

GFRP サンドイッチパネル床版のコア材の材料特性の評価と VaRTM 成形による製作

東京都立大学 学生会員（研究当時）○横山桃花
東京都立大学 正会員 中村一史

1. はじめに

近年、軽量で耐食性に優れたガラス繊維強化プラスチック（以下、GFRP とよぶ）の特長を活かし、橋梁構造への適用が進められている。本研究では、GFRP サンドイッチパネルを橋梁の床版等に適用することを目的として、大型 FRP 構造物の成形方法の一つである VaRTM（Vacuum Assisted Resin Transfer Molding）成形により、コア材に発泡硬質ウレタンを、上下スキンプレート・垂直材にはロービングクロス (0/90°) のガラス繊維を使用し、垂直材の配置の異なるサンドイッチパネル床版を作製した。本概要では、床版に用いるコア材の引張試験、せん断試験、VaRTM 成形で作製したサンドイッチパネル床版の曲げ載荷実験を行った結果について述べる。

2. コア材の材料試験

GFRP サンドイッチパネルに使用するコア材（硬質発泡ウレタン：スタイロエース II）の材料特性を把握するため、コア材厚さ（25, 50, 100mm）をパラメータとして引張試験、せん断試験を行った。試験には容量 100kN, 1000kN の試験装置を、変位、ひずみの計測にはデジタル画像関連法を使用した。

2.1 引張試験

引張試験は、ASTM C297 に準拠して行った。コア材の厚さに加え、断面寸法（25.4×25.4mm, 50.8×50.8mm）をパラメータとして設定し、それぞれ 5 体ずつ実施した。評価対象は、引張強度、引張弾性率、ポアソン比とした。表-1 に、コア材の引張試験の結果を示す。表より、引張強度、引張弾性率、横弾性率は、試験体の断面寸法、厚さによらずほぼ同じであることがわかる。コア材のスタイロエース II と同程度の材料特性で、参考としていた FL30FA の規格値を若干下回る結果となった。ASTM では、硬質発泡ウレタンの引張試験は、断面寸法 25.4×25.4mm を標準としているが、50.8×50.8mm の試験体と比べ、試験結果にばらつきが生じた。その理由として、治具への接着に使用した接着剤の影響や画像解析に用いたデータ数が少なかったこと等が考えられた。

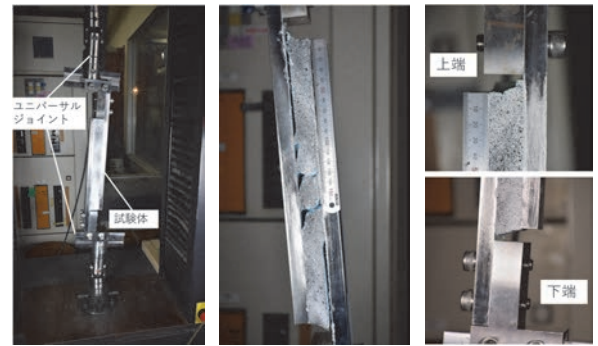
2.2 せん断試験

せん断試験は、ASTM C273 に準拠して行った（図-1）。試験は 3 体ずつ実施し、評価対象はせん断強度、最大せん断ひずみ、降伏強度、降伏強度時のせん断ひずみとした。降伏強度は、オフセット法 (0.2%) により算出した（図-2）。表-2 に、コア材のせん断試験の結果を示す。表より、せん断強度はコア材の厚さによらずほぼ同じであることがわかる。一方、最大せん断

表-1 コア材の引張試験 (ASTM C297) の結果

コア材		引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)	ポアソン比
断面寸法 (mm)	厚さ (mm)			
25.4×25.4	25	0.57	26.93	-
	50	0.41	22.03	-
	100	0.51	20.90	-
50.8×50.8	25	0.69	34.77	0.38
	50	0.51	26.74	0.31
	100	0.50	26.49	0.46
平均値		0.52	25.55	0.38
FL30FA (規格値)		0.80	29.8	-

※灰色のハッチングは、ばらつきが大きく、評価対象外の箇所



(a) セットアップ (b) 破壊時 (c) 破断時端部
図-1 せん断試験 (ASTM C273) の状況

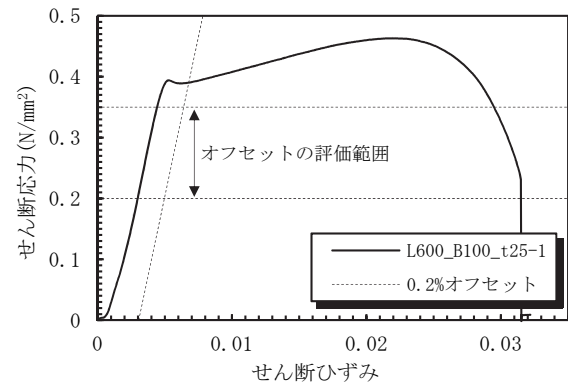


図-2 せん断応力とせん断ひずみの関係

表-2 コア材のせん断試験 (ASTM C273) の結果

コア材		せん断 強度 (N/mm ²)	最大 せん断 ひずみ	降伏点	
寸法： 長さ×幅	厚さ (mm)			降伏強度 (N/mm ²)	せん断 ひずみ
L300× B50	25	0.40	0.35	0.34	0.05
	50	0.22	0.17	0.21	0.17
	100	0.22	0.05	0.21	0.01
L300× B100	25	0.28	0.12	0.23	0.03
	50	0.26	0.02	0.27	0.01
	100	0.23	0.07	0.23	0.01
L600× B100	25	0.49	0.21	0.40	0.03
	50	0.28	0.28	0.33	0.05
	100	0.23	0.03	0.22	0.03
FL30FA (規格値)		0.30	-	-	-

キーワード サンドイッチパネル床版, 硬質発泡ウレタン, GFRP, スキンプレート, VaRTM 成形
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL.042-677-1111 内線(4564)

ひずみはコア材の厚さが増えるほど小さくなる傾向があった。破壊形式は、図-1(b)のようにコア材の中央部が破壊する形式、図-1(c)のようにコア材の端部が引張せん断力によりき裂が生じる形式の2通りであった。

3. GFRP 垂直材を有するサンドイッチパネル床版の作製

課題であったコア材の圧縮変形によるサンドイッチパネル床版の破壊を防ぐため、床版に GFRP 垂直材を導入した。試験体は、垂直材を導入しないもの、垂直材に囲まれたコア材（基本厚さ 50mm）の縦横比毎にそれぞれ 4:1, 2:1, 1:1 としたものを合わせ、全 4 種類を 3 体ずつ作製した。試験体の作製では、一度 VaRTM 成形によりサンドイッチパネルを作製し、ブロック状に切り出した後、そのブロックを並べて上下にロービングクロス (0/90°, 繊維重量: 588g/m², 3 層) のガラス繊維を配置し、再度 VaRTM 成形することで垂直材を導入した (図-3)。

なお、2 回目の VaRTM 成形後の加温養生において、部分的に温度が上昇したことで、内部のコア材が融解し、空隙が生じた。2:1 の試験体では 1 体のみで載荷試験を行った。

4. サンドイッチパネル床版の 4 点曲げ載荷試験

作製した GFRP 製サンドイッチパネルを用いて、ASTM C393 に準拠した 4 点曲げ載荷試験を行った。評価対象は、試験規格に基づいたコア材のせん断強度、スキンプレーットのせん断強度であり、コア材のせん断強度から床版のせん断強度を算定した。試験には前述の載荷装置を、変位の計測には非接触 3 次元動的挙動測定システムを使用した。変位測定用のマークは試験体片面の断面に配置し、ひずみゲージを支間中央に 2 箇所、支間 1/4 点に 4 箇所設置した。

図-4 に、荷重とたわみの関係を示す。図中には弾性 FEM 解析の結果に併記している。全パターンで、たわみ剛性（荷重-変位関係の初期の勾配）、最大荷重は GFRP 垂直材の数量が多いほど大きくなること、実験値の勾配は、解析値に比べて若干小さいこと、実験では、荷重の増加に対して、たわみが非線形的に大きくなることわかる。表-3 に、試験結果を示す。GFRP 垂直材を適用することで、せん断強度が向上することを確認できた。コア材のせん断強度は、垂直材の強度を含む値であることに注意が必要である。4:1 の試験体では、ブロック間でせん断変形が生じたため、2:1, 1:1 の試験体よりも勾配、変位が大きくなったと考えられる。垂直材無しでは、スキンプレーットの圧縮破壊、垂直材 (4:1, 2:1, 1:1) ありでは、ブロック内のせん断破壊、スキンプレーットのはく離が生じた (図-5)。

5. まとめ

以上のことから、画像相関法を適用して、硬質発泡ウレタンのせん断特性、引張特性を、試験体寸法によらず評価することができた。また、サンドイッチパネル床版のコア材の局部変形とせん断強度の低下に対しては、VaRTM 成形により GFRP 垂直材を導入することで改善することができた。

参考文献 1)石井佑弥, 中村一史, 古谷嘉康, 中井裕司, 西田雅之: トラス桁形式 GFRP 製橋梁用検査路の使用性と耐荷力に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.5, II_33-II_45, 2016.

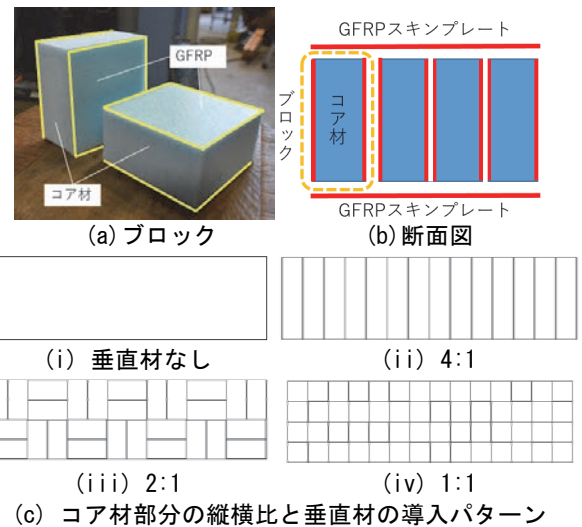


図-3 GFRP 垂直材導入の概念図

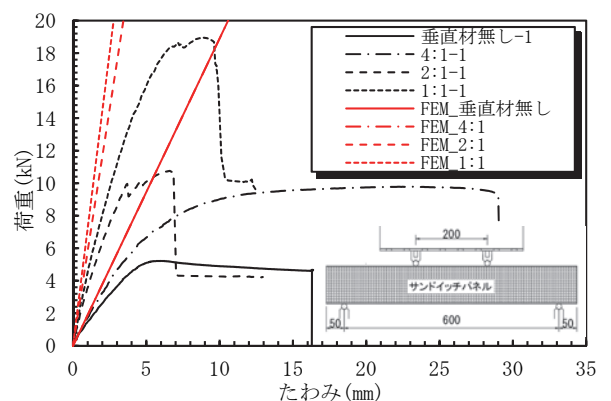


図-4 荷重とたわみの関係

表-3 サンドイッチパネル床版の曲げ載荷試験の結果

試験体の種類	せん断強度 (N/mm ²)		荷重範囲 (1.5-3.0kN) の勾配 (kN/mm)	最大荷重時たわみ (mm)
	コア材	スキンプレーット		
垂直材無し	0.13	13.2	1.16	5.25
4:1	0.23	20.2	1.55	21.12
2:1	0.40	36.0	3.11	7.61
1:1	0.50	44.2	4.17	8.70

※部材のせん断強度は ASTM C393 に準拠して算定した

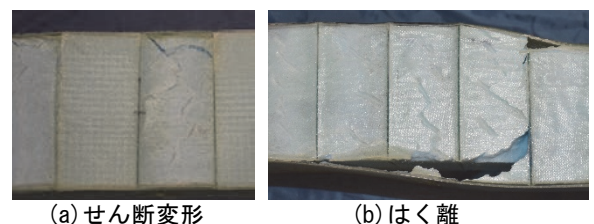


図-5 サンドイッチパネル床版の破壊形式 (4:1)