

論文 超高強度材料を用いた RC 梁部材の構造特性に関する一考察

野澤 忠明*1・松永 徳重*2・崔 準祐*3・大塚 久哲*4

要旨: 超高強度合成繊維補強コンクリート (PVA-UFC) と超高強度鉄筋 (USD685) を組合せた RC 梁を製作し、曲げ載荷試験ならびにせん断載荷試験を実施した。その結果、超高強度材料においても平面保持の仮定が成立つこと、道路橋示方書・Ⅲコンクリート橋編 (2012 年) (以下、道示Ⅲ) の材料構成則を用いて再現解析を行っても実用上問題のない範囲で耐力評価が可能であること、PVA 繊維にひび割れ分散・抑制効果があること、道示Ⅲに代表される現行示方書では超高強度材料 RC 梁のせん断耐力を過小評価することなどが確認された。また、本試験の結果から得られた超高強度材料を用いた RC 梁部材の設計用値を提示した。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, PVA, 曲げ強度, せん断強度, ヤング係数比, 曲げひび割れ幅

1.はじめに

近年、コンクリートの超高強度化が進み、超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) を用いた構造物や二次製品等が多く見られるようになった。これは、2004 年に土木学会から発刊された「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⁾ によるところが大きいと言えるが、UFC 指針は、無筋または PC 構造を対象としており、RC 構造は適用範囲外である。したがって、UFC を用いて RC 構造物を検討する際には道示Ⅲ²⁾などを参考とする必要があるが、現行示方書では、UFC などの超高強度材料を対象としておらず、設計用の規定値が設定できないのが現状である。

本研究は、超高強度コンクリートと超高強度鉄筋を用いた RC 梁部材に対し、曲げ載荷試験およびせん断載荷試験を実施し、耐力および力学的特性を確認することで、設計用値を提案することを目的としている。

2.使用材料

2.1 コンクリート

現在 UFC を用いた構造物は、鋼繊維を用いたものが主流である。しかし、RC 構造物への適用を考えた場合、曲げひび割れ発生に際し、ひび割れ面に架橋している鋼繊維の腐食が懸念される³⁾。そこで本研究では、PVA 繊維 (引張強度 $1.0 \times 10^3 \text{N/mm}^2$, 繊維長 12mm, 直径 0.2mm) を用いた超高強度合成繊維補強コンクリート (以下、PVA-UFC) を使用した。本研究で使用した PVA-UFC は混練後に真空ポンプを用いてコンクリート内の空気量を低減させる工程 (減圧処理工程) ならびに蒸気養生工程を経ることで $\sigma_{ck}=150\text{N/mm}^2$ 以上の特性値が得られる材料である。

PVA-UFC は PVA 繊維を用いること、減圧処理工程を経ることなど、UFC 指針の標準材料・製造方法とは異なるが、PVA 繊維の優れた付着性能と引張性能に期待した材料である。表-1 に標準配合、表-2 に特性値を示す。

2.2 主鉄筋

曲げ供試体、せん断供試体ともに主鉄筋には超高強度鉄筋 USD685 を使用した。USD685 は、旧建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」において開発された鉄筋で、一般的な鉄筋の約 2 倍の降伏強度を有している。

表-1 標準配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水 W	結合材 B	骨材 S	混和剤 A	PVA 繊維 F
15.0	195	1500	750	30.0	1.7vol%

表-2 PVA-UFC の特性値

項目	単位	特性値
密度	g/cm ³	2.45
圧縮強度	N/mm ²	150
ひび割れ発生強度	N/mm ²	6.8
引張強度	N/mm ²	7.0
ヤング係数	N/mm ²	4.8×10^4

表-3 USD685 の機械的性質

種類の記号	降伏点又は 0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	伸び (%)
USD685	685~755	857~1100	2.0×10^5	10 以上

*1 (株) エスイー ESCON 事業部 技術開発部 (正会員)

*2 (株) エスイー ESCON 事業部 技術開発部

*3 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教 博(工) (正会員)

*4 (株) 大塚社会基盤総合研究所 九州大学名誉教授 工博 (正会員)

3. 曲げ載荷試験

3.1 供試体と試験ケース

供試体は、図-1 に示すように支間長 6250mm、梁幅 250mm、梁高は 375, 500, 625mm の 3 種類とし、せん断変形の影響が小さくなるよう梁高と支間長の比を 1/10 以下とした。主鉄筋は、各供試体で引張鉄筋比がほぼ等しくなるよう D25, D29, D32 を 4 本配置した。

荷重の載荷位置は、梁高 375, 500, 625mm に対し、純曲げスパンが 2 倍、せん断スパンが 4 倍以上となるよう、純曲げスパンをそれぞれ 750, 1000, 1250mm とした。試験ケースおよび各ケースの材料諸元を表-4 に示す。

なお、圧縮強度が表-2 に示す特性値よりも若干低いが、これは供試体が大きいことから、蒸気養生工程を省略し、気中養生・材齢 28 日で試験を行ったためである。

表-4 試験ケースおよび各ケースの材料諸元

試験ケース		No.1	No.2	No.3
PVA-UFC	圧縮強度 (N/mm ²)	123	134	131
	ヤング係数 (N/mm ²)	4.6×10 ⁴		
主鉄筋 USD685	鉄筋径	D25	D29	D32
	降伏応力 (N/mm ²)	712	723	700
	弾性係数 (N/mm ²)	2.0×10 ⁵		
断面寸法	梁幅 (mm)	250		
	梁高 (mm)	375	500	625
	有効高さ (mm)	329	452	576
支間長 (mm)		6250		
純曲げスパン (mm)		750	1000	1250
引張鉄筋比 (%)		2.46	2.27	2.21
せん断スパン比		8.36	5.81	4.34

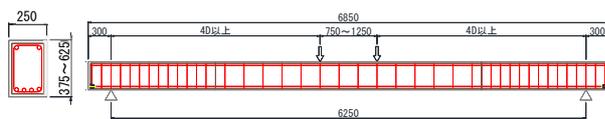


図-1 供試体概要

3.2 試験方法

荷重載荷は、鉛直ジャッキにより行い、載荷梁を介して行った。載荷ステップは、計算により算出したひび割れ発生荷重、設計荷重（主鉄筋に 300N/mm² の引張応力が発生する荷重とした）、鉄筋降伏時荷重の各荷重時ならびに、鉄筋降伏荷重時に実測されたたわみ量 (δ_y) をもとに、たわみ量が 1.5 δ_y , 2 δ_y に到達した時点とした。各ステップ到達後、除荷し次のステップまで載荷を行った。

3.3 試験結果

写真-1 に各ケースの曲げ破壊時の状況を示す。いずれのケースも、荷重載荷初期に支間中央部の引張側でひび割れが発生、載荷点に向かってひび割れが進展し、その後、主鉄筋が降伏、変位が大きく増加して載荷点付近

のコンクリートが圧縮破壊する曲げ破壊を示した。表-5 にひび割れ発生時などの各イベント発生時の載荷荷重、図-2 に荷重-たわみ曲線を示す。ここで降伏荷重は、供試体のたわみ量が急増する点を降伏荷重とした。



写真-1 各ケースの曲げ破壊状況

表-5 載荷試験結果

試験ケース	No.1	No.2	No.3
ひび割れ発生(kN)	25	53	111
降伏荷重(kN)	315	585	1010
最大荷重(kN)	360	650	1124
終局荷重(kN)	357	638	1056

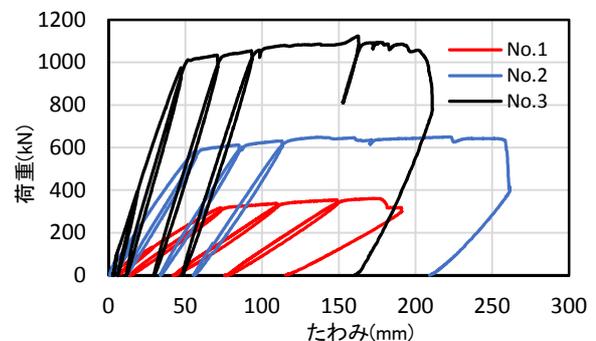


図-2 荷重-たわみ曲線

3.4 試験結果考察

(1) 平面保持の仮定検討

一般的な RC 構造物は、断面の平面保持の仮定を前提として設計される。本試験でも、この仮定に基づき供試体設計を行っているが、その妥当性を検討した。

支間中央の主鉄筋の引張ひずみと供試体上端から 25mm の位置に設置したコンクリート表面ゲージから得られた PVA-UFC の圧縮ひずみを直線的に結ぶことで、簡易的に中立軸の推移を確認した。図-3 にケース No.2 の結果を示す。図に示すとおり、降伏に至るまで中立軸の移動はなく、荷重増加に伴い線形的に主鉄筋および PVA-UFC のひずみが増加する傾向が確認された。この傾向は全てのケースと同様であった。また、計算上の中立軸と比較しても、ほぼ同等の位置で中立軸が推移している。このことから、超高強度材料を使用した RC 梁部材においても平面保持の仮定が成り立つと考えられる。

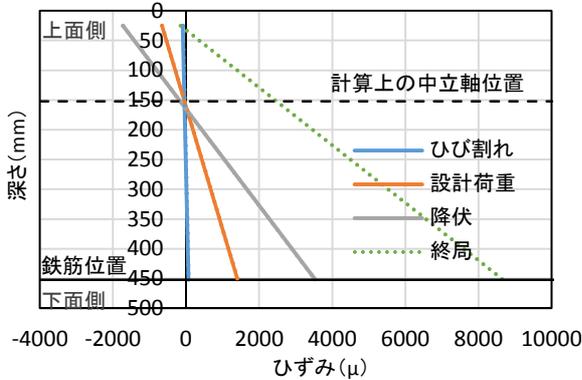


図-3 中立軸の推移 (No. 2)

(2) 降伏荷重の試験値と計算値との比較

実測された降伏荷重と平面保持の仮定に基づき計算した降伏耐力の比較を表-6 に示す。ここで、計算に用いた鉄筋と PVA-UFC のヤング係数比は、道示Ⅲに示されている $n=15$ と各材料の実ヤング係数比 ($E_s/E_c=4.3$) 程度の値である $n=4.5$ を用いて計算を行った。

表に示すとおり、道示Ⅲの値よりも実ヤング係数比を用いることで、降伏耐力を精度良く算出できる傾向にある。この理由として、一般的なコンクリートと比較し、PVA-UFC のヤング係数が大きいことや、繊維が引張応力度の一部負担することにより、鉄筋に作用する応力度が緩和され、降伏耐力が向上することなどが考えられる。

表-6 降伏荷重の比較

試験ケース		No.1	No.2	No.3	
降伏荷重 (kN)	試験値	315	585	1010	
	計算値	$n=15$	290 (0.92)	549 (0.94)	888 (0.88)
		$n=4.5$	303 (0.96)	568 (0.97)	916 (0.91)

() 内は計算値と試験値との比

(3) 試験結果と再現解析による解析値の比較

再現解析は PVA-UFC と鉄筋の応力-ひずみ関係を各々定義するため、ファイバー要素を用いてモデル化した。材料の非線形特性は、道示Ⅲを参考とし、PVA-UFC には終局ひずみ 2500μ の二次曲線モデルを、鉄筋についてはバイリニアモデルとした。また、本検討での終局時載荷荷重は、試験値では PVA-UFC の圧縮ひずみの計測値が道示Ⅲの終局ひずみである 2500μ に達した時点の荷重とし、解析値では PVA-UFC の圧縮ひずみが 2500μ に到達する荷重とした。試験結果と解析結果の荷重-たわみ関係の比較を図-4 に、終局荷重の比較を表-7 に示す。

圧縮ひずみが 2500μ に達する終局荷重の解析値は、試

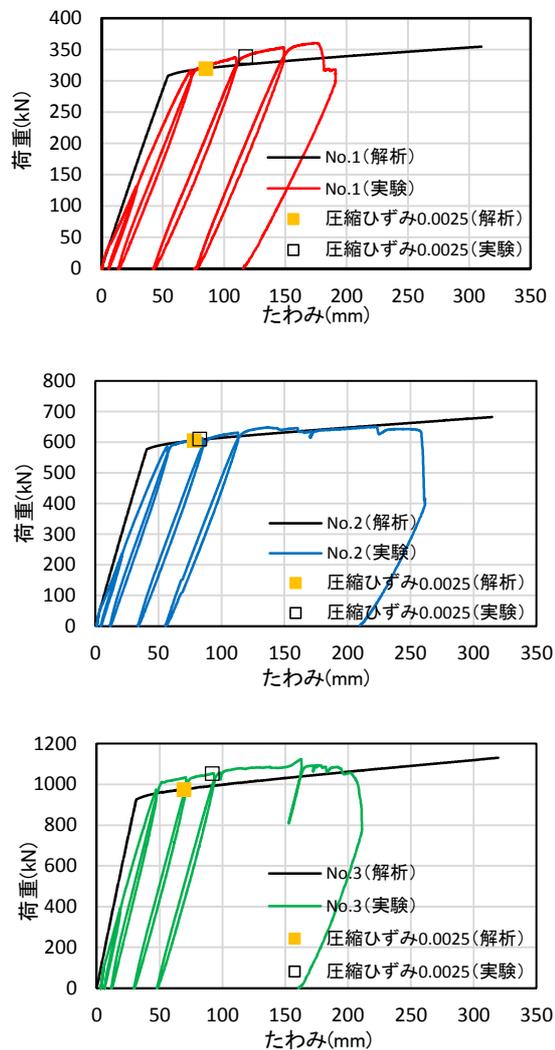


図-4 荷重-たわみ関係の比較

表-7 終局荷重の比較

	終局荷重 (kN)		
	試験値	解析値	解析値/実験値
No.1	339.3	320.0	0.94
No.2	610.7	605.0	0.99
No.3	1052.7	975.0	0.93

験値に対して 0.94~0.99 倍であり、再現性が高く、かつ、十分に安全側の解析結果が得られた。このことから、道示Ⅲに基づいて材料非線形特性を設定しても、実用上問題のない精度で耐力評価が可能であることが確認された。

(4) 最大ひび割れ幅の試験値と計算値の比較

No.2 において観測された最大ひび割れ幅と載荷荷重および鉄筋応力度の関係を図-5 示す。ここで、鉄筋応力度は、ひずみゲージにより得られた主鉄筋ひずみにヤング係数を乗じて算出した値である。また、ひび割れ幅の計測は、クラックスケールにより行った。

約 50kN でひび割れが発生し、荷重増加に伴いひび割れ幅も線形的に増えていき、降伏荷重を迎えると急激にひび割れ幅が広がる傾向を示した。

コンクリート標準示方書設計編⁴⁾で示されている曲げひび割れ幅の算定式(式(1))を用いて算出されるひび割れ幅の計算値と試験値の比較を表-8 に示す。観測された最大ひび割れ幅は、計算値の 50~60%程度であり、計算値と比較し小さかった。また、設計荷重時には、鉄筋に 300N/mm²程度と通常よりも大きな応力が作用しているにも関わらず、腐食に対するひび割れ幅の限界値 w_a (一般的な環境で $w_a=0.005c \approx 0.17\text{mm}$) よりも小さいひび割れ幅であった。これは、PVA 繊維が、ひび割れの分散とひび割れ幅の進展抑制に寄与したためと考える⁵⁾。

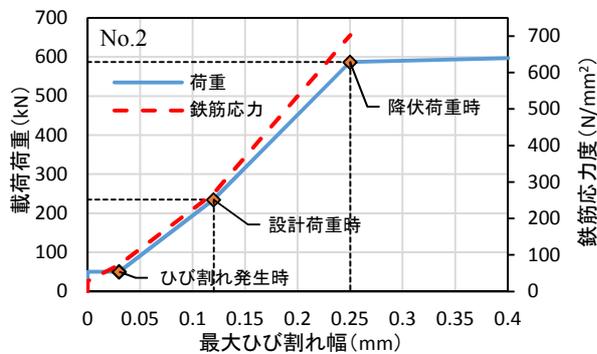


図-5 最大ひび割れ幅と荷重および鉄筋応力度の関係

表-8 設計荷重時におけるひび割れ幅

試験ケース		No.1	No.2	No.3
ひび割れ幅 (mm)	試験値	—	0.12	0.10
	計算値	0.201	0.195	0.190
試験値/計算値		—	0.62	0.53

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{csd} \right] \quad (1)$$

ここで、

w : 曲げひび割れ幅

k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響

(異型鉄筋の場合 $k_1=1.0$)

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響

$$(k_2=15/(f'+20)+0.7)$$

f' : コンクリートの圧縮強度

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数

$$(k_3=5(n+2)/(7n+8))$$

n : 引張鋼材の段数

c : かぶり, c_s : 鋼材の中心間隔, ϕ : 鋼材径

ϵ'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための係数

(供試体完成直後の試験であり $\epsilon'_{csd}=0$ とする)

4. せん断載荷試験

4.1 供試体と試験ケース

試験ケースと材料諸元を表-9 に示す。使用した PVA-UFC の強度は、圧縮強度 185 N/mm²程度、曲げ引張強度 27MPa 程度である。また主鉄筋には、曲げ破壊が先行しないよう超高強度鉄筋 USD685 (D32) を使用し、せん断補強鉄筋には SD345 (D10) を 200mm ピッチで配筋した。

せん断破壊形状ならびにせん断耐力はせん断スパン比 (a/d) に大きく影響されることが知られていることから、本試験では、せん断スパン比とせん断補強鉄筋の有無をパラメータとした 4 体の供試体を製作した。

各供試体のせん断スパン比は、表-9 のように 1.15~3.45 とした。S4 は S3 と同様のせん断スパンでせん断補強鉄筋無しの供試体である。図-6 に S3 の配筋図を示す。

表-9 試験ケースおよび材料諸元

試験ケース		S1	S2	S3	S4
PVA-UFC	圧縮強度 (N/mm ²)	185	186	186	185
	鋼種	USD685, D32			
	降伏応力	734 N/mm ²			
主鉄筋	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²			
	鋼種	SD345, D10			
	降伏応力	378 N/mm ²			
せん断補強鉄筋	弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²			
	せん断鉄筋比	0.28%			
供試体高さ (mm)		375			
有効高さ (mm)		326			
せん断スパン長 (mm)		375	750	1125	
せん断スパン比		1.15	2.30	3.45	

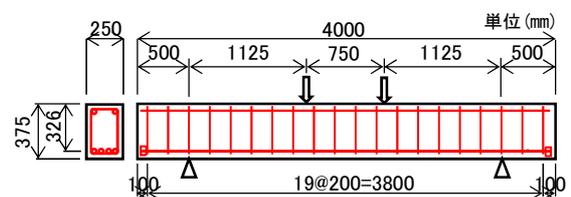


図-6 試験体配筋図 (S3)



写真-2 各ケースの最終載荷時の破壊状況

表-10 各耐力計算式による計算値と試験値（終局荷重）の比較

	道示Ⅲ ²⁾ 式			土木学会 ⁴⁾ 式			二羽 ⁶⁾ らの式	
検討式	$S_{US} = S_c + S_s + S_p$ (2) S_c : コンクリートが負担できるせん断力 $S_c = k * \tau_c * b_w * d$ S_s : 斜引張鉄筋が負担できるせん断力の合計 $S_s = \sum \frac{A_w * \sigma_{sy} * d(\sin \theta + \cos \theta)}{1.15 * a}$ S_p : PC 鋼材のせん断力作用方向分力 $S_p = 0$			$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ (3) V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力 $V_{cd} = \beta_a * \beta_p * f_{vcd} * b_w * d / \gamma_b$ V_{sd} : せん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力 $V_{sd} = \left[\frac{A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{S_s} \right] z / \gamma_b$			$f_v = 0.20 f_c^{\frac{1}{3}} d^{\frac{1}{4}} P_w^{\frac{1}{3}} [0.75 + 1.4 / (a/d)]$ (4) f'_c : 圧縮強度 P_w : 引張鉄筋比 ($100A_s / (b_w d)$)	
	Case	Con 負担	鉄筋負担	合計	Con 負担	鉄筋負担	合計	Con 負担
S1							378.6kN	975kN 以上
S2	120.8kN	75.5kN	196.3kN	192.5kN	75.5kN	268.0kN	261.5kN	550.0kN
S3								400.0kN
S4	120.8kN	—	120.8kN	192.5kN	—	192.5kN	222.4kN	238.5kN

4.2 供試体と試験ケース供試体破壊状況

写真-2 に各ケースの最終載荷時の破壊状況を示す。

S1 (a/d=1.15) では、載荷点から支点まで直線的にひび割れが進展するディープビームのせん断破壊形状を示した。S2 (a/d=2.30) では、載荷点直下のコンクリートが圧壊し破壊に至るせん断圧縮破壊形状を示し、S3 および S4 (a/d=3.45) では、斜め引張ひび割れが圧縮域に伸展し、梁上端まで達する斜め引張破壊型の破壊形態を示した。

4.3 部材の斜め引張破壊に対する耐力検討

載荷試験により得られた終局荷重 (S1 は最終破壊直前であったが、試験機の載荷能力の都合上、載荷を止めた) と、道示Ⅲのせん断耐力算定式 (式(2)), コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式 (式(3)) ならびに二羽らによる提案式⁶⁾ (式(4)) より求めた算定値を表-10 に示す。また、計算に当たっては、表-9 に示す材料緒元を用いて各値を算出した。ここで、道示Ⅲ式で用いるコンクリートが負担できる平均せん断応力 (τ_c) は、道示Ⅲに示される圧縮強度 (σ_{ck}) との関係表から近似式 ($\tau_c = 0.0484 \sigma_{ck}^{0.6574}$) をつくり、PVA-UFC の圧縮強度 (185N/mm²) を代入して得られた $\tau_c = 1.50$ N/mm² を用いて算出した。また、土木学会式では、部分係数などの安全係数は考慮せず、さらに、圧縮強度の影響を考慮す

る項の上限値はすべて無視して計算を行った。

(1) 試験値

せん断スパン比が小さいほど大きな耐力を示した。また、S3 (せん断補強筋あり) と S4 (せん断補強筋なし) の比較から、a/d=3.45 の場合、コンクリートの負担分が 238.5kN、せん断補強筋の負担分が 161.5kN と推察でき、その負担割合は 6 : 4 となる。

(2) 試験値と耐力計算値との比較

ここでは、斜め引張破壊の破壊形態を示した S3 ならびに S4 に着目し、検証を行う。

S4 の試験結果と各計算値 (コンクリート負担分) を比較すると、二羽式は超高強度である PVA-UFC であっても試験値と近似した計算値が得られた。一方、道示Ⅲ²⁾式 ($\tau_c = 1.50$ N/mm² を使用) では計算値は試験値のおよそ 1/2 であり、コンクリートが負担できるせん断耐力を過小評価する結果となり、PVA-UFC に対応した τ_c の設定が必要である。S4 の試験値から τ_c を逆算すると 2.96 N/mm² となった。標準示方書⁴⁾ を参考に安全係数 (材料係数 $\gamma_m = 1.3$, 部材係数 $\gamma_b = 1.3$) を考慮し、逆算値を安全係数で除することで、 $\tau_c = 1.75$ N/mm² が提案できる。

鉄筋負担分は、S3 ならびに S4 の結果から 161.5kN と推察されるが計算値は 75.5kN であり試験値との間で乖

離が大きい。この理由として、計算値では鉄筋の降伏強度から終局耐力を算出しているが、実際の終局時には降伏強度以上の引張力が作用することなどが考えられるが、今後の検討課題である。

4.4 部材のウェブコンクリート圧壊に対する耐力検討

本試験の供試体は長方形断面を有しており、ウェブの圧壊に対し、十分な耐力を有している。一方、負担できるせん断耐力が大きい PVA-UFC の特性を活かすためには、ウェブ厚の薄い I 型や T 型断面とすることが有効であると考えられるが、このような断面では、ウェブの圧壊が危惧される。

ウェブの圧壊に対する終局耐力は、道示Ⅲ²⁾では、式(5)のように、コンクリートの平均せん断応力度の最大値(τ_{max})を使って算出される。したがって、道示Ⅲを参考にウェブの圧壊に対する照査を行う場合、PVA-UFC に対応した τ_{max} の設定が必要となる。

$$S_{uc} = \tau_{max} \cdot b_w \cdot d + S_p \quad (5)$$

ここで、

S_{uc} : ウェブコンクリートの圧壊に対する耐力

τ_{max} : コンクリートの平均せん断応力度の最大値

b_w : 部材断面のウェブ厚, d : 部材断面の有効高

S_p : PC 鋼材の引張力のせん断力作用方向の分力

ここで、小林ら⁷⁾の研究では、せん断補強鉄筋比を考慮した Placas 式(式(6))を用いることで、100N/mm²クラスの超高強度コンクリートの斜め圧縮破壊耐力を精度良く再現できたと報告されている。そこで、本試験の供試体条件を式(6)に当てはめ、想定耐力を算出し、この値を式(5)に代入することで、PVA-UFC における τ_{max} の推察を試みる。

$$S_{uc} = 0.15 (6.63 + 1.32r_w) f_c'^{1/2} b_w d \quad (6)$$

ここで r_w : せん断補強鉄筋比 (%)

式(6)より、本供試体のウェブ圧壊に対する想定耐力は $S_{uc} \approx 1270\text{kN}$ となり、この値を式(5)に適用し τ_{max} を逆算すると 13.5N/mm² となる。この結果を 4.3 と同様に安全係数で除すると $\tau_{max} \approx 8.0 \text{ N/mm}^2$ となるが、今後検証試験が必要である。

5.まとめ

PVA-UFC と USD685 という超高強度材料を用いた RC 梁部材に対し、曲げ載荷試験およびせん断載荷試験を行った。本研究の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

1) 超高強度材料を用いた RC 梁部材においても平面保持の仮定が成立し、一般的な RC 部材と同様の検討

が可能である。

- 2) 断面計算に用いる PVA-UFC と鉄筋とのヤング係数比は、それぞれの材料の実ヤング係数比程度の値である $n=4.5$ として計算を行うことで、精度良く降伏耐力を算出できた。
- 3) 道示Ⅲの材料構成則を用いた再現解析の結果、試験値と近似した解析値が得られた。これにより、現行の設計基準でも耐力評価が可能であることを確認した。
- 4) 実測された最大曲げひび割れ幅は、計算値と比べ 50~60%程度と小さかった。これは、PVA 繊維が、ひび割れの分散・抑制に寄与したものと推察される。PVA 繊維の効果として、曲げ耐力の増進には効果が限定的であるものの、ひび割れの分散・抑制効果は大きいものとする。今後、繊維の有無をパラメーターとした供試体を製作し検証を行いたい。
- 5) 実測されたせん断耐力は、各示方書^{2) 4)}に基づく計算値を上回り、現行基準では、超高強度材料製 RC 梁部材のせん断耐力を過小評価する結果となった。
- 6) PVA-UFC が負担できる平均せん断応力 (τ_c) は、S4 の試験結果から、2.96 N/mm² となった。この値を安全係数で除することで、 $\tau_c \approx 1.75\text{N/mm}^2$ が提案できる。
- 7) 平均せん断応力度の最大値 (τ_{max}) の算出を試みた結果、13.5 N/mm² 程度の算出結果が得られた。この値を安全係数で除することで、 $\tau_{max} \approx 8.0\text{N/mm}^2$ となるが、今後、試験を実施し検証したい。

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.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編, 2012
- 3) 兵頭彦次・新藤竹文・横田弘・下村匠：乾燥繰り返し促進腐食試験による超高強度繊維補強コンクリートの耐久性能評価, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.635-636, 2005
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編, 2012
- 5) 川口哲生・片桐誠・前堀伸平・兵頭彦次：超高強度繊維補強コンクリート部材のひび割れ分散性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.27, No.2, pp.709-714, 2005
- 6) 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, 1986
- 7) 小林央治・渡辺健・三木朋広・二羽淳一郎：高強度コンクリートを用いた RC はりの斜め圧縮破壊に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.3, pp.625-630, 2008