

慣性質量ダンパーを用いた連結制振建物の信頼性に基づくロバスト最適設計

RELIABILITY-BASED ROBUST DESIGN OPTIMIZATION FOR BUILDING-CONNECTING INERTIAL-MASS DAMPER

村瀬 充*¹, 竹脇 出*²

Mitsuru MURASE and Izuru TAKEWAKI

In this paper, we propose an accurate and efficient reliability evaluation method for robust design optimization using a probabilistic approach. First, we verify the validity of this method using two benchmark functions. Then, we apply this method to the robust design optimization problem of building-connecting damper parameters and verify the effect of robust design. We consider the variation of the natural period and structural damping ratio of buildings, and directly evaluate the criteria satisfaction rate (CSR) using the response value calculated by time-history response analysis.

Keywords : *Variability analysis, Reliability-based design optimization, Robustness, Inertial mass damper, Building-connection vibration control*

ばらつき解析, 信頼性最適設計, ロバスト性, 慣性質量ダンパー, 連結制振

1. 序

近年, 建築物の最適設計に関する研究が数多く報告されており^{例え}ば¹⁻⁵⁾, 外乱や構造物特性の不確定性を考慮したロバスト設計やロバスト最適設計に関する研究も報告されている⁶⁻¹⁷⁾。これらの不確定性は, 確率的に取り扱う方法(probabilistic approach)と非確率的に取り扱う方法(possibilistic approach)に大別される。

非確率的な不確定性を取り扱う理論は, ばらつき変数の変動幅を指定し, 区間解析⁶⁾, 凸最適化⁷⁾あるいは多項式近似⁸⁾により最悪応答値を評価する手法や, ばらつき変数の変動幅を議論しない最悪ケース解析手法^{9,10)}が提案されている。また, ロバスト性の定量的評価手法として, 区間内の最悪応答値がクライテリアと一致するときの変動幅をロバスト性指標とする Info-gap ロバストネス解析^{8,11,12,13)}が提案されている。これらの理論を用いたロバスト最適設計に関する研究として, 藤田ら⁸⁾は時刻歴応答解析による最大応答値を Taylor 展開により高精度に予測する手法を用いて, 構造物の物性ばらつきを考慮したロバスト最適化手法を提案した。寒野ら¹³⁾は, 2つのインパルス入力を用いて弾塑性建物の共振時最悪応答値を表現する手法を利用し, 1質点モデルの固有周期や降伏変位等のばらつきを考慮したロバスト性評価手法を提案した。山川ら¹⁴⁾は, 順序統計量に基づき最悪応答値を予測する手法を用いて, 地震動の周期特性および構造物の物性ばらつきを考慮したロバスト最適化手法を提案した。これらの手法は, 設定したばらつき条件において目標性能を 100% 満足する設計解を得るものであるが, 場合によっては過剰設計につ

ながる可能性があることが指摘されている。

一方, 不確定性を確率的に取り扱うものとしては, 信頼性理論に基づく研究¹⁸⁻²⁶⁾が数多く展開されている。一般的に, 応力解析や応答解析に基づく建物の性能評価は計算負荷が大きく, 不確定性を有する建物の性能が目標性能を満足する確率を直接求めることは容易ではない。そこで, 一次信頼性評価法(FORM)や確率モーメントを用いてそれらを発展させた手法による近似法が提案されている^{例え}ば^{18,19)}が, 限界状態関数を線形近似あるいは曲面近似するため, 性能関数が強非線形性を有する場合には精度に課題があると指摘されている。また, 性能関数を応答曲面(Response Surface Method : RSM)で近似し, RSMを用いたモンテカルロシミュレーション(MCS)により確率を直接求める手法も提案されており, 多項式で近似する例^{20,21,22)}やクリギングで近似する例^{23,24)}が報告されている。一方, ロバスト性最適化事例と比べ, 信頼性に基づく最適設計(Reliability-Based Design Optimization : RBDO)の報告例^{25,26)}は少なく, 目標性能を満足する確率を直接求めた RBDO 例はほとんどない。RBDOにより, 設定したばらつき条件内の目標性能を満足する確率(Criteria Satisfaction Rate : CSR)を明示し, CSR と許容ばらつき量や, CSR とコスト指標のトレードオフ関係を得ることができる。この情報は, 建物の被災リスクや供用期間の情報と併せて, ライフサイクルコストの最適設計に有用である。

本論文では, 著者らが前報^{27,28)}で報告した慣性質量ダンパー(IMD : Inertial Mass Damper)を用いた連結制振建物に対し, 構造物

*¹ 清水建設(株)技術研究所 研究員・修士(工学)
/ 京都大学大学院工学研究科博士後期課程学生

*² 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.
/ Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

の物性ばらつきを考慮した連結ダンパーのロバスト最適設計法を展開し、物性ばらつきを考慮しない最適設計の結果と比較することで、ロバスト最適設計の効果を確認することを主目的としている。ロバスト最適設計問題の解法としては、応答曲面の高精度高効率近似手法の導入により、目標性能を満足する確率を直接算出する新しいRBDO手法を提案する。提案RBDOの妥当性は、複数のベンチマーク関数を利用してMCSや既往手法と比較することで確認する。なお、本論文において、設計変数のばらつきに対して建物の応答が設計クライテリアを満足する能力(確率)をロバスト性と定義する。

Ben-Haimの提唱したInfo-gapロバストネス関数¹¹⁾とRBDOにおけるCSR関数の関係をFig.1に示す。ここで、Fig.1の左の図の横軸は性能クライテリア p を表し、グラフの右側ほど性能クライテリアが緩和されていることを示す。また、Fig.1の左の図の縦軸はモデルが性能クライテリアを満足する最大許容変動幅であり、値が大きいほどロバスト性が高い。Info-gapロバストネス関数は、最悪応答値と性能クライテリアが一致するときの最大許容変動量を示すためCSR100%に相当し、RBDOの概念を導入することで、Info-gapロバストネス関数を拡張することができる。性能要求 p' に対するCSR100%の最大許容変動量を $\hat{\alpha}_{100}$ と表す。一方、CSR95%を許容した場合、同じ性能要求を満たす最大許容変動量 $\hat{\alpha}_{95}$ は常に $\hat{\alpha}_{95} > \hat{\alpha}_{100}$ の関係を満たす。言い換えると、不確定性を有する建物の性能が目標性能を一部満足しないことを許容することで、最大許容変動量は増大する。ただし、 $\hat{\alpha} = 0$ はばらつきを考慮しないことを意味するため、CSRを定義することはできない。

2. 提案RBDO手順

提案RBDOの手順をFig.2および以下に示す。ここでは、設計パラメータ x のノミナル値 \bar{x} が設計変数であるものとし、ここでのRBDOはCSRとInfo-gapロバストネス関数の同時最適化、あるいはCSRとコスト指標の同時最適化を想定する。

手順(1) 設計パラメータ x のノミナル値 \bar{x} およびばらつき幅 α を指定する。ここで、 $\bar{x} = \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$, $\alpha = \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ としたとき、設計区間 $x(\bar{x}, \alpha)$ は次式で表される。

$$x(\bar{x}, \alpha) = \{x_i | [\bar{x}_i - \alpha_i \Delta x_i, \bar{x}_i + \alpha_i \Delta x_i], i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

ただし、 Δx_i は設計パラメータ x_i のばらつき変動基準、 i は設計パラメータ番号、 n は不確定設計パラメータ数を示す。

手順(2) 設計区間 $x(\bar{x}, \alpha)$ に対して目標性能を満足する確率CSRを逐次更新クリギング(Adaptive Kriging: AK)およびモンテカルロシミュレーション(MCS)により算出する。この手法はAK-MCSと呼ばれる²³⁾。

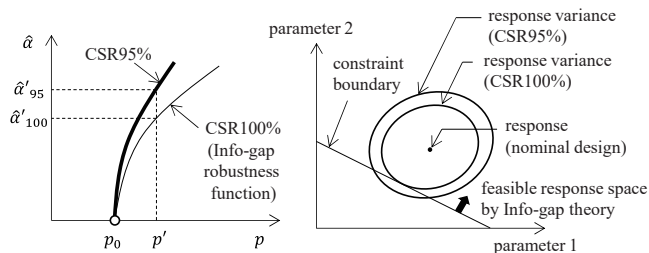


Fig. 1 Relation between Info-gap robustness function and RBDO

手順(3) 指定した \bar{x} および α より、コスト、CSR、 α の関係をj得る。
 手順(4) 手順(1)で指定したノミナル値 \bar{x} およびばらつき幅 α と異なるノミナル値 \bar{x} およびばらつき幅 α を指定し、 \bar{x} や α に対して手順(1)~手順(3)を繰り返す。

手順(5) CSRと α やCSRとコストのパレート解集合を得る。

上記のように、RBDOでは計算負荷の大きいCSR計算を多数回実施する必要があるため、1回のCSR計算における解析実施回数をできる限り少なくすることが望ましい。本論文では、CSR計算における計算時間の短縮のため、性能関数を応答曲面法(RSM)により近似し、得られた応答曲面を利用してモンテカルロ法による数値計算でCSRを算出する。ここで、CSRを高精度に算出する際に最も重要なクライテリア境界面の効率的探索のため、応答曲面は確率論に基づく空間内挿法であるクリギングを用いる。クリギングは、サンプル位置からの距離を元に既存サンプル位置の応答結果を用いた線形結合で表現する。このとき、推定点の推定応答値の平均値および推定誤差分散(推定値の不確かさ)を計算できる。さらに、計算を効率化するため、初期サンプル数を減らし、クライテリア境界面付近であると推定される領域(後述の式(6)を満たす領域)内において、既往のサンプル取得点からの距離が最も大きくなる点に追加サンプルを取得する逐次更新クリギングを用いる。この選択方法は、Echardら²³⁾や北原ら²⁴⁾が提案した方法では考慮されていない新しい方法である。

提案RBDOの手順(2)の詳細をFig.3および以下に示す。

手順(2-1) k 個の初期サンプルの解析を行う。初期サンプルはばらつき区間内で等間隔に設定し、得られた応答値(真値)を z_j とおく。ただし、 j は解析ケース番号を示し、 $j = 1, 2, \dots, k$ とする。

手順(2-2) サンプルの解析結果およびサンプル取得位置間の距離 h の関係から、バリオグラム $\gamma(h)$ を設定する。

なお、バリオグラムとはデータ間の空間相関性に相当し、既往の例と同様に、以下の式で表されるガウスモデルを用いる。また、各係数は経験バリオグラムと理論バリオグラムの誤差2乗和RSSを最小とする最小2乗法を用いて設定する。

$$\gamma(h) = b + (c - b)[1 - \exp\{- (h/a)^2\}] \quad (2)$$

ここで、 a, b, c はそれぞれレンジ、ナゲット、シルと呼ばれる。本論文では、ナゲット(距離ゼロにおける非類似度の変動)は0とする。

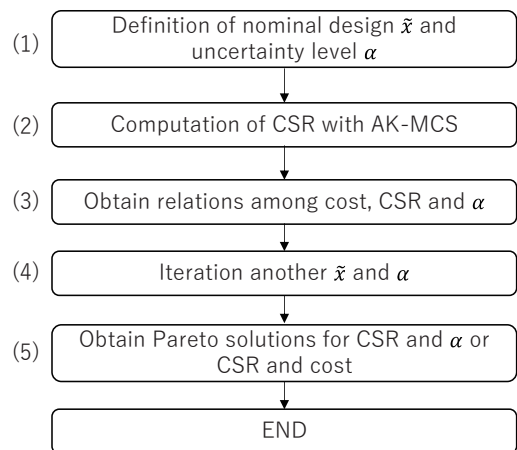


Fig. 2 RBDO flowchart

手順(2-3) バリオグラムを用いてばらつき区間内の推定応答の平均値 $z^*(\mathbf{x})$ および推定誤差分散 $\sigma^{*2}(\mathbf{x})$ を通常クリギングで計算する。以降、*を推定値として真値と区別して表す。

ここで、推定点を $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{x}$ としたとき、 $z^*(\mathbf{x}_0)$ および $\sigma^{*2}(\mathbf{x}_0)$ はそれぞれ以下の式で表される。

$$z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{j=1}^k \omega_j z_j \quad (3a)$$

$$\sigma^{*2}(\mathbf{x}_0) = \sum_{j=1}^k \omega_j \gamma(\mathbf{h}_{0,j}) + \mu \quad (3b)$$

ただし、 $\omega = \{\omega_j | j = 1, 2, \dots, k\}$ はクリギング係数、 $\gamma(\mathbf{h}_{0,j})$ は推定点と既存サンプル位置の距離に応じたバリオグラム、 z_j は初期サンプル点(j 点)における応答である。また、クリギング係数 ω およびラグランジュ未定乗数 μ は、以下のクリギング方程式から計算できる。

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_k \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(h_{1,1}) & \cdots & \gamma(h_{k,1}) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(h_{1,k}) & \cdots & \gamma(h_{k,k}) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \gamma(h_{0,1}) \\ \vdots \\ \gamma(h_{0,k}) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

クリギングは内挿法であるため、サンプル位置での推定応答値 $z^*(\mathbf{x}_j)$ は応答値(真値) $z(\mathbf{x}_j)$ と一致し、既存サンプル位置からの距離が遠いほど推定誤差分散 $\sigma^{*2}(\mathbf{x})$ は大きくなるという特徴がある。

手順(2-4) クリギングの応答推定値の不確実性を考慮するため、応答推定値の平均値に対し安全側に $+2\sigma^*(\mathbf{x})$ を考慮する。応答曲面 $z^*(\mathbf{x})$ および $z^*(\mathbf{x}) + 2\sigma^*(\mathbf{x})$ に対し、 \mathbf{x} の確率密度関数 $f_X(\mathbf{x})$ を用いてクライテリアを満足する確率 $P(z^*(\mathbf{X}) \leq C)$ 、 $P(z^*(\mathbf{X}) + 2\sigma^*(\mathbf{X}) \leq C)$ を(5)式に示す。なお、(5)式は $n = 2$ のときを例示する。また、(5)式の多重積分はモンテカルロ法による数値計算により評価する。

$$P(z^*(\mathbf{X}) \leq C) = \iint_{z^*(\mathbf{x}) \leq C} f_X(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (5a)$$

$$P(z^*(\mathbf{X}) + 2\sigma^*(\mathbf{X}) \leq C) = \iint_{z^*(\mathbf{x}) + 2\sigma^*(\mathbf{x}) \leq C} f_X(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (5b)$$

ここで、 C はクライテリアの値を示す。

手順(2-5) $P(z^*(\mathbf{X}) \leq C)$ と $P(z^*(\mathbf{X}) + 2\sigma^*(\mathbf{X}) \leq C)$ の差の比率が1%未満となった場合、 $CSR = P(z^*(\mathbf{X}) + 2\sigma^*(\mathbf{X}) \leq C)$ とする。1%以上となった場合は、クライテリア境界の精度向上のため新たにサンプル取得を取得する。

手順(2-6) 本手法では、クリギングの応答曲面上において、応答推定値の $\pm 2\sigma^*$ 以内にクライテリア C を含む領域を「クライテリア境界付近にあると推定される領域」とする。上記の領域は(6)式で表現できる。これらの領域の中から、既往サンプル点からの最小距離 $h_{min} = \min(h_1, h_2, \dots, h_k)$ が最大となる点を新しいサンプル点として解析を行う。

$$|z^*(\mathbf{x}) - C| / \sigma^*(\mathbf{x}) < 2 \quad (6)$$

$k + 1$ 個のサンプル位置に対し手順(2-2)以降を行い、手順(2-5)の不等式を満足するまで繰り返す。なお、上記の候補となる点が複数個存在する場合、(6)式の左辺の値が最も小さい点を新しいサンプル点とする。

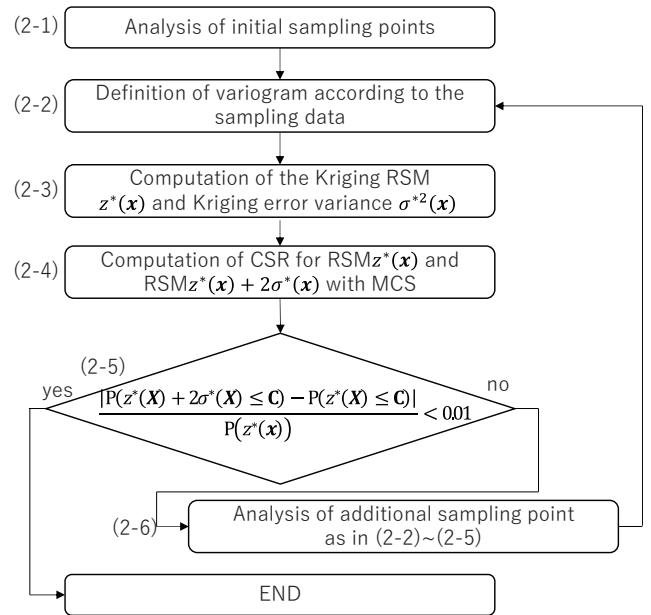


Fig. 3 Adaptive Kriging flowchart

手順(2-5)の判定は、クリギング推定値が正規分布に従うものと仮定したとき、信頼区間約95%でCSRの値の誤差が1%以内となることを表している。

3. 提案 RBDO の検証

2種類のベンチマーク関数を用いて、提案手法によるRBDOの妥当性の検証を行う。提案RBDOはクライテリア境界の推定が重要であるため、ここでは、2変数のばらつきを考慮した建築物の応答曲面とクライテリアとの境界線として凸形、非凸形の2パターンを考慮し、ベンチマーク関数を選択した。

①関数 A (Rosenbrock)

2変数のRosenbrock関数の真値を(7a)式で表す。ノミナル値 $\mathbf{x} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2\}$ を設計変数とし、 \tilde{x}_1, \tilde{x}_2 がそれぞれノミナル値から α_1, α_2 だけばらつくときのクライテリアを満足する確率を考える。なお、例題ではいずれのばらつきも一様分布と仮定する。また、クライテリアは $C = 500$ と設定した。設計区間 $\mathbf{x}(\tilde{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\alpha})$ は(7b)式で表される。

$$z(\mathbf{x}) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (x_1 - 1)^2 \quad (7a)$$

$$\mathbf{x}(\boldsymbol{\alpha}) = \{x_i | \tilde{x}_i - \alpha_i, \tilde{x}_i + \alpha_i, i = 1, 2\} \quad (7b)$$

Fig. 4に、ノミナル値を $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_2 = 0$ 、ばらつきを $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$ としたときの応答曲面(真値)、クライテリア境界および $z(\mathbf{x}) \leq C$ の領域を示す。このとき、MCS(解析回数15000回)によるクライテリアを満足する確率CSRの正解値は0.708である。

提案手法は、初期サンプルを25点(5×5グリッド)とし、2節で示した手順でCSRを算出する。

Fig. 5に、クライテリア境界の収束状況を示す。黒点がMCSで求めたクライテリア境界の正解値であり、青点がクリギングで求めた応答曲面上において式(6)を満たす点群である。青点群の幅が小さいほどクライテリア境界付近の推定誤差が小さいことを表す。提案手法は青点群の中で、白抜き点で示した既存のサンプル点からの距離が最も遠い赤点を追加サンプル点とする。追加サンプル点を含めて新たに作成した応答曲面では、追加サンプル点付近の青点群の幅が小

さくなっており、クライテリア境界をより正確に求められている。このような操作を繰り返し実施し、手順(2-5)の判定式が成立したと

きの収束状況を Fig. 5(f)に示す。提案手法の CSR 計算値は 0.707 であり、MCS による正解値との誤差は 1%以内である。

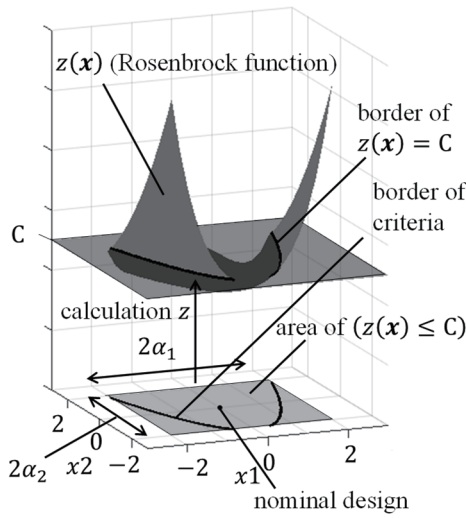


Fig. 4 Rosenbrock function

②Threehump-camel 関数

2変数の Threehump-camel 関数の真値を(8)式で表す。ノミナル値の範囲およびばらつき量は Rosenbrock 関数の場合と同様とし、クライテリアは $C = 2$ と設定した。

$$z(\mathbf{x}) = 2x_1^2 - 1.05x_1^4 + x_1^6/6 + x_1x_2 + x_2^2 \quad (8)$$

Fig. 6 に、ノミナル値を $\hat{x}_1 = \hat{x}_2 = 0$ 、ばらつきを $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$ としたときの応答曲面(真値)、クライテリア境界および $z(\mathbf{x}) \leq C$ の領域を示す。このとき、MCS (解析回数 15000 回) によるクライテリアを満足する確率 CSR の正解値は 0.600 である。

提案手法は、初期サンプルを 25 点(5×5 グリッド)とし、2 節で示した手順で CSR を算出する。

Fig. 7 に、クライテリア境界の収束状況を示す。Rosenbrock 関数の場合と同様、サンプル点を追加することに追加サンプル点付近の青点群の幅が小さくなっており、クライテリア境界をより正確に求められている。このような操作を繰り返し実施し、手順 2-5 の判定式が成立したときの収束状況を Fig. 7(f)に示す。提案手法の CSR 計算値は 0.602 であり、MCS による正解値との誤差は 1%以内である。

③RBDO 結果

本例題の RBDO は、CSR と Info-Gap ロバストネス関数の同時最適化問題とする。いずれのベンチマーク関数も、ノミナル値の範囲は $-5 \leq \hat{x}_1, \hat{x}_2 \leq 5$ 、ばらつき量は $0 < \alpha_1 = \alpha_2 \leq 5$ とすると、最適化問題は以下のように表すことができる。

$$\text{maximize } \begin{cases} \text{CSR} \\ \hat{\alpha} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} -5 \leq x_i \leq 5 \quad (i=1,2) \\ 0 \leq \hat{\alpha} \leq 5 \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 $\hat{\alpha}$ は、既往の Info-gap ロバストネス関数の定義を拡張し、CSR を制約条件としたときの変動パラメータの許容最大変動幅であり、下式で定義される。

$$\hat{\alpha}(x, \text{CSR}) = \max[\alpha | P(z^*(X) + 2\sigma^*(X) \leq C) = \text{CSR}] \quad (11)$$

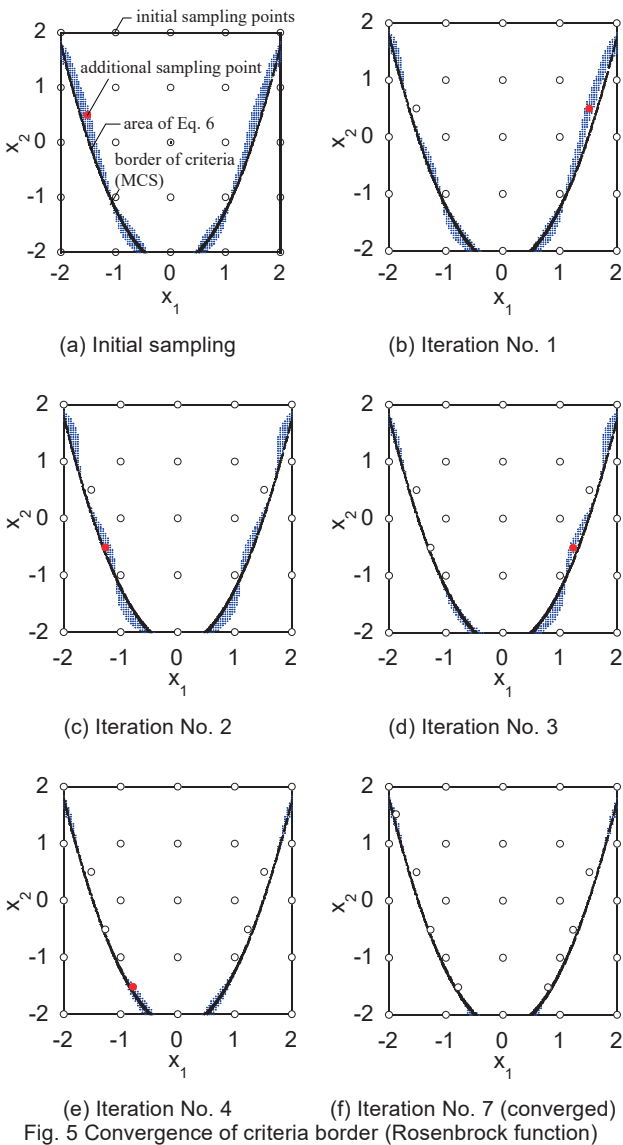


Fig. 5 Convergence of criteria border (Rosenbrock function)

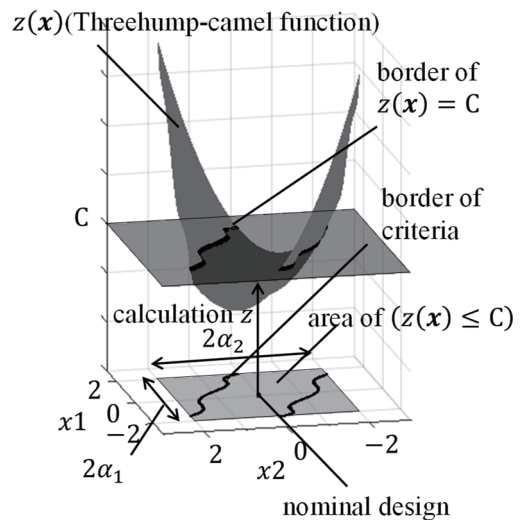


Fig. 6 Threehump-camel function

この最適化問題は、指定したばらつき量に対し CSR が最大となるようなノミナル値を探索する最適化を、様々なばらつき量で繰り返して実施する問題といえる。CSR = 100%のときの最大 $\hat{\alpha}$ が既往の Info-gap ロバストネス関数に対応している。

最適化には modeFRONTIER²⁹⁾を用いる。アルゴリズムは遺伝的アルゴリズムによる発見的手法に基づく piLOPT を採用する。

それぞれのベンチマーク関数の RBDO 結果のパレート解集合を Fig. 8 に示す。グラフは、CSR の算出方法を MCS としたケース (正解値), AK-MCS において追加サンプル点の選択方法が異なる従来手法, および提案手法の結果を重ねて示している。なお, 従来手法は Echard ら²³⁾が提案した以下の評価関数が最小となる点を追加サンプル点として選択する手法であり, 収束条件は(12)式の評価関数がすべての \mathbf{x} において 2 以上という条件である。また, 提案手法は 2 節で提案した手法である。

$$U(\mathbf{x}) = |z^*(\mathbf{x}) - C|/\sigma^*(\mathbf{x}) \quad (12)$$

Fig. 8 より, AK-MCS で CSR を算出した 2 ケースはいずれも MCS で CSR を算出した場合と同様の結果が得られており, 計算精度は良好である。また, パレート解となった解析ケースの解析回数を平均

した値を Table 1 に示す。Table 1 より, 提案手法の方が関数 A では 29%, 関数 B の場合では 27%少ない。実際の応答解析は時刻歴応答解析や FEM 解析など解析時間を要するのに対し, クリギングによる応答推定は(4)式の逆行列計算を一度実施すれば線形和で求められるため, サンプル点数が解析時間に直結する。従って, 提案手法は RBDO の計算時間短縮に効果的である。

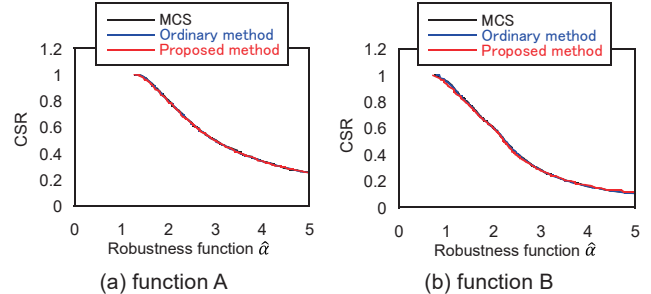


Fig. 8 Pareto solutions of RBDO results (benchmark function)

Table 1 Average number of sample points of Pareto solution set

Method	function A	function B
MCS	15000	15000
Echard ²³⁾	55.75	55.86
Proposed	39.33	40.61
Ratio (Proposed / Echard ²³⁾)	70.5%	72.7%

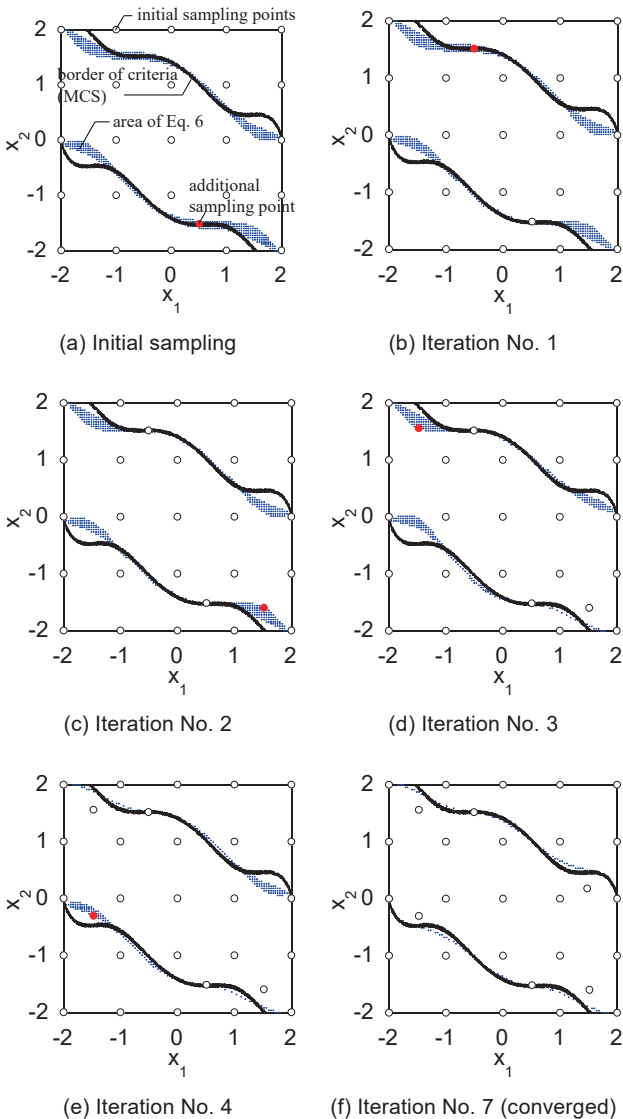


Fig. 7 Convergence of criteria border (Threehump-camel function)

4. ロバスト最適化設計例で対象とする IMD 連結制振建物の概要

提案 RBDO によるロバスト最適化設計例を示す。設計対象は Fig. 9 に示す連結制振建物の連結ダンパー諸元とする。建物の主構造は超高層集合住宅の居住棟, 副構造はタワーパーキング棟とし, 層数はいずれも 31 層とする。連結要素は Fig. 10 に示す IMD とオイルダンパーの並列配置としている。連結層は文献 28)と同様, 主構造の固有モードの腹となる 4 層 (8, 13, 22, 31 層) とした。設計変数はそれぞれの IMD 慣性質量およびオイルダンパー減衰係数の計 8 種類である。解析に用いる諸元は, 主構造の各層の質量を $m_1 = 1.08 \times 10^6$ (kg) とし, 副構造の各層の質量は $m_2 = 1.08 \times 10^5$ (kg) とする。ここで, 左下の添え字は層番号を表し, 右下の添え字は 1 が主構造, 2 が副構造を表す。主構造に対する副構造の総質量比 μ は, $\mu = \sum m_2 / \sum m_1 = 0.10$ である。主構造および副構造の設計用 1 次固有周期はそれぞれ 3.5 秒, 1.0 秒に設定し, 層剛性は 1 次モードの形状が直線分布となるよう設定した後に実状に沿った剛性分布とするため, 主構造, 副構造ともに上 4 層の剛性は上から 5 層目の剛性と同一とした。構造減衰は剛性比例型で設計用減衰定数を 2% とし, 階高は 3.5m とした。

本論文で想定する IMD を Fig. 11 に示す。左端の支持点では軸方向変位のみ拘束し, ボールナットを回転自在とする。右端では回転を拘束し, ボールねじの軸方向変位を自由としている。フライホイール (回転錘) はボールナットと一体化している。

ボールねじの軸方向変位 x により, 回転慣性 I_θ をもつフライホイールを θ 回転させたときの軸方向力 (反力) を F とする。ボールねじのリード (ねじ山ピッチ) を L_d , フライホイールを円盤状として径を D , 質量を m とすると, $x = \theta L_d / (2\pi)$ より次式が成立する。

$$F = \frac{I_\theta \ddot{\theta}}{L_d / (2\pi)} = \left(\frac{2\pi}{L_d}\right)^2 I_\theta \ddot{x} = \frac{\pi^2 D^2}{2L_d^2} m \ddot{x} = z \ddot{x} \quad (13)$$

(13)式より、反力 F はボールねじとボールナットの相対加速度 \ddot{x} に比例し、 z が軸方向の慣性質量となる。フライホイールの形状寸法やボールねじのリードにもよるが、慣性質量 z はフライホイール質量 m の数百倍～数千倍の値をとる。

文献 27)より、IMD で連結することで副構造を主構造に対して TMD のように同調させ主構造の応答倍率を低減することができる。

本検討では、Table 2 および Fig. 12 に示す計 10 波のレベル 2 告示波（ランダム位相）の地震動に対して主構造最大層間変形角の層平均値を算出し、それらの最大値を建物の応答値の目的関数に設定した。これは、地震動の周波数特性による影響を極力排除し、主構造全体の層間変位の低減を目的とした連結ダンパー諸元を得るためである。また、本検討のクライテリアは上記の応答値が 0.004 (1/250) 以下と設定した。

物性ばらつきを考慮しない場合の連結ダンパーコストと応答値の同時最適化問題は(14)式のように表すことができる。

$$\begin{cases} \text{minimize Response} = \max_{j=1,2,\dots,10} (\Delta_j(x)) \\ \text{and Damper cost} = \sum_i i\mu_z + \sum_i ih_c \quad (\text{for all } i) \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 Δ_j は j 番目の地震動入力時の最大層間変形角の層平均値を表す。なお、例題では建物の復元力やダンパーは線形として解析している。また、第 i 層の連結 IMD 量および第 i 層の連結オイルダンパー量を(15a)、(15b)式で表す。

$$i\mu_z = i z / M_1 \quad (\text{for all } i) \quad (15a)$$

$$ih_c = i c_c / c_r \quad (\text{for all } i) \quad (15b)$$

(15a)式は、主構造総質量 M_1 に対する慣性質量の比を示している。(15b)式は、オイルダンパーの減衰係数を主構造 1 質点縮約かつ副構造剛体仮定時の臨界減衰係数 $c_r = 2\omega_1 \sum_i m_1$ で無次元化している。なお、 ω_1 は非連結時の主構造の非減衰 1 次固有円振動数である。

本例題では、IMD 連結制振の同調性には必ずしも拘らず、時刻歴応答解析に基づく応答値の最小化を実施するため、連結ダンパーのコスト指標として(15a)式に示す連結 IMD 量および(15b)式に示す

連結オイルダンパー量の単純和を用いる。実際の建物では、ダンパーのコストはダンパーの種類やダンパーに生じる慣性力や減衰力、ストロークの影響を受けるが、ここでは簡便のため単純和を用いた。

物性ばらつきを考慮しない場合の連結ダンパーコストと応答値のパレート解集合を Fig. 13 に示す。本設計例では、クライテリアに対し 5%程度余裕を有する連結ダンパー諸元 (Fig. 13 中の○印) を、ロバスト性を考慮しない場合の最適解 (Non-Robust Optimization solution : NRO solution) とした。このときの連結ダンパー諸元を 6 節中の Table 3 に示す。

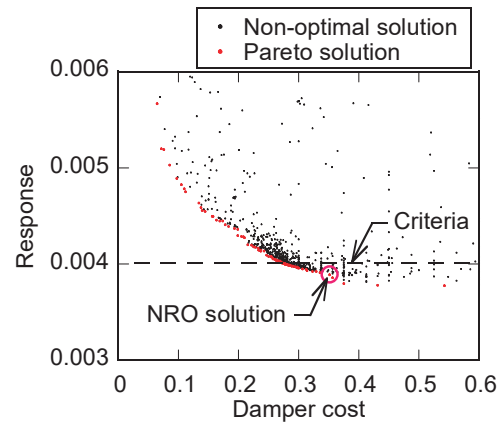


Fig. 13 Non-robust optimization analysis

5. 建物物性のばらつきを考慮したロバスト性の定量的評価

次に、ばらつきを考慮した場合の CSR 評価を行う。本論文で対象とするばらつきは、主構造の非減衰 1 次固有周期 T_1 および主構造の構造減衰定数 h_1 とする。このようなばらつきは、建物の振動性状の変化を伴うため、従来の部分係数法や信頼性指標による設計では考慮できず、確率の直接照査が必要となる。それぞれのノミナル値は 4 節で設定した値とする。ばらつき幅は文献 30)を参考に、1 次固有周期はノミナル値の $\pm 20\%$ 、構造減衰の 1 次減衰定数はノミナル値の $\pm 40\%$ とした (Appendix 1 参照)。上記を(1)式に当てはめると、 $n = 2$, $\bar{x}_1 = \Delta x_1 = \bar{T}_1 = 3.5$ (秒), $\bar{x}_2 = \Delta x_2 = \bar{h}_1 = 0.02$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$ となる。解析では、建物の剛性や構造減衰の分布形状はばらつきによらず 4 節と同様とし、1 次固有周期や 1 次減衰定数のばらつきに応じて剛性や構造減衰の値を係数倍した解析モデルを種々作成し、時刻歴応答解析を実施する。

なお、十分な観測データ数が得られていないことや、経年変化、地震経験後の変化等を勘案し、ばらつきの確率分布は一様分布と仮定する。

まず、ロバスト性を考慮しない場合の最適解のときのロバスト性を信頼性手法に基づき評価する。クライテリアを満足する確率 CSR は、建物物性のばらつきを考慮したときの応答のばらつきがクライテリアを満足する確率として次式で表される。

$$CSR = \iint_{\max_{j=1,2,\dots,10} (\Delta_j(x)) \leq C} f_X(x) dx \quad (16)$$

ただし、 $f(x)$ は設計変数のばらつき確率密度関数を表し、クライテリア C は 4 節と同様 $C = 0.004$ とした。

CSR の算出は 2 節で定義した提案手法で行う。初期サンプル点は 25 点 (5×5 グリッド) とした。

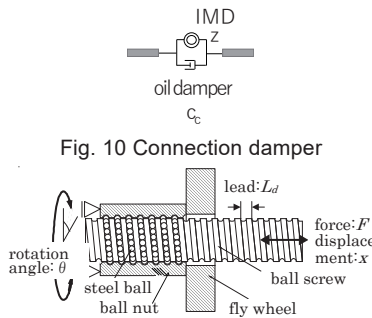
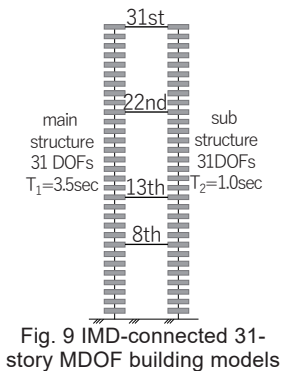


Table 2 Input ground motion

No.	Max acc. [cm/s ²]
1	348
2	351
3	321
4	343
5	403
6	394
7	387
8	340
9	318
10	384

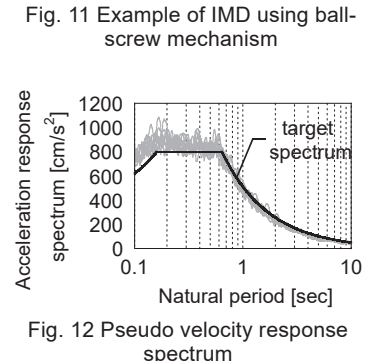


Fig. 14に、4節で設定したロバスト性を考慮しない場合の最適解の連結ダンパー諸元のモデルに対し、建物業性のばらつきを考慮した応答推定曲面を示す。Fig. 14より、主構造固有周期がノミナル値より長く、主構造の構造減衰定数がノミナル値より小さくばらついたときにクライテリアを超過する傾向がある。ロバスト性を考慮しない場合の最適解 (NRO solution) のクライテリアを満足する確率 CSR は 0.714 であった。

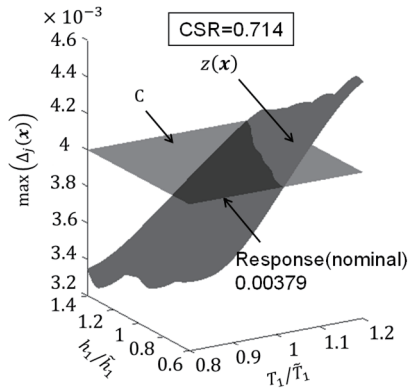


Fig. 14 Robust analysis (NRO solution)

6. IMD 連結制振システムの RBDO

続いて、RBDOによる最適連結ダンパー諸元の設計を行う。設計変数は計8個 ($i\mu_z, ih_c; i=31,22,13,8$) であり、考慮するばらつきは5節と同様である。RBDOでは、次の同時最適化問題を解く。

$$\begin{cases} \text{maximize CSR} \\ \text{minimize Damper cost} \end{cases} \quad (17)$$

ただし、CSR および Damper cost はそれぞれ(16)式、(14)式による。最適化のアルゴリズムは modeFRONTIER²⁹⁾の piOPT とし、解析実行回数を 4000 としてパレート解を取得する。

Fig. 15に、RBDOによるCSRとDamper costのパレート解集合および建物業性のばらつきを考慮しないときの最適解 (NRO solution) の位置を示す。Fig. 15より、NRO solution と同一のコストでCSRを改善する解 (RO solution A) や、同一のCSRでコストを改善する解 (RO solution B)、CSR が概ね 1.0 となるときのコスト最小解 (RO solution C: 従来のロバスト最適解) が得られる。

それぞれの解の連結ダンパー諸元を Table 3 に示す。また、コストとCSRの関係性を Table 4 に示す。ただし、2節で提案したCSR算出手法の精度が誤差 1% のため、CSR の小数点以下 3 位を四捨五入したときに 1.0 となるときの解を RO solution C とした。

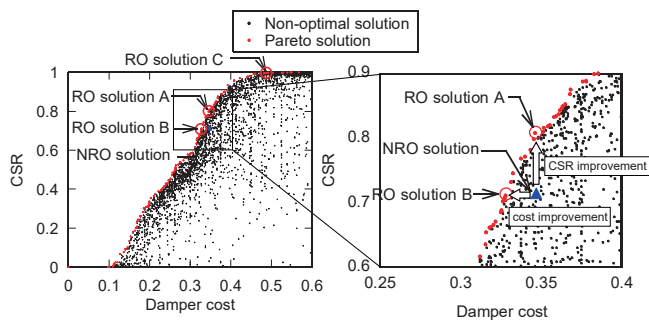


Fig. 15 Robust optimization analysis

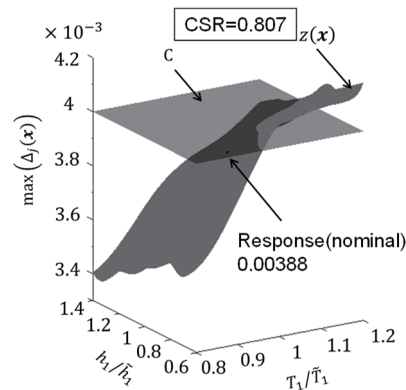
Fig. 16に、RO solution A、RO solution B および RO solution C の連結ダンパー諸元を用いた場合における、ばらつきを考慮した応答推定曲面を示す。Fig. 14 および Fig. 16 より、以下の点が確認できる。
①NRO solution はノミナル値における応答を指標とした最適化を行うため、ノミナル値における応答は RO solution A、RO solution B に

Table 3 Damper parameters of NRO solution and RO solutions

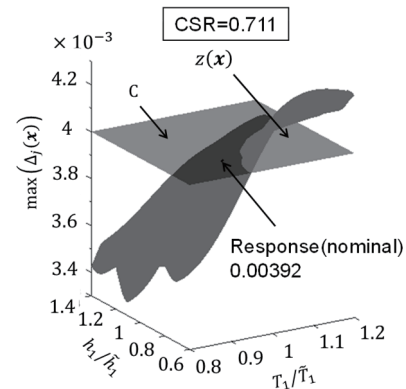
Solution	$_{31}h_c$	$_{22}h_c$	$_{13}h_c$	$_8h_c$	$_{31}\mu_z$	$_{22}\mu_z$	$_{13}\mu_z$	$_8\mu_z$
NRO solution	0.054	0.071	0.032	0.000	0.016	0.091	0.000	0.082
RO solution A	0.001	0.095	0.059	0.002	0.112	0.014	0.000	0.063
RO solution B	0.009	0.094	0.056	0.000	0.094	0.019	0.000	0.056
RO solution C	0.006	0.114	0.062	0.028	0.125	0.047	0.024	0.075

Table 4 Damper cost and CSR of NRO solution and RO solutions

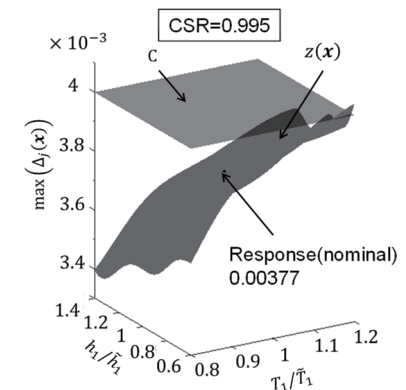
Solution	Damper cost	CSR
NRO solution	0.347	0.714
RO solution A	0.346	0.807
RO solution B	0.328	0.711
RO solution C	0.482	0.995



(a) Solution A (CSR improvement)



(b) Solution B (Damper cost improvement)



(c) Solution C (CSR nearly 1.0)
Fig. 16 Robust analysis (RO solutions)

比べて NRO solution の方が小さい。一方、ロバスト最適化を行うことで、NRO solution に比べ同一コストでロバスト性が優れた解や同一ロバスト性でコストが優れた解を探索することができる。②ロバスト最適化により、主構造固有周期および主構造の構造減衰定数が+側にばらついたときの応答値が低減される連結ダンパー諸元が得られた。③RO solution C に比べ、RO solution A のコスト指標は約 72% となり、ばらつき領域内のクライテリア超過を部分的に許容することで、コスト改善効果が得られることを示した。④本例題においては、頂部の連結オイルダンパー量 $_{31}h_c$ を減らし頂部の連結 IMD 量 $_{31}\mu_z$ を増加させると、建物物性のばらつきに対するロバスト性が向上する傾向がある。

7. 結論

種々のばらつきに対する建物の性能ばらつきを表現するために用いられる「クライテリアを満足する確率を指標としたロバスト最適設計手法」は、信頼性最適設計 (Reliability-Based Design Optimization: RBDO) ともいわれる。RBDO の課題として、従来の信頼性指標に基づく手法は、性能関数が複雑な形状の場合に適用が困難であること、確率を直接照査する場合は計算負荷が大きいことが挙げられる。本論文では、慣性質量ダンパーを用いた連結制振建物に対する、建物物性のばらつきを考慮した連結ダンパー諸元のロバスト最適設計問題において、上記の課題を解決するクリギングを用いた新しい高精度高効率応答曲面近似手法を提案した。

提案手法の特徴は、クライテリア境界の近似精度向上のための新規サンプル点の取得アルゴリズムを、既存のサンプル点からの空間的距離に基づき設定することである。提案手法の妥当性確認のため、2 種類のベンチマーク関数を用いた信頼性最適化の検討を行った。モンテカルロシミュレーションや既往のクリギングを用いた応答曲面近似手法に比べ、提案手法は同等の精度で計算効率を改善できることを確認した。

以下に、得られた知見や適用範囲を示す。

- 1) 連結制振建物の連結ダンパー諸元のロバスト最適設計問題において、建物物性のばらつきを考慮せずにノミナル応答値を最小化する連結ダンパーの最適解 (NRO solution) は、建物物性のばらつきを考慮した場合の「応答値のクライテリアを満足する確率 (CSR)」と「連結ダンパーのコスト」の多目的最適化において非パレート解となる。従って、建物物性のばらつきを考慮した場合のパレート解 (RO solutions) は、NRO solution に比べてコストが同等で CSR に優れた解や、CSR が同等でコストに優れた解を提供することを示した。
- 2) 提案する応答曲面近似手法は内挿近似であるため、初期サンプル数が多いほど応答曲面の近似精度が向上するが、解析に要する時間は増加する。対象とする性能関数が局所的に急変するケースでは、初期サンプル位置によっては正しく近似できない可能性がある。また、ばらつきには上下限を設定する必要がある。正規分布のような上下限を有しない分布の場合、適切な上下限を設定した上で、上下限外の事象が発生する確率を 2 節における手順(2-5)の CSR 算出の誤差に加える等の工夫が必要となる。
- 3) 本手法は応答曲面法を採用しているため、対象となるばらつきは連続関数により表現可能なものとする。地震動の種類など、

離散型のばらつきは対象外とする。

- 4) 本論文で扱ったばらつきは 2 変数であるが、クリギングによる空間内挿は理論上多変数へ適用可能である。ただし、初期サンプル点の増加に伴い共分散行列が悪条件化し、逆行列計算が困難となる。従って、感度解析や工学的判断等により考慮するばらつき変数を絞ることが重要である。なお、ばらつきが 3 変数の場合の提案手法による CSR 評価例を Appendix 2 に示した。
- 5) 2 種類のベンチマーク関数を用いた妥当性検証において、クリギングを用いた既往手法に比べ提案手法は解析回数を約 27%~29%削減できており、追加サンプリング点を選択する際の距離の算出の手間が非常に少ないことから、RBDO を効率的に行うことができる。
- 6) 確率的ロバスト最適化では性能 (クライテリアを満足する確率) とコストのトレードオフ関係が明示できるため、従来の非確率的ロバスト最適化により得られる最適解を含む幅広い最適解群の中から、発注者や設計者が要求性能やコストの制約に応じて適切な解を選択するのに有効である。

なお、本論文では一様確率分布のみを対象とし、初期サンプリングはばらつき幅を等間隔に区切って設定した。一様確率分布以外の確率分布に対する初期サンプリング点の効率的設定手法については今後の課題とする。

また、本論文では IMD の軸剛性ばねやボールねじの摩擦による影響を考慮していない。軸剛性ばねを考慮すると IMD と付加振動系を構成することとなり、付加振動系の固有周期と建物の固有周期が近接する場合は共振による応答への影響を考慮する必要がある。ボールねじの摩擦力は一般的に IMD のダンパー耐力の数%程度であるため、本論文では摩擦の影響を無視した。一方、入力地震動のレベルが小さい場合は摩擦の影響が無視できない可能性がある。

参考文献

- 1) Yamakawa M, Yoshitomi S. and Uetani K. : Optimum design method of steel building frames using expression of a member section based on mixtures of probabilistic principal component analyzers, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 583, pp.77-83, 2004 (in Japanese) 山川誠, 吉富信太, 上谷宏二 : 混合主成分分析による部材断面表現を用いた鋼構造骨組の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 583, pp. 77-83, 2004 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.69.77_3)
- 2) Takewaki I. : Optimal damper placement for minimum transfer functions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.26, pp.1113-1124, 1997 (DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199711\)26:11<1113::AID-EQE696>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11<1113::AID-EQE696>3.0.CO;2-X))
- 3) Adachi, F. et al. : Nonlinear optimal oil damper design in seismically controlled multi-story building frame, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.44, Issue 1, pp.1-13, 2013 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.08.010>)
- 4) Nishihara M. and Tamori S. : An optimal selection method for damping coefficient and relief force of oil damper by a multi-objective genetic algorithm, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 21, No.49, pp. 949-954, 2015 (in Japanese) 西原芽衣, 田守伸一郎: 多目的遺伝的アルゴリズムを用いたオイルダンパーの減衰係数とリリーフ荷重の最適選択手法, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻, 第 49 号, pp. 949-954, 2015 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijt.21.949>)
- 5) Takei, H. et al. : Proposal of the damper arrangement using optimization method, part 1 New design flow and explanation of the study model, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, Structures I pp.205-206, 2019 (in Japanese) 武居 秀樹ほか 5 名: 最適化手法を用いたダンパー配置検討法の提案, その 1 提案設計フローと検討モデルの説明, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.205-206, 2019
- 6) Alefeld G. and Mayer G. : Interval analysis: theory and applications , Journal of

Computational and Applied Mathematics, Vol. 121, pp. 421-464, 2000 (DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(00\)00342-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00342-3))

7) Ben-Haim Y. and Elishakoff I. : Convex Models of Uncertainty in Applied Mechanics, Elsevier, 1990

8) Fujita K. and Takewaki I. : Earthquake response bound analysis of uncertain base-isolated buildings for robustness evaluation, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 76, No. 666, pp.1453-1460, 2011 (in Japanese) 藤田皓平, 竹脇出 : 不確定な構造特性を有する免震建物のロバスト性評価のための地震時応答限界解析, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第666号, pp. 1453-1460, 2011 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.76.1453>)

9) Takewaki I. : Maximum global performance design for variable ritical excitations, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 539, pp.63-69, 2001 (in Japanese) 竹脇出 : 変動クリティカル外乱に対するグローバル性能最大化設計, 日本建築学会構造系論文集, 第539号, pp. 63-69, 2001 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.66.63_1)

10) Takewaki I. : New evaluation method of robustness of structures with uncertainties based on non-probabilistic approach, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 581, pp.55-61, 2004 (in Japanese) 竹脇出 : 不確定性を有する構造物のロバスト性の非確率的評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第581号, pp.55-61, 2004 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.69.55_4)

11) Ben-Haim Y. : Info-gap decision theory: decisions under severe uncertainty, Elsevier, 2001

12) Takewaki, I. and Y. Ben-Haim : Info-gap robust design with load and model uncertainties, Journal of Sound and Vibration, Vol. 288, pp. 551-570, 2005 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.07.005>)

13) Kanno Y. and Takewaki I. : Robustness analysis of elastoplastic structure subjected to double impulse, Journal of Sound and Vibration, Vol. 383, pp. 309-323, 2016 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.07.023>)

14) Yamakawa M. and Ohsaki M. : Robust design optimization considering parameter variation of seismic characteristics using order statistics, Journal of Structural Engineering, AIJ, Vol. 62B, pp.381-386, 2016 (in Japanese) 山川誠, 大崎純 : 順序統計量を用いて地震動特性のパラメータ変動を考慮したロバスト最適設計, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 62B, pp.381-386, 2016

15) Fujita K. and Yasuda K. : Robust optimization for damper placement under structural uncertainties using robustness function, Journal of Structural Engineering, AIJ, Vol. 62B, pp.387-394, 2016 (in Japanese) 藤田皓平, 安田圭佑 : 制振建物における種々の構造物特性の変動を考慮したロバスト最適ダンパー配置, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 62B, pp. 387-394, 2016

16) Yasuda K., Fujita K. and Takewaki I. : Robustness evaluation method for elastic-plastic base-isolated high-rise building structure, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II pp. 811-812, 2017 (in Japanese) 安田圭佑, 藤田皓平, 竹脇出 : 地震時弾塑性応答を考慮した高層免震建物のロバスト性評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 811-812, 2017

17) Makita K., Kondo K. and Takewaki I. : Finite difference method-based critical ground motion and robustness evaluation for long-period building structures under uncertainty in fault rupture, Frontiers in Built Environment, Volume 5: Article 2, 2019

18) Ono T. et al. : Structural reliability analysis with consideration of parameter uncertainties, Journal of Structural Engineering, AIJ, Vol. 41B, pp.159-164, 1995 (in Japanese) 小野徹郎ほか3名 : パラメータの不確定性を考慮した構造信頼性解析, 構造工学論文集, Vol. 41B, pp. 159-164, 1995

19) Zhao Y. G. and Ono T. : Structural reliability analysis using moment methods Part 1, basic ideas, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, Structures I pp. 13-14, 1999 (in Japanese) 趙衍剛, 小野徹郎 : モーメント法による構造信頼性解析 : その 1, 基本的な考え方, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp. 13-14, 1999

20) Kotani, T. et al. : Numerical-analysis-aided probabilistic tsunami hazard evaluation using response surface, Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2, Vol. 72, No.1, pp. 58-69, 2016 (in Japanese) 小谷拓磨ほか7名 : 応答曲面を用いた数値解析援用確率論的津波ハザード評価, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 72, No. 1, pp.58-69, 2016 (DOI: <https://doi.org/10.2208/jscejam.72.58>)

21) Hirohata K. et al : Proposal for structural reliability design method based on response surface methodology and bayes theory, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 67, No. 660, pp. 1297-1304, 2001 (in Japanese) 廣

畑賢治ほか6名 : 応答曲面法およびベイズ理論に基づく構造信頼性設計手法の提案, 日本機械学会論文集(A編), 67巻, 660号, pp. 1297-1304, 2001 (DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaia.67.1297>)

22) Zhao Y. G., Ono T. and Suzuki M. : Dynamic structural reliability evaluation considering parameter uncertainties, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 497, pp.33-38, 1997 (in Japanese) 趙衍剛, 小野徹郎, 鈴木誠 : パラメータの不確定性を考慮した動的構造信頼性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第497号, pp. 33-38, 1997 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.62.33_1)

23) Echard B., Gayton N. and Lemaire M. : AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation, Structural Safety, Vol. 33, pp. 145-154, 2011 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.01.002>)

24) Kitahara M. Broggi M. and Beer M. : Efficient seismic performance estimation method by surrogate modeling based on adaptive Kriging and Markov Chain Monte Carlo, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2, , Vol. 76, No. 1, pp. 75-86, 2020 (in Japanese) 北原優, Broggi M., Beer M. : 適応型クリギングとMCMC法に基づく代替モデルを用いた効率的な耐震性能評価手法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 76, No. 1, pp. 75-86, 2020 (DOI: https://doi.org/10.2208/jscejam.76.1_75)

25) Okada Y. and Ogawa S. : Application of GA to reliability-based optimum design, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 470, pp.29-34, 1995 (in Japanese) 岡田康男 : 最適信頼性設計へのGAの適用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第470号, pp. 29-34, 1995 (DOI: https://doi.org/10.3130/aijs.60.29_1)

26) Hishiki T. et al. : Reliability analysis of single layer lattice shells with shapes by robust optimization for geometric initial Imperfection, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, Structures I pp. 941-942, 2020 (in Japanese) 日紫喜智昭ほか3名 : 形状初期不整に対してロバスト最適化された単層ラチスシェルの信頼性解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp. 941-942, 2020

27) Murase, M., Takewaki, I.: Optimal specifications of inertial mass damper used for building connection system, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 86 No. 784, pp.912-923, 2021 (in Japanese) 村瀬 充, 竹脇 出 : 慣性質量ダンパーを用いた連結制振構造の最適慣性質量ダンパー量, 日本建築学会構造系論文集, 第86巻, No.784, pp.912-923, 2021 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.86.912>)

28) Murase, M., Takewaki, I.: Robust design of building-connection inertial-mass damper for uncertain earthquake input using input energy analysis, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 87 No. 799, pp. 902-911, 2022 (in Japanese) 村瀬 充, 竹脇 出 : 地震動特性の変動にロバストな連結慣性質量ダンパーの入力エネルギー解析を用いた最適パラメータ設定, 日本建築学会構造系論文集, 第87巻, No.799, pp. 902-911, 2022 (DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.87.902>)

29) modeFRONTIER ESTECO SpA, <https://www.esteco.com/modelfrontier>

30) Yokota H. et al. : Damping properties of high-rise steel buildings based on data of vibration tests and earthquake observatons, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 453, pp.77-84, 1993 (in Japanese) 横田治彦ほか2名 : 振動試験および地震観測データに基づく鉄骨造高層建物の減衰性状, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 453, pp. 77-84, 1993

Appendix 1 建物の固有周期と減衰定数のばらつき

文献 30)に, 振動試験から得られる建物の固有周期および減衰定数の観測記録, 並びにそれらの回帰直線式が示されている。Fig. A1 および Fig. A2 に文

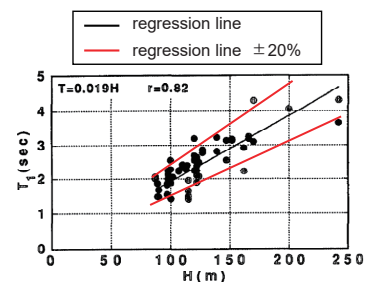


Fig. A1 Relations between eave height and 1st natural period (Modified from Fig. 1 of reference No. 29)

献30)で示されている建物の1次固有周期や1次減衰定数の観測記録, 回帰直線(黒線), および筆者が追記した回帰直線の±20%, ±40%の直線(赤線)を示す。図より, 多くのデータが赤線の内部に存在しているため, これらの値をばらつき幅の数値として採用した。

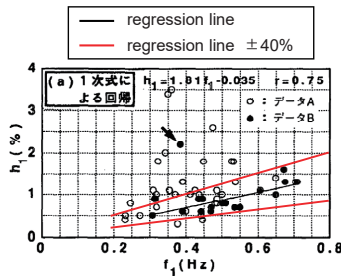


Fig. A2 Relations between 1st natural frequency and 1st damping ratio (Modified from Fig. 9 of reference No. 29)

Appendix 2 ばらつき対象が3変数の場合のCSR評価

ばらつき対象が3変数の場合のCSR評価の例として, ここでは本稿で用いたベンチマーク関数である Rosenbrock 関数を用いて, MCS および提案手法によるCSR算出結果を比較する。3変数の Rosenbrock 関数の真値を(A1a)式で表す。

$$100(x_2 - x_1^2)^2 + (x_1 - 1)^2 + 100(x_3 - x_2^2)^2 + (x_2 - 1)^2 \quad (A1a)$$

$$x(\tilde{x}, \alpha) = \{x_i | \tilde{x}_i - \alpha_i, \tilde{x}_i + \alpha_i, i = 1, 2, 3\} \quad (A1b)$$

なお, この例題では, 提案手法の解の収束に関する手順 2-5 の判定値を 5%に変更した。これは, 結論 4)で示した通り, ばらつき変数の増大に伴い解の収束に必要なサンプル数が増加することで, 共分散行列が悪条件化し, 逆行列計算が困難となることへの対応である。この変更により, 提案手法においてクリギング推定値が正規分布に従うものと仮定したとき, 信頼区間約 95%でCSRの値の誤差が5%以内となる。

同等のCSR計算誤差を与えるMCSの計算回数を検討するため, MCSの計算回数をパラメータとし, それぞれ1000回計算した際のCSRの平均値Eおよび標準偏差σを用いて, MCSにより算出したCSRの値が正規分布に従うものと仮定したときの95%信頼区間におけるCSR算出誤差を式(A2)に基づき算出した。

$$\varepsilon_{95} = 2\sigma/E \quad (A2)$$

Fig. A3に式(A2)の算出結果を示す。Fig. A3より, 提案手法と同程度のCSR算出誤差となるMCSの計算回数は2000回であった。

本例題に対するMCSおよび提案手法のCSR算出結果とサンプル数(関数の数値計算回数)をTable A1に示す。なお, 提案手法の初期サンプルは27点(3×3×3グリッド)とした。また, MCSのCSRの値は試行1000回の平均値Eの値を示している。本例題では, 提案手法の追加サンプル点数は90点であり, MCSと比較し十分に少ない計算回数で指定した誤差範囲内に納まるCSRを算出することができた。

Fig. A4(a)に, 式(A1a)の直接数値計算で求めたクライテリア境界の3D分布図を示す。なお, 境界に対しx3が大きい側がクライテリアを満足する領域である。また, Fig. A4(b)に, 提案手法によるクリギング応答曲面で求めたクライテリア境界の3D分布図を示す。図中に, 初期サンプル点および追加サンプル点も併せて示す。

Fig. A5に, それぞれのx3の値における断面図を示す。Fig. A4およびFig. A5より, ばらつき範囲の端部となるFig. A5(a)やFig. A5(e)でわずかにクライテリア境界に誤差があるものの, その他の領域のクライテリア境界は十分な精

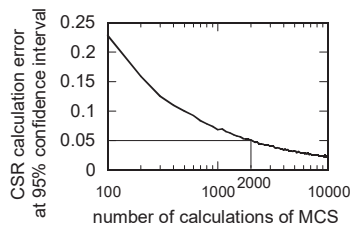
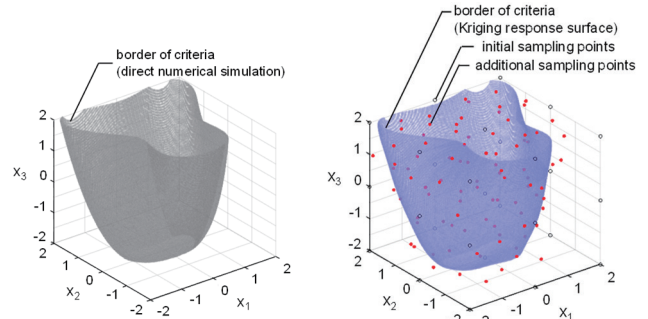


Fig. A3 CSR calculation error in MCS

度で推定できている。以上より, ばらつき変数が3変数の場合にも提案手法を適用できることを確認した。

Table A1 CSR calculation result and number of sample points

Method	CSR	Number of sample points
MCS	0.442	2000
Proposed	0.423	117
Ratio (Proposed / MCS)	0.96	0.06



(a) Direct numerical simulation (b) Kriging response surface Fig. A4 Border of criteria in 3D (three parameters Rosenbrock function)

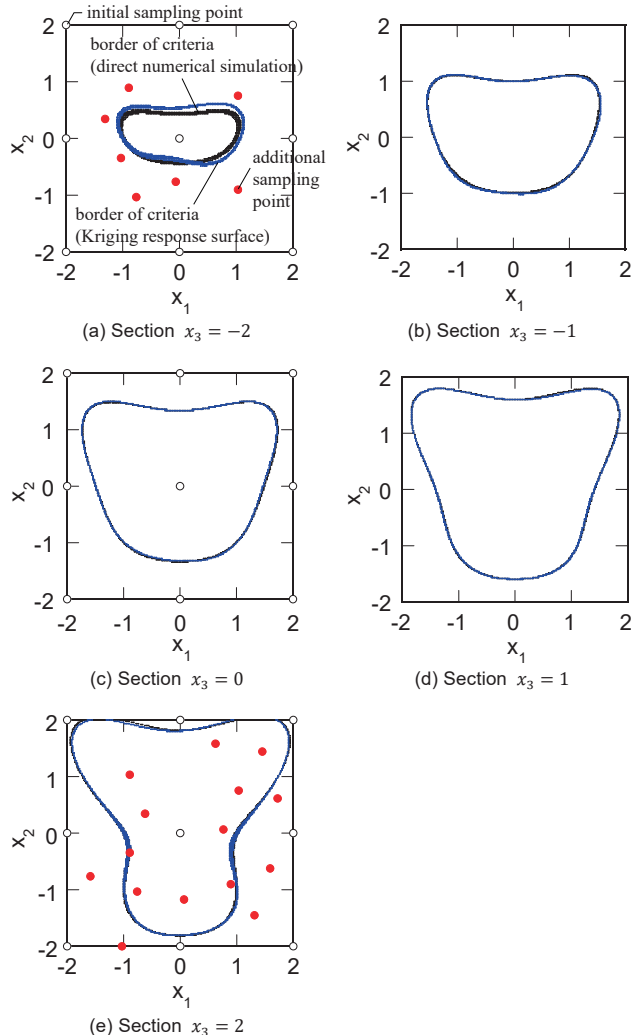


Fig. A5 Border of criteria in section (three parameters Rosenbrock function)

(2022年7月7日原稿受理, 2022年10月25日採用決定)