FRP の 衝 撃 に 関 す る 研 究*

(強化プラスチック部門委員会研究報告)

遠 藤 吉 郎** 吉 田 治 夫***

On Impact Resistance of FRP

(Report of Committee of Reinforced Plastics)

by

Kichiro ENDO

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

and Haruo YOSHIDA

(Osaka Municipal Technical Research Institute, Osaka)

1 ま え が き

日本材料学会強化プラスチック部門委員会(委員長西山卯二郎氏)では研究発表,文献紹介などによりFRPの強度,とくに耐久性に関する研究活動と情報の普及につとめてきたが,今回研究小委員会を作って,目標を定めた協同研究を行なうことになった。研究のテーマとしては,学界,産業界に貢献することはもちろんであるが,なるべく多数の委員が興味をもって参加でき,かつ結果を得るのにさほど長期間を要しないものということで,部門委員会において種々協議した結果,FRPの衝撃強度の研究を行なうことになった。昭和45年4月に小委員会を組織し,各委員が試験を分担して行ない,得られた結果を総合して,第1回FRPシンポジウム(昭和47年3月28日)で報告した。本総説はこれを再録するものである。

金属の衝撃試験は歴史もあり, JIS規格の制定も古く,一応確立されている。硬質プラスチックでは JIS がごく最近制定されたが,繊維で強化されたFRPについては技術的蓄積はまだ少ない。また金属用の衝撃試験機は多くの台数のものが使用されているし,小容量のプラスチック用のものもかなり普及しているが,中間の強度を持つ FRP にはどのような試験機を使用するか問題がある。さらに試験片の形状,寸法,衝撃の方向などの衝撃値におよぼす影響を知る必要がある。試験方法に上に述べたような問題があるが,実際に

機械,構造物として使用される FRP としては,その耐衝撃性の意味すなわち衝撃破壊の規模と実用性との関連が重要である。金属の衝撃破壊の機構は相当に明らかになっているが,FRPのような積層材についてはさらに研究すべき問題が多く残されている。試験片を使用して得られる衝撃値の意味の解釈およびこの衝撃値を設計に適用する方法などはいまだ知られておらず,これらを明らかにする必要がある。さらに FRP の耐衝撃性は,ひずみ速度のほか温度,湿度などの環境に影響されるであろうし,また屋外で長期間使用されることによる劣化,繰返し応力による疲労の蓄積の影響をうけるであろう。このような問題を究明することは,衝撃破壊の機構の研究にも貢献するが,同時に実際面でも重要な意味をもっている。

以上のような意図により,小委員会では FRP の衝撃について研究した。ここには得られた結果のみを報告する。結果に対する解釈や,細かい考察は,それぞれ試験を分担した委員の責任において別に報告されることがあるであろう。

2 研 究 組 織

本研究のために組織された小委員会の構成と分担テーマを表 I に示す。

3 試験材料および試験方法

本研究に使用した材料はつぎの2種類である。

- (1) ガラスマット強化ポリエステル樹脂積層板(以下マット FRP と称する)
使用樹脂: エポラック G-153L (日本触媒化学工業(株)製)

* 原稿受理 昭和47年7月11日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 正 会 員 大阪市立工業研究所 大阪府北区北畠町

表I 研究組織

	分担研究テーマ	担当委員
1	試験機容量の影響	大阪工業技術試験所 黒田 寿紀生
2	切欠きの影響	大阪市立工業研究所 吉田 治夫
3-1-1	衝撃方向の影響 (金属用試験機) (フラットワイズ)	大阪大学工学部 築 添 正
3-1-2	" (") (エッジワイズ)	アルナ工機 (株) 山 上 聖 之
3-2-1	" (プラスチック用試験機) (フラットワイズ)	日本触媒化学工業 (株) 仁 木 正 夫
3-2-2	" (") (エッジワイズ)	大日本硝子工業 (株) 瀬 川 浄 一 郎
4	疲労の影響	京都大学工学部 遠 藤 吉 郎
5	静的曲げとの関係	大阪市立大学工学部 藤 井 太 一
6	温度、湿度の影響	大阪府立工業奨励館 貴 志 純 治
7	ウェザーメータ照射の影響	大阪府立大学工学部 井 上 卓
8	ウェザーメータ照射	同志社大学工学部 網 島 貞 男
9	材 料 提 供	(株) クラレ 吹 田 英 二 日本触媒化学工業 (株), 日本硝子繊維 (株) 大日本インキ化学工業 (株), 旭ファイバーグラス (株)

硬化条件: オクテン酸コバルト(金属分8%のもの)
0.2%

メチルエチルケトンパーオキサイド (55
%溶液) 0.8%

常温ゲル化時間 5 hr

ガラス繊維: CM-455FA (旭ファイバーグラス (株)
製)

積層方法: ガラス繊維10枚積層後, 両面をセロハン
で覆い, 10 mm のスペーサーを置いて
厚みを与えたのち荷重を加えて, 常温で
一夜放置後 110℃, 2 hr アフターキュア
を行なう。板の大きさは約400 mm×500
mm, 厚さ 10 mm

製作担当: 日本触媒化学工業 (株) 研究所

(2) ガラスクロス強化ポリエステル樹脂積層板 (以下
クロス FRP と称する)

使用樹脂: ポリライト OD-R-485 (大日本インキ化
学工業 (株) 製)

硬化条件: ナフテン酸コバルト(金属分6%のもの)
0.05%

メチルエチルケトンパーオキサイド 0.5
%

常温ゲル化時間 4 hr

ガラス繊維: ES-21GH (日本硝子繊維 (株) 製)

積層方法: ガラス繊維 37 枚積層後, 10 mm のス
ペーサーを用いてプレスで約 60 kg/cm² の
圧力を加えて常温硬化させる。硬化後一
夜放置し, その後 80℃, 4 hr のアフ
ターキュアを行なう。板の大きさは約 400
mm×500 mm, 厚さ 10 mm

製作担当 大日本インキ技術研究所ポリエステル技
術グループ

板材より所定寸法の試験片を採取し, 各試験条件に

つき10本の試験片を用いるのを標準とする。これより
その平均値, 標準偏差, 変動係数を求める。試験機は
シャルピーおよびアイゾットの衝撃試験機を用いるが,
アイゾット試験機による結果も比較のため, 吸収エネ
ルギを断面積で除して, kg-cm/cm² で示す。

4 試験結果

以上表 I に示した研究テーマの順に従い試験結果を
述べるが, 各項目とくに1~3の間には互に関連が
あり, ときには矛盾した結果もみられるが, ここには
得られた結果を忠実に叙述することにする。

4.1 試験機容量の影響

試験条件を表 II に, 試験結果を図 1, 2 に示す。こ
れを要約すると, つぎのようである。

マット FRP については

(1) 試験機容量の変化はシャルピー値およびアイゾ
ット値に影響しない。打撃速度の変化範囲はせいまいが,
その影響はみられない。

(2) フラットワイズの打撃の方がエッジワイズのそ
れより大きい衝撃値を示す。前者の標準偏差は 15 kg-
cm/cm² 程度, 後者のそれは 5 kg-cm/cm² 程度であ
る。

(3) シャルピー衝撃試験における支点間距離の影響
(フラットワイズの場合) は, 支点間距離の短い金属
用の試験片の方が大きい衝撃値を示してはいるが, 試
験片幅が金属用 15 mm, プラスチック用 10 mm と異
なり, その影響の有無は明らかでない (図 5 参照)

クロス FRP については

(1) 試験機容量の変化, 打撃速度の差の影響はみら
れない。

(2) フラットワイズの打撃の方がエッジワイズのそ
れより大きい衝撃値を示すが, 変動係数も前者の方が
大きい。

(3) シャルピー衝撃試験における支点間距離の差は

表Ⅱ 試験条件 (試験機容量の影響)

材 料		マ ッ ト FRP						ク ロ ス FRP															
試験温度・湿度		20℃ 65%						20℃ 65%															
衝撃試験の種類		シャルピー			アイゾット			シャルピー						アイゾット									
試験片の種類		プラスチック形		金 属 形		プラスチック形		金 属 形		プラスチック形				金 属 形		プラスチック形		金 属 形					
種 類		U ノ ッ チ			V ノ ッ チ			U ノ ッ チ						V ノ ッ チ									
深さ (mm)		2.0			2.54		2.0		2.0				2.0				2.54		2.0				
加工位置		表面 (フラットワイズ)			側 面 (エッジワイズ)		表面 (フラットワイズ)		表 面 (フラットワイズ)		側面 (エッジワイズ)		表 面 (フラットワイズ)		側面 (エッジワイズ)		側面 (エッジワイズ)		表面 (フラットワイズ)		側面 (エッジワイズ)		
寸 法	厚さ (mm) (ノッチ深さ方向)	原 厚			12.7 10.0		原厚		原 厚		10.0		原 厚		10.0		12.7		原厚		10.0		
	幅 (mm) (ノッチ長手方向)	10.0		15.0		原 厚		9.8		10.0		原厚		10.0		原厚		原厚		10.0		原厚	
	長さ (mm)	100		60		63.5				100				60				63.5		63.5		63.5	
支点間距離 (mm)		60		40						60				40									
試験機容量 (kg·m)		1.5 3		1.5 3 30		1.5 17		3		5.6 30 3		3		5.6 30 3		3		3		17			
打撃速度 (m/s)		3.35			5.5		3.35 4		3.35 4.6 5.5 3.35		3.35 4.6 5.5 3.35		3.35 4.6 5.5 3.35		3.35 4.6 5.5 3.35		3.35		4

図1 試験機容量の影響 (マット FRP)

フラットワイズでは認められないが、エッジワイズでは支点間距離の短い金属用試験機の方が大きい衝撃値を示す。

4・2 切欠きの影響

試験条件を表Ⅲに、試験結果を図3, 4に示す。打撃方向はフラットワイズであるが、クロス FRP にお

図2 試験機容量の影響 (クロス FRP)

いては繊維方向が試験片軸と一致したもの (以下 $\theta = 0^\circ$ と記す) のほかに、 45° をなす方向に試験片を採取

表Ⅲ 試験条件 (切欠きの影響)

材 料		マット FRP				クロス FRP											
試験温度・湿度		13℃ 64%				16℃ 60%				14.6℃ 47%				16℃ 60%			
衝撃試験の種類		シャルピー				シャルピー											
試験片採取方向						0°				0°				45°			
試験片の種類		金属形 (フラットワイズ)				金属形 (フラットワイズ)				金属形 (フラットワイズ) (有効断面積一定)				金属形 (フラットワイズ)			
ノ ッ チ	種 類	U ノ ッ チ				U ノ ッ チ				U ノ ッ チ				U ノ ッ チ			
	深 さ (mm)	0	0.5	1.0	2.0	0	0.5	1.0	2.0	0	0.5	1.0	2.0	0	0.5	1.0	2.0
	加 工 位 置	表 面				表 面				表 面				表 面			
寸 法	厚 さ (mm) (ノッチ深さ方向)	原 厚				原 厚				7.2	7.7	8.2	9.2	原 厚			
	幅 (mm) (ノッチ長手方向)	15				15				15				15			
	長 さ (mm)	60				60				60				60			
支点間距離 (mm)		40				40				40				40			
試験機容量 (kg・m)		30				30				30				30			
打撃速度 (m/s)		5.01				5.01				5.01				5.01

図3 切欠きの影響 (マット FRP)

したもの (以下 $\theta=45^\circ$ と記す) の衝撃試験も行なっている。結果を要約すると、切欠きの有無の影響は金属ほど大きくないが、

マット FRP については

(1) 切欠き深さが大きくなればシャルピー衝撃値は小さくなる。

クロス FRP については

(1) $\theta=0^\circ$ の場合、切欠き深さ 1mm までは明確な差異は認められないが、切欠き深さ 2mm になると、

図4 切欠きの影響 (クロス FRP)

やや衝撃値が低下する。

(2) $\theta=45^\circ$ では切欠き深さが大きくなるにつれて

表Ⅳ 試験条件 (衝撃方向の影響)

材 料		マ ッ ト FRP				ク ロ ス FRP					
試験温度・湿度		24℃ 72%	21.5℃ 62%	24℃ 60%	23℃ 50%	11.5℃ 63%	14.5℃ 65%	11.5℃	22℃ 47%		
衝撃試験の種類		シャルピー				シャルピー					
試 験 方 法		金属用試験機		プラスチック用試験機		金属用試験機				プラスチック用試験機	
		フラット ワイズ	エッジワイズ	フラット ワイズ	エッジワイズ	フラットワイズ	エッジワイズ	フラットワイズ	エッジワイズ	フラットワイズ	エッジワイズ
試験片採取方向						0°	45°	0°	45°	0°	45°
試験片の種類		金 属 形		プラスチック形		金 属 形	金 属 形	プラスチック形	プラスチック形		
ノ ツ チ	種 類	U ノ ッ チ		U ノ ッ チ		U ノ ッ チ				U ノ ッ チ	
	深さ (mm)	2.0		2.0		2.0				2.0	
	加 工 位 置	表 面	側 面	表 面	側 面	表 面	側 面	表 面	側 面	表 面	側 面
	寸 法	厚さ (mm) (ノッチ深さ) 方向	原 厚	10	原 厚	5, 10, 15, 20	原 厚	5, 10	原 厚	5, 10, 15	5, 10
幅 (mm) (ノッチ長手) 方向		5, 10, 15, 20	原 厚	5, 10, 15, 17	原 厚	5, 10, 15, 20	原 厚	5, 10, 15, 17	10, 15, 17	厚 原	
長さ (mm)		60		100		60				100	
支点間距離 (mm)		40		60		40				60	
試験機容量 (kg・m)		30		1.5	2	30				1.5*	2
打撃速度 (m/s)		4.4	1.5	3.26	3.4	4.4	1.5	5.5	3.4		

*印は容量不足

衝撃値も少しづつ大きくなる。

(3) $\theta=45^\circ$ の方が $\theta=0^\circ$ より衝撃値が大きい。

(4) 板厚一定で切欠き深さによって断面積が変化する場合と、切欠き底断面積を一定にした場合 (ただし $\theta=0^\circ$) とで顕著な差はみられない。

なお打撃方向がエッジワイズのものは、4・1においてアイゾット衝撃試験機で試験されているが、マット FRP、クロス FRP ともに、試験片の厚さおよび切欠き深さが少々変化しても (ただし切欠き深さと厚さの比を 1:5 一定に保つ)、衝撃値に差異は認められなかった。

4・3 衝撃方向の影響

シャルピー衝撃試験による試験条件を表Ⅳに、試験結果を図5～8に示す。図はマット FRP のフラットワイズとエッジワイズ、およびクロス FRP の $\theta=0^\circ$ と $\theta=45^\circ$ についてフラットワイズとエッジワイズに打撃した結果を試験片寸法に対して示したものである。結果を要約すると、つぎのようである。

マット FRP については

(1) フラットワイズの方がエッジワイズより大きい衝撃値を示す。(図1参照)

(2) フラットワイズでは試験片幅が大きくなるほど、

またエッジワイズでは試験片厚さが大きくなるほど、衝撃値は大きくなる。

(3) 金属用試験機とプラスチック用試験機 (支点間距離の差) について同一断面寸法 (10 mm×10 mm) では衝撃値に差がない。

クロス FRP については

図5 衝撃方向の影響 (マット FRP) フラットワイズ

図6 衝撃方向の影響 (マット FRP) エッジワイズ

図8 衝撃方向の影響 (クロス FRP) エッジワイズ

図7 衝撃方向の影響 (クロス FRP) フラットワイズ

(1) フラットワイズの方がエッジワイズより大きい衝撃値を示す。(図2参照)

(2) フラットワイズでは、 $\theta=45^\circ$ の方が $\theta=0^\circ$ より衝撃値が高く(図4参照)、これらの値は試験片幅に影響されないが、 $\theta=45^\circ$ で試験片幅が小さく(5 mm)なると衝撃値が低下する。

(3) エッジワイズでは同一断面寸法(10 mm×10 mm)の試験片について支点間距離の影響が明らかである。

4.4 疲労の影響

試験材料に空中、水中で疲労被害を与えたのち、シャルピー衝撃試験を行なう。疲労試験はシェンク PH QD 型試験機により、2 200～2 350 c/min の片振り引

張りで行なう。S-N 曲線を図9、10に示す。これより寿命 $(1\sim2)\times 10^5$ を目標として、

マット FRP については

空中 $\sigma_{\max}=3.7 \text{ kg/mm}^2$ に対して $N=1.5\times 10^5$

水中 $\sigma_{\max}=3.7 \text{ kg/mm}^2$ に対して $N=1.5\times 10^5$

クロス FRP については

空中 $\theta=0^\circ$, $\sigma_{\max}=10 \text{ kg/mm}^2$

に対して $N=2\times 10^5$

$\theta=45^\circ$, $\sigma_{\max}=2.6 \text{ kg/mm}^2$

に対して $N=0.7\times 10^5$

水中 $\theta=0^\circ$, $\sigma_{\max}=9.8 \text{ kg/mm}^2$

に対して $N=1.5\times 10^5$

図9 マット FRP の S-N 曲線

図10 クロス FRP の S-N 曲線

水中試験は 13°C 水中に 24 hr 浸漬後、水滴下で行なう

$$\theta = 45^\circ, \sigma_{\max} = 4.0 \text{ kg/mm}^2$$

に対して $N = 1.5 \times 10^6$

を得て、それぞれ上記の応力を繰返し数比 $n/N = 0, 0.1, 0.5, 0.8, 1.0$ 与えたものを試験材料とする。ただし水中とは試験片をあらかじめ 13°C の水中に 24 hr 漬けたのち、滴水下で疲労試験したものである。この試験材料より応力方向に平行に衝撃試験片を採取し、切欠きなしでシャルピー衝撃試験を行なう。マット FRP の衝撃値の変化と破壊様式を図 11, 12 に示す。またクロス FRP の衝撃値の変化を図 13, 14 に、その破壊様式を図 15, 16 に示す。これらの結果を要約するとつぎのようである。

図11 マット FRP の繰返し数比と衝撃値

図12 マット FRP の衝撃破壊様式

図13 クロス FRP の繰返し数比と衝撃値 $\theta = 0^\circ$

図14 クロス FRP の繰返し数比と衝撃値 $\theta = 45^\circ$

図15 クロス FRP の衝撃破壊様式空中

図16 クロス FRP の衝撃破壊様式水中

マット FRP については

- (1) 繰返し数比とともに衝撃値は低下するが、空中で疲労を与えたものの方が水中で疲労を与えたものより、その低下率大きい。
- (2) 空中で疲労を与えたものは繰返し数比とともに、衝撃によって層間はく離する率が大きくなる。水中で疲労を与えたものは、全般的に層間はく離し易い。

クロス FRP については

- (1) $\theta = 0^\circ$ で疲労を与えたものは、繰返し数比とともに衝撃値が低下するが、水中で疲労を与えたものの方が空中で疲労を与えたものより衝撃値が低い。層間はく離の率はともに繰返し数によって減少する。
- (2) $\theta = 45^\circ$ で疲労を与えたものは繰返し数比による衝撃値の低下がみられず、水中の方が空中より衝撃値が低い。破壊様式はすべて層間はく離である。

4.5 静的曲げとの関係

試験片形状は $100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ に深さ 2 mm の U 形切欠きをつけたもので、静的曲げはインストロンにより、スパン 50 mm の 3 点曲げを行なう。荷重点の速度は $0.1 \text{ cm/min} \sim 50 \text{ cm/min}$ である。衝撃試験はスパン 60 mm のシャルピー試験で行ない、衝撃の初速度は $(1 \sim 1.8) \times 10^4 \text{ cm/min}$ である。曲げ強度 $\sigma_B \text{ kg/mm}^2$ は最大荷重より弾性的に計算された値である。

図17 曲げ強度におよぼす速度効果

得られた結果を図17に示す。これを要約すると、

(1) 荷重速度の対数に比例して σ_B は増大するが、途中 σ_B の急に増大する速度がある。

(2) マット FRP, クロス FRP とも、低速ではフラットワイズとエッジワイズの荷重方向の影響がみられないが、 σ_B の増大する荷重速度以上ではフラットワイズの方がエッジワイズより σ_B が大きい。

(3) 荷重速度の小さいときは層間はく離破壊は起こりにくい、高速になると層間はく離を生じ易くなる。

4・6 温度、湿度の影響

あらかじめ試験片を室温において、デシケータ中に乾燥状態にて2週間放置し、その後温度の影響については、所定の温度に20hr保ち、湿度の影響については、所定の温度、湿度に200hr保った後、ただちにフラットワイズにシャルピー衝撃試験を行なった。試験条件を表Vに、試験結果を図18, 19に示す。結果を要約すると、つぎのようである。

(1) 温度は低くなるほど、衝撃値が増大するが、マット FRP は室温付近では温度の影響が小さい。

(2) 湿度の影響はほとんどみられない。図13の $n/N=0$, すなわち水中放置の結果からクロス FRP は湿度の影響があるともいえる。

4・7 ウェザメータ照射の影響

ASTM W-V2-3-HD の形式のカーボンアークによる照射器にて、温度は約40℃とし、120minごとに18

表V 試験条件(温度、湿度の影響)

材 料	温度の影響		湿度の影響	
	マット FRP	クロス FRP	マット FRP	クロス FRP
衝撃試験の種類	シャルピー		シャルピー	
試験温度・湿度	-70℃, -40℃, -20℃, 0℃, 20℃, 40℃, 60℃, 80℃, 100℃		16.5℃の場合 20%, 56%, 80%, 98% 60℃の場合 20%, 50%, 80%, 98%	
試験片の種類	金属形(フラットワイズ)		金属形(フラットワイズ)	
ノ ツ チ	種 類	Uノッチ	Uノッチ	
	深さ(mm)	2.0	2.0	
	加工位置	表 面	表 面	
	厚さ(mm) (ノッチ深さ方向)	原 厚	原 厚	
	幅(mm) (ノッチ長手方向)	15	15	
法	長さ(mm)	60	60	
支点間距離(mm)	40		40	
試験機容量(kg・m)	30		30	
打撃速度(m/s)	4.97		4.97

図18 シャルピー衝撃値に及ぼす温度の影響

図19 シャルピー衝撃値に及ぼす湿度の影響

min 水噴射の繰返しによるウェザリングを行なった。試験片切欠き切削面に照射し、フラットワイズにシャルピー衝撃試験を行なった。ウェザメータ照射100hrまでの結果では、衝撃値に変化がみられない。この項については、さらに長時間の照射による試験が必要であろう。

5 結 言

以上、試験結果のみを述べた、総体としていえることは、

(1) フラットワイズはエッジワイズより曲げ強度が高く、衝撃値も大きい。

(2) 試験機の容量、打撃速度の影響はほとんどみられない。

(3) 試験条件の衝撃値に及ぼす影響はフラットワイズに打撃した方が敏感である。

(4) しかし試験片の形状、寸法のわずかな変化は衝撃値にあまり影響せず、切欠きの効果も顕著でない点は金属と異なる。

(5) 環境の衝撃値に及ぼす効果は動的条件において著しい。

(6) 衝撃破壊に繊維破断によるものと、層間はく離によるものがある。

このような複合材料の吸収エネルギーの意味と衝撃破壊の機構を明らかにすることは学問上、實際上貢献するところが大きいが、本研究結果はそれに対する重要な資料を与えるものと考えられる。

(昭和47年3月28日 第1回 FRP シンポジウムにて講演)