論文 UFC はりのせん断耐荷機構に及ぼすウェブ配置の影響

加藤 雅基*1・大窪 一正*2・山下 悠貴*3・二羽 淳一郎*4

要旨: ウェブ配置やウェブ幅の合計が異なる超高強度繊維補強コンクリート(UFC)はりの静的載荷試験を実施 し、ウェブ配置の違いに伴う上下フランジの効果やウェブ幅の増減が UFC はりのせん断耐力,破壊性状に及 ぼす影響を検討した。その結果、ウェブ幅の合計が同等であっても、ウェブを複数本に分割することでせん 断耐力が著しく向上することを確認した。また、フランジ張出し部の存在、分散されたウェブの配置によっ て異なる破壊形態を示すことが観察された。さらに、それぞれの破壊形態でせん断破壊に支配的となった領 域が変化したことを踏まえ、せん断耐力に顕著な差が生じた要因を検討した。 キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート、ウェブ配置、ウェブ幅、せん断破壊

1. はじめに

薄肉化された床版,意匠性の高いブロック耐震壁など, 現在までに超高強度繊維補強コンクリート(以下,UFC) の優れた力学特性,施工性,耐久性を活かした先鋭的な 土木構造物が供用されている。その中でも,UFCを用い た比較的大きな構造物としては橋梁への適用が先行して おり,それらのほとんどが薄肉・軽量化された複数本の ウェブを有する T 形断面桁ならびに箱桁となっている。 しかし,そのようなUFCはり特有の断面形状に着目した 研究は少なく,特にせん断破壊に対しては様々なウェブ の配置や上下フランジの影響などは,構造物の設計を行 う上で考慮できていない¹⁾。今後それらの影響を適切に 考慮することで,さらに合理的な断面形状の提案や既存 のUFC橋梁の正確な耐荷力の算定などが期待できる。

本研究では、フランジを有する UFC はりのせん断耐荷 機構に及ぼすウェブ配置の影響を明らかにすることを目 的に、ウェブ配置、ウェブ幅の合計が異なる UFC はりの 静的載荷試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1に試験体諸元を、図-1,2に試験体立面図なら びに断面図を示す。実験シリーズは、ウェブ幅の合計が 60mm、フランジ幅が 300mm の UFC はり 3 体による 60mm シリーズと、ウェブ幅の合計が 90mm、フランジ幅 が 450mm の UFC はり 5 体による 90mm シリーズであ る。各シリーズにおいてパラメータはウェブ配置のみと し、全ての試験体で、有効高さを 260mm、上フランジ厚 を 25mm、下フランジ厚を 80mm、引張鉄筋総断面積を 1472.7mm²とした。また、下フランジに内径 38mm のシ ース管を 3 本埋設し、試験体の脱型後に引張鉄筋の挿入 ならびにグラウトの充填を行った。さらに、ナット、ア ンカープレートを試験体端部に配置し、引張鉄筋の定着 を確保した。脱型時の応力集中を緩和させることを目的 に、ウェブとフランジの接合部には半径 20mm の円弧状 のハンチを設けた。

試験体名	$b_w (\mathrm{mm})$	$b_f(mm)$	b_w '(mm)	b_w " (mm)	$b_{f'}(mm)$	d (mm)	t _{fl} (mm)	<i>t</i> _{f2} (mm)	a/d	$A_s (\mathrm{mm}^2)$
I-60			60	-	120					
II-60	60	300	30	120	60					
箱-60			30	240	0					
I-90			90	-	180	260	25	80	2.5	1472 7
II-90			45	180	90	200	23	80	5.5	14/2./
箱-90	90	450	45	360	0					
III 形			30	120	60					
二室箱形			30	180	0					

表-1 試験体諸元

 $b_w: ウェブ幅の合計, b_f: フランジ幅, b_w': ウェブー本の幅, b_w'': ウェブ間距離, b_f': フランジ張出し長さ, d: 有効高さ, <math>t_{f1}: 上フランジ厚, t_{f2}: 下フランジ厚, a/d: せん断スパン比, A_s: 引張鉄筋総断面積$

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 受託研究員 修士(工学)(正会員)

*3 日本コンクリート工業(株) 都市基盤製品開発部 都市基盤技術グループ

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 工博(フェロー)



表-2 UFC の配合

空気量		補強用			
(%)	水	プレミッ クス粉体	骨材	混和材	繊維 (kg)
2.0	195	1287	905	32.2	137.4



2.2 使用材料

表-2に UFC の示方配合を示す。補強用繊維には繊維 長が 15mm, 22mm である直径 0.2mm の2 種類の鋼繊維 を同量使用した。引張鉄筋には,異形 PC 鋼棒 D25 を用 いた。引張鉄筋,補強用繊維の力学特性を表-3に示す。

2.3 載荷方法および測定項目

載荷は,油圧式 2000kN 試験機による静的 4 点曲げ載 荷とした。載荷板幅は 65mm とし,60mm シリーズでは 幅 100mm の鋼板を,90mm シリーズでは幅 150mm の鋼 板を支点として回転支承の上に設置した。支点の鋼板と 試験体の間には,減摩パッドを挿入して水平方向の摩擦 を低減した。載荷試験における測定項目は,荷重,コン クリートひずみ,支点ならびにスパン中央の鉛直変位と した。コンクリートひずみは,載荷点から 52.5mm (載荷 板から 20mm)離れた図-1 中の A-A'断面の上フランジ 上面における図-3 に示す位置で,ゲージ長 30mm のひ ずみゲージを用いて計測した。

表-3 引張鉄筋、補強用繊維の力学特性

使用材料	呼び名 種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)
引張鉄筋	D25	1179	1279	201
補強用繊維	鋼繊維	-	2800	200

表-4 UFC の力学特性, せん断耐力

試験体名	f_c ' (N/mm ²)	f_{cr} (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	V_u (kN)
I-60	193.6	7.0	47.7	232.3
II-60	174.0	7.8	45.3	291.9
箱-60	177.7	6.0	46.6	262.6
I-90	191.8	8.1	47.1	244.0
II-90	200.1	7.0	49.1	302.2
箱-90	198.4	8.8	47.3	293.4
III 形	181.2	8.7	47.1	310.6
二室箱形	199.2	8.4	47.4	324.0

f_c': 圧縮強度, f_{cr}: ひび割れ発生強度, E_c: 弾性係数, V_u: せん断耐力

3. 実験結果と考察

3.1 荷重変位関係およびせん断耐力

表-4 に各試験体の UFC の力学特性とせん断耐力を, 図-4 に荷重一変位関係を示す。

60mm シリーズにおいて,一本のウェブが集約された I-60 と比較し,二本のウェブを有する II-60 と箱-60 のせ ん断耐力が著しく増大した。また 90mm シリーズでは, 三本のウェブを有した III 形と二室箱形のせん断耐力が ウェブが一本である I-90,二本である II-90,箱-90 と比 較しさらに増大した。したがって,ウェブ幅の合計は同 等であっても、ウェブを複数本に分割することでせん断 耐力が向上することが示唆される。また、60mm シリー ズと 90mm シリーズに対し類似した断面形状となる I 形, II 形,箱形で比較すると、90mm シリーズのせん断耐力 は、60mm シリーズに対してそれぞれ I-90 では 1.05 倍, II-90 では 1.04 倍,箱-90 では 1.12 倍の増大となった。引 張鋼材比は低下しているものの、ウェブ幅は 1.5 倍増大





していたことから,ウェブ幅の合計の増大に伴うせん断 耐力の増加は小さい結果であった。

その他の構造性能として,最大荷重後の挙動に着目す ると,II-60,箱-60,箱-90 では急激に荷重が低下する脆 性的な破壊となり,その他の試験体では緩やかな荷重の 低下が認められた。また,60mmシリーズではII-60のみ 斜めひび割れ発生後の二次剛性が大きく,最大荷重時の 変位はI-60とII-60が箱-60と比較して小さかった。90mm シリーズにおいても同様に,II-90とIII形において二次 剛性が大きくなり,最大荷重時の変位はI-90とII-90が 他の3体と比較して小さかった。

3.2 せん断破壊性状

ひび割れ性状ならびにせん断破壊時の挙動から、「ウェ ブ破壊型」、「上フランジ押曲げ型」、「フランジ貫通型」 の3種類の破壊形態が観察された。それぞれに代表され る試験体として、図-5にIII形、II-60、箱-60、二室箱形 の最大荷重時と除荷直前の斜めひび割れを示す。これら はいずれも、目視により観察されたものである。

(1) ウェブ破壊型

この破壊形態は III 形に加え, I-60, I-90, II-90 の計4 体で確認された。まず,荷重の増加に伴い下フランジ下 面から曲げひび割れ,ウェブ下端から斜めひび割れが発 生した。最大荷重までに主にせん断スパン中央から載荷 点にかけての領域に多数の斜めひび割れが確認できた。 最終的に,せん断スパン中央のウェブ下端から載荷点に かけて発生した一本の斜めひび割れが大きく開口するこ とによって,荷重が緩やかに低下した。最大荷重前に斜 めひび割れが上下フランジに進展していなかったことか ら,上下フランジの破壊に先行し,ウェブの耐力が低下 したことでせん断破壊に至ったことが考えられる。

その後ポストピークにおいて,新たな斜めひび割れが せん断スパン中央付近のウェブで発生し,上フランジが 上方向に押し曲げられるような挙動を示した(図-5(a) ☆部)。これは、最大荷重時ではウェブだけが破壊された ことから、ポストピークでは、破壊の生じていない上フ ランジがある程度のせん断抵抗力を維持することができ たためと考えられる。この破壊領域の推移が最大荷重後 になだらかに荷重が低下した要因であると推測される。

(2) 上フランジ押曲げ型

この破壊形態は II-60 においてのみ認められた。図-5 (b)から「ウェブ破壊型」と比較し、斜めひび割れがウェ ブの広域で密に生じていたことが確認できる。最終的に 最大荷重時において、支点付近のウェブ下端からせん断 スパン中央にかけて発生した一本の斜めひび割れが大き く開口し、上フランジがせん断スパン中央で押し曲げら れることでせん断破壊に至った(図-5(b)☆部)。これ は「ウェブ破壊型」のポストピークで確認された破壊性 状と同様のものであった。一方で、下フランジの明確な 破壊は認められなかった。この破壊形態では、最大荷重 時にウェブならびに上フランジの広域が大きな変形を伴 って破壊されたため、急激な荷重の低下を示した。

(3) フランジ貫通型

この破壊形態は箱-60,箱-90 および二室箱形の3体で 確認されたが、それぞれにおいてわずかに違いが認めら れたことから、比較のため図-5(c)に箱-60のひび割れ 性状を、図-5(d)に二室箱形のひび割れ性状を示す。図 中の網掛け部分はコンクリートの圧縮破壊領域を示して いる。また、図-6に箱-60と箱-90における載荷後の上 フランジの破壊性状を示す。

箱-60 では、破壊に支配的となった斜めひび割れは、せん断スパン中央のウェブ下端から載荷点にかけて発生した。また、最大荷重前にそれらがウェブから下フランジ 側面に連続的に進展していたことが観察された。最終的 に上フランジの載荷点近傍でせん断圧壊することで荷重



(c) 箱-60 (フランジ貫通型)

除荷直前 (b) II-60 (上フランジ押曲げ型) 1 最大荷重時 除荷直前



(d) 二室箱形 (フランジ貫通型)

図-5 ひび割れ性状

が急激に低下し、その間に下フランジにおいて支点付近 まで斜めひび割れが進展した。その際、図-6(a)に示さ れるように、せん断圧壊は上フランジの全域で生じ、二 本のウェブは両方とも等しく破壊されていた。

箱-90において、ひび割れ性状は箱-60と概ね同様とな り、下フランジへの連続的な斜めひび割れの進展が認め られ、最終的に上フランジの破壊により急激に荷重が低 下した。一方で、上フランジの破壊性状は箱-60とは異な り,ウェブが上フランジを押し抜く挙動であった。また, 図-6(b)に示されるように、二本のウェブのうち、片側 のウェブは完全な破壊に至らず、上フランジの押抜きは 破壊したウェブ直上においてのみ発生していた。これは, 箱-90では箱-60と比較してウェブ同士の距離が広がった ため, 載荷時に二本のウェブでせん断力の配分に偏りが 生じ、それぞれのウェブと上フランジが独立した挙動を 示したためと推測される。

二室箱形においても、箱-60、箱-90と同様に、ウェブ から下フランジ側面に連続的に斜めひび割れが進展して いる様子が確認できた。一方で最大荷重時に上フランジ の破壊は見られず、ウェブならびに下フランジで破壊に 支配的となったひび割れが大きく開口することで荷重が 緩やかに低下した。その後、ポストピークにおいて下フ ランジで支点付近まで斜めひび割れが進展した。二室箱 形では,三本のウェブのひび割れ性状は概ね同様だった。





両側のウェブが破壊 (a) 箱-60 図-6 上フランジ破壊性状

最大荷重時

ウェブは破壊に至らず (b) 箱-90

3.3 ウェブ配置が破壊形態に及ぼす影響

「フランジ貫通型」を示した箱-60, 箱-90 および二室 箱形は,全てフランジ張出し部を有さない試験体である。 したがって、せん断による変形が試験体側面でウェブか らフランジに連続的に伝達されやすかったことが推測で きる。これにより、せん断破壊時に上フランジの圧壊や 下フランジへの連続的な斜めひび割れの進展が生じたと 考えられる。その他の試験体は全てフランジ張出し部を 有しており、せん断破壊時にフランジ張出し部が斜めひ び割れの進展を遮る様子が認められた。

「上フランジ押曲げ型」を示した試験体は II-60 のみ であった。ここで、図-5で示した III 形, II-60, 箱-60, 二室箱形を例に, A-A'断面(図-1)における上フラン ジ上面の幅方向ひずみの幅方向分布を図-7 に示す。こ



図-7 上フランジ幅方向ひずみ分布

れらはウェブが上フランジを押し抜く作用によって生じ る, 上フランジの幅方向の変形性状を観察するために計 測した。ひずみは引張の値を正とし、荷重 100kN 時, 400kN時,最大荷重時ならびに除荷直前の実測値をプロ ットした。グラフ中にはウェブ側面に対応する位置を黒 い点線で併せて示した。

III形, 箱-60, 二室箱形において, せん断破壊が生じる 前後にウェブ直上の幅方向ひずみの値が引張側に著しく 増大していることが確認できる。それぞれにおいて、隣 接するひずみの値は小さく, ウェブ直上のひずみだけが 不連続に増大していた。これはウェブが上フランジを押 し抜く作用により、上フランジ上面でウェブに沿うよう にしてひび割れが発生していたことを示している。その 結果、ウェブと上フランジの一体性が損なわれ、せん断 力に対する抵抗として上フランジの寄与が小さかったと 推測される。このようなウェブ直上における幅方向ひず みの局所化は、II-60 以外の全ての試験体で確認された。

一方で II-60 では、せん断破壊後においても、ひずみは 幅方向に連続した値を示していた。ひずみの値としては 最大荷重時のウェブ直上で1000μ程度生じているが、他 の試験体で確認されたひずみの局所的な増大などは見ら れない。したがって、II-60ではウェブが上フランジを押 し抜く作用が上フランジの広域に分散して生じていたこ とが考えられる。このことにより、ウェブと上フランジ の一体性が高まりそれらが同時にせん断力に抵抗するこ とが可能となったため,最大荷重時に上フランジが押し 曲げられるようなせん断破壊性状を示したと推測できる。

II-60 だけが一様なひずみ分布を示した要因としてウ ェブ配置に着目すると, II-60 はフランジ幅 300mm に対 しウェブ間距離 120mm と二本のウェブの間隔が狭く, ウェブが分散していると言える。そのため、ウェブが上 フランジを押抜く作用に対する抵抗として、上フランジ の広域が有効となったことが考えられる。一方で III 形 も II-60 と同様のウェブ間隔であったが、三本のウェブ



のうち,外側のウェブ直上においてひずみの増大が認め られた。これは、III 形は II-60 と異なりウェブを三本有 していたことから、上フランジを押し抜く作用に対する 有効領域のうち、上フランジの中央のウェブ近傍と外側 のウェブ近傍で偏りを生じていたためと推測される。

3.4 せん断耐力の比較

3 種類の異なる破壊形態が確認されたことを踏まえ, せん断耐力に顕著な差が生じた要因を考察した。ここで, 60mm シリーズと 90mm シリーズではウェブ幅が 1.5 倍 増大したことで、鋼材比が 0.67 倍低下している。掛井ら ²⁾は、UFC はりのせん断耐力における鋼材比の影響は、 普通強度 RC はりのせん断耐力 Vcの算定式 3)で用いられ る鋼材比 pwの補正項 pw1/3 に基づいて評価することが妥 当であると報告している。したがって、せん断耐荷性能 の比較のため, それぞれの試験体のせん断強度 *vu*(=*Vu/bwd*)を鋼材比による補正項 *pw*^{1/3} で除した値を図ー 8 に整理した。すなわち、仮にウェブ配置の違いがせん 断強度に影響を及ぼさないのであれば、全ての試験体で 一定値を示すこととなる。また、横軸はウェブ一本の幅 とした。

(1) 破壊形態に基づくせん断抵抗領域の影響

「ウェブ破壊型」では、上下フランジが破壊に至る前 にウェブの耐力低下によって荷重が低下した。したがっ て、最大荷重時に大きく変形が生じていた領域がせん断 耐力に対し主に抵抗していたと推定すると、そのせん断 抵抗領域は、ウェブのせん断スパン中央から載荷点にお いてだけであったことが考えられる。一方、「フランジ貫 通型」を示した試験体では、せん断破壊時にウェブの斜 めひび割れの開口に加え、下フランジへの斜めひび割れ の進展が確認され、さらに箱-60、箱-90 では、上フラン ジの圧壊等も認められている。したがって、部分的では あるものの、ウェブに加え上下フランジもせん断力に対 する抵抗領域として有効となったことが考えられる。ま た、「上フランジ押曲げ型」を示した II-60 では、上フラ ンジがせん断スパン中央で押し曲げられる破壊となり, ウェブの広域に広く斜めひび割れが発生していた。その ため、せん断力に対しウェブならびに上フランジの広域 が機能していていたことが推測される。

図-8から破壊形態ごとに比較すると、「上フランジ押 曲げ型」を示した試験体のせん断強度が著しく大きく、 続いて「フランジ貫通型」を示した試験体が「ウェブ破 壊型」を示した試験体に比べてせん断強度が増大する傾 向を示した。箱-90では、「ウェブ破壊型」を示した試験 体の耐力を下回ったが、これは片側のウェブしか完全な 破壊に至らず、ウェブのせん断耐力に対する貢献が低減 したためと推測できる。以上から、「上フランジ押曲げ型」、 「フランジ貫通型」などの破壊形態では、せん断力に主 に抵抗した領域が増大したことで、せん断耐力が向上し たことが考えられる。

(2) ウェブ幅の影響

図-8 において、同様の破壊形態を示した試験体で比較を行うと、ウェブー本の幅の増大に伴い、せん断強度が低下する傾向が確認される。

UFC はりのせん断耐力 V_uは,マトリクスの分担分 V_{rpc} と補強用繊維の分担分 V_fの和とした,以下の式で算定さ れることが超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工 指針(案)(以下,UFC 指針¹)に示されている。

$$V_u = V_{rpc} + V_f \tag{1}$$

$$V_{rpc} = 0.18\sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d \tag{2}$$

$$V_f = \frac{f_v}{\tan \beta_u} \cdot b_w \cdot z \tag{3}$$

ここで, b_{w} : ウェブ幅, d: 有効高さ, f_{c} : 圧縮強度, f_{v} : 平 均引張強度, β_{u} : 軸方向と斜めひび割れがなす角度, z: 圧 縮合力作用位置から引張鋼材の図心までの距離(=d/1.15) である。式(1)における補強用繊維の分担分 V_{f} は, UFC に 混入した繊維が斜めひび割れ間を架橋することで,ひび 割れ面で高い引張力を伝達することを考慮している。し たがって、ウェブで斜めひび割れと交差する、はりの部 材軸方向ならびに高さ方向を示す繊維の配向性が高いほ ど、繊維によるせん断抵抗力も大きいことが推測できる。

今回,全ての試験体で上フランジ上面から UFC を連続 的に流し込むように打設を行ったが,一本あたりのウェ ブ幅が 90mm の試験体では,ウェブ幅が 30mm,45mm の 試験体と比べ,ウェブ幅が拡がったことで幅方向を示す 繊維の本数が増加した可能性が考えられる。すなわち, 斜めひび割れと交差する部材軸方向,高さ方向を示す繊 維の本数が相対的に減少したことが示唆される。このこ とにより,一本あたりのウェブ幅が大きな試験体では, せん断強度が小さな値を示したことが考えられる。

今回の試験ケースでは, I-90 などの一本あたりのウェ ブ幅が比較的大きい試験体の載荷試験は1体だけであっ た。さらにウェブ幅を増大させた場合の影響について, 今後も検討が必要である。

4. まとめ

ウェブ配置,ウェブ幅の合計をパラメータとした UFC はりの静的載荷試験を実施し,ウェブ,上下フランジが UFC はりのせん断破壊挙動に及ぼす影響を検討した。本 研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) ウェブ幅の合計が同じ試験体では、ウェブを複数本 に分割することでせん断耐力が向上することが認め られた。また、同様の断面形状でウェブ幅とフランジ 幅を 1.5 倍増大させた場合、せん断耐力は 1.04 から 1.12 倍程度の向上となった。
- (2) ウェブ配置の違いにより,破壊形態やせん断力に主 に抵抗していた領域が変化したことが,せん断耐力 に影響を与えたと推測された。
- (3) ウェブー本の幅を大きくした場合,斜めひび割れに 交差する繊維の本数が相対的に減少することで、単 位幅あたりにウェブが受け持つことができるせん断 力が低下する可能性が示唆された。

参考文献

- 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, pp.31-35,2004.8
- 掛井 孝俊,村田 裕志,二羽 淳一郎,兵頭 彦 次:超高強度繊維補強セメント系複合材料を用いた はり部材のせん断特性,コンクリート工学年次論文 集, Vol.26, No.2, pp.787-792, 2004
- 二羽淳一郎,山田一宇,横沢和夫,岡村 甫:せん断 補強 鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再 評価,土木学会論文集,第372号, V-5, pp.167-176, 1986.8