

新規収縮低減剤の添加によるUFCのひび割れ抵抗性向上に関する研究

太平洋セメント(株)	工(修)	○川口	哲生
太平洋セメント(株)	正会員	工(博)	河野 克哉
北海道大学大学院	工(博)	橋本	勝文

Abstract : In this study, we examined the mechanical properties and fracture energy of the UFC with the addition of Shrinkage Reducing Agent (SRA). Furthermore, in the RC members using UFC, the effect of the addition of the SRA on the crack initiation load and crack width were investigated. As the results of this study, by the addition of SRA, fracture energy and initial crack strength was increased. And it inhibited the increase of crack width of RC members using UFC.

Key words : Ultra high strength fiber reinforced concrete(UFC), Shrinkage reducing agent (SRA), Fracture energy, double-pulling test

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（以降、UFC と表記）は、高強度、高靱性、高耐久性の性能を有しており¹⁾、その特徴を活用することで、より優れた性能を有する部材を成立させることが可能である。しかし、養生中、UFC に発生する収縮ひずみが大きいと、異形鉄筋や異形 PC 鋼棒などの補強鋼材を UFC 内部に配置すると、UFC の収縮と補強鋼材による拘束に起因して、プレストレス導入以前に、ひび割れの発生やひび割れ発生強度の低下などが懸念される。そこで、UFC 向けに開発された新規収縮低減剤(以降、SRA を表記)を添加し、養生中に発生する収縮を抑制した UFC の力学特性と破壊エネルギーについて検討を行った。さらに、内部に補強鋼材を配置した部材の両引試験を実施して、SRA の添加がひび割れ発生荷重とひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 試験水準と使用材料

表-1は両引試験の試験水準を示したものであり、試験要因は、かぶり、SRA添加の有無である。使用した短繊維は、鋼繊維であり、繊維混入率は2.0 vol.%である（以降、FM2.0%と表記）。ここでは、かぶりを変化させることで、軸方向鋼材比を変化させた。表-2は使用材料、表-3は示方配合を示したものである。ここでは、土木学会より刊行されている「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」¹⁾（以降、指針（案）と表記）に準拠した標準配合粉体を使用し、UFC専用の鋼繊維、高性能減水剤を用いた。使用したSRAはUFC向けに新規に開発された高級アルコール系のものであり²⁾、予備試験により、その添加量を15kg/m³と設定した。ただし、難溶性であるため、水道水に対して、外割りで添加した。また、試験体の成型後、1次養生として、20℃ 48時間の封緘養生を行い、その後、最高温度を90℃として、48時間保持する標準熱養生¹⁾を行った。

2.2 試験概要

図-1は、両引試験の概要を示したものである。ここでは、試験体長さを500mmとして、断面寸法を82×82mmから42×42mmまでの範囲で変化させた。試験体断面の中心位置に配置した補強鋼材は、異型鉄筋（D22 SD345）である。成型に際して、異型鉄筋の長手軸方向中心部に耐熱性に優れたひずみゲージを貼り付け、養生中に発生するひずみを連続的に計測した。両引試験においては、静的単調に、軸方向鋼材を引っ張ることで、試験体に引張力を加えた。載荷に際しての計測項目は、載荷荷重、ひ

表-1 試験水準 (両引試験)

No	名称	繊維混入率 (vol.%)	試験体長さ (mm)	かぶり (mm)	断面寸法 (mm×mm)
1	FM2.0%	2.0	500	10	42×42
2	FM2.0%	2.0		20	62×62
3	FM2.0%	2.0		30	82×82
4	FM2.0%+SRA	2.0		10	42×42
5	FM2.0%+SRA	2.0		20	62×62
6	FM2.0%+SRA	2.0		30	82×82

表-2 使用材料

種類	名称	記号	物性または成分
結合材	標準配合粉体	P	UFC 指針(案) ¹⁾ に準拠
砂	専用細骨材	S_a	UFC 指針(案) ¹⁾ に準拠
短繊維	鋼繊維	S_F	長さ:15mm, 径:0.2mm, アスペクト比:75, 引張強度:2700N/mm ² 以上
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	収縮低減剤	SRA	高級アルコールアルキレンオキシド付加物, 難溶性, 密度 0.98 g/cm ³
	消泡剤	T	シリコン系

表-3 示方配合

名称	繊維混入率 (vol.%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	標準配合粉体+専用細骨材 $P_a + S_a$	鋼繊維 S_F	高性能減水剤 SP (水に含む)	SRA (外割)
FM2.0%	2.0	180	2254	157	28	0
FM+SRA	2.0	180	2254	157	25	15

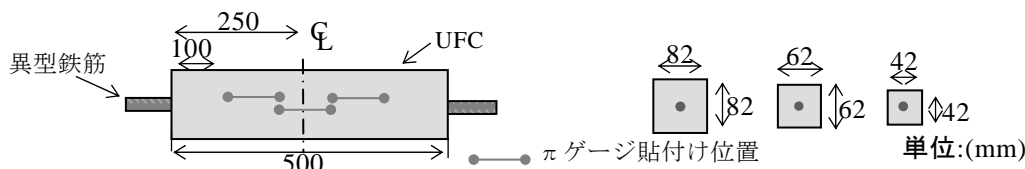


図-1 試験概要 (両引試験)

ひび割れ幅, 軸方向の鋼材ひずみ (長手軸方向中央部) とした。ひび割れ発生荷重, ひび割れ幅の計測では, 図-1に示す様に, 試験体軸方向にπゲージを千鳥状に貼り付けることによって各区間内の標点間距離の計測を行った。また, 管理試験として, 圧縮強度とひび割れ発生強度を計測した。ここで, ひび割れ発生強度は, 指針 (案) に従い割裂引張試験より求めた。さらに, 「切欠きはりをを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法」 (JCI-S-002-2003)³⁾に従い, 切欠きを有するはりの3点曲げ試験を行った (図-2)。試験体は, 100×100×400 mmの角柱供試体であり, 角柱の長手軸方向中央部に深さ30 mmの切欠きを設けた。クリップゲージを, 切欠き開口部に貼り付け, 開口変位を測定した。破壊エネルギー G_F はJCI-S-001-2003に従い, 式(1)を用いて算出した。

$$G_F = (0.75W_0 + W_1) / A_{lig} \quad (\text{N/mm}) \quad (1)$$

ここで, W_0 : 荷重-開口変位曲線下の面積(N・mm), W_1 : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事(N・mm), A_{lig} : はり破断部分面積(mm²)

なお, 供試体は, 最終的に破断しないため, 開口変位が10mmに達した時点で破断したものと仮定して計算した。

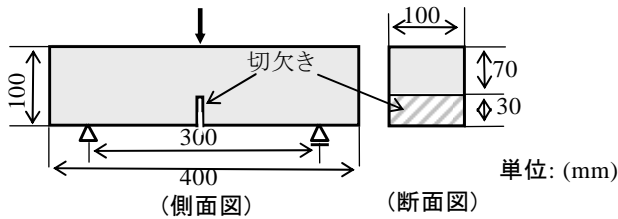


図-2 切欠きはりの3点曲げ試験

表-4 強度特性と破壊エネルギー

名称	圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー G_F (N/mm)
FM2.0%	217	9.5	16.2
FM2.0%+SRA	207	10.3	19.9

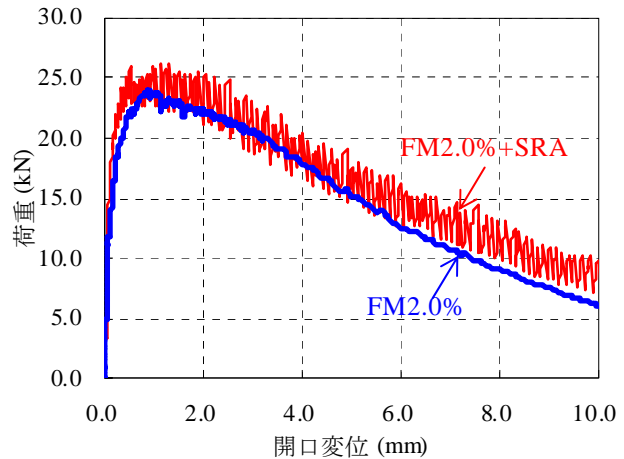


図-3 荷重-開口変位関係

表-5 試験結果一覧 (両引試験)

No.	名称	繊維混入率 (vol.%)	かぶり (mm)	ひび割れ発生荷重 (kN)	ひび割れ本数(本)	養生中に発生した収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)
1	FM2.0%	2.0	10	12.0	2	438
2	FM2.0%	2.0	20	31.2	2	352
3	FM2.0%	2.0	30	62.3	1	366
4	FM2.0%+SRA	2.0	10	26.6	1	318
5	FM2.0%+SRA	2.0	20	42.6	2	302
6	FM2.0%+SRA	2.0	30	75.6	2	288

3. 実験結果

3. 1 強度特性と荷重-開口変位関係

表-4 は、UFC の強度特性と破壊エネルギーを示したものである。FM2.0%の圧縮強度は 217N/mm^2 であるのに対し、FM2.0%+SRA の圧縮強度は、 207N/mm^2 となった。これは、収縮低減剤を外割りで添加しており、実質的に、ペースト量が増加したためであると考えられる。しかし、FM2.0%のひび割れ発生強度は、

9.5N/mm^2 であったのに対し、FM2.0%+SRA のひび割れ発生強度は、 10.3N/mm^2 となっており、収縮低減剤の添加により、ひび割れ発生強度が向上することが確認された。図-3 は、切欠きはりの曲げ試験(図-2)より得られた荷重-開口変位関係を示したものである。ここで、FM2.0%+SRA における最大荷重が FM2.0%のそれを上回っていることがわかる。また、FM2.0%では最大荷重以降、荷重が単調に低下しているが、FM2.0%+SRA では、大きな増減を繰り返して、荷重が全体的に低下していくことが分かる。試験終了後、破断面の目視観察を行ったが、両ケースとも鋼繊維の破断は認められなかった。そのため、収縮低減剤の添加により、UFC のマトリクスと鋼繊維の付着性能が向上し、短繊維が少しずつ抜出したため、図-3 の様な挙動を示したものと考えられる。また、表-4 に示した様に、SRA を添加することにより、破壊エネルギーは 23%程度増大しており、SRA の添加は引張特性の向上に有効であると考えられる。

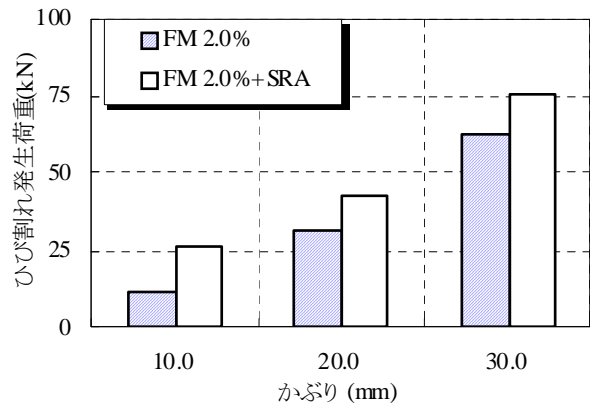


図-4 ひび割れ発生荷重とかぶりの関係

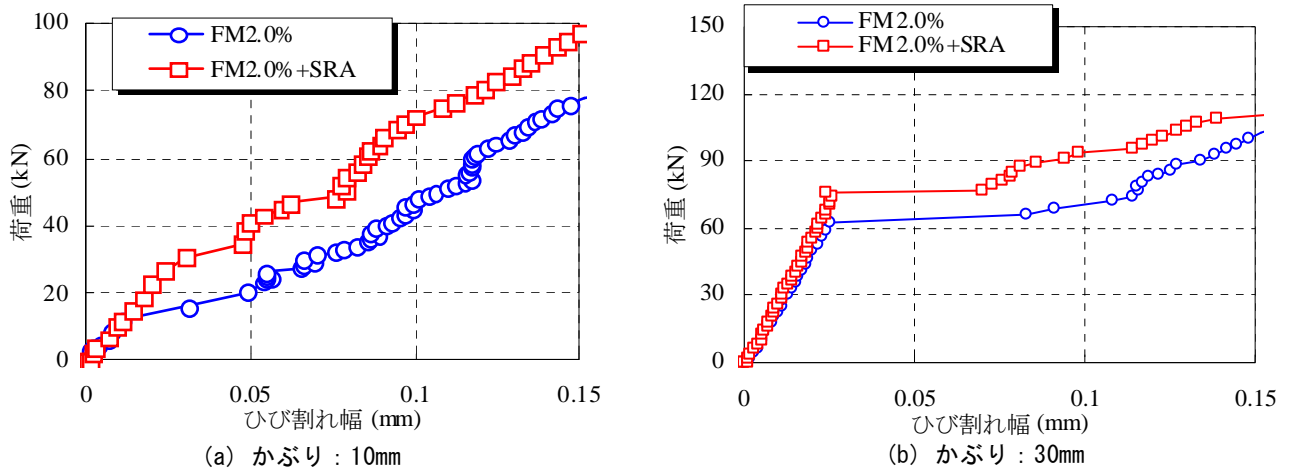


図-5 荷重とひび割れ幅の関係

3. 2 両引試験結果

図-4 は、両引試験(図-1)から得られたひび割れ発生荷重を示したものである。FM2.0%とFM2.0%+SRAを比較すると、SRAを添加することにより、かぶりにかかわらず、ひび割れ発生荷重が増大していることが確認された。これは、表-5に示す様に、SRAの添加により、発生する収縮ひずみが低減され、補強鋼材の拘束により発生する収縮応力が低減したためと考えられる。さらに、かぶりが10mmの水準では2.2倍、かぶりが20mmの水準では1.4倍、かぶりが30mmの水準では1.2倍となった。つまり、かぶりが小さくなるにつれて、ひび割れ発生荷重の増加率は高くなっており、かぶりを小さくする場合、すなわち軸方向鋼材比が小さくなる場合には、SRAの添加が有効であると考えられる。

図-5は、かぶり10mm(試験体No.1とNo.4)と30mm(試験体No.3とNo.6)の場合における荷重とひび割れ幅の関係を示したものである。図-5(a)と(b)を比べると、ひび割れ発生荷重の増加に伴い、急激にひび割れ幅が増加する傾向があるが、両者ともに、SRAの添加により、荷重-ひび割れ幅の関係は変化している。また、それぞれの水準において、SRAの添加により、同一荷重におけるひび割れ幅は小さくなっており、SRAの添加はひび割れ幅の抑制に効果を有していることがわかる。ここでは、SRAの添加により、養生中に発生するUFCの収縮が低減し、試験体中に発生する収縮による引張応力が減少したことと、UFC自身のひび割れ発生強度と破壊エネルギーが増大したため、このような傾向を示したものと考えられる。

4. 結論

(1) 収縮低減剤をUFCに添加することで、ひび割れ発生強度が10%程度増加し、破壊エネルギーが23%程度増加した。また、収縮低減剤を添加することにより、荷重-開口変位関係におけるポストピーク挙動が大きく変化した。

(2) 両引試験の結果、収縮低減剤の添加により、養生中に発生する収縮ひずみが低減されており、ひび割れ発生荷重が増加することが確認された。また、ひび割れ発生荷重は、かぶりが小さくなるにつれて、より増大することが確認された。さらに、収縮低減剤の添加により、荷重とひび割れ幅の関係は変化しており、ひび割れ幅の抑制に効果を有しているものと考えられる。

5. 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 No.113, 2004.9.
- 2) 佐藤正己，田中敏嗣，杉山真悟：収縮低減剤を添加した超高強度繊維補強コンクリートの収縮特性，第64回土木学会年次学術講演会講演概要集第V部門，pp.437-438, 2009
- 3) http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.html