

## 角型コルゲートコア構造を有する CFRP パネルの接合と拡張

八塚直紀 藤本俊二 黄木景二\*<sup>1</sup> 堤三佳\*<sup>1</sup> 田中正夫\*<sup>2</sup>

## Expansion of CFRP Panel with a Square Corrugated Core Structure

YATSUZUKA Naoki, FUJIMOTO Syunji OGI Keiji and TSUTSUMI Mitsuyoshi and TANAKA Masao

本研究では、角型コルゲートコア構造を有する CFRP パネルユニットの中子を用いた連結・拡張する方法について、接着強度、曲げ剛性の観点から実験及び有限要素法 (FEM) により検討した。まず、CFRP パネルに中子を接着して作製した試験片の引張せん断接着試験の結果から、本研究における中子の接着長さの最適値を 50mm とした。さらに、接着長さを 50mm とし連結・拡張した CFRP パネル試験片の 3 点曲げ試験の実験及び有限要素法の解析結果から、パネルの拡張における曲げ剛性低下防止のために中子の接着が必要であることが分かった。

キーワード：角型コルゲートコア構造、CFRP パネル、拡張、3 点曲げ試験、有限要素法 (FEM)

## はじめに

“コルゲートコア構造物”とは、段ボール断面などに見られる構造で、2 枚の板で波状構造を挟み込んだサンドイッチ状の構造物のことを言う。中空断面形状を有することから軽量かつ高剛性であり、内部に中子 (なかご) 等を挿入することで構造物を連結・拡張することが可能である。そのため、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 製のコルゲートコア構造物は、軽量・高剛性かつ高強度の特徴を活かし舞台・ステージ等で使用される平板状構造物として期待される。

そこで、角型コルゲートコア構造の CFRP パネル及び中子を試作し、中子をコルゲートコア内部に挿入して複数の CFRP パネルを連結・拡張する方法について検討した。本研究では、中子の接着長さ (接着面積) が連結 (拡張) 時における構造物の剛性等の機械的特性に及ぼす影響について、実験及び有限要素法 (FEM) により解析を行ったので結果を報告する。

## 実験方法

## 1. 供試体の試作

田中技研株式会社が試作した角型コルゲートコア構造の CFRP パネル (以下「パネル」という) と CFRP 中子 (以下「中子 (なかご)」という) を供試体とした。いずれも CFRP 材料として、トレカブリプレグの P3252S-15 (一方向) 及び F6343B-05P (クロス) を使用した。図 1 に示すように、基本となるパネル 1 ユニットの大きさは、長さ 480mm×幅 48mm×高さ 13mm (厚さ 0.4mm) である。また、コルゲートコア空洞部に挿入する中子は、高さ 12mm (厚さ 0.9mm) 中空四角柱とし、試験に応じて長さを調整した。

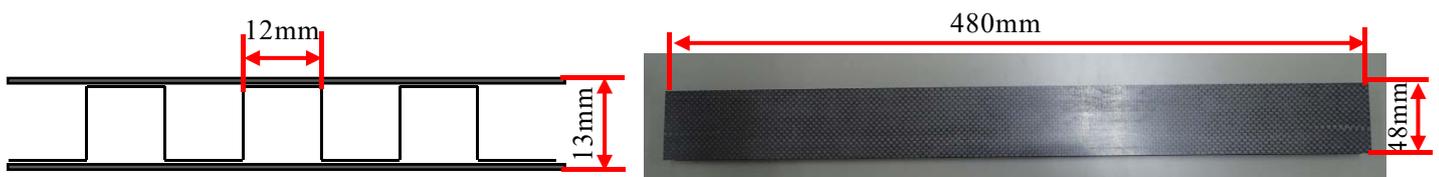


図 1 左：角型コルゲートコア構造断面、右：CFRP パネル

\* 1 愛媛大学、\* 2 田中技研株式会社

この研究は、「炭素繊維関連産業創出事業」の予算で実施した。

## 2. パネルと中子の引張せん断接着試験

パネルを拡張時の中子の最適接着長さを求めるために、パネル内部に中子を接着した試験片を作製し、オートグラフ（(株)島津製作所製 AG-100kNXPlus）を用いて引張せん断接着試験を行った（写真1）。試験片のパネルは、長さ 220mm×幅 48mm とした。パネル上部に長さ 100mm の中子 1 本を挿入し、接着長さが 10mm、20mm、30mm、40mm、50mm に調整した試験片をそれぞれ作製した。試験片の下部は長さ 100mm の中子 2 本を接着長さ 60mm で挿入した。中子は試験装置のチャック部に把持した際の破壊防止のために中子内部に長さ 180mm の金属製の芯材を入れた。なお、接着剤にはセメダイン(株)製メタルロックを用い、パネルと中子の接長面を粗してから接着した。



写真1 引張せん断接着試験の風景

## 3. 3点曲げ試験の実験と剛性解析

### (1) パネル及び中子の3点曲げ試験

パネル（長さ 480mm×幅 48mm×高さ 13mm）及び中子（長さ 480mm×高さ 12mm）を(株)島津製作所製オートグラフ（AG-100kNXPlus）を用いて、それぞれ3点曲げ試験を行った（写真2）。圧子半径 R 5 mm、支点半径 R 5 mm、支点半距離は 400mm、試験速度 1 mm/分とした。また、圧子による試験片への応力集中回避のため、パネル及び中子と圧子の間に厚さ 1 mm のシリコンゴムシートを入れ、3点曲げ試験を参考のため実施した。

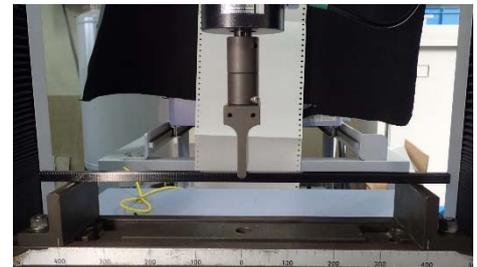


写真2 3点曲げ試験の風景

### (2) 有限要素法（FEM）によるパネル及び中子の剛性解析

FEM 解析は、実験では行えないパネルの拡張を行った場合の構造物の変形挙動を推測することを目的として実施した。解析には有限要素法解析ソフト MSC 社製 marc2020 を用いた。図2のように、パネル及び中子のそれぞれを一方向プリプレグとクロスシート部分に分けて実物同様に積層させて構成した。材料物性値を表1に示す。クロスシートについては引張及び圧縮時の剛性の違いを考慮し、圧縮を受ける部位（モデル中の上面）に配置された場合では縦弾性係数が小さくなるよう設定した。

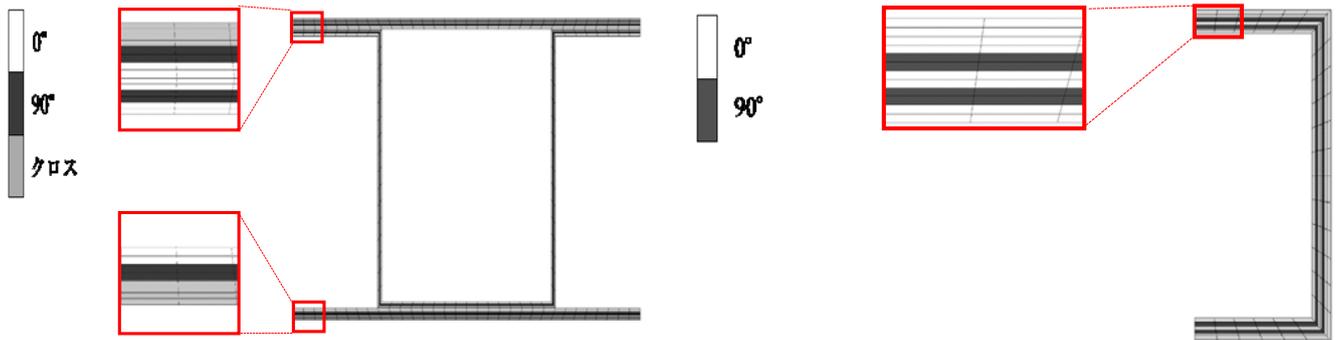


図2 解析モデル（左：パネル、右：中子）

表1 材料物性値

(方位：1=パネル長手方向、2=1の面内直交方向、3=厚さ方向)

材料	物性値
CFRP 一方向 プリプレグ (0° の場合)	$E_1=130\text{GPa}$ 、 $E_2=8.0\text{GPa}$ 、 $E_3=8.0\text{GPa}$ 、 $\nu_{12}=0.35$ 、 $\nu_{23}=0.45$ 、 $\nu_{31}=0.0215$ 、 $G_{12}=3.5\text{GPa}$ 、 $G_{23}=4.5\text{GPa}$ 、 $G_{31}=3.5\text{GPa}$
CFRP クロス プリプレグ	$E_1$ =引張時：69.0GPa、圧縮時：20.0GPa $E_2=69.0\text{GPa}$ 、 $E_3=8.0\text{GPa}$ 、 $\nu_{12}=0.176$ 、 $\nu_{23}=0.400$

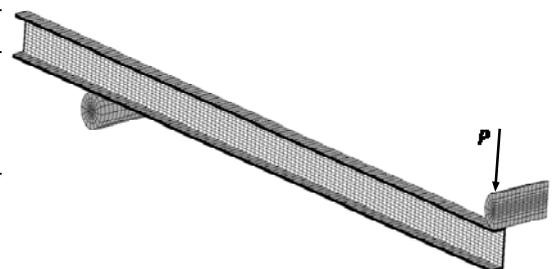


図3 中子解析モデル（1/4対称）

実施された単体の3点曲げ試験の条件に合わせて図3の解析モデルを作成した。いずれも要素数削減のために対称モデルにしている。荷重点変位10mmまでの曲げ荷重と変位の関係を解析した。

(3) 拡張パネルの3点曲げ試験

2個のパネル（長さ240mm×幅48mm×高さ13mm）を長さ100mmの中子と接着剤により接合し拡張したパネル（それぞれのパネルに中子を50mm挿入）について、3点曲げ試験を行った（写真3）。パネルを床面に設置して使用する場合の曲げ剛性は、水平方向の力は加わらないため、接着剤無の場合についても試験を実施した。試験条件は上記(1)と同様とした。

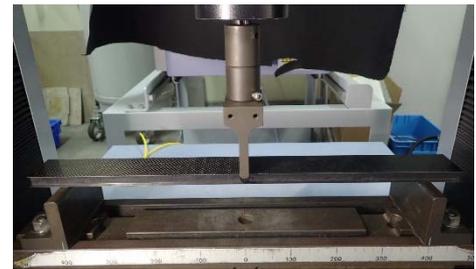


写真3 3点曲げ試験の風景

(4) 有限要素法による拡張パネルの剛性解析

上記(2)と同様な積層構成と材料物性値を与え、拡張パネルの3点曲げ試験に合わせて解析モデルを作成した。図4の拡張パネルの解析モデルはパネルと中子の境界部分で固定の有無による2通りで接着剤の有無を解析した。

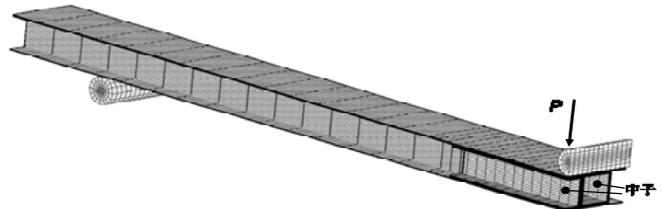


図4 拡張パネル解析モデル (1/4対称)

結果と考察

1. パネルと中子の引張せん断接着試験

引張せん断接着試験の結果を表2に示す。また、各接着長さに対する荷重—変位曲線、せん断応力の結果を図5、図6にそれぞれ示す。せん断応力は接着長さ10mmが最も高く、接着長さ50mmが最も低い値となった。接着長さが長くなると接着剤の塗りむらが発生しやすくなるのが原因と考えられる。ただし、最大荷重に関しては接着長さ50mmが最も高かったことから、パネルを拡張する際の中子の接着長さは50mmとした。

参考のため、引張試験終了後の中子の表面（接着面）をオリンパス（株）製デジタルカメラ（STYLUS TG-4 Tough）で観察した。接着長さ20mm、50mmの結果を写真4、写真5にそれぞれ示す。接着長さ20mmの接着面は部分的な凝集破壊<sup>1)</sup>のみであったが、接着長さ50mmはCFRPの層間剥離が発生していた。パネルや中子はラッピングテープでの熱成形のため、層間せん断強度が弱い可能性がある。そのため、パネルと中子ともに真空引きや型を当てながら加圧して成形することが必要と考えられる。

表2 引張せん断接着試験結果

接着長さ	10mm-1	10mm-2	20mm	30mm	40mm	50mm
最大荷重(N)	6168	6060	7809	13009	11807	14137
接着面積(mm <sup>2</sup> )※	552	576	1013	1378	1901	2338
せん断応力(MPa)	11.2	10.5	7.7	9.4	6.2	6.0

※接着面積は実測した着長さから算出した。

例（10mm-1）：12mm×11.5mm（実測した接着長さ）×4=552mm<sup>2</sup>

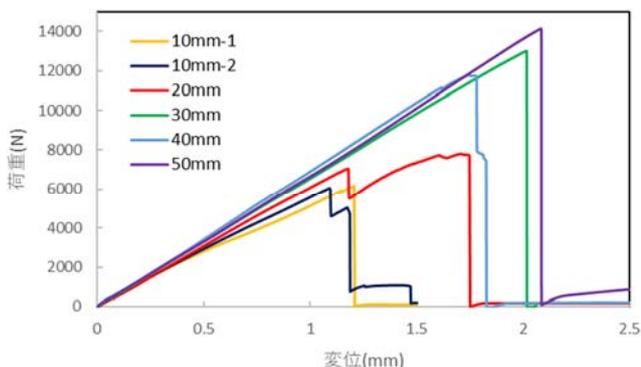


図5 各接着長さに対する荷重—変位曲線

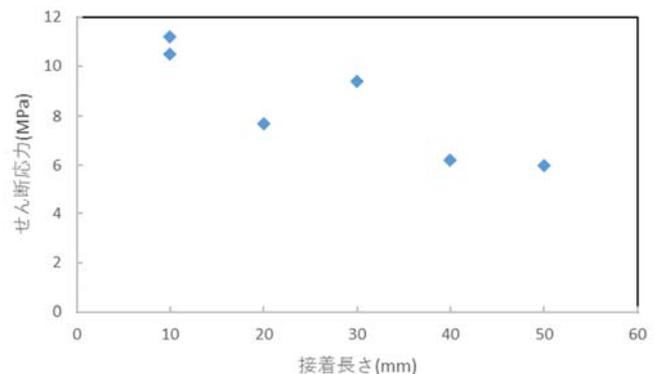


図6 各接着長さに対するせん断応力



写真4 試験後の表面（接着長さ 20mm）



写真5 試験後の表面（接着長さ 50mm）

## 2. 3点曲げ試験の実験と剛性解析

### (1) パネルと中子の3点曲げ試験

パネルと中子の3点曲げ試験の結果を表3に、荷重—変位曲線を図7に示す。図7のLは支点間距離を意味する。試験後の試験片の観察結果から圧子直下で炭素繊維の座屈による破断が確認された。

表3 パネルと中子の3点曲げ試験結果

	パネル1	パネル2	中子1	中子2
最大荷重(N)	710	648	433	406
最大変位(mm)	9.3	8.5	10.3	9.4

また、参考のため、パネルと中子の曲げ試験において、圧子直下のシリコンゴムシートの有無を比較した結果を図8、図9にそれぞれ示す。シリコンゴムシートを用いた場合、シリコンゴムシートがない場合と比べて最大荷重が約20~30%大きくなることが分かった。シリコンゴムシートを用いたことで応力集中が緩和され構造体としての強度として評価できたと考えられる。

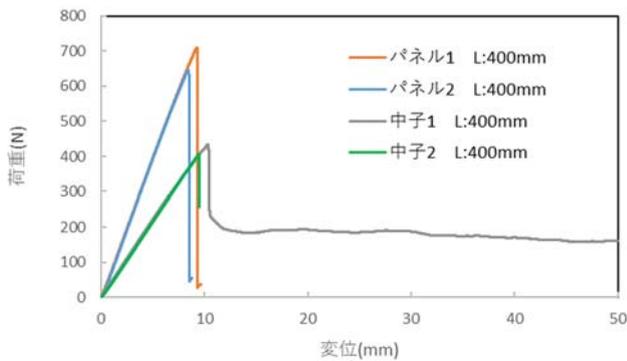


図7 パネル及び中子の荷重—変位曲線

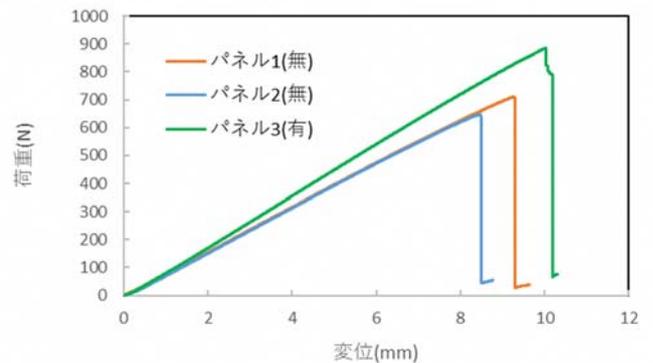


図8 シリコンゴムシート有無の比較結果（パネル）

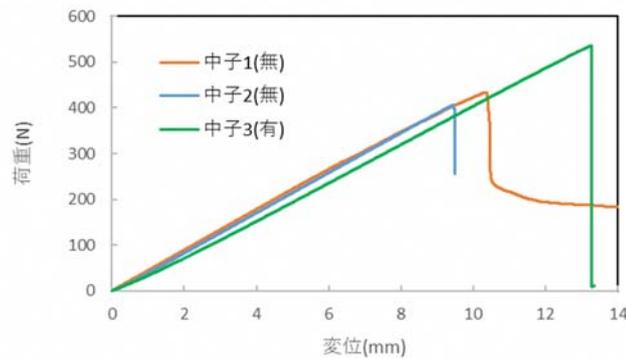


図9 シリコンゴムシート有無の比較結果（中子）

(2)有限要素法 (FEM) によるパネル及び中子の剛性解析

単体パネル、単体中子の3点曲げ試験の実験と FEM 解析を比較した結果を図 10、図 11 にそれぞれ示す。グラフの傾きを比較すると、パネルと中子いずれも FEM 解析結果の方が実験値よりもやや大きな傾き（剛性が高い）となった。FEM 解析モデルの寸法どおりに試験片が成形できていないことが結果の一因と考えられる。

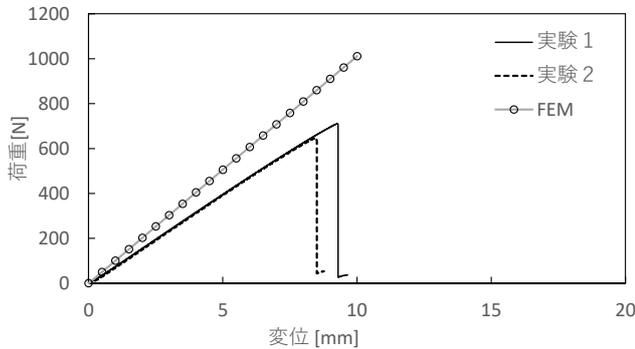


図 10 パネルでの実験値と FEM 解析の比較

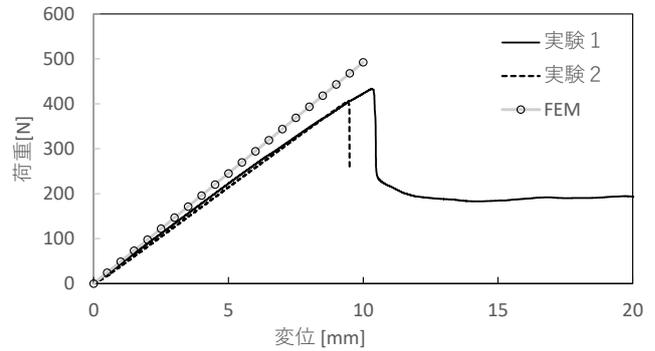


図 11 中子での実験値と FEM 解析の比較

(3)拡張パネルの3点曲げ試験

パネルと中子で拡張したパネルの3点曲げ試験結果を表 4 に、接着剤の有無を比較した結果を図 12 に示す。図 12 の L は支点間距離を意味する。接着剤有の拡張パネルの最大荷重は、接着剤無の拡張パネルと比べて約 50%上昇した。接着剤無の拡張パネルは単体パネルと同等の最大荷重となったことから、パネル内部に中子を挿入し拡張する際は接着剤が必要であることが分かった。

表 4 拡張パネルの比較結果

	パネル+中子 接着剤有	パネル+中子 接着剤無
最大荷重 (N)	1062	699
最大変位 (mm)	13.3	38.9

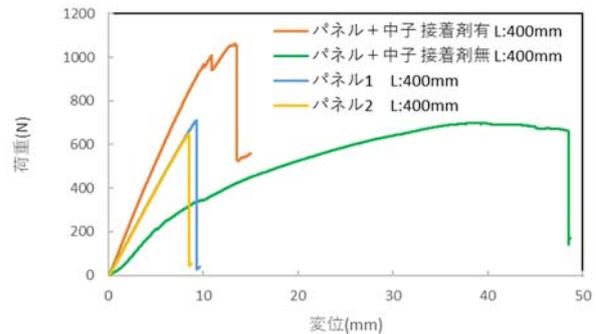


図 12 拡張パネルにおける接着剤有無の比較結果

(4)有限要素法による拡張パネルの剛性解析

拡張パネルの3点曲げ試験の実験と FEM 解析を比較した結果を図 13 に示す。拡張パネルは FEM 解析の方が実験よりも剛性が高くなった。試作した部材は実測にて設計値よりも小さくなっている部分を確認されており、FEM 解析モデルの寸法と差異がある部分で剛性の差を生じていると推察される。また、寸法同様に一方向プリプレグ及びクロスプリプレグの配置のずれによって炭素繊維の配向がばらついており、パネル長手方向での繊維強化の効果は意図されたよりも小さくなって剛性が低くなる反面、直交方向には強化されて剛性が高くなると推察される。FEM 解析による高精度な部材剛性の予測には、実部材の正確な仕上がり寸法及び炭素繊維配向状況の反映が必要と考えられる。

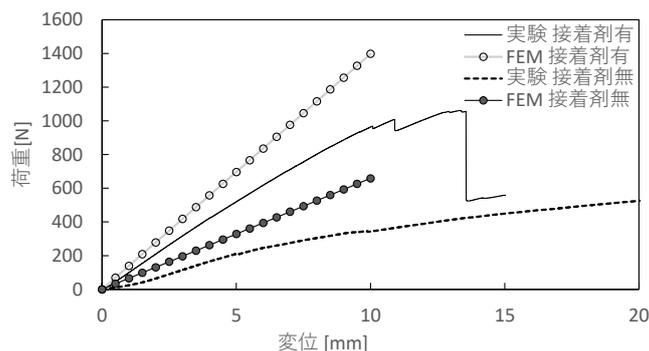


図 13 拡張パネルにおける実験と FEM 解析の比較結果

## ま と め

CFRP パネルについて、各構成ユニット単位及び拡張パネルでの実験的な評価及び有限要素法(FEM)による解析を行った結果、以下の成果が得られた。

1. 角型コルゲートコア構造を有するパネル及び接合用の中子を試作した。
2. パネルと中子の引張せん断接着試験を行った結果、接着長さが短いほどせん断応力は高くなる傾向となった。接着長さが長くなると接着剤の塗りむらが生じやすいことが原因と考えられた。しかし、接着長さ 50mm の最大荷重が最も高かったことから、パネルを拡張する際の中子の接着長さは 50mm とした。
3. 全長 100mm の中子で拡張したパネルの 3 点曲げ試験の結果、接着剤無の場合の拡張パネルの曲げ剛性は単体のパネルの曲げ剛性に比べ半分程度しかないことから、接着剤は必要であることがわかった。接着剤による拡張パネルは接着剤の無い場合に比べて剛性は 2 倍程度上昇した。

また、拡張パネルの 3 点曲げ試験の実験値と FEM 解析値を比較した結果、拡張パネルは FEM 解析の方が実験よりも剛性が高くなった。この差異は実物と FEM 解析モデルの寸法誤差や炭素繊維の配向のばらつきが要因と推察され、FEM 解析の精度向上には実部材の正確な仕上がり寸法及び炭素繊維配向状況の反映が必要と考えられる。

## 文 献

- 1)原賀康介:わかる!使える!接着入門(日刊工業新聞社)p. 8-11(2018).