

論文 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

川口 哲生*1・森 香奈子*1・河野 克哉*2・田中 敏嗣*3

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 はりの曲げ挙動について検討を行った。併せて、UFC に収縮低減剤を添加することが、破壊エネルギーと荷重-開口変位関係に及ぼす影響について検討を行った。試験の結果、収縮低減剤を添加した UFC を用いた複合 RC はりでは、収縮と主鉄筋の拘束に起因して発生する初期ひずみが抑制され、ひび割れ発生荷重が増大するとともに、発生するひび割れ幅が抑制されることが確認された。また、収縮低減剤の添加により、UFC の荷重-開口変位関係が大きく変化することと、破壊エネルギーが向上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, 埋設型枠, 主鉄筋

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、セメントを主成分として細粒径材料が最密充填するように配合設計された材料であり、非常に緻密な硬化体組織を有し、高強度の鋼繊維を混入した材料である。そのため、UFCは200 N/mm²程度の高い圧縮強度、高い耐久性、高い変形能力を有した材料であり、さらに設計に見込めるほどの高い引張抵抗力を有している。氏家ら³⁾は、この特徴に着目し、せん断補強された鉄筋コンクリートはりとUFCを一体化させ、引張縁がUFCとなる複合RCはりについて、破壊挙動や変形挙動などについて検討を行いその有意性を示してきた。一方、UFCは極めて高いせん断耐荷力を有しているため、一切のせん断補強を施さなくても、高いせん断抵抗力を有する複合RCはりを実現できると予想される。そこで、本研究では、施工性の向上、耐荷力の向上、耐久性の向上を図るために、主鉄筋を配置したUFC製埋設型枠にコンクリートを打ち込むことで一体化させた複合RCはりについて検討を行うこととした。これまでに、UFCを用いた部材では、PC鋼材による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)²⁾ (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。それは、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。これらの問題を解決するためには、UFC自体の収縮を低減することが有効であり、佐藤ら⁴⁾は、UFCに適用可能な収縮低減剤の検討を行って

きた。しかし、構造部材へ適用した例はなく、引張特性を評価する指標である破壊エネルギーや荷重-開口変位関係に及ぼす影響についても不明な点が多いのが現状である。そこで本研究では、複合RCはりの検討に加えて、収縮低減剤を添加したUFCの破壊エネルギーと荷重-開口変位関係についても検討を行うこととした。

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。UFCは、セメント、シリカフューム、珪石微粉末などからなる標準配合粉体²⁾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。UFCは、自己充てん性を有しつつ、材料分離を防ぐため、高い粘性を有するように配合設計されている。また、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-2は、UFCの示方配合、表-3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。(以降、収縮低減剤を添加していないUFCは「FM」、収縮低減剤を添加したUFCは「FM+SRA」と略記)。UFCの示方配合は、指針(案)²⁾に基づいたものであり、本研究では佐藤ら⁴⁾が検討を行ってきた収縮低減剤を使用した。収縮低減剤の添加量は、外割りで15kg/m³であり、これは事前に行った予備試験により定めた。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30~40N/mm²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 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 主任研究員 博(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 リーダー 博(工)(正会員)

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) ²⁾ 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 ²
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-2 UFC の示方配合

名称	単位量 (kg/m ³)				SRA 添加量(外 割り)(kg/m ³)	フロー値(mm)
	W	P	SF	SP(水を含む)		
FM	180	2254	157	24.5	0	265
FM+SRA				24.5	15	272

表-3 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

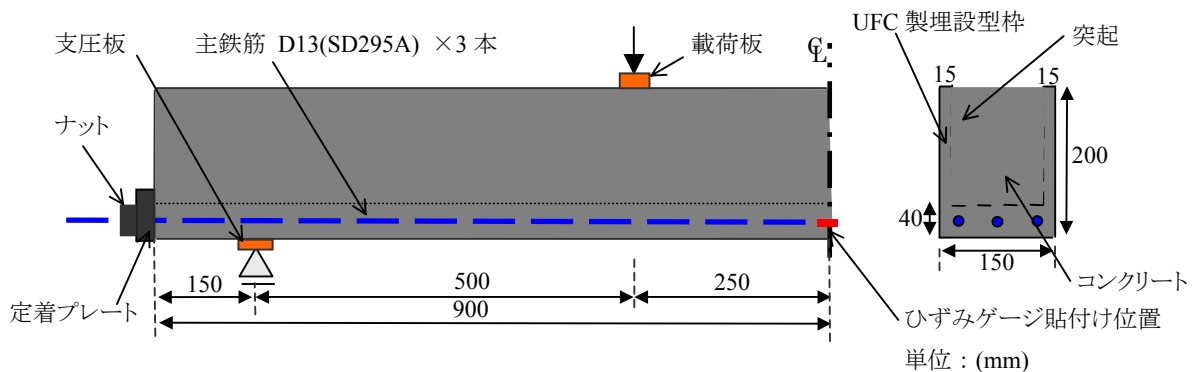


図-1 試験体概要 (複合 RC はり)

2.3 試験体の製作と養生

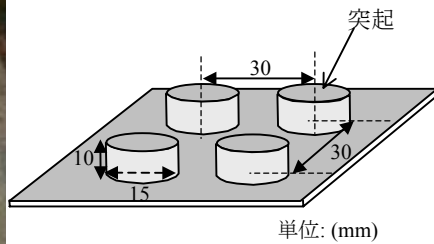
図-1 は複合 RC はりの概要を示したものである。ここでは、UFC 製埋設型枠を事前に製作し、その後、コンクリートを打ち込んで、複合 RC はりを製作した。試験体幅は、150 mm、せん断スパンを 500 mm、等モーメント区間を 500 mm とした。ここでは、せん断補強筋は一切配置しておらず、主鉄筋に、D13 SD295A (降伏強度: $f_y=324\text{N/mm}^2$) を 3 本配置し、曲げ破壊する様に試験体形

状を設定した。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、载荷試験終了時まで、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⁾



(a) 突起の配置状況



(b) 突起の寸法

図-2 UFC に設置した突起 (UFC とコンクリートの界面)

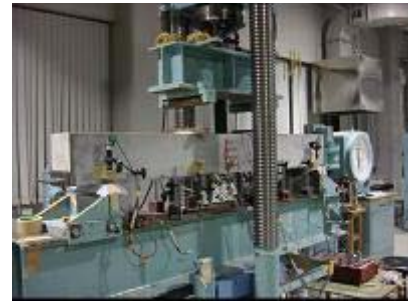


図-3 荷重試験状況

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 l 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、 270 ± 10 mm の範囲内になるように管理を行った。UFC 埋設型型枠の成型方法は、指針(案)²⁾に従った。さらに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考えられるため、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間隙は出来にくく、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覆い、 20°C 48 時間の封緘養生を行った。その後、最高温度を 90°C として、48 時間保持する標準熱養生²⁾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 埋設型型枠内部にコンクリートを打ち込み、 20°C 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、弾性係数、割裂引張強度の計測を行った。UFC の圧縮強度試験では、 $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体、割裂引張試験では $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体を用い、指針(案)²⁾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 $\phi 100 \times 200$ mm 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 荷重概要

図-3は、荷重試験状況を示したものである。複合RC はりの荷重試験では、容量2000kNの万能耐圧機を用いて静的単調に荷重を行い、荷重速度は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、耐圧機と試験体の荷重点の間には荷重板を設置した。支圧板の幅は、50mmであり、荷重

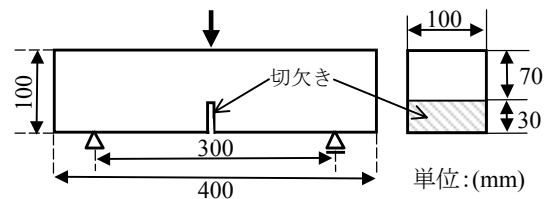


図-4 切欠きはりの3点曲げ試験

板の幅は30mmである。荷重は、耐圧機のロードセルより検出した。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、ひび割れ発生を検知とひび割れ幅の計測を行った。支点部には、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、 $100 \times 100 \times 400$ 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($\text{N} \cdot \text{mm}$)、 W_1 : 供試体の自重および荷重治具がなす仕事($\text{N} \cdot \text{mm}$)、 A_{lig} : はり破断部分面積(mm^2)

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。

表-4 強度特性(UFC, コンクリート)

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	破壊エネルギー (N/m)
FM	223.5	47.9	8.18	1.07×10 ⁴
FM+SRA	204.8	40.6	10.3	1.19×10 ⁴
コンクリート	38.4	30.5	2.11	計測せず

表-5 複合 RC はりの曲げ試験結果

名称	最大荷重 (kN)	主鉄筋に発生した初期ひずみ (×10 ⁻⁶)			ひび割れ発生荷重 (kN)
		1次養生時	2次養生時	全ひずみ量	
FM	142.4	48	765	813	29.5
FM+SRA	136.1	138	298	436	47.7

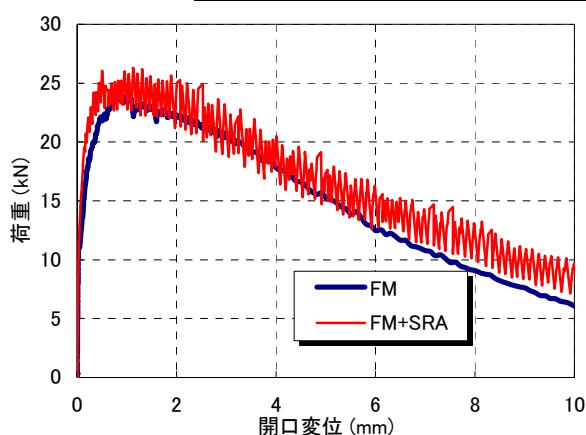


図-5 荷重-開口変位関係(切欠きはりの曲げ試験)

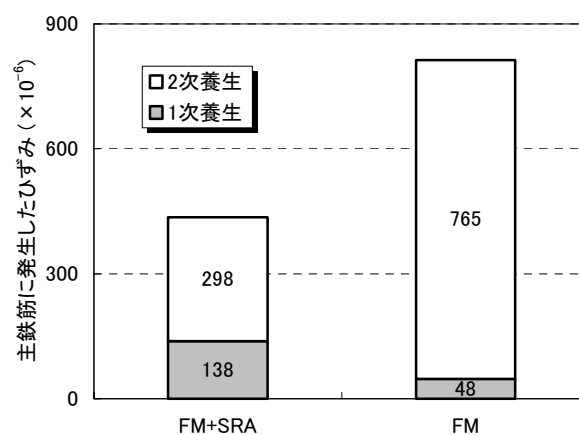


図-6 主鉄筋に発生したひずみ

3. 実験結果

3.1 強度特性と荷重-開口変位関係

表-4は、UFCとコンクリートの強度特性を示したものである。FMの圧縮強度は223.5N/mm²であるのに対し、FM+SRAの圧縮強度は、204.8N/mm²となった。これは、収縮低減剤を外割りで添加しており、実質的に、ペースト量が増えたためであると考えられる。しかし、FMの割裂引張強度は、8.18 N/mm²となったのに対し、FM+SRAの割裂引張強度は、10.3 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-5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。同図より、FM+SRAでは、最大荷重がFMを上回っており、さらに開口変位6mm以降の範囲で、FMを上回っていることがわかる。また、FMでは最大荷重以降、荷重が単調に低下しているが、FM+SRAでは、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分かる。試験終了後、破断面の目視観察を行ったが、両ケースとも鋼繊維の破断は認められなかった。以上より、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、短繊維が少しずつ拔出したため図-5の様な挙動を示したものと考えられる。また、表-4に示した様に、

収縮低減剤を添加することにより、破壊エネルギーは10%程度増大しており、収縮低減剤の添加は、引張特性の向上に有効であると考えられる。

3.2 複合 RC はりの曲げ試験

表-5は、複合RCはりの曲げ試験から得られた結果をまとめたものである。FMのひび割れ発生荷重は29.5kN、FM+SRAのひび割れ発生荷重は47.7kNであり、収縮低減剤の添加により、ひび割れ発生荷重は1.6倍程度増加していることが分かる。

図-6は、UFC埋設型枠内に配置した主鉄筋に、1次養生時、2次養生時に発生したひずみを示したものである。ただし、1次養生時では、注水から脱型時までのひずみを示しており、SRAの添加による始発時間の変化は考慮していない。FMでは、1次養生時に48×10⁻⁶、2次養生で765×10⁻⁶のひずみが主鉄筋に発生した。一方、FM+SRAでは、1次養生時に138×10⁻⁶、2次養生で298×10⁻⁶のひずみが発生した。養生時に、FM+SRAの主鉄筋に発生した全ひずみ量は、FMで発生した全ひずみ量の半分程度となっており、収縮低減剤の添加により、主鉄筋に発生するひずみが抑制されていることが確認された。

図-7は、複合RCはりの曲げ試験より得られた荷重

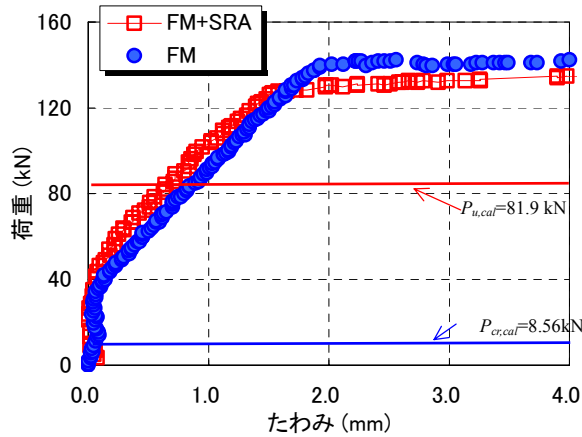


図-7 荷重-たわみ関係

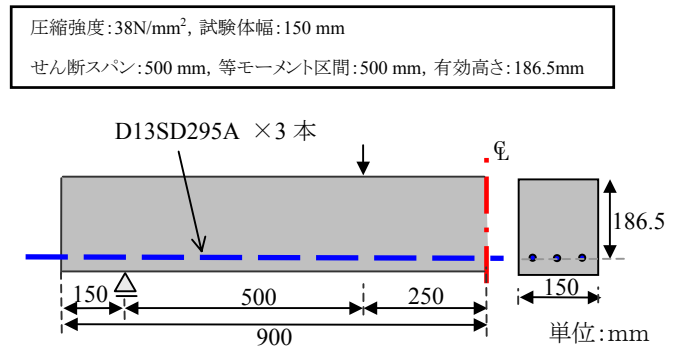
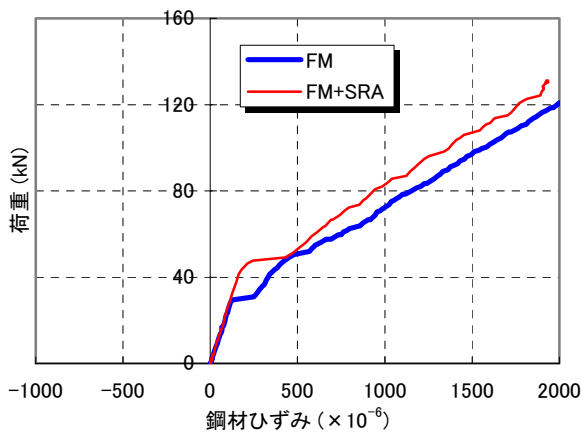
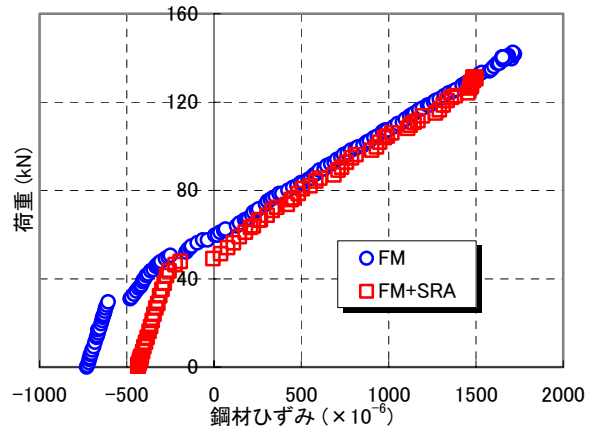


図-8 仮定した RC はり



(a) 載荷前に生じた主鉄筋の初期ひずみを無視



(b) 載荷前に生じた主鉄筋の初期ひずみを考慮

図-9 主鉄筋に発生する応力と荷重の関係

一たわみ関係を示したものである。両ケースとも、たわみが 2.0mm 以上の領域で荷重がほぼ一定となっており、せん断補強筋を全く配置していないにもかかわらず、延性的挙動を示した。ここでは、複合 RC はりと同一寸法と仮定した RC はり (図-8) の曲げ破壊荷重 $P_{u,cal}$ 、ひび割れ発生荷重 $P_{cr,cal}$ を併記した。ここでは、土木学会編コンクリート標準示方書、設計編⁷⁾に基づいて計算を行った。同図より、曲げ破壊荷重とひび割れ発生荷重について、UFC と普通コンクリートの複合 RC はりは、同一寸法と仮定した RC はりを大きく上回ることが確認された。つまり、本構造とすることで断面を小さくし、補強筋を減らすことが可能と考えられるが、UFC は優れた耐久性を有するため、より合理的な構造部材を実現できるものと考えられる。さらに、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、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たのと考えられる。

図-9(a)ならびに図-9(b)は、荷重と主鉄筋に生じるひずみの関係を示したものである。図-9(a)は、載荷前(養生中)に生じた主鉄筋のひずみを無視したもの(初期ひずみ=0)である。ここでは、曲げひび割れ発生以前の挙動は一致しているものの、曲げひび割れ発生以降になる

と、同一荷重における主鉄筋のひずみは、FM+SRAの方が小さくなる傾向を示すことが確認された。しかし、図-6に示した様に、実際には、載荷前の主鉄筋にコンクリートの自己体積変化に応じた量の初期ひずみが生じていることから、谷村らが提案する載荷前の長さ変化と構造挙動の考え方⁸⁾を参考にすると、複合RCはりと主鉄筋に生じるひずみの関係は図-9(b)のように修正できる。載荷以前に生じた引張鉄筋のひずみを考慮することで、曲げひび割れ発生後の複合RCはりの荷重と主鉄筋ひずみの関係は、自己体積変化にかかわらずほぼ一致することがわかる。よって、数値計算などで破壊挙動を推定する場合は、自己体積変化によって、主鉄筋に生じた初期ひずみを考慮することが有効であると考えられる。

図-10は、荷重と最大ひび割れ幅の関係をFM、FM+SRAについて示したものである。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。ただし、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。同図より、両者とも、荷重の増加に伴いひび割れ幅が拡大するが、FM+SRAでは、FMに比べて、同一荷重下におけるひび割れ幅が小

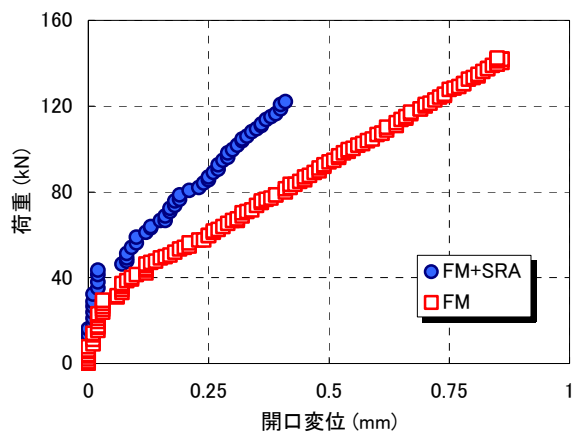


図-10 荷重と最大ひび割れ幅の関係

さくなっており、収縮低減剤の添加によりひび割れ幅が抑制されていることが確認された。

図-11は、試験終了後のひび割れ性状を示したものである。どちらのケースともに、等モーメント区間にひび割れが発生し、圧縮縁側のUFCとコンクリートが圧壊し、曲げ破壊となった。また、FMでは、等モーメント区間に曲げひび割れが発生した後、載荷荷重の増大に伴い、多数の斜めひび割れが発生した。しかし、FM+SRAでは、FMのケースほど、多数の斜めひび割れは発生していないことが確認された。収縮低減剤をUFCに添加したことにより、破壊エネルギーが増大し、その結果、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。

4. まとめ

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 収縮低減剤をUFCに添加することで、割裂引張強度と破壊エネルギーが増加することが確認された。また、荷重-開口変位関係のポストピーク挙動が大きく変化することが確認された。
- (2) 複合RCはりの曲げ試験において、UFCに収縮低減剤を添加することで、UFC内に配置されている主鉄筋に発生する初期応力を低減させることができた。さらに、ひび割れ発生荷重を増大させ、ひび割れが発生してもひび割れ幅を相対的に抑制することができた。
- (3) 複合RCはりの曲げ試験結果は、同一寸法と仮定したRCはりのひび割れ発生荷重、曲げ破壊荷重を大きく上回ることが確認された。また、本研究で検討した複合RCはりは、一切のせん断補強筋を用いていないにもかかわらず、曲げ破壊となった。以上より、本構造形式は、せん断耐荷力の向上効果を有しており、より合理的な構造部材を実現できる可能性を有していると考えられる。

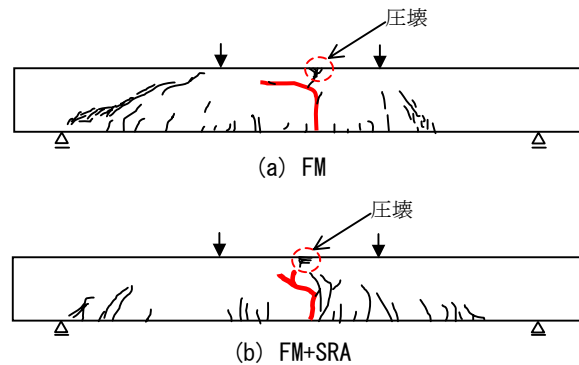


図-11 ひび割れ状況

謝辞：本研究の実施に当たり、愛媛大学大学院理工学研究科 氏家勲教授より、貴重なご意見を頂きました。ここに記して深謝致します。

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) 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
- 3) 例えば，山口哲也，氏家勲，岡崎慎一郎，川本聖二：静的載荷および一定持続載荷されたRPC補強RC梁部材の変形挙動に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.247-252，2009.7
- 4) 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
- 5) 小幡浩之，西澤辰男，佐々木徹，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
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書，[設計編]，2007年制定
- 8) 谷村 充，佐藤良一，平松洋一，兵藤彦次：若材齢時長さ変化を考慮したRC曲げ部材のひび割れ・変形の一般化評価 方法，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.181-195，2004.