

地震動を受けるオイルダンパー付建物の層方向自由度に関する縮約法

— (その2) ダンパーリリーフ機構を考慮した場合 —

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 縮約モデル 縮約地震時慣性力 消費エネルギー 地震応答

1. 序

復元力が速度に関して非線形となるダンパーを組み込んだ建物については、等価線形化法を導入して応答スペクトル法を適用することで、解析自由度を縮約しつつある程度の精度で最大応答を予測することは可能であるが、常に良好な精度が期待できるわけではない。

本論文の目的は、非線形のオイルダンパーを有する建物が地震動を受ける場合について、建物を層方向に縮約し、簡易かつ高精度な時刻歴応答解析が可能な方法を提案することにある。

2. オイルダンパー付建物の層方向縮約モデル

2.1 リリーフ機構付オイルダンパーのモデル化

本論文では、リリーフ機構付きオイルダンパーを、図1に示すバイリニア型の速度—抵抗力特性を有する粘性要素にモデル化する。また、オイルダンパーの支持部材は剛と仮定する。第 j 層に設置するオイルダンパーの減衰係数を c_j 、リリーフ荷重を d_{Rj} とし、リリーフ後の減衰係数を γc_j で表す。なお、リリーフ荷重到達後の勾配比 γ は全層で一様とする。

2.2 主体構造の縮約

さらには、逆問題型定式化に基づき、非線形の粘弾性ダンパーを有する多自由度モデルを少自由度モデルに縮約する方法を提案している^[1]。本論文でもその縮約方法を用いる。縮約前のモデルを原モデル、縮約後のモデルを縮約モデルと表記する。ここでは縮約過程の明快な提示のため、図2のような第 j 層の質量 m_j 及び、層剛性 k_j が指定された4自由度モデルを2自由度モデルに縮約する場合を示す。 $(\bar{\quad})$ は縮約モデルに関する量を表す。

縮約モデルの各層質量は、 $\bar{m}_1 = m_1 + m_2$ 、 $\bar{m}_2 = m_3 + m_4$ とし、既知量として扱う^[1]。縮約モデルの剛性は、原モデルとの等価性条件を逆問題的に解くことにより決定する。本例の場合、縮約モ

デルの層剛性 \bar{k}_1, \bar{k}_2 を、以下の等価性条件に基づき決定する。

$$\omega^{(1)} = \bar{\omega}^{(1)}, (u_2^{(1)}/u_4^{(1)}) = (\bar{u}_1^{(1)}/\bar{u}_2^{(1)}) \quad (1a, b)$$

縮約モデルの層剛性 \bar{k}_1, \bar{k}_2 は次のようになる^[2]。

$$\bar{k}_i = \bar{\omega}^{(1)2} \frac{\sum_{k=i}^2 \bar{m}_k u_k^{(1)}}{\bar{u}_i^{(1)} - \bar{u}_{i-1}^{(1)}} \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

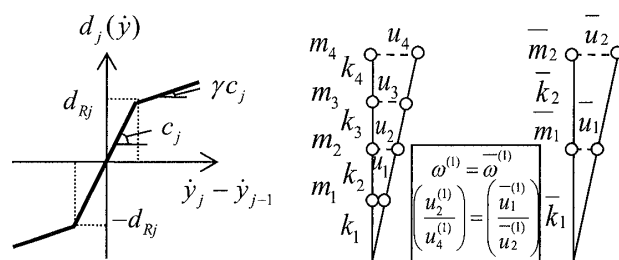


図1 ダンパー復元力特性 図2 原モデル(左)と縮約モデル(右)

2.3 主体構造に設置されるオイルダンパーの縮約

2.3.1 オイルダンパーの減衰係数の決定

著者らは、「1次消費エネルギーモードの等価性」と「1次減衰定数の等価性」から縮約モデルの減衰係数を決定する方法を提案している^[2]。本論文でもその方法を用いて、縮約モデルの減衰係数を決定する。

$$S_j = \alpha^2 \pi c_j \omega^{(1)} (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)})^2$$

$$\bar{S}_j = \bar{\alpha}^2 \pi \bar{c}_j \bar{\omega}^{(1)} (\bar{u}_j^{(1)} - \bar{u}_{j-1}^{(1)})^2 \quad (3a, b)$$

ここで α と $\bar{\alpha}$ は未知量である。 $\{S_j\}$ および $\{\bar{S}_j\}$ のことを「1次消費エネルギーモード」と定義する。さらに、次のような関係を1次消費エネルギーモードの等価性と呼ぶことにする。

$$\bar{S}_1 = (S_1 + S_2), \bar{S}_2 = (S_3 + S_4) \quad (4a, b)$$

式(3a,b), (4a,b)より、縮約モデルの減衰係数 \bar{c}_1, \bar{c}_2 は次のように求められる。

$$\bar{c}_i = \left(\frac{\alpha}{\bar{\alpha}} \right)^2 \frac{\sum_{j=1}^2 c_{2(i-1)+j} (u_{2(i-1)+j}^{(1)} - u_{2(i-1)+j-1}^{(1)})^2}{(\bar{u}_i^{(1)} - \bar{u}_{i-1}^{(1)})^2}$$

$$(\bar{u}_0^{(1)} = 0) \quad (i=1, 2) \quad (5)$$

Reduced load and structural models of buildings with oil dampers including relief mechanism under earthquake loading

TANAKA Hidetoshi, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki, and TAKEWAKI Izuru

さらに、原モデルを非連成近似のもとで評価した1次減衰定数 $h^{(1)}$ と縮約モデルを非連成近似のもとで評価した1次減衰定数が等しくなることを等価性条件とすることにより、式(5)中の未定係数 $\alpha/\bar{\alpha}$ を決定する。

$$h^{(1)} = \bar{h}^{(1)} \quad (6)$$

$$h^{(1)} = \mathbf{u}^{(1)r} \mathbf{C} \mathbf{u}^{(1)} / (2\omega^{(1)} \mathbf{u}^{(1)r} \mathbf{M} \mathbf{u}^{(1)}) \quad (7)$$

\mathbf{C} は減衰行列、 \mathbf{M} は質量行列である。

2.3.2 オイルダンパーのリリーフ荷重の決定

原モデルとその縮約モデルがともに1次振動成分のみで振動し、すべてのオイルダンパーの最大減衰力がちょうどリリーフ荷重に達していると仮定する。このとき、両モデルで次式が成立する。

$$\frac{d_{Rj}}{\bar{d}_{Rj}} = \frac{\alpha c_j (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)}) \omega^{(1)}}{\bar{\alpha} c_j (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)}) \omega^{(1)}} \quad (8a,b)$$

\bar{d}_{Rj} は縮約モデル第 j 層に設置されるオイルダンパーのリリーフ荷重を表す。このときのオイルダンパーが描く履歴ループの面積は、両モデルでそれぞれ次式であらわされる。

$$\frac{S_j}{\bar{S}_j} = \frac{\alpha d_{Rj} \pi (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)})}{\bar{\alpha} \bar{d}_{Rj} \pi (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)})} \quad (9a,b)$$

1次消費エネルギーモードの等価性条件式(4a,b)に(9a,b)を代入すれば、原モデル及び縮約モデルの既知量を用いて \bar{d}_{Rj} を以下のように表すことができる。

$$\frac{\bar{d}_{Ri}}{\alpha} = \frac{\sum_{j=1}^2 d_{R2(i-1)+j} (u_{2(i-1)+j}^{(1)} - u_{2(i-1)+j-1}^{(1)})}{\bar{\alpha} (u_i^{(1)} - u_{i-1}^{(1)})} \quad (10)$$

$(u_0^{(1)} = 0) \quad (i=1,2)$

なお、原モデルにおいてオイルダンパーが存在しない層($c_j = 0$)については、オイルダンパーのリリーフ荷重もゼロとする。

2.4 最大層間変位分布の推定

原モデルの縮約代表層間の相対変位に相当する縮約モデルでの層間変位分布から、原モデルの層間変位分布を推定する方法を以下に示す。

縮約モデルの第 j 層の最大層間変位を $\bar{\delta}_{j\max}$ とする。縮約モデルの第 j 質点位置が原モデルの第 i_j 質点位置に、第 $j-1$ 質点位置が原モデルの第 i_{j-1} 質点位置に対応しているとする。ダンパー無し原モデルの第 i_j 質点から第 i_{j-1} 質点間の層間変位分布と、ダンパー有り原モデルの第 i_j 質点から第 i_{j-1} 質点間の層間変位分布が相似であると仮定し、以下の式から原モデルの第 i 層の最大層間変位 $\delta_{i\max}$ を推定

することとする。

$$\delta_{i\max} = \frac{\delta_{i\max}^o}{\sum_{l=i_{j-1}}^{i_j} \delta_{l\max}^o} \bar{\delta}_{j\max} \quad (11)$$

$\delta_{i\max}^o$ は、ダンパー無し原モデルの第 i 層の最大層間変位を表す。

3. 変位の等価性に基づく地震時慣性力の縮約法

さらには、縮約モデルの自由度に合わせて地震時慣性力も縮約する方法を提案している^[1]。本論文でもその縮約方法を用いる。なお、縮約された地震時慣性力を縮約地震時慣性力と表記する。

構造物に地震動 $\ddot{u}_g(t)$ が入力されたときの原モデルの運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \quad (12)$$

$\mathbf{y}(t)$ は水平変位ベクトルである。また、 \mathbf{r} は成分がすべて1のベクトルである。

原モデルの第 j 層に時間 t における地震時慣性力 $-m_j\ddot{u}_g(t)$ を静的に作用させた時の原モデルの各層の水平変位ベクトルを \mathbf{y}^* とする。このとき、縮約モデルの第 i 層に作用する縮約地震時慣性力を $\bar{f}_i(t)$ とし、縮約モデルの第 i 層に $\bar{f}_i(t)$ を静的に作用させた時の縮約モデルの各層の水平変位ベクトルを $\bar{\mathbf{y}}^*$ とする。両モデルにおいての力の釣り合い式は次式で表わされる。

$$-\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) = \mathbf{K}\mathbf{y}^*, \bar{\mathbf{f}}(t) = \bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{y}}^* \quad (13a,b)$$

$\bar{\mathbf{K}}$ は縮約モデルの剛性行列である。本論文では構造物は弾性範囲にあるとしているので、 $\mathbf{K}, \bar{\mathbf{K}}$ は一定である。

原モデルの縮約代表位置における水平変位と、それに対応する縮約モデルの水平変位が等しいという条件より縮約地震時慣性力を導く。 N 自由度の原モデルの縮約地震時慣性力を \bar{N} 自由度の縮約地震時慣性力に縮約する場合を考え、原モデルの第 j 層変位と縮約モデルの第 i 層変位が対応すると考える。このとき $T_{ij} = 1$ とし、対応する自由度がない場合には $T_{ij} = 0$ とする。 T_{ij} を第 i 行 j 列成分とする行列 \mathbf{T} を縮約変換行列^[1]と表記する。 \mathbf{T} を用いると、変位等価性条件は次のように表される。

$$\bar{\mathbf{y}}^* = \mathbf{T}\mathbf{y}^* \quad (14)$$

式(13a,b)と式(14)より、縮約地震時慣性力 $\bar{\mathbf{f}}$ は次式で表される。

$$\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{y}^* = -\bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \quad (15)$$

4. 数値例題

4.1 建物モデルと入力地震動

実在する建物を参考に決定した層剛性分布を有する20層せん断質点モデルを原モデルとする。床質量は1層～10層は各層 $1,000 \times 10^3 \text{kg}$ 、11層～20層は各層 $800 \times 10^3 \text{kg}$ とする。1次固有周期は2.61sである。なお、ダンパーがない場合の構造減衰は、1次減衰定数が2%となる剛性比例型減衰とした。

縮約モデルは、1層モデル、2層モデル、4層モデルの3種類を設定した。1層縮約モデルでは原モデルの第20層を、2層縮約モデルでは原モデルの第10層と第20層を、4層縮約モデルでは原モデルの第5層、第10層、第15層、第20層を、それぞれ縮約代表層とした。

縮約の精度は、複数の記録地震波に対する時刻歴応答解析で検証した。本論文では、El Centro 1940 NS波の原波（地動最大加速度 341.7cm/s^2 、継続時間53.74s）に対する結果を示す。

4.2 リリーフ機構なしのダンパーを配置したモデル

本節では、4.1節で示した建物モデルに対して、ダンパーにより付加される1次減衰定数が5%となるように、全層一様の減衰係数分布を与える。

図3に両モデルの最上層変位と最上層加速度を示す。最上層変位について両モデルは良好に一致している。ピーク値に注目すると、1自由度モデルよりも2自由度モデルの方が精度良く原モデルを表現可能である。変位応答ほど精度が高くないものの、加速度応答においても両モデルは良好に一致している。

なお、1次固有ベクトルが逆三角形状となるように層剛性分布を決定した建物モデルについても、本論文で提案する縮約方法は、本節で示した数値例と同等の精度を有していることを確認した。

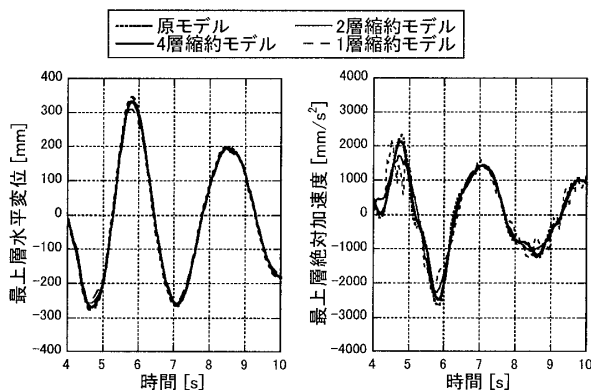


図3 時刻歴応答波形

(一様ダンパー配置, リリーフ機構なし)

4.3 リリーフ機構付のダンパーを配置したモデル

本節では、4.1節で示した建物モデルに対し、次の3種類の減衰係数分布を与える。

Damper-U：ダンパー減衰係数は全層で同一

Damper-LW：第1層～第10層に同一減衰係数のダンパーを設置し、第11～20層にはダンパーを設置しない

Damper-UP：第11層～第20層に同一減衰係数のダンパーを設置し、第1～10層にはダンパーを設置しない

各ケースとも、原モデルにダンパーを配置したときの非連成近似により評価した1次減衰定数が7%（ダンパーにより付加される1次減衰定数が5%）となるようにダンパー減衰係数を設定した。

オイルダンパーのリリーフ荷重 d_{Ri} は、全層で同じ値とした。本節では、丹羽の研究^[3]にならい、リリーフ荷重の大きさを「減衰力制限比 L =リリーフ荷重/リリーフ機構を設けないオイルダンパーに発生する最大減衰力」で表現することとし、オイルダンパーの最下層の減衰力制限比 L が0.50, 0.25, 0.125の3つのケースを設定した。また、リリーフ荷重到達後の γ はすべてのケースで0.05とした。

図4に減衰力制限比 $L=0.125$ の場合について、原モデルおよび縮約モデルの最上層水平変位と最上層絶対加速度の時刻歴応答波形を示す。最上層水平変位については、減衰力を極端に制限した場合についても縮約モデルは原モデルの応答を良好な精度で表現できている。最上層絶対加速度については、減衰力制限比 L を小さくすることで縮約の精度は低下するものの、4層縮約モデルについては、良好な精度で原モデルの応答を表現できているといえる。

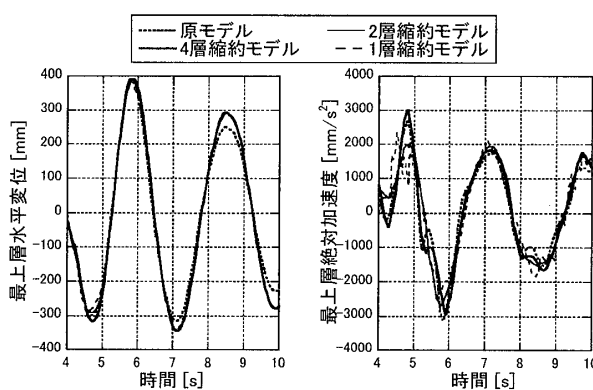


図4 時刻歴応答波形

(一様ダンパー配置, 減衰力制限比 $L=0.125$)

図5に両モデルの層方向の最大層間変位の分布を示す。前節までに示したリリーフ機構なしの場合と同様、1層縮約モデルおよび2層縮約モデルから推定した最大層間変位分布は、原モデルの最大層間変位分布を明らかに過小評価している。一方、4層縮約モデルでは、 $L=0.125$ の場合でも、減衰力を大幅に制限したことによる応答低減効果を、良好な精度で表現できている。

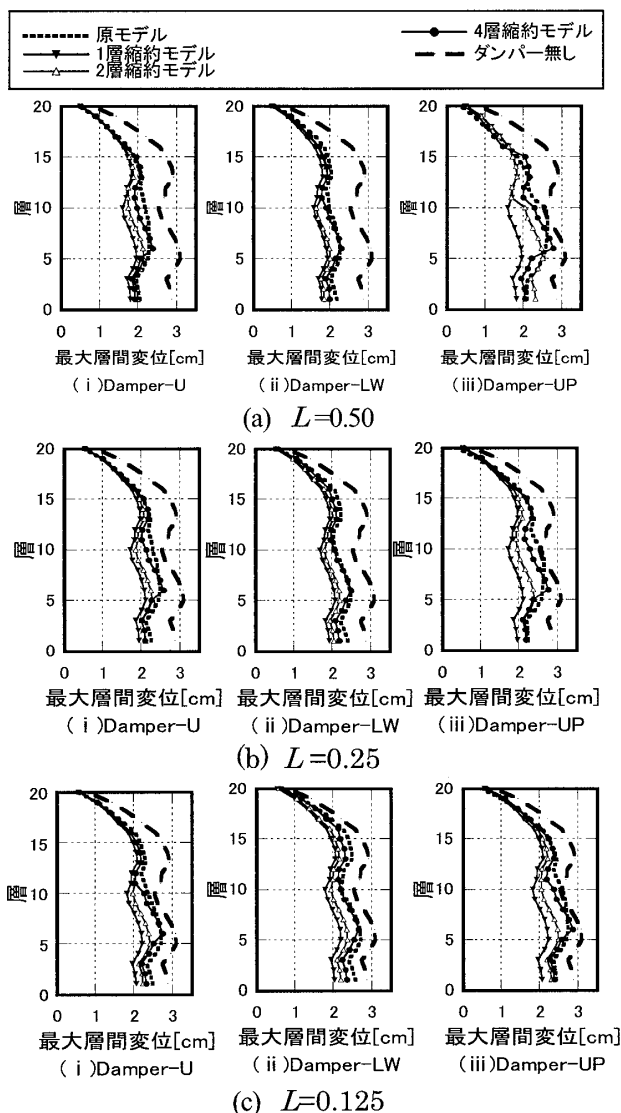


図5 最大層間変位分布

図6には、最大層間変位の最大値と減衰力制限比の関係を示す。いずれのダンパー配置においても、減衰力制限比 L を小さくすると、原モデルでの最大層間変位の最大値は大きくなる。ただし、 $L=0.5$ とした場合には、 $L=1.0$ の場合との違いは殆ど見られない。また、 $L=0.125$ とした場合には明らかに有意な差が生じてい

るが、ダンパーなしの場合と比べると最大層間変位は低減されており、ダンパーによる低減効果は保持されている。4層縮約モデルでは、最大層間変位に対する減衰力制限比の影響を、十分な精度で表現できているといえる。

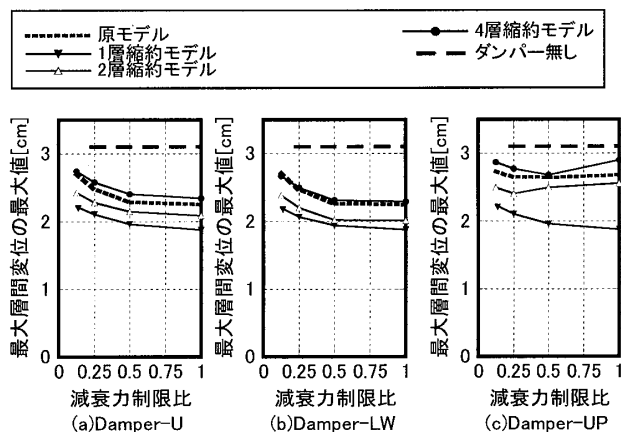


図6 最大層間変位の層方向の最大値と減衰力制限比

5. 結論

- 1) 非線形復元力特性を有する制振部材付構造物の縮約法を拡張し、リリーフ機構付オイルダンパーを有する構造物を層方向に縮約する方法を提案した。具体的には、原モデルにおいて各オイルダンパーが丁度リリーフ荷重に達するような振動が生じていると仮定した場合に、対応する縮約モデルにおいても各オイルダンパーが丁度リリーフ荷重に到達するという等価条件のもとで縮約モデルのリリーフ荷重を決定する方法を提案した。
- 2) 1)で提案した縮約法を用いて、縮約モデルに対する時刻歴応答解析を行った。その結果、減衰力制限比が0.125といった極端にリリーフ荷重が小さいモデルについても、十分な精度で原モデルの応答を推定することが可能であることを示した。

参考文献

- [1]辻聖晃他：非線形復元力特性を有する制振ダンパーの構造縮約モデルを用いた最適配置法，日本建築学会構造系論文集，No.658，pp.2143-2152，2010.12.
- [2]田中英稔他：地震動を受ける粘性ダンパーを有する建物の層方向自由に関する縮約法，日本建築学会大会学術講演概論集，B1分冊，pp.371-372，2010.9.
- [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.

*1 京都大学工学研究科建築学専攻

Dept of Architecture & Architectural Eng., Kyoto Univ.