

機能分離型免震支承システムの すべり摩擦特性に関する研究

伊津野和行¹・袴田文雄²・志村 敦²

¹正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

²正会員 工修 阪神高速道路公団 大阪建設局 (〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16)

平常時の荷重に対する支承の働きと、地震荷重に対するダンパーの働きとを分離した、機能分離型支承装置が開発された。本研究では、この機能分離型支承装置の振り子衝突載荷実験を実施し、動摩擦係数の載荷速度依存性および面圧依存性を確認した。その結果、40kine程度までの載荷に対する摩擦係数が15～25%であることを明らかにした。さらに、機能分離型支承への支承交換を含む耐震補強を実施した高架橋橋脚において、耐震補強前後の振動計測を行い、振動レベルとスペクトル特性の変化を調査した。その結果、耐震補強によって振動特性が向上したことが判明した。

Key Words: *bridge structure, sliding bearing, coefficient of friction, dynamic loading test, PTFE, nonlinear earthquake response*

1. はじめに

近年では、既存道路橋の耐震補強にもゴム支承が使用されるようになった。しかし、既存橋梁では、必ずしもゴム支承の設置空間が十分確保されているとは限らず、縦断勾配変更も不可能な場合が多い。また、地震に強い構造にすることは必要であるが、平常時の機能もおおそかにしてはならない。そこで、平常時の荷重に対する支承の働きと、地震荷重に対するバフアの働きとを分離し、従来の線支承の交換にも用いることができるような、背の低い機能分離型支承装置が開発された。

この装置は、PTFE (四フッ化エチレン) とステンレスとを用いたすべり摩擦型支承装置の一種である。PTFEとステンレスを用いる場合、摩擦係数が面圧やすべり速度によって変動することが知られている¹⁾³⁾。これまでの正弦波加振実験⁴⁾では、大地震時における数十kineのすべり速度に対する摩擦係数が未確認であった。

本研究では、振り子を供試体に衝突させることによって高速載荷を実現し、摩擦係数の載荷速度依存性および面圧依存性を確認した。また、耐震補強の一貫として従来の線支承を機能分離型支承に交換した道路高架橋において交通振動計測を行い、耐震補強前後の振動特性を比較した。

2. 衝突載荷実験

(1) 機能分離型支承装置

機能分離型支承装置は、図-1に示すように、荷重支持板とその上に設けられたスライド部、および側面に取り付けられたゴムバフアからなる。

荷重支持板は薄い積層ゴムからなり、常時の鉛直荷重支持と、桁の回転吸収を行う。

スライド部は、荷重支持板の上面に取り付けられたPTFEと、桁の下面に取り付けられたステンレスとの間ですべり摩擦が生じることを利用し、地震時における橋軸方向の揺れの長周期化と、摩擦減衰の付加をねらっている。スライド部は強制スライド形式として、荷重支持板のゴムには大きなせん断変形が生じないようにしてある。

バフアは天然ゴムの積層ゴムからなり、地震時における反力分散と三方向の変位制限装置として働く。橋軸方向のみならず、鉛直方向に対してもゴムのせん断変形に抵抗し、地震時における桁の浮き上がりを防止する。

(2) 実験システム

本装置の面圧依存性と載荷速度依存性を調べるため、装置の全体模型に対して、図-2の実験システムによって衝突載荷実験を行った。

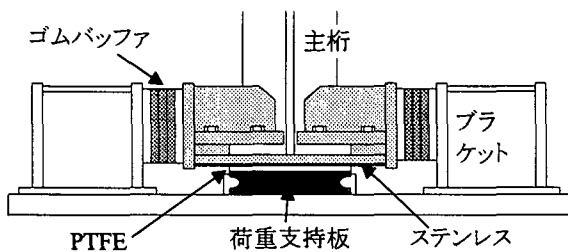


図-1 機能分離型支承装置

表-1 実験ケース

面圧 (MPa)	6, 12, 25						
振り子高さ (cm)	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0
衝突速度 (kine)	70	80	90	95	105	115	125

荷重支持板に鉛直方向の面圧を加えた状態で、振り子によって装置を水平方向に打撃した。打撃によってスライド部にはすべり摩擦が生じ、ゴムバッファはせん断変形を受ける。

実験ケースを表-1に示す。荷重支持板に与える面圧については、6MPa、12MPa、25MPaの3通りとし、衝突速度を70～120kineで各7通り実施した。面圧12MPaは、本装置模型を設計するにあたって用いた死荷重相当反力である。なお、面圧12MPaのケースについては、同じケースをそれぞれ2回繰り返し、実験結果が再現できることを確認している。

振り子前面に設置したロードセルによって衝突荷重を、非接触型の赤外線半導体型レーザー変位計によって振り子と供試体の変位を、それぞれ1/10,000秒単位で測定した。また、変位計の記録を数値微分し、速度を計算した。

(3) 衝突载荷実験結果

実験結果の一例として面圧12MPa、振り子の落下高さ2.5cmのケースにおける、振り子と供試体の変位時刻歴を図-3に示す。衝突速度は70kineであり、衝突によって供試体は18kineの速度で移動した。図中の時間軸0.06秒付近で衝突しているが、その少し前から供試体が動き始めている。これは、振り子前面にロードセルを保護するためのゴム片を貼り付けたためである。これらの波形から摩擦係数を推定する。供試体の運動は、速度が時々刻々と変化しているが、簡単化のため、あるひとつの周期に対しては、摩擦係数が一定だと仮定した。

図-4は、供試体の変位波形と、摩擦係数を計算して変位波形を逆算したものとを比較したものである。測定値は、図-3の一部分を拡大した図になっている。このケースでは、測定値と計算値がほとんど一致していることがわかる。

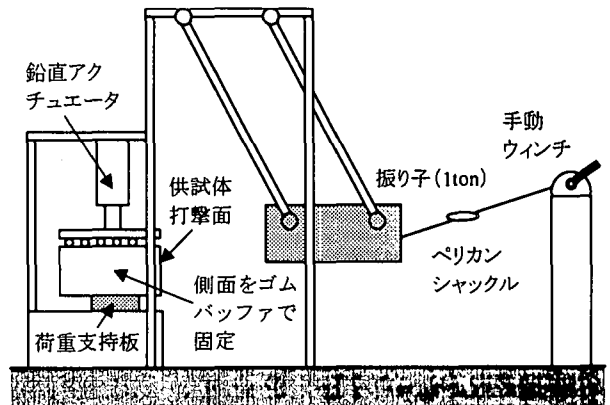


図-2 衝突载荷実験システム

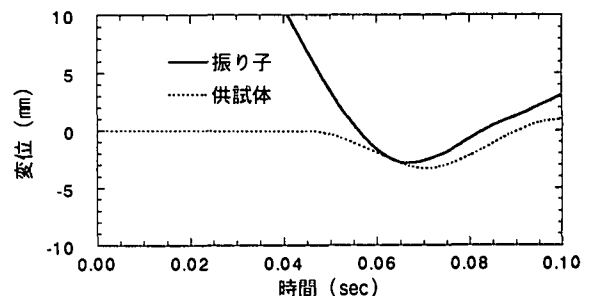


図-3 衝突変位波形の例

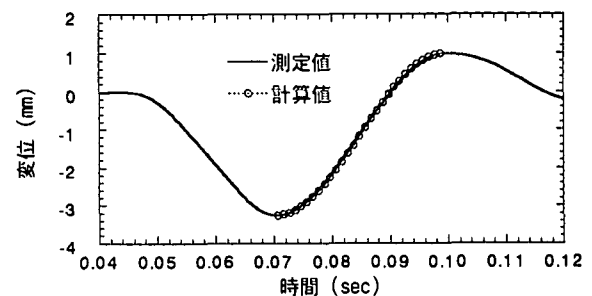


図-4 摩擦係数の同定

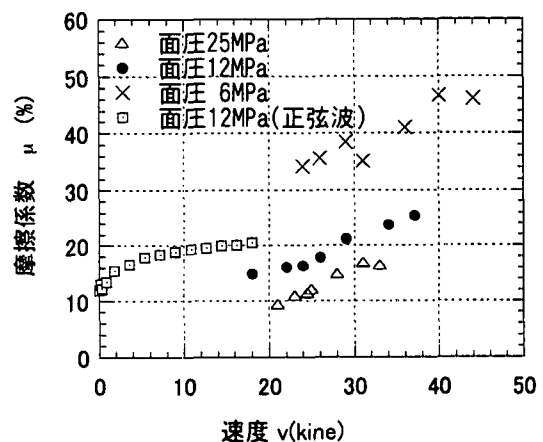


図-5 摩擦係数の载荷速度および面圧依存性

しかし、供試体初速度が30kineを越えるケースでは、測定値と計算値との差が多少見られた。速い速度の

ケースで同定誤差が大きくなるのは、速度依存性のある摩擦係数を、高速運動中一定としたことの影響がある。また、供試体が最大点に達した後も振り子がゴム片を介して接しており、仮定した式が厳密には成り立たないことも影響している。

摩擦係数と供試体の速度との関係をグラフで示すと図-5になる。図中には、文献4)に示された最大速度0.018～18kineの範囲の正弦波加振実験による面圧12MPaに対する摩擦係数も示してある。衝突載荷実験では摩擦係数がばらついているが、面圧12MPaのケースで15～25%であった。

40～50kineまで速度が上がっても、摩擦係数が小さくなることはないといえる。地震時の速い速度においても、摩擦による減衰を見込めると判断される。

よって、地震時に対する摩擦係数の設計値として、面圧12MPaのケースでは、安全側に評価し $\mu=15\%$ 程度を与えればよいと考えられる。また、面圧の違いによる摩擦係数の変化は大きいことがわかる。面圧が半分になれば、摩擦係数は約2倍になった。

なお、衝突実験終了後、荷重支持板、ゴムバッファ、スライド部とも、供試体に異常は認められなかった。

3. 実橋における振動特性の観測

(1) 観測方法

機能分離型支承の試験施工を行った実橋において交通振動を観測し、その平常時における振動特性を把握した。供試体による実験や数値シミュレーションでは得られない、機能分離型支承装置の実際の挙動や検討課題を明らかにする。耐震補強工事の実施前後で振動計測を行い、その差を評価した。

図-6に観測を行った場所を示す。T型単柱の鋼橋脚で鋼床版となっている。従来の線支承から機能分離型支承への交換と、橋脚補強工事が実施された。橋脚補強としては、幅厚比などが不足している場合には、リブを取り付けて補強し、また、最下部のダイヤフラムまでコンクリートが充填された。桁端横桁補強も実施されている。図-6において、A地点は橋脚から150mほど離れた舗装道上、B地点は橋脚から10mほど離れた歩道上、C地点は橋脚基部の地盤上、D地点は橋脚天端の中央部、E地点は橋脚天端の梁端部、F地点は中央の桁上、G地点は端部の桁上である。

まず、耐震補強前、1998年5月に第1回目の振動計測を実施した。橋脚補強や支承交換終了後に、耐震補強後の計測を1999年1月に実施した。この間、1998年9月までに、橋脚補強工事が完了している。

歪みゲージ式3軸加速度計を用い、1点ずつ3成分（水平2成分+鉛直1成分）同時観測を行った。各測定点で1分間×2回にわたって、交通振動を測定した。

(2) 観測記録

高架橋から約150m離れたA地点における観測において、水平2成分は両時点で同レベル（約5gal）のホワイトノイズに近い振動が観測された。鉛直方向については、耐震補強前の記録が約2倍大きく、当日の交通量や周辺での工事など、周辺状況の差がある。よって、他の地点における観測結果でも、鉛直動の大きさは、この差を考慮して評価する必要がある。

図-7～9に、D地点橋脚天端中央における観測記録を示す。図-7が橋軸方向、図-8が橋軸直角方向、図-9が鉛直方向の観測記録であり、それぞれ、(a)耐震補強前の記録、(b)耐震補強後の記録、(c)耐震補強前後におけるフーリエスペクトルの比較の3つのグラフを示す。

橋軸方向5Hz、橋軸直角方向3～4Hzに卓越周期が見られる。橋脚の何次モードかの固有周期かと考えられる。2Hz前後のピークは小さく抑えられており、補強によって剛性が増した効果だと考えられる。橋軸方向5Hz、橋軸直角方向1.5Hzという、補強前の観測で最も卓越していた周波数が、補強後には小さくなっている。加速度波形も、補強前30gal程度の振動レベルであったものが、約半分に小さくなった。

支承交換の他に、リブ補強、基部へのコンクリート充填、端横桁補強が行われており、これら耐震補強によって全般的に振動特性が向上したものと考えられる。図-7～9より、本支承交換によって、低周期振動が増幅されることはなかったと判断される。

なお、桁における記録（F地点）は橋脚天端記録とほぼ同様であり、また、中央部の振動と比較して、E地点やG地点といった端部では鉛直振動が2～3倍に達した。補強後の振動波形はいずれも補強前よりも振動レベルが小さい。150m離れた地点でも鉛直動が2倍大きいことを差し引いてもなお、補強後の振動低減は大きい。

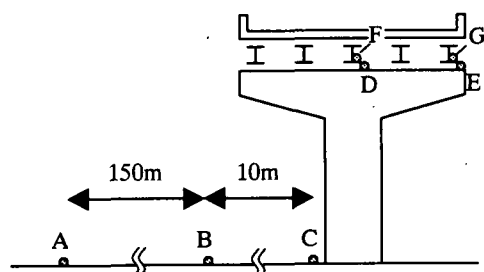


図-6 観測場所

4. おわりに

機能分離型支承装置は実用化が始まっており、写真-1のように、実橋梁への設置も進められている。現在、経年変化に対する検討などが継続的に実施されている。本研究では、すべり摩擦型装置を用いた機能分離型支承装置の特性および設計手法について検討した。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 振り子の衝突载荷実験より、面圧12MPaを与えた場合、载荷速度20～40kineの加振では動摩擦係数が15～25%であった。
- 2) 動摩擦係数は面圧によっても変化し、面圧が半分になれば、摩擦係数は約2倍になった。
- 3) 機能分離型支承装置を用いた耐震補強を行った道路高架橋で、補強前後に振動計測を行った。加速度振動レベルが、補強前と比べて、補強後は約半分に小さくなった。また、支承交換に伴う低周期振動の増幅は見られなかった。

謝辞：本研究の実施にあたり、ビービーエム、コベルコ科研、春本鐵工、三井造船の各社にお世話になった。また、振動計測にあたって、立命館大学大学院の学生諸君の協力を得た。記して謝意を表する。

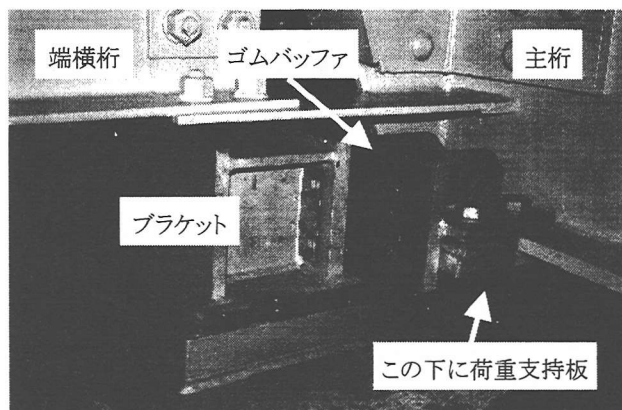
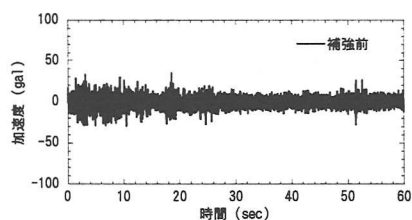


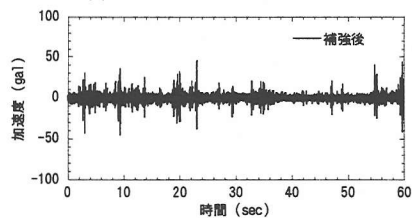
写真-1 実橋梁に設置された機能分離型支承装置

参考文献

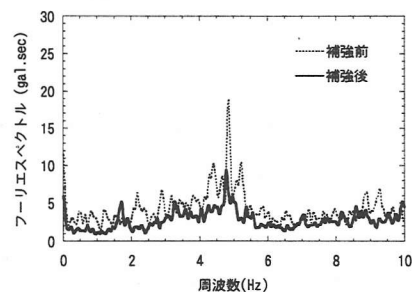
- 1) Mokha, A. Constantinou M. and Reinhorn A.: Teflon bearings in base isolation. I: Testing, *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.2, pp.438～454, Feb. 1990.
- 2) 岡本晋ほか：すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.507/I-30, pp.167～177, 1995年1月。
- 3) 岡本晋ほか：すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性，土木学会論文集，No.513/I-31, pp.191～200, 1995年4月。
- 4) 伊津野和行，袴田文雄，佐藤大輔，中村一平：橋梁の機能分離型免震すべり支承に関する実験的研究，第10回日本地震工学シンポジウム，Vol.3, pp.2783～2788, 1998年11月。



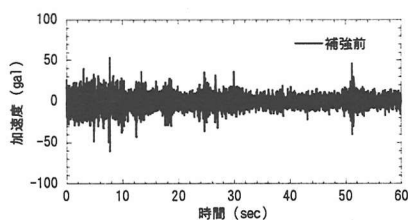
(a) 補強前の加速度波形



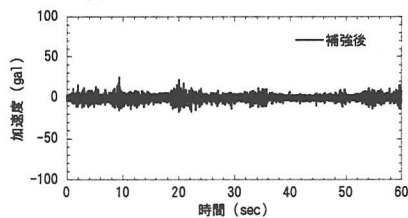
(b) 補強後の加速度波形



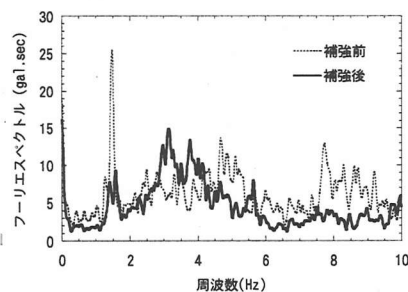
(c) 加速度フーリエスペクトル
図-7 橋脚天端中央橋軸方向



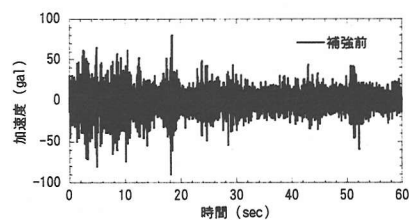
(a) 補強前の加速度波形



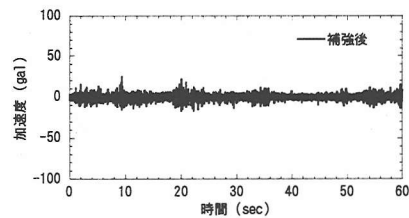
(b) 補強後の加速度波形



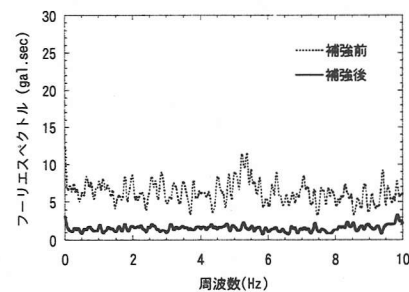
(c) 加速度フーリエスペクトル
図-8 橋脚天端中央橋軸直角方向



(a) 補強前の加速度波形



(b) 補強後の加速度波形



(c) 加速度フーリエスペクトル
図-9 橋脚天端中央鉛直方向