

### 1. はじめに

強震動予測では、予測すべき地震動の周波数帯域を明らかにしておくことが大切である。一般に加速度波形は比較的高い周波数成分が卓越し、速度波形は比較的低い周波数成分が卓越するので、それらの予測には比較的高い周波数成分と比較的低い周波数成分の評価がそれぞれ大切である。ここでは、液状化の予測等において重要なせん断応力についても同様の判断基準を提供することを目的として、鉛直方向に伝播する S 波によるせん断応力の周波数特性を検討した。

### 2. 半無限地盤の場合

図-1 に示す密度  $\rho$ 、S 波速度  $c$  の半無限地盤を鉛直方向に伝播する S 波を考える。鉛直下向きに  $z$  軸をとると、地盤内の変位と応力のフーリエ変換は次式で与えられる。

$$u = E e^{ikz} + F e^{-ikz} \quad (1)$$

$$\tau = i \rho c \omega \left( E e^{ikz} - F e^{-ikz} \right) \quad (2)$$

ここに  $E$  と  $F$  はそれぞれ上昇波と下降波の振幅、 $k = \omega / c$  は波数である。ここで、深さ  $z$  の位置におけるせん断応力のフーリエスペクトルを地表加速度のフーリエスペクトルで除したスペクトル比を求めると

$$\left| \frac{\tau(z)}{a_{surface}} \right| = \rho z \left| \frac{\sin(\omega z / c)}{\omega z / c} \right| \quad (3)$$

となる。式 (3) のスペクトル比はコーナー周波数  $f_c = c / (2\pi z)$  を持つ。コーナー周波数より低周波側では式 (3) の右辺は

$$\left| \tau(z) / a_{surface} \right| = \rho z \quad (4)$$

に漸近する。一方、コーナー周波数より高周波側では式 (3) の右辺は

$$\left| \tau(z) / a_{surface} \right| = \rho c / \omega \quad (5)$$

で包絡され、 $\omega^{-1}$  に比例して減少する。図-2 は相異なる  $z$  に対して式 (3) のスペクトル比を図示したものである。ここでは  $c=100\text{m/s}$ 、 $\rho=2.0\text{t/m}^3$  とした。式 (4) の漸近線および式 (5) の包絡線も同時に示している。図-2 に示すように地盤内の十分に浅い位置 ( $z=1\text{m}$ ) では式 (3) のスペクトル比は 10Hz 以下でフラットな特性を示す。すなわちせん断応力の周波数特性は地表加速度の周波数特性に近い。一方地盤内の十分に深い位置 ( $z=40\text{m}$ ) では 0.4Hz 以上のすべての周波数帯域で式 (3) のスペクトル比は  $\omega^{-1}$  に比例して減少する。すなわちせん断応力の周波数特性は地表速度の周波数特性に近い。図-3 に地表加速度として八戸波 (NS) を与えた場合の  $z=1\text{m}$  および  $z=40\text{m}$  におけるせん断応力のフーリエスペクトルを示す。これらのスペクトルを地表加速度および速度のフーリエスペクトル (図-4) と比較すれば、 $z=1\text{m}$  ではせん断応力の周波数特性は地表加速度の周波数特性に近く、 $z=40\text{m}$  ではせん断応力の周波数特性は地表速度の周波数特性に近いことがわかる。

### 3. 水平成層地盤の場合

同様の議論が水平成層地盤についても成立することを表-1 のモデル地盤について確認する。モデル地盤の三カ所 ( $z=8\text{m}$ ,  $16\text{m}$ ,  $32\text{m}$ ) におけるせん断応力のフーリエ変換を地表加速度のフーリエ変換で除したスペクトル比を図-5 に示す。スペクトル比は行列計算で求めた。区間  $[0, z]$  の平均密度と平均 S 波速度 (表-1) を用いて式 (4) および式 (5) の直線を求め図中に示したが、これらはそれぞれ低周波側の漸近線と高周波側の包絡線となっており、せん断応力のスペクトル特性は半無限地盤の場合と同じであることがわかる。

### 4. まとめ

地盤を鉛直方向に伝播する S 波によるせん断応力の周波数特性を検討した結果、次のことがわかった。

任意の深さにおけるせん断応力を地表加速度で除したスペクトル比はコーナー周波数を持ち、コーナー周波数より低周波側ではフラット、高周波側では  $\omega^{-1}$  に比例して減少する。

せん断応力の周波数特性は深度に依存する。地盤の浅い位置ではせん断応力の周波数特性は地表加速度の周波数特性に近く、深い位置では地表速度の周波数特性に近い。

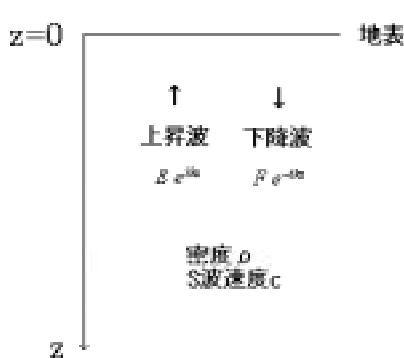


図-1 半無限地盤内の上昇波と下降波

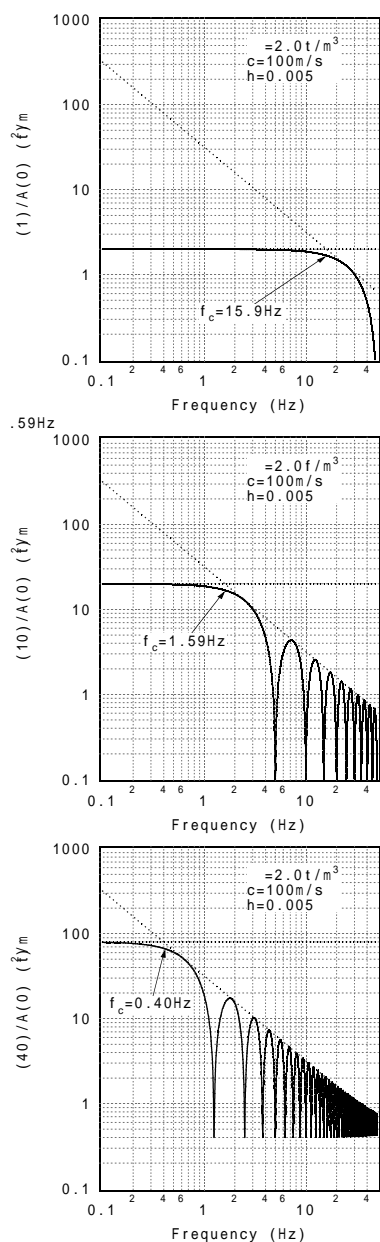


図-2 相異なる  $z$  に対して式 (3) のスペクトル比を図示したもの.  $c=100$  m/s,  $\rho=2.0t/m^3$  とした. 式 (4) の漸近線および式 (5) の包絡線も同時に示す. 上から  $z=1m, 10m, 40m$ .

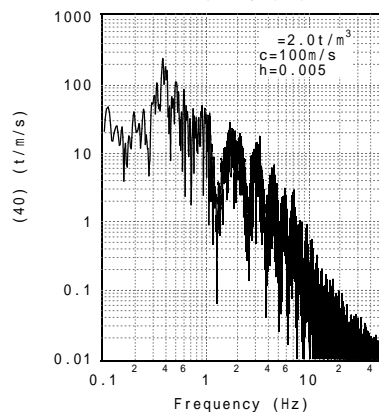
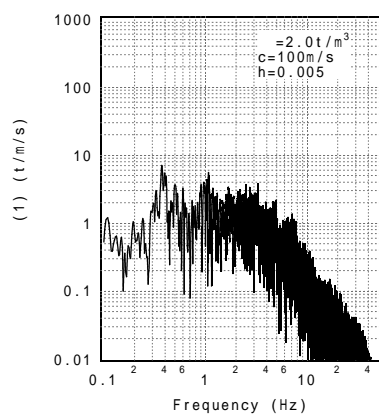


図-3 地表加速度として八戸波 (NS) を仮定したときの地中のせん断応力のフーリエスペクトル. 上から  $z=1m, 40m$ .

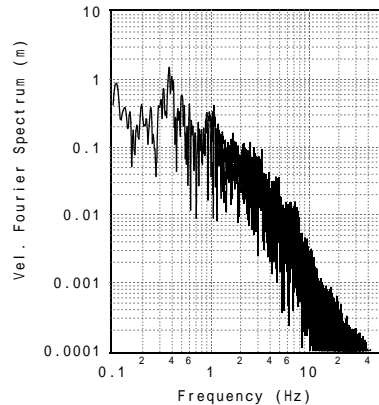
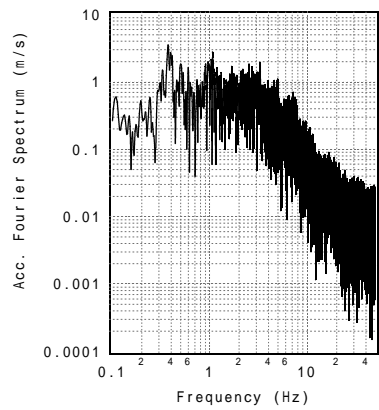


図-4 八戸波 (NS) の加速度フーリエスペクトル (上) と速度フーリエスペクトル (下)

表-1 モデル水平成層地盤

層厚 (m)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	S波速度 (m/s)	減衰定数
4	1.8	155	0.005
4	1.8	144	0.005
1	1.6	155	0.02
4	1.8	174	0.005
3	1.8	197	0.005
1	1.8	197	0.005
11	1.6	131	0.02
2	1.6	174	0.02
2	1.8	249	0.005
0-8m平均	1.8	149	-
0-16m平均	1.8	162	-
0-32m平均	1.7	154	-

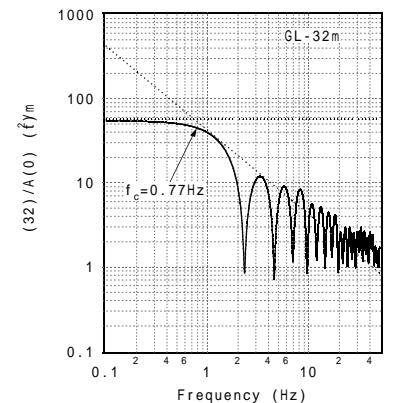
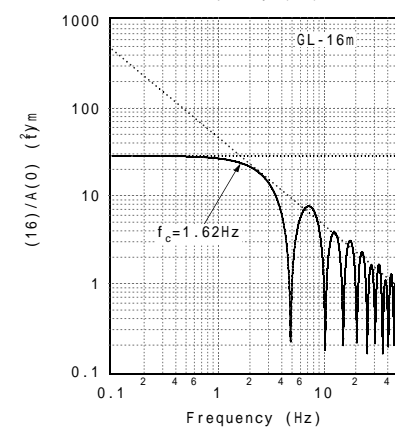
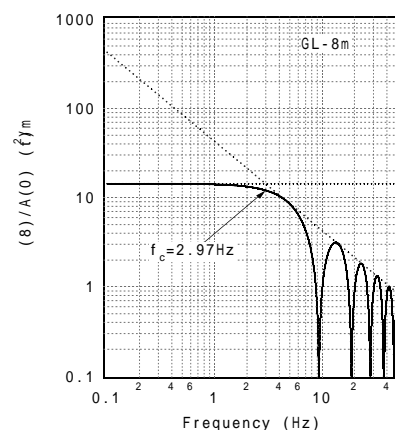


図-5 モデル水平成層地盤に対して求めた式 (3) のスペクトル比と式 (4) の漸近線および式 (5) の包絡線.