

FRP パネルをウェブに使用した PC 合成桁の載荷試験

Experimental Study on Prestressed Concrete Composite Beams with FRP Panel Web

二井谷 教治*

阿部 浩幸*

Kyoji NIITANI

Hiroyuki ABE

ABSTRACT As a new composite bridge in the next generation, prestressed concrete composite bridges with FRP(Fiber Reinforced Plastics) panel web is proposed. This type of bridge is expected to reduce self-weight, maintenance cost and life cycle cost because heavy concrete web is replaced with light and durable FRP panels. A series of static loading test was conducted on prestressed concrete composite beams with FRP panel web to investigate bending and shear behavior and ultimate strength of this structure. The tests proved possibility of using FRP panels as shear members instead of concrete or corrugated steel web of conventional prestressed concrete box girders.

Keywords: FRP, 合成構造, プレストレストコンクリート, コンクリートジベル

FRP, composite structure, prestressed concrete, concrete dowel

1. はじめに

主桁自重の軽量化を図った複合構造の橋梁が注目されている。なかでも、PC 箱桁橋のウェブを波形鋼板で置き換えた波形鋼板ウェブ PC 橋は、現在数橋の実績があり、今後も施工例が増えるものと期待される[1]。

FRP は、一般に鋼と同程度、もしくはそれ以上の引張強度を有し、耐腐食性、非磁性、あるいはハンドリングの容易さなどの特徴から、橋梁分野においても適用例が増加しつつある。これまでの適用例としては、棒状の FRP を鉄筋、あるいは PC 鋼材の代替として使用する方法や、シート状の FRP を橋脚や橋桁に巻付けや貼付けを行って補強材として使用する方法が主なものであった。一方、FRP をすべての部材に適用した橋梁(以下 FRP 橋)、あるいは床版に使用した橋梁が、欧米で既に数十橋完成している[2]。また、英国にはコンクリート上床版と FRP パネルの合成構造橋が完成している[3]。我が国においても、最初の FRP 歩道橋が海洋環境の厳しい沖縄について最近完成した[4]。

本研究では、パネル状の FRP を PC 箱桁橋のコンクリートウェブの代替として適用する次世代の新しい複合構造の PC 橋を提案する。図-1 に FRP

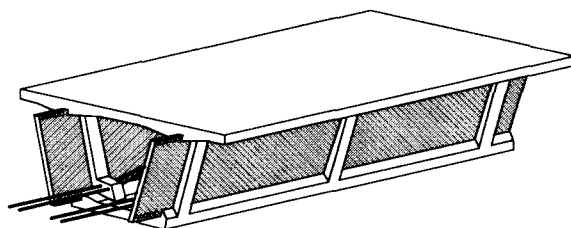


図-1 FRP ウェブ PC 橋のイメージ

ウェブ PC 橋のイメージを示す。FRP の比重が小さいことから、従来の PC 箱桁橋と比較して主桁自重の軽量化を図ることができる。また、ガラス繊維補強プラスチック (GFRP) のように弾性係数がコンクリートと同等のものもあり、クリープの性質を持つことから、波形加工することなく軸方向剛性が小さなウェブを構成することができる。さらに、FRP 自体は腐食しないことから、鋼部材を用いた複合 PC 橋と比較して、メンテナンスコスト、あるいはライフサイクルコストを軽減する効果が期待できる。

ここでは、FRP ウェブ PC 橋の実用化に向けて、FRP パネルとコンクリートとの接合方法に関する実験、FRP ウェブ PC 合成桁供試体による静的載荷試験など一連の基礎的実験を行ったので、その結果について報告する。

*工修 オリエンタル建設(株) 技術研究所
(〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘 5)

2. コンクリートとFRPパネルとの接合

複合構造物においては、コンクリートと異種材料との接合が重要な点である。鋼板ウェブとコンクリート床版との接合方法としては、ウェブにフランジプレートを溶接し、さらにスタッドやアンクルジベルをフランジに溶接して接合する方法が一般的である。波形鋼板ウェブPC橋の一部では、鋼板の上下端に孔をあけて鉄筋を貫通させ、その部分を直接コンクリート床版に埋め込んで接合する方法（以下コンクリートジベル）[5]も採用されている[6]。FRPパネルの場合を考えると、フランジとジベルによる接合方法では、構造が複雑になり実践的ではない。そこで、FRPパネルとコンクリート床版との接合には、図-2に示すようなコンクリートジベルによる方法を採用した。

FRPウェブPC橋においては、FRPを補強材としてではなく、パネル状の型材を構造部材として使用する新しい適用法となる。FRPのパネルには引抜成型法によるものを使用した。本構造形式では橋梁のウェブとして用いるため、FRPパネルにはせん断力が卓越して作用する。FRPパネルは一方に繊維補強されているため、このままではせん断力を受ける部材としては不向きである。そこで、図-3に示すように、一方に繊維補強された薄いパネルを繊維方向が交互に直交するように配置した積層構造のパネルとすることで、せん断強度を高める構造としている。FRPの各層は、樹脂

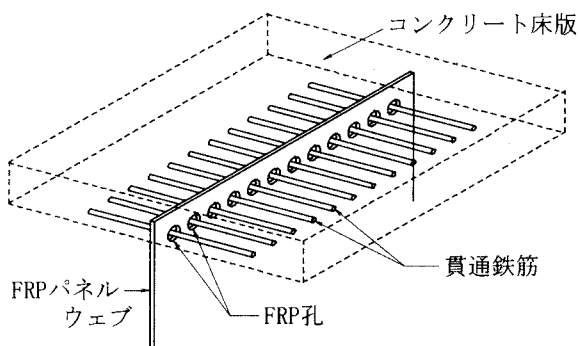


図-2 コンクリートジベルによる接合例

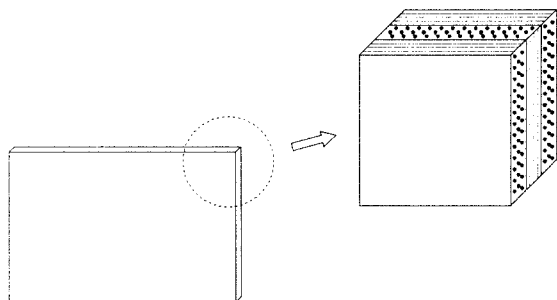


図-3 繊維方向を直交配置した積層FRPパネル

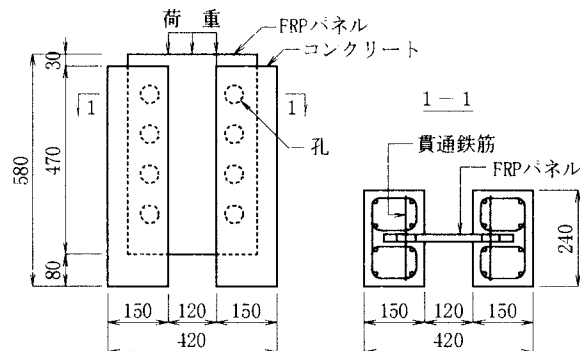


図-4 押抜き試験供試体

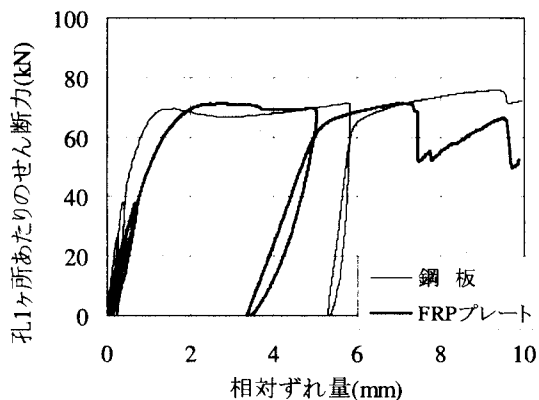


図-5 押抜き試験結果

接着剤によって貼り合わせた。FRPの種類としては、GFRPを使用した。

3. 押抜き試験

3.1 供試体

FRPパネルの場合でもコンクリートジベルによる接合が可能かどうか。可能な場合はどのような特性を有するのかを確認するため、まず最初に押抜き試験を行った。供試体は図-4に示すように、FRPパネルの両側に開けた孔に貫通鉄筋を配置し、FRPパネルを挟むようにコンクリートを打設した。試験はFRPパネルの上端に荷重を載荷し、コンクリートとFRPパネルとの相対ずれ量やせん断耐力などを測定した。試験の要因としては、孔の径および個数、貫通鉄筋の有無とし、比較のため鋼板を用いた供試体についても試験を行った。

3.2 試験結果

試験結果の一例を図-5に示す。図は孔1ヶ所あたりのせん断力とコンクリートとパネルとの相対ずれ量との関係を示したもので、孔径 $\phi 30\text{mm}$ の場合の鋼板とFRPパネルとの試験結果を比較したものである。コンクリートジベルが降伏に至るまでの相対ずれ量は、FRPパネルの場合の方が若

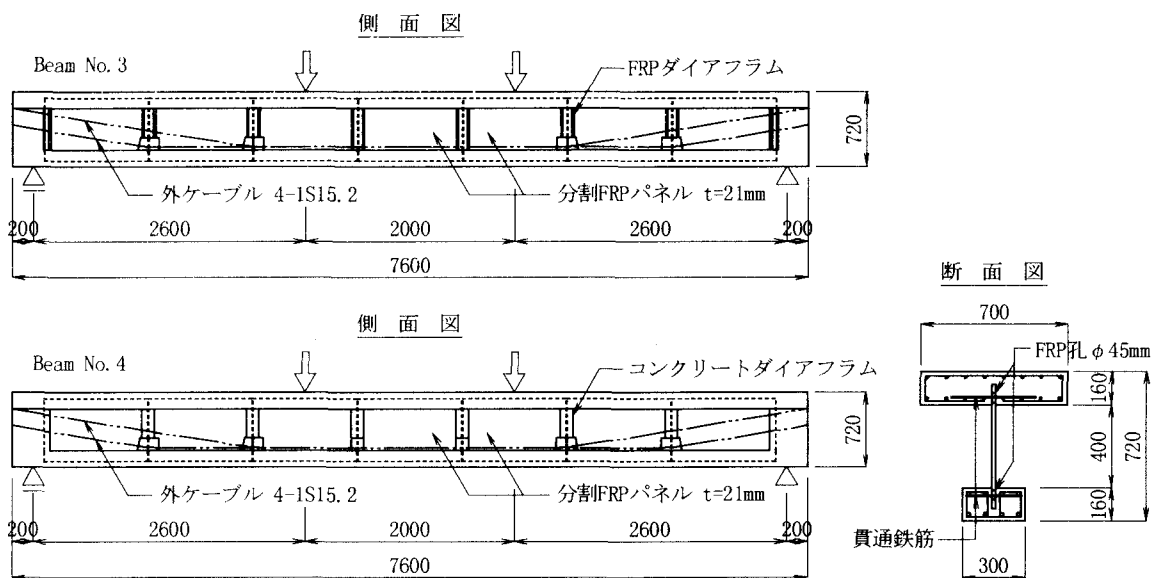


図-6 大型合成桁供試体

干大きい。しかしながら、孔1ヶ所あたりのせん断耐力、すなわちコンクリートジベルの耐力は、ほぼ同等であることがわかる。この試験結果から、FRP パネルの場合も鋼板と同様に、コンクリート床版との接合にコンクリートジベルが有効であると考えられる。後述する合成桁供試体のコンクリートフランジと FRP パネルとの接合には、コンクリートジベルを用いることとした。

4. 大型合成桁載荷試験

4. 1 供試体

FRP パネルをウェブに使用した PC 合成桁の可能性および静的な特性を把握するため、小型合成

桁2体および大型合成桁2体の合計4体の供試体を用いて曲げおよびせん断試験を行った。ここでは、大型合成桁の載荷試験について述べ、小型合成桁については他の文献[7]に譲ることとする。

実際に FRP ウェブ PC 橋を施工する場合、FRP パネルの成型、運搬および架設を考えると、パネルを適当な大きさに分割することが必要となる。したがって、FRP パネルはコンクリートと接合するだけでなく、隣りあうパネルどうしも接合する必要がある。また、プレストレストを与えるため、外ケーブルの配置も必要となる。そこで、実構造物に近い構造での挙動を確認する目的で、図-6に示す大型合成桁供試体を用いて静的載荷試験

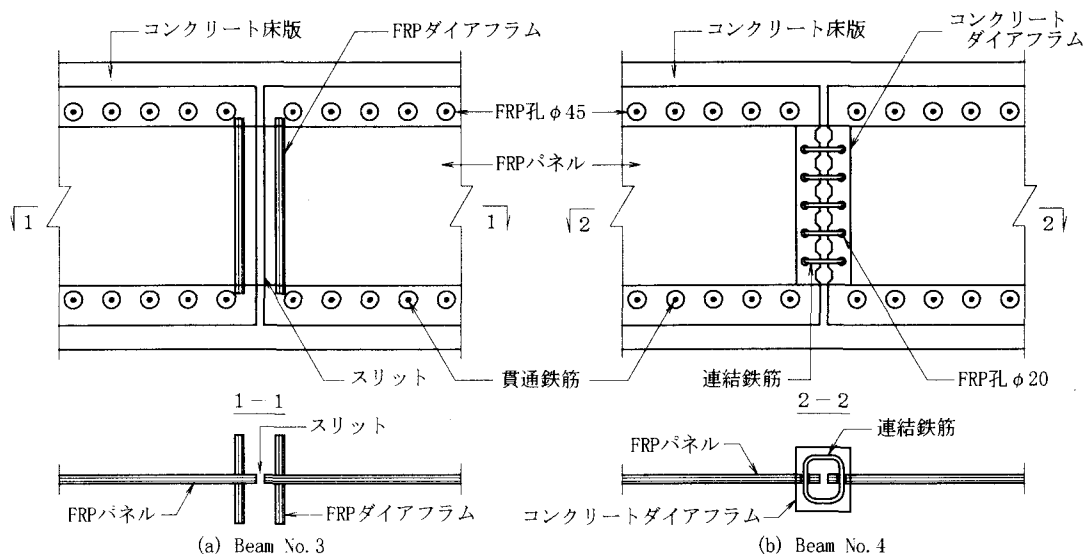


図-7 大型合成桁供試体 FRP パネル接合部詳細

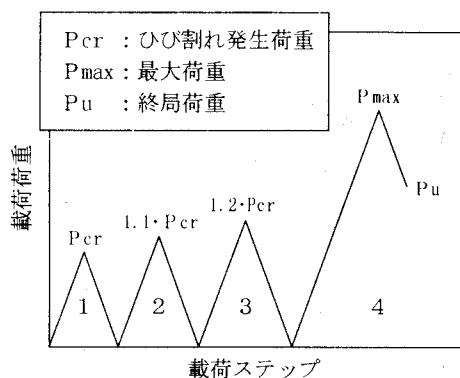


図-8 大型合成桁供試体荷重載荷ステップ

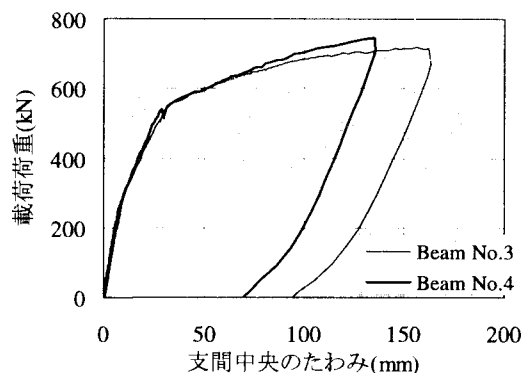


図-9 荷重-たわみ関係

を行った。断面形状は T 型で、上下のコンクリート床版と FRP パネルのウェブで構成される。コンクリート床版と FRP パネルとの接合は、押抜き試験の結果をもとに、コンクリートジベルによって行った。コンクリートジベルの孔径は 45mm とし、間隔は約 100mm ピッチとした。FRP パネルは繊維方向が直交する 5 層の積層構造で、厚さは約 21mm である。パネルは 7 枚に分割されており、1 枚の大きさは長さ 995mm×高さ 600mm である。プレストレストを導入するため、外ケーブル用シングルストランド 1S15.2 を合計 4 本配置した。供試体は隣りあう FRP パネルの接合方法を変えた 2 種類とした。接合部の詳細を図-7 に示す。Beam No.3 は、FRP パネルどうしを直接接合せず、スリット（隙間）を開けたままとし、スリットの両側にウェブと同一材料の FRP ダイアフラムを配置して補強した。Beam No.4 は、FRP パネルの接合部にコンクリートダイアフラムを設けて接合している。FRP パネルの左右両端に孔 φ20mm を開け、その孔を利用して隣りあう FRP パネルを貫通鉄筋で縫い合わせ、コンクリートを打設してコンクリートジベルを形成した。

荷重の載荷ステップを図-8 に示す。荷重の載荷

は静的に行い、ひび割れ発生荷重、ひび割れ発生荷重の 1.1 倍および 1.2 倍をそれぞれピーク値とする暫増載荷を 3 ステップ行い、4 ステップ目で破壊まで荷重を増加した。

4. 2 実験結果および考察

図-9 に載荷荷重と支間中央のたわみの関係、図-10 に終局時のひび割れ発生状況を示す。図-9 から、両供試体とも載荷荷重が 600kN まで同様なたわみ挙動を示していることがわかる。終局時には、Beam No.4 の方が Beam No.3 に比較してたわみが 15%程度小さく、最大荷重は 5%程度大きく、曲げ剛性が若干大きい結果となった。コンクリートダイアフラムが終局時のたわみ剛性に寄与しているものと思われる。ひび割れ発生状況もほぼ同様な傾向を示した。FRP パネルの接合目地断面の下床版に、比較的多くのひび割れが発生し、FRP パネルの接合目地断面近くの上床版コンクリートが圧縮破壊して曲げ破壊に至った。

図-11 は FRP パネルと上下床版コンクリートとの相対ずれ量の測定結果である。上床版側と下床版側の測定結果を比較すると、両者にほとんど差がないことがわかる。Beam No.3 と Beam No.4 と

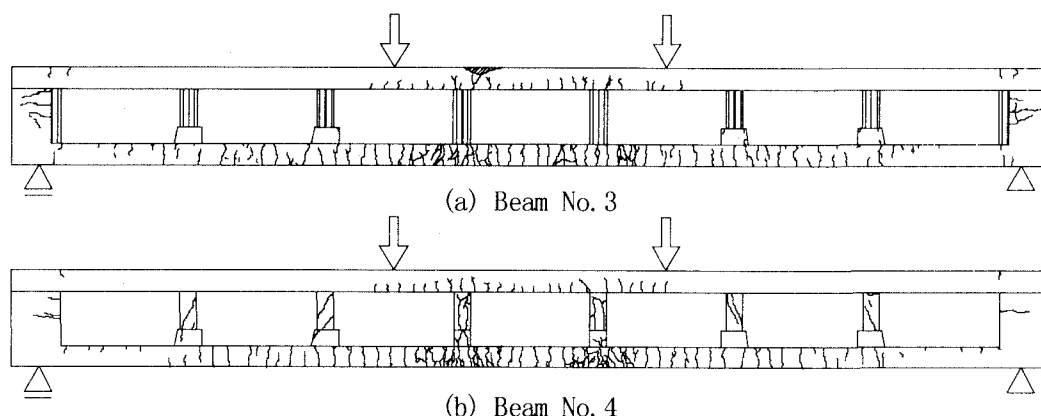
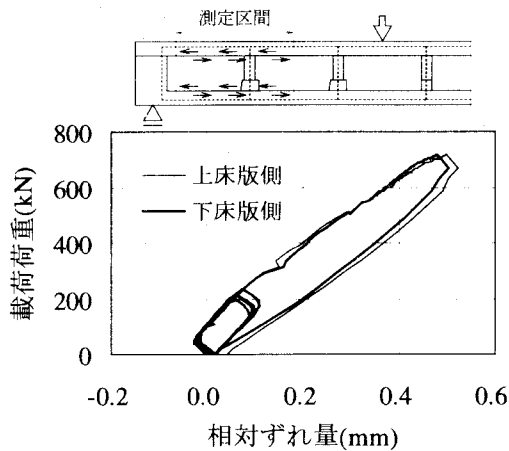
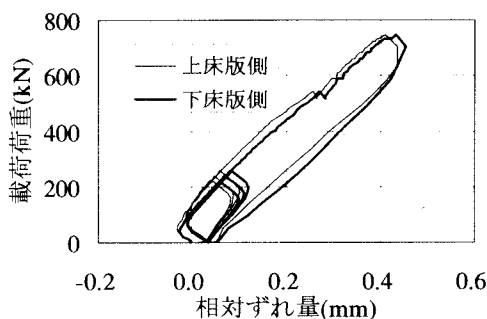


図-10 ひび割れ発生状況



(a) Beam No.3



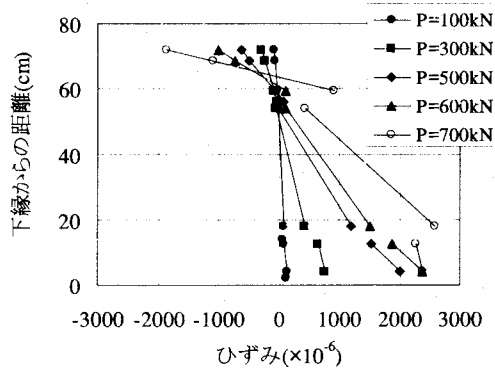
(b) Beam No.4

図-11 荷重－相対ずれ量関係

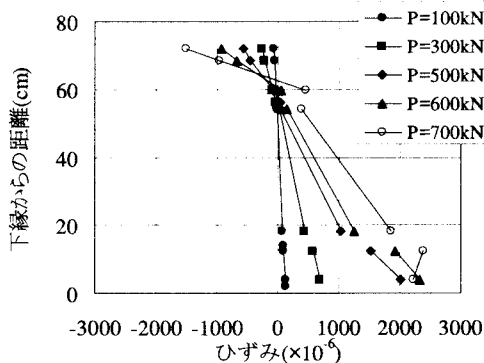
を比較すると、コンクリートダイアフラムを配置した Beam No.4 の方が若干ずれ量が小さくなっているが、両者とも終局時で 0.5mm 程度である。

図-12 は各載荷荷重における支間中央断面のひずみ分布の測定結果である。両供試体とも図-11 に示したずれ量が小さいため、ひずみ分布も載荷荷重が 600kN まではほぼ完全合成に近いひずみ性状を示している。終局状態に近い載荷荷重の 700kN の時点では、非合成の傾向がみられる。

FRP パネル接合目地の開き量の測定結果を図-13 に示す。両供試体とも、載荷荷重が 300kN 程度までは開きがほとんど生じていない。載荷荷重が 300kN 以降は徐々に開きが観測され、載荷荷重が 550kN から中央パネルの接合目地③に急激な開きが観測された。なお、図-13(a)の Beam No.3 では、計測器の不都合により目地開き量が約 7mm のときに測定を中止したが、終局時の③の最大目地開き量は Beam No.4 と同等であった。ここで、荷重－たわみ関係と目地開き量との関連について考察する。図-9 と見比べると、たわみ曲線の勾配も同じく載荷荷重が 550kN で大きく変化していることがわかる。これは、下床版コンクリートに発生した曲げひび割れが上方に伸びる過程で、ひび割れ

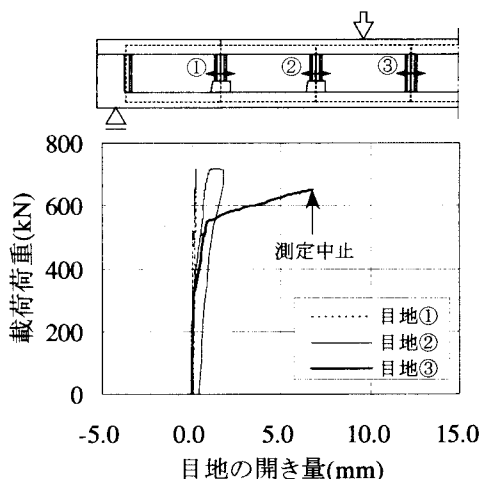


(a) Beam No.3

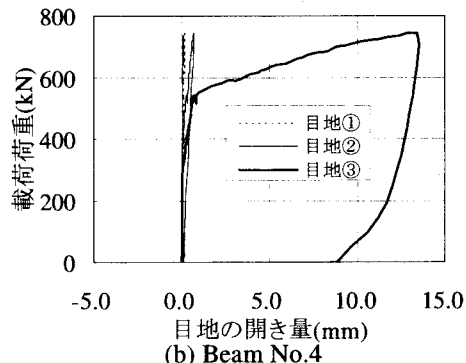


(b) Beam No.4

図-12 支間中央断面のひずみ分布



(a) Beam No.3



(b) Beam No.4

図-13 荷重－パネル接合目地の開き関係

がウェブに達した場合、FRP パネルの引張強度が高く弾性体であるため、下床版の複数のひび割れが FRP パネル目地に集中し、目地の開きに形を変えたものと考えられる。この目地の開きがコンクリートウェブでのひび割れのような役目をし、桁の靱性的なたわみ挙動に貢献したと考えられる。

5. まとめ

FRP ウェブ PC 橋という新しい複合構造形式の橋梁を提案し、実用化に向けての一連の基礎的実験を行った。これらの実験から得られた結果を以下に列挙する。

押抜き試験の結果：

(1) FRP パネルにコンクリートジベルを適用した場合、鋼板の場合に比べて相対ずれ量は大きくなるものの、せん断耐力は同等であった。

(2) FRP パネルとコンクリート床版を接合する場合、コンクリートジベルが適用できる。

大型合成桁載荷試験の結果：

(3) スリットを開けて FRP パネルどうしを直接つながない場合も、コンクリートダイアフラムを設けて接合する場合も、ほぼ同様のたわみ性状を示したが、終局時にはコンクリートダイアフラムを設けた場合がたわみ剛性が若干大きかった。

(4) スリットを開けてつながない場合も、コンクリートダイアフラムを設けて接合する場合も、ひび割れ性状はほぼ同等で、接合目地部の下床版にひび割れが比較的多く発生し、接合目地部上床版コンクリートの曲げ圧縮によって破壊した。

(5) FRP パネルとコンクリート床版との相対ずれ量は、コンクリートダイアフラムを設けて接合した方が若干小さかったものの、スリットの場合もずれ量はほぼ同等であり、両供試体とも終局時で 0.5mm 程度と小さかった。

(6) 相対ずれ量が小さかったため、両供試体とも合成度の高いひずみ分布性状を示した。

(7) FRP パネルの接合目地部では、載荷荷重が 300kN 程度まではほとんど開きがなく、載荷荷重が 550kN から中央部の目地に急激な開きがみられた。これは、たわみの増加割合が大きくなった点と一致した。

これらの結果から、FRP パネルを PC 桁のウェブに使用した合成構造でも、曲げおよびせん断に対して十分な耐荷力があり、FRP ウェブ PC 橋の実現の可能性が見いだされた。今後、実用化に向けて、(1)本構造形式、特に接合部の疲労。(2)FRP パネルの座屈挙動。(3)積層構造 FRP の強度特性。(4)FRP の耐候性および耐久性など長期特性の検

討。(5)本構造形式の設計方法の確立。などが検討項目として挙げられる。

謝 辞

本実験での FRP パネルの製作に関しては、エイ・ジイ・インタナショナル・ケミカル(株)、日本ユピカ(株)および旭硝子マテックス(株)各社より多大なる協力をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- [1]森山陽一ら：鍋田高架橋の設計－波形鋼板ウェブ PC 橋－プレストレストコンクリート，Vol. 41，No. 2，pp. 48～55，1999
- [2]G. J. Turvey：Bolted Connections in FRP Structures, Progress in Structural Engineering and Material, Vol. 2, No. 2, pp. 146～156
- [3]Palladian Publication Ltd.：Concrete Engineering International, Vol. 4 No. 3, pp. 54～57，2000，3
- [4]日経BP社：日経コンストラクション，2000，4-20，pp. 28～32，2000
- [5]Leonhardt et al.：Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit (New improved shear connector with high fatigue strength for steel concrete composite structures), Beton und Stahlbetonbau, 12/1987, pp. 325～331，1987
- [6]水口和之ら：本谷橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol. 32, No. 9, pp. 2～10，1998
- [7]K. Niitani et al.：FRP Plates as Shear Member for a New Generation of PC Composite Bridges, コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 3, pp. 1123～1128，2000