

大阪市の K-NET, KiK-net 観測点の地震動に関する検討

Study on earthquake ground motions at K-NET and KiK-net stations in Osaka City

間瀬 辰也*

MASE Tatsuya

In this paper, we confirmed the relationship between ground hardness and softness by microtopographic classification and seismic intensity in order to understand the shaking susceptibility of Osaka City. In addition, it is examined frequency characteristics of seismic waves, calculation of the predominant period of the ground and the trend of vertical seismic motion relative to horizontal seismic motion, by using strong motion observed waves from the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED).

1. はじめに

近畿地方では、海溝型の南海トラフ巨大地震や内陸型地震¹⁾に対して防災対策を行うことが求められている。防災対策を行うにあたり、地域の地盤条件や観測波の分析により地域の揺れの傾向を把握することは重要である。兵庫県南部地震（1995年1月17日）以降、1996年6月から防災科学技術研究所（以下、「防災科研」と略す）²⁾の地震計（K-NET、KiK-net）が順次日本全国に設置され、高密度に地震観測記録の利用が可能となっている。稼働中の地震計は全国に1731地点（K-NET:1039か所、KiK-net:692か所）あり、近畿7県では164地点（K-NET:105か所、KiK-net:59か所）が設置されている。観測波の検討としては、計測震度³⁾、フーリエスペクトル解析⁴⁾により周波数特性、ウェーブレット変換⁵⁾により時間一周波数領域によるスペクトルの時間特性、応答スペクトルにより建築物への影響^{6),7)}、H/Vスペクトル比⁸⁾による地盤の卓越周期などの分析が報告されている。また、地震動の振動特性は地盤の震動特性に強く影響される。このため、地震被害と関係があるとされている微地形区分^{9),10)}と地震動の振動特性の関係の検討も重要となる。

本論では、地震動の特徴を把握する方法としては、微地形区分による地盤震動の検討および防災科研の観測波の分析を行い、大阪市の観測点の地震動の特徴を確認することを目的とする。

2. 大阪市の観測点と観測点地盤

大阪市内に設置されている防災科研の3観測点（OSK005、OSKH05、OSKH02）のデータを表1に示す。計測深度は、K-NETは地表面レベル、KiK-netは地表面と地中部の2深度である。東淀川区のOSK005地点と北区のOSKH05地点は、淀川をはさみ地点間距離1.4kmであり比較的近接し、此花区のOSKH02地点は、直線距離でOSK005地点とは13.1km、OSKH05地点とは13.3kmの西南西に位置している。

図1に大阪市の微地形区分、K-NET、KiK-net観測点および気象庁計測震度計の位置(25か所)を示す。大阪市の微地形区分は、中央部の南北方向に比較的地盤が良い砂礫質台地（上町台地）が約12.4%あり、その他は軟弱な地盤に分類される低地（谷底低地、自然堤防、後背湿地、旧河

* 居住空間デザイン学科 教授

道、三角州、砂州・砂礫州、干拓地、埋立地) である。OSK005 地点は砂州、OSKH05 地点は旧河道、OSKH02 地点は埋立地に位置している。表 2 に防災科研が公開している地盤条件を示す。図 2 に、表 2 の地盤条件に減衰定数として基盤層を 0%、それ以浅を 3%とした地盤モデルにおける重複反射理論¹¹⁾に基づく入力層 E_n+F_n に対する地表面 $2E_I$ の伝達関数を示す。図 2 より、地盤モデルの卓越周期は、OSK005 地点は 0.27 秒、OSKH05 地点は 3.3 秒、OSKH02 地点は 6.7 秒である。

表 1 大阪市の K-NET、KiK-net 観測点

データ種別	観測点コード	観測点名	北緯	東経	標高(m)	地中測点(m)
K-NET	OSK005	OHSAKA	34.7256	135.5101	4.00	—
KiK-net	OSKH02	KONOHANA	34.6628	135.3896	6.68	2008
KiK-net	OSKH05	OSAKA	34.7159	135.5199	1.00	982

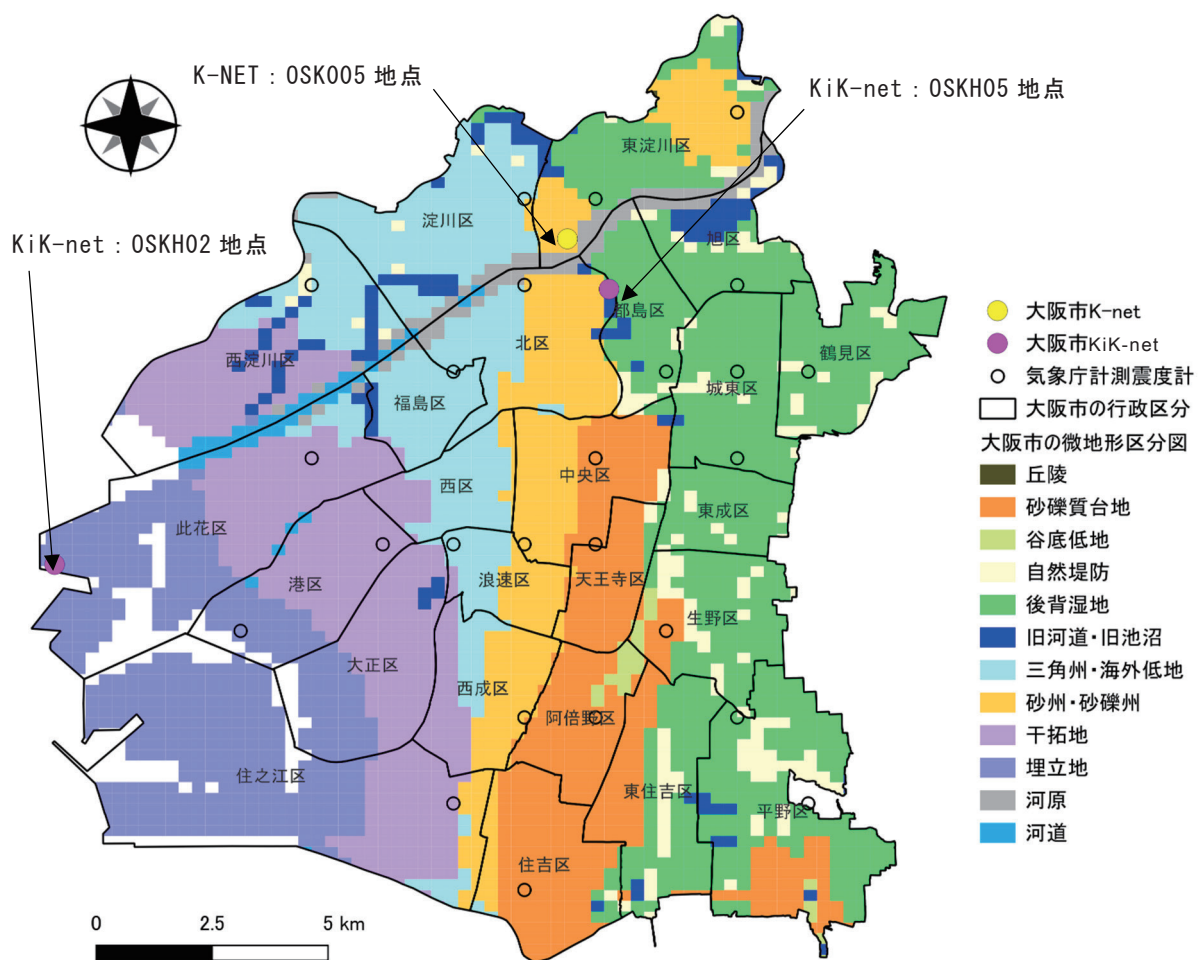


図 1 微地形区分と観測地点の関係

3. 観測データの分析

本検討では、1996年6月から2023年12月15日間にOSK005、OSKH02、OSKH05地点いずれかで震度2(計測震度1.5)以上を記録した観測データ(n=82)を対象とする。

3.1 微地形区分と計測震度の傾向

図3に地震発生日と3地点で震度2以上が観測された地震の計測震度を示す。3地点の震度頻

度は、震度 5 弱が 1 回（2018 年 6 月 18 日 7:58 の大阪北部地震）、震度 4 が 1 回（2004 年 9 月 5 日 23:57）、震度 3 が 8 回である。なお、3 地点とも震度 3 以上を示す地震は 3 地震である。

図 4 に OSK005 と OSKH05、OSKH02 地点の計測震度の比較を示す。実線は 1:1 の直線、破線は最小二乗法による回帰直線である。近接している OSK005 地点と OSKH05 地点は、同程度の揺れの傾向を示す。一方、OSK005 地点と OSKH02 地点では OSK005 地点の計測震度が大きい傾向を示している。

図 5 に大阪市の微地形区分と K-NET、KiK-net 観測点および気象庁計測震度計による大阪北部地震での震度分布を示す。大阪市は震度 4 以上を観測し、震度 6 弱は砂州、三角州の境界に位置する北区茶屋町、震度 5 強は砂州、三角州、後背湿地で観測されている。

表 2 OSK005、OSKH05、OSKH02 地点の地盤諸元

OSK005			OSKH05			OSKH02		
深度 z(m) 層上端	密度 ρ (g/cm ³)	S 波速度 Vs(m/s)	深度 z(m) 層上端	密度 ρ (g/cm ³)	S 波速度 Vs(m/s)	深度 z(m) 層上端	密度 ρ (g/cm ³)	S 波速度 Vs(m/s)
0.00	1.69	80	0.00	1.8	150	0.00	1.70	350
1.00	1.88	80	25.00	1.8	390	180.00	1.80	550
2.00	1.92	210	150.00	1.8	690	580.00	2.10	1000
3.00	1.94	210	300.00	1.8	740	1530.00	2.70	3200
4.00	1.99	210	550.00	1.8	1290	1600.00	2.70	3200
5.00	2.03	210	625.00	2.1	3060			
6.00	1.94	210	800.00	2.7	3060			
7.00	1.94	210						
8.00	2.00	210						
10.00	1.99	210						
12.00	2.00	380						
13.00	1.98	380						
14.00	1.99	380						
15.00	2.00	380						
17.00	1.99	380						
18.00	1.87	380						
19.00	1.92	380						

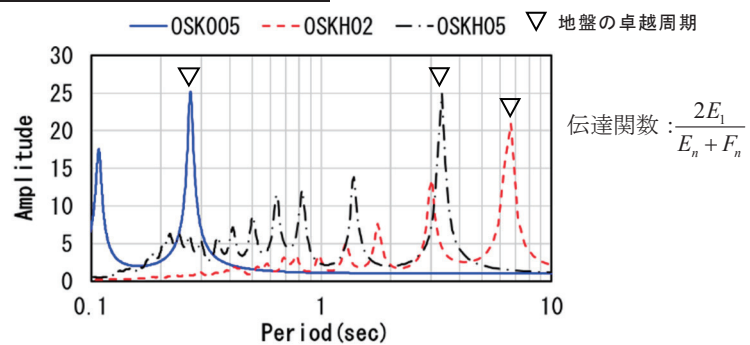


図 2 地盤モデルの伝達関数

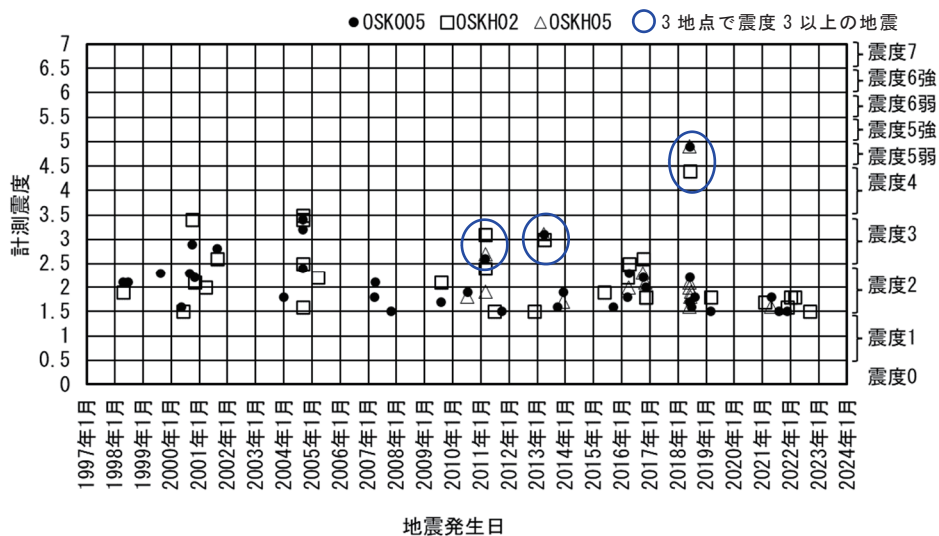


図 3 観測地点の計測震度（震度階）（震度 2 以上）

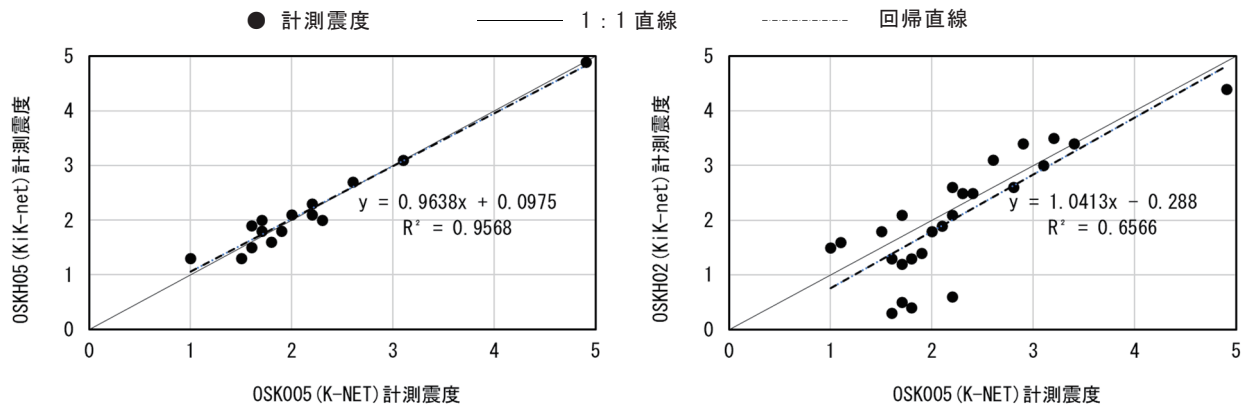


図4 OSK005 と OSKH05、OSKH02 地点の計測震度の比較

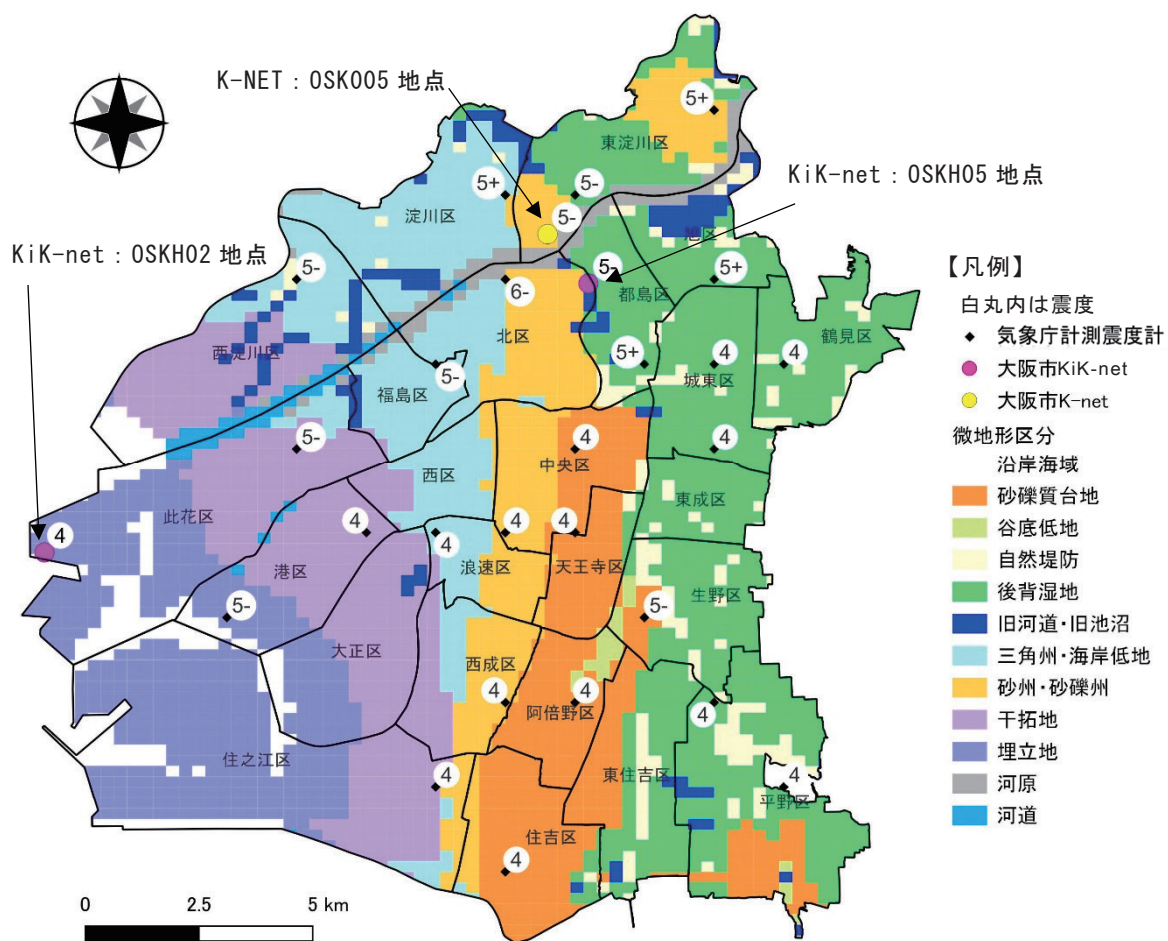


図5 大阪市の微地形区分と大阪北部地震の震度分布

3.2 観測地震波の分析

表3に OSK005、OSKH02、OSKH05 の3地点とも震度3以上を観測した3地震の諸元を示す。また、図6に検討対象の3地震の震源位置を示す。震源方向は、大阪市に対して大阪北部地震は北東、淡路島付近の地震は西南西の内陸型、東北地方太平洋沖地震は北東の海溝型である。3地点からの観測点までの平均の震源距離は、大阪北部地震は25km、淡路島付近の地震は平均69km、東北地方太平洋沖地震は平均762kmである。

表 3 検討用地震

地震	地震情報	観測点	距離	地表最大加速度 (gal)	計測震度	震度階
1. 大阪北部地震	発生日時: 2018/6/18 7:58 緯度, 経度: (34.843, 135.622) 震源深さ: 13km Mg: 6.1 最大震度 6 弱	OSK005	震央距離: 16.6km 震源距離: 21.1km	NS: 191.026 EW: 282.921 UD: 165.775	4.9	震度 5 弱
		OSKH02	震央距離: 29.2km 震源距離: 32km	NS: 178.124 EW: 120.354 UD: 76.297	4.4	震度 4
		OSKH05	震央距離: 16.9km 震源距離: 21.3km	NS: 262.42 EW: 223.036 UD: 310.016	4.9	震度 5 弱
2. 淡路島付近の地震	発生日時: 2013/4/13 5:33 緯度, 経度: (34.418, 134.828) 震源深さ: 15km Mg: 6.3 最大震度 6 弱	OSK005	震央距離: 71.2km 震源距離: 72.8km	NS: 36.018 EW: 44.412 UD: 18.673	3.1	震度 3
		OSKH02	震央距離: 58.2km 震源距離: 60.1km	NS: 25.381 EW: 19.619 UD: 30.83	3	震度 3
		OSKH05	震央距離: 71.5km 震源距離: 73km	NS: 29.509 EW: 26.004 UD: 12.574	3.1	震度 3
3. 東北地方太平洋沖地震	発生日時: 2011/3/11 14:46 緯度, 経度: (38.103, 142.86) 震源深さ: 24km Mg: 9 最大震度 7	OSK005	震央距離: 757km 震源距離: 757.4km	NS: 7.262 EW: 5.743 UD: 3.216	2.6	震度 3
		OSKH02	震央距離: 770.1km 震源距離: 770.4km	NS: 14.818 EW: 16.092 UD: 6.895	3.1	震度 3
		OSKH05	震央距離: 756.8km 震源距離: 757.2km	NS: 8.497 EW: 8.042 UD: 3.516	2.7	震度 3

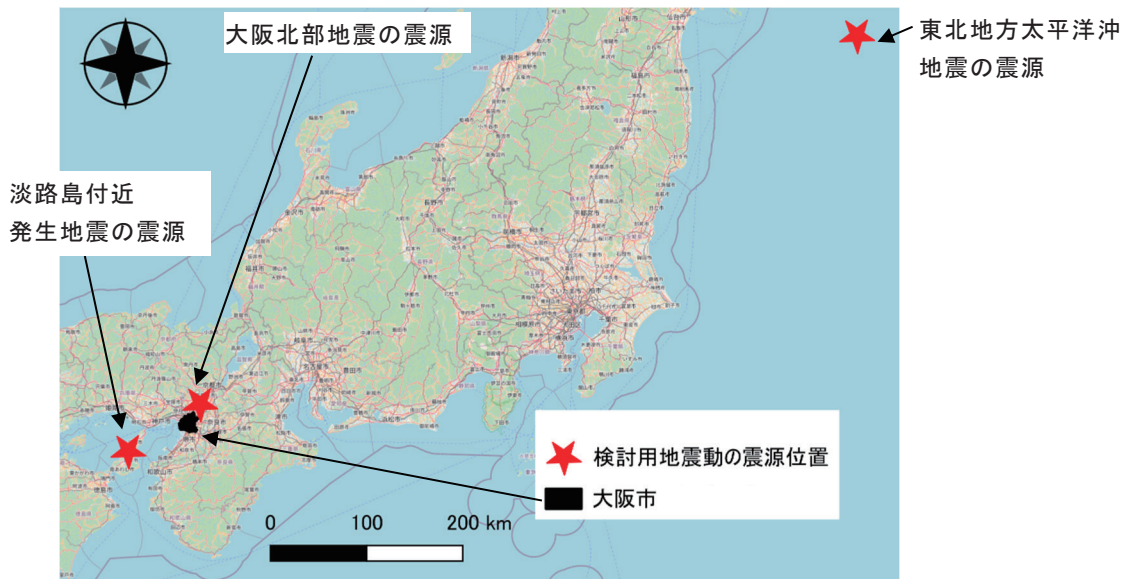


図 6 検討対象地震の震源位置

(1) 検討用地震動の周波数特性

図 7 に地表面レベルの検討用地震動 (NS 方向) のスペクトル図を示す。周波数成分としては、近距離の内陸型である大阪北部地震の地震動は 3 地点とも 0.3Hz 以上の長周期から短周期成分が多く、遠距離の海溝型である東北地方太平洋沖地震の地震動は 3 地点とも 0.6Hz 以下の長周期成

分が多い傾向を示している。中距離の内陸型である淡路島付近の地震の地震動は OSK005、OSKH05 地点では 1Hz 以上の振動数成分が多く、埋立地の OSKH02 地点では 0.6Hz 以下の長周期成分が多い傾向である。

地震動の非定常なスペクトル特性の時間的変動を捉えるために式(1)、(2)を用いたガボールウェーブレット変換を実施した。

$$WT(b,a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{i\omega t} \quad (2)$$

ここで、 a : 周波数の逆数、 b : 時間、 σ : ガウス関数の標準偏差

図 8 に検討用地震動の NS 方向加速度時刻歴とウェーブレット解析結果を示す。大阪北部地震および淡路島付近の地震の地震動の高振動のピークは、3 地点とも主要動始まりから 10 秒間の範囲で示している。なお、OSKH02 地点では淡路島付近の地震の地震動の波形後半 120~140 間に低振動数のピークを示す。東北地方太平洋沖地震の地震動の低振動数のピークは、OSK005 地点では 40~60 秒間、OSKH05 地点では波形後半の 110~150 秒間、OSKH02 地点でも波形後半の 220~230 秒間にピークを示している。

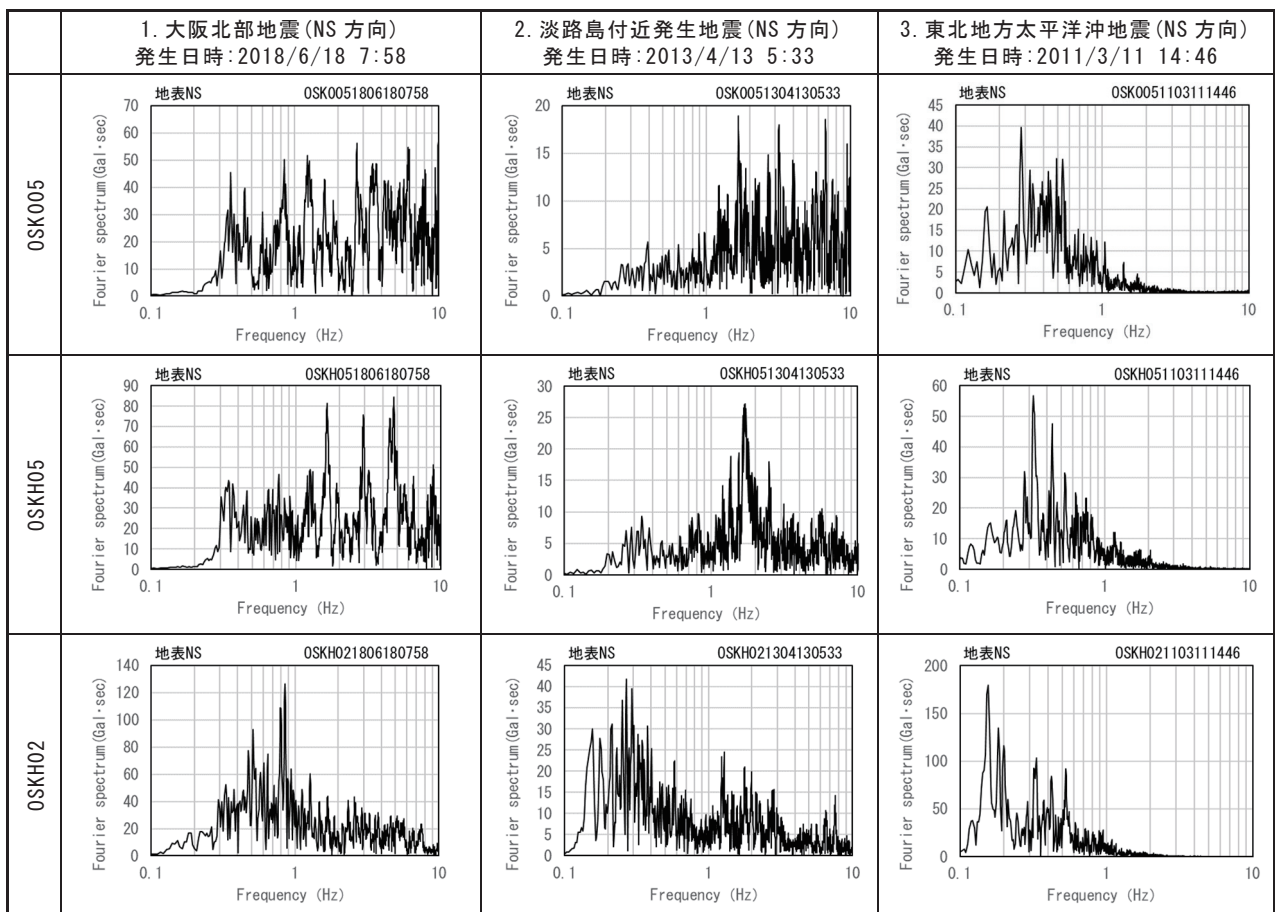


図 7 検討用地震動のフーリエスペクトル (NS 方向)

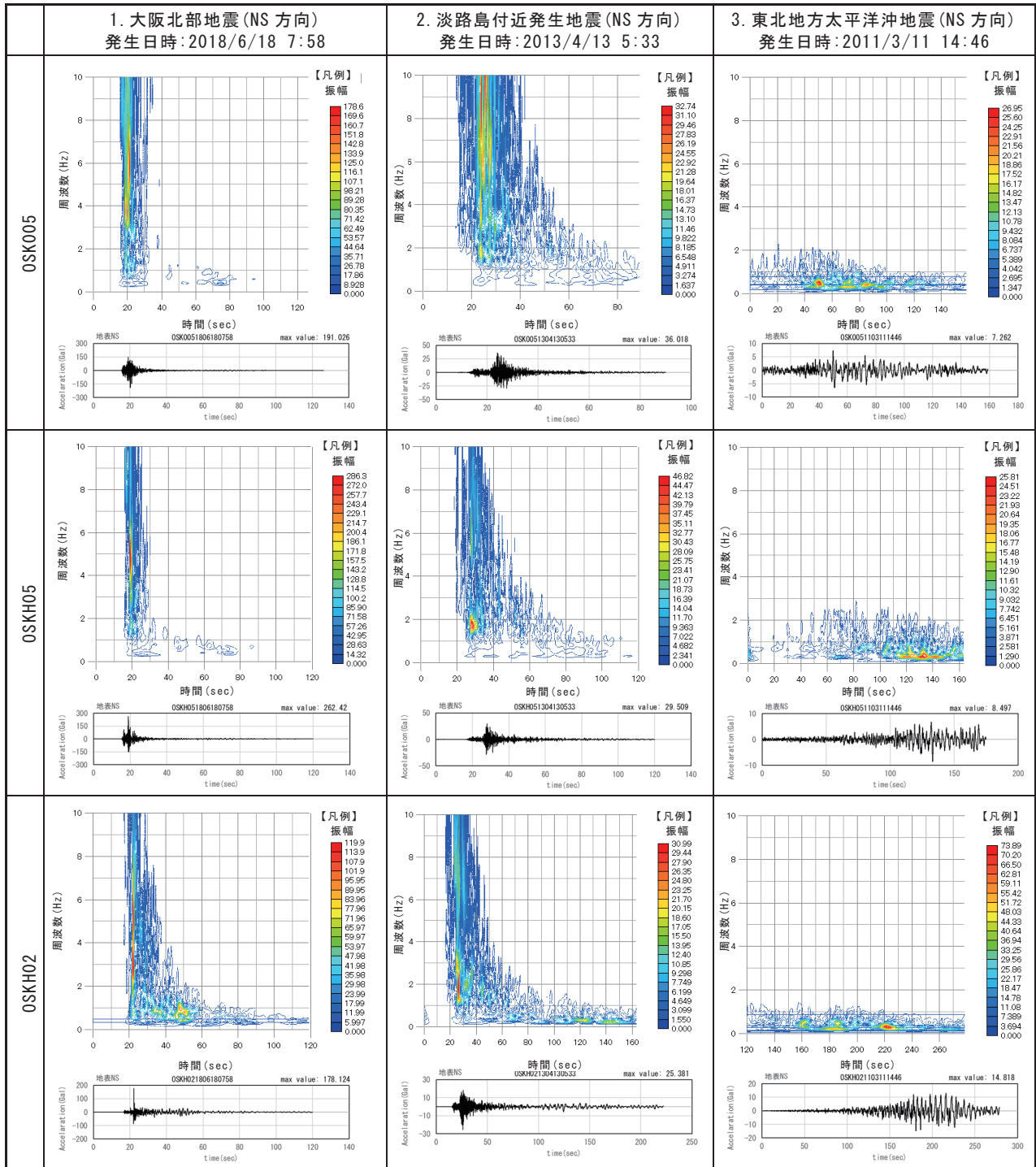


図8 検討用地震動の加速度時刻歴とウェーブレット解析結果 (NS方向)

(2) 速度応答スペクトル

図9に地表面レベルの速度応答スペクトル (NS方向) を示す。OSK005、OSKH05 地点は、周期0.2~0.3秒、0.6秒、3.5秒程度の建物の応答が大きくなる傾向である。OSKH02 地点は、周期1秒~7秒間の周期の長い構造物の応答が大きくなる傾向にある。水平2方向の速度応答スペクトルのベクトル和の周期1.6秒から7.8秒間の最大値から評価される長周期地震動階級¹²⁾は、大阪北部地震で3地点とも階級2、淡路島付近の地震ではOSKH02地点のみ階級1、東北地方太平洋沖地震では、OSK005、OSKH05 地点で階級1、OSKH02 地点で階級2である。

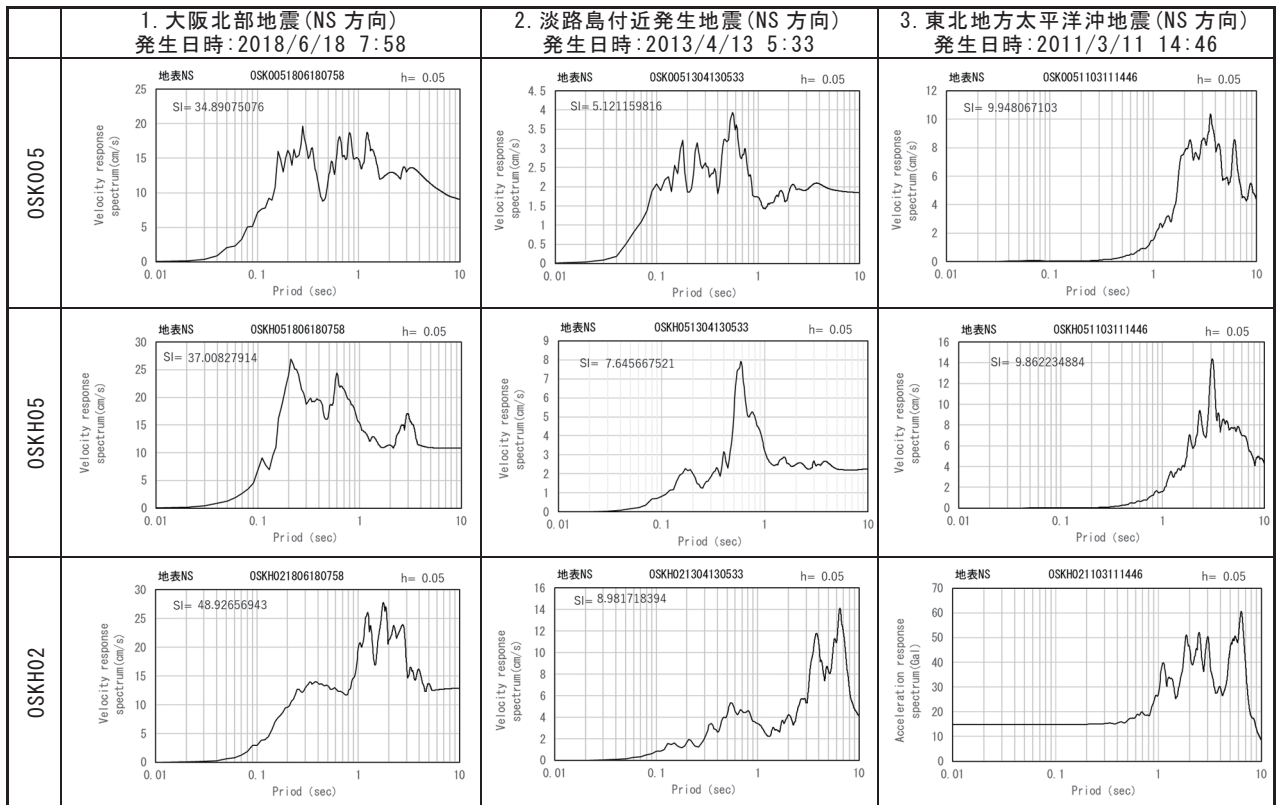


図9 速度応答スペクトル (NS 方向)

(3) 観測波形による地盤の卓越周期

観測波形から求まる地盤の卓越周期は、 V_s (せん断波速度) 2.4km/s 層以浅の地盤モデルの一次固有周期との相関が高い¹³⁾こと、地盤の卓越周期の算定は観測波形の H/V スペクトル比で算定できることが報告¹⁴⁾されている。また、堆積層の厚い大阪平野では、長周期地震動による高層建築物や長大構造物の被害が懸念されている。大阪府には 60m 以上の超高層建物が 470 棟あり、その内 415 棟が大阪市内に立地しており、超高層建物の高さ (H) は 9 割が 150m 以下、5 割強が 100m 以下、それらの固有周期は $T=0.015H\sim 0.025H$ の範囲に分布¹⁵⁾している。したがって、大阪市では周期 1.5~3.75 秒にピークがある長周期地震動による影響が大きいことがわかる。

地表面で観測された 3 成分 (NS, EW, UD) について観測開始 10 秒以降の 163.84 秒間を切り出した。H/V スペクトル比は、水平動 2 成分と鉛直動の切り出した波形の端部に 1 秒のコサイナーを施し、フーリエ振幅スペクトルをバンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウで平滑化した後に、水平動と鉛直動成分のスペクトルの比¹⁶⁾ (式(3)参照) として算定した。

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{S_{NS}^2 + S_{EW}^2}}{S_{UD}} \quad (3)$$

ここに、 S_{NS}, S_{EW}, S_{UD} はそれぞれ NS、EW、UD 成分のフーリエスペクトルである。

図 10 に H/V スペクトル比を示す。検討用地震動の H/V より地盤の卓越周期を推定すると、OSK005 地点は 2.8~4.3 秒、OSKH05 地点は 2.7~4.2 秒、OSKH02 地点は 7.1~8.2 秒である。

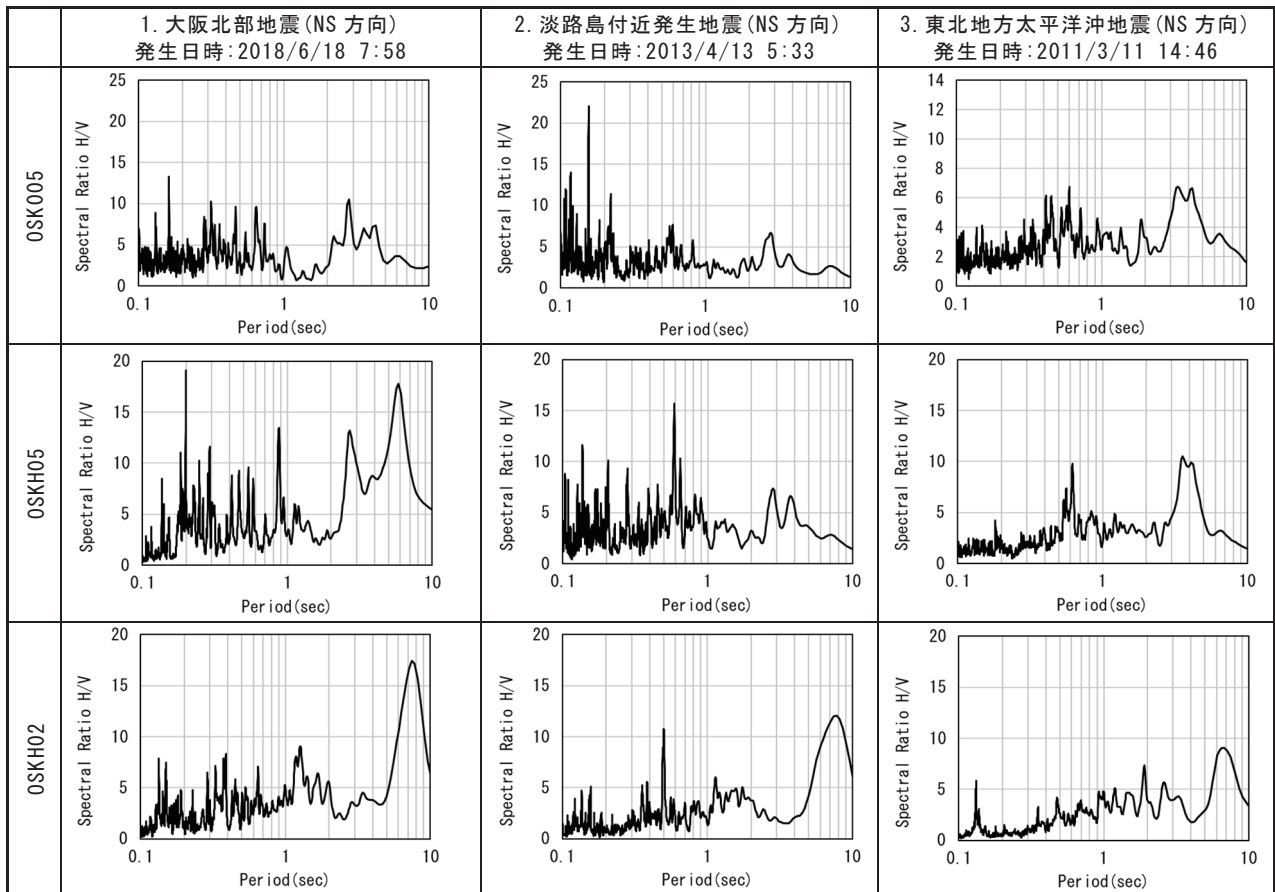


図 10 H/V スペクトル比 (観測点地表レベル)

(4) 鉛直方向地震動

高い安全性が求められる建物、免震建物、大空間を有する建物では、鉛直方向地震動に対する検討が必要となる。鉛直震度として考慮する場合、水平動の最大加速度振幅の 1/2 を採用する方法¹⁷⁾などがある。鉛直方向の地震応答解析を行う場合、鉛直地震動の設定方法として日本建築センター¹⁸⁾には、全周期帯で一律で係数を乗じるのではなく、短周期領域で増幅する方法が提案されている。

図 3 に示す 3 地点で観測された地表面観測波の水平方向最大加速度値に対する鉛直方向最大加速度値の比は、平均値で 0.56 倍、±標準偏差で 0.3~0.82 倍である。図 11 に日本建築センターの提案の係数と 3 地点の水平(NS)方向に対する鉛直(UD)方向の加速度応答スペクトル比を示す。地震波によっては、提案係数を超える場合がある。

4. まとめ

大阪市の微地形区分と K-NET、KiK-net 観測点の観測波の分析結果を下記に示す。

- ・大阪市の微地形区分は、中央部の南北に比較的地盤が良い砂礫質台地（上町台地）が約 12.4%、その他は軟弱な地盤に分類される低地で構成されている。
- ・大阪北部地震では、低地と分類される砂州、三角州、三角州、後背湿地で大きな震度が観測されている。
- ・検討用地震動の周波数特性としては、OSK005（砂州）、OSKH05（旧河道）では 0.3Hz 以上、OSKH02（埋立地）では 0.6Hz 以下の振動数成分が多く、長周期（1.6 秒から 3.3 秒）成分

を含む傾向である。

- 3 地震の速度応答スペクトルより、3 地点とも大阪市にある超高層建物の 1 次固有周期（1.5～3.75 秒）に対応するピークを有する。超高層建物が共振する恐れがある。
- 長周期地震動階級は、大阪北部地震で 3 地点とも階級 2、東北地方太平洋沖地震では、OSK005、OSKH05 地点で階級 1、OSKH02 地点で階級 2 である。
- H/V スペクトル比の検討より、淀川沿いの OSK005（砂州）、OSKH05（旧河道）の地盤の卓越周期は 2.7～4.3 秒、OSKH02（埋立地）の地盤の卓越周期は 7.1～8.2 秒である。
- 上記 2 点より大阪市の観測点付近の超高層建物は長周期地震動に注意する必要がある。
- 地盤モデルによる地盤の卓越周期と観測波の H/V スペクトル比による地盤の卓越周期は、地盤モデル下端のせん断波速度を 3km/sec まで調査している OSKH05、OSKH02 地点では対応している。
- OSK005 地点のように工学的基盤(V_s :300～700m/sec)までの調査による地盤モデルによる地盤の卓越周期は、長周期地震動を考慮した設計を行う場合には注意する必要がある。
- 鉛直震度は、水平動の最大加速度振幅の平均値で 0.56 倍、標準偏差で 0.3～0.8 倍である。
- 3 地震波での水平方向に対する鉛直方向の加速度スペクトル比は日本建築センターの提案係数を超える場合があるため注意が必要である。

本検討では、3 地点とも震度 3 以上を示す 3 地震の観測波を用いた限定的な検討のため、今後は震度 3 より小さい観測波を含めた検討を行う必要がある。

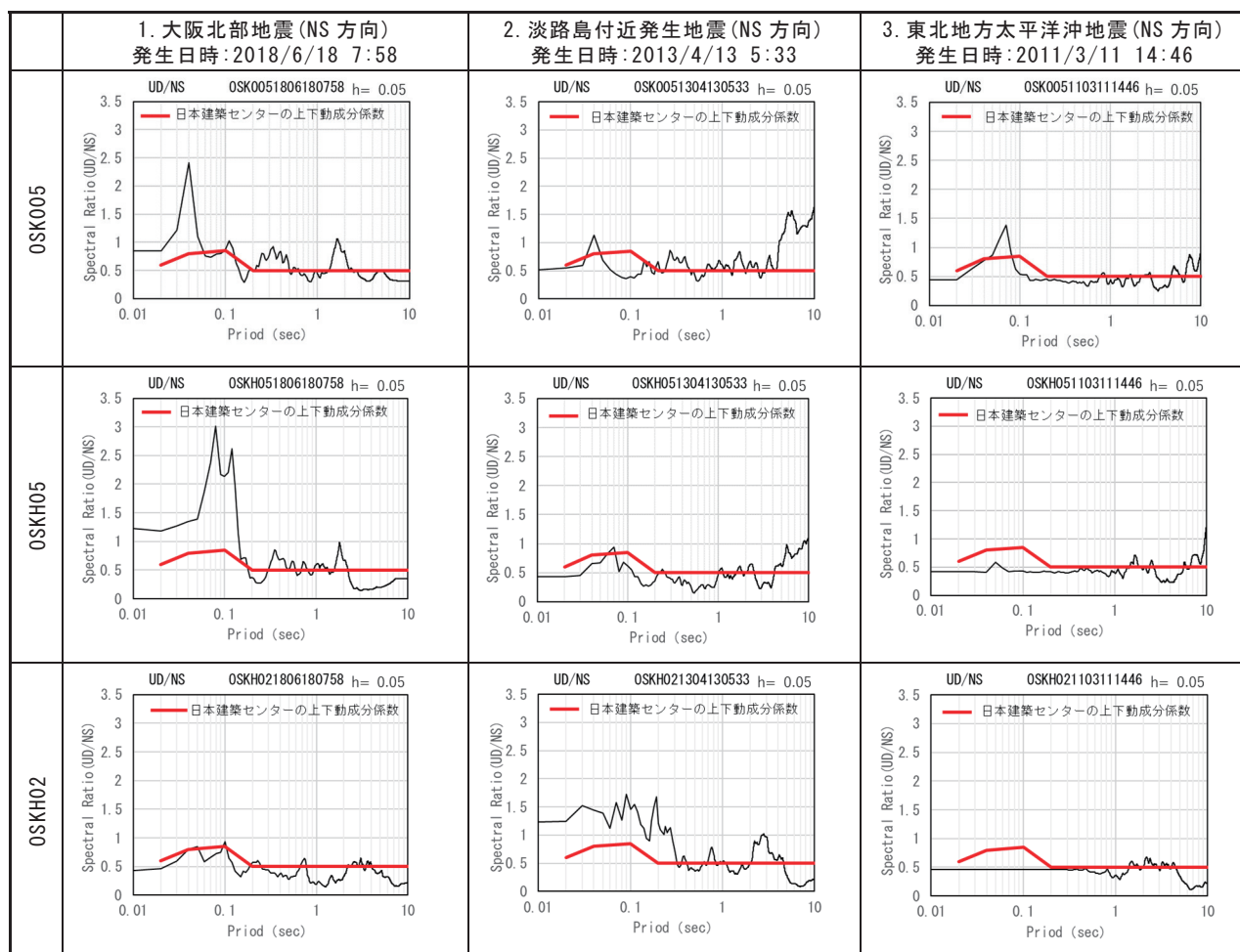


図 11 水平(NS)方向に対する鉛直(UD)方向の加速度応答スペクトル比（観測点地表レベル）

謝 辞

本論文の執筆にあたり、独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET、KiK-net）の強震波形記録および気象庁一元化震源カタログを利用しました。また、2023年度ゼミナール生 森田果蘭、森田美優、両氏の卒業論文のデータの一部を参考にしました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)大阪管区気象台：<https://www.jma-net.go.jp/osaka/index.html>、2023年12月1日 最終閲覧日。
- 2)National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019)、NIED K-NET、KiK-net、National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience、doi:10.17598/NIED.0004。
- 3)気象庁(計測震度)：https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html、2023年12月1日 最終閲覧日。
- 4)大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版社、1994。
- 5)谷崎 浩、野田 茂、菊池久和、安中 正：高速ウェーブレット解析による地震動の非定常パワースペクトルの評価、土木学会第49回年次学術講演会梗概集I、pp.1340~1341、1994。
- 6)日本建築学会：建物と地盤の相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006.2。
- 7)野木淑裕、野畑有秀、田中清和、藤森健史:観測記録に基づく合理的上下地震応答評価法に関する研究、大林技術研究所報 No.85、pp.1-8、2021。
- 8)中村 豊：H/V スペクトル比の基本構造、物理探査学会、第3回地震防災シンポジウム「微動と地震防災」、2008。
- 9)松岡昌志、若松加寿江、藤本一雄、翠川三郎:日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定、土木学会論文集 No.794/I-72、pp.239-251、2005。
- 10)出口拓磨、長尾 毅、山田雅行、伊藤佳洋:高密度強震観測エリアにおけるサイト増幅特性の解析的評価法に関する研究、土木学会論文集 A1 Vol.72 No.4、pp.199-212、2016。
- 11)Shnabel、P.B.、J. Lysmer and H.B. Seed: SHAKE、A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites、Report No. EERC72-12、University of California at Berkeley、1972。
- 12)気象庁(長周期地震動)：https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/ltpgm_explain/kaisetsu.html、2023年12月1日 最終閲覧日。
- 13)中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門部会」：長周期地震動の卓越周期と深部地盤の固有周期、2008.12。
- 14)大熊裕輝、松岡昌志、山崎文雄、原田隆典：宮崎県における常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動の推定、土木学会論文集、696/I-58、pp.261-272、2002。
- 15)林 康裕、村瀬詩織、杉野未奈:大阪府域に立地する超高層建物、日本建築学会技術報告集、第24巻、第58号、pp.1075-1078、2018.10。
- 16)時松孝次、新井 洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響、日本建築学会構造系論文集、No.511、pp.69-75、1998。
- 17)土木学会原子力土木委員会性能照査高度化小委員会:原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査マニュアル、2018。
- 18)建設省建築研究所・(財)日本建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針(案)、1992。