論文 超高強度繊維補強コンクリートの圧送性に関する研究

川西 貴士*1・岩城 孝之*2・仲田 宇史*3・村上 隆弘*4

要旨:床版の接合部へ超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を圧送するために,実際の施工で想定される配管にて圧送実験を行い,輸送管の種類,圧送距離,吐出量および配管の方法が管内圧力損失に及ぼす影響について確認した。その結果,理論吐出量 7m³/h のピストン式ポンプおよび直径 2 インチの鋼製やゴム製の輸送管を用いて,圧送距離 28m までは品質を保持しながら圧送が可能であること,ゴム製の輸送管を使用する場合や上り配管とする場合に管内圧力損失が増加すること,吐出量と管内圧力損失の間に相関関係があることなどを確認した。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート,鋼繊維,ポンプ,圧送性,輸送管,吐出量,管内圧力損失

1. はじめに

我が国の社会基盤ストックは,高度経済成長期に整 備・建設されたものが多く,老朽化が進んでいる。高速 道路の橋梁では,大型車の交通量の増加や凍結防止剤に よる塩害などの影響で床版の損傷が著しく,床版の取替 えを伴う大規模なリニューアル工事が進められている。

社会基盤ストックの効率的な維持管理の観点から,耐 久性が高く,ライフサイクルコストを低減できる材料が 求められており,優れた強度特性と高い耐久性を有する 超高強度繊維補強コンクリート(以下,UFCと呼称)が 開発されている¹⁾。高速道路のリニューアル工事では, 交通規制を伴うため,交通規制の期間の短縮が求められ る。そのため,UFCを利用した急速施工が可能な PCa 床 版の接合工法が開発され,適用が進められている^{2),3)}。

この既往の工法においては, PCa 床版同士の接合部に, 床版上面からの UFC の打込みにより施工されている。し かし,接合部に打ち込んだ UFC が所要の強度に達するま で,交通規制を解除できない。そのため,図-1に示すよ うに接合部の上部に上蓋を設置して,一時的に交通規制 を解除した後に,床版下面から接合部へ UFC を充填する 工法が求められる。UFC の圧送による打込みができれば, 交通規制の期間をさらに短縮することが可能となる。そ こで,UFC の圧送性に関する評価やデータの蓄積を目的 として, 圧送実験を行った。

2. UFC および実験の概要

2.1 UFC の圧送性および実験水準

UFC は粉体量が多いため,高粘性の材料であり,かつ, 優れた引張強度や靭性を確保するために,細長い鋼繊維 が多量に混入される。そのため,UFC の圧送においては, 管内圧力の増加やファイバーボールの発生による閉塞が

120N/mm² 程度,水粉体比が 20%までのコンクリートに 関するデータの記載があるが,UFC のような低水粉体比 の材料の圧送性については報告されていない⁴⁾。 これまでに,水粉体比 13%程度の超高強度モルタルの

圧送が可能であることが報告されている^{5),6}。しかし, 輸送管の種類,圧送距離,吐出量および管内圧力に関す る知見は少ない。そこで,本研究では,UFCを用いた圧 送実験を行い,材料分離の状況,圧送距離,吐出量およ び管内圧力損失などの圧送性について確認を行った。実 験は**表-1**に示す3種類のシリーズで行った。

懸念される。土木学会のポンプ指針では、圧縮強度



実験シリーズ	実験水準	検討内容
シリーズ I	 ・輸送管の種類 (鋼製, 鋼製+ゴム製) ・圧送距離 (10m, 20m) 	 ・圧送の可否(基礎実験) ・管内圧力の測定(基礎実験) ・硬化後のモルタルの 品質確認
シリーズⅡ	 ・輸送管の種類 (鋼製,鋼製+ゴム製) ・圧送距離 (20,24,28,32m) ・吐出量 (0.75,1.00,1.50m³/h) 	 ・圧送可能な距離の把握 ・管内圧力の測定 (輸送管の種類,圧送距離, 吐出量の影響の把握) ・圧送前後の流動性の確認
シリーズⅢ	 輸送管の種類および配管 (実施工を想定した組合せ) ・吐出量 (1.00, 1.25, 1.50m³/h) 	 ・実施工を模擬した配管 での圧送の可否 ・管内圧力の測定 (上り,下り,水平配管) ・圧送前後の品質確認

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 生産技術本部橋梁技術部副部長 修士(工学)

*3 (株) 大林組 生産技術本部橋梁技術部課長 修士(工学)

*4 (株) 大林組 生産技術本部橋梁技術部副課長 修士(工学)

2.2 使用材料,配合および使用機材

実験には既往の実験でも使用されている常温硬化型の UFCを使用した⁵⁾。UFCの構成材料は、高強度用にエー ライトの比率を高めた専用プレミックス粉体、細骨材、 高性能減水剤および鋼繊維とした。配合を表-2に示す。 水粉体比は 12.6%であり、極めて高粘性の材料である。 鋼繊維には直径 0.16mm で長さ 13mm の形状のものを使 用した。目標とする品質は、技術評価報告書の記載のと おり、モルタルのフロー(JISR 5201 落下無し)で 260± 30mm、圧縮強度 180N/mm²以上、曲げひび割れ発生強度 13.6N/mm²以上、曲げ強度 25.1N/mm²以上とした¹⁾。

練混ぜは一軸の強制練りミキサを用いて行った。ポンプのホッパへのモルタルの排出状況を写真-1に示す。 製造したモルタルは十分な自己充填性を有しており、特に材料分離も認められない良好な品質であることを確認した。練混ぜ後直ちに圧送を開始しており、経時変化による品質変動の影響は小さいものと考えられる。

圧送には、定置式のコンクリート用ポンプを用いた。 ポンプの種類は油圧のピストン式とし、実際の施工量や 配管を考慮して、理論吐出量 7m³/h のポンプを使用した。 使用したポンプを**写真-2**に示す。

既往の実験では、有機繊維を用いた同様の高粉体材料 を用いて、2 インチのゴム製の輸送管で圧送可能である ことが報告されている %。そこで、輸送管の直径は2イ ンチとし、輸送管には鋼製とゴム製の2種類を用いて実 験を行った。ゴム製の輸送管は、フレキシブルホースで はなく、耐圧性の高いゴムホースを使用した。

3. 圧送実験(シリーズ I)

3.1 実験概要

シリーズ I では,直径 2 インチの鋼製およびゴム製の 輸送管を用いて,圧送が可能かどうかを検討した。圧送 実験の概要を図-2 に示す。鋼製の輸送管については, 長さ 9m の輸送管をベント管にて繋いで配管した。ゴム 製の輸送管については,10m および 20m の 2 種類で実験 を行った。ポンプからの排出部,ゴム製の輸送管同士の 接続部および先端部については,鋼製の輸送管を用いた。 ゴム製の輸送管 20m のケースにおいては,排出側の輸送 管の先端をポンプのホッパに設置し,排出したモルタル を循環させた。吐出量はいずれも 0.5m³/h とした。輸送 管の継手部に圧力計を設置し,管内圧力を測定した。

圧送が硬化後の品質に及ぼす影響を確認するために, 鋼製の輸送管を用いたケースについて,圧送前後で圧縮 強度試験(直径 50×長さ 100mm の供試体,JIS A 1108) および曲げ強度試験(縦 100×横 100×長さ 400mm の供 試体,JIS A 1106)用の供試体を採取した。モルタルの温 度は 20℃程度であった。

表一2 配合

空気量	水粉体	単位量(kg/m ³)			鋼繊維	
	比	水	専用	細骨材	高性能	
			フレミ		减水剤	
(%)	(%)		ックス 粉体			(kg/m ³)
	W/P	W	Р	S	SP	SF
2.0	12.6	230	1830	331	22	157



写真-1 モルタルの排出状況



写真-2 使用したポンプ



3.2 実験結果

圧送に使用したモルタルのフローは 266mm であり, 十分な流動性を有しており,良好な状態であった。鋼製 の輸送管を用いたケース(圧送距離 24m)については, 圧送を行うことができた。鋼製やゴム製の輸送管を用い たケースについては,圧送距離 13mは圧送できたが,圧 送距離を 26mに伸ばすと,鋼繊維のファイバーボールが 発生し,分離したモルタルとファイバーボールが交互に 排出された。圧送中の管内の圧力により,鋼繊維が分離 したものと思われる。鋼繊維のファイバーボールの発生 状況を写真-3に示す。圧送実験終了後にゴム製の輸送 管を切断して管の内部の状況を確認したところ,管壁に 鋼繊維はほとんど刺さっておらず,ファイバーボールも 認められなかった。鋼繊維が管壁に刺さることによる閉 塞のリスクは小さいものと判断した。

管内圧力の測定結果を図-3 に示す。ポンプからの距離の増加に伴い,管内圧力が低下した。鋼製のみに比べて、ゴム製を使用した場合,管内圧力が増加した。また, 圧送距離が長くなるほど,管内圧力が増加した。

硬化後のモルタルの品質試験結果を表-3 に示す。圧 縮強度,曲げひび割れ発生強度および曲げ強度とも,圧 送前後で有意な差は認められず,圧送後のモルタルも十 分な品質が確保されていた。目標とする品質を満足して おり,UFC としての性能を十分満たす結果が得られた。

4. 圧送実験(シリーズⅡ)

4.1 実験概要

シリーズ I の結果より、鋼製の輸送管については 24m 程度、ゴム製の輸送管については 10m 程度の圧送が可能 であることを確認した。そこで、シリーズⅡでは、実験 水準として輸送管の種類、圧送距離および吐出量を変え た場合に、材料分離の程度や管内圧力がどのように変化 するかを確認した。実験ケースを表-4 に、圧送実験の 概要を図-4 に示す。ポンプを2台準備し、鋼製のみの ケースと鋼製とゴム製を混合したケースを同時に圧送し た。輸送管の先端から排出するモルタルをポンプのホッ パに投入し、循環しながら圧送を行った。鋼繊維が分離 したモルタルは、ホッパ内のパドルの攪拌により良好な 状態に戻して循環した。シリーズⅡでは、圧送距離 20m をベースとして、ケースごとに鋼製の輸送管を 4m ずつ 追加して、圧送距離を変えて実験を行った。鋼製とゴム 製を混合するケースについては、ポンプ排出口より鋼製 の輸送管を接続し、長さ10mのゴム製の輸送管を先端に 配置した。シリーズ I と同様に、輸送管の継手部に圧力 計を設置し,管内圧力を計測した。また,圧送が流動性 に及ぼす影響を確認するために, 圧送前後でフロー試験 を実施した。モルタルの温度は20℃程度であった。



写真-3 鋼繊維のファイバーボールの発生状況



図-3 管内圧力の測定結果(シリーズI)

表-3	結:	果
-----	----	---

試験時期	圧縮強度	曲げひび割れ 発生強度	曲げ強度	
	(N/mm²)	(N/mm²)	(N/mm²)	
圧送前	202	17.2	44.5	
圧送後 206		18.5	43.1	
目標値 ¹⁾	180以上	13.6以上	25.1以上	

表-4 実験ケース

輸送管 の種類	輸送管の長さ(m)		(m)	吐出量	
	全長	鋼製	ゴム製	(m³/h)	
鋼製	20	20	—	0.75, 1.00, 1.50	
	24	24	-	0.75, 1.00, 1.50	
	28	28	—	0.75, 1.00, 1.50	
	32	32	-	0.75, 1.00, 1.50	
	20	10	10	0.75, 1.00, 1.50	
御制 」 ― 、/ 制	24	14	10	0.75, 1.00, 1.50	
判 衆十コム衆	28	18	10	0.75, 1.00, 1.50	
	32	22	10	0.75, 1.00, 1.50	



4.2 実験結果

鋼製の輸送管を用いたケースの管内圧力の測定結果を 図-5に、ゴム製を用いたケースの結果を図-6に示す。 鋼製の輸送管を用いた場合は、ポンプからの距離の増加 に伴い、ほぼ直線的に管内圧力が低下することが確認で きた。また、圧送距離が長くなるほど、ポンプ近傍の管 内の圧力も増加する傾向が認められた。鋼製とゴム製の 輸送管を併用した場合は、鋼製からゴム製に切り替わっ た段階で管内圧力が低下する勾配が変化しており、ゴム 製の方が、圧送負荷が増大することが確認された。その ため、同一の圧送距離のケースで比較すると、鋼製のみ の場合に比べて、鋼製とゴム製を併用した方が、ポンプ 近傍の管内圧力が大きかった。圧送距離が 32m のケース においてもゴム製の輸送管に切り替わる箇所での管内圧 力は3~4MPaの間であった。ゴム製の輸送管は鋼製に比 べて耐圧性が低いが、ポンプ近傍ではなく配管の先端に 配置することで発生する管内圧力を抑えることができ, 鋼製との併用が可能である。

鋼製のケースおよび鋼製とゴム製を併用したケース の両者とも,圧送距離が32mのケースについては,鋼繊 維のファイバーボールが発生し,モルタルと鋼繊維の分 離が認められ,安定した圧送が難しいことが判った。

圧送距離が 20~28m のケースにおけるフロー試験の 結果を図-7 に示す。圧送前のフローに比べて圧送後は フローが低下する傾向が認められた。また,吐出量の増 加に伴い,フローが低下する傾向があり,吐出量 1.5m³/h のケースについては,フローの低下量が大きかった。フ ロー試験の状況の例を**写真-4**に示す。圧送に伴い流動



写真-4 フロー試験の状況の例

性が低下したが、特にファイバーボールも認められず、 十分な流動性を有していた。吐出量1.5m³/hにおいても、 施工が可能であると考える。圧送距離20~28mの範囲で は、圧送距離の違いによる有意な差は認められなかった。

5. 圧送実験(シリーズ皿)

5.1 実験概要

シリーズIIIの実験では、実際の床版の接合部へ圧送す ることを想定した配管を用いて圧送を行った。床版の接 合部への圧送方法の概要を図-8に示す。以下のとおり、 実際に想定する配管を模擬して実験を行った。

- a) 床版上面に設置したポンプ排出口から壁高欄の 上まで上り配管
- b) 壁高欄の上から桁下まで下り配管
- c) 桁下を取りまわすための水平配管
- d) 桁下から床版までの上り配管

シリーズ I および II の結果から, 圧送負荷を低減する ために, できるだけ鋼製の輸送管を用いることとし, 水 平方向の移動をしやすくするために, 一部水平配管のみ 10m のゴム製の輸送管を使用した。圧送距離は 21m と した。圧送実験の概要を図-9 に示す。シリーズ II の結 果から, できるだけ吐出量を大きくすることとし, 1.00, 1.25 および 1.50m³/h の 3 水準で実験を行った。

圧送前後でモルタルの品質を確認した。試験項目は, フロー試験(JISR 5201 落下無し),圧縮強度試験(直径 50×長さ100mmの供試体,JISA 1108)および曲げ強度 試験(縦100×横100×長さ400mmの供試体,JISA 1106) とした。モルタルの温度は24℃程度であった。

5.2 実験結果

いずれの吐出量のケースにおいても、鋼繊維のファイ バーボールは認められず、良好な状態で圧送することが できた。管内圧力の測定結果を図-10に示す。シリーズ IIと同様に吐出量の増加に伴い、管内圧力が増加した。 上り配管部とゴム製の水平配管部は、管内圧力が低下す る勾配が大きい結果となった。

モルタルの品質試験結果を図-11 および図-12 に示 す。圧送前に比べて、圧送後はモルタルのフローが低下 した。また、吐出量が大きいほどフローの低下量も大き く、シリーズIIと同様の傾向を示した。圧縮強度、曲げ ひび割れ発生強度および曲げ強度については、圧送前と 圧送後で特に有意な差はなく、圧送後も材料の均一性が 確保されることを確認した。また、各目標値を十分上回 っており、UFC としての性能が確保されることが判った。

6. 圧送負荷のまとめ

シリーズ I ~Ⅲの結果から,管内圧力損失を算出し, 吐出量との関係を整理した。その結果を図-13 に示す。 吐出量と管内圧力損失の間には相関関係が認められた。 ゴム製の輸送管は鋼製に比べて,管内圧力損失が大きく なった。また。上り配管の場合,管内圧力損失が大きく



なり、下り配管の場合は、水平配管と同程度の圧力損失 であった。既往の実験で報告されているゴム製の輸送管 のデータを併記した ^の。既往のデータでは、有機繊維を 使用しているため、管内圧力損失が若干小さい値ではあ るが、概ね今回の実験結果と合致する結果であった。





図-13 吐出量と管内圧力損失の関係

7. まとめ

床版取替工事の効率的な施工に向けて,床版の接合部 への超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の圧送性を 確認するために,圧送実験を行った。実施工を想定した 配管とし,輸送管の種類,圧送距離,吐出量および配管 の方法が管内圧力損失に及ぼす影響を確認した。

今回の実験の結果,得られた知見を以下に示す。今後 は、実施工に向けて,実際の接合部を模擬した部材への 圧送実験を行い,充填性の確認や施工方法の検討を実施 する予定である。

- (1) 理論吐出量 7m³/h のピストン式ポンプと直径が 2 インチの輸送管を用いて, UFC の圧送が可能である。
- (2) 鋼製の輸送管は28m,ゴム製の輸送管は10mまでは、 鋼繊維のファイバーボールに起因する材料分離は認められず、安定した圧送が可能である。
- (3) 圧送により流動性が低下する傾向が認められたが、 硬化後の物性には特に影響はなく、圧送距離が28m であれば、所要の品質を保持しながら圧送が可能で ある。
- (4) ポンプ近傍に鋼製の輸送管を配置し、管内圧力が低下する箇所にゴム製の輸送管を配置することで、両者の輸送管の併用が可能である。
- (5) 実際の施工を想定して、上り配管、下り配管および 10m のゴム製の輸送管を組み合わせた配管にて圧送 した結果、圧送距離21mの圧送が可能である。
- (6) 鋼製の輸送管に比べてゴム製の輸送管の方が、管内 圧力損失が大きい。また、上り配管は、管内圧力損失 が増大する。
- (7) 吐出量の増加に伴い, 管内圧力損失も増加する。両者 の間には相関関係が認められる。

謝辞

本研究の実施にあたり,宇部興産株式会社ならびにア シス株式会社にご協力いただきました。関係各位に感謝 の意を表します。

参考文献

- 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, 2017.1
- 佐々木一成:急速施工を可能にしながら高い耐久性 を発揮するプレキャスト床版接合工法「スリムファ スナー[®]」の開発,セメント・コンクリート, No.862, pp.26-31, 2018.12
- 3) 後藤健二,富永高行,天野寿宣,青木峻二:新技術の適用により急速施工を実現した床版取替工事,コンクリート工学,Vol.58,No.4,pp.297-301,2020.4
- 4) 土木学会:コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版],コンクリートライブラリー135,2012.6
- 5) 石関嘉一,平田隆祥,渕田安浩,田中友博,古川正 典:常温硬化型 UFC のポンプ圧送試験および現場施 工,土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, V-198, 2011.8
- 西澤彩,川西貴士,武田篤史,平田隆祥:超高強度の繊維補強モルタルの圧送性に関する実験的検討, 土木学会第74回年次学術講演会講演概要集,V-508, 2019.8