

論文 短繊維混入超高強度コンクリート柱の基本的力学性状に関する研究

木村 秀樹^{*1}・石川裕次^{*1}・大野定俊^{*1}・柿沢忠弘^{*1}

要旨：圧縮強度が 130 (N/mm²) を超える超高強度コンクリートに短繊維を混入した場合の短繊維の種類、長さ、混入量、横補強筋との組み合わせの影響などを把握するために、標準供試体 (100φ×200mm) および鉄筋コンクリート角柱 (250□×700mm) を作成し、その製作方法、施工性、基本的力学性状などを検討した。その結果、標準供試体では短繊維を混入することにより圧縮靱性が著しく向上した。一方、RC 角柱では鋼繊維混入コンクリートを横補強筋と共に用いることによって、拘束効果による強度増分をさらに大きく見込むことができることが分かった。しかし、圧縮靱性の改善は認められなかった。

キーワード：短繊維、高強度コンクリート、柱、圧縮試験、靱性、鉄筋コンクリート

1. はじめに

コンクリートは強度が高くなるにつれて圧縮時の力学性状は脆性的になることが知られている。特に圧縮強度が $F_c130 \text{ N/mm}^2$ (以下 F_c130) を超える超高強度コンクリートでは最大耐力に達した直後に爆裂が生じ、下降域までも含めた完全な応力-歪曲線を得ることが難しくなる。本報ではこのような超高強度コンクリートに短繊維を混入した場合の製作方法、施工性、基本的力学性状などを検討した。

2. 標準供試体試験

第 1 ステップとして、短繊維混入コンクリー

トの製造方法、基本性状の把握を目的として標準供試体による圧縮試験を実施した。

2.1 短繊維混入コンクリートの調合と製造

試験体一覧およびコンクリートの調合を表-1 に示す。短繊維としては鋼繊維 (SF)、アラミド繊維 (AF)、炭素繊維 (CF) の 3 種類を用いた。繊維長さは SF が 60mm、30mm、AF が 30mm、6mm、CF が 40mm である。SF のみ 2 種類とも両端部にフックを有する特殊形状のもの (表-1 脚注) であるが、AF と CF はともにフックや突起の無いストレートタイプである。短繊維の体積混入率 V_f は SF で 1.5、3.0、4.0% の 3 水準、AF および CF では 1% のみ 1 水準である。

表-1 試験体の調合および圧縮試験結果

試験体	混入繊維	繊維長さ (mm)	混入量 V_f (%)	調合 (重量: kg/m ³)						圧縮強度* (N/mm ²)	弾性係数* (N/mm ²)
				水	結合材		細骨材	粗骨材	繊維		
					セメント	シリカ					
ベース	無し	—	—	180	800	200	643	455	—	168.7	39913
SF-60-1.5	鋼繊維 (SF)	60	1.5	177	788	197	634	448	115	165.0	39421
SF-30-3		30	3.0	175	777	194	624	442	227	156.8	41560
SF-30-4		30	4.0	173	769	192	618	438	300	155.6	40130
AF-30-1	アラミド繊維 (AF)	30	1.0	178	792	198	637	451	14	128.5	34506
AF-6-1		6	1.0							131.1	33619
CF-40-1	炭素繊維 (CF)	40	1.0	178	792	198	637	451	18	129.8	41401

注) 水結合材比 (W/B) = 18%

V_f = 体積混入率

*: 圧縮強度および弾性係数は標準供試体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) 3本の平均値

・セメント: ハイフローセメント

・細骨材: 段戸産細砂微粉

・粗骨材: 段戸産石英片岩砕石 (最大寸法 13mm)

・混和剤: 高性能減衰剤および消泡剤

・シリカ: 粉体シリカフューム

・CF繊維: 繊維集束型 (繊維径 7μ を 12000本集束)

・鋼繊維 (SF) の形状:  (アスペクト比は長さが 30mm の場合 37.5、60mm の場合 75)

・AF繊維: 長さ 30mm は繊維非集束型 (繊維径 12μ)、長さ 60mm は繊維集束型 (繊維径 12μ を 1000本集束)

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 (正会員)

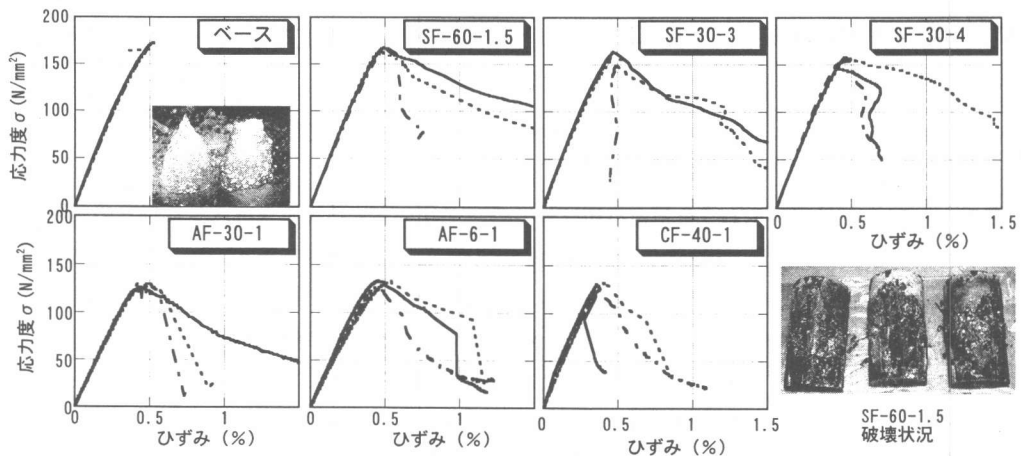


図-1 応力-ひずみ関係と破壊状況

練り混ぜにはオムニキサー(容量 10L)を用い 6L 製造した。短繊維の混入は全材料の投入および練り混ぜ後に行なった。ここでは練り混ぜ量が少ないためにスランプ、空気量の測定は行なわなかった。標準供試体(100φ×200mm)のモールドは翌日脱型し、標準水中養生とした。

2.2 製造結果

試験体の製作に当たり各繊維の混入状況は以下のものであった。

①SF の混入: 繊維長さ 60mm のものは混入量 3% ではセメントペーストと繊維が分離して練り混ぜが不可能であった。混入量を 1.5%としたものはかろうじて練り混ぜが可能であった。繊維長さ 30mm のものは混入量 4%まで練り混ぜ可能であった。しかし、4%はほぼ限界に近いと思われる。②AF の混入: 繊維長さ 30mm のものは混入量 1%で練り混ぜを行なったが、初回はベースコンクリートが少し硬めであったため練り混ぜらなかった。ベースコンクリートを少し柔らかく目にして再度練り混ぜを行なった結果、練り混ぜは可能であったが、混入量 1%はほぼ限界に近いと思われる。繊維長さ 6mm のものも混入量 1%から練り混ぜを行なったが、繊維混入後はワカビリチが極端に減少した。今回のベースの調合では 1%が限界であると思われる。③CF の混入: 繊維長さ 40mm のものを 1%混入してみたが、良好に練り混ぜができた。混入量をもう少し多くしても練り混ぜは可能であると思われる。

2.3 圧縮試験結果

試験には 2000 kN の高剛性試験機を用いた。

表-1 に圧縮試験結果を、図-1 に 3 本の供試体の応力-歪関係を示す。供試体の端面は研磨

処理を行なった。

1) 破壊性状: 繊維を混入していないベースコンクリートは最大応力に達した直後に爆裂を生じた(図-1 の写真)。それに対して短繊維を混入した供試体はいずれも爆裂は生じず、徐々にエネルギーが開放され、最大応力以後の下り勾配も計測可能であった(図-1 の写真)。

2) 応力-歪関係: 軸歪は左右の軸変形の平均から求めた。供試体が均等に縮まずデータが乱れているものもある。SF を混入した試験体の最大圧縮応力は、ベース供試体の 169 N/mm² に対し、98~92%と若干小さ目の値であった。一方、AF 及び CF を混入した供試体では圧縮強度は約 74%に減少した。これは AF、CF を強度の低い骨材と考えれば理解し得る。SF 及び CF 混入供試体のヤング係数は、ベース供試体と同等あるいはそれ以上の値を示したが、AF 混入供試体ではベース供試体の 87%に減少した。これは AF がほぐれ易い集束力の弱い繊維であったためと思われる。最大耐力以降の変形能力(圧縮靱性)は SF 混入供試体では繊維長が長い方が靱性が大きい傾向にある。また、同一繊維長であれば混入量が多い方が靱性が大きい。

3. 鋼繊維混入 RC 角柱の中心圧縮試験

第 2 ステップとして、短繊維コンクリートを鉄筋コンクリート部材に用いた場合の性状を把握するために角柱の中心圧縮試験を行なった。混入する短繊維は標準供試体試験結果に基づいて、最大耐力およびヤング係数への影響が少ない鋼繊維(SF)のみとし、標準供試体試験で用いたものと同じものを使用した。

3.1 試験体及び実験方法

試験体一覧を表-2に、試験体の形状寸法および配筋の一例を図-2に示す。試験体は250□×700mmの四角柱17体である。コンクリートかぶり厚は帯筋外面まで10mmとし、試験体を立てた状態でコンクリートを打設した。粗骨材は甲州産安山岩、最大粒径13mmのものを使用した。横補強筋には直径6.4と7.4mmの降伏点強度 $w\sigma_y=140\text{ N/mm}^2$ の超高強度異形PC鋼棒およびSD295AのD10鉄筋を用い、外周筋はスパイラル筋、中子筋は135度フックとした。異形PC鋼棒のフック余長は $8d_b$ (d_b :鉄筋径)とした。コンクリートの調合は標準供試体試験を参考に水結合材比(W/B)=18%とした。SFの混入は標準供試体試験同様、全材料の投入および練り混ぜ後に行なった。コンクリートの製造は生コンプラントのミキサーで 1 m^3 ずつ行なった。

実験変数は①SF混入量、②SF長さ、③横補強筋量である。横補強筋量は拘束されたコア(コ

ア幅として外周横補強筋の芯～芯間距離を採用)に対する帯筋比 Pw' と補強筋降伏点強度の積 $Pw' \cdot w\sigma_y$ で表わした。表-2に鋼材の機械的性質および標準供試体(100φ×200mm)によるコンクリートの機械的性質を合わせて示す。

加力は20000kN試験機により中心圧縮力を一方方向単調载荷した。軸方向ひずみは試験体に貫通して水平に埋め込まれた2本のボルト間の相

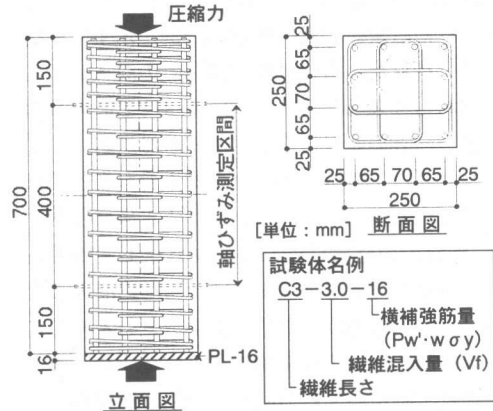


図-2 試験体の形状および配筋

表-2 試験体概要および実験結果

試験体名	繊維長さ(mm)	混入量 V_f (%)	軸鉄筋 ^{*1}	横補強筋 ^{*2}				コンクリート ^{*3}		実験結果 ^{*4}		C0-0-0との比較 ^{*5}	
				本数	ピッチS(mm)	帯筋比 Pw'	$w\sigma_y$ (N/mm^2)	$Pw' \cdot w\sigma_y$ (N/mm^2)	圧縮強度 f_c' (N/mm^2)	最大強度 f_{cc} (N/mm^2)	f_{cc} 時軸ひずみ ϵ_{cm}	強度増分	f_{cc} 時軸ひずみ比
C0-0-0	—	0.0	4-D10	—	—	0	—	0	137.2	121.7	0.0029	—	—
C0-0-16	—	0.0	12-D10	4-U6.4	45	0.0119	1372	16.4	137.2	151.1	0.0076	29.3	2.621
C0-0-29	—	0.0	12-D10	4-U7.4	35	0.0205	1396	28.6	137.2	177.1	0.0129	55.3	4.448
C6-1.5-0	60	1.5	4-D10	—	—	0	—	0	126.2	130.4	0.0031*	8.7	1.069
C6-1.5-16	60	1.5	12-D10	4-U6.4	45	0.0119	1372	16.4	126.2	172.3	0.0043*	50.6	1.483
C6-0.8-0	60	0.8	4-D10	—	—	0	—	0	135.7	137.2	0.0036*	15.5	1.241
C6-0.8-10	60	0.8	12-D10	4-D10	45	0.0288	357	10.3	135.7	186.2	0.0067	64.5	2.310
C6-0.8-16	60	0.8	12-D10	4-U6.4	45	0.0119	1372	16.4	135.7	172.4	0.0068	50.6	2.345
C6-0.8-29	60	0.8	12-D10	4-U7.4	35	0.0205	1396	28.6	135.7	187.2	0.0106	65.5	3.655
C3-3.0-0	30	3.0	4-D10	—	—	0	—	0	130.4	111.7	0.0035	-10.0	1.207
C3-3.0-10	30	3.0	12-D10	4-D10	45	0.0288	357	10.3	130.4	181.0	0.0070	59.3	2.414
C3-3.0-16	30	3.0	12-D10	4-U6.4	45	0.0119	1372	16.4	130.4	174.1	0.0079	52.3	2.724
C3-3.0-29	30	3.0	12-D10	4-U7.4	35	0.0205	1396	28.6	130.4	208.0	0.0123	86.3	4.241
C3-1.5-0	30	1.5	4-D10	—	—	0	—	0	136.8	124.5	0.0034	2.8	1.172
C3-1.5-16	30	1.5	12-D10	4-U6.4	45	0.0119	1372	16.4	136.8	168.9	0.0076	47.2	2.621
C3-0.8-0	30	0.8	4-D10	—	—	0	—	0	129.3	114.1	0.0031*	-7.6	1.069
C3-0.8-16	30	0.8	12-D10	4-U6.4	45	0.0119	1372	16.4	129.3	160.0	0.0061	38.3	2.103

注) *1: 軸鉄筋の降伏強度は366N/mm²ですべて共通

*2: 帯筋比 Pw' はコア断面に対する帯筋比、コア断面はスパイラル筋の芯～芯とする

*3: 圧縮強度および弾性係数は封かん養生供試体(φ100×200mm)3本の平均値

4: 最大強度 f_{cc} はコア断面の最大強度、 ϵ_{cm} の[]は最大付近でひずみが戻ったため、正割配時の最大値を採用

*5: 強度増分= $f_{cc}-121.7$, f_{cc} 時軸ひずみ比= $\epsilon_{cm}/0.0029$

対変位を平行する2面について測定し、その平均値より求めた。軸ひずみの測定長は400mmを基本としたが、最大耐力付近で試験体が偏心圧縮状態になり軸歪みが戻る場合などは測定長300mmのデータを採用した。軸筋および横補強筋には歪ゲージを貼付し、その歪を測定した。

3.2 実験結果

1) 試験経過と破壊性状

実験結果を表-2に合わせて示す。また、写真-1に試験体の最終状況の一例を示す。横補強筋を有しない角柱試験体はSFの混入いかんに関わらず軸ひずみが0.3~0.35%で最大耐力に達し、その直後に爆裂が生じ急激に耐力が低下した。ここでは「爆裂」とは大きな音と共に大きく耐力が低下することを言う。破壊性状はSF無混入角柱では内部コンクリートが爆裂により飛散してしまうのに対し、SFを混入した場合には斜め方向の破壊面が形成されるもののコンクリート同士は繊維により繋ぎ止められ、試験終了時にいずれも試験体の原形を留めていた(写真-1(a)~(c))。一方、横補強筋により拘束された角柱試験体は①軸筋の降伏、②かぶりコンクリートの圧壊、剥落、③横補強筋の降伏、④最大耐力、の順で最終破壊に至るもの、①②④③の順になるもの①②④の直後に破壊するものに分類される。軸ひずみが0.3%を超えるあたりからピシピシという音が発生し、かぶりコンクリートの圧壊兆候が始まる。かぶりの剥落はSFを混入した場合、無混入よりもかなり少ない。SF無混入で $P_w \cdot w_{\sigma y} = 16$ と 29 N/mm^2 の試験体は①②④③の順になり、軸ひずみが3%を超えるまで爆裂は生じなかった(写真-1(d))。一方、SF混入の場合、繊維長さ30mm、混入量3%で $P_w \cdot w_{\sigma y} = 10$ と 16 N/mm^2 の2体を除いた試験体はいずれも①②③④あるいは①②④の直後に帯筋の破断を伴う爆裂が生じ、耐力が低下している(写真-1(f))。最終破壊状況は多くの場合、斜め方向の滑り面を生じ、これに沿って主筋の座屈、横補強筋の破断が生じている。

2) コンクリートの応力~ひずみ関係

横補強筋で拘束された試験体の場合、コアコンクリートの応力~ひずみ関係を求めるために軸筋とかぶりコンクリートの寄与分を全荷重から差し引いて、残りをコアコンクリートの負担分

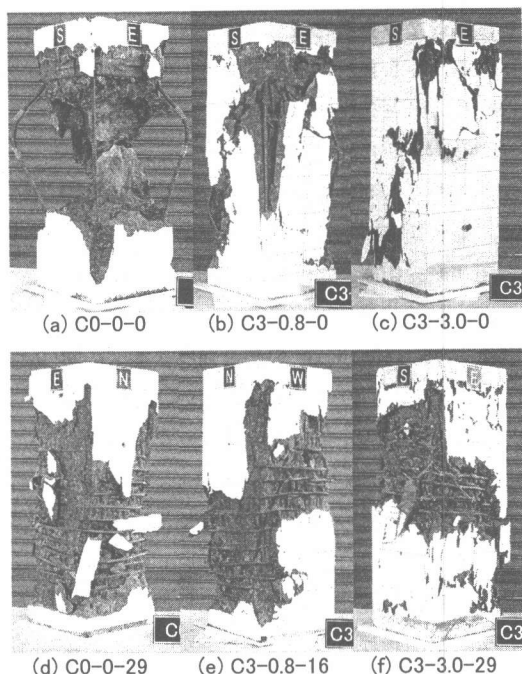


写真-1 最終破壊状況

とし、コアコンクリートの応力度を求めた。かぶりコンクリートの最大強度は $100 \phi \times 200 \text{ mm}$ の標準シリンダから得られた強度の85%と仮定し、応力~ひずみ関係は最大耐力まで直線で近似した。軸筋の応力~ひずみ関係は完全弾塑性とした。図-3に試験体の応力~ひずみ関係を比較して示す。また、図中の○印は帯筋の降伏開始時期を示している。

a) SF混入量の影響

図-3(a)~(c)は横補強筋量が同一でSF混入量が異なる試験体の比較を示している。横補強筋量 $P_w \cdot w_{\sigma y} = 0$ の場合(a)にはSF混入量が増加しても最大耐力および圧縮靱性共に増加はみられない。無拘束の標準供試体($100 \phi \times 200 \text{ mm}$)では図-2に示すようにSFを混入した場合、最大耐力後の負勾配まで計測可能であったが、SF混入角柱試験体は最大耐力直後に爆裂が生じ急激に耐力が低下し、最大耐力後の負勾配の計測は不可能であった。従って、無拘束コンクリートの応力~ひずみ関係は標準供試体($100 \phi \times 200 \text{ mm}$)と角柱試験体とは性状が異なった。これは寸法効果あるいは試験機の剛性の影響が考えられる。 $P_w \cdot w_{\sigma y} = 16 \text{ N/mm}^2$ の場合(b)はSF無混入試験体は最大耐力以降徐々に耐力が低下してゆくのにに対し、混入量が0.8および1.5%では無混入に対し最大耐力の増加

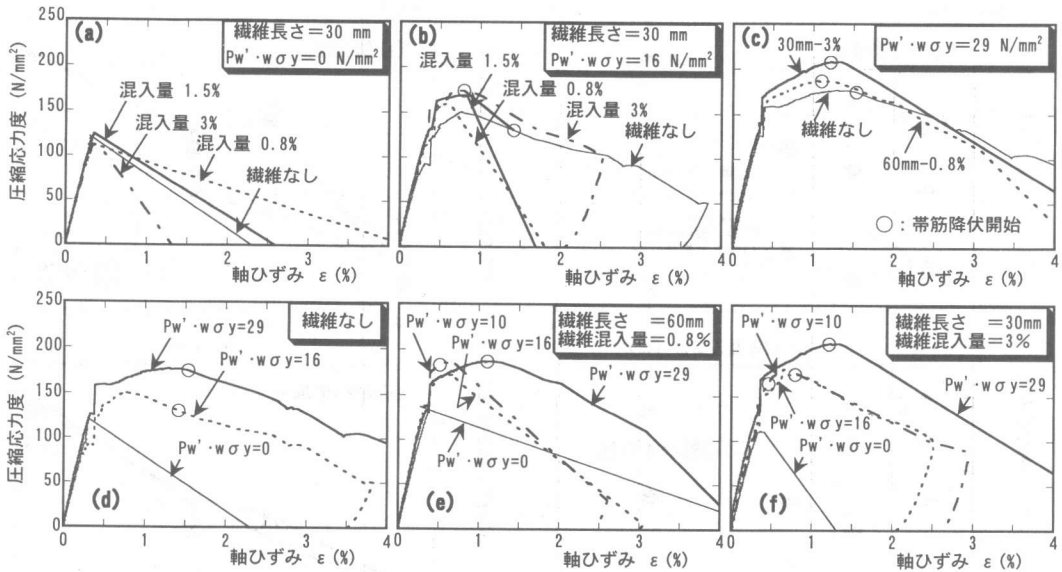


図-3 応力-ひずみ関係の比較

は見られるが最大耐力直後に爆裂による急激な耐力低下が生じた。一方、SF 混入量が3%の場合には無混入に比べ最大耐力は増加し、最大耐力以降も無混入試験体と同様爆裂は生じなかった。Pw'・wσy=29 N/mm² とさらに横補強筋量が増えた場合(c)には SF 混入量が 0.8、3.0%共に最大耐力は増加し、最大耐力以降の負勾配は無混入と同等であったが、最大耐力直後に帯筋の破断を伴う爆裂が生じている。

b) 横補強筋量の影響

図-3 (d)~(f)は SF 混入量が同一で横補強筋量が異なる試験体の比較を示している。SF 無混入の場合(d)には Pw'・wσy の増加に伴い最大耐力、最大耐力時のひずみの増加が見られ、横補強筋を有する場合には、前述のように3%を超える軸ひずみまで爆裂は生じなかった。また、横補強筋の降伏は軸ひずみが1.5%付近から開始している。それに対し、SF が混入されると横補強筋を有する試験体では最大強度が増大する傾向がみられるが、最大強度時の軸ひずみ増大および最大耐力以降の性状の改善はみられない。SF 混入によって横補強筋の降伏時期は早まる傾向がみられる。なお、図-3 中で横補強筋降伏開始時期が示されていない試験体は、爆裂直前まで降伏ひずみに達しておらず爆裂と同時にひずみゲージが断線しているものである。

3.3 実験結果の検討

表-2 に応力~ひずみ関係における最大応力

度 fcc と最大応力度時の軸ひずみ ε cm を示す。また、図-4 には SF 無混入、横補強筋無しの試験体 (C0-0-0) からの最大強度増分 (fcc-121.7) および最大強度時の軸ひずみ比 (ε cm/0.0029) に対する SF 混入量の影響を示す。図中、繊維混入量以外の変数が共通のものを線で結んでいる。図より Pw'・wσy=0 N/mm² の場合 (C0-0-0) からの強度増分はほとんど無く、最大強度時軸ひずみの増加も無い。Pw'・wσy =16 および 29 N/mm² の場合には SF 混入量が増加するにつれて強度増分も増加する傾向が見られる。Pw'・wσy =29 N/mm² の場合、SF 無混入時の強度増分が 55 N/mm² であるのに対し、SF を3%混入した場合 86 N/mm² の増加が見られる。最大強度時の軸ひずみ比は SF 混入によって増加する傾向は見られない。同一繊維混入量の場合の繊維長さ (60 と 30mm) の影響は強度増分に現れ、SF 混入量が 0.8 と 1.5% の場合、60mm の方が強度増分が大きい傾向が見られる。

図-5 は (C0-0-0) からの最大強度増分 (fcc-121.7) および最大強度時の軸ひずみ比 (ε cm/0.0029) に対する横補強筋量の影響について示したものである。図中、横補強筋量以外の変数が共通のものを線で結んでいる。SF 混入量が 0、0.8、1.5、3.0%いずれの場合も Pw'・wσy の増加に伴い (C0-0-0) からの最大強度増分は増加している。また最大強度時の軸ひずみ比 (ε cm/0.0029) も増加している。

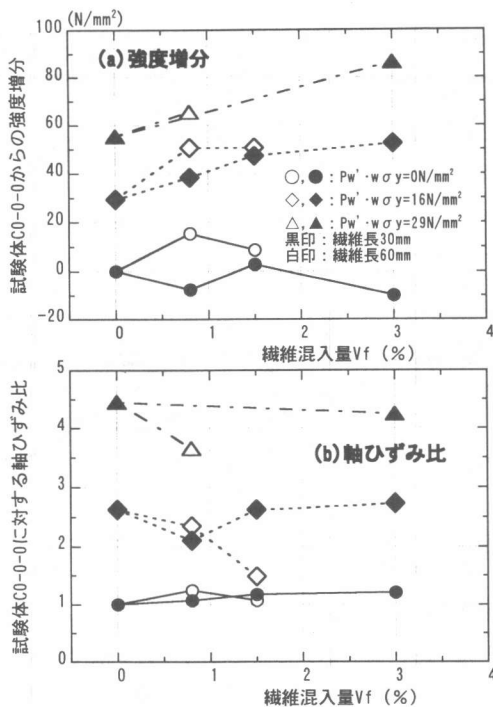


図-4 繊維混入量の影響

以上のことからSF混入コンクリートは横補強筋と共に用いることによって、拘束効果による強度増分をさらに大きく見込むことができる。すなわち、SF混入によって圧縮有効強度が増大すると考えることもできる。従って、同一横補強筋量の場合、SF無混入時よりも靱性が低下する傾向は、横補強筋で拘束できるエネルギー量が等しいと考えれば説明が可能である。

5. まとめ

- 1) $150 N/mm^2$ の強度を有する超高強度コンクリート(UHSC)に混入できる最大繊維量は、繊維の種類、繊維の長さによって異なり、SFで繊維長が60mmの場合で2%程度、繊維長が30mmの場合で4%程度、AF繊維で繊維長が30mmの場合1%程度、CF繊維で繊維長が40mmの場合1%強であった。
- 2) 標準供試体による圧縮試験では、SF混入時の最大圧縮応力度は、ベース供試体の98~92%であった。一方、AF及びCFを混入した供試体では約74%に減少した。
- 3) SF及びCF混入供試体のヤング係数は、ベース供試体と同等あるいはそれ以上の値を示したが、AF混入供試体では87%に減少した。
- 4) 無筋の標準供試体では圧縮靱性は短繊維を

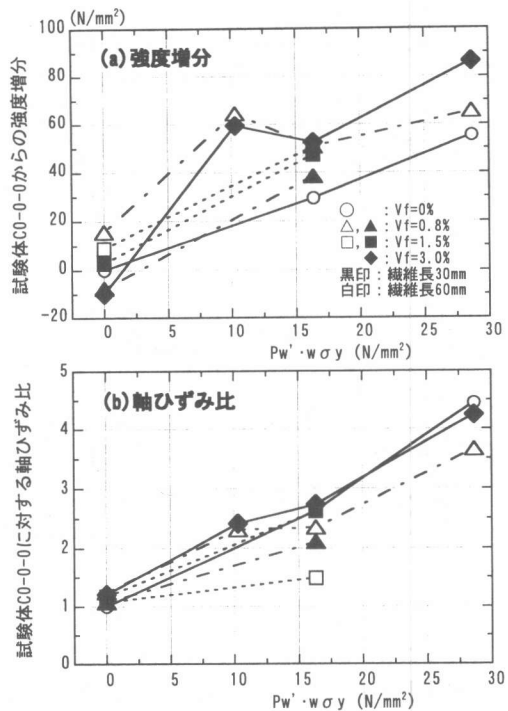


図-5 横補強筋量の影響

混入することにより著しく向上した。しかし、無筋のSF混入角柱の場合には靱性の向上はみられなかった。

5) SF混入コンクリートは横補強筋と共に用いることによって、拘束効果による強度増分をさらに大きく見込むことができるが、圧縮靱性の改善は認められなかった。

【参考文献】

- 1) Martinez S., Nilson A.H. and Slate F.O.: Spirally Reinforced High-Strength Concrete Columns, ACI Journal, pp. 431-442, September-October 1984.
- 2) Nagashima T., Sugano S., Kimura H. and Ichikawa A.: Monotonic Axial Compression Test on Ultra-High-Strength Concrete Tied Columns, Proceedings of 10th WCCE, Madrid, Spain, July 1992.
- 3) 木村秀樹ほか: 短繊維を混入した超高強度コンクリート($F_c=150 N/mm^2$)の基本性状に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV, pp. 641-642, 1999.9