

兵庫県南部地震記録(本震、余震)による埋立地盤の非線形性の推定

電力中央研究所 正会員○佐藤 清隆
 同上 正会員 国生 剛治

1. 目的

神戸市ポートアイランドのボアホール鉛直アレー観測で得られた兵庫県南部地震の本震(マグニチュード7.2)および余震記録を用いて、その増幅特性に適合する地盤物性(S波速度、P波速度、Q値)を同定し、PS検層の結果と比較することによって非線形効果を推定する。

2. 方法

埋立地盤で構成されるポートアイランドでは表層部分で液状化現象が確認された。神戸市ではこの地域で地表(GL0m)およびボアホール内(GL-16m, -32m, -83m)の鉛直アレー観測を行っており、本震およびその直後の余震の記録を得た。本報告では、これらの記録の地盤の増幅特性を地表と地中の測点間のフーリエスペクトル比で求め、1次元波動論より求められる地盤の伝達関数との差を最小にするパラメータ(S波速度、P波速度、Q値)をシステム同定より解析した。同定に際しては、PS検層の結果を初期物性としHardi n- Dr nei bichモデルによる歪依存性を考慮した初期値を用い、埋立土層(GL-4m~-17.5m)は1/4、沖積層(GL-17m~-36m)は1/2、洪積層(GL-36m~)は3/4の剛性低下を仮定し、最大減衰定数を20%と仮定して求めた。P波速度の本震による同定のみP波が卓越する主要動(5秒間)を対象とし、すべて20秒間の記録を対象とした。

3. 結果

システム同定

図-1に示すS波速度の同定値をみると、本震ではGL-29m以深の沖積砂層、洪積層では初期値に比べて10%低下の収束を示すのに対し、それ以浅の沖積粘土層では20%低下、埋立土層においては表層部分を除いて50%以上の低下を示している。余震記録においては、この埋立土層のみS波速度の低下が認められる。したがって、本震による地盤の剛性低下は洪積層を含む表層全体で認められ、埋立土層では液状化を伴うため他の層をはるかに上回る非線形性を生じたことが推定される。一方、P波速度は本震では地下水面(GL-4m)以下でほぼ1km/s以上の値を示すのに対し、余震では表層を除く埋立土層のみP波速度が50%以上の低下を示す。

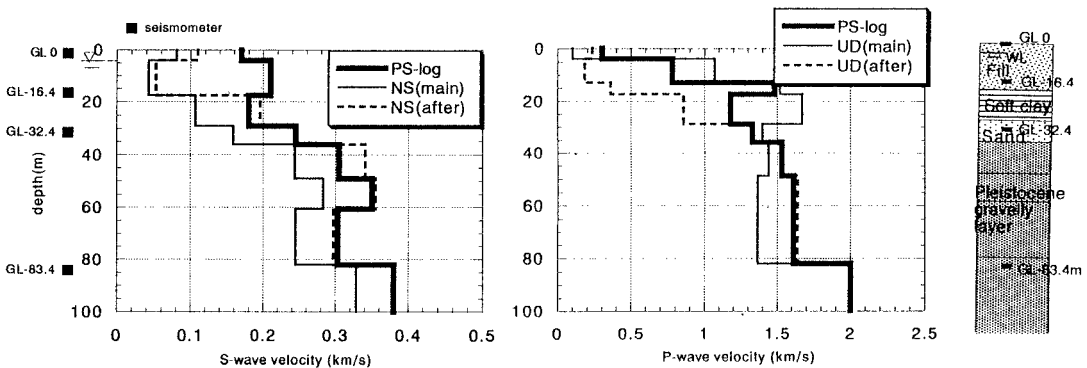


図-1 PS検層および同定による観測地盤の速度構造分布

同定モデルの一次元線形解析

同定モデルを用いて一次元線形解析を行い、水平NS成分の加速度時刻歴の観測記録と重ねて図示した結果、図-2に示すように地中の応答はほとんど一致しているのに対し、地表の波形は主要動の3波までは一致しているもののそれ以降は波動の時間差が大きくなっている。これは、加速度が最大となる時刻6.2秒以後、時間の経過とともに地盤の非線形化が進行していることを示している。したがって、同定モデルによる線形解析は地表の波形の後半において適用の限界を超えているが、本震の継続時間が短いため地盤の剛性低下を考慮した線形解析で主動部分を十分再現できている。図-3のように同定モデルの地表（GL0m）と地下（GL-83m）とのスペクトル比を観測値と比べると、0.3Hz～2Hzの範囲で一致し、0.7Hzで最大となる増幅特性を示す。

地盤の深さ方向の最大加速度分布

本震の水平動（NS,EW）、上下動（UD）の地盤の深さ方向の加速度分布を、一次元線形解析の結果と観測値とを図-4に比較して示す。ここで地中GL-16mの上下動観測値は約800galを示したが、波形をみるといくつか認められるヒゲ状のひとつで他の成分や測点で見られない現象であることから誤動作と考えて修正すると、観測値は解析値とほとんど一致し同じ分布傾向を示す。洪積地盤中（GL-83m）でNS 660gal、EW 300galを示す水平2成分の最大加速度は、埋立土層以深では地表に向かって増幅する傾向があるが、埋立土層の非線形性による減衰効果のため地表では両方ともほぼ同じ約350galの値を示している。他方、本震の上下動は、埋立土層においても水の速度1.5km/sに近いP波速度を示し、上下方向の剛性はすぐには低下しないため、地表550galの増幅傾向を示し非線形の影響が認められない。

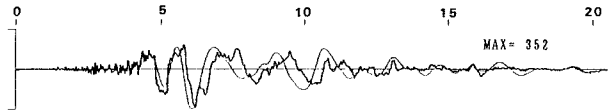


図-2 地表（GL 0m）NS成分の加速度波形
（太線が観測波、細線が解析波）

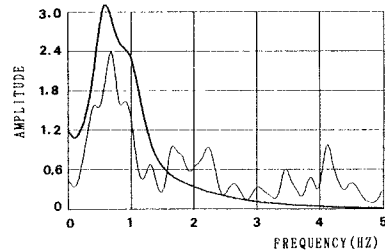


図-3 地表（GL 0m）と地中（GL-83m）との間の増幅関数
（太線が解析値、細線が観測値）

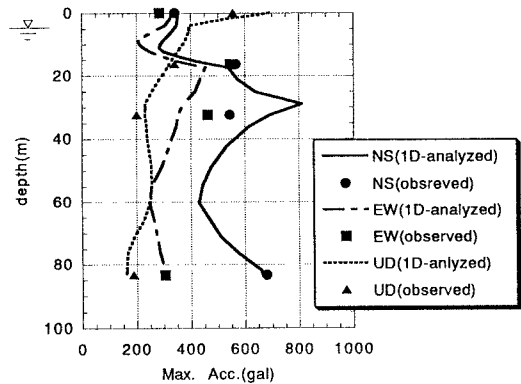


図-4 深さ方向の最大加速度分布

4.まとめ

- ①本震は、水平せん断剛性のみ剛性低下が認められ、これを考慮した線形解析で再現できる。
- ②本震から2分後の余震は、水平・上下とも埋立土層のみ剛性低下が認められた。
- ③地表の上下動の最大加速度が水平に比べて上回ったのは、上記の非線形効果の結果であり、洪積層では水平の最大値に比べて半分以下を示すことがわかった。

5.謝辞

本地震記録は、関西地震観測協議会により公開された神戸市の観測記録であり、解析においては（株）コノマの田沢氏、（株）吉沢技研の山田氏に協力いただき、ここに謝意を表明する。