

6. ゴム沓への置き換えが橋梁の振動応答特性に及ぼす影響

兵庫県南部地震の発生以降、橋梁の耐震性を向上させることを主眼として、鋼製沓からゴム沓へ支承の置き換えが広く実施されるようになった。このことは、耐震設計上は想定した地震に対して所要のアイソレータ機能や復元力特性を発揮するよう設計されるが、振動モードによっては、常時の動的交通荷重や風に起因する振動を助長することが懸念される。

ここでは、簡単な橋梁モデルを用い、支承部（鋼製沓、ゴム沓）の差が橋梁の固有振動特性や振動応答特性に及ぼす影響について解析的な検討を実施した結果を報告する。

なお、本論文は土木学会論文集（第6部門）に投稿中である。

支承特性差に着目した 橋梁振動応答特性に関する研究

山田 均¹, 沢田 繁樹², 篠原 修二³, 風間 浩二⁴

¹正会員 横浜国立大学 教授 工学部 建設学科 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²正会員 (株)CRC総合研究所 耐震技術部 (〒136-8581 東京都江東区南砂2-7-5)

³正会員 (株)総合技術コンサルタント 技術第一部 部長 (〒101-0051 東京都千代田区神田小川町3-1)

⁴正会員 住友重機械工業 (株)鉄構機器事業本部課長代理 (〒141-8686 東京都品川区北品川5-9-11)

兵庫県南部地震以降、橋梁構造物や建築構造物では免震構造物が多く建造されている。具体的な免震装置としては、構造の単純さと経済的に優れた点が評価されて積層ゴムタイプの支承が採用される機会が多くなっている。これらゴム支承は、想定した地震に対して所要のアイソレータ機能及び復元力特性を発揮するよう設計されるが、振動モードによっては、常時の動的交通荷重や風に起因する振動を助長することが懸念される。本論文では、簡単な橋梁モデルを用い、支承部（鋼製支承、積層型ゴム支承）の特性差が、橋梁の固有振動特性や振動応答特性に及ぼす影響について、数値解析による基礎的な検討結果について報告する。

Key Words : Rubber Bearings, Bridge vibration, Vibration Absorber

1. はじめに

わが国は世界有数の地震国であり、幾多の地震被害の経験をもとに、橋梁の耐震設計においても被害を軽減するための多く技術開発が行われてきた。

平成7年1月の兵庫県南部地震の被災を受けて、建設省からは被災地の復旧のための仕様¹⁾が出され、連続高架橋等では免震支承等を用いた弾性固定方式により地震力を分散させることが望ましいことが示されている。

また、耐震性の向上のみならず、弾性的な支承の採用により、支承本来の変形自由度の確保²⁾³⁾や温度変化による桁の伸縮に伴う橋脚への水平力を低減させることにより上部工の多径間連続化の可能性が広がり、走行性の向上、騒音や振動の軽減⁴⁾、維持管理の向上など利点が多い。

このような理由から、道路橋においても兵庫県南部地震以前は鋼製支承が用いられていたが、地震以後、新設橋梁においては大部分がゴム支承を採用するとともに、既設橋梁においても、鋼製支承からゴム支承への取り替え工事が行われている。

これらゴム支承は、想定した地震に対して所要のアイソレータ機能と復元力特性を発揮するよう設計される。ゴム支承を採用した場合、これが摩擦減衰を持たないことや鉛直方向にも僅かながら変形自由度を持つ弾性支承であることから、交通振動を対象とした実測でも必ずしも全ての振動が低減していな

い場合もあり⁵⁾、振動モードによっては、動的交通荷重や風による振動を助長することが懸念される。

既に実施されたゴム支承化の報告に於いては、その効果について、水平方向加速度を前提とした耐震効果の検討や構造の連続化と併せた効果の検討はあるものの、支承自体の特性差が橋梁の振動応答特性に及ぼす影響の基礎的検討は少ない。

このため、本論文では、鋼製支承からゴム支承への置き換えが橋梁の固有振動特性や振動応答特性に及ぼす影響について基礎的な考察を加えることを目的として、比較的簡単な橋梁モデルを用い、支承部（鋼製支承、積層型ゴム支承）の構造特性の差がこれらの特性に与える影響を解析的に検討した。

2. 解析モデルと解析方法

(1) 解析モデル

解析対象は、モデルの一般性を考慮しながら、3径間連続桁橋（桁幅11m、鋼床版2箱桁、支間長L=100m及び150m）を例題として取り上げた。これら2つの支間モデルに対して、鋼製支承（BP沓）と積層型ゴム支承（以下ゴム支承）の2種類をそれぞれ適用した場合の固有振動特性及び振動応答特性を比較検討することとした。

具体的な解析モデルは図-1に示す平面骨組みモデルとした。支承部は水平、鉛直、回転の各ばね要素でモデル化（図-2）し、脚下端は固定とした。

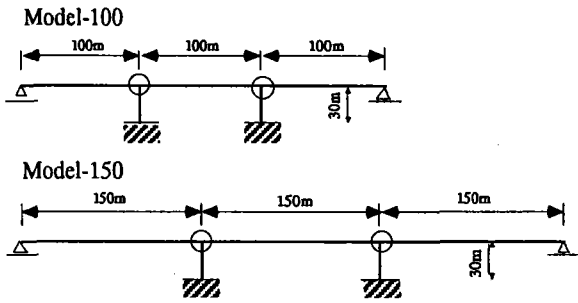


図-1 解析対象橋梁モデル

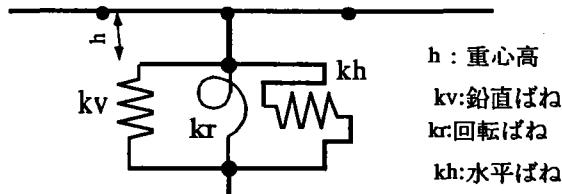


図-2 支承部の解析モデル化

表-1 モデル諸元

	model100R	model150R	
形式	3 径間連続箱桁		
支承条件	Move+Fix+Fix+Move		
支間割	100+100+100	150+150+150	m
桁剛性:鉛直	0.68~1.12	0.47~1.76	m ⁴
脚剛性:橋軸	32.0	49.4	m ⁴
支点反力 (端支点)	Rd=180 RL=130	Rd=330 RL=140	tf
支点反力 (中間支点)	Rd=490 RL=260	Rd=955 RL=300	tf
設計水平震度	Kh=0.2		

a) 鋼製支承部の減衰のモデル化

鋼製支承部の減衰力は、鋼製支承の減衰が摩擦によるものと仮定した。また、単純化のために、その振幅依存性を無視し、低次側の振動特性を中心に検討することから、鉛直1次モードを与える振幅（中央支間中央部で0.5m）を仮定し、摩擦係数に対する等価摩擦減衰係数を下記の方法で求めた。

減衰は、モデルの性質から、小振幅では過大に、大振幅では過小に評価される傾向となるため、3つの値に対して計算を行い比較した。

① 1次モードに着目し、中央径間中央の鉛直変位を仮定し、支承部回転変位を定める。

② 支承部回転変位から桁の鉛直1次固有振動数での回転速度を求める。

$$Vr = i\omega ur \quad (1)$$

ここに、Vr: 回転速度, ur: 回転変位, ω : 桁の固有円振動数である。

③ 支承部は点支持と考え、接線方向摩擦力を支承部回転中心におけるモーメントに置き換え、そのモーメント力を等価な減衰力と仮定し、回転成分等価減

衰係数Crを求める。

$$F = \mu N \quad (2)$$

$$M = Fh \quad (3)$$

$$Cr = M/Vr \quad (4)$$

F: 接線方向摩擦力 (ton)

M: 支承部回転中心モーメント (ton・m)

h: 支持点から回転中心までの距離(m, 0.1mと仮定)

μ : 摩擦係数, N: 鉛直力(死荷重) (ton)

Cr: 等価減衰係数 (ts/rad), Vr: 回転速度 (rad/sec)

その他の諸量は標準的な鋼製支承 (BP-A) ⁶⁾を参照した。

b) ゴム支承部のモデル化と設計値

ゴム支承では、水平と鉛直の2自由度を弾性とし、回転ばねの剛性を無視した。ゴム支承の支承部条件を鋼製支承との比較で表-2に示す。

また、ゴム支承の設計値諸量を表-3に示す。ゴム支承の設計は、道路橋示方書⁷⁾に準じて、保有水平耐力法でタイプI, II地震の照査を行った。中間支点は水平ばねが線形の分散ゴム支承を使用した。また、可動支承は剪断変形型の可動支承とした。回転ばねに対応する減衰は、ゴムのひずみ量が比較的小さいため、これを無視した。

表-2 支承部条件

		水平ばね	鉛直ばね	回転ばね
鋼製固定支承 (可動支承)	剛性	$\approx \infty(0)$	$\approx \infty$	0
	減衰定数	0	0	摩擦(0)
ゴム支承	剛性	設計値	設計値	0
	減衰定数	5%	0	0

表-3 ゴム支承設計諸元 (中間支点)

	model-100R	model-150R	単位
橋軸方向支承幅	100	135	cm
橋直方向支承幅	100	135	cm
ゴム1層厚	2.4	3.3	cm
ゴム層数	4	4	
ゴム総厚	9.6	13.2	cm
ゴムのG	10	10	kgf/cm ²
剪断ばね定数	1041.7	1380.7	tf/m
形状係数	10.42	10.23	
圧縮ばね定数	7468.5	9544.0	tf/cm
許容圧縮応力度	80	80	kgf/cm ²
圧縮応力度	76.1<=80	70.0<=80	kgf/cm ²
常時引張応力度	0<=20.0	0<=20.0	kgf/cm ²
地震時引張応力度	14.7<=20.0	15.7<=20.0	kgf/cm ²
局部ひずみ γ_c	0.940	0.881	
局部ひずみ γ_S	0.156	0.170	
局部ひずみ γ_R	0.723	0.697	
局部ひずみ 計	1.820	1.748	

(2) 解析方法

解析は、支承自体の特性差が橋梁の振動応答特性に及ぼす影響を調べることを目的として、下記の3種の解析を実施した。

① 実固有値解析：図-1に示す解析モデル（1支間を20節点、橋脚を10節点に分割）に固有値解析を実施し、支承差による固有振動数及び振動モード形の比較を実施した。

② 複素固有値解析：図-2に示す支承部のモデル化で、鋼製支承には等価減衰係数、ゴム支承には所定の減衰定数を与え、複素固有値解析を実施し、振動モード毎のモード減衰を求めた。

③ 単位振幅加振に対する応答解析：振動応答の基本特性として、加振外力に対する揺れ易さを把握するために、振動モード毎に各振動のモード形の腹の位置に単位振幅外力を与え、これによる振動応答を求めた。

3. 解析結果と考察

(1) 固有値解析結果

固有値解析の結果を表-4に示す。固有振動数の順に並べた振動モードは解析モデルによって、相対位置が異なったが、ここでは、振動モード形の順に整理を行った。固有振動数は、ゴム支承の設置により水平モードで約40~50%、鉛直モードで5~25%低下

しており、特に水平モードでの振動数低下が大きい。固有振動数の低下は、風による振動（渦励振）の発生風速⁸⁾の低下に結びつくため、注意が必要である。固有値解析結果として得られた振動モード形の差の顕著なものを表-5に示す。支承の特性差は固有値解析の内、上述の固有振動数のみでなく、固有振動モードにも顕著に現れている。

振動モード形を見ると、ゴム支承の鉛直方向の収縮により支点上変位の差によって振動モード形状に

表-4 固有振動数 (Hz)

支間長 支承	100m			150m		
	鋼	ゴム	R/S	鋼	ゴム	R/S
橋軸1次	1.11	0.61	0.55	1.02	0.53	0.52
鉛直1次	0.71	0.67	0.94	0.41	0.37	0.92
鉛直2次	0.96	0.84	0.88	0.50	0.47	0.94
鉛直3次	1.35	1.13	0.83	0.87	0.80	0.92
鉛直4次	2.76	2.09	0.76	1.54	1.40	0.91

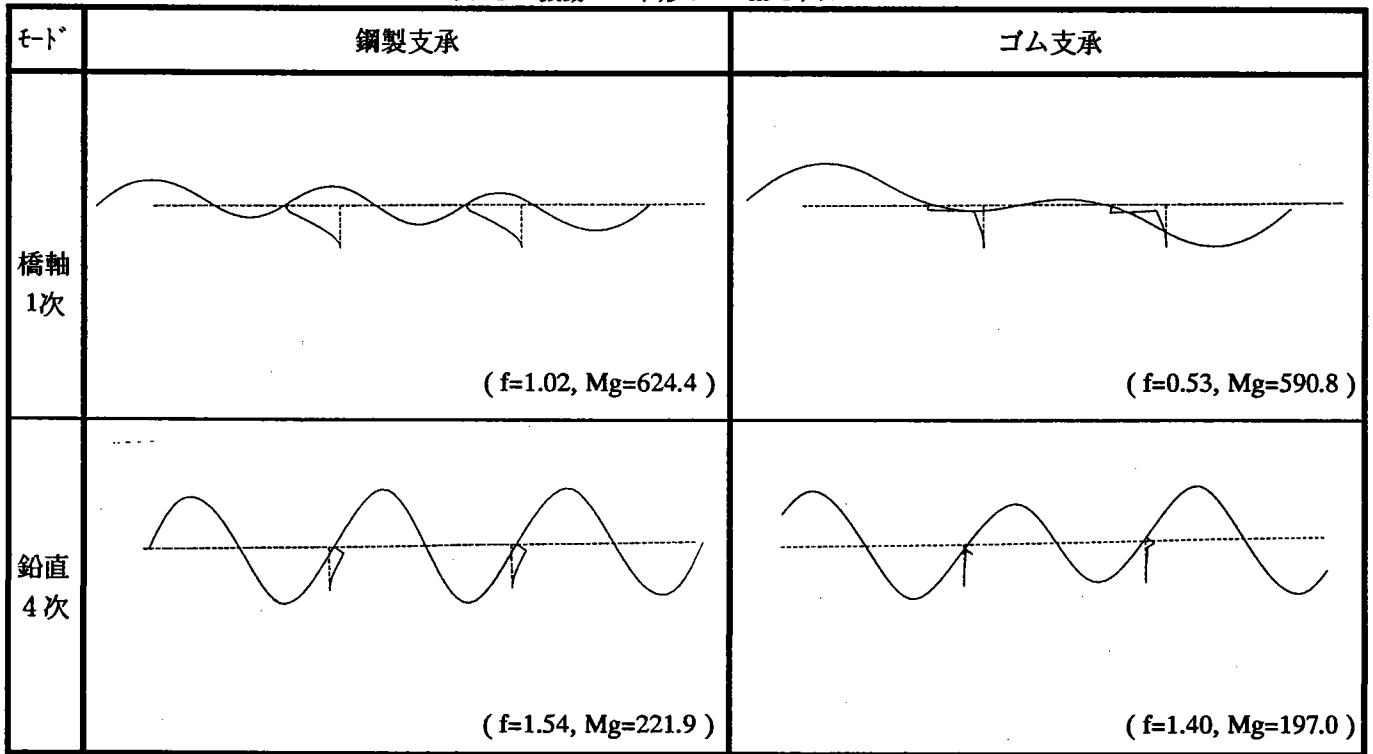
※ 表中R/Sはゴム沓と鋼製沓の値の比である。

表-6 一般化質量

支間長 支承	100m			150m		
	鋼	ゴム	R/S	鋼	ゴム	R/S
橋軸1次	1.11	0.61	0.55	1.02	0.53	0.52
鉛直1次	0.71	0.67	0.94	0.41	0.37	0.92
鉛直2次	0.96	0.84	0.88	0.50	0.47	0.94
鉛直3次	1.35	1.13	0.83	0.87	0.80	0.92
鉛直4次	2.76	2.09	0.76	1.54	1.40	0.91

※ 表中R/Sはゴム沓と鋼製沓の値の比である。

表-5 振動モード形：150mモデル



f：固有振動数(Hz)，Mg：一般化質量（各モード最大振幅を1として計算）

差が見られる。特に、振動応答に関する指標を得るために、各振動モードの最大振幅を1として基準化したモードに対しての一般化質量及び、ゴム支承と鋼製支承との比を表-6に示す。

表-6を見ると、多くのモード形で鋼製支承モデルで大きな値が得られており、モードによっては(100m 鉛直 4次)ゴム支承の採用により一般化質量が半減しているものもある。

(2) 複素固有値解析結果

鋼製支承とゴム支承の特性差を減衰の観点から見るために、前述の両解析モデルに対して複素固有値解析を実施した。鉛直モードに着目した解析結果を表-7, 8に示す。

鋼製支承のモーダル減衰が約2%の状態であるのに比し、ゴム支承では2%を下回るモードが多く、モードによっては、1%を下回る場合(100m, 4次)もある。これは、鋼製支承では支承での減衰が摩擦によるものであり、支承の機構(鉛直モードに対しては、必ず回転変位すること)がモードによる減衰差を生み難いことに比べ、ゴム支承では、振動モード図からも読みとれるように、ゴム支承の減衰が発生する(ゴムの剪断変形が発生する)方向への変形が鉛直モードからは発生し難く、その程度も振動モードにより変化することに起因している。

表-7 モーダル減衰：100mモデル (%)

モード	鋼製支承			ゴム支承
	$\mu = 0.05$	$\mu = 0.10$	$\mu = 0.15$	
鉛直1次	2.008	2.016	2.024	1.787
鉛直2次	2.004	2.006	2.008	1.483
鉛直3次	2.001	2.001	2.002	1.363
鉛直4次	2.010	2.017	2.024	0.870

表-8 モーダル減衰：150mモデル (%)

モード	鋼製支承			ゴム支承
	$\mu = 0.05$	$\mu = 0.10$	$\mu = 0.15$	
鉛直1次	2.016	2.031	2.046	1.992
鉛直2次	2.005	2.009	2.013	2.170
鉛直3次	2.005	2.010	2.014	1.690
鉛直4次	2.032	2.048	2.065	1.643

(3) 振動応答解析結果

本説では、前節までに述べた支承特性差に起因する振動特性の差が、具体的な振動応答(たとえば、交通振動に対する応答)に対してどの程度の差を及ぼすかを見るための検討を行った。

解析は、両支承モデルに対して各振動モードの最大振幅位置に単位荷重の加振(振幅: 1tf, 振動数は

対応するモードの固有振動数)を行い、その応答振幅を比較した。解析結果を、図-3及び図-4に示す。表には、各応答観測位置の振幅に加え、ゴム支承と鋼製支承の比を示した。

単位振幅加振に対する応答を見ると、振動モード形の節となる点付近の比は、大きくなっているが、これはモードの小さいところでの比であるため、モードの腹付近での比較が必要になる。

モードの腹付近の値を比較すると、100mモデルの側径間1/4点付近では、モードの腹付近であるにも関わらずゴム支承モデルが4~6倍程度の応答振幅を示している。

このように、ゴム支承の採用によって、モードによっては単位調和加振に対する応答振幅が大幅に大きくなる場合があることが明らかになった。

この現象は、前述の固有振動特性や減衰特性を含めて、多自由度振動系の応答解析⁹⁾より、以下のように説明できる。

全体系の運動方程式を

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = \{F\} \quad (5)$$

で表し、近似的に

$$\{\phi_s\}^T [C] \{\phi_r\} = 0 \quad (s \neq r) \quad (6)$$

が成り立つと仮定すると、調和外力による振動応答 q は、

$$q = \frac{1}{\omega_0^2 M_g} \frac{F_g}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4h_g^2 \omega^2}{\omega_0^2}}} \quad (7)$$

で表される。

ここに、[M]:質量マトリクス、[C]:減衰マトリクス、[K]:剛性マトリクス、 $\{\phi\}$:モードベクトル、 $\{F\}$:外力ベクトル、 u :変位ベクトル、 M_g :一般化質量、 F_g :一般化外力、 h_g :一般化減衰、 ω_0 :固有振動数、 ω :加振振動数 である。

固有振動数で加振した場合には、 $\omega = \omega_0$ より、振動応答は

$$q = \frac{F_g}{2\omega_0^2 M_g h_g} \quad (8)$$

と表される。

ここで、振動応答の差が比較的大きかった150mモデルの鉛直4次モードで、要素となる振動パラメータを比較すると表-9のようになる。両者の比から応答振幅の比を推定すると、ゴム支承の採用により、応答振幅は約1.7倍となる。一方、この振動モードの応答解析結果は加振側側径間3/4点で1.77となっており概ね一致している。

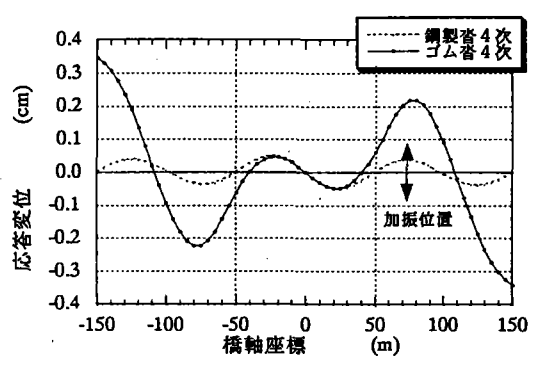
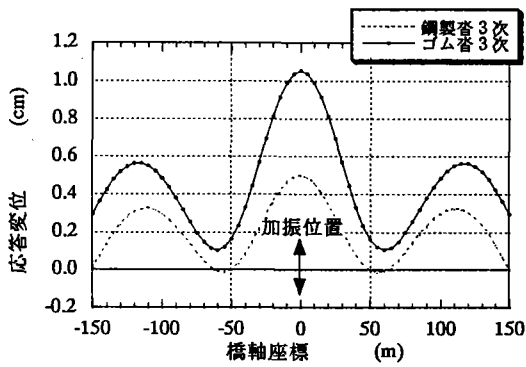
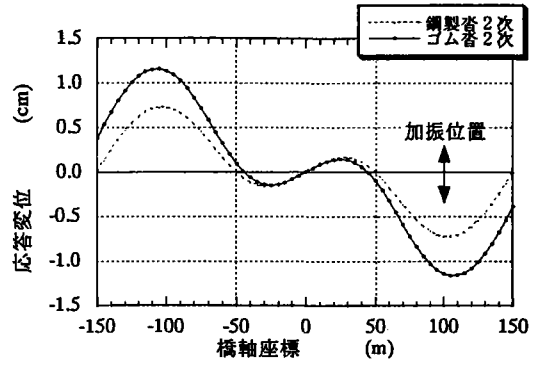
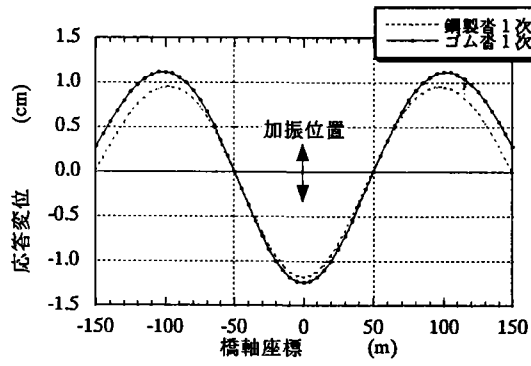


図-3 単位調和外力（振幅：1tf，振動数：各モードの固有振動数）に対する応答振幅（100mモデル）

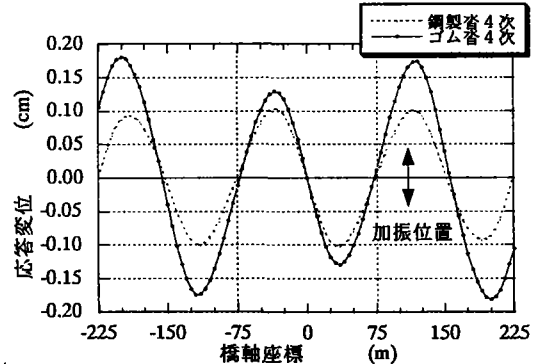
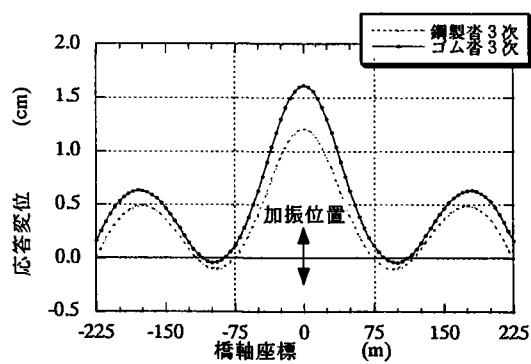
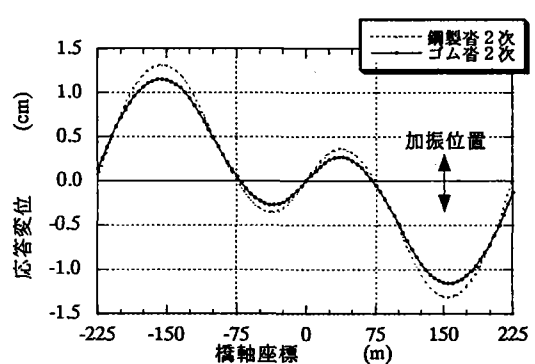
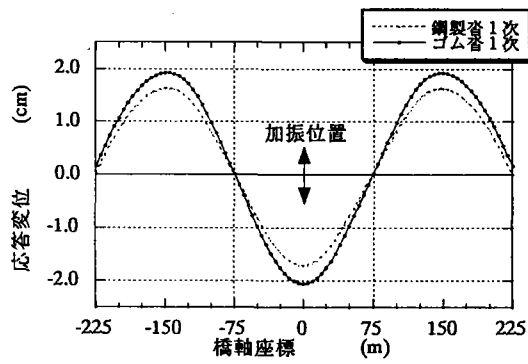


図-4 単位調和外力（振幅：1tf，振動数：各モードの固有振動数）に対する応答振幅（150mモデル）

表-9 振動パラメータ比較(150m, 4次モード)

	鋼製支承*	ゴム支承	ゴム/鋼
振動数 (Hz)	1.54	1.4	
(ω^2)	93.6	77.4	0.826
一般化質量	221.9	197	0.888
減衰 (%)	2.032	1.643	0.809

*鋼製支承の値は $\mu=0.05$ のもの

同様な比較は、両モデルの他のモードに付いても可能である。

以上の解析結果から、鋼製支承とゴム支承との支承差は、固有振動数や振動モード形の差となって現れ、振動応答はモードによっては固有振動数、減衰、及び一般化質量の低下と併せて振動応答を助長させる原因となることが明らかとなった。

まとめと今後の課題

鋼製支承から免震支承への置き換えが橋梁の固有振動特性や振動応答特性に及ぼす影響について基礎的な考察を加えることを目的として、ごく一般的な橋梁諸元に対して簡単なモデルを用い、支承部(鋼製支承、積層型ゴム支承)の構造の差がこれらの振動特性に与える影響を検討した。

検討の範囲では、ゴム支承の採用により、固有振動数、減衰及び一般化質量が低下し単位調和入力に対する振動応答が増大するモードの存在が明らかとなった。弾性支承の採用にあたっては、地震力の分散のみでなく振動の防止にも配慮する必要がある。

今後、両支承の変形特性や減衰特性を定量的に評価し、これらの非線形性を勘案した解析を進めていく必要がある。

謝辞

本研究は鋼橋技術研究会 耐風制振設計研究部会の研究活動の一環として実施されたものである。ここに記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) (財)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)，1965年6月
- 2) 山本 泰幹，森 清，稲田 育朗：密閉ゴム支承の活荷重挙動に関する実橋調査，土木学会第50回年次学術講演会I-333，1995年9月
- 3) 北村 隆里，小林 潔，田嶋 仁志：ゴム支承への取替効果に関する鋼桁橋の実橋計測，土木学会第50回年次学術講演会I-334，1995年9月
- 4) 田嶋 仁志，佐藤 克寿，橋 義規：鋼桁橋のゴム沓交換による交通振動計測，第21回日本道路会議論文集，1994年
- 5) 長尾 彰洋，佐藤 弘史，今野 久志：ゴム支承による交通振動軽減対策試験について，土木学会第49回年次学術講演会I-508，1994年9月
- 6) (社)日本橋梁建設協会：デザインデータブック，1993年
- 7) (財)日本道路協会：道路橋示方書同解説，1996年
- 8) (財)日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1991年，pp.102
- 9) 片山 恒雄，宮田利雄，国井隆弘，構造物の振動解析，技報堂出版，1979年11月

COMPARATIVE VIBRATION STUDY OF GIRDER BRIDGES WITH RUBBER BEARINGS AND STEEL BEARINGS

Hitoshi YAMADA Shigeki SAWADA Shuji SHINOHARA and Kohji KAZAMA,

After the Hyogo-Ken Nanbu Earthquake occurred, the steel bearings underneath the girder bridges came to be substituted with rubber bearings in order to prevent seismic damage to the bridges. However, in this change of design, the concern of vibration increased by response amplitude has been overlooked and, therefore, the new design (with rubber bearings) had to be verified safer for also normal traffic conditions. In the process of analysis, data were collected from three span girder bridges those are equipped with only rubber bearings or steel bearings. In a consequence of analysis, it was revealed that rubber bearings caused not only damping difference but also the difference of vibration mode shapes, which was accountable enough for the phenomena that response from unit sinusoidal load of rubber bearings exceeded that of steel bearings.