

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～ 問題の概要とせん断型モデルへの適用

正会員 ○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, 最適設計, 制振構造, 多層建物

1. 序

本論文の目的は, 地震荷重を受ける高層建物の層間に設置されるオイルダンパーについて, 最適ナリリーフ荷重の分布ならびに最適なダンパー配置を見出す方法を提案し, 最適ナリリーフ荷重・ダンパー配置の特徴を明らかにすることである. ここでいう「最適ナリリーフ荷重・ダンパー配置」とは, 「ナリリーフ荷重の総和が一定の下で, 地震時最大層間変位の層方向の最大値を最小化するナリリーフ荷重とダンパーの有無の層方向の分布」のことを指す.

ナリリーフ機構付きダンパーの最適減衰係数を見出す方法は提案されている^{[1][2]}が, 最適ナリリーフ荷重分布を見出す方法はこれまでに提案されていない.

2. ナリリーフ機構付オイルダンパーを有するモデル

2.1 建物モデルと地震時応答の評価

図1(a)に示す, N 層せん断型構造物モデルの各層間に, ナリリーフ機構を有するオイルダンパーを設置した建物モデルを考える. 第 j 層の床面集中質量を m_j , 層剛性を k_j で表す. 構造減衰は剛性比例型とし, ダンパーの取付部材は剛とする.

ナリリーフ機構付オイルダンパーを, 図1(b)に示すバイリニア型速度—復元力特性を有する非線形粘性要素にモデル化する. 第 j 層に設置するダンパーのナリリーフ荷重到達前の減衰係数を c_{1j} , ナリリーフ荷重到達後の減衰係数を c_{2j} , ナリリーフ荷重を d_{Rj} とする. c_{2j} の c_{1j} に対する比(減衰係数比) c_{2j}/c_{1j} は全層で同一とし γ で表す. オイルダンパーの仕様上の減衰力の限界値を限界減衰力と呼び f_{CRj} で表す. f_{CRj} は d_{Rj} に依存する変数として取り扱う. 一般的には, d_{Rj} に対する f_{CRj} の比として, 1.25程度の値が設定される. また, ナリリーフ荷重をナリリーフ機構を設けない場合にダンパーに発生する減衰力で除したものを減衰力制限比 L と呼ぶ^[3]. 図2に, 上記のようにモデル化

したオイルダンパーが描く履歴ループの例を減衰力制限比 L が1.0, 0.5の場合について示す.

構造物モデルの地震時最大応答の評価および後述する設計感度解析には, 非線形時刻歴応答解析を用いる. ある一つの入力地震動に対する第 j 層の最大層間変位を $\delta_{j\max}$ で表し, 全層中の最大値を $D_{\max}$ で表す. また, 第 j 層のダンパーに生じる最大減衰力を $f_{j\max}$ で表し, ナリリーフ荷重 d_{Rj} に対する $f_{j\max}$ の比

$$r_{j\max} = \frac{f_{j\max}}{d_{Rj}} \quad (1)$$

を「最大減衰力比」と呼ぶ.

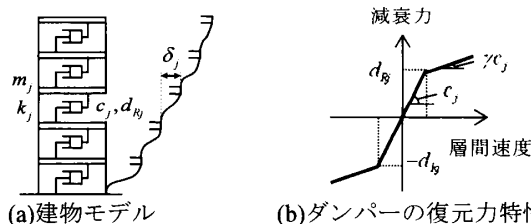


図1 建物モデルとオイルダンパーの復元力特性

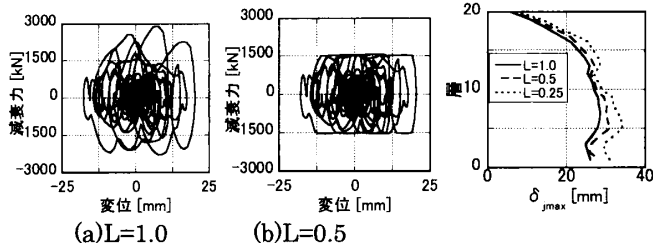


図2 履歴ループ 図3 最大層間変位

2.2 ナリリーフ荷重が応答に与える一般的な影響

本節では, 設計変数が, 制約条件を記述するための代表変数にどのような影響を与えるのか, その定性的な傾向を示す. 10層, ダンパーを全層配置(付加減衰定数5%)したモデルを用いる. モデルの詳細は4節で示す. また, 以下では, 入力地震動として地動最大速度を0.5m/sとなるように調整したEI Centro NSを用いた場合の結果を示す.

ナリリーフ機構が地震時応答に与える一般的な傾向

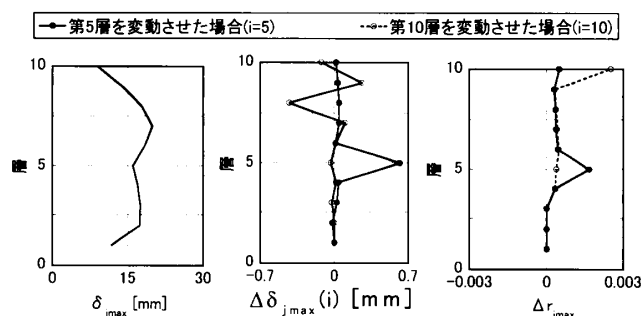
Optimum oil damper design in seismically controlled multi-story buildings
(Part1: Formulation and application to shear-building model)

TANAKA Hidetoshi, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki and TAKEWAKI Izuru

を示すため、図3に上記モデルについて、減衰力制限比 L が全層一定であり、 $L=1.0, 0.5, 0.25$ とした場合の最大層間変位分布を示す。図2.3より、リリーフ機構を導入することで最大層間変位は大きくなる傾向にあることがわかる。

次に、ある特定層のリリーフ荷重を変動させたときに、各層の地震時最大応答にどのような影響があるのかを明らかにする。

図4に、全層の減衰力制限比 L が1.0のケースから、それぞれ各層のリリーフ荷重を同じ値だけ変動させたときの地震時応答の変化量を示す。リリーフ荷重の変動量は50kNとする。なお、 $\Delta\delta_{j\max}(i)$ 、 $\Delta r_{j\max}(i)$ は、第 i 層のリリーフ荷重のみを変化させた場合の第 j 層最大層間変位の変化量、第 j 層のリリーフ荷重に対する最大減衰力比の変化量を表す。



(a)最大層間変位 (b)最大層間変位変化量 (c)最大減衰力比変化量
図4 最大層間変位とリリーフ荷重低減時変化量

図4より、ある層のリリーフ荷重を微小量低減したときの地震時応答の変化について、以下のことが観察される。

- (1)最大層間変位 $\delta_{j\max}$ の変化は不規則であり、経験的判断は困難である。
- (2)最大減衰力比 $r_{j\max}$ は、リリーフ荷重を低減した層において顕著に大きくなるが、低減していない層では $r_{j\max}$ の値はほとんど変化しない。

なお上記の傾向は、本論文で示したものの以外の数値例題でも観察された。

3. せん断型モデルにおけるオイルダンパーの最適リリーフ荷重分布に関する設計問題

3.1 最適設計問題の定式化

以下のように最適リリーフ荷重設計問題を定式化する。また、複数の地震動に対する地震時応答値を $(\hat{\cdot})$ を用いて表す。複数地震動に対する最大応答の包

絡線を性能評価用の応答値とする。

問題1: 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。オイルダンパーのリリーフ荷重到達前の減衰係数 $\{c_{lj}\}$ 、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

$$\sum_{j=1}^N d_{Rj} = \bar{C}_d \quad (2)$$

および最大減衰力比に関する不等式制約条件

$$\hat{r}_{j\max}(\mathbf{d}_R) \leq \bar{\alpha} \quad \text{for all } j \quad (3)$$

を満足し、かつ、目的関数

$$F(\mathbf{d}_R) = \hat{D}_{\max}(\mathbf{d}_R) \quad (4)$$

を最小化するリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R = \{d_{Rj}\}$ を求めよ。

ここで、 $\bar{C}_d$ はリリーフ荷重の総和に対する指定値、 $\bar{\alpha}(\geq 1)$ は最大減衰力比の上限値であり、いずれも予め与えられているものとする。また、 $(\mathbf{d}_R)$ はリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R$ の関数であることを表す。

3.2 リリーフ荷重総和レベル毎の最適設計解集合

設計者にとっては、単一の $\bar{C}_d$ に対する単一の最適設計解が得られるよりも、異なるレベルの $\bar{C}_d$ に対する最適設計解の集合が得られる方が、その中からコストと性能のバランスに配慮して「望ましい」最適設計解を選択できるという意味で有用である。

そこで、 $\bar{C}_d$ の離散集合 $\{\bar{C}_d^{[0]}, \bar{C}_d^{[1]}, \bar{C}_d^{[2]}, \dots\}$ （上付数字はステップ数を表す）に対して、問題1の解となるリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R$ の離散集合 $\{\mathbf{d}_R^{[0]}, \mathbf{d}_R^{[1]}, \mathbf{d}_R^{[2]}, \dots\}$ を求める離散化されたパラメトリック最適化問題を考え、最適解 $\mathbf{d}_R^{[k]} = \{d_{Rj}^{[k]}\}$ および最適解の差分 $\Delta\mathbf{d}_R^{[k]} = \{\Delta d_{Rj}^{[k]}\}$ を求める問題を以下のように定式化する。ここで、

$$\bar{C}_d^{[k]} = \bar{C}_d^{[k-1]} + \Delta\bar{C}_d^{[k]}, \quad \Delta\bar{C}_d^{[k]} < 0 \quad (k=1, 2, \dots) \quad (5a, b)$$

$$\mathbf{d}_R^{[k]} = \mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta\mathbf{d}_R^{[k]} \quad (k=1, 2, \dots) \quad (6)$$

とする。(5a,b)、(6)式は $k-1$ ステップから k ステップへの遷移を表す。

問題2: リリーフ荷重の初期値 $\mathbf{d}_R^{[0]}$ と、その総和 $\bar{C}_d^{[0]}$ が与えられているとする。このとき、リリーフ荷重の総和の変化量に関する等式制約条件

$$\sum_{j=1}^N \Delta d_R^{[k]} = \Delta \bar{C}_d^{[k]}$$

および最大減衰力比に関する不等式制約条件

$$\hat{r}_{j\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R^{[k]}) \leq \bar{\alpha} \quad \text{for all } j$$

を満足し、かつ、目的関数

$$F(\mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R^{[k]}) = \hat{D}_{\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R^{[k]}) \quad (9)$$

を最小化するリリーフ荷重の変化量 $\Delta \mathbf{d}_R^{[k]}$ およびリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R^{[k]} = \mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R^{[k]}$ を逐次求めよ。

問題 2 の解 $\mathbf{d}_R^{[k]}$ を「(第 k ステップの) 解」, $\Delta \mathbf{d}_R^{[k]}$ を「(第 k ステップの) 解の変化量」と呼ぶ。

3.3 実用的近似解法

本論文では、計算負荷軽減の観点から、問題 2 に対して以下の近似解法を展開する。

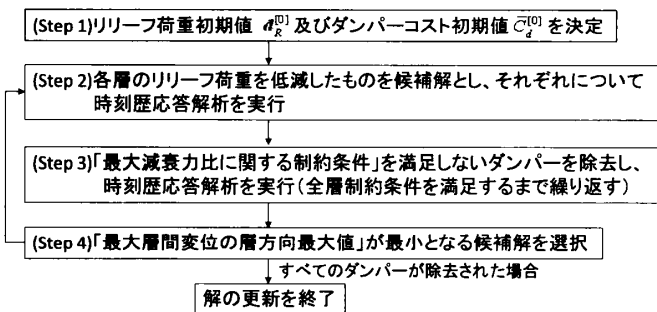


図 5 最適化アルゴリズム

[Setp 1] 初期値 $\mathbf{d}_R^{[0]}$ および $\bar{C}_d^{[0]}$: リリーフ荷重を無限大としたモデルについて、最大減衰力 $\hat{d}_{\max}$ を計算し、

$$\mathbf{d}_R^{[0]} = \hat{d}_{\max}, \quad \bar{C}_d^{[0]} = \sum_{j=1}^N d_{Rj}^{[0]} \quad (10a,b)$$

とする。これは最大減衰力比に関する不等式制約条件(3)を満たす解である。また、 $\bar{C}_d^{[0]}$ を適当に分割して $\Delta \bar{C}_d^{[k]} (k=1,2,\dots)$ を決定する。

[Step 2] 候補解に対する応答計算 : 現在のリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R^{[k-1]}$ から、各層のリリーフ荷重 d_{Ri} を $\Delta \bar{C}_d^{[k]}$ だけ変化したリリーフ荷重 $\mathbf{d}_R(i) = \mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R(i)$ を「候補解」と呼ぶこととする。それぞれの候補解に対して時刻歴応答解析を実行し、目的関数 $F(\mathbf{d}_R(i))$ を計算する。

[Step 3] 最大減衰力比に関する制約条件(8)のチェックと制約条件(8)を満たさないダンパーの除去 : Step 2 で作成した候補解のうち、リリーフ荷重変更後の最大減衰力比が制約条件(8)を満足しなくなるようなものについては、制約条件(8)を満たさない層のダンパーを除去し(減衰係数をゼロとし)、再度、時刻歴応

- (7) 答解析を実行して、目的関数 $F(\mathbf{d}_R(i))$ を計算する。
この結果、別の層で制約条件(8)が満足されなくなった場合には、そのような層がなくなるまで上記のダンパー除去操作を繰り返す。

[Step 4] 解の選択 : Step 3 で除外されなかった候補解のうちで、 $F(\mathbf{d}_R(i))$ が最も小さくなる候補解 $\mathbf{d}_R(i)$ を選択し、これを第 k ステップでの解とする。

[Step 5] すべての層のダンパーが除去された時点で、解の更新を終了する。

4. 数値例題

4.1 数値例題における設計条件

数値例題における設計条件を以下に記す。

- ・リリーフ荷重に到達する前のオイルダンパー減衰係数 c_{ij} は、ダンパーを設置した層では全て同じ値とし、その値は、 c_{ij} によって付加される 1 次減衰定数 $h_{Add}^{(i)}$ (非連成近似) が 0.05 の場合と 0.10 の場合の 2 ケースを設定する。
- ・ダンパーの減衰係数比 $\gamma = c_{2j}/c_{1j}$ は 0.05 とする。
- ・減衰力制限比 $\hat{r}_{j\max} = \hat{f}_{j\max}/d_{Rj}$ の上限値 $\bar{\alpha}$ は 1.1 とする。
- ・1 回の設計変更で減少させるリリーフ荷重 $\Delta \bar{C}_d^{[k]}$ は、最適化の初期段階におけるリリーフ荷重の最小値の 1/120~1/10 とする。

4.2 入力地振動と解析モデル

入力地震動は、最大地動速度を 0.5m/s に調節した El Centro NS および Hachinohe NS を用いる。

表 1 建物モデルの諸元

j	k_j [kN/mm]	c_{ij} [kNs/mm]				$d_{Rj}^{[0]}$ [kN]			
		0.05		0.10		0.05		0.10	
		A	H	A	H	A	H	A	H
1	1513	18.7	32.5	37.3	64.9	1447	1703	2988	3274
2	995	18.7	32.5	37.3	64.9	1981	2350	4168	3966
3	942	18.7	32.5	37.3	64.9	2028	2298	4124	3787
4	919	18.7	32.5	37.3	64.9	2081	1935	4021	3568
5	887	18.7	32.5	37.3	64.9	2216	1984	3972	3168
6	731	18.7	0	37.3	0	2759	-	4368	-
7	625	18.7	0	37.3	0	3117	-	4524	-
8	592	18.7	0	37.3	0	2916	-	3980	-
9	555	18.7	0	37.3	0	2345	-	3029	-
10	450	18.7	0	37.3	0	1523	-	1838	-

本節で用いる解析モデルを以下に記述する。ダンパー配置は、A : ダンパー全層配置または H : ダンパー下半分配置とする。床面集中質量は、全層一様で $m_j = 10 \times 10^6 \text{ kg}$ 、ダンパーを設置しない場合の 1 次固

有周期は 1.39s である。表 1 にモデルの諸元を示す。解析モデルの層剛性分布は実在する鋼構造建物に参考を設定する。

4.3 最適リリース荷重分布

図 6, 7 に、各モデルに 3.3 節に示した最適化アルゴリズムを適用した場合のリリース荷重分布の変化及び最大層間変位分布の変化を示す。図より、以下のことが観察される。

- ・いずれのモデルでも、最大層間変位の小さい層のダンパーにおいて重点的にリリース荷重が低減される傾向がある。
- ・本アルゴリズムを用いてリリース荷重を低減すると、層間変位応答は全層ほぼ一様に増加する。

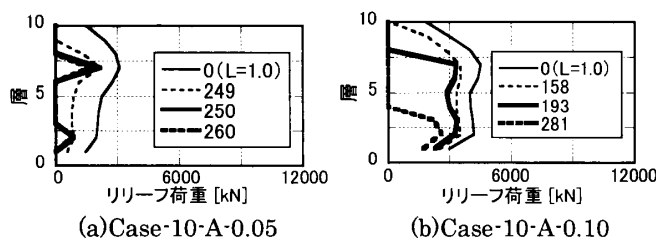


図 6 リリース荷重 (凡例の数字はステップ数)

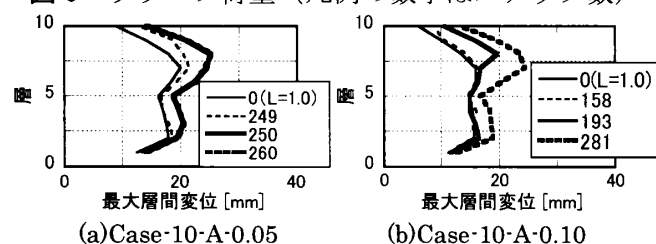


図 7 最大層間変位 (凡例の数字はステップ数)

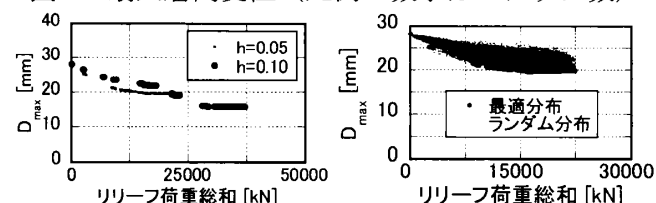


図 8 コストと目的関数
($h=0.05, 0.10$)

図 9 コストと目的関数
(本手法, ランダム)

図 8 に、3.4 節のアルゴリズムを適用した場合のリリース荷重総和と最大層間変位の層方向最大値の関係を示す。図より、以下のことが観測される。

- ・いずれのモデルにおいても、最大層間変位の層方向最大値 $\hat{D}_{\max}$ をほとんど増加させることなく、リリース荷重総和 (すなわちオイルダンパーのコス

ト) を全層の減衰力制限比 $L=1.0$ の場合の半分程度まで低減可能である。

- ・ダンパー減衰係数を大きくするほど、すなわちダンパーによる付加減衰定数 $h_{\text{Add}}^{(i)}$ を大きくするほど、ダンパーが線形の場合の $\hat{D}_{\max}$ は小さくなるが、リリース荷重総和がある程度小さい領域では上記のような関係は必ずしも成立しない。また、ダンパー減衰係数を大きくすることで最大減衰力比に関する制約条件を侵しやすくなるため、リリース荷重総和が小さいダンパー配置を求めることが困難な場合がある。

図 9 に、3.4 節のアルゴリズムを適用した場合と、無数に生成したランダムなリリース荷重分布を有するモデルのうち最大減衰力比の制約を満足するものについて、リリース荷重総和と最大層間変位の層方向最大値の関係を示す。本手法により得られるリリース荷重分布はほぼグローバル最適解を与えると言える。

5. 結論

本論文では、多層建物の層間にリリース機構付きオイルダンパーを設置した構造物モデルが地震動を受ける場合を考え、そのリリース荷重を適切に決定するための実用的近似解法を提案した。すなわち、各ダンパーに生じる最大減衰力のリリース荷重に対する比 (最大減衰力比) が制限値を超えないことと、リリース荷重の総和が指定した値に一致することを制約条件とし、地震時最大層間変位の層方向最大値を最小化するような各ダンパーのリリース荷重を見出す最適設計問題を定式化して、その解法を提案した。さらに、提案した最適設計法を用いた数値例題を扱い、最適なリリース荷重分布の特徴を明らかにした。

参考文献

- [1] 中川肇, 浅野幸一郎: Maxwell型非線形粘性ダンパーを有する構造物の最適地震応答制御について, 日本建築学会構造系論文集, No.542, pp.83-89, 2001.4
- [2] 笠井和彦, 伊藤浩資, 小椋崇之: オイルダンパーの等価剛性調節による制振構造の応答制御手法, 日本建築学会構造系論文集, No.630, pp.1281-1288, 2008.8
- [3] 丹羽直幹: 構造物に設置させたオイルダンパーの必要減衰力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.545, pp.43-50, 2001.7.