論文　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

川口　哲生[*1]・河野　克哉[*2]・橋本　勝文[*3]・横田　弘[*4]

要旨：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)のひび割れ幅やひび割れ発生荷重について検討するため，両引試験を行った。ここでは，繊維種類，繊維混入率などがひび割れ幅に及ぼす影響を把握するとともに，既往のひび割れ幅推定式に破壊力学特性を組み込むことで，ひび割れ幅推定式を実験的に定めた。その後，UFC 製 RC はりの曲げ試験結果と比較して，推定精度について検証を行った。さらに，収縮低減剤(SRA)を添加した UFC を対象に両引試験を実施して，SRA の添加がひび割れ発生荷重やひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，ひび割れ幅，短繊維，収縮低減剤，RC はり

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に近づく様に配合設計され，高強度の短繊維を混入した材料である。そのため，硬化体は非常に緻密な組織を有し，200 N/mm^{2}程度の圧縮強度，高い耐久性，さらには高い変形能力を有する材料である。土木学会から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（案）[2)]においては，UFCの引張抵抗力を設計に見込めることが可能となっている。筆者らは，UFCの特徴を活用して，さらに合理的な構造として，内部に軸方向鋼材を配置する構造について検討を行ってきた[3)]。UFCの収縮と鋼材の拘束により発生する引張応力を低減するために，収縮低減剤（以降，SRAと表記）をUFCに添加している。

一般に，ひび割れ間隔やひび割れ幅に代表されるひび割れ分散性は，力学的挙動の把握に有用なだけでなく，耐久性照査にも重要な指標となる。特にひび割れ幅は，補強鋼材を配置したRC部材の設計において重要な指標となる。しかし，内部に補強用鋼材を配置したUFCについて，ひび割れ幅に関する研究は十分ではなく，さらにSRAの添加がひび割れ発生荷重やひび割れ幅に及ぼす影響についても十分とは言えない。

従来の短繊維補強コンクリートに関する既往の研究[4)]によると，短繊維補強により，発生するひび割れ幅は減少し，ひび割れが分散することが報告されている。これは，マトリクスのひび割れ発生後における短繊維の架橋効果によるものとされている。一方，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く，ひび割れ幅は従来のコンクリートと大きく異なり，既往の推定手法では適切に評価できない可能性がある。本研究では，以上の観点より，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，ひび割れ幅を把握するとともに，既往のひび割れ幅推定式と破壊力学特性を用いて，ひび割れ幅推定式を実験的に定めた。さらに，SRAの添加が，ひび割れ発生荷重やひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行った。

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，短繊維種類，試験体長さ，繊維混入率，かぶり，SRA 添加の有無である。短繊維は，鋼繊維（以降 FM と表記），PVA 繊維（以降，FO と表記)を対象としている。試験体長さを 2000 mm（以下，シリーズ 1 と略記）と 500 mm（以下，シリーズ 2 と略記）の 2 水準とした。シリーズ 2 においては，さらにかぶりを変化させ，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 において，FM では 2.0%, 3.0%とし，FO では 3.0%と設定し，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。さらに，シリーズ 2 では，FM，FO について，繊維混入率をそれぞれ体積当り 1.0，2.0，3.0%と設定した。また，SRA の添加が及ぼす影響の検討として，FM2.0%に SRA を添加した水準を対象とした。**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 UFC 向けに新規に開発したものであり [5)]，添加量は 15kg/m^3 である。ただし，難溶性であるため，W に対して，外割りで添加した。

*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 建設技術チーム 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 建設技術チーム 主任研究員 博(工) (正会員)
*3 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 助教 博（工） (正会員)
*4 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門 教授 博（工） (正会員)

表－1 試験水準（両引試験）

No	名称	繊維混入率 (vol.%)	試験体長さ (mm)	かぶり (mm)	断面寸法 (mm×mm)	シリーズ
1	FM2.0%	2.0	2000	39	100×100	シリーズ 1
2	FM3.0%	3.0				
3	FO3.0%	3.0				
4	NF	0.0				
5	FM1.0%	1.0	500			シリーズ 2
6	FM2.0%	2.0				
7	FM3.0%	3.0				
8	FO1.0%	1.0				
9	FO2.0%	2.0				
10	FO3.0%	3.0				
11	NF	0.0				
12	FM2.0%	2.0		10	42×42	
13	FM2.0%	2.0		20	62×62	
14	FM2.0%	2.0		30	82×82	
15	FM2.0%+SRA	2.0		10	42×42	
16	FM2.0%+SRA	2.0		20	62×62	
17	FM2.0%+SRA	2.0		30	82×82	

表－2 使用材料

種類	名称	記号	物性または成分
結合材	標準配合粉体	*P*	UFC 指針（案）[2]に準拠
砂	専用細骨材	S_a	UFC 指針（案）[2]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
	PVA 繊維	O_F	長さ：15mm, 径：0.3mm, アスペクト比 50, 引張強度：900N/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, 難溶性, 密度 0.98 g/cm^3
	消泡剤	*T*	シリコン系

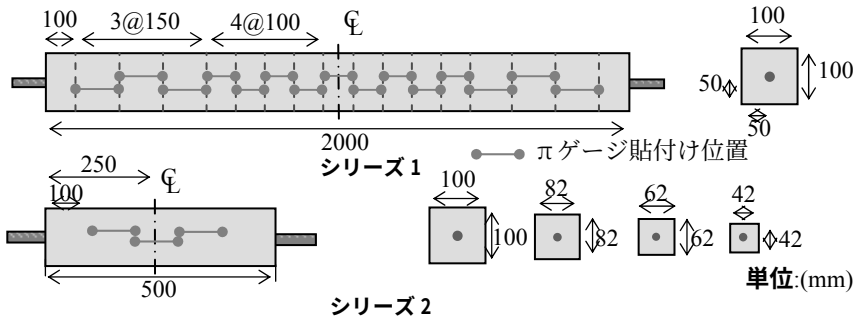
表－3 示方配合

名称	繊維混入率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
		水 *W*	標準配合粉体 *P* +専用細骨材 S_a	鋼繊維 S_F	PVA 繊維 O_F	高性能減水剤 *SP*（水に含む）	*SRA* (外割)
FM1.0%	1.0	182	2277	79	0	27	0
FM2.0%	2.0	180	2254	157	0	28	0
FM3.0%	3.0	178	2230	236	0	29	0
FO1.0%	1.0	182	2277	0	13	27	0
FO2.0%	2.0	180	2254	0	26	28	0
FO3.0%	3.0	178	2230	0	39	29	0
NF	0.0	184	2300	0	0	27	0
FM+SRA	2.0	180	2254	157	0	25	15

また，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±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

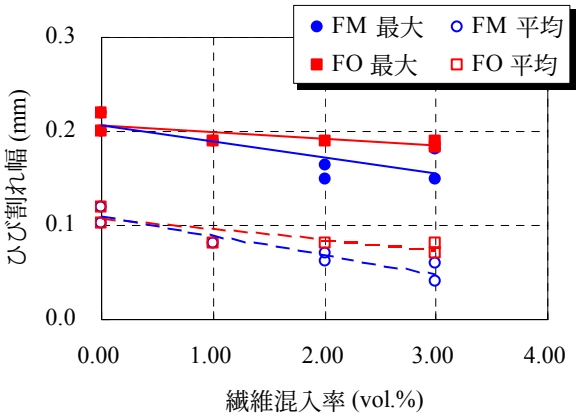
図－1 は，両引試験の概要を示したものである。シリ



図－1 試験概要（両引試験）

表－4 強度試験結果

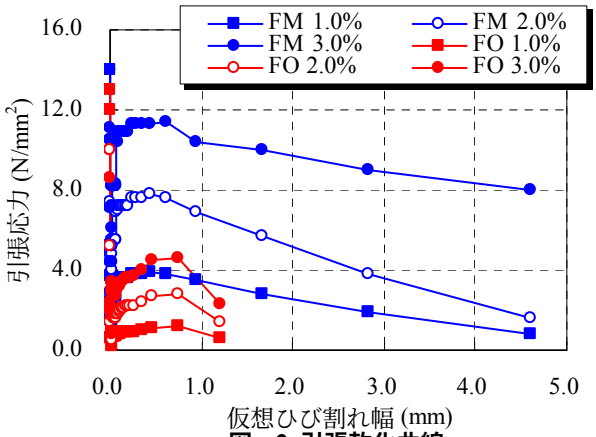
名称	圧縮強度 (N/mm^2)	ひび割れ発生強度 (N/mm^2)	破壊エネルギーG_F (N/mm)
FM1.0%	209	9.2	10.2
FM2.0%	217	9.5	16.2
FM3.0%	206	12.1	40.3
FO1.0%	160	8.5	1.2
FO2.0%	166	8.4	2.5
FO3.0%	167	8.7	3.9
NF	185	9.3	0.03
FM2.0%+SRA	207	9.9	19.9



図－3 繊維混入率とひび割れ幅の関係

ーズ 1 では，100×100×2000 mm（高さ×幅×試験体長さ）とし，シリーズ 2 では，試験体長さを 500mm と固定して断面寸法を変化させた。の角柱試験体とした。試験体断面の中心位置に，異型 PC 鋼棒（D=22.0 mm）または異型鉄筋（D22 SD345）を配置した。載荷は静的単調に，軸方向鋼材を引張ることで，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 1800mm，シリーズ 2 における計測区間は 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を計測し，ひび割れ発生強度は割裂引張試験より求めた。「切欠きはりを用いた繊維コンクリートの



図－2 引張軟化曲線

荷重－変位曲線試験方法」（JCI-S-002-2003）[6]に基づき，切欠きはりの 3 点曲げ試験を実施して，式(1)より破壊エネルギーを算出した。その後，JCI より配布されているプログラム [6]を用いて多直線近似法にて引張軟化曲線を推定した。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

ここに，G_F：破壊エネルギー (N/mm)，W_0：試験体が破断するまでの荷重－開口変位曲線下の面積 (mm^2)，A_{lig}：リガメントの面積 (mm^2)，W_1：試験体の質量 (N)

3．実験結果

3.1 強度試験結果と破壊エネルギー

表－4 は強度試験と破壊エネルギーの測定結果を示したものである。**図－2** は引張軟化曲線を示したものである。FM，FO の両者ともに，繊維混入率が増加するにつれて，引張軟化曲線の形状が変化し，破壊エネルギーが増大することが確認された。また，引張軟化曲線において，仮想ひび割れ幅が 0.3mm 以上の領域で，急激に引張応力が低下していないことが確認された。

3.2 繊維種類と混入率を変化させた UFC に関する検討

表－5 は両引試験結果を示したものである。収縮ひずみは，耐熱処理を施したひずみゲージ鋼材の軸方向中心部に貼り付け，計測を行った。また，シリーズ 1 について，ひび割れ間隔を計測したが，60～130mm 程度となった。**図－3** は，鋼材に発生した応力が戴荷開始より 300

表－5 両側引張試験結果一覧

No.	名称	繊維混入率 (vol.%)	かぶり (mm)	ひび割れ発生荷重 (kN)	ひび割れ本数(本)	ひび割れ間隔(mm)	養生中に発生した収縮ひずみ($\times10^{-6}$)
1	FM2.0%	2.0	39	80.9	21	125	388
2	FM3.0%	3.0		123.4	18	127	360
3	FO3.0%	3.0		90.7	26	60	401
4	NF	0.0		50.6	23	73	612
5	FM1.0%	1.0		63.3	3	－	－*
6	FM2.0%	2.0		79.5	4	－	－*
7	FM3.0%	3.0		117.7	1	－	－*
8	FO1.0%	1.0		54.5	3	－	－*
9	FO2.0%	2.0		67.1	4	－	－*
10	FO3.0%	3.0		73.2	2	－	－*
11	NF	0.0		50.9	3	－	－*
12	FM2.0%	2.0	10	12.0	2	－	438
13	FM2.0%	2.0	20	31.2	2	－	352
14	FM2.0%	2.0	30	62.3	1	－	366
15	FM2.0%+SRA	2.0	10	26.6	1	－	318
16	FM2.0%+SRA	2.0	20	42.6	2	－	302
17	FM2.0%+SRA	2.0	30	75.6	2	－	288

*：計測せず

N/mm^{2}増大した際における最大および平均ひび割れ幅と繊維混入率の関係を示したものである。ただし，試験体No.1～No.11 から得られた結果であり，平均ひび割れ幅は，各πゲージで得られた標点間距離の変化量を，ひび割れ本数で平均化したものである。また，最大ひび割れ幅は，πゲージより得られた値の最大値である。同図より，FM，FO 両者ともに，最大ひび割れ幅は，平均ひび割れ幅の 2 倍程度となることが確認された。また，繊維混入率の増加によって，最大ひび割れ幅，平均ひび割れ幅がともに減少していることが確認された。さらに, PVA 繊維よりも鋼繊維の方が, ひび割れ幅の抑制効果が高く，短繊維が大きな影響を及ぼしていることがわかる。

3.3 ひび割れ幅の推定方法

図－4 は，ひび割れ幅と鋼材応力の関係を示したものであり，試験結果と推定結果を併記している。ここで用いた推定式は，式(3)に示されるも角田[7]らが提案した推定式である。

$$w_{\max} = L_{\max}\left(\sigma_{se} / E_s + \varepsilon'_{csd}\right) \tag{3}$$

ここで，$L_{\max}$=5.4 c ，c：かぶり (mm)，σ_{se}：鋼材の引張応力度 (N/mm^2)，E_s：鋼材のヤング係数 (N/mm^2)，ε'_{csd}：コンクリートの収縮・クリープ等によるひずみ（＝150×10^{-6}）

同図より，NF は，FM2.0%，FO3.0%に比べて，初期の段階からひび割れ幅が大きくなることがわかる。また，式(3)の算定結果と比較すると，NF については過小評価となり，FM2.0%，FO3.0%のひび割れ幅については過大評価となっている箇所が存在することがわかる。つまり，短繊維の影響が考慮されていないことが，主な原因として挙げられる。そこで，ひび割れ幅の推定精度を向上させるために，短繊維混入によるひび割れ幅の低減係数を設定し, 式(3)に乗ずることで, 短繊維の影響を加味して，推定精度の向上を図ることとした。ここでは，短繊維補強効果を示す指標として，破壊力学特性の破壊エネルギーに着目して，低減係数に関連づけることとした。**図－2** に示す引張軟化曲線において，繊維混入率により程度の差はあるものの，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(4)となる[8]。

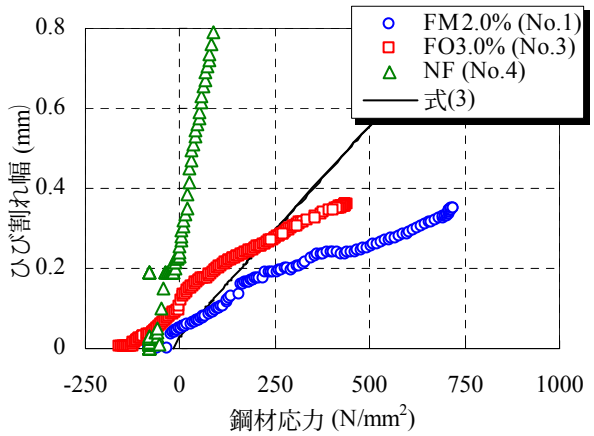
$$G_{F0} = G_F / f_c'^{0.7} \tag{4}$$

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/mm^2)

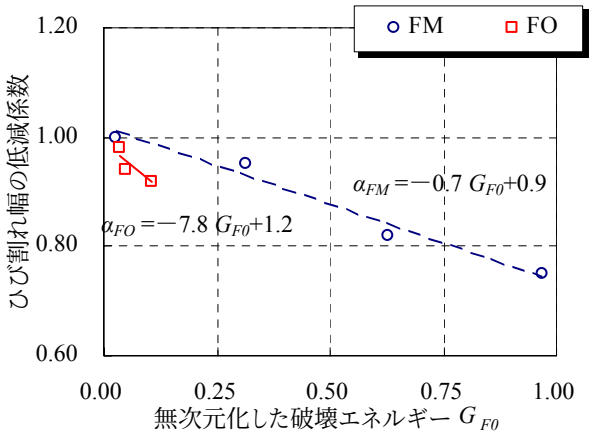
図－5 は圧縮強度で補正した破壊エネルギーと短繊維補強によるひび割れ幅の低減係数の関係を示したものである。ここで，ひび割れ幅の低減係数は，各水準において実験より得られた最大ひび割れ幅と NF における最大ひび割れ幅との比と定義した。同図に示す様に，ひび割れ幅の低減率と圧縮強度で補正した破壊エネルギーについて回帰分析を行った結果，式(5)，式(6)が得られた。

$$\alpha_{FM} = \left(-0.7G_{F0} + 0.9\right) \tag{5}$$

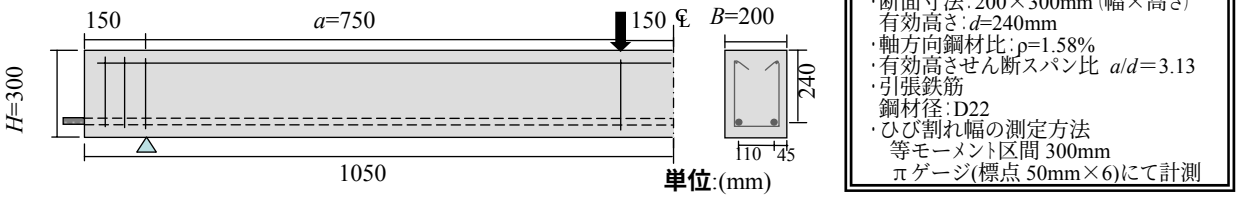
$$\alpha_{FO} = \left(-7.8G_{F0} + 1.2\right) \tag{6}$$



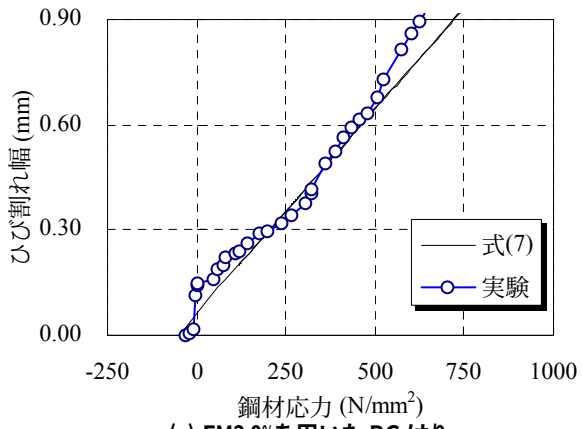
図－4 ひび割れ幅と鋼材応力の関係



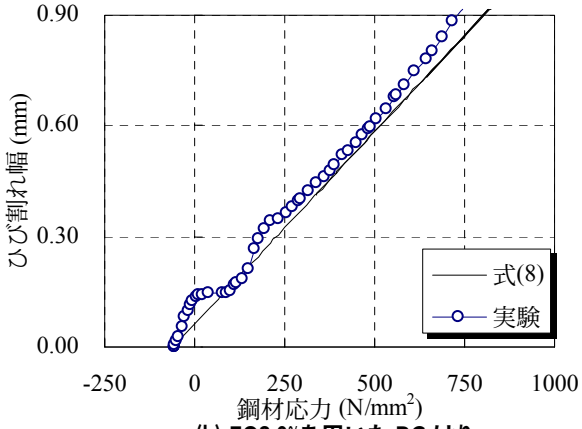
図－5 ひび割れ幅の低減率と圧縮強度で補正した破壊エネルギーの関係



図－6 比較対象とした RC はりの概要 [9]



(a) FM2.0%を用いた RC はり



(b) FO3.0%を用いた RC はり

図－7 RC はりの曲げ試験結果との比較

ここで，α_{FM}は，FM における低減係数，α_{FO}は FO における低減係数

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})の推定式は式(7)，FO のひび割れ幅(w_{FO})の推定式は式(8)となる。

$$w_{FM} = 5.4c\left(-0.7G_{F0}+0.9\right)\left(\sigma_{se}/E_s+\varepsilon'_{csd}\right) \quad (7)$$

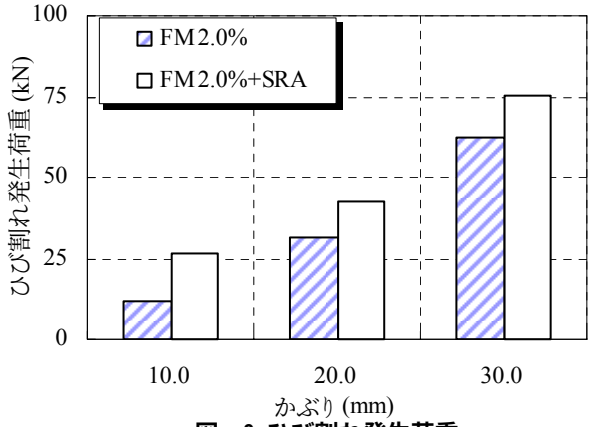
$$w_{FO} = 5.4c\left(-7.8G_{F0}+1.2\right)\left(\sigma_{se}/E_s+\varepsilon'_{csd}\right) \quad (8)$$

ここでは ε'_{csd} を便宜的に 400×10^{-6} とした。この値は，No.1，No.3 において，戴荷開始時に鋼材に発生したひずみに基づき定めたものである。初期に発生する鋼材ひずみについては今後の課題であると考える。

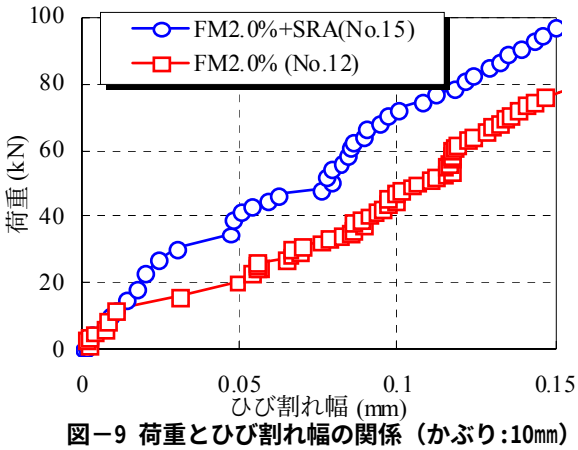
次に，軸方向鋼材を有する RC はりのひび割れ幅の推定を行い，式(7)，式(8)の推定精度の検証を行った。**図－6** は，対象とした RC はりの概要を示したものであり，筆者らが過去に実施したものである [9]。対象とした RC はりの寸法は，高さ 300mm，幅 200mm，有効高さ 240mm であり，FM2.0%，FO3.0%を用いて製作し，両者とも曲げ破壊になったものである。戴荷は静的単調に行っており，等モーメント区間を 300mm として，標点距離 50mm のπゲージを千鳥状に貼り付け，ひび割れ幅を計測した。**図－7(a)**は FM2.0%の RC はりの結果であり，**図－7(b)**は，FO3.0%の結果である。今後，一軸応力状態と曲げ応力状態の差や初期に発生する収縮応力の影響について検討の余地はあるが，本研究の範囲内では，式(7)，式(8)で概ね良好な精度で推定できているものと考えられる。また，ここでは，式(3)に低減係数を乗じて短繊維の影響を加味すると仮定しているが，鋼材応力の影響など，更なる検討が必要と考えられる。

3.4 SRA を添加した UFC のひび割れ発生荷重およびひび割れ幅

図－8 は，試験体 No.12～No.17 から得られたひび割れ発生荷重を示したものであり，かぶりがそれぞれ異なる。



図－8 ひび割れ発生荷重



図－9 荷重とひび割れ幅の関係（かぶり:10㎜）

また FM2.0%と FM2.0%+SRA を比較すると，SRA を添加することにより，かぶりにかかわらず，ひび割れ発生荷重は増大することが確認された。これは，**表－5** 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，鋼材の拘束により発生する引張応力が低減したためと考えられる。さらに，かぶりが 10mm の水準では 2.2 倍，かぶりが 20mm の水準では 1.36 倍，かぶりが 30mm の水準では 1.2 倍となった。かぶりが小さい水準の方が，ひび割れ発生荷重の増加率は高くなっており，かぶりを小さく，軸方向鋼材比が小さくなる場合には，SRA の添加が有効であると考えられる。

図－9 は，試験体 No.12 と No.15 から得られた荷重とひび割れ幅の関係を示したものである。ここでは，1 例として，かぶりが 10mm のケースについて示したものであるが，荷重－ひび割れ幅の関係は変化している。また，他の水準も同様の傾向を示しており，SRA の添加はひび割れ幅の抑制に効果を有していることがわかる。

4．結論

本研究では，両引試験を行って，UFC のひび割れ幅に関する研究を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) FM，FO について繊維混入率を 1.0%，2.0%，3.0%とした際における強度特性，破壊力学特性を把握した。

(2) 繊維混入率 1.0%，2.0%，3.0%の範囲において，FM，FO どちらとも，短繊維混入率が増加するにつれて発生するひび割れ幅が小さくなることが確認された。また，FO に比べて，FM の方が，発生するひび割れ幅は小さく，鋼繊維の方がひび割れに対して，抵抗性が高いことが確認された。さらに，最大ひび割れ幅は，平均ひび割れ幅の 2 倍程度となることが確認された。

(3) 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，FM，FO を使用した RC 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比較すると，改善の余地はあるが，実験結果と概ね一致していることが確認された。

(4) SRA を添加した FM2.0%について両引試験を行った結果，かぶりにかかわらず，SRA の添加により，ひび割れ発生荷重が増大することが確認された。また，かぶりが小さくなるほど，ひび割れ発生荷重は増大することが確認された。さらに，SRA の添加により，ひび割れ幅の拡大が抑制され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) 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) 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，コンクリート工学年次論文集, Vol.34，No.2，pp.1177-1182，2012.7

4) 伊藤 始，岩波光保，横田 弘：PVA 繊維で補強したコンクリートのひび割れ分散性に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1549-1554, 2004.6

5) 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

6) http://www.jci-web.jp/jci_standard/kitsutaka_dl.html

7) 角田 與史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅，コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970.

8) CEB ： CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d ’ Information, No.213/214, pp.33-43, 1993.

9) 川口 哲生，片桐 誠， 白井 一義， 二羽 淳一郎：超高強度繊維補強コンクリートの引張抵抗力が曲げ破壊性状に及ぼす影響，土木学会論文集 E 部門, Vol.64，No.3，pp.435-438，2008