

I-622 吊橋キャットウォークの歩行による振動の H^∞ 制御○摂南大学 学 山口 真弘
神戸製鋼 三田村 武摂南大学 正 頭井 洋
摂南大学 正 波田 凱夫

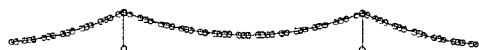
1 緒言

長大吊橋のキャットウォークは、風による振動以外に人の歩行によっても振動を生じ、特に歩行周期とキャットウォークの固有振動数が近接する場合には、大きな振動を発生する可能性がある。キャットウォークには、一定の間隔でステップ材を設けてあるため複数の歩行者の歩行周期が同調し易く大勢の人数が移動するとき、かなりの水平振動を生じたという報告がなされている。歩道橋でも、歩行荷重により1Hz付近の水平振動が発生することが報告されている^[1]。

歩行振動に対しては、受動制振法(T.M.D)も有効であるが、大きな制御力を必要としないことや設置スペースも小さくてすむことから能動制振法も有効と考えられる。そこで、本研究では支間2000m級吊橋を対象に、歩行荷重による水平振動に対し、 H^∞ 制御理論を用いたアクティブマスダンパー(以下、A.M.D)を適用した場合の制振効果を数値計算により検討した。

2 制御対象のモデル

図(1)が制御対象の塔とキャットウォークの連成系全体図であり、歩行によるキャットウォークの振動はクロスブリッジ間でのみ生じることが多いので、クロスブリッジ間のキャットウォークを取り出し、有限要素法でモデル化し固有値解析した。固有値解析の結果より1Hzに近い周波数で水平方向に振動するモードを制御対象とし、この振動モードを図(2)に示した。A.M.Dの取り付け位置は制御対象の振動モードの腹の部分としそのマス部分の質量を100kgとした。また、制御に必要な観測量は、A.M.Dを取り付けた位置の速度とA.M.Dとその取り付け位置との相対変位とした。



図(1) 塔とキャットウォークの連成系

3 歩行荷重

平地では人の歩行には位相差があるが、キャットウォーク上では複数の歩行者の歩行周期が同調し易く、キャットウォークが振動し始めると人はバランスを保とうと



図(2) 制御対象の振動モード

して変位方向に力をかける性質がある。

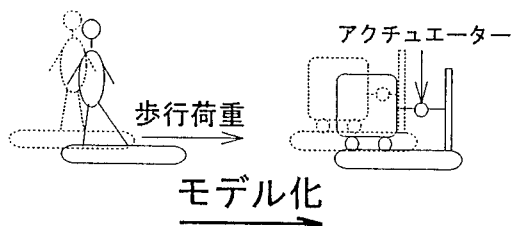
歩行荷重の鉛直成分については比較的容易に再現できるが、水平成分はキャットウォークの振動に応じて変化すると考えられるため再現が容易ではない。その目安を得るため、図(3)の様に人をA.M.Dでモデル化しA.M.Dのマス部分の絶対変位が0になるように最適フィードバック制御理論を適用して制御した。その結果、質量300kgのA.M.Dのマスに対し約40kgfの制御力が働き、歩行者重量の約10%の水平力を考えておけばよいことがわかった。

4 運動方程式と状態方程式

はじめに、最適化手法に基づく目標形状決定プログラム^[4]を用いて、所要の形状と張力の条件を満足する各ケーブル部材の無応力長さと節点座標を決定した。これらの値を有限要素法プログラムに入力し、自重を考慮して静的な釣合形状を求め、その後各ケーブルに導入された初期張力による剛性(幾何剛性)を考慮した固有振動解析を行った。比例減衰を仮定し、マスマトリックスと剛性マトリックスのモードシェイプとの直交性を利用すると、各次モード座標ごとに分離された運動方程式が得られる。その運動方程式から制御対象となる1Hz近くのモード座標にA.M.Dを付加した低次元化した運動方程式を作成し、その運動方程式から制御理論を適用するために、一階の微分方程式である状態方程式を作成した。

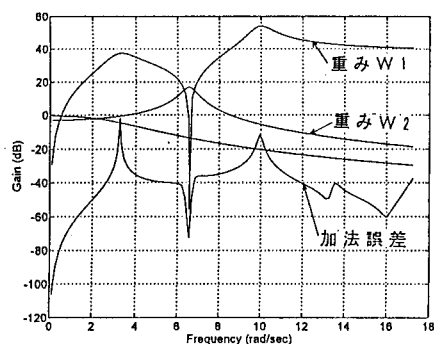
5 H^∞ 制御器の作成

H^∞ 制御では、制御対象モード以外のモード座標を除いた低次元化したモデルに対し制御器の設計を行う。まず、ロバスト安定を補償するための重み関数 $W_1(s)$ と制御重み関数 $W_2(s)$ を設定する。 $W_1(s)$ は低次元化されていないフルオーダーモデルの応答値から低次元化されたモデルの応答値を差し引いた加法誤差を覆うように周波数領域で設定する。 $W_2(s)$ は制御対象外の周

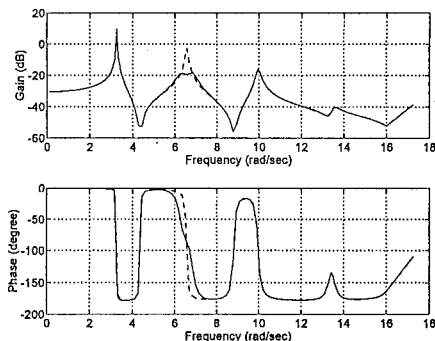
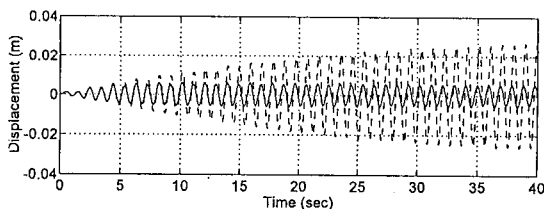


図(3) 歩行荷重のモデル化

波数領域で大きくなるように設定する。以上の重み関数 $W_1(s)$, $W_2(s)$ と加法誤差を図(4)に示した。以上の状態方程式と重み関数により H^∞ 制御器を作成した。



図(4) 加法誤差と重み関数

図(5) σ プロット

図(6) 時刻歴応答

6 数値計算

図(5)に制振を行わない場合の周波数応答解析結果を破線で、 H^∞ 制御による制御を行った場合の周波数応答を実線で示した σ プロットを示した。制振対象の円振動数 6.87rad/sec (周波数 1.093Hz) 付近でゲインが低下していて、位相の変化も安定していることがわかる。

図(6)に制振を行わない場合の応答解析結果を破線で、 H^∞ 制御による制御を行った場合の応答を実線で示した時刻歴応答を示した。数値計算はいずれもフルオーダーの有限要素法解析によるもので、高次モードや変形による非線形性を考慮した解析結果を示している。励振力としては A.M.D の取り付け部に片振幅 392N 周波数 1.093 の正弦波を入力した。無制御に比べ制御後の応答は $1/5$ に減少していることがわかる。制御設計に LQG 制御を用いる場合は、スビルオーバー対策のため、制御対象モード以外の多数の振動モードも考慮せねばならず、制御器の次数および制御力の計算時間がかなり増大する。

7 結言

本研究は長大吊橋におけるキャットウォークの歩行荷重に対する制振対策として、A.M.D を設置した場合の

制振効果の検討を数値計算によって行い、以下に示すことが確認できた。

- (1) H^∞ 制御ではロバスト安定性が保証されるため、制御対象モデルのみの低次元化モデルを用いても十分制振でき、LQG 制御に比べて計算時間をかなり低減できた。
- (2) 非線形応答解析ができる F.E.M を用いて時刻歴応答解析を行った結果、制振効果が確認でき実用上問題ないと思われる。

H^∞ 制御の設計はやや面倒であるが、ロバスト制御法としてその効果は大きいといえよう。

参考文献

- [1] Fujino 他. SYNCHRONIZATION OF HUMAN WALKING OBSERVED DURING LATERAL VIBRATION OF A CONGESTED PEDESTRIAN BRIDGE. EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, Vol.22, 741-758 (1993)
- [2] 頭井他. 吊橋の塔キャットウォーク系の渦励振による共振現象に対する能動制振の検討. 土木学会, 振動に関するコロキウム講演論文集, 1991
- [3] 三平他. 状態空間論による H^∞ 制御の解法, 計測と制御, vol.29, No.2, 1990
- [4] 波田他. 最適値問題の手法による吊構造の形状決定解析, 日本建築学会論文報告書集, No.238 号, 1975, 12