

常温硬化型超高強度鋼繊維補強コンクリートの基本性状に関する実験的研究

宇都宮大学大学院 正会員 藤原 浩巳
 宇都宮大学大学院 正会員 丸岡 正知
 宇都宮大学大学院 学生会員 ○ 井口 舞
 宇都宮大学 遊佐 源邦

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(UFC)は、圧縮強度が 150N/mm^2 に達する優れた強度発現性と、繊維添加による高い靱性、塩化物イオンの浸透、凍結融解作用に対する優れた耐久性を有するため、近年実用化に至った。また、その優れた材料特性から、部材断面の縮小、使用材料の減少、長期耐久性の向上などの多くのコスト低減が可能となることが期待されている。

しかし、多くの UFC は高強度・高耐久性を安定的に発揮させるために高温でかつ長時間の蒸気養生を必要とし、工場でプレキャスト部材として製造されることが中心となっている。このように、プレキャスト部材とする場合、生産性や部材の品質が安定する利点はあるが、蒸気養生の工程、製品の運搬、設置工程が必要となることから建設コストの増加が問題となる。そのため、さらなる普及のためには現場打ちを可能とする、つまり常温での養生により UFC の特徴である高強度、耐久性を発揮できることが、非常に重要となると考えられる¹⁾。

本研究では、普通ポルトランドセメントと試作した高エーライトセメントを用い常温硬化型 UFC の製造可能性を検討すると共に、その基本性状を把握することを目的として実験を行った。

2. 高炉スラグ微粉末を混和した常温硬化型 UFC の基本性状

2. 1 実験概要

高炉スラグ微粉末の混和率、高炉スラグ微粉末の比表面積およびセメントの種類の違いが UFC のフレッシュ性状、硬化性状に与える影響について検討した。

2. 2 使用材料

使用材料を表 1 に、使用繊維の物性を表 2 に、セメントの鉱物成分とブレン比表面積を表 3 にそれぞれ示す。結合材には、初期強度に寄与するとされる C_3S (エ

表 1：使用材料

材料	材料名	記号	密度(g/cm^3)
結合材	特殊セメント	HAC	3.16
	普通ポルトランドセメント	OPC	3.15
	高炉スラグ微粉末(ブレン値4000クラス)	BS4	2.90
	高炉スラグ微粉末(ブレン値8000クラス)	BS8	2.91
	高炉スラグ微粉末(ブレン値12000クラス)	BS12	2.91
	シリカフューム主体混和材	P	2.43
細骨材	硅砂6号	S	2.61
水	上水道水	W	1.00
減水剤	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	SP	1.10
消泡剤	ポリアルキレン誘導体	DF	1.00
補強材	鋼繊維	F	7.80

表 2：使用繊維の物性値

種類	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	引張強さ (MPa)	形状
鋼繊維	13.0	0.16	2000以上	直線

表 3：セメントの鉱物成分

セメント種類	鉱物組成(%)				ブレン比表面積(cm^2/g)
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	
HAC	68.6	3.4	8.5	10.4	4780
OPC	56.0	18.0	9.0	9.0	3340

ーライト)を多く含む試作セメント(HAC)と普通ポルトランドセメント(OPC)、シリカフュームを主体とした高強度コンクリート用混和材を用いた。

2. 3 実験条件

本実験の配合条件を表 4 に、粉体構成を表 5 にそれぞれ示す。

本実験では、全配合において水粉体比 15%、砂結合材比 30%、繊維混入率を外割りで容積比 2%とした。また、高炉スラグ微粉末(ブレン比表面積 $8000\text{ cm}^2/\text{g}$ クラス)の混和率は、10、15、25%の 3 配合とした。さらに、高炉スラグ微粉末のブレン比表面積の違いを

検討するために 4000 cm²/g クラスおよび 12000 cm²/g クラスをそれぞれ 15% 混和した 2 配合、また、4000 cm²/g、12000 cm²/g クラスの高炉スラグ微粉末をそれぞれ 20%、5% 混和させた配合も設けた。また、比較用としてベースセメントを OPC とした使用した配合を設けた。

2. 4 実験方法

(1) モルタルフロー試験

モルタルフロー試験は「JIS R 5201 セメントの物理試験方法」に準拠し、落下を与えない状態での試料の広がりをモルタルフロー値とした。

(2) 空気量試験

空気量試験は「JIS A 1116 フレッシュコンクリートの空気量の質量による試験方法(質量法)」に準拠した。

(3) 200mm フロー到達時間

モルタルフロー試験を行う際に、モルタルコーンを上に持ち上げてからモルタルフロー値が 200mm に達するまでの時間を測定し、粘性の評価の代替とした。

(4) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、「JSCE-G 505-1999 円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」に準拠した。測定は脱型直後 1 日、20℃ 水中養生材齢 7 日、28 日とした。

(5) 曲げ強度試験

曲げ強度試験は、20mm×100mm×400mm の薄板曲げ部材を用い「JIS A 1106:2006 中央点載荷法によるコンクリートの曲げ強度方法」に準拠して行った。測定は脱型直後 1 日、20℃ 水中養生材齢 7 日、28 日とした。

2. 5 試験結果

(1) フレッシュ性状試験結果

試験結果を表 6 に示す。目標値を満たした全ての配合において、施工上問題となるような材料分離、繊維の偏りやファイバーボールの発生は見られず、繊維分散性は良好であった。モルタルフローの例を写真 1 に示す。

BS 混和の影響については、BS8 混和率の減少に伴い、SP 添加率は増加する傾向を示した。これは、表 3 にも示すように HAC は比表面積が 4780 cm²/g と大きく、BS8 混和率の減少、つまり HAC 混和率の増加に伴い、粉体全体としての拘束水量および SP の吸着量が増加するためと考えられる。BS8 混和率が同じでベースセメントが異なる 15BS8、OPC15BS8 を比較した場合にも、OPC15BS8 の方が少ない SP 添加量で目標とする優れた流動性が得

表 4：配合条件

水粉体比 (%)	砂結合材比 (%)	繊維混入率 (vol%)	空気量 (%)	0打モルタルフロー (mm)
15	30	2	3以下	250±25

表 5：粉体構成

配合番号	記号	質量比(%)					
		HAC	OPC	BS4	BS8	BS12	P
1	25BS8	60	—	—	25	—	15
2	15BS8	70	—	—	15	—	
3	10BS8	75	—	—	10	—	
4	15BS4	70	—	15	—	—	
5	15BS12	70	—	—	—	15	
6	20(5)BS4BS12	60	—	20	—	5	
7	OPC15BS8	—	70	—	15	—	

表 6：フレッシュ性状試験結果

配合番号	記号	SP (%)	DF (%)	モルタルフロー値 (mm)	200mm フロー時間 (s)	空気量 (%)	温度 (℃)
1	25BS8	2.3	0.4	250	4" 57	0.1	30
2	15BS8	2.5	0.4	238	6" 86	2.0	28
3	10BS8	3.5	0.3	225	16" 13	0.3	28
4	15BS4	3.0	0.4	185	—	1.4	21
5	15BS12	6.0	0.4	173	—	0.9	21
6	20(5)BS4BS12	2.3	0.4	240	6" 94	0.3	19
7	OPC15BS8	1.8	0.4	263	5" 86	0.3	20



写真 1：モルタルフローの一例
(20(5)BS4BS12)

られたため、HAC と OPC のフレッシュ性状に与える影響の違いは明確である。

高炉スラグ微粉末の比表面積 4000 cm²/g および 12000 cm²/g を用いた場合、SP を 5% 以上添加したがモルタルフローの目標値を達成することができなかった。15BS4 に関しては、SP 添加量を 3% から 5% まで増やしたが流動性は変化なく、SP 添加量の増加の効果が確認できなかった。しかし、SP を 5% 以上添加することは凝結遅延等が生じる可能性があるため実験をとりやめた。目

標とする流動性が得られなかった理由としては、BS4 は HAC と比表面積が近く、BS12 は微粒分が多いことから、粉体全体として充填性という観点において粒度分布が適正でなかったためと考えられる。一方、BS4 を 20%、BS12 を 5% ずつ混和した配合 20(5)BS4BS12 では SP 添加率が 2.3% で目標とする流動性を得ることができたため、粉体全体としての粒度分布がフレッシュ性状に与える影響は大きいと考えられる。

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図 1 に示す。本実験では、初期強度確保を目的として HAC を使用したが、材齢 1 日において HAC 適用に伴う強度発現性改善効果を得ることが出来た。

材齢 7 日において BS8 混和率の異なる 25BS8、15BS8、10BS8 を比較した場合、25BS8、15BS8 が 150N/mm^2 程度の圧縮強度を示す一方で、最も HAC 量の多い 10BS8 が 133.5N/mm^2 となり、 20N/mm^2 程低下する結果となった。この理由としては、10BS8 では SP 添加率が 3.5% と非常に多く、SP が過剰にセメント粒子に付着し、水和反応が遅延したためと考えられるが、今後検討が必要である。

(3) 曲げ強度試験結果

曲げ強度試験結果を図 2 に示す。曲げ強度においては、OPC を用いた OPC15BS8 が最も強度発現性に優れる結果となった。材齢 7 日以降では、BS8 混和率の減少に伴い、曲げ強度は増加する傾向が見られたものの、本実験では、高炉スラグ微粉末の混和率、比表面積による明確な違いはみられなかった。

本実験では、圧縮強度、曲げ強度ともに材齢 7 日以降では HAC より OPC を使用した方が強度発現性に優れる結果となった。そのため、次の実験においては OPC をベースセメントとして用いることとした。

3. 普通ポルトランドセメントをベースとした 常温硬化型 U F C の基本性状

3. 1 実験概要

前実験でフレッシュ性状、硬化性状ともに優れていた OPC をベースセメントとして使用し、高炉スラグ微粉末の混和率および比表面積の違いがフレッシュ性状、硬化性状に与える影響について検討した。

3. 2 使用材料および配合条件

使用材料を、表 1 に示す。また、配合条件を表 7 に、粉体構成を表 8 にそれぞれ示す。

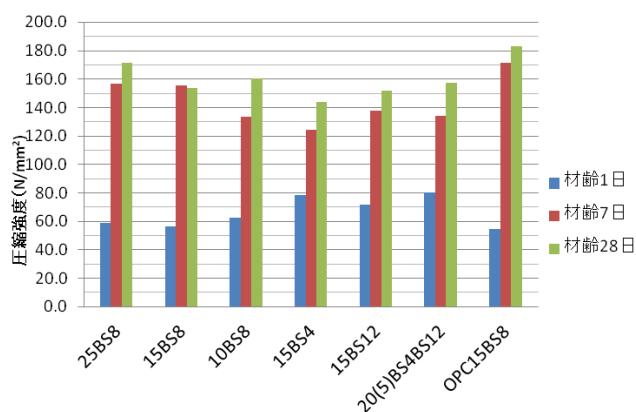


図 1：圧縮強度試験結果

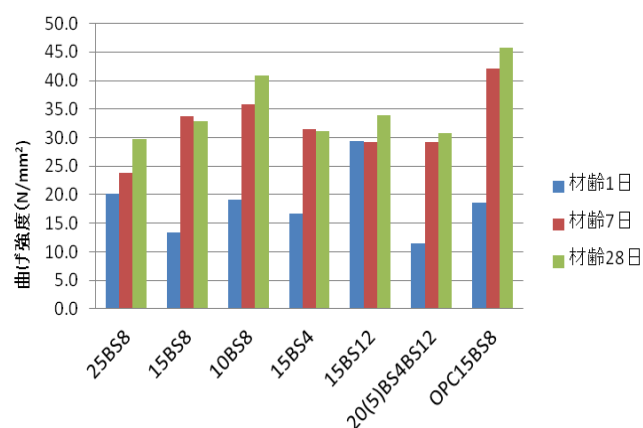


図 2：曲げ強度試験結果

表 7：配合条件

水粉体比 (%)	砂結合材比 (%)	繊維混入率 (vol%)	SP添加率 (%)	消泡剤 添加率(%)
15	30	2.0	1.8	2.0

表 8：粉体構成

配合番号	記号	質量比(%)				
		OPC	BS4	BS8	BS12	P
1	OPC25BS8	60	—	25	—	15
2	OPC15BS8	70	—	15	—	
3	OPC10BS8	75	—	10	—	
4	OPC15BS4	70	15	—	—	
5	OPC15BS12	70	—	—	15	

3. 3 試験項目

2. 3 と同様とした。

3. 4 実験結果

(1) フレッシュ性状試験結果

試験結果を表 9 に示す。BS8 混和率の増加に伴いモルタルフローは大きくなることが確認できた。これは、

高炉スラブ微粉末の粒子がガラス質で滑らかな表面をしているため拘束水量が少なく、湿潤作用を与え流動性が向上したためと考えられる。また、高炉スラグ微粉末の比表面積の増大に伴いモルタルフローは大きくなり、**2.5 試験結果**に示す HAC を用いた場合とは異なる結果となった。これは、ベースセメントに OPC を使用した場合には、充填性という観点において BS の比表面積が大きくなる程粉体全体の粒度分布が改善され、流動性に寄与する自由水量が増加したためと考えられる。

(2) 圧縮強度試験結果

図 3 に圧縮強度試験結果を示す。材齢 7 日以降、BS8 混和率の増加に伴い強度は増加する傾向が見られた。

また、比表面積が大きくなるに従い強度は増加した。これは、比表面積が大きくなる程、粒子径が小さく密充填されことや、反応性が高くなり、マトリックスの内部組織の緻密化に大きく寄与するためと考えられる。

(3) 曲げ強度試験結果

図 4 に曲げ強度試験結果を示す。BS8 混和率の増加に伴い、曲げ強度は増加する傾向が確認できた。また、材齢 7 日では、BS の比表面積の増加により、強度は増加した。これは、比表面積の増加によりマトリックスが緻密になり繊維との付着が向上したことによると考えられる。しかし、曲げ強度の発現性は繊維とマトリックスとの関係に加え、繊維の配向性や混入方法の影響を受けやすいと考えられる。そのため、安定的に強度発現させるために、更に検討していく必要があると考えられる。

4. まとめと今後の課題

(1) フレッシュ性状

- ・HAC より OPC を使用した方が、流動性に優れる。
- ・BS8 の混和率の増加に伴い、流動性は向上する。
- ・OPC を使用した場合、BS の比表面積が大きくなるに従い、流動性は向上する。

(2) 硬化性状

- ・圧縮強度、曲げ強度ともに HAC より OPC を使用した方が強度発現性に優れる。
- ・OPC を使用した場合、BS8 の混和率の増加に伴い、圧縮強度、曲げ強度は増加する。
- ・OPC を使用した場合、BS の比表面積の増加に伴い、圧縮強度、曲げ強度は増加する。

表 9：フレッシュ性状試験結果

配合番号	記号	SP (%)	DF (%)	モルタルフロー値 (mm)	200mm フロー時間 (s)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	OPC25BS8	1.8	0.4	295.0	4" 09	0.8	22
2	OPC15BS8			262.5	5" 86	0.3	20
3	OPC10BS8			242.5	8" 63	0.8	23
4	OPC15BS4			245.0	10" 50	0.6	20
5	OPC15BS12			270.0	5" 11	0.4	21

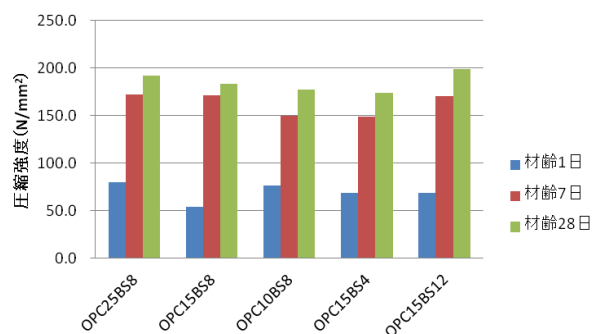


図 3：圧縮強度試験結果

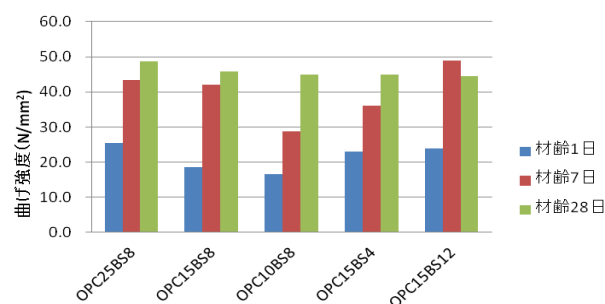


図 4：曲げ強度試験結果

以上のことから、常温養生において蒸気養生と同等の強度を得ることが可能であることがわかった。しかし、粉体の粒度分布や鋼繊維がフレッシュ性状および硬化性性状に与える影響に関して更なる検討が必要である。

謝辞

実験の遂行にあたり、(株)デイ・シイの鯉淵清氏、二戸信和氏にはお忙しい中ご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 桐山宏和, 吉田浩一郎, 丸谷英二, 平田隆祥：常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの諸物性について, 土木学会第 66 回年次学術講演会, V-199, pp. 397-398, 2011