

# NIOM 法を活用した地震記録による ロックフィルダムの健全性評価手法の検討

佐野 貴之<sup>1</sup>・市川 滋己<sup>2</sup>・茂木 秀則<sup>3</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人水資源機構 池田総合管理所 新宮ダム管理所(〒799-0301 愛媛県四国中央市新宮町馬立1144)

<sup>2</sup>独立行政法人水資源機構 総合技術センター(〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区大字神田936)

<sup>3</sup>埼玉大学工学部建設工学科 准教授(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

フィルダム堤体の物性値は強い地震動を受けると一時的に変化することが知られているが、これまで地震観測記録から直接的に堤体の物性値を把握する方法はなかった。

本研究では、NIOM 法という解析手法を大規模ロックフィルダムの地震観測記録に適用した。結果、堤体コアゾーン、上下流ロックゾーン、及び岩盤の動的物性値を地震観測記録から直接的に把握できることを示した。また、小地震記録に NIOM 法を適用して平常時の堤体の物性値を把握するとともに、大地震前後の物性値の変化を分析することにより、地震観測記録に基づいてロックフィルダム堤体の健全性を評価できる可能性を示した。

キーワード NIOM 法, 地震観測記録, ロックフィルダム, 伝播速度, 健全性評価

## 1. はじめに

本研究は、ロックフィルダムで観測された地震波形記録から直接的に堤体の物性値を把握することを目的として、水資源機構が所管する阿木川ダム（堤高101.5m, 岐阜県恵那市）及び徳山ダム（堤高161.0m, 岐阜県揖斐川町）で観測された地震記録を用いて NIOM 解析<sup>1)</sup>を行い、堤体及び基礎岩盤を伝わる地震波の伝播速度を求めることにより、ダム堤体の動的物性値を推定するとともに、堤体の健全性評価手法について検討したものである。

## 2. NIOM 解析の概要

鉛直アレー2点の観測記録を  $f(t)$ ,  $g(t)$  とするとき、両者は伝達関数  $H(\omega)$  を用いて式(1)のように関連づけることができる。

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (1)$$

ここで  $\omega$  は角振動数であり、 $G(\omega)$ ,  $F(\omega)$  はそれぞれ  $f(t)$ ,  $g(t)$  のフーリエ変換である。

NIOM 法は、2点の観測結果から求めた  $H(\omega)$  に対して、入力  $x(t)$  を  $x(0) = 1$  を満たす単純なパルス形としたときの入力  $x(t)$  と出力  $y(t)$  を求める手法であり（図-1）、具体的には式(2a)及び式(2b)で与えられる。

$$X(\omega_i) = N\Delta t \frac{1}{\frac{(1 + \frac{kx}{Cx}\omega_i^2)(Cx + Cy|H(\omega_i)|^2)}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{(1 + \frac{kx}{Cx}\omega_n^2)(Cx + Cy|H(\omega_n)|^2)}}} \quad (2a)$$

$$Y(\omega_i) = H(\omega_i)X(\omega_i) \quad (2b)$$

ここで、 $\Delta t$  は観測記録の時間ステップ、 $N$  はデータ数、 $Cx$ ,  $Cy$ ,  $kx$ ,  $ky$  は NIOM 解析のパラメータである。

最後に、得られた  $X(\omega)$ ,  $Y(\omega)$  をフーリエ逆変換すると、単純化された時間領域の入出力モデルが得られる。この時間領域の入出力波形におけるピークの時間差から、2点間の伝播時間を求めることができる。

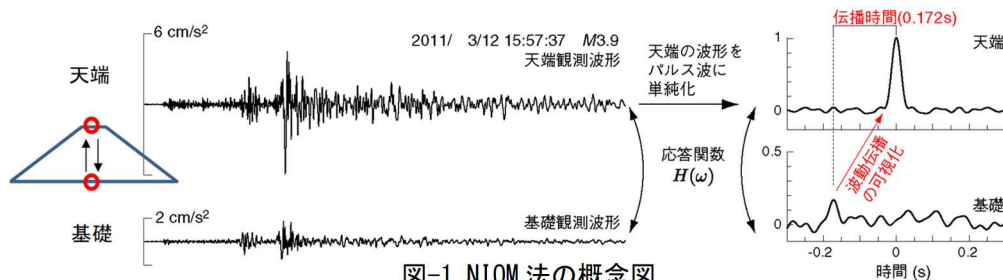


図-1 NIOM 法の概念図

### 3. 阿木川ダムにおける NIOM 解析

#### 3.1 コアゾーンの伝播速度

阿木川ダム（図-2）の地震計設置位置を図-3に、その地震記録に NIOM 解析を適用して得られた入出力モデルの例を図-4に示す。用いた地震記録は 2002/9/22 9:36:34、岐阜県南東部 M4.0、深さ 49.2 km、震央距離 19.4 km によるもので、堤頂 T1-コア内上 M3（鉛直距離 27 m）の上下流方向成分の結果である。

図中、太実線が観測点 M3の波形を入力モデル  $x(t)$ （図中、細実線）に置き換えたときの観測点 T1の出力モデル  $y_g(t)$ 、細破線が観測点 T1の波形を入力モデル  $x(t)$  に置き換えたときの観測点 M3の出力モデル  $y_f(t)$  を示す。この結果では、コア内上 M3に時刻0で単位振幅をもつ入力モデル  $x(t)$ （図中細実線）が現れ



図-2 阿木川ダム（堤高101.5m、岐阜県恵那市）

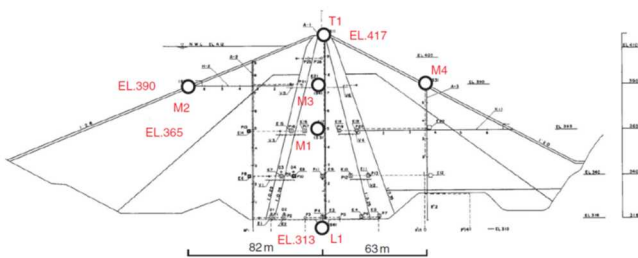


図-3 阿木川ダム地震計設置位置図

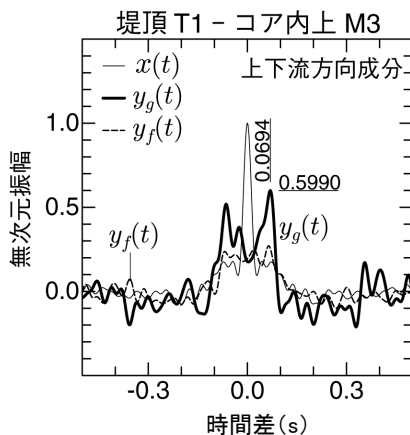


図-4 NIOM 解析の入出力モデルの例

るとき、堤頂 T1では太実線のような波形が生じることを示しており、M3から T1までの波動伝播に0.0694 s を要することが読み取れる。

図-5に2001年から2004年までの地震記録の解析から得られた伝播時間を示す。この図は堤体中央の鉛直アレー部分の下区間（コア内下 M1-監査廊 L1）の結果である。図中の横線は M1-L1間に要した伝播時間の平均値で、この平均値から求めた伝播速度は、上下流方向成分523m/s、ダム軸方向成分539m/s、鉛直方向成分2255m/s となった。

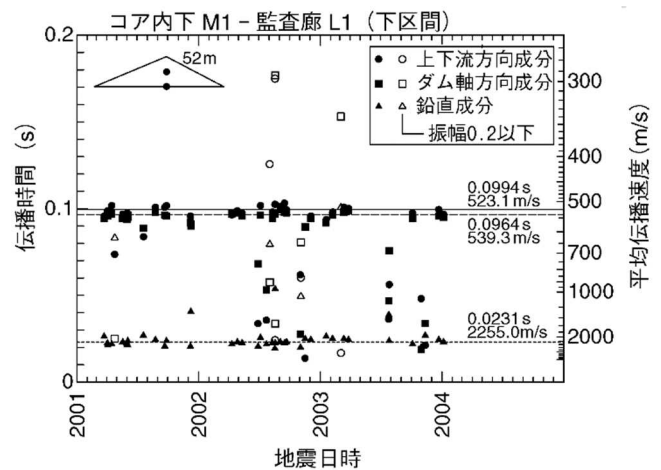


図-5 NIOM 解析による阿木川ダム堤体内の地震波の伝播時間と区間平均伝播速度（コア内下 M1-監査廊 L1）

#### 3.2 堤体の速度構造の推定

阿木川ダム堤体における地震波の伝播速度を NIOM 法解析によって推定した結果を図-6に示す。

ここで図中の数字は、隣接する地震計設置位置の標高差（図中矢印の長さに相当する距離）を、NIOM 解析で得た上下流方向成分の伝播時間で除して求めたゾーンごとの平均的なせん断波（S 波）速度である。

コアゾーンの平均的な S 波速度は、上区間（T1-M3）で424m/s、下区間（M1-L1）で523m/s を示し、拘束圧の増加に伴う S 波速度の増加が見られた。

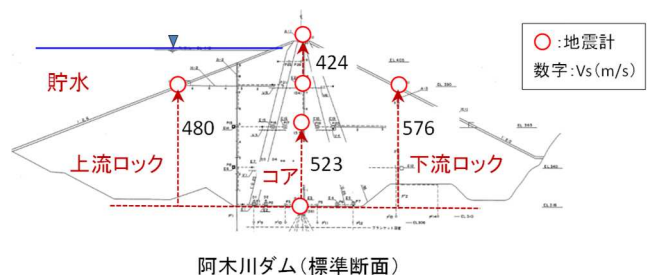


図-6 小地震記録の NIOM 解析で得た阿木川ダム堤体の地震波伝播速度（上下流方向成分）

ロックゾーンについて、上流側ロックゾーンの平均的なS波速度は480m/sで、コアゾーン上部より多少大きい。一方、下流側ロックゾーンは576m/sであり、上流側より大きい値を示した。これらの違いの要因として、貯水の有無による有効応力の違いや、貯水による動的な影響の可能性が考えられる。本研究で得られた伝播速度は、過去に実施されたPS検層による計測値と概ね整合している<sup>2)</sup>。

なお、飽和しているロックゾーンの伝播速度がドライなゾーンに比べなぜ遅くなるのか、そのメカニズムは、筆者の知る限り十分に解明されていない。この点については、試験湛水中の小石原川ダムで、湛水開始前から地震観測を開始し、貯水位が徐々に上昇していく過程の小地震記録を分析することによって、水の影響を定量的に評価していく予定としている。

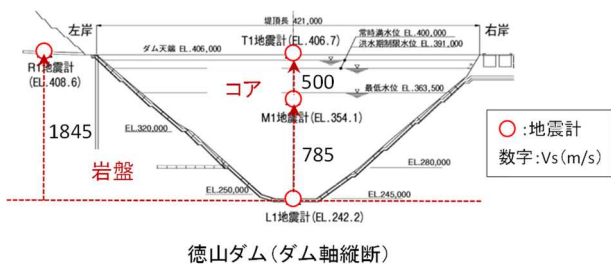
#### 4. 徳山ダムにおける NIOM 解析

徳山ダム（図-7）の地震観測記録を用いて阿木川ダムと同様のNIOM解析を行い、堤体および岩盤の伝播速度を推定した結果を図-8に示す。

コアゾーンの平均的なS波速度は上区間で500m/s、下区間で785m/sとなり、阿木川ダムよりやや大きい結果となった。この伝播速度は、過去に実施されたPS検層結果と概ね整合している<sup>3)</sup>。また岩盤内に設置された地震計記録から、岩盤内の伝播速度も1845m/sと推定できた。



図-7 徳山ダム（堤高161.0m,岐阜県揖斐川町）



徳山ダム(ダム軸縦断)

図-8 小地震記録の NIOM 解析で得た徳山ダム堤体・岩盤の地震波伝播速度(上下流方向成分)

この結果は、地震観測装置を常に良好な状態に管理していたことによって得られた貴重な成果である。

#### 5. 強震動を受けた荒砥沢ダムでの知見<sup>4)</sup>

荒砥沢ダム（図-9）は堤高74.4mのロックフィルダムであり、地震計がダム基礎、コアゾーン中段、天端に配置されている（図-10）。宮城県にある同ダムは、これまでに岩手・宮城内陸地震、東北地方太平洋沖地震など複数回の強震動に見舞われている。それらの大地震震時を含む長期間にわたる地震記録の分析から、強震動を受けた後に、堤体の物性値が変化したことが報告されている。



図-9 荒砥沢ダム（堤高74.4m,宮城県栗原市）

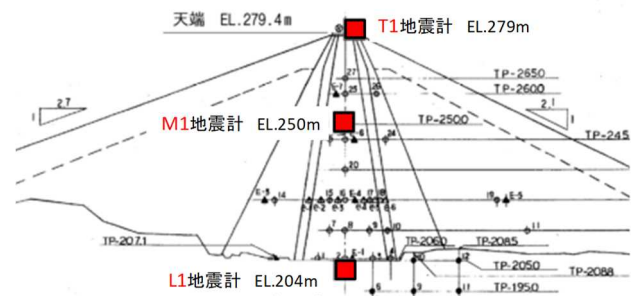


図-10 荒砥沢ダム地震計設置位置図

荒砥沢ダムの長期にわたる地震観測記録に NIOM 法を適用し、堤体内部を伝わる地震波の伝播時間の経時変化をまとめたのが図-11である。

図-11の上の図から、堤体の中位標高から天端までの伝播時間は、強震動直後に長くなり（すなわち伝播が遅くなり）、その後時間をかけて強震動を受ける前のレベルに回復していることがわかる。また地震波の伝播時間は、上下流方向成分の方が、ダム軸方向成分よりも長い（上下流方向成分の方が伝わるのが遅い）。これは、上下流方向の方が堤体の拘束度が小さいためと推察されている。

一方、図-11の下図から、堤体基礎から堤体の中位標高までの伝播時間は、強震動を受ける前後でほとんど変化していないことがわかる。低位標高部の変化が

高位標高部に比べて小さかったのは、低位標高ほど拘束圧が大きいためと推察されている。

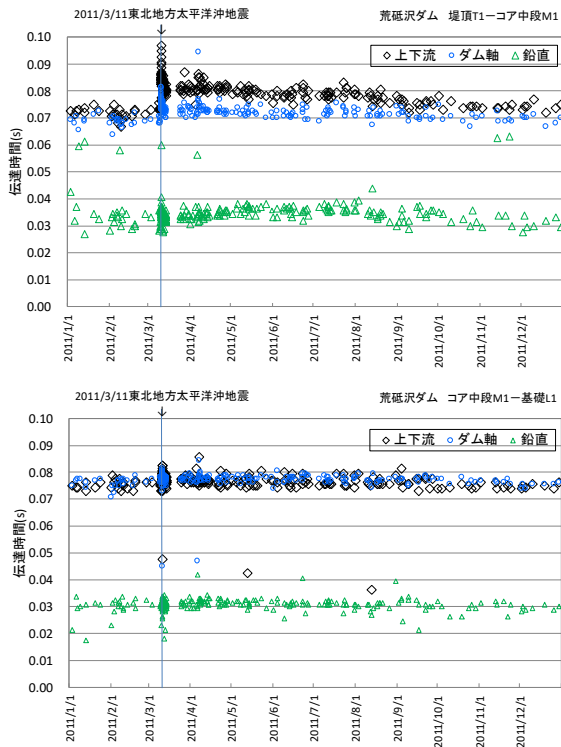


図-11 荒砥沢ダム堤体内の地震波伝達時間の経時変化  
(上図:コア中段→堤頂 下図:基礎→コア中段)

## 6. 堤体の健全性評価への活用

筆者らは、図-11に示す伝播時間の経時変化図がロックフィルダム堤体の健全度評価に活用できるものと考えている。すなわち、小地震の観測記録から NIOM 法によって平常時の伝播時間を求めておき、大地震が起こった際には余震記録を用いて速やかに伝播時間の変化を把握する。仮に伝播時間が長くなっていけば（伝播速度が小さくなっていけば）、地震動によって堤体の物性値が一時的に変化した可能性が把握でき、その後、伝播時間が時間の経過とともに短くなっていけば（伝播速度が大きくなっていけば）、堤体の物性値が回復したことを確認できるものと考えている。また、長期的にダム堤体の圧密が進めば、コア採取ができないゾーンの強度の増加を定量的に把握できる可能性がある。

ロックフィルダム堤体の常時の伝播速度は、ダムごとに少しずつ異なることが想定される。本研究により、事前に各ダム堤体の常時の物性値を NIOM 法で推定しておき、地震中および後の地震記録を NIOM 法で

分析することで、ロックフィルダム堤体の健全性を評価できる可能性を示すことができた。健全性の評価手法については今後も検討していく必要がある。

## 7. 結論

本研究では、堤高の高い中央コア型ロックフィルダムである阿木川ダムと徳山ダムで観測された地震記録に NIOM 法を適用して解析することにより、堤体のコアゾーン、上下流ロックゾーン、及び基礎岩盤内を伝わる地震波の伝播速度を算出し、地震観測記録から堤体の動的物性を直接的に把握できることを示すことができた。本研究で求めた堤体のせん断波速度は、過去に実施された PS 検層による計測値と概ね整合していることが確認されている。

これまでの研究により、フィルダム堤体は強震動を受けるとその物性値が一時的に変化することがわかっている<sup>4),5)</sup>。今後は、地震観測記録に基づく NIOM 解析によってロックフィルダム堤体の定常時の物性値を把握するとともに、その解析結果を用いて常時および大地震後のダム堤体の健全性（強震動が堤体に与えた影響や回復状況）を評価する手法の検討を進めていく予定である。

謝辞: 本研究では、阿木川ダム、徳山ダム、荒砥沢ダムの地震観測記録を使わせて頂いた。また埼玉大学工学部建設工学科川上研究室による NIOM 解析プログラムを使わせて頂いた。記して深謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) Kawakami et al: Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM), Soil Dyn. Earthq. Engng., 17, 1998
- 2) 茂木秀則ら: 地震観測記録に基づくロックフィルダム堤体の速度構造の推定, ダム工学29(3), 181-190, 2019
- 3) 茂木秀則ら: 長期間の地震観測記録に基づくロックフィルダムの動的物性評価, ダム工学27(4), 254-264, 2017
- 4) 茂木秀則ら: ロックフィルダムにおける長期間にわたる地震観測記録から推定した地震波伝播時間の経時変化, ダム工学25(4), 218-229, 2015
- 5) 茂木秀則ら: アースダムにおける長期間にわたる地震観測記録の NIOM 解析と堤体の物性評価, ダム工学25(3), 139-149, 2015