Hybrid GA および弾塑性応答解析を用いた制振改修におけるダンパーの最適設計 OPTIMIZATION OF DAMPER ARRANGEMENT WITH HYBRID GA USING ELASTO-PLASTIC RESPONSE ANALYSIS ON SEISMIC RESPONSE CONTROL RETROFIT

藤 下 和 浩*1, スッチュ・ファーティフ*2, 松 井 良 太*3, 竹 内 徹*4 Kazuhiro FUJISHITA, Fatih SUTCU, Ryota MATSUI and Toru TAKEUCHI

Damper distribution rule with equivalent linearization method on seismic control retrofit for overseas brittle RC buildings was proposed by the authors. However, this result is not necessarily proved as optimal. Recently, Genetic Algorithm (GA) is applied to solve numerous kinds of structural optimization problems, mainly in the range of static analysis. In this paper, the optimization method of damper distribution with GA using elasto-plastic dynamic analysis for multi degree of freedom shear spring model is proposed. By using proposed optimization method, the optimal damper distribution, defined as minimum damper distribution satisfying the target story drift angle for seismic retrofit, is obtained. Finally, comparison of the results with GA and solutions with equivalent linearization method is represented and the effectiveness of proposed damper distribution rule is discussed.

Keywords : Response Control Retrofit, Genetic Algorithm, Elasto-Plasticity Dynamic Analysis, Equivalent Linearization Method, Elasto-plastic Dampers, Structural Optimization

制振改修,遺伝的アルゴリズム,弾塑性応答解析,等価線形化法,弾塑性ダンパー,構造最適化

1. 序

トルコなど諸外国における保有耐力の小さい既存 RC 建物を対象 として,筆者らは笠井ら^{1,2)}の等価線形化法を用いた制振設計手法を 応用し,図1に示すように主架構の塑性化を考慮しつつ弾塑性ダン パーと鉄骨フレーム(付加弾性骨組)を用いる制振改修の設計法を 提案した³⁾。同論文では多質点モデル各層の復元力特性を,改修の 目標変形に対する割線剛性により線形近似することで等価一質点モ デルに縮約し,時刻歴応答解析を用いずに弾塑性ダンパーが改修後 の RC 架構の応答に与える影響を評価する手法を提案している。同 手法は既存建物の最大応答値を目標変形角近傍に抑制するための適 切な制振部材量を与えることが確認されているが投入量が最小解と なっているかは確認されていない。

等価線形化法による設計法とは別のアプローチとして、動的解析 や固有値解析を用いたモーダルアナリシスによる制振建物の応答評 価値を最適化アルゴリズムにより最小化することによる設計も試み られている。特に近年、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm,以 下 GA) ⁴⁾を用いた検討が建築設計を含む様々な領域で応用されてい る。GA は膨大な繰り返し計算を要するものの、定式化が難しい目 的関数であってもその最適解を探索できる。そのためコンピュータ の処理性能の飛躍的向上に伴い、最適化問題を解くツールとして重 要性を高めている。しかし現状ではコンピュータの解析速度は未だ

- *2 イスタンブール工科大学土木工学科 助教・博士(工学)
- *3 東京工業大学建築学専攻 助教・博士(工学)

発展途上にあり、比較的計算量の少ない静的な構造設計問題や弾性 部材の固有値解析への応用が多い^{5.0}。

時刻歴応答解析を用いた最適化アルゴリズムの応用例として、加 藤ら[¬]は並列グリットシステムを用い、立体トラス鉄塔モデルの最 適ダンパー配置を立体モデルの弾塑性応答解析とGAを用いて評価 することにより導出している。しかし同手法により最適解を得るた めには、計算負荷の大きい立体モデルの時刻歴応答解析の反復計算 を必要とするため多数のコンピュータによる並列計算を用いてなお 膨大な計算時間を要し、まだ実務的に用いることのできる手法とは 言い難い。辻ら[®]は、各層の投入オイルダンパーのリリーフ荷重の 総和が一定のもと変位指標を最小化する最適化問題を解くため、立 体モデルに比べ自由度を大幅に縮約した多質点せん断モデルの動的 解析結果の感度解析を行っている。ただし、より解空間が広く探索 難度が高いと考えられる、弾塑性応答解析における変形評価に基づ いた既定の変形条件を満たす条件下での変位依存型の弾塑性ダンパ ー投入量の最小化は検討されていない。

本論では弾塑性ダンパーを対象に筆者らが提案した制振設計手法³⁾ により得られる解の精度の検証を目的とし、入力地震動に対し各層 の変形が制振改修における目標変形を満たす条件のもとで投入ダン パー量を最小化した設計解をダンパーの最適設計解と定義し、時刻 歴応答解析と GA を組み合わせたダンパーの最適設計解の探索を試

Grad. Stud., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, M.Eng. (Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science) Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Istanbul Technical University, Dr.Eng. Assist. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

^{*1} 東京工業大学建築学専攻 大学院生·修士(工学) (日本学術振興会特別研究員 DC2)

^{*4} 東京工業大学建築学専攻 教授·博士(工学)

みる。GA による最適化計算は膨大な数の弾塑性応答解析を必要と するため,解析対象モデルを1回の応答解析時間が数十分の立体モ デルから数秒の多質点せん断モデルに縮約することで,最適化にお ける計算時間を大幅に短縮し,卓上 PC で実現可能な最適化システ ムを構築する。本例でとりあげる最適化問題の設計変数は各層にお けるダンパー投入量であり,想定される解の探索空間が大きいため, 単純遺伝的アルゴリズム(SGA)と局所探索手法を組み合わせた Hybrid GA⁹を,最適化アルゴリズムとして適用し計算量を削減する。 構築した最適化システムにより得られる入力地震波ごとのダンパー の最適設計解を比較し,入力地震波の違いがダンパーの最適設計解 に及ぼす影響を調査する。最後に設計用地震波 BCJ-L2¹⁰を入力地震 波とした検討を行い,既論³⁾で提案した改修設計法による設計解と, 本論で導く GA による最適設計解を比較することで,最適化計算を 要さない既往設計手法の有用性を確認する。

2. Hybrid GA を用いた最適ダンパー設計法の構築

多質点せん断モデル(図 2)の弾塑性応答解析に基づいて評価した解の適合度関数を最適化アルゴリズムにより最小化する。最適化アルゴリズムとして Hybrid GA を用い,図3に示すように時刻歴応 答解析プログラムと組み合わせることで、制振改修における既存架 構各層のダンパーの最適設計解を得る最適化システムを構築する。

2.1 多質点せん断モデルの弾塑性時刻歴応答解析

多質点せん断モデルの弾塑性時刻歴応答解析の概要を以下に示す。 図 2 に示すように、各部材の復元力特性として既存 RC 架構にはト リリニアの Takeda モデル¹¹⁾、付加ダンパーには変位依存型の弾塑性 ダンパーとして、バイリニアの完全弾塑性モデルを用いる。解析時 間を削減するため弾塑性ダンパーとともに付加する付加弾性骨組

(鉄骨フレーム)は完全弾性として理想化し,数値計算手法には Newmark- β 法¹²⁾(平均加速度法, β =1/4),減衰条件には初期剛性比 例型減衰 h=0.03 をそれぞれ用いる。扱う改修対象モデルは中低層モ デルに限定するため,対象架構の曲げ変形および PA 効果は考慮し ない。多質点せん断モデルは,各層において図2における x 方向の みの1自由度を有し,同方向に地震波を入力する。対象モデルを5 層,9層の中低層モデル(3章にて説明)に限るため10自由度以下 の比較的小規模の問題領域となる。そのため弾塑性応答解析の単位 解析時間は卓上 PC (CPU:Intel Core i7 3.5GHz, RAM:8GB)を用い ても、5層モデルで0.6秒,9層モデルでも2.3秒となり(BCJ-L2 入力時),膨大な反復計算を要する GA に応用可能となる。

2.2 最適化計算に用いる最適化アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムなどの発見的解法は、数理計画法に比べ解の 探索精度にランダム性を有する多点探索によるため、局所探索能力 が低いという問題が指摘されている。本論では連続関数に近い解候 補数の多い設計問題を対象とすることから、大域的な探索を得意と する単純遺伝的アルゴリズム (SGA) に対し、図4右側に四角で囲 んで示す山登り法を参考に構築した最良解近傍での局所探索ルーチ ンを導入した Hybrid GA を導入する。

SGA において選択手法はトーナメント法とし、トーナメントサイズは2とする。設定した交叉確率で選択された染色体における各遺伝子座において独立に 1/2 の確率で入れ替える一様交叉を採用し、交叉率は 0.4 とする。交叉により優良解のスキーマ(遺伝子型のビ



ットパターン)を次世代の子個体に残す。各遺伝子座における遺伝 子の突然変異率は0.01とする。(解析途中15~19世代にかけて解候 補を分散させるため10倍にする)各世代の個体数は5層モデルで 200個体,9層モデルで400個体とし,初期個体は生成した乱数に基 づいて各遺伝子座をランダムに設定することで生成する。最適化計 算において5層モデルでは100回,9層モデルでは150回連続で適 合度関数が更新されない場合,解が収束したものとみなす。GAに おけるパラメータの設定値により解の探索性能は大きく異なるが, 本論では文献6)で用いられているパラメータを参考に決定する。

一方,局所探索は最適解が局所解に陥る確率を高めるが,本論で は局所探索ルーチンの発動条件(世代間の最良解の改善率0の連続 回数)を調節することで局所・大域探索のバランスをとり,大域的 最適解の探索精度と最適解への収斂速度の向上を図る。解空間が大 きい問題ほど大域的探索に時間を要すことから,局所探索の発動条 件は複数回の最適化計算の試行により,5層モデルで2回,9層モデ ルで10回以上とした。局所探索においては最良解の解析モデル各層 のダンパー剛性を一定量下げた最良解近傍のモデルの絵数はN個とな る。次にそれらの時刻歴応答解析を行うことにより各層の最大層間 変形角を計算する。生成された解のいずれかが制約条件を満たして いれば次世代の最良解を更新する。1世代分の計算を考えた場合, 局所探索は N 回の時刻歴応答解析のみで行え, GA により世代全個 体の適合度評価を行うのに比べて少ない計算量で最良解の近傍を探 索できると考えられる。

2.3 ダンパー設計解のコード化

ダンパー設計解となる構造物各層の投入ダンパー量を0と1の2 進数で表現される染色体としてコード化する。改修における投入ダ ンパー設計解を表す各層の投入ダンパー剛性の情報は0以上の実数 により表現され、上限を考えなければその解空間は無限となる。そ こで多点探索を行う GA での解の扱いを容易にし、最適化計算のコ ストを減らすために解空間を有限区間の離散値に限定する。ダンパ 一設計解のコード化の手順を図5に示す。まず10進数の実数により 表される各層の投入ダンパー剛性を,100kN/mm 刻みで離散化する。 また各ダンパー剛性を表す10進数を,プログラム上での扱いを容易 にするため0と1の2進数で表されるバイナリコードに変換する。 しかしバイナリコードを GA の染色体として用いた場合, GA を成 立させている積み木仮説の有効性を下げる可能性があることから,2 進数と 10 進数において隣り合う数字のハミング距離を同様とする ためグレイコード¹³⁾に変換する。GA においてグレイコードを扱っ た場合,その有効性が改善される傾向があることが知られている14)。 最後に全層のダンパー剛性を表すグレイコードを左側から順に結合 したものを本最適化計算における各染色体としてコード化する。

本手法による染色体のコード化において,各層のダンパー剛性を 表す情報の最大格納値 *a*(kN/mm)は式(1)で表される。

$$a = 100 \left(\sum_{k=0}^{n} 2^k - 1 \right) \tag{1}$$

なお n は染色体において 1 層分のダンパー剛性を表現するために割 り当てられた遺伝子長を表す。また解析モデルの層数 N とすると染 色体の遺伝子長は nN,最適化計算における解候補数は 2^{nN} となり, n を大きくすると解候補数及び最適化計算負荷は指数的に増大する。

本論では n=8 と設定し,各層のダンパー設計解の最大格納値は式 (1)より a=25500kN/mm となる。扱う解析モデルに関しては5,9層 の解析モデルを設定するため,染色体の遺伝子長及び設計解の解候 補数はそれぞれ5層モデルで45,2⁴⁵=3.5×10¹³個,9層モデルで81, 2⁸¹=2.4×10²⁴個と膨大な数となる。

2.4 最適化計算における目的関数の定式化

本最適設計法においては制振改修における設計クライテリアを制 約条件とし,投入するダンパー量(改修コストと同義)の最小化を 行う。そのため,最適化計算における目的関数として,解析モデル における各層の投入ダンパー量の総和を設定する。解析モデルにお ける各層の投入ダンパー量の指標はその剛性(耐力)の指標と等し く,最適化計算における適合度関数として,各層の投入ダンパー剛 性 K_{di} (kN/nm)の総和を設定する。ダンパーの降伏変形 δ_y^d とダンパ ーと付加弾性骨組の剛性比 ysを固定とすれば、ダンパーの耐力及び 付加弾性骨組の剛性がダンパー剛性に基づき一意に定まる。最適化 計算における制約条件は,入力地震波に対し、建物各層の最大層間 変形角 y_{maxi} が改修の目標層間変形角 y_{target}以下を満たすこととする。

単一目的関数の最小化においては、GA による評価対象となる適



合度関数における制約条件を考慮する必要がある。そこで最適化計 算における各ステップの適合度計算において、各解が制約条件を満 たさないと判断された場合、過大な数(P=1×10⁷)を適合度関数 f に与えることによりペナルティを課す。これにより適合度関数の最 小化において制約条件を満足しない解の成績は大きく下がり、制約 条件を満たすもののみが最良解の候補に残る。以上より、本最適化 計算における目的関数及び制約条件は式(2)で表される。

minimize
$$f = \sum_{i=1}^{N} f_i$$

$$f_i = \begin{cases} K_{di} + P & (y_{\max i} > y_{target}) \\ K_{di} & (y_{\max i} \le y_{target}) \end{cases}$$
(2)

3. Hybrid GA を用いた最適ダンパー設計法の適用

本章では Hybrid GA を用いた提案最適ダンパー設計法を多質点せ

ん断モデルに適用し、得られるダンパーの最適設計解を分析する。 3.1 制振改修における対象モデルと設計条件

解析モデルとして、図6に示すトルコの既存学校校舎の静的増分 解析に基づき検討建物の状態を表現した基準モデルである5層の多 質点せん断モデル(5層モデル,階高3.2m)を設定する。また5層 モデルと同等の耐力水準で設計された9層の多質点せん断モデル(9 層モデル, 階高 3.5m)を併せて設定する。これらのモデルは各層の 降伏変形角が一律であると仮定した上で、Takeda モデル ($\alpha_1=0.22$, α2=0.01)に当てはめ、各層の水平方向に材料非線形性を有するせん 断バネを有する多質点モデルとする。また図7に示すモデルの各層 を低剛性とした層への損傷集中が生じやすい 1L~4L モデルの検討 を合わせて行う。各モデルの諸元を表1,2に、固有周期を表3に示 す。対象モデル各層の剛性が低いため固有周期は通常に比べ長い。 トルコの実在建物は日本の既存 RC 建物に比べ柱梁の断面が小さく 水平剛性・耐力が小さいが、曲げ柱で構成されており、層間変形角 1/150 を超える程度まで柱及び耐力壁にせん断破壊を生じない靱性 型の架構とみなし、改修における目標層間変形角を耐震性能評価指 針¹⁵⁾における修復限界状態 I を満たす 1/150 と設定する。また制振 改修における検討入力地震波を人工地震波 BCJ-L2 及び最大速度振 幅を 50cm/s で規準化した観測地震波 6 波の計 7 波とし,各地震波に 対しダンパーの最適設計の検討を行う。表4に検討入力地震波と入 力波の原波に対する速度規準化倍率を示す。

改修設計においては,降伏層間変形角 δ_v^d が 1/830 の弾塑性ダンパ ーと付加弾性骨組の付加を想定し,付加弾性骨組のダンパーに対す る剛性比 у。は既往の研究 3)で有効性が示された 0.05 とする。

3.2 Hybrid GA によるダンパーの最適設計解

Hybrid GA を用いた最適化計算により得られた制振改修における 各層の最適ダンパー耐力を図 8(a)-(e)中に示す。図より各入力地震波 において無補強モデルの最大層間変形角が大きい低剛性層の最大ダ ンパー耐力がやや大きくなっていることが分かる。各層の最適ダン パー耐力に関しては、各入力地震波によって大きく異なるが、設計 用地震波 BCJ-L2 入力時の最適ダンパー耐力は選定した 6 入力地震 波に応じた最適ダンパー耐力の平均値と近接している。

一方,図8中右図には全層における最適ダンパー耐力の最大値で

表1 5層モデル(Sモデル)諸元表2 9層モデル(Sモデル)諸元

Г	初期剛性	降伏耐力	層質量	降伏変形	Г	初期剛性	降伏耐力	層質量	降伏変形
	K_{fi}	Q_{fyi}	W_i	δ_{yi}		K_{fi}	Q_{fyi}	W_i	δ_{yi}
	(kN/mm)	(kN)	(t)	(mm)		(kN/mm)	(kN)	(t)	(mm)
5	377.8	1700	540	15	9	572	3208.92	1940	23
4	644.8	2900	1182	15	8	714	4648.14	3880	23
3	866.7	3900	1182	15	7	847	6072.99	3880	23
2	1077.8	4850	1182	15	6	975	7371	3880	23
1	1222.2	5500	1182	15	5	1100	8514	3880	23
					4	1219	9252.21	3880	23

表 3 一次固有周期

対象モデル	固有周期 T(s)
5層-S	0.69
5層-1L	0.72
5層-2L	0.71
5層-3L	0.7
5層-4L	0.71
9層-S	2.01
9層-1L	2.01

0 _{yi}		K_{fi}		Q_{fyi}	W_i	0 _{yi}		
nm)		(kN/mm)		(kN)	(t)	(mm)		
15	9	572	3	208.92	1940	23		
15	8	714	4	648.14	3880	23		
15	7	847	6	072.99	3880	23		
15	6	975		7371	3880	23		
15	5	1100		8514	3880	23		
	4	1219	9	252.21	3880	23		
	3	1324	9	810.84	3880	23		
	2	1421	1	0188.57	3880	23		
	1	1513	-1	0575.87	3880	23		
	:	表 4 検	討	入力地	震波			
1 上 14 雷 14			PGA	速度規準化倍率				
~	Л	也侵议		(cm/s^2)	(SF=	=1.0) (%)		
IMA	IMA Kobe (N.S)			817.85		54		

	(cm/s)	(51 1.0)(70)
JMA Kobe (N-S)	817.85	54
El Centro (N-S)	341.78	131
Miyagi Oki 1978 (N-S)	206.40	135
Taft-Kent Country (E-W)	174.42	287
Northridge-Sylmar (N-S)	826.80	74
Hachinohe-Tokachi (E-W)	176.58	131
BCJ-L2	355.66	100



各層の最適ダンパー耐力を規準化した各層の最適ダンパー耐力比を 示す。同図より Northridge 波を入力波とした場合その応答レベルが 小さいため,得られる最適ダンパー耐力比が他のケースとやや異な るが,各入力地震波における最適ダンパー耐力比の各層の標準偏差 の平均値は 0.015 以下となり,概ね一定であることが分かる。

次に入力地震波の強さと最適ダンパー耐力の関係を考察するため, 3 段階の入力地震動倍率(SF)を設定し、各場合における最適ダン パー耐力を導出する。SFは、最大速度を 50cm/s に規準化した観測 地震波と人工地震波原波を SF=1と設定し、SF=1,1.5,2の地震に 対する検討を行う。図 9(a)-(c)にみるように、S モデルの各入力地震 動倍率における最適ダンパー耐力比は、地震動の強さによらずほぼ 変化しないことが分かる。改修建物は比較的低層であり、いずれの 地震波を入力した場合においても、1 次モードが卓越した変形性状 となるため、得られるダンパーの層せん断力分布も同様に1次モー ドに準じたものとなると考えられる。

図 9(d)には 9 層モデルの最適ダンパー耐力比を示すが,5 層モデ ルの最適ダンパー耐力比と比較すると,5 層モデルに比べ,やや上 層の投入ダンパー量の比率が小さく分布は丸みを帯びていることが 分かる。また図 10 に S,1L モデルにおいて,各入力地震動倍率に おける各層の最適ダンパー量の総和を示すが,入力地震動倍率の増 加に伴い,GA による最適設計解における必要制振部材量も一定の 倍率で増加する傾向がみられ,入力レベルに応じ,GA による最適 設計解における必要制振部材量は増加する傾向があるといえる。

なお、本検討で用いた卓上 PC の計算環境においては、立体モデ ルの時刻歴応答解析(入力地震波 BCJ-L2)の単位計算時間は剛床仮 定とした5層モデルにおいて570sであるのに対し本論で対象とする 多質点モデルでは、5層モデルで0.6秒、9層モデルで2.3秒と大幅 に少ない。そのため図11に示す適合度関数の推移から5層モデルに おいて200世代、9層モデルにおいて800世代程度で最適解近傍に 収束すると仮定すると、多質点モデルを対象とした最適化計算では、 5層モデルで2.8時間、9層モデルで84時間と概ね実務的な計算時 間で解が収斂することになる。各モデルにおいて実際の収斂時間も 同程度のオーダーに収まることを確認した。一方立体モデルにおい て同様の仮定を想定した最適化問題を考えた場合、5層モデルでも 2615時間(108日間)と膨大な計算量となり、実務的な最適化計算 の適用は現実的とはいえない。

また9層モデルにおいては,設計解の解候補数は5層モデルの約 43億倍となるが,計算時間は5層モデルの30倍程度に留まること が分かる。最適化計算の複数回試行を行った結果,解空間の大きい 9層モデルにおける最適解は,5層モデルに比べややばらつく場合が みられたが概ね一致した。発見的手法であるGAにより得られた最 適解は厳密な大域的最適解である保証はないが,適合度関数の推移 が十分収束していることからも,得られた解は少なくとも最適解に 近い近傍解には至っていると考えられる。

全ての最適設計解において,各層の最大層間変形角は制約条件と して設定した改修における目標層間変形角 1/150 以下になることを 確認した。また残留層間変形角は 1/1000 以下になり,建物の継続使 用性が概ね確保されているといえる¹⁶。

3.3 Hybrid GAの導入が解の探索性能に及ぼす影響

本検討で導入している Hybrid GA の効果を検討するため, SGA と



Hybrid GA での最適化計算における各世代の最良解の適合度の推移 を比較する。比較のため両者において初期解を揃えた検討を行う。 SGA は Hybrid GA において局所探索ルーチンを発動させずに最適化 計算を実施した場合を表す。図 11 に 5,9 層モデルの最適化計算に おける各世代の最良解の適合度の推移を比較する。実線が Hybrid GA,点線が SGA のみの場合を示し,実線上における黒丸が局所探 索ルーチンによる解の更新が行われた場合,白丸が解が更新されな かった場合をそれぞれ示す。図より Hybrid GA を用いた場合,解の 探索過程で局所探索ルーチンが作動していることが分かる。しかし 両者における収束性能の違いは必ずしも顕著とはいえない。これは 局所探索ルーチンを用いた場合,一部のケースにおいて最良解が局 所解に停留したためと考えられ,Hybrid GA による安定した解探索 の向上を目指すためには対象とする最適化問題の解空間の大きさに 応じた局所探索の作動頻度の更なるスタディが必要と考えられる。

4. 等価線形化法による改修設計解と最適設計解の対応

本章では既往の等価線形化法に基づく改修設計手法³⁾による設計 解(EL 解)と本論における Hybrid GA によるダンパーの最適設計解



(GA 解)を比較し、最適化計算を要さない既往の改修設計法が、 GAによる設計解とどのように対応しているかについて検証する。

4.1 既往の改修設計法の概要

既往の改修設計法³⁾では等価線形化法を適用するため制振改修に 伴う応答低減により,各系の最大変形が目標変形に一致するという 仮定を導入している。まず,RC架構を表す等価一質点モデルの等 価剛性 K_{μ} ,等価周期 T_{μ} を,目標変形時の RC架構の塑性率 μ を用 いてその割線剛性,周期と仮定し,応答スペクトル法による RC架 構の応答評価を行う。図2中における目標変形までの RC架構,弾 塑性ダンパー(ダンパー塑性率 μ_d)の履歴ループ,RC架構,付加 系の弾性歪エネルギーを考えることで(計算において図2(a)中 $a_2=0$ と仮定),RC架構の減衰定数 h_p ,付加系の等価減衰定数 h_{eq} を求め る。地震波入力時の減衰評価に際し平均減衰法¹⁷⁾を検討範囲 (1< μ <1.5)において簡略化した低減係数 R (=0.6)を乗じる³⁾。

 $h_p^{-1} \ge T_a^{-1} \varepsilon$ 用い,応答スペクトル法により RC 架構の最大層間変形 角の予測値 $\theta_m^{-1} \varepsilon$ 得る。また, h_p^{-1} , $h_{eq} \varepsilon$ 用いて減衰効果係数 $D_h(\alpha=25)$ を求め,付加系の最大層間変形角の予測値 $\theta_{eq}^{-\Sigma} \varepsilon$ 得る。ダンパー塑 性率を固定すれば $\theta_{eq}^{-\Sigma}$ が制振改修における目標層間変形角 $\theta_{tar}^{-\Sigma}(=1/150) \ge -$ 致するときの必要ダンパー/RC 架構剛性比 $r_d(=K_d/K_f)$ は式(3)により陽に求まる。なお式中,目標変形時 RC 架構 の割線剛性の初期剛性に対する比 $p=K_d^{-1}/K_f(=0.22)$, RC 架構のひび割 れ塑性率 $\mu_c(=0.1)$,構造減衰 h_d^{-1} (=0.03),除荷剛性低下指数 $\lambda(=0.4)$ とする。

$$r_{d} = \frac{p\left\{\left(\frac{\theta_{f}}{\theta_{tar}^{2}}\right)^{2} - 1\right\}\left[1 + \alpha\left\{h_{0}^{f} + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{p\mu + \mu_{c} - p\mu^{\lambda}\left(1 + \mu_{c}\right)}{p\mu + \mu_{c}} \cdot R\right\}\right]}{\left(1 + \alpha h_{0}^{f}\right)\left(\gamma_{s} + \frac{1}{\mu_{d}}\right) + \frac{2\alpha R}{\pi\mu_{d}}\left(1 - \frac{1}{\mu_{d}}\right)}$$
(3)

得られた必要ダンパー/RC 架構剛性比 r_dは等価一質点系におけ る必要ダンパー剛性を RC 架構の弾性剛性で除した比である。多層 構造物各層の必要ダンパー剛性を決定するため, RC 架構各層の初 期剛性に対し得られた r_dを考慮してダンパーを配分する剛性比一定 手法,また以降に述べる層間変形角一定法³⁾を適用する。

笠井らの手法 ³⁾を拡張した層間変形角一定法 ³⁾は, RC 架構は各層において目標変形までの割線剛性 K_{μ} を有した線形系であるものとみなし,以下の条件を仮定することにより導出する。

a)多質点モデル(階高 h_i, 層数 N)と等価一質点モデルの間で, 目

標層間変形角時の付加系及び RC 架構の減衰定数が等しい。 b)Ai 分布に基づく静的な層せん断力分布 Q_i に対し,最大弾塑性変形 時の多質点系全層の層間変形角が一質点系の目標値 θ_{tar}^{Σ} と等しい。 c)各層の弾塑性ダンパーの塑性率 μ_{di} , RC 架構の塑性率 μ_i , 付加弾 性骨組と弾塑性ダンパーの剛性比 γ_{si} はそれぞれ均一である。 $(i \leq N)$ 以上の条件をもとに改修建物各層の必要ダンパー剛性 K_{di} が式(4) により得られる。なお式中 α_j は RC 架構の降伏時割線剛性比を表す。

$$K_{dl} = \frac{Q_{i}}{h_{i}} \sum_{i=1}^{N} \left(K_{\mu i}^{f} h_{i}^{2}\right) \left(\frac{1}{\gamma_{s} + 1/\mu_{d}} + \frac{\mu}{\alpha_{y}} \cdot r_{d}\right) - \frac{K_{\mu i}^{f}}{\gamma_{s} + 1/\mu_{d}}$$
(4)

本論では EL 解として、剛性比一定手法による解(kdkf)と式(4) を用いた層間変形角一定法による解(SD)を検討する。

4.2 等価線形化法に基づく EL 解と GA 解の対応関係

比較的安定したスペクトルを有する BCJ-L2 を対象として Hybrid GA により得られるダンパーの最適設計解(GA 解)と等価線形化法 に基づく EL 解を比較し、最適化計算なしで得られる EL 解との対応 関係を検証する。EL 解の導出の際には BCJ-L2 のスペクトル (h=0.03) を用い、GA 解は BCJ-L2 を入力波とした弾塑性応答解析 に基づく最適設計解とする。まず5層モデル(S~4Lモデル)にお ける各層のダンパー設計解を図12で、ダンパー耐力の最大値で規準 化したダンパー耐力比を図 13 でそれぞれ比較する。図 12 より, GA 解は各モデル各層において必要ダンパー耐力が EL 解または保有水 平耐力計算に基づくダンパー耐力に比べ小さい値となっており, GA 解における各層のダンパー耐力の総和は EL 解に比べ S モデルで 2 割程度,低剛性層を有するモデルで3割程度小さいことがわかる。 また層間変形角一定法を用いた SD 解は層剛性が比較的均等な S モ デル,各層の層剛性の差が大きい1L~4Lモデルのいずれにおいても, GA 解を包絡している。図 13 にはダンパー耐力比を示すが、概ね GA 解と EL 解の差は上層ほど大きくなる傾向がみられる。

一方,9層モデルと9層モデル1層の剛性・耐力を20%低減した ILモデルにおけるGA解とEL解を,図14で比較する。5層モデル における結果とは異なり,EL解(SD解)はGA解に比べ特に下層 の必要ダンパー量を小さめに評価する場合があることが分かる。ま た図15にBCJ-L2波を入力した際のGA解とEL解の中でもGA解 と対応がよい層間変形角一定法に基づくSD解の各層のダンパー耐



力の対応を示す。5層モデルにおける全ての解析ケースにおいて SD 解は GA 解より大きい一方、9層モデルでは一部の解において SD 解 は GA 解より小さいことがわかる。また、1L、2Lモデルなどの耐力 が低く脆弱なモデルにおいて、SD 解と GA 解の差がやや大きい傾向 がみられる。表5より9層モデルは5層モデルと比較して、有効質 量比、刺激係数の1次モードの2次モードに対する比率はそれぞれ 0.89、0.90とほぼ同程度であるものの、ABS、SRSS法を用いたモー ダルアナリシスにおけるそれぞれの変位構成比に占める2次モード の割合が高いことが分かる。図16には9層モデルの1、2次モード ベクトルを示すが、2次モードは1次モードに比べ相対的に下部応 答の比率がやや大きい振動モードであることが分かる。等価線形化 法では1次固有周期に準じたAi分布を用いて各層のダンパー耐力を 決定しているため、2次モードの影響が考慮できていないことが 9 層モデルの下層でSD 解が GA 解に比べ小さい原因と考えられる。

図17に最適化計算に用いた応答解析と同条件でBCJ-L2を入力波 とした多質点モデルの応答解析における改修モデル,非改修モデル の各層の最大,残留層間変形角を示すが,●で示されるGA解の最 大層間変形角は改修における目標変形角である1/150以下,残留層 間変形角は1/1000以下となっていることが確認できる。したがって 検討した最適化問題において設定した制約条件が有効に機能してい るといえる。一方で白抜きの印で示す EL 解によるモデルは,上層 へのダンパーの投入比率がGA解に比べ大きいため,上層の変形が 抑制される一方で下層の変形がやや励起する傾向がみられる。また 図18より5層モデルにおいては、各層の投入ダンパー量の小さい GA解の方がEL 解に比べ最大応答加速度が小さいことが分かる。ま た9層モデルにおいても最大応答加速度の最大値はGA解の方がEL 解に比べ小さくなっていることが分かる。

さらに SNAPV5¹⁸⁾にて構築した立体モデル(図6,7)に対して質 点モデルを用いて得られたダンパー設計解(EL,GA解)をもとに ダンパーを適用した制振改修モデルの応答解析を行う。立体モデル





图 3

において, 柱梁部材は材端曲げばねモデル, 壁部材は剛梁付き間柱 モデルを用い、各層の床は剛床仮定とする。各部材の復元力特性は 文献 19)~21)による耐力式で折れ点を決定した剛性劣化型 Takeda モ デルとする。弾塑性ダンパーは完全弾塑性の復元力特性を有する軸 ばねモデル,付加弾性骨組はバイリニアの材端曲げばねモデルとし, 得られた各層のダンパー耐力をもとに建物ファサード面に分散配置 する。時刻歴応答解析においては、人工地震波 BCJ-L2 原波を入力 し、コンクリート部材のひび割れ時の減衰力の低下を考慮した初期 剛性比例減衰(h=0.015)を用い、pΔ効果は考慮しない。構築した立体 モデルと多質点モデルの無補強モデルにおける最大応答値の対応を 付録1に示す。また立体モデル(5層モデル)の応答解析結果を図 17(a)-(e)中に点線で示す。図より立体モデルは多質点モデルに比べ 下部の応答が小さく、卓越する振動形状が異なることがわかる。こ れは立体モデルが多質点モデルに比べ各部材の降伏をより精緻に表 現しているためと考えられる。また立体モデルは多質点せん断モデ ルに比べ最大応答値がやや大きくなる傾向が見られるが、GA 解, SD 解の最大層間変形角はともにトルコの構造規準²²⁾において建物 の使用継続性を確保するために要されている 1/100 程度に、残留層

最大水平加速度(gal) (a)S モデル (5 層モデル) 図 18 各モデルの最大水平加速度(BCJ-L2)

700 800

500 600

間変形角は 1/1000 以下に収まっている。

300

400

100 200

以上より,本論で検討した5層,9層の多質点せん断モデルにおいて,等価線形化法に基づく改修設計法により得られたEL解(SD 解)は本論で提案した最適化手法によるGA解を概ね包絡しており, 両者の対応は良好といえる。またより現実に即した立体モデルを用 いた時刻歴応答解析によって,GA解及びEL解(SD解)を用いた 設計により設計用地震波に対し地震後の使用継続性を概ね確保でき

團

100 200 300

200

500 600

700 800

ることを確認した。さらに、GA 解と EL 解の必要ダンパー耐力の比較により、等価線形化法による設計解は GA 解に比べ建物上層のダンパー量をやや多めに評価する傾向がみられることがわかった。

5. 結

本研究では、立体モデルと応答スペクトル法の適用対象となる等 価一質点モデルの中間に位置づけられる各層の自由度をせん断方向 のみとした多質点せん断モデルの弾塑性応答解析と Hybrid GA を組 み合わせ、材料非線形性と多次モードを考慮した制振改修における 各層のダンパーの最適設計解を得る手法を提案するとともに、GA により得られたダンパー設計解を提案改修設計法³による設計解 (EL 解)と比較検証した。本論において得られた知見を以下に示す。

- 1)最適化の計算量は解析モデルの質点数に応じて大きく異なるものの、重層骨組を多質点せん断系ヘモデル化すれば、提案した最適化手法は中低層モデルに適用できる。また、最適化アルゴリズムとして局所探索ルーチンを用いた Hybrid GA を用いた場合の収束性は SGA を用いた場合と比較し改善する場合が見られたものの、その効果は必ずしも保証されたものとはならなかった。
- 2)各入力地震波、モデルにおいて、本提案最適化手法により得られる最適ダンパー耐力比は概ね同一であり、入力地震波の違いによらない結果となった。これは改修後建物の高さ方向の層せん断力分布が入力地震波によらずに1次モードに従うためと考えられる。
- 3)対象モデルにおいて既論文3)で提案した手法は本提案最適化手法 によるダンパーの最適設計解に比べやや大きめの耐力でほぼ同等 の分布を与えることを確認した。なお、2次モードの影響が大き い9層モデルは5層モデルに比べ、両者の対応が下層部において 異なる傾向がみられた。

付録1 立体モデルと多質点モデルの最大応答値の対応

本論 4 章では制振改修設計の妥当性を示すため、多質点モデルと立体モデ ルを対象とした時刻歴応答解析を実施している。両者の応答解析において初 期剛性比例型減衰を適用しているが、多質点モデルにおいては減衰定数 h=0.03 を用いている一方、立体モデルにおいては初期剛性時の減衰を h=0.05 とし目標変形までの割線剛性を考慮した場合として h=0.015 を減衰定数とし て考慮しており、異なる減衰定数を設定している。

解析における減衰定数設定の妥当性を示すため 5 層の未補強モデル (S モ デル)の応答解析における各層の最大応答値を付図 1 に比較する。図より各 モデルにおいて両者は最大応答値のオーダーが概ね近接しているといえる。 異なる減衰条件の解析において両者の最大変形のオーダーが近接する要因と しては多質点モデルでは各層が 1 つの独立したせん断ばねでモデル化されて いることから,立体モデルに比べ各層における層間変形のばらつきが大きく なっていることが考えられる。以上より比較の際に立体モデルの時刻歴応答 解析において初期剛性比例型減衰 *h*=0.015 を設定することは概ね妥当と考え られる。



参考文献

- 浦武川,笠井和彦:弾塑性ダンパーを用いた多層 RC 構造の地震応答制 御設計法,日本建築学会構造系論文集,第78巻,第685号,pp.461-470, 2013.3
- 2) 笠井和彦,伊藤浩資:弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調節に よる制振構造の応答制御法,日本建築学会構造系論文集,第 595 号, pp.45-55, 2005.9
- 3) 藤下和浩、スッチュ・ファーティフ,松井良太,竹内徹:損傷配分に着 目したトルコにおける多層 RC 建物の制振改修,日本建築学会構造系論 文集, Vol.79, No.699, pp.661-669, 2014.5
- John H. Holland : Adaptation in Natural and Artificial Systems, Ann Arbor, The Univ. of Michigan Press, 1975
- 5) 大森博司,田村尚土,伊藤智幸:多目的最適化法による鋼構造物の構造 設計支援手法の提案,構造工学論文集.B,第 54 号 B, pp. 251-257, 2008.3
- 竹内徹,木内佑輔,松井良太:トラス鉄塔の耐震改修における制振部材の最適配置,日本建築学会構造系論文集,第79巻,第700号,pp.791-799, 2014.6
- 7) 中澤祥二,村上秀樹,加藤史郎,大河内靖雄,竹内徹,柴田良一:座屈 拘束ブレースを用いた通信鉄塔の耐震補強法に関する研究:グリッドシ ステムを用いた遺伝的アルゴリズムによる座屈拘束ブレースの最適配置 探索法,日本建築学会構造系論文集,第604号,pp.79-86,2006.6
- 8) 辻聖晃,田中英稔,吉富信太,竹脇出:多層建物におけるオイルダンパーの最適リリーフ荷重決定法,日本建築学会構造系論文集,第77巻,第 678号,pp.1237-1246,2012.8
- Malek, M., Guruswamy, M. etc : A Hybrid ALGORITHM TECHNIQUE, technical report of Texas Univ. at Austin, TR-89-06, 1990
- 10) 建設省建築研究所:建築研究資料第 83 号設計用入力地震動作成手法, 1994.9
- Takeda T., Sozen M.A. and Nielsen N.N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal of Structural Division, Journal of structural Engineering, ASCE, Vol.96, ST12, pp.2557-2573, 1970
- Newmark, N.M.: A Method of Computation for Structural Dynamics, Proc. ASCE, Vol. 85, No. EM3, pp.67-94, 1959
- 13) Frank, Gray : Pulse code communication, United States Patent 2632058, 1953.3
- 14) 三木光範,廣安知之,吉田純一,金子美香:分散遺伝的アルゴリズムの 性能におよぼす交叉法とコーディング法の影響,情報処理学会全国大会 講演論文集,1999.9
- 15) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解 説,2004.2
- 16)日本建築センター:エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法の技術基準 解説及び計算例とその解説、2005.10
- Newmark, N. M. and Rousenblueth, E. : Fundamentals of Earthquake Engineering Prentice-Hall Inc, 1971
- 18) (株)構造システム: SNAP Ver.5 テクニカルマニュアル, 2009.8
- 19) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説-許容応力度設 計法-,2010.6
- 20) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同 解説,1997
- 21)国土交通省住宅局建築指導課他編:2001年度版建築物の構造関係技術基 準解説書,工学図書株式会社,2001.3
- 22) M.Nuray AYDINOGLU : Specification for Buildings to be Built in Seismic Zones (2007), Chapters 1,2, Ministry of Public Works and Settlement Government of Republic of Turkey, 2007.3

OPTIMIZATION OF DAMPER ARRANGEMENT WITH HYBRID GA USING ELASTO-PLASTIC RESPONSE ANALYSIS ON SEISMIC RESPONSE CONTROL RETROFIT

Kazuhiro FUJISHITA^{*1}, Fatih SUTCU^{*2}, Ryota MATSUI^{*3} and Toru TAKEUCHI^{*4}

 *1 Grad. Stud., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, M.Eng. (Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science)
 *2 Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Istanbul Technical University, Dr.Eng.
 *3 Assist. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.
 *4 Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

1. Introduction

Damper distribution rule with equivalent linearization method on seismic control retrofit for overseas brittle RC buildings was proposed by the authors. However, this result is not necessarily proved as optimal. Recently, Genetic Algorithm (GA) is applied to solve numerous kinds of structural optimization problems, mainly in the range of static analysis. In this paper, the optimization method of damper distribution with GA using elasto-plastic dynamic analysis for multi degree of freedom shear spring model is proposed. By using proposed optimization method, the optimal damper distribution, defined as minimum damper distribution satisfying the target story drift angle for seismic retrofit, is obtained. Finally, comparison of the results with GA and solutions with equivalent linearization method is represented and the effectiveness of proposed damper distribution rule is discussed.

2. Proposed Hybrid GA Damper Optimization Method for Structural Retrofit

Hybrid GA based damper optimization method using elasto-plasticity time history analysis for structural retrofit is proposed. In this paper, optimal solution is defined as minimum damper design satisfying the displacement limits on each story, therefore, horizontal response of multi-degree of freedom shear spring model subjected to earthquake wave is obtained with dynamic response analysis. In damper optimization, the sum of damper stiffness in each story (ductility factors of dampers on each story is identical.) is considered as objective function and minimization of the objective function is carried out under the limiting condition with Hybrid GA. Hybrid GA is consisted of SGA for global search and Hill-climbing method for local search where it is effective for searching optimal solution from a huge amount of solution space.

3. Application of Damper Optimization Method to Structural Retrofit with Hybrid GA

Proposed optimization method of damper distribution on structural retrofit is applied to the multi degree of freedom model of 5 and 9 story analysis models. The 5 story models are designed based on actual Turkish RC school buildings where the analysis models have weak stories (1F-4F) and 9 story model is also designed based on actual Turkish RC building. The optimal damper distributions on each model are obtained with hybrid GA for seven different earthquake waves. The shape of obtained optimal damper distributions normalized by maximum amount of damper are almost identical for each earthquake wave. Moreover, the relationship between earthquake intensity and the amount of damper obtained by optimal damper design with GA are almost linear. The optimization calculation of 5 story model takes about half a day, and that of 9 story model takes for several days with a regular personal computer, and time mostly depends on the number of degree of freedom of analysis model and input earthquake data. Also, the search performances on Hybrid GA and SGA are compared and the effectiveness of hybrid GA on local search is confirmed.

4. The Effectiveness of Damper Distribution Rule with Equivalent Linearization Method

The effectiveness of existing damper distribution rule obtained equivalent linearization (EL Method) is investigated by comparing with the proposed optimization with Hybrid GA (GA method). It is shown that the design solution obtained by EL method is on safer side compared to optimal design obtained with GA on all analysis models and the effectiveness of damper distribution with EL method is confirmed. However, the difference is less obvious in the case of optimal damper distribution of 9 story model, which may be attributable to the fact that optimization method with GA takes higher mode contribution into account.