

論文 超高強度繊維補強コンクリートウェブとコンクリート床版との接合構造

大熊 光^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}・阪本 陽一^{*3}・片桐 誠^{*4}

要旨：PC 箱桁橋におけるウェブに超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を用いることにより、上部構造の軽量化が図れ、スパンの長大化や下部構造・基礎構造を含めた橋梁全体の合理化を図ることが期待される。本研究では、UFC ウェブと通常のコンクリート床版との複合構造において重要となる接合構造に関する基礎的研究として、接合方法の提案を行い、橋軸直角方向の曲げ伝達性能に関する実験を行った。接合方法としては、孔あき鋼板ジベルおよび鉄筋を用いた構造を検討し、破壊に至るメカニズムと曲げ耐力を確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、複合 PC 構造、孔あき鋼板ジベル、曲げ耐力

1. はじめに

近年、コンクリート橋の建設技術は波型鋼板ウェブ複合 PC 橋梁、鋼トラスウェブ複合 PC 橋梁など、ウェブの軽量化による建設費のコストダウンや大スパン化を目指す傾向にある。本研究は、PC 箱桁橋のウェブ部材に超高強度繊維補強コンクリート¹⁾（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete：以下 UFC と称す）を適用することで、ウェブ厚を減少して主桁自重の軽減を図るとともに、維持補修の不要な高耐久性橋梁を実用化することを目的としている。また UFC ウェブはプレキャスト部材のため、工場製作による高品質化と、大幅な現場施工の省力化が期待される。

UFC は反応性微粉末を使用した無機系複合材料であり、優れた強度特性（圧縮強度約 200MPa）だけでなく、自己充填性、高靱性、高耐久性などを特徴とした新素材である。鋼繊維補強による優れた靱性により鉄筋を必要としないため、大幅なウェブ厚低減が可能となる。

UFC をウェブとして適用した場合、コンクリート床版との接合構造が重要となる。これまで

UFC とコンクリートとのせん断耐荷機構については研究が進められている²⁾が、箱桁断面では、活荷重による橋軸直角方向の曲げモーメント（首振り）が接合部に発生する。そのため本研究では、孔あき鋼板ジベルおよび鉄筋を用いた接合構造を提案し、実験によりこれらの曲げ伝達性能の比較を行い、実用的な接合構造を検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) UFC

UFC の示方配合を表-1 に示す。UFC の目標圧縮強度は 200N/mm²とした。プレミックス粉体は、セメント、シリカフェーム、珪石微粉末などから構成され、最密充填理論に基づきあらかじめ混合された粉体である。高性能減水剤は練混ぜ水の一部とし、直径 0.2mm で長さ 15mm の

表-1 UFC の示方配合(kg/m³)

水	プレミックス粉体	鋼繊維	高性能減水剤
180	2254	157	28

*1 大成建設（株） 技術センター土木技術開発部ダクトル事業推進室 課長 工修（正会員）

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博（正会員）

*3 東京工業大学 工学部土木工学科（非会員）

*4 太平洋セメント（株） 中央研究所 ダクトル技術開発チーム リーダー 工博（正会員）

表-2 使用材料

材料	品種	物性もしくは成分
セメント	早強セメント	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4570cm ² /g
細骨材	東員町産粗砂	表乾密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 0.86%, 粗粒率 2.90
粗骨材	北勢町産碎石	表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 0.62%, 最大寸法 20mm, 粗粒率 6.72
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系, 密度 1.05g/cm ³

表-3 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤
20	18±2.5	43.1	2.0±1.5	44.0	174	404	778	1004	2.02

表-4 接続構造一覧

ケース	接続方式		備考
Case-1	PBL	標準	
Case-2		埋込	UFC 埋込長 20mm
Case-3	鉄筋	埋込	UFC 埋込長 70mm

鋼繊維を容積比で 2%混入した。

(2) コンクリート

コンクリート床版に使用した材料を表-2 に、示方配合を表-3 に示す。コンクリートは目標圧縮強度を 40N/mm² とし、早強セメントを使用した。

2.2 供試体と接合構造の概要

(1) 供試体構造

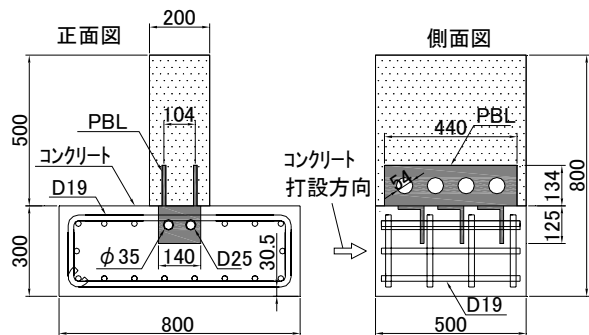
図-1 に供試体の概要を、表-4 に接合構造の一覧を示す。図-1 に示すように、供試体形状は幅 800mm, 厚さ 300mm, 奥行き 500mm のコンクリート床版に、ウェブ厚 200mm, 奥行き 500mm の UFC ウェブを、埋込み後の高さが 500mm となるように設定した。

床版は鉄筋コンクリートとし、D19 の鉄筋を 100mm ピッチで配置し、純かぶりは 30mm とした。鉄筋の材質は全て SD345 とした。

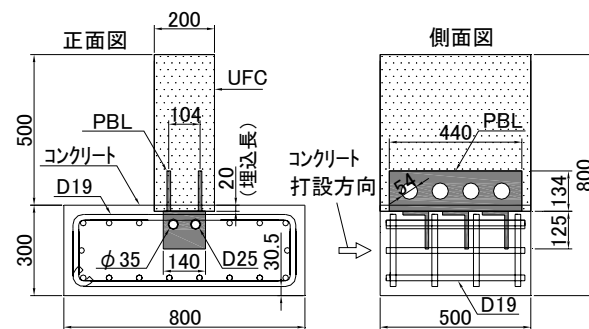
(2) 接合構造

接合方法としては、剛性と強度特性に優れた孔あき鋼板ジベル (以下 PBL と称す) による接

Case-1 (PBL 標準)



Case-2 (PBL 埋込)



Case-3 (鉄筋接続)

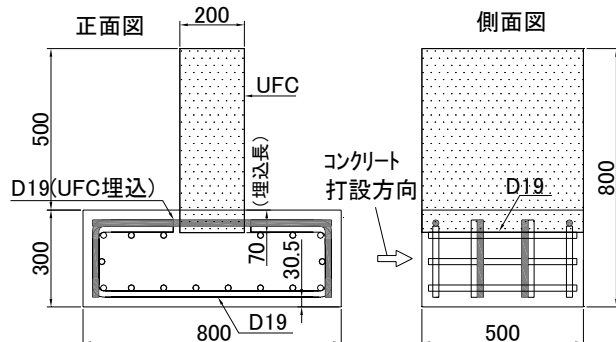


図-1 供試体概要

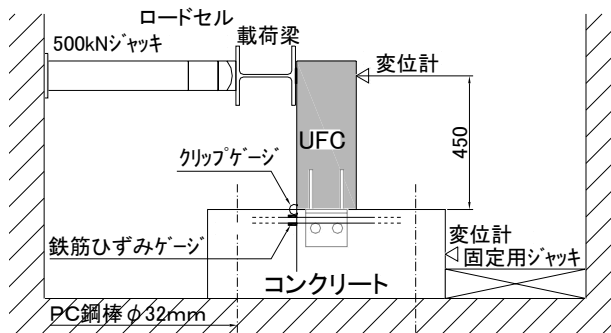


図-2 載荷図

合と、鉄筋による接合方法を検討した。

PBL による接合方法では、首振りによる曲げモーメントに抵抗するように PBL は 2 列配置とした。また、図-1 に示す標準タイプ (Case-1) のほか、剛性の向上および接合面の縁切れによる水の浸入を防止するために、UFC ウェブをコンクリート床版に 20mm 埋込むタイプ (Case-2) についても実験を行った。PBL は材質を SS400 とし、UFC 側には厚さ 12mm の平鋼に $\phi 54\text{mm}$ の丸孔をあけたものを 2 列、コンクリート側には厚さ 12mm の不等辺山形鋼に $\phi 35\text{mm}$ の丸孔をあけたものを平鋼と直角に配置し、両者を溶接により接合した。コンクリート側の孔内には、耐荷力と靱性の向上のために貫通鉄筋 (D25) を配置した。

鉄筋による接続タイプでは、コンクリート中の鉄筋かぶりを道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編 (H14.3) における床版の最小かぶり (30mm) に設定し、UFC ウェブの埋込み長は 70mm とした。

2.3 供試体の製作

(1) UFC ウェブ

UFC の練混ぜは 12~14 分で行い、ホッパーにて打込みを行った。打込み時にはフロー試験 (JIS R 5201, 落下なし) を行い、フローコーン引き上げから 180 秒後のフロー値が $270 \pm 10\text{mm}$ となるように管理した。打込み後は 48 時間の湿潤養生を行い、その後脱型して 90°C の蒸気養生を 48 時間行った。

(2) コンクリート床版

コンクリート床版の施工に際しては、UFC ウ

表-5 コンクリートおよび UFC の材料特性

(単位: N/mm^2)

UFC			コンクリート	
圧縮強度	ひび割れ発生強度	ヤング係数	圧縮強度 σ_{12}	圧縮強度 σ_{14}
220	9.3	54.1×10^3	48.9	49.2

ェブとの界面に空隙が生じないように、図-1 の側面図を 90° 度回転させた状態で UFC ウェブを固定し、型枠・鉄筋を組立てた後に、同図に示す方向で打設を行った。養生については、冬期のため 30°C の蒸気養生を 24 時間行った。

2.4 強度試験

UFC については、圧縮強度試験用およびヤング係数の算出用に $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 供試体を、割裂引張強度試験用に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 供試体を 3 体ずつ作製した。

コンクリートについては、圧縮強度試験用に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 供試体を 9 体作製し、脱型時、載荷実験直前、載荷実験終了後に強度試験を行った。

圧縮強度試験は JIS A 1108 に、割裂引張強度試験は JIS A 1113 に、ヤング係数の算出は JIS A 1149 に準じて行った。

2.5 載荷実験

実橋における接合面は、曲げ・せん断・軸力により複雑な応力状態となるが、本実験では曲げの卓越する接合構造の基礎的実験として、図-2 に示す曲げせん断実験を行った。固定用ジャッキと PC 鋼棒にてコンクリート床版を固定し、500kN 油圧ジャッキを用いて水平方向に UFC ウェブ側面から載荷した。載荷位置は 3 ケースともコンクリート天端から 450mm とした。

3. 実験結果

3.1 材料試験

表-5 に UFC ならびにコンクリートの材料試験結果を示す。コンクリートの圧縮強度試験は、載荷実験の前後 (材齢 12 日と 14 日) に行った。

UFCとコンクリートはともに目標圧縮強度を満足した。

3.2 荷重実験

写真-1に荷重状況写真を示す。

(1) 計測結果

表-6に各ケースの曲げ耐力一覧を、図-3～5には図-2に示す位置での各計測結果を示す。図表に示すように Case-2 (PBL 埋込タイプ) の耐力が最も大きくなった。

図-3 は荷重-変位関係を示す。ここでいう変位とは、荷重点位置での水平変位から供試体全体のずれ量を差し引いた補正值であるが、前者が最大17mm (Case-2) に対して後者は0.3mm であり、十分小さい値であった。図-4には、UFC ウェブとコンクリート床版との開き量を示すが、これは境界部の縁が切れて UFC ウェブが浮き上がる程度を示している。図-5には荷重-鉄筋ひずみ関係を示す。ここでいう鉄筋とは、PBL 接続タイプにおいてはPBLを貫通する鉄筋と直角方向筋を、鉄筋接続タイプでは UFC に埋込まれた接続用鉄筋を示し、それぞれ上下縁に貼り付けたひずみゲージの平均値を示す。各ケースの破壊に至る性状を以下に示す。

1) Case-1 (PBL 標準タイプ)

図-3に示すように、Case-1は3ケース中で初期の剛性が最も高く、荷重が40kN まではほぼ線形関係にあった。荷重が40kN の時には、図-5に示すように、鉄筋のひずみが増加を始めており、荷重-変位関係についても、徐々に勾配が緩やかになった。荷重が70kN の時には、荷重が増加せずに変位のみが進行しているが、その後再び荷重が増加を始め、最大荷重は120kN となった。鉄筋の平均ひずみ量については最大940 μ であるが、上縁のひずみ量は2,200 μ に達しており降伏点を越えていた。図-4の荷重-開き量関係についても変位量と同様の傾向がみられた。

2) Case-2 (PBL 埋込タイプ)

Case-2 の荷重-変位関係より、荷重直後は Case-1 と同等の剛性を有していたが、荷重が



写真-1 荷重状況

表-6 実験結果一覧

実験ケース	接続タイプ		最大荷重 (kN)	曲げ耐力 (kN・m)	最大荷重時変位 (mm)
Case-1	PBL	標準	120	54.2	-9.4
Case-2		埋込	156	70.4	-14.6
Case-3	鉄筋	埋込	80	36.1	-9.9

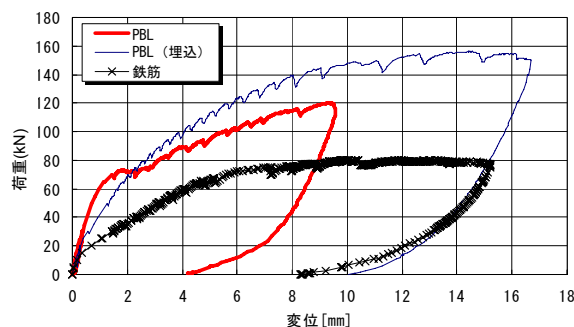


図-3 荷重-水平変位関係

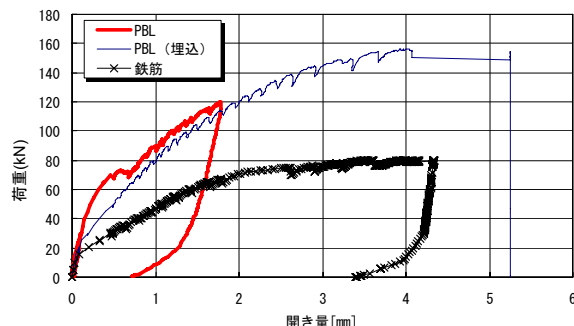


図-4 荷重-開き量関係

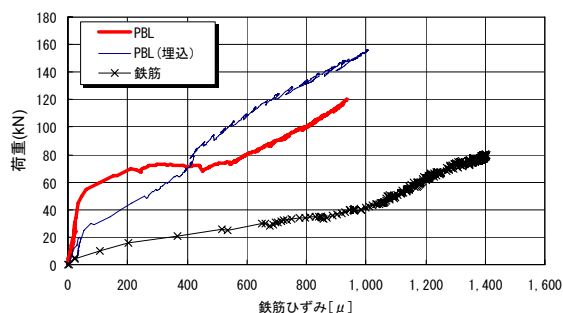


図-5 荷重-鉄筋ひずみ関係

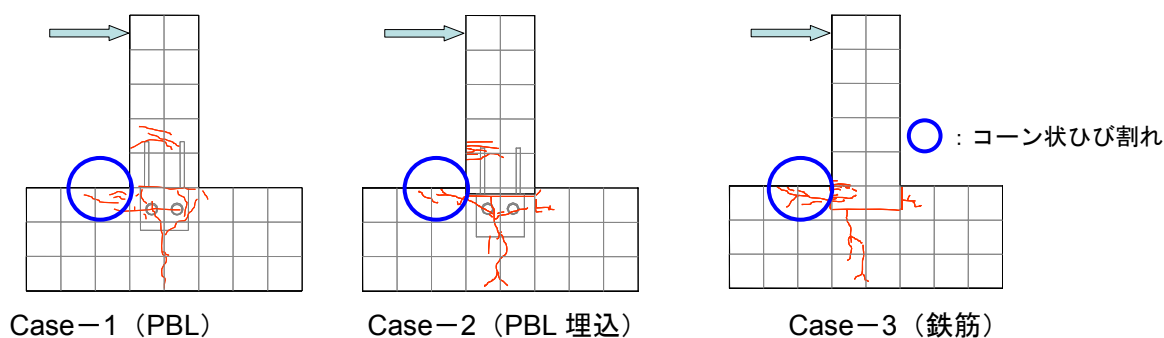


図-6 ひび割れ図

20kN の時に勾配の変化点がみられ、剛性が低下した。図-5 においても荷重が 20kN の時から鉄筋のひずみ量が増加してきている。これ以降は連続的に推移し、荷重が 70kN の時点で Case-1 と変位量が逆転した。最大荷重についても Case-1 を上回る 156kN となった。荷重-開き量の関係では、荷重が 20kN~70kN の範囲においては、勾配が Case-1 よりも小さいが、70kN 以降はほぼ同じ勾配となった。

3) Case-3 (鉄筋接続タイプ)

Case-3 は 3 ケースの中で最も剛性が小さく、荷重が 20kN の時に勾配が変化するが、その後はほぼ直線的に変位が進行した。荷重 70kN 付近からは荷重がほとんど増加せず、最大荷重は 80kN であり Case-2 の約半分程度であった。図-5 より鉄筋の平均ひずみ量は最大 1400 μ であるが、上縁のひずみ量は 2,000 μ に達していた。

(2) ひび割れ性状

図-6 に載荷終了後のひび割れ図を示す。

1) Case-1 (PBL 標準タイプ)

Case-1 では、荷重が 20kN の時点で UFC ウェブとコンクリートとの付着が切れ、境界部にヘアクラックがみられた。荷重 60kN においては、コンクリートに鉛直方向のひび割れが発生した。その後 PBL 貫通鉄筋付近から水平方向にもひび割れが伸びてゆき、これがコンクリート表面に到達し、コンクリートが浮き上がる形でコーン破壊した。UFC ウェブについては、荷重 100kN において PBL 天端付近から水平方向に曲げひび割れが発生した。

2) Case-2 (PBL 埋込タイプ)

Case-2 では、荷重が 10kN の時点で UFC ウェブとコンクリートの境界部の縁が切れたほか、コンクリートにひび割れが発生した。ひび割れは UFC ウェブ下縁の中央部および隅角部を起点として、鉛直方向に発生していた。荷重 70kN 以降は Case-1 と同様に PBL 貫通鉄筋付近からコンクリート表面に向けて斜め方向のひび割れが伸びてゆき、コンクリートが浮き上がりコーン破壊した。UFC ウェブは、Case-1 と同じく荷重が 100kN の時に PBL 天端付近でひび割れが発生した。

3) Case-3 (鉄筋接続タイプ)

Case-3 では、載荷前のひび割れ調査において、コンクリート側の UFC 下縁から鉛直方向にヘアクラックが確認された。荷重が 20kN の時には接続用の埋込み鉄筋に沿って、コンクリート床版および UFC ウェブに水平方向のひび割れが発生した。コンクリート側の水平ひび割れは斜め上方向に伸びてゆき、荷重 40kN でコンクリート表面に到達した。また、コンクリート側の鉛直方向のひび割れについては最終的には下縁付近まで到達した。

4. 考察

以上の実験結果から、各ケースの破壊に至る性状を考察する。

(1) Case-1 (PBL 標準タイプ)

図-4, 5 より、荷重が 20kN において UFC ウェブとコンクリート間の付着が切れた後、荷重 40kN の時にはコンクリートと PBL 鋼板との付

着が切れて、PBL 孔内のコンクリートと貫通鉄筋に力が伝達されていることが推察される。荷重が 60kN の時には、コンクリートにひび割れが発生することにより剛性が低下している。

荷重が 70kN 付近から荷重が増加しなくなり、その後再び増加しているが、この原因としては PBL 孔内のコンクリートが圧壊したことにより変形が進み、その後 PBL 貫通鉄筋が直接 PBL 鋼板に力を伝達し始めたと考えられる。これ以降は孔内の貫通鉄筋およびこれを拘束する横方向鉄筋のひずみから、これらの鉄筋が有効に機能し耐力に寄与していることがわかる。最終的には横方向鉄筋が降伏し、床版コンクリートがコーン状に破壊した。

(2) Case-2 (PBL 埋込タイプ)

Case-2 では荷重初期段階においてコンクリートにひび割れが発生している。これは剛性の大きな UFC ウェブの変形により隅角部を介してコンクリートに引張応力が発生したことに加え、後打ちのコンクリートが UFC に拘束されたことにより、荷重前に引張ひずみが残留していたことが原因と考えられる。荷重 20kN~70kN において Case-1 よりも変位量が大きくなった理由としては、上述のひび割れによる全体の剛性低下に加えて、PBL 付近にもひび割れが到達したことにより、接合部の剛性が鉄筋のみに依存していたことが原因と思われる。

荷重 70kN 以降では、Case-1 の孔内コンクリートの圧壊により、両者の荷重-開き量関係はほぼ同等となった。しかし、Case-2 は UFC ウェブの先端が埋め込まれていることにより、付根部のたわみ角が拘束されるため、剛性および耐力が Case-1 を上回ったと考えられる。

(3) Case-3 (鉄筋接続タイプ)

Case-3 は Case-2 よりも埋込長が長く (70mm)、UFC による拘束が卓越して事前にひび割れが発生したと考えられる。自己収縮が比較的大きい早強コンクリートを用いたことも一因であった。本ケースは鉄筋に応力が集中し、UFC、コンクリートともに鉄筋に沿って早期に

ひび割れが発生したと考えられる。

5. まとめ

本研究では、UFC ウェブとコンクリート床版を接合した場合の曲げ伝達性能について、耐力、変形状に関する載荷実験を行った。以下に本研究より得られた知見を示す。

- (1) 実験結果より、PBL による接合方法と鉄筋による接合方法については、前者が剛性および耐力に優れた性能を持つことが示された。
- (2) ウェブを床版に埋め込むタイプについては、UFC とコンクリートとの剛性の違いから、載荷後すぐに床版にひび割れが発生した。
- (3) PBL の標準タイプと埋込タイプを比較した場合、初期の剛性については標準タイプが高く、ひび割れ発生荷重も大きかった。最終耐力については埋込タイプが高い結果となったが、前述のように埋込タイプは荷重初期に床版のひび割れが発生すること、剛性が小さいことに問題があるものと思われる。
- (4) 実験結果より、各部材が接合耐力や変形状に与えるメカニズムを解明した。今後は本結果を解析により検証してゆく。また PBL による接続方法については、PBL 鋼板厚、孔径、貫通鉄筋径などをパラメータとしたケーススタディ、並びに疲労特性に関する繰返し載荷実験を行い、設計手法を確立してゆく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)，コンクリートライブラリー113，2004.9
- 2) 黒岩正，岩崎郁夫，大熊光：超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋，コンクリート工学，Vol.43，No.10，pp.39-44，2005.10