

免震建物と耐震建物の連結制震に関する研究  
その3 多質点せん断型モデルによる有効性の検証

A Study on Coupled Vibration Control System of Base Isolation Structure and Seismic Structure  
Part 3 Verification of Effectiveness Using Multi-mass Shear Model

○高林正和<sup>3</sup>, 古橋剛<sup>1</sup>, 押山育未<sup>2</sup>, 井上啓道<sup>3</sup>, 大館龍平<sup>3</sup>

\*Masakazu Takabayashi<sup>3</sup>, Takeshi Furuhashi<sup>2</sup>, Ikumi Oshiyama<sup>2</sup>, Hiromichi Inoue<sup>3</sup>, Ryuhei Odate<sup>3</sup>

In part 2, proposed a new design method of " Performance Specified Type Design Method ". In this paper, verified effectiveness of Performance Specified Type Design Method using multi-mass shear model.

3.1 はじめに

前報その2では, 最適設計より求めたダンパー量を低減して付加した場合の制震性能及び免震建物の固有値を確認し, 低減したダンパー量で十分な連結制震をすることができる「性能指定型設計法」の提案を行った. 本報その3では実際にモデルを用いて, 本研究で提案する設計法の有用性について検証を行う.

3.2 性能指定型設計法による設計の手順

作成した設計指標を用いた, 「性能指定型設計法」による設計の手順を Figure 3-1 に示す.

ここで用いられている目標耐震減衰定数とは, 非連結時の耐震建物の 1 次モードにあたる連結時の耐震建物の減衰定数であり, 免震減衰定数とは, 非連結時の免震建物の 1 次モードにあたる連結時の免震建物の減衰定数である.

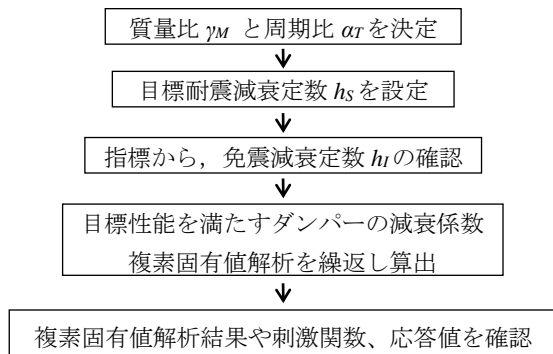


Figure 3-1 Procedure of performance specified type design using the index

3.3 多質点せん断型モデルによる有用性の検証

想定する対象建物の概要と諸元を Table 3-1 に示す. 耐震建物は, 免震建物に対して, 床面積が 1/5 程度の規模を想定している. モデル図及び免震層諸元は Figure 3-2, Table 3-2 に示す. 部材減衰は, 耐震建物及び免震建物の上部構造に対して, それぞれ剛性比例型で 1 次モードに 1% 付加させている. また, 連結ダンパーは, 耐震建物の最上層である 5 層目に配置することとする.

Figure 3-1 のフローチャートに沿って, 設計を行う.

まず, 構造体の諸元から, 質量比  $\gamma_M$  と周期比  $\alpha_T$  を求める. 多質点系の場合は非連結時の固有値解析により, 耐震建物及び免震建物の 1 次固有周期と 1 次有効質量を算出し, それらを用いて質量比  $\gamma_M$  と周期比  $\alpha_T$  を算出することとなる. なお, 連結制震を考える場合の有効質量は, 式(3-1)を用いて算出される.

$$\hat{M}_i = \{\beta_j r_j\}^T [M] \{\beta_j r_j\} / (\beta_j r_j)_i^2 \quad (3-1)$$

$\hat{M}_i$  : i 層を連結層とした時の有効質量

[M] : 構造物の質量マトリクス

$\{\beta_j r_j\}$  : j 次モードの刺激関数

$(\beta_j r_j)_i$  : i 層の刺激関数値

Table 3-1 Specifications and assumed building outline (Base isolation structure for superstructure)

	層数	階高 [m]	建物高さ [m]	1層あたりの質量 [ton]	固有周期 [s]
耐震建物	5	4.0	20.0	200.0	0.5
免震建物	10	4.0	40.0	1000.0	1.0

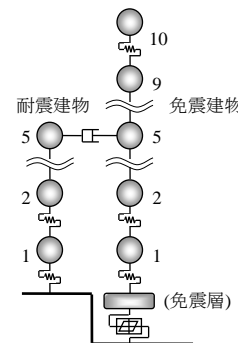


Figure 3-2 Multi-mass shear model

Table 3-2 Base isolation layer specifications

免震層質量 $m_b$ [ton]	1500
降伏せん断力係数 $\alpha_s$	0.03
降伏せん断力 $F_y$ [kN]	3381.0
免震周期 $T_f$ [s]	4.0
2次剛性 $k_i$ [kN/m]	28375.1
バイリニア係数 $p_d$	0.1
1次剛性 $k_f$ [kN/m]	283751.1

固有値解析の結果, 1 次固有周期は, 耐震建物が 0.5 秒, 免震建物が 4.1 秒であるため, 周期比は  $\alpha_T=8.2$  となった. また, 1 次有効質量は, 耐震建物が 561.7[ton], 免震建物が 11313.7[ton]であるため, 質量比は  $\gamma_M=20.1$  となった. 次に, 指標を参考に目標性能を定める. 本設計では, 免震建物において, 高い減衰定数の付加は高次モードを発生させる可能性があることを考慮し, 免震減衰定数を  $h_I=0.10$  以内に収めることを考える.

その 2 の Figure 2-4 に示した  $\gamma_M=20$  の場合の設計指標から、 $\alpha_T=8$  において、 $h_T=0.10$  を限界値とすると、目標耐震減衰定数は最大で  $h_S=0.22$  程度獲得できることが分かる。従って、ここでは、設計目標として、目標耐震減衰定数を  $h_S=0.20$  と決定する。なお、目標耐震減衰定数  $h_S=0.20$  とした時の免震減衰定数は、 $h_T=0.08$  程度と予測することが出来る。

次に、目標性能を満たす  $c_d$  を複素固有値解析を繰返し、決定する。 $h_S=0.20$  となる時の  $c_d$  は、 $2800[\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}]$  と決定した。求めた  $c_d$  を付加した複素固有値解析結果を Table 3-3 に、刺激関数図を Figure 3-3 に示す。以上で性能指定型設計法が終了となる。なお比較として、非連結時の結果と、既往の最適設計理論による設計の場合の結果を同図表に示している。既往の最適設計理論( $c_d=15000.0[\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}]$ ,  $m_d=1300.0[\text{ton}]$ )の場合、1次、2次に非常に高い減衰が付与されており、刺激関数図は免震建物において高次モードが発生している。また、 $T_2=1.05[\text{s}]$  となっており、元々の耐震建物の固有周期が 0.5 秒であったことを考えると、変位応答が増大する可能性が考えられる。一方、性能指定型設計の場合は、目標耐震減衰定数  $h_S=0.20$  をほぼ満たしており、免震減衰定数も指標から読み取った  $h_T=0.08$  をほぼ満たしている。刺激関数においても、免震建物の高次モードはほぼ発生していないことが確認できる。

Table 3-3 Complex eigenvalue analysis results at the time of the design

モード	非連結時		最適設計時		性能指定型設計時	
	$Teq$	$heq$	$Teq$	$heq$	$Teq$	$heq$
1次	4.09	0.000	3.74	0.470	4.08	0.081
2次	0.54	0.018	1.05	0.614	0.54	0.018
3次	0.50	0.010	0.54	0.018	0.49	0.213
4次	0.28	0.036	0.29	0.038	0.28	0.047
5次	0.19	0.054	0.21	0.040	0.19	0.054
6次	0.17	0.029	0.19	0.053	0.17	0.088

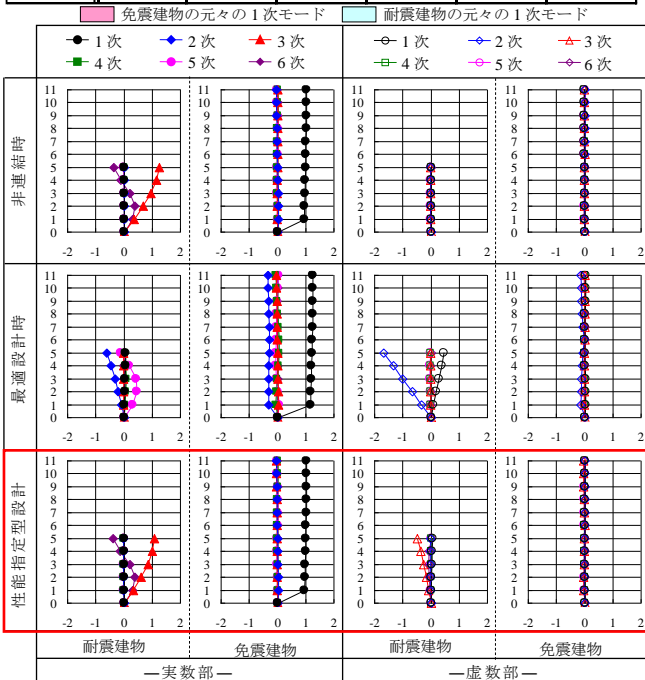


Figure 3-3 Participation vector figure at the time of the design (Horizontal axis: stimulus function, vertical axis: layer)

最後に非線形時刻歴応答解析を行い、応答を確認する。入力地震動は、BCJ\_L2 及び JR 鷹取 1995NS を用いる。Figure 3-4 に非線形時刻歴応答解析結果を示す。

既往の最適設計理論による設計の場合、免震建物の層変位と耐震建物の絶対加速度は低減できるものの、免震建物の絶対加速度や耐震建物の層変位及び層間変位が増大している。これは、免震建物の高次モードの発生や、耐震建物の大幅な長周期化が原因であると考えられる。一方、性能指定型設計の場合、耐震建物において高い応答低減効果が現れる。免震建物においては、連結前の性能をほぼ維持できていることが分かる。また、モード形状を変化させずに減衰効果を付与したことから、BCJ\_L2 の層変位が低減できていることも分かる。

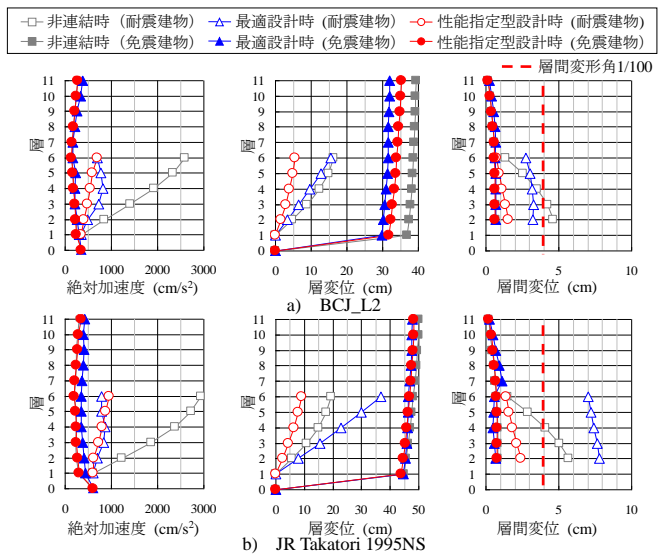


Figure 3-4 Non-linear time history response analysis results

### 3.4 まとめ

免震建物及び耐震建物の連結制震において、連結制震の最適設計理論を適用した場合、免震建物に悪影響を及ぼす可能性があることを示した。また、ダンパー量を最適設計時から低減させても、耐震建物の減衰定数は十分確保でき、免震建物の性能の悪化も抑制できる傾向があることを示した。このことに着目し、目標耐震減衰定数を設計目標として設定しダンパー量を算出する、連結制震の「性能指定型設計法」を提案し、目標耐震減衰定数と免震減衰定数の関係性を把握できる指標を作成した。最後に、多質点せん断型モデルに性能指定型設計法を適用し、本設計法の有用性を確認した。

### 参考文献

- 1) 石丸辰治：応答性能に基づく「対震設計」入門，彰国社，2004
- 2) 蔭山満，安井譲，戸野里美：複合構造物の制振に関する研究，(その1～その2)，日本建築学会関東支部研究報告書，1992