

令和6年度 農林水産省所管農業農村整備事業等 優良工事等 農林水産大臣表彰を受賞して ー「国営造成水利施設ストックマネジメント推進事業 佐渡地区外山ダム耐震性能照査業務」ー

株式会社 三祐コンサルタンツ 総合技術第1部
渡部 大輔

1. はじめに

当社はこのたび、令和6年度農林水産省農業農村整備事業等優良工事等の表彰において農林水産大臣表彰を受賞することができました。

農林水産省が所管する農業農村整備事業の一

端を担うコンサルタントの一員として、自社の提供した成果品がこのような栄えある評価をいただいたことに心より感謝を申し上げます。

本稿では、受賞対象となった外山^{とやま}ダムと当社との係わり、また外山ダム耐震性能照査業務の背景や業務における創意工夫や安全性評価への取り組みについて紹介させていただきます。

2. 外山ダムの概要及び当社との係わり

ー調査・設計から試験湛水完了までー

外山ダムは国営佐渡農業水利事業により2007（平成19）～2012（平成24）年度にかけて、新潟県佐渡市外山地先に建設された農業用ダムであり、2025（令和7）年現在、供用から13年が経過しています。



写真-1 受賞時の写真（北陸農政局にて）



写真-2 表彰状

表-1 外山ダムの諸元

所在地	新潟県佐渡市外山地先
型 式	複合ダム（重力式コンクリートダム、中心遮水ゾーン型フィルダム）
堤 高	重力部 46.1m/ フィル部 10.0m
堤頂長	161.0m (重力部 141.0m/ フィル部 20.0m)
堤体積	68.1 千 m ³ (重力部 58.8 千 m ³ / フィル部 9.3 千 m ³)
貯水量	総貯水量 2,600 千 m ³ / 有効貯水量 2,250 千 m ³



図-1 外山ダム位置図

当社は、外山ダムについて、1987（昭和 62）年度の全体実施設計から、調査・設計・計画変更、ダム建設工事、試験湛水完了の 2012（平成 24）年度までの長期に亘り、継続して業務を担当させていただきました。

設計コンサルタントとして係わった業務の過程で、本ダムの技術的特徴となる事項は以下のとおりです。

①ダム基礎の地質条件を踏まえた「複合ダム型式」の採用

本ダム基礎岩盤は、河床部及び右岸側、左岸側中腹までは堅硬な安山岩が分布しているのに対し、左岸側の上部においては風化変質を受けた凝灰岩類が分布することから、構造的な安定性や基礎掘削・止水対策（グラウチング）の確実性・経済性から、複合ダム型式を採用しました。

図-2 及び図-3 に示すとおり、ダム堤体は重力式コンクリートダム（重力部）と中心遮水ゾーン型ロックフィルダム（フィル部）で構成される、重力部とフィル部の境界は接合部と称する四角錐台のコンクリートブロックが構築されています。

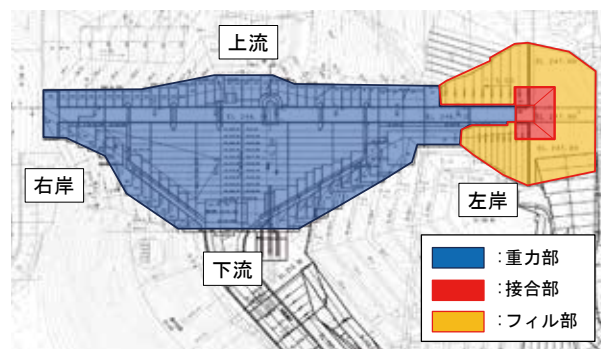


図-2 外山ダム平面図



図-3 外山ダムの外観（上空より）

②堤体コンクリートの温度規制計画

寒冷地でのダム建設であることから、堤体コンクリートに発生する温度応力による有害なひび割れ発生を抑制するため、設計段階及び施工段階において 2 次元 FEM（有限要素法）による温度応力解析を実施し、温度規制計画（管理値）を立案して堤体内ひずみを予測するとともに、現場での計測データに基づく逆解析を行って予測精度の向上を図るとともに、越冬期（打設休止期間）の養生対策にも反映させるなどの対応を図りました（図-4）。

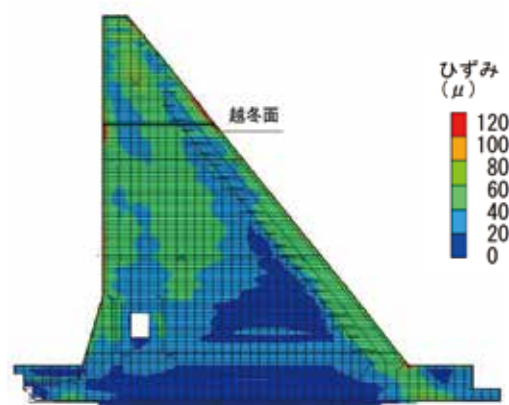


図-4 施工中の堤体内ひずみ分布図（予測値）

③左岸長大法面对策

堤体左岸側地山については、堤体掘削により出現する長大法面の変状や切土後の進行性破壊が生じる恐れがあったため、法面对策としてグラウンドアンカー工を実施し、施工時には荷重計やGPS、光波による動態観測を実施して、安定性を確認するとともに、施工段階に一部不安定化した箇所においては、ロックボルト（切土補強土）を追加することで施工の安全性を図りました（図-5）。

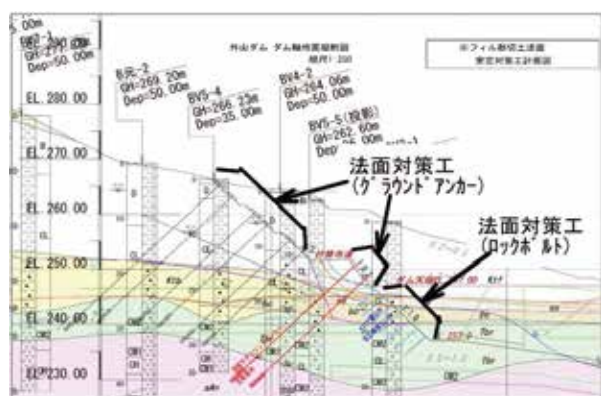


図-5 左岸法面の安定対策

④試験湛水中の対応（揚圧力上昇対策）

ダム工事の最終段階である試験湛水において、重力ダム堤体の安定性に影響する揚圧力が設計時の想定よりも上昇したことから、堤体底面に作用する圧力を軽減される「追加基礎対策孔」を7孔施工することで、設計上想定される地震動が作用した場合でも堤体の安定性が確保されることを確認して試験湛水を完了しました。

3. 接合部を含む全体3次元モデルによる耐震性能照査について

今回の表彰対象業務では、外山ダム接合部を含む堤体全体を対象とした耐震性能照査を実施しました（なお、重力部の照査は2012（平成24）～2015（平成27）年度にかけて実施済み）。

国営造成農業用ダムのレベル2地震動（現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動）に対する耐震性能照査は、2012（平成24）年度に公表された『国営

造成農業用ダム耐震性能照査マニュアル』（農林水産省農村振興局）に基づき、全国の国営農業用ダムで実施されてきましたが、同マニュアルで対象とするダム型式は「重力式コンクリートダム」と「フィルダム」であり、照査に用いる解析モデルは、他省庁のダム耐震照査でも一般的に採用される「2次元断面モデル」としていたため、3次元的な挙動を評価する手法は確立されていませんでした。

このため、本業務においては照査の手法、手順、結果の評価等に関して「外山ダム安全性評価委員会（委員長：青山威康京都大学名誉教授）」に諮り、慎重に審議を頂きながら作業を進めていきました。

（1）解析モデルの構築

解析モデルは、本ダムの構造上の特徴を踏まえ、実際の構造を反映した全体3次元モデルを採用することにより、地震時の堤体各部の応答を詳細に把握することとしました。地山の地形・地質条件も実形状・分布を反映し、精度の高いモデルを構築することに留意しました（図-6及び図-7）。

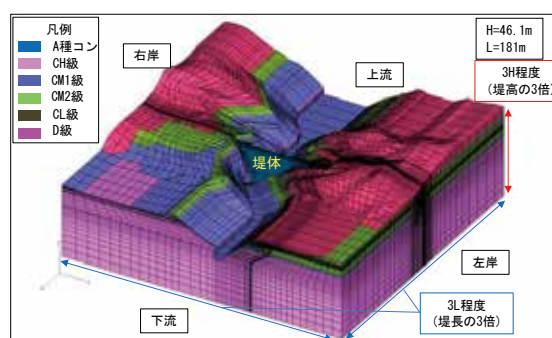


図-6 全体3次元モデル



図-7 全体3次元モデル（堤体部のみ表示）

(2) 解析手法・入力地震動

レベル2地震動に対する地震応答解析は、使用する解析コード（ISCEF、開発元：センチュリテクノ社）の制約条件や解析計算に要する時間を考慮して、以下の手法・条件により設定しました。

【手順①】フィル部の剛性を2次元横断モデルを用いた「等価線形解析」の収束剛性により設定した上で、3次元解析（1回目）を実施



【手順②】2次元横断モデルと3次元解析での最大せん断ひずみを比較、大きな差がないことを確認



【手順③】3次元解析（1回目）で得られた要素毎の最大せん断ひずみに基づき、フィル部要素毎の剛性・減衰率を設定し、再度3次元解析を実施（2回目）

①解析手法

時間領域（逐次積分）による線形解析とし、以下の手順で実施しました。この工夫によりフィル部の状態（ひずみの状態によって変化する剛性低下の適切な反映）を精度良く表現することが可能となりました（図-8）。

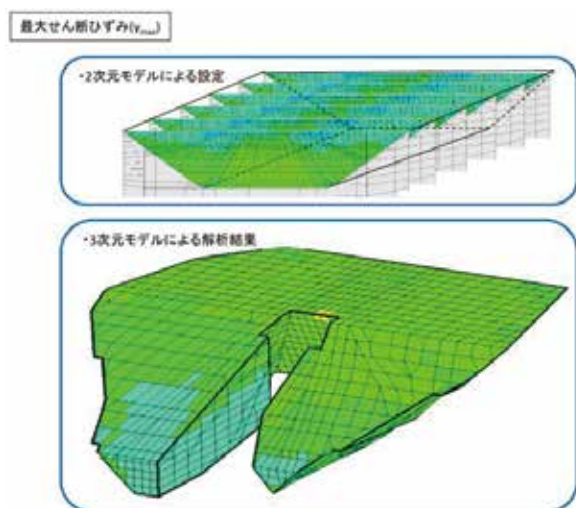


図-8 フィル部剛性の設定

②入力地震動の設定

堤体（重力部）の堤敷部をレベル2地震動定義位置として、図-9に示すとおり、水平2方向（上下流、左右岸）の地震動を設定しました

（最大加速度：上下流方向 593Gal、左右岸方向 548Gal）。

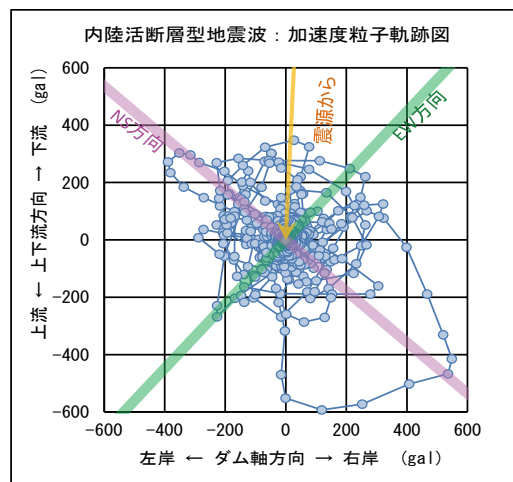


図-9 入力地震動（加速度粒子軌跡）

(3) 接合部を含む継目のモデル化

本ダム重力部（横継目）、接合部（コンクリートとフィル部の境界面）の開きやずれを評価するため、継目（ジョイント）をモデルに組み込むこととしました（図-10）。

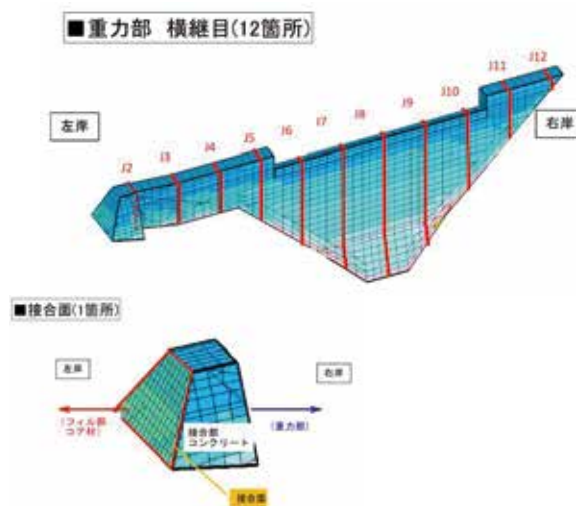


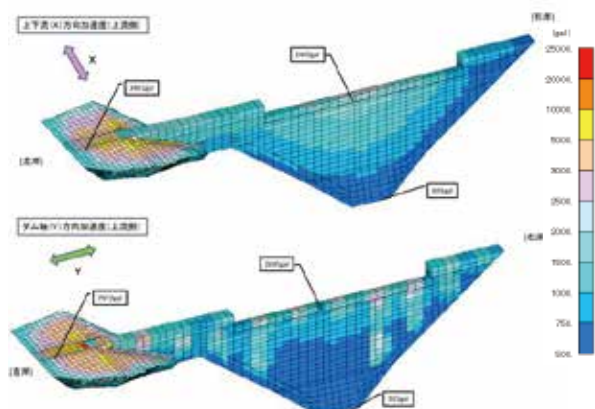
図-10 継目のモデル化

(4) 耐震性能照査及び評価

①堤体全体の応答（加速度）

レベル2地震動解析による、堤体全体の加速度応答分布は、重力部天端で最大 2,400Gal（上下流方向）、フィル部天端で最大 7,900Gal（上下流方向）となり、フィル部と接合部の継目部

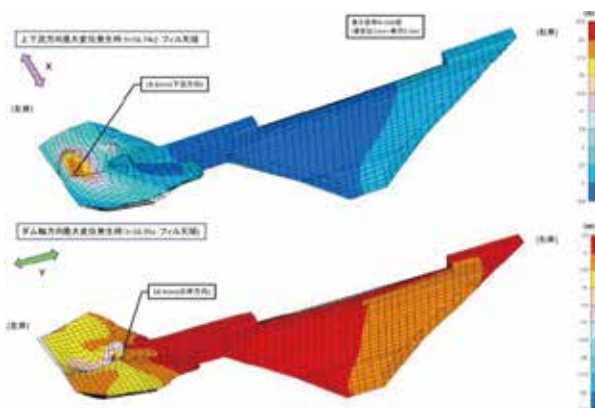
で継目開閉による影響により加速度が増大したものと評価しました（図－11）。



図－11 最大加速度分布

②堤体全体の応答（変位）

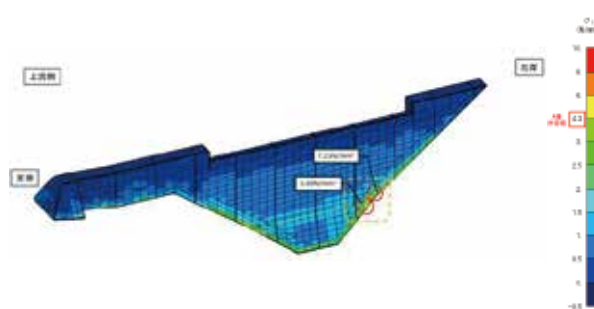
堤体全体の変位応答は、剛性の小さいフィル部で発生しており、ピーク時に上下流・ダム軸方向で18～19mm程度となっています。また、フィル部ではうねるような変位を呈しており、3次元構造に起因した高次の変形モードが生じているものと評価されます（図－12）。



図－12 最大変位分布

③重力部の発生応力

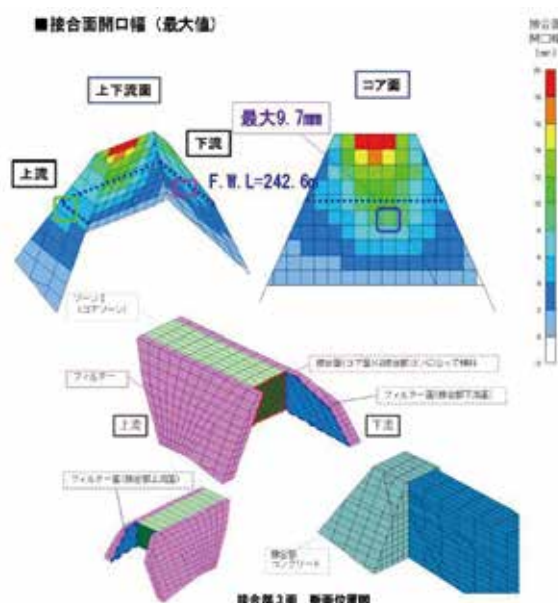
重力部（コンクリート）の引張応力が局所的に許容値を超過しましたが、その範囲は限定的であり、上下流に連続しないことを確認しました（図－13）。



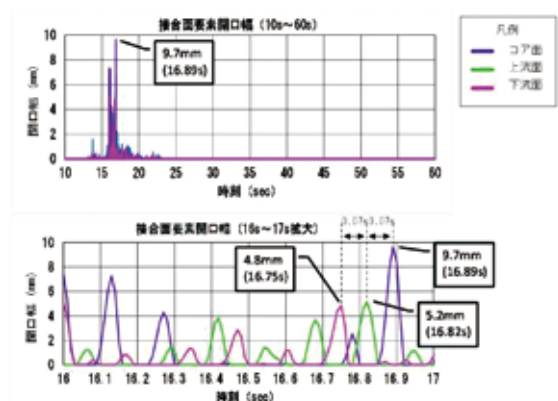
図－13 重力部 最大主応力分布

④継目の応答

継目（接合面）の応答は開口幅が最大10mm程度と想定されましたが、同時刻に開口部が連続することはないため、耐震性能は確保されるものと評価しました（図－14及び図－15）。



図－14 継目（接合部）最大開口幅分布



図－15 継目（接合部）開口幅時刻歴

また、継目（重力部横継目）の応答は、最大開口幅 1.7mm であり、堤体内に設置された止水板（塩化ビニル製）の伸び能力の範囲内にあるものと評価しました（図-16）。

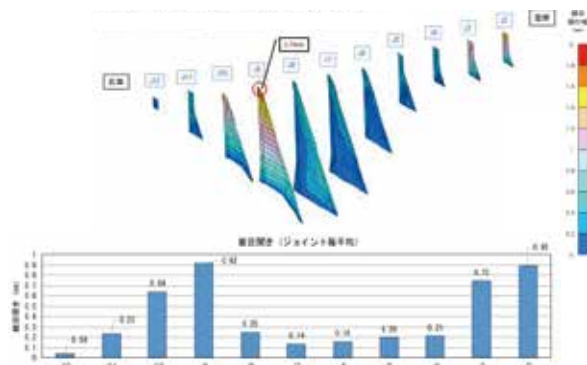


図-16 継目（横継目）最大開口幅分布

⑤フィル部材料の要素安全率

接合部周辺のフィル部材料について、モル・クーロンの破壊基準に基づく要素安全率を算定した結果、解析期間中に安全率 1.0 を下回る状況となりました（図-17）。このため、ダム of 放流設備を用いた緊急放流機能を検証し、短期間で水位低下（常時満水位からコア敷まで 3.8 日）が可能であることから、耐震性能は確保されるものと評価しました。

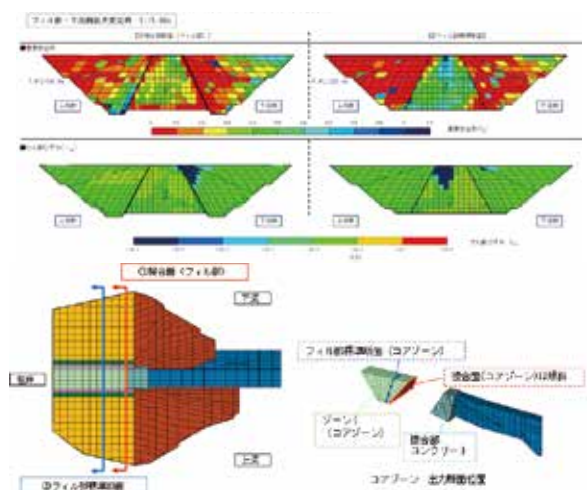


図-17 フィル部材料の要素安全率分布

(5) 耐震性能照査のまとめ

全体 3 次元モデルを用いた外山ダムの耐震性能照査に関する一連の検討過程では、フィル部の剛性を精度よく評価する手法を採用したこと、浸透破壊に対する検討として接合面の開口状況を詳細に検証するなどの対応を図ったこと、等の創意工夫は特殊型式である複合ダムの耐震照査技術の向上に寄与できたものと考えています。

なお、照査結果に基づき、大規模地震発生時に想定される事象を検討し、施設管理者に対して、今後のダム管理における留意点の引き継ぎを行うこととしました。外山ダムの安全管理は、堤体埋設計器を主体とする自動観測と巡回観測により実施されており、耐震性能照査により評価された内容を日常点検や大規模地震発生時の監視体制に反映させることにより、施設管理者が行う管理作業の合理化が図れるものと考えます。

4. おわりに

大規模地震に対する農業用ダムの耐震性能照査は、2012（平成 24）年度から検討に着手され、大半のダムで照査を了しております。

しかしながら、2024（令和 6）年元旦に発生した能登半島沖地震や、近い将来に発生が想定される南海トラフ巨大地震など、我が国では今後も大規模地震の発生が不可避であると考えます。一方で、解析技術の高度化により、実現象の予測精度を向上することで、想定される損傷形態の把握や、施設管理・監視の合理化を図るなど、今後も継続して取り組んでいくべき課題は多いものと考えており、当社としても農業農村整備に関わるコンサルタントとして、より高度な技術を提供できるよう、研鑽を重ねて参る所存です。

最後になりましたが、本業務の遂行にあたり、貴重なご助言・ご指導を賜りました、外山ダム

安全性評価委員会の青山咸康委員長及び委員・幹事各位、ならびに業務発注をいただきました北陸農政局信濃川水系土地改良調査管理事務所のご担当各位に厚く感謝申し上げます。

併せて、今回、農林水産大臣表彰に推挙いただきました、農林水産省及び北陸農政局の関係各位に改めてお礼を申し上げます。

【最後に：個人的な思い出】

思い返しますと、私自身は1996（平成8）年に初めて佐渡島を訪問し、設計・施工段階を経て、耐震照査の業務まで、30年近くが経ちましたが、その中で特に佐渡島にかかわる思い出を述べます。

①冬の日本海の荒波と日本酒

太平洋側で育った自分にとって、冬の日本海の厳しさが印象に残っております。大波に揺られるカーフェリーで2時間半、2等船室に雑魚寝しながら佐渡の日本酒（真野鶴など）を頂くのは楽しい時間でした。

②信じられないお米のおいしさ

佐渡島への現場出張時は旅館に宿泊することが多かったのですが、なかでも真野にある定宿では、朝晩の食事（特にご飯、カニ、いごねり

などの海産物）が信じられないほど美味しく、4杯お代わりをしたことも良い思い出です。

2024年に世界遺産に登録された佐渡島の金山など、観光地としての魅力とともに、トキと共生し、上質の佐渡米を生み出す水田農業を支える基幹水利源施設である外山ダムが、施設の健全性を保持しつつ、末長く地域農業に寄与していくことを願って、本稿のまとめとさせていただきます。

引用文献：

- 1) 北陸農政局佐渡農業水利事業所：外山ダム技術誌
- 2) 北陸農政局信濃川水系土地改良調査管理事務所：平成5年度 佐渡地区外山ダム耐震性能照査業務報告書
- 3) 今出和成，渡部大輔，及川信浩，松村彰則：複合ダムのレベル2地震動に対する耐震性能照査（外山ダム），第73回 農業農村工学会 大会講演会 要旨

参考文献：

- 1) 一般社団法人 土地改良建設協会：土地改良ダム総覧（平成30年10月）

