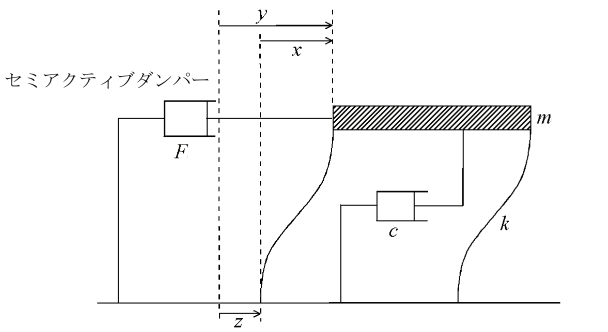
セミアクティブ擬似負剛性ダンパーの過渡応答時制震性能の評価

名古屋市　　正会員　○藤井　健太
京都大学工学研究科　　正会員　五十嵐　晃

1．はじめに

セミアクティブ制震ダンパーの制御則として提案されている擬似負剛性制御においては，これまで定常応答特性や動的応答倍率に基づいて制御性能が論じられてきたが，地震動入力は一般に強い非定常性を有し，制震性能についても構造物応答の非定常性を考慮した評価が必要と考えられる．線形な負剛性を仮定した制御(負剛性制御)を導入することにより，擬似負剛性制御の非定常応答最大値の評価を行う方法を検討した．



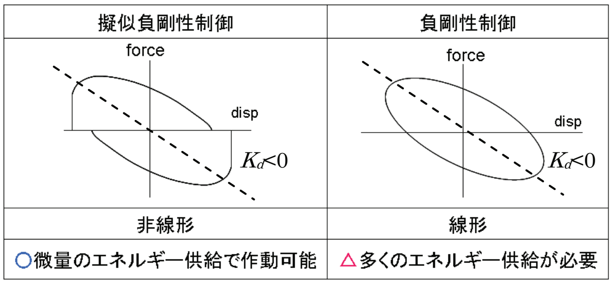


図１　擬似負剛性制御と負剛性制御

2．擬似負剛性制御の性質

擬似負剛性制御は，可変減衰ダンパーを用いて実現される制御手法であり，制御則は次式で与えられる．

$$F=\begin{cases} K_d\cdot x+C_d\cdot \dot{x} & (K_d\cdot x+C_d\cdot \dot{x})\cdot \dot{x}\geq 0 \\ 0 & (K_d\cdot x+C_d\cdot \dot{x})\cdot \dot{x}<0 \end{cases}$$

ここに，K_dは負剛性パラメータ，C_dは減衰係数パラメータであり，K_d<0,　C_d>0 とする．構造物の長周期化により，動的作用力を低減する効果を期待するものである．

3．擬似負剛性制御と同等な性能の負剛性制御の導出

擬似負剛性制御ダンパーは上記のように非線形な復元力特性を持ち，構造物応答も非線形となるが，等価線形化により最大応答を評価することが考えられる．エネルギー吸収の等しい負剛性制御ダンパーを導入し，線形的に過渡応答を評価する．この妥当性を検討するため，①擬似負剛性制御と履歴吸収エネルギーの等しい負剛性制御（等価負剛性制御）を導出　②各種入力波に対して，両ダンパーが同等の応答性能を示すかどうかの比較　という手順を用いる．負剛性制御ダンパー設置した１自由度系の運動方程式を，次式とする．

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx+(-k_{ns}x+c_{ns}\dot{x})=-m\ddot{z}$$

ここにm:構造物の質量，c:構造物の減衰係数，k:構造物の剛性，k_{ns}:負剛性制御の剛性，c_{ns}:負剛性制御の減衰係数，$\ddot{z}$:地震波加速度である．調和振動

$$\begin{cases} x=X_{ns}e^{i\omega t} \\ z=z_0e^{i\omega t} \end{cases}\quad \omega=\sqrt{\frac{k-k_{ns}}{m}},\quad \omega_0=\sqrt{\frac{k}{m}},\quad h_{ns}=\frac{c_{ns}}{2m\omega_0},\ \gamma_\omega=\frac{\omega}{\omega_0}$$

が生じたとすると，その応答振幅は次式で与えられる．

$$\frac{X_{ns}}{z_0}=\frac{\gamma_\omega^2\left(1-\dfrac{k_{ns}}{k_0}-\gamma_\omega^2\right)}{\left(1-\dfrac{k_{ns}}{k_0}-\gamma_\omega^2\right)^2+4(h+h_{ns})^2\gamma_\omega^2}+i\frac{-2(h+h_{ns})\gamma_\omega^3}{\left(1-\dfrac{k_{ns}}{k_0}-\gamma_\omega^2\right)^2+4(h+h_{ns})^2\gamma_\omega^2}=A_{ns}+iB_{ns}$$

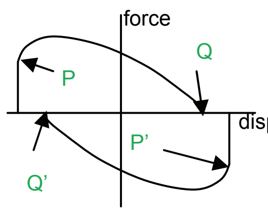


図２　擬似負剛性履歴曲線

定常応答解は　$x=\sqrt{A_{ns}^2+B_{ns}^2}\cos(\omega t+a)$ により与えられるため，１周期あたりのダンパーのエネルギー吸収は

キーワード　振動制御，セミアクティブ制御，制震ダンパー，制御則，非定常応答
連絡先　〒615-8540　京都市西京区京都大学桂　京都大学工学研究科社会基盤工学専攻　ＴＥＬ075-383-3245

$$\Delta W_{ns} = \oint F_{ns} dx = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F_{ns} \dot{x} dt = \left(A_{ns}^2 + B_{ns}^2\right)\pi\, c_{ns}\,\omega$$

により算出される。これに対して，擬似負剛性制御のエネルギー吸収は図２に示す履歴曲線の囲む面積で与えられるため，PQ 区間（あるいは P'Q'区間）では線形であることに着目すれば，

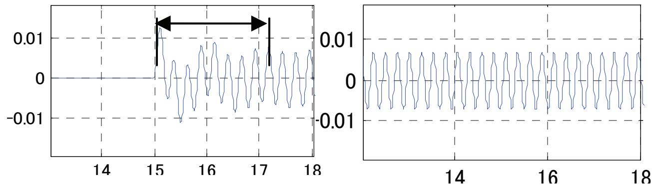
$$\Delta W_{pns} = 2\int_o^{T_1}\left(-k_{pns}x + c_{pns}\dot{x}\right)\dot{x}dt$$

ここに　$x = e^{h_{pns}\omega t}\left(R\cos\omega' t + S\sin\omega' t\right) + \sqrt{A_{pns} + B_{pns}}\cos\omega t$　$R = \sqrt{A_{ns}^2 + B_{ns}^2} - \sqrt{A_{pns}^2 + B_{pns}^2}$　$S = h_{pns}{}' R$

で評価できる。両者を等しいと置くことにより，擬似負剛性制御と等価な負剛性制御を求めることができる．

４．擬似負剛性制御と等価負剛性制御の比較

１自由度系モデルを用いた動的応答の数値計算を行い，擬似負剛性制御と上述の方法によって計算された等価な負剛性制御の場合の応答を比較することにより，妥当な等価性が得られるかどうか検討を行った．モデルの諸元を表１に示す．正弦波加振を仮定し，一定振幅および振動数の定常応答と，静止状態から正弦波加振を開始した場合の過渡応答を比較した．図３に，変位応答の比較の例を示す．過渡応答では，定常応答よりも変位最大値が大きくなる傾向がある．図４は，最大変位と加振振動数の関係における過渡応答と定常応答の比較であり，固有振動数よりも高い振動数領域で差が大きい．



(a) 過渡応答　　(b) 定常応答

図３　擬似負剛性制御時の正弦波加振応答

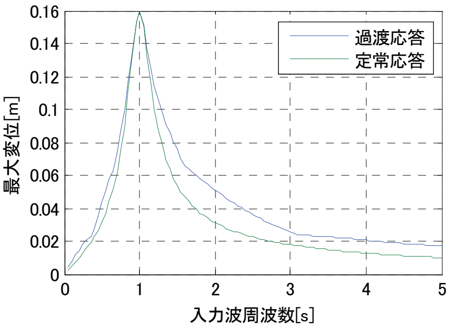


図４　最大変位－加振振動数関係による比較

表１　構造物諸元および制御パラメータ

	質量[ton]	減衰定数[N.s/m]	剛性[N/m]
構造物	23.76	14.9	938
擬似負剛性		29.8×0.998	-938×0.01
等価負剛性		29.8	-938×0.01

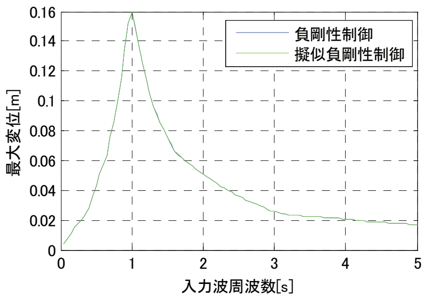


図５　過渡応答最大変位の比較

吸収エネルギーの等価性の仮定より，擬似負剛性とその等価な負剛性制御では，定常応答については同等な最大変位が得られるが，過渡応答時における最大変位の対応関係についても検証の必要がある．図５は擬似負剛性制御と等価負剛性制御での過渡応答での最大変位の比較図である. 両者はほぼ一致しており，擬似負剛性制御における過渡応答についても, 等価な負剛性制御に基づく構造モデルにより十分評価できることを示している.

さらに，過渡から定常応答に収束するのに要する時間や，パルス波・非定常ホワイトノイズを入力とした場合の過渡応答についても比較を行ったが, いずれについても擬似負剛性制御と等価負剛性制御はほぼ同等の応答となる結果が得られた．したがって，線形システムである等価負剛性制御を行った構造物により仮想的に応答評価を行うことにより，擬似負剛性制御を導入した場合の応答値の評価を行うことが可能であると言える．

５．結語

擬似負剛性制御の非定常入力に対する最大応答や制震性能を評価するための手法として, 線形である等価負剛性制御を用いた方法が有効であることを示した．擬似負剛性制御を用いた制震設計への適用が考えられる．定常応答のみ着目した検討は危険側の評価となるため，過渡応答についても考慮することが必要である．