

Time Lapse Analysis of Seismic Propagation Property Based on a Series of Seismic Records Obtained by Existing Seismometer of Dam

メタデータ	<p>言語: jpn</p> <p>出版者:</p> <p>公開日: 2019-03-07</p> <p>キーワード (Ja):</p> <p>キーワード (En): Dams for irrigation, Seismometer, Seismic Records, Seismic wave propagation, Time lapse analysis</p> <p>作成者: 黒田, 清一郎, 田頭, 秀和, 増川, 晋, 渡部, 大輔, 影浦, 弘樹</p> <p>メールアドレス:</p> <p>所属:</p>
URL	<p>https://doi.org/10.24514/00001161</p>

© 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

National Agriculture and Food Research Organization, Japan

農業用ダム地震計観測記録に基づく 地震波伝播特性逐次解析の試み

黒田清一郎* 田頭秀和* 増川 晋** 渡部大輔*** 影浦弘樹***

*施設工学研究領域施設構造ユニット

**施設工学研究領域領域長

***三祐コンサルタンツ

要 旨

本報は、近年の地震防災上の必要性により整備されてきた農業用ダム地震計の観測記録を対象として、その整理と解析を行う方法について述べたものである。特に農業用ダム地震計観測記録を逐次自動的に読み取り処理するプログラムと、その読み取り結果に地震波干渉法に基づき繰り返し解析を行うことによって、農業用ダムに地震動が与える影響等に関する情報を提示することができる。近年、大規模地震が頻発し、農業用ダムにおいては余震等も含め多くの地震計観測記録が蓄積されているが、それに対して逐次自動的な解析を行えることも特徴である。例として、東北地方太平洋沖地震の前後で発生した堤体の地震波伝播速度とその緩和過程を 1000 以上の観測記録の解析を元に定量化し解析を行った。緩和過程については緩和時間帯域制限型の対数関数により近似することができた。最後に、地震波干渉法によって評価された伝播時間が、堤体の地震計間の地震波伝播時間に相当することを、数値解析により確認した。一連の地震計観測記録に関する解析手法はプログラムとしてルーティン化可能であることから、現在蓄積されている農業用ダムの多くの地震計観測記録に適用し、網羅的かつ系統的な研究を行うことができるものと考えられる。

キーワード：農業用ダム，地震計，観測記録波形，地震波伝播特性，逐次解析

1 緒 言

地震計の観測記録は、ダムの安全管理と、耐震評価の高度化の双方にとって必要不可欠なものであり(建設省土木研究所ダム部(1997))、農林水産省では、現在までに農業用ダム 190 基(ただし、うち 2 基は廃止・譲渡のため対象外)のうち、187 基に地震計が設置されており、残り 1 基についても設置が計画されている(北谷，黒田(2016))。

これらの地震計を常時健全な状態に保ち、予期せぬ時に発生する大規模地震の強震動データを確実に保存するためには、それぞれのダムの管理者および関係者がその地震計システムの特徴を把握し、適切な設定操作やデータ回収などの作業を行う必要がある。このような観点から、農業用ダムの地震計観測記録を対象として、その整理・管理手法および保存・集約手法、さらに農業用ダムで統一的に運用していくための体制整備の確立に向けた検討が行われ、また地震計観測記録の解析システムの構築が試みられてきた(黒田ほか(2017))。

本報では特に筆者らが提案してきた、構造物の地震動観測記録への地震波干渉法への適用とその繰り返しによりモニタリングを行う技術に基づき、農業用ダムに地震動

が与える影響を系統的に逐次評価するシステムとその適用結果について述べる。

本システムは、農業用ダムの地震計観測記録の特徴である様々な機種・様式の地震計の原波形データに対応し自動的に読み取り図化を行うプロセスに始まる。またその繰り返し処理により逐次的な解析処理を行うことによって、農業用ダムの地震波伝播特性の経時的な変化を評価することができる。その方法について 2 において述べ、結果について 3 に示す。

ダム堤体の振動特性は、貯水位や降雨、長期供用に伴う経年変化および大規模な地震動の影響などによって変化する(黒田ほか(2013,2014)；佐藤ほか(2013)；Ohmachi and Tahara(2011))。このような変化を評価することは構造物のヘルスマニタリングの概念とも符合し、農業用ダムの保全管理に携わる技術者に有益な情報を与えるものと考えられる。そこで 2，3 で示した東北地方太平洋沖地震によって生じた一時的な地震波伝播時間とその後の変化について、近年提案された熱力学に基づく解析手法により、定量化を行った結果を 4 において示す。

最後に、これらの評価において示した地震波伝播特性の物理的意味を示すよう、フィルダムの動的解析の結果に対

して、2で示した地震波伝播特性評価の手法を適用するプログラムを作成した。それにより、2で示した評価手法により堤体内の地震波伝播特性が評価できることを数値解析により視覚的に示す。

2 農業用ダム地震計観測記録の処理解析方法

地震計観測記録の処理方法を Fig. 1 に示すとともに以下に述べる。地震計はその時点での最新,最良のものを選定することとされており(建設省土木研究所ダム部(1997)),結果として農業用ダムの既設地震計はメーカー及び装置の新旧も多種多様である。しかし最近の機種については、各社独自に定めたヘッダ部分やヘッダファイルを除いて、波形部分のバイナリデータについては WIN フォーマットと呼ばれる公開された様式に統一されるようになってきた。旧型機では個別のフォーマットが使われているが、波形データ部分は単純なものであり容易に読み取り可能である。そこで、まず初めに全ての地震計データの形式に対応したプログラムを作成し、テキストファイルや表計算ソフト形式に変換することなく直接的に取り扱えるよう整備し、一連の地震計観測記録を逐次ファイルを読み取る (Fig. 1)。

バイナリデータから波形を読み取ったのちに、一つの地震観測波形記録に対して、10秒区間毎に区切りを行い、またその区間毎に基礎一堤頂など2点間の相関関係を解析することにより、ダムの振動特性や地震波伝播特性とその地震時における時間変化を評価する。また地震動の初動、主要動コーダといった区間毎の平均化処理を行う。

次に蓄積された一連の地震観測波形を自動的に読み取り逐次解析に供することができるという特徴、また一つ一つの地震における構造物の振動特性、地震波伝播特性の変化が評価できるという特徴を活かして、構造物の地震波伝播特性の長期的な変化の評価を行う。

ここで、フィルダムの監査廊と堤頂の観測記録に基づきその間の地震波伝播特性の評価を行う具体的な方法について述べる。ダムの基礎-堤頂間等の応答関係の評価は周波数領域の解析が一般的であるが(佐藤ほか(2013); Ohmachi and Tahara(2011)),近年時間領域の応答関係に注目した解析も行われてきた(黒田ほか(2013); 茂木ほか(2015))。本報では地震学・地震工学分野において適用されてきた手法であり、近年土木構造物における地震波伝播速度を評価する手法として活用されている地震波干渉法(王ほか(2013), Nakata et al.(2015))を用いて、時間領域の応答から地震波伝播速度を評価した事例を示す。地震波干渉法は構造物や地盤における鉛直アレイ型の地震計観測記録において適用実績の多いデコンボリューションによる地震波干渉法 (Snieder and Safak (2006); Nakata et al.(2013); 黒田ほか(2013)) を採用した。実際の解析は、具体的には以下のように行った。

ここで $u_1(t), u_0(t)$ を2点での振動波形とすると

$$u_1(t) = D(t) * u_0(t) \quad (1)$$

という関係を満たすような $D(t)$ を推定することとする。ここで演算子 $*$ は重畳積分を意味するものとする。周波数領域では、 $D(t), u_1(t), u_0(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $D(\omega), u_1(\omega), u_0(\omega)$ とすると

$$D(\omega) = u_1(\omega) / u_0(\omega) \quad (2)$$

となる。この式のままで $u_0(\omega)$ の一部が 0 や非常に小さい値となった場合に不安定となる。デコンボリューション干渉法では安定化のため次式による推定が行われる(例えば Sawazaki et al.(2009))。

$$D(\omega) = \frac{u_1(\omega)u_0^*(\omega)}{|u_0(\omega)|^2 + \varepsilon} \quad (3)$$

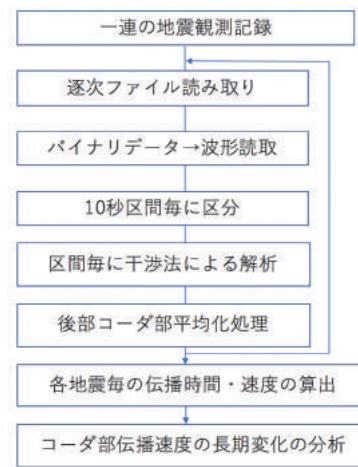


Fig. 1 本報における解析の手順
A schematic diagram of analysis

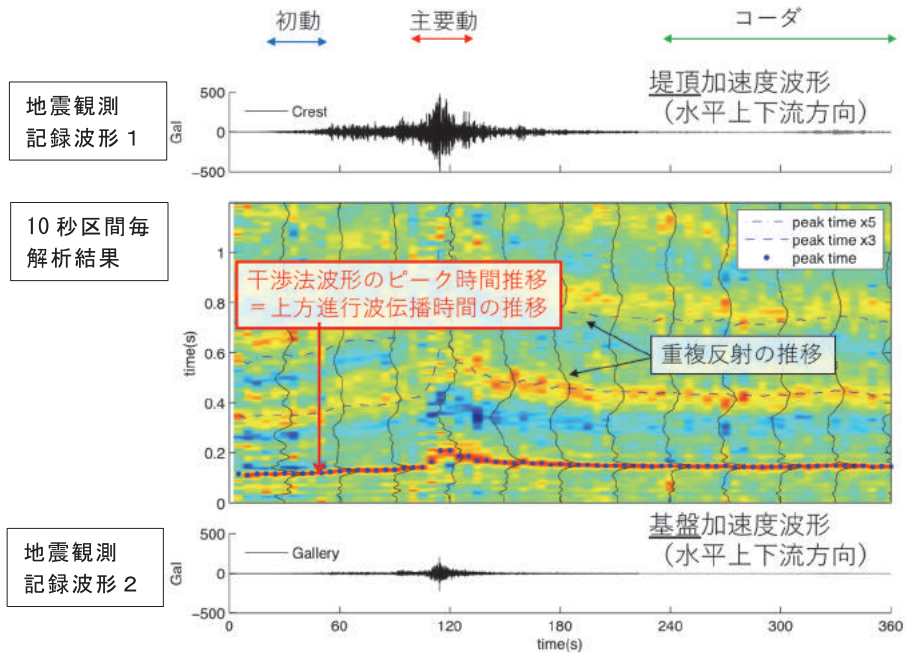
ここでアスタリスクは複素共役を意味し、 ε は安定化のための因子であり正の実数である。この $D(\omega)$ を逆フーリエ変換により時間領域に変換することにより $D(t)$ を推定した。

以上の解析を Fig. 1 内に示した手順に実装することにより、一連の地震計観測記録に逐次解析を行った。

3 地震波伝播時間変化の評価結果

2で述べた処理方法を大規模な地震の観測記録に適用し、大規模地震の影響による地震波伝播時間の変化を評価した事例について述べる。

Fig. 2 に茨城県常陸大宮市にあるフィルダム(御前山ダム)における東北地方太平洋沖地震の堤頂・監査廊の地震計観測記録に地震波干渉法により評価した時間領域応答の時間変化を示した。評価は Fig. 1 で示した10秒区間毎に地震波干渉法を適用した結果を、濃淡の分布図として示した。地震波伝播時間は時間領域応答の初動のピーク時間に相当黒点で示した点の値となる。地震波伝播時間は加速度の増大にともない増大し、100cm/s² を超過すると顕著に増大し、地震イベント全体での加速度最大値において最低値となった。その後、加速度の低下にともない伝播時間は減少したが初期の伝播時間には



(中段のコンター図は 10 秒区間毎に地震波干渉法を適用した波形の時間の推移0、その初動ピークから上方進行波の伝播時間の推移を読み取った結果を示す。110 秒付近の強い地震時には伝播時間が顕著に遅延し、その後コーダの領域では一定の値に漸近する。(コーダの領域の伝播時間の平均を各地震) 0 に算出した結果が図 3 0 1 する。

Fig. 2 地震時の地震波伝播時間の変化の評価
Analysis for change in seismic propagation time during an earthquake

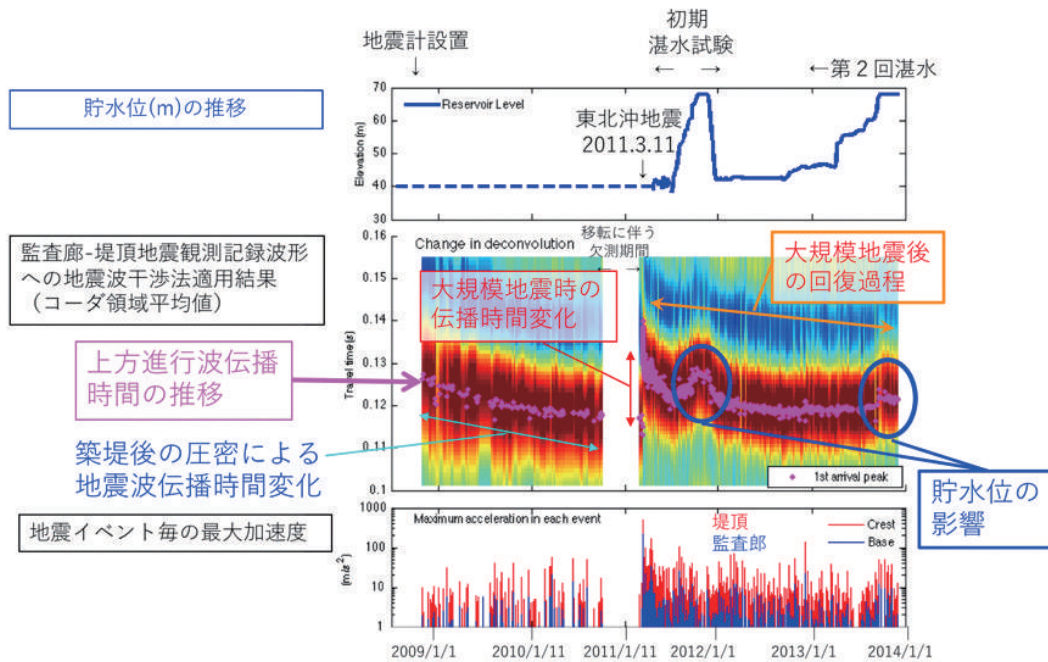


Fig. 3 後部コーダ波の地震波伝播時間の長期的な変化
Analysis for long-term change in seismic propagation time of late coda waves

達しなかった。結果として主要動の強震を受ける前の伝播時間と主要動から十分時間経過した後部コーダにおける伝播時間には差が生じた。このことは基礎-堤頂間における振動の応答特性が強震により顕著に変化したことを示すものである。このように地震時の地震波伝播特性の変化を評価できる。

Fig. 2 の後部コーダ(ここでは地震計観測記録の尾部の 20 秒間における伝播時間は地震強度による非線形性等の影響

の少ないダムの剛性を反映するものと考え、上記の解析を築堤後の地震計設置から東北地方太平洋沖地震後 1000 日に発生した 1,462 回の地震の観測記録に繰り返し適用し、後部コーダ地震波伝播時間の長期的経時変化を評価した結果を Fig. 3 に示す。築堤後の圧密過程や湛水に伴う貯水位の変動によっても伝播時間は変化したが、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の影響により発生した変化よりは小さ

いものであることがわかる。

4 逐次解析による地震波伝播特性長期的変化の定量的解析の試み

逐次解析によって得られたダムの地震波伝播特性の時系列解析の試みと方法について述べる。

ここでは地震波伝播時間を監査廊と天端の地震計間の高低差 51m で除して地震波伝播速度に換算した結果について述べる。

前章で述べたような強震時に発生した地震波伝播速度の低下は、その後、上昇傾向がみられ見かけ上回復過程を示したように見えた。このような一時的な地震波伝播速度の低下とその回復過程については、地盤材料一般にもみられる現象であり、healing とよばれ現在地震学分野においても大きな興味の対象となっている。このような回復過程については、縦軸に地震波伝播速度を、横軸の時間軸を対数でとった場合に線形に変化することから対数関数によって表現されることもあるが、この場合、速度低下が発生した直後の時間に相当する時間0に近づいた場合には負の無限大に発散し、また十分時間が経過したあとは無限大に発散することになり、物理的な意味を見出すことが難しい。このような対数時間による近似の有効性を活用しながら、発散の問題を回避できる方法として、回復過程を様々な時間スケールの緩和過程の線形和とみなした以下の式が提案されている(式(4)) (Snieder et al (2017))。

$$R(t) = \int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} d\tau \quad (4)$$

ここで $R(t)$ は速度低下の変化を示す関数であり、 t は速度低下が発生してから経過時間、 τ は速度低下のその後の変化量

を緩和時間とみなした場合の時定数となる。

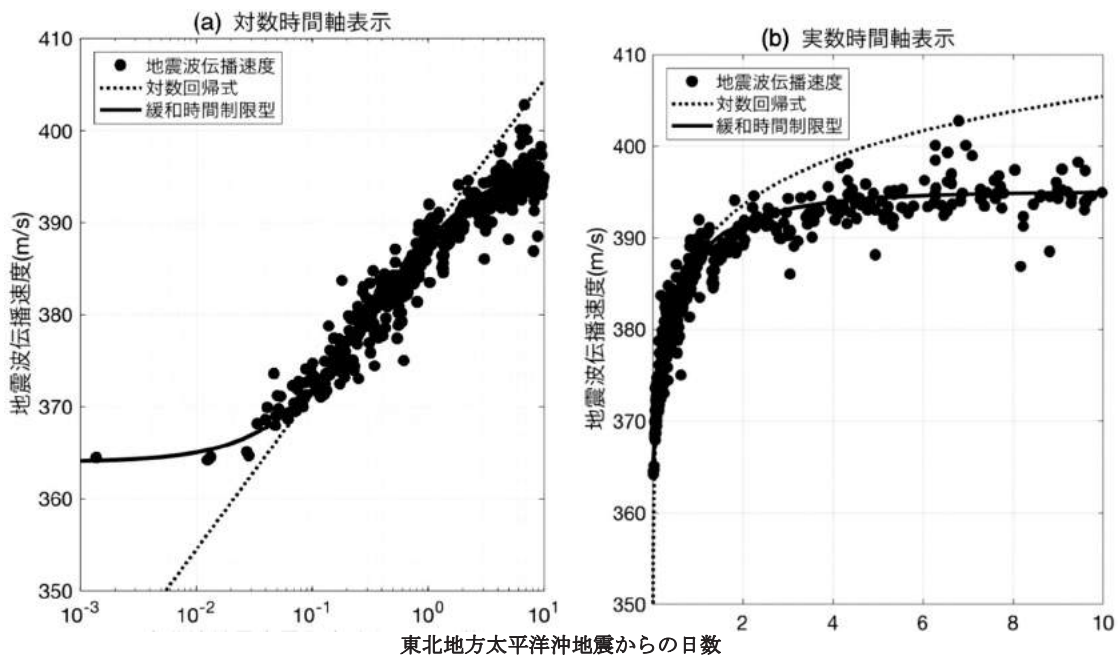
これはより一般的には

$$R(t) = \int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} f(\tau) e^{-t/\tau} d\tau \quad (5)$$

と表現することができ、この場合 $f(\tau)$ は速度低下を示す $R(t)$ に対する緩和時間 τ の寄与度を示すものである。式(4)はその寄与度が緩和時間に反比例する、すなわち緩和時間が短いものほど寄与度が大きく、緩和時間が長いものの寄与度が少ないということの意味する。これは例えば緩和時間が短いものは現象としてスケールが小さい速度低下からの緩和現象と考えれば、そのような事象は、スケールが大ききものと比べて起こりやすく発生頻度が高く、結果として寄与度が高いということになり、合理的と考える。なお熱力学的考察により速度低下の原因となったエネルギーがアレニウス則に従う場合、 $f(\tau)$ が $1/\tau$ に比例することが示されており(Snieder et al (2017))、そのような場合において式(5)が式(4)のようになると考えられる。

以上のように式(4)は速度低下の変化が、 $\tau_{min} \sim \tau_{max}$ までの緩和時間を有する指数減衰の重ね合わせで表現するものである。また式(4)において τ_{min} を0に、 τ_{max} を無限大に漸近させた場合には対数曲線に漸近する。よって $\tau_{min} \sim \tau_{max}$ の範囲に十分含まれる時間 t 、すなわち $\tau_{min} \ll t \ll \tau_{max}$ の範囲を考える場合には対数とみなすことができる。以上のことから、式(4)による回復をここでは緩和時間制限型の対数回復と呼ぶこととする。

Fig. 4 に前に述べた地震波干渉法の後部コーダ波への適用により評価された地震波伝播速度の地震後10日の変化を示した。また図に対数式による近似と式による緩和時間制限型の近似曲線とを示した。対数式による近似は速度の緩和過程をある程度表現しているが、緩和時間制限型の回復曲線は地震による変化発生直後と十分時間が経過したあとの漸近的な



東北地方太平洋沖地震からの日数
 Fig. 4 大規模地震前後の地震波伝播速度低下後の長期的な変化の回帰分析
 Regression analysis for a long-term change in seismic propagation property induced by a huge earthquake

挙動をよく表現することができるといえる。

5 数値計算による地震波干渉法適用結果の物理的な意味の確認

ここでは、ダムの動的解析の結果を元に地震波干渉法による伝播時間の意味について検討する。

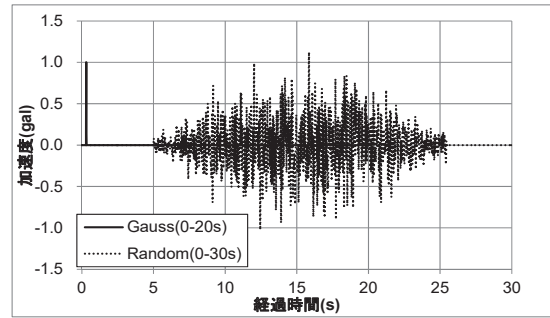
堤体全体の基本的な振動特性を把握するため、2次元断面モデル(河床部最大断面)を用いた動的解析を実施した。解析には農業用ダムの耐震評価に一般的に使用されているISCEF(センチュリーテクノ社製)を用いて、等価線形化法のシミュレータにより計算を行った。ただし後に述べるように、入力した地震動の加速度は小さいため、線形応答の領域であり、本報で示した解析に大きな加速度やそれに伴う剛性低下などの効果の影響は現れていない。

解析モデルの形状と概要を Fig. 5 に示した。入力波形はランダム波を最大 1gal 程度に調整して解析モデル底面に入力した。また干渉法適用結果の比較のためにガウス波(ガウスの誤差関数を用いるパルス状の波形)を入力した。本報で用いたランダム波、ガウス波とそのスペクトルを Fig. 6 に示した。ガウス波の入力結果を Fig. 7(a)、ランダム波の入力結果に、前述の地震計観測記録と同様に地震波干渉法を適用した結果を Fig. 7(b)に示し比較を行うと、干渉法の結果はガウス波同様に上方に進行する様子を確認することができた。以上のことから、地震波干渉法によって得られた波形の初動のピークの時間は、監査廊一端地震計間の地震波伝播時間とみなすことができることを数値計算によっても確認することができた。

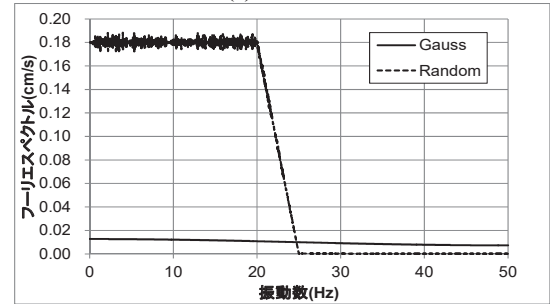
6 結 言

本報では地震計観測記録の逐次解析処理のシステムの整備を進めるとともに、以下のプロセスによる地震波観測記録の処理を提示した。

- 1) 農業用ダム地震計観測記録の自動読み取り
- 2) 地震時地震波伝播速度の変化の評価
- 3) 後部コーダ波に注目した地震波伝播速度の長期的な変化の評価



(a)入力波形



(b)入力波形のスペクトル

Fig. 6 数値解析(動的解析)に用いた入力波形について
Waveform and spectrum of excitation in numerical simulation

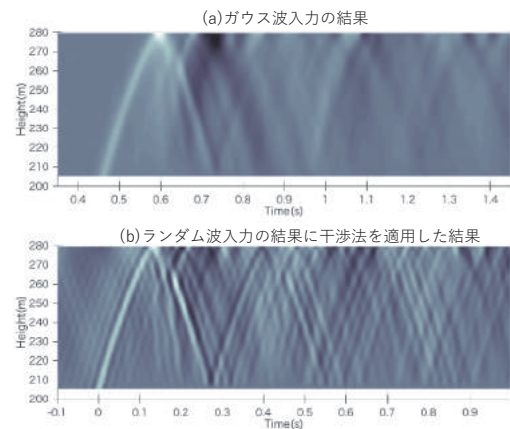


Fig. 7 数値解析(動的解析)におけるガウス波入力の結果とランダム波入力の結果に干渉法を適用した結果との比較
(コア中央部の波形プロファイルを表示)

Waveform profile in core in the simulation of gaussian pulse and deconvolved waveform in the simulation excited by random wave

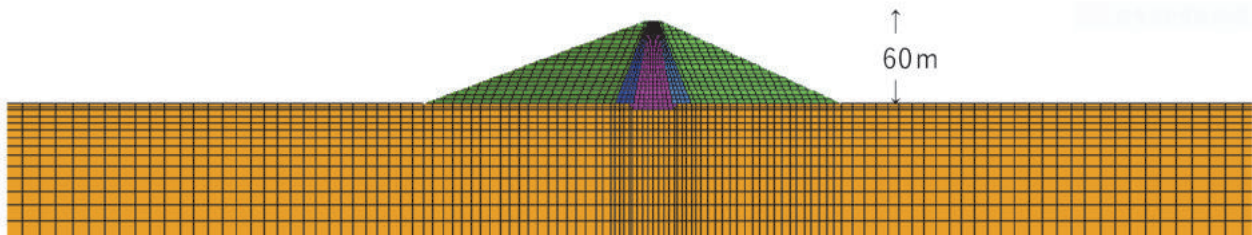


Fig. 5 数値解析(動的解析)に用いたモデル
Numerical simulation model

4) 地震波伝播速度低下量およびその緩和過程に関する定量的解析

地震波伝播速度低下量およびその緩和過程に関する定量的解析については、近年、大規模地震が発生しており、同様の現象が他地区においても確認されていることから、より多くの適用事例を示すことによって、ダムの形状や構造、材料による相違などについても、検討を行うことができると考える。今後はこのような方法のルーティン化を行い、広く多くの農業用ダムに適用し事例収集を行いたいと考えている。

謝辞: 現地調査およびダム地震計データの収集にあたって管理者、関係者の方には多くの協力賜りました。また4については、コ罗拉ドマイズ大学 Roel Snieder 教授の助言に基づき解析を実施しました。本報はイノベーション事業(No. 28002A)および科研費基盤A(No. 25294117)等に基づき実施した研究に基づきます。記して謝意を表します。

引用文献

- 北谷康典, 黒田清一郎(2016): 国営造成農業用ダムにおける地震計システムの整備, 水と土, **178**, 51-55
- 黒田清一郎, 増川 晋, 田頭秀和(2013): 建造物の地震波伝播特性評価と経年変化監視への適用性, 農業農村工学会誌, **81**(8), 627-630
- 黒田清一郎, 田頭秀和, 増川 晋(2014): 長期供用農業用ダムにおける地震観測システムの整備とその意義, 農業農村工学会誌, **82**(12), 19-22
- 黒田清一郎, 北谷康典, 田頭秀和, 中村康明, 吉野英和, 増川 晋 (2017): 農業農村工学会誌, **85**(3), 1-4
- 建設省土木研究所ダム部(1997): ダムに設置する地震計の設置位置, 設置方法, ダム技術, **126**, 56-57,
- 佐藤信光, 曾田英揮, 太田垣晃一郎(2013): 実測地震記録による既設ダム堤体の動的特性および物性値の推定と適用, ダム技術, **(321)**, 40-47
- 王欣, 正木和明, 入倉孝次郎(2013): 常時微動を用いた被災建物の層間せん断波速度の測定, 日本地震工学会論文集, **13**(2), 22-36
- 茂木秀則, 曾田英揮, 川上英二, 大町達夫(2015): ロックフィルダムにおける長期間にわたる地震計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**(3), 139-149
- Nakata, N., Snieder, R., Kuroda S., Ito S., Aizawa T., Kunimi T., Nakata, N., R. Snieder, S. Kuroda, S. Ito, T. Aizawa, and T. Kunimi (2013) : Monitoring a building using deconvolution interferometry, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103** (3), 1662-1678
- Nakata, N., Tanaka W., Oda, Y. (2015) : Damage Detection of a Building Caused by the 2011 Tohoku - Oki Earthquake with Seismic Interferometry, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**(5) DOI: 10.1785/0120140220
- Sawazaki K., H. Sato, H. Nakahara, and T. Nishimura (2009) : Time-Lapse Changes of Seismic Velocity in the Shallow Ground Caused by Strong Ground Motion Shock of the 2000 West-ern-Tottori Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **99**, 352-366
- Snieder, R. and E. Şafak (2006) : Extracting the Building Response Using Seismic Interferometry, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**, 586-598
- Snieder, R., Sens-Schoenfelder, C. and Wu, R., (2017) : The time dependence of rock healing as universal relaxation process, *Geophys. J. Int.*, **208**(1), 1-9
- Tatsuo Ohmachi, Tetsuya TaharaTAHARA (2011) : Nonlinear response characteristics of a central clay core rock fill dam, *SOILS AND FOUNDATIONS*, **51**(2), 227-238

原稿受理 平成31年1月25日

Time Lapse Analysis of Seismic Propagation Property Based on a Series of Seismic Records Obtained by Existing Seismometer of Dam

KURODA Seiichiro*, TAGASHIRA Hidekazu*, MASUKAWA Susumu**,
WATANABE Daisuke*** and KAGEURA Hiroki***

* Structural Engineering Unit , Division of Facilities and Geotechnical Engineering

**Director, Division of Facilities and Geotechnical Engineering

***Sanyu Consultants Co.

Abstract

The existing seismometers installed at the dams for irrigation built by Ministry of Agriculture, Fisheries, and Forestry in Japan has recorded many seismic records during huge earthquake events. Those are useful for analysis to understand how dams moved during earthquake. Those records are valuable as the evidence not only to show the behavior of dams caused by but also to retrieve the index to reflect the dynamic property of dams. In this sense, we have applied the concept of seismic interferometry and its method to seismic records of dams to estimate their property of seismic wave propagation and the dynamic proper ties of those structures.

This report show the applicability of seismic interferometry for a series of seismic records obtained by existing seismometer of dams, including small earthquake records. Based on analysis for over 1,000 waveforms of acceleration during about 10years, we can retrieve the waveforms of time domain response and its change. We analyzed the change after huge earthquake and its healing process, considering it as relaxation process.

Finally we showed the first arrival time estimated by seismic interferometry is considered as the travel time between seismometer based on numerical simulation.

Though we must verify the applicability of this method to the other many dams, this method might be expected to be more useful to estimate the seismic response and its change in dams.

Key words: Dams for irrigation, Seismometer, Seismic Records, Seismic wave propagation, Time lapse analysis