

## 一般化応答スペクトル解析法に基づく制振ブレース構造の最適設計手法

OPTIMAL DAMPER DESIGN STRATEGY FOR BRACED STRUCTURES  
BASED ON GENERALIZED RESPONSE SPECTRUM ANALYSIS寺澤友貴<sup>\*1</sup>, 竹内 徹<sup>\*2</sup>

Yuki TERAZAWA and Toru TAKEUCHI

This paper presents an optimal damper design strategy for highly indeterminate 3D structures utilizing computational optimization and response spectrum analysis, which has been extended to incorporate non-proportional damping. This enables a more efficient design process than trial-and-error approaches with non-linear response history analysis. The efficiency of the proposed design strategy is verified, analyzed and discussed in a series of studies using an existing lattice tower structure, popular buckling-restrained braced frames and a concentric braced frame skin structure.

**Keywords:** Response Spectrum, Complex Stiffness, Complex Eigenvalue Analysis, Elasto-plastic Damper, Layout Optimization, Distribution Optimization

応答スペクトル, 複素剛性, 複素固有値解析, 弾塑性ダンパー, 配置最適化, 分布量最適化

## 1. 序

大地震後における継続使用の観点から<sup>1)</sup>, 要求性能の高い建築物において制振部材の適用が一般的となっている。特に座屈拘束ブレース(BRB)などの弾塑性ダンパーは, 応答低減効果に加えて周辺部材の荷重制限効果があり, 個材座屈が問題となる強度型ブレースに代わり適用が進んでいる<sup>2)</sup>。強度型のブレースは座屈後破断すると架構の変位応答が急増するため(例えば<sup>3)</sup>), 倒壊に繋がる部材破断を防ぐ点で座屈を解消する BRB への置換は抜本的な解決策となる。

制振構造の設計は, 応答スペクトル法に基づく略算が時刻歴応答解析より時間効率性に優れる。特に Jacobsen に端を発する等価線形化法<sup>4)</sup>は, 振動系の付加減衰を手計算できるため, 笠井を初めとした精力的な検討が行われ, 各制振部材に対応した簡易な評価法の分類・体系化が進み, 標準的な最適設計法が既に確立している<sup>5)</sup>。簡易手法は数値解析を行う前の計画段階で実用的であり, 特定の制御構造に特化した派生法も多く検討されている(例えば<sup>6)</sup>)。

しかし, 簡易手法の適用範囲は, 単純な振動系に置換できる理想的な制御構造に限られ, 空間構造など複雑な振動性状を示す構造物では時刻歴応答解析を用いて試行錯誤するケースが多い(例えば<sup>7), 8)</sup>。さらに, デザイン・コンピューティング<sup>9)</sup>が意匠・構造を問わず普及し, 設計者が 3D モデラー, スクリプト言語, 数値解析, クラウド上の高性能計算環境(HPC)を積極的に駆使する現状<sup>10)</sup>を考えると, 数値的な応答スペクトル法と種々のツールを組合せた制振構造の最適設計も一般化すると考えられる。しかし, 同様の検討は未だ少ない<sup>11)</sup>。最適化手法は結果が目的関数や制約条件に左右されるため, 実務に近い設計理念を反映する設定が求められる。アルゴリズムや問題定式化の提案は大崎<sup>12)</sup>や藤井<sup>13)</sup>により精力的に行われているが, 現実的な設計クライテリアに基づく手法に踏込んだ研究はまだ少ない。

本研究では, 制振部材, 特に弾塑性ダンパーも含む立体モデルに適用可能な応答スペクトル解析法と最適化アルゴリズムを組合せた制振構造物の設計手法の提案に基づき, 様々な適用例を通してその有効性と解の特性を分析する。2 章では提案手法の詳細と基本的な適用性を述べる。3 章と 4 章では実用的な建物(実在改修鉄塔, BRB 付骨組)を対象に, ダンパーの配置や容量分布量の最適化を行い, 設計手法の有効性と解の特性を分析する。5 章では耐震要素を外周に集約した外殻構造物を対象に, 複雑な個体操作を含む部材配置最適化を行い, 解の特性と実用上有効な条件設定を探索する。なお, 提案する応答評価法自身の精度は, 別報<sup>14)</sup>で詳細に検証しているため, 本論では, 精度比較は適用性を示す代表例や一部の最適解の図示に限り, 適用性と得られた最適解の分析に重点を置く。

## 2. 一般化応答スペクトル解析法 (GRSA) に基づく最適設計手法

Fig. 1 に提案手法の全体像を示す。本法は複素固有値解析と応答スペクトル法の収斂計算を中核とし, 一連の数値解析群を“一般化応答スペクトル解析法”(Generalized Response Spectrum Analysis, GRSA)と呼ぶ。本論の設計手法では, 単純なスクリプトを介して最適化アルゴリズムと GRSA が相互にデータ変換し, さらに HPC でタスク並列計算する。本論では最適化アルゴリズムは純粋なツールと位置付け主題としない。これは地震応答が対象の最適化計算では, 目的関数の計算が時間効率性に最も影響するためであり, また, 最適化アルゴリズムは問題毎に適性が異なるため, 今後の個別の検討で議論することとする。本論は汎用性が認知されている遺伝的アルゴリズム(GA)と粒子群最適化(PSO)を例として実装する。本研究の GRSA は数値ライブラリを除き Fortran 90/95 で自作し, データ交換と並列計算は Python スクリプトを, 最適化ツールは Python Module

<sup>\*1</sup> 東京工業大学建築学系 大学院生・修士(工学)  
(日本学術振興会特別研究員 DC1)

<sup>\*2</sup> 東京工業大学建築学系 教授・博士(工学)

Grad. Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, M.Eng.  
(Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science)  
Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

(DEAP<sup>15)</sup>を用いる。3章以降の最適化計算はクラウド型 HPC の代わりに東京工業大学の TSUBAME 3.0 (28 コア, 1 ノード)を用いた。以下, 質量 **M**, 減衰 **C**, 剛性 **K**(**K<sub>eq</sub>**)行列の対称性に基づき, 振動系は **MK** 型(非減衰系), **MCK** 型(実対称減衰系), **MK<sub>eq</sub>** 型ないし **MCK<sub>eq</sub>** 型(複素非対称減衰系)と分類して提案手法の詳細を議論する。

## 2.1 ブレース型弾塑性ダンパーの複素剛性要素

弾塑性ダンパーは複素剛性要素でモデル化する。複素剛性<sup>16)</sup>は剛性行列内で振幅依存性を表現でき, 周波数依存で振動系の高次モード減衰比が増大する等価粘性弾性より直接的である。本論は立体モデルが他の数値解析にも共用される点を考慮し, ブレース型の複素要素剛性行列 **K<sub>eq</sub>** はトラス要素の剛性行列に基づき式(1)で定式化する。

$$\mathbf{K}_{eq} = \begin{pmatrix} (a + ib \operatorname{sgn} \omega_e) k_x & \cdots & -(a + ib \operatorname{sgn} \omega_e) k_x & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \\ -(a + ib \operatorname{sgn} \omega_e) k_x & \cdots & (a + ib \operatorname{sgn} \omega_e) k_x & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} + \mathbf{K}_G \quad (1)$$

ここに材軸は各端 6 自由度の右手座標系  $x$  方向に対応し,  $k_x$  は一様断面の弾性軸剛性,  $\mathbf{K}_G$  は幾何剛性行列,  $a$  は等価剛性係数,  $b$  はエネルギー吸収係数,  $\operatorname{sgn} \omega_e$  は仮想外力円振動数の符号関数である。

振幅依存型の弾塑性減衰は, 等価線形化の仮定に任意性を有し, 複素剛性は様々な関係式を選択できる。本章は Table 1 に示す著名な 3 種の等価線形化を比較する。ここに  $\gamma_K = \{1 + p(\mu - 1)\}/\mu$  は最大点割線剛性比,  $\gamma_E = (4/\pi)(1 - p)(\mu - 1)/\mu^2$  はエネルギー吸収比,  $\mu$  は塑性率,  $p$  は 2 次剛性比,  $\xi$  は要素減衰比である。Fig. 2 に示す通り, GSM は Jacobsen の原法<sup>17)</sup>, ADM は Newmark らの平均減衰法<sup>18)</sup>, DSM は Caughey の最小二乗法<sup>19)</sup>に対応する。なお, 複素剛性関係式の塑性率  $\mu$  は, 各モードを重合した変形応答値を最大変形として計算する。

## 2.2 複素非対称減衰系の応答評価と GRSA の詳細

複素固有値解析は厳密な各モードの減衰比と振動形状の計算に適する。固有モード成分は複素項を有するが, 文献 20)では固有値の共役性に注目して **MCK** 型固有値を従来の RSA に用いる修正 CQC 法(式(2))が提案され, 本論は複素剛性を含む **MCK<sub>eq</sub>** 型に拡張する。

$$R_{CQC} = \sqrt{\sum_{s=1}^n \sum_{r=1}^n B_s B_r S_{d_s}(\omega_s, \xi_s) S_{d_r}(\omega_r, \xi_r) \cos(\theta_s - \theta_r) \rho_{sr}} \quad (2)$$

ここに  $s$  と  $r$  はモード番号,  $\xi$  はモード減衰比,  $\rho$  はモード相関係数,  $\omega$  は固有円振動数,  $S_d$  は変位スペクトル,  $\lambda$  は複素固有値,  $\beta$  は複素刺激係数,  $\phi$  は固有ベクトル成分,  $*$  は複素共役,  $B = 2|\operatorname{Re}(\lambda^* \beta \phi) / \sin(\theta)|$ ,  $\theta = \tan^{-1}(-\operatorname{Re}(\lambda^* \beta \phi) / \operatorname{Re}(\beta \phi))$  である。式(2)は各自由度毎に計算する。

式(3)に 1 自由度系の **MCK<sub>eq</sub>** 型固有方程式を, 式(4)に重解を除く固有値を示す。Fig. 3 は後述の鉄塔モデルの固有値分布例である。ここに  $\xi_v$  は粘性項のみの減衰比,  $\xi_k$  は複素剛性項を含む減衰比である。

$$\lambda^2 + 2\xi_v \omega_0 \lambda + (a + ib \operatorname{sgn} \omega_e) \omega_0^2 = 0 \quad (3)$$

$$\lambda = \begin{cases} -(\xi_v + \xi_k) \omega_0 + i \sqrt{(a - \xi_v^2) + \xi_k^2} \omega_0 \\ -(\xi_v - \xi_k) \omega_0 - i \sqrt{(a - \xi_v^2) + \xi_k^2} \omega_0 \end{cases} \quad (\omega_e > 0) \quad (4)$$

$$\lambda = \begin{cases} -(\xi_v + \xi_k) \omega_0 - i \sqrt{(a - \xi_v^2) + \xi_k^2} \omega_0 \\ -(\xi_v - \xi_k) \omega_0 + i \sqrt{(a - \xi_v^2) + \xi_k^2} \omega_0 \end{cases} \quad (\omega_e < 0)$$

$$\xi_k = \sqrt{\{-(a - \xi_v^2) + \sqrt{(a - \xi_v^2)^2 + b^2}\} / 2} \quad (5)$$

複素剛性を有する振動系では発散振動の固有値(実部正)が求まる。元来の **MK<sub>eq</sub>** 型(Fig. 3(b))は原点对称性より符号関数で **MCK** 型(Fig. 3(a))と同様の共役性を与えるが, **MCK<sub>eq</sub>** 型(Fig. 3(c))では対称軸が各  $\xi_v$  で決定し, 多自由度系で発散側の固有値が減衰側に移動する場合があります, 各モード集団(式(4))の抽出は難しい。しかし, **MCK<sub>eq</sub>**

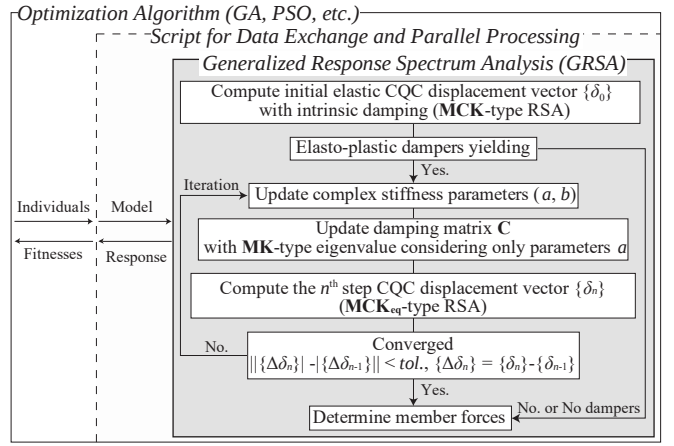


Fig. 1 Proposed damper structure design routine based on GRSA  
Table 1 Parameter formulations for complex stiffness

| Method Series                                     | $a$                                                                                                                                             | $b$             | $\xi$                                      |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| Geometrical stiffness method (GSM) <sup>17)</sup> | $\gamma_K$                                                                                                                                      | $\gamma_E$      | $\frac{\gamma_E}{2\gamma_K}$               |
| Average damping method (ADM) <sup>18)</sup>       | $\gamma_K$                                                                                                                                      | $2\gamma_K \xi$ | $\frac{1}{\mu} \frac{\gamma_E}{2\gamma_K}$ |
| Dynamic stiffness method (DSM) <sup>19)</sup>     | $\frac{1-p}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left( 1 - \frac{2}{\mu} \right) - \left( 1 - \frac{2}{\mu} \right) \frac{2}{\mu} \sqrt{\mu-1} \right\} + p$ | $\gamma_E$      | $\frac{b}{2a}$                             |

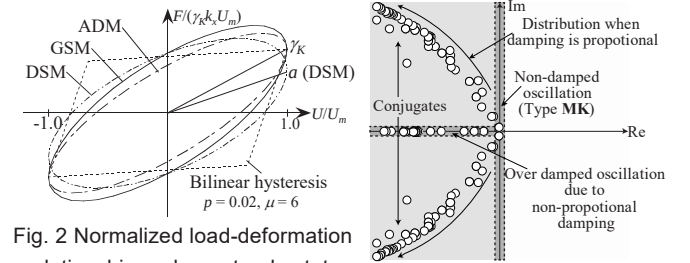


Fig. 2 Normalized load-deformation relationship under a steady-state

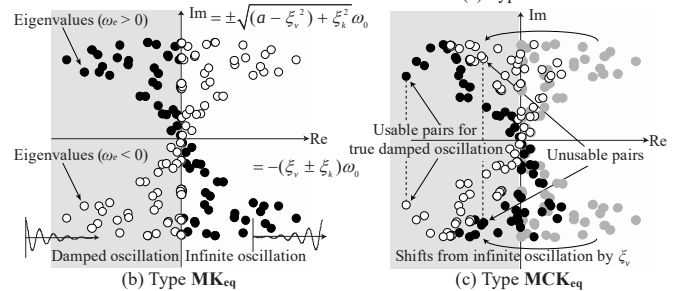


Fig. 3 Complex eigenvalues for damped systems

型で用いるべき正しい減衰振動の共役解は判別でき, GRSA では第 1, 第 3 解を抽出し, **MCK** 型固有値と読替えて式(2)を準用する。式(2)上は  $\omega = |\lambda|$ ,  $\xi = -\operatorname{Re}(\lambda)/\omega$  とする。この妥当性は別報<sup>14)</sup>で検証している。主要な減衰比の応答スペクトル( $\xi_0 = 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30\%$ )は外部ファイルから事前に与え, 減衰効果係数  $D_h = \sqrt{(1 + \alpha \xi_0)/(1 + \alpha \xi)}$  を乗じて任意減衰比のスペクトル値を補完する<sup>5)</sup>。 $\alpha$  は 25(観測波), 75(模擬波)とする。Fig. 1 のフローチャートに時刻歴応答解析は含まれない。本論では, 周期 0.01 秒刻み, 周期範囲 0.1~50 秒の範囲で応答スペクトルのデータベースを作成し, 周期刻み間のスペクトル値は離散データを線形補間した。データベースは 1 地震波約 500kB, Nigam 法を用いて数秒で作成でき, 一度作成した後は再利用する。

収斂計算の収束条件は, 応答評価の変動ベクトルをノルム化した微分係数で判断する。本論は著者の試行より収斂許容回数は 10 回, 収束許容誤差は 1 とした。GRSA は特定の弾塑性履歴の縮約 1 自由度系時刻歴応答に基づく手法<sup>21)</sup>と異なり, 弾性応答で評価し, 多自由度系で各部材, 各履歴の複素剛性を検討し得る余地を残す。なお,

GRSA はモデルの初期座標に対して実行するが、精算解の時刻歴応答解析(Non-Linear Response History Analysis, NLRHA)は座標移動や材料ないし幾何非線形性で回転行列や全体剛性行列が時々刻々変動し(固有振動特性が変動する), これが全てのモード解析に共通する精度限界の原因となる。固有値は式(6)と Arnoldi 法と QR 法で解く。

$$\begin{pmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_{eq} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda\{\phi\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} \lambda\{\phi\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

### 2.3 GRSA 単体の代表的な適用例(ラーメン構造)と複素剛性関係式

GRSA の基本的な適用性を確認する。本節ではラーメン構造物(曲げ系)への適用例を示す。Fig. 4 にモデル図を示す。対象は 4 スパン 9 層の低層 BRBF である。弾塑性ダンパー耐力は約 750 kN (LY225,  $p = 0.02$ , 芯材 PL-19×175mm)とし BRB を想定する。柱は層剛性  $k_f$  が BRB2 本(K 型配置)の層剛性  $k_d$  に対し,  $k_d/k_f = 1.0$  となる断面とする。Fig. 4 に示すように, 柱の剛性により  $k_f$  を操作するため, 梁は柱より曲げ剛性を大きくしている。重量は 1 次固有周期が 1.08 秒 ( $0.03 \times$  軒高)となる質量を節点に均等配分する。入力地震動は Fig. 5 の BCJ-L2 とし, 初期減衰は 2%とする。以上のモデルに固定荷重と様々なダンパー配置を考慮して GRSA と NLRHA を比較する。

Fig. 6 に層間変形角(SDR)と全部材応答(曲げモーメント, 固定荷重を含む)の比較を示す。同図から GRSA は任意の層・スパンのダンパー配置に対し NLRHA を十分な精度で捉えている事が分かる。GRSA は具体的なダンパー配置を考慮した応答評価が可能である。簡易応答評価<sup>5)</sup>では, 過大評価を防ぐ安全側の処置として, 減衰比を積分平均する ADM が建物規模に依らず推奨されている。しかし, 元々の ADM は複数の振動モードを含むランダム振幅を想定しており<sup>18)</sup>, 特定の振動モード(低層ラーメンは 1 次)だけが卓越する場合には, 同図に示すように, 定常振幅を仮定する GSM の精度が良い場合があることが GRSA 上で確認されている<sup>14)</sup>。DSM を使用する一連の研究(例えば<sup>21)</sup>)もあるが, DSM の精度は GSM と同程度である<sup>14)</sup>。

### 2.4 GRSA 単体の代表的な適用例(トラス構造)と複素剛性関係式

トラス構造(軸力系)への適用例を示す。以下は 3 章の基本情報も兼ねる。Fig. 7 にモデル図を示す。対象は建屋敷設型の実在通信鉄塔であり, 個材屈屈を生じるブレースを BRB(LY225)に置換する改修が行われた<sup>7)</sup>。部材諸元は Table 2 に示す。実改修と同じ弾塑性ダンパーモデルは EP とし, 粘弾性ダンパーを配置した VE も検証する。VE は等価線形化法を利用した既往研究<sup>11)</sup>と同じである。Fig. 8 に示すように, 地震動は設計時と同じ告示波(地表面 G 波)と下部構造(26 m)の屋上応答 R 波とする。初期減衰は 1%である。固定荷重は考慮しない。卓越モードは式(7)で判断し, モード形状は式(8)で求める。

$$\mathbf{M}_e = 2 \times \{1\}^T \mathbf{M} \text{Re}(\lambda\beta\{\phi\}) \quad (7), \quad \mathbf{B}' = \mathbf{B} \text{sgn}(\text{Re}(\beta\phi)) \quad (8)$$

Fig. 9 に代表的な水平変位, 層間変形角, 全部材軸力の評価例を示す。GRSA は, Fig. 9(a)の VE に示すように, 既往手法より精度が改善し, Fig. 9(b)の EP に示すように, 軸力系構造物でも NLRHA を概ね捉えている。GRSA は簡易評価用の等価せん断変形型モデル<sup>5)</sup>が考慮しない曲げ変形も考慮する。Fig. 10 は GRSA の前(Initial)と後(After the iterations)の卓越固有振動特性の変動を示し, 弾塑性ダンパーが塑性化すると, 卓越モード順序が変わる場合があることが分かる。一方, 最高高さ約 54m では ADM の精度が良い。これは, 同図に示すように, BRB 導入層で高次モード振動が卓越したためと考えられる<sup>14)</sup>。なお, 3 章の図版に示すが, 極端なスペクトル励起帯を

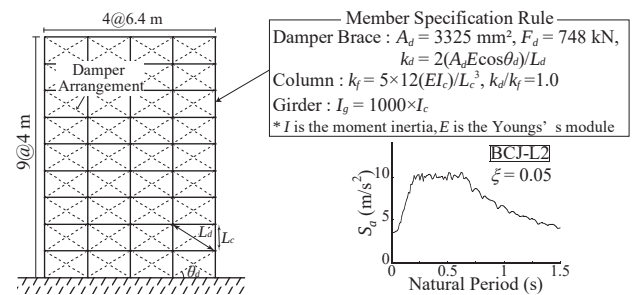


Fig. 4 9-story model schematic

Fig. 5 Response spectra

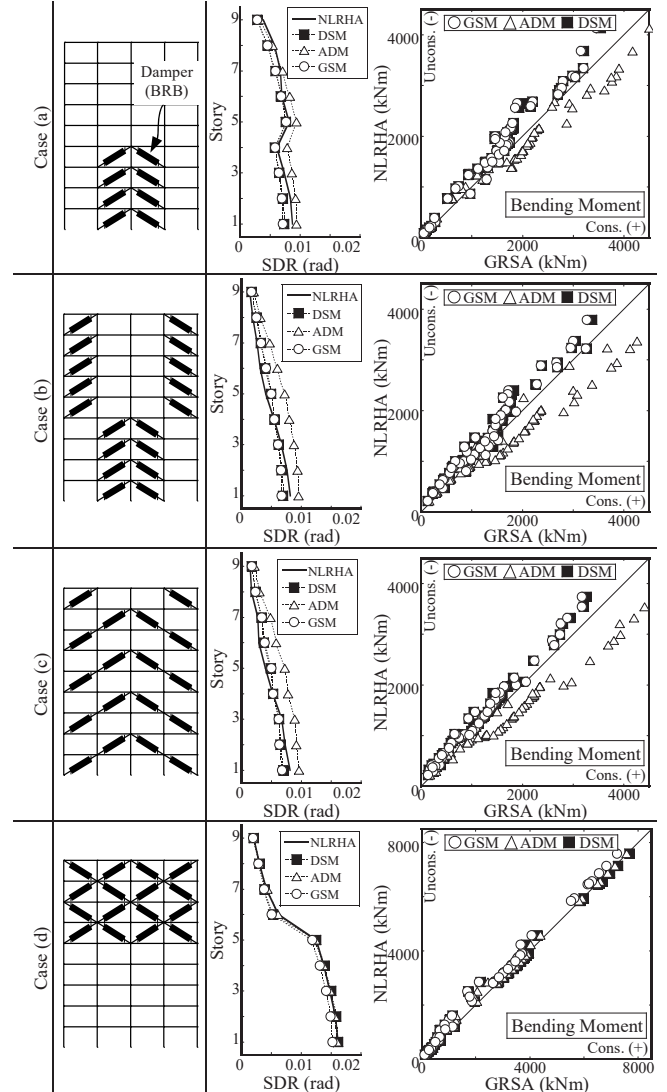


Fig. 6 Comparison of GRSA and NLRHA

有する R 波は非線形応答が強く, G 波と比べて評価精度は悪化する。

自由度数 810 の EP は, NLRHA(ステップ数 7,000)が 15~30 分, 対する GRSA は 5~10 秒の計算時間を要した。数値解析は Intel 社製 CPU(3.6 GHz)と DDR4 規格のメモリを内蔵した PC で行い, 上記は 1 Processor あたりの性能に対応する。なお, NLRHA は直接疎行列解法を用いており, 計算時間は可能な範囲で必要メモリ量の効率化と計算の高速化を施した結果である。以上の検討より, 本論の範囲では, 最高高さ約 40 m を基準に GSM と ADM を使い分ける。

### 2.5 本論の最適化計算に共通する目的関数の定義

最適化計算では, 実際の構造設計クライテリアに基づく共通の目的関数を定義する。設計変数ベクトル(遺伝子列, 位相列と同一)を  $\mathbf{x}$ ,

荷重ケースを  $C$  (地震荷重のみ, 荷重数  $n$ ), 目的関数に対応する応答評価値ベクトル成分を  $f_j$  (次元  $m$ ) として, 目的関数  $F$  は式(9)で定義する。 $r$  は応答を表し, 層間変形角 (SDR,  $m =$  層数), 座屈検定値 (DCR,  $m =$  部材数), ベースシア ( $m = 1$ ), 層間変形角の標準偏差 (S.D.,  $m = 1$ ) 等を想定する。

$$F(\mathbf{x}, C) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\max\{f_j^i(\mathbf{x}, iC) | j = 1, 2, \dots, m\}| \quad (9)$$

例えば対象を 3 章の鉄塔 (15 層), 入力を G 波 ( $n = 3$ ), 応答を層間変形角 (SDR) とする目的関数  $F$  は, 地震波毎に SDR ベクトル ( $m = 15$  層) から絶対値が最大の成分を合計し, 地震波数の平均として計算される。その他の制約条件 (または設計範囲) は各章ごとに後述する。

Fig. 1 に示すように, 最適化アルゴリズムが生成した個体は, スクリプトを介してモデルデータに変換されて GRSA に渡り, GRSA 実行後の応答評価値は, 式(9)より目的関数値に処理されて最適化アルゴリズムに戻る。なお, 3 章以降の最適化計算は, 2 度以上の繰返し計算を行って結果が最適解であること確認している。

### 3. 実在構造物の配置または分布量最適化と既存改修法の有効性

次に 2.4 節の鉄塔を対象に, 提案する設計手法を適用する。また, 最適設計という観点で既存改修の有効性も検証する。なお, 既存改修における BRB の配置と容量分布は, 個材座屈の解消を目的に, NLRHA と静的解析の試行錯誤に基づき設計されている。

#### 3.1 最適化問題の概要

本章では既存改修の BRB の「配置」と「容量分布」を, それぞれ独立した最適化計算と比較して, 提案設計手法の有効性を検証する。配置最適化は単純遺伝的アルゴリズム (SGA) を用いる。BRB 配置に着目するため, BRB 容量分布は長期風荷重<sup>7)</sup>を満たす 388 kN (1~2F) と 200 kN (3F~15F) で固定する。なお, 各容量は実改修と異なる。BRB 配置数は既存改修と同じにするため, 5 層配置 (対称配置で Diagonal 40 本) を制約条件とする。SGA の設計変数ベクトル  $\mathbf{x}$  (次元 15) は層単位で配置の有無 (例:  $\mathbf{x} = \{0, 1, \dots\}$ , 1: BRB 置換) を表す。

容量分布最適化は粒子群最適化 (PSO) を用いる。BRB 容量分布に着目するため, BRB 配置は既存改修と同じ (Fig. 7(b)) とする。各層 BRB 容量分布は既存改修より 140 ~ 250 kN を制約条件とする (層内の各 BRB 容量は同一)。PSO の設計変数ベクトル  $\mathbf{x}$  は容量分布 (次元 5) を表す。PSO のパラメータは Python Module<sup>15)</sup> の例題に従う。

SGA と PSO の目的関数 (式(9)参照) は, 層間変形角 (SDR) または座屈検定値 (= 部材軸力 / 短期座屈軸力, Demand Capacity Ratio, 以降 DCR) とする。目的関数の入力地震動は, 実物と同様な屋上応答 R 波群 (1R~3R) に加えて, 地上設置型の鉄塔として地表面 G 波群 (1G~3G) も検討する。以上の最適化問題の要約は Table 3, Table 4 に示す。

タスク並列計算を用いると, 配置最適化は 30 分, 容量分布最適化は 2 時間程度の時間を必要とし, 1 個体あたり 15~30 分の解析時間 (2.4 節参照) を要する NLRHA より大幅に時間効率性が向上する。

#### 3.2 最適 BRB 配置と既存改修法の比較 (各層 BRB 容量は固定)

Fig. 11 と Fig. 12 に, 目的関数と入力地震動で整理した配置最適化結果を示す。No BRB は改修前, Existing は既存改修の NLRHA 結果である。各応答の絶対値最大成分は引出線で示す。Fig. 11 に示すように, どの目的関数も 1 層の BRB 配置を含む個体を選ばれた。これは 1 層 (階高の都合で変形が大きくなる) にダンパー配置する設計が

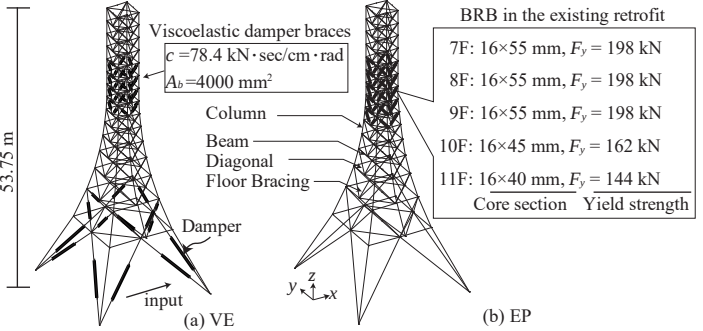


Fig. 7 Lattice tower model schematics

Table 2 Member specifications

| Story | Column Member (CHS) |          | Diagonal Member (CHS) |          |
|-------|---------------------|----------|-----------------------|----------|
|       | Section (mm)        | Material | Section (mm)          | Material |
| 1     | φ 355.6×7.9         | STK540   | φ 355.6×7.9           | STK540   |
| 2     |                     |          | φ 318.5×6.9           |          |
| 3     |                     |          | φ 267.4×6.6           |          |
| 4     |                     |          | φ 216.3×5.8           |          |
| 5     |                     |          | φ 165.2×4.5           |          |
| 6     | φ 318.5×6.9         | STK540   | φ 139.8×4.5           | STK400   |
| 7     |                     |          |                       |          |
| 8     |                     |          |                       |          |
| 9     |                     |          |                       |          |
| 10    |                     |          |                       |          |
| 11    | φ 267.4×6.6         | STK540   | φ 139.8×4.5           | STK400   |
| 12    |                     |          |                       |          |
| 13    |                     |          |                       |          |
| 14    |                     |          |                       |          |
| 15    |                     |          |                       |          |
| 16    | φ 216.3×5.8         | STK540   | φ 139.8×4.5           | STK400   |
| 17    |                     |          |                       |          |
| 18    |                     |          |                       |          |
| 19    |                     |          |                       |          |
| 20    |                     |          |                       |          |
| 21    | φ 165.2×4.5         | STK540   | φ 139.8×4.5           | STK400   |
| 22    |                     |          |                       |          |
| 23    |                     |          |                       |          |
| 24    |                     |          |                       |          |
| 25    |                     |          |                       |          |

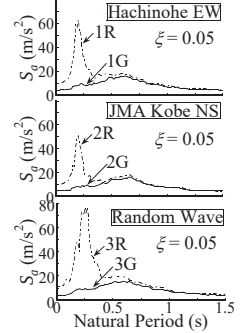


Fig. 8 Response spectra

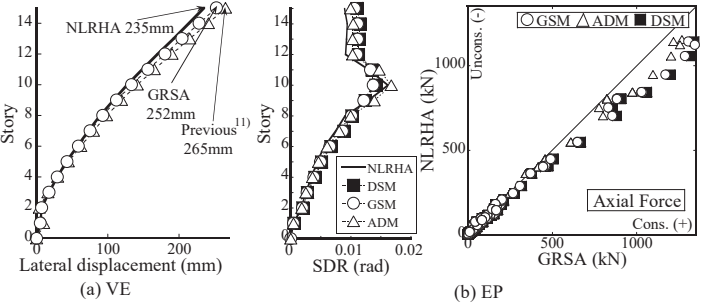


Fig. 9 Comparison of GRSA and NLRHAs (Input: 1G)

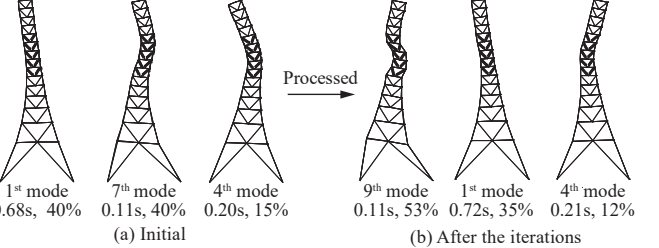


Fig. 10 Dominant mode shifts in EP-ADM (natural period, mass ratio)

Table 3 Optimization problem matrix

| Optimize    | Damper Layout (Fixed Size) |                         | Damper Distribution (Fixed Layout) |                         |
|-------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Algorithm   | Simple Genetic Algorithm   |                         | Particle Swarm Optimization        |                         |
| Minimize    | SDR                        | DCR                     | SDR                                | DCR                     |
| Subject to  | $\sum x_i = 5$             | $\sum x_i = 5$          | $140 \leq x_i \leq 250$            | $140 \leq x_i \leq 250$ |
| Response to | 1G to 3G<br>(L15-G-SDR)    | 1G to 3G<br>(L15-G-DCR) | 1G to 3G<br>(D-G-SDR)              | 1G to 3G<br>(D-G-DCR)   |
|             | 1R to 3R<br>(L15-R-SDR)    | 1R to 3R<br>(L15-R-DCR) | 1R to 3R<br>(D-R-SDR)              | 1R to 3R<br>(D-R-DCR)   |

Table 4 Optimization algorithm specifications

| Simple Genetic Algorithm |                 |                    | Particle Swarm Optimization |                              |                            |
|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Selection                | Crossing (Rate) | Mutation (Rate)    | Inertia $w$                 | Personal Best Priority $c_1$ | Global Best Priority $c_2$ |
| Tournament (3 inds.)     | Uniform (60%)   | Shuffle Index (1%) | 1.0                         | 2.0                          | 2.0                        |

効果的である, という経験則に対応する。また, 同様の傾向は粘弾性ダンパーを対象とした既往研究<sup>11)</sup>とも対応する。なお, 既存改修では 1 層が含まれていない。DCR 関係の No BRB の Diagonal の結

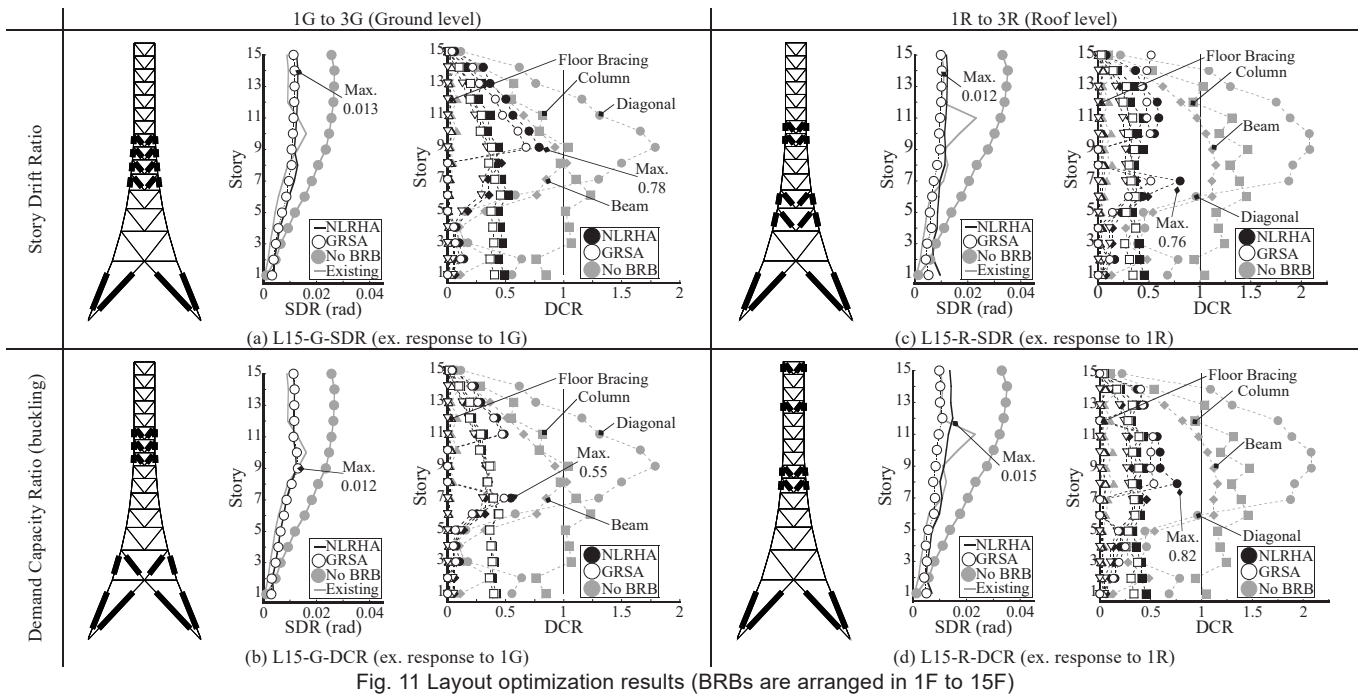


Fig. 11 Layout optimization results (BRBs are arranged in 1F to 15F)

果に示すように、これは既存改修では、NLRHA で顕著な座屈が検出された部材を順に BRB に置換する検討が行われたためである。従って、提案設計手法は、既存改修の検討時より優れた、より良い解を導いたことを示す。なお、Fig. 11～Fig. 13 の DCR 関係に示すように、Diagonal を BRB へ置換することで、Diagonal だけでなく Column や Beam も均一に座屈が解消されることが分かる。これが BRB による周辺部材の荷重制限効果(ヒューズ効果)を示している。

一方、1 層の斜材は部材長さが 10m を超え、鉄塔自重を支持しているため、Fig. 11 に示すような最適解は、応答低減効果は高くとも、既存部材の取替など施工性を考慮すると実現が難しい解とも言える。そこで、低層配置(1F～2F)を禁止する制約を追加すると、Fig. 12 に示すように、最適化計算はどの目的関数においても、既存改修と同様に連続した層に集中配置する個体が最適解に選ばれた。特に G 波を入力する地上設置型(Fig. 12(a)(b))では、層間変形角と座屈検定値どちらも既存改修と同じ配置が最適解となった。

### 3.3 最適 BRB 容量分布と既存改修法の比較 (BRB 配置は固定)

Table 5 と Fig. 13 に容量分布最適化の結果を示す。容量分布最適化では、目的関数による明確な差異が示された。Table 5 に示すように、層間変形角(SDR)を最小化する場合は上層に向かって耐力が高くなり、座屈検定値(DCR)を最小化する場合では下層に向かって耐力が高くなる。詳細な分布量は異なるものの、DCR に関する傾向は既存改修と対応する。この結果は、既存改修における技術者の選択は、“出来るだけ個材座屈を防ぐ”という目的にとって有効な制振設計であったことを示唆する。3.2 節に示す配置最適化の結果も考慮すると、既存改修は“座屈検定値を最小化する配置制約付最適化”の優良解であったとも言える。また、実在構造物との比較検証より、提案する設計手法は、時刻歴応答解析を手動で駆使する最適設計と同程度以上に有効な解が探索できる。

以上に示したように、最適化計算は設計領域の探索として、有効な配置や分布量の傾向を分析できる。その一方で、最適解の詳細は選択した地震波に依存することが分かる。

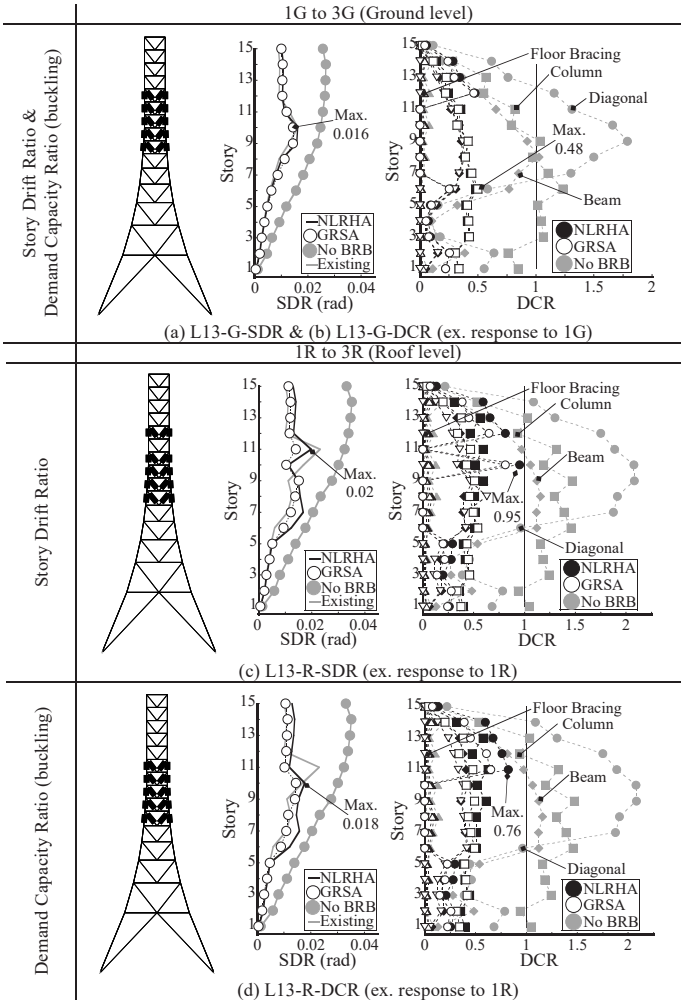


Fig. 12 Layout optimization results (BRBs are arranged in 3F to 15F)

Table 5 Detail of distribution optimization results

| Minimize          | Inputs             | Damper Size (kN) |     |     |     |
|-------------------|--------------------|------------------|-----|-----|-----|
|                   |                    | 7F               | 8F  | 9F  | 10F |
| SDR               | 1G to 3G (D-G-SDR) | 140              | 166 | 227 | 207 |
|                   | 1R to 3R (D-R-SDR) | 140              | 162 | 196 | 197 |
| DCR               | 1G to 3G (D-G-DCR) | 215              | 187 | 160 | 145 |
|                   | 1R to 3R (D-R-DCR) | 241              | 185 | 205 | 140 |
| Existing Retrofit |                    | 198              | 198 | 198 | 162 |

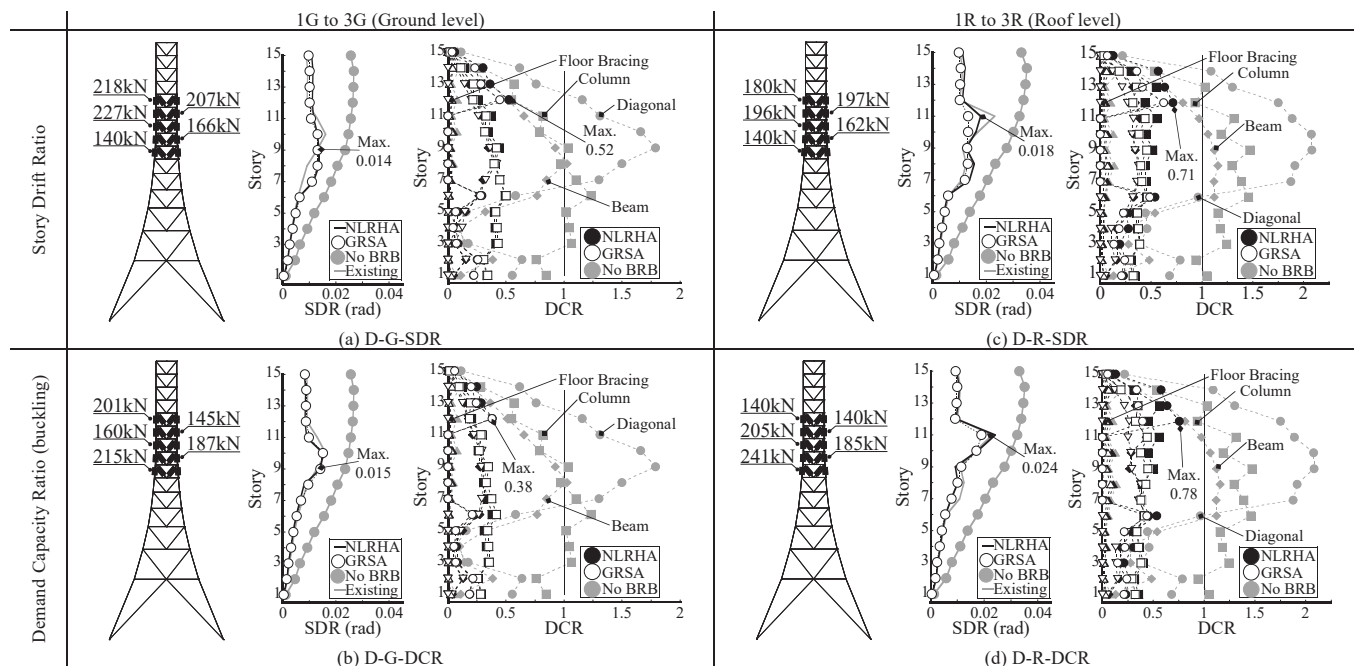


Fig. 13 Distribution optimization results (ex. response to 1G or 1R)

#### 4. BRBF の容量分布最適化と標準的な最適設計法の比較検証

続いて BRB 付骨組(BRBF)を対象に多目的の容量分布最適化を実施し、標準的な最適設計法と提案手法を比較して有効性を検証する。

##### 4.1 検討概要

Fig. 14 にモデル図を示す。対象は JSSI マニュアル<sup>5)</sup>の例題建物の4層と10層モデルとし、本章は長手方向中央構面を抽出する。重量は  $7.8 \text{ kN/m}^2$  である。主架構層剛性  $k_f$  等は Table 6 に示す。ここでは BRB の容量分布に着目するため配置は固定する。本章の検討は意匠・設備の制約で部材配置が確定している設計状況に相当する。

文献5)では、笠井の手法(以下、SDOF 法)が標準的な最適設計法として採用されている。SDOF 法は周期  $T_0$ 、質量  $M_{eq}$ 、高さ  $H_{eq}$  の等価1自由度系を用いて、ダンパー剛性  $k_d$  や塑性率等に基づく応答低減曲線(性能曲線)を作成し、視覚的・効率的にダンパー設計できる。なお、SDOF 法は、多自由度系への変換の仮定に任意性があり、様々な手法を選択できる。本章は、等価1自由度系の応答が多自由度系と全て一致すると仮定し、性能曲線の剛性比  $k_d/k_f$  一定の条件下で、その諸元(層間変形角、塑性率)を多自由度系の各層に比例倍する手法を最適化計算と比較する。これは同手法が SDOF 法として最も簡易かつ基礎的(主架構剛性が  $A_i$  分布に対し均等とする本例題で最適解を与える)と考えたためである。対する最適化計算は多目的粒子群最適化(MOPSO<sup>22)</sup>)を用いて、多自由度系に同様な性能曲線が存在するか検証し、その後 SDOF 法と比較する。変数  $\mathbf{x}$  の次元は層数であり、パラメータは Table 4 と同様である。なお、等価1自由度系の性能曲線は ADM 法の等価線形化より評価した<sup>5)</sup>。

最適化計算の多自由度系モデルは、各層 BRB の断面積を固定して剛性比一定を模擬し、SDOF 法と条件を合わせる。最適化計算の容量分布の設計範囲(制約条件)は 200 kN 以上(100 または 250 kN 刻み)、SDOF 法は 0 kN 以上とする。SDOF 法は上記に従い耐力が比例配分されるが、最適化計算は各層 BRB 容量を独立して探索するため、非比例配分も考慮される。3 章より解の入力依存性が判明したため、本章は基盤入力的设计用スペクトル(Fig. 15)で応答評価し、

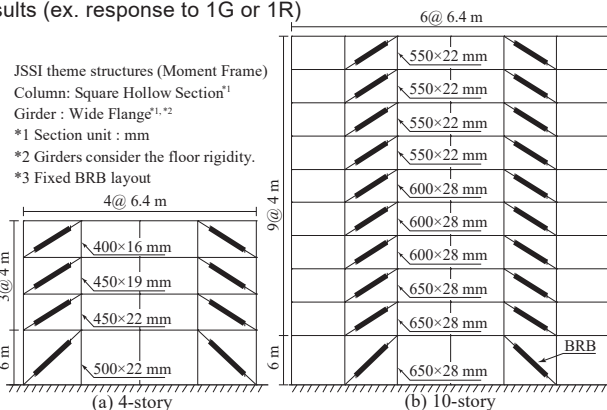


Fig. 14 JSSI BRBF theme structure model schematics

Table 6 Story stiffness specification

|          | $T_0$<br>(s) | $M_{eq}$<br>(ton) | $H_{eq}$<br>(m) | $k_f$ (kN/mm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|--------------|-------------------|-----------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |              |                   |                 | 1             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 4-story  | 0.97         | 671               | 12.6            | 61            | 86  | 75  | 51  |     |     |     |     |     |     |
| 10-story | 1.39         | 2803              | 29.4            | 168           | 255 | 251 | 232 | 227 | 220 | 184 | 172 | 160 | 135 |

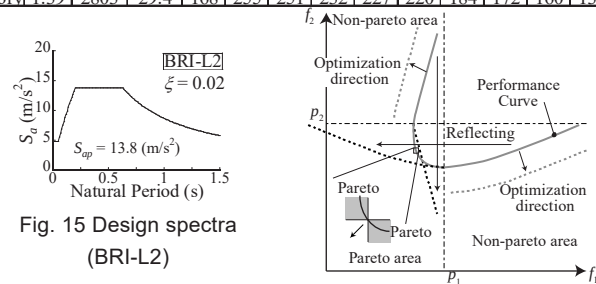


Fig. 15 Design spectra (BRI-L2)

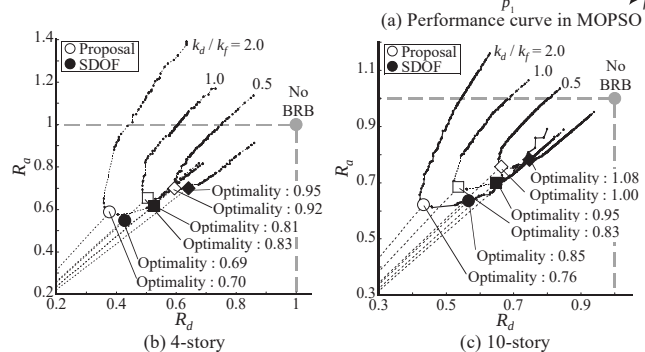


Fig. 16 MOPSO results

観測波の位相特性は排除して傾向分析する。式(9)の目的関数( $n = 1$ )は層間変形角とベースシアである。

#### 4.2 多目的分布量最適化と標準法の比較

Fig. 16 に多目的最適化の結果を示す。 $R_d$  と  $R_a$  は BRB 投入前に対する層間変形角とベースシアの最大応答低減比である。各解で最大層間変形角の最大層は変動するが、 $R_d$  は No BRB の最大層(4 層, 10 層ともに第 1 層)の層間変形角で一律無次元化して示す。多目的最適化はパレート最適解集合(目的関数値がトレードオフ関係)を探索する手法であり、本論は目的関数空間の非パレート解を、Fig. 16(a)の黒点線に示すように、パレート端部( $p_1, p_2$ )で仮想的に反転して多目的最適化し、性能曲線全体を探索した。同図に示すように、多自由度系も性能曲線を有し、MOPSO 法の最適化計算で探索可能である。

$R_d$ - $R_a$  平面原点からの距離を最適性指標(Optimality)として、SDOF 法と最適化計算の最適解を比較する。Fig. 16 中の●■◆は SDOF 法の最適解を GRSA で応答評価した結果である。最適解の詳細は Table 7 に示す。EL は最適解のその層の BRB が降伏せず、設計範囲で応答が不変であることを表す。Fig. 16(b)に示すように、4 層では最適化計算と SDOF 法は同程度の最適性を持つ容量分布量を設計できているが、Fig. 16(c)に示すように、10 層では SDOF 法の最適性がやや劣る。本モデルのように、第 1 層剛性が低い建物は、一般に下層の BRB 剛性と容量を大きくする方が良いとされ、文献 5)では SDOF 法の補足(せん断力分布に基づく容量配分や付加ダンパー剛性の調節)が提案されている。Table 7 に示すように、10 層の最適化計算は下層のダンパー耐力を高める解が実際に選ばれた。多自由度系の性能曲線はこの経験則を裏付けていると考えられる。以上より、最高高さ約 18m 以下の建物では最も単純かつ基礎的な本章の SDOF 法で妥当な最適ダンパー量を検討できるが、約 42m 以上の建物では上記の補足を考慮する SDOF 法の使用が推奨される。ただし、同手法は、各層剛性比が等価 1 自由度系から変動する場合があります、剛性比一定の比較条件から逸脱するため、本論では比較していない。

多目的最適化は 4 層で約 10 分、10 層で約 2 時間の計算時間を要した。なお、Optimality などを単目的関数とすれば、層間変形角とベースシアを同時に最小化する解を直接探索できると考えられる。

#### 5. 外殻構造物の最適配置解の傾向と最適化条件設定

2~4 章より提案する設計手法は妥当な制振部材の最適解を誘導できることが確認された。最後に多層多スパン骨組を対象に、ダンパー配置を含む、より複雑な部材配置最適化を行い、解の特性と実用に向けた問題設定を分析し、部材配置解の可能性を探索する。

##### 5.1 想定建物と最適化問題の概要

Fig. 17 に想定建物を示す。対象は耐震要素を外周に集約した外殻構造物である。外殻構造物では意匠・設備の制約に依らないブレース配置を検討できる。まず、本章では、Fig. 17 の点線部の平面モデルを抽出し、負担部分の重量を基に保有水平耐力計算の水平荷重  $C_0 = 1.0$  を想定して、強度型の全面耐震ブレース架構(CBF)を設計した。部材諸元は Table 8 に示す。Fig. 18 に卓越固有モードを示す。外殻構造は荷重負担が分離され、固有周期に対するブレースの影響が大きい。Fig. 19 の例に示すように、CBF は剛性が高く、層間変形角(SDR)は約 1/200 rad だが、座屈検定値(引出線は最大 DCR とその層を示す。))は 1 を超える。骨組のみ架構(Frame)は変形が 1/50 rad を超

Table 7 Optimization result (EL means non-yielding)

(a) 4-story

| $k_d/k_f$ | Method series | BRB size $F_{di}$ (kN) |     |     |     |  |
|-----------|---------------|------------------------|-----|-----|-----|--|
|           |               | 1                      | 2   | 3   | 4   |  |
| 0.5       | Proposal      | 500                    | 300 | 200 | 200 |  |
|           | SDOF          | 282                    | 229 | 200 | 135 |  |
| 1.0       | Proposal      | 700                    | 500 | 500 | 500 |  |
|           | SDOF          | 423                    | 343 | 299 | 203 |  |
| 2.0       | Proposal      | 1000                   | 500 | 500 | EL  |  |
|           | SDOF          | 564                    | 457 | 399 | 271 |  |

(b) 10-story

| $k_d/k_f$ | Method series | BRB size $F_{di}$ (kN) |      |      |      |      |      |      |     |     |     |
|-----------|---------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
|           |               | 1                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8   | 9   | 10  |
| 0.5       | Proposal      | 1250                   | 700  | 700  | 450  | 450  | 700  | 450  | 450 | 200 | 200 |
|           | SDOF          | 454                    | 394  | 388  | 358  | 351  | 340  | 284  | 267 | 247 | 209 |
| 1.0       | Proposal      | 2000                   | 1000 | 1000 | 750  | 750  | 500  | 500  | 500 | 500 | EL  |
|           | SDOF          | 701                    | 609  | 600  | 554  | 542  | 526  | 439  | 412 | 382 | 323 |
| 2.0       | Proposal      | 2500                   | 1250 | 750  | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 500 | 500 | EL  |
|           | SDOF          | 949                    | 824  | 812  | 749  | 733  | 711  | 594  | 558 | 517 | 438 |

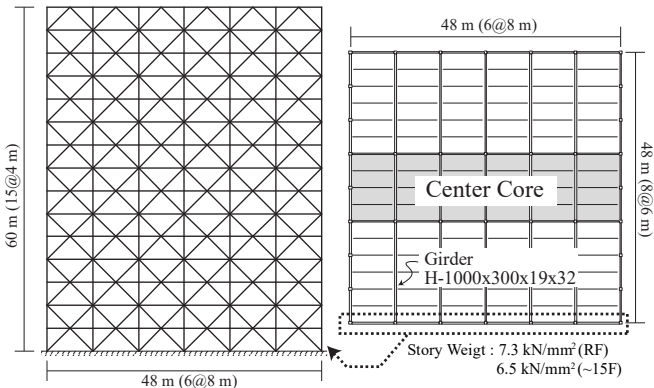


Fig. 17 CBF skin structure model schematic

Table 8 Initial member specification

| Story | Column SHS (BCP325) | $M_{pc}$ (kNm) | Girder Wide flange (SS400) | $M_{pg}$ (kNm) | $M_{pg}/M_{pc}$ | Brace CHS (STK540) | D/t | Rank |
|-------|---------------------|----------------|----------------------------|----------------|-----------------|--------------------|-----|------|
| 15    | 500×25              | 2,490          | H-500×300×12×22            | 895            | 0.36            | φ267.4×6.6         | 41  | BC   |
| 14    | 500×25              | 2,490          | H-500×300×12×22            | 895            | 0.36            | φ267.4×6.6         | 41  | BC   |
| 13    | 500×25              | 2,490          | H-500×300×12×22            | 895            | 0.36            | φ267.4×6.6         | 41  | BC   |
| 12    | 500×25              | 2,490          | H-500×300×16×22            | 945            | 0.38            | φ267.4×8.0         | 33  | BC   |
| 11    | 500×25              | 2,490          | H-500×300×16×22            | 945            | 0.38            | φ267.4×8.0         | 33  | BC   |
| 10    | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×22            | 945            | 0.35            | φ267.4×8.0         | 33  | BC   |
| 9     | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×22            | 945            | 0.35            | φ267.4×9.3         | 29  | BC   |
| 8     | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×22            | 945            | 0.35            | φ267.4×9.3         | 29  | BC   |
| 7     | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×22            | 945            | 0.35            | φ267.4×9.3         | 29  | BC   |
| 6     | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×25            | 1,034          | 0.38            | φ318.5×10.3        | 31  | BB   |
| 5     | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×25            | 1,034          | 0.38            | φ318.5×10.3        | 31  | BB   |
| 4     | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×25            | 1,034          | 0.38            | φ318.5×10.3        | 31  | BB   |
| 3     | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×25            | 1,034          | 0.38            | φ318.5×12.7        | 25  | BB   |
| 2     | 500×28              | 2,717          | H-500×300×16×25            | 1,034          | 0.38            | φ318.5×12.7        | 25  | BB   |
| 1     | 500×32              | 2,993          | H-500×300×16×28            | 1,126          | 0.38            | φ318.5×12.7        | 25  | BB   |

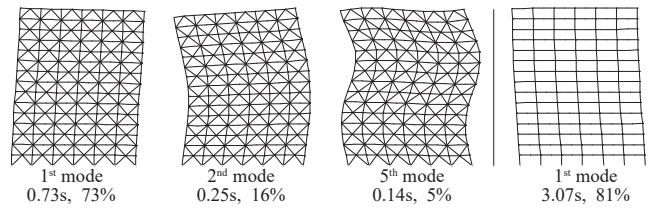


Fig. 18 Dominant modes (natural period, mass ratio)

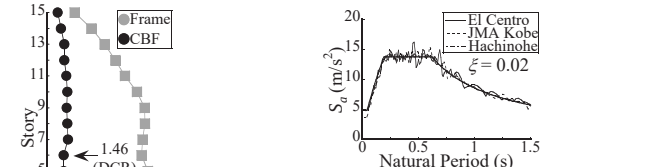


Fig. 21 Response spectra matched to Japanese level 2 design earthquake

Table 9 Optimization algorithm parameter

| Selection            | Crossing (Rate) | Mutate (Rate)      | Migration                      |
|----------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|
| Tournament (3 inds.) | Uniform (60%)   | Shuffle Index (1%) | Random Ring (2 inds., 6 gens.) |

Fig. 19 Initial Response (El Centro)

える。以上の架構を初期状態として部材配置最適化を実施する。

最適化アルゴリズムは島 GA を用いる。Fig. 20 に概要を示す。島 GA は母集団を部分集団(島)に分割し、各島は独立して GA 計算を行って定期的に優良個体を交換(移住)する。各島は移住により多様性を維持して局所収束を避ける。本章はある程度収束すると優良個体を保存して変異率を上昇する大突然変異世代を加えた。交差と変異は層、スパン、遺伝子単位で行う(等確率)。その他は Table 9 に示す。

個体操作は合計 180 本の強度型ブレースに関する 3 種(BRB 置換, 除去, 無変更)と, 1 層柱の BRB 化(BRC 置換)であり, K 型対称配置の遺伝子列  $x$  (Fig. 20(b))を作成する。ブレースの全操作を含む問題(5.3 節)で条件を均等にするため, 上記 3 操作は各 60 本の制約条件を設ける。ただし, BRC 置換を含む問題(5.4~5.5 節)は, 最低 2 本柱が BRB 化する解を考慮し, BRB は 62 本制約とする。柱の無置換または全置換の解も平等に探索するため, ブレースと柱で置換数は区別せず, 柱は 1 本ずつ置換可能とする。 $x$  の次元は 45(ブレース操作のみ), 49(1 層柱の BRC 置換を含む場合)である。BRB は 250 kN (断面積 1,111mm<sup>2</sup>), BRC は 5000 kN (断面積 22,222mm<sup>2</sup>)とする。

各最適化問題の単目的関数(式(9))は, SDR(以降, 変位), DCR(以降, 座屈), DCR のペナルティ付き SDR, DCR のペナルティ付き SDR 標準偏差の 4 種とする。入力地震動は告示適合 3 波(Fig. 21)とする。

以上より, 最適化問題は操作 4 種(5.2 節: BRB 置換, 5.3 節: BRB 置換+ブレース除去, 5.4 節: BRB 置換+BRC 置換, 5.5 節: BRB 置換+ブレース除去+BRC 置換)×目的関数 4 種の 16 種を設定する。Table 10 は要約を示す。最適解の応答値は平均的な El Centro で示す。

5.2 BRB 置換のみを利用した最適配置解の傾向

初めに BRB 置換のみで変位または座屈を最小化する配置を分析する。Fig. 22(a)(b)に示すように, 変位最小化では層方向に概ね均一配置する解が選ばれ, 座屈最小化ではスパン方向に集中配置する解が選ばれた。連続する層に集中配置すると座屈に有効な点は単スパンの鉄塔と同様だが, 多スパンでは変位と座屈で配置傾向が分岐する。BRB 置換は応答低減とヒューズ効果を得るが, 全面耐震ブレース(Fig. 17)を初期とすると水平剛性の低下を招く。つまり, 変位最小化で均一配置が選ばれる理由は, 等価剛性を考慮した層剛性分布が均一化するためであり, 座屈最小化で集中配置が選ばれる理由は, 層剛性が低い層で免震効果が得られるためである。なお, Fig. 18 の通り, 連層壁の特性で外殻構造は曲げ応答が生じ, 層内各スパンの水平変形が不均等になり, 変位最小化では等価剛性の低下が小さい外側に BRB が配置された。

一方, 変位最小化の均一配置は層間変位が 1/200 rad まで収まるが座屈が解消されず, 座屈最小化の集中配置は BRB 配置層に連続して変形集中を招き, 目的関数に対し過剰に応答低減する解が得られる。両者を補完する方法の 1 つは多目的最適化であるが, 本論はペナルティ付の単目的最適化を採用し実行した。これは応答を基準に収めることが優先される設計段階では, パレート最適解集合から解を選択するより, あるペナルティ下で特定の応答を最小化の方が直接的と考えたためである。具体的に対象の外殻構造においては DCR<1.0 をペナルティとする。Fig. 22(c)は変位を最小化する解であり, 集中配置が層方向に分散され, Fig. 22(d)は変位の標準偏差(S.D.)を最小化する解であり, 全層変位を均一化するため, 集中配置がより分散される。最大変位はやや増大するが連続集中は緩和される。

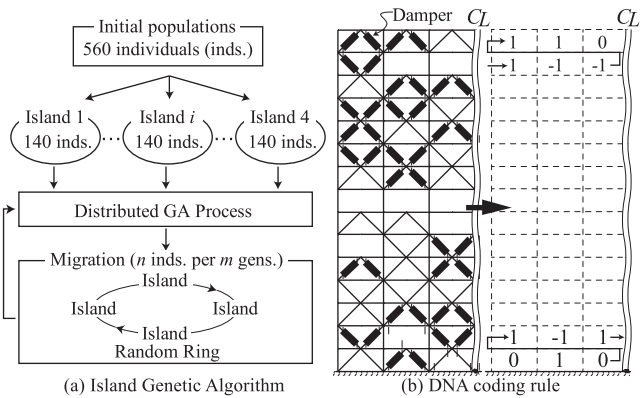


Fig. 20 Optimization schematic

Table 10 Optimization problem matrix

| Ch. | DNA Operation                                      | Minimize Response of                                                                                                       | Subject to the number of                        |
|-----|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 5.2 | BRB replacemnt                                     | SDR,<br>DCR,<br>SDR with a penalty <sup>*1</sup><br>or<br>S.D. with a penalty <sup>*1</sup><br><sup>*1: DCR &lt; 1.0</sup> | BRB (60)                                        |
| 5.3 | BRB replacemnt<br>+ CB removal                     |                                                                                                                            | BRB (60), CB (60)<br>and Removed CB (60)        |
| 5.4 | BRB replacemnt<br>+ BRC replacemnt                 |                                                                                                                            | BRB+BRC (62)                                    |
| 5.5 | BRB replacemnt<br>+ CB removal<br>+ BRC replacemnt |                                                                                                                            | BRB+BRC (62),<br>CB (60) and<br>Removed CB (60) |

5.3 ブレースの除去を含む最適配置解の傾向

次にブレースの除去を加えた配置傾向を分析する。本章の目的関数は経済指標を含まないが, ブレースの除去は鋼材量の低減に貢献する。Fig. 23(a)に示すように, 変位最小化は同様に層方向の均一配置が選ばれるが, BRB 置換のみと異なり, BRB が中央スパンに配置される。これは等価剛性の低下を抑える外側スパン配置より, 塑性変形量と付加減衰が大きくなる中央スパン配置が有利なためと考えられる。ただし, DCR が 0 になるブレースの除去を加えても, 変位最小化だけで座屈は解消しない。Fig. 23(b)に示すように, 座屈を最小化する場合は下層に BRB 置換と耐震ブレース要素の除去が集中する解が選ばれるが, 層変位が下部に集中する。一方, Fig. 23(c)(d)に示すように, ペナルティ付では, 座屈を解消しつつ変位を低減でき, 特に標準偏差の最小化は層集中を均一に緩和する解を得た。これは BRB 置換が集中する層と, ブレースが除去される層が同時に生じ, 結果的に剛性分布が均一化されたためと推測される。

5.4 1 層柱の BRC 置換を含む最適配置解の傾向

続いて 1 層柱の BRC 置換を許容し, 曲げ応答を積極利用する配置傾向を分析する。本論の複素剛性要素(2.1 節)は軸力系の部材であれば BRC にも適用できる。同種の構造は Spine Frame<sup>6)</sup>と呼ばれる。BRC 置換による応答低減効果は BRB 置換のみより大きく, Fig. 24(a)に示すように, 単純な変位低減では, 一般に変形が小さく塑性化しにくい最上層の BRB 配置が選ばれ, BRB が余る。Fig. 24(b)に示すように, BRC 置換を許容すると相対的に 1 層変形が大きくなり, 座屈最小化では BRB の集中配置が下層に移動する。一方, Fig. 24(c)(d)に示すように, ペナルティ付では, 前節までと異なり, 座屈最小化の集中配置より, 変位最小化の均一配置解が選ばれた。これは曲げ応答が利用できると均一配置系の解で座屈が解消されるためである。

5.5 ブレースの除去と 1 層柱の BRC 置換を含む最適配置解の傾向

最後に全操作を含む配置傾向を分析する。ブレースの除去と 1 層柱の BRC 置換を含むと, 座屈の解消は BRB 置換のみより容易となる。Fig. 25(a)に示すように, 変位最小化のみで座屈の解消が達成で

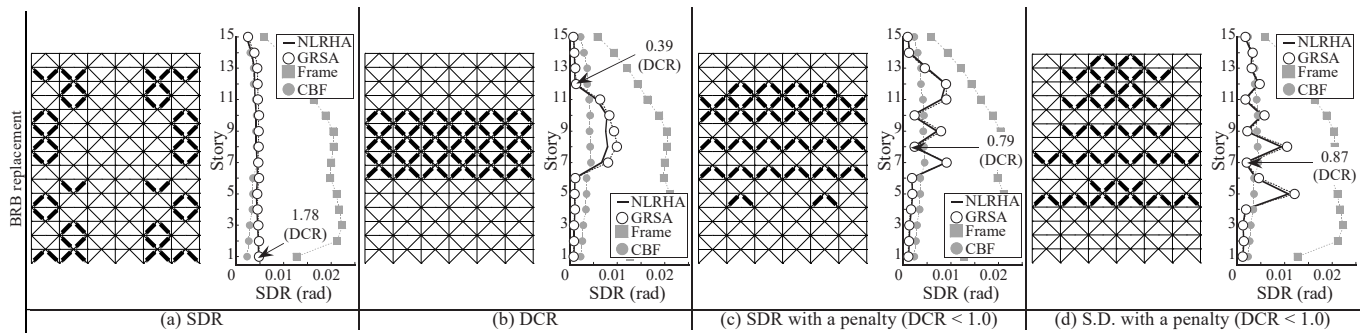


Fig. 22 Layout optimization results (Operation: BRB replacement, ex. Response to El Centro)

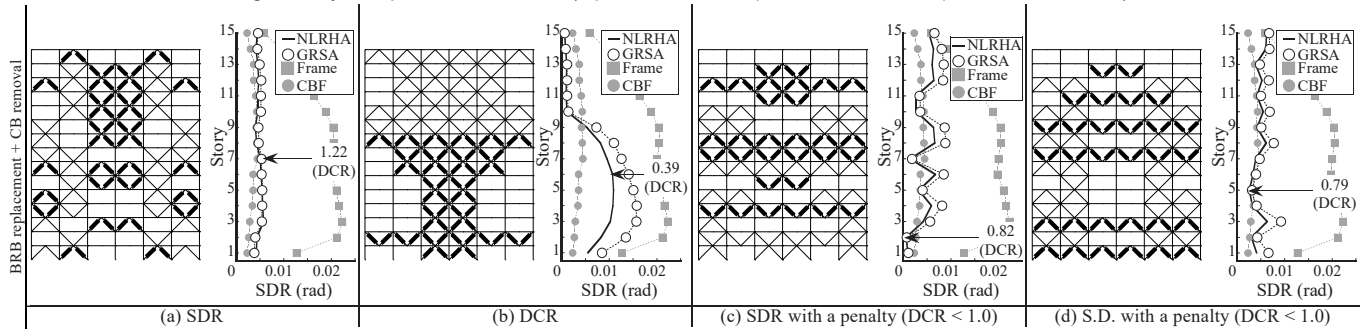


Fig. 23 Layout optimization results (Operation: BRB replacement + CB removal, ex. Response to El Centro)

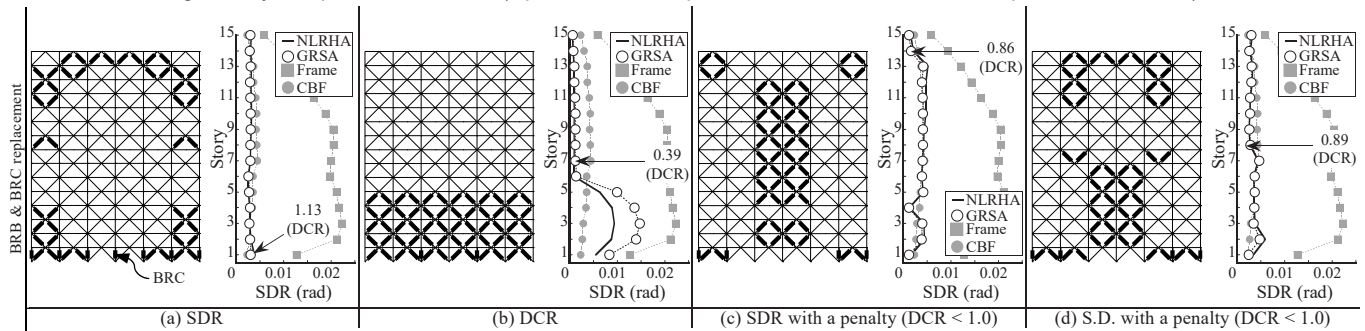


Fig. 24 Layout optimization results (Operation: BRB & BRC replacement, ex. Response to El Centro)

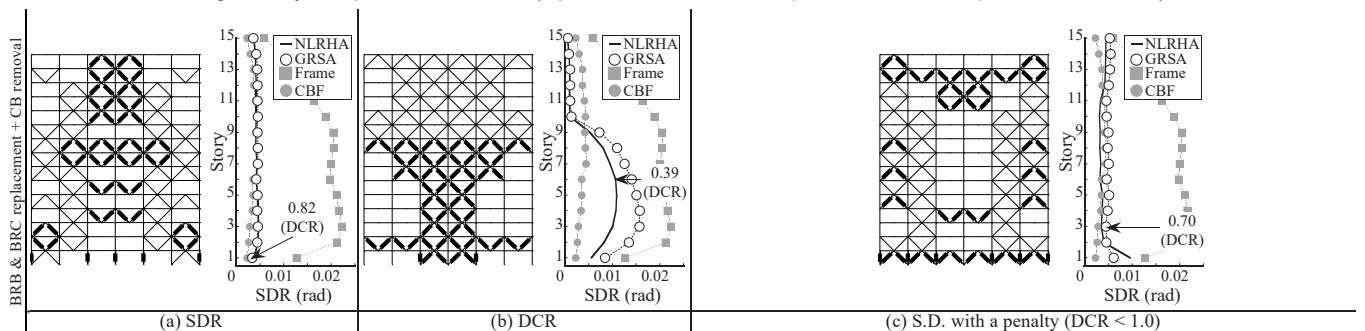


Fig. 25 Layout optimization results (Operation: BRB & BRC replacement + CB removal, ex. Response to El Centro)

き、ペナルティ付の検討は不要となる。付加減衰を大きくするために BRB が中央スパン配置される傾向は Fig. 23(a)より顕著となる。Fig. 25(b)に示すように、座屈を最小化する場合 Fig. 23(b)と同程度である。Fig. 25(c)に示すように、標準偏差を最小化する場合 5.3 節同様 BRB が余る解が選ばれた。なお、Fig. 22~Fig. 25 に示すように、BRB 置換やブレース除去が集中する層は剛性低下や高いダンパー剛性比により非線形応答が強く、最大で約 30%安全側評価となった。

## 6. 結

本論の検討範囲で得られた結論を以下に示す。

1)弾塑性ダンパーブレースも含む数値解析モデルにそのまま適用で

きる一般化応答スペクトル解析法(GRSA)を構築し、曲げ系、軸力系、立体、平面によらず応答評価に適用できることを示した。ブレース型弾塑性ダンパーの複素剛性要素は軸力系部材に適用できる。自由度数 810 のモデルの計算時間は、NLRHA(ステップ数 7,000)で 15~30 分、GRSA で 5~10 秒を示した。

2)試行錯誤で BRB 配置と容量分布を決定した通信鉄塔の既存改修は、座屈最小化の配置制約付き最適化問題の優良解と言える。GRSA と最適化ツールを組合せた設計手法はより良い解を導き、制振構造の最適設計に適用できる。ただし、最適解の詳細な BRB の配置や容量分布量は地震入力依存性がある。

3)多自由度系においても、等価一自由度系と同様な応答低減性能曲

線が存在し、多目的最適化で導出可能である。等価一自由度系の性能曲線に基づく標準的な最適設計法は、ある程度(本論の検討では約 42m)以上の最高高さの建物は、等価 1 自由度系の応答が多自由度系と全で一一致すると仮定してダンパー諸元を決定する手法では妥当な最適解を検討できない場合がある。同様の場合では、文献 5)のせん断力分布に基づく容量配分や付加ダンパー剛性の調節など補足法の使用が推奨される。

- 4)座屈するブレースを含む外殻構造物は、特定の応答の単目的最適化のみでは、変位や座屈検定値を満足する解が得られるとは限らない。同様の場合は、座屈検定値などをペナルティとして単目的最適化すると、座屈と変位を同時に抑制できる配置解を探索できる。また、柱の BRB 置換等を考慮すると、ペナルティ等を考慮しない単純な単目的最適化で設計基準を満たす配置解を探索できる。

本論の範囲の GRSA は線形粘性、線形粘弾性、バイリニア型の弾塑性ダンパーに対応する。Voight モデルなどの等価粘弾性要素<sup>4)</sup>を用いることで、GRSA は非線形粘性や非線形粘弾性にも拡張可能と考えられ、その場合の操作は Fig. 1 の減衰行列の更新ステップに含まれる。本論は最大応答評価を主軸とし、複素剛性で話題になる時間因果性の問題は無視したが、今後は GRSA の収束結果を利用して時刻歴応答の評価も検討する必要がある。なお、本論は弾性主架構と有限のダンパー部材を持つ構造に対象を限定した。主架構とダンパー剛性比により非線形応答が強くなると弾塑性応答の評価精度が悪化する点は本文の応答評価の図版(3 章, 5 章)にも示されており、等価線形化法の提案者の Jacobsen も指摘している<sup>17)</sup>。GRSA を主架構弾塑性応答に拡張することは特別の議論と適用範囲の検証が必要である。なお、本論は、各章の目的に応じて等式制約を持つ配置最適化問題を検討したが、使用した最適化ツール自身は、不等式制約や無制約の問題にも適用可能である。

## 謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費(研究課題番号: 16J04303)の助成を戴きました。また、本研究は東京工業大学の TSUBAME 3.0 (2017 年運用開始)の計算結果です。ここに謝意を記します。

## 参考文献

- 1) AIJ: Report on 2016 Kumamoto earthquake, 2018.6 (in Japanese)  
日本建築学会 : 2016 年熊本地震被災調査報告, 2018.6
- 2) JSSI: Buckling-Restrained Braces and Applications, 2017.10
- 3) Terazawa, T., Matsui, R., Nakamura, T. and Takeuchi, T.: Cumulative Deformation Capacity and Structural Ductility Factor of Circular Hollow Section Steel Braced Frames with Different Diameter Thickness Ratio, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.739, pp.1485-1495, 2017.9 (in Japanese)
- 4) Jacobsen, L.S.: Steady forced vibration as influenced by damping, Transaction of the ASME, ASME, Vol.51, pp.169-181, 1930
- 5) JSSI: Manual for Design and Construction of Passively-Controlled Buildings 3<sup>rd</sup> Edition, Daioh Co., Ltd, 2013 (in Japanese)  
日本免震構造協会 : パッシブ制振構造設計施工マニュアル第 3 版, 2013
- 6) Chen, X., Takeuchi, T. and Matsui R.: Simplified design procedure for controlled spine frames with energy-dissipating members, Journal of Constructional Steel Research, Vol.135, pp.242-252, 2017
- 7) Ookouchi, Y., Takeuchi, T., Kato, S. and Suzuki, K.: Seismic Retrofit of

- Existing Telecommunication Tower Using Buckling Restrained Brace, AIJ Journal of Technology and Design, No. 22, pp.179-184, 2005.12 (in Japanese)
- 8) Takeuchi, T., Uchiyama, T., Suzuki, K., Ookouchi, Y. and Ogawa T. : Seismic Retrofit of Truss Tower Structures using Buckling Restrained Braces - Cyclic tests on real-size mock-up frames -, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.589, pp.129-136, 2005.3 (in Japanese)
  - 9) AIJ: Introduction to Design Computing, Corona Co., Ltd., 2017.9 (in Japanese)
  - 10) Structural Design and Numerical Simulation Tool, Special issue, The Kenchiku Gijutsu No. 797, Kenchikugijutsu Co., Ltd, 2016.6 (in Japanese)  
特集 構造デザインと数値解析ツール, 建築技術 No. 797 2016 年 6 月号, 建築技術
  - 11) Takeuchi, T., Kinouchi, Y., Matsui, R. and Ogawa, T.: Optimal arrangement of energy-dissipating members for seismic retrofitting of truss structures, American Journal of Engineering & Applied Science, Vol. 8, pp. 455-464. 2015.
  - 12) Osaki, M.: Optimization of Finite Dimensional Structures, CRC Press, 2011.
  - 13) Nomura, M., Matsumoto, S., Sakino, Y. and Fujii, D.: Optimization of Placement of Response Control Damper on Plane of High-rise Building Structure using ESO Method, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.742, pp.1885-1891, 2017.12 (in Japanese)
  - 14) Terazawa Y. and Takeuchi T. : Generalized Response Spectrum Analysis for Structures with Dampers, Earthquake Spectra, EERI, accessed 2018. 5. 31, DOI: <https://doi.org/10.1193/092217EQS188M>
  - 15) DEAP 1.1.0: <https://github.com/DEAP/deap>
  - 16) Myklestad, N.O.: The concept of complex damping, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 19, pp. 284-286, 1952.
  - 17) Jacobsen, L.S.: Damping in composite structure, 2WCEE, pp. 1029-1043. 1960.
  - 18) Newmark, N.M., and Rosenblueth E.: Fundamental of Earthquake Engineering, Prentice-Hall Inc., 1971.
  - 19) Caughey, T.K.: Sinusoidal excitation of a system with bilinear hysteresis, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol.27, pp.640-643, 1960.
  - 20) Shinha, R. and Igusa, T: CQC and SRSS methods for non-classically damped structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 615-619, 1995.
  - 21) Ishimaru, S. and Chunhuan, K.: New version / ductility factor control method - Evaluation of ratios and cumulative ductility factors for a structure with specified ductility factor, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.708, pp.241-251, 2015.2 (in Japanese)
  - 22) Coello, C. A. C., Pulido, G. T. and Lechuga, M. S.: Handling multiple objectives with particle swarm optimization, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol.8, No.3, pp.256-279, 2004.6

# OPTIMAL DAMPER DESIGN STRATEGY FOR BRACED STRUCTURES BASED ON GENERALIZED RESPONSE SPECTRUM ANALYSIS

*Yuki TERAZAWA<sup>\*1</sup> and Toru TAKEUCHI<sup>\*2</sup>*

<sup>\*1</sup> Grad. Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, M.Eng.  
(Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science)

<sup>\*2</sup> Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

## 1. Introduction

Numerous structures are recently required continuous use even after large earthquakes. An efficient technique is to employ elasto-plastic dampers, such as buckling-restrained braces (BRBs), which act as fuses. Although response spectrum analysis (RSA) has a good time efficiency for damper design, relative to non-linear response history analysis (NLRHA), the conventional methods are generally limited to specific structures that are easily translated into simple models. With a suitable RSA method, computational optimization of damped structures will be also important, considering recent trends towards the use of algorithmic modelling, scripting and cloud-based high performance computing servers. Thus, this paper presents a damper design routine for highly indeterminate 3D structures utilizing computational optimization and response spectrum analysis, which has been extended to incorporate non-proportional damping.

## 2. Generalized Response Spectrum Analysis and computational work flow

The proposed routine (GRSA) is presented, and the accuracy is verified in the comparison with THA.

## 3. Damper layout or distribution optimization for the lattice tower

A series of optimizations, including damper layout or distribution, is performed for the lattice tower in order to verify the efficiency of the proposed design routine, and to analyze the efficiency of the existing retrofit design.

## 4. Damper distribution optimization for the conventional BRBFs

A multi objective damper distribution optimization is performed in order to verify whether the well-known performance curve can be found in a detailed BRBFs. Additionally, the optimization results are compared with that of the conventional design method.

## 5. Layout optimization for a concentric braced frame skin structure and the practical optimization conditions

A series of detailed layout optimizations, including BRB replacements of the concentric braces, BRB replacements of the first story columns or the concentric brace removals, is performed in order to investigate both the optimal layout tendencies and the practical optimization conditions.

## 6. Conclusions

In summary, the following results were obtained:

- 1) GRSA can be used for direct RSA of 3D structural analysis models including dampers of various types, with buckling-restrained braces used in this study, and the accuracy is verified in a series of comparison studies with NLRHAs. In the study of the systems including 810 degree-of-freedom, NLRHAs (7,000 steps) take 15 to 30 min., GRSA takes 5~10 s, which indicates GRSA has a good time efficiency compared with NLRHA.
- 2) While improved layouts and distributions were identified for certain constraint and target objectives, the existing design for a particular lattice tower was found to be close to the optimal solution for minimizing the buckling utilization. While the layout and distribution trends are usefully indicated by the optimal solutions, the results are dependent on the input waves, suggesting that there may be no versatile optimum solution to every possible scenario.
- 3) Even for the multi degree-of-freedom models, the well-known performance curve related to the response reduction of passively-controlled buildings can be found, utilizing a multi objective distribution optimization method. While the full proportional distribution method of equivalent single degree of freedom is reasonable for low rise structures.
- 4) A single objective optimization may be an inadequate optimization condition for the concentric braced frame skin structures. A penalty is suitable for this situation in order to reduce both the story drifts and demand capacity ratios of member buckling. Nevertheless, BRB replacements of columns or concentric brace removals enable simple single objective optimization.

(2018年3月3日原稿受理, 2018年7月24日採用決定)