

## 爆発衝撃によるFRPの損傷について

井上 卓\*, 沢田継男\*\*, 森本修司\*

FRPが爆発による強力な圧力波の負荷を受ける時、FRP本体は何らかの損傷を受ける。圧力波がFRP内部を進行する場合、境界面において反射波が生起するが、この反射波とFRPが受ける損傷の関係について、FRPの耐爆設計という立場から究明する必要がある。本報告は、この問題について実験的に調べたものであるが、特にFRPの積層構造の影響について調べた点に特徴がある。得られた結果は次の通りである。

- (1) 反射引張り波が生起するような条件の下では、フラットワイズ方向の衝撃を受けると、はく離による破壊が起る。FRPはこのような負荷に対しては、最も脆弱である。
- (2) 反射圧縮波が生起するような条件の下では、フラットワイズ方向の衝撃を受けると、断面の全面にわたる白化が生じるが、はく離による破壊は起らず、強度の低下率も小さい。

一方、エッジワイズ方向の衝撃を受けると、その断面に部分的な白化が生ずるが、白化部の総面積は、フラットワイズ方向の衝撃の場合よりも少く、耐衝撃性は大きい。

### 1. 緒言

現在、繊維強化プラスチック(以下FRPと略記)は、きわめて多方面に使われているが、今回、筆者らは、FRPという特殊な構造をもつ複合材料が爆発衝撃を受けた場合、どのような損傷を蒙るかについて実験を行ったので、その結果について報告する。

FRPの衝撃試験には、シャルピー、またはアイゾット衝撃試験機が使用されるが、これらは材料に局部的な衝撃を与える方法を採用しているので、材料全面にわたる衝撃(例えば、爆風圧)を受けるような場合には、これらによる試験結果は参考にし難い。

爆発衝撃の与え方には種々の方法が考えられるが、筆者らは、ジアゾジニトロフェノール(以下DDNPと略記)とFRP試験片との間に鋼板を介在させて間接的に衝撃を加える方法を採用した。

この実験において、まず、試験片内を透過した圧力波が底面(境界面)において、圧縮波として反射する場合と、引張り波として反射する場合について、衝撃の効果、すなわち損傷の程度、特徴を調べ、比較した。

昭和55年11月18日受理

\*大阪府立大学 工業短期大学部

〒544 大阪市生野区勝山南 3-1-4

TEL 06-712-0341 (代)

\*\*近畿大学 理工学部

〒577 東大阪市小若江 321

TEL 06-721-2332 (代)

次に、FRPの強化材であるガラスクロス(積層方向)に対し、衝撃の方向が直角をなす場合と、平行になる場合の両者について、衝撃の効果を比較検討した。

### 2. 実験方法および試験片

Fig.1に示す通り、敷板(back up plate)の上面にFRP試験片を置き、その上に厚さ2mmの鋼板(cover plate)をのせる。次にcover plateの上面中央部に爆

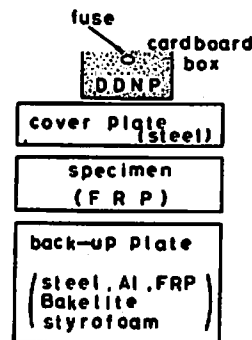


Fig.1 Arrangement of elements for explosive impact.

薬(DDNP)を配置する。本実験ではDDNPを底面が30mm×30mmで任意の高さをもつトレーシングペーパー製の角筒容器に未圧縮の状態に入れ、点火玉を用いてこれを爆発させる。back up plateには密度の

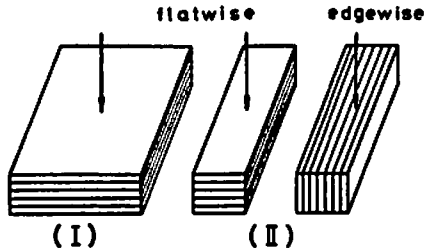


Fig. 2 Relation between impact direction and laminate direction

異なる各種材料（鋼、アルミニウム、FRP、ペークライト、発泡スチロール）を使用する。

本実験では、Fig.2 (I), (II) に示すように、実験を二大別する。すなわち、実験 I においては、140mm×30mm×10mm の試験片に対し、ガラスクロス の積層方向に直角に（フラットワイズに）衝撃を加える。また実験 II においては、100mm×10mm×10mm の角棒状試験片に対し、ガラスクロス の積層方向に平行な方向（すなわち、エッジワイズの方向）とフラットワイズの方向に衝撃を加え、損傷の程度を比較する。

試験材料は朱子織ガラスクロスによる強化ポリエステル樹脂積層板である。以下にこの材料の成分と成形条件を示す。

〔成分〕

樹脂 ポリエステル樹脂（一般用2401L）  
 強化剤 無アルカリガラス朱子織クロス  
 ガラス含有率 61%（重量割合）

〔成形条件〕

熟板温度 60℃～70℃  
 圧力成形 約 4kg/cm<sup>2</sup>（プレス成形）  
 成形所要時間 3時間

3 衝撃荷重

本実験において使用するDDNPの爆ごう圧力に関しては、沢田の研究報告<sup>12)</sup>がある。この報告によれば、DDNPの爆ごう圧力は爆薬重量に関係せず、容器内への爆薬の充填密度に関係する。筆者らは、まず爆ごう圧力を知るため、使用するDDNPの重量とその体積を測定して充填密度を求め、沢田の研究より得られた充填密度と爆ごう圧の関係線図を用いて圧力値を求めた。その結果、本実験におけるDDNPの爆ごう圧力は、おおよそ  $3 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup> となることがわかった。

次に、上記のような爆ごう圧力をもつ爆ごう波は、爆薬と相接する鋼製 cover plate に強い衝撃を与えるため、圧力波が発生し、これが伝ばするものと考えられる。

cover plate 内を通過した圧力波は、次の境界面において、一部はFRPに入射し、一部は反射して cover plate に返る。したがって、FRPに入射する圧力波の圧力、すなわち衝撃荷重は前述の爆ごう圧力に比して相当に低下するものと考えられる。

4. 実験結果および考察

4.1 反射波が引張り波になる場合の損傷の特徴

Fig.1の衝撃実験装置において、back up plate に発泡スチロールを使用すれば、発泡スチロールは多量の空気を含んでいるので、境界面は自由面に近い状態になる。したがって、この場合、FRP内を透過した圧力波の反射波は引張り波となる。

Table 1における実験番号 I-1 および I-2 の実験はこの場合に当る。この Table 1は実験番号、実験条件ならびに実験結果（試験片の内部状態の変化）をまとめて示したものである。

実験 I-2 における衝撃後の試験片の状態を Fig. 3 の写真に示す。この写真より、ガラスクロス の積層部

Table 1 Experimental conditions and variation of specimens after impact.  
 (Case of Experiment I)  
 demension of specimen: 30mm×140mm×10mm (thickness)  
 direction of impact: flatwise

No. of experiment	Weight of DDNP (g)	Charged explosive density (g/cm <sup>3</sup> )	Materials of back up plate	Kinds of reflective stress wave	Variation of specimens after impact
I-1	7.5	0.83	styrofoam	tensile wave	} fracture by delamination
I-2	12.5	0.87	styrofoam	tensile wave	
I-3	7.5	0.83	steel	compressive wave	} whitening of all sectional area
I-4	10.0	0.86	steel	compressive wave	
I-5	12.5	0.84	steel	compressive wave	



No. of Experiment I-2

Fig. 3 Cross-section of the specimen after impact.



No. of Experiment I-4

Fig. 4 Cross-section of the specimen after impact.

が10数層にはく離している様子がわかる。この現象は前述の通り、FRP内を透過してきた圧縮波が、境界面におけるHopkinson効果により、引張り波として反射することにより起るものと考えられる。

#### 4.2 反射波が圧縮波になる場合の損傷の特徴

Fig. 1の衝撃実験装置において、back up plateに銅板を使用すると、back up plateの衝撃インピーダンスがFRPの衝撃インピーダンスより大きくなり、反射波は圧縮波となる。ここにいう衝撃インピーダンスとは、物質の密度とその物質内を伝ばする圧力波の伝ば速度との積をいう。

Fig. 4は実験I-4における衝撃後の試験片の断面写真を示したものであるが、試験片全体にわたって白化が起り、また中央部には横方向に走るかなり明りょうな線が認められる。この線は圧縮波の干渉によって生じたものと考えられる。

実験I-3～I-5は、Table 1に示している通り使用爆薬量を変化させて実験を行ったものであるが、Fig. 5はこの実験において、衝撃後のFRP板より引張り試験用の試験片を切り出し、それらに対し引張り試験を行った結果を示したものである。図中の最も左にプロットした点は、衝撃していないFRPの引張り強度を示したもので、これを基準にして強度変化の割合を知ることができる。使用爆薬量は7.5gから12.5gの範囲で変化させているが、ほぼ一様に15%程度の強度低下が認められる。この実験では爆薬の充填密度はほぼ同程度(0.83～0.86g/cm<sup>3</sup>)になるようにしているので、上記の現象は、爆薬(DDNP)の充填密度を一定にすれば、発生する爆ごう波の波とう圧力も一定して、材料(FRP)の受ける損傷もほぼ一樣になるこ

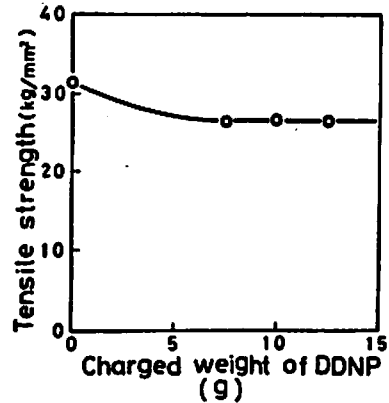


Fig. 5 Variation of tensile strength after explosive impact loading.

とを示している。

#### 4.3 フラットワイズ方向とエッジワイズ方向の衝撃効果の比較

(実験II<sub>A</sub>-1～II<sub>A</sub>-4, II<sub>B</sub>-1～II<sub>B</sub>-4)

この実験においては、フラットワイズ方向とエッジワイズ方向の衝撃効果を比較するため、次のような方法で衝撃実験を行う。すなわち、

断面10mm×10mmの正方形の形状をもった長さ100mmの角棒状のFRP試験片を4本平行に密着してback up plate上に並べる。この場合、back up plateには、ベークライト(密度 $\rho=1.3\text{g/cm}^3$ )、FRP( $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ )、アルミニウム( $\rho=2.7\text{g/cm}^3$ )、銅( $\rho=7.8\text{g/cm}^3$ )の4種の材料を使用して、反射波の反射率を変化させ、衝撃後の試験片の内部組織にどのような変化が生じるかについて、断面写真より調べる。

Table 2における実験番号II<sub>A</sub>-1～II<sub>A</sub>-4は衝撃方向がフラットワイズの場合であり、II<sub>B</sub>-1～II<sub>B</sub>-4はエッジワイズの場合である。

##### 4.3.1 反射引張り波が作用する場合の両衝撃方向による衝撃効果の比較

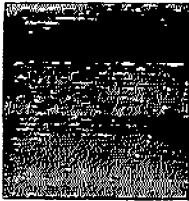
反射引張り波が作用するような条件下において、衝撃方向がフラットワイズの場合とエッジワイズの場合について衝撃効果を比較する。

実験II<sub>A</sub>-4はフラットワイズの場合であり、II<sub>B</sub>-4はエッジワイズの場合である。これらの場合はいずれもback up plateにベークライトを使用しているので、発泡スチロールを使用した場合と同様、反射引張り波が生ずる。

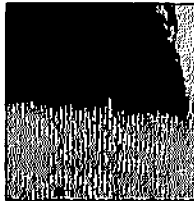
Fig. 6の写真は実験II<sub>A</sub>-4とII<sub>B</sub>-4に関する衝撃後の試験片の断面の状態を示したものである。図の(a)はフラットワイズの場合であり、FRPの内部に層間

Table 2 Experimental condition and variation of specimens after impact.  
(Case of Experiment II)  
dimension of specimen: 10mm×10mm×100mm

No. of experiment	Direction of impact	Weight of DDNP (g)	Charged explosive density (g/cm <sup>3</sup> )	Materials of back up plate	Kinds of reflective stress wave	Variation of specimens after impact	No. of Figure (photograph of section)
II <sub>A</sub> -1	flatwise	13.7	0.81	Steel	compressive wave	whitening of all sectional area divided into two layers	Fig. 7-(a)
II <sub>A</sub> -2		13.7	0.81	Aluminum	compressive wave		Fig. 7-(b)
II <sub>A</sub> -3		13.5	0.82	FRP	compressive wave		Fig. 7-(c)
II <sub>A</sub> -4		14.0	0.79	Bakelite	tensile wave		Fig. 6-(a)
II <sub>B</sub> -1	edgewise	13.8	0.80	Steel	compressive wave	whitening of partial area near the boundary surface	Fig. 7-(d)
II <sub>B</sub> -2		13.8	0.80	Aluminum	compressive wave		Fig. 7-(e)
II <sub>B</sub> -3		13.7	0.81	FRP	compressive wave		Fig. 7-(f)
II <sub>B</sub> -4		14.0	0.79	Bakelite	tensile wave		Fig. 6-(b)



(a) flatwise  
No. of Experiment II<sub>A</sub>-4



(b) edgewise  
No. of Experiment II<sub>B</sub>-4

Fig. 6 Cross-section of the specimen after impact.

はく離が生じ、2層に分層した状態が観察できる。図の(b)はエッジワイズの場合であるが、部分的な白化が認められるものの、はく離破断を起すまでには至っていない。以上の観察より、反射引張り波による損傷は、フラットワイズの場合の方がエッジワイズの場合より大きいという結果が得られた。

#### 4.3.2 反射圧縮波が作用する場合の両衝撃方向による衝撃効果の比較

反射圧縮波が作用するような条件下において、衝撃方向がフラットワイズの場合とエッジワイズの場合について衝撃効果を比較する。

実験 II<sub>A</sub>-1~II<sub>A</sub>-3はフラットワイズの場合であり、実験 II<sub>B</sub>-1~II<sub>B</sub>-3はエッジワイズの場合である。いずれの場合も back up plate に三種類の材料

(鋼、アルミニウム、FRP)を使用して、反射波として、圧縮波が作用するようにしている。(FRPをback up plate に使用する場合は、同一材質であるため、一応は完全に透過することになるが、さらに次の境界面、すなわち、地面とback up plateとの境界面からの反射効果もあるので、この場合も、試験片には、反射圧縮波が作用すると考えられる。)

Fig. 7の(a)~(f)に衝撃後の試験片の断面写真を示す。図の(a)~(c)はそれぞれ実験 II<sub>A</sub>-1~II<sub>A</sub>-3の結果に該当し、図の(d)~(f)はそれぞれ実験 II<sub>B</sub>-1~II<sub>B</sub>-3の結果に該当する。すなわち、(a)~(c)はフラットワイズの場合であり、(d)~(f)はエッジワイズの場合である。

いま、これらの断面写真より、白化の状態について、フラットワイズの場合とエッジワイズの場合を比較すると、次のようなことがいえる。

- (1) フラットワイズの場合は、ほぼ全面にわたり白化する。
- (2) エッジワイズの場合は、試験片の下面(back up plateとの境界面側)より白化し、白化部分と未白化部分が瞭然と区別される。

以上のように白化状態に関して、両者の間に顕著な差異が生じたことは注目すべき現象である。

いま、この現象について考察すると、フラットワイズの場合、樹脂層とガラスクロス層が交互に進行波に対向するが、局所的に見た場合、両層間には反射現象が起っており、このような反射現象が全面にわたり重畳するため、全面白化の現象が起るものと推察する。

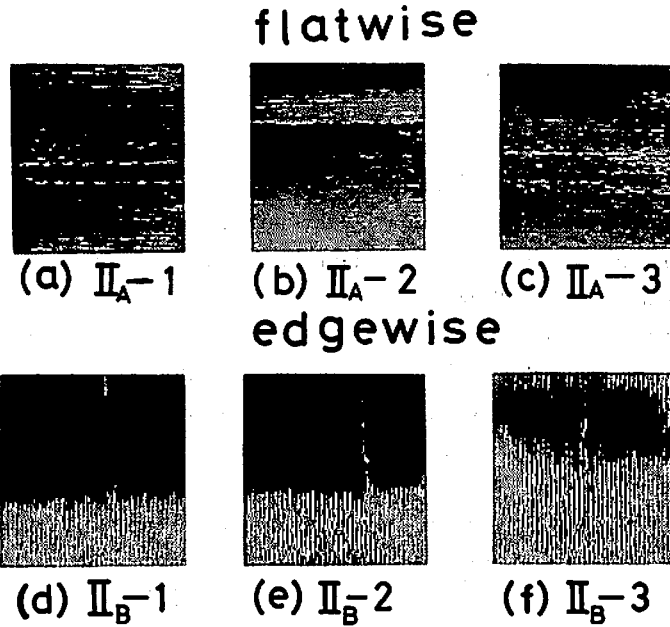


Fig. 7 Cross-section of the specimen after impact.

一方、エッジワイズの場合は、樹脂層もガラスクロス層も進行波の方向に平行に配列されているので、進行波は入射面より次の境界面まで同一材質の中を進行する。すなわち、圧力波は樹脂層中を伝ばするものと、ガラスクロス層中を伝ばするものとに分かれる。この場合、樹脂層中の圧力波の伝ば速度とガラスクロス層中の伝ば速度との間に差が生じる。したがって、これら二つの層は別々のひずみ変化の挙動を示すことになり、両層間に位置のずれが生じ、層間せん断による白化現象が起るものと考えられる。back up plateの側に白化が著しく起るのは、このような樹脂層とガラスクロス層のひずみ変化の差が、この部分において若しくなるものと考えられる。

##### 5. 結論

今回の実験により明らかにし得た事柄を要約すると、次のようになる。

- (1) フラットワイズ方向の衝撃において、FRP 内を透過した圧力波の境界面からの反射波が引張り波として作用する場合は、積層方向に平行に板状のはく離破断が生じる。
- (2) フラットワイズ方向の衝撃において、反射波が

圧縮波となるような条件下では、FRP 内部に白化の現象は起るが破壊することはない。ただし、FRP の引張り強度は低下する。例えば、本実験においては、back up plate が鋼板の場合、引張り強度の低下率は約15%となった。

(3) フラットワイズ方向の衝撃とエッジワイズ方向の衝撃とでは、次のような場合 破壊および破損の機構に著しい差異が生じる。すなわち、

境界面からの反射波が圧縮波として作用するような条件下では、フラットワイズ方向の衝撃の場合、FRP の内部には、全面白化の現象が認められる。これに対し、エッジワイズ方向の衝撃では、back up plate との境界面より部分的に白化する現象が認められる。

以上の結果は、FRP 耐爆設計において考慮されねばならない事柄と考える。

本研究の遂行にあたり、爆発衝撃実験にご協力いただいた日本化薬株式会社姫路工場の方々に深く謝意を表する。

##### 文 献

- 1) Sawada T., J. Industrial Explosives Soc. Jpn., 29, 116 (1968)

## Damage of FRP by Impact of Exploding

by Takashi INOUE\*, Tuguo SAWADA\*\* and Syuji MORIMOTO\*

When FRP subjects to the loading of strong pressure wave by the exploding, the body of FRP sustains considerable damage.

The object of this study is to clarify the mutual relation between the reflected wave at the boundary surface and the damage of FRP. The results obtained from these experiments are as follows.

- (1) Under the condition reflected tensile wave are released, Flatwise loading brings the fracture that is caused by delamination.
- (2) Under the condition reflected compressive wave are released,
  - (a) Flatwise loading brings the whitening all area of section, but the fracture does not occur.
  - (b) Edgewise loading brings the whitening partial area of section, and the total area of whitening in this case is smaller than that of flatwise loading. Under this loading condition, the impact resisting ability of FRP is very high.

(\*Junior College of Engineering, University of Osaka prefecture,  
3-1-4 Katuyamaminami, Ikuno, Osaka, 544, Japan.

\*\*College of Science and Engineering, University of Kinki,  
321 Kowakae, Higashiosaka, Osaka, 577, Japan.)

### ニュース

事故情報—ブースター工場と貯蔵庫の爆発事故  
ペルーのLima, Puente Piedra の Fabrica de  
Mechas S. A. のブースター工場と貯蔵庫で、1980年  
11月24日に火災から爆発となる事故が発生した。気温  
22℃、相対湿度80%、最高風速12ノットであった。事  
故発生箇所はペントライト融解・空気抽出装置で、温  
湯ジャケットを有する3つの融解加熱槽とダクトと電  
動抽出器からなる。事故発生時には融解加熱槽のジャ  
ケットの清掃中であり、午後2時35分、作業者がNo.3  
の融解加熱槽から真上にでている多量の煙を発見した。  
次いで火災は急激に拡大し、爆発となり、それによる  
白熱した飛散物がNo.3貯蔵庫におち火災となり、火災  
に続いて強い爆発となった。被災火薬類はペンスリッ  
ト15 ton と書かれているが、ブースター工場のみと

すれば被害は小さく、実態は不明である。この他No.  
3貯蔵庫の火薬類は各種と書かれている。被害は死  
傷者はなく、60mと100mの工場の破損が報告され  
ている。事故の原因は明らかではないが、火災はス  
イッチによるかまたは清掃作業中になされた人の不  
手際によるのではないかと想定される。(筆者注：  
火薬類停帯中にジャケット清掃 (Jacket cleaning)  
を行なうのは不可解である。) 今後の対策として、  
熱源として電気エネルギーの使用を避けること、保  
守作業手順の改善、大きいバリエードの建設、熱感  
知シャワーの設置等である。

出典：国際火薬類事故情報交換会報告

Accident Report No. 370 (衣山太郎)