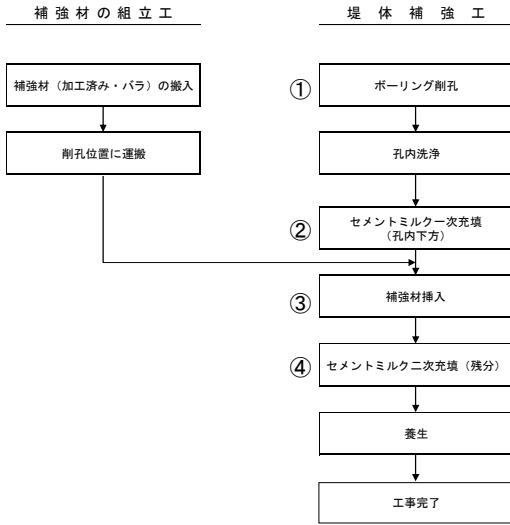


図-12 施工フロー図

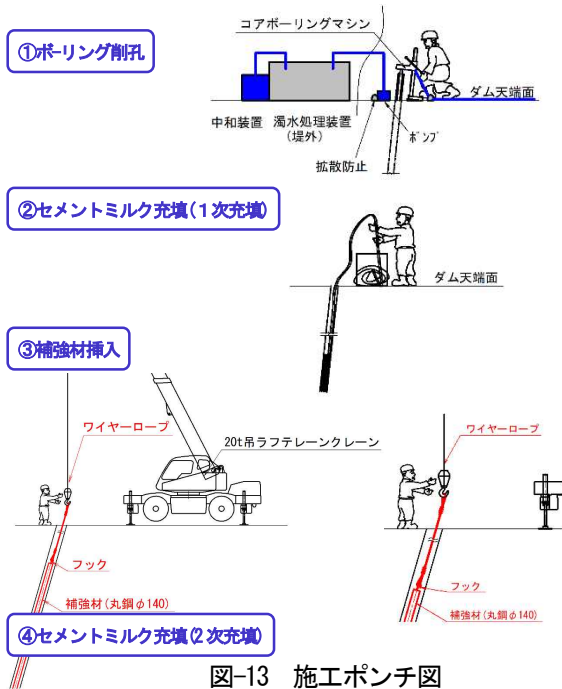


図-13 施工ポイント図

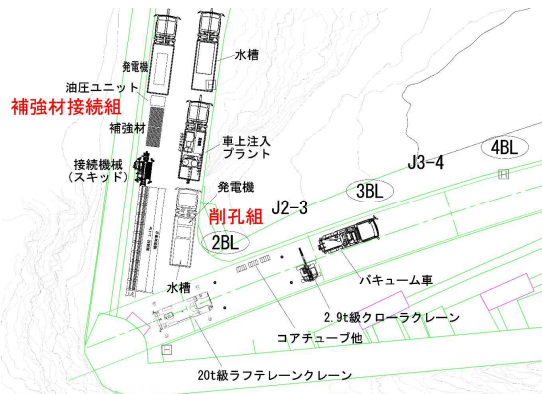


図-14 平面図



写真-5 補強鋼材挿入



写真-6 補強鋼材接続

## 7. 今後の課題

### (1) 令和4年度工事に向けての検討課題

令和3年度試験工事では狭小なダム天端における補強鋼材の接続・挿入までの取り扱い及び施工機械である20t級ラフテレーンクレーンの作業制約が明確となった。令和4年度試験工事では以下の条件をモニタリングする。

a) 複数ブロックの施工における、施工箇所の配置替えに伴う補強鋼材接続機械等の移設時間や錯綜効率及び施工能力を最終精査する。

b) 重機の配置が最も困難となる最端部ブロックでも、課題がないか確認。また、端部から端部までのBL間距離能力等の移動の確認。施工する際は右岸側のような天端侵入口は無いため、どのように重機を配置するのかを検証する。

### (2) 関連構造物の施工

豊平峡ダムの耐震性能照査は、損傷が想定される場合にダムの貯水機能が維持されない放流設備のゲートも対象としており、補強が必要とされている。補強工事は、非常用洪水吐ゲート、門柱全てが対象となる。ただし、非常用洪水吐ゲートならびに門柱の耐震補強も、非越流部ブロックと同様に資機材搬入ルートがダム右岸天端からとした施工となる。また、非洪水期の冬期間に施工することになるため、5門あるゲート施工手順の検討、防寒仮囲いの検討、補強工事実施中のゲート操作要領等の策定の検討を今後進める。

### 参考文献

- 1) 国土交通省河川局：大地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説
- 2) 今泉俊文、宮内崇裕、堤浩之、中田高 編：活断層詳細デジタルマップ[新編]，2018