

3.3 コンクリートダムの嵩上げと耐震性照査に関する基礎的検討

研究年度：令和4年度

研究分野：ダム構造・設計及び施工に関する調査研究

調査研究名：嵩上げ重力式コンクリートダムの施工計画及び耐震性照査に関する基礎的検討

研究者：安田成夫、間野 喬博

【要約】

本研究は、重要な社会基盤施設の一つであるコンクリートダムを対象として、堤体構造の物理特性を踏まえた地震時安定性の評価手法を開発するものである。1995年兵庫県南部地震を契機に、「大規模地震に対するダムの耐震性性能照査指針(案)」が策定され、令和3年に改訂された河川砂防技術基準によれば、既設ダムのみならずダムの新設または再生にあたっては耐震性能評価を行い損傷が限定的であることを確認することを基本としている。現在、既設ダムの耐震性能の評価は、当該ダムで記録された地震波を用いて弾性係数・減衰定数といった物理特性を同定して検討するが、当初想定との乖離している事例が少なからず存在する。耐震性能照査によりダムの安定性を合理的に説明するために、実際の物理特性を用いて評価する必要がある。

今回、嵩上げ重力式コンクリートダムを対象として新旧堤体の物理特性を当該ダムで記録された地震動によって同定し、得られた物理特性を用いて耐震性能照査を試みた。併せて、嵩上げ重力式コンクリートダムの新堤体に発生する応力と施工時水位の関係から、適切な施工計画を検討した。

【キーワード】重力式コンクリートダム、嵩上げ、地震記録

【背景・目的】

近年、計画規模を上回る異常豪雨の発生の増加や台風の大型化等により、大規模な水害が頻発している。2019年には国内の水害被害額が2兆1800億円¹⁾に達しており、今後さらに気候変動による水災害の頻発化・激甚化が予測されている。ダムはその流域における洪水調節効果が大きいものの、ダムサイトとしての適地が限られているのが現状である。このような背景から、既設ダムによる洪水調節能力の増強が求められており、いわゆるダム再生の必要性が高まっている。そのなかでも、ダムの嵩上げはダム再生の有効な手段の一つとなっている。

ダムの嵩上げには構造設計、施工などに関して技術課題が多くあり、特に地震多発地帯の我が国では嵩上げ中・後のダムの耐震安全性を慎重に検討する必要がある。土木研究所は、堤体嵩上げや放流管新設に伴う再開発(再生)ダム特有の構造的特徴を考慮したダムの耐震性能照査の方法や留意点について検討し、大規模地震時における嵩上げ重力式コンクリートダムの動的挙動とその推定方法を解析的に検討

表-1 新桂沢ダムの嵩上げ前後の諸元

項目	嵩上げ前	嵩上げ後
ダム所在地	北海道三笠市桂沢	
ダム形式	重力式コンクリートダム	
堤高	63.6 m	75.5 m
堤頂長	334.25 m	397.0 m
堤頂幅	5.5 m	5.5 m
天端標高	EL.188.6 m	EL. 200.5 m
法面勾配	上流： EL.153 以下 1:0.10 EL.153 以上 1:0.08 下流：1:0.77	上流： EL.153 以下 1:0.10 EL.153 以上 1:0.08 下流：1:0.88
体積	350,000 m ³	646,000 m ³
流域面積	298.7 km ²	298.7 km ²
総貯水量	92,700,000 m ³	147,300,000 m ³

した^{2),3),4)}。

本研究は、重力式コンクリートダムの同軸嵩上げ事例である新桂沢ダム(表-1にダムの嵩上げ前後の諸元を示す。)を検討対象として、以下の事項を検討した。

①完成から55年を経た既設ダム堤体コンクリートの力学的特性(弾性係数, 単位体積重量, 圧縮強度及び引張強度)をコア供試体による材料試験の結

果⁵⁾をまとめた上で、ダム地震時挙動の再現解析によりその結果を検証した。

- ②貯水池を運用しながら嵩上げの通年施工を想定し、施工時における貯水池の水位による新・旧堤体の発生応力への影響を明らかにするとともに、貯水池運用に適した嵩上げ施工の計画を提案した。
- ③地震記録の分析により嵩上げ前、中、後のダムの振動特性の変化を明らかにした。また、嵩上げ後のダムの地震時挙動の再現解析により新堤体コンクリートの弾性係数を推定した。
- ④想定したダムサイトのレベル2地震動に対して、嵩上げ前・後のダムの地震応答を解析し、嵩上げによるダムの耐震性能の変化及びその影響要因を明らかにした。

嵩上げ新堤体に発生する温度応力は重要な検討課題である。ただ、当該ダムの嵩上げ設計時に行われた解析検討⁵⁾により、温度応力対策と堤体に発生する引張りずみの関係が明らかにされており、本論文では言及しない。

【令和4年度の研究成果】

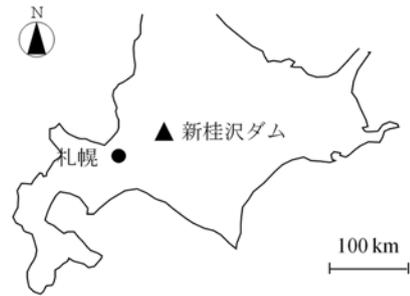
(1). 既設桂沢ダム堤体のコア採取調査結果の再検討

(1)-1 既設桂沢ダム及び嵩上げ工事概要

桂沢ダムは北海道初の多目的ダムとして1957年に竣工し、洪水調節のほか、利水の供給や水力発電を担ってきた。図-1(a)にダムの位置を示す。ダムの治水・利水機能の増強を目的として、既設ダムを同軸嵩上げ型式により再生し、2023年3月に嵩上げ工事が完了した。嵩上げ前、後のダムの断面図を図-1(b), (c)に示す。ダム高を11.9m嵩上げることにより貯水量が約1.6倍となった。

(1)-2 既設ダム堤体のコア供試体によるダムコンクリートの力学的特性の調査

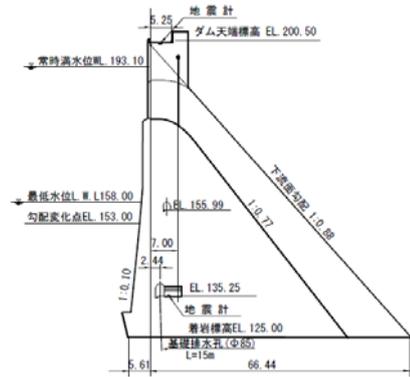
既設桂沢ダムの完成から55年が経て、長年の厳しい自然環境下におけるダムコンクリートの力学的特性を調査することは、ダムの嵩上げ設計のみならず、ダムの維持管理及び長期的な運用計画にとって有益であると考えられる。よって、本論文では、設計時



(a) 新桂沢ダムの位置

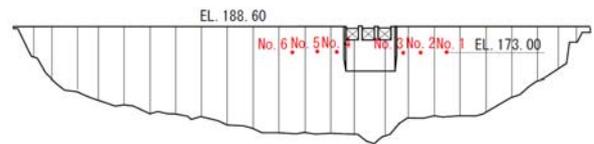


(b) 嵩上げ前の断面図

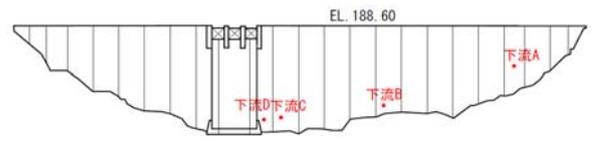


(c) 嵩上げ後の断面図

図-1 新桂沢ダムの位置及び嵩上げ前後の断面図



(a) 上流側



(b) 下流側

図-2 既設桂沢ダムにおけるコア供試体の採取位置

に実施した既設桂沢ダムのコア供試体を用いた材料試験結果をマクロ的に検証する。図-2にコア供試体

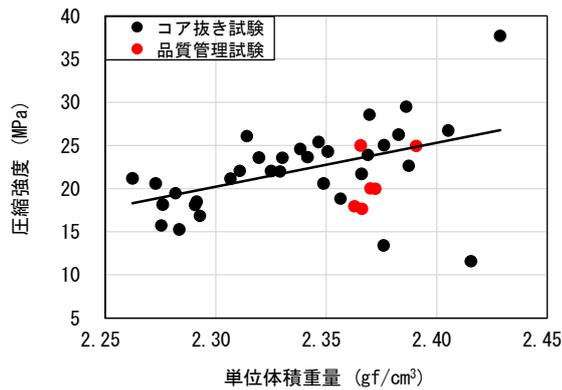


図-3 コア供試体及び品質管理試験によるコンクリートの単位体積重量と圧縮強度の関係

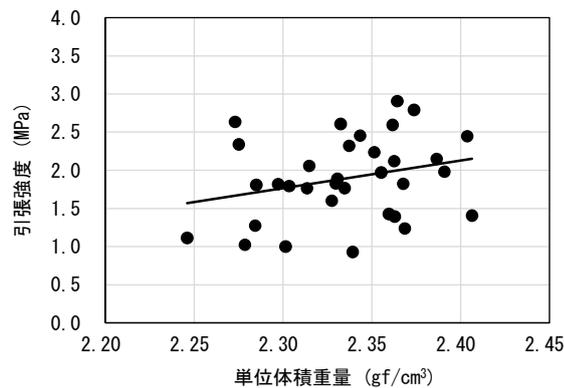


図-4 コア供試体によるコンクリートの単位体積重量と引張強度の関係

の採取位置を示す。上流側の No. 1 - No. 6 及び下流側の B 位置においては外部コンクリート，下流側の A, C, D 位置においては，外部及び内部コンクリートのコア供試体を採取した。本論文で外部及び内部コンクリートの分布を考慮した物性を用いて，ダムの地震時挙動の再現解析によりコア供試体の試験結果を検証した。

(1)-2-1 ダムコンクリートの圧縮強度と引張強度

異なる配合，深さ位置で採取したコア供試体を用いて，一軸圧縮試験を行った。単位体積重量を単一相関パラメータとして，既設ダムコンクリートの圧縮強度との関係を図-3 に示す。図示の関係からコア供試体の圧縮強度はコンクリートの単位体積重量の増大につれて高くなることと，両者の間にバラツキがあるものの比較的良好な相関関係が認められた。また，同図に旧堤体建設時のコンクリートの品質管理試験（材齢 91 日）で得られた圧縮強度の試験結果を併記する。この比較により全体としてコア供試体

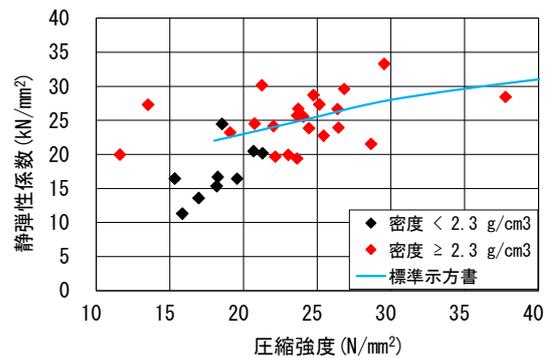


図-5 コンクリートの弾性係数と圧縮強度の関係

の圧縮強度が旧堤体建設時の品質管理試験の結果と同程度かそれ以上であることが分かる。

一方，採取したコア供試体を用いた割裂引張強度試験の結果を単位体積重量との関係として図-4 に示す。圧縮試験の結果よりもバラツキが大きく現れているが，総じて引張強度が単位体積重量の増大とともにやや大きくなることが分かる。

また，その近似直線と圧縮強度のそれとを比べると，引張強度が圧縮強度の 1/10～1/13 の範囲となっている。

(1)-2-2 ダムコンクリートの弾性係数

前節のコア供試体の一軸圧縮試験において，その応力-ひずみ曲線の初期の接線勾配をコンクリートの静弾性係数とする。こうして得られた静弾性係数と同供試体の圧縮強度の関係を整理すると，図-5 に示す結果となる。ダムコンクリートではないが，同図にコンクリート標準示方書（設計編）に示されている全国での調査結果を平均した圧縮強度と静弾性係数の相関関係と比較する。コア供試体の試験結果にバラツキがあるものの，単位体積重量が 2.3gf/cm³ 以上であれば普通のコンクリートと同程度の弾性係数が維持されており，55 年も経たコンクリートでも，弾性係数は劣化しないことが分かる。また，単位体積重量 2.3gf/cm³ 以下のコア供試体はダムの内部から採取されたもので，平均値として 15kN/mm² 以上の静弾性係数を有していることが分かる。また，桂沢ダムと同様な骨材を用いた近隣のダムの堤体から採取したコア供試体を用いて，静弾性係数試験と動弾

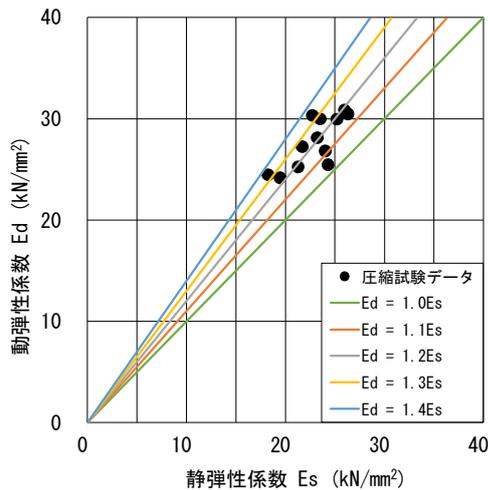


図-6 動弾性係数と静弾性係数の関係

性係数試験を実施した結果を図-6に示す。この図より動弾性係数が静弾性係数の1.0-1.4倍であり、平均値として1.22倍であることが分かる。なお、既設桂沢ダムの基礎岩盤は、砂岩・泥岩互層、シルト岩、細粒砂岩から構成される。河床部の岩級区分は、全般的にはCHmd級岩盤に分類され、弾性波速度は、地表付近を除いて、着岩面からの深さ約10mで3.8-3.9 km/sが得られている。上記のコア供試体を用いた材料試験により、竣工後55年経過した桂沢ダムのコンクリートの圧縮強度、引張強度及び弾性係数を明らかにした。これによりダムの耐震性能照査に必要なデータが得られた。

(1)-3 既設ダムの地震時挙動の再現解析によりコア供試体の試験結果の検証

ダムの地震時挙動の観測と再現解析は一種の非破壊検査と位置付けられ、再現解析を通じてダムコンクリートの物理特性及びダムの振動特性を把握することが可能と考える。前述したコア供試体の試験結果を検証し、ダムの地震時挙動を明らかにするため、既設桂沢ダムの地震観測結果を基に、ダムの地震時挙動の再現解析を実施した。再現解析は、既設ダムの地震計の設置断面(図-1(b))を2次元モデル化し、図-7に示すダム-基礎岩盤-貯水池の連成モデルを用いて実施した。再現解析の対象地震は、加速度振幅の比較的大きい2003年9月26日(06:08)の十勝沖地震の余震とした。地震時水位は171.18mであったため、解析にもこの貯水位に対応する貯水池を

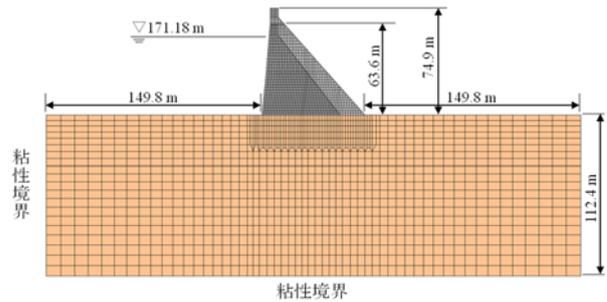


図-7 地震時挙動の再現解析用モデル

有限差分法により模擬した。ダム及び基礎岩盤の振動による散乱波の逸散及び解析モデルに対する周辺地山の振動の影響を考慮するために、基礎岩盤モデルの底面及び側方境界で粘性境界条件⁶⁾を用いた。貯水池の上流端では波動エネルギーの完全吸収境界条件⁷⁾を適用し、貯水池の底部では部分反射条件⁷⁾(貯水池底部の堆積物と水のインピーダンス比1.5)を設定した。貯水池の表面では表面重力波の影響を考慮した。再現解析に用いるダムコンクリートの弾性係数は、コア供試体の平均単位体積重量が2.3 gf/cm³であるため、図-3及び図-5によりダムコンクリートの静弾性係数が23kN/mm²であると推定した。さらに、図-6により動弾性係数は静弾性係数の1.22倍として28.06kN/mm²と設定した。この値を動弾性係数の初期値として設定し、解析の再現性を向上させるために調整した。解析における入力地震動は、下部地震計位置の地震記録を基礎岩盤モデル底面に引き戻すことにより作成した。解析の再現性は、地震記録と解析による加速度、フーリエスペクトル及びその伝達関数の比較により判断した。なお、本再現解析にダム解析専用プログラム“UNIVERSE”⁸⁾を用い、線形解析として行った。再現解析の結果として表-2に示す物性を用いた場合、上部監査廊の地震計位置での地震記録が最もよく再現された。図-8にその加速度時刻歴、図-9にその加速度のフーリエスペクトル及び下部地震計位置との間の伝達関数を示す。同定したダムコンクリートの動弾性係数は36.48kN/mm²であり、初期値28.06kN/mm²と比べ約3割増であった。この差は二つの要因によると考えられる。第一に弾性係数の設定根拠であるコア供試体の材料試験は一軸圧縮試験であるが、実ダムにおけるコンクリートが三軸圧縮状態にあり、拘束圧によ

表-2 桂沢ダム地震再現解析により同定した物性値

区分	動弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	密度(gf/cm ³)	減衰
ダムコンクリート	36.480 堤体コアの試験結果を基に、動弾性係数として 1.22 倍に、さらにダム内部の拘束圧依存性及び両岸地山の拘束効果を考慮するために、3割増	0.2 一般値	2.3 堤体コアの試験結果	2.0% 地震記録から推定した平均値を微調整
基礎岩盤	26.300 Vsの計測値による換算値	0.3 一般値	2.45 岩石試験の平均値	3.0% 類似岩盤の実績値

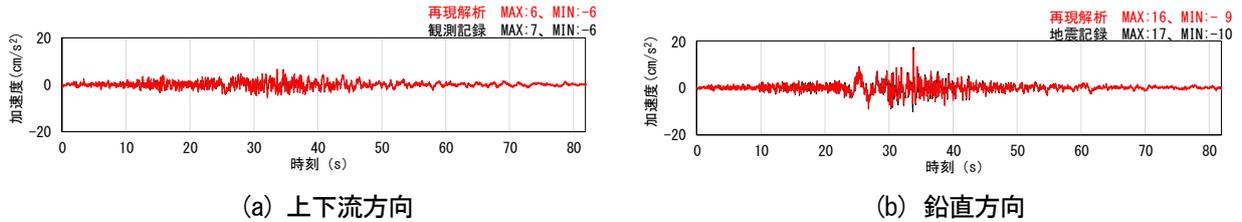


図-8 上部地震計位置の加速度応答の比較

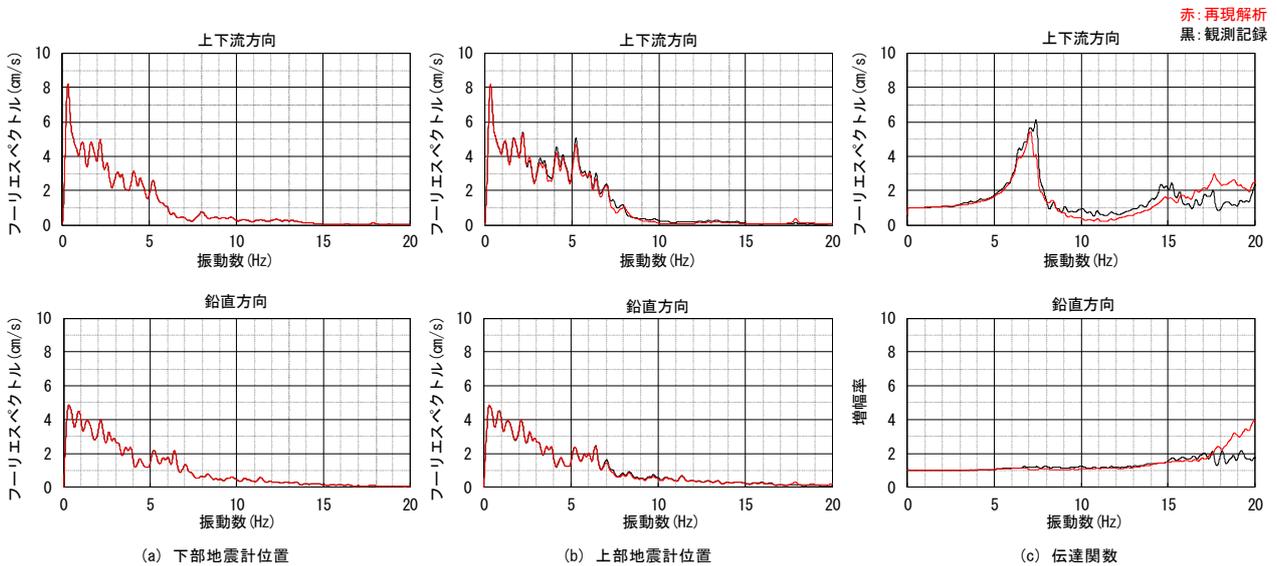


図-9 嵩上げ前の地震時挙動の再現解析による加速度のフーリエスペクトル及び伝達関数の比較

る弾性係数の増大が考えられる。第二に、解析はほぼ最大断面の二次元断面モデルを用いて行ったが、実ダムはダム軸方向に断面の高さが低くなり、それに伴う地山の拘束効果により、見かけの剛性が大きくなると考えられる。これらの要因を考慮すれば、再現解析により同定したダムコンクリートの弾性係数は前述したコア供試体を用いた材料試験の結果と概ね一致すると判断できる。

(2). 貯水池運用中の嵩上げ施工計画の最適化検討

重力式コンクリートダムの同軸嵩上げには、貯水池運用との協調、コンクリートの温度応力、完成後のダムの耐震性の確保などいくつか留意する事項が

あるが、本研究ではこのうちの嵩上げ施工中の貯水池運用との協調及び嵩上げ後のダムの耐震性の確保(次章)に着目して検討を行う。

既存ダムの現有機能を維持しながらの、ダムの嵩上げは一般的である。静水圧を受けて既設ダムが変形し、既設ダム内部で応力が発生する。この状態で新設堤体のコンクリートが打設され、新設堤体では自身の自重による応力が発生するが、既設ダムには自身及び新設堤体の自重による応力と静水圧による応力が生じる。また、嵩上げ施工後貯水位が低下した場合、既設ダムが新設堤体に拘束され、本来の湛水前の状態には戻らない。新・旧堤体の間に内力が発生し、一定の応力が残留する。本章では、嵩上げ

施工時の貯水位条件に着目して、嵩上げ後のダム堤体の応力に対する影響を明らかにし、特に貯水池の通年運用に対して新旧堤体の境界、新堤体底面に過度な応力の発生を抑制する施工手順を検討する。そのため、既設ダムの施工時最低水位、常時満水位及び変動水位条件を設定して、それぞれの条件における嵩上げ施工を新堤体の逐次嵩上げにより解析する。結果的に嵩上げ後の貯水位が下がった段階で、ダム堤体内の応力状態が最も安定的になるような嵩上げ施工手順を検討する。

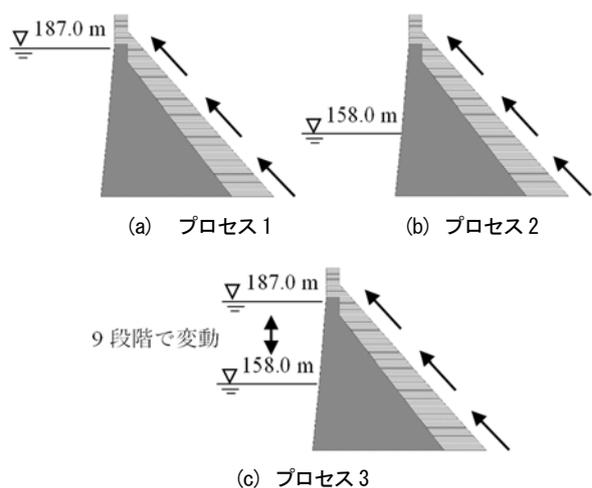


図-10 嵩上げ施工イメージ及び想定した水位条件

(2)-1 解析条件

既設桂沢ダムの標準断面及び新設堤体を対象として作成した二次元モデルのダム堤体部分を図-10に示す。そのうち、新設堤体を24ステップに分けて逐次嵩上げ施工を行う。基礎岩盤の底面は固定として、側方境界は鉛直ローラーとする。図-11に嵩上げ施工及び貯水位変動を想定した解析プロセスを示す。プロセス1及びプロセス2は、それぞれ旧常時満水位及び施工時最低水位状態での嵩上げ施工を想定するが、プロセス3においては貯水池の通年運用状態、即ち、貯水位の変動状態における嵩上げ施工を想定する。具体的には、嵩上げ施工中に水位が単調に上がる事、単調に下がる事、前半に下がり後半に上がる事及び前半に上がり後半に下がる事を想定し、各プロセスにより嵩上げの完成後に、新常時満水位までの湛水解析及び施工時最低水位に下げた時のダムの応力解析を行い、結果を比較した。解析にはダムの解析専用プログラム“UNIVERSE”を使用した。

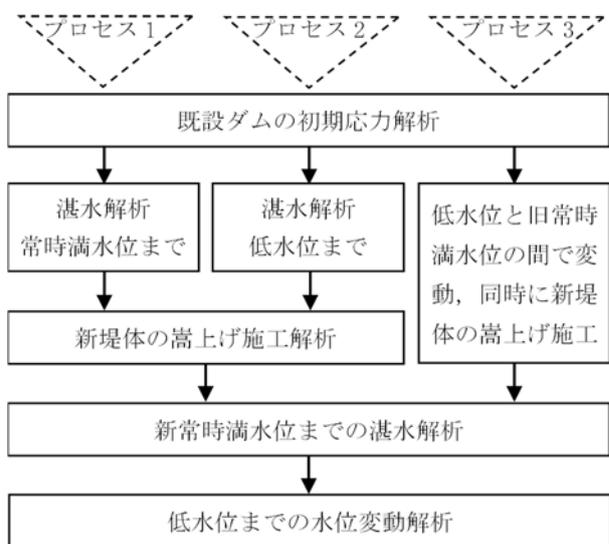


図-11 嵩上げ施工プロセス検討

(2)-1-1 施工時の貯水位条件

施工時最低水位： 158.0 m

旧常時満水位： 187.0 m

施工時最低水位と旧常時満水位の間に9水位で変動

(2)-1-2 ダムの物性条件 (線形)

既設ダムと新設堤体のコンクリートの物理特性は共にコア供試体の試験結果を基に設定し、基礎岩盤の物理特性は岩石試験の結果などを参考に設定した。

表-3 桂沢ダムの嵩上げ施工解析に用いる物理特性

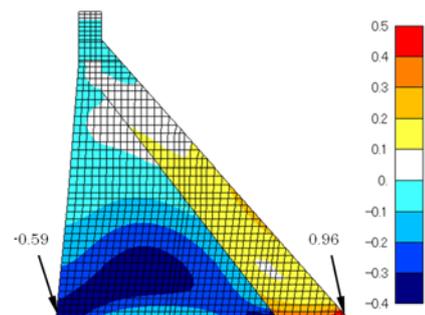
区分	静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	密度 (gf/cm ³)
ダム(新・旧)コンクリート	23.000 堤体コアの試験結果	0.2 一般値	2.3 堤体コアの試験結果
基礎岩盤	14.040 原位置の試験結果	0.3 一般値	2.45 岩石試験の平均値

表-3に解析用物理特性をまとめる。

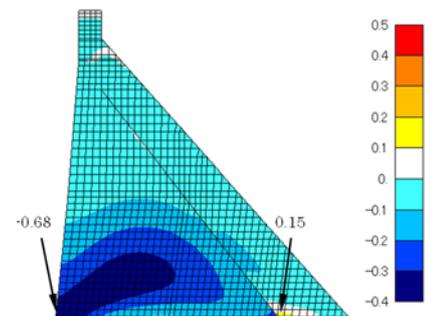
(2)-2 解析結果及び考察

解析により各プロセスにおけるダム堤体で発生する応力を求めた。図-12に嵩上げ後に貯水が施工時最低水位に下がった時点でダム堤体に発生する最大主応力(引張側)を示す。プロセス1において、つ

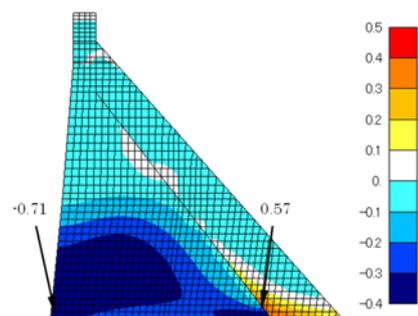
まり旧常時満水位状態で嵩上げをした場合、貯水位降下により天端付近を除いて新設堤体のほぼ全域に引張応力が発生する。標高が低いほど引張応力の値が大きく、下流面底部で最大 1MPa 弱になっている。これに対して、プロセス 2 においては、つまり施工時最低水位状態で嵩上げをした場合、竣工直後のダム堤体の応力は全体的に圧縮側となっている。しかし、前述した通り、新設堤体の嵩上げは貯水池の通常運用状態で行うため、施工中に常に施工時最低水位状態に保つことは現実的ではない。そこで、貯水位の変動に伴う嵩上げを模擬し、その解析結果を比較した。その結果、標高の高い位置（既設ダムの約 1/2 高さより旧天端まで）の新設堤体をできるだけ低い貯水位状態で施工することは重要なコントロールポイントであることがわかった。換言すれば、低標高の新設堤体は高水位における施工であっても新堤体の応力状態への影響は少ない。また、既設ダムの天端より高い位置の新設堤体に発生する応力は貯水位に影響されない。貯水位が単調に旧常時満水位から施工時最低水位に降下する（9 段階で）とともに、新設堤体が下層から天端へ逐次打設（24 層で）される場合、完成後のダムの最大主応力は図-12(c)となる。新設堤体底部で引張応力が発生するが、プロセス 1 より大幅に緩和され、プロセス 2 の結果に近付いている。また、プロセス 1 とプロセス 3 による最大主応力の差分は、図-13 になる。この図は、貯水池運用（貯水位調節）に合わせて嵩上げを計画すれば、ダム堤体に発生するこの程度の引張応力を避けることが可能であることを示唆している。以上のことにより、ダムの嵩上げは、可能な限り低い水位状態で施工することが推奨される。また、貯水池を通常運用しながら嵩上げ施工を行う場合は、図-14 に示す通り、施工標高の低い位置（L 区：既設ダムの堤高の約 1/2 まで）では貯水位の高い状態においても打設したコンクリートの内部応力への水位の影響は小さい。しかし、標高の高い位置（H 区：既設ダムの堤高の約 1/2 より天端まで）のコンクリート打設は可能な限り貯水位の低い時期に実施することが望ましい。一方、既設ダムの天端より高い位置（T 区）のコンクリート打設となる新堤体はいかなる水位で



(a) 旧常時満水位状態で嵩上げ施工（プロセス 1）



(b) 低水位状態で嵩上げ施工（プロセス 2）



(c) 貯水位変動に適した嵩上げ施工（プロセス 3）

図-12 嵩上げ後貯水が施工時最低水位に下がった時の最大主応力

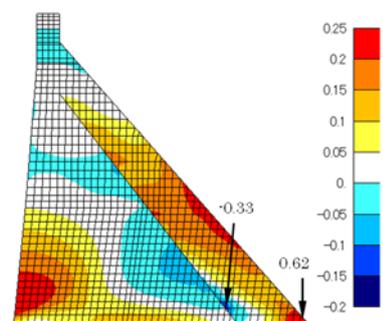


図-13 嵩上げ後貯水が施工時最低水位に下がった時の主応力差分（プロセス 1ープロセス 3）

も大きな影響はない。このような嵩上げの施工計画とすれば嵩上げ終了後のダム堤体に対して、貯水位の変動による引張応力の低減が可能となる。

(2)-3 新桂沢ダムの高上げ実績

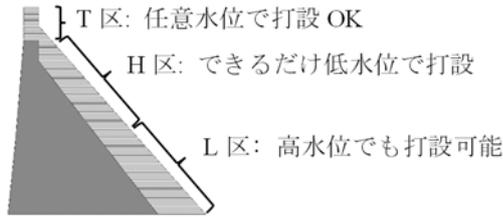


図-14 嵩上げ施工の計画の推奨案

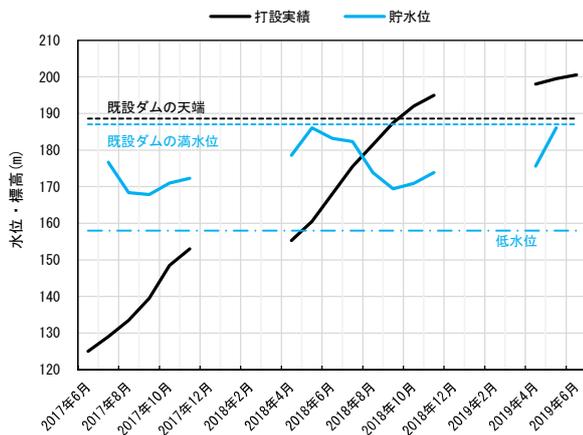


図-15 新桂沢ダムの高上げ実績と貯水位

新桂沢ダムの高上げ施工実績と施工中の貯水位を図-15に示す。標高 170m 以上の既設ダム天端 (EL. 188.6 m) までの高い位置での新堤体コンクリート打設は、貯水位が 182 m から 170 m へ降下する時期であった。2019 年 4 月以降は、貯水位は高いものの、新堤体のコンクリート打設は、既設ダムの天端より高標高であったので、貯水の影響は殆ど受けない。

以上から、新桂沢ダムの高上げ施工時貯水によるダムの応力への影響は限定的であると推測できる。

(3). 嵩上げ後のダムの地震時挙動及び再現解析

新桂沢ダムの高上げ竣工後、多数の地震が観測された。嵩上げ施工の前・中・後のダムの地震時挙動を分析することにより、ダムの振動特性の変化を把握することが可能である。

(3)-1 嵩上げ前後のダム堤体の振動特性の変化

ダムの地震加速度記録（地震計の位置は前出の図-1 参照）を用いて、そのフーリエスペクトル及び伝達関数を求めた。伝達関数の 1 次ピークに対応する振動数がダム堤体の 1 次固有振動数であると考えられる。

図-16 に嵩上げ施工前、施工中及び施工後の地震観

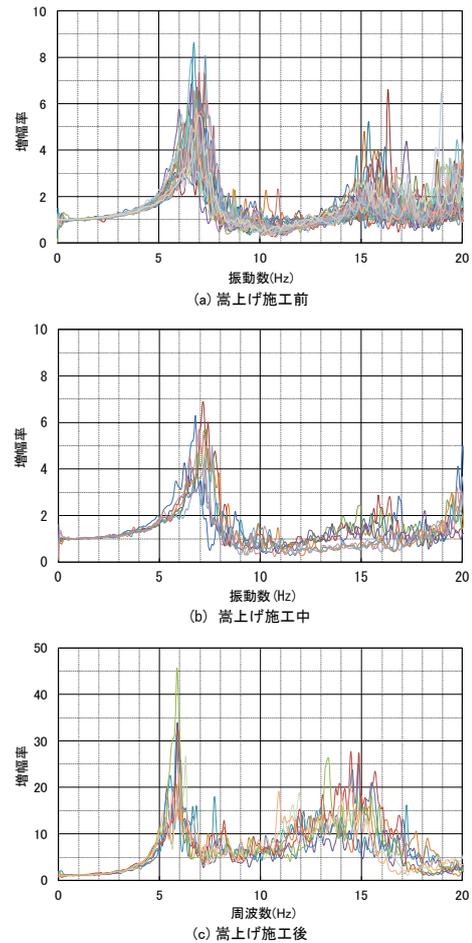


図-16 嵩上げ施工前後の上下地震計の間の伝達関数

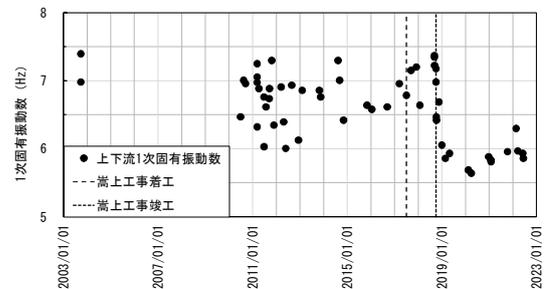


図-17 上下流方向の 1 次固有振動数の変化

測データから得られた堤体下部地震計と堤体上部監査廊地震計間の上下流方向の伝達関数を示す。ただし、上部監査廊地震計は嵩上げ竣工後、新堤体天端に移動した。また、図-16により読み取ったダム堤体上下流方向の 1 次固有振動数を時系列で整理すると図-17に示す変化が見られる。バラツキがあるものの、嵩上げ施工前と比べ、嵩上げ施工後はダムの 1 次固有振動数が明らかに低下している。これは嵩上げ施工後にダム底面幅が大きくなり、下流面勾配

も緩くなっているものの、ダム高が高くなったことによる影響と考えられる。一方、嵩上げ施工中にダムの1次固有振動数が施工前よりもやや高くなっており、これは嵩上げ施工中の殆どの時期にダム高が変わらないことに比して、既設ダムの下流側に新設堤体が付加されることによりダム全体の剛性が高くなったと推測される。以上から、嵩上げの施工中、嵩上げ後にダムの振動特性が変化したことが分かる。このような変化がダムの耐震性能に対してどのような影響を与えるかを次節で検討した。すなわち嵩上げ後のダムの地震時挙動の再現解析を実施した上で、想定したレベル2地震動に対するダムの耐震性能を照査した。さらに嵩上げ前後のダムの耐震性能の変化を考察した。

(3)-2 嵩上げ後の地震時挙動の再現解析

嵩上げ竣工後、既設ダムの上部監査廊に設置されていた地震計を新設ダムの天端に変更設置した(図-1(c)参照)。2021年1月27日に北海道胆振地方中東部でM5.4の地震が発生し、新桂沢ダムでこの地震を記録した。新設堤体のコンクリートの物性を同定し、嵩上げ後のダムの振動特性を把握するために、この地震で観測されたダムの地震時挙動を再現解析した。

(3)-2-1 再現解析条件

再現解析に使用するモデルは前出の図-7であるが、地震時水位がEL.179.7mであったため、再現解析における貯水位とした。ダムと基礎岩盤は線形弾性体として、ダム-基礎岩盤-貯水池の連成解析とした。解析モデルの物理特性について、既設ダム及び基礎岩盤は嵩上げ前の地震時挙動の再現解析により同定したもの(表-2に示す)を用い、新設堤体は既設ダムと同じ物理特性を初期値として使用し、解析の再現性を向上させるために微調整した。調整結果として、観測されたダムの地震時挙動が最もよく再現された時の新堤体コンクリートの弾性係数は 30kN/mm^2 、減衰比は1.0%である。表-2に示す既設ダムのコンクリートと比べて弾性係数は約18%低くなっている。これは新堤体コンクリートの材齢が旧堤体に比べて若く、力学性能がまだ十分に発揮されて

いないと推測される。同定した新堤体のコンクリートの減衰比が既設ダムコンクリートの2.0%より低いが、その差はバラツキ範囲と考える。解析モデルにおける基礎岩盤及び貯水池の境界条件は嵩上げ前の地震時挙動の再現解析に用いたものである。

解析における入力地震動は、地震時下部地震計位置での加速度記録を解析モデルの基礎岩盤の底面まで引き戻すことにより作成した。解析の再現性は地震記録と解析による加速度、フーリエスペクトル及びその伝達関数の比較により判断した。

(3)-2-2 再現解析結果

解析により得られたダム天端地震計位置の加速度応答時刻歴を図-18に示す。同図に地震時の加速度記録を示すが、天端の加速度最大値及び加速度波形が概ね再現されたことが分かる。また、図-19に下部地震計位置と天端地震計位置の加速度のフーリエスペクトル及びその伝達関数を示す。これらの図からも解析によりダムの地震時挙動がよく再現されたと判断できる。伝達関数の17Hz以上の周波数範囲では解析と観測結果の差が比較的大きいが、高周波数範囲は、ダム地震応答の評価には重きをなさないと考えられる。ダムの地震時挙動がよく再現されたことで、既設ダムの弾性係数及び減衰比を再び検証した上で、新堤体コンクリートの弾性係数及び減衰比が同定されたと判断される。材齢が進むにつれて、コンクリートの強度及び弾性係数がある程度高くなり、長期的には、新堤体コンクリートが既設ダムコンクリートと等価な性質になると推察される。一方、解析モデルの同定により、次章以降のレベル2地震動に対するダムの耐震性能照査に必要な条件が整理された。

(4) 嵩上げ前後のダムの耐震性能の変化

レベル2地震動に対する既設ダムと嵩上げ後のダムの耐震性能の変化を明らかにし、ダムの耐震安全性の視点から嵩上げ設計及び施工における留意点を明確にする。検討は、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説」⁹⁾に規定された方法で行う。嵩上げ前・後の地震時挙動の再現解析により

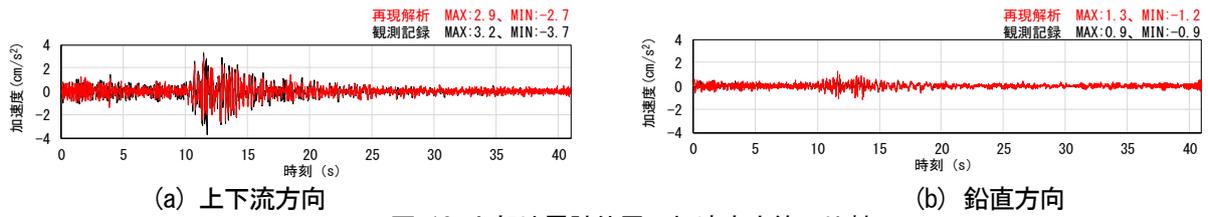


図-18 上部地震計位置の加速度応答の比較

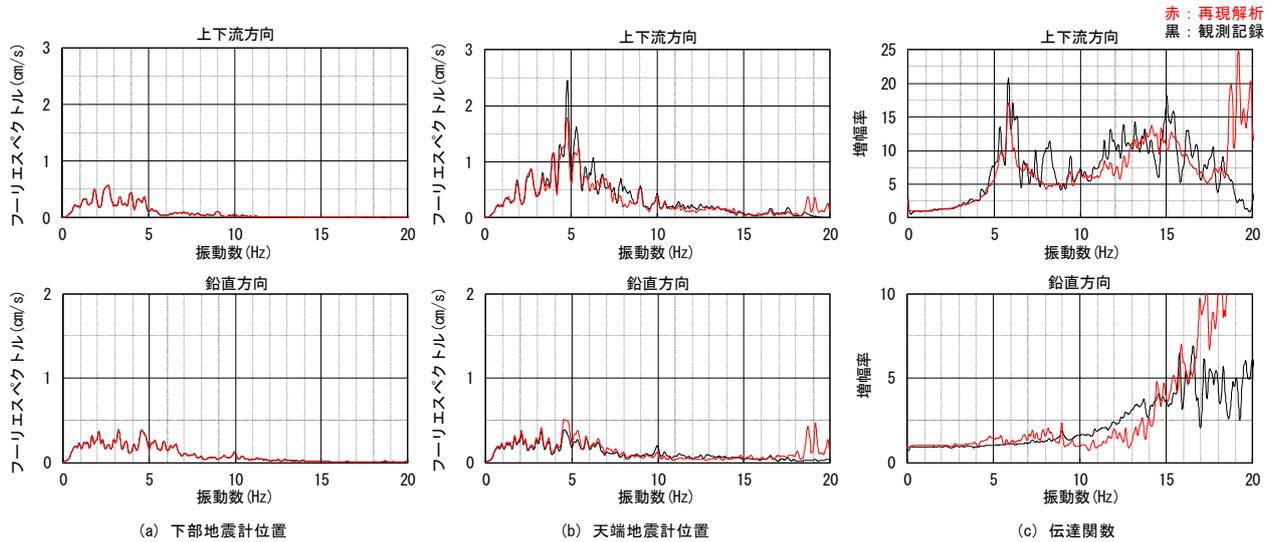


図-19 嵩上げ後の地震時挙動の再現解析による加速度のフーリエスペクトル及び伝達関数の比較

同定したそれぞれの解析モデルを用い、想定した同一のレベル2地震動に対して地震応答解析を行う。解析結果を基に、嵩上げ前・後のダム堤体の内的安定性及び岩着部における外的安定性を比較する。

(4)-1 解析条件

(4)-1-1 解析モデル

(1)-3 節の嵩上げ前のダムの地震時挙動の再現解析により同定した解析モデル（基礎岩盤及び貯水池の境界条件等を含む）と(3)-2 節の嵩上げ後のダムの地震時挙動の再現解析により同定した解析モデルの両方を用いた。但し、貯水位は、それぞれ嵩上げ前・後の常時満水位とした。ダムの安定性を評価する際に必要となる岩着部の応力を精度よく計算するために、ダム堤体と基礎岩盤の間に接触面要素¹⁰⁾を用い、岩着面での応力集中を再現した。

(4)-1-2 物理特性

地震時挙動の再現解析で同定したダム及び基礎岩盤の弾性係数、密度、ポアソン比をそのまま適用し、線形弾性解析を行った。しかし、レベル2地震動を

想定するため、ダムコンクリートの減衰比を5%、レイリー型減衰として設定した。レベル2地震動に対する地震応答解析に用いる物理特性を表-4に示す。ダムの内的安定性評価に用いるコンクリートの引張強度は、前出の旧堤体コア供試体の試験結果(図-4参照)を基に、静的引張強度を1.75 N/mm²と設定する。動的引張強度は静的引張強度の1.4倍であると関連研究¹¹⁾に示されているが、本研究では安全側の評価になるよう、動的引張強度を静的引張強度の1.2倍として2.1 N/mm²と設定した。ダムコンクリートの圧縮強度は、コア供試体の圧縮試験結果(図-3参照)を引用した。外的安定性、即ち、岩着部におけるダム堤体の安定性照査に必要な強度パラメータは、基礎岩盤の材料試験の平均値を使用し、せん断強度は1.63 N/mm²、せん断抵抗角は48°とした。

(4)-1-3 想定したレベル2地震動

ダムサイト近傍の石狩低地東縁断層帯の活動による地震(M7.9、断層面中心深さ15.5 km)を想定して、等価震源距離式(H20年式、距離22.9 km)にダムサイトの地震動の加速度応答スペクトル(図-20)

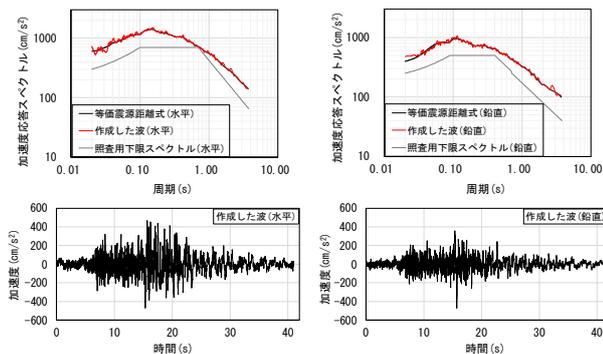


図-20 想定したダム底部の入力地震動

表-4 レベル2地震動の応答解析に用いる物性値

区分	動弾性係数 (kN/mm ²)	密度 (g/cm ³)	ポアソン 比	減衰比
既設ダム	36.480	2.30	0.2	5%
嵩上げ堤体	30.000			
基礎岩盤	26.300	2.45	0.3	3%

を推定した。北海道胆振東部地震時（M6.7、2018/09/06）、既設桂沢ダムの下部監査廊での地震記録を原種波形としてダム底部の地震動を作成した。図-20 に作成した波の加速度波形及び加速度応答スペクトルを示す。作成した波の最大加速度値は水平方向 468 cm/s²と鉛直方向 469 cm/s²であり、加速度の最大値及び加速度応答スペクトル共に振幅が非常に大きくなっている。これらの地震波をダム底面より解析モデル底面（図-7）まで引き戻して、上下流方向と鉛直方向同時に入力加振した。

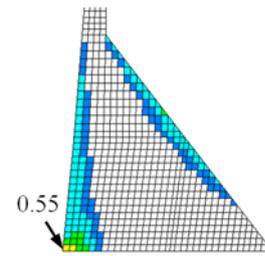
(4)-2 解析結果及びダム耐震性能照査

(4)-2-1 内的安定性の比較

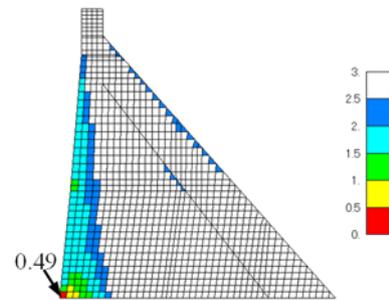
嵩上げ前・後のそれぞれの常時満水位条件で、同一のレベル2地震動を受けた時のダム堤体の主応力を求めた。引張強度と最大主応力（引張側） σ_1 の比を引張安全率、圧縮強度と最小主応力（圧縮側） σ_3 の比を圧縮安全率とし、せん断安全率 F'_s は式(1)により求めた。

$$F'_s = \frac{\tau_c + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \tan\phi_c}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \quad (1)$$

ここに、 τ_c はコンクリートのせん断強度、 ϕ_c はコンクリートのせん断抵抗角である。



(a) 嵩上げ前



(b) 嵩上げ後

図-21 要素毎の引張安全率の比較

このうち、要素毎の引張安全率が最も厳しくなるが、その嵩上げ前・後の分布を図-21 で比較する。嵩上げ前と比べて嵩上げ後の上流面底部の引張安全率が 0.55 から 0.49 に僅かに下がったが 1.0 を下回る範囲は何れも限られている。ダムの耐震性能照査指針では、クラック進展解析などの損傷を考慮した解析手法により、さらなる詳細な検討が必要となる。ここでは嵩上げ前・後のダムの安定性を比較する目的で、線形解析の結果の比較に留める。一方、図-21 から嵩上げ後のダム下流面の引張安全率は安全側になっていることが分かる。これは嵩上げ後、ダムの下流面の勾配が緩やかに（嵩上げ前の 1:0.77 から 1:0.88 に）なったことの効果と推測される。総じて、同一のレベル2地震動に対して、嵩上げ後のダム上流面底部の安全率が僅かに下がった。一方で下流面の安全率が上昇したが、嵩上げ前・後のダムの内的安定性に大きな変化はなかった。

(4)-2-2 外的安定性の比較

外的安定性は、地震時ダムの岩着面で時々刻々に発生する鉛直応力及びせん断応力を用いて、ダム底面の反力圧縮条件（転倒に対する安定性の確認）及び滑動安定性の2項目で評価した。

底面反力圧縮条件は、ダム岩着面のせん断力が最大となる瞬間の鉛直応力（揚圧力を考慮）の分布をチェックすることにより評価した。揚圧力係数は、上流端では1.0、基礎排水孔（図-1参照）では0.2、下流側水位は無いとした。嵩上げ前・後の条件で得られた岩着部の鉛直応力分布をそれぞれ図-22(a)及び図-22(b)の上段に示す。嵩上げ前では、上流端からダムの底面幅の約1/4までが引張応力の範囲であった。嵩上げ後ダム底面の引張応力の範囲は上流端より新堤体を含めたダム底面幅の1/7以下に縮小した。一方、ダム底面の滑動安定性は、式(2)により計算した滑動安全率 F_s を用いて評価した。

$$F_s(t) = \frac{\sum [\tau_0 + (\sigma_{ni}(t) - u_i) \tan \phi] l_i}{\sum \tau_i(t) l_i} \quad (2)$$

ここに、 τ_0 は基礎岩盤のせん断強度であり、 ϕ はせん断抵抗角である。 $\sigma_{ni}(t)$ と $\tau_i(t)$ は、それぞれ岩着面をモデル化する接触面要素 i の鉛直応力とせん断応力である。 u_i は揚圧力であり、 l_i は接触面要素 i の上下流方向の長さである。但し、 $\sigma_{ni}(t) - u_i$ が引張状態となる時刻ではその要素の抵抗力への寄与がないので算入しないこととした。式(2)により算出したダム底面の滑動安全率は、図-22(a)及び図-22(b)の下段に示す。嵩上げ前・後の最小滑動安全率はそれぞれ3.23と3.25であった。最小値こそ大きく変化しなかったが、滑動安全率の時刻歴を比べると、多くの時間帯で嵩上げ後の方がより安定的であることが分かる。また、レベル2地震動に対する滑動安全率の要求は1.0であるため、嵩上げ前・後共にレベル2地震動を受けても岩着部の滑動安定性に十分な余裕があることは明らかである。以上のことから、設定したレベル2地震動に対して、新桂沢ダムが嵩上げ前よりも安定的であると判断できる。要因として、ダム底面幅の増大と、より緩やかな下流面勾配が寄与していると考えられる。

(5). まとめ

本研究により以下のことを明らかにした。

1) 完成から55年を経たダムコンクリートのコア供

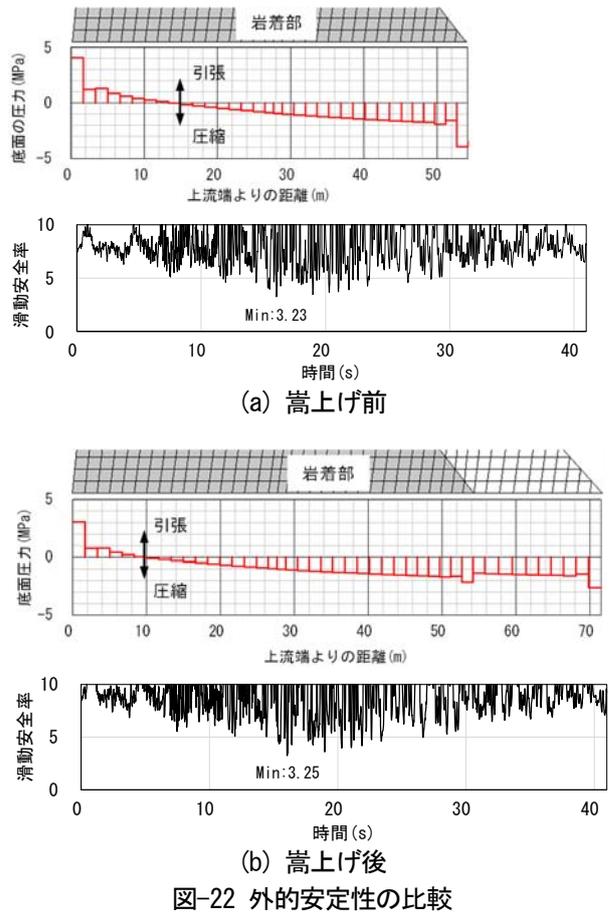


図-22 外的安定性の比較

試体による材料試験結果の再検討により現状のコンクリートの力学的特性を明らかにした。また、試験結果よりダムコンクリートの引張強度、圧縮強度及び弾性係数との関係、さらに静弾性係数と動弾性係数との関係が明らかになった。なお、弾性係数などの試験結果がダムの地震時挙動の再現解析により検証された。

2) 既設ダムの初期応力解析、湛水解析及び嵩上げ施工のシミュレーションにより、嵩上げ施工時の貯水位条件による完成後のダムの応力への影響を明らかにした。高い貯水位条件における嵩上げ施工は完成後のダムに応力が残留することを指摘し、可能な限り低い貯水位での嵩上げ施工が有利であることを確認した。貯水池の通年運用ながらの嵩上げ施工の場合は、標高の比較的高い位置のコンクリート打設は貯水位が比較的低い時期に計画することが理想的であることが分かった。

3) 嵩上げ後のダムの地震時挙動の再現解析を実施し、既設ダムの物理特性を再度検証した上で、新堤体コンクリートの弾性係数及び減衰比を同定した。その

結果を基に、嵩上げ堤体コンクリートの力学的特性が材齢の若いために旧堤体に比べて十分に発揮されていないことを指摘した。

4) 想定したダムサイトのレベル2地震動に対して嵩上げ後の新桂沢ダムは既設ダムと比べ、上流面底部の局所的な安全率がやや低くなったものの、ダム全体の安定性がより高く、岩着部の外的安定性もより向上している。これは嵩上げ堤体底面幅が広くなり、下流面の勾配がより緩やかになったことに起因していると考えられる。

【謝辞】

本研究に関して、北海道開発局札幌開発建設部幾春別川ダム建設事業所より貴重な地震観測データ並びにダムの再生に関する情報を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。

【参考文献】

1) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課：令和元年東日本台風の発生した令和元年の水害被害額が統計開始以来最大に、～令和元年の水害被害額（確報値）を公表～、プレスリリース，2021年3月31日
2) 土木研究所水工研究グループ水工構造物チーム：再開発重力式コンクリートダムの耐震性能照査技術に関する研究，（国）土木研究所平成27年度重点プロジェクト研究報告書，2016
3) 土木研究所水工研究グループ水工構造物チーム：大規模地震時における再開発重力式コンクリートダムの動的挙動の推定に関する解析的検討，ISSN 0386-5878，土木研究所資料 第4327号，27年度重点プロジェクト研究報告書，2016

4) 榎村康史，金銅将史，佐藤弘行，小堀俊秀：ダム堤体嵩上げに関する技術的課題，土木技術資料56-2，pp. 6-9，2014

5) 山田孝治，藤田司，安田裕一：新桂沢ダム建設時における既設堤体コンクリートの品質について，コンクリートの伸び能力試験・評価，石狩川開発建設部 幾春別川ダム建設事務所，平成15年度技術発表会/第47回北海道開発局技術研究発表会，2004

6) 三浦房紀，沖中宏志：仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物—地盤系の動的解析手法，土木学会論文集，第404号/I-11，pp. 395-404，1989

7) 畑野正：水の弾性による地震時動水圧の共振に関する吟味，土木学会論文集第129号，pp. 1-5，1966年5月

8) 渡邊啓行，有賀義明，曹増延：三次元動的解析による非線形性を考慮したコンクリート重力式ダムの耐震性評価について，土木学会論文集，No. 696/I-58，pp. 99-110，2002

9) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説，2005年3月

10) 有賀義明，曹増延，渡邊啓行：強震時のジョイントの非連続的挙動を考慮したアーチダムの三次元動的解析に関する研究，土木学会論文集，No. 759/I-67，pp. 53-67，2004年4月

11) 国土技術政策総合研究所 河川研究部 ダム研究室：大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料，1-9 コンクリートダム本体の照査における材料物性値の設定における留意点，国総研資料，第244号，平成17年3月