

多層建物におけるオイルダンパーの最適リリース荷重決定法

OPTIMUM RELIEF FORCE OF OIL DAMPERS IN MULTI-STORY BUILDINGS

辻 聖晃*, 田中英稔**, 吉富信太***, 竹脇 出****
Masaaki TSUJI, Hidetoshi TANAKA, Shinta YOSHITOMI
and Izuru TAKEWAKI

The purpose of this paper is to propose a practical method for optimum design of oil dampers with relief mechanism installed in multi-story buildings. The optimum design problem is formulated so as to minimize the maximum interstory drift under design earthquakes in terms of a set of relief forces subject to an inequality constraint on maximum ratio of the damping force to the relief force and an equality constraint on sum of relief forces of oil dampers. The proposed method to solve the optimum design problem is a successive procedure which consists of two steps. The first step is a sensitivity analysis including nonlinear time-history analyses, and the second step is a modification of the set of relief forces based upon the sensitivity analysis. Numerical examples are conducted to present the effectiveness and validity of the proposed design method.

Keywords: Oil damper, Relief force, Optimum design, Seismic controlled structure, Multi-story building

オイルダンパー, リリース荷重, 最適設計, 制震構造, 多層建物

1. 序

1.1 研究の目的と背景

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、最適なリリース荷重の分布ならびに最適なダンパー配置（ダンパーの有無）を見出す方法を提案し、最適リリース荷重・ダンパー配置の特徴を明らかにすることである。なおここでいう「最適リリース荷重・ダンパー配置」とは、「リリース荷重の総和が指定した値と一致し、地震時最大層間変位の層方向の最大値が最も小さくなるようなリリース荷重とダンパーの有無の層方向の分布」のことを指す。

オイルダンパーは、多層建物の地震時応答や風応答の最大値を抑制し、かつ早期に振動を減衰させる制振デバイスとして、数多くの建物に適用されている。適用例の多くは、独立して建つ多層建物の層間にダンパーを設置し、層間速度を利用して減衰力を生じさせるような機構となっているが、近年では、隣接して建つ複数の多層建物の棟間にダンパーを設置し、棟間速度を利用して減衰力を生じさせるような機構を採用する例も増えつつある。

オイルダンパーは、内蔵されたオイルの流体抵抗と減衰弁の作用により、温度にはほとんど依存せず、ピストンの作動速度にほぼ比例した減衰力を生じさせる機構となっている。ダンパーに生じる減衰力は、ブレースなどのダンパー取付部材や、ダンパー取付部材が取り付く梁柱接合部などにとっては外力となるため、減衰力が過度に大きくなると、ダンパー取付部材や梁柱接合部の損傷を引き起こ

しかねない。そこで、建築用のオイルダンパーには、減衰力が一定の値に達するとリリース弁を開放して、減衰力の上昇を抑制する機構が組み込まれている。このような機構はリリース機構と呼ばれ、リリース弁が開放されるときに減衰力はリリース荷重と呼ばれている。ダンパーのピストンや筒体などの仕様は、ダンパーに生じる最大減衰力によって決まり、また、ダンパー取付部材に必要な剛性と強度も最大減衰力によって決まるため、リリース荷重は、オイルダンパー設置に関わるコストとして最も主要なものといえる。また、オイルダンパーが損傷しないために、最大減衰力が仕様上の限界値を超えないことも必要とされる。

オイルダンパーの特性を決定する基本的な物理パラメータには、リリース機構が作動しないときの減衰係数（以降はこれをダンパー減衰係数と呼ぶ）、リリース荷重、リリース機構が作動した後の減衰力の速度に対する勾配（減衰係数）のダンパー減衰係数に対する比（以降はこれを減衰係数比と呼ぶ）、ピストン軸剛性やオイルの圧縮剛性に起因するオイルダンパー自身の剛性があげられる。オイルダンパーによる制振（制震）性能は、これらのダンパー基本特性量と、ダンパー取付部材の剛性、およびダンパーが組み込まれる建物の振動特性が相互に影響しあい決まることになる。

1.2 既往の研究

上述のダンパー基本特性量と制振性能の関係にみられる一般的な傾向を明らかにして、経験式や図表を用いた簡便な方法により要求性能を満たすダンパーを見出す方法の提案がこれまでになされてい

* 京都大学工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

** 京都大学工学研究科建築学専攻 大学院生
(現 ㈱日揮)

*** 京都大学工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)
(現 立命館大学 准教授)

**** 京都大学工学研究科建築学専攻 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University

Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

る。石丸は、バイリニア型履歴ダンパーと線形粘性ダンパーを有する1自由度モデルについて、履歴ダンパーの塑性率と粘性ダンパーによる付加減衰定数をパラメタとして、地震時最大変位および地震時最大加速度（それぞれ減衰定数40%での変位応答スペクトルおよび加速度応答スペクトルに対する比）を複数の地震波に対する実験式により求めた「応答性能図表」を示し、これを用いたダンパーの設計法を提案している¹⁾。また、モーダルアナリシスを利用した多自由度モデルへの適用法も示している²⁾。

中川と浅野は、層間変位が一様となるような多層建物の各層間にブレースを介して設置されたリリーフ機構付きオイルダンパーについて、リリーフ荷重をパラメタとしたときの最適ダンパー減衰係数を示している³⁾。丹羽は、多層建物モデルから1層分を取り出したユニットモデルを用い、ブレースを介して層間に設置されたオイルダンパーのリリーフ荷重に関して、制振性能をほとんど損なわない減衰力制限比 L （＝リリーフ荷重／リリーフ機構がない場合の最大応答減衰力）の推奨値を提案している。また、標準的な剛性分布を有する多層建物モデルについて、減衰力制限比 L を与えたときの必要減衰力の総量の略算式を示している⁴⁾。笠井らはリリーフ機構付きオイルダンパーを始めとする種々のダンパーに対して、1質点モデルに設置した場合にその構成要素と制振性能を関連付ける性能曲線を作成し、これを用いて必要ダンパー量を決定する方法を示している。さらにその後、多質点構造物の高さ及び剛性分布、地震波の位相やスペクトル形状などを考慮して有効なダンパー配置を決定する手法を提案している⁵⁻⁷⁾。これらの方法は、構造設計の初期段階において、ダンパー総量の見当を得たり、種々の制振機構の比較検討のための概略設計を容易に提供することが可能であり、実用上有用である。しかしながら、標準的なケース以外に対する精度は必ずしも保証されておらず、最終的には時刻歴応答解析などによる性能検証が必要となる。

一方、設計図表などを使用せず、数理計画法や逆問題型定式化を用いて、最適なオイルダンパー配置やダンパーと建物の両設計を見出す方法もこれまでに提案されている。ZhangとSoongは、容量の与えられた粘弾性ダンパーを、performance indexと呼ぶ応答代表量の減少を最も大きくするような層に連続的に配置していくことで、ダンパーの最適配置を見出す方法を提案している⁸⁾。辻と中村は、総ダンパー減衰係数が一定の下で、最大層間変位を目標値以下とし、構造物の層剛性の総和を最小化する粘性ダンパーの最適配置手法を提案している⁹⁾。竹脇らは粘性ダンパーを設置した構造物に対して、非減衰1次固有振動数における層間変位の伝達関数の層方向和や地震時応答を最小化するダンパーの最適配置手法を提案している^{10,11)}。SinghとMoreschiは、立体骨組モデルに対して、遺伝的アルゴリズムを用いて、容量と数の与えられたダンパーを、応答量で定義された目的関数を最小化するように最適配置する方法を提案している¹²⁾。

しかしながら、既往の研究においては、オイルダンパーはリリーフ機構のない線形ダンパーとして取り扱われることがほとんどであり、また、ダンパー減衰係数をダンパー設置に関わるコストとして採用するケースが多い。そのような定式化が採用されることが多いのは、リリーフ機構を有するオイルダンパーを含む構造物は非線形モデルとなり、線形モデルに比べて応答計算や感度解析に必要な計算量が格段に大きくなるためである。リリーフ荷重を考慮しない場合

には、ダンパー減衰係数とダンパーに生じる最大減衰力には強い相関があり、ダンパー減衰係数をコストの代表量として採用することにも一定の合理性がある。一方、リリーフ荷重と最大減衰力に関する制約条件を満たし、地震時応答に関して定義された目的関数を最小とするようなオイルダンパーの最適設計法の提案は、これまでになされていない。

1.3 本論文の構成

本論文では、多層建物の層間にリリーフ機構付きオイルダンパーを設置した構造物モデルを考え、この構造物モデルに地震動が作用したときの各ダンパーに生じる最大減衰力のリリーフ荷重に対する比が制限値を超えないことと、リリーフ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の最大値を目的関数として、各ダンパーのリリーフ荷重を設計変数とする最適設計問題を定式化して、その実用的近似解法を提案する。なおこの「近似」とは、提案する解法が、最適設計問題を数理計画法における各種の数学的アルゴリズムに基づくのではなく、リリーフ荷重が建物の地震時応答に与える影響の一般的傾向を利用した単純なルールにより、現設計からの設計変数の変化量を定める方法を採用していることを指す。

本論文では、ダンパーが組み込まれる建物はせん断型構造物とし、その剛性分布は予め与えられているものとする。また、リリーフ前のダンパー減衰係数と、リリーフ後のダンパー減衰係数比も予め与えられるものとする。ダンパー取付部材は、ダンパー性能に対しては十分に剛なものが用いられるとして、本論文では考慮しない。

2. リリーフ機構付きオイルダンパーを有する建物モデル

2.1 建物モデルと地震時応答の評価

本論文では、提案する手法の手順を平易に示すために、建物モデルには平面弾性せん断型構造物モデルを用いる。図1(a)に示す、 N 層せん断型構造物モデルの各層間に、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を仮定し、ダンパーを設置しない場合の1次固有円振動数 $\omega_{ND}^{(1)}$ と1次減衰定数 h_S により、各層の減衰係数 c_{Sj} を以下の式により与えるものとする。

$$c_{Sj} = \frac{2h_S}{\omega_{ND}^{(1)}} k_j \quad (1)$$

ダンパー自身の軸剛性とダンパー取付部材の剛性は、特にその大きさがダンパー減衰性能に対して十分ではない場合には、ダンパーによる制振効果に大きな影響を与える^{4,13)}。一方、ダンパーとダンパー取付部材の直列バネ剛性に対してダンパー減衰性能が過度に大きくない場合には、直列バネ剛性を無限大とした簡易的な評価により、動的荷重に対する応答を高い精度で評価することが可能であることも既往の研究により明らかにされている^{14,15)}。本論文では、リリーフ荷重がダンパーによる制振効果や、それを反映させたダンパーの最適設計に与える影響を明快に示すため、オイルダンパーは、設定する減衰性能に対して十分な軸剛性を有し、かつ、十分な剛性（と強度）を有する取付部材を介して層間に設置されているものとする。すなわち、構造物モデルとしては、層間に生じる相対速度の全てが、オイルダンパーを表すリリーフ荷重付きダッシュポットに

入力されるとする。

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の速度一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リリーフ荷重到達前の減衰係数を c_{1j} 、リリーフ荷重到達後の減衰係数を c_{2j} 、リリーフ荷重を d_{Rj} とする。 c_{2j} は減衰力制限の観点からはゼロとすることが望ましいが、技術的な限界からゼロとはできず、市販されている建築制振用の一般的なオイルダンパーでは $c_{2j}/c_{1j}=0.05 \sim 0.1$ 程度となるように c_{2j} の値が設定されている。本論文では c_{2j}/c_{1j} を減衰係数比と呼び、 γ_j で表す。オイルダンパーの耐力およびピストン速度の限界から設定される減衰力の限界値を限界減衰力と呼び f_{CRj} で表す。市販の建築制振用オイルダンパーでは、 $f_{CRj}/d_{Rj}=1.25$ 程度となるように f_{CRj} もしくは d_{Rj} の値が設定されることが多いため、本論文でも f_{CRj} は d_{Rj} の値に依存する変数として取り扱う。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。

リリーフ機構付きオイルダンパーを設置した構造物は、非線形構造物となるために、精度の高い応答評価を行うためには、非線形時刻歴応答解析が必要である。したがって本論文でも、採用する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、さらにその値の全層中の最大値を 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、リリーフ荷重 d_{Rj} に対する $f_{j\max}$ の比

$$r_{j\max} = \frac{f_{j\max}}{d_{Rj}} \quad (2)$$

を「最大減衰力比」と呼ぶ。

時刻歴応答解析を必要とする建物では、通常は単独の入力地震動に対する最大応答ではなく、レベルを規準化した複数の入力地震動に対する最大応答の包絡値を、性能評価用の応答値とする。本論文でも、複数の地震動に対する第 j 層最大層間変位の包絡値を $\hat{\delta}_{j\max}$ 、その値の全層中の最大値を \hat{D}_{\max} 、第 j 層のダンパーに生じる最大減

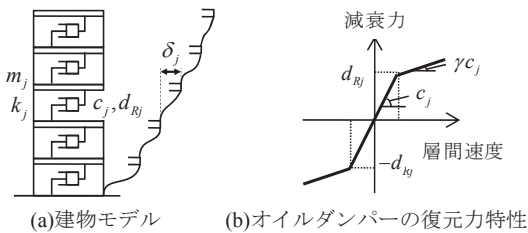


図 1 建物モデルとオイルダンパーの復元力特性

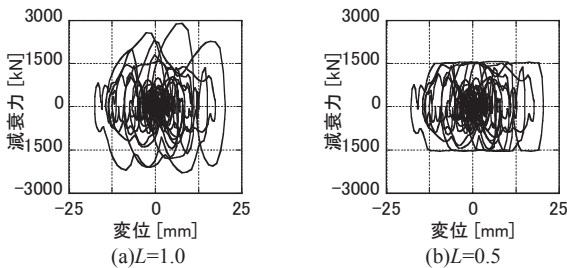


図 2 オイルダンパーの履歴ループ

衰力比の包絡値を $\hat{r}_{j\max}$ で表し、これを最適化問題における制約条件評価用の応答値とする。また、以降では「複数の地震動に対する最大応答の包絡値」を単に「最大応答」と呼ぶ。

非線形時刻歴応答解析は、応答スペクトル法などの時刻歴応答解析を用いない応答評価法や、線形時刻歴応答解析に比べて、高い計算負荷を要求される。したがって、解析対象構造物が立体モデルや骨組モデルとなると、多数回の応答評価が必要となるパラメトリック解析や設計感度解析では、現実的な計算時間以内では必要とされる精度での解を得られない可能性がある。そのような場合には、本論文で採用する等価せん断モデルや、静的縮約法に基づく自由度の縮約法を用いて、解析精度をできるだけ損なわないように解析自由度を縮約する方法^{例えば 16,17)}を導入すればよい。

2.2 リリーフ荷重が建物の地震時応答に与える影響の一般的傾向

最適設計問題に対する解法アルゴリズムを構築するに際しては、設計変数(本論文の場合はリリーフ荷重)が、制約条件を記述するための代表変数(本論文の場合は地震時最大層間変位)にどのような影響を与えるのか、その定性的な傾向を事前に把握しておくことが、より効率の高いアルゴリズムの構築に役立つ。

本論文では、下記のモデルに対する結果を示す。

モデル 1: 10 層, ダンパー全層配置 (付加減衰定数 5%)

モデル 2: 20 層, ダンパー全層配置 (付加減衰定数 5%)

両モデルの詳細な諸元は 4 節で示す。また、以下では、入力地震動として El Centro NS 1940 の地動最大速度を 0.5m/s となるように調整したものをを用いた場合の結果を示す。

リリーフ機構が地震時応答に与える一般的な傾向を示すため、図 3 に、両モデルについて、減衰力制限比 L が各層で一様であり、 $L=1.0, 0.5, 0.25$ とした場合の最大層間変位分布を示す。 $L=1.0$ は、線形ダンパーの場合に相当する。なお、線形ダンパーの場合の各層の最大減衰力は、10 層モデルで 1,497~3,117kN, 20 層モデルで 573~3,686kN であった。図 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があることがわかる。一般的に、リリーフ荷重を小さくするほど、地震時変位応答は増加する。また、全層で L が 1.0 を上回るようなリリーフ荷重を設定した場合には、 $L=1.0$ の場合と地震時変位応答は変わらない。したがって、全層で $L=1.0$ となるようなリリーフ荷重分布は、同じリリーフ荷重の総和を持つリリーフ荷重分布の中で、最大層間変位を最小化すると考えてよい。

本論文ではリリーフ荷重の最適化問題を取り扱うため、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ことが、効率的なアルゴリズムの構築にとって有用である。そこで、標準的な種々のモデルに対する数値例を用いて、この一般的影響を予め明らかにしておく。

図 4 から図 6 に、全層の減衰力制限比 L が 1.0 のケース及び、最適化が進んだ段階のリリーフ荷重分布を有するケース (L は 1.0 以下であり、層によって値が異なる) 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。これは、線形ダンパーの場合の最大減衰力の最小値 (573kN) の 10% 程度の値である。なお、 $\Delta\delta_{j\max}(i)$ 、 $\Delta D_{\max}(i)$ 、 $\Delta r_{j\max}(i)$ は、第 i 層のリリーフ荷重のみを変動させた場合の第 j 層最大層間変位の変化量、最大層間変位の最大値の変化量、第 j 層のリリーフ荷重に対する最大減衰力の比 (最大

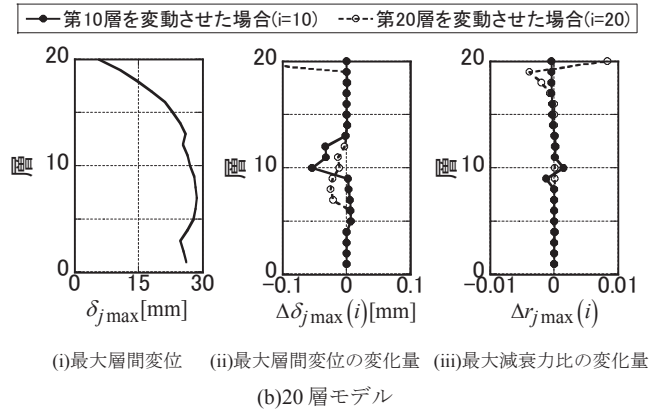
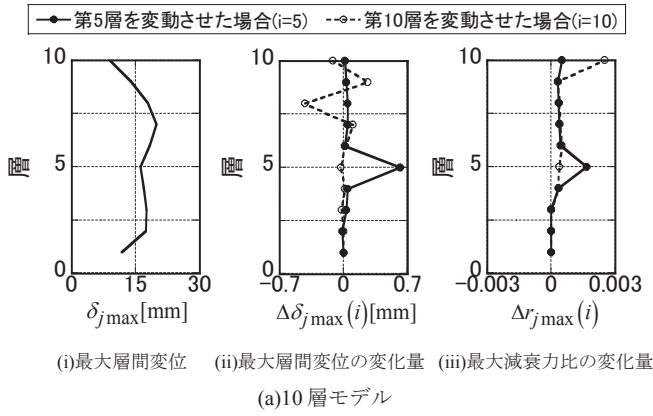


図4 最大層間変位分布とリリーフ荷重低減時の各種変化量 ($L=1.0$)

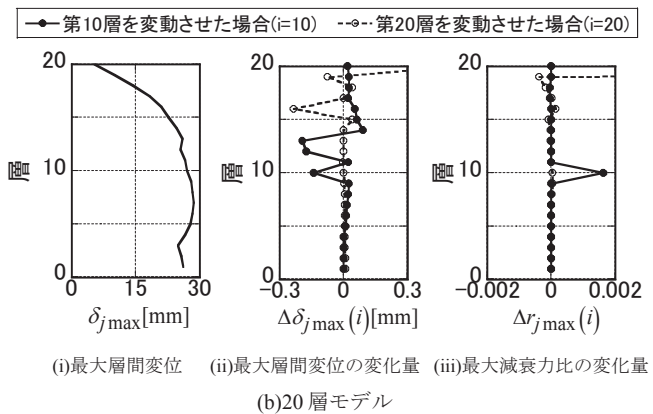
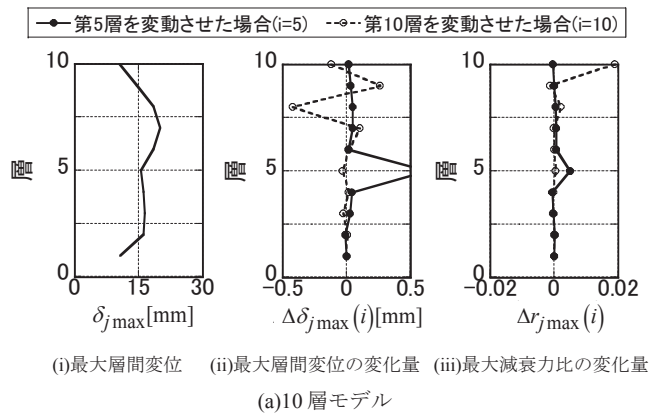


図5 最大層間変位分布とリリーフ荷重低減時の各種変化量

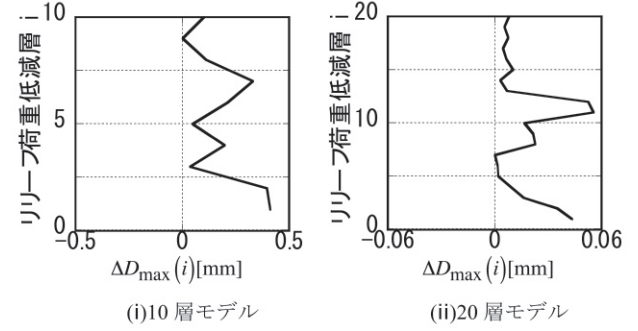
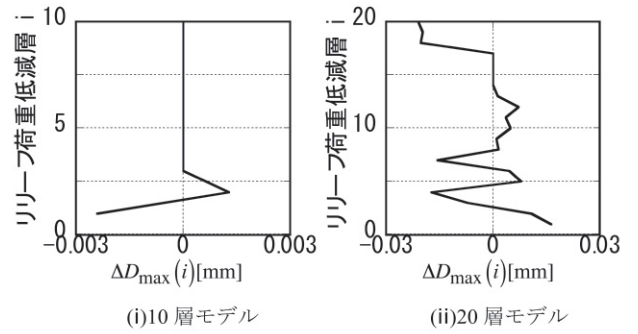


図6 最大層間変位の最大値の変化量

減衰力比)の変化量を表す。

図4~6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(リリーフ荷重の変化と $\Delta\delta_{j\max}(i)$ の相関が不規則)であり、経験的判断は困難である(図4および図5の(ii))。
- (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 ($\Delta r_{i\max}(i) > 0$)。一方、リリーフ荷重を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 ($\Delta r_{j\max}(i) \approx 0, j \neq i$) (図4および図5の(iii))。
- (3)最大層間変位の最大値 D_{\max} の変化 $\Delta D_{\max}(i)$ は、リリーフ荷重を低減する層 i により、有意に異なる(図6)。
- (4)各層の減衰力制限比 L が十分に大きい場合は、リリーフ荷重を低減することで最大層間変位の最大値 D_{\max} を減少させることが可能な場合もみられるが(図6(a))、減衰力制限比 L が小さくなると上記のような場合は少なくなる(図6(b))。

なお上記の傾向は、本論文で示した以外の数値例題でも観察された。

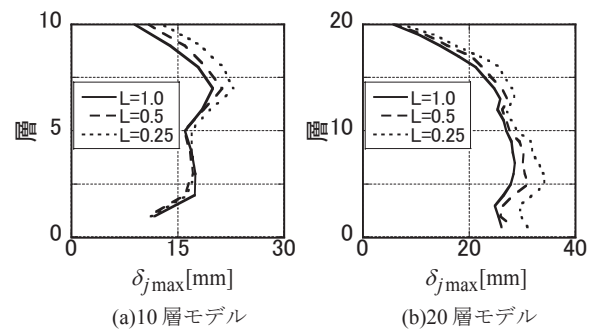


図3 最大層間変位分布 ($L=1.0, 0.5, 0.25$)

3. 最適リリーフ荷重・ダンパー配置設計問題

3.1 最適設計問題の定式化

本論文では、以下のように最適リリーフ荷重設計問題を定式化する。

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 $\{\gamma_j\}$ が予め与えられているとき, リリーフ荷重の総和に関する等式制約条件

$$\sum_{j=1}^N d_{Rj} = \bar{C}_d \quad (3)$$

および最大減衰力比に関する不等式制約条件

$$\hat{r}_{j\max}(\mathbf{d}_R) \leq \bar{\alpha} \text{ for all } j \quad (4)$$

を満足し, かつ, 目的関数

$$F(\mathbf{d}_R) = \hat{D}_{\max}(\mathbf{d}_R) \quad (5)$$

を最小化するように, 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.

前述したように, オイルダンパーのリリーフ荷重は, オイルダンパーの設置に関わるコストの代表量と考えられるので, 上記の問題 1 は, 「コストを指定して, 性能を最大化する」タイプの最適設計問題であると言える.

3.2 リリーフ荷重総和指定値の各レベルに対する最適設計解集合

問題 1 の解は, リリーフ荷重の総和, すなわちオイルダンパーの設置に関わるコストに対する指定値 \bar{C}_d の値ごとに存在する. したがって, 異なる \bar{C}_d の値の集合に対応して, 最適設計解の集合が形成されることになる. 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.

問題に含まれる変数以外に一つないしは複数のパラメタを有する最適化問題は「パラメトリック最適化問題」と呼ばれる¹⁸⁾. 問題 1 において, \bar{C}_d を単一の値ではなくパラメタとみなせば, 問題 1 はパラメトリック最適化問題であるといえる. パラメタ \bar{C}_d を連続変数と考えると, それに対応する最適設計解もまた連続集合となる. しかしながら実用上は, 離散的な \bar{C}_d の値ごとに最適設計解の離散集合を得ることができれば十分である. 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,

$$\bar{C}_d^{[k]} = \bar{C}_d^{[k-1]} + \Delta \bar{C}_d^{[k]}, \quad \Delta \bar{C}_d^{[k]} < 0 \quad (k=1, 2, \dots) \quad (6a,b)$$

$$\mathbf{d}_R^{[k]} = \mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R^{[k]} \quad (k=1, 2, \dots) \quad (7)$$

とする. (6), (7)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

$$\sum_{j=1}^N \Delta d_{Rj}^{[k]} = \Delta \bar{C}_d^{[k]} \quad (8)$$

および最大減衰力比に関する不等式制約条件

$$\hat{r}_{j\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R^{[k]}) \leq \bar{\alpha} \text{ for all } j \quad (9)$$

を満足し, かつ, 目的関数

$$F(\mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R^{[k]}) = \hat{D}_{\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R^{[k]}) \quad (10)$$

を最小化するように, 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, $k=1, 2, \dots$ について求めよ.

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」と呼ぶこととする.

3.3 実用的近似解法 1 (ダンパーの除去なし)

3.2 節で示した問題 2 を数理計画法における各種アルゴリズムにより厳密に解くことも考えられるが, 計算負荷低減の観点から, 本論文では, 問題 2 に対して以下の近似解法を適用する.

3.2 節で示した問題 2 において, リリーフ荷重の総和に対する指定値の変化量 $\Delta \bar{C}_d^{[k]}$ は $\bar{C}_d^{[k-1]}$ に比べて十分小さく, 解の変化量 $\Delta \mathbf{d}_R^{[k]}$ も $\mathbf{d}_R^{[k-1]}$ に比べて小さいとする. このとき, 以下の 3 つの仮定を導入する.

仮定 1 : 解 $\mathbf{d}_R^{[k-1]}$ と, その近傍の設計 $\mathbf{d}_R = \mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R$ において, ある i について

$$d_{Ri}^{[k-1]} - d_{Ri} > 0, \quad d_{Rj}^{[k-1]} - d_{Rj} = 0 \quad (j \neq i) \quad (11a,b)$$

であるとき,

$$\begin{aligned} r_{i\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) - r_{i\max}(\mathbf{d}_R) &< 0 \\ r_{j\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) - r_{j\max}(\mathbf{d}_R) &= 0 \quad (j \neq i) \end{aligned} \quad (12a,b)$$

が成り立つ. この仮定は, 「第 i 層のみのリリーフ荷重を減少させた場合, 最大減衰力比 $r_{j\max}$ は, 第 i 層でのみ増加し, 第 i 層以外では変化しない」ことを意味しており, 2.2 節で示した $r_{j\max}$ に関する観察結果に基づいている.

仮定 2 : $\Delta \bar{C}_d^{[k]}$ の正負と $\Delta d_{Rj}^{[k]}$ の符号は一致するか, $\Delta d_{Rj}^{[k]} = 0$ である. すなわち,

$$\Delta \bar{C}_d^{[k]} \Delta d_{Rj}^{[k]} \geq 0 \quad (13)$$

が成り立つ. この仮定は, 「コスト $\bar{C}_d^{[k]}$ を単調に減少させたとき, 解 $\mathbf{d}_R^{[k]}$ の各要素もまた単調に減少する (変化しないことも含む)」ことを意味している.

仮定 3 : 解 $\mathbf{d}_R^{[k-1]}$ の近傍の設計 \mathbf{d}_R において, (10)式で定義された目的関数 $F(\mathbf{d}_R)$ は, $\Delta \mathbf{d}_R$ に関して線形である. すなわち,

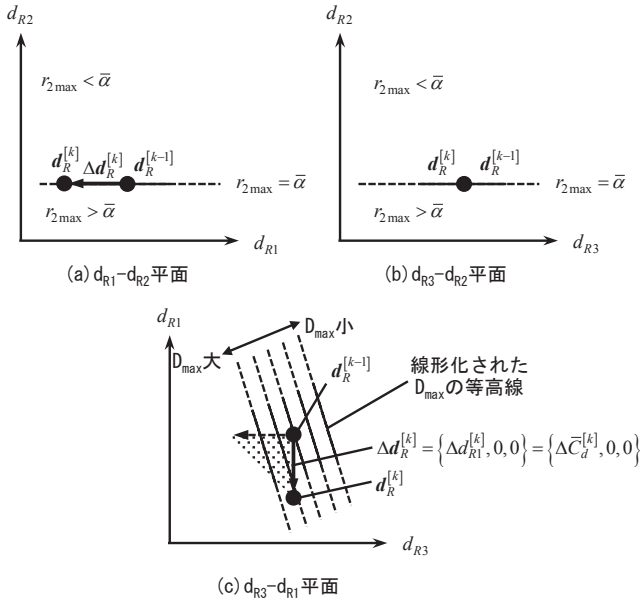


図7 条件1と条件2から選択される解 $\Delta d_R^{[k]}$ の模式図

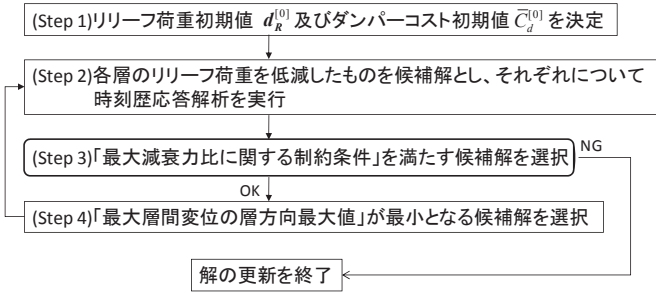


図8 問題2の近似解法アルゴリズム (ダンパー除去なし)

$$F(\mathbf{d}_R) = F(\mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R) = F(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) + \sum_{i=1}^N F_{,i}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) \Delta d_{Ri} \quad (14)$$

と表せる。ここで、 $F_{,i}(\mathbf{d}_R^{[k-1]})$ は第 i 層のリリーフ荷重のみを単位量減少させたときの、目的関数 $F(\mathbf{d}_R^{[k-1]})$ の変化量 (感度) であり、本論文では以下の有限差分により評価するものとする。

$$F_{,i}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) = \frac{\hat{D}_{\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]} + \Delta \mathbf{d}_R(i)) - \hat{D}_{\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]})}{\Delta d_{Ri}} \quad (15)$$

ここで $\Delta \mathbf{d}_R(i) = \{0, \dots, \Delta d_{Ri}, \dots, 0\}$ である。仮定2より、解 $\mathbf{d}_R^{[k]}$ の各要素は単調に減少する場合のみを考えるので、(15)式による感度計算時には $\Delta d_{Ri} < 0$ とする。

仮定1～3の下では、問題2における解の変化量 $\Delta \mathbf{d}_R^{[k]}$ は以下のように書ける。ただし $\Delta \bar{C}_d^{[k]}$ は負とする。

条件1: $\hat{r}_{\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) = \bar{\alpha}$ となる (制約条件が等式で満足される) i では $\Delta d_{Ri}^{[k]} = 0$

条件2: $\hat{r}_{\max}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) < \bar{\alpha}$ となる (制約条件が不等式で満足される) i において、

条件2-1: $F_{,i}(\mathbf{d}_R^{[k-1]})$ が最大となる i では $\Delta d_{Ri}^{[k]} = \Delta \bar{C}_d^{[k]}$

条件2-2: 条件2-1の i 以外の j では $\Delta d_{Rj}^{[k]} = 0$

条件2-1において「 $F_{,i}(\mathbf{d}_R^{[k-1]})$ が最大となる」とは、負の $\Delta d_{Ri} = \Delta \bar{C}_d$ に対しては「 $F_{,i}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) \Delta \bar{C}_d$ が最小となる」ことを意味している。仮定

2の下では、条件2-1を満たす i 以外の j では $\Delta d_{Rj} = 0$ となるため (条件2-2), 「 $F_{,i}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) \Delta \bar{C}_d$ が最小となる」ことは同時に「 $F(\mathbf{d}_R) = F(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) + \sum_{i=1}^N F_{,i}(\mathbf{d}_R^{[k-1]}) \Delta d_{Ri}$ が最小となる」ことを意味している。

条件1を満たすような i が存在する場合について、問題2の解の変化量 $\Delta \mathbf{d}_R^{[k]}$ が選択される様子の模式図を図7に示す。

上記の条件1と条件2を用いて、問題2の解を $\Delta \mathbf{d}_R^{[0]}$ から連続的に生成する手順は以下のように書ける。

[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{f}_{\max} を計算し、

$$\mathbf{d}_R^{[0]} = \hat{f}_{\max}, \quad \bar{C}_d^{[0]} = \sum_{j=1}^N \mathbf{d}_{Rj}^{[0]} \quad (16a, b)$$

とする。また、 $\bar{C}_d^{[0]}$ を適当に分割して (例えば等分割して) $\Delta \bar{C}_d^{[k]} (k=1, 2, \dots)$ 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。 N 層モデルで、全層にダンパーが設置されている場合は、 N 個の候補解が存在することになる。この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(9)のチェックと候補解の除外: 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(9)を満足しなくなるようなものについては、候補解から除外する。

[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 サイクルでの解とする。

[Step 5]すべての層について、制約条件(9)が満足されなくなれば、解の更新を終了する。

上記の解法手順 (アルゴリズム) を図8に示す。この手順は、仮定1から仮定3に基づき各サイクルの解を決定していること、および、制約条件(9)が満たされなくなった場合に、それを等式で満たされるように解を修正する手順を組み込んでいないという意味で、本論文では「実用的近似解法」と称している。

上記のアルゴリズムでは、Step 4において、第 $k-1$ サイクルの解の近傍にある候補解の中で、目的関数 (=地震時最大層間変位の最大値) を最も小さくするような候補解を次サイクルでの解として選択している。リリーフ荷重を減少させると、地震時最大層間変位の最大値は概ね増加するため、この手順は、「地震時最大層間変位の最大値の増加が最小となるように、どれか一つの層のリリーフ荷重を減少させる」手順となっている。

リリーフ荷重 $\mathbf{d}_R^{[0]}$ の初期値を(16a)式で与えると、全層で減衰力制限比 L の値は1.0となる。2.2節で述べたように、全層で $L=1.0$ となるリリーフ荷重分布は、同じリリーフ荷重の総和を持つリリーフ荷重分布の中で、最大層間変位を最小化すると考えてよい。また、このようなリリーフ荷重分布は、自動的に制約条件(4)を満足し、許容解となっている。したがって、(16a)式で与えられる $\mathbf{d}_R^{[0]}$ は、問題1において(16b)式で与えられる $\bar{C}_d^{[0]}$ を \bar{C}_d とした場合の最適解であるとみなせる。この意味で、上記のアルゴリズムは、最適解を初期解として、各パラメタの値に対応する最適解を連続的に生成している

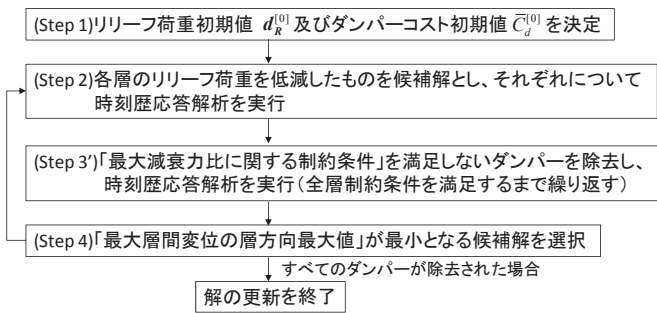


図9 問題2の近似解法アルゴリズム (ダンパー除去あり)

ことになっている。

3.4 実用的近似解法2 (ダンパーの除去あり)

3.3節で示したアルゴリズムを適用して数値例を実行したところ、リリーフ荷重の初期値 $d_R^{[0]}$ の1/3~1/4程度の値までリリーフ荷重が減少し、最終的にはダンパーが設置されたすべての層で制約条件式(9)が満足されなくなって、解の更新が終了した。その一例を設計例題(4.2節(1))で示す。3.3節で示したアルゴリズムは、「地震時最大層間変位の最大値の増加が最小となるように、どれか一つの層のリリーフ荷重を減少させる」手順となっているため、リリーフ荷重が他の層に先行して減少させられ、その結果として他の層に先行して制約条件(9)を満たさなくなった層のダンパーは、建物の地震時最大層間変位の最大値に対して、影響の小さいダンパーであると考えられることができる。

そこで、3.3節で示したアルゴリズムに、「他の層に先行して制約条件(9)を満たさなくなった層のダンパーは除去する(減衰係数をゼロとする)」という手順を追加し、すべての層で制約条件(9)が満たされなくなることによる「解の下げ止まり」を防いだ新しいアルゴリズムを提案する。

新しいアルゴリズムでは、3.3節で示したアルゴリズムのStep3を、以下のStep3'に変更する。

[Step 3']最大減衰力比に関する制約条件(9)のチェックと制約条件(9)を満たさないダンパーの除去: Step2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(9)を満足しなくなるようなものについては、制約条件(9)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、時刻歴応答解析を実行して、目的関数 $F(d_R(i))$ を計算する。この結果、別の層で制約条件(9)が満足されないようになった場合には、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。

上記の解法手順を図9に示す。このアルゴリズムを用いると、制約条件(9)を満たさなくなった層のダンパーが次々と取り外されてゆき、最終的にはすべてのダンパーが除去された時点で設計解の変更が終了する。この意味で、本節で示したアルゴリズムは、「最適リリーフ荷重・ダンパー配置設計」を得るための実用的近似解法となっていると言える。

4. 数値例題

4.1 共通事項

数値例題における共通事項を以下に記す。

- ・入力地震動は、超高層建築設計用入力地震動のレベル2に相当するように最大地動速度を0.5m/sに調整したEl Centro NS 1940および

Hachinohe NS 1968の2波を用いる。2.1節で述べた通り、複数地震動に対する最大応答の包絡値を用いる。

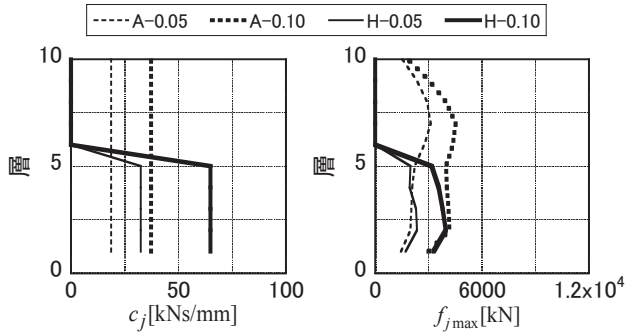
- ・層数 N は、10と20の2ケースを設定する。
- ・床面集中質量は、第1層から第10層は $m_j = 1.0 \times 10^6 \text{kg}$ 、20層モデルの第11層から第20層は $m_j = 0.8 \times 10^6 \text{kg}$ とする。
- ・層剛性分布は、実在する鉄骨造建物を参考にして設定する。なお、ダンパーを設置しない場合の1次固有周期は、10層モデルが1.39秒、20層モデルが2.57秒である。なお、ダンパーを設置することを想定して、層数に対して1次固有周期がやや長いモデルとした。
- ・ダンパーがないときの構造減衰定数 h_s は0.02とする。
- ・最適化の初期段階におけるオイルダンパーは、全層に配置した場合(Case-A)と、下半分の層に設置した場合(Case-H)の2ケースを設定する。
- ・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_{1j} 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_{1j} によって付加される1次減衰定数 $h_{Add}^{[0]}$ が0.05の場合と0.10の場合の2ケースを設定する。
- ・オイルダンパーの減衰係数比 $\gamma_j = c_{2j}/c_{1j}$ は、市販の建築制振用オイルダンパーを参考にして全層一様に0.05とする。
- ・最適化の初期段階における各層のリリーフ荷重 $d_{Rj}^{[0]}$ としては、リリーフ荷重を設定しない線形オイルダンパーとして応答解析を実施した場合のそれぞれの層における最大減衰力を用いる。
- ・減衰力制限比 $\hat{r}_{j\max} = \hat{f}_{j\max}/d_{Rj}$ の上限値 $\bar{\alpha}$ は、市販の建築制振用オイルダンパーでは $f_{CRj}/d_{Rj} = 1.25$ 程度に設定されていることを

表1 建物モデルの諸元 (10層モデル)

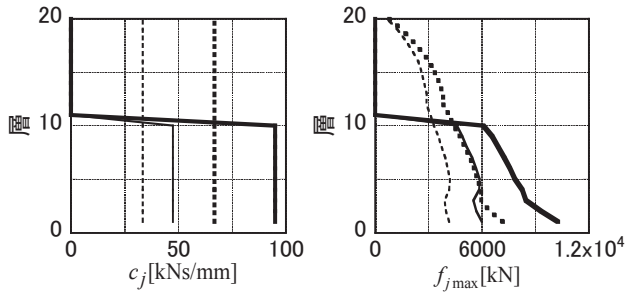
j	k_j [kN/mm]	c_{1j} [kNs/mm]				$d_{Rj}^{[0]}$ [kN]			
		0.05		0.10		0.05		0.10	
		A	H	A	H	A	H	A	H
1	1513	18.7	32.5	37.3	64.9	1447	1703	2988	3274
2	995	18.7	32.5	37.3	64.9	1981	2350	4168	3966
3	942	18.7	32.5	37.3	64.9	2028	2298	4124	3787
4	919	18.7	32.5	37.3	64.9	2081	1935	4021	3568
5	887	18.7	32.5	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	-

表2 建物モデルの諸元 (20層モデル)

j	k_j [kN/mm]	c_{1j} [kNs/mm]				$d_{Rj}^{[0]}$ [kN]			
		0.05		0.10		0.05		0.10	
		A	H	A	H	A	H	A	H
1	1000	33.4	47.5	66.8	95.0	4154	5991	7168	10268
2	1000	33.4	47.5	66.8	95.0	3971	5683	6433	9307
3	1000	33.4	47.5	66.8	95.0	3904	5519	5950	8464
4	900	33.4	47.5	66.8	95.0	4155	5840	5947	8263
5	850	33.4	47.5	66.8	95.0	4196	5865	5741	7847
6	830	33.4	47.5	66.8	95.0	4077	5670	5546	7573
7	810	33.4	47.5	66.8	95.0	3938	5448	5329	7254
8	800	33.4	47.5	66.8	95.0	3732	5144	5027	6909
9	780	33.4	47.5	66.8	95.0	3550	4892	4761	6570
10	770	33.4	47.5	66.8	95.0	3299	4588	4411	6073
11	740	33.4	0	66.8	0	3108	-	4137	-
12	730	33.4	0	66.8	0	2878	-	3821	-
13	660	33.4	0	66.8	0	2891	-	3810	-
14	630	33.4	0	66.8	0	2757	-	3607	-
15	600	33.4	0	66.8	0	2608	-	3342	-
16	560	33.4	0	66.8	0	2426	-	3042	-
17	540	33.4	0	66.8	0	2090	-	2585	-
18	510	33.4	0	66.8	0	1704	-	2072	-
19	470	33.4	0	66.8	0	1254	-	1492	-
20	440	33.4	0	66.8	0	675	-	788	-



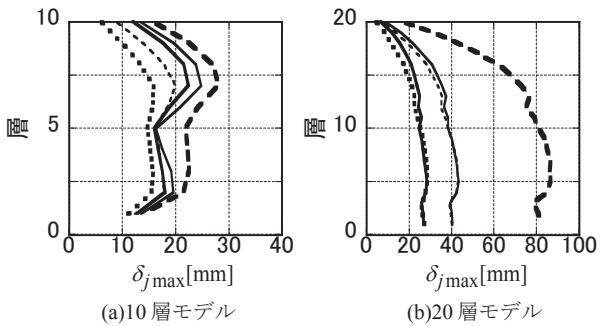
(i)減衰係数 (ii)最大減衰力(線形ダンパー)
 (a)10層モデル (A: 全層配置, H: 下層配置)



(i)減衰係数 (ii)最大減衰力(線形ダンパー)
 (b)20層モデル (A: 全層配置, H: 下層配置)

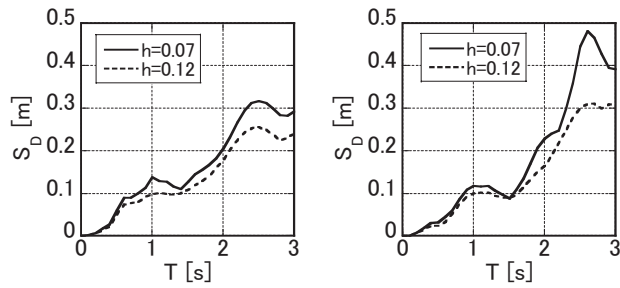
図10 オイルダンパーの減衰係数および最大減衰力分布

---ダンパー無し - - - - A-0.05 - - - - A-0.10 — H-0.05 — H-0.10



(a)10層モデル (b)20層モデル

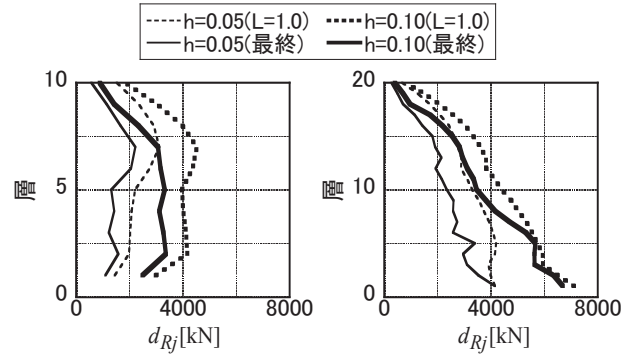
図11 ダンパーがない場合およびリリーフ荷重を設定しない場合の最大層間変位分布



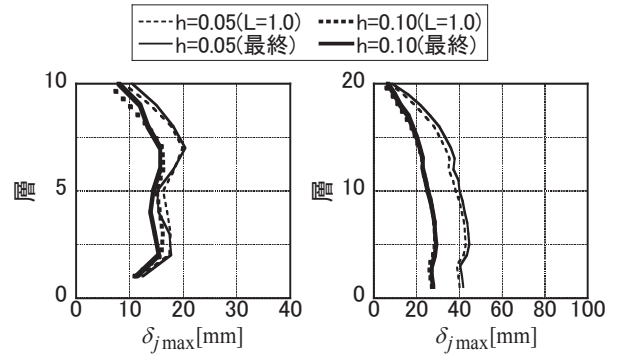
(a)El Centro NS(Lv2) (b)Hachinohe NS(Lv2)

図12 入力波変位応答スペクトル

- 考慮し、 $\hat{f}_{j,max}$ が余裕を持って f_{CRj} を下回るように $\bar{\alpha}=1.1$ とする。
- モデルの名称は、Case-N-X- $h_{Add}^{(l)}$ とする (Xは A: ダンパー全層配置または H: ダンパー下半分配置)。
 - 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、種々の数値的検討の結果に基づき、最適化の初期段階におけるリリーフ荷重の最小値の $1/120 \sim 1/10$ とする。



(a)Case-10-A-h (b)Case-20-A-h
 図13 初期および最終サイクルにおけるリリーフ荷重分布



(a)Case-10-A-h (b)Case-20-A-h
 図14 初期および最終サイクルにおける最大層間変位分布

・設計変数であるリリーフ荷重は連続変数として取り扱い、かつ、変数のグルーピング(複数層のリリーフ荷重を、同一の変数を用いて表すこと)は行わない。

表1および表2に、10層モデルおよび20層モデルの諸元(上記に数値が明記されていないもの)を示す。図10に、各モデルの減衰係数分布及び線形ダンパーの場合の最大減衰力分布を示す。この最大減衰力分布が、リリーフ荷重分布の初期解となる。図11には、10層モデルおよび20層モデルのそれぞれについて、ダンパーを設置しない場合の最大層間変位分布および線形ダンパーの場合の最大層間変位分布を示す。図12には、各入力地震動の変位応答スペクトルを減衰定数が7%及び12%の場合について示す。

図11は、オイルダンパーを設置することで地震時応答を十分に低減できることを示している。また、20層モデルの最大層間変位が非常に大きな値をとっているが、これは20層モデルの1次固有周期が入力地震動の応答スペクトルの山にあたるためであり、本論文では骨組に高強度鋼を用いているため弾性域に留まると考えている¹⁹⁾。

4.2 最適リリーフ荷重・ダンパー配置にみられる一般的な傾向

(1) 3.3節のアルゴリズム(ダンパー除去なし)を用いた場合

図13、14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最初(L=1.0)と最終サイクルにおけるリリーフ荷重分布及び最大層間変位分布を示す。なお、最終サイクルとは、最大減衰力に関する制約条件をすべての層で満足しなくなり、リリーフ荷重の変更が終了するサイクルのことである。

図13、14より、各モデルとも、最終サイクルにおいて、線形ダンパーとした場合の最大減衰力に比べて無視できない割合(10層モデルで38~84%、20層モデルで40~100%)のリリーフ荷重が残存して

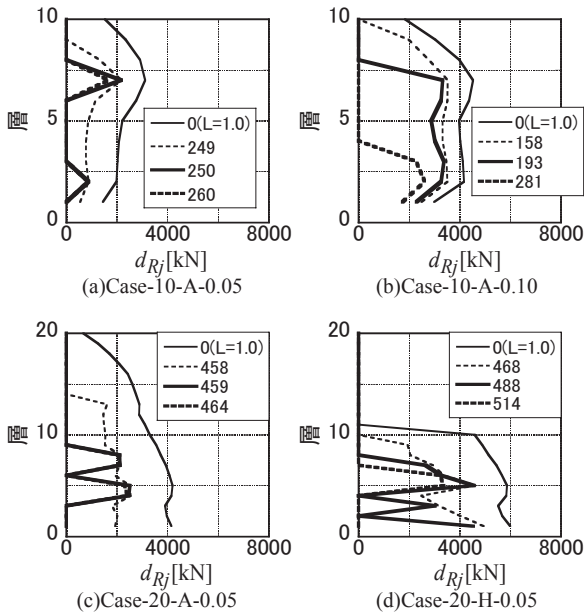


図 15 リリース荷重分布の変化 (凡例の数字はサイクル数を表す)

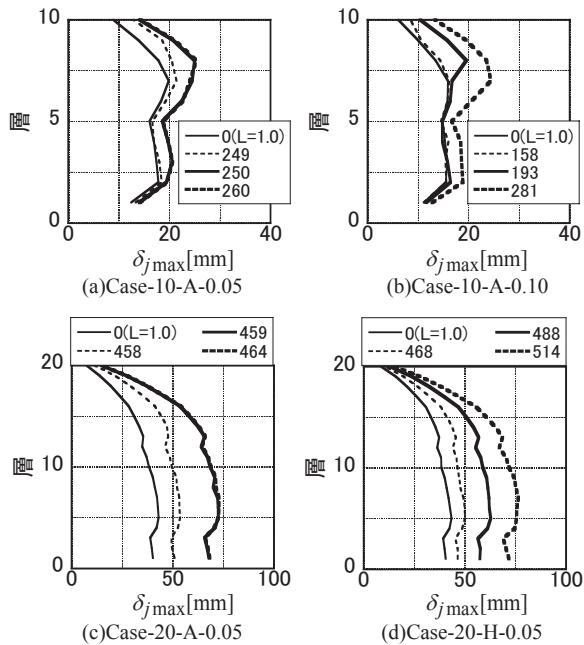


図 16 最大層間変位分布の変化 (凡例の数字はサイクル数を表す)

いることがわかる。これは、建物により大きな層間変位が許容できる場合であっても、3.3 節で示したアルゴリズムでは、十分にリリース荷重総和を低減できないことを示している。

(2) 3.4 節のアルゴリズム (ダンパー除去あり) を用いた場合

図 15, 16 に、各モデルに 3.4 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。

- ・いずれのモデルにおいても、最大層間変位の小さい層のダンパーで重点的にリリース荷重が低減される傾向がある。これは、「層間変位が大きい層にオイルダンパーを配することで効率的に減衰能力を付加できる」という、経験上得られている知見とも一致する。
- ・本アルゴリズムを用いてリリース荷重を低減していくと、層間変位応答は全層ほぼ一様に増加する傾向がある。つまり、オイルダ

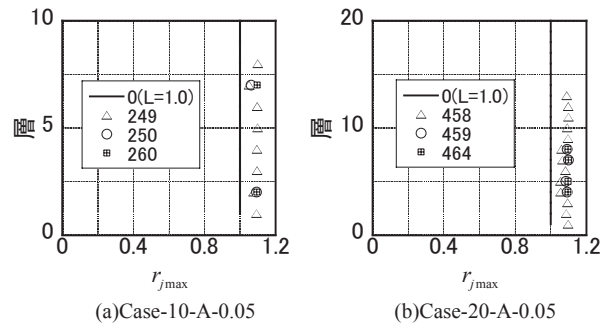


図 17 最大減衰力比分布の変化 (凡例の数字はサイクル数を表す)

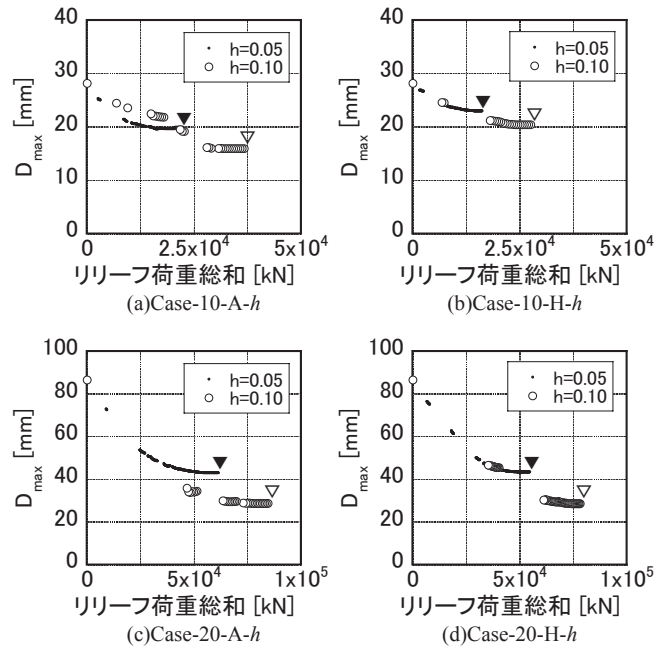


図 18 リリース荷重総和と最大層間変位の層方向最大値

ンパーのリリース荷重を局部的に変化させても、層間変位応答は大域的に変化する傾向がある。

なお、最終サイクルに近い解 (例えば図 15(a) の第 260 サイクルのリリース荷重分布) では、残存しているダンパーが連続しない複数層に存在する傾向が強くなり、やや現実性を欠く。連続する複数層でのリリース荷重のグルーピングを行うことにより、このような現象は回避可能である。

図 17 に、Case-10-A-0.05 と Case-20-A-0.05 のモデルにおける図 15 に対応するサイクル時の最大減衰力比の分布を示す。ここに示す段階では、存在するダンパーの最大減衰力比はすべて 1.1 よりわずかに小さなレベルにとどまっており、制約条件を満たしていることがわかる。

図 18 に、各モデルに 3.4 節に示した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最大値の関係を示す。なお図中の▼と▽はそれぞれ、 $h_{Add}^{(i)} = 0.05$ の場合と $h_{Add}^{(i)} = 0.10$ の場合の初期解のリリース荷重総和 (=線形ダンパーの場合の最大減衰力の総和) と \hat{D}_{max} の関係を示している。図より、以下のことが観測される。

- ・本アルゴリズムにより、最大減衰力比に関する制約条件を全てのサイクルで満足しながら、最終的には全てのダンパーが除去された解まで見出すことが可能である。

- ・いずれのモデルにおいても、最大層間変位の最大値 \hat{D}_{max} をほとんど増加させることなく、リリーフ荷重総和（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が $L=1.0$ 場合（▼で示した箇所）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 $h_{Add}^{(0)}$ を大きくするほど、ダンパーが線形の場合（▼で示した箇所）の \hat{D}_{max} は小さくなるが、リリーフ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（例えば図 18(a)のリリーフ荷重総和が 2.0×10^4 [kN]以下の領域）。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、リリーフ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（例えば図 18(c)に示された Case-20-A-0.10 のリリーフ荷重総和が 4.0×10^4 [kN]以下の領域）。

5. 結論

本論文では、多層建物の層間にリリーフ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、そのリリーフ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フ荷重に対する比（最大減衰力比）が制限値を超えないことと、リリーフ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最大値を目的関数として、各ダンパーのリリーフ荷重を設計変数とする最適設計問題を定式化し、その実用的近似解法を提案した。提案した解法は以下のような特徴を有する。

- 設計変数に関する応答量の感度解析には、非線形時刻歴応答解析結果に基づく有限差分法を用いるため、原理的にはどのような構造物モデルに対しても適用できる。
- ダンパーコスト代表量としてのリリーフ荷重総和の値毎の最適解を、リリーフ荷重の総和を減らしながら連続的に見出す方法である。
- リリーフ荷重分布の初期値を、全層で減衰力制限比 L （＝リリーフ荷重／リリーフ機構がない場合の最大応答減衰力）が 1.0 となるようなリリーフ荷重分布とすることにより、初期解としての許容解の探索が不要である。
- リリーフ荷重が建物の地震時応答に与える影響の一般的傾向を利用した単純なルールのみを用いたアルゴリズムであるため、リリーフ機構付きオイルダンパーを有する建物の時刻歴応答解析が可能なアプリケーションさえあれば、提案する最適設計法の実装は極めて容易である。

提案した最適設計法を用いて数値例題を実行した。最適なりリーフ荷重分布（ダンパーの有無も含む）には、以下のような特徴があることが観察された。

- 層間変位の大きい層に、大きいリリーフ荷重を有するダンパーが配置される傾向がある。
- 減衰係数を大きくすると減衰力制限比 L がより大きい段階でダンパーが除去される。これは、 L が小さいダンパーは最大減衰力に関する制約条件を侵しやすい傾向があるためである。そのため、減衰係数を大きくしすぎると、十分小さいリリーフ荷重を有するダンパー配置ができない。

- 最大層間変位の最大値をほとんど増加させることなく、リリーフ荷重総和を減衰力制限比 L が全層 1.0 の場合の半分程度まで低減することが可能である。

本論文で提案する方法は、平面骨組モデルや立体骨組モデルに対しても容易に拡張できる。解析自由度がせん断型構造物モデルに比べて格段に大きな骨組モデルに対しては、自由度の縮約法^{16,17)}の導入が有効である。骨組モデルに対する適用例は、稿を改めて示す予定である。

参考文献

- 石丸辰治: エネルギースペクトルによる性能設計 - 粘性&履歴ダンパーを有する系の応答特性 -, シンポジウム「耐震設計の一つの新しい方向」, pp.155-170, 1995.10.
- 石丸辰治: 応答性能に基づく「対震設計」入門, 彰国社, 2004.
- 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.
- 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.
- 笠井和彦, 湊生, 桜井馨: 粘弾性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.610, pp.75-83, 2006.12.
- 笠井和彦, 小椋崇之, 鈴木陽: 非線形粘性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.618, pp.97-104, 2007.8.
- 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.
- R. H. Zhang and T. T. Soong : Seismic Design of Viscoelastic Dampers for Structural Applications, *J. Struct. Engng.*, **118**, pp.1375-1392, 1992.
- M. Tsuji and T. Nakamura : Optimum Viscous Dampers for Stiffness Design of Shear Buildings, *J. Structural Design of Tall Buildings*, **5**, pp.217-234, 1996.
- I. Takewaki : Optimal Damper Placement for Minimum Transfer Functions, *Earthq. Engrg. Struct. Dyn.*, **26**, pp.1113-1124, 1997.
- 竹脇出: 地盤との連成を考慮した曲げ-せん断型構造物モデルの地震時有効ダンパー配置法, 日本建築学会構造系論文集, No.530, pp.77-84, 2000.4.
- M. P. Singh and L. M. Moreschi : Optimal Placement of Dampers for Passive Response Control, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **31**(4), pp.955-976, 2002.4.
- 水野孝之, 小堀鐸二, 高橋元一, 丹羽直幹, 倉田成人: 可変剛性・減衰機構を用いた構造性能可変型制震システムの研究(その1) 基本特性と制御方法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造1, pp.1121-1122, 1991.9.
- N. Niwa, T. Kobori, M. Takahashi, T. Hatada, H. Kurino and J. Tagami : Passive Seismic Response Controlled High-Rise Building with High Damping Device, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **24**, pp.655-671, 1995.
- 辻聖晃, 中村恒善: Maxwell型の粘性ダンパーを有するせん断型構造物の地震時指定層間変位に対する剛性設計解列, 日本建築学会構造系論文集, 491, pp.55-64, 1997.1.
- 辻聖晃, 田中英稔, 吉富信太, 竹脇出: 地震動を受ける粘性ダンパー付建物の層方向自由度に関する縮約法, 日本建築学会構造系論文集, No.665, pp.1281-1290, 2011.7.
- 足立冬樹, 吉富信太, 辻聖晃, 竹脇出: セットバック建物の弾性地震応答解析のための層方向縮約モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.669, pp.1925-1933, 2011.11.
- T. Gal : *Postoptimal Analysis, Parametric Programming, and Related Topics*, Mc-Graw Hill, 1979.
- 中井政義, 中村豊, 前田祥三, 田中勉, 浅井英克, 鈴木庸介: 高強度鋼を用いた巨大地震に対する主架構無損傷設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.666, pp.1443-1451, 2011.8.

(2011年12月7日原稿受理, 2012年5月1日採用決定)