

## 時刻歴応答制約を満足する免震建物の異種免震部材組合せ最適化

## COMBINATORIAL OPTIMIZATION OF MULTIPLE-TYPE DEVICES IN SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS SATISFYING CONSTRAINTS IN RESPONSE HISTORY ANALYSES

渡邊 大地<sup>\*1</sup>, 高木 次郎<sup>\*2</sup>, 大崎 純<sup>\*3</sup>, 見上 知広<sup>\*4</sup>*Daichi WATANABE, Jiro TAKAGI, Makoto OHSAKI  
and Tomohiro MIKAMI*

A combinatorial optimization algorithm for the design of base-isolation devices (bearings and dampers) is proposed. Among multiple-type options in the devices, rational combinations with efficient sizes or numbers are designed. For given structural conditions of superstructures, the total cost of the devices is minimized under the multiple constraints including the maximum displacements and floor accelerations. The responses under large earthquakes are simulated in the response history analyses, and the effects by higher modes are directly evaluated. The effectiveness of using the proposed algorithm is confirmed by comparing the results with those by the alternative algorithm for fixed-device design.

**Keywords** : *Combinatorial optimization, Seismic isolation device, Cost minimization, Local search, Response history analysis*

組合せ最適化, 免震部材, コスト最小化, 局所探索, 時刻歴応答解析

## 1. はじめに

免震構造建物は設計地震動に対して上部構造物の応答加速度, 免震層の応答変位, 個々の免震部材に作用する軸力などが設計条件に納まるように設計される。支承やダンパーなどの免震部材の種類は多く, その組み合わせを決める作業は時に困難を伴う。上部構造を1質点に縮約し等価線形化法などを適用することで上部構造および免震層の応答をある程度推定できる一方, 高次モードの影響が大きい高層建物の応答は多質点系モデルの時刻歴応答解析によって評価される。等価線形化法で推定した応答結果から想定した各階の応答値と時刻歴応答解析による各階の応答値の差は大きくなる場合があり, 複数の入力地震動に対して, 設計制約を満足する支承とダンパーの経済設計のために試行錯誤が繰り返されることが多い。

免震部材の最適配置手法として, 田守らによるヒューリスティクスを応用した一連の提案がある。それらは遺伝的アルゴリズム(GA)による方法<sup>1-3,5)</sup>, 焼きなまし法(SA), タブー探索(TS)による方法<sup>4,6,7)</sup>, GAを応用したアルゴリズムによる多目的最適化手法<sup>8-11)</sup>などである。和多田ら<sup>12)</sup>は機械学習とSAを組み合わせた方法によって時刻歴応答制約を満足する設計解を導出した。五十子・上谷<sup>13,14)</sup>は1質点系モデルの免震建物について, 構造躯体と免震層の直接工事費の和を最小化する最適化問題を定式化した。これらおよびその他

の既往研究において, 著者らが知る限り, 支承やダンパーの種類と仕様を同時に設計変数とした設計手法の提案はなされていない。異なる種類の設計変数を持つ問題にGAを適用した場合, 各変数の順序関係がないため, 評価の高い2つの解の交叉によって得られる解の評価が高いとは限らず, また突然変異によって近傍を探索することもできない。異種の免震部材それぞれのサイズを最適化する際, 種類の変化とサイズの変化の効果は全く異なり, 局所探索(LS)によって細かいルールの設定が必要になる。

本研究では, 異種免震部材を扱う局所探索のアルゴリズムを提案し, 多質点系モデルを用いた時刻歴応答解析により応答を求めることで, 高次モードの影響を考慮する。21階建RC造の基礎免震建物の設計例を対象に提案手法を適用し, アルゴリズムの有用性を示す。上部構造を1質点に縮約したモデルと比較して高次モードの影響を確認する。また, 設計条件が設計解に及ぼす影響を評価する。

## 2. 局所探索法の概要

基礎免震構造の免震層には上部構造を柱直下で支持しつつ, 大きな水平変形に追従できる支承と地震入力エネルギーを吸収するダンパーが組み込まれる。支承の種類には積層ゴム支承, すべり支承, 転がり支承などがあり, ダンパーの種類には履歴減衰型, 粘性減衰

\*1 東京都立大学都市環境科学研究科 元大学院生・修士(工学)

\*2 東京都立大学都市環境科学研究科 准教授・Ph.D.

\*3 京都大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

\*4 大林組構造設計部 博士(工学)

Former Graduate Student, Tokyo Metropolitan Univ., M.Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Urban Env. Sciences, Tokyo Metropolitan Univ., Ph.D.

Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr.Eng.

Structural Eng. Dept., Obayashi Corporation, Dr.Eng.

型、摩擦減衰型などがある。それら免震部材を組み合わせる設計の選択肢は膨大であり、多種多様な設計条件を満足しつつ経済性を考慮した組合せを求めることは困難である。そこで、免震部材の総コスト最小化を目的関数として、異種免震部材の組合せ設計解を導出する。

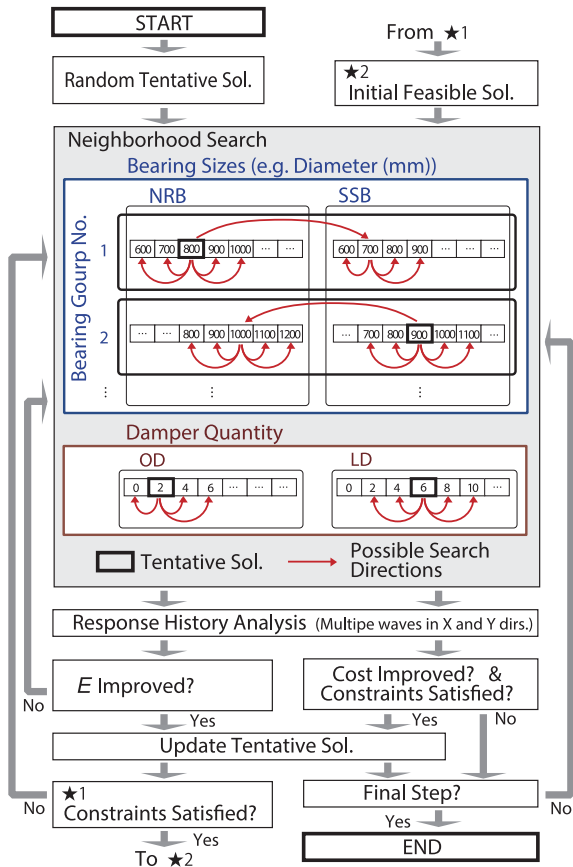


Fig.1 Combinatorial optimization algorithm

### 2.1 探索アルゴリズム

探索アルゴリズムを図1に示す。いま、複数の制約条件を全て満足する設計解を「許容解」と呼ぶ。本最適化問題は制約が厳しく、探索を開始するための許容解を無作為に与えることは困難である。従って、初期許容解を求めるプロセスにも局所探索法を用いる。

図1の左側が、ランダムな設計組合せ（「ランダム解」と呼ぶ）から許容解を探索する過程であり、ランダム解から最初に到達した許容解を初期許容解と定義する。図1の右側が初期許容解からコスト最小化を進めて最終的な解（「優良設計解」と呼ぶ）を求める過程である。いずれの過程でも繰り返し計算を行い、暫定解の近傍を探索して、制約条件の満足度や目的関数値の改善が進む方向に暫定解を入れ替える操作を行う。初期許容解を得る過程で、制約条件の評価値  $E$  を式(1)のように定義する。

$$E = \text{Max} (R_\delta, R_A, R_C, R_{\sigma_c}, R_{\sigma_t}) \quad (1)$$

ここで、 $R$  は時刻歴応答値の制約値に対する割合であり、複数の検討地震波に対する時刻歴解析中の全層あるいは全支承中の最大値を示す。下添字の  $\delta$  は免震層の水平変位、 $A$  は上部構造の床応答加速

度、 $C$  は免震層のせん断力係数、 $\sigma_c$  と  $\sigma_t$  はそれぞれ支承の短期圧縮面圧と引張面圧に対応する。ここで、短期圧縮面圧および短期引張面圧は長期面圧と変動面圧の和であり、圧縮を正と定義する。層せん断力係数については、上部構造のベースシア係数を評価対象にすることも考えられるが、建物への入力レベルの評価指標として免震層でのせん断力係数を制約条件にした。

得られた初期許容解に対して免震部材総コスト最小化を目的とした探索を行う。近傍解の中に、前ステップよりコストが小さい許容解が存在する場合、それらのコスト最小解を暫定解として更新し、最終ステップの暫定解を優良設計解とする。初期許容解から優良設計解までの解析ステップ数は300とし、各ステップで30の近傍解を評価する。設計変数は支承装置の種類と径およびダンパーの種類と数とし、支承とダンパーそれぞれで近傍解の生成方法を設定する。支承は平面位置に応じてグループ化し、同一グループ内の支承の種類と径を同一とする。グループごとに独立して近傍を探索する。暫定解で用いられている支承と同一種内で異なる径を探索する確率を2/3とし、異なる種類に変更する確率を1/3とする。初回種類変更時は表1中からランダムに径を選択し、過去のステップで変更先の支承種を用いた経験がある場合は、直近で用いた径から表1の支承番号の0, ±1, ±2を1/5の確率で選択する。支承の種類を変更しない場合、前ステップの径から表1の支承番号の0, ±1, ±2を1/5

Table 1 Design variables of base-isolation devices

Natural Rubber Bearing (NRB)							
No.	1	2	3	4	5	6	7
Diameter (mm)	600	700	800	900	1000	1100	1200
Cost	60	70	80	90	100	110	120
Shear Stiffness (kN/mm)	0.69	0.8	0.91	1.04	1.15	1.26	1.39
Lateral Displacement Limit (mm)	480	560	640	720	800	880	960

Sliding Support With Rubber-Pad (SSB)									
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diameter (mm)	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Cost	150	175	200	225	250	275	300	325	350
1st Shear Stiffness (kN/mm)	5.55	7.56	9.88	12.5	15.42	18.65	22.2	26.05	30.22
2nd Shear Stiffness (kN/mm)	0								
Friction Coefficient	0.075								

Lead Damper (LD)		Oil Damper (OD)	
Cost	90	Cost	160
1st Shear Stiffness (kN/mm)	30	1st Damping Coefficient (kNs/mm)	1.25
2nd Shear Stiffness (kN/mm)	0	2nd Damping Coefficient (kNs/mm)	0.085
Yielding Displacement (mm)	7.333	Relief Velocity (mm/s)	320
Lateral Displacement Limit (mm)	800		

Table 2 Constraints

Locations	Descriptions	Symbols	Limitations
Super-Structure	Max. Floor Acceleration	$A$	250 (gal)
	Max. Lateral Displacement	$\delta$	300 (mm)
Isolation Layer	Max. Shear Coefficient	$C$	0.15
	Bearings	Max. Compressive Stress in RHA*	$\sigma_c$
$\sigma_t$			NRB - 1 (N/mm <sup>2</sup> ) SSB 0 (N/mm <sup>2</sup> )
Max. Tensile Stress in RHA*		$\sigma_L$	NRB + 10 (N/mm <sup>2</sup> ) SSB + 15 (N/mm <sup>2</sup> )
		Max. Compressive Stress under Sustained Load	

RHA\* : Response History Analysis

の確率で選択する。ダンパーは暫定解の個数から 0, ±2, ±4 を 1/5 の確率で変更する。ダンパーの配置は考慮しない。個数がゼロになることを許容することで、特定の種類のダンパーを使用しない設計解を得ることを意図した。支承とダンパーの組合せに制約はないが、図 1 では後述する解析例に合わせて支承の種類は積層ゴム支承 (NRB) と弾性すべり支承 (中摩擦タイプ) (SSB) とし、ダンパーの種類は、オイルダンパー (OD) と鉛ダンパー (LD) の場合を例示した。支承の長期許容面圧は NRB が 10 N/mm<sup>2</sup> であり、SSB が 15 N/mm<sup>2</sup> である。

## 2.2 設計変数と制約条件

表 1 に免震部材の設計変数領域を示す。図 1 と同様に NRB, SSB, OD および LD の値を示す。表中のコストは、ある程度実状を反映させて仮定したものであり、NRB (直径 1000mm) を 100 として基準化した。制約条件を表 2 に示す。支承に作用する長期軸力は与条件とし、長期面圧 ( $\sigma L$ ) が長期許容面圧を超える支承径は変数から除外する。これにより図 1 中の解はランダム解を含めて常に  $\sigma L$  の制約を満足する。上部構造の設計を与条件とし、免震層のみを設計対象とする。平面形状が整形な建物を対象とし、免震層の偏心率は制約条件に含まない。

## 2.3 応答値の計算

図 2 に時刻歴応答解析のモデルを示す。図中の  $M_i$ ,  $sK_i$  はそれぞれ上部構造の  $i$  階の質量と剛性を表す。 $K_{NRB}$ ,  $K_{SSB}$ ,  $K_{OD}$ ,  $K_{LD}$  はそれぞれの免震部材の剛性であり、下添字は免震部材の種類である。また、 $C_{OD}$  はオイルダンパーの減衰係数を表す。上部構造は多質点等価せん断型モデルとする。支承が負担する水平動による変動面圧は 1 階床面を剛体として、時刻歴応答解析から求められる最大転倒モーメントと変動軸力によるモーメントの釣合いから算出する。後述の例題で、このような簡易な計算で求めた変動面圧が、3 次元立体骨組モデルを作成して求めた変動面圧と概ね一致することを別途確認している。支承の短期面圧は長期面圧と変動面圧の和であり、上下動の影響は考慮しない。El Centro NS (1940), Taft EW (1952), Hachinohe NS (1968) の観測地震動波形 (観測波) 3 波に対して、最大速度  $V_{max}$  を 75km に基準化した地震動を検討用地震波とする。解析時間を 50s、時間積分の刻み幅を 1/500s として、Newmark  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) を用いる。(Hachinohe NS (1968) 波については長周期波であることを考慮して解析時間を 120s とした場合も検討したが、50s の

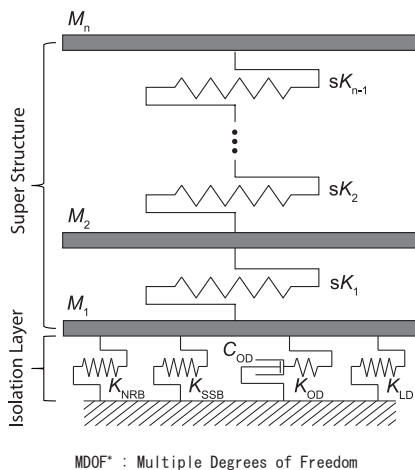


Fig.2 MDOF\* RHA shear model

場合と比較して差が認められなかったことから一律 50s とした。)

## 3. 解析例

### 3.1 解析例の概要

アルゴリズムを適用する免震建物の高さや階数に制約はないが、高次モードの影響を考慮した優良設計解を求めるため、多層の建物を解析例とする。実設計例を参考に形状を簡略化した地上 21 階、4×4 スパン、RC 純ラーメンの基礎免震構造建物である。免震部材の設置場所と長期軸力を図 3 に示す。支承は平面中央部、側辺部、隅角部でグループ化した。表 3 に上部構造の諸元を示す。建物の曲げ変形が応答に与える影響が小さいことを別途確認し、上部構造をせん断ばねでモデル化した。表 3 中のせん断剛性はコンクリートのひび割れによる低減を考慮して実設計例の初期剛性の 50% とした。基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期は X 方向が 2.21 秒、Y 方向が 2.17 秒である。地震動の検討方向は X, Y の 2 方向とし、優良設計解は 2 方向の地震動の応答に対して制約条件を満足する。

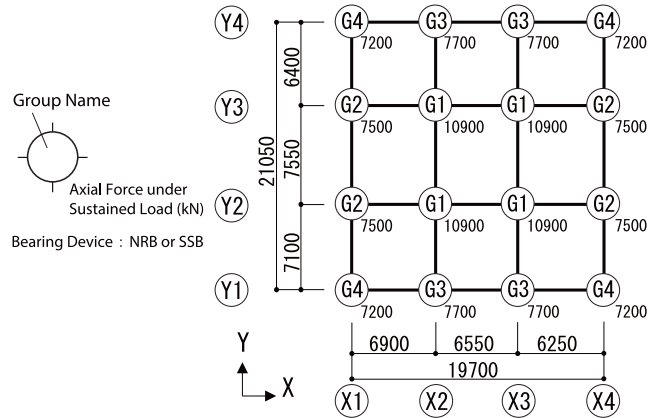


Fig.3 Bearing group and location in isolation layer

Table 3 Structural properties of super structure

Story	Height (mm)	Mass (ton)	Shear Stiffness (kN/mm)	
			X dir.	Y dir.
R		710		
9 - 21	3380	540	830 - 410	860 - 510
4 - 8	3110	540	880 - 830	910 - 860
3	3060	540	900	930
2	3110	650	970	1000
1	4630	1100	840	870
Isolation Layer	2860			

### 3.2 優良設計解の応答

優良設計解を表 4 (a) に示す。ここで、 $T_{eq}$  は免震層の変形が変位制約値である 300mm 時の等価剛性に対する免震層の等価周期であり、 $h_{eq}$  は振幅 300mm、周期  $T_{eq}$  の正弦波強制変位を上部構造に与えた場合の等価減衰定数である。また、局所探索中のコスト (灰色太線) および応答比の推移を図 4 に、優良設計解の時刻歴応答解析結果を図 5 に示す。図 3 の平面の X 方向と Y 方向の応答はほぼ同じであるため、図 5 には X 方向の結果のみ示した。なお、支承の種類を変数に含まず、固定とした解 (「種別固定解」と呼ぶ) について後述するが、同解の結果についても表 4 (b) と図 4, 5 に併記した。また、3.3 節に示す 1 質点に縮約したモデル (「縮約モデル」と呼ぶ) の結果に

ついても図5に併記した。表4中のランダム解は(a)と(b)で共通である。ランダム解から優良設計解を得られるまでに要した解析時間は個人用PCで2時間程度であった。表4より、ランダム解及び初期許容解の  $T_{eq}$  は同程度であるが、優良設計解では支承径が小さくなるとともに支承の種類がSSBからNRBに変化したことで5.3秒に長くなった。また、ランダム解から優良設計解に至る過程でダンパー数が減少したため  $h_{eq}$  も減少した。図4より、ランダム解では  $R_d^{max}$  と  $R_{ot}^{min}$  が1を超えており、4ステップ目で初期許容解に至るまで、 $R_d^{max}$  と  $R_{ot}^{min}$  の値は単調減少した。そして、初期許容解到達以降にコストが減少する様子が分かる。探索の結果、122ステップ目から最終の300ステップまで解は変化しておらず、122ステップ目以降の解が優良設計解になった。優良設計解の  $R_{ot}^{max}$  と  $R_{oc}^{max}$  が1に近く、 $R_d^{max}$  も比較的大きい。長期面圧と免震層の変位の制約に加えて、上部構造の加速度が設計上支配的となった。上階の最大層せん断力係数は0.2程度であり(図5)、最大床応答加速度分布から高次モードの影響が読み取れる。また、上部構造の最大層間変形角は1/438(X方向)と1/450(Y方向)である。

種別固定解は、優良設計解導出時と同様にダンパーを扱う一方で、支承の種類を変数に含まず、図1のランダム解設定後に支承の種類を変更しない設計解である(表4)。優良設計解はすべての支承グループでNRBが用いられているが、種別固定解ではODの数が優良設計解よりもXY両方向でそれぞれ2基多く、また支承はG2以外でSSB

が用いられているため、優良設計解のコストは種別固定解よりも40%低い。図5の時刻歴応答解析結果を比較すると、両者の応答の差は小さく、優良設計解のコスト上の優位性が分かる。すなわち、免震部材の種類を設計変数に含み、探索アルゴリズム中の近傍解生成における支承種類の変更の効果が確認できる。

### 3.3 縮約モデルとの比較

縮約モデルは、免震部材の構成を優良設計解と同じとし、1質点の質量を上部構造と基礎構造の和とした1自由度モデルである。図5の時刻歴応答解析結果より、多質点の優良設計解と比較して縮約モデルの最大変位は免震層で10-15%程度大きく、上層で10-15%程度小さい。また最大層せん断力係数は免震層では同程度であるが、上層では60%程度小さい。最大応答加速度は全層で10-70%小さい。すなわち、縮約モデルでは、変形に関しては多質点優良設計解と同程度の評価ができる一方で、最大層せん断力係数と最大応答加速度に関しては評価値の差が大きい。また、上部構造を2質点として、上部構造の周期や振動モードを考慮することで、多質点モデルに近い評価値が得られる可能性もある。ただし、図5(c)の優良設計解の最大加速度の応答値を見ると、上部構造の1次モードより高次のモードの影響が確認でき、それを評価できる本アルゴリズムのような設計体系が必要である。

## 4. 設計条件が優良設計解に与える影響

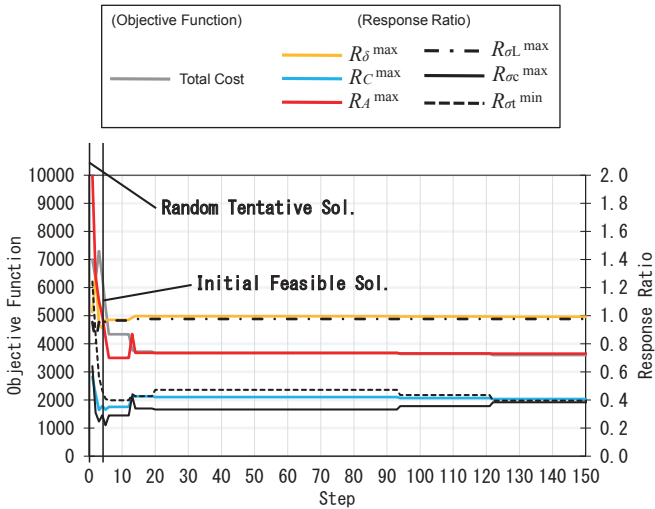
### 4.1 入力地震動の大きさの影響

3章では観測地震波の最大速度  $V_{max}$  を75 kine に基準化して入力

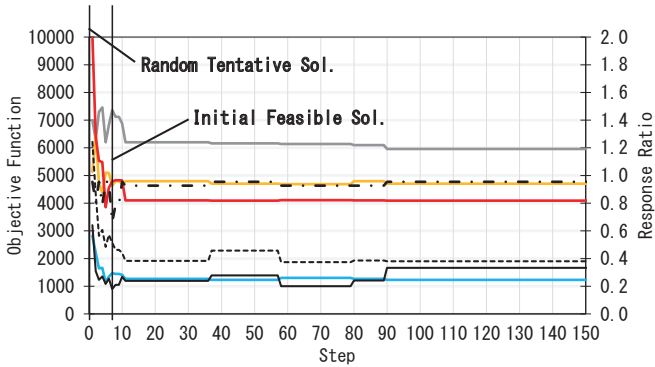
Table 4 Design solutions

		Bearing (NRB or SSB) diameter (mm)				Number of dampers		$T_{eq}$ (s)	$h_{eq}$ (%)	Cost	
		G1	G2	G3	G4	OD					
						X dir.	Y dir.				
Random Tentative Sol. *		SSB 1000	NRB 1000	SSB 900	SSB 1200	4	10	10	4.4	61	7000
(a) Superior Design Solution	Initial	SSB 1400	NRB 1200	SSB 1200	NRB 1000	8	10	0	4.4	59	6360
	Final	NRB 1200	NRB 1000	NRB 1000	NRB 1000	6	6	0	5.3	22	3600
(b) Fixed Device-type Solution	Initial	SSB 1200	NRB 1400	SSB 1400	SSB 1400	10	8	0	4.6	77	7360
	Final	SSB 1000	NRB 1000	SSB 1000	SSB 1000	8	8	0	4.5	70	5960

\* Common to (a) and (b)



(a) Superior design solution



(b) Fixed device-type solution

Fig.4 History of total cost and response ratio

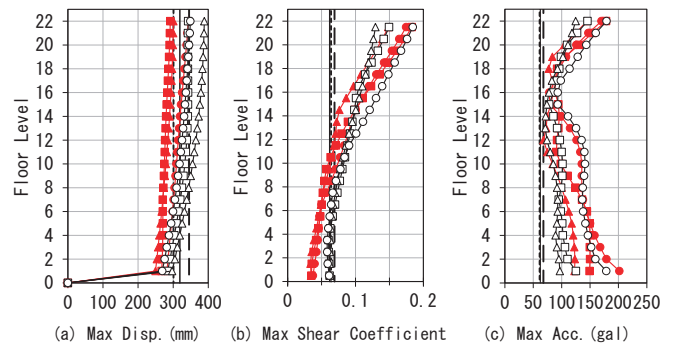
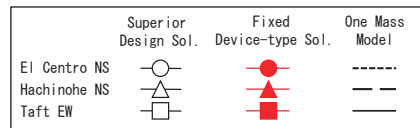


Fig.5 Response comparison in RHA (X dir.)

波として用いた。本節では、 $V_{max}$ を50-80 kineで変化させた場合の優良設計解の変化を調べる。入力波の最大速度と優良設計解の関係、および最大速度と優良設計解のコストと応答比の関係をそれぞれ図6(a1)と図6(a2)に示す。50 kine $\leq V_{max}\leq 60$  kineでは優良設計解に変化しないが、 $V_{max}=60$  kineでLDが増え、60 kine $\leq V_{max}$ でLDに代わりODが使われて $V_{max}$ の増加に伴いODの数が増えた。コストと応答比も増大し、その理由としては、免震層の水平変位 $\delta$ の制約が支配的になることが考えられる。70 kine $\leq V_{max}$ で上部構造の床応答加速度 $A$ の応答比が上昇し、 $V_{max}=85$  kineでは $\delta$ と $A$ の両方の制約を満足する初期許容解が得られなかった。

#### 4.2 免震層の最大水平変位制約の影響

3.2節の優良設計解の導出では、長期面圧 $\sigma_L$ と $\delta$ の制約が支配的となった。本節では $\delta$ に着目して制約値を300 mmから600 mmまで変化させ、それが優良設計解に与える影響を調べる。 $\delta$ と優良設計解の関係、および最大速度と優良設計解のコストと応答比の関係をそ

れぞれ図6(b1)と図6(b2)に示す。支承の設計やコストに変化はないが、350 mm $\leq \delta\leq 600$  mmでは $\delta$ の制約値が小さくなるにつれてLDの数が増えている。 $\delta$ の制約値=300 mmで $\delta$ の制約が支配的なため、LDに代わりODが使われるようになり、前節と同様に全体のコストも上昇する。 $\delta=250$  mmでは $\delta$ の制約を満足する初期許容解を得られなかった。

#### 4.3 弾性限界制約の影響

3.2節の優良設計解は耐風設計されていない。そこで、免震建物の耐風設計関連資料<sup>15,16)</sup>を参考に、式(2)のような免震部材降伏時の免震層のせん断力係数 $C_y$ に対する制約を加えた優良設計解を導出して考察する。

$$C_y \geq C_{yn} \quad (2)$$

ここで、 $C_{yn}$ は $C_y$ の制約値である。 $C_y$ は、免震層の復元力特性における最初の折点におけるベースシア係数であり、SSBとLDを含まない場合はNRBのせん断歪が25%時の値とする。また、 $C_y$ を求める際の復元力特性にODによる減衰力は含まない。 $C_{yn}$ を0.00(式(2)の制約がない場合)から0.06まで変化させた場合の $C_{yn}$ と優良設計解の関係、および最大速度と優良設計解のコストと応答比の関係をそれぞれ図6(c1)と図6(c2)に示す。いずれの $C_{yn}$ 値でもODが用いられ、LDは用いられなかった。0.01 $\leq C_{yn}$ では $C_y$ の増大に伴いNRBに代わってパイリニア型で初期剛性が高いSSBが用いられてコストが上昇した。応答比は $C_{yn}\leq 0.04$ では変化が小さいが、0.05 $\leq C_{yn}$ でODの数が増えて $A$ の応答比が上昇した。 $C_{yn}=0.07$ では、 $\delta$ と $A$ の制約を満足する初期許容解は得られなかった。

#### 5. まとめ

免震構造物の免震層の最大応答変位や上部構造の床応答加速度などの制約を満足して、免震部材の総コストを最小化した優良設計解を導出するアルゴリズムを提案した。免震部材について、支承とダンパーそれぞれの種類や仕様を設計変数として考慮した。多質点モデルの時刻歴応答解析結果を用いて制約条件を満足させることで、上部構造の高次モードの影響を直接評価した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 21階建鉄筋コンクリート構造純ラーメン基礎免震建物を対象として、提案アルゴリズムの有用性を確認した。優良設計解は局所探索(LS)によって得られた解のため大域的最適解ではないが、免震部材の種類を固定した単純な探索アルゴリズムを用いた設計解よりも経済的で設計制約条件を満足する優良設計解が得られた。
- 2) 1質点に縮約したモデルの時刻歴応答解析結果との比較により、高次モードが優良設計解に及ぼす影響を評価した。免震層の応答変位は多質点モデルと1質点縮約モデルで20%以下の差である一方、多質点モデルにおける上層の最大せん断力係数及び最大床応答加速度は1質点縮約モデルの2倍以上になった。多質点モデルを用いたことで、高次モードの影響を考慮した優良設計解が得られていることを確認した。
- 3) 入力地震動の大きさ、免震層の応答水平変位、耐風設計上必要な免震層の降伏時耐力に着目して、それらの制約条件の設定が優良設計解に及ぼす影響を確認した。入力地震動が大きい場合

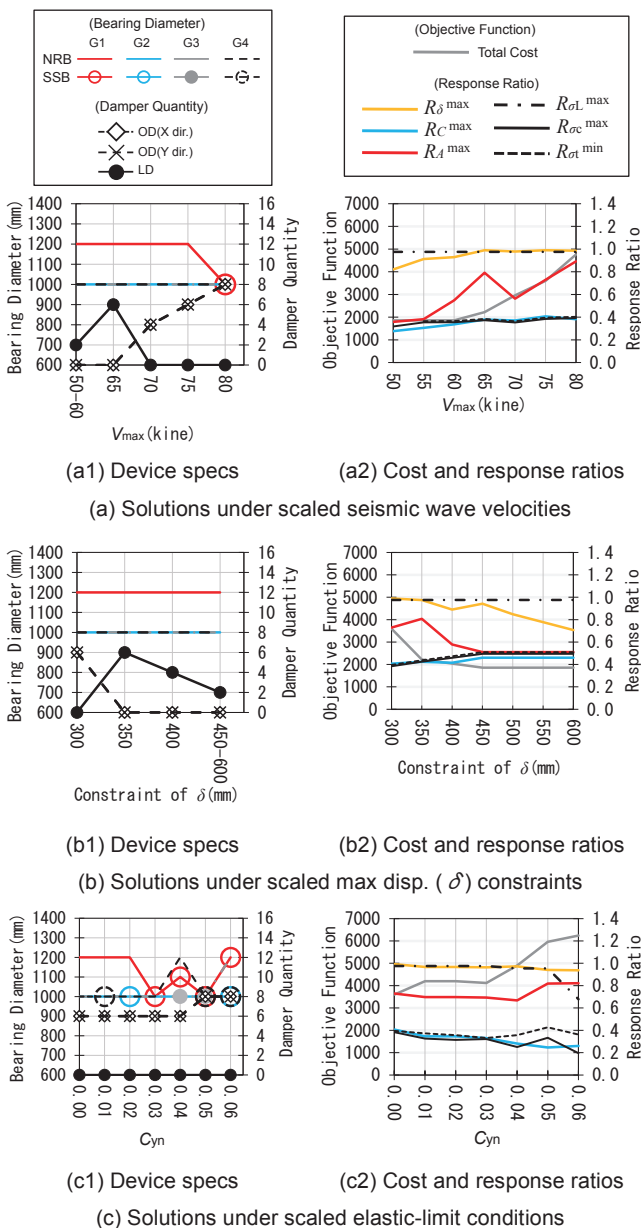


Fig.6 Superior solutions under various design conditions

および免震層の応答水平変位の制約値が小さい場合は、上層の応答を抑えるために比較的単価の高いオイルダンパーが選択され、コストが高くなった。耐風設計上必要な免震層の降伏時耐力が大きい場合に弾性すべり支承が多用される傾向が確認された。異なる設計条件に応じた優良設計解を導出することで、提案手法は設計上支配的な条件を把握する上で有用であることを確認した。

## 謝辞

本研究は、科学研究費・基盤研究(C) No. 21K04337 (研究代表者：高木次郎)の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Funahashi, M. and Tamori, S. : An optimal arrangement method of base-isolated device by using a genetic algorithm, An examination of evaluation item in case of oil dampers, Journal of Structural Engineering, Vol.48B, pp.561-568, 2002.3 (in Japanese)  
船橋昌代, 田守伸一郎 : 遺伝的アルゴリズムによる免震装置の最適配置計画, オイルダンパーを用いた場合の評価項目についての検討, 構造工学論文集, Vol. 48B, pp. 561-568, 2002. 3
- 2) Tamori, S. and Hayashi, Z. : An optimal arrangement method of base-isolated device by using a genetic algorithm, An examination when the cost of base-isolated device is considered, Journal of Structural Engineering, Vol.49B, pp.111-121, 2003.3 (in Japanese)  
田守伸一郎, 林善太郎 : 遺伝的アルゴリズムによる免震装置の最適配置計画, 免震装置のコストを考慮した場合の検討, 構造工学論文集, Vol. 49B, pp. 111-121, 2003. 3
- 3) Tamori, S., Matsutani, Y. and Hayashi, Z. : An optimal selection method for base-isolation devices using a genetic algorithm in multi-mass system, Part 1 analysis for base isolation model, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 588, pp.63-70, 2005.2 (in Japanese)  
田守伸一郎, 松谷有祐, 林善太郎 : 多質点系構造物モデルにおける遺伝的アルゴリズムによる免震装置の最適選択計画, その 1 基礎免震の場合, 日本建築学会構造系論文集, 第 588 号, pp. 63-70, 2005. 2
- 4) Tamori, S., Matsutani, Y. and Hirayanagi, M. : Optimal design of base isolated device by heuristic, Study by genetic algorithm, a simulated annealing and a taboo search and their combined method, Journal of Structural Engineering, Vol.54B, pp.599-607, 2008.3 (in Japanese)  
田守伸一郎, 松谷有祐, 平柳美弥子 : ヒューリスティクスによる免震装置の最適配置計画, 遺伝的アルゴリズム, 焼きなまし法, タブー探索による配置計画の検討, 構造工学論文集, Vol. 54B, pp. 599-607, 2008. 3
- 5) Murota, N., Yamasaki, H., Yasue, M., Tamori, S., Hamazaki, H., Takeuchi, S., Suzuki, S. : Development of a computer program for layout-planning of seismic isolators using genetic algorithm, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 15, No. 29, pp.71-76, 2009.2 (in Japanese)  
室田伸夫, 山崎久雄, 安江昌晃, 田守伸一郎, 濱崎宏典, 竹内貞光, 鈴木重信 : 遺伝的アルゴリズムを応用した免震部材配置計画支援プログラムの開発, 日本建築学会技術報告集, 第 15 巻, 第 29 号, pp. 71-76, 2009. 2
- 6) Hirayanagi, M., Otsuki, D. and Tamori, S. : An optimal design of base-isolated structures by using a taboo search, A study on three-dimension steel frames and base-isolated structure using time history response analysis, Journal of Structural Engineering, Vol.55B, pp.485-495, 2009.3 (in Japanese)  
平柳美弥子, 大槻大佑, 田守伸一郎, : タブー探索による免震構造物の最適設計, 基礎免震・鋼構造三次元立体骨組モデルでの時刻歴応答解析を用いた検討, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp. 485-495, 2009. 3
- 7) Yasue, M. and Tamori, S. : Optimal design of base isolated device by temperature parallel simulated annealing, Comparison with simulated annealing, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 74, No. 643, pp.1595-1602, 2009.9 (in Japanese)  
安江昌晃, 田守伸一郎 : 温度並列焼きなまし法による免震装置の最適配置計画, 従来の焼きなまし法との比較, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 643 号, pp. 1595-1602, 2009. 9
- 8) Yasue, M., Kobayashi, K. and Tamori, S. : Multi-objective optimal design of base isolated device in base-isolated structure, Method by multi-objective genetic algorithm, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 75, No. 655, pp.1645-1652, 2010.9 (in Japanese)  
安江昌晃, 小林浩一, 田守伸一郎 : 免震構造物における免震装置の多目的最適配置, 多目的遺伝的アルゴリズムによる解法, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 655 号, pp. 1645-1652, 2010. 9
- 9) Kobayashi, K., Tsuchiya, S. and Tamori, S. : Multi-objective optimal design of base-isolated reinforced concrete building, Study by a pseudo three-dimensional analytical model, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 77, No. 681, pp.1645-1654, 2012.11 (in Japanese)  
小林浩一, 土屋駿介, 田守伸一郎 : 多目的遺伝的アルゴリズムによる RC 造免震建物の最適設計, 疑似立体モデルによる検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 681 号, pp. 1645-1654, 2012. 11
- 10) Tsuchiya, S. and Tamori, S. : Multi-objective optimal design of base-isolated reinforced concrete building, Study on multi-objective distributed cooperation model, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 79, No. 697, pp.375-384, 2014.3 (in Japanese)  
土屋駿介, 田守伸一郎 : 遺伝的アルゴリズムによる RC 造免震建物の多目的最適設計, 多目的分散協力モデルを用いた検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 697 号, pp. 375-384, 2014. 3
- 11) Ejima, D. and Tamori, S. : Multi-objective optimal design of base-isolated reinforced concrete building using grouping of the member, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 22, No. 50, pp.29-34, 2016.2 (in Japanese)  
江島大貴, 田守伸一郎 : 部材のグループ化を用いた RC 造免震建物の多目的最適設計, 日本建築学会技術報告集, 第 22 巻, 第 50 号, pp. 29-34, 2016. 2
- 12) Watada, R., Uchiyama, M., Kinoshita, T., Fujii, E., Iino, N. and Maeda, S. : (Optimal arrangement method of base-isolated device by heuristic), Proceedings of the 41th Symposium on Computer Technology of Information, Systems and Applications, AIJ, pp.188-191, 2018 (in Japanese)  
和多田遼, 内山元希, 木下拓也, 藤井英二, 飯野夏輝, 前田周作 : 発見的最適化手法を用いた免震デバイス配置決定法, 日本建築学会・情報システム技術委員会第 41 回情報・システム・利用・技術シンポジウム 2018, pp. 188-191, 2018
- 13) Ikago, K. and Uetani, K. : Optimum design of base-isolated structures with one-degree-of-freedom approximation, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 586, pp.87-94, 2004.12 (in Japanese)  
五十子幸樹, 上谷宏二 : 一自由度近似を用いた免震構造物の最適設計, 日本建築学会構造系論文集, 第 586 号, pp. 87-94, 2004. 12
- 14) Ikago, K. and Uetani, K. : Inequalities on optimum design of base-isolated structures, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 594, pp.85-92, 2005.8 (in Japanese)  
五十子幸樹, 上谷宏二 : 免震構造物の最適設計解に関する不等式, 日本建築学会構造系論文集, 第 594 号, pp. 85-92, 2005. 8
- 15) Architectural Institute of Japan : Recommendation for the Design of Seismically Isolated Buildings, 2013.10 (in Japanese)  
日本建築学会 : 免震構造設計指針 第 4 版, 2013. 10
- 16) Kanto Chapter, Architectural Institute of Japan : (Design of base-isolated structure and seismic control structure, Easy-to-learn Structural design), 2018.1 (in Japanese)  
日本建築学会関東支部 : 免震・制振構造の設計 学びやすい構造設計, 2018. 1

# COMBINATORIAL OPTIMIZATION OF MULTIPLE-TYPE DEVICES IN SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS SATISFYING CONSTRAINTS IN RESPONSE HISTORY ANALYSES

*Daichi WATANABE*<sup>\*1</sup>, *Jiro TAKAGI*<sup>\*2</sup>, *Makoto OHSAKI*<sup>\*3</sup>  
and *Tomohiro MIKAMI*<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> Former Graduate Student, Tokyo Metropolitan Univ., M.Eng.

<sup>\*2</sup> Assoc. Prof., Graduate School of Urban Env. Sciences, Tokyo Metropolitan Univ., Ph.D.

<sup>\*3</sup> Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr.Eng.

<sup>\*4</sup> Structural Eng. Dept., Obayashi Corporation, Dr.Eng.

A combinational optimization algorithm for the design of base-isolation devices (bearings and dampers) is proposed. Among multiple-type options in the devices, rational combinations with bearing and dampers are designed by applying the local search approach in the algorithm. The bearing sizes and numbers of dampers in addition to the device-types are treated as discrete design variables. For given structural conditions of superstructures, the total cost of the devices is minimized under the multiple constraints such as the maximum displacements in the isolation layers and floor accelerations in the superstructures. The responses under large earthquakes are simulated with multiple degree of freedom (MDOF) models of the superstructures in the response history analyses (RHA). The multiple Level 3 earthquake ground motions, which are recorded ground motions scaled and normalized as the maximum velocity of 75 kine, are used in RHA. The effects by higher modes are directly evaluated in RHA. The findings are as follows:

- (1) A base isolation building with 21-story RC moment-frame superstructure was examined. The natural rubber bearings (NRB) and sliding support with rubber-pad (SSB) are the design options for the bearing types. Also, the lead dampers (LD) and oil dampers (OD) are the options for the dampers. The effectiveness of using the proposed algorithm was confirmed by comparing the results with those by the alternative algorithm for fixed-device design. The obtained design solutions are defined as superior solutions, in which the constraints of maximum displacement in the isolation layer and bearing pressure under the sustained load are governing in the examined structure. The superior solutions are not globally optimized solutions but are rationally designed independent of the engineer's skills.
- (2) The effects in the responses induced by higher vibration modes were confirmed by a comparison of the responses with the models with rigid superstructure. While the difference between the MDOF and rigid models is less than 20 % in the responses of the maximum displacements at the isolation layers, the floor accelerations and story shear coefficients in higher stories are significantly greater (more than twice) in the MDOF models than rigid models. The proposed algorithm takes into account the higher-mode effect, which can significantly influence the floor accelerations and story shear coefficients.
- (3) The influences in the superior solutions by the design constraints regarding the displacement in the isolation layer, floor accelerations and elastic base-shear coefficient were investigated. The ODs, whose cost is relatively high, are more used for desisting the floor accelerations at higher stories under the greater seismic ground motions and smaller displacement constraints at the isolation layer. In contrast, SSBs are more used rather than LDs for increasing the elastic lateral strength of the isolation layers, which is required for the design against wind loads. The usefulness of the proposed algorithm was confirmed through this study, identifying the governing design constraints for various superior solutions.

(2021年4月10日原稿受理, 2021年8月10日採用決定)