

各種繊維混和における超高強度繊維補強モルタルに関する実験的研究

宇都宮大学 学生会員 ○渡邊 郁尋
 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 非会員 大塚 亮介

1 はじめに

構造物の高層化、大型化に伴いコンクリートに求められる性能は多様化してきている。しかしコンクリートは圧縮応力に強い反面、引張応力に弱く、それを補うために鉄筋、鉄骨が用いられる。ひび割れが生じると、ひび割れを経路として腐食因子が内部に侵入し鉄筋、鉄骨が腐食し、構造体の寿命を縮めてしまう。そこでこの問題の解決策の一つとして材料に短繊維を混和し、優れた流動性と高い靱性を有する繊維補強コンクリートが開発された。その中でも超高強度繊維補強コンクリート(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下 UFC と称す)は優れた流動性と高い力学特性を有する。しかし多くの UFC は高強度、高耐久性を得るために 90℃程度の蒸気養生を行う必要があり、工場での製造が中心となる。またこの場合工場から建設現場への運搬、製品の設置工程が必要なため建設コストの増加も問題となる¹⁾。そこで近年注目されているのが現場施工可能、かつ特別な高温養生を必要としない常温硬化型 UFC である。常温硬化型 UFC に関しては様々な研究が行われているが、フレッシュ性状や硬化性状等の詳しい特性については明らかになっていないことも多い。

本研究では圧縮強度 150 N/mm² 以上、曲げ強度 30 N/mm² 以上を有し、吹き付け施工可能な UFC 開発を目指し、各種繊維を添加した場合の常温硬化型 UFC の基本性状を把握するとともに問題点を抽出、それらを改善することを目的として実験、検討を行った。

2 各種繊維混和モルタルの基本性状

2.1 実験概要

本研究ではアラミド繊維、ポリパラフェニレンベ

ンズオキサゾール繊維(以下 PBO 繊維と略す)、ポリエチレン繊維(以下 PE 繊維と略す)、炭素繊維をモルタルに混和した場合のモルタルの基本性状の比較検討を行った。

2.2 使用材料

本試験で用いる使用材料を表 1 に示す。結合材には普通ポルトランドセメント(OPC)、シリカフェーム(SF)、高炉スラグ微粉末(BS)、無水石膏(AG)を用いた。また、ワラストナイト(WA)は施工性改善および曲げ強度向上を目的として加えた。

2.3 配合条件および粉体構成比

本試験の配合条件および粉体構成比をそれぞれ表 2 および表 3 に示す。各種繊維はこれまでの検討で適切とされたモルタルの配合条件を基にモルタル体積の 0.25、0.50、0.75、1.0%を外割で添加した。

2.4 各種繊維の物性

本試験で用いた各種繊維の物性を表 4 に示す。

表 1:使用材料

材料	材料名	記号	密度(g/cm ³)
結合材	普通ポルトランドセメント	OPC	3.16
	シリカフェーム	SF	2.25
	高炉スラグ微粉末12000	BS12	2.91
	高炉スラグ微粉末20000	BS20	2.91
	無水石膏	AG	2.90
	ワラストナイト	WA	2.91
細骨材	珪砂KS4号	S	2.61
水	宇都宮市上水道水	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	1.09
消泡剤	ポリアルキレン誘導体を主成分とする消泡剤	DF	1.00

表 2:配合条件

水結合材比(%)	砂結合材比(%)	空気量(%)
17	30	3.0以下

キーワード 超高強度繊維補強コンクリート、フレッシュ性状、曲げ強度、各種繊維、ワーカビリティ

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部材料研究室 TEL.028-689-6209 E-mail:t142839@cc.utsunomiya-u.ac.jp

表 3:粉体構成比

質量比(%)					
OPC	SF	AG	BS12	BS20	WA
73	5	5	3.5	3.5	10

表 4:各種繊維の物性

繊維名称	繊維長 (mm)	繊維径 (μ m)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (cN/dtex)	アスペクト比
アラミド繊維	6	14	1.39	24.5	429
	12	14	1.39		857
レギュラー系PBO繊維	6	13	1.56	37	462
高弾性率系PBO繊維	6	13	1.54		462
PE繊維	6	12	0.97	35	500
炭素繊維	6	7	1.76	20	857
	12	7	1.76		1714

2.5 練混ぜ方法

繊維混入モルタルの練混ぜには、公称容量 10L のオムニミキサーを使用した。まず全粉体と細骨材をミキサーに投入し 30 秒練り混ぜた。その後水および高性能 AE 減水剤、消泡剤を投入し 9 分間練り混ぜ、材料が十分に混ぜられていることを目視で確認した後、繊維の分散性を良くするためミキサーを回転させながら均一になるよう繊維を順次投入し、投入完了後 1 分間練り混ぜ排出した。

2.6 試験項目および方法

(1) 0 打フロー試験

JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠した。

(2) 空気量試験

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)」を参考に、下記の方法で測定した。

寸法 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の容器に二層に分けてタッピング充填し、充填した材料の質量を測定した。空気量は次式で算出した。

$$A = \frac{D - M/V}{D} \times 100 \quad [1]$$

A: 空気量(%)

D: 空気量を 0%とした場合の計画配合における理論密度 (g/cm³)

M: 充填した材料の質量(g)

V: 容器の容積 (cm³)

(3) J₁₄漏斗流下試験

JSCE-F541 に準拠した。

(4) 加圧 JP 漏斗流下試験

モルタル試料などがチクソトロピー性を有する場合のその程度簡易に評価するために、本研究室において独自に考案した加圧 JP 漏斗流下試験を行った。図 1 は加圧 JP 漏斗流下試験装置の概要図である。

試験手順は次の通りである。まず加圧 JP 漏斗流下試験装置内の JP 漏斗の内側を予め水で湿らせておく。次にコックを閉め、JP 漏斗に試料を隙間なく流し込み、蓋を閉め、圧力弁を調節し容器内を所定の圧力(本研究では 0.1MPa)にする。コックを開いて試料を流出させ、コックが開いた瞬間から試料がすべて吐出するまでの時間を 10 分の 1 秒の単位で表し「圧送流下時間」とする。容器を減圧し、蓋を開け、JP 漏斗内に試料が残っていないことを確認する。残っていた場合は試験結果を破棄し再度実験を行う。詰まり防止のため、1 回の測定ごとにコック、JP 漏斗を分解し水・ブラシを用いて十分に清掃する。

以上の手順を 1 配合につき別試料で 2 回行い、得られた平均値を「圧送流下時間」とした。2 回の試験結果が著しく異なっていた場合には、3 回目の試験を行い、近い 2 つの値の平均値を用いる。

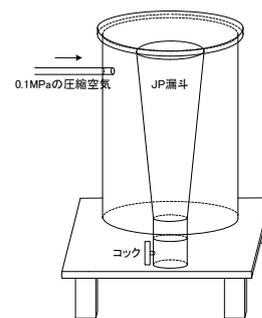


図 1:加圧 JP 漏斗流下試験装置

(5) 圧縮強度試験

JSCE-G 505 に準拠した。供試体成型後、材齢 1 日で脱型し、材齢 7 日および 28 日まで 20°C 水中養生を行った。

(6) 曲げ強度試験

JIS R 5201 に準拠した。供試体成型後、材齢 1 日

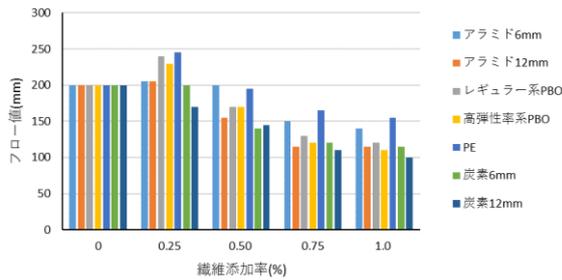


図 2:各種繊維の 0 打モルタルフロー測定結果

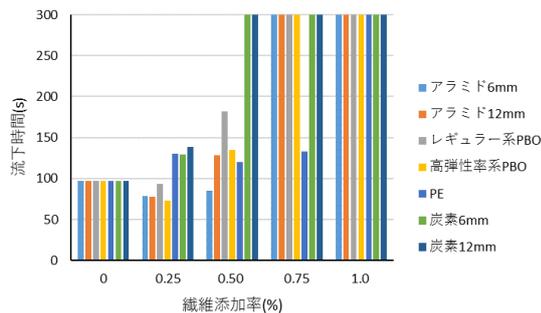


図 3:各種繊維の J₁₄漏斗流下時間測定結果

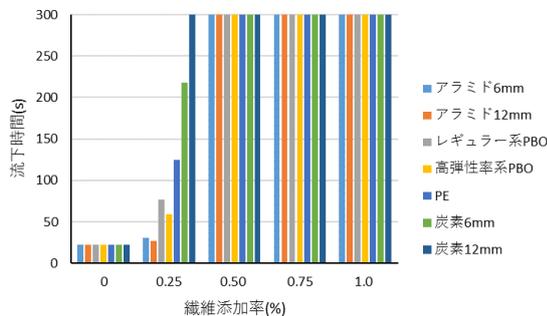


図 4:各種繊維の加圧 JP 漏斗流下時間測定結果

で脱型し、材齢 7 日および 28 日まで 20℃水中養生を行った。

3 試験結果

3.1 フレッシュ性状

図 2 に各種繊維の 0 打モルタルフロー測定結果、図 3 に各種繊維の J₁₄漏斗流下時間測定結果、図 4 に各種繊維の加圧 JP 漏斗流下時間測定結果をそれぞれ示す。

図 2 より繊維添加率増大に応じ SP および DF の添

加率も増加してもフレッシュ性状は改善せず、十分な流動性は得られなかった。

また繊維添加率 0.25%の場合のレギュラー系 PBO 繊維、高弾性率系 PBO 繊維、PE 繊維のフロー値が他の配合と比較して大きかった。アラミド繊維 6mm、12mm の場合 0.25%では同程度のフロー値を示したが、繊維添加率の増加に伴いアラミド繊維 12mm を添加したモルタルのフロー値が極端に小さくなった。これは繊維長が長い繊維同士の干渉が影響していると考えられる。アラミド繊維 12mm、炭素繊維 6mm および 12mm では繊維混入前と比べ繊維混入によるフロー値の増大には至らなかった。この 3 種類の繊維は他繊維と比べアスペクト比が 2 倍程度もしくはそれ以上であり、アスペクト比の増加は繊維全体の表面積の増加を示す。よって、表面積の増加に伴いペースト部が拘束されフロー値が小さかったと考えられる²⁾。また、どの繊維も繊維添加率が増加するとフロー値は小さくなった。これは繊維添加率の増大により繊維に拘束されるモルタルのペースト部分が増加し変形を妨げるためと考えられる。

図 3 より繊維添加率 0.25%ではアラミド繊維 6mm、12mm、レギュラー系 PBO 繊維、高弾性率系 PBO 繊維において繊維無混和モルタルより J₁₄漏斗流下時間が短くなった。しかし繊維添加率が 0.75%以上になると 5 分を超えても流下しなかった。これはモルタル中の繊維量が増加することで繊維に拘束されるモルタル部分が増加し変形を妨げることが考えられる。炭素繊維は繊維長に関わらず 0.50%以上で流下しないことが明らかとなった。PE 繊維は繊維添加率を 0.75%としても流下することがわかった。

図 4 より繊維添加率 0.25%以外の配合では、加圧 JP 漏斗流下時間が 5 分を超えても流出せず、計測ができなかった。加圧条件下では繊維同士が絡み合い圧送が困難であると考えられる。

3.2 圧縮強度

材齢 28 日の圧縮強度測定結果を図 5 に示す。図 5 よりアラミド繊維は繊維添加率 0.50%を超えると圧縮強度に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。

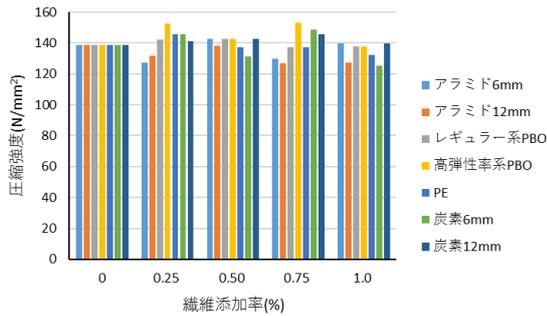


図 5: 圧縮強度測定結果(材齢 28 日)

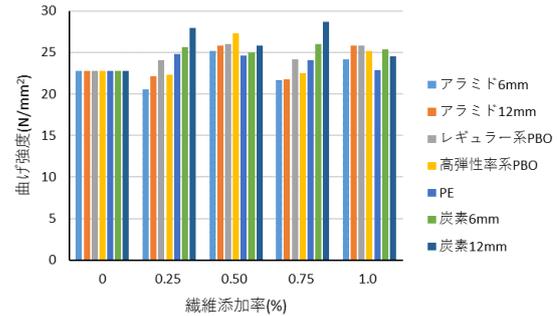


図 6: 曲げ強度測定結果(材齢 28 日)

アラミド繊維 12mm は繊維添加率増加に伴い強度が低下した。これは繊維長が長く繊維同士の絡みが生じ組織が密実でなくなったため強度低下に繋がったと考えられる。

レギュラー系 PBO 繊維は繊維添加率を増加させても繊維無混和モルタルと同等の強度を示したため圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。高弾性率系 PBO 繊維は繊維無混和モルタルと同等かそれ以上の強度を示し、繊維添加率 0.75% で最大圧縮強度 153N/mm² に達し目標の圧縮強度を上回った。

PE 繊維は繊維添加率の増加により圧縮強度が低下する傾向が見られた。これはモルタル中の分散性が低下したためだと考えられる。

炭素繊維 6mm および 12mm は、繊維添加率が 0.75% を超えると強度が低下した。これはモルタル中の繊維の分散性によるものと考えられる。

3.3 曲げ強度

材齢 28 日の曲げ強度測定結果を図 6 に示す

図 6 よりアラミド繊維 6mm および 12mm は同添加率において繊維長が長い方が曲げ強度は概ね増加する傾向を示した。アスペクト比ではアラミド繊維 12mm は 6mm のものより 2 倍近く大きいため、繊維表面積が大きく付着強度に優れており引き抜けにくかったことが考えられる。

PBO 繊維の種類および繊維添加率では、曲げ強度の傾向は見られなかった。

PE 繊維は繊維添加率増加に伴い曲げ強度が低下する傾向が見られた。これはモルタル中の繊維の分散

性が低下したためと考えられる。

炭素繊維は 6mm より 12mm の方が曲げ強度が増加した。繊維長が長い方が繊維 1 本当たりの付着面積が大きく、強度を増加させたと考えられる。また、12mm の繊維添加率が 0.75% を超えると強度が低下した。これはモルタル中の繊維の分散性によるものと考えられる。

4 まとめ

- ・今回用いた繊維は繊維添加率増大に応じ SP および DF の添加率を増加しても十分な流動性は得られないことがわかった。
- ・アスペクト比の大きいものは繊維全体の表面積が大きく流動性を低下させる傾向にあった。
- ・繊維添加率増加により繊維同士が絡みフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響が大きい。
- ・本実験で用いた繊維は流動性および強度発現性が十分でないため、目標の強度での吹き付け施工への適用は困難であり、鋼繊維などを視野に入れた実験および検討が必要である。

<参考文献>

- 1) 河野克哉ほか：PC 歩道橋に日本で初めて適用された超高強度繊維補強コンクリートの長期耐久性，太平洋セメント研究報告 (TAIHEIYO CEMENT KENKYU HOKOKU) 第 165 号，2013]
- 2) 石関嘉一ほか：鋼繊維の種類が高強度高じん性セメント複合材料の引張特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，2010