

すべり方式免震システムを有する橋梁の正弦波地動に対する応答特性

DYNAMIC BEHAVIOR OF A BRIDGE WITH SLIDE TYPE ISOLATION SYSTEM
UNDER SINUSOIDAL EXCITATION

岡本 晋*、深沢 泰晴**

By Susumu Okamoto and Yasuharu Fukasawa

Dynamic behavior of a bridge with slide type isolation system is studied. The isolation system consists of a slide bearing and a restoring force device. The analytical model is the lumped mass model with a slide element, linear springs and viscous dampers. The sinusoidal excitations with various kinds of period and amplitude are exerted to the model. As results of these analyses, the following characteristics of the system are pointed out.

- 1) When a relatively soft horizontal spring is used with the slide bearing, the ratio of maximum acceleration response to the acceleration due to gravity is almost the same as the friction coefficient of the slide bearing.
- 2) When the input acceleration is large, the resonant excitation occurs and the period of the resonant excitation is almost the same as the period defined by the mass of the deck and the stiffness of the restoring force device.

Key Words : base isolation system, slide bearing, bridge, response analysis

1. はじめに

近年、橋梁の下部構造に生ずる地震力を低減することを目的とする免震技術が実用化されつつある¹⁾。建築分野では免震構法がすでに定着しており、建物を柔らかい支承で支え長周期化するとともに、エネルギー吸収能力を増加させることで免震効果が発揮される各種の免震装置が実用化されている。橋梁における免震装置は、一般に、橋脚上に設けられるため、免震装置への入力加速度が建屋用免震装置に比べて大きくなると考えられる。また、伸縮装置等の制限により、橋桁と橋脚との間の水平相対変位（支承変位）をあまり大きくすることができない。したがって、橋梁を対象とした免震システムは、むやみに柔らかい免震装置を用いるのではなく、エネルギー吸収装置を併用することにより支承変位と地震力を同時に減少させることを目的として設置されている²⁾。我が国では、免震時の固有周期が非免震橋梁の固有周期の2倍程度以上となるせん断剛性を持たせ、同時にエネルギー吸収機能を有している鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）や高減衰積層ゴム支承（HDR）を免震装置として用いた例がみられる^{3)・4)}。

一方、免震装置としてすべり支承を使用すると、すべり現象による大きな履歴減衰が得られるとともに、摩擦力以上の地震力が上部工に伝達されず、また、システムの固有周期がないため共振現象がなく、免震装置として優れた特性を示す。しかし、すべり支承を単独で橋梁に適用する場合は、復元力がないため、地震時のすべり変位や地震後の残留変位を許容値以内に制御できない。そこで、本検討で対象とする橋梁用すべり方式免震システムは、既に実用化されている建物や床を対象としたすべり方式免震システム^{5)・6)}と同様に、すべり支承とともに復元力を得るための水平ばねを併用することとしている^{7)・8)}。

* 工修 研究員 大成建設技術研究所 (〒245 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

** 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400 山梨県甲府市武田4-3-11)

すべり支承と水平ばねで構成される橋梁用すべり方式免震システムは以下に示す特長を有している。

- ①比較的弱い水平ばねを使用することにより、橋桁慣性力が摩擦力とほぼ等しい値で頭打ちとなる。
- ②すべり現象に伴う大きな履歴減衰が期待できる。
- ③すべり現象を利用することで、共振現象が生じにくくなり、特定の地震に対して過大な応答が生じない。

実橋梁への適用においては、入力地震動の特性を考慮した上で、適切な摩擦係数を持ったすべり支承と、適切なばね定数を持った水平ばねを組み合わせることにより、橋梁端部における地震時の移動量や残留変位量を許容値以内におさえながら、①～③の特長を生かした大きな免震効果を得ることが望ましい。

本報では、すべり支承と水平ばねで構成される、すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時の特性を把握するため、正弦波地動に対する橋梁の基本的な応答を解析的に検討した結果を報告する。最初に、入力正弦波の振幅や周期、橋梁の固有周期および免震システムの特性値の影響をみるため、これらのパラメータを広範囲で種々変化させた時の定常応答を整理し、本システムを有する橋梁の基本的な特徴を整理した⁹⁾。次に、パラメータを現実的な橋梁に合わせて固定し、正弦波地動および設計用地震動が入力した時の橋梁の応答特性を検討し、現実的な範囲での本システムの特徴を明らかにした。

2. 正弦波地動入力時の応答特性

2.1 解析方法

解析対象は、1次振動が卓越する単純な振動特性を持った橋梁とする。橋梁は、図-1に示すように橋脚質点と橋桁質点からなる2質点系にモデル化する。橋脚部は一次振動のみを考慮し、1自由度のばね質点系でモデル化し、粘性減衰要素を付加する。橋桁は剛体として扱い、集中質量とする。橋桁質点と橋脚質点の間に設ける免震装置は、すべり支承の力・変形関係を表す剛塑性ばねと復元力装置としての水平ばねおよび粘性減衰要素を組み合わせる。

周期 $T (T=2\pi/\omega)$ 、変位振幅 d の正弦波地動入力に対する、対象橋梁の滑動時・非滑動時の運動方程式を(1)式～(3)式に、滑動開始・終了条件を(4)式、(5)式にそれぞれ示す。滑動時は、免震装置の摩擦力、ばね反力および減衰力が橋桁と橋脚の間で伝達される。また、非滑動時は、支承の残留変位 (u_{d0}) が一定のまま橋桁と橋脚が一体となって振動する。滑動開始は、橋桁の慣性力と残留変位 (u_{d0}) から算出されるばね反力の和が摩擦力以上となる条件によって、滑動終了は、橋桁と橋脚との相対速度 (\dot{u}_d) がゼロとなる条件によってそれぞれ判定する。なお、本解析では静止摩擦係数を動摩擦係数と等しくした。

橋梁各部の応答は、滑動開始・終了条件を考慮しながら滑動時および非滑動時の運動方程式(1)式～(3)式を順次解くことによって求める。なお、本報では定常な状態の応答値を整理する。

滑動時

$$m_d \cdot (\ddot{z} + \ddot{u}_p + \ddot{u}_d) + c_d \cdot \dot{u}_d + k_d \cdot u_d = -\text{sign}(\dot{u}_d) \cdot \mu \cdot m_d \cdot g \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$m_p \cdot (\ddot{z} + \ddot{u}_p) + c_p \cdot \dot{u}_p + k_p \cdot u_p - c_d \cdot \dot{u}_d - k_d \cdot u_d = \text{sign}(\dot{u}_d) \cdot \mu \cdot m_d \cdot g \quad \dots\dots\dots(2)$$

非滑動時

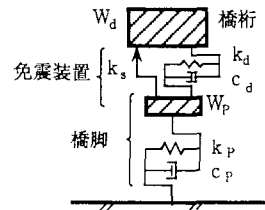
$$(m_p + m_d) \cdot (\ddot{z} + \ddot{u}_p) + c_p \cdot \dot{u}_p + k_p \cdot u_p = 0$$

ただし、 $u_d = u_{d0}$ 、 $\dot{u}_d = 0$ 、 $\ddot{u}_d = 0$ (3)

滑動開始条件 $|m_d \cdot (\ddot{z} + \ddot{u}_p) - k_d \cdot u_{d0}| > \mu \cdot m_d \cdot g$ (4)

滑動終了条件 $\dot{u}_d = 0$ (5)

ここに、 m_d 、 m_p ：橋桁と橋脚の集中質量
 k_d 、 k_p ：水平ばねと橋脚のばね定数



- W_p ：橋脚の重量
- W_d ：橋桁の重量
- k_p ：橋脚のばね定数
- k_d ：水平ばねのばね定数
- c_p ：橋脚の減衰係数
- c_d ：免震装置の減衰係数
- k_s ：すべり現象を表わす非線形ばね

図-1 解析モデル

c_d, c_p : 免震装置と橋脚の減衰係数

μ : すべり支承の摩擦係数

z : 地動変位 ($= d \sin(\omega t)$)

u_d, u_p : 支承のすべり変位および橋脚の地面に対する相対変位

である。なお、 $(\dot{\quad})$ 、 $(\ddot{\quad})$ はそれぞれ時間に関する1回微分と2回微分を表す。

2. 2 検討方法

検討対象とした、すべり支承と水平ばねで構成される免震システムの履歴特性を図-2に示す。地動加速度が小さく、橋桁慣性力が摩擦力より小さい間は滑動しないため免震効果が生じない。滑動していない時の橋脚の振動モードは、非免震の場合と同じく支承部をヒンジと考えると、片持ばりのモードと等しくなる。徐々に地動加速度が増加し、摩擦力以上の橋桁慣性力が生ずると橋桁～橋脚間ですべりが生じ、免震効果が発揮される。免震装置の特性値としては、摩擦係数と水平ばねのばね定数があげられるが、ここでは、水平ばねのばね定数 k_d と橋桁質量 m_d から算出されるすべり後の固有周期 T_d ($T_d=2\pi\sqrt{m_d/k_d}$) を、摩擦係数とともに免震装置の特性を表す代表値として使用する。

今回の検討は、以下に示す3個の固定無次元パラメータと、3個の変動無次元パラメータを考慮する。

固定パラメータ

①橋桁質量 m_d の橋脚質量 m_p に対する比の値 I_m を5とする。

②橋脚の減衰定数 h_p ($h_p=c_p/(2\sqrt{m_p k_p})$) は5%とする。したがって支承をヒンジとした時の非免震橋梁の減衰定数 h_f は、 $h_f=h_p/\sqrt{I_m+1}$ より約2%となる。

③免震システムの減衰定数 h_d ($h_d=c_d/(2\sqrt{m_d k_d})$) は5%とする。

変動パラメータ

①非免震橋梁の固有周期 T_f ($T_f=2\pi\sqrt{(m_d+m_p)/k_p}$) に対する免震システムのすべり後の固有周期 T_d の比 I_T ($I_T=T_d/T_f$) の値を1から10まで変化させる。

②非免震橋梁の固有周期 T_f に対する正弦波地動の周期 T ($T=2\pi/\omega$) の比 I_f ($I_f=T/T_f$) の値を0.02から10まで変化させる。

③摩擦係数と重力加速度の積 μg (以下、摩擦力相当加速度と呼ぶ) に対する地動加速度振幅 a ($a=d\omega^2$) の比の値 I_a ($I_a=a/\mu g$) を0.5から4まで変化させる。

2. 3 共振曲線

すべり支承を免震装置として用いる利点のひとつとして、共振現象が生じにくくなることがあげられる。すべり支承を単独で使用すると、復元力がないため共振現象は生じないが、今回の解析対象である免震システムでは、すべり支承の他、水平ばねを併用しているため、摩擦力に比べて大きな橋桁慣性力が生ずる振幅を持った地動が作用した場合には、共振現象が生じる可能性もある。ここでは、正弦波地動の振幅が変化した時のすべり方式免震システムを有する橋梁の共振曲線を求め、その振動特性を検討する。図-3に、すべり後の固有周期を非免震橋梁の固有周期の5倍 ($I_T=T_d/T_f=5$) としたシステムに対する橋桁加速度と支承のすべり変位の共振曲線を示す。

共振曲線を見ると、非免震橋梁の固有周期に近い周期成分が

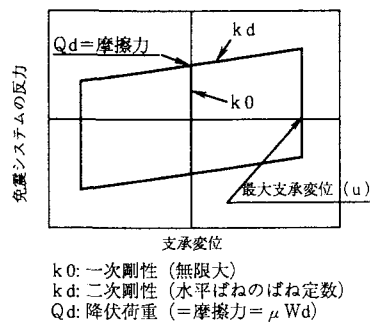


図-2 すべり方式免震システムの履歴特性

入力される場合には、橋桁の加速度が摩擦力相当加速度に達するまで増幅されるが、摩擦力相当加速度を越えると橋桁の加速度が頭打ちとなる。入力波の周期成分が非免震橋梁の固有周期より長くなり、すべり後の固有周期に近付くと、地動加速度振幅が摩擦力相当加速度より小さい場合には滑動しなくなり、橋桁加速度は地動加速度とほぼ等しくなる。地動加速度振幅が大きくなり、摩擦力相当加速度の1.5倍以上となる場合には、水平ばねによるすべり後の振動が顕著となり、すべり後の固有周期付近で共振に近い状態が現れる。橋桁加速度および支承のすべり変位のピーク値は、免震システムの減衰定数 ($h_d=5\%$) から算出される応答倍率10倍 ($1/2h_d$) より小さく、履歴減衰の影響が表れている。

2. 4 応答波形

図-4に、図-2中、A点とB点で示す状態の橋脚、橋桁および免震装置の定常応答波形を示す。横軸は無次元化した時間軸で、位相角を表わしている。縦軸は、地動振幅で無次元化した橋桁と橋脚の絶対加速度、および、支承のすべり変位と橋脚の地面に対する相対変位を示す。

図-4 (a) は振幅が摩擦力相当加速度の0.5倍で、周期が非免震橋梁の固有周期と等しい正弦波地動が作用する時の応答値を示す。この場合

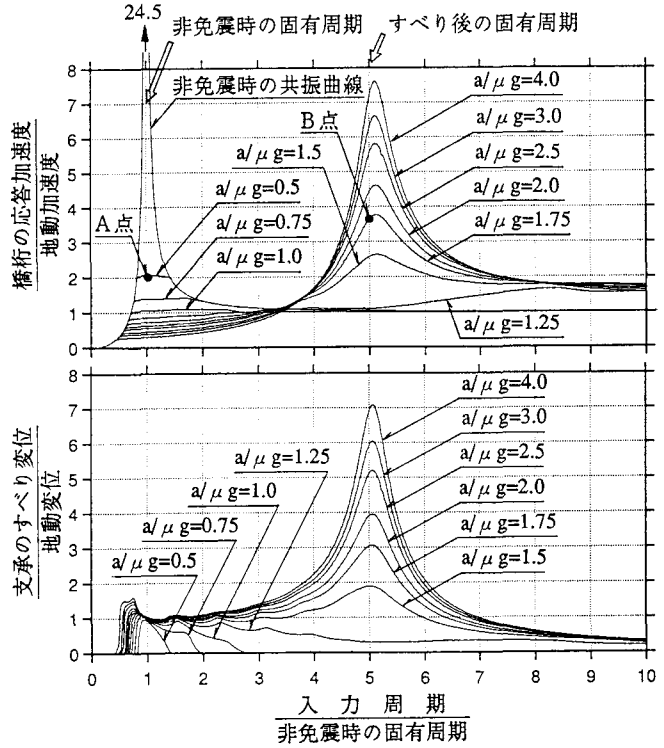
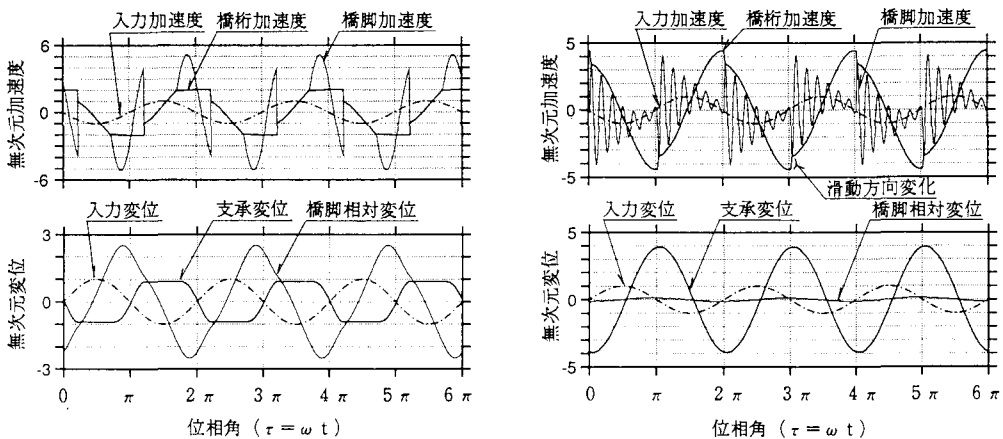


図-3 すべり方式免震システムを有する橋梁の共振曲線
[$(T_d/T_f) = 5$]



(a) 図-2中A点、 $(T_d/T_f) = 5$ 、 $(T/T_f) = 1$ 、 $(a/\mu g) = 0.5$ (b) 図-2中B点、 $(T_d/T_f) = 5$ 、 $(T/T_f) = 5$ 、 $(a/\mu g) = 2$

図-4 正弦波入力時の応答例

には橋桁加速度は摩擦力相当加速度（地動加速度の2倍）ではほぼ頭打ちとなり、橋桁加速度が摩擦力相当加速度より小さい間はすべっていない。滑動時の橋脚加速度は橋桁加速度より大きくなり、最大で地動加速度の約5.1倍となる。支承のすべり変位はほぼ地動変位と等しく、橋脚の地面に対する相対変位は地動変位の約2.5倍となる。この値は、橋梁の減衰定数 ($h_f=2\%$) から算出される非免震橋梁の橋脚変位の応答倍率約25倍 ($1/2h_f$) のほぼ1/10で、大きな免震効果が表れている。

図-4 (b) は振幅が摩擦力相当加速度の2倍で、周期がすべり後の固有周期と等しい正弦波地動が作用した時の応答値を示す。この場合には、常にすべりが生じ、橋桁の位相は地動に対してほぼ 90° 遅れる。このことは、加速度振幅が摩擦力相当加速度の2倍程度になると、共振に近い現象が生じることを示している。また、滑動方向が変化する時 ($\tau \Rightarrow \pi$, n : 整数)、橋桁加速度に摩擦力の作用方向の変化に伴う段差がみられ、その反力として橋脚に大きな加速度が生じる。なお、橋脚の地面に対する相対変位は支承のすべり変位にくらべて非常に小さく、変形が免震装置に集中する。

2. 5 水平ばねのばね定数の影響

図-5 に、地動加速度を摩擦力相当加速度のそれぞれ0.5倍、2倍とし、すべり後の固有周期を変化させた時の橋桁加速度と支承のすべり変位の共振曲線を示す。

地動加速度が摩擦力相当加速度の0.5倍の時には、すべり後の固有周期を非免震橋梁の固有周期の2倍以上に設定すれば、顕著な共振点が生じず、橋桁加速度の最大値がほぼ摩擦力相当加速度で頭打ちとなる。また、非免震橋梁の固有周期に近い周期成分が入力した時だけ滑動し、支承変位が生じる。その最大値は、すべり後の固有周期を非免震時の固有周期の2倍以上に設定すればほぼ一定で、地動変位振幅とほぼ等しくなる。

地動加速度が摩擦力相当加速度の2倍の時には、非常に弱いバネを使用してすべり後の固有周期を長くしても共振点が生じる。共振点の橋桁加速度最大値は、すべり後の固有周期を非免震橋梁の固有周期と一致させた時に摩擦力相当加速度の約28倍と大きくなるが、すべり後の固有周期を長くすることにより共振点のピーク値は徐々に減少する。すべり後の固有周期が非免震橋梁の固有周期の5倍以上となると橋桁加速度の最

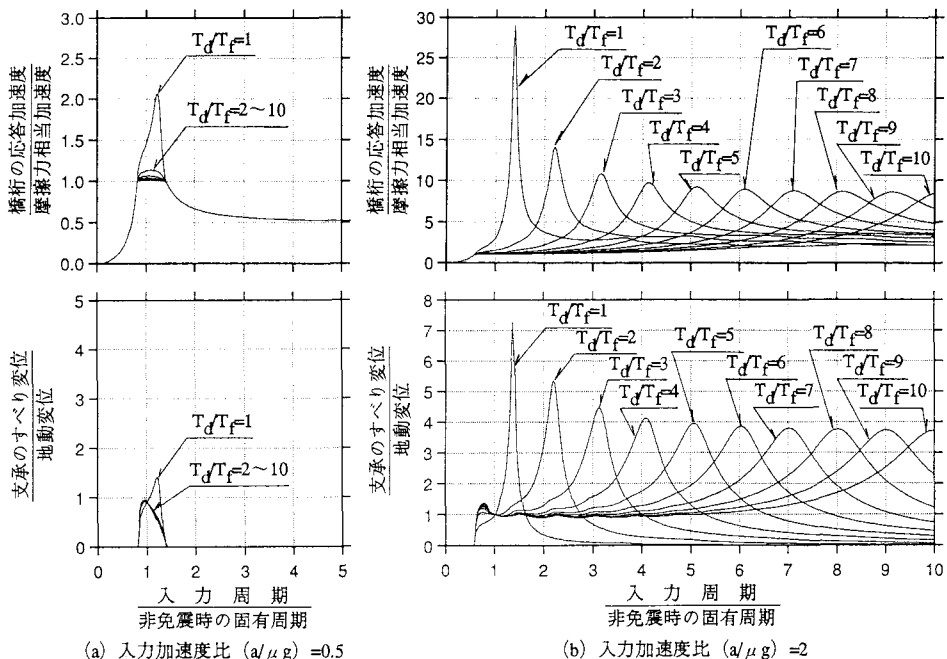


図-5 水平ばねのばね定数が異なるシステムの共振曲線

大値が摩擦係数相当加速度の約9.2倍と大幅に小さくなる。これ以上は、すべり後の固有周期を長くしても加速度の最大応答倍率はあまり変わらず、免震効果は改善されない。

支承のすべり変位の共振点の応答倍率も、すべり後の固有周期を非免震橋梁の固有周期の5倍以上にするとほぼ一定値となる。同一加速度振幅を持った正弦波の場合、地動変位振幅が、周期が長くなると大きくなることを考えあわせると、過大な支承のすべり変位を抑制しながら大きな免震効果を得るためには、すべり後の固有周期を非免震橋梁の5倍程度とすることが必要である。

3. 実橋梁との対応

前節では、様々な特性を持ったすべり方式免震システムを有する橋梁に、正弦波地動が入力した時の橋梁の応答特性を、無次元化した応答値を用いて検討した。ここでは、前節の結果を応用し、すべり方式免震システムを適用した現実的な橋梁の正弦波や設計用地震動に対する応答特性について検討した結果を示す。

3.1 正弦波地動に対する応答

非免震時の固有周期が0.5秒で橋脚の減衰定数が5%の橋梁に、摩擦係数10%と15%のすべり支承を設置する場合について検討する。図-6に、すべり後の固有周期を2.5秒（非免震橋梁の固有周期の5倍）としたシステムを有する橋梁に、加速度振幅を50Galから150Galまで変化させた正弦波地動を入力した時の橋桁加速度と支承のすべり変位を示す。

地動加速度150Galの正弦波が摩擦係数10%のシステムを有する橋梁に作用する場合には、すべり後の固有周期（2.5秒）付近で共振現象が生じ、橋桁加速度、支承のすべり変位ともにピークを持ち、最大値がそれぞれ約390Gal、約45cmに達する。これに対して摩擦係数15%のシステムを有する橋梁に地動加速度150Galの正弦波が入力する場合には、橋桁の加速度が摩擦係数相当加速度（150Gal）ではほぼ頭打ちとなりすべり方式の特長がみられる。この時、支承のすべり変位の最大値は約2cmで、摩擦係数を10%とした場合に比べて小さくなる。

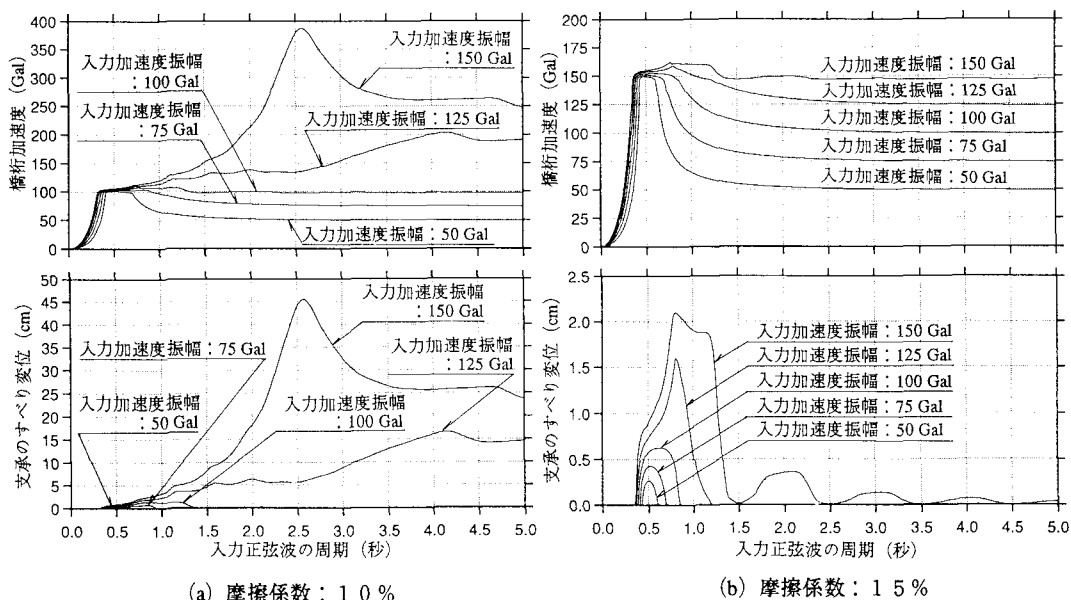


図-6 非免震時の固有周期が0.5秒の橋梁の免震時の応答値
[すべり後の固有周期：2.5秒]

図-7に、摩擦係数を10%とし、水平ばねのばね定数を変え、すべり後の固有周期を0.5秒から5秒まで変化させた時の加速度振幅150Galの正弦波に対する橋桁加速度と支承のすべり変位の共振曲線を示す。橋桁加速度は、すべり後の固有周期が0.5秒の場合約1850Galに達するが、すべり後の固有周期を2.5秒以上にすると、約350Galではば一定値となる。支承のすべり変位は、地動変位が大きくなるため、すべり後の固有周期を長くすると大きくなり、すべり後の固有周期を5秒とした場合が最大で約150cmに達する。

例えば、以上の結果を踏まえて支承のすべり変位約30cmを許容するように、周期が種々変化する加速度振幅150Galの正弦波を対象として設計し、すべり後の固有周期を2秒と設定すれば、橋桁の応答加速度の最大値を約400Galに抑制することができる。この値は、非免震時の共振点の応答倍率(24.5倍)から評価される橋桁加速度最大値(約3600Gal)の約1/9となり、大きな免震効果が得られる。

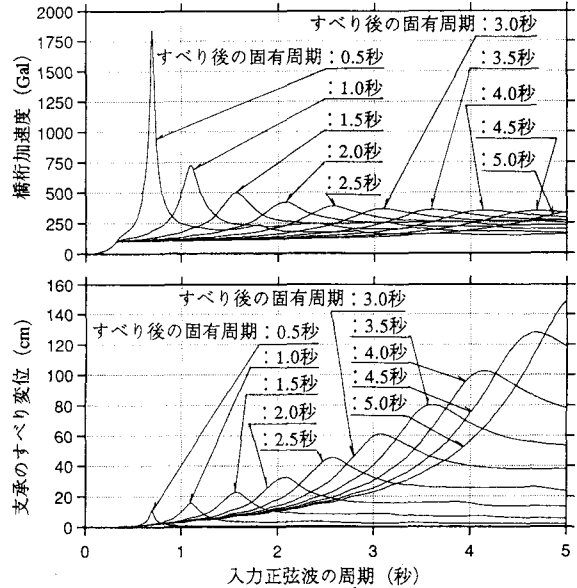


図-7 非免震時の固有周期が0.5秒の橋梁の共振曲線
[摩擦係数：10%、地動加速度：150Gal]

3. 2 設計用地震動に対する応答

これまでの検討は、正弦波地動入力時の定常応答の結果を対象として行った。以下、複雑な振幅、周期特性を持つ設計用地震動入力時の応答と正弦波地動入力時の応答との関係を調べる。本報では、1例として免震設計法マニュアル(案)¹⁾で規定されているⅢ種地盤の保有水平耐力照査用地震動を用いる。図-8にⅢ種地盤の保有水平耐力照査用地震動の加速度応答スペクトルを示す。対象地震波は、よく知られているように、減衰定数5%に対して、周期2秒以下ではば一定の加速度応答スペクトル(約1000Gal)を持つ地震動である。図-9に、対象地震波の周期特性を入力波としての正弦波地動の振幅と関連付けるために算出した狭帯域フィルター波の最大加速度を示す。フィルターの帯域は対象周期±0.1秒とする。フィルター波の最大加速度は、周期が長くなるとともに減少しており、周期1.5秒以上で100Gal以下となる。

図-10に、Ⅲ種地盤保有水平耐力照査用地震動入力時の橋桁の最大加速度と支承の最大すべり変位を、正弦波地動入力時の最大応答とともに示す。この図は、非免震時の固有周期が0.5秒の橋梁を対象とし、摩擦係数が10%および15%のすべり支承を持ち、すべり後の固有周期を変化させた時の最大値を示すものである。

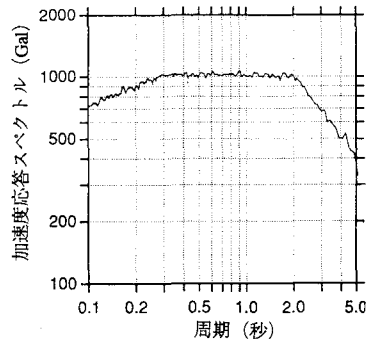


図-8 Ⅲ種地盤保有水平耐力照査用地震動の加速度応答スペクトル

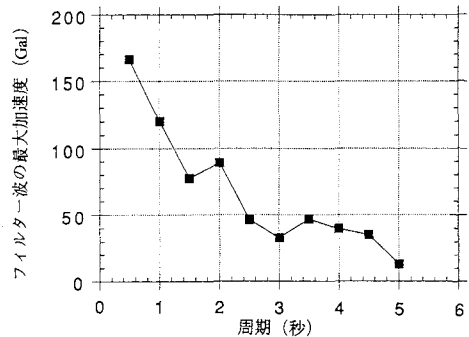


図-9 Ⅲ種地盤保有水平耐力照査用地震動の狭帯域フィルター波の最大加速度

すべり後の固有周期が2.5秒（非免震橋梁の固有周期の5倍）となる免震システムを有する橋梁のⅢ種地盤保有水平耐力照査用地震動入力時の橋桁加速度および支承のすべり変位は、摩擦係数10%と15%に対して、それぞれ、351Galおよび276Gal、39.7cmおよび20.0cmとなり、摩擦係数を15%とする場合には、10%とする場合に比べて橋桁加速度、支承のすべり変位はともに小さくなる。特に支承のすべり変位は摩擦係数を15%とする場合に10%とする場合の約半分となる。

すべり後の固有周期が2.5秒の時、Ⅲ種地盤の保有水平耐力照査用地震動入力時とほぼ同等の応答が得られる正弦波の加速度振幅（摩擦係数10%の時約150Gal、15%の時約175Gal）の摩擦力相当加速度に対する比は、摩擦係数10%と15%に対して、それぞれ1.5、1.17となる。図-3をみると、摩擦係数が10%の場合に共振的な現象が生じることが推測され、結果的に応答が大きくなったものと思われる。

図-10をみると、Ⅲ種地盤保有水平耐力照査用地震動入力時の応答最大値が、すべり後の固有周期1秒～2秒の範囲では、摩擦係数10%および15%に対して、それぞれ150Gal、200Galの振幅を持った正弦波の最大応答とほぼ等しく、さらに長いすべり後の固有周期を持ったシステムでは、徐々に小さい振幅を持った正弦波の最大応答に近づく。この傾向は、加速度応答スペクトルや狭帯域フィルター波の加速度最大値が、周期が長くなると小さくなることと定性的な傾向が一致している。ただし、設計用地震動入力時とほぼ等しい応答が得られる正弦波の加速度振幅は、図-9に示した狭帯域フィルター波の加速度最大値よりかなり大きい。

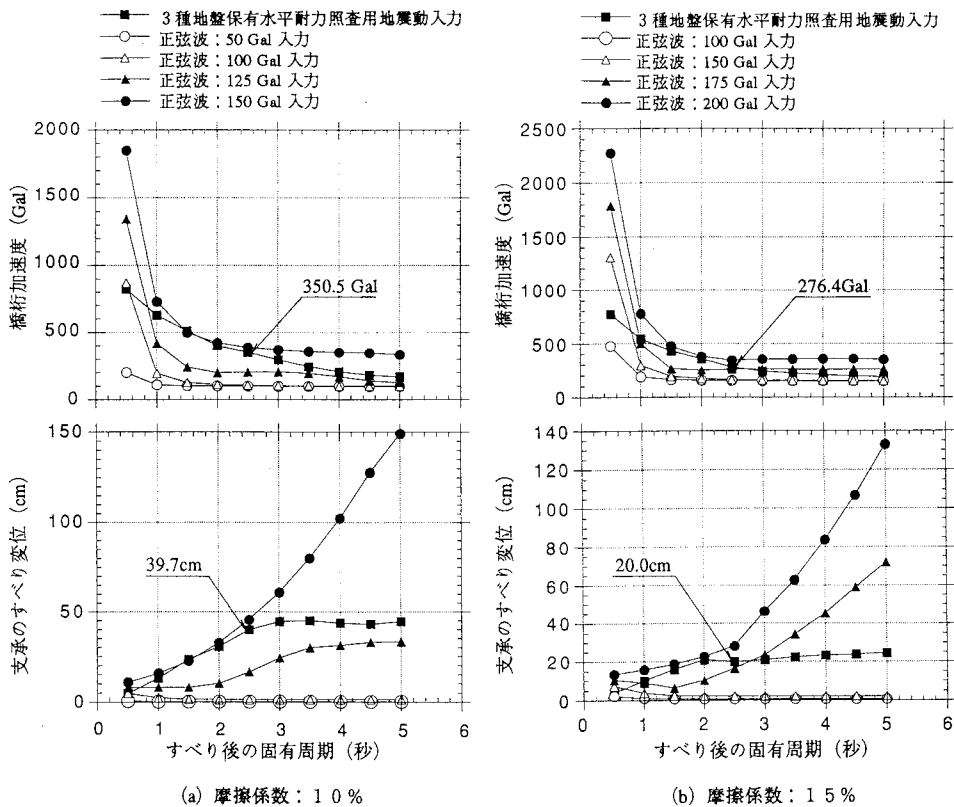


図-10 Ⅲ種地盤保有水平耐力照査用地震動入力時の応答と正弦波入力時の応答の比較
[非免震時の橋梁の固有周期：0.5秒]

5. まとめ

すべり支承と水平ばねから構成されるすべり方式免震システムを有する橋梁を対象として、正弦波地動に対する振動特性を簡易な2質点ばねモデルを用いて解析的に検討した。検討した結果、以下の点が明らかとなった。

- ①すべり後の固有周期を非免震橋梁の固有周期の2倍以上とすれば、非免震橋梁の固有周期に近い周期成分を持った正弦波地動が入力した場合に、橋桁の加速度が摩擦係数相当加速度で頭打ちになる。
- ②摩擦係数相当加速度に比べて大きな振幅を持った正弦波地動を入力すると、共振現象が生じる。しかし、共振点の応答倍率は、履歴減衰の影響で、免震システムの減衰定数から算出される応答倍率より小さくなる。
- ③摩擦係数を大きくすると、共振現象が起こりにくくなる。また、共振現象が起こった場合でも、履歴減衰の影響により、橋桁加速度と支承のすべり変位が、摩擦係数が小さい場合に比べて小さくなる。したがって、支承変位を抑制しながら大きな免震効果を得るためには摩擦係数を大きくすることが有効である。
- ④すべり後の固有周期が5倍以上となると、免震効果が一定となる。一方、周期が長くなると支承のすべり変位が大きくなる。したがって、大きな免震効果を必要とする場合の適切なすべり後の固有周期は、非免震橋梁の固有周期の5倍程度となる。
- ⑤設計用地震動入力時とはほぼ等価な応答結果が得られる正弦波の振幅は、すべり後の固有周期が長くなると小さくなる傾向があり、対象地震波の加速度応答スペクトルや狭帯域フィルター波の最大加速度値が周期が長くなると小さくなる傾向と定性的に一致している。

なお、今後、すべり方式免震システムを有する橋梁を対象とした実地震波入力時の応答解析を実施し、正弦波地動入力時の特性との関連を調べ、応答加速度の低減率と支承のすべり変位との関係をより詳細に検討していく予定である。

本研究の一部は、大成建設とNCEER（アメリカ地震工学研究センター）との間で進めている「すべり方式橋梁用免震システムの開発」研究（共同研究者：Constantinou教授、State University of New York at Buffalo）の成果である。

参考文献

- 1) 建設省：道路橋の免震設計法マニュアル（案）、（財）土木研究センター、1992年12月
- 2) 川島一彦：研究展望 免震設計技術の発展と今後の展望、土木学会論文集、第398号/I-10、pp.1～pp.12、1988年10月
- 3) 松尾芳郎、原広司、大石昭雄、山下幹夫：宮川橋の設計と施工—我が国初の免震橋梁—、橋梁と基礎、91-2、pp.15～22、1991年
- 4) 池田猛、熊倉一臣、谷英夫、阿部登：烏山1号橋の計画・設計、橋梁、pp.33～42、1991年6月
- 5) 久野雅祥、河村壮一、北沢巧次、長島一郎：すべり支承を用いた免震構法—その1 構法概要と基本的特性の検討—、大成建設技術研究報、第20号、pp.71～79、1987年
- 6) 萩尾堅治、河村壮一、高木政美、畑中武利：すべり方式免震床の応答性状、大成建設技術研究報、第22号、pp.163～168、1989年
- 7) 尾崎大輔、岡本晋、M.C.Constantinou、P.C.Tsopelas：すべり方式免震装置を用いた橋梁の基本応答特性、土木学会第48回年次学術講演会、1993年9月
- 8) 岡本晋、尾崎大輔、藤井俊二、M.C.Constantinou、P.C.Tsopelas：すべり方式免震装置を有する橋梁の模型振動実験、土木学会第48回年次学術講演会、1993年9月
- 9) 岡本晋、深沢泰晴：すべり方式免震システムを有する橋梁の振動特性、第22回地震工学研究発表会、1993年7月
(1993年9月16日受付)