

免震支承の鉛直剛性が橋梁の交通振動に与える影響

勝田つかさ¹・伊津野和行²

¹学生会員 立命館大学大学院理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を受けて、耐震設計に関する道路橋示方書が改訂され、橋梁の耐震補強時に金属支承からゴム支承へ交換するケースも増えてきている。免震ゴム支承は地震時の応答を軽減する効果を期待されている一方で、鉛直剛性の違いによって橋梁の振動特性が変化し、交通振動などの常時振動が大きくなるという報告がある。

そこで本研究では、モデル化した単径間5主桁橋の支承鉛直剛性を変化させて固有値解析および時刻歴応答解析を行い、橋梁の振動特性に支承鉛直剛性がどのような影響を与えるか検討した。また、支承部にバネを用いた平板の固有振動数を理論式によって求めることを検討した。

2. モデル概要

解析モデルは、図-1のようなスパン30m、幅員10mの単径間5主桁橋の上部構造モデルを用いた。横桁は10m間隔で配置し、床板はブレース置換した。

支承部に、金属支承を想定したモデルとゴム支承を想定したモデルを作成した。金属支承を想定したモデルは、図-1の各主桁両端における○印部分を単純支持した。ゴム支承を想定したモデルは、金属支承モデルと同じ位置に水平方向と鉛直方向のバネを設置した。支承水平剛性は10MN/mで一定とし、支承鉛直剛性は、一般的な道路橋用積層ゴム支承の

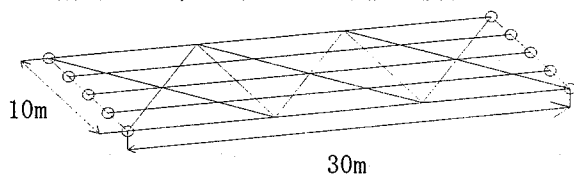


図-1 単径間5主桁モデルの概略図

鉛直剛性を参考に¹⁾、50～1000MN/mの範囲で変化させて解析を行った。

3. 固有値解析

(1) 支承鉛直剛性の影響

支承鉛直剛性を変化させたモデルに対して固有値解析を行った。図-2に支承鉛直剛性の変化による対称1次振動モードの固有振動数の変化を示した。図の右の縦軸に金属支承を想定した場合の固有振動数を100%とした場合の百分率を示した。一般的な積層ゴム支承の鉛直剛性の範囲と考えられる500～1000MN/mでは、支承鉛直剛性の固有振動数への影響は3%未満である。これより、金属支承から積層ゴム支承に交換することによって、対称1次振動モードに関する振動が変化する可能性は低いと考えられる。

しかし、支承鉛直剛性が200MN/m以下になると急激に固有振動数が低下していることがわかる。よって、連続桁の端支点において支承に引っ張り力が作用しないように通常よりもかなり低い剛性の支承を採用した場合においては、固有振動数に影響を及ぼす可能性がある。

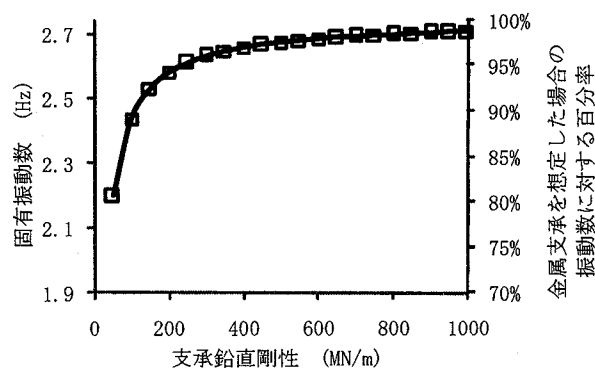


図-2 固有振動数の変化(対称1次振動モード)

次に、図-3 に、たわみ振動モード（対称 1 次・2 次、逆対称 1 次・2 次振動モード）について、固有振動数を比較した。たわみ振動に関しては、高次の振動モードになるにつれて支承鉛直剛性の影響を受けやすいことが分かった。ただし、高次振動モードほど有効質量比は小さくなるため、振動全体に与える影響は少ないと考えられる。

また、図-4 に、逆対称 1 次振動モードとねじり 1 次振動モードについて比較した。この 2 つの振動モードは金属支承を想定した場合の固有振動数が近い値を示しているが、ねじり 1 次振動モードの方が支承鉛直剛性の影響を受けやすいという結果となった。

そこで、支承鉛直剛性の影響を受けやすいねじり 1 次振動モードについてモード形状の比較を行った。金属支承を想定した場合と支承鉛直剛性 200MN/m の場合の振動形状を図-5、図-6 に示した。金属支承を想定した場合は桁の中央がねじれる形状になっているのに比べて、支承鉛直剛性が低くなると、桁全体が橋軸まわりに回転し、桁端も上下に振動するような形状になる。支承鉛直剛性の低下に伴い、桁端部を車両が通過した際の加振によって、桁全体の振動を励起することが考えられる。さらに、片側を車両が通過した時に反対車線も振動し、振動の回数を増加させる可能性もある。

(2) 支承の回転連成の影響

ゴム支承は水平方向の剛性が低い。そのため、水平方向への動きが回転運動と連成することが、桁の固有振動数に影響を及ぼす可能性もある。支承の橋軸直角まわりの回転方向の連成が固有振動数に与える影響を検討するために、支承に連成バネを用いたモデルを作成した。表-1 に連成バネの自由度及びバネの設定を示した。バネ剛性を $K11=10\text{MN/m}$ 、 $K22=500\text{MN/m}$ とし、回転連成項である $K13$ を 10MN/rad として解析を行った。この値は、理論式から得られた提案式による値²⁾の 10 倍以上であり、一般的なゴム支承はこの範囲に収まるものと考えられる。

連成を考慮しないモデルの支承鉛直剛性を 500MN/m としたケースと、連成を考慮したモデルの固有振動数を表-2 に示した。橋軸並進振動モードに関しては、連成を考慮しないモデルと連成を考慮したモデルの固有振動数の違いは 0.003Hz で、連成を考慮しないモデルの固有振動数 1.518Hz の 0.2% 未満で非常に小さい。その他の振動モードは、さらに影響を受けていないという結果を得た。よって、支承の回転方向の連成は固有振動数にほぼ影響を与

えない。ここで用いた連成項の大きさでは、各振動モードの振動方向のベクトル（対称・逆対称振動モードでは鉛直、橋軸並進振動モードでは橋軸）がほとんど変化しないためであると考えられる。

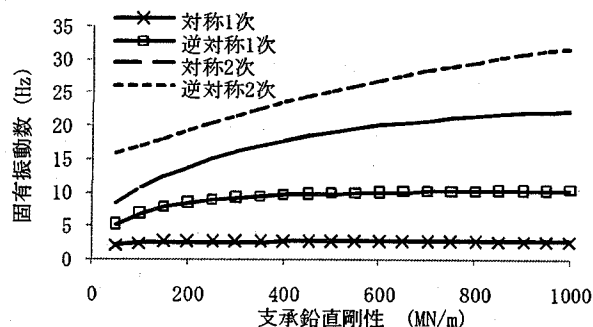


図-3 たわみ振動モード

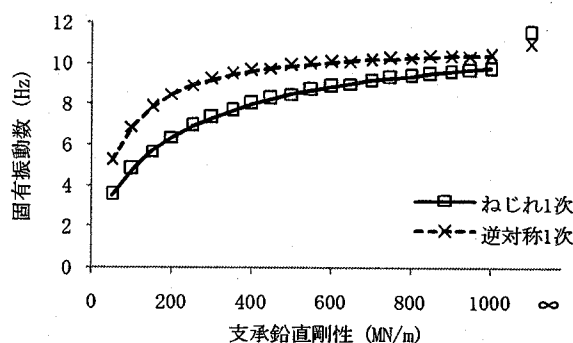


図-4 ねじり 1 次と逆対称 1 次の比較



図-5 ねじり 1 次振動モード (金属支承)

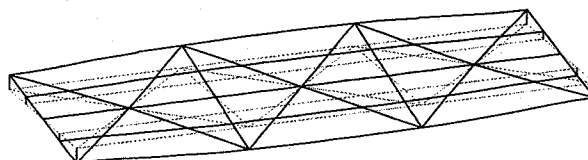


図-6 ねじり 1 次振動モード (200MN/m)

表-1 節点バネの自由度

	C1	C2	C3
橋軸方向 C1	K11	K12	K13
鉛直方向 C2		K22	K23
橋軸直角まわり回転 C3	Sym.		K33

表-2 固有振動数に対する回転連成の影響

(Hz)	橋軸並進	対称1次	ねじり1次	逆対称1次
連成なし	1.52	2.65	8.11	9.80
連成10MN/m	1.52	2.65	8.11	9.80

4. 理論解

支承鉛直剛性の変化による固有振動数への影響を理論式として求めることを検討した。たわみ振動モードは、2次元梁における振動方程式を用いて求めることができる¹⁾。そこで、本研究では、2次元梁理論では求めることができないねじり1次振動モードについて検討した。

構造物の固有振動数を近似的に求める方法として、レイリーの方法を用いた。レイリーの方法は、振動系の変形曲線を近似し、運動エネルギーと位置エネルギーを求め、それぞれの最大値を等値することによって固有振動数を求める方法である³⁾。

各支承位置にバネ定数 k のバネを設置した、長さ $a=30\text{m}$ 、幅 $b=10\text{m}$ の長方形を仮定し、長さ方向 x 、幅方向 y における鉛直方向の変位 z を式(1)に求めた。図-7のように、橋軸中心は変位せずに全体が回転する形を仮定し、全体に等分布荷重 q をかけた場合の変形曲線をねじりの曲線として与えた。

$$z = \frac{q}{192EI} \left\{ 8y^4 - 16by^3 + 3b^2y^2 + \frac{16y}{b} (x^4 - 2ax^3 + a^2x^2) \right\} + \frac{qay}{bk} \quad (1)$$

このたわみ式から運動エネルギーと位置エネルギーを式(2)、式(3)から求め、固有円振動数 n を導いた。

$$V_{\max} = \frac{q}{2} \int_0^{b/2} \int_0^a z dx dy \quad (2)$$

$$K_{\max} = \frac{mn^2}{2} \int_0^{b/2} \int_0^a z^2 dx dy \quad (3)$$

図-8に、解析結果とレイリーの方法による理論値を比較した。レイリーの方法は上限値を与えるため、解析値より全体的に大きくなる。金属支承モデルではその誤差はほぼないが、支承鉛直剛性が低くなるほど大きくなっている。支承鉛直剛性 1000 MN/m では 4.5%、100 MN/m では 15% となり、支承鉛直剛性が低い場合には、この理論値の信頼性は低い。

5. 時刻歴応答解析

(1) 桁端部の応答

交通振動は、桁上の移動荷重による動的応答であるが、ここでは簡易法として、橋脚上の交通振動実測波形を両端の支承下に与えて動的応答を求めた。図-1のモデルに対して、交通振動実測波形を、橋軸、橋軸直角、鉛直方向の三方向に入力した。

解析結果として、支承上の鉛直方向の変位と加速度の最大値と支承鉛直剛性の関係を図-9、図-10に

示した。図-9より、最大変位は支承鉛直剛性に反比例して変化することが分かった。よって、変位振幅は支承鉛直剛性を高くすることによって抑制できる可能性がある。

一方、図-10を見ると、最大加速度は支承鉛直剛性がきわめて低い場合には変化が見られるものの、支承鉛直剛性 300 MN/m 以上では、0.5 gal 以内の小さい変化しか見られなかった。よって、加速度振幅は支承鉛直剛性の影響を受けにくいと考えられる。

振動規制法では、規制基準値が時間帯や区域によって 60~70 dB に定められている。また、一般的に、人は水平振動よりも鉛直振動を強く感じるといわれている。そこで、図-11に鉛直方向の時間率振動レベル L_{10} の支承鉛直剛性による影響を示した。支承鉛直剛性を 100 MN/m から 1000 MN/m に変えても、3.8 dB しか減少しないことがわかった。

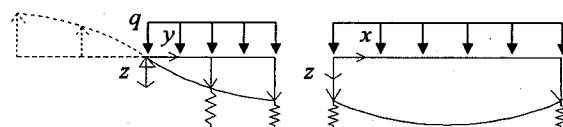


図-7 変形曲線 概略図

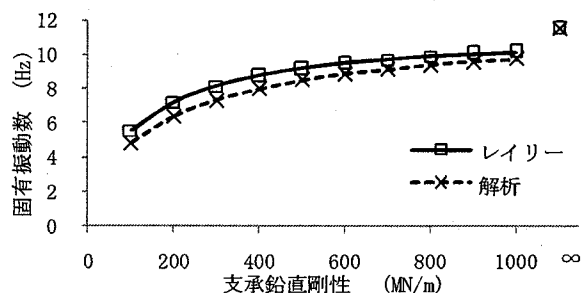


図-8 解析結果と理論値の比較

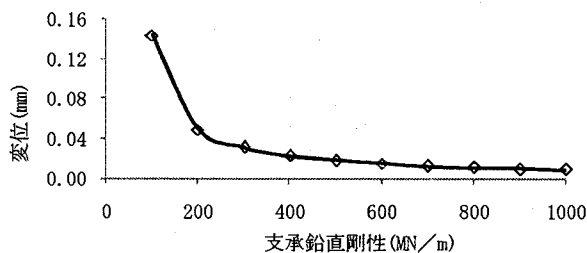


図-9 最大応答変位

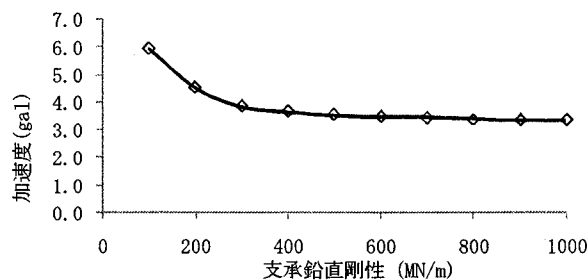


図-10 最大応答加速度

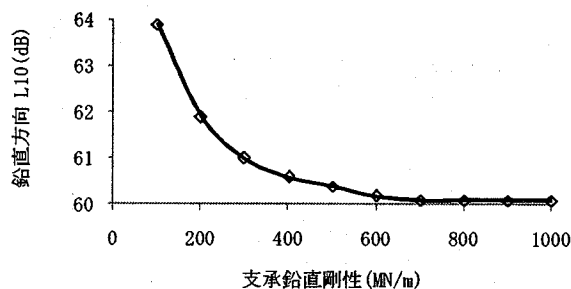


図-11 時間率振動レベル L_{10}

(2) フーリエ・スペクトル

図-12 に入力波形のフーリエスペクトルを示した。また、動的応答解析結果の加速度データをフーリエ変換し、支承鉛直剛性 100MN/m と 1000MN/m の場合の加速度応答スペクトルを比較した。図-13 は支承上、図-14 は桁中央の加速度応答スペクトルを示したものである。

図-13 を見ると、2.2~2.8Hz に卓越周期がある。2.2Hz では 100MN/m が 1000MN/m よりも卓越しているが、2.8Hz では 1000MN/m の方が卓越している。これは、モデルの固有振動数が変化し、入力波形と共振する振動数が変わったためであると考えられる。また、7~12Hz 付近では、支承鉛直剛性を低くすることによって、スペクトルが大きくなっている。この周波数領域には、ねじり 1 次振動モードが含まれている。支承鉛直剛性が変化すると、ねじり 1 次振動モードによる振動は、振動形状の変化とともに、加速度も大きくなり、交通振動に影響を及ぼす可能性が高いと考えられる。

図-14 を見ると、桁中央部のスペクトルは支承上での応答スペクトルより狭帯域であり、卓越振動数が 2.2~2.8Hz の周波数領域に表れている。この周波数領域は、対称 1 次振動モードの固有振動数と重なる。よって、桁中央部での振動は対称 1 次振動モードによるところが大きいと考えられる。支承鉛直剛性を 100MN/m とかなり小さくすると、図-2 の振動数変化のみならず、振動レベルも変化することが分かる。

6. まとめ

- 1) 支承鉛直剛性の違いによって、低次のたわみ振動はあまり影響は受けないが、ねじり 1 次振動モードの形状と振動数は変化し、桁端部の加振に伴って桁全体の振動を励起する可能性がある。
- 2) 支承の水平と回転の連成によって固有振動数が受ける影響は小さい。

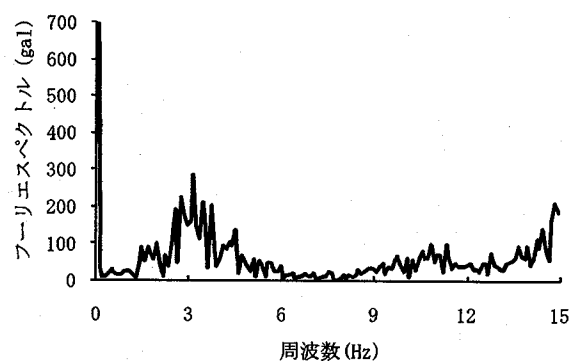


図-12 入力波形のフーリエスペクトル

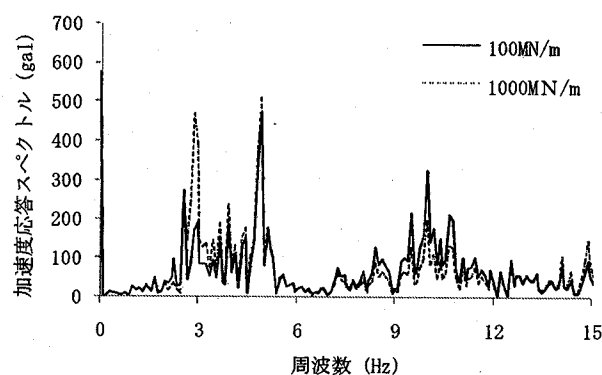


図-13 加速度応答スペクトル (支承上)

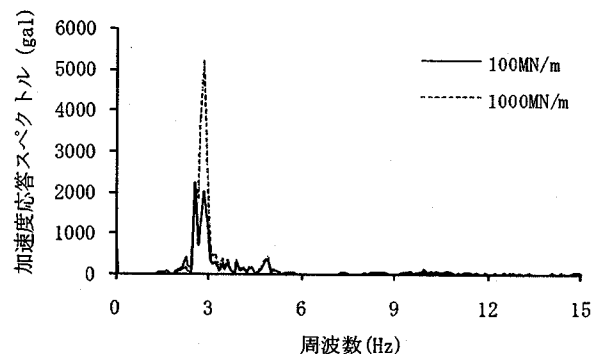


図-14 加速度応答スペクトル (桁中央)

- 3) 振動の加速度成分、および時間率振動レベルが、支承鉛直剛性によって受ける影響は小さい。

参考文献

- 1) 伊津野和行, 小林紘士: 免震支承の剛性が桁の固有振動に与える影響に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.593-602, 2006.
- 2) 吉田純司, 阿部雅人, 藤野陽三: 高減衰積層ゴム支承の 3 次元有限要素解析法, 土木学会論文集, No.717/I-61, pp.37-52, 2002.
- 3) 小坪清眞: 入門建設振動学, 森北出版, pp.167-171, 1996.