

〔農工研技報 217〕
〔101 ~ 113, 2015〕

既設地震計の微小振動記録への地震波干渉法の適用による 農業用ダム地震波伝播特性評価の試み

黒田清一郎* 増川 晋** 田頭秀和*

* 施設工学研究領域構造担当

** 施設工学研究領域

要 旨

本報では、農業用ダム既設地震計の観測記録から、有感地震以外の微小な振動についても、地震波干渉法に基づき時間領域応答を抽出できるかどうかを検討する。そのために、実際の農業用ダムの既設地震計において、10時間以上の連続的な振動波形記録を取得し、それを対象とした検討事例を示す。その結果、一定強度の有感地震において得られた地震時時間領域応答と同様の結果を、より微小な無感地震や常時微動に伴う雑振動からも抽出できる可能性を示した。このことから地震波干渉法概念に基づく提案手法は、一定強度の地震を待つ事無く、より頻度の高い評価・監視を行なうことができる可能性を示すことができた。

キーワード：農業用ダム、地震計、振動波形、地震波伝播、常時微動

I 緒 言

農林水産省所管の国営造成のダムでは、地震計の整備が進められ、大規模地震の発生時には貴重な地震時振動波形データを記録してきた。このような強震動観測記録は、大規模地震時にダムがどのような挙動をしたかを示す貴重なものであり、農業用ダムにおいてもこれらの記録に基づいた総合的な解析がなされてきた(増川他, 2002, 2005, 2006, 2012)。

一方で、ダムの地震時の挙動は、ダムに入射する地震波の特徴だけではなく、ダム堤体周辺の地盤や堤体そのものの特徴を反映する。現在、一般的にはダムの地震計は、基礎地盤に相当する箇所と、堤頂に相当する箇所の少なくとも2点に配置される場合が多く、その場合、基礎—堤頂間の応答関係を評価することによって、ダムの状態そのものを評価・監視できる可能性もある。筆者等はそのような考えに基づき、地震波干渉法と呼ばれる技術に基づき、構造物内の地震波伝播特性を継続的に評価・監視する技術の開発と提案を行なってきた(Nakata et al., 2013; 黒田他, 2013)。また、この方法によって地震波伝播特性を継続的に評価することで、土構造物の圧密や強震動に起因する堤体内の力学特性の変化の指標が得られることを、遠心載荷振動模型実験により示した(黒田他2013)。上記提案手法は一定強度以上の地震時の振動波形を対象としたものであったが、その基礎とした地震波干渉法は地震動だけではなく常時微動に伴

う振動も対象とする概念である(白石, 2008, Wapenaar et. al. 2008, Schuster, 2009)。もし提案手法が、より頻度の高い微小振動や、基礎および周辺地盤の常時微動等に伴い発生するダム堤体の雑振動にも適用できるとすれば、一定強度の地震の発生を待たずとも、頻度高く、あるいは随時評価・監視することが可能となる。地震学分野では地震波干渉法の有効性の一つとして、地震が発生しない場所においても活用できることが挙げられている(Nishida et. al. 2009)。よって、農業用ダムの分野においては、地震発生頻度が低い地域やダム地震計設置期間が短く十分な観測記録が得られていないサイト等においても、ダムの振動特性等を把握する際に有効に活用されるものと期待される。

ダムに設置された地震計は強震計であり、近年の大規模地震の頻発を背景として最近では2000Gal (cm/s²)以上、近年では3000~4000Gal (cm/s²)程度まで計測できる仕様となっており、微小振動を対象としたものではない。しかし近年の地震計はアナログ—デジタル変換ボード部分の高性能化によって0.001Gal (cm/s²)以下の分解能を有するものもある。また感震器の多くは信号出力のデジタル化が行なわれており、ダム地震計においては必ず必要となる長い信号通信ケーブルによるノイズの増大の懸念も少ないものとなった。よって従前に比べダム地震計のS/N (信号—ノイズ)比は向上しているものと考えられる。また最近の震度表示器(データ収録器)の一部では、一定の装置の準備と設定を行なえば、地震時だ

けではなく、非地震時も含めて常時振動波形データを観測記録として保存できる機能も有している。このような状況をふまえて、提案してきた手法が一定強度以上の有感地震だけではなく、無感地震や、常時微動に起因する堤体の雑振動など、より微小な振動に対しても適用できるかどうかを検討することは有意義と考える。

そこで本報では、農業用ダム既設地震計の観測記録から、より微小な振動についても地震波干渉法に基づく地震時間領域応答を抽出できるかどうかを検討するための手続きを示すとともに、実際の農業用ダムの既設地震計で取得された観測波形を対象とした適用事例を示す。その結果、一定強度の有感地震において得られた地震時間領域応答と同様の結果を、より微小な無感地震や、非地震時の雑振動からも抽出できる可能性を示す。

II 現地概要および研究の方法

対象としたダムは、農業用ダムであり中央土質遮水壁型のロックフィルダムである。ダムの規模は堤高約50m、堤頂長約300m、湛水面積は約50haである。

地震計は2007年に設置されたものであり、感震器は2台で、ダムの最大断面上の堤頂と監査廊内に設置されている。上部の感震器は風雨から保護するためにマンホール中に設置され、堤頂から約50cm下方に設置されている。両感震器はほぼ鉛直線上に配置されており、高低差は51mである。震度計を兼ねたデータ収録器は数百m以上離れた管理事務所に設置されている。

感震器はデジタル出力サーボ式感震器とよばれるもので、感震器内部にあるAD（アナログ→デジタル）変換ボードによってデジタル信号に変換され、光通信ケーブルを通じてダム管理所内にある波形収録器に送信される。検出方式はフォースバランスサーボ式加速度計であり測定範囲は最大で $\pm 2000\text{Gal}(\text{cm}/\text{s}^2)$ である。このような加速度計が水平2方向および鉛直方向の合計3方向に内蔵されている。地震計設置場所からデータ収録器までの間は光ファイバによるデジタル通信が行われており、この過程でノイズは原理上発生しない。

データ収録機器に通信されたデータは、1ビット当たりの加速度が $1/4096 = 0.00024\text{Gal}(\text{cm}/\text{s}^2)$ として換算される。サンプリング速度は100Hzである。

上述の地震計観測システムのデータ収録部は、通常のトリガーによるデータ収録方法の他に、データロガーモードという機能を有しており、このモードで運用すれば非地震時も含めて常時の振動データを収録することができる。そこでこのモードに設定を行い、振動データを取得した。調査計測は2013年9月に行われた。収録器の設定操作を行う場合やデータが収録されたCFカードの読み取り、交換の際には計測を一時停止する必要がある。そのためデータは断続する時間があるが、それ以外は常時連続したデータを取得することができた。

上記のようにして収録したデータを以下のように処理し、解析に供する。

- 1) 収録したデータのうち、断続箇所がなく、完全な連続性を持って収録された部分を選定した。
- 2) 地震波形データは3成分あるが本研究では水平上下流方向に注目する。そこで堤頂および監査廊に設置された地震計（以下それぞれ堤頂（Crest）および基礎（Base）の地震計とよぶ）の水平上下流方向成分のデータを選定した。
- 3) 各感震器のデータは1分毎のファイルにおさめられている。これを連続した期間について結合し、堤頂-基礎のそれぞれの水平成分の波形データとして2つのファイルにまとめた。
- 4) それぞれのデータについて温度変化等によるトレンド成分除去のためデジタルフィルターにより2秒周期以上の長周期成分を取り除いたものに更新した。次にこのデータについて以下の解析作業を行う。

- 1) 堤頂および基礎の波形データそれぞれについてグラフをプロットし概要を把握した。
- 2) 静謐期間（地震の発生もなく、工事や機械振動、交通振動等の人工的な影響も少ない期間）を選定して、その頻度分布などの統計的な特徴を明らかにした。
- 3) 2)の結果を参照しながら適切な閾値を設定し、地震発生時と思われる区間を設定した。なおこの地震発生時データには震度1以下の無感地震も含まれる。
- 4) 地震波干渉法により、上記地震発生時データから時間領域応答の抽出を行い、地震波伝播特性の特徴について評価を行った。
- 5) 地震発生時間を参考にして、地震の影響を受けている可能性のある波形データを注意深く取り除いた後のデータについて、地震波干渉法により時間領域応答の抽出を行った。その結果を、地震時のものと比較検証するとともに、抽出に必要な観測時間と収束状況について検討を行った。

III 解析に供したデータの概要について

データロガーモードによる地震計の連続観測振動波形データの取得は2013年9月17～19日の3日にわたって行われた。その間、機器設定やCFカードからの読み取り作業によって、3回の一時的なデータ収録の中断があったため、データは連続した4期に区分される。データの記録期間をTable 1に示した。またそれらをグラフ上にプロットしたものをFig.1に示す。

基礎部が0点のシフトを起こさず安定的な値を示しているのに対して、堤頂の方は $0.2\text{cm}/\text{s}^2$ 程度で1日周期とみられる0点の変化が生じている。基礎部の地震計が設置されている監査廊内は温度が安定であり日変化がほとんど生じないのに対して、堤頂部はマンホール内に設置されているものの、わずかに温度の影響を受けている

Table 1 取得した連続観測記録の一覧
List of continuous seismic records of the dam

September, 2013	Term	Start Time	End	Recording Time
1	Sep. 17	15:40:20 ~	08:16:10	16:35:50
2	Sep. 18	08:22:30 ~	20:55:50	12:33:20
3	Sep. 18	21:01:40 ~	07:51:00	10:49:20
4	Sep. 19	07:56:50 ~	09:02:10	01:05:20

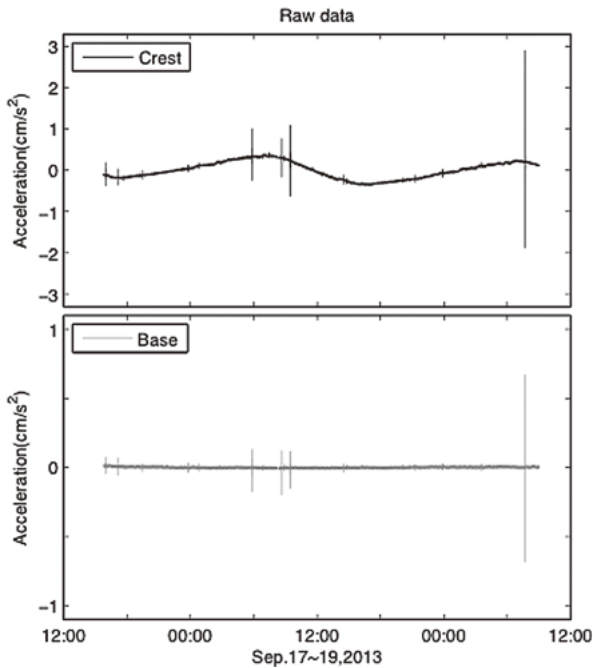


Fig.1 取得した地震計の連続観測記録の原波形

Waveforms of continuous records observed by the seismometer of the dam

ことが原因と考えられる。その変化は小さなものであるが、本報では 1 cm/s^2 以下の微小な振動にも注目しているため、これらのベースラインのシフトを除去するために、デジタルフィルターにより2秒周期以上の長周期成分を取り除いた。適用後の波形を **Fig.2** に示す。本図に示したように本ダムの地震計では、一定の振幅範囲（約 0.01 cm/s^2 ）の振動を記録しながら、それを超過する一時的な振動が生じるという様相になっていることがわかる。

本研究ではこれらの振動波形記録の中から、一時中断区間を含まない期間を選択することとした。ここでは表1における第3期に注目し、選択して解析を行った。第3期を選択した理由は、夜間から朝にかけての深夜、早朝期間を含むことから、人工的な振動の影響が少ないこと、またその期間中のなかに一定強度の有感地震を含むことなどが挙げられる。

Fig.3 に第3期の波形のみを拡大して示した。堤頂

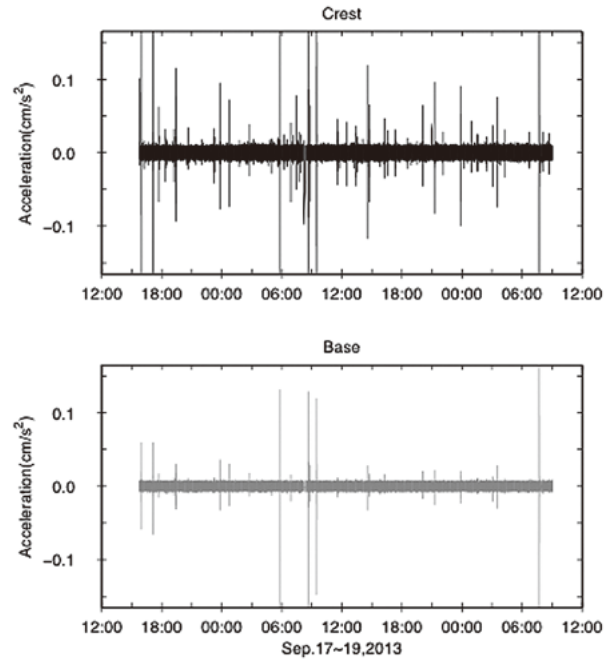


Fig.2 取得した地震計の連続観測記録のフィルター適用後の波形

High-pass filtered waveforms of continuous records observed by the seismometer of the dam

(Crest), 基礎 (Base) とともに示したのは水平上下流方向成分のデータである。共に常時約 0.01 cm/s^2 程度の振動を有するが堤頂の方がわずかに大きいことがわかる。これは基礎—堤頂間での振動の増幅を示すものであると考える。

IV 静謐時振動波形データの特徴

本報では **Fig.3** で示したようなデータを地震時のデータとそれ以外の雑振動データとに厳格に区別する必要がある。その方法としては閾値の設定が考えられる。適切な閾値の設定のために、ここでは静謐時の振動波形データの統計的な特徴を把握する。静謐区間として18日22:14:00から23:54:00の100分の期間を選択した (**Fig.4**)。

100分間で100Hzのサンプリング速度であることから、データ点数は1chあたり600,000点となる。これについて相対累積頻度分布を求めた (**Fig.5**) ところ、相対累積頻度分布は誤差関数で近似することができ両者はほぼ一致した。誤差関数のパラメータのうち分散については非線形最小自乗法により推定した。それぞれの標準偏差 σ は、堤頂で 0.00342 cm/s^2 、基礎で 0.00258 cm/s^2 と推定された。これに基づき頻度分布の形状を同じ標準偏差を持つ正規分布として推定したところ、実際の頻度分布の形状はほぼ一致した (**Fig.6**)。

次に10秒毎の区間中の最大値の推移を **Fig.7** に、頻度分布を **Fig.8** に示した。最大値の算出区間を10秒間とし

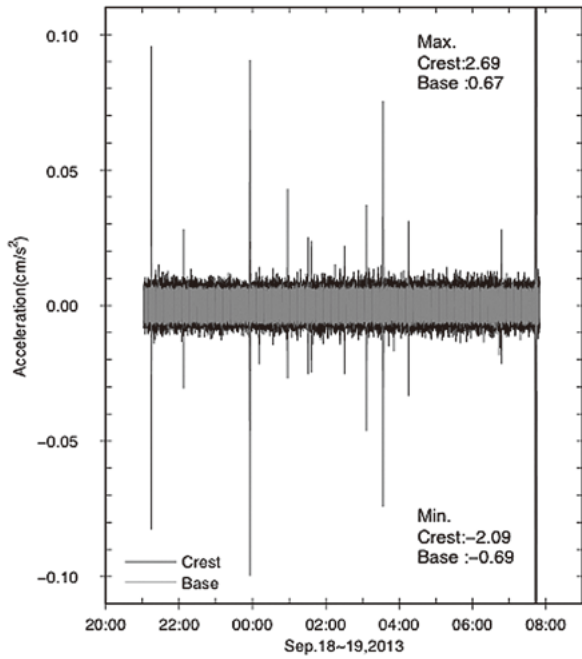


Fig.3 本研究で解析対象とした地震計の連続観測記録波形 (フィルター適用後)

High-pass filtered waveforms of continuous records observed by the seismometer of the dam (Targeted data in this study)

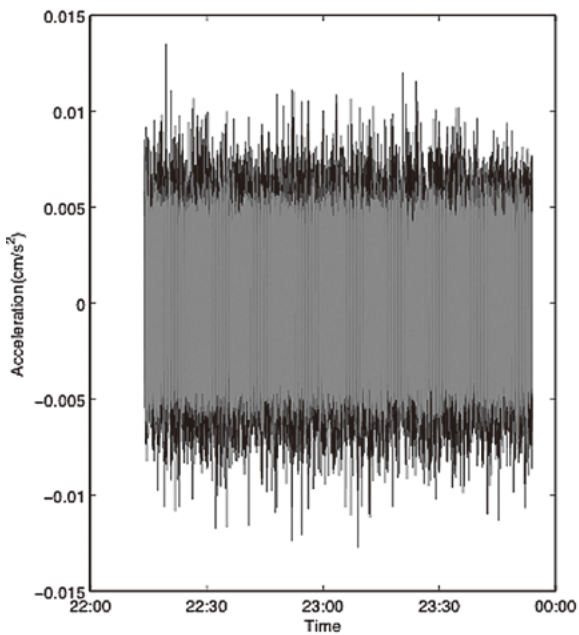


Fig.4 夜間静謐期間の連続観測記録波形

Waveforms of continuous records observed by the seismometer of the dam during a silent night term

たのは後の波形解析において、10秒毎の区間に区切って解析を行なうからである。

Fig.7およびFig.8より、基礎の方が最大値は小さな値に収まっており、約0.0075cm/s²程度で相対累積度数は

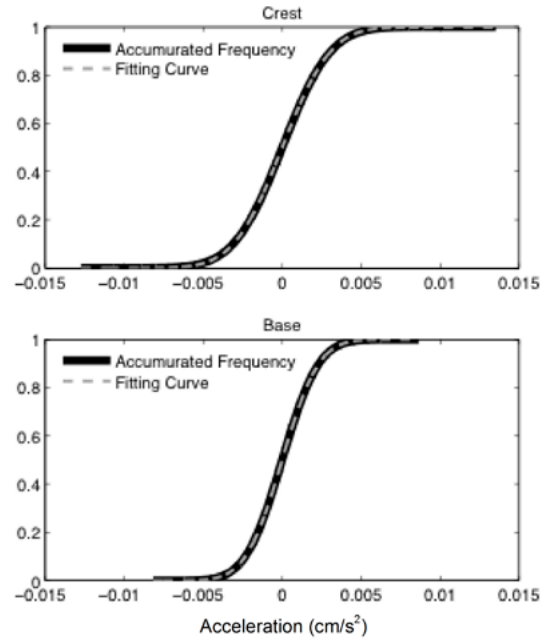


Fig.5 夜間静謐期間の連続観測記録波形加速度値の累積頻度分布

Cumulative relative frequency of acceleration values in continuous records observed by the seismometer of the dam during a silent term at night

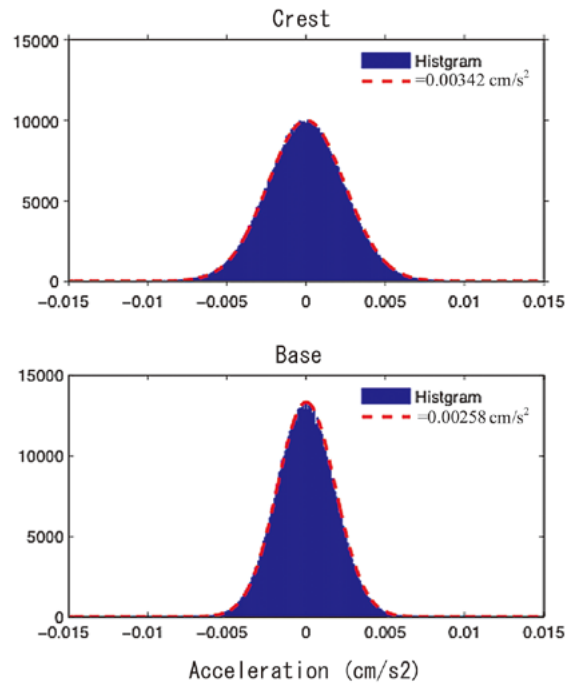


Fig.6 夜間静謐期間の連続観測記録波形加速度値の頻度分布 Histogram of acceleration values in continuous records observed by the seismometer of the dam during a silent term at night

90%を越え、0.009cm/s²を超えることはほとんどないことがわかる。また同様に堤頂では0.013cm/s²を超過する最大値はほとんど出現しないことがわかった。

V 地震時データの選出方法の検討

このような変動に対して、地震イベントを検出するための閾値を検討するために、Fig.9では、基礎部の閾値を0.0080, 0.0085, 0.0090, 0.0100cm/s²とした場合の超過数の頻度の経時変化を示した。

この図から閾値を0.008cm/s²に設定した場合には、微小な地震発生以外の場合にも、より頻繁にカウントしてしまう傾向があることがわかる。一方で0.0100cm/s²では超過するイベントは7回となるため、Fig.3における微小地震発生時の比較的大きな加速度値の発生回数に比べ

でも不十分となる。以上の結果から基礎部の閾値として0.0085~0.0090cm/s²前後を検討することとした。

次に閾値を基礎部で0.0085cm/s²とした場合に、それを超過したイベントを切り出す。超過した場合、前に1分、後に3分の観察期間を設けて、この間再び超過する場合があったときは一つのイベントとしてグルーピングした。このような方法で検出された区間と、その区間内での各最大値をまとめた一覧表をTable 2に示すとともに、その各区間に対応した振動波形についてFig.10(a)~(e)に示した。またTable 2にはFig.10の波形を目視によって確認し、地震によるものと思われるものには

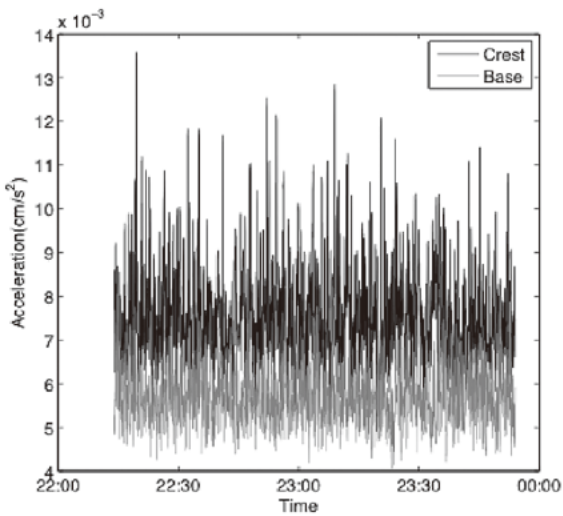


Fig.7 夜間静謐期間の10秒区間毎の最大値の変化
Change in maximum values during every 10 seconds of acceleration observed by the seismometer

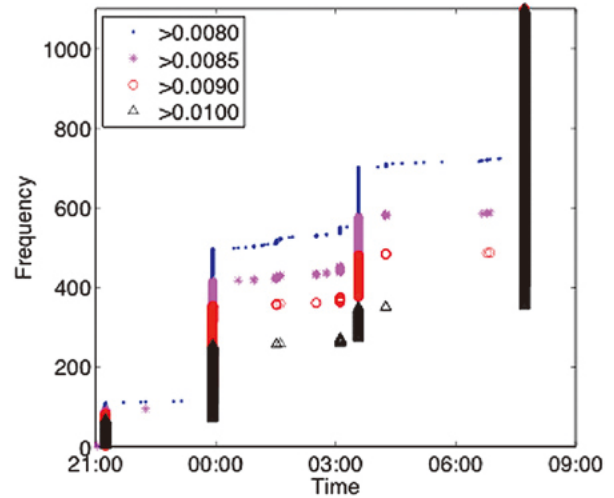


Fig.9 各閾値に対する加速度の超過頻度の変化
Change in frequency of excess over thresholds about acceleration values observed by the seismometer of the dam at the base

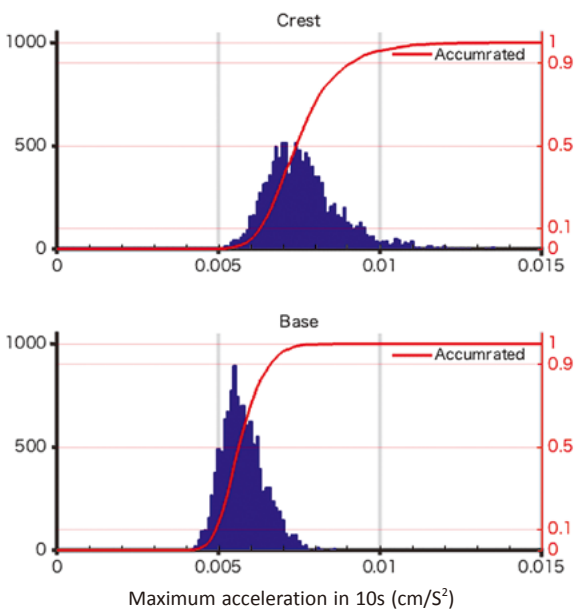


Fig.8 夜間静謐期間の10秒区間毎の最大値の頻度分布
Histogram of maximum values during every 10 seconds of acceleration observed by the seismometer

Table 2 閾値をもとに選出した期間と最大値(絶対値)の一覧
List of terms excess over the threshold, 0.0085cm/s² at the base, and the maximum absolute values during each term

Terms selected by the thershold (= 0.0085cm/s ² at the base)	Maximum vakuue (cm/s ²)		Event Type
	Crest	Base	
1 09/18 21:01:50 ~ 21:05:30	0.0105	0.0087	
2 09/18 21:13:45 ~ 21:17:53	0.0956	0.0252	Earthquake1
3 09/18 22:13:57 ~ 22:17:57	0.0098	0.0086	
4 09/18 23:54:01 ~ 23:58:40	0.0997	0.0235	Earthquake2
5 09/19 00:32:45 ~ 21:36:45	0.0145	0.0086	
6 09/19 00:56:22 ~ 01:00:22	0.0429	0.0089	
7 09/19 01:27:09 ~ 01:34:20	0.0252	0.0105	Earthquake3
8 09/19 01:35:40 ~ 01:39:48	0.0246	0.0100	Earthquake4
9 09/19 02:29:38 ~ 02:33:46	0.0252	0.0097	Earthquake5
10 09/19 02:44:55 ~ 02:49:08	0.0124	0.0086	
11 09/19 03:05:44 ~ 03:09:46	0.0462	0.0203	Earthquake6
12 09/19 03:32:53 ~ 03:37:09	0.0753	0.0301	Earthquake7
13 09/19 04:13:58 ~ 04:18:00	0.0333	0.0103	Earthquake8
14 09/19 06:38:46 ~ 06:42:46	0.0125	0.0086	
15 09/19 06:45:58 ~ 06:49:58	0.0279	0.0091	Earthquake9
16 09/19 06:50:18 ~ 06:54:18	0.0108	0.0089	
17 09/19 07:42:04 ~ 07:46:04	2.6908	0.6853	Earthquake10

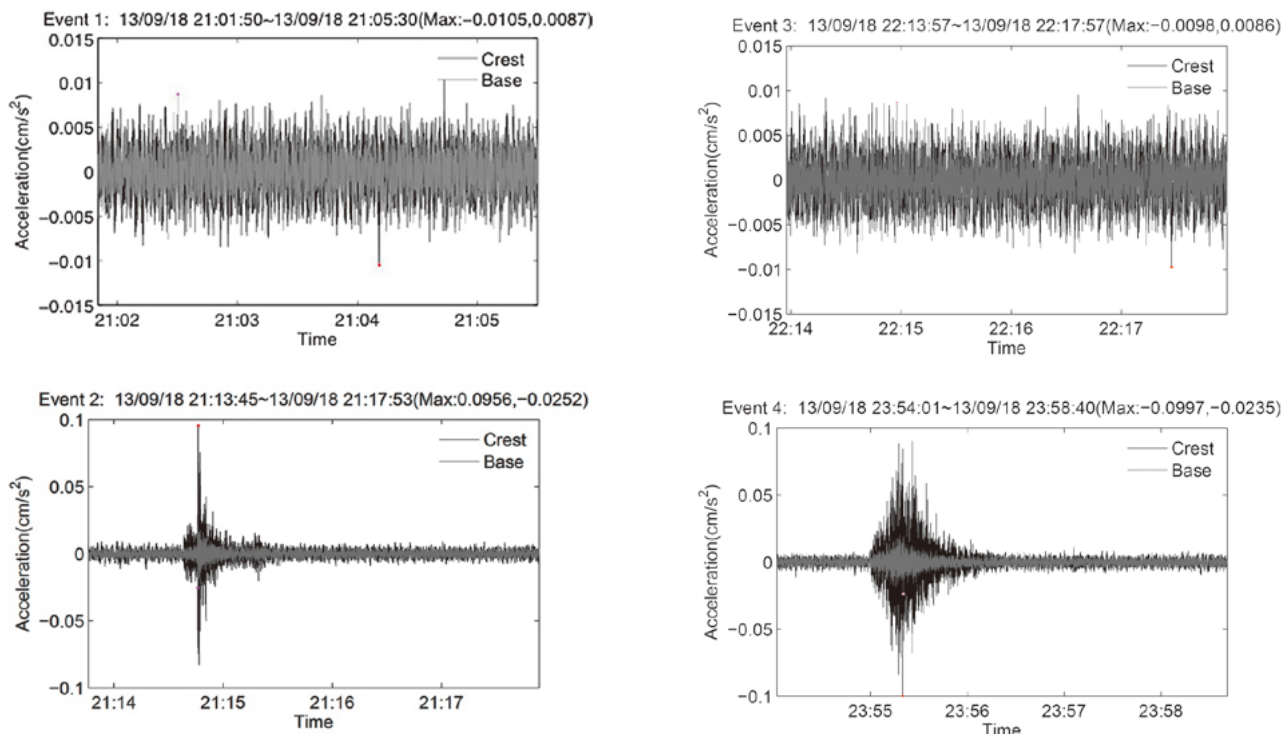


Fig.10(a) 閾値を基礎0.0085cm/s²とした場合に抽出された振動波形 (Event 1~2)

Waveforms selected by the threshold, 0.0085cm/s² at the base, continuous records observed by the seismometer of the dam (Event 1~2)

Event type 欄に Earthquake と記載し、また発生順に番号付けを行なった。なおEvent5, 6については基礎部に顕著な振動がみられないため地震動とは分類しないこととした。

Fig.10およびTable 2の結果より、少なくとも本報で解析対象とした時期について、基礎部の加速度の閾値を0.0090cm/s²に設定し、それを超過する区間を選出すれば、自動的に地震動による振動波形を区別することができ、またその区間を除いたものは地震の影響を受けていない可能性が高い区間となるといえる。

以降の議論においては、このような閾値による客観的な方法で、地震の影響を受ける期間と、影響を受けていない期間を判定する。なおここで地震とは有感地震だけでなく震度1に満たないような無感地震も含むものである。

Ⅵ 地震時データからの時間領域応答の抽出

Ⅳにおいて選出された地震期間の振動波形データから、時間領域応答の抽出を試みた。時間領域応答の抽出はNakata et al. (2013)らの地震波干渉法のビル構造物への適用を行なった方法に基づき、逆重畳を算出した。これは黒田他 (2013)と同様の方法である。さらに解析結果の安定のための平均化処理については、逆重畳算出

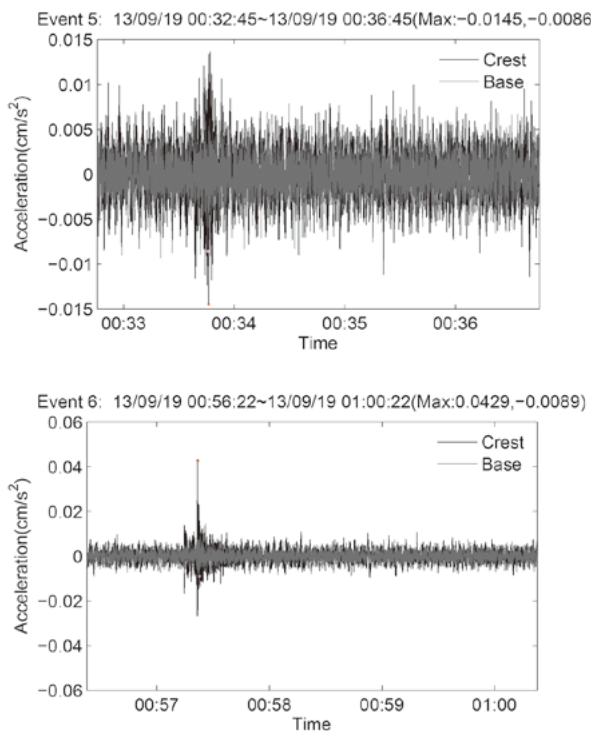


Fig.10(b) 閾値を基礎0.0085cm/s²とした場合に抽出された振動波形 (Event 3~6)

Waveforms selected by the threshold, 0.0085cm/s² at the base, continuous records observed by the seismometer of the dam (Event 3~6)

のスパンを10秒間とし、それを0.5秒間ずつずらし9.5秒間をオーバーラップさせながら全てのセグメントについて解析を行なった後に、積算あるいは平均化を行なう

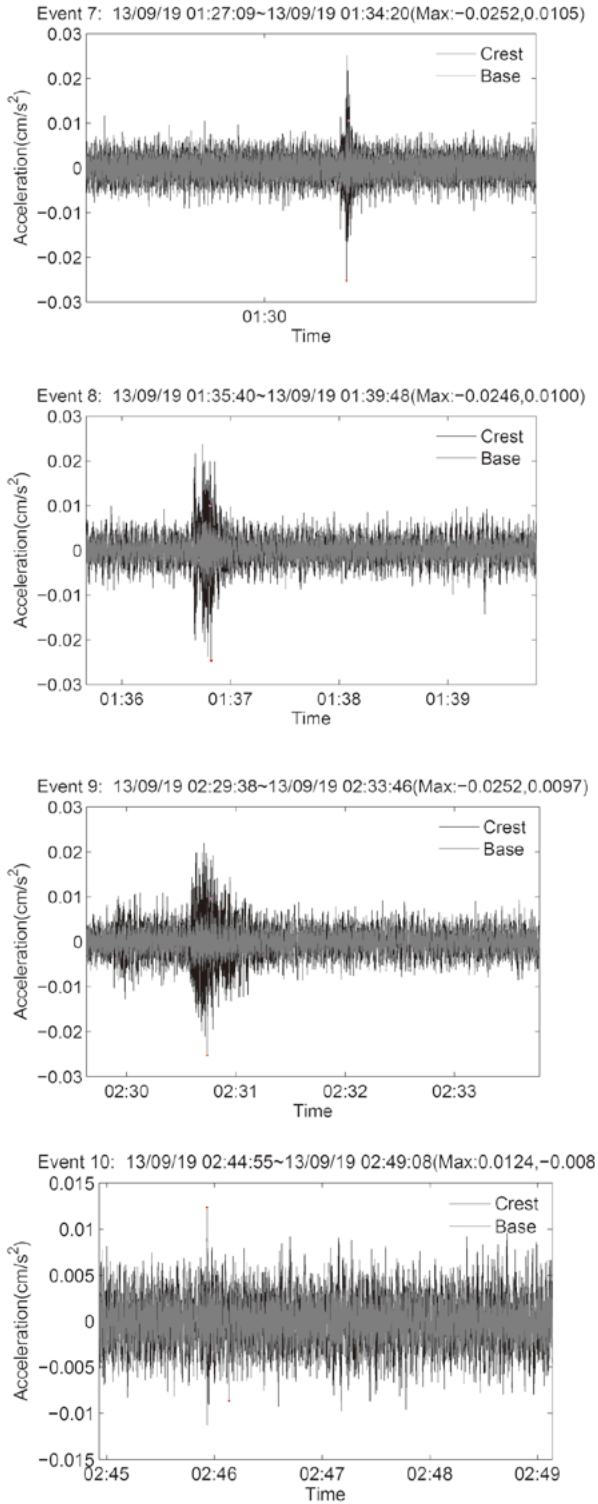


Fig.10(c) 閾値を基礎 0.0085cm/s^2 とした場合に抽出された振動波形 (Event 7~10)

Waveforms selected by the threshold, 0.0085cm/s^2 at the base, continuous records observed by the seismometer of the dam (Event 7~10)

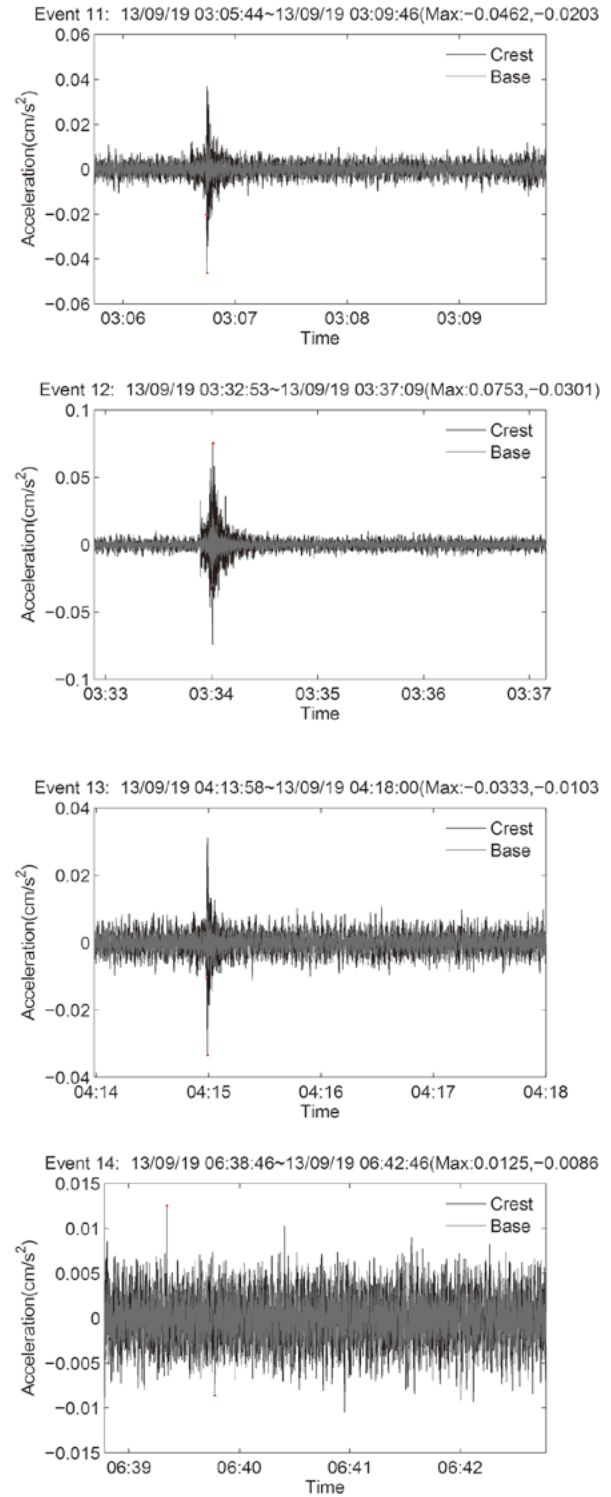


Fig.10(d) 閾値を基礎 0.0085cm/s^2 とした場合に抽出された振動波形 (Event 11~14)

Waveforms selected by the threshold, 0.0085cm/s^2 at the base, continuous records observed by the seismometer of the dam (Event 11~14)

という方法を採用した。

Table 2において地震による影響があると判断された10回の地震波形に対して、解析を適用した。解析結果

を Fig.11 に示す。構造物への地震波干渉法の適用に関する既往研究 (Nakata et. al., 2013, 黒田他, 2013) と同様に、Fig.11においても基礎から堤頂部にかけての上方進

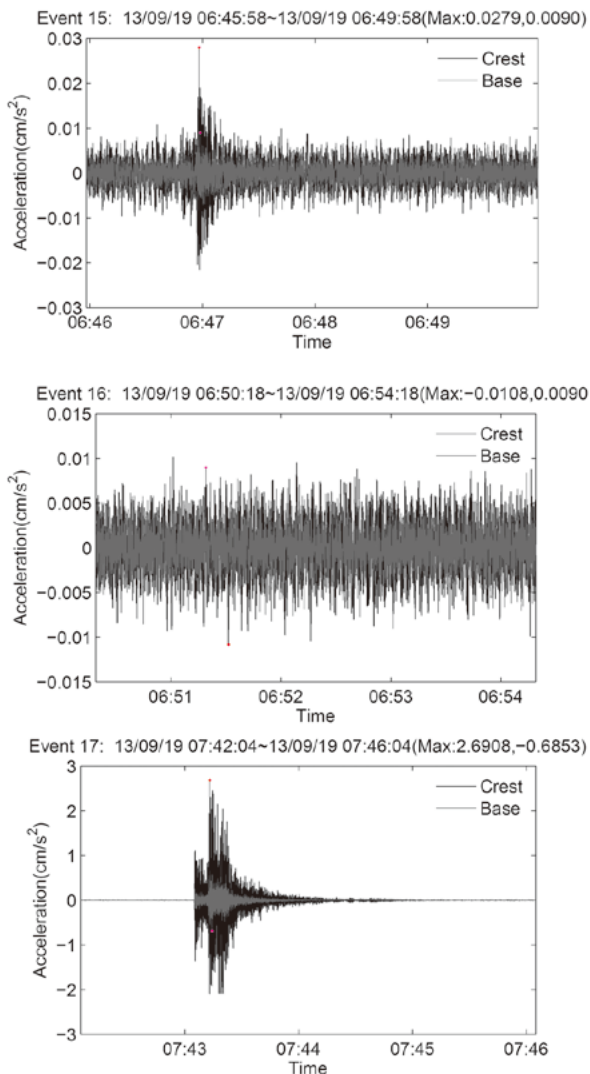


Fig.10(e) 閾値を基礎0.0085cm/s²とした場合に抽出された振動波形 (Event 15~17)

Waveforms selected by the threshold, 0.0085cm/s² at the base, continuous records observed by the seismometer of the dam (Event 15~17)

行波の伝播に対応した初動ピークを確認することができた。このピーク時間を Table 3 に示した。なお Table 3 に示した期間は、解析に供した期間であり、Table 2 に供した期間と異なる。その理由は、Table 2 における選出作業においては地震の影響を受けた可能性がある期間を全て選定し、それ以外の期間は地震を受けていないものとする必要から、閾値を超過した期間から前に1分、後に3分の余裕をもって期間を設定している。それに対して、Table 3 における期間の設定は、地震の影響を十分受けた波形について解析を適用することを目的とするため、期間中閾値を超えた時点の前の15秒と閾値以下で安定してから1分を期限としているためである。

初動ピーク時間の読み取りについては実際のデータのピーク値と前後2つのデータから2次関数補間 (Press et.

Table 3 時間領域応答解析の対象期間と応答の初動ピークおよび地震波形の最大加速度値の一覧表

List of terms for analysis, 1st arrival peak in time-domain response function, and maximum values of seismic waveforms

Terms selected by the threshold (= 0.0090cm ² /s at the base)	Peak time 1st arrival (s)	Maximum value (cm ² /s)	
		Crest	Base
1	09/18 21:13:42~21:15:55	0.1208	0.0253
2	09/18 23:53:58~23:56:43	0.1200	0.0235
3	09/19 01:30:15~01:32:22	0.1212	0.0106
4	09/19 01:35:46~01:37:51	0.1217	0.0100
5	09/19 02:29:35~02:31:48	0.1207	0.0097
6	09/19 03:05:41~03:07:49	0.1206	0.0203
7	09/19 03:32:51~03:35:11	0.1216	0.0302
8	09/19 04:13:56~04:16:01	0.1197	0.0103
9	09/19 06:45:56~06:52:21	0.1190	0.0091
10	09/19 07:42:01~07:47:35	0.1209	0.6854
	Max.	0.1217	0.6854
	Min.	0.1190	0.0091
	Average	0.1206	0.0834
	Standard deviation	0.00085	
	c.v.	(0.70%)	

al. 2007) によって有効数字4桁まで算出して示した。その平均値は0.1206秒であり、全10ケースについてはそのピークはほぼ0.12秒で変動は少なく、変動係数にして0.7%であった。解析対象となった振動波形の最大加速度は、堤頂では0.0247~2.69cm/s²の範囲であり、最小と最大では100倍以上のひらきがあるが、時間領域応答の初動については再現性の高い結果が得られたといえる。

ただし Fig.11 をみると、ピーク以降の変動については、例えば地震の最大加速度の大きなNo.10や次に大きなNo.2では、周期0.3秒程度の類似の特徴的な振動波形を見ることができ、それ以外では0近傍で平坦であるかランダムな振動を呈している。構造物の時間領域応答に関しては、初動ピーク以降の波形は構造物内の重複反射に対応したものであることが知られている (Snieder and Safak (2006))。地震の強度が小さい波形を対象とした場合、計測波形のS/N比が低くなるため、このような重複反射に対応した応答が顕われにくくなったものと考ええる。

一方で、フィルダムのように土構造物であり比較的地震波伝播過程において減衰が大きな構造物においても、上方進行波の到達に対応する初動ピークは特徴的であり、Fig.11の時間領域応答の中にも明瞭に見て取ることができる。有感地震であるNo.10だけではなく、それ以外の無感地震に分類される地震においても、初動ピークを明瞭に見て取る事ができ、またそのピーク時間については非常に安定的であった。本報で対象とした地震イベントは比較的強度の小さいものであり、大きな歪みの発生に伴う弾性係数等の非線形性が顕われない領域と考え

られる。

以上のことから本報の対象ダムにおいても、既往の研究と同様に、上方進行波の伝播に対応した特徴的なピークを確認することができ、その伝播時間については再現性が高く安定的なものであった。

Ⅶ 非地震時データからの時間領域応答の抽出

非地震時データについて、地震波干渉法を適用し時間領域応答の抽出を試みる。そのため、Table 2, 3に掲げたような基礎部で0.009cm/s²以上を検出した期間は地震の影響を受けているものと考え、この期間を除外した。特に後続の影響を一切除外するため、地震後は5分

間を除外区間とし、特に10番目に発生した地震についてはそれ以降全てを除外した。よって解析対象期間は9月19日7:42までとなる。また堤頂についても、閾値を0.013cm/s²に設定し、それ以上の値を示すデータは解析対象から除外した。

地震時データと同様に解析結果の安定のため、10秒間毎に解析を行ない、それを0.5秒間ずつずらし9.5秒間をオーバーラップさせながら全てのセグメントについて解析を行なった後に、平均化処理を行なうという方法を採用した。

Fig.12にその解析結果を示す。非地震時データはAmbient Noiseとして示したが、非地震時データのみに限定した上で約10時間のデータを上記方法で平均化処

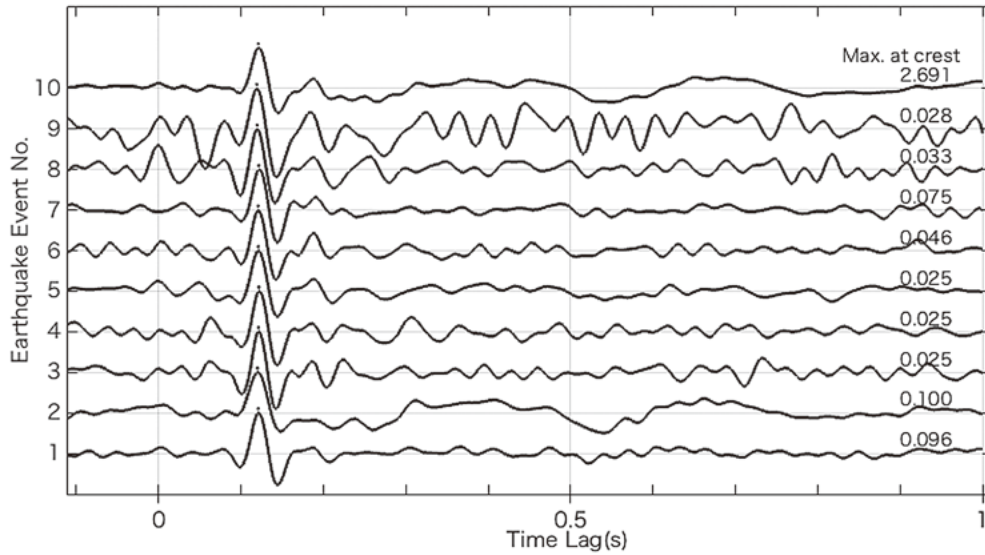


Fig.11 地震波干渉法より地震時振動波形から得られた時間領域応答
Waveforms of time-domain response retrieved by seismic interferometry from seismic records during earthquake

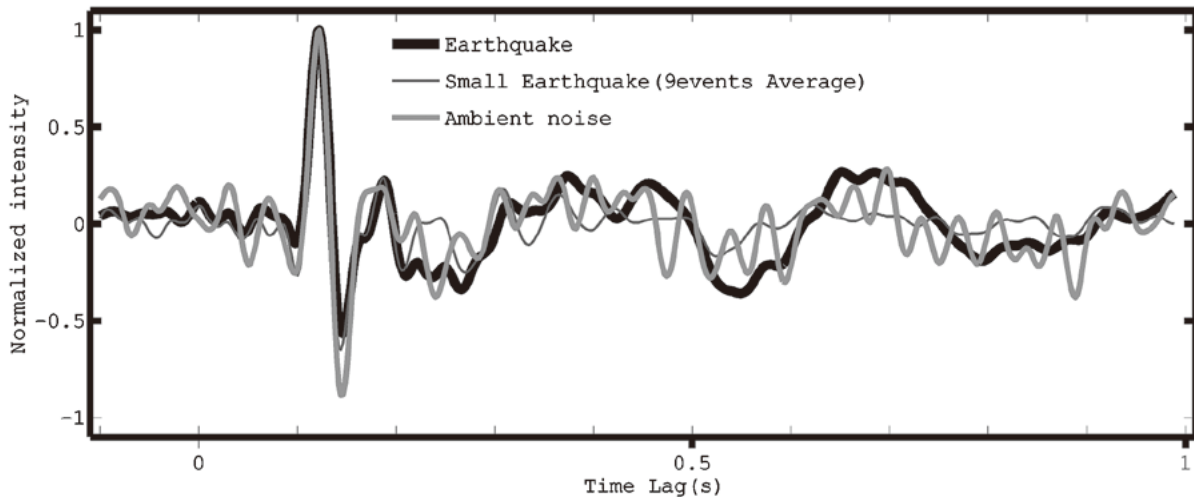


Fig.12 地震波干渉法より地震時振動波形および非地震時振動波形から得られた時間領域応答
Waveforms of time-domain response retrieved by seismic interferometry from seismic records of seismic events and ambient noise

理している。地震時データについては有感地震データに関する結果を示した。すなわち Fig.11におけるNo.10の波形に相当するものである。また残りのNo.1~9の地震については、これを無感地震のグループ Small Earthquakeとしてその平均値を示した。これは Fig.11におけるNo.1~9の波形を平均化したものに相当する。この3者は元の振動波形が微小であるほどピークの後続部にノイズ的な波形が顕著となる傾向はあるものの、ほぼ同じ特徴を示している。特に初動ピーク近傍については、概ね一致している。このことから、非地震時の振動データから、地震時と同様の時間領域応答を抽出することができ、地震波伝播特性を評価できるものと考えられる。

Fig.13において、スタッキング（積算処理）および平均化処理による、時間領域応答の収束状況を確認する。Fig.13の上のスタッキング処理においては積算によって、ノイズレベルから最終的な時間領域応答の形状に至るよう、初動ピーク等の特徴が強調されていく過程が見てとれる。平均化処理については、ノイズ振動のような状況から時間の経過とともに最終的な時間領域応答の形状に漸近する様子を確認することができる。

収束過程への時間経過をより視認できるよう、Fig.14において時間領域応答の時間発展をコンター図で示し

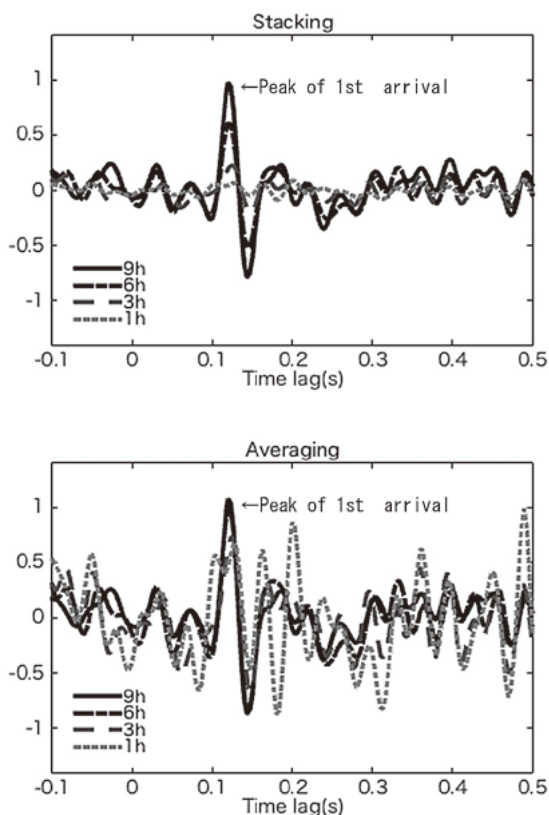


Fig.13 スタッキングおよび平均化処理による時間領域応答の収束状況

Change in the time-domain response from seismic records of ambient noise by stacking and averaging

た。Fig.14(a)には10秒間毎の最大値の変化を示した。またコンター図の白色部は、地震動の影響を受けている可能性がある区間を除去した時間帯を示している。最大値が閾値を超過したところで解析対象外となっている状況を確認できる。この図からも積算処理および平均化処理によって最終的な時間領域応答の波形形状に収束する状況を確認できる。

非地震時データからの時間領域応答抽出に必要な時間を見積もるために、時間領域応答のピークであるタイムラグ0.12秒のピーク高さおよびその前後の0.11秒、0.13秒の値の平均化処理における過程での変化を Fig.15に示した。この図からは平均化処理の効果が十分顕われる前の、1時間内はピーク周りの値も激しく振動しているが、その後、2-3時間の後に安定し、5-6時間経過した後は一定値に収束していることがわかる。

この結果より、本報での観測期間の中から、地震による影響が少ない2時間以上のデータとして、9月18日 21:30-23:30、9月19日 01:00-03:30、04:30-06:30の3期を選択して、それぞれの期間内で平均化処理を行なった結果を Fig.16に示した。比較のため全観測期間の平均化処理結果についても図示したが、短時間の平均化処理の結果はノイズ振動の影響は大きいものの概ね同様の形状を示している。特に初動ピークの0.12s近傍では概ね一致しており、期間によらず再現性を有していることが確認できた。

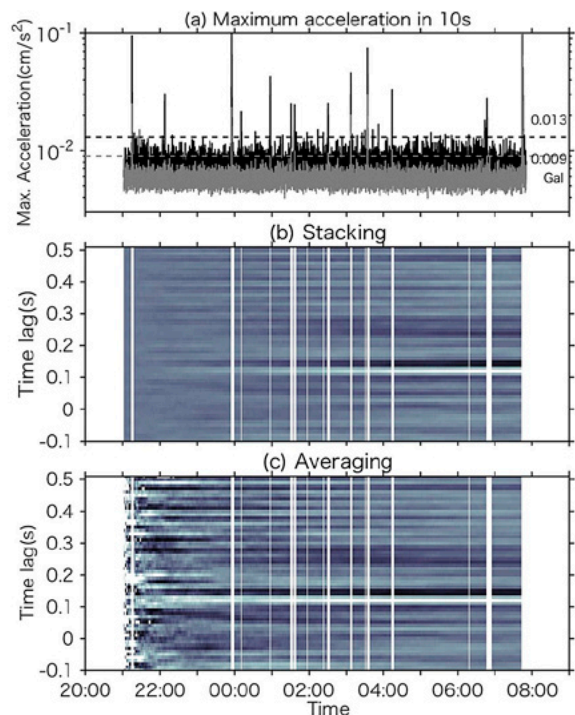


Fig.14 時間領域応答の収束状況

Convergence in the time-domain response from seismic records of ambient noise by stacking and averaging

以上のことから、初動ピーク走時の評価のためには2～3時間以上のスタッキングもしくは平均化が必要であるが、そのような比較的短時間にも時間領域応答は一定の収束が見られた。より高い再現性と精度の確保には5

～6時間ないしはそれ以上の観測時間が必要である。

Ⅷ 結 言

ダムの耐震性評価や健全性評価において、その振動特性の評価は重要である。特にフィルダムについては土構造物であることから、圧密過程や貯水位変化、また大規模な地震や長期供用に伴う変化によって、振動特性が変動する可能性がある。よってこのような時系列変化を含めて把握することが重要である。

一方で、近代的で大型のダムにおいては、その安全性の確認や地震時挙動の把握のため、地震計が設置されている。発生頻度の低い大規模地震や有感地震のみの振動記録を保存するのではなく、より発生頻度の高い微小な無感地震や常時微動に伴う雑振動も記録し、それに基づき振動特性を評価することができれば、上記のような時系列変化も含めた振動特性の変化を追跡することが現実的に可能となる。

本報では、堤高が50m程度の大ダムに分類される農業用フィルダムを対象として、その監査廊と頂上に設置された既設地震計による振動観測記録に対して、地震波干渉法によって時間領域の応答を抽出するとともに、その結果がダムの地震時の地震波伝播特性に対応するものであることを示した。また、最大加速度数 cm/s^2 程度の小規模地震や 1 cm/s^2 未満の無感地震においても適用可能である事、さらに非地震時の常時微動による雑振動と考えられる約 0.01 cm/s^2 の振動記録からも数時間の平均化処理によって適用可能であることを示した。

本研究の事例は、ダムにおいて広く普及している地震計システムを対象としたものではあるが、信号伝送において光ファイバ通信を採用した結果、ノイズレベルが低いシステムであり、また、分解能 $2 \times 10^{-4}\text{ cm/s}^2$ 程度の

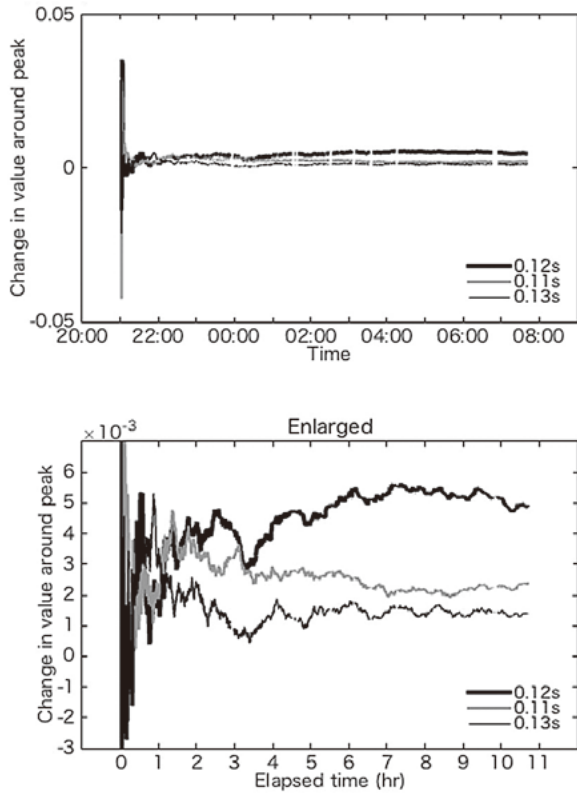


Fig.15 初動ピークおよび前後のデータの平均化処理による収束状況

Change and convergence in the points around the 1st arrival peak of time-domain response function from seismic records of ambient noise caused by averaging

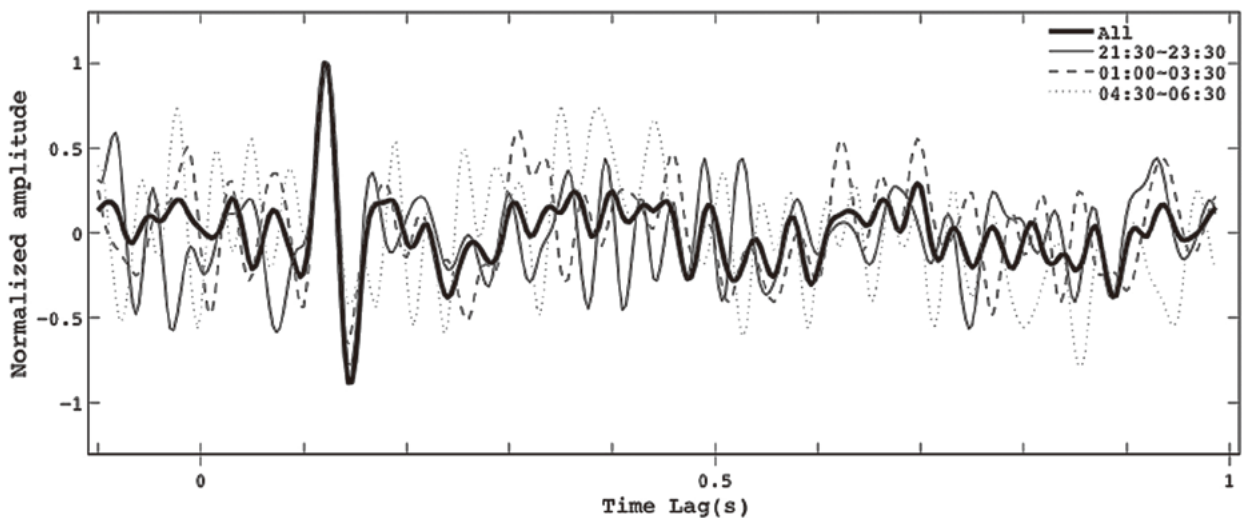


Fig.16 地震波干渉法より各時間帯の非地震時の振動波形から得られた時間領域応答

Waveforms of time-domain response function retrieved by seismic interferometry from seismic records of ambient noise

ADボードを用いているなどの特徴がある。適用した現地は道路や住宅地も近隣にある地域であり常時微動レベルがダムの中では比較的高いものとなっている可能性があり、微小地震の発生も少なくない地域でもある。本手法の適用性が普遍的なものであるかどうかは、その地震計の性能や振動状況に依存するものと考えられるので、今後検証する必要がある。

非地震時の振動観測記録からの評価が可能であるということは、振動特性の時系列変化を連続的に評価することができることを意味する。例えば大規模地震発生前後にフィルダム内の剛性変化等にもなう振動特性変化が生じたかどうかの判断に適用することができる。また耐震性評価において貯水位変化の影響や、材料特性の変動を考慮すべきかどうか等にも活用することができる。また地震計そのものの不具合、例えば停電発生時や突発的な衝撃による地震計の不具合発生等に対する診断にも適用することができる。

現在、農林水産省により国営事業として建設されたダムについては、基本的に地震計が設置されていることから、今後本手法の適用可能性について検討を進めていきたい。

謝辞：本報告をまとめるにあたって、農林水産省関係各位および調査対象となったダムの管理にあたる関係部局の皆様には、現地調査およびデータ収集において多大なるご理解とご協力を賜りました。貴重な地震観測記録の貸与及び種々の資料のご提供を頂いたことを記して感謝の意を表します。また、農林水産省農村振興局整備部設計課には、本研究を進めるにあたって御支援、御協力を賜りましたことを記して、感謝の意を表します。

なお本研究の解析プログラムの開発は一部、科研費基盤研究の支援によって行われたものである。

参考文献

黒田清一郎・増川晋・田頭秀和 (2013) 土構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** 卷 8

号, pp.627~630

白石和也, 松岡俊文, 川中卓 (2008) 地震波干渉法概説, 地学雑誌, Vol.117, No.5, pp.863~869

増川晋・向後雄二・浅野勇・林田洋一 (2002) 地震観測による複数のフィルダムの地震時挙動, 農業工学研究所報告, 第41号, 19-59, <http://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010650622.pdf>

増川晋・中西憲雄 (2005) : 宮城県沖の地震 (2003年5月26日) における農業用大ダムの地震時挙動, 農業工学研究所報告, 第44号, 105-138, http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/naro-se/nkou44-4.pdf

増川晋 (2006) : 平成16年 (2004年) 新潟県中越地震—地震と地震動—, 特集: 平成16年 (2004年) 新潟県中越地震対応, 農村工学研究所技報, 第205号, 5-15, http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/205-02.pdf

増川晋・田頭秀和・黒田清一郎・林田洋一 (2012) 平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震による国営農業用フィルダムの被害, 農業工学研究所技報, 第213号, 217-241, http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/213No15.pdf

Kiwamu Nishida, Jean-Paul Montagner, Hitoshi Kawakatsu (2009) Global Surface Wave Tomography Using Seismic Hum, *Science*, Vol. 326, no. 5949, p. 112, 2009

Gerald Schuster (2009) *Seismic Interferometry*, Cambridge University Press

Nori Nakata, Roel Snieder, Seiichiro Kuroda, Shunichiro Ito, Takao Aizawa, and Takashi Kunimi (2013) Monitoring a building using deconvolution interferometry. I: Earthquake-data analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **103**, 1662-1678

Snieder, R, Safak, E. (2006) Extracting the Building Response Using Seismic Interferometry, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **96**(2), pp.586-598

Wapenaar, K., Draganov, D., and Robertsson, J., (Editors) (2008), *Seismic interferometry: History and present status: Society of Exploration Geophysicists, Geophysics Reprint Series No.26*

William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling (2007) *Numerical Recipes in C (Third Edition): The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press

受理年月日：平成26年11月4日

Time-domain seismic response retrieval from waveforms of small vibration recorded by the existing seismometer of a dam for irrigation based on seismic interferometry

KURODA Seiichiro*, MASUKAWA Susumu** and TAGASHIRA Hidekazu*

* Facilities and Geotechnical Engineering Research Division, Engineering Analysis

** Facilities and Geotechnical Engineering Research Division

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 behaved 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 the dams. Considering this point, we have applied the concept of seismic interferometry and its method to seismic records of the dams to estimate their properties of seismic wave propagation and the dynamic properties of those structures.

This report shows the applicability of seismic interferometry for small vibration records of existing seismometer of dams, like small earthquake records, whose maximum acceleration are less than 1 cm/s^2 , or ambient noise. Based on the analysis for the waveform of acceleration during more than 10 hours, we can retrieve the waveforms of time domain response similar to the one extracted from the seismic record of earthquake events, whose maximum acceleration is more than 2 cm/s^2 , from small earthquake records and even from ambient noise only. This fact shows the proposed method might be applicable more frequently, if we applied it not only earthquake records but also the small records which has been considered to be trivial ones.

Key words: Dam for irrigation, Seismometer, Acceleration waveform, seismic wave propagation, Ambient noise

