3点曲げ試験によるGFRPサンドイッチ版の 耐荷性状に関する実験的研究

岩田 大輝¹·井上 澄貴²·松村 政秀³

1 学生会員 熊本大学大学院 自然科学教育部土木建築学専攻 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1) E-mail: 223d8301@st.kumamoto-u.ac.jp

> ²正会員 株式会社コムテック (〒861-8019 熊本市東区下南部 3 丁目 6-80) E-mail: inoue@comtec.jp

³熊本大学 くまもと水循環・減災研究教育センター (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1) E-mail: matsumura-m@kumamoto-u.ac.jp

腐食・老朽化に伴い,既設歩道橋の木製床版の取り替えが進められている.山間部の木製遊歩道では重 機を必要とする工事が困難であるため,耐久性に優れ,人力運搬が可能な床版が求められている.本研究 では,表面材にGFRP,心材に硬質ウレタンを用い,VI(Vacuum Infusion)成形したGFRPサンドイッチ版に 着目し,GFRPの引張試験と曲げ試験,および,GFRPサンドイッチ版の3点曲げ試験を実施し,0.8~1.2 m 程度の支間の,遊歩道床版として適用できることを確認した.また,GFRPサンドイッチ版の断面板厚方 向のひずみ分布より,曲げ応力はGFRP板に分担され,硬質ウレタンの破壊により終局に至ることを確認 した.

Key Words: GFRP, polyurethane, sandwich deck, bending test

1. はじめに

白色腐朽菌により腐食劣化した木製床版¹の取り替え が進められている。山間部など狭隘地に設置された主桁 間隔の小さい小規模な木製遊歩道では、重機を用いる作 業が困難なため、新しい床版には優れた耐食性を有し、 軽量で人力運搬が可能な構造が必要とされている。

ここで、高耐久かつ軽量な材料として繊維強化プラス チック(Fiber Reinforced Plastics:以下 FRP)が挙げられ、 繊維材料の入手性、コスト面から GFRP 板を床版として 使用することが考えられる.また、軽量な構造で所要の 曲げ剛性を確保する必要があることから、床版の表面材 に高強度な材料を、心材に比重の小さい材料を使用する サンドイッチ構造が着目されている.例えば、石井ら³ は、真空圧によってエポキシ樹脂を含浸させる VI

(Vacuum Infusion) 成形によって表面材にGFRP板,心材 にバルサ材を配した歩道橋用床版を対象に,3 点曲げ試 験を実施している.その結果,同構造は歩道橋用床板と してたわみ制限値(=スパン長 L/350)を満足することを 確認している.さらに,天然繊維とバイオベースの樹脂 と組み合わせて用いることによって,吸水による性能低 下を改善したバイオベースの可動式自転車橋も建設され ている³.

ここで、曲げモーメントを受けるサンドイッチ版の破壊モードの分類を図-1%に示す.サンドイッチ版の破壊モードは、同図(a)~(c)に示す表面材の破壊、(d)~(g)に示す心材の破壊、(h)に示す表面材と心材の界面破壊の3種



類に大別される. 界面破壊のように, 接着面が剥離する と, 表面材と心材の耐荷性能を十分に発現されず, サン ドイッチ構造としてのメリットを活かすことができない ことが懸念され, 破壊モードを確認しておくことが重要 である.

そこで、本研究では、表面材に GFRP 板を、心材に天 然繊維よりも強度のばらつきが小さく、吸水しにくい硬 質ウレタン (COOSA 社 Bluewater20)を、エポキシ樹脂 を含浸させる VI成形によって一体化した GFRP サンドイ ッチ版に着目する.3 点曲げ試験を実施することで、 GFRP サンドイッチ版の破壊モード、耐荷性状を明らか にし、遊歩道床版としての適用可能性を確認する.

2. 材料試験

(1) GFRP 板

GFRP サンドイッチ版の表面材として用いた GFRP 板の材料試験を実施した. 図-2に GFRP 板の製作に使用した 1 軸繊維と 4 軸繊維の 2 種類のガラス繊維マットの繊維方向,表-1に GFRP 板の積層構成および目付量示す. 表-1 に示すように,GFRP 板には,7層の繊維マットを両表面に 1 軸繊維,2-6層は 1 軸繊維と 4 軸繊維を交互に配している.1 軸繊維層は 0°軸方向にのみ配し,目付量が 1,200 g/m²,4 軸繊維は 0°,45°,-45°,90°方向に 300 g/m²であり,両繊維の目付量の合計値は等しい.なお,GFRP 板の材料試験片はサンドイッチ版の製作と同時に成形した.

表-2にGFRP板の材料試験の内訳を示す.繊維方向が 0°(軸)方向,90°(直角)方向の材料試験片を対象に, 引張力を漸増させる引張試験,および単純支持した GFRP板のスパン中央に鉛直荷重を漸増させる3点曲げ 試験を実施する.試験片数は各5片である.

a) 引張試験

JISK 7164⁹のタイプ 1B系 A形試験片に準拠して切り出 した板幅 20 mm (中央部は 10 mm) の GFRP 引張試験片 を図-3に示す.試験片には,縦ひずみを計測するためゲ ージ長 5 mm の 1 軸ひずみゲージ (東京測器研究所製: BFLA-5-8-3LJCT) を中央の両面に貼付した.載荷には 1,000kN 万能試験機を使用し,ひずみ速度が 20 µ/s となる ように載荷した.

図4に応力-ひずみ曲線,応力は荷重を試験前のGFRP 板の断面積で除して求めている.表-3に引張試験結果を まとめている.すべての試験片で,載荷方向の繊維が破 断することで最大荷重を得ており,直角方向の繊維の破 断はなかった.引張弾性率は,ひずみ値が500~2,500µの 範囲で最小二乗法により算出した.引張強度,引張弾性 率の変動係数を併記している.



図-2 ガラス繊維マットの繊維方向

表-1 GFRP 板の積層構成と目付量

	ガラスマット		Total			
層数	の種類	0°	45°	-45°	90°	(g/m ²)
1	1軸	1,200	0	0	0	1,200
2	4軸	300	300	300	300	1,200
3	1軸	1,200	0	0	0	1,200
4	4軸	300	300	300	300	1,200
5	1軸	1,200	0	0	0	1,200
6	4軸	300	300	300	300	1,200
7	1軸	1,200	0	0	0	1,200
Total (g/m ²)		5,700	900	900	900	8,400

表-2 材料試験の内訳(GFRP板)

試験方法	着目する繊維方向	試験片数
	軸方向	5
51 饭 武 映	直角方向	5
っと中心学を	軸方向	5
3 点曲り 武鞅	直角方向	5



図-3 引張試験片の寸法図(単位:mm)



試験片 種類	試験片 No.	板幅 <i>b</i> (mm)	板厚 h(mm)	断面積 A(mm ²)	引張強度 σ (N/mm ²)	σ の 変動係数	引張弾性率 E_{\star} (×10 ⁴ N/mm ²)	$E_t の変動係数$	EA (×10 ⁵ N)
III.),	1	10.22	())	(1.26	0 (1 % iiiii)	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	2.00	及新床妖	(~10 10)
軸方向 (A)	1	10.32	6.22	64.26	606.38		2.90		16.35
	2	10.36	6.53	67.66	637.33		3.04		19.44
	3	10.40	6.36	66.18	641.33	0.028	3.02	0.019	18.37
	4	10.38	6.60	68.48	660.23		3.05	l T	19.00
	5	10.43	6.43	67.09	647.63		3.06		18.16
	平均值	10.38	6.43	66.73	638.58	-	3.01	-	18.27
直角方向 (R)	1	10.37	6.30	65.31	210.21		1.62		4.82
	2	10.46	6.42	67.20	236.30		1.77		5.72
	3	10.39	6.34	65.80	188.83	0.074	1.63	0.036	4.46
	4	10.45	6.24	65.27	216.49		1.72		5.07
	5	10.44	6.24	65.14	225.28		1.75		4.90
	平均值	10.42	6.31	65.74	215.42	-	1.70	-	5.00

表-3 引張試験結果(GFRP板)

変動係数を比較すると、引張強度、引張弾性率ともに、 載荷方向の断面積に占める繊維目付量の少ない直角方向 のばらつきが大きい. *EA* は式(1)を用いて、荷重が 5~10 kNの範囲で算出した.

$$\varepsilon = \frac{P}{EA} \tag{1}$$

b) 曲げ試験

長さ 220 mm, 板幅 20 mm の曲げ試験片の寸法図を図-6 に示す.スパンが 170 mm となるよう支点を設け,ス パン中央に鉛直荷重を載荷した.その載荷点では,引張 側にひずみゲージを貼付し,変位計(東京測器研究所 製: CDP-25)を設置した.載荷には 500 kN 万能試験機 を使用し,ひずみ速度 20 μ/s となるよう載荷した.

図-7 に荷重-たわみ関係を示す.軸方向の試験片は最 大荷重に達する前に,一時的に荷重が低下する試験体も 観察されたが,直角方向では,最大荷重と同時に繊維が 破断していることが確認できた.図-8 に載荷終了後の損 傷状況を A3, R3 を例に示す.軸方向試験片 A3 では, 圧縮側のガラス繊維が座屈し,ガラス繊維に層間剝離が 生じ,引張側では一部のガラス繊維の破断が確認された. 一方,直角方向試験片 R3 では引張側の繊維の破断に伴 い層間剝離が生じたが,このとき,軸方向試験片で観察 された圧縮側のガラス繊維の座屈は圧縮側の試験片幅の 一部のみで観察された.これより,GFRP 板単体では, 曲げモーメントの作用により,軸方向試験片は圧縮破壊, 直角試験片は引張破壊により終局に至ることがわかる.

表4 に曲げ試験の結果を示す.曲げ応力のは式(2)より求めた.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{2}$$

ここに, σ :曲げ応力(N/mm²),P:荷重(N),L:スパン(mm),b:板幅(mm),h:板厚(mm).

図-9に曲げモーメント-ひずみ関係を示す.曲げ弾性 率は、ひずみ値が 500-2,500 µ の範囲で最小二乗法によ









図-8 試験後の材料試験片

試験片 種類	試験片 No.	板幅 <i>b</i> (mm)	板厚 h (mm)	断面積 A(mm ²)	最大荷重 <i>P</i> (kN)	最大たわみ δ (mm)	曲げ強度 σ(N/mm ²)	σ の 変動係数	曲げ弾性率 $E_b(\times 10^4 \text{ N/mm}^2)$	E_b の 変動係数	曲げ剛性 EI(×10 ⁹ N・mm ²)
	1	20.16	6.08	122.64	1.64	26.69	564		2.85	0.053	1.91
	2	20.26	6.06	122.79	1.97	27.89	674	1	2.62		1.96
軸方向	3	20.22	6.30	127.42	1.97	25.06	626	0.087	2.43		1.96
(A)	4	20.21	5.96	120.49	1.72	23.86	734		2.75		1.98
	5	20.26	6.10	123.54	1.99	28.51	675		2.63		2.01
	平均值	20.22	6.10	123.38	1.86	26.40	655	-	2.66	-	1.96
直角方向 (R)	1	20.37	6.29	128.01	1.01	16.76	316		1.94	0.039	1.65
	2	20.18	6.46	130.35	1.13	19.53	341		1.83		1.63
	3	20.34	6.48	131.76	1.16	19.67	347	0.062	1.94		1.75
	4	20.02	6.56	131.24	1.29	20.43	381		1.93		1.90
	5	20.21	6.32	127.72	1.14	20.39	361		2.07		1.69
	平均値	20.22	6.42	129.82	1.14	19.35	349	-	1.94	-	1.72

表4 曲げ試験結果(GFRP板)

り算出した.曲げ強度と曲げ弾性率の変動係数を併記している.

同表より、GFRP板の軸方向と直角方向の曲げ強度は 軸方向の方が大きい.一方、変動係数は断面積に占める 繊維目付量の少ない直角方向のばらつきが小さく、表-3 に示した引張試験の結果と大小関係が逆になっている. 曲げ剛性はEIは式(3)より、荷重が 0.1~0.3 kN の範囲で算 出した.

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \tag{3}$$

(2) 硬質ウレタン

硬質ウレタンの材料試験は実施していないため、製品 情報に基づくと、主な性質は、縦弾性率は 3.03 N/mm²、 層内平面せん断弾性率は 32.1 N/mm²、曲げ弾性率は 1,145 N/mm²であり、GFRP 板のそれらと比べかなり小さい. 硬質ウレタンには、図-10 に示すように表面から約 3 mm の位置にガラス繊維の層が織り込まれている.

3. GFRP サンドイッチ版の曲げ試験

(1) 実験方法

GFRP サンドイッチ版の 3 点曲げ試験を 5 体の試験体 を用いて実施した.図-11 にサンドイッチ版を示す.表 面材のGFRP板の厚さは6mm,心材の硬質ウレタンの厚 さは 25 mm,GFRP サンドイッチ版の全厚は 37 mm であ り,幅 200 mm,長さ 1,180 mm の試験体を用いる.いず れの試験体も1枚の VI成形したGFRP サンドイッチ版か ら切り出し製作した.GFRP サンドイッチ版を遊歩道の 床版として使用することを想定すると,長手方向が橋軸 直角方向となるため,1 軸繊維の目付量が大きい 0°方向 を長手方向としている.

載荷には 1,000 kN 万能試験機を使用した.3 点曲げ試験の載荷方法を図-12に示す.3 点曲げ試験では,スパンを 1,000 mm とし,その中央に鉛直荷重を載荷する.





図-10 硬質ウレタン



図-11 GFRP サンドイッチ版



図-12 曲げ試験方法(単位:mm)



載荷中は、図-13 に示すように両支点間に渡した治具 に変位計(東京測器研究所製: CDP-50)を設置・固定 することで、支点沈下量διを含まない試験体中央のたわ みδを計測する.

(2) 実験結果

図-14 に 3 点曲げ試験体の損傷状況を No.4,5 を例に 示す. 最大荷重作用時は、大きな音を伴い破壊に至った. 図-1に示した破壊モードを参照すると、硬質ウレタンの せん断破壊(e) と層間剝離(g)の混合破壊(e)+(g)がほとんど の試験体で観察された. No.5のみ, せん断破壊が生じな かった. 図-15 に載荷点直下の試験前後の状況を試験体 No.2を例に示す. すべての試験体で破壊後に, 同図に示 すようなズレが観察され、上側の表面材に近い硬質ウレ タン内のガラス繊維層の織り込み位置で層間剝離が生 じた. GFRP 板の破断や、GFRP 板と硬質ウレタンの接 着面の剥離は確認されなかった.

図-16 に荷重-たわみ関係を示す. No.3 は、試験機と 治具が接触したため、計測値を得ていない.3点曲げ試 験結果を表-5 にまとめている. 初期曲げ剛性はほとん どばらつかず,最大荷重に至る前に剛性が低下し,最 大荷重とそのときの最大たわみにばらつきが生じてい る. 破壊モードの違いによる実験値の差異は見られな かった.





(b) No.5 (層間剝離)

図-14 3点曲げ試験体の損傷状況



(b)試験後 図-15 載荷点直下の破壊状況 (No.2)

(a)試験前



表-5 曲げ試験結果(サンドイッチ版)

No.	最大荷重 (kN)	最大荷重の 変動係数	最大たわみ (mm)	初期曲げ剛性 (×10 ¹⁰ N・mm ²)	破壊モード
1	39.11		62.21	1.494	(e) + (g)
2	37.45		66.11	1.434	(e) + (g)
3	-	0.11	-	-	(e) + (g)
4	31.28		49.00	1.471	(e) + (g)
5	29.91		50.85	1.427	(g)
平均値	34.44	-	57.04	1.457	-





ここで、日本道路協会の立体横断施設技術基準より、 設計荷重(5 kN/m²)が作用した際のたわみの制限値は、 L/600以下が示されている. P-δ関係より算定された EIを 用いると、設計荷重が作用した際の GFRP サンドイッチ 版のたわみは、L=1,200 mm のとき、1.85 mm であり、 L<600 を満足することを確認できた. したがって、今回 用いた GFRP サンドイッチ版は主桁間隔 L<1.2 m 以下で 適用可能と考えられる. なお、初期曲げ剛性は式(4)よ り、荷重が 5~10kN の範囲で算出した.

$$EI = \frac{PL^3}{48\delta} \tag{4}$$

ここで、No.5のGFRPサンドイッチ版には、図-17(a)に 示すように、中央から距離25mmの断面Aと中央から距離250mmの断面Bの2断面にひずみゲージを貼付した. 図-17(b)、(c)には、断面AおよびBのそれぞれの側面お

よび上下面に貼付したひずみゲージの位置を示す.ひず みゲージは,東京測器研究所製の FLKB-2-11-3LJCT-F を 使用した.

図-18 は P=5-25 kN のときに側面および上下面に貼付 したひずみゲージより得られた断面板厚方向のひずみ分 布を示す. 断面 A は, GFRP 板とその接着面近傍の硬質 ウレタンのひずみ分布には線形的な関係が認められる.

一方,硬質ウレタン内部ではひずみ,とりわけ圧縮ひず みは小さく,サンドイッチ版の断面に見かけ上,平面保 持は成立していない.断面Bは,断面Aと同様な傾向が みられるが,断面Aで見られた鉛直荷重の影響は表れて いない.したがって、載荷点近くの断面Aのひずみ分布 には上側表面材の局所変形(陥入)の影響が現れている ものと考えられる.

4. まとめ

本研究では、表面材に GFRP、心材に硬質ウレタンを 用いる GFRP サンドイッチ版を対象として、3 点曲げ試 験を実施した.本研究で得られた結論は以下のとおりで ある.

- GFRP サンドイッチ版(GFRP 厚さ:6 mm, 硬質ウ レタン厚さ:25 mm) は断面板厚方向のひずみ分布 より、曲げ応力はGFRP板に分担され、硬質ウレタ ン内のガラス繊維の層間剝離,および硬質ウレタ ンのせん断破壊によって終局に至ることを確認した。
- 2) GFRP と硬質ウレタンの接着面の剥離は生じておら ず、十分な接着力があることが確認できた.
- 対象とした GFRP サンドイッチ版は、スパン L<1.2 mの条件で L/600 のたわみの制限値を満足すること が確認できた.

GFRP サンドイッチ版は硬質ウレタンが破壊すること で終局を迎えているため、今後は硬質ウレタンの材料特 性を確認する必要がある.また、断面板厚方向のひずみ 分布に関して、4 点曲げ試験を実施し、せん断力の作用 の影響を明らかにするなど、引き続き検討を行う.

参考文献

- 1) 土木学会:木材工学特別委員会:木橋の維持管理, JSCE 木材利用ライブラリー, pp.1-13, 2011.11.
- 石井博典、山浦明洋、白水晃生、小島郁夫、松田紀元: バルサ材と GFRP の複合構造パネルを用いた歩道橋床版 の実験的検討、構造工学論文集、Vol.65A, pp.786-798、土 木学会、2019.3.
- 海外文献研究グループ:世界初のバイオベース複合 材で造られた可動式自転車橋 -オランダ リツマシル 橋-,橋梁と基礎, Vol.56, pp.58-60, 2022.7.
- 4) 宮入裕夫:サンドイッチ構造, 2008.
- 5) 日本規格協会: JIS K 7164 プラスチック-引張特性の 試験方法-第4部:等方性及び直交異方性繊維強化プ ラスチックの試験条件,2005.

(Received August 26, 2022)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD CARRYING BEHAVIOR OF GFRP SANDWICH COMPOSITE FLOOR BY THREE POINT BENDING TESTS

Hiroki IWATA, Sumitaka INOUE and Masahide MATSUMURA

There is growing need of replacement of a damaged floor slab of existing wooden pedestrian deck, promenade and bridges to a new one. A describle one will show high durability and light weight, so as to epect a long-term use and an erection work by human power without using a heavy machine especially in mountainous area. Then focused on in this study is a sandwich composite panel consist of GFRP plates and hard urethane core integrally molded by Vacuume Infusion technique. Material tests and 3 point bending test of the GFRP sandwich panels are carried out to confirm their fundamental structural properties and applicability of the panels to the deck floor slabs. The bending tests reveals collapse modes of the sandwich slabs and the panels will be used for the deck floor slab at the length of 1.2 m or less.