横圧縮負荷を受けるFW円筒の衝撃吸収に及ぼす水環境効果†

片山 傳生* 篠原 正浩** 長船 達矢***

Influence of Water on Energy Absorption of Filament Winding Ring under Lateral Impact Loading

by

Tsutao KATAYAMA*, Masahiro SHINOHARA** and Tatsuya OSAFUNE***

Fiber reinforced plastics that have good specific strength and rigidity are used in many fields. Recently, they are applied as components of high speed vehicles such as automobile, aircraft and spacecraft. Such vehicles need a large absorbing capacity of energy to secure passengers from impact caused by collisions with stones, hailstones and birds. In the earlier paper on this work, it was found that, when FW rings having some notches along the internal circumference of the ring were subjected to lateral impact loading, inter-laminar fracture appeared but the absorbing energy increased under constant impact load. So such a notched FW ring shows ideal characteristics as the shock absorbing component. However, some problems may occur such as that energy absorption characteristics are influenced by the direction of impact loading. In addition, FRP used as a component of transportation vehicles may be exposed to various environments such as water or thermal environments. So, it is also necessary to investigate the energy absorbing ability of FRP exposed to such environments.

In this paper, FW rings are exposed to water environment and hot wet environment to cause the deterioration of rings, and then the impact loading tests of FW rings are carried out in order to obtain the ideal load-time history and energy absorption as well as the influence of water environment on energy absorption. As a result, the influence of water environment is made clear and the ideal load-time history as shock absorber is obtained in some conditions.

Key words : Shock absorber, FW ring, Impact loading test, Water environment

1 緒 言

FRPは比強度、比剛性に優れるという性質から多くの分野への適用が進められている。近年では省エネルギー化やハイスピード化のため軽量化が要求される自動車や航空宇宙機体といった高速で移動する物体への適用が拡大している。このように運行体では衝突および氷、石、鳥といった異物による衝撃負荷を受けるため、安定性の確保が重要であり、その観点からFRPの衝撃吸収に関する研究も進められている。また、衝撃緩衝材そのものにFRPを適用しようという試みもなされている。

過去の研究において、FRPの一種であるフィラメント・ワインディング(FW)リングを取り上げ、運行体のバンパーなどの緩衝材への適用を想定して、衝撃吸収能^{1)~3)}についての研究がなされてきた。その結果、FWリングの適切な位置に切欠きを設けることで積層界面にはく離破壊を誘発し、緩衝材として有効な吸収エネルギーおよび荷重履歴が得られることが明らかとなった。しかし、このような形状効果による方法では負荷の方向により衝撃吸収に違いが生じるなどの問題がある。

また運行体のバンパー材等へFRPを適用することを考えた場合、FRPが水分や熱などの環境にさらされる

ことになり、環境にさらされて劣化したFRPの衝撃吸収能力を知ることは安全性の面から非常に重要である。

そこで、本研究ではFWリングに対して温水環境下および高温高湿環境下において吸水、吸湿を促進し、材料の劣化を起こさせることで衝撃緩衝材として適した特性が、衝撃荷重の負荷方向によることなく得られないかを検討し、あわせて衝撃吸収能力に及ぼす環境の影響について考察した。

2 供試材料および実験方法

2・1 供試材料

本研究で使用した試料はフィラメント・ワインディング法により成形されたガラス繊維-エポキシ樹脂ヘリカル巻きFW円筒(東洋ライト製)からFig. 1に示すような形状に切り出したFWリングである。図において D_0 はリングの外径、 T は円筒の肉厚、 L はリングの幅、 θ は強化繊維の巻き角度を表わす。本研究では $D_0=38$ mm、 $T=4$ mm、 $L=15$ mm、 $\theta=80^\circ$ のFWリングを試料として用いた。

2・2 実験方法

2・2・1 温水環境試験 所定の寸法に切り出したFWリングの試験片を、 80°C 一定に設定した乾燥炉に

† 原稿受理 平成7年8月2日 Received Aug. 2, 1995

* 正会員 同志社大学工学部機械系学科 〒610-03 京都府綴喜郡田辺町, Dept. of Mech. Eng., Doshisha Univ., Tanabe-cho, Kyoto, 610-03

** 正会員 舞鶴工業高等専門学校機械工学科 〒625 舞鶴市宇白屋, Dept. of Mech. Eng., Maizuru College of Tech., Shiraya, Maizuru, 625

*** 同志社大学大学院 〒610-03 京都府綴喜郡田辺町, Graduate Student, Doshisha Univ., Tanabe-cho, Kyoto, 610-03

Fig. 1. Shape of test piece.

て48時間乾燥した後, 1/10000 g まで測定可能な分析用電子天秤にて浸漬前の重量を測定し, 60°C 一定および90°C 一定の二種類の温度に設定した恒温水槽にそれぞれ浸漬し吸水させた. 所定の時間経過後, 水槽から試験片をとりだし, 表面の水分をぬぐい去ってから浸漬後の重量を測定し, さらに浸漬前と同様に80°Cで48時間再乾燥後の重量を測定した.

2・2・2 高温高湿環境試験 温水環境試験ではマトリックス樹脂の腐食溶解を伴うため, 材料劣化の様相が複雑となる. そこで, マトリックス樹脂の腐食溶解を考慮しなくても済むと考えられる環境試験として高温高湿環境試験もあわせて行うこととした⁴⁾. 温水環境試験と同様に, 吸湿前の試験片の重量を測定した後, 恒温恒湿器を用いて60°C95%RH一定および90°C95%RH一定の二種類の条件で吸湿を行った. 所定の時間経過後, 吸湿後の試験片重量を測定した.

2・2・3 衝撃試験 所定の時間吸水あるいは吸湿されたFWリングに一段式ガス銃式衝撃試験機(GMエンジニアリング製G-25型)を用いて, ステンレス鋼製のプロジェクタイトル(直径24.8 mm, 長さ180 mm, 質量0.6 kg)を衝突させ, その際の衝撃荷重, プロジェクタイトルの変位を測定し, さらに吸収エネルギーの計算も行った. 衝撃速度に関しては車両衝突時の安全規格などを考慮して15 m/s (約54 km/h)とした.

3 実験結果および考察

3・1 温水環境下におけるFWリングの衝撃特性

3・1・1 FWリングの吸水特性 FRPの力学的特性に与える水環境の影響を明らかにするには, まずFRPの吸水特性を把握しておく必要がある. 本研究では材料の吸水の指標として以下の式に示される吸水率 R_w および重量損失率 R_d を採用した⁵⁾.

$$R_w = \frac{W_1 - W_2}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

$$R_d = \frac{W_2 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

ただし W_0 , W_1 , W_2 はそれぞれ浸漬前の重量, 浸漬後の重量, 再乾燥重量を表す.

Fig. 2は60°C一定および90°C一定の温水環境下におけるFWリングの吸水率, 重量損失率と浸漬時間の関

(a) Environment temperature 60°C.

(b) Environment temperature 90°C.

Fig. 2. Relation between water absorption and immersion time under hot water environment.

係を示したものである. この図より60°C一定の温度において重量損失はほとんどなく樹脂の溶解などは生じていないことがわかる. また, 吸水率に関しては浸漬1000時間付近で飽和に達すると考えられ, そのときの飽和吸水量は約0.3%である.

次に90°C一定の温水環境下におけるFWリングの吸水率および重量損失率について検討する. 90°C一定では60°C一定の場合と比較して吸水が著しく, 初期の吸水の後, 浸漬500時間付近より急激な吸水率の増加, いわゆる二次拡散が観察される. また, 浸漬500時間以降樹脂の溶解による重量損失も生じている.

3・1・2 60°C一定の温水環境下における衝撃特性 Fig. 3は衝撃試験を行ったときのFWリングの荷重-時間線図のうち, 浸漬時間0(未浸漬材), 500, 1000時間のものである. また, Fig. 4は吸収エネルギーと時間の関係を表したものである.

荷重-時間線図より, 60°C一定の温水に浸漬した場合, 浸漬時間とともに荷重レベルは低下し, 未浸漬材で見られる著しい荷重の変動が減少し荷重履歴は安定に近づくことがわかる. また, 吸収エネルギーは浸漬100時間および200時間では未浸漬材とほとんど差が見られないが, 浸漬500時間以降は浸漬時間の経過とともに若干減少している.

3・1・3 90°C一定の温水環境下における衝撃特性 前項と同様に, 浸漬時間0(未浸漬材), 500, 1000時間のFWリングに衝撃負荷を与えたときの荷重-時間線

Fig. 3. Impact load/time curve (Hot water environment 60°C).

Fig. 4. Representative energy/time plots (Hot water environment 60°C).

Fig. 5. Impact load/time curve (Hot water environment 90°C).

Fig. 6. Representative energy/time plots (Hot water environment 90°C).

Fig. 7. Scanning electron micrographs showing fracture surface of non-immersion specimen.

Fig. 8. Scanning electron micrographs showing fracture surface of specimen under hot-water environment (60°C, 1000 h).

図を Fig. 5 に、吸収エネルギーと時間の関係を Fig. 6 に示す。

浸漬時間の経過とともに荷重レベルは大きく低下し、荷重の変動も少なくなり一定の荷重レベルを保持するようになる。また吸収エネルギーに関しては、浸漬時間とともに減少していくが、特に浸漬 1000 時間での吸収エネルギーの低下が著しい。

3・1・4 温水環境が衝撃挙動に及ぼす影響 Fig. 7 および Fig. 8 は未浸漬の FW リングおよび 60°C 一定で 1000 時間浸漬した FW リングの衝撃試験後のはく離破面を走査型電子顕微鏡で撮影したものである。

未浸漬の FW リングでは、繊維表面にマトリックス樹脂が付着しており、繊維-樹脂界面の接着状態が良好であったことが伺える。一方、60°C 一定で 1000 時間浸漬した FW リングでは、繊維表面に付着しているマト

リックス樹脂はほとんど見られず繊維がむき出しになっているのが多く見られる。このことより、温水に浸漬することにより繊維-樹脂界面が劣化していることが推察される。60°C 一定の温水環境下では、浸漬時間の経過とともに荷重レベルが低下し、荷重の変動も小さくなっていくことが観察された。また、吸収エネルギーの若干の低下も見られたが、これらはマトリックス樹脂が吸水により劣化し強度が低下したこと、また繊維-樹脂界面が劣化し、はく離が生じやすくなったことによると思われる。

よって、60°C 一定の温水環境下に浸漬することによって衝撃吸収エネルギーは若干低下するが荷重履歴は衝撃緩衝材として理想的な形に近づくということが明らか

Fig. 9. Scanning electron micrographs showing fracture surface of specimen under hot-water environment (90°C, 1000 h).

になった。

ここでいう「衝撃緩衝材として理想的な形」とは、荷重が被衝撃体にとって過大とならない程度の値まで上昇し、その後激しい荷重の変動を伴わずにほぼ一定の値を維持しながら変形量を増加させていくような形のことを指す。

Fig. 9 は 90°C 一定で 1000 時間浸漬した FW リングの衝撃試験後の離破面を走査型電子顕微鏡で撮影したものである。この写真からも、繊維がむき出しになっており、繊維-樹脂界面が劣化しているのがわかる。

一方、90°C 一定の温水環境下では、60°C 一定の温水環境下に比べて、浸漬時間の経過とともに著しい荷重低下が見られ、荷重の変動もより小さくなっている。吸収エネルギーに関しても浸漬時間の経過に伴うエネルギーの低下が著しいことが観察された。90°C 一定の温水に浸漬した場合、60°C 一定の場合に比べて吸水が著しく、浸漬 500 時間付近で微小き裂の発生などによる二次拡散を生じており、また、樹脂の加水分解による溶解損失も発生しているため、マトリックス樹脂および繊維-樹脂界面の劣化が激しく、衝撃吸収能力がかなり低下することが明らかとなった。

3・2 高温高湿環境下における FW リングの衝撃特性

3・2・1 FW リングの吸湿特性 温水環境試験では 90°C 一定の温度においてマトリックス樹脂などの溶出を生じていたため、FW リングの劣化は複雑となり、水環境が衝撃特性におよぼす影響について十分に検討するのは困難であった。

そこで次にマトリックス樹脂の溶解を伴わないと考えられる高温高湿環境下において FW リングの劣化を促進し、その後衝撃試験を行い、衝撃特性に及ぼす高温高湿環境の影響について検討を行った。

高温高湿環境下では、吸湿率 R_w は重量損失を考慮せずに次式で求められる。

$$R_w = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3)$$

ここで、 W_0 は吸湿前の重量を、 W_1 は吸湿後の重量を表す。

(a) Environment temperature 60°C.

(b) Environment temperature 90°C.

Fig. 10. Relation between moisture absorption and immersion time under hot-wet environment.

60°C 一定および 90°C 一定の高温高湿環境下における FW リングの吸湿率と吸湿時間の関係を Fig. 10 に示す。Fig. 10 より、60°C 一定、90°C 一定両環境においても、吸湿率は温水環境下にさらした場合と比較してほぼ同様の傾向を示し、60°C 一定では吸湿 1000 時間付近で飽和に達し、90°C 一定では吸湿 500 時間付近では二次拡散が生じていることがわかる。

3・2・2 60°C 一定の高温高湿環境下における衝撃特性 吸湿時間 0 (未吸湿材)、500、1000 時間の FW リングに衝撃負荷を与えたときの荷重-時間線図を Fig. 11 に、また吸収エネルギーと時間の関係を Fig. 12 に示す。

荷重-時間線図より、60°C 一定で吸湿させた場合、温水環境試験のときと同様、吸湿時間の経過とともに荷重レベルが若干低下し、荷重の変動が減少し安定に近づく傾向にあることがわかる。

吸収エネルギーに関しても温水環境試験のときと同様に 100 時間および 200 時間では未吸湿材との差はあまりみられないが 500 時間、1000 時間では吸湿時間の経過とともに吸収エネルギーが若干減少していくことが明らかになった。

3・2・3 90°C 一定の高温高湿環境下における衝撃特性 Fig. 13 は 90°C 一定の高温高湿環境にさらした FW リングの、吸湿時間 0 (未吸湿材)、500、1000 時間における衝撃荷重-時間線図である。この図より、浸漬時間の経過とともに荷重レベルは低下し、荷重の変動も少なくなり、一定の荷重レベルを保持するようになってい

Fig. 11. Impact load/time curve (Hot wet environment 60°C).

Fig. 12. Representative energy/time plots (Hot wet environment 60°C).

Fig. 13. Impact load/time curve (Hot wet environment 90°C).

ることがわかる。しかし、荷重レベルの低下の度合いは90°C一定の温水環境下の場合に比べると小さいものとなっている。

Fig. 14は90°C一定の高温高湿環境にさらしたFWリングの吸収エネルギー-時間線図である。この図から、FWリングの吸収エネルギーは吸湿時間の経過とともに減少していくが、この場合も90°C一定の温水環境下にさらしたFWリングに比べて吸収エネルギーの低下の度合いは小さいものとなっている。

3・2・4 高温高湿環境が衝撃挙動に及ぼす影響
Fig. 15は60°C95%RH一定で1000時間吸湿させたFWリングの衝撃試験後の破面を走査型電子顕微鏡で撮影したものである。この写真からも、繊維表面に付着しているマトリックス樹脂はほとんど観察されず、繊維-樹脂界面が劣化しているのがわかる。

Fig. 14. Representative energy/time plots (Hot wet environment 90°C).

Fig. 15. Scanning electron micrograph showing fracture surface of specimen under hot-wet environment (60°C, 1000 h).

60°C一定で吸湿させたFWリングでは、吸湿時間の経過とともに荷重レベルが低下し、また吸収エネルギーも減少していくが、これは温水環境下にさらしたときと同様にマトリックス樹脂そのものや繊維-樹脂界面が吸水により劣化し強度が低下したことによると思われる。

また、荷重レベルの低下や吸収エネルギーの減少の度合いは温水環境下にさらしたときとほぼ等しいものとなっているが、60°C一定では加水分解による溶解損失が生じていず、吸水率(吸湿率)がほぼ等しいので、このことから荷重レベルの低下や吸収エネルギーの減少が、吸水によるマトリックス樹脂や繊維-樹脂界面の劣化によるものであると言える。

よって、60°C一定では、高温高湿環境下にさらすことにより、温水環境下にさらした場合と同様に衝撃吸収エネルギーは若干低下するが、荷重履歴は衝撃緩衝材として理想的な形に近づくことが明らかになった。

Fig. 16は90°C95%RH一定で1000時間浸漬したFWリングの衝撃試験後の破面を走査型電子顕微鏡で撮影したものである。この写真においても、繊維表面に付着しているマトリックス樹脂はほとんど観察されず、繊維がむき出しになっており、繊維-樹脂界面が劣化しているのがわかる。

90°C一定の場合では、吸湿時間の経過とともに荷重レベルの低下や吸収エネルギーの減少が観察されるが、60°C一定の場合と比べてその低下や減少の度合いは大きくなっている。これは、吸湿率から見てもわかるよう

Fig. 16. Scanning electron micrograph showing fracture surface of specimen under hot-wet environment (90°C, 1000 h).

に 90°C 一定の方が 60°C 一定の場合よりも吸湿が著しく, また二次拡散も生じており, マトリックス樹脂や繊維-樹脂界面の劣化が進んだためであると思われる。

また, 90°C 一定の高温高湿環境下にさらした場合と, 90°C 一定の温水環境下にさらした場合とを比べると, 温水環境の方が荷重レベルの低下や吸収エネルギーの低下の度合いが大きくなっている。これは, 高温高湿環境では樹脂の加水分解による溶解損失が発生していないのに対して, 温水環境では加水分解による溶解損失が生じ, マトリックス樹脂や繊維-樹脂界面の劣化が著しく, 衝撃吸収能力の大きな低下を招くと考えられる。

4 結 言

本論文では FW リングの衝撃緩衝材への適用を想定

し, 温水環境下および高温高湿下において劣化を促進し, FW リングの衝撃吸収に及ぼす影響について検討を行った。これらにより以下の様な結論を得た。

(1) FW リングが 60°C 一定の水環境下にさらされた場合, マトリックス樹脂および界面状態の劣化を生じ荷重および衝撃吸収エネルギーの若干の低下をまねくが, 荷重履歴は衝撃緩衝材として理想的な形に近づくことが明らかになった。

(2) FW リングが 90°C 一定の水環境下にさらされた場合, マトリックス樹脂および界面状態の劣化が著しく, 衝撃吸収能力の大きな低下が見られた。

(3) 加水分解による溶解損失が生じると, マトリックス樹脂や繊維-樹脂界面の劣化は著しく, 衝撃吸収能力は大きく低下する。

(平成 7 年 3 月 15 日 日本材料学会第 24 回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 平井恒夫, 今井田 豊, 片山傳生, 小林伸行, 材料, **39**, 254 (1990).
- 2) 平井恒夫, 片山傳生, 山野隆行, 日本材料学会第 22 回 FRP シンポジウム講演論文集, p. 206 (1993).
- 3) 平井恒夫, 片山傳生, 篠原正浩, 山野隆行, 日本機械学会材料力学部門講演会論文集, p. 179 (1993).
- 4) 平井恒夫, 片山傳生, 井ノ口博一, 篠原正浩, 志水秀男, 材料, **43**, 464 (1994).
- 5) T. Hirai, T. Katayama, S. Ito, H. Inoguchi, M. Shinohara and M. Ogawa, "Mechanical Behaviour of Materials-IV", p. 85 (1991).