

# 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

國生剛治<sup>1</sup>・本山隆一<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

<sup>2</sup> 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

地震による構造物や地盤の破壊は、波動エネルギーの消費量と直接対応しており、現在行われている加速度や速度の振幅による見方とは別に、表層地盤に出入りする波動のエネルギー収支により、耐震性の評価を行える可能性があると考えられる。そこで、兵庫県南部地震において鉛直アレーにより観測された加速度時刻歴から、重複反射理論によって上昇波、下降波を求め、それらの波動によるエネルギーから地震の際に表層地盤でどの程度エネルギー収支があるのかを検討した。その結果、地盤の液状化や非線形性の発揮によって、表層地盤のエネルギー消費が大きくなることが分かり、エネルギー収支の計算により地盤の破壊や非線形応答が評価できる可能性が示された。

*Key Words* : earthquake wave energy, energy loss, SH wave, multi-reflection theory, earthquake array observation

## 1. まえがき

地震波の主要動は、基盤から入射する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ことが、金井の研究<sup>1)</sup>以来認められている。すなわち、基盤にほぼ鉛直に入射した波は、各層境界で透過と反射を繰り返しながら上昇し、地表で全反射してまた透過と反射を繰り返しながら下降していく。この場合各層境界で、上下層間のインピーダンス比により入射波と透過波、反射波の振幅比が決まり、上層が軟質なほど、そこを透過した上昇波の振幅が増幅する。地震波の振幅が大きくなると、地盤物性の非線形性を考慮した等価剛性や等価減衰を用いた等価線形解析が行われる。さらに、集中質点-バネ系モデルにより、応力-ひずみ関係を時々刻々追跡した逐次非線形解析も行われる。このような一次元モデルにより軟質地盤での地震波の加速度や速度の増幅度が検討され、それに基づき、構造物の耐震性や地盤の液状化可能性などが判断される。また、実際の地震被害の発生原因を調べる場合にも、表層地盤での加速度、速度の増幅度と被害の関係が検討される。

一方、エネルギー論的にみると、地震により発生する構造物や地盤の破壊は、そこでの波動のエネルギー消費量と直接対応しているはずである。したがって、加速度や速度の振幅による見方とは別に、表層地盤に出入りする地震波動のエネルギー収支によって、地震被害の評価を妥当に行える可能性が考えられる。地震波動のエネルギー的捉え方の試みは地震学分野での地震波エネルギーの算定<sup>2)</sup>、物理探査分野での発破による波動エネルギーの算定の例<sup>3)</sup>などがあるが、工学分野で表層地盤の実体波を対象にした例はきわめて少ないといえよう。

一般に、弾性地盤中の1次元重複反射解析モデルでは、地表あるいは地中の任意の1点の地震記録があれば、全ての深度での地震動とその上昇波、下降波成分が計算でき<sup>4)</sup>、それにより波動エネルギーの流れも計算できる。しかし、強地震動においては地盤物性が非線形化するため、基盤から入射した地震の波動エネルギーの多くは地盤中での内部減衰や液状化のような破壊によって失われ、その残りが地表に到達することになる。したがって、これらのエネルギー消費量が分からない限り、地表付近の記録から表層地盤へのエネルギーの出入りを計算するこ

とは難しい。しかしながら、鉛直アレー記録がある場合には、非線形挙動に伴うエネルギー消費がそれほど大きくない深い地盤での記録から、上昇波と下降波の分離をすれば良い。この分離は、地中の異なる2深度での地震記録と、その間の地盤条件が与えられれば可能である。上昇波と下降波の分離ができれば、対応した波動エネルギーの流れが計算できることになる。

ここではそのための大前提として、地震のSH波については鉛直方向のみの波動エネルギーの流れで近似できるとしている。実際、工学的には同じ仮定の下に加速度・速度応答を計算している。この場合、ある深度レベルでの上昇波エネルギーと下降波エネルギーがわかれば、図-1に概念的に示すように、その差し引きからそれより上の層でのエネルギーの収支が計算できることは明白である。

本研究ではこの方法により、兵庫県南部地震において鉛直アレー地震観測地点で得られた世界的にも貴重な強地震動記録を用いて、表層地盤への上昇波と下降波のエネルギーの収支を計算し、その結果に考察を加える。

## 2. 地震波の分離とエネルギーの計算方法

鉛直方向に伝播する角振動数 $\omega$ で調和振動する水平せん断波(SH波)は、鉛直下向きにz軸をとり水平変位をuとして、

$$u = A e^{i(kz + \omega t)} + B e^{-i(kz - \omega t)} \quad (1)$$

と表される。ここに  $i = \sqrt{-1}$  である。第1項は上昇波に、第2項は下降波に対応し、AとBはそれらの振幅である。ここにkは複素波数と呼ばれ、

$$k^2 = \frac{\rho \omega^2}{G^*} = \frac{\rho \omega^2}{G + iG'} \quad (2)$$

の関係がある。 $\rho$ は地盤の密度、 $G^* = G + iG'$ は複素剛性である。ここで複素剛性としては、土質材料での一般的な扱いにならない、非粘性減衰を仮定し、減衰定数は複素剛性から  $D = G'/2G$  により算出される<sup>4)</sup>。変位uよりせん断応力 $\tau$ が次式により計算される。

$$\tau = ikG^* (A e^{i(kz + \omega t)} - B e^{-i(kz - \omega t)}) \quad (3)$$

解析対象とする地盤は図-2に示すように、水平な複数の層によってモデル化し、各層ごとに、例えば第m層であれば、層厚 $h_m$ 、密度 $\rho_m$ 、せん断剛性 $G_m$ 、減衰定数 $D_m$ 、波数 $k_m$ というように特性値を指

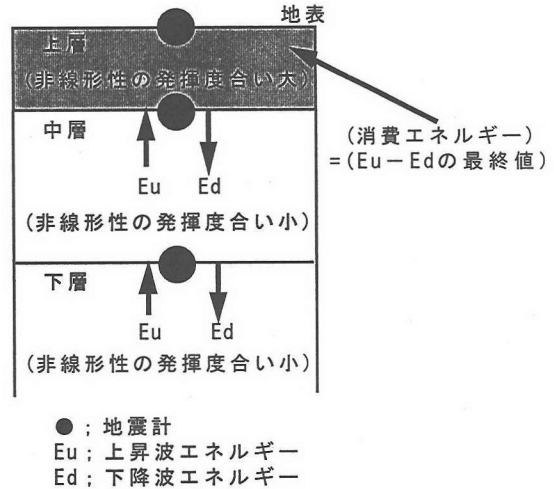


図-1 鉛直アレーの地盤深部での記録を用いた地震波の上昇波、下降波エネルギーの流れと消費エネルギーの算定

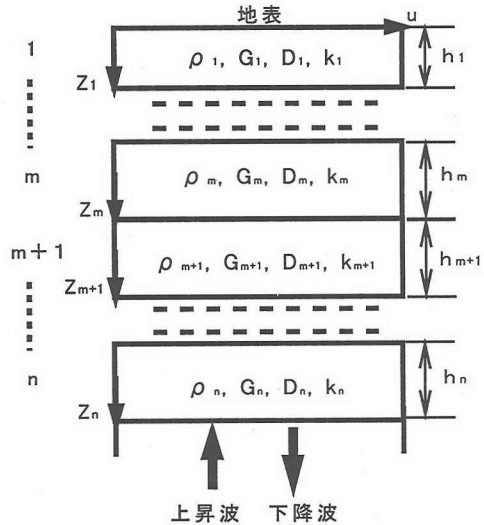


図-2 SH波の重複反射理論に基づいた成層地盤のモデル化

定する。第m層に着目し、図示の部分座標を採ると、m層とm+1層の境界での変位と応力の連続条件から未知数AとBについての漸化式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} A_{m+1} \\ B_{m+1} \end{Bmatrix} &= [T_m] \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} \equiv \\ & \begin{bmatrix} k_{m+1}G_{m+1}^* + k_mG_m^* e^{ik_m h_m} & k_{m+1}G_{m+1}^* - k_mG_m^* e^{-ik_m h_m} \\ 2k_{m+1}G_{m+1}^* & 2k_{m+1}G_{m+1}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_m \\ B_m \end{Bmatrix} \quad (4) \\ & \begin{bmatrix} k_{m+1}G_{m+1}^* - k_mG_m^* e^{ik_m h_m} & k_{m+1}G_{m+1}^* + k_mG_m^* e^{-ik_m h_m} \\ 2k_{m+1}G_{m+1}^* & 2k_{m+1}G_{m+1}^* \end{bmatrix} \end{aligned}$$

さて、第m層上端の層境界での変位は次式で表されるが、

$$u_m = U_m e^{i\omega t} = (A_m + B_m) e^{i\omega t} \quad (5)$$

$A_m$ ,  $B_m$ はそれぞれ第m層中の上昇波成分と下降波成分の複素振幅を表す。地中の第m層上端の観測波形が式(5)により与えられ、さらにそれより深い第n層の上端の観測波形が次式により与えられている場合には、

$$u_n = U_n e^{i\omega t} = (A_n + B_n) e^{i\omega t} \quad (6)$$

この2つの記録から地表での全反射の条件を用いずとも上昇波成分と下降波成分が分離可能となる<sup>5)</sup>。

すなわち第n層上端と第m層の上端との間で、式

$$(4) \text{ における } [T_m] \text{ を用いて次式が成り立つ。} \\ \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} [T_{n-1}] [T_{n-2}] \cdots [T_m] \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \end{bmatrix} \equiv [T_{n/m}] \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

この式中の2x2のマトリクスを

$$[T_{n/m}] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表すと、

$$\begin{bmatrix} U_n \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} + T_{21} & T_{12} + T_{22} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \end{bmatrix} \equiv [P_m] \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

結局第m層中での上昇波成分 $A_m$ と下降波成分 $B_m$ は、

$$\text{ここ } \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \end{bmatrix} = [P_m]^{-1} \begin{bmatrix} U_n \\ U_m \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_n \\ U_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

に、 $Q_{11} \cdots Q_{22}$ は2x2のマトリクス $[P_m]^{-1}$ の各要素である。また、第n層中での対応する成分は

$$\begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} = [T_{n/m}] [P_m]^{-1} \begin{bmatrix} U_n \\ U_m \end{bmatrix} = \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_n \\ U_m \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} \\ Q'_{21} & Q'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_n \\ U_m \end{bmatrix}$$

により求められることになる。

以上は、角振動数 $\omega$ の調和波に対する解であるが、地震波のような不規則波に対する応答を計算するためには、フーリエ級数展開の手法を用いて不規則波を調和波の重ね合わせで表わし、それぞれの角振動数について式(11)を適用すればよい<sup>4)</sup>。

さて、次に1方向へ伝播する波動により運ばれるエネルギーについて考える。 $z$ 軸の正の方向に速度 $V$ で伝わる波は一般的に任意の関数形 $f()$ で表すと、

$$u = f(z - Vt) \quad (12)$$

ある時間 $t = t \sim t + \Delta t$ の間にある点を一方向へ伝播する波動の運動エネルギー $E_k$ とひずみエネルギー $E_e$ は

$$E_k = E_e = \frac{1}{2} \rho V \Delta t \int \left( \frac{du}{dt} \right)^2 \quad (13)$$

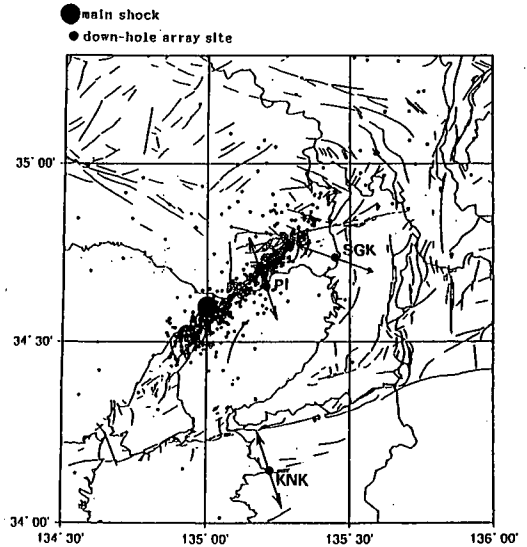


図-3 解析に用いた記録が得られた3カ所の鉛直アレーサイトと兵庫県南部地震の本震、余震震源の位置

したがって、上昇あるいは下降する地震波が座標 $z$ を通過する時間を $t=t_1 \sim t_2$ とすれば、その間に運ばれるエネルギーは

$$E(z, t_1 \sim t_2) = \rho V \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{du}{dt} \right)^2 dt \quad (14)$$

のように表されることになる。ここで注意すべきは式(12)-(14)の $u$ はあくまで一方向への進行波であり、二方向への波を一点で重ね合わせた観測波ではないという点である。すなわち、上昇波と下降波の重なった観測波そのものでは波動エネルギーは計算できず、両方向への波に分離して、はじめてエネルギーの流れが検討できることになる。

### 3. 解析条件と解析手順

解析の対象としたのは、兵庫県南部地震において図-3に示す3カ所の鉛直アレーサイトで得られた本震記録である。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)、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、標準貫入試験N値、PS検層により測定したP波とS波の伝播速度(それぞれ、 $V_p$ ,  $V_s$ で表す)を図-4に示す。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

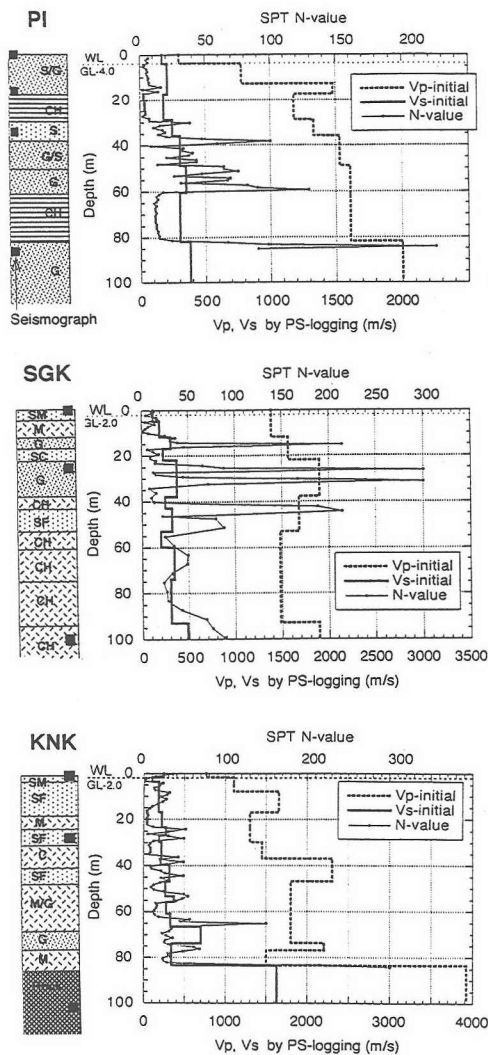


図-4 3カ所の鉛直アレーサイトの土質、地震計設置深度とP波、S波速度、N値の分布

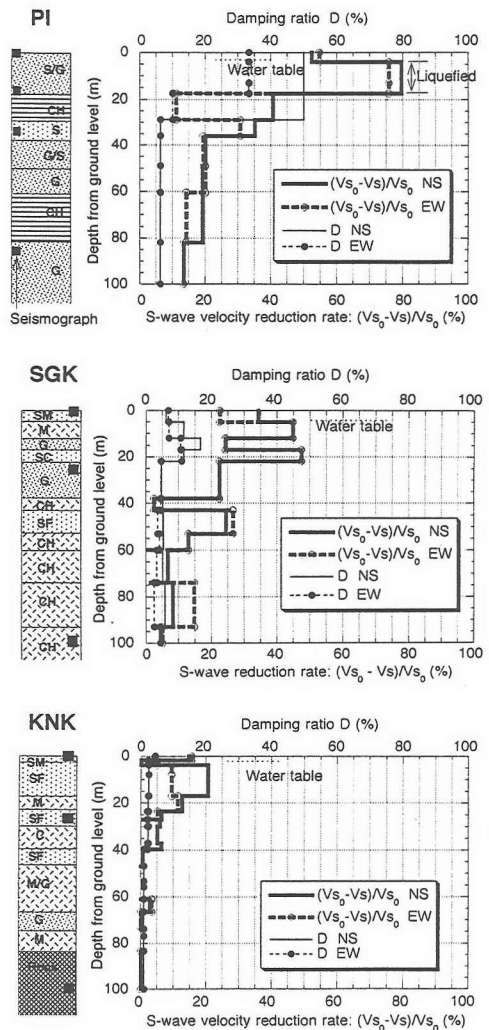


図-5 逆解析により同定された3カ所の鉛直アレーサイトの地震時のS波速度低減率と減衰定数

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(10)、(11)により行う。これにより、非線形性が大きく信頼性のある物性値評価が困難な表層部分の記録を用いずにエネルギー収支の分析が可能となる。

この地震波の分離を行うためには、地震記録を用いる2深度間の地盤のモデルが必要となることは式(7)から理解できる。その間の地盤の物性値を選ぶに際しても、微小ひずみに対応したPS検層の測定値ではなく、非線形的な変化を考慮した値を用いるべきである。この地震で発揮された非線形物性については、すでに同じ鉛直アレー記録を用いた逆解析

でS波速度 $V_s$ と減衰定数 $h$ が推定されている<sup>6), 7), 9)</sup>。その結果を図-5に示すが、地震動の大きかったPIやSGKでは、本震記録の逆解析で求められた $V_s$ の低減率(PS検層による初期 $V_s$ に対する比)は地表に近い層では最大80~50%にもなることが示されている。特に地震動の大きかったPIでは地表から2番目の地震計で深でも非線形性がきわめて大きいことが図-5からわかる。しかし、最深部から2番目の地震計より以深では、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限り、物性値の非線形的変化量もそれほどではなく、それだけ信頼性の高い評価が可能となるわけである。ここでは、一

表-1 3カ所の鉛直アレーサイトの上昇波と下降波の分離に用いた中層の地盤モデル

PI のモデル

深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)		減衰定数 (%)	
			EW	NS	EW	NS
32.4	3.6	2.0	170	159	6.3	6.3
36.0	13.0	2.2	246	244	6.3	6.3
49.0	11.5	2.2	280	283	6.3	6.3
60.5	21.5	1.8	260	245	6.3	6.3
82.0	1.4	2.2	326	329	6.3	6.3
83.4		2.2	329	329	6.3	6.3

SGK のモデル

深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)		減衰定数 (%)	
			EW	NS	EW	NS
25.0	13.0	2.2	291	291	4.6	4.7
38.0	5.0	1.8	244	244	4.5	5.1
43.0	10.0	2.0	235	242	3.6	5.3
53.0	7.0	1.8	174	174	4.1	5.4
60.0	14.0	1.8	350	322	3.3	5.1
74.0	19.0	1.8	260	280	2.5	5.8
93.0	4.0	1.8	456	459	4.4	5.1
97.0		1.8	459	459	5.0	5.0

KNK のモデル

深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)		減衰定数 (%)	
			EW	NS	EW	NS
25.0	2.0	1.8	257	253	2	2
27.0	3.0	1.8	191	177	2.1	2.1
30.0	7.1	1.6	224	205	2.2	2.2
37.1	2.6	1.8	212	193	2.1	2.1
39.7	7.2	1.8	323	313	1	1
46.9	6.5	1.7	290	269	1	1
53.4	2.4	2.0	376	371	1	1
55.8	5.2	1.7	288	275	1	1
61.0	5.5	1.8	314	316	1	1
66.5	7.4	1.9	700	699	1	1
73.9	9.6	1.9	395	395	1	1
83.5	16.5	2.7	1630	1630	1	1
100.0		2.7	1630	1630	1	1

応逆解析で計算された非線形性を考慮した Vs と h を用いて以下の解析を行った。一方、土の密度は以前の研究の値を用いた<sup>6), 7)</sup>。表-1にはこのようにして決定し、以下のエネルギー収支の解析に用いた3地点の地盤解析用モデル(最深部およびそこから2番目の地震計設置レベルの間)を示している。

解析に用いた地震波は、あらかじめ設置誤差の検

表-2 鉛直アレー記録の方向修正角度

サイト	地震計深度 (m)	修正角度 (度)
PI	0	0
	16.4	9
	32.4	7
	83.4	25
SGK	0	0
	24.9	6
	97	-39
KNK	0	0
	25	64
	100	48

注) ただし、正を反時計回り方向、負を時計回り方向として回転した場合に地表方向に一致する。

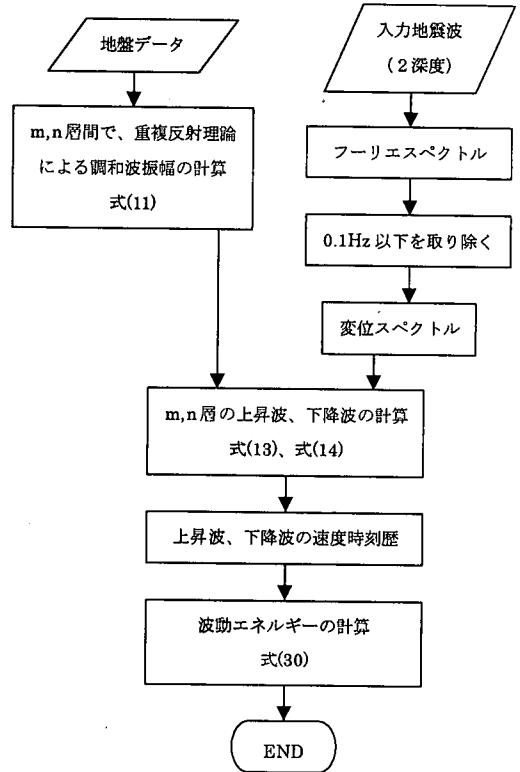


図-6 解析のフローチャート

討を行い、その結果により方向修正を加えたものである<sup>8)</sup>。修正角度を表-2に示す。PIを除く2地点については修正後のNS, EW方向の波形を用いたが、PIについては、地震断層にほぼ直行する方向の震動成分が卓越しているため、最大加速度の生じた方向(主軸: NSから反時計回りに46度)と、それに直行する方向の2方向の波形を用いて解析を行った。地震記録は時間刻みが0.01秒で4096点、初動から40.96秒の長さを解析対象とした。

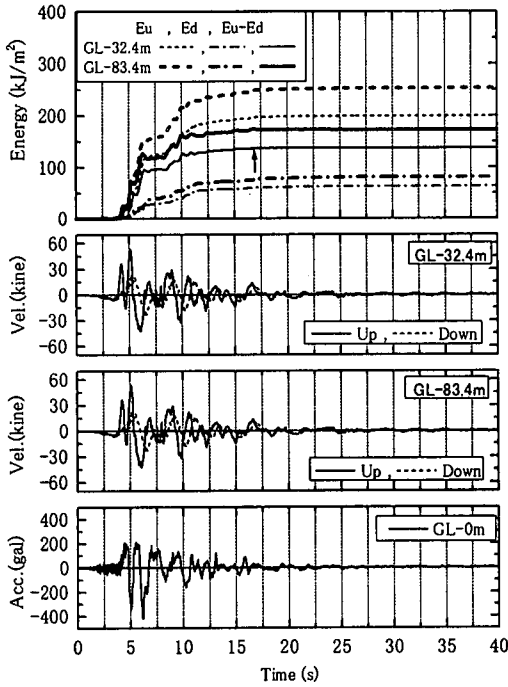


図-7(a) PI地点における主軸方向の解析結果

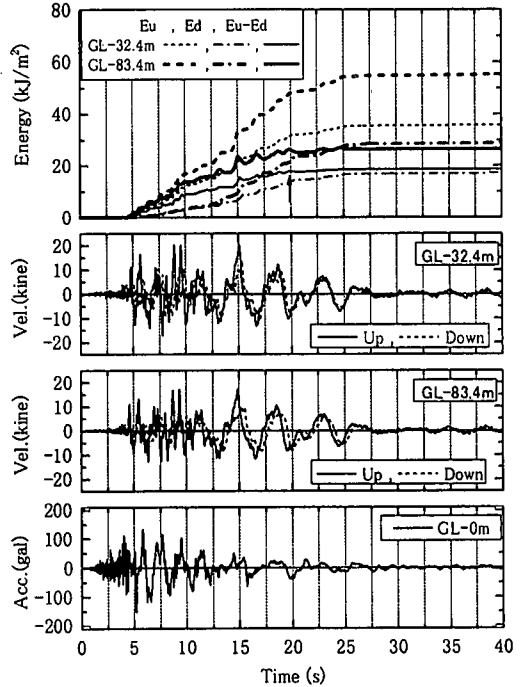


図-7(b) PI地点における主軸直角方向の解析結果

解析のフローは図-6に示すとおり、まず鉛直アレーの最深部と次の深さの2深度の加速度波形をフーリエ変換し、0.1Hz以下の成分をカットする。このフィルター操作は、後の数値積分において基線からのずれによるエネルギーの計算誤差を除外するため、不可欠である。これにより、10秒以上の長周期のエネルギーはカットしているが、地震の主要動の時間10秒程度に対してその影響は無視できるものと思われる。その後、2深度のレベルの各々の下面での上昇波と下降波を計算した後、数値積分してそれぞれの速度波形を求め、それから式(14)により上昇波と下降波のエネルギーの時刻歴を計算した。

#### 4. 解析結果

##### (1) PI地点の解析結果

図-7(a)、(b)はPIにおける主軸と主軸直交の2方向についての計算結果である。横軸の時間は最深レベルの地震計の記録において、初期微動の始まった点を読みとり、そこを $t=0$ としてあらわしている。それぞれの図の上から3段目と2段目には最深レベル(GL-83.4m)と最深から2番目のレベル(GL-32.4m)

での上昇波と下降波の速度時刻歴を示している。これより、いずれの方向についても上昇波が下降波に比べてかなり大きな速度振幅を示していることが分かる。また、上昇波と下降波の間には明瞭な位相ズレが表れている<sup>10)</sup>。

同図の1段目のグラフには、これらから計算した二つの深度での上昇波と下降波のエネルギーEuとEdの時間変化と、それらの差しき(Eu-Ed)の時間変化を示している。さらに、最下段には参考のため、地表での加速度記録の時刻歴を示している。エネルギーはすべて平面積 $1\text{m}^2$ あたりの値で表している。加速度記録との比較により、Euは主要動の大きな加速度波の $t=6.3\text{s}$ までと $t=10.0\text{s}$ までで大きく上昇しほぼ最終値に至っていることが読みとれる。その値は最深レベルの主軸方向で $250\text{kJ/m}^2$ である。一方、主軸直角方向では $55\text{kJ/m}^2$ である。上昇エネルギーEuの合計は両方向の値のスカラー和であるので、PIのGL-83.4mのレベルでの総上昇エネルギーは $305\text{kJ/m}^2$ となる。これは、 $1\text{m}^2$ に1個ずつ質量1tの錘を地上高さ約31mから地表に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におけるEuはGL-83.4mでの値のほぼ80%の値で、同様な時間変化を示す。一方、下降波のエネルギーEdは上昇波

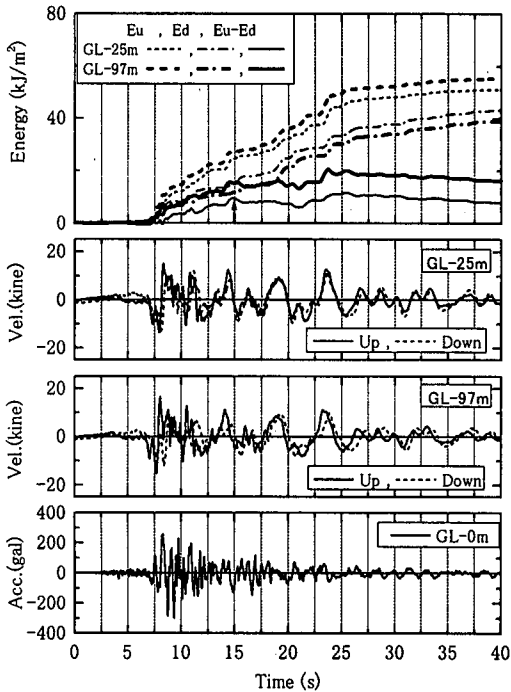


図-8(a) SGK 地点におけるNS方向の解析結果

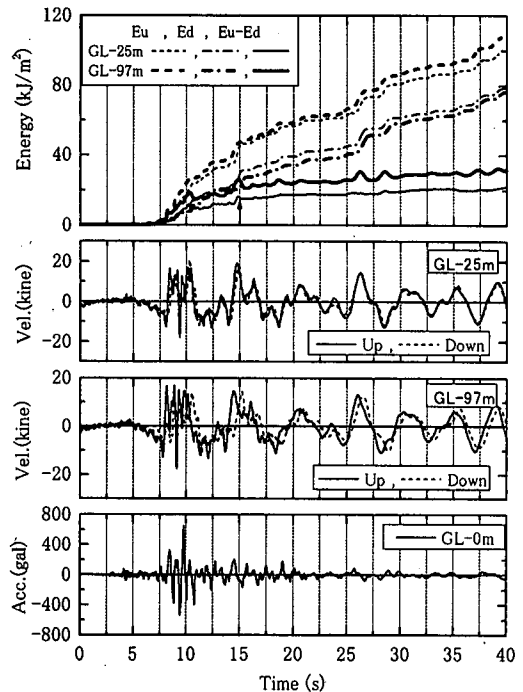


図-8(b) SGK 地点におけるEW方向の解析結果

に比べるとかなり小さく、GL-83.4mのレベルで主軸方向では $80\text{kJ/m}^2$ 、主軸直角方向で $29\text{kJ/m}^2$ である。

つぎに、(Eu-Ed)を見てみる。Eu, Ed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った。それに対し、(Eu-Ed)は着目点より上層でのエネルギーの収支を表しており、当然増減を示す。(Eu-Ed)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、(Eu-Ed)は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。

この地点の場合、(Eu-Ed)の最終値は主軸方向と主軸直角方向をあわせてGL-83.4mで $198\text{kJ/m}^2$ 、GL-32.4mで $155\text{kJ/m}^2$ であり、それぞれのレベルでの上昇波エネルギーの約65%を占めている。その値は着目したレベルより上方の地盤で消費されたエネルギーを表しており、損失エネルギーEwに等しい。一方、GL-83.4mとGL-32.4mでの(Eu-Ed)の最終値の差は $43\text{kJ/m}^2$ であり、二つの深度の間で失われたエネルギーに相当している。しかし、この値はその間の地盤に表-1により入力条件として与えた減衰定数

に支配されるものであり、ここではむしろGL-32.4m以浅の値に注目する。この損失エネルギーは地表に構造物がある場合は、地盤と構造物の両方で失われたエネルギーを反映したものとなる。しかし、PI鉛直アレー地点の地表に大きな構造物は存在しなかったことを考慮すると、Ewは地盤の内部減衰で失われたものと考えて良いであろう。(Eu-Ed)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(Eu-Ed)が急増したものと考えられる。それ以降、上昇割合は鈍くなり、 $t=10$ 秒以降、Euはまだ多少伸びているのに比べ(Eu-Ed)の伸びが極めて小さくなっている。これはこの時点以降、上昇波と下降波のエネルギーの伸びに大差がなくなったことを意味している。

## (2) SGK地点の解析結果

図-8(a)、(b)にはSGK地点のNSとEW2方向についての計算結果を示す。それぞれの図の第3段目と2段目には最深レベル(GL-97m)と最深から2番目のレベル(GL-25m)での上昇波と下降波の速度時刻

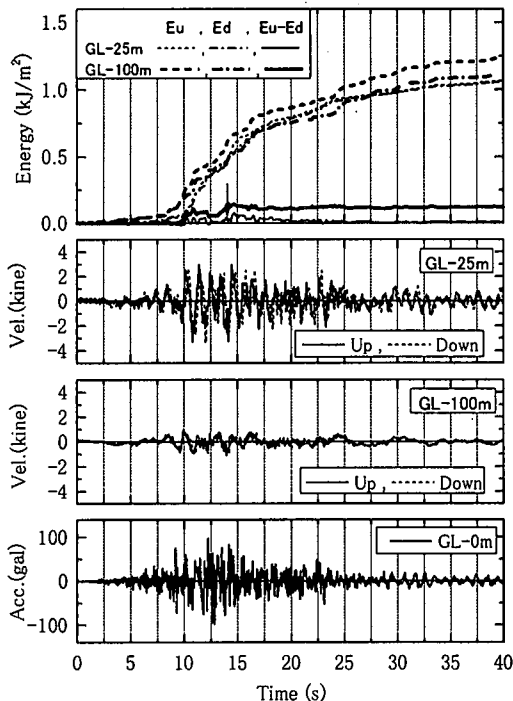


図-9(a) KNK 地点におけるNS方向の解析結果

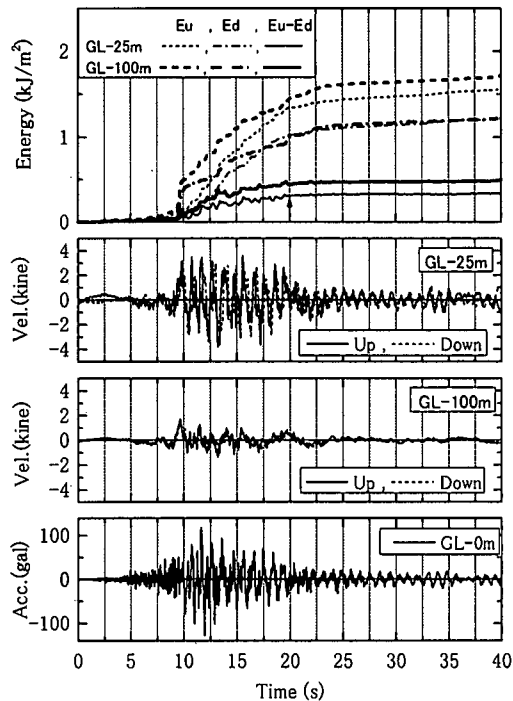


図-9(b) KNK 地点におけるEW方向の解析結果

歴を示している。これより、NS、EWいずれの方向についても上昇波が下降波に比べて主要動の最初の部分では大きな速度振幅を示しているが、途中からはその差がほとんどなくなることが分かる。また、上昇波と下降波それぞれにおいて、振幅の絶対値は地表での加速度記録の振幅が明瞭に小さくなる $t=20$ s以降にも主要動の先頭部分と同程度の速度振幅を示している<sup>11)</sup>。

同図の1段目のグラフに示されているように、上昇波エネルギーEuはEW方向がNS方向より絶対値が大きな値を示しているが、PI地点ほどの大きな差はない。NS方向では主要動の到来から $t=25$ s付近まで増加し続け、その後増加割合は明瞭に低下している。一方、EW方向ではEuは $t=20$ s くらいまで増加したあと、 $t=25$ s 以降再び増加傾向が強まっている。GL-25mにおけるEuはGL-97mでの値の90%以上の値で、この間において上昇エネルギーはほとんど減少していない。Edは終始Euにほぼ並行的に変化している。

つぎに(Eu-Ed)は、主要動の初期において急激に増加し、 $t=15$ s 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、土のひずみの増大にともない履歴減衰が増加したためと考えられる。その後、

$t=23\sim 25$ s くらいまではわずかながらも増加傾向を示すが、それ以降はほぼ一定値を示す。一方その間、Eu、Edそれぞれは $t=15$ s 以降も明瞭に増加し続けていると評価されるが、その伸び方がほぼ同じで、上層でのエネルギー消費がほとんどないという結果になっている。このような結果となる原因としては $t=15$ s 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。

### (3) KNK地点の解析結果

図-9(a)、(b)はKNK地点のNSとEWの2方向についての計算結果を示す。上昇波エネルギーEuはEW方向では主要動の到来から $t=23$ s くらいまで増加したあと頭打ち傾向が見えるが、NS方向ではその後も増加傾向は継続している。Edは終始Euにほぼ並行的に変化している。

この地点の特徴はGL-25mとGL-100mで速度の上昇波と下降波の振幅が大きく異なっている点である。これは、この地点ではGL-100mの地震計が $V_s=1630$ m/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ことによっている。それにもかかわ



らず、上昇波のエネルギーはGL-100mとGL-25mであまり大きな差はみられない。すなわち、エネルギーの観点からみれば、一方向への進行波の軟質地盤での振幅の増幅は、特段、エネルギーの増幅をもたらすものでないという当然のことが理解される。

つぎに(Eu-Ed)の絶対値はEuにくらべてかなり小さく、エネルギー消費量がきわめて小さいことが分かる。(Eu-Ed)はt=14~20s以降はほぼ一定値を示しているのに対して、EuとEdは増え続けており、t=20s以降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。

## 5. 考察

上記の3地点における解析において、SGK, KNKの記録の後半部で(Eu-Ed)はほぼ一定となっているにも関わらず、EuとEdは依然として明瞭に増加しているという結果が得られた。PIにおいてはこの現象はそれほど目立たないが、それでも図-7(b)に示すように、主軸直角方向には明瞭に表れている。この時点から後で、図-7~9から分かるように、上昇波と下降波の速度振幅の差異がほとんどなくなり、また地表での実測加速度波形に長周期成分が徐々に混入し始めることが認められる。これらの点から、この時点以降、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ことの意味している。各地点の各方向ごとに(Eu-Ed)がほぼ一定となる初動からの時間を表-3にまとめて示す。この時間は14秒から20秒の範囲で、地点によって異なるが、同じ地点でも方向によっても異なる。このような現象が現れる原因としてまず考えられるのは表面波の影響であろう。表面波においては同一振動数成分については深さ方向の振幅分布は一定のまま地表面に沿って水平方向に伝播するため、波動エネルギーの移動は水平方向のみで鉛直方向には生じないことが直感的に理解できる。勿論、この点については今後、波形の軌跡や分散性等の詳細な分析により、表面波の種類の確認、実体波と表面波の分離等が必要である。

図-7, 8, 9に示された地盤のエネルギー消費量は同じ部分での減衰定数と関連を有することが予想される。そこで、図-1に示す上層部分(最深部から2番目の地震計より上部)に着目し、損失エネルギーEwの上昇エネルギーEuに対する比を計算した。この際、(Eu-Ed)がほぼ一定値に落ち着き、その最終値をEwとして読みとれる時点(表-3に示す時点)まで

表-3 (Eu-Ed)がほぼ一定となるまでの初動からの時間

サイト	PI		SGK		KNK	
	主軸	主軸直角	NS	EW	NS	EW
初動からの時間(秒)	17	20	15	15	14	20

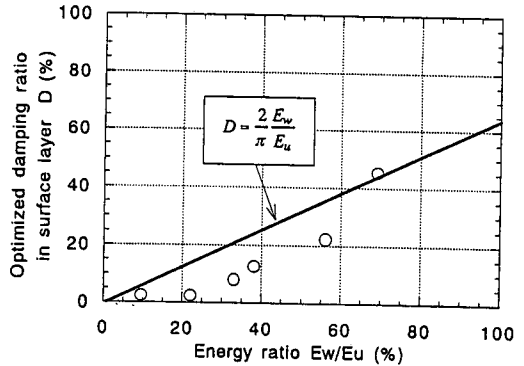


図-10 上層におけるエネルギー比と  
同定された減衰定数の比

のエネルギーの値を用いた。そして、その値を別途行った逆解析により同定された減衰定数Dと比較することを試みた。逆解析の詳細については文献(6), 7), 9)を参照願いたい。同じ鉛直アレーによる本震記録を用いて、各層のS波速度と減衰定数を最小自乗法により同定したものである。同定された3地点の減衰定数の深度分布は図-5に地盤の土質構造モデルとともに示されている。

図-10は縦軸と横軸それぞれに3地点の2方向についての逆解析により同定された減衰定数とEw/Eu(消費エネルギーEwの上昇エネルギーEuに対する比)をとって表したものである。ここで同定結果の減衰定数はモデル分割された各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。両者には明らかに正の相関があり、エネルギー比は地盤の減衰定数と何らかの関係があることが分かる。

一般に、減衰定数は図-11(a)に示すように、1サイクル中に失われるエネルギー(履歴面積 $\Delta W$ )と、その1サイクル中の弾性ひずみエネルギーの累積値(三角形oabの面積の4倍)4Wにより次式で定義される。

$$D = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta W}{4W} \quad (15)$$

地震時に上層地盤が一定振幅調和波動でNサイクル振動すると仮定した場合、図-11(c)に概念的に示すように消費エネルギーはEw=N $\Delta W$ である。この間に上層に入射したひずみエネルギーの累積値はEe=

4NWであるが、式(13)から分かるように、それに対応して同じ量の運動エネルギー $E_k$ も入射しており、上層への入射エネルギーは $E_u = E_e + E_k = 8NW$ により表されることになる。これらの関係を式(15)に代入すると、結局、減衰定数と波動エネルギーの間は次式のように表される。

$$D = \frac{2}{\pi} \frac{E_w}{E_u} \quad (16)$$

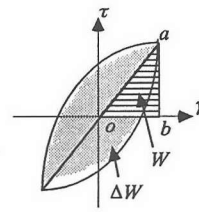
図-10には式(16)による直線関係を記入し、個々の計算値と比較している。 $E_w/E_u = 1.0$ の時は、上層への入力エネルギーがすべて土の内部減衰で失われる場合であり、 $D = 2/\pi = 0.637$ となる。これは、土の非線形性の極限状態として完全剛塑性状態となった場合、図-11 (b)のように $\Delta W/W = 8$ となるから、式(15)によって $D = 2/\pi = 0.637$ となることに対応している。同様に、双曲線型応力ひずみ関係を骨格曲線として用いた履歴ループについても、ひずみが大きくなると $D$ は $2/\pi$ に近づくことが示される<sup>12)</sup>。

図-10の各点は式(16)の理論線と必ずしも良く一致はしておらず、逆解析から同定された値はエネルギーから式(16)により評価した値に比べて、 $E_w/E_u = 70\%$ のPIの主軸方向を除いてはかなり小さく、むしろ非線形的関係となっている。地震波動は実際はその振動数特性や地盤境界のインピーダンス比が関わる不規則波であり、式(16)は厳密には成り立たないこと、逆解析による同定減衰定数の側にも種々の誤差要因が含まれていることなども関わっていると思われるが、さらに今後の検討が必要である。

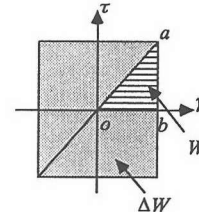
最近、土質材料の試験によって、非排水繰り返しせん断試験での応力・ひずみ関係からエネルギー消費量を算定し、液状化判定をエネルギーの指標により行おうとする試みがいくつか行われるようになってきた<sup>13) 14)</sup>。このような土質要素から算出した表層地盤のエネルギー消費量は、本研究の方法で算出する波動のエネルギー消費と当然一致することが想定される。今後はこのような土質の要素試験に基づいたエネルギー消費との直接的対比を行っていくことにより、地震波動エネルギーを直接用いた地盤の非線形応答の評価法や液状化判定法が確立できることが期待される。

## 6. 結論

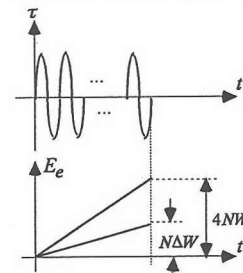
地震の主要動がSH波の重複反射理論により説明できるとの前提に立ち、鉛直アレー記録から地盤の深いレベルでの上昇波と下降波を分離した。それら



(a) 履歴ループによる減衰定数の定義



(b) 剛完全塑性での履歴ループ



(c) 調和波動による累積ひずみエネルギー

図-11 履歴ループによる減衰定数の定義と波動エネルギーとの関連の概念図

に基づき、上昇波エネルギー $E_u$ と下降波エネルギー $E_d$ を算定し、その差( $E_u - E_d$ )から表層地盤への地震波動エネルギーの流れを評価した。その結果、以下の主要な知見が得られた。

- 1) 液状化した地盤や非線形化が著しかった地盤ではエネルギー消費量が大きく、地盤の非線形応答特性は波動のエネルギー収支によっても解釈できる可能性がある。
- 2) この方法により算定した上層のエネルギー消費量の入力エネルギーに対する比は、別途行った逆解析による同じ上層の減衰定数と正の相関を示し、波動エネルギー消費量が上層の地盤材料のエネルギー減衰能と密接な関係があることを示唆している。
- 3) このエネルギー算定方法によると、ある時点からは $E_u$ ,  $E_d$ は増加していても( $E_u - E_d$ )はほぼ頭打ちになる現象が現れる。別途厳密な証明は必要であるが、この時点から表面波の影響が無視し得なくなるためと思われる。

このように、本研究により地震の主要動部分において表層地盤の鉛直方向のエネルギーの流れを評価

することが可能であることが示され、今後、この考え方を地盤の非線形震動や液状化、さらには上部構造物の地震被害の評価に結びつけていく可能性が示されたと言える。

謝辞：本研究で用いた鉛直アレー記録の便宜を図っていただいた関西電力(株)土木建築研究室、(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) 金井清, 田中貞二, 吉沢静代, 森下利三, 長田甲斐男, 鈴木富三郎: 地下における地震動の研究, 第2報, 地震研報 44号, pp.609-643, 1966.
- 2) Gutenberg, B. and Richter, C.F.: Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration (second paper), *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.46, pp.105-145, 1956.
- 3) 飯田汲事, 青木治三, 水野正彦: 波動エネルギーの時間的空間的分布, 物理探鉱, 第20巻, 第1号, pp.16-21, 1967.
- 4) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report EERC 72-12, University of California Berkeley, 1972.
- 5) 阪神淡路大震災地盤調査研究会: 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, 阪神淡路大震災地盤調査研究会報告書, pp.150-152, 1998.
- 6) Kokusho, T., Sato, K. and Matsumoto, M.: Nonlinear dynamic soil properties back-calculated from strong motions during Hyogoken-Nambu Earthquake, Proc. 11th WCEE, Acapulco, CD version, 1996.
- 7) Kokusho, T. and Matsumoto, M.: Nonlinearity in site amplification and soil properties during the 1995 Hyogoken Nambu earthquake, *Soils and Foundations Special Issue for the 1995 Hyogoken Nambu earthquake No.2*, pp.1-9, 1998.
- 8) 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, pp.1107-1108, 1998.
- 9) 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*, pp.41-52, 1996.
- 10) 國生剛治, 本山隆一: 観測地震波の入射波, 反射波を用いたエネルギーの評価, 地盤工学会, 第44回地盤工学研究発表会概要集, pp.1941-1942, 1999.
- 11) 國生剛治, 本山隆一: 鉛直アレー記録からみた表層地盤における地震エネルギーの収支, 土木学会, 第25回地震工学研究発表会, pp.269-272, 1999.
- 12) 國生剛治, 桜井彰雄: Modified Hardin-Drnevich モデルについて, 土木学会, 第33回土木学会年次学術講演会概要集, vol.3, pp.116-117, 1978.
- 13) Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liang, L. and Dahisaria, N.M.: Evaluation of soil liquefaction by energy principles, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.120, No.9, 1994.
- 1) 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方法及び液状化予測への適用, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.161-177, 1999.

(1999.10.8 受付)

## ENERGY FLOW EVALUATION IN SURFACE SOIL BY SEPARATING UPWARD AND DOWNWARD SEISMIC WAVES

Takaji KOKUSHO and Ryuichi MOTOYAMA

If the upward and downward wave components can be separated by utilizing vertical array records obtained in a deeper ground where the seismic energy is less contaminated by soil nonlinearity, the energy flow in a surface layer can reliably be evaluated. Based on this concept, vertical array data during the 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake are incorporated to evaluate the energy flow in a surface soil at three vertical array sites. The energy consumption thus evaluated in a surface layer indicates a close connection with the occurrence of liquefaction during the earthquake or with damping values estimated by another method.