



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(補遺)

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

前論文では、近年我国で発生した強地震の鉛直アレー記録を用いて、30地点での表層地盤中の地震波動エネルギーフローをSH波重複反射理論に基づき計算し、エネルギーは波動伝播中にほぼ一定に保持されるとしてきたこれまでの認識とは異なり、基盤から地表に向かうほど低減する一般的傾向を明らかにした。ここでは前回の結果に基づき、隣接する上層と下層の間、さらに任意の層と鉛直アレー基盤層の間の上昇エネルギーの比を計算した。その結果、上昇エネルギー比が、地震基盤に近い硬質岩盤から地表付近の軟弱層に至るまで、対応する層間インピーダンス比のほぼ0.70乗に比例して減少することを見出した。この関係を使って、鉛直アレー最深部での上昇エネルギーから地震基盤での入射エネルギーを計算し、震源距離に対してプロットした。

キーワード： 地震波動エネルギー、SH波、インピーダンス比、鉛直アレー、基盤

1. はじめに

地震に対する地盤や構造物の挙動を理解するためには、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フローを調べておくことは有用である。前論文¹⁾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(前論文表1参照)に基づき、地盤中のエネルギーフローをSH波の重複反射理論に基づいて分析し、表層地盤での深度に対す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上昇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検討した。その結果、鉛直アレー最深部に到達した上昇エネルギー E_u は、地表に近づくほど減少する傾向を示し、地表まで到達するエネルギーは最深部上昇エネルギーに対し、ほとんどの地点で大幅に減少することが分かった(前論文図7)。この知見は、地中を伝播する地震波動のエネルギーはほぼ保持されるとする従来の考え方^{例えば²⁾}と大きく異なる。本補遺ではこの点にさらに踏み込み明確にするため、地層間での上昇エネルギーの比とインピーダンス比の関係に着目したデータ整理と分析を行った。

2. 地層間での上昇エネルギーの比とインピーダンス比の関係

まず、前論文と同じ9地震30地点の鉛直アレー記録から計算した各層での上昇エネルギー E_u (前論文図7参照)の深度分布に基づき、アレー地盤の各層において、図1に示すように隣接する2層それぞれ

の上部境界に入射する上昇エネルギー E_u の比〔上層/下層； $\beta = (E_u)_{upper} / (E_u)_{lower}$ 〕を地表層まで計算した。また、本震に対応して逆計算で求めた各層の等価S波速度 V_s （前論文図2参照）と密度 ρ によりインピーダンス ρV_s を計算し、やはり隣接する2層のインピーダンス比〔上層/下層； $\alpha = (\rho V_s)_{upper} / (\rho V_s)_{lower}$ 〕を算出した。この際に用いた密度は、 $V_s \leq 300$ m/s で $\rho = 1.6 \sim 2.0$ t/m³、 300 m/s $\leq V_s \leq 700$ m/s で $\rho = 2.0 \sim 2.2$ t/m³、 700 m/s $\leq V_s \leq 1000$ m/s で $\rho = 2.3 \sim 2.4$ t/m³、 1000 m/s $\leq V_s \leq 2800$ m/s で $\rho = 2.5 \sim 2.7$ t/m³の値を使っている。このようにして、隣接上下層間のインピーダンス比 α と上昇エネルギー比 β の関係を9地震30地点の鉛直アレー観測点すべてについて異なる記号でグラフ上にプロットしたのが図2である。一般に上層は下層に比べインピーダンスが小さい場合が多いことから、当然インピーダンス比 $\alpha \leq 1.0$ の点が多く、それらの上昇エネルギー比 β はインピーダンス比 α に対し比較的良好な相関を示すことが分かる。一方、 $\alpha \geq 1.0$ となる点もかなり存在するが、それらは下層より上層のほうがインピーダンスが大きい逆転層に対応している（前論文図2参照）。それらの上昇エネルギー比は大きくばらついており統一的评价が難しい。

インピーダンス比が異なる層境界に平面波が下から入射した場合、その下層と上層の間の上昇エネルギーの比 β は、もし上層に下降波が存在しない場合は α の関数として $\beta = 4\alpha / (1 + \alpha)^2$ で表わされる³⁾。しかし、一般的な多層系地盤の層境界では境界を挟む上下層での上昇波と下降波が関わる式となるため、 β を2層間のインピーダンス比 α による単純な理論式で表わすことは困難と思われる。ここでは、図2の $0 \leq \alpha \leq 1.0$ のプロットに調和的な近似式として $\beta = \alpha^n$ の関数を定めた。 $\alpha = 0$ の場合は当然 $\beta = 0$ となり、また $\alpha = 1.0$ の時は層境界のない均一層に対応しているため $\beta = 1.0$ と解釈できる。プロットとの残差二乗和が最小となる条件からベキ定数 $n = 0.70$ （相関係数：RC=0.88）が決まり、次式が得られた。

$$\beta = \alpha^{0.70} \quad : \quad \alpha \leq 1.0 \quad (1)$$

なお、図2に黒丸で示した兵庫県南部地震KNK地点のプロットについては、前論文でも述べた通り他と傾向がかなり異なっており、1次元波動伝播の適用性の観点などから問題あるデータと考え近似式の誘導においては除外している。図2にはこのように決定した式(1)が実線カーブで示されているが、 $\alpha \sim \beta$

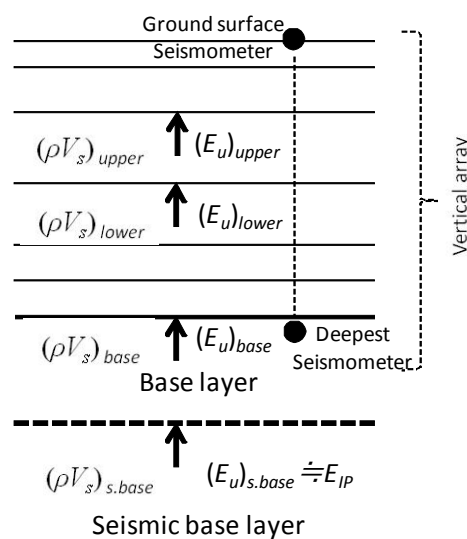


図1 鉛直アレー地盤各層および地震基盤での上昇エネルギー E_u とインピーダンス ρV_s

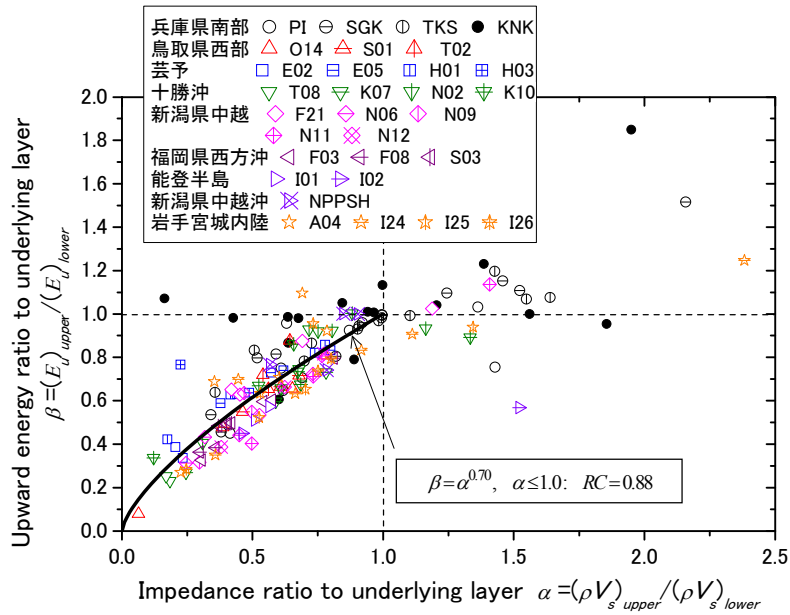


図2 30鉛直アレー地点での地層間上昇エネルギー比 β のインピーダンス比 α に対するプロット

関係は式(1)によりかなり良好に近似できることが分かる。ここに含まれる鉛直アレー地点の地層構造は軟弱地盤から硬質岩盤まで V_s 値の変化幅は大きく(前論文の図2参照)、地表付近には液状化が発生した地点も含まれているため、発生ひずみレベルに応じて等価線形化した V_s 値を用いて分析を行っている(前論文表1参照)。このように地盤物性の非線形性の程度が大きく異なる地点が含まれているにもかかわらず図2のプロットの集中度は良いことから、地盤の硬軟を問わず式(1)の適用性は高いと考えられる。

ところで、一般に地震基盤での硬質岩盤のS波速度は $V_s=3000$ m/s、密度は $\rho=2.7$ t/m³程度とされているが、このインピーダンス値 $\rho V_s=8100$ t/m²/sに達するまで、ほぼ式(1)に従って上昇エネルギーは増大すると考えることができるであろうか。インピーダンスは地盤の深度とともに大局的には増加することは間違いないが、途中にインピーダンス逆転層を挟むとそこでの上昇エネルギー比は図2から分かる

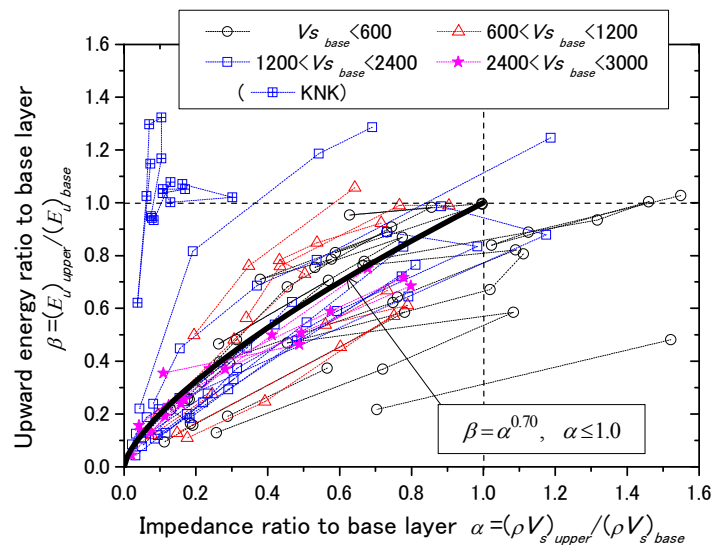


図3 30鉛直アレー地点での各層と基盤間の上昇エネルギー比 β とインピーダンス比 α との関係(最深部 V_s 値(V_{s_base})の4グループ別表示)

ように乱れる傾向がある。そこでこれらの影響を含めた全体的傾向を見るために、図3では鉛直アレー最深部の上昇エネルギー $(E_u)_{base}$ とインピーダンス $(\rho V_s)_{base}$ (図1参照)を基準として、それより上部にある各層の上昇エネルギー比 $\beta = (E_u) / (E_u)_{base}$ とインピーダンス比 $\alpha = (\rho V_s) / (\rho V_s)_{base}$ を計算し、それらを縦軸と横軸にとって30地点についてプロットしている。なおここでは地点名ではなく、鉛直アレー最深部の V_s 値を4段階に分類してそれぞれ異なる記号で示す。同じ地点のプロットは破線で結んでおり、一般的には左下に向かうほど、地表近くの層と最深層との比を表わしている。図中にはやはり式(1)による近似カーブを重ね書きしている。この場合、式(1)は隣接層間だけでなく、離れた任意の2層間の α 、 β についても適用可能としていることになる。

ところで前論文で述べたように、上昇エネルギーの値は地表と地中の観測波から算出した値を各深度ごとに地表と地中地震計との距離近接度により重み付き平均して計算誤差を処理している。その影響やインピーダンス逆転層の存在により、プロットのバラツキは図2よりかなり大きくなるものの、やはり異常な値を示すKNK地点を除いては、式(1)でほぼ平均的傾向が近似できていると言えよう。特に最深部が $2400 < V_s < 3000 \text{m/s}$ の極めて硬質な岩盤からなるサイト(星印)については浅部・深部間エネルギー比の式(1)による近似度が良く、地震基盤に近い深部に対する地盤浅部のエネルギー比は式(1)である程度近似できると言えよう。

3. 上昇エネルギーと地震被害との関係

以上の結果は、基盤に同じ地震エネルギーが与えられた場合、地表では V_s 値の小さな軟弱地盤の方が硬質地盤より上昇エネルギーが小さくなることを意味している。前論文¹⁾や文献3)でも指摘したように、これは一見、軟弱地盤ほど地震被害が大きくなるとのこれまで広く受け入れられてきた認識とは整合していないように見える。その第一の理由は、これまで一口に地震被害とされてきたものの中にライフライン被害など地盤に起因したものが多く含まれているためではないかと思われる。それ以外にも不同沈下や側方流動などの地盤変形が上部構造の被害につながっている場合も考えられ、地震被害の分析に当たっては地盤被害か上部構造物本来の被害かを峻別することが重要と思われる。

そのうち地盤被害については、一般のサイト地盤を図4のように表層地盤と基盤(それぞれのインピーダンスは $\rho_1 V_{s1}$ と $\rho_2 V_{s2}$)からなる2層系で単純化して考えてみよう。表層地盤の上昇変位波を、鉛直

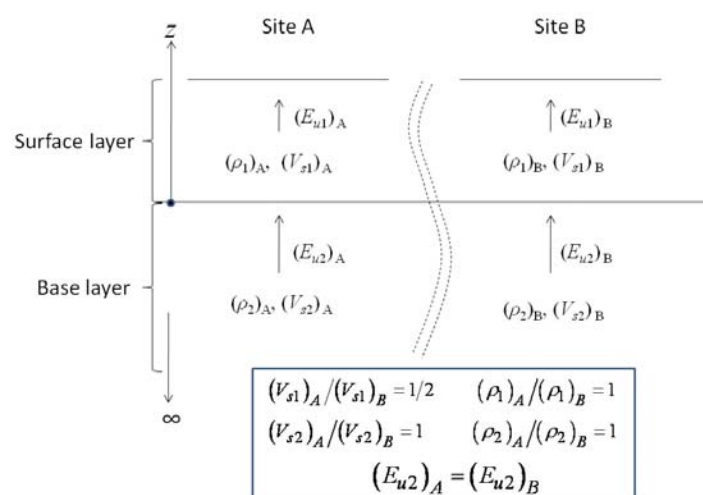


図4 サイトA, Bの2層地盤での上昇エネルギーの検討

上方への座標 z と時間 t による任意の関数 $f(\)$ により $u = f(z - V_{s1}t)$ で表わすと、上昇波の粒子速度 \dot{u} とせん断ひずみ γ の関係は $\gamma = -\dot{u}/V_{s1}$ となるから、表層の上昇エネルギー E_{u1} (前論文の式(3)参照) は次式最右辺の形で表わすことができる。

$$E_{u1} = \rho_1 V_{s1} \int (\dot{u})^2 dt = \rho_1 V_{s1}^3 \int \gamma^2 dt \quad (2)$$

したがって、上昇エネルギー E_{u1} を $\rho_1 V_{s1}^3$ で除することにより次の値が得られる。

$$\int \gamma^2 dt = E_{u1} / \rho_1 V_{s1}^3 \quad (3)$$

この式の左辺は、一つの地震動によって表層地盤に生じるひずみ γ の時間累積効果を表わす「累積ひずみパラメータ」と見なすことができ、これが大きいほど地盤被害が生じやすいと考えられる。

図4のようにサイト A とサイト B の 2 層系地盤において、A の方が B に比べ表層の V_{s1} のみが 1/2 と軟弱で、その他はすべて同一条件の場合を考える。すなわち、

$$(V_{s1})_A / (V_{s1})_B = 1/2, (V_{s2})_A / (V_{s2})_B = 1, (\rho_1)_A / (\rho_1)_B = 1, (\rho_2)_A / (\rho_2)_B = 1 \quad (4)$$

かつ、 $(E_{u2})_A = (E_{u2})_B$ 、すなわち基盤での上昇エネルギーは同じとする。表層・基盤間のインピーダンス比 $\alpha = \rho_1 V_{s1} / \rho_2 V_{s2}$ は 2 サイト間で $\alpha_A / \alpha_B = 1/2$ であるため、式(1)により、

$$\beta_A / \beta_B = (E_{u1} / E_{u2})_A / (E_{u1} / E_{u2})_B = (E_{u1})_A / (E_{u1})_B = (\alpha_A / \alpha_B)^{0.70} = (1/2)^{0.70} = 0.62 \quad (5)$$

となり、表層地盤中の上昇エネルギー E_{u1} は A では B に比べ 0.62 倍と小さくなる。一方、式(3)の累積ひずみパラメータの 2 地点間の比は次式で計算される。

$$\left(\int \gamma^2 dt \right)_A / \left(\int \gamma^2 dt \right)_B = \left[(E_{u1})_A / (E_{u1})_B \right] / \left[(\rho_1 V_{s1}^3)_A / (\rho_1 V_{s1}^3)_B \right] = 0.62 / (1/2)^3 = 5.0 \quad (6)$$

つまり V_s が 1/2 の軟弱地盤 A の方が上昇エネルギーは小さくても地盤被害は生じやすくなり、被害実態と矛盾しないと考えることができよう。

一方、1923 年関東地震での東京下町のように、これまでの地震で軟弱地盤の方が木造建物の倒壊が大きくなる傾向が報告されてきた。この場合、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³⁾。一方で、強い地震動を受けた場合に、軟弱地盤になるほど基礎地盤の変形によらない上部構造物自体の震動被害が大きくなる普遍的傾向が存在するかについて、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ことは前論文¹⁾でも述べた。この重要なテーマに対しさらに解明の努力がなされなければならない。

4. 地震基盤でのエネルギー推定

9 地震についての鉛直アレー最深部での上昇エネルギー $(E_u)_{base}$ から、式(1)を用いて $V_s = 3000$ m/s、 $\rho = 2.7$ t/m³ とした地震基盤での上昇エネルギー $(E_u)_{s,base}$ を計算し、震源距離に対して白抜きの大きな記号でプロットしたのが図5である。すべての地点で、鉛直アレー最深部での値 (小さな塗潰し記号; 前論文図10参照) に比べ、上昇エネルギーは増加している。図中には、実体波の球面波エネルギー拡散を仮定した簡易評価式 (前論文式(8)(9)参照) で計算した入射エネルギー E_{IP} と震源距離 R の関係が、地震マグニチュード (M) ごとに右下がりの直線で示されている (前論文図10参照)。前論文で述べたように、この直線で示した $E_{IP} - R$ 関係と鉛直アレー最深部での上昇エネルギー $(E_u)_{base}$ のプロットはある程度の相関性が認められた。今回、これを地震基盤での上昇エネルギー $(E_u)_{s,base}$ に置換えると、やはりある程度の相関性は認められるが、球面波拡散式との一致度は改善される地点もある一方で、開きが拡大する地点

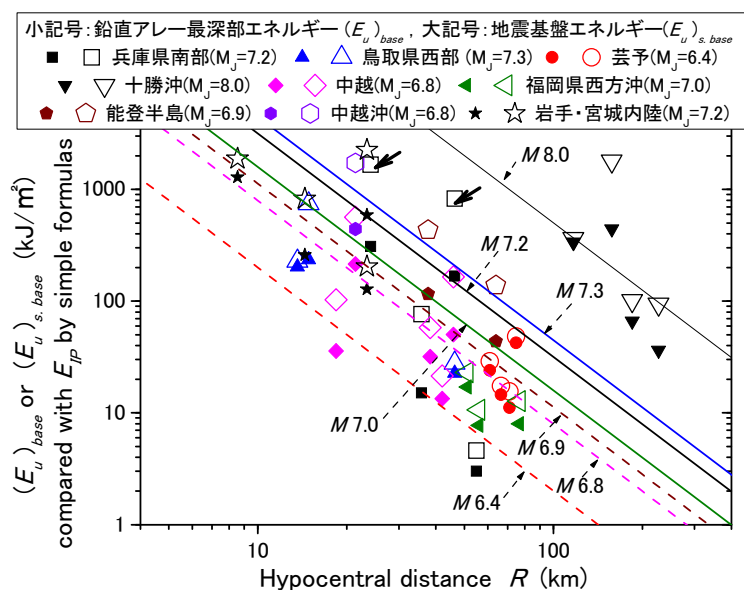


図5 鉛直アレー最深部または地震基盤での上昇エネルギー $(E_u)_{base}$ 、 $(E_u)_{s.base}$ と震源距離 R との関係

もある。例えば、兵庫県南部地震のうち図中に矢印で示したPI地点とSGK地点については球面波拡散式を大きく上回ることになるが、これらについては、断層破壊方向に位置しフォワード・ディレクティブティーによるエネルギー集中が指摘されている⁴⁾。他にも理論線から大きく外れた地点について、今後、断層メカニズムの観点からの検討を行っていく必要がある。

また今回は、上昇波の斜め入射が想定される地震基盤に至るまで、実体波の鉛直伝播を前提とした重複反射理論による評価となっており、今後その面からもさらに詳細な検討が必要である。

5. まとめ

- 1) 波動伝播中にエネルギーはほぼ一定に保持されるとしてきたこれまでの認識とは異なり、鉛直アレーでの地震波上昇エネルギーは地表に近付くほど減少する。その減少傾向において各地層間の上昇エネルギー比はインピーダンス比のほぼ0.70乗に比例し、式(1)により近似できることが分かった。
- 2) この近似式により、 $V_s=3000\text{m/s}$ 程度の硬質岩盤からなるとした地震基盤での入射エネルギーから任意の層での上昇エネルギーが概略評価できる。
- 3) この近似式によれば、地表層が軟弱な方が硬質の場合より地震波動エネルギーは小さくなる。これは地震被害と地表層との関連についての従来の一般的認識に反するように思われるが、少なくとも地盤に関する地震被害については矛盾なく説明可能である。
- 4) 上記の関係を用いて地震基盤での上昇エネルギーを鉛直アレー最深部のエネルギーから計算したところ、マグニチュード、震源距離による簡易評価式との大まかな相関が認められるが、評価式と大幅に異なる地点もあり、これらについては今後、震源メカニズムの視点からの精査が必要である。

参考文献

- 1) 國生剛治、鈴木 拓：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、日本地震工学会論文集、第11巻、第1号、14-31、2011.
- 2) 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.

- 3) 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、1-20、2004.
- 4) Somerville, P. : Forward rupture directivity in the Kobe and Northridge earthquakes and implications for structural engineering, Proc. International Workshop on Site Response subjected to Strong Earthquake Motions, Yokosuka, Japan, Vol.2, 324-342, 1996.

(受理： 2012年 5月23日)
(掲載決定： 2012年 8月23日)

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

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

By using the seismic wave energy in surface layers calculated in the previous paper ¹⁾ based on vertical array records at 30 sites during 9 strong earthquakes, it is found that the upward energy decreases with decreasing ground depth in proportion to the power of 0.70 of the impedance ratio between layers. Based on this finding, the incident energies at the seismological bedrock were calculated from the energies at the deepest point of the arrays to correlate with corresponding hypocentral distances and seismic magnitudes.

Key Words: Seismic wave energy, Vertical array, Impedance ratio, Bed rock.