

第 I 部門

鋼・GFRP 合成桁の曲げ挙動に関する実験的研究

神戸大学工学部

学生員 ○川上 拓人

神戸大学大学院工学研究科

正会員 橋本国太郎

株式会社ヒビ

正会員 日比 英輝

1. 研究背景および目的 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)とは、一般に熱硬化性樹脂をガラス繊維で補強した複合材料である。他の FRP と比べ、価格当たりの強度や剛性に優れ、実用性が高い。しかし、鉄に比べ剛性が小さいため、たわみが大きくなりやすく、設計ではたわみを抑えるために部材断面を大きくする必要がある。先行研究¹⁾では、GFRP 合成桁の剛性の増大のために、鋼板を GFRP 部材内に積層した鋼・GFRP 合成桁の曲げ挙動について検討した。I 形部材を 2 つの C 形部材を接着することで製作したが、载荷にあたりこの接着面で剥離し破壊した。本研究では、鋼・GFRP 合成桁の製作方法の改善し、最大曲げ耐力の測定および剛性の向上を目的として载荷実験により検討した。試験体の製作方法の改善策として、C 形部材を抱き合わせた後に、フランジ板を積層し、I 形部材を製作した。また、積層する鋼材の再選定と剛性の改善を実験的に検討した。

2. 鋼・GFRP 板の引張試験 GFRP 板および鋼板 (パンチングメタル: PM)を積層した鋼・GFRP 板の引張強度および引張弾性係数を確認する。なお、試験に用いた GFRP には不飽和ポリエステル樹脂を用いている。図 1 に示すように、使用する PM は長孔を有するステンレス鋼板の SL タイプと、円孔と十字孔を有する SPHC 鋼板の CR タイプの 2 種類を用いた。各試験板を 5 体ずつ製作して JIS K 7165 を参考に引張試験を行った。試験板の寸法およびひずみゲージ貼付位置を図 2 に示す。試験結果を表 1 に示す。平均最大応力はそれぞれ $\sigma_{GFRP}=377\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_{CR}=270\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_{SL}=278\text{N/mm}^2$ となり、GFRP 試験板が最も大きく、CR と SL で大きな差は見られなかった。引張弾性係数 $E_{GFRP} = 25.9\text{kN/mm}^2$ 、 $E_{CR} = 24.0\text{kN/mm}^2$ 、 $E_{SL} = 29.6\text{kN/mm}^2$ で全試験板のうち SL 試験板が最も大きくなった。荷重载荷初期では、PM と GFRP が一体となって変形しているため、PM の弾性係数が大きいほど、引張弾性係数が大きくなると考えられる。

3. 鋼・GFRP 板の曲げ試験 GFRP 板および 2 種類の PM を積層した鋼・GFRP 板の曲げ強度および曲げ弾性係数を確認するため、各試験板を 5 体ずつ製作して JIS K 7017 を参考に曲げ試験を行った。試験板の寸法およびひずみゲージ貼付位置を図 3 に示す。試験板には引張試験に用いた試験板と同様の積層構成のものを使用した。試験結果を表 2 に、応力ひずみ関係を図 4 に示す。平均最大応力はそれぞれ $\sigma_{GFRP}=331\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_{CR}=144\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_{SL}=290\text{N/mm}^2$ で GFRP 板試

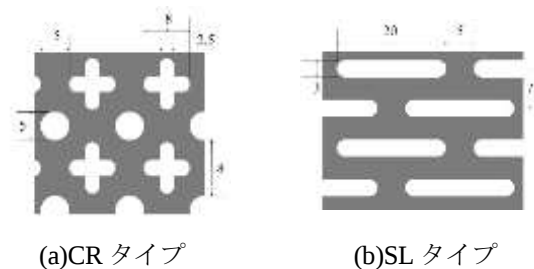


図 1 PM の種類の概要(単位: mm)

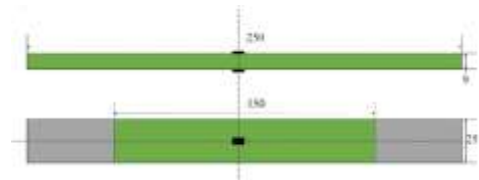


図 2 引張試験板の概要

表 1 引張試験結果

	最大応力(N/mm ²)	引張弾性係数(kN/mm ²)
GFRP	378	25.9
CR	270	24.0
SL	274	29.6



図 3 曲げ試験板の概要

表 2 曲げ試験結果

	最大応力 (N/mm ²)	曲げ弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ剛性 (N/mm)
GFRP	331.1	20.7	384
CR	143.7	15.2	473
SL	290.4	19.2	596

験板の方が大きくなった。

PM を積層すると、荷重が増えるにつれて PM と GFRP の境界で剥離が生じ破壊に至るため、GFRP 試験板のほうが最大応力が大きくなったと考えられる。それぞれの平均曲げ剛性は $K_{b\text{ GFRP}}=384\text{N/mm}$, $K_{b\text{ CR}}=474\text{N/mm}$, $K_{b\text{ SL}}=596\text{N/mm}$ となり、SL 鋼板を積層した試験板が最も大きくなった。以上より鋼・GFRP 合成桁には SL 鋼板を積層すると最も剛性が大きくなると予想される。

4. 鋼・GFRP 合成桁の桁曲げ試験 GFRP 桁および2種類のPMを積層した鋼・GFRP 桁の曲げ強度、曲げ剛性、および曲げ弾性係数を確認するため、各試験体を3体ずつハンドレイアップ工法で製作して曲げ試験を行った。試験体の寸法を図5に示す。スパン中央および支点の垂直変位、さらに载荷点の下フランジと载荷点から200mm 支点側に離れた位置でのウェブ・フランジのひずみを測定した。万能試験機を用いて荷重および試験体中央の変位の測定を行った。GFRP 桁試験体は、C 形桁を背中合わせに積層し一体とした後、さらにフランジ板のGFRPを積層しI 形桁とした。鋼・GFRP 桁試験体はC 形桁を背中合わせに積層し一体とした後、表面に厚さ1.6mm のPMを積層し、さらにフランジ板のGFRPを積層しI 形桁とした。試験結果を表3に、荷重-変位関係を図6に示す。各試験体の平均最大荷重は $P_{\text{GFRP}}=206\text{kN}$, $P_{\text{CR}}=214\text{kN}$, $P_{\text{SL}}=211\text{kN}$ でPMを積層した試験体の方が大きくなった。また、CR 鋼板を積層した桁の剛性はGFRP 桁の1.06倍、SLを積層した桁ではGFRP 桁の1.26倍と上昇した。ティモシェンコ梁理論から算出された理論剛性 K_t を各試験体の剛性と比較するとGFRP 試験体では比較的近い結果となった。一方、PM 試験体では理論剛性に比べ実験値が小さく実験理論比(K_e/K_t)が0.8から0.9程度となった。これはGFRPとPMの合成が十分でなく、载荷が進むにつれて剥離が生じ、桁が一体となって挙動していないためと考えられる。また、それぞれの試験体は载荷点の支圧板の縁からウェブにかけてせん断破壊した。これは桁のたわみが大きく曲がるため、支圧板の縁がGFRPに食い込み桁が破壊したためと考えられる。今後実験より曲げ最大耐力を求めるためには、4点曲げ試験、またはGFRP製の支圧板の製作などでせん断破壊の防止を検討する必要がある。

5. 結論 全ての試験体は、荷重増加につれ支圧板の縁が桁に食い込み、せん断破壊し曲げ強度の測定には至らなかった。CR 鋼板、SL 鋼板の積層によって桁の剛性が1.06倍、1.26倍上昇した。鋼・GFRP 合成桁の剛性は理論値の80%程度であり、荷重増加とともに表層のGFRPが剥離し剛性が低下した。

参考文献 : 1) 橋本 国太郎, LEE EngMing, 杉浦 邦征, 西崎 到, 日比 英輝: 鋼・GFRP 合成桁の曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol. 70 (2014) No. 5, p. II_31-II_39, 201

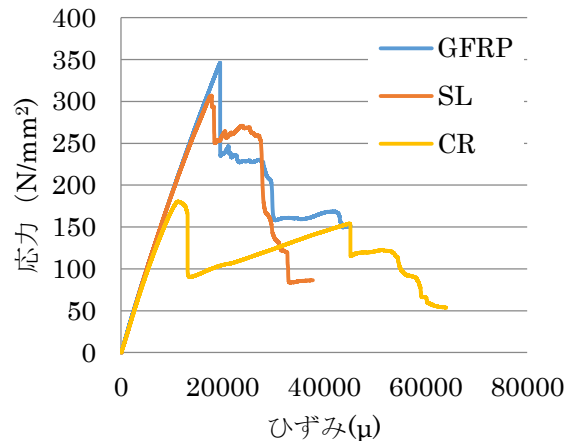


図4 各試験体の応力-ひずみ関係

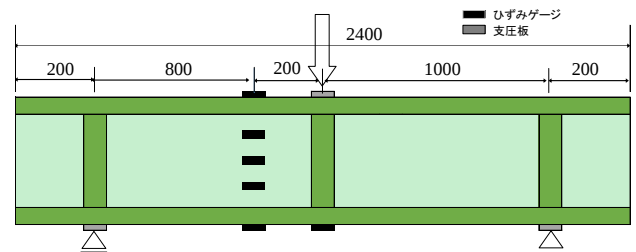


図5 鋼・GFRP 合成桁の概要

表3 桁曲げ試験の結果

	最大荷重 (kN)	曲げ剛性 K_e (kN/mm)	$K_t / K_{t(G)}$	理論剛性 K_t (kN/mm)
GFRP	206	5.83		5.71
CR	214	6.16	1.06	7.82
SL	211	7.35	1.26	8.51

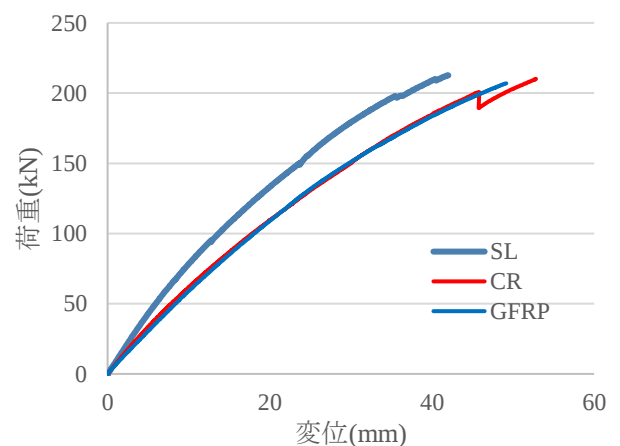


図6 各試験桁の荷重-変位関係