鉄道橋交通振動を対象としたアクティブ制振の数値的検討

東京大学　学生会員　○飯田芳久　正会員　長山智則
正会員　蘇迪　正会員　水谷司

１．目的

一部の新幹線用 PRC 橋で，新幹線の走行に伴い橋梁が大きく振動する現象が確認され，これにより乗り心地や安全性の低下，架線コネクタの破壊等の問題が発生している．これは，新幹線によって与えられる外力の振動数と橋梁の固有振動数が近接し，共振が生じることが原因であると考えられる．この大振幅を伴う振動の対策として，チューンドマスダンパ(以下，TMD)やアクティブマスダンパ(以下，AMD)といった制振装置の利用が考えられる．しかし，制振装置を橋面上に設置する場合，車両との接触を避けるために設けられる厳しい変位制限が存在する．本研究では，可動質量を大きく振動させることができない状況下で，アクティブ制御力を利用する AMD による制振効果を検討する．また，鉄道橋には列車が橋梁上を 1 方向から走行する単線載荷と双方向から走行する複線載荷の 2 つの載荷パターンが存在し，荷重に急変する準静的成分が含まれる．これを考慮し，制振の高度化を目的とする．

２．モデルの概要

本研究で対象とする橋梁は，橋長 31m の PRC 橋である．橋梁モデルの解析には，固有振動数 2.50Hz の 1 次モード（曲げ 1 次）と固有振動数 3.73Hz の 2 次モード（ねじれ 1 次）のみを利用する．実橋梁には，剛性や固有振動数に振幅依存性が存在するが，今回使用するモデルでは剛性や固有振動数が一定であると仮定しており，図 1のように，交通荷重は車輪によって伝えられる接触力を固定値とする移動荷重とした．

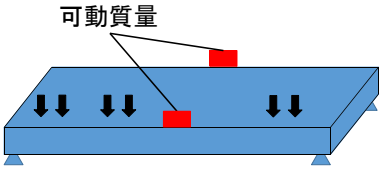


図 1　橋梁モデルのイメージ

続いて，ラグランジュの運動方程式を利用し，橋軸方向の中央，橋軸直角方向の両端に設置された可動質量のモデル化を行った．アクチュエータによって出力されるアクティブ制御力を作用させることで可動質量は AMD として機能するが，基準となる質量を決定するため，まずは制御力を作用させずに TMD として機能させてシミュレーションを行った．可動質量の固有振動数と減衰定数は TMD の設計に用いられる定点理論に基づいて決定し，可動質量が大きく振動する複線載荷でも，可動質量の変位が制限内に収まるような可動質量の総質量比が，橋梁の 1 次モード質量に対して 2.2%と求められた．　ここで複線載荷は，同時刻，同速度で列車が橋梁上を互いに逆向きに走行するケースを想定している．

３．AMD の設計

LQ 制御に基づいて AMD のモデル化を行った. 図 2のように LQ 制御では，橋梁の各モード，可動質量それぞれの変位，速度からなる状態ベクトル Xとフィードバックゲイン Gの積として制御力が計算される．Gを固定して制御を行う場合，可動質量が大きく振動する複線載荷で可動質量が変位制限を越えないように G を決定する必要がある．しかし，高頻度で発生する 単線載荷では，橋梁の変位や速度が小さく制御力も小さくなる．従って，可動質量の振動も小さくなりストロークを十分に活用できない．そこで，可変ゲイン制御[1)]による制振を考える．新たな変数 α を可動質量の振幅の関数として与え，G を α の関数とし，可動質量の振幅が大きい場合には，変位制限を越えないように可動質量の制御への重み付けを大きくし，一方で可動質量の振幅が小さい場合には橋梁の制御への重み付けを大きくするように G を変化させた．まずは，α の最小値，最大値を予め設定し，その間を式(1)によってタイムステップごとに変化させる．

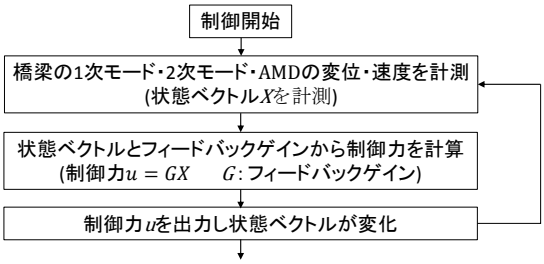


図 2　制御のフローチャート

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + \Delta\alpha\left(1 - \frac{x_{ai}}{x_{aT}}\right) \quad (1)$$

キーワード　アクティブ制振，大振幅振動，鉄道橋
連絡先　〒113-8656　東京都文京区本郷 7-3-1　東京大学橋梁研究室　ＴＥＬ03-5841-6097

ここで，α_iはタイムステップ i での α の値，$\Delta\alpha$ は α の増分，x_{ai}は変位と速度から計算されるタイムステップ i での可動質量の振幅，x_{aT}は基準となる可動質量の振幅である．式(1)に従って，可動質量の振動が小さい場合には α の値は大きく，可動質量の振動が大きい場合には α の値は小さくなる．そのため，α が最小値の場合には複線載荷用の制御を，α が最大値の場合にはより橋梁への制御が大きくなるように G を与えることで，複線載荷でも可動質量の変位が制限を越えず，単線載荷では可動質量の振動を大きくして橋梁の変位を小さく抑えることが可能となる．

また，橋梁の変位には準静的成分が含まれるが，この準静的成分を抑制しようと制御力が働くと AMD の振動に片寄りが生じる．厳しい変位制限がある状況下で振動に片寄りが生じるとストロークを十分に活用できず，制振効果が低下する．そのため，橋梁の変位にハイパスフィルタを適用して橋梁の準静的成分を除去してからアクティブ制御力の計算に用い，AMD の振動の片寄りが解消された．そして，α の移り変わりに関与する $\Delta\alpha$ と x_{aT}，α が最大値の場合のフィードバックゲイン G を計算するための設計変数を遺伝的アルゴリズムによって決定した．最適化関数は，走行速度 150km/h から 300km/h までの単線載荷での橋梁の最大変位としている．

４．解析結果

AMD による効果を確認するため，AMD を利用しない場合，可変ゲイン制御による AMD を利用した場合について，単線載荷，列車の走行速度走 225km/h での橋梁の変位時刻歴を図 3に示す．共振していた桁が AMD によって共振しなくなり，橋梁の振動が小さくなることが分かる．続いて，列車の走行速度を 150km/h から 300km/h まで変化させて解析を行った．走行速度ごとの，橋梁の動的成分の最大値と可動質量の最大変位を図 4に示す．図 4 (b)の直線は可動質量の変位制限を示している

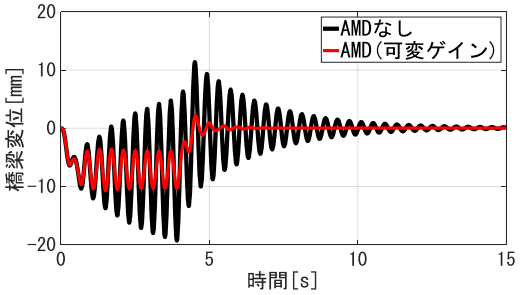
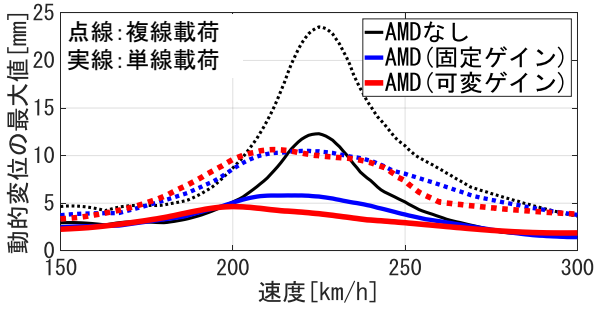
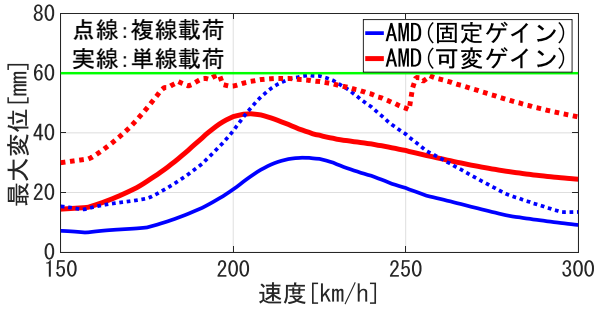


図 3　橋梁変位時刻歴の比較(225km/h)



(a)橋梁の動的変位の最大値



(b)可動質量の最大変位

図 4　橋梁・TMD の最大変位

複線載荷では固定ゲインの AMD を利用した場合，可変ゲインの AMD を利用した場合ともに，AMD を利用しない場合と比較して橋梁変位の動的成分の最大値を 45%程度に低減させることができた．単線載荷では，AMD を利用しない場合と比較して，固定ゲインの AMD を利用すると動的成分の最大値を 47.3%に，可変ゲインの AMD を利用すると動的成分の最大値を 36.5%に低減させることができた．これは，可変ゲイン制御を利用した AMD は，固定ゲインの AMD に比べて単線載荷で可動質量の振動を大きくし，制振性能が向上したためであると考えられる．

５．まとめ

AMD の鉄道橋交通振動に対する制振効果が確認された．また，可変ゲイン制御を用いることで，固定ゲインを用いた AMD と比較して，単線載荷時の制振性能が向上することが分かった．

謝辞：日本大学渡邊亨教授には貴重なご意見をいただきました．ここに感謝の意を表します．

参考文献

1)　Ichiro Nagasshima and Yuzo Shinozaki : Variable Gain Feedback Control Technique of Active Mass Damper and Its Application to Hybrid Structural Control，Earthquake Engineering and Structural Dynamics，VOL.26，815-838 (1997)