I-B 302

高架橋システムの耐震性能向上の観点からみた支承の最適設計値

東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻　正会員　阿部雅人
同　上　フェロー　藤野陽三

1．はじめに

桁，支承，橋脚などからなる高架橋システムの耐震性能を向上する一方法として，可動支承部分にダンパーを設置する，あるいは免震化するなどの方法が考案されている．ここでは，支承部分の動特性が高架橋システム全体の動特性に及ぼす影響を明らかにし，耐震性能の観点からみて理想的な支承のあり方を提案することを目的として，定常ランダム振動理論を用いた解析的検討を行う．具体的には，支承の最適設計の主たる目的は橋脚の応答を軽減することであると考え，定常白色雑音入力の際の橋脚の２乗平均応答を最小化する最適設計値を求める．

2．定常ランダム振動理論に基づく最適化

高架橋のモデルとしては，図１に示した桁１自由度（質量 m_g，剛性 k_g，減衰定数 c_g），橋脚１自由度（質量 m_p，剛性 k_p，減衰定数 c_p）からなる線形２自由度系を用いた． 橋脚と桁を結ぶ剛性 k_gと減衰定数 c_gが支承部分の動特性を表すパラメータである．地震動がスペクトル密度 S_0の定常白色雑音であるとすると，橋脚の変位応答 x と桁の脚に対する相対変位応答 y の２乗平均応答は，それぞれ，

$$\sigma_x^2 = \pi S_0 \left\{ \frac{1-(1+\mu)^2(2-\mu)f^2+(1+\mu)^4 f^4}{\mu c' \omega_s^2} + \frac{c'(1+\mu)^3}{\mu \omega_s^4} \right\}, \quad \sigma_y^2 = \pi S_0 \left\{ \frac{(1+\mu)^2 + \mu/f^2}{\mu c' \omega_s^2} \right\} \qquad (1), (2)$$

となる[1]．ただし，質量比 $\mu = m_g/m_p$, 振動数比 $f = \omega_g/\omega_p$, 質量正規化減衰定数 $c' = c_g/m_g$である．ここで，簡単のため，橋脚の減衰は無視した．支承の設計値は，$k_g = m_g\omega_g^2 = m_g f^2 \omega_p^2$, ならびに $c_c = m_c c'$ であるから，f と c'を決定すれば，支承の設計値を定めることができる．橋脚の応答 σ_x^2を最小化する f と c'の値は，式(1)を微分することによって，μ についての式の形で以下のように求めることができる．

(i) $\mu < 2$ のとき

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu}, \quad c'_{opt} = \omega_p \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{(1+\mu)^3}}, \qquad (3), (4)$$

(ii) $\mu > 2$ のとき

$$f_{opt} = 0, \quad c'_{opt} = \omega_p / (1+\mu)^3. \qquad (5), (6)$$

式(3), (4) に示した最適設計値は，これまでも動吸振器（TMD）の最適設計値として知られているものである[2]．実際の高架橋，特に鋼製橋脚においては，式(5), (6) に示した $\mu > 2$ の場合に対応するのが一般的であろう．

式(3)から(6)に示した最適設計値を代入したときの２乗平均応答を，固定支承の場合の応答 $\sigma_0^2 = \pi S_0(1+\mu)/(2\zeta_p\omega_p^3)$ で正規化した値の平方根，すなわちRMS値を，質量比 μ について図示したのが図２，図３である．つまり，これらの図で，縦軸の１に対応するのが固定支承の場合の応答である．ここで，橋脚の減衰 ζ_pは 0.02 とした．また， $\mu > 2$ の場合の振動数比 fの最適値は０であるが，桁の永久変位を防ぐために，ここでは $f=0.1$ とした．図２から分かるように，最適設計された支承を用いることによって，橋脚変位の RMS 値，すなわち橋脚の地震力を大きく減少させることが可能である．桁と橋脚が切り離されている場合の，橋脚単独の応答も図２に点線で示した．橋脚の応答は，単に桁と橋脚を切り離す場合よりも，最適設計された免震支承によって接続した場合の方が低減されている．これは，支承が単に桁から橋脚への慣性力の伝達を防ぐのみでなく，最適設計値を用いることによって，橋脚に対して桁が動吸振器（TMD）のように働くようになるためである．

なお，式(2)の桁の相対変位 σ_y^2は，f と c'両方について単調減少になっている．すなわち，桁については，支承が

固定に近いほど相対変位が低減されることになる．

３．数値解析例

上記のように定常ランダム振動理論によって最適設計された支承の有効性を，非定常性が強いといわれる兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測波 NS 成分を用いて検証した．構造モデルは線形２自由度系とし，桁・橋脚質量比 μ=4, 橋脚減衰比 ζ_p=0.02，橋脚の固有周期 0.3 秒とした．図４は，固定支承の場合の応答である．線形解析であるため，40[cm]という大きな応答となっている．図５，図６が，ここで提案された設計値による支承を用いた場合の，橋脚ならびに桁の応答である．桁の永久変位を防ぐため，式(5)の最適値である f=0 は用いず，f=0.1 とした．橋脚の応答は 5[cm]以内，桁の応答は 20[cm]以内に収まっており，非定常性の強い地震入力に対しても，本設計値を用いた支承が有効に働くことがわかった．

４．まとめ

高架橋における支承部分の最適設計に関する基礎的情報を得るため，橋脚・桁系を線形２自由度系にモデル化し，定常ランダム振動理論を用いて解析的検討を行った．その結果，支承が線形の動特性を持つという理想的な条件の下で，式(3)～(6)に示したように簡単な解析的な形で最適設計値を求めることができた．また，単に桁と橋脚を切り離すよりも，本設計値による支承を用いた方が，橋脚の応答が一層低減されることが明らかになった．これは，最適設計された支承を用いることによって，桁の慣性力が橋脚に伝わるのを防ぐのみでなく，桁が橋脚に対して動吸振器（TMD）的に作用するためであると考えられる．さらに，兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測波 NS 成分を用いた数値解析によって，本設計値の有効性を確認した．今後は，支承や橋脚の非線形性，基礎の影響などを加味したより精緻なモデルでの検証を行い，ハードウェア構成を含めて現実的な最適設計法を構築していく予定である．

参考文献： [1] S.H.Crandall and W.D.Mark, *Random Vibration in Mechanical Systems*, Academic Press, 1963.
[2] 阿部雅人・藤野陽三：摂動解による同調質量ダンパー（ＴＭＤ）-構造物系の動特性の理解と制振評価、土木学会論文集 No.446, pp.157-166, 1992.

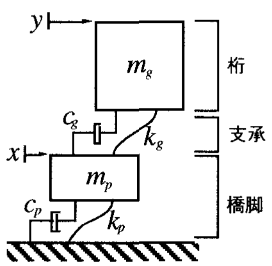

図１　橋脚・桁系

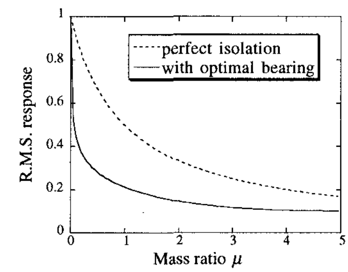

図２　定常白色雑音入力時の橋脚の RMS 応答

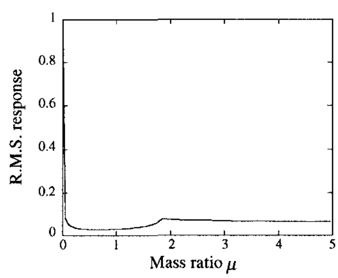

図３　定常白色雑音入力時の桁の RMS 応答

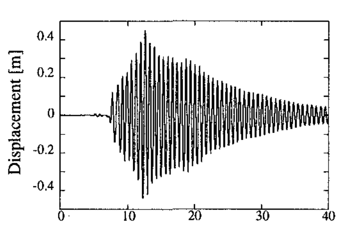

図４　神戸海洋気象台 NS 波入力時の固定支承の場合の応答

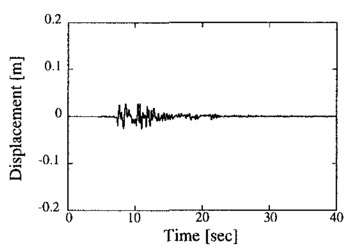

図５　神戸海洋気象台 NS 波入力時橋脚の応答

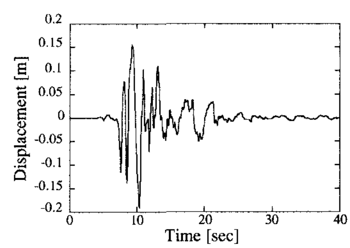

図６　神戸海洋気象台 NS 波入力時の桁の応答