

収縮低減剤と鋼繊維を混入した超高強度セメント系材料のひび割れ特性

太平洋セメント(株) 工(博) ○川口 哲生
太平洋セメント(株) 正会員 工(博) 河野 克哉

Abstract : In this study, we examined mechanical properties and fracture properties of UFC with the addition of two types of Shrinkage Reducing Agent (SRA). In addition to these properties, the effect of addition of SRA on crack initiation load and crack width were investigated in RC members using ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) and SRA. As the results of this study, addition of SRA increased fracture energy and initial crack strength. And addition of SRA prevented opening of crack width in RC members using UFC.

Key words : Ultra high strength cementitious composites, Shrinkage reducing agent (SRA), Fracture energy, Double pull out test, Crack width

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、高耐久性などの特徴を有しており¹⁾、それらを活用することで、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、養生中に、UFC 内部に発生する収縮ひずみが大きいため、異形鉄筋や異形 PC 鋼棒などの鋼材を UFC 内部に配置する場合、UFC の収縮と補強鋼材との拘束による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、筆者らは、UFC 向けに開発された新規収縮低減剤を添加した UFC について、検討を行ってきた²⁾。本研究では、UFC 向けに開発された新規収縮低減剤だけでなく、現行で市販されている収縮低減剤についても着目し、収縮低減剤（以降、SRA と表記）の種類、すなわち収縮低減効果の差異が、ひび割れ分散性（ひび割れ幅、ひび割れ間隔）に及ぼす影響について検討を行った。また、試験体の軸方向鋼材比を試験水準として、これらに及ぼす影響についても検討を行った。具体的には、内部に補強鋼材を配置した RC 部材のかぶりを変化させて、両引試験を実施した。ここで、使用した SRA は、市販されている低級アルコール系の SRA(以降、SRA1 と表記) と UFC 向けに新規に開発された高級アルコール系の SRA²⁾(以降、SRA2 と表記) である。

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の種類である。使用した短繊維は、長さ15mmの鋼繊維であり、繊維混入率は2.0 vol.%である（以降、FM2.0%と表記）。ここで、かぶりは10~40mmの範囲で設定した。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。SRA1は易溶性であるため、水道水に対して、内割りで添加しており、SRA2は難溶性を示すため、水道水に対して、外割りで添加した。また、SRAの添加量は、予備試験の結果を踏まえ、種類によらず15kg/m³と設定した。これは、凝結に悪影響を及ぼさず、収縮低減効果を最大限発揮するための添加量である。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、

表-1 試験水準 (両引試験)

| 名称 | SRA | | | かぶり (mm) | 試験体長さ (mm) | 断面 (mm×mm) |
|-----------------|-----|------|------|----------|------------|------------|
| | なし | SRA1 | SRA2 | | | |
| FM2.0% | ○ | — | — | 10 | 1500 | 42×42 |
| | ○ | — | — | 20 | | 62×62 |
| | ○ | — | — | 30 | | 82×82 |
| | ○ | — | — | 40 | | 102×102 |
| FM2.0% +SRA1 | — | ○ | — | 10 | | 42×42 |
| | — | ○ | — | 20 | | 62×62 |
| | — | ○ | — | 30 | | 82×82 |
| | — | ○ | — | 40 | | 102×102 |
| FM2.0% +SRA2 | — | — | ○ | 10 | | 42×42 |
| | — | — | ○ | 20 | | 62×62 |
| | — | — | ○ | 30 | | 82×82 |
| | — | — | ○ | 40 | | 102×102 |

表-2 使用材料

| 種類 | 記号 | 物性または成分 |
|-------|--------|---|
| 結合材 | 標準配合粉体 | P_{mix} UFC 指針(案)に準拠 |
| 砂 | 専用細骨材 | S_a UFC 指針(案)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 | $SRA1$ 低級アルコールアルキレンオキシド付加物, 易溶性, 密度 1.02 g/cm ³ , 表面張力 37.4 mN/m |
| | 収縮低減剤 | $SRA2$ 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 , 表面張力 32.8 mN/m |
| | 消泡剤 | $T-A$ |
| $T-B$ | | 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) | | | | | | | | |
|--------------|---------------|--------------------------|-----------|-------|-------|------|------|------|---------|----------|
| | | W | P_{mix} | S_a | S_F | SP | SRA1 | SRA2 | $T-A$ | $T-B$ |
| FM2.0% | 2 | 180 | 1322 | 932 | 157 | 23.5 | 0 | 0 | - | - |
| FM2.0%+SRA-1 | | | | | | | 15 | 0 | P×0.02% | - |
| FM2.0%+SRA-2 | | | | | | | 0 | 15 | - | SRA-2×5% |

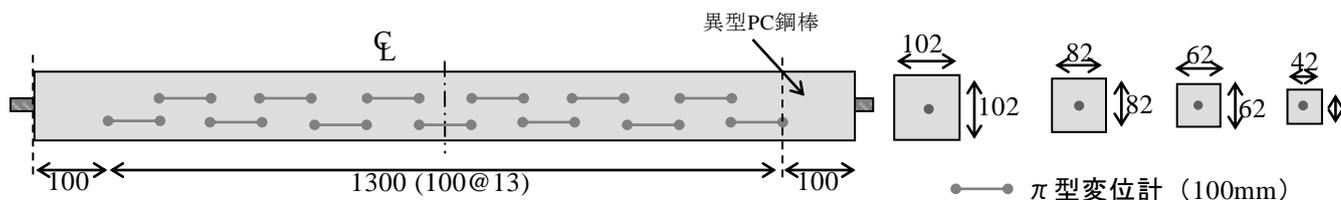


図-1 試験概要 (両引試験)

単位:(mm)

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1500mmとして、断面寸法を

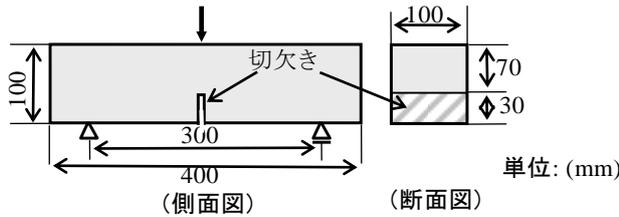


図-2 切欠きはりの3点曲げ試験

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% | 229 | 8.2 | 16.2 |
| FM2.0%+SRA1 | 229 | 9.5 | 18.9 |
| FM2.0%+SRA2 | 207 | 10.6 | 20.4 |

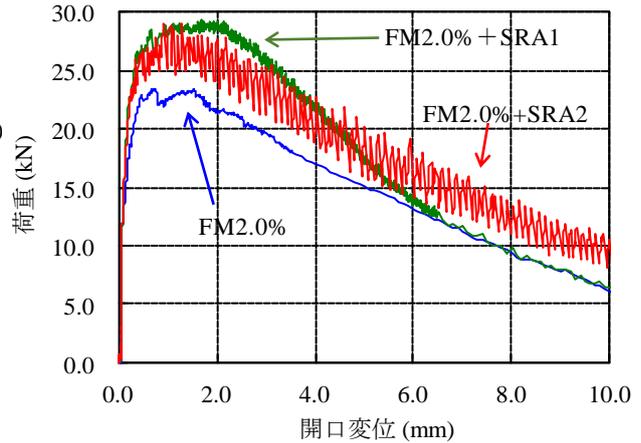


図-3 荷重-開口変位関係

表-5 試験結果一覧 (両引試験)

| 名称 | かぶり (mm) | 養生中に発生したひずみ ($\times 10^{-6}$) | ひび割れ発生荷重 (kN) | 最大ひび割れ幅 (mm) | ひび割れ間隔 (mm) | ひび割れ本数 (本) |
|-------------|----------|----------------------------------|---------------|--------------|-------------|------------|
| FM2.0%+SRA2 | 40 | 364 | 92.1 | 0.103 | 38 | 34 |
| FM2.0%+SRA1 | | 396 | 86.2 | 0.098 | 40 | 30 |
| FM2.0% | | 462 | 67.6 | 0.164 | 52 | 26 |
| FM2.0%+SRA2 | 30 | 456 | 58.0 | 0.094 | 36 | 43 |
| FM2.0%+SRA1 | | 466 | 45.6 | 0.099 | 36 | 39 |
| FM2.0% | | 488 | 43.1 | 0.148 | 41 | 34 |
| FM2.0%+SRA2 | 20 | 501 | 46.6 | 0.095 | 25 | 45 |
| FM2.0%+SRA1 | | 499 | 36.6 | 0.082 | 22 | 43 |
| FM2.0% | | 566 | 28.4 | 0.142 | 31 | 38 |
| FM2.0%+SRA2 | 10 | 495 | 12.5 | 0.086 | 20 | 51 |
| FM2.0%+SRA1 | | 512 | 8.8 | 0.074 | 23 | 48 |
| FM2.0% | | 612 | 4.9 | 0.135 | 25 | 42 |

42×42mmから102×102mm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PC鋼棒 (D22 SBPD1080) である。試験体の成型に際して、異型PC鋼棒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。両引試験は、載荷フレームを介して、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、ひび割れ幅、軸方向の鋼材ひずみ (長手軸方向中央部) とした。また、載荷後にひび割れ間隔、ひび割れ本数の計測を行った。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ε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) ¹⁾に従い割裂引張試験より求めた。さらに、「切欠きはり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-001-2003) 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。ここでは、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-002-2003⁴⁾に従い、式(1)を用いて算出した。

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

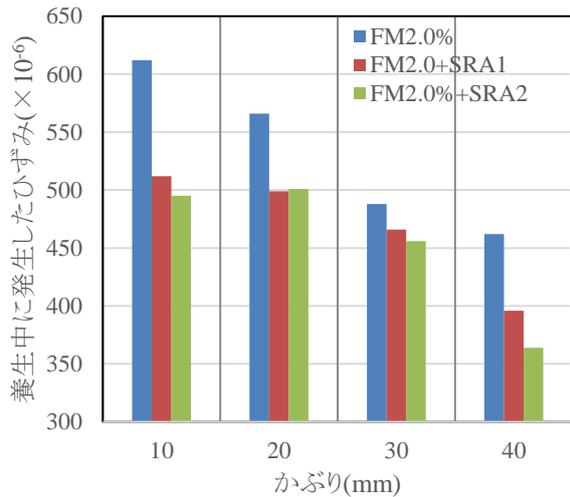


図-4 養生中に発生したひずみ

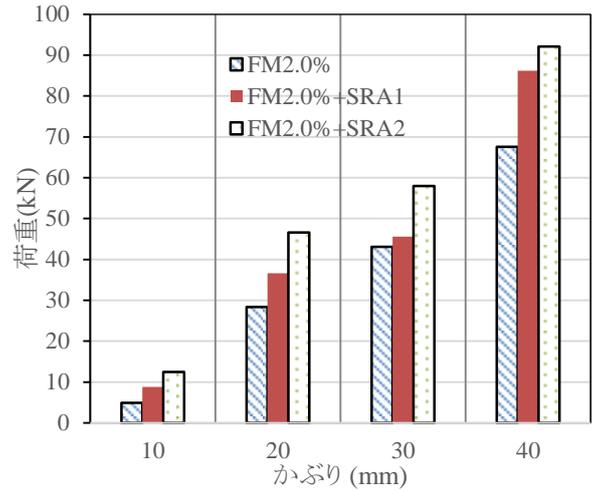


図-5 ひび割れ発生荷重とかぶりの関係

ここで、 W_0 ：荷重－開口変位曲線下の面積(N・mm)， W_1 ：試験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。

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/mm² であるのに対し、FM2.0%+SRA1 の圧縮強度は 207N/mm²，FM2.0%+SRA2 の圧縮強度は 207N/mm² となった。SRA1 は内割で添加したため、FM2.0%と FM2.0%+SRA1 は同等の圧縮強度となったが、SRA2 の圧縮強度が若干低下したのは、SRA を外割りで添加し、実質的にペースト量が変化したためであると考えられる。一方、FM2.0%のひび割れ発生強度は、8.2 N/mm²であったのに対し、FM2.0%+SRA1 のひび割れ発生強度は 9.5N/mm²，FM2.0%+SRA2 のひび割れ発生強度は、10.6 N/mm² 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%+SRA1、FM2.0%+SRA2 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%+SRA1、FM2.0%+SRA2 とともに、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わかる。また、FM2.0%+SRA1 よりも FM2.0%+SRA2 の方がより増減が大きくなっていることがわかる。また、試験終了後に破断面の目視観察を行ったが、全ケースとも鋼繊維の破断は認められず、鋼繊維が引き抜けることで破壊したことが確認された。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け出したため、図-3 の様な挙動を示したものと推測される。次に、表-4 に示した様に、SRA1、SRA2 をそれぞれ添加することにより、破壊エネルギーは向上しており、SRA1 では 16%程度、SRA2 では 26%程度増大しており、ひび割れ発生強度の向上を加味すると、SRA の添加は引張抵抗性の向上に有効であると考えられる。

3. 2 両引試験結果

(1)養生中に発生したひずみ

図-4 は、養生中に発生したひずみ(圧縮：正)を示したものであるが、かぶりが増大すると、養生中に発生するひずみが減少することが確認された。また、SRA の添加により、養生中に発生する収縮が

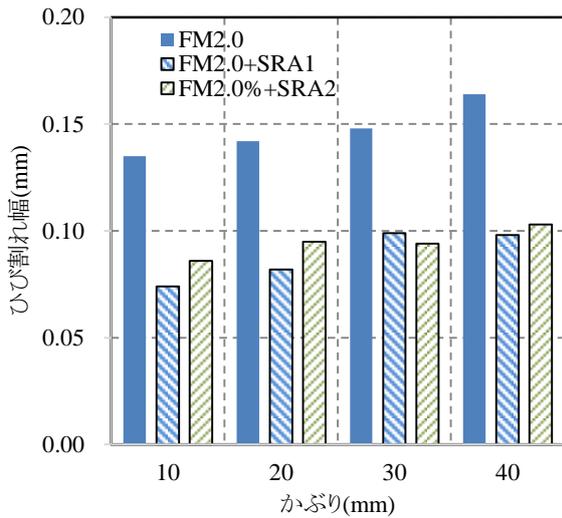
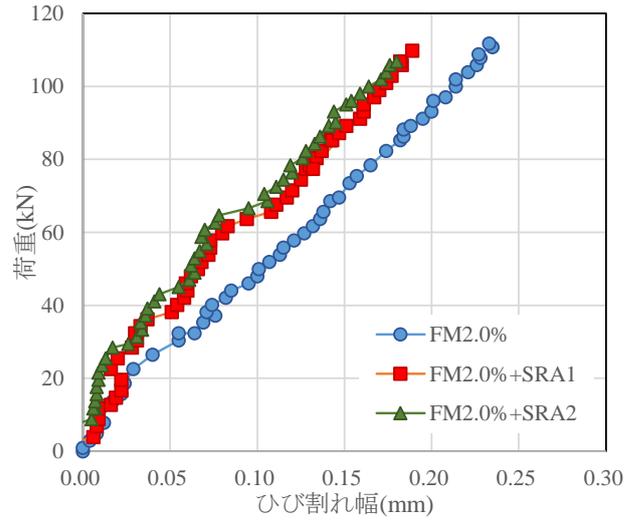
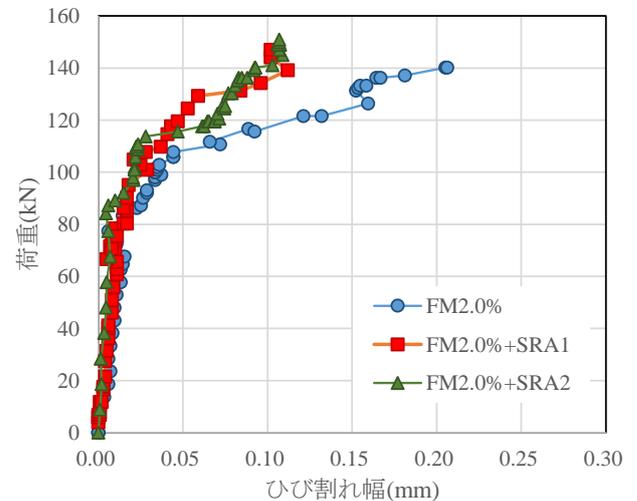


図-6 ひび割れ幅



(a) かぶり 10mm



(b) かぶり 40mm

図-7 荷重-ひび割れ幅の関係

抑制されており、かぶりによっては、FM2.0%+SRA2の方が収縮ひずみの低減効果が高いことがわかる。

(2) ひび割れ発生荷重とひび割れ幅

図-5は、両引試験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%+SRA1、FM2.0%+SRA2を比較すると、SRAを添加すると、かぶりによらず、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、図-4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、FM2.0%+SRA1とFM2.0%を比較すると、ひび割れ発生荷重は、かぶりが10mmの水準では1.8倍、かぶりが20mmの水準では1.3倍、かぶりが30mmの水準では1.1倍、かぶり40mmでは1.3倍となった。同様に、FM2.0%+SRA2とFM2.0%を比べると、かぶりが10mmの水準では2.6倍、かぶりが20mmの水準では1.6倍、かぶりが30mmの水準では1.3倍、かぶり40mmでは1.4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する比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、ひび割れ発生荷重を向上させるためには、SRAの添加が有効であると考えられる。

次に、図-6は鋼材の応力が250N/mm²になった時点におけるひび割れ幅を示したものである。ただし、ひび割れ幅は、π型変位計から得られた値を、各変位計の標点区間内に発生したひび割れの本数で除して、平均化したものである。同図より、かぶりの上昇に伴い、発生するひび割れ幅は増大するものの、SRAを添加することで、ひび割れ幅を抑制することができていることがわかる。また、かぶり20mm以下において、FM2.0%+SRA2のひび割れ幅は、FM2.0%+SRA1のひび割れ幅を下回るが、かぶり30mm以上では、概ね同等になることが確認された。

図-7は、かぶり10mmと40mm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-7(a)と(b)を比べると、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。つ

まり、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ものと考えられる。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) SRA2, SRA1のどちらについても、UFCに添加することで、ひび割れ発生強度と破壊エネルギーが増加しており、その効果は、SRA1よりもSRA2の方が高いことが確認された。さらに、荷重-開口変位関係におけるポストピーク挙動は、大きな増減を繰り返して、荷重が全体的に低下しており、大きく変化したが、SRA2の方が、SRA1より大きく変化することが確認された。

(2) 両引試験を行い、収縮低減剤の種類とかぶりが、養生中に発生する収縮ひずみに及ぼす影響を把握した。SRAの種類によらず、SRAを添加することで、養生中に発生する収縮ひずみが大幅に小さくなっていることと、SRA1に比べて、かぶりの大きさによっては、SRA2の方が収縮低減効果が高いことが確認された。また、収縮の低減に伴い、ひび割れ発生荷重が増加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、同一荷重下におけるひび割れ幅は大きく減少しており、SRAの添加は、ひび割れ幅の抑制など、引張抵抗性の向上に効果を有していることが分かった。

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) 河野克哉,川口哲生,森香奈子,田中敏嗣：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材料特性ならびにRCはりのせん断特性，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.523-528, 2011.
- 3) http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.html