

異種装置の仕様を設計変数として時刻歴応答結果を制約条件とする免震装置の優良設計解

正会員 ○渡邊 大地*1 同 高木 次郎*2
同 大崎 純*3 同 見上 知広*4

免震装置 コスト最小化 時刻歴応答解析
局所探索

1. 研究背景と目的

免震構造建物は設計地震動に対して上部構造物の応答が設計クライテリアに納まるように設計される。支承と減衰装置の種類は多く、それらの中から適切な組み合わせを設計する作業は時に困難を伴う。上部構造を1質点として等価線形化法などを適用することで、ある程度応答を推定できる一方で、上部構造の高次モードや支承への変動軸力の影響などは、時刻歴応答解析によって評価される。等価線形化法と時刻歴応答解析の結果の差は時に大きく、複数の入力地震動に対して、設計制約を満足する支承と減衰装置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。

免震装置の設計手法として、田守ら^{1,2,3)}は遺伝的アルゴリズム(GA)による多目的最適化を提案した。また、和多田ら⁴⁾は時刻歴応答解析に対する制約条件を満足する設計解を導出した。ここでは、支承の種類と大きさ、およびダンパーの個数などが設計変数とされた。一方、著者らが知る限り、支承と減衰装置の両方に対して、それらの種類を変数とした設計手法の提案はなされていない。異種変数が存在する場合、GAや既存のライブラリによる最適化は困難であり、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、時刻歴応答解析を用いて応答値を算出し、LSによる免震装置の合理的な設計の可能性を示す。

2. 検討建物の概要と初期解

文献⁵⁾の2階建て鉄筋コンクリート造の基礎免震建物と同平面で10階建ての建物を解析例1および2とする。図1に両解析例の解析モデルを示す。図2に免震装置のグループ化と解析例毎の長期荷重を示す。両解析例共、免震層、中間階と最上階の質量はそれぞれ3000ton, 3150tonと3300tonである。上部構造のせん断剛性は全層6870kN/mmであり、減衰定数は2.0%である。免震層固定の上部構造の1次固有周期は解析例1で0.22秒、解析例2で0.91秒である。

3. 優良設計解の探索

初期解に対してLSによる局所的な最適設計解(「優良設計解」と呼ぶ)を求める。変数は、支承装置の種類と径および減衰装置の種類と数である。支承装置の種類は積層ゴム支承(NRB)と弾性すべり支承(SSB)とし、減衰装

置の種類は、オイルダンパー(OD)と鉛ダンパー(LD)とする。設計制約条件は、(1)支承の長期面圧が基準面圧以下、(2)免震層の最大水平変位 Δ_{MAX} が300mmまたは400mm以下、(3)免震層の最大せん断力係数 C_{BMAX} が0.15以下、の3つである。各階の応答加速度と支承の短期面圧は制約に含まれない。目的関数は免震装置の総コスト最小化である。表1に免震装置の設計変数領域を示す。数値は本解析例のために設定したものであり、必ずしも実状を反映しない。表中の支承のコストは、NRB(面圧10(N/mm²), 1000φ)を100として基準化した値である。NRBは解析例1と2でそれぞれ面圧が10(N/mm²)と15(N/mm²)を選択対象とする。初期解は建物を等価1質点系に置換し、告示記載のレベル2, 2種地盤の設計用応答スペクトルを用いて最大応答を求めた。初期解の免震支承のみの固有周期は解析例1で4.03秒、解析例2で4.53秒である。 Δ_{MAX} の

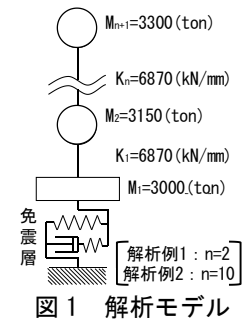


図1 解析モデル

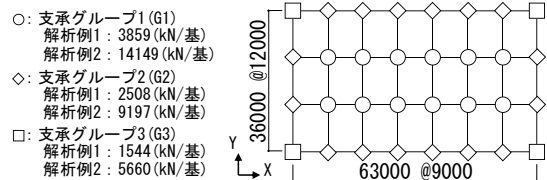


図2 免震装置の設置場所と長期荷重

表1 免震装置の設計変数領域

支承番号	NRB (面圧 10N/mm ²) 免震用積層ゴム支承								
	1	2	3	4	5	6	7		
径(mm)	600	700	800	900	1000	1100	1200		
コスト	60	70	80	90	100	110	120		
水平剛性(kN/mm)	0.69	0.8	0.91	1.04	1.15	1.26	1.39		
推奨長期軸力(kN)	2826	3847	5024	6359	7850	9499	11304		
支承番号	NRB (面圧 15N/mm ²) 免震用積層ゴム支承								
	1	2	3	4	5	6	7		
径(mm)	600	700	800	900	1000	1200	1400		
コスト	90	100	110	120	130	140	150		
水平剛性(kN/mm)	1.04	1.2	1.37	1.56	1.72	2.08	2.43		
推奨長期軸力(kN)	4239	5770	7536	9538	11775	16956	23079		
支承番号	SSB (面圧 15N/mm ²) 弾性すべり支承								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
径(mm)	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
コスト	150	175	200	225	250	275	300	325	350
水平剛性(kN/mm)	5.55	7.56	9.88	12.5	15.42	18.65	22.2	26.05	30.22
摩擦係数	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075
推奨長期軸力(kN)	4239	5770	7536	9538	11775	14248	16956	19900	23079
LD 鉛ダンパー		OD 免震用オイルダンパー							
コスト	160	コスト	90						
初期水平剛性(kN/mm)	30	最大減衰力(kN)	125						
降伏時水平変位(mm)	7.333	1次減衰係数(kNsec/mm)	1.25						
限界変形(mm)	800	2次減衰係数(kNsec/mm)	0.085						

制約を 300mm とした場合、初期解の Δ_{MAX} は解析例 1 で 289mm、解析例 2 で 298mm であり、400mm とした場合は両解析例で 397mm である。表 2 に初期解から優良設計解までの探索則を示す。解析ステップ数は 400 とし、初期解の違いによる影響を少なくするために、近傍解の総数は $400 \times 20 = 8000$ とする。最終ステップの解を優良設計解とする。本研究の優良設計解は LS によって得られた解のため大域最適解ではないが、工学的には概ね合理的で経済的な設計解と言える。探索時の応答値は多質点モデルによる時刻歴応答解析により評価する。入力地震動の規模はレベル 2 の 1.5 倍をレベル 3(L3)とし El Centro NS(1940), Taft EW(1952), 八戸 NS(1968)に対して最大速度を 75(cm/s)に基準化した地震動を L3 地震動とする。数値積分法は線形加速度法とし、積分時間間隔は 1/10sec とする。

表 2 優良設計解の探索における法則

A	グループごとに支承の種類と仕様を設定することとし、種類は NRB あるいは SSB のどちらかとする。
B	支承の種類を変更する確率を 1/3 とし、大きさ(径)は過去の同種時の径から表 2 の支承番号の $\pm 0, \pm 1, \pm 2$ を 1/5 の確率で探索する。初回種類変更時はランダムに探索する。
C	支承の種類を変更しない場合、前ステップの径から表 2 の支承番号の $\pm 0, \pm 1, \pm 2$ を 1/5 の確率で選択する。
D	OD と LD は前ステップの個数から $\pm 0, \pm 2, \pm 4$ を 1/5 の確率で 0 から 30 個の間を移動する。
E	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する。

4. 優良設計解の分析

解析例 1 と 2 の優良設計解を表 3 と表 4 に示す。表中の応答比は制約に対する最大応答の割合である。いずれの優良設計解でも Δ_{MAX} の制約が支配的となった。 $\Delta_{MAX} \leq 300\text{mm}$ の場合は、変形を抑えるために減衰装置を多用し、 $\Delta_{MAX} \leq 400\text{mm}$ の場合は SSB を用いて減衰装置を少なくする傾向がわかる。解析例 1 と 2 について、時刻歴応答解析結果を図 3 と図 4 に示す。 $\Delta_{MAX} \leq 300\text{mm}$ と $\Delta_{MAX} \leq 400\text{mm}$ の場合をそれぞれ白抜印と黒埋印で示した。地震波に応じた優良解を求めているため、コストと応答値には相関がない。いずれも Δ_{MAX} の制約が支配的であることが再確認できるが、上階で最大層せん断力係数が大きくなる結果が得られており、上部構造の各層の加速度上限を制約条件に加える今後の研究の方向性が考えられる。

最大応答層せん断力係数によって上部構造を剛体として求めた支承にかかる短期軸力は基準面圧の 2 倍以下であった。また最大床応答加速度は全ての優良設計解で 250gal 以下であった。

5. まとめ

LS を用いて免震装置の種類と仕様等を設計変数として時刻歴応答解析の結果を制約条件とする免震装置の優良設計解を求めた。目的関数は免震装置の総コスト最小化である。解析例として、RC 造 2 階建と 10 階建の免震建物

表 3 解析例 1 の優良設計解

制約条件		支承 (mm)			減衰装置 (基)		コスト	応答比		
		G1	G2	G3	OD	LD		Δ_{MAX}	C_{EMAX}	
$\Delta_{MAX} \leq 300\text{mm}$	初期解	SSB 1000	NRB 1000	NRB 1000	4	20	7440	0.96	0.48	
	優良設計解	ElCentroNS	NRB 800	NRB 600	NRB 600		22	4140	0.98	0.87
		TaftEW	NRB 800	NRB 600	NRB 800		16	3680	0.99	0.81
		八戸 NS	NRB 800	NRB 600	NRB 700		18	3820	0.98	0.85
$\Delta_{MAX} \leq 400\text{mm}$	初期解	SSB 1000	NRB 1000	NRB 1000		20	6800	0.99	0.66	
	優良設計解	ElCentroNS	NRB 800	NRB 600	SSB 600	2		2840	0.95	0.71
		TaftEW	NRB 800	NRB 600	SSB 600		2	2700	0.98	0.74
		八戸 NS	NRB 800	NRB 600	NRB 600	4	2	2980	0.95	0.77

表 4 解析例 2 の優良設計解

制約条件		支承 (mm)			減衰装置 (基)		コスト	応答比		
		G1	G2	G3	OD	LD		Δ_{MAX}	C_{EMAX}	
$\Delta_{MAX} \leq 300\text{mm}$	初期解	NRB 1200	NRB 1200	NRB 1200	28	24	11120	0.99	0.39	
	優良設計解	ElCentroNS	NRB 1400	NRB 700	SSB 700	10	2	6680	0.99	0.52
		TaftEW	NRB 1400	NRB 800	NRB 800	6	22	7580	0.99	0.56
		八戸 NS	NRB 1200	NRB 900	NRB 700	10	30	8300	0.99	0.48
$\Delta_{MAX} \leq 400\text{mm}$	初期解	NRB 1200	NRB 1200	NRB 1200	28		8960	0.99	0.52	
	優良設計解	ElCentroNS	NRB 1200	NRB 900	SSB 700			4300	0.90	0.41
		TaftEW	NRB 1200	NRB 900	SSB 700		12	5380	0.97	0.49
		八戸 NS	NRB 1200	NRB 900	NRB 700	6		4960	0.98	0.44

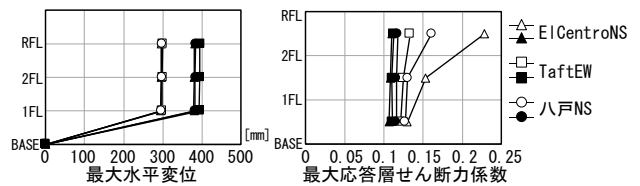


図 3 解析例 1 の時刻歴応答解析結果

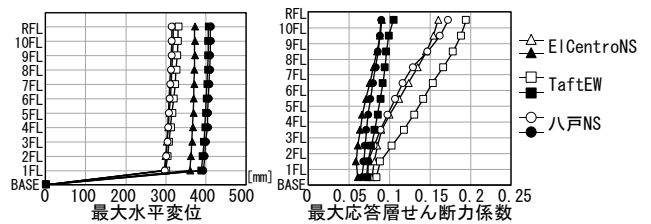


図 4 解析例 2 の時刻歴応答解析結果

を対象にした。L2 あるいは L3 の記録地震波 3 波に対して、免震層の最大水平変位の制約が支配的で、変位の制約値が相対的に大きい場合に SSB を用いて減衰装置が少ない設計解が得られた。

参考文献

- 1) 安江昌晃, 小林浩一, 田守伸一郎: 免震建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 655 号, pp. 1645-1652, 2010. 9
- 2) 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 681 号, pp. 1645-1654, 2012. 11
- 3) 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 697 号, pp. 375-384, 2014. 3
- 4) 和多田達, 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
- 5) 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, 2016

*1 東京都立大学 都市環境科学研究科 建築学域 大学院生
 *2 東京都立大学 都市環境科学研究科 建築学域 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)

*1 Graduate Student, Dep. of Architecture and Bldg. Eng., Tokyo Metropolitan Univ.
 *2 Associate Prof., Dep. of Architecture and Bldg. Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Ph.D.
 *3 Prof., Graduate School of Engineering Kyoto Univ., Dr Eng.
 *4 Structural Eng. Dept., Obayashi Corporation, Dr. Eng.