

接着剤を用いたGFRP小型歩道橋の開発

高橋 浩介¹・大西 弘志²・栗田 真輝³

¹学生会員 岩手大学大学院 総合科学研究科 地域創生専攻 修士課程
(〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)
E-mail: g0117032@iwate-u.ac.jp

²正会員 岩手大学准教授 理工学部 システム創成工学科
(〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)
E-mail: onishi@iwate-u.ac.jp

³非会員 日本ファブテック株式会社

現在、GFRPの構造体を成型する方法は多様である。しかし、複雑な構造を持つものを成型する場合、現段階の技術ではコストと手間がかかってしまい、困難が伴う場合がある。この問題を解決するために、本研究では簡単な構造を接着剤により接合し、複雑な形状を成形することを考えた。本論文ではハンドレイアップ成形法で制作したGFRP板とフィラメントワインディング成形法で制作したGFRP円筒を接着剤により接合し板材を成型し、その性能を曲げ試験により検討した。また、検討結果をもとに簡易的な小型歩道橋の開発を行った。

Key Words : GFRP, footbridge, slab, adhesives

1. はじめに

近年、土木構造物の老朽化が問題となっている。中でも鋼構造物の老朽化の原因の一つとして鉄の腐食が問題視されている¹⁾。

鉄の腐食のほとんどは、「湿食」による腐食である。湿食を防止する基本的な対策は、水または酸素の供給を断つことであり、塗装等の被膜による防食や耐食性材料の使用による防食が現在行われている。しかし、これらの防食は塗膜や材料の劣化等があり、定期的に点検・補修が必要とされコストがかかる上に、それでもなおエッジ部分やボルト部分に腐食が出てしまっているのが現状である。日本各地の41の地域において、一定期間内における鋼材の腐食量を暴露試験によって調べ、大気環境の分類区分ごとに整理した結果を図-1に示す。沿岸地域は過度の飛来塩分により腐食反応が促進されるため、これらの地域は厳しい腐食問題にあるといえる。

そこで、腐食してしまう鋼材や鉄筋コンクリートの代替素材としてFRPを用いることに着目した。FRPは腐食劣化をしないため、飛来塩分が多い地域に適している。現在新設の土木構造物において、FRPが使用される場合は比較的安価なGFRPを用いるのが一般的である。GFRP製品の成形方法は用途や形状によって決定しており、成形する手段は多様である。

しかしながら、形状が筒状や板状のような簡易的な形状や、一つの形状を大量に生産するのであれば安価で生産ができる一方、土木構造物においては異なる複雑な形状が多量に必要な場合が多く、複雑な形状を成形するにはその製品専用の型枠を一つ一つ準備しなければならない為、その点からコストがかかってしまう³⁾⁴⁾。

そこで本研究では、立体構造の構造物を安価で製作する方法として、接着接合を活用して部材を構築する方法を考えた⁵⁾。今回、フィラメントワインディング成形材の円筒パイプと、ハンドレイアップ成形材の平板を接着接合することにより床版材を作成し、その性能を静的載荷試験によって確認した。その後検討結果をもとに簡易的な小型歩道橋の開発を行った。

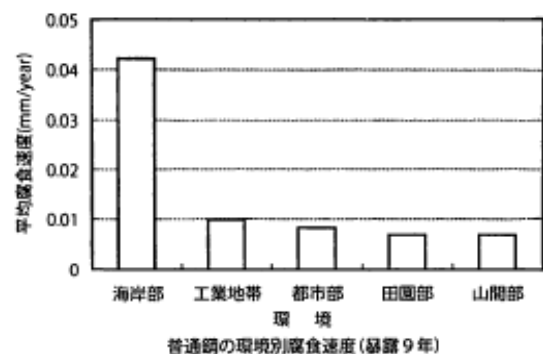


図-1 環境毎の鋼材腐食量²⁾

2. 床版材に用いたGFRPの材料特性

(1) 材料試験概要

GFRP部材の材料特性値は繊維含有率や成形方法によって大きく変動するため、実際に载荷試験を行って導き出した。本研究では、平板の引張試験、円筒パイプの曲げ試験を行った⁷⁾。引張試験、曲げ試験共に3体の試験体を作成し試験を実施した。図-2に引張試験の試験体の寸法、ひずみゲージを貼付した位置を示す。試験体は全長460mm、幅100mm、板厚4.7mm、タブの材質はFRPとし、長さ80mmとした。試験体の中央には2軸のひずみゲージを貼付した。材料試験機は容量2000kNの万能試験機を用いて行った。図-3に曲げ試験に用いたパイプ試験体の寸法、ひずみゲージ位置、変位計位置及び载荷位置を示す。曲げ試験は3点曲げ試験を行い、試験体は全長1200mm、板厚11mm、内径49mmである。ひずみゲージは、パイプ全長の1/4、1/2、3/4にあたる断面（圧縮側、引張側）の部材軸方向に1軸のひずみゲージを各1枚貼付した。変位は支点上部と中央下部で計測した。曲げ試験は载荷中にパイプが移動しないようにするために、写真-1に示すような支点を設けた。

(2) 引張試験結果

引張試験で得られた、FRP平板材の応力-ひずみ関係を図-4に示す。JISK7164に基づき弾性係数の算出には応力-ひずみ曲線のうち比較的直線的傾向を示した範囲（500-2500 $\mu\epsilon$ ）を用いた。弾性係数やポアソン比の算出結果を表-1に示す。今回の引張試験では、破壊は試験片中央での破断ではなくタブの滑り破壊による破壊であった。そのため、一般的なGFRPの弾性係数より低い結果となっている。また、引張試験の試験結果より以下の(1)式を用いてFRPのガラス繊維含有率を算出した⁸⁾。

$$V_f = \frac{E - E_m}{E_f - E_m} \quad (1)$$

E :FRPの弾性係数, E_f :強化繊維の弾性係数,

E_m :母材の弾性係数, V_f :強化繊維の体積含有率

本試験の結果に基づいて繊維含有率を求めると11%となった。

(3) 曲げ試験結果

曲げ試験における荷重-変位関係を図-5に、曲げ試験結果を表-2に示す。また、破壊の位置を図-6に示す。破壊の位置に着目すると、それぞれ破壊の場所にばらつきがみられる。特に試験体2と3は载荷点から大きくずれている。これは試験体製作時の繊維量や樹脂含有量にばらつきがあったことによる影響と考えられる。

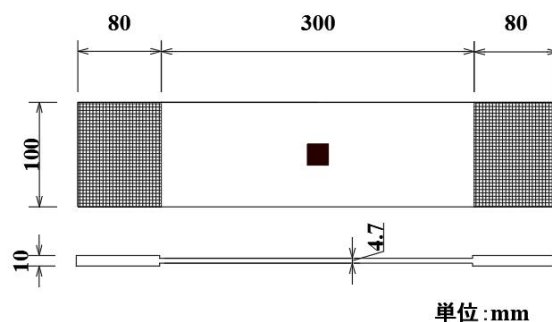
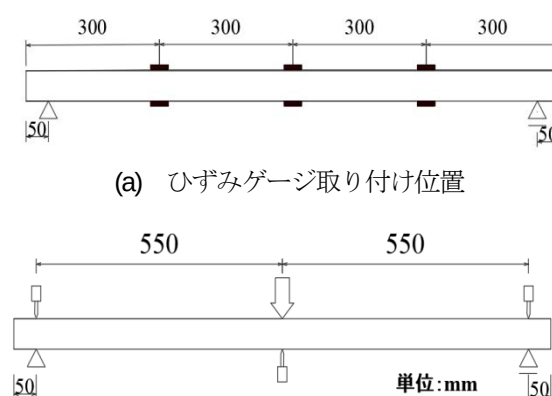


図-2 引張試験片概要



(a) ひずみゲージ取り付け位置
(b) 変位計設置位置及び载荷位置
図-3 曲げ試験体概要



写真-1 曲げ試験支点半

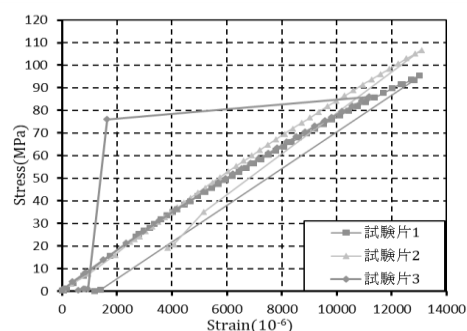


図-4 応力 - ひずみ関係 (引張試験)

表-1 引張試験結果

試験片No	最大引張荷重(kN)	引張強度(Mpa)	弾性係数(Gpa)	ポアソン比
1	44.87	95.47	8.84	0.18
2	50.18	106.76	8.55	0.23
3	40.47	86.08	8.70	0.31

表-2 曲げ試験結果

試験片No	最大荷重(kN)	最大曲げ応力(Mpa)	曲げ弾性係数(Gpa)
1	7.26	150.7	0.551
2	5.36	106.0	0.483
3	6.27	106.1	0.450

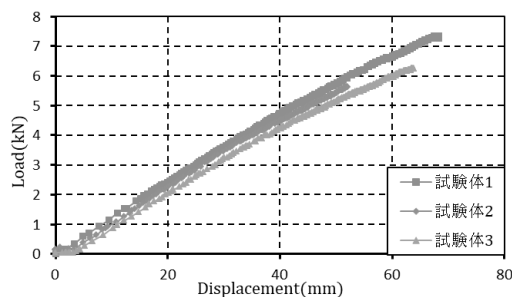


図-5 荷重 - 変位関係 (曲げ試験)

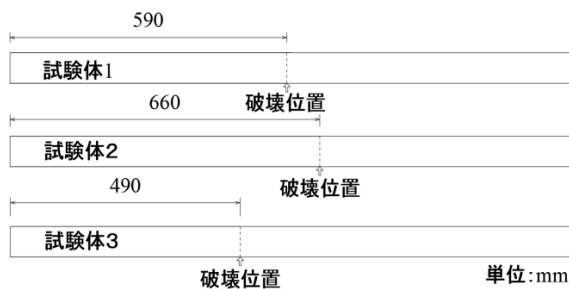


図-6 試験体破壊位置

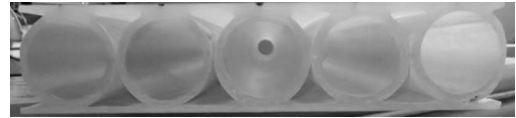
3. GFRP板材の曲げ試験

(1) 試験体概要

接着接合を用いた試験体の外観を写真-2に示す。また、試験体寸法を図-7示す。本試験で用いた試験体は別々に製作した平板と円筒パイプを接着接合により組み立てて製作した。試験体内の平板とパイプの接着・配置を変化させて3種の試験体を準備した。共通して平板とパイプは接着接合をし、パイプ同士を接触させて接着接合したものをtype-A、パイプ同士を接着させていないものをtype-B、パイプとパイプの間に5mmほどの間隙を設けたものをtype-Cとした。type-Aとtype-Bに用いた平板は部材軸直角方向幅300mm、type-Cはパイプの間に5mmの間隙を設けたので、部材軸直角方向幅は320mmとなっており、

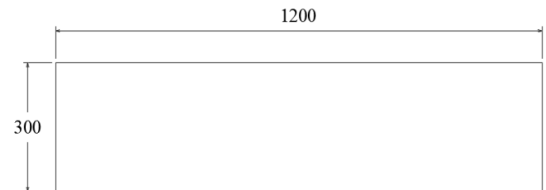


(a) 試験体上面

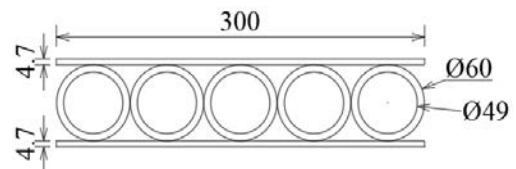


(b) 試験体断面

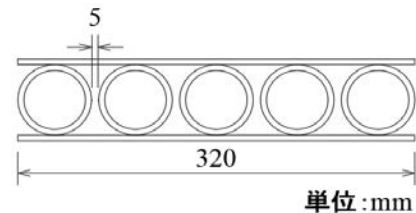
写真-2 試験体写真



(a) 試験体上面図 (type-A,B)



(b) 試験体断面図 (type-A,B)



(c) 試験体断面図 (type-C)

図-7 試験体寸法

その他の規格は部材軸方向長さ1200mm、板厚4.7mmである。パイプは外径60mm、内径49mm、全長1200mmである。

(2) 試験内容

本研究では、試験体に対して4点曲げによる載荷試験を実施した。試験時の支間長は1100mm、載荷点は両支点から400mmの位置とし、等曲げ区間長を300mmとした。図-8に載荷位置を示す。また、図-9に変位計設置位置を示す。変位計は板材の部材軸直角方向の両端に設置し、これらの点の変位の平均を中央の変位とした。図-10にひずみゲージ貼付位置を示す。ひずみゲージは圧縮側平板表面、引張側平板表面と、パイプ側面に添付した。試験体設置の様子を写真-3に示す。



写真-3 荷重試験様子

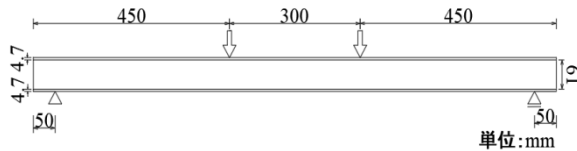


図-8 荷重位置

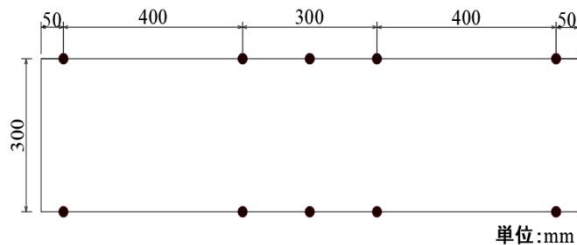
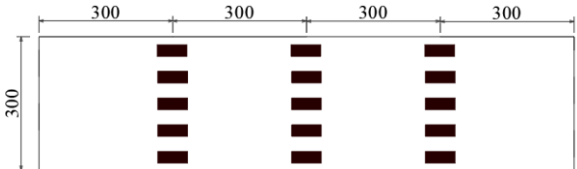
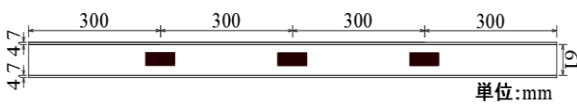


図-9 変位計位置



(a) 上下面図

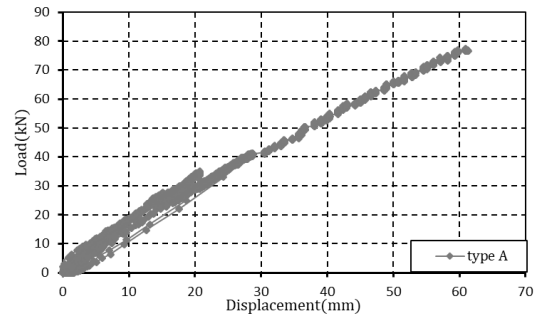


(b) 側面図

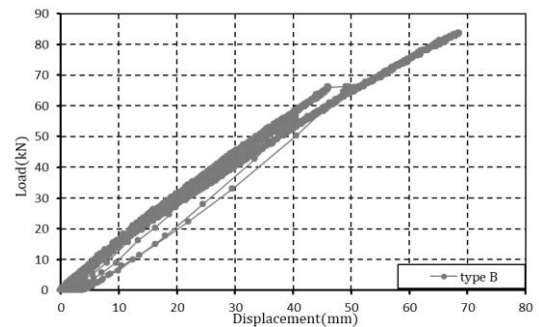
図-10 ひずみゲージ位置

表-3 静的荷重試験結果

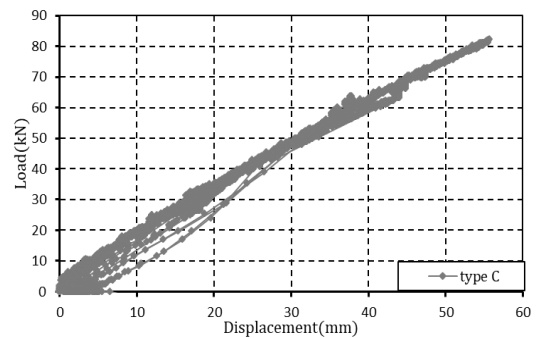
試験片No	最大荷重(kN)	最大変位(mm)	ヤング係数($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
type-A	76.6	61.3	1.32
type-B	83.3	68.4	1.29
type-C	82.3	55.7	1.50



(a) type-A



(b) type-B



(c) type-C

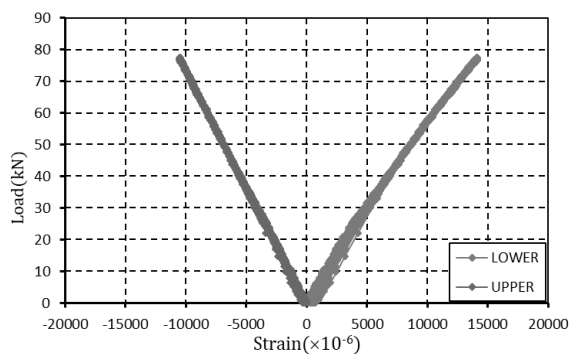
図-11 荷重 - 変位関係

4. 試験結果と考察

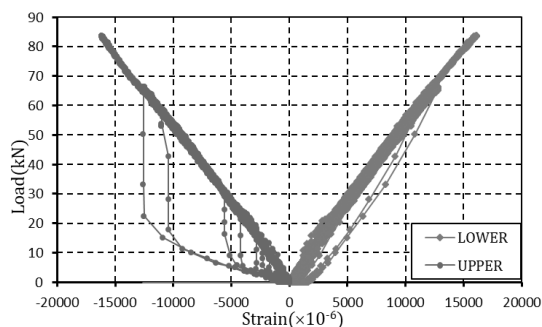
(1) 荷重 - 変位関係

本試験における、各試験体の荷重-変位関係を図-11に示す。また、各試験体の最大荷重と最大変位、荷重-変位関係から得られるヤング係数を表-3に示す。type-Aとtype-Bの結果より、パイプ同士を接着させることによる曲げ耐力の大きな向上は確認できなかった。type-Cは最

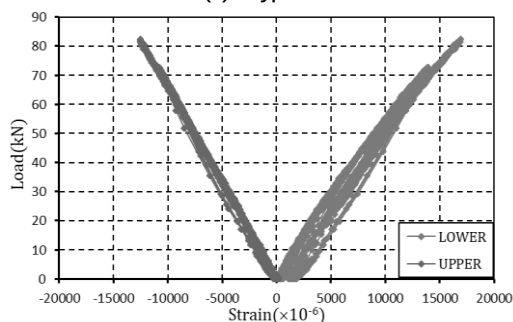
大荷重がtype-Aより大きく、type-Bとほぼ同等の値を示しているが、最大変位は最も小さい値を示した。これは、パイプ同士に間隙を設けることによって、荷重を受ける面積が大きくなったためだと考えられる。またtype-Aとtype-Bのヤング係数の値から、接着剤によるヤング係数の大きな向上は確認できなかった。



(a) type-A



(b) type-B



(c) type-C

図-12 荷重 - ひずみ関係

(2) 荷重 - ひずみ関係

type-A~type-Cの試験体中央の圧縮側、引張側における荷重とひずみの関係を図-12に示す。type-Bは圧縮側、引張側のひずみがほぼ対象に生じている。一方で、type-A、type-Cでは引張側の方が大きなひずみを示していることがわかる。この原因として、荷重をかけていくにつれて、引張側の平板とパイプの接着が弱まってしまったためだと考えられる。type-Bの最大ひずみは圧縮側、引張側共に約 16000×10^6 となっているが、type-Aは圧縮側の最大ひずみが約 10000×10^6 、引張側が約 14000×10^6 、type-Cでは、最大ひずみが約 12000×10^6 、 17000×10^6 となっている。type-Aとtype-Cを比較すると、たわみはtype-Aの方が大きい、ひずみはtype-Cの方が大きい値を示している。これはtype-Cに間隙があることにより、最大応力部で円筒パイプが潰れ、中央部が大きくひずんだためだと考えられる。

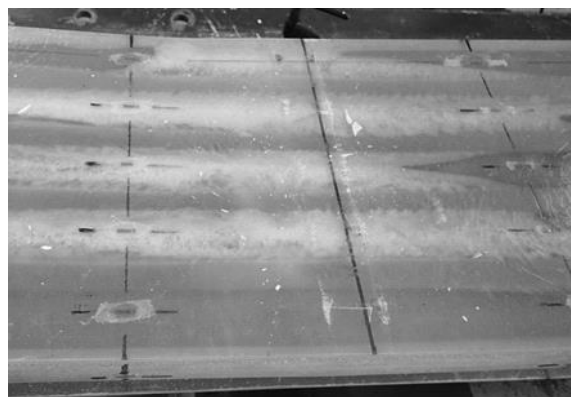
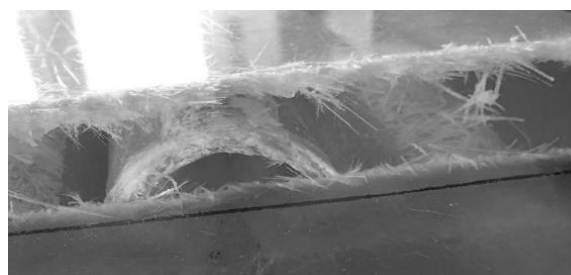
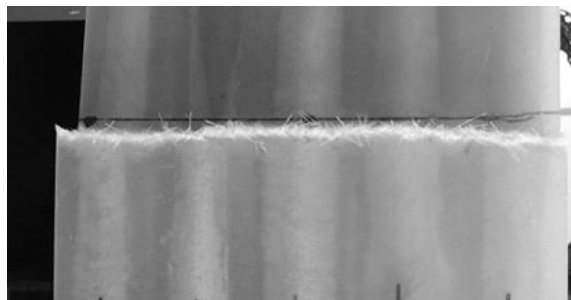


写真-4 破壊状況

(3) 破壊状況

Type-Bの破壊状況を写真-4に示す。試験中、荷重を大きくするにつれて、接着剤が剥がれる音がしていき、最大荷重の時に大きな音と共に破壊した。接着剤が剥がれる音はしていたが、最大荷重に至るまでに目視観察により破壊は確認できなかった。type-Bとtype-Cは平板の破壊位置とパイプの破壊位置が10cmほどずれていた。

5. FEM解析による検討

(1) 解析概要

実験値の妥当性の検証，異なる繊維含有率やGFRP以外の材料との比較のために，汎用有限要素解析プログラム（SOFISTIK）を用いて数値解析を実施した．比較はGFRPの繊維含有率を10%~80%まで10%ごとに解析し，そのほかに強度の比較としてコンクリート，一般構造用鋼の3種の材料を解析した．

解析モデル図を図-13に示す．载荷条件は試験時と同様の4点曲げ，寸法はすべてtype-B同様の条件とし，接着接合していた平板材とパイプ材間は完全結合している設定とした．

(2) 解析結果

a) 試験結果との比較

荷重をかけた際の応力分布図を図-14に示す．解析では完全結合としていたため，パイプ材まで均一に応力が伝達している．

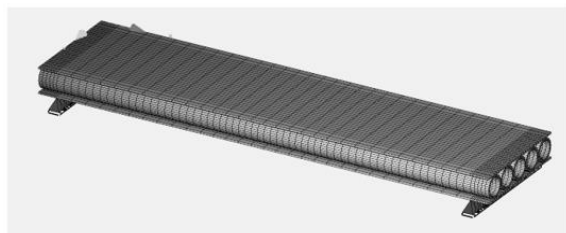


図-13 解析モデル

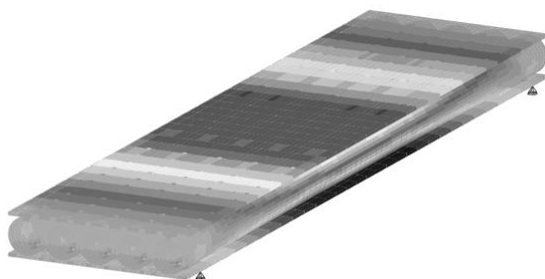


図-14 応力分布図

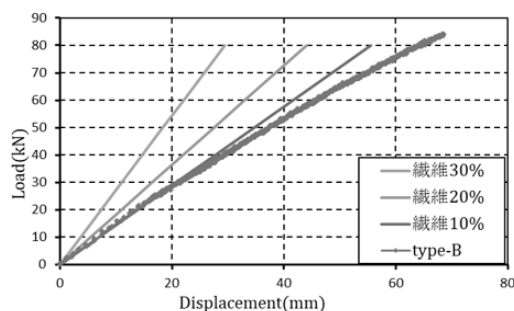


図-15 試験結果との比較

本試験における試験体type-B（繊維含有率11%）と繊維含有率10%~30%の解析結果の荷重 - 変位関係を図-15に示す．図-15より，試験結果は繊維含有率10%の解析結果に近い直線を示しているのがわかる．試験体の繊維含有率が11%であることから本試験結果が妥当であったといえる．また，完全結合の解析結果と比べ，荷重が大きくなるにつれて変位の変化量が大きくなっている．これは接着剤の剥離による影響だと予想される．

b) 他材料との比較

繊維含有率10%~80%のGFRP及びコンクリート，一般構造用鋼の解析結果における荷重 - 変位関係を図-16に示す．GFRPの強度は鋼材には劣るが，繊維含有率を変化させることで，コンクリート以上の強度を示すことができる．コンクリートの強度はGFRPの繊維含有率30%~40%と同程度の強度となった．また，解析結果のまとめを表-4に示す．コンクリートの密度は繊維含有率80%のGFRPの密度とほぼ同等であるが，変位は繊維含有率80%のGFRPの方がコンクリートと比べ半分以下に収まっていることがわかる．コンクリートと同じ変位量となると繊維含有率30%~40%の間であることがわかる．

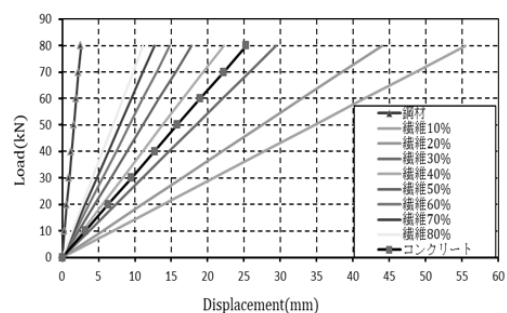


図-16 他材料との比較

表-4 解析結果

材料	密度(g/cm ³)	80kN時の変位(mm)
GFRP(10%)	1.4	55.5
GFRP(20%)	1.5	44.0
GFRP(30%)	1.7	29.4
GFRP(40%)	1.8	22.2
GFRP(50%)	1.9	17.8
GFRP(60%)	2.0	14.8
GFRP(70%)	2.1	12.7
GFRP(80%)	2.3	11.1
コンクリート	2.3	25.3
鋼	7.8	2.57

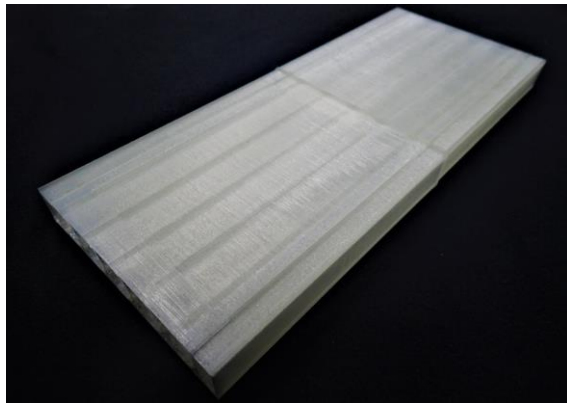
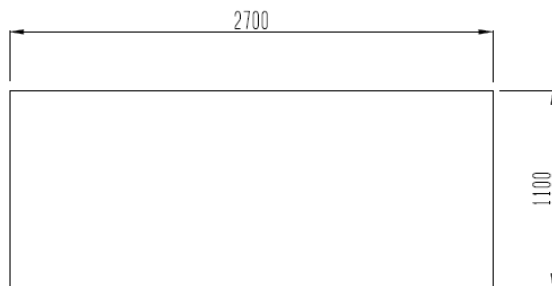
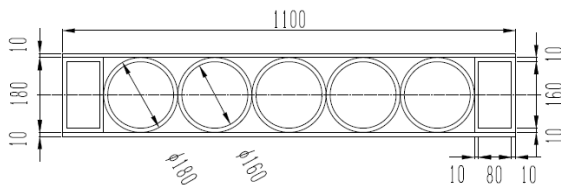


写真-5 床版 1/10 モデル



(a) 上面図



(b) 断面図

図-17 小型歩道橋寸法

6. GFRP小型歩道橋の開発

(1) 設計条件

本実験により得られた結果をもとに、実際に使われる小型のGFRP歩道橋の床版を設計することを考えた。用いる材料は本実験で用いた平板やパイプと同じ製法、同じ繊維含有率とする。今回設計する床版の規格は縦2700mm、横1100mm、高さ200mmの床版とした。GFRPの場合他の材料と比べ、たわみが制限値より大きくなってしまう傾向があるため、今回はたわみ制限値のみ考慮して設計を行った。

『FRP歩道橋設計・施工指針（案）』（土木学会）⁹⁾を設計基準の参考とし、活荷重5.0kN/m²に対してたわみL/600以下をたわみ制限値とした。

体積	159580800mm ³
推定重量	226.6kg
断面積	59104mm ²
断面二次モーメント	3.38×10 ⁸ mm ⁴
曲げ剛性	4.36×10 ⁶ N・m ²
推定たわみ値	0.47mm
たわみ制限値	4.5mm

表-5 床版モデル詳細

(2) 設計概要

3Dプリンターを用いて作成した、設計した床版の1/10モデルの全体図を写真-5に示す。また、設計した床版の規格を図-17に、各データを表-5に示す。試験結果より、平板とパイプの間の接着剤によるヤング係数の大きな向上は見られなかったため、コスト面も考慮して設計にはtype-Bの試験結果を用いた。断面図両端は飛び出した平板部分による事故の防止や強度を上げる目的、また、手すりを両端に取り付けることを考慮して円筒ではなく箱型の筒を採用した。

7. まとめ

本研究では、接着接合により部材を組み立てた板材の静的載荷試験を実施することによって板材の力学的挙動を検討した。得られた結果を以下に示す。

- ・板材の載荷試験において、繰り返し載荷を行ったが、最大荷重を加え破壊に至るまでの間に塑性変形はみられない。
- ・板材の載荷試験において、パイプ同士の接着接合による耐力の向上はみられなかった。また、パイプに間隙を与えるとヤング係数は小さくなるが支間中央部のひずみが少し大きくなる。
- ・接着接合による成形は完全結合のものと比べ、途中まで似た挙動をするが荷重が大きくなるにつれて若干ひずみが大きくなる。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧、第I編、丸善出版、2015。
- 2) 建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XV)－耐候性鋼材の暴露試験のまとめ－全国暴露試験の第5回腐食量測定結果(9年目)、1992。
- 3) 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、2014。

- 4) 大西弘志, 山本竜一, 岩崎正二, 出戸秀明, 西田雅之 : ハンドレイアップ型材で構成した GFRP 梁の曲げ強度, 2015.
- 5) 小林憲治, 日野伸一, 青野雄太, 山口浩平, 岡俊蔵, 林耕四郎 : GFRP 引抜き成形 I 形断面はりの材料力学特性および曲げせん断挙動に関する実験的研究, 2008.
- 6) 土木学会 : 複合構造レポート 09, 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, 丸善出版, 2013.
- 7) 土木学会 : 複合構造レポート 11, 土木構造用 FRP 部材の設計基礎データ, 丸善出版, 2014.
- 8) 土木学会 : 構造工学シリーズ 14, FRP 橋梁—技術とその展望—, 丸善出版, 2004.
- 9) 土木学会 : 複合構造シリーズ 04, FRP 歩道橋設計・施工指針 (案), 丸善出版, 2011.

DEVELOPMENT OF GFRP SMALL FOOTBRIDGE USING ADHESIVE

Kosuke TAKAHASHI, Hiroshi ONISHI and Masaki KURITA

Currently, there are various ways to form a structure consisting of GFRP. However, it is difficult because it costs and labor when forming a complicated structure with the current technology. to solve this problem, I thought of making complex shapes by attaching a simple structure with adhesive. In this research, I prepared a plate material with two parts glued together. One is a GFRP board made by Hand lay-up molding method. The other one is GFRP cylinder made by Filament winding molding method. I examined the performance of the plate material by bending test. Also, I developed a small footbridge based on the result of review.