

# 論文 超高強度材料を用いた RC 梁部材に対する PVA 繊維の補強効果に関する一考察

野澤 忠明\*1・小林 裕貴\*2・崔 準祐\*3・大塚 久哲\*4

**要旨：** PVA 繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリート (PVA-UFC) と超高強度鉄筋を組み合わせた RC 梁を製作し、曲げ載荷試験を実施した。繊維混入率を変化させた供試体の試験結果から、繊維の効果により降伏耐力が増加すること、最大ひび割れ幅が低減することを確認した。また、鉄筋の許容応力度を 300N/mm<sup>2</sup> とすることで耐久性上問題の無いひび割れ幅を抑えられることを示した。さらに試験値との比較により、PVA-UFC を用いた RC 梁の降伏耐力、および、終局抵抗モーメントを精度良く算出する方法について提案を行った。

**キーワード：** 超高強度繊維補強コンクリート, PVA, 曲げ載荷, 降伏耐力, 終局耐力, 曲げひび割れ幅

## 1. はじめに

わが国では、少子高齢化や社会保障費の増大により建設就労人口の減少および公共事業費の縮減が進んでおり、現場での省力化や構造物の長寿命化が求められている。

超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) は超高強度、超高耐久といった特長を有し、これらの特長を活かすことで構造物の軽量化・長寿命化が可能な材料であり、上記の課題を解決する一つの手段となり得る。しかし、「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)」<sup>1)</sup> では無筋または PC 構造を対象としている。また、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup> ならびに道路橋示方書Ⅲコンクリート編 (2012 年)<sup>3)</sup> (以下道示Ⅲ) では、超高強度領域や繊維補強コンクリートなどは適用範囲外であり、UFC の特性を活かした RC 構造物の設計を行う場合、新たに設計用値を設定する必要がある。

本研究では、補強繊維として PVA 繊維を用いた PVA-UFC と超高強度鉄筋を組み合わせた RC 梁部材に対して行った曲げ載荷試験結果から、繊維による補強効果を定量的に把握し、当該部材の曲げ特性にかかわる設計用値ならびに設計手法の提案を行うものである。

## 2. 曲げ載荷試験計画

### 2.1 使用材料

本研究では、圧縮強度の特性値が  $\sigma_{ck}=150\text{N/mm}^2$  を有し、補強繊維として PVA 繊維(引張強度  $1.0 \times 10^3\text{N/mm}^2$ , ヤング係数  $2.7 \times 10^4\text{N/mm}^2$ , 繊維長 12mm, 直径 0.2mm) を 1.7vol.% 配合することを標準とする PVA-UFC を使用した。この材料は、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 (90℃以上, 8 時間保持) を経ること

を特徴とする材料である。本研究に用いた PVA-UFC の標準配合ならびに特性値を表-1, 表-2 に示す。ここで、ひび割れ発生強度は、割裂引張試験において応力-ひずみ曲線が不連続となる強度、引張強度は ASTM C190 に準じて直接引張試験を実施し得られた引張強度である。

また、PVA-UFC の圧縮強度を活かすには、引張側鉄筋も高強度とすることが合理的であることから、主鉄筋には、一般的な鉄筋の約 2 倍の降伏強度を有する超高強度鉄筋 USD685 (一部 USD590) を使用した。

表-1 PVA-UFC の標準配合

W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	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 (標準配合) の材料特性値

項目	単位	特性値
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	24.0
圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	150
ひび割れ発生強度	N/mm <sup>2</sup>	6.8
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	7.0
ヤング係数	N/mm <sup>2</sup>	$4.6 \times 10^4$

### 2.2 試験概要

補強繊維によるひび割れ幅抑制効果、ならびに引張応力度の分担効果を定量的に把握するため、表-1 に示す標準配合から繊維量のみを変化させ、繊維混入量を 0.0vol.%, 1.0vol.%, 1.7vol.% とした供試体を製作した。その後、各供試体の曲げ載荷試験を実施し、載荷荷重、たわみ量、最大ひび割れ幅の計測を行った。

\*1 (株)エスイー ESCON 事業部 設計部 (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)

## 2.3 供試体設計

本試験の供試体は、道示Ⅲ<sup>3)</sup>を参考として設計を行った。PVA-UFCの許容圧縮応力度は設計基準強度(圧縮強度特性値)の1/3である $\sigma_{ca}=50\text{N/mm}^2$ とした。また、USD685の許容引張応力度についても道示Ⅲを参考に、鉄筋の降伏応力度に対し安全率1.7を見込み、さらに約10%低減を行った値である $\sigma_{sa}=360\text{N/mm}^2$ とした。

また、著者らの過去の研究<sup>4)</sup>より、RC断面計算に用いるコンクリートと鉄筋のヤング係数比は、道示Ⅲ<sup>3)</sup>に示されている $n=15$ とするよりも、実ヤング係数比に近い $n=4.5$ とすることで計算精度が向上するとの結果を得ていることから、この値を用いて供試体設計を行った。

## 2.4 供試体材料諸元

本研究で使用したPVA-UFCの圧縮強度と繊維混入率の関係を図-1に示す。同図に示すとおり、繊維量が0~1.7vol.%までの範囲では、繊維の増加に伴い圧縮強度がほぼ線形的に減少する性状を示した。また、ヤング係数についても繊維量増加に伴い減少する傾向が見られた。各供試体の諸元を表-3に示す。

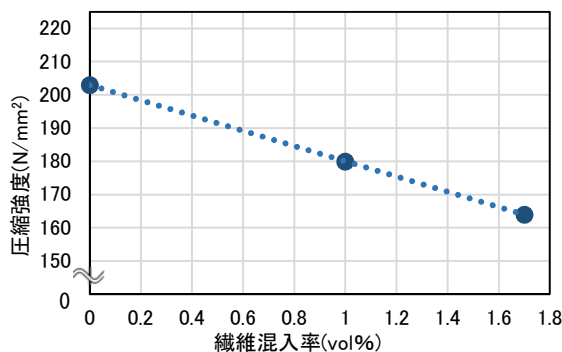


図-1 PVA-UFCの圧縮強度と繊維混入率の関係

表-3 各供試体の材料諸元

供試体名		B-1	B-2	B-3	B-4
PVA-UFC	繊維混入率 (vol%)	0.0	1.0	1.7	
	圧縮強度 (N/mm²)	203	180	164	
	ヤング係数 (N/mm²)	4.88 × 10 <sup>4</sup>	4.82 × 10 <sup>4</sup>	4.68 × 10 <sup>4</sup>	
引張側主鉄筋	鉄筋の種類	USD685			USD590
	降伏強度 (N/mm²)	690			638
	引張強度 (N/mm²)	899			817
	ヤング係数 (N/mm²)	1.9 × 10 <sup>5</sup>			1.9 × 10 <sup>5</sup>
各供試体共通		鉄筋種類	材料特性 (N/mm²)		
			降伏	引張	ヤング係数
圧縮側主鉄筋		SD345	387	552	1.9 × 10 <sup>5</sup>
せん断補強鉄筋		SD345	372	544	2.0 × 10 <sup>5</sup>

## 2.5 供試体寸法および試験方法

供試体は、支間長4300mm、梁幅250mm、梁高350mmとし、荷重載荷位置は、純曲げスパンが梁高の2倍となる700mmとした。引張側主鉄筋は、USD685(B-4)供試体はUSD590)のD19を3本配置し、圧縮側主鉄筋はSD345のD16を3本配置した。せん断補強鉄筋は、SD345のD13を載荷点付近250mmピッチ、支持点付近125mmピッチで配置した。供試体概要図を図-2に示す。

載荷ステップは、設計計算上のひび割れ発生荷重、設計荷重(主鉄筋に許容引張応力度(360N/mm²)の引張応力が発生する荷重)、鉄筋降伏時荷重とし、各ステップ到達後に除荷し、次のステップまで載荷を行った。

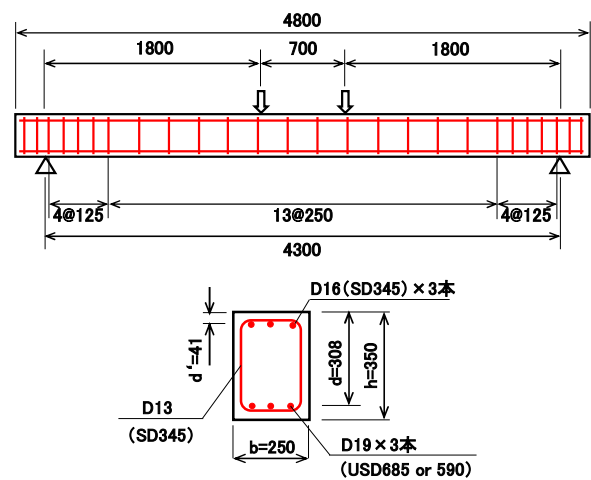


図-2 供試体概要図



写真-1 供試体のセットアップ状況

## 3. 曲げ載荷試験結果と考察

### 3.1 試験結果概要

いずれの供試体においても、載荷荷重を増加させていくと、支間中央部の引張側にひび割れが発生し、荷重増加に伴ってひび割れが進展、さらに載荷を続けると主鉄筋が降伏に至り、その後、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の性状を示した。写真-2および写真-3にB-1とB-3の終局時の破壊状況をそれぞれ示す。

また、図-3に荷重-たわみ曲線、表-4にひび割れ発生時、主鉄筋降伏時等の各段階での載荷荷重を示す。こ



写真-2 終局時の状況 (B-1)

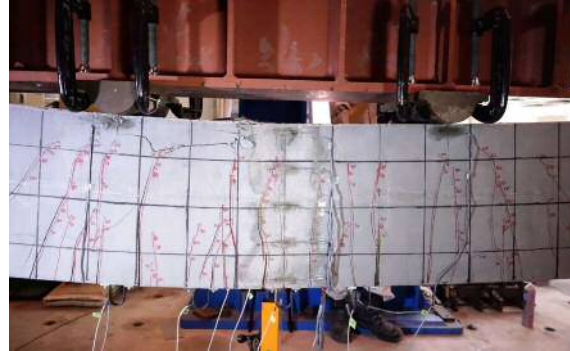


写真-3 終局時の状況 (B-3)

表-4 曲げ載荷試験結果一覧

※ ( ) 内の数値は B-1 の値との比

供試体名	B-1	B-2	B-3	B-4 (USD590)
繊維混入率 (vol.%)	0.0	1.0	1.7	
ひび割れ発生荷重 (kN)	26 (1.00)	33 (1.27)	38 (1.46)	37 (1.42)
降伏荷重 (kN)	187 (1.00)	199 (1.06)	208 (1.11)	190 (1.01)
最大荷重 (kN)	235 (1.00)	247 (1.05)	247 (1.05)	227 (0.97)
終局荷重 (kN)			238 (1.01)	223 (0.95)

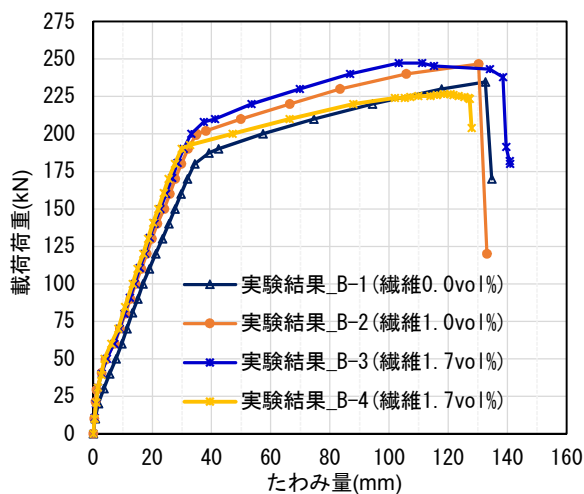


図-3 載荷荷重-たわみ関係

ここで、ひび割れ発生荷重は、荷重-たわみ曲線の初期勾配が変化する段階の荷重、降伏荷重は供試体のたわみ量が急増する段階の荷重とした。

表-4 に示すとおり、繊維量が多いほどひび割れ発生時荷重、降伏荷重が向上した。B-1 (繊維無し) と B-3 (1.7vol.%) を比較すると、ひび割れ発生荷重が 1.46 倍、降伏荷重が 1.11 倍となった。繊維混入率が高くなるほど、それぞれの荷重も増大しており、補強繊維が引張応力度の一部を負担したものと考えられる。

最大荷重や終局荷重付近の荷重-たわみ関係を見ると、繊維混入率が 1.0vol.% 以下の B-1, B-2 では、最大荷重を迎えた直後に破壊するのにに対し、繊維を 1.7vol.% 配合し

た B-3, B-4 では最大荷重を迎えた後、緩やかな荷重低下が生じ破壊に至った。このことから、補強繊維混入率が 1.7vol.% の場合、一般の RC 部材と同様に、最大耐力時を終局と見なした靱性設計が成り立ちそうである。

また、図-1 に示すように繊維を混入すると圧縮強度が低下するにもかかわらず、繊維を混入した供試体の方が大きい最大耐力を示した。これは、補強繊維が引張力の一部を負担することにより、繊維の無い供試体と比較して、中立軸と圧縮端の距離が大きくなり、圧縮領域が広がったためと考えられる。

### 3.2 最大ひび割れ幅と主鉄筋の許容引張応力度

本研究では、主鉄筋(USD685)の許容引張応力度を  $360\text{N/mm}^2$  として供試体設計を行っており、設計荷重時(本件では約 100kN)では、普通鉄筋を使用した RC 構造物と比較し、約 2 倍の引張応力が作用することとなる。したがって、設計荷重時に発生する曲げひび割れ幅が大きくなり、耐久性低下に繋がる懸念される。そこで曲げ載荷試験時にクラックスケールを用い、最大ひび割れ幅の計測を行った。図-4 に各供試体における載荷荷重と最大ひび割れ幅の関係を示す。

まず、計測された最大ひび割れ幅は、繊維の無い B-1 と比較し、繊維を混入した B-2 (1.0vol.%)、B-3, 4 (1.7vol.%) のほうが小さくなっており、繊維によるひび割れ幅の抑制効果が確認された。

次に、設計荷重載荷時(約 100kN)に計測された最大ひび割れ幅は、補強繊維がある場合には、一般的に耐久性上問題ないと判断されているひび割れ幅 0.2mm 程度

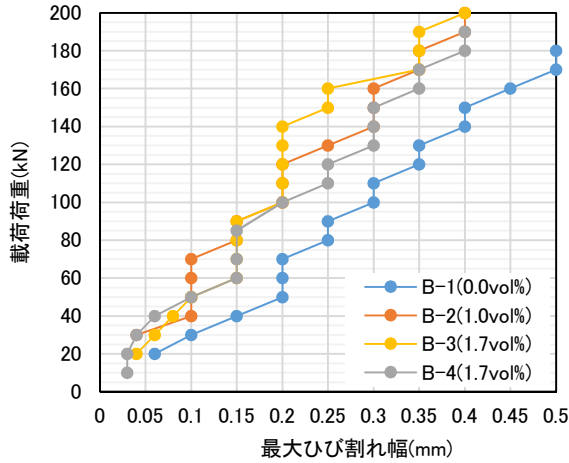


図-4 載荷荷重と最大ひび割れ幅の関係

表-5 各鉄筋応力発生時の最大ひび割れ幅

		最大ひび割れ幅 (mm)			
		B-1	B-2	B-3	B-4
実測値	360N/mm <sup>2</sup> 発生時 (約 100kN)	0.30	0.20	0.20	0.20
	300N/mm <sup>2</sup> 発生時 (約 80kN)	0.25	0.15	0.15	0.15
腐食に対する限界 (0.005c)		0.165			

であった。

ここで、鉄筋に作用する応力度を 300N/mm<sup>2</sup>とした場合の荷重である 80kN 時の最大ひび割れ幅を同図から読みとると 0.15mm であり、これは、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に示される腐食に対するひび割れ幅の限界値  $W_a$  ( $W_a = 0.005c = 0.165\text{mm}$ ,  $c$ : 純かぶり) よりも小さい。表-5 に各鉄筋応力発生時の最大ひび割れ幅を示す。

以上より、PVA-UFC を用いた RC 部材では、超高強度鉄筋 (USD685, USD590) の許容引張応力度を 300N/mm<sup>2</sup> (引張降伏応力度に対する安全率がそれぞれ約 2.3, 約 1.9 となる) 以下とすることで、最大ひび割れ幅は、補強繊維のひび割れ抑制効果もあって、耐久性上問題のない範囲に抑えられると考えられる。

### 3.3 繊維の補強効果を見込んだ降伏耐力の計算

PVA-UFC は、一般的なコンクリートと比べて、圧縮強度、ならびにヤング係数が大きいという特徴がある。この特徴を踏まえ、繊維を含まないコンクリート自体の性能を見込み、ヤング係数比を実ヤング係数比に近い  $n=4.5$  として断面計算を行うことで B-1 (繊維なし) では、試験値に近似した計算結果が得られた (計算値/試験値=0.98)。一方、繊維を混入した供試体では、繊維の補強効果により耐力が向上していることから、 $n=4.5$  としただけでは、降伏耐力を過小評価する結果となった (計算値/試験値=0.89~0.90)。

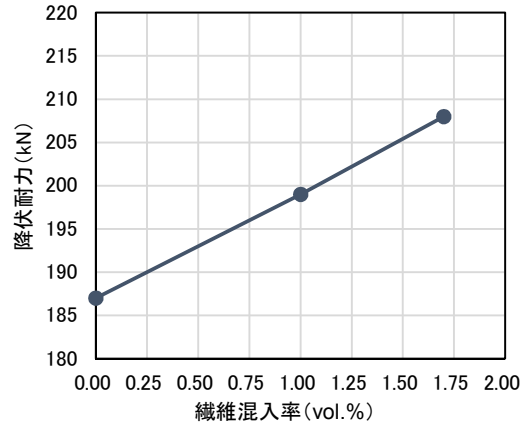


図-5 繊維混入率-降伏耐力関係

繊維混入率と降伏耐力の関係は図-5 に示すとおり、繊維混入率 0.0~1.7vol.% までの間では、繊維混入率を上げるほど降伏耐力が線形的に向上している。このことから、2.1 に示す PVA 繊維による補強効果を取り込む簡易的な方法として、繊維混入率に応じて主鉄筋に作用する引張応力度を低減させる以下の方法を提案する。

繊維混入率を  $f_m$  としたときの主鉄筋作用応力度の低減係数  $\alpha$  を式(1)で表せるものとする。

$$\alpha = 1 - 0.05f_m \quad (1)$$

ここに、

- $\alpha$  : 繊維の影響を見込んだ鉄筋応力度の低減係数
- $f_m$  : 繊維混入率(vol.%) ( $0 \leq f_m \leq 1.7$ )

このとき、低減された鉄筋の引張応力度  $\sigma_s'$  は、平面保持の法則から式(2)で表せる。

$$\sigma_s' = \alpha \cdot \sigma_s = \alpha \cdot \frac{n \cdot \sigma_c (d - x)}{x} \quad (2)$$

ここに、

- $\sigma_s'$  : 繊維による分担を考慮した鉄筋に作用する引張応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_s$  : 断面計算により算出される鉄筋に作用する引張応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $n$  : ヤング係数比 ( $n = 4.5$ )
- $\sigma_c$  : 断面計算により算出される PVA-UFC に作用する圧縮応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $d$  : 有効高さ (mm)
- $x$  : 圧縮端から中立軸までの距離 (mm)

ヤング係数比を一般的な断面計算で用いられる  $n=15$  としたケース、実際のヤング係数比に近い  $n=4.5$  としたケース、 $n=4.5$  としてさらに式(1)、(2)を用いて鉄筋応力度を低減させて計算を行ったケースの計 3 ケースについて

表-6 降伏耐力の各計算値と試験値の比較

供試体		B-1	B-2	B-3	B-4 (参考)
繊維混入率(vol.%)		0.0	1.0	1.7	1.7
降伏耐力 (N)	試験値	187	199	208	190
	計算値 n=15	176.3			163.0
		(0.94)	(0.89)	(0.85)	(0.86)
	計算値 n=4.5	184.1			170.2
(0.98)		(0.93)	(0.89)	(0.90)	
計算値 さらに 式(1)(2)使用	184.1	193.8	201.2	186.0	
		(0.98)	(0.97)	(0.97)	(0.98)

( ) 内の値は計算値/試験値の数値

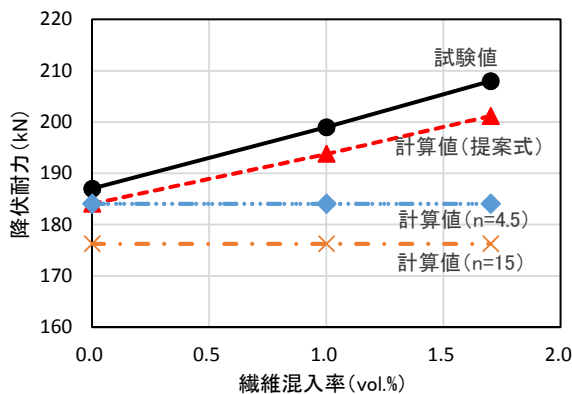


図-6 降伏耐力の試験値と計算値の比較

て、主鉄筋が計算上降伏応力に達する時点の荷重と試験値との比較を表-6 および図-6 に示す。図表から明らかなように、式(1)、(2)を用いて鉄筋応力度を低減させたケースが、供試体の降伏耐力を精度良く算定している。

### 3.4 終局抵抗モーメントの検討

B-3 と B-4 (共に繊維混入率 1.7vol.%) に使用した PVA-UFC の圧縮試験で得られた応力とひずみの関係を図-7 に示す。同図のように圧縮を受ける PVA-UFC の応力とひずみの関係は、破壊に至るまで、ほぼ線形で推移する。このことを踏まえ、終局抵抗モーメントの算出に当たっては、圧縮側の応力ブロックとして  $\sigma_{ck} = \epsilon_c \cdot E_c$  となるような三角形のブロックを設定した。

引張側の検討では、一般にコンクリートの引張抵抗は無視されるが、PVA-UFC では補強繊維の架橋効果による引張抵抗が働くことから、本試験に先立ち実施した繊維混入率 1.7vol.%) における PVA-UFC の切欠き梁 3 等分点曲げ試験 (写真-4) の結果を用いて逆解析を行い、図-8 のように PVA-UFC の引張軟化曲線をモデル化した。なお、曲げ試験は、UFC 指針<sup>1)</sup> に示されている「切欠きのある供試体の 3 等分点曲げ試験」に準拠して行い、逆解析は、JCI が配布している「引張軟化曲線多直線近似解析

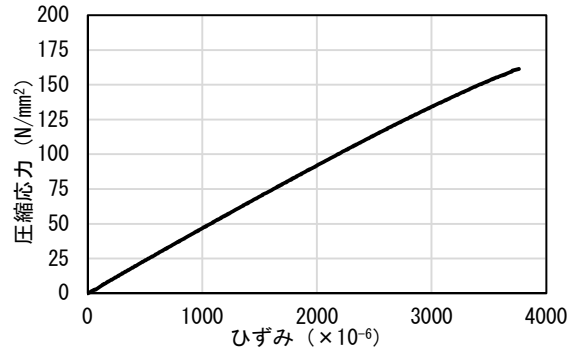


図-7 PVA-UFC (1.7vol.%) の応力—ひずみ曲線



写真-4 切り欠き梁の 3 等分点曲げ試験状況

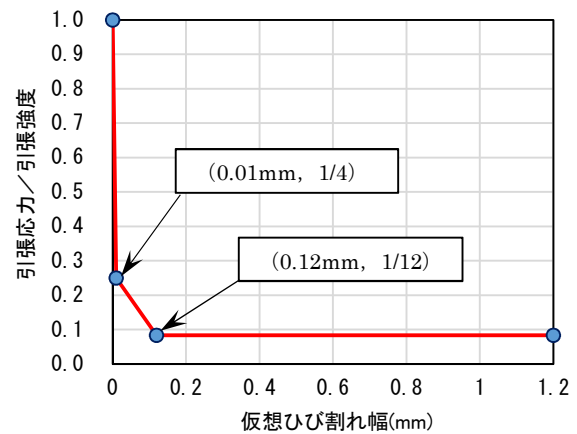


図-8 モデル化した PVA-UFC の引張軟化曲線

プログラム」を用いて行った。その結果、図-8 のとおり PVA-UFC の残留引張応力は、引張強度 (ここでは、割裂引張強度試験において、荷重—ひずみ関係が不連続となる時の強度) の 1/12 となった。

上記結果を踏まえ、ひび割れ発生強度の特性値である  $\sigma_{kr} = 6.8\text{N/mm}^2$  の 1/12 の値である  $\sigma_{ci} = 0.567\text{N/mm}^2$  を PVA-UFC の終局時の引張応力とし、引張側の応力ブロックを設定した。図-9 に断面計算で用いた応力ブロック、表-7 に終局抵抗モーメントの算定値を示す。比較のため、PVA-UFC の引張抵抗を見込まない計算結果も併記する。

PVA-UFC の引張抵抗を見込んで計算することで、3.1 項で考察したように、繊維を見込まない場合と比較し、圧縮端から中立軸までの距離が大きくなり、圧縮領域が広がる計算結果となる。PVA-UFC の引張抵抗を計算に見

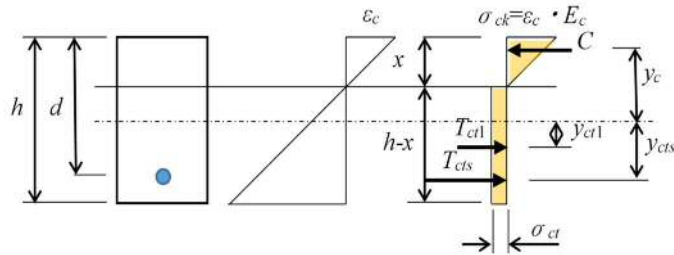


図-9 PVA-UFCの応力ブロック

表-7 終局抵抗モーメントの算定値

		PVA-UFCの引張力	
		見込まず	見込む
中立軸（圧縮端からの距離） x (mm)		28.930	31.195
圧縮力 C (kN)		593.1	639.5
引張力	鉄筋 T <sub>ets</sub> (kN)	593.1	593.1
	PVA-UFC T <sub>ctl</sub> (kN)	0.0	46.5
	合計 T <sub>ets</sub> +T <sub>ctl</sub> (kN)	593.1	639.5
合力の偏心量	y <sub>c</sub> (mm)	165.4	164.6
	y <sub>ets</sub> (mm)	132.5	132.5
	y <sub>ctl</sub> (mm)	0	15.6
終局抵抗モーメント	計算値 (kN・m) Mu=C・y <sub>c</sub> +T <sub>ets</sub> ・y <sub>ets</sub> +T <sub>ctl</sub> ・y <sub>ctl</sub>	176.6	184.6
	試験値 (kN・m)	※214.2	
計算値/試験値		0.82	0.86

※B-3 供試体の試験結果より算出した終局抵抗モーメント

込むことで、試験結果との比率が4%程度向上しており、場合によっては、断面の縮小が可能になると考えられる。

#### 4. まとめ

PVA-UFCと超高強度鉄筋を組み合わせたRC梁部材の曲げ荷重試験を実施し、その設計手法について考察を行った。以下に本研究の範囲内で得られた主な知見を列挙する。

- (1) 繊維混入率 0~1.7vol.%の範囲においては、繊維量の増加とともに、梁のひび割れ発生時荷重および降伏耐力が向上する傾向が見られた。
- (2) 繊維の混入により、最大ひび割れ幅は低減する傾向が見られる。また、超高強度鉄筋の許容引張応力度を 300N/mm<sup>2</sup> とすることで、繊維混入率 1.0~1.7vol.%の範囲では耐久性上問題のない範囲にひび割れ幅を抑えられることが確認できた。この数値は鉄筋の公称降伏応力度に対して安全率を約 2.3 (USD685の場合)とした値である。この数値の妥当性については、今後の検証が必要である。
- (3) ヤング係数比を実ヤング係数比に近い  $n=4.5$  とし、さらに繊維混入率に応じて鉄筋応力度を低減させることで、一般的な方法で得られる算定値と比較し、

より試験値に近い降伏耐力を算定できた。

- (4) PVA-UFCの応力-ひずみ関係を用いて応力ブロックを設定し、さらに引張軟化モデルから推定した繊維の引張抵抗を考慮することで、梁の終局抵抗モーメントの精度の向上をはかる事ができた。
- (5) 今後の課題として、限界状態設計法に対応するための部分係数の設定や、PVA繊維の補強効果を設計に見込む上で、繊維の配向性ならびに引張クリープの影響をどのように考慮するのか等が挙げられる。

#### 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.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）、土木学会、2012
- 3) 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
- 4) 野澤忠明・松永徳重・崔準祐・大塚久哲：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、コンクリート工学年次論文集, vol39, No.2, pp.427-432, 2017