

(21) VaRTM成形で作製したGFRPサンドイッチパネル床版の構造特性に関する実験的研究

岩田 壮¹・横山 桃花²・中村 一史³

¹学生会員 東京都立大学 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: iwata-takeshi@ed.tmu.ac.jp

²学生会員 東京都立大学 都市環境学部 都市基盤環境学科 (研究当時)
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

³正会員 東京都立大学 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

検討対象のGFRPサンドイッチパネル床版は、コア材の硬質発泡ウレタンをGFRPスキンプレートで挟んだ構造で、薄く軽量で、耐荷力が大きい特徴がある。本研究では、GFRPサンドイッチパネルを橋梁の床版等へ適用することを目的として、試作した試験体を用いて曲げ載荷試験を行い、変形特性および耐荷力を検討した。試験体は、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（補剛材）にロービングクロスガラス繊維を使用し、VaRTM（Vacuum Assisted Resin Transfer Molding）により作製したものである。コア材の局部変形とせん断強度の低下によるサンドイッチパネル床版の破壊を防ぐため、床版にはGFRP垂直材を導入した。検討の結果、床版のコア材の局部変形とせん断耐力の低下に対し、VaRTM成形によるGFRP垂直材を導入することで改善されることがわかった。

Key Words : sandwich panel slab, GFRP, skinplate, hard urethane foam, VaRTM

1. はじめに

従来の建設材料からなる鋼・コンクリート橋に比べ、軽量で耐食性に優れる繊維強化プラスチック（以下、FRP）を適用したFRP橋梁¹⁾は、歩道橋、検査路²⁾³⁾などを中心に国内外で建設されている。既往の研究⁴⁾⁵⁾では、床版等の曲げせん断が支配的な部材に、GFRPサンドイッチパネルを適用する場合、せん断を受けるコア材に軽量の硬質発泡ウレタンを用いることで、FRPをより効率的に活用できることが示されている。GFRPサンドイッチパネル床版の基本構造は、コア材となる軽量の発泡材をGFRPスキンプレートで挟んだ形式であり、薄く軽量で、耐荷力が大きい点に特徴がある。

これらのFRP部材の性質を活かして、既設橋を利用した歩道部の幅員拡張⁶⁾⁷⁾⁸⁾や、パネル毎の分割施工による工期短縮が期待されている。また、より軽量で剛性の高い床版を既設歩道橋の床版取替えに適用することを目的として、バルサ材とGFRPの複合構造パネルを用いた

歩道橋床版の開発も行われている⁹⁾。このようにFRP橋梁は、既設橋の課題を補完する機能を持っているものの、橋梁分野への適用実績は少ないこと、活荷重によるたわみ等、剛性で断面が決定され、破壊形式が明確ではないことなどの課題があり、本格的な普及には至っていない。

本研究では、橋梁の床版においてGFRPサンドイッチパネル床版の適用性を検討する。この床版は大型FRP構造物の成形方法の一つであるVaRTM（Vacuum Assisted Resin Transfer Molding）成形によってコア材に発泡硬質ウレタン、上下スキンプレート・垂直材にロービングクロス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。従来のハンドレイアップ成形に対し、VaRTM成形は強化基材と成型型をフィルムに封入し、樹脂を真空引きして含浸させるため、施工が容易でコストを抑えることができるほか、品質の向上が見込まれる。そこで、VaRTM成形で作製したGFRPサンドイッチパネル床版を対象に、4点曲げ載荷試験を実施し、変形特性および耐荷力を検討した。

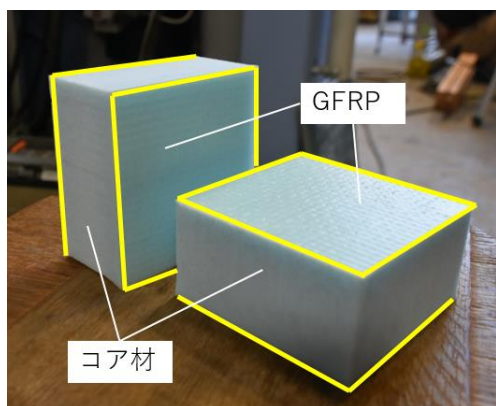
2. 検討対象と材料特性

(1) 対象とするGFRPサンドイッチパネル床版の概要

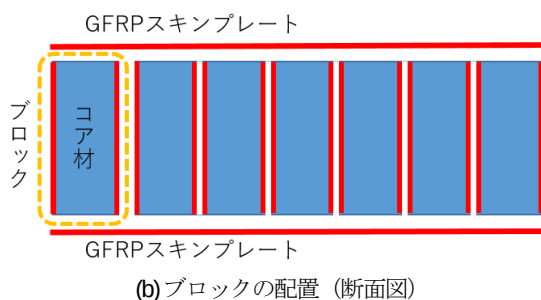
図-1に、検討対象とするGFRPサンドイッチパネル床版を示す。既往の研究では、コア材の圧縮変形とせん断強度の低下によるサンドイッチパネル床版の破壊が課題となっており、それを防ぐため、床版にGFRP垂直材（補剛材）を導入した。試験体は、垂直材を導入しないもの、垂直材に囲まれたコア材（基本厚さ：50mm）の縦横比ごとにそれぞれ4:1, 2:1, 1:1としたものを合わせ、全4種類を3体ずつ作製した。図-2に、垂直材の導入パターンを示す。

(2) 材料特性

GFRP サンドイッチパネル床版に用いられている各材料（GFRP 製スキンプレート（板厚 1.5mm）、発泡硬質ウレタン：スタイロエース II）について、材料を切り出し、材料試験を行うことで各部材の材料特性を求めた。FRP 部材は、材料の異方性を考慮し、弾性係数 E 、ポアソン比 ν 、せん断弾性係数 G を求めた。表-1 に、各部材の材料特性値を示す。表-1 より、GFRP 製スキンプレートでは、引張強度は 226.6MPa、圧縮強度は 77.4MPa であり、圧縮強度は引張強度の半分以下であった。また、発泡硬質ウレタンの引張強度、せん断強度はそれぞれ 0.53MPa、0.25MPa であった。これはスタイロエース II との同程度の材料特性で、参考としていた FL30FA の規格値を下回る結果となった。



(a) ブロック



(b) ブロックの配置（断面図）

図-1 GFRPサンドイッチパネル床版と垂直材の導入方法

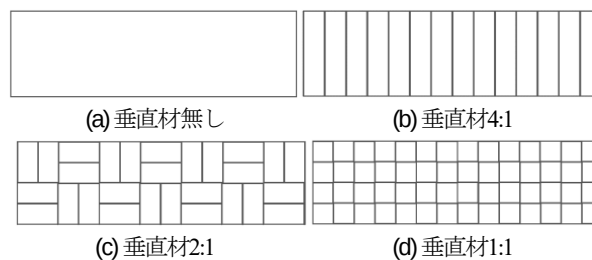


図-2 垂直材の導入パターン（平面図）

表-1 各部材の材料特性値

GFRPスキンプレート (板厚1.5mm)	弾性係数 (GPa)	18.9
	ポアソン比	0.16
	せん断弾性係数 (GPa)	2.0
	引張強度 (MPa)	226.6
	圧縮強度 (MPa)	77.4
発泡硬質発泡ウレタン スタイロエースII	弾性係数 (MPa)	25.6
	ポアソン比	0.38
	せん断弾性係数 (MPa)	9.26
	引張強度 (MPa)	0.53
	せん断強度 (MPa)	0.25
発泡硬質発泡ウレタン FL30FA (参考)	引張強度 (MPa)	0.80
	せん断強度 (MPa)	0.30

表-2 GFRPサンドイッチパネル床版の製作材料・数量

(a) ブロック

部位	材料	数量	寸法 $B \times L \times t$ (mm)
スキンプレート (上)	ガラスロービングクロス 090°, RH600A	1×3	1000×1750×0.3
コア材	スタイロエースII	1×3	1000×1750×50
スキンプレート (下)	ガラスロービングクロス 090°, RH600A	1×3	1000×1750×0.3
含浸接着樹脂	AUP40	—	—

(b) サンドイッチパネル床版

部位	材料	数量	寸法 $B \times L \times t$ (mm)
スキンプレート (上)	ガラスロービングクロス 090°, RH600A	3×9	210×720×0.3
ブロック (1:1)	上記の表(a)	56×3	50×50×100
ブロック (2:1)	上記の表(a)	28×3	100×50×100
ブロック (4:1)	上記の表(a)	14×3	200×50×100
スキンプレート (下)	ガラスロービングクロス 090°, RH600A	3×9	210×720×0.3
含浸接着樹脂	AUP40	—	—

表-3 試験体作製の手順

作業	内容	備考
1 ブロック作製	コア材、ロービングクロス配置	ロービングクロス：上下1層
	VaRTM施工 (1回目)	
	硬化・加温養生	投光器を照射
2 ブロック切出し	ウォータージェットにより切断	
3 サンドイッチパネル床版作製	ブロック、ロービングクロス配置	ロービングクロス：上下3層
	VaRTM施工 (2回目)	
	硬化・加温養生	投光器を照射
	仕上げ	不要な樹脂を除去

3. VaRTM成形による試験体の作製

表-2 に、GFRP サンドイッチパネル床版の製作材料・数量を、表-3 に、試験体作製の手順をそれぞれ示す。試験体の作製は、はじめに、コア材（1000×1750×50mm）の上下に、ガラス繊維ロービングクロス（0/90°、繊維重量：588g/m²、1層）を VaRTM 成形する（1回目）ことで、大きなブロック（3体）を作製する。

次に、大きなブロックからウォータージェットにて小さなブロックに切出す。

さらに、図-1 (b)のように、切り出した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（2回目）ことで、サンドイッチパネル床版に垂直材が導入される。

図-3 に、作製したサンドイッチパネル床版を示す。垂直材なしのサンドイッチパネル床版は、過年度研究で作製したものを実験に使用した。作製したものを実験に使用した。

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、2:1の試験体内部のコア材が融解し、空隙が生じた。そのため、2:1の試験体では融解が確認されなかった1体のみで载荷試験を行った。



(a) 垂直材無し



(b) 垂直材4:1



(c) 垂直材2:1



(d) 垂直材1:1

図-3 作製したサンドイッチパネル床版（平面）

4. サンドイッチパネル床版の4点曲げ载荷試験

4点曲げ载荷試験は、ASTM C393¹⁰⁾に準拠して行った。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。試験は島津製作所製オートグラフ（荷重容量：100kN）の変位制御で行い、载荷速度は ASTM C393 で定められた標準速度 6mm/min とした。試験体の寸法は、全長 700mm、幅 200mm、支間長 600mm とし、厚さは 100mm で統一した。

また、ASTM C393 の 4 点曲げ载荷方法にしたがい、载荷用治具の支間は 200mm とし、垂直材の数量ごとに 3 体ずつ試験を行った。

図-4 に、ひずみゲージの設置位置を示す。ひずみゲージは支間中央に 2 箇所、支間 1/4 点に 4 箇所、表裏に設置した。図-5 に、非接触 3 次元変位計測システムのマーカ設置位置を示す。変位計測用マーカは図のように 19 個設置し、たわみの算出には試験体長手方向の中央部の座標を使用した。また、図-6 に、サンドイッチパネル床版の 4 点曲げ载荷試験のセットアップを示す。

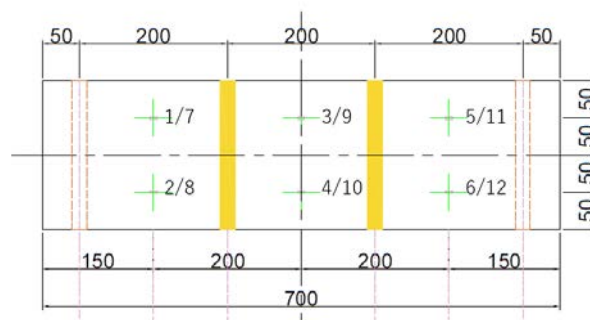


図-4 ひずみゲージの設置位置（平面図）

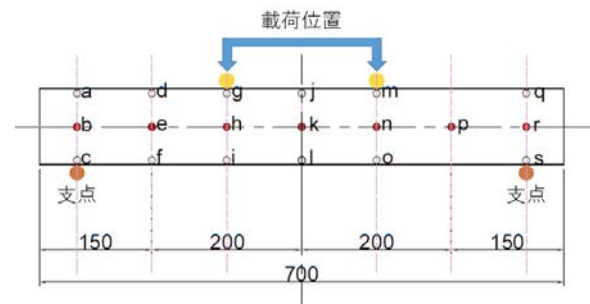


図-5 非接触3次元変位計測システムのマーカ設置位置

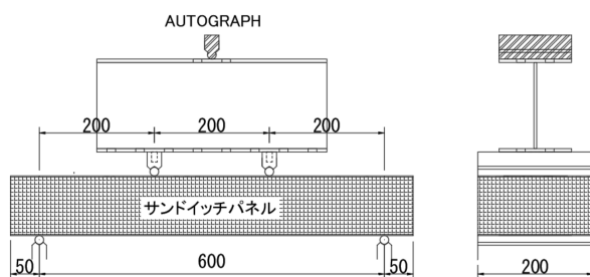


図-6 4点曲げ载荷試験のセットアップ

また、4点曲げ載荷試験では、有限要素解析を行って、実験結果との比較を行った。解析には、汎用有限解析プログラム Msc Marc/Mentat 2020 を適用し、線形弾性解析を行った。GFRP スキンプレートは、板要素（4 節点厚肉シェル要素）、コア材（発砲硬質ウレタン）は、6 面立方体要素（8 節点ソリッド要素）とした。材料物性値は、表-1 の値を用いた。境界条件は、支点をピン支持とし、荷重は集中荷重として与えた。

5. 試験結果と考察

(1) 荷重とたわみの関係

図-7 に、荷重とたわみの関係を示す。図中には FEM 解析の結果を併記している。また、表-4 に、4 点曲げ載荷試験結果を示す。なお、垂直材 2:1、1:1 の試験体は、前述したように、作製工程の加温養生中に、コア材が融解し、試験体の内部に空隙が発生した。したがって、問題がなかった各 1 体で評価している。

図-7より、たわみ剛性（荷重とたわみの関係の初期の勾配）、最大荷重は、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。なお、実験値、解析値ともに、コア材厚さ中心における支点と支間1/2点の鉛直変位の差（相対変位）で評価している。図からわかるように、垂直材無しの解析値の剛性は、垂直材4:1の解析値とほぼ同じであった。

(2) 荷重とひずみの関係

図-8 に、荷重と支間 1/2（中央）点のひずみの関係を、図-9 に、荷重と支間 1/4 点のひずみの関係をそれぞれ示す。ひずみゲージの設置位置は、図-4 に示したとおりである。なお、実験値は、幅方向 2 箇所のひずみの平均

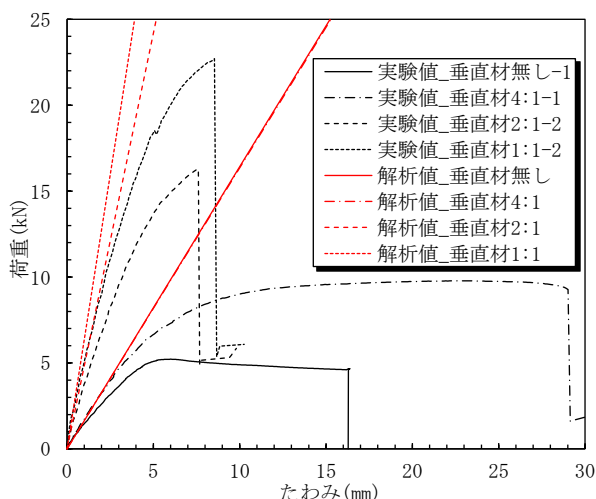


図-7 荷重とたわみの関係

値をして示している。

図-8 より、垂直材 4:1 および垂直材 2:1 の支間中央では上縁、下縁ともに引張りひずみが生じていることがわかる。それらより剛性の小さい、垂直材無しでは、上縁、下縁で、それぞれ圧縮、引張のひずみであることから、集成したブロックの局部的な曲げが生じたことによるものと考えられた。一方、垂直材 1:1 では、上縁、下縁で、

表-4 サンドイッチパネル床版の4点曲げ載荷試験結果

(a) まとめ

試験体	最大荷重(kN)	せん断強度(N/mm ²)		勾配 [1.5-3.0kN] (kN/mm)	最大荷重時たわみ (mm)
		コア材	スキンプレート		
無し	5.17	0.13	13.2	1.16	5.75
4:1	9.57	0.23	20.2	1.55	21.12
2:1	16.28	0.40	36.0	3.11	7.61
1:1	20.83	0.50	44.2	4.21	8.70

(b) 垂直材無し

試験体	最大荷重 (kN)	せん断強度(N/mm ²)		勾配 [1.5-3.0kN] (kN/mm)	最大荷重時たわみ (mm)
		コア材	スキンプレート		
1	5.22	0.13	13.27	1.15	6.16
2	5.07	0.13	13.04	1.13	5.44
3	5.23	0.13	13.15	1.19	5.66
平均値	5.17	0.13	13.15	1.16	5.75
標準偏差	0.070	0.002	0.094	0.026	0.299
変動係数	0.014	0.012	0.007	0.022	0.052

(c) 垂直材 4:1

試験体	最大荷重 (kN)	せん断強度(N/mm ²)		勾配 [1.5-3.0kN] (kN/mm)	最大荷重時たわみ (mm)
		コア材	スキンプレート		
1	9.78	0.24	20.87	1.52	32.38
2	9.54	0.23	20.53	1.52	29.96
3	9.39	0.23	19.06	1.60	24.13
平均値	9.57	0.23	20.15	1.55	28.46
標準偏差	0.162	0.005	0.786	0.038	3.379
変動係数	0.017	0.023	0.039	0.025	0.119

(d) 垂直材 2:1

試験体	最大荷重 (kN)	せん断強度(N/mm ²)		勾配 [1.5-3.0kN] (kN/mm)	最大荷重時たわみ (mm)
		コア材	スキンプレート		
1	10.76	0.26	24.25	3.56	13.42
2	16.28	0.40	35.95	3.11	10.09
3	10.36	0.25	21.56	3.01	9.27
平均値	—	—	—	—	—
標準偏差	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—

(e) 垂直材 1:1

試験体	最大荷重 (kN)	せん断強度(N/mm ²)		勾配 [1.5-3.0kN] (kN/mm)	最大荷重時たわみ (mm)
		コア材	スキンプレート		
1	18.95	0.46	40.27	4.58	12.82
2	22.70	0.54	48.05	3.83	10.82
3	7.89	0.19	17.10	4.11	13.93
平均値	—	—	—	—	—
標準偏差	—	—	—	—	—
変動係数	—	—	—	—	—

それぞれ圧縮，引張のひずみが生じている．いずれの試験体においても，引張ひずみは最大荷重までほぼ線形的に増加するが，圧縮ひずみは途中から小さくなる傾向が見られた．これは，垂直材が少ない試験体ほど顕著であった．さらに，全ての試験体で，ひずみは，解析値に比べて実験値の方が大きかった．

図-9 より，支間 1/4 点のひずみの傾向は，支間 1/2 点と比べて，曲げモーメントによる作用が小さくなるため，ひずみの大きさはその分小さくなるのみで，それ以外の挙動はほぼ同じ傾向であった．また，支間 1/2 点と同様，全ての試験体で，ひずみは解析値に比べて実験値の方が大きかった．

(3) サンドイッチパネル床版のせん断強度の評価

表-4 には，各試験体の 4 点曲げ載荷試験結果に基づいた，各部位のせん断強度を併記している．コア材のせん断強度，スキムプレートのせん断強度は，ASTM C393 に基づいて，式(1)より算定した．

$$F = P_{\max} / ((d+c)b) \quad (1a)$$

ここに， F : コア材のせん断強度 (N/mm²)

$P_{\max}$: 最大荷重 (N)

d : サンドイッチパネルの厚さ (mm)

c : コア材の厚さ (mm)

b : 試験体幅 (mm)

$$\sigma = P_{\max} S / (3t(d+c)b) \quad (1b)$$

ここに， σ : スキムプレートのせん断強度 (N/mm²)

t : スキムプレート厚さ (mm)

S : 支間長 (mm)

表-4 より，まず，最大荷重のばらつきに着目すると，垂直材無し，垂直材 4:1 の各 3 体の結果のみとなるが，変動係数はそれぞれ 1.4%，1.7%であり，比較的小さいといえる．

次に，コア材，スキムプレートのせん断強度は，GFRP の垂直材を適用することで向上すること，また，密に配置するほど，せん断強度が増加することがわかる．ただし，コア材のせん断強度は，垂直材の強度も含むことに留意する必要がある．垂直材 4:1 の試験体は，垂直材の配置が最も単純な形式であるが，コア材のせん断強度は，0.23N/mm²であった．これは，表-2 に示した，硬質発泡ウレタンのせん断強度 (0.25N/mm²) に最も近かった．垂直材 2:1，1:1 では，材料試験に基づいたコア材のせん断強度以上であることから，垂直材の影響があると考えられる．

また，後述するように，垂直材 4:1 の試験体では，ブロック間でのせん断破壊が生じたため，垂直材 2:1，垂

直材 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．

(4) サンドイッチパネル床版の破壊形式

図-10，図-11に，サンドイッチパネル床版の破壊形式

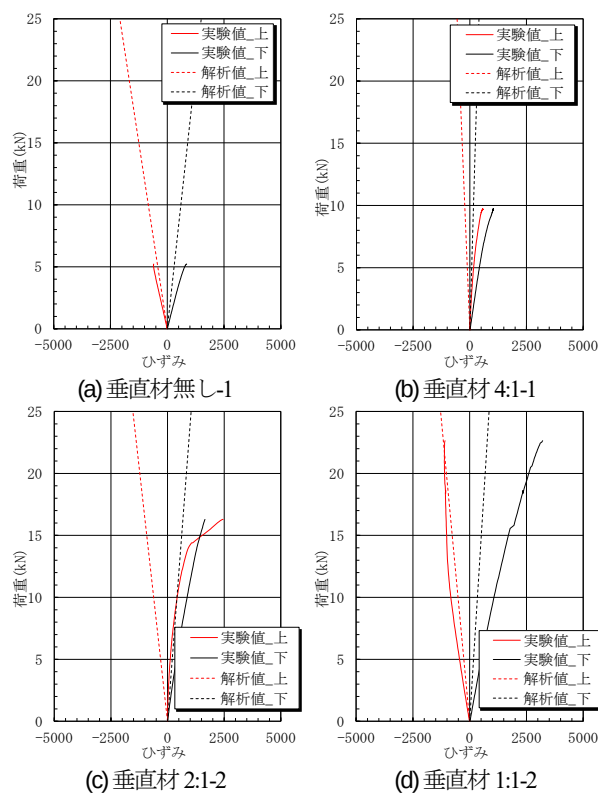


図-8 荷重と支間 1/2 (中央) 点のひずみの関係

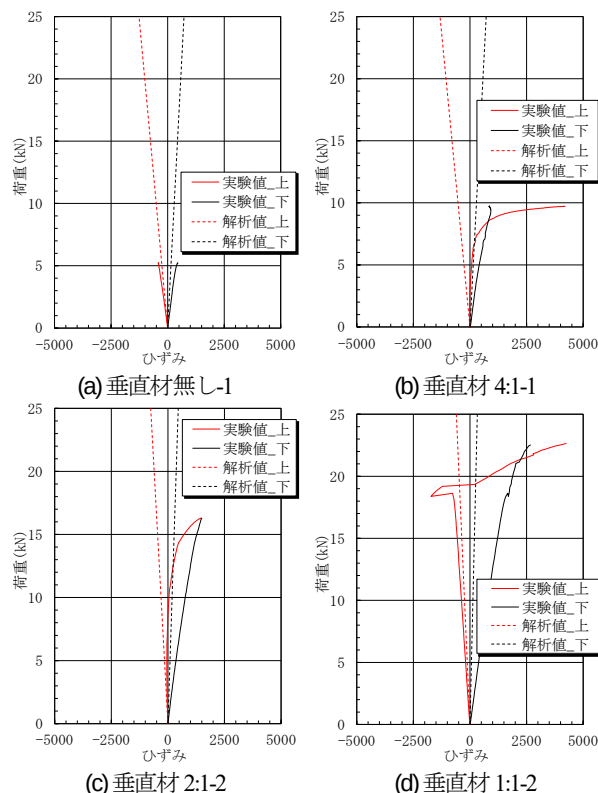


図-9 荷重と支間 1/4 点のひずみの関係



(a) 垂直材無し



(b) 垂直材4:1



(c) 垂直材2:1



(d) 垂直材1:1

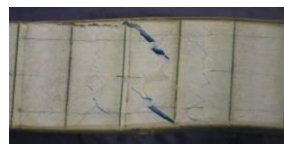
図-10 サンドイッチパネル床版の破壊形式 (側面)

を示す。垂直材無しでは、図-10 (a)、図-11 (c)より、載荷点下におけるスキンプレーットの圧縮破壊が生じることがわかる。図-7に示した、荷重とたわみの関係から、最大荷重以降は、荷重が急激に低下することなく、徐々に低下するため、脆性的な破壊ではないといえる。

垂直材 (4:1, 2:1, 1:1) ありでは、図-10 (b)~(d)、図-11 (a), (b), より、ブロック内のコア材のせん断破壊、スキンプレーットのはく離が生じた。スキンプレーットの圧縮破壊はコア材の圧縮強度の不足、スキンプレーットのはく離は接着剤の面内張力不足によるものとされている¹⁾。スキンプレーットの圧縮破壊は、垂直材無しの試験体のみで確認されたため、垂直材の導入により、コア材の圧縮破壊が防止されたといえる。さらに、垂直材4:1, 2:1では、コア材のせん断破壊、スキンプレーットのはく離が複合して生じるが、垂直材1:1では、コア材のせん断破壊のみであった。垂直材1:1では、最大荷重が最も高いことから、垂直材を密に配置することで、スキンプレーットのはく離も防止できると考えられた。

6. まとめ

本研究では、VaRTM成形で作製し、GFRP垂直材 (補



(a) せん断変形 (4:1, 側面)



(b) はく離 (2:1, 側面)



(c) スキンプレーットの圧縮破壊 (垂直材無し: 平面)

図-11 サンドイッチパネル床版の破壊形式 (拡大図)

剛材) を導入したGFRPサンドイッチパネル床版を対象に、4点曲げ載荷試験を実施し、変形特性および耐荷力を検討した。これらの検討の結果、次のことがいえた。

- (1) 試験体のたわみ剛性, 最大荷重, コア材, スキンプレーットのせん断強度は、垂直材が多いほど大きくなることことがわかった。
- (2) 垂直材の密な配置により、コア材 (硬質発泡ウレタン) の材料強度以上のせん断強度となるが、これは、垂直材のせん断抵抗による影響と考えられた。
- (3) 垂直材無しではスキンプレーットの圧縮破壊が生じること、垂直材の導入によりスキンプレーットの圧縮破壊が防止されること、垂直材が多くなるにつれて、コア材のせん断破壊とスキンプレーットのはく離の複合破壊から、コア材のせん断破壊に移行することが確かめられた。

今後は、変形特性を解析でシミュレーションするためのモデル化、材料強度からの破壊荷重の予測について、検討する予定である。

参考文献

- 1) 構造工学委員会編：FRP 橋梁—技術とその展望—，土木学会，2000。
- 2) 栗田繁実，佐藤昌義，久保圭吾：FRP 製橋梁付属物の特徴と今後の展望，宮地技報，No.23，pp.13-18，2008。
- 3) 大谷康史，荻原勝也，貴志友基：橋梁管理路に対する FRP 適用に関する検討，国土交通省国土技術研究会報告，pp.183-188，2018。
- 4) 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，pp.II_33-II_45，2016。
- 5) 辻本輝司，王元斌，中村一史：一体成形サンドイッチパネル床版を有する GFRP 検査路の実構造物への適用性に関する検討，土木学会論文集 A1 (構造・地

- 震工学) , Vol.76, No.5, pp.II_84-II_94, 2020.
- 6) 角間恒, 三田村浩, 岡田慎哉, 表真也, 松井繁之 : FRP を用いた既設 RC 床版の拡幅工法に関する基礎的研究, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1150-1160, 2013.
 - 7) 角間恒, 岡田慎哉, 久保圭吾, 松井繁之 : FRP を用いた道路橋歩道拡幅構造の耐荷性能に関する研究, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.1150-1158, 2014.
 - 8) 田村修一, 久保圭吾, 角間恒, 岡田慎哉, 松井繁之 : FRP を用いた歩道床版拡幅工法の耐荷性能に関する実験的研究, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.1073-1084, 2015.
 - 9) 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, 2019.
 - 10) ASTM C393/C393M-20: Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, 2020.
 - 11) Luigi Ascione, Eugenio Gerardo Gutierrez Tenreiro, Silvia Dimova, Artur Pinto Vieira, Steve Denton (Ed.): Prospect for new guidance in the design of FRP, Joint Research Centre, pp.93-96, 2016.

(Received September 10, 2021)

EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF GFRP SANDWICH PANEL SLAB FABRICATED BY VARTM

Takeshi IWATA, Momoka Yokoyama and Hitoshi Nakamura

The GFRP sandwich panel slab has a structure with a hard urethane foam as a core material is sandwiched between GFRP skin plates, and is characterized by a thin and lightweight slab and a large load carrying capacity. In this study, for the purpose of applying the GFRP sandwich panel to the deck of a bridge, etc., a flexural loading test was conducted using a prototype test specimen, and the deformation characteristics and the load carrying capacity were examined. The test specimen was fabricated by VaRTM using hard urethane foam, upper and lower skin plates of the roving cloth glass fiber as a vertical material. In order to prevent the sandwich panel deck from being destroyed due to local deformation of the core material and reduction in shear strength, a GFRP vertical member was introduced into the slab deck. As a result, it was found that the local deformation of the slab deck, the shear strength of the core material and the load carrying capacity can be improved by introducing the GFRP vertical members.