論文 UFC のひび割れ分散性を向上させる鉄筋量に関する基礎的検討

森 亮太*1·中家康宏*1·國枝 稳*2·佐々木一成*3

要旨:超高強度繊維補強コンクリート(UFC)は、超高強度マトリックスに高強度鋼繊維を用いておりひび割 れ幅が極めて小さいことが特徴である。一般的には、ひび割れの発生を許容しない適用方法が採用されてい るが、この微細なひび割れの優位性を活用できる可能性がある。少なくとも、設計上はひび割れを許容しな いとしても、発生後の挙動を制御することも重要である。本研究では、鉄筋比や断面形状の異なる鉄筋補強 UFC 部材を用いた一軸引張試験を行い、ひび割れ分散性を向上させるための鉄筋量について基礎データを得 た。特に、0.6%程度以上の鉄筋比にすることで、複数微細ひび割れ部材の作製が可能であった。 キーワード:UFC、一軸引張試験、ひび割れ分散性、鉄筋補強

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(Ultra high strength Fiber reinforced Concrete:以下 UFC と言う)は特殊粉体 材料と高強度繊維を用いることで,圧縮強度 180N/mm² 以上,引張強度 8.8N/mm²以上の力学特性を発揮する。一 般には蒸気養生を行うものが多いが,常温硬化型で現場 打設できるものも開発され¹⁾,製造上の多様性が増して いるといえる。現状では土木学会の指針²⁾を基本に,ひ び割れを許容しない適用が積極的に進められており,例 えば,日本初のプレストレスト UFC 橋梁では,10 年後 の調査結果³⁾なども報告されている。

UFC は超高強度マトリックスに超高強度繊維を組み 合わせた複合材料であり、一般的な繊維補強コンクリー トに比べてひび割れ幅が小さいのが特徴である。今後、 UFC の適用を高度化させるためには、この微細ひび割れ の優位性を活用した新たな利用法を模索することが必要 となる。少なくとも、設計上はひび割れを許容しない場 合でも、ひび割れ性状の知見を蓄積し、ひび割れの制御 を積極的に行う必要がある。これにより、例えばプレス トレストコンクリート部材の配力筋の考え方を整理する ことも可能となる。

構造部材としての設計方法については、繊維の架橋力 を引張軟化曲線として評価し、設計に用いる方法が提案 されている⁴⁰。しかし、鉄筋補強した場合のひび割れ分 散性については、一般的な FRC や複数微細ひび割れ型セ メント系複合材料などでは、ひび割れ分散性を向上させ る鉄筋の効果について実験的あるいは解析的な検討^{50,0} も行われているが、UFC も含めて設計で利用できる知見 まで体系化されていないのが現状である。

本論文では、断面の寸法および鉄筋量の異なる UFC の

ー軸引張試験により,ひび割れ分散性を確保するための 鉄筋比について実験的な知見を得ることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験では、常温硬化型 UFC¹⁾を用いた。セメント等の反応性微粉末と微粉細骨材を混合したプレミックス粉体,水,細骨材,および特殊高性能減水剤(SP)で構成されている。本実験に用いた常温硬化型 UFC の配合およびフレッシュ性状としてフローを表-1 に示す。鋼繊維には高強度鋼繊維を使用した。繊維の引張強度は2,000N/mm² 以上で、形状は直線状であり、長さ 13mm, 直径 0.16mm である。

練混ぜには容量 120 リットルの 2 軸強制練りミキサ (シャフトレス)を用い、1バッチあたりの混練量を 40 リットルとした。合計 7 バッチの練混ぜを行い、2 バッ チ目に強度試験用供試体の試料を採取した。

2.2 供試体の寸法および作製方法

表-2 に本実験の検討ケースを示す。図-1 に示すように試験体長さはいずれも 1800mm とし、断面を50×50mm, 50×100mm, 50×200mm, 100×100mm の4パターン,鉄筋比を0, 0.3, 0.6, 1.27%の4パターンとし計13ケースを作製した。鉄筋は、すべてD6(降伏強度458 N/mm²)を用いた。打設後28日間, 20℃の恒温室内で湿布養生を行った。なお、1ケースにつき同一供試体を2体作製した。

強度試験用供試体には、圧縮強度試験用として ϕ 50×100mm、 ϕ 100×200mmの2種類とし、曲げ強度試験用には、40×40×160mmと100×100×400mmの2種類とした。曲げ強度試験用供試体には、はり高さの0.3倍の

*1 岐阜大学 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)
*2 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 博士(工)(正会員)
*3 (株)大林組 技術研究所 構造技術研究部 副主任研究員 修士(工)(正会員)

表-1 UFC の配合

W/B	単位量(kg/m ³)				繊維	フロー
(%)	水	プレミックス紛体	細骨材	減水剤	(kg)	(mm)
15.5	230	1830	330	32	157	278×276

ケース	呼び名	UFC の断面 (mm)	鉄筋 (鉄筋比)	N 数
1	50-50-0	50~50	—	2
2	50-50-1	30×30	D6 1本 (1.27%)	2
3	50-100-0		—	2
4	50-100-1	50×100	D6 1本(0.6%)	2
5	50-100-2		D6 2本 (1.27%)	2
6	50-200-0	50×200	—	2
7	50-200-1		D6 1本 (0.3%)	2
8	50-200-2		D6 2本 (0.6%)	2
9	50-200-4		D6 4本 (1.27%)	2
10	100-100-0	100×100	—	2
11	100-100-1		D6 1本 (0.3%)	2
12	100-100-2		D6 2本 (0.6%)	2
13	100-100-4		D6 4本 (1.27%)	2

表-2 実験ケース





深さの切欠きを脱型後コンクリートカッターを用いて導入し,3等分点載荷を行った。ロードセル(容量100kN) およびクリップゲージ(容量5mm)を用いて荷重および CMODを測定した。

2.3 一軸引張試験

図-2 に一軸引張試験の治具および試験体を示す。供 試体端部に厚さ 22mm の鋼板を配置し,UFC 側には定着 用の異形鉄筋 (D13,長さ 200mm または 100mm)を各4 本溶接するとともに,供試体外側に向けてネジ節鉄筋(径 29mm)を1本溶接し,カップラーを介して引張冶具に固 定した。片側の端部にはロードセル(容量 300kN)を設 置し,油圧ジャッキにより供試体に引張力を加えた。引 張試験は,UFC の材齢 28~30 日の間に実施した。

計測は4つの供試体側面のうち2面で全体の伸びを計 測するため、1200mmの区間について高感度変位計(ス トローク25mm)を設置し、さらに1面に試験区間にお けるひび割れ幅を計測するため、検長100mmのパイ型 変位計(以下パイゲージと言う)を12個設置した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

表-3 に材齢 28 日における圧縮強度の試験結果を示 す。ここでは 3 体の平均値を算出した。 ϕ 50×100mm で は, 圧縮強度が 185N/mm²程度であったが, ϕ 100×200mm では, 170N/mm²となり, ϕ 50×100mm の結果に比べて小 さくなった。

3.2 曲げ強度

表-4 に材齢 28 日における曲げ強度の試験結果を示 す。40×40×160mmでは6体の平均を,100×100×400mm は2体の平均値を算出した。曲げ強度に関しては,供試 体寸法の影響は少なく,いずれも 20N/mm²程度の曲げ強 度であった。

3.3 一軸引張試験結果

表-5 に一軸引張試験におけるひび割れ発生荷重,最 大荷重および引張強度を示す。ひび割れ発生荷重は,目 視においてひび割れ発生を確認することが困難であるた め,荷重-変位曲線の変曲点から求めた。また,引張強



図-2 一軸引張試験図 (50-200-4)

度については,鉄筋を配置していない供試体について, 最大荷重を供試体の断面積で除して求めた。ひび割れ発 生荷重については,鉄筋の追加によりやや大きくなる傾 向にあった。一般に UFC は自己収縮ひずみが大きく,本 実験で使用した UFC も 182 日で 660×10⁻⁶の自己収縮ひ ずみとなることが分かっている¹⁾。なお,UFC の収縮が 大きいほど,鉄筋による拘束効果によってひび割れ発生 荷重が小さくなることが予想されたが,本研究の範囲内 の鉄筋比ではその影響は認められなかった。先述のとお り,当該 UFC は 20℃の封緘養生の場合,182 日程度で自 己収縮ひずみがほぼ収束することが分かっており,材齢

表-3 圧縮強度

	φ50×1	00mm	φ100×200mm		
バッチ	圧縮強度	平均	圧縮強度	平均	
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	
	188.4		174.2		
2	182.6	185.1	168.2	170.2	
	184.4		168.1		

表-4 曲げ強度

	40×40>	<160mm	100×100×400mm		
バッチ	曲げ強度 平均		曲げ強度	平均	
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	
	17.8		20.0		
	24.3		20.7		
r	24.1	21.1	- 20.2	20.2	
2	16.9	21.1	-	20.5	
	23.7		-		
	19.4		-		



28日で試験を実施したことにより,発生したひずみが小 さかった可能性も考えられる。

最大荷重については、鉄筋の追加により大きくなる傾向にあった。最大荷重を断面積で除した引張強度(RCについてはみかけの引張強度)については、鉄筋比0%の場合には 7.4~8.7N/mm²の範囲にあり、供試体断面が大きい 50-200-0 および 100-100-0 において引張強度がやや小

ケース	呼び名	ひび割れ 発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	みかけの引張強度 (N/mm ²)			
				鉄筋比 0%	鉄筋比 0.3%	鉄筋比 0.6%	鉄筋比 1.27
1	50-50-0	6.5	19.4	7.8	-	-	-
2	50-50-1	12.8	27.4	-	-	-	11.0
3	50-100-0	26.4	43.5	8.7	-	-	-
4	50-100-1	28.3	39.6	-	-	7.9	-
5	50-100-2	38.1	53.3	-	-	-	10.7
6	50-200-0	48.7	61.5	6.2	-	-	-
7	50-200-1	58.5	67.0	-	6.7	-	-
8	50-200-2	72.8	92.4	-	-	9.2	-
9	50-200-4	85.7	123.1	-	-	-	12.3
10	100-100-0	68.8	74.0	7.4	-	-	-
11	100-100-1	46.7	77.5	-	7.8	-	-
12	100-100-2	65.3	80.0	-	-	8.0	-
13	100-100-4	80.4	127.8	-	-	-	12.8

表-5 ひび割れ発生荷重と最大荷重(2体の平均値)



さい結果となった。

3.4 一軸引張試験におけるひび割れ分散性状

(1) 最大荷重時のひび割れ性状

図-4~6 に各シリーズの最大荷重時のひび割れ図を 示す。目視でのひび割れの確認は困難であったため,試 験終了時にラッカースプレーを噴霧してひび割れを確認 した。なお,鉄筋比0%のケースではひび割れの分散がほ とんど認められなかったため図示していない。

図示されたすべてのケースにおいて,鉄筋の配置により ひび割れが複数本発生していることが分かる。その中で も,鉄筋比 0.3%のケースでは,供試体の断面積の大きさ によらずひび割れの分散が不均一であることがわかる。 これは,一様なひび割れ分散性を得るためには 0.3%の鉄







筋比では不十分であることを示している。一方,鉄筋比 0.6%以上であれば供試体全体にほぼ一様にひび割れが 分散しており,鉄筋配置によりひび割れ分散性が向上す る結果となった。

(2) 最大荷重時の軸方向変位分布 (パイゲージ)

図-7~9に最大荷重時の各パイゲージの値を示す。先述のひび割れ分布では、鉄筋比 0.3%の場合には、ひび割



図-6 ひび割れ分布(鉄筋比1.27%)

れが分散していない結果となったが,パイゲージの値に ついても,供試体軸方向にいずれも 0.05mm 以下の値と なっており,ひび割れ性状と対応している。なお,鉄筋 比 0.3%の場合において 50-200-1 は試験区間外での破壊 であったためパイゲージの値に変化はなかった。また, 100-100-1 ではパイゲージ 1 の位置で偏心しマイナスの 値が出力する結果となった。鉄筋比 0.6%の場合には, 0.1mm 以上 (0.1%のひずみ相当)の値を呈しているが, 供試体軸方向のばらつきがやや大きい場合もあった。鉄 筋比 1.27%の場合には,各パイゲージの値は 0.1mm 以上 となっているが,鉄筋比 0.6%の値に比べて格段に大きく なるわけではなく,供試体軸方向に同程度の値を呈する 傾向になった。

このことは,鉄筋比 0.6%から 1.27%の間である程度ひび割れ間隔が飽和していることを示している。

4. まとめ

本研究では,鉄筋比や断面形状の異なる鉄筋補強 UFC 部材を用いた一軸引張試験を行い,ひび割れ分散性を向 上させるための鉄筋量について基礎データを得た。以下



(a) 50-200-1



(b) 100-100-1

図-7 供試体軸方向の変位分布(鉄筋比0.3%)



(a) 50-100-1



(b) 50-200-2





に主な結論を示す。

1) 鉄筋補強された UFC では、目視にて確認ができない ほど微細なひび割れを呈する優位性が認められた。



(a) 50-50-1







 $2 \ 3$

1

9 10 11 12

匮 0



(d) 100-100-3 図-9 供試体軸方向の変位分布(鉄筋比1.27%)

2)鉄筋で補強されたことによるひび割れ発生荷重の低 下は、本研究で対象とした鉄筋比の範囲では認められ なかった。当該 UFC は 20℃の封緘養生において 182 日程度で自己収縮ひずみがほぼ収束することが分か っており、材齢 28 日で試験を実施したことにより、発 生したひずみが小さかった可能性も考えられる。

3)ひび割れ分散性については、鉄筋比 0.3%のケースでは、 供試体の断面積の大きさによらずひび割れの分散が 不均一となった。これは、一様なひび割れ分散性を得 るためには 0.3%の鉄筋比では不十分であることを示 している。一方、鉄筋比 0.6%以上であれば供試体全体 にほぼ一様にひび割れが分散していた。

4)パイゲージの測定結果もおおよそ前述のひび割れ性状 と対応していた。鉄筋比 0.6%の場合には、0.1mm 以上 (1%のひずみ相当)の値を呈しているが、供試体軸方 向のばらつきがやや大きい場合もあった。

鉄筋比 1.27%の場合には、各パイゲージの値は 0.1mm以上となっているが、鉄筋比 0.6%の値に比べて 格段に大きくなるわけではなく、供試体軸方向に同程 度の値を呈する傾向になった。

このことは,鉄筋比 0.6%から 1.27%の間である程度 ひび割れ間隔が飽和していることを示しており,言い 換えればひび割れ分散性の安定的な確保には 0.6%以 上の鉄筋比が必要である。

本研究では、ごく限られた供試体断面寸法や形状、鉄 筋径で得られた知見であり、更なる実験データの蓄積が 必要ではあるが、このような知見を鉄筋で補強された UFCの利用拡大に向けて蓄積すべきである。

参考文献

- 玉滝浩司,吉田浩一郎,石関嘉一,平田隆祥:常温 硬化型超高強度繊維補強コンクリートの諸性質,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.208-213, 2012.
- 2) 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.
- 3) 河野克哉,川口哲生,武者浩透,小林忠司:プレス トレストコンクリート橋に日本で初めて適用され た超高強度繊維補強コンクリートの供用 10 年間の 耐久性,コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.262-267, 2014.
- 土木学会:鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材設計 指針(案),コンクリートライブラリー97,1999.
- M. Kunieda, M. Hussein, N. Ueda and H. Nakamura: Enhancement of Crack Distribution of UHP-SHCC under Axial Tension Using Steel Reinforcement, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.1, 49-57, 2010
- 小倉大季,国枝稔,中村光:鉄筋補強した繊維補強 セメント系複合材料の引張破壊解析と架橋力に着 目した破壊挙動評価,土木学会論文集 E2, Vol. 72, No. 3, pp. 249-267, 2016.