

制振高層建物におけるオイルダンパーの地震動に対する最適配置決定法 ～その3～ 減衰係数を設計変数に加えた問題への拡張

正会員 ○熨斗克哉^{*1} 同 田中英稔^{*1} 同 吉富信太^{*1} 同 辻 聖晃^{*1} 同 竹脇 出^{*1}

2. 構造—2. 振動

オイルダンパー, リリーフ荷重, 減衰係数, 最適設計, 制振構造, 多層建物

1. 序

前報(その1)^[1]では, リリーフ機構付きオイルダンパーを設置した弾性建物モデルに対して, コスト代表量としての全てのオイルダンパーのリリーフ荷重の総和が与えられたときに, 個々のオイルダンパーの最大減衰力に関する制約条件を満たし, 制振性能代表量としての地震時最大層間変位の層方向最大値を最小化するリリーフ荷重分布を, リリーフ荷重総和を変動させながら連続的に見出す方法を提案した。しかしながら前報に示した手法では, リリーフ荷重到達前のダンパー減衰係数(以降これを単に減衰係数とよぶ)は予め定数として与えられ, 最大減衰力に関する制約条件を満足しない層が発生した場合にその層のダンパーを除去するという手法を採用したため, コスト—制振性能関係に不連続部分(指定したリリーフ荷重総和に対して制約条件を満たす解を見いだせない部分)が生じた。

本報ではこの問題を克服するため, 前報で定数としていたダンパー減衰係数を設計変数に加え, リリーフ荷重と減衰係数の同時最適化手法を提案する。

なお, 変数を表す記号については, 特に断らない限り前報(その1)と同じものを用いる。

2. ダンパー減衰係数と応答の一般的関係

リリーフ機構付きオイルダンパーの減衰係数と建物モデルの応答の一般的関係の一例を示す。建物モデルおよび入力地震動はその1の2.2節と同じものとする。図1に, リリーフ荷重は変化させずに特定層の減衰係数を低減した場合の各地震時応答の変化量を示す。 $\Delta\delta_{j\max}$, $\Delta v_{j\max}$, $\Delta r_{j\max}$ はそれぞれ, 特定層の減衰係数を低減した場合の第 j 層の最大層間変位, 最大層間速度, 最大減衰力比(リリーフ荷重に対するダンパー最大減衰力の比)の変化量を表す。減衰係数を変化させた層は各プロット上に○で示す。

図1より, ある層の減衰係数を変更した場合の地震時応答について, 以下のことが観察される。

<1>最大層間変位の変化は不規則で予測困難。

<2>最大層間速度は減衰係数を低減した層では増加する傾向があるが, 他層については予測困難。

<3>最大減衰力比は減衰係数を低減した層では低下し, 他層ではほとんど変化無し。

ここで示した以外のモデルでも同様の傾向が観察された。

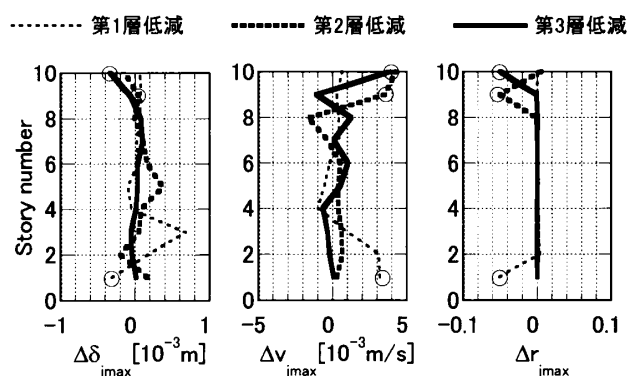


図1 減衰係数変更時の各応答変化量

3. 減衰係数を設計変数に加えた設計問題への拡張

3.1 リリーフ荷重のみを設計変数としたときの問題点

前報その1では, リリーフ荷重のみを設計変数として, 最大減衰力比に関する制約条件を侵した層のダンパーを強制的に除去していたため, リリーフ荷重総和の指定値 $\bar{C}_d$ が小さくなるとそれに対応する解を見いだせないという問題があった。

一方, 前節で明らかとなった特徴<3>からは, 最大減衰力比に関する制約条件を侵した層の減衰係数を低減することにより, その層は制約条件を満たす状態に回復可能と考えられる。そこで, 本報では, ダンパー減衰係数を設計変数に加えた上で, 最大減衰力比に関する制約条件を満足しない層が存在する候補解について, その層の減衰係数を以下に示す方法

Optimal oil damper design in seismically controlled multi-story buildings (Part 3: Problem including damping coefficients of oil dampers as design variables in addition to relief loads)

NOSHI Katsuya, TANAKA Hidetoshi, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki, TAKEWAKI Izuru

で低減したものを新たな候補解とする新しい実用的解法を提案する。

3.2 最適設計問題の定式化

前報^[1]で定式化した設計問題を、リリーフ荷重だけでなく減衰係数も設計変数に含むものに拡張した以下の問題を考える。

問題3：各層集中質量 $\{m_j\}$ 、各層剛性 $\{k_j\}$ 、構造減衰を表すための各層減衰係数 $\{c_{sj}\}$ が与えられたせん断型構造物モデルにリリーフ機構付きオイルダンパーを設置する。この構造物モデルが設計用地震動の作用を受ける場合について考える。ダンパーの減衰係数比 γ が予め与えられているとき、リリーフ荷重の総和（コスト）に関する等式制約条件

$$\sum_{j=1}^N d_{Rj} = \bar{C}_d$$

および最大減衰力比に関する不等式制約条件

$$\hat{f}_{j\max}(\mathbf{d}_R, \mathbf{c}_1) \leq \bar{\alpha} \quad \text{for all } j$$

を満足し、かつ、目的関数

$$F(\mathbf{d}_R, \mathbf{c}_1) = \hat{D}_{\max}(\mathbf{d}_R, \mathbf{c}_1)$$

を最小化するリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R = \{d_{Rj}\}$ および減衰係数 $\mathbf{c}_1 = \{c_{1j}\}$ を求めよ。ここで、 $\hat{D}_{\max}(\mathbf{d}_R, \mathbf{c}_1)$ は地震時最大層間変位の層方向最大値、 $\bar{\alpha} (\geq 1)$ は最大減衰力比の上限値（限界減衰力比）である。また、 $(\mathbf{d}_R, \mathbf{c}_1)$ はリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R$ と減衰係数 $\mathbf{c}_1$ の関数であることを表す。

その1と同様に、本報でも問題に対して、「リリーフ荷重総和レベル毎の最適設計解集合」という概念を導入し、すべての制約条件を満足する初期解から、連続的に $\bar{C}_d$ を減少させ、それに対する設計解 $\{\mathbf{d}_R, \mathbf{c}_1\}$ を逐次的に求める手法を提案する。

3.2 ダンパー減衰係数の低減手順

図2(a)に示すように、最大減衰力 $f_{j\max}$ が限界減衰力 $\bar{\alpha} d_{Rj}$ を超えている場合について、現設計で生じる最大層間速度 $v_{\max}$ に対する減衰力が $\bar{\alpha}' d_{Rj}$ となるように次式により減衰係数を変更する。

$$c_{1j}' = \frac{(\bar{\alpha}' - 1 + \gamma) \bar{v}_{j\max}}{(\bar{\alpha} - 1 + \gamma) v_{j\max}} c_{1j} \quad (4)$$

ここで、 c_{1j}' は変更後の減衰係数、 c_{1j} は現設計での減衰係数、 $v_{j\max}$ は現設計での最大層間速度、 $\bar{v}_{j\max}$ は限界減衰力に対応する最大層間速度を表す。また、 $\bar{\alpha}'$ を中間減衰力比、 $\bar{\alpha}' d_{Rj}$ を中間減衰力と呼ぶ。上記<2>

で得られた「減衰係数を低減した層では最大層間速度が大きくなる」ことを考慮すると、 $\bar{\alpha}'$ に限界減衰力比 $\bar{\alpha}$ よりも小さい値を与えることにより、変更後に最大速度応答が増加した場合でも、制約条件を満足すると考えられる(図2(b))。

このように減衰係数を変更した候補解について再度時刻歴応答解析を実行し、その結果別の層で制約条件を満たさなくなった場合は、その層についても同様の変更を施し、全層の制約条件が満足されるまで上記の減衰係数変更操作を繰り返す。しかしながら、上記<3>より、「ある層の減衰係数を低減しても他層の最大減衰力比はほとんど変化しない」ため、ある層の減衰係数を変更した結果別の層で制約条件を満たさなくなることはないと考えられる。

(1)

(2)

(3)

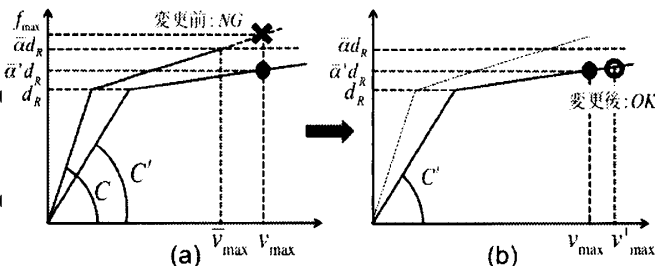


図2 減衰係数の変更手順

この減衰係数変更の手順を加えた問題3に対する新たなアルゴリズムを以下に示す(図3)。なお、上添字 $[k]$ は設計解更新のサイクル数を指す。

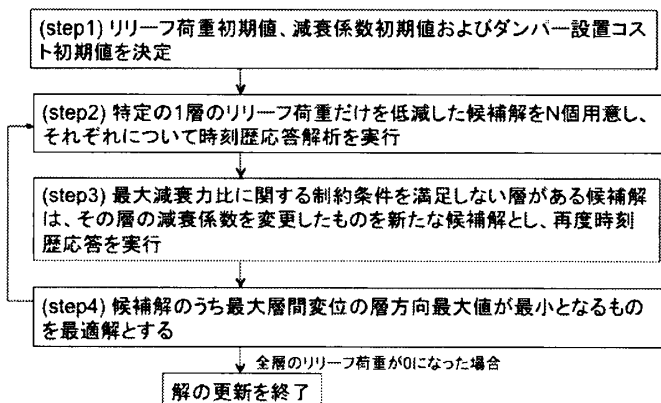


図3 減衰係数も設計変数とした最適化アルゴリズム

[step1] その1と同様の方法でリリーフ荷重初期値 $\mathbf{d}_R^{[0]}$ およびダンパー設置コスト初期値 $C_d^{[0]}$ を決定する。なお、減衰係数初期値 $\mathbf{c}_1^{[0]}$ については与えられているものとする（例えば1次減衰定数を指定する）。

[step2] 現在のリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R^{[k-1]}$ から第 i 層のリリーフ荷重を ΔC_d だけ変化させたものを第 i 候補解とし

$d_R^{[k]i}$ と表す。この段階では減衰係数は第 $k-1$ サイクルの解のまま変更は加えない ($c_1^{[k]i} = c_1^{[k-1]}$)。それぞれの候補解 ($d_R^{[k]i}, c^{[k]i}$) ($i=1, \dots, N$) に対して時刻歴応答解析を実行し、目的関数 $F(d_R^{[k]i}, c^{[k]i})$ を計算する。

[step3][step2]で作成した候補解のうち、制約条件(2)を満足しない層(第 n 層とする)が存在する第 i 候補解について、その層の減衰係数を上記の方法で低減し ($c_n^{[k]i} \rightarrow c_n^{[k]i+1}$)、それを新たな候補解 ($d_R^{[k]i}, c^{[k]i+1}$) ($i=1, \dots, N$) とする。この候補解について再度時刻歴応答解析を実行して目的関数 $F(d_R^{[k]i}, c^{[k]i+1})$ を計算する。この結果、新たに制約条件(2)を満足しない層が発生した場合は、そのような層がなくなるまで上記の減衰係数の変更を繰り返す。

[step4][step3]で得られた候補解のうちで、目的関数の値が最も小さくなる候補解 ($d_R^{[k]i}, c^{[k]i+1}$) を第 k サイクルの最適解として選択する。また、全ての層のリーフ荷重が 0 (これ以上低減させることができない) になった時点で解の更新を終了する。

4. 数値例題

4.1 入力地震動と建物モデルおよび変数の初期値

入力地震動には最大地動速度を 0.5m/s に調節した El Centro 1940 NS および Hachinohe 1968 NS を用いる。建物モデルの諸元とリーフ荷重初期値 $d_R^{[0]}$ および減衰係数初期値 $c_1^{[0]}$ を表 1 に示す。初期減衰係数 $c_{1j}^{[0]}$ は全層で等しい値とし、 $c_{1j}^{[0]}$ によって付加される 1 次減衰定数 $h_{Add}^{(1)}$ が 0.05 となるように設定している。本節では、応答は弾性範囲に収まると仮定する。また、各定数の値を以下のように定める：減衰係数比 $\gamma = 0.05$, 限界減衰力比 $\bar{\alpha} = 1.1$, 中間減衰力比 $\bar{\alpha}' = 1.05$ 。1 ステップで変化させるリーフ荷重量 $\Delta C_d^{[k]}$ は全ステップで 50kN。

表 1 建物モデルの諸元および設計変数初期値

j	m_j [kN]	k_j [kN/m]	$d_j^{[0]}$ [kN]	$c_j^{[0]}$ [kN/m]
1	1000	1513198	1447	18669
2	1000	995660	1981	18669
3	1000	941725	2028	18669
4	1000	818894	2081	18669
5	1000	887396	2215	18669
6	1000	730635	2759	18669
7	1000	624810	3117	18669
8	1000	592045	2916	18669
9	1000	554630	2345	18669
10	1000	450286	1523	18669

4.2 リリーフ荷重・減衰係数の最適解

図 4, 5 に、前節で示した建物モデルに本提案手法を適用した場合の各設計変数の分布を、図 6, 7 に最大層間変位分布の変化および最大減衰力比分布を、初期解, $C_d^{[k]} = 0.75C_d^{[0]}$, $C_d^{[k]} = 0.5C_d^{[0]}$, $C_d^{[k]} = 0.25C_d^{[0]}$ の場合について示す。それぞれの分布から、以下のことが観察される。

- ・ 図 4 と図 5 より、リーフ荷重が小さい層は減衰係数も小さくなる傾向がある。
- ・ 図 4 と図 6 より、最大層間変位が大きい層にはリーフ荷重が多く残る傾向がある。
- ・ 図 7 より、最大減衰力比は 1.0 から $\bar{\alpha}$ の範囲内で変動し、特定の傾向は見られない。

これ以外のモデルでも同様の傾向が観察された。

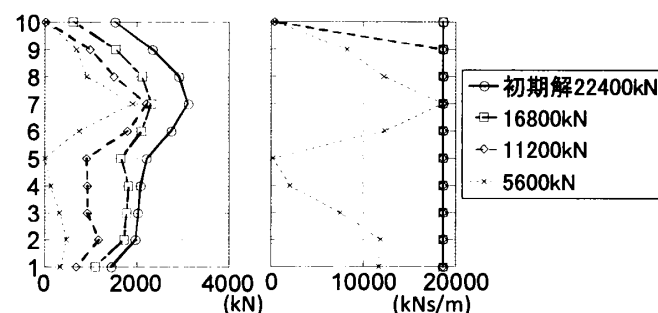


図 4 リリーフ荷重分布 図 5 減衰係数分布

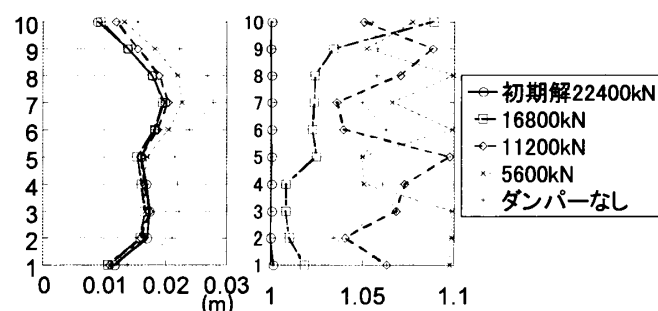


図 6 最大層間変位分布 図 7 最大減衰力比分布

また、図 8 にコスト ($C_d^{[k]}$) —制振性能 ($\hat{D}_{max}$) 関係を示す。比較のため、その 1 の手法を用いた場合の曲線も示す。図 8 より、本提案手法で得られた解 (・) は、その 1 の手法で得られた解 (○) とほぼ重なっていることに加えて、その 1 の解の不連続部分の大半を滑らかに繋いでいる。このことから、本手法でも、その 1 と同等の制振性能を持つ解が得られ、かつその欠点 (リーフ荷重総和が小さくなると、解が得られない領域が発生すること) を克服しているといえる。

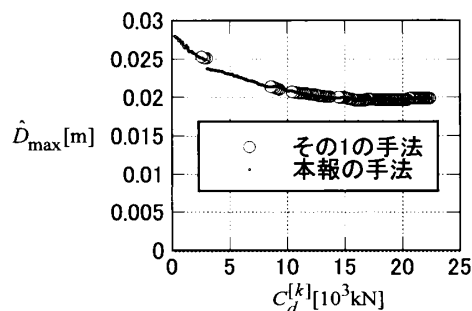


図8 $C_d^{[k]}-\hat{D}_{max}$ 関係 (その1と本報の手法の比較)

4.3 主架構が弾性的場合と塑性化する場合の比較

地震時最大応答が弾性範囲に留まるとして本手法を適用した場合と、建物モデルの骨組が一部塑性化することを考慮した場合の結果を比較し、骨組の塑性化がオイルダンパーの最適配置に与える影響について検討する。入力地震動は、最大地動速度を 0.75m/s に調節した El Centro 1940 NS および Hachinohe 1968 NS とする。骨組の降伏層間変位は全層一様に 25mm、剛性の第二分枝勾配比は全層一様に 0.1 とする。

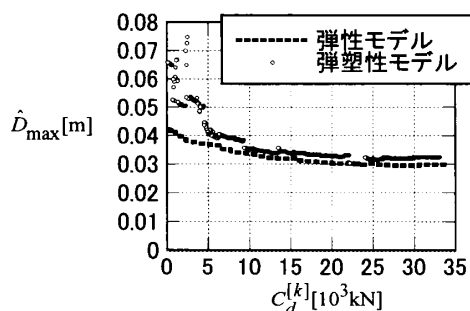


図9 $C_d^{[k]}-\hat{D}_{max}$ 関係 (弾性モデルと弾塑性モデル)

図9に、弾性モデルと弾塑性モデルについて、 $C_d^{[k]}-\hat{D}_{max}$ 関係の比較を示す。図10より、建物の塑性化を考慮した場合においても、リリーフ荷重総和が初期解の 1/3 程度までは、弾性モデルの場合とほぼ重なった $C_d^{[k]}-\hat{D}_{max}$ 関係を描くことがわかる。ただし、リリーフ荷重総和が初期解の 1/4 程度を下回ると、弾性モデルとの差が急激に拡大している。

図10には、初期解、 $C_d^{[k]}=0.5C_d^{[0]}$ 、 $0.25C_d^{[0]}$ 、ダンパーなしの場合についての最大層間変位分布を、図11には、初期解、 $C_d^{[k]}=0.75C_d^{[0]}$ 、 $0.5C_d^{[0]}$ 、 $0.25C_d^{[0]}$ の場合についてのリリーフ荷重分布を示す。 $C_d^{[k]}=0.25C_d^{[0]}$ の場合については、リリーフ荷重分布は弾性モデルと弾塑性モデルで有意な差は見られな

いものの、最大層間変位分布においては特に応答が大きな層で有意な差が見られることがわかる。

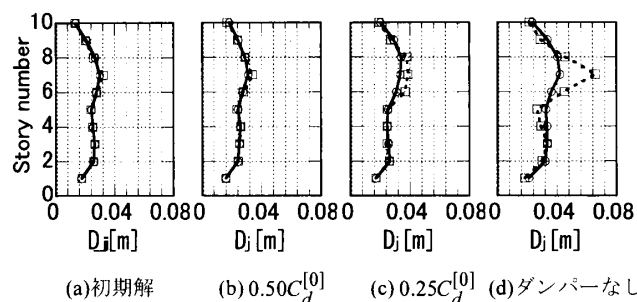


図10 層間変位分布 (実線：弾性、破線：弾塑性)

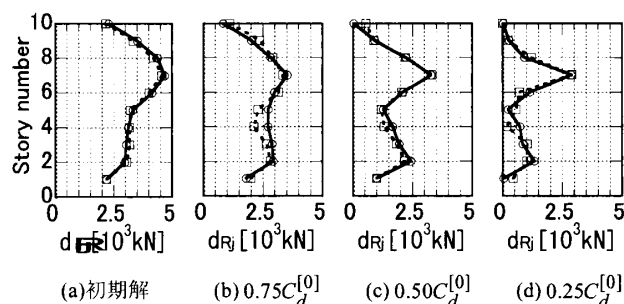


図11 リリーフ荷重分布 (実線：弾性、破線：弾塑性)

5. 結論

本論文では、その1で提案されたオイルダンパーの最適設計手法を拡張して、ダンパー減衰係数も設計変数とし、より広い範囲で指定したリリーフ荷重総和に対応する最適解 (リリーフ荷重分布および減衰係数分布) が得られる手法を提案した。すなわち、地震動の作用を受ける高層建物の各層間に設置されるオイルダンパーのリリーフ荷重と減衰係数について、2つの制約条件 (リリーフ荷重の総和制約と、各ダンパーの最大減衰力比制約) を満たし、かつ、複数の地震動に対する最大層間変位の層方向の最大値を最小にするような分布を、リリーフ荷重総和のレベルごとに連続的に見出す手法を提案した。

さらに、提案した手法を用いた数値例題を実行し、最適なリリーフ荷重分布および減衰係数分布の特徴を明らかにした。また、建物主架構が一部塑性化する場合についても同手法を適用し、主体骨組が弾性範囲に留まる場合との違いを明らかにした。

参考文献

- [1] 田中英稔他, 制振高層建物におけるオイルダンパーの地震動に対する最適配置決定法 その1 日本建築学会近畿支部研究発表会 (2012)