

地震応答スペクトルでみた岡山平野児島湾干拓地中部の震動特性

西村 敬一

岡山理科大学フロンティア理工学研究所

2022年12月27日受理

1. はじめに

岡山県下で有感となる地震の震度情報は、県内102地点における強震観測点の加速度波形の記録から算出される。これらの波形記録は気象庁（9地点）、防災科学技術研究所（10地点）、岡山県（83地点）によって設置された強震計から防災情報ネットワークを経由して岡山県庁内のサーバに伝送されたものである。

強震観測点の分布図¹⁾をみると、県内各地に概ね均等に配置されているものの県南では偏在していて、上記3機関の観測点が近接して配置されている地区があるのに対し、児島湾干拓地では、中央部にあるのは後述する岡山市南区の岡南飛行場観測点のみで、岡山市南区灘崎支所、早島町役場、東区役所の観測点は干拓地の周辺部にある。また、1946年昭和南海地震による被害が最も甚大だったとされる岡山市中区-東区の沖新田干拓地には1ヶ所もなく、地震防災の最も基本的な情報である震度情報すらわからない状態である。

小論では、このような状況に鑑み、児島湾干拓地中部の震動特性を明らかにすることを目的として、以下の2地点で同時に観測された加速度波形の記録を解析することにした。

- (i) 岡山県が設置・運用している岡南飛行場観測点(34°35' 34.1"N, 133°55' 43.3"E, 標高T.P.-0.2m)
- (ii) その南南西約4.4kmにある岡山市立七区小学校の敷地内に設置させて頂いた独自の観測点(34°33' 21.1"N, 133°54' 39.1"E, 標高T.P.-0.6m; 観測期間2013年3月1日~2022年11月24日)

図1に両観測点の位置を示す。図の背景は、筆者が重力探査によって明らかにした花こう岩質3次元基盤構造を示している²⁾。図からわかるように、七区小学校はほぼ東北東-西南西方向に伸びる狭い溝状凹地(推定された深さは約220m)付近に位置しているので、地震波の伝わり方と揺れ方に影響が生じることが予想される。観測によってそれを確かめることが、七区小学校に独自の強震計を設置した目的である。

ここで、児島湾干拓の歴史における両観測点の位置と1946年昭和南海地震の発生時期との関係を考える



図1 児島湾干拓地中部における岡南飛行場(K)と七区小学校(N)の位置。背景は重力探査で推定した花こう岩質基盤上面の深さと凹凸²⁾。

と、七区小学校を含む藤田六区・七区一帯は1950~1963年代に干拓された地区であり、1946年昭和南海地震の発生時には現在の国道30号まで児島湾が広がっていた³⁾。一方、岡南飛行場を含む浦安南部の干拓が完工したのは1950年であり、昭和南海地震発生時には、法律上はまだ「海面」であった土地に、早期に入植し始めた人々の家屋が点在する状態であった⁴⁾。したがって、岡南飛行場も七区小学校も、事実上、昭和南海地震を経験していない地区に立地していることになる。

その意味で、この地区の震動特性を明らかにすることは、近い将来の発生が予想されている南海トラフの巨大地震に備えるための1つの手がかりになると考えられる。

2. 強震動の観測記録

表1に、両観測点で同時にS/N比の高い記録が得られた地震の震源要素と加速度波形から計算した計測震度を示す。計測震度は気象庁が発表する10段階の震度階級のもとになる数値である⁵⁾。地震発生時に気象庁が「岡山県南部の最大震度」として発表する震度は、殆どの場合、岡南飛行場の震度階級であるが、表1に

示した地震の多くで、岡南飛行場と七区小学校の震度階級が同じになるので、小学校も最大震度が生じやすい地区に位置することがわかる。

図2に、表1の地震の中で震度が最も大きかった伊予灘の地震（2014年3月14日）の加速度波形を示す。岡南飛行場（以下、岡南と略記）と七区小学校（以下、七区と略記）の観測点からの震央距離は、それぞれ209.5kmと212.8km、逆方位角（北から時計回りに測った震央の方位）は、それぞれ243°と242°である。両観

測点の記録を比べるとP-S間の波形は似ているが、S波初動以降の後続波群には違いが見られる。以下では、FFT（高速フーリエ変換）を用いる場合も考えて、S波初動から40.95秒間（データ数4096個）の記録を対象とする。

3. 地震応答スペクトル

地震動はさまざまな周期の成分から構成されるので、その特性を調べるためには、各周期成分の大きさ

表1 岡南飛行場と七区小学校で同時に記録された地震の震源要素と両観測点における計測震度。2019以前の震源要素は気象庁による「確定値」、2021年以降は「暫定値」。

No.	年/月/日	発生時刻	緯度 (N)	経度 (E)	深さ/km	Mj	震央地名	計測震度	
								岡南	七区
1	2013/04/13	05:33:17.75	34°25.13'	134°49.74'	14.85	6.3	淡路島	3.6	3.5
2	2014/03/14	02:06:50.86	33°41.50'	131°53.48'	78.04	6.2	伊予灘	3.5	3.9
3	2015/02/06	10:25:12.44	33°44.02'	134°22.22'	11.15	5.1	徳島県南部	2.3	2.5
4	2016/04/14	21:26:34.43	32°44.50'	130°48.52'	11.39	6.5	熊本県北西部	1.9	1.5
5	2016/04/16	01:25:05.47	32°45.27'	130°45.78'	12.45	7.3	熊本県北西部	3.2	3.1
6	2016/10/21	14:07:22.57	35°22.83'	133°51.37'	10.61	6.6	鳥取県中部	3.7	3.5
7	2016/10/21	14:53:17.57	35°21.68'	133°52.07'	8.94	5.0	鳥取県中部	1.3	1.0
8	2017/06/14	19:24:33.41	33°48.00'	133°25.74'	37.72	4.5	高知県中部	1.2	1.2
9	2018/04/09	01:32:30.81	35°11.08'	132°35.20'	12.13	6.1	鳥根県東部	2.7	3.0
10	2018/06/18	07:58:34.14	34°50.66'	135°37.30'	12.98	6.1	大阪府北部	2.9	2.9
11	2018/06/26	17:00:09.66	34°55.89'	132°52.31'	11.64	5.0	広島県北部	1.8	2.1
12	2018/11/02	16:53:54.15	33°41.78'	135°11.75'	43.81	5.4	紀伊水道南部	1.6	1.5
13	2019/03/13	13:48:48.78	33°48.06'	134°54.81'	43.05	5.3	紀伊水道南部	2.5	2.5
14	2019/11/26	15:09:10.96	34°02.76'	133°03.89'	15.82	4.6	燧灘	1.8	1.8
15	2021/06/19	07:39:13.3	33°27.6'	132°30.8'	42	4.7	愛媛県南予	1.0	1.6
16	2021/07/17	20:50:00.7	33°38.3'	131°51.3'	76	5.1	伊予灘	0.9	1.3
17	2021/07/18	14:35:50.6	33°58.1'	133°55.7'	45	4.4	徳島県北部	2.0	2.1
18	2021/07/31	13:09:44.6	33°47.8'	134°37.9'	45	4.5	徳島県南部	1.5	1.4
19	2021/11/01	05:35:41.0	33°16.5'	135°40.1'	20	5.0	和歌山県南方沖	1.6	1.6
20	2021/12/03	09:28:28.9	33°48.0'	135°08.8'	18	5.4	紀伊水道	3.0	3.2
21	2022/01/22	01:08:37.5	32°42.9'	132°04.3'	45	6.6	日向灘	2.5	2.7
22	2022/05/23	08:20:22.1	33°56.4'	134°18.5'	39	4.2	徳島県北部	1.5	1.4
23	2022/06/17	00:51:25.7	33°54.7'	134°35.3'	45	4.9	徳島県南部	1.4	1.8

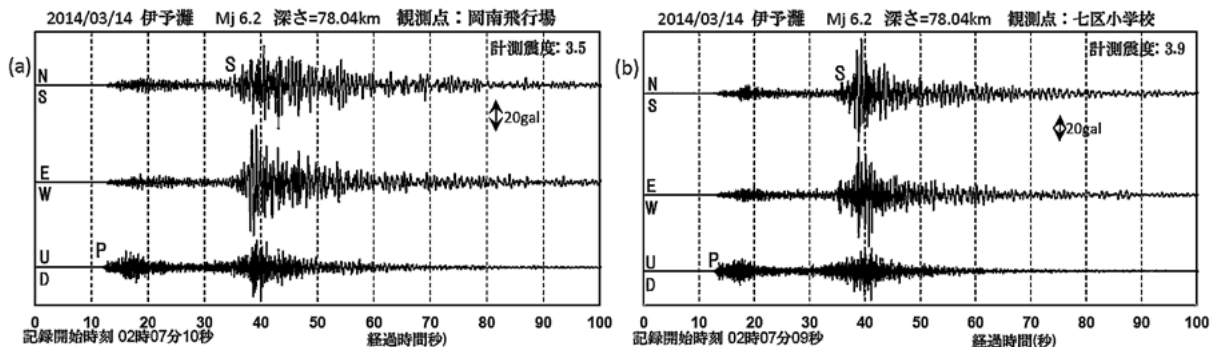


図2 岡南飛行場 (a) と七区小学校 (b) とにおける伊予灘の地震（2014年3月14日）の加速度波形。

を表すスペクトルを計算する必要がある。一般に地震動のスペクトルとしては、地震学の分野で用いられるフーリエスペクトルと工学の分野で多用される地震応答スペクトルがある。

フーリエスペクトルは、地震動そのものの特性に注目して、その時刻歴の波形を定常な正弦波に分解し、各正弦波の振幅と位相で表すものである。この場合の関心は、地震動に及ぼす震源、地震波の伝播経路、および観測点直下の地下構造などの影響に向けられている。その応用例の1つとして、地震動の水平成分と上下成分のスペクトルの比(H/Vスペクトル比)のピーク周期から直下の堆積層の厚さとS波速度を推定する方法が知られており、筆者も児島湾西方の干拓地に適用したことがある⁶⁾。

これに対して、Housner⁷⁾が考案した地震応答スペクトルは、地震動が地表の構造物にどう影響を及ぼすかという観点から、各周期成分の大きさを表すものである。このスペクトルの基礎となる関係は、図3に一例を示した建物の高さH(m)と基本モードの水平振動の固有周期T(秒)との関係⁸⁾である。この関係が重要なのは、地震動に含まれる周期成分が建物の固有周期と等しい場合、建物が地震動に共振して揺れが大きくなり、被害が生じる可能性が高いからである。なお、日本地震学会・強震動基礎講座⁸⁾と気象庁⁹⁾によると、図の一般の建築物の場合、H(m)あるいは階数NとT(秒)の間には次のような経験的な関係がある。

- S(鉄骨)造 — $T=0.02H$, $T=0.082N$
- SRC(鉄骨鉄筋コンクリート)造・
- RC(鉄筋コンクリート)造 — $T=0.015H$, $T=0.049N$

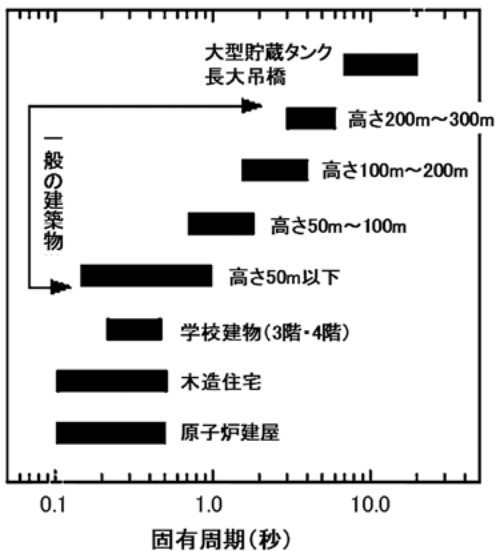


図3 建物の高さH(m)と基本モードの水平振動の固有周期T(秒)との関係⁸⁾。

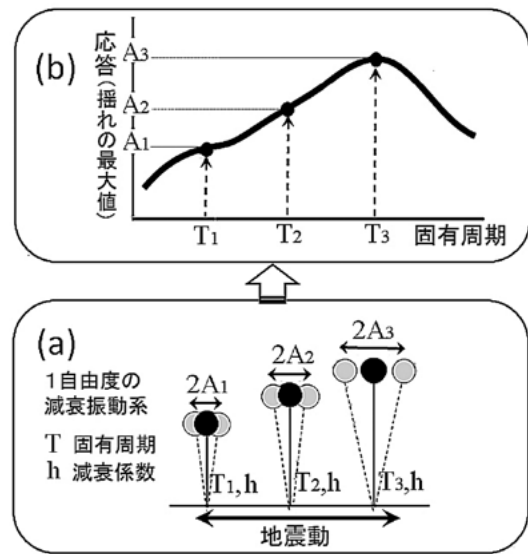


図4 地震応答スペクトルの概念図
(a) 建物のモデルとしての1自由度の減衰振動系
(b) 地震動に対する振動系の応答(揺れの最大値)。

図4に地震応答スペクトルの概念図を示す。この図で建物は、固有周期T、減衰係数hの1自由度減衰振動系で表され、いろいろな固有周期をもつ振動系に水平方向の地震動が作用した時の応答振幅の最大値を、固有周期ごとに並べたものが地震応答スペクトルであることを示している。数学的には、この振動系の応答は、2階線形微分方程式の非同次項として地震動の加速度の時系列を与え、減衰係数として5%($h=0.05$)という小さい値を仮定した時の数値解で表される。hが小さければ固有周期付近でのみ応答振幅が大きくなる。従って、地震応答スペクトルは、地震動を構成するさまざまな周期成分のうち、振動系の固有周期を中心周期とする狭帯域バンドパスフィルタを通過した成分を並べたものと同等であると考えられることができる。

減衰振動系の応答としては加速度、速度あるいは変位が考えられ、また、それぞれについて絶対応答と相対応答が考えられるので、合計6種類が定義される。ここで、絶対応答とは静止空間に対する揺れ、すなわち、地震動の揺れと減衰振動系の応答を重ね合わせたものであり、相対応答は減衰振動系の応答のみを考えたものである。通常は、6種類のうちの3種類、すなわち絶対加速度応答スペクトル(SA)、相対速度応答スペクトル(SV)、および相対変位応答スペクトル(SD)が用いられることが多い。これら3種類の応答の力学的な意味は、それぞれ、

- SA --- 建物に作用する最大のせん断力
- SV --- 地震動が建物に与える最大のエネルギー
- SD --- 地震動が建物に生じさせるひずみの大きさと解釈することができる¹⁰⁾。

4. 強震記録の解析結果と考察

地震応答スペクトルの計算には大崎のプログラム ERES (Earthquake Response Spectra)¹⁰⁾ を用いた。ただし、プログラムに入力する水平方向の加速度波形は、通常用いられる南北成分と東西成分でなく、震源から観測点への地震波伝播方向のradial成分とそれに垂直な方向のtransverse成分に変換したものをを用いた。その理由は、図1に示したように、地下構造は水平成層ではなく花こう岩質基盤の上面に複雑な凹凸があると推定されるので、その地震動への影響は地震波伝播方

向を基準とした方が捉えやすいと考えたからである。

小論では、紙数に限りあるため、表1の中で震度が最も大きかった伊予灘の地震(2014年3月14日)を対象にして地震応答スペクトルを求め、フーリエ震幅スペクトルとも比較しながら、児島湾干拓地中部の震動特性を考えることにする。

図5に岡南と七区における前述の3種類の地震応答スペクトルを示す。

図5には、地震応答スペクトルの一般的特徴がみられる。すなわち、上から絶対加速度応答スペクトル、

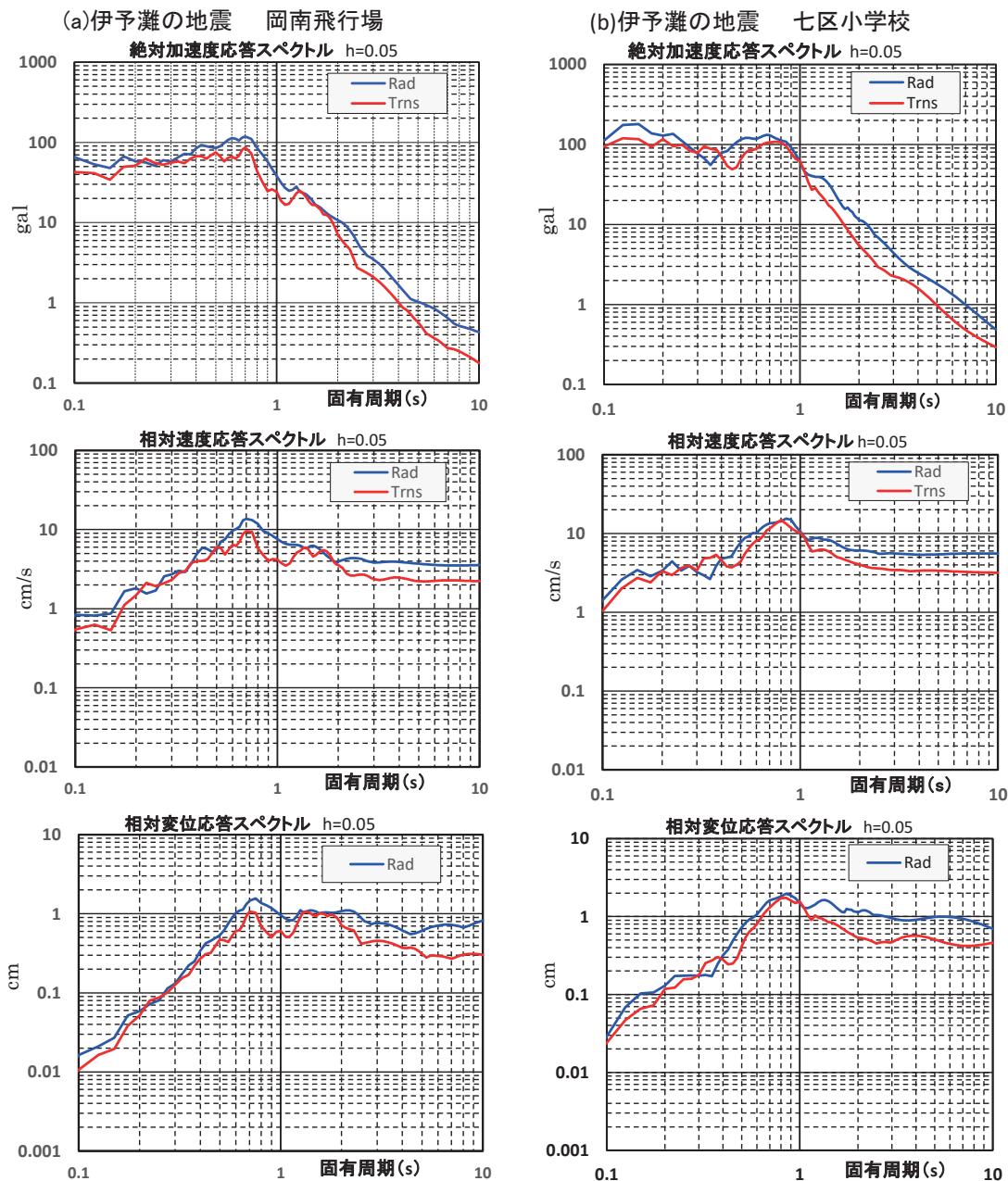


図5 伊予灘の地震(2014年3月14日)による岡南飛行場(a)と七区小学校(b)における地震応答スペクトル。横軸は建物(1自由度の減衰振動系)の固有周期。RadとTrnsはそれぞれradial成分とtransverse成分を表す。

相対速度応答スペクトル、および、相対変位応答スペクトルの順に、短周期の領域に対する長周期の領域の比が大きくなることである。これは、地震動加速度に対する1自由度減衰振動系の応答を表す微分方程式を時間領域で順次積分したことに相当する。

次に、各応答スペクトルの特徴を検討する。まず、図5の中段と下段、すなわち、建物の応答のみを考えた相対速度応答と相対変位応答をみると、岡南と七区のスペクトルは似ていて、岡南では固有周期0.7秒-0.75秒付近、七区では0.85秒付近で応答が最も大きくなっていることがわかる。これを図3に示した建物の高さH (m) と固有周期T (秒) との関係と照らし合わせると、高さ50m以下の一般の建築物の固有周期に相当し、また、前述の日本地震学会・強震動基礎講座と気象庁による経験式に当てはめれば、地震動の影響を最も受けやすい建物の高さや階数の目安は以下のようになる。

岡南ではS造 --- 高さ約35m, 8~9階建

SRC・RC造 --- 高さ約45m, 14階建

七区ではS造 --- 高さ約42m, 10~11階建

SRC・RC造 --- 高さ約55m, 17階建

これに対して、図5の上段、すなわち絶対加速度応答スペクトルには、七区における固有周期0.1秒~0.3秒の応答が岡南に比べて顕著に大きいという違いがある。これを図3と照らし合わせると、七区では学校建物(3階・4階)や木造住宅が被害をより受けやすいことがわかる。また、改めて図5をみると、絶対加速度応答ほどではないが、固有周期0.1秒~0.3秒の相対速度応答と相対変位応答も七区の方が大きくなっているため、原因は地震応答スペクトルの計算に用いた地震動の加速度の違いであると推定できる。

それを確かめるために、岡南と七区における地震動加速度のフーリエ振幅スペクトルを計算した。結果を図6に示す。通常、フーリエスペクトルは周波数の関数で表されるが、ここでは、応答スペクトルとの比較のために周期の関数として表した。図をみると、七区における周期0.1秒~0.5秒のスペクトル振幅が岡南の振幅の数倍になっていること、そして、この違いが図5の絶対加速度応答スペクトルに反映していることがわかる。

一般に、地震観測記録のフーリエスペクトルは震源特性、伝播経路の影響、観測点直下の構造の影響、および、地震計の特性の各スペクトルの積として表されるが、ここで扱っている伊予灘の地震の場合は、岡南と七区の観測点からの震央距離と逆方位角はほぼ同じであり、地震計の特性の補正もされているので、図6の両観測点におけるスペクトル振幅の違いは、観測点直下の構造の違いを反映すると考えられる。

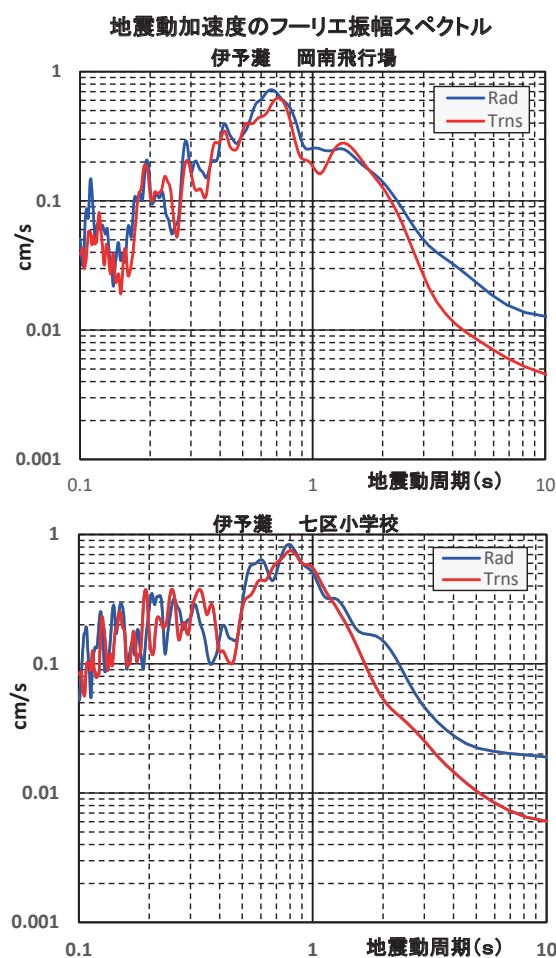


図6 岡南飛行場(上)と七区小学校(下)における伊予灘の地震による地震動加速度のフーリエ振幅スペクトル。

そこで、図1に示した観測点直下の地下構造をみると、岡南(K)では花こう岩質基盤の上面が比較的幅の広い凹地になっているのに対し、七区(N)の直下にはほぼ東北東-西南西方向に伸びる幅の狭い溝があることがわかる。この構造のスケールの違いが、0.1秒~0.5秒という短周期、従って短波長の地震動の違いをもたらしたと解釈できる。

この解釈は伊予灘の地震(2014年3月14日)の記録に基づくが、震央方位が異なる他の地震、例えば淡路島の地震(2013年4月13日)や紀伊水道の地震(2021年12月3日)の場合も、それぞれ、周期0.1秒~0.3秒と周期0.1秒~0.25秒における七区のスペクトル振幅が岡南の数倍になっている。今後、表1のすべての地震について、地震波の到来方向と入射角を考慮した解析と波動論的な検討を進め、児島湾干拓地中部の震動特性を地下構造と関連づけてより具体的に明らかにする必要がある。

4. まとめと今後の課題

児島湾干拓地中部の震動特性を明らかにするための手がかりとして、岡山市南区の岡南飛行場と七区小学校における強震観測記録から地震応答スペクトルを計算した。得られたスペクトルには共通する特徴がある反面、絶対加速度応答スペクトルには、七区における固有周期0.1秒～0.3秒の建物の応答が岡南に比べて顕著に大きいという違いが見られた。強震観測記録のフーリエ振幅スペクトルを比べた結果、この違いは観測点直下の花こう岩質基盤上面の形状に起因することが示唆された。

今後、記録の得られたすべての地震について、地震波の到来方向と入射角を考慮した解析と波動論的な検討を進め、児島湾干拓地中部の震動特性をより具体的に明らかにすることが課題である。

謝辞

岡南飛行場の強震記録を提供して頂いた岡山県危機管理課、岡山市立七区小学校敷地内での強震観測を許可して頂いた岡山市教育委員会学校施設課と七区小学

校、並びに、強震計の設置と運用について多大のご協力を頂いた（株）勝島製作所に、記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) <https://www.jma-net.go.jp/okayama/jishin/seismo.html> (2022年12月現在閲覧可)
- 2) 西村敬一, 岡山理科大学技術科学研究所年報, 第35号, 45-57 (2017).
- 3) <https://www.city.okayama.jp/museum/kantaku/mainText3.htm> (2022年12月現在閲覧可)
- 4) 白神始一, 岡山市浦安町史, 浦安町史編集委員編 (1971).
- 5) https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html (2022年12月現在閲覧可)
- 6) 西村敬一, 岡山理科大学技術科学研究所年報, 第36号, 49-62 (2018)
- 7) G.W.Housner, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 47, No. 3, 179-186 (1957).
- 8) https://www.zisin.jp/publications/deocument_02_03.html (2022年12月現在閲覧可)
- 9) https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/ltpgm_ex_plain/about_period.html (2022年12月現在閲覧可)
- 10) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会 (2008).

The vibration characteristics of ground motions in the middle part of the reclaimed lands of the Okayama plain, west Japan, as examined using the earthquake response spectra

Keiichi NISHIMURA

*Institute of Frontier Science and Technology, Okayama University of Science,
0-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 700-0005, Japan*

The earthquake response spectra were calculated from ground acceleration time-series recorded at two nearby observation sites, located in the middle part of the reclaimed land of Okayama plain, to examine the vibration characteristics of ground motions. As a result, it was found that the peaks of the response spectra were within the period range of 0.7 to 0.85 seconds at the both sites. On the other hand, there was a significant difference in the absolute acceleration response spectra between the two sites in the range of 0.1 to 0.3 seconds, corresponding to the fundamental natural periods of low-rise buildings. Since a similar difference was also found in the Fourier amplitude spectra of ground acceleration, it was suggested that the difference of vibration characteristics between the two sites could be ascribed to the subsurface structure, probably to the granitic bedrock topography, as inferred from gravity survey in the Okayama plain conducted in a previous study.

Keywords: vibration characteristics of ground motion, reclaimed land of the Okayama plain, earthquake response spectrum, Fourier amplitude spectrum, granitic bedrock topography.