

ベクトルスペクトルによる地震動の増幅特性評価とその適用

中村 晋

正会員 工博 佐藤工業(株)主任研究員 (〒103 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

ここでは、水平面における地震動の周波数特性を周波数毎の粒子軌跡よりベクトル量つまりベクトルスペクトルとして評価する手法、さらにそのスペクトルを用いた地震動の増幅特性の評価手法の提案を行った。それらの特徴と有用性を明かにするため、それら手法を実観測記録に適用し、水平2成分のフーリエ・応答速度スペクトルの2乗平方和、また地中の異なる2点の同一方向成分に関するフーリエスペクトル比等の既往の研究に基づいて算出した結果との比較を行った。その結果、ベクトルスペクトルは水平面における地震動の周波数特性を量的に把握するという観点で有用であること、提案した周波数応答関数は従来手法より地震毎の等価性や安定性という面で優れており地震動の増幅特性を表す指標として有用であることを明かにした。

Key Words : *vector spectrum, frequency response function, seismic record, horizontally layered ground, embankment*

1. はじめに

地震動を適切に予測するために重要な震源特性、伝播特性と局所サイト特性の3つの因子のうち、局所サイト特性は表層の地盤特性に起因して地震動を増幅させる効果を表し、耐震設計上重要であることはいうまでもない。最大加速度等の地震動振幅や周波数特性の増幅率は地震動の増幅特性を表す指標としてよく用いられている。両者は地震動の増幅特性を表す上で補完関係にあるものの後者は周波数応答関数と呼ばれ地盤の固有周波数とそれに応じた地震動の増幅率、さらに速度構造等の多くの情報を含んでいる。最近、地震観測記録より算出した周波数応答関数に基づいて地盤の速度構造を同定¹⁾³⁾する試みも行われている。一方、地盤や地盤～構造物系の動的解析法の急速な進歩や地震観測事例が増加するにつれ動的解析により耐震設計の照査を行う機会が増加し、設計用入力地震動の精度向上に対する要求からも、地震動の増幅特性の適切な評価が必要になると考えられる。

地震動の増幅特性はある地盤系に入力する地震動に対するその系の応答の比率として定義される量である。地震動の増幅特性のうち周波数応答関数を地震観測記録に基づいて評価するには、これまで地表と地中の同一方向の成分(例えばNS,EW成分)に関するスペクトルの比として評価(以後、従来の手法と呼ぶ)されていた⁴⁾。もし、地盤が水平成層構造を有

した均質な媒質であると見なせる場合には、そのような地震動の同一方向成分に関するスペクトル比は地震動の増幅を表す指標となり得る。しかし、地盤つまり波動の伝播媒質は構造や材料の不均質性を有していることから、波動の散乱や偏向および種々の伝播経路を有する波動の相互干渉等により地震動特性が空間的にゆらぐことがAkiらにより指摘されている⁵⁾。つまり、地震動の特性、特にその振動方向は空間的に異なると考えられる。すると、ある地盤系に入力する地震動の振動方向と地盤系の応答の振動方向は必ずしも一致しないと考えられるので、周波数応答関数はそれぞれの地震動の振動方向に対するスペクトルの比として求めることが本来の定義からも有意であると考えられる。

一方、方向と振幅つまりベクトル量として地震動の特性をとらえた研究には、振動の主軸方向や主値を直交3成分の観測記録を用いた固有値解析により求めるPenzenと渡部⁶⁾、星谷ら⁷⁾および松島⁸⁾による研究がある。特に、星谷らは相互スペクトルを用い、Penzenと渡部による主軸を含む種々の主軸の評価手法を統一的に解釈し、それを物理的に意味づけている。いずれも、主値は観測記録を主軸方向に座標変換することに求められているが、観測記録のスペクトル解析により直接求めるという手法にはなっていない。一方、水平2成分の地震記録を用いたスペクトル解析法として回転スペクトル⁹⁾、水平2成分の速度応答スペクトルの2乗平方和によるスペクトルお

よび水平面における粒子軌跡が楕円であるとして幾何的にスペクトルを評価する小林らの手法¹⁰⁾はあるものの小林らの手法を除きいずれもベクトルとしての粒子の動きに対応するものとはなっていない。小林の手法においても、前提条件の根拠やスペクトルの導出過程が不明確である。しかし、回転スペクトルを求める過程において示された複素平面を用いて水平面における直交2成分の動きをベクトルとして表す手法およびそのフーリエ変換手法は、ベクトル量として地震動の周波数特性を表す手法を導く上で有用である。

ここでは、まずベクトル量として地震動の周波数特性を求める手法を提案する。それは、Gonella⁹⁾が示した複素時刻歴のフーリエ変換手法に基づいて、水平面における地震動の周波数毎の粒子軌跡を求め、その卓越振動方向の振幅を周波数特性として評価する手法である。ここで提案した地震動の周波数特性を以後ベクトルスペクトルと呼ぶ。地震動の増幅特性を評価する手法の提案は、このベクトルスペクトルを用いて行う。次に、そのベクトルスペクトルの特徴を明かにするため、耐震設計でよく用いられる2つの地震記録を用いて算出したベクトルスペクトルと既往のスペクトル特性との比較を行う。さらに、水平成層とみなせる地盤と造成地盤の2種類の異なる地盤で観測された地震記録より地震動の増幅特性を提案手法と従来の手法により算出し、提案手法を地震動の増幅特性評価に用いることの有用性を明かにする。

2. ベクトルスペクトルに基づく地震動の増幅特性の評価

(1) ベクトルスペクトルの評価手法

まず、地震動の直交水平2成分 $\{x(t), y(t)\}$ を用い水平面における粒子の動き $z(t)$ を複素平面で表す。すると、その周波数特性はGonella⁹⁾が示した複素時刻歴のフーリエ変換により式(1)の様に正の周波数における時計回りのスペクトル $\tilde{Z}_+(\omega)$ と負の周波数における反時計回りのスペクトル $\tilde{Z}_-(\omega)$ として求めることが出来る。ここで、 $X^*(\omega), Y^*(\omega)$ はスペクトル $X(\omega), Y(\omega)$ の共役スペクトルを表す。得られた正・負の周波数におけるスペクトルは共役関係に無く、

$$\begin{aligned}\tilde{Z}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \{x(t) + i \cdot y(t)\} e^{-i\omega t} d\omega \\ &= X(\omega) + i \cdot Y(\omega) \\ &= \begin{cases} X(\omega) + i \cdot Y(\omega) = \tilde{Z}_+(\omega) & \omega \geq 0 \\ X^*(\omega) + i \cdot Y^*(\omega) = \tilde{Z}_-(\omega) & \omega < 0 \end{cases} \quad (1)\end{aligned}$$

実数時刻歴のフーリエ変換により得られる正・負の周波数におけるスペクトルの関係と大きく異なっている。

Gonella⁹⁾が示した回転スペクトルは式(2)に示した3つのスペクトルであり、式(1)の正・負の周波数におけるスペクトルをパワースペクトルの定義に基づいて表した時計回り・反時計回りスペクトル $\{S_+(\omega), S_-(\omega)\}$ およびそれらの和である全スペクトル $\{S_t(\omega)\}$ である。さらに、式(1)に示した時計回りおよび反時計回りスペクトルと水平2成分のスペクトルの関係を用いて求めた回転スペクトルと水平2成分のスペクトル特性との関係も合わせて式(2)に示す。ここで、 $P_x(\omega), P_y(\omega), K_{xy}(\omega)$ および $Q_{xy}(\omega)$ はX, Y方向成分のパワースペクトル、X方向とY方向成分間のコスペクトルおよびクオドラスペクトルである。

$$\left. \begin{aligned} S_+(\omega) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left\langle \frac{2\pi \tilde{Z}_+^*(\omega) \tilde{Z}_+(\omega)}{T} \right\rangle \\ &= \frac{1}{4} \{P_x(\omega) + P_y(\omega) + 2Q_{xy}(\omega)\} \\ S_-(\omega) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left\langle \frac{2\pi \tilde{Z}_-^*(\omega) \tilde{Z}_-(\omega)}{T} \right\rangle \\ &= \frac{1}{4} \{P_x(\omega) + P_y(\omega) - 2Q_{xy}(\omega)\} \\ S_t(\omega) &= S_+(\omega) + S_-(\omega) \\ &= \frac{1}{2} \{P_x(\omega) + P_y(\omega)\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

次に、円振動数 σ (正值のみをとる円振動数)における水平面の粒子の動きは、式(3)に示した様に時計回りスペクトルの粒子の動きを表す回転ベクトル $\tilde{Z}_+(\sigma)e^{-i\sigma t}$ と反時計回りスペクトルの粒子の動きを表す回転ベクトル $\tilde{Z}_-(\sigma)e^{i\sigma t}$ の和として表される。この式のexp項中の時間 t を $t' = t + (\theta_- - \theta_+)/2$ と置き換えた後に式中の $\exp[i(\theta_- + \theta_+)/2]$ で両辺を割ることにより得られた式の実軸を X' 、それに直交する虚数軸を Y' とすると式(4)が得られる。式(4)は、水平面における粒子軌跡がFig.1に示した様に長軸を $|\tilde{Z}_+(\sigma)| + |\tilde{Z}_-(\sigma)|$ 、短軸を $|\tilde{Z}_+(\sigma)| - |\tilde{Z}_-(\sigma)|$ とする楕円となることを表している。この長軸方向つまり X' 軸方向はX軸を角度 $(\theta_+ + \theta_-)/2$ 時計回りに回転した方向となっている。ここで回転スペクトルのうち時計回りおよび反時計回りスペクトルはFig.1に示した時計回りおよび反時計回りのスペクトル $\{\tilde{Z}_+(\omega), \tilde{Z}_-(\omega)\}$ の特性を表し、図中の地震動の粒子

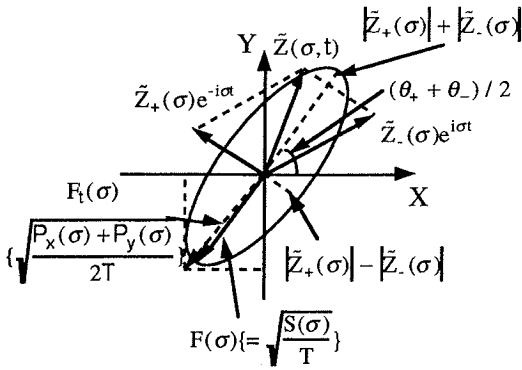


Fig.1 Particle Orbit at Arbitrary Frequency

$$\begin{aligned}\tilde{Z}(\sigma, t) &= \tilde{Z}_+(\sigma)e^{-i\sigma t} + \tilde{Z}_-(\sigma)e^{i\sigma t} \\ &= |\tilde{Z}_+(\sigma)|e^{-i(\sigma t - \theta_+)} + |\tilde{Z}_-(\sigma)|e^{i(\sigma t + \theta_-)}\end{aligned}\quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned}X'(\sigma t') &= \operatorname{Re}\left\{\frac{\tilde{Z}(\sigma, t')}{e^{i(\frac{\theta_+ + \theta_-}{2})}}\right\} \\ &= (|\tilde{Z}_+(\sigma)| + |\tilde{Z}_-(\sigma)|)\cos(\sigma t') \\ Y'(\sigma t') &= \operatorname{Im}\left\{\frac{\tilde{Z}(\sigma, t')}{e^{i(\frac{\theta_+ + \theta_-}{2})}}\right\} \\ &= (|\tilde{Z}_+(\sigma)| - |\tilde{Z}_-(\sigma)|)\sin(\sigma t')\end{aligned}\right\}\quad (4)$$

軌跡の特性を表していない。さらに、全スペクトルについても、それをフーリエスペクトルの次元(継続時間で割った値の平方根; $F_t(\sigma)$)で表すと Fig. 1 に示したとおりであり、粒子軌跡の扁平率がかなり高い場合を除き粒子軌跡の特性を表していない。

Fig.1 より水平面における地震動の粒子軌跡の長軸方向は卓越振動方向に対応していることが分る。ここでは、その卓越振動方向における地震動ベクトルの振幅を水平面における地震動の周波数特性を表すスペクトルとして定義する。このスペクトルの定義は、その物理的意味が明確であるとともにその値が用いる水平2成分の方向に依存しない不変量であり、地震動の周波数特性評価という観点で有用であると考えられる。その方向のスペクトル振幅は式(4)に示した楕円長軸のスペクトル値つまり正と負の周波数において得られたスペクトルの絶対値の和 $\tilde{Z}(\sigma)_p$ として表される。このようにある周波数における地震動の主値が、粒子軌跡から主値の方向を与える必要もなく求められるのがこの手法の大きな特徴である。そのスペクトル振幅をパワースペクトルの定義に基づいて表すと式(5)となり、ここではそのスペクトルをベクトルスペクトル $S(\sigma)$ と呼ぶことにする。式(5)には、式(2)と同様に水平2成分のス

ベクトル特性との関係も合わせて示す。さらに、それを回転スペクトルと同様にフーリエスペクトルの次元 $\{F(\sigma)\}$ で表すと Fig. 1 に示したとおりであり、両者の差異は明かである。また、この式(5)は松島⁸⁾による観測2成分の座標軸回転により得られるパワースペクトルの最大値と同一の結果を与えている。さらに、星谷らの示した相互スペクトルによる考えに従えば時間 t で積分した水平2成分に関する相互スペクトル行列つまりパワー、クロススペクトルからなる複素行列の対角化により得られる周波数で変動する主軸方向の主値に対応している。しかし、複素平面を用いて地震動を定義することによりスペクトル解析の枠組みの中で主値を求める手法を示し、さらに周波数毎の粒子軌跡を明確にしたという意味においても、この手法の独自性をそこなうものではないと考える。

$$\begin{aligned}S(\sigma) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left\langle \frac{2\pi |\tilde{Z}(\sigma)_p|^2}{T} \right\rangle \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left\langle \frac{2\pi (|\tilde{Z}_+(\sigma)| + |\tilde{Z}_-(\sigma)|)^2}{T} \right\rangle \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left\langle \frac{2\pi |\tilde{Z}_+(\sigma)|^2}{T} \right\rangle + \lim_{T \rightarrow \infty} \left\langle \frac{2\pi |\tilde{Z}_-(\sigma)|^2}{T} \right\rangle \\ &\quad + \lim_{T \rightarrow \infty} \left\langle \frac{4\pi |\tilde{Z}_+(\sigma)| \cdot |\tilde{Z}_-(\sigma)|}{T} \right\rangle \\ &= \frac{1}{4} \{P_x(\sigma) + P_y(\sigma) + 2Q_{xy}(\sigma)\} \\ &\quad + \frac{1}{4} \{P_x(\sigma) + P_y(\sigma) - 2Q_{xy}(\sigma)\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \sqrt{\{P_x(\sigma) - P_y(\sigma)\}^2 + 4\{K_{xy}(\sigma)\}^2} \\ &= \frac{1}{2} \{P_x(\sigma) + P_y(\sigma)\} \\ &\quad + \frac{1}{2} \sqrt{\{P_x(\sigma) - P_y(\sigma)\}^2 + 4\{K_{xy}(\sigma)\}^2}\end{aligned}\quad (5)$$

また、そのベクトルスペクトルの方向つまり粒子軌跡における長軸方向のX軸方向からの角度 $\theta(\sigma) (= (\theta_+ + \theta_-)/2)$ は時計回りと反時計回りスペクトルの内積に基づき式(6)により得られる。

$$\theta(\sigma) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{K_{xy}(\sigma)}{P_x(\sigma) - P_y(\sigma)} \right)\quad (6)$$

(2)地震動の増幅特性

ある構造系の伝達関数とは系への入力と系の応答との関係により定義されるので、地震動の鉛直方向

伝播に伴う伝播媒質つまり地盤の伝達関数は鉛直下方からの入射波に対する地中各深度における地震動の比として定義されなければならない。一方、鉛直アレー観測で得られた地中各位置における地震記録のスペクトル比は地震動の増幅特性つまり周波数応答関数を表す。この周波数応答関数は地盤の伝達関数とはならないが地盤特性を反映した量であり、地震動の増幅率を表す量として用いるのみならず地盤物性の推定にも用いられている。

従来の周波数応答関数の評価は地中の異なる2点の同一方向成分に関するフーリエスペクトルの比⁴⁾やパワースペクトル比の平方根等¹¹⁾により求められている。その際、2点における地震計の設置方位を同一とするための補正¹²⁾、また対象とする方向成分、例えば対象地点から震源の方向に直交する方向等に応じた観測記録の方向変換¹³⁾が必要となる。一方、地震動の卓越振動方向は、地盤構造の不整形性や地盤の不均質性に起因した波動の散乱や種々の伝播経路を有する波動の相互干渉により生じる地震動特性のゆらぎに起因し、地点毎に異なるとともに周波数によっても異なると考えられる。このことは、地震動の揺らぎに伴う周波数応答関数の揺らぎは、従来の同一方向成分の地震記録に基づいた周波数応答関数の算出手法では回避することは出来ないことを示している。

前節で示したベクトルスペクトルは地震動の卓越振動方向に対するスペクトル特性を表すことから、それを用いて周波数応答関数を算出することにより、地震動の空間的揺らぎに起因するばらつきを緩和出来る。さらに、それを算出するための補正手続きや座標変換が不用となる。ここでは式(7)に示す様に周波数応答関数を地中の異なる2点のベクトルスペクトル($S_U(\sigma)$, $S_L(\sigma)$)の比の平方根として算出する手法を提案する(以後、提案手法と呼ぶ)。

$$H(\sigma) = \sqrt{\frac{S_U(\sigma)}{S_L(\sigma)}} \quad (7)$$

3. 地震観測の概要

ここでは、提案した周波数応答関数の評価手法の有用性を検討するために用いる地震記録が得られた水平成層地盤および造成地盤(不整形地盤)について、地震観測及び地盤構造の概要を示す。

(1) 水平成層地盤

地盤構造が水平成層とみなせる地盤で観測された地震記録は、1986年より仙台市で実施されている11サイトからなる高密度強震観測網のうちFig.2に示

す比較的沖積層の厚い4サイト(TRMA, NAKA, OKIN, SHIR)で得られた地震記録を用いた。観測は、地震動の加速度成分を対象とし、水平2成分(NS, EW)および鉛直成分の3成分に関する測定を速度帰還型加速度計により行っている。それらのサンプル周波数は200Hzである。ここでは、これまでに観測された多くの地震記録のうち4サイトでほぼ共通に観測されている加速度値(最大45gal)の大きな8地震の記録を選定した。それらの地震諸元をTable1、震源位置をFig.3に示す。

次に、それら4サイトの地盤・速度構造、密度分布および地震計の深度をFig.4に示す。地表と地中の地震計の設置深度は、TRMAでGL-1,25m, NAKAでGL-1,30m, OKINでGL-1,17mおよびSHIRでGL-1,20mとなっている。

(2) 不整形地盤¹⁴⁾

地震観測は山梨県笹子町の山作沢流域をFig.5に示す様に切土・盛土を施すことにより造成した地盤上及び地中、さらに各種施設の基礎上で1988年より実施している。各観測点では水平2成分(NS, EW)及び上下成分の3成分を対象とし、サンプリング周波数100Hzで加速度の測定を実施している。ここでは、地盤構造の不整形性の影響が最も表れると考えられる法肩部(GL-1m; S3)、ほぼその直下の基盤位置(GL-41m; S6)で観測された記録を用いた。

Fig.5中の実線に沿った2点の地震観測位置を含む地盤の縦断構造をFig.6に示す。表層はせん断波速度が200~400m/sの盛土地盤で、土石流堆積物を盛土材として用いている。その下はせん断波速度400~800m/sの土石流堆積物からなる地山及びせん断波速度が2000m/s程度の安山岩となっている。ただし、盛土と土石流堆積物からなる地山の間にはローム層が存在し、そのせん断波速度は180m/sと盛土及び他の地山に比べ小さい。

検討には、これまで観測された地震のうち特定の方向に震源位置が偏らない6地震による記録を用いた。それらの震源位置をFig.7、地震諸元をTable2に示す。

4. 従来の手法との比較

(1) ベクトルスペクトル

ここでは、まず設計でよく用いられる八戸波(1968十勝沖地震)とエルセントロ波(1940インベリアルバレー地震)の水平2成分(NS, EW)を用い、ベクトルスペクトルと各成分のスペクトルの比較をFig.8に示す。各成分のスペクトルは継続時間で割ったバ

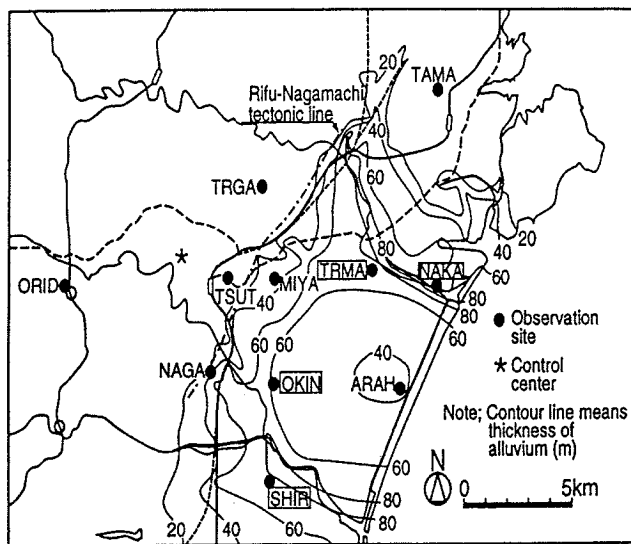


Fig.2 Location of Seismic Observation Sites

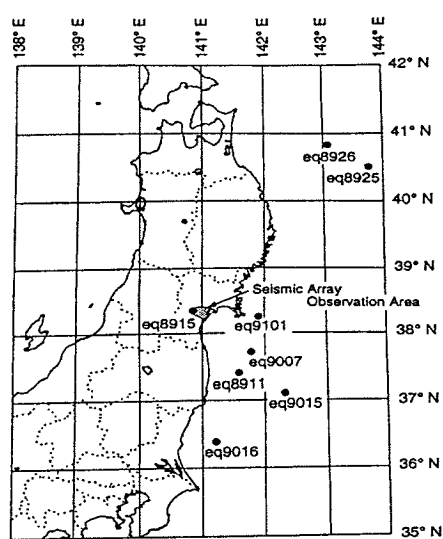
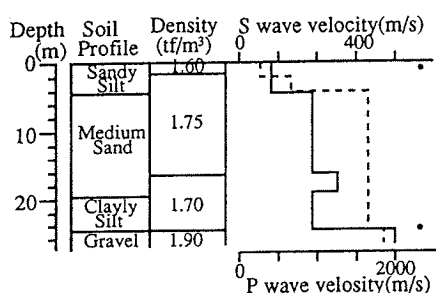
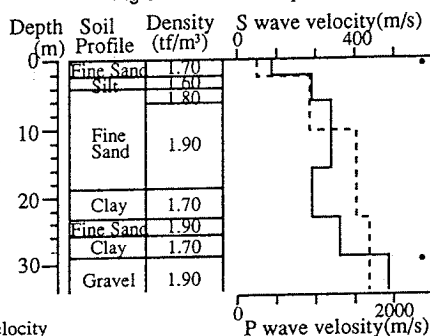


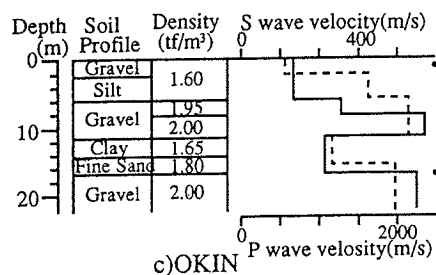
Fig.3 Location of Epicenters



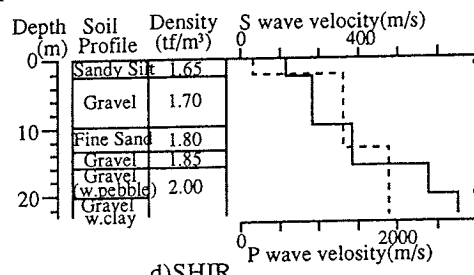
a) TRMA



b) NAKA



c) OKIN



d) SHIR

Fig.4 Soil Profile and Configuration of Seismograph

ワースベクトルの平方根として求めたフーリエスペクトルである。また、各パワースペクトルは、継続時間をいずれの波も40.96秒とし、Parzen Window(バンド幅0.4Hz)処理により求めた。各成分間のスペクトル振幅の差異は、八戸波の周波数1.0Hz付近ではEW成分がNS成分より大きいものに対して周波数2.5Hz付近ではその逆の傾向が見られる様に周波数に応じて異なっている。しかし、ベクトルスペクトルは各成分を包絡していることが分る。

次に、ベクトルスペクトルと水平2成分(NS,EW)

に関するフーリエスペクトルの2乗平方和および水平2成分(NS,EW)それぞれの同一固有周期に関する線形1質点系の応答の2乗平方和の最大値として定義される速度応答スペクトル(減衰定数0.0%)の比較をFig.9に示す。いずれも、定性的な傾向はよく似ているが、スペクトル振幅は手法により異なっている。特に、フーリエスペクトルの2乗平方和は、周波数によって若干異なるもののベクトルスペクトルに比べ2~3割程度大きな値となっている。

Table1 Earthquake Parameters

No.	Date	Epicenter Location		Mj	Δ (km)	Depth (km)
		Latitude	Longitude			
eq8911	1989,4,28	37° 29.9'	141° 31.0'	4.9	106.9 ~110.4	52.0
eq8915	1989,6,24	38° 17.8'	140° 49.8'	4.1	17.9 ~21.4	18.3
eq8925	1989,10,29	40° 31.1'	143° 44.6'	6.5	275.3 ~285.9	0.0*
eq8926	1989,11,2	40° 51.3'	143° 3.4'	7.1	250.9 ~261.6	0.0*
eq9007	1990,5,1	37° 40.0'	141° 41.0'	4.1	110.8 ~112.9	64.0
eq9015	1990,8,5	37° 7.0'	142° 13.0'	4.2	164.5 ~166.9	3.0*
eq9016	1990,9,5	36° 24.0'	141° 6.0'	5.2	203.5 ~210.7	37.0
eq9101	1991,1,16	38° 15.0'	141° 55.0'	4.7	94.7 ~99.1	48.0

* Close to sea bed elevation.

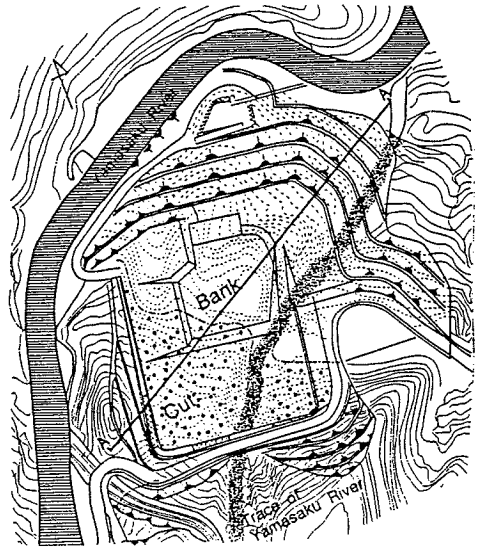


Fig.5 Plane View of Created Land and Contour Line of Original Ground Surface

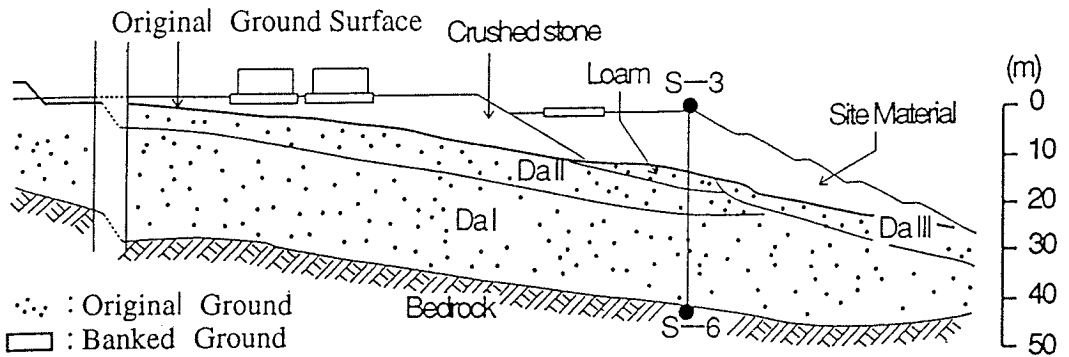


Fig.6 Soil Profile at Cross Section along Solid Line in Fig.5

Table2 Earthquake Parameters

No.	Date	Epicentral Location		Mj	Δ (km)	Depth (km)
		Latitude	Longitude			
eq1	1991,1,26	35° 31'	138° 57'	3.3	16.0	24.0
eq2	1991,4,1	34° 55'	139° 46'	4.2	115.0	42.0
eq3	1991,4,25	35° 4'	138° 12'	4.9	80.0	32.0
eq4	1991,5,30	35° 53'	139° 22'	4.3	60.0	67.0
eq5	1991,11,24	36° 4'	139° 15'	4.1	67.0	*
eq6	1992,2,2	35° 14'	139° 48'	5.9	98.0	90.0

Δ represents epicentral distance

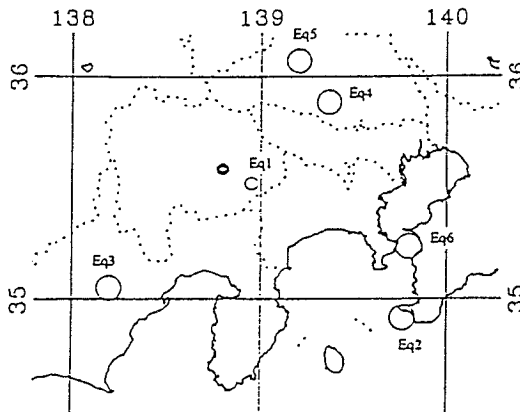


Fig.7 Location of Epicenters

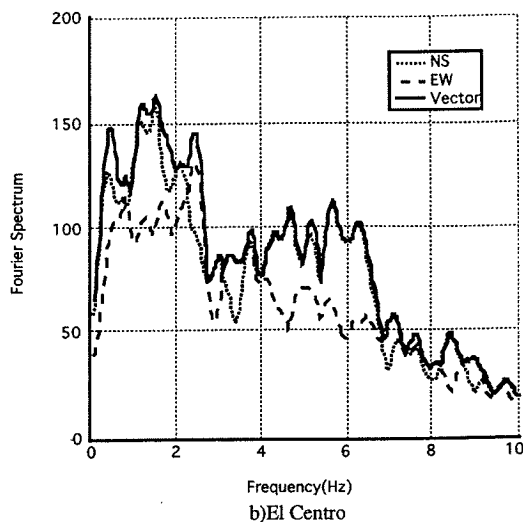
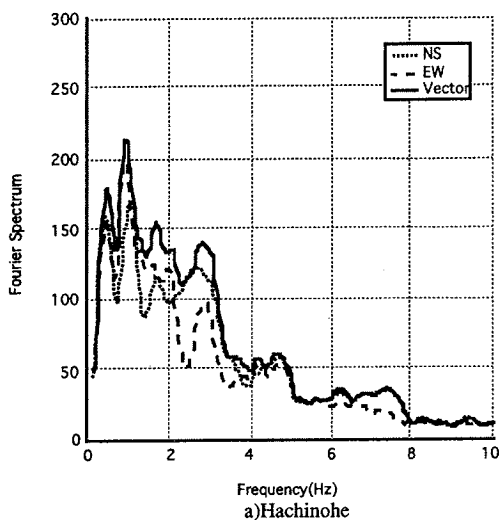


Fig.8 Comparison between Vector Spectrum and Spectrum with respect to NS and EW Component

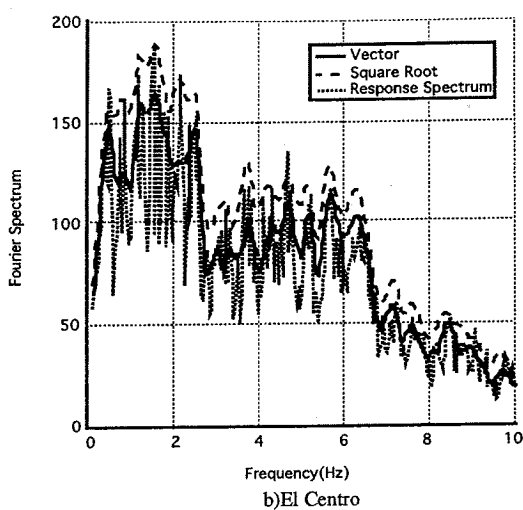
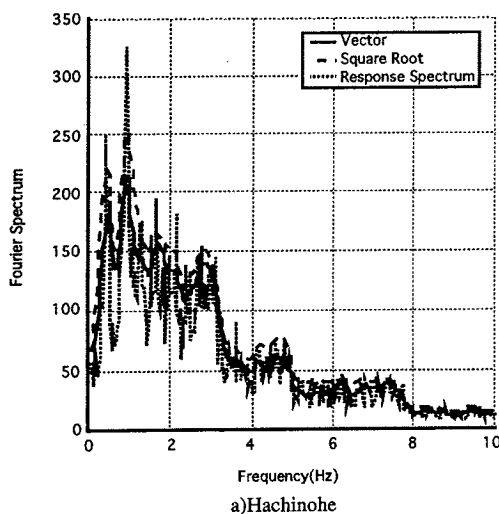


Fig.9 Comparison between Vector Spectrum and Square Root of Sum of Fourier Spectrum and Velocity Response Spectrum with respect to NS and EW component

ここでは、水平成層地盤における4地点及び不整形地盤で観測された水平成分に関する地震記録を用い、提案手法と従来手法により求めた周波数応答関数を比較し、提案手法の有用性を示す。周波数応答関数はいずれの地点でも地表と地中の地震記録より算出した。その際、ベクトルスベクトルは、地震記録にS波の到達が認められる時刻より水平成層地盤では10.0秒、不整形地盤では5.0秒間の記録を用い、0.2Hzのバンド幅を有するParzen Windowによる処理を施して算出した。検討に用いた解析時間長は各地盤の平均的な主要動部の時間長に基づいて設定した。両地盤で観測された地震の規模がほぼ同程度であるにも拘らずその様な差異が生じる理由として、比較的固い地盤上の盛土である不整形地盤の記録には水

平成層地盤の様な沖積平野の記録にみられる地震動の多重反射に起因する継続時間の延びの影響が小さいためと考えられる。

a)水平成層地盤

4サイトについて両手法より算出した全地震に対する周波数応答関数をFig.10に示す。ここで従来手法による各サイトの周波数応答関数は各地震の震源直交方向の成分について算出した。提案手法による周波数応答関数は従来手法に比べ、地震毎のばらつきが小さいことが分る。その傾向は、2次以上の高次の固有周波数の近傍において顕著である。この差異は、地震動の周波数毎の卓越振動方向が一致していないことに起因していると考えられる。

さらに、サイトおよび手法毎に全地震について算

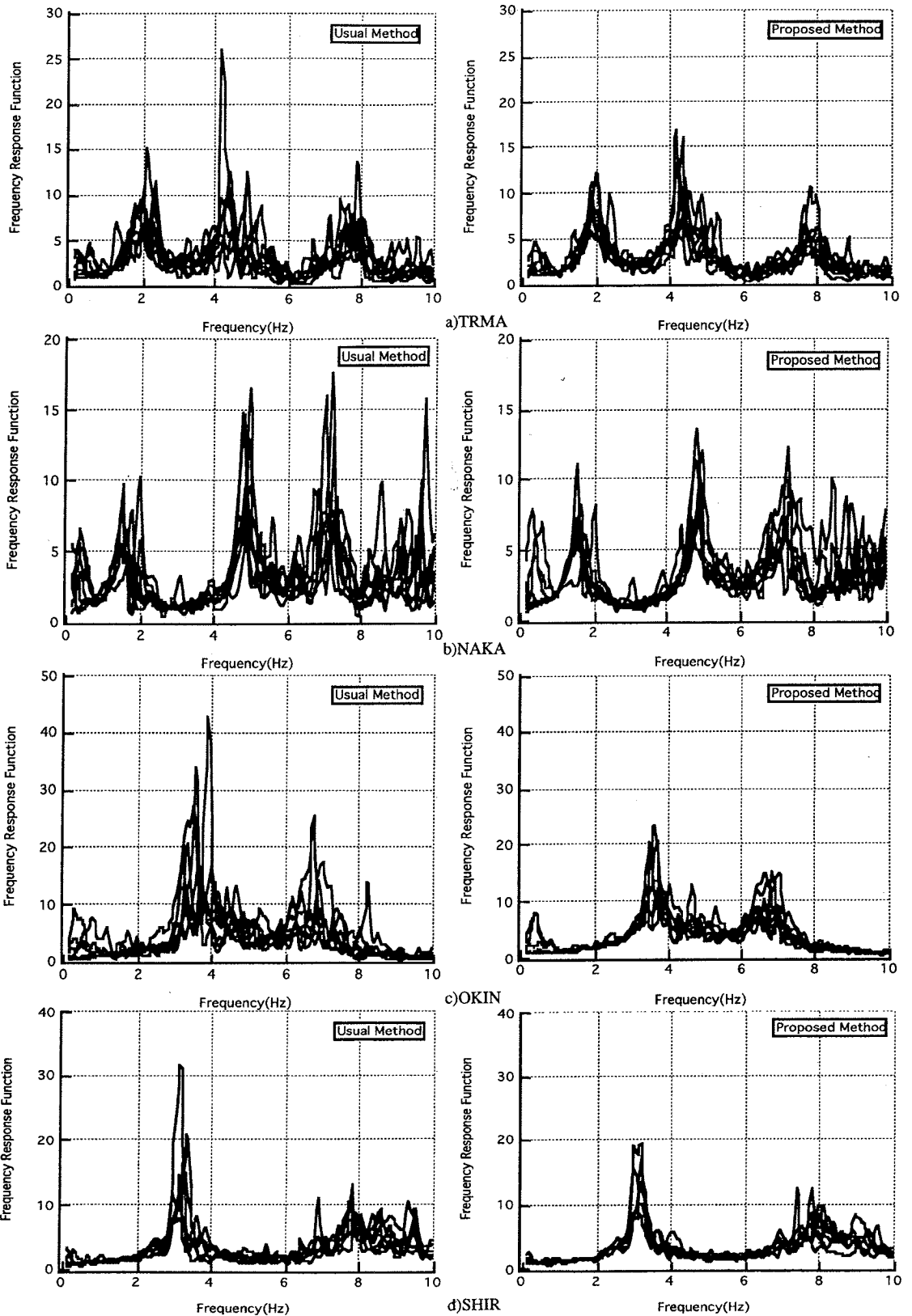


Fig.10 Comparison between "Proposed" and "Usual" Frequency Response Function

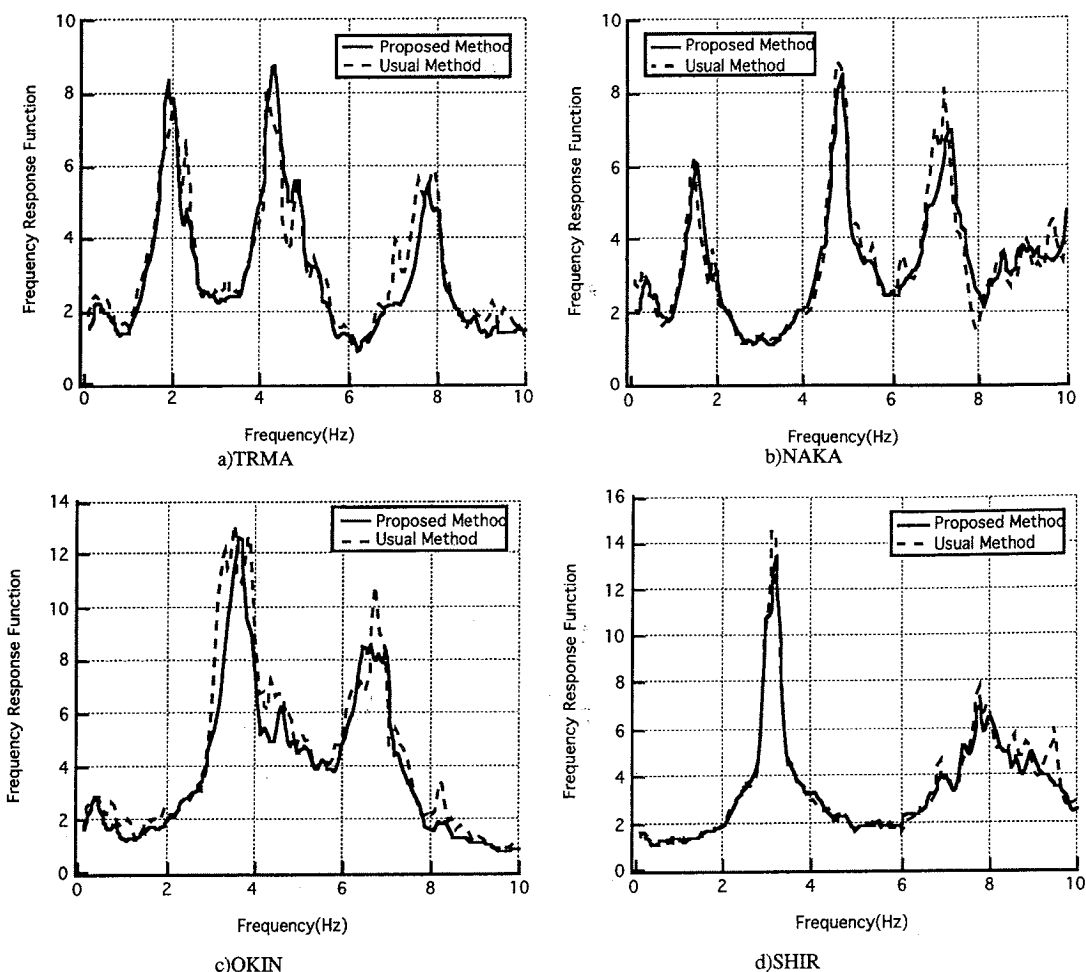


Fig.11 Comparison of Mean "Proposed" and "Usual" Frequency Response Function

出した周波数応答関数の平均値(以後、平均周波数応答関数)の比較をFig.11に示す。固有周波数やその周波数における増幅率についてみると、提案手法と従来手法の差異は1割以下とかなり小さい。

b)不整形地盤

基盤(S6)に対する地表(S3)の全地震に対する周波数応答関数を提案手法と従来手法により算出し、Figs.12, 13に示す。従来手法によるEW成分の周波数応答関数は1次の固有周波数3.8Hz近傍を除きNS成分と異なり、周波数4.0Hz以上でピークが見られないのに対し、NS成分では5.0Hz, 8.0~10.0Hz及び14.0Hz近傍でピークが認められる。さらに、従来手法による周波数応答関数は、地震毎の差異も提案手法に比べ大きい。提案手法による周波数応答関数はNS成分の周波数応答関数とピークを与える周波数等は良く対応しているが、NS成分の周波数5.0Hzに見られる様な地震毎の差異が見られない。この様に

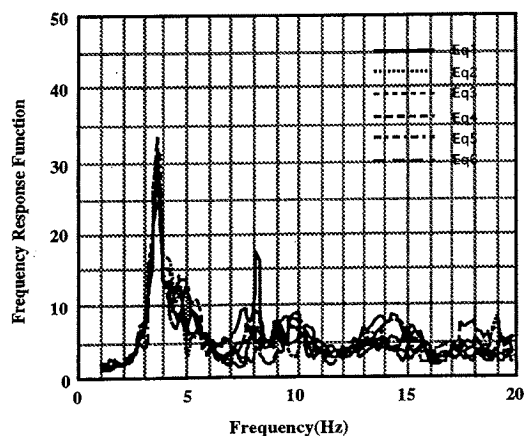


Fig.12 Proposed Frequency Response Function

成分によって周波数応答関数異なるのは、基盤と地表における地震動の卓越振動方向が地盤の不整形性に起因して異なるためと考えられる。

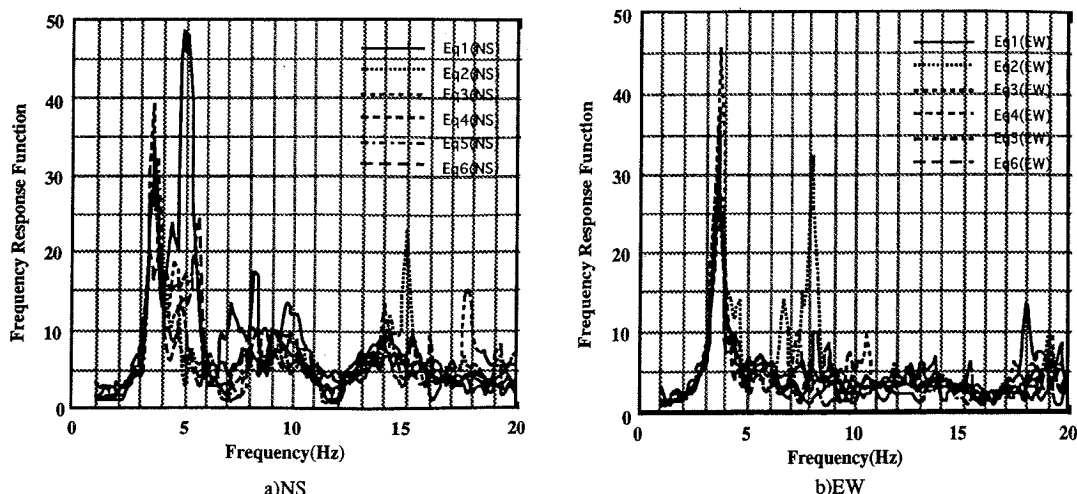


Fig.13 "Usual" Frequency Response Function with respect to NS and EW Component

5.考察

(1)手法に応じた周波数応答関数のばらつき

水平成層地盤の4地点で観測された記録を用い両手法より算出した地震毎の周波数応答関数より得られる1～3次モードの固有周波数とその周波数における応答倍率の平均値と変動係数を算出し、手法毎の比較をTable3に示す。これより、両手法の固有周波数に関する平均値の差異は6%以下と小さいが、その変動係数はNAKAの3次モード、SHIRの1次モードを除き提案手法は従来手法より小さく、その差異の比率の平均は76%程度である。また、応答倍率については、提案手法の平均値は従来手法より小さく、その差異の比率の平均は80%程度となっている。さらに、変動係数はTRMAの3次、NAKAの1次モードおよびSHIRの2次モードを除き提案手法は従来手法より小さく、地点によらず19～26%以下となっている。その差異の比率の平均は64%程度となっている。提案手法に基づく周波数応答倍率の地震毎のばらつきは既往の地震動のスペクトル特性に関する距離減衰式のばらつき、例えば神山¹⁵⁾による距離減衰式のばらつき0.4～0.7に比べてかなり小さいことが分る。既往の距離減衰式のばらつきが大きい要因の一つとして、観測成分に基づいて求めた地震動スペクトルを回帰分析に用いたことが考えられる。

次に、Table3に示した固有周波数と応答倍率の平均値とFig.11の平均周波数応答関数により得られる固有周波数と応答倍率の比較をTable4に示す。平均周波数応答関数より得られる固有周波数は、TRMAの1次モードおよびNAKAの3次モードを除き提案手法と従来手法の差異は4%以下と小さい。また、

Table3に示した各地震の周波数応答関数より求めた固有周波数の平均と平均周波数応答関数より求めた固有周波数の差異は、提案手法で6%以下と小さいものの従来の手法では8～12%と提案手法の2倍程度の差異となっている。

最後に、平均周波数応答関数の信頼性について検討を行うため、両手法により得られる1～3次固有周波数における95%の信頼区間の比較をTable5に示す。Table5にはTable4に示した地震毎の周波数応答関数の1～3次固有周波数における応答倍率の平均値も比較のため示している。信頼区間の幅はTRMAとNAKAの1次モードを除き、提案手法は従来手法より小さい。その差異の比率の平均は70%程度である。さらに、地震毎の周波数応答関数の平均値はTRMAとSHIRの2次モードを除き提案手法の平均は信頼区間内の値となっている。一方、従来手法では、提案手法に比べ信頼区間の幅が広いにもかかわらず、TRMAの1次モード、NAKAの2次モードおよびTRMAとOKINの3次モードの平均値は信頼区間外の値となっている。

以上のことより、提案手法による地震動の周波数応答関数は、従来手法に比べ地震毎の等価性および周波数応答関数の期待値としての信頼性が高いと言えることが分る。

(2)卓越振動方向

不整形地盤における地表(S3)と基盤(S6)における地震動の卓越振動方向とベクトルスペクトルの関係を比較し、卓越振動方向の差異が周波数応答関数に及ぼす影響を検討する。Fig.12に示した提案手法による周波数応答関数において、1次固有周波数近傍

Table3 Comparison of Mean Value and Coefficient of Variance(Cv) for Natural Frequencies(N.F.) and Magnification Factor(M.F.) at Each Natural Frequency obtained by The Proposed Method with Those by The Usual Method

		First mode				Second mode				Third mode			
		N.F.(Hz)		M.F.		N.F.(Hz)		M.F.		N.F.(Hz)		M.F.	
		Mean	Cv	Mean	Cv	Mean	Cv	Mean	Cv	Mean	Cv	Mean	Cv
T R M A	Vector	1.93	0.05	9.28	0.19	4.35	0.03	12.14	0.24	7.71	0.01	6.17	0.35
	1D	2.05	0.09	10.14	0.24	4.51	0.07	12.57	0.43	7.76	0.03	8.53	0.28
N A K A	Vector	1.60	0.10	7.39	0.24	4.81	0.17	9.66	0.24	7.20	0.04	8.63	0.20
	1D	1.66	0.11	7.78	0.22	4.82	0.20	11.72	0.29	7.14	0.03	11.15	0.34
O K I N	Vector	3.63	0.05	16.27	0.26	6.80	0.03	11.08	0.26				
	1D	3.64	0.06	22.91	0.44	6.70	0.04	14.00	0.47				
S H I R	Vector	3.14	0.23	14.08	0.25	7.78	0.03	9.69	0.22				
	1D	3.18	0.22	17.12	0.41	7.78	0.05	9.91	0.19				

Table4 Comparison of Natural frequency obtained from Mean Frequency Response Function with Mean Values of Natural Frequencies for the Proposed and Usual Method

		First mode			Second mode			Third mode		
		Mean F.R.F	Value for Each Events		Mean F.R.F	Value for Each Events		Mean F.R.F	Value for Each Events	
			Mean	Cv		Mean	Cv		Mean	Cv
T R M A	Vector	1.86	1.93	0.05	4.30	4.35	0.03	7.76	7.71	0.01
	1D	2.00	2.05	0.09	4.15	4.50	0.07	7.76	7.76	0.03
N A K A	Vector	1.51	1.60	0.10	4.83	4.81	0.17	7.32	7.20	0.04
	1D	1.46	1.66	0.11	4.79	4.82	0.20	6.74	7.14	0.03
O K I N	Vector	3.66	3.63	0.05	6.59	6.80	0.03			
	1D	3.51	3.64	0.06	6.59	6.70	0.04			
S H I R	Vector	3.17	3.14	0.23	7.76	7.78	0.03			
	1D	3.17	3.18	0.22	7.76	7.78	0.05			

Table5 Comparison of Confidence Interval of Estimated Magnification Factor and Mean Magnification Factor calculated by the Proposed Method with Those by the Usual Method

		First mode		Second mode		Third mode	
		Estimated M.F (Confidence Interval)	Mean M.F for Every Events	Estimated M.F (Confidence Interval)	Mean M.F for Every Events	Estimated M.F (Confidence Interval)	Mean M.F for Every Events
T R M A	Vector	6.83 ~ 9.93	9.28	6.10 ~ 11.34	12.14	3.77 ~ 7.23	6.17
	1D	6.12 ~ 9.13	10.14	2.35 ~ 14.07	12.54	3.22 ~ 8.52	8.53
N A K A	Vector	4.25 ~ 8.03	7.39	6.85 ~ 10.15	9.66	4.56 ~ 9.42	8.63
	1D	4.44 ~ 7.94	7.78	6.09 ~ 11.55	11.72	4.90 ~ 11.44	11.15
O K I N	Vector	8.11 ~ 17.27	16.27	5.85 ~ 11.25	11.08		
	1D	4.94 ~ 21.34	22.91	3.87 ~ 17.58	14.00		
S H I R	Vector	10.16 ~ 16.90	14.08	4.52 ~ 9.56	9.69		
	1D	7.78 ~ 21.24	17.12	5.11 ~ 10.33	9.91		

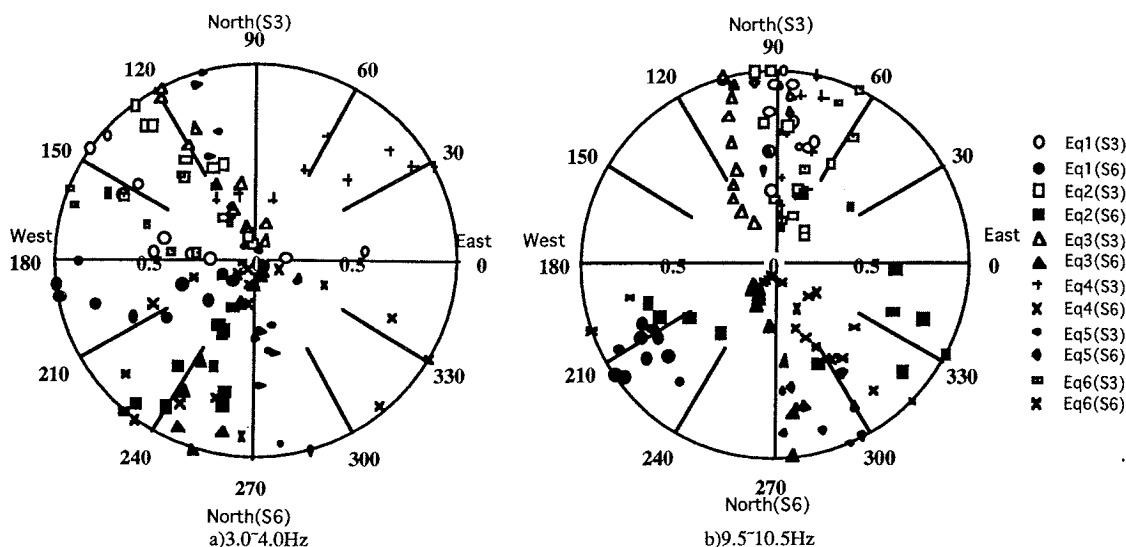


Fig.14 Normalized Vector Spectrum at Two Frequency Ranges for Predominant Vibrating Direction

の3.0~4.0Hzおよび高次の固有周波数近傍9.5~10.5Hzを対象とし、地表と基盤における地震動の卓越振動方向とベクトルスベクトル $S(\sigma)$ との関係を6地震についてFig.14に示す。図中の上半円は地表、下半円は基盤における関係を示す。ここで、卓越振動方向は東方からの角度、ベクトルスベクトルは各周波数帯域内の最大値で基準化し、中心からの距離で表している。周波数3.0~4.0Hzについて見ると、地表と基盤における卓越振動方向は必ずしも一致せず、数10度程度の差異が認められる。周波数9.5~10.5Hzについて見ると、地表における地震動の卓越振動方向は基盤における地震動の卓越振動方向によらずほぼ南北方向を向いていることが分かる。このことは、オービットに基づく検討結果¹⁰⁾とも一致している。この周波数帯域により得られる地表の卓越振動方向は造成地盤全体の固有振動方向に対応しているものと考えられる。また、Fig.13に示したNS成分の周波数応答関数における周波数5.0Hz近傍の応答倍率は地震によって48~13倍と大きく異なり、Fig.12の提案手法より大きな値となっている。このように、地盤構造の不整形性は地震動の卓越振動方向に大きな影響を及ぼすことから、ここで提案した周波数応答関数の評価手法は周波数応答関数の本来の定義からも不整形地盤における地震動の周波数応答関数を評価する上で有用であることが分る。

6. あとがき

ここでは、まず従来の座標変換に基づいた手法と異なり複素平面で表した水平地震動ベクトルのフー

リエ変換により得られる周波数毎の粒子軌跡に基づき、水平面における地震動の卓越振動方向のスペクトル振幅を求める手法の提案を行った。そのスペクトル振幅はパワースペクトルの定義に基づいて表し、ベクトルスベクトルと名付けた。このベクトルスベクトルは座標系つまり地震動の観測方向に依存しない量であると同時に粒子軌跡との対応という意味で物理的意味が明確であるという特徴を有している。

さらに、そのベクトルスベクトルを用い、地震動の鉛直アレー観測記録より地震動の増幅特性を表す周波数応答関数を求める手法を提案した。その周波数応答関数はベクトルスベクトル同様に地震観測の方向によらない不変量であり、従来手法のように周波数応答関数を求めるための種々の手続きが不用となる等の特徴を有している。それらの有用性は従来手法との比較により行った。比較に際して、ベクトルスベクトルの算出には耐震設計でよく用いられる2つの地震記録、周波数応答関数には水平成層地盤における4地点及び造成地盤における鉛直アレー観測により得られた記録を用いた。その結果、ここで提案した手法の有用性やそれぞれの地盤における周波数応答関数の特性が以下のように明かとなった。

1)ベクトルスベクトルは水平2成分のフーリエスペクトルの平均等の簡易的に求めた水平面の地震動の周波数特性との間に明確な値の差が認められ、水平面における地震動の周波数特性を量的に把握するという観点で有用である。

2)提案した周波数応答関数は、従来手法より地震毎の等価性や安定性という面で優れ、地震動の増幅特性を表す指標として有用である。特に、不整形地盤

では単に安定性という点のみならず周波数応答関数がある地盤系への入力地震動と応答との関係を表すという本来の意味からも、提案手法は有意であると考えられる。

3)提案した周波数応答関数に基づく水平成層地盤における周波数応答倍率の地震毎のばらつきは観測地点によらず同程度であり、変動係数で見るとほぼ19～26%であり、地震動のスペクトル特性に関する既往の距離減衰式のばらつきより小さい。

4)不整形地盤における地震動の卓越振動方向は、地盤の不整形性に起因し地盤内の位置によって異なる。

本研究は著者がRenssler Polytechnic Instituteに在籍中(1992,9,1～1993,8,31)に実施した研究成果の一部をまとめたものであり、そのような機会と貴重な助言を与えてくれた同大学のM.,O'Rourke教授に感謝の意を表する次第です。なお、ここで用いた地震観測記録のうち水平成層地盤における記録は、建設省建築研究所と(社)建築研究振興協会の共同研究として実施されている高密度強震観測事業により得られたものである。本事業の運営に当っては、同協会内に建築研究所、建設業16社および設計事務所連合からなる「高密度強震観測運営委員会」が設置されている。

参考文献

- 1) 中村晋,M.,O'Rourke:地震観測記録に基づく表層地盤のせん断波速度と減衰定数について,「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性・試験法・調査法および結果の適用」に関する国内シンポジウム, pp.295-300,1994.
- 2) 沢田勉,岡本康,平尾潔,辻原治:地盤のS波速度とQ値の部分同定法の開発,土木学会論文集No.495/I-28, pp.111-118,1994.
- 3) 佐藤智美,川瀬博,佐藤俊明:堆積盆地におけるS波速度の識別と土の非線形性の同定-足柄平野久野地区の鉛直7ル-観測された弱震動と強震動の分析,日本建築学会 構造系論文報告集,第449号, pp.55-68,1993.
- 4) 例えばTanaka,T. et al:Observation and Analysis of Underground Earthquake Motions, *Proc. Fourth W.C.E.E.*, pp.658-667, 1972.
- 5) Aki,K.,Richards,P.,G.:*Quantitative Seismology - Theory and Methods* -,Vol.2,pp.636-639,1980.
- 6) Penzen,J. , Watabe,M.:Characteristics of 3- Dimensional Earthquake Ground Motion, *Int. J. E. E. S. D.*,Vol.3, pp.365-373,1975.
- 7) 星谷勝,石橋裕:地震動ベクトルの主軸と波形特性,土木学会論文報告集,第268号,pp.33-46,1977.
- 8) 松島豊:水平地震動の特性の方向による変動,日本建築学会構造系論文集,第226号,pp.39-44,1974.
- 9) Gonella,J.:A Rotary-Component Method for Analysis Meteorological and Oceanographic Vector Time Series, *Deep-Sea Research*, Vol.19,pp.833-846,1972.
- 10) 小林啓美,小林喜久二,光用薫:常時微動の安定性について,第4回自然災害科学総合シンポジウム, pp.347-350,1977.
- 11) 横井義彦,飛田潤,久保田一秀,杉村義広:観測記録による伝達関数推定法に関する一検討,日本建築学会大会 学術講演概要集B構造I(北陸), pp.451-452,1992.
- 12) 永田茂,片山恒雄,山崎文雄,佐藤暢彦:加速度・速度・変位地震計の同時観測に基づく記録精度の検討,土木学会論文集,No.422/I-14,pp.371-380,1990.
- 13) 例えば末富岩雄,中村晋:強震時における表層地盤のQ値について,第8回日本地震工学シンポジウム, pp.589-594,1990.
- 14) 中村晋,M.,O'Rourke:大塚正博:造成地盤における地震動の増幅特性,第9回日本地震工学シンポジウム, pp.199-204,1994.
- 15) 神山真:地盤の強震動特性とその予測に関する研究,東北大学学位論文,pp.24-28,1985.
- 16) 大塚正博,矢野康明,中村晋:造成地盤における地震時挙動,土木学会第47回年次学術講演会講演概要集,第1部門, pp.144-145,1992.

(1994. 10. 7 受付)

PROPOSAL OF VECTOR FREQUENCY RESPONSE FUNCTION OF GROUND BASED ON VECTOR SPECTRUM AND ITS APPLICATION

Susumu NAKAMURA

A new method for calculating spectrum with respect to horizontal earthquake motion as vector is introduced. The spectrum is named herein as "Vector spectrum". Furthermore, a new method for calculating the frequency response function based on the vector spectrum is proposed. These methods were applied to the observed earthquake motion and were compared with the results calculated by the usual method. As a result of these, it is found that vector spectrum is useful to evaluate the frequency characteristics of horizontal earthquake motion quantitatively and that the proposed frequency response function is also useful as the index to represent the amplification characteristics of earthquake motion because it has the high equivalency and stability in comparison with the usual method.