

報告 超高強度繊維補強コンクリートの鋼繊維添加方法に関する検討

玉滝 浩司*1・藤野 由隆*2・吉田 浩一郎*3・桐山 宏和*4

要旨: 常温養生で早期に高い性能が得られる超高強度繊維補強コンクリートは、レディーミクストコンクリート工場で製造し、アジテータトラックで運搬して施工できる特長がある。しかしながら、補強材料に鋼繊維を用いることから、ミキサの洗浄に手間がかかることや一般コンクリートに混入する恐れがあること等の問題点もある。そこで本報告では、鋼繊維をアジテータトラックに投入することを想定し、多量製造に向けた製造時間および製造後の品質等を調査した。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 製造方法, 鋼繊維

1. はじめに

これまで、超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete : 以下, UFC と表記) は高強度と高耐久性を得るため、高温の熱養生を行うことが基本とされており、熱養生が必要なことから、工場におけるプレキャスト部材の製造が主であった。しかし、近年では、熱養生が不要で常温でも早期にこれらの高い性能が得られる UFC が開発され護岸構造物等に適用されている¹⁾。

この UFC は、熱養生が不要なため、レディーミクストコンクリート工場で製造した後、施工現場までアジテータトラックで運搬して打ち込むことができる。常温環境における硬化物性は、養生期間 28 日で圧縮強度 180N/mm², 引張強度 8.8N/mm², ひび割れ発生強度 8.0N/mm² と、2004 年に土木学会から発行された超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案) (以下, UFC 指針と表記)²⁾の特性値を満足する。

このような UFC の製造が一般的なレディーミクストコンクリート工場においても長期間安定的に製造可能であることが報告されている³⁾。しかし、鋼繊維を含んでいることから、ミキサに鋼繊維を直接投入して製造する場合は、その後に製造する一般のコンクリートに誤混入する恐れがあることやミキサの洗浄に時間を要するため、UFC の製造が敬遠される可能性もある。

本報告は、レディーミクストコンクリート工場における UFC の多量製造において、鋼繊維をアジテータトラックに添加することを想定し、プラントのミキサに投入した場合の製造時間やフレッシュ性状および硬化性状等の品質を比較してとりまとめたものである。

2. 検討の概要

アジテータトラックへ鋼繊維を投入する製造方法に

関しては、鋼繊維の分散性に問題ないことなどが報告されているものの⁴⁾、連続的かつ多量に製造した場合の供給時間や問題点などは明確になっていない。アジテータトラックへ鋼繊維を投入する場合は、スラリー製造と鋼繊維投入場所が異なる等の理由から、ミキサへ鋼繊維を投入するよりも製造時間が長くなることも考えられる。よって、以下に示す 2 種類の投入方法について、供給速度や品質を確認することとした。まず、少量製造の予備試験において、製造が可能かを確認し、さらに実製造において連続的に多量に製造した場合の製造時間やフレッシュ性状および硬化性状を確認することとした。

2.1 鋼繊維の投入方法

(1)アジテータトラックへ投入する場合

アジテータトラックへ鋼繊維を投入する場合は、写真-1のように足場を架設して、製造日までに鋼繊維を足場上部に荷揚げした。10m³分の鋼繊維の荷揚げに要し時間は約 20 分であった。鋼繊維は足場上部に設けた開口から分散機を用いて投入することとした。分散機の下部には長さ 2.5m のシュートを設置し、その先端をアジテータトラック内部に挿入することで鋼繊維がアジテータ



写真-1 鋼繊維投入場の外観

*1 宇部興産 (株) 技術開発研究所 コンクリート開発部 工修 (正会員)
 *2 宇部興産 (株) 技術開発研究所 コンクリート開発部 (正会員)
 *3 宇部興産 (株) 技術開発研究所 コンクリート開発部 主席研究員 (正会員)
 *4 宇部興産 (株) 技術開発研究所 コンクリート開発部 工修 (正会員)

ラックの投入口付近に付着することを防止した。投入はアジテータトラックのドラムを10rpm程度で回転させながら行った。鋼繊維の投入速度は7分/m³程度であった。また、雨天の場合は、投入作業を行う場所に簡易テントを設置して、雨水が混入しないように配慮した。なお、鋼繊維投入用の足場は、最低1日の最大製造量に当たる鋼繊維の荷重に耐える設計とした。

鋼繊維の投入は製造時間を短縮するため、2バッチ以降の練混ぜと並行して行い、練混ぜが完了する直前にアジテータトラックを鋼繊維投入場から排出口に移動して、練上がったスラリーを排出することとした。

(2)プラントミキサへ投入する場合

プラントミキサへ鋼繊維を投入する場合の製造時間等は、既往の報告³⁾を参考にした。事前準備として、製造日までに鋼繊維をミキサ上部の開口（投入口）まで荷揚げする必要があった。常設のホイストを使用して、10m³分の鋼繊維の荷揚げに要した時間は、約1時間であった。練混ぜ時間は、鋼繊維の投入時間を含めて20～30分である。

3. 製造概要

3.1 常温硬化型 UFC の構成材料と配合

製造した常温硬化型 UFC の配合を表-2に示す。常温硬化型 UFC は、ポゾラン材等を含むプレミックス材、高強度コンクリートに適した粒径5mm以下の細骨材、ポリカルボン酸系の高性能減水剤、および補強用鋼繊維で構成されている。鋼繊維を除くマトリックス部分は、C₃A量が少なく、かつ硬化時に反応速度の早いC₃S量が多いセメントをベースとした結合材により、低水結合材比を実現し、常温環境においても早期に高強度が得られるように配合を最適化している⁵⁾。補強用繊維には、引張強度が2,000N/mm²を超える鋼繊維を使用し、混入率は2.0vol%である。

3.2 製造工場の概要

常温硬化型 UFC は東海地区にあるレディーミキストコンクリート工場で製造した。製造したレディーミキストコンクリート工場の外観を写真-2に示す。

また、工場の設備概要を表-3に示す。当該工場には、セメントサイロが3本設置してあり、製造期間中のプレミックス材は、このうち1本のサイロに保管することとした。なお、プレミックス材は製造工場からジェットトラックで輸送した。

細骨材は事前の試験練りで、強度等の品質を満足することが確認できたものを近隣の碎石工場から取り寄せて使用した。なお、細骨材の物性は表乾密度2.65g/cm³、吸水率1.53%、粗粒率2.89であり、一般的なコンクリートに使用されているものである。

表-1 予備試験における調査項目

調査項目		試験内容
フレッシュ性状	フロー	JIS R 5201（落下なし）
	空気量	JIS A 1128 に準拠
	コンクリート温度	JIS A 1156 に準拠
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108 を参考
時間	繊維投入時間	時計により確認
	ミキサ洗浄時間	
	製造時間（全体）	

表-2 常温硬化型 UFC の配合

単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
水	プレミックス材	細骨材	高性能減水剤	
230	1830	330	20～24	157

注) 水の単位量は減水剤の水分を含む。

高性能減水剤は出荷時期に応じて適宜調整した。



写真-2 製造工場の外観

表-3 工場の設備概要

設備		容量等
サイロ貯蔵量 (プレミックス材)		150t
計量 上限値	セメント	1,000kg
	細骨材	2,500kg
	混和剤	20kg
ミキサ 仕様	練混ぜ容量	2.5m ³
	ミキサ形式	水平二軸（強制練り）
	電動機	37kw×2機（200V）
	回転数	30rpm

表－4 予備試験における調査結果

調査項目		試験結果	既往の報告より ³⁾	鋼繊維の投入方法による影響
鋼繊維の投入場所		アジテータトラック	ミキサ	
フレッシュ性状	フロー (mm)	281	272～295	影響なし
	空気量 (%)	2.3	1.5～2.6	影響なし
	コンクリート温度 (°C)	31.0	18.0～32.0	影響なし
硬化性状	圧縮強度 ^{※1} (N/mm ²)	196	191～205	影響なし
時間	繊維投入時間	10分	10分	影響なし
	ミキサ洗浄時間	5分	30分	ミキサに鋼繊維を投入する場合はミキサの洗浄に時間を要す
	製造時間 ^{※2}	30分	20分	アジテータトラックへ投入する場合は若干時間を要す

※1 標準養生材齢 28 日

※2 材料計量から鋼繊維投入後排出までの時間

高性能減水剤は 1,500L の混和剤タンクに保管した。セメントおよび混和剤の計量上限は、それぞれ 1,000kg、20kg であったため、数回に分けて計量した。

製造に使用したミキサは容量 2.5m³ の二軸強制練りミキサであり、練混ぜ量は既往の報告³⁾を参考にして、ミキサ容量の 80%以下とした。

3.3 予備試験における調査項目

予備試験では、実製造前に、表－1 に示す項目について、鋼繊維をアジテータトラックに投入する場合について調査し、既往の報告³⁾におけるミキサに鋼繊維を投入する場合と比較することとした。なお、予備試験における練混ぜ量は 1.5m³ とした。

3.4 予備試験結果

試験結果の一覧を表－4 に示す。アジテータトラックへ鋼繊維を投入した場合のフレッシュ性状、硬化性状および鋼繊維の投入時間は、ミキサへ鋼繊維を投入した場合と同等の結果となった。しかし、製造時間は鋼繊維の投入時間分 (約 10 分) 長くなった。ただし、連続して製造する場合は、プラントにおけるスラリー製造と鋼繊維の投入が並行して行えることから大幅な時間ロスにはならないと考えられる。

また、ミキサに鋼繊維を投入する場合、ミキサの洗浄時間は 30 分であったが、アジテータトラックに鋼繊維を投入する場合のミキサ洗浄時間は約 5 分であった。鋼繊維が混入していないため、洗浄が簡便であった。さらに、ミキサの洗い水に鋼繊維が混入していないため、一般のコンクリート廃棄物と同様に処理することができた。

予備試験の結果、鋼繊維の添加場所をアジテータトラックとした場合でも連続して供給することが可能と考えられたため、実製造で連続的かつ大量に製造した場合のフレッシュ性状、硬化性状等の品質と供給時間や問題点を

を確認することとした。

4. 実製造

製造量は施工条件に応じて、1 日あたり 6.9～8.1m³ とした。製造期間は約 4 ヶ月であり、合計の製造量は約 150m³ である。運搬にはアジテータトラックを使用し、製造量に応じて、2 車または 3 車で運搬した。運搬時間は 40～50 分であった。

4.1 製造時間および製造速度

製造量および時間の計画と実績の比較を表－5 に示す。製造時間の実績は、1 日の製造量に影響されるため、若干変動はあったものの、80～110 分程度であり概ね計画通りであった。

鋼繊維の投入方法が異なる場合の製造実績の例を図－1 に示す。アジテータトラックに鋼繊維を投入する場合、スラリー製造と並行して鋼繊維の投入ができたため、1 日あたりの製造時間は、ミキサへ鋼繊維を投入する場合より若干長くなる程度であった。供給速度は、アジテータトラックに鋼繊維を投入する場合で約 4.3m³/h、ミキサに鋼繊維を投入する場合で約 4.7m³/h であった。

また、アジテータトラックへ鋼繊維を投入する場合は、ミキサの洗浄時間が短くなるため、速やかに通常出荷が可能であった。

表－5 製造量および時間の計画と実績の比較

項目	計画	実績
1 バッチ当たりの製造量	2.00m ³ 以下	1.30～1.95m ³
1 日当たりの製造量	10m ³ 以下	6.9～8.1m ³
1 バッチ当たりの製造時間	30 分	20～30 分
1 日当たりの製造時間	120 分以内	80～110 分

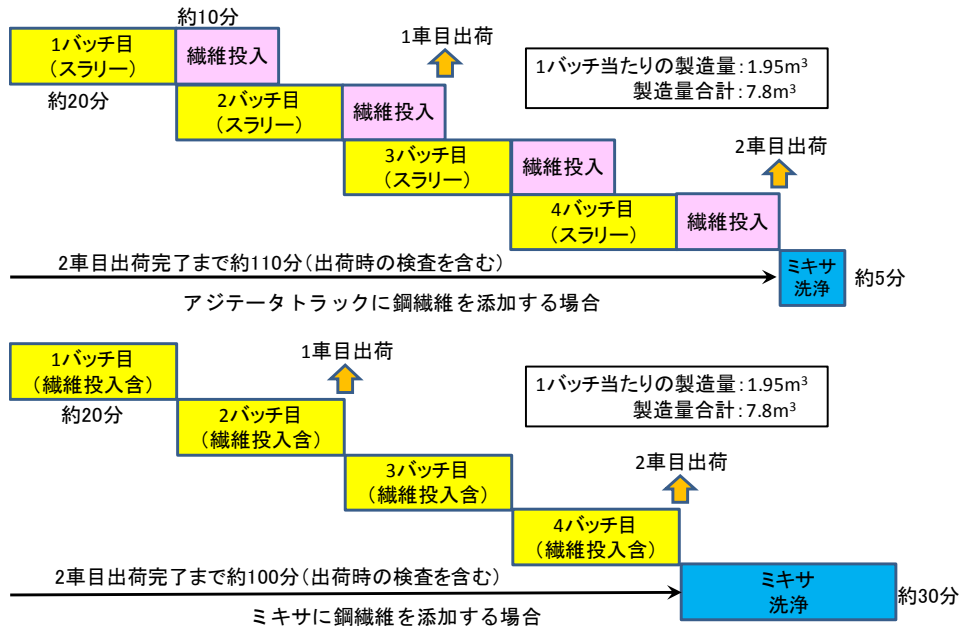


図-1 鋼繊維の投入方法が異なる場合の製造実績比較
(上: 鋼繊維をアジテータトラックへ投入する場合)
(下: 鋼繊維をミキサへ投入する場合)

表-6 荷卸し時の品質管理項目

管理項目	管理値	頻度	管理・試験方法等
フロー	260±30mm	1回/製造日	JIS R 5201 (落下なし)
空気量	3.5%以下		JIS A 1128 に準拠
コンクリート温度	10℃以上		JIS A 1156 に準拠
圧縮強度 ^{※1}	180N/mm ² 以上		JIS A 1108 を参考 試験体寸法: φ50×100mm
引張強度 ^{※1}	8.8N/mm ² 以上		JIS A 1106 に準じた試験結果を用いて, 以下のUFC指針の関係式より算出 引張強度 (N/mm ²) = (曲げ強度-1.54) / 2.59

※1: 標準水中養生 材齢28日で管理

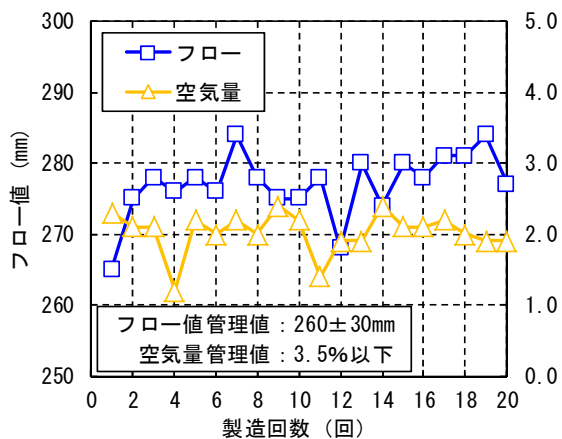


図-2 荷卸し時のフロー値と空気量

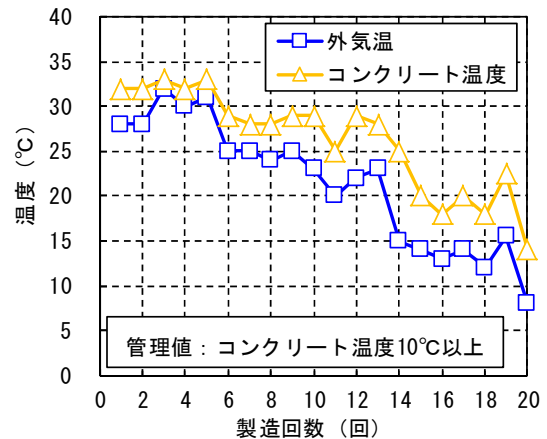


図-3 荷卸し時のコンクリート温度と外気温

4.2 製造した UFC の品質

製造した UFC は、施工現場までアジテータトラックで運搬した。荷卸し時に表－6 に示す項目に関して、品質管理試験を行った。

(1) フローおよび空気量

荷卸し時におけるフロー値と空気量を図－2 に示す。フロー値の平均は 277mm (265～284mm) となり、いずれも管理値の範囲内であった。変動係数は 1.7% であった。また、繊維ダマは認められなかった。

また、荷卸し時の空気量は 1.5～2.7% となり、いずれも管理値 (3.5%以下) の範囲内であった。

(2) コンクリート温度

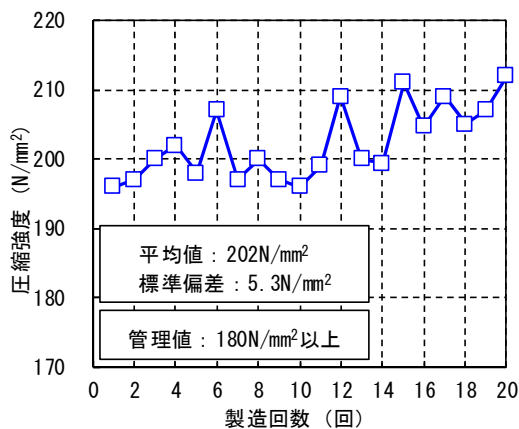
荷卸し時のコンクリート温度を図－3 に示す。外気温の下降に伴って、コンクリート温度は低下したが、いずれも管理値 (10℃以上) を満足した。

(3) 圧縮強度

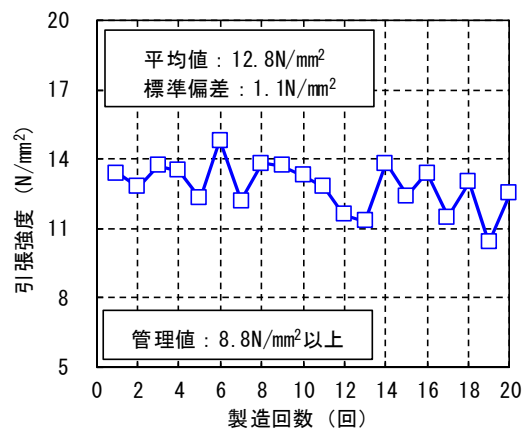
荷卸し時に採取したコンクリートの圧縮強度を図－4 に示す。圧縮強度の平均値は 202N/mm² (195～212N/mm²) となり、管理値の 180N/mm² を上回る結果となった。また、変動係数は 2.6% であり、ばらつきが小さいことが確認された。鋼繊維をミキサに投入した場合³⁾ と同等の強度が得られた。

(4) 推定引張強度

曲げ強度試験結果から算定される引張強度を図－5



図－4 荷卸し時に採取した供試体の圧縮強度



図－5 曲げ強度から推定した引張強度

表－7 製造方法が異なる場合のメリットとデメリット

繊維投入箇所	アジテータトラック	ミキサ
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ミキサの洗浄が容易。 通常出荷に鋼繊維が混入する恐れがない。 追加発注に対応できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 供給速度が若干速い。 追加発注に対応するためには、他の出荷との調整が必要。
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> 投入する敷地や足場の設置が必要。 鋼繊維や投入場所の雨天時の対策が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ミキサの洗浄に時間を要する。ウォータージェット等を用いて入念に洗浄する必要がある。



写真－3 ミキサの洗浄状況



写真－4 鋼繊維投入時の雨天対策の状況

に示す。引張強度の平均値は 12.8N/mm^2 ($10.6 \sim 14.8\text{N/mm}^2$) となり、管理値である 8.8N/mm^2 を満足した。鋼繊維をミキサに投入した場合³⁾と同等の強度が得られており、標準偏差も小さいことから、鋼繊維の分散性等は問題ないと考えられる。

なお、今回使用した常温硬化型 UFC の引張強度が曲げ強度から推定できることは、既往の報告⁶⁾で確認されている。

4.3 メリットとデメリット

表 7 に鋼繊維の添加方法の違いによる、メリットとデメリットを示す。

(1) アジテータトラックに鋼繊維を投入する場合

鋼繊維をアジテータトラックに投入する場合は、ミキサに水を溜めて攪拌することで洗浄できたため(写真-3)、ミキサの洗浄が簡略化できることがわかった。また、ミキサ洗浄が容易なことから、一般コンクリートの出荷の合間に追加発注に対応することができた。しかし、屋外で鋼繊維を投入するため、保管時の鋼繊維と投入時に雨天対策を施す必要があった。保管時の鋼繊維は、降雨に曝されると錆びるため、厚手のブルーシート等で二重に覆う必要があった。また、製造時が雨天の場合は鋼繊維の投入箇所も簡易なテントを用いて雨水が鋼繊維にかからないように注意した(写真-4)。

(2) ミキサに鋼繊維を添加する場合

ミキサへ鋼繊維を投入した場合は、製造時間が若干短縮できることと、鋼繊維投入時の雨天対策が不要というメリットがあった。しかし、一般のコンクリートへ誤混入を避けるため、ウォータージェット等を用いて入念に洗浄する必要があったため、ミキサの洗浄に時間を要した。また、追加発注に対応する際は、ミキサの洗浄時間も考慮して、他の出荷と調整する必要があった。

5. まとめ

超高強度繊維補強コンクリートのレディーミクストコンクリート工場における製造方法検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 鋼繊維をアジテータトラックに投入する方法でも、ミキサに投入する場合とほぼ同等の製造時間で、フレッシュ性状の安定した UFC を連続的に供給することが可能であり、その硬化体物性も安定している。

- (2) 鋼繊維をアジテータトラックに投入する製造方法は、投入時の敷地や足場、雨天時の対策が必要なものの、ミキサの洗浄時間を短縮できることや、一般のコンクリートへ鋼繊維が混入する恐れがないことから、UFC 製造における製造工場の負担を軽減できる有効な製造方法と言える。

本報告では、レディーミクストコンクリート工場における UFC 製造に関する鋼繊維の投入方法を検討した。今後は、今回の結果を踏まえ、UFC 技術がさらに普及するよう、製造および品質管理の省力化を図りたいと考える。

謝辞：常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの製造にあたり、ユタカコンクリート工業株式会社の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平田隆祥, 石関嘉一, 武田篤史, 小澤武史, 常温硬化型 UFC の現場打設による護岸構造物のリニューアル, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1249-1254, 2014
- 2) 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113, 2004
- 3) 玉滝浩司, 吉田浩一郎, 石関嘉一, 平田隆祥：レディーミクストコンクリート工場における超高強度繊維補強コンクリートの大量製造, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.316-321, 2014
- 4) 玉滝浩司, 吉田浩一郎, 石関嘉一, 平田隆祥：超高強度繊維補強コンクリートによる大型部材製造(その1 製造方法の検討), 土木学会第66回年次学術講演会, V-207, pp.413-414, 2011
- 5) 丸屋英二, 歳谷一雄, 高橋俊之, 平田隆祥：超高強度繊維補強コンクリートの流動性及び強度に及ぼすセメントの鉱物組成の影響, 土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度)要旨, V-497, pp.993-994, 2011
- 6) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo.10, 2012.1