

鋼材とFRPのハイブリッド型枠を用いた合成床版の開発

Development of FRP composite slab using a hybrid permanent form of steel and FRP

久保圭吾*, 能登宥愿**, 松井繁之***, 長尾千瑛****, 石崎茂*****, 平山紀夫*****, 宮永直弘*****, 小牧秀之*****
Keigo Kubo, Hiroyoshi Noto, Shigeyuki Matsui, Chiaki Nagao, Shigeru Ishizaki, Norio Hirayama, Naohiro Miyanaga, Hideyuki Komaki

* (株) 宮地鐵工所, 設計部設計二課 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通 3)

** (株) 宮地鐵工所, 技術研究所 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通 3)

*** 工博 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**** 大阪大学大学院, 工学研究科博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

***** 工博 (株) 富士技建, 技術部 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国4-1)

***** 日東紡績 (株), 生産本部FRP開発グループ (〒963-8061 福島県郡山市富久山町福原字塩島1)

***** 新日本石油 (株), 新商品事業部C F事業室 (〒105-8412 東京都港区西新橋 1-3-12)

A new FRP composite deck was developed intending for replacing of deteriorated RC slabs. The bridge deck is a hybrid structure consisting of a form panel made of steel pipe core wrapped with fiber reinforced polymer and a reinforced concrete. In this paper, the fabrication method of the deck is introduced, and the structural characteristics are clarified based on the four-point bending test carrying out to investigate the essential structural behavior and their load-carrying capacities. From the results, it was seen that the new deck has a sufficient capacity as an actual bridge slab.

Key Words : composite slab, fiber reinforced plastic, static strength, steel pipe core

キーワード : 合成床版, 繊維強化プラスチック, 静的耐力, 鋼管パイプ心材

1. はじめに

近年の交通量の増加と交通荷重の増大により既設橋梁のRC床版は、しばしば、劣化・損傷を受け、鋼板接着工法などによる補強が行われてきた。しかし、近年、補強後の床版で、アンカーボルトや鋼板などの腐食問題が生じ、打ち換えを余儀なくされる事例が増加している。また、海岸部や融雪剤を散布する積雪部橋梁の床版では、塩害による劣化が進行し、床版の打ち換えが増加しつつある。

現在、軽量で耐久性が高く、塩害に強い床版として、引抜成形材を用いたFRP合成床版が実用化され、床版打ち換えにも適用されている。しかし、引抜成形材を用いていることからリブ間隔が固定されているため、既設床版との取り合い部において、リブと鉄筋が干渉するなどの問題を残している。

このため、打ち換えに適した、軽量で、FRPの断面形状にある程度自由度を持ったFRP打ち換え床版を開発した。Fig.1に、本床版の概念図を示す。型枠パネルは、心材である角形鋼管をGFRPで覆い、底面にCFRPを配置

した構造であり、角形鋼管内を中空とすることで、軽量化を図っている。また、荷重に対しては、主として床版支間方向の剛性で支持する一方向版とすることにより、引張側配筋鉄筋を省略し、現場施工性の向上を図った。なお、本床版は、鋼とGFRP、CFRPのハイブリッド構造の型枠パネルと鉄筋コンクリートとの合成構造であり、それぞれの材料特性が異なるため、応力伝達機構も複雑となる。このため、本研究では、曲げ・せん断に対する構造特性と静的基本強度を確認するため、支間方向の梁供試体による静的試験を行った。以下に、この実験結果について報告する。

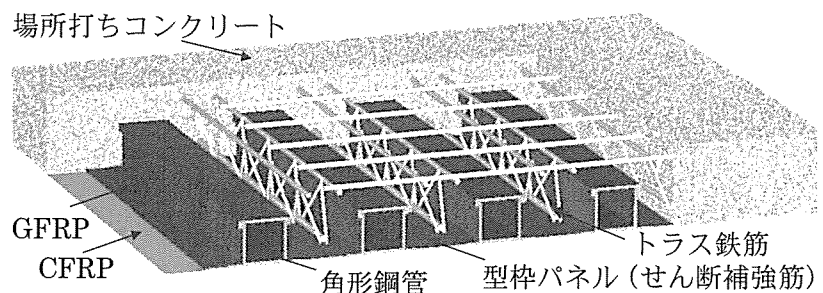


Fig.1 構造概念図

2. FRP 型枠の製作方法

2.1 FRP の成形方法

FRP 型枠はコンクリート打設時の死荷重を支持する剛性を確保すると共に、床版死荷重を軽減するため、角形中空鋼管にFRPを巻き付ける構造とした。また、配力筋方向には、鉄筋を省略し、FRP底板で応力を伝達する構造とするため、FRP底板は、引抜き成形材のような異方性の高いものではなく、等方性材料とする必要がある。このため、FRP 型枠の成形には、上記を満足する成形が可能である、インフュージョン成形法を用いることとした。

インフュージョンとは、上型の代わりにフィルムやシリコンバックを用いて型を密閉し、真空圧にて樹脂を基材に充填・含浸させる閉塞型成形法であり、航空機部品や舟艇等の大型構造物を製作する手法として開発されたものである。以下にこの成形法の利点を示す。

- ① 高繊維含有率のFRPを成形できるため、高強度の材料が成形可能となる。
- ② 上型が柔軟であるため、アンダーカットがあるような複雑な形状も成形可能であり、リブ間隔の変更にも対応できる。
- ③ 下型（樹脂型）と真空ポンプにより成形可能で初期投資が低い。

2.2 FRP と鋼材の付着特性

FRP 型枠は、角形鋼管とFRPのハイブリッド構造であり、外力に対して合成断面として抵抗させるためには、鋼管とFRPが一体として挙動することが必要であり、鋼管とFRP間の接着強さが重要となる。このため、鋼管表面の処理方法を変えた供試体による試験を行い、接着強さの確認をおこなった。この結果を、Table.1 に示す。これより、パイプとFRPの接着面については、ショットブラスト+ウレタン系プライマーが最も接着強さが大きいですが、サンディングなし+ウレタン系プライマーでも十分な強度が得られるため、施工性を考慮し、サンディングなし+ウレタン系プライマーを採用することにした。

2.3 FRP とコンクリートの付着特性

FRP とコンクリートの接着面については、従来のFRP合成床版では、コンクリートとの付着を確保するため、FRPのコンクリート接触面に砂を接着している。これにより、疲労耐久性が大幅に向上した実績を有する²⁾。この

ため、本床版でも砂接着処理を行うことを考えたが、インフュージョン成形面（ピールプライ剥離面）でも表面が粗くなるため、引張せん断接着試験を行い、接着強さを調査した。この結果をTable.2 に示すように、FRP 表面はインフュージョン成形のままのピールプライ剥離面でも砂接着と大差ない接着強さが得られたため、FRP の表面は砂接着処理なし（インフュージョン成形面）とした。

Table.1 鋼管表面処理別の接着強さ

角形鋼管の表面処理	接着強さ(N/mm ²)
サンディング	9.08
サンディング+ウレタン系プライマー	16.44
ショットブラスト	14.35
ショットブラスト+ウレタン系プライマー	22.08
ショットブラスト+防錆プライマー(A)	2.60
ショットブラスト+防錆プライマー(B)	9.47
サンディングなし+ウレタン系プライマー	15.45

Table.2 FRP の表面処理別の接着強さ

FRPの表面処理方法	接着強さ(N/mm ²)
サンディング	0.721
サンディング+砂接着	1.042
インフュージョン成形面 (ピールプライ剥離面)	1.001

3. はりの静的曲げ試験

3.1 実験概要

鋼材とFRPのハイブリッド構造を用いたFRP合成床版の曲げ特性を調べるため、Fig.2 に示すように、支間方向にリブ2本を配置した供試体を製作し、曲げ耐力試験を実施した。鋼とFRPのハイブリッド供試体は、Fig.3 に示すように、FRPとコンクリート間のずれ防止構造を、角形鋼管側面上端部に沿って丸鋼を溶接し、その上を

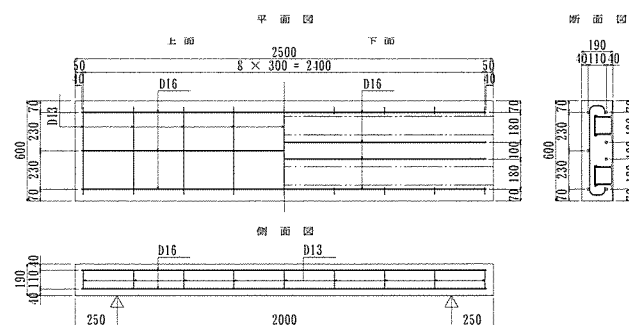


Fig.2 供試体詳細図

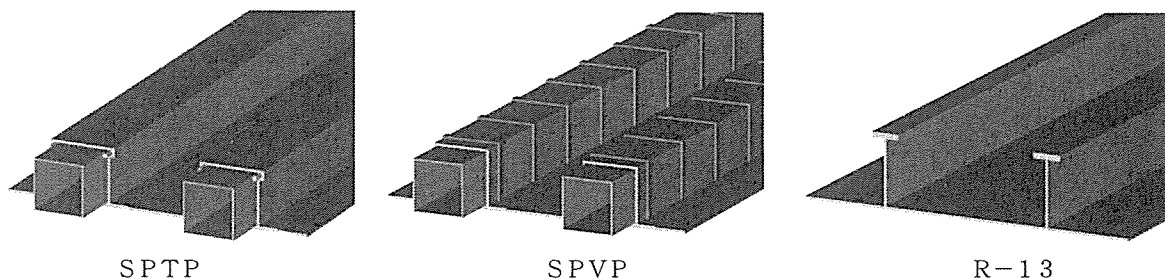


Fig.3 断面形状

FRP で覆うことで突起としたタイプ (SPTP) と、鉛直方向に一定間隔でコの字型の FRP 材をはめ込み、その上を FRP で覆ったタイプ (SPVP) の 2 種類とした。なお、比較のため、従来の引抜き成形タイプ (R-13) の試験も行った。供試体の種類と名称を Table.3 に示す。なお、荷重は、油圧ジャッキにより、載荷フレーム、ローラー、載荷板を介して行い、荷重は 20kN 毎に除荷を繰り返しながら漸増させる方法とした。載荷時の測定項目は、はりのたわみ、コンクリート・鉄筋・FRP のひずみ、および端部の FRP とコンクリートのずれとした。なお、供試体構成材料の力学特性は Table.4 のとおりであった。

3.2 実験結果と考察

曲げ試験による各供試体の破壊荷重、破壊形態を Table.3 に示す。これより、鋼と FRP のハイブリッド供試体は、

Table.3 供試体の名称と破壊荷重

供試体名	成形方法	FRPのコンクリート 接触面の 表面処理方法	破壊荷重 (kN)	備考
SPTP-1	インフュージョン	ビールプライ剥離面	296.5	曲げ破壊 ^{注)}
SPTP-2	インフュージョン	ビールプライ剥離面	363.5	曲げ破壊
SPVP	インフュージョン	ビールプライ剥離面	299.1	曲げ破壊
R-13	引抜き	砂接着	274.4	せん断破壊

注) 角型鋼管外側のコンクリート剥離が先行

Table.4 供試体構成材料の力学特性

	強度(N/mm ²)
コンクリート	30.2
GFRP	248
GFRP+CFRP	319
角形鋼管	420
鉄筋 D16	502

Table.5 計算値と実験値の比較

供試体名	ひび割れ 発生荷重 (kN)	角形鋼管下縁 降伏荷重 (kN)	下側鉄筋 降伏荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)
計算値	45	285	355	442
SPTP (19cm)				
実験値 SPTP-1	30	201	220	296.5
実験値 SPTP-2	70	226	255	363.5
R-13 (19cm)				
計算値	54	---	211	389
実験値	60	---	200	274.4
RC床版 (24cm)				
計算値	139	---	273	277

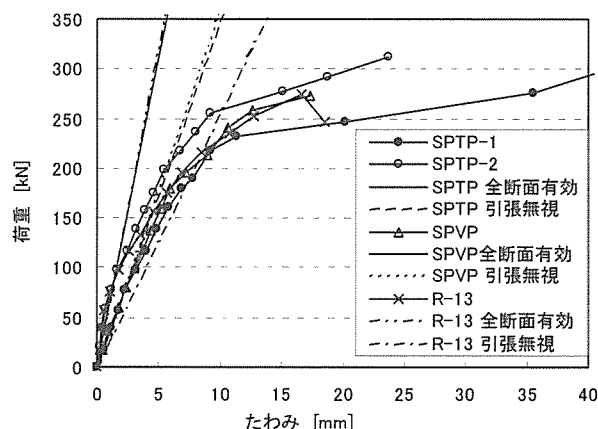


Fig.4 荷重－たわみ曲線

床版自重が約 20% 軽量化されるにもかかわらず、いずれも、引抜き材を用いた供試体の破壊荷重より大きく、耐荷力の向上が期待できることが分かる。なお、SPTP-1 供試体は、角型鋼管外側のコンクリートが拘束されていないことにより、鋼管ウェブ外縁に沿ったひび割れが生じ、この部分のコンクリートが剥離する破壊形態となったが、実際の床版では、配筋方向に連続した版であることから、このような破壊は生じないものと考えられる。また、R-13 供試体はせん断破壊したが、鋼と FRP のハイブリッド構造供試体は曲げ破壊している。これは、角型鋼管を入れたことで、せん断耐力が向上したためと考えられる。

Table.5 に、SPTP と R-13 のひび割れ荷重、鋼材降伏荷重、および破壊荷重の計算値と実験値を示す。ここで、各荷重値は、計算ひずみ、実測ひずみが、それぞれの状態に達した時の値とした。なお、本表には、比較のため、床版支間 3m で設計したときの RC 床版の計算値も併記した。

これより、SPTP 供試体の鋼材降伏荷重、破壊荷重が計算値より小さくなっている。これは、コンクリートと FRP 間にずれが生じたためと考えられる。R-13 供試体の破壊荷重が計算値より小さいのは、破壊が、曲げ破壊ではなく、せん断破壊したためである。SPTP 供試体の破壊荷重は、計算値と比べ、若干実験値の方が小さくなるが、RC 床版の計算値と比べ、床版厚がうすくなっているにも関わらず、破壊荷重は大きく、十分な耐荷力があることがわかった。また、SPTP 供試体、R-13 供試体では、鋼材降伏後から破壊荷重までの荷重差が、RC 床版より大きくなっている。これは、鉄筋降伏後も FRP が荷重負担するためであり、鋼材降伏後の残存耐力が大きいためとわかる。

Fig.4 に、各供試体の支間中央における荷重－たわみの包絡線を、床版の全断面を有効とした場合と、引張側コンクリートを無視した場合のたわみの理論値とともに示す。この図より、SPTP-2、R-13 供試体は、80kN 程度までほぼ全断面有効の理論値に近い剛性を示し、その後、荷重の増加とともに引張り側コンクリートを無視した理論値に近づいてくるが、SPTP-2 の方が、たわみの増加勾配が小さい。これは、引張側コンクリートを無視した理論曲線の傾きからも分かるように、ハイブリッド構造とすることで、引抜き材に比べ、曲げ剛性が大きくなるためであり、優れた耐荷性能を有していることがわかった。

一方、SPTP-1、SPVP 供試体は、載荷直後からたわみ曲線の傾きが引張無視の計算値に近い値を示している。これは、SPTP-1 と SPTP-2 が同一条件の供試体であることから推察して、供試体輸送時に FRP とコンクリート間で一部剥離が生じていたためと思われる。

また、ハイブリッド供試体では、破壊直前に端部でずれが生じ、たわみが急増しているが、その値は、SPVP の方が SPTP より小さい。これは、鉛直方向に配置したずれ止めの効果と思われる。

なお、SPTP-2 供試体は、型枠の中央部に樹脂の含浸不足による白化が見られたが、型枠載荷試験の結果、および曲げ試験の結果からは、剛性の違いは見られず、多少の含浸不足は問題とならないことがわかった。

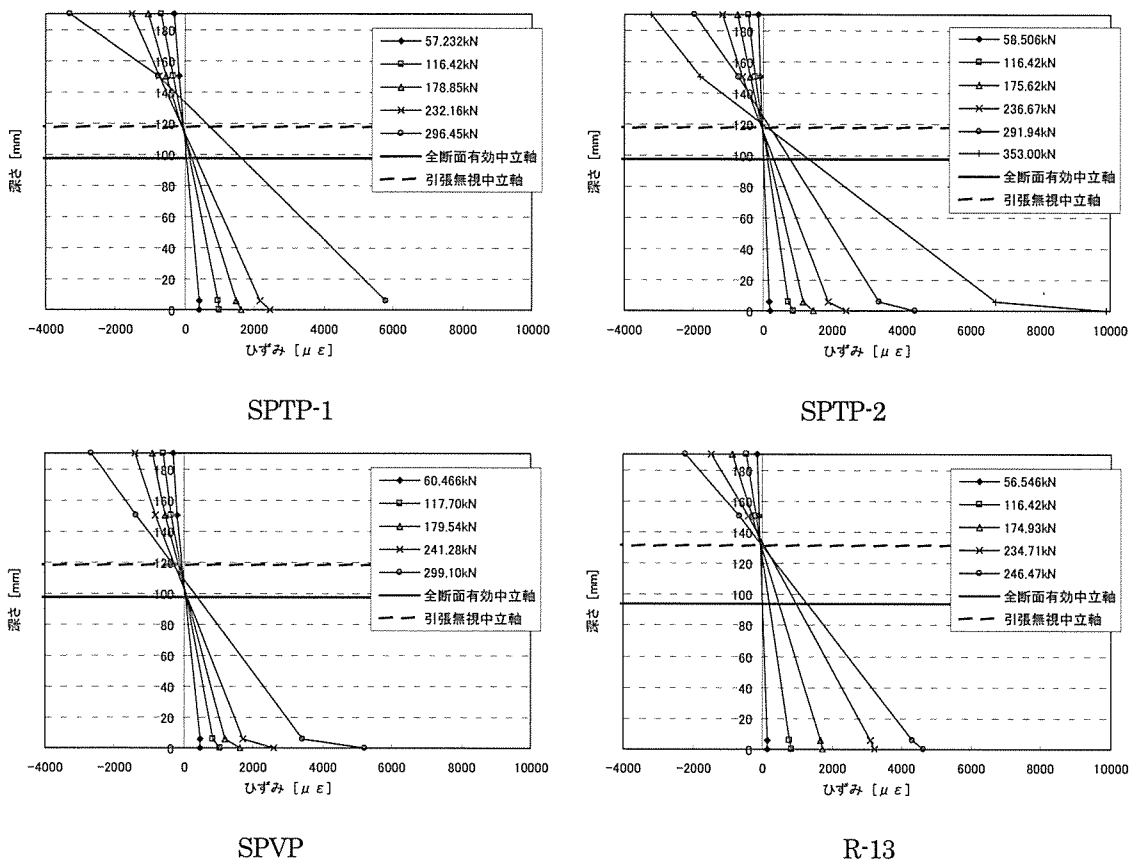


Fig.5 断面内でのひずみ分布

Fig.5 に、供試体中央位置における、縦ひずみ分布を示す。これらのひずみは、ハイブリッド供試体では、コンクリート上面、上側鉄筋、GFRP 上面、CFRP 下面における測定値であり、R-13 供試体では、コンクリート上面、上側鉄筋、GFRP 上面、GFRP 下面における測定値である。なお、本図には、全断面有効の場合と引張側コンクリートを無視した場合の中立軸の位置も併記している。

SPTP-1、R-13 では、各荷重段階において概ね直線となっており、断面内で各構成材料が合成した挙動を示していることがわかる。また、載荷初期では、ほぼ全断面有効の中立軸の位置と一致するが、載荷とともに引張無視の中立軸位置に近づくことがわかる。SPTP-2 では、床版下面の CFRP のひずみが大きい傾向にあるが、これは、型枠製作時の樹脂未含浸による白化の影響と考えられ、荷重－たわみ関係にほとんど影響がないことから、この欠陥は局所的であると思われる。SPVP では、100kN 以降、床版下面の CFRP のひずみが大きくなる傾向が見られるが、これは、鉛直方向に付けたリブによる局所的なひずみの影響と考えられる。

4. まとめ

FRP と角型鋼管のハイブリッド構造の永久型枠を用いた FRP 合成床版の静的載荷試験結果から、以下に示す事項が明らかになった。

- ①FRP と鋼管のハイブリッド構造は、従来の引き抜き成形材を用いた FRP 合成床版と比べ、死荷重を約 20% 軽減できる上、静的耐荷力の向上も図れる。
- ②ハイブリッド構造の FRP 合成床版は、RC 床版より薄い版厚でも、大きな耐荷力を有していることがわかった。
- ②型枠とコンクリート間のずれ止め構造として、鋼管上部に水平方向の突起を設けることで、十分な合成効果が得られることがわかった。
- ③ピールプライ剥離面に直接コンクリートを打設した場合でも、十分なずれ止め効果が得られることがわかった。
- ④インフュージョン成形の際、部分的な樹脂の未充填部があっても、剛性に与える影響は少ないことがわかった。

今後は、本床版の疲労耐久性を確認し、実橋への適用性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 望月秀次・花田克彦・石崎茂・久保圭吾・松井繁之：FRP 合成床版の実橋への適用例と疲労耐久性評価，土木学会第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム，pp.65-72，2001.
- 2) 松井繁之・石崎茂・久保圭吾：FRP 永久型枠を用いた RC 床版の静的強度・疲労耐久性に関する研究，土木学会構造工学論文集 Vol.40A，pp.1413-1424，1994.