

ループ整形設計法に基づくフレーム構造部材の面外振動制御

積水化学工業(株)	正会員	○渡邊	亮
長岡技術科学大学 建設系	正会員	鳥居	邦夫
長岡技術科学大学 建設系	正会員	宮木	康幸
長岡技術科学大学 機械系	正会員	川谷	亮治
太陽工業(株) 空間技術研究所		中原	義男

1. はじめに

近年、土木・建築構造物において、美観・景観の重要性が高まっている。東京ドームに代表される大型膜構造物やアトリウムなどは、そのシンボリックな形からイベント開催時に、またはランドマークとして利用され、今後さらに多用されることが予想される。これらは多数のトラス、フレーム構造からなる空間構造物であり、複雑な振動特性を持つ。特に膜構造物の場合、風による膜の振動で部材の振動が励起されるという問題点を有する。

本研究ではこのような空間構造物の振動制御を目的としており、ここではその基礎研究として構造物の構成部材であるフレーム部材のたわみ及びねじれ変形による面外振動についてロバスト制御理論に基づくアクティブ制御系の設計を行い、制御実験によりその制振効果を確認した。

2. 設計モデル

一般に弾性構造物を制御対象として考える場合、制御目的、制御器の演算速度、モデリングなどの理由から、通常振動特性の中で支配的なモードのみを考慮した低次元化モデルが用いられる。

本研究では Fig.1 に示すように、たわみ方向の1次振動モードとねじれ方向の2次振動モードで構成される2次までの低次元化モデルを設計モデルとした。

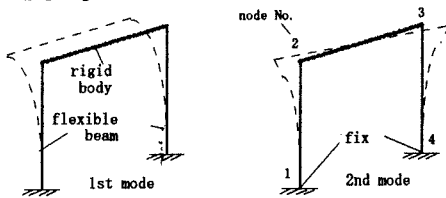


Fig.1 制御モデルの振動モード

3. ループ整形設計法¹⁾²⁾

設計モデルと実制御対象との間にはモデル化誤差が存在する。このモデル化誤差による影響を補うものとして、近年ロバスト制御理論の研究が進められている。これは低次元化などにより不確かさを有する設計モデルに対して有効な制御手法である。本研究ではループ整形設計法を制御器設計に適用した。この手法は設計要求を周波数領域上

の重み関数で表現するため、制御性能とロバスト安定性に関して設計者の要求に沿った合理性の高い設計が可能であるという特長を持つ。Fig.2 に本研究で用いた重み関数の1つを示す。

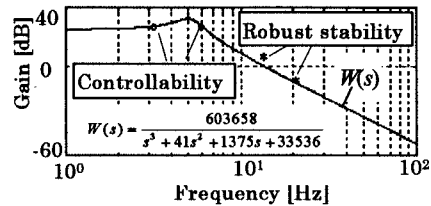


Fig.2 重み関数による設計要求

4. ループ整形設計法による制御器の設計

Fig.2 の重み関数に対して設計されたロバスト制御器の制振性能を Fig.3 に、ロバスト安定性を Fig.4 に示す。図中の W は重み関数を表す。

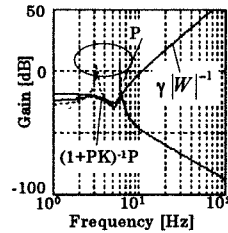


Fig.3 制御性能

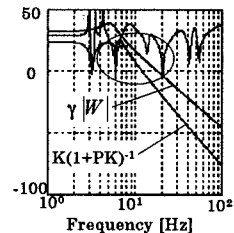


Fig.4 ロバスト安定性

ここで、ロバスト安定性の評価基準であるモデルの不確かさを加法的誤差（周波数領域上での実測値と数式モデルのゲイン差）とした。 γ は安定度と呼ばれる設計パラメータで、ここでは $\gamma = 2.2$ とした。Fig.3 は制御対象の伝達関数表現 P の共振ピークに対する閉ループ系でのゲインの低減を表す。Fig.4 では加法的誤差の逆数を用いてモデル化誤差が顕著に現れる領域（モデル化されない領域）において $\gamma|W|$ がこの値より下であればロバスト安定であることを示す。

5. 制御実験

Fig.5 に実験装置図を示す。フレームはアルミ部材により構成され、自重による初期たわみが生じないように、図に示すような横置きとした。状態量の測定は2本の梁の1/3地点に取り付けたひず

みセンサにより行い、それをもとにパソコンに内蔵された高速演算装置 DSP で適切な操作量を計算し、コイル巻き電磁石の磁気吸引・反発力による制御力をアクチュエータから与える。

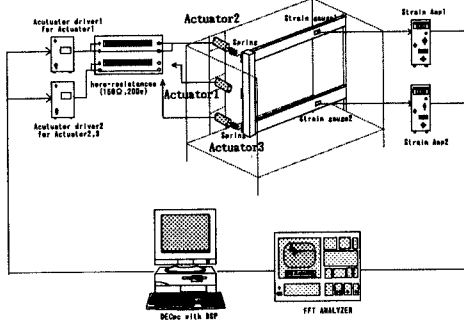


Fig.5 実験装置の構成

実験装置には図に示すように3つのアクチュエータが配置されており、1)アクチュエータ2だけで制御する、2)2つのアクチュエータ2,3により制御する、3)フレームの1次振動モードに対してアクチュエータ1、2次に対してアクチュエータ2を配置して独立に制御系を構成する、の3通りについてインパルス応答に対する制御実験を行った（Fig.6）。特にケース3のように各振動モード

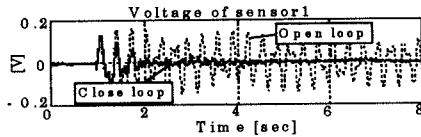


Fig.6 case3のインパルス応答

に対して独立に制御器を設計する方法を分散制御といい、他の2ケースと比べて制御器の設計が容易に行えるという利点がある。ここで制御によって吸収された振動エネルギーと操作量の消費エネルギーとの比を制御効率と定義し、この値により3ケースの性能比較を行った（Fig.7）。この結果

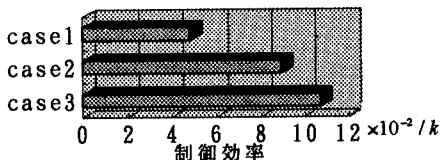


Fig.7 制御効率の比較

より、ケース3の分散制御システムは制御器設計の容易さ、制御性能の面で優位性を示すことがわかった。なお、Fig.7のkは無次元量である。

次に不規則な連続強制力に対する制御実験結果について、Fig.8に連続強制力の測定値（電圧値）を、またこの外乱に対して制御を行わない時の振動波形と分散制御による結果をFig.9に示す。

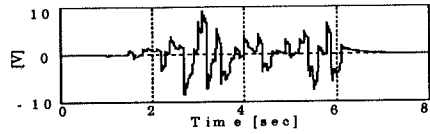


Fig.8 連続強制力

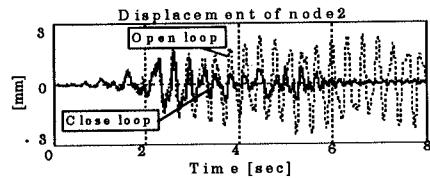


Fig.9 分散制御システムの制振結果

このような連続した外乱に対しても十分に振動制御が行われていることがわかる。

また、この波形をラグランジュの5点公式により数値微分して得た加速度応答結果をFig.10に示す。オープンループでは連続外乱の影響で、ところどころに加速度のピークが見られるが、制御を行っている状態ではこの加速度のピークが押さえられていることがわかる。

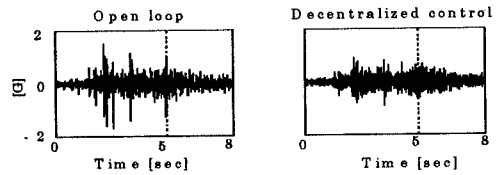


Fig.10 連続強制力に対する加速度応答

6. おわりに

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

1. ループ整形設計法により、ロバスト安定性を確保することでモデルの低次元化による実制御対象との不確かさに対して制御器の及ぼす悪影響（スピルオーバー現象）を抑制し、かつ制振性能を高める制御器を用いた制御システムを構成できた。
2. アクチュエータを各振動モードの腹に対して有効に作用するように配置した分散制御システムにより、制御効率を高めることができた。
3. 不規則な連続強制力に対してアクティブ制御を行うことにより、制御を行わない場合と比べて変位応答、加速度応答ともに良好な制御結果が得られた。

参考文献

- 1) 川谷：ループ整形設計法を用いたロバスト制御系の設計、システム/情報/制御、36-12(1992)
- 2) 川谷： H_{∞} 制御理論に基づく柔軟構造物のロバスト振動制御、土木学会論文集 No.465(1993)