

## 1995年兵庫県南部地震の際の大阪湾岸部でのやや長周期地震動

清水建設(株) 片岡 俊一\*  
東京工業大学 片岡正次郎\*\*  
東京工業大学 大町 達夫\*\*

周期2秒~10秒程度を対象とするいわゆる「やや長周期地震動」に関しては、これまでに多くの研究がなされてきたが、これまでに研究対象としてきた地震動は、比較的遠方で起きた地震による振幅が小さなものであった。兵庫県南部地震の際に大阪西部の観測記録を地下構造と対照させて検討したところ、観測された記録には表面波が優勢に含まれていた。次に、付近の記録も含めて波動の伝播速度と到来方向を検討した結果、速度は表面波の位相速度に対応し、到来方向は北西方向であった。さらに、震源を含んだ地震動の伝播を数値計算し、その結果を用いて到来方向と速度を求めたところ、観測記録と解析結果と同じ結果になった。到来方向から判断すると、湾岸部で卓越していたやや長周期の波動成分は盆地の端部で生成されたものと考えられる。

### 1. はじめに

周期2秒~10秒程度を対象とするいわゆる「やや長周期地震動」については、盆地あるいは平野内に長周期構造物が建設されるに伴い、多くの研究がなされてきた。しかしながら、これまで研究対象としてきた地震は、比較的遠方で起きたものであるため、振幅が小さなものであった。また、盆地近傍で生じる地震によって生成される「やや長周期地震動」についての観測例は非常に少ない。

一方、1995年兵庫県南部地震の際に大阪湾東部の湾岸部で観測された地震動は、水平、上下両成分ともに周期2~5秒成分が優勢であった。「やや長周期」帯域の地震動としては、震源が近いことから従来の研究に比べて振幅が1桁以上大きいものであり、例えば近年提案されている建築構造物の設計用入力地震動<sup>1)</sup>に匹敵する程度の大きさであった。

最近では、様々な方法により平野内のやや長周

期地震動を評価することが可能となってきた。観測結果の吟味は、断層を含めた平野規模の3次元のシミュレーションに対しては計算結果の妥当性を確認するのに重要である。また、簡便な方法を用いる際には、その方法の適用範囲についての判断が必要となる。

以上のことより、兵庫県南部地震の際の大阪湾岸部で観測された地震動の生成、伝播の状況を検討してみた。本報告では、まず大阪市西部の記録を地下構造とともに吟味し、さらにその周辺の複数の観測点の記録から波群の伝播について検討した。また、震源を含む3次元地震動シミュレーションの結果をもとに、主として波動の伝播について考察を加えた。

### 2. 大阪市西部における観測記録の検討

#### (1) 大阪市福島区における記録

図-1は、大阪市福島区において関西地震観測研究協議会により観測された速度記録である(以下、福島区記録と呼ぶ)。また、図-2には震央と観測点の位置関係を示す。水平動の最大値は約30cm/sと大きなものであるが、これと同等の振

キーワード: 表面波, やや長周期, アレー解析

\* 清水建設(株) 技術研究所, 03-3820-5532

\*\* 東京工業大学大学院総合理工学研究科, 045-924-5605

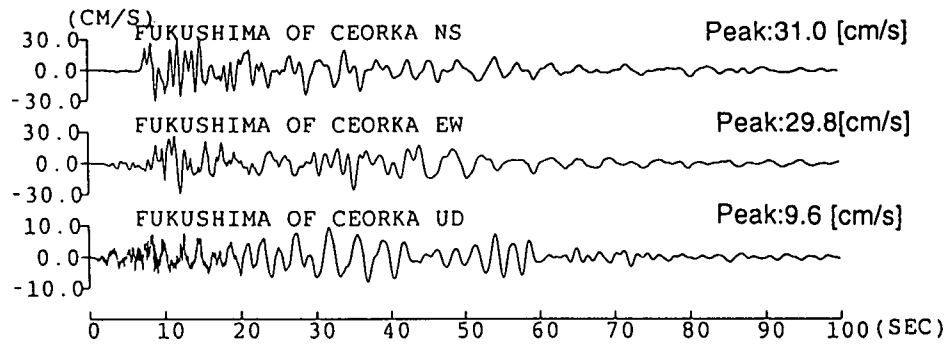


図-1 関西地震観測研究協議会福島観測点で観測された速度地震記録

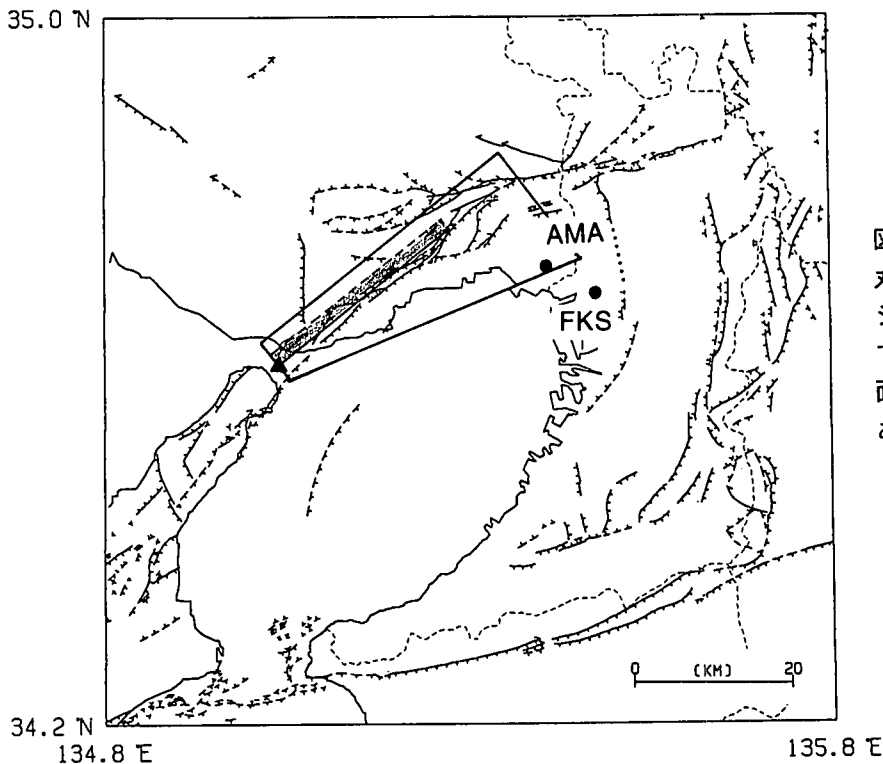


図-2 震央(黒三角)と観測点(黒丸)及び活断層の分布。図には数値シミュレーションの対象領域(台形で囲んだ部分)と断層モデルの水平面投影(塗りつぶし部分)も描いてある。FKS:福島, AMA:尼崎

幅が図中約50秒間続いている。また、上下動記録を見ると、30-40秒にかけて周期3-5秒の波が分散傾向を示して現われており、さらに50-60秒付近にも周期3秒弱の波群が見られる。このような地震動は、これまでの研究<sup>2)</sup>から表面波と考えられる。

図-3は、観測記録から算出した速度応答スペクトルであり、周期0.8~7秒の範囲で応答値が50cm/sを越えている。ここで見られる最大速度振幅と速度応答値は、近年提案されている建築構造物の設計用入力地震動<sup>1)</sup>のレベル1地震動(耐用年数中に1度以上うける地震動)の大きさを越えている。

以下応答スペクトルの卓越周期と地下構造の関係を見してみる。

横田・他<sup>3)</sup>は大阪周辺の観測記録を、周期2~5秒の範囲に着目し速度応答スペクトルによって3グループに整理している。もっとも大きな応答値を示すグループは、周期2~5秒で応答値は50cm/sを越え、福島も含まれる。このグループに含まれる観測点は、15点ある。

図-4は、香川・他<sup>4), 5)</sup>により整理された大阪盆地の地下構造モデルから福島観測点直下の構造を求め(表-1)、平行成層を仮定して求めたLove波とRayleigh波の振幅スペクトル<sup>6)</sup>である。振幅スペクトルとは、メディアムレスポンスを波数で除したものであり、Love波の場合は水平動の励起されやすさを、Rayleigh波の場合上下動の励起されやすさを表わしている。図-4(a)のLove波の振幅スペクトルは周期約6秒でピー

表-1 大阪堆積盆地のモデル<sup>4)</sup>から算出した福島観測点直下の構造

No.	Vp[km/s]	Vs[km/s]	Density [t/m <sup>3</sup> ]	Thickness [km]
1	1.6	0.35	1.7	0.220
2	1.8	0.55	1.8	0.380
3	2.5	1.00	2.1	0.665
4	5.4	3.20	2.7	infinite

クとなっているが、応答スペクトルでもEW成分の6秒付近にピークがある。この周期はLove波の基本モードのエアリー相に対応する。また、1秒付近で振幅スペクトルと応答スペクトルがともにピークとなっている。図-4 (b) のRayleigh波では周期1~3秒にかけて大きな値になっているが、ピークは周期約1.3秒と2.5秒であり、図-3の上下動の応答スペクトルにも周期約2.5秒に卓越が見られる。なお、Rayleigh波のエアリー相は基本モードでは約5秒に、1次モードでは約2.8秒にある<sup>7)</sup>。このように応答スペクトルの一部の卓越周期については、地下構造と対応させることが出来るが、例えば上下動の周期3.5秒程度の卓越は、地下構造では説明つかないので、震源の影響と考えられる。

(2) 大阪市西部の記録を用いた波動の伝播解析やや長周期帯域で卓越する波動成分は、表面波と考えられるので、福島観測点の記録に周辺の記録を加えて、波動の伝播速度と到来方向を求めてみる。用いた観測点の相対関係を図-5に示す。図中#1が福島観測点であり、震央は図-1で見たように観測点からほぼ西の方向に位置する。また、地震計は#3を除いて全て地表に設置されている。

ここでのアレー解析には上下動を用いるが、その理由は波動がほぼRayleigh波で構成されると考えられ、水平動に比べ単純であること、上下動成分の振幅がかなり大きいこと、設置方位あるいはその誤差に煩わされなくてよいこと、などである。

複数の観測機関から提供されたデータを用いているが、アレー解析時に問題となる事項とその精度に関しては既に検討を行なっている<sup>7)</sup>。

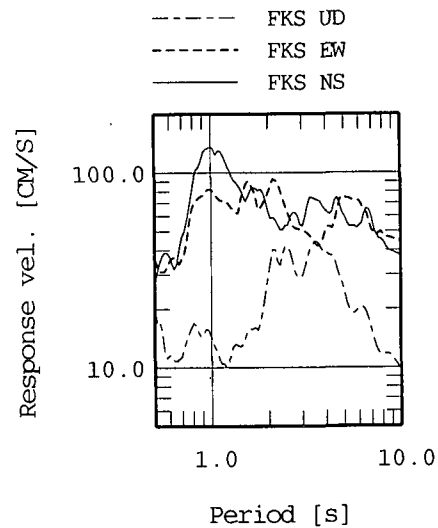
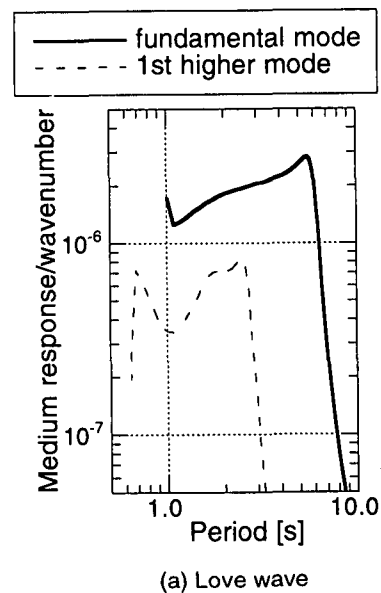
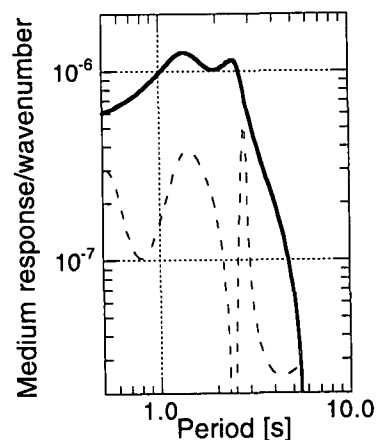


図-3 福島の記録から算出した減衰定数5%の速度応答スペクトル



(a) Love wave



(b) Rayleigh wave

図-4 表面波の振幅スペクトル

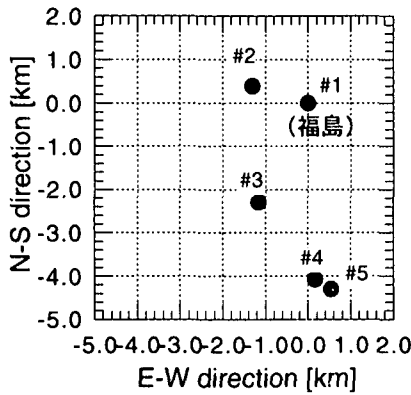


図-5 アレー解析に用いた福島付近の観測点の相対位置

波動の伝播速度と到来方向の推定には、Semblance 法<sup>8)</sup>を用いた。対象とする波動が表面波であることから、バンドパスフィルターを通した波形を解析の対象としたが、その時の中心周期は、4.55、3.57、2.86、2.50 秒とした。Semblance 解析の詳細とバンドパスフィルターの設定については、参考文献7)を参照されたい。到来方向は60分割とし、速度については0.3km/sから4km/sの間を逆数 (slowness) にして100等分に分割して求めた。

各フィルターによって Semblance 値の最大値が異なるが、Semblance 値が最大となる時刻での波形の到来方向と到来速度を図-6に示す。また、解析した限りでは震源方向から到来した波動は見られなかった。解析から求めた伝播速度を表1から求められる Rayleigh 波の位相速度と比較して図-7に示す。図から、伝播速度は基本モードの位相速度とよく対応することから、大阪市西部の波形には、平均的に330度の方向から到来する基本モードの Rayleigh 波が含まれていることが推定できる。

図-1で見たように観測点から見た震源の方位は約270度であり、観測点から330度の方向には、今回の地震に関する数種の断層モデル<sup>例え、10)</sup>、<sup>11)</sup>の断層の縁が存在するだけである。表面波の生成位置についてこれ以上議論するためには、現況では震源と地盤とを3次元的にモデル化した理論計算をすることが有用である。

### 3. 3次元地震応答シミュレーション結果の検討

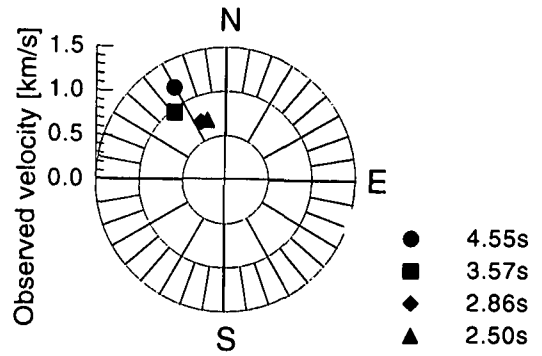


図-6 アレー解析から求められた波動の到来方向とその速度

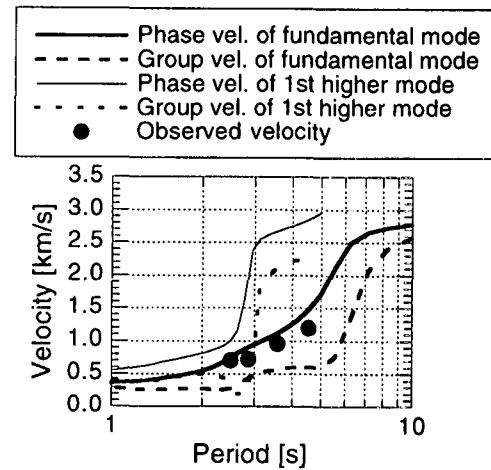


図-7 アレー解析結果と理論分散曲線との比較

#### (1) 数値シミュレーションの概要

ここでは、3次元直接境界要素法を用いて、震源を含めて地震応答計算を行なった結果<sup>12)</sup>を用いて検討する。検討に先立ち、本数値シミュレーションの概要を述べる。

シミュレーションに用いた断層のすべり分布を図-8に示す。これは、Ide et. al<sup>10)</sup>によって推定された最終すべり分布である。この推定断層の地図上の位置は図-1に示してあるが、走行はN232E、傾斜85度である。破壊は震源から同心

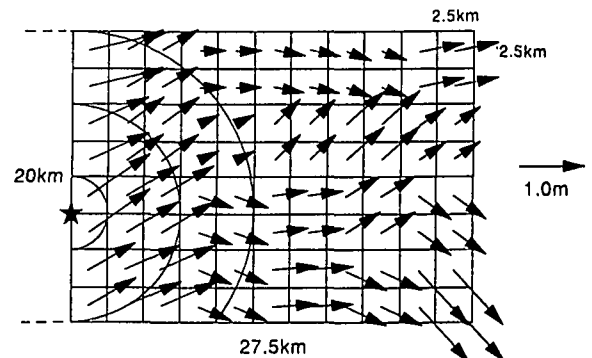


図-8 シミュレーションに用いたすべり分布

円状に速度 3km/s で伝播すると仮定している。本計算では 2.5km × 2.5km の大きさをもつ小断層の中心に、その小断層全体が破壊した場合と等価な地震モーメントをもつ点震源を配置している。各小断層の破壊開始時刻は、小断層の境界に破壊が到達する時刻とした。Ide *et al.*<sup>10)</sup> は各小断層について異なる震源時間関数を求めているが、ここでは簡単に、全ての小断層の震源時間関数をライズタイム 1.0s の ramp function とした。なお、震源よりも西南西に位置する断層の破壊は、神戸側の地震動にあまり影響しないため、ここでは考慮していない。

対象とする大阪湾周辺の深い基盤構造は、Nakagawa *et al.*<sup>13)</sup> によって Bouguer 重力異常から推定されているものを用いた。前章では香川・他<sup>4)</sup> を用いて観測記録を説明したが、3次元シミュレーションでは計算機の能力による制約が大きく、浅い構造まで十分モデル化することはできない。そのため、ここでは Nakagawa *et al.*<sup>13)</sup> に従って、表層と基盤から成る二層地盤モデルを作成した。モデル化した領域は図-1 に示してあるが、立体的に断層を含めて描くと図-9 のようになる。表層部と基盤部の節点間隔はそれぞれ約 0.6km, 1km であり、物性値は香川・他<sup>4)</sup> を参考に決めた。なお、地盤の材料減衰は、考慮していない。

## (2) シミュレーション結果の検討

ここでは、まず前章と同様に 1 観測点の計算波形を吟味し、さらに複数の地点の計算結果を集めてアレー解析を行なう。対象地点としては、観測記録があること、震源断層から十分はなれて大阪堆積盆地の中心に近いこと、前章で検討した大阪市西部から北西側に位置すること、等を考えて関西地震観測研究協議会の尼崎観測点付近とした。

図-10 は、尼崎観測点に最も近い節点（以下、

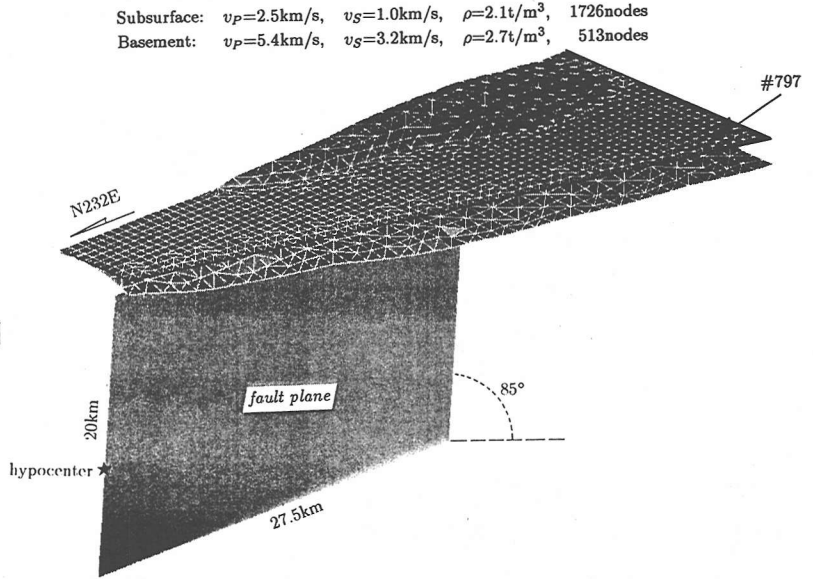


図-9 シミュレーションに用いた断層と地盤モデル

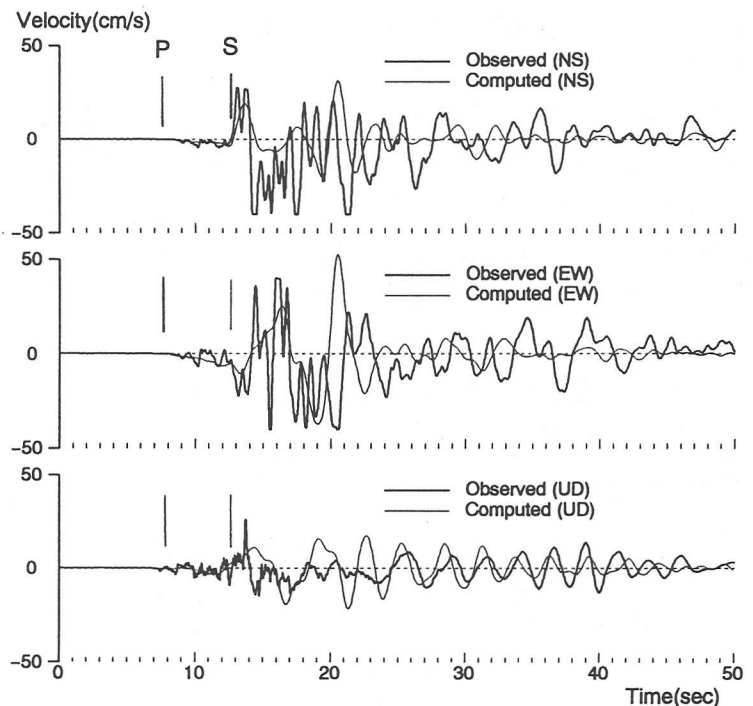


図-10 尼崎における計算結果と観測結果の速度波形での比較

#797 地点と略称する) での計算速度波形と尼崎観測点の記録との比較である。計算波形と観測波形を比較すると、波形の消長の傾向がよく似ていることが分かる。特に、上下動における分散傾向は、やや周期がことなるものの、観測結果をよく再現していると言えよう。計算結果と観測結果の差違は、上下動から判断すると地下構造の影響によるものと考えられ、実現象を再現するためには

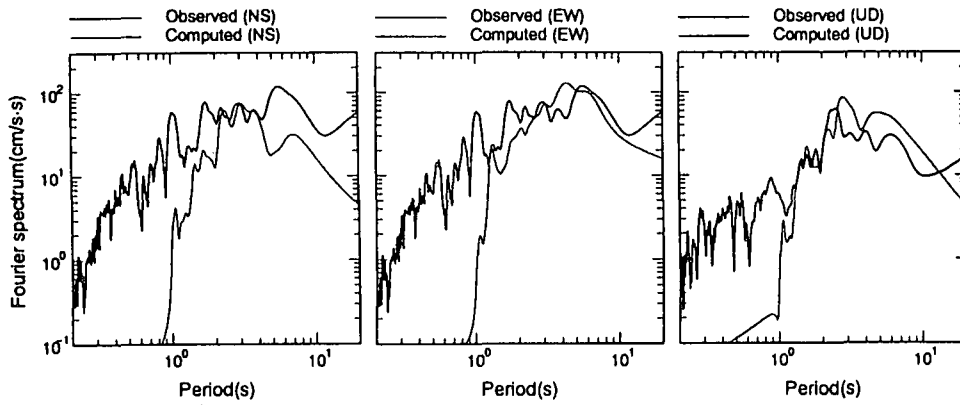


図-11 尼崎における計算結果と観測結果のフーリエスペクトルでの比較

地下構造の吟味が必要と考えられる。なお、時間軸の原点は震源の破壊開始時刻である。

また、水平動の最大値がEW成分であることも興味深い。水平面内の粒子軌跡を描くと、最大振幅方向はほぼ断層平行方向であった。断層近傍では、ディレクティブティの効果により断層直交方向の振幅が大きいことが、理論並びに観測から言われているが、EW方向は断層平行成分に近く、断層から約10kmはなれるとこの影響が小さいようで興味深い。ただし、ディレクティブティの影響は周期によって異なることには留意する必要がある。また、近地項が現れているために、実体波の到来時刻は見極めにくいだが、走時を参照して図中に目視で判定した初動の時刻を記入してある。EW方向の最大値は、S波の初動時刻から約10秒ほど遅れて発生していることが指摘できる。

図-11にフーリエスペクトルを示すが、水平動ではNS方向は3秒、EW方向は5~6秒、上下動では3秒が卓越していることが分かる。

次に、大阪西部の観測記録と同様に#797周辺の9つの節点における計算波形を用い、波動の伝

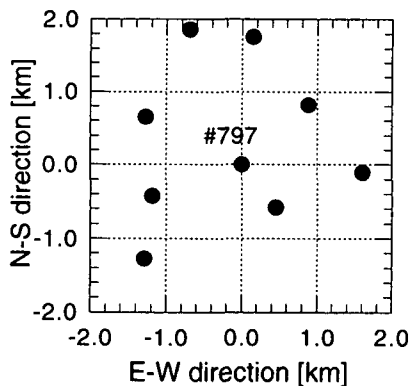


図-12 アレー解析に用いた#797 節点付近の節点の相対位置

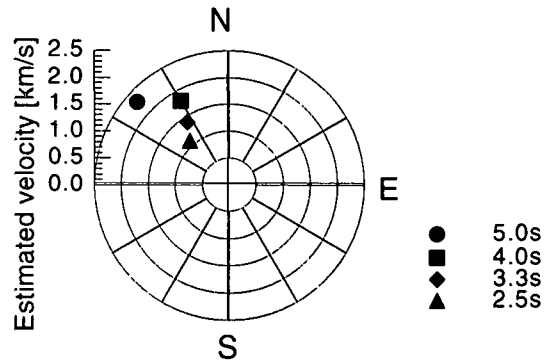


図-13 アレー解析から求められた波動の到来方向とその速度

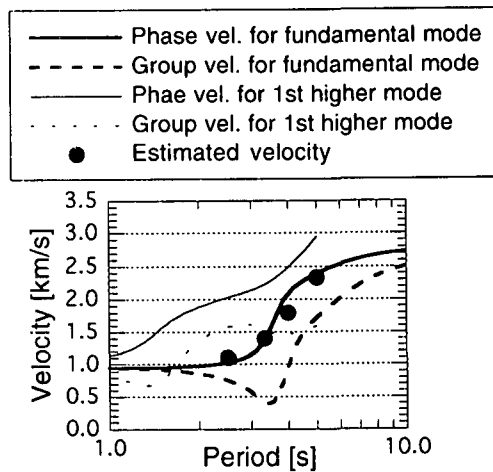


図-14 アレー解析結果と理論分散曲線との比較

播方向と速度を Semblance 解析により求めた。解析に用いた節点の配置を図-12に示す。

上下動についての解析結果を図-13に示す。バンドパスフィルター中心周期は、5.0秒、4.0秒、3.3秒、2.5秒とした。伝播方向はほぼ北から時計

表-2 シミュレーションモデルによる#797直下の構造

No.	Vp[km/s]	Vs[km/s]	Density [t/m <sup>3</sup> ]	Thickness [km]
1	2.5	1.0	2.1	1.64
2	5.4	3.2	2.7	infinite

周りに310~330度になっている。

上下動を対象とした解析結果のうち伝播速度を、表-2に示した#797地点直下の地下構造から平行成層を仮定して求めたRayleigh波の分散曲線と併せて図-14に示す。図から伝播速度はほぼ基本モードの位相速度と対応することが分かる。また、ここでは紙面の都合で示さないが、断層平行成分を用いた解析では、伝播方向はほぼ上下動と同じであり、伝播速度としてLove波の基本モードに対応した速度が得られている<sup>7)</sup>。

観測された表面波については、断層で生成された波動が盆地端部で増幅されたいわゆる盆地生成表面波であろうが、震源がどのように寄与しているかは不明である。これ以上の解明のためには、震源を単純化して表面波の伝播特性を把握したり、断層から遠い地点での波動の位相速度を評価し生成位置を逆算すること等が必要と考えられる。

#### 4. まとめ

本論文では、観測記録と数値シミュレーションの結果を用いて、1995年兵庫県南部地震の際に大阪湾岸で観測されたやや長周期地震動について検討した。

大阪市福島区の記録は、提案されている地下構造に対応した表面波としてよく説明された。すなわち、振幅スペクトルのピーク周期と応答スペクトルの卓越周期には対応が見られた。つぎに、福島観測点の周辺の観測記録を集め、上下動に対するSemblance解析により、伝播方向と速度を求めると、ある時間帯における伝播速度は福島直下の地下構造から求められる基本モードの理論分散曲線とよく対応することが判明した。また、波動の到来方向としては、観測点から見て北から時計周りに330度となり、震源方向から到来する波動は見られなかった。

更に、震源断層を含む3次元境界要素法により波動伝播を計算し、計算結果に対してSemblance解析を行なった。計算機の容量制限のために、大阪市までモデル化できなかったが、福島観測点から見て北西約7kmの位置にあたる

尼崎における計算結果を調べたところ、ここでも、伝播速度は水平動はLove波の位相速度、上下動はRayleigh波の位相速度とほぼ同じであった。また、伝播方向は観測点から見て北から時計周りに330度であった。得られた到来方向は、断層の走行とほぼ直交しているが、この地域の堆積層と岩盤との境界ともほぼ直交している。伝播している波は盆地生成表面波であろうが、現時点では表面波の生成に及ぼす震源の影響の度合については不明確である。

また、計算結果では、断層延長線上から約10km離れている尼崎でさえ、実体波とほぼ同時に表面波が到来していたが、これは今後の構造物の耐震設計を考えるうえで重要なことであろう。これまでは、設計時に表面波を考慮する地震としては、堆積盆地から離れた規模が大きい、いわゆる海洋型の地震を想定することが多かったように思える。このような地震の場合は、実体波と表面波は震央距離が大きいため別個の時刻に到来し、継続時間が長くなる。しかしながら、盆地境界で発生する地震による地震動は、これとは異なり実体波と表面波がほぼ同時に到来し干渉しあって振幅が大きくなることに、留意すべきであろう。更に、本論文では計算上の限界から1Hzより低い振動数を扱っているが、計算結果では#797周辺では最大速度振幅は表面波が与えていることにも注意が必要と思われる。

#### 謝辞

本論文で使用した記録は、関西地震観測研究協議会が実施した観測及び会員機関からの提供記録である。記して謝意を示す。表面波の振幅スペクトルを計算するプログラムは、東京工業大学大学院総合理工学研究科年縄巧助教授のものを借用させていただいた。また、地震記録の解釈に関しては、清水建設技術研究所の横田治彦主席研究員、来田義弘主任研究員との議論が有意義であった。

#### 参考文献

- 1) 太田外気晴, 北川良和: 建築構造物の設計用入

- 力地震動スペクトル, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp.631-636, 1994.
- 2) Hatayama K., K. Matshunami, T. Iwata and K. Irikura, 1995, Basin-induced Love waves in the eastern part of the Osaka basin, *J. Pays.*, *Earth*, 43, 131-155.
- 3) 横田治彦, 片岡俊一, 趙文方: 1995年兵庫県南部地震における大阪平野の地震動特性, 日本建築学会講演概要集(近畿), 構造(臨), pp.183-184, 1996.
- 4) 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 南荘淳: 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化, 第22回地震工学研究発表会講演概要, 199-202, 1993.
- 5) 香川敬生, 堀江好平: 大阪堆積盆地深部地盤構造のモデル化(その2), 土木学会第50回年次学術講演会梗概集, 1264-1265, 1995.
- 6) 大町達夫: 振動学的手法によるLove波の再定式化へのアプローチ, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.33, pp.65-75, 1984.7.
- 7) 片岡俊一, 片岡正次郎, 大町達夫: 観測記録と数値シミュレーションから見た1995年兵庫県南部地震の際の大阪湾東部におけるやや長周期地震動の伝播, 自然災害科学投稿中.
- 8) Neidell, N. S. and M. T. Taner, *Semblance and other coherency measures for multichannel data*, *Geophysics*, 36, 482-497, 1971.
- 9) 斉藤正徳: 漸化式デジタル・フィルターの自動設計, *物理探鉱*, 31, No. 4, 112-135, 1978.
- 10) Ide, S., Takeo, M. and Yoshida, Y. : Source process of the 1995 Kobe earthquake : determination of spacio-temporal slip distribution by Bayesian modeling, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 86, pp. 547-566, 1996.
- 11) Sekiguchi H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi and M. Hoshiba : Minute locationing of fault planes and source process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) , Japan, earthquake from the waveform inversion of strong ground motion records, *J. Phys. Earth* in printing, 1996.
- 12) 片岡正次郎: 三次元境界要素法による1995年兵庫県南部地震のシミュレーション, 東工大土木工学科研究報告, No.54 (印刷中), 1996.
- 13) Nakagawa, K., Shiono, K., Inoue, N. and Sano, M. : Geological characteristics and problems in and around Osaka basin as a basis for assessment of seismic hazards, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp. 15--28, 1996.

## Study of long period ground motion in the Osaka basin during 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake using observed and simulated ground motion

Shun'ichi Kataoka, Shojiro Kataoka and Tatsuo Ohmachi

To fill up knowledge about long period ground motion, we focus on the ground motion in the Osaka basin during 1995 Hyogo-ken nanbu earthquake. We first show that predominate period of velocity response spectra are explained by surface wave generation. Then we estimate propagation velocity and direction for both observed and simulated ground motion. Estimated velocities are close to the phase velocity of fundamental mode of surface waves estimated from deep underground structure model. Propagation directions are almost 330 degree in clockwise from the north. This direction is perpendicular to fault strike, but this is not correspond to epicenter azimuth.