解 説

GFRP 製板ばねについて

栗原 信哉*, 弘元 修司**

1. はじめに

自動車用材料としてプラスチックの使用量が年々増加していることは、種々の統計が示すところである。その使用範囲も内装部品から FRP 製構造部材へと広がってきている。しかしながら、FRP 製構造部材などはまだ実用化されているものが少ない。GFRP 製板ばね(以下 GFRP 板ばね)は実用化された数少ない FRP 製構造部材である。

米国のゼネラルモーターズ社が世界にさがかけて、昭和 55 年秋、スポーツカー「コルベット」に GFRP 板ばねを採用している¹⁾。日本では昭和 60 年秋、日本発条㈱の GFRP 板ばねが日産自動車㈱のワンボックスカー「パネット」に採用されたのが初めてである²⁾。

今回実用化した GFRP 板ばねは乗り心地の向上と軽量化を目的としている。乗り心地をよくするためには、ばね定数を低くすることが挙げられるが、レイアウトスペースの制約や耐久性、重量などの点から鋼製板ばね(以下鋼板ばね)ではむずかしく、GFRP 板ばねを用いることにより、この問題点を解決した。

本稿では自動車用板ばねとして、GFRP を選んだ理由や著者らが行ってきた実験結果を中心に GFRP の基本特性、GFRP 板ばねの性能について述べてみたい。

2. 材 料

2.1 樹 脂

板ばねは外装部品で、路面から受ける輻射熱のほか、エンジンなどからの熱も受けるため、国内でも板ばね周辺の雰囲気温度は最高約 60~70℃ 程度になると想定されている。したがって砂漠があるような海外ではさらに高い雰囲気温度が想定される。しかも、車両重量がばねに負荷されている状態であるため、FRP 板ばねに

は高い耐熱性が要求される。

樹脂は大きく分けて、熱硬化性と熱可塑性があるが、耐熱性の高い熱硬化性樹脂が用いられている。熱可塑性樹脂も PEEK (ポリエーテルエーテルケトン) などに代表されるように、耐熱性の高いものが開発されてきており、サイクルの観点から今後の研究対象になると思われる。

熱硬化性樹脂のなかでも、とくに強度的な観点からエポキシ樹脂、硬化速度からはビニルエステル樹脂が挙げられる。ビニルエステル樹脂は硬化時の収縮率が大きく、割れが生じやすいことから、充填材を添加することが考えられるが、これは耐久性を低下させる。このことから現在では、硬化収縮率が小さく、強度特性の優れたエポキシ樹脂が用いられている。

最近、速硬化性で、硬化収縮率も比較的小さく、耐熱性や強度特性も優れている耐熱性エポキシ樹脂³⁾などが開発されている。今後はこのように速硬化性で、成形性がよく、耐熱性が高く、強度特性の優れた低価格の樹脂の開発が望まれる。

2.2 強化繊維

FRP ばね用の強化繊維としては炭素繊維(以下 CF)、ガラス繊維(以下 GF)が挙げられる。ばね用材料の適否は材料に蓄えられる弾性エネルギーの多少で評価できるが、表 1⁴⁾は CFRP、GFRP と鋼についてこれらと比較したものである。

ばねに最も要求される疲れ強さを用いた単位重量当りの弾性エネルギー(比弾性エネルギー)を表 1 でみると、鋼、GFRP、CFRP の順に大きくなり、その比は約 1:5:9 となっている。これは一定量の弾性エネルギーを蓄えるのに GFRP、CFRP はおのおの、鋼の約 1/5、1/9 の重量になることを意味している。同様に、CFRP は GFRP の約 1/2(=5/9)の重量で同じ弾性エネルギーが蓄えられるので、CFRP が最も軽量化効果大きい。しかし、価格的には CF は GF の約 20 倍以上であり、性能/価格を考慮すると、GFRP がばね用材料として適当であるといえる。

* Nobuya KURIHARA: 日産自動車 ㈱ 材料実験部 第 1 材料実験課 (243-01 厚木市岡津古久 560-2),

** Syuji HIROMOTO: 日本発条 ㈱ 開発本部第 1 開発室 (235 横浜市磯子区新磯子町 1)

表 1 比弾性エネルギーの比較

材 料	曲げ弾性率 (kgf/mm ²)	曲げ強さ (kgf/mm ²)	疲れ強さ* ² (kgf/mm ²)	比重	比弾性エネルギー* ⁴
鋼	21000	>200	±52.5* ³	7.80	0.0028(1)* ⁵
CFRP* ¹	13070	156	±55	1.52	0.0253(9)
GFRP* ¹	4730	132	±27.5	1.97	0.0135(5)

*¹ 宮入ら：材料, 128, 315 (1979), 1187 のデータを引用した.

*² 両振りで 10⁷ 回での疲れ強さを示す.

*³ 内山ら：ばね論文集, 7 (1961), 88 のデータを引用した.

*⁴ (疲れ強さ)²/(6×比重×曲げ弾性率)

*⁵ 鋼を 1 としたときの比を示す.

機能的に強化繊維を配するという意味から CFRP/GFRP のハイブリッド構造の板ばねも考えられるが、前述したように CF が高価なため実用化にまで至っていない。

3. 材料構成と成形法

自動車用板ばねはその取付け構造から車両の進行方向に対して同じ方向に取り付けられる「縦置きばね」と、直角方向に取り付けられる「横置きばね」に分けられる。

実用化した GFRP 板ばねは図 1 に示すように「横置きばね」で、これは構造的に入力は上下方向の曲げだけになる。「縦置きばね」の場合はばね作用のほかに車両に対して前後、左右などの荷重を支える強度部材の役割があり、曲げ以外の入力も多少入るが、やはりおもに入力は上下方向の曲げである。したがって、軽量化効率、成形性、経済性などとあわせて考えると、ばねの長手方向にのみ強化繊維を配列した一方向強化が、現在最も実用的と考えられる。図 2 は GFRP 板ばねの横断面における強化繊維の分布状態を示している。

FRP 板ばねの成形法としてはおおむね、プレスを用いたマッチドダイ法 (MD 法)、フィラメントワインディング法 (FW 法)、プルフォーミング法 (PF 法) の

図 1 横置きばねの懸架構造

三方式が考えられる。

図 3 は FW 法と PF 法の成形法を示すが、現在、日

図 2 繊維の分布状態 (横断面)

(a) FW 法

(b) PF 法

図 3 成形法

本発条例では FW 法で生産している⁵⁾。

4. FRP の基本特性

上述のように現在では、FRP 板ばねはエポキシ樹脂を GF で一方向強化したものが最も適している。また、板ばねが主に曲げの入力を受けることから、ここでは一方向強化した GFRP の曲げの試験で種々の特性を調べた結果を述べる。

材料でエポキシ樹脂は低粘度のものを、GF はEガラスのロービングを用いた。

図4は曲げ弾性率、曲げ強さ～ガラス含有率の関係である。著者らの成形した経験ではガラス含有率は70～75 wt% のときに性能、成形性とも最も安定していることから、この中央値である72.5 wt% をガラス含有率の目標値とした。このとき、曲げ弾性率は約4,350 kgf/mm² である。以下の特性はガラス含有率を72.5 wt% (目標) とした試料を用いている。

4.1 静的曲げ特性

図5は温間曲げ特性であるが、温度が高くなるにしたがい、曲げ強さ、層間剪断強さともに低下している。

曲げ破壊のモードは温度が高くなるにしたがい、引張り応力側の剥離から圧縮応力側の圧子直下での局部破壊に変わる。GFRPは鋼に比較して、硬度の低い材料であり、曲げ試験の際、圧子の直下は高面圧が負荷され、圧壊される傾向にある。高温下ではGFRPのマトリックス樹脂の硬度が低下し、その傾向はより顕著になって、前述のような破壊モードが引き起こされやすくなるものと思われる。室温下でも試験片の板厚を厚くしてゆくと、同じ傾向を示すが、これも板厚の2乗に比例して圧子直下の面圧が高くなるためと思われる。

図4 曲げ弾性率、破壊曲げ強さとガラス含有率の関係

図5 温間曲げ特性

図6 繊維の座屈（圧縮応力側の表層部）

また、とくに高温下では圧縮応力側に小さな白点が生じる。これは図6に示すようにごく表層部の繊維が局部的に座屈で破壊している。

このような高温下での特性、すなわち耐熱性を上げる方法として、熱変形温度の高い耐熱性エポキシ樹脂を用いる場合と太い繊維径のGFを用いる場合が考えられる。

図7はそれらの曲げ特性を示したものであるが、高温での曲げ特性が優れていることがわかる。

しかし、熱変形温度の高い耐熱性樹脂は一般的に粘度が高いために、成形しにくい。価格も高くなる。また繊維径を太くすると、後に述べるように耐久性が低下する傾向にあり、耐熱性を上げるためには、これらに注意する必要がある。

図7 温間曲げ特性 (耐熱性樹脂と繊維径の影響)
試験片寸法: 20^b×7^t

記号	樹脂	繊維径
—	A	細
- - -	A	太
- · -	B	細

耐熱性 (熱変形温度): A<B

4.2 疲れ特性

FRP は鋼と異なり、表面層の剝離などにより徐々に破壊が進行する。変位一定で疲れ試験を行なう場合、JIS (K7119) では剛性保持率が 80% に達したときを疲れ破壊の時期としている。しかし、実際に板ばねで剛性保持率が 80% に達したときには車高の低下が著しく、板ばねとしての機能は失われていると考えてよい。著者らはこれらを考慮して、剛性保持率が 95% に達した時期を破壊の時期とした。

試験方法は図8に示すが、疲れ試験時の最大荷重をロードセルで連続的に測定し、初期の最大荷重に対して、保持率が 95% に達した時期を破壊の時期とした。温間

図8 疲れ試験外観
変位一定 (約 2 Hz), 試験片寸法 60^b×13^t×600^l

図9 疲れ限度線図

温度	-30℃	R. T.	70℃
繰返し数*			
20×10 ⁴ 以上	□	○	△
10×10 ⁴ 以上	■	●	▲
10×10 ⁴ 未満	■	●	▲

* 繰返し数は荷重低下5%時までの回数

での疲れ試験は同じ方法で恒温槽内で行なった。

図9はこの試験方法から得られた疲れ限度線図⁶⁾であるが、この図から 70℃ の温度を考慮しても、最大曲げ応力が 65 kgf/mm² 以下であれば 20 万回以上繰返しでも損傷しないことがわかる。

図10は同じ樹脂で GF の繊維径を変えた場合の室温時の疲れ試験結果である。縦軸は剛性保持率を示しているが、繊維径の太いほうが疲れ強さは低い。これは同じガラス含有率の場合、繊維径の太いほうは繊維の本数が少なくなり、繊維の表面積、すなわち樹脂との接着面積が小さくなるのが原因の一つと考えられる。

4.3 クリープ特性

図11は GFRP 板ばねのクリープ試験結果 (応力一

図10 疲れ試験結果 (繊維径の影響)

繊維径: — 細, - - - 太
応力条件 35±30 kgf/mm² (室温)

図 11 クリープ試験結果

定)であるが、時間軸(横軸)を対数表示すると、ほぼ直線的に変位(へたり)が増加している。

ばねでは疲れやクリープなどによる永久変形をへたりと呼んでいるが、5~10 日間の締付け試験(変位一定)でのへたり量とクリープ試験でのへたり量とはほぼ同じであった。このことは前述のクリープ特性でへたり量が時間の対数表示に対してほぼ直線的に増加していることと考え合わせると、締付け試験のへたり量から長期的なへたり量の予測ができると思われる。

5. GFRP の特徴と留意点

5.1 特 徴

GFRP の特徴として次のようなことが挙げられる。

- (1) 軽量化
- (2) 耐久性向上
- (3) 耐食性向上
- (4) 乗り心地性向上

(1)~(3)はよく知られている FRP の性質であるが、(4)は GFRP を板ばねに用いた場合の特徴である。

車両の乗り心地をよくするために、ばねに要求されることは、ばね定数を低くできることと大きく撓ませられることである。GFRP 板ばねはこの要求によく適している。

片持ち梁をモデルにスパン、板幅を同じとしたとき、表 1 の値をもとに鋼との比較計算をしてみると、次のようになる。

(a) 設計荷重が同じ場合

$$\begin{aligned}\sigma_s/\sigma_F &= (t_F/t_s)^2 \\ &= 52.5/27.5 = 1.91\end{aligned}$$

$$\therefore t_F/t_s = 1.38$$

$$k_F/k_S = E_F t_F^3 / (E_S t_S^3) = 0.594$$

$$W_F/W_S = t_F \rho_F / (t_S \rho_S) = 0.349$$

ここで添字の F, S はおのおの GFRP, 鋼を示す。またおのおのの記号の意味は下記のとおり。

σ : 疲れ強さ, t : 板厚, k : ばね定数, W : 重量, E : 曲げ弾性率, ρ : 比重

上式から GFRP 板ばねは鋼板ばねに比べて板厚が 1.38 倍厚くなるが、ばね定数は鋼板ばねの 59.4% で、40.6% も低くできることを示している。このとき、重量は鋼板ばねの 35% で、65% 軽量化できる。

(b) ばね定数が同じ場合

$$\begin{aligned}E_F I_F / (E_S I_S) \\ &= (E_F t_F^3 / E_S t_S^3) = 1\end{aligned}$$

$$\therefore t_F/t_S = 1.64$$

$$P_F/P_S = \sigma_F t_F^2 / (\sigma_S t_S^2) = 1.41$$

$$W_F/W_S = t_F \rho_F / (t_S \rho_S) = 0.41$$

ここで P : 最大荷重

上式から GFRP 板ばねは鋼板ばねに比べて板厚が 1.64 倍厚くなるが、最大荷重は鋼板ばねの 1.41 倍までとれることを示している。すなわち撓みが大きくとれることを示している。このとき、重量は鋼板ばねの 41% で、59% 軽量化できる。

上述のように等幅、等厚をモデルにすると GFRP 板ばねは鋼板ばねに比べて、約 60~70% 軽量化できる。今回実用化した GFRP 板ばねのように、ばね形状が変化幅で変厚の場合、さらに軽量化が図れる。

しかし、「縦置きばね」の場合、強度部材の役割もあり、車体への取付け部である目玉部、車軸への取付け部であるセンタークランプ部に剛性が要求される。その結果として、これらの部品が金属製で重くなる。したがって「縦置きばね」の場合、これら部品重量を考慮すると、鋼板ばねの約 55% 程度しか軽量化が期待できない。

これに対して、「横置きばね」はたんに上下方向のばね作用が要求され、取付け構造が簡単なために、上述のように約 60~70% の軽量化が期待できる。しかも、「横置きばね」にはスタビライザ効果も期待ができ、サスペンション全体で考えると、「横置き」の GFRP 板ばねは鋼製のコイルばねよりも軽量化が図れ、部品点数も少なくなるといわれている⁷⁾。

5.2 留 意 点

GFRP 板ばねを設計する上で、次のような点に留意する必要がある。

- (1) 耐熱性
- (2) 耐摩耗性
- (3) 異方性

(1)については GFRP の耐熱性をよく把握しておく必

要がある。前述したように、とくに高温では破壊形態も常温時と異なり、常温時の曲げ強さよりも低い曲げ応力で圧縮側の繊維の座屈による破壊がおこる。

(2)について、GFRP は鋼に比べて硬さが柔らかい上に、摺動部分は高面圧、高温になりやすいので、GFRP が摺動部分にあると損傷しやすい。したがって、できるだけ摺動部分がないような板ばね構造が望ましい。摺動部分がある場合でも GFRP を直接、摺動面にもってこないような注意が必要である。具体的には、重ね板ばねの板端の摺動部分に金属板を取り付けて、GFRP が摺動面にこないような工夫が考えられている⁸⁾。

(3)について、GFRP 板ばねは一方強化で異方性であるため、ねじりや穴による応力集中などで注意が必要である。

6. GFRP 板ばねの性能⁹⁾

GFRP 板ばねを実用化するに際して、次に示すようなばね特性、耐久性、耐へたり性、耐環境性について台上評価を行なった。

(1) ばね特性

ばね定数は雰囲気温度が上がるにしたがって、低くなる傾向にあるが、実用上の雰囲気温度範囲内 ($-40 \sim 70^{\circ}\text{C}$) であれば、常温時のばね定数に対して $\pm 1\%$ 以内でとくに問題はない。

(2) 耐久性

耐久性は実際にばねが取り付けられている状態で、しかも実用上の最高雰囲気温度 (70°C) で最大荷重を 30 万回繰り返し、負荷しても外観上に異常はなかった。これは鋼板ばねに比べて 1.5 倍以上の耐久性を示している。とくに、常温下では 100 万回繰り返し、負荷しても、異常はなく、鋼板ばねに比べて、5 倍以上の耐久性を示している。

(3) 耐へたり性

耐へたり性は温度と応力を組み合わせた長期間のクリープ試験と疲れ試験で生じるへたりの総和で評価した。鋼板ばねのへたりの総和が約 6 mm に対して、GFRP 板ばねは約 8 mm とやや大きい、10 mm 以下であれば実用上問題のないレベルと判断した。

(4) 耐環境性

耐環境性については、自動車に用いられる樹脂部品の試験方法に準じて、表 2 に示すような項目について静的

表 2 耐環境性試験

試験項目	試験内容
耐薬品性	酸・アルカリ・塩水 融雪剤・不凍液など
耐油性	ガソリン・軽油・灯油 グリース・各種オイル ワックスなど
耐水性	煮沸による促進試験
耐凍結性	浸漬後凍結
耐候性	ウェザー・メータによる促進試験
耐熱サイクル性	高温・低温・高湿の組合せ
耐チップング性	飛び石
耐寒衝撃性	低温落球衝撃

な曲げ特性で評価したがとくに問題はなかった。

7. あとがき

実用化した GFRP 板ばねは、ばね形状が変幅タイプであり、鋼板ばねに比べてばね定数が 44% 低く、乗り心地が向上するとともに、重量も 73% の軽量化が図られている。

GFRP 板ばねは軽量化、乗り心地性向上のほかに、ばね下重量軽減による安定した走行性能やこもり音、騒音の低減にも効果が期待できる。GFRP 板ばねが実用化されたのを契機に、材料、成形法の開発はもとより、FRP 板ばねに適したサスペンションの開発にも期待したい。

参考文献

- 1) B.E. Kirham: SAE Technical Paper 820160 (1982).
- 2) 山本憲行, 弘元修司: 強化プラスチック, **32**, 1 (1986), 30.
- 3) R.W. Hewitt: 38th SPI, 19-D (1983).
- 4) 三角 淳, 田部隆幸: 自動車技術, **39**, 8 (1982), 894.
- 5) 日経メカニカル, **192** (1985), 108.
- 6) 三角 淳: 特殊鋼, **34**, 8 (1985), 51.
- 7) SAMPE J., March/April (1985), 134.
- 8) たとえば, 特願 55-11853.
- 9) 山本憲行, 栗原信哉: 自動車技術学会学術講演会前刷集, 861 (1986), p. 365.