

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06528

研究課題名(和文) フィルダム堤体の地震波の伝播速度調査

研究課題名(英文) Investigation of seismic-wave velocities in embankment dam body

研究代表者

茂木 秀則 (Mogi, Hidenori)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80261882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では四時ダムや荒砥沢ダムなどの長期間の地震観測記録にNIOM解析を適用し堤体内の波動伝播速度と堤体物性の変化を検討した。

その結果、(1)2008年岩手宮城内陸地震や2011年東北地方太平洋沖地震による強震動によってP波とS波の伝播速度が大きく減少したこと、(2)直後の余震や小地震の観測記録の解析から経過日数の対数にほぼ比例して伝播速度が回復していくこと、(3)減衰比も著しい強震動によって伝播時間と同様の増減を示すことなどを定量的に示した。また、得られた伝播速度に基づくモデルを用いた2次元FE-BE解析を行い、堤体内の波動伝播の特徴を論じた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではロックフィルダムの長期間の地震観測記録にNIOM解析を適用し、堤体内の波動伝播速度と堤体物性の変化を詳細に調べた。その結果、従来は室内実験に基づいて論じられることの多い土質材料の剪断剛性の低下と数年にわたる長期間の回復過程を、地震観測記録に基づいて原位置における変化として定量的に示すことができた。また、著しい強震動による原位置における減衰比の経時変化も得られており、本研究によって工学的に重要な知見が得られたものと考えている。

研究成果の概要(英文)：We applied the NIOM method (Normalized Input--Output Minimization) to long-term earthquake observation records from such as Shitoki Dam and Aratozawa Dam to determine the propagation velocities of seismic waves in the embankment, and investigated changes in soil properties. As a result, we showed that (1) the velocities of S- and P-waves decreased significantly during strong ground motions due to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake and the the Great East Japan earthquake of 2011; (2) in subsequent minor earthquakes the propagation velocity increased more or less in proportion with the logarithm of the number of elapsed days; (3) the damping ratio in the dam body also increased due to the principal motions of the mainshocks and decreased after them in the similar manner as seen in the results of the propagation time; and, (4) an FE/BE analysis using the estimated propagation velocities was conducted and wave-propagation characteristics in the embankment was discussed.

研究分野：地震工学

キーワード：ロックフィルダム 堤体物性 NIOM解析 FE-BE解析

1. 研究開始当初の背景

地震観測記録に基づいたフィルダム堤体の地震波速度の同定は、上下観測点のスペクトルの位相差を用いる方法、応答解析のインバージョンによる方法、地震波干渉法による方法などが行われているが、その適用例は限られており、長期間にわたるフィルダム堤体の物性変化について十分に把握されているとは言い難い。

研究代表者・茂木らはNIOM解析に基づく地震波の伝播速度の同定手法をいくつかのダムに適用している。この解析例として荒砥沢ダム(宮城県栗原市)における2020年までの観測記録の解析結果をFig. 1に示す(本図は著者らによる既発表の研究に引き続き、本研究計画において地震記録を加えて再検討したものである)。左上から右下まで、試験湛水(1994/2~1996/5)より2020年までの長期にわたる伝播時間(右縦軸は伝播速度)の変化を示しており、2008年岩手・宮城内陸地震や2011年東北地方太平洋沖地震の主要動付近(それぞれ、10sならびに40s、90s付近)において、強震動によって伝播時間が著しく増加していることがわかる。また、地震動が収束するに従い伝播時間は急速に減少していくが、直ちに完全に元に戻るわけではなく、数年をかけてゆっくりと回復していく様子がみられる。また、このような長期的な観点からは貯水位の影響も無視できず、地震波の伝播時間には複雑な経時変化が生じていることがわかる。

2. 研究の目的

上記のように、地震波の伝播時間はフィルダムの堤体の状態を端的に示す指標の一つと考えられ、複数のダムにおいて、長期間かつ微小地震も含めた多数の地震記録に基づいて地震波の伝播時間の経時変化を調べておくことは、堤体の維持管理や耐震性照査のための基礎的な情報となる。そこで本研究ではフィルダムの記録を収集し、地震波の経時変化を調べるとともに、地震時の剪断歪だけでなく、貯水位などの計測値との関係を調べることを目的とする。

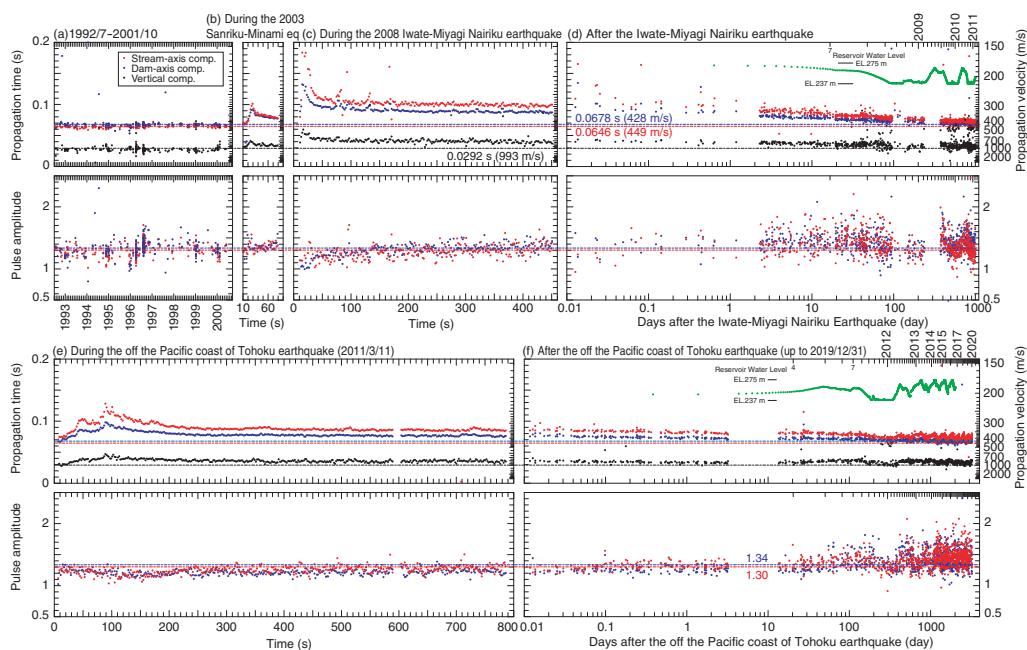


Fig. 1 NIOM解析によって得られた上区間における伝播時間(上段)とパルス振幅 R (下段)の経時変化。

3. 研究の方法

2011年東北地方太平洋沖地震は極めて広い範囲に著しい強震動をもたらしているが、多くの場合、強震動のみが注目され、その前後の小地震は解析の対象とされないことが多い。しかしながら、上述のように、小地震の記録も極めて重要な情報を持っており、有効に活用すべきと考えられる。さらに、本震後5年が経過し余震や周辺の小地震の観測記録の蓄積が進んでいるため、本研究の適期と言える。このことから本研究では、次の点について研究を進める。

- (1) フィルダムにおける余震や小地震を含む多数の地震記録を収集し、地震波の伝播時間の変化を調べる。
- (2) 堤体のせん断弾性係数や減衰比を調べるとともに、貯水位や間隙水圧、有効応力との関係を検討する。
- (3) 地震波の解析から得られる伝播速度は、有効応力や飽和度の違いなどに起因する分布を平均化した伝播速度と考えられる。本研究では有限要素法と境界要素法の結合解法によるインバージョン解析を併用してゾーンごとの剛性と減衰定数の分布について明らかにする。

4. 研究成果

本研究計画で四時ダムなど複数のロックフィルダムの観測記録を解析しているが、本報告では荒砥沢ダムの解析結果を *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **112.2**, pp.1080–1100(2022); *17WCEE*, 4f-007(2020)に基づいてまとめた。

(1) 荒砥沢ダム伝播時間の経時変化

Fig. 1の結果では、(c)岩手・宮城内陸地震で生じた極めて強い地震動により、上下流方向成分とダム軸方向成分の伝播時間はそれぞれ、0.182s (区間平均伝播速度 158 m/s), 0.132s (220m/s) 程度まで増加している。その後、地震動の振幅が小さくなるに従って伝播時間も急速に減少するが、400sを過ぎても初期値には戻っていないことがわかる。その後の小地震の解析結果 (Fig. 1d) において、経過日数の対数にほぼ比例して伝播時間が減少する変化が見られる。この結果から、初期値に戻るにはダム軸方向成分で1000日程度、上下流方向成分では1000日後でも依然としてわずかながら大きい伝播時間を示していることがわかる。

同様の変化は(b)2003年三陸南地震や(e)東北地方太平洋沖地震本震にも見られるが、岩手・宮城内陸地震よりも震動が小さかったため、伝播時間の増加も最大で上下流方向0.122s (平均伝播速度 238 m/s), ダム軸方向成分 0.098s (296 m/s) までにとどまっている。東北地方太平洋沖地震では主要動後に残留する伝播速度の低下(剛性低下)は岩手宮城内陸地震の場合よりも小さく、荒砥沢ダムの堤体には東北地方太平洋沖地震の大きな影響はないものと判断できる。

(2) 荒砥沢ダムせん断弾性係数と剪断歪の関係

Fig. 2は上区間におけるせん断弾性係数とせん断歪の関係をまとめたものである。上区間では上下流方向成分とダム軸方向成分の偏向異方性があるため、成分によってせん断弾性係数の値も異なっている。以降では、上下流方向成分の値について記す。小地震の結果では、ばらつきが大きい 10^{-6} 程度の比較的小さい歪レベルからせん断弾性係数が減少し始めることがわかる。本震中の変化をみると、(d)三陸南地震では400MPaから200MPa程度まで低下(図中1)しており、最大せん断歪はおよそ 2×10^{-4} である。その後、地震動が収まるとともにせん断弾性係数が上昇し300MPa程度まで回復(2)していることがわかる。同様の過程は(f)東北地方太平洋沖地震でもみられ、400MPa程度の値から120MPa程度まで低下(最大せん断歪 $3-4 \times 10^{-4}$)し、その後、250MPa程度まで回復している。一方、(e)岩手・宮城内陸地震では震源距離が小さく、すぐに主要動となるためせん断弾性係数の低下する様子はわからないが、主要動において最大せん断歪は 10^{-3} 程度となり、せん断弾性係数は50MPa程度ま

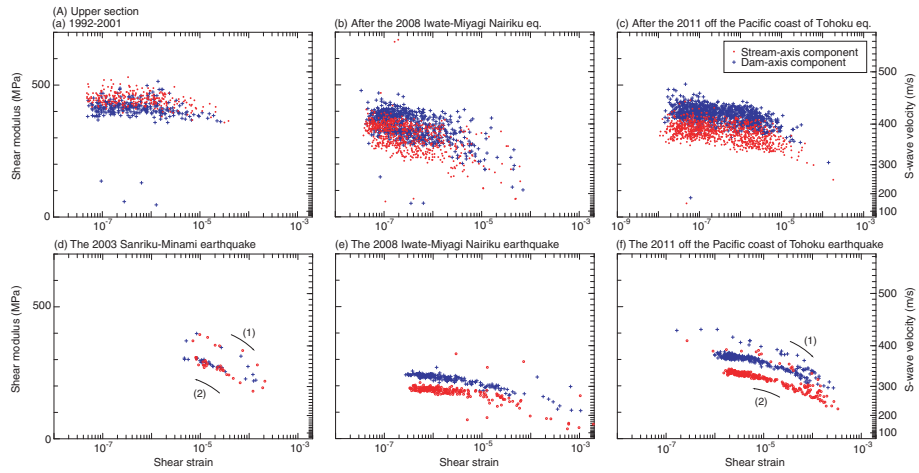


Fig. 2 NIOM 解析に基づく剪断弾性係数と剪断歪の関係.

で低下している。その後、波形記録中に 200MPa 程度まで回復していることがわかる。せん断弾性係数の残留低下量は東北地方太平洋沖地震と比べて大きく、強震動の堤体への影響の強さを示唆するものと考えられる。

(3) 荒砥沢ダム減衰比の経時変化

Fig. 3 にパルス振幅比から得られた減衰比の経時変化を示す。Fig. 3 をみると、上区間ではせん断弾性係数の著しい低下が生じた岩手・宮城内陸地震の主要動部分においても 5% 以下の減衰比を示し、強震動による変化はそれほど明瞭なものではない。一方、下区間では強震動による減衰比の増加が顕著にみられ、(c) 岩手・宮城内陸地震の主要動部では 10% 以上を示している。また、波形の継続時間中にみられる残留量も 2~3% となっている。また、(b) 三陸南地震、(e) 東北地方太平洋沖地震においても最大で 5% 程度まで減衰比が増加していることがわかる。このように、上区間と比べて下区間で大きな減衰比の増加を示す原因として、拘束圧が大きいために摩擦によるエネルギーの損失が大きいことなどが考えられるが、今後

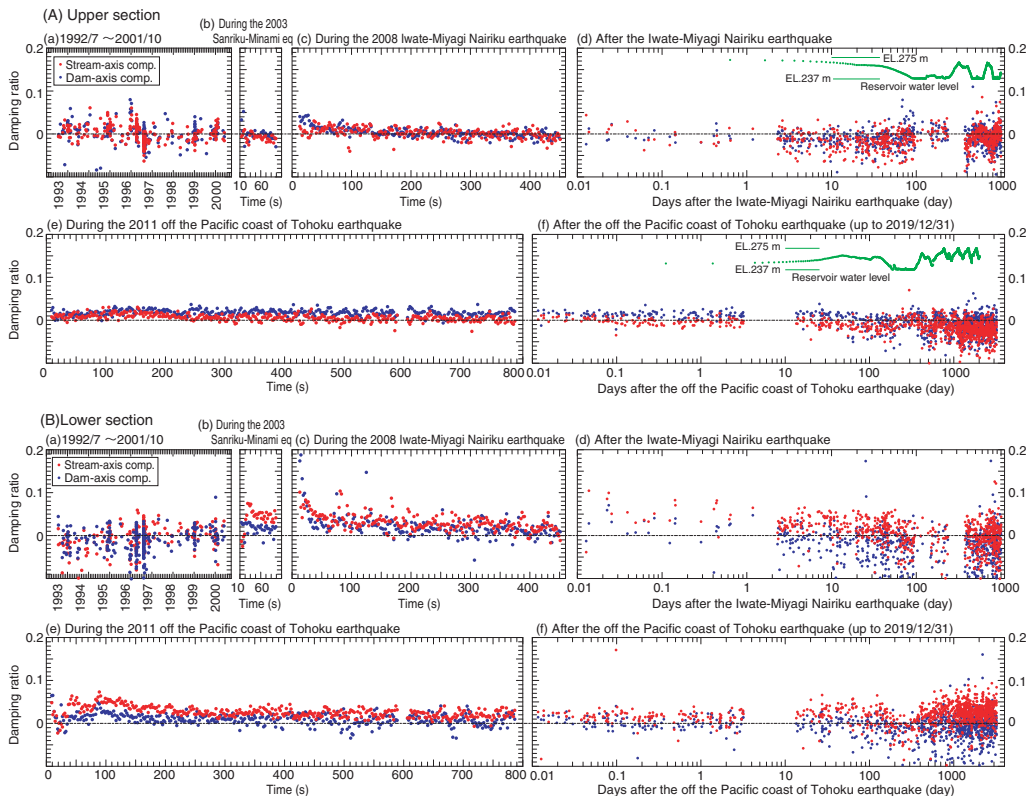


Fig. 3 NIOM 解析に基づく減衰比の経時変化。(A)(B) はそれぞれ、上区間と下区間の結果。

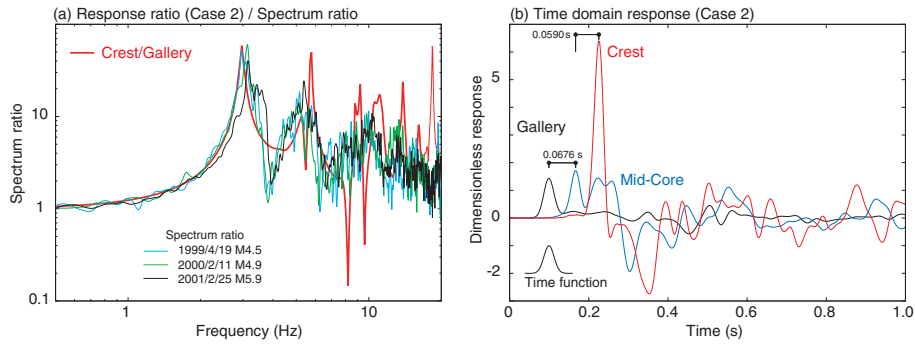


Fig. 4 Case 2における解析結果. (a) FEBE解析による堤頂/監査廊の応答関数の比と観測スペクトル比の比較. (b) ガウスパルスが入射した際の堤頂, コア中段, 監査廊における応答波形.

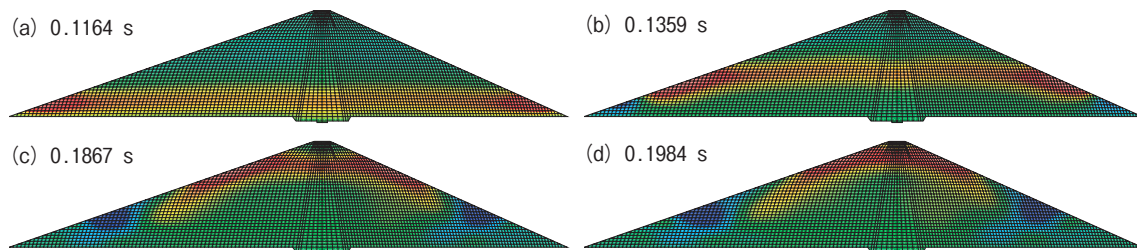


Fig. 5 Case 2におけるパルス応答のスナップショット.

の検討を要する.

(4) FE-BE 解析

Fig. 4にNIOM解析に基づくS波速度(固有振動数が観測値と比較して小さかったため, ロックゾーンとフィルターゾーンの伝播速度を1.2倍としたモデル: Case 2)を用いた(a)堤頂と監査廊における応答関数の比と地震観測記録の堤頂/監査廊のスペクトル比と(b)ガウスパルス入射時の堤頂, コア中段, 監査廊における応答波形を示す. Fig. 4に示すように, ロックゾーンの剛性を増加することで一次固有振動数が増加し, 観測波形のスペクトル比と整合する結果が得られている. 一方で, コア内の伝播時間は観測による伝播時間に近い値(若干小さい値)が得られている. 以上のことから, NIOM解析による地震波の伝播速度はコアゾーンの物性を強く反映しているのに対して, スペクトル比による一次固有振動数は断面積が大きいロックゾーンの物性に強い影響を受けることがわかる.

Fig. 5はパルス波の伝播をスナップショットで示したものである. この図にみるように, 拘束圧が大きいロックゾーンの堤体中心に近い部分の波面が先に進むため, 堤体内の波面が湾曲して伝播することがわかる. また, 堤頂付近に波面が近づくとコアゾーンを上向きに伝わる波動とロックゾーンを伝播して回り込んでくる波動とが重ね合わされるため, 堤頂の地震記録を用いてNIOM解析により推定した伝播時間はコアゾーンだけでなくロックゾーンからの波動の重ね合わせの影響を受けた伝播時間となることがわかる. このことから, 地震記録から堤体の物性をより厳密に決定するためには, 堤体内の波動の伝播性状を正確に評価する必要があるものと考えられる.

(5) まとめ

本報告では, 本研究で検討したダムのうち, 荒砥沢ダム(宮城県栗原市)の解析結果に関して以下の点を指摘した. (1)岩手・宮城内陸地震の極めて強い地震動では伝播時間の増加が顕著であるのに対して, 東北地方太平洋沖地震では大きな影響はないものと判断できること, (2)本解析によって, 原位置におけるせん断弾性係数や減衰比の強震動による急激な変化やその後の長期間にわたる回復過程を論じることが可能である. また, (3)NIOM解析によって得られた堤体剛性に基づいて作成したモデルを用いたFE-BE解析を行い, フィルダム堤体内の波動伝播の特徴を論じた.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 H. Mogi, H. Kawakami	4. 巻 112.2
2. 論文標題 NIOM ANALYSIS OF EARTHQUAKE OBSERVATION RECORDS IN A ROCKFILL DAM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 1080-1100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1785/0120210016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Mogi, H. Kawakami	4. 巻 WEB
2. 論文標題 VIBRATION CHARACTERISTICS OF ROCKFILL DAM BASED ON EARTHQUAKE OBSERVATION RECORDS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 World conference on earthquake engineering	6. 最初と最後の頁 4f-0007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 茂木 秀則, 曾田 英揮, 荒井 大輝, 佐藤 信光	4. 巻 29.3
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ダム工学	6. 最初と最後の頁 181-190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11315/jsde.29.181	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 茂木秀則, 川上英二	4. 巻 18.4
2. 論文標題 ロックフィルダムの地震観測記録に基づく地震波の伝播速度の検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 91-110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5610/jaee.18.4_91	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 茂木秀則, 曾田英揮, 田那部直也, 佐藤信光	4. 巻 27.4
2. 論文標題 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	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ダム工学	6. 最初と最後の頁 254-264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 茂木 秀則
2. 発表標題 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
3. 学会等名 平成30年度ダム工学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田那部直也
2. 発表標題 地震観測記録に基づくロックフィルダム堤体の動的物性に関する研究
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田那部直也
2. 発表標題 ロックフィルダムにおける地震観測記録のNIOM解析
3. 学会等名 平成28年度ダム工学会研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------