

京都大学工学部 正会員 家村 浩和  
 京都大学大学院 学生員 岩崎 好寿

1. はじめに

近年、地震時の構造物の動的応答を低減する方法として、免震および制震構造に関する研究がさかに行なわれつつある。また、構造物の耐震性を評価する手法として、地震時に構造物にされるエネルギー量とその分担率に注目した研究も提案されている。地震入力エネルギーは、地震動の強度を継続時間の影響を含めて評価するものであり、構造物の損傷度をより精度よく予測できるパラメーターである。本研究では、まず地震入力エネルギーが多自由度履歴構造物においてどのように分担されるかを、シミュレーションの手法により明らかにした。次にこの考え方を免震および制振構造物に適用し、免震および制震機構の効果を、地震入力エネルギーの観点から評価した。

2. 免震および制震構造物における地震入力エネルギーの分担率

多自由度履歴構造物として Fig.1に示すせん断型多層ラーメンモデルを考える。これに対応する運動方式を地震継続時間 (0~t<sub>0</sub>) で積分することにより次式が得られる。

$$\sum_i \left( \frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 \right) + \sum_i \int_0^{t_0} C_i \dot{y}_i^2 dt + \sum_i \int_0^{t_0} F_i \dot{y}_i dt$$

$$= \sum_i \int_0^{t_0} (-m_i \ddot{x}_i z) dt \quad (1)$$

今、左辺第1項をW<sub>k<sub>i</sub></sub>；第i質点の時刻 t<sub>0</sub> での運動エネルギー、左辺第2項をW<sub>c<sub>i</sub></sub>；第i層における粘性吸収エネルギー、左辺第3項をW<sub>E<sub>i</sub></sub>+W<sub>H<sub>i</sub></sub> (W<sub>E<sub>i</sub></sub>；第i層のせん断柱の時刻 t<sub>0</sub> での弾性歪エネルギー、W<sub>H<sub>i</sub></sub>；第i層のせん断柱に蓄積される塑性歪エネルギー)、右辺をE<sub>i</sub>；時刻 t<sub>0</sub> までに第i質点へ入力される総入力エネルギーとすると(1)式は次式ようになる。

$$\sum_i W_{k_i} + \sum_i W_{c_i} + \sum_i W_{E_i} + \sum_i W_{H_i} = \sum_i E_i \quad (2)$$

ところで地震応答終了時には運動エネルギーや弾性歪エネルギーは0となるため結局(2)式は次式ようになる。

$$\sum_i W_{c_i} + \sum_i W_{H_i} = \sum_i E_i \quad (3)$$

従って地震動により構造物に入力されたエネルギーは、最終的に粘性吸収エネルギーと塑性歪エネルギーとで吸収される。

次に Table 1に示す3つのモデルについて地震入力エネルギーの分担率を評価する。モデル1は通常の構造物を想定したもので、質量、剛度とも各層にわたって等分布とした。

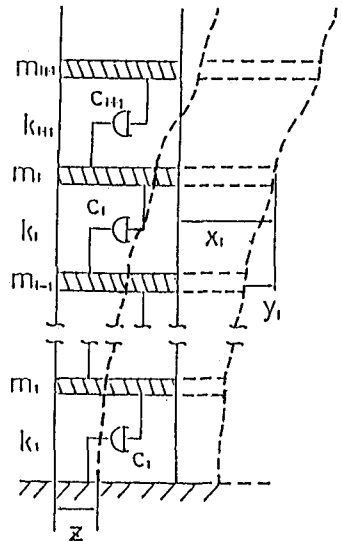


Fig.1 Multi DOF System

Table 1 Mass and Stiffness of Each Model

No	B	1	2	3	4	5	6
Model 1	k (ton/cm)	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	
	m (ton)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
Model 2	k (ton/cm)	100.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0
	m (ton)	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Model 3	k (ton/cm)	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	10.0
	m (ton)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	2.0

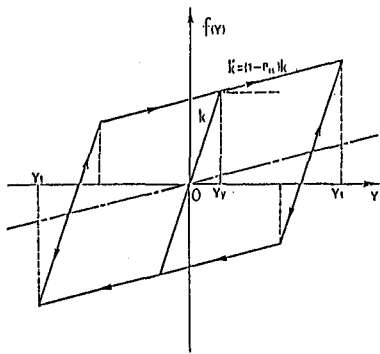


Fig. 2 Bi-linear Model

モデル2では、地下基礎部が剛度の低い支承部により支持されている免震構造を想定した。モデル3は、屋上部に質量と剛度の低いTuned Mass Damperを用いたモデルである。Tuned Massの質量、剛性はモデル1の一次固有周期と等しくなるように選んだ。なお入力地震波としてEl Centro, NS記録(1940.5.18 Imperial Valley E.Q.)を用い、また各層の復元力特性としてFig.2に示すようなBi-linear型モデルを用いた。

まずモデル1において各層の降伏変位 $x_v$ を1.0 cm、弾塑性傾斜率 $P_n$ を0.75とした時の入力エネルギーの分担率をFig.3に示した。この図より、 $E_i / \sum E_i$ 、 $W_{ci} / \sum E_i$ 、 $W_{hi} / \sum E_i$ はいずれも下部ほど大きな値を示していることがわかる。これは下層ほどせん断力が大きくなるため層間応答が増大し、塑性領域に及ぶ振幅や頻度も増し、その結果エネルギー吸収量が大きくなるためと考えられる。従って等質量、等剛性の多層せん断モデルでは、下層ほど大きな地震入力エネルギーを分担することになる。また減衰定数 $h$ の増加に伴って、 $W_{hi} / \sum E_i$ が小さくなり $W_{ci} / \sum E_i$ が大きくなっていることがわかる。これは減衰が大きくなるに従って層間変位が減少し、塑性領域に入る割合が少なくなり、 $W_{hi}$ が減少するためと考えられる。

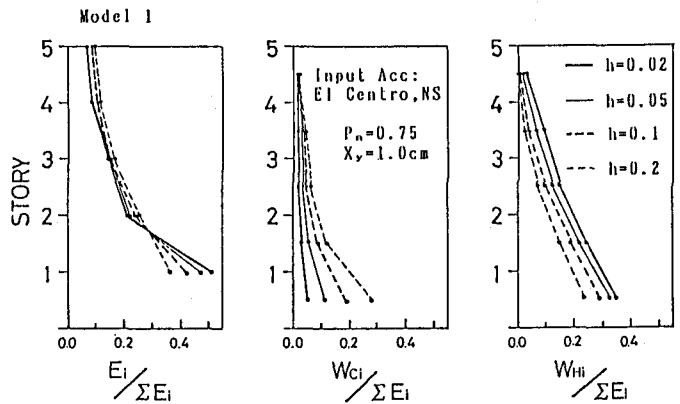


Fig. 3 Distribution of Input Energy

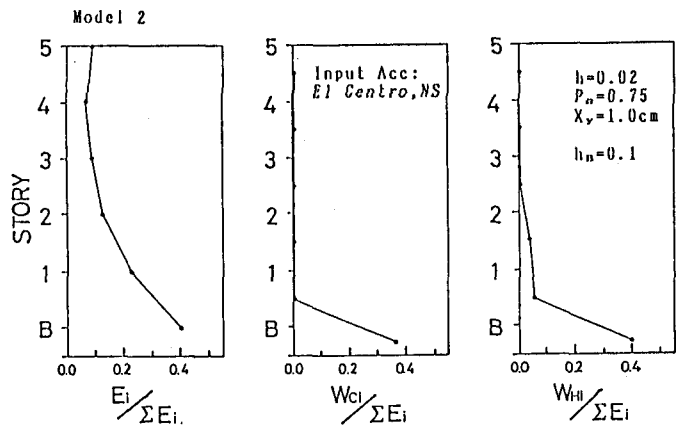


Fig. 4 Distribution of Input Energy

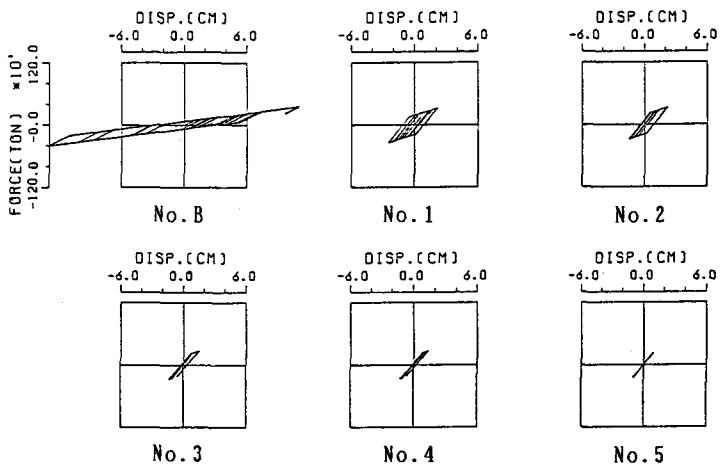


Fig. 5 Hysteretic Loop

この図より、 $E_i / \sum E_i$ 、 $W_{ci} / \sum E_i$ 、 $W_{hi} / \sum E_i$ はいずれも下部ほど大きな値を示していることがわかる。これは下層ほどせん断力が大きくなるため層間応答が増大し、塑性領域に及ぶ振幅や頻度も増し、その結果エネルギー吸収量が大きくなるためと考えられる。従って等質量、等剛性の多層せん断モデルでは、下層ほど大きな地震入力エネルギーを分担することになる。また減衰定数 $h$ の増加に伴って、 $W_{hi} / \sum E_i$ が小さくなり $W_{ci} / \sum E_i$ が大きくなっていることがわかる。これは減衰が大きくなるに従って層間変位が減少し、塑性領域に入る割合が少なくなり、 $W_{hi}$ が減少するためと考えられる。

次にモデル2における入力エネルギーの分担率を Fig.4に示す。各層の $x_y$ は1.0cm、 $P_n$ は0.75、 $h$ は支承部分のみ0.1、他の層はすべて0.02とした。この図により地震入力エネルギーは、そのほとんどが支承部の $W_{Ci}$ と $W_{Hi}$ で吸収されていることがわかる。すなわち支承部より上部の各層はほとんど相対変位を発生せず、剛体的な振動をしているものと考えられる。Fig.5に応答解析により得られたヒステリシスループを示す。これを見ると支承部分のみが大きく振動し、上部の層は振幅がかなり小さくなっている。

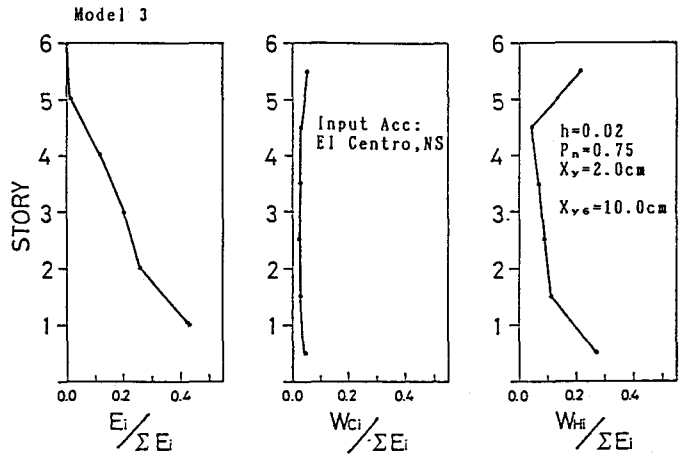


Fig. 6 Distribution of Input Energy

次にモデル3における入力エネルギーの分担率を Fig.6に示す。なお各層の $h$ は0.02、 $P_n$ は0.75、 $x_y$ は6層のみ10.0cm、他の層は2.0cmとした。この図より第6質点(Tuned Mass)に入力される地震エネルギーはほとんどゼロであることすなわち第5質点と逆位相の振動をしていることがわかる。この結果、第6層での $W_{Hi}/\Sigma E_i$ が大きくなり、下部層の $W_{Hi}/\Sigma E_i$ が減少している。またヒステリシスループを Fig.7に示す。これを見ると Tuned Mass が大きく振動しているのがわかる。

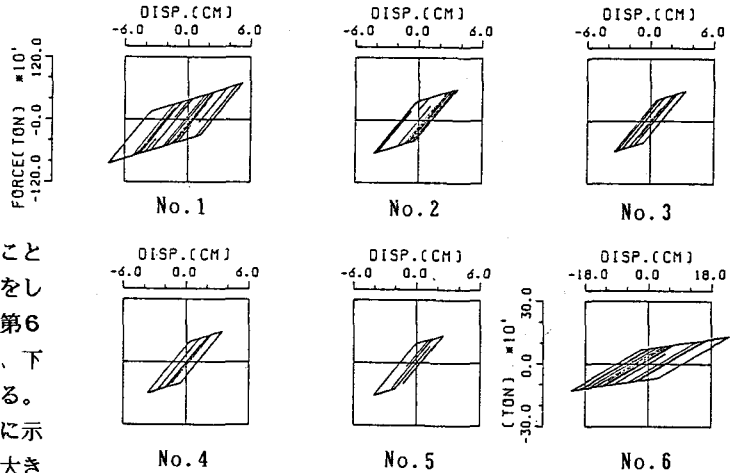


Fig.7 Hysteretic Loop

### 3. 総地震入力エネルギー量の評価

ここでは構造物に入力される総地震エネルギー量について検討する。また、構造物の損傷といったものに注目すると、塑性歪エネルギー量が重要になってくる。免震および制震機構の効果を見るために、総入力エネルギー $\Sigma E_i$ 、総入力エネルギー $\Sigma E_i$ から免震および制震機構での $W_c$ および $W_H$ を引いた値(構造部材へのネットの地震入力エネルギー値で以下TEと呼ぶ)、また免震および制震機構以外の層に蓄積される塑性歪エネルギー量(以下 $TW_H$ と呼ぶ)を比較した。これを Table 2に示す。まず、モデル1の減衰定数が2%の場合とモデル2とを比べて免震機構の効果調べる。 $\Sigma E_i$ を見るとモデル2の方がモデル1よりも小さい。すなわち免震機構を用いることにより構造物に入力されるエネルギー量そのものが減少する。そして2章で述べたように、モデル2では入力エネルギーのほとんどが支承部分で分担されているため、TE、 $TW_H$ はモデル1の $\Sigma E_i$ 、 $TW_H$ と比べると大きく減少しており免震機構の効果が極めて大きいことがわかる。次にモデル1の減衰定数が2%の場合とモデル3を比べて、制震機構の効果調べてみると、 $\Sigma E_i$ ではモデル3の方が大きくなっている。これはモデル3ではTuned Massを設置した分、構造物全体の質量が増加したためと考えられる。しかしTE、 $TW_H$ はモデル1の $\Sigma E_i$ 、 $TW_H$ よりも減少しており、Tuned

エネルギーを吸収した効果が現れている。

以下では、各モデルについて構造物の特性（減衰定数、降伏変位、弾塑性傾斜率）を変化させた場合の影響を調べる。モデル1で減衰定数  $h$  を変化させた場合は、 $h$  の増加に伴って  $\Sigma E_i$  は大きくなり、 $TW_H$  は逆に減少している。 $TW_H$  が減少するのは、減衰定数の増加により応答が小さくなり、塑性領域に入る割合が小さくなるためと考えられる。次にモデル2において、免震機構の減衰定数  $h_B$  を変化させたところ、 $h_B = 0.1$ 、 $0.02$  の場合の  $\Sigma E_i$ 、 $TE$ 、 $TW_H$  の値には大きな差がなく、 $h_B$  の影響は少ないと考えられる。これは減衰定数が小さい時には免震機構の部分での粘性吸収エネルギーが小さくなるが、塑性歪エネルギー吸収量が大きくなるため上部の層に入力されるエネルギーには大きな変化がないためと考えられる。また降伏変位  $x_{yB}$  を変化させた場合については、 $x_{yB}$  を小さくするのに従って  $\Sigma E_i$ 、 $TE$ 、 $TW_H$  が減少しており、 $x_{yB}$  を小さくした方が効果が大きいことがわかる。弾塑性傾斜率  $P_{nB}$  を変化させた場合では、 $P_{nB}$  が大きくなるほど  $\Sigma E_i$ 、 $TE$ 、 $TW_H$  が減少していることから、 $P_{nB}$  を大きくした方が効果が大きいということが出来る。従って免震構造物の場合には支承部分での降伏変位を小さくし、弾塑性傾斜率を大きくして塑性領域に入る割合を大きくし、見かけの剛性を小さくすることにより構造物への地震入力エネルギーを小さくすることができる。次にモデル3で、Tuned Massの減衰定数  $h_s$  を変化させた場合については、 $h_s = 0.02$  の時と  $h_s = 0.1$  の時には  $\Sigma E_i$ 、 $TE$ 、 $TW_H$  にはほとんど変化はなく、 $h_s$  の影響は小さい。降伏変位  $x_{yS}$  を変化させた場合では、 $\Sigma E_i$  は  $x_{yS}$  を大きくした方が小さくなっている。また  $x_{yS} = 6.0\text{cm}$ 、 $10.0\text{cm}$ 、 $\infty$  の時の  $TE$ 、 $TW_H$  に大きな違いはないが  $x_{yS} = \infty$  の時の方が  $TE$ 、 $TW_H$  が少し小さくなっており、Tuned Mass を弾性振動させた方が効果が大きいということが出来る。Tuned Massの質量、剛性はモデル1の一次固有周期に合わせてあるため、弾性振動させたほうがTuned Massに入力エネルギーが集中しやすいと考えられる。次にモデル1、モデル2、モデル3を比較すると、モデル2の場合は他のモデルと比べて  $TE$ 、 $TW_H$  が極めて小さな値となっている。これらより免震機構を用いた場合の効果が最も大きいことがわかる。

次にモデル2において、免震機構の減衰定数  $h_B$  を変化させたところ、 $h_B = 0.1$ 、 $0.02$  の場合の  $\Sigma E_i$ 、 $TE$ 、 $TW_H$  の値には大きな差がなく、 $h_B$  の影響は少ないと考えられる。これは減衰定数が小さい時には免震機構の部分での粘性吸収エネルギーが小さくなるが、塑性歪エネルギー吸収量が大きくなるため上部の層に入力されるエネルギーには大きな変化がないためと考えられる。また降伏変位  $x_{yB}$  を変化させた場合については、 $x_{yB}$  を小さくするのに従って  $\Sigma E_i$ 、 $TE$ 、 $TW_H$  が減少しており、 $x_{yB}$  を小さくした方が効果が大きいことがわかる。弾塑性傾斜率  $P_{nB}$  を変化させた場合では、 $P_{nB}$  が大きくなるほど  $\Sigma E_i$ 、 $TE$ 、 $TW_H$  が減少していることから、 $P_{nB}$  を大きくした方が効果が大きいということが出来る。従って免震構造物の場合には支承部分での降伏変位を小さくし、弾塑性傾斜率を大きくして塑性領域に入る割合を大きくし、見かけの剛性を小さくすることにより構造物への地震入力エネルギーを小さくすることができる。次にモデル3で、Tuned Massの減衰定数  $h_s$  を変化させた場合については、 $h_s = 0.02$  の時と  $h_s = 0.1$  の時には  $\Sigma E_i$ 、 $TE$ 、 $TW_H$  にはほとんど変化はなく、 $h_s$  の影響は小さい。降伏変位  $x_{yS}$  を変化させた場合では、 $\Sigma E_i$  は  $x_{yS}$  を大きくした方が小さくなっている。また  $x_{yS} = 6.0\text{cm}$ 、 $10.0\text{cm}$ 、 $\infty$  の時の  $TE$ 、 $TW_H$  に大きな違いはないが  $x_{yS} = \infty$  の時の方が  $TE$ 、 $TW_H$  が少し小さくなっており、Tuned Mass を弾性振動させた方が効果が大きいということが出来る。Tuned Massの質量、剛性はモデル1の一次固有周期に合わせてあるため、弾性振動させたほうがTuned Massに入力エネルギーが集中しやすいと考えられる。次にモデル1、モデル2、モデル3を比較すると、モデル2の場合は他のモデルと比べて  $TE$ 、 $TW_H$  が極めて小さな値となっている。これらより免震機構を用いた場合の効果が最も大きいことがわかる。

#### 4. 結論

本研究で得られた結果は次のようにまとめることができる。

- 1) 通常の構造物では、下層ほど地震入力エネルギーが大きくなる。
- 2) 免震構造物では地震入力エネルギーそのものが減少するとともに、そのほとんどが免震機構に集中し、上部の層への入力エネルギーは極めて小さくなる。
- 3) 制震構造物では構造物に入力されるエネルギーの分担率を制御することができ、Tuned Mass以外の層に入力されるエネルギーを減少させることができる。
- 4) 本研究でモデルとして扱った5層ラーメン構造物では、免震機構による効果が最も大きい。

Table 2 Total Energy

Model 1

h	$x_{yB}$ (cm)	$P_n$	$\Sigma E_i$ (ton-cm)	TE (ton-cm)	$TW_H$ (ton-cm)
0.02	1.0	0.75	36,161.3	—	31,095.2
0.05	1.0	0.75	36,604.1	—	26,943.0
0.10	1.0	0.75	39,669.3	—	24,309.5
0.2	1.0	0.75	43,634.1	—	20,406.7

Model 2

$h_B$	$x_{yB}$ (cm)	$P_{nB}$	$\Sigma E_i$ (ton-cm)	TE (ton-cm)	$TW_H$ (ton-cm)
0.1	1.0	0.75	23,667.0	5,429.6	2,807.2
0.02	1.0	0.75	19,626.6	6,065.7	2,696.0
0.1	0.5	0.75	21,131.7	4,310.8	1,637.5
0.1	2.0	0.75	26,716.9	8,891.1	6,632.5
0.1	1.0	0.60	26,448.7	10,784.0	7,606.7
0.1	1.0	0.85	23,131.0	3,024.2	1,068.6

Model 3

$h_s$	$x_{yS}$ (cm)	$P_{nS}$	$\Sigma E_i$ (ton-cm)	TE (ton-cm)	$TW_H$ (ton-cm)
0.02	10.0	0.75	45,737.2	33,727.7	26,032.7
0.1	10.0	0.75	46,246.6	33,046.0	25,817.6
0.1	$\infty$	—	44,931.3	32,916.0	25,369.3
0.1	6.0	0.75	50,123.0	36,667.8	29,357.0