

I-B93 観測地震波の入射波、反射波を用いた表層地盤でのエネルギー消費

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治
同 上 学生員 ○本山 隆一

1. はじめに

地震波の主要動は、基盤から入射する水平せん断波(SH波)が鉛直方向に伝播するという単純なモデルでかなり説明できる。このとき地震波は重複反射理論によって、基盤から入射して表層方向へ伝播し、表層で全反射して再び基盤方向へ伝播していく。波動が伝播していくとき、地盤が破壊したり、非線形化するとその部分では大きなエネルギーが消費される。波動によるエネルギーは、運動エネルギーとひずみエネルギーとの間でやりとりされながら伝播していくが、その全エネルギーは運動エネルギーとひずみエネルギーの和として考えられる。兵庫県南部地震のように非常に大きな地震の場合、ポートアイランドのような軟弱地盤ではかなり大きなエネルギーが消費されるであろうと考えられる。そこで本研究では、まず兵庫県南部地震の際に観測された加速度記録を重複反射理論を用いて入射波、反射波に分解して、それらの波動によるエネルギーを計算し、その差からどの程度地盤内でエネルギーが消費されるのかを検討した。

2. 波動によるエネルギーの算定方法

微小要素中を一方方向に伝播する波動によるエネルギーは、要素の運動エネルギーと、要素のひずみエネルギーの2つに分けて考えることができる。まず前者について考えると、微小要素(V_s をS波速度とすれば、微小要素の厚さは $V_s \Delta t$)がゼロから u までの変位によりなされる単位平面積あたりの仕事が結局は運動エネルギー E_d と等しくなることから、次式のように表される。

$$E_d = \int_0^u \rho V_s \Delta t \frac{d^2 u}{dt^2} du = \frac{1}{2} \rho V_s \Delta t \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \quad (1)$$

次に後者について考える。波動が伝播していくとき地盤にはひずみが生じ、それによってひずみエネルギーが生じる。地盤に働く応力を τ 、ひずみを γ 、せん断剛性を G とすると単位平面積あたりの弾性ひずみエネルギー E_e は次式のようになる。

$$E_e = \int_0^\gamma V_s \Delta t \tau d\gamma = \frac{1}{2} V_s \Delta t G \gamma^2 = \frac{1}{2} \rho V_s \Delta t \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、波動による全エネルギーは運動エネルギー(1)と弾性ひずみエネルギー(2)の和であるから、地震波が微小要素を通過する間($t=t_1 \sim t_2$)の波動による全エネルギー E は(3)式のようになる。

$$E = \rho V_s \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad (3)$$

3. 計算条件

本研究では、地震動の入射波と反射波によるエネルギーを求め、その差をとることで主に表層付近の地盤内でどの程度エネルギーが失われたのかを検討する。そのためにまず、鉛直アレー観測システムにより観測された加速度時刻歴のうち、地盤物性の非線形性の発揮度合いがそれほど大きくない、地表よりも深い位置で観測された2つの深度の観測波を文献1)の手法にならい、重複反射理論を用いて入射波と反射波に分解した。この分解された入射波、反射波を積分して求めた速度時刻歴と(3)式を用いて2つの深度におけるそれぞれの波動によるエネルギーを計算する。計算に用いる地盤条件は文献2)に基づいて作成し、物性値は本震時の非線形性を考慮した値を用いた。波形データは、兵庫県南部地震の際にポートアイランドで観測されたGL-32.4mとGL-83.4mの本震記録を地震計の設置誤差を考慮して方向修正し³⁾、さらに最大加速度が現れる主方向に回転(NS方向から時計方向に46度)させたものを用い計算を行った。また、入射、反射波を求める際全ての成分を用いて計算した場合、基線が大きくゆがんでしまうため今回は0.1Hz以下の成分を取り除いて計算した。

キーワード：エネルギー、入射波、反射波

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 TEL 03-3817-1799 FAX 03-3817-1803

4. 計算結果

図1, 2はそれぞれNS,EW方向について上段から順に、地表の観測波、エネルギーの時刻歴(GL-32.4m は細線、GL-83.4m は太線、また入射波によるものは点線、反射波によるものは一点鎖線、エネルギーの差、つまりエネルギー消費は実線)、入射、反射波の速度時刻歴(入射波は点線、反射波は実線)を示している。ここで速度は周波数領域で加速度を積分して求めた。まず、エネルギーの図を見ると最終的なエネルギー消費はNS, EW方向それぞれ GL-32.4m では約14($\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)、2($\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)、GL-83.4m では約18($\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)、3($\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)であることがわかる。ここで、この地盤内全体でのエネルギー消費はNSとEW方向で計算されたエネルギー消費の和である。したがって、GL-32.4m では16($\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)、GL-83.4m では21($\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)のエネルギー消費があったと考えられる。前者は埋土層の液状化や沖積層の内部減衰によるもので、前者と後者の差約5($\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)はGL-32.4m からGL-83.4m までの洪積層の内部減衰により消費されたものと考えられる。さらに図1, 2でGL-0mの実測加速度波形とエネルギーを比較すると、NS, EW方向ともSH波が卓越すると考えられる部分のうち4秒～7秒の間でエネルギー消費の増加率が特に大きくなっており、この間に埋土層の液状化が進んだものと推察される。

5. まとめ

地震により地盤内でどの程度エネルギーが消費されるのかを検討した。その結果、約16($\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m}^2$)のエネルギーがGL-32.4mよりも浅い地盤内で消費され、そのうち大半が埋土層の液状化と沖積層の非線形化によって消費されたものと考えられる。またP波、表面波が卓越すると思われる部分ではエネルギー消費はほとんど増加せず、水平動によるエネルギーの増加はSH波による影響が大きいことがわかった。

〈謝辞〉今回用いた地震データを提供していただいた関西地震観測協議会に感謝の意を表します。

〈参考文献〉1) 阪神淡路大震災地盤調査研究会(1998):同報告書、7-2神戸市ポートアイランド鉛直アレー地震観測記録を用いた入射波の分離、pp150-152、2) T.Kokusho et al.(1996):Nonlinear dynamic soil properties back-calculated from strong seismic motions during Hyogoken-Nanbu earthquake, 11th WCEE (Mexico)、3) 國生剛治他(1998):兵庫県南部地震のアレー観測における最大コヒーレンス法を用いた地震計設置誤差の評価、pp1107-1108、第33回地盤工学研究発表会

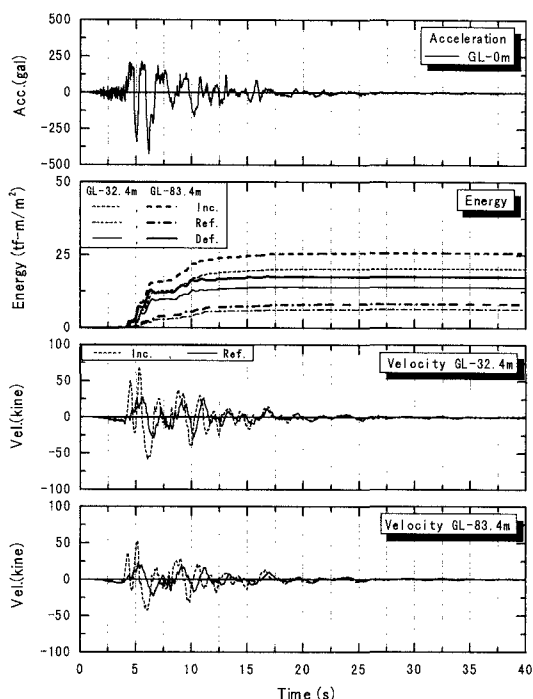


図-1 NS方向の時刻歴

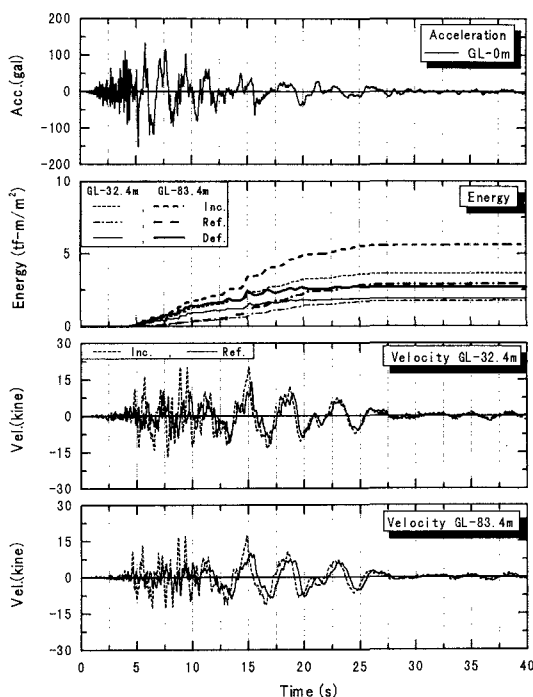


図-2 EW方向の時刻歴