

構造細部の局所変形を考慮した GFRP 接合部の強度特性に関する研究

Study on the strength characteristics of the GFRP joints considering local deformation of structural details

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)
(株) 日本製鋼所 寺田 寿 (Hisashi Terada)

1. はじめに

異方性材料である繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics : FRP) は、軽量、高強度、塩分による腐食がない、などといった特徴から、土木構造分野への適用が期待されている。FRP 材料は繊維の種類とその構成、成型法などにより多種多様な材料であるといえ、ここでは連続引抜成形ガラス繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastics : GFRP) を取り上げている。連続引抜成形法は、強化材であるガラス繊維や炭素繊維を熱硬化製樹脂に含浸させた後、金型に導入し加温ゲル化させ、硬化した製品を引取機で連続的に引き抜く方法で成型する。そのため、特に引抜方向に対してハンドレイアップ法や SMC 法に比べると高い強度特性が得られるものである。

土木構造分野での FRP に関する研究事例をみると、鉄筋の代替品としてのロッド状 FRP の使用、またシート状 FRP をコンクリート等に貼付することにより補修、補強するといったように、構造物の 2 次的部材として使用する事例が多い。

一方、FRP を構造物の 1 次部材として使用した事例²⁾は、国内では土木研究所での FRP 橋梁の実用化研究があり、2000 年には沖縄県にオール FRP 歩道橋³⁾が施工された。

しかしながら、部材接合部の力学特性は明確にされていないのが現状であり、耐久性、強度に関する合理的、また信頼性の高い接合法が確立していないのが現状である。

本研究では、大型構造物を考える上で主要技術となる接合に関し、特にボルト接合を取り上げ、その破壊特性、破壊性状の検証のため実験をおこない、また接合部の設計において有効となるであろう有限要素法解析について、モデル化手法の検討を含め実験との比較、検討をおこなう。実験は接合部の引張載荷実験、接合部模型を使用した実験の 2 種類、解析は有限要素法 (FEM) による接触解析とした。

表 1 材料物性値

引張弾性係数	E_L (GPa)	35.0
	E_T (GPa)	10.6
ポアソン比	ν_{LT}	0.221
せん断弾性係数	G_{LT} (GPa)	1.4
曲げ弾性係数	E (GPa)	14.4

2. 使用材料

供試体は、連続引抜成形により製造された既製品である一方向強化型 H 型ビーム (フランジ厚 10mm、ウェブ厚 14mm) を実験に合わせ切断、穿孔加工により製作した。材料物性値については材料試験をおこない、試験により求められなかった物性値は材料力学的手法⁴⁾により算出、また有限要素法解析結果との比較により推定した。表 1 に材料物性値をまとめる。ここで添字 L は繊維方向 (引抜方向) を、添字 T は繊維直交方向を表すものとする。

3. ボルト接合部の引張載荷実験

ボルト孔周辺の破壊性状、破壊強度を求めるため、ボルト接合部の引張載荷実験をおこなった。供試体は H 型ビームからの切り出し部位、切り出し方向により 3 種とした。その種別、供試体名称を表 2 に示す。種別の略字 F は H 型ビームにおけるフランジを、W はウェブを表し、また試験方向は繊維方向に対するものを示す。

図 1 に供試体図を示す。ボルトは直径 16mm のものを使用し、GFRP 板の孔径は 18mm とした。また、本実験ではせん断強度を求める。また縁端距離は 30mm とした。GFRP 板の幅はすべて 50mm である。

表 2 供試体種別

供試体種別	枚数	試験方向	t (mm)	l (mm)
FL	4	0°	10	120
WL	4		14	120
WT	3	90°		160

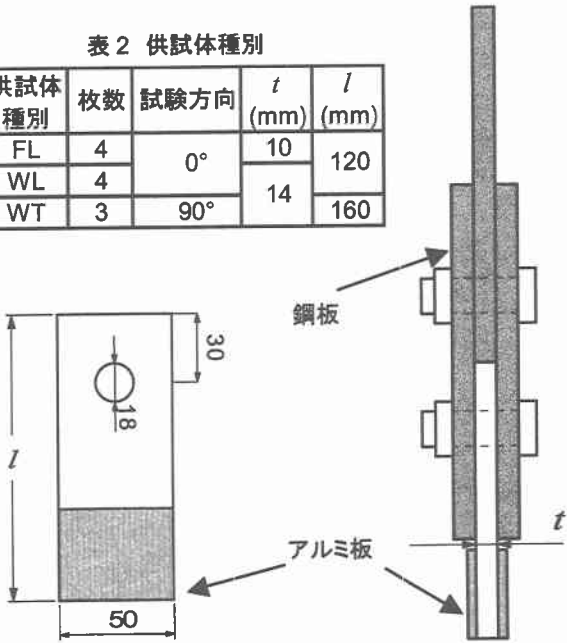


図 1 引張試験供試体



写真 1 (FL, WL)



写真 2 (WT)

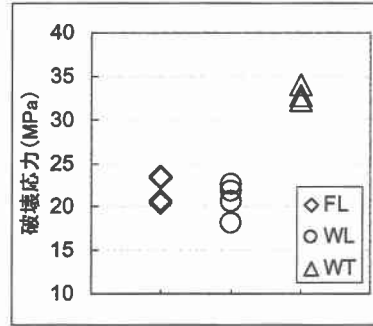


図 2 破壊応力

表 3 応力平均値

種別	破壊応力 (MPa)
FL	21.9
WL	20.7
WT	32.9

また、試験機つかみ具部分にはアルミ板を貼り付けた。荷重はアムスラー型試験機（最大荷重 100kN レンジ）を用い、添接板、片側試験器つかみ部には厚さ 9mm の鋼板を使用した。ボルトには締付力を与えないこととし、摩擦接合の効果は期待しないものとした。

供試体の最終的な破壊状況を写真 1,2 に示す。破壊の形態は繊維の破断、マット層の剥離をともなったものであり、供試体種別 FL, WL では写真 1 のようなせん断抜け破壊、種別 WT は写真 2 のような引張破壊となった。

図 2 に供試体別の破壊応力、表 3 に破壊応力の平均値を示す。引張破壊においては破壊応力の算出に純断面積を用いた。破壊強度の差は繊維方向によるものが大きく、供試体の厚さによる違いはあまり見られなかった。

4. 接合部実験

既製品である H 型ビーム (高さ 200mm, 長さ 800mm) を高力ボルト接合により壁面に固定する接合モデルを作成し、接合部の破壊について実験的に検討をおこなう。

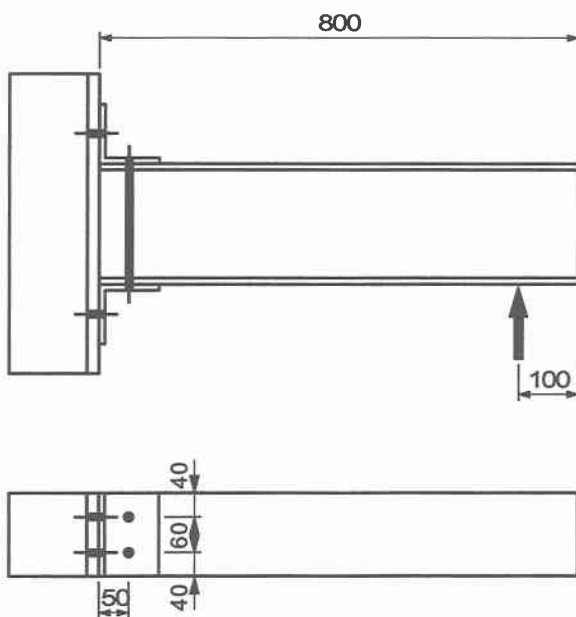
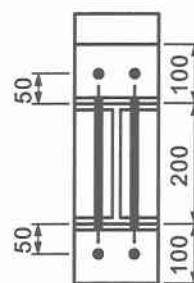


図 3 接合モデル詳細



Unit : mm

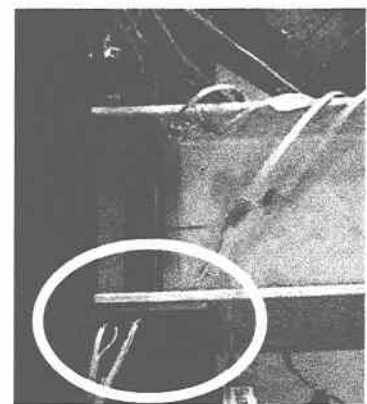


写真 3 載荷終了時

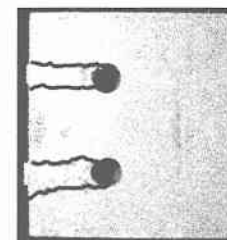


写真 4 破壊箇所

使用した接合モデルを図 3 に示す。

添接板には鋼製 L 字型アングル (100×100×10mm) を使用した。ボルトは F10T, M16 の高力ボルトとし、ボルト孔の直径は 18mm である。ボルトの締め付けは GFRP 母材がぐらつかない程度とし、締付力を入れることはしていない。

添接板は、現時点で入手可能な GFRP 既製品単品の断面積、形状を目安として設定した。荷重は変位制御とし、0.2mm/sec の速度で載荷した。

荷重を載荷していくと、7kN～8kN で繊維が切れるような音が聞こえはじめ、最大荷重 16.44kN で載荷は終了した。最終的な破壊形態は母材の載荷側フランジでのせん断抜け破壊となった。載荷終了時の供試体の状況、破壊箇所を写真 3,4 に示す。

5. 有限要素法による接触解析

前述の接合部実験を、汎用構造解析プログラム MARC を使用して有限要素法 (FEM) 解析をおこなった。実験供試体は節点数 3413、要素数 1904 の 8 節点ソリッド要素によりモデル化した。図 4 に解析モデル全景図、表 4 に各部材の材料物性値、要素数をまとめて示す。また、計算時間短縮のため、供試体の対称性を利用し解析モデルは実験供試体の 1/2 とし、弾性領域内のみの接触解析とした。

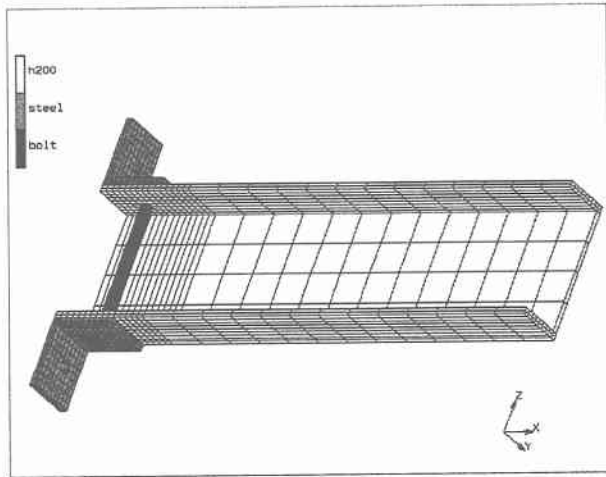


図 4 解析モデル

表 4 部材種別

部材種別	弾性係数 GPa	ポアソン比	要素数
FRP	(表1)		1104
鋼製アングル	200.0	0.3	688
高力ボルト(F10T)			112

解析では以下のような仮定を立て、境界条件を設定した。

- 仮定 1 ねじれは発生していない
- 仮定 2 壁面との接合点は完全拘束されている
- 仮定 3 載荷点に応力集中はしていない

これらより、解析上の境界条件は壁面側アングルのボルト孔周辺変位の完全拘束、母材中立軸上節点の y 方向変位の拘束とした。また荷重は等分布荷重とした。実験では、ボルトとボルト孔での間のあそび、またせん断抜け破壊での変形から、図 5 のような隙間が発生する、母材が浮かび上がる現象が見られた。この現象を解析でも考慮するために、解析モデルの検討をおこなう。

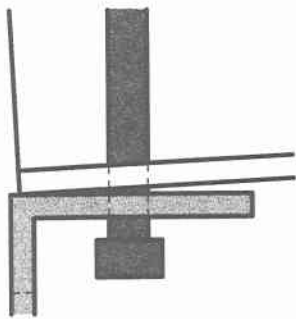
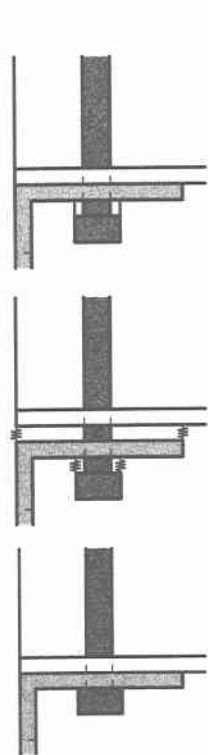


図 5 母材の浮かび上がり

ここで問題となるのは材料別要素間の接触判定、結び付けである。接触解析においては材料別要素ごとに接触ボディの定義を必要とする。材料別各要素は全て変形体とし、各要素間における接触オプションを指定した。接触判定は互いのモデル間で判定し、摩擦係数はプラスチックのものを参考とし、0.3 とした。ここで材料別要素間の接続に関してパラメータを設定し、モデル化手法の検討をおこなった。パラメータは 3 種とし、モデル模式図を図 6 に示す。



モデル 1：タイイング使用モデル

ボルトーアングル間に TYING を設け、自由度の結び付けをおこなったモデル

モデル 2：バネ要素使用モデル

ボルトーアングル間、母材ーアングル間を、剛性の弱いバネ要素を用いてつなげたモデル

モデル 3：完全接着モデル

節点を共有させ、完全に接着させたモデル

図 7 はこれら解析モデルと実験結果、片持ちばりとして計算したたわみを載荷点変位で比較した結果である。

図 6 モデル化方法

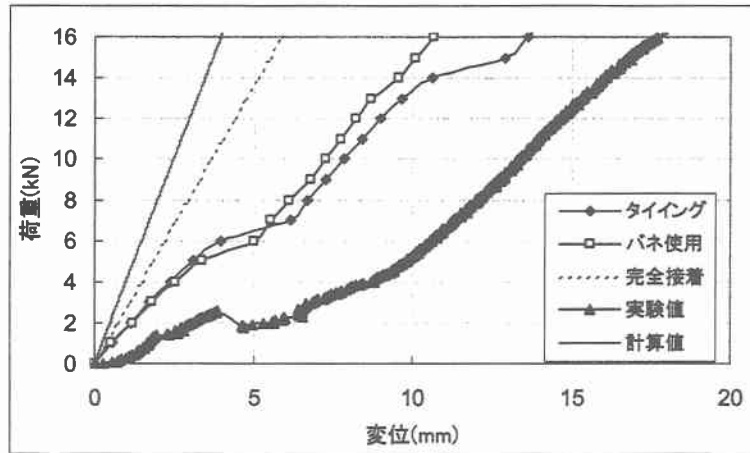


図7 荷重－変位曲線

実験値と解析値が大きな差が見られるのは、今回の解析条件が弾性範囲のみであること、また本解析ではせん断抜け破壊による変化を考慮しておらず、実験時には母材基部で抜け破壊による変形が起こるため、母材の壁面に対する回転角には大きな違いが見られる。また載荷点の変位ではその影響が大きいためであると考えられる。この点についてはせん断抜け破壊のモデル化、種々破壊則の適用などを検討する必要がある。

この結果から、タイピングを使用する手法が今回の解析において最適なものであると考えられる。

図8はタイピング使用モデルでのせん断応力出力結果（最大荷重時）を、破壊強度以上を表示したコンター図である。

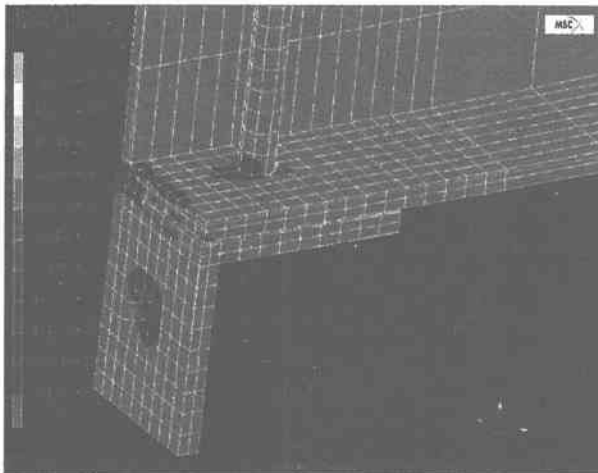


図8 解析結果(最大荷重時)

実際に破壊が見られたボルト孔周辺で応力集中が見られ、同様に添接板でもボルト孔周辺で応力集中が見られた。

6. まとめ

- (1) 引張載荷実験においては、破壊の形状はせん断抜け破壊、引張破壊の2種が見られ、繊維の破断、マット層の剥離をとともうのものであった。
- (2) 本研究では接合部実験において添接板に鋼製ア

ングルを用いているが、FRPの特徴を最大限に活用することを考えると、添接板にもFRPを使用するケースが望ましい、そのためには現在の既製品では断面が小さいため、貼り合わせ等による大断面部材の作成、補強が必要である。

(3) 有限要素法による接触解析では、実験時の母材の挙動を再現することができ、また応力集中についても成果が得られた。今後は弾性領域のみならず、破壊近傍での非線形解析をおこなうことにより、より精度の高い解析結果が得られると考えられる。

【謝辞】

本研究は平成14年度文部省科学研究費（代表者 大島俊之）の補助を受けておこなわれました。

【参考文献】

- 1) 建設省土木研究所他：「繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書（Ⅱ）」共同研究報告書第252号・2000.12
- 2) 明嵐政司,西崎到,木嶋健,佐々木厳：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 論文集,pp.13-18・2001.1
- 3) 北山暢彦,佐伯彰一,山城和男：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 論文集,pp.103-106・2001.1
- 4) 山岸暢,吉田光則,鈴木耕裕,中西洋介,成田吉弘,山下信博,横山光紀：FEMによる異方性複合材料構造体の構造解析（第1報）－FRPの構造解析用物性値の検証－,北海道立工業試験場報告No.298
- 5) 強化プラスチック協会：FRP構造設計便覧・1994.9
- 6) 増田祐介,三上修一,山崎智之,大島俊之：ガラス繊維強化プラスチック（GFRP）接合部の強度特性に関する研究,土木学会第57回年次学術講演会公演概要集I-669・2002.9