

京都大学大学院 学生会員 ○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

地震時に動的応答を低減させる装置であるダンパーのうち、制御力を電氣的に制御し、応答の追従性を向上させた手法の一種として、擬似負剛性制御、負剛性制御が提案されている。図 1 は両制御の特徴を示している。線形性を有する負剛性制御は多くのエネルギー供給が必要とされる一方で、非線形性を有する擬似負剛性制御は微量のエネルギー供給により効果を発揮させることが可能である。擬似負剛性制御の研究は定常応答時の応答性状や応答倍率に着目した議論が行われてきている。しかし、地震動は強い非線形性を持つ入力であり、対象構造物の動的応答の非定常性を考慮することが必要と考えられる。そこで、非線形入力に対する応答を評価し、擬似負剛性制御の設計に関する体系を導いた。

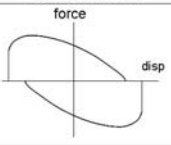
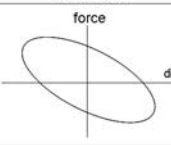
擬似負剛性制御	負剛性制御
	
非線形	線形
○微量のエネルギー供給で作用可能	△多くのエネルギー供給が必要

図 1 擬似負剛性・負剛性ダンパーの特徴

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再現される制御手法であり、制御式は次式のようなになる。

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

$K_d (< 0)$: 負剛性
 $C_d (> 0)$: 減衰係数

入力データは設置部の変位と速度のみでよい。負剛性の効果により、構造物を長周期化し、構造物に作用する動的荷重を低減する事ができる。

3. 擬似負剛性制御と同等な性能の負剛性制御の導出

3.1 導出の動機

非線形性をもつ擬似負剛性制御ダンパーと応答性能の等しい負剛性制御ダンパーを用いて、線形的に過渡応答を評価する事を考える。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。

3.2 等価負剛性制御の導出

負剛性制御ダンパー設置時の運動方程式を、

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

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
 と表現する。調和振動

$$\begin{cases} x = X_{ns} e^{i\omega t} \\ z = z_0 e^{i\omega t} \end{cases} \quad \omega = \sqrt{\frac{k - k_{ns}}{m}}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad h_{ns} = \frac{c_{ns}}{2m\omega_0}, \quad \gamma_\omega = \frac{\omega}{\omega_0}$$

が入力したとすると、

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

$$= A_{ns} + iB_{ns}$$

よって、定常応答解は、

$$x = \sqrt{A_{ns}^2 + B_{ns}^2} \cos(\omega t + a)$$

よって、履歴面積は、

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

次いで、擬似負剛性制御の履歴面積を算出する。図 2 に示すように、履歴曲線で見ると P(P')点から Q(Q')までは線形応答であり、応答変位は

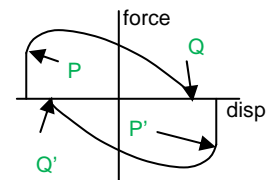


図 2 擬似負剛性制御の履歴の道筋

$$x = e^{h_{pms} \omega t} (R \cos \omega t + S \sin \omega t) + \sqrt{A_{pms} + B_{pms}} \cos \omega t$$

$$R = \sqrt{A_{ns}^2 + B_{ns}^2} - \sqrt{A_{pms}^2 + B_{pms}^2} \quad S = h_{pms}' R \quad h_{pms}' = h + h_{pms} \quad \omega' = \sqrt{1 - h_{pms}'^2} \omega$$

で表す事ができる。よって履歴面積は、

$$\Delta W_{pms} = 2 \int_0^T (-k_{pms} x + c_{pms} \dot{x}) \dot{x} dt$$

で表す事ができる。両面積を等しいとすれば、履歴面

積を一致させるパラメーターを決定できる。

3.3 擬似負剛性制御と等価負剛性制御の比較

各種の代表的な動的入力として正弦速度波、パルス波、ホワイトノイズを選び、1自由度系に対する擬似負剛性制御と等価負剛性制御の比較を行った。諸元を表1に示す。正弦速度波で比較する際、静止状態から15秒後に入力された場合と、定常的に入力された場合で比較した。また、入力波の最大速度を30kineに保ち、振動数を変化させて比較検討した。図3は入力振動数4(1/s)の場合の変位時刻歴である。過渡応答の方が、最大変位が大きい事が分かる。図4は入力振動数に対する過渡応答と定常応答の比較である。いずれの入力振動数でも、過渡応答の方が大きい最大変位をとっている。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。両者はきわめて近い性能を有している事が分かる。次に、過渡応答が定常応答に収束する時間 T の比較を行った。 T が大きい方が、構造物により多くの損傷を与えると考えられる。今回は図6に示すように値を設定し、次式

$$0.995 < \frac{x_{n-1} - x_n}{x_n - x_{n+1}} \text{ and } \frac{x_n - x_{n+1}}{x_{n+1} - x_{n+2}} < 1.005$$

を初めて満たすまでの時間を比較した。図7は入力振動数に対する T の比較である。これによると両者に違いは見られない事が分かった。また、速度・加速度の場合、パルス波・ホワイトノイズの場合も違いは見られなかった。そのため、擬似負剛性制御と等価負剛性制御は応答性能はほぼ同様であると言え、さらに、線形の等価負剛性制御で仮想的に設計を行った後で擬似負剛性制御に変換する事で、簡単に擬似負剛性制御を導入する事ができる。

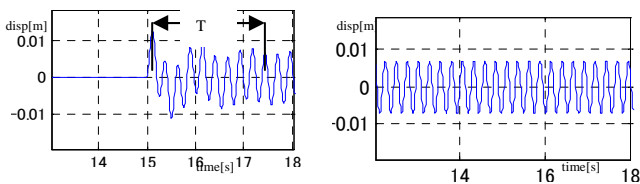


図3 過渡(左)・定常(右)応答の変位時刻歴

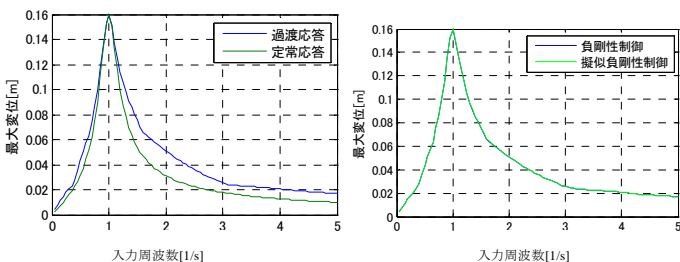


図4 過渡・定常比較

図5 擬似・等価比較

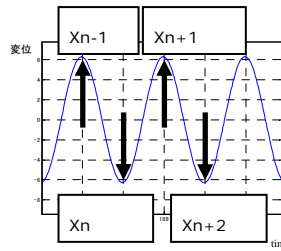


図6 値設定

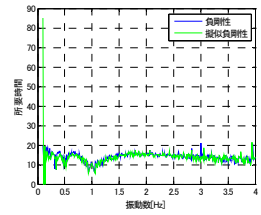


図7 緩和時間比較

表1 諸元

	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

4. 慣性力載荷装置による実証実験

実験により擬似負剛性制御の過渡応答を再現し、解析値と比較した。実験装置は概略図を図8に示す。加振装置を用いて入力波を再現する事でダンパーの性能を調べた。実験での諸元は表2に示す。図9は擬似負剛性制御の実験値・解析値での過渡応答での最大変位の比較である。両者は近い値を示している事が分かる。また、パルス波でも同様の検証を行い、近い値を示している結果が得られた。

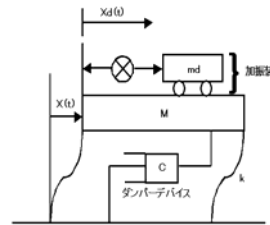


図8 装置概略

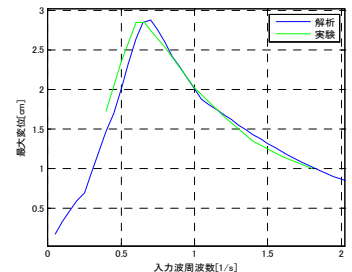


図9 実験値との比較

表2 諸元

	質量[ton]	減衰定数[N.s/m]	剛性[N/m]
構造物	23.76	7.49	408.6
擬似負剛性		50	-26.15

5. 結論

本研究では、非線形入力に対する応答を評価し、擬似負剛性制御の設計に関する体系を導いた。定常応答のみ着目して設計することの危険性を示した。擬似負剛性制御を、等価負剛性制御を用いて簡易的に構造物へ導入する手法を示した。慣性力載荷試験装置を用いて実験結果と解析結果の比較検討を行い、結果の信頼性は高いことを確認した。