岩盤・地盤条件を考慮した設計用エネルギースペクトルの提案

A PROPOSAL OF DESIGN ENERGY SPECTRA ALLOWING FOR ROCK AND SOIL CONDITIONS

秋山 宏*, 楊 志勇**, 北村 春幸***

Hiroshi AKIYAMA, Zhi Yong YANG and Haruyuki KITAMURA

The loading effect of earthquakes to structures is evaluated in terms of energy spectra. The energy spectra of seismic motions in the deep rock is assumed to be of the simplest form. The seismic motions in the deep rock are amplified due to the process of wave propagation through base rocks and sedimentary soils upon the rock. The well-established wave propagation theory is applied to the seismic motions in the deep rock and the energy spectra for the surface seismic motions are estimated for the practical design purposes.

Keywords : energy input, energy spectrum, ground condition, wave propagation, amplification characteristics, synthetic seismic wave

エネルギー入力, エネルギースペクトル, 地盤条件, 波動伝達, 増幅特性, 人工地震波

1. 序

地震動の構造物への荷重効果はエネルギー入力によって最も端的にとらえることができる。その理由は下記のとおりである¹⁾。

1) 地震動のフーリエ加速度振幅スペクトルは、無減衰弾性1質点系への総エネルギー入力 E の次式による速度換算値 V_E と固有周期 T との関係に一致する。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \dots\dots\dots (1)$$

2) 一つの地震動による一つの構造物への総エネルギー入力 E の(1)式による速度換算値 V_E と構造物の1次固有周期 T との関係を地震動の一つの構造物におけるエネルギースペクトルと定義する。減衰系ないし、弾塑性系のような非線形系におけるエネルギースペクトルは、地震動のフーリエ加速度振幅スペクトルを周期に関して平滑化したものに対応する。平滑化の程度は、構造物の非線形性の程度に比例する。

3) 弾塑性系におけるエネルギースペクトルは、 $h=0.1$ なる弾性1質点系におけるエネルギースペクトルで代表される。 h は減衰定数である。この意味において、一つの地震動により構造物に投入されるエネルギーの総量は、専ら、構造物の総質量、1次固有周期に依存し、構造物の強度、強度分布、剛性分布、質量分布、復元力特性に影響されない安定した量であると言える。

地震動の発生のメカニズムは現在次のように考えられている。

1) 震源域において、岩盤にひずみエネルギーが蓄積し、岩盤内の断層が破断限界に達すると断層が破壊し、ひずみエネルギーが岩盤内に解放され、振動として岩盤内を伝播する。

2) 建物直下の岩盤に到達した実体波としての地震動は地表付近で増幅されて地表面に到達する。また、地表面の地震動は、地表面付近を水平に伝播する表面波を含んでいる。

岩盤を伝播する地震動のフーリエ加速度振幅スペクトルは、限界周期 T_c より小さい周期範囲ではほぼ一定の振幅を示すこと、および、地震のマグニチュードが増大すると T_c も大きくなることが明らかとなっている^{2),3)}。

岩盤の地震動の地表面への増幅特性は波動の1次元重複反射理論によってその大要が把握できることが明らかにされている⁴⁾⁻⁶⁾。

また、地表面で得られた地震動から地盤の増幅特性を消去して得られる基盤における地震動の速度応答スペクトルも周期に鈍感な平坦な形状を有することも明らかにされている⁷⁾。

本論文では、まず、地震基盤における地震動を設定し、これに基づいて岩盤・地盤における実体波の増幅特性を明らかにする。次いで、過去に記録された強震記録を参

* 東京大学

** 東京大学

*** 日建設計

University of Tokyo

University of Tokyo

Nikken Sekkei

Table 1 Referred Seismic Records

Name of Earthquake (Date)	Site of Record	Magnitude	Epicentral Distance (km)	Maximum Value of V_E (cm/sec)		Substructure
				Horizontal	Vertical	
Imperial Valley (May 18, 1940)	El Centro	6.3	25	162.5	28.8	Soil
Kern County (July 21, 1952)	Taft	7.4	43	101.5	43.7	Soil
Tokachi-oki (May 16, 1968)	Hachinohe	7.9	180	222.6	78.0	Soil
Michoacan (Sept 19, 1985)	La Union	8.1	35	105.0	47.0	Rock
	Mexico City		350	74.0	52.0	Rock

照して、設計用地震動のエネルギスペクトルを求める。

参照した強地震動記録は Table 1 に示すものである。なお、本論文では特にことわらない限り、 $h=0.1$ のエネルギスペクトルをエネルギスペクトルと呼ぶ。

2. 岩盤・地盤における地震動の増幅

2.1 地震基盤における地震動

観測された地震動は多少とも岩盤・地盤における増幅の影響を受けているが、その内でも増幅の影響が少ないとされる Michoacan 地震の La Union における岩盤上の記録波のエネルギスペクトルを Fig. 1(a) に示す。 V_E は減衰 10%，周期 T なる弾性系へのエネルギー入力速度換算値である。水平動に対する V_E は次式によるものである。

$$V_E = \sqrt{\frac{2(E_{EW} + E_{NS})}{M}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 E_{EW} ：EW 方向水平動による総エネルギー入力

E_{NS} ：NS 方向水平動による総エネルギー入力

一般に、上下動は水平動に比べて岩盤・地盤の増幅を受けにくい。図中に示されるように、上下動のエネルギスペクトルは T に関する変化がなく平坦である。

Fig. 1(b) に示すものは、同一地震における震源から 350 km 離れた Mexico city の岩盤上の記録波のエネルギスペクトルである。上下動のエネルギスペクトルは短

(a) La Union

(b) Mexico City

Fig. 1 Energy Spectra for Records in Michoacan Earthquake

周期領域ではかなりの増幅を受けているが、長周期領域では平坦である。

Fig. 2 には、土質地盤上の記録波のエネルギスペクトルを示す。土質地盤上においても上下動のエネルギスペクトルは長周期領域で平坦な形状を持っている。

震源モデルに基づくフーリエ加速度振幅スペクトルもその形態は $T > T_c$ の領域で平坦とされており、地震基盤におけるエネルギスペクトルの形態として、Fig. 3 に

(a) El Centro

(b) Taft

(c) Hachinohe

Fig. 2 Energy Spectra on Soil Surface

Fig. 3 Energy Spectrum for Ground Motions in Base Rock

Fig. 4 Energy Spectrum of A Synthetic Ground Motion

Fig. 5 Distribution of V_s in Substructure

示すものを仮定する。ここで、地震基盤として V_s が 3 km/s 程度の硬岩層を考えている³⁾。また、 T_c の下限値として $T_c=0.2$ s を設定した。

2.2 人工地震波による地震動の増幅解析

地震基盤における地震動を模擬した人工地震波を作成し、これを岩盤・地盤から成る地層構造底部に入力し、岩盤表面および地表面における地震動を 1 次元波動伝播理論により求める。得られた地震動のエネルギースペクトルを比較することにより岩盤・地盤の振動増幅特性を求める。

2.2.1 人工地震波

Fig. 3 に示されるエネルギースペクトルを有する人工地震波 $\ddot{z}(t)$ を作成する。人工地震波は次式で表現される。

$$\ddot{z}_0(t) = B(t) \sum_{k=1}^n A_k \cos\left(\frac{2\pi}{T_k} t + \phi_k\right) \cdots \cdots (3)$$

ここで、 $B(t)$: 振幅の包絡関数⁸⁾

A_k : 振動成分の振幅

T_k : 振動成分の周期

ϕ_k : 振動成分の位相角

t : 時間

人工地震波の継続時間は 50 秒であり、位相角は $0 \sim 2\pi$ 間の一様乱数とした。 T_k としては $0.05 \text{ s} \leq T_k \leq 50 \text{ s}$ の範囲の 62 個を採り、 A_k は試行錯誤法により求めた。得られた人工地震波のエネルギースペクトルを Fig. 4 に示す。人工地震波は一波を用いたが、岩盤、地盤表面でのエネルギースペクトルは、地震波が目標エネルギースペクトル

Fig. 6 Damping Constant in Ground (from Fig. 4.35 in Ref. (9))

ルに適合するものである限り、地震波の違いによる影響をほとんど受けないことは確かである。

2.2.2 岩盤・地盤の構成

岩盤・地盤としては Fig. 5 に示す成層構造を設定する。すなわち、岩盤は深さが H (km) で表面の S 波速度が V_{ST} (km/s) 基部の S 波速度が V_{SB} (km/s) である。表層地盤は深さが ΔH (m) で、表面の S 波速度が sV_{ST} (m/s)、基部の S 波速度 sV_{SB} (m/s) である。

岩盤・地盤の物性値は次のように設定した⁹⁾。

$$\text{密度 } \gamma = 1.5 + 0.0004 V_s \quad (\text{t/m}^3)$$

$$\text{せん断弾性係数 } G = \frac{\gamma V_s^2}{g} \quad (\text{t/m}^2)$$

$$\text{P 波速度 } V_p = 1000 + 1.4 V_s \quad (\text{m/s})$$

$$\text{減衰定数の基準値 } h_1 = -\frac{V_s}{30000} + 0.11, \text{ ただし, } h_1 \geq 0.01$$

ここで V_s の単位は m/s, g : 重力加速度 = 9.8 m/s² 減衰定数の基準値 h_1 は岩盤・地盤の減衰定数の上限値に近い値である。 h_1 を基準として、他の 3 通りの減衰定数を次のように設定した。

$$h_2 = \frac{h_1}{2}, \quad h_3 = \frac{h_1}{3}, \quad h_5 = \frac{h_1}{5}$$

$h_1 \sim h_5$ は既往の調査結果⁹⁾と比較して Fig. 6 に示されている。

2.2.3 増幅率

人工地震波を岩盤基部に入力し、次の 2 種類の応答波を求めた。

- 1) 表層地盤がない場合の岩盤表層の加速度応答波
- 2) 岩盤・地盤系の表層地盤表面上の加速度応答波

無減衰の均質岩盤の基部に地震動を入力した場合、岩盤の表面の地震動は 2 倍に増幅される。したがって、岩盤・地盤の応答増幅は、基盤入力加速度記録の振幅を 2 倍した地震波に対して評価する。すなわち、次式により応答増幅を評価する。

$$f_R = \frac{R V_E}{V_{E0}}, \quad f_S = \frac{S V_E}{V_{E0}} \cdots \cdots (4)$$

ここで, f_R : 岩盤による増幅率

f_S : 地盤による増幅率

${}_R V_E$: 岩盤表面の波形のエネルギスペクトル

${}_S V_E$: 地盤表面の波形のエネルギスペクトル

V_{E0} : 基盤入力波のエネルギスペクトルの平坦部の値 ${}_0 V_{E0}$ の2倍

水平地震動の増幅特性を求める際には一次元せん断波重複反射理論を用い, 上下地震動の増幅特性を求める際には一次元P波重複反射理論を用いた。

Fig. 7 Energy Spectra of Horizontal Ground Motion on Rock Surface

Fig. 8 Effect of Damping

2.3 岩盤・地盤の増幅特性

Fig. 7 には種々の岩盤上の水平地震動の増幅率と T との関係, すなわち V_{E0} で無次元化されたエネルギスペクトルを示す。岩盤構成は, H, V_{ST}, V_{SB} によって示されている。 H, V_{ST}, V_{SB} の単位は 2.2.2 に示されている。岩盤の増幅率を支配するものは岩盤表面と岩盤基部の V_S の比率 V_{ST}/V_{SB} である。岩盤の卓越周期は V_{ST}/V_{SB} および岩盤深さ H に支配される。

Fig. 8 には減衰定数の変化による増幅特性の変化を示す。減衰定数の岩盤の増幅特性に及ぼす影響はそれほど顕著ではない。

Fig. 9 は岩盤上の鉛直地震動のエネルギスペクトルを示す。P波速度がS波速度に比べて大きいことから, 岩盤の卓越周期は水平地震動の場合に比べて短くなっている。

Fig. 10 には地盤表面上の水平地震動の無次元化されたエネルギスペクトル (エネルギスペクトルの増幅率) を示す。地盤構成は, $\Delta H, {}_S V_{ST}, {}_S V_{SB}$ によって示されている。岩盤構成は $R-H-V_{ST}-V_{SB}$ によって示されている。 R は岩盤構成であることを示す。 $\Delta H, {}_S V_{ST}, {}_S V_{SB}$ の単位は 2.2.2 に示されている。増幅率は地盤表面と岩盤表面の V_S の比 ${}_S V_{ST}/V_{ST}$ に支配される。

Fig. 11 には地盤表面上の鉛直地震動の無次元化され

Fig. 9 Energy Spectra of Vertical Ground Motion on Rock Surface

Fig. 10 Energy Spectra of Horizontal Ground Motion on Soil Surface

Fig. 11 Energy Spectra of Vertical Ground Motion on Soil Surface

たエネルギースペクトルを示す。P波速度は表層地盤においてもあまり変化しないことから、岩盤においてある程度の増幅を受ける場合には、表層地盤における増幅は相対的に小さくなる。なお、岩盤表面のエネルギースペクトルは $\Delta H=50\text{ m}$ の場合とほとんど等しい。

2.4 増幅率の簡易評価式

岩盤地盤の地震動の増幅特性を把握するために、一連

Fig. 12 Energy Spectrum on Rock Surface

の応答解析結果に基づき、岩盤表面および地盤表面の地震動の無次元化されたエネルギースペクトルの簡易評価式を求めた。結果は次のように要約される。

2.4.1 岩盤表面上の無次元化エネルギースペクトル

岩盤表面のエネルギースペクトル ($V_{ER}-T$ 関係) は Fig. 12 に示す形態を持つ。すなわち、岩盤の卓越周期 T_{mR} でエネルギースペクトルは極値 V_{Em} を採る。 $T > 2T_{mR}$ では、エネルギースペクトルの応答倍率は一定値 $\bar{A}_R$ を採る。短周期領域は原点を通る線分で与えられ、その勾配 S_0 は極大点 (T_{mR}, V_{Em}) の割線勾配 S_m と対応づけられる。短周期領域の限界点のエネルギースペクトル値 V_{E0} の値は $0.8 V_{Em}$ で近似できる。エネルギースペクトルを規定する諸量を支配パラメータの単純な結合則として求めた結果、次の諸式が得られた。

1) 水平地震動の場合

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_{Em}}{V_{E0}} &= \left(\frac{V_{SB}}{V_{ST}} \right)^{0.5} \left(\frac{h_1}{h} \right)^{0.2} \\ T_{mR} &= \left(0.5 + 0.3 \frac{V_{ST}}{V_{SB}} \right) T_0 \\ T_0 &= \frac{4H}{V_{SB}} \left(\frac{V_{SB}}{V_{ST}} \right)^{0.44} \\ \bar{A}_R &= \left[1.5 - 0.5 \left(\frac{V_{ST}}{V_{SB}} \right) \right] \left(\frac{h_1}{h} \right)^{0.15} \\ \frac{S_0}{S_m} &= 7 \left(\frac{V_{E0}}{V_{Em}} \right) \left(\frac{h_1}{h} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

2) 鉛直地震動の場合

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_{Em}}{V_{E0}} &= \left(\frac{V_{PB}}{V_{PT}} \right)^{0.5} \left(\frac{h_1}{h} \right)^{0.2} \\ T_m &= \left(0.5 + 0.3 \frac{V_{PT}}{V_{PB}} \right) T_0 \\ T_0 &= \frac{4H}{V_{PB}} \left(\frac{V_{PB}}{V_{PT}} \right)^{0.44} \\ \bar{A}_R &= \left[1.5 - 0.5 \left(\frac{V_{PT}}{V_{PB}} \right) \right] \left(\frac{h_1}{h} \right)^{0.15} \\ \frac{S_0}{S_m} &= 7 \left(\frac{V_{E0}}{V_{Em}} \right) \left(\frac{h_1}{h} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 V_{PB} : 岩盤基部におけるP波速度

V_{PR} : 岩盤表面におけるP波速度

2.4.2 地盤表面上の無次元化エネルギースペクトル

岩盤上のエネルギースペクトルに基づき、地盤表面上の水平地震動のエネルギースペクトル (V_{ES} - T 関係) は Fig. 13 に示すように作図することができる。エネルギースペクトルは地盤の卓越周期 T_{ms} で極値 $a_{ms} V_{ER1}$ を採る。 $T > 3 T_{ms}$ では増幅率は一定値 a_{s2} である。 $T_{ms} < T < 3 T_{ms}$ における増幅率は T_{ms} における増幅率 a_{ms} と a_{s2} を線形補間した値となる。

エネルギースペクトルを規定する諸量は次のように与えられる。

1) $a_{ms} V_{ER1} > V_{ER0}$ の場合

i) $T \leq T_{ms}$ の場合

a) $\frac{V_{ER0}}{T_{R0}} < \frac{a_{ms} V_{ER1}}{T_{ms}}$ の場合

O-A' 点を結ぶ線分を採る。

b) $\frac{V_{ER0}}{T_{R0}} \geq \frac{a_{ms} V_{ER1}}{T_{ms}}$ の場合

1) $\frac{V_{Em}}{T_{mR}} < \frac{a_{ms} V_{ER1}}{T_{ms}}$ の場合

O-A-A' 点を結ぶ線分を採る。

2) $\frac{V_{Em}}{T_{mR}} \geq \frac{a_{ms} V_{ER1}}{T_{ms}}$ の場合

O-A-B-A' 点を結ぶ線分を採る。

ii) $T_{ms} < T < 3 T_{ms}$ の場合

$$V_{ES} = a_{s1} V_{ER}$$

iii) $3 T_{ms} < T$ の場合

$$V_{ES} = a_{s2} V_{ER}$$

2) $a_{ms} V_{ER1} \leq V_{ER0}$ の場合

表層地盤による増幅は無視できる。

ここで、 T_{ms} : 表層地盤の卓越周期

V_{ER1} : $T = T_{ms}$ における岩盤表面上のエネルギースペクトル値

T_{R0} : V_{ER0} に対応する周期

$$\left. \begin{aligned} T_{ms} &= \frac{4 \Delta H}{s V_{SB}} \left(\frac{s V_{SB}}{s V_{ST}} \right)^{0.44} \left\{ 0.5 + 0.5 \left(\frac{s V_{ST}}{s V_{SB}} \right)^{0.4} \right\} \\ a_{ms} &= 5 \left\{ 1 - \left(\frac{s V_{ST}}{s V_{SB}} \right)^{0.4} \right\} \left(\frac{h_1}{h} \right)^{0.5} \\ \text{但し, } \frac{s V_{ST}}{s V_{SB}} > 0.5 \text{ の場合, } \frac{s V_{ST}}{s V_{SB}} &\text{を } 0.5 \text{ とする。} \\ a_{s2} &= \left\{ 1 + 0.8 \left(\frac{\Delta H}{s V_{ST}} \right)^{1.5} \right\} \left(\frac{h_1}{h} \right)^{0.15} \\ a_{s1} &= \frac{3 a_{ms} - a_{s2}}{2} + \left(\frac{a_{s2} - a_{ms}}{2} \right) \left(\frac{T}{T_{ms}} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 7~11 には (5)~(7) 式による予測値が示されている。鉛直地震動のエネルギースペクトルも同様であって、(7) 式中のせん断波速度をP波速度に置き換えることにより増幅率、卓越周期が評価できる。

Fig. 13 Energy Spectrum on Soil Surface

3. 設計用エネルギースペクトル

3.1 基盤における地震動の強さ

表層地盤の増幅を受ける前の基盤における地震動の強さに関しては、基礎の深さが3 km 程度に達することから実測例がほとんどなく、その推定が難しい。また、設計で対象とすべきマグニチュード8級の地震記録も極めて少ない。過去における観測記録を統計処理して地震動の強さを一般的に表現しようとする場合、記録数を増せば、中小地震記録を含めざるを得ず、地震動を規定する諸量の相対的関係を得られるとしても、大地震の実像を的確にとらえることは困難となる。

本論文では、Table 1 に示す強地震記録のみを用いて、岩盤・地盤の増幅を消去して得られる基盤における地震動強さを求め、それに基づいて設計用エネルギースペクトルを提案する。

基盤における開放基盤上の地震動のエネルギースペクトルの形態として Fig. 14 に示すものを仮定する。したがって、求めるべきものはエネルギースペクトルのレベル V_{E0} である。 V_{E0} は開放基盤上における地震動の最大速度 V と対応づけることができる¹⁰⁾。文献10) によれば、地震動のスペクトル強度と地震動の最大速度との関係は次のように求められている。

$$\left. \begin{aligned} SI_H &= 5.921 V_H \\ SI_V &= 5.821 V_V \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 SI_H, SI_V : 水平動および上下動のスペクトル強度

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_{v,h=0} dT$$

$S_{v,h=0}$: 無減衰系の速度応答スペクトル

V_H, V_V : 水平動および上下動の最大速度

$S_{v,h=0}$ は無減衰系のエネルギースペクトル $V_{E,h=0}$ とほぼ一致する¹¹⁾。 $V_{E,h=0}$ を平滑化したスペクトルが $V_{E,h=0.1}$ に対応する。スペクトルを平滑化しても積分値は変わらない。したがって、 $h=0.1$ のエネルギースペクトルを Fig. 14 のように仮定した場合、 SI と V_E とは次式で対応づけられる。

$$SI = 2.375 V_{E0} \dots\dots\dots (9)$$

(8), (9) 式より, エネルギスペクトルのレベルを地動の最大速度は次式のように対応づけられる。

$$\left. \begin{aligned} {}_H V_{E0} &= 2.5 V_H \\ {}_V V_{E0} &= 2.5 V_V \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで, ${}_H V_{E0}$: 水平地震動のエネルギスペクトルのレベル

${}_V V_{E0}$: 鉛直地震動のエネルギスペクトルのレベル

Fig. 14 Energy Spectrum on Base Rock

Table 1 に示す El Centro 記録, Taft 記録, 八戸記録に関しては表層地盤の特性が調査されている^{11)~13)}。調査結果の V_s 分布と Fig. 5 に従って単純化した V_s 分布を Fig. 15 に示す。いずれの地点においても, 岩盤表面付近の V_s 値を除けば岩盤の特性は明らかでない。 V_s が 3 km/s 程度に達する深さを基盤深さと考え, エネルギスペクトルの卓越周期を参考にして岩盤深さ H を設定して得られた岩盤の V_s 分布が Fig. 15 中に示されている。

Fig. 15 に示される単純化された V_s 分布を用い, 重複反射理論により求めた地表面上のエネルギスペクトルが Fig. 16 に示されている。Fig. 2 中には, Fig. 16 に示すエネルギスペクトルを最大値を Fig. 2 中の対応するエネルギスペクトルの最大値に一致させて予測値として示してある。なお, 解析に用いた減衰定数は h_2 である。

Fig. 15 Assumed V_s -Profile in Sites of Strong Record

Fig. 16 Calculated Energy Spectra

Fig. 2 に示されるように、スペクトルの形状は 1 次元波動伝播理論により予測可能であると言える。

Fig. 2 に示すエネルギースペクトルの最大値を Fig. 16 に示す増幅率の最大値で除せば、Table 2 に示すように、基盤におけるエネルギースペクトルのレベル V_{E0} を求めることができる。さらに (10) 式を用いれば、基盤における最大速度を求めることができる。

既に地動の最大速度に関しては多くの研究があり^{14)~16)}、水平地動の最大速度に対する鉛直地動の最大速度の比に関して、おおむね次の関係が成立すると言われている。

$$0.3 \leq \frac{V_v}{V_h} \leq 1.0 \quad (11)$$

Table 2 に示す V_v と V_h の比率を参照して、次の値を設定する。

$$\frac{V_v}{V_h} = 0.7 \quad (12)$$

Fig. 17 はマグニチュード 8 級の大地震の基盤における上下動の最大値を震源距離 X との関係で描いたものである。いずれの値も基盤におけるエネルギースペクトルのレベル V_{E0} より (10) 式を用いて得たものである。

Fig. 17 Maximum Vertical Velocity in Base Rock

Fig. 18 N-Value and V_s

La Union の記録については、Fig. 1(a) に見られるように地盤増幅の影響はないと考えられ、エネルギースペクトルから V_{E0} は容易に読みとれる。Mexico city の記録は Fig. 1(b) に示すエネルギースペクトルにおいて、岩盤・地盤の増幅の影響がないと考えられる $6 \text{ sec} < T < 10 \text{ sec}$ の範囲の V_E の値を V_{E0} としている。

Fig. 17 の V_v - T 関係は次式で近似できる。

$$V_v = 56 \cdot 10^{-0.35 \log X} \quad (13)$$

V_v の代表値として $X=100 \text{ km}$ における V_v を (13) 式より求めると、 $V_v = 11.2 \text{ cm/s}$ を得る。この値は、Table 2 に示す強震記録の V_v の上限に位置する。そこで、この値を設計用エネルギースペクトルを求める際の基準値とする。(10), (11) 式より、設計用エネルギースペクトルのレベル V_{E0} は Table 3 に示すように設定される。

Table 2 Level of Seismic Motions in Base Rocks

	El Centro		Taft		Hachinohe	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Maximum Value of V_E V_{Em} (cm/s)	162.5	28.8	101.5	43.7	222.6	78.0
Spectral Amplification V_{Em}/V_{E0}	4.30	2.06	3.06	1.81	5.55	2.77
Level of V_{E0} (cm/s)	37.8	14.0	33.1	24.1	40.1	28.2
Maximum Velocity in Base Rock $V_m (= V_{E0}/2.5)$	15.1	5.6	13.3	9.7	16.0	11.3

Table 3 Ground Motion in Base Rock

	Horizontal	Vertical
Maximum Velocity V_m (cm/s)	16.0	11.2
Energy Spectral Level V_{E0} (cm/s)	40.0	28.0

Table 4 Standardization of Substructure

Subsoil Conditions	sV_{ST} (m/s)	sV_{BT} (m/s)	ΔH (m)	V_s (km/s)	V_{SB} (km/s)	H (km)	N-Value
I	400	400	30 to 100	0.5 to 1.5	3.0	3.0	$60 \leq N$
II	300	300					$30 \leq N \leq 60$
III	200	200					$10 \leq N \leq 30$
IV	100	100					$N \leq 10$

Fig. 19 Energy Spectra on the IIInd Ground

3.2 設計用エネルギースペクトル

地震動の増幅は地盤・岩盤の構成，すなわちせん断波速度の分布によって異なる。増幅特性において支配的な量は V_{ST}/V_{SB} , sV_{ST}/V_{ST} , ΔH , H である。 H は岩盤の卓越周期を支配する。 H については，岩盤の増幅が広い周期帯に及ぶように $H=3\text{ km}$ を設定値とする。 ΔH は地盤の卓越周期を支配する。 ΔH についても，地盤増幅の影響範囲を広く考慮するために $\Delta H=30\text{ m}\sim 100\text{ m}$ の範囲で設定する。 V_{ST} , sV_{ST} に関しても，広い範囲の値の変化を考慮して次の範囲の値を設定する。

$$0.5\text{ km} \leq V_{ST} \leq 1.5\text{ km}$$

$$100\text{ m} \leq sV_{ST} \leq 400\text{ m}$$

以上の設定値に基づき，Table 4 に示す4種の地盤種別を設定する。表中の V_s の値は地盤種別ごとの最低値である。

せん断波速度と標準貫入試験による N 値との関係は多くの研究者により提案されている^{(17),(18)}。Fig. 18 には， N 値と V_s との関係を示す。これ等の研究成果を参照して，Table 4 中には V_s の範囲と対応させておおよその N 値の範囲を示している。なお，表中， sV_{ST}/sV_{SB} は表層地盤の増幅にほとんど影響を与えないので $sV_{ST}=sV_{SB}$ としている。 ΔH は地盤の増幅率にほとんど影響を与えず，地盤の卓越周期を支配する量であり，Table 4 中の両端の値 $\Delta H=30\text{ m}$, 100 m についてエネルギースペクトルを求めた。 V_{ST} については代表値として， $V_{ST}=0.5\text{ km/s}$, 1.0 km/s , 1.5 km/s について解析した。

Ⅱ種地盤についての解析結果が Fig. 19 に示されている。実線は $V_{ST}=0.5\text{ km/s}$ の場合のエネルギースペクトルであり，破線は $V_{ST}=1.0\text{ km/s}$ の場合のエネルギースペクトルである。細い実線は $V_{ST}=1.5\text{ km/s}$ の場合である。 $T>2.0\text{ s}$ では $V_{ST}=0.5\text{ km/s}$ の場合のエネルギースペクトルが卓越する。一方， $V_{ST}=1.0\text{ km/s}$, 1.5 km/s では短周期領域 ($T<2.0\text{ s}$) でスペクトルの極値が現れ，スペクトル形状は V_{ST} が大きくなるほど急峻になる。すなわち，岩盤による増幅は減少し，地盤の増幅が強調されるようになる。図中のエネルギースペクトルはいずれも $h=0.1$ に対するものである。このような急峻なスペクトルの極大値は減衰量 h に敏感である。したがって，このような急峻なエネルギースペクトルを設計用エネルギースペクトルに考慮する際には，現実の建造物の h の値をよりの確に評価する必要がある。現在， $T \leq 2.0\text{ s}$ の建造物に対しては終局強度設計法が適用されており，構造特性係数 D_s 値の範囲は次のようなものである⁽¹⁹⁾。

$$0.25 \leq D_s \leq 0.5 \quad (14)$$

D_s 値は，建造物の実強度の建造物が弾性にとどまる場合の所要強度に対する比率と解釈できる。建造物の塑性化によるエネルギー吸収が所要強度の低減に寄与する。一

方，弾塑性系を等価線形系に置換することができ，系の非線形性は等価線形系における減衰定数に反映される。弾性系の応答スペクトルの低減率として次式を取り上げる¹⁾。

Fig. 20 Energy Spectra on Specified Grounds

Fig. 21 Design Energy Spectra

$$\frac{S(h)}{S(0)} = \frac{1}{1 + 3h + 1.2\sqrt{h}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $S(0)$ ： $h=0$ の系の応答スペクトル

$S(h)$ ：減衰定数が h なる系の応答スペクトル

$S(h)/S(0)$ は D_s 値と同等の意味を持つ。 $h=0.2$ の場合の $S(h)/S(0)$ は 0.47 となる。この値を D_s 値と見なせば、この値は (14) 式のほぼ上限に位置する。すなわち、現実の建造物の非線形性は減衰定数に換算すれば $h \geq 0.2$ に対応すると言える。以上の考察を踏まえて、長周期領域のエネルギースペクトルを支配する $V_{sr}=0.5 \text{ km/s}$ の場合は $h=0.1$ に対するエネルギースペクトルを、短周期領域のエネルギースペクトルを支配する $V_{sr}=1.0 \text{ km/s}$, 1.5 km/s の場合は $h=0.2$ に対するエネルギースペクトルを求め、これ等を総合して設計用エネルギースペクトルを導く。Fig. 20 には得られた地盤表面上のエネルギースペクトルを示す。表記法は Fig. 19 の場合と同様である。 $h=0.2$ を導入することにより、短周期領域のスペクトル形状はなだらかになる。Fig. 20(e) に示す鉛直地動のエネルギースペクトルは、表層地盤の影響をあまり受けない。図中には $V_{sr}=100 \text{ m/s}$ の場合を示してある。Fig. 20 の各エネルギースペクトルをおおむね包絡するものとして、図中に示す bi-linear 型の V_E - T 関係が得られ、これを設計用エネルギースペクトルとする。Table 3 に示す V_{E0} を乗ずれば、設計用エネルギースペクトルとし

て Fig. 21 に示すものが得られる。鉛直地震動に対するエネルギースペクトルは地盤種別によらず単一のものとなる。エネルギースペクトルは 2 線分で表現でき、2 線分の交点の周期は図中の () 内に示されている。

総エネルギー入力 E から減衰により消費されるエネルギー入力 W_h を除いて得られる損傷に寄与するエネルギー入力 E_d の速度換算値 $V_d (= \sqrt{2E_d/M})$ と T との関係は速度応答スペクトルとほぼ一致することが明らかにされている^{1), 20)}。現行の建築基準法施行令²¹⁾に示される 2 次設計用加速度応答スペクトルを円振動数で除して得られる速度応答スペクトルは、おおむね、Fig. 21(a) に示される I, II, III 種地盤のエネルギースペクトルと対応している。すなわち、この速度応答スペクトルを 2 線分で近似した場合の 2 線分の交点 ($T_{(s)}$, $V_{\max}(\text{cm/s})$) は I 種地盤で (0.64, 100) II 種地盤で (0.96, 150), III 種地盤で (1.28, 200) である。しかし、ここに提案したエネルギースペクトルは水平 2 方向入力の荷重効果の和を表現していること、および減衰によるエネルギー吸収量をも含んだ総エネルギー入力を表現している点で、上記速度応答スペクトルに比べて、より明確な意味を持っている。

4. 結 語

地震基盤における地震動のエネルギースペクトルの形態として最も単純な bi-linear 型を仮定し、これに適合した人工地震波および一次元波動理論を用いて、地表面のエネルギースペクトルを求めた。本手法により、地表面で得られた強震記録のエネルギースペクトルの形態を予測し得た。

M 8 級の地震動の地震基盤におけるエネルギースペクトルのレベルを観測記録より推定し、代表的地盤の深さ方向の弾性波速度分布を仮定して、代表的地盤の地表面のエネルギースペクトルを求め設計用エネルギースペクトルとして提案した。

ただし、提案されたエネルギースペクトルは、数少ない強震観測資料に基づくものであり、定量化の精度に関しては、より多くの観測資料を加えた今後の検討に俟つ所が大きい。

謝 辞

地震記録等の資料収集に関して、清水建設(株) 壇一男氏、ハザマ(株) 井上 超氏にご協力いただいた。

参考文献

- 1) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計，東京大学出版会，1980
- 2) 壇 一男，渡辺孝英，田中貞二：遠方場 S 波の近似式に基づく地震波形の半経験的合成法，日本建築学会論文報告集，第 396 号，pp. 2~36，1989. 2
- 3) 太田 裕，鏡味洋史：耐震工学上考慮すべき地震波の周

- 期の上限と振幅の下限, 日本建築学会論文報告集, 第249号, pp. 53~60, 1976.11
- 4) 田治見宏: 建築振動学, コロナ社, 1965
- 5) 大築志夫, 金井 清: 耐震設計, コロナ社, 1961
- 6) 阿部康彦, 小林喜久二, 大島 豊, 真下 貢, 小林啓美: 地震動の上下動・水平動スペクトル振幅比の特性とその応用に関する研究(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 403~404, 1991
- 7) 小林啓美, 長橋純男: 地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅特性と地震基盤における地震動の性質, 日本建築学会論文報告集, 第240号, pp. 79~90, 1976.2
- 8) Jennings, P.C., Housner, G.W. and Tsai, N.C.: Simulated Earthquake Motions for Design Purposes, Proc. 4th W.C.E.E., Santiago, 1(A1), pp. 145~160, 1969.1
- 9) 日本建築学会: 地震荷重—その現状と将来の展望, 丸善, 1987
- 10) 渡辺 丹, 藤堂正喜: 設計用模擬地震動に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第303号, pp. 41~51, 1981.5
- 11) Anderson, J.G., Bodin, P., Brune, J.N., Prince, J., Singh, S.K., Quaaas, R. and Onate, M.: Strong Ground Motion from the Michoacan Mexico Earthquake, Science, Vol. 233, pp. 1043~1049, 1986.9
- 12) 翠川三郎, 小林啓美: 地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質, 日本建築学会論文報告集, 第273号, pp. 43~52, 1978.11
- 13) 土田 肇, 上部達生: El Centro および Taft の強震計の設置資料, 地震工学振興会ニュース, No. 69, pp. 9~19, 1983.3
- 14) Kanai, Ko: A study of Strong Earthquake Motions, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 36, pp. 295~310, 1958
- 15) 田中貞二: 最近の被害地震における最大加速度の大きさについて, 第7回地盤振動シンポジウム, pp. 3~8, 1979.3
- 16) Gutenberg, B and Richter, C.F.: Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 46, pp. 163~191, 1956
- 17) 大場新太郎, 鳥海 勲: 大阪地盤の振動特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 487~488, 1970
- 18) Ohsaki, Y, and Iwasaki, R.: On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratio of Soil Deposits, Research Report 73-02, University of Tokyo, 1973
- 19) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), 丸善, 1990
- 20) Housner, G.W.: Limit Design of Structures to Resist Earthquakes, Proc. 1st WCEE, pp. 5-1-13, 1956
- 21) 建築基準法施行令, 1981.6

(1992年12月10日原稿受理, 1993年5月11日採用決定)