

論文 一軸引張応力下におけるハイブリッド型繊維補強セメント複合材料と鉄筋との複合効果に関する基礎的研究

中川 佑哉^{*1}・菊田 貴恒^{*2}・西脇 智哉^{*3}・三橋 博三^{*4}

要旨: 本研究では, 2 種類のビニロン繊維を混合したハイブリッド型繊維補強セメント複合材料を鉄筋と組み合わせることにより生じる複合効果を, ひび割れ分散性などの材料視点から評価することを目的とした実験を行った。角柱試験体による一軸引張試験を行い, 鉄筋比及び鉄筋位置の影響を評価した。その結果, ひび割れ分散性は鉄筋位置による影響が大きく, 荷重-ひずみ関係は鉄筋比が異なっても同様の傾向を示した。鉄筋は中心からの距離が大きいと局所的な変形や縁応力などの影響により終局状態に至るのが早まるが, バランス良く配筋することで曲率を制御でき, その結果ひび割れ分散性の向上が確認された。

キーワード: 繊維補強セメント複合材料, 一軸引張試験, 角柱試験体, 鉄筋, テンションスティフニング

1. はじめに

ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料(Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites : 以下 HFRCC)は, 物性の異なる 2 種類の繊維を用い, その相互作用によって, それぞれの繊維の単一混入では得られない, 高い引張靱性能を実現している材料である^{例え ば 1) 2)}。その材料特性から, 実構造物への適用が期待され, 近年では構造部材レベルでの研究も活発に行われている³⁾。

これまで菊田らは, HFRCC の中でも高い靱性能と施工性とを両立させる調合を開発してきた⁴⁾。これら調合には多量の繊維を混入させ, 割れ面を架橋する繊維の効果によって, 重要な材料特性である複数ひび割れの発生を促し, 曲げ及び引張応力下における靱性能の向上を実現してきた。

セメント系材料を建築構造部材へ適用する場合には法律上, 主筋や帯筋などを配筋しなければならず, そのため, 構造部材レベルでの研究は HFRCC や繊維補強セメント複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composites : 以下 FRCC)と鉄筋を組み合わせた実験が行われている。しかし, 構造部材に用いる前段階において, 開発された高性能な HFRCC や FRCC は, 鉄筋と複合化された場合の性能評価を行っているものは少なく, 検討が十分に行われているとは言えない。国枝らは, UHP-SHCC(Ultra High Performance - Strain Hardening Cementitious Composites)と D6 鉄筋を複合化させ, 鉄筋本数に応じた材料性能への影響を評価するため 50×200×900mm の角柱試験体による一軸引張試験を行い, UHP-SHCC と鉄筋の複合化を行うことで, ひび割れ分散性の向上やテンションスティフニング効果が安定し

表-1 繊維の物性値

繊維	シンボル	密度 (g/cm ³)	長さ (mm)	直径 (μm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
Vinylon (PVA)	R15	1.3	6	40	1600	40
	R100		12	100	1100	25

表-2 異形鉄筋の物性値

鉄筋種類	シンボル	公称直径 (mm)	降伏強度 (MPa)	最大強度 (MPa)
SD295A	D4	4.23	312	506
	D6	6.35	356	525

表-3 調合条件

W/B (Wt.%)	FA/B (Wt.%)	S/B (Wt.%)	Fiber (Vol.%)	
			R100-12mm	R15-6mm
40	30	40	2.3	0.75

凡例 FA= フライアッシュ, S=けい砂 B=セメント + フライアッシュ

表-4 マトリックスの物性値

テーブルフロー値 (mm)	圧縮強度 (MPa)	密度 (g/cm ³)
250×245	38.6	1.88

て生じることなどを報告している⁵⁾。HFRCC は様々な繊維を混入させることで性能を向上させてきたが, 繊維の分散性に大きく依存しており, また, 繊維そのものが高価であるなどといった特徴がある。これまで開発された HFRCC に対して少量の鉄筋を複合化させた場合について各種評価を行うことは, HFRCC の材料性能の変化を理解する上で有効であり, 実構造物に HFRCC を適用していく上で課題となっている, 繊維の多量混入によるコストの高さや, 性能のばらつきが大きいといった点などに対して, HFRCC と鉄筋の複合効果を明らかにするこ

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 東北大学 名誉教授 工学博士 (正会員)

とで、繊維の分散性への依存度を低減でき、コスト低減を図れるなど、HFRCC の実用化に向けて大いに役立つと考えられる。

そこで本研究では、図-1 に示すひび割れの破壊レベルに応じた補強を行うマイクロ・メゾ・マクロの3段階繊維補強の概念のもと、鉄筋を3番目の補強繊維と位置付ける。3段階繊維補強はサイズの異なる繊維がマイクロレベルのひび割れ・メゾレベルのひび割れそれぞれを連続的に効率良く補強し、鉄筋によってマクロレベルのひび割れ幅の制御および試験体の2次曲げを抑制するマルチレベル補強手法である。⁶⁾HFRCC と鉄筋が複合化された場合の鉄筋比及び鉄筋位置によるテンションステイニング効果などの影響を、最大荷重、ひずみ硬化領域の大きさ、ひび割れ分散性および曲率をパラメータとして評価することを目的とし、100×100×400mm の角柱試験体による一軸引張試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究に使用した材料は、早強ポルトランドセメント（密度：3.14g/cm³）、フライアッシュⅡ種（密度：2.33g/cm³）、細骨材として7号珪砂（密度：2.61g/cm³）、高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）、セルローズ系増粘材、鉄筋（D4、D6）およびビニロン繊維である。使用したビニロン繊維の物性値を表-1に示す。本研究で用いたビニロン繊維は、繊維径が太いものの方が流動性を比較的確保しやすく、また、繊維同士の干渉が起こり難いため⁷⁾、直径100μmの繊維を主たる繊維補強材と位置付け、混入した。次に、使用した異形鉄筋の物性値を表-2に示す。本研究で用いた鉄筋はD4及びD6であり、形状はほぼ同じで、太さが異なる2種類を使用した。

2.2 調合、練り混ぜ及び養生方法

本研究で用いたHFRCCの調合を表-3に示す。ビニロン繊維の混入率は太径のR100繊維を2.3Vol.%とし、細く短いR15繊維は0.75Vol.%とした。練り混ぜには容量50リットルの一軸ミキサーを用い、角柱試験体3本を同一バッチから採取した。練混ぜは粉体及び細骨材を空練り後、水と高性能AE減水剤を投入して3分混練、R15繊維を投入して3分混練、最後にR100繊維を投入して3分混練した。

試験体の養生方法は、打設後24時間湿空養生を行い、脱型後は水中養生とし、材齢28日で実験を行った。表-4に練上がり直後に測定したテーブルフロー値、直径50mm、高さ100mmのシリンダーを用いた圧縮試験結果並びに供試体のマトリックス部分の密度を示す。

2.3 試験体概要及び一軸引張試験方法

本研究で使用した試験体は、100×100×400mmの角柱試

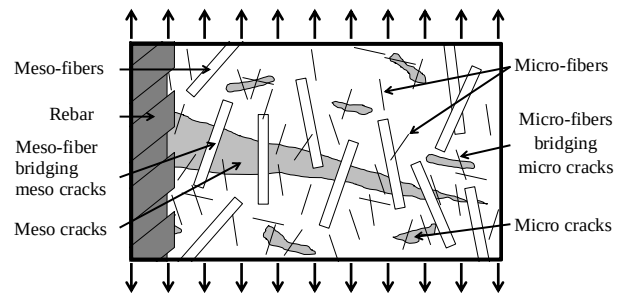


図-1 三段階繊維補強の概念図

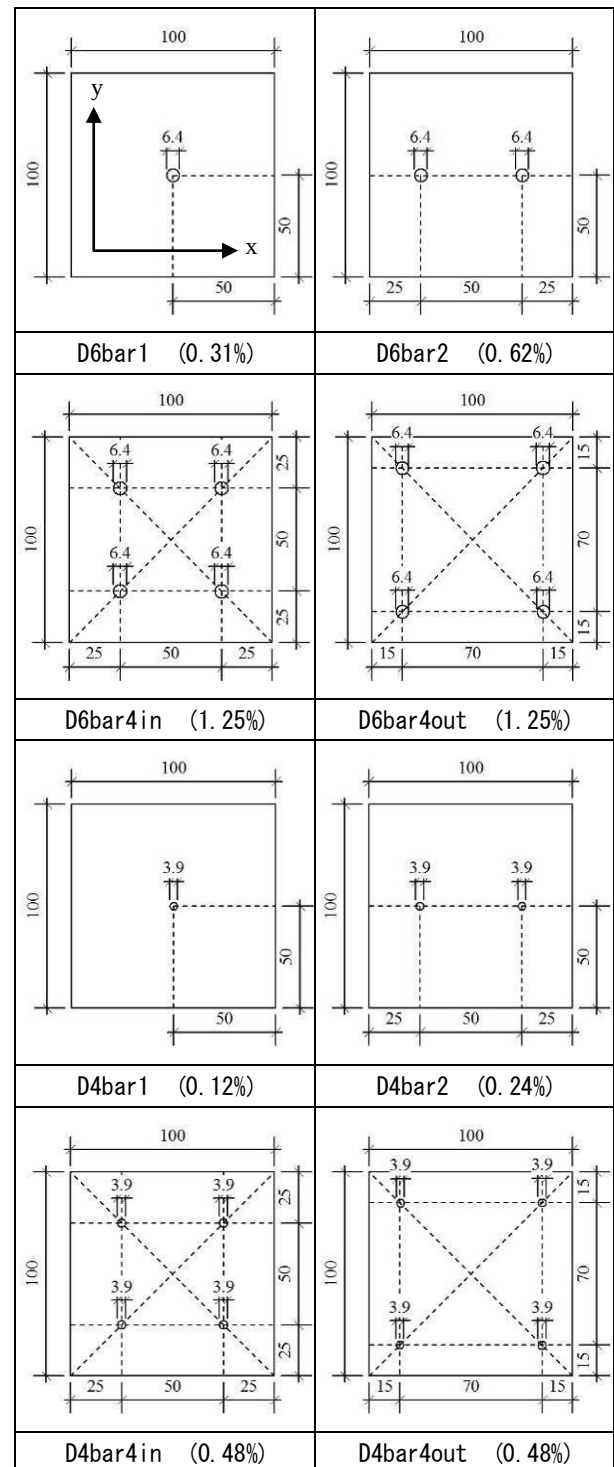


図-2 シリーズ名および配筋図（鉄筋比：%）

験体に、図-2 に示すように鉄筋を配することによって作製した。x 軸および y 軸は D6bar1 の配筋図中の通り定義する。型枠は、金属製の型枠の両端を木製の型枠と置き換え、任意の位置に穴をあけることで鉄筋をそれぞれ配置した。配筋位置は 4 パターンあり、D4 及び D6 においてそれぞれ 2 体または 3 体ずつ検討を行った。

角柱試験体による一軸引張試験は、菊田が提案している試験方法⁹⁾を用いた。HFRCC は、ひずみ硬化挙動を継続する領域において、ひび割れの発生に伴う 2 次曲げが極わずかしき発生しないため、両端ピンのように試験体の拘束が低い支持条件であっても十分にその材料が有している性能を評価できることが確認されている。そのため、この試験方法では両端ともにピン支持としている。装置への設置状況を図-3 左に示す。また、図-3 右に示すように試験体端部を機械的に挟み込む 2 方向楔型治具を用い、その内部に設けられたテーパ部分のチャックと試験体との摩擦力で引張力を試験体に伝達している。チャックの締付けにより、チャックの先端から検長区間に向かって 20mm 程度の範囲に局所的な応力集中が起こることが解析より確認できている。そこで、挟み込み長さ 90mm と局所的な応力集中区間 20mm を考慮して、試験体の両端から 130mm の部分はガラス繊維シートを巻きつけて接着することによって補強し、チャックの締付け応力による局所的な破壊を予防するとともに、引張力による変形領域を試験体中央部に明確化した。変位計測には試験体の 4 面に高感度変位計を取り付け、検長区間 140mm で計測することとした⁹⁾。

2.4 評価項目

配筋された HFRCC の引張性状における評価項目は、ひび割れ発生応力、鉄筋の降伏、最大引張応力および終局引張ひずみとした。これらのうち、HFRCC の引張性状評価において特に重要となる終局ひずみに関しては、ひずみ硬化挙動から軟化挙動に移行する点、すなわちあるひび割れの拡幅を伴いながら荷重が低下し始める点を終局引張ひずみと定義した⁹⁾。

3. 実験結果および考察

本論文では、鉄筋の一軸引張載荷試験の結果と本実験の結果を比較するため、荷重—ひずみ関係のグラフを用いた。図-4 に示すグラフの形状は、初期ひび割れまでの初期勾配 (図中の(i))、初期ひび割れから鉄筋の降伏までの第 2 勾配 (同(ii)) および、鉄筋降伏後の第 3 勾配 (同(iii)) の 3 段階での挙動を確認できた。図-4(c) に D6bar4in における(i)、(ii)および(iii)を示す。また、図-4(c)および(d)における破線のグラフは鉄筋の直接引張試験結果を示しており、名称 Dn_n の左 Dn は鉄筋径を、右 n は鉄筋本数を示す。除荷時の各面の変形量をひび割

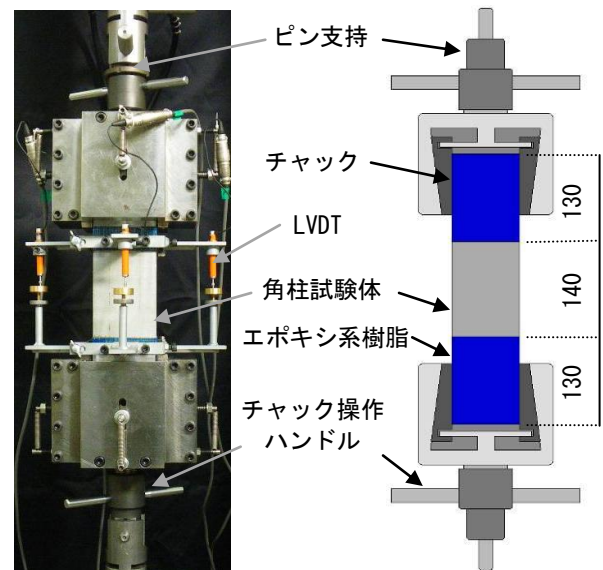


図-3 2 方向楔型治具の設置状況および断面概略図⁹⁾

れ本数で除することによって求めた平均ひび割れ幅とひび割れ本数の関係を図-5 に示す。また、各試験体の平均ひび割れ幅とひび割れ本数の関係および対面変位差により生じる曲率と平均ひずみの関係を示したグラフを図-6 および図-7 に示す。

3.1 鉄筋比による影響

図-4 より、荷重とひずみの関係は同じ鉄筋位置の場合は鉄筋径が異なる場合でも、同様の傾向を示した。D6bar1 および D4bar1 は鉄筋降伏後、ひずみが 1%に到達する前に最大強度に達し、疑似ひずみ硬化を 0.5%程度示して終局状態に至った。その後は緩やかに軟化し、鉄筋の引張試験結果に漸近するような破壊を示したことから、ひび割れが貫通し、繊維の架橋効果がほぼなくなっていると考えられる。D6bar2 および D4bar2 は、ひずみが 1~3%の間で最大強度に達した。鉄筋降伏後では若干のひずみ硬化を起こしながらひび割れが進展し、最大強度後は鉄筋の一軸引張試験結果に漸近するように緩やかな軟化曲線を示した。D6bar4out および D6bar4in では最大強度に達するまで安定して疑似ひずみ硬化が進展し、全ての試験体において引張終局ひずみが 3%を超える値を示した。一方、D4bar4out および D4bar4in では、グラフ形状において D6 と同様の傾向を示しているが、D6 に比べ最大強度および引張終局ひずみがともに同程度の割合で小さくなる結果となった。引張終局ひずみが小さくなった理由として、局所的にひび割れが発生したときに解放されるエネルギー量が D4 および D6 の両方の場合において同程度だとすると、D6 に比べ耐荷重の小さい D4 の方が同じエネルギー量を負担するために必要な変形量が大きく、D4bar4out や D4bar4in のように、全体として小さい変位であっても狭い領域で鉄筋が大きく変形し、鉄筋が終局状態に至ったと考えられ、その結果、引張終局ひずみが

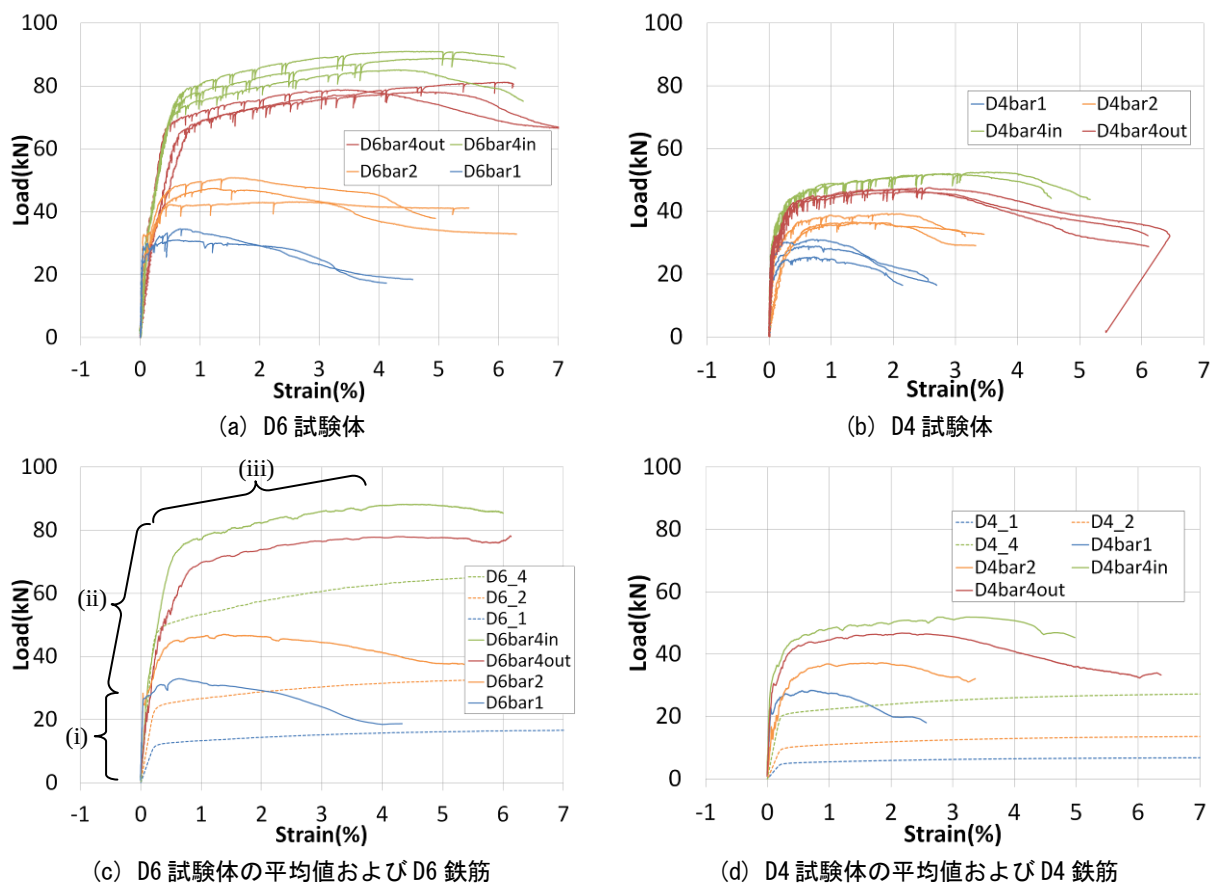


図-4 引張荷重-ひずみ関係

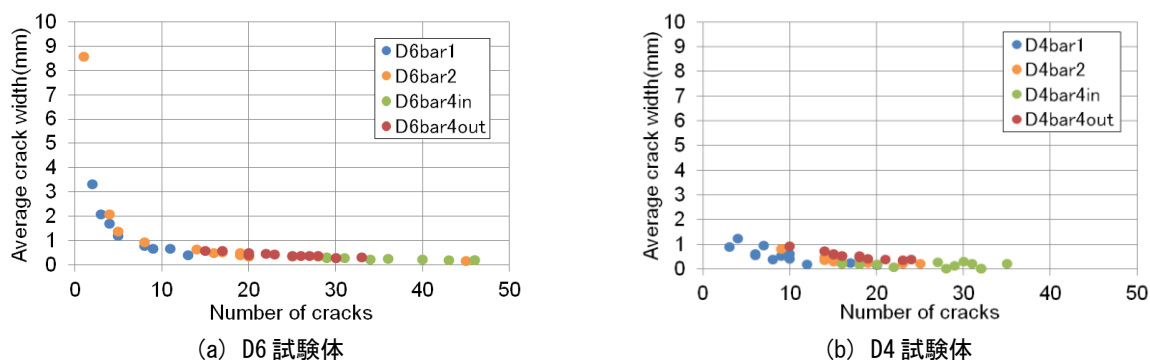


図-5 平均ひび割れ幅-ひび割れ本数関係

小さくなったと考えられる。

3.2 鉄筋位置による影響

鉄筋 4 本を配した試験体を比較すると、図-4 より、D6bar4out と D6bar4in、D4bar4out と D4bar4in のようにそれぞれ内側と外側に配筋した試験体では、鉄筋を内側に配した試験体に比べ、外側に配した試験体の方が若干強度が低下する結果となった。また、図-4 (b), (d) より、D4 の試験結果を比較すると、D4bar4in に比べ、D4bar4out の方が疑似ひずみ硬化域が狭くなる結果となり、一つの試験体において、ひずみが 6.5%程度に達した時点で鉄筋が破断した。このことから、全ての試験体に共通して、ひび割れの局所化による曲げ変形が発生することで鉄筋

に対して局所的に大きな応力が作用するが、特に、D4bar4out のように鉄筋がより外側にあることによって縁応力が増大し、鉄筋がひずみ硬化域を超えてしまったと考えられる。

また、図-4 より、各配筋位置を比較すると、D4bar4in および D6bar2 のように同程度の鉄筋比であっても、中心に配筋するよりも 4 面にバランスよく配筋することがひび割れ分散性の向上や疑似ひずみ硬化の進展などに対して有効であることが確認できた。

3.3 鉄筋との複合化によるひび割れ分散性への影響

図-5 より、D6 および D4 の各試験体において、4 面にバランスよく 4 本配筋することでひび割れの分散性が

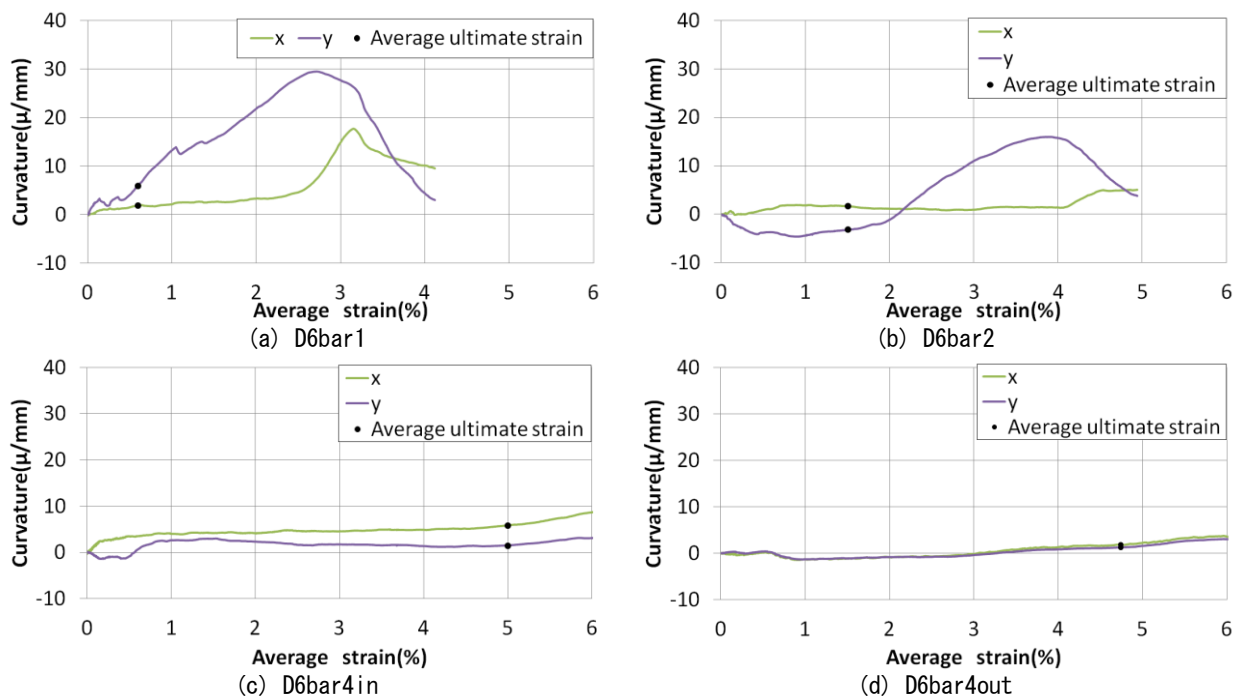


図-6 曲率-平均ひずみ関係 (D6)

向上することが確認できる。しかし、4 本配筋した試験体において、鉄筋をより内側に配した試験体に比べ外側に配した試験体の方がひび割れの分散性が低下する結果となり、ひび割れ本数は D6bar4in に比べ D6bar4out では平均して一面当たり約 11 本、D4bar4in に比べ D4bar4out では約 9 本低下した。鉄筋比が同じ場合、ひび割れの分散性は鉄筋位置の影響を受け、図心から鉄筋までの距離によって変化することが示された。鉄筋がより外側になり、ひび割れ縁に近くなることで鉄筋が負担するエネルギー量が増加したと考えられ、HFRCC 部分が負担していたエネルギー量を鉄筋が代わりに負担しており、そのため HFRCC 部分のひび割れ本数が減少したと考えられる。しかしながら、鉄筋 4 本を外側に配したシリーズでは、鉄筋によるひび割れ幅の制御により、目視の難しい極微細なひび割れが多数発生している可能性があり、その評価が今後の課題である。

3.4 鉄筋が曲率に与える影響

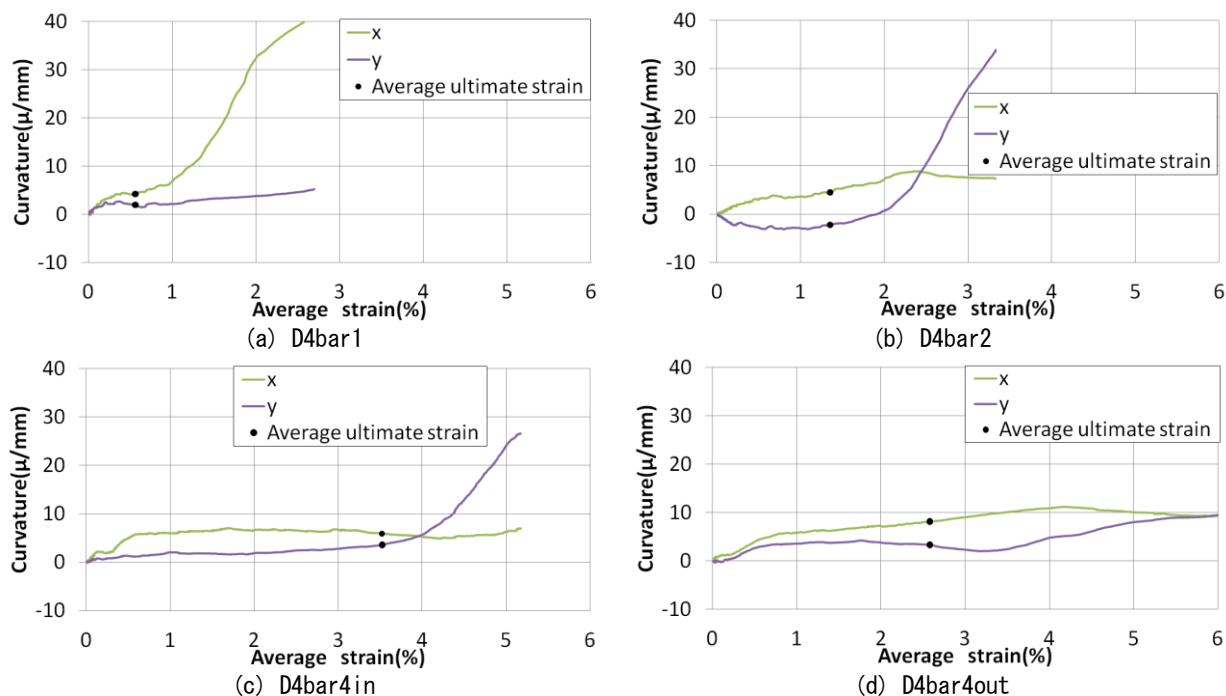
曲率は対面する試験体面の変位差により生じるものであり、曲率が大きくなるほど対面に生じるひび割れの進展に差があることを示す。また、曲率が生じるということは純粋な引張力だけでなく、2 次曲げも生じていることになる。2 次曲げは、材料が不均質であることが原因で生じ、骨材による局所的なクラックアレスト効果により発生する⁹⁾。各配筋パターンにおける試験体は 3 体であるが、代表的な 1 体から得られたひずみと曲率の関係を図-6 および図-7 に示す。図中の黒のプロットはそれぞれの試験体の終局引張ひずみを示している。

図-6 より、D6bar1 および D6bar2 では、ひずみ 1%前

後で終局状態に至った。D6bar1 は中心に 1 本のみの配筋であるが、中心から試験体表面までの距離が大きく、表面からのひび割れ発生に対して鉄筋がひび割れ幅制御に寄与していないものと考えられる。また、D6bar2 は x 方向にのみ 2 本の鉄筋を配しており、y 方向には配しておらず、y 方向に対して D6bar1 と同様に鉄筋がひび割れ幅制御に寄与していないことが考察される。一方、x 方向に関しては曲率が小さく、ひび割れ幅制御に対して鉄筋が有効に作用していることが確認できる。また、D6bar1 および D6bar2 共に、大変形時には断面中央付近が引張縁になるため、曲率を小さくする方向に鉄筋が作用し、終局後も対面のひび割れがバランスをとるように進展したと考えられる。

一方、D4bar1 および D4bar2 では、同様に初期の段階から曲率が增大して終局状態に至ったものの、終局状態以降の曲率の増大は D6bar1 および D6bar2 に比べて大きい。大変形域においては曲率を小さくする方向に鉄筋が作用しておらず、対面のひび割れの進展は小さいことが考えられる。

鉄筋 4 本を配したシリーズではいずれもひずみ 4%前後まで曲率が小さく、鉄筋が 2 次曲げを制御できていることが分かる。また、鉄筋を 2 本以下とした場合は終局状態以前、すなわち疑似ひずみ硬化域での曲率はいずれもおよそ $5\mu/\text{mm}$ に満たない値を示しており、終局後の値と比べると小さい値である。これらのことから、鉄筋を用いることで機械的に曲率が抑制され、これにより疑似ひずみ硬化域を大きく、ひび割れ分散性が高まりやすい 2 次曲げの小さい状態となることが確認された。



図ー7 曲率-平均ひずみ関係 (D4)

4. まとめ

- (1) いずれの鉄筋径の場合も、同じ鉄筋配置において、引張荷重とひずみの関係はそれぞれ同様の傾向を示すことから、鉄筋比による影響は小さいことが確認された。D6 に比べ D4 は、ひび割れ制御における局所的な変形が大きく、全体として小さい変形であっても終局状態に至ったと考えられる。
- (2) 4 本の鉄筋を用いたシリーズの結果より、鉄筋は断面の図心からある程度離れた位置にバランスよく配置することで大きな複合効果が得られることが確認できた。しかし、図心からの距離が大きくなるにつれ、鉄筋が制御するひび割れ幅は大きくなり、縁応力も増大するため、局所的な応力集中により、鉄筋が終局状態に至りやすい。
- (3) 疑似ひずみ硬化域は曲率が小さい領域において進展しやすい傾向を示した。試験体断面に対してバランスよく配筋することによって機械的に曲率を小さい状態に保つことができ、疑似ひずみ硬化域を大きくできると確認された。

参考文献

- 1) A. Peled, M. Cry and S. P. Shah : Hybrid Fibers in High Performances Extruded Cement Composites, Fiber-Reinforced Concrete(FRC) BEFIB' 2000, RILEM, pp.139-147 , 2000
- 2) 川又篤, 三橋博三, 金子佳生, 福山洋 : ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料の靱性能に関

する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp. 235-240 , 2001

- 3) 田邊佑介, 中村匠, 前田匡樹 : ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いた柱及び耐震壁の構造性能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.1411-1416, 2008
- 4) 菊田貴恒 : ハイブリッド型繊維補強セメント複合材の材料設計と性能評価に関する研究, 平成 21 年度 東北大学 審査学位論文(博士), Jan.2010
- 5) Minoru Kunieda, Mohamed Hussein, Naoshi Ueda : Enhancement of Crack Distribution of UHP-SHCC under Axial Tension Using Steel Reinforcement, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.1, pp.49-57, Feb. 2010
- 6) 三橋博三, 六郷恵哲, 国枝稔 : コンクリートのひび割れと破壊の力学 -現象のモデルと制御-, 技報堂出版, Jul. 2010, p.5
- 7) Evans, K. E. and Gibson, A. G. : Prediction of the maximum packing Fraction Achievable in Randomly Oriented Short-fibre Composites, Composites Science and Technology, Vol.25, pp.149-162, 1986
- 8) 菊田貴恒, 三橋博三, 秋田宏 : ひずみ硬化セメント複合材料の一軸引張試験用治具の開発に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.81-90, May. 2012
- 9) 秋田宏, 小出英夫, 三橋博三 : コンクリートの直接引張試験における 4 つの誤解, コンクリート工学論文集, Vol.16, No.1, pp.77-86, 2005