



強地震鉛直アレー記録に基づいた地盤中の波動エネルギーフロー

國生剛治¹⁾、鈴木 拓²⁾

1) 正会員 中央大学理工学部、教授 工博

e-mail : kokusho@civil.chuo-u.ac.jp

2) 非会員 元中央大学理工学研究科博士前期課程 (現 東京電力 (株))

要 約

近年我国で発生した強地震の鉛直アレー実測記録を用いて、表層地盤中での地震波動のエネルギーの流れをSH波重複反射理論に基づき計算した。その結果、波動エネルギーは基盤から地表に向かうほど低減する一般的傾向が見られた。これはインピーダンスが大きく異なる層境界で下方に戻されるためで、多くの地点で深度100m程度での上昇波エネルギーのうち3割以下しか地表まで到達しない。さらに、地盤中で失われる内部損失エネルギーと上昇エネルギーの割合は地盤各層の減衰定数と良い相関があることが分かった。また、深度100m程度での水平動の入射エネルギーはマグニチュードと震源距離によるごく単純な計算式により概略評価できることが分かった。

キーワード： 地震波動エネルギー、SH波、インピーダンス比、減衰、性能設計

1. はじめに

地震工学の歴史を辿ると、構造物設計は慣性力に直結した静的震度法から始まり、加速度を用いる力の釣り合いによる設計法が近年に至るまで主流となってきた。しかし最近では、速度やそのスペクトル指標も使われるようになってきている。その背景としては、最近の地震による上部構造物や土構造物・地盤の被害が必ずしも加速度で決まらず、速度やそれに関連したエネルギーのような指標に密接に結びついているとの認識が共有化されて来つつあるためと思われる。

構造物被害は主要部材でのエネルギー損失で規定され、地震波動エネルギーがどのくらいそこに供給されるかによって決まると言えよう。実際、エネルギー損失の考え方は設計の実務にも取り入れられており、例えば道路橋示方書では橋脚の塑性指数を決めるための根拠となっている¹⁾。最近では構造物の最終破壊に至るまでの保有すべき耐震性能を段階的に規定した性能設計法が取り入れられ、対応して地震時に発生する変形やひずみの評価が重要となっている。そのためには従来の加速度による力の釣り合いとは別の観点から、変形やひずみに直結したエネルギーによる見方が役立つと思われる²⁾。

地盤中の地震波動のエネルギーフローに工学面から着目し、具体的に波動エネルギーを算定した初期の研究としては、地震計の速度記録に基づき観測点での波動エネルギーを1次元進行波として算定し、断層モデルと距離減衰による理論値と比較して両者の対応関係を検討したSarmaによる論文³⁾が挙げら

れる。設計面でエネルギーを用いる具体的動きとしては、建築の上部構造本体については地動による建物内でのエネルギーの釣り合いに着目した耐震設計法が秋山⁴⁾により提案されている。しかし、入力条件については剛体地盤の地動加速度から出発しており、基盤から表層地盤を通して入ってくる地震波動エネルギーの流れとの連続的取り扱いはされていない。

一方、地盤の地震時液状化の判定についても、通常の地表加速度に基づく方法に代わりエネルギーを用いた方法が提案されている。例えば、Davis & Berrill⁵⁾やCao & Law⁶⁾の研究では、エネルギー放出中心から球面波減衰を仮定して計算した地震波動エネルギーと地盤材料の内部損失エネルギーの比較により液状化判定する方法を試行している。他にも、地盤の1次元地震応答解析で計算される地層の内部損失エネルギーとの比較により液状化判定する方法が提案されている^{7), 8)}。

他方で、國生らは1995年兵庫県南部地震での震源断層近傍4箇所鉛直アレー水平動記録を用いて、SH波の重複反射の仮定により地盤深部から地表までの上昇波・下降波エネルギーの分布と、それらの差から算出される地盤中の損失エネルギーを算定し、液状化が起きた地点での損失エネルギーが入射波動エネルギーの70%に達することを明らかにしている⁹⁾。さらに一般的な条件の下で、地盤中のエネルギーフローを支配する条件を検討し、地盤の層構造や減衰定数さらには軟弱地盤の非線形性がエネルギーフローに影響を与えることを示した²⁾。また、地震時斜面崩壊の評価についても、崩壊現象が加速度よりはむしろエネルギーに支配されていることを模型実験的に示し¹⁰⁾、地震波動エネルギーによる崩壊土流動距離の評価方法を提案している¹¹⁾。

このように地盤中の地震波動のエネルギーに着目した研究はいくつか挙げられるものの、加速度の視点からの研究に比べて決して多くはない。その理由としては、地表での静的震度・慣性力や加速度から出発し、地震を波動としてエネルギー的に捉えることが構造物設計面からは主流とはなっていないことなかつた地震工学の歴史的背景があることは勿論であるが、さらに波動エネルギーを計算するための地中での地震記録や地盤情報が限られていたことにもあると言えよう。しかし、近年我が国では鉛直アレーの設置がすすみ、特に1995年兵庫県南部地震以降、全国に約700箇所におよぶKiK-netシステムが完備され、多くの強震記録が得られ地盤情報とともに公開されるようになってきた。これらの観測データは表層地盤での加速度や速度の増幅特性の評価法の高度化に役立てられるとともに、基盤から地表に至る波動エネルギーの流れを実証的に解明する上でも大いに役立つものである。

ところで、筆者らの以前の研究によれば²⁾、一般に地震時に揺れやすいとされる軟弱地盤において、地表でのエネルギーが硬質地盤より大きいとは限らないことが単純な2層系地盤モデルの計算で示されている。これは、軟弱地盤ほど木造建物などの被害が大きくなるという従来からの共通的認識と整合していないように思える。しかし地表への上昇エネルギーは小さくても、地盤の非線形化により卓越振動数が低くなり、建物の共振により特に老朽木造家屋が被災し易くなった可能性は考えられる²⁾。一方で強い地震動を受けた場合に、軟弱地盤ほど構造物被害が大きくなる普遍的傾向が存在するかについては、最近の地震被害のケーススタディーからはむしろ逆の傾向を指摘する研究もいくつか見られるようになってきている^{12), 13), 14)}。

一方、地震工学の発展と共に、構造物の耐震性評価において地震動の加速度時刻歴を直接用いる動きは最近加速している。しかし、設計地震動を事前に評価し設計に用いることは未だ十分な信頼性があるとは言い難い。設計地震動を用いた詳細解析においても、そのモデル内ではエネルギー的な条件が陰に満足されていることは当然である。時刻歴による検討とは別にエネルギーにより地震入力条件を定義することは、その時刻歴的特性を消し去り情報の精緻化には逆行するように思えるが、一方、地震動が地盤や構造物に与える影響を単一の指標により簡便に評価できるため、工学的な第1次の判断に役立つと考えられる。すなわち、最大加速度や静的震度を用いた従来の設計法とは異なり、地震波の振動数成分、波形や継続時間などの違いが構造物破壊におよぼす影響をエネルギーという指標を通じて統一的に評価できることが期待できる。特に擁壁・ケーソン岸壁・盛土・斜面などマッシュで減衰定数が大きい構造物では、建物のような比較的たわみ性が大き減衰定数が小さく地震動波形に敏感な構造物とは異なり、滑り面やせん断ゾーンにおけるひずみ累積値が構造物の破壊に直結する。このような場合、地震動の時刻歴波形が与えられなくてもエネルギーの累積値による設計が可能と考えられる²⁾。

エネルギーによる設計法を確立するためには、実際の地震記録に基づいて地盤中の地震波動エネルギーの流れ方を調べておくことが重要である。本論文では、近年発生した9個の強地震による30地点の鉛直アレー記録に基づき、地盤中のエネルギーフローを統一的に分析し、表層地盤での深度によるエネルギーの変化とそれに与える影響因子や地盤深部での入射エネルギーの大きさとマグニチュード・震源距離との関係などを定量的に検討する。

2. エネルギーフローの計算方法

地震波動は、実体波成分と表面波成分からなるが、本研究では大半の地震波動エネルギーは実体波のうち鉛直伝播するSH波によって運ばれることを前提としている。この前提条件は他の種類の波とくに表面波についても包含する方向に今後拡張していくべきである。しかし、SH波を構造物の耐震設計上で最も主要な地震波動として選択し、実際にはP波や表面波の成分も含んだ水平地震動をS波の重複反射により近似することは加速度による設計法でも定着しており、エネルギーによる検討についても第一近似としてはこれまでと同様に許容されうると考えられる。

SH波が地盤中のある深度を一方向に伝播していくときの粒子速度を \dot{u} とすると、微小時間 Δt での単位平面積を通過する波動エネルギーの増分 ΔE は運動エネルギー増分 ΔE_k とひずみエネルギー増分 ΔE_e の50%ずつの和として次式で表される¹⁵⁾。

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_e = \rho V s \Delta t (\dot{u})^2 \quad (1)$$

ちなみに、地盤の減衰効果は距離減衰として別途考慮されることになるため、ここでは減衰を含めず定式化していることなど、式(1)の誘導根拠については文献2)を参照願いたい。ここで、単位時間当たりのエネルギー増分 $\Delta E/\Delta t = dE/dt$ を次式により定義し、エネルギーフラックスと呼ぶことにする。

$$dE/dt = \rho V s (\dot{u})^2 \quad (2)$$

また、一つの地震波がある深度を通過する時間を $t=0 \sim t_1$ としたとき、

$$E = \int_0^{t_1} (dE/dt) dt = \rho V s \int_0^{t_1} (\dot{u})^2 dt \quad (3)$$

によりこの時間内に単位平面積を通過する一つの地震波のエネルギーを算定することができる。ちなみに、このエネルギー定式化は Sarma³⁾によるものとも一致している。ここで強調すべきは、式(1)~(3)で

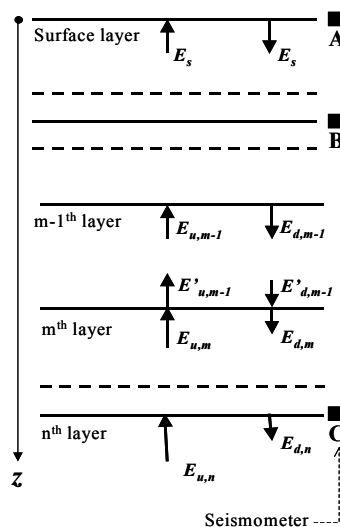


図1 鉛直アレーによるSH波振幅とエネルギーフローの解析モデル

用いる速度波形はあくまで1方向への進行波であり、地中地震記録からエネルギーの流れを計算するときには、上昇波と下降波に分解する必要があることである。

鉛直方向への重複反射理論により地盤モデルの各層境界での速度波形が計算でき、それよりひとつの地震波に対応するエネルギーが式(3)により計算できる。図1には n 層からなる多層系地盤での上昇波と下降波によるエネルギーの流れを概念的に示している。第 m 層の上端境界での上昇エネルギーと下降エネルギーを $E_{u,m}$ と $E_{d,m}$ で表す。同様に第 $m-1$ 層の上端境界のエネルギーは $E_{u,m-1}$ と $E_{d,m-1}$ であるが、波動の伝播に伴う距離減衰によって振幅低下が起きるため、第 $m-1$ 層の下端境界での上昇エネルギーと下降エネルギーは当然異なった値となり、これを $E'_{u,m-1}$ と $E'_{d,m-1}$ で表す。第 m 層と $m-1$ 層の境界に注目すると、そこに流れ込む上昇エネルギー $E_{u,m}$ 、下降エネルギー $E'_{d,m-1}$ と、そこから流れ出る上昇エネルギー $E'_{u,m-1}$ 、下降エネルギー $E_{d,m}$ との間では、エネルギーバランスが成り立っていることから、当然

$$E_{u,m} + E'_{d,m-1} = E'_{u,m-1} + E_{d,m} \equiv E_t \quad (4)$$

が得られる。この式(4)の値は境界を通過する全エネルギーであり、これを E_t で表す。また、式(4)のエネルギーバランス式より

$$E_{u,m} - E_{d,m} = E'_{u,m-1} - E'_{d,m-1} \equiv E_w \quad (5)$$

が成り立ち、層境界に出入りするエネルギー累積値の差は境界より上部での損失エネルギー E_w を表す。また E_t は層境界上でのみ定義されるのに対し、 E_w については層境界のみでなく任意の深度での上昇エネルギー E_u と下降エネルギー E_d の差として定義され、それより上部での損失エネルギーとなることは明らかであり、一般的に

$$E_w = E_u - E_d \quad (6)$$

により計算できる。

SH波の重複反射を前提として波動エネルギーを算出する時、地盤モデルが既知で地盤物性が線形と仮定できる場合には、地表境界での完全反射条件を用いて地表記録により任意の深度での上昇波・下降波が計算できるため、任意の深度でのエネルギーフローが計算できることになる。この計算法については文献16)や文献2)に詳細に述べられているので参照願いたい。しかし、SH波の重複反射理論と実際の波動伝播との差異を見るためには、鉛直アレーの地中記録を活用したエネルギー算定が望ましい。特に、軟質な地盤が強い地震動を受けた場合には、地盤物性の非線形性によって波形が変化するため、地表記録から深度方向の波形の変化やエネルギーの流れを算定すると誤差が大きくなる。その点、鉛直アレーであれば、地表と同時に非線形性が生じにくい地盤深部の地震記録も使用できるため、エネルギーフロー計算の信頼度が高められる。

本研究で対象とした鉛直アレーサイトのうち、図1に示すように地表のA点以外にB、Cのように複数の異なる深度に地震記録がある場合は、B、Cの観測波を重複反射理論に基づいて上昇波と下降波に分解し、その2深度間の上昇・下降エネルギーを計算している⁹⁾。この場合、その深度間の地盤の層構造・層厚はボーリング調査結果を使い、各層のS波速度 V_s や減衰定数 D については、S波検層値や地震記録から逆計算した値を用いている。

一方、図1に示す地表A点と直ぐ下のB点の間では、地表の全反射条件を用いれば地表あるいは地中の片方の地震記録で上昇波・下降波と対応するエネルギーが計算できる。KiK-netでは地表と地中に1点ずつの地震記録があってまさにこれに当たるため、A点の地表記録あるいはB点の地中記録それぞれによってエネルギー計算し、二つの結果をA、B点からの距離近接度に応じて重み付き平均することとする。

3. 対象とした地震記録と地盤モデル

本研究で解析対象とした9つの地震で記録が得られた30観測点の関連データを表-1に示している。9個の地震の気象庁マグニチュードの範囲は $M_f=6.4\sim 8.0$ であり、30観測点の震源距離は $R=9\sim 227\text{km}$ の範囲である。鉛直アレーは深さ100m程度のものが大半であるが、それを大きく越えるものもあり、最も深いものは260mに達する。その地震計設置深度やサイトの地盤条件、さらに後に述べるエネルギーの計算結果なども表にまとめている。

1995年兵庫県南部地震の4箇所と2007年新潟県中越沖地震の1箇所の鉛直アレーでは地表以外に2つ以上の異なる深度レベルの地中記録が得られている。その他はKiK-netのデータであり、地表と地中に各1つの地震記録がある。今回用いた地中記録の最深レベルGL-83~-260mでのS波検層による伝播速度は $V_s=380\sim 2800\text{m/s}$ と非常に幅のある値となっている。設置された地震計はいずれも3成分加速度計であるが、そのうちの水平2成分を用いた。

エネルギーフローの算定には地盤の層構造や各層のインピーダンス ρV_s 、減衰定数 D が大きく関わっている。とくに軟質地盤においては、強地震時に発生する大きなひずみに応じて V_s や D が変化する影響を考慮することが必要となる。本研究で対象とした地震のうち、1995年兵庫県南部地震、2003年十勝沖地震、2007年新潟県中越沖地震の観測点では、本震記録から得られるフーリエスペクトル比を最適化する逆解析手法を使って別途の研究^{17), 18)}により得られた V_s と D を用いた。それ以外の6地震の全観測点の地震データについては、逆解析に代わる簡易的逆算法として、各層の V_s と減衰定数 D を段階的に変化させて1次元重複反射解析を繰り返し行い、一致度の高い物性値を絞り込んでいる。簡易的逆算法での手順は以下の通りである。

- 1) 本震波形全体の初動から記録の全区間を対象として地表と地中の観測加速度波形からフーリエスペクトルを算出し、0.3HzのParzen Windowで平滑化処理したものから地表を地中で除することによりスペクトル比を計算する。
- 2) KiK-net設置地盤のS波検層値(初期線形モデル)を使用して地表地震計と地中地震計間の理論伝達関数を作成し、地中観測加速度を入力し地表応答加速度時刻歴を計算する。このときの減衰定数は地盤全体に微小ひずみ時の $D=1.0\sim 2.5\%$ を設定する。なお、理論伝達関数にも観測フーリエスペクトル比と同様に0.3HzのParzen Windowによる平滑化を行う。
- 3) 1)のフーリエスペクトル比と2)の理論伝達関数および観測と解析による加速度を同一グラフ上で重ね書きし、それらがなるべく一致するようにS波速度 V_s と減衰定数 D を調整する。深度の浅い層ほどひずみレベルの影響が大きいため、 V_s の減少割合や D の増加割合を大きく設定する。つまり、いずれの地点についても本震での地盤応答をなるべく再現できる V_s と D の等価線形値を決定した。この際、減衰定数 D の振動数依存性については非粘性(振動数非依存型)を仮定している¹⁹⁾。これらの本震記録を用いた逆解析ないしは簡易逆算法により決定されたS波速度 V_s と減衰定数 D の深度分布を、全30地点について対応する地震ごとに V_s は太線で D は細線で図2(a)~(h)に示している。 V_s は途中で部分的な増加を示す地点も多いが、深度が浅くなるにつれて全体的には当然ながら減少傾向である。強地震動によるひずみ依存非線形性によって軟弱地盤のサイトでは地表付近での V_s の低下が目立ち、PI地点など $V_s<100\text{m/s}$ の低い値を示すところもある。減衰定数 D は最深部で1~3%から地盤が軟弱な地点では地表付近で最大20~30%まで単調に増加している。これらのひずみ依存性を考慮した V_s と D を用いて、以下の地震波動エネルギーの算定を行った。なお、最深部と最上層については、地盤密度やS波検層による V_s と本震対応の非線形性を反映した V_s を表1にまとめている。

減衰定数については、本震に対応して逆算した各層の値を層厚により重み付き平均した値 D_{av} を求め、さらに鉛直アレーでの地震計設置最深深度の代表値を100mとし、各サイトでの最深深度以浅の層厚 H により D_{av} を補正した補正重み付き平均減衰定数 D_{M1} を $D_{M1}=D_{av}\times H/100$ により計算した値も示しており、後ほどの検討で用いる。

表1 全30観測点の概要とエネルギーなどの計算値

地震名	気象庁 マグニ チュード (M _J)	震源深 さ (km)	観測地点名	震央 距離 (km)	震源 距離 R (km)	用いた地中 地震計深度 (m)	最深部 密度 ρ (t/m ³)	最深部 S波速度 Vs (m/s)	最深部 本震対応 Vs (m/s)	地表面 密度 ρ (t/m ³)	地表面 S波後層 Vs (m/s)	地表面 本震対応 Vs (m/s)	最深/地表 本震対応 インピーダ ンス比	重み付き 平均減衰 定数 D _{av} (%)	層厚100m 補正 減衰定数 D _{MA} (%)	最深部上昇 エネルギー Eu (kJ/m ²)	地表面到達 エネルギーEs (kJ/m ²)	エネルギー比 Es/Eu	最深部損失 エネルギー E _w =E _v -E _d (kJ/m ²)	最深部損失工 ネルギー比 E _w /E _u (kJ/m ²)	
1995 兵庫県南部	7.2	16	P(神戸)	18	24	0, 32.4, 83.4	2.2	380	329	1.7	170	79	5.4	17.0	14.2	308.3	50.3	0.163	198.8	0.645	
			SGK(尼崎)	44	46	0, 24.9, 97	1.8	480	459	1.7	120	86	86	5.7	5.7	5.5	167.6	43.4	0.259	50.0	0.298
			TKS(高砂)	32	36	0, 25, 100	2.0	420	400	1.7	120	86	86	5.5	6.2	6.2	15.1	3.9	0.258	3.2	0.210
2000 鳥取県西部	7.3	11	KNK(和歌山)	53	55	0, 25, 100	2.7	1630	1630	1.6	238	202	13.6	1.5	1.5	3.0	2.7	0.900	0.7	0.231	
			OKYH14(北房)	45	46	0, 100	2.6	2280	2318	1.6	120	122	120	30.9	3.5	3.5	22.7	1.0	0.043	0.9	0.041
			SMNH01(伯太)	8	14	0, 101	2.6	2800	2646	2.0	290	244	290	14.1	7.2	7.3	203.2	26.6	0.131	18.5	0.091
			TTRH02(日野)	10	15	0, 100	2.3	790	679	2.0	210	152	210	5.1	6.7	6.7	235.8	117.6	0.499	72.1	0.306
			EHHM02(西条)	54	71	0, 110	2.3	2195	2195	1.6	151	151	151	20.9	8.6	9.5	11.2	1.2	0.103	3.9	0.349
2001 去予	6.4	46	EHHM05(砥部)	48	66	0, 134	2.6	2419	2419	1.8	164	164	21.3	7.9	10.6	14.6	2.0	0.135	6.6	0.453	
			HRSH01(三原)	40	61	0, 205	2.6	2523	2396	1.6	180	162	180	24.0	3.9	8.1	24.1	3.8	0.156	7.2	0.298
			HRSH03(御調)	59	75	0, 200	2.6	2600	2600	2.0	370	370	370	9.1	1.0	1.9	42.4	15.1	0.355	3.1	0.073
			TKGH08(大樹)	109	117	0, 100	2.6	2800	2800	1.8	130	86	130	47.0	2.9	2.9	337.1	14.9	0.044	7.6	0.023
2003 十勝沖	8.0	42	KSRH07(鶴居南)	152	158	0, 222	2.2	510	500	1.6	100	78	8.8	3.0	6.7	443.7	41.5	0.094	52.3	0.118	
			NMRH02(標津南)	223	227	0, 103	2.4	870	870	1.8	110	110	110	10.5	3.3	3.4	36.4	7.1	0.195	4.1	0.113
			KSRH10(浜中)	180	185	0, 255	2.6	1700	1700	1.6	90	63	90	43.8	2.1	5.4	66.2	5.6	0.085	15.3	0.231
			FKSH21(只見)	40	42	0, 200	2.6	1600	1600	1.7	200	200	200	12.2	2.4	4.7	13.4	3.2	0.239	2.2	0.164
			NIGH06(加茂)	44	46	0, 100	2.3	740	648	1.6	100	73	100	12.8	4.6	4.6	50.4	6.0	0.119	9.6	0.190
2004 新潟県中越	6.8	13	NIGH09(下田)	36	38	0, 100	2.5	1380	1380	1.6	150	109	19.8	3.8	3.8	31.9	2.5	0.078	3.6	0.113	
			NIGH11(川西)	17	21	0, 205	2.4	850	850	1.8	200	200	200	5.7	3.0	6.1	215.7	23.5	0.109	42.8	0.198
			NIGH12(湯之谷)	13	18	0, 110	2.3	780	780	1.8	240	183	240	5.4	2.8	3.1	35.8	6.6	0.184	4.3	0.120
2005 福岡県西方沖	7.0	10	FKOH03(宇美)	50	51	0, 100	2.6	2030	2030	2.0	250	250	10.6	3.3	3.3	17.1	2.0	0.119	0.6	0.032	
			FKOH08(小石原)	76	77	0, 100	2.6	1600	1600	2.0	180	180	180	11.6	1.8	1.8	8.0	0.9	0.106	0.2	0.028
			SAGH03(富士)	55	56	0, 103	2.6	1980	1980	2.0	160	160	160	16.1	4.7	4.8	7.7	1.0	0.128	0.7	0.093
2007 能登半島	6.9	11	ISKH01(珠洲)	63	64	0, 200	2.2	630	709	1.8	240	250	3.5	3.9	7.8	43.7	8.3	0.191	10.8	0.247	
			ISKH02(柳田)	36	38	0, 102	2.2	530	557	2.0	420	431	420	1.4	5.9	6.0	115.5	25.1	0.217	28.7	0.248
2007 新潟県中越沖	6.8	17	KKNPS-SH (相崎羽原奈SH)	13	21	24, 50.8, 99.4, 250	1.8	640	640	1.9	310	207	2.9	5.9	14.8	442.8	370.3	0.836	121.6	0.275	
			AKTH04(東成瀬)	22	23	100	2.6	1500	1600	2.0	150	90	150	23.1	2.5	2.5	128.2	28.3	0.221	20.4	0.159
2008 岩手宮城内陸	7.2	8	IWTH24(金ヶ崎)	22	23	150	2.2	540	540	1.8	180	170	3.9	1.9	2.9	588.3	76.1	0.129	42.9	0.073	
			IWTH25(一関西)	3	9	260	2.6	1810	1800	1.6	430	340	430	8.6	6.7	17.5	1285.8	164.0	0.128	476.2	0.370
			IWTH26(一関東)	12	14	108	2.3	680	675	2.0	130	115	130	6.8	2.5	2.7	258.5	33.2	0.128	24.1	0.093

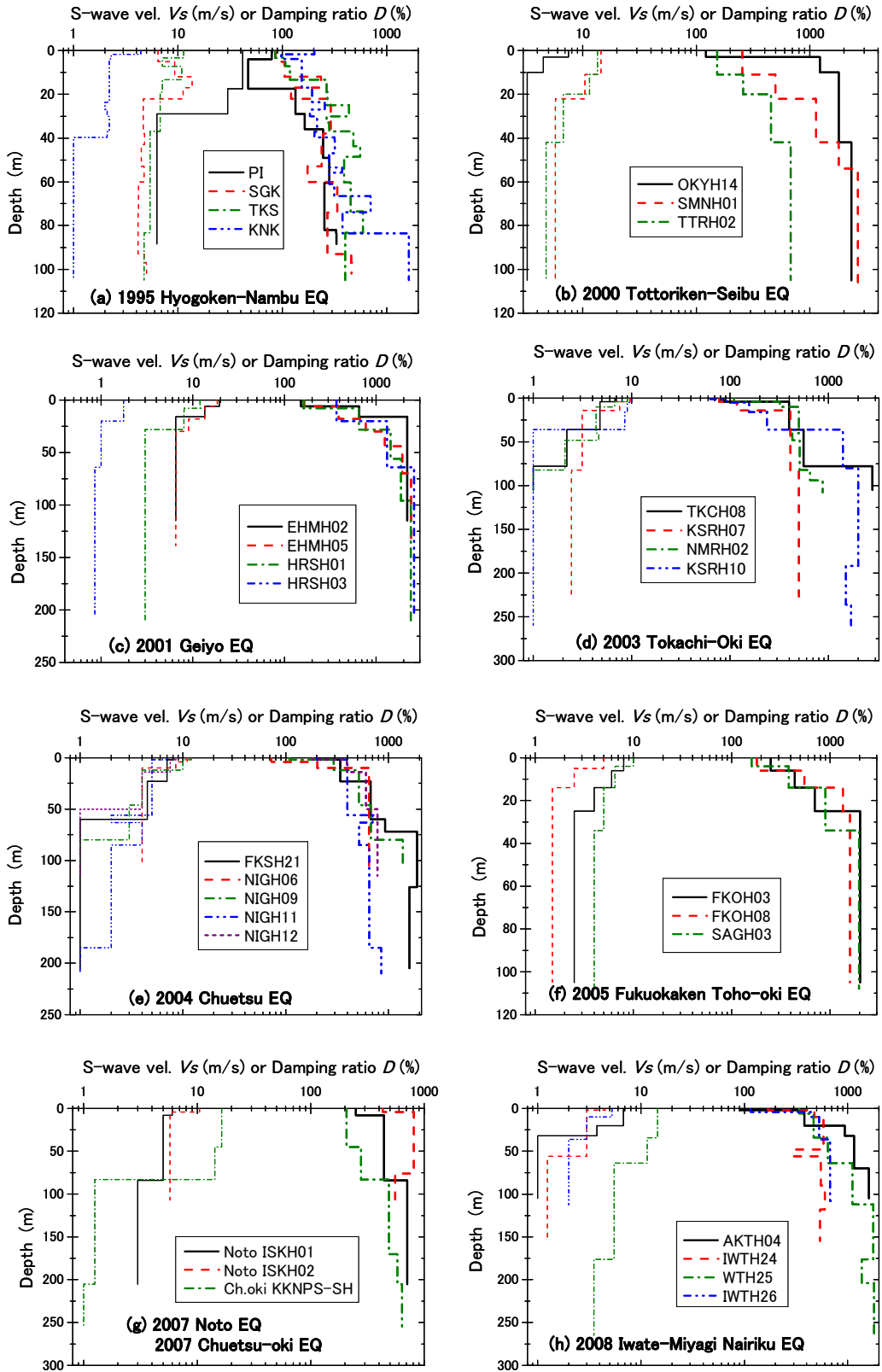


図2 解析対象鉛直アレーサイトにおける本震でのひずみ依存性を考慮したS波速度（太線）と減衰定数（細線）の深度分布

4. 地盤中の波動エネルギーフローの計算例

ここでは鉛直アレーでのエネルギーフロー計算のうち、地表地震計と複数の地中地震計により強い非線形応答記録が得られたものの代表として1995年兵庫県南部地震でのポートアイランド (PI) と、地表と地中1深度のみのKiK-netの代表として2003年十勝沖地震の大樹 (TKCH08) を取り上げ、説明を行う。

(1) ポートアイランド (PI) 地点

表2はPI地点の地盤構成、小ひずみ物性、本震の逆解析物性、地震計深度を示している。地震計は地表を含め4深度にあるが、本震記録に異常なショックが含まれるGL-16.4mを除く3深度の記録を用いている。GL-83.4mの最深部でも小ひずみ時のS波速度は $V_s=380$ m/sとかなり低く、工学的基盤ぎりぎりの値である。地表からGL-17.5mまでは六甲マサ土の埋立地盤であり、本震時に激しく液状化し等価 V_s は初期値の20%程度まで低下したがゼロにはならなかったことが分かっている(例えば17)、20)。地表の加速度計もある程度の地震応答を記録しており、液状化層中でも非液状化層と同様な方法でエネルギーフロー分析が可能である。

図3には地表とGL-83.4mでの速度波形(地表で最大加速度が表れた主軸方向と主軸直角方向の上昇波と下降波)とそれより式(3)で計算した地表での上昇・下降エネルギー $E_s \equiv E_u = E_d$ 、GL-83.4mでの上昇・下降エネルギー E_u 、 E_d と、それらのエネルギー差 $E_u - E_d$ の時刻歴を例示している。エネルギーはスカラー量であるため、水平直角2方向のエネルギーを計算しその和をとってエネルギー合計値としている。

地表では上昇波と下降波のエネルギーは当然同値であり、 E_s は地表波の速度振幅を半分にしたものから計算している。 E_u 、 E_d はともに単調増加関数であるが、 $E_u - E_d$ はわずかな増減を繰り返しながら最終値に至り、その値は当該深度より上部で失われた損失エネルギー E_w に相当している。また、地点によってはエネルギー時刻歴の後半にはSH波以外に表面波の影響が混入している可能性が考えられるが⁹⁾、その影響は実体波に比べ相対的に小さいと仮定し、以後のエネルギー分析においてはすべて、時刻歴のエネルギー最終値を用いている。

表2 ポートアイランド地点(PI)での地盤構成・物性値と地震計深度

Layer No.	Depth from GL. (m)	Layer thickness (m)	Soil density (t/m ³)	Small-strain properties		Main-shock properties		Seismo-meter Installatio (m)
				Vs (m/s)	D (%)	Vs (m/s)	D (%)	
1	GL-0	4	1.7	170	2	79	42	GL-0
2	GL-4.0	12.4	2	210	2	47	42	W.T.GL-4.0 (GL-16.4)
3	GL-16.4	1.1	2	210	2	47	42	
4	GL-17.5	11.5	1.7	180	1	134	30	GL-32.4
5	GL-29.0	3.4	2	245	1	165	6.3	
6	GL-32.4	3.6	2	245	1	165	6.3	
7	GL-36.0	13	2.2	305	1	245	6.3	
8	GL-49.0	11.5	2.2	350	1	282	6.3	
9	GL-60.5	21.5	1.8	303	1	253	6.3	
10	GL-82.0	1.4	2.2	380	1	328	6.3	
11	GL-83.4	base layer	2.2	380	1	329	6.3	GL-83.4

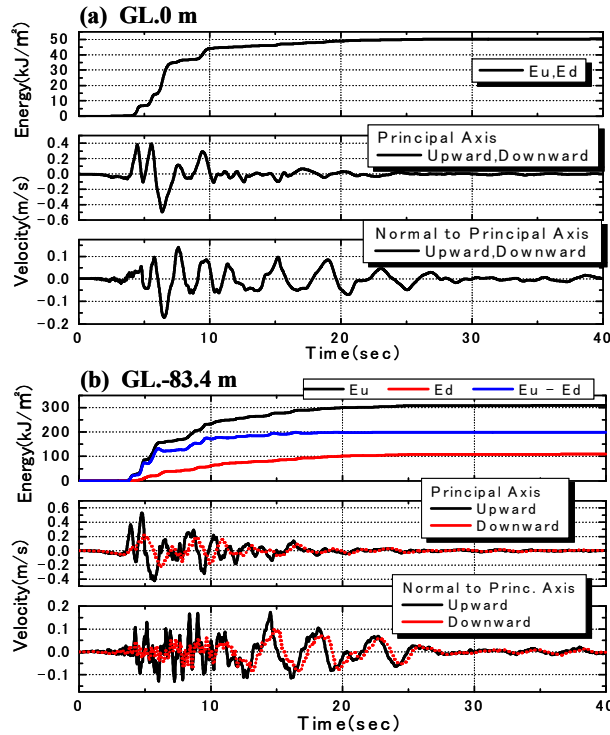


図3 PI 地点鉛直アレーの地表 (a) と最深部 (b) での上昇・下降速度波とエネルギー時刻歴

図4にはPI地点の各層境界でのエネルギー値、 E_u 、 E_d 、 E_w の変化を示している。この地点は図示の深度A、B、Cの地震記録を使ってエネルギー計算をしているが、BC間ではB、C両者の記録を使って一意的結果を得ているのに対し、AB間では地表での全反射条件を使いBでの地震記録を入力として計算している。これによる地表のエネルギー $E_u \equiv E_s$ は 86 kJ/m^2 と得られたがAの地震動記録と地表付近の逆解析 V_s を用いて計算すると 50 kJ/m^2 となる。計算に用いた地盤物性は図2(a)に実線で示す本震の逆解析値¹⁷⁾で、この地点では地表付近で非常に強い非線形性が発揮されたため等価線形物性としての精度はそれほど期待できず、地表のみでA点の記録を用い $E_u = 50 \text{ kJ/m}^2$ の値を採用している。またB点での E_u 、

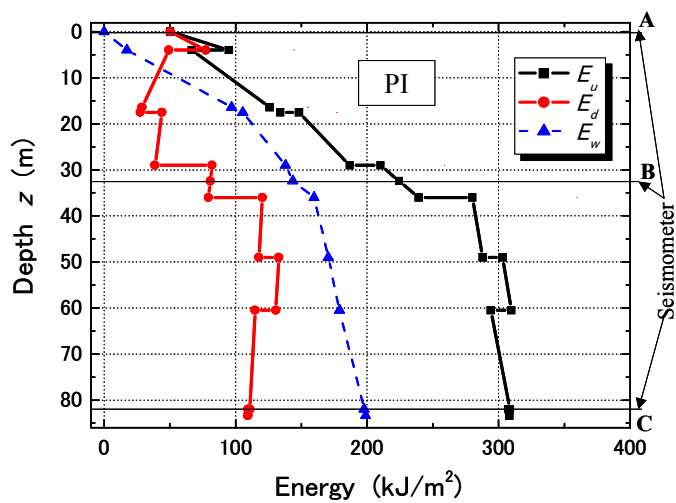


図4 PI 地点での上昇エネルギー E_u 、下降エネルギー E_d 、損失エネルギー E_w の深度方向変化

E_d については、上述の B、C 両者の記録を使う場合と地表全反射条件と B の記録のみを使う場合の 2 種類の値が得られることになる。前者では $E_u=236 \text{ kJ/m}^2$ 、 $E_d=80 \text{ kJ/m}^2$ に対して、後者では $E_u=212 \text{ kJ/m}^2$ 、 $E_d=82 \text{ kJ/m}^2$ となり、それほど大きな誤差ではないが、 E_u と E_d の引き算で算定される E_w には層境界付近で乱れが生じる。これらの様々な計算誤差を考慮して、式(5)の損失エネルギー E_w については次式により層境界の上下層から求めた値を平均した値を図示している。

$$E_w = (E_{u,m} - E_{d,m})/2 + (E_{u,m-1} - E_{d,m-1})/2 \quad (7)$$

図 4 から、PI 地点の上昇エネルギー E_u は GL-83.4m の最深部の 305 kJ/m^2 から地表での 50 kJ/m^2 までほぼ単調な減少傾向を示し、特に GL-36m より上部で急激に減少する。下降エネルギー E_d は GL-36m より上部で小さいが、それ以深では増加している。途中の層で E_u 、 E_d が部分的に多少大きくなる場所がある。これから、一見エネルギー保存則が成り立っていないようにも見られるが、実際は層内に捉えられた地震波が上下の層境界で重複反射を繰り返すため、見かけ上このような結果となり得ることは、既に文献 2) で考察している。また、損失エネルギー E_w は深度に対してほぼ単調増加であり、特に浅い深度での増加が大きい。大規模な埋立地盤の液状化が起きた深度 $z=17.5 \text{ m}$ までの E_w の増加割合は深さ 1 m 当り $6 \text{ kJ/m}^2/\text{m}$ であり、液状化によって失われた単位体積あたりの損失エネルギーに当たっている。

(2) 大樹地点 (TKCH08)

表 3 は 2003 年十勝沖地震で強い地震動を受けた KiK-net の一つ、大樹地点 (TKCH08) の地盤構成、小ひずみ物性、本震の逆解析物性、地震計深度を示している。GL-100m の地中地震計の位置で $V_s=2800 \text{ m/s}$ と非常に大きい値に対し、最上層では小ひずみ時に $V_s=130 \text{ m/s}$ 、本震時にはさらに低下した値となっていることが特徴である。図 5(a)(b)にはそれぞれ地表 GL.0m と GL.-100m での NS・EW 方向の速度波形と両方向を足し合わせたエネルギーの時刻歴を示す。KiK-net では地表と地中の 1 深度の加速度記録が得られているが、(a)は地表記録、(b)は GL.-100m 深度での記録から計算している。図(b)から分かるように、この地点では $E_u=300 \text{ kJ/m}^2$ を越える大きな上昇エネルギーにも関わらず、PI 地点と異なり E_u と E_d の違いが小さく、 $E_u - E_d$ も極めて小さな値に留まっていることが分かる。

図 6 では、深度 100m と地表にそれぞれの記録を入力し、地表での全反射条件を使って各層境界でのエネルギー E_u 、 E_d 、 E_w を計算し比較している。白抜き記号を結んだ細い破線と細い一点鎖線がそれぞれ深度 100m と地表での入力に対応している。これらを深度 100m と地表への距離近接度を重みにして平均し、塗潰し記号を結んだ太い実線で示している。この地点では 2つの入力条件でエネルギーの計算結果の一致度は高いが、かなり大きな差異が表れる地点もある。これは、地盤モデルに含まれる誤差や重複反射理論と実現象との乖離によるものと思われる。その差の大きい地点では、平均化操作によりエネルギー分布がある程度変化してしまうが、地中と地表の地震計位置ではそれぞれの記録のみを使って

表 3 大樹地点 (TKCH08)での地盤構成・物性値と地震計深度

Layer No.	Depth from GL. (m)	Layer thickness (m)	Soil density (t/m ³)	Small-strain properties		Main-shock properties		Seismometer Installation
				Vs (m/s)	D (%)	Vs (m/s)	D (%)	
1	GL-0m	4	1.8	130	2.5	86	6.8	GL-0m GL-100m
2	GL-4m	32	2.1	480	2.5	398	4.8	
	GL-36m							
3	GL-78m	42	2.2	590	1	559	2.2	
4	GL-100m	22	2.6	2800	1	2800	1	
5	GL-100m	Base layer	2.6	2800	1	2800	1	

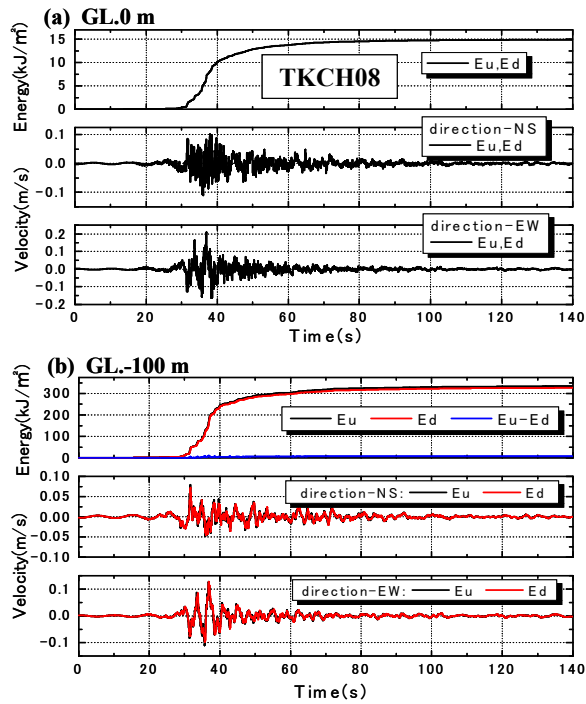


図5 TKCH08の地表(a)と最深部(b)での上昇・下降速度波とエネルギー時刻歴

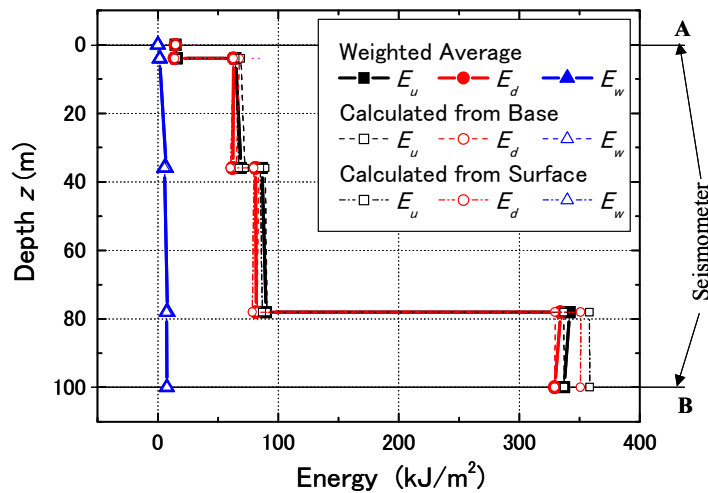


図6 TKCH08地点での上昇エネルギー E_u 、下降エネルギー E_d 、損失エネルギー E_w の深度方向変化

エネルギーを算出するため平均化の影響は受けず、地中から地表までの全体的変化傾向は十分掴めると考えられる。

大樹地点では最深部の上昇エネルギーはPI地点と同程度であるが、深度78mのインピーダンスの大きな層境界によりそれ以浅では $E_u=100\text{kJ/m}^2$ 以下に急減し、地表にはわずか $E_u=15\text{kJ/m}^2$ しか達していない。 E_u と E_d が極めて近い値を取るから分かるように、上昇エネルギーの大半は層境界で反射されて下降エネルギーとなり上部に達しにくいことが読みとれる。当然、 E_u-E_d の最終値から計算される E_w は極めて小さい値を示し、地表付近の軟らかい地盤まで大量のエネルギーが届かなかったこと、大量のエネルギーが通過した硬い地盤では大きなエネルギー損失は起こりにくかったことを反映している。

5. 地盤中の波動エネルギーフロー特性

図7には今回対象とした9地震、30観測点での上昇エネルギー E_u の深度 z による分布を示している。各地点でのエネルギーに大きな開きがあるため、横軸のエネルギーは対数表示となっている。まず気の付くことは、前述の2つの例で見たように、大多数の地点でエネルギーの絶対値の大小に関わらず、最深部に到達した上昇エネルギーが地表に近づくほど明らかに減少する傾向を示す。地表で1/10以下になってしまう場合も珍しくない。また、深度減少によるエネルギー減少割合は深部ほど穏やかで、深さ数10m以浅においては地表に近くなるほど急激な減少を示す傾向も読みとれる。従来、波動エネルギーがサイトの基盤から地表まで上昇していく時に、例えば Sarma³⁾の地表でのエネルギー算定や Davis & Berrill⁵⁾の地表層の液状化判定に用いるエネルギーの算定、さらには Joyner & Fumal の地盤の増幅率の評価²¹⁾に見られるように、上昇エネルギーがほぼそのまま保たれるとされることが多かった。しかし図7より、実際は地盤深部に到達した地震波動エネルギーは地表に近づくにしたがって大半の地点で大幅に減少することが分かる。ただし、中にはそれほど極端に減少しない地点（例えば図中に示す KNK、KKNPS-SH）もある。

この点をさらに調べるため、図8には各鉛直アレーでの最深部と地表のインピーダンス比 $(\rho V_s)_{base} / (\rho V_s)_{surface}$ を横軸にとり、縦軸に地表と最深部との上昇エネルギー比 E_s/E_u をとって30地点の結果をプロットしている。バラツキの幅はあるが、プロットは2本の包絡破線カーブの間にあり、また大多数のプロットは $E_s/E_u < 0.3$ の範囲にあることが分かる。つまり深度100m内外の地盤に上昇してくるエネルギーのうち、地表に達するのは大半の地点で3割以下に過ぎない。また、既述のように KNK と KKNPS-SH についてはこの値は例外的に大きく、 $E_s/E_u > 0.8$ の大きな値をとっている。しかし、プロットのバラツキはかなり大きいにも関わらず、全体的にみても右下がりの傾向は読みとれ、地表と基盤のインピーダンス ρV_s あるいは（一般には密度 ρ には大きな違いはないため） V_s が大きく異なるほど地表まで到達するエネルギーの割合が減少する傾向があることが分かる。ただし、KNK 地点についてはこの全体の傾向から多少外れる傾向にあり、その理由については今後検討が必要である。

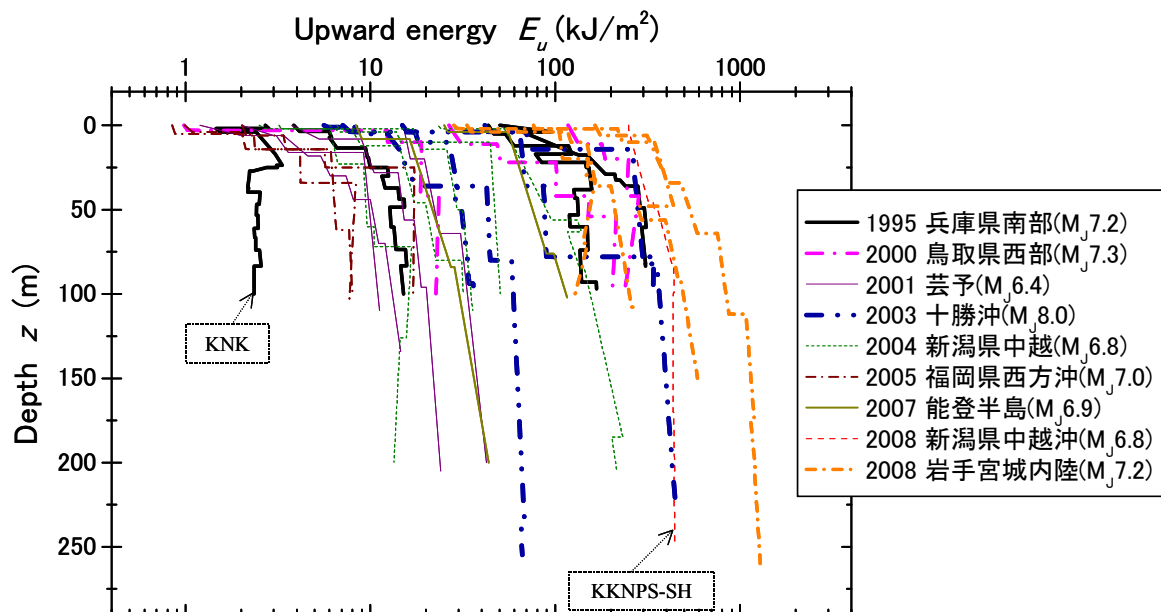


図7 全観測地点での上昇エネルギーの深度方向変化

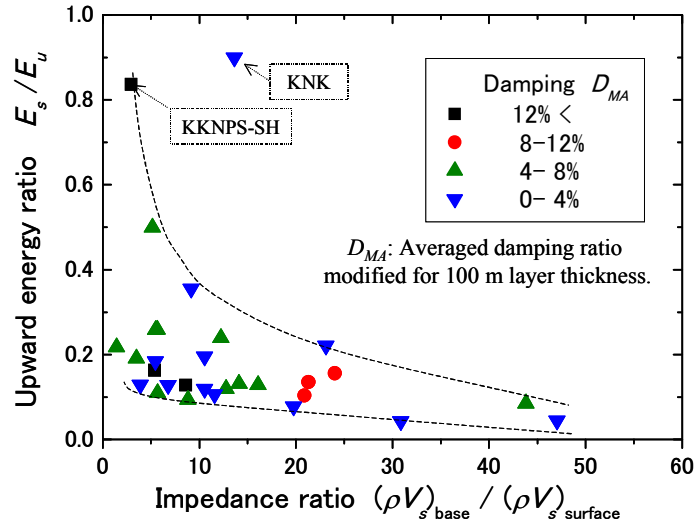


図 8 最深部/地表のインピーダンス比 $(\rho V_s)_{\text{base}} / (\rho V_s)_{\text{surface}}$ と上昇エネルギー比の関係

また図 8 においては、既に説明した地層厚 100m に対応した補正重み付き減衰定数 D_{MA} を 4 段階に分け、各段階のプロットを異なる記号で表している。地表への上昇エネルギー比 E_s/E_u には地盤が示す減衰定数も影響する可能性が考えられるが、図 8 からは減衰定数が大きい地点で縦軸の値が小さくなる傾向は読みとれず、減衰定数の E_s/E_u への影響はインピーダンスや V_s の比の影響に比べて大きくはないと判断される。

図 9 には各地点の最深部での $E_u - E_d$ の最終値すなわちその深度で失われた損失エネルギー E_w の上昇エネルギーに対する割合 E_w/E_u をグラフ左側の縦軸にとり、横軸には本震記録から逆算した物性値に基づく地層厚 100m に補正した重み付き減衰定数 D_{MA} との関係を示している。図中のプロットのうち PI 地点については大規模な液状化が生じたため、 E_w/E_u も D_{MA} も大きな値を示している。他の地点については、TKS 地点で多少液状化の痕跡があった¹⁷⁾程度で、液状化はしなかったと考えられる。この図から、最深部より上部の地盤で失われる損失エネルギーの割合は、大半のケースで上昇エネルギーの 3~4 割以下であることが分かる。また、バラツキは大きいもののプロットは液状化が起きた地点も含めて 2本の包絡破線カーブの間にあり、明らかに右上がりの関係が読みとれる。つまり、最深部で浅の

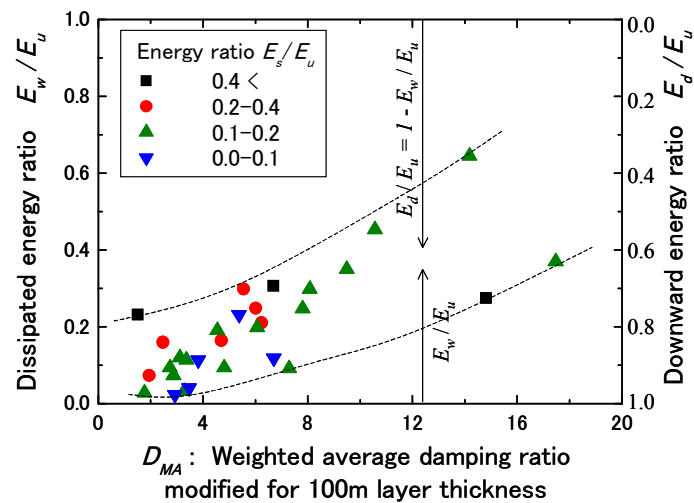


図 9 最深部での損失エネルギーと上昇エネルギーの比と補正重み付き平均減衰定数 D_{MA} の関係

地盤が本震時に発揮する減衰能と E_w/E_u とは正の相関を示すことが確認できる。また図 9 では、基盤から地表に到達する上昇エネルギー比 E_s/E_u を 4 段階に区分し、異なる記号でプロットしている。バラツキ幅はかなり大きいものの、各 E_s/E_u 段階ごとに個別の右上がりの関係が描け、 E_s/E_u が大きくなるほどグラフの上方に位置する傾向が読みとれる。つまり、地表まで達する上昇エネルギーの割合が大きいほど最深部での上昇エネルギーに占める損失エネルギーの割合も増える傾向があると言えよう。

一方、式(6)から分かるように、最深部から下方に戻っていく下降エネルギーは $E_d = E_u - E_w$ で表されるため、上昇エネルギーに対するその割合は $E_d/E_u = (E_u - E_w)/E_u = 1 - E_w/E_u$ であることから、図 9 の右の縦軸では最深部での下降エネルギーと上昇エネルギーの比を表している。これより、多くの地点では一旦表層に運ばれたエネルギーも含め、最深部に到達したエネルギーの 6~7 割以上は再び地中深くに戻され、 E_d/E_u の割合は表層の減衰能が小さいほど大きくなることが分かる。

6. 最深部での上昇エネルギー

今回対象とした 9 地震、30 観測点の本震記録について、最深部での単位平面積 (1m^2) 当たりの上昇エネルギー E_u (kJ/m^2) を震源距離 R (km) に対して両対数軸上でプロットしたグラフを図 10 に示す。プロットは大きなバラツキを示しているが、各地震ごとに R と共に E_u が減少する全体的傾向は読みとれる。

図中に示した複数の直線は、各地震のマグニチュードごとに次式により計算した震源距離 R と単位平面積当たりの入射エネルギー E_{IP} の関係である。

$$E_{IP} = TE / \left[4\pi (R \times 1000)^2 \right] \quad (8)$$

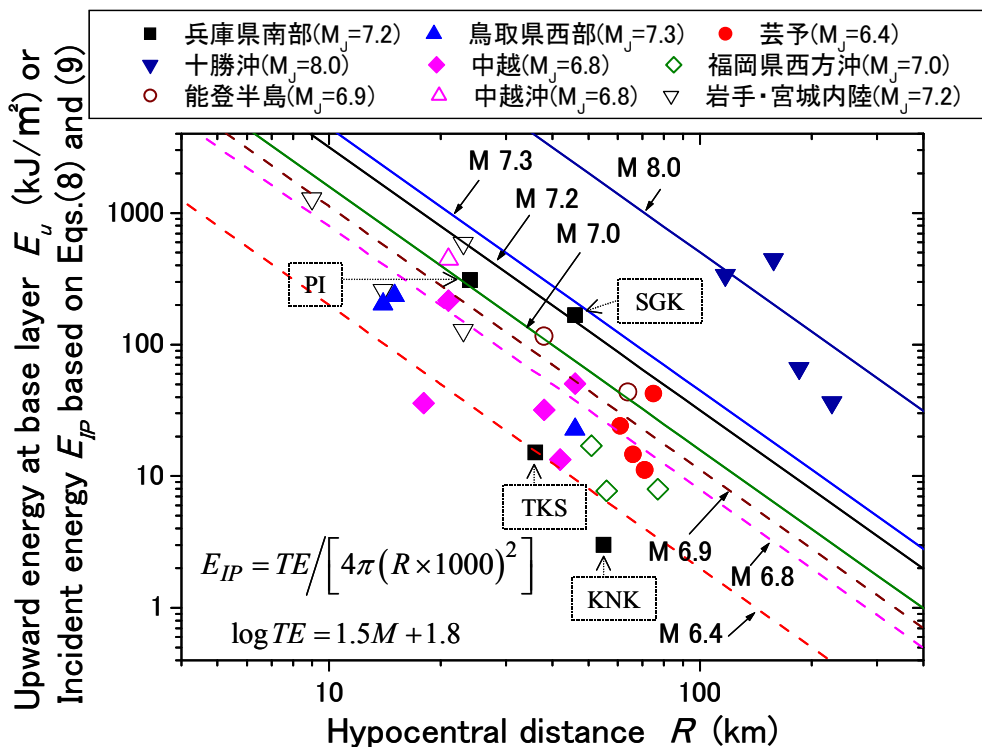


図 10 本震記録より計算した最深部での上昇エネルギーと震源距離との関係

$$\log TE = 1.5M + 1.8 \quad (9)$$

すなわち文献 3)、5)と同様に、断層のエネルギー放出中心（ここでは震源と仮定）からサイトに到達する地震波動エネルギー E_{ip} は式(8)により実体波の球面減衰で近似できると単純に仮定し、放出される総波動エネルギー TE （単位 kJ）は良く知られた式(9)²²⁾により評価している。なお、式(9)の M は本来、表面波マグニチュードを取るべきであるが、ここではその違いは小さいとして気象庁マグニチュードを用いている。

サイトごとの上昇エネルギーのプロットはマグニチュードと概略の対応関係が認められ、 $M_J = 8.0$ の十勝沖地震についてはグラフの最も上方右側に、 $M_J = 6.4 \sim 6.8$ の地震については相対的に下方左側にプロット点が点在している。簡易評価式(8)、(9)による E_{ip} と最深部の上昇エネルギー E_u を対比すると、十勝沖地震についてはある程度良好な一致度が認められる一方で、鳥取県西部地震、福岡県西方沖地震のようにプロット値がかなり下回るものもある。

もちろんマグニチュード M と震源距離 R のみによる単純な式でサイトでの入射エネルギーが評価しきかないことは当然予想され、特に震源付近においては断層の種類、破壊過程（アスペリティー、ディレクティビティー）などの震源断層メカニズムがサイトでの入射エネルギーに大きな影響を及ぼす。たとえば図 10 において兵庫県南部地震の 4 つの鉛直アレーサイトのプロットを眺めると、ほぼ震源断層（横ズレ）上にあった SGK 地点は簡易評価式を上回るエネルギーとなっているのに対し、断層から直交方向に離れた TKS と KNK では簡易評価式を大幅に下回る値となっており、ディレクティビティーの影響が疑われる。また芸予地震については、 E_u は評価式をはるかに上回っていて震源距離は適切なパラメータとなっていないようである。その理由についてはプレートスラブ内で起きた深い地震であることが関わっている可能性があるが、別途詳細な検討が必要である。

しかし、図 10 の結果を全体的に見ると、簡易評価式がエネルギーの上限に近い値を与えていることが分かる。従来から地震動の最大加速度（PGA）や最大速度（PGV）をマグニチュードと震源距離などから評価する距離減衰法が提案されてきた。これに対し、球面波動減衰のごく単純な仮定ではあるが物理的根拠のあるエネルギー評価式(8)、(9)によって、鉛直アレーの 100m 程度の深度での観測波形から計算した上昇エネルギー E_u がある程度まで定量的に評価できたことになり、地震入力を考える際の概略判断に役立つ可能性がある。

図 11 は横軸に各地点での鉛直アレー最深部の V_s をとり、 E_u と E_{ip} の間のエネルギー比を縦軸にとつ

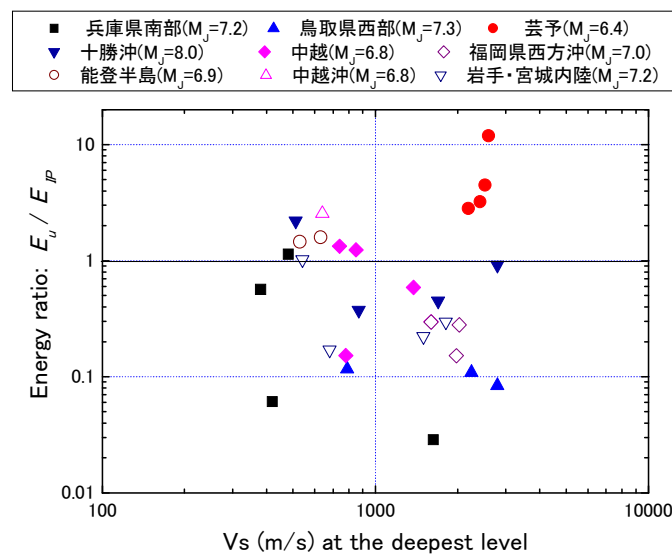


図 11 最深部での V_s と簡易評価式に対する上昇エネルギー比との関係

てプロットしている。30 箇所のアレーサイト最深部は $V_s=3000\text{m/s}$ 近くの地震基盤に当たる硬岩から $V_s=400\text{m/s}$ 程度まで広範な硬さの地盤からなっていることが分かる。これよりまず、芸予地震、鳥取県西部地震、福岡県西方沖地震を除いて、プロットの縦軸の上限が $E_u/E_{IP}=1\sim3$ の範囲にあるのに対し、下限値は $E_u/E_{IP}=0.1$ 程度かそれ以下まで大きくばらついている。各サイトでの上昇波の簡易評価式に対するエネルギー比 E_u/E_{IP} は震源メカニズムなどによって大きく影響されているため、最深部 V_s との相関はその中に埋もれてしまい、少なくともこのようなグラフからは認められない。すなわち今回の研究の範囲では、100m 内外の深度の地盤に到達する上昇エネルギーにその地盤の硬軟が与える影響は震源メカニズムなどの影響に比べてそれほど大きくはないと判断される。

7. まとめ

本研究では従来あまり扱われてこなかった地震波動エネルギーに着目し、近年に発生した強地震による多数の鉛直アレー記録を用いて、SH 波の重複反射を前提とした地盤中のエネルギーフローを分析した。未だ解明すべき点は多く残されているものの、現時点までに得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 鉛直アレー最深部に到達した上昇エネルギー E_u は地表に近づくほど急激に減少する傾向を示し、地表まで到達するエネルギー E_s は最深部上昇エネルギーに対し今回対象とした大半の地点で3割以下に過ぎない。
- 2) 上記1)に関し、地表到達エネルギーと最深部上昇エネルギーの比 E_s/E_u は最深部と地表でのインピーダンス比とある程度の相関が認められ、最深部に比べて地表が軟らかいほど E_s/E_u は小さくなる傾向が見られる。
- 3) 最深部より上部の地盤で損失エネルギー E_w として失われる割合は、今回対象とした大半の地点で上昇エネルギー E_u の3~4割以下である。
- 4) 最深部以浅の地盤が発揮する減衰能（基準厚地盤の重み付き平均減衰定数）と E_w/E_u との間には正の相関がある。また、地表まで達する上昇エネルギーの割合 E_s/E_u が大きいほど損失エネルギーの割合 E_w/E_u も増える傾向にあることが確認できる。
- 5) 多くの地点では一旦表層に運ばれたエネルギーも含め、最深部に到達したエネルギーの6~7割以上は失われることなく再び地中深くに戻され、 E_d/E_u の割合は表層の減衰能が小さいほど大きくなる。
- 6) 最深部での上昇エネルギー E_u を震源距離 R に対してプロットしたグラフは、大きなバラツキにも関わらず、地震マグニチュードの大きさごとに R の増大によって E_u が減少する全体的傾向が読みとれる。
- 7) 球面波動減衰を仮定しマグニチュードと震源距離のみを用いた簡易評価式によりサイトでの入射エネルギー E_{IP} を計算し最深部の上昇エネルギー E_u と対比したところ、震源断層メカニズムを無視しているにも関わらず多くの地震において簡易評価式がエネルギー E_u の上限に近い値を与えており、ごく単純なエネルギー評価式でも、工学的な概略判断に役立つものとなりうる。
- 8) 対象としたアレーサイト最深部の V_s は広範な幅で変化しているが、今回の研究の範囲では、100m程度の深度の地盤に到達する上昇エネルギーにその V_s の大小が与える影響は震源メカニズムなどの影響に比べてそれほど大きくはないと判断される。

謝辞

KIK-netデータを提供いただいた防災科学技術研究所、兵庫県南部地震データを提供いただいた関西電力(株)と神戸市、さらに新潟県中越沖地震データを提供いただいた東京電力(株)に末筆ながら深甚なる謝意を表します。また、多くの地震データの分析に協力いただいた中央大学理工学部土木工学科の歴代の大学院生と卒業研究生に謝意を表します。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編、12章、平成14年、pp.210-221.
- 2) 國生剛治、本山隆一、万谷昌吾、本山 寛：表層地盤における地震波のエネルギーフローと性能設計、日本地震工学会論文集、第4巻、第4号、2004年、pp.1-20.
- 3) Sarma, S. K. : Energy Flux of Strong Earthquakes, *Tectonophysics*, Elsevier Publishing Company, 1970, pp.159-173.
- 4) 秋山 宏： エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計、技報堂出版、1999年.
- 5) Davis, R. O. and Berrill, J. B.: Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vo.10, 1982, pp.59-68.
- 6) Cao, Y. L. and Law, K. T.: Energy approach for liquefaction of sandy and clay silts, Proc. 2nd Intern. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Paper No. 3.38, 1991, pp.491-497.
- 7) Figueroa, J. L., Saada, A. S., Liang, L. and Dahisaria, N. M.: Evaluation of soil liquefaction by energy principles, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120 (9), 1994, pp.1554-1569.
- 8) 風間基樹、鈴木崇弘、柳沢栄司：地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用、土木学会論文集631/III-48、1999年、pp.161-177.
- 9) 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/III-51、2000年、pp.257-267.
- 10) Kokusho, T. and Ishizawa, T.: Energy approach to earthquake-induced slope failures and its implications, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.133, No.7, 2007, pp.828-840.
- 11) Kokusho, T., Ishizawa, T. and Nishida, K.: Travel distance of failed slopes during 2004 Chuetsu earthquake and its evaluation in terms of energy, *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Elsevier, 29, 2009, pp.1159-1169.
- 12) Suetomi, I. and Yoshida, N.: Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, *Special Issues of Soils and Foundations*, 1998, pp.11-22.
- 13) Trifunac, M. D. and Todorovska, M. I.: 1971 San Fernando and 1994 Northridge, California, earthquakes: did the zones with severely damaged buildings reoccur?, *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Elsevier, 24, 2004, pp.225-239.
- 14) Bakir, B. S., Yilmaz, M. T., Yakut, A. and Gulkan, P.: Re-examination of damage distribution in Adapazari: Geotechnical considerations, *Engineering Structures*, Elsevier, 27, 2005, pp.1002-1013.
- 15) Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N.: *Theory of Elasticity*, Third Edition, McGraw-Hill International Editions, 1970, p.495.
- 16) Schnabel, P.B., Lysmer, J. & Seed, H.B.: SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. *Report EERC 72-12*, University of California Berkeley, 1972.
- 17) Sato, K., Kokusho, T., Matsumoto, M. and Yamada, E.: Nonlinear seismic response and soil property during strong motion, *Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken Nambu Earthquake*, *Soils and Foundations*, 1996, pp.41-52.
- 18) 鈴木 拓：鉛直アレー記録を用いた地震波動エネルギーの算定と表層地盤中の伝播特性、中央大学理工学研究科、土木工学専攻修士論文、2010年.
- 19) 石原研而：土質動力学の基礎、第2章土の動的変形特性の表現方法、鹿島出版会、1976、pp.7-35.
- 20) Kokusho, T., Aoyagi, T. and Wakunami, A.: In situ soil-specific nonlinear properties back-calculated from vertical array records during 1995 Kobe Earthquake, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.12, 2005, pp.1509-1521.
- 21) Joyner, W. B. and Fumal, T. E.: Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion, Proc. of 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, 1984, PP.777-783.
- 22) Gutenberg, B.: The energy of earthquakes, *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, Vol.112, No.455, 1956, pp.1-14.

(受理：2010年 9月22日)
(掲載決定：2010年 11月19日)

Subsurface Energy Flow of Seismic Wave based on Strong Motion Records Observed in Vertical Arrays

KOKUSHO Takaji ¹⁾ and SUZUKI Taku ²⁾

- 1) Member, Professor, Department of Civil & Environment Engineering, Chuo University, Dr. Eng.
2) Ex-graduate student, Graduate Course, Chuo University (now: Tokyo Electric Power Company)

ABSTRACT

Seismic wave energy in surface layers is calculated based on vertical array records at 30 sites during 8 strong earthquakes recently occurred in Japan by assuming vertical propagation of SH wave. The upward energy tends to decrease generally as it goes up from the base layer to the ground surface particularly in soft soil sites due to drastic impedance changes at soil boundaries. Hence, only 30% of the upward energy reaches to the ground surface at the maximum, and about 30-40% of that or less tends to dissipate in the ground shallower than the deepest point with the rest 60-70% returning to the earth again, in most sites studied here. It is also found that the upward energy at the depth of around 100 m may be roughly evaluated for engineering purposes by a simple equation based on the spherical energy radiation from focal points.

Key Words: Seismic wave energy, Vertical array, Impedance ratio, Damping ratio