

系統別復旧シナリオに基づくレジリエンス性能評価モデルと 粘性ダンパーによるレジリエンス性能の改善

MODELING OF RESILIENCE BASED ON CATEGORIZED RECOVERY SCENARIO AND IMPROVING RESILIENCE WITH VISCOUS DAMPER

明橋 弘樹^{*1}, 竹脇 出^{*2}

Hiroki AKEHASHI and Izuru TAKEWAKI

A model for the evaluation of building's resilience and recovery time is proposed. Then a new method of optimal viscous damper placement for targeted resilience is developed. The features of this model are : 1) Building components are categorized into some systems in view of function, 2) The recovery time is a function of damage of building components and human resources to repair the components, 3) Applicable to structural design. This design method uses a kind of real-coded GA. The effective use of the constraint on the sum of added damper damping coefficients enables an efficient search for the solution.

Keywords : Resilience, Recovery time, Viscous damper, Multi-objective optimization, Real-coded genetic algorithm, Facility

レジリエンス, 復旧時間, 粘性ダンパー, 多目的最適化, 実数値遺伝的アルゴリズム, 設備

1. 序

制振建物の設計では、変形を抑制して構造体の損傷を抑制することが第一の目的とされてきた。しかし、構造体の損傷のみならず、設備・非構造体の損傷も建物の継続使用を妨げ、復旧時間を長期化させる要因となる¹⁾。オフィスビルを例に考えれば、被災後の早期復旧・業務継続は経済性の観点から重要であり、復旧性を考慮したレジリエントな構造設計法の構築が社会的にも必要とされている。

建物のレジリエンスを向上させる方法として、制振ダンパーによる構造応答の低減や設備・非構造体の耐震化（耐力向上）が挙げられる。設備・非構造体に関して、床加速度や層間変形はこれらの要素にとっての入力であり、構造体応答と設備・非構造体の損傷には相関がある。特に床加速度の低減は、飛散物等による物的・人的被害の低減にも寄与する。

以上の観点から、構造体の応答の低減は、構造体そのものの損傷防止のみならず、設備・非構造体の損傷防止、ひいては早期復旧性の向上に有効であると考えられる。

近年、建築・土木分野においてレジリエンス・復旧時間に関する研究が精力的に取り組まれている。Bruneau and Reinhorn (2006)²⁾はレジリエンスを表現する指標として、ロバストネス、リダンダンシー、リソースフルネス、ラピディティの4つを挙げている。

ライフライン・インフラストラクチャー（power, water, gas, telecom）や重要施設の復旧時間を扱った研究のうち^{1), 3), 4)}、特に文

献 1)は非構造要素の損傷も考慮した方法を示している。

これらのほか、病院施設や地域の医療ネットワーク（病院施設群）の事業継続性を扱った研究⁵⁾、建物の downtime（発災後再び使用可能となるまでの時間）をファジィロジックに基づいて予測することを提案した研究⁶⁾が存在し、また downtime の rational, irrational な構成要素（後者は不確実性が高くモデル化・予測が困難であるものをいう）について言及したもの⁷⁾などが存在する。

以上に示したように、レジリエンス・復旧時間の推定・評価に関する研究が多いが、構造設計の観点からレジリエンス・復旧時間を扱ったものはほとんど存在しない。

一方、ダンパーの最適設計に関する研究は数多くなされている⁸⁾⁻¹⁰⁾。Takewaki (1997)は1次固有円振動数での層間変形伝達関数の振幅の総和を目的関数としたダンパー最適化を行っている¹¹⁾。Aydin et al. (2007)はTakewaki (1997)の方法をベースシアに拡張した¹²⁾。Akehashi et al. (2020)はTakewaki (1997)の概念を高次モードへと拡張してn次モード最適ダンパー配置の概念を提案した¹³⁾。Zhang and Soong (1992)はダンパー配置の非常に簡潔な手法を提示し¹⁴⁾、Garcia (2001)はZhang and Soong (1992)の方法を拡張している¹⁵⁾。Kanno (2013)はダンパーの付加減衰係数を離散変数とし、ダンパー最適化問題を混合整数計画問題として扱っている¹⁶⁾。これらのほか、種々のダンパー最適化法の比較を行った研究¹⁷⁾や、弾塑性建物に対するダンパー最適化問題を扱った研究も存在する^{18), 19)}。

¹⁾ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻大学院生
日本学術振興会特別研究員 DC1・修士（工学）

²⁾ 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Grad. Stud., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.,
Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science, M.Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.

本論文では、レジリエンス指標の最適化に実数値遺伝的アルゴリズム（実数値 GA）を用いている。遺伝的アルゴリズム（以下 GA）はメタヒューリスティクスの代表的な手法の一つであり、構造最適化や振動制御の有力な手法として取り入れられている^{20)~25)}。GA は多点探索型の確率的（乱数を用いるという意味）最適化手法であり、目的関数が複雑（不連続点や多峰性の存在など）であっても有効に機能することや、多目的最適化が可能であるなどの利点を有する²⁶⁾。これらのほか、弾塑性応答を考慮しているために数値感度解析では局所解に陥る恐れがあること、設計変数のバイナリ表現への変換が不要であることも実数値 GA を用いる理由である。一般的な GA では遺伝子をバイナリ表現する。これに対して、実数値 GA は設計変数ベクトルもしくはそれらに関係のある実数値ベクトルを遺伝子に用いる方法である。交叉法の良し悪しが解の性能に大きく影響するため、問題ごとに適切な交叉法を用いる必要がある。代表的な交叉法として BLX- α 法が挙げられる²⁷⁾。

本論文の目的は、1) レジリエンス・復旧時間評価モデルの提案と、2) これらを指標とした粘性ダンパー最適設計法の構築である。提案するレジリエンス・復旧時間評価モデルは以下のような特徴を有する：1) 建物内の構成要素（構造躯体・非構造・設備）を機能の観点から種々の系統に分類、2) 復旧力（速度）を復旧人員数、すなわち要素の修復に取り組むことのできる人員数として考慮、3) 構造設計に適用可能。また、総復旧時間の正確な予測を直接の目的としてはいないため、遅延時間やインフラの被害などは考慮しない。本論文で提案するダンパー設計法は実数値 GA に着想を得た方法である。本論文では、ダンパーによる付加減衰係数の総和を一定とする制約を有効活用した交叉法を提案しており、これにより効率的な解の探索が可能である。また、復旧力（復旧シナリオ）の不確実性を非確率的に表現しつつ、この不確実性をダンパー設計に反映させることが可能な方法を提案している。具体的には、復旧力が最小・最大の 2 ケースによる復旧時間の多目的最適化を行っている。復旧力が最小・最大となる場合の復旧時間の（単目的）最適化はそれぞれ、建物構成要素の損傷の総和及び最大値の最小化に相当することを意味している。数値例題により、ダンパー配置の違いによる復旧時間の分析や提案設計法の有効性の検証を行う。

2. 建物のレジリエンス・復旧時間モデル

2.1 レジリエンス・復旧時間モデルの基本的な考え方

Bruneau and Reinhorn (2006) は、被災後から復旧までの建物の性能低下量の時間積分を小さくすることがレジリエンスを高めることになると定義している²⁾。本論文でも同様の考え方に基づき、この量を構造設計の指標として用いることによりレジリエンスの評価モデルを提案する。まず復旧時間評価モデルについて述べ、性能低下量に関しては後で言及する。

ある建物の総復旧時間 T_{total} を構造体の修復に要する総時間 T_{total}^S と設備・非構造体の修復に要する総時間 T_{total}^F の和として、(1) 式のように定義する。

$$T_{total} = T_{total}^S + T_{total}^F \quad (1)$$

構造体に損傷が生じている場合には、安全性の観点から建物の使用が規制される場合が多く、構造体の修復が完了するまでは設備・非

構造体の復旧作業に取り組みえないものと考えられる。(1) 式はこれを反映している。また一般的には、地震後におけるある建物の性能低下量や復旧完了までにかかる時間には、建物内被害のみならず、様々な外的要因・不確定要因が関係すると考えられる（例えば、供給系インフラ・交通インフラの被害、作業の遅延など）。本論文では、建物応答が直接関係する範囲を指標化の対象とし、外的要因・不確定要因は考慮しない。

2.2 設備・非構造体の修復に要する時間の評価方法

建物内の個々の設備・非構造体を、建物の全機能を果たす要素とみなす。各要素が有する機能が連関する場合、それらを 1 つの系統に分類する（系統は、機能の観点から分類された要素の集合）。例えば、受電盤・幹線・分電盤は電気供給の機能を果たす。これら各要素の機能は直列的に連関しており、すなわちどれか一つでも損傷した場合には系統全体の機能（電気供給の機能）が失われる。具体例は 2.4 節に示している。系統 i に属する要素 j の復旧時間 $T_{i,j}$ は、要素への入力レベル I と被害レベル D に同時確率密度を仮定し、(2) 式のように期待値として評価する（Fig. 1）。

$$T_{i,j}(I) = \int f_{i,j}(I, D) \cdot \tau_{i,j}(D) dD \quad (2)$$

ここで $f_{i,j}, \tau_{i,j}$ はそれぞれ入力レベルと被害レベルの同時確率密度、被害レベル毎の復旧時間とする。入力レベルとして、構造躯体の最大応答（床加速度・層間変形）を採用する。また、各要素の損傷相関は考慮しない。

系統内の全要素の修復が完了すれば、系統機能が回復されたと考える。系統 i の復旧時間及び要素数を T_i, M_i とすると、 T_i と $T_{i,j}$ には (3) 式のような関係が存在する。

$$\max_j \{T_{i,j}\} \leq T_i \leq \sum_{j=1}^{M_i} T_{i,j} \quad (3)$$

T_i が左辺に等しい場合は、系統内のすべての要素を同時に修復開始する場合、すなわち復旧作業にあたる人員が十分に確保可能である場合を表す。 T_i が右辺に等しい場合は、系統内の要素を順次修復する場合、すなわち復旧作業にあたる人員が最低限である場合を表す。

レジリエンス・復旧時間を正確に予測することを目的としている場合には、復旧シナリオを予め想定する（復旧シナリオを指定する）、もしくは復旧力を確率モデル化する必要がある。復旧力を確率モデル化した場合には、結局生じうるシナリオ全てを数え上げて考慮する必要がある、非現実的である。以下では、復旧作業に当たる人員が最小及び最大となる端的な復旧シナリオに基づいたレジリエンス・復旧時間評価法を提示する。Beck et al. (1999) も同様の概念（復旧シナリオの上下限のケース）を提示している²⁸⁾。

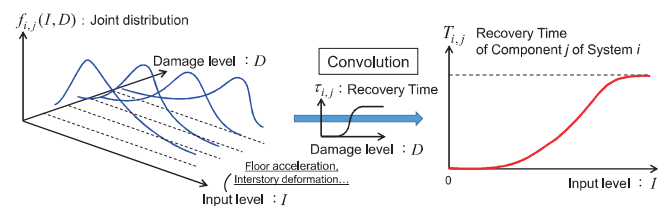


Fig. 1 Outline of evaluation of recovery time

[Scenario LA (Limited Ability to Recover)]

Scenario LA は復旧作業に当たる人員を限定的（最小）と想定した場合、すなわち建物内の全要素を順次修復するシナリオである。系統の数を n 、系統 i の機能不全による性能低下量を r_i とすると、提案レジリエンス指標 $R_{reduction}$ と系統 i の復旧時間 T_i 及び総復旧時間 T_{total} は(4)-(6)式のように表される (Fig. 2a)。

$$R_{reduction} = \sum_{i=1}^n T_i (\sum_{k=i}^n r_k) \quad (4)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^{M_i} T_{i,j} \quad (5)$$

$$T_{total} = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M_i} T_{i,j} \quad (6)$$

$R_{reduction}$ は図中の赤線で囲まれた部分の面積である。また、機能回復の過程は長方形的に表現される。すなわち、系統 i の構成要素が全て修復されると、性能が r_i 回復することとする。 $R_{reduction}$ の値は系統の修復の順番に依存するが、 T_{total} はこれに依存しない。(5), (6)式に示すように、Scenario LA における復旧時間は一般的なリスクアナリシスと同様の方法で計算できる。

[Scenario FA (Full Ability to Recover)]

Scenario FA は復旧作業に当たる人員を最大と想定した場合、すなわち建物内の全要素の修復を同時に開始するシナリオである。 $R_{reduction}, T_i, T_{total}$ はそれぞれ(7)-(9)式のように表される (Fig. 2b)。

$$R_{reduction} = \sum_{i=1}^n T_i \cdot r_i \quad (7)$$

$$T_i = \max_j \{T_{i,j}\} \quad (8)$$

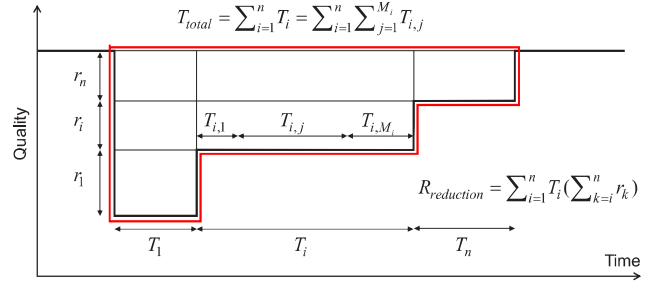
$$T_{total} = \max_i \{T_i\} = \max_{i,j} \{T_{i,j}\} \quad (9)$$

復旧シナリオを不確実なものとする場合（復旧作業にあたる人員数が不確定の場合）、総復旧時間に関する不等式は(10)式のように表される。

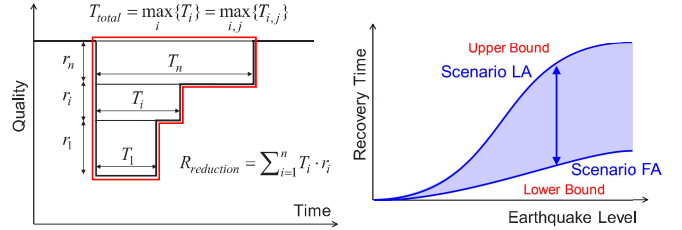
$$\max_{i,j} \{T_{i,j}\} = T_{total}^{FA} \leq T_{total} \leq T_{total}^{LA} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M_i} T_{i,j} \quad (10)$$

Scenario LA, FA の関係を Fig. 2c に示す。建物内の要素（設備・非構造体）が増えるほど、想定可能な復旧シナリオの数も増える。Scenario LA, FA に基づく復旧時間はそれぞれ復旧時間の上端・下端となり、実際の復旧シナリオは両シナリオの間に存在する。両シナリオに基づく復旧時間の値の差が小さい設計は、不確実性が小さいという観点から望ましい設計であるといえる。また、どちらか片方のシナリオに基づいた復旧時間を小さくする設計がほかのシナリオに基づく復旧時間の低減に有効であるとは限らない。すなわち、Scenario LA, FA のどちらか一方を小さくするように設計するだけでは不十分であるといえる。5 節では、復旧力（復旧シナリオ）の不確実性を考慮したダンパー設計を行う方法として、Scenario LA, FA（復旧人員が最小及び最大の場合）に基づく 2 つの復旧時間の多目的最適化問題を扱う。

上で提案した復旧時間指標に性能低下量 r を合積すれば、レジリエンス評価が可能である。 r としては様々なものが想定可能である。例えば、損傷した要素の修復費用・1 日当たりの事業損失（オフィスビル）などである。前者の場合は通常のリスクアナリシスと同様の手順で定量化可能である。一方、事業損失は不確実性が高い。予め想定できないような事象（取引先の消失など）が生じる場合には、確率論を用いた定量化は難しく、事後的にしか評価できない。



(a) Scenario LA



(b) Scenario FA

(c) Relation of Scenario LA and FA

Fig. 2 Model for resilience and recovery time evaluation based on different recovery scenarios

r については、上記のように様々な観点に基づいて設定可能であり、建物の用途に基づいて適切に設定することが望ましい。逆に、 r 設定の観点の選択が困難ならば、復旧時間のみを対象としてダンパーの設計を行うことにも十分な合理性があるといえる。次節以降の数値例題では r を特に設定せずに、総復旧時間のみを扱う。

2.3 構造体の修復に要する時間の評価方法

構造体の修復に要する総時間 T_{total}^S に関しては、設備・非構造体の損傷による復旧時間と同様に確率論に基づき算定可能である。あるいは、構造設計時には最大層間変形に関するクライテリアを満たす必要があるため、フレンジー曲線をそれらの値（あるいは安全率を乗じた値）を閾値としたステップ関数などとしてもよい。

2.4 機能回復過程の例

2.1-2.3 節で説明したレジリエンス・復旧時間の概念の例を示す。12 層建物モデルを考える。Fig. 3a に示すように、非構造・設備要素として電気系統設備のみを考慮する。各階への電気供給機能を 1 系統と考えると、建物全体では 12 系統存在する。1 階の配電盤は 12 系統全てに含まれる要素であるため、これが損傷した場合には、12 系統全ての機能が失われることになる。

例を Fig. 3b-d に示す。損傷状態は 3 通り (Fig. 3b: 11 層の分電盤と幹線および 12 層の分電盤が損傷する場合、Fig. 3c: 1 層の配電盤と 12 層の分電盤が損傷する場合、Fig. 3d: 12 層の分電盤および 5 層の幹線と構造体が損傷する場合) を考える。Fig. 3b の例では 11, 12 層の計 2 系統の電気供給機能が失われている。Scenario FA では、全復旧時間は修復に最も時間を要する要素、すなわち幹線によって決まる。Fig. 3c の例では 1 層の配電盤が損傷するために全ての系統の機能が失われる。Scenario LA では配電盤の修復後に 1-11 層の機能が回復する。Scenario FA では、配電盤と分電盤の修復時間を同じものとしているために、全層の機能が同時に回復する。Fig. 3d の例では、構造を修復した後に設備系統の修復が始まる。ここでは構造損傷による性能低下量は $r=0$ としている。

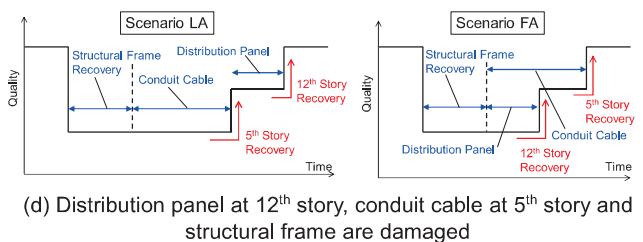
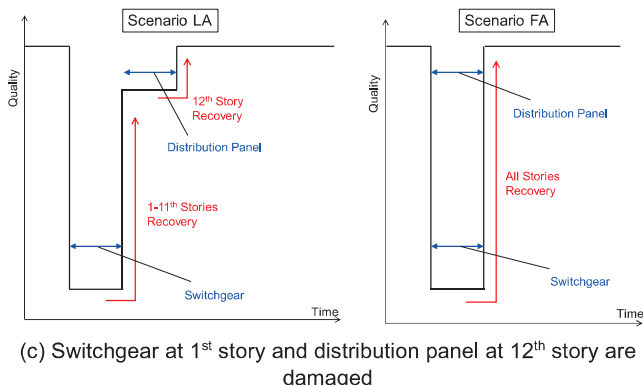
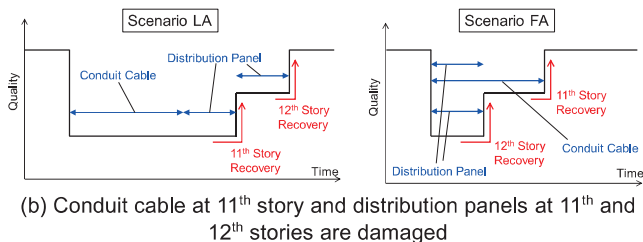
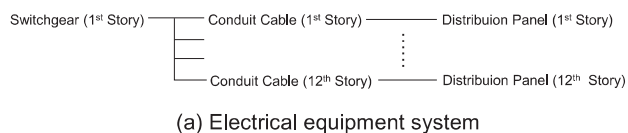


Fig. 3 Examples of recovery process of building's function

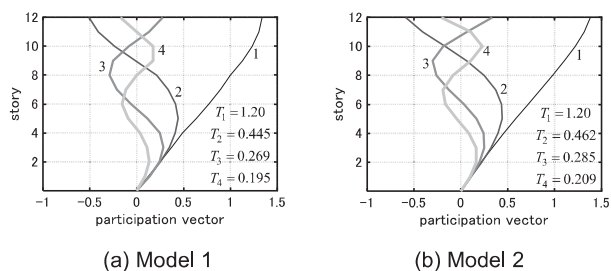


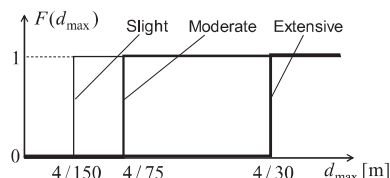
Fig. 4 Participation vectors and natural periods (unit: s)

3. 異なる基準で最適化されたダンパー配置の違いが復旧時間に及ぼす影響

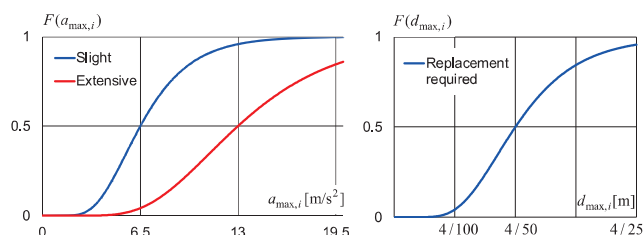
3.1 モデル

本節では、異なる基準で最適化されたダンパー配置による付加減衰分布が復旧時間に与える影響を、数値例題を通じて考察する。

12層建物モデルを対象とする。非減衰1次固有周期を1.2s、全層等質量、構造減衰1% (剛性比例)、各層高さ4m、降伏変位4/150mとし、完全弾塑性型の復元力特性を仮定する。剛性分布は2通り (①1-4, 5-8, 9-12層の剛性がそれぞれ一定で、その比率が2:1.5:1, ②第1層、第12層の剛性の比が4:1となる台形分布) を扱い、それ



(a) Structural Frame



(b) Switchgear, Distribution Panel (c) Conduit Cable
Fig. 5 Fragility curves of structural frame and facilities

Table 1 Fragility functions of structural frame

damage state	recovery time [month]
Slight	0.1
Moderate	3
Extensive	12

Table 2 Fragility functions of facilities

component	story	damage state	median value	logarithmic standard derivation	recovery time [month]
Switchgear	1st Story	Slight	6.5 m/s ²	0.4	0.25
		Extensive	13 m/s ²	0.4	1
Distribution Panel	Each Story	Slight	6.5 m/s ²	0.4	0.25
		Extensive	13 m/s ²	0.4	1
Conduit Cable	Each Story	Replacement required	4/50 m	0.4	0.5

ぞれ Model 1, 2 と表記する。1-4 次の刺激関数と非減衰固有周期を Fig. 4 に示す。

構造の脆弱性は最大層間変形 $d_{\max} = \max_i(d_{\max,i})$ のみで決定するものとし、脆弱性はステップ関数で表現されるものとする (Fig. 5a, Table 1)。目的関数がこのような強い不連続性を有していても、4 節で提案する復旧時間最適化ダンパー配置アルゴリズムが良好に機能することを示すため、敢えてこのような設定を行っている。

次に設備・非構造体モデルについて説明する (Fig. 5b, c, Table 2)。これは両モデルで共通とする。簡単のために、2.4 節で用いた電気系統設備のみを扱う。脆弱性は Table 2 に示すとおりで、対数正規分布とした。配電盤と分電盤の耐力は各層の最大加速度で評価し、幹線の耐力は各層層間変形で評価している。幹線の耐力は上下層の床加速度と層間変形から生じる最大応力で評価するほうが精度は高いと考えられるが、簡単のために層間変形のみで評価する。

また、脆弱性や復旧時間の値は、FEMA (2018) ²⁹⁾ を参考に設定した。

3.2 数値例題

入力地震動は、PGV=0.75m/s に調整した El Centro NS 波(1940)を用いる。

3.2.1 変形及び頂部加速度を最適化するダンパー配置の比較

最大層間変形及び頂部最大加速度を目的関数として最適化した場合の復旧時間を Fig. 6(上段左)に示す。ダンパーによる付加減衰係数の総量が $10, 20, \dots, 50 \times 10^7$ [Ns/m]のときの各層層間変形及び加速度と、付加減衰係数の総量が 30×10^7 [Ns/m]のときのダンパー配置(上段右)も併せて示す。ここでは BLX- α 法²⁷⁾を交叉法として用いた実数値 GA により最適化を行っている。実数値 GA については 4 節で詳しく説明する。各層層間変形の図より、頂部加速度を目的関数として最適化した場合 (b), (d) 図) には、ダンパー量が小さい範囲では大きな塑性変形が生じることが分かる。逆に各層加速度の図から、最大層間変形を目的関数として最適化した場合 (a), (c) 図) には、ダンパー量が大きい範囲でも加速度応答は効果的に低減されていないことが分かる。

復旧時間はダンパー量に対して概ね単調に減少することが分かる。また、ダンパー量が小さい範囲では最大層間変形を目的関数として最適化した場合の方が復旧時間を短くできるが、ダンパー量が十分に与えられると、頂部加速度を目的関数として最適化した場合の方が復旧時間を短くできることが分かる。これは、加速度により耐力評価を行う設備要素が多いためである。幹線は層間変形により耐力評価を行っているが、弾性範囲では損傷確率はほとんど 0 である。一般に、層間変形により耐力評価を行う非構造体・設備 (内外壁や配管など) は、構造体と比較して十分な変形性能を有する場合が多いと考えられる。このため、ダンパー量が十分に与えられる場合には加速度応答の低減が復旧時間の短縮につながると考えられる。尚、Model 1 で頂部加速度を目的関数として最適化した場合に、ダンパー量がおおよそ 12×10^7 [Ns/m] で復旧時間の急激な落ち込みがみられるが、これは層間変形が $2dy$ (dy: 降伏層間変形) 以下となったことによるものである (層間変形は応答履歴に依存する)。

3.2.2 1-3 次モード最適ダンパー配置の比較

ダンパー配置として、1-3 次モード最適ダンパー配置¹³⁾を用いる。1-3 次モード最適ダンパー配置は、層間変形伝達関数の固有円振動数での振幅の総和を目的関数としたダンパー配置である。付加減衰係数の総和が $10, 30, 50 \times 10^7$ [Ns/m] の場合の付加減衰分布、層間速度伝達関数振幅を Fig. 7, 8 に示す。層間速度伝達関数振幅の比較及び頂部加速度伝達関数の比較から、1 次モード最適ダンパー配置は 1 次の円振動数の範囲では小さい値を取るが、高次の振動数域は良好に制御できていないことが分かる。一方、2 次モード最適ダンパー配置は 1 次振動数での層間速度伝達関数の値をあまり抑制できていない。また、3 次モード最適ダンパー配置は広範囲の振動数域でその値を抑制していることが分かる。

n 次モード最適ダンパー配置は、 n 次モード刺激関数における層間変形の大きな層への減衰の付加を優先する (特にダンパー量が小さい場合) とも考えられる。このため、1, 2 次モードと比較して、3 次モードダンパー配置は、多くの層に少量ずつ減衰を付加する配置となる (モード形状の折れ点間で層間変形が大きくなりやすい)。結果的に、3 次モード最適ダンパー配置は 3 次モードのみならず、他の振動数域でもある程度有効な配置となる。

次に、復旧時間を Fig. 9 に示す。ダンパー量が 10×10^7 [Ns/m] の場合には、モデルやダンパー配置に関わらず塑性化している。塑性

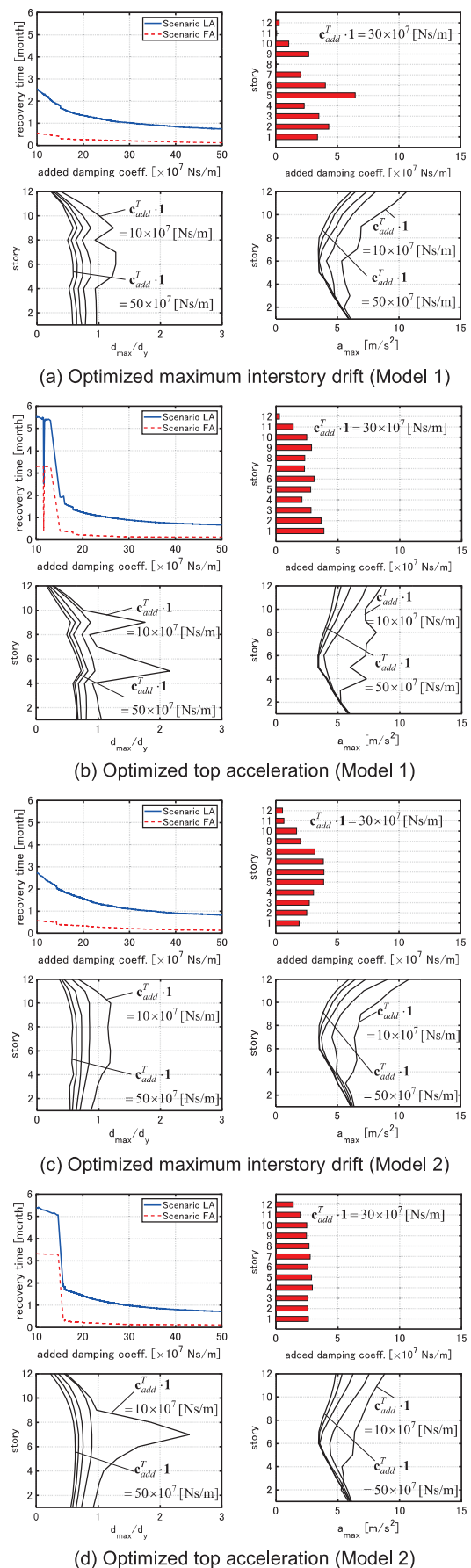
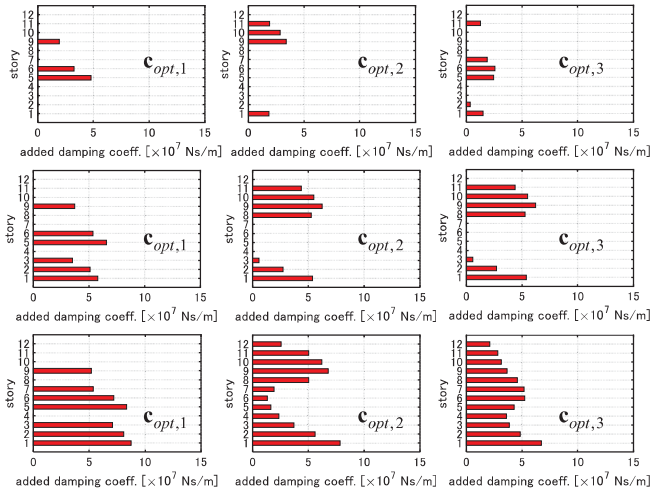
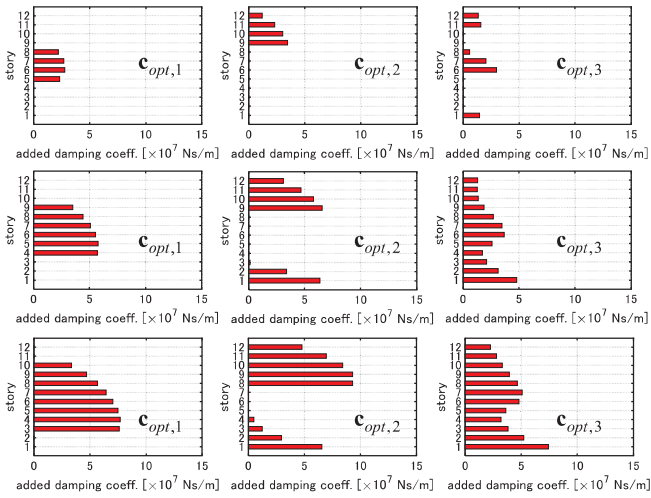


Fig. 6 Damper placements for optimized maximum interstory drift and optimized top acceleration

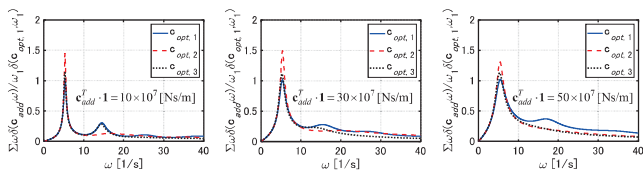


(a) Model 1

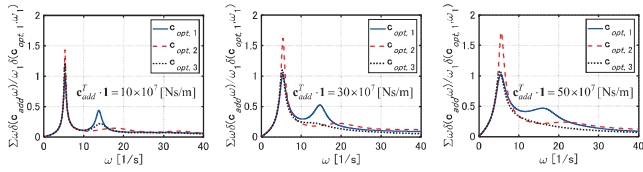


(b) Model 2

Fig. 7 Comparison of optimal damper placements with respect to transfer function amplitude at natural frequency



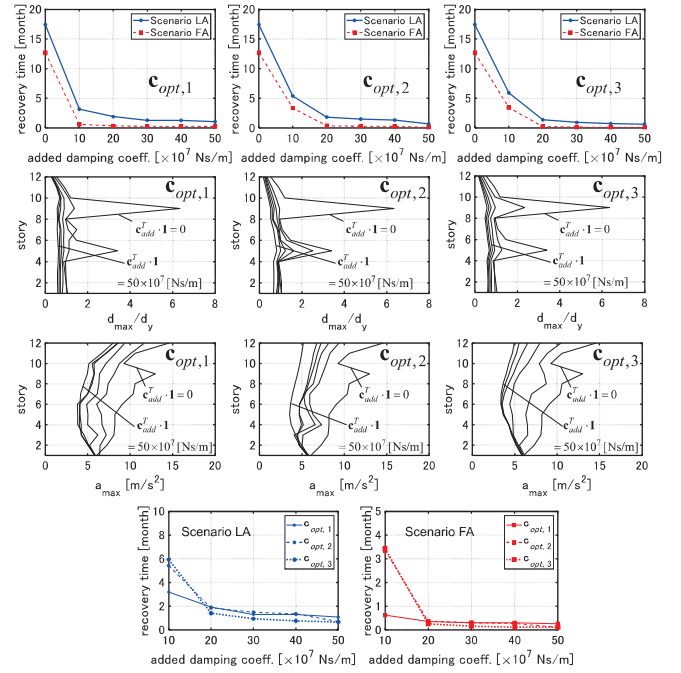
(a) Model 1



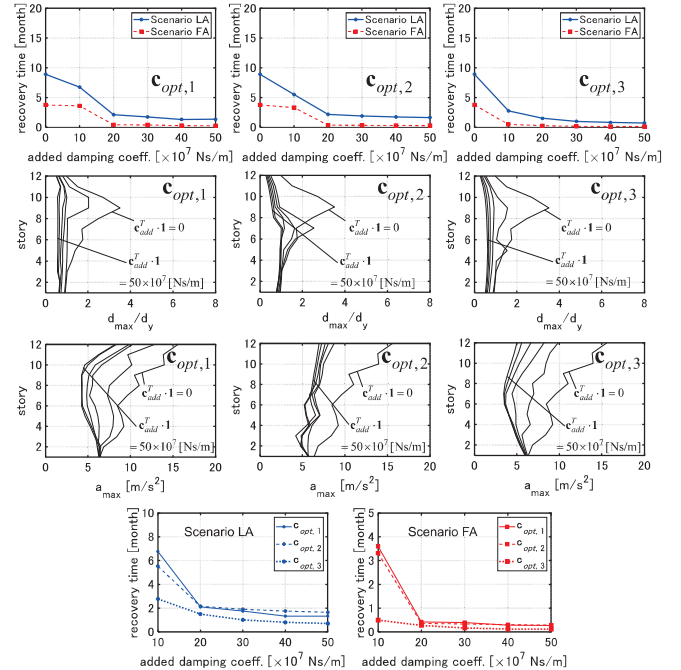
(b) Model 2

Fig. 8 Sum of transfer function amplitudes of interstory velocity

化した場合には、伝達関数を用いてダンパー配置の違いによる復旧時間の大小関係を明確に説明することは難しい。ダンパー量が $20, \dots, 50 \times 10^7$ [Ns/m] の場合は 1, 3 次モードダンパー配置の最大層



(a) Model 1



(b) Model 2

Fig. 9 Comparison of recovery time, interstory deformation and floor acceleration

間変形は降伏変位以下となり、また 2 次モードダンパー配置でも降伏変位の 2 倍(2dy)を下回るため、復旧時間曲線は比較的安定的に推移する。この範囲では、高振動数域をより有効に制御している 3 次モード最適ダンパー配置が最も復旧時間を小さくする。逆に、1 次モード最適ダンパー配置は高振動数域を十分に制御できていないために、加速度応答が大きくなっている。また、2 次モードダンパー配置は変形を十分に小さくすることができていない。このため、1, 2 次モード最適ダンパー配置を有する場合の復旧時間は 3 次モード最適ダンパー配置のそれより大きくなっている。

4. 復旧時間を目的関数とするダンパー配置最適化

4.1 復旧時間最適化アルゴリズム

本節では、復旧時間を目的関数としたダンパー配置の最適化法を示す。提案するアルゴリズムは、実数値 GA に着想を得た方法である。実数値 GA とは、遺伝子を 0 もしくは 1 で表現する一般的な GA²⁶⁾とは異なり、設計変数もしくは関係のある値を直接（コーディングなしで）交叉に用いる方法である。一般的な GA と実数値 GA の概要を Fig. 10 に示す。一般的な GA のプログラミングはコーディングなどに高度なプログラミング技術を要するため作成が難しく、GA を搭載した商用ソフトはかなり高価である。また、どのように変数をコーディングするかが解の精度に大きく関係する。実数値 GA はコーディング（0,1 への変換）が不要であるため、比較的プログラムの作成は容易であるが、交叉法がアルゴリズムの性能に大きく関係する。すなわち、問題ごとに適切な交叉法を用いる必要がある。実数値 GA の他の特徴として、変数が連続値をとる（離散でない）関数の最適化への適用も容易であることが挙げられる。

実数値 GA の交叉法としては様々なものが提案されており、例えば BLX- α 法²⁷⁾は非常にシンプルなお方法である。Fig. 10b) には実数値 GA の例として BLX- α 法による交叉の概要を示している。提案手法の有効性を検証するため、後の数値例題では BLX- α 法の使用例も示す。本論文で提案するアルゴリズムは、ダンパーによる付加減衰係数の総量を一定とする制約を有効活用することで（ N 次元 $\rightarrow$ ($N-1$)次元）、計算時間を飛躍的に短縮可能な方法である。

実数値 GA をダンパー最適化に用いる理由は以下の通りである。

- ・目的関数（復旧時間）は非線形性が強く、不連続点を有する。また、弾塑性応答を考慮しているため、数値感度解析による最適化では局所解に陥る恐れがある。従って、確率的な（乱数を用いる）最適化手法が適している。
- ・多目的最適化に適している（単目的の場合と比較して、計算負荷をあまり増大させない）。
- ・コーディング不要である。

また、ダンパーによる付加減衰係数の総量を一定とするメリットは以下の通りである。

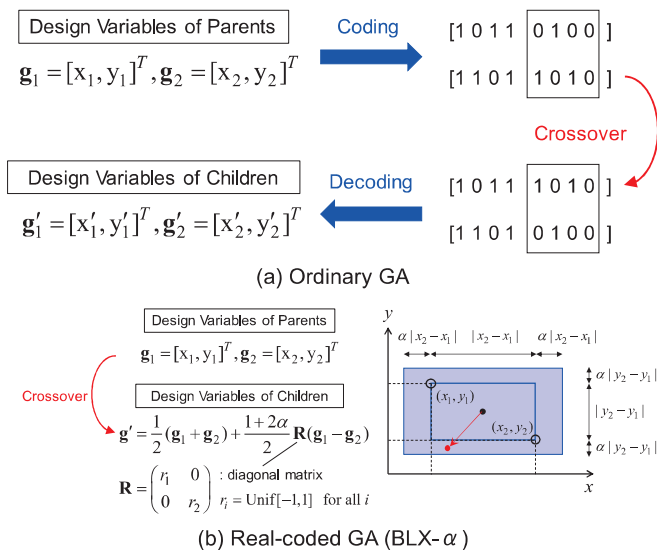


Fig. 10 Difference of ordinary GA and real-coded GA

- ・解の探索範囲の次元が 1 小くなるため、計算時間を短縮可能。
- さらに、後述の感度解析オペレーターと組み合わせることで、ダンパー量を変化させた場合の解も効率的に計算可能。
- ・ダンパー量が変動する場合よりも、応答の増減がかなり安定的。
- 逆に、既往研究で提案されている交叉法を用いる場合、生成される個体のダンパー量が変動するため、以下の点に留意する必要がある。
- ・生成される個体のダンパー量のコントロールが困難。
- ・解の精度を高めるために、最初にダンパー量の異なる個体を大量に発生させる必要がある。
- ・集団全体のレベルが徐々に改善されていく。このため、求めたい解のダンパー量の範囲が限定的である場合には、非効率的である。
- ・交叉させる個体同士のダンパー量の差が大きい場合には、良い解が得られにくい。

まず復旧シナリオを指定する場合（単目的最適化に相当）のダンパー最適化アルゴリズムを示す。

4.1.1 復旧シナリオを指定したアルゴリズム

- Step 1 ダンパーによる付加減衰係数の総和が $c_1 + \dots + c_N = W$ となる個体をランダムに $M_1 (> N)$ 個生成する（ランダムに生成する方法は Appendix 参照）。
- Step 2 ルーレット選択した N 個体に対して下記の交叉オペレーターを適用し、新たに N 個体を生成する。
- Step 3 全個体中 M_2 個体をエリート選択し、 $(M_1 - M_2 - M_3)$ 個体をルーレット選択する。また、ランダムに M_3 個体を生成し Step 2 へ戻る。事前に決められた回数を繰り返した後、Step 4 へ進む。
- Step 4 エリート選択された M_2 個体に後述の感度解析オペレーターを適用し、目的関数が改善されるごとに個体も更新する。これを繰り返す。

[交叉オペレーター]

第 i 個体 ($i=1, \dots, N$) の付加減衰ベクトルを $\mathbf{c}_i = (c_{1,i}, \dots, c_{N,i})^T$ とする。各 i に対して、 $\mathbf{c}'_i = \mathbf{c}_i + \sum_{j=1}^N \varepsilon_j (\mathbf{c}_j - \mathbf{c}_i)$ の付加減衰を有する個体を生成する（計 N 個体）。ここで、 ε_j は一様分布に従う乱数で、正負両方の値を取るように設定する。生成された個体の付加減衰係数が一つでも負の値を取った場合、負の値を取った層の付加減衰係数を 0 に修正し、付加減衰係数の総量の制約を満足するように各層の付加減衰係数を等倍する。

[感度解析オペレーター]

付加減衰ベクトル $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_N)^T$ を有する個体に対して、 $\mathbf{c}' = \mathbf{c} + (\mathbf{c}^T \cdot \mathbf{1}) \sum_{j=1}^{N-1} \varepsilon_j \Delta_j$ の付加減衰係数を有する個体を生成する。ここで、 ε_j は一様分布に従う乱数で、正負両方の値を取るように設定する。また、 Δ_j ($j=1, \dots, N-1$) は第 j 要素が 1、第 $(j+1)$ 要素が -1、それ以外の要素が 0 の N 次元ベクトルである。生成された個体の付加減衰係数が一つでも負の値を取った場合、負の値を取った層の付加減衰係数を 0 に修正し、付加減衰係数の総量の制約を満足するように各層の付加減衰係数を等倍する。

提案交叉オペレーターの概要を Fig. 11a に示す。提案する交叉オペレーターは、付加減衰係数の総量を一定に保つように個体を生成

するという特徴を有する。すなわち、交叉に用いる個体の付加減衰係数の総和が等しく、 $(\mathbf{c}_j - \mathbf{c}_i)^T \cdot \mathbf{1} = 0$ for all i, j となる。言い換えれば、全ての個体が $c_1 + \dots + c_N = W$ 平面上に存在し、 $(\mathbf{c}_j - \mathbf{c}_i)$ は第 i 個体から第 j 個体へ向かうベクトルである。提案交叉法は、第 i 個体を基準とし、第 j 個体の方向へ近づくもしくは遠ざかる操作を施すものである。

また、感度解析オペレーターは目的関数の向上の迅速化を図ったものである。提案アルゴリズムではまず、交叉によってダイナミックに解空間を探索する。感度解析オペレーターは、交叉を経て残ったエリート個体の近傍を集中的に探索するための操作である。

前述のダンパー配置アルゴリズムは、単目的最適化アルゴリズムであり、復旧シナリオをあらかじめ設定しておく必要がある。2.2 節で述べたように、指定されたシナリオに基づいて復旧時間を小さくした設計が他のシナリオに基づく復旧時間の低減に有効であるとは限らない。また、ダンパー配置の最適化において復旧シナリオをすべて数え上げて考慮することは非現実的である。このような復旧シナリオ（復旧力）の不確実性を近似的に扱う方法として、本論文では Scenario LA, FA（それぞれ復旧作業要員が最小・最大の場合）の 2 つのシナリオのみを考慮し、それぞれのシナリオに基づいた復旧時間の多目的最適化を行うことを提案する。

前述のアルゴリズムを多目的最適化アルゴリズムへ拡張することは容易である。提案手法では、エリート選択やルーレット選択において、パレートランキングの逆数を適合度として用いる³⁰⁾。

4.1.2 復旧シナリオを指定しないアルゴリズム

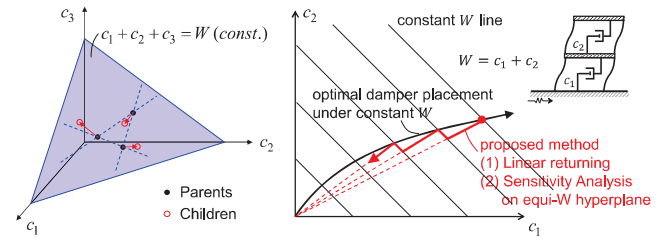
- Step 1 $c_1 + \dots + c_N = W$ となる個体をランダムに $M_1 (> N)$ 個生成する。
- Step 2 ルーレット選択した N 個体に対して交叉オペレーターを適用し、新たに N 個体を生成する。
- Step 3 ランク 1 の個体を次世代に残すかどうかは別としてデータを保存する。次世代に残す個体はルーレット選択 ($(M_1 - M_3)$ 個体) し、個体をランダムに M_3 個生成する。Step 2 へ戻る。
- 事前に決められた回数を繰り返した後、保存個体と最終的に得られた個体からパレート解を選択。Step 4 へ進む。
- Step 4 選択された全個体の中から M_4 個体をルーレット選択し、感度解析オペレーターを適用する。その後、非パレート個体を消去する。Step 4 を繰り返し行う。

前述の 2 つのアルゴリズムは、ダンパー量に関する制約を有効活用した方法である。これらのアルゴリズムにより得られた個体を用いて、ダンパー量を変動させた場合の最適解を連続的に得るアルゴリズムを示す。概念を Fig. 11b に示す。

4.1.3 ダンパー量を変動させた場合のアルゴリズム

- Step 1 前述のアルゴリズムにより、 $c_1 + \dots + c_N = W$ の下での最適解またはパレート解を得る。
- Step 2 得られたパレート解のダンパー量を等倍し、 $c_1 + \dots + c_N = W'$ を満たす新たな個体を得る。
- Step 3 感度解析オペレーターによる探索を行い、 $c_1 + \dots + c_N = W'$ の下での最適解またはパレート解を得る。Step 2 に戻る。

このアルゴリズムにおいて、ダンパー量の変動を大きくしすぎると解の精度に問題が生じる可能性がある。ダンパー量の変動が小さ



(a) Crossover operator (b) Search for varied sum of damper coeffs.
Fig. 11 Overview of proposed method

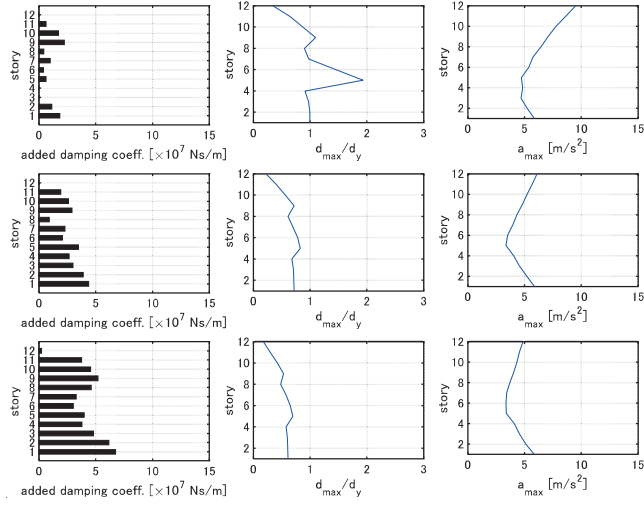
い場合、感度解析オペレーターの適用回数が少なくても、最適解またはパレート解を探索可能である。この場合には、計算負荷が大きく変わらないと考えられるため、ダンパー量の変動を大きくして感度解析オペレーターの適用回数を増やすよりも、ダンパー量の変動を小さくして感度解析オペレーターの適用回数を減らす方が解の精度上有利であるといえる。

4.2 数値例題

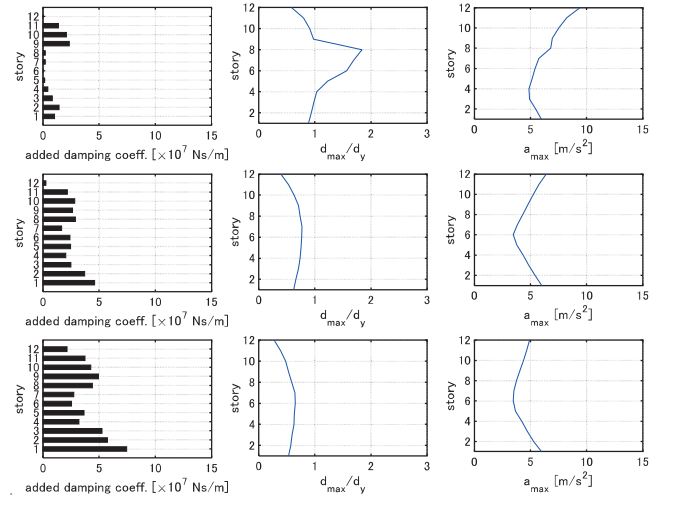
Model 1, 2 について、Scenario LA, FA に基づく復旧時間の多目的最適化を行った結果を Fig. 12, 13 に示す。ここでも 3.2 節と同じ地震動を用いる。まず、ダンパー量が 50×10^7 [Ns/m] の制約の下で最適化を行い、 10×10^7 [Ns/m] まで 1×10^7 [Ns/m] ずつダンパー量を減少させる。アルゴリズムの最初に発生させる個体数は $M_1 = 2N + M_3 = 27$ とし、毎 Step ランダムに発生させる個体数を $M_3 = 3$ として交叉オペレーターを 150 回適用した。交叉オペレーターでは $[-0.15, 0.15]$ の一様乱数を用いた。 $M_4 = N$ とした感度解析オペレーターを 50 回適用し、 $[-0.03, 0.03]$ の一様乱数を用いた。Fig. 12a, b, 13a, b はダンパー量が 10, 30, 50×10^7 [Ns/m] の場合に各シナリオに基づく復旧時間を最小化する設計を、両シナリオの多目的最適設計から抜き出したものである。計算時間は 2700s であった。

Fig. 12c, 13c では BLX- α 交叉法を用いた実数値 GA による結果との比較を行っている。BLX- α 交叉法を用いる場合には、最初に発生させる個体数を 2000、各ステップでの生成個体数を $4N = 48$ 、 $\alpha = 0.3$ とし、これを 500step 繰り返した。Fig. 10b に示すように、 α は交叉に用いるパラメーターである。BLX- α 法は、交叉に用いる 2 個体の各層付加減衰係数の区間の両側を 100% 拡張した区間から、子個体の付加減衰係数を一様乱数によって生成する。パレート保存戦略を適用し、ダンパー量の差が大きすぎる個体を交叉しないように留意した。計算時間は 5500s であった。Fig. 12d, 13d では、ダンパー量が 10, 30×10^7 [Ns/m] の場合の各設備要素の損傷による復旧時間（期待値）を示している。ただし、配電盤の損傷による復旧時間は省略している（分電盤とフラジリティー・復旧時間の設定を同じにしているため）。Fig. 12, 13 より以下のことが分かる。

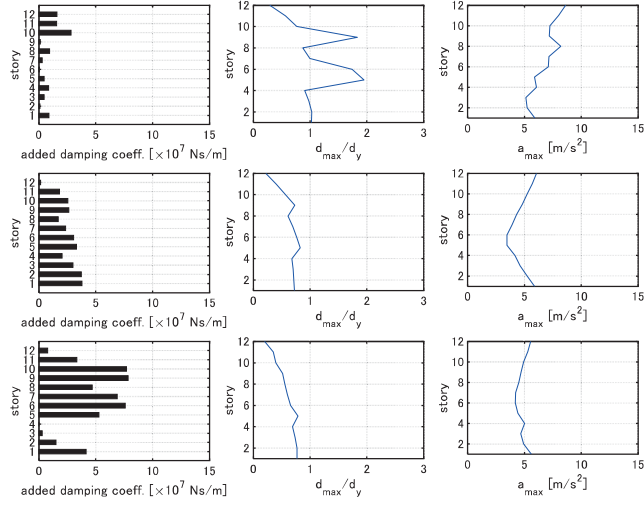
- ・提案手法により、精度の良い解が得られている。
- ・Scenario LA による復旧時間を最小化する場合では、設備要素の損傷を全体的に抑えようとする。Scenario FA による復旧時間を最小化する場合では、設備要素のなかで最も大きい被害が生じるものの損傷を抑えようとする。この傾向は、Fig. 12d, 13d のダンパー量が 10×10^7 [Ns/m] の場合に顕著に見られる。後者の設計では、頂部加速度は低減されているが、中層部の分電盤の損傷、及び幹線の損傷が大きくなっている。



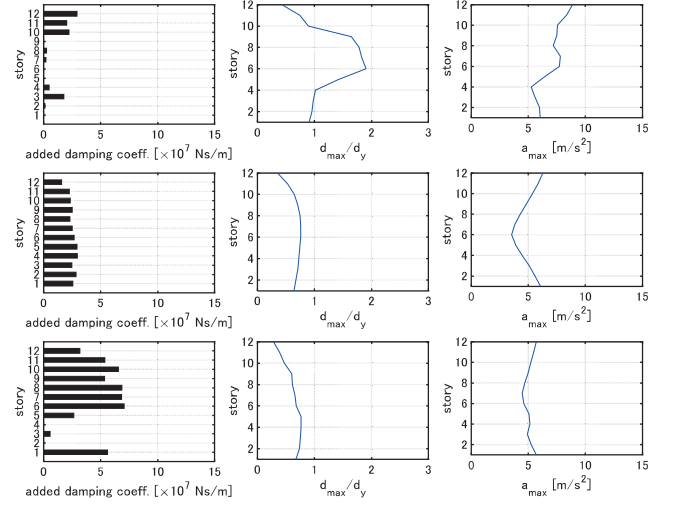
(a) Scenario LA-based design



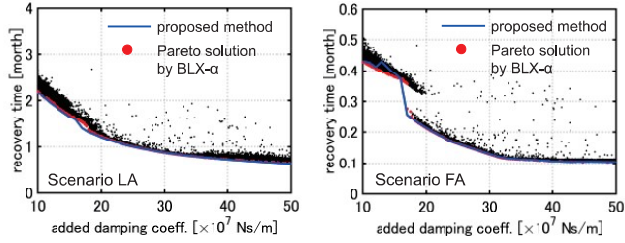
(a) Scenario LA-based design



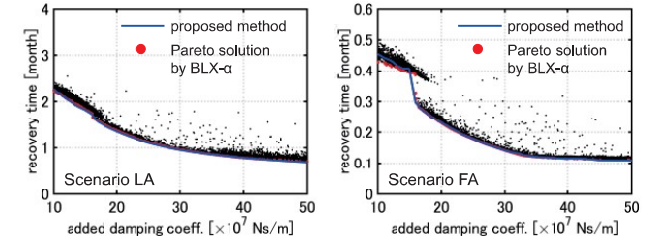
(b) Scenario FA-based design



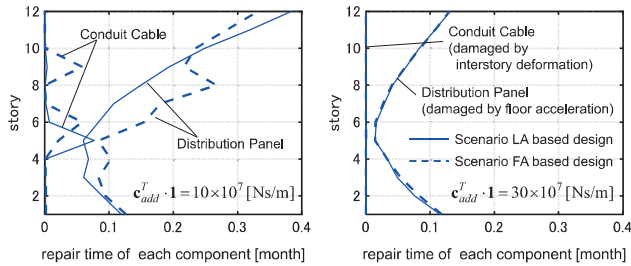
(b) Scenario FA-based design



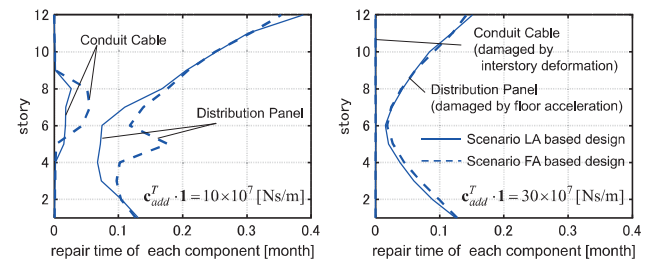
(c) Comparison of recovery time with that by BLX- α



(c) Comparison of recovery time with that by BLX- α



(d) Distribution of repair time of each component



(d) Distribution of repair time of each component

Fig. 12 Multi-objective optimization of recovery time by Scenario LA and Scenario FA (Model 1)

Fig. 13 Multi-objective optimization of recovery time by Scenario LA and Scenario FA (Model 2)

- ・ダンパー量が十分に与えられると構造体の変形が十分に抑えられるため構造体に損傷は生じず、また Fig. 12d, 13d に見られるように幹線の損傷確率はほぼ 0 となる。さらに、ダンパー量が十分に与えられる場合は加速度応答の低減を図ることが望ましい。
- ・ダンパー量が 20×10^7 [Ns/m] よりも小さい範囲では、最大層間変形が $2d_y$ 以下となるように設計されている。これは、構造体のフラジリティー (Fig. 5a) によると考えられる。逆にダンパー量が 10×10^7 [Ns/m] の場合では、 $2d_y$ をぎりぎり下回る変形を許容することで加速度応答を低減していると考えられる。
- ・ダンパー量が $40, 50 \times 10^7$ [Ns/m] の場合、Scenario LA による復旧時間を最小化する設計では、高層部の加速度が徐々に低減されている。Scenario FA による復旧時間を最小化する設計は、低層部への付加減衰が小さくなり、頂部加速度と第 1 層の加速度がほぼ等しい値をとるようになる。第 1 層の加速度は地動加速度とほぼ等しく、低層部に減衰が付加されるとわずかながら加速度は増大する。つまり、頂部加速度を抑えることよりも、第 1 層の加速度のわずかな増加を防ぐことが優先されるため、低層部への減衰付加が小さくなる。

5. 結論

本論文では、建物のレジリエンス・復旧時間評価モデルを提案し、これらを指標とする粘性ダンパー最適設計法を展開した。得られた結論と知見は以下のようにまとめられる。

- (1) 提案したレジリエンス・復旧時間評価モデルは、構造体・設備・非構造体を建物の機能を果たす要素として捉えたものであり、
 - 1) これらの構成要素を機能の観点から種々の系統に分類し、
 - 2) 復旧力 (速度) を復旧人員数として表現した上で、
 - 3) 構造設計に適用可能であるという特徴を有している。
- (2) 提案したレジリエンス・復旧時間評価モデルは、構造体の応答と建物内要素のフラジリティー曲線を用いて定量化している。復旧力は非確率的に表現し、特に、復旧力が最小・最大の場合のレジリエンス・復旧時間評価式を提示した。
- (3) 異なる基準で最適化されたダンパー配置による付加減衰分布の違いが復旧時間に及ぼす影響を、数値例題を通して明らかにした。ダンパー量が少ない範囲では変形を抑制する設計が望ましく、ダンパーが十分に与えられる場合には、加速度すなわち高振動数域を抑制できる設計が望ましい。
- (4) 復旧時間を最小化するダンパー配置アルゴリズムを提案した。提案手法は実数値 GA に着想を得た方法である。目的関数の非線形性が強く不連続点を有するため、確率的な (乱数を用いる) 最適化手法の適用が望ましい。提案手法は、交叉によって解空間をダイナミックに探索した後、エリート個体 (優良な個体) の近傍を集中的に探索する方法である。また、ダンパーによる付加減衰係数の総量を一定とする制約を有効活用することで、計算負荷を大幅に軽減可能とした方法である。BLX- α 法との比較から、提案手法の有効性を明らかにした。
- (5) 復旧力の不確実性をダンパー設計に反映させるために、復旧力が最小・最大の場合の 2 つのシナリオに基づく復旧時間の多目的最適化を行った。各シナリオに基づくダンパー設計はそれぞれ、構成要素の損傷の総和及び最大値を最小化すること

に相当することを明らかにした。

本論文で提示した復旧力が最小・最大となる二つのシナリオに基づく復旧時間の多目的最適化により、ダンパー量一定 (コスト一定を仮定) の下で多数のパレート設計群が生成される。実際の設計では、それらのパレート設計群から一つを選択する必要がある。その選択方法としては、1) 両シナリオによる復旧時間の値の勘案、2) 各設計の実現の容易さの検討 (例えばダンパーを設置する層数の少なさなど)、3) より大きなレベルの地震波や最適化に用いなかった地震波に対する性能の検証などが考えられる。また提案手法を適用するためには、予め設備・非構造体の具体的なフラジリティーと配置が定まっていることが望ましい。従って、本手法を既存建物の制振改修へ適用することは容易である。新築の場合であっても、設備・非構造体の配置をある程度見積り、既往研究などによって得られている類似の要素のフラジリティーを援用することで本手法が適用可能となる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 18H01584, JP20J20811 による。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Porter, K., and Ramer, K.: Estimating earthquake-induced failure probability and downtime of critical facilities. *J. Business Continuity and Emergency Planning*, 5(4), pp. 352-364, 2012.
- 2) Bruneau, M., and Reinhorn, A.: Overview of the resilience concept. In *Proc. of the 8th US National Conf. on Earthq. Eng.* (Vol. 2040, pp. 18-22), 2006.
- 3) Guidotti, R., Chmielewski, H., Unnikrishnan, V., Gardoni, P., McAllister, T., and van de Lindt, J.: Modeling the resilience of critical infrastructure: The role of network dependencies. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1(3-4), pp. 153-168, 2016.
- 4) Kammouh, O., Cimellaro, G. P., and Mahin, S. A.: Downtime estimation and analysis of lifelines after an earthquake. *Eng. Struct.*, 173, pp. 393-403, 2018.
- 5) Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., and Bruneau, M.: Seismic resilience of a hospital system. *Struct. and Infrastructure Eng.*, 6(1-2), pp. 127-144, 2010.
- 6) De Iuliis, M., Kammouh, O., Cimellaro, G. P., and Tesfamariam, S.: Downtime estimation of building structures using fuzzy logic. *Int. J. Disaster Risk Reduction*, 34, pp. 196-208, 2019.
- 7) Comerio, M. C.: Estimating downtime in loss modeling. *Earthq. Spectra*, 22(2), pp. 349-365, 2006.
- 8) Takewaki, I.: *Building Control with Passive Dampers: Optimal Performance-based Design for Earthquakes*, John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- 9) Lagaros, N. D. (Ed.): *Design Optimization of Active and Passive Structural Control Systems*, IGI Global, 2012.
- 10) De Domenico, D., Ricciardi, G., and Takewaki, I.: Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 118, pp. 144-165, 2019. doi: 10.1016/j.soildyn.2018.12.024
- 11) Takewaki, I.: Optimal damper placement for minimum transfer functions, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 26(11), pp. 1113-1124, 1997.
- 12) Aydin, E., Boduroglu, M.H., and Guney, D.: Optimal damper distribution for seismic rehabilitation of planar building structures. *Eng. Struct.*, 29, pp. 176-185, 2007.
- 13) Akehashi, H., and Takewaki, I.: Comparative investigation on optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures: Transfer function amplitude or double impulse. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*,

130, 105987, 2020.

- 14) Zhang, R. H., and Soong, T. T.: Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications. *J. Struct. Eng.*, 118(5), pp. 1375-1392, 1992.
- 15) Garcia, D. L.: A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures. *Earthq. Spectra*, 17(3), pp. 387-398, 2001.
- 16) Kanno, Y.: Damper placement optimization in a shear building model with discrete design variables: a mixed - integer second - order cone programming approach. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 42(11), pp. 1657-1676, 2013.
- 17) Silvestri, S., and Trombetti, T.: Physical and numerical approaches for the optimal insertion of seismic viscous dampers in shear-type structures. *J. Earthq. Eng.*, 11(5), pp. 787-828, 2007.
- 18) Lavan O., and Levy R.: Optimal design of supplemental viscous dampers for irregular shear-frames in the presence of yielding. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 34(8): pp. 889-907, 2005.
- 19) Akehashi, H., and Takewaki, I.: Optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures under critical double impulse. *Frontiers in Built Environment*, 5, 20, 2019.
- 20) Mathakari, S., Gardoni, P., Agarwal, P., Raich, A., and Haukaas, T.: Reliability - based optimal design of electrical transmission towers using multi - objective genetic algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Eng.*, 22(4), pp. 282-292, 2007.
- 21) Kim, H. S., and Roschke, P. N.: Design of fuzzy logic controller for smart base isolation system using genetic algorithm. *Eng. Struct.*, 28(1), pp. 84-96, 2006.
- 22) Arfiadi, Y., and Hadi, M. N. S.: Optimum placement and properties of tuned mass dampers using hybrid genetic algorithms. *Int. J. Optim. Civil Eng.*, 1(1), pp. 167-187, 2011.
- 23) Singh, M. P., and Moreshi, L. M.: Optimal placement of dampers for passive response control. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 31(4), pp. 955-976, 2002.
- 24) Bishop, J. A., and Striz, A. G.: On using genetic algorithms for optimum damper placement in space trusses. *Struct. and Multidisciplinary Optimization*, 28(2-3), pp. 136-145, 2004.
- 25) Wongprasert, N., and Symans, M. D.: Application of a genetic algorithm for optimal damper distribution within the nonlinear seismic benchmark building. *J. Eng. Mech.*, 130(4), pp. 401-406, 2004.
- 26) Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search. Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- 27) Eshelman, L. J., and Schaffer, J. D.: Real-coded genetic algorithms and interval-schemata. In *Foundations of genetic algorithms* (Vol. 2, pp. 187-202). Elsevier, 1993.
- 28) Beck, J.L., Kiremidjian, A., Wilkie, S., Mason, A., Salmon, T., Goltz, J., Olson, R., Workman, J., Irfanoglu, A., and Porter, K.: Decision Support Tools for Earthquake Recovery of Businesses, *Final Report, CUREe-Kajima Joint Res. Program Phase III*. Richmond, CA, 1999.
- 29) FEMA: Seismic performance assessment of buildings (2018 Edition), CA, USA: Applied Tech. Council for the Federal Emergency Management Agency, 2018.
- 30) Fonseca, C. M., and Fleming, P. J.: Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization, *Proc. of the Fifth Int. Conf. on Genetic Algorithms*, pp. 416-423, 1993.

Appendix 付加減衰係数の総和一定の制約下で個体をランダムに生成する方法

Step 1 (N-1)個の乱数 $x_1, \dots, x_{N-1}$ を独立に発生させる。これらは(A1)式に従うものとする。

$$f(x_i) = \begin{cases} (N-i) \cdot (1-x_i)^{N-1-i} & (0 \leq x_i \leq 1) \\ 0 & (x_i < 0, 1 < x_i) \end{cases} \quad (i=1, \dots, N-1) \quad (\text{A1})$$

ただし、 $i=N-1$ の場合は一様分布である。

Step 2 各層の付加減衰係数 $c_1, \dots, c_N$ を(A2)式のように決定する。

$$\begin{cases} c_1 = W x_1 \\ c_i = W(1-x_1) \dots (1-x_{i-1}) x_i & (i=2, \dots, N-1) \\ c_N = W(1-x_1) \dots (1-x_{N-1}) \end{cases} \quad (\text{A2})$$

ここで、 W は付加減衰係数の総量である。

以上の手順をサンプル数だけ繰り返せばよい。

発生させる乱数の分布を単純な一様分布に設定していないのは、ダンパーによる付加減衰係数の総量一定という制約を設けたためである。 $c_1, \dots, c_N$ が(A1)式に従うとき、 $c_1, \dots, c_N$ の同時確率密度 $f(c_1, \dots, c_N)$ は(A3)式のように表される。

$$\begin{aligned} f(c_1, \dots, c_N) &= f(c_1) f(c_2 | c_1) f(c_3 | c_1, c_2) \\ &\quad \dots f(c_{N-1} | c_1, \dots, c_{N-2}) f(c_N | c_1, \dots, c_{N-1}) \\ &= \frac{N-1}{W} \left(1 - \frac{c_1}{W}\right)^{N-2} \cdot \frac{N-2}{W-c_1} \left(1 - \frac{c_2}{W-c_1}\right)^{N-3} \\ &\quad \dots \cdot \frac{N-i}{W - \sum_{j=1}^{i-1} c_j} \left(1 - \frac{c_i}{W - \sum_{j=1}^{i-1} c_j}\right)^{N-1-i} \\ &\quad \dots \cdot \frac{1}{W - (c_1 + \dots + c_{N-2})} \cdot 1 \\ &= \frac{(N-1)!}{W^{N-1}} \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

(A3)式より、 $c_1, \dots, c_N$ の組み合わせによらず $f(c_1, \dots, c_N)$ の値は一定となる。すなわち、解空間である超平面 $c_1 + \dots + c_N = W$ ($c_i \geq 0$ for all i) 上の任意の点において尤度が一定となる。

また、 $x_1, \dots, x_{N-1}$ は逆変換法（逆関数法ともいう）で容易に生成可能である。累積分布関数は(A4)式の通り。

$$F(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i < 0) \\ 1 - (1-x_i)^{N-i} & (0 \leq x_i \leq 1) \\ 1 & (1 < x_i) \end{cases} \quad (i=1, \dots, N-1) \quad (\text{A4})$$

F を[0 1]一様乱数によって生成し、それに対応する x_i を(A5)式のように得る。

$$\begin{aligned} (1-x_i)^{N-i} &= 1-F \\ x_i &= 1 - (1-F)^{1/(N-i)} \end{aligned} \quad (\text{A5})$$

MODELING OF RESILIENCE BASED ON CATEGORIZED RECOVERY SCENARIO AND IMPROVING RESILIENCE WITH VISCOUS DAMPER

Hiroki AKEHASHI^{*1} and *Izuru TAKEWAKI*^{*2}

^{*1} Grad. Stud., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.,
Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science, M.Eng.

^{*2} Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.

One of the main roles of passive dampers is to reduce structural damage, that is, to reduce interstory deformations. It is also well known that the damage of non-structural components and facilities as well as the structural damage delays the recovery of the damaged building. It is needed to develop a resilience-based design method.

The reduction of structural response by passive dampers and the increase of the strength of non-structural components and facilities lead to the enhancement of the resilience of buildings. The structural responses (floor acceleration and interstory deformation) and the damages of the non-structural components and facilities are strongly correlated because the structural responses are regarded as the inputs to the non-structural components and facilities. In addition, the reduction of floor acceleration also contributes to the reduction of material quantities and human damages. For these reasons, it appears effective to reduce the structural responses for preventing damage to the non-structural components and facilities and improving recoverability of building functions.

Recently, research on resilience and recovery time has been carried out extensively in the fields of architectural and civil engineering. However, researches on resilience and recovery time are still insufficient.

On the other hand, there have been many researches on the optimum placement of passive dampers. The genetic algorithm (GA), which is one of the useful methods of metaheuristics, has been adopted as a powerful means for structural optimization and vibration control. Since random numbers are used and searching is performed at multiple points in GA, it works effectively even when the objective function has discontinuity points and/or multiple peaks. It is also known that GA can easily perform multi-objective optimization. While a gene is usually expressed by 0 or 1 (binary expression) in ordinary GA, design variable vectors are directly treated to create new individuals in the real-coded genetic algorithm (real-coded GA). In addition, the binary expression is not required in the real-coded GA. However, an appropriate crossover is required in the real-coded GA to get good solutions for each problem.

The purpose of this paper is to propose both a model of the evaluation of building's resilience and recovery time and a new optimal viscous damper placement method for targeted resilience. The evaluation model has the following features: 1) Building components (structural frame, non-structural components and facilities) are categorized into some systems from the viewpoint of function: 2) The recovery time is considered as a function of damages to building components and human resources to repair the components: 3) It is applicable to structural design. The design method proposed in this paper uses a kind of real-coded GA. The proposed method can reflect the uncertainty of the process to recover from damaged states (or the pace to recover) in a non-stochastic manner. Therefore, this uncertainty can be reflected in the damper design. The effective use of the constraint on the sum of added damper damping coefficients enables an efficient search for the solution. It is shown finally that the minimization of the recovery time with the limited ability (manpower) to repair the building components and the minimization of the recovery time with the full (unlimited) ability to repair the components correspond to the minimization of the total damage of the components and the minimization of the maximum damage among the components, respectively.

(2020年9月3日原稿受理, 2020年12月17日採用決定)