

論文 常温で硬化させた RPC 系超高強度繊維補強コンクリートの諸特性に関する研究

川口 哲生*1・河野 克哉*2・Eduardo Daniel*3

要旨：本研究では、常温で養生を行った超高強度繊維補強コンクリートの力学特性、収縮特性、破壊力学特性について検討を行った。併せて、収縮低減剤の添加がこれらに及ぼす影響について検討を行った。検討の結果、養生温度が異なる場合の圧縮強度、静弾性係数、ひび割れ発生強度、破壊力学特性の経時変化を明らかにするとともに、収縮特性（収縮ひずみ、収縮応力）を明らかにした。また、収縮低減剤を添加すると、養生温度によらず、収縮を抑制でき、ひび割れ発生強度、破壊エネルギーが増大することが分かった。さらに、静弾性係数、ひび割れ発生強度、破壊エネルギーと圧縮強度の関係式を実験的に定めた。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、破壊力学特性、収縮低減剤、経時変化

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、セメント、シリカフューム、珪石微粉末、専用細骨材、短繊維、高性能減水剤、水道水から構成されるセメント系複合材料である。これは、Richard らが開発した Reactive Powder Concrete¹⁾を基に開発されたものである。UFC の硬化体は非常に緻密であり、200N/mm²級の圧縮強度と高い耐久性を有し、短繊維補強による高い変形能力を有する。しかし、所定の強度、耐久性を発揮させるためには、90℃48時間の熱養生が必要である。そのため、使用用途はプレキャスト部材が大半となっており、仮に熱養生を省略することや簡略化することができれば、より合理的になるものと考えられる。しかしながら、熱養生を行っていない UFC の強度特性、破壊力学特性、収縮特性は明確になっていないのが現状であり、これらについて検討することは有益である。一方、UFC の優れた性能は、水結合材比がきわめて低いことや90℃程度の蒸気養生などによって実現されているものであり、養生中に発生する収縮が増大しやすいといった課題が存在する。そこで、筆者ら²⁾は、UFC 向けに開発された収縮低減剤（以降、SRA と表記）を添加した UFC に関する検討を行ってきた。その結果、養生中に発生する収縮を抑制すると、ひび割れ発生強度、破壊エネルギーなど、引張抵抗性が向上するため、SRA の添加は UFC の性能向上に有益であると考えられる。これらの点を踏まえ、本研究では、熱養生を行わない、すなわち 5℃～30℃の範囲となる常温硬化させた UFC の強度特性、破壊力学特性、収縮特性（収縮ひずみ、収縮応力）の経時変化について検討を行うこととした。加えて、SRA を添加した UFC に

ついても同様の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 は、使用材料を示したものである。ここで、使用したプレミックスは、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）³⁾（以下、指針(案)と表記)に規定されている標準配合粉体である。また、使用した SRA は、UFC 向けとして新規に開発した高級アルコール系のものである²⁾。また、収縮低減剤の添加による連行空気量の増加を抑制する目的で消泡剤を適宜添加した。

2.2 配合

表-2 は、UFC の示方配合であり、使用した短繊維は鋼繊維であり、その混入量は全体積の 2%である。練混ぜには容量 100ℓの強制パン型ミキサーを用いた。コンシステンシー試験として、フロー試験（JIS R 5201, 0 打）を行った。ここでは、高性能減水剤 SP の添加量を調整し、フロー値が 260±10 mm の範囲内になるように管理した。試験体の成型は、指針（案）に従った。ここでは、短繊維の配向が偏らないように、流込み速度に注意して UFC を打ち込んだ。また、本研究で用いた SRA は難溶性を示すため、W に対して外割で添加した。ここで、SRA の添加量は、15kg/m³とした。これは、事前に実施した予備試験より定めたものである。

2.3 試験体の製作と養生

強度特性、破壊力学特性を計測した材齢は、練混ぜより、1日後、3日後、7日後、14日後、28日後、56日後、91日後である。ここで設定した養生温度は、10℃、20℃、

*1 太平洋セメント(株)中央研究所 第2研究部 建設技術チーム 副主任研究員 博(工)(正会員)

*2 太平洋セメント(株)中央研究所 第2研究部 建設技術チーム 主任研究員 博(工)(正会員)

*3 元長岡技術科学大学 工学部 建設工学課程

表-1 使用材料

材料	種類	記号	物性または成分	
UFC	結合材	プレミックス	P	指針(案) ³⁾ に準拠した標準配合粉体
	短繊維	鋼繊維	SF	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, 密度:0.98g/cm ³

表-2 UFCの配合

名称	単位量 (kg/m ³)					フロー値 (mm)
	W	P	SF	SP(水を含む)	SRA(外割り)	
SRAなし	180	2254	157	22	0	265
SRA添加				23	15.0	258

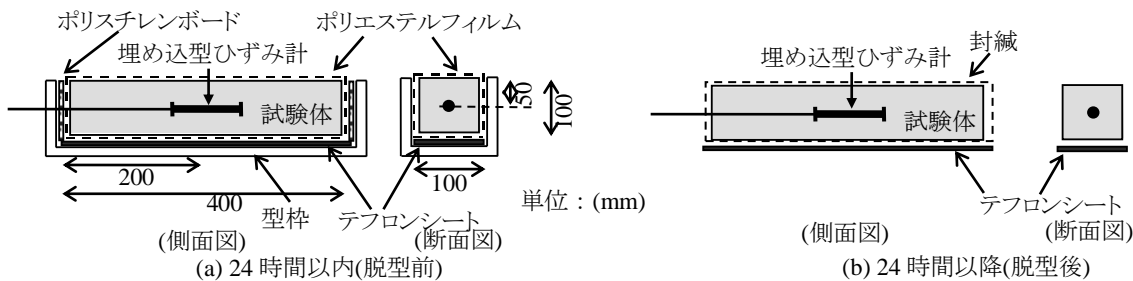


図-1 収縮ひずみの測定方法

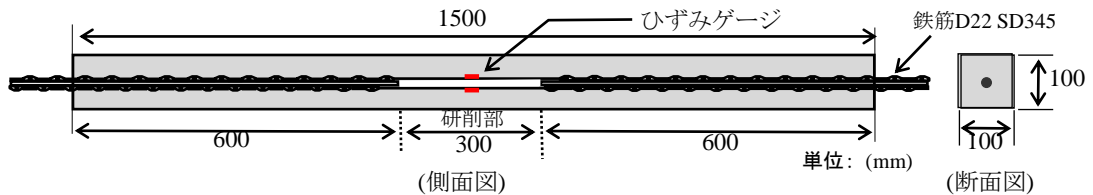


図-2 収縮応力の測定方法

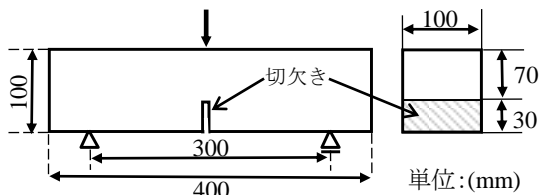


図-3 切欠きはりの3点曲げ試験

30℃である。試験体の成型後24時間で脱型し、乾燥を防ぐため、封緘養生を行った。さらに、比較として、指針(案)に規定される標準熱養生(90℃48時間)を行ったUFC(SRA無添加, SRA添加)の強度特性と破壊力学特性についても検討を行った。

2.4 強度特性の計測方法

圧縮強度 f_c と静弾性係数 E_c は寸法 $\phi 50 \times 100$ mm の試験体を用いて計測した。ひび割れ発生強度 f_{cr} は、 $\phi 100 \times 200$ mm の試験体を用いて計測した。圧縮強度 f_c は、JIS A 5201 に準拠して計測を行い、ひび割れ発生強度 f_{cr} は UFC 指針(案)³⁾に規定されている割裂引張試験から求めた。ここでは、試験体端面にポリエステル箔ひずみゲ

ージを貼り付け、このひずみの計測値が不連続になったときの荷重をひび割れ発生荷重とした。

2.5 収縮ひずみの計測方法

図-1 は、収縮ひずみの測定で用いた試験体の概要を示したものである。ここでは、埋込み型ひずみ計を用いて収縮ひずみを測定した。また、試験体の自由な変形の拘束(底面にテフロンシートならびに両端面にポリスチレンボードの設置)、および水分の逸散を防止(全面にポリエステルフィルムの設置)した型枠(寸法 100×100×400 mm)内で凝結の始発に達した時点から計測した。ただし、凝結(始発)は、事前に求めたものを用いた。

図-2 は収縮応力の測定で用いた試験体の概要を示したものである。試験体は、長手軸方向に鉄筋を配置した 100×100×1500 mm の角柱であり、JCI が提唱するコンクリートの自己収縮応力試験方法⁴⁾に基づいている。ひずみゲージを用いて計測された鋼材ひずみと式(1)を用いて、収縮応力を求めた。ここでは、UFC 断面内に応力が均一に分布すると仮定して算出した。

表-3 試験結果一覧

養生温度 (°C)	材齢 (days)	SRA無添加				SRA添加			
		f_c (N/mm ²)	E_c (×10 ⁴ N/mm ²)	f_{cr} (N/mm ²)	G_F (N/mm)	f_c (N/mm ²)	E_c (×10 ⁴ N/mm ²)	f_{cr} (N/mm ²)	G_F (N/mm)
10	1	*	*	*	*	*	*	*	*
	3	63	3.5	4.7	5.2	57	3.3	5.0	6.1
	7	91	3.9	6.2	7.1	85	3.9	6.0	9.2
	14	108	3.7	6.5	9.3	102	4.5	7.4	11.2
	28	123	4.8	7.3	11.1	118	4.8	8.3	14.3
	56	137	4.9	7.6	13.4	134	5.0	8.3	16.4
	91	166	5.0	8.2	14.2	157	5.0	8.6	18.2
20	1	36	2.2	4.1	4.8	16	1.8	4.1	5.2
	3	94	4.2	5.8	6.2	89	4.3	5.8	9.2
	7	124	4.7	7.4	10.2	110	4.7	7.4	11.2
	14	147	5.2	9.0	12.2	145	5.2	9.0	13.5
	28	164	5.2	9.0	15.8	169	5.6	9.0	16.8
	56	170	5.6	8.9	16.5	172	5.5	8.9	18.5
	91	178	5.6	9.8	17.0	179	5.4	9.8	18.5
30	1	53	3.1	4.4	4.0	31	2.5	4.4	4.0
	3	121	4.8	6.8	9.2	103	4.8	6.8	10.3
	7	153	5.5	8.7	10.8	138	5.3	8.7	12.8
	14	165	5.5	9.1	13.4	157	5.3	9.1	15.2
	28	174	5.5	8.4	13.5	173	5.5	9.5	15.9
	56	188	5.6	8.7	14.1	193	5.4	9.7	16.1
	91	190	5.5	8.5	14.5	190	5.5	9.8	16.8
標準熱養生	—	210	5.3	8.9	15.4	204	5.4	9.5	18.6

* : 脱型できず

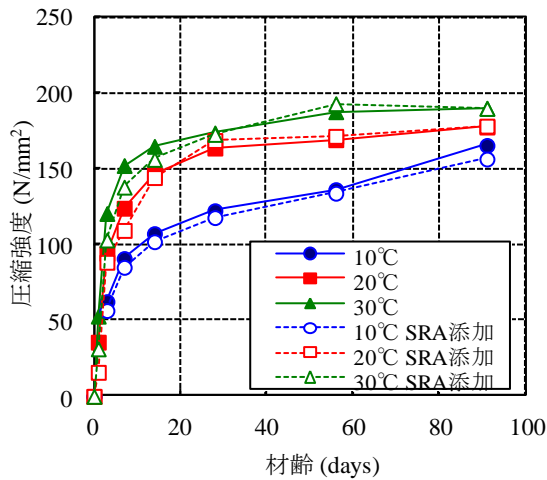


図-4 圧縮強度の経時変化

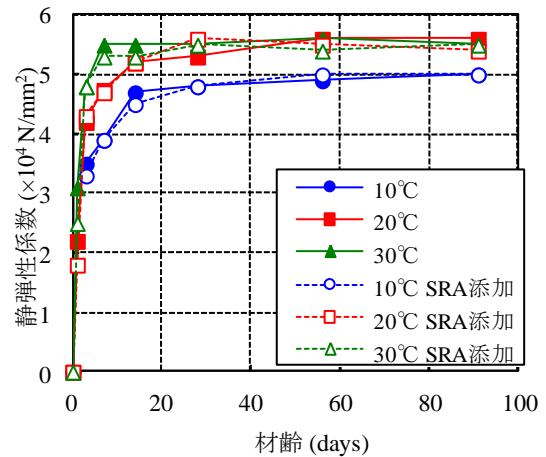


図-5 静弾性係数の経時変化

$$\sigma_{sh} = \rho E_s \varepsilon_s \quad (1)$$

ここで、 σ_{sh} : 養生中に発生した収縮応力 (N/mm²)、 ρ : 鉄筋比、 E_s : 鋼材の弾性係数 (N/mm²)、 ε_s : 養生中に発生した鋼材のひずみ

2.6 荷重-開口変位関係と破壊エネルギーの計測方法

ここでは「切欠きはりを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) ⁵⁾ に従い、切欠きを有するはりの3点曲げ試験を行った (図-3)。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。クリップゲージを用いて、切欠き開口部の変位を測定した。破壊エネルギー G_F の算出には、JCI-S-002-2003 に従い、

式(2)を用いており、全水準における W_0 は、得られた荷重-開口変位関係を台形近似して算出した。

$$G_F = (0.75W_0 + W_1) / A_{lig} \quad (\text{N/mm}) \quad (2)$$

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、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

表-3 は、各養生温度、各材齢における圧縮強度 f_c 、静弾性係数 E_c 、ひび割れ発生強度 f_{cr} 、破壊エネルギー G_F

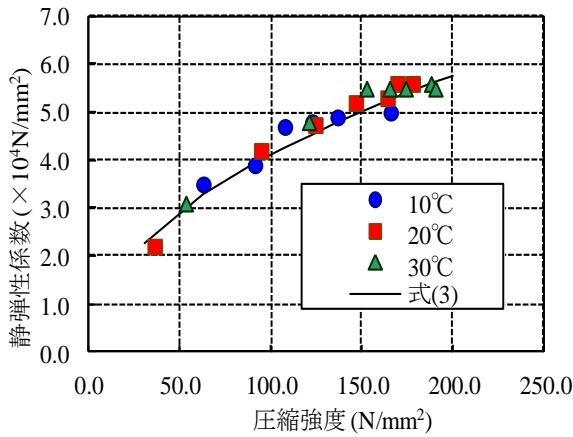


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

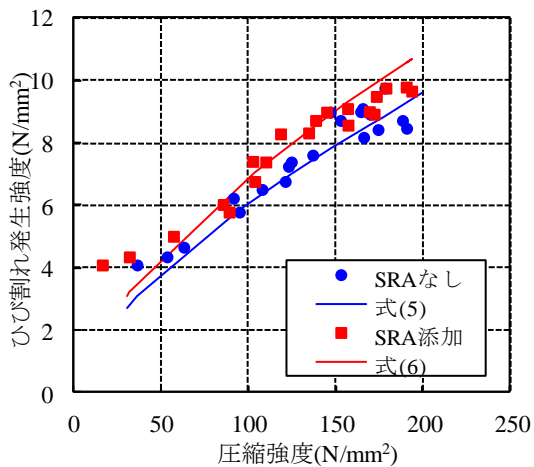


図-8 圧縮強度とひび割れ発生強度の関係

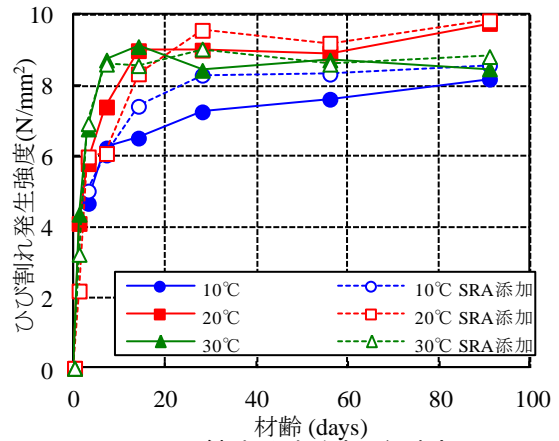


図-7 ひび割れ発生強度の経時変化

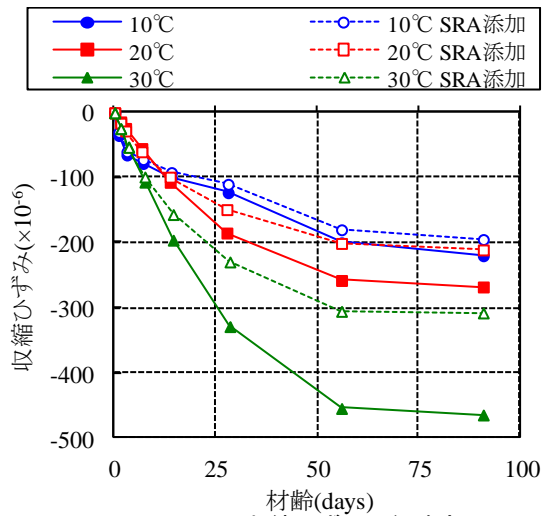


図-9 収縮ひずみの経時変化

の一覧を示したものである。

3.1 強度特性

(1) 圧縮強度と静弾性係数

図-4 は圧縮強度の経時変化を示したものである。ここでは、養生温度 20°C、30°Cの水準においては材齢 28 日を過ぎると、圧縮強度の増進はわずかとなった。しかし、養生温度 10°Cでは、材齢が進むにつれ、圧縮強度が増加しており、91 日以降でも増大する可能性があると考えられる。また、材齢 91 日では、30°Cで 190N/mm²、20°Cで 178N/mm²、10°Cで 168N/mm²となっており、標準熱養生を行った UFC($f_c=210\text{N/mm}^2$)に比べて、若干ではあるが圧縮強度が低下することが確認された。また、SRA 無添加の水準と、SRA 添加の水準における圧縮強度は、28 日以前の初期強度は若干低下することがあるが、28 日以降では、ほぼ同等の値となっており、SRA の添加は大きな影響を及ぼさないことが分かる。

図-5 は静弾性係数の経時変化を示したものである。ここでは、養生温度によらず、材齢 28 日以降の静弾性係数は、ほぼ一定となった。また、標準熱養生を行った UFC ($E_c=5.3\times 10^4\text{N/mm}^2$) とほぼ同等となっていることが確認された。次に、SRA 無添加の水準と SRA 添加の水準を比較すると、静弾性係数は、ほぼ同等の値となってお

り、SRA の添加は静弾性係数に影響を与えないことが確認された。

図-6 は圧縮強度と静弾性係数の関係を示したものである。ここでは、養生温度によらず、静弾性係数と圧縮強度には相関があることが分かった。そこで、静弾性係数 E_c と圧縮強度 f_c' の関係として、回帰分析により式(3)を実験的($R^2=0.83$)に定めた。

$$E_c = 4.3 \times f_c'^{0.49} \quad (3)$$

(2) ひび割れ発生強度

図-7 はひび割れ発生強度の経時変化を示したものである。ここで、養生温度 20°C、30°Cの材齢 28 日以降では、ほぼ一定のひび割れ発生強度となるが、10°Cでは漸増していた。これは、圧縮強度の経時変化の挙動と同様の傾向である。材齢 91 日におけるひび割れ発生強度は、20°Cで 9.8N/mm²、30°Cで 8.5N/mm²となっており、標準熱養生の水準 ($f_{cr}=8.9\text{N/mm}^2$) と概ね同等となった。次に、SRA 無添加の水準と SRA 添加の水準を比較すると養生温度によらず、SRA の添加により、ひび割れ発生強度が概ね増大する傾向を示している。また、養生温度が 20°C、30°Cにおいて、材齢 91 日のひび割れ発生強度は、標準熱養生の水準 ($f_{cr}=9.5\text{N/mm}^2$) と概ね同等となるこ

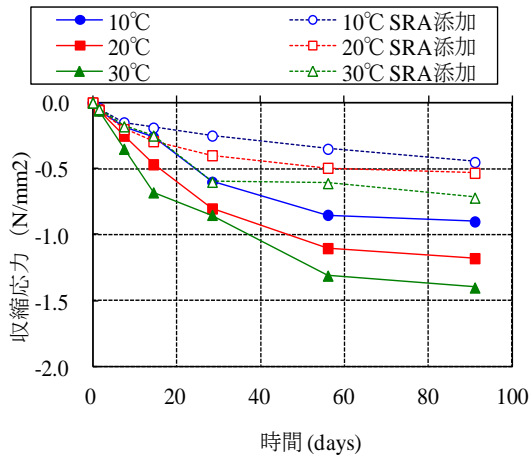
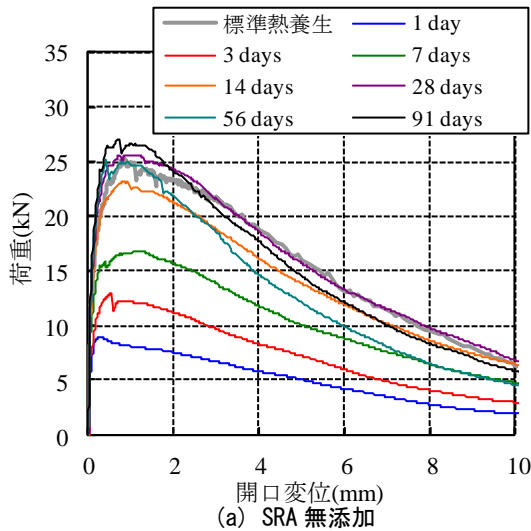
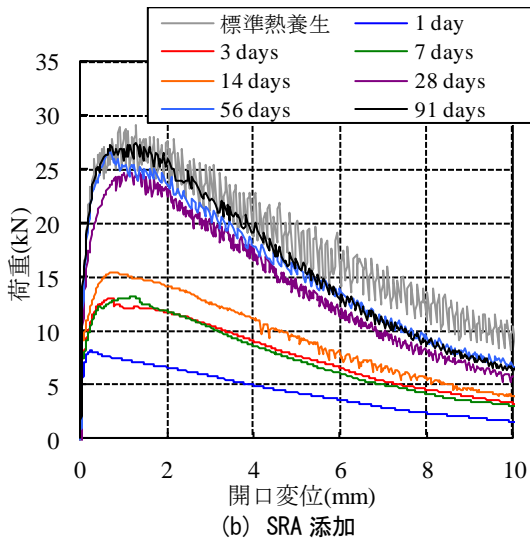


図-10 収縮応力の経時変化



(a) SRA 無添加



(b) SRA 添加

図-11 荷重-開口変位関係 (養生温度 20°C)

とが確認された。

図-8 は圧縮強度とひび割れ発生強度の関係を示したものである。ここでは、圧縮強度とひび割れ発生強度に相関があると判断されたため、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾に示されている引張強度と圧縮強度の特性値との関係式(式(4))を参考にして、ひび割れ発生強度 f_{cr} と圧縮強度 f'_c の関係式について、回帰分析を行って式(5)、

式(6)を得た。ここで、式(5)は SRA 無添加の水準、式(6)は SRA 添加の水準を対象としたものである。

$$f_{ik} = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} \quad (4)$$

$$f_{cr} = 0.29 f'_c{}^{2/3} \quad (5)$$

$$f_{cr} = 0.33 f'_c{}^{2/3} \quad (6)$$

ここで、 f_{ik} ：引張強度(N/mm²)、 f'_{ck} ：圧縮強度の特性値(N/mm²)

3.2 収縮特性

(1) 収縮ひずみ

図-9 は収縮ひずみの経時変化を示したものである。ここで、全水準において、材齢 56 日以降で概ね一定の値になることが分かった。SRA 無添加の水準では、養生温度が上昇するにつれ、収縮ひずみが増大している。特に、養生温度が 30°C、材齢 91 日で -460×10^{-6} の収縮ひずみが発生することが確認された。また、養生温度が 30°C で、SRA を添加すると、収縮ひずみは、減少し、 -310×10^{-6} 程度になった。また、養生温度 30°C において、大幅に収縮ひずみが減少することが分かった。

(2) 収縮応力

図-10 は収縮応力の経時変化を示したものである。ここで、材齢 56 日以降で、発生する収縮応力は概ね一定となった。また、養生温度が低くなるにつれて、収縮応力が小さくなった。さらに、SRA の添加により、発生する収縮応力は大幅に小さくなり、養生温度が 20°C、30°C の水準で、 0.5 N/mm^2 程度の収縮応力(引張：正)が発生していることが確認された。

3.3 破壊力学特性

(1) 荷重-開口変位関係

図-11 は、養生温度が 20°C で、各材齢における荷重-開口変位関係を示したものである。(a)は SRA 無添加の水準、(b)は SRA 添加の水準を示したものである。(a)において、材齢が進むにつれ、最大荷重が増大していることが分かるが、材齢 28 日、56 日、91 日の水準は、それぞれ概ね一致しており、標準熱養生を行った UFC と類似した挙動を示していることが確認された。また、(b)では、(a)と同様に、材齢の増加とともに最大荷重は増大しているが、材齢 28 日、56 日、91 日の荷重-開口変位関係は概ね一致したことに加え、標準熱養生を行った UFC と概ね同等の挙動を示すことが分かった。ただし、これらの水準では、最大荷重以降、大きな増減を繰り返して、荷重が全体的に低下する挙動を示した。試験終了後、破断面の目視観察を行ったが、鋼繊維の破断は認められず、繊維が抜け出していることが確認された。よって、SRA の添加により、マトリクスと鋼繊維の付着性能が向上しており、鋼繊維がマトリクスとの付着切れを起こした際に急激に引き抜けるため、このような現象になったものと推察される。

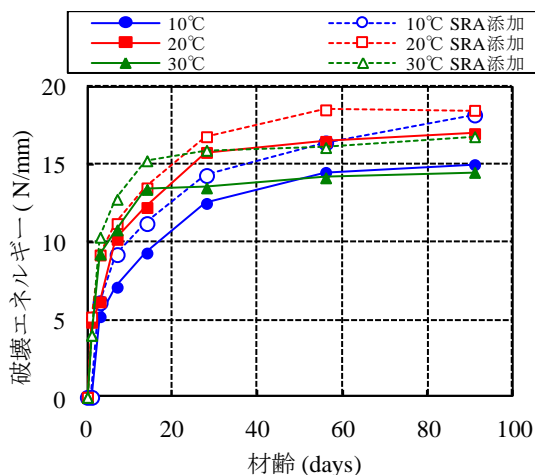


図-12 破壊エネルギーの経時変化

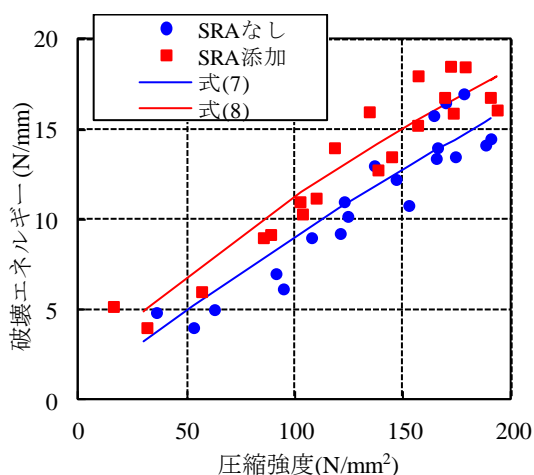


図-13 圧縮強度と破壊エネルギーの関係

(2) 破壊エネルギー

図-12 は破壊エネルギーの経時変化を示したものである。SRA 無添加の水準で、養生温度が 20℃、30℃の水準においては、材齢 56 日以降ではほぼ一定となり、標準熱養生を行った UFC ($G_F=15.4 \text{ N/mm}$) と同等の破壊エネルギーになった。また、養生温度 10℃の水準では、破壊エネルギーは漸増しており、材齢 91 日以降でも増加する可能性があると考えられる。次に、SRA 添加の水準では、材齢 56 日以降養生温度によらず、破壊エネルギーが一定となっており、標準熱養生を行った水準 ($G_F=18.6 \text{ N/mm}$) と概ね同等になることが分かった。また、養生温度によらず、SRA の添加により破壊エネルギーが増大していることが分かった。

ここで、SRA を添加することでひび割れ発生強度 f_{cr} や破壊エネルギー G_F が向上した原因には、収縮を鋼繊維が拘束することでマトリクスに生じる引張応力を抑制できることと、マトリクスと鋼繊維の界面に生じる収縮応力を低減し、微細収縮ひび割れを抑制することで鋼繊維の架橋効果を向上できること、鋼繊維とマトリクスの付着が向上し鋼繊維が大きな引張力を分担できるようになったことによるものと考えられる。

図-13 は、SRA 無添加の水準と SRA 添加水準にお

ける圧縮強度と破壊エネルギーの関係を示したものであるが、両者には概ね良好な相関があることが確認された。そこで、破壊エネルギー G_F と圧縮強度 f_c の関係を実験的に定めた。ここで式(7)は SRA 無添加の水準、式(8)は SRA 添加の水準を対象としている。

$$G_F = 0.18 f_c^{0.85} \quad (7)$$

$$G_F = 0.45 f_c^{0.7} \quad (8)$$

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に纏める。

- (1) 圧縮強度、静弾性係数の経過時間を明らかにした。また、圧縮強度は標準熱養生を行った UFC には及ばないものの、養生温度が 20℃、30℃で、材齢 28 日以降の静弾性係数は同等となった。さらに、SRA の添加は、圧縮強度、静弾性係数には大きな影響を及ぼさないことが分かった。
- (2) ひび割れ発生強度の経時変化を明らかにした。養生温度が 20℃、30℃で、材齢 28 日以降のひび割れ発生強度は、標準熱養生を行った UFC とほぼ同等となった。また、SRA を添加すると、養生温度によらず、ひび割れ発生強度が増大することが分かった。
- (3) 収縮応力、収縮ひずみの経時変化を明らかにした。また、熱養生を行わなくても、SRA の添加により、大幅に減少できることが分かった。
- (4) 荷重-開口変位関係、破壊エネルギーの経時変化を明らかにした。養生温度 20℃では、材齢が 28 日を超えると、荷重-開口変位関係は、熱養生を行った UFC の結果と概ね一致し、破壊エネルギーもほぼ同等になった。また、SRA の添加により、養生温度、材齢によらず、破壊エネルギーは増大することが分かった。

参考文献

- 1) Richard.P, Cheyrezy.M : Composition of Reactive Powder concretes, cement and Concrete Research, Vol.25, No.7, 1501-1511, 1995
- 2) たとえば、川口哲生, 河野克哉, 橋本勝文, 横田弘 : 内部に補強用鋼材を配置した超高強度繊維補強コンクリートのひび割れ幅に関する研究, vol.35, No.2, pp.1255-1260. 2012.7
- 3) 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
- 4) 日本コンクリート工学協会 : 自己収縮研究委員会報告書, p195-198, 1996
- 5) 土木学会 : コンクリート標準示方書, 設計編, pp.34-37, 2007.
- 6) http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.htm