

(151) 免震橋梁の固有周期の設定法に関する一検討

(株) 荒谷建設コンサルタンツ 正会員 西原 史和
 建設省土木研究所 正会員 大塚 久哲
 建設省土木研究所 正会員 運上 茂樹

1. はじめに

免震設計は、アイソレーターによって橋を水平方向に柔らかく支持し、固有周期を長くするとともに、ダンパーにより橋の減衰性能を増大させ、地震力の低減を期待する設計である。免震設計を採用する場合の設計方法として、「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」(以下、マニュアル(案))が提案されており、ここでは、免震装置を用いた場合の橋の固有周期としては、免震装置を用いない場合の橋の固有周期の2倍程度以上とするのが良いとされている。免震橋の固有周期の設定によって免震効果が影響を受けるとともに、免震設計を適用する橋梁の条件によって異なってくることも考えられる。

本文は、免震装置を用いた場合と免震装置を用いない場合の橋の固有周期の比に着目し、固有周期が免震設計の有効性におよぼす影響を解析的に検討した結果を取りまとめたものである。

2. 解析方法

解析に用いたモデル橋としては、図-1に示すような都市内高架橋を想定し、構造型式および解析方法は以下のように設定した。

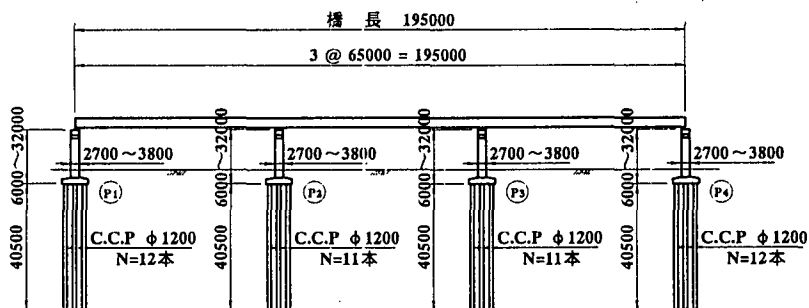


図-1 モデル橋一般図

- ① 上部構造は橋長 195m、支間長 65m の 3 径間連続鋼箱桁橋とし、下部構造は張出式鉄筋コンクリート橋脚(矩形断面)とした。また、地盤条件としてはⅢ種地盤を想定し、基礎形式は施行実績の多い場所打ち杭とした。なお、支承条件はすべての下部構造で免震支承(鉛プラグ入り積層ゴム支承; LRB)による弾性固定とした。
- ② 各ケースの設計は、橋脚高が 14m のケースを基本として支承の設定を行い、各ケースで支承剛性を大きく変化させないように、震度法レベルおよび地震時保有水平耐力法レベルについてマニュアル(案)に基づき設計を行った。
- ③ 解析は、モデル橋の各部の変位および断面力に着目し、固有周期が免震設計の有効性におよぼす影響について検討した。固有周期の算出は、「道路橋示方書 V 耐震設計編」に基づき静的骨組解析により求め、免震装置はマニュアル(案)に基づき求めた等価剛性 K_B を有する水平バネとしてモデル化した。免震橋を 1 次振動モデルに限定しモデル化すると、図-2 に示すように免震装置の剛性 K_B と下部構

造の剛性 K_{Pi} （橋脚躯体剛性と基礎剛性の直列剛性）を直列バネとし、そのバネが並列に結ばれる ΣK_i と上部構造の質量 W により構成される 1 質点 1 自由度モデルと考えることができる。

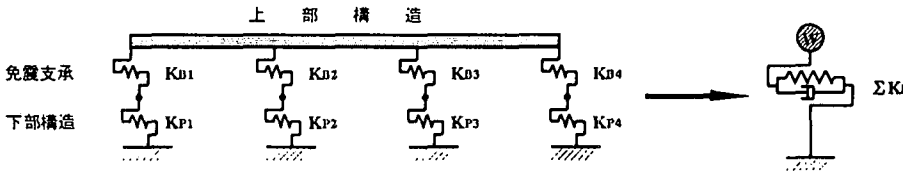


図 - 2 免震橋梁のモデル化

図 - 2 のモデルに上部構造の重量 W に相当する水平力を作用させた場合、各橋脚が分担する慣性力 F_i は次式により算出できる。

$$F_i = \frac{W \cdot K_i}{\Sigma K_i} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \dots \dots \dots (2.1)$$

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{K_{Di}} + \frac{1}{K_{Pi}}$$

ここに、

- F_i : 各橋脚が分担する慣性力 (tf)
- K_i : 各橋脚の剛性で免震装置と下部構造の剛性の直列剛性 (tf/m)
- K_{Di} : 免震装置の等価剛性 (tf/m)
- K_{Pi} : 下部構造の剛性で橋脚躯体剛性と基礎剛性の直列剛性 (tf/m)
- ΣK_i : 免震橋梁の剛性で各橋脚の剛性の和 (tf/m)
- W : 上部構造の重量 (tf)

一般に、免震装置が有効に機能する橋梁では、免震装置の等価剛性 K_{Di} は下部構造の剛性 K_{Pi} に比べ小さいので、各橋脚の剛性 K_i は免震装置の等価剛性 K_{Di} に影響される。したがって、免震装置が有効に機能する場合は、各橋脚が分担する慣性力 F_i の比率は各橋脚の免震装置の剛性比と等しくなると考えられる。反対に、免震装置の効果が期待できない橋梁では、下部構造の剛性 K_{Pi} が小さく、各橋脚の剛性 K_i は下部構造の剛性 K_{Pi} の影響を受ける。したがって、各橋脚が分担する慣性力 F_i の比率は各橋脚の下部構造の剛性比に近づくと考えられる。

さらに、各構造要素の減衰エネルギーの分担率を調べるために、モデル橋の固有値解析を行い、減衰エネルギーの分担率と固有周期比との関係について検討した。なお、減衰エネルギーの分担率は、橋全体系での 1 次モードにおけるモード減衰に対する各構造要素の減衰の占める割合とし、次式により算出した。

$$\beta_{ic} = \frac{\alpha_{ic} \cdot h_c}{h_i} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$h_i = \Sigma \alpha_{ic} \cdot h_c \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\alpha_{ic} = \frac{E_{ic}}{E_i} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$E_i = \frac{1}{2} \Sigma \phi_{ki}^T \cdot K_k \cdot \phi_{ki} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$E_{ic} = \frac{1}{2} \Sigma \phi_{ic}^T \cdot K_c \cdot \phi_{ic} \dots \dots \dots (2.6)$$

ここに、

- β_{ic} : i 次モードにおけるある特定の構造要素に属する部材の全体系に対する減衰の分担率
- h_i : i 次モードにおける橋全体系の減衰定数

- α_{ic} : i 次モードにおけるある特定の構造要素の全体系に対するひずみエネルギーの分担率
- h_c : ある特定の構造要素に属する部材の減衰定数
- E_i : 橋全体系での i 次モードにおける最大ひずみエネルギー
- E_{ic} : i 次モードにおけるある特定の構造要素に属する部材のひずみエネルギーの和

3. 解析結果

3.1 橋の固有周期および各部の変位

図-3に橋脚高と固有周期比（免震時固有周期／非免震時固有周期）の関係を示す。長周期化の度合いを表す固有周期比は、震度法・地震時保有水平耐力法ともに橋脚高が低いほど大きくなっている。

上部構造、下部構造および支承の変位量を図-5に、免震時の震度法レベルおよび地震時保有水平耐力法レベルにおける支承の変位の分担率（上部構造変位のうち、支承変位の占める割合）を図-4に示す。なお、支承の変位量としては、離散型モデルにて算出した上部構造と下部構造の間に生じる相対変位とした。

これより、支承の変位は固有周期比の大小に関わらず一定であるが、上部構造および下部構造の変位は固有周期が小さくなるにしたがい増加している。また、支承の変位の分担率は、固有周期比が大きいほど高くなっており、地震時保有水平耐力法レベルでは固有周期比が2程度より大きい範囲では80%以上を分担しているのに対し、固有周期比が1.5程度となると50%に低下している。

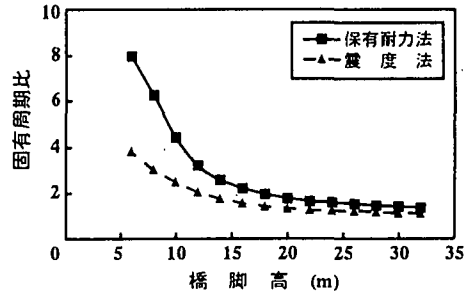


図-3 橋脚高と固有周期比

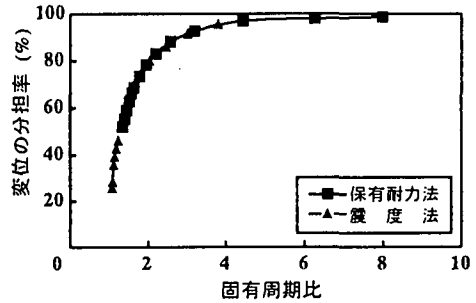
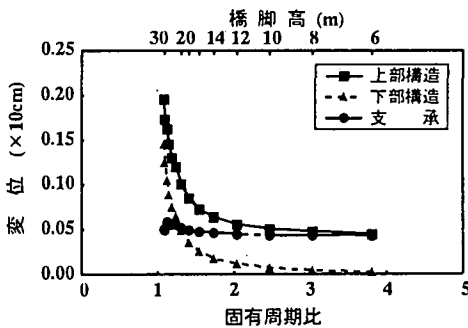
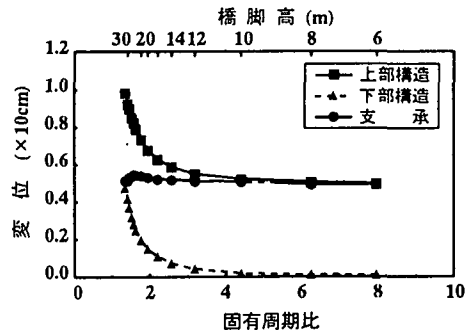


図-4 支承の変位の分担率



(a) 震度法レベル



(b) 地震時保有水平耐力法レベル

図-5 各部の変位量

3.2 橋脚天端の慣性力

図-6に免震時における各橋脚の天端に作用する慣性力、橋脚剛性および支承剛性を端部橋脚と中間橋

脚の比として無次元化したものを示す。これより、固有周期比が大きい場合は橋脚天端に作用する慣性力の比は支承剛性の比と等しく、固有周期比が小さくなるのにしたがって橋脚剛性の比に近づく。これは震度法レベルでは固有周期比が 1.5 程度、地震時保有水平耐力法レベルでは 2.0 程度を境として見られる。

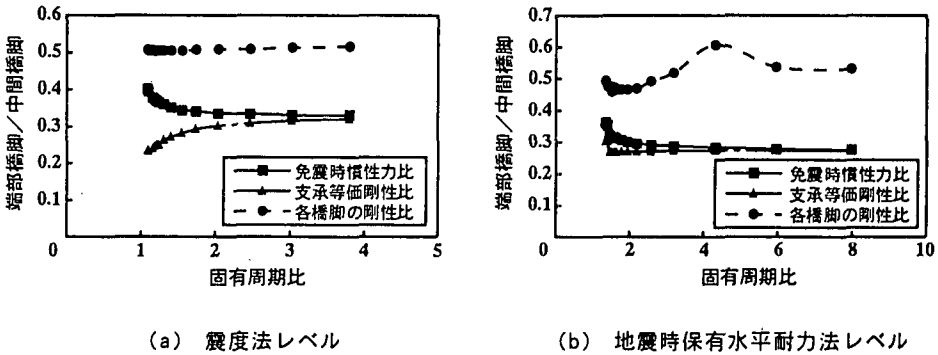


図-6 固有周期比と各橋脚の分担率

3.3 エネルギー減衰の分担率

橋のモード減衰に対する各構造要素の減衰が占める割合として、式(2.1)～式(2.5)により算出したエネルギー減衰の分担率を図-7に示す。これによると、震度法レベルでは固有周期比が大きい場合は、橋のエネルギー減衰のほとんどを支承が分担しているが、固有周期比が高くなるにしたがってその割合は徐々に減少し、固有周期比が 1.5 程度以下になると支承より基礎の分担率が卓越している。地震時保有水平耐力法レベルにおいても、固有周期比が大きい場合は、橋のエネルギー減衰のほとんどを支承が分担しており、固有周期比が 2 程度以上の範囲では 80% 以上を分担しているのに対し、固有周期比が 1.5 程度となると 60% に低下している。

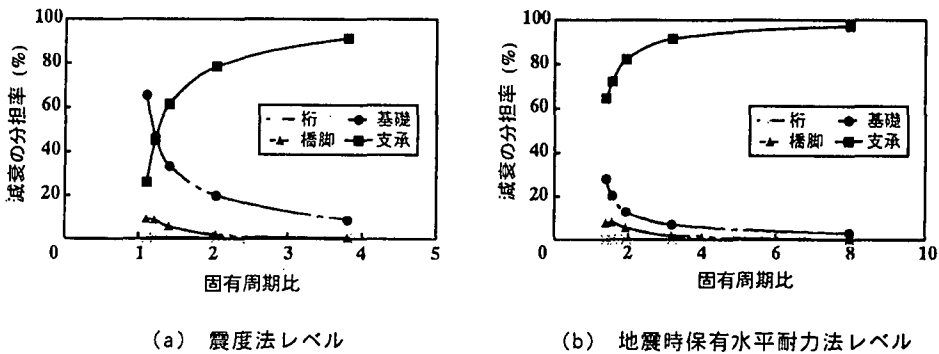


図-7 固有周期比と各部のエネルギー減衰の分担率

4. 結論

免震時と非免震時の橋の固有周期の比に着目し免震設計の有効性について検討した結果を以下に示す。

- ① 支承の変位の分担率は、地震時保有水平耐力法レベルにおいて固有周期比が 2 程度以上の範囲では 80% 以上を分担しているのに対し、固有周期比が 1.5 程度となると 50% に低下している。
- ② 橋脚天端に作用する慣性力は、震度法レベルでは固有周期比が 1.5 程度以下、地震時保有水平耐力法レベルでは 2.0 程度以下となると、支承の剛性の影響より下部構造の剛性の影響を受ける。
- ③ 免震支承のエネルギー減衰の分担率は、震度法レベルでは固有周期比が 1.5 程度以下、地震時保有水平耐力法レベルでは 2 程度以下となると低下して基礎部の分担率が増加する。