

成果報告 7

高速その場観察に基づくCFRP積層板内部損傷の 破壊モードに関する考察

齊藤博嗣*1, 金原 勲*2

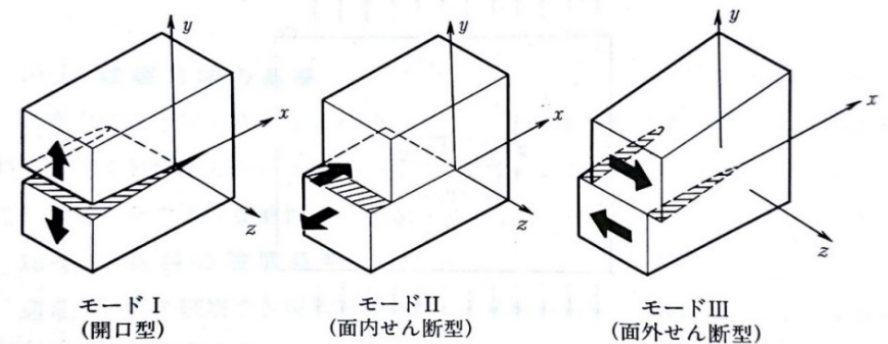
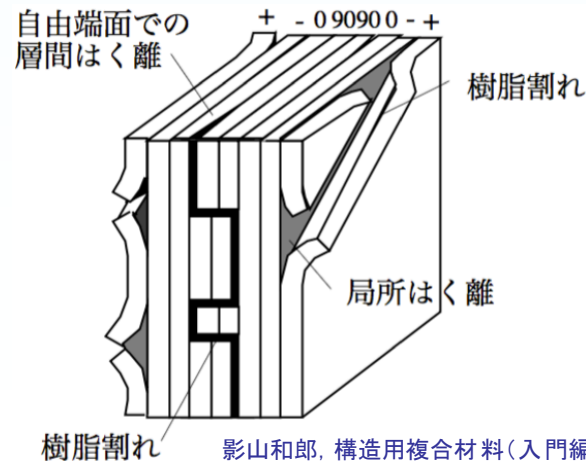
*1 金沢工業大学 工学部 機械系 機械工学科

*2 金沢工業大学 研究支援機構 顧問

面外衝撃による炭素繊維強化プラスチックの 内部損傷



- 炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)は、高比強度、高比弾性率を有する材料である。
- 一方、材料表面からわずかに目視可能なレベルの**面外衝撃**によって、CFRP積層板の内部には、樹脂割れや、層内・層間き裂、層間はく離などの損傷が生じ、特に**層間のき裂およびはく離は、圧縮強度の大幅な低下**を引き起す。
 - 層間の破壊モードは、開口型のモードⅠ、面内せん断型のモードⅡ、面外せん断型のモードⅢに大別される。



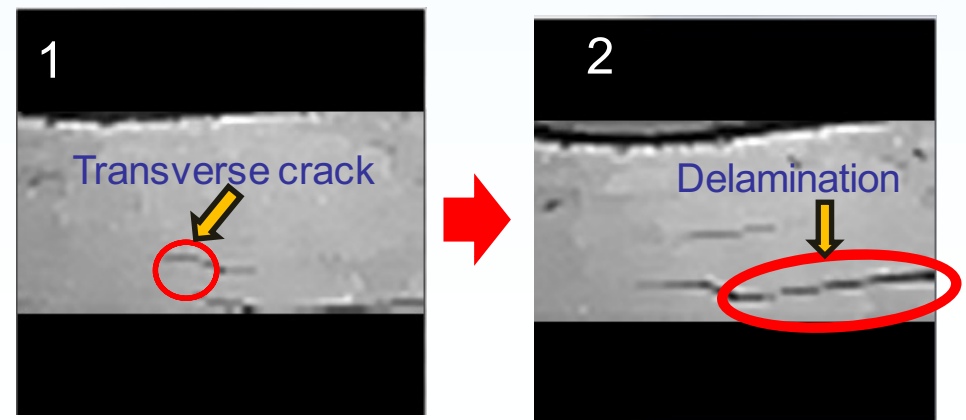
影山和郎, 構造用複合材料(入門編), 東京大学大学院講義資料, p.97.

宮入裕夫, 複合材料入門-基礎と応用-, 裳華房, 1997, p.222.

CFRPの衝撃損傷メカニズム



- そのため、CFRPの衝撃損傷メカニズムの解明に向け、非破壊観察や断面観察に基づく実験的アプローチや、損傷進展を考慮した有限要素解析などによる解析的アプローチを用いた研究が数多くおこなわれている。
- 従来の研究では、衝撃時に材料内部で生じる損傷は、基本的にモードIIや、モードIとモードIIの混合モードなど、「**支配的な破壊モード**」の存在が前提になってきた傾向がある¹⁻³⁾。
- しかし、実際にはき裂、はく離の発生メカニズムおよび進展プロセスは一様ではなく、進展過程において「**破壊モードの変化**」を伴うと考えられる。



- 1) T. Kusaka, et al., Key Engineering Materials, (1998), 143, 477-498.
- 2) 日下ら, 材料, (2001), 50(3), 235-241.
- 3) T. Kusaka, et al., J Phys IV France 10, (2000), Pr9-317-Pr9-322.

研究目的



- CFRPの内部損傷の進展は非常に高速であり，破壊モードの変化に注目し，その挙動を実験的に捉えた例は少ない.
- 本研究では，CFRP積層板に面外衝撃を与え，CFRP端面に現れる破壊進展挙動を高速その場観察する.
- これにより，CFRP積層板内部に生じる面外衝撃損傷の破壊モードについて考察をおこなう.

供試材料



- 本研究では0°方向と90°方向に配向したプリプレグを交互に積層したクロスプライ積層板を作製した.
 - プリプレグ: 東レ T800SC/#2592
 - 積層構成: $[0/90]_{6S}$
- オートクレーブ成形条件
 - 成形温度: 130 [°C]
 - 成形圧力: 0.3 [MPa]
 - 温度・圧力保持時間: 120 [min]
- 試験片
 - 長さ: 80 [mm]
 - 幅: 15 [mm]
 - 厚さ: 3 [mm]
 - 長手方向を0°方向とした.



評価方法



■ 落錘衝撃試験機を用いて、試験片に面外衝撃を与えた。

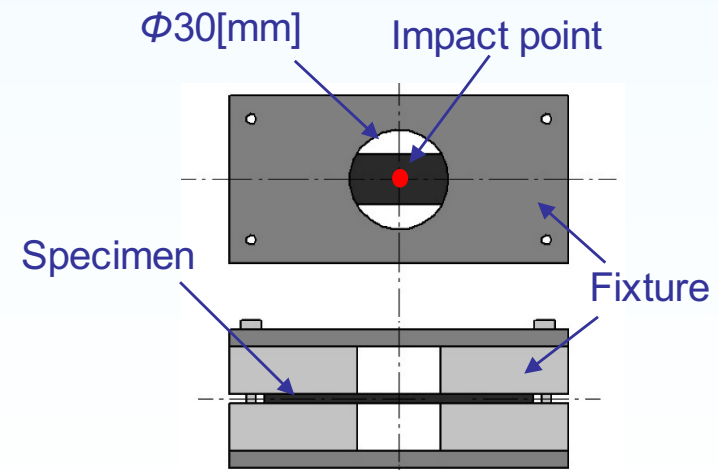
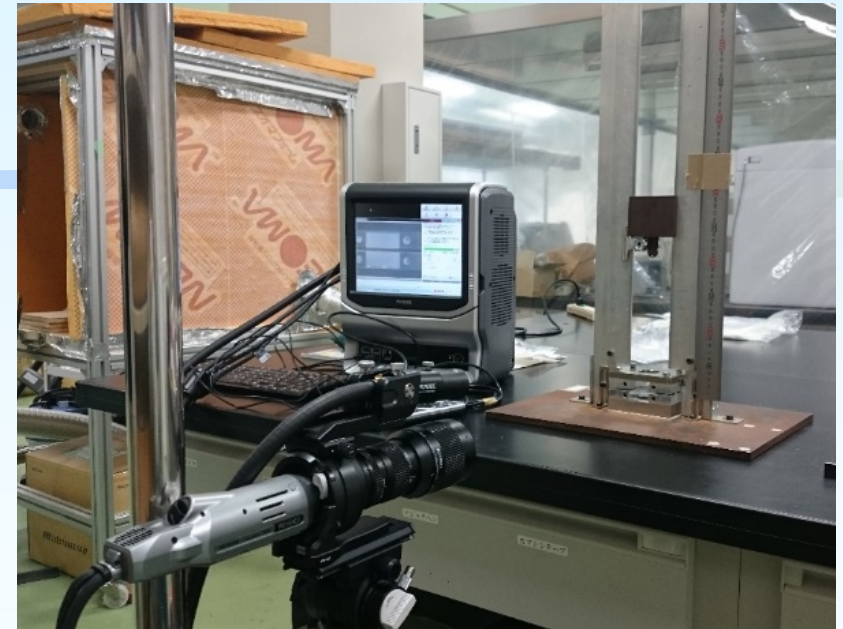
- 落錘子: 0.998 [kgf], 先端半球径: 16 [mm]
- 高速度カメラ: VW-9000, キーエンス
 - ◆ シャッタースピード: 1/900,000 [sec]
 - ◆ フレームレート: 230,000 [fps]

■ 試験片固定方法

- 試験片は幅30 [mm]の空隙を有する治具で挟み、四隅をボルトで固定した。

■ 試験条件

- 治具空隙中央部の試験片に落錘子を落下させた。
- 落下高さ: 20[cm], 40[cm], 60[cm]



| Drop height [cm] | Impact Velocity [mm/min] | Potential energy [J] |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 20 | 118,855 | 1.96 |
| 40 | 168,086 | 3.92 |
| 60 | 205,862 | 5.87 |

比較対象としての静的3点曲げによる評価



- 落錘衝撃により試験片に生じる損傷との比較対象として、同じ試験片を用いて静的3点曲げ試験をおこない、損傷進展挙動をその場観察した。
 - 試験機：サーボパルサー, EHF-EB-5KN-10LAL, 島津製作所
 - 高速度カメラ: VW-9000, キーエンス
 - ◆ シャッタースピード: 1/900,000 [sec]
 - ◆ フレームレート: 57,000 [fps]
- 試験条件
 - 負荷速度: 5 [mm/min]



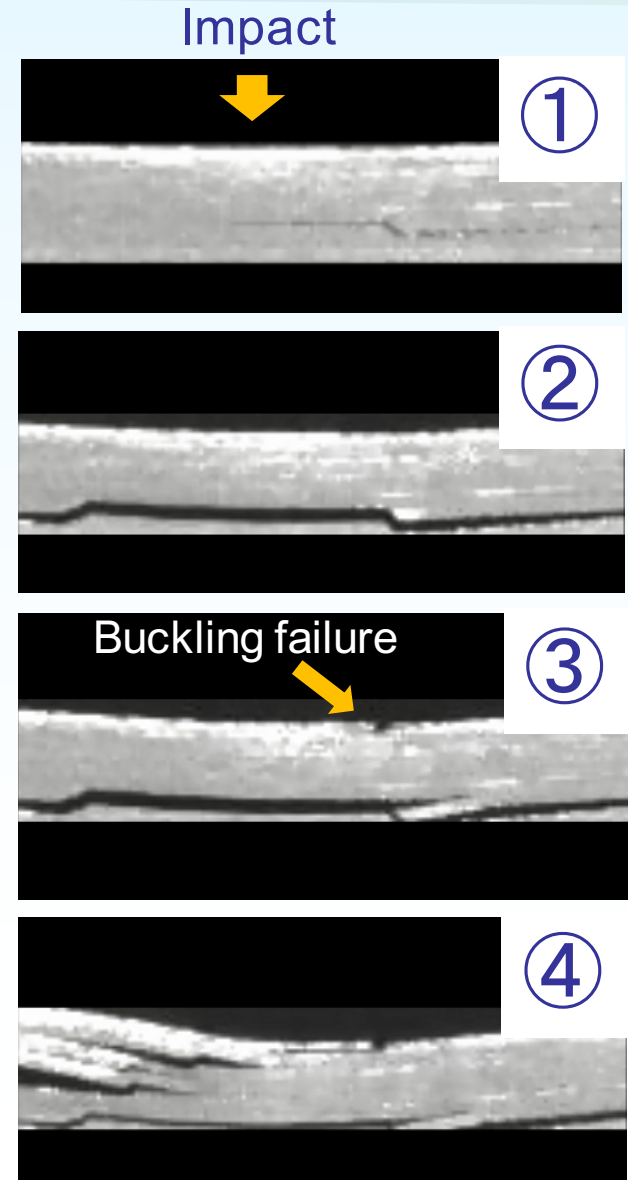
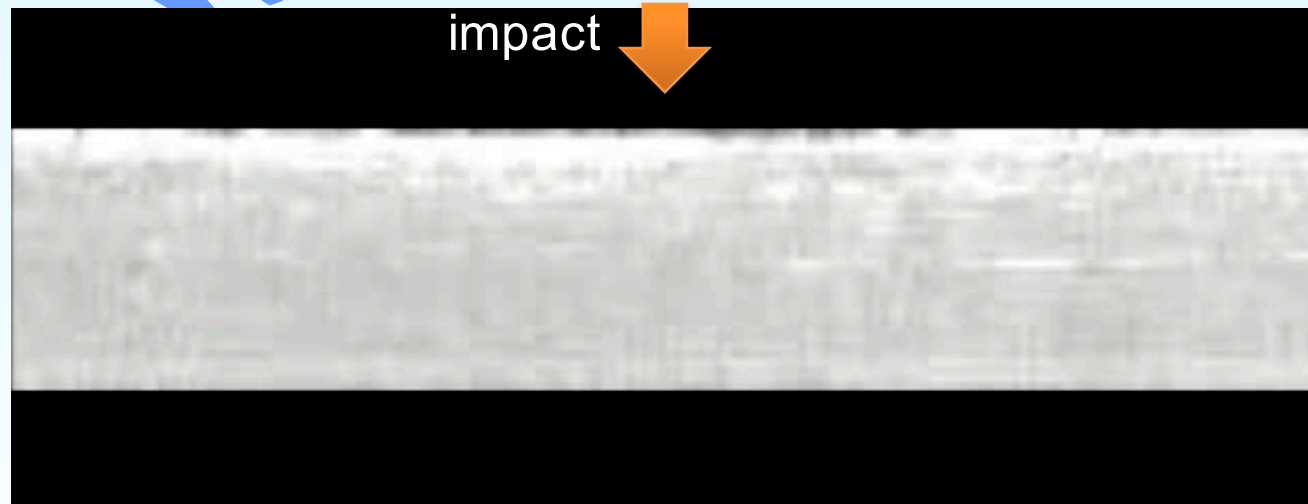
静的3点曲げによる損傷進展挙動



- 中間層付近にトランスバースクラックが発生した.
- 試験後の試験片端面では、トランスバースクラックを起点とするせん断型(モードII型)の層間はく離が観察された.
- したがって、静的な面外負荷では、モードII型層間はく離が支配的であることが明らかである.



落錘衝撃による損傷進展挙動

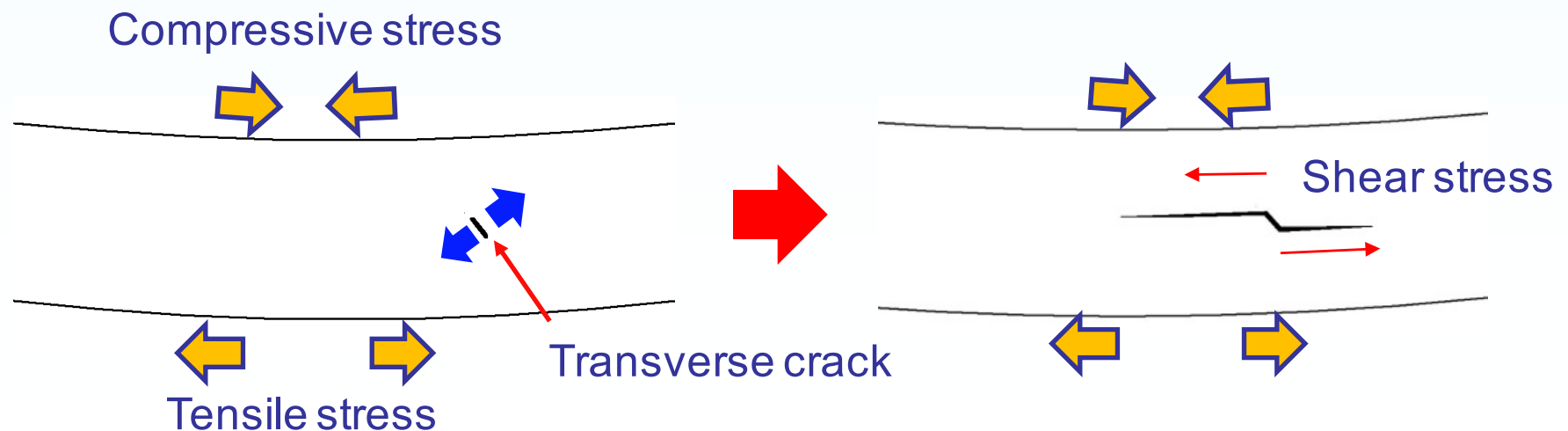


- ① 静的3点曲げと同様に、トランスバースクラックが発生し、それを起点にモードⅡ型の層間はく離が進展する。
- ② ①で生じた層間はく離が、モードⅠ型の開口を生じる。
- ③ 試験片の圧縮側で局所的な微小座屈が生じる。
- ④ ③とほぼ同時に、複数の層間でモードⅠ型の層間はく離が生じる。

面外衝撃による破壊モードに関する考察



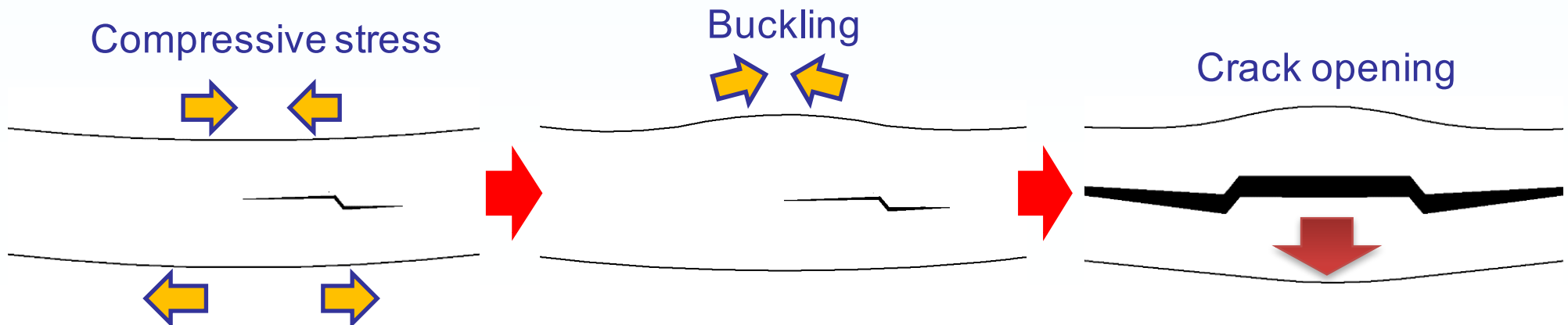
- 静的曲げ試験と同様に，圧子接触側には圧縮応力，試験片下部には引張応力が作用する。
- そのため，中間層付近にせん断応力が生じ，せん断応力場に生じる「**引張の主応力**」によって**トランスバースクラック**が発生する。
- このき裂を起点に，せん断応力場により**モード II 型の層間はく離**が**進展**すると考えられる。



面外衝撃による破壊モードに関する考察



- 層間はく離により，試験片は厚さ方向に局所的な分離を生じる.
- そのため，板厚の薄い層間はく離部分では，圧縮応力により「座屈」が生じやすい状態となる.
- 座屈の発生により，層間はく離部では瞬間的に試験片の引張側と圧縮側ではりの長短が生じ，これにより，引張側で厚さ方向に開口する力が生じる.
- したがって，座屈発生に伴い，モード I 型の層間はく離が生じると考えられる.



本研究のまとめ



- 従来、「支配的な破壊モード」の存在が前提になってきた傾向があるCFRPの衝撃損傷について、高速その場観察をおこなった結果、次の結果および考察が得られた。
 - 落錘による面外衝撃により、CFRP積層板の内部にはトランスバースクラックが生じ、それを起点にモードⅡ型の層間はく離が発生したと考えられる。
 - その後、層間はく離部で座屈が生じることにより、モードⅠ型の層間はく離が生じたと考えられる。
- したがって、CFRPの衝撃損傷では、**破壊モードの変化を考慮した破壊メカニズムの考察**が必要であると考えられる。

トランスバースクラック → モードⅡ型層間はく離 → モードⅠ型層間はく離