

引抜成形 GFRP 接合部の補強に関する研究

Study on the reinforcement of the pultruded GFRP joints

北見工業大学大学院	○学生員	増田 祐介 (Yusuke Masuda)
北見工業大学	正 員	三上 修一 (Shuichi Mikami)
北見工業大学	正 員	山崎 智之 (Tomoyuki Yamazaki)
北見工業大学	フェロー	大島 俊之 (Toshiyuki Oshima)
東邦コンサルタント(株)	正 員	工藤 英雄 (Hideo Kudo)
東邦コンサルタント(株)	正 員	村上 新一 (Shinichi Murakami)

1. はじめに

FRP (繊維強化プラスチック) は、軽量、高強度、塩分などによる腐食に対する優れた耐性をもつといった特徴から、近年、土木構造分野への適用が進められている¹⁾。構造物の主部材としての適用事例では、国内外において歩道橋²⁾、車道橋³⁾の施工実績があり、構造物の補強材料としては、鉄筋の代替として FRP ロッド、コンクリート構造物への補修用途での FRP シートを使用した事例が多数報告されており、主部材または補修・補強材に FRP を使用した橋梁の総数は国内外合わせて 300 橋余りあるという報告がある⁴⁾。しかしながら、構造物を考える際に主要技術となる接合については接合方法として接着接合、機械接合をはじめ、さまざまな手法が考案、実用されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾が、それぞれ欠点を抱えており、不明の点が多いのが現状である。また、FRP は強化繊維と樹脂による複合材料であり、繊維の種類やその構成、成形法などにより物性の変化する多種多様な材料であることが特徴としてあげられる⁸⁾。このような背景のなかで、複数の複合材料を組み合わせるハイブリッド複合材料⁹⁾への期待も高く、航空分野においては金属材料とのハイブリッド材料¹⁰⁾の採用も進められている。

本研究では、連続引抜成形法により作製された GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) 板を母材とし炭素繊維シートなどの補強材料を 2 次接着することにより供試体を作成しその耐力向上効果について検討をおこなった。また、前述

の接合方法の中で可逆性を利点とし、現在多くの構造物で採用されているボルト接合について、破壊形式としてせん断破壊を想定し FRP 母材の補強方法について実験、FEM 解析をおこなった。

2. ハイブリッド板の引張载荷実験

本章では、連続引抜成形法により作製された GFRP 板に炭素繊維シートを接着することにより、ガラス繊維と炭素繊維を組み合わせたハイブリッド積層板を作成しおこなった引張载荷実験について述べる。

2.1 供試体

供試体は、連続引抜成形法により作製された GFRP 板、一方向強化型炭素繊維シート、含浸接着樹脂の 3 種により作成した。材料構成の模式図を図 1 に、各材料の材料物性を表 1 に示す。表 1 中添字 L は繊維方向 (引抜方向) を、添字 T は繊維直交方向を示す。GFRP 板については材料試験を実施し、その他の材料についてはメーカーのカタログ値を参考にした。繊維シート厚は繊維断面積から算出した設計厚さ、含浸接着樹脂厚はシート積層後 1 層あたりのものである。また、シートの接着方法はコンクリートへの接着方法と同様とし、接着面前処理→樹脂の下塗り→シート貼付→樹脂の上塗り→脱泡の順に手作業によりおこなった。供試体形状を図 2 に、供試体詳細を表 2 に示す。炭素繊維シートの積層枚数は 1 枚、2 枚の 2 種とし、2 枚貼り付ける際には、偏心の影響を減らすため両面に貼り付けた。

表 1 材料物性値

材料種別	引張弾性係数 (GPa)		引張強度 (MPa)		厚さ (mm)
	E_L	E_T	σ_L	σ_T	
GFRP	37.5	12.8	398.3	42.2	4
炭素繊維シート	245		3400		0.111
含浸接着樹脂			30		0.6~1.0

表 2 供試体詳細

供試体呼称	試験方向	補強枚数 (枚)	板厚 t (mm)
R0L	0°	0	4.00
R1L		1	4.74
R2L		2	5.05
R0T	90°	0	4.00
R1T		1	4.61
R2T		2	5.08

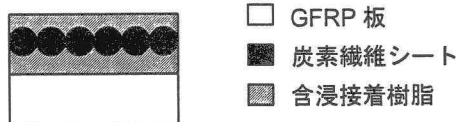


図 1 材料構成模式図

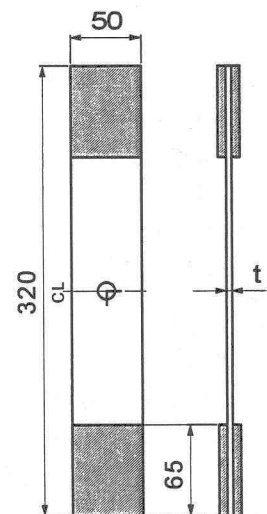


図 2 供試体形状 (単位: mm)

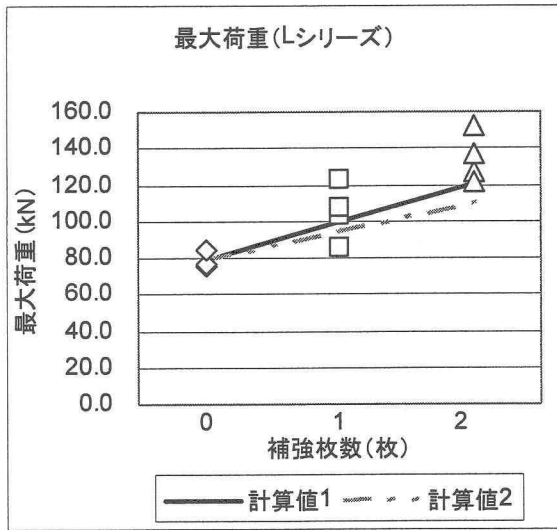


図3 補強枚数と最大荷重の関係 (Lシリーズ)

シートの繊維方向は引張方向と同方向とし、載荷試験機つかみ具部分にはアルミニウム板を接着した。

2.2 複合則による強度計算

ハイブリッド板の強度を計算するために、ハンドレイアップ成形材などで整合性が確認されている複合則を用いる。複合則により、各材料を1層とした積層板全体の弾性係数 E_x は次式で表される¹¹⁾。

$$E_x = K_F \sum_{i=1}^n t_i E_x^{(i)} = K_F \{ t_1 E_x^{(1)} + \dots + t_n E_x^{(n)} \} \quad \dots (1)$$

K_F : 経験係数 i : 層 (材料) t : 板厚比

全ての層で同一ひずみ ε が生じるとした場合、積層板の強度 F_x は次式で表される。

$$F_x = E_x \varepsilon = \sum_{i=1}^n t_i F_x^{(i)} = t_1 F_x^{(1)} + \dots + t_n F_x^{(n)} \quad \dots (2)$$

一方、層の破損を考慮した場合、 m 層における限界ひずみ $\varepsilon_f^{(m)}$ に達したときの積層板の強度 F_x は次式で表される。

$$F_x = E_x \varepsilon_f^{(m)} \quad \dots (3)$$

限界ひずみに達した m 層は破壊し、 m 層の弾性係数 $E_x^{(m)}$ を除いた積層板の弾性係数 E_{x2nd} 、強度 F_{x2nd} は次式のようになる。

$$E_{x2nd} = E_x - t_m E_x^{(m)} \quad \dots (4)$$

$$F_{x2nd} = E_{x2nd} \varepsilon_f^{(k)} \quad \dots (5)$$

以降、破壊した層を除き繰り返し計算し、式3,5の値を比較することにより最大強度を計算する。これ以降、全ての層で同一ひずみが生じるとして式2により求めたものを計算値1、層の破損を考慮し、式3~5により求めたものを計算値2として区別する。

2.3 結果および考察

補強シート枚数と最大荷重の関係を図3,表3に、実験終了後の供試体写真を図4に示す。供試体の破壊はシートの

表3 実験値と計算値の比較

供試体 呼称	最大荷重 (kN)			A/B	A/C
	実験値 A	計算値1 B	計算値2 C		
R0L	79.2	—	—	—	—
R1L	109.9	99.4	94.3	1.11	1.17
R2L	132.4	120.1	110.1	1.10	1.20
R0T	8.3	—	—	—	—
R1T	27.3	28.5	19.9	0.96	1.37
R2T	47.4	49.0	40.1	0.97	1.18

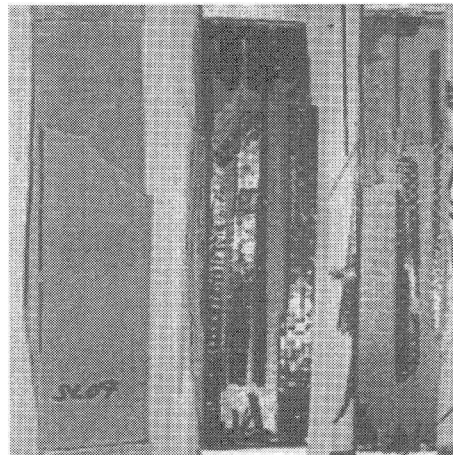


図4 実験終了後供試体 (Lシリーズ)

剥離を伴うものであり、母材はその繊維方向に沿った破壊となり、最終的には図4のように全体的に破断した。実験値は補強シート枚数に対して線形的に増加している。また、通常ハンドレイアップ成形材などで補正のために式1で用いられる経験係数 K_F が 0.8~1.1 程度であることから、実験値と計算値は比較的よく一致している。このため、シート補強効果を検討する際に複合則による計算式が有用であると考えられる。

3. ボルト接合部の引張載荷実験

FRP は異方性材料であることから、その接合部の強度、破壊性状は材料的要因、力学的要因、幾何学的要因によって大きく影響を受ける可能性があり、特に、他の強度と比べせん断強度が低いこと、穿孔加工による強度低下が著しいことからせん断に対する検討が重要となる。本章では、せん断破壊に対する耐力向上効果を検討することを目的としておこなったボルト接合部の引張載荷実験について述べる。

3.1 供試体

供試体形状を図5に示す。ボルト径は16mm、ボルト孔径は18mm、縁端距離は30mmとし、GFRP板2枚の間に接着層を設け、層内の構成を実験変数とした。供試体種別を表4に示す。EPシリーズでの接着には2液混合型エポキシ接着剤を使用し、CFシリーズでの炭素繊維シートはせん断強度を高める目的から引張方向に対し $\pm 45^\circ$ 方向に繊維を配向させた。また、ALEPシリーズのアルミニウム板は厚さ2mmとし、特にせん断剛性の優れた種類を選択しEPシリーズと同じエポキシ接着剤により接着した。GFRP板の繊維方向は引張方向と同方向とした。載荷は変

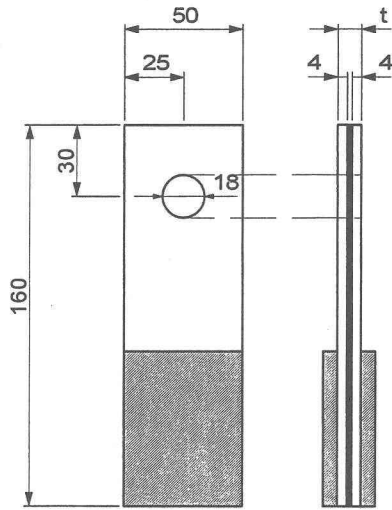


図5 供試体形状 (単位: mm)

表4 供試体種別

供試体呼称	使用材料	厚さ t (mm)
EP	エポキシ接着	9.74
CF	炭素繊維シート(±45)	9.85
ALEP	アルミニウム板+エポキシ接着	10.25

位制御によるものとし、載荷速度 1mm/min とした。

3.2 結果および考察

実験終了後の供試体写真を図6に示す。EPシリーズの破壊モードは引き裂き破壊とせん断抜け破壊の混在、CF, ALEPシリーズにおいてはせん断抜け破壊のみがみられた。荷重が増加していくにつれ繊維の破断音が聞こえはじめ、最大荷重に達したのち、徐々に耐荷力を失っていく過程で、母材と補強材料との間で接着剤の剥離を伴い材料による異なる破壊がみられた。供試体種別と最大荷重の関係を図7に示す。最大荷重はEP<CF<ALEPの順に増加しており、補強材料による耐力向上効果を確認することができた。

4. ボルト接合部の FEM 解析

FRPの解析事例は理論計算によるもの、有限要素法(FEM)解析によるものに大別される。FRPは自由度の大きい材料であることから、解析で用いる変数もミクロ的な視点を設定するほど多くなり複雑なものとなる。特に、機械的接合部についてはその応力分布が複雑であり、現状では破壊までのシミュレーションは困難である。本章では、前述の引張載荷実験をFEM解析によりモデル化し、それらを比較することにより検討を加える。

4.1 解析モデル

解析には汎用有限要素解析プログラム ANSYS を使用した。解析モデルを図8に示す。x軸に供試体長さ方向(引張方向)、y軸に幅方向、z軸に厚さ方向をとりモデル化には積層構成を容易に変更することが可能である3次元8節点非線形積層構造シェル要素を使用し、総節点数 3252、総要素数 1028 で構成している。境界条件はボルトとの接触

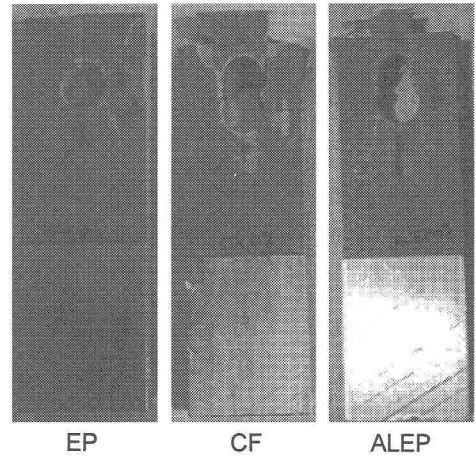


図6 実験終了後供試体

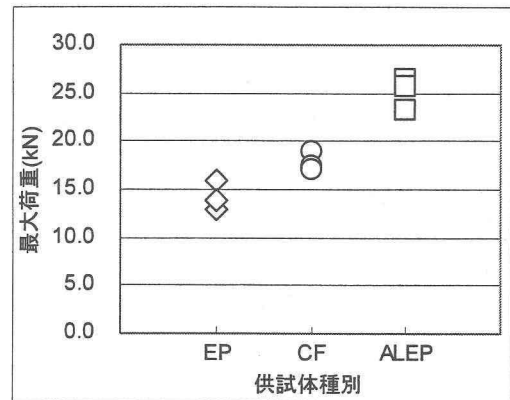


図7 最大荷重

面要素の完全拘束、荷重を点荷重により材端に与えるものとした。解析パラメータは実験供試体と同様に3種とし、各材料を1層としてモデル化している。材料物性は表1にあげた材料試験の結果やカタログ値、また材料力学的手法⁹⁾により算出したものを用い、FRPの異方性を考慮した線形解析とした。

4.2 解析結果および考察

図9に、解析値と実験値との関係を示す。ここで、解析値は1kN載荷時における母材表面でのxy方向最大せん断応力の出力結果である。せん断応力はEP>CF>ALEPの順に減少しており、応力低減効果が確認できる。また、解析値での応力減少傾向と実験値での耐力向上傾向には相関関係がみられ、材料構成を検討する際にFEM解析が有効であると考えられる。今後は非線形解析に取り組むことにより、破壊後のシミュレーションを考慮した上で実験結果との比較をおこなっていく。

5. おわりに

本研究では、引抜成形されたGFRP板と異種材料を組み合わせハイブリッド化することにより補強した場合の耐力向上効果を、実験および解析により検討した。本研究で得られた結論をまとめると以下ようになる。

- (1) 炭素繊維シート補強板の引張載荷実験では、補強シート枚数に対し最大荷重が線形的に増加することが示され、その補強効果を検討する際に複合則による計算式が有用であることが確認できた。

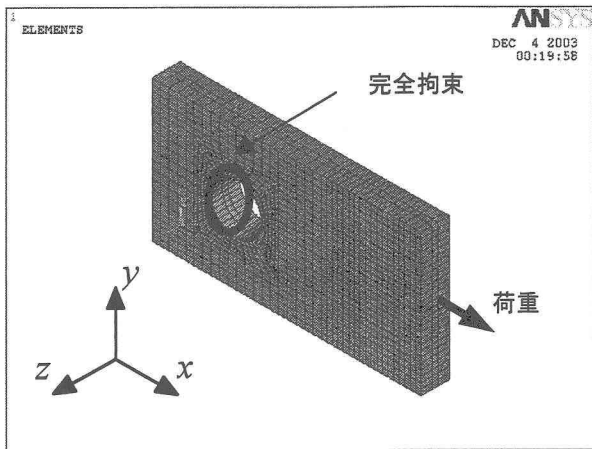


図8 解析モデル

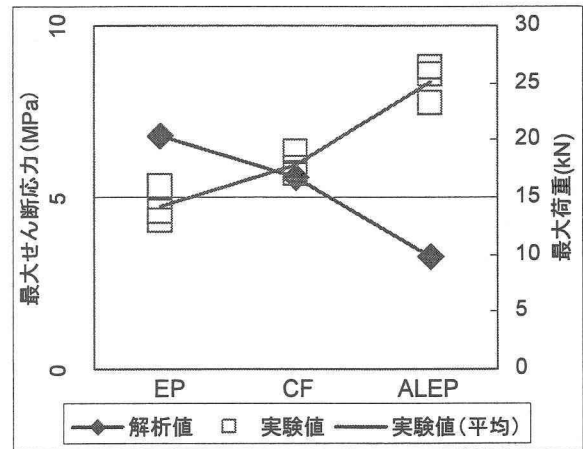


図9 解析値と実験値の比較

- (2) 炭素繊維シート補強供試体の破壊はシートの剥離が伴うため、接着工程において接着前処理方法の検討、接着剤の選択などを検討することが必要である。
- (3) ボルト接合部の引張載荷実験においては、異種材料と接着することによる耐力向上効果を確認することができた。
- (4) FEM 解析においては、積層要素を使用することにより層内の材料構成を容易に変更でき、また実験値との比較においては、解析での応力低減効果と実験での耐力向上効果に相関性がみられ、補強材料を選択する際に FEM 解析が有用であることが確認できた。

今後の課題として、より大きなボルト径の場合を検討するため、ボルト径や配置、縁端距離等を実験変数として実験データを蓄積していくこと、FEM 解析においては破壊近傍の非線形解析をおこなうことにより解析精度を高めていくことがあげられる。

謝辞

本研究は平成 15 年度文部科学省科学研究費（代表者大島俊之）の補助を受けておこなわれました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書（I）—一次構造物材料としての FRP の適用事例調査—共同研究報告書, No.210・1998.10
- 2) 北山、佐伯、山城：沖縄ロードパーク歩道橋の設計, 第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム, pp.103-106・2001.1
- 3) 鈴木、林、大橋、西崎：朝霧暴露試験場における GFRP モデル車道橋の設計, 第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム, pp.113-116・2001.1
- 4) The Market Development Alliance of the FRP Composites Industry (MDA) Home Page : <http://www.mdacomposites.org/>より

- 5) 山田、中澤：連続引抜成形繊維補強ポリマー接合部の母材破壊性状, 土木学会構造工学論文集 Vol.48A, pp.11-18・2002.3
- 6) 三瀬、阿部：積層 FRP パネルのボルト接合に関する実験, 土木学会第 56 回年次学術講演会, Vol.1, pp.330-331・2001.10
- 7) 張、山本、北山、佐伯、山城：GFRP 部材の接合方法, 第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム, pp.107-112・2001.1
- 8) 社団法人強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧・1994.9
- 9) 植松、福田：ハイブリッド複合材料・2002.8
- 10) Meola C, Squillace A, Giorleo G, Nele L : Experimental Characterization of an Innovative Glare® Fiber Reinforced Metal Laminate in Pin Bearing, Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol.37, No.17, pp.1543-1552・2003
- 11) 日本複合材料学会：複合材料ハンドブック・1989.11
- 12) 三刀、駒峯、小林：わかりやすい接着技術読本 被着材からみた接着技術 プラスチック材料編・2003.4
- 13) 中村、山沢、前田、土肥、入部、高木、鈴木：CFRP 板による鋼部材の補修に関する基礎的研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会, Vol.1, pp.438-439・2001.10
- 14) 佐々木：繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用, 土木技術, Vol.53, No.4, pp.96-101
- 15) 山田、田高、小宮：連続引抜成形 FRP 箱形構造部材の局部座屈に及ぼすマット材の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.951-952・1996.9
- 16) 明嵐、西崎、木嶋、佐々木：繊維強化プラスチックの橋梁への適用事例に関する研究, 第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム, pp.13-18・2001.1
- 17) 木嶋、西崎、明嵐：引抜成形 FRP 積層板の引張特性, 第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム, pp.27-34・2001.1
- 18) Moses, D. and H. Prion : Anisotropic plasticity and failure prediction in wood composites, Proceeding. ANSYS Inc. Ninth International Conference and Exhibition・2000