発見的最適化手法を用いた免震デバイス配置決定法

〇和多日	日 遼*	内山	元希*
木下	拓也*	藤井	英二*
飯野	夏輝*	前田	周作*

キーワード:免震構造 最適化 機械学習 ヒューリスティクス

1. はじめに

免震建物における免震材料(建物の重量を受ける免震支 承,及びオイルダンパーなどの減衰材)の設計は,建物の 構造性能を大きく左右する重要な決定行為である。一方で, 免震材料の決定において,設計者は,選択しうる膨大な支 承材の組合せの中から,制約条件を満足し,かつ性能(例 えば,地震時に上部建物に発生する最大応答加速度や最大 変位,免震材料に生じるコストなど)に優れたものを選び 取る必要がある(図1)。採用しうる組合せが膨大であり, かつ地震時の免震建物の正確な応答予測が困難であるこ とから,限られた設計時間の中で上記の性能に優れた配置 計画を実現するには,設計者の判断(あるいは勘と経験) に頼る部分が大きかった(図2(a))。

上述した免震装置の従来の設計手法に替えて,最適化手 法を活用した設計手法が提案されている。五十子・上谷¹⁾ は,積層ゴム,すべり支承,履歴系ダンパーからなる1質 点系モデルの免震建物について,免震工事費を建物の応答 値に関する制約下で最小化する最適化問題を定式化し,最 適性条件から最適な免震層の降伏せん断力と二次剛性を 算出した。ここに,応答値の算定は時刻歴応答解析によら ず,入力地震動のエネルギースペクトルを用いる簡易な包 絡解析法によっている。同手法は,評価が簡便であるため, 設計初期段階で動的応答の概算値を計算するのに有効で あるが,時刻歴応答解析により算定される応答値(以下, 「実応答値」)との差が大きい場合がある。 免震材料の設計においては、支持すべき軸力が柱位置に より異なる中、支承材の許容軸力内で偏心の生じないよう に免震材料を配置する必要があり、これらの制約も設計時 の大きな課題になる。田守ら²⁰は、免震配置の決定に発見 的最適化手法を用いる手法を示し、制約条件の強い同問題 に焼きなまし法(simulated annealing、以下 SA)などの 局所探索系アルゴリズムが有効であることを示した。

免震装置の設計に最適化手法を活用するにあたり,前述 の包絡解析法などを用いる場合を除き,応答値を時刻歴応 答解析により算定する必要がある(図 2(b))。しかし,一 般に時刻歴応答解析は時間を要するため,検討すべき組合 せ数の多い免震装置最適化問題において,それを解くに足 る回数の繰り返し計算を行う際に,その都度時刻歴応答解 析を実行するのは,計算コストの観点からも,実務におけ る設計スケジュールの観点からも現実的でない(図 3(a))。 よって,時刻歴応答解析によらず応答値を推定する手法と して,前述の包絡解析法の他,告示免震建物と同様に加速 度応答スペクトルから応答値を推定する手法(図 3(b),以 下「応答スペクトルによる推定手法」)などが考えられる が,こちらも実応答値と推定値の差が大きい場合がある。

本研究では、実務設計の場で容易に実施可能な免震装置 の種別・配置最適化手法を提案することを目的として、応 答値の推定に、機械学習を終えた推定器(図 3(c))を利用 する最適化フローを提案する。



図1 免震装置の設計問題



図2 従来の設計手法と最適化による設計手法

2. 最適化問題の定式化

本研究で扱う免震装置の種別・配置最適化問題の概要を 示す。なおここでは、同問題を考えるにあたり、免震層上 部建物の重量、免震支承の数および平面的な座標、各支承 に生じる長期(仮定可能ならば短期も)の軸力分布、考慮 する入力地震動の時刻歴加速度データは与えられている 状況を想定する。

本研究で扱う問題は,多目的組合せ最適化問題として次 式で定式化される。

(P)	
Minimize	$\text{DISP}(X, C_v), \text{ACC}(X, C_v), \text{COST}(X, C_v), \text{N}_{\text{dev}}(X)$
s.t.	$g(X) \ge 0$
	$X \in L_{iso}$
	$C_{\mathrm{v}}^{\mathrm{L}} \leq C_{\mathrm{v}} \leq C_{\mathrm{v}}^{\mathrm{U}}$

ここに、目的関数である DISP、ACC、COST、N_{dev}はそ れぞれ、地震時に免震層上部に生じる最大応答変位、最大 応答加速度、免震支承とオイルダンパーを合わせた総コス ト、使用する免震支承の種別数を表す。また、Xは免震支 承の選択を表す設計変数、 L_{iso} は選択候補とする免震支承 のリストを表す。 C_v は付加する粘性ダンパーの減衰係数を 表す設計変数であり、 C_v^U および C_v^L はその上下限値を表 す。 L_{iso} 、 C_v^U および C_v^L は、軸力レベルや建物規模等から 設計者が事前に定める。 $g(X) \ge 0$ は免震装置の設計時に満 たすべき全ての制約条件で、長期および短期の軸力上下限 値制約、偏心率の制約などからなる。

なお,実際の設計において,オイルダンパーは既製のも のを使用し,またその種類はあらかじめ決めたうえで,そ の個数を調整するのが一般的である。よって,以降は問題 (**P**)中の $C_{v_{\mu}}C_{v_{\mu}}^{U}C_{v_{\mu}}$ をそれぞれ,オイルダンパーの個数を 表す設計変数 n_v およびその上下限値 n_v^U, n_v^L に読み替えて扱う。

3. 提案する最適化手法のフロー

本研究で提案する手法のフローを以下に示す。

フェーズ0:事前学習 ①免震特性の広範な分布をカバーする学習用免震配 置データセットを作成(データ数を N.とする)。 ②①で作成した免震配置データから表1中の「入力」 に示す諸元を算定。 ③①で作成した免震配置データに対し、時刻歴応答 解析を実施し、対応する変位及び加速度の実応答 値を算定。 フェーズ1:推定器を用いた最適化と優良解探査 ①学習済みの推定器とSAによる優良解選定(探索解 の数を N_pとする) ②SAにより得られたパレート最適解(および,必要) に応じその近傍)の中から、フィルタリングによ り「優良解」を選定(この個数を Ne とおく) フェーズ2: 選定された優良解の時刻歴応答解析 ①フェーズ1の②で選定された Ne個の「優良解」全 てに時刻歴応答解析を実施 ②①により算定された実応答値を考慮しつつ、最終 採用解を決定

このフローにおいて、時刻歴応答解析が必要な回数は $N_{s}+N_{e}(\ll N_{p})$ である。



4. 実施例

図4に示す長期および短期支点反力分布を持つ4×4ス パンの上部建物を対象に,免震支承の種別・配置およびオ イルダンパー本数の最適化を行う。ここに,免震支承の選 択候補リスト *L*_{iso},オイルダンパーの種別,およびそれら のコストを表2に示す。免震支承は配置の対称性から図4 に示す6グループにグルーピングし,同グループ内では同 じ支承が選択されるものとした。*n*_v^U,*n*_v^Lはそれぞれ8およ び0とし,検討用地震動はレベル2相当の標準波および告 示波それぞれ3波,計6波とした。

事前学習(フェーズ 0)用のデータは N_s=300 とし,選択 候補リストから生成されうる免震特性の範囲を広範にカ バーするよう配慮しつつ作成した。学習用データの免震特 性の分布を,等価周期と減衰定数について図 5 に示す。時 刻歴応答解析は質点系モデルで行った。全時刻歴応答解析 に要した時間は,個人用 PC で数時間程度であった。 学習には R の機械学習ライブラリを用い, アルゴリズム にはランダムフォレスト³⁾を採用した。学習により得られ た推定器の精度検証を,別途作成した 50 個のランダムな 免震配置データに対して行った結果を図 6 に示す。得られ た推定器は,比較対象とした応答スペクトルによる推定結 果と比較しても,良い精度を有していることが分かる。

得られた推定器を用いて、多目的 SA による最適化を行った(フェーズ1)。初期解を20個ランダムに作成し、重複を含み1500回繰り返し計算を行った($N_p=20 \times 1500=30,000$)。計算には汎用最適化パッケージmodeFRONTIER 2017R5を使用した。計算時間は個人用PCで約8時間であった。全探索解について、目的関数値によりプロットした結果を図7に示す。また、フェーズ1により算定された159個のパレート最適解について、各目的関数値を軸とする多次元解析チャートを図8に示す。これらの中から、例として(a)推定加速度最小、(b)推定変位







最小, (c)コスト最小の免震配置,およびこれらの目的関数 値がいずれも中間的な値を取る(d)の4個について,免震配 置とダンパー数を図9に示す。

これら159個のパレート解を優良解として、フェーズ2 で検証した。推定された応答値と実応答値の比較結果を図 10に示す。同図中に前述の4例a,b,c,dを合わせてプロッ トしている。図10より、機械学習結果を用いる本手法に より選定された解の応答量推定値は、同じ解集合において 応答スペクトルを用いて応答結果を推定した場合(図11) と比べても、より良い精度を有していることが確認された。 設計者は、これらの優良解の中から、目的関数値のフィル タリング等を行い採用する配置を選択することができる。

5. まとめ

本研究では,機械学習と発見的最適化手法の組み合わせ

図11 (参考)応答スペクトルで応答量を推定した場合 (横軸:推定値,縦軸:時刻歴応答解析による実応答値)

により,実務設計に容易に適用が可能な免震装置の種別お よび配置の最適化手法を提案した。今後,実際のプロジェ クトに適用する予定である。

[参考文献]

- 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,Vol. 586, pp. 87-94, 2004 年 12 月
- 2) 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,タブー検索による配置計画の検討,構造工学論文集, Vol. 54B, pp. 599-607, 2008 年 3 月
- Leo Breiman: Random Forests, Machine Learning, Vol. 45, Issue 1, pp. 5-32, 2001

^{*} 竹中工務店