1809 引張荷重を受ける擬似等方積層 CFRP 単純重ね合せ接着継手の応力解析と強度

FEM Stress Analysis and Strength of Quasi-isotropic CFRP Single-lap Adhesive Joint Subjected to Tensile Load

○学 小坂 典嵩 (東京高専専攻科)

正 黒崎 茂 (東京高専)

正 志村 穰 (東京高専)

正 鈴木 拓雄 (産技高専荒川)

Noritaka KOSAKA, Tokyo National College of Technology, Kunugidamachi 1220-1, Hachioji, Tokyo

Jyo SHIMURA, Tokyo National College of Technology

Shigeru KUROSUKI, Tokyo National College of Technology

Takuo SUZUKI, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Minamisenjyu 8-17-1, Arakawa-ku, Tokyo

Recently, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) material has been used in structural element of transport vehicles. Besides, adhesive bonding is known as better method for joining the CFRP structures. The purpose of our work was to examine the characteristics of strength for CFRP composite structures. We modeled single-lap adhesive joints composed of quasi-isotropic CFRP laminates having various lay-up pattern subjected to static tensile load to carry out finite element method analysis, and compared the analysis results of stress distribution at adhesive layer. In addition, failure load of various adhesive joint specimens were measured. As a result, it was found that the stress distributions on adhesive layer and failure load for joints were affected by each lay-up patterns of CFRP adherends.

Key Words: Adhesion, Finite element method, Single-lap joint, CFRP, Quasi-isotropic

1. 緒言

CFRP (炭素繊維強化プラスチック) など複合材料部材は輸送機械などの構造部分への適用が進んでいるが、こうした場面においては接着接合が有効な接合方法として知られている。部材同士を接着する継手部分の設計に際しては複合材料特有の力学的特性による影響を把握する必要があるが、代表的な接着継手形状である単純重ね合せ接着継手の力学的特性について、CFRP 被着体の積層構成が異なる場合の報告例は少ない。そこで本研究では擬似等方積層 CFRP を被着体とする引張荷重下の CFRP—CFRP 単純重ね合せ接着継手を対象とし、CFRP の積層構成が接着層応力分布および継手強度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。有限要素法応力解析による接着層応力分布の評価に加えて、実験により継手の破断荷重を測定した。また、接着層近傍のひずみ分布を測定することにより、解析結果の妥当性を検証した。

2. 接着継手の構成

2.1 接着継手形状

解析対象とする単純重ね合せ接着継手の形状、寸法および座標系を Fig. 1 に示す。本継手は擬似等方積層 CFRP 板の端部を 12.5mm 重ね合せ、住友スリーエム製 二液室温硬化型エポキシ系構造用接着剤 SW1838B/A を用いて接着接合したものである。また、継手試験片の両端部には実験時にチャッキングを行うためのつかみ部を設けた。

Fig. 1 Dimension and geometry of adhesive bonded single-lap joint

2.2 CFRP 被着体の積層構成および組み合わせ

CFRP 積層板のうち一方向性プリプレグを積層したものは、各層の繊維配向角を、 180° を等角に 3 分割以上となるように設定し積層することで、面内のひずみ特性が擬似的に等方性となることが知られている⁽¹⁾。本研究では積層構成の異なる 4 種類の擬似等方積層 CFRP 板を被着体として使用した。積層構成を示す積層コードおよびその模式図を Fig. 2 に示す。ただし、積層コードの基準方向は接着継手の引張方向、すなわち x 軸方向とした。また、被着体の積層構成の組み合わせは 4 種類とし、(Upper adherend)—(Lower adherend) の順にそれぞれ Pair I: (A)—(A), Pair II: (A)—(D), Pair III: (B)—(B) および Pair IV: (B)—(C) とした。

3. 接着継手の有限要素法応力解析

3.1 解析方法

接着継手の有限要素法モデルを作成し、各 CFRP 被着体が接着層の応力分布に及ぼす影響を応力解析により調査した。六面体 1 次要素による弾性解析とし、解析ソルバには NX Nastran 7 を用いた。CFRP 積層板のモデリングは 3 次元直交異方性材料特性を与えた要素を組み合わせたものとし、各ラミナの領域に属する要素に同一組成の一方向性 CFRP により測定した材料特性をそれぞれ独立して与え、擬似等方積層 CFRP 板の構造を準微視的に再現した。接着層は被着体と連続した要素分割である。解析時の引張荷重は 1000N とした。要素分割の状態を Fig. 3 に示す。

Fig. 2 Lay-up patterns of quasi-isotropic CFRP laminate

Fig. 3 Finite element model of adhesive bonded single-lap joint

3.2 接着層応力分布の解析結果および考察

解析結果のうち、接着層の厚さ方向中心面における応力について評価を行った。特に接着層に支配的に作用するせん断応力 τ_{xy} 、接着層の剥離に作用する垂直応力 σ_y および接着継手の破壊指標として用いられている最大主応力 σ_1 に着目し、これらを実評価応力とした⁽²⁾。ここでは、最大主応力 σ_1 の分布を Fig. 4 に示す。ただし、継手の長手方向位置を l 、幅方向位置を b とした。単純重ね合せ接着継手の接着層応力分布は、長手方向端部において応力の値が高くなる特異な応力分布となることが知られている。Pair I と比較して、Pair II, III および IV では端部における最大応力の値が大きく、また接着層幅方向の応力分布に偏りが生じた。

Pair III および IV の接着表面の繊維配向角の組み合わせについて、接着層上下の接着表面の繊維配向角は Part III においてそれぞれ 45° 、Part IV の場合は 45° および -45° である。両者とも荷重方向と接着表面の繊維配向角が異なっており、このような場合には応力分布に偏りが生じ、最大応力値も上昇すると考えられる。また、最外面の荷重方向縦弾性係数の低下は被着材の曲げ剛性を低下させ、接着部での剥離力に対する剛性が低下し変形しやすい状態となるため、接着層端部の全域において応力の値が増大するものと推測される。

4. 継手強度・ひずみ分布測定実験

4.1 継手試験片の製作および実験方法

擬似等方積層 CFRP 単純重ね合せ接着継手を製作し、島津製作所製 精密万能試験機 オートグラフ AG-10kNXPlus を用いて変位速度 0.5mm/min にて引張荷重を作用させた。接着面はサンドペーパーを用いて $Ra=2$ 程度に調整し、アセトンで洗浄および脱脂した。接着後は室温にて 24 時間放置し、定温乾燥器により 80°C で 2 時間保持してキュアリングを行った。また、有限要素法解析結果との比較による妥当性の検証を目的として、CFRP 被着体の接着層近傍におけるひずみ分布を測定した。測定点は 4 か所とし、ひずみの測定には東京測器研究所製 複合材料用ひずみゲージ UBFLA-03 (ゲージ長 0.3mm) を使用した。

4.2 実験結果および考察

CFRP 被着体の積層構成と継手の平均破断荷重の関係を Fig. 5 に示す。試験数は各組み合わせにおいて 10 回とし、平均破断荷重はそれぞれ、Pair I: 4966kN ; Pair II: 3299kN ; Pair III: 3405kN ; Pair IV: 3668kN であった。解析により得られた接着層応力分布と比較すると、最も応力分布の特異性が小さい Pair I の場合に平均破断荷重が最大となっており、解析結果から予測される傾向と一致した。より幅方向の偏りが大きく応力分布の特異性の大きい Pair II, III および IV においては、何れも平均破断荷重が Pair I に比べて大きく減少しているが、解析結果から予測される破断荷重の順序とは異なっている。曲げ剛性が最も低い Adherend D を接合した Pair II の平均破断荷重が最も低いことから、曲げ剛性が破断荷重に及ぼす影響が大きいことが示唆される。

Fig. 4 Maximum principal stress σ_1 distribution on mid-plane of adhesive layer

Fig. 5 Relation between combination of CFRP lamina and failure loads

ひずみ分布測定実験結果は、紙面の都合上、図の掲載は省略するが、実験により得られたひずみ分布と解析結果によるそれとの傾向が概ね一致した。有限要素法応力解析結果に基づく接着継手評価は妥当なものであるといえる。

5. 結言

擬似等方積層 CFRP 板を接着接合した単純重ね合せ接着継手の有限要素法応力解析および継手強度・ひずみ分布測定実験を行い、以下に記す知見が得られた。

- (1) 接着継手の有限要素法解析モデルを作成し、実験により測定したひずみ分布との比較により解析モデルの妥当性を確認した。
- (2) 接着層応力分布は CFRP 被着体の積層構成による影響を大きく受け、接着面表層の繊維配向角により応力増大部において幅方向の偏りを生じさせる。
- (3) CFRP 被着体の組み合わせによって継手破断荷重は変化し、Pair A が最も高く、次いで Pair IV, III および II の順となった。

参考文献

- (1) 竹園茂男 他, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集 V(01-1), (2001), pp. 97-98.
- (2) 市川幸平 他, 機論(A 編), 75-751(2009), pp. 279-286.