

免震ゴム支承の常時振動に対する減衰特性

高井 智康¹・伊津野 和行²

¹学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻（〒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 理工学部土木工学科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

1. はじめに

免震ゴム支承としては、鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）や高減衰積層ゴム支承（HDR）がよく利用されている。これらの支承は、地震時に15%以上の減衰を与えることができ、橋梁の耐震性向上に役立っている。

一方、免震ゴム支承の常時振動特性については、その地震時特性ほど詳細には検討されていない。交通振動レベルの揺れに対する減衰特性も、明確な実験結果が少ない。道路橋示方書^{1), 2)}でゴム支承が標準的な支承として位置づけられたこともあり、既存橋梁の耐震補強策としても、従来の金属支承からゴム支承への交換が多数実施されてきた。しかし、金属支承とゴム支承とでは常時荷重に対する挙動や特性が異なるため、支承交換によって振動苦情の内容や発生場所分布が変化することも十分に考えられる。また、照明柱や標識柱等、橋梁付属構造物の振動性状にも影響があるものと考えられる。

阪神・淡路大震災より以前には、金属支承をゴム支承に交換することにより、長年の供用によって低下した支承の回転・移動機能を改善することを目的とした検討が行われていた^{3), 4)}。これらは、既に機能が低下した金属支承と、新しいゴム支承との性能を比較しており、両者の特性の違いという観点からの評価はあまり行われていなかった。

解析的には、積層ゴム支承の特性を有限要素法によって明らかにしようとする研究が数多く行われており^{5), 6)}等、各種実験結果との整合性もとれるようになってきている。しかし、地震時における水平方向の大変形問題に対する解を得ることを目的とした研究が多く、実験との比較もその領域での考察が主体である。常時における1mm未満の微小振動領域における挙動について検討された例は少なかったが、最

近では詳細な有限要素解析手法が提案され^{7), 8)}、大変形のみならず微小振動に対しても、その特性をある程度予測することができるようになってきた。

本研究では、鉛プラグ入り積層ゴム支承の簡易打撃試験を行うことにより、交通振動レベルの揺れに対する固有振動数と減衰特性とを明らかにしようとした。

2. 実験概要

実験状況を写真-1に示す。供試体は $G=1\text{MPa}$ 、 $\square 400\text{mm}$ の鉛プラグ入り積層ゴム支承であり、無負荷状態、死荷重反力相当の 640kN (4N/mm^2) および最大反力 1280kN を載荷した状態で、それぞれインパルスハンマーによる打撃を行った。打撃力はインパルスハンマーからの出力を加速度計で計測した結果をモニターしつつ、最大値 $100\sim 200\text{gal}$ 程度になるよう



写真-1 実験状況

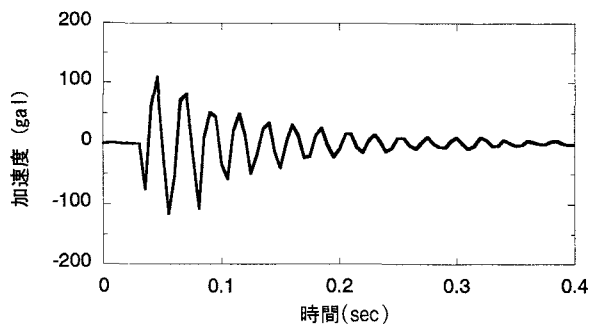


図-1 計測された振動波形の例（無負荷）

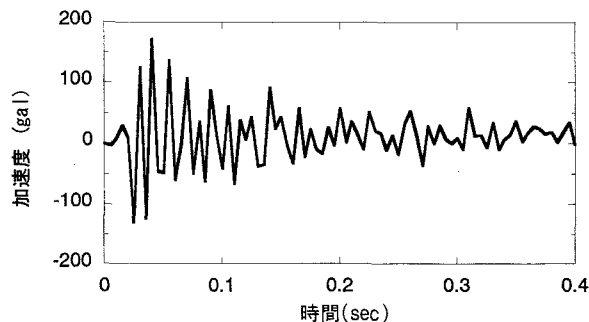


図-2 計測された振動波形の例（鉛直荷重640kN）

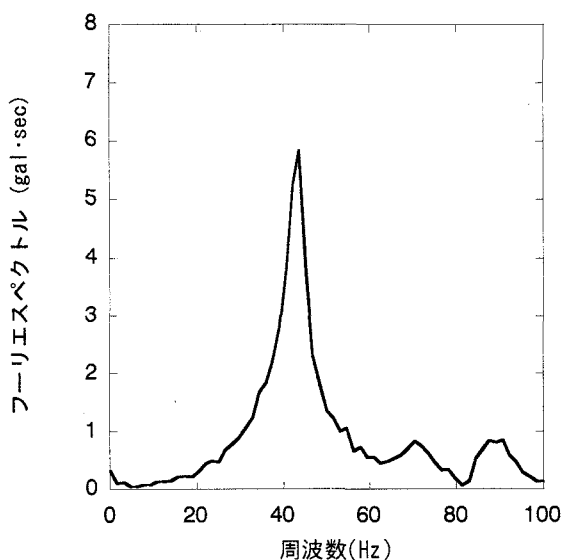


図-3 観測波形のフーリエスペクトル（無負荷）

表-1 減衰定数の測定値

無負荷状態				
1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
0.059	0.046	0.046	0.073	0.084
平均 0.06				
鉛直荷重640kN				
1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
0.044	計算不可	0.088	0.041	0.041
平均 0.05				

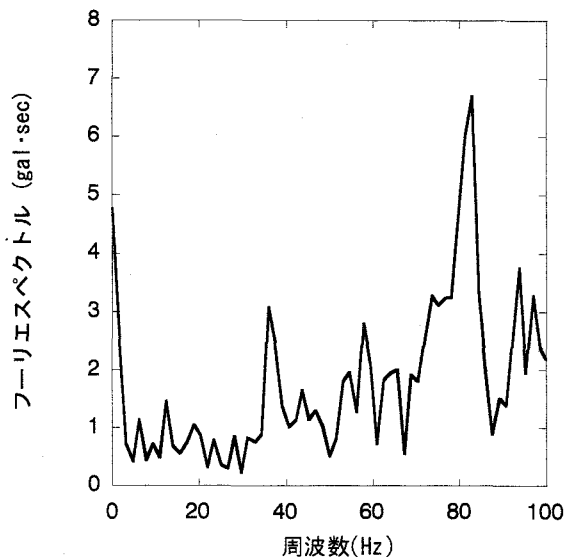


図-4 観測波形のフーリエスペクトル（鉛直荷重640kN）

調整して水平方向に打撃した。同条件で5回ずつ繰り返して平均をとることとし、3軸加速度計を用いて200Hzでサンプリングした。

計測された水平加速度波形の例として、図-1に無負荷状態での打撃結果、図-2に死荷重相当の載荷状態での打撃結果を示す。無負荷状態に対する図-1の波形のフーリエスペクトルが図-3であり、卓越振動数は約43Hzであった。死荷重相当の載荷状態（鉛直荷重640kN、応力4N/mm²）に対する図-2の波形のフーリエスペクトルが図-4であり、卓越振動数は約80Hzであった。ただし、死荷重相当の載荷状態は上下面とも固定であるため、固定条件が実橋とは異なる可能性がある。

なお、最大反力載荷状態における結果は、計測記録に不備があり、解析は実施しなかった。また、打撃方向に直角な水平方向および鉛直方向についても、高周波成分が多く含まれて卓越振動数が明確に現れにくくなっているものの、ほぼ同様のスペクトルが得られた。サンプリング周波数をもう少し上げて計測した方が、より正確な検討には必要だと考えられる。

波形から計算される減衰定数は、表-1のようになった。用いたLRBの地震時に期待される減衰定数は15%以上だと考えられるため、それと比較すると5～6%という小さな減衰定数が得られた。地震時の数cmという変位に対して高減衰を発揮する支承も、0.1mm以下の非常に小さな振幅における減衰は、あまり期待できない可能性がある。

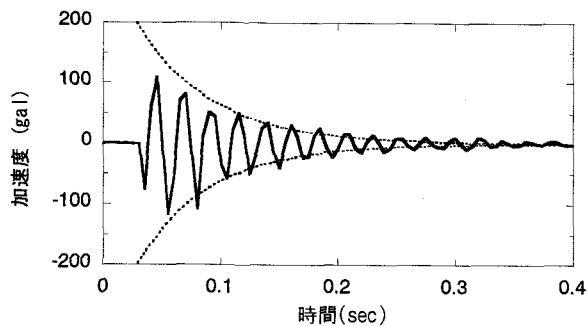


図-3 計測値と減衰曲線との比較

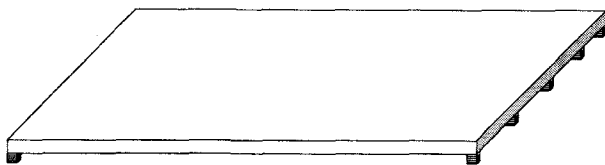
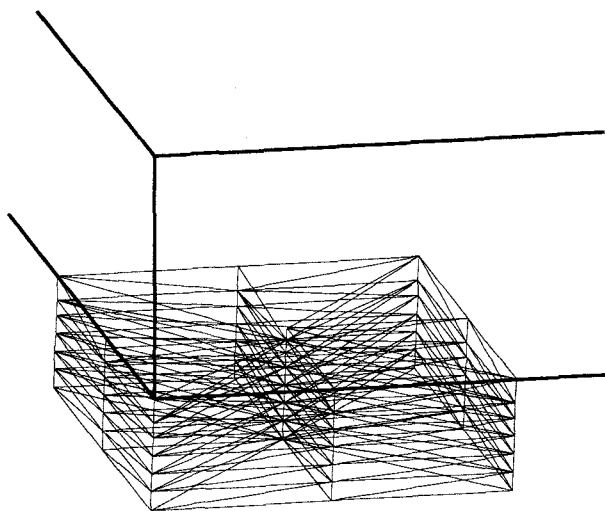
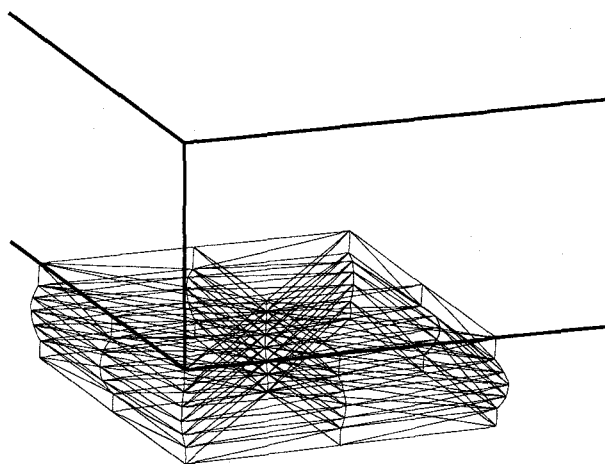


図-4 桁のモデル化



(a) 変形前



(b) 変形後

図-5 荷重載荷による支承変形

減衰定数が6%だとし、減衰曲線 $\exp(-2\pi fht)$ を図-1の波形に書き込んだグラフを図-3に示す。 $h=0.06$, $f=43\text{Hz}$ とした。ピーク値を必ずしも記録できていない可能性があるが、この記録から得られる推定値としては妥当な値ではないかと考えられる。

3. 数値解析概要

支承部の微小振動に対する減衰定数が5~6%の場合、桁の振動特性にどのような影響を及ぼすのか、数値解析によって検討した。

市販の有限要素法ソフトウェアMSC.visualNastran for Windowsを用い、1支線上に5つのゴム支承（□400mm、ゴム層厚17mm×4層）によって支えられるスパン25m、幅17.6mの単純桁をモデル化した。桁は簡単のため直方体によってモデル化し、1次固有振動数が実橋レベルになるように曲げ剛性を調整した。

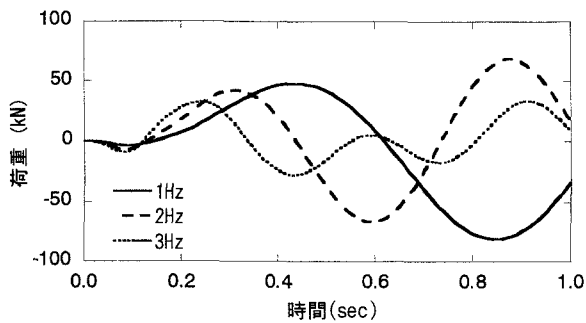
数値解析モデルを図-4に示す。支承は図-5(a)に示す通り、ゴム層（4層）および補強鋼板とをそれぞれモデル化した。メッシュサイズは、支承部分で0.1m、桁部分で0.5mとなっている。支承部の減衰定数は、前章の結果を受けて5%と仮定した。

桁に周期外力を作用させ、図-5(b)のような支承各部分の変形状況を検討した。ゴム層がはらみだし、支承が全体に回転している様子がうかがえる。

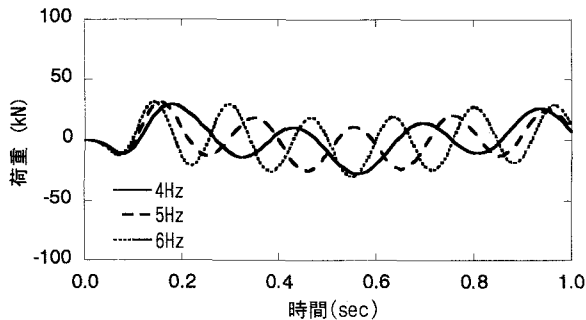
図-6は、桁に正弦波加振を行った場合、支承部下面から橋脚へ伝達される荷重の時刻歴応答波形である。25t車が走行車線中央に存在することを想定し、スパン中央の、桁幅1/4だけ内側に入った点に、最大245kNの正弦波外力を載荷した。正弦波の周波数を1Hz~9Hzまで変化させて、1秒間の強制加振を行った。図-6(a)の1~3Hzの波形では定常状態に至っておらず、もうしばらく強制加振を続ける必要があるが、今回は計算機環境の制限より1秒で打ち切っている。

図-6の各図では、全体に長周期の波がのっており、単純な1自由度系システムの強制加振波形にはなっていない。支承部の動きが複雑に影響しているものと考えられ、今後の詳細な検討が必要である。

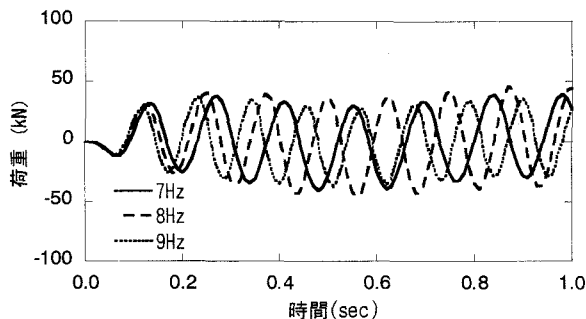
今後、減衰など支承部の特性を変化させて影響を見るとともに、常時振動の低減に向けて検討を行っていく予定である。ゴムのせん断剛性や補強鋼板の大きさ、あるいは減衰の大きさを変化させることにより、交通振動レベルの揺れに対する特性の変化について検討する。理想的には、地震時の大変形に対する特性と、常時の微動に対する特性と、両者の性能を満足させる支承システムが望ましい。



(a) 1Hz～3Hz加振



(b) 4Hz～6Hz加振



(c) 7Hz～9Hz加振

図-6 载荷によって支承部下面に伝達される荷重

4. おわりに

本研究では、免震ゴム支承の常時振動特性について実験および数値解析から検討を行った。打撃試験から得られた減衰定数は5～6%と、地震時に期待さ

れる減衰より小さな値を示した。また、交通振動に対する動特性の改善を検討するため、汎用有限要素法ソフトウェアによる数値解析モデルを作成し、加振シミュレーションを試みた。地震時特性のみではなく、常時特性にも優れた支承システムについて、今後とも検討していく予定である。

謝辞：本実験の実施にあたっては、(株)ビービーエム、(株)コベルコ科研、および立命館大学院生の川原林浩君、阿原進也君、中尾尚史君にお世話になった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V．耐震設計編，1996年12月．
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V．耐震設計編，2002年3月．
- 3) 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，第1部(A)，pp.666-667，1995年9月．
- 4) 北村 隆理，小林 潔，田嶋 仁志：ゴム支承への取替効果に関する鋼I桁橋の実橋計測，土木学会第50回年次学術講演会，第1部(A)，pp.668-669，1995年9月．
- 5) Hosam-Eddin, M.A. and Abdel-Ghaffar, A.M.: Modeling of rubber and lead passive control bearings for seismic analysis, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 7, pp. 1134-1144, 1995.
- 6) 松田 泰治，大塚 久哲，中島 崇之，矢葺 亘：FEMを用いた積層ゴムの力学特性に与える形状パラメータの影響評価に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.47A，pp.895-904，2001年3月．
- 7) 阿部 雅人，吉田 純司，藤野 陽三：免震用積層ゴム支承の水平2方向を含む復元力特性とそのモデル化，土木学会論文集，No. 696/I-58，pp.125-144，2002年1月．
- 8) 吉田 純司，阿部 雅人，藤野 陽三：高減衰積層ゴム材料の構成則，土木学会論文集，No. 710/I-60，pp.209-224，2002年7月．
- 9) 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年10月．