

論文 R/FRC 部材の付着挙動に及ぼす引張軟化特性の影響

中道 優太*1・上田 尚史*2

要旨：鉄筋で補強した繊維補強コンクリートの付着挙動を把握するため、引張軟化特性の異なる繊維補強コンクリートを用いて、鉄筋で補強した繊維補強コンクリート部材の一軸引張試験を行った。その結果、ひび割れ発生後の応力低下が小さい材料ほど、ひび割れの開口を抑制することができ、高いテンションスティフニング効果が得られることを確認した。また、そのような材料ほど、内部のひび割れがより分散する結果が得られた。

キーワード：繊維補強コンクリート, 付着, ひび割れ幅, 内部ひび割れ

1. はじめに

近年、繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete, 以下 FRC) の利用拡大を目的として、構造部材としての利用が検討されている。これまでに、FRC を用いた RC 部材の構造挙動として、曲げモーメントやせん断力に対する耐荷特性^{1,2)}や、座屈抑制効果の検討³⁾が数多く行われている。また、FRC の引張特性を活かす方向として RC 部材の構造細目に関わる検討も行われており、鉄筋で補強した FRC 部材 (以下、R/FRC) の付着試験によりひび割れの抑制効果やテンションスティフニング効果の検討がされている^{4,5)}。一方、これらの研究では、巨視的な荷重-平均ひずみ関係や、コンクリート表面におけるひび割れ性状に着目されており、繊維の架橋効果が巨視的な付着挙動にどのように寄与しているかについては、必ずしも明らかにされていない。

著者らはこれまでに、長さ 12mm 程度の細径短繊維をコンクリートに混入した FRC について検討しており、R/FRC 部材においては、細径短繊維の混入によりひび割れ発生後に急激なひび割れの拡大を抑制できる可能性を示している⁶⁾。鉄筋とコンクリートの付着挙動は、Goto⁷⁾が指摘するように、鉄筋の節から発生する内部ひび割れが重要な役割を果たしている。細径短繊維を混入することで内部ひび割れが抑制され、付着効果が高くなることが期待される。

以上のことから、R/FRC 部材の巨視的な付着挙動と内

部のひび割れ状態を関連付けることができれば、FRC における付着挙動をメカニズムに基づいて議論することができると考える。そこで本研究では、引張軟化特性の異なる FRC を用いた R/FRC 部材の一軸引張試験を対象として、供試体表面のひび割れ分布やテンションスティフニング効果を明らかにするとともに、鉄筋近傍の内部ひび割れ状態について実験的に検討した。

2. 使用した FRC

2.1 使用材料および配合

表-1 に配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメント (C : 密度 3.15g/cm³) を使用し、流動性を確保するために、混和材としてフライアッシュ II 種 (FA : 密度 2.25g/cm³) を用いた。細骨材 (S : 表乾密度 2.59g/cm³) には川砂を、粗骨材 (G : 表乾密度 2.69g/cm³) には碎石を使用した。また、繊維には、繊維径 40 μ m、繊維長 12mm のポリビニルアルコール短繊維 (PVA12) と、繊維径 660 μ m、繊維長 30mm の PVA 短繊維 (PVA30) を用いた。

配合は、水粉体比を 40% とし、単位粗骨材容積を 28.1% で一定として、繊維を細骨材で置換することで混入した。本研究では、PVA12 を 0.5~1.5% 混入した FRC (PVA12-0.5, PVA12-1.0, PVA12-1.5) と PVA30 を 1.0% 混入した FRC (PVA30-1.0) に加えて、PVA12 と PVA30 をそれぞれ 0.5% ずつ混入した FRC (hybrid) を用いた。

表-1 配合表

ケース	W/B (%)	FA/B (%)	V _f (%)	単位量(kg/m ³)						
				W	C	FA	S	G	PVA12	PVA30
NC	40	30	0.0	200	350	150	757	751	-	-
PVA12-0.5			731				6.5		-	
PVA12-1.0			749				13.0		-	
PVA12-1.5			220	385	165	630	19.5		-	
PVA30-1.0			200	350	150	749	-		13.0	
hybrid			1.0	6.5	6.5					

* PVA12 を混入した配合のみ、高性能 AE 減水剤をセメント重量の 1.5% 混入

*1 関西大学大学院 理工学研究科環境都市工学専攻 修士 (工学) (学生会員)

*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

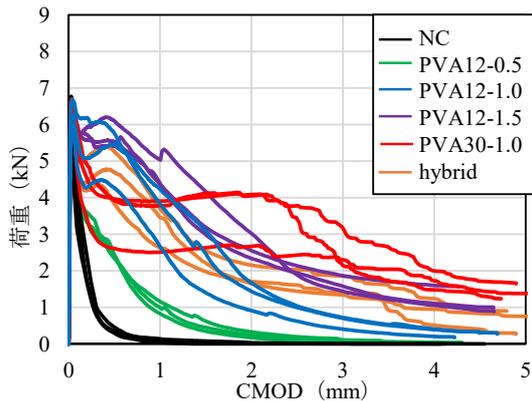


図-1 荷重—CMOD 関係

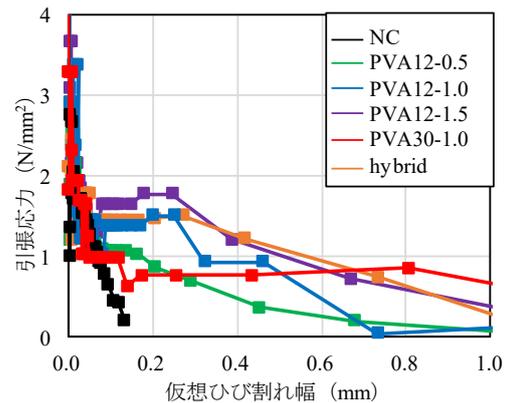


図-2 引張軟化曲線

2.2 引張軟化特性の特徴

図-1に、切欠きを有する角柱供試体（寸法 100×100×400mm）の3点曲げ試験から得られた荷重—CMOD 関係を示す。図より、PVA12を混入した供試体のうち、PVA12-1.0とPVA12-1.5は、ひび割れ発生直後の荷重低下が小さく、ひび割れ幅が1.0mm程度までは、PVA30-1.0よりも荷重を高く保持できることが確認できる。一方、PVA30-1.0では、ひび割れ発生後により大きなひび割れ幅まで荷重を保持することができることがわかる。hybridでは、PVA30-1.0と比較してひび割れ発生後の荷重低下は小さくなるとともに、PVA12-1.0と比較するとひび割れが増加してもある程度荷重を保持できおり、混入したPVA12とPVA30の両方の特徴が表れている結果となった。

これらの結果を基にして、逆解析⁸⁾により求めた引張軟化曲線を図-2に示す。NC供試体では、ひび割れ発生直後に引張応力が急激に低下し、仮想ひび割れ幅0.13mmにおいて応力を失った。一方、繊維を混入した供試体では、仮想ひび割れ幅が増加した後も応力を保持する挙動が得られた。PVA30-1.0は、PVA12を混入した供試体よりひび割れ発生後の引張応力は小さいが、仮想ひび割れ幅が1.0mmにおいても応力を保持する結果となった。一方、PVA12を混入した供試体では、繊維混入率が大きいほどひび割れ発生直後の引張応力の低下は小さくなる傾向が確認された。hybridでは、PVA30-1.0よりもひび割れ発生後の応力は大きく、PVA12-1.0と比較してより大きな仮想ひび割れ幅まで応力を保持する結果となった。

3. R/FRC 部材の一軸引張試験

3.1 実験概要

図-3に供試体の概略図を示す。供試体は長さが500mmであり100×100mmの断面を有し、断面の中心にD22 ($f_y=390\text{N/mm}^2$)の異形鉄筋を一本配置した。

引張試験は、アムスラー型の万能試験機を用い、鉄筋

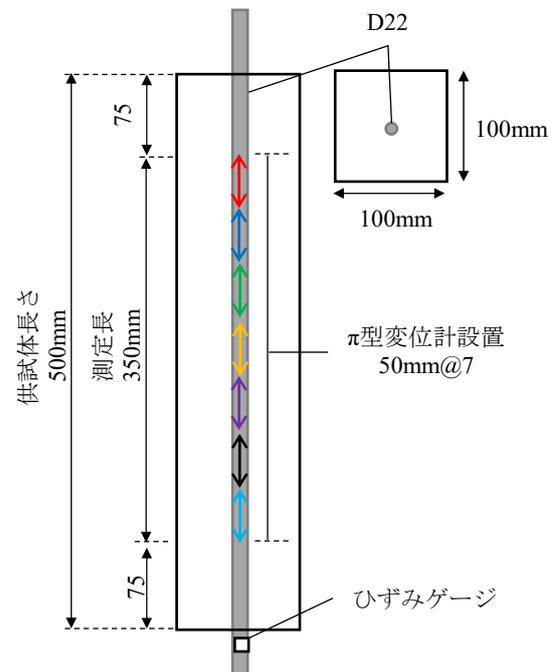


図-3 供試体概要

表-2 圧縮試験結果

ケース	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
NC	64.6	32.1
PVA12-0.5	65.5	33.6
PVA12-1.0	62.1	34.1
PVA12-1.5	63.2	34.3
PVA30-1.0	58.3	32.4
hybrid	65.4	33.9

の端部に引張力を加えることで行った。载荷は鉄筋が降伏し、ひずみ硬化域に達するまで行った。载荷速度は鉄筋の応力増分が0.5N/mm²/secとなるように制御した。

供試体には、区間350mmにおいて検長50mmのπ型変位計を設置し、FRCの表面変位を測定するとともにひび割れの発生および進展状況を確認した。また、供試体外に貼付したひずみゲージにより鉄筋のひずみを測定した。その後、荷重を除荷して供試体を試験機から取り外



(a) 初期載荷 (b) 再載荷時

写真-1 実験の状況の一例

した状態で目視により供試体表面のひび割れ性状を確認した。さらに、供試体の断面 1/4 をコンクリートカッターにより切断除去し、再度、鉄筋のひずみ硬化域である 420N/mm^2 まで加え、荷重を保持した状態で内部ひび割れの観察を行った。写真-1 に載荷時の状況を示す。

表-2 に、各種 FRC の圧縮強度と静弾性係数を示す。圧縮強度は $58.3 \sim 65.5\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数は $32.1 \sim 34.3\text{kN/mm}^2$ であり、いずれの供試体においても、概ね同程度の力学特性であった。なお、PVA12-1.5 の圧縮強度および静弾性係数が若干低くなっているのは、硬練りであったために充填不良が生じていたためであると考えられる。ただし、R/FRC 供試体では、目視で確認した範囲では、充填不足は認められなかった。

3.2 実験結果および考察

(1) テンションスティフニング効果

図-4 に鉄筋降伏までの荷重-平均ひずみの関係を示す。ここで平均ひずみは、 350mm 区間の供試体変位から算出したものである。図には鉄筋単体の引張荷重-ひずみ関係と、合成断面の引張剛性の理論値を併記している。

図より、ばらつきは見られるものの、いずれの供試体もひび割れ発生前は理論値と概ね同程度の傾きとなっており、ひび割れ発生後に傾きが低下する結果となった。ひび割れ発生荷重は、繊維の寸法や混入率による明確な違いはなかった。ひび割れ発生後の挙動に着目すると、NC 供試体および PVA12-0.5 供試体では傾きが徐々に低下し、鉄筋単体の挙動に近づくような挙動を示した。一方、PVA12-1.0 供試体、PVA12-1.5 供試体、PVA30-1.0 供試体ならびに hybrid 供試体では、ひび割れ発生後も傾きが大きく低下することなく、鉄筋単体の剛性と平行するような挙動が得られた。それらの FRC は、図-3 に示す引張軟化曲線において、ある程度仮想ひび割れ幅が増加しても応力を保持する結果となっている。R/FRC 部材

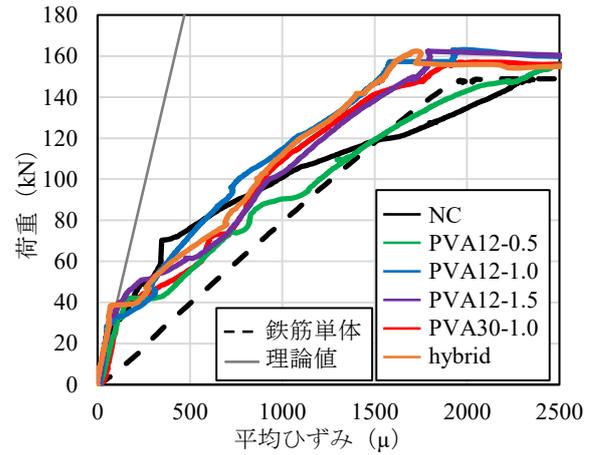


図-4 荷重-平均ひずみ関係

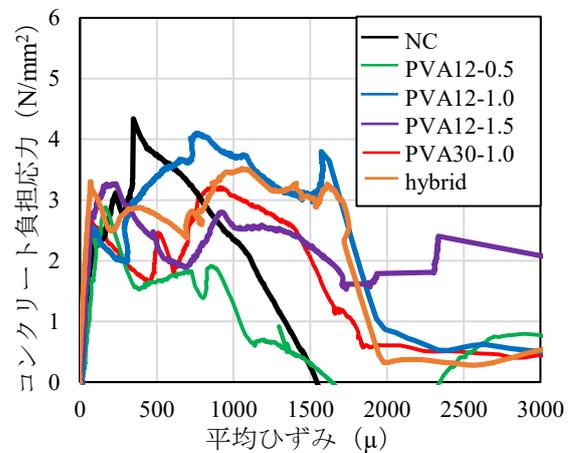


図-5 テンションスティフニング効果

においても、繊維の架橋効果により繊維が引張力を負担していたためであると考えられる。なお、NC 供試体において降伏ひずみが鉄筋単体よりも大きくなったのは、ひび割れの開口に伴い偏心が生じ、測定面側の変形が増大したためであると考えられる。

ここで、引張荷重から鉄筋が負担する荷重を差し引くことで、コンクリートの平均応力を求めた。なお、本研究では FRC 内の鉄筋のひずみを測定していないため、鉄筋が負担する荷重を直接求められない。そこで、便宜的に鉄筋の平均ひずみが FRC の平均ひずみと等しいと仮定し、その平均ひずみから鉄筋の応力-ひずみ関係により鉄筋の応力を算出し、鉄筋の負担する荷重を概算した。

図-5 にコンクリートの平均応力と平均ひずみの関係を示す。ひび割れが発生するまでのコンクリート応力には、繊維の寸法および混入率の違いによる影響は確認されなかった。ひび割れ発生後はいずれの供試体も応力が低下する傾向が得られた。NC 供試体および PVA12-0.5 供試体では平均ひずみ 1500μ 程度でコンクリート応力がゼロとなった。PVA12-1.0 供試体、PVA12-1.5 供試体、PVA30-1.0 供試体ならびに hybrid 供試体では、平均ひず

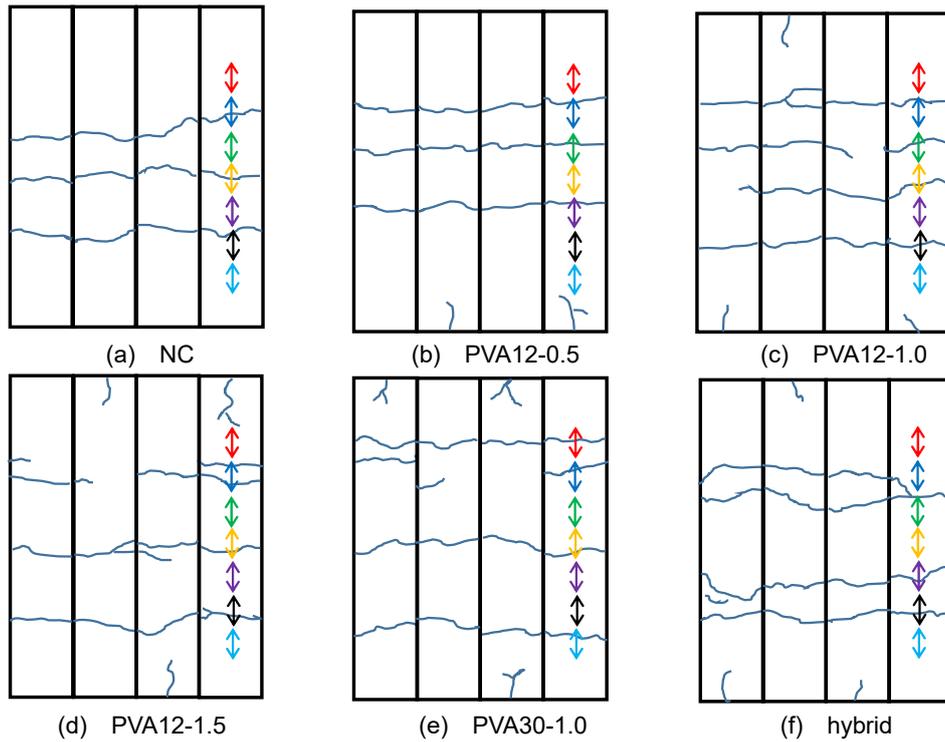


図-6 表面のひび割れ性状

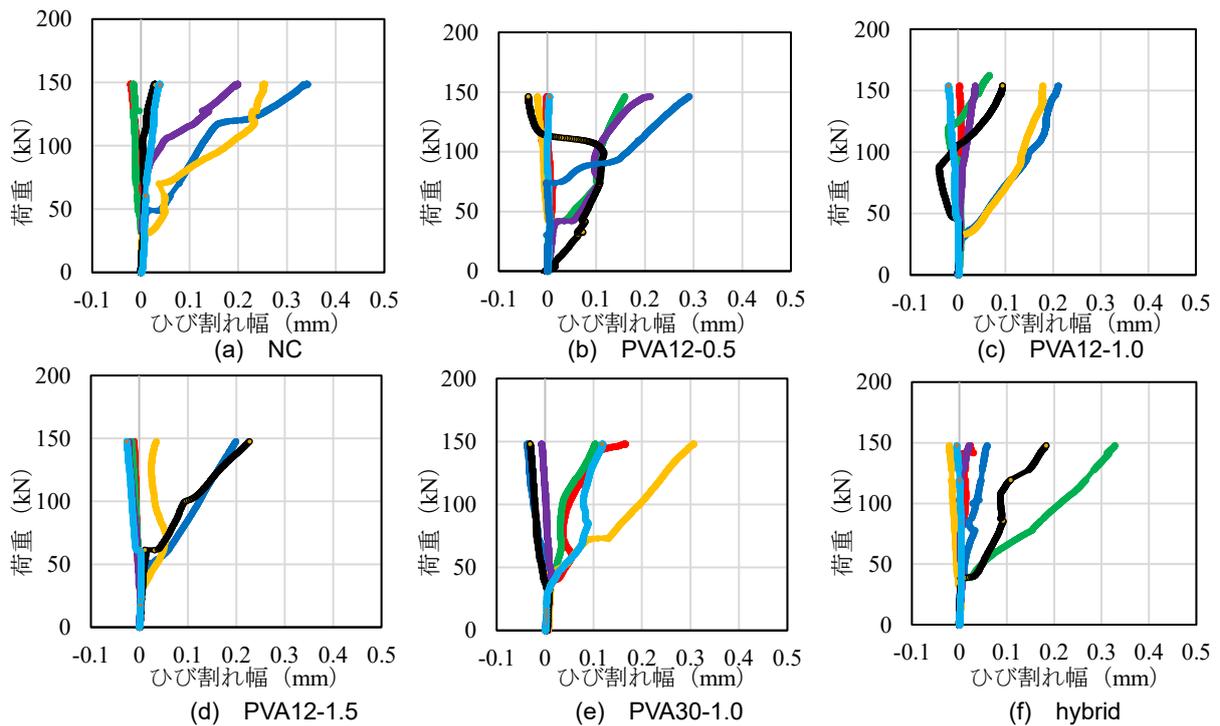


図-7 荷重—ひび割れ幅関係

み 2000μ を超えても、コンクリートは応力を負担する結果となった。ひび割れ発生後の PVA12-1.0 供試体, PVA12-1.5 供試体ならびに hybrid 供試体におけるコンクリート応力は、PVA30-1.0 供試体よりも高く、より高いテンションステイフニング効果があることが確認された。なお、NC において平均ひずみ 300μ 程度でコンクリートの負担応力が急増する結果となっているのは、ひび割れが測

定面以外の面で生じたことで平均ひずみが一時的に増加しなかったことが要因であると考えられる。

(2) 表面ひび割れの発生および進展挙動

図-6 に各供試体の載荷後の表面のひび割れ図を示す。NC 供試体ではひび割れが 3 本入り、ひび割れ間隔は平均して 86.7mm であった。一方、PVA30-1.0 供試体では、NC 供試体とひび割れ本数は同じであったが、ひび割れ

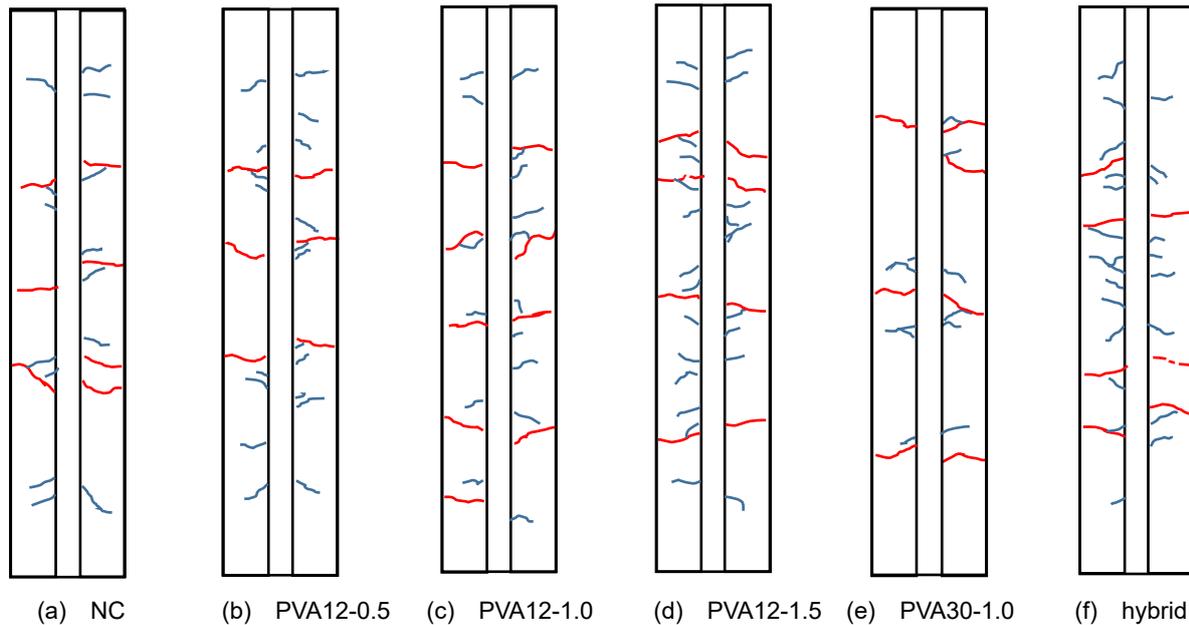


図-8 内部ひび割れ性状

間隔は大きくなり平均ひび割れ間隔は 155mm であった。PVA12-0.5 供試体では、ひび割れ本数および平均ひび割れ間隔ともに NC 供試体と明確な違いは確認されなかった。PVA12-1.0 供試体、PVA12-1.5 供試体ならびに hybrid 供試体では、ひび割れは 4 本発生し、平均ひび割れ間隔はそれぞれ、82.3mm、84.5mm ならびに 79.3mm であった。わずかな差ではあるが、ひび割れ発生後の応力低下が小さい材料ほど、ひび割れが多く発生する結果となった。

図-7 に供試体に設置した π 型変位計により測定したひび割れ幅と引張荷重の関係を示す。なお、図中の線の色は、図-6 の π 型変位計設置位置の色と対応している。いずれの供試体においても、引張荷重 40kN 付近で 1 つの π 型変位計のひび割れ幅が増大する結果が得られた。このことから、ひび割れ発生荷重は繊維の寸法および混入率に影響を受けないことが確認された。また、鉄筋降伏時の最大ひび割れ幅に着目すると、NC 供試体、PVA30-1.0 供試体および PVA12-0.5 供試体では、それぞれでは 0.35mm、0.33mm および 0.30mm 程度であり、これらの供試体において最大ひび割れ幅に差は認められなかった。また、その他のひび割れの幅を比較すると、NC 供試体では 0.2~0.25mm であるのに対して、PVA30-1.0 供試体では 0.1~0.15mm 程度であり、ひび割れ幅が抑制される結果となった。PVA12-0.5 供試体においては、ひび割れ幅は 0.18~0.22mm と NC 供試体と同程度であり、繊維混入の影響は認められなかった。

一方、PVA12-1.0 供試体および PVA12-1.5 供試体では、最大ひび割れ幅は 0.21mm および 0.19mm であり、NC 供試体に比べてひび割れ幅が抑制される結果となった。な

お、PVA12-1.5 供試体の黒線については、図-6 に示すように 50mm の間隔にひび割れが 2 本発生しているためここでの議論からは除外した。hybrid 供試体では、最大ひび割れ幅は 0.33mm 程度と NC よりも大きくなったが、その他のひび割れの幅は、0.05~0.2mm であった。hybrid 供試体では、PVA12 と PVA30 の混入率がそれぞれ 0.5% であったため、ひび割れの局所化が生じたものと考えられる。以上のことから、テンションステイニング効果の高い供試体ほど、繊維の影響によりひび割れ幅の開口が抑制されることが確認された。

(3) 内部ひび割れ状態

実験概要で述べたように、供試体の断面 1/4 を取り除いた後に、再度加力しひずみ硬化域において荷重を保持した上で鉄筋近傍の内部ひび割れを目視により観察した。図-8 に内部のひび割れ性状を示す。図において、赤線は鉄筋降伏以前において、青線はひずみ硬化域において観察されたひび割れである。いずれの供試体においても、鉄筋近傍から角度を持ったひび割れが発生していることが確認された。

内部ひび割れの分布を比較すると、PVA30-1.0 供試体と NC 供試体では明確な違いは確認されなかった。一方、hybrid 供試体を含む PVA12 を混入した供試体では、内部ひび割れが比較的分散して生じていることが確認できる。また、繊維混入率が大きいほど、ひび割れの分散性は高くなる傾向が確認された。引張軟化特性においてひび割れ発生後の応力低下が小さい材料ほど、ひび割れの開口と進展を抑制することができたためであると考えられる。

前述のように、表面ひび割れにおいては、繊維の寸法および混入率の違いはわずかに認められる程度であった

が、内部のひび割れ状態においては、細径のPVA12を混入した供試体の方がひび割れの分散性が高くなる傾向があることが示唆された。

なお、鉄筋降伏以前においては、内部の微細なひび割れは目視では確認することができなかった。今後は、画像計測技術⁹⁾を用いて、目視では確認することのできない微細なひび割れの発生状況について検討することが必要である。

4. 結論

本研究では、FRCの付着挙動に及ぼす引張軟化特性の影響について、鉄筋で補強したFRC部材の一軸引張試験により実験的に検討した。限られた範囲内ではあるが、以下の知見が得られた。

- 1) ひび割れ発生後の応力低下が小さい材料ほど、高いテンションスティフニング効果が得られた。また、ひび割れ間隔は小さくなり、ひび割れの開口を抑制できることが確認された。
- 2) コンクリートの断面1/4を取り除いた供試体の引張試験において目視によるひび割れ観察を行った結果、ひずみ硬化域において鉄筋近傍から角度をもったひび割れを確認することができた。内部ひび割れ性状の発生状況から、細径短繊維を混入することで、ひび割れの分散性が高くなる可能性が示唆された。

今後は、画像計測技術により目視では確認することのできない微細なひび割れの発生状況について検討するとともに、3次元RBSMなどの離散化解析手法¹⁰⁾を用いて、FRCの付着挙動に対する定量的な検討を行うことを予定している。

参考文献

- 1) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: PVA短繊維で補強したRCはりのせん断耐力評価に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.774/V-65, pp.123-138, 2004.

- 2) 渡辺健, 木村利秀, 児玉亘, 喜多俊介, 大寺一清, 二羽淳一郎: 鋼繊維とせん断補強鉄筋の併用によるRC棒部材のせん断補強効果, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.3, pp.322-331, 2009.
- 3) 栗橋祐介, 岸徳光, 三上浩, 田口史雄: PVA短繊維混入によるRC柱の靱性能向上効果, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.879-888, 2011.
- 4) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: PVA短繊維で補強したコンクリート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.26, No.2, pp.1549-1554, 2004.
- 5) Deluce, J. R. and Vecchio, F. J.: Cracking Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement, ACI Structural Journal, Vol.110, No.3, pp.481-490, 2013.
- 6) 中道優太, 上田尚史: 細径短繊維を混入したFRCの材料特性とR/FRCはりのせん断挙動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.1063-1068, 2020.
- 7) Goto, Y.: Cracks formed in concrete around deformed tension bars, Jour. of ACI, Vol. 68, pp. 244•251, April 1971.
- 8) JCI規準・指針: JCI-S-001-2003, JCI-S-002-2003 「切欠きを用いた繊維補強コンクリートの荷重—変位曲線試験法」, 2003.
- 9) Okeil, A., Matsumoto, K. and Nagai, K.: Investigation on local bond behavior in concrete and cement paste around a deformed bar by using DIC technique, Cement and Concrete Composites, Vol.109, 103540, 2020.
- 10) 渡辺勇輝, Usman Farooq, 中村光, 三浦泰人: 3次元剛体バネモデルとはり要素を組み合わせた手法による腐食したRC部材の付着解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, 2019.