

# 論文 両引試験による鉄筋とPVA-ECCの付着性状

金久保 利之<sup>\*1</sup>・清水 克将<sup>\*2</sup>・閑田 徹志<sup>\*3</sup>

**要旨:** PVA-ECC中に異形鉄筋を1本配した試験体による両引試験により基本的付着特性の検討を行った。また、材料特性把握の一環としてPVA-ECCの一軸引張性状と曲げ性状の関連を検討した。PVA-ECCの曲げ試験結果から得られた引張側完全弾塑性モデルの一樣応力および終局歪は、一軸引張試験より得られた値とよい対応を示した。両引付着試験では、変形の局所化、鉄筋付着応力の発生等が確認された。鉄筋コンクリートと比較して、テンションスティフニング効果の増大、ひび割れ間隔の減少といった性状が見られた。

**キーワード:** 高靱性セメント複合材料、付着応力、テンションスティフニング、引張試験

## 1. はじめに

高靱性セメント複合材料（以下、DFRCC）と異形鉄筋の組合せによる構造部材の力学特性を評価するために必要な特性の一つとして、DFRCCと異形鉄筋の付着特性が考えられる。本研究ではDFRCCとしてPVA繊維を使用したEngineered Cementitious Composites（以下、PVA-ECC）に着目し、PVA-ECC中に異形鉄筋を1本配した試験体による両引試験により、その基本的特性を把握する。また本報では、DFRCCの基本的力学特性である一軸引張性状および曲げ性状を、100×100×400mm角の中心部をくびれ型とした試験体による一軸引張試験<sup>1)</sup>、100×100×400mm角試験体による三等分点曲げ試験によって検討する。

## 2. 使用材料

使用繊維はPVAで、体積混入率は1.9%である。以下、PVA19と称す。繊維の力学的性質（メーカー値）を表-1に、調合計画を表-2に示す。また、100φ-200mmシリンダーによる圧縮試験結果を表-3に示す。

表-1 使用繊維

種類	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	破断強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
PVA	12	0.04	1600	40

表-2 調合計画

体積混入率 (%)	W/C (%)	S/B	単位量		
			W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )
1.9	44.0	0.66	412	674	618

表-3 圧縮試験結果

種類	圧縮強度 (MPa)	圧縮強度時歪 (%)	弾性係数 (GPa)
PVA19	31.5	0.47	14.6

## 3. PVA-ECCの一軸引張試験

### 3.1 試験体

一軸引張試験用の試験体<sup>1)</sup>は、図-1に示すように、JIS A 1106に規定されている100×100×400mmの角型供試体作製用鋼製型枠の内側にアルミ製の型枠を固定し、その中にPVA-ECCを打設して作製した。アルミ製型枠は、厚さ20mm、円弧部分の半径350mm、中心部直線区間の長さ100mmである。試験体数は2体である。

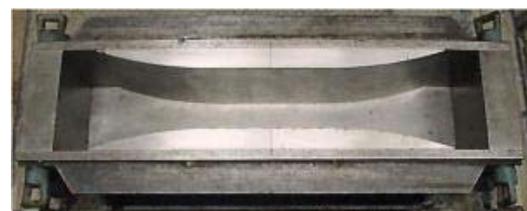


図-1 一軸引張試験用試験体型枠

\*1 筑波大学講師 機能工学系 博士 (工学) (正会員)

\*2 筑波大学大学院 理工学研究科 (正会員)

\*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 Ph.D. (正会員)

### 3.2 加力・計測方法

加力には 500kN 万能試験機を使用し、端部固定条件を曲げモーメントの影響や初期ひび割れ発生後の二次曲げモーメントの影響等を考慮したピン固定とした。加力方法を図-2に示す。中心にねじ穴を設けた鋼板をエポキシ樹脂系接着剤で試験体上下面に接着させ、ロッドエンドおよびボルトを試験機のヘッドチャックにて固定した。試験機のヘッド間速度は 0.5mm/min に設定した。計測項目は、荷重および試験体中央部表裏に取り付けた変位計（検長 160mm）による軸方向歪である。

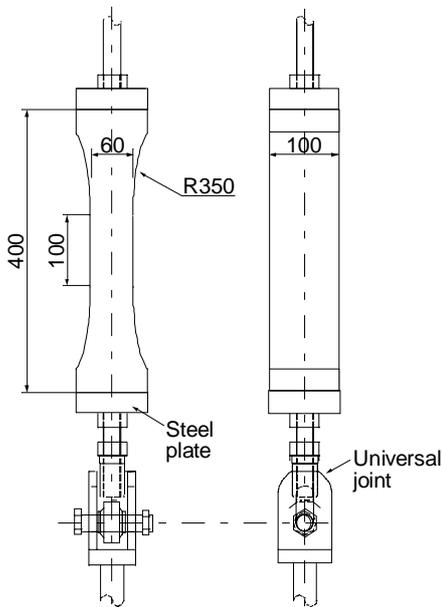


図-2 一軸引張試験加力方法

### 3.3 実験結果

引張応力-引張歪（検長 160mm の変位計による歪）関係の例を、図-3に示す。破線は試験体表裏に取り付けた変位計によるそれぞれの歪値を、実線はそれらの平均値を示す。初期ひび割れ発生後、試験区間全域にわたってマルチプルクラックが確認でき、応力-歪関係も歪硬化型の性状を示した。実験結果の一覧を表-4に示す。終局歪は、応力-歪関係を完全弾塑性モデルで表現することを念頭に置き、最大引張応力以降、初期ひび割れ強度まで応力が低下した点の歪とした。

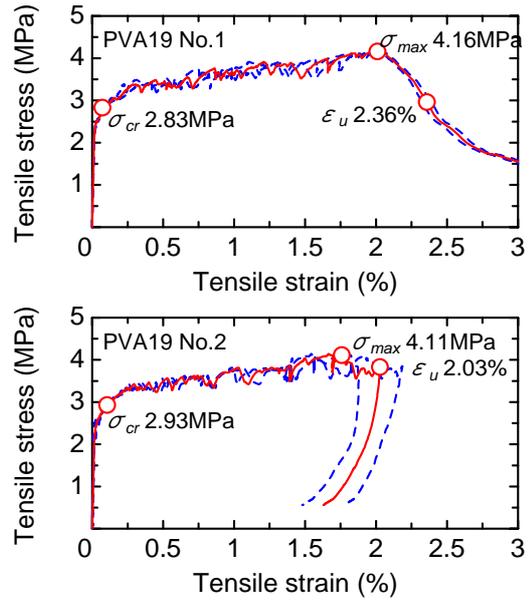


図-3 一軸引張試験応力-歪関係

表-4 一軸引張試験結果

種類	初期ひび割れ強度 $\sigma_{cr}$ (MPa)	引張強度 $\sigma_{max}$ (MPa)	終局歪 $\epsilon_u$ (%)
PVA19	2.88	4.14	2.20

## 4. PVA-ECC の曲げ試験

### 4.1 試験体

試験体は、100×100×400mm の角型である。鋼製型枠を使用して作製した。

### 4.2 加力・計測方法

加力には変位制御式 2MN 万能試験機を用い、図-4に示すように三等分載荷を行った。試験

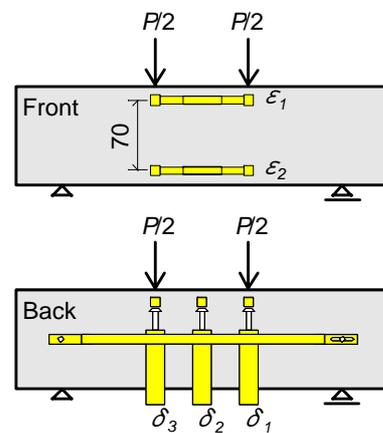


図-4 曲げ試験加力方法

体表側には曲率計測用として純曲げ区間の上下2点の伸縮を変位計により計測し、試験体裏側では純曲げ区間3点のたわみを変位計により計測した。

### 4.3 実験結果

曲げモーメントー曲率関係の例を図-5に示す。純曲げ区間およびその周辺においてマルチプルクラックが確認でき、初期ひび割れ発生後の荷重の増大も大きい。全試験体6体の実験結果の一覧を表-5に示す。

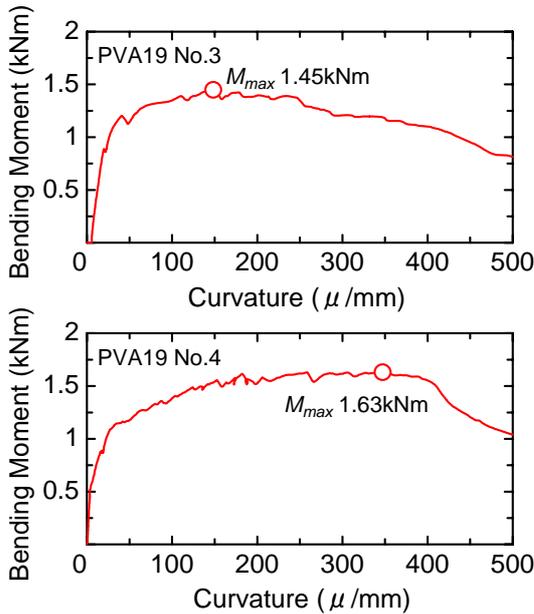


図-5 曲げ試験モーメントー曲率関係

表-5 曲げ試験結果

試験体	初期ひび割れ時		最大荷重時	
	$M_{cr}$ (kN·m)	$\phi_{cr}$ ( $\mu$ /mm)	$M_{cr}$ (kN·m)	$\phi_{cr}$ ( $\mu$ /mm)
No.1	0.500	4.7	1.64	184.8
No.2	0.329	2.6	1.90	391.3
No.3	-	-	1.45	149.0
No.4	0.525	3.8	1.63	344.7
No.5	0.833	6.5	1.60	153.7
No.6	0.477	2.8	1.77	159.7
平均	0.533	4.1	1.67	230.5

### 4.4 曲げ試験結果と一軸引張試験結果の関係

曲げ試験における最大曲げモーメント時のみに着目し、最大曲げモーメントとその時の曲率から、引張側応力ー歪関係の降伏応力および終局歪を導出する。最大曲げモーメント時に引張

縁の歪が終局歪に対応するものとし、その時の応力分布を図-6に示すように、圧縮側では直線分布、引張側では一様応力とする。

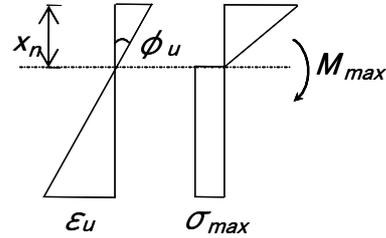


図-6 終局時の応力分布の仮定

圧縮側の弾性係数を  $E$ 、最大モーメント時の曲率を  $\phi_u$ 、圧縮縁から中立軸までの距離を  $x_n$ 、引張側一様応力を  $\sigma_{max}$  とし、部材幅を  $b$ 、せいを  $D$  とすると、圧縮側と引張側の力の釣合から (1) 式が成り立つ。また、最大モーメントを  $M_{max}$  とするとモーメントの釣合から (2) 式が成り立つ。

$$\frac{E \cdot \phi_u \cdot b}{2} x_n^2 = \sigma_{max} \cdot (D - x_n) \cdot b \quad (1)$$

$$M_{max} = \frac{E \cdot \phi_u \cdot b}{3} x_n^3 + \frac{\sigma_{max} \cdot b}{2} (D - x_n)^2 \quad (2)$$

(1) 式を (2) 式に代入して、 $bD^2$  で除すと、

$$m_{max} \equiv \frac{M_{max}}{bD^2} = \frac{E \cdot \phi_u \cdot D}{3} x_{n1}^3 + \frac{E \cdot \phi_u \cdot D}{4} x_{n1}^2 (1 - x_{n1}) \quad (3)$$

ここで、 $x_{n1} = x_n / D$

(3) 式の両辺を  $E \cdot \phi_u \cdot D$  で除し、新たに

$$m^* \equiv \frac{m_{max}}{E \cdot \phi_u \cdot D} = \frac{x_{n1}^3}{3} + \frac{x_{n1}^2 (1 - x_{n1})}{4} \quad (4)$$

とすると、(5) 式が成り立つ。

$$x_{n1}^3 + 3x_{n1}^2 - 12m^* = 0 \quad (5)$$

(5) 式から  $x_{n1}$  が求まると、次の式から終局歪  $\epsilon_u$  と引張側一様応力  $\sigma_{max}$  が求められる。

$$\epsilon_u = \phi_u \cdot D \cdot (1 - x_{n1}) \quad (6)$$

$$\sigma_{max} = \frac{E \cdot \phi_u \cdot D \cdot x_{n1}^2}{2 \cdot (1 - x_{n1})} \quad (7)$$

曲げ試験結果から求まる引張側特性値の一覧を表-6に示す。終局歪、応力とも表-4に示す一軸引張試験結果とよい対応がみられる。また、一軸引張試験から得られた応力-歪関係と、曲げ試験結果より計算された引張側応力-歪関係を比較して図-7に示す。

表-6 曲げ試験結果から求めた引張特性値

試験体	$m^*$	$x_{nl}$	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_{max}$ (MPa)
No.1	$6.08 \times 10^{-3}$	0.152	1.57	3.68
No.2	$3.33 \times 10^{-3}$	0.113	3.47	4.13
No.3	$6.67 \times 10^{-3}$	0.159	1.25	3.26
No.4	$3.24 \times 10^{-3}$	0.112	3.06	3.54
No.5	$7.12 \times 10^{-3}$	0.164	1.29	3.63
No.6	$7.58 \times 10^{-3}$	0.169	1.33	4.03
平均	$5.67 \times 10^{-3}$	0.145	1.99	3.71

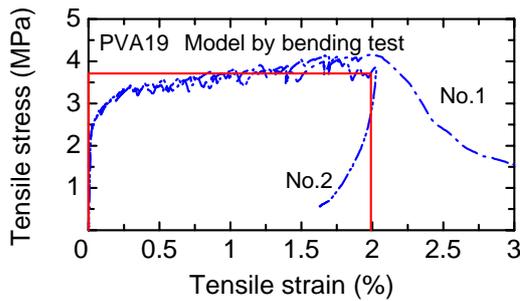


図-7 引張側応力-歪関係の比較

## 5. 両引付着試験

### 5.1 試験体

試験体は、図-8に示すように、 $100 \times 100 \times$

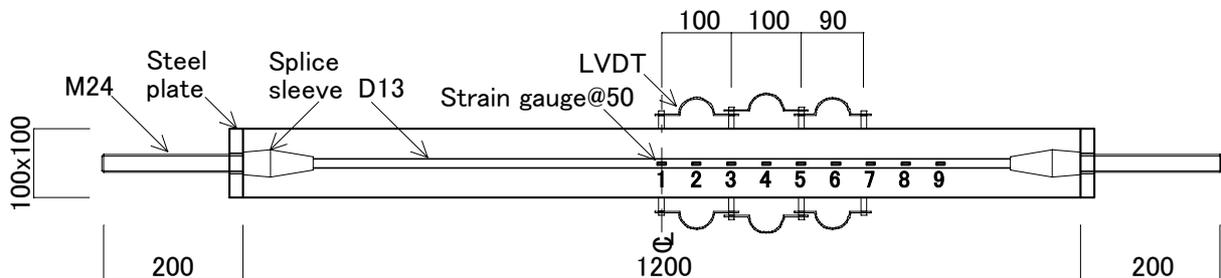


図-8 両引付着試験体



図-9 両引付着試験体破壊状況(No.2)

1200mm の PVA-ECC ブロックの中心に異形鉄筋 D13 を 1 本配したもので、両端部には加力固定用の M24 全ねじ、鋼板、および鋼製継手を設けた。継手の表面は異形状で、引張荷重は継手部において鉄筋と PVA-ECC に伝達される。3 体の試験体の加力を行った。また、鉄筋の引張試験の結果を表-7に示す。

表-7 両引付着試験鉄筋の力学的性質

種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断伸び (%)
D13	335	479	195	27.1

### 5.2 加力・計測方法

加力には変位制御式 2MN 万能試験機を用い、単調引張加力を行った。計測項目は、引張荷重値、両端部鋼板間の全体変形、試験体中央部から表裏 2 カ所ずつ 3 区間に設置した変位計による局所変形、中央部から 50mm ピッチで貼付した歪ゲージによる鉄筋の歪である。

### 5.3 実験結果

加力終了後の試験体の例を図-9に示す。いずれの試験体においてもひび割れ発生以前までは一様に引張力を受け、鉄筋歪が 0.02~0.03% に至ると初めてひび割れが観測された。その後もひび割れを発生させながら荷重を上昇させるが、全体変形歪 0.2% になると一つのひび割れに変形が集中し、荷重は鉄筋のみが受け持つよう

になった。最終的には鉄筋が破断した。

各試験体の引張荷重－全体変形関係、PVA-ECC の負担引張応力－全体歪関係を図-10に示す。上2図は引張荷重－全体変形関係で、図中の破線は、試験体両端部定着区間の長さを除いた部分の鉄筋のみが引張力を受けた場合の荷重と伸びの関係を表している。全体変形3mm程度までは、鉄筋のみの場合と比較して明らかに荷重の増加が確認できる。0.5～1.5mm程度の部分では荷重の増減が繰り返され、ひび割れの発生と対応する現象と思われる。全体変形5mm以降では再度荷重が上昇しており、局所化したひび割れ部分での鉄筋の歪硬化によるものと考えられる。下図は、引張荷重から鉄筋のみが受ける荷重を差し引いた見かけ上のPVA-ECCの負担引張力を示している。実際にPVA-ECCが負担している引張力とテンションスティフニング効果が加算された値である。

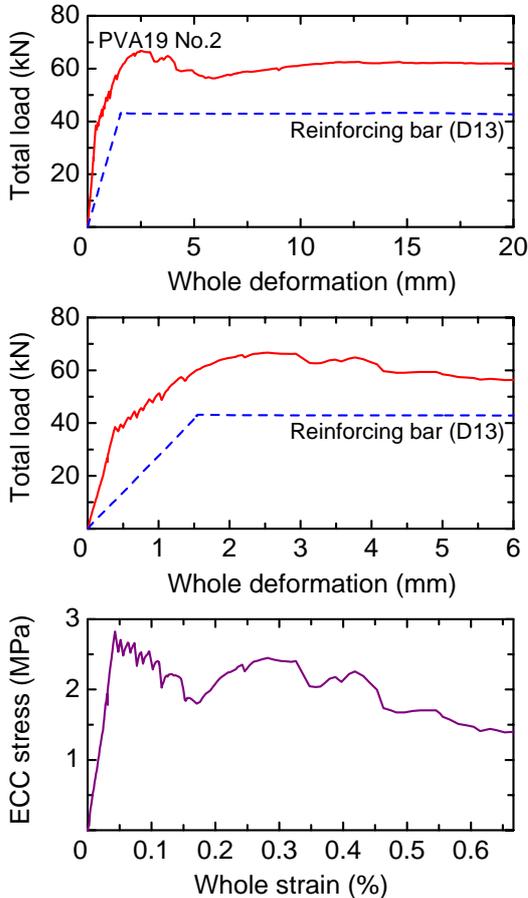


図-10 荷重・ECC 応力－全体変形関係

#### 5.4 付着応力・変形の局所化の検討

鉄筋の歪分布の例を図-11に示す。全体変形が1mmで、鉄筋は弾性範囲であるが歪分布の勾配が見られ、変形の局所化が進行しているものと思われる。

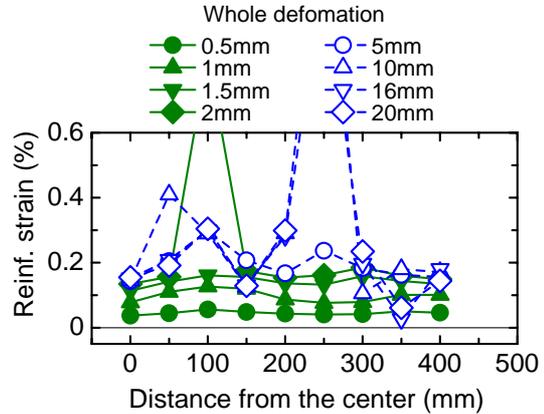


図-11 鉄筋の歪分布

鉄筋の局所付着応力と全体変形の関係の例を図-12に示す。図中の数字は図-8中の歪ゲージ位置と対応しており、鉄筋の応力－歪関係を完全弾塑性型とし、隣り合った歪ゲージ間の鉄筋の引張力の差から平均付着応力を算出した。全体変形が0.5mm程度で付着応力が発生しており、これは初期ひび割れ発生時と一致する。付着応力の最大値は全体変形が1mmの時に

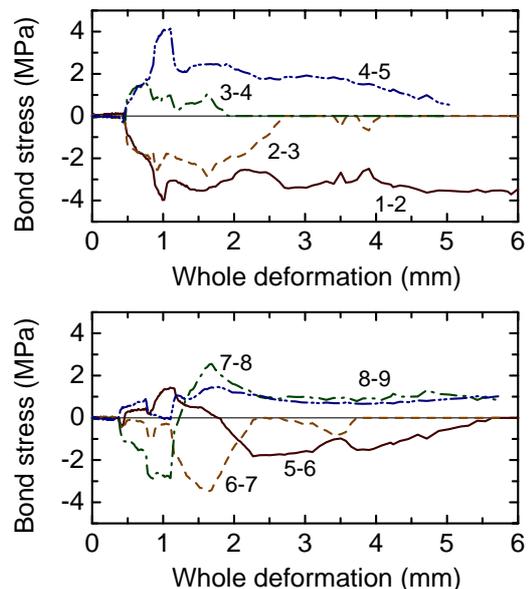


図-12 付着応力の推移状況

4MPa に達している。また付着応力の正負が反転する箇所も見られ、新たなひび割れの発生による付着応力負担方向の逆転によるものと思われる。

### 5.5 ひび割れ間隔の検討

加力後の平均ひび割れ間隔を、主立ったひび割れの本数を両端部定着区間を除いた試験体の長さで除して求めた。また、平均ひび割れ間隔の計算値を文献 2) に準じて求めた。結果を表 8 に示す。ひび割れ間隔の実験値は計算値より小さく、通常の鉄筋コンクリートと比較して 1 カ所のひび割れでの歪増大の抑制、鉄筋との付着能力の向上といった要因が考えられる。

表 8 平均ひび割れ間隔

試験体	ひび割れ本数	実験値 (mm)	計算値 (mm)	比較値
No.1	9	100	207	0.48
No.2	7	129		0.62
No.3	6	150		0.72
平均		126		0.61

### 6. まとめ

PVA-ECC の曲げ試験結果から得られた、引張側完全弾塑性モデルの一樣応力および終局歪は、一軸引張試験より得られた値とよい対応を示した。

両引付着試験では、基本的には通常の鉄筋コンクリートと同様に、変形の局所化、鉄筋付着応力の発生等が確認された。鉄筋コンクリートと比較して、PVA-ECC による引張力負担や付着能力の向上により、テンションスティフニング効果の増大、ひび割れ間隔の減少といった性状が見られた。

### 謝辞

本研究の一部は、「日米共同研究スマートストラクチャーエフェクター部会セメント系複合材料 WG」（主査：松崎育弘東京理科大学教授）の研究活動の一環として実施したものである。関係者各位に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 清水克将, 金久保利之, 関田徹志, 永井 覚: HPRCC の一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.281~286, 2003.7
- 2) 日本建築学会: プレストレス鉄筋コンクリート (Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説, 1986