



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

國生剛治¹⁾、本山隆一²⁾、万谷昌吾²⁾、本山 寛³⁾

1)正会員 中央大学理工学部土木工学科、教授 工博

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

2)元中央大学大学院理工学研究科博士前期課程

3) 中央大学大学院理工学研究科博士前期課程

要 約

工学的に重視される SH 波の鉛直伝播を前提とし、1995 年兵庫県南部地震の鉛直アレーの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計算した。さらにその結果を理論的に解釈するために、重複反射計算によってモデル地盤でのエネルギーの流れと損失量を分析した。その結果、地表でのエネルギーは表層地盤の共振効果の発揮程度、表層地盤と基盤のインピーダンス比、表層地盤の減衰定数や層構成などに依存することが分かった。また、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ること、軟弱地盤で共振によるエネルギー集中効果が起きる場合でも、大地震時には表層での減衰による損失エネルギーが大きくなり、軟弱地盤に被害が集中しやすいとの従来の一般的認識とは整合しない可能性があることも分かった。しかし、波動エネルギーは構造物に発生するひずみに直接結びついているため、エネルギーを共通尺度として設計地震動を定義することにより合理的な性能設計が可能となることを示した。

キーワード：地震波動エネルギー、SH 波、インピーダンス比、減衰、性能設計

1. まえがき

地震に対する構造物設計は、従来から慣性力に直結した震度や加速度を用いる力の釣り合いによる設計法が使われてきたが、最近では速度さらにそれらのスペクトル指標も使われるようになってきた。その背景として、地震による構造物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指標のほうが被害に密接に結びついているのではないかと認識がある。

実際、最近の地震では観測網の高密度化のおかげでますます大きな加速度が観測されるようになってきた。たとえば 1993 年釧路沖地震、1994 年ノースリッジ地震、ごく最近では 2003 年の三陸南地震、宮城県北部地震、十勝沖地震などで、1G 近くまたはそれをはるかに越える最大加速度が観測されたにも関わらず、それが必ずしも大きな被害とは結びついていないことが指摘されている。一方、1995 年兵庫県南部地震では観測された最大加速度は 0.8G 程度であったが、比較にならないほどの甚大な被害を引き起こした。その理由として、

地震による構造物被害は加速度の値とは直結せず、むしろ地震波のエネルギーに依存しているためと考えられるのではないだろうか。

実際、構造物被害は部材での損失エネルギーで規定され、地震の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。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の段階を規定した性能設計法が取り入れられ、構造物ごとの耐震性能の段階に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きた。そのためには従来の加速度による力の釣り合いよりは変形やひずみの評価が可能なエネルギーによる設計の方が適していると思われる。それにも関わらず、地震波のエネルギーを直接的に設計に結びつけようとする試みはこれまでほとんどされてこなかった。もともと、地震学においては震源から放出される地震波のエネルギーを算出する試みがされ、地震マグニチュードの概念に結びついている¹⁾。地震工学の分野でも、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提案されている²⁾。しかしながら、表層地盤での地震波動エネルギーの流れに着目した指摘は散見されるものの³⁾、それを詳細に分析し、構造物の設計に反映させることを目指した動きはほとんどなかったと言えよう。

本研究ではその手始めとして、工学的に重要視される実体波のSH波を対象として、1995年兵庫県南部地震の鉛直アレー記録に基づき表層地盤中での地震波のエネルギーフローを分析する。また、その結果を理論的に解釈するために、単純な多層地盤の1次元重複反射計算によって表層地盤でのエネルギーの伝達と損失の基本的メカニズムを明らかにする。さらにそれらの結果に基づき、性能設計への地震波動エネルギーの有用性について考える。

2. 波動エネルギーと鉛直アレー記録を用いたエネルギー算出方法

地震波動は、実体波成分と表面波成分からなるが、本研究では大部分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、金井らの研究^{4), 5)}からも明らかのように、通常の構造物の設計にはSH波を最も主要な地震波動として選択することは、許容しうると考えられる。

SH波動が単位平面積を有する微小要素中を一方向に伝播していくとき、そのエネルギーは、要素の運動エネルギー E_k とひずみエネルギー E_e の2つに分けて考えることができる。せん断波速度を V_s とし、微小な Δt 時間にほぼ剛体的に動く地盤内の微小要素を $V_s \Delta t$ とすると、微小要素が水平方向にゼロから u だけ変位する時になされる単位平面積あたりの仕事が Δt 時間内の運動エネルギー増分となることから、

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

と表される。次に E_e は、波動が伝播する際に地盤にひずみが生じることにより発生するから、地盤に働くせん断応力を 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 Δt 時間内の弾性ひずみエネルギーの増分は、

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

と表される。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、ここでは減衰を含まない式(2)で弾性ひずみエネルギーを表現している。地震時の波動の持つ全エネルギーの増分は、運動エネルギー増分 ΔE_k とひずみエネルギー増分 ΔE_e の和であるから、

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_e = \rho V_s \Delta t \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \quad (3)$$

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、エネルギー流量と呼ぶことにする。

$$dE/dt = \rho V_s \left(\frac{du}{dt} \right)^2 \quad (4)$$

また、地震波が微小要素を通過する時間を $t=t_1 \sim t_2$ としたとき、エネルギー E は

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{dE}{dt} \right) dt = \rho V_s \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad (5)$$

と表すことができ、この時間内に要素を通過した累積の波動エネルギーを算定することができる。

次に地震観測記録から SH 波の鉛直伝搬を前提として波動エネルギーを算出する方法について述べる。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、地表記録を用いて重複反射理論により任意の深度での上昇波・下降波が計算できるため⁶⁾、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。しかし、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。その場合、鉛直アレー記録があれば地表と同時に深部の地震波の情報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⁷⁾⁸⁾。

鉛直アレーサイトにおける解析では、深部からの地震波の上昇エネルギーを算定するために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中の 2 深度（最深点と 2 番目に深い点）で観測された鉛直アレー観測記録の加速度時刻歴を使用することにする。まず、この 2 深度の観測波を重複反射理論に基づいてその観測深度における上昇波と下降波に分解する。その方法については文献 7) 8) に述べられているが、その骨子を述べると以下の通りである。

図 1 に示すように、地表層を第 1 層とし基盤層を第 n 層とする全部で n 層からなる水平成層を考え、そこを鉛直に伝搬する SH 調和波の変位 u を z 座標を下向きにとり次式で表す。

$$u = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)} \quad (6)$$

ここに、 t は時間、 ω は角振動数、 A, B は定数、 k は波数で $k^2 = \rho\omega^2/G^*$ で表される。 ρ は土の密度、 G^* は複素剛性であり、 G^* はせん断剛性と減衰定数 D により次式で表される。ここで、減衰定数 D は振動数に依存しない非粘性減衰を仮定している。

$$G^* = G(1 + 2iD) \quad (7)$$

第 m 層での波の振幅 A_m, B_m と第 $m+1$ 層での波の振幅 A_{m+1}, B_{m+1} との関係は次式ようになる。

$$\begin{Bmatrix} A_{m+1} \\ B_{m+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{m+1}G_{m+1}^* + k_mG_m^* e^{ik_m h_m} & k_{m+1}G_{m+1}^* - k_mG_m^* e^{-ik_m h_m} \\ 2k_{m+1}G_{m+1}^* & 2k_{m+1}G_{m+1}^* \\ k_{m+1}G_{m+1}^* - k_mG_m^* e^{ik_m h_m} & k_{m+1}G_{m+1}^* + k_mG_m^* e^{-ik_m h_m} \\ 2k_{m+1}G_{m+1}^* & 2k_{m+1}G_{m+1}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} = [T_{m+1}] \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} \quad (8)$$

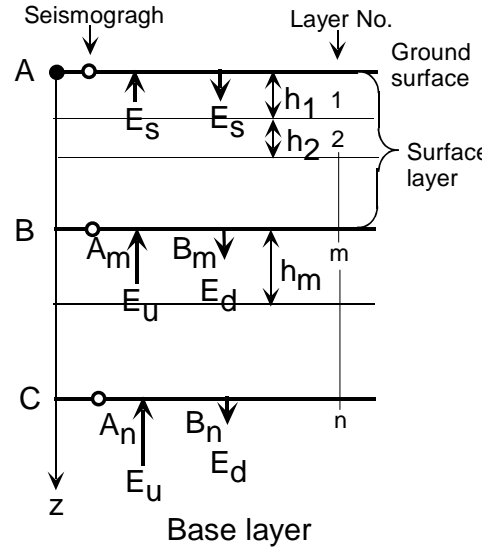


図 1 鉛直アレー記録によるエネルギーフローの解析モデル

ここに、 h は層厚であり、各特性値の添え字は層番号を意味している。

いま、図 1 に示す第 m 層の上端 B と第 n 層の上端 C で地震観測記録 u_m 、 u_n が与えられているとし、 z を各層ごとの局所座標として、原点を各層の上端とすると、

$$\begin{aligned} u_m &= U_m e^{i\omega t} = (A_m + B_m) e^{i\omega t} \\ u_n &= U_n e^{i\omega t} = (A_n + B_n) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (9)$$

式(2)の中の行列を $[T_{m+1}]$ で表すと、第 m 層と第 n 層の振幅の関係は、次式のように表せる。

$$\begin{Bmatrix} A_n \\ B_n \end{Bmatrix} = [T_n][T_{n-1}] \cdots [T_{m+1}] \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} = [T_{n,m+1}] \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここに、 $[T_{n,m+1}] = [T_n][T_{n-1}] \cdots [T_{m+1}]$ は 2×2 の行列で、その要素を T_{11}, T_{12}, \dots で表す。式(9)、(10)より観測波の振幅 U_m, U_n は、

$$\begin{Bmatrix} U_n \\ U_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} + T_{21} & T_{12} + T_{22} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} = [P_{n,m+1}] \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} \quad (11)$$

したがって、第 m 層と第 n 層での上昇波、下降波の振幅は次式で与えられることになる。

$$\begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} = [P_{n,m+1}]^{-1} \begin{Bmatrix} U_n \\ U_m \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} A_n \\ B_n \end{Bmatrix} = [T_{n,m+1}][P_{n,m+1}]^{-1} \begin{Bmatrix} U_n \\ U_m \end{Bmatrix} \quad (12)$$

以上は、角振動数 ω の調和波に対する解であるが、不規則波に対する応答はフーリエ級数展開の手法で不規則波を ω の異なる調和波に分解し、それぞれに式(12)を適用してから重ね合わせればよい。このようにして、深部の 2 深度の観測記録からそれぞれの深度での速度波の上昇成分と下降成分が計算できる。これに、式(4)、(5)を適用することにより上昇・下降する波動エネルギーの流量や累積値が計算できることになる。

一方、図 1 に示す地表 A 点への上昇エネルギーは、地表地震計の記録を用い、自由表面での全反射を前提に速度振幅を半分にして式(4)、(5)により計算できる。なお、すべての計算に当たって、数値積分での基線からのずれを避けるため観測波に含まれる 10 秒以上の長周期成分をカットしている。

3. 兵庫県南部地震での鉛直アレーサイト地盤のエネルギーフロー

ここでは、兵庫県南部地震において 4 カ所の鉛直アレーサイトで得られた本震記録を用いた。すなわち、震源断層から近い順に、神戸市のポートアイランド(PI)、尼崎市の関西電力総合技術研究所(SGK)、高砂市の関西電力高砂火力発電所(TKS)、和歌山市の関西電力海南港変電所(KNK)であり、以下ではカッコ内の略称により表記する。それぞれの地点の地盤の土質構成、地震計設置深度、S 波検層により測定した S 波の伝播速度 V_s 、さらに逆解析により NS・EW 方向について同定した V_s と減衰定数の深度分布を図 2 に示す。なお、逆解析についての詳細は文献 9)、10)を参照願いたい。

いずれの地点も地表から最深レベル 84m ~ 100m の間に、3 ~ 4 個の 3 方向加速度計が設置されている。このうちの、深い方の 2 個の地震計(最深点を C、2 番目に深い点を B で各地盤柱状図に示す)の水平加速度記録を用いて、それぞれのレベルでの上昇波と下降波の分離を式(12)により行った。このためには、地震を記録した 2 深度間の地盤の物性値が必要となる。図 2 より分かるように、S 波検層により得られた微小ひずみ時の V_s (V_s -initial) に比べて、本震での同定 V_s (V_s -inv.) は地表(A 点)付近では大幅に低減している。それに対して B 点以深では V_s の低減率は 20% 程度かそれ以下であり、震源から離れた KNK では 5% 以下である。したがって、深い位置の地震記録を用いることにより、それだけ信頼性の高いエネルギー評価が可能となることが期待できる。ここでは、低減率はそれほど大きくないにしろ、逆解析に基づく V_s と減衰定数 D を用い

て以下の解析を行った。

一方、地表(A点)への上昇エネルギーの計算では地表付近のVsが必要となる。しかし地盤の非線形化が進んだため、S波検層による微小ひずみ時のVsとは大きく隔たっており、信頼すべき実測値はない。ここでは、図2に示す鉛直アレー記録を用いた逆解析から得られたVs値^{9), 10)}を用いている。解析に用いた地震波は、あらかじめ設置誤差の検討を行い、その結果により方向修正を加えたものである¹¹⁾。

図3~6には各地点での計算結果を示す。最上段には鉛直アレー4地点の水平方向の地表(A点)での上昇エネルギー E_s 、深度B、Cでの上昇エネルギー E_u 、下降エネルギー E_d および2つのエネルギー差($E_u - E_d$)の時刻歴を示している。エネルギーはすべて平面積1m²あたりの値で表している。また各図の下段には、A、B、C点での上昇波・下降波の速度波形を示している。

3.1 PI 地点

図3にはPI地点の主軸方向(NSから反時計回りに46度¹¹⁾)についての計算結果を示す。上昇エネルギー E_u は主要動の大きな $t=6.3s$ までと $t=10.0s$ まで大きく上昇しほぼ最終値に至っている。その値は最深レベル(C点)の主軸方向で250kJ/m²であり、主軸直角方向の55kJ/m²と合わせたGL-83.4mのレベルでの上昇エネルギーの合計は305kJ/m²となる⁶⁾。これは、1m²に1回づつ質量1tの錘を地上高さ約31mから落下させたときに地盤に加わるエネルギーに相当する。GL-32.4m(B点)における E_u は同様な時間変化を示すが、その値はC点の値のほぼ80%である。さらに地表(A点)での上昇エネルギー($E_s = E_u$)は、C、B点に比べてはるかに小さく2方向を合わせてC点の上昇エネルギーの2割程度であり、地表に近づくほどエネルギーは低下する傾向が見える。一方、下降波のエネルギー E_d は上昇波に比べるとかなり小さ

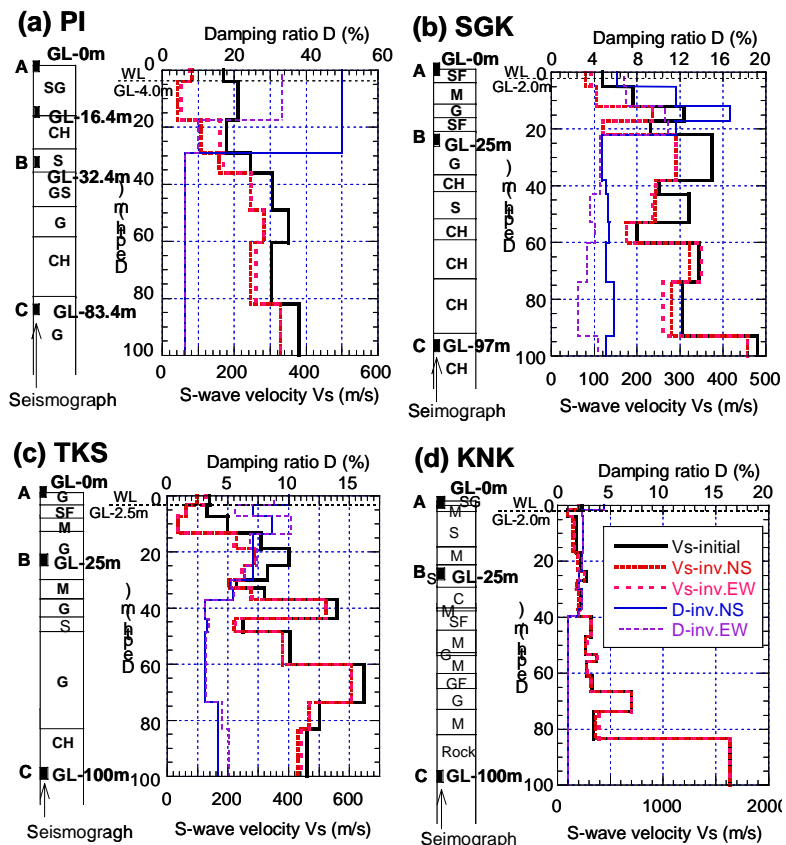


図2 兵庫県南部地震での鉛直アレー4地点のボーリング柱状図とS波速度分布

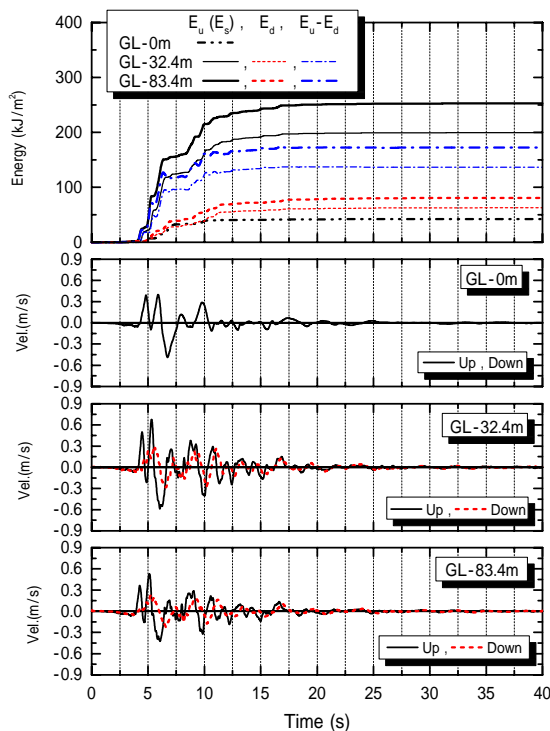


図3 PI地点の主軸方向における各エネルギー時刻歴と各深度における速度波形

く、GL-83.4mのレベルで両方向合わせて109kJ/m²である⁷⁾。

つぎに、 $(E_u - E_d)$ を見てみる。 E_u 、 E_d は一方方向への進行波のエネルギーの累積値であるので、当然ながら単調増加関数であるのに対し、 $(E_u - E_d)$ は着目点より上層でのエネルギーの収支を表しており、増減を示す。 $(E_u - E_d)$ が減少するときは、上層に一時的に蓄えられた地震波エネルギーが深部に戻される時点を意味している。ただ、小刻みな増減は繰り返しながらも、全体的にはほぼ単調に増加しており、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ことが分かる。 $(E_u - E_d)$ の時刻歴は、上昇波エネルギーに対応して主要動の始まりからわずか2波以内で最終値の75%まで上昇しており、この間におそらく表層のマサ土の液状化などで失われるエネルギー損失により $(E_u - E_d)$ が急増したものと考えられる。それ以降、上昇割合は鈍くなるがわずかに伸び続け、 $t=17$ 秒に至って、一定値に収束している。その最終値を損失エネルギー E_w とよぶことにするが、GL-32.4m(B点)で主軸方向と主軸直角方向をあわせて $E_w = 155\text{kJ/m}^2$ であり、上昇波エネルギーの約65%を占めている。その値はB点より上方の地盤で消費されたエネルギーを表している。

3.2 SGK 地点

図4にはSGK地点のNS方向についての計算結果を示す。GL-97m(C点)、GL-25m(B点)、GL-0m(A点)ともに上昇波エネルギー E_u は主要動の到来から $t=25$ 秒付近まで増加し続け、その後の増加割合は明瞭に低下している。速度波形の振幅は地表の方が大きいが、 E_u は地表に近づくほど小さくなる傾向はここでも明瞭に見られる。 $(E_u - E_d)$ は、主要動の初期において増加し、 $t=15$ 秒くらいまでは明らかに増加している。この地点では土質性状などから判断すると液状化の発生はなかったと思われ、土のひずみの増大ともない履歴減衰が増加したためと考えられる。その後、 $t=23 \sim 25$ 秒くらいまでは増減を繰り返しながらわずかな増加傾向を示すが、それ以降はほぼ一定値を示す。その間、 E_u 、 E_d それぞれは $t=15$ 秒以降も明瞭に増加し続けていると評価されるが、その伸び方はほぼ同じで、上層での $(E_u - E_d)$ の増分は $t=23$ 秒付近で上昇を示す以外はほとんどゼロとなる結果になっている。この原因としては、 $t=15$ 秒以降においては鉛直方向のエネルギーの伝播という仮定が当てはまらなくなっている可能性が考えられる。この時点以降、

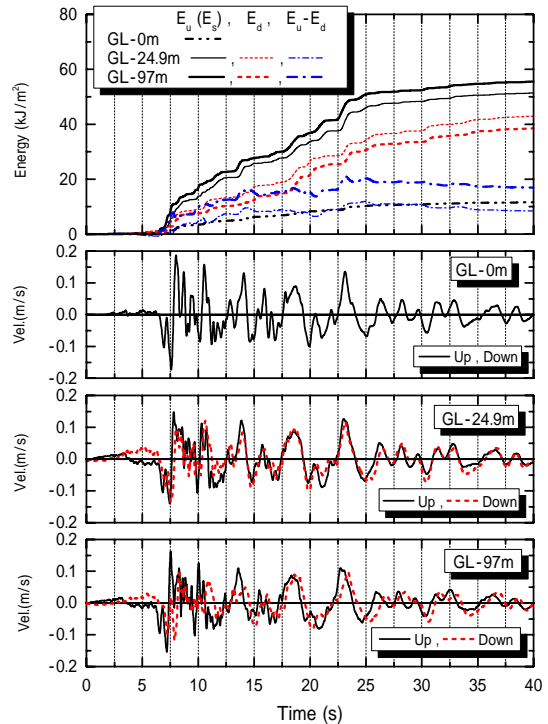


図4 SGK 地点のNS方向における各エネルギーと各深度における速度波形

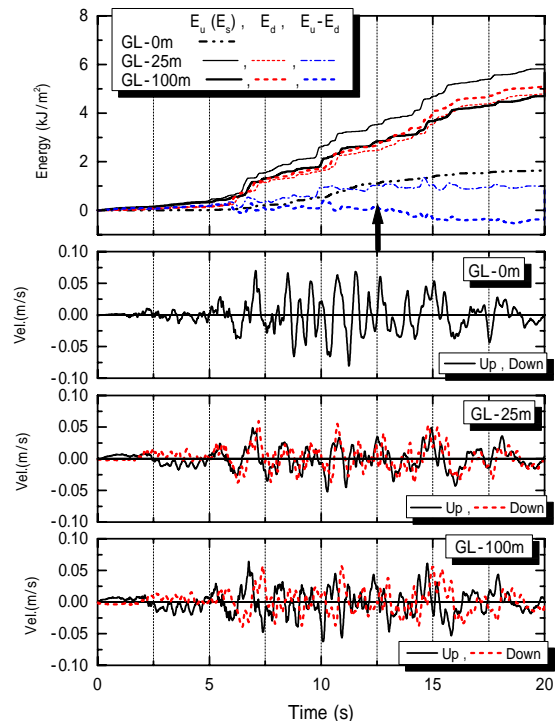


図5 TKS 地点のNS方向における各エネルギーと各深度における速度波形

速度波形に明らかな長周期の卓越が見られるため、表面波がその主要因のひとつと思われる。

3.3 TKS 地点

図5はTKS地点のNS方向についての計算結果を示す。ここでも、GL-25m(B点)の方がGL-100m(C点)に比べて地表(A点)での上昇エネルギーがかなり小さい。GL-100mの($E_v - E_d$)は徐々に上昇し $t=12.5s$ 付近以降ほぼ一定値に収束しているのに対し、それ以降も E_u 、 E_d のそれぞれはここに示されている $t=20s$ までの範囲だけでなく $t=32s$ 付近まで大きく増加し続ける。その理由としてはやはり鉛直方向のエネルギーの伝播という仮定が当てはまらなくなっている可能性が考えられる。また、GL-25mにおいては $E_v - E_d$ は最終的にマイナスになっている。この地点はGL-10m付近で液状化の発生が疑われた地盤であり、地盤のモデル化の誤差などが原因していると考えられるが、その絶対値は前述の2地点に比べて小さいため、後述の全体的エネルギー評価においては大きな問題とならないとし、この計算結果をそのまま使っている。

3.4 KNK 地点

図6はKNK地点のNS方向についての計算結果を示す。上昇波エネルギー E_u は主要動の到来から $t=17s$ くらいまで増加してからある程度頭打ち傾向が見えるが、その後も増加傾向は継続している。 E_d は E_u にほぼ並行的に変化している。この地点ではGL-25m(B点)とGL-100m(C点)で上昇波と下降波の振幅が大きく異なっている点特徴的であり、GL-100mの地震計が $V_s=1630m/s$ の硬岩に設置され、GL-25mの第四紀地盤中の地震計との間にインピーダンス比による大きな振幅差が生じるためと思われる。それにもかかわらず、上昇波のエネルギー E_u はGL-100mとGL-25mであまり大きな差はみられない。また、地表での値もそれらと大差はなく、上昇エネルギーが地表まで余り低下していない点は他の3地点と大きな違いである。 $(E_v - E_d)$ の絶対値は E_u に比べてかなり小さく、エネルギー消費量がきわめて小さい。B点(GL-25m)ではNS・EW方向を合わせて $E_u = 2.8kJ/m^2$ に対し $E_w = 0.39kJ/m^2$ であり、上昇エネルギーの86%程度が再び基盤以深に戻っていったと考えられる。 $(E_v - E_d)$ は $t=14 \sim 20s$ 以降はほぼ一定値を示しているのに対して、 E_u と E_d は増え続けており、 $t=14s$ 以降はやはり鉛直方向のエネルギーの伝播という仮定が当てはまらなくなっていると考えられる。

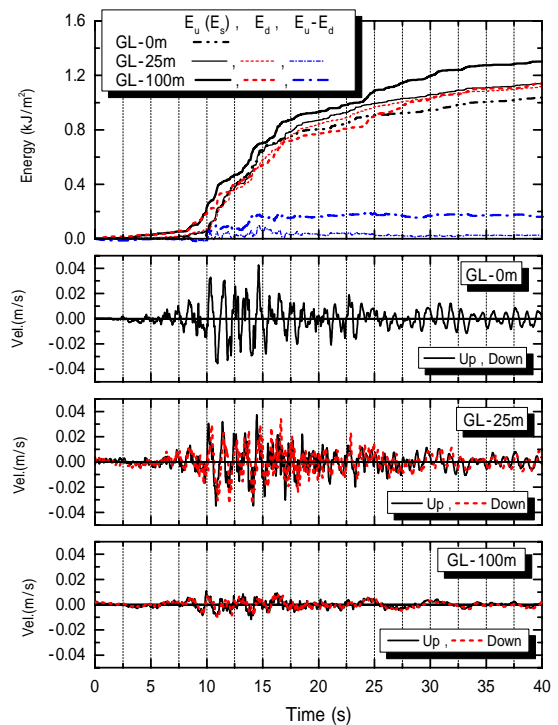


図6 KNK地点のNS方向における各エネルギーと各深度における速度波形

3.5 4地点でのエネルギーフロー

4地点について、図3~6に示されたエネルギーの時間的推移のうち、A点での E_s とB点での $(E_v - E_d)$ に着目する。 E_s は地表に到達した地震波エネルギーであり、構造物の地震被害に密接な関連があると考えられる。一方、1次元重複反射を前提とした分析であることを考えれば、 $(E_v - E_d)$ は着目深度より浅い表層地盤でのエネルギー収支を表しており、その最終値 E_v は表層で失われた損失エネルギーであることは容易に分かる。地盤に発生する大きなひずみなどにより地中で熱エネルギーに変換されるものに当たり、地盤の非線形性の発揮度合いを示すと言える。

これまでの分析から、いくつかの地点の波形の後半部で、 $(E_u - E_d)$ がほぼ一定となった時点でも E_u と E_d は依然として増加しているケースがあることを述べた。これは、表面波成分の卓越などにより鉛直方向へのエネルギーの伝播の仮定が成り立たなくなるためと考えられる。そこで、その影響が現れ始めたと考えられる時点を各波形について図3～図6に矢印で示した点と判断し、そこでの $(E_u - E_d)$ の値を E_w とした^{7), 8)}。さらに、 E_s , E_w についても、同じ矢印の時点での値を用いて以下の分析を行った。

図7は上記の4地点のエネルギーの分析から、PI 地点主軸方向についての1秒当たりのエネルギー流量の時間変化を計算したものである。図2(a)中のA, B, Cの3深度での上昇エネルギーが示されている。これより、エネルギー流量の変化は激しく、エネルギーは幾つかのピークを有する塊をなして押し寄せてくるのが分かる。ピークは図3での上昇エネルギー(累積値)の急勾配の時点に対応しており、速度波形の特徴を強く反映したものとなっている。流量のピークは明らかに深部ほど大きく、地表に近づくほどエネルギー流量は減少すること、また、エネルギー流量の最大値は深部ほど早く現れることも読みとれる。

図8はPIも含めた4地点の同様な分析から得られた最大エネルギー流量と累積エネルギーの深度分布を示している。横軸は対数軸であり、4地点間でのエネルギーレベルの大きな違いを示している。さらに、最大エネルギー流量・累積エネルギーともに深部から浅部に向かうほど、ほぼ同じ割合で減少する。とくに、地表付近では地盤物性の非線形化が進みやすく、そのためエネルギーが大幅に減少する傾向が、非線形化が余り進まなかったKNK 地点以外において、顕著に表れている。

図9では、地表への上昇エネルギー E_s と点Bでの E_d の比 E_s/E_d を縦軸にとり、別途行った逆解析⁹⁾¹⁰⁾により同定された表層(B点より上部の層)の減衰定数 D を横軸にとって、白抜きマークにより各地点のNS・EWそれぞれの方向で対比している。同定された4地点の減衰定数の深度分布は図2に示されているが、表層の減衰定数といってもモデル分割された各薄層ごとに異なるので、それらの層厚による加重平均値をとった。図9からは、減衰定数の増加にともない E_s/E_d が急激に減少し0.2程度の一定値に収束するという傾向が読みと

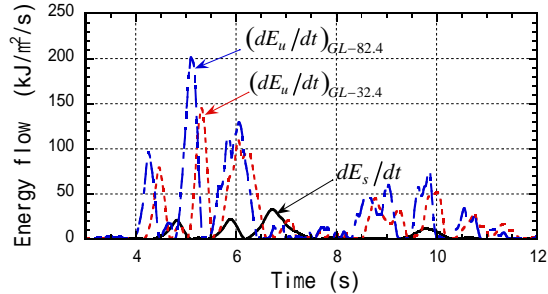


図7 PI 地点主軸方向3 深度での上昇エネルギー流量

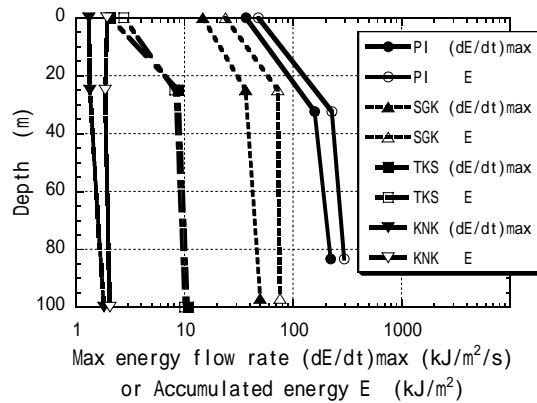


図8 4 地点での上昇エネルギーの最大流量 $(dE/dt)_{max}$ と累積値 E の深度分布

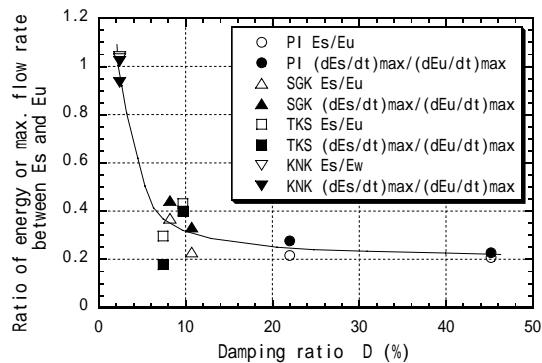


図9 地表への上昇エネルギー比 E_s/E_u 、上昇エネルギー最大流量比と同定減衰定数の関係

れる。B 点での上昇エネルギー E_u に対する地表への上昇エネルギー E_s は地盤の等価減衰によって大幅に変化し、震央から近い PI 地点では小さく、遠い KNK では大きい値をとる。また、 E_s/E_u は KNK を除いて 1.0 を大幅に下回っており、基盤より地表での上昇エネルギーが小さくなっていることが分かる。さらに、塗りつぶしのマークで示した最大エネルギー流量比も減衰定数に対しエネルギー比とほぼ同様な傾向を示し、やはり KNK を除けば基盤より地表でのエネルギー流量ははるかに小さい結果となる。

図 10 は損失エネルギーの上昇エネルギーに対する比 E_w/E_u を同じく逆解析により同定された減衰定数 D に対しプロットしたものである。両者には明らかに正の相関があり、減衰定数の増加にともない当然のことながら E_w/E_u も増加する関係となっている。しかし D が大きくなるにつれて E_w/E_u の増加割合は小さくなり、0.8 程度の一定値に収束する傾向を示している。

図 9 の E_s/E_u と図 10 の E_w/E_u の減衰定数に対する変化傾向はお互いに相関があると考えられる。つまり、震央近くの地盤では大きな揺れによって内部減衰による損失エネルギーが大きくなり、そのぶん地表に到達するエネルギーの割合が減少し、一方震央から離れた地盤では内部減衰による損失エネルギーが小さく、大きな割合のエネルギーが地表まで達することができると考えられる。しかし、実測の鉛直アレーデータから得られた図 9、10 の傾向には、減衰以外にもさまざまな要因の影響が含まれていることが考えられる。

そこで以下においては線形物性を仮定して、成層地盤中の 1 次元波動式に基づき波動エネルギーを計算し、各種要因の影響を探る。

4. 1 次元波動理論による地震波動エネルギーフロー

4.1 無限地盤中の地層境界でのエネルギーフロー

図 11(a) のように無限地盤中に水平層境界を考え、 z 軸を層境界から上方にとる。上層、下層の密度と S 波速度を ρ_1 、 ρ_2 と V_{s1} 、 V_{s2} とし、波数を $k_1 = \omega/V_{s1}$ 、 $k_2 = \omega/V_{s2}$ とし、上層と下層での変位波 u_1 、 u_2 を次式で表す。

$$u_1 = A_1 e^{i(\omega t - k_1 z)} \quad (13)$$

$$u_2 = A_2 e^{i(\omega t - k_2 z)} + B_2 e^{i(\omega t + k_2 z)} \quad (14)$$

地層境界 $z = 0$ における上昇波と透過波、下降波の変位振幅をそれぞれ A_1 、 A_2 、 B_2 とし、インピーダンス比を $\alpha = \rho_1 V_{s1} / \rho_2 V_{s2}$ とすると、層境界での変位と応力の連続条件から、

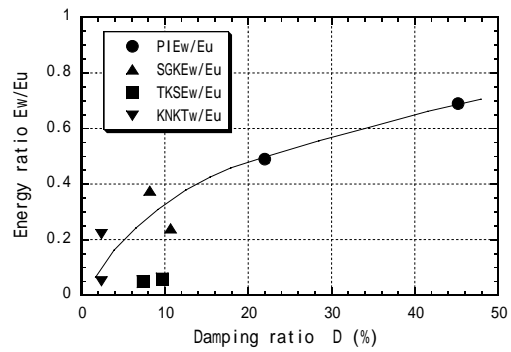
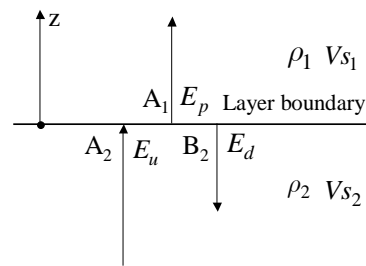


図 10 表層での損失エネルギー比 E_w/E_u と同定減衰定数の関係

(a)



(b)

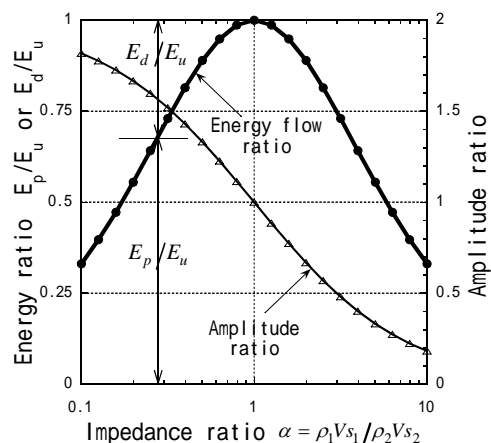


図 11 無限地盤中の層境界(a)でのエネルギーフローと振幅の比(b)

$$A_1/A_2 = 2/(1+\alpha) \quad (15)$$

$$B_2/A_2 = (1-\alpha)/(1+\alpha) \quad (16)$$

透過エネルギーと上昇エネルギーの比 E_p/E_u 、反射エネルギーと上昇エネルギーの比 E_d/E_u はそれぞれ次式で表される。

$$E_p/E_u = 4\alpha/(1+\alpha)^2 \quad (17)$$

$$E_d/E_u = (1-\alpha)^2/(1+\alpha)^2 \quad (18)$$

減衰を有する系でも層境界では距離減衰がゼロであるため、 E_u 、 E_p 、 E_d を層境界でのエネルギーとすれば、まったく同じ関係が成り立つことは明らかである。これらのエネルギー比をインピーダンス比 の対数 \log に対して表すと、図 11(b) のグラフに太い実線で示すように、 $\alpha = 1$ について左右対称な関係になる。つまり進行波が地層境界を通過する場合、 α が 1 から大小いづれの側に同じ割合変化しても同じエネルギーの減少が起きることが分かる。波の振幅については V_s の大きな層から小さな層に透過する場合、式(15)により $2/(1+\alpha)$ 倍となり、図中に細線で示すように α が小さいほど増幅するにも関わらず、エネルギーは減少することになる。それは、式(3)で $(du/dt)^2$ に ρV_s が乗げられているためである。つまり、進行波のエネルギーは地層境界を通過するたびに硬軟の区別なく必ず減少することになる。

4.2 2層系地盤での調和波によるエネルギーフロー

つぎに、図 12 のように厚さ H の表層が存在する 2 層系地盤について考える。この場合には無限地盤とは異なり、地表で全反射する波が地層境界に戻ってくる影響を考慮する必要がある。まず、調和波を入力した場合の定常応答について考えよう。 z 軸を基盤上面から上向きにとり、表層と基盤での変位波 u_1 、 u_2 を次式で表す。地層境界 $z = 0$ における表層での上昇波、下降波と基盤での上昇波、下降波の変位振幅をそれぞれ A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 とすると、

$$u_1 = A_1 e^{i(\omega t - k_1 z)} + B_1 e^{i(\omega t + k_1 z)} \quad (19)$$

$$u_2 = A_2 e^{i(\omega t - k_2 z)} + B_2 e^{i(\omega t + k_2 z)} \quad (20)$$

地表でのせん断応力ゼロの条件から $B_1/A_1 = e^{-2ik_1 H}$ が得られ、さらに基盤境界での条件から、振幅比として次式が得られる。

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{2}{(1+\alpha^*) + (1-\alpha^*)e^{-2ik_1^* H}} \quad (21)$$

$$\frac{B_2}{A_2} = \frac{(1-\alpha^*) + (1+\alpha^*)e^{-2ik_1^* H}}{(1+\alpha^*) + (1-\alpha^*)e^{-2ik_1^* H}} \quad (22)$$

また、地表での上昇波の振幅比は

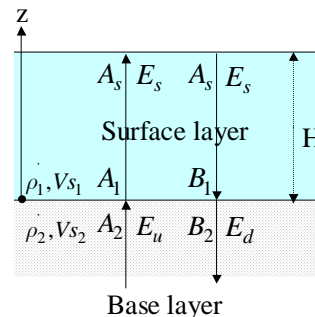


図 12 2層系地盤の定常応答での変位振幅とエネルギーフロー

$$\frac{A_s}{A_2} = \frac{2}{(1+\alpha^*)e^{ik_1^*H} + (1-\alpha^*)e^{-ik_1^*H}} \quad (23)$$

ここに、 α^* は複素インピーダンス比、 k_1^* は複素波数であり、 $\omega = 2\pi f$ を角振動数、 $\alpha = \rho_1 V_{s1} / \rho_2 V_{s2}$ をインピーダンス比、表層と基盤での密度を ρ_1 、 ρ_2 、S 波速度をそれぞれ V_{s1} 、 V_{s2} として次式で表される。

$$\alpha^* = \frac{\rho_1 V_{s1}^*}{\rho_2 V_{s2}^*} = \alpha \left(\frac{1+2iD_1}{1+2iD_2} \right)^{1/2} \quad (24)$$

$$k_1^* H = \left(\frac{\rho_1 \omega^2}{G_1^*} \right)^{1/2} H = \frac{\pi}{2} \frac{f}{V_{s1}/4H} \left(1+2iD_1 \right)^{1/2} \quad (25)$$

なお、減衰定数 D_1, D_2 は非粘性減衰を仮定している。

次にエネルギーについては、調和波による定常応答を対象としているから、単位時間内のエネルギー流量を対象とすることになる。地表での上昇エネルギー流量 (dE_s/dt) と基盤境界での上昇エネルギー流量 (dE_u/dt) の比は

$$\left| (dE_s/dt) / (dE_u/dt) \right| = \left| \alpha^* \right| \left| A_s / A_2 \right|^2 \quad (26)$$

また基盤境界での下降エネルギー流量 (dE_d/dt) についての比は次式で表される。

$$\left| (dE_d/dt) / (dE_u/dt) \right| = \left| B_2 / A_2 \right|^2 \quad (27)$$

さらに、表層で土の内部減衰により失われる単位時間当たりの損失エネルギー dE_w/dt と dE_u/dt の比 $(dE_w/dt) / (dE_u/dt)$ は、エネルギー保存の観点から当然、次式となる。

$$(dE_w/dt) / (dE_u/dt) = 1 - \left| (dE_d/dt) / (dE_u/dt) \right| \quad (28)$$

なぜなら、定常状態であるためには基盤・表層間の上昇と下降のエネルギー流量の差は必ず表層の単位時間当たりの損失エネルギーにより消費されなければならないからである。

式(26)の $(dE_s/dt) / (dE_u/dt)$ をインピーダンス比の対数 $\log \alpha$ に対して表したのが図 13(a)(b)である。地盤の内部減衰のない場合、 $\alpha = 1$ では当然ながら $(dE_s/dt) / (dE_u/dt) = 1.0$ であり、その値を挟んで左右対称となる。そして、 $\alpha < 1$ では $f/V_{s1}/4H = 1.0$ の場合に 1 波長 $= 4H$ となる共振が起き、 $\alpha > 1$ では $f/V_{s1}/4H = 2.0$ では 1 波長 $= 2H$ となる共振が起きて表層へのエネルギーの蓄積

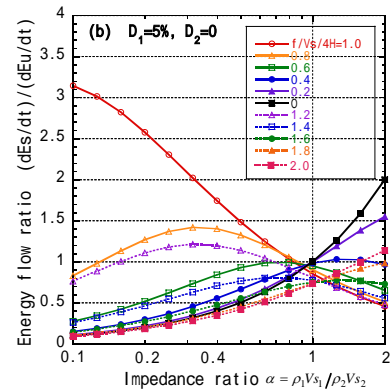
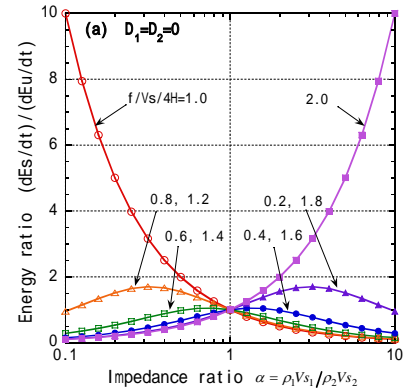


図 13 2 層系地盤での調和波による $(dE_s/dt) / (dE_u/dt)$ とインピーダンス比の関係：(a)表層減衰 $D_1=0$ 、(b)表層減衰 $D_1=5\%$

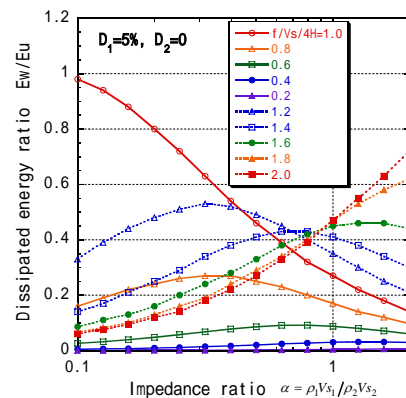


図 14 2 層系地盤での調和波による $(dE_w/dt) / (dE_u/dt)$ とインピーダンス比の関係：表層減衰 $D_1=5\%$

が起きるために、 dE_s/dt は dE_u/dt よりも大きくなる。また、減衰のある図 13(b) の場合 ($D_1=5\%$) にも $f/Vs/4H=1.0$ において dE_s/dt が最も大きくなり、インピーダンス比が小さい地盤ほどその傾向が強く、柔らかい表層地盤で共振が起きることによりエネルギーが蓄積されることが分かる。調和波による完全共振状態では $\omega=(2n+1)\pi Vs_1/2H$ (n は任意の整数) であり、減衰定数がゼロの時には式(23)に

$$k_1^* H = \omega H / Vs_1 = (2n+1)\pi/2 \quad (29)$$

を代入すると、式(26)より $|(dE_s/dt)/(dE_u/dt)|=1/\alpha$ となる。つまり、減衰ゼロでの共振時の振幅は α に反比例し、軟らかい地盤ほど増幅が激しい。しかし、共振状態から外れて $f/Vs/4H \leq 0.6$ または $f/Vs/4H \geq 1.4$ となると、インピーダンス比が小さくなるほどむしろ地表のエネルギー流量 dE_s/dt が基盤の上昇エネルギー流量 dE_u/dt よりかなり下回るようになる。

表層で失われる損失エネルギーについての比 $(dE_w/dt)/(dE_u/dt)$ と $\log \alpha$ との関係を図 14 に示す。式(27)(28)により計算した結果を、 $D_1=5\%$ 、 $D_2=0\%$ の場合について図 14 に示す。 $f/Vs/4H=1.0$ において、インピーダンス比が小さい地盤ほど dE_w/dt は大きくなること、つまり共振による表層地盤へのエネルギー蓄積とともに、その中で土の内部減衰により消費される単位時間当たりの損失エネルギー dE_w/dt が増加することになる。しかし、それから大きく外れる振動数では dE_w/dt は小さな値にとどまる。

これより、地表への上昇エネルギーあるいはエネルギー流量は地盤の内部減衰のみでなく、表層と下層間のインピーダンス比や入力波の振動数と表層の固有振動数の比によっても大幅に変動することが明らかである。

4.3 2層系地盤での不規則波によるエネルギーフロー

これまで、調和波入力による2層系地盤の定常振動を考えたが、次に、有限長さの不規則波によるエネルギーフローを検討するために、同じ2層系モデル地盤に地震波を入力した¹²⁾。用いた波は、図 15(a) に示す兵庫県南部地震のポートアイランド GL-83.4m での主軸方向の入射波である。図 12 の2層地盤において、表層厚を $H=30\text{m}$ 、表層の物性を $\rho_1=2.0\text{t/m}^3$ 、 $Vs_1=330\sim 30\text{m/s}$ 、 $D_1=0\sim 40\%$ に、また基盤の物性を $\rho_2=2.0\text{t/m}^3$ 、 $Vs_2=330\text{m/s}$ 、 $D_2=0\%$ に設定し、基盤境界から入射波を入力した。図 15(b) には入射波のフーリエスペクトルを、同図(c) には Vs_1 を段階的に変化させたときの地表と基盤との間の幾つかの伝達関数の例を示す。

図 16(a)(b) には地表での上昇エネルギー E_s の時刻歴を表層の減衰定数 $D_1=0$ と $D_1=5\%$ のケースについて示している。 E_s は地表に到達したエネルギーの累積であるため、時間とともに単調増加し、一定値に収束する。 E_s の値は地表の構造物の地震被害に関連すると考えられるが、表層の減衰定数が一定であってもインピーダンス比に大きく支配されることが分かる。一方、図 17(a)(b) には基盤境界への上昇エネルギーとそこから下降エネルギーの差 $(E_u - E_d)$ の時刻歴をやはり同じ2種類の減衰定数について示している。 $(E_u - E_d)$ は時間に対して増減を示し、その減少時は表層に一時

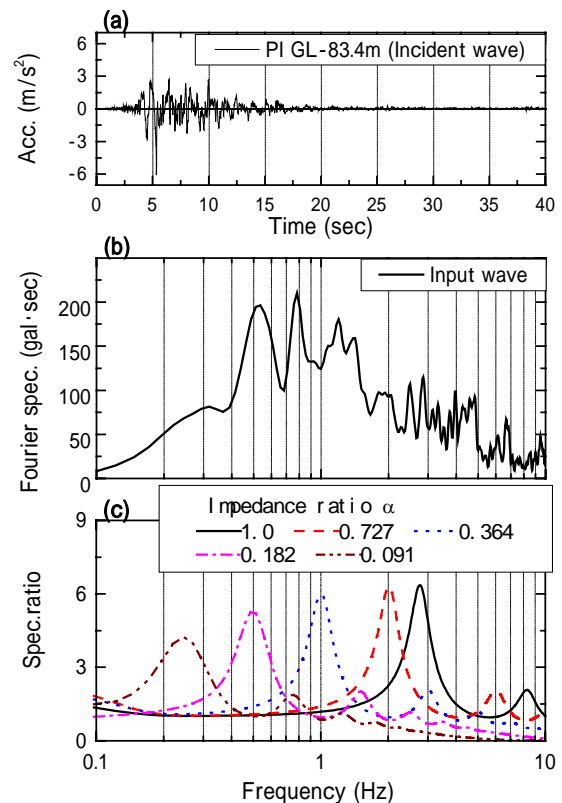


図 15 基盤への入射波時刻歴(a)とそのフーリエスペクトル(b)および2層系地盤の伝達関数(c)

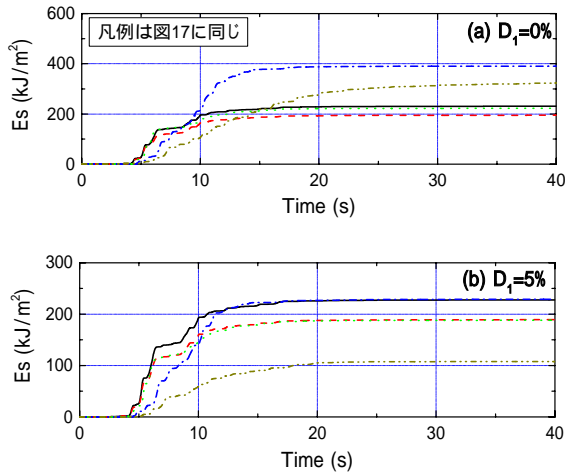


図16 地表への入射エネルギー E_s の時刻歴: (a) $D_1=0\%$ 、(b) $D_2=5\%$

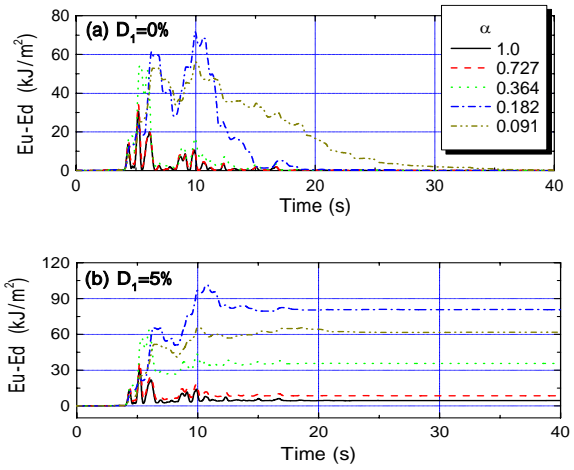


図17 層境界への上昇エネルギーと下降エネルギーの差 E_u-E_d の時刻歴: (a) $D_1=0\%$ 、(b) $D_2=5\%$

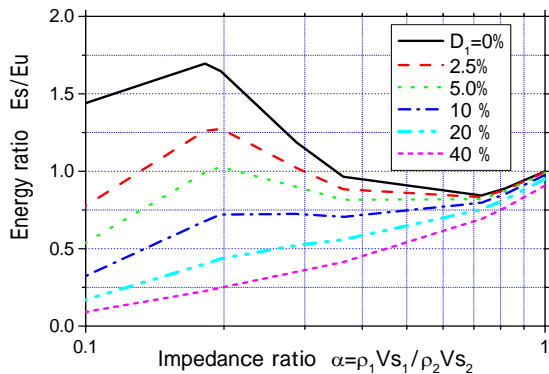


図18 地表への入射エネルギー比 E_s/E_u とインピーダンス比の関係

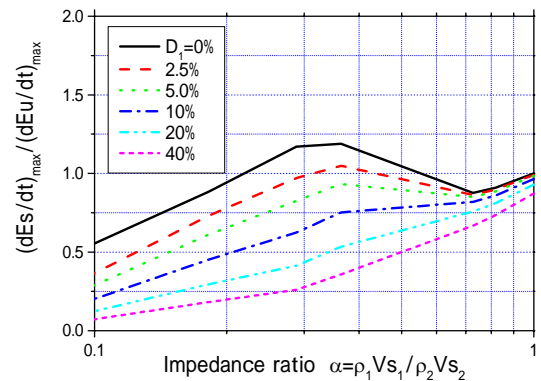


図19 地表への最大上昇エネルギーフローの比とインピーダンス比の関係

的に貯えられたエネルギーが基盤に戻る過程を表していると言える。表層の減衰定数 D_1 がゼロの場合には、当然ながらすべてのエネルギーは再び基盤に戻り $(E_u - E_d) = 0$ となるが、 $D=5\%$ の場合にはゼロでない一定値に収束する。この値は前に定義した損失エネルギー E_w に相当するが、減衰定数が一定でも E_w はインピーダンス比によって大きく変化することが分かる。

これらの一連の計算結果により、地表への上昇エネルギー E_s と基盤から層境界への上昇エネルギー E_u の比をインピーダンス比 α を横軸にとって表したのが図18である。これより、減衰定数が小さい時には、地盤の伝達関数の1次ピークが地震の卓越振動数に近い $\alpha=0.2$ 付近(図15(c)参照)で、 E_s は E_u よりも大きくなり、表層へのエネルギー蓄積効果が見られる。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、実際は表層に捉えられた地震波が地表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るわけである。一方、減衰が大きくなると E_s は小さくなり、 $D_1=10\sim 20\%$ を越えると、インピーダンス比の減少にしたがって E_s は低下していく傾向となる。

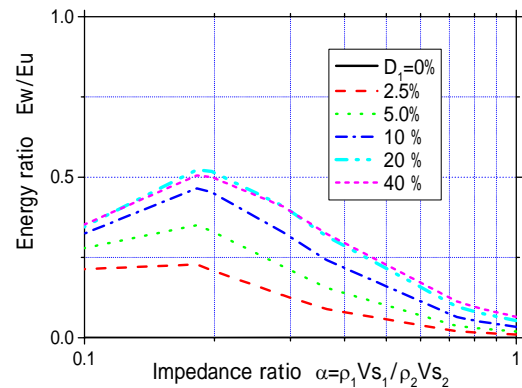


図20 地表層での損失エネルギー比 E_w/E_u とインピーダンス比の関係

一方、図 19 は、地表への上昇エネルギー流量（1 秒当たり）の最大値を基盤境界への上昇エネルギー流量の最大値で基準化した値 $(dE_s/dt)_{max}/(dE_u/dt)_{max}$ をインピーダンス比に対して表したグラフであり、減衰が小さい場合には、エネルギー累積値をとった図 18 に比べ少し大きめのインピーダンス比においていったん大きな値を示す。しかし、減衰が大きい時には、 α が小さく表層が軟弱なほど基盤に比べてエネルギー流量も小さくなる傾向は図 18 の累積エネルギーと同様に見られることが分かる。

図 20 は同じ 2 層系地盤の解析で得られた E_w/E_u とインピーダンス比 α の関係を表したグラフである。これより、インピーダンス比 α が 1 から遠ざかり小さくなるほど E_w は増加する傾向が見られ、さらに地盤が入力地震動に対し共振状態に近づく $\alpha \approx 0.2$ 付近で E_w が特に大きくなることが分かる。つまり図 18 と図 20 を合わせ考えると、表層の固有振動数が地震の卓越振動数に近い場合には E_s/E_u は大きくなる可能性はあるが、土の内部減衰が大きくなると表層地盤での損失エネルギーの割合 E_w/E_u も大きくなるので、 E_s は小さくなり表層の共振効果が表れにくくなると言える。

図 18、図 19 に示された E_s/E_u あるいは $(dE_s/dt)_{max}/(dE_u/dt)_{max}$ は減衰が $D=10\%$ 以上の大きな値となる場合、インピーダンス比 α が小さく表層地盤が軟弱なほど小さくなる傾向が読みとれる。つまりエネルギーで被害が決まるとすると、減衰の大きさによっては強地震時に軟弱地盤ほど大きな被害が発生するとの従来の認識とは必ずしも整合しないことになる。

4.4 多層系地盤での不規則波によるエネルギーフロー

これまでの検討では、A~B 間の地表層を単一の均質層と考えてきたが、実際には異なる V_s を持つ複数の層からなるとする方が現実的である。そこで、表層の層分割が波動エネルギーの流れに及ぼす影響を検討するために、2~5 層系モデルに不規則波を入力する解析を行った¹³⁾。すなわち表層の全層厚を 100m とし、2 層系地盤モデルでは表層を単一層として取り扱い、3~5 層系モデルでは、表層をほぼ等分割した。それぞれの層の S 波速度の分布を図 21 に示す。

このモデルの基盤に、以前の 2 層系での検討と同様に、兵庫県南部地震の PI 地点での GL-83.4m の入射波（図 15(a)）を与えた。用いた入力地震動の加速度フーリエスペクトルのピーク値は図 15(b) に示すように 0.78Hz である。基盤は $V_s = 700\text{m/s}$ 一定とし、各層の V_s は地表に近づくほど小さくなるように設定した。地盤の固有振動数を層分割数に関わらず入射波の卓越振動数に一致させるため、1/4 波長則の近似式(30)を用いて V_s の値を決めた。

$$f_0 = 4 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{V_{s_i}}{H_i} \quad (30)$$

ここで、 f_0 は表層地盤の固有振動数であり、 V_s 、 H はそれぞれ第 i 層における S 波速度、層厚を表す。しかし式(30)は近似式であるため、これにより各層の V_s を算出すると理論伝達関数の 1 次ピークと多少のズレが出る場合がある。このため、式(30)で求めた V_s に同じ比率を掛けることにより、表層地盤の固有振動数が正確に 0.78Hz になるように各層の V_s を調整した。また、解析を行う際に基盤の減衰を常に 0 とし、地表での減衰定数 D_i をすべての層について统一的に 0~40% まで変化させた。

図 22 は、2~5 層系でのエネルギーフローの計算に基づいた地表への上昇エネルギー E_s を基盤での上昇エネルギー E_u で基準化した値 E_s/E_u を縦軸に取り、横軸にとった表層地盤の減衰定数 D_i に対する変化を表している。これより、 D_i が大きくなるほど

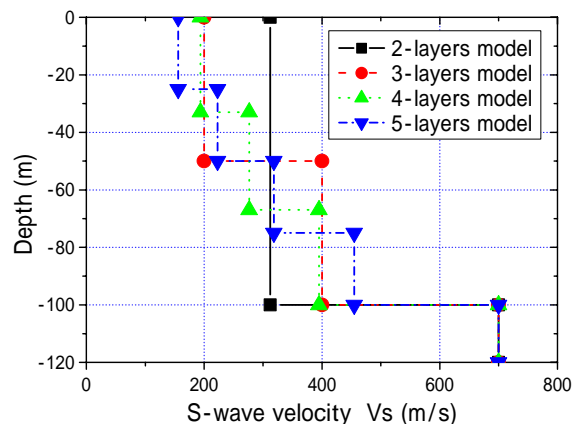


図 21 同じ 1 次固有振動を有する多層系地盤モデルの V_s の深度分布

当然のことながら地表に到達するまでに失われるエネルギーが増加するため、 E_s/E_u は減少するが、その関係は下に凸なカーブとなる。同様な傾向は、実地盤の地震記録に基づいた図 9 から明瞭に読み取ることができる。また、層分割数が多くなるほど E_s が明らかに小さくなる傾向が見られる。これは、層境界が増えるほど重複反射が多くなり、そうした中でエネルギーの一部は表層まで到達せず反射して基盤に戻るためと考えられる。

図 23 は、同一条件での計算に基づき、損失エネルギー E_w を基盤での上昇エネルギーで基準化した値 E_w/E_u と表層地盤の減衰定数 D の関係を表している。 $D=0$ のときは、当然 $E_w/E_u = 0$ であり、減衰が無くエネルギーが失われることが無いため上昇エネルギーはすべて地中にもどる。表層の減衰定数 D_1 が大きくなるほど、当然ながら E_w/E_u は増加するが、上に凸なカーブを描き、上限値が存在するようである。このような傾向は、実地盤の地震記録に基づいた図 10 から読み取れる。つまり、減衰が大きくなって入力エネルギーのすべてが損失エネルギーになるわけではない。その理由は文献 8) において考察している通り、減衰が過大になると地盤に大きなひずみが生じにくくなるため、損失エネルギーがある程度以上大きくなれないためと考えられる。また層分割が E_w に与える影響は非常に小さく、一定固有振動数で一定層厚の条件下では層分割数によらず損失エネルギーはほぼ同一であることがわかる。つまり、表層の層数が増えるほどに、表層で失われる全損失エネルギーはほぼ一定であるにも関わらず、地表に到達するエネルギーは小さくなることを意味していると思われる。

このような結果や図 8、図 9 に示した実測波に基づく分析、さらに図 18、図 19 に示した 2 層系地盤による分析などによれば、強震時の地表への上昇波のエネルギーは軟弱地盤の方が硬質地盤よりむしろ小さい場合が多いことが想定できる。したがって、地表に到達した波動エネルギーが構造物の破壊に直接関与していると考えれば、従来のように軟弱地盤の方が地震被害が大きいと考える必然性は失われると言えよう。そこで次に、波動エネルギーと構造物被害の関連を性能設計法を視野に入れながら考えてみる。

5. 波動エネルギーによる性能設計について

言うまでもなく、構造物の破壊現象には地震波が運ぶエネルギーの大きさが関連していることは間違い無い。しかし、一般に地震の時に揺れやすい軟弱な表層地盤であっても、前述のように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。表層の共振現象によってエネルギーの蓄積傾向は現れるが、ひずみの増大にともなって減衰定数も大きくなると、インピーダンス比 α の小さな軟弱地盤の方が地表でのエネルギーは小さくなるからである。すなわち図 18、19 に示された傾向は、軟弱地盤で木造建物などの被害が大きくなるという従来の一般的地震被害への認識と整合していない。その理由として幾つかの推論が可能であろう。

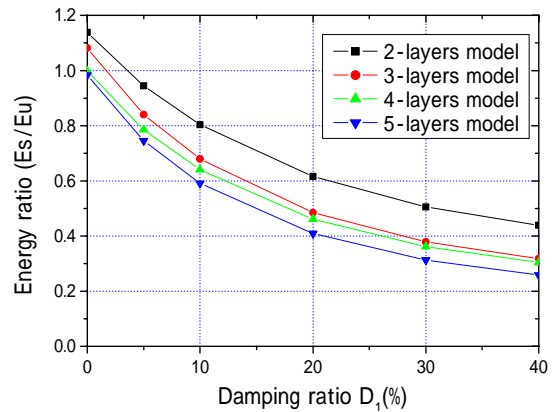


図 22 同じ 1 次固有振動を有する多層系地盤の E_s/E_u と地盤の減衰定数の関係

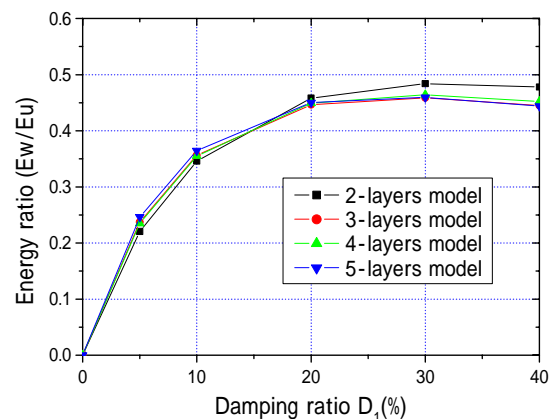


図 23 同じ 1 次固有振動を有する多層系地盤の E_w/E_u と地盤の減衰定数の関係

まず、非常に強い地震動を受けた場合に本当に軟らかい地盤ほど建物などの被害が大きくなるかについては、兵庫県南部地震の経験からはむしろ逆の傾向を指摘する研究もある¹⁴⁾。1923年関東地震において震源より比較的離れていた東京下町では、地盤の減衰定数はそれほど大きくなり、表層地盤の共振によるエネルギー蓄積効果が発揮された可能性も考え得る。実際、1983年メキシコ地震においては震央から300km以上離れたメキシコシティで、軟弱粘土地盤にエネルギーが蓄積し大きな被害を引き起こしている。ちなみに、このメキシコシティ粘土地盤は例外的に超軟弱で大きなひずみ振幅においても減衰があまり大きくなることが知られている¹⁵⁾。一方、軟弱地盤では地表への上昇エネルギーは基盤より減少したとしても、地震の卓越振動数が低くなり、木造家屋のような柔構造では建物自身の共振によるエネルギー蓄積が起こり易かった可能性なども考えられる。

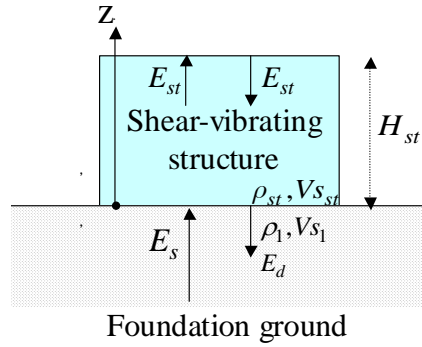


図24 基礎地盤上のせん断振動型構造物の概念

構造物の破壊は部材に生じるひずみの大きさに直接支配される。構造物を図24に概念的に示すような均質地盤上に設置されたせん断振動系で単純化できると仮定すると、4.2で扱った2層系の式が適用できる。構造物のせん断ひずみ γ は2層系地盤の振動理論により式(19)の表層(この場合は構造物)の変位 u_1 を鉛直座標 z で微分し、 $B_1/A_1 = e^{-2ik_1H}$ の関係を用いると、

$$\gamma = 2k_1 A_1 \sin k_1 (H - z) e^{i(\omega t - k_1 H)} \quad (31)$$

と表される。さらに式(21)、(26)を用い、表層をせん断振動系構造物、基盤を構造物の基礎地盤と解釈し、 $H \rightarrow H_{st}$ 、 $\rho \rightarrow \rho_{st}$ 、 $V_s \rightarrow V_{s_{st}}$ 、 $dE_s/dt \rightarrow (dE_{st}/dt)$ 、 $dE_u/dt \rightarrow dE_s/dt$ 、 $A_s \rightarrow A_{st}$ 、 $A_2 \rightarrow A_s$ 、 $\alpha^* \rightarrow \alpha_{st}^*$ 、 $k_1^* \rightarrow k_{st}^*$ とすると、構造物ひずみ γ と地表での上昇エネルギー流量 dE_s/dt との関係は、

$$\gamma = \frac{4 \sin k_{st}^* (H_{st} - z)}{(1 + \alpha_{st}^*) e^{ik_{st}^* H_{st}} + (1 - \alpha_{st}^*) e^{-ik_{st}^* H_{st}}} \left(\frac{\alpha_{st}^*}{\rho_{st} V_{s_{st}}^3} \frac{dE_s}{dt} \right)^{1/2} \quad (32)$$

と表される。ここに、 k_{st}^* はせん断振動型構造物の複素波数、 $\rho_1 V_{s_1}$ は基礎地盤のインピーダンス、 α_{st}^* は構造物と地盤の間の複素インピーダンス比である。つまり、構造物のせん断ひずみは地表への上昇エネルギー流量 dE_s/dt の0.5乗に比例し、構造物の硬さを表す等価S波速度 $V_{s_{st}}$ の1.5乗に反比例することが分かる。さらに、式(32)右辺の最初の絶対値記号の中は共振の程度により値が大きく変動する部分であり、構造物・地盤の内部減衰は小さいとすると1次共振時の最大せん断ひずみは次式で表される。

$$\gamma_{\max} = |\gamma|_{\omega = \pi V_{s_{st}}/2H} = \frac{2}{\alpha_{st}^{1/2}} \left(\frac{dE_s/dt}{\rho_{st} V_{s_{st}}^3} \right)^{1/2} \quad (33)$$

すなわちインピーダンス比 α_{st} の平方根に反比例し、同じ構造物を想定すると地盤が硬いほど α_{st} は大きくなるため、地表での同じエネルギー流量により発生する共振時ひずみは大きくなる。もちろん軟弱地盤と硬質地盤のどちらで共振状態が起きやすいかは当然構造物の固有振動数によって異なり、それが大きな影響を与えることになる。

ところで、式(23)において表層をせん断振動系構造物、基盤を構造物の基礎地盤と解釈し、式(26)を

$$\left| (dE_{st}/dt) / (dE_s/dt) \right| = \left| \alpha_{st}^* \right| \left| A_{st} / A_s \right|^2 \quad (34)$$

と表すと、式(32)のせん断ひずみは次式のように表される。

$$\gamma = 2(dE_{st}/dt)^{1/2} \left| \sin \left\{ k_{st}^* (H_{st} - z) \right\} \right| / \left(\rho_{st} V_{S_{st}}^{*3} \right) \quad (35)$$

つまり、せん断振動系構造物の調和波定常振動による発生ひずみは、構造物の中を流れる波動エネルギー流量(dE_{st}/dt)の1/2乗に比例することが分かる。

このように構造物のひずみがエネルギー流量に直結していることから、エネルギー流量を用い種々の限界状態に対応した性能設計が可能となると言えよう。すなわち構造物と基礎地盤をせん断振動系で近似し、1次元重複反射理論により設計用地震波を用いて構造物に加わるエネルギー流量 dE_{st}/dt を計算し、それより発生ひずみ γ を算定する。発生ひずみ γ が決まれば、降伏ひずみ γ_y との比から決まる塑性率 $\mu = \gamma/\gamma_y$ などによって、終局限界、使用限界などの評価に結びつけられるので、波動エネルギーと限界状態が直接関連づけられることになる。

もちろん個々の構造物ごとの設計法の詳細についてはこれから詰めるべき点が多く残されている。実際の構造物は曲げせん断振動系のもが多いが、エネルギーフローの観点から等価な(等価S波速度 $V_{S_{st}}$ と等価密度 ρ_{st} の)せん断振動系に置き換えることは可能であろう。また、構造物の平面積は地盤に比べて限られており、真の2層系せん断振動モデルとは異なる。例えば、地盤への波動の逸散は鉛直下方のみでなく表面波により水平方向にも起きる。しかし、その場合でも平面積当たりの等価な下降エネルギーに置き換えてエネルギーの流れを考えることにより近似的評価は可能であろう。

通常の建物のような比較的たわみ性が大きく減衰定数も相対的に小さい構造物では、振動の繰り返しよりは各サイクルで生じるひずみにより性能設計の各限界状態が決定される傾向が強い。このため、半サイクルあるいは1サイクルごとのエネルギー流量とその間の損失エネルギーの大小関係で限界状態を評価することになる。一方、擁壁・ケーソン岸壁などの剛体構造物やマッシュで剛性が大きい盛土・斜面などにおいては、滑り面やせん断ゾーンにおけるひずみの累積値が構造物の限界状態を支配すると言えよう。さらには、振動繰り返し効果による地盤の液状化や間隙水圧上昇などがひずみの累積に大きな影響をおよぼす場合がある。したがって、サイクルごとのエネルギー流量よりは、繰り返し载荷による累積エネルギーで限界状態を評価する方が適していると考えられる。

エネルギー的設計法では、水平成層をなす表層地盤から構造物へのエネルギーフローを計算する上で設計地震動の具体的な波形あるいはスペクトル特性が必要である。特に、エネルギーの累積値よりは流量が重要となるたわみ性の構造物においては、波形が重要となる。現行の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。それでは、従来の設計地震動を用いた設計法とエネルギー設計法の違いは何かといえば、地盤と構造物の震動を波動エネルギーと常に関係づける点である。したがって、設計地震動の設定時にはその波動エネルギーも設定する必要がある。これは設計地震動とともに入力基盤のインピーダンス ρV_s も同時に設定することにより行える。通常、地震入力基盤の V_s については漠然とした概念はあるものの、その値の幅は広い。サイト条件や波形条件などの違いを越えて設計条件の共通化を図るためにも、波動エネルギーで定義すべきである。そして、基盤から表層地盤、構造物に至るまでのエネルギーフローを計算し、構造物に加わるエネルギーからその限界状態を判定する手順をたどることになる。それにより、加速度など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地震の被害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。

6. 結論

兵庫県南部地震での鉛直アレー観測サイト地盤と、2層系あるいは多層系のモデル地盤について、SH波の重複反射理論に基づき地震波動エネルギーを計算し、その流れを分析した。

まず、4地点の鉛直アレー記録の分析から、鉛直アレー記録から地盤の深いレベルでの上昇波と下降波を

分離し、上昇エネルギー E_u と下降エネルギー E_d 、そのエネルギー差 ($E_u - E_d$) を算定し、さらにその収束値をその深度より浅い層での損失エネルギー E_w と考えた。さらに地表記録から地表への上昇エネルギー E_s を算定することにより、表層地盤中での地震波動エネルギーの流れを定量化した。これにより、以下に知見が得られた。

- 1) 地表での上昇エネルギーの表層底面上昇エネルギーに対する比 E_s/E_u は、震央から遠い地点を除いて 1.0 を大幅に下回っており、基盤より地表での上昇エネルギーが小さくなる傾向が見られる。特に表層地盤が広範に液状化した PI 地点では 20% 程度しか地表に到達していない。
- 2) E_s/E_u と E_w/E_u は地盤のエネルギー減衰能と密接な関係があることが予想される。4 地点の記録の分析からも、表層地盤の減衰の増加に対し E_s/E_u の減少と E_w/E_u の増加の傾向が読みとれるが、直線的には変化せず減衰が大きくなるほどその変化割合が減少する傾向を示す。
- 3) 単位時間当たりの上昇エネルギー流量は上昇エネルギー（累積値）の増加割合の激しい時点でピークをなし、地震波形の特徴を強く反映したものとなっている。

次に、2 層系あるいは多層系の線形モデル地盤などを対象とした簡単な 1 次元波動解析を行い、以下の知見が得られた。

- 4) 無限地盤において硬い地盤から軟らかい地盤に向かって地震波が境界を透過する時に振幅は増幅するが、エネルギーは反射波エネルギーの分だけ必ず減少する。
- 5) 2 層系地盤へ調和波を入力した時、その振動数と地盤の固有振動数が近い場合には、共振効果により地表と基盤境界での上昇エネルギーの比 E_s/E_u は 1 以上となり、エネルギー蓄積効果が現れるが、振動数が離れている場合、表層と基盤のインピーダンス比が小さくても E_s/E_u は 1 よりはるかに小さくなる。
- 6) 2 層系地盤に地震波を入力した時、その卓越振動数と地盤の固有振動数が近い場合、やはり共振効果によりエネルギー蓄積傾向が現れるが、減衰定数がある程度大きくなるとインピーダンス比が小さい場合でも E_s/E_u は 1 をかなり下回る。したがって、大きな地震動においては、軟弱地盤で大きな減衰が発揮されれば E_s/E_u は硬質地盤に比べて小さくなる。
- 7) 地盤の減衰の増加に対する E_s/E_u の低減と E_w/E_u の増加は直線的には生じず、減衰が大きくなるほどその変化割合が減少する傾向を示すことが単純な 2 層系モデルからも示され、鉛直アレー記録の分析結果を裏付けることができる。
- 8) 表層地盤を層厚・固有振動数・減衰定数一定の下で V_s の異なる複数の薄層に分割した場合、表層地盤中での損失エネルギー E_w は層分けにかかわらず無くほぼ一定値を保つが、地表への上昇エネルギー E_s は分割数が増えるほど減少する。すなわち地表に到達するエネルギーは表層地盤の層構造にも依存する。
- 9) 以上より、地表に到達するエネルギーの割合 E_s/E_u は表層地盤のインピーダンス比、地盤の固有振動数と地震動の卓越振動数の一致度、地盤の減衰定数、さらに表層地盤の層数にも依存することが言える。
- 10) 以上を総合すると、地盤が強地震動を受けた場合、軟弱地盤の方が地震波の上昇エネルギーが大きいとは考えにくく、地震被害が地震波動エネルギーに支配されるならば、軟弱地盤の方が震動による地震被害が大きいと考える必然性はない。

このような検討結果に基づき、地震波動エネルギーと構造物被害の関連および波動エネルギーの性能設計への適用方法について考察を加え、以下の見解を提示した。

- 11) 地盤～構造物連成系をせん断振動型で近似した場合、波動エネルギー流量は構造物ひずみと直結しており、エネルギーにより構造物被害の評価が可能と言える。したがって、構造物に入ったエネルギーによる発生ひずみと各限界状態に応じたひずみの大きさを対応させることにより、性能設計が可能となる。
- 12) たわみ性が大きく減衰定数が小さい構造物では、地震動の各サイクルに生じるひずみが構造物被害に直結するため、エネルギー流量に基づいて限界状態を評価することが適当と考えられる。一方、剛体構造物や盛土・斜面などにおいては、繰り返し载荷による累積ひずみや間隙水圧の上昇などによって構造物の限界状態が決定されるため、エネルギー流量よりは、エネルギー累積値での評価が適切と言えよう。
- 13) エネルギー設計法においては設計地震動のエネルギーを規定するが、具体的波形あるいはスペクトル特性

も基盤から表層地盤さらに構造物へのエネルギーフローを計算する上で必要になる。設計地震動のエネルギーは地震入力基盤のインピーダンスを指定することにより規定できる。それにより、加速度などで規定する従来の設計法とは異なり、振動数、波形や継続時間の違いが地震の被害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。

謝辞 .

本研究で用いた 1995 年兵庫県南部地震での鉛直アレー記録の便宜を図っていただいた関西電力(株)土木建築室、神戸市開発局、(株)ニュージェック、関西地震観測研究協議会の関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Gutenberg, B. and Richter, C.F.: Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration (second paper), *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.46, 1956, pp.105-145.
- 2) 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 .
- 3) 土岐憲三： 構造物の耐震設計、土木学会編新体系土木工学 11、技報堂出版、pp.89-90.
- 4) Kanai, K., Tanaka, T., Yoshizawa, S.: Comparative studies of earthquake motions on the ground and underground, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Tokyo University, Vol.37, 1959, pp.53-87,.
- 5) Kanai, K., Tanaka, T., Yoshizawa, S., Morishita, T., Osada, K. and Suzuki, T.: Comparative studies of earthquake motions on the ground and underground II, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Tokyo University, Vol.44, 1966, pp.609-643.
- 6) 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.
- 7) 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 文集 No.652/111-51、2000、pp.257-267.
- 8) Kokusho, T. and Motoyama, R.: Energy dissipation in surface layer due to vertically propagating SH wave, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.4, 2002, pp.309-318.
- 9) Kokusho, T., Matsumoto, M. and Sato, K.: Nonlinear seismic properties back-calculated from strong motions during Hyogoken-Nambu EQ, *Proc. World Conference on earthquake Engineering (Acapulco)*, 1996, CD-publication.
- 10) Sato, K., Kokusho, T., Matsumoto, M., and Yamada, E. : Nonlinear seismic response and soil property during strong motion, *Soils and Foundations Special Issue for the 1995 Hyogoken Nambu earthquake*, 1996, pp.41-52.
- 11) 國生剛治、高橋佳宏、本山隆一： 兵庫県南部地震のアレー観測における最大コーヒーレンス法を用いた地震計設置誤差の評価、地盤工学会、第 33 回地盤工学研究発表会概要集、1998、pp.1107-1108.
- 12) 國生剛治、本山隆一、本山 寛： 鉛直アレー観測記録の入射波を用いた地表層のエネルギー収支、第 37 回地盤工学研究発表会、2002、pp.1931-1932.
- 13) 國生剛治、万谷昌吾、本山 寛： 表層地盤における地震波のエネルギーの流れ、第 11 回日本地震工学シンポジウム、2002、pp.189-192.
- 14) 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.
- 15) Romo, M. P.: Clay behavior, ground response and soil-structure interaction studies in Mexico City, *Proc. 3rd International Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Vol.II, 1995, pp.1039-1051.

(受理： 2004年 1月 27日)
(搭載決定： 2004年 5月 14日)

Energy Flow of Seismic Waves in Surface Ground for Performance-Based Design

KOKUSHO Takaji¹⁾, MOTOYAMA Ryu-ichi²⁾, MANTANI Shogo²⁾
and MOTOYAMA Hiroshi³⁾

1) Professor, Faculty of Science & Engineering, Chuo University

2) Ex-graduate student, School of Science & Engineering, Chuo University

3) Graduate student, School of Science & Engineering, Chuo University

ABSTRACT

Energy flow of seismic waves observed during the 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake in vertical array sites is calculated by assuming vertical propagation of SH waves in surface layers. In order to basically understand the results, wave energy and its dissipation in linear 2 to 5 layers systems are also investigated. The major findings are; (1) Wave energy generally tends to decrease as it goes up from base layer to ground surface, (2) The amount of upward energy depends on the resonant condition, the impedance ratio, soil damping, the number of soil layers, etc. (3) A general perception that soft soil sites are prone to heavier damage due to energy storage effect by resonance may not be right, because large damping ratio tends to cancel resonant effect if it ever occurs. The wave energy, which is directly related to induced strain in superstructures, can play a key role for the performance-based design. For that purpose, design seismic motion should be defined in terms of wave energy.

Key Words: Seismic wave energy, SH wave, Impedance ratio, Damping, Performance-based design