炭素繊維シートの真空含浸接着によるリブ十字 溶接継手の補強に関する基礎的研究

小沢 拓弥1・タイ ウィサル2・中村 一史3・松井 孝洋4

1学生会員 首都大学東京大学院博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1) E-mail: ozawa-takumi@ed.tmu.ac.jp

²学生会員 首都大学東京大学院博士後期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: thay-visal@ed.tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

⁴正会員 東レ株式会社 コンポジット技術第1部コンポジット技術第1課 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1) E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

本研究は、予防保全型の疲労対策として、真空含浸工法により炭素繊維シートを疲労き裂の発生前の荷 重非伝達型リブ十字溶接継手に接着して補強する方法の開発を目的としたものである. 基礎的な研究とし て、有限要素解析により、荷重非伝達型リブ十字溶接継手に炭素繊維シートを接着した解析モデルを作成 し、疲労き裂が発生すると予測される溶接止端部での応力低減を解析的に検討した. 補強モデルを作成す るにあって、炭素繊維シートの定着長およびテーパーの設計を行い、接着端部のはく離の評価を主応力に より検討した. 解析の結果、炭素繊維シートが荷重を負担することで、溶接止端部の応力低減に有意な効 果があることが示された. さらに、炭素繊維シートの積層数と応力集中の低減率との関係を示す近似式を FEM結果より提案し、積層数の増加に伴って応力集中の効果が低下することが確認された.

Key Words : cruciform welded joints, stress concentration, VaRTM, CF sheet, bonded joint

1. 緒言

過去に建設された鋼橋の中には、交通量の増加や建設 当時の疲労設計への未対応などから、多くの疲労き裂が 発見されている.これらの疲労き裂は進展し、疲労破壊 に至る場合もあることから、重大な事故につながる危険 性がある.しかし、鋼橋の疲労き裂の補修は狭隘部が多 く、施工条件が厳しくなるため、コストが増大する傾向 にある.さらに、社会基盤構造物の老朽化に伴い、維持 管理費のコスト縮減が求められており、予防保全型の疲 労対策も有効と考えられる.

既存の補修・補強工法¹として,疲労き裂きが発生した箇所に高当て板を高力ボルトによって接合する方法や,き裂先端の応力集中を低減させるスットプホール法などがある.疲労き裂発生前の対策工法としては,グライン

ダ仕上げやピーニング等により、ビード形状を改善する ことが主である.しかし、これらの工法は、施工に専門 の知識と技術が必要である.また、専用の重機が必要で あり、作業場所は狭隘部が多いため作業性に影響を及ぼ すこともある.

このような課題に対して,軽量で高強度かつ高耐食性 を有する炭素繊維シート(以下,CFシートと記す)を 用いた補修・補強工法は,既設鋼構造物の性能を回復ま たは向上させるための技術²の一つとして注目されてい る.しかし,FRP接着による溶接継手部の疲労強度の向 上を目的とした研究開発は国内外でも検討例^{3~6}は少な く,その効果が十分に明らかにされているとはいえない. これは,溶接ビード部への接着は,形状が複雑で,定量 的な評価が難しいことが主な要因と考えられる.

一方、航空分野で多用されている真空含浸工法(以下、

VaRTMと記す)は、任意の大型FRP構造物を高品質に成 形できる特徴がある.真空含浸工法の原理は、図-1に示 すように、FRPの強化材をプラスチックフィルムで封入 し、真空吸引した後に液体樹脂を注入・含浸して硬化さ せて、成形する技術である.通常の接着接合と違いは、 液状樹脂を真空吸引をするため、溶接ビード部等の不陸 のある面に合わせて接着できることが挙げられる.さら に、簡易かつ合理的な仕組みであり、多積層のCFシー トを一回の作業で施工できるため、現場での施工性に優 れている.近年、この工法を鋼構造物の補修・補強に応 用することが提案⁷され、研究開発が行われている.

そこで本研究では、予防保全型の疲労対策として、 VaRTM施工によりCFシートを疲労き裂の発生前の荷重 非伝達型リブ十字溶接継手に接着し、その補強の効果を 明らかにすることを目的としている.基礎的な検討とし て、有限要素解析を用いて、荷重非伝達型リブ十字溶接 継手にCFシートを積層接着した解析モデルを作成し、 疲労き裂の発生が予測される溶接止端部での応力低減を 検討した.補強モデルを作成するにあって、CFシート の定着長および段差の設計を行い、疲労に対する接着端 部のはく離の評価を主応力により検討した.

2. リブ十字溶接継手の無補強モデルの解析検討

(1) 解析対象および方法

本研究では、汎用有限要素解析プログラムMsc Marc 2013により、図-2に示す荷重非伝達型リブ十字溶接継手を対象に三次元弾性解析を行った.既往の研究では、GFRPシート接着による荷重非伝達型リブ十字溶接継手の補強方法が提案されている³.そこで、文献3)で検討されている荷重非伝達型リブ十字溶接継手の応力集中係数を比較することで、モデル化の妥当性を検討する.

荷重非伝達型リブ十字溶接継手の寸法は、母材、リブ の長さおよびその板厚は、それぞれ700mm、100mmおよ ひ9mmとする.溶接止端部の形状は、基礎的な検討とし て単純化し、脚長を6mm、フランク角 θ を45°、止端半径 ρ を0mmとした.なお、対称性を考慮して1/8でモデル化 を行った.要素は、8節点6面体ソリッド要素を用いてお り、要素分割された解析モデルの例を図-3に示す.溶接 止端部周辺の要素寸法はx、y、z方向それぞれ0.2、1.0、 0.2mmとなるようにメッシュ分割し、その他はアスペク ト比が5以下になるよう設定した.拘束条件は、モデル の対称性を再現するためx、y、z方向それぞれの断面方 向を固定している.作用応力は、x方向に一様な引張応 力 σ_{sr} =300MPaを載荷することとした.材料は、SM400を 想定しており、鋼材の材料物性値は、ヤング係数を 205GPa、ポアソン比を0.3とした.

(2) 解析モデルの妥当性

図-4に、溶接止端部周辺における荷重軸方向の応力ox の応力分布を示す.応力は、溶接止端部の一つ隣の節点 で最も大きい値となり、荷重伝達のないリブでは母材に 比べて応力緩和していることが確認できる.表-1に、本 研究および既往の解析モデル3より得られた溶接止端部 の応力集中係数の比較を示す. ここで応力集中係数とは, 溶接止端部周辺ののの最大値を公称引張応力のので除した 値である.本研究モデルと文献3)の解析モデルとの差異 は2.64%で近い値となり、本研究モデル化は十分妥当で あるといえる. なお, 文献3)で検討されているモデルの 寸法は、母材幅、リブ高さおよび板厚がそれぞれ102mm、 20mmおよび6mmで、実際の溶接ビードの形状を2次元で モデル化しており、本研究とは、板厚、溶接ビードの形 状が大きく異なるが、それらが応力集中に及ぼす影響は 小さいと判断された. 今後, 本研究においても詳細な溶 接ビードの形状を考慮して検討を行う予定である.



図-3 荷重非伝達型リブ十字溶接継手の要素分割の例



図-5 接着端部に発生するせん断応力と垂直応力の概念図

3. リブ十字溶接継手の補強モデルの解析検討

(1) CFシートを10層接着した場合の定着長の検討

前章で解析した荷重非伝達型リブ十字溶接継手のモデ ルに、高強度タイプのCFシートを、一例として10層接 着した場合に必要な定着長を検討した. CFRPを鋼部材 に接着した場合、接着剤を介して鋼部材の断面力が CFRPへ徐々に伝達されるが、断面力の分担が合成断面 に対する値とほぼ一致するまでのCFRPの長さを定着長 とされている. 文献8)より, 鋼板の応力が合成断面とし て計算される値に収束する程度をnとすれば、nが1以上 で1に近い値の場合, CFRPの定着長lは,式(1)で定義さ れる.

$$l \ge \frac{1}{c} \cosh^{-1} \left(\frac{2}{\eta - 1} \cdot \frac{E_c A_c}{E_s A_s} \right)$$
(1)

ここで、EおよびEはそれぞれ鋼部材およびCFRPの弾性 係数(MPa), A、およびA。はそれぞれ鋼部材およびCFRP の断面積 (mm²) である. 係数cは式(2)で算出される.

$$c = \sqrt{\frac{b_e \cdot G_e}{t_e} \cdot \left(\frac{2}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c}\right)}$$
(2)

ここで、t_tおよびb_tはそれぞれ接着剤の厚さ(mm)およ び幅 (mm) である. G_e は接着剤のせん断係数 (MPa) である.

表-1 応力集中係数の比較

	応力集中係数
本論文の解析モデル	2.21
文献4)の検討モデル	2.27

本論文の解析モデル	2.21			
文献4)の検討モデル	2.27			
素の 定差長の計算に用いた冬材料の物性値				

材料 項目 記号 単位 値 縦弾性係数 MPa 205,000 E_s 鋼材 幅 b_s 80 mm (SM400) 厚さ 9 t_s mm 断面積 720 A_s mm 縦弾性係数 E_c MPa 245,000 Mm 80 幅 b_c CFシート 厚さ 0.33 Mm t_c (高強度) 積層数 10 п 断面積 3.34 A_c mm^2 せん断係数 G_e MPa 1,234 接着剤 幅 80 b_e mm 厚さ (AUP40) 0.4 mm t_e 収束度合い 1.01 η

以上の計算式と表-2に示す物性値から、CFシートを10 層接着した場合、定着長は43mmとなった。

(2) CFシートを10層接着した場合の段差の検討

鋼部材に接着されたCFシート端部に急激な断面変化 がある場合,高いせん断応力と垂直応力が生じるため, その端部からはく離が生じる場合がある. 図-5に、接着 端部近傍の接着層に発生するせん断応力と垂直応力の概 念図を示す.本研究では、各段のCFシート端部の接着 層に生じるせん断応力、垂直応力および主応力を算定し、 疲労破壊しない主応力の限界値以下とすることで、段差 の設計を行うこととした.具体的には、これらの値は、 理論計算およびFEM解析より算出し、CSMおよびCFシ ート接着層の主応力の値を比較することで、CFシート 端部がはく離しない適切な段差長を検討する.

図-6、図-7に、段差の設計を行った補強モデルと段差 を設けない補強モデルの寸法を示す. 母材に近いCFシ ートから荷重が伝達されるため、母材側の段差は、1~5 層を10mm, 6~10層を6mmとした. リブ面の段差は, 無 補強モデルの解析より応力集中係数がほぼ1であったた め、本研究では考慮しないこととした. モデル化には、 図-8に示すように、接着層とCSMを考慮しており、各層 の厚さは、CSM接着層で0.4mm、CSMで0.143mm、CFシ ートおよびCFシート接着層で0.167mmとしている. 図-9 に、要素分割された溶接止端部周辺のモデルを示す.表 -3に、本解析で用いた物性値を示している. なお、CFシ ートの弾性係数は、接着されているビードのフランク角 と平行になるように要素座標系を回転して入力している. その他の境界条件は、無補強モデルと同じ条件とする.





図-8 CFシート, CSM および接着層の段差の概念図

(3) 解析値と理論値による主応力の比較

前述で示したようにCFシート端部でのはく離を主応 力により評価する. 主応力の理論値は、式(3)より算出 することが示されている⁸.

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{ye}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2}\right)^2 + \tau_e^2}$$
(3)

ここで、 τ は 接着剤に 生じるせん 断応力、 σ には 接着剤に 生じる垂直応力 σ_{μ} である. せん断応力 τ_{e} と垂直応力 σ_{μ} の 値については、軸力を受ける部材の収束式(式(4)、式 (5))から計算した.

$$\tau_e = \frac{c}{2b_c} (1 - \xi_0) P \tag{4}$$

$$\sigma_{ye} = \frac{1}{2} (2\omega - c) t_c \tau_e \tag{5}$$

ここで、Pは軸力(N)、係数ωおよび応力低減率をは式 (6)および式(7)から算出した.

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{b_c E_e}{4t_e} \cdot \frac{1}{E_c I_c}} \tag{6}$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1 + 2E_c A_c / (E_s A_s)}$$
(7)



要素分割された溶接止端部周辺の解析モデルの例 図-9

表-3 補強モデルの物性値				
材料	項目	単位	値	
鋼材	縦弾性係数	MPa	205,000	
(SM400)	ポアソン比	-	0.30	
	縦弾性係数(0°)	MPa	245,000	
CFシート	縦弾性係数(90°)	MPa	16,000	
	せん断係数 (0°)	MPa	10,400	
(高弾性)	せん断係数 (90°)	MPa	8,000	
	ポアソン比 (0°)	-	0.34	
	ポアソン比(90°)	-	0.005	
CSM	縦弾性係数	MPa	18,750	
	ポアソン比	-	0.30	
接着剤	縦弾性係数	MPa	3,430	
(AUP40)	ポアソン比	-	0.39	

そして、14は式(8)から算出した.

$$I_{c} = \frac{b_{c} t_{c}^{3}}{12}$$
(8)

接着接合の疲労強度に関する研究%より、静的はく離 強度の30%が疲労限となる評価基準が得られている.本 研究で用いる含浸接着樹脂(AUP40)の実験値に基づい て、図-8の積層構成、材料特性を考慮すると、疲労限界 度の最大主応力のpelimは24.3MPaとなる.以上の値から, 疲労試験で想定する応力範囲で、CFシート端部にはく 離が生じない設計条件を検討する.

図-10に、以上の計算式から理論値である主応力on せん断応力 τ_e および垂直応力 σ_e を算出した値と、解析モ デルより算出した各接着層のそれぞれの値を比較したも のを示す. なお、ここで示す各応力の値は、母材の公称 応力ので無次元化している. はじめに, 段差なしの補強 モデルの解析値および理論値とを比較すると, 主応力のアクロ せん断応力でおよび垂直応力の。の差異は、CSM接着層で それぞれ3.5%, 52.6%および18.6%, CFシート1層目の接 着層でそれぞれ3.7%, 23.8%および42.6%となった. 差異 の要因として、理論値の計算は、CSMを考慮していな いため、主応力のの値が解析値よりも低い値で算出され

たと考えられた.次に、段差あり、なしの解析モデルの CFシート接着層の1層目の公称応力σ_nに対する主応力σ_{pe}の比は、それぞれ0.297および0.104となり、約1/3の低減 率を示していることが確認できる.ここで、疲労限界度 である主応力σ_{pelm}を疲労試験の際に想定している最大公 称応力230MPaで無次元化すると、0.106となる.以上の 結果から、本研究の段差ありの補強モデルでは、疲労試 験の際に、最大公称応力が230MPa以下であれば、接着 端部からはく離しないことが確認された.



(4) CFシート接着による溶接止端部の応力低減の検討

図-11に、図-6で示した荷重非伝達型リブ十字溶接継 手に段差を考慮してCFシートを10層接着した、補強モ デルにおける荷重軸方向の応力なの分布を示す. なお、 応力分布は、各材料の材料物性値に対する表示としてい る.図-4に示した無補強モデルの応力分布と、図-11に 示した補強モデルを比較すると、補強モデルではCFシ ートを接着したことにより、高応力域が無補強モデルよ り緩和されていることが確認できる.

図-12に、補強モデルの母材表面における溶接止端部から鋼材端部までの応力低減率ξααを示す.ここで、応力低減率ξααは、同じ長手方向の座標位置において、補強モデルの応力集中係数を無補強モデルの応力集中係数で除した値と定義した.図-12より、応力低減率ξααは、 CFシートを接着したことにより、すべての区間で低減していることが確認できるため、CFシートが荷重を負担することで、応力低減に効果をもたらすことが示された.また、表-4は、無補強モデルと同じ節点から算出した応力集中係数であり、溶接止端部の低減率は21.3%となった.



図-11 荷重軸方向の応力 σxの分布



表-4	無補強。	と補強モ	デルに	よる	応力集	中係数	の比較
-----	------	------	-----	----	-----	-----	-----

	応力集中係数	低減率%
無補強モデル	2.21	-
補強モデル	1.74	21.3



図-14 近似式から算出した応力低減率と積層数の比較

(5) 積層数変化による溶接止端部の応力低減率の比較

前述より、本研究で検討した荷重非伝達型リブ十字溶 接継手では、CFシートを10層接着することで最大値で ある応力低減率ζ_{max}は、理論値である応力低減率ζ_oと比 較的近い値まで減少することが確認することができた. しかし、溶接止端部の応力低減率ζ_{wel} と、応力低減率ζ_o を比較すると、応力低減率ζ_{wel}では2割ほど高い値を示し ている.これは、断面変化による構造的な応力集中の影 響と考えられる.そこで、積層数変化による理論値の応 力低減率ζ_oおよびζ_{wel}を比較することで、両者の関係式を 導出し、理論的に低減可能な応力低減率ζ_{wel}を検討した. モデル化には、図-7で示した段差を考慮しない補強モデ ルにて、CFシートの積層数を1、3、4、5、6、7、8およ び10層に変化させた解析モデルにより検討を行った.な お、事前の解析にて段差の有無が溶接止端部の応力低減 率に影響しないことを確認している.

図-13に、CFシートの積層数を変化した解析モデルから算出したそれぞれの応力低減率ξ_{wet}およびξ_{max}と、応力低減率ξ_oを比較したものを示す.なお、応力低減率ξ_{max}と、応力低減率ξ_oを比較したものを示す.なお、応力低減率ξ_{max} は、図-12の応力低減率ξ_oよりも前述の解析モデルにて求めた応力低減率ζ_{max}が低かった40~120mmの区間にて算出することとする.図-13には、それぞれの応力低減率の線形近似を示している.近似式の決定係数R²は、ほぼ1に近い値となるため、比例関係にあるといえる.応力低減率ζ_{max}とζ_oによる近似式を式(10)に示す.

 $\xi_{wel.} = 0.558\xi_0 + 0.401 \quad R^2 = 0.99990 \tag{9}$

$$\xi_{max.} = 0.993\xi_0 \quad R^2 = 0.99994 \tag{10}$$

応力低減率ξ_{wel}は、応力低減率ξ_{max}に比べて傾きが小さ いことから、積層数nによる低減率の違いを確認できた. 次に、CFシートが10層以上を補強した場合の応力低 減率ξ_{wel} およびξ_{max}を式(9)および式(10)から算出し、CFシ ートの積層数nによる比較を行った.これを図-14に示す. 図-14からも応力低減率ξ_{wel} は、応力低減率ξ_{max}に比べて 積層数nが増加するごとに低減率が下がりにくい傾向を 示している.そして、応力低減率ξ_{wel}は、0.6を超えた辺 りから収束していることを確認した.以上のことから、 応力低減率はある一定の値で収束し、応力低減率ξ_{wel} お よびξ_{max}は、積層数nの理論式によって低減率を評価可能 であることが示された.

4. 結言

本研究では、VaRTM工法による多層積のCFシートを 疲労き裂の発生前の荷重非伝達型リブ十字溶接継手に接 着して補強した場合の応力低減効果を明らかにすること を目的として、有限要素解析により、溶接止端部での応 力低減を検討した.得られた結果を下記に示す.

- 検討した 10 層の補強モデルの段差では、段差なしの補強モデルに比べて1層目の接着層の主応力が約 1/3 に低減された. さらに、接着層の主応力の疲労 限界度 のm以下の場合、最大公称応力 230MPa までであればはく離しないことが予測された.
- 2) 10 層の補強モデルと無補強モデルの鋼板表面の軸 方向応力の分布の比較から、補強モデルでは鋼板の 応力が緩和されていること、溶接止端部の応力低減 率 *ξ_{au}*は 21.3%であり、合成断面に基づく応力低減 率の理論値 *ξ* よりも低下しなかかったが、CF シー トが荷重を負担することで溶接止端部の応力が有意

に低減されることが示された.

- 3) CF シートの積層数を変化した解析モデルから算出した溶接止端部の応力低減率 ζ_{met}および最大値の応力低減率 ζ_{met}および最大値の応力低減率 ζ_{met}と、応力低減率の理論値 ζ₀の比較では、両者に相関関係があることを確認し、線形近似による近似式を示した.さらに、応力低減率 ζ_{met}に比べて傾きが小さいことから、積層数 nによる低減率の違いを確認できた.
- 4) 応力低減率 ζ_{wel} および ζ_{max}の予測値を算出した CF シ ートの積層数 n による比較では、応力低減率 ζ_{wel} は、応力低減率 ζ_{max}に比べて積層数 n が増加するごとに 低減率が下がりにくい傾向を示した.そして、応力 低減率 ζ_{wel}の値が 0.6以下では応力低減の効率が低下 することが確認された.

以上のことから, VaRTM工法による補強する工法は, 溶接止端部の応力低減が可能であることが示された. 今 後は,算出したCFシートがはく離をしない応力範囲内 にて疲労試験を行うことで,本稿より示した解析結果と の比較を行っていく予定である.

参考文献

- 鋼構造委員会:鋼橋の疲労対策技術,鋼構造シリーズ 22, 土木学会,2013.12
- 2) 複合構造委員会編: FRP 接着による鋼構造物の補修・補 強技術の最先端,複合構造レポート05,土木学会,2012.6
- 3) 稲葉尚文, 富田芳男, 紫桃孝一郎, 鈴木博之, 岡本

陽介:GFRP シート貼付によるリブ十字溶接継手の補 強に関する-提案,土木学会論文集,No.798, Vol.68, pp.89-99, 2005.9

- 4) Tao Chen, Qian-Qian Yu, Xiang-Lin Gu, Xiao-Ling Zhao: Study on Fatigue Behavior of Strengthened Non-Load-Carrying Cruciform Welded Joints Using Carbon Fiber Sheets, International Journal of Structural Stability and Dynamics, Vol.12, Issue 01, pp.179-194, 2012.
- 5) Tao Chen, Qian-Qian Yu, Xiang-Lin Gu, Xiao-Ling Zhao: Fatigue Test on Out-of-Plane Gusset Welded Joints Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Materials, The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS2012, CD-ROM, 6 pages, 2012.
- Fatih Alemdar, Adolfo Matamoros, Caroline Bennett, Ronald Barrett - Gonzalez, and Stanley T. Rolfe: Use of CFRP Overlays to Strengthen Welded Connections under Fatigue Loading, ASCE, Journal of Bridge Engineering, 17 (3), pp.420-431, 2012.
- 7) 近藤諒翼、中村一史、松井孝洋、松本幸大: VaRTM 成形法を応用した鋼部材の補修・補強工法に関する 実験的検討、土木学会、第 11 回複合・合成構造の活 用に関するシンポジウム講演集、pp.192-201、2015.11
- 複合構造委員会編: FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術,複合構造レポート 09, 土木学会,2013.11
- 9) タイウィサル、中村一史、林帆、堀井久一:当て板 がエポキシ樹脂で接着された鋼板の接着接合部の疲 労強度の評価、土木学会論文集 A1(構造・地震工 学), Vol.74, No.5, pp.II_56-II_66, 2018.5

FUNDAMENTAL STUDY ON STRENGTHENING OF CRUCIFORM WELDED JOINTS BY EXTERNALLY BONDED CARBON FIBER SHEETS USING VARTM TECHNIQUE

Takumi OZAWA, Visal THAY, Hitoshi NAKAMURA and Takahiro MATSUI

Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) as a composite fabricating technique can be used to apply carbon fiber (CF) sheets on steel structures for repairing and strengthening. This paper deals with the development of strengthening steel structures before the occurrence of fatigue crack by externally bonded CF sheets using VaRTM technique on typical non-load-carrying cruciform welded joints. As a fundamental study, the reduction of stress concentration at weld toe welded joints where fatigue crack is expected to be occurred are analytically investigated using finite element (FE) model of non-loadcarrying cruciform welded joints adhered with CF sheets. In strengthened FE model, the debonding evaluation of adhesive at the end of CF sheets base on principal stress was investigated and the fixation length and taper design at the end of CF sheets were conducted. The result shows the significant effect of adhered CF sheets on reduction of stress concentration due to the transmission of loading to CF sheets. Moreover, the regression lines of the relationship between numbers of CF sheet layers and stress reduction factor was proposed. It was further confirmed that the effect of stress concentration decreases as the number of CF sheet layers increases.