

論文 超高強度繊維補強コンクリートの大量製造性に関する検討

柳井 修司^{*1}・坂井 吾郎^{*2}・大野 俊夫^{*3}・芦田 公伸^{*4}

要旨：エトリングایت生成系超高強度繊維補強コンクリートを一度に大量に適用することを目的として、レディーミクストコンクリート工場等で使用されている汎用的なミキサを用いた製造実験を行い、その製造性を評価した。製造実験において結合材の形態や製造時期を変化させた結果、汎用的なミキサでの製造が十分に可能であること、結合材の形態や季節によらず同等の製造性が得られることが分かった。また、1 m立方の試験体を製作して水和熱に伴う温度履歴の計測を行うとともに、高温履歴を受けた部位から採取したコア供試体の圧縮強度、細孔構造を調査した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、大量製造性、圧縮強度、細孔構造

1. はじめに

エトリングایت生成系超高強度繊維補強コンクリート¹⁾（以下、AFt系UFCと記す）は、圧縮強度 180N/mm^2 以上、引張強度 8.8N/mm^2 以上の特性値を有する超高強度繊維補強コンクリートである。AFt系UFCは、水和の初期段階でエトリングایتを生成し、その後のセメントの水和反応とポゾラン材の活性によって硬化体組織を緻密化して超高強度と高耐久性を実現している。また、長さの異なる2種類の補強用鋼繊維を混入して得られる高いじん性と高い流動性を併せ持つため、鉄筋のない極薄部材を実現できる。そのため、主に部材断面の小さい構造物へ適用されることが多い。しかしながら、近年の構造物の多様化や施工方法の変化に伴って、AFt系UFCが大量製造され、断面の大きい部材に打ち込まれることも想定される。

本検討では、AFt系UFCを一度に大量に製造することを想定して、レディーミクストコンクリート工場等で使用される汎用的なミキサ（容量 2.5m^3 ）による練混ぜを行い、その製造性や練混ぜ効率について検討した。また、断面の大きい

部材に打ち込まれた場合のAFt系UFCの発熱性状や構造体強度を評価するために、1 m立方の大型試験体を打設して、水和に伴う部材温度の計測、材齢初期に高温履歴を受けた部材の圧縮強度、細孔構造を調査した。本報は、これらの結果をとりまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 AFt系UFCの配合と結合材の形態

実験に供したAFt系UFCの配合を表-1に示す。AFt系UFCの結合材は、ポルトランドセメントと複数のポゾラン材等で構成され、基本的には、これら全ての結合材を予め混合したプレミックス結合材（以下、プレミックスタイプと記す）を用いることとしている。ただし、AFt系UFCを大量に製造する際には、結合材の混合設備の大型化や材料の輸送費の増大が見込まれ、セメントとその他の材料を分けて計量・混練した方が合理的となる場合（以下、混和材タイプと記す）もある。そこで、本検討では、結合材の形態として、プレミックスタイプと混和材タイプの2種類を検討対象とした。

*1 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員 工修（正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員（正会員）

*3 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造・材料グループ 上席研究員 工博（正会員）

*4 電気化学工業（株） 青海工場 無機材料研究センター 研究部長 工博（正会員）

骨材には、粒度調整した砕砂を用い、高性能減水剤にはポリカルボン酸系の減水剤を用いた。補強用繊維としては、引張強度 2.0kN/mm²以上、直径 0.2mmで、長さ 15mmと 22mmのものを混合した鋼繊維を用いた。

2.2 コンクリートミキサ

実験に使用したミキサの仕様を表-2に示す。AFt系UFCの製造は、室内のモルタルミキサやコンクリートミキサ、あるいはプレキャスト製品工場のコンクリートミキサ（ミキサA：水平二軸形強制練り形式、公称容量 1 m³）での実績がある²⁾が、大量に製造する場合には、1回の練混ぜで多くのAFt系UFCを効率よく製造する必要がある。そこで、製造実績のあるミキサAに加えて、レディーミクストコンクリート工場で使用されている汎用的な大型ミキサ（ミキサB：水平二軸形強制練り形式、公称容量 2.5m³）を使用してAFt系UFCの製造を行い、その製造性を比較・評価することとした。

2.3 製造性の検討

製造実験では、ミキサの種類、結合材の形態および製造時期が AFt 系 UFC の製造性に及ぼす影響について検討した。検討要因と実験水準を表-3に示す。

AFt系UFCの練混ぜ手順は、既往の検討結果²⁾を参考にして、「空練り（30秒間）→水（混和剤を含む）投入→一次練り（7分間）→補強用繊維投入（2分間）→二次練り（5分間）→排出」とした。補強用繊維の投入は、バケツ（6.875kg/個）を用いて行い、ミキサの点検口から人力によって投入した（写真-1）。なお、Case 2, 3はCase 1に比べて繊維の絶対量が多いため、投入作業時間を3分（二次練りは4分間）とし、投入作業の安全性を考慮し

表-1 AFt系UFCの配合

結合材 の 形態	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						補強用 繊維 (kg)
		水*1	結合材			骨材	高性能*2 減水剤	
			プレミックス 結合材	セメント	混和材			
プレミックス タイプ	2.0	195	1,287	-	-	905	32.2	137.4 (1.75vol%)
混和材 タイプ		195	-	927	360	905	32.2	137.4 (1.75vol%)

*1:高性能減水剤の水分を含む

*2:夏期は45.0kg/m³

表-2 ミキサの仕様

種類	形式	公称容量	動力	回転数	備考
A	水平二軸形強制練りミキサ	1.0m ³	220V (60Hz) 22kW×2	一定速:36r.p.m	1989年式 N社製
B		2.5m ³	220V (60Hz) 55kW	高速:41r.p.m 中速:32r.p.m 低速:10r.p.m	1996年式 I社製

ミキサAはJIS認定プレキャスト製品工場が所有

ミキサBはJIS認定レディーミクストコンクリート工場が所有

表-3 検討要因と実験水準

Case	ミキサ			結合材の形態	補強用繊維の有無	製造時期
	種類	公称容量	練混ぜ量			
1	A	1.0m ³	0.8m ³	プレミックスタイプ	あり	夏期 (7月)
2	B	2.5m ³	2.0m ³			
3	B	2.5m ³	2.0m ³	プレミックスタイプ	あり	秋期 (11月)
4				混和材タイプ	なし	



写真-1 繊維の投入状況

表-4 測定項目

測定項目		測定方法	目標値
製造時	骨材表面水率	JIS A 1111 (容積法による)	-
	ミキサ負荷	負荷電流値を10秒毎に測定	-
	目視観察	練混ぜ状況をビデオカメラで観察	-
フレッシュ性状 (練上り直後)	フロー	JIS R 5201 (落下なし)	270~290mm
	空気量	JIS A 1128	5%以下
	練上り温度	温度計による	-
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108 二次養生後に実施 (n=3) 供試体寸法φ100×h200mm	180N/mm ² 以上

て、作業中の練混ぜを低速回転とした。また、Case 4 では、補強用繊維を投入せず、注水後 14 分間練り混ぜた。全練混ぜ時間は、全ケース統一の 14 分間である。練混ぜ量は、全てのケースにおいてミキサの公称容量の 80%とした。

実験における測定項目は表－4 に示すとおりであり、製造時にはミキサ負荷電流値を測定して製造性を評価した。また、製造された AFt 系 UFC の性状確認を行った。AFt 系 UFC は常温 24 時間の前養生（一次養生）を行った後、85℃を 20～24 時間保持する蒸気養生（以下、二次養生と記す）を行うことを基本としている。本実験においては供試体の二次養生を 85℃-24 時間とした。

(1) ミキサの種類に関する検討 (Case 1, 2)

練混ぜに供した AFt 系 UFC の結合材の形態はプレミックスタイプであり、夏期の実験であることを考慮して高性能減水剤の使用量を 45kg/m^3 とした。

(2) 結合材の形態に関する検討 (Case 3, 4)

結合材を構成する各材料の製造ロットを全く同じものとし、事前混合の有無が製造性に及ぼす影響を評価した。実験は秋期に実施した。

(3) 製造時期に関する検討 (Case 2, 3)

製造時期が製造性に及ぼす影響について Case 2 と 3 の比較・評価を行った。

2.4 大型試験体の評価

大量に製造した AFt 系 UFC を断面の大きい部材に適用することを想定して、 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ の大型試験体を打設し、その硬化過程で結合材の水和に伴う部材の温度履歴を測定した。また、 $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体を採取して、水和熱による高温履歴を受けた AFt 系 UFC 部材の圧縮強度、細孔構造およびひび割れの有無を調査した。検討要因と実験水準を表－5 に、測定項目を表－6 に、大型試験体の概要を図－1 に示す。

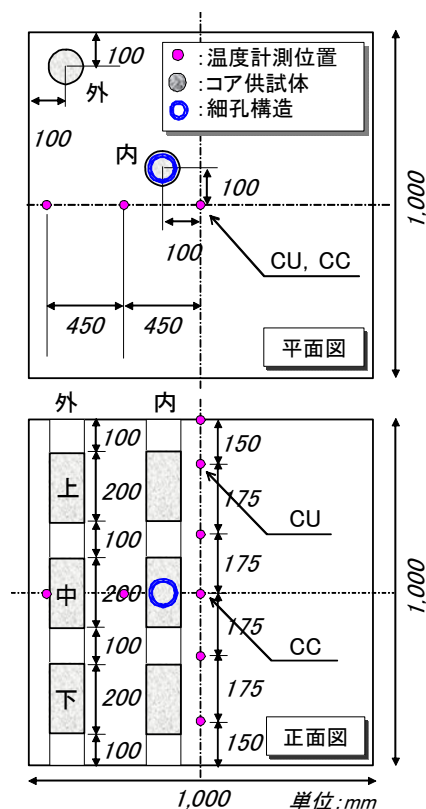
AFt 系 UFC は、2.3 で製造したものを小型アジテータ車に積載して約 15 分かけて運搬し、厚さ 12mm の化粧合板を用いた型枠内に、バケット

表－5 検討要因と実験水準

実験の時期	結合材の形態	試料の製造	打込み温度	大型試験体の種類		二次養生の有無
夏	プレミックスタイプ	Case 2	32.8	S	木製型枠	あり
秋		Case 3	23.3	A	木製型枠	なし

表－6 測定項目

測定項目	測定方法
部材温度	熱電対で測定 測定位置は図-1のとおり
圧縮強度	JIS A 1128 ($\phi 100 \times h200\text{mm}$) コア供試体は図-1に示す位置から採取
細孔構造	水銀圧入式ポロシメーターで測定 試料は図-1に示す位置から採取



図－1 大型試験体の概要

を用いて打ち込んだ。その際、振動締固め作業は行わなかった。

供試体 S (夏) は、常温雰囲気下で 24 時間一次養生した後、85℃の二次養生を実施した。ただし、養生装置の不具合により、85℃の保持時間が 10 時間となった時点で温度低下が生じた。その後 85℃まで昇温した結果 85℃の保持時間は 11.5 時間となった (図－4, 5)。供試体 A (秋) については、水和熱による部材温度の上昇によ

る温度履歴が二次養生に相当する効果があるか否かを検討するために、二次養生を行わず、雰囲気温度（外気温）のままで養生した。

3.実験結果および考察

3.1 製造実験

(1) ミキサの種類に関する検討 (Case 1, 2)

製造時に計測した練混ぜ時間とミキサ負荷電流値の関係を図-2に示す。ミキサ負荷電流値は、ミキサの種類と練混ぜ量によって大きく異なったが、一次練りおよび二次練り終了時の勾配等、負荷値が時間とともに変化していく履歴はほぼ同じであった。また、同一練混ぜ時間における材料の練上り状態は、目視観察ではほぼ同じであり、容量の大きいミキサBを使用して大量に練混ぜを行っても、実績のあるミキサAと同等の練混ぜ時間でAFt系UFCが製造できると判断された。また、いずれのミキサにおいても、繊維投入完了後2～3分程度で繊維の塊が消失したこと、ミキサの負荷値もこれ以降一定値になったこと、繊維の投入方法を機械化する等の投入手法に改善の余地があること等を考慮すると、注水からの練混ぜ完了までに要する時間は10～12分程度まで短縮できると判断された。

製造されたAFt系UFCの試験結果を表-7に示す。空気量に若干の差があるものの、ほぼ同等の試験結果であり、いずれも目標値を満足した。これらのことから、ミキサの種類がAFt系UFCの製造性や品質に及ぼす影響は小さく、汎用的な大型ミキサ（2.5m³）によってAFt系UFCの製造が十分可能であることが明らかになった。

(2) 結合材の形態に関する検討 (Case 3, 4)

一次練りにおけるミキサ負荷電流値の測定結果を図-3に記す。ミキサの負荷電流値のピーク

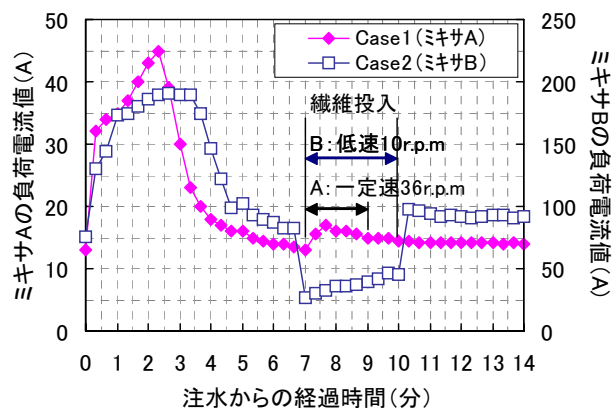


図-2 ミキサ負荷電流値

表-7 フレッシュおよび硬化後の試験結果

Case	ミキサ種類	表面水率 (%)	外気温 (°C)	練上り温度 (°C)	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
1	A	3.5	26.0	29.5	288×274 (281)	4.0	185.0
2	B	4.5	25.9	32.8	283×282 (282)	2.6	187.3

※モルタルフローは繊維投入後の測定値

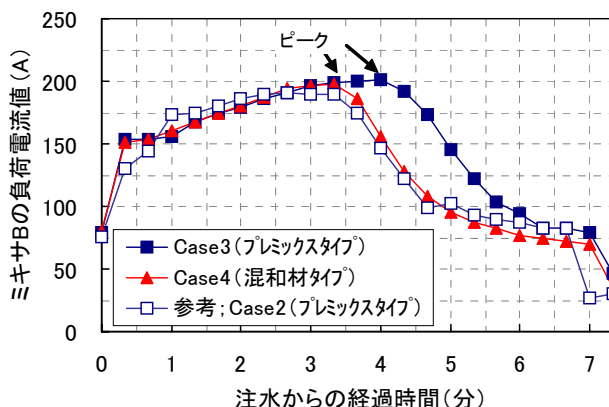


図-3 ミキサ負荷電流値（一次練り）

表-8 フレッシュおよび硬化後の試験結果

Case	結合材の形態	表面水率 (%)	外気温 (°C)	練上り温度 (°C)	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
3	プレミックスタイプ	1.9	16.9	23.3	272×268 (270)	2.7	207.2
4	混和材タイプ	1.7	18.1	24.7	288×287 (288)	2.8	194.3

※モルタルフローは繊維投入前の測定値

クは、Case 3が4分、Case 4が3分20秒であり、混和材タイプを用いた方が負荷値のピークがやや早くなる傾向を示した。しかしながら、その差は比較的小さく、プレミックスタイプと混和材タイプでは、ほぼ同等の製造性が得られるものと判断された。

AFt系UFCの試験結果を表-8に示す。両タイ

プの試験結果はほぼ同等であったが、圧縮強度はプレミックスタイプの方がわずかに高い値を示した。この理由については、別途詳細な検討が必要であるが、繊維の有無が圧縮強度に及ぼす影響が小さいこと⁴⁾を考慮すると、結合材の形態に起因していると考えられた。プレミックスタイプの結合材は、出荷前に工場で十分に混合されるため、粉体の分散性が優れ、セメントの水和やポズラン反応が進行しやすい状態になっているものと推察された。

(3) 製造時期に関する検討 (Case 2, 3)

Case 2 と 3 では、外気温が約 10℃異なった。これに伴い、AFt系UFCの製造においては、高性能減水剤の使用量を約 13kg/m³変化させた。しかしながら、図-3のCase 2 と 3 の対比および表-7, 8 に示すようにAFt系UFCの練混ぜ性能やフレッシュおよび硬化性状に大きな違いは認められなかった。このことから、高性能減水剤の使用量を調整することで、季節が変化してもほぼ一定の製造性と品質を確保できると判断された。

3.2 大型試験体の評価

(1) 試験体の温度

1 m 立方試験体の中心温度の計測結果を図-4, 5に示す。部材中心 (CC) の最高温度は、試験体 S (夏) で 101.6℃, 試験体 A (秋) で 96.1℃であり、いずれも注水から 24 時間以内の一次養生中に 100℃前後という非常に高い温度を示した。また、試験体 S の部材上面 (CU) も、二次養生によって温度が上昇し、最高温度は 90.4℃に達した。これに対し、二次養生を実施しなかった試験体 A の上面の最高温度は、67.7℃にとどまった。

なお、試験体 S に対して試験体 A は、打込み温度が 9.5℃低下したのに対して、最高温度は 5.5℃の低下 (いずれも一次養生中) であった。

(2) コア供試体の圧縮強度

コアの採取および圧縮強度試験は、供試体 S を材齢 91 日に、供試体 A を材齢 63 日に実施した。コア供試体の圧縮強度と計測で得られた温度分

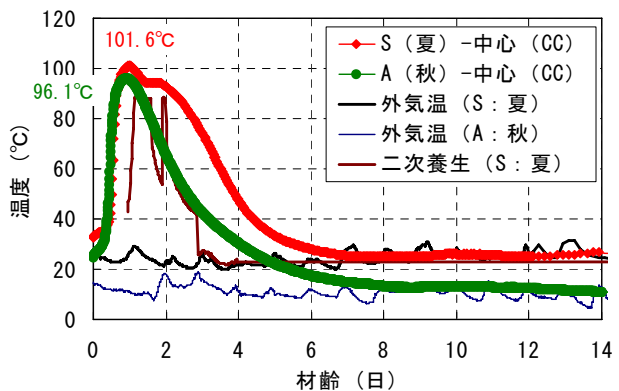


図-4 大型試験体上面 (CC) の温度計測結果

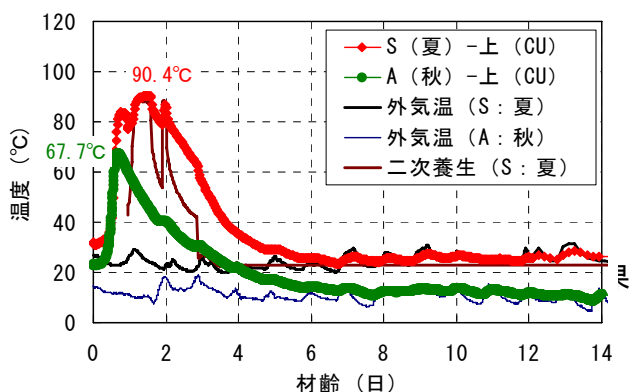


図-5 大型試験体上面 (CU) の温度計測結果

表-9 圧縮強度と温度履歴

		試験体S			供試体A		
		85℃以上の時間 (時間)	最高温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm ²)	85℃以上の時間 (時間)	最高温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm ²)
内	上	12.5	96.6	205.5	8.7	88.3	169.3
	中	45.5	101.0	203.1	21.0	96.1	206.6
	下	33.5	98.1	200.8	19.5	94.0	226.9
外	上	5.0	88.3	189.6	0	70.7	150.6
	中	5.0	89.4	191.0	0	76.3	205.5
	下	6.5	89.3	191.0	0	75.4	194.9

いずれもサンプル数はn=1

布から推定したコア供試体の温度履歴を表-9に示す。夏期に製作した試験体Sから採取したコア供試体は、二次養生が所定の条件でなかったにもかかわらず、いずれも 180N/mm²以上となった。秋期に製作した試験体Aから採取したコア供試体の圧縮強度についても、試験体上部から採取したものが 180N/mm²を下回ったものの、その他の部位は 200N/mm²程度に達していた。また、いずれの試験体においても、外側よりも内側の

コア供試体の方が高い圧縮強度を示した。

AFt系UFCの二次養生温度の基本である 85℃ が保持された時間に着目すると、表－9 に示すように、85℃の保持時間が短い場合や最高温度が 85℃に満たない場合であっても 180N/mm²以上の圧縮強度に達しているものもみられたが、少なくとも85℃が20時間程度保持されたコア供試体については 180N/mm²以上の高い圧縮強度が得られていた。これらの供試体は、一次養生期間中に二次養生に相当する温度履歴が与えられたものと推察された。これらのことから、85℃を20～24時間程度保持する養生（二次養生）が重要であること、最高温度が低い場合や温度の保持時間が短い場合でも高い圧縮強度得られる可能性があることが示された。

大型試験体の表面およびコア供試体には目視で確認できるひび割れは発生しなかった。

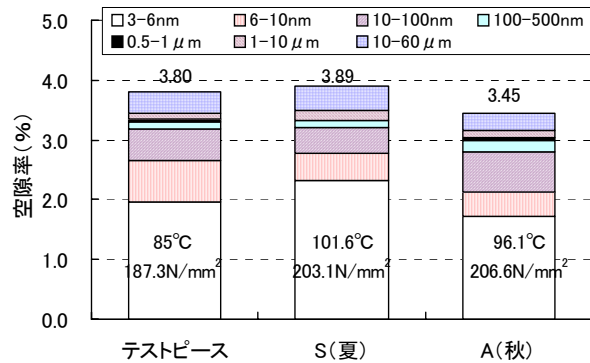
(3) 細孔構造

部材中心部から採取した試料の細孔構造の測定結果を図－6に示す。60μm以下の空隙率は、供試体S、Aとも基本の一次・二次養生を行ったテストピースと同等であり、いずれも緻密な組織になっていた。また、既往の報告と同等の空隙率³⁾であった。コア供試体の圧縮強度や空隙率の観点から、一次養生中の水和発熱も含めて部材温度が85℃で20時間程度保持された場合には、その後に十分な二次養生を実施しなくても、緻密で強固な硬化体が形成できる可能性が示唆された。これは、水和熱によって結合材に含まれるポゾラン材の反応が促進されたことによるものと考えられた。

7.まとめ

本検討で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- (1) AFt系UFCは汎用的な大型ミキサ（2.5m³）で練混ぜ容量 80%の製造が可能である。その必要練混ぜ時間は12～14分以下である。
- (2) 同一の練混ぜ条件では、プレミックスタイプと混和材タイプの結合材ではほぼ同等の製



図－6 コア供試体の細孔構造

造性とほぼ同等の性能を有する AFt 系 UFC が得られる。

- (3) 高性能減水剤量の調整によって、季節が変化しても一定の製造性と品質を確保できる。
- (4) AFt 系 UFC の水和熱は非常に高く、1m立方の部材中心部の温度は 100℃前後となる。
- (5) 一次養生期間中に二次養生に相当する高温履歴を受けた場合、180N/mm²以上の圧縮強度と緻密な組織が得られる可能性がある。

参考文献

- 1) 例えば、日紫喜剛啓、五味秀明、山田真人、益子博志、一宮利通：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の開発、コンクリートテクノ、Vol.25, No.9, pp.40～45, 2006.9
- 2) 大野俊夫、坂井吾郎、保利彰宏、樋口正典：超高強度繊維補強コンクリートの品質安定性に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.28, No.1, pp.1265～1270, 2006.7
- 3) 柳井修司、松原功明、坂井吾郎、大野俊夫、日紫喜剛啓：超高強度繊維補強コンクリートの耐久性、鹿島技術研究所年報、Vol.55, 2006.9
- 4) 松原功明、大野俊夫、柳井修司、芦田公伸、渡邊芳春：超高強度繊維補強コンクリートの養生方法と細孔構造、土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集、5-360, pp.717～718, 2006.9