

第 I 部門

スカイフック系に準拠した構造物の擬似負剛性セミアクティブ制御

京都大学工学部 学生員 ○樋口 匡輝
 京都大学大学院工学研究科 正会員 五十嵐 晃
 京都大学大学院工学研究科 フェロー 家村 浩和

1. 概要

構造物のセミアクティブ制御手法の1つである擬似負剛性制御においては、負剛性の設定と制御性能の関係に不明確な点がある。本研究では、スカイフック系と擬似負剛性セミアクティブ制御の間の近似関係を利用して、擬似負剛性制御のパラメータを決定する手法を提案する。

2. スカイフック系

スカイフック系^[1]は、図 1(b)に示すように構造物を仮想的な不動点に拘束するダンパーを想定する方法または概念を指す。図 1(a)に示すようなセミアクティブ制御に適用する場合はセミアクティブダンパーを、セミアクティブ装置の動作制約範囲内で、構造物の絶対速度に比例した制御力を発生させるように制御する。そのため、構造物の固有振動数付近から高振動数帯域に至る入力に対して、絶対応答、特に絶対加速度を抑制する効果が得られる。図 2 は、図 1(b)に示すスカイフック系のモデルに基づき周波数応答倍率を示したものであるが、スカイフックダンパーの減衰 h_{sh} の増加と応答倍率ピーク値の減少の関係が示されている。

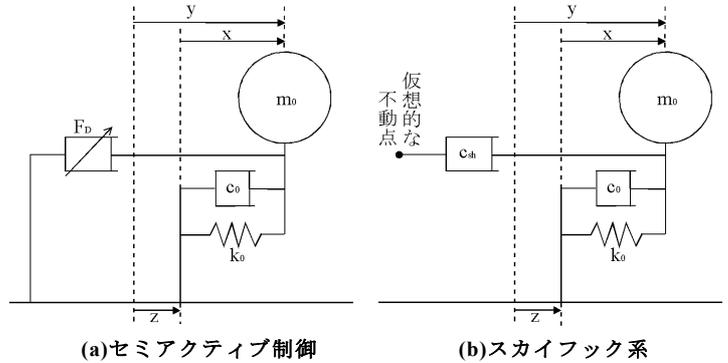


図 1 構造物モデル

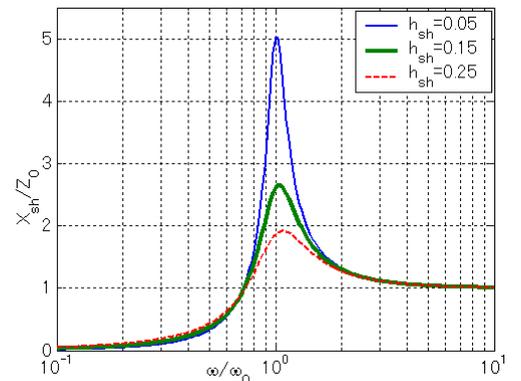


図 2 スカイフック系応答倍率

3. 擬似負剛性セミアクティブ制御

バリアブルダンパーに負の剛性を伴うエネルギー吸収性能を与える復元力を発生させることで、制御対象構造物の剛性と合わせた履歴復元力に完全剛塑性に近い特性を付与することが、擬似負剛性制御の基本的な考え方である^{[2][3]}。この時、バリアブルダンパーを制御して得る目標荷重は、次式で与えられる。

$$F_D = \begin{cases} -k_{sa}x + c_{sa}\dot{x} & \text{if } F_D(t) \cdot \dot{x} \geq 0 \\ 0 & \text{if } F_D(t) \cdot \dot{x} \leq 0 \end{cases}$$

負剛性の効果により構造系が長周期化されるため、負剛性制御の適用は構造物の加速度応答を低減する効果がある。また、制御力の決定に必要な計測値はダンパー設置部の相対速度と相対変位のみであるため、絶対量を必要とするスカイフック系と比べ、実際の構造物への適用もより容易となるメリットがある。擬似負剛性制御を適用した1自由度系の周波数応答倍率を図3に示す。左図が係数 c_{sa} の変化、右図が負剛性 k_{sa} の変化に対応した周波数応答倍率の変化を示している。粘性係数 c_{sa} ・

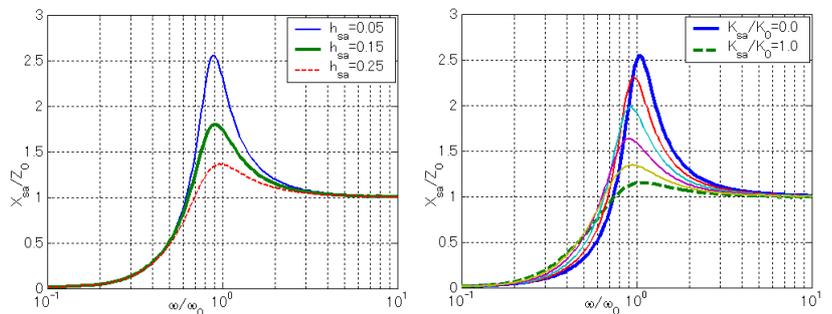


図 3 擬似負剛性制御系応答倍率

擬似負剛性制御を適用した1自由度系の周波数応答倍率を図3に示す。左図が係数 c_{sa} の変化、右図が負剛性 k_{sa} の変化に対応した周波数応答倍率の変化を示している。粘性係数 c_{sa} ・

負剛性 k_{sa} とともに、増加して制御強度を上げるにしたがって応答倍率ピーク値が低減する効果が得られる。スカイフック系と擬似負剛性制御系に正弦波加振を行った場合の相対変位-ダンパー荷重応答の計算結果を図4に示す。図4に示されるように、スカイフック系と擬似負剛性制御系は良く似た復元力特性および性質を持っている。

4. 対応パラメータの算出

与えられた減衰 h_{sh} を持つスカイフック系と周波数応答倍率曲線のピーク値同士が等しくなるような擬似負剛性制御のパラメータ h_{sa}, k_{sa} を数値的に探索する手法を用いて、両者の対応パラメータを求めた結果を図5に示す。図5は、負剛性ダンパーの集合を示す空間上で、「対応スカイフック系の性能」に関する等高線（等性能線）を意味している。本図を参照する事により、単一のスカイフック性能 h_{sh} を指定することで、擬似負剛性制御パラメータ h_{sa} と k_{sa} の組み合わせを一意に決定できる。

5. 実地震波による検証

最大加速度 100[gal]に調整した El centro 地震波を擬似負剛性セミアクティブ制御系への加振入力とした場合の応答により、上述の対応パラメータの関係を検証した。図5中に、今回使用したパラメータを示す。擬似負剛性制御系(2)(3)は、スカイフック系(1)を示す曲線上にある。したがって、(1)(2)(3)は同等の最大振幅応答値を示す事が期待される。擬似負剛性制御系(4)は、従来の擬似負剛性制御の研究で用いられてきたパラメータである。解析結果を図6・図7に示す。

図6を見ると、(1)(2)(3)はそれぞれの応答最大値がほぼ同じ値をとっている事から、対応パラメータを用いる制御性能の指定は妥当であると言う事ができる。図6において(4)の解析結果を見ると、応答は他の場合と比べて低減効果が大きい。これは、図5において(4)がスカイフック性能のより高い位置にある事からも説明できる。しかしながら、図7においてダンパー最大荷重を見ると、(4)の場合は(2)(3)と比べて大きなダンパー荷重を要する事がわかる。従来の研究では最適とされてきたパラメータ(4)を用いると、要求ダンパー最大荷重が大きくなり、定格荷重の大きなセミアクティブダンパーが必要となる。コストパフォーマンスのバランスからセミアクティブダンパーを選定する際に、図5に示した対応パラメータ図を用いれば、セミアクティブダンパーの定格荷重に合わせたパラメータを選択する事ができる。

6. まとめ

スカイフック系と擬似負剛性制御系の間で類似した特性が存在することに着目し、応答倍率曲線の最大値で規定される対応パラメータの算出を行った。実地震波を用いた応答解析の結果、対応パラメータの妥当性が示された。

参考文献[1] D.Karnopp et al. : J. Eng. for Industry, ASME, 619-626, 1974. [2] Hirokazu Iemura et al. : Proc. Passive Structural Control Symposium, 7-16, 2002. [3] Hirokazu Iemura et al. : J. Struct. Control, 187-203, 2003.

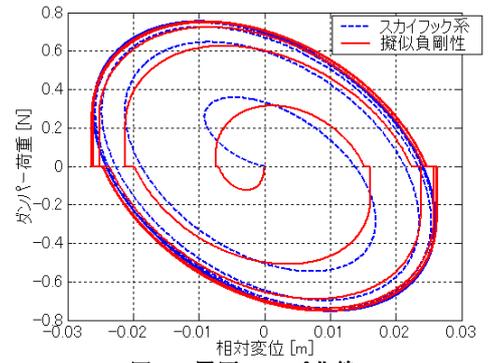


図4 履歴ループ曲線

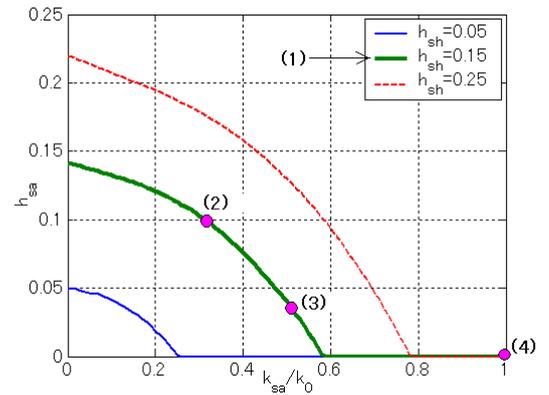


図5 対応パラメータ

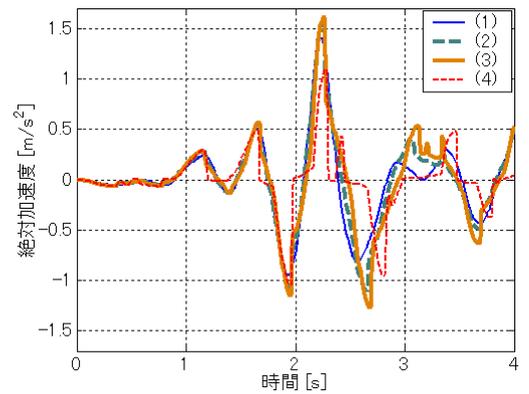


図6 絶対加速度応答

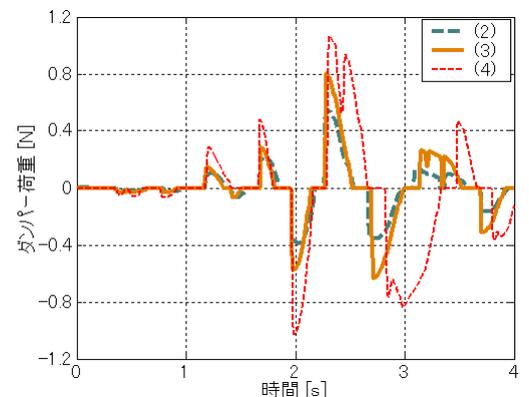


図7 ダンパー荷重