平成23年度　修士論文 発表（2012.02.07）

CFRTPの破壊メカニズムと補修性に関する研究

Research on fracture mechanism and repairability of CFRTP

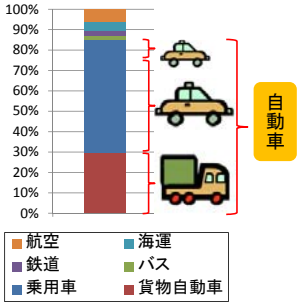
平成24年2月
東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻
田丸雅智
指導教員　髙橋淳　教授

発表の流れ

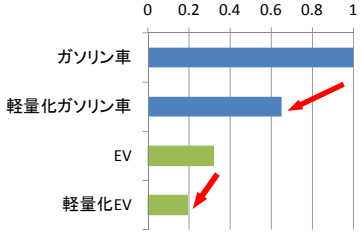
1. 研究背景
2. 破壊メカニズムの評価（静的試験）
3. リペアの評価（静的試験）
4. 破壊メカニズムとリペアの評価（動的試験）
5. 結論

研究の着眼点①

エネルギー消費量内訳('07)
(日本の運輸部門)



車体軽量化効果（CO_2排出量）
※車体軽量化率50%



超軽量車の開発により、自動車のエネルギー消費量とCO2を大幅削減

source: EDMC 2009 エネルギー・経済統計要覧　　source: 菅康博：東京大学工学部卒業論文，2006

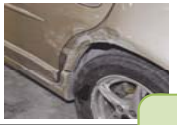
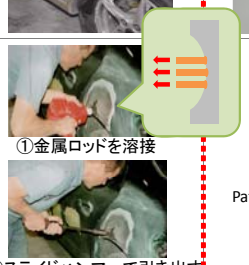
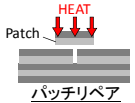
研究の着眼点②

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics：炭素繊維強化プラスチック)

CFRP	CFRTP
炭素繊維 ＋ 樹脂（熱硬化性） (Epoxy)	炭素繊維 ＋ 樹脂（熱可塑性） (polypropylene)
不可逆性 × 高速成形 → 高コスト化 × リサイクル性 × 補修性	可逆性 ○ 高速成形 →低コスト化 ○ リサイクル性 ○（？）補修性

■ リペアによって材料のロス、自動車の高コスト化を防ぐ
→ 量産車にとってリペア技術の確立は必須

リペアとは

Steel車のリペア	CFRP航空機のリペア	CFRTPのリペア
		
 ①金属ロッドを溶接 ②スライドハンマーで引き出す（自動車板金修理 完全ガイド より）	スカーフリペア パッチリペア	熱溶着技術を用いたリペアの可能性 熱リペア  パッチリペア

→ 高コスト、高度な技術
→ 接着剤の特性が影響

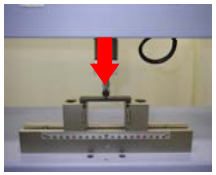
→ 低コスト、簡易的
→ 損傷材とパッチが一体化

研究の目的

- CFRTPの基礎的な破壊メカニズムの評価
- CFRTPの補修性の定量的評価

発表の流れ

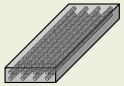
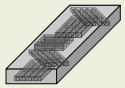
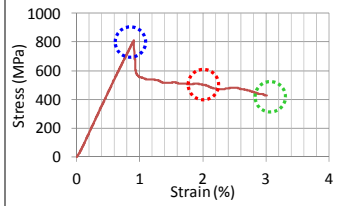
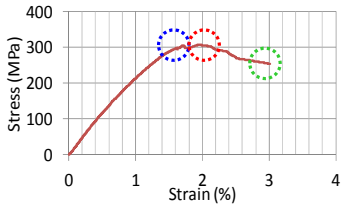
1. 研究背景
2. 破壊メカニズムの評価（静的試験）
3. リペアの評価（静的試験）
4. 破壊メカニズムとリペアの評価（動的試験）
5. 結論



静的三点曲げ試験

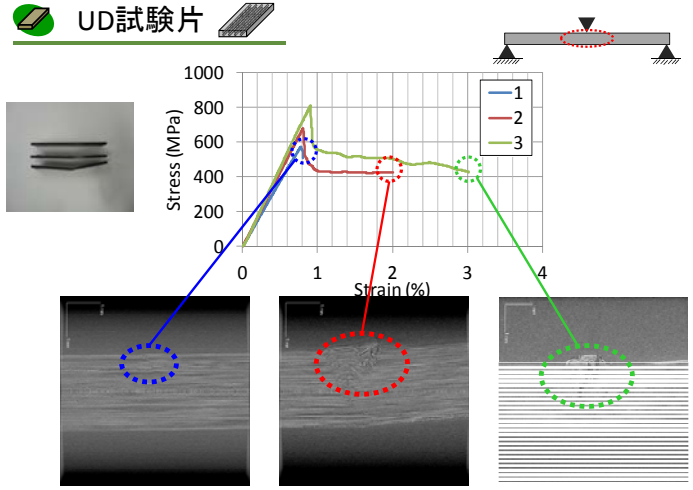
X線装置

使用した試験片

UD試験片 (Uni-Directional carbon fiber reinforced plastics)	CTT試験片 (Chopped carbon fiber Tape reinforced Thermoplastics)
 (V_f:50 %、2 mm×15 mm×80 mm)	 (V_f:50 %、2 mm×30 mm×100 mm)
	

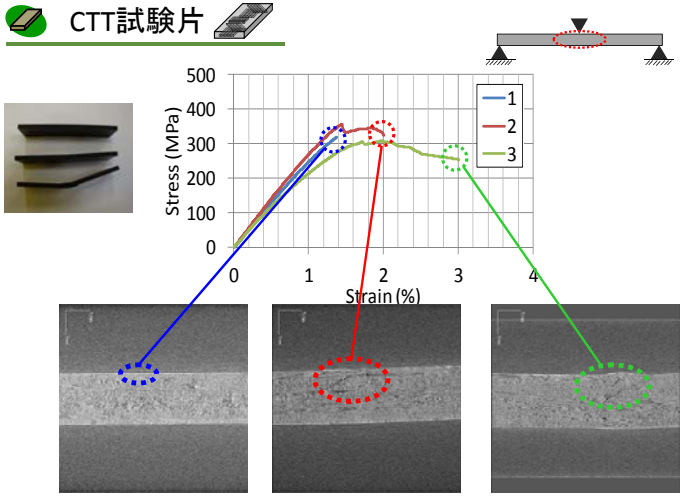
※ UD試験片、CTT試験片ともに母材はPP、プレス成形により作成。
※ 試験片寸法は日本工業規格（JIS）による。

UD試験片



■ 圧縮側で生じる座屈によって破壊がはじまり、座屈領域が広がっていくことで延性的に破壊が進行し、最終的に圧縮側で繊維破断が生じて破壊する。

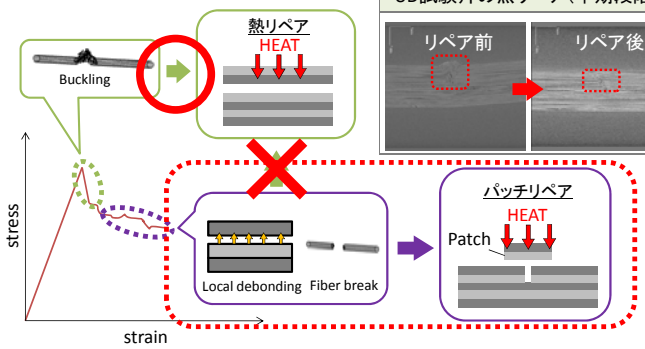
CTT試験片



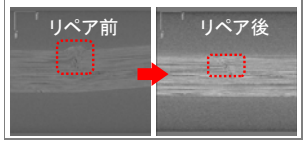
■ 圧縮側で座屈が生じた後、局所的な繊維破断や繊維－樹脂間の剥離を伴いながら延性的に破壊が進行していく。

CFRTPの破壊メカニズム

CFRTPの応力－歪線図の概念図



UD試験片の熱リペア（中期段階）



■ 繊維損傷により、破壊が進むと熱リペアによる回復が困難。

➡ 破壊の中期段階以降でのパッチリペアの評価を行う。

発表の流れ

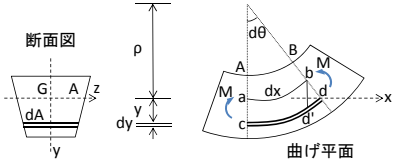
1. 研究背景
2. 破壊メカニズムの評価（静的試験）
3. リペアの評価（静的試験）
   3.1 リペアの定義
   3.2 パッチリペア
      3.3.1 理論による評価
      3.3.2 実験による評価
4. 破壊メカニズムとリペアの評価（動的試験）
5. 結論

➡ 破壊の中期段階以降でのパッチリペアの評価を行う。

リペアの定義

■ 何をもってリペア完了とするか？
→ 他の部材でのリペア完了の基準は曖昧。
→ リペアを想定しているボンネットやドアなどは主に曲げを受ける。

梁の単純曲げ



$$\varepsilon = \frac{d'd}{cd'} = \frac{y\,d\theta}{dx} = \frac{y}{\rho} \quad \left(\because \frac{dx}{d\theta} = \rho\right)$$

$$\sigma = E\frac{y}{\rho}$$

以上より、

$$M = \int_A \sigma \cdot y\ dA = \frac{E}{\rho}\int_A y^2\ dA$$

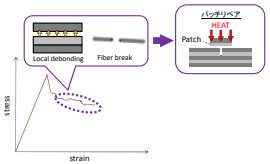
$$\therefore M = \frac{EI}{\rho} \quad \left(I = \int_A y^2\ dA \right)$$

曲げ剛性（曲がりにくさの指標）

■ 損傷を受け曲げ剛性が低くなった部材は変形しやすくなったり座屈を起こしやすくなったりし、大きな破壊現象につながる危険性がある。
→ 曲げを受ける部材のリペアにおいては、曲げ剛性の回復が最優先課題。
→ 第2の課題として曲げ強度の回復率についても検討。

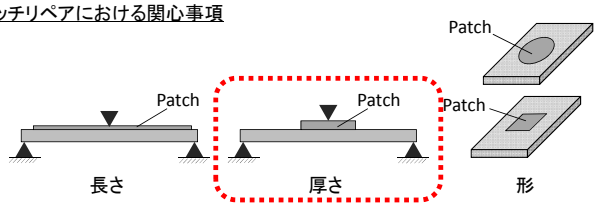
発表の流れ

1. 研究背景
2. 破壊メカニズムの評価（静的試験）
3. リペアの評価（静的試験）
   3.1 リペアの定義
   3.2 パッチリペア
      3.3.1 理論による評価
      3.3.2 実験による評価
4. 破壊メカニズムとリペアの評価（動的試験）
5. 結論



パッチリペアの目的

パッチリペアにおける関心事項



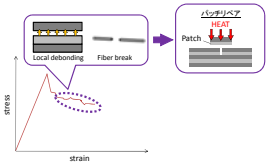
目的

力学特性を回復するために必要なパッチ厚さを予測できるようになりたい。

→ パッチリペアのモデルを構築し、力学特性とパッチ厚さの関係を理論的に評価。
→ 理論をもとに実験。
→ 実験結果を反映し、パッチリペアの基礎理論を確立。

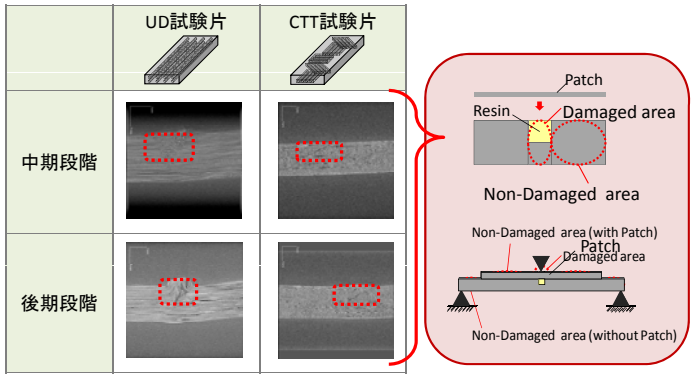
発表の流れ

1. 研究背景
2. 破壊メカニズムの評価（静的試験）
3. リペアの評価（静的試験）
   3.1 リペアの定義
   3.2 パッチリペア
      3.3.1 理論による評価
      3.3.2 実験による評価
4. 破壊メカニズムとリペアの評価（動的試験）
5. 結論



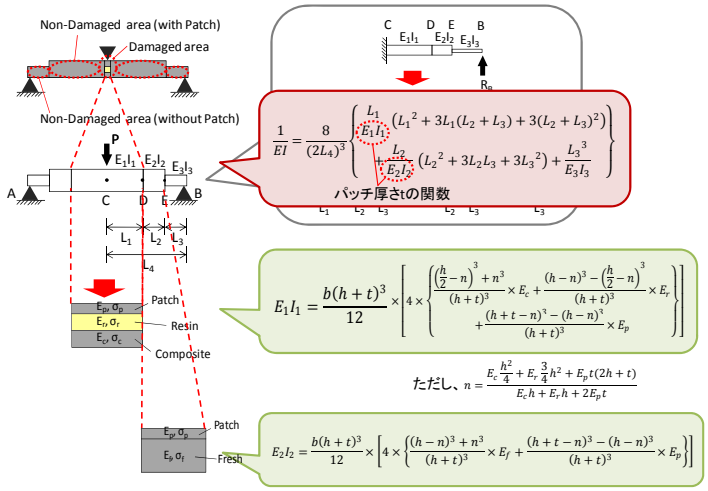
モデルの構築

■曲げ剛性とパッチ厚さの関係をモデル化して評価。



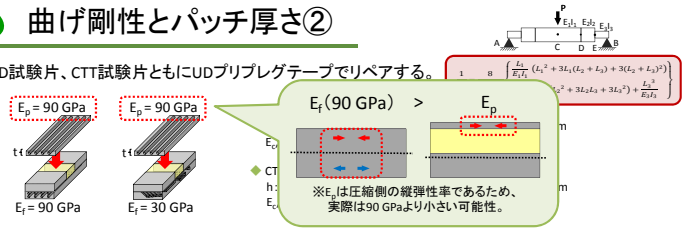
■ 板厚の半分近くまで破壊している。
→ 板厚の半分までの損傷領域を樹脂層と仮定。

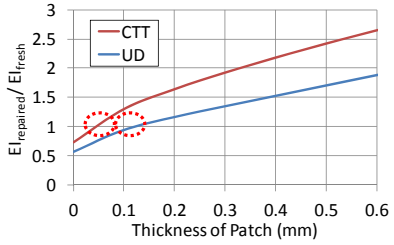
曲げ剛性とパッチ厚さ①



曲げ剛性とパッチ厚さ②

■UD試験片、CTT試験片ともにUDプリプレグテープでリペアする。

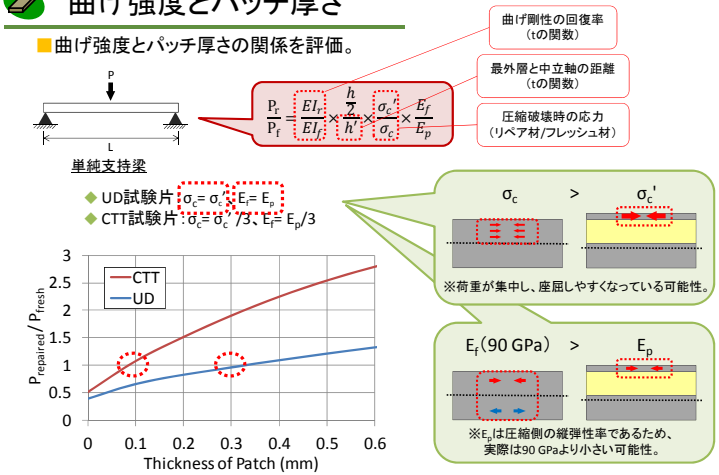




■ フレッシュ材と同等の曲げ剛性を回復するには、理論的に
UD試験片：約0.1 mm以上、CTT試験片：約0.05 mm以上のパッチ厚さが必要。

曲げ強度とパッチ厚さ

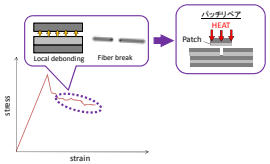
■曲げ強度とパッチ厚さの関係を評価。



■ フレッシュ材と同等の曲げ強度を回復するには、理論的に
UD試験片：約0.3 mm以上、CTT試験片：約0.1 mm以上のパッチ厚さが必要。

発表の流れ

1. 研究背景
2. 破壊メカニズムの評価（静的試験）
3. リペアの評価（静的試験）
   3.1 リペアの定義
   3.2 パッチリペア
      3.3.1 理論による評価
      3.3.2 実験による評価
4. 破壊メカニズムとリペアの評価（動的試験）
5. 結論



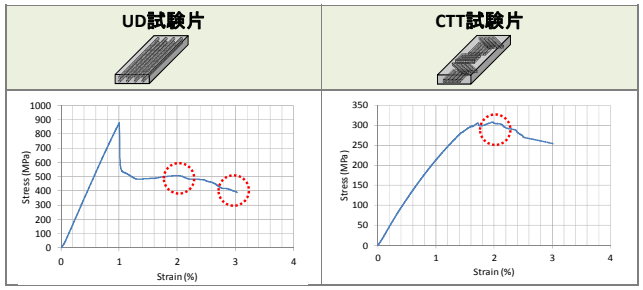
パッチリペアの方法

Condition
- 加熱温度：200～230℃
- 加熱時間：1～2分
- 試験片数：各3本

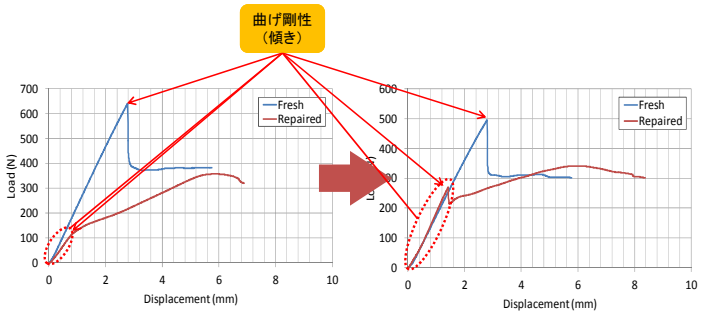
実験の流れ

■曲げ剛性・曲げ強度の回復率とパッチ厚さの関係を評価。

① UD試験片の中期段階でパッチリペア：パッチ0～6枚（0～約0.6 mm）
② UD試験片の後期段階でパッチリペア：パッチ0、3枚（0、約0.3 mm）
③ CTT試験片の中期段階でパッチリペア：パッチ0、2枚（0、約0.2 mm）



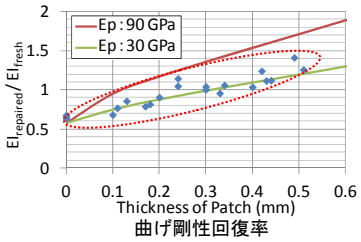
UD試験片のパッチリペア（破壊の中期段階）

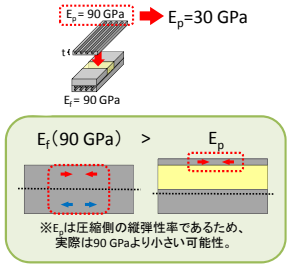


パッチなし（熱リペア）　　パッチ3枚でのリペア

■ 曲げ剛性はパッチ3枚（約0.3 mm）でフレッシュ材と同等まで回復。

UD試験片のパッチリペア（破壊の中期段階）②

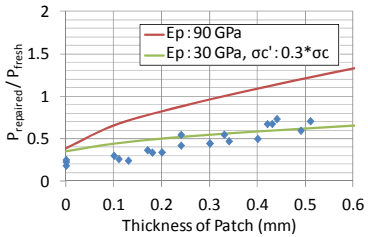


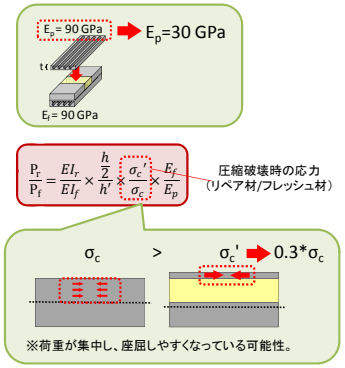


■理論値との乖離。
→パッチの縦弾性率を1/3にした場合の理論値と傾向が一致。
→複合材料では圧縮側の縦弾性率が低いため妥当な仮定といえるが、のちにCTT試験片においても検討を行う。

■ 修正した理論より、フレッシュ材と同等の曲げ剛性を回復するためには0.3 mm以上のパッチ厚さが必要であることが分かった。

UD試験片のパッチリペア（破壊の中期段階）③





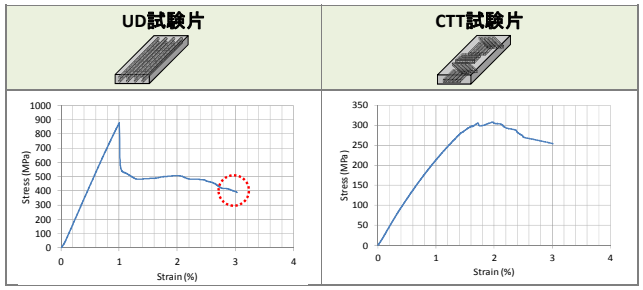
→パッチの縦弾性率を1/3、圧縮破壊時の応力を一律0.3 σ_c'にした場合の理論値とおおよそ傾向が一致。

■ 修正した理論より、フレッシュ材と同等の曲げ強度を回復するためには1.7 mm以上のパッチ厚さが必要であることが分かった。

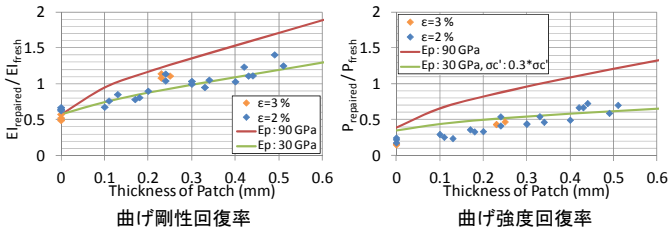
実験の流れ

■曲げ剛性・曲げ強度の回復率とパッチ厚さの関係を評価。

①UD試験片の中期段階でパッチリペア：パッチ0～6枚（0～約0.6 mm）
② UD試験片の後期段階でパッチリペア：パッチ0、3枚（0、約0.3 mm）
③CTT試験片の中期段階でパッチリペア：パッチ0、2枚（0、約0.2 mm）



UD試験片のパッチリペア（破壊の後期段階）



■ 中期・後期段階では回復率がほぼ同じ。
→破壊の段階によらず同じパッチ厚さで安定したリペア結果が得られるため、現場でのリペアに有利。

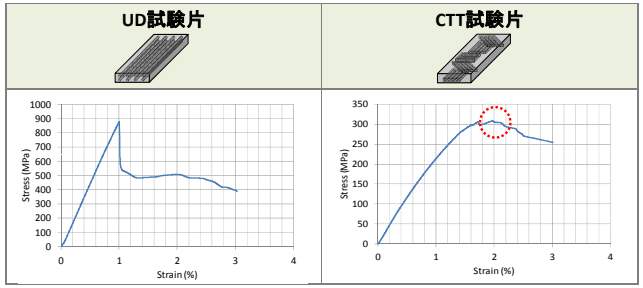
➡ CFRTPは優れた補修性をもつ材料であることが示された。

➡ UD試験片における最適なパッチ厚さを予測できるようになった。

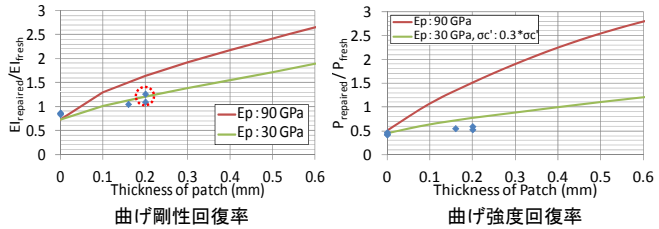
実験の流れ

■曲げ剛性・曲げ強度の回復率とパッチ厚さの関係を評価。

① UD試験片の中期段階でパッチリペア：パッチ0～6枚（0～約0.6 mm）
② UD試験片の後期段階でパッチリペア：パッチ0、3枚（0、約0.3 mm）
③ CTT試験片の中期段階でパッチリペア：パッチ0、2枚（0、約0.2 mm）



CTT試験片のパッチリペア（破壊の中期段階）

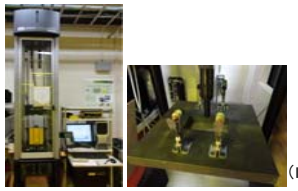


■ UD試験片と同じモデルが適用可能であり、理論の妥当性が示された。
→ CTT試験片においてフレッシュ材と同等の曲げ剛性・曲げ強度を回復するためにはそれぞれ0.1 mm以上、0.4 mm以上のパッチ厚さが必要。
■ UD試験片での知見から、後期段階でも同じ結果が得られると予測される。

➡ 静的な破壊現象における材料ごとの最適なパッチ厚さを予測できるようになった。

発表の流れ

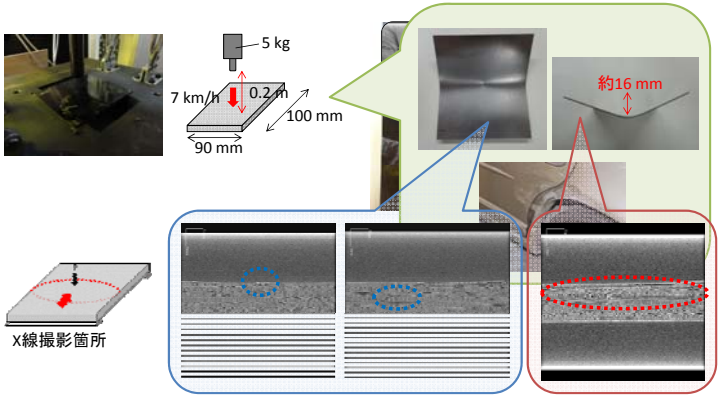
1. 研究背景
2. 破壊メカニズムの評価（静的試験）
3. リペアの評価（静的試験）
4. 破壊メカニズムとリペアの評価（動的試験）
5. 結論



（Instron社「Dynatup」）

➡ 動的な衝突において最適なパッチ厚さを予測できる基礎理論を確立する。

破壊メカニズム（動的試験）

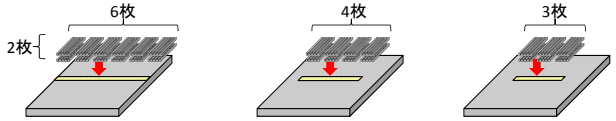


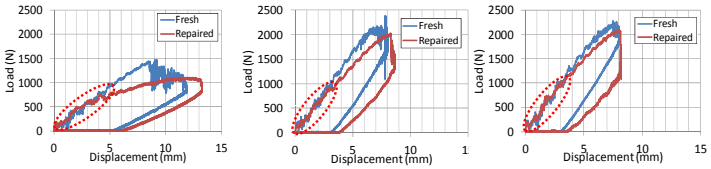
■ 圧縮側で厚さ方向に半分程度まで破壊が進行。
→ 静的試験における破壊の中期・後期段階とほぼ同じ破壊メカニズム。
→ 静的試験と同じ理論によるパッチリペアが可能と考えられる。

CTT板のパッチリペア（動的試験）

リペア後の外観

パッチ枚数
- 厚さ方向：2枚（約0.2 mm）※静的試験と同じ条件
- 幅方向：損傷範囲を覆う枚数





■ 損傷の幅によらず、曲げ剛性・曲げ強度ともに予測どおり回復。
→ 動的試験においても静的試験におけるモデルが適用可。

➡ 動的な衝突においても最適なパッチ厚さを予測できるようになった。

発表の流れ

1. 研究背景
2. 破壊メカニズムの評価（静的試験）
3. リペアの評価（静的試験）
4. 破壊メカニズムとリペアの評価（動的試験）
5. 結論

結論

■ CFRTPの基礎的な破壊メカニズムが明らかになった。
→ 圧縮側で破壊するCFRTPは、引張側へのアクセスが厳しいドアなどの部材をリペアする際も容易にリペアできる。

■ CFRTPの高い補修性が明らかになった。
→ 破壊の段階に関わらず、簡易的な方法により同じパッチ厚さで安定したリペア結果が得られることが分かった。

■ パッチリペアの基礎理論が確立された。
→ モデルを構築し、理論と実験の両面から検証を行った。これにより、力学特性を回復するために必要なパッチ枚数を理論的に予測できるようになった。

➡ 今後は、より安定したリペア技術の開発や、本研究で構築した理論の実構造物への応用が求められる。

ありがとうございました。