

ダム安全管理用計測データによる異常検知へのAI活用の試み

小堀俊秀・佐藤弘行・二階堂良平・傅 斌・金銅将史

1. はじめに

ダムは流域の洪水被害の防止・軽減、生活・産業用水及び電力の供給など様々な役割を通じ社会の安全と経済を支えている。個々のダムがその役割を果たすには管理者による適切な維持管理が欠かせない。とりわけ、巡視による目視等での点検とともに各種の計測データを定期的に取り得し監視する日常の安全管理は、早期にダムの異常を検知する上で極めて重要である。

令和3年5月に第5次社会資本整備重点計画が閣議決定され、持続可能なインフラメンテナンスが重点目標の1つに掲げられた。ダムの維持管理においては、長期供用ダムが増加する一方で、今後経験豊富な熟練職員の減少が懸念される。貴重な客観情報としての計測データを監視強化や対策検討の要否など、管理者の意思決定によりの確に活用できるような工夫が求められる。

そこで、ダムで取得される安全管理用の各種計測データをもとに管理者が行う異常有無の判断を支援する技術として、近年各分野での活用が進むAIを用いた異常検知の可能性について検討した。

2. 計測データ活用の現状と課題

ダムの安全管理を目的として取得される計測データには、わが国のダムの構造基準である河川管理施設等構造令で定められている漏水量、揚圧力、変形（変位）の他、地震時の臨時点検実施の

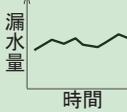
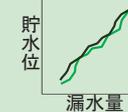
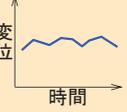
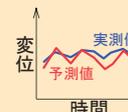
判断等に用いられる地震動データ等がある。現在、これらのデータは、主に表-1に示すような判定方法を用いて異常有無の判断に用いられている。しかし、これら計測データの異常有無の判断への活用状況について国内計133ダムに尋ねたところ、約40%にあたる52ダムから「信頼できるデータの分析によっても明確な異常有無の判断が難しい」など経験ある職員も含めて何らかの課題があるとの声が寄せられた。

3. AIを用いた異常検知の試行

本研究では、安全管理目的で取得される各種計測データのうち、それぞれ回帰問題と分類問題に適したAI技術の活用が考えられる変形（変位の時系列データによる堤体変形量）と地震動（加速度波形データ）を対象とし、AI技術を用いた異常検知の可能性を検討した。

このうち変形量は、外荷重として作用する貯水圧のほか、コンクリートダムではその体積変化を生じさせる温度変化の影響を受けることが知られており¹⁾、貯水位や外気温を説明変数とする重回帰分析による予測値が安全管理に用いられている例もある（表-1）。そこで、時系列データを対象とした深層学習に適した再帰型ニューラルネットワークのアルゴリズムの一つで、過去の様々な時点の情報を長期記憶として保持し続けながら学習を続けることが可能なLong Short Term Memory（以下「LSTM」という。）²⁾を用い、その予測値

表-1 ダムの安全管理を目的として取得される主な計測データとそれらに基づく異常有無の判断方法の例

データ種類	漏水量・揚圧力		変形(変位)			地震動(加速度波形)
取得方法 頻度等性	ダム堤体に設置された各計測装置により定期的に取り得 (毎正時による自動計測、日単位・月単位等での手動計測等)					ダム堤体に設置された地震計により地震発生時に自動取得
異常有無の判断のためのデータ整理方法	時系列図 	貯水位との相関図 	時系列図 	平面軌跡 	貯水位や外気温を説明変数とした重回帰分析 	最大加速度値 
詳細点検等の要否の判断方法	基準値超過の有無	線形性の保持有無	基準値超過の有無	既往実績からの逸脱の有無	予測値と実測値の乖離の程度	基準値*超過の有無 *臨時点検の要否の判断基準

と実測値の相違からの異常検知を試みた。

地震動データについては、表-1に示すとおり、現状では地震後臨時点検の要否判断のために最大加速度値が用いられているにとどまる。しかし、多くのダムではその基礎部と上部に地震計が設置されている。それらで同時に得られた地震動データから両者間の伝達関数（フーリエ振幅スペクトル比）の経時変化（図-1）を求め、伝達関数のピーク振動数に対応し、堤体の構造体としての剛性変化を反映する固有振動数の変化を調べれば、ダムの健全性への影響を把握できる可能性がある。大規模地震で損傷を受けたダムでは固有振動数が減少することが指摘されている³⁾。そこで、地震動データに対しては、このように元データから抽出可能な何らかの特徴量によりデータを分類するIsolation Forest（以下「IF」という。）⁴⁾を用い、異常検知（正常／異常の判定）を試みた。

3.1 堤体変形量の予測による異常検知の試行⁵⁾

LSTMでの堤体変形量の予測による異常検知の試行は、国内の重力式コンクリートダム（堤高約120m）で計測された上下流方向変位（堤体内プログラムラインで得られた基礎部と堤体上部の間の相対変位）データについて、図-2に示す予測モデル（以下「LSTMモデル」という。）を用いて行った。なお、当該ダムは比較的最近建設され、コンクリート硬化時の水和熱の影響が残っている可能性があるため、LSTMモデルへの入力変数としては重回帰分析で一般に考慮される貯水位及び外気温のほか堤体温度のデータも加えた。各データのLSTMモデルへの入力条件を表-2に示す。長期記憶として考慮される過去データの入力期間は、比較のため実施した重回帰分析で堤体表面から内部への熱伝達に要する時間としての遅れ時間を変化させた感度分析結果をもとに過去28日とした。

LSTMモデルによる変形量の予測結果を図-3に示す。同図には、比較のため従来手法の重回帰モデルによる予測結果も示している。同図からわかるように、LSTMモデルによる予測値は、実測値の変動をよく表現できており、実測値との差は概ね1mm以内である。また、全体的に重回帰モデルによる予測値よりもLSTMモデルによる予測値の方が実測値との差は小さい。特に、実測値の変動が大きくなる時期の予測精度としてはLSTMモデルの方が良い結果が得られている。この結果か

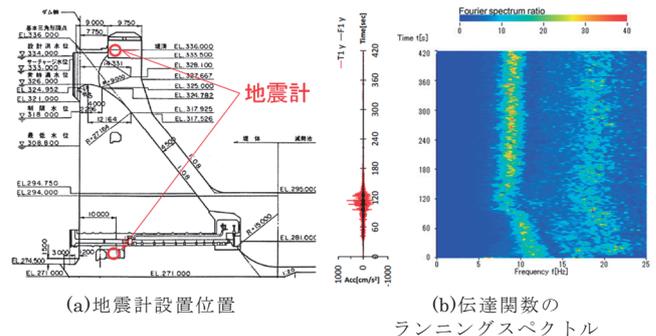


図-1 ダム堤体の基礎部と上部で観測された地震動データから求めた伝達関数の経時変化の例²⁾に追記

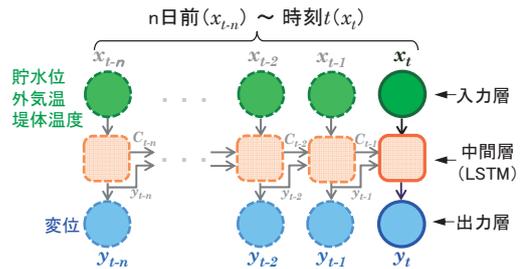


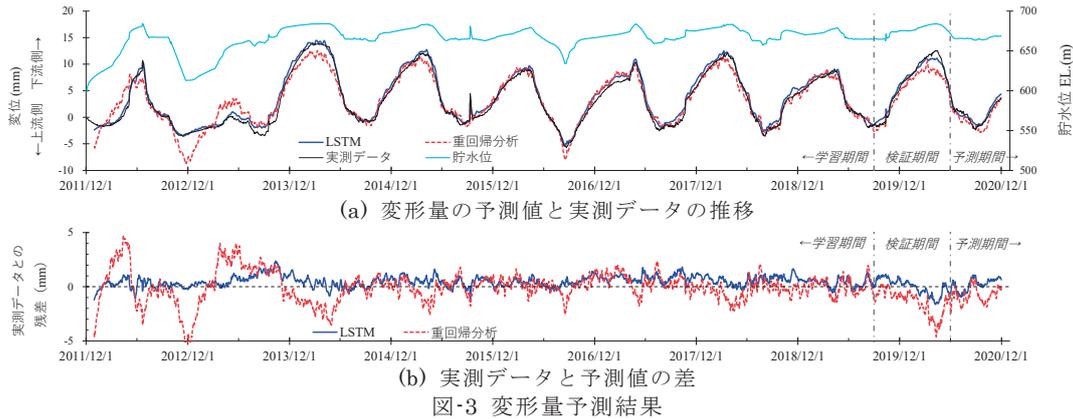
表-2 LSTMモデルへの入力条件

目的変数	説明変数	計算期間
堤体変位 (上下流方向)	貯水位	○学習期間(7年8ヶ月) 2011.12.30~2019.8.31
	外気温	○検証期間(0年9ヶ月) 2019.9.1~2020.5.31
	堤体温度 (過去28日)	○予測期間(0年6ヶ月) 2019.6.1~2020.11.30

ら、LSTMモデルによる予測値を実測値と比較し、両者の乖離の大きさをもとに異常検知を行う手法として活用することが期待できる。一例として、図-3に示したLSTMモデルでの予測値に対し、実測値との差の標準偏差 σ の2倍（ $\pm 1.45\text{mm}$ ）を閾値とした場合の判定基準の例を図-4に示す。計測値がこのような閾値を超過した場合や経時的にシフトして超過する傾向が認められれば、異常と判定されることになる。なお、適切な閾値は、今後データを積み重ねて検討する必要がある。

3.2 地震動データの分析による異常検知の試行⁶⁾

IFでの地震動データの分析による異常検知の試行は、国内のロックフィルダム（堤高約75m）に設置された地震計で観測された地震動（加速度波形）データのうち、天端付近での観測記録（計23波形）を用いて行った。IFは図-5(a)に示すような木構造を用いて多数のデータ（同図の例ではA~F）の分類を行う決定木の一種であり、ある特徴量の最大値から最小値の間の閾値をランダムに設定して特徴量を分割し、全ての特徴量が孤立するまで分割を繰り返していく（図-5(b)）。その



際、正常データの特徴量は値が近いいためなかなか孤立せず、分割回数が多くなる。一方、異常データの特徴量は正常データのそれと差があるため、少ない分割回数で孤立しやすくなる。この特性(決定木での分割回数の違い)から正常/異常の分類が可能なIFは、教師データなし、つまり正常データのみの学習による機械学習が可能なアルゴリズムとして異常検知に活用されている。

本試行では、全23波形のうち比較的強い地震時に得られ、基礎部での観測波形との間で算出した伝達関数のピーク振動数に相当する固有振動数の減少が認められる点で異常の可能性が考えられる1波形を正常/異常の判定に用いるテストデータとした。中小地震時に得られたそれ以外の波形データは、うち1波形をテストデータと判定結果を比較するための比較用データ、残りの波形を学習用データとした。抽出する特徴量は表-3に示す計11の基本的統計量とした。なお、学習データ数を確保し、かつ周波数領域での特徴量(表-3の10、11)が安定して算出できるよう、前処理として各波形データ(サンプリング間隔0.01秒)は分割した部分波形のデータ数が2のべき乗倍となるよう5.12秒間の部分波形に分割して学習に用いた(図-6)。ただし、各1波形しかないテストデータ及び比較用データは0.5秒ずつずらしながら学習用データを同じ時間幅(5.12秒)の部分波形を抽出し、正常/異常の判定を行えるようにした。各部分波形データから算出した特徴量は、各特徴量の絶対値を揃えるため、平均0、標準偏差1となるよう標準化した。

このようにして用意した学習用データを機械学習させた後、テストデータと比較用データを対象に、IFによる異常検知を試みた。その結果を図-7に示す。図中⑦は加速度時刻歴波形、①は伝達関

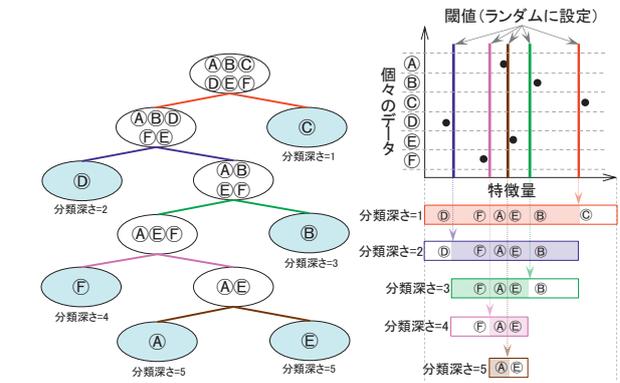
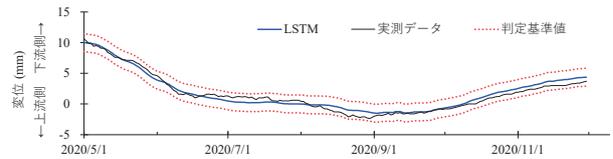
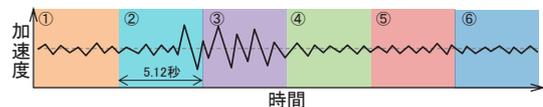
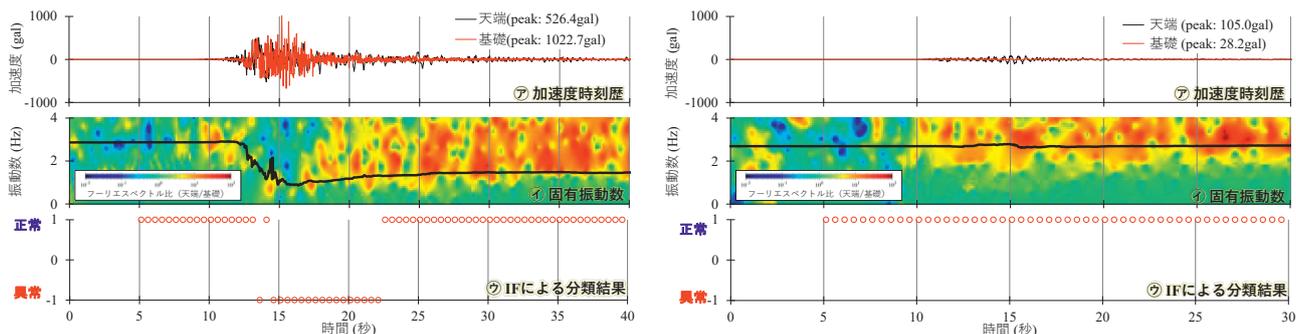


表-3 抽出した特徴量

1	平均	データの平均値	7	尖度	頻度分布で表したときのピークの尖り方
2	分散	データのばらつき	8	RMS	二乗平均平方根
3	最小値	データの最小値	9	動的特徴量	線形フィットさせたときの傾き
4	最大値	データの最大値	10	エントロピー	周波数領域での分布の広がり
5	中央値	データの中央値	11	パワーバンド	周波数区間でのパワーの総和
6	歪度	頻度分布で表したときの裾の広がり方			



数のランニングスペクトル(背景)とそのピーク振動数に対応する固有振動数の経時変化(実線)、⑦はIFによる時系列での正常/異常の判定結果(1:正常、-1:異常)である。同図より、IFを用いた分析では、テストデータの中で堤体の固有振動数が減少している時間帯で異常と判定され、それ以外の時間帯や、固有振動数に明確な変化が認められない比較用データは正常と判定された。なお、図-7(a)では固有振動数の低下後も従前より低いほぼ一定の固有振動数の状態が継続しているが、



(a)テストデータに対する結果

(b)比較用データ（正常データ）に対する結果

図-7 IFによる分類結果

この時間帯は異常と判定されていない。これは、様々な水位条件での異なる固有振動数を有する加速度データを学習させた今回の機械学習では、学習データの観測時間中に固有振動数が変化しないデータを全て正常として学習させている（言い換えると観測時間中の固有振動数の変化を異常と判定するよう学習させている）ためと考えられ、ダムの状態は従前から変化した状態が継続していることに注意が必要である。本試行では、表-3に示す特徴量のうち、特にパワーバンドと分散において、テストデータ中で異常と判定された時間帯での学習用データとの差が認められた。これらの特徴量が特に異常検知に寄与したものと考えられる。

このようにIFは地震動データを用いたダムの異常検知に活用できる可能性がある。なお、強震動を受けて固有振動数が一時的に低下しても、堤体の沈下以外に顕著な変状が認められなかったフィルダム⁷⁾では、その後エイジング効果によるとみられる固有振動数の回復傾向が認められるとの指摘がある⁸⁾。コンクリートダムでも、微かな継目変位以外の目立った変状が認められなかったダムでは同様の回復傾向がみられること⁹⁾が指摘されている。このため、本手法は最終的な異常有無の判断に必要な詳細点検等の要否を判断するためのスクリーニングに活用することが考えられる。

4. まとめ

ダムの安全管理での管理者による異常有無の判断を支援する技術として、AIを用いた計測データの異常判断を試行的に検討した。その結果、時系列データの回帰問題に適したLSTMや分類問題に有効なIFの活用が期待できる結果が得られた。

今後はさらに試行をすすめ、ダム管理現場で実用可能な異常判断支援ツールの作成等につなげていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 飯田隆一：ダムの安全管理、(一財)ダム技術センター、pp.93~107、2006。
- 2) 例えば、岡谷貴之：深層学習、pp.111~130、2015。
- 3) 金銅将史、小堀俊秀、佐々木 隆：地震動がコンクリートダムの振動特性に及ぼす影響、ダム工学、27(4)、pp.265~278、2017。
- 4) 例えば、福井健一：識別・予測・異常検知、p.148、2018。
- 5) 二階堂良平、小堀俊秀、金銅将史：ダムの安全管理における計測データを用いたAIによる異常検知の検討、土木学会第76回年次学術講演会、VI-267、2021。
- 6) 佐藤弘行、大谷 周、傅 斌、金銅将史：ダム堤体で観測された地震記録の教師なし機械学習による異常検知、土木学会第76回年次学術講演会、I-277、2021。
- 7) 国土技術政策総合研究所：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震被害調査報告、国総研資料第486号、2008。
- 8) 松本徳久、安田成夫、曹 増延：フィルダムの長期的な振動特性の変化及びダム-岩盤系における波の伝播挙動に関する一考察、土木学会論文集A1、Vol.74、No.3、pp.319~329、2018。

小堀俊秀



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 主任研究官、博士(工学)
Dr. KOBORI Toshihide

佐藤弘行



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 主任研究官
SATO Hiroyuki

二階堂良平



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 交流研究員
NIKAIDO Ryohei

傅 斌



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 交流研究員
FU Bin

金銅将史



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 室長、博士(工学)
Dr. KONDO Masafumi