ベルリンアイ型目玉を有する重ね板ばねの履歴曲線*

山本英次**, 浜野俊雄**, 沼崎郁男***

Characteristic of Hysteresis Loop of the Leaf Spring with Berlin Eye

Eiji YAMAMOTO, Toshio HAMANO, and Ikuo NUMAZAKI

The Leaf Spring consists of several leaves. Its load-deflection curve shows hysteresis because of the friction between leaves. Since this hysteresis loop affects the driving comfort and stability of vehicle, this is one of the most important factor for designing leaf spring. In this paper, the effects of type of eye, eye diameter, and edge shape of No.2 leaf to the friction on hysteresis loop were experimentally studied.

It was found that combining berlin eye of No.1 leaf with curved edge of No.2 leaf can control the increase of dynamic spring-rate under the low deflection area.

It was also realized that this effect can improve the driving comfort of vehicle.

Key Words: Leaf Spring, Berlin Eye, Friction, Hysteresis Loop, Riding Quality

1. はじめに

重ね板ばねは、ばね板を数枚重ねて構成されたもので、荷重が加わると板間に摩擦を生じる。そのため、荷重-たわみ線図は履歴曲線（ヒステリシスループ）を描く。この板間摩擦による履歴曲線は動的ばね定数、減衰力を左右する要因であり、車両の乗心地や操縦安定性に大きな影響を与えるため、板間摩擦による履歴曲線を適正化することは設計上重要な課題となっている^{1)~3)}。従来では、例えば板間摩擦を増加させる手段としては構成枚数を増加する方法が取られている。逆に、減少させる手段としては構成枚数を減少させたり、板間に摩擦係数の低い樹脂板を挿入するなどの方法が取られている^{3),4)}。

本報告では、こうした方法とは別に板間での荷重伝達が最も大きいと考えられる目玉と板端の接触部分に着目し、目玉のタイプと目玉に接する2番リーフの板端形状との組み合わせにより板間摩擦を減少させ、履歴曲線を変化させる方法について検討した。その結果、これらの組み合わせによって板間摩擦をコントロールするための実用的な指針を得たのでここに報告する。

2. 重ね板ばねの履歴曲線

先に記したように、重ね板ばねの荷重-たわみ線図は板間摩擦により Fig. 1 に示すような履歴曲線を描く。この履歴曲線の特徴は、移り部分と呼ばれる非線形な AB (CD) 部分が存在することである。これは、荷重反転の直後に固着状態にある板端の接触点が荷重の増加（或いは減少）に伴い

Fig. 1 Hysteresis loop of leaf spring

順次減少し、各リーフが段階的に滑り状態に移行するため現れるものと考えられている^{4),5)}。

Fig. 1 の履歴曲線において、直線 AC の傾きを対角線ばね定数 (kd) と呼び、動的ばね定数に近似できることが実験的に確認されている⁵⁾。また、EF間の荷重差を荷重 P における板間摩擦力 (2F) と呼ぶ^{3),6)}。

3. 供試品

供試品には、Fig. 2 に示すような従来から多く用いられているアップターンドアイ型とベルリンアイ型を対象に選んだ。

原稿受付日 1994年10月6日

* ばね技術研究会1993年度春季講演会にて一部発表

** 日本発条(株)(NHK Spring Co., Ltd.)

*** (株) いすゞ中央研究所 (ISUZU Advanced Engineering Center, Ltd.)

	Upturned eye	Berlin eye		
		Type I	Type II	Type III
①				
②				
③				

Width×Thickness×Leaves: 70×9-1, 70×12-1
 Span: 570+570=1140
 Spring Rate: 89.4N/mm

Fig. 2 spring specifications

Fig. 3 Measurement of strain and rotatory angle of eye

Fig. 4 Hysteresis loop of specimens

ベルリンアイ型は2番リーフの形状が異なるタイプⅠ、Ⅱ、Ⅲの3種類を用意した。更に、タイプⅠとⅡについては目玉径が異なる①、②、③を、タイプⅢについては板端曲率が異なる①、②を用意した。これらの供試品はいずれも等厚リーフの2枚構成とし、ばね定数は同一とした。

4. 実験方法

4.1 履歴曲線の測定

目玉のタイプ及び2番リーフ板端形状が板間摩擦に及ぼす影響について調べるため荷重試験機により履歴曲線を測定した。履歴曲線は、重ね板ばねのセンタ部に上下振幅を

与え、大振幅(±15mm)から順次小振幅(±10, ±5, ±3, ±1mm)へ移行させながら各振幅に対して測定した。なお、測定に先立ち重ね板ばねの摺動部の表面状況を安定化するため、エージング処理として1万回の慣らし加振をすべての供試品について実施した。

4.2 リーフの変形及び目玉の回転角に及ぼす摩擦の影響の測定

Fig. 3 にリーフの変形及び目玉の回転角の測定装置を示す。

履歴曲線は摺動部に発生する板間の摩擦とその時の板間の相対変位とに起因する事象である。目玉中心直下及びこれに接する2番リーフ板端の接触点には、摩擦力が作用する。こ

の時摩擦力はリーフに対して軸力及び曲げモーメントとして作用し、リーフに変形を与える。この摩擦力による変形を歪みゲージにより検出した。更にこのときの目玉の回転角を Fig. 3 の A 部詳細に示す方法により測定した。これらの測定結果から重ね板ばねの上下変位、リーフの変形及び目玉の回転角の対応付けを行い、ヒステリシスループの発生機構、目玉のタイプ等によるその違いについて検討を行った。

なお、リーフの変形は Fig. 3 に示すように 1 番リーフのセンタ際、ハーフスパン中央及び目玉際、2 番リーフのリーフ端（先曲げ加工際）に各々単軸歪みゲージを貼付し測定した。また、目玉の回転角はピンと目玉を薄板でつなぎ、この薄板の曲げ歪みを測定し事前に作成した回転角と歪みの較正線図から回転角を求めた。

5. 実験結果及び考察

5.1 履歴曲線

各供試品の履歴曲線を Fig. 4 に示す。いずれも評価荷重 P は 6370N であり、この荷重の時にリーフがフラットになるようにキャンバは設定されている。以下ではベルリンアイ型タイプ I, II, III についての特徴を各々アップターンドアイ型と比較しながら述べる。

5.1.1 ベルリンアイ型タイプ I の履歴曲線

履歴曲線が移り部分を有していることはアップターンドアイ型と類似しているが、板間摩擦力 ($2F$) はアップターンドアイ型に比べ著しく大きくなっている。また、目玉径の異なる①, ②, ③を比較すると目玉径が大きい程板間摩擦力 ($2F$) が大きくなっている。

ここで、目玉径が大きくなるにしたがって板間摩擦力 ($2F$) が増加した理由は、目玉径に応じた座金をセンタ部の板間に挿入したため、1 番リーフと 2 番リーフのセンタ部のリーフ間隔が広がったことにより荷重伝達点である板端接触点での荷重に伴う相対変位が大きくなったためと考えられる（なぜなら、履歴曲線は接触点の相対変位量と摩擦力との積、即ち仕事量として生じると考えられるからである⁷⁾）。この結果は本報の目的である目玉径自体の影響とは区別しておく必要がある。

5.1.2 ベルリンアイ型タイプ II の履歴曲線

タイプ II-①, ②, ③ではアップターンドアイ型と比べ、いずれも荷重反転後の移り部分の傾きがなだらかなり、かつこの間の変位量も大きくなっている。これはタイプ II に共通した特徴である。この特徴は、①, ②, ③の順に目玉径が大きくなる程顕著に現れている。また、タイプ II ではいずれもアップターンドアイ型に比較し板間摩擦力 ($2F$) が増加している。これは板間接触の防止のためにセンタ部にスペーサとして t6 の座金を挿入したため、センタ部のリーフ間隔がタイプ I の場合と同様に広がり、板端の荷重に伴う相対変位が大きくなったためである。ちなみに、タイプ II をタイプ I と比較すれば、センタ部のリーフ間隔が小さいタイプ II の方が板間摩擦力 ($2F$) は小さくなっている。

5.1.3 ベルリンアイ型タイプ III の履歴曲線

Δk : Grade of transition area
 Δl : Length of transition area

Fig. 5 Grade of transition area and length of transition area

Fig. 6 Comparisons of the grade of transition area (Δk)

Fig. 7 Comparisons of the length of transition area (Δl)

タイプ III-①, ②はタイプ II-③と目玉径を等しくし 2 番リーフの目玉との接触部に曲率を持たせた仕様である。

Fig. 4 において、タイプ III-①, ②とタイプ II-③とを移り部分について比較すると、タイプ III-①, ②の方がタイプ II-③より移り部分が長くなっている。タイプ III の①と②とを比較すれば、板端曲率 R60 の②の方が R100 の①よりも移り部分の変位量は大きくなっている。

5.2 履歴曲線の移り部分の傾きとたわみ量

履歴曲線の移り部分の差異を定量化するため、測定結果から移り部分の傾き (Δk) とその時の変位量 (Δl) を

Fig. 8 Relations between diagonal spring rates and deflections (Berlin eye type I)

Fig. 10 Relations between diagonal spring rates and deflections (Berlin eye type II)

Fig. 9 Relations between frictions between leaves and deflections (Berlin eye type I)

Fig. 11 Relations between frictions between leaves and deflections (Berlin eye type II)

Fig. 12 Relations between diagonal spring rates and deflections (Berlin eye type III)

Fig. 13 Relations between frictions between leaves and deflections (Berlin eye type III)

Fig. 5 に示すように定義し、各々を各供試品について比較した結果が Fig. 6 と Fig. 7 である。

Fig. 6 より、ベルリンアイ型であるタイプⅡ-①, ②, タイプⅢ-①, ②はアップターンドアイ型に較べて移り部分の傾き (Δk) は一様に25%程度低下している。また、Fig. 7 より移り部分の変位量 ($\Delta \ell$) は、目玉径が大きい方が大きく、更に2番リーフ端がフラットであるより曲率を持たせた方が大きい。ちなみに、ベルリンアイ型で目玉径が最も大きく、しかも2番リーフ端にR60の曲率をもたせたタイプⅢ-②での $\Delta \ell$ はアップターンドアイ型の4倍程度である。

5.3 対角線ばね定数と板間摩擦力

履歴曲線から求められる特性値として、対角線ばね定数 (k_d) と板間摩擦力 ($2F$) がある。ベルリンアイ型についてこれらの特性値をタイプ別に各々アップターンドアイ型と比較して示したものが Fig. 8 ~ Fig. 13 である。

Fig. 8, Fig. 9 に示すようにタイプⅠでは大振幅での板間摩擦力 ($2F$) の増加、小振幅での対角線ばね定数 (k_d) の上昇がアップターンドアイ型に較べて顕著である。目玉径が同じであるタイプⅠ-③とアップターンドアイ型とを比較すれば、タイプⅠ-③の板間摩擦力 ($2F$) はアップターンドアイ型に較べて約3倍 ($\pm 5\text{mm}$ 以上) 大きく、対角線ばね定数 (k_d) は約2倍 ($\pm 1\text{mm}$) 高くなっている。これは前述したように座金挿入によるリーフ間隔の増加の影響である。

次に Fig. 10 ~ Fig. 13 において、タイプⅡ-①, ②, Ⅲ-①, ②では座金を挿入しているためにタイプⅠと同様に大振幅での板間摩擦力 ($2F$) の多少の増加は認められる。しかし、小振幅 ($\pm 1\text{mm}$) での対角線ばね定数 (k_d) は大振幅での板間摩擦力 ($2F$) の増加にもかかわらず低下している。例えば、振幅 $\pm 1\text{mm}$ の対角線ばね定数 (k_d) はタイプⅢ-①の方がアップターンドアイ型に較べ、80%程度に低下している。

このような小振幅での低い対角線ばね定数を得ることは、履歴曲線の性格上から、前述した移り部分の傾き (Δk) を低くすることに帰着するものと考えられる。つまり、移り部分の傾き (Δk) を低くすることによって対角線ばね定数の上昇が抑制出来ると言える。

5.4 摩擦力によるリーフの変形及び目玉回転角

Fig. 14, Fig. 15 はアップターンドアイ型及びベルリンアイ型タイプⅢ-①, ②について、上下変位に対し Fig. 3 に示すようなリーフ各部位での歪み変化と目玉の回転角の測定結果を並べて示したものである。

5.4.1 アップターンドアイ型

Fig. 14 において、1枚リーフの場合と2枚リーフの場合の歪み変化を比較すると、2枚リーフでは変位①-②間に点②' が現れている。この点②' は板間摩擦の状態 (固着, 滑り等) が変化することの影響である。

ここで2枚リーフの歪み変化 (変位①-②' 又は③-④' の間) について見ると、センタ部と目玉近傍では逆方向の歪み変化が発生している。また、この時の上下荷重に対する

Fig. 14 Strains and rotatory angles against vertical deflections (Upturned eye)

Fig. 15 Strains and rotatory angles against vertical deflections (Berlin eye type III)

Fig. 16 Mechanism of frictional force between leaves

Width×Thickness×Leaves: 70×15-1, 70×18-2
Span: 675+675=1350
Spring rate: 173N/mm

Fig. 17 Spring specifications of 3-leaves taper leaf springs

Fig. 18 Hysteresis loop of 3-leaves taper leaf springs

目玉の回転は、1枚リーフの場合に比べ抑制されている。これらは、板間摩擦の影響の現れであると言える。

変位①-②' (③-④')の間では摩擦力によってリーフ端には固着の状態が継続しながら、上下荷重によるたわみが進行していると考えられる。この間での摩擦力は Fig. 16 に示すようにリーフ端に引張力 (圧縮力) として作用している。

変位①-②' (③-④')の変位量は履歴曲線の移り部分の変位量にほぼ等しいことから、変位①-②' (③-④')は履歴曲線の移り部分に対応しており、移り部分 (Δl 間)ではリーフ端は固着状態にあると考えられる。

5.4.2 ベルリンアイ型

Fig. 15 より、アップターンドアイ型とベルリンアイ型をメインリーフ単品について比較すると各部位での発生歪みの分布は両者に差異がない。ところが、2番リーフを重ねた場合にはタイプⅢ-①, ②は、アップターンドアイ型との比較において履歴曲線に差異が認められたのと同様に、歪み出力においても大きな差異が認められる。

例えばタイプⅢ-①の場合では、変位方向が反転した際 (例えば、点①又は点③) の歪みの符号は、1番リーフの目

Fig. 19 Relations between diagonal spring rates and deflections (3-leaves taper leaf spring)

Fig. 20 Relations between frictions between leaves and deflections (3-leaves taper leaf spring)

Fig. 21 Frequency diagram on bench vibration test

玉際と2番リーフの板端とは正負逆である(変位①-②'又は変位③-④'の間)。これは、タイプⅢがベルリンアイ型で、しかも2番リーフの先曲げ加工を施してあることから、Fig. 16に示すように、目玉には回転モーメントとして、また2番リーフの板端にはこれと相反する方向の曲げモーメントとして摩擦力が各々作用するためである。上下荷重に伴う目玉の回転モーメントと摩擦力による回転モーメントの方向が相反しているため目玉の回転が抑制されている。

また、変位①-②'又は変位③-④'はベルリンアイ型タイプⅢの方がアップターンドアイ型に較べて長くなっている。つまり、変位①-②' (③-④')の間では1番リーフと2番リーフの接触点には、アップターンドアイ型のような固着は生じておらず、接触点の移動が起きているのではないかと考えられる。このときの変位①-②' (③-④')は、履歴曲線の移り部分の変位量 Δl に相当している。このことから固着を生じないことが履歴曲線の移り部分を長くし、その傾きを低くする効果を生んでいると言える。

変位②' (④')を境としてタイプⅢ-①、②ともに、接触点にはすべりが発生しており、変位②'-③ (④'-⑤)の間ではアップターンドアイ型の場合と同様な歪み変化等が生じている。

2番リーフ板端曲率の異なるタイプⅢ-①、②について変位①-②' (③-④')間の変位量を比較するとタイプⅢ-②の方が大きい。このことから、2番リーフの板端形状にはすべりを生じにくい目玉径に応じた適切な曲率があると考えられる。

6. 実用ばねへの応用

2枚ばねでの実験結果に基づき、Fig. 17に示した3枚構成のテーパリーフスプリングにてベルリンアイ型タイプⅢの試作評価をおこない、小振幅での対角線ばね定数上昇の抑制効果、更には車両振動特性への影響を確認した。なお、テーパリーフスプリングであるため板間接触防止のための座金を必要とせず、樹脂製のセンタスペーサ(t1)を挿入したのみである。

6.1 履歴曲線

アップターンドアイ型とベルリンアイ型の履歴曲線をFig. 18に示した。更に、対角線ばね定数(kd)及び板間摩擦力(2F)の比較をFig. 19, Fig. 20に示した。

ベルリンアイ型の方が移り部分の傾きがなだらかで長く、これにより小振幅での対角線ばね定数の上昇、板間摩擦力の発生が抑制されている。その差は前述した2枚ばねの場合の結果よりも顕著である。これは、負担荷重の増加により摩擦力も増加して、その影響がより大きく現れたためである（例えば、振幅±1mmでの対角線ばね定数は60%に低下している）。

しかし、大振幅での板間摩擦力の低下は僅かであるため、対角線ばね定数はアップターンドアイ型と同等に維持される。

6.2 実車性能評価

台上加振試験（前軸・同相加振）による車両のキャブ床上下加速度の周波数応答特性を比較したものが Fig. 21 である。加振振幅±1mmではベルリンアイ型の方がばね上共振周波数が低く、加速度も全般的に低く抑えられている。このようにベルリンアイ型の効果が車両振動特性の向上においても認められた。

7. 結 言

重ね板ばねにおいて、1番リーフの目玉形状をベルリンアイ型とし、2番リーフの板端に先曲げ加工を施し、かつ目玉との接触部に曲率を持たせることにより従来のアップ

ターンドアイ型に比べ移り部分の傾きがなだらかになり小振幅では板間摩擦力の発生を抑えて対角線ばね定数の上昇を抑制する。しかも、大振幅での板間摩擦力の発生は維持出来ることを確認した。

この効果は車両性能へも反映され、振動乗心地向上のための一手段として有効に作用することも確認した。

最後に、本報告に当たり実車性能試験に協力いただいたいすゞ自動車（株）の方々に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 稲生 武, 自動車技術, 28-4 (1974), 283.
- 2) 千島和夫, 自動車技術, 30-3 (1976), 189.
- 3) 千島和夫, ばね論文集, No.16, (1971), 40.
- 4) ばね技術研究会, “第3版ばね”, 1982, 158.
- 5) 山本敏男, 太田 博, 川崎光洋, 石田隆, ばね論文集, No.18, (1973), 39
- 6) 重ね板ばねの動的特性評価に関する共同研究報告, ばね論文集, No.35, (1990), 55.
- 7) 佐藤尚志, 山本英次, 浜野俊雄, ばね技術研究会春季講演会前刷集, (1992), 25.