

震災による崩壊から復旧した藤沼ダムの運用

Operation of Fujinuma Earth Fill Dam Recovered From Damage Caused by The Earthquake .

鈴木秀一郎* (SUZUKI Shuichiro)	渡邊浩樹* (WATANABE Hiroki)	三浦 亨*** (MIURA Tohru)
デュッティン アントワン**** (DUTTINE Antoine)		山岸 明広***** (YAMAGISHI Akihiro)

I. はじめに

藤沼ダム（福島県須賀川市）は、2011年東北地方太平洋沖地震（3月11日14時46分）によって決壊した。藤沼ダムは、同規模の地震に対しても健全性を維持可能な要求性能を保証し、再度災害を完全に防止するために、設計と施工の両面での技術的な課題を克服して再構築された。具体的には、適切な堤体構造の採用と盛土材の選択を行い、堤体土の施工については従来の締固め度と含水比に基づく管理に加えて「最適飽和10度」を目標値とする飽和度管理によって締固め施工を実施した。これにより、合理的な盛土の締固め管理が実施され、効果的に高品質な盛土が実現された¹⁾。ダム復旧工事期間中は、地元行政区、改良区、市及び県による連絡会議を設立して、工事の進捗状況や第三者15委員会との検討内容等について情報を共有しながら復旧工事を進め、2017年1月から試験湛水を行い、同年4月から農業用水の供給を再開した（写真-1）。

本報では、復旧した藤沼ダムの管理体制並びに確認結果に基づいた設計及び施工の妥当性について紹介20し、安全・安心なダム運用について報告する。

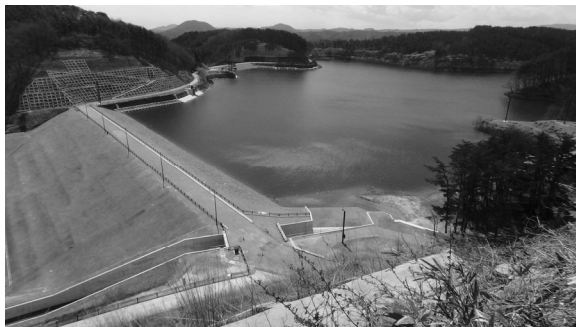


写真-1 完成した藤沼ダム本堤（2017年11月21日）

II. 復旧ダムの管理

1. 管理体制

復旧した藤沼ダムでは安全管理と合理的な水利用を25図るため、ダム本体の各種センサーによる挙動観測と

ともに、取水工、緊急放流工、ダム上下流監視施設、放流警報施設、気象観測施設、堤体監視施設及びダム付帯施設の管理を行っている（表-1）。本データは本堤・副堤及び取水工が眺望できるダムサイト左岸へ建30設したダム管理棟に集約され一元的な管理を行っている（写真-2）。

表-1 藤沼ダムの主な管理項目等

状態	頻度	管理（点検）項目
通常時	毎日	堤体目視、貯水位、ダム流入量、流出量、ゲート操作
	週1回	ダム浸透量、各種ダム挙動観測値（間隙水圧、土圧、岩盤変位、地山地下水位）
	月1回	堤体の変位量、堤体層別沈下計測
非常時	年1回	ダム管理設備・挙動観測機器及びゲート設備点検
	震度4以上の地震が発生した場合	1時間点検、3時間点検、24時間点検 堤体・貯水池内及び周辺地山の目視 ダム浸透水量、各種挙動観測値、堤体の変位量

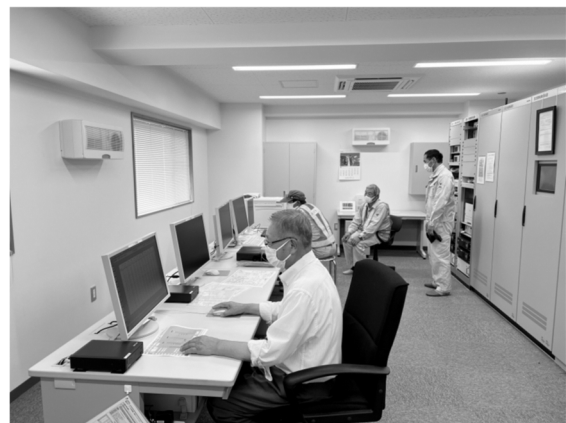


写真-2 藤沼ダム管理棟操作室

ダム管理棟では、日中は江花川沿岸土地改良区職員が常駐して安全な利水管理に努めている。ダム管理棟35以外でもダム地点の観測データが得られるように、管理システムを整備した。さらにダム管理機器の故障時や堤体挙動観測装置が管理値を超えた場合には、いち早く異常を把握できるよう、管理者への自動メール配

* 福島県農村整備課 **福島県中農林事務所 ***NTC コンサルタンツ(株) **** (株)複合技術研究所 ***** 安藤・ハザマ
キーワード フィルダム 災害復旧 ダム管理 試験湛水 地震時挙動 塑性すべり解析

信及び自動音声伝達が行われるシステムを構築した。

遠隔監視については、2011年東北地方太平洋沖地震において、堤体の決壊により貯水が流出したことによる甚大な被害が生じたことから、ダム地点のライブカメラ映像を須賀川市ホームページ上で一般に公開して、堤体が健全であることを地域住民が常時確認できるように配慮している（写真-3）。



写真-3 藤沼ダムライブカメラ映像（須賀川市ホームページ）

2. 警報設備

10 放流警報施設は、ダム周辺及び下流域住民へ確実な警報伝達を実現するため、ダム地点及び下流域にサイレン、スピーカーを設置した。この施設は須賀川市行政無線にも伝達できるシステムとして、確実な警報周知が行えるものとした（図-1）。

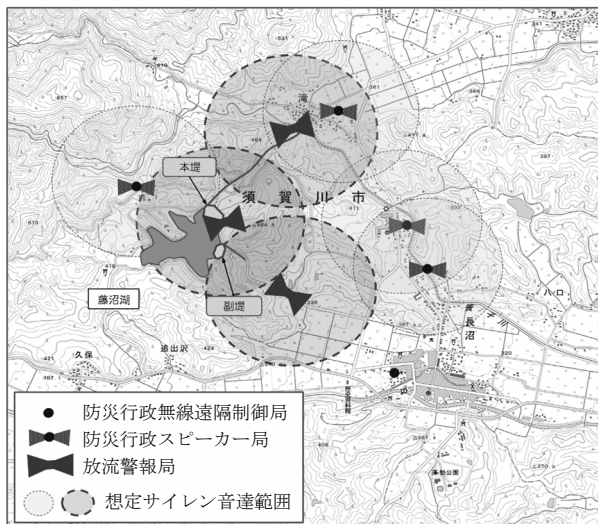


図-1 藤沼ダム放流警報施設

15 また、同時に県は須賀川市を支援して、地域住民が緊急時の迅速な避難ができるように、想定される災害を住民が事前に確認できるハザードマップを作成する
20 図っている（図-2）。

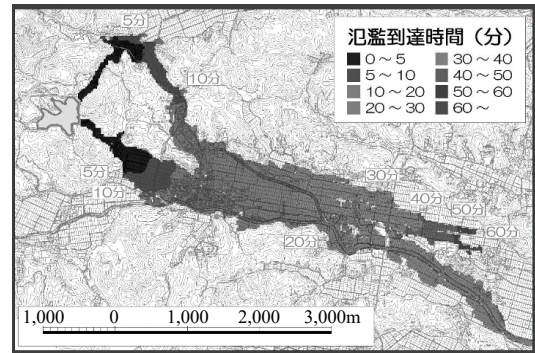


図-2 藤沼ダムハザードマップ

III. 運用中のダム挙動に基づいた安全性確認

1. 湛水中のダム挙動確認結果

ダム完成後の試験湛水は2017年1月に開始し、2020年9月に至るまで計4回の貯水位上昇、降下の操作を行った。全てが正常に動作した埋設計器等による堤体挙動計測によってダム堤体の安全性を確認した。この試験湛水期間中における本堤の挙動は以下のとおりであった。

30 ① 間隙水圧：貯水位を上昇させることにより、徐々に堤体内部へ浸潤面が形成された。コアゾーン内部と基盤内部で間隙水圧は低下しており、適切な堤体の締固めによりコアゾーンとともに基盤面も含めて適切な遮水性能が機能していると判断
35 できる（図-3）。

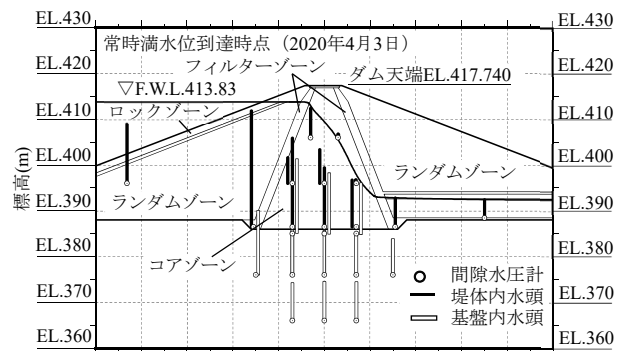


図-3 満水位時点の本堤間隙水圧発生状況

② 土圧：貯水位が変化しても基盤面に作用する盛土荷重（鉛直土圧）に大きな変化は認められない。仮にコアゾーンの締固めが不足すると、その浸水沈下が生じて、フィルターゾーンによるアーチ作用によってコアゾーン基盤面に作用する鉛直土圧が低下して、水理破壊による異常な水平浸透の危険性が高まる。しかしながら、先に示した間隙水圧計の計測結果からもコアゾーンによる遮水機

能は健全に発揮されていることが確認できるため、浸水後においても堤体と基盤面の密着状態に問題は無いことが把握された。

③ 浸透量：浸透量は左・右岸地山ドレーンと左・右岸堤体ドレーン、河床ドレーンの全5系統にて計測している。このうち浸透量が認められたのは左岸堤体ドレーンと堤体河床ドレーンの2系統のみであり、他の3系統では認められなかった。貯水位が満水位状態の時に左岸堤体ドレーンでは15 L/min程度、河床ドレーンでは40～50 L/minの浸透量が計測された。基礎及びコアゾーンが正常に遮水している際の河床ドレーン浸透量の目安値は55 L/minであり、計測された浸透量はこれを下回っていることから、堤体の遮水性能に問題がないことを確認した。

④ 堤体の層別沈下：コアゾーン内部に全6段の層別沈下計測点を設け、堤体の沈下量を計測した。湛水開始後（盛立完了後）においてもコアゾーンの圧密進行によって層別沈下量は徐々に増加している。しかしながら、試験湛水による4回の貯水位変動（約10 mの水位変化）による堤体の沈下の加速は全く認められない。このことから、良好な締固めが行われたことにより浸水による沈下は生じていないと判断できる（図-4）。

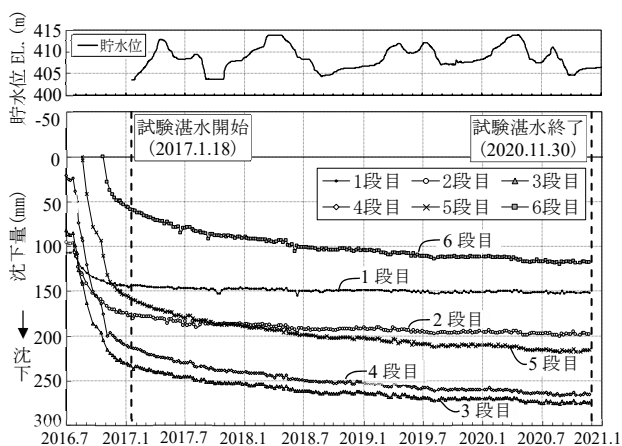


図-4 藤沼ダム本堤層別沈下計履歴図

⑤ 堤体表面変位：堤体の表面に計測固定点を設け、測量により表面変位を計測した。堤体の水平方向の変位は最大29mm、最小4.5mmであった。これは水平変位量の目安値（=最終盛土高×0.1%=31.4m×0.1%≒31mm）を下回っている。堤体の沈下量は上流側天端付近で34mm、下流側天端付近にて37mmであった。これは鉛直変位の目安値（=最終盛土高×0.3%=31.4m×0.3%≒90mm）を大きく

下回っていることから、湛水によって生じる堤体の変位は小さくその安全性を確認できる（図-5）。

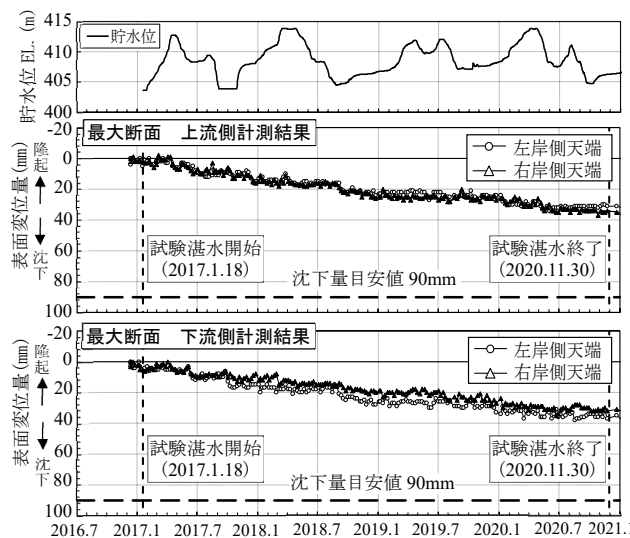


図-5 藤沼ダム本堤表面変位計(上下流天端側)履歴図

2. 2021年2月福島県沖地震

2021年2月13日午後11時7分、福島県沖の深さ約55 kmでM7.3の地震が発生した。東北地方沖を震源とする地震で震度6弱以上を観測したのは、2011年4月7日の宮城県沖の地震以来約10年ぶりであった。この地震は藤沼ダムに設置している地震計の計測によると、本堤基礎にて震度4.9、上下流方向の加速度102gal、本堤45天端にて震度5.3、上下流方向の加速度299galが計測され、ダム復旧運用後に経験した地震動として最も大きなものであった。

この地震によるダムの挙動について、設計に用いた詳細ニューマークD法と準静的非線形FEMによる解析50を実施して挙動の再現性を確認した²⁾。再現解析では、ダム基礎地盤に設置されている地震計の実観測記録と一致するような入力波を解析モデル下部に与え（波形引き戻し）、堤体天端中央での地震応答解析結果と実観測記録の比較を行った。解析による最大水平55応答加速度（上下流方向）の分布を図-6に示す。

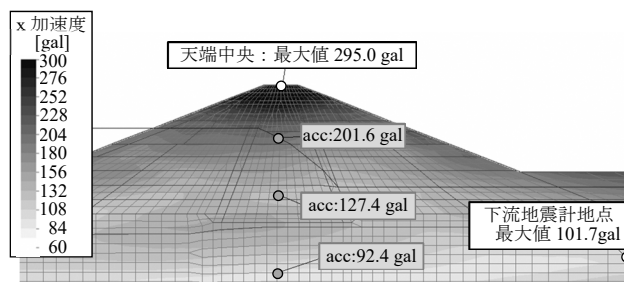


図-6 再現解析（最大水平応答加速度分布）

堤体天端中央での最大加速度は295galが得られ、実測記録値の299galとほぼ等しい結果が得られている。

堤体天端中央での解析結果（解析）と観測波（観測）から求まる時刻歴波形及び加速度応答スペクトル5とフーリエスペクトルの比較を図-7～8に示す。堤体天端中央での解析による水平加速度と観測波を比較すると、加速度時刻歴波形（図-7）、応答加速度スペクトル（図-8上段）はよく一致している。フーリエスペクトル（図-8下段）で比較しても、解析と実測での加10速度振幅の周波数依存性と最大振幅の生じる周波数は、よく一致している。

さらに、この地震応答解析結果を用いた詳細ニューマークD法による円弧すべり解析の結果を表-2及び図-9に示す。図-9には、上下流側の上部盛土と中部盛土15土内、下部盛土から地表地盤の3つの領域ごとに実施した試行的すべり解析によって求めた最終降伏加速度が最小となる円弧すべり（臨界円弧すべり）の位置を示す。表-2には、それぞれの臨界円弧すべりにおいて、FEM地震応答解析より求めたすべり土塊の最大応答加速度、初期（地震前）と最終（地震後）の降伏加速度、回転変位量及び地震中の最小安全率を示す。本地震に対して、それぞれの円弧の初期と最終降伏加速度の比較により、すべり面で発揮される強度の低下が微小であり、すべりが発生しない（変形量=0）結果25となっている。なお、地震中の最小安全率がFs=1.802～2.869の範囲であることから、高い安全性を示すことが確認できる。

藤沼ダム旧堤体は2011年東北地方太平洋沖地震によって崩壊し、復旧にあたっては「再度災害」の完全30な回避を目標として、2011年東北地方太平洋沖地震と同じレベルの地震動を受けても十分な健全性を維持できることを要求性能とした設計が実施された¹⁾。

藤沼ダムの復旧では、詳細な調査と解析の両面から旧堤体の崩壊メカニズムを解明した上で、新たな堤体35の設計では同様の解析手法を用いて2011年東北地方太平洋沖地震に対する安定性を確認し、施工によってこれを確実に実現している。さらに、建設後に経験した比較的大きな2021年福島県沖地震（震度6弱）を対象として、堤体挙動観測と解析の両面から評価し、実施40された設計と施工の妥当性、及び安全・安心なダムの復旧が実現されたことを、確認することができた。本ダムで実施した一連の設計施工の考え方とその実証的な検証に至る系統的な取組みは、他に事例がないことから、今後のダム耐震性能確保の面で貴重な教訓と45なっていると評価している。

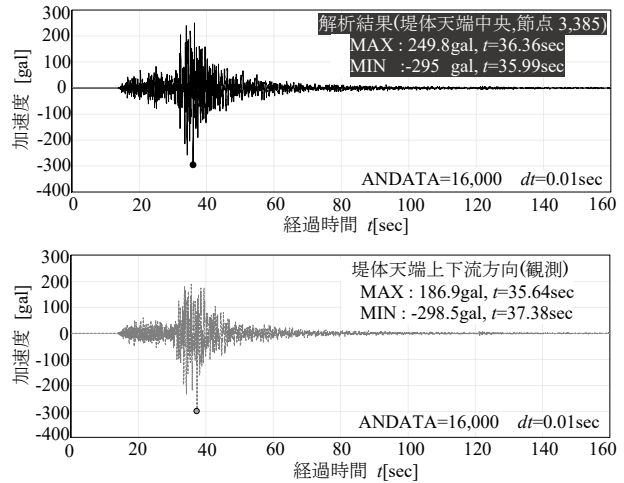


図-7 堤体天端中央での加速度時刻歴波形比較

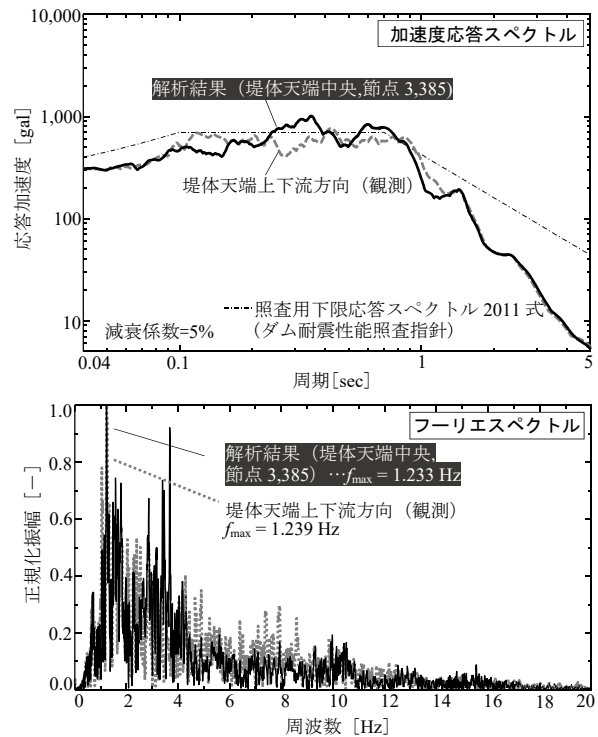


図-8 堤体天端中央での加速度応答スペクトル及びフーリエスペクトルの比較

表-2 詳細ニューマークD法解析結果一覧

解析ケース※	堤体底面最大加速度 (gal)	土塊すべりの最大応答加速度 (gal)	初期降伏加速度 (gal)	最終降伏加速度 (gal)	回転変位量 (mm)	沈下量 (cm)	備考***
C1	143.6	167.4	559.5	558.8	0	0	Fs=2.410
C2	143.6	238.4	1,172.1	1,171.0	0	0	Fs=2.869
D1	143.6	165.8	640.7	640.7	0	0	Fs=2.218
D2	143.6	217.8	665.2	665.2	0	0	Fs=1.802

※：円弧ケース C2,D2 は中部や上部盛土内に試行すべり円弧を限定した、円弧ケース D2 は下流側の中部や上部盛土内に不飽和領域が比較的大きいため、低下しない排水強度 c, ϕ を用いた(従来法)。

***：地震中の最小安全率

引用文献

- 1) 鈴木秀一郎・渡邊浩樹・田中忠次・龍岡文夫・毛利栄征・デュッティンアントワン・三浦亨：藤沼ダムの新たな締固め管理と安定解析による再建，*水土の知* 90(08)，pp.599～604(2022)
- 2) 福島県県中農林事務所：令和1年度災害調査0101業務藤沼湖地区 報告書(2020)

[20##. ##. ##. 受理]

紹介

鈴木秀一郎 (正会員)



1991年 福島県入庁
2022年 福島県農林水産部農林技術課

渡邊 浩樹

1983年 福島県入庁。2021年 県中農林事務所

三浦 亨 (正会員・CPD個人登録者)

- 40 1997年 日本技研(株)技術研究所。2019年 NTCコンサルタンツ(株)東北支社技術部長

デュッティン アントワン (正会員)

- 45 2005年 東京大学生産技術研究所。2009年 東京理科大学理工学部 助教。2016年 (株)複合技術研究所 解析技術部長

山岸 明広

1992年 (株)間組 広島支店。2020年 (株)安藤・間 北陸支店 朝日温海4号トンネル作業所

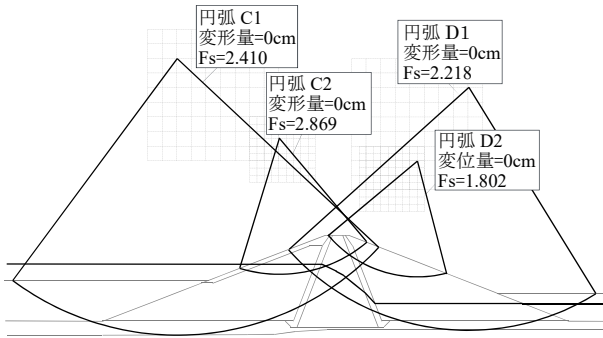


図-9 詳細ニューマークD法解析結果(上下流側円弧)

IV. 安全安心なダムを維持するための取組み

完成後は、須賀川市が主体となってダム管理を行い、農業用水の管理等については、江花川沿岸土地改良区5が市から業務委託を受けて管理している。県は、ダム管理者である市に対して、定期点検や観測データ解析における技術的、維持管理費の補助(藤沼ダム安全管理事業：2025年まで)を行うことで今後も支援を続けていく。

10

V. まとめ

「今後とも藤沼湖被災の教訓と地域の皆様の思いを強く刻み、震災からの復興・創生を前に進め、県民の安全安心の確保に努めたいと考える」という慰霊碑除15幕式の知事挨拶にあるように、地域の皆様が農業用ダムの元で安心して生活と営農ができるようにするために我々農業土木技術者は、肝に銘じて安全な設計、施工及び管理をしていかなければならない(写真-4)。

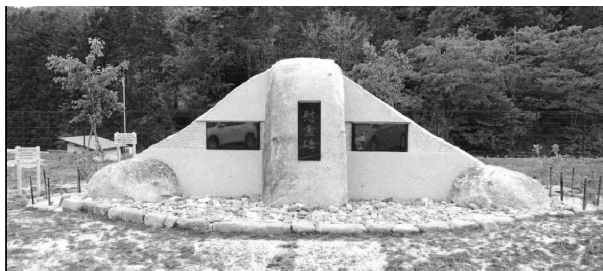


写真-4 藤沼ダム慰霊碑

20

謝辞 最後に、地域住民の方々並びに受益者の皆様はじめ、本事業に携わられた関係機関各位、ダムの決壊メカニズムの原因解明、設計・施工及び管理手法等に多大なる協力を頂いた藤沼ダム復旧委員会委員各位、建設会社、設計コンサルタンツ等の皆様に誌面をお借25りして心より感謝申し上げますとともに、事業完了の報告といたします。