

論文 超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた複合 PC 部材の力学的特性に関する実験的研究

川口 哲生^{*1}・掛井 孝俊^{*1}片桐 誠^{*2}二羽 淳一郎^{*3}

要旨：超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料¹⁾ (Ultra High Strength steel Fiber Reinforced Cementitious Composites : 以降 UFC と略記) をプレキャストウェブパネルに用いた複合 PC 構造を提案するために、複合 PC はりの曲げせん断載荷実験を行った。実験に際し、接合方法、ウェブパネル形状、ウェブパネル厚、導入プレストレス量を実験パラメータとした。実験により、複合 PC はりが有する耐荷力と破壊性状を把握し、接合方法、ウェブ厚さ、ウェブパネル形状、導入プレストレス量が耐荷力と破壊性状に及ぼす影響を明らかにした。さらに、等価な耐荷力を有する RC はりと比較し、本構造の有用性を示した。

キーワード：超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料、複合構造、プレキャストパネル

1. はじめに

近年、ウェブ部材に異種材料を用いる複合 PC 橋梁が注目されている。複合構造とすることで、構造物の自重の軽減、現場作業の軽減、コストの削減など多くの利点が見込めるためである。その様な背景の中、プレストレストコンクリート(PC)橋梁に関しても、ウェブ部材に異種材料を用いる複合橋梁が注目されている。

最近フランスで超高強度繊維補強セメント系複合材料¹⁾が開発された。これは、非常に高強度で、靱性の高い材料である。また、流動性にも優れ、コンクリートと同様に練り混ぜることができるので、複雑な形状でも製作が容易なのも特徴である。

そこで、本研究では超高強度繊維補強セメント系複合材料と普通コンクリートの複合 PC 構造形式を提案することを最終的な目的としている。この構造の主な特徴は、ウェブ部材に予め製作した超高強度繊維補強セメント系複合材料のパネルを用いることであり、軽量化、現場施工の省力化、パネル輸送の簡略化、工期の短縮等を図っている。また、ウェブパネルに全くせん断補強鉄筋を用いずに、合理化を図っている。

この構造形式を実現するにあたっては、十分な曲げせん断耐荷力と十分な剛性、変形性能を有していること、破壊性状、応力分布を把握することが前提となる。そこで、ウェブ部材に超高強度繊維補強セメント系複合材料を使用した複合 PC はりを対象に実験的な検討を行った。

この構造が十分な耐荷力を有するには、ウェブフランジ間の合理的な接合方法が課題として挙げられるので、超高強度繊維補強セメント系複合材料の特性を活かした合理的な接合方法について検討を行うこととした。

パネル厚、ウェブパネル形状、下縁応力度をパラメータとして、これらが複合 PC はりの曲げせん断耐荷力と曲げせん断挙動に及ぼす影響について検討することにした。ウェブパネルには全くせん断補強筋を配置しないので、せん断抵抗力を変化させるために、パネル厚を 20mm,40mm の 2 水準に変化させた。

また、景観性の付与と設計自由度の向上を目的として、四角形パネルに加えて三角形パネルも対象とすることにした。

なお、導入するプレストレス量は、下縁応力

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第一研究部 工博

*3 東京工業大学大学院教授 理工学研究科 土木工学専攻 工博

表-1 実験ケース一覧

試験体 No.	ウェブパネル 形状	接合方法			ウェブパネル厚さ (mm)		導入プレストレスレベル (MPa)	
		キー接合	キー接合 (多段)	埋込み鉄筋型	20	40	5.0	10.0
1	三角パネル	○				○	○	
2	三角パネル		○			○	○	
3	三角パネル			○		○	○	
4	三角パネル	埋込み鉄筋+キー接合(多段)			○		○	
5	三角パネル	埋込み鉄筋+キー接合(多段)				○	○	
6	三角パネル	埋込み鉄筋+キー接合(多段)				○		○
7	四角パネル	埋込み鉄筋+キー接合(多段)			○		○	
8	四角パネル	埋込み鉄筋+キー接合(多段)				○	○	
9	四角パネル	埋込み鉄筋+キー接合(多段)				○		○

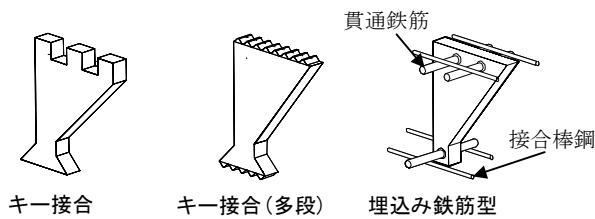


図-1 接合方法

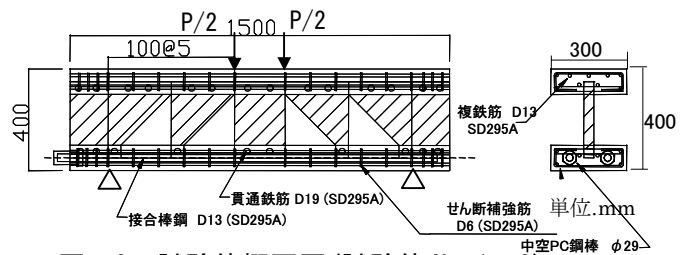


図-2 試験体概要図(試験体 No. 1~3)

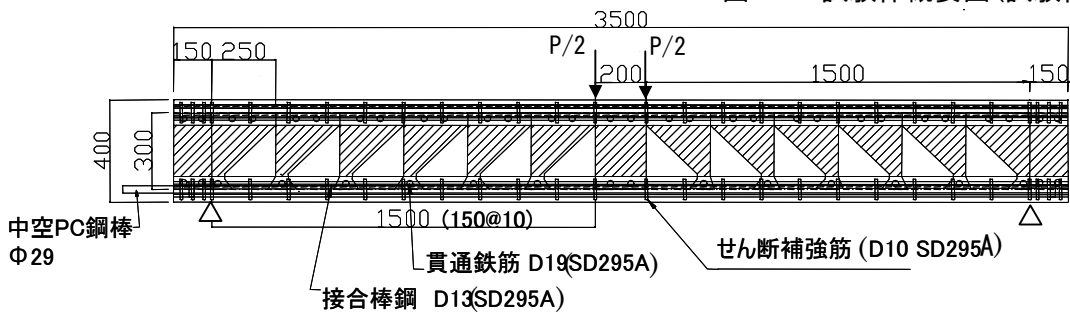


図-3 試験体概要図(試験体 No. 4~9)

単位 mm

度で、5,10MPa の 2 水準とした。

2. 実験概要

本研究で行った実験ケースを表-1 に示す。全部で9体の複合 PC はりの試験体を製作した。試験体 No.1~3 では、図-1 に示す 3 通りの接合方法の検討を行った。すなわち、キー接合、キー接合(多段)、埋込み鉄筋²⁾の 3 通りである。埋込み鉄筋に用いた貫通鉄筋は D19 (SD295A, $f_y=349\text{MPa}$, $E_s=208\text{GPa}$), 接合棒鋼には D13 (SD295A, $f_y=353\text{MPa}$, $E_s=202\text{GPa}$)を用いた。試験体 No.4~9 では、パネル形状、パネル厚さ、導入プレストレスをパラメータとした。試験体の製作では、UFC を用いたウェブパネルを予め製作しておき、その後一週間以上の時間を置いて、フランジ部を普通コンクリートで製作した。

複合 PC はりの試験体形状を図-2、図-3 に示す。試験体 No.1~3 では有効高さを 350mm、せん断スパンを 500mm とし、有効高させん断スパン比(a/d)を 1.42 とした。試験体 No.4~9 では断面の形状は同様で、せん断スパンを 1500mm とした。プレストレスの導入に際しては、施工の簡略化のために $\phi 29$ の中空 PC 鋼棒 ($f_y=1120\text{MPa}$, $E_s=210\text{GPa}$) を 2 本配置し、NAPP 工法によりプレストレスを導入した。この時の軸方向鉄筋比は 1.72% である。フランジ部でせん断破壊するのを防ぐために、試験体 No.1~3 では 0.15% のせん断補強筋 D6 (SD295A, $f_y=325\text{MPa}$, $E_s=205\text{GPa}$) を上下のフランジ部に配置し、試験体 No.4~9 では、0.3% のせん断補強

表-2 UFC の示方配合 (kg/m³)

W 水道水	P プレミックス	鋼繊維	高性能AE減水剤
180	2297	157	23

表-3 示方配合(フランジ部) (kg/m³)

試験体名称						
No.	W	C	シリカフューム	S	G	高性能AE減水剤
1	160	510	13	846	836	5.0
2	175	583	0	816	875	5.8
3	175	583	0	816	875	5.8
4~9	151	583	0	823	875	5.8

表-4 コンクリートの使用材料

名称	密度	特記事項
セメント	3.16	早強ボルトランドセメント
シリカフューム	1.70	
砂	2.59	千葉県子櫃産, 粗粒率2.5
碎石	2.62	東京都青梅産, 粗粒率7.0, G _{max} =13mm
高性能AE減水剤	1.10	ポリカルボン酸系



表-5 実験結果一覧

試験体名称	接合方法	耐力力Pmax (kN)	フランジ部コンクリート			UFCウェブパネル		
			圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
1	キー接合	160.7	63.4	4.2	34.7	203.7	11.1	49.4
2	キー接合(多段)	196.0	68.8	3.7	36.4	208.7	11.6	50.6
3	埋込み鉄筋	309.0	63.9	3.6	35.5	208.7	11.6	51.2
4	埋込み+キー(多段)	70.4	70.2	3.5	36.6	204.5	10.9	49.8
5	埋込み+キー(多段)	105.4	72.4	4.2	37.1	207.5	12.9	50.8
6	埋込み+キー(多段)	102.9	75.3	4.5	37.4	202.9	11.6	50.2
7	埋込み+キー(多段)	219.5	73.2	3.6	37.2	209.4	11.2	51.2
8	埋込み+キー(多段)	206.8	73.2	4.2	37.2	207.5	12.9	50.8
9	埋込み+キー(多段)	270.5	75.6	4.2	38.5	206.7	11.8	50.9

写真-1 載荷状況

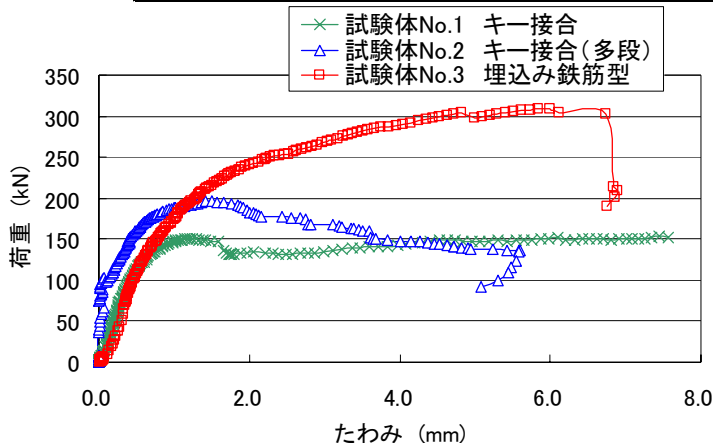


図-4 荷重-たわみ曲線 (No. 1~3)

鉄筋 D13 (SD295A, $f_y=349\text{MPa}$, $E_s=206\text{GPa}$)を上下のフランジ部に配置した。フランジ部コンクリートの目標圧縮強度は 60MPa である。四角形パネル同士の縦目地はエポキシ樹脂によるウェットジョイントとした。

表-2 に UFC の示方配合, 表-3 にフランジ部の示方配合, 表-4 にフランジ部コンクリートの使用材料を示す。

写真-1 に載荷状況を示す。載荷試験は、容量 1000kN のアムスラー万能試験機を使用し、静的単調載荷を行った。支点部にはローラー支点を用い、支点部で試験体が拘束されるのを防ぐため、試験体と支圧板の間にテフロンシートを挿入した。

3. 実験結果

3.1 接合方法の検討 (試験体 No. 1~3)

図-4 に、複合 PC はりの載荷実験より得られた荷重-たわみ関係、図-5 に終局時のひび割れ性状を示す。載荷実験の終局時では、試験体 No.3 (埋込み鉄筋使用) では、上フランジ部コンクリートが最大荷重以降、急激に耐力力を失うせん断破壊となった。試験体 No.1 (キー接合使用) では、ウェブパネルと下フランジ部の接合面で、局所的にずれが生じ、耐力力は低下せずに変形だけが増加した。

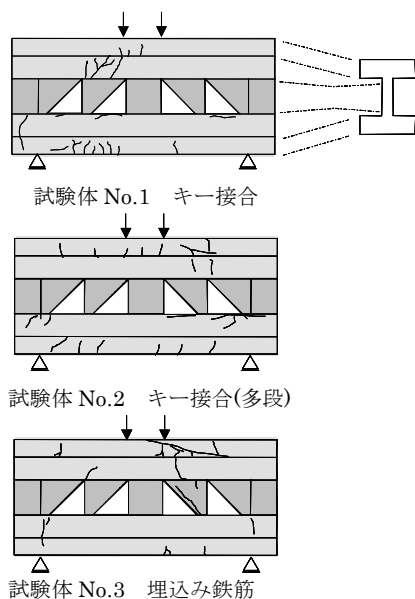


図-5 ひび割れ性状図(展開図)

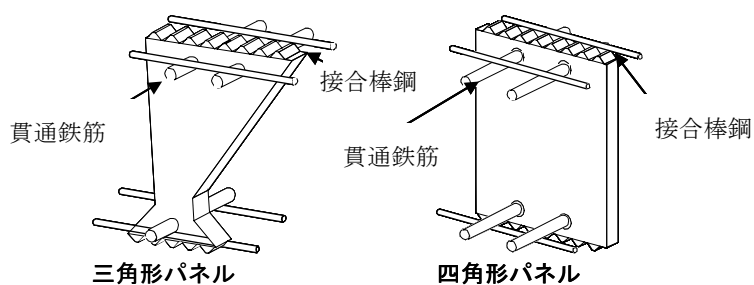


図-6 今回提案する接合方法

試験体 No.2 (キー接合(多段)使用) では、キー接合より大きな耐荷力を有するものの、最大荷重後は徐々に耐荷力を失った。初期剛性は、No.2 が最も大きい値を示したが、これはせん断キーを多く設置することにより、鉛直方向の接地面積が増大し、ウェブパネルがフランジ部コンクリートにめり込むことが防止されたためではないかと考えられる。

以上より、複合 PC はりに十分な一体化を付与するためには、埋込み鉄筋型が最も有効であると考えられる。そして、初期剛性の向上に関してはキー接合(多段)が最も有効であると考えられる。そこで、埋込み鉄筋型とキー接合(多段)を組み合わせ、図-6 に示す接合方法を No.4 ~No.9 で用いることにした。なお、使用した接合棒鋼と貫通鉄筋は埋込み鉄筋と同じものを使用した。

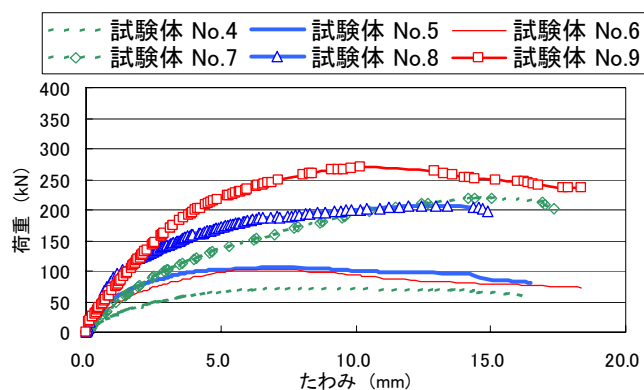


図-7 荷重-たわみ関係

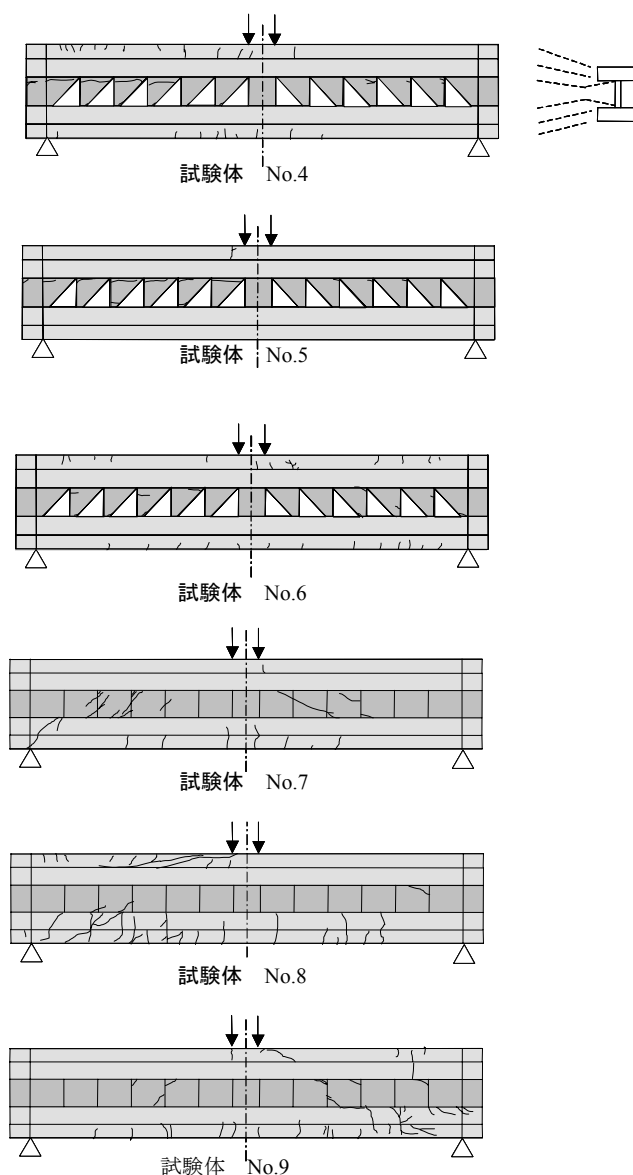


図-8 ひび割れ性状(展開図)
試験体 (No. 4~9)

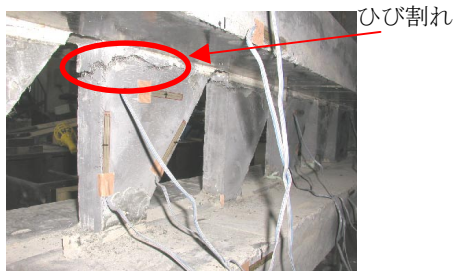


写真-2 ウェブパネルひび割れ

3.2 パネル形状, プレストレス量, パネル厚さの検討

図-7 に実験より得られた荷重-たわみ関係 (試験体 No.4~9), 図-8 にひび割れ性状を示す。これより, 全てのケースにおいて, 終局荷重後も靱性的な挙動を示し, 大きな変形能力を有していることがわかる。また, 三角形パネルを用いた複合 PC はりの耐荷力は四角形パネルを使用した複合 PC はりの半分程度となった。三角形パネルを用いた複合 PC はりにおいて, 同じプレストレス量の No.4(パネル厚 20mm)と No.5(パネル厚 40mm)を比較すると, ウェブパネル厚さを増加させることで, 耐荷力が約 50%向上することが確認された。三角形パネルの全ケースで, ウェブパネルに水平にひび割れが生じ, 複合 PC はりが終局状態に至った。写真-2 に示すように最大荷重時にウェブパネルに生じたひび割れ幅は, 目視で 7~8mm 程の大きなひび割れであったが, 耐荷力は保持されていた。マトリクス部は完全にひび割れていたが鋼繊維の架橋効果により耐荷力が保持されており, 鋼繊維の架橋効果が非常に高いことがわかる。

初期剛性に関しては, 四角形パネルを用いた複合 PC はりの方が三角形パネルを用いた複合 PC はりより大きく, パネル形状が影響していることが確認された。また, No.7 の初期剛性が No.8, No.9 に比べて小さいのは, ウェブ厚を薄くすることによって, ウェブパネルがフランジ部コンクリートにめり込んでいるためと考えられる。四角形パネルを用いた複合 PC はりにおいて, 試験体 No.7 (パネル厚 20mm) と試験体 No.8 (パネル厚 40mm) では, パネル厚さによる耐荷力の差は確認されなかった。これは, 破壊モードが異なっており, No.7 ではパネル部で, No.8 では, フランジ部で破壊したためである。また, 同じパネル厚さの試験体 No.8 と No.9 で導入プレストレス量を 5MPa と 10MPa と変化させたケースでは, 導入プレストレス量を増加させることにより, 耐荷力が約 30%増加することが確認された。No.9 では, プレストレス量を増加させることにより, ウェブパネルの斜めひび割れが支配的な破壊となった。この理由として, 導入プレストレスの増加により, フランジ部のせん断耐荷力が増大したことと, パネル同士の摩擦が増加したことが考えられる。

また, 剛性に関しては, ウェブパネル厚 40mm のケースの方がウェブ厚 20mm のケースよりも, 大きいことが確認された。全てのケースでウェブ-フランジ間の大きなずれは, 確認されなかった。

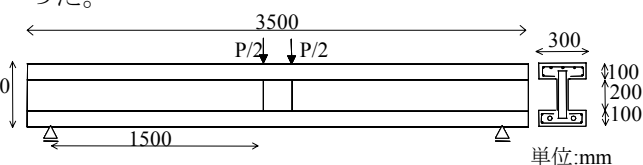


図-9 等価な耐荷力を有する RC はりの概要図

表-6 等価なせん断耐荷力を有する RC はりの試算結果

試験体名称 No.	ウェブパネル 形状	ウェブパネル 厚さ (mm)	最大荷重 (kN)	等価なウェブ厚さ (mm)	複合はりウェブ重量 w_1 (kg)	等価なRCはりウェブ重量 w_2 (kg)	ウェブの重量比 (w_1/w_2) (%)
4	三角	20	70.4	36.4	18.2	63.7	28.6
5	三角	40	105.4	63.9	36.4	111.8	32.6
6	三角	40	102.9	61.8	36.4	108.2	33.7
7	四角	20	219.5	174.8	36.4	305.9	11.9
8	四角	40	206.8	161.2	72.8	282.1	25.8
9	四角	40	270.5	231.8	72.8	405.7	17.9

4. 等価なせん断耐荷力を有する RC はりの試計算

UFC と PC の複合構造の有用性について検討するため、図-9 に示す形状で、同じ軸方向鉄筋量、同じせん断耐荷力となる RC はりを設計することにした。対象とする RC はりの a/d は実験と一致させて、4.23 とし、有効高さは 350mm とした。上下のフランジ部の幅は 300mm、高さは 100mm、ウェブの高さを 200mm とし、ウェブの厚さをパラメータとする。圧縮強度は、60MPa とする。対象とする RC はりに設置する軸方向鉄筋は、複合 PC はりと同様に公称径が 29mm、公称降伏強度 930MPa の PC 鋼棒とする。RC はりに配置するせん断補強鉄筋は、せん断補強鉄筋比で 0.15% とする。また、普通コンクリートの比重は 2.5、UFC の比重を 2.6 としてウェブ重量を算出する。この条件では、RC はりはせん断破壊となり、実験における試験体も No.7 を除いて、変形能力は大きいもののせん断破壊をしているため、土木学会コンクリート標準示方書に定められている式(1)~(3)を用いて試計算を行った。³⁾

$$\text{修正トラス理論} \quad V_u = V_c + V_s \quad (1)$$

コンクリートの分担分

$$V_c = 0.2(f'_c)^{1/3}(1000/d)^{1/4}(100p_w)^{1/3}b_wd \quad (2)$$

せん断補強鉄筋の分担

$$V_s = \frac{A_w f_{wy} j d}{s} \quad (3)$$

f'_c : コンクリート圧縮強度(MPa), $p_w = A_s/(b_w d)$, d : 有効高さ(mm), a : せん断スパン, b_w : ウェブ幅(mm), A_w : せん断補強筋の断面積(mm²), f_{wy} : せん断補強筋の降伏強度(N/mm²), s : せん断補強筋間隔

表-6 に等価なせん断耐荷力を有する試計算の結果を示す。これより、せん断補強鉄筋比が 0.15% である RC はりに比べて、ウェブ重量を大幅に軽量化することが可能であり、PC と UFC

の複合構造は部材レベルでの軽量化に非常に有効である。

5. 結論

- (1) UFC ウェブパネルとフランジ部の接合方法を検討した結果、埋込み鉄筋型がもっとも大きな耐荷力を有していた。
- (2) 曲げせん断載荷実験の結果、UFC 製の三角形パネルを用いた場合の耐荷力は、四角形パネルを用いた場合の約半分の耐荷力となった。試験体の破壊性状は、靱性的な破壊となり、UFC 中の鋼繊維の架橋効果が非常に高いことが確認された。
- (3) 四角形パネルを用いた複合 PC はりの耐荷力は導入プレストレスを増加させることにより増大し、三角形パネルを用いた場合では、ウェブ厚を増加させることにより、耐荷力が増加した。
- (4) 実験結果と等価なせん断耐荷力を有する RC はりと比較した結果、ウェブ部材の重量を大幅に軽量化することが可能であることが確認された。

謝辞

本研究を行うに当たり、中空 PC 鋼棒を提供頂いたオリエンタル建設(株)の関係者各位に、この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 佐川康貴ほか：鋼繊維補強高強度モルタルの力学的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.199-204，2001.6
- (2) 山口恒太，山口隆裕，池田尚治：波形鋼板をウェブに用いた複合プレストレストコンクリート桁の力学的挙動に関する研究，コンクリート工学論文集，第 8 巻，第 1 号，1997.1
- (3) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.67-68，2002