

京都大学大学院 学生員 茅野 茂 京都大学工学部 正員 山田善一
 京都大学工学部 正員 家村浩和

1. 本研究の概要

従来、耐震設計においては、震度法、修正震度法が用いられ、また動的耐震設計法として、応答スペクトルを用いた方法等がある。しかしながら構造物の地震被害を検討する時、その最大応答だけでは不十分な場合がある。たとえば、応答変位が構造物の降伏変位を超えるような地震入力を長時間にわたって受ける場合、構造物の塑性疲労が重要となる。すなわち最大応答が小さくても、繰返し回数が多くなれば、構造物は大きな損傷を受けるものと考えられる。これらのことから本研究では、構造物に入力されるエネルギー値というものに注目し、地震動の持つエネルギーがどのようにして消費吸収されるのかを入力エネルギースペクトルという概念を導入することにより考察した。

2. 多自由度弾性系における地震入力エネルギーの評価法

多自由度振動系における振動方程式は次式のようにになる。

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = -M \{1\} \ddot{z} \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 M : 質量マトリックス, C : 減衰マトリックス, K : 剛性マトリックス

$u, \dot{u}, \ddot{u}$: 応答変位, 速度, 加速度, $\ddot{z}$: 地震加速度

さらに(1)式の両辺に $du = \dot{u} dt$ をかけ、地震継続時間(0~t)について積分すると次式のようにになる。

$$\begin{bmatrix} \int_0^t m_1 u_1 \dot{u}_1 dt \\ \vdots \\ \int_0^t m_n u_n \dot{u}_n dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^t \left(\sum_{j=1}^n C_{ij} u_j \right) \dot{u}_i dt \\ \vdots \\ \int_0^t \left(\sum_{j=1}^n C_{nj} u_j \right) \dot{u}_n dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^t \left(\sum_{j=1}^n k_{ij} u_j \right) \dot{u}_i dt \\ \vdots \\ \int_0^t \left(\sum_{j=1}^n k_{nj} u_j \right) \dot{u}_n dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - \int_0^t m_i \ddot{z} u_i dt \\ \vdots \\ - \int_0^t m_n \ddot{z} u_n dt \end{bmatrix} \quad \text{--- (2)}$$

上式の左辺第1項は時刻tにおける運動エネルギー W_k , 第2項は時刻tまでに粘性減衰機構によって吸収されるエネルギー W_c , 第3項は時刻tにおける弾性ひずみエネルギー W_e を表わしている。(弾塑性系では W_e に加え、時刻tまでに塑性変形によって吸収される累積履歴エネルギー W_h を表わしている。) また右辺は時刻tまでに構造物に入力される総入力エネルギー E である。

今n個の質点についてn個の振動形が考えられる。これらの各質点に対しての重ね合せの割合を第i質点について ϕ_{is} (第s次モードについて) で表わすとその変位及び速度は次式のようにになる。

$$u_i = \sum_{s=1}^n \phi_{is} \cdot y_s, \quad \dot{u}_i = \sum_{s=1}^n \phi_{is} \cdot \dot{y}_s \quad \left(\text{ここに } y_s (s=1, 2, \dots, n): \text{第s次の基準座標} \right) \quad \text{--- (3)}$$

これらより、(3)式を(2)式に代入すると右辺は $-m_i \sum_{s=1}^n \phi_{is} \int_0^t \ddot{z} y_s dt$ となり、このうち $-m_i \int_0^t \ddot{z} y_s dt$ は y_s に対する固有周期 T_s と減衰定数 h_s から求められる入力エネルギーである。これを E_s とすると(2)式右辺は第i質点については $m_i \sum_{s=1}^n \phi_{is} E_s$ となり、これは第i質点に対する総入力エネルギー E_i を表わしている。これらより系全体への総入力エネルギー E は次式で表わされる。

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \left(m_i \sum_{s=1}^n \phi_{is} E_s \right) \quad \text{--- (4)}$$

すなわち E_s が求まれば E は容易に求められることになる。ところで E_s は T_s, h_s が与えられるとその対応する一質点系のエネルギースペクトルより決定できるものである。

以上より一質点系のエネルギースペクトルを求められ

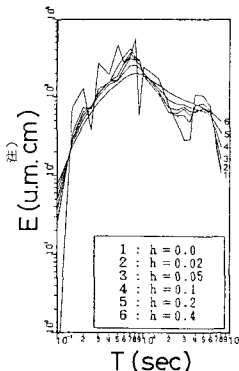


Fig. 1 Energy Spectra

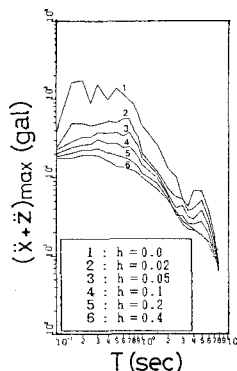


Fig. 2 Response Spectra

ば多自由度系全体への全入力エネルギーが求められることになる。Fig. 1にTaft記録(1952年7月21日Kern Country地震最大加速度152.7gal 継続時間50秒)による一質点弾性系の入力エネルギースペクトル図を、Fig. 2に絶対加速度応答スペクトル図を示した。そしてFig. 3 には入力エネルギーを、 $E_a = \omega_0 \sqrt{2E/M}$ ω_0 : 固有振動数 によって加速度に変換した値と絶対最大応答加速度との相関図を減衰定数 $h=0.0$ と 0.2

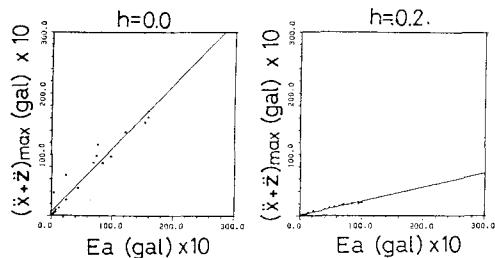


Fig. 3 $(\ddot{x}+\ddot{z})_{\max}$ - E_a Correlation

について示した。なお各スペクトル図については固有周期 $T=0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0$ (sec) についてプロットした。これらの図から(i)減衰が大きくなるほどエネルギースペクトルにおいて周期による変動が小さくなり、(ii)減衰定数の差異による入力エネルギーの絶対値の変動は小さい、(iii)入力エネルギー値と最大応答値との相関は減衰が大きくなるほどエネルギー側に傾く、ことがわかる。これを時刻歴から見るため、Fig. 4に $h=0.05$ 、固有周期 $T=1.0$ (sec)に対する入力エネルギー量の変化と時刻歴によって示した。この図からわかるようにある程度時刻が経過すると応答に寄与するエネルギー W_k, W_E が、 W_C に対して非常に小さくなる。そしてこれは h が大きくなる程顕著に現れるため先の(ii)のようになると考えられる。また(ii)に関しては、減衰が大きくなり、 W_C が大きくなって逆にも W_E, W_k が小さくなるためその相殺効果により、 E の変動が小さくなると考えられる。(iii)に関しては、 h が大きくなる程最大応答値がかなり小さくなっているためだと考えられる。

$T=1.0$ (sec) $h=0.05$

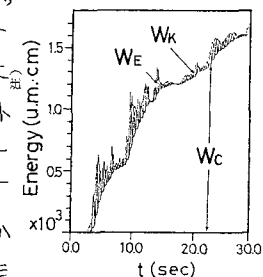


Fig. 4 Accumulated Energy

3. 弾塑性系における地震入力エネルギースペクトル

さらに復元力特性にBilinearを用いた弾塑性系について考察した。弾塑性傾斜率 $P_n=0.8$ 、降伏変位 $X_y=0.4$ (cm)の時の入力エネルギースペクトル図、最大塑性率 $\mu_{\max}$ のスペクトル図、

入力エネルギーを $E_d = \frac{1}{2} \omega_0 \times \sqrt{2E/M}$ によって変位に変換した値と $\mu_{\max}$ との相関図をそれぞれFig. 5~7に示した。Fig. 5から弾性系に比べて特に h が小的时候 T による変動が小さいこと、またFig. 7より h

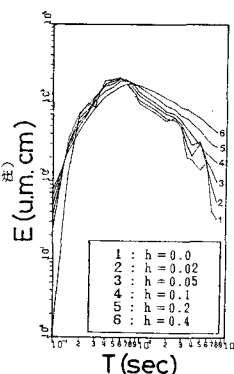
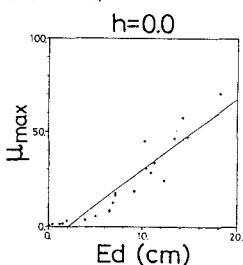
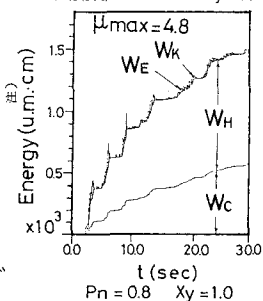


Fig. 5 Energy Spectra $h=0.2$

Fig. 6 $\mu_{\max}$ Spectra $T=1.0$ (sec) $h=0.05$ $P_n=0.8$ $X_y=1.0$ (cm)

が大きい程相関はエネルギー側に傾いていることがわかる。またFig. 8に弾塑性系での時刻によるエネルギー蓄積図を示す。これより、弾性系のものに W_H が加わり、 W_k, W_E がかなり小さくなっていることがわかる。



$P_n=0.8$ $X_y=1.0$

Fig. 8 Accumulated Energy

(注): u.m.=unit mass

4. 耐震設計への応用

近年、耐震設計において、非弾性領域におけるエネルギー吸収能を有効に利用するという考え方が用いられている。そして構造物へのエネルギー吸収量は劣化振動系の損傷度の指標でもある。このことから今後、耐震設計を入力エネルギーという観点からとらえることが重要となってくると考えられる。

参考文献 秋山 宏: 構造物の極限耐震設計, 東京大学出版会, 昭和55.9