

論文 鋼繊維を多量混入したセメント系材料の開発と力学特性

河野 克哉*1・石田 征男*2・高橋 英孝*3・田中 敏嗣*4

要旨: 立体波形の鋼繊維を型枠内にプレバックドし、充填性に優れた超低粘性かつノンブリーディングのグラウトを注入することで、最高水準の体積混入率 15%となる多量の鋼繊維を含んだセメント硬化体を得ることができた。この硬化体は多量の鋼繊維の混入によって、圧縮強度ならびに破壊エネルギーの増大、引張軟化曲線の改善、乾燥収縮の低減が認められ、これらの効果は注入グラウトへの膨張材の添加によってさらに向上できることがわかった。また型枠にプレバックドした鋼繊維は配向性をもち、グラウトを注入した打込み面と直交する方向では圧縮強度の増加や乾燥収縮の低減といった効果が低下することも明らかになった。

キーワード: 鋼繊維, プレバックド, 注入グラウト, 圧縮破壊, 破壊力学特性, 乾燥収縮

1. はじめに

脆性材料であるコンクリートの破壊挙動を改善する目的で短繊維が用いられることがある。短繊維はコンクリート中の体積混入率が増加するほど、硬化コンクリートに対する補強効果を向上できるものの、フレッシュコンクリートの流動性は著しく低下させることになる。そのため鋼繊維補強コンクリートは、施工性を考慮して繊維混入率 0.5~1.5%の範囲で用いることが一般的である。

仮に施工性を十分に確保した上で従来の繊維混入率を 1 オーダー以上増加させることができれば、飛躍的にコンクリートの力学特性を改善できる可能性がある。

このような考え方から、繊維混入率 12~13%のセメント硬化体の検討が行われたことがあり、これは型枠内に鋼繊維をプレバックド(先詰め)し、その後からグラウトを注入することで鋼繊維同士の間隙を埋めて一体化させたものである。このような多量繊維混入セメント系材料(以下、HVFC)は、過去に米国で空港のプレキャスト舗装や二次製品に実用化されており¹⁾、国内では実用化に至っていないものの研究例がある²⁾。しかし、これらの事例では、いずれも当時の技術において流動性と材料分離抵抗性を両立させた高性能な注入グラウトが得られなかったことを課題にしている。

本研究では、過去に検討された HVFC よりも多量の鋼繊維を混入することで高い補強効果をもつ硬化体の開発が目的であり、鋼繊維の種類、注入グラウトの材料ならびに配合について検討した。さらに、これらの検討の結果にもとづいて作製された最高水準となる 15%の繊維混入率を有する HVFC 供試体の圧縮破壊特性、破壊力学特性および乾燥収縮特性について検討した。なお、鋼繊維のプレバックド化は繊維に配向性を与える可能性があり、各特性に対する繊維配向の影響も検討した。

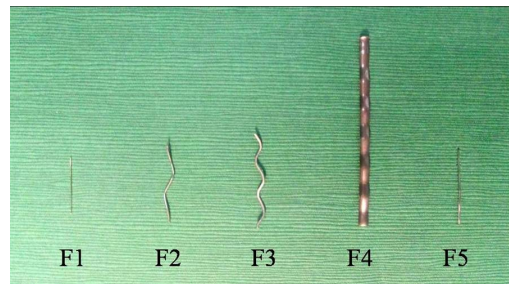


図-1 検討した鋼繊維

表-1 検討した鋼繊維の物性

略号	材質	断面 (mm)	長さ (mm)	形状	密度 (g/cm ³)	実積率 (%)
F1	鋼	φ0.2	15	直線形	7.85	8.6
F2	鋼	φ0.5	20	立体波形	7.85	15.6
F3	鋼	φ0.6	25	立体波形	7.85	15.3
F4	鋼	2.5×1.0	50	平板波形	7.85	15.5
F5	ステンレス	φ0.5	20	直線形	7.70	9.8

2. 実験概要

2.1 HVFC の構成材料、配合および製造方法の検討

(1) プレバックド鋼繊維の選定

鋼繊維は、型枠に対する実積率が高いものほど体積で繊維混入率(以下、 V_f)の高い HVFC を製造できることになる。そのため、図-1 ならびに表-1 に示すように寸法や形状が異なる市販の鋼繊維 5 種類について、鋼製型枠(内寸法 100×100×400mm)に投入し、さらに外部振動を与えて密実にプレバックドしたときの実積率(型枠内容積に占めるプレバックド鋼繊維の実体積比)を測定した。その結果、型枠に対する実積率は鋼繊維の形状に依存し、直線形の場合 10%以下、波形の場合 15%以上になることがわかった。ここで波形の鋼繊維に着目すると F4 は断面が板状で二次元的な波形であるのに対し、F2 ならびに F3 は断面が円状で三次元的な波形(らせん状)と

*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 主任研究員 博(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 副主任研究員 修(工)

*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 修(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 チームリーダー 博(工) (正会員)

表-2 検討した注入グラウトの構成材料

材料	略号	物性
早強ポルトランドセメント	C	密度 3.14g/cm ³ , プレーン 4490cm ² /g
シリカフェーム (SF)	低 BET 品	SF-L 密度 2.37g/cm ³ , BET 10.48m ² /g
	高 BET 品	SF-H 密度 2.20g/cm ³ , BET 18.87m ² /g
早強性膨張材	EX	石灰系, 密度 3.19g/cm ³
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-3 検討した注入グラウトの配合

No.	W/B (%)	SF/B (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (B×%)	
			W	B					
				C	SF-L	SF-H	EX		
1	40	0	557	1392	0	0	1.00		
2		5	553	1313	69		1.00		
3		10	549	1235	137		1.00		
4		20	541	1082	271		0	1.00	
5								1.15	
6								1.30	
7								15	1.15
8								30	1.15
9								45	1.15
10		30	534	934	400		0	1.30	
11		20	536	1073	0		268	1.30	
12		30	527	922	0		395	1.30	

なっており、繊維間は点で接触する (F4 は繊維間が面で接触)。型枠に対する繊維の実積率、グラウトの注入しやすさ、および繊維の長さ (一般に繊維が長いほど補強効果が高い) を総合的に勘案して、本研究では F3 の鋼繊維を最大の実積率となる $V_f=15\%$ で用いることにした。

(2) 注入グラウト配合の検討

注入グラウトは、プレパックド鋼繊維の間隙を充填して硬化後も空隙を残存させないため、流動性 (低粘性) と材料分離抵抗性 (ノンブリーディング) を兼ね備える必要がある。そのため注入グラウトの性能は、近年開発された超低粘性型ノンブリーディング PC グラウト^{3), 4)}の性能を参考にして、JP ロート流下時間 3.0 ± 0.5 秒ならびにブリーディング率 0.5% 以下を目標とした。

グラウトの結合材 (以下、B) は、表-2 に示すように二次製品としての早期脱型を考慮して早強ポルトランドセメント (以下、C) ならびに早強性膨張材 (以下、EX) を用い、さらに流動性改善のため BET 比表面積が異なる 2 種類のシリカフェーム (以下、SF) を検討した。また混和剤には高性能 AE 減水剤 (以下、SP) を用いた。

グラウトの配合は、表-3 に示すように水結合材比を 40% で一定とし、C に対する SF の置換率を 0~30%、EX の単位量を $0 \sim 45 \text{kg/m}^3$ で変化させ、SP の添加率を $B \times 1.0 \sim 1.3\%$ とした。

本実験においてグラウトは、全材料をオムニミキサ (容量 30L) に投入して 3 分間の練混ぜを行った後、JP ロート流下時間 (JSCE -F531-1999 に準拠) ならびにブリーディング率 (JSCE -F522-1999 に準拠) を測定した。



図-2 HVFC の製造 (プレパックド鋼繊維とグラウト注入)

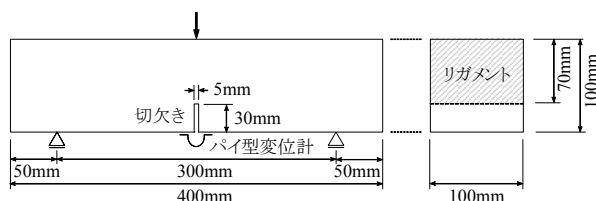


図-3 切欠きはりの 3 点曲げ試験の方法

(3) HVFC の製造方法の検討

図-2 に示すように鋼製型枠 (寸法 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$) に HVFC の配合で $V_f=15\%$ となるように鋼繊維 F3 をプレパックドし、型枠底面まで挿入したプラスチック製ロート (足の外径 15mm ならびに内径 12mm, 1 つの型枠当り両端部 2 か所に挿入) から目標性能を満足したグラウトを上面まで注入した後、振動台にて締め固めを行った。

グラウトを注入した供試体は材齢 1 日で脱型後に寸法と質量を測定し、所定の配合ならびに計算された密度から見掛けの充填率を算出することで、HVFC の成形性を評価した。なお、グラウトが十分に充填された HVFC 供試体は力学特性に関する各試験に供した。

2.2 HVFC の力学特性の検討

(1) 曲げによる破壊力学特性の試験方法

破壊エネルギー (以下、 G_F) の測定は JCI-S-002-2003 に準じて、図-3 に示した切欠きはり供試体の 3 点曲げ試験から荷重-ひび割れ肩口開口変位 (以下、 $CMOD$) 曲線を求め、JCI-S-001-2003 に準じて式(1)にて G_F を算出した。なお、供試体は材齢 1 日で脱型後、材齢 14 日まで水中養生 (20°C) し、切欠きは曲げ試験に供する前にカッターにて部分的に切断する形で導入した。

$$G_F = (0.75W_0 + W_I) / A_{lig} \quad (\text{N/mm}) \quad (1)$$

ここで、 W_0 : 荷重- $CMOD$ 曲線下の面積 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)、 W_I : 供試体の自重ならびに載荷具が成す仕事 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)、 A_{lig} : リガメントの面積 (mm^2)。

引張軟化曲線は図-3 の試験で得られた荷重- $CMOD$ 曲線から、はり中央部に仮想ひび割れモデルを組み込んだ

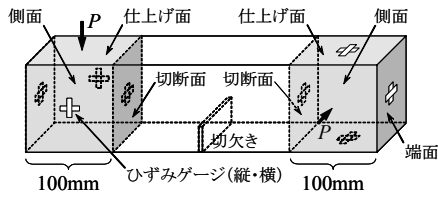


図-4 一軸圧縮载荷試験の方法

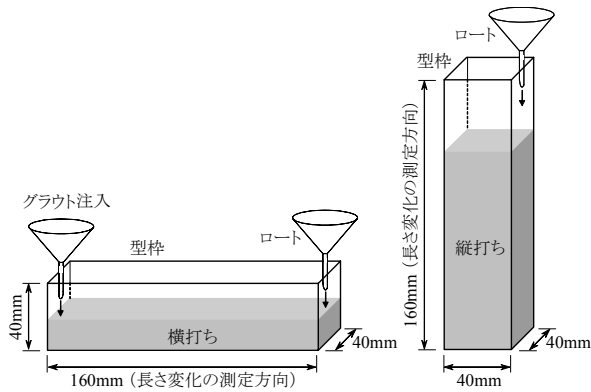


図-5 乾燥収縮測定用供試体の作製方法

だ FEM を用いて多直線近似法⁵⁾にて推定した。

(2) 一軸圧縮による力学特性の試験方法

一軸圧縮载荷試験には、図-4 に示すように曲げ試験を終了した切欠き供試体で損傷を受けていない両端面から長さ 100mm までの部分を切断した角柱供試体(寸法 100×100×100mm)を用いた。なお、プレパックド鋼繊維の配向性を考慮し、仕上げ面(グラウト注入面)を圧縮軸方向の上面とする方法(仕上げ面載荷)、ならびに型枠の側面を圧縮軸方向の上面とする方法(側面載荷)の 2 通りで載荷した。また、面中心部にポリエステル箔ゲージを縦方向ならびに横方向に貼り付け、縦ひずみ(以下、 ε_1)ならびに横ひずみ(以下、 ε_3)をそれぞれ測定した。

(3) 乾燥収縮の試験方法

供試体(寸法 40×40×160mm)は材齢 1 日まで封緘養生し、脱型直後を基長として恒温恒湿室(20℃, 60%R.H.)で乾燥させ、所定の乾燥期間にて傾斜式デジタルマイクロメータにて長さ変化を測定した(セメント協会)。なお、供試体はプレパックド繊維の配向性を考慮し、図-5 に示すように型枠を横方向にして鋼繊維のプレパックドとグラウトの注入を行う方法(横打ち)、ならびに型枠を縦方向にして鋼繊維のプレパックドとグラウトの注入を行う方法(縦打ち)の 2 通りで作製した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 HVFC の構成材料、配合ならびに製造

(1) 注入グラウトの検討

図-6 は、BET 比表面積の低い SF(以下、SF-L)ならびに BET 比表面積の高い SF(以下、SF-H)の置換率を変化

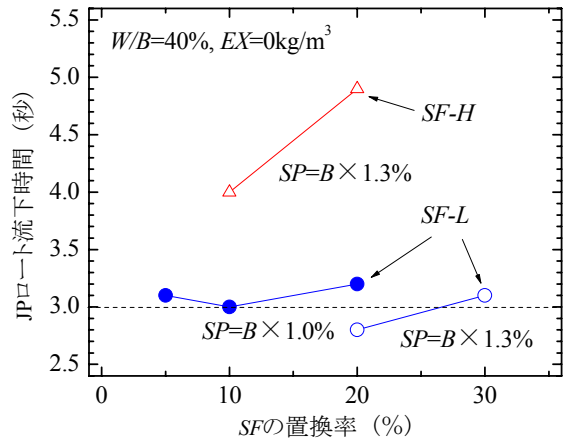


図-6 SF の種類と置換率が流動性に及ぼす影響

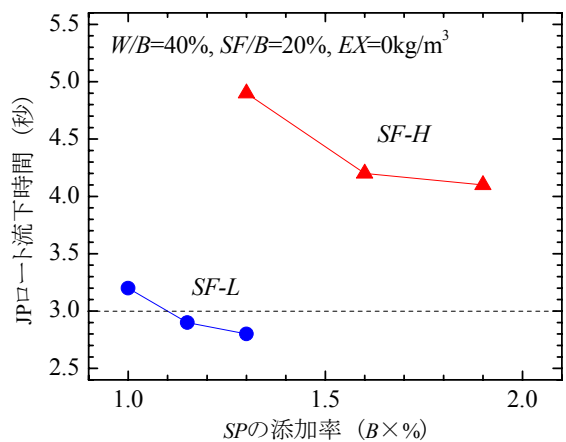


図-7 SP の添加率が流動性に及ぼす影響

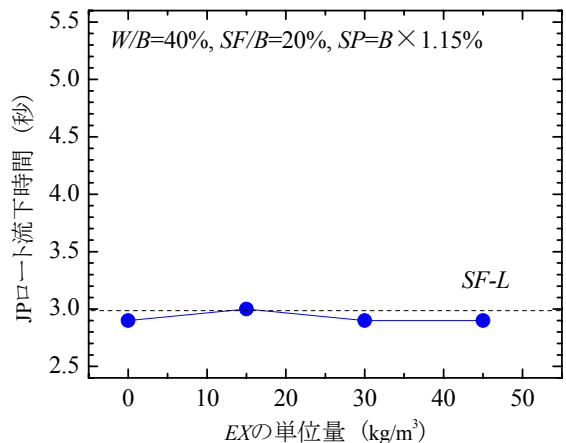


図-8 EX の単位量が流動性に及ぼす影響

させたグラウトの JP ロート流下時間を示したものである。SF-H を用いた場合は置換率が増加するほど JP ロート流下時間が長くなり、粘性が増加した。一方、SF-L を用いた場合には SF-H を用いた場合に比べて JP ロート流下時間は短く、置換率を増加させても 3 秒程度となり、グラウトの粘性はほとんど変化しないことがわかる。

図-7 は、SF-L ならびに SF-H の置換率を 20% として SP の添加率を変化させたグラウトの JP ロート流下時間

表-4 グラウトのフレッシュ性状とHVFC 供試体の充填率

EXの単位量 (kg/m ³)	0	15	30	45
JP ロート流下時間 (秒)	2.9	3.0	2.9	2.9
ブリーディング率 (%)	0.3	0.3	0.0	0.0
見掛けの充填率 (%)	98.4	99.0	98.5	99.3

* 早強セメント・SF-L 使用, W/B=40%, SF/B=20%, SP=B×1.15%

を示したものである。SF-L, SF-H のいずれを用いた場合にも SP 添加率を増加させると JP ロート流下時間が短くなって粘性が低下する。しかし, SF-H を用いた場合には SP 添加率を増加させても JP ロート流下時間 3 秒程度を達成することはできていない。BET 比表面積が 10m²/g 程度の SF は高強度コンクリートの流動性の改善に効果があると報告されており⁶⁾, 粘性を低下させて充填性の良いグラウトを得るために SF-L を用いることにした。

図-8 は, SF-L の置換率を 20% として SP の添加率を B×1.15% で一定の下で EX の単位量を変化させたグラウトの JP ロート流下時間を示したものである, この図から, EX の単位量を増加させても JP ロート流下時間は変化せず, EX は粘性にほとんど影響しないことがわかった。

(2) HVFC 供試体の作製

表-4 は, 図-8 に示した各グラウトのフレッシュ性状をまとめたものである。これらのグラウトは, いずれも JP ロート流下時間が 2.9~3.0 秒となる低粘性を示しながら, 注水から 24 時間経過後のブリーディング率は 0.0~0.3% であり, 流動性と材料分離抵抗性を兼ね備える配合となっている。これらの目標性能を満足したグラウトを実際に V_f=15% で鋼繊維 F3 をプレパックドした型枠に注入し, 硬化脱型後の HVFC 供試体の密度測定から計算した見掛けの充填率についても表-4 中に併記した。HVFC 供試体の見掛けの充填率はいずれのグラウトにおいても 98% 以上となっており, 鋼繊維同士の間隙にも十分にグラウトが充填できたものと考えられる。したがって, 表-4 に示した 4 種類のグラウト配合を用いて作製した HVFC 供試体を力学特性の試験に供することにした。

3.2 HVFC の力学特性

(1) 一軸圧縮を受ける HVFC の力学特性

図-9 は V_f=0% で EX の単位量を 0~45kg/m³ に変化したグラウトならびにそれらのグラウトを V_f=15% でプレパックドした鋼繊維に注入した HVFC の材齢 14 日 (水中養生) における圧縮強度を示したものである。なお, V_f=15% の HVFC では仕上げ面ならびに側面をそれぞれ一軸圧縮荷重した結果を併記した。HVFC の母材である硬化グラウトの圧縮強度は, いずれの配合においても 20N/mm² 程度となった。一般的な鋼繊維補強コンクリート (以下, SFRC) の V_f は流動性を確保する観点から 2% 未満であり, このような少量の鋼繊維は圧縮強度にほとんど影響しないことが知られている。しかし, V_f=15% とし

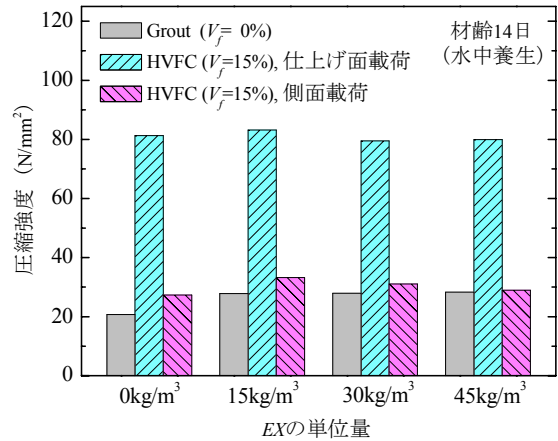


図-9 グラウトならびに HVFC の圧縮強度

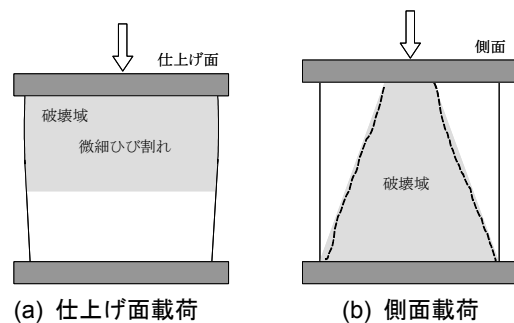


図-10 荷重方向が異なる HVFC の圧縮破壊性状の模式図

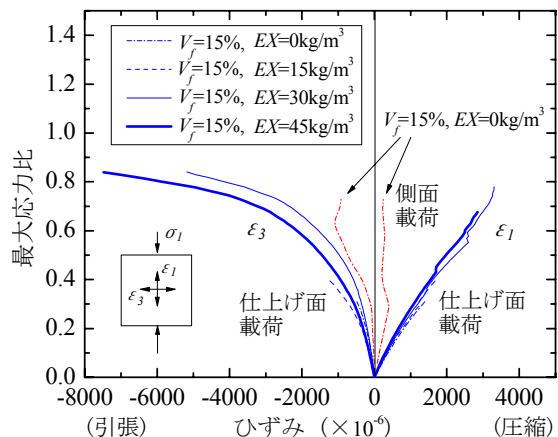


図-11 一軸圧縮を受ける HVFC の ε₁ と ε₃

た HVFC の仕上げ面を荷重した場合の圧縮強度は母材である硬化グラウトの圧縮強度よりも約 4 倍増大し, 80N/mm² 程度となった。これは圧縮応力の直交方向に生じる横膨張変形が多量に混入された鋼繊維により拘束され, 供試体には 3 軸状態の圧縮応力が作用して, 圧縮強度が増加したものの (コンファインド効果) と考えられる。なお, 側面を荷重した場合の圧縮強度は, いずれの配合においても母材である硬化グラウトの圧縮強度よりも若干増加する程度であり, 仕上げ面荷重で確認されたような圧縮強度の増加には鋼繊維の配向の影響がきわめて大きく関与していることがわかった。図-10 は,

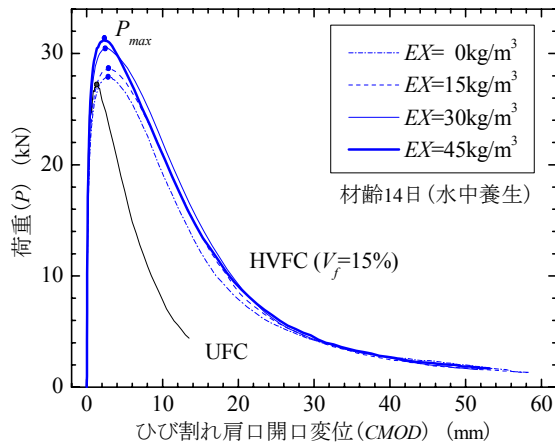


図-12 HVFC の荷重-CMOD 曲線

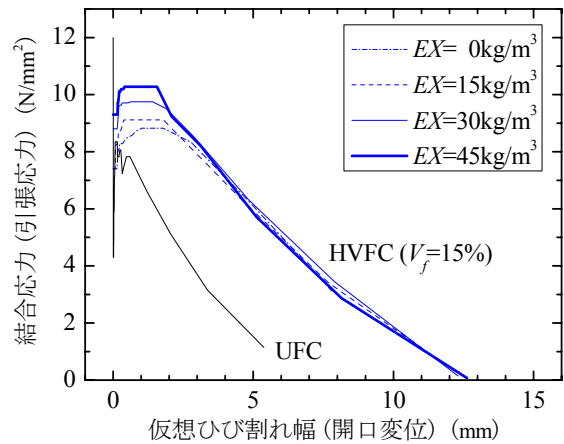


図-14 HVFC の引張軟化曲線



図-13 HVFC を用いた切欠きはりの 3 点曲げ試験

載荷方向が異なる HVFC の圧縮破壊性状の模式図を示したものである。仕上げ面を載荷した場合は、供試体の上半分に多数の微細ひび割れを生じながら縦方向ならびに横方向に大きく変形した(図 10(a)参照)。この場合、鋼繊維の多くは鉛直な圧縮軸と直交した方向に配列している。これに対して、側面を載荷した場合には、斜め方向に主要なひび割れが発生し、これがすべり面となって周囲を押し広げながら破壊した(図 10(b)参照)。この場合、鋼繊維の多くは鉛直な圧縮軸と平行した方向に配列している。

図-11 は、一軸圧縮を受ける HVFC の ϵ_1 と ϵ_3 を示したものである。仕上げ面を載荷した場合には、側面を載荷した場合にくらべて同じ応力比における ϵ_1 ならびに ϵ_3 がいずれも大幅に増加し、大きな変形を生じることがわかる。

(2) HVFC の破壊力学特性

図-12 は、EX の単位量が異なる HVFC の切欠きはりの曲げ試験における荷重-CMOD 曲線を示したものである。なお、図中には 200N/mm^2 以上の圧縮強度を有する超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)の場合の荷重-CMOD 曲線を併記した。HVFC のピーク荷重は、UFC のピーク荷重とくらべて向上した。また、HVFC の破断時ひび割れ開口変位(以下、 $CMOD_C$)は最終的に供試

表-5 HVFC の G_F の算出値

種類	HVFC				UFC	SFRC	普通
EX (kg/m ³)	0	15	30	45	—	—	—
G_F (N/mm)	52.85	54.30	57.07	57.52	27.12	約 10	約 0.01

体が破断しないものの、おおよそ 60mm となった。HVFC の $CMOD_C$ は UFC の場合よりも大きな値を示し、多量な繊維混入による変形能力の向上が確認できた。図-13 は、HVFC を用いた切欠きはりの 3 点曲げ試験の状況を示したものであり、多量の鋼繊維がひび割れ面に架橋して破断せず、大きく変形したことがわかる。EX の単位量の増加にともなって HVFC のピーク荷重は増大するものの、ポストピーク挙動や $CMOD_C$ の値はほとんど変化せず、EX は主としてピーク挙動の改善に寄与している。これは膨張材を含む注入グラウトからなる母材の膨張変形を多量の鋼繊維が拘束したことでケミカルプレストレスが発生した可能性がある。一方、HVFC のポストピーク挙動や $CMOD_C$ の改善には、ひび割れ間で架橋して応力伝達可能な鋼繊維の量が大幅に増加したことが関与している。

表-5 は、各 HVFC の G_F を算出し、UFC ならびに SFRC の G_F と比較したものである。HVFC の G_F はいずれの配合においても 50N/mm 以上となっており、EX の単位量が増加するほど G_F も増加している。 G_F の値は普通コンクリートの場合 0.01N/mm 程度⁷⁾、SFRC の場合 10N/mm 程度⁷⁾、UFC の場合 27.12N/mm であること⁸⁾を考えると、HVFC は G_F が大きく向上している。

図-14 は HVFC の引張軟化曲線を示したものである。HVFC の結合応力の最大値(ひび割れ発生引張強度)は、UFC の場合よりも低く、これは母材である硬化グラウトの強度が UFC の母材の強度よりも低いことによるものである。しかし、HVFC の結合応力の最大値は EX の単位量が増加するほど向上し、この最大値を保持できるひび割れ幅は UFC が 0.5mm 以下であるのに対して、HVFC

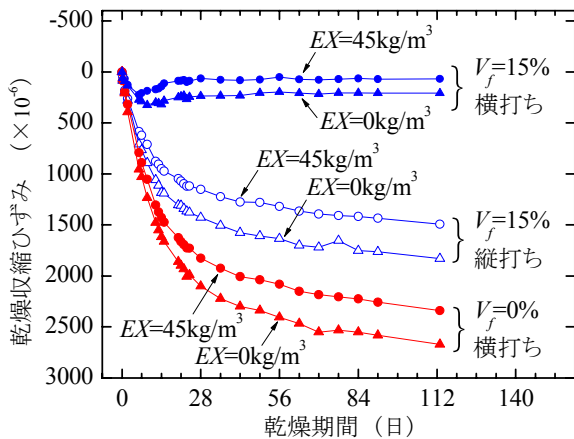


図-15 HVFCの乾燥収縮

は 2.0~2.5mm 程度に増加することがわかる。また同じひび割れ幅では UFC よりも HVFC の方が 4 倍程度高い結合応力を示し、鋼繊維の多量混入によってひび割れ面における架橋効果が向上している。

(3) HVFC の乾燥収縮特性

図-15 は、EX の単位量を 0kg/m³ ならびに 45kg/m³ とした硬化グラウト ($V_f=0\%$) ならびに HVFC ($V_f=15\%$) の乾燥収縮を示したものである。なお、HVFC の場合は鋼繊維の配向性が異なる横打ちならびに縦打ちで作製した供試体の乾燥収縮も測定した。EX を用いた配合では鋼繊維の有無や配向にかかわらず EX を用いていない配合よりも乾燥収縮が低減している。横打ち同士で乾燥期間 118 日の収縮ひずみを比較すると、 $V_f=15\%$ の HVFC の場合 70~180×10⁻⁶ であるのに対して、HVFC の母材である $V_f=0\%$ の硬化グラウトの場合 2340~2680×10⁻⁶ となった。このように HVFC で乾燥収縮が減少したことは、多量の鋼繊維の混入によって収縮するグラウトの容積が減少したことや、鋼繊維による収縮変形の拘束などが関与していると考えられる。なお、 $V_f=15\%$ の HVFC を縦打ちとした場合の乾燥期間 118 日における収縮ひずみは 1490~1830×10⁻⁶ となった。長さ変化の測定軸に対して、縦打ちの場合には垂直に配列した鋼繊維が多いものの、横打ちの場合では平行に配列した鋼繊維が多くなっており、このような鋼繊維の配向が乾燥収縮に影響を与えることが明らかになった。

4. まとめ

鋼繊維を多量混入したセメント系材料の開発を目的として、構成材料、配合および製造方法の検討を行うとともに、この硬化体の力学特性を測定した。本研究で得られた成果とその応用については、以下の通りである。

(1) 立体波形の鋼繊維は実積率 15% で型枠にプレパッキング可能であり、その型枠に BET 比表面積が低いシリカフェームを用いた超低粘性かつノンブリーディン

グのグラウトを注入することで最高水準の繊維混入率 15% となるセメント硬化体を得ることができた。

- (2) 鋼繊維の多量混入によって圧縮強度ならびに破壊エネルギーの増大、引張軟化曲線の改善、乾燥収縮の低減が認められ、これらの効果は注入グラウトへの膨張材の添加で、さらに向上させることができた。
- (3) 型枠にプレパッキングした鋼繊維は配向性をもつため、グラウトを注入した打込み面(仕上げ面)と直交する方向では圧縮強度の増加や乾燥収縮の低減といった効果が低下することを明らかにできた。
- (4) 例えば、作業性の観点でグラウトの注入高さを低くし、繊維の配向方向に直交した方向の外力を主に受け持つような薄肉プレキャストパネルの製造では、高圧縮・高曲げ特性、低収縮性となる材料特性を活用した形で応用できるのではないかと考える。

謝辞

本研究の実施に当たっては、長岡技術科学大学からの実務訓練生であった鳶田聖史氏にご協力頂いた。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) David R. Lankard : Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), Concrete International, Vol.6, No.12, pp.44-47, 1984.12
- 2) 新村亮, 平井有紀, 青木茂, 原田暁 : 繊維高含有コンクリート SIFCON の基礎性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1207-1212, 1997
- 3) 吉岡民夫, 石森正樹, 副田孝一 : 超低粘性 PC グラウトの開発, Vol.21, No.10, コンクリートテクノ, pp.60-64, 2002
- 4) 土木学会 : 2007 年制定コンクリート標準示方書施工編, pp.360-365, 2008
- 5) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝稔, 内田裕市 : 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ性状, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.119-129, 1996.2
- 6) 松井淳, 中村秀三 : シリカフェームの BET 法による比表面積が超高強度コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.489-490, 2004.8
- 7) 土木学会 : 鋼繊維補強コンクリート柱部材の設計指針(案), コンクリートライブラリー第 97 号, p.5, 1999
- 8) 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第 113 号, p.19, 2004