

I - 13

1995年兵庫県南部地震の鉛直アレー強震記録にみられる各種パラメータの時間変動

東北工業大学 学生員 ○吉田 勝
 タ 正 員 神山 眞
 タ 正 員 松川忠司

1. はじめに 1995年兵庫県南部地震では震源近傍でいくつかの貴重な強震記録が得られた。このうち、ポートアイランドで得られた鉛直アレー強震記録は強震動に及ぼす震源での破壊過程、波動特性および表層地盤の影響を明らかにする上でとりわけ重要である。特に、付近では広範な液状化発生が認められており、液状化に伴う地盤物性の変動がこれらのアレー記録に含まれていると考えられる。近年、表層地盤の非線形応答の重要性が論議されている中、鉛直アレーであるが故に、これらの記録は貴重な材料を提供していると思われる。本文は地盤物性の非定常な時間変動を中心として、ポートアイランドの鉛直アレー強震記録にみられるいくつかのパラメータの時間変動について論じたものである。

2. ポートアイランドの強震記録とその非定常特性

図1にポートアイランドの鉛直アレー観測地点の地盤構造と地震計配置を示す。図に示すように深さ0、16、32、83mにそれぞれ水平2成分、鉛直1成分の加速度計が設置されており、兵庫県南部地震の本震の際に完全な強震記録が得られた。さらに、その後のいくつかの余震記録も得られている。図2はこのうち、本震の各深さでのNS成分記録を示したものである。地表面での記録の加速度振幅が地下のそれより小さくなるとともに、波形も大きく異なっており、明らかに液状化に起因した非線形応答の痕跡がみられる。図3は地表0mの深さ83mに対するNS成分記録の主要動におけるフーリエスペクトルのスペクトル比を求めたものである。同図には本震でのスペクトル比とともに代表的な余震でのそれも示されている。このようなスペクトル比は地表と深さ83m間の近似的な周波数応答関数（増幅スペクトル）とみなされるが、余震での増幅スペクトルが安定した増幅特性をしめすのに対して本震でのそれは大きく異なり、本震の際には弾性挙動からはずれた非線形応答が存在したことがスペクトル比からも裏付けられる。そこで、増幅特性の非線形性と非定常性をみるため地表面NS成分記録の非定常スペクトルを求めたのが図4である。これをみると、周波数特性の時間変動が一目瞭然である。例えば、図3の余震記録のスペクトル比で認められる約1.2秒、0.5秒、0.25秒の卓越周期は図4の非定常スペクトルで主要動が始まる時間1.5秒付近には確かに存在している。すなわち、余震記録のような弱震動で存在する卓越周期は本震の強震動においても主要動の始まった段階では確実に存在する。ところが、本震ではその後の主要動の継続の中で周期1秒以下の卓越周期が突然消失し、かつ周期1.2秒の卓越周期は急激に約2秒まで伸びて、この周期の卓越が約10秒間継続していることが図4の非定常スペクトルから読み取れる。そして、このような急激な周波数変動の時刻は記録の最大加速度（-341ガル）が生じている時刻と一致している。なお、図4では主要動の周期1秒以上の周波数変動に分散性もみられる。

3. 強震記録により推定される地盤物性の時間変動

上述のようにポートアイランドの強震記録には表層地盤の非線形応答の影響が明瞭にみられる。これは震動の大きな変動に伴う地盤物性の変化に起因していると考えられる。そこで、強震記録から地盤物性の時間変動を求めてみる。最近では実記録から地盤物性の変動を求める試みがいくつかなされている^{1)・2)}。これらは、いずれも強震記録から応力、ひずみを求め、それらの履歴から剛性、減衰比を推定するものである。ここでは、このような方法とは異なり、波動方程式の直接的な操作から物性の時間変動を求める。この方法は地表面を含め任意の深さでの物性変動が求められる利点がある。いま、地盤震動が一般に成立するとされるS波重複反射によるものとする。このとき、地盤が非粘性履歴減衰を有すると次式が成立する。

$$\rho \frac{\partial^2 u(t, z)}{\partial t^2} = G(1 + i2h) \frac{\partial^2 u(t, z)}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここに、 $u(t,z)$ 、 ρ 、 G 、 h 、 t 、 z 、 i はそれぞれ変位、密度、せん断剛性、減衰比、時間、深さの座標、虚数単位である。式(1)から G 、 h の時間変動を求めるとはいくつかの工夫が必要である、左辺の加速度は得られているが、右辺の変位の座標に関する2階微分を求めなければならない。そこで、ポートアイランドの各深さの加速度記録からバンドパスフィルター(コサインテーパ付で帯域0.1~25HZ)を施して変位記録を求めた。さらに、2階微分を近似度4の差分表式に変換するとともに、各深さの実測変位記録にLagrangeの補間法(深さ方向に4点)を適用して右辺の座標に関する2階微分を近似的に求めた。このように、主なる項は求められるが、式(1)の最も困難な点は G 、 h の組み合わせが複素表示されていることである。この困難を解決するため、ここでは式(1)の加速度、座標の2階微分の時間変動のHilbert変換を求め、これを虚数項としたComplex Envelopeを用いた。このようなComplex Envelopeの概念を導入することにより時間領域においても複素数処理が可能となる。図5はこのような処理により求められたポートアイランド地表面(深さ0 m)のNS成分におけるせん断剛性 G と減衰比 h の時間変動を加速度記録の時間変動とともに示したものである。図5から、せん断剛性は初期微動の始まりから一端大きくなり、その後急激に減少する極めて非正常性が高い複雑な変動することがわかる。また、減衰比の変動はせん断剛性よりさらに複雑な非正常性を示している。

(参考文献) 1) 風間他: 第23回地震工学研究発表会講演集, P.185-188、2) Elgamal et al.: Preprint Volume of IS Tokyo, p.51-

90

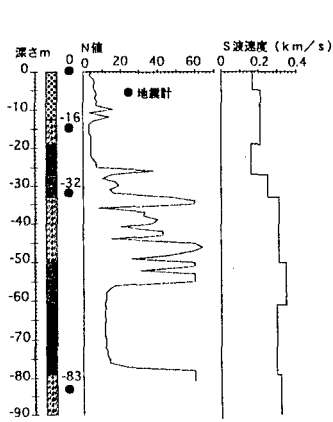


図1 ポートアイランド地盤構造

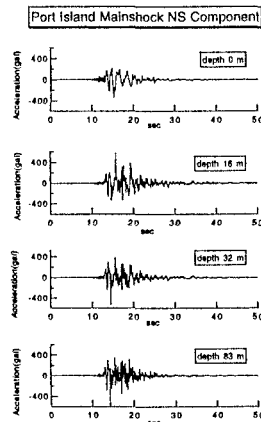


図2 加速度強度記録(NS成分)

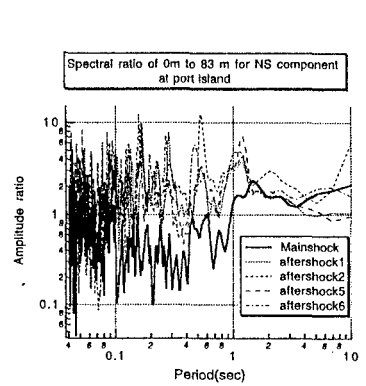


図3 スペクトル比

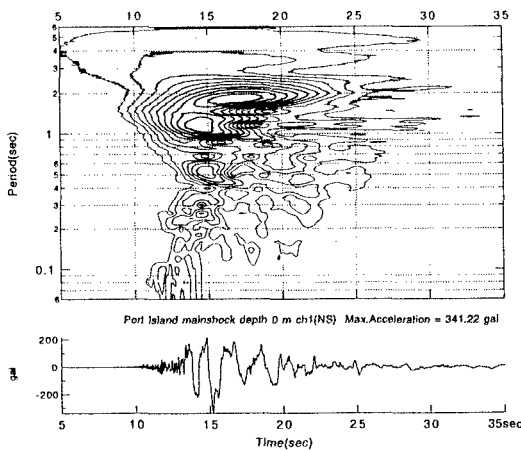


図4 非正常スペクトル(深さ0 m, NS成分)

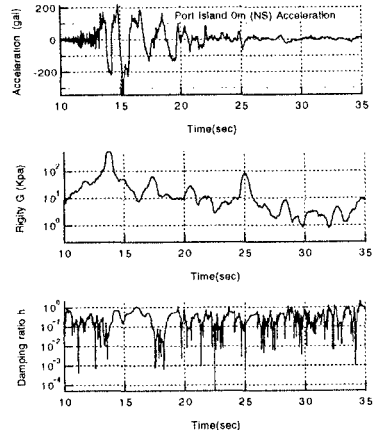


図5 せん断剛性 G 、減衰比 h の時間変動(深さ0 m, NS成分)