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2 中間層免震の場合

AN OPTIMAL SELECTION METHOD FOR BASE-ISOLATION DEVICES USING A GENETIC ALGORITHM IN MULTI-MASS SYSTEM

—Part 2 Analysis for mid-story isolation model—

田守 伸一郎*, 林 善太郎**, 松谷 有祐***

Shin'ichiro TAMORI, Zentaro HAYASHI and Yusuke MATSUTANI

This study proposes an optimal selection method for base-isolation devices in a mid-story isolation structure using a genetic algorithm. Parameters employed in the genetic algorithm's evaluation functions are: A) eccentricity ratio, B) vertical load on each isolator, C) temporary load on each isolator, D) natural period, E) yield force coefficient of base isolation devices, F) the maximum response displacement of isolation devices, G) storey shear force coefficient and H) base isolation displacement. We employed three groups of parameters: (1). A-B-C-D-E, (2). A-B-C-E-F, (3). A-B-C-G-H. We did time history response analyses with buildings designed by the proposed method. As the result, the response value was suppressed in case of (3). Therefore, the proposed method is effective for selection isolation devices for mid-story isolation buildings.

Keywords : Genetic algorithm, Mid-story isolation, Optimal design, Multi mass system

遺伝的アルゴリズム, 中間層免震, 最適設計, 多質点系モデル

1 はじめに

免震構造物の多くは、基礎に免震層を設けた基礎免震構造である。しかし、敷地に制限がある場合や既存の建物を耐震改修する場合、また建物の形状により、建物中間層に免震層を設ける中間層免震構造を採用することがある。中間層免震構造の設計に関しては、免震層の挿入位置、免震層の降伏せん断力係数、最大塑性率応答など免震層のパラメータが応答に与える影響についての研究¹⁾²⁾や、上部・下部構造の質量比が0.375以上で、免震層の降伏せん断力係数が0.03~0.05の範囲であるとき応答が比較的安定する傾向にあるという報告³⁾がある。しかし、基本的な設計方法は確立しておらず、上部構造の応答を小さくするような免震装置の配置にすると下部構造の応答が大きくなるような場合がある。そのため上部・下部構造の応答をともに考慮し、免震装置の配置をおこなう必要がある。

そこで本論その2では、中間層免震構造物において遺伝的アルゴリズム⁴⁾(以下、GAと表記)を用いて、上部・下部構造の応答を低減し、設計条件を満たすような免震装置の配置を得ることを目的としている。その1⁵⁾では、上部構造を線形多質点系モデルとしたが、中間層免震構造の特に下部構造においては、基礎免震構造の場合に比べて水平変位が大きくなり、部材のひび割れなどにより剛性が低下するような場合も考えられるため、免震層を挟んだ上部・下部構造において非線形性を考慮した多質点系モデルとした。

2 GAの解析手法

2.1 GAの解析手法の概要

本論文においてGAの解析は、以下のように進めた。

- i) 免震装置の配置を2進数の遺伝子の配列に置き換える。
- ii) この遺伝子を持った個体を1世代に複数生成する。これにより複数の検索点を持つことができる。
- iii) 複数の個体から親の選択、交叉、突然変異を繰り返すことにより、適応度の高い個体を求める。

これらの詳細は文献5)と同様である。また、適応度はその個体が次の世代に残るかの判断基準となる値であり、それを規定するための評価値をどのように設定するかが重要となる。この部分の詳細は3章で説明する。

2.2 GAの解析過程における地震応答値の計算手法

地震応答値の計算においては、対象となる地震動の応答スペクトルを用いたモーダルアナリシスと等価線形化法を用いた。その際の上部・下部構造の等価剛性、等価減衰定数は以下のように評価した。

各層の等価剛性は、上部・下部構造のそれぞれのPush Over解析による復元力特性をTri-Linear型に近似したときの割線剛性とした。

等価減衰定数は以下の式(1)⁶⁾により求めた。

$$h_{eq} = 0.2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) + h_0 \quad (1)$$

* 信州大学工学部 助教授・工博

** ユニオンシステム(株)

*** 信州大学大学院 大学院生

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.
Union System Inc.

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Shinshu Univ.

ここで、 h_{eq} ：等価減衰定数、 μ ：塑性率、 h_0 ：初期減衰定数とする。 h_0 は実施設計に合わせて、建物ごとに値を設定した。限界耐力計算法においては塑性率を定義する変位を第2折れ曲がり点の変位として減衰定数を評価する方法が示されているが、この方法を適用したところ、下部構造の応答値が時刻歴応答解析の結果に比べかなり過大になったため、第1折れ曲がり点の変位から塑性率を求めた。

免震層の等価剛性と等価減衰定数は文献 5) と同様に、免震層の最大変位を δ_{max} とした場合に、 $0.65\delta_{max}$ で定常振動するものと仮定し、そのときの等価剛性と等価減衰定数を等価線形化手法により求めた。

また、設計対象とする応答スペクトルは 1940 El Centro NS (以下、El Centro 波と表記)、1952 Taft EW (以下、Taft 波と表記)、1968 Hachinohe NS (以下、Hachinohe 波と表記) の 3 波の応答スペクトルと告示の応答スペクトルの最大値を包絡したものをを用いた。

3 GA における個体の評価方法

3.1 概要

設定した評価項目は以下の 8 つである。

- 1) 免震層の偏心率
- 2) 個々の免震装置が負担する長期鉛直荷重 (以下、長期軸力と表記)
- 3) 地震時に個々の免震装置に作用する地震時の変動軸力を考慮した短期軸力 (以下、短期軸力と表記)
- 4) 免震層の固有周期
- 5) 免震層の降伏せん断力係数
- 6) 上部・下部構造の層せん断力係数
- 7) 限界変形が最も小さい免震装置の最大応答水平変位
- 8) 免震層の最大応答水平変位

これらにより、GA における個体の評価方法を以下のように 3 つ設定した。

1)、2)、3)は必須項目とし、それらに加え、評価方法 1 は 4)、5)を、評価方法 2 は 5)、8)を、評価方法 3 は 6)、7)を評価項目とする評価方法である。評価方法 1、2 は免震層の固有周期と降伏せん断力係数の関係から変位応答を予測できる⁷⁾ことを利用している。解析にオイルダンパーを用いない場合は評価方法 1、用いる場合は評価方法 2 により個体を評価する。これは、免震層の降伏せん断力係数と最大水平変位を評価項目とすることで免震層の性能を満足するような配置が得られるという結論が先の研究⁸⁾で得られているからである。したがって、評価方法 1、2 は上部・下部構造の応答値を評価していないが、評価方法 3 は、文献 5) の評価方法 3 と同様で、上部・下部構造の応答値を評価する方法となる。

3.2 評価値の設定方法

評価項目のうち、3.1 概要に示した 1)~7)の項目の評価値は、本論その 1 と同様の設定方法で設定した。8)の免震層の最大水平変位に対する評価値は以下のように設定した。

免震層の最大水平変位の評価値の設定方法⁸⁾

免震層の最大変位が、あらかじめ設定した値に近いほど評価値が高くなるように最大水平変位に対する評価値 P_d を式(2)、(3)、(4)のように定めた。評価は X 方向、 Y 方向でおこなう。

$$d_{max,l} < d_c \text{ のとき } P_{d,l} = d_{max,l} / d_c \quad (2)$$

$$d_{max,l} \geq d_c \text{ のとき } P_{d,l} = d_c / d_{max,l} \quad (3)$$

$$P_d = P_{d,X} \times P_{d,Y} \quad (4)$$

ここで、 d_c ：設定した最大変位、 $d_{max,l}$ ：求められた l 方向の最大応答変位、 $P_{d,l}$ ： l 方向の最大応答変位に対する評価値、 l は方向を示す添字で、以下 $l=X$ または Y とする。

3.3 適応度の計算

適応度は、上記で求めた評価値を用いて、式(5)、(6)のように計算した。

[評価方法 1]

本論その 1 の評価方法 1 に短期軸力の評価項目を加え、免震層の偏心率、個々の免震装置が負担する長期軸力、短期軸力、免震構造物の固有周期、免震層の降伏せん断力係数の 5 つを評価項目とする評価方法である。

$$\begin{aligned} \text{適応度} = & \prod_{i=1}^3 (\text{免震層の偏心率に対する評価値} : P_{Re}(i)) \\ & \times \prod_{m=1}^n (\text{長期軸力に対する評価値} : P_{NL}(m)) \\ & \times \prod_{m=1}^n (\text{短期軸力に対する評価値} : P_{Ns}(m)) \\ & \times (\text{免震層の降伏せん断力係数に対する評価値} : P_A) \\ & \times (\text{固有周期に対する評価値} : P_T) \end{aligned} \quad (5)$$

[評価方法 2]

免震層の偏心率、個々の免震装置が負担する長期軸力、短期軸力、免震層の降伏せん断力係数、免震層の最大応答水平変位の 5 つを評価項目とする評価方法である。

$$\begin{aligned} \text{適応度} = & \prod_{i=1}^3 (\text{免震層の偏心率に対する評価値} : P_{Re}(i)) \\ & \times \prod_{m=1}^n (\text{長期軸力に対する評価値} : P_{NL}(m)) \\ & \times \prod_{m=1}^n (\text{短期軸力に対する評価値} : P_{Ns}(m)) \\ & \times (\text{免震層の降伏せん断力係数に対する評価値} : P_A) \\ & \times (\text{免震層の最大応答水平変位に対する評価値} : P_d) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 i ：水平変位レベル、 n ：積層ゴム支承の設置個数、 m ：設置番号、 $\prod_{k=1}^n f(k)$ ： $f(1)$ から $f(n)$ までのすべての積とする。

[評価方法 3]

本論その 1、評価方法 3 と同様に、免震層の偏心率、個々の免震装置が負担する長期軸力、地震時に個々の免震装置に作用する地震時の変動軸力を考慮した短期軸力、上部・下部構造の層せん断力係数、免震装置の最大応答水平変位の 5 つを評価項目とする評価方法である。

4 最適配置計画

実際に設計された 4 棟の中間層免震構造物について、免震装置を設置可能箇所にどのように配置すれば適応度の高い配置が得られるかを、GA を用いて解析した。免震装置は天然ゴム系積層ゴム支承 (以下、RB と表記)、高減衰積層ゴム支承 (以下、HRB と表記)、鉛プラグ入積層ゴム支承 (以下、LRB と表記) から、計 16 種類を選択し、使用した。また、実施例でオイルダンパーを用いている場合 (対象建物 2) については、実施例と同様にオイルダンパーを使用可能とした。評価方法は、対象建物 1、3、4 では評価方法 1、3、対象建物 2 ではオイルダンパーを用いるため、評価方法 2、3 を用いた。上記の手法による GA により得られた配置での性能を検証す

るため時刻歴応答解析⁹⁾をおこなった。入力地震動は、最大速度を50cm/sで基準化したEl Centro波、Taft波、Hachinohe波の3波と、乱数位相の告示波(以下、告示波(乱数)と表記)、1995 JMA KOBE NS位相の告示波(以下、告示波(JMA KOBE)と表記)の計5波とした。

4.1 対象建物1

4.1.1 対象建物の概要

地上14階建RC造で、免震層は4階に設けられている。免震層固定時の上部構造物の一次固有周期は、X方向が0.621秒、Y方向が0.742秒である。実施例で使用している免震装置は、LRB18基である。GAの解析にはRB、LRBを8種類ずつ使用可能とした。免震装置の設置場所と、各免震装置が負担する長期軸力を図1に、使用した免震装置の概要を表1に示す。また、モーダルアナリシスにより応答値を求める際の上部・下部構造の初期減衰定数を、実施設計と合わせて0.03とした。

図1 対象建物1の免震装置の設置場所と負担する長期軸力

表1 対象建物1で使用した装置概要

免震装置	RB	LRB
せん断弾性係数[N/mm]	0.392	0.392
ゴム外径[mm]	800~1200	800~1200
2次形状係数	4.0~6.0	4.0~6.0
ゴム層厚[mm]	200	200

4.1.2 解析結果

GAによる解析で得られた結果を表2に、得られた免震装置の配置を表3に示す。表2中の最大変位は時刻歴応答解析の結果であり、免震層変位がもっとも大きくなった、入力地震動が告示波(JMA KOBE)の場合の値を示している。これは、以降の対象建物2、3、4においても同様で、表6、9、12の最大変位は、入力地震動が告示波(JMA KOBE)の場合の値である。GAの解析による結果では、どの評価方法を用いた場合においても偏心率は1%以内となった。GAによる配置を用いると、実施例と比べ固有周期では、評価方法1で86%程度、評価方法3で105%程度、減衰定数では、評価方法1で93%程度、評価方法3で75%程度となった。

時刻歴応答解析の結果を図2に示す。時刻歴応答解析の結果は、実地震動において評価方法1と、評価方法3で最も違いが大きくなった場合と、免震層の水平変位が最大となった場合について示した。

これは、以降の対象建物2、3、4の場合も同様である。時刻歴応答解析の結果は、最大応答加速度は評価方法3が最も小さくなった。X方向の応答加速度を比べると、評価方法3は、評価方法1に対して平均して68%程度、実施例に対しては84%程度となった。評価方法1は実施例よりも応答加速度が127%程度と大きくなった。免震層の最大応答水平変位が最も大きくなったのは、評価方法3で得られた配置のY方向に、告示波(JMA KOBE)を入力した場合で、34.8cm(装置のせん断ひずみで174%)となり、限界変形が最小である免震装置の安定変形に対応するせん断ひずみ、218%以内に収まった。したがって、この場合は上部・下部構造の応答値を評価すること(評価方法3)により、中間層免震構造物において、上部・下部構造の応答を抑えるような免震装置の配置が得られたことになる。

表2 対象建物1のGA解析結果

	せん断歪	実施例		評価方法1		評価方法3	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
偏心率(%)	10%	0.40	0.70	0.31	0.41	0.57	0.41
	100%	0.40	0.70	0.26	0.02	0.01	0.40
	200%	0.50	0.70	0.50	0.14	0.19	0.68
1次固有周期(s)	10%	1.57	1.57	1.54	1.57	1.87	1.89
	100%	3.31	3.33	2.98	2.99	3.49	3.50
	200%	3.96	3.96	3.41	3.42	3.91	3.92
減衰定数(%)	10%	21.6		21.6		21.5	
	100%	24.5		23.3		19.7	
	200%	18.2		17.0		13.6	
降伏せん断力係数		0.04		0.05		0.03	
最大変位(cm) [※]		27.9	28.3	25.7	26.3	33.3	34.8
RB設置数(基)		0		2		6	
LRB設置数(基)		18		16		12	

※) 表中の最大変位は、入力地震動を告示波(JMA KOBE)として時刻歴応答解析をおこなった結果の値である。

表3 対象建物1のGA解析結果の免震装置の配置

アイソレータ設置番号		実施例	評価方法1	評価方法3
アイソレータ設置番号	1	LRB900	LRB950	LRB900
	2	LRB900	LRB950	RB850
	3	LRB800	LRB1000	LRB900
	4	LRB800	RB850	LRB850
	5	LRB800	LRB900	RB800
	6	LRB1000	LRB1200	LRB1100
	7	LRB1000	LRB1200	RB1000
	8	LRB900	LRB1000	RB900
	9	LRB900	LRB1000	LRB950
	10	LRB900	LRB1100	LRB900
	11	LRB800	RB950	RB850
	12	LRB1100	LRB1200	LRB1200
	13	LRB1000	LRB1200	LRB1000
	14	LRB900	LRB1000	LRB950
	15	LRB900	LRB1200	LRB950
	16	LRB1000	LRB950	RB900
	17	LRB900	LRB1100	LRB950
	18	LRB1000	LRB1100	LRB1100

4.2 対象建物2

4.2.1 対象建物の概要

地上8階、地下2階建のRC造で、免震層は3階部分に設けられている。免震層固定時の上部構造物の一次固有周期は、X方向が0.622秒、Y方向が0.664秒である。実施例で使用している免震装置は、RB12基、LRB20基、オイルダンパーがX、Y方向に各4基である。解析にはRB、LRBを8種類ずつと、オイルダンパーを使用可能とした。免震装置の設置場所、各免震装置が負担する長期軸力を図3に、使用した免震装置の概要を表4、5に示す。オイルダンパーの設置可能個所は建物のねじれを防ぐために、平面の隅に設置可能とした。また、モーダルアナリシスにより応答値を求める際の上部・下部構造の初期減衰定数を、実施設計と合わせて0.03とした。

図2 対象建物1の時刻歴応答解析結果

図3 対象建物2の免震装置の設置場所と負担する長期軸力

表4 対象建物2で使った装置概要(RB, LRB)

免震装置	RB	LRB
せん断弾性係数[N/mm]	0.392	0.392
ゴム外径[mm]	700~1000	700~1000
2次形状係数	3.5~5.0	3.5~5.0
ゴム層厚[mm]	200	200

表5 対象建物2で使った装置概要(オイルダンパー)

免震装置	オイルダンパー
1次減衰係数[kN・sec/m]	1225
2次減衰係数[kN・sec/m]	0
最大減衰[kN]	1764

4.2.2 解析結果

GAによる解析で得られた結果を表6に、得られた免震装置の配置を表7に示す。GAによる解析結果では、どの評価方法を用いた場合においても偏心率は2%以内となった。GAによる配置を用いると、実施例と比べ固有周期では、評価方法2で96%程度、評価方法3で107%程度となった。減衰定数では、評価方法2で35%程度、評価方法3、X方向で44%程度、Y方向で23%程度となった。

時刻歴応答解析の結果を図4に示す。この場合は、加速度応答は評価方法3で最も小さくなり、Y方向で評価方法2と比べると、平均して83%程度、実施例と比べると92%程度となった。評価方法2は、Y方向で実施例に比べて112%程度と大きくなった。最大応答水平変位が最も大きくなったのは、評価方法3、Y方向に告示波(JMA KOBE)を入力した場合で、35.6cm(装置のせん断ひずみで178%)となり、限界変形が最小の免震装置の安定変形である200%以内に収まった。

したがって、オイルダンパーを用いる場合においても評価方法3により、中間層免震構造物において、最適な配置が得られたと考えられる。

4.3 対象建物3

4.3.1 対象建物の概要

地上10階、地下1階、塔屋1階のRC造で、免震層は2階床下に設けられている。免震層固定時の固有周期は、X方向1.124秒、Y方向1.022秒である。実施例ではLRBを28基使用している。解析にはRBとLRBから8種類ずつを使用可能とした。免震装置の設置場所と各免震装置が負担する長期軸力を図5に、使用した免震装置の概要を表8に示す。また、モーダルアナリシスにより応答値を求める際の上部・下部構造の初期減衰定数を、実施設計と合わせて0.02とした。

4.3.2 解析結果

GA による解析で得られた結果を表 9 に、得られた免震装置の配置を表 10 に示す。GA による解析結果では、どの評価方法を用いた場合においても偏心率は 1%未満と小さくなった。GA による配置を用いると、実施例と比べて固有周期では、評価方法 1 で 95%程度、評価方法 3 で 118%程度となった。減衰定数では、評価方法 1 で 112%、評価方法 3 で 69%程度となった。

時刻歴応答解析の結果を図 6 に示す。この場合、評価方法 3 で上部・下部構造における応答加速度は最も小さくなっている。応答加速度を評価方法 1 と比べると、評価方法 3 では平均して 60%程度となった。免震層の最大応答水平変位が最も大きくなったのは、評価方法 3 で得られた配置の Y 方向に、告示波 (JMA KOBE) を入力したときの 28.7cm (せん断ひずみで 144%) で、最小径の免震装置の安定変形 43.6cm (せん断ひずみで 218%) 以内におさまった。

この建物は免震層固定時の固有周期 (X 方向で 1.124 秒) に比べて、免震時の固有周期 (実施例、せん断ひずみ 100%、X 方向で 3.22 秒) が 2.9 倍程度である。このように上部構造の剛性が低い建物の場合は、評価方法 3 を用いることで応答値を抑えるような免震装置の配置が得られると考えられる。

表 9 対象建物 3 の GA 解析結果

	せん断歪	実施例		評価方法1		評価方法3	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
偏心率 (%)	10%	0.65	0.65	0.23	0.38	0.43	0.22
	100%	0.68	0.72	0.18	0.10	0.08	0.26
	200%	0.69	0.74	0.15	0.33	0.06	0.27
1次固有周期 (s)	10%	1.76	1.81	1.65	1.70	2.26	2.30
	100%	3.22	3.25	3.06	3.09	3.82	3.84
	200%	3.65	3.67	3.52	3.54	4.15	4.16
減衰定数 (%)	10%	26.4		21.9		20.1	
	100%	21.1		23.6		14.5	
	200%	14.6		17.3		9.3	
降伏せん断力係数		0.03		0.05		0.02	
最大変位 (cm) [※]		19.4	19.3	15.4	15.6	28.4	28.7
RB設置数 (基)		0		2		14	
LRB設置数 (基)		28		26		14	

※) 表中の最大変位は、入力地震動を告示波 (JMA KOBE) として時刻歴応答解析をおこなった結果の値である。

表 10 対象建物 3 の GA 解析結果の免震装置の配置

アイソレーター設置番号		実施例	評価方法1	評価方法3
1		LRB800	LRB900	LRB800
2		LRB900	LRB950	LRB900
3		LRB900	LRB900	LRB950
4		LRB800	LRB850	LRB850
5		LRB800	LRB950	LRB850
6		LRB900	LRB950	LRB950
7		LRB900	LRB1100	LRB900
8		LRB800	LRB850	LRB800
9		LRB900	LRB1200	LRB950
10		LRB1000	LRB1200	LRB1000
11		LRB1000	LRB1000	LRB1000
12		LRB900	LRB1100	RB1000
13		LRB900	LRB900	LRB850
14		LRB900	RB900	RB950
15		LRB900	LRB1100	RB850
16		LRB900	LRB900	RB800
17		LRB900	RB850	RB850
18		LRB900	LRB1100	RB900
19		LRB900	LRB950	RB900
20		LRB1100	LRB1200	LRB1000
21		LRB1000	LRB1100	RB1000
22		LRB1000	LRB1000	LRB950
23		LRB1000	LRB1100	RB1000
24		LRB1100	LRB1300	RB1100
25		LRB1100	LRB1100	RB1100
26		LRB1000	LRB1300	RB1000
27		LRB1000	LRB1200	RB1100
28		LRB1100	LRB1200	RB1100

図 6 対象建物 3 の時刻歴応答解析結果

4.4 対象建物 4

4.4.1 対象建物の概要

地上 5 階建て RC 造で、免震層は 2 階部分に設けられている。免震層固定時の上部構造の一次固有周期は、X 方向が 0.368 秒、Y 方向が 0.270 秒と、比較的短い建物である。実施例で使用している免震装置は、HRB26 基、すべり支承（以下、SL と表記）2 基である。解析には RB、HRB を 8 種類ずつ使用可能とした。免震装置の設置場所、各免震装置が負担する長期軸力を図 7 に、使用した免震装置の概要を表 11 に示す。また、モーダルアナリシスにより応答値を求める際の上部・下部構造の初期減衰定数を、実施設計と合わせて 0.03 とした。

図 7 対象建物 4 の免震装置の設置場所と負担する長期軸力

表 11 対象建物 4 で使用した装置概要

免震装置	RB	HRB
せん断弾性係数[N/mm]	0.392	0.66
ゴム外径[mm]	600~1000	600~1000
2次形状係数	3.0~5.0	3.0~5.0
ゴム層厚[mm]	200	200

4.4.2 解析結果

GA による解析で得られた結果を表 12 に、得られた免震装置の配置を表 13 に示す。GA による解析結果では、どの評価方法を用いても偏心率はすべて 1%以内となった。GA による配置を用いると、実施例と比べて固有周期では、評価方法 1 で 109%程度、評価方法 3 で 117%程度となった。減衰定数では評価方法 1 で 92%程度、評価方法 3 で 81%程度となった。

時刻歴応答解析の結果を図 8 に示す。この場合は、応答加速度は評価方法 3 で最も小さくなり、X 方向で評価方法 1 と比べると、平均して 79%程度となった。評価方法 1 は実施例と同程度となった。免震層の最大応答水平変位は、評価方法 3、X 方向、入力地震動は告示波（JMA KOBE）の場合に最大となり、35.2cm（装置のせん断ひずみで 176%）で、最小径の免震装置の安定変形 29.6cm（装置のせん断ひずみで 148%）より 5cm 程度大きくなった。告示波（JMA KOBE）による免震層の応答変位は、告示波（乱数）を用いた場合より大きくなることが知られている。著者らの時刻歴応答解析の結

果では、告示波（JMA KOBE）での免震層の最大応答変位は、告示波（乱数）での値に対し、およそ 1.28 倍程度となっている。また、モーダルアナリシスによる応答値に対しては、およそ 1.34 倍程度となった。したがって、最大変位が限界変形の $\frac{2}{3}$ 倍以下となるように設定している評価関数を、最大変位が限界変形の 0.5 倍 $(\frac{2}{3} \times \frac{1}{1.34} \div 0.5)$ 以下となるように修正したところ、時刻歴応答解析による免震層の最大応答水平変位が最小径の免震装置の安定変形以下となるような、免震装置の配置が得られた。このときの GA の解析結果と免震装置の配置を表 12、13 に、評価方法 3 改として示した。表 13 より、評価方法 3 改では評価方法 3 に比べて大きな径の免震装置を選択することで免震層の最大応答水平変位を、免震装置の安定変形以内におさえていることが分かる。また、上部・下部構造の最大応答加速度は実施設計に比べて 87%程度となった。したがって、場合によっては時刻歴応答解析を実施し、その結果に応じて免震層の最大変位の評価値に若干の修正を加えることも必要となる。

対象建物 4 は、非免震時の固有周期が X 方向で 0.368 秒、免震時の固有周期が 3.13 秒であり、固有周期ののびが 8.5 倍程度となっている。このような場合、評価方法 1 でも実施例と同程度の応答値となる免震装置の配置が得られることが分かった。

表 12 対象建物 4 の GA 解析結果

	せん断歪	実施例		評価方法1		評価方法3		評価方法3改	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
偏心率 (%)	10%	-	-	0.27	0.34	0.15	0.16	0.01	0.37
	100%	2.60	0.40	0.06	0.01	0.38	0.21	0.40	0.47
	200%	-	-	0.05	0.09	0.36	0.30	0.53	0.62
1次固有周期 (s)	10%	1.67	1.65	1.90	1.89	2.16	2.14	2.05	2.04
	100%	2.35	2.34	3.23	3.23	3.53	3.52	3.42	3.41
	200%	3.13	3.12	3.40	3.40	3.67	3.67	3.58	3.57
減衰定数 (%)	10%	-	-	22.7	-	21.8	-	22.3	-
	100%	20.9	-	19.2	-	17.0	-	18.1	-
	200%	-	-	15.5	-	13.5	-	14.5	-
降伏せん断力係数	-	-	-	0.045	-	0.035	-	0.038	-
最大変位 (cm)*1	30.0	30.1	29.6	29.7	35.2	35.2	30.0	30.9	-
HRB設置数 (基)	26	21	19	20	-	-	-	-	-
RB設置数 (基)	SL 2	7	9	8	-	-	-	-	-

※) 表中の最大変位は、入力地震動を告示波（JMA KOBE）として時刻歴応答解析をおこなった結果の値である。

表 13 対象建物 4 の GA 解析結果の免震装置の配置

アイソレータ設置番号		実施例	評価方法1	評価方法3	評価方法3改
		HRB800	HRB600	HRB600	HRB650
1	HRB800	HRB600	HRB600	HRB600	HRB650
2	HRB800	HRB600	HRB600	HRB600	HRB650
3	SL300	RB600	RB600	RB600	RB600
4	SL300	RB600	RB600	RB600	RB600
5	HRB800	HRB750	HRB700	HRB700	HRB700
6	HRB800	HRB700	HRB650	HRB650	HRB750
7	HRB800	HRB650	HRB600	HRB600	HRB650
8	HRB800	HRB650	HRB600	HRB600	HRB650
9	HRB800	RB800	HRB600	RB850	RB850
10	HRB800	HRB700	HRB700	RB750	RB750
11	HRB800	HRB600	HRB600	HRB650	HRB650
12	HRB800	HRB600	HRB600	HRB650	HRB650
13	HRB800	HRB650	RB700	HRB650	HRB650
14	HRB800	RB700	RB750	RB750	RB750
15	HRB800	RB600	RB600	RB600	RB600
16	HRB800	RB600	RB600	RB600	RB600
17	HRB850	HRB650	RB800	HRB650	HRB650
18	HRB850	HRB800	HRB700	HRB700	HRB700
19	HRB850	HRB850	HRB650	HRB650	HRB650
20	HRB850	HRB750	RB800	HRB700	HRB700
21	HRB900	HRB700	HRB700	HRB750	HRB750
22	HRB900	RB850	HRB700	HRB700	HRB700
23	HRB900	HRB800	HRB700	HRB700	HRB700
24	HRB900	HRB850	HRB700	HRB700	HRB700
25	HRB850	HRB700	HRB650	HRB650	HRB650
26	HRB850	HRB800	RB800	HRB650	HRB650
27	HRB850	HRB850	HRB650	HRB650	HRB650
28	HRB850	HRB850	HRB650	HRB650	HRB650

図8 対象建物4の時刻歴応答解析結果

5 まとめ

中間層免震構造物において、上部・下部構造の応答を抑え、設計条件を満足するような配置を得るために、上部・下部構造を非線形性を考慮した多質点系モデルに置き換え、GAにより免震装置の配置をおこなった。その際に、上部・下部構造の応答値を評価しない場合(評価方法1、2)と、評価する場合(評価方法3)について検討をおこなった。その結果、以下のようなことがわかった。

- 1) 今回検討した4つの例において構造物を多質点系モデルに置換えし、上部・下部構造の応答値を評価項目に加えた適応度評価により、これらの応答値を実施例より最も低減し、免震層の設計条件を満足する免震装置の配置が得られた。
- 2) 上部構造の剛性が十分高いような建物では、上部・下部構造の応答値を評価しなくても設計が可能な場合があると考えられる。
- 3) JMA 神戸位相告示波のように特に免震層の応答変位が大きくなる地震動に適応するときは最大変位の評価値の設定に配慮する必要がある。

参考文献

- 1) 山下忠道, 伊藤真二, 向井洋一, 井上豊: 中間層免震構造物の最大塑性率応答に着目した地震応答特性に関する研究, 構造工学論文集 Vol.46B, pp.297-306, 2000.3
- 2) 小倉桂治, 高山正春, 辻田修, 木村雄一, 和田章: 中間層免震建物の地震応答, 日本建築学会構造系論文集, 第516号, pp.99-104, 1999.2
- 3) 小林正人, 武部良樹, 小平孝, 金子快郎, 洪忠憲: 中間層免震建物の振動特性と地震応答性状 — (その2) 上・下部構造部の質量比、及び免震層減衰(履歴型)の影響 —, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.551-552, 2000.9
- 4) 伊藤斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎—GAの謎を解く—, オーム社, 1994
- 5) 田守伸一郎, 松谷有祐, 林善太郎: 多質点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, 構造系論文集, 第588号, pp.63-70, 2005.2
- 6) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版株式会社, 1981
- 7) 「免震構造設計指針」, pp.308-315, 日本建築学会, 2001
- 8) 田守伸一郎, 舟橋昌代: 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
- 9) SS21 / DynamicPRO (Version5.2.0), Copyright(C) UNION SYSTEM INC.

(2005年1月10日原稿受理, 2005年3月2日採用決定)