

超高強度繊維補強コンクリートのポンプ圧送性に関する研究

渡部 孝彦*¹・臼井 達哉*¹・武田 均*¹

Keywords : UHPFRC, pumpability, pipe pressure loss, horizontal conversion factor, pumping efficiency

超高強度繊維補強コンクリート, ポンプ圧送性, 管内圧力損失, 水平換算係数, 圧送効率

1. はじめに

粗骨材を混入した圧縮強度 100~150N/mm² 程度の超高強度コンクリートは、これまでに多くの研究がなされており施工実績も多いが、粘性が高くポンプ圧送をした際の管内圧力や管内圧力損失が普通コンクリートに比べて非常に大きい傾向がある^{1),2)}。また、鋼繊維を混入した超高強度材料(UFC³⁾)があるが、その流動性は、粘性が非常に高く現場打ちには適さないものである。繊維補強材料としての観点からは、火災時のコンクリート爆裂対策として有機繊維を混入することが行われている^{例え}が、このクラスの圧縮強度を有するコンクリートを対象に、引張特性を向上させるために鋼繊維を混入する検討はほとんど行われていない。これは、鋼繊維を混入することで流動性が低下すること、圧送時にファイバールが発生しやすいこと等により圧送性が低下するためと考えられる。そのため、鋼繊維による優れた引張特性を有し、圧縮強度 60~150N/mm² 程度のポンプ圧送可能な超高強度繊維補強コンクリートの技術を確立することができれば、様々な用途に展開できると考えられる。

筆者らはこれまでに100N/mm²級の超高強度吹付けコンクリートを開発してトンネル現場に適用した⁴⁾。その後、この超高強度吹付けコンクリート用に開発した結合材を用い、圧縮強度が100~140N/mm²程度で、UFC指針³⁾に示された引張軟化特性と同等以上の性能を有する超高強度繊維補強コンクリートの開発を行い、鋼繊維の種類や混入量が強度特性や流動性に与える影響についての検討を実施してきた^{5),6)}。

本研究では、圧縮強度が120N/mm²程度のポンプ圧送が可能な超高強度繊維補強コンクリートの開発を目的とし、鋼繊維を1.5 vol.%混入した水結合材比の異なる3つの超高強度繊維補強コンクリートの配合を選定し、ポンプ圧送実験を行った。

2. ポンプ圧送性確認実験

2.1 実験概要

使用材料を表-1、コンクリートの配合を表-2に示す。配合は、水結合材比の異なるW/B18, 19.4, 20の3配合を選定した。圧送に用いた機械および機材を表-3に、練混ぜ時間を図-2示す。練混ぜは公称1m³の移動式コ

表-1 使用材料
Table 1 Materials used

記号	材料名	品質
W	水	上水道水
B	プレミックス結合材	普通ポルトランドセメント, スラグせつこう, シリカフェーム等 密度 2.95g/cm ³
S	細骨材	川砂, 表乾密度 2.63g/cm ³ , 粗粒率 2.94, 吸水率 1.12%
G	粗骨材	川砂利, Gmax15mm, 表乾密度 2.66g/cm ³ , 粗粒率 6.18, 吸水率 0.29%
Fb	鋼繊維	公称長さ 36mm, 直径 0.55mm
SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル化合物
AE 助	空気量調整剤	消泡剤
Sh	収縮低減剤	低級アルコールのアルキレンオキシド付加物

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室

表-2 超高強度コンクリートの配合

Table 2 Mix proportion of Ultra-high strength concrete

配合名	W/B	S/B	s/a	設計 空気量	単位量 (kg/m ³)							Fb (vol.%)
					W	B	S	G	SP	AE 助	Sh	
									B×%	B×%		
WB18	18	65	50	0.0	177	983	639	643	0.70	0.08	5.0	1.5%
WB19	19.4	65	50	0.0	188	970	630	635	0.94	0.08	5.0	1.5%
WB20	20	65	50	0.0	193	966	626	631	1.1~1.2	0.08	5.0	1.5%

表-3 使用機械および機材

Table 3 Machinery and equipment used

機械・機材名	説明
移動式コンクリートミキサー	傾胴2軸式, 公称容量1m ³ , 公称製造能力15m ³ /h
トラックアジテータ車	10t車
コンクリートポンプ車	ピストン式, 理論最大吐出圧22.0MPa, 理論最大吐出量69m ³ /h
配管	5B管 (ZX配管: 高压配管), 4B管 (S配管: 一般配管)



図-1 使用機械および配管の配置
Fig.1 Machinery and plumbing arrangement

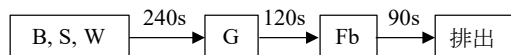


図-2 練混ぜ方法
Fig.2 Mixing method

表-4 試験水準

Table 4 Experimental factor

実験 No.	配合	目標吐出量 (m ³ /h)
1	WB18	15
2		30
3	WB20	15
4	WB19	30

ンクリートミキサーを用いて1バッチ0.8m³練りで行った。材料投入はあらかじめ計量した各材料をフレキシブルコンテナに入れ、クレーンでミキサーへ投入した。練りあがったコンクリートはバケットで受け、クレーンでトラックアジテータ車に移した。3.2m³のコンクリートを製造した後、圧送前の品質確認試験を行い、圧送実験を開始した。

使用機械および配管の配置を図-1に示す。4B管および5B管の直管部、ベント管部、テーパ管部での圧力損失が算出できるようにP1~P8の位置に圧力測定管を設けて圧力を測定した。輸送管内の圧力を測定するに

表-5 試験項目
Table 5 Test item

項目	記号	試験方法	目標値・備考
スランブフロー	SF	JIS A 1150	650±100mm
500mm フロー到達時間	T ₅₀₀	JIS A 1150	-
空気量	air	JIS A 1128	1.5%
外気温	AT	-	-
コンクリート温度	CT	JIS A 1156	-
繊維混入率	Fb	JSCE F 554	-
管内圧力	P	-	8箇所 (P1~P8)
圧縮強度	f _c	JIS A 1132	材齢28日 標準養生
割裂引張強度	f _t	JIS A 1113	
曲げ靱性係数	f _b	JSCE F 552	

あたり、はじめに表-2に示すコンクリートの配合から粗骨材、鋼繊維を除いた高流動モルタルを先送りした。モルタルを先送り後、コンクリートを試験ケースの吐出量で圧送した。輸送管内に試験ケースの吐出量のコンクリートが充填されたことをポンプのストローク数、ストローク速度から確認し、輸送管内の圧力の測定を開始した。

試験水準を表-4に示す。目標吐出量を15, 30m³/hとし既往の圧送試験を参考に圧送効率0.85⁷⁾を仮定して、

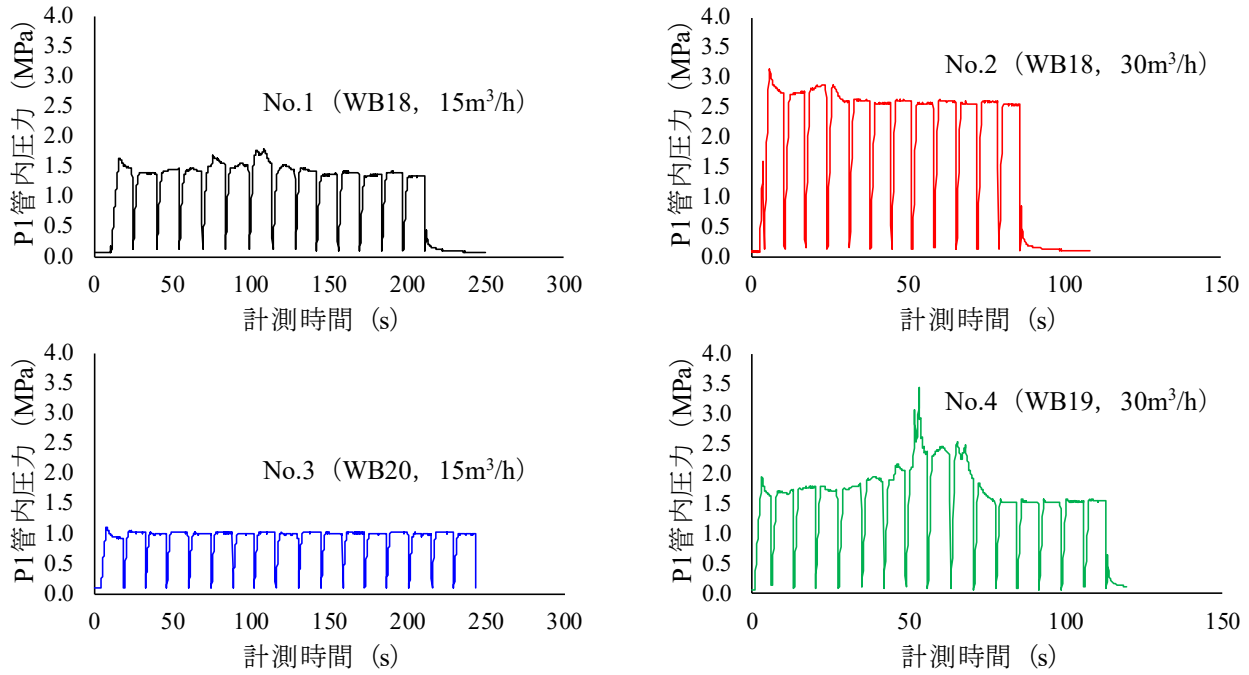


図-3 P1 管内圧力の測定結果
Fig.3 Pipe pressure measurement results at P1

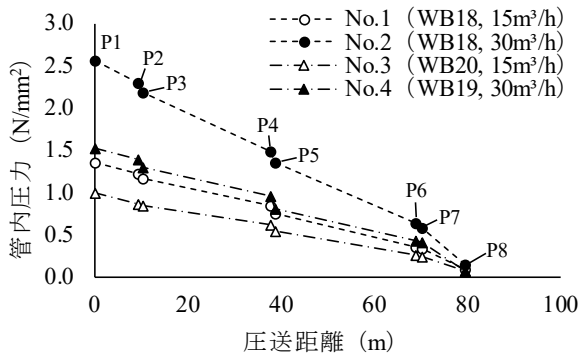


図-4 管内圧力と圧送距離の関係

Fig.4 Relation between pressure in pipe and pressure feed distance

コンクリートポンプ車の設定吐出量を設定した。試験項目を表-5 に示す。各試験は圧送前後のコンクリートの品質を確認することで圧送による影響を比較した。

2.2 実験結果

2.2.1 管内圧力測定の結果

コンクリートポンプ車に最も近い位置で測定した P1 における管内圧力の測定結果を図-3 に示す。No.1 (WB18, 15m³/h) は管内圧力 1.4MPa 程度で、No.2 (WB18, 30m³/h) は 2.7MPa 程度で管内圧力が安定した。No.3 (WB20, 15m³/h) では、管内圧力 1.0MPa 程度で安定して圧送が可能であったが、No.4 (WB19, 30m³/h) において一時的に管内圧力が急増した。その後、配管が閉塞することなく管内圧力は 1.6MPa 程度に安定した。No.4 では圧送により局所的にファイバークラックが発生し、配管内で閉塞しかけたためと考えられ

表-6 水平換算係数の算出結果

Table 6 Horizontal conversion coefficient calculation results

実験 No.	配合	目標吐出量 (m ³ /h)	水平換算係数	
			テーパー管	ベント管
コンクリート標準示方書 ⁸⁾			3	6
1	WB18	15	1.2	5.1
2		30	1.8	4.6
3	WB20	15	0.2	4.4
4	WB19	30	0.7	8.8

る。

次に、P1～P8 で測定した圧力から本配合における水平換算係数を算出し、コンクリート標準示方書[標準編]⁸⁾ (以下、標準示方書) に示されている一般のコンクリートの水平換算係数と比較した。水平換算距離の算出方法は、テーパー管およびベント管を含む管内圧力と水平換算距離の関係 (図-4) が管径ごとに直線になるように定めた。すなわち、長さあたりの管内圧力損失 (N/mm²/m) が直管部と等しくなるように最小二乗法で水平換算係数を求めた。表-6 に算出した水平換算係数を示す。テーパー管部分での水平換算係数は 0.2～1.8 程度となり、WB18 の配合で比較的大きい傾向があるが、いずれの配合も標準示方書の値より小さい。これは、本配合は普通コンクリートより単位粗骨材絶対容積が小さく、粗骨材の最大寸法が小さいことが影響していると思われる。一方、ベント管部分での水平

換算係数は実験値が標準示方書の値とほぼ同等であったが、No.4 (WB19, 30m³/h) でベント管の水平換算係数が 8.8 と大きい値となった。No.4 では管内圧力が一時的に増加し閉塞しかけているが、ベント管部での圧力損失が大きいことも影響していたと思われる。以上より、WB18 の配合は標準示方書と同様に圧送計画を立案することが可能であることが確認できた。また、

今回のように水平 80m 程度の圧送であれば最大管内圧力が WB18 配合で 3MPa 程度であるため、高压タイプでない一般的な 4~5MPa 程度のコンクリートポンプ車で圧送可能であることが明らかになった。次に、1m 当たりの管内圧力損失と吐出量の関係を図-5 に示す。本実験結果の他に、比較として標準示方書よりスランプ 8cm の普通コンクリート (以下、普通コン) のデータ

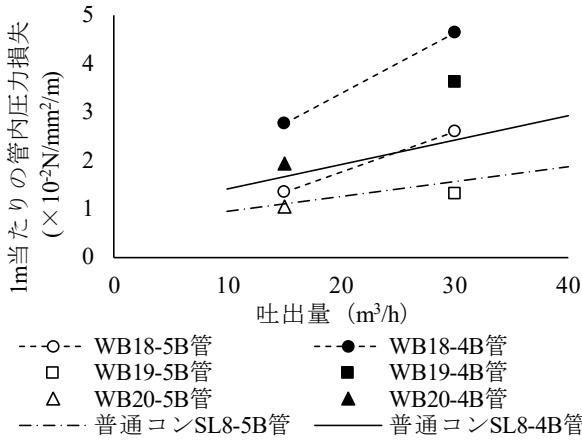


図-5 管内圧力損失と吐出量の関係

Fig.5 Relation between pressure drop in pipe and discharge rate

表-7 圧送効率の算出結果

Table 7 Calculation results of pumping efficiency

実験 No.	1	2	3	4
配合	WB18		WB20	WB19
目標吐出量 (m ³ /h)	15	30	15	30
[設定吐出量]	[18]	[36]	[18]	[18]
実圧送量 (m ³)	0.61	0.76	0.72	0.69
理論圧送量(m ³)	0.79	0.99	0.92	0.92
圧送効率	0.77	0.77	0.78	0.75
実吐出量 (m ³ /h)	13.8	27.7	14.0	27.0

表-8 フレッシュ性状試験結果

Table 8 Consistency test result of fresh concrete

実験 No.	配合	目標吐出量 (m ³ /h)	AT (°C)	圧送前						圧送後					
				経過時間 (分)	SF (mm)	T ₅₀₀ (s)	air (%)	CT (°C)	Fb (vol.%)	経過時間 (分)	SF (mm)	T ₅₀₀ (s)	air (%)	CT (°C)	Fb (vol.%)
1	WB18	15	8.1	66	641	12.8	1.5	15.3	1.49	85	693	10.3	1.5	16.3	1.54
2		30	18.6	52	601	21.0	2.0	21.5	1.57	73	646	14.4	1.7	23.3	1.72
3	WB20	15	11.0	67	658	4.6	1.7	17.7	1.49	85	682	4.2	1.7	19.0	-
4	WB19	30	19.5	62	610	20.0	1.7	21.4	1.65	86	693	5.7	1.2	22.4	1.65

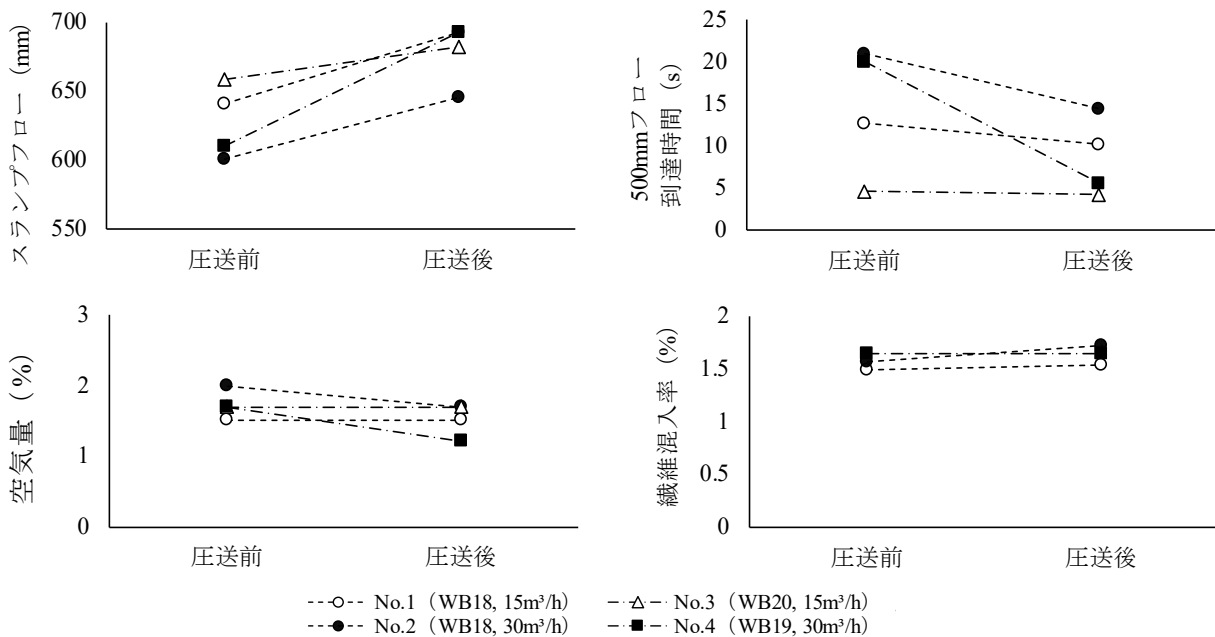


図-6 圧送前後のフレッシュ性状試験結果の比較

Fig.6 Comparison of Consistency tests before and after pumping

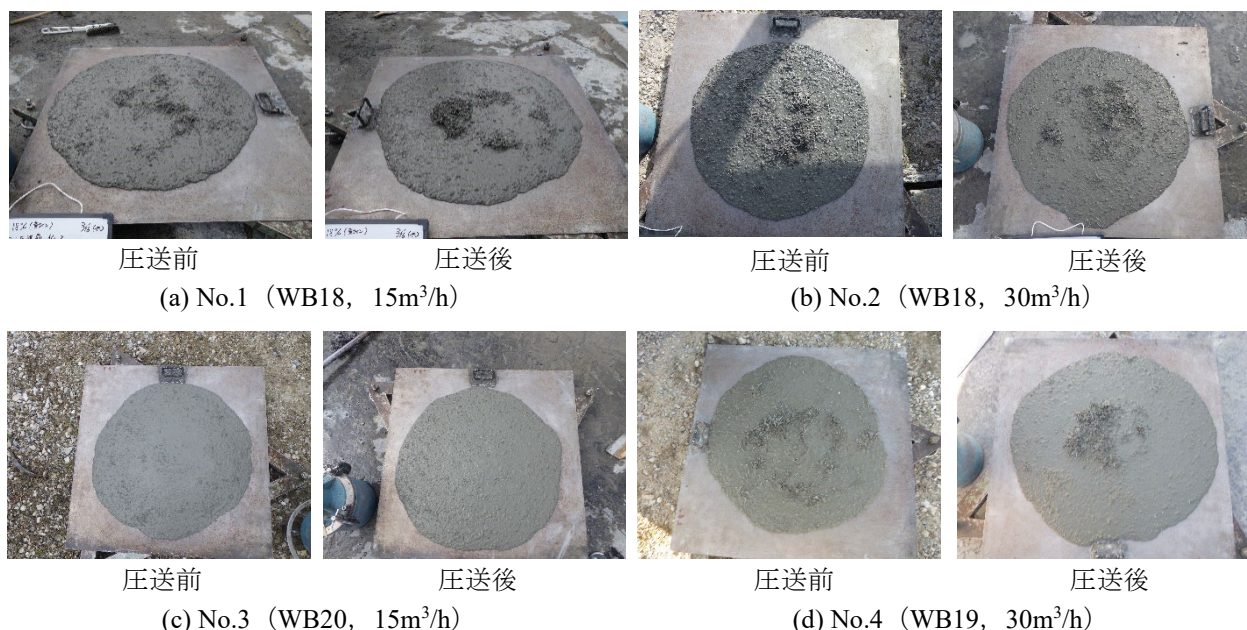


写真-1 圧送前後のスランプフロー

Photo.1 Slump flow before and after pumping

を示した。まず、5B管で吐出量 $15\text{m}^3/\text{h}$ の管内圧力損失はいずれの実験ケースにおいても普通コンと同程度であった。吐出量 $30\text{m}^3/\text{h}$ の圧力損失は WB18 が普通コンの 1.6 倍程度であったが、WB20 は普通コンと同等の圧力損失であった。次に、4B管で吐出量 $15\text{m}^3/\text{h}$ の管内圧力損失は WB18 が普通コンの 1.6 倍程度であり、WB20 は普通コンと同等であった。吐出量 $30\text{m}^3/\text{h}$ の圧力損失は WB18 および WB19 のいずれにおいても普通コンよりも大きく、WB18 が普通コンの 2.2 倍程度であった。

2.2.2 圧送効率の算出結果

圧送効率の算出結果を表-7 に示す。ここで、圧送効率は $0.6\sim 0.8\text{m}^3$ 程度のコンクリートを圧送した際の実圧送量をピストンのストローク回数から算出した理論圧送量で除すことで算出した。圧送効率は $0.75\sim 0.78$ 程度となり、実験前に仮定した 0.85 よりも小さい結果となったが、コンクリートのポンプ圧送における圧送効率は $0.7\sim 0.9$ 程度とされており⁹⁾、本配合の圧送効率も一般的な範囲であった。今回の圧送における実吐出量は目標吐出量 $15, 30\text{m}^3/\text{h}$ に対し、各実験 No. の平均でそれぞれ $13.9, 27.4\text{m}^3/\text{h}$ であった。

2.2.3 フレッシュ性状試験の結果

フレッシュ性状試験結果を表-8 に、圧送前後のフレッシュ性状試験結果の比較を図-6 に示す。あわせて、圧送前後のスランプフローを写真-1 に示す。まず、配合 WB18 に着目し、No.1 (WB18, $15\text{m}^3/\text{h}$) および No.2 (WB18, $30\text{m}^3/\text{h}$) の圧送前後の試験結果を比較した。圧送前後のスランプフローを比較すると、No.1, No.2 ともに圧送前より圧送後のスランプフローの方が大き

くなっており、増加量は 50mm 程度であった。次に、圧送前後の 500mm フロー到達時間を比較すると、No.2 の方が No.1 よりも圧送後の 500mm フロー到達時間が短くなった。これは No.2 の圧送前のスランプフローが小さく、 500mm フロー到達時間が大きかったことで、圧送による影響がより大きく出たためと思われる。空気量は No.1 および No.2 のどちらのケースにおいても圧送前後で変化がなかった。また、No.2 において、圧送前後の繊維混入率は配合量である $\text{vol.}1.5\%$ と同等であり、ポンプ圧送による変動は小さい結果であった。

次に、写真-1 のスランプフロー形状を確認すると、No.1 および No.2 で、圧送前のスランプフローにおいて鋼繊維と骨材が絡み合っており、均一に分散していない様子が確認された。既往の研究では粗骨材量と繊維量の組合せがコンクリートの流動性および分散性に影響を及ぼすことが明らかにされており¹⁰⁾、本配合においても単位粗骨材絶対容積を低減する配合修正が必要であると考えられる。以上より、WB18 の配合では、配合の修正が必要であるが、吐出量 $15\text{m}^3/\text{h}, 30\text{m}^3/\text{h}$ のポンプ圧送が可能であることが確認された。

次に、No.3 (WB20, $15\text{m}^3/\text{h}$) および No.4 (WB19, $30\text{m}^3/\text{h}$) の圧送前後の試験結果からスランプフローに着目すると、No.3, No.4 ともに圧送後のスランプフローが大きくなっており、特に No.4 では 83mm 増加と変化が顕著であった。次に、圧送前後の 500mm フロー到達時間に着目すると、No.4 の変化が顕著でありスランプフローと同じ傾向だった。

ここで、吐出量が等しい No.2 (WB18, $30\text{m}^3/\text{h}$) と

表-9 圧送前後の強度試験結果

Table 9 Strength test results before and after pumping

実験 No.	配合	目標吐出 量 (m ³ /h)	圧送前			圧送後		
			f_c	f_t	f_b	f_c	f_t	f_b
2	WB18	30	121.3	8.3	20.8	128.0	8.8	20.9
4	WB19	30	113.3	7.5	18.3	117.0	7.9	16.0

(単位：N/mm²)

No.4 (WB19, 30m³/h) の圧送前後のスランプフローを比較すると、圧送前のスランプフローおよび500mmフロー到達時間が同等であったが、圧送前後の変化量は、No.4の方がNo.2よりも顕著であった。これは、圧送前のコンクリートのコンシステンシーが同等であっても、W/Bや単位水量などの違いにより圧送がコンシステンシーに及ぼす影響が異なることを示している。

No.3およびNo.4において圧送前後の空気量に変化は生じなかった。圧送前後の繊維混入率を比較すると、No.3では計測ミスにより圧送後のデータがロスとなってしまい比較ができなかったが、No.4では繊維混入率は圧送前後で変化しなかった。

2.2.4 強度試験の結果

圧送前後の強度試験結果を表-9に示す。No.2 (WB18, 30m³/h) およびNo.4 (WB19, 30m³/h) で強度試験を実施した。圧縮強度 f_c および割裂引張強度 f_t はいずれのケースにおいても圧送前後で差が確認されなかった。これより、ポンプ圧送によるこれらの強度への影響は小さいことが確認された。次に、圧送前後の曲げ靱性係数 f_b を比較するとNo.2では低下は確認されなかった。一方No.4においては12.6%の低下が確認された。前項で示したように圧送の前後で繊維混入率に変化がなかったことから試験の誤差範囲であると考えられる。

3. まとめ

本研究では、圧縮強度が120N/mm²程度のポンプ圧送が可能な超高強度繊維補強コンクリートの開発を目的とし、鋼繊維を1.5vol.%混入した超高強度繊維補強コンクリートのポンプ圧送性確認実験を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) WB18の配合では繊維の分離や強度特性の変化が生じることなくポンプ圧送が可能であった。圧送時のスランプフローは600~640mm程度、500mmフロー到達時間は12~21秒程度であった。普通コンと比べた管内圧力損失は5B管で約1.0~1.6倍、4B管で約1.6~2.2倍であった。

- (2) 本実験の配合における圧送効率は0.75~0.78程度であり、一般のコンクリートと同等の範囲であった。
- (3) 圧送前のコンクリートのコンシステンシーが同等であっても、水結合材比や単位水量等の影響により圧送後のコンシステンシーに及ぼす影響は異なる。
- (4) テーパー管部分での水平換算係数は標準示方書⁸⁾の値より小さい。普通コンクリート配合よりも単位粗骨材絶対容積が小さいことや、粗骨材最大寸法が小さいことが影響していると思われる。また、WB18の配合ではベント管の水平換算係数は一般的な普通コンクリートと同等であった。

参考文献

- 1) 黒岩秀介, 河合邦彦, 小田切智明ほか: F_c 130N/mm²の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工, コンクリート工学, Vol.42, No.10, pp.44-49, 2004.
- 2) 鳴瀬浩康, 石中正人, 中瀬博一ほか: 設計基準強度150N/mm²級超高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集, Vol.15, No.30, pp.359-362, 2009.
- 3) 土木学会: コンクリートライブラリー超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004.
- 4) H. Takeda, T. Kawaguchi, H. Yoshimoto, S. Fujiwara, K. Sato: Material properties and construction performance of ultra-high strength sprayed concrete, World Trotting Conference 2019.
- 5) 川口哲生, 島崎利孝, 武田均: 鋼繊維を混入した超高強度コンクリートの力学特性と破壊力学特性, 土木学会全国大会第75回年次講演会, V-257, 2020.
- 6) 島崎利孝, 川口哲生, 武田均: 鋼繊維を混入した超高強度コンクリートの流動性と力学特性の検討, 土木学会全国大会第76回年次講演会, V-392, 2021.
- 7) 臼井達哉, 木ノ村幸士, 坂本淳ほか: 鋼繊維補強高流動コンクリートのポンプ圧送性に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.38, No.1, 2016.
- 8) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2018.
- 9) 毛見虎雄: コンクリートポンプ工法について, コンクリート工学, Vol.13, No.1, 1975.
- 10) 栗田守朗, 田中博一: ECL工法の一次覆工を対象とした高流動鋼繊維補強コンクリートのフレッシュ性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.767, V-64, pp.177-184, 2004.