

強震記録からみた地盤の剛性および ダンピングの非定常変動

吉田 勝¹・神山 眞²・松川忠司³

¹学生会員 工修 東北工業大学大学院生 土木工学専攻 (〒982 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35 番 1 号)

²正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35 番 1 号)

³正会員 東北工業大学助手 工学部土木工学科 (〒982 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35 番 1 号)

兵庫県南部地震の際、液状化に伴う甚大な被害がポートアイランドで発生した。同島では鉛直アレー地震観測システムが設置されており、異なる4つの深さに設置された加速度計により本震と幾つかの余震の記録が得られた。本研究は、これらの観測記録を用いて地盤剛性ならびにダンピングの非定常変動を算定する方法について述べたものである。ここでは、運動方程式のせん断応力とせん断ひずみにコンプレックスエンベロップの手法を導入することでせん断剛性とダンピングの時間変動を求めている。この結果によれば、本震の主要動において地盤表面に近い層のせん断剛性がファクター50程度の急激な減少を示すとともに、ダンピングは複雑に変動していることがわかった。一方、余震では、せん断剛性、ダンピングともに時間的に安定した性状がみられた。

Key Words: : Rigidity modulus, damping factor, non-stationary variation, strong motion, complex envelope, stress, strain, 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake

1 はじめに

1995年兵庫県南部地震により様々な被害が発生した。これらの被害の中で、筆者らは特にポートアイランドに設置された鉛直アレー観測記録とここで発生した液状化現象の関心に着目した。幸いポートアイランドの鉛直アレー観測システムでは、本震、余震ともに記録が得られている。この鉛直アレー観測システムは4つの異なる深さに3成分の加速度計が設置される鉛直アレーを構成しており、その全ての地震計で記録が得られている。得られた記録には、液状化現象に伴う詳細な特性が含まれていると考えられる。

本研究は、これら記録から時々刻々変動する地盤物性のせん断剛性とダンピングの非定常特性の解析手法及びその結果について考察したものである。

2 せん断剛性とダンピングの算定方法

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、

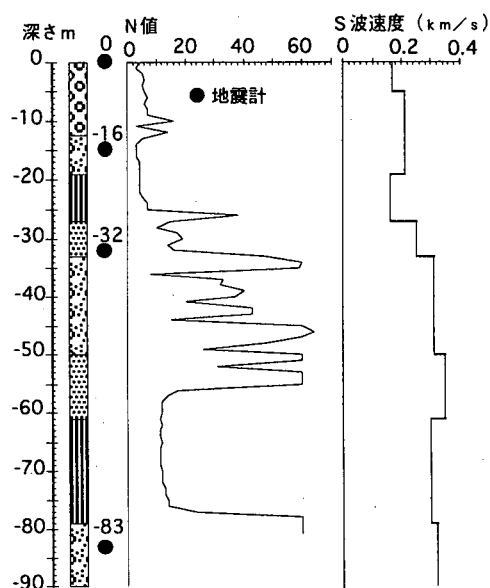


図-1 鉛直アレー配置図と地盤構造

このシステムにより 0m, 16m, 32m, 83m の異なる4つの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、ダンピング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、次式ようになる。

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

ここに、 $\gamma(t, z)$ はせん断ひずみ、 $G(t, z)$ はせん断剛性、 $h(t, z)$ はダンピング。

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間した。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、ダンピングは評価できない。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、ダンピングは次のように求めることができる。

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

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

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

表-1 ポートアイランド強震記録一覧

地震	マグニチュード	震源（北緯）	震源（東経）	震源深さ(km)
本震	7.2	34.6° N	135.0° E	20
余震 1	4.7	34.6° N	135.0° E	19
余震 2	4.5	34.7° N	135.2° E	15
余震 5	4.2	34.7° N	135.2° E	18
余震 6	4.9	34.5° N	135.2° E	13

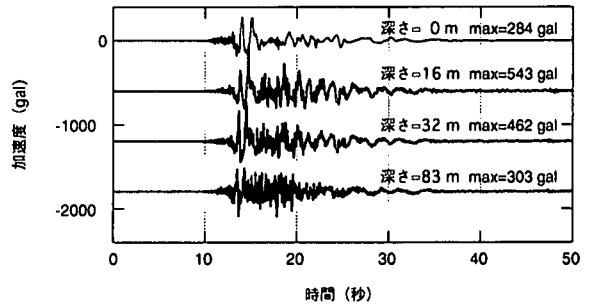


図-2 本震の加速度記録（EW 成分）

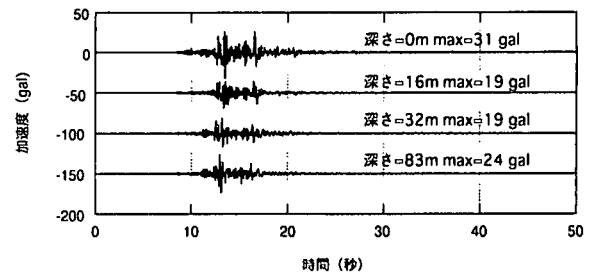


図-3 余震 1 の加速度記録（EW 成分）

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

以上がせん断剛性、ダンピング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、加速度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のバンドパスフィルターを原加速度記録に施した（本震に対し 1.5Hz～0.1Hz、余震に対し 3.0～0.5Hz）。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、ダンピングの時間変動の算定結果

表-1 には本解析に用いた地震の一覧を示す。この表には地震の諸元を示した。この論文では紙面の関係で本震と余震 1 の記録に対する解析結果を示す。

ポートアイランドで記録された EW 成分の波形を図-2、図-3 に示す。図-2 は本震で得られた記録を図-3 には余震 1 で得られた記録を示す。両図とも上から順に深さ 0m、16m、32m、83m で得られた記録を示した。

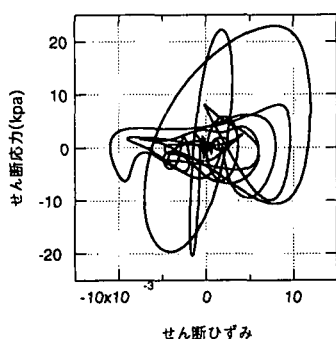


図-4 応力とひずみのオービット
(本震, EW 成分, 深さ 8m)

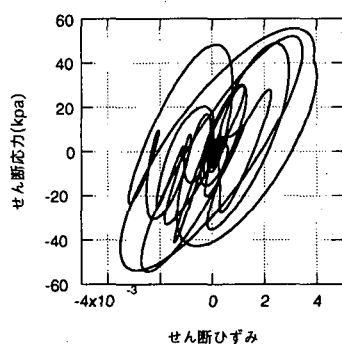


図-5 応力とひずみのオービット
(本震, EW 成分, 深さ 24m)

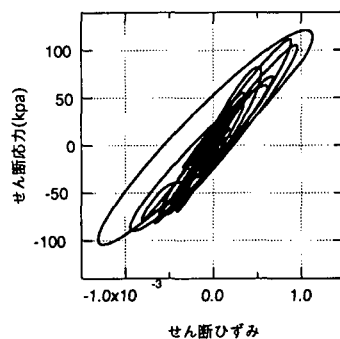


図-6 応力とひずみのオービット
(本震, EW 成分, 深さ 57.5m)

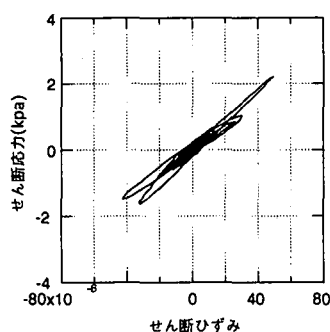


図-7 応力とひずみのオービット
(余震 1, EW 成分, 深さ 8m)

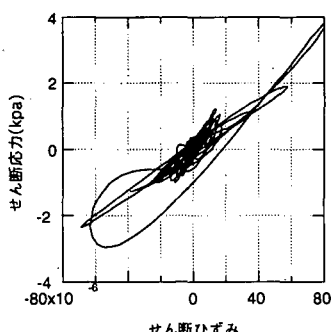


図-8 応力とひずみのオービット
(余震 1, EW 成分, 24m)

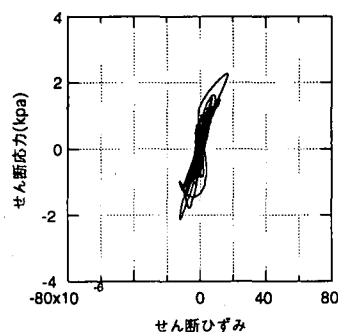


図-9 応力とひずみのオービット
(余震 1, EW 成分, 深さ 57.5m)

図-4～図-6 に本震 EW 成分に関する応力とひずみのオービットの図を示す。また図-7～図-9 には余震 1 のオービットの図を示す。この図から見ても分かるように大変複雑に変動している。

図-10 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、ダンピングの変動が図-11 にプロットされている。こ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、ダンピング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 32～83m の層での変動が相対的に小さいことである。さらに、手法の検証として図-12～図-14 には、本解析で算定したせん断剛性と減衰比の結果と別途に相互相関より求めたせん断剛性、減衰比を算定したものを示した。この図-12 の深さ 8m での算定結果を比較しても分かるように本手法を用いた場合のせん断剛性が著しく減少しているのが見てとれる。又減衰比も主要動で 0.7 付近まで上昇を示しており非線形性の強いことが分かる。次に図-13 の深さ 24m で算定した結果を見ていただきたい。減衰比は図-12 と同程度の変動を示しているが、せん断剛性が図-12 と比べても大きく比較的安定している事が分かる。

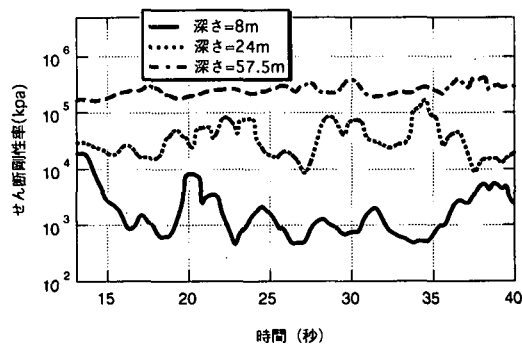


図-10 各深さのせん断剛性の時間変動の比較
(本震, EW 成分)

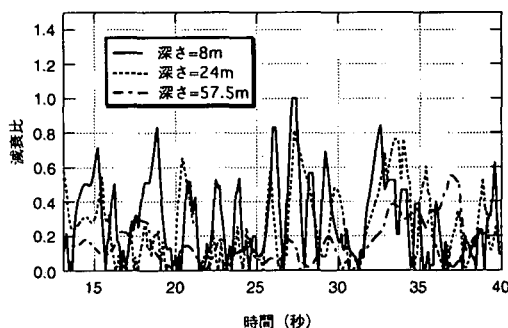


図-11 各深さの減衰比の時間変動の比較
(本震, EW 成分)

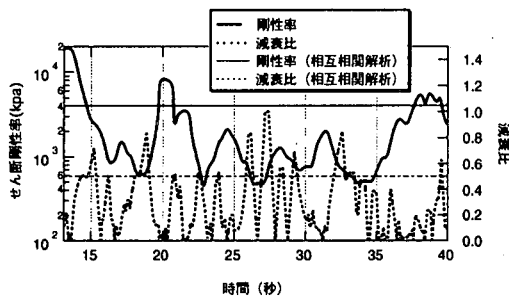


図-12 セン断剛性と減衰比の時間変動
(本震, EW 成分, 深さ 8m)

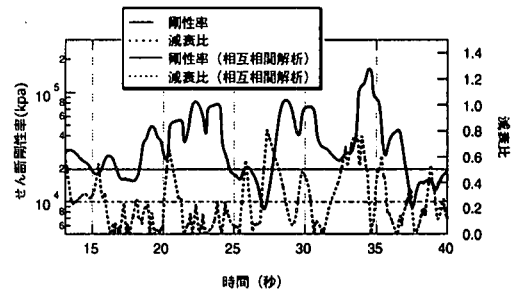


図-13 セン断剛性と減衰比の時間変動
(本震, EW 成分, 深さ 24m)

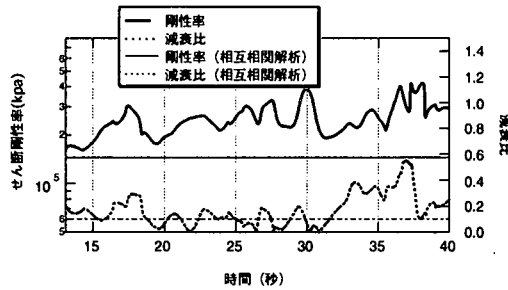


図-14 セン断剛性と減衰比の時間変動
(本震, EW 成分, 深さ 57.5m)

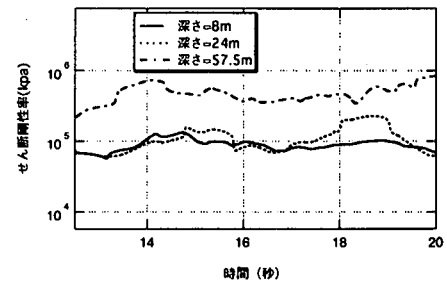


図-15 各深さのセン断剛性の時間変動の比較
(余震 1, EW 成分)

次に図-14 は、深さ 57.5m での算定結果である。この図は図-12、図-13 と比較してもセン断剛性が大きく、減衰比も 0.3 程度と小さく安定していることが分った。基本的に相互相関で算定したものは剛性の平均値であり、本手法を用いることで時間ごとの複雑な変動を追従する事が分かる。このことから、本手法は非線形性と非定常性の強い観測記録に対して有効であることが分った。

一方、地表での最大加速度が 31 ガルであった余震 1 の記録を用いて同様に評価したセン断剛性とダンピングの時間変動が図-15、図-16 にプロットされている。これを見ると、余震ではセン断剛性とダンピングの時間変動が小さく、安定した性状を示している。

4 結論

本研究は、ポートアイランドで得られた 1995 年兵庫県南部地震の本震と余震の強震記録を用いて、地盤物性の変動を考察した。ここでは、特に地盤物性の非定常変動に焦点を合せ、得られた記録から直接地盤物性の算定を試みる手法を考案した。ここで得られた結論をまとめると以下のようなものである。

1) ポートアイランドの本震と余震の記録に本手法を用いて解析することにより、本震記録において特に深さ 16m 以浅でセン断剛性が約 5 秒間でファクター 50 程度の急激な減少と減衰比の増加により非線形応答が顕著に見られ、余震では線形応答が主に見られた。

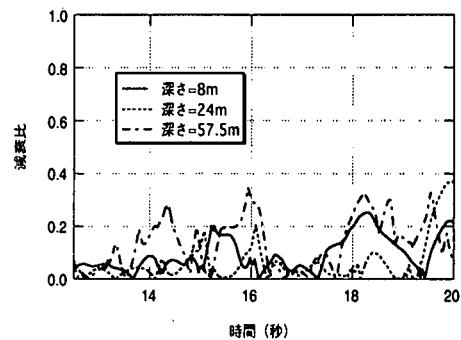


図-16 各深さの減衰比の時間変動の比較
(余震 1, EW 成分)

2) 応力とひずみの時刻歴にコンプレックスエンベロップの概念を導入する手法は、時間変動ごとの非定常変動を的確にとらえている。そのため割線剛性と減衰比の逆解析手法として有効であることが分った。

3) 本手法を用いた結果を検証するために別途相互相関より求めたセン断剛性、減衰比を比較しても比較的良く対応しており有効であることが分った。

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協議会に深く感謝申し上げます。

参考文献

1) John S. Farnbach: The complex envelope in seismic signal analysis. BSSA, Vol. 65. pp. 951-962. 1975