

(78) 上下動を考慮した地盤の地震応答解析

--- 神戸市ポートアイランドについて ---

金沢大学大学院 学生会員 翟 恩地  
金沢大学工学部 正会員 北浦 勝  
金沢大学工学部 正会員 宮島昌克

1. はじめに

地震時の地盤の増幅特性については種々の研究が行われているが、強震時における増幅特性については、観測データが少ないこともあり未解明の点が多い。本論では、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震における神戸市ポートアイランドで観測された地表面および地中の地震波形に注目し、地表面と地中G.L.-32mの地盤増幅スペクトルを用いて、地盤の非線形挙動に関する検討を行う、さらにその結果を用いて地盤応答解析を行い、水平動および上下動地盤増幅特性について検討する。

2. 観測記録と地質条件

地震観測はFig. 1に示す位置の地表面およびG.L.-83m、G.L.-32m、G.L.-16m地点で行われている。観測記録は6分間にわたっており、約40秒間の本震の後に5つの余震が記録されている。本論では、本震加速度だけを基線補正して利用した。地表面およびG.L.-83m、G.L.-32m地点で得られた記録(NS、UD)をFig. 2に示す。Fig. 3にはそれぞれのフーリエスペクトルを示す。なお、データのサンプリングは0.01秒間隔である。

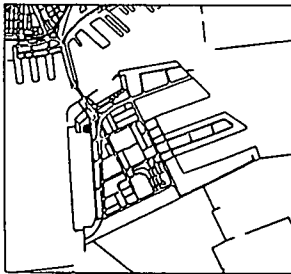


Fig.1 Observed position (●)

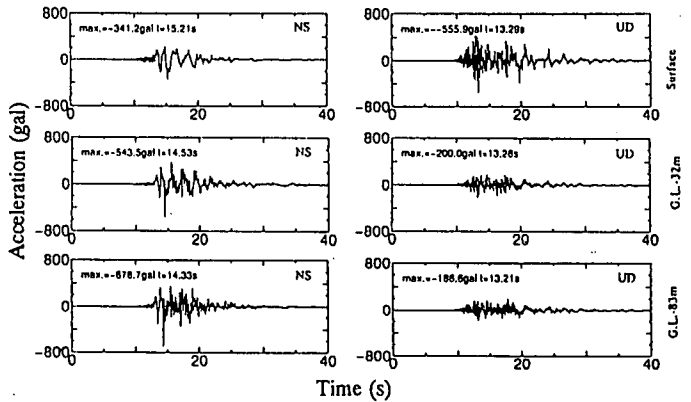


Fig.2 Acceleration time histories recorded in Port-island

観測地点のPS検層の結果は、関西地震観測研究協議会を通じて公開された神戸市開発局によるTable 1に示すとおりである。

3. 観測地点における周波数応答関数  
地表面での観測記録とG.L.-83m、G.L.-32m地点での観測記録のフーリエスペクトルを算出した後、地表面とG.L.-83m、G.L.-32mとG.L.-83m地点のそれぞれのフーリエスペクトル比を求めた。一方、線形次元地震応答解析によりそ

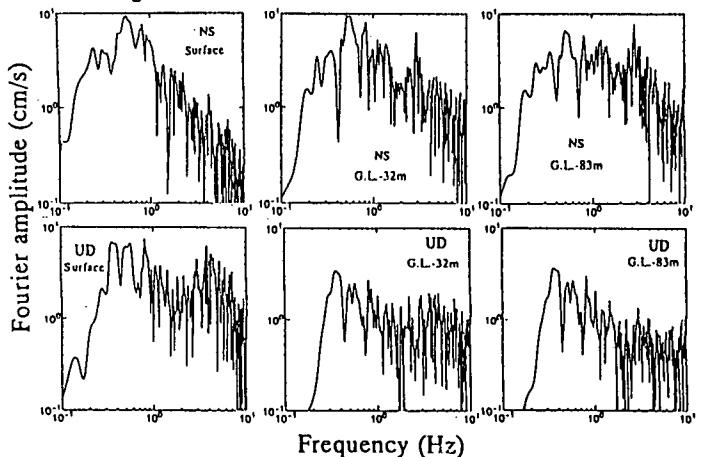


Fig.3 Fourier spectra recorded in Port-island

それぞれの応答関数を求め、これらを線形領域でのスペクトル比と考える。求めたスペクトル比はFig. 4に示すとおりである。

Table 1 Ground Model

深度 (M)	主な地質	単位体積重量 (t/m <sup>3</sup> )	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	平均N値	ポアソン比
0~2.0	砂礫	1.7	0.260	0.170	5.2	0.127
2.0~5.0	砂礫	1.7	0.330	0.170	5.2	0.319
5.0~12.6	砂礫	1.7	0.780	0.210	6.5	0.461
12.6~19.0	礫混り砂	1.7	1.48	0.210	6.5	0.490
19.0~27.0	粘土	1.6	1.18	0.180	3.5	0.488
27.0~33.0	砂	1.7	1.33	0.245	13.5	0.482
33.0~50.0	礫混り砂・砂	1.8	1.53	0.305	36.5	0.479
50.0~61.0	砂	1.8	1.61	0.350	61.9	0.475
61.0~79.0	粘土	1.7	1.61	0.303	11.7	0.482
79.0~85.0	礫混り砂	2.0	2.00	0.320	68.0	0.487

\*道庁提示方書・同解説による仮定

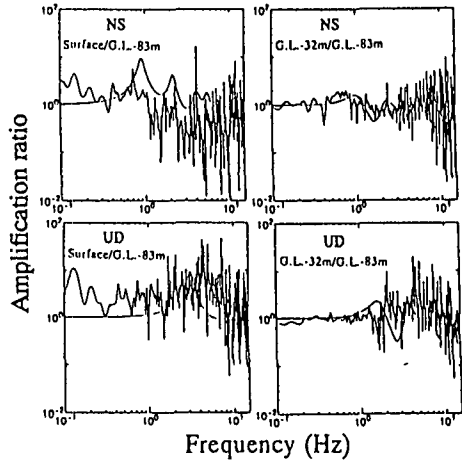


Fig.4 Ground amplification spectra

地表面NS方向の実地震波のスペクトルは0.3~10Hzの周波数領域で線形のスペクトル比より低下しており、地盤が非線形挙動していることが分かる。一方、地表面UD方向、G.L.-32m地点NS方向およびUD方向では0.1~10Hzの周波数領域で線形のスペクトル比といずれもほぼ同じと言え、それらについては非線形挙動が生じなかったものと考えられる。したがって、本論では、地表面NS方向における地盤振動を等価線形化手法で解析し、地表面UD方向、G.L.-32m地点NS方向およびUD方向の所は線形化手法で解析する。

#### 4. 地盤の地震応答解析

##### 4.1. 解析方法

##### 4.1.1. 地盤モデル

地盤モデルはTable 1に示すPS検層結果に基づく成層地盤とする。各層ごとに座標軸  $Z_i$  を設け、 $\xi_i(Z_i, t)$  を  $i$  層内の変位とすれば、調和振動解は層ごとに成り立つ。

$$\xi_i(Z_i, t) = (A_i e^{ip_i Z_i} + B_i e^{-ip_i Z_i}) e^{i\omega t} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

第  $r$  層 (対象層) の上端面における加速度は

$$\ddot{\xi}_r(0, t) = -\omega^2 (A_r + B_r) e^{i\omega t} \quad (2)$$

第  $s$  層 (基準層) の上端面における加速度は

$$\ddot{\xi}_s(0, t) = -\omega^2 (A_s + B_s) e^{i\omega t} \quad (3)$$

この2つの加速度の比  $Z_r / Z_s(\omega) = (A_r + B_r) / (A_s + B_s)$  は、第  $r$  層と第  $s$  層の間の加速度に関する周波数応答関数である。同様に、第  $r$  層の中心におけるせん断ひずみと、第  $s$  層の上端面における加速度との間の周波数応答関数は式 (4) のとおりである。

$$\bar{Z}_r / Z_s(\omega) = \frac{ip_r (A_r e^{ip_r H_r / 2} - B_r e^{-ip_r H_r / 2})}{\omega^2 (A_s + B_s)} \quad (4)$$

ただし  $p = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G}}$  ,  $G$  - 複数せん断弾性定数、 $H_r$  - 対象層の層厚

##### 4.1.2. せん断弾性係数のひずみ依存性

地震時における地盤内のひずみは線形挙動をするものとみなしてよい  $10^5$  程度以下のひずみ振幅の領域

から、破壊に至るまでの広範囲なひずみ領域にわたる構成関係が必要になる。せん断弾性係数のひずみ依存性に関する実験的な研究は、これまでに数多く行われている。本論では、地盤の非線形性を表現する  $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$  として文献<sup>1)</sup>に示された粘性土と砂に関する  $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$  関係 (Fig.5) を用いた。

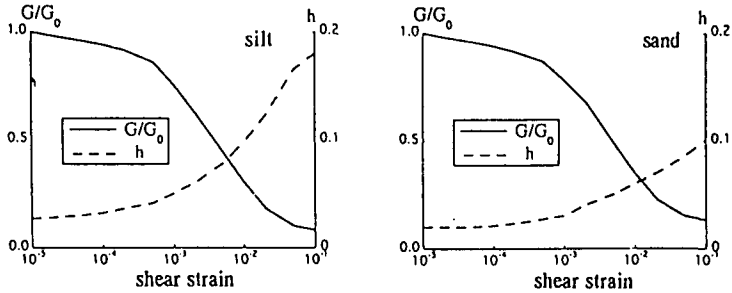


Fig.5 Shear modulus and damping versus shear strain

4.1.3.線形および等価線形化解析の上下動への適用

水平動と同様に上下動についても、基準層からの入射波に対する対象層での加速度振幅の倍率を表す周波数応答関数を求めることができる<sup>2)</sup>。しかし、土の動的非線形性は前述の水平動についてのみ検討されており、上下動方向の弾性係数のひずみ依存性については十分に検討されていない。したがって、上下動方向の等価線形化解析を水平動方向と同様に行うことができない。しかしながら、ポアソン比はせん断ひずみの変化によらず定数とすれば  $E/E_0 = G/G_0$  が得られる。すなわち、上下動方向の等価線形化地震応答解析を行う時の弾性定数は水平動方向によるせん断ひずみに依存すると考えることができる。

4.2.解析結果および考察

入力基準層はG.L.-83m地点である。観測された地震波をNS方向、UD方向ともに地盤モデルに入力する。NS方向においては等価線形解析を、UD方向においては線形解析をそれぞれ行い、地表面の地震応答を求めた。Fig.6、Fig.7はそれぞれ地表面のNSとUD方向の加速度時刻歴およびそれらのフーリエスペクトルである。G.L.-32m地点に対しては、NS方向およびUD方向ともに線形解析を行い、Fig.8、Fig.9は示す加速度時刻歴およびそれらのフーリエスペクトルを求めた。

地表面については、等価線形解析によって求めたNS方向加速度の波形、最大値および最大値の発生時刻は観測されたものと比較するとほぼ一致することがわかる。上下動については、線形解析によって求めた波形とその最大値の発生時刻は観測された波形とその最大値の発生時刻に近くなっている。しかし、計算で求め

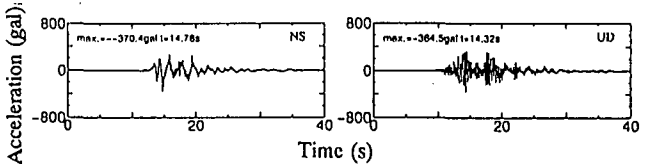


Fig.6 Acceleration time histories calculated at surface

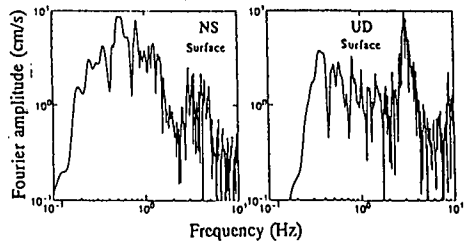


Fig.7 Fourier spectra calculated at surface

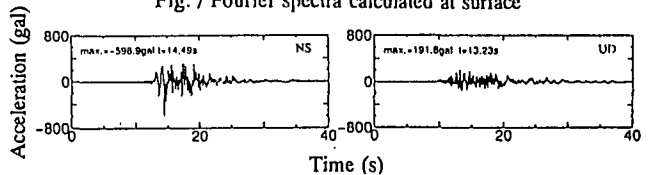


Fig.8 Acceleration time histories calculated at G.L.-32m

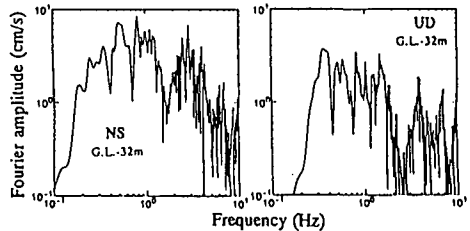


Fig.9 Fourier spectra calculated at G.L.-32m

た最大加速度値は364.5galであり、増幅倍率は約2倍であるのに対して、観測された最大値は555.9galであり、増幅倍率は約3倍となっている。その原因については今後の課題である。フーリエスペクトルについては、計算で求めた波形のスペクトル (Fig.7) は観測した波形のスペクトル (Fig.3) と同様に、NS方向において、0.55Hzと0.81Hzにおいて振幅が卓越している。これに対して、UD方向において0.35Hz、0.55Hzと0.8Hzで振幅が卓越しているとともに、3~4Hzでも振幅が卓越している。一方、G.L.-32m地点の応答解析結果は、Fig. 2、Fig.8とFig. 3、Fig.9にそれぞれ示すように、加速度波形、フーリエスペクトルとも計算値と観測値がよく一致する。

以上の考察から、地表面と地中G.L.-32m地点での水平動と上下動の観測と解析結果は一致することがわかり、本解析法は妥当であると考えられる。

## 5.結論

本研究は1995年1月17日兵庫県南部地震の際に神戸市ポートアイランドで得られた強震記録を用いて、地盤水平動と上下動の増幅特性を検討するとともに地盤応答解析を行った。解析から得られた地盤応答を観測された強震記録と比較して、その妥当性を検討した。以下に本研究の結論を示す。

(1)対象層と基準層で観測されたフーリエスペクトル比を求め、その比を線形地震応答解析による周波数応答関数と比較することにより、水平成層地盤の地震応答解析を行う時に地盤の非線形性を考慮する必要があるか否かを推測できる。

(2)ポートアイランドの地盤は地下G.L.-83m地点からG.L.-32m地点までで非線形性は生じなかったのに対し、地表面まででは水平動方向で非線形性が生じ、上下動方向で非線形性は生じなかったものと考えられる。

(3)地下G.L.-83m地点を基準層とすると、G.L.-32m地点ではNS方向の加速度最大値は0.8倍になり、UD方向の加速度最大値は1.07倍に増幅する。これに対して、地表面ではNS方向の加速度最大値は0.5倍になり、UD方向の加速度最大値は約3倍に増幅する。

## 謝辞

本研究で使用した神戸市ポートアイランドにおける観測記録は、関西地震観測研究協議会（関震協）を通じて公開された、神戸市開発局によるものである。関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 後藤洋三、江尻讓嗣（大林組）：ノースリチ地震 Tarazona 強震観測点における地盤の増幅特性、軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム、発表論文集、pp.194~201、1994.10.
- 2) 西居昭彦：直下型地震時の上下動成分による構造物および剛体の応答に関する研究、金沢大学修士論文、pp.10~22、1992.