

# 論文 収縮低減剤を使用した超高強度繊維補強コンクリートの収縮特性と破壊力学特性

森 香奈子<sup>\*1</sup>・川口 哲生<sup>\*2</sup>・河野 克哉<sup>\*3</sup>・田中 敏嗣<sup>\*4</sup>

**要旨：**超高強度繊維補強コンクリートに収縮低減剤を使用することにより、養生中の収縮ひずみを低減することを目的として検討を行った。その結果、高級アルコールアルキレンオキシド付加物体を主成分とする難溶性の収縮低減剤を外割添加で使用するにより、フレッシュ性状を維持したまま、高い収縮低減効果が得られることがわかった。さらに、収縮低減剤がマトリクスと繊維の付着に影響することにより、破壊力学特性（破壊エネルギー）の向上が期待できることを確認した。

**キーワード：**超高強度繊維補強コンクリート、収縮ひずみ、収縮低減剤、圧縮強度、破壊力学特性

## 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: UFC) は、セメントを基材とし、珪砂や反応性微粉末などをあらかじめ混合した標準配合粉体 (プレミックス粉体) を低水結合材比で練り混ぜることにより、圧縮強度 200N/mm<sup>2</sup> 程度の超高強度、かつ高耐久性、高靱性を有する画期的なコンクリートである。2004 年には土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」<sup>1)</sup> (以下、指針 (案)) が刊行されており、UFC 適用物件の増加が今後も期待される。UFC は、高温の標準熱養生 (90℃-48 時間保時の蒸気養生) が行われることにより、材齢初期に高い強度を発現できる材料である。しかし低水結合材比であるために、凝結の始発から標準熱養生終了までの収縮が大きいという問題がある。そのため、UFC 内部に鉄筋を使用する場合は、収縮時の拘束応力によって構造物内部にひび割れが発生する危険性があり注意しなければならず、指針 (案) では鉄筋の埋設は推奨されていない。しかし、UFC の収縮を低減することができれば、鉄筋埋設が可能となり、UFC の適用範囲の拡大が期待できる。

コンクリートの収縮を低減する方法の一つとして、収縮低減剤の利用があり<sup>2)</sup>、この効果は乾燥収縮だけでなく自己収縮に対しても発揮される<sup>3)</sup>。しかし収縮低減剤の研究は、普通強度や高強度コンクリートの乾燥収縮を対象としたものが多く<sup>4)</sup>、超高強度コンクリートや UFC の自己収縮を対象とした研究は十分とは言えない。また、UFC に使用するためには、繊維混入の影響も考慮した検討が必要である。

そこで本研究では、UFC に収縮低減剤を使用した場合の、凝結の始発から標準熱養生終了までにおける収縮低

減効果を評価することを目的とした。さらに、収縮低減効果が UFC の圧縮強度への影響、破壊力学特性の評価指標となる破壊エネルギーおよびひび割れ発生強度に及ぼす影響についても検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料ならびに配合

表-1 に使用材料を示す。UFC は、セメント、シリカフェーム、珪石微粉末などをプレミックスした標準配合粉体、水道水、高性能 AE 減水剤、補強繊維から構成されるセメント系材料である。本試験では、UFC の材料として、指針 (案) に適合する標準配合粉体ならびに鋼繊維を使用した。また、収縮低減剤は、4 価のアルコールである A および 8 価のアルコールである B の 2 種類を使用した。このため、収縮低減剤 A は水に溶けるが、炭化水素基 (疎水基) の占める割合が高い収縮低減剤 B は水に溶けにくい性質を示す。

表-2 に UFC の配合を示す。収縮低減剤量は 9kg/m<sup>3</sup>、12 kg/m<sup>3</sup> および 15 kg/m<sup>3</sup> の 3 水準に変化させ、UFC のフロー (JIS R 5201, 無振動 0 打) が 280±15mm の範囲となるように減水剤の添加量で調整した。ただし、減水剤量は 30.0kg/m<sup>3</sup> を上限と定め、それ以上を要する場合は練混ぜ困難と判断し供試体の作製は行わなかった。収縮低減剤の配合について、収縮低減剤 A は易溶性であるため練混ぜ水に内割置換としたが、収縮低減剤 B は難溶性であるため、内割置換・外割添加の 2 種類の処方にて練混ぜを行った。さらに、収縮低減剤による空気量増加を抑制するために消泡剤を添加し、空気量の調整を行った。収縮低減剤の種類に合わせ、消泡剤の種類も成分が異なる 2 種類とし、収縮低減剤 A には消泡剤 A を、収縮低減

\*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 複合構造材料チーム 研究員 修(工) (正会員)

\*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 複合構造材料チーム 研究員 修(工) (正会員)

\*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 複合構造材料チーム 主任研究員 博(工) (正会員)

\*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 複合構造材料チーム リーダー 博(工) (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	記号	概要
練混ぜ水	水道水	W	千葉県佐倉市上水道水
粉体	標準配合粉体	P	密度 2.81g/cm <sup>3</sup>
繊維	鋼繊維	F	密度 7.85g/cm <sup>3</sup> , 引張強度 2700N/mm <sup>2</sup> , 直径 0.2mm, 長さ 15mm
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	標準配合粉体専用減水剤
	収縮低減剤 A	SRA-A	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 <sup>3</sup> , 表面張力 37.4 mN/m (原液)
	収縮低減剤 B	SRA-B	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 <sup>3</sup> , 表面張力 32.8 mN/m (原液)
	消泡剤 A	T-A	ポリアルキレングリコール誘導体
	消泡剤 B	T-B	シリコン系

表-2 UFC の配合

No.	記号	単位量						
		W (kg/m <sup>3</sup> )	P (kg/m <sup>3</sup> )	F (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	SRA (kg/m <sup>3</sup> )	T-A	T-B
1	SRA-0	180	2254	157	23.5	0	0.02 (C×%)	0
2	SRA-A-9				23.5	9		
3	SRA-A-12				23.5	12		
4	SRA-A-15				23.5	15		
5	SRA-B-9*				24.0	9	-	5 (B×%)
6	SRA-B-12*				23.5	12		
7	SRA-B-15*				23.5	15		
8	SRA-B-9[内]*				30.0	9		

\*収縮低減剤 B を使用した配合では, 内割置換の水準には[内]と記載し, 外割添加の水準は無記名とした。

剤 B には消泡剤 B を使用した。いずれの消泡剤についても練混ぜ水の一部として内割置換した。また, 本試験では, 鋼繊維の混入率は 2vol.% と一定にした。

## 2.2 練混ぜおよび養生方法

練混ぜは 20℃ の恒温室内で, パン型ミキサーを使用して行った。フレッシュ性状評価のために, 練上がり直後にフロー試験, 空気量測定 (JIS A 1116 : 質量方法) ならびに温度測定を行った。そして, フローが 280±15mm の範囲であることを確認した後, 指針 (案) にしたがって型枠に流し込んだ。供試体は各水準につき, 圧縮強度試験用の φ50×100mm の円柱 3 体, 収縮測定用の 100×100×400mm の角柱 3 体, 破壊力学特性試験用の 100×100×400mm の角柱 4 体, および割裂引張試験用の φ100×200mm の円柱 3 体を作製した。

供試体は, 一次養生として 20℃ 48 時間の封緘養生を行った後, 脱型した。さらに, 二次養生として 90℃-99.9%RH-48 時間 (昇降温 15℃/hr) の蒸気養生を行った。

## 2.3 収縮ひずみの測定方法

収縮ひずみの測定は, 「(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」<sup>5)</sup> に準拠して行った。図-1 に示すように, 供試体内部中央に埋込み型ひずみ計 (標点距離: 100mm, 許容温度範囲: -20~180℃) を設置し, 凝結始発 (JIS A 1147) から蒸気養生終了までの収縮ひずみを測定した。一次養生中は, 供試体の自由な変形の拘束なら

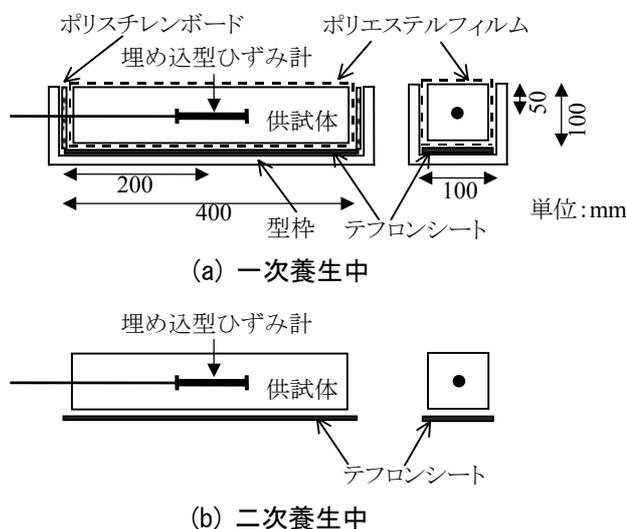


図-1 収縮ひずみ測定方法

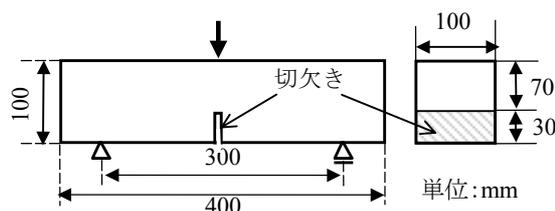


図-2 切欠きはりの 3 点曲げ試験

びに水分の逸散を防止した型枠内で測定を行った。一方、二次養生中は、蒸気養生槽内に敷いたテフロンシート上に供試体を設置することで底面摩擦を低減し、供試体表面を保護せず湿度 99.9%の環境下で測定を行った。

## 2.4 破壊力学特性の測定方法

破壊力学特性を測定するため、図-2 に示すように「切欠きはりを用いた繊維コンクリートの荷重 - 変位曲線試験方法」(JCI-S-002-2003) にしたがって切欠きはりを製作し、3 点曲げ試験を実施した。深さ 30mm の切欠きは、二次養生終了後にコンクリートカッターにより導入した。

破壊エネルギー $G_F(N/mm)$ は、この切欠きはりの 3 点曲げ試験結果より、式(1)を用いて算出した。

$$G_F = (0.75 W_0 + W_1) / A_{ig} \quad (1)$$

ここで、 $W_0$ : 荷重 - 変位曲線下の面積 ( $N \cdot mm$ )、 $W_1$ : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事 ( $N \cdot mm$ )、 $A_{ig}$ : はりの破断部分面積 ( $mm^2$ )

このとき、短繊維を混入した供試体は最終的に破断しないため、開口変位が 10mm に到達した時点で破断したものと仮定して計算を行った。

さらに、指針(案)にしたがって割裂引張強度試験を実施し、UFC のひび割れ発生強度を測定した。

なお、破壊力学特性については、収縮低減剤  $0kg/m^3$  の配合、および収縮低減剤 A、B を使用したそれぞれの配合について最大の収縮低減効果が得られる添加量の配合、合計 3 配合のみ評価を行うこととした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 フレッシュ性状

表-3 にフレッシュ性状試験結果を示す。収縮低減剤 A を使用した水準および収縮低減剤 B を外割添加した水準では、SP 添加量の調整を行うことなく目標フロー値が得られた。しかし、収縮低減剤 B を内割置換した水準では、目標フロー値を得るための SP 添加量を増量する必要があった。これより、UFC に収縮低減剤を適用する場合、易溶性の収縮低減剤であれば内割置換、難溶性の収縮低減剤であれば外割添加とすることにより、SP 添加量の増量を行うことなく良好な流動性が得られることが確認できた。

空気量は、消泡剤を併用することにより、収縮低減剤  $0 kg/m^3$  よりも低減することができた。

### 3.2 圧縮強度

図-3 に圧縮試験結果を示す。なお、収縮低減剤  $0 kg/m^3$  では、表-3 に示すように他の水準との空気量の差が大

表-3 フレッシュ性状試験結果

No.	記号	SP 量 ( $kg/m^3$ )	フロー (mm)	空気量 (%)	温度 ( $^{\circ}C$ )
1	SRA-0	23.5	276	6.0	30.7
2	SRA-A-9	23.5	288	2.7	30.4
3	SRA-A-12	23.5	289	2.5	31.3
4	SRA-A-15	23.5	288	2.3	31.4
5	SRA-B-9	24.0	288	3.4	29.1
6	SRA-B-12	23.5	290	3.5	29.3
7	SRA-B-15	23.5	292	2.8	29.6
8	SRA-B-9[内]	30.0	293	3.2	30.5

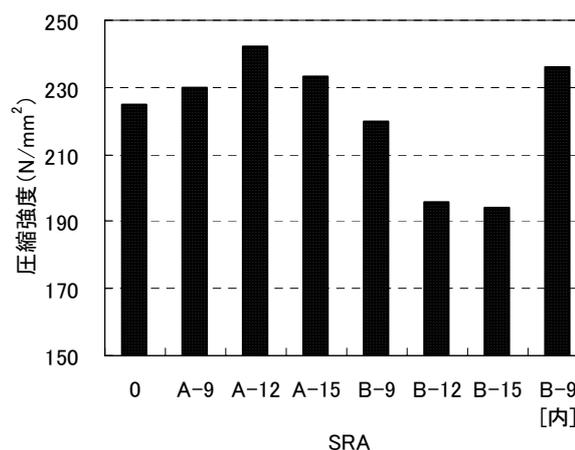


図-3 圧縮強度試験結果

きいため空気量による影響を考慮し、圧縮強度の補正を行った。ここでは、空気量が 1%増加するにつれて圧縮強度が 4%低下したとして<sup>6)</sup>、空気量 3%の場合の圧縮強度となるように補正した。補正後の収縮低減剤  $0 kg/m^3$  における圧縮強度は  $225N/mm^2$  であり、収縮低減剤 A を使用した場合、ならびに収縮低減剤 B を内割置換した場合において圧縮強度が同等以上となった。これは、収縮低減剤 A は易溶性であるため実質的な単位水量の変化もなく、収縮低減剤は圧縮強度に影響しなかったと考えられる。一方、収縮低減剤 B は難溶性であるため水結合材比が減少し、圧縮強度増加に影響を及ぼしたと考えられる。また、収縮低減剤 B を外割添加した配合では、添加量  $12kg/m^3$  ならびに  $15kg/m^3$  において、圧縮強度は収縮低減剤  $0 kg/m^3$  よりも低下した。これは、収縮低減剤 A を使用した水準と比較して空気量による影響は認められないこと、収縮低減剤量の増加に伴って圧縮強度が低下していることから、収縮低減剤の外割添加によって結合材の単位量の減少が起こったために、圧縮強度が低下したと推察できる。

### 3.3 収縮ひずみ

表-4 に各水準の凝結始発時間を、図-4 に凝結始発から蒸気養生終了までの実ひずみの変化の一例を、図-

表-4 凝結試験結果 (始発時間)

No.	記号	始発時間	
		時間	分
1	SRA-0	10	30
2	SRA-A-9	13	10
3	SRA-A-12	13	25
4	SRA-A-15	14	35
5	SRA-B-9	11	20
6	SRA-B-12	11	55
7	SRA-B-15	12	15
8	SRA-B-9[内]	15	10

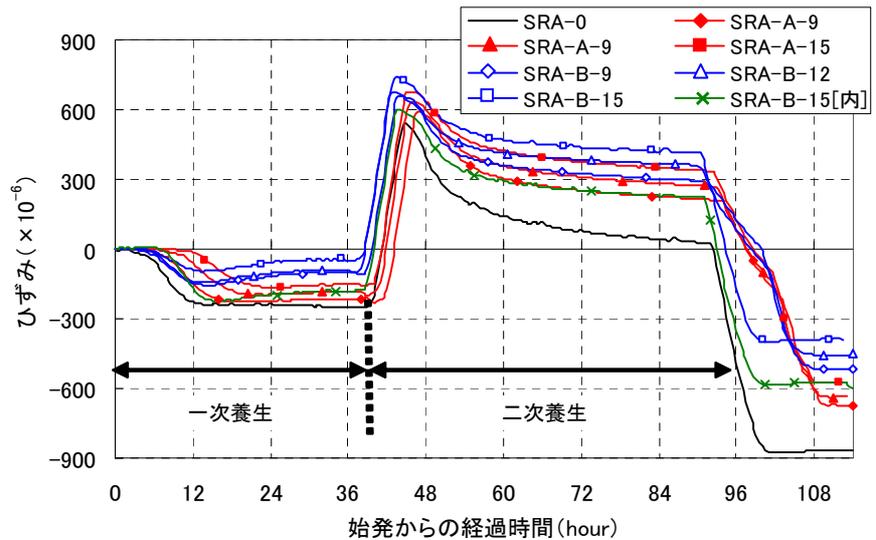


図-4 経過時間と実ひずみの関係

5 に各養生期間中のひずみを示す。ここでは、凝結始発から脱型後に蒸気養生を開始するまでのひずみを一次養生中のひずみとし、蒸気養生開始から蒸気養生終了後に長さ変化が落ち着くまでのひずみを二次養生中のひずみとした。また、本試験では、UFCの標準熱養生終了までの実際の長さ変化を評価するために、温度変化による膨張量あるいは収縮量の補正は実施しなかったが、測定開始および測定終了時の温度は20℃であった。さらに、図-6 に配合ならびに養生条件別の収縮低減剤量と収縮低減率の関係を示す。なお、収縮低減率  $R_s(\%)$  は、式(2)のように定義した。

$$R_s = (S_0 - S_i) / S_0 \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $S_0$  : 収縮低減剤 0 kg/m<sup>3</sup>における収縮ひずみ、  
 $S_i$  : 収縮低減剤を使用した場合の各配合における収縮ひずみ

表-4 より、収縮低減剤の添加量が増加するとともに、始発時間が遅くなるのがわかった。また、収縮低減剤 B を内割置換で使用した場合に始発時間が大幅に遅れたのは、表-2 に示すとおり SP 添加量が他の水準よりも多いことが影響したと考えられる。

図-5 より、収縮低減剤 0kg/m<sup>3</sup>の養生終了時における収縮ひずみは、853×10<sup>-6</sup>と全水準中で最大となっており、収縮低減剤使用による収縮低減効果が明らかとなった。養生終了時の収縮ひずみを比較すると、収縮低減剤 A を使用した場合、9kg/m<sup>3</sup>のとき 663×10<sup>-6</sup>、12kg/m<sup>3</sup>のとき 632×10<sup>-6</sup>、15kg/m<sup>3</sup>のとき 579×10<sup>-6</sup>であり、収縮低減率はそれぞれ 22%、26%、32%となった。一方、外割で収縮低減剤 B を使用した場合の収縮ひずみは、9kg/m<sup>3</sup>のとき

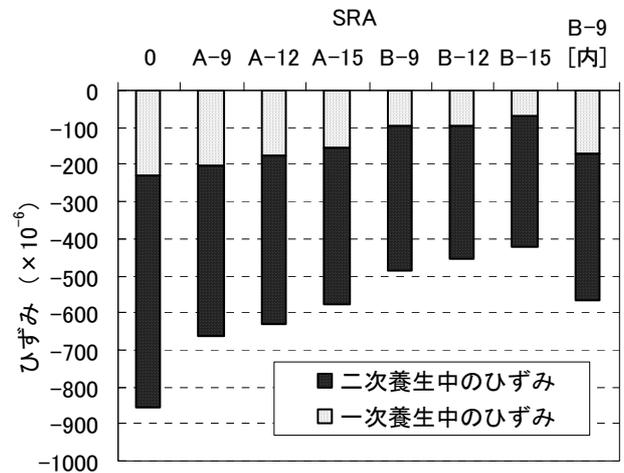


図-5 ひずみ測定結果

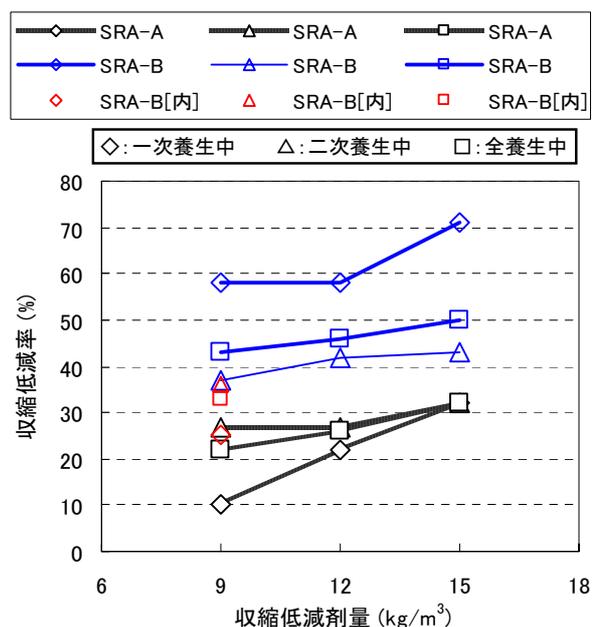


図-6 収縮低減剤と収縮低減率の関係

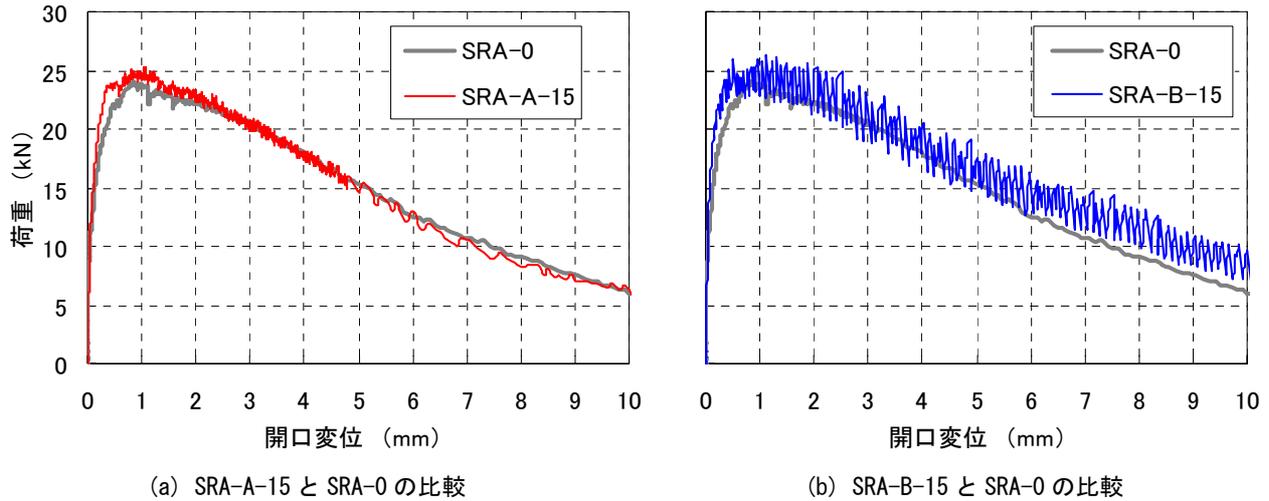


図-7 切欠きはりの荷重-変位曲線

き  $489 \times 10^{-6}$ ,  $12 \text{kg/m}^3$  のとき  $457 \times 10^{-6}$ ,  $15 \text{kg/m}^3$  のとき  $423 \times 10^{-6}$  であり、収縮低減率はそれぞれ 43%, 46%, 50% となった。また、内割  $9 \text{kg/m}^3$  で収縮低減剤 B を使用した場合の収縮ひずみは  $568 \times 10^{-6}$ , 収縮低減率は 33% となった。以上の結果より、収縮低減剤量の増加にしたがい、収縮低減効果は大きくなることが確認できた。さらに、収縮低減剤 A を使用した水準よりも、収縮低減剤 B を使用した水準、特に外割添加の配合において、UFC の収縮低減効果が大きいことが確認できた。収縮低減剤の作用機構は、コンクリート中の空隙水の表面張力を低下させることが一因であると考えられる<sup>7)</sup>。これより、表-1 で示したように、収縮低減剤自体の表面張力が小さい収縮低減剤 B を使用することによって、より大きな効果が発現したと思われる。しかし、収縮低減剤を添加した練混ぜ水の表面張力は添加量の増大に伴い低減し続けるわけではなく、添加量が一定量以上になると頭打ちになる<sup>8)</sup>。そのため、収縮低減剤量の増加に伴う収縮低減効果の増大については、空隙水の表面張力低下だけでなく、他の要因も合わさっていると考えられる。

収縮低減剤 B を使用した水準について収縮低減剤の処方の違いに着目すると、内割置換では、外割添加に比べ一次養生中の収縮ひずみが大きくなった。低水結合材比シリカフェームセメントペーストの場合、 $20^\circ\text{C}$  条件下の若材齢では、水結合材比が小さいほど自己収縮が増大するという実験結果が報告されている<sup>9)</sup>。このことは UFC のマトリクスにおいても同様の傾向を示すと考えられ、実質的に低水結合材比となった収縮低減剤 B を内割置換した水準では、外割添加した水準に比べ収縮低減効果が低下したと推察される。

図-6 より、二次養生中では、収縮低減剤量による収縮低減率の差が小さくなっている。本試験における一次養生中の収縮ひずみは、ほとんどが自己収縮ひずみによ

るものと言える。一方、二次養生中の収縮ひずみには乾燥収縮ひずみも含まれており、さらに温度履歴の影響も関与している。低水結合材比シリカフェームセメントペーストに関する既往の報告<sup>7)</sup>によれば、高温 ( $70, 80^\circ\text{C}$ ) 条件下では、 $20^\circ\text{C}$  条件下に比べて水結合材比による自己収縮ひずみの差はほとんど見られないとの実験結果が確認されている。したがって、本試験では、収縮低減剤量が  $9 \text{kg/m}^3$  であっても、収縮低減剤 A を使用した場合、収縮低減剤 B を外割で使用した場合、および収縮低減剤 B を内割で使用した場合では、実質的な水結合材比が異なっているが、高温の二次養生中では一次養生中ほど収縮ひずみ差が現れなかったと考えられる。

### 3.4 破壊力学特性

図-7(a)ならびに図-7(b)は、それぞれ収縮低減剤 A  $15 \text{kg/m}^3$  ならびに収縮低減剤 B  $15 \text{kg/m}^3$  の場合の切欠きはりの荷重-変位曲線の一例を示したものである。図中には、収縮低減剤  $0 \text{kg/m}^3$  についても併記した。3水準とも荷重は開口変位 1mm 付近でピークを迎え、その後緩やかに低下している。最大荷重は、収縮低減剤を使用した水準で大きくなること、また収縮低減剤 B  $15 \text{kg/m}^3$  の水準において、荷重の低下が最も緩やかになることが確認できた。3点曲げ試験後の供試体破断面において鋼繊維の破断は認められず、本試験では繊維が引き抜けながら荷重低下したと思われる。したがって、収縮低減剤を添加した UFC では、マトリクスと繊維の付着性状が変化したことにより、繊維の引張応力伝達性能や引抜け方が変化したと考える。最大荷重以降の荷重に着目すると、収縮低減剤  $0 \text{kg/m}^3$  では単調に低下するのに対し、収縮低減剤を添加した場合には全体的に荷重が低下する中でも荷重の触れ幅が大きくなり、特に収縮低減剤 B を使用した場合に大きくなった。これは、マトリクスと繊維の付着性状の向上により高い荷重で急に繊維が引き抜け

たことで、剛性の低い試験機では解放されたエネルギーの吸収しきれなかったものとする。図-7の荷重-変位曲線から式(1)を用いて算出した破壊エネルギーの結果を表-5に示す。収縮低減剤の添加により破壊エネルギーは増大しており、UFCの更なる高強度・高靱性化を図れる可能性が示された。さらに、表-6に割裂引張強度試験により求めたひび割れ発生強度を示す。収縮低減剤を添加した水準では、収縮低減剤 0 kg/m<sup>3</sup> に比べひび割れ発生強度が高くなった。これより、収縮低減剤の使用によりUFCの収縮を低減できるだけでなく、破壊エネルギーやひび割れ発生強度も向上できることが確認できた。

以上の結果より、UFCに収縮低減剤を使用することによってUFC内部に鉄筋を埋設した設計が可能となるだけでなく、例えばUFCを使ってはり部材を作製する場合には、耐力向上やポストピーク挙動の改善など、破壊力学特性の向上という利点を活かした設計も可能になると考える。

#### 4. まとめ

本研究では、超高強度繊維補強コンクリートに収縮低減剤を使用することによる標準熱養生中の収縮低減効果、圧縮強度ならびに破壊力学特性に及ぼす影響について検討した。本研究で得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 難溶性の収縮低減剤を練混ぜ水に内割置換すると、水結合材比が小さくなり減水剤の増量が必要となるため、難溶性の収縮低減剤を使用する場合には外割添加とすることが望ましい。
- (2) 収縮低減剤を使用したときの圧縮強度は、練混ぜ水に内割置換した場合は同等以上となったが、外割添加した場合は低下する傾向を示した。
- (3) 易溶性の低級アルコールアルキレンオキシド付加物を主成分とする収縮低減剤を使用したときに比べ、難溶性の高級アルコールアルキレンオキシド付加物を主成分とする収縮低減剤を使用したときに、高い収縮低減効果が現れ、特に一次養生(20℃ 48時間の封緘養生)中において効果が大きくなった。
- (4) 収縮低減剤を使用することにより、破壊力学特性を向上できる可能性が認められた。

#### 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、

表-5 破壊エネルギー

記号	供試体 No.	破壊エネルギー(N/mm)	
		平均	
SRA-0	1	16.3	15.5
	2	12.9	
	3	16.2	
	4	16.4	
SRA-A-15	1	16.5	16.5
	2	19.9	
	3	11.8	
	4	17.9	
SRA-B-15	1	15.1	18.0
	2	20.0	
	3	18.5	
	4	18.4	

表-6 ひび割れ発生強度

記号	供試体 No.	ひび割れ発生強度(N/mm <sup>2</sup> )	
		平均	
SRA-0	1	7.95	7.70
	2	7.10	
	3	8.06	
SRA-A-15	1	10.4	9.51
	2	9.18	
	3	8.98	
SRA-B-15	1	8.68	9.41
	2	9.81	
	3	9.74	

2004.9

- 2) 富田六郎，有機系収縮低減剤の作用機構に関する考察，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.197-205，1991.8
- 3) 田澤栄一：水和反応によるセメントペーストの自己収縮，セメント・コンクリート，No.565，1994.3
- 4) 大濱嘉彦，宮良政克，遠藤光弘：収縮低減剤を用いた鋼繊維補強モルタルの乾燥収縮および強さ，材料，Vol.376，No.34，pp.14-18，1985.1
- 5) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会 報告書(II)，1994.5
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'08，p.326，2008.9
- 7) 藤田康彦：乾燥収縮低減剤のメカニズムと収縮低減効果，コンクリート工学，Vol.43，No.5，pp.97-101，2005.5
- 8) 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，土木学会第64回年次学術講演会概要集，pp.871-872，2010.9
- 9) 寺本篤史，丸山一平，三谷裕二，谷村充：低水結合材比シリカフェームセメントペーストの自己収縮性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.601-606，2009