バイリニア型免震支承の特性値の決定法

佐賀大学理工学部　正会員　井嶋克志
〃　正会員　後藤茂男
〃　川崎徳明

1．まえがき

現在までに開発された免震支承は、その履歴曲線をバイリニア型に近似できる場合が多く、免震支承の設計は、許容できる支承変形のもとに、地震時の桁慣性力および桁の応答変位を許容範囲内に抑えることのできる合理的な支承の１次剛性k_1、降伏後の２次剛性k_2および降伏荷重Q_yを決定することが重要となる。したがって、これらの特性値あるいは直接それぞれの支承形状、構造の決定法として、非線形応答スペクトルを用いる方法、等価線形化法による試行錯誤的方法、一つの免震支承形式に対する膨大な応答計算結果を図表にまとめこれを用いる方法などが採られている。

本研究は、新しい手法として、等価線形化式から同一の仮定のもとにその逆の等価バイリニア式を誘導し、種々の免震支承形式において、同一形式であれば２次剛性と１次剛性の比は一定である場合が多いことに着目し、繰り返し計算を用いることなく、応答スペクトル曲線から入力地震波の最大加速度に応じた特性値の設定が容易にでき、線形系とバイリニア系の等価性の仮定の範囲で、同一の剛比のもとにほぼ最適な地震応答最大値を示す特性値の設定方法を提案するものである。本手法は、種々の地震波について全て最適の応答を示すものではないが、剛比と降伏荷重が独立であり、決定した特性値を持つ支承構造が作成可能のものであれば、バイリニア型免震支承に共通して用いることができる合理的な特性値の決定法と思われる。

2．１自由度バイリニア系の特性値の決定法

バイリニア系の履歴ループのもとに、地震応答最大値における割線剛性および履歴減衰エネルギーが、線形系のそれと等価であると仮定すれば、y_mを最大変位、y_0を降伏変位とし、$\nu=y_m/y_0$，$\mu=k_2/k_1$とおけば、hとh'の違いはあるが、よく知られた次式を得る。

$$k=\frac{1-\mu+\mu\nu}{\nu}k_1 \qquad (1) \qquad\qquad h'=\frac{2}{\pi}\,\frac{\nu-1}{\nu}\,\frac{1-\mu}{1-\mu+\mu\nu} \qquad (2)$$

ここに、$h'=h/\sqrt{h^2-1}$である。上式においては、最大応答値はバイリニア系のそれであるが、等価性の仮定のもとに線形系の最大応答値と考え、$\eta=y_c/y_m$（y_cは１次剛性から２次剛性に変わる点の変位）のパラメータを導入すれば、次式で現されるような線形系と等価なバイリニア系の特性値を示す式を得る。

$$k_1=\left(1+\frac{\pi h'}{1+\eta}\right)k,\quad k_2=\left(1-\frac{\pi h'}{1-\eta}\right)k,\quad Q_y^{*}=mS_A\pi h'/(1-\eta) \qquad (3)$$

ここに、mは質点の質量、S_Aは加速度応答スペクトル、Q_y^{*}は２次剛性直線の切片荷重である。上式が示すように、入力地震波に関係することなくk_1，k_2を得ることができる。μが一定であれば、ηは式（４）で表される。さらに、ηの存在範囲より、等価減衰定数の最大値は式（５）で表される。

$$\eta=-\frac{\pi}{2}h'\pm\sqrt{1-\frac{1+\mu}{1-\mu}\pi h'+\frac{\pi^2}{4}h'^2} \qquad (4) \qquad\qquad h'=(2/\pi)(1-\sqrt{\mu})/(1+\sqrt{\mu}) \qquad (5)$$

これより、式（５）の等価減衰を有するバイリニア系の特性値が次のように簡単な式で得られる。

$$k_1=k/\sqrt{\mu},\qquad k_2=\sqrt{\mu}\,k,\qquad Q_y^{*}=mS_A(1-\sqrt{\mu}) \qquad (6)$$

連続橋の支承の設計の場合は当然であるが、支承の形状あるいは材料的制約により必ずしも式（６）の特性値を達成できない場合がある。このときには、式（３），（４）を用いて特性値を求めればよい。

3．連続橋のバイリニア型免震支承の特性値

連続橋における橋台および各橋脚上の支承の特性値の決定法は、確率論的等価線形化手法や限られた範囲

での図表を用いる手法などはあるが、現状では、合理的な支承を設計するためには経験と試行錯誤を要している。本手法は、橋台および各橋脚を全系の応答と等しくなるように分割し、前節と同様にして、個々の系のバイリニア型免震支承を設計するものである。すなわち、まず、荷重分担および応答スペクトル曲線から設定した全系の固有周期と減衰定数を用いて、支承を含めた各橋脚および橋台の個々の1自由度系の剛性k_iと質量m_iを決める。k_pを橋脚単体の剛性とし、$\sigma=k_i/k_p$と置くことにより、橋脚と支承の合成バイリニア系について前節と同様の計算を行えば、等価減衰定数の最大値は次式で表される。

$$h'=(2/\pi)(1-\sigma)(1-\sqrt{\mu})/(1+\sqrt{\mu}) \qquad (7)$$

したがって、支承単体より$1-\sigma$だけ減衰は低下することになる。式(7)より、最大の減衰効果を持つバイリニア系の特性値は、

$$k_1=\frac{k_i}{(1-\sigma)\sqrt{\mu}},\quad k_2=\frac{\sqrt{\mu}}{1-\sigma}k_i,\quad Q_y{}^*=m_i S_A\frac{(1-\sigma)(1-\sqrt{\mu})}{1-\sigma(1-\sqrt{\mu})} \qquad (8)$$

なお、免震支承が活用できる橋脚剛性の最小値は、

$$k_p=k_i/\{1-\pi/2h'(1+\sqrt{\mu})/(1-\sqrt{\mu})\} \qquad (9)$$

となる。

4．数値計算

バイリニア型免震支承として、最も普及している鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB支承）を数値計算に用いた。LRB支承の剛比は$\mu=1/6.5$である。入力には種々の地震波を用いたが、本論ではエルセントロ地震波記録についての計算結果を示している。

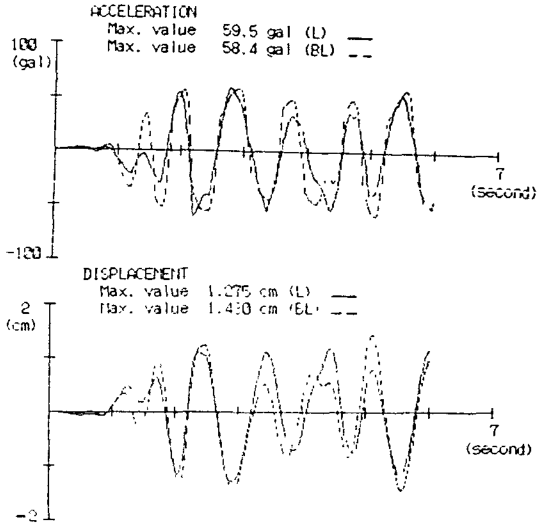

図1．バイリニア系と線形系の応答時刻歴の比較

図1は、固有周期1sec、式（5）から得られる減衰定数の最大値を0.268として、入力加速度$\ddot{\phi}max=100gal$のもとに式（6）から得られた特性値を持つバイリニア系と線形系との応答を比較したものである。本来、設計においては応答最大値のみ必要であるが、時刻歴も含めて2つの系は比較的よく一致している。

図2は、最大減衰定数のもとに、入力加速度最大値をパラメータとして、種々の線形系の固有周期について等価なバイリニア系の応答最大値を示したものである。絶対加速度はよく一致し、変位については少し誤差があるが、免震橋梁として妥当な周期1.0～2.0secにおいては比較的よく一致していると思われる。さらに、バイリニア系の応答最大値も入力加速度にほぼ比例して増加していることが判る。なお、その他の計算結果および免震支承を有する連続橋の応答計算結果については、講演時に発表する予定である。

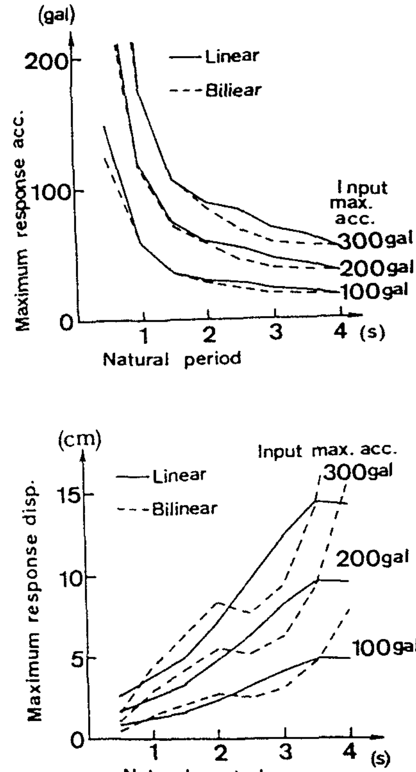

図2．バイリニア系と線形系の応答最大値の比較

参考文献　道路橋の免震設計法ガイドライン（案）、国土開発技術研究センター、1989.