

等価バイリニア化手法による免震支承の実設計への応用

佐賀大学 正員 井嶋克志

" 正員 後藤茂夫

" 川崎徳明

1. まえがき

最近、実用化されつつある免震支承は、橋脚、橋台への作用桁慣性力の分担および長周期化による低減を図ると共に、これに伴う桁変位の増大を支承の履歴吸収エネルギーによる高減衰能化により防ぐものである。これまでに開発された免震支承の多くは、バイリニア復元力特性を有し、その設計においては、地震時の桁慣性力および桁変位をできる限り小さく抑えることのできる免震支承の合理的特性値を決定し、これに適合する支承構造を求めることが重要となる。

本研究は、1自由度バイリニア系の地震応答と線形系のそれに比較的良好一致を得る等価線形化手法の仮定に基づき、線形系のバネ定数と減衰定数から地震応答が等価となるバイリニア系の特性値を求めれば、繰り返し計算の必要ない等価バイリニア化式が得られることを示したものである。さらに、支承降伏前後の剛比が一定の条件の基に、最大の減衰を示す唯一のバイリニア特性値が入力の大きさに応じて決定する。また、連続橋において、橋脚の動的応答が無視できる場合、橋脚を複素バネに置換することにより免震支承の合理的バイリニア特性値が容易に得られることを示した。

2. Dynamic Stiffness法に基づく等価バイリニア化式

Dynamic Stiffness法はKryloff-Bogoliuboff法の第1近似解に基づく等価線形化手法であり、位相共振状態の振動数とヒステリシスが囲む面積が等しい仮定の基に、バイリニア系と等価な複素バネ系のバネ定数 k'_D および減衰定数 h'_D は次式で表される。

$$k'_D = k_{2D} + (\theta_c - \sin \theta_c \cos \theta_c)(k_{1D} - k_{2D})/\pi \quad (1)$$

$$2h'_D k'_D = (\sin^2 \theta_c)(k_{1D} - k_{2D})/\pi \quad (2)$$

ここに、 k_{1D} 、 k_{2D} はそれぞれバイリニア型復元力特性における1次剛性、2次剛性であり、 $\cos \theta_c = y_c/y_m$ である。

一方、この等価線形化手法の仮定に基づき、線形系と等価なバイリニア系の特性値は次式で表される。

$$k_{1D} = \{1 + 2h'_D(\pi - \theta_c + \sin \theta_c \cos \theta_c)/\sin^2 \theta_c\}k'_D \quad (3)$$

$$k_{2D} = \{1 - 2h'_D(\theta_c - \sin \theta_c \cos \theta_c)/\sin^2 \theta_c\}k'_D \quad (4)$$

$$F_{yD}^* = m S_A \pi h'_D / (1 + \cos \theta_c) \quad (5)$$

ここに、 m は質点の質量、 S_A は加速度応答スペクトルである。

等価線形化式(1)、(2)と等価バイリニア化式(3)～(5)は、等価のための仮定は同じであっても、式中の θ_c の性格は異なる。即ち、等価線形化式の

θ_c は確定値であり、バイリニア系の最大変位応答値を得る必要があるから、等価線形化において繰り返し計算が必要となる。しかし、等価バイリニア化式においては、 θ_c はヒステリシスが囲む面積を一定とするためのパラメータであり、減衰定数による制限はあるが、 $0 < \theta_c < \pi$ の任意の値とすることができる。

式(3)、(4)より、剛比 $\mu = k_{2D}/k_{1D}$ が一定の条件の基に、

$$h'_D = (1 - \cos 2\theta_c) / \{4\pi\mu / (1 - \mu) + 4\theta_c - 2\sin 2\theta_c\} \quad (6)$$

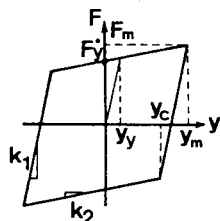
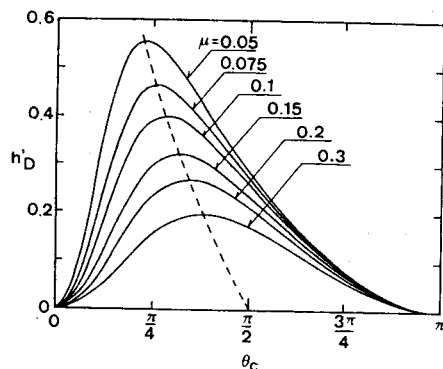


図1. バイリニア復元力特性

図2. θ_c と減衰定数 h'_D

を得る。式(6)を図示すれば、図2となる。図より、剛比 μ の値により目標とできる減衰定数には制限があることが分かる。また、式(3)～(5)を用いて、減衰定数が最大となる θ と設計地震波に対する加速度応答スペクトルによりバイリニアの復元力特性値を決定すれば、非線形のバイリニア系であっても、入力地震波より小さい同一の周波数特性を有する地震波に対しては小さい応答を示すのは当然であるから、合理的特性値を得ることができる。

3. 数値計算による等価バイリニア化式の検討

剛比 $\mu = 1/6.5$ 一定と与えられているLRB支承について、図2において最大減衰定数($h'_p = 0.317$)を取るバイリニア系特性値による地震応答計算結果と、目標とした線形系のそれとの比較を図3、4に示す。横軸が目標とした固有周期である。使用した地震波は修正開北橋記録である。加速度応答最大値は、比較的良く一致しているものの、変位応答最大値には差異が生じる。これは、等価線形化手法における仮定そのものに起因すると思われる。しかしながら、バイリニア系においては、絶対加速度最大値と変位最大値は同時に現われることから、次式を用いれば、図4に○印で示されているように、変位応答の予測は可能となる。

$$y_{\max} = (S_A - F_y^*/m) / (k_2/m) \quad (7)$$

4. 連続橋における免震支承の特性値の決定法

連続橋において、免震支承を複素バネとして、その合理的な特性値を求めれば、それに対応するバイリニア系の特性値は、2.に示した方法より得ることができる。

桁の橋軸方向の振動において、橋脚、橋台を複素バネに置換し、桁を各橋脚、橋台上毎に分割する。ここで、分割された1つの桁、支承および橋脚からなる1質点系が、目標とする全体

系の固有周期、減衰定数と同一であるように支承の複素バネを設定すれば、これらを足し合わせた全体系も目標値を有することになる。この理論の基に、各橋脚、支承の複素剛性を次式で表せば、

$$\bar{k}_p = k_{Rp} + i k_{Ip}, \quad \bar{k}_b = k_{Rb} + i k_{Ib} \quad (9)$$

力の連続条件より、支承の複素剛性は次式のように表される。

$$k_{Rb} = k_R \{ 1 + 4h_p'^2 - \sigma(1 + 4h_p'^2) \} / \{ (1 - \sigma)^2 + 4(h_p' - \sigma h')^2 \} \quad (10)$$

$$k_{Ib} = 2k_R \{ h'(1 + 4h_p'^2) - \sigma h_p'(1 + 4h_p'^2) \} / \{ (1 - \sigma)^2 + 4(h_p' - \sigma h')^2 \} \quad (11)$$

ここに、 k_R 、 h' はそれぞれ全体系のバネ定数、減衰定数であり、 $\sigma = k_R / k_{Rp}$ 、 $h'_b = k_{Ib} / (2k_{Rb})$ 、 $h'_p = k_{Ip} / (2k_{Rp})$ (12)

式(10)、(11)より、免震支承の減衰定数は式(13)、全体系の減衰定数は式(14)で表される。

$$h'_b = \{ h'(1 + 4h_p'^2) - \sigma h_p'(1 + 4h_p'^2) \} / \{ 1 + 4h_p'^2 - \sigma(1 + 4h_p'^2) \} \quad (13)$$

$$h' = \frac{1 + 4h_p'^2}{8\sigma(h'_b - h'_p)} \{ \sqrt{1 + 16\sigma(h'_b - h'_p)\{h'_b(1 + 4h_p'^2) - \sigma(h'_b - h'_p)\}} - 1 \} \quad (14)$$

式(14)は、 σ が増加するに伴い、 h' は減少し、その値は支承の減衰定数 h'_b よりも小さい値を示す。したがって、2次剛性と1次剛性の剛比が一定の同一形式の免震支承を全ての橋脚上に使用する場合には、 σ が最も大きい分割系について、同一剛比でのバイリニア系が取りうる最大減衰定数 h'_b を式(14)に代入し、この分割系の減衰定数 h' を求めれば、この h' が全体系として設定できる最大の減衰定数となる。

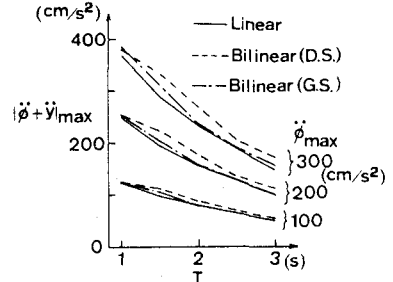


図3.1 自由度線形系とバイリニア系の加速度応答最大値

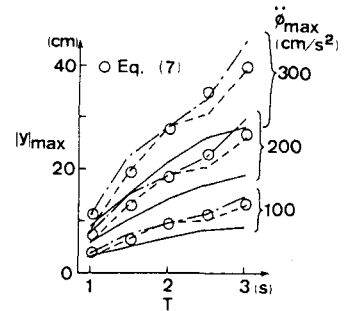


図4.1 自由度線形系とバイリニア系の変位応答最大値

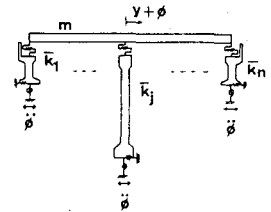


図5. 連続橋モデル