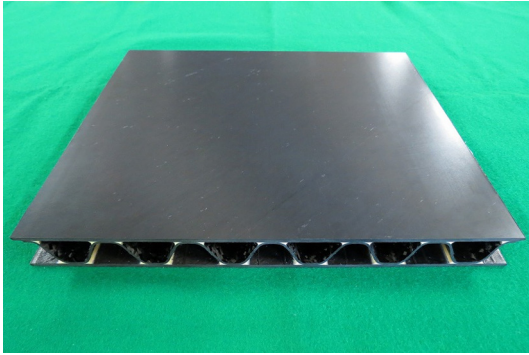


CFRP モノリシックサンドイッチ構造の開発

Development of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) Monolithic Sandwich Construction



小山 貴之*¹
Takayuki Koyama

阿部 俊夫*²
Toshio Abe

高木 清嘉*³
Kiyoka Takagi

将来の航空機において軽量かつ低コストの構造を実現するためには、炭素繊維複合材料(CFRP)を用いた大型一体成形部品製造による部品点数の低減とボルトレス化がキー技術となる。このうち、大型一体成形部品については高い剛性を得やすいサンドイッチ構造の適用が有効である。本稿では、従来のハニカム構造よりも軽量かつ腐食しない CFRP モノリシックサンドイッチ構造について論じる。特に、本構造のコーナーフィレット(Corner fillet; コーナー部のすみ肉)に着目し、接着引き剥がし強度向上効果を数値解析により明らかにした。また、一体成形プロセスによる試作品を製作し、良好な品質であることを確認した。

1. はじめに

航空機構造には数多くの部品及びそれらを組み立てるための膨大な数(1機あたり数万本～数十万本)のファスナが使用されており、部品点数の低減及びボルトレス化(ファスナを使用せずに組み立てる)が、軽量化及び低コスト化を実現するためのキーとなる技術である。

軽量化及び低コスト化を実現するためには、部品の一体化、特に一次構造部材の大型部品一体化が有効である。本稿では、部品の一体化を進める上で重要となる、高効率の面外せん断剛性を有する高剛性パネル構造について論じる。

2. CFRP モノリシックサンドイッチ構造へのモチベーション

近年、航空機構造にはその比強度の高さ等の理由から CFRP の適用が急速に広がっているが、実際に適用されている CFRP 構造は、そのほとんどが外板に補強材(ストリング:縦通材/フレーム等)をコボンド(Co-bond)結合又はボルト結合しており、金属材料を使用した場合と同様の構造様式を採用している。

将来の航空機構造では、従来の構造様式に代わるものとして、サンドイッチ構造の適用が有望であると考えられる。サンドイッチ構造は、それ自身で面内/面外せん断荷重、面外圧縮荷重、及び軸力を受け持つことができ、さらに面外剛性が高い(座屈強度が高い)という特徴を有するため、フレーム間ピッチ/ストリング間ピッチを広く取ることできるという利点がある。すなわち、フレームやストリングといった荷重を受け持つ部材を減らすことで、軽量かつ部品組立コストの低減につながると思われる。

*1 防衛・宇宙ドメイン 航空機事業部 航空機技術部 工博

*2 防衛・宇宙ドメイン 航空機事業部 航空機技術部 首席技師

*3 防衛・宇宙ドメイン 航空機事業部 航空機技術部 首席チーム統括

サンドイッチ構造としては、一般的にはハニカムサンドイッチ構造がよく知られており、ハニカムコアの材料は主としてアラミド繊維(ノームックス®)やアルミニウムである。しかしながら、両者とも長期の運用に伴う環境曝露に起因する、コアの吸湿やコア内部への浸水による腐食等の損傷が問題となっている。コアの腐食や吸湿は強度低下を引き起こすため、運用継続のためには定期的な修理が必要であり、ライフサイクルコストの増加要因にもなっている。

これに対し、サンドイッチ構造のコアとして CFRP モノシックコアを適用することは、腐食をなくすことにつながるため、ライフサイクルコストの観点において大きな利点となる。

CFRP モノシックコアの比強度について、[図1](#)にノームックス®コア、アルミハニカムコア、CFRP 積層板、及びCFRP 波板(モノシックコア)の重量比較を示す。各重量は一般的な主翼荷重である面外せん断荷重が作用するものとして計算した値である。

[図1](#)から同一強度で比較した場合、CFRP 波板の重量は一般的なハニカムやCFRP 積層板より軽量となる。すなわち、最も効率的に面外せん断荷重を受け持つことができることが分かった。

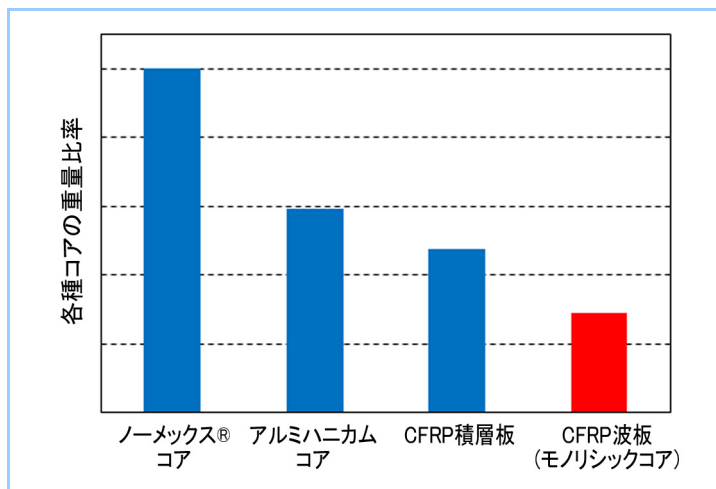


図1 面外せん断荷重作用下での各構造様式の重量比較

3. CFRP モノシックサンドイッチ構造の設計

本稿においては、高剛性パネルとして[図2](#)に示すような段ボール等に広く用いられている波板形状のCFRP モノシックコアを有するサンドイッチ構造について述べる。

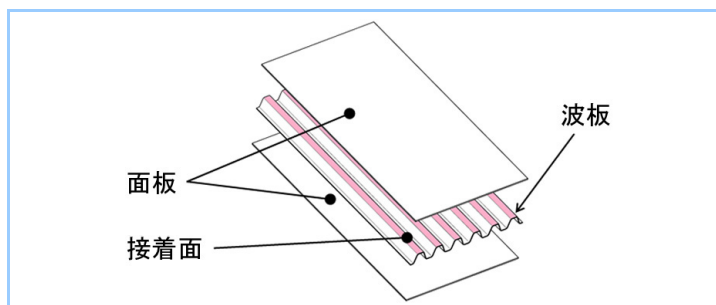


図2 CFRP モノシックサンドイッチ構造

CFRP 製の面板及び波板から構成されるモノシックサンドイッチ構造の概要を示す。

ハニカムとは異なり、波板は強い面内異方性を有する。その特徴から、高い剛性を有する方向に縦通材としての機能の軸力を受け持たせることが可能であり、また、面外せん断荷重を伝達する際に重要となる面板とコアとの接着面を十分に取ることも利点である。

一般的に知られているように、この種の構造は接着層の引き剥がし強度がクリティカルであり、接着層の応力集中を低減することが引き剥がし強度向上のための重要な要素となる。

接着層の応力集中を低減する方法として、接着層の終端部にコーナフィレットを適用することが有効であると考えられるため、本稿では数値解析により CFRP モノリックサンドイッチ構造におけるコーナフィレットの効果について検討を行った。

図3に有限要素解析モデルを示す。一つはコーナフィレット有りのモデルで、もう一つはコーナフィレット無しのモデルである。

解析モデルは主に六面体立体要素でモデル化し、面板と波板は CFRP 擬似等方積層板とした。また、コーナフィレットは接着剤相当の材料特性とした。ソルバー (solver) は MSC.Nastran の線形解析機能を使用した。

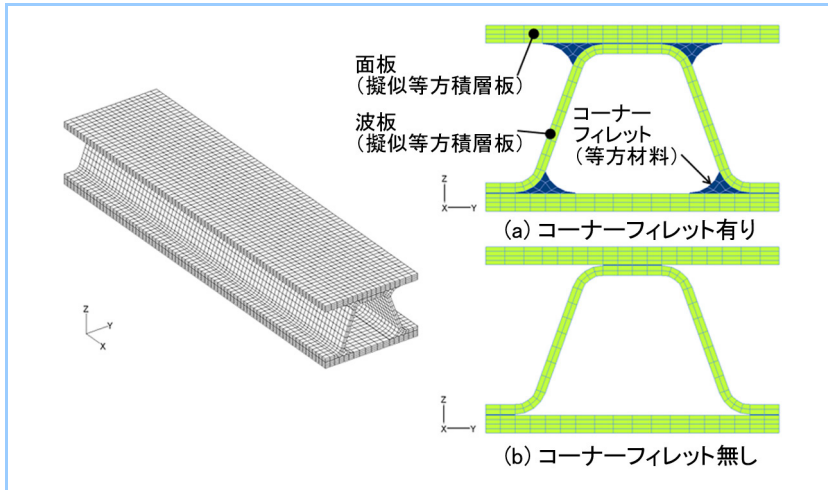


図3 有限要素解析モデル概要

解析結果として、図4に示す複数の荷重条件下においてコーナフィレット有無による接着層の面外引き剥がし応力 (ピーク値) を比較したものを表1に示す。表1では、コーナフィレット無しの場合の応力値を 1.00 として無次元化した値を示す。

コーナフィレット有りの場合に値は 0.65 以下となっており、特に内圧に対しては 0.16、横方向面外せん断荷重に対しては 0.24 であり、コーナフィレットが面外引き剥がし応力低減に非常に有効であることが分かった。

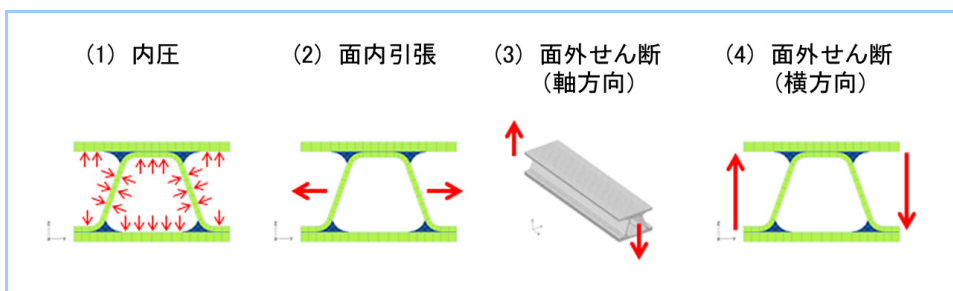


図4 有限要素解析を実施した荷重条件

表1 接着層の面外引き剥がし応力の比較

荷重条件	接着層の面外引き剥がし応力 (ピーク値)		ピーク値の 低減割合
	(a) コーナフィレット有り	(b) コーナフィレット無し	
(1) 内圧	0.16	1.00	84%
(2) 面内引張	0.65	1.00	35%
(3) 面外せん断(軸方向)	0.60	1.00	40%
(4) 面外せん断(横方向)	0.24	1.00	76%

4. CFRP モノシックサンドイッチ構造の試作

前項にてコーナーフィレットが CFRP モノシックサンドイッチ構造の接着引き剥がし強度向上に有効であることを明らかにした。

これを受けて、コーナーフィレットを有する CFRP モノシックサンドイッチ構造を試作した。試作した CFRP モノシックサンドイッチ構造を図5に示す。面板には一方向プリプレグ、波板には織物プリプレグ、コーナーフィレットには接着剤を使用し、また、成形にはオートクレーブを使用した一体成形プロセスを適用した。

試作品に対する目視検査の結果、母材(面板、波板)及び接着面とも良好な品質であることを確認した。本試作により、CFRP モノシックサンドイッチ構造を航空機構造へ適用するための目途付けが得られた。

今後、将来の航空機構造への適用に向けて、より安定した成形プロセスの確立及び生産性の向上を図る必要がある。

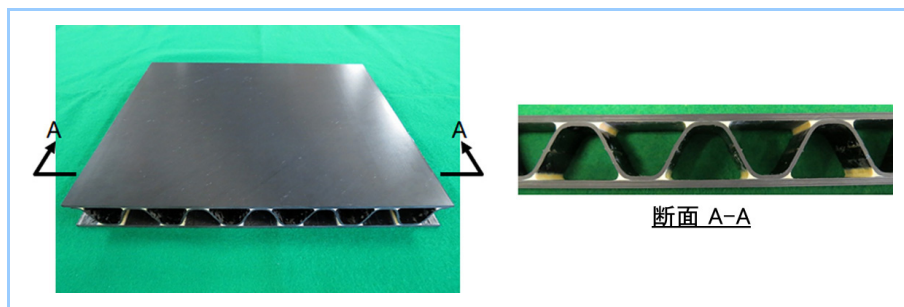


図5 試作した CFRP モノシックサンドイッチ構造

5. まとめ

軽量・高強度の航空機構造様式として、CFRP モノシックサンドイッチ構造を提案した。

さらにその構造について、数値解析によりコーナーフィレットの接着引き剥がし強度向上効果を明らかにした。また、コーナーフィレットを有する CFRP モノシックサンドイッチ構造を一体成形プロセスで試作し、航空機構造への適用の見通しを得た。

参考文献

- (1) Takayuki, K. et al., EFFICIENT CFRP MONOLITHIC SANDWICH CONSTRUCTION, SAMPE EUROPE 35th International Conference and Forum, (2014) p.25-30