

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と普通コンクリートからなる複合 RC はりの曲げ・せん断破壊性状

川口 哲生^{*1}・森 香奈子^{*2}・河野 克哉^{*3}・田中 敏嗣^{*4}

要旨: 本研究では、内部に鉄筋を配置し、収縮低減剤を添加した UFC と普通コンクリートからなる複合 RC はりを対象に、軸方向鋼材の種類・配筋量を変化させ、曲げ破壊、せん断破壊時の破壊性状について検討を行った。ここでは、成分が異なる 2 種類の収縮低減剤が、複合 RC はりのひび割れ発生荷重、最大荷重に及ぼす影響について検討を行った。試験の結果、収縮低減剤の添加により、軸方向鋼材に発生するひび割れが減少し、ひび割れ発生荷重が増加するだけでなく、曲げ破壊荷重、せん断破壊荷重が向上することが確認された。さらに、収縮低減剤種類、配筋条件によっては、軸破壊形態が変化することが確認された。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート、収縮低減剤、複合 RC はり、埋設型枠

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート¹⁾ (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : 以下「UFC」と略記) は、非常に緻密な硬化体組織を有するだけでなく、高強度の鋼繊維を混入しているため、設計に見込めるほどの高い引張抵抗力を有する材料である。筆者ら²⁾は、この特徴に着目し、施工性の向上、耐荷力の向上、耐久性の向上を図るために、主鉄筋を内部に配置した UFC 製埋設型枠にコンクリート充填し、一体化させた複合 RC はりについて検討を行ってきた。一般に、UFC を用いた部材では、PC 鋼材を用いて、軸方向に対する補強は行われているが、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)と略記) では、原則として異型鉄筋による補強は行わないものとされている。これは、UFC の収縮が大きく、異型鉄筋の拘束により、UFC 内に引張応力が発生し、ひび割れ発生強度が低下する恐れがあるためである。そのため、これまでは、低減剤を添加した UFC を対象として検討を行ってきたが、1 種類の収縮低減剤についてのみ検討しており、破壊形態が曲げ破壊となる場合のみ検討してきた。そのため、収縮量が異なる収縮低減剤を用いた場合だけでなく、せん断破壊する場合における破壊性状は不明である。そこで本研究は、異なる収縮低減剤種類についても検討を行うこととし、さらにせん断破壊する場合における破壊性状についても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 は試験水準を示したものである。試験水準は収

縮低減剤の種類と軸方向鋼材の種類・配筋量である。ここでは、せん断補強筋を配置せず、軸方向鋼材のみ配置し、有効高さを一定としたまま軸方向鋼材を変化させた。具体的には、曲げ破壊となることを意図した水準、(D10(SD295A)×2 本を配置、以降、シリーズ 1 と表記)、D10(SD295A)×3 本を配置した水準 (以降、シリーズ 2 と表記)、せん断破壊となることを意図した水準、(細径異型 PC 鋼棒×3 本を配置、以降、シリーズ 3 と表記) とした。表-2 は、使用材料を示したものであるが、UFC は、指針 (案)³⁾ に規定されている標準配合粉体と、水道水、高性能減水剤、鋼繊維により構成されるセメント系材料である。ここで、UFC 製埋設型枠内に充填する普通コンクリートは、載荷時の強度が普通強度レベルとなる様に材料・配合を選定した。

2.2 配合

表-3 は、UFC の示方配合、表-4 は、使用したコンクリートの示方配合を示したものである。ここで使用した収縮低減剤は 2 種類である。SRA-1 は、市販品であり SRA-2 は新規に開発したものである。(以降、収縮低減剤を添加していない UFC は「SRA なし」、SRA-1 を添加した UFC は「SRA-1」、SRA-2 を添加した UFC は「SRA-2」と略記)。収縮低減剤の添加量は 15kg/m^3 とした。これは事前に行った要素試験⁴⁾により定めた。ただし、SRA-1 は易溶性であるため練混ぜ水に内割置換としたが、SRA-2 は難溶性であるため、外割とした。また、UFC 製埋設型枠内に打ち込むコンクリートでは、早強セメントを用いて、材齢 7 日後の載荷試験時の圧縮強度が $30\sim 40\text{N/mm}^2$ となる様に、W/C を 50% と設定した。

*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 副主任研究員 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 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 試験水準

No.	収縮低減剤			使用鋼材	鋼材本数(本)	軸方向鋼材比(%)*	
	なし	SRA-1	SRA-2				
1	○			D10 (SD295A) ($f_y=355\text{N/mm}^2$)	2	0.52	シリーズ 1
2		○					
3			○				
4	○			D13 (SD295A) ($f_y=355\text{N/mm}^2$)	3	1.33	シリーズ 2
5		○					
6			○				
7	○			細径異型 PC 鋼棒 ($\phi=12.6\text{mm}$) ($f_y=1188\text{N/mm}^2$)	3	1.25	シリーズ 3
8		○					
9			○				

表-2 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-1	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	SRA-2	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	
コンクリート	セメント	早強セメント	C 密度:3.12 g/cm ³ , 比表面積:4650(cm ² /g)	
	細骨材	山砂	S 静岡県掛川産, 表乾密度:2.56 g/cm ³ , 粗粒率:2.68, 吸水率:2.40 %	
	組骨材	硬質砂岩	G 茨城県砂川産, 表乾密度:2.64 g/cm ³ , 粗粒率:7.00, 吸水率:0.64 %	
	混和剤	AE減水剤	Ad ₁	変性リグニンスルホン酸化合物
		AE剤	Ad ₂	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-3 UFCの示方配合

名称	単位量 (kg/m ³)					消泡剤		フロー値 (mm)
	W	P	SF	SP (水に含む)	SRA添加量 (kg/m ³)	T-A	T-B	
SRAなし				24.5	0		0	262
SRA-1	180	2254	157	24.5	15	0.02 (C×%)		258
SRA-2				24.5	15 (外割り)		5 (B×%)	250

表-4 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	Ad ₁ (C×%)	Ad ₂ (C×%)
50	46	165	330	807	980	1.0	0.002

2.3 試験体の製作と養生

図-1は複合RCはりの試験体概要を示したものである。ここでは、軸方向鋼材を内部に配置したUFC製埋設型枠を事前に製作し、コンクリートを打ち込んで、複合RCはりを製作した。試験体幅を150mm、せん断スパンを500mm、等モーメント区間を500mmとした。また、図-1に示す様に、長手軸方向中央部の主鉄筋表面に、耐熱性に優れたひずみゲージを貼り付け、UFC製埋設型枠の製作時から、載荷試験終了時まで、主鉄筋のひずみを計測した。

UFCとコンクリートを十分に一体化させるために、コンクリートと接するUFCの表面に円柱の突起を設けた。図-2はUFC表面に設置した突起の概要を示すものであるが、突起の直径は15mm、突起の高さは10mm、突起の中心間隔は30mmとした。ここでは小幡らの研究⁵⁾を参考にして、突起の寸法を選定した。UFCの練混ぜには容量100リットルの強制パン型ミキサーを用いた。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)を行い、管理を行った。フロー値については、高性能減水剤添加量を調整することにより、260±

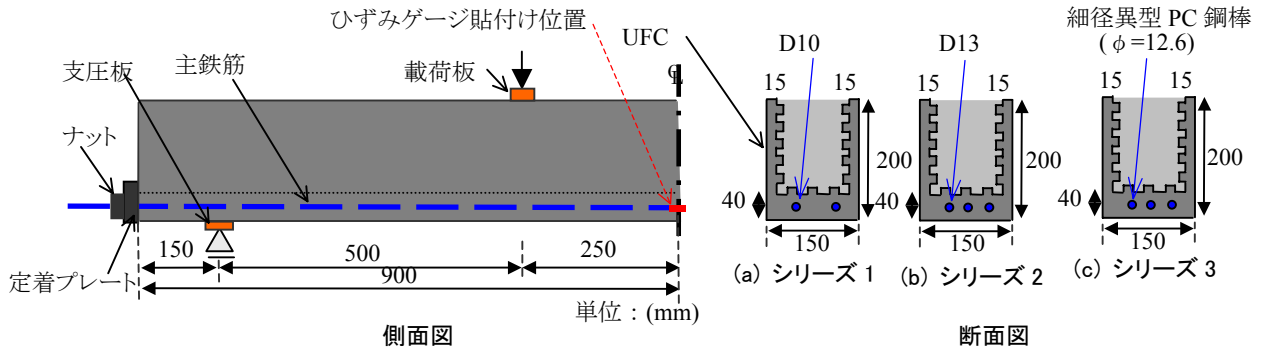


図-1 試験体概要



図-2 UFC 表面に設置した突起 (UFC とコンクリートの界面)

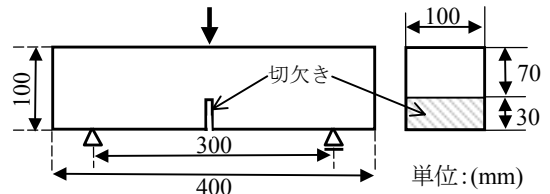
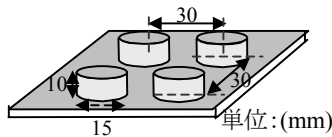


図-3 切欠きはりの3点曲げ試験

表-5 強度特性(UFC, コンクリート)

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー ギー(N/mm)
SRA なし	223.5	8.2	1.07×10 ⁴
SRA-1	226.5	10.3	1.15×10 ⁴
SRA-2	205.9	10.9	1.19×10 ⁴
コンクリート	38.4	2.11	計測せず

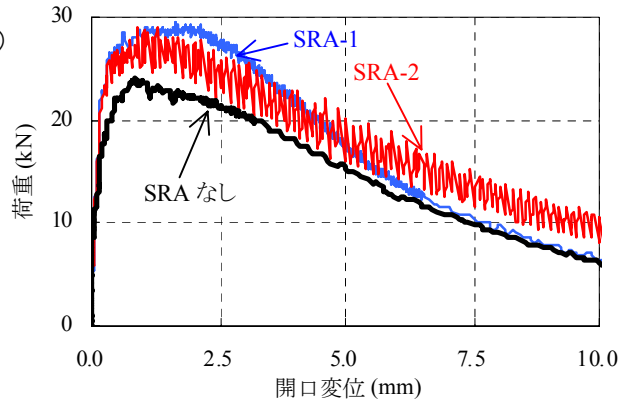


図-4 荷重-開口変位関係

10 mm の範囲内になるように管理を行った。UFC 埋設型枠の成型方法は、指針(案)³⁾に従った。ここでは、短繊維の配向が強度特性などに強く影響を及ぼすことが予想されるため、流込み速度を遅くして、短繊維の配向が偏るのを防いだ。UFC は、ほとんどブリーディングを生じないため、UFC と主鉄筋間の界面において、ブリーディングに起因する隙間は出来にくく、UFC と主鉄筋は十分に付着していると考えられる。次に、1 次養生として、ポリ塩化ビニリデンフィルムで試験体を覆い、20℃ 48 時間の封緘養生を行った。その後、最高温度を 90℃ として、48 時間保持する標準熱養生³⁾を行った。脱型時と熱養生終了時には、目視観察を行ったが、ひび割れの発生は確認されなかった。UFC の養生終了後、UFC 埋設型枠内部にコンクリートを打ち込み、20℃の恒温室で7日間の封緘養生を行った。コンクリートは 100 リットルの強制パン型ミキサーを用いて練り混ぜており、UFC 表面に配置した突起と十分に付着するために必要な流動性を確保するため、スランプが 10±2.5 cm となるように配合を選定した。また、管理試験として、圧縮強度、割裂

引張強度の計測を行った。UFC の圧縮強度試験では、φ 50×100mm の円柱供試体、割裂引張試験では φ 100×200mm の円柱供試体を用い、指針(案)³⁾に従って強度試験を行った。また、コンクリートでは、ともに φ 100×200mm の円柱供試体を用いて、圧縮強度試験 (JIS A 1108 に準拠)、割裂引張試験 (JIS A 1113 に準拠)を行った。

2.4 载荷概要

複合RCはりの载荷試験では、容量2000kNの万能耐圧機を用いて静的単調に载荷を行い、载荷速度は10.0 kN/min.とした。ここでは、ローラー支点を用いており、支点と試験体の間に支圧板を設置し、耐圧機と試験体の载荷点の間には载荷板を設置した。支圧板の幅は、50mm であり、载荷板の幅は30mmである。試験体中央部鉛直変位と支点部の鉛直変位を高感度変位計により計測し、中央部の鉛直変位より支点部鉛直変位を差し引くことで試験体のたわみを求めた。また、等モーメント区間(区間長:500mm)の試験体下面に、ひずみゲージとπ型変位計(標点間距離:100mm)を千鳥状に貼り付け、ひび割れ発生の検知とひび割れ幅の計測を行った。支点部に

表-6 複合RCはりの曲げ試験結果

No.	収縮低減剤	主鉄筋に発生した初期ひずみ ($\times 10^{-6}$)			ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形態
		1次養生時	2次養生時	全ひずみ量			
1	SRAなし	120	453	573	42.1	73.7	曲げ破壊
2	SRA-1	84	269	353	44.9	95.4	曲げ破壊
3	SRA-2	39	211	250	45.6	89.9	曲げ破壊
4	SRAなし	48	765	813	29.5	142.4	曲げ破壊
5	SRA-1	130	475	605	35.6	136.1	せん断破壊
6	SRA-2	138	298	436	48.4	140.1	曲げ破壊
7	SRAなし	103	747	850	26.0	192.5	せん断破壊
8	SRA-1	83	512	595	31.6	225.9	せん断破壊
9	SRA-2	75	330	405	47.0	229.4	せん断破壊

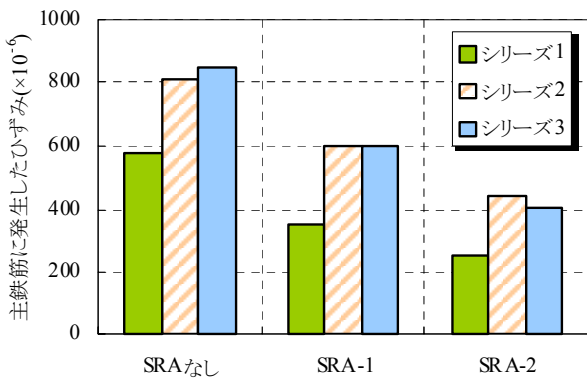


図-5 軸方向鋼材に発生したひずみ

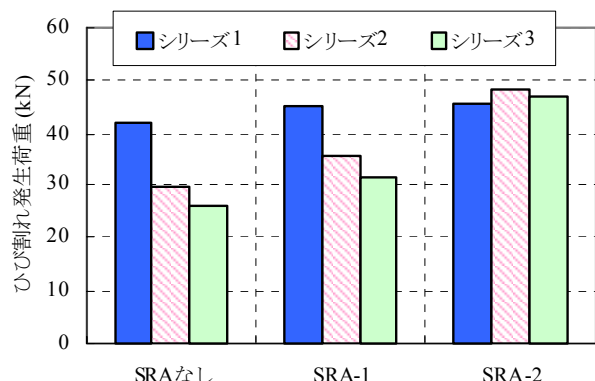


図-6 ひび割れ発生荷重

は、2枚のテフロンシートからなる減摩パッドを試験体と支圧板の間に挿入し、支点における拘束を防止した。また、試験体端部に定着プレートを設置して、定着部で破壊することを防止した。

2.5 荷重-開口変位関係と破壊エネルギーの測定方法

ここでは「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)⁶⁾に従い、切欠きを有するはりの3点曲げ試験を行った(図-4)。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 はJCI-S-002-2003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、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

3.1 強度特性と荷重-開口変位関係

表-5は、UFCとコンクリートの強度特性を示したものであるが、圧縮強度は200N/mm²以上と、所定の強度が発現していることが確認された。また、「SRAなし」における割裂引張強度は、8.2 N/mm²となったのに対し、「SRA-1」では10.3N/mm²、「SRA-2」で10.9 N/mm²となっており、収縮低減剤の添加により、割裂引張強度が向上することが確認された。図-4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。収縮低減剤を添加した両ケースの荷重-開口変位関係は、「SRAなし」を大きく上回った。また、最大荷重以降、「SRAなし」では、荷重が単調に低下しているが、「SRA-2」を添加したケースでは、大きな増減を繰り返して、荷重が全体的に低下した。試験終了後、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、その結果、荷重-開口変位関係が向上したものと考えられる。また、表-5に示した様に、「SRA-1」の破壊エネルギーは、 1.15×10^4 N/mm、「SRA-2」の破壊エネルギーは、 1.19×10^4 N/mmであり、収縮低減剤の添加により、最大で10%程度増大することが確認された。これは、鋼繊維による

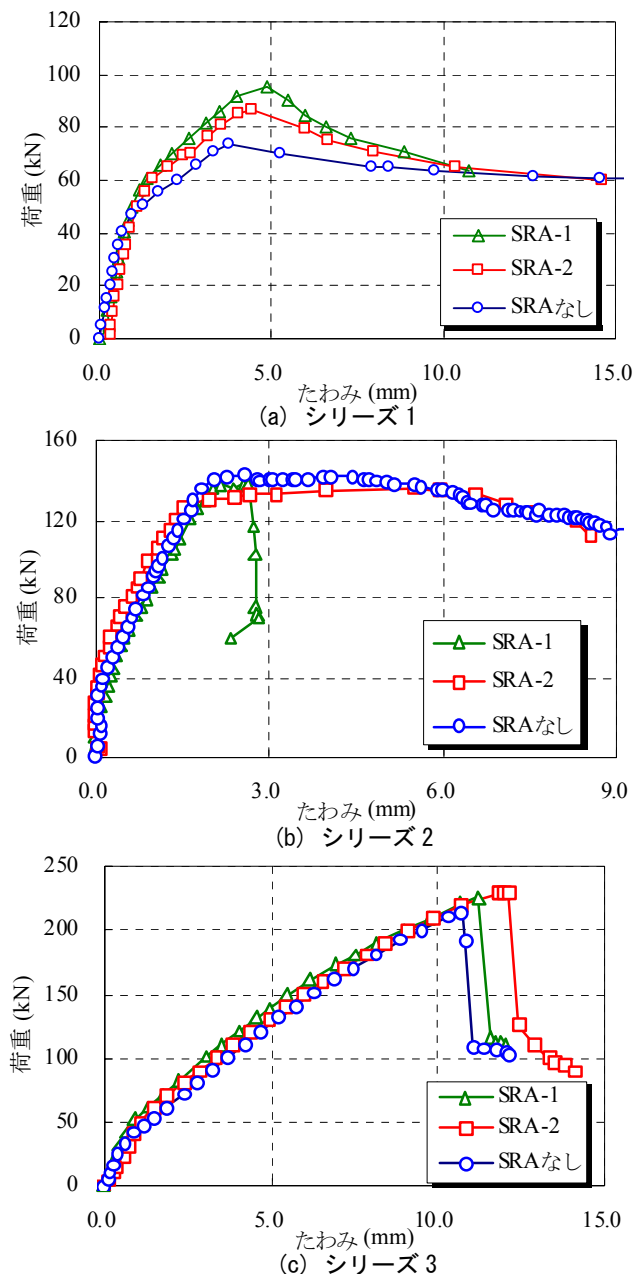


図-7 荷重-たわみ関係

収縮拘束を低減したためと考えられる。以上より、収縮低減剤の添加は、割裂引張強度と破壊エネルギーの向上に有効であり、「SRA-2」の方が、その向上効果が高いことがわかる。

3.2 複合 RC はりの曲げ試験

表-6 は、複合 RC はりの曲げ試験から得られた試験結果を示したものである。図-5 は、UFC 埋設型枠内に配置した軸方向鋼材に、養生中に発生した全ひずみを示したものである。同図より、全シリーズにおいて、「SRAなし」、「SRA-1」、「SRA-2」の順に、発生したひずみが小さくなることがわかる。また、軸方向鋼材比がほぼ等しいシリーズ 2 とシリーズ 3 では、ほぼ同等のひずみが発生していることが確認された。また、「SRA-2」では、「SRAなし」に比べて、発生したひずみが半分程度となっており、「SRA-2」の方が、より優れた収縮低減効果を有して

いることが確認された。

図-6 は、各試験水準におけるひび割れ発生荷重を示したものである。「SRAなし」において、シリーズ 2、シリーズ 3 のひび割れ発生荷重は、シリーズ 1 に比べて小さくなっており、軸方向鋼材比が増大するにつれて、ひび割れ発生荷重が低下していることが分かる。しかし、収縮低減剤を添加することにより、ひび割れ発生荷重は増大し、「SRA-2」を添加すると、軸方向鋼材比にかかわらず、ひび割れ発生荷重はほぼ等しくなった。

図-7 は、複合 RC はりの曲げ試験から得られた荷重-たわみ関係を示したものである。(a)はシリーズ 1、(b)はシリーズ 2、(c)はシリーズ 3 の結果を示したものである。図-7(a)において、収縮低減剤を添加することで、最大荷重は増大しており、「SRAなし」で 73.7kN、「SRA-1」で 95.4 kN、「SRA-2」で 89.9kN となっており、20~30%程度、最大荷重が増加していることが確認された。これは、収縮低減剤の添加により、主鉄筋に発生する初期応力(収縮応力)が低減され、UFC の引張抵抗力が向上したためと考えられる。また、全ケースとも、最大荷重以降において、急激に耐荷力が低下せず、延性的な曲げ破壊となることが確認された。次に、図-7(b)において、最大荷重は、全ケースともほぼ同等となった。また、「SRAなし」、「SRA-2」は最大荷重以降も耐荷力を保持しており、延性的な曲げ破壊となった。しかし、「SRA-1」では、最大荷重以降、急激に耐荷力が低下しており、脆性的なせん断破壊となっており、破壊形態が変化していることが確認された。ここで、「SRA-1」では、収縮低減剤の添加により、主鉄筋に発生する応力が減少し、曲げ破壊荷重がせん断破壊荷重を上回ったため、せん断破壊となったと考えられる。また、「SRA-2」では、収縮低減剤の添加により、主鉄筋に発生する応力が減少し、曲げ破壊荷重が向上したと考えられる。同時に収縮低減剤の添加により、破壊エネルギー、すなわち斜め方向に対する引張抵抗力が、向上したものと考えられる。そして、せん断破壊荷重が、曲げ破壊荷重を上回り、曲げ破壊になったものと考えられる。

次に、図-7(c)では、全ケースとも最大荷重以降、急激に耐荷力が低下するせん断破壊となることが確認された。収縮低減剤の添加により、18%程度、最大荷重は増加し、荷重-たわみ曲線が変化していることが確認された。これは、収縮低減剤の添加により破壊エネルギーが増大し、斜め方向に対する引張抵抗力が増大したためと考えられる。

図-8 はひび割れ性状を示したものである。(a)はシリーズ 1、(b)はシリーズ 2、(c)はシリーズ 3 の結果を示したものである。(a)では、全ケースともに、戴荷点付近、等モーメント区間に発生した曲げひび割れが、大きく開いており、同図から

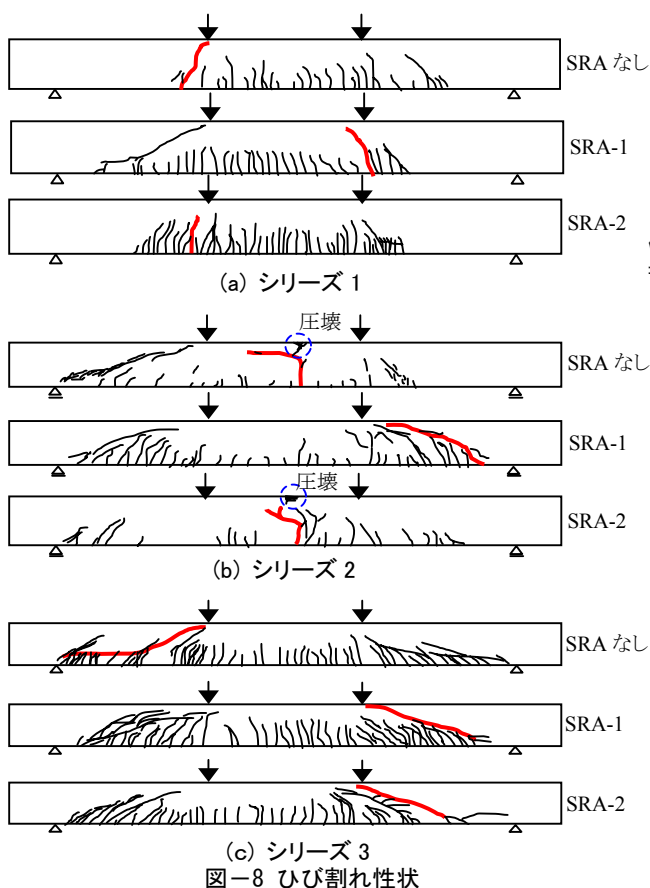


図-8 ひび割れ性状

も、曲げ破壊になったと判断される。次に、(b)では、「SRAなし」、「SRA-2」のケースにおいて、上縁が圧壊する曲げ破壊となったが、「SRA-1」では、斜めひび割れが破壊に対して支配的なひび割れとなっており、せん断破壊になったと判断される。また、(c)において、全ケースとも、斜めひび割れが支配的なひび割れとなり、破壊に至っており、せん断破壊になったと判断される。また、全ケースにおいて、載荷試験終了後、目視観察と打音検査を行ったが、UFCとコンクリートの剥離は確認されておらず、図-7、図-8の結果と合わせて考慮すると、UFCとコンクリートの界面に設置した突起は有効に機能し、十分に一体化していたものと考えられる。

図-9は、一例として、シリーズ2における荷重と最大ひび割れ幅の関係を示したものである。ここでは、各 π 型変位計から得られたひび割れ幅の中で、最大となるものを示している。標点間距離内に複数のひび割れが発生した場合、発生したひび割れ本数で平均化しており、 π 型変位計では検知できないマイクロクラック等の微細なひび割れは対象としていない。ここでは、両者とも、荷重の増加に伴いひび割れ幅が拡大するが、収縮低減剤を添加したケースは、「SRAなし」に比べて、同一荷重下におけるひび割れ幅が小さくなっていることが分かる。これは、収縮低減剤の添加により、鋼材に発生したひずみが減少したことに加えて、破壊エネルギーが増大し、ひび割れ発生後の抵抗力が増大したためであると考えられる。

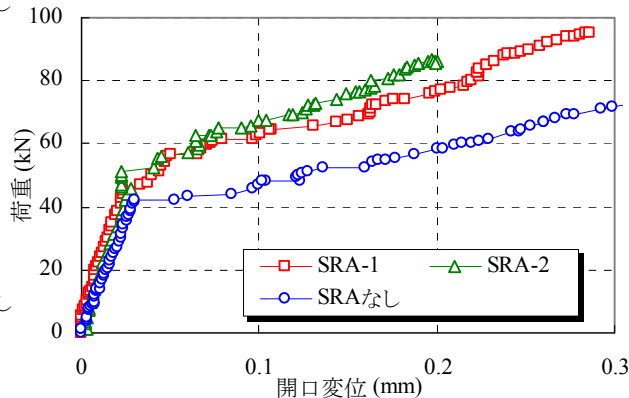


図-9 荷重-ひび割れ幅関係

4. まとめ

- (1) 収縮低減剤をUFCに添加することで、割裂引張強度が20~30%程度増加し、破壊エネルギーが最大で10%程度増加した。SRA-2を添加すると、荷重-開口変位関係のポストピーク挙動が大きく変化した。
- (2) 複合RCはりの曲げ試験の結果、主鉄筋に発生するひずみが減少し、ひび割れ発生荷重が増大することが確認された。ただし、「SRA-2」の方が、「SRA-1」に比べて、より増大することが確認された。
- (3) 複合RCはりの曲げ試験の結果、低減剤がせん断耐荷力、曲げ耐力に及ぼす影響を把握した。曲げ破壊荷重が20~30%程度増加し、せん断破壊荷重は18%程度増加することが確認された。また、同一配筋であったとしても、収縮低減剤の種類によっては、破壊形態が変化することが確認された。さらに、本研究の範囲内では、コンクリートとUFCが十分に一体化しており、破壊に至っていることが確認された。

参考文献

- 1) 佐川康貴, 松下博通, 鶴田浩章, 下山善秀: 鋼繊維補強高強度モルタルの力学的性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.199-204, 2001.6
- 2) 川口哲生, 森香奈子, 河野克哉, 田中敏嗣: 収縮低減剤を添加したUFCと普通コンクリートの複合RCはりに関する研究, Vol.33, No.2, pp.1273-1278, 2011.7
- 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) 森香奈子, 川口哲生, 河野克哉, 田中敏嗣: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.257-262, 2011.7
- 5) 小幡浩之, 西澤辰男, 佐々木巖, 國府勝郎: 超高強度繊維補強コンクリートと無機系グラウト材の付着特性, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, pp.233-234, 2006.9
- 6) http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.html