

I - 6

鉛直アレー強震記録を用いた地盤の剛性および減衰特性の時間変動

東北工業大学	学生会員	○吉田	勝
々	正会員	神山	眞
々	正会員	松川	忠司

1 はじめに

1995 年兵庫県南部地震により様々な災害が起った。中でもポートアイランドでは液状化に起因する被害が多く発生した。一方ポートアイランドでは 0m、16m、32m、83m の各深さに地震計が設置されており、この鉛直アレー観測システムで本震及びいくつかの余震記録が得られた。これらの記録には液状化に伴う地盤物性の変化による影響が存在すると考えられる。本研究はポートアイランド鉛直アレー記録を用いて地盤のせん断剛性、減衰定数の時間変動について考察したものである。

2 せん断剛性と減衰特性の算定方法

図 1 にポートアイランドでの鉛直アレー観測システムの概要を地盤資料とともに示す。図 1 に示すように、このシステムにより 4 つの異なる深さで加速度記録が得られている。本研究では、これらの加速度記録から各加速度計の中間深さでせん断応力、せん断ひずみを算定し、これからせん断剛性、減衰定数の時間変動を評価した。いま、地震動はせん断波（S 波）の鉛直伝播により生じると仮定する。このとき運動方程式は次式ようになる。

$$\rho(z) \frac{\partial^2 u(t, z)}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau(t, z)}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 $\rho(z)$ は密度、 $u(t, z)$ は変位、 $\tau(t, z)$ はせん断応力、 t は時間、 z は深さ

ここで、地盤は非粘性履歴減衰を有すると仮定すると式（1）のせん断応力はせん断ひずみと複素数を介して結ばれ、次式のようにになる。

$$\tau(t, z) = G(t, z) \{1 + i2h(t, z)\} \gamma(t, z) \quad (2)$$

ここに、 $\gamma(t, z)$ はせん断ひずみ、 $G(t, z)$ はせん断剛性、 $h(t, z)$ は減衰定数。

ここで、式（2）のせん断応力は式（1）を z に関して積分して実測加速度記録から求めることができる。このとき、加速度は各加速度計間で線形補完した。一方、せん断ひずみについても実測加速度記録から変位記録を求め、これを利用して各加速度計間の中間深さで平均ひずみとして算定できる。このように、式（2）のせん断応力、せん断ひずみは実測記録から算定可能であるが、式（2）は複素数表示となっているので、何らかのテクニックを労しないとせん断剛性、減衰定数は評価できない。本研究では、このテクニックとしてコンプレックスエンベロップ¹⁾を用いた。

いま、せん断応力 $\tau(t, z)$ 、せん断ひずみ $\gamma(t, z)$ のそれぞれのコンプレックスエンベロップ $T(t, z)$ 、 $\Gamma(t, z)$ は次のように表される。

$$T(t, z) = \tau(t, z) + iH[\tau(t, z)] \quad (3)$$

$$\Gamma(t, z) = \gamma(t, z) + iH[\gamma(t, z)] \quad (4)$$

ここで i は虚数単位、 $H[\]$ はヒルベルト変換

そこで、これらのコンプレックスエンベロップ $T(t, z)$ 、 $\Gamma(t, z)$ を $\tau(t, z)$ 、 $\gamma(t, z)$ に代わって、式（2）に代入するとせん断剛性、減衰定数は次のよう求めることができる。

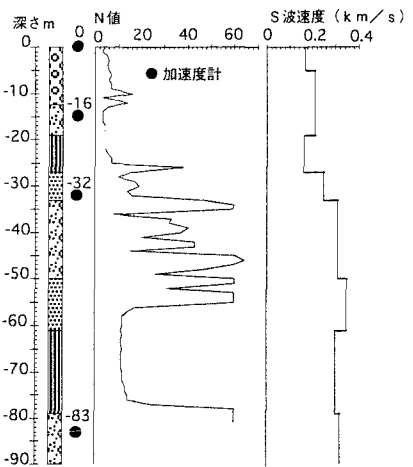


図 1 鉛直アレー配置図と地盤構造

$$h(t, z) = \frac{1}{2} \tan\{\phi(t, z) - \psi(t, z)\} \quad (5)$$

$$G(t, z) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2h(t, z))^2}} \frac{|T(t, z)|}{|\Gamma(t, z)|} \quad (6)$$

$$T(t, z) = |T(t, z)| \exp\{i\phi(t, z)\} \quad (7)$$

$$\Gamma(t, z) = |\Gamma(t, z)| \exp\{i\psi(t, z)\} \quad (8)$$

以上がせん断剛性、減衰定数の時間変動を求める方法の概要であるが、ここではその適用に当たり、加速時計間隔の大きさに伴う空間エイリアジング誤差を避けるため各記録の SN 比に応じたバンド幅を持つバンドパスフィルターを原加速度記録に施した。また、求められた $G(t, z)$ 、 $h(t, z)$ の時間変動はウィンドウ幅 1 秒の移動平均を加えスムージングした。

3 セン断剛性、減衰定数の時間変動の算定結果

図 2 は各加速度計の中間深さで算定されたせん断剛性の時間変動を本震の EW 成分についてプロットしたものである。ここでは、せん断震動が卓越すると考えられる時刻 13.1 秒からの変動が示してある。同様に、減衰定数の変動が図 3 にプロットされている。こちらの図で特徴的なことは、最も浅い深さ 0m~16m の層においてせん断剛性、減衰定数とも時間変動が著しく、それに比較して他の層、とりわけ最も深い 32m~83m の層での変動が相対的に小さいことである。

一方、地表での最大加速度が 31 ガルであった余震記録を用いて同様に評価したせん断剛性と減衰定数の時間変動が図 4、図 5 にプロットされている。これを見ると、余震ではせん断剛性と減衰定数の時間変動が小さく、安定した性状を示している。

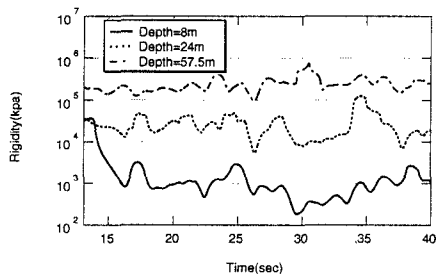


図 2 各深さのせん断剛性の時間変動（本震）

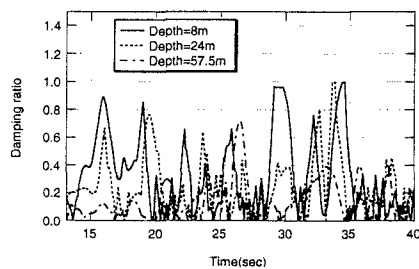


図 3 各深さの減衰定数の時間変動の比較（本震）

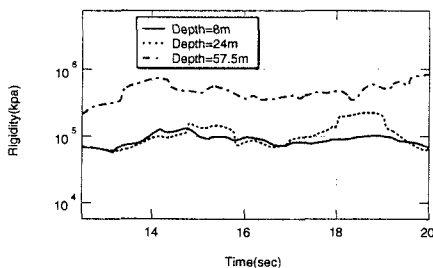


図 4 各深さのせん断剛性の時間変動（余震）

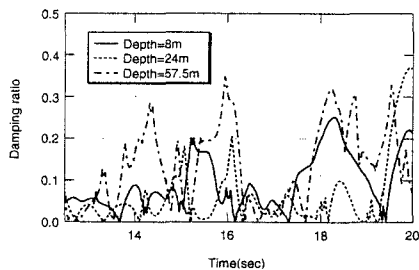


図 5 各深さの減衰定数の時間変動の比較（余震）

4 結論

本震と余震の記録から求められたせん断剛性と減衰定数の比較から本震においては表層の非線形化が著しく、これが約 5 秒間という短時間で生じたことが推定される。一方、ここで取扱った余震程度の震動レベルでは線形応答が卓越したと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり貴重なデータを提供して頂いた関西地震観測研究協議会に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Farnbach, J.S. 1975: The complex envelope in seismic signal, BSSA, Vol.65, No.4, pp.951-962