



Title	大阪堆積盆地モデルに基づいた表面波の卓越周期に関する検討
Author(s)	宮腰, 研; MIYAKOSHI, Ken; 大西, 良広 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 69, 41-50
Issue Date	2006-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.69.41
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21499
Type	departmental bulletin paper
File Information	04.pdf



大阪堆積盆地モデルに基づいた表面波の卓越周期に関する検討

宮腰 研・大西 良広・赤澤 隆士

(財) 地域地盤環境研究所地震防災グループ

堀家 正則

大阪工業大学工学部

(2005年12月20日受理)

Predominant period for surface waves based on the Osaka basin model

Ken MIYAKOSHI, Yoshihiro ONISHI, Takashi AKAZAWA

Earthquake Engineering Group, Geo Research Institute

and

Masanori HOIKE

Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology

(Received December 20, 2005)

We estimated the predominant period of surface waves from the dispersion curves of the Love and the Rayleigh fundamental mode, calculated from 1-D velocity structure models extracted from the Osaka basin model. The estimated predominant period is from 1 to 10 s for the Love waves and 1 to 6 s for the Rayleigh waves in the Osaka plain. The linear relationships between the predominant period of surface waves and the bedrock depth are confirmed. Predominant period is proportional to the bedrock depth. Coefficient proportionality approximately equals 5 s/km for Love waves and 2 s/km for Rayleigh waves.

We compared the estimated predominant periods with the observed ones at strong ground motion observation stations maintained by CEORKA (Committee of Earthquake Observation and Research in the Kansai Area) for the main shock (M_j 7.4) and aftershock (M_j 6.5) of the 2004 off the Kii peninsula earthquake. Except for some CEORKA sites, where the depth of the bedrock is deeper than 1.5 km, the estimated predominant period of surface waves is consistent with the observed one. This result is the first approximation, effective for the predominant period of surface waves in the Osaka plain. However, there is a possibility of a variation of the predominant period for the surface waves coming from a different direction.

I. はじめに

大阪湾を含む大阪堆積盆地は、西側は淡路島、北側を北摂山地や千里丘陵、東側を生駒山地や枚方丘陵、南側を和泉山脈や泉北丘陵で囲まれており、長軸方向に約 100 km、短軸方向に約 50 km のほぼ楕円形をしている。このような大規模な堆積盆地内にある大阪平野では、近い将来発生すると考えられる南海・東南海地震によって周期数秒以上の長周期表面波が励起することが予想されている（例えば、鶴来・他、2005）。近年の長周期表面波による被害として 2003 年十勝沖地震による苫小牧の石油タンクのスロッシングが挙げられる。大阪平野の大阪湾岸地域でも石油コンビナートがある一方、大阪市周辺では都市再開発に伴い、周期 1 秒以上の高層ビルの建設が進んでいる。このため、南海・東南海地震などのような M 7～8 クラスの海溝型巨大地震に対する石油タンクのスロッシングや周期 1 秒以上の高層ビルの地震動応答を考える上で、大阪平野内で卓越する表面波の周期特性を知ることは重要と考える。

地震動によって励起される表面波の卓越周期は地盤構造（特に速度構造）と密接な関係があるが、これまで大阪平野における地盤構造モデルと表面波の卓越周期の関係を定量的に議論された例はあまり多くない（例えば、上林・他、2000）。そこで本研究は宮腰・他(1999)による大阪堆積盆地モデルに基づき、大阪平野内で卓越する表面波の周期特性を求めるとともに、関西地震観測研究協議会（以下、関震協）で得られた 2004 年紀伊半島沖地震の本震および余震の地震動記録を用いて大阪平野内で卓越する表面波の周期特性の検討を行った。

II. 大阪堆積盆地モデルによる表面波の卓越周期

大阪堆積盆地では、Fig.1 に示すように、スプライン関数を用いた地盤構造のモデル化手法（Koketsu and Higashi, 1992）を用いて深さ約 3 km までの速度構造モデルが得られている（宮腰・他、1999）。図中のコンターは大阪堆積盆地モデルにおける基盤岩 ($V_s=3.2$ km/s) の上面深さ、また、▲は関震協の強震観測点を示す。Table 1 に大阪堆積盆地モデルにおける各層の物性値を示す（香川・他、1998）。本検討では、国土数値情報の標準地域メッシュに基づき、大阪堆積盆地モデル（約 72 km×72 km）を約 1 km×1 km の領域（第 3 次メッシュ）に分割し、各メッシュ地点での Love 波と Rayleigh 波の卓越周期を求めた。ただし、基盤岩が露頭している地点は本検討から除外しており、結局、大阪平野を中心とした堆積層上の 1022 地点で表面波の卓越周期を求めている。

一般に、任意の一次元速度構造モデルから計算される表面波分散曲線の群速度において、群速度が極小（エアリー相）となる波長で表面波が卓越するとされている（例えば、宇津、2002）。そこで、本検討では各メッシュ地点での卓越周期を以下のように求めた。まず、(1)大阪堆積盆地モデルに基づき各メッシュ地点で一次元速度構造モデルを求める。次に、(2)仮定した一次元速度構造モデルから Rayleigh 波および Love 波の分散曲線（位相速度と群速度）を計算する。最後に、(3) Rayleigh 波および Love 波における基本モードの群速度分散曲線のエアリー相に対応する周

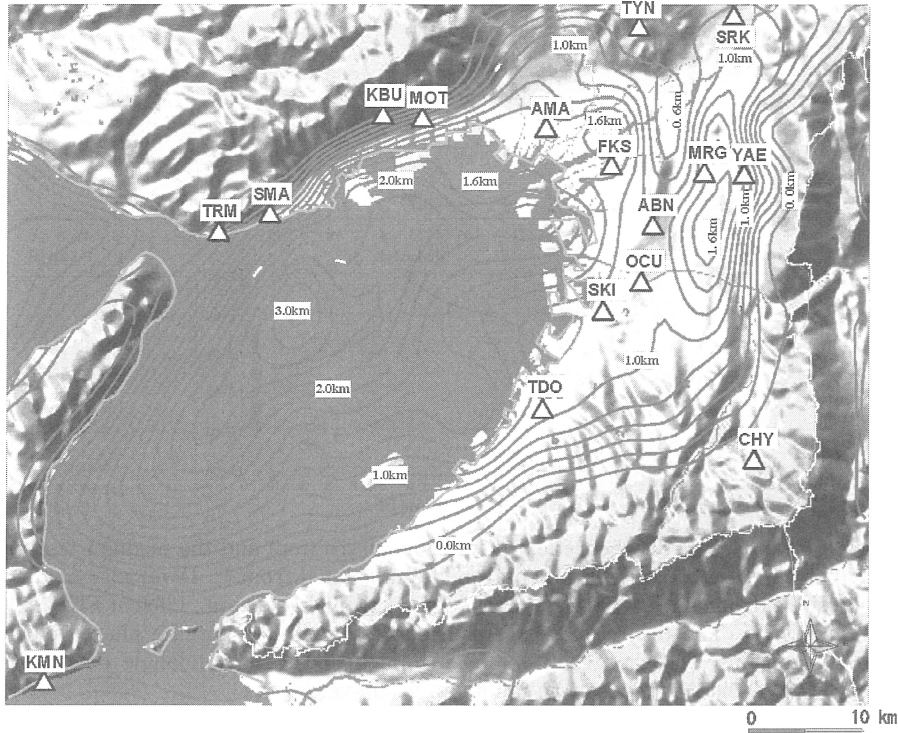


Fig. 1. Location map showing strong ground motion observation stations maintained by CEORKA (Committee of Earthquake Observation and Research in the Kansai Area). Contour lines indicate bedrock depth (km) distribution of the Osaka basin model (Miyakoshi et al., 1999).

期を各メッシュ地点での表面波の卓越周期とした。この時、各メッシュ地点では表面波の振幅特性 (Medium Response ; Harkrider and Anderson, 1966) も計算しており、エアリー相に対応する周期において表面波の振幅特性も卓越することを確認している。なお、本検討では長周期地震動を対象としていることから、Rayleigh波およびLove波分散曲線のエアリー相に対応する卓越周期の読み取りは周期1秒以上とした。

Table 1. Parameters of the four-layer structure model for the Osaka basin with three sediment layers and a rock half space (Kagawa et al., 1998).

	Vp [km/s]	Vs [km/s]	Density [g/cm ³]
Layer A	1.6	0.35	1.7
Layer B	1.8	0.55	1.8
Layer C	2.5	1.00	2.1
Layer D	5.4	3.2	2.7

Fig. 2, Fig. 3 に関震協の強震観測点における Rayleigh 波および Love 波の分散曲線と表面波の振幅特性の例を示す。各地点ともにエアリー相に対応する周期 (図中の▼) において表面波の振幅特性が卓越している。例えば、基盤岩深度が浅い TYN (深さ約 0.3 km) での Love 波の卓越周期は約 2 秒、一方、基盤岩深度が深い FKS (深さ約 1.6 km) では約 7 秒である。また、Rayleigh 波の卓越周期は TYN で約 1 秒、FKS で約 3 秒であった。以上のように、基盤岩深度が深くなるにつれて表面波の卓越周期は長くなる傾向が見られる一方、同一地点における Love 波の卓越周

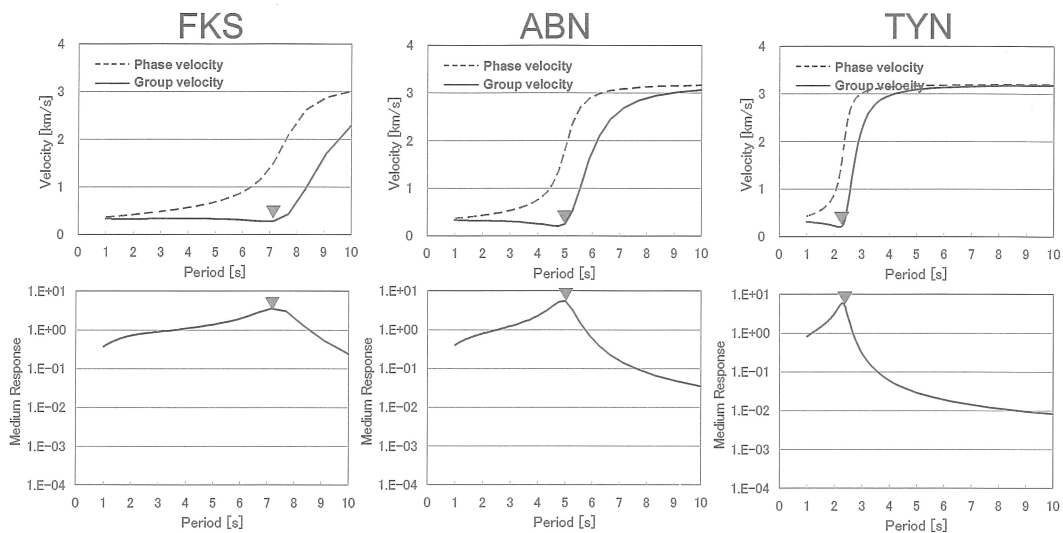


Fig. 2. Examples of the theoretical dispersion curves (top) and the medium response (bottom) of the Love fundamental mode, calculated from 1-D velocity model at a site extracted from the Osaka basin model (Miyakoshi et al., 1999) at FKS, ABN and TYN. The theoretical dispersion curves are shown for the phase velocity (broken line) and the group velocity (solid line). Reverse-triangle denotes the period of the Airy phase (the minimum group velocity).

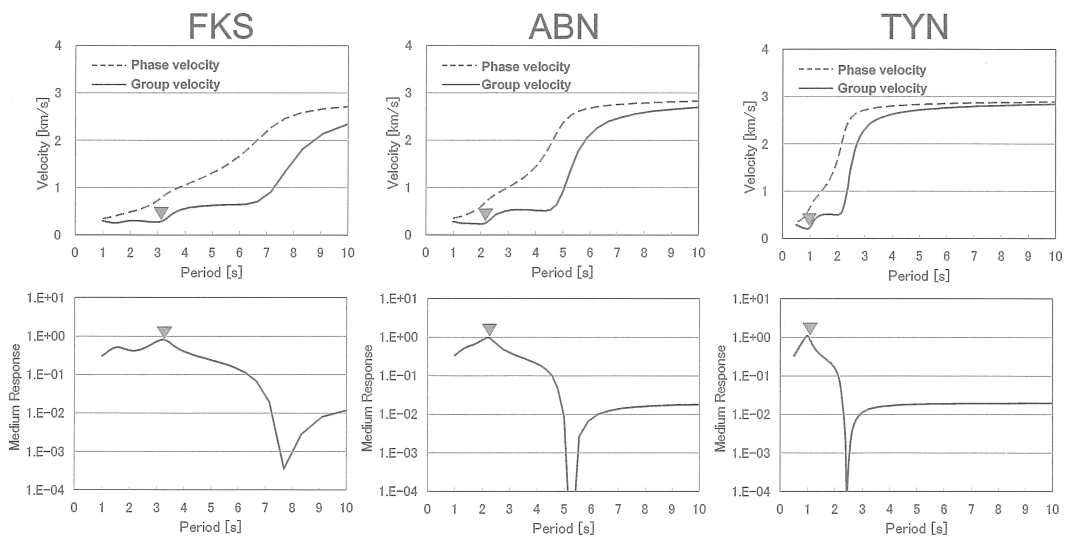


Fig. 3. Same as Fig.2, but for the Rayleigh wave.

期は Rayleigh 波に比べて約 2 倍長いことが分かる。

Fig. 4, Fig. 5 に大阪堆積盆地モデルに基づいて得られた大阪平野内での Love 波および Rayleigh 波の卓越周期分布を示す。Love 波および Rayleigh 波の卓越周期分布は Fig. 1 に示し

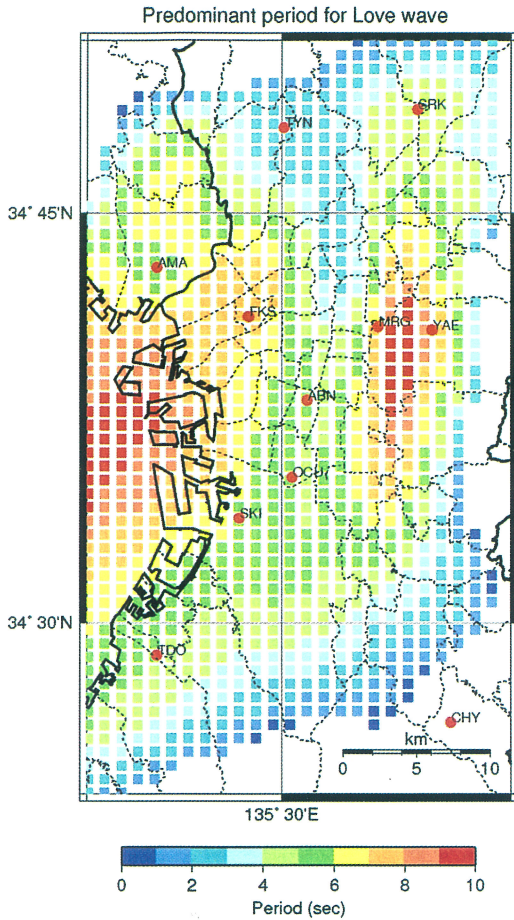


Fig. 4. Distribution map of the predominant periods for the Love waves in the Osaka plain. Solid circles denote the strong ground motion observation stations maintained by CEORKA.

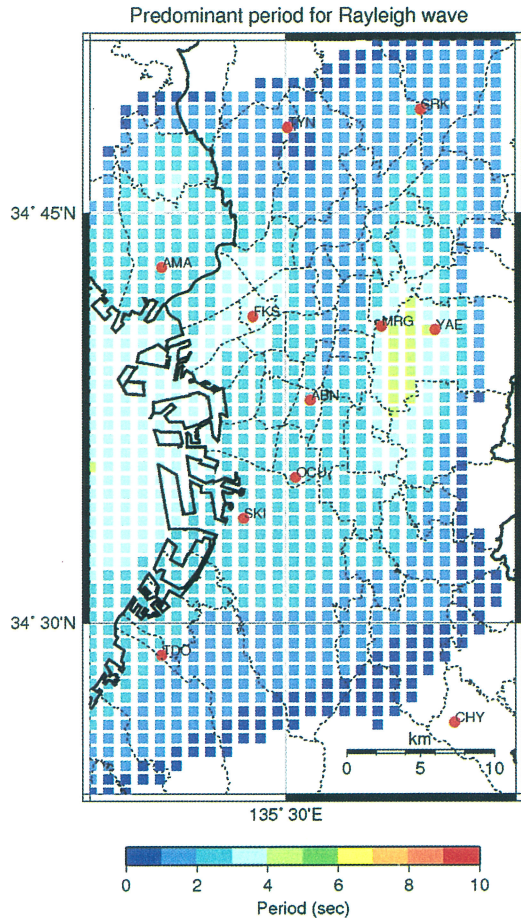


Fig. 5. Same as Fig.4, but for the Rayleigh waves.

た大阪堆積盆地モデルの基盤岩深度分布に対応した変化を示している。例えば Love 波の卓越周期分布は、大阪平野の北側の北摂山地や千里丘陵(例えば TYN)および南側の泉北丘陵で約 1 ~ 4 秒であるのに対し、西側の大阪湾周辺や東側の東大阪周辺(例えば, MRG, YAE)では卓越周期が 8 ~ 10 秒となっている。また、大阪市周辺ではその卓越周期は約 4 ~ 8 秒である。一方、Rayleigh 波の卓越周期分布は Love 波とほぼ同じ分布を示すが、その卓越周期は Love 波の約半分である。本検討結果から大阪湾岸地域や大阪市周辺で励起される表面波の卓越周期は、Love 波は 6 秒前後、Rayleigh 波は 3 秒前後であることが示唆される。

Fig. 6, Fig. 7 にそれぞれ大阪堆積盆地モデルによる基盤岩深度(km)と Love 波および Rayleigh 波の卓越周期(s)の関係を示す。なお、Fig. 6 および Fig. 7 に見かけの下限周期(1 秒)が見られる。これは本検討で Love 波あるいは Rayleigh 波分散曲線から読み取る表面波の卓越周期

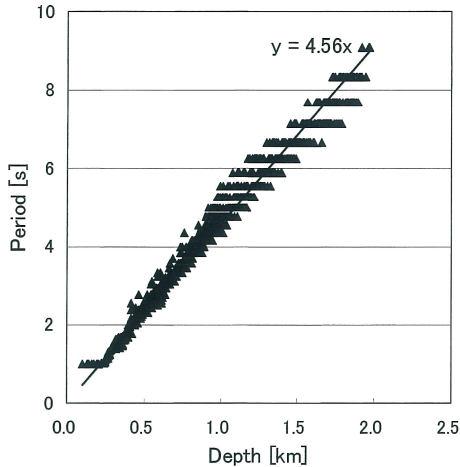


Fig. 6. Dependence of the predominant period for the Love wave on the bedrock depth. Linear relationship with proportionality coefficient of 4.56 fit the data well.

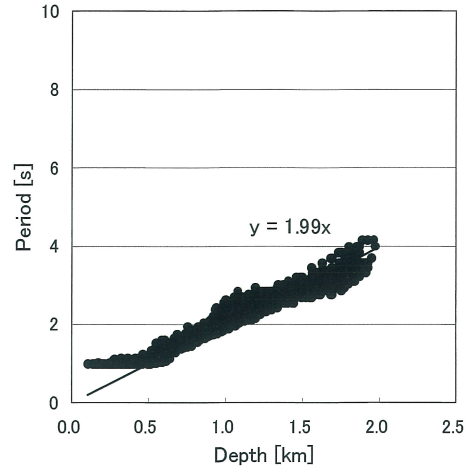


Fig. 7. Same as Fig.6, but for the Rayleigh wave. Proportionality coefficient equals 1.99 in this case.

(エアリー相に対応)を周期1秒以上としているためである。本検討の結果から、大阪平野内においてLove波の卓越周期(s)は基盤深度(km)の約5倍、また、Rayleigh波の卓越周期(s)は基盤深度(km)の約2倍に対応することが分かった。

III. 2004年紀伊半島沖地震による表面波の卓越周期

2004年9月に紀伊半島沖深さ44 kmで $M_j7.4$ の地震が発生し、関震協の強震観測点でも本震記録およびその余震記録が多数観測された。ここでは、基盤岩深度の異なる関震協観測点の3地点(TYN, ABN, FKS; Fig.1 参照)を例に、各強震観測点で得られた本震および余震による地震動記録を用いて(Table 2 参照)、前述した大阪堆積盆地モデルによるLove波およびRayleigh波の卓越周期について検証を行う。

Fig. 8に本震($M_j7.4$)記録における非定常スペクトル例(神山, 1979)を示す。なお、参考のため、岩盤サイトであるCHYの非定常スペクトルも示している。非定常スペクトルの解析時間は記録開始から300秒間であり、図中の振幅スペクトルは三成分記録中の最大振幅スペクトルで規格化されている。同図には大阪堆積盆地モデルに基づいて得られているLove波(図中のNS, EW成分)およびRayleigh波(図中のUD成分)の卓越周期に対応する周期帯(1秒間)を白い四角いハッチで示している。ただし、大阪堆積盆地モデルによるTYNのRayleigh波の卓越周期が約1秒であったことから、TYNのUD成分にはハッチを示していない。FKSを除き、TYNとABNともに大阪堆積盆地モデルによる表面波の卓越周期と非定常スペクトルによるS波到着後の後続波群の卓越周期は調和的な結果が得られている。なお、TYNにおいて周期7秒前後の後続波群が顕著に見られるが、この波群は岩盤サイトであるCHYでも確認できる。このことから、卓越周

Table 2. List of earthquakes used for spectrogram.

	Date	Time	Lat.(°)	Lon.(°)	Depth(km)	M _J
Main shock	2004/9/5	23:57:16.8	33.137	137.140	44	7.4
After shock	2004/9/7	08:29:36.2	33.208	137.292	41	6.5

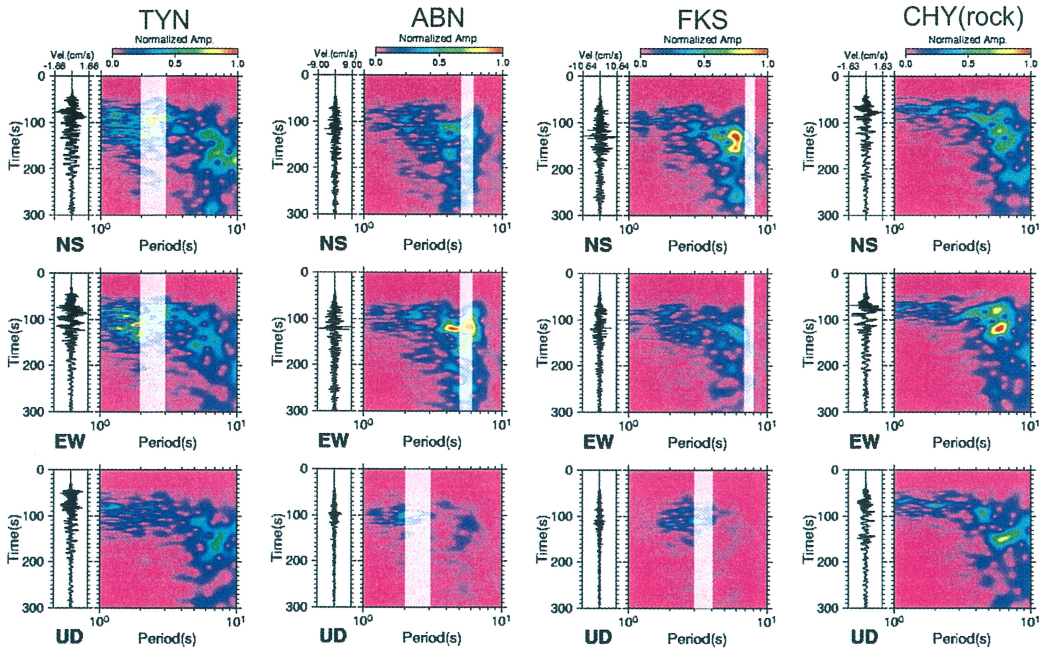


Fig. 8. Examples of the spectrograms of the main shock of the 2004 off the Kii peninsula earthquake ($M_J 7.4$) at the four CEORKA stations (TYN, ABN, FKS, and CHY). CHY locates on the rock site. White squared hatching indicates the range of predominant period for Love waves (horizontal components) and Rayleigh waves (vertical component), estimated by using the Osaka basin model (refer to Fig.4 and Fig. 5). The spectrum amplitude of spectrogram is normalized by the maximum amplitude of the three-component data.

期7秒前後の後続波群は本震の震源域から大阪平野までの伝播経路で生成された表面波と考えられる。このため、震源域から大阪平野までの間で生成される表面波の影響を排除するために、次に地震規模の小さな地震を用いて同様な検証を行った。

Fig. 9 に一つの余震($M_J 6.5$)記録における非定常スペクトル例を示す。岩盤サイトのCHYでは顕著な後続波群は確認されないことから、この地震において震源域から大阪平野までの伝播経路で表面波は生成されていないものと考えられる。余震記録でも本震記録と同様に、FKSを除き、TYNとABNともに大阪堆積盆地モデルによる表面波の卓越周期と非定常スペクトルによるS波到着後の後続波群の卓越周期は調和的な結果が得られている。

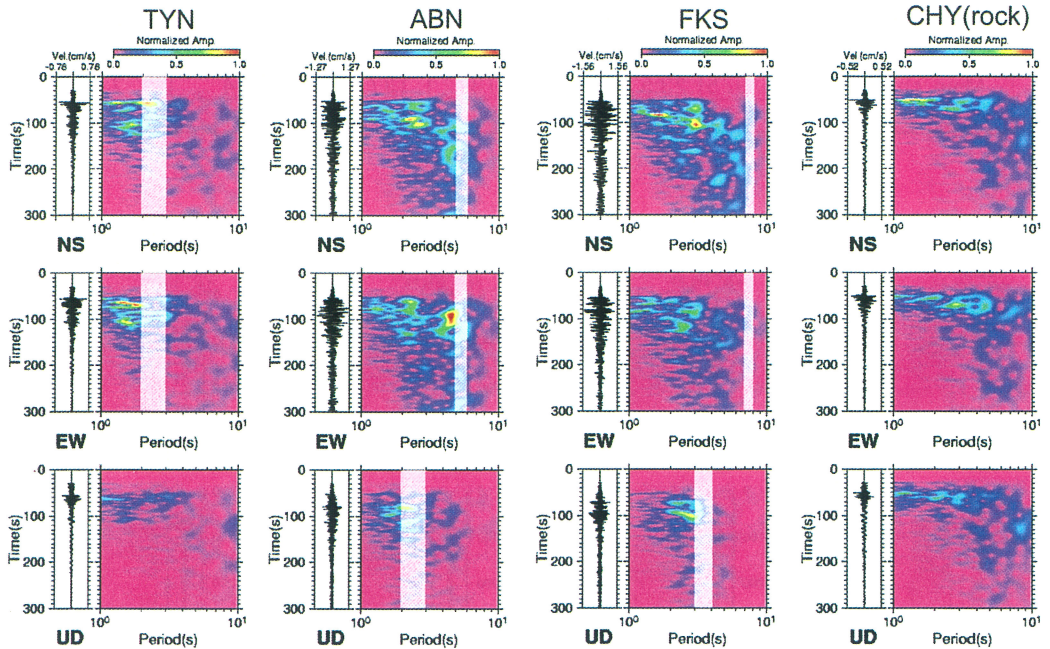


Fig. 9. Same as Fig.8, but for the aftershock ($M_j6.5$).

IV. 考 察

大阪堆積盆地モデルによる表面波 (Love 波と Rayleigh 波) の卓越周期 (Fig. 4, Fig. 5 参照) と $M_j6.5$ の余震を例に大阪平野内の関震協観測点 (CHY 除く) で得られた地震動記録中の後続波群の卓越周期を比較した結果を Fig. 10, Fig. 11 に示す. なお, OCU は $M_j6.5$ の余震記録が得られていないため, 図には OCU を除く 9 地点がプロットされている. 図中の横実線は大阪堆積盆地モデルに基づいて得られた表面波の卓越周期帯 (1 秒間) を示している (Fig. 4, Fig. 5 参照). また, 観測記録中の後続波群の卓越周期については非定常スペクトル (Fig. 8, Fig. 9 参照) から見かけの卓越周期帯 (1 秒間) を読み取っており, この 1 秒間の周期帯を図中の縦実線として示している.

余震記録において FKS, MRG, YAE の 3 地点を除いた大阪平野内の関震協観測点では, Love 波と Rayleigh 波ともにほぼ両者は調和的な結果が得られており, 本震記録でもほぼ同じ結果が得られた. 以上から, 大阪堆積盆地モデルによる表面波の卓越周期と 2004 年紀伊半島沖地震の本震およびその余震で得られた関震協観測点での後続波群の卓越周期は調和的であり, この結果から, 大阪平野内で励起される後続波群は主に表面波であることが示唆される.

ところで, FKS, MRG, YAE の 3 地点では大阪堆積盆地モデルによる表面波 (特に Love 波) の卓越周期は, 観測記録中の表面波と考えられる後続波群の卓越周期より長い結果が得られてい

る。このように大阪堆積盆地モデルによる表面波の卓越周期が地震動記録中の後続波群の卓越周期より長い結果が得られている地域の特徴として、基盤岩深度が1.5 km以上と深く、なおかつその周辺で基盤岩深度が急変している点が挙げられる(Fig. 1 参照)。

本検討で得られている表面波の卓越周期は各メッシュ地点における一次元速度構造モデルによる理論分散曲線に基づいているが、実際の地震動記録には観測点周辺の3次元的地盤構造の変化を含んでいると考えられる。例えば、FKS, MRG, YAEでのLove波の卓越周期は約7~8秒(Fig. 4 参照)であるが、この周期に対応するLove波の位相速度は約1.5~1.9 km/sであり、その波長は約10~15 kmに相当する(例えばFig. 2のFKS参照)。このため、地震動記録に含まれるLove波は10 km程度の範囲内の地盤構造の影響を含んでいると予想される。

本検討で得られたこれら3地点(FKS, MRG, YAE)の表面波の卓越周期は各地点直下の一次元速度構造モデルに基づいていることから、その卓越周期は3次元的地盤構造の変化を含んでいる観測表面波の卓越周期に比べて過大評価になっている可能性が考えられる。このような、基盤岩深度が深く、かつ3次元的地盤構造モデルの急変する場所では、本検討で得られた卓越周期に対して、その卓越周期の波長に対応した空間的スムージングを行う必要があるかもしれない。

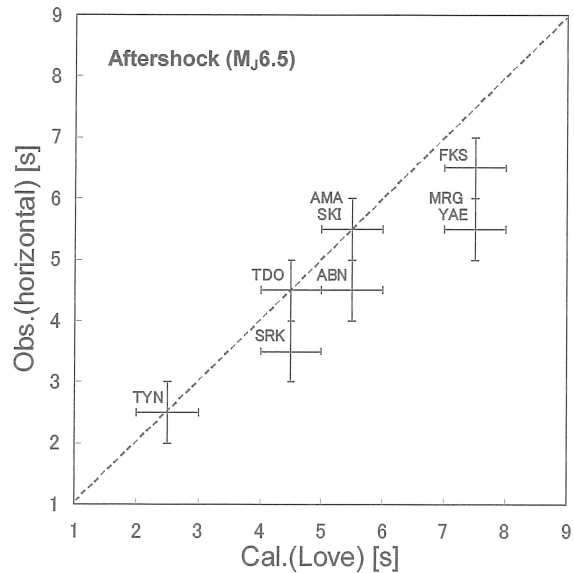


Fig. 10. Comparison of the predominant periods of Love waves calculated from 1-D velocity model at CEORKA site, extracted from the Osaka basin model, with observed ones of the surface waves for the horizontal component of the seismograms of aftershock ($M_j6.5$). Vertical and horizontal bars denote the range of the observed predominant periods and the estimated ones, respectively.

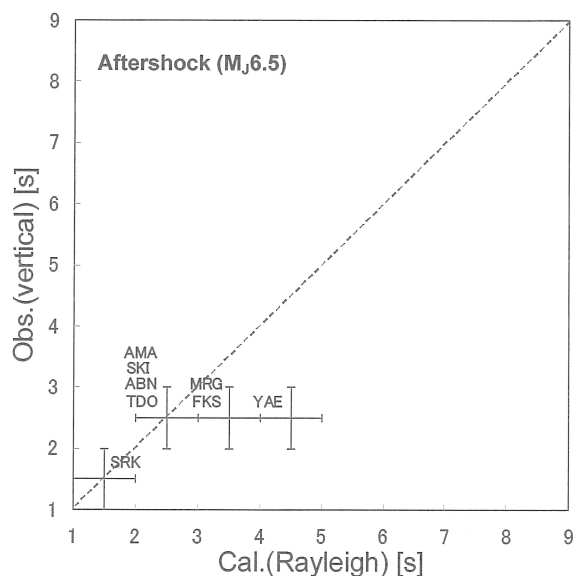


Fig. 11. Same as Fig. 10, but for the Rayleigh wave.

V. ま と め

大阪堆積盆地モデルに基づき大阪平野での Rayleigh 波および Love 波の卓越周期の検討を行った。その結果, Rayleigh 波および Love 波の卓越周期は基盤岩 ($V_s=3.2$ km/s) 深度分布と調和的な変化をしており, Love 波の卓越周期 (s) は基盤岩の上面深度 (km) の約 5 倍, Rayleigh 波の卓越周期 (s) は基盤岩の上面深度 (km) の約 2 倍に対応することが示された。大阪堆積盆地モデルによる表面波の卓越周期と関震協観測点で得られた 2004 年紀伊半島南東沖地震の本震 ($M_J7.4$)・余震 ($M_J6.5$) 記録中の表面波と考えられる後続波群の卓越周期を比較した結果, 基盤岩深度が 1.5 km 以上と深く, なおかつ基盤岩深度が急変する地域を除いて, 両者は調和的な結果が得られていることを確認した。ある対象地点で観測される表面波の卓越周期は, 地震規模やその到来方向によって変化する可能性が考えられるが, 本検討で得られた Rayleigh 波と Love 波の卓越周期は, 大阪平野内で卓越する表面波に対する高層ビルや石油タンクのレスポンスを考える上で, 第一次近似的には有効であると考えられる。

今後は基盤岩深度が 1.5 km 以上と深く, かつ基盤岩深度が急変する地域での卓越周期の空間的なスムージング方法を検討するとともに, 観測記録に基づき震央方向の違いなどによって同一地点でも励起される表面波の卓越周期に違いが生じるかどうかの検討を行う必要があるだろう。

謝辞 関西地震観測研究協議会の強震データを使用しました。また, 気象庁発表による地震の震源情報を利用しました。記して感謝します。

文 献

- Harkrider, D. G., and D. L. Anderson, 1962. Surface wave energy from point sources in plane layered Earth Models, *J. Geophys. Res.*, **71**, 2967–2980.
- 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南荘淳, 1998. 常時微動アレー観測による大阪堆積盆地深部 S 波速度構造のモデル化, *地震* **2**, **51**, 31–40.
- 神山 眞, 1979. 強震地震動の非定常スペクトル特性とその波動論的考察, *土木学会論文報告集*, **284**, 35–48.
- Koketsu, K., and S. Higashi, 1992. Three-dimensional topography of the sediment/basement interface in the Tokyo Metropolitan Area, central Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 2328–2349.
- 宮腰研・香川敬生・趙伯明・徳林宗孝・澤田純男, 1999. 大阪堆積盆地における深部構造モデルのモデル化 (その 3), 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, 185–188.
- 鶴来雅人・趙伯明・Petukhin Anatoly・香川敬生, 2005. 南海・東南海地震の大阪府域における強震動予測, *構造工学論文集*, **51 A**, 501–512.
- 上林宏敏・堀家正則・竹内吉弘, 2000. 北摂山地と大阪平野境界部の地下構造と地震動特性, *地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集*, Sg-005.
- 宇津徳治, 2002. *地震学* (第 3 版), 共立出版, pp. 376.