

2001年広島県芸予地震における表層地盤のエネルギー収支

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治
 中央大学理工学部 学生会員 長尾 晋悟
 中央大学理工学部 学生会員 本山 寛

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一次元モデルで工学的には十分説明できる。重複反射理論によれば地震波は、まず基盤から入射して層境界で透過、反射を繰り返しながら表層方向に伝播し、地表で全反射して再び基盤方向に伝播していく。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大きなエネルギーが消費されるが、このエネルギー消費量は上昇波と下降波から理論的に求められる。1)本研究では、広島県芸予地震の際に防災科学技術研究所のKiK-netの鉛直アレーによって観測された加速度記録を重複反射理論によって上昇波、下降波に分解し、それによるエネルギーの流れを計算することにより、表層地盤内のエネルギー収支を評価することを試みた。

2.波動によるエネルギーの計算方法

地盤中を一方向に伝播する波動によるエネルギーEは、要素の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。従って、一方向への地震波が微小要素通過する間($t=t_1 \sim t_2$)の波動による全エネルギーは次式のように表される¹⁾。 $E = \rho V_S \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt$ (1) ここに ρ = 土の密度、 V_S = S波速度、 $\frac{du}{dt}$ = 地震動の速度である。

本研究では、地震動の上昇波と下降波によるエネルギーを式(1)により求め、その差をとることで表層付近の地盤内でどの程度のエネルギーが消費されたのかを検討する。そのためにまず、鉛直アレーにより観測された基盤と表層での加速度時刻歴に基づき重複反射理論を用いて上昇波と下降波に分解する。この分解された加速度波を積分して求めた速度波と式(1)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。加速度時刻歴を積分して上昇、下降速度時刻歴を求める際には基線が大きくゆがんでしまう事を避けるため0.1Hz以下の長周期成分を取り除いて計算した。また表層でのS波速度 V_S は基盤と地表でのスペクトル比のピーク周波数から $f = V_S / 4H$ [1/4波長則]により算出し、さらに重複反射解析プログラムを用いて、算出した表層の計算波形と観測波形との対比により減衰を決定した。図1、図2は観測点丹原、柳谷の地盤モデルと解析に用いた V_S を示したものである。

4.解析結果

図3は上段に芸予地震での観測点丹原のEW方向における基盤の上昇波、下降波の速度時刻歴を示している。下段には観測点丹原のEW方向における基盤の上昇波、下降波、表層の上昇波のエネルギー時刻歴、そして基盤の上昇波のエネルギーから基盤の下降波のエネルギーの差を示したものである。まず上段の速度時刻歴をみると下降波は上昇波に比べて明らかに振幅が小さい波形になっていることが分かる。次に下段のエネルギー時刻歴をみてみると基盤の上昇波、下降波のエネルギー E_u, E_d は20秒

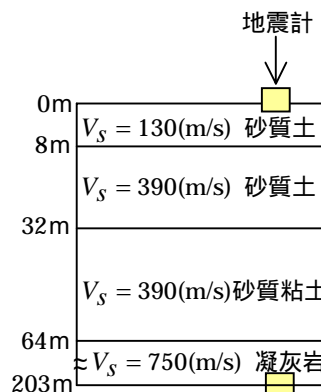


図1 観測点丹原の地盤モデルと解析に用いた V_S

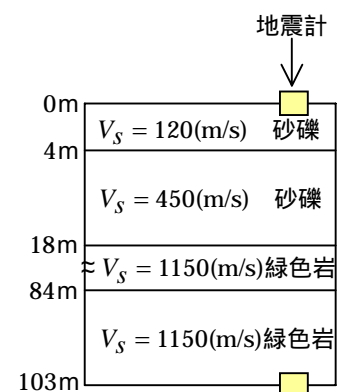


図2 観測点柳谷の地盤モデルと解析に用いた V_S

keyword : 地震、重複反射理論、エネルギー、S波速度、エネルギー損失

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

までは上昇を続けそれ以降は一定値をとっている。表層の上昇波エネルギー E_s は15秒付近まで上昇を続けそれ以降は一定値をとっている。上昇波、下降波のエネルギーは一方向への進行波のエネルギーの累積値なので単調増加関数であるが、それに対しエネルギーの差 $E_u - E_d$ は着目点から上層でのエネルギー収支を表しているの、増減を示しエネルギー差が減少するときは上層に一時的に蓄えられたエネルギーが深部に戻されることを意味している。ただ、エネルギー差は小刻みな増減を繰り返してはいるものの基本的には増加の傾向があり、上層の内部で失われるエネルギーの影響が支配的であると分かる。

図4は上段に観測点柳谷のEW方向における基盤の上昇波、下降波の速度時刻歴を示している。下段には観測点柳谷のEW方向における基盤の上昇波、下降波、表層の上昇波のエネルギー時刻歴、そしてエネルギー収支を示したものである。まず上段の速度時刻歴についてみると丹原と同様に下降波は上昇波に比べ振幅が小さくなっている事が見てとれる。次に下段のエネルギー時刻歴においては0～10秒の主にP波が卓越していると考えられる部分では基盤の上昇波、下降波、表層の上昇波はほぼ0である。またSH波が卓越する部分のうち13秒～15秒の間でエネルギー差が急激に上昇しており最終的には失われたエネルギーは E_u の1/3に達している。この観測点は基盤と表層での V_s 比=9.58であり、観測点丹原に比べ1.7倍程度の値をとっている。そのため内部損失が大きくなったと考えられる。図3、4ともに15秒以降においてエネルギー差はほぼ一定に収束しているにもかかわらず E_u 、 E_d は増加し続けている。この原因としては表面波の影響が疑われるがさらに検討を要する。

5.まとめ

広島県芸予地震の際に観測されたEW方向の本震記録を用いて基盤の上昇波、下降波、表層の上昇波そして基盤の上昇波、下降波の差から表層でどの程度エネルギーが消費されるかを検討した。

- 1) 丹原、柳谷においてはそれぞれ最終的に $1.8(\text{kJ}/\text{m}^2)$ 、 $1.4(\text{kJ}/\text{m}^2)$ のエネルギーがそれよりも浅い地盤内で消費された。
- 2) エネルギー収支が急激に増加している部分では地盤物性の非線形性の影響によりエネルギーが消費されたと考えられる。またP波の部分と表面波が卓越すると思われる部分ではエネルギー増加はほとんど生じず、水平動によるエネルギー増加はSH波による影響が大きいことが分かった。

<謝辞>最後にウェブサイトで地震観測データを使わせていただいた防災科学技術研究所の関係の方々感謝の意を表します。

<参考文献> 1) 國生剛治、本山隆一：地震波の上昇波と下降波の分離による表層地盤でのエネルギー収支、土木学会論文集 No.652/ -51,257-267,2000.6.

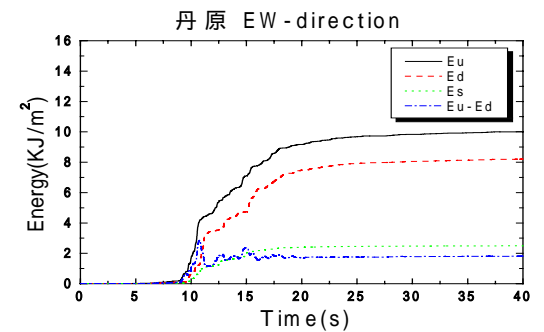
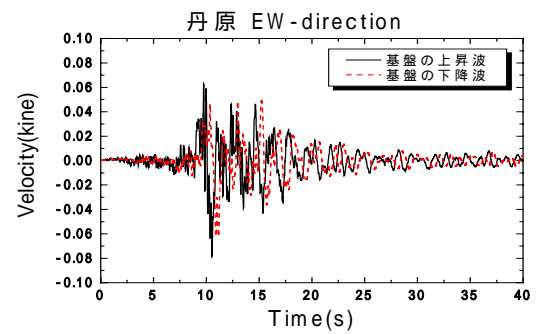


図-3 丹原 EW 方向の時刻歴

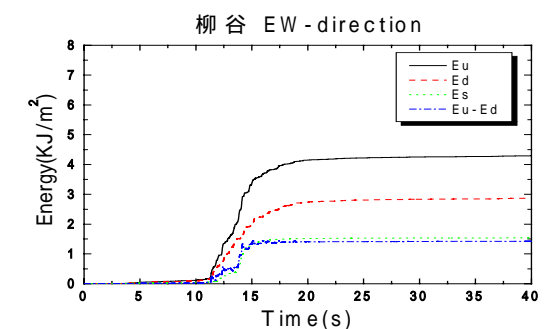
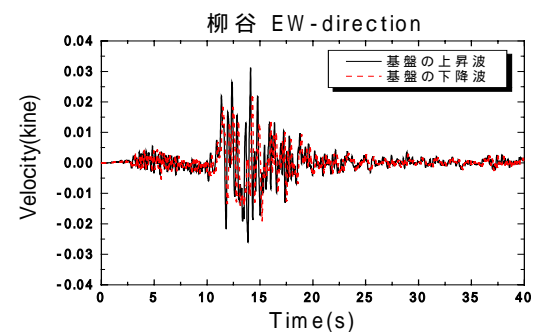


図-4 柳谷 EW 方向の時刻歴