

ゴム支承を有する連続高架橋の 振動特性について

北海道大学工学部	正 員	林川 俊郎
中央コンサルタンツ(株)	正 員	松井 義孝
北海道大学工学部	学生員	松山 英治
北海道大学工学部		滝川 雅晴

1. まえがき

地震の多い我が国では、地震を無視して橋梁を設計することはできない。そこで、多径間連続桁や高架橋では耐震設計が重要となる。従来は、橋梁が地震力に耐え得るように、耐震設計がなされてきたが、最近では、ニュージーランドを中心として免震設計が盛んに行なわれるようになってきた。免震設計というのは、文字どおり地震から免れることを考えた設計で、基本的な考え方は次の3つである¹⁾。

- 1) 地震力を低減するために、横造物を柔らかくし、固有周期を長くする。
- 2) 長周期化により、変位が大きくなるため、ダンパーを用いて、エネルギーを吸収する。
- 3) 風など常時作用する荷重により有害な振動が生じないように、一定以上の地震力が作用する以前には、アイソレータもしくはダンパーに十分な剛性をもたせる。

この免震構造として多く取り入れられているのが、ゴム支承を用いた設計方法である。「ゴム支承方式」はゴムの剪断変形により上部工の伸縮を吸収する方式であり、近年ゴムの性能が向上しており注目されている。もっとも一般的なゴム支承の構造は、ゴムと鋼板が互層になり、お互いが接着している積層タイプ(図-1参照)のものである。鋼板は、支承に鉛直力が作用したときのゴムの横へのはらみ出しを防止し、鉛直剛性を高める効果がある。

従来の、ゴム支承を用いた例としては、我が国初の免震橋梁として有名な静岡県の宮川橋²⁾や、道央自動車道の深川IC～旭川鷹栖IC間にある石狩川橋³⁾、東京湾横断道路の浅瀬部橋梁⁴⁾等がある。

本研究では、一般的な3径間連続鋼鈑桁橋を数値計算例として取り上げ、支承部にゴムを使った場合を想定し解析する。解析方法としては整合質量法を用い、求められた固有周期(固有円振動数)を固有振動モードの低次から高次まで詳しく検討する。

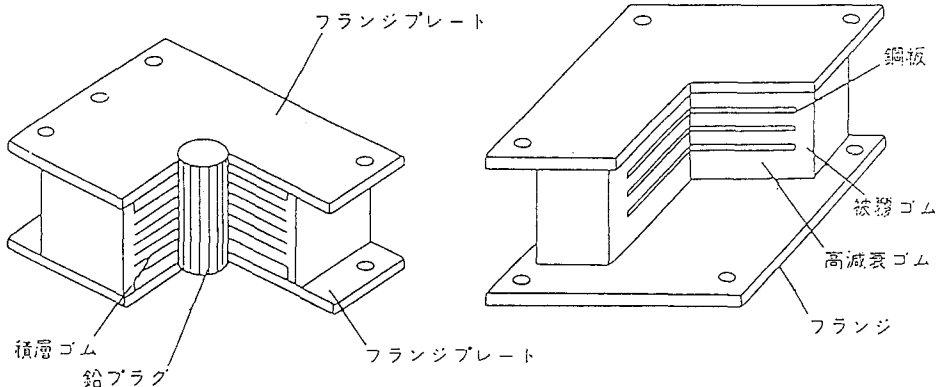


図-1 ゴム支承

Vibration Characteristics of Continuous Viaduct with Rubber Bearings.

by Toshiro HAYASHIKAWA, Yoshitaka MATSUI, Eiji MATSUYAMA, and Masaharu TAKIKAWA.

2. 固有振動解析

2-1 3次元骨組モデル

本研究で取り扱う立体骨組構造物は、図-2に示すように3次元骨組モデルを考え⁵⁾、軸変形、曲げ変形およびねじり変形を受ける骨組部材より構成されているものとする。すなわち骨組部材は、軸力、剪断力、曲げモーメント、ねじりモーメントのみを受け、1つの接点の自由度はx、y、z軸方向の並進3方向、各軸回りの回転3方向の計6自由度とする。ここでは、曲げねじり変形の影響はないものとする。

また、立体骨組構造物の固有振動解析には一般的な変位法（有限要素法）を適用する。

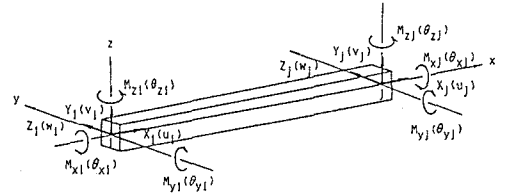


図-2 骨組部材の座標系

2-2 整合質量法

離散座標系による解には、質量マトリックスにより集中質量法と整合質量法の2種類がある。集中質量法は、部材要素の片側半分の質量と質量モーメントを両節点に等しく置換する方法で、整合質量法は、軸変形には1次式および曲げ変形には3次式の変位関数を用いて部材要素の質量を分配する方法である。同じ要素分割数Nでは、整合質量法による解析結果は集中質量法による結果と比較してかなり良い精度で固有円振動数を計算することが確認されている^{6), 7)}。よって、本研究では質量マトリックスには整合質量法を用いることにする。

また、本研究で用いる振動数方程式は次式で表される。

$$\det |K - \omega^2 M| = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、K：剛性マトリックス、M：質量マトリックス、 ω ：固有円振動数。固有値問題の解析には、Householder法を用いて行なう。

2-3 ばね支承

支承部にゴム支承を用いることは前述したが、その解析方法としてはゴム支承をばねに置き換えて、1つの部材として考える。質量マトリックスはそのまま考え、剛性マトリックスは対角項に各々のばね定数を置き次式のようにする。

$$\text{diag} [k_x, k_y, k_z, k_{ox}, k_{oy}, k_{oz}, k_x, k_y, k_z, k_{ox}, k_{oy}, k_{oz}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

k_i はばね定数でx方向、y方向、z方向の並進ばねと、x軸、y軸、z軸まわりの回転ばねの6種類を考える。これを他の部材の剛性マトリックスに組み込ませ、 $\det |K - \omega^2 M| = 0$ の固有値問題より固有円振動数を求める。

また、 k_i の値は石狩川橋の設計計算方法を参考にする³⁾。石狩川橋は、道央自動車道の深川IC～旭川鷹栖IC間にある暫定車線施工の橋長543.8mのPC8径間連続箱桁橋であり、支承には、大反力ゴム支承を採用しており、その断面諸元を参考にした。

3. 数値計算結果

本研究では、一般的な3径間連続鋼桁橋を数値計算例として取り上げる。図-3は本研究の対象となる立体骨組モデルである。上部構造と下部構造の接合部分は仮想部材として断面諸元を無限大にしている。ここで、その仮想部材の一部にゴム支承を取り入れ、ばね部材として計算する。ばね定数の値は表-1に示す。また、表-2は数値計算に必要な断面諸元である。ここで、 A は各部材の断面積、 I_y 、 I_z はそれぞれY軸、Z軸に関する断面2次モーメントである。 J はねじり定数、 w は単位当りの部材の重量である。

表-1 ばね定数

(t/m)	k_x	k_y	k_z
Value of Spring support	2.0×10^6	2.0×10^3	2.0×10^3
(t m/m)	k_{ox}	k_{oy}	k_{oz}
Value of Spring support	6.0×10^3	1.0×10^6	1.0×10^4

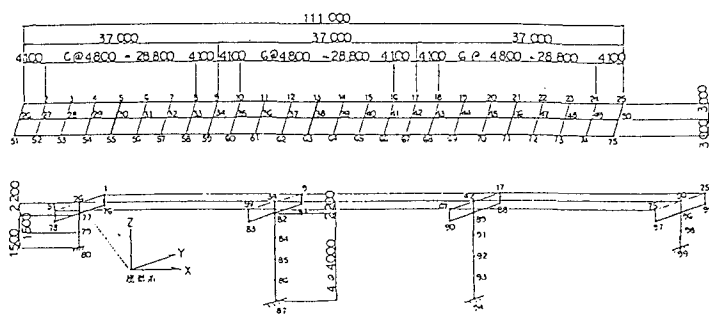


図-3 立体骨組モデル

表-2 各部材の断面諸元

Members	$A(m^2)$	$I_y(m^4)$	$I_z(m^4)$	$J(m^4)$	$E(t/m^2)$	$W(t/m)$
Main girder (G1, G3)	0.98×10^{-1} $\sim 1.10 \times 10^{-1}$	3.61×10^{-2} $\sim 5.52 \times 10^{-2}$	3.96×10^{-2} $\sim 3.99 \times 10^{-2}$	1.83×10^{-5} $\sim 2.08 \times 10^{-5}$	2.10×10^7	3.048
Main girder (G2)	1.07×10^{-1} $\sim 1.19 \times 10^{-1}$	3.42×10^{-2} $\sim 5.71 \times 10^{-2}$	6.08×10^{-2} $\sim 6.10 \times 10^{-2}$	2.06×10^{-5} $\sim 2.36 \times 10^{-5}$	2.10×10^7	2.433
Cross beam	0.18×10^{-1}	0.56×10^{-2}	1.55×10^{-5}	5.24×10^{-7}	2.10×10^7	—
End sway bracing	0.10×10^{-1}	0.27×10^{-2}	—	—	2.10×10^7	—
Intermediate sway bracing	0.79×10^{-2}	0.20×10^{-2}	—	—	2.10×10^7	—
Abutment	13.120	2.799	73.516	9.820	2.35×10^8	32.800
Beam of pier	2.600	0.867	0.366	0.874	2.35×10^8	6.600
Column of pier	7.069	3.976	3.976	7.952	2.35×10^8	17.671

3-1 固有振動モード

図-3の仮想部材にゴム支承を入れて計算する場合と、そのままゴム支承を入れず仮想部材のままで計算する場合と、2通り考える。図-4、5より、ばね支承を有する高架橋の固有振動モードは、ばね無しの場合に比べて、かなり複雑に変化している。例えば、ばね無しの橋軸直角曲げ振動1次、2次、3次モードは、ねじり振動との連成が見られるが、ばね有りの固有振動モードでは、水平振動のみが、卓越している。また、ねじり振動モードおよび鉛直曲げ振動モードも、ばね支承効果により固有振動モードの形状に変化が見られる。

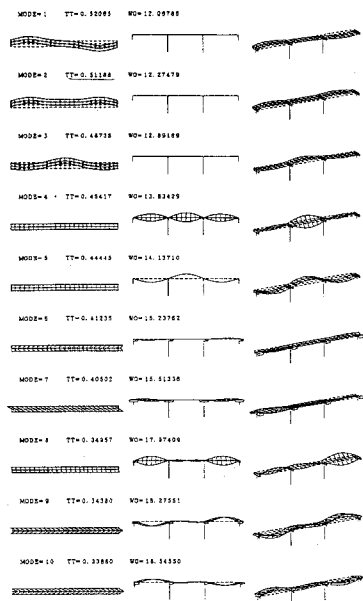


図-4 固有振動モード (ばね有り)

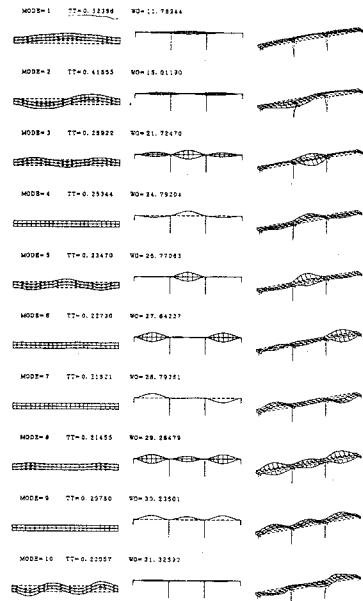


図-5 固有振動モード (ばね無し)

3-2 固有周期

支承部にゴム支承を入れて計算する場合と、そのまま仮想部材だけを考慮して計算する場合と、2種類の固有周期を固有振動モード別に比較した。橋軸方向の固有振動モードは11次以降の高次モードに現われるため、ここでは、鉛直

表-3 固有周期

Mode order	Vertical vibration		Torsional vibration		Lateral vibration	
	with spring support	without spring support	with spring support	without spring support	with spring support	without spring support
1st	0.444	0.253	0.521	0.288	0.512	0.584
2nd	0.340	0.218	0.519	0.235	0.521	0.419
3rd	0.250	0.207	0.487	0.215	0.487	0.289

曲げ振動、ねじり振動、水平曲げ振動の各1次、2次、3次固有振動モードに着目して検討する。鉛直振動とねじり振動では、どれもゴム支承を入れた方が、仮想部材だけの場合より1.5倍～2.0倍の長周期の値をとる。橋軸直角方向の曲げ振動において、3次モードは約1.7倍程度の値となっている。2次では長周期化される割合が比較的小さく、1次にいたっては周期が逆に短くなっている。この原因としては、固有周期モードの形状による差異と考えられる。しかし、全体的にみれば平均して1.5倍～2.0倍の値をとり、設計するにあたっては理有益な値といえる。

3-3 振動特性

図-6、7、8は、ばね定数値を変えたときの固有周期の変化を示したものである。ばね定数の値は、前述した値(表-1;ばね定数)を基本値として、6種類のばね定数のすべての値を0.1～0.9、1～9、10～90、100倍に変化させ、パラメーター解析する。その時の固有周期を、鉛直曲げ振動、ねじり振動、水平曲げ振動モードごとに整理しその特性について議論する。図を見てわかるとおり、ばね定数値による水平曲げ振動の固有周期の移り変りが、鉛直曲げ振動、ねじり振動とは、異なっていることがわかる。鉛直曲げ振動、ねじり振動の場合、ばね定数値が大きくなるにつれて1次、2次、3次固有振

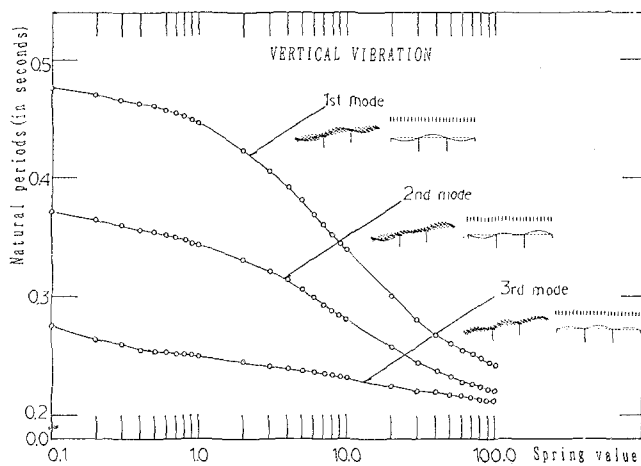


図-6 鉛直曲げ振動の固有周期

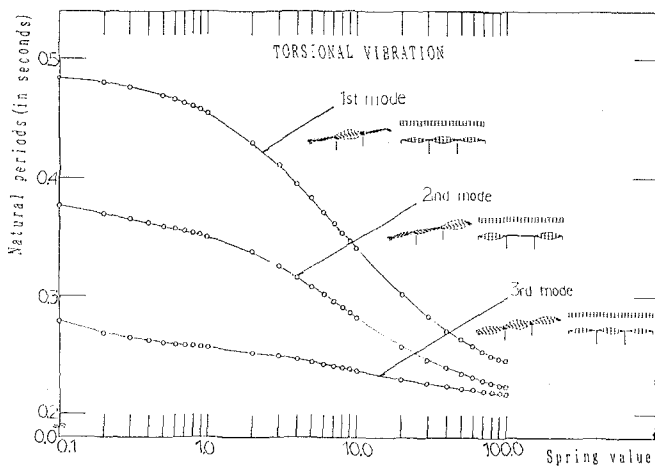


図-7 ねじり振動の固有周期

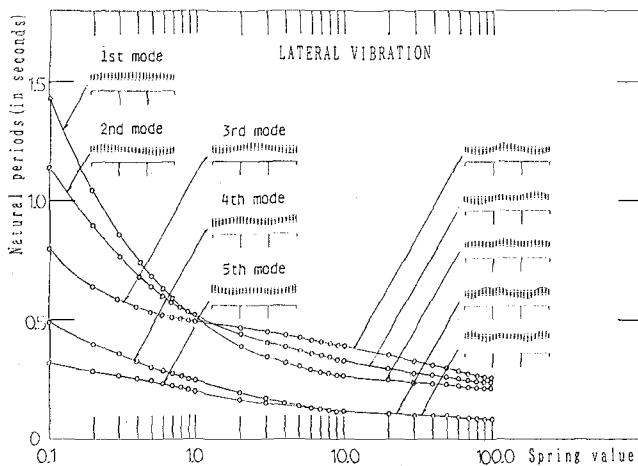


図-8 水平曲げ振動の固有周期

動モードの固有周期が全体的に小さくなっている。また、ばね定数の値による固有振動モードの変化は比較的少ない。ここで、図－8を見ると、ばね定数の値によって固有振動モードの形が変化していることがわかる。固有周期についても、ばね定数値の小さいうちは、1次、2次、3次の順になっているが、ある値を越えると3次、2次、1次の順になり固有振動モードの逆転が起こっている。これは、ばね定数値の変化によって固有振動モードに変化が生じ、それが固有周期に影響していると考えられる。例として1次固有振動モードを見ると、ある値までは2次、3次より長周期であるが、その値をこえると2次、3次より周期が短くなっている。その時の固有振動モードをみると、ちょうど支承の部分の変位がほとんどなく、高次固有振動モードのような形になっており、そのため固有振動モードの逆転が起こっていると考えられる。また、1次、2次、4次、5次において固有振動モードの形に変化が起こっているのに対し、3次固有振動モードのみ変化がみられない。これは、1次、2次、4次、5次固有周期モードでは、支承部分の変位がばね定数値の増加とともに小さくなり、モード形状が変化する。しかし、3次固有振動モードは、もともと支承部の変位がないため、固有振動形の形状に変化がみられないと思われる。

4. あとがき

本研究では、3径間連続橋の支承部にゴム支承を入れ、主に固有周期について調べ、従来の橋と比較した。固有振動モードの形状はばね定数の値によって複雑に変化し、固有周期はゴム支承を用いたほうが従来の橋より約1.5～2.0倍の値となった。

またばねの値を幾つか取り、鉛直曲げ振動、ねじり振動、橋軸直角曲げ振動の固有周期の振動特性を調べた。得られた結果および今後の課題について次にまとめる。

- 1) ばね定数の増加にともない、連続高架橋の固有周期の値が全体的に小さくなる傾向がある。
- 2) 鉛直曲げ、ねじり、水平曲げ固有振動モードはばね定数値の増加とともに変化する。特に、低次の水平曲げ固有振動モードは複雑に変化し、あるばね定数値を越えると、固有振動モードの逆転が見られた。
- 3) ばね支承の挿入により固有周期の値が1.5～2.0倍と大きくなることが確認されたことにより、今後は、応答加速度および応答変位についても検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 川島一彦：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，pp.1～12，1988.10
- 2) 松尾・原・大石・山下：宮川橋の設計と施工，橋梁と基礎，pp.15～22，1991.2
- 3) 檜山・久保・鈴木・池田：石狩川橋の設計・施工，橋梁と基礎，pp.2～11，1991.11
- 4) 香川・中村・樺山：ゴム支承を用いた多径間連続橋の計画，橋梁と基礎，pp.17～24，1991.6
- 5) 林川・角田・高田：曲線高架橋の固有振動周期の算定について，土木学会北海道支部論文報告集，pp.193～196，1990
- 6) 林川俊郎：Vレグラーメン橋の固有振動解析とその精度の検討について，構造工学論文集，Vol.35A，pp.719～725，1989.3
- 7) 林川・佐藤・角田：平面骨組構造物の固有振動解析と固有値の精度：北海道大学工学部研究報告，第148号，pp.1～15，1989