

論文 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ひび割れ特性に関する研究

川口 哲生*1・河野 克哉*2

要旨：収縮低減剤(SRA)を添加し、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(UFC)のひび割れ特性（ひび割れ幅、ひび割れ発生荷重）について検討を行った。ここでは、試験体のかぶり、SRAの種類を試験水準として、両引き試験を行い、SRAの種類がひび割れ特性に及ぼす影響について検討を行った。その後、SRAを添加したUFCの破壊力学特性を組み込むことで、筆者らがこれまでに提案したUFCのひび割れ幅推定式の改良を図った。また、UFC製RCはりの曲げ試験において、SRAの添加がひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行うとともに、ひび割れ幅の推定精度について検証を行った。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、ひび割れ幅、収縮低減剤

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、高耐久性などの特徴を有しており、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と考えられる。しかし、養生中に、UFC内部に発生する収縮ひずみが大きいと、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¹⁾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に加えて、現行で市販されている収縮低減剤についても着目した。つまり、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、ひび割れ特性（ひび割れ幅、ひび割れ発生荷重）に及ぼす影響について検討を行った。さらに、試験体のかぶりを試験水準として、内部に補強鋼材を配置したRC部材の両引試験を実施した。使用したSRAは、市販されている低級アルコール系のSRA¹⁾（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。

UFCで用いている短繊維による架橋効果は、従来のコンクリートよりも高いため、ひび割れ幅について、従来のコンクリートを対象とした推定手法では適切に評価できないことが分かっている²⁾。そこで、筆者らは、破壊力学エネルギーに着目することで、UFCのひび割れ幅の推定式に関する検討を行ってきた²⁾。これらを踏まえ、本研究では、SRAを添加したUFCのひび割れ幅推定式にも適用できる様に、推定式の改良を行うこととした。そこで、軸方向鋼材を内部に配置したUFCを対象に両引試験を実施して、ひび割れ特性を把握し、SRAの添加が及ぼ

す影響について検討を行い、筆者らが提案したひび割れ幅の推定式の改良を図った。また、両引き試験と併せて、SRAを添加したUFCを用いたはり部材の載荷試験により、SRAの添加が曲げひび割れに及ぼす影響を検討するとともに、実験的に定めたひび割れ幅推定式の適用性の検証を行った。

2. 実験概要

2.1 試験水準

表-1 は両引試験の試験水準を示したものである。試験要因は、SRAの種類、かぶりである。対象とした短繊維は、鋼繊維（以降FMと表記）である。試験体長さを1500 mm（以下、シリーズ1と略記）、2000 mm（以下、シリーズ2と略記）、500mm（以下、シリーズ3）の3水準とした。ここでシリーズ2、シリーズ3は筆者らが過去に実施したものである²⁾。シリーズ1においては、かぶりを変化させ、軸方向鋼材比を変化させている。また、繊維混入率は、シリーズ1では2.0%としており、シリーズ2、シリーズ3では、1.0～3.0%の範囲で設定したものである。また、比較として繊維を混入しないケース（以降、NFと表記）についても検討を行った。表-2は使用材料、表-3は示方配合を示したものである。使用したSRAは、市販されているもの（SRA1）と、UFC向けに新規に開発したもの（SRA2）であり¹⁾、添加量は15kg/m³である。ただし、SRA2は難溶性であるため、Wに対して外割りで添加した。また、消泡剤を添加して空気量の調整を行っており、SRA1にはポリエーテル系（以下、T-Aと表記）、SRA2にはシリコーン系（以下、T-Bと表記）を添加し、T-Aの添加量はB×0.02%、T-Bの添加量は(SRA2)×5%とした。ここでは、UFCの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。フロー値については、

*1 (株)太平洋コンサルタント コンクリート技術部 博(工) (正会員)

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

表－1 試験水準（両引き試験）

No.	名称	繊維混入率(vol.)	SRA			試験体長さ (mm)	かぶり (mm)	断面寸法 (mm×mm)	シリーズ
			なし	SRA1	SRA2				
1	FM2.0%	2.0	○	-	-	1500	10	42×42	シリーズ1
2			○	-	-		20	62×62	
3			○	-	-		30	82×82	
4			○	-	-		40	100×100	
5	FM2.0% +SRA1		-	○	-		10	42×42	
6			-	○	-		20	62×62	
7			-	○	-		30	82×82	
8	FM2.0% +SRA2		-	○	-		40	100×100	
9			-	-	○		10	42×42	
10			-	-	○		20	62×62	
11			-	-	○		30	82×82	
12			-	-	○		40	100×100	
13	FM2.0%	2.0	○	-	-	2000	40	100×100	シリーズ2
14	FM3.0%	3.0	○	-	-				
15	NF	0.0	○	-	-				
16	FM1.0%	1.0	○	-	-	500	40	100×100	シリーズ3
17	FM2.0%	2.0	○	-	-		40		
18	FM3.0%	3.0	○	-	-		40		

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	$T-A$	ポリアルキレングリコール誘導体
		$T-B$	シリコン系

表－3 示方配合

No.	名称	繊維混入率(vol.%)	単位量 (kg/m ³)							
			W	$P_{mix}+S_a$	S_F	SP	SRA1	SRA2	$T-A$	$T-B$
1	FM2.0%	2.0	180	2254	157	28	0	0	-	-
2	FM2.0%+SRA1						15	0	B×0.02%	-
3	FM2.0%+SRA2						0	15	-	(SRA2)×5%
4	FM1.0%	1.0	182	2277	79	27	-	-	-	-
5	FM2.0%	2.0	180	2254	157	28	-	-	-	-
6	FM3.0%	3.0	178	2230	236	29	-	-	-	-
7	NF	0	184	2300	0	27	-	-	-	-

高性能減水剤添加量を調整することにより、270±20 mm の範囲内となるように管理を行った。また、養生は練混ぜ終了後、20℃の恒温室で 24 時間静置した後、90℃48 時間の標準熱養生³⁾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、試験体断面の中心位置に、異型 PC 鋼棒 ($D=22.0$ mm) を配置している。載荷は静的単調に、軸方向鋼材

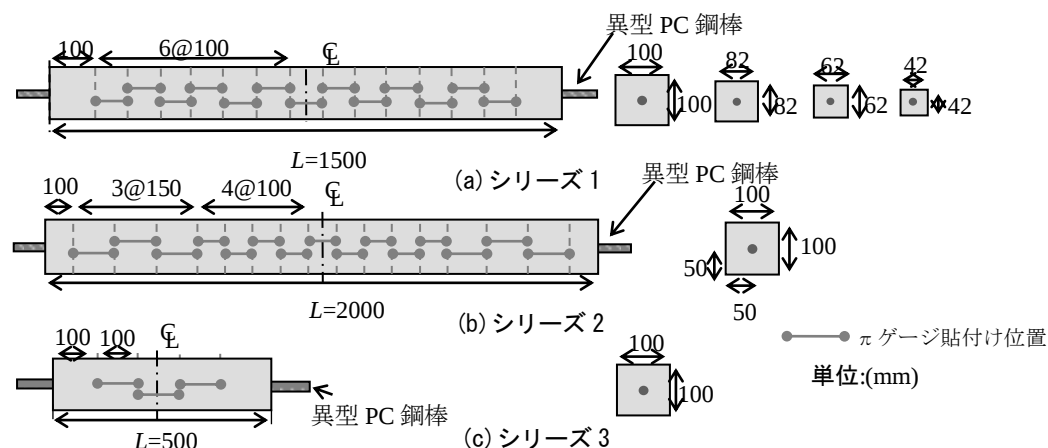


図-1 試験概要(両引き試験)

表-4 コンシステンシー試験, 強度試験および破壊エネルギーの測定結果

名称	フレッシュ性状		強度特性		
	フロー値 (mm)	空気量(%)	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	ひび割れ発生強度* f_{cr} (N/mm ²)	破壊エネルギー G_F (N/mm)
FM2.0%	272	3.8	229	8.2	16.5
FM2.0%+SRA1	280	3.5	229	9.5	18.9
FM2.0%+SRA2	272	2.5	208	10.6	20.4
NF	268	2.8	221	8.9	0.03
FM1.0%	-	-	209	9.2	10.2
FM3.0%	-	-	206	12.1	40.3

*: 割裂引張試験より算出

表-5 両引き試験結果

No.	名称	かぶり (mm)	養生中に発生 したひずみ	ひび割れ発生荷重(kN)	ひび割れ幅 最大(mm)	ひび割れ間隔 (mm)	ひび割れ本 数(本)
1	FM2.0%	10	612	4.9	0.135	25	42
2		20	566	28.4	0.142	31	38
3		30	488	43.1	0.148	41	34
4		40	462	67.6	0.164	52	26
5	FM2.0%+SRA1	10	512	8.8	0.074	23	48
6		20	499	36.6	0.082	22	43
7		30	466	45.6	0.099	36	39
8		40	396	86.2	0.098	40	30
9	FM2.0%+SRA2	10	495	12.5	0.086	20	51
10		20	501	46.6	0.095	25	45
11		30	456	58	0.094	36	43
12		40	364	92.1	0.103	38	34
13	FM2.0%	40	388	80.9	-	125	21
14	FM3.0%		360	123.4	-	127	18
15	NF		612	50.6	-	73	23
16	FM1.0%		-	63.3	-	-	3
17	FM2.0%		-	79.5	-	-	4
18	FM3.0%		-	117.7	-	-	1

を引張ることで、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、軸方向鋼材ひずみ(長手軸方向中央部)とした。

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。シリーズ 1 における計測区間は 1300mm, シリーズ 2 では 1800mm, シリーズ 3 では 300mm である。また、管理試験として、圧縮強度とひび割れ発生強度の計測を行うとともに、切欠きを有するはりの 3 点曲げ試験を行い、(JCI-S-002-2003) に

基づき破壊エネルギーと引張軟化曲線⁴⁾を算出した。

3. 実験結果

3.1 強度試験結果と破壊エネルギー

表-4 は、コンシステンシー試験結果と強度、破壊エネルギーの測定結果を示したものであり、ひび割れ発生強度は割裂引張試験より求めたものである。ここでは、SRA の添加によりひび割れ発生強度と破壊エネルギーが増大する傾向を示しているが、200N/mm² 以上の圧縮強度を確保できていることがわかる。

3.2 SRA を添加した UFC のひび割れ特性

表-5 は両引試験結果を示したものである。ここで、収縮ひずみは、耐熱処理を施したひずみゲージを鋼材の軸方向中心部に貼り付け、計測したものである。図-2 は、シリーズ1 から得られた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抑制されており、概ね 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。図-3 は、シリーズ1 から得られたひび割れ発生荷重とかぶりの関係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た。これは、図-2 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。また、FM2.0%+SRA1 と FM2.0%を比較すると、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。そのため、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いることから、かぶりを小さくする場合、すなわち軸方向鋼材比を大きくする場合において、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-4 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、かぶりの増加に伴い、発生するひび割れ幅は増大する傾向があるものの、SRA を添加することで、ひび割れ幅を大幅に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 のひび割れ幅を上回るが、

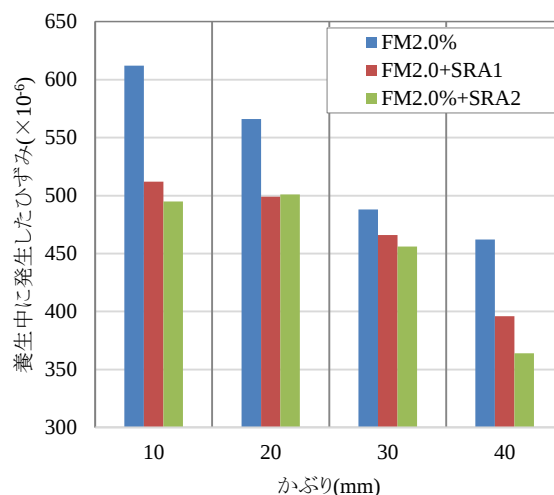


図-2 養生中に発生したひずみとかぶりの関係

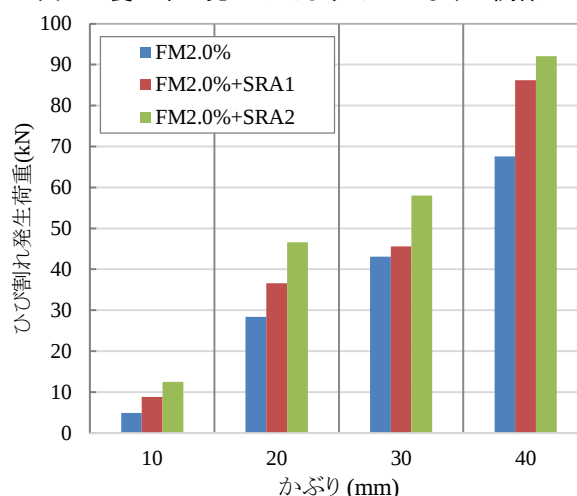


図-3 ひび割れ発生荷重とかぶりの関係

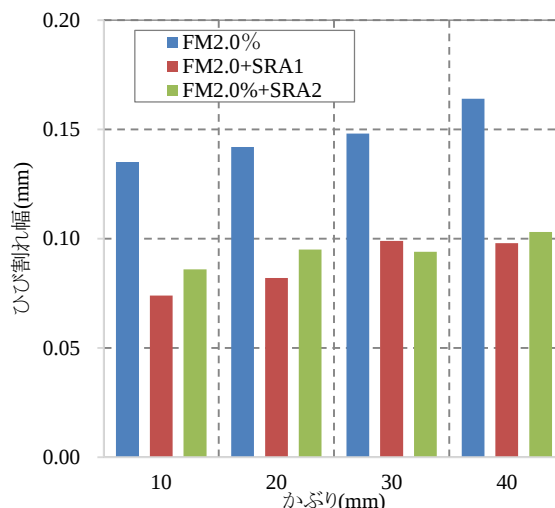
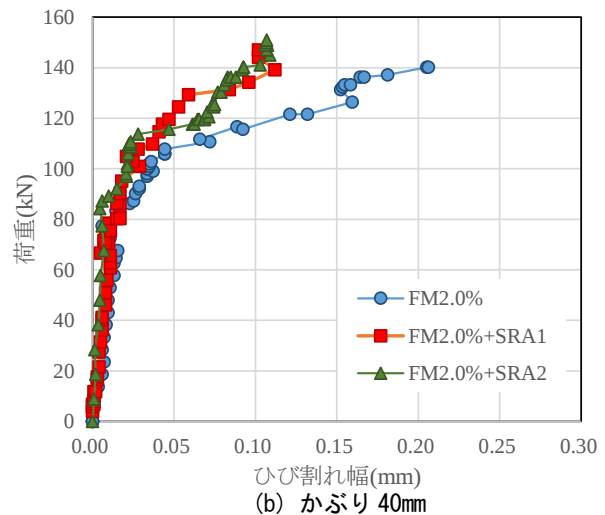
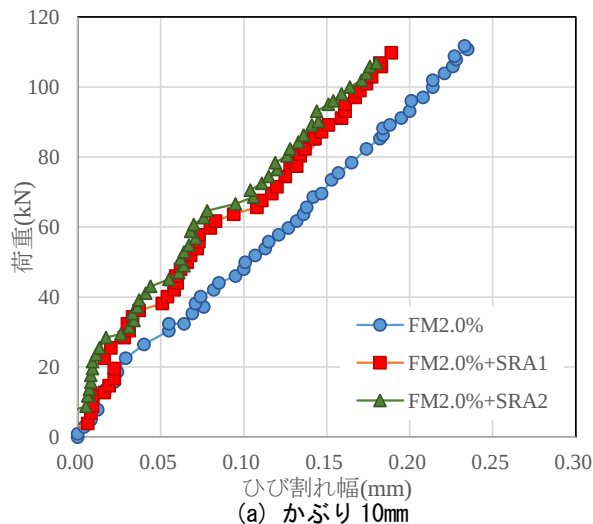


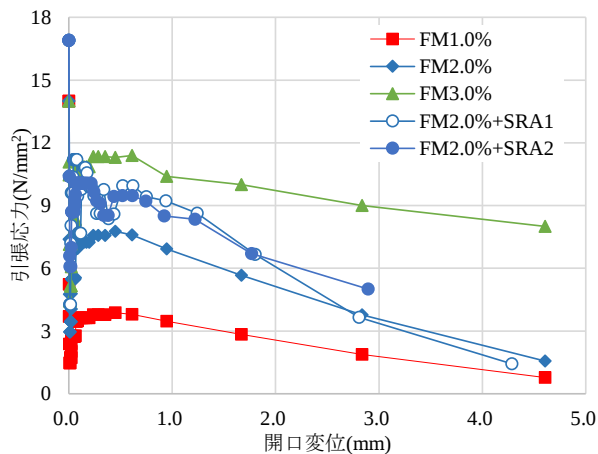
図-4 ひび割れ幅とかぶりの関係

かぶり 30mm 以上では、概ね同等になることが確認された。

図-5 は、シリーズ1 におけるかぶり 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-5 (a) と (b) を比較すると、かぶりによらず、SRA の添加により、荷重-ひび割れ幅の関係は大きく変化しているが、SRA1 と SRA2 には大きな差異は確認さ



図－5 荷重-ひび割れ幅の関係



図－6 引張軟化曲線

れなかった。つまり、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が原因と考えられる。また、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ことに加えて、更なる検討が必要であるがマトリクスと短繊維の付着が向上したためと考えられる。

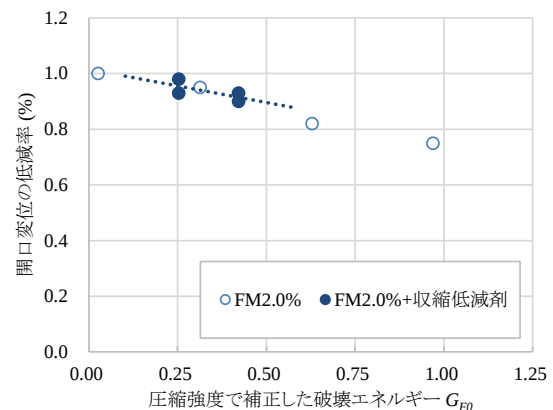
3.3 ひび割れ幅の推定方法とその検証

筆者らは、軸方向補強鋼材を内部に配置した UFC のひび割れ幅の推定式について検討を行ってきた²⁾。これは、角田らが提案した従来のコンクリートを対象とした推定式に、圧縮強度で補正した破壊エネルギーを考慮することで、実験的に定めたものであり、式中の α_{FM} が、短繊維によるひび割れ幅の低減効果を表現したものである(式(1))。

$$w_{FM} = 5.4c \cdot \alpha_{FM} \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_{FM} = (-0.7G_{F0} + 0.9) \quad (2)$$

c : かぶり (mm), σ_{se} : 鋼材の引張応力度 (N/mm²), E_s : 鋼材のヤング係数 (N/mm²), ε'_{csd} : コンクリートの収縮・



図－7 開口変位の低減率と圧縮強度で補正した破壊エネルギーの関係

クリープ等によるひずみ ($=400 \times 10^{-6}$), G_{F0} : 圧縮強度の影響を考慮した破壊エネルギー

SRA を添加した UFC のひび割れ幅推定式を検討するために、本研究においても、SRA を添加した UFC の破壊力学特性に着目した。図－6 に示す引張軟化曲線では、繊維混入率により程度の差はあるものの、他の水準と同様に、引張応力は急激に低下していないことから、短繊維によるブリッジングが支配的であると考えられる。そのため、引張軟化曲線下の面積すなわち破壊エネルギーが、ひび割れ幅の拡大に影響を及ぼすものと仮定した。ただし、圧縮強度の影響を考慮した破壊エネルギー G_{F0} を用いた。これは、CEB-FIP model code 90 に基づいたもので、式(3)となる⁵⁾。

$$G_{F0} = G_F / f_c^{0.7} \quad (3)$$

ここに G_{F0} : 圧縮強度で補正した破壊エネルギー, G_F : 破壊エネルギー (N/mm), f_c : 圧縮強度 (N/mm²)

図－7 は圧縮強度で補正した破壊エネルギーと短繊維補強によるひび割れ幅の低減係数の関係を示したものである。ここで、ひび割れ幅の低減係数は、各水準において実験より得られた最大ひび割れ幅と NF における最大

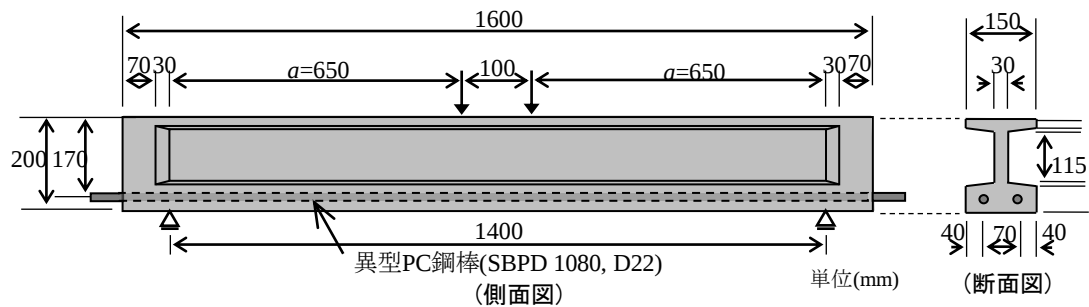


図-8 曲げ試験を行った RC はりの概要

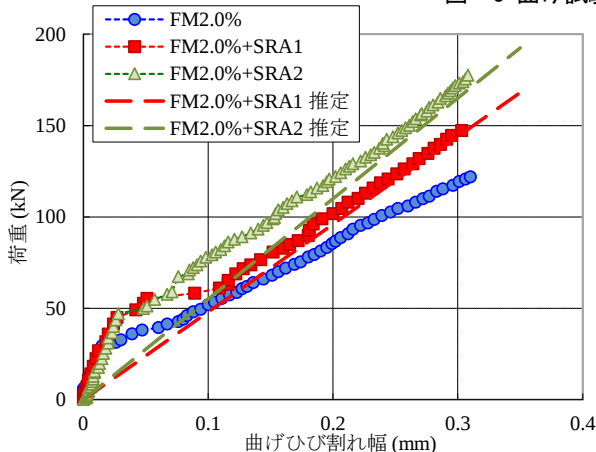


図-9 荷重-曲げひび割れ幅の関係

ひび割れ幅との比と定義した。同図に示す様に、ひび割れ幅の低減率と圧縮強度で補正した破壊エネルギーには相関があり、SRA を添加した FM2.0%の低減率として式(4)が成立することがわかった。

$$\alpha_{FM+SRA} = (-0.2G_{F0} + 1.0) \quad (4)$$

以上より、本研究の範囲に限定すると、FM のひび割れ幅(w_{FM+SRA})の推定式は式(5)となる。

$$w_{FM+SRA} = 5.4c(-0.2G_{F0} + 1.0) \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s + \varepsilon'_{csd}} \right) \quad (5)$$

ここでは ε'_{csd} を便宜的に 400×10^{-6} とした。この値は、No.4, No.13 において、戴荷開始時に鋼材に発生したひずみに基づき実験的に定めたものである。

次に、軸方向鋼材を有する RC はりのひび割れ幅の推定を行い、式(5)の推定精度の検証を行った。図-8 は、対象とした RC はりの概要を示したものであるが、筆者らが過去に実施したものである⁶⁾。対象とした RC はりの寸法は、高さ 200mm、幅 150mm、有効高さ 170mm、 $a/d=3.8$ としたものである。ここでは、FM2.0%、FM2.0%+SRA1、FM2.0%+SRA2 の試験体を製作した。戴荷は静的単調に行っており、等モーメント区間を 100mm とし、標点距離 50mm の π ゲージを千鳥状に貼り付け、曲げひび割れ幅を計測した。図-9 は RC はり部材の曲げ試験より得られた荷重と曲げひび割れ幅の関係である。ここでは実験より得られた荷重-鋼材ひずみの関係から、鋼材応力を算出して、式(5)より荷重-曲げひび割れ幅の関係を算出した。同一荷重において、FM2.0%、FM2.0%+SRA1、FM2.0%+SRA2 の順にひび割れ幅が小さくなるのがわかる。つまり、UFC はり部材においても、SRA の添加により曲げひび割れ幅の抑制が可能であり、

ひび割れ幅の抑制については、SRA2 が最も高い効果を有していることが分かる。また、式(5)による推定結果と比較すると、曲げひび割れ幅 0.1mm 以下は実験値と一致しておらず、検討の余地があるものと考えられるが、安全側に評価できており、実用的な範囲で、概ね良好に曲げひび割れ幅を推定できていることが分かる。

4. 結論

本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) 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 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り、SRA1 より SRA2 が有する収縮低減効果が高くなることが確認された。さらに、SRA の添加により、荷重とひび割れ幅の関係は変化し、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確認された。
- (2) 圧縮強度で補正した破壊エネルギーをパラメータの一つとして、SRA を添加した FM2.0%を用いた RC はり部材のひび割れ幅推定式を実験的に定めた。RC はりの曲げ試験結果と推定結果を比較すると、改善の余地はあるが、実験結果を概ね推定できていることが確認された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.1255-1260，2013.
- 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) http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.html
- 5) CEB：CEB-FIP Model Code 1990，Bulletin d' Information，No.213/214，pp.33-43，1993.
- 6) 河野克哉，川口哲生，森香奈子，田中敏嗣：超高強度繊維補強コンクリートを用いた RC はりのせん断特性に及ぼす高級アルコール系収縮低減剤の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1273-1278，2012.