

# 超軽量 FRP 複合床版の静的載荷実験と現場施工

大垣 賀津雄<sup>1</sup>・小林 朗<sup>2</sup>・小森 篤也<sup>3</sup>・秀熊 佑哉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 ものつくり大学教授 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 新日鉄住金マテリアルズ(株) 技術総括部 技術企画G (〒104-0061 東京都中央区銀座7-16-3)

E-mail: kobayashi.hr7.akira@nsmat.nssmc.com

<sup>3</sup>正会員 新日鉄住金マテリアルズ(株) コンポジットC 開発部 (〒104-0061 東京都中央区銀座7-16-3)

E-mail: komori.8fs.atsuya@nsmat.nssmc.com, hidekuma.3ae.yuya@nsmat.nssmc.com

災害時等に使用される応急橋梁はアルミ合金や鋼材を使用しているため比較的重く、専用運搬・架設機材が必要となる。そのため、現地に到着後に迅速な架設作業が困難であり、軽量化して容易に空輸や架設ができるように更新したいというニーズがある。そこで、筆者らは超軽量応急橋梁に関する基礎研究として、FRP 複合床版を試作した。ガラス繊維強化プラスチックを用いたハニカムを床版のコア材料とし、上下面に高強度炭素繊維シートを貼付けた構造とした。

このような複合床版の曲げ実験と押抜きせん断実験を行い、基本的な強度特性を把握した。さらに、FRP トラス歩道橋の床版更新工事に適用した。

**Key Words** : GFRP, CFRP, Composite Slabs, Emergency Bridge, Deployable Bridge

## 1. はじめに

災害発生状況下においても対象地点までの急速機動展開が可能であり、現地に到着後に迅速な架設作業が可能な応急橋梁が求められている。従来災害時等に使用される応急橋梁は、アルミ合金や鋼材を使用しているため比較的重く、専用運搬・架設機材が必要となる。これらを軽量化して容易に空輸や架設ができるようにすれば、急速機動展開が可能となる<sup>1)</sup>。

そのため、現在の各種応急橋梁に適用可能な部材の軽量化、対応可能な径間長の延伸、架設作業の迅速化、各種車両に対する耐荷性能の確保等といった性能向上に寄与できる技術確立が必要である<sup>2)</sup>。

そこで、超軽量応急橋梁に関する基礎的研究として、複合材による積層構造設計を行い、効率的な部材断面構成の検討や適用箇所の調査が行われつつある<sup>3)6)</sup>。また、床版についても、種々の応急橋に適用できるような軽量化で浮体形式のものが有効であると思われる。そこで、桁本体構造の検討を行う前に、種々の応急橋梁に適用可能な超軽量 FRP 複合床版の検討を行うこととした<sup>7)</sup>。

図-1 に示す通り、ガラス繊維強化プラスチック（以下、GFRP と呼ぶ）を用いたハニカム構造を床版のコア材料とし、上下面に高強度炭素繊維（以下、CFRP と呼

ぶ）シートを貼付けた構造の FRP 複合床版を試作した。

この床版の耐荷性能を調査した結果、GFRP ハニカムコア材（以下、ハニカムと呼ぶ）と GFRP スキンプレート（以下、スキンと呼ぶ）の接着面での水平方向のせん断力によるはく離破壊（以下、水平せん断破壊と呼ぶ）が生じた<sup>7)</sup>。そこで、発泡ウレタンをハニカムに充填し、スキンとの接着面積を大きくした供試体を実験パラメータに追加して、水平せん断強度が向上することを確認した。このような複合床版の曲げ実験と押抜きせん断実験を行い、基本的な強度特性を把握した。

さらに、FRP トラス歩道橋（ものつくり大学第2連絡橋）に設置されていた木製床版の腐食損傷が激しくなっ

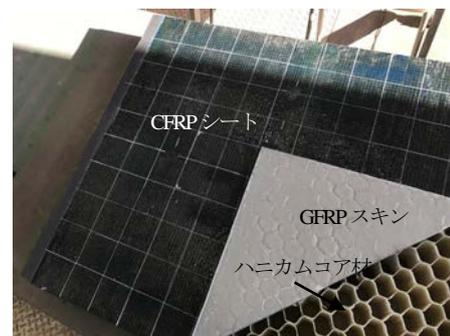


図-1 FRP 複合床版の構造

ていたため、メンテナンスフリーを前提としたFRP複合床版への更新工事を行った。本文はこれらの内容を報告するものである。

## 2. FRP 複合床版

### (1) 使用材料

FRP 複合床版は図-1 に示した通り、版厚 140mm の GFRP 製のハニカムコア材の表面に、GFRP スキンプレートを接着した構造であり、さらに上下面には高強度 CFRP シートを接着して構成している。本床版の使用材料は、表-1 に示す通りである。

表-1 使用材料諸元

種類	厚さ mm	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	破断強度 N/mm <sup>2</sup>
高強度炭素繊維	0.333×層数	2.57×10 <sup>5</sup>	5174
エポキシ接着樹脂	—	—	58
ハニカム	3.25	1.06×10	258
スキンプレート	4.0	1.15×10	194
発泡ウレタン	—	—	—

### (2) 製作方法

専用の工場において、GFRP 製のハニカムコア材と側面の GFRP 板、および GFRP 短繊維マットによるスキンプレートを接着して組立てを行った。その後実験室にて、高強度 CFRP シートを含浸接着して、FRP 複合床版を製作した。その含浸接着作業の様子は、図-2 に示す通りである。

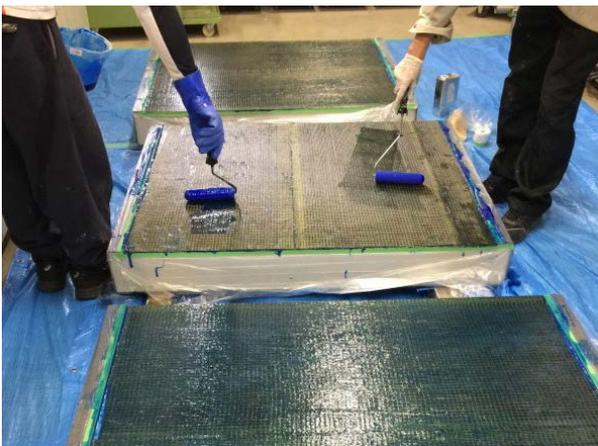


図-2 CFRP シートの含浸接着状況

表-2 曲げ載荷実験供試体

供試体	補強条件パラメータ
CASE1	CFRP シート無し
CASE2	CFRP シート上下1層
CASE3	CFRP シート上下2層
CASE4	CFRP シート上下2層、内部に発泡ウレタン

注) 支間方向 X のみ CFRP シートを貼付けた。

## 3. 曲げ載荷実験

### (1) 実験供試体

曲げ実験で使用した複合床版供試体は、幅 1,000mm、長さ 4,000mm、厚さ 140mm の寸法である。補強条件は表-2 の 4 種類とした。曲げ載荷実験では、支間方向のみ CFRP シート補強を行っている。

### (2) 実験方法

曲げ載荷実験は図-3 に示す通り、2点載荷の4点曲げ実験であり、耐荷力が低下しても完全に破壊するまで載荷を行った。支点部と載荷点部には幅 150mm の鋼板を速硬化性のモルタルを介して設置し、支持点と載荷点で丸鋼が直接供試体に当たって食い込まないように配慮した。載荷状況は図-4 に示す通りである。

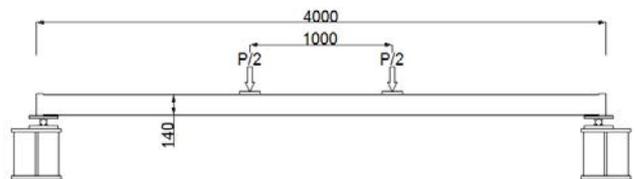


図-3 曲げ載荷実験寸法図



図-4 曲げ載荷実験状況

### (3) 実験結果

曲げ載荷実験による荷重と支間中央の鉛直変位の関係は図-5 に示す通りである。同図から、曲げ実験では CASE1~4 ともに荷重と鉛直変位の関係は弾性線形であり、材料の非線形段階も無く、突然破壊に至る。

CFRP シートによる補強を行っていない CASE1 のたわみは最も大きく、終局荷重は最も低いことがわかる。CFRP 上下1層の CASE2 は剛性が向上するため、たわみが CASE1 の約 40% になっていることがわかる。CFRP 2層の CASE3 はさらにたわみが CASE1 の約 25% になってい

ることがわかる。また、ハニカムの中に発泡ウレタンを充填してスキンプレートの接着面積を増加させたCASE4は、CFRPシート枚数がCASE3と同じであるので、両者の剛性がほぼ一致し、たわみ量が同等であることがわかる。

しかしながら、終局強度は表-3に示す通り、CASE4はCASE3より38%上昇しており、発泡ウレタンによる接着面積を増加させた効果が確認できた。

破壊状況は図-6に示す通り、いずれの供試体も同様に、支間中央部の床版上面の圧壊ではなく、床版下面側のハニカムコア材とCFRPスキンプレート間の水平せん断破壊であった。このことから、上下の床版面の材料強度を十分発揮する前に、構造体の接合部の破壊が生じていることがわかる。ただし、想定した通り、歩道橋用の設計曲げモーメントに対して、いずれも10倍以上の安全率を有していることが確認できた。

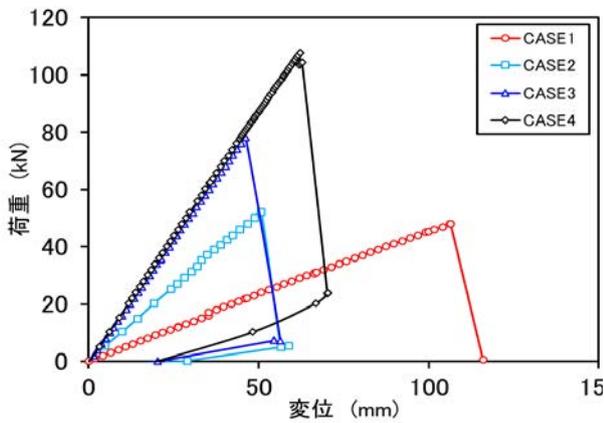


図-5 鉛直変位（曲げ載荷実験）

表-3 終局強度（曲げ載荷実験）

供試体	実験値 kN	終局曲げモーメント kN-m	設計曲げモーメント kN-m	安全率
CASE1	48.6	33.7	2.85	11.8
CASE2	53.2	37.2		13.1
CASE3	78.1	54.7		19.1
CASE4	107.6	75.3		26.4



図-6 破壊状況（曲げ載荷実験）

#### 4. 押抜きせん断載荷実験

##### (1) 実験供試体

押抜きせん断載荷実験で使用した供試体は幅 1,000mm、長さ 1,200mm、厚さ 140mm の寸法である。補強条件は表-4の5種類とした。押抜きせん断載荷実験では、支間（主鉄筋）X方向のみならず直交する方向（配力筋）Y方向にもCFRPシートによる補強をパラメータとしている。CFRPシートは1方向繊維シートを重ねて貼り付けることにより補強を行っている。

表-4 曲げ載荷実験供試体

供試体	補強条件パラメータ
CASE1	CFRPシート無し
CASE2	CFRPシートX方向のみ上下1枚
CASE3	CFRPシートX,Y方向上下1枚
CASE4	CFRPシートX方向上下2枚、Y方向上下1枚
CASE5	CFRPシートX方向上下2枚、Y方向上下1枚 内部に発泡ウレタン

注) 支間（主鉄筋）方向をX、配力筋方向をYとする。

##### (2) 実験方法

押抜きせん断曲げ載荷実験は図-7に示す通り、2辺単純支持、2辺を床版の連続性を考慮してチャンネル材補強した状態で輪荷重相当の接地面（200×500mm）にて載荷を行った。載荷版と載荷面の間にはクロロプレンゴムを挟み、版の曲げ変形による接地面角部における集中荷重を緩和させた。載荷状況は図-8に示す通りである。

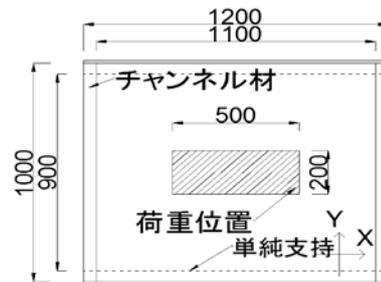


図-7 押抜きせん断載荷実験寸法図



図-8 押抜きせん断載荷実験状況

### (3) 実験結果

押抜きせん断載荷実験による荷重と載荷版近傍の鉛直変位の関係は、図-9 に示す通りである。同図から、押抜きせん断実験では CASE1~5 とともに荷重と鉛直変位の関係は載荷初期の 30kN 程度までほぼ同等の弾性線形の変形であり、弾性限界を過ぎてから、破壊音を伴いながら荷重が低下したり上昇したりを繰り返す、変位が 10mm 程度で荷重が最小値に至り、そこから耐荷重が徐々に増加して、最終的に 40mm 程度で破壊に至っている。このように、押抜きせん断については、大変形を伴った段階での終局的な破壊であることがわかる。

押抜きせん断実験の終局強度は表-5 に示す通りである。同表には弾性限界荷重と破壊時の荷重を記載しており、両者の大きい値が最大荷重であり終局強度と定義する。CASE1~CASE3 の最大荷重は同程度である。CASE4, CASE5 の最大荷重は上昇している。CASE4 の弾性限界荷重は 100kN 以上あるが、発泡ウレタンを充填した CASE5 の弾性限界荷重は CASE4 の 53%に低下していることがわかる。発泡ウレタンによる接着面積を増加させた効果は破壊時荷重にでており、CASE4 より 32%上昇していることが確認できた。CASE5 は発泡ウレタン充填により接着面積が増加したものの、逆にハニカムコア材とガラスの短繊維マットを押し付けて接着するときの食い込み度合いが減少したことが一因として考えられる。

破壊状況は図-10 に示す通り、いずれの供試体も同様に、単純支持支点上の上側のスキンプレートが剥離破壊を起こしており、押抜かれるような破壊ではない。ただ

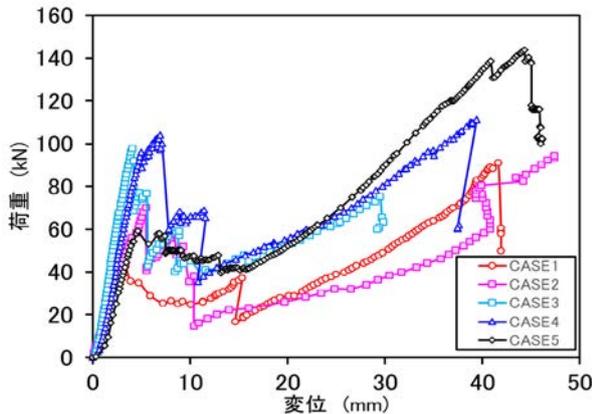


図-9 鉛直変位 (押抜きせん断載荷実験)

表-5 終局強度 (押抜きせん断載荷実験) (単位:kN)

供試体	弾性限界荷重	破壊時荷重	最大荷重
CASE1	44.0	91.8	91.8
CASE2	70.1	95.8	95.8
CASE3	99.3	76.7	99.3
CASE4	104.8	111.3	111.3
CASE5	56.0	146.0	146.6

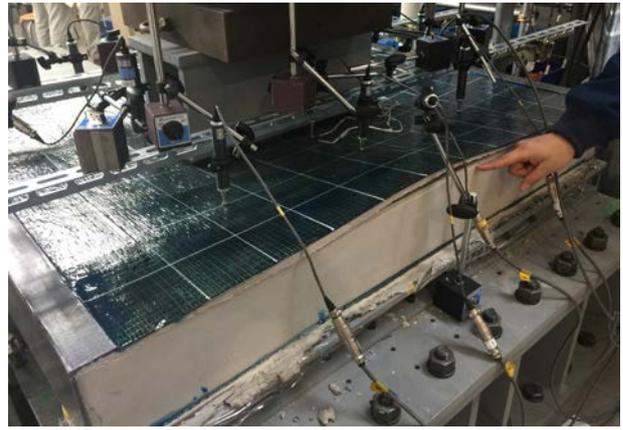


図-10 破壊状況 (押抜きせん断載荷実験)

し、弾性限界荷重が CASE4 でも最大で 104.8kN であり、輪荷重 50kN に衝撃と安全率を考慮すると、車両走行に対しては現時点で少し強度不足である。今回は歩道橋として使用するが、今後これらの対策については検討する予定である。

### 5. 現場施工

図-11に示すとおり、ものづくり大学の第2連絡歩道橋は建設後約8年が経過し、劣化した木床版を更新する必要があった<sup>8)</sup>。そこで死荷重が同等で腐食しない超軽量



a) FRP 複合床版 (取替後)



b) 木床版 (取替前) c) GFRP 縦桁(取替前)

図-11 第2連絡床版取替え (ものづくり大学)

FRP複合床版に取替えることとした。

施工では図-12, 13に示すとおり、床版製作作業として専用工場から搬入したGFRP製ハニカムコア材に、高強度CFRPシートを接着して複合化した。さらに表面にセラミックサンド樹脂舗装を行い、すべり止め機能を持たせ直射日光からの保護層とした。さらに、第2連絡橋の腐食している木床版を撤去した後、高所作業車を用いてGFRP縦桁を切断して解体・撤去を行った。超軽量FRP複合床版(60kgf/m<sup>2</sup>)を高所作業車を用いて人力で取付けた。本橋のトラス主構はGFRP製であるので、本FRP複合床版更新工事により、トラス格点部のステンレスを除いてオールFRP構造の歩道橋を構成することができた。

## 5. まとめ

曲げ載荷実験、押抜きせん断載荷実験ともCFRPによる補強効果は確認できたが、GFRP製のハニカムとGFRPスキンプレートの接着部が剥離して破壊に至ることがわかった。

今回、ものづくり大学内の歩道橋へ試験適用を行った

が、今後、道路橋などへの適用を考えると、ハニカムとスキンの接着構造や方法の見直しを行い、押抜きせん断における弾性限界を向上させることが課題となる。また、車両走行におけるたわみや振動が大きくなることが懸念される。

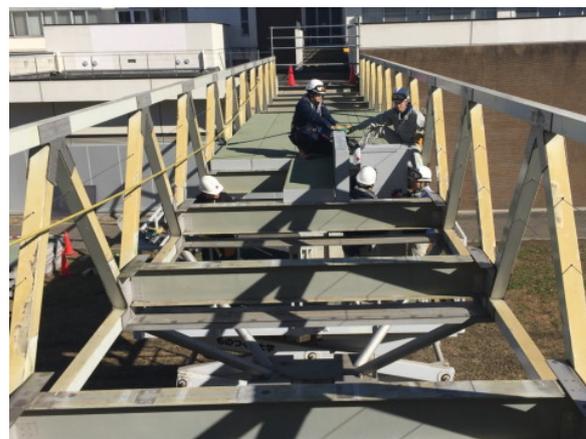
しかしながら、今回開発したFRP複合床版は新規性があり、超軽量で人力施工可能な床版であることから、応急橋梁等における重要な床版構造部材のプロトタイプであることが確認できた。



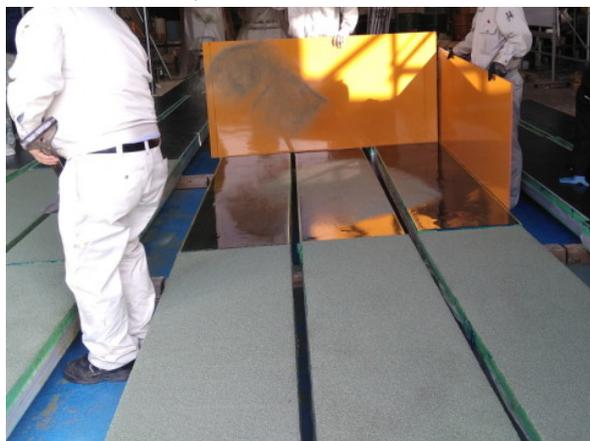
a) 木床版の撤去



a) CFRPシート貼付け



b) FRP複合床版の架設



b) セラミック樹脂舗装施工  
図-12 FRP複合床版の製作



c) 完成 (開通式)

図-13 FRP複合床版の架設

謝辞：本研究を行うにあたり，ハニカムの製作には AGC マテックス殿に協力を頂きました。また実験および現場施工においては，ものづくり大学の荻野紳太郎君他橋梁・構造研究室の関係者に協力を頂きました。感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 中田光洋，國方貴光：軌道展開をサポートする橋梁軽量化技術，防衛省・自衛隊 60 周年 防衛技術シンポジウム 2014
- 2) 伊藤一雄：陸上自衛隊の架橋器材の概要と災害派遣事例，橋梁と基礎，2012.8
- 3) 平栗浩一：陸上自衛隊の施設科部隊の概要と災害派遣，橋梁と基礎，2012.8
- 4) 鈴木勝，玉越隆史，沢田道彦：緊急仮設橋の開発について，橋梁と基礎，2015.11
- 5) A. Xie, M. A. Erki, R. G. Wight : Development of an FRP Deployable Bridge, ADVANCED COMPOSITE MATERIALS IN BRIDGES AND STRUCTURES, 2008.9
- 6) 西崎到：FRP の橋梁への適用，橋梁と基礎，2015.8
- 7) 小林朗，秀熊佑哉，大垣賀津雄：超軽量FRP 複合床版の強度特性に関する基礎的研究，土木学会第73回年次学術講演会，CS5-010，2017.9
- 8) 松本幸大，山田聖志，花田幸大，柴田龍哉，増渕文男：ものづくり大学FRPトラス歩道橋の振動特性，S2-037，2011.9

## STATIC LOADING TESTS AND CONSTRUCTION SUPER LIGHTWEIGHT FRP COMPOSITE HONEYCOMB SLABS

Kazuo OHGAKI, Akira KOBAYASHI, Atsuya KOMORI and Yuya HIDEKUMA

The emergency bridges are used for at the time of earthquakes or floods. Because those bridges are made from aluminum alloy or steel materials, there is much weight, and the exclusive equipments are necessary for assembling, and erection. Therefore construction work quick locally is difficult. The emergency bridge composes it of lightweight materials, and it is necessary to enable air transportation and quick construction. Therefore the authors produced FRP composite slabs version experimentally as fundamental researches about the super lightweight emergency bridge. The core part of the slabs assumes it honeycomb structure using GFRP. In addition, this composite slabs bonds high elastic CFRP sheet to the upper and lower surface.

We performed the bending loading experiment and the pushing shear experiment of these FRP composite slabs, and research basic strength properties. Furthermore, the woody floors were replaced by the FRP composite slabs in the FRP truss pedestrian bridge.