

論文 超高強度繊維補強セメント系複合材料を用いたはり部材のせん断特性

掛井 孝俊^{*1}・村田 裕志^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}・兵頭 彦次^{*3}

要旨：圧縮強度約 200 N/mm² を有する，超高強度繊維補強セメント系複合材料 UFC を用いたはり部材のせん断載荷実験を実施した。その結果，繊維を体積比 2 % 混入した UFC はりにおいては，普通強度 RC はりの場合と比較して，せん断スパン有効高さ比がせん断耐力に大きな影響を与えること，顕著な寸法効果が存在することが明らかとなり，普通強度 RC はりのせん断耐力算定式は適用できなかった。そこで本研究では，斜めひび割れ面における繊維の引張伝達力が，せん断力に抵抗すると仮定し，力の釣合いから UFC はりのせん断耐力を推定できることを示した。また，その際に必要となる斜めひび割れ角度の算出法として，非線形有限要素解析を用いる方法を提案した。

キーワード：高強度，繊維補強，セメント系複合材，せん断耐力，斜めひび割れ，有限要素解析

1. はじめに

超高強度繊維補強セメント系複合材料¹⁾(Ultra High Strength Fiber Reinforced Cementitious Composites:以下 UFC と略記)はセメントを基材とした材料であり，約 200 N/mm² の高い圧縮強度に加え，鋼繊維補強により優れた変形性能を示す。既に UFC を用いた土木構造物の実用化が始まっており²⁾，UFC の性能を活かすことで構造物の自重低減や耐久性の向上が期待されている。しかしながら，UFC を用いた構造部材の性能を評価した報告は未だに少なく，その体系的な設計手法も確立されていない。本研究では，UFC を用いた構造部材の合理的な設計を行う上で重要となるせん断特性を把握することを目的として，UFC を用いたはり部材のせん断載荷実験を実施した。そして，破壊モードやせん断特性に及ぼす影響因子およびせん断耐力の評価方法を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表－1 に UFC の示方配合を示す。UFC は，水，プレミックス粉体(セメント，シリカフューム，珪石微粉末をあらかじめ混合したもの)，鋼繊維(長さ 15 mm，直径 0.2 mm のストレート繊維)および高性能減水剤から構成される。本研究では，鋼繊維を無混入(NF)，単位体積あたり 1 % 混入(F1)，2 % 混入(F2)の 3 水準を設けた。各配合の流動性は，JIS R 5201 によるフロー値(0 打)を指標とし，260 ±10 mm で管理した。養生方法は，20℃湿潤養生を 48 時間行い，脱型後，90℃で 48 時間の蒸気養生を行った。

2.2 供試体概要

表－2 に供試体諸元を示す。試験のパラメータは，せん断スパン有効高さ比 a/d (3.0～5.0)，軸方向鉄筋比 $p_w(=A_s/b_w d)$ (7.49～18.22 %)，有効高さ d (170～340 mm)，繊維混入率 V_f (0.0～2.0 %)，せん断補強の有無とした。なお，せん断補強を行った供試体のせん断補強鉄筋間隔 s は 67.5 mm であり，せん断補強鉄筋比 $r_w(=A_w/b_w s)$ は 1.56%，使用鋼材は D6 SD295A($f_{wy}=325$ N/mm²)とした。

図－1 に供試体形状図を示す。断面は I 型(A-A')

表－1 示方配合

名称	V_f [%]	単位量[kg/m ³]			
		水 ^{*1}	プレミックス	鋼繊維	高性能減水剤
NF	0.0	180	2254	0	26
F1	1.0			78.5	
F2	2.0			157	

*1 減水剤を含む。

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

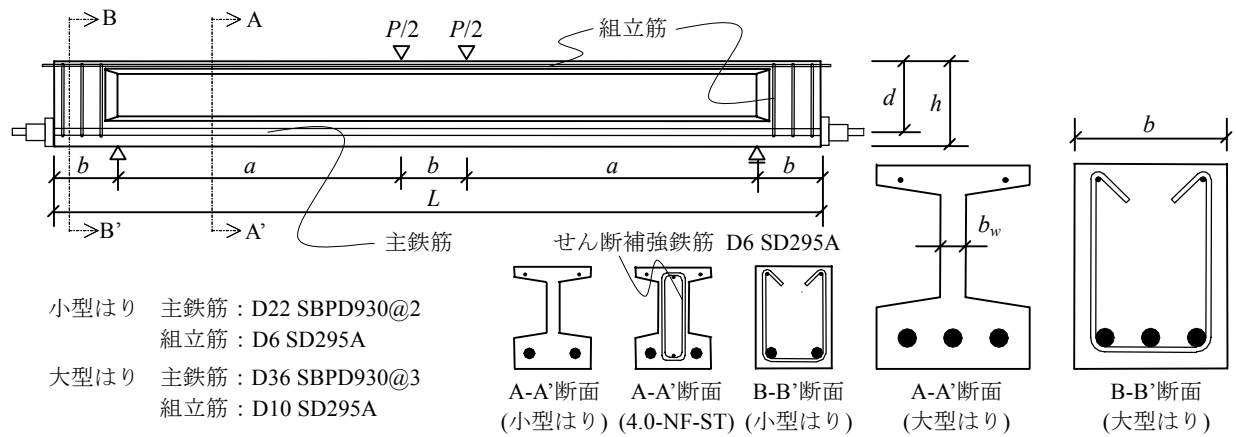
*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所第1研究部第8グループ (正会員)

表－２ 供試体諸元

供試体 名称	UFC	供試体寸法							補強鉄筋諸性状			
	V_f [%]	a/d —	a [mm]	d [mm]	b_w [mm]	b [mm]	h [mm]	L [mm]	p_w [%]	A_s [mm ²]	f_y [N/mm ²]	r_w [%]
3.0-NF-60	0.0	3.1	525	170	60	150	200	1500	7.59	774.2	1038	—
4.0-NF-60		4.0	675		60	150		1800	7.59		1033	—
5.0-NF-60		5.0	850		60	150		2150	7.59		1033	—
4.0-NF-35		4.0	675		35	150		1800	13.01		1033	—
4.0-NF-ST		4.0	675		60	150		1800	7.59		1033	1.56
4.0-F1-35	1.0	4.0	675		35	150		1800	13.01		1038	—
3.0-F2-25	2.0	3.1	525		25	150		1500	18.22		1033	—
4.0-F2-25		4.0	675		25	150		1800	18.22		1033	—
5.0-F2-25		5.0	850		25	150		2150	18.22		1033	—
4.0-F2-35		4.0	675		35	150		1800	13.01		1033	—
4.0-NF-L	0.0	4.0	1350	340	120	300	400	3600	7.49	3054.0	1008	—
4.0-F2-L	2.0	4.0	1350		50	300		3600	17.96		1008	—

供試体名称のつけ方 $[a/d]$ —[繊維混入率]— $[b_w]$ あるいはST(せん断補強), L(大型はり))



図－１ 供試体形状図

断面)とし、主鉄筋には異形 PC 鋼棒を使用した。使用鋼材の断面積 A_s および降伏強度 f_y は表－２に示す。また、UFC と鉄筋の十分な定着を確保するために供試体端部は横方向鉄筋を配置した矩形断面(B-B'断面)とし、アンカープレートを使用した。

なお、以下の検討では、繊維を混入していない供試体を NF シリーズ、繊維を混入した供試体を F シリーズ、 $d=170$ mm の供試体を小型はり、 $d=340$ mm の供試体を大型はりと呼ぶ。

2.3 荷重方法および測定項目

荷重は油圧式 2000 kN 万能試験機にて静的単調 2 点荷重を行った。可動支点と供試体間には減摩パッドを挿入し、支点の拘束による水平反力が発生しないようにした。支圧板のはり軸方向長さは、小型はりで 65 mm、大型はりで 150 mm とした。

測定項目は、荷重 P 、供試体スパン中央部のたわみ δ 、UFC および鉄筋のひずみとし、目視により破壊モードおよびひび割れ進展の観察を行った。

さらに、F シリーズでは、2 軸型亀裂変位計を供試体上縁より高さ方向 $d/2$ の位置に設置し、破壊に支配的であった斜めひび割れの幅 w を算出した。 w の算定にあたっては、亀裂変位計から得られた測定値を、斜めひび割れの角度 β から、ひび割れの直交方向に変換した。ここで、 β は亀裂変位計の測定位置における斜めひび割れの角度とした。

3. 実験結果

3.1 破壊モードおよびひび割れ状況

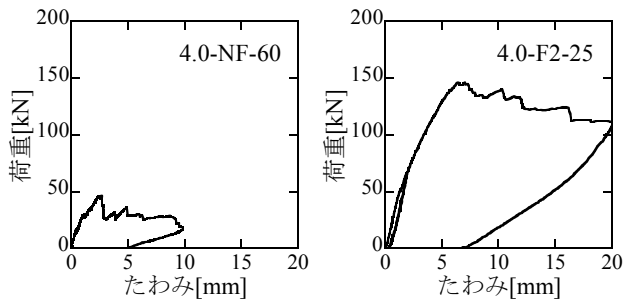
表－３に実験結果を示す。また、図－２に主な供試体の荷重－たわみ関係を、図－３に破壊時のひび割れ状況を示す。

破壊モードに関して、NF シリーズの 4.0-NF-60 および 5.0-NF-60 では、斜めひび割れ発生と同時に急激に耐力を失う典型的な斜め引張破壊であった。その他の NF シリーズ供試体では、斜めひび割れ発生後、タイドアーチを形成し耐力が上昇し

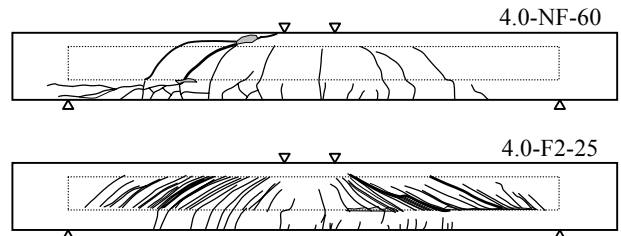
表－３ 実験結果

供試体 名称	材料試験結果		斜めひび割れ発生時			最大荷重時					
	f'_c [N/mm ²]	E_c [kN/mm ²]	P_c [kN]	V_c [kN]	v_c [N/mm ²]	P_{max} [kN]	V_{max} [kN]	v_{max} [N/mm ²]	β_u [deg]	w_u [mm]	破壊 モード
3.0-NF-60	185.2	51.5	52.8	26.4	2.59	70.8	35.4	3.47	39	—	DT
4.0-NF-60			45.9	23.0	2.25	46.5	23.2	2.28	41	—	DT
5.0-NF-60			43.4	21.7	2.13	44.3	22.2	2.17	39	—	DT
4.0-NF-35			39.0	19.5	3.28	82.0	41.0	6.89	22	—	SC
4.0-NF-ST			26.0	13.0	1.27	178.9	89.5	8.77	33	—	DT
4.0-F1-35	186.7	52.6	74.2	37.1	6.24	163.7	81.9	13.76	25	0.8	DT
3.0-F2-25	195.1	52.9	82.2	41.1	9.67	181.1	90.6	21.31	28	1.2	DT
4.0-F2-25			66.0	33.0	7.76	146.7	73.4	17.26	22	1.5	DT
5.0-F2-25			91.0	45.5	10.71	124.1	62.0	14.59	28	0.5	DT
4.0-F2-35			78.5	39.3	6.60	174.1	87.0	14.63	26	1.5	DT
4.0-NF-L	167.0	52.7	184.2	92.1	2.26	369.5	184.7	4.53	25	—	SC
4.0-F2-L	232.9	54.0	208.7	104.4	6.14	455.7	227.9	13.40	25	2.4	DT

破壊モード：DT－斜め引張破壊，SC－せん断圧縮破壊



図－２ 荷重－たわみ関係



図－３ ひび割れ状況図

た。特に 3.0-NF-35 および 4.0-NF-L では、最終的に圧縮側鉄筋の座屈に伴い UFC が圧壊する，せん断圧縮破壊となった。一方，F シリーズは全ての供試体で斜め引張破壊となった。ただし，その破壊モードは，両スパンに多数の斜めひび割れが入ることで耐力が上昇し，最終的に 1 つの斜めひび割れが大きく開口して終局に至るものであった。このように耐力が上昇した理由は，斜めひび割れ面で繊維による応力伝達が行なわれていることが考えられる。結果として終局せん断強度は 13.8～21.3 N/mm² と非常に高い値を示した。また，図－2 に示すように最大荷重に達した以後も，F シリーズは NF シリーズと比較して十分な変形性能を有しており，破壊は脆性的なものとならなかった。

ひび割れ状況は，NF シリーズと F シリーズで大きく異なった。図－3 に示すように NF シリーズと比較すると，すべての F シリーズ供試体で微細なひび割れが多数観察され，斜めひび割れの角度 β が小さくなる傾向にあった。

3.2 各パラメータがせん断耐力に及ぼす影響

ここでは a/d ， p_w ， d ， V_p が UFC の斜め引張破

壊時のせん断強度 $v_u(=V_u/b_w d)$ に及ぼす影響を整理する。特に a/d ， p_w ， d ，に関しては，下記の普通強度 RC はりを対象としたせん断耐力 V_c の算定式³⁾を用いて v_u が評価可能か検討した。

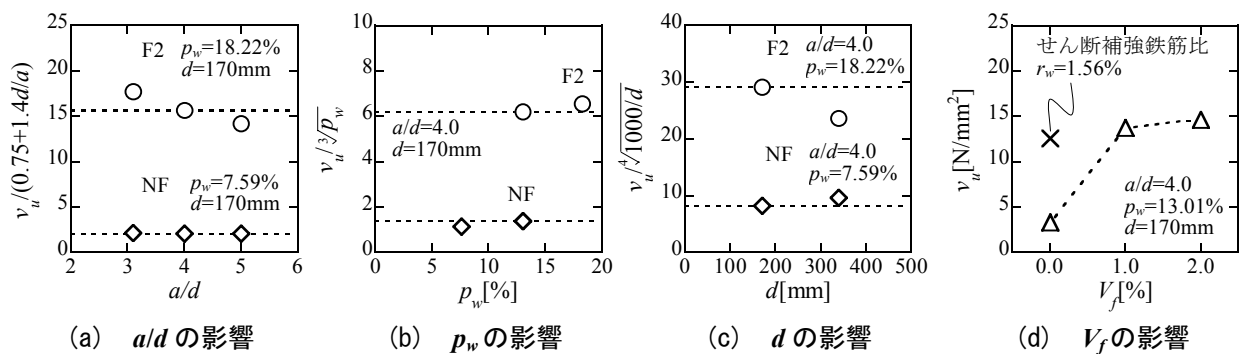
$$V_c = 0.2 \sqrt[3]{f'_c} \sqrt[3]{p_w} \sqrt[4]{1000/d} (0.75 + 1.4d/a) b_w d \quad (1)$$

以下の検討では，式(1)において a/d ， p_w ， d の影響を表す項である $(0.75 + 1.4d/a)$ ， $\sqrt[3]{p_w}$ ， $\sqrt[4]{1000/d}$ で，実験値 v_u をそれぞれ除した値を用いて整理した。すなわち，各パラメータがせん断強度に及ぼす影響を式(1)で評価できるのならば，パラメータの変化によらず，式(1)の各項で v_u を除した値はある一定値を示すこととなる。

なお，NF シリーズでせん断圧縮破壊した供試体は，斜めひび割れ発生時のせん断強度で評価した。

(1) せん断スパン有効高さ比 a/d の影響

図－4 (a) に， a/d と $v_u/(0.75 + 1.4d/a)$ の関係を示す。図より，NF シリーズは a/d の変化によらず一定の値を示しており， a/d の影響は式(1)の項 $(0.75 + 1.4d/a)$ で評価可能と考えられる。一方，F シリーズは a/d の増加に伴って値が減少する傾向が



図－4 各パラメータがせん断耐力に及ぼす影響

見られ、式(1)での評価は適当でないと考えられる。

(2) 鉄筋比 p_w の影響

図－4 (b)に $\sqrt[3]{p_w}$ と $v_u/\sqrt[3]{p_w}$ の関係を示す。図より、NF シリーズ、F シリーズともにほぼ一定値を示すことから、 p_w の影響は、式(1)の項 $\sqrt[3]{p_w}$ で評価することが妥当であるといえる。

(3) 有効高さ d の影響

図－4 (c)に d と $v_u/\sqrt[3]{1000/d}$ の関係を示す。図より、NF シリーズは d の変化によらずほぼ一定値を示しており、 d の影響、すなわち寸法効果は、式(1)の項 $\sqrt[3]{1000/d}$ で概ね評価できる結果となった。なお、一般に高強度コンクリートを用いた RC はりでは強度に関する寸法効果が、式(1)による評価よりも大きくなることが知られている⁴⁾。しかし、本研究の NF シリーズでは、顕著な寸法効果が見られなかった。一方で、F2 シリーズでは、 d の増加に伴って値が減少する傾向が見られ、 $\sqrt[3]{1000/d}$ よりも大きな寸法効果が確認された。

(4) 繊維混入率 V_f とせん断補強鉄筋の影響

V_f とせん断強度 v_u の関係を図－4 (d)に示す。図より、 V_f の増加に伴ってせん断強度が上昇し、 $V_f=1\%$ でも十分なせん断補強効果が現れた。また、 $V_f=2\%$ のせん断補強効果は、せん断補強鉄筋比 $r_w=1.56\%$ のせん断補強効果よりもさらに優れた効果を示した。このように繊維の混入により、せん断強度が飛躍的に上昇することを確認した。

4. せん断耐力評価方法の検討

4.1 NF シリーズせん断耐力評価方法の検討

NF シリーズにおいて、 a/d 、 p_w 、 d 、がせん断強度に及ぼす影響は、式(1)の各項により評価できた。

表－4 NF シリーズのせん断耐力算定結果

供試体 名称	V_{exp} [kN]	(a)上限値なし		(b)上限値あり	
		V_{cal} [kN]	V_{exp}/V_{cal}	V_{cal} [kN]	V_{exp}/V_{cal}
3.0-NF-60	26.4	198.8	0.13	20.6	1.28
4.0-NF-60	23.0	182.1	0.13	18.9	1.21
5.0-NF-60	21.7	170.1	0.13	17.7	1.23
4.0-NF-35	19.5	127.2	0.15	11.0	1.77
4.0-NF-L	104.4	589.2	0.16	63.6	1.45

そこで、式(1)を用いて NF シリーズの斜め引張破壊時のせん断耐力 $V_u(=P_u/2)$ を算定した。表－4 (a)に算定結果を示す。 V_{exp}/V_{cal} の平均値は 0.14、変動係数は 10.5 % となり、ばらつきは小さいものの、かなり危険側の評価となった。これは、UFC の高い圧縮強度と本研究における高い鉄筋比を、普通強度 RC はりを対象とした式(1)にそのまま適用したためであると考えられる。つまり式(1)の適用で、UFC はりのせん断耐力を評価するには、係数の修正や適切な上限値の設定等を検討する必要がある。ここでは、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾に設けられている、 $0.2\sqrt[3]{f'_c}=0.72$ および $\sqrt[3]{p_w}=1.5$ の上限値を式(1)に用いて V_u を算定することで、表－4 (b)に示すように、 V_{exp}/V_{cal} の平均値 1.39、変動係数 16.7 % と、安全側に評価できることを確認した。

4.2 F シリーズせん断耐力評価方法の検討

F シリーズにおいて、 a/d および d がせん断強度に及ぼす影響は、式(1)による予測結果と比較して若干異なった傾向を示した。また、斜めひび割れ発生後もひび割れ面において繊維が応力を伝達することにより、急激な耐力の低下が起こらなかった。そこで、F シリーズのせん断耐力を、式(1)によって評価するのではなく、図－5に示すように、せん断力 V に抵抗する要素が、斜めひび割れ面に作用する繊維の引張伝達力であると仮定し、力の

釣合いから導かれる以下の式(2)により評価した。

$$V_u = \frac{\sigma_p}{\tan \beta_u} b_w j d \quad (2)$$

ここで、 σ_p は繊維の引張伝達応力、 β_u は斜めひび割れ角度、 $j d$ はモーメントアーム長($1/1.15 \cdot d$)である。したがって、Fシリーズのせん断耐力 V は、 σ_p と β_u が決定されれば、式(2)によって算定することができる。このような考え方はフランスの AFGC/SETRA 指針⁶⁾にも用いられており、特に同指針では、 σ_p を図-6に示すように引張軟化曲線 ($\sigma(w)$ - w 関係)から以下の式(3)で算定している。

$$\sigma_p = \frac{1}{w_u} \int_0^{w_u} \sigma(w) dw \quad (3)$$

ただし、 w_u は終局時の斜めひび割れ幅である。本研究では、 σ_p は、実測した w_u および UFC の引張軟化曲線⁷⁾を用いて式(3)から求めた。また、 β_u は、表-3に示した実験値を用いた。以上の考え方に基づいたFシリーズのせん断耐力の算定結果を表-5に示す。 V_{exp}/V_{cal} の平均値は1.17、変動係数は20.9%となり、ややばらつきが大きいものの平均的には1.0に近い評価が可能であった。

5. 非線形有限要素解析の適用

5.1 解析概要

Fシリーズのせん断耐力は、式(2)によって概ね評価することができた。しかしながら、式(2)で用いた斜めひび割れ角度 β_u は実験値であるため、実用的に式(2)を用いるには、 β_u が UFC の材料特性や供試体形状から予測できなければならない。そこで、解析コード DIANA を用いた2次元非線形有限要素解析を適用し、 β_u の予測を試みた。

解析に使用したひび割れモデルは、分布ひび割れモデルの1つである回転ひび割れモデルとした。使用した UFC の構成則を図-7に示す。図-7(a)に示す圧縮構成則は、 $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体の一軸圧縮試験より得られた応力-ひずみ関係⁷⁾であり、図-7(b)に示す引張構成則は切欠きはりの3点曲げ試験から得られた引張軟化曲線⁷⁾である。UFC の要素は4節点アイソパラメトリック4辺形要素を使用し、要素辺長は20 mm とした。

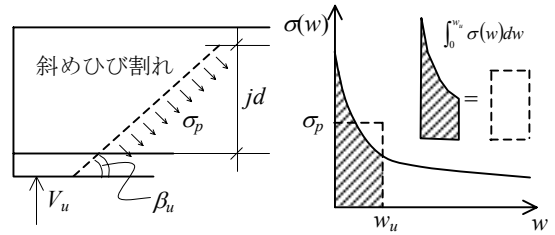
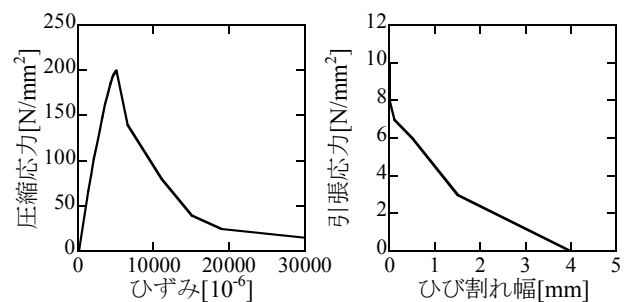


図-5 力の釣合い 図-6 σ_p の算定法

表-5 Fシリーズのせん断耐力算定結果

供試体 名称	σ_p [N/mm ²]	V_{exp} [kN]	V_{cal} [kN]	V_{exp}/V_{cal}
3.0-F2-25	8.4	90.6	58.7	1.54
4.0-F2-25	7.5	73.4	68.8	1.07
5.0-F2-25	10.0	62.0	69.4	0.89
4.0-F2-35	7.5	87.0	80.0	1.09
4.0-F2-L	5.8	227.9	183.1	1.24



(a) 圧縮モデル (b) 引張モデル

図-7 UFCの構成則

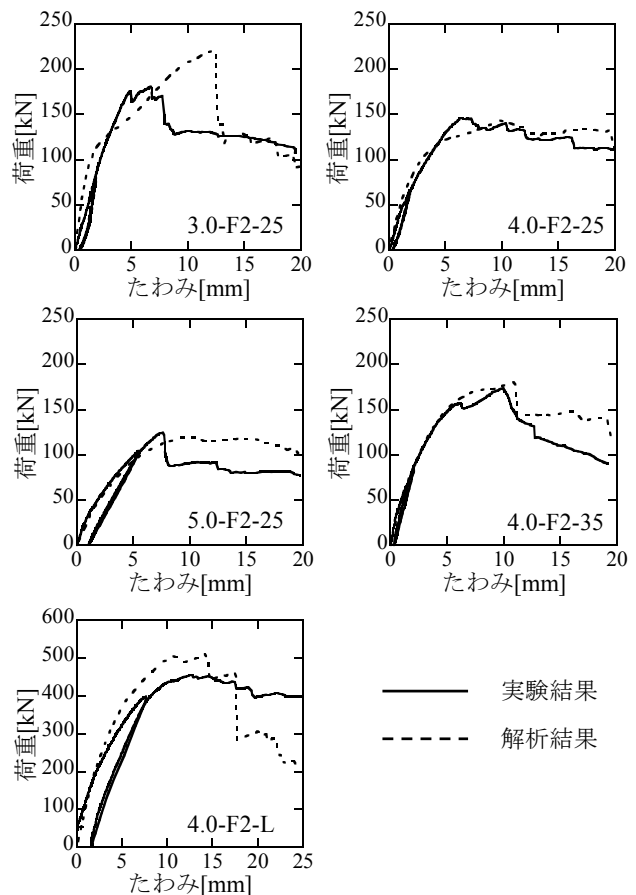
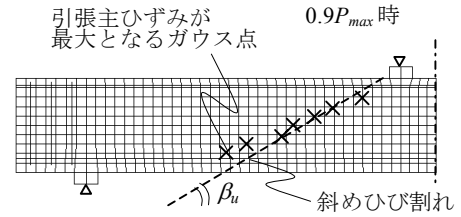


図-8 解析結果

表－6 斜めひび割れ角度の算定結果

供試体 名称	P_{exp} [kN]	P_{FEM} [kN]	$P_{exp}/$ P_{FEM}	β_{exp} [deg]	β_{cal} [deg]	$\beta_{exp}/$ β_{cal}
3.0-F2-25	181.1	221.8	0.82	28	25.7	0.92
4.0-F2-25	146.7	140.8	1.04	22	28.6	1.30
5.0-F2-25	124.1	119.4	1.04	28	25.2	0.90
4.0-F2-35	174.1	178.4	0.98	26	24.1	0.93
4.0-F2-L	455.7	500.8	0.91	25	28.0	1.12



図－9 β_u の算定方法

5.2 解析結果および斜めひび割れ角度の予測

図－8に実験および解析により得られた荷重－たわみ関係を、表－6に実験および解析から得られた最大荷重 P を示す。3.0-F2-25 では解析結果が実験結果よりも最大荷重を若干高く評価しているものの、いずれのケースにおいても解析結果は実験結果の挙動および最大荷重をほぼ予測できている。そこで、斜めひび割れ角度 β_u を解析から得られたひずみ分布を用いて予測することにした。 β_u の算定方法は、まず水平方向同一高さにおけるガウス点で、引張主ひずみが最大となっているガウス点を順次見つけ、図－9に示すように得られたガウス点を供試体ウェブ区間においてプロットする。そしてプロットした点を対象に最小二乗法によって近似曲線を定め、これを斜めひび割れと仮定してその角度 β_u を算出した。なお、最大荷重の90%時のひずみ分布を対象とした。このようにして得られた β_u を表－6に示す。表－6より有限要素解析の適用により、UFC の材料特性や供試体形状から β_u を比較的妥当な精度で予測できた。実験データの蓄積と解析精度の向上という点でさらに検討の余地があるが、 β_u に影響を及ぼす要因を特定し、これを評価できれば、式(2)によって UFC のせん断耐力を予測できる可能性が示された。

6. まとめ

本研究では、 $a/d=3.0\sim 5.0$ 、 $p_w=7.49\sim 18.22\%$ 、 $d=170\sim 340$ mm、せん断補強の有無をパラメータとして、UFC を用いたはり部材のせん断載荷実験を行った。以下に得られた知見をまとめる。

(1)NF シリーズと同様に、F シリーズにおいても斜め引張破壊を呈したが、最大荷重に達した以降も急激な耐力の低下が起こらず、十分な変形性能を示し、ひび割れが分散した。

- (2)NF シリーズでは a/d 、 p_w 、 d がせん断耐力に及ぼす影響は普通強度 RC はりと同程度であったが、F2 シリーズでは、大きな a/d の影響および寸法効果が確認された。
- (3)NF シリーズのせん断耐力は既存の普通強度 RC はりを対象としたせん断耐力算定式に準じて安全側に評価できた。一方、F シリーズのせん断耐力は繊維の引張伝達応力と斜めひび割れの角度を用いて推定できる可能性が示された。
- (4)UFC の材料構成則を用いた非線形有限要素解析によって F シリーズの実験の挙動が再現され、さらにはひずみ分布から斜めひび割れ角度を予測することができた。

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)田中良弘，武者浩透，大竹明朗，下山善秀：超高強度繊維補強コンクリートによる PC 歩道橋の設計施工法，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1603-1608，2002.6
- 3)二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村 甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 4)藤田 学，佐藤良一，松元香保里，高木康宏：高強度コンクリートを用いた RC はりのせん断強度と寸法効果，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.161-172，2002.8
- 5)2002 年制定土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002
- 6)AFGC/SETRA：Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes Interim Recommendations，2002
- 7)掛井孝俊，川口哲生，二羽淳一郎，兵頭彦次：超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料の破壊力学特性，第 57 回セメント技術大会講演要旨，pp.230-231，2003.5