

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06637

研究課題名(和文) 免震建物の圧倒的に計算効率のよい多目的最適設計支援システムの開発

研究課題名(英文) OPTIMAL DESIGN OF BASE-ISOLATED REINFORCED CONCRETE BUILDINGS

研究代表者

田守 伸一郎 (Tamori, Shinichiro)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：40179916

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート造および鉄骨造免震構造物を対象に多目的遺伝的アルゴリズムより計算効率のよいシステムを開発した。鉄筋コンクリート造免震建物においては、局所探索である多目的タブーを採用することで制約条件を満足するのに必要な計算回数がおよそ1/16になった。鉄骨造免震建物においては、局所探索法に誘導システム(部材応力が制限値を超えた場合は検定比の大きな部材を変更の候補とし、それが許容値よりも小さい場合は、余裕が一番ある部材に変更の操作を加える。)によって、より少ない計算回数で制約条件を満足できる設計例を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

免震建物の構造設計において、構造設計者は無数にある免震装置と骨組部材の組み合わせの中から、様々な制約条件を満足したうえで、コストや構造性能を考慮した免震装置と骨組部材を選定する必要がある。そのために断面の仮定や応答計算、部材の変更などを繰り返しおこなう必要があり、大変な労力を要しており、最適設計支援システムの構築が望まれてきた。これまで、免震構造物を対象に遺伝的アルゴリズムを用いた最適設計支援システムを開発してきたが、計算時間が非常にかかるので、より効率的なシステムの構築が必要となっている。

研究成果の概要(英文)：A more efficient system than the optimal design method using a genetic algorithm (SPEA2: Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) was developed for reinforced concrete and steel-frame seismic base isolation structures. The number of calculations required to satisfy the constraint is reduced to 1/16 by adopting a multi-objective taboo local search for reinforced concrete seismic isolation buildings. In the case of the steel frame base isolation buildings, the number of calculations required to satisfy the constraint conditions has been reduced by using the guide system (if the stress of the member exceeds the limit, the member with a large test ratio as a candidate for change, and if it is less than the allowed value, the operation should be carried out on the member with the most margin.).

研究分野：建築構造学

キーワード：免震構造物 最適化 タブーサーチ 遺伝的アルゴリズム 山登り法 誘導システム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

免震建物の構造設計において、構造設計者は無数にある免震装置と骨組部材の組み合わせの中から、様々な制約条件を満足したうえで、コストや構造性能を考慮した免震装置と骨組部材を選定する必要がある。そのために断面の仮定や応答計算、部材の変更などを繰り返しおこなう必要があり、大変な労力を要する。一方、これまでの免震建物の最適設計についての一連の研究<sup>1) 4)</sup>において、様々な制約条件を満足する設計解を得るシステムの検討がおこなわれている。多目的最適化手法の一種である SPEA2(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) を免震建物の最適設計に適用したシステムでは、複数の目的関数を設定することにより、性能の異なる設計解の同時探索が可能であることが確認されている。<sup>1)</sup>しかし、多点探索型の最適化手法である SPEA2 は最適化のために多くの計算時間を必要としており、より計算時間のかからないシステムの構築が望まれている。

2. 研究の目的

免震構造物を対象に設計の制約条件を満足するのに必要な計算回数より少ない最適設計支援システムを構築することが目的である。

3. 研究の方法

単点探索型である山登り法(Multi-Objective Hill Climbing: MOHC)、タブー探索法 (Multi-Objective Tabu Search: MOTS)、焼きなまし法 (Multi-Objective Simulated Annealing: MOSA)、と多点探索型である SPEA2(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2: SPEA2)による最適設計システムを構築し、より計算時間のかからない手法、計算条件を検討した。

4. 研究成果

4-1 鉄筋コンクリート免震構造物の最適設計

4-1-1 概要

MOTS と SPEA2 を用いた最適設計システムを構築した。最適設計の目的関数として上部構造の層間変形角、部材総重量を設定した。層間変形角が小さければ地震時の損傷が低減され、部材総重量が軽ければ建設コストの低減につながる。制約条件として部材の応力・変形が制限値以下(建物に損傷を与えないレベル)であることとした。目的関数は建物の性能を示す指標となるが、制約条件を満足しなければ免震建物として成立しない。さらに施工上実用的な条件として部材断面寸法のグループ化を採用し、同じような条件の位置に使われる部材は断面寸法が同一になるようにした。また、はり幅が柱幅より小さいこと、上階の柱断面が下階の柱断面より小さくなることを制約条件に加えた。

解析建物は、6 層 4×1 スパンの RC 造免震構造物であり、免震装置をすべての 1 階柱直下に設置した基礎免震構造である。免震装置数は 10 基、骨組部材数は柱 60 本、梁 91 本の計 151 本である。使用部材は、免震装置は 5 種類、柱部材は 16 種類、梁部材は 16 種類、主筋は 4 種類、せん断補強筋は 6 種類から選択することとした。立体骨組モデルを図 1 に、グループ化の設定について図 2 に、表 1 に解析パラメータを示す。

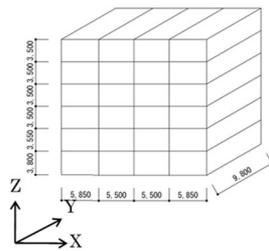


図 1 立体骨組モデル

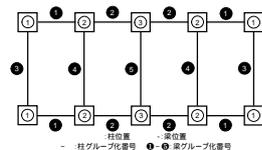


図 2 グループ化の設定

表 1 解析パラメータ

解析手法	多点探索型	単点探索型
	SPEA2	MOTS
評価計算回数	100000	100000
1世代の個体数(近傍解生成数)	100	25
最大繰り返し世代数	1000	4000
選択・淘汰方法	エリート選択&ルーレット選択	
交叉方法	二点交叉	
交叉率	0.9	
突然変異率	0.01	
逆転率	0.02	
改善許容回数		100
アスピレーション基準の判定		あり
タブー判定		あり
タブー期間		部材数の10%を最大としランダム

4-1-2 地震応答計算

本研究では、擬似立体モデルを用いた応答スペクトルによるモーダルアナリシスによって地震応答計算をおこない、応答値を求める。応答値計算に用いる応答スペクトルは、最大速度を 50 cm/s に基準化した 1940 El Centro NS, 1952 Taft EW, 1968 Hachinohe NS, 告示、これらの 4 つの包絡スペクトルとする。なお、モーダルアナリシスにおいては建物を弾性モデルとしているが、免震層の変形によって免震層の剛性や減衰性が変わるので、等価線形化法を用いた収束計算をすることで免震層の応答値を予測する。収束判定は、免震層の応答変位と仮定変位の誤差が 5% 以内に収まる場合、収束したものとす。

4-1-3 解析結果

表 2 に解析によって得られた、制約条件を満足するまでに必要な評価計算回数を示す。これより、試行 10 回の平均で見ると MOTS による計算回数は SPEA2 の 1/16 程度に低減されていることがわかる。なお、表中の × 印は制約条件を満足する解が得られなかったことを意味している。

図3, 4に目的関数1, 2の推移を示す。これより, MOTSによる設計解はSPEA2より少ない計算回数で実施設計(図中の黒線)と同等の性能を持っていることがわかる。一方でSPEA2による設計解が実施設計の評価値を上回るのに必要な計算回数はばらつきが大きい。

図5に最終世代でのパレート解を示す。それぞれの点が1つの設計解の性能を示している。最終解の評価値に着目するとSPEA2の方がMOTSより若干上回っているが, 評価値および解の広がりともMOTSの結果はSPEA2に比べて遜色ない値となっている。このようにMOTSは局所探索の手法であるが, 多点探索型のSPEA2に比べても解の広がり(多様性)はあまり変わらない。

以上の結果から, MOTSによる最適設計支援システムは, SPEA2に比べて, 解の多様性および解の性能とも同等であるにも関わらず, 必要な計算回数は1/16程度になっており, 研究の目的は達成されたといえる。

表2 制約条件を満足するまでの評価計算回数

解析	制約条件を満足するまでの評価計算回数	
	SPEA2	MOTS
1	23200	1000
2	10300	425
3	19900	750
4	5100	1725
5	3100	600
6	×	1200
7	51500	675
8	5300	2325
9	×	925
10	16000	1075
平均	16800	1070

■ SPEA2 ● MOTS ● 実施例

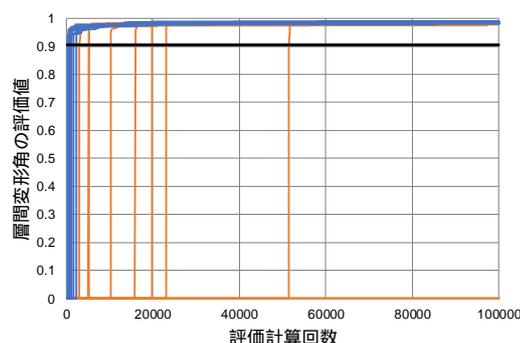


図3 目的関数1の評価値推移

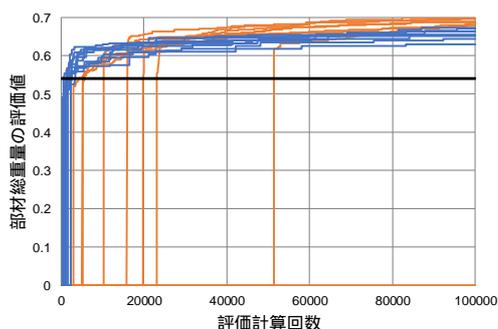


図4 目的関数2の評価値推移

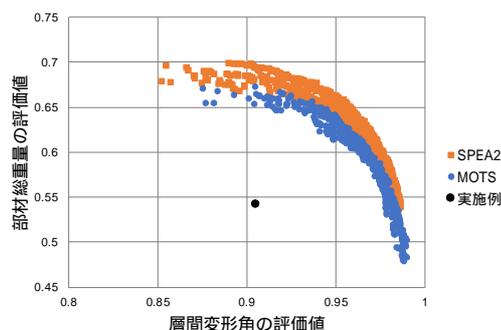


図5 最終世代のパレート解分布

## 4-2 鉄骨造免震建物の最適設計支援システム

### 4-2-1 概要

鉄骨造免震建物を対象にした最適設計支援システムにおいては, 安定して制約条件を満足し, 建物の安全性とコストを考慮した実用的な設計解を効率よく探索することを目的とし, 従来の最適化手法であるSPEA2, MOHC, 及びMOTSに最適化の誘導システム<sup>5)</sup>を応用したプログラムを開発した。

誘導システムにおいては, 以下の操作をする。

#### ) 免震装置

許容面圧(許容圧縮応力度)の検定を満たさない免震装置の中からランダムに変更箇所とする。

) 柱梁部材

許容応力度検定を満たさない骨組部材の中から検定比が大きいほど変更箇所選ばれやすいように変更箇所を決定し,ランダムに部材を大きくする。許容応力度検定を満たさない箇所が全て選択可能部材の中で最大となった場合,検定比が小さいほど変更箇所選ばれやすいように変更箇所を決定し,ランダムに部材を小さくする。なお,変更箇所の決定には,検定比を用いたルーレット選択を用いる。

)評価方法

個体の評価値として制約条件(部材の応力と変形)による評価値を用いる。つまり,制約評価を目的関数とした単一目的最適化となる。以上の誘導操作を SPEA2, MOHC 及び MOTS に適用したシステムを, GSPEA2(Guided Strength Pareto Evolutionary Algorithm, 多目的誘導山登り法 MOGHC

( Multi-Objective Guided Hill Climbing ), 多目的誘導タブー探索法 MOGTS ( Multi-Objective Guided Tabu Search ) と呼称する。

なお,GSPEA2 では次世代の個体生成に交叉という手法を用いるため,変更箇所を意図的に誘導することが難しい。そこで,評価方法による誘導のみを適用した。解析パラメータを表3に示す。解析建物は4層8×3スパンの実在する鉄骨造免震建物とした。骨組部材数は梁278本,柱135本であり,免震装置使用数は28基

表3 解析パラメータ

解析手法	遺伝的アルゴリズム		単点探索型			
	SPEA2	GSPEA2	MOHC	MOGHC	MOTS	MOGTS
評価計算回数	100000	100000	100000	100000	100000	100000
1世代の個体数	100	100	1	1	100	5
最大繰り返し世代数	1000	1000	100000	100000	100	20000
設計解の誘導	×	○	×	○	×	○
選択・淘汰方法	エリート保存+ルーレット					
交叉方法	二点交叉					
交叉率	0.9					
突然変異率	0.01					
逆転率	0.02					
改悪許容回数					1000	1000
アスピレーション基準判定			×	×	○	○
タブー判定			×	×	○	○

である。そこで,評価方法による誘導のみを適用した。解析パラメータを表3に示す。解析建物は4層8×3スパンの実在する鉄骨造免震建物とした。骨組部材数は梁278本,柱135本であり,免震装置使用数は28基

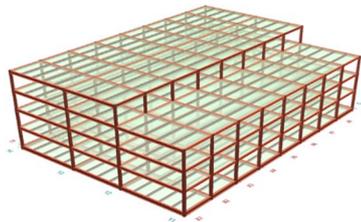


図6 立体骨組モデル

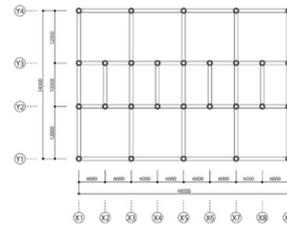


図7 免震装置配置

である。図6に解析建物の立体骨組モデルを,図7に免震装置の配置を示す。

4-2-2 解析結果

図8,9に各最適化手法で10回の解析から得られた目的関数1と2の推移をそれぞれ示す。これより,制約条件を満たさない設計例(評価値が0.1以下)だったものが,誘導システムを導入することによって,ほとんどの場合,制約条件を満たすことがわかった。評価値の高かったのは,MOGHCとMOGTSであった。表4に制約条件を超えるために必要だった計算回数を示す。これより,MOGHCは計算効率が最も高いことがわかる。以上のように鉄骨造免震建物においても誘導システムを導入することによって計算回数は激減することが分かった。

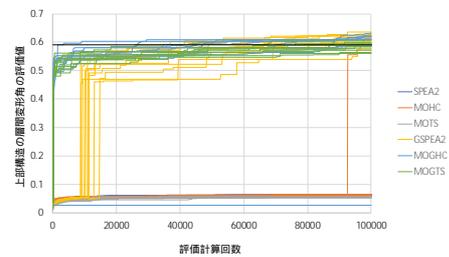


図8 目的関数1の評価値

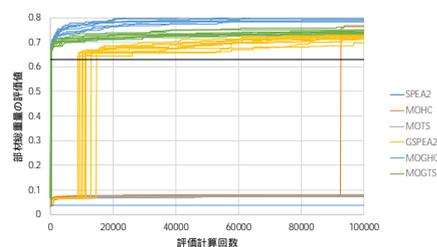


図9 目的関数2の評価値

表 4 制約条件を満足するのに必要な計算回数

解析	制約条件を満足するまでの評価計算回数		
	GSPEA2	MOGHC	MOGTS
1	9400	x	170
2	8800	85	195
3	11300	66	315
4	10100	60	155
5	8900	74	155
6	14700	75	180
7	10900	39	180
8	11300	62	145
9	13000	263	160
10	10300	147	135
平均	10870	97	179

参考文献

- 1)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設計 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)小嶋健嗣,田守伸一郎:多目的タブー探索によるRC造免震建物の最適設計,日本建築学会北陸支部研究報告集,第60号,pp17-20,2017.7
- 3)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50号,pp.29-34,2016.2
- 4)長谷川伸,田守伸一郎,金原航:多目的温度並列擬似焼きなまし法と山登り法のハイブリッドによるRC造免震建物の最適設計,日本建築学会北陸支部研究報告集,第62号,pp37-40,2019.7
- 5)福田海里,田守伸一郎:誘導タブー探索法を用いた鉄骨造免震建物の最適設計,日本建築学会北陸支部研究報告集,第62号,pp.45-48,2019.7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長谷川伸, 田守伸一郎, 金原航
2. 発表標題 多目的温度並列擬似焼きなまし法と山登り法のハイブリッドによる RC 造免震建物の最適設計
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川伸, 田守伸一郎
2. 発表標題 適応的の最高温度を持つ多目的擬似焼きなまし法を用いた鉄骨造免震建物の最適設計
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田海里, 田守伸一郎
2. 発表標題 誘導タブー探索法を用いた鉄骨造免震建物の最適設計
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金原航, 田守伸一郎
2. 発表標題 多目的温度並列擬似焼きなまし法を用いたRC造免震建物の最適設計
3. 学会等名 日本建築学会北陸支部研究報告集
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	金原 航  (KINNPARA WATARU)		
研究協力者	福田 海里  (FUKUDA KAIRI)		
研究協力者	長谷川 伸  (HASEGAWA SHIN)		