

鋼鉄道橋に使用するゴム支承の実験的研究

Experimental study of elastomeric bearings for steel railway bridge

保坂 鐵矢*, 市川篤司**, 伊関治郎***, 池永雅良***

Tetsuya HOSAKA, Atsushi ICHIKAWA, Jiro ISEKI and Masayoshi IKENAGA

*日本鉄道建設公団 設計技術室 (〒100 東京都千代田区永田町二丁目)

**(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発部 (〒185 東京都国分寺市光町二丁目)

***オイレス工業(株) 第二事業部 (〒105 東京都港区芝大門一丁目)

The elastomeric laminated bearings are designed for steel, long span railway bridges. We tested the elastomeric laminated bearings in consideration of the steel railway bridge characteristics. The 3 types of the elastomeric laminated bearings tested are the natural rubber bearings, the lead rubber bearings and high damping rubber bearings. The first endurance test in consideration of the load due to temperature change was at compression stress of 60kgf/cm², under the slow shear movement of 5 thousand cycles. The second endurance test in consideration of the train load was rotational with bearing deflected by 1/250, under the vertical compression and horizontal shear movement of 2 million cycles, giving good end results. We measured the compression stiffness of the bearings, under the maximum compression stress of 140kgf/cm², to check the comfort of the train ride.

Key Words: elastomeric bearing, endurance test, compression stiffness

1. はじめに

ゴム支承が東北本線鬼怒川PC連続橋梁(1961年)に本格的に使用されて以来, 支承として優れた機能が着目され, 次第に適用範囲が広がって来ている。近年になってさらに分散支承, 免震支承としての使用が始まり, 支承の中での位置が大きなものになって来た。

このため鉄道公団では鋼構造物の設計施工に関する調査研究でゴム支承を取り上げ実施してきた。^{1),2)} これらの研究により地震時の慣性力を下部構造に伝える水平力分散咎として, 北総線の都計道 BV(馬桁一体構造 2 径間連続合成桁)や京葉高速白筋高架橋(3 径間連続合成桁), そして一般ゴム支承の適用範囲を拡大し北陸新幹線の SRC 桁の裾花川 B(2 径間連続桁 41.6m + 39.6m), 新田川 B(46.2m), 眼鏡橋(2 径間連続桁 44.4m + 40.4m)等々に採用している。^{3),4)}

ゴム支承にはエネルギー吸収しない復元力のみタイプ(以下一般ゴム支承と呼ぶ)とエネルギー吸収する鉛プラグ入りゴム支承や高減衰ゴム支承のようなタイプがある。これらのゴム支承はいずれも鋼鉄道橋にその特徴を活かした使用が見込まれていて適切な設計法の確立が要求されている。これらの 3 種類のゴム支承は現在鉄道橋だけでなく道路橋でも広く使用されている。⁵⁾ 本研究ではこの 3 種類のゴム支承を対象とした。

本研究で取り上げた上記のゴム支承の構造は従来型のベタ置きタイプのように水平力を摩擦力で伝えるゴム支承ではなく, 上下の厚い鋼板をゴムと一体成形し, ボルトやシャキィーにより水平力を伝達するゴム支承である。

鋼鉄道橋でのゴム支承の使用には列車走行による繰返し疲労や桁の温度伸縮による繰返し疲労と, 列車の走行性⁶⁾に影響すると考えられる圧縮剛性の検討が必要である。図 1 に研究の全体概要を示す。常時におけるこれらのゴム支承の使用条件に着目してその特性について研究した。

なお, 3 種類のゴム支承は以下のように略して呼ぶ。

LRB:鉛プラグ入りゴム支承

HRB:高減衰ゴム支承

RB:一般ゴム支承(減衰機能を持たないゴム支承)

また, ゴム支承のゴム 1 層の厚さと鋼板に接着された面積との形状に関する比率については以下のように形状係数(S)によって表す。

$$\text{形状係数}(S) = \frac{\text{接着面積}}{\text{自由面積}} = \frac{a \times b}{2(a+b)tr} \quad \begin{array}{l} a: \text{短辺長さ} \\ b: \text{長辺長さ} \\ tr: \text{ゴム 1 層厚さ} \end{array}$$

2. ゴム支承の繰返し耐久性

ゴム支承を鉄道橋に使用するに当たっては従来から疲

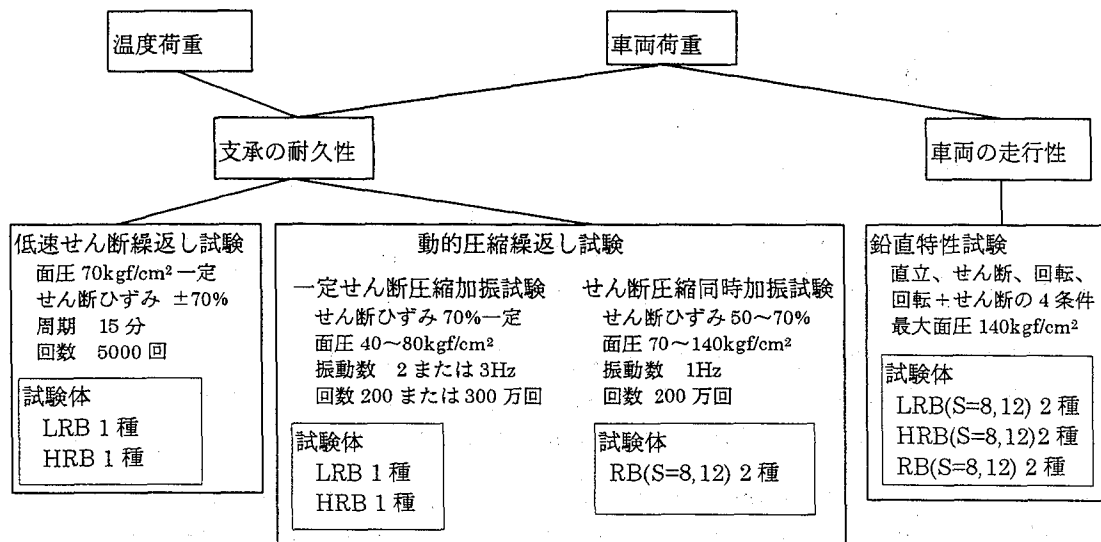


図 1 研究概要

表 1 試験体番号

試験項目	一般ゴム支承	鉛プラグ入りゴム支承	高減衰ゴム支承
低速せん断繰返し試験		LRB1	HRB1
圧縮繰返し試験	RB1、RB2	LRB2	HRB2
圧縮特性試験	RB1、RB2	LRB3、LRB4	HRB3、HRB4

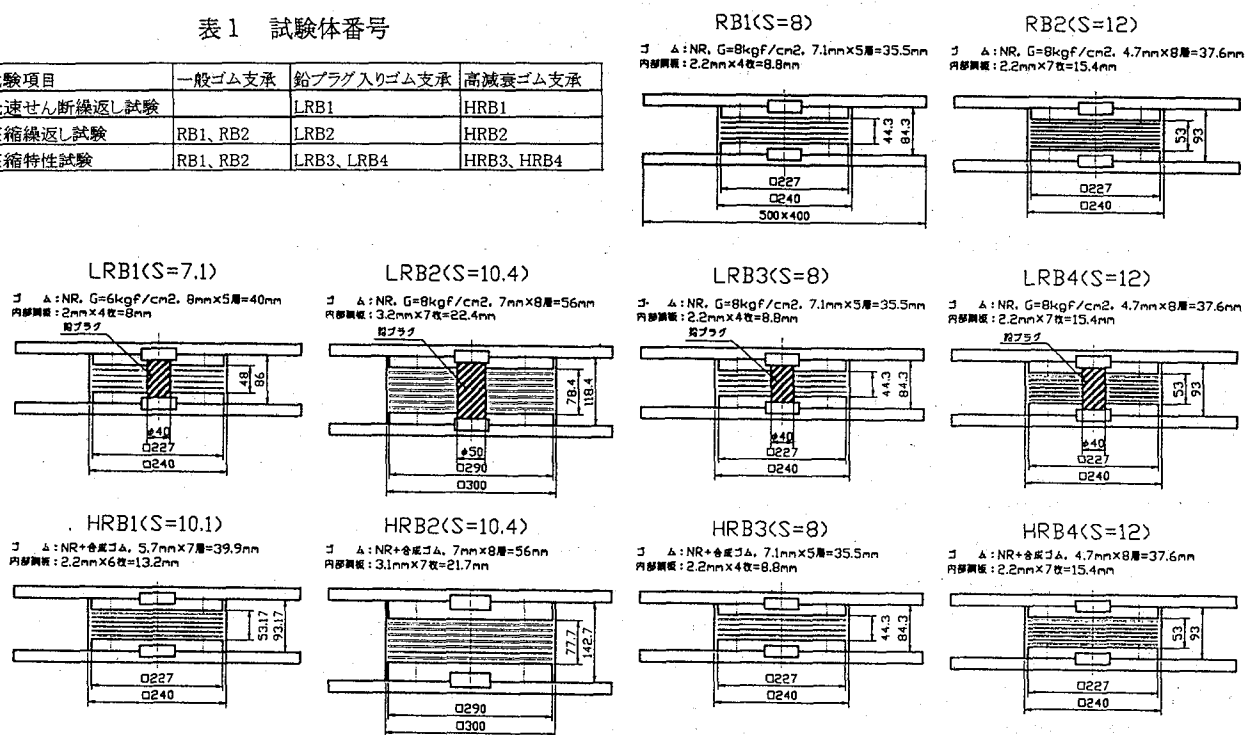


図 2 試験体

劣試験により耐久性の確認がされてきた。ゴム支承の繰返し変形の耐久性は温度変化による桁の伸縮による変形と列車走行時の桁の変形を伴う圧縮荷重の変化が考えられる。温度による変形はその変形速度が極めて遅く 1 回/日あるいは 1 回/年という特徴がある。またその時のゴム支承の変形は圧縮荷重の変化は無く、せん断変形量が桁の伸縮によって変化するだけである。活荷重による変化はその変形速度が速く、圧縮荷重の変化とせん断、回転が同時に生じる特徴がある。このため温度変化による繰返しはできるだけ低速の方が実条件に近い

めそのような条件で試験を行った。活荷重による繰返しは荷重変化だけでなくその他のゴム支承に生じる変形も考慮した繰返し試験を行った。

2. 1 低速せん断繰返し試験

(1) 試験方法

試験体は図 2 に示す 227×227mm の鉛プラグ入りゴム支承(LRB1)、高減衰ゴム支承(HRB1)を使用した。試験機は図 3 に示すようにモータを減速機により 4 回/時間まで回転数を下げ、クランクにより一定振幅の往復動の変形が加えられる装置を使用した。鉛直荷重は 40tf(面

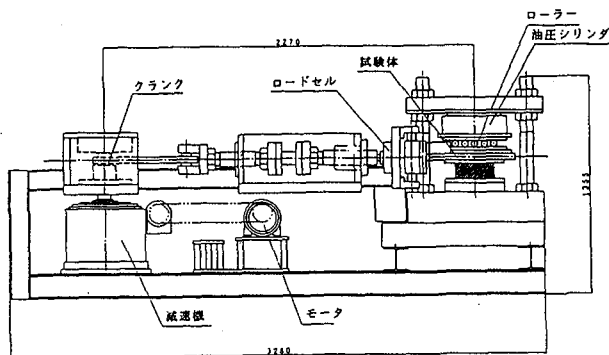
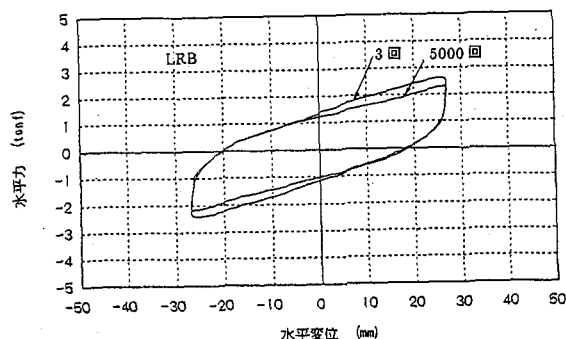
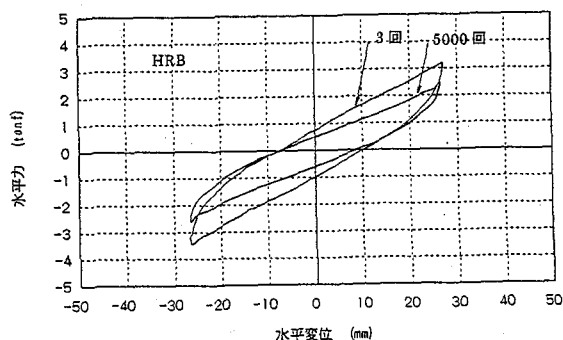


図3 低速せん断試験機



(a) LRB の履歴曲線



(b) HRB の履歴曲線

図4 低速せん断履歴曲線

圧 70kgf/cm²、水平変位は±28mm(せん断ひずみ±70%)を与えた。せん断ひずみ 70%は常時荷重におけるゴム支承の最大ひずみを想定した。1 回/日の温度伸縮はこの最大ひずみ振幅より相当小さいが、1 回/年程度実橋においてこの最大ひずみ振幅に達することを考慮して設定した。

(2) 試験結果

繰返し3回目と繰返し試験最後の5000回目の水平変位一水平荷重の履歴曲線を図4に示す。履歴曲線は繰返しによって剛性、吸収エネルギーが低下したため最大荷重が低下する結果となった。履歴曲線は図5に示すように荷重振幅と変位振幅から求められる等価剛性 K_{eq} と履歴面積から求められる等価減衰 heq を用いて表すことができる。さらに設計では履歴曲線をバイリニアとして扱うことが多くその場合、降伏後剛性 K_d と降伏荷重特

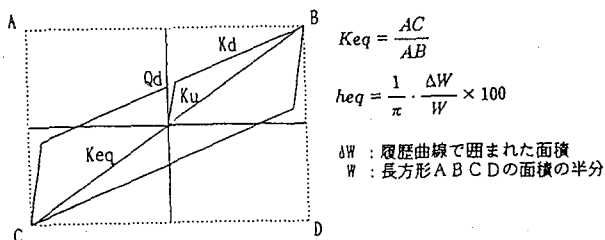
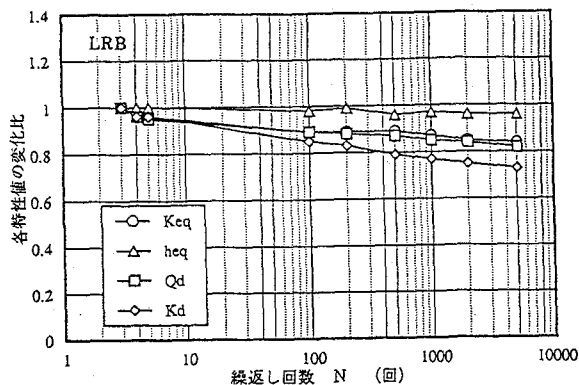
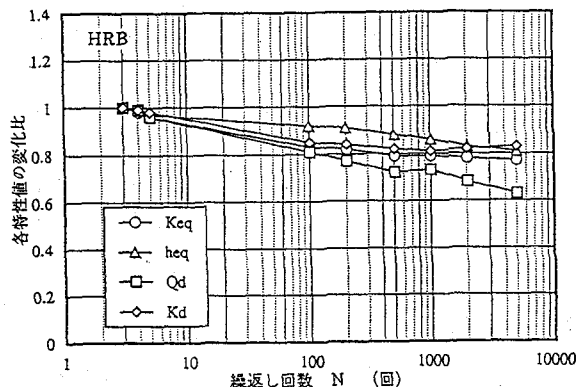


図5 せん断履歴特性値



(a) LRB の特性変化



(b) HRB の特性変化

図6 低速せん断試験結果

性値 Q_d で表すことができる。図6に4つの特性値の回数ごとの変化を3回目を規準として示す。鉛プラグ入りゴム支承ではどの特性値も回数とともに低下し、5000 回では等価剛性は-16%、等価減衰定数は-4%、降伏後剛性は-28%、降伏荷重特性値は-18%となった。

高減衰ゴム支承ではどの特性値も回数とともに低下し、5000 回では等価剛性は-23%、等価減衰定数は-19%、降伏後剛性は-37%、降伏荷重特性値は-17%となった。

5000 回の繰返しせん断疲労に対し、せん断の特性値は低下するが、その割合は0.7 ~ 0.9 と小さく、試験体には損傷も認められないなど充分な耐久性を有することが確認できた。

2.2 動的圧縮繰返し試験

(1) 試験方法

試験体は図2に示す 290×290mm の鉛プラグ入りゴム

支承 (LRB2)、高減衰ゴム支承 (HRB2)、および 227×227mm の一般ゴム支承 2 種 (RB1,RB2)を使用した。試験装置は図 7 に示す 2 軸の加力が可能な試験機を使用した。圧縮は 100tonf サーボアクチュエータの荷重制御により一定の荷重振幅を加え、せん断は 10tonf サーボアクチュエータの変位制御により一定の変位を加えた。圧縮、せん断の力はそれぞれのアクチュエータの先端に取り付けたロードセルで計測した。圧縮の変形量は試験体の 4 隅に取り付けた 4 本の変位計の平均値から、せん断の変形量は試験体の上下の鋼板の相対変形を側面に取り付けた変位計から測定した。

鉛プラグ入りゴム支承は 3 個の圧縮繰返し試験を行った。LRB2-1 は圧縮荷重振幅が面圧 45~75kgf/cm²、一定せん断ひずみ 70%、振動数 2Hz で 200 万回、LRB2-2 は同じ荷重振幅、せん断ひずみで 3Hz、300 万回、LRB2-3 は面圧 40~80kgf/cm²、一定せん断ひずみ 70%、振動数 3Hz で 300 万回の試験をした。高減衰ゴム支承は 2 個の圧縮繰返し試験を行った。HRB2-1 は圧縮荷重振幅が面圧 40~80kgf/cm²、一定せん断ひずみ 70%、振動数 3Hz で 300 万回、HRB2-2 は同じ面圧、同じ一定せん断ひずみに回転角 1/250 を付加し 300 万回の試験をした。

一般ゴム支承は形状係数が S=8 と S=12 の 2 種類についてそれぞれ 1 個の疲労試験を行った。試験条件は同じで圧縮荷重振幅が面圧 70~140kgf/cm²、せん断ひずみ振幅が 50~70%、回転角 1/250 で振動数 1Hz、200 万回の試験をした。振動数 1Hz は 2 軸を同時に加振した時の試験機の最大の振動数である。試験条件一覧を表 2 に示す。

鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承は現在標準的に使用されている最大面圧のもとでの特性を調べるため最大面圧を 80kgf/cm² とした。鋼鉄道橋では死荷重に対する活荷重の比率が大きいので実橋の設計を参考に試験体 LRB2-3、HRB2-1、HRB2-2 の 3 個の試験体については最大荷重の半分の荷重振幅で繰返し疲労試験を行った。せん断ひずみは常時における鉄道橋の設計標準の最大 70%を一定とした。また、回転の影響を調べるため高減衰ゴム支承(HRB2-2)には角度を付けた鋼板で支圧する方法により一定の回転角を加えた。回転角は桁のたわみが 1/800 の時に支承部に生じる回転角を最大として 1/250 とした。

一般ゴム支承については合理的設計を目指して、現在の標準の最大面圧以上の適用のため、圧縮荷重は最大面圧を 140kgf/cm² として試験した。荷重振幅は鋼鉄道橋を考慮して最小荷重は最大荷重の半分の 70kgf/cm² とした。回転角は高減衰ゴム支承の場合と同様に一定の回転角 1/250 を与えた。せん断変形は実際の列車走行時のゴム支承の動きを模して、図 8 のように圧縮荷重が加わると同時に変形するよう変位振幅を与えた。圧縮荷重とせん断変形は圧縮荷重の最大とせん断変形の最大が同時となるよう同期させた。せん断変形振幅は実橋の設計をもとに列車載荷によるせん断ひずみで 20%とし、常

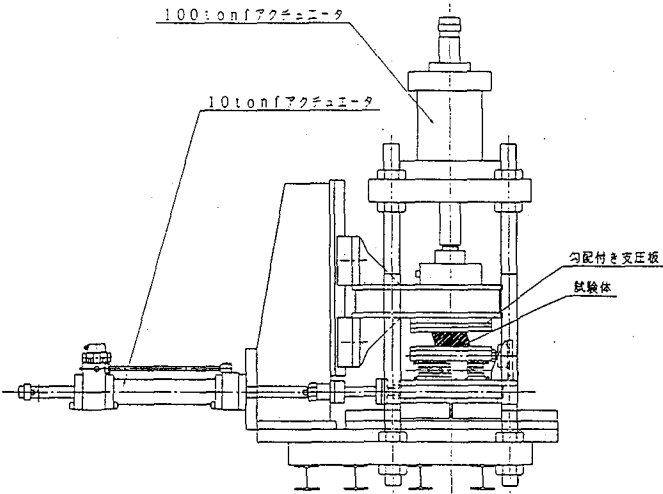


図 7 動的 2 軸加力試験機

表 2 動的圧縮繰返し試験条件

試験体	荷重振幅 (kgf/cm ²)	せん断ひずみ (%)	回転角	振動数	繰返し回数
LRB2-1	45-75	70	無	2	200万回
LRB2-2	45-75	70	無	3	300万回
LRB2-3	40-80	70	無	3	300万回
HRB2-1	40-80	70	無	3	300万回
HRB2-2	40-80	70	1/250	3	300万回
RB1	70-140	50-70	1/250	1	200万回
RB2	70-140	50-70	1/250	1	200万回

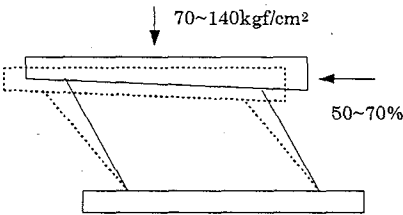


図 8 ゴム支承加力状態

時の最大せん断ひずみが 70%となるよう 50~70%の変形とした。

各試験体とも 200 万回または 300 万回の途中 50 万回または 75 万回ごとに休止し、恒温室に 12 時間以上置いた後、寸法の測定および常時におけるゴム支承の使用条件下の圧縮特性とせん断特性の変化を調べる基本特性試験を行った。鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承の圧縮特性は 0~最大面圧と 50~80kgf/cm² までの圧縮試験を行った。せん断特性は圧縮応力 60kgf/cm² を載荷した状態でせん断ひずみ±70%のせん断試験を 0.02Hz の振動数で行った。一般ゴム支承は 0~140kgf/cm² と 70~140kgf/cm² までの圧縮試験を行った。せん断特性は圧縮応力 70kgf/cm² を載荷した状態でせん断ひずみ±70%のせん断試験を 0.02Hz で行った。

圧縮試験は 3 回繰返し 3 回目の荷重-変位曲線から圧縮ばね定数を読み取った。せん断試験は 4 回繰返し、3 回目の荷重-変位曲線から特性値を読み取った。

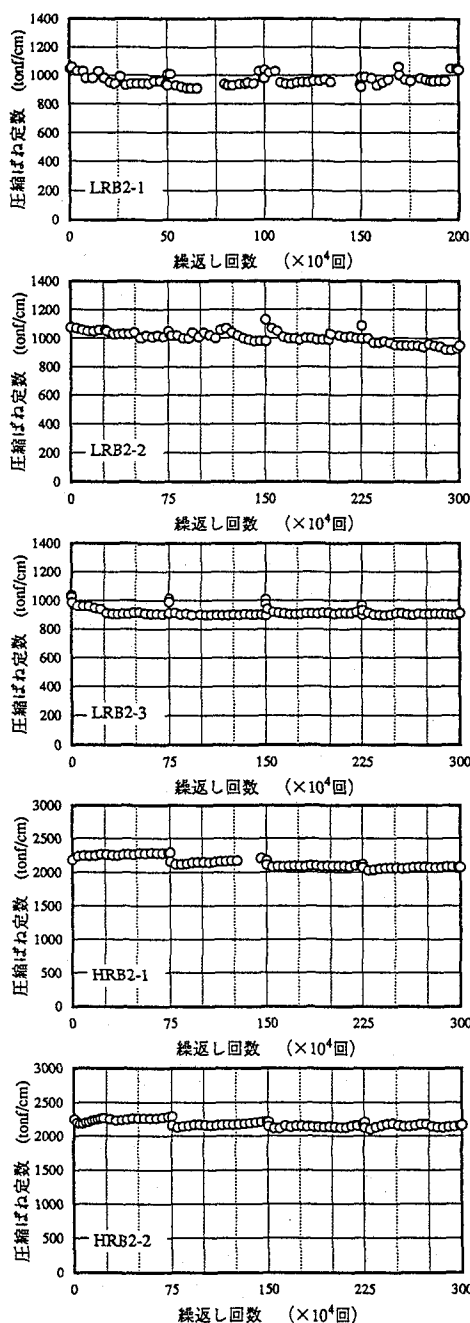


図9 動的圧縮ばね定数

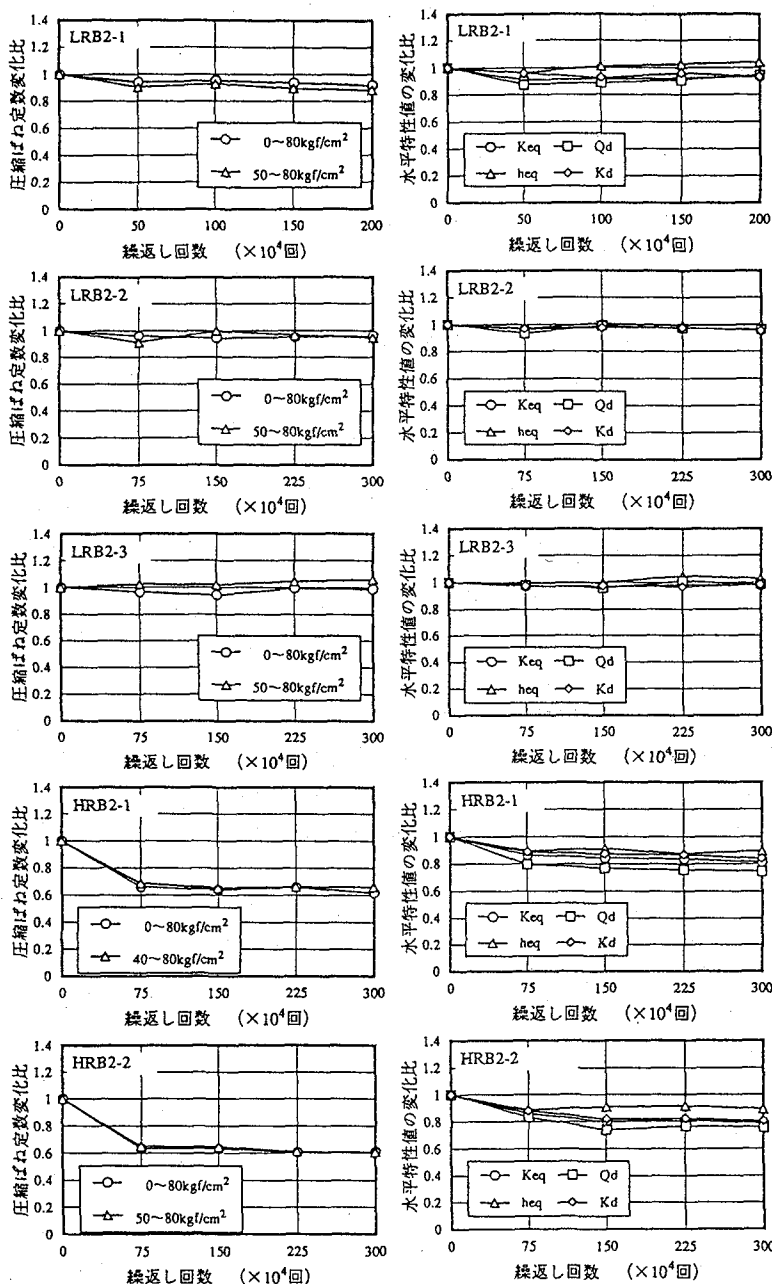


図10 基本特性試験

(2) 試験結果

鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承

圧縮繰返し試験中の動的圧縮ばね定数の測定結果を図9に示す。ばね定数が一部不連続になっているのは繰返し試験が50万回、あるいは75万回ごとに停止したためである。動的圧縮ばね定数は測定回によって若干のバラツキがあるので、試験開始後10万回までの平均値と試験終了前10万回の平均値で比較した。結果は表3のように、動的圧縮ばね定数は全ての試験において繰返しによって低下したがLRB2-1が最大で13%、HRB2-2が7%と鉛プラグ入りゴム支承、高減衰ゴム支承ともに大きな変化ではなかった。

基本特性試験によるせん断、圧縮の特性値の変化を図10に、繰返し疲労試験前後の特性値の変化率と寸法の変化量を表3に示す。

鉛プラグ入りゴム支承のせん断特性は変化が小さく、いずれの特性値も7%以下の変化であった。等価剛性、降伏後剛性の二つの剛性に関する特性値は2~7%の低下であった。等価減衰定数は逆に0~3%の微増となった。基本特性試験の圧縮ばね定数の変化も小さく最大の変化で12%である。200万回と300万回と試験条件が異なっていたが動的圧縮ばね定数は300万回の試験における変化が大きかったが、基本特性試験による圧縮ばね定数の変化は200万回の試験体の方が変化が大きかった。

表3 圧縮繰返し試験変化率

測定項目	LRB2-1	LRB2-2	LRB2-3	HRB2-1	HRB2-2
動的圧縮ばね定数(%)	-1	-13	-8	-3	-7
等価剛性(%)	-7	-5	-2	-19	-11
等価減衰定数(%)	4	0	3	-10	-10
降伏後剛性(%)	-7	-5	-2	-16	-19
降伏荷重特性値(%)	-5	-4	-2	-25	-24
圧縮ばね定数(0-80)(%)	-8	-4	-1	-38	-39
圧縮ばね定数(50-80)(%)	-12	-6	6	-34	-39
寸法					
厚さ(mm)	0.1	0.2	0.2	-0.3	-0.3
幅(mm)	0.3	0.1	0.3	0.5	0.5
長さ(mm)	0.9	1	0.6	3	3.7

圧縮繰返し試験によって特性値に変化が認められたが、その変化は10%程度であり性能は保持されていることが確認できた。寸法は試験後に厚さが0.2~0.3mm、幅が0.1~0.3mm、長さが0.6~1.0mm大きくなった。長さの増加はせん断変形が残留変形となって試験後に残ったものである。厚さの変化は試験後の測定時の温度が3~4℃高かったためと考えられる。

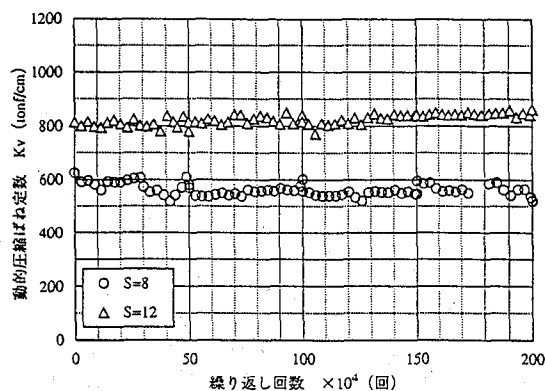
高減衰ゴム支承の基本特性試験によるせん断、圧縮の特性値は図10に示すように75万回後に低下するが、その後の変化は小さい。繰返し前と300万回繰返し試験後の特性値の変化はせん断試験の特性値が10~25%の低下、圧縮ばね定数は39%の低下となった。高減衰ゴムは大きなひずみを受けると剛性が低下する特徴があり、基本特性試験は圧縮試験、せん断試験の順で試験したため、最初の圧縮試験ではせん断変形による大きなひずみを受ける前の高い剛性となった。このため圧縮特性はせん断特性の変化より大きな変化となったものである。回転角1/250の有無による違いは動的特性、基本特性ともに特に認められなかった。寸法は厚さが0.3mmの減少、幅が0.5mm、長さが3.0~3.7mm大きくなった。長さの増加はせん断変形が残留変形となって試験後に残ったものである。

鉛プラグ入りゴム支承、高減衰ゴム支承とも疲労試験前後のばね定数等の特性、寸法に大きな変化はなく、外観の亀裂、損傷などは認められなかった。

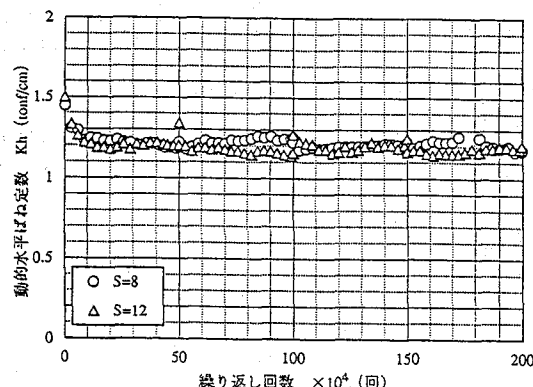
以上の結果から活荷重の繰返し载荷による鉛プラグ入りゴム支承、高減衰ゴム支承の性能は安定していて、常時のせん断変形70%、平均圧縮応力80kgf/cm²以下では十分に耐久性があることが確認できた。

一般ゴム支承

圧縮繰返し試験中の動的圧縮ばね定数と動的水平ばね定数の測定結果を図11に示す。圧縮ばね定数は形状係数Sの差によりS=8が約600tonf/cm、S=12が約800tonf/cmであった。動的圧縮ばね定数にはバラツキがあるが試験開始10万回までの平均値と試験終了前10万回の平均値を比較するとS=8が8%の減少、S=12が3%の増加となった。

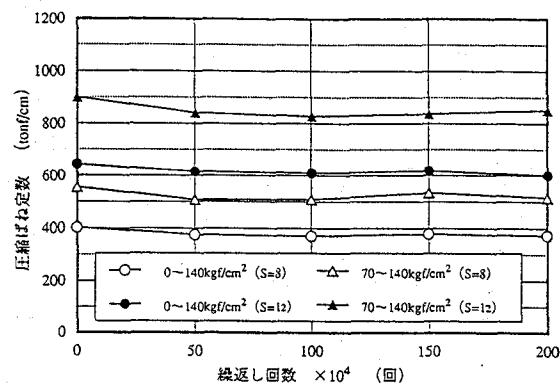


(a) 圧縮ばね定数

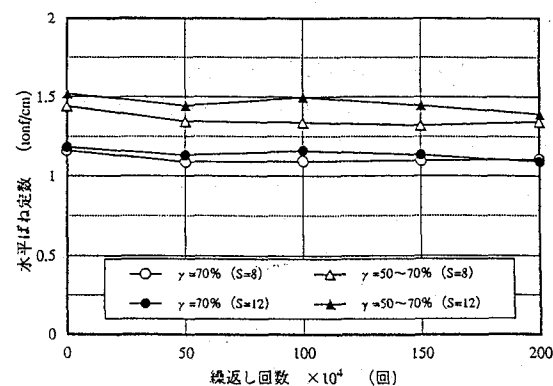


(b) 水平ばね定数

図11 動的ばね定数の変化



(a) 圧縮ばね定数



(b) 水平ばね定数

図12 基本特性の変化

動的水平ばね定数は形状係数 $S=8,12$ とともに最初は 1.5tonf/cm とほぼ同じであった。これはゴムの総厚さがほぼ等しいためである。動的水平ばね定数は試験開始 10 万回まで低下しその後はほぼ一定の値となった。試験開始 10 万回に対して試験終了前 10 万回の平均値は $S=8$ が 18%, $S=12$ が 19% の低下となった。

疲労試験開始前および 50 万回ごとに測定した基本特性試験における圧縮ばね定数と水平ばね定数を図 12 に示す。200 万回試験後は圧縮ばね定数が $S=8$ が 7 %, $S=12$ が 5 % 低下し、水平ばね定数は $S=8$ が 7 %, $S=12$ が 9 % 低下した。基本特性の変化は圧縮、せん断ともに動的ばね定数の変化に比べると小さく 10% 以下である。一般ゴム支承の形状係数の差による繰返し耐久性の試験結果には明瞭な違いは認められなかった。

圧縮繰返し試験による一般ゴム支承の発熱は小さく支承の側面の表面温度と雰囲気温度の測定結果は試験期間を通じて、室温より $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 高いだけであった。また、一般ゴム支承の寸法は試験後厚さが 0.1mm の減少、幅が 0.1mm 、長さが $0 \sim 0.3\text{mm}$ の増加と変化は微小で、外観の亀裂、損傷などは認められなかった。

形状係数 $S=8, S=12$ とともに最大面圧 140 kgf/cm^2 、せん断ひずみ 70%、回転角 $1/250$ の条件で 200 万回の疲労による損傷は無く、十分な耐久性があることが確認できた。

3. ゴム支承の圧縮特性

ゴム支承の圧縮特性は従来、耐荷重性と活荷重による回転発生時の浮き上がりの有無の観点から調べられてきた。耐荷重性はゴム支承に加わる最大圧縮荷重をゴム支承の面積で除したゴム支承の平均圧縮応力度とその時のゴム支承の圧縮ひずみにより設計規定されている。また、浮き上がりはゴム支承全体の圧縮変形量に対し、回転によってゴム支承の端部に生じる変形が小さいことが設計規定されている。

実際の設計例では回転時の圧縮側に生じるひずみは小さく、この規定によって形状が変更となることは無い。逆に回転時の浮き側で引っ張り力が発生しない規定はしばしばゴム支承の形状設計に決定的となる。いずれにせよ現在のゴム支承の設計では圧縮荷重が加わった時の圧縮変形量が重要視されている。この圧縮変形量は無荷重時から最大荷重時までの変形量であり、ばね定数として評価するには注意が必要である。ゴム支承はその非線形性によりばね定数として捉える場合、低荷重で小さく高荷重で大きくなり、荷重レベルによってばね定数が異なる。ゴム支承の圧縮特性は従来単に支承の健全性の観点から設計されてきたが列車の高速走行性に及ぼす影響を考えるとゴム支承の圧縮剛性の値そのものも重要と考えられる。このため各種のゴム支承の圧縮特性を様々な条件下で調べ、走行性検討のための資料とした。

(1) 試験方法

試験体は図 2 に示す一般ゴム支承(RB1, RB2)、鉛プラグ

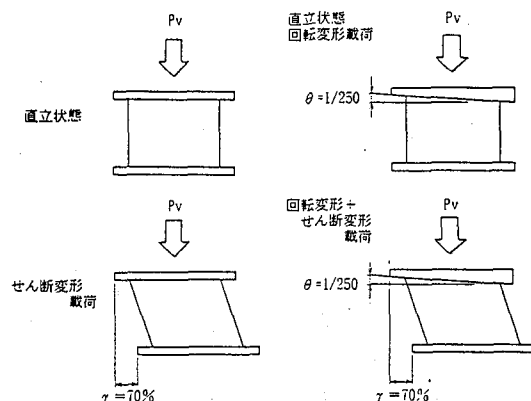
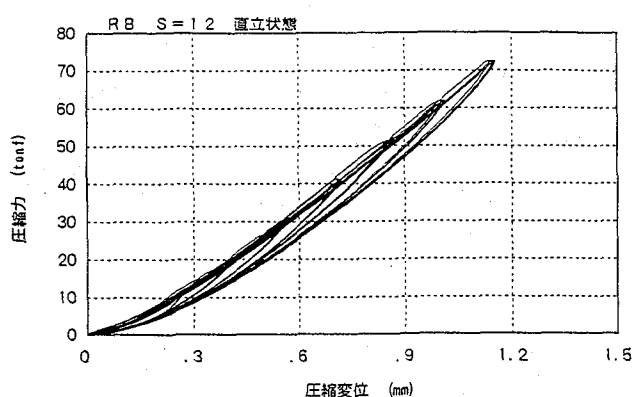
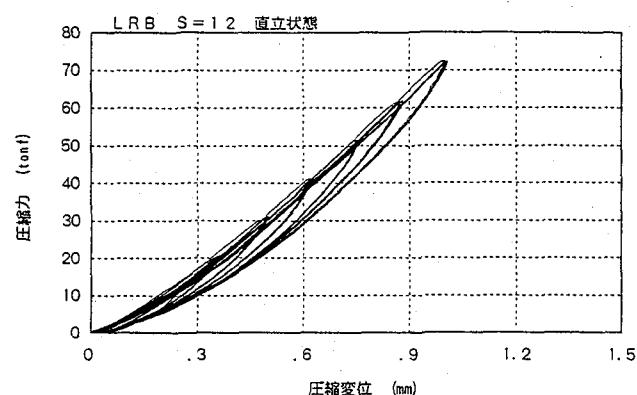


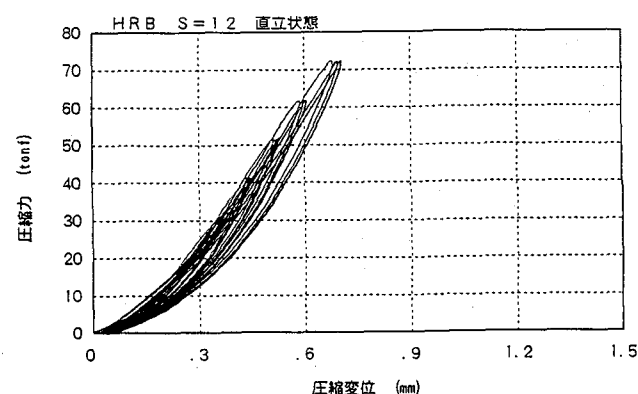
図 13 圧縮試験加力状態



(a) 一般ゴム支承



(b) 鉛プラグ入りゴム支承



(c) 高減衰ゴム支承

図 14 圧縮試験荷重-変位曲線

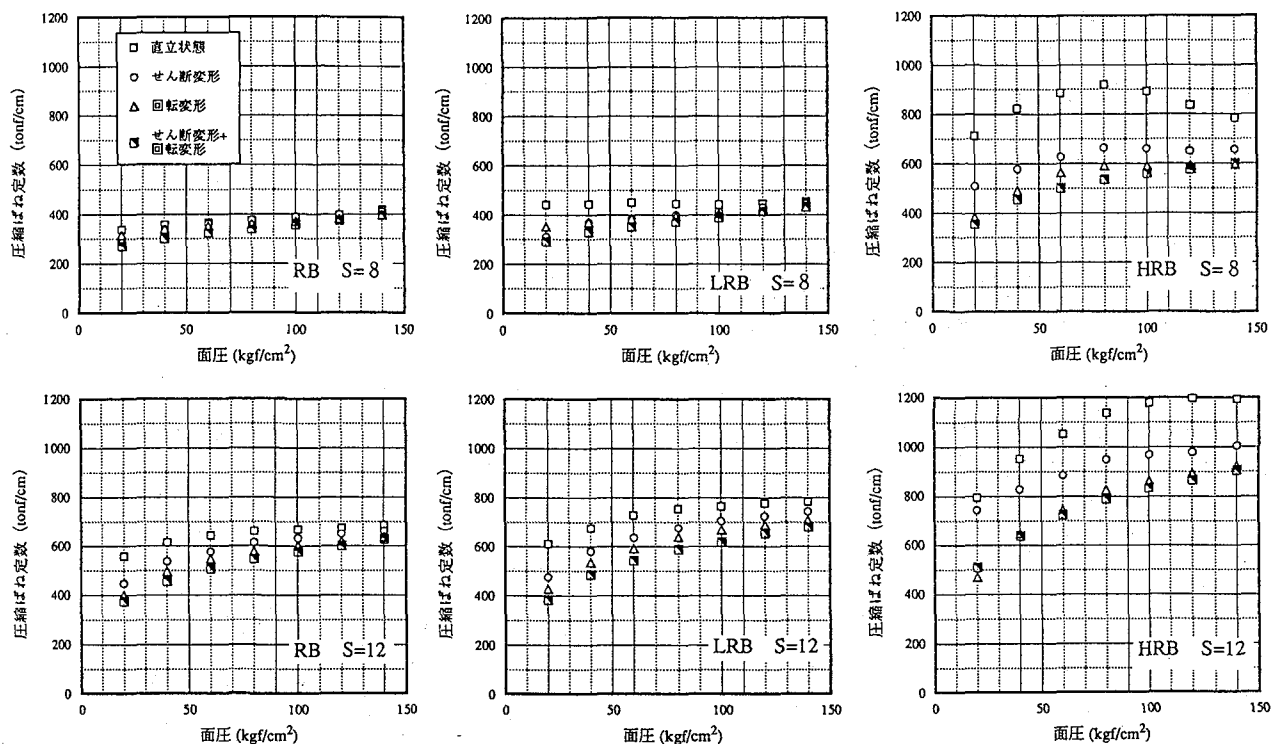


図 15 圧縮ばね定数

表 4 圧縮ばね定数

試験体	80kgf/cm ²		120kgf/cm ²	
	S=8	S=12	S=8	S=12
RB	375	659	397	673
LRB	446	753	446	775
HRB	1137	919	835	1196

単位 (tonf/cm)

グ入りゴム支承 (LRB3, LRB4)、高減衰ゴム支承 (HRB3, HRB4) を使用した。ゴム層は 7.1mm×5 層と 4.7mm×8 層の 2 種類とした。ゴム支承の形状係数はそれぞれ S=8, S=12 である。これは現在一般に設計されているゴム支承の標準的の形状係数のほぼ下限と上限に相当する。鉛プラグ入りゴム支承は一般ゴム支承と同じゴム厚さ、層数とし、中心に直径 40mm の鉛プラグ 1 本が入った形状である。一般ゴム支承と鉛プラグ入りゴム支承ゴム材料は静的せん断弾性率が $G=8\text{kgf/cm}^2$ の天然ゴムを使用した。高減衰ゴム支承も寸法形状は一般ゴム支承と同じである。

試験機は動的繰返し試験で使した図 7 に示す圧縮とせん断が同時に加力可能な 2 軸試験装置を使用した。試験は図 13 に示すように直立状態、せん断変形状態、回転変形状態、せん断変形+回転変形状態の 4 種類の条件について圧縮試験を行った。せん断変形は水平アクチュエータによりせん断ひずみ $\gamma=70\%$ を与え一定に保持した。回転変形は試験体の上部に勾配 $\theta=1/250$ を付けた支圧板により与えた。せん断ひずみ 70% はゴム支承の常時における最大変形に相当する。また回転角 $1/250$ は桁の

たわみ制限から算出される支承に生じる最大の回転角に相当する。

圧縮試験は無負荷からゴム支承の平均圧縮応力で 20、40、60、80、100、120、140kgf/cm² までの 7 ケースの加力試験を行った。加力は各ケース 3 回行った。

(2) 試験結果

静的圧縮特性

図 15 に直立状態における形状係数 S=12 の各ゴム支承の荷重変位曲線を示す。表 4 に各試験体の最大圧縮応力 80、120kgf/cm² の試験における圧縮ばね定数を示す。圧縮ばね定数はゴム支承厚さの不均一等による不安定部分の影響を除くため 15kgf/cm² を最小応力として、最大応力とを結ぶ勾配として算出した。圧縮ばね定数は一般ゴム支承<鉛プラグ入りゴム支承<高減衰ゴム支承の順に高かった。

鉛プラグ入りゴム支承の圧縮ばね定数は一般ゴム支承に対し 1.12~1.19 倍、高減衰ゴム支承は一般ゴム支承に対し 1.73~2.45 倍高かった。鉛プラグ入りゴム支承は鉛プラグがゴムの圧縮変形を部分的に拘束するため、一般ゴム支承に比べて 10% 程度圧縮ばね定数が上がる。高減衰ゴム支承はゴムの内部摩擦により変形に対する抵抗力が大きく、圧縮ばね定数が上がる。

形状係数の違いによる圧縮ばね定数は一般ゴム支承、鉛プラグ入りゴム支承がともに形状係数 S=12 が S=8 の 1.7 倍であった。高減衰ゴム支承は形状係数 S=12 が S=8 の 1.2~1.4 倍と形状係数による差が他の支承に比べて小さかった。高減衰ゴム支承の圧縮ばねはゴム層の厚さや面積の形状以外のゴムの性状の影響が他のゴム支承に

比べて大きいと考える。

圧縮ばね定数の4種の状態における測定結果を図15に示す。ばね定数は面圧が低いところで、圧縮力が大きくなると増加する傾向がある。形状係数 $S=12$ の試験体の方が面圧による違いが大きい。これらの特徴は全ての試験体に共通して見られる。面圧 60kgf/cm^2 以上では圧縮ばね定数はほぼ一定とみなせる。

4種の状態の圧縮ばね定数は(直立状態) > (せん断変形) > (回転変形) > (せん断+回転変形)の順で小さくなる。荷重が小さい範囲ではばね定数の差が大きく、高荷重では差が小さい。形状係数が大きい試験体($S=12$)で差が大きい。せん断変形によって圧縮ばね定数が小さくなるのは水平力によってゴム支承に純粋なせん断だけでなく曲げ変形が生じるためである。ゴム支承の曲げ変形により圧縮荷重が低いとゴム支承の一部にのみ圧縮力が加わることで、結果的に小さな面積で荷重を受け見かけのばね定数が低下する。圧縮力が大きくなると水平力によって生じた曲げ変形を押さえて支承全面で荷重を受けようになり、直立状態での支圧分布に近づくためばね定数の低下が小さくなる。なお、圧縮力が充分大きい場合でもせん断変形によってゴム支承の上面と下面の重量面積が減少し圧縮ばね定数が低下するが、試験した支承の形状では70%せん断変形時の重量面積の減少は11%と小さく、この影響は大きくなかった。

回転変形によって圧縮ばね定数が小さくなるのも、回転を与えるため角度を付けた鋼板が低荷重時には支承の一部分にのみを支圧するためである。

圧縮ばね定数は面圧が低いと小さくなる傾向があるので極端な $20\sim30\text{kgf/cm}^2$ といった低い面圧での使用にはこの点を考慮した設計が必要である。特に同一支承線や隣接支承線で使用面圧が極端に異なる設計は避けた方が望ましい。また形状係数の大きなゴム支承を低面圧で使用することも避けた方がよい。実橋に使用するゴム支承の圧縮ばね定数をせん断変形下や回転変形下で測定することは通常ないため、直立状態の測定によるばね定数は割り引いて考える方が実際の条件に近い。

動的圧縮特性

列車走行性に及ぼすゴム支承の圧縮特性の影響を考えるには動的なばね定数が重要となる。圧縮繰返し試験で得られた特性値から動的ばね定数と静的ばね定数の違いを調べた。列車走行時のゴム支承の変形は死荷重に活荷重が加わるため図16に示すような荷重-変位曲線となる。さらに、この時の荷重が加わる速度が速いためゴム支承の変形速度も考慮しなければならない。

表5に静的載荷による1/2荷重振幅と0~最大荷重のばね定数の測定値を示す。静的載荷試験の1/2荷重振幅と0~最大荷重とのばね定数の比率はゴム支承が1.4倍、鉛プラグ入りゴム支承が1.3~1.4倍、高減衰ゴム支承が1.5倍と支承の違いによる差は無かった。静的載荷試験によって、ある荷重振幅の圧縮ばね定数を知るには図16か

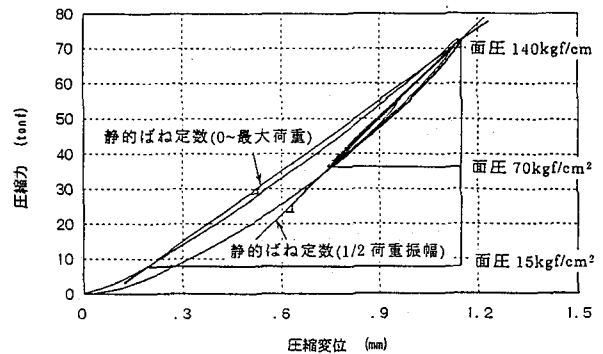


図16 圧縮荷重-変位曲線

表5 圧縮ばね定数

試験体番号	動的ばね定数	静的ばね定数 1/2荷重振幅	静的ばね定数 0~最大
RB1	522	616	373
RB2	863	853	602
LRB2-1	1040	839	650
LRB2-2	950	855	633
LRB2-3	913	857	616
HRB2-1	2165	1387	904
HRB2-2	2080	1289	885

単位 tonf/cm

表6 耐久性試験結果

試験項目	特性値	LRB	HRB	RB
せん断耐久性 (5000回)	等価剛性	-16	-23	-
	等価減衰	-4	-19	-
	降伏後剛性	-28	-37	-
	降伏荷重特性値	-18	-17	-
圧縮耐久性 (300万回)	等価剛性	-2	-19	-
	等価減衰	3	-10	-
	降伏後剛性	-2	-16	-
	降伏荷重特性値	-2	-25	-
圧縮せん断耐久性 (200万回)	動的圧縮ばね定数	-	-	-8~-3
	動的水平ばね定数	-	-	-19~-18

変化率(%)

ら明らかなようにその最大荷重からの除荷時の荷重-変位曲線から読み取ることが可能である。

動的ばね定数は表5に示す。静的ばね定数はおよそ0.02Hz、動的ばね定数は1~3Hzである。1/2荷重振幅の動的載荷と静的載荷による載荷速度の違いは一般ゴム支承が1%、鉛プラグ入りゴム支承が7~24%、高減衰ゴム支承が46~53%増と載荷速度が速いとばね定数が大きくなった。増加の程度は支承による違いが大きい。

4. 結論

(1)繰返し耐久性

一般ゴム支承、鉛プラグ入りゴム支承、高減衰ゴム支承は表6に示すように温度荷重や列車荷重に対し、せん断や圧縮の繰返し耐久性が十分あることが確認できた。

(2)許容面圧

面圧 140kgf/cm^2 に対しても十分な耐久性を有することがわかり、鋼鉄道橋へのゴム支承の使用にあたってより合理的な設計が可能となった。

(3) 圧縮特性

ゴム支承の変形状態や面圧による圧縮特性の違いを定量的に知ることができ、実橋に使用される各種のゴム支承の圧縮特性を評価することができた。

(4) 動的圧縮ばね定数

動的圧縮ばね定数と静的圧縮ばね定数の関係から、測定が困難な大型ゴム支承の動的圧縮ばね定数を知ることが可能となり、列車走行性の検討資料ができた。

以上、鋼鉄道橋へのゴム支承の適用を前提に各種の静的、動的試験を行った結果、本試験においては十分な信頼性が確認できた。

製品としてのゴム支承は支承要部としてのゴムと鋼板等の部品から組み立てられているのでゴム自体の物性、耐力だけでなく各部材の精度等の総合により品質が定まる。分散機能や免震機能を求める設計を行う場合は、ゴム支承の使用に当たって、特に各部材の品質はもとより支承全体の製品としての耐力評価を求める必要がある。

最後に本研究が合理的な構造物の開発の一助となれば幸いであると共に、関係者の協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 保坂鐵矢、中川俊隆、池永雅良: 鋼鉄道橋の折れ角を模したゴムシューの回転疲労試験、土木学会第 51 回年次学術講演会, I-A289, 1996
- 2) 保坂鐵矢、中川俊隆、池永雅良: 鋼鉄道橋の列車載荷を模したゴム支承の疲労試験、土木学会第 52 回年次学術講演会, I-A297, 1997
- 3) 奥田庸、佐藤哲也、八巻康博、伊関治郎: 北総線・都計道 3.4.20 架道橋の設計と施工、橋梁と基礎 24 巻 12 号, pp13-22, 1990
- 4) 保坂鐵矢: 免震支承と柔ジベルを用いた部分合成鉄道橋、土木技術 48 巻 11 号, pp.43-51, 1993
- 5) 建設省: 道路橋の免震設計法マニュアル(案), 1992
- 6) 光木香、保坂鐵矢、松浦章夫、市川篤司、松尾仁: ゴム支承を用いた連続合成桁の高速車両走行性に関する研究、土木学会第 52 回年次学術講演会, I-B226, 1997
- 7) 市川篤司、武友憲重: 鋼桁用ゴム支承の試験、構造物設計資料 No.75, pp24~27, 1983
- 8) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 一鋼・合成構造物, 1992

(1997 年 9 月 26 日受付)