

論文 床版接合部の施工における超高強度繊維補強コンクリートの圧送性 および充填性に関する研究

川西 貴士*1・岩城 孝之*2・仲田 宇史*3・村上 隆弘*4

要旨: 超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の圧送において、配管条件や吐出量が管内圧力損失に及ぼす影響を実験的に検討した。また、高速道路の床版取替工事における床版接合部を模擬したアクリル製の型枠内に UFC を圧送して打ち込み、充填性を確認した。その結果、管内圧力損失は、輸送管の直径が小さいほど、また吐出量が増加するほど増大すること、上向き配管の水平換算係数は輸送管の直径が大きいほど増大すること、UFC の圧送により床版接合部を模擬した部材に密実に充填でき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, 圧送性, 充填性, 床版接合部, 管内圧力損失, 水平換算係数

1. はじめに

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、床版取替を伴う大規模リニューアル工事が進められている¹⁾。

一方で、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いる。この対策技術として、優れた耐久性と高い強度特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²⁾。

高速道路のリニューアル工事においては、交通規制期間の短縮が求められる。交通量の多い都市部においては、比較的交通量の少ない夜間に1車線のみを規制して工事を行い、交通量の多い昼間は交通開放できる夜間半断面の床版取替工法が開発・実用化されている³⁾。従来の工法では、図-1の左側に示すように、プレキャスト床版 (以下、PCa床版と呼称) 同士の接合部の上部から UFC の打ち込みを行うが、この工法では、接合部の上部に、図-1の右側に示す UFC 製の上蓋を設置して、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 を圧送することにより充填して連結するものである。

UFC は粉体量が多く、高粘性の材料であり、かつ、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懸念される。

超高強度のコンクリートの圧送性に関しては、水粉体比 18~20%で圧縮強度 120N/mm²程度のコンクリートを対象とした知見が示されている^{4),5)}。さらに圧縮強度の高い UFC については、これまでに、直径2インチの輸送管 (以下、2B と呼称) を用いて UFC を圧送した実験結

果を報告している⁶⁾。しかし、施工の効率化や圧送負荷を低減する上では、より大きな直径の輸送管で圧送することが望まれるが、直径を変えた場合の圧送性や水平換算距離に関しては明らかにされていない。さらに、UFC を実際の接合部に圧送により充填した場合の充填性については知見がない。

そこで、本研究では、2B だけでなく、3インチの輸送管 (以下、3B と呼称) についても圧送実験を行い、輸送管の直径が圧送性に及ぼす影響も含めた形で総括的に実験結果を取りまとめた。また、実施工を想定した配管により、UFC の圧送性を確認するとともに、上り配管の場合の水平換算距離を確認した。さらに、実際に床版の接合部を模擬した型枠の中に圧送により充填を行い、接合部への充填性について確認を行った。

2. 実験ケースおよび使用資機材

2.1 実験ケース

実験は、3種類のシリーズで行った。実験シリーズの概要を表-1に示す。シリーズ I では、水平管を用いた場合の圧送性について確認を行った。輸送管の直径、輸

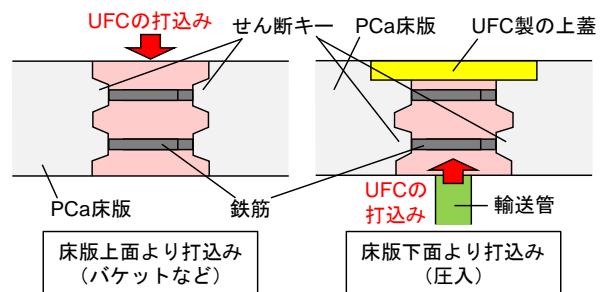


図-1 接合部の施工方法の比較

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部上席研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 生産技術本部橋梁技術部担当部長 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)

送管の種類、圧送距離および吐出量を変えて実験を行い、各圧送条件が管内圧力に及ぼす影響を確認した。

シリーズⅡでは、実際の施工を想定した配管の圧送性について確認を行った。シリーズⅡについても、輸送管の直径、輸送管の種類、圧送距離および吐出量を変えて実験を行った。

シリーズⅢでは、アクリル板を使用した実部材を模擬した型枠を用いた圧送実験により、接合部への充填状況を確認した。シリーズⅢについては、吐出量は同一とし、輸送管の直径、圧送距離を変えて実験を行った。

2.2 UFC の概要

実験には、一般的に適用されている UFC を使用した²⁾。UFC の構成材料は、反応速度の速いエーライト (C₃S) の多いポルトランドセメント、ボゾラン材および無機粉体をあらかじめ混合し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、粉体量が多く、高粘性の材料である。UFC のフローの管理値は、260±30mm (JIS R 5201 落下無し)とし、自己充填性を有する材料とした²⁾。ポンプのホッパーへの UFC の排出状況を写真-1に示す。

2.3 使用ポンプおよび輸送管

圧送には、定置式のコンクリート用ポンプを使用した。ポンプは油圧のピストン式とし、実際の施工量や配管を想定して、最大吐出量 7m³/h、最大吐出圧力 10.7MPa のポンプを使用した。使用したポンプを写真-2に示す。

実験には、2B および 3B の 2 種類を使用した。輸送管の材質として、耐圧 10MPa の鋼製および耐圧 2MPa (破裂 8MPa) のゴム製の 2 種類の輸送管を使用した。

3. 圧送実験 (シリーズⅠ)

3.1 実験概要

シリーズⅠでは、3 種類の配管パターンで実験を行った。実験に使用した配管の概要を図-2 に示す。実験には 2B および 3B の 2 種類の輸送管を使用し、配管の方向は水平配管とした。輸送管の種類は鋼製を基本とし、2B については、配管の先端に長さ 10m のゴム製の輸送管を使用したケースについても検討を行った。ポンプの理論吐出量は、2B、3B ともに 3 種類変えて実験を行った。

圧送距離は、2B は 28m、3B は 35m とした。輸送管の継手部には圧力計を設置し、管内圧力の分布を測定した。

3.2 実験結果

管内圧力の測定結果を図-3 に示す。普通コンクリートと同様に、輸送管の直径が大きい 3B の方が、2B と比べて管内圧力が小さい結果となった。また、2B については、先端にゴム製の輸送管を配置した方が鋼製のみの場合より管内圧力が増加する傾向が認められた。今回の圧

表-1 実験シリーズの概要

実験シリーズ	輸送管の直径	輸送管の種類	配管条件	圧送距離	ポンプの設定吐出量
シリーズⅠ			水平配管のみ	(2B) 28.2m (3B) 28.0m (3B) 35.0m	(2B) 0.75~1.5m ³ /h (3B) 1.0~3.8m ³ /h
シリーズⅡ	2B 3B	鋼製 (2B, 3B) 鋼製+ゴム製 (2Bのみ)	実施工を模擬した配管	(2B) 21.0m (3B) 35.6m	(2B) 1.0~1.5m ³ /h (3B) 1.0~3.8m ³ /h
シリーズⅢ			水平配管 上向き配管 下向き配管	(2B) 16.4m (3B) 34.7m	1.0m ³ /h

表-2 使用材料および配合

空気量 (%)	水粉体比 (%)	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg/m ³)
		水	専用プレミックス粉体	細骨材	高性能減水剤*	
	W/P	W	P	S	SP	SF
2.0	12.6	230	1830	331	22	157

*添加量は適宜調整



写真-1 UFCの排出状況



写真-2 使用したポンプ

送距離の範囲内では、実験に使用したポンプの能力で圧送可能であることが確認できた。

理論吐出量どおりに吐出されているかを確認するため、輸送管の先端より排出された UFC の吐出量を測定した。2B については、ポンプに設定した時間当たりのピストン数から算出される理論吐出量とほぼ同程度の量が吐出された。3B については、ポンプの理論吐出量より、実際の吐出量は低下した。そのため、輸送管の先端の出口より排出された UFC の吐出量を測定した。その結果、理論吐出量 1.0m³/h の場合は 1.0m³/h であったが、理論吐出量 2.6m³/h の場合で 1.1m³/h、理論吐出量 3.8m³/h の場合で 1.4m³/h となった。ピストン式のポンプは、引き抜いたシリンダ内に圧送するコンクリートやモルタル材料が供給され、シリンダを押し込むことでその材料を圧送する機械である。UFC は粘性が高く、引き出されたシリンダ内に短時間では充填できないため、供給される量が頭打ちとなり、理論吐出量を高めても実際の吐出量が増加しなかったと考えられる。3B の場合、管内圧力を低減できるため吐出量の増加を期待できるが、使用したポンプでは、吐出量は 1.4m³/h 程度が限界であった。

4. 圧送実験 (シリーズ II)

4.1 実験概要

シリーズ II の実験では、実際の床版取替工事における床版接合部への圧送を想定した配管として、実験を行った。床版接合部への圧送における施工の概要を図-4 に示す。実施工における圧送では下記の a)~d)の向きの配管を組み合わせたものになるため、これらを模擬した条件とした。

- 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
- 壁高欄の上から桁下まで下り配管
- 桁下空間を移動させるための水平配管
- 桁下から床版までの上り配管

実験に用いた配管の概要を図-5 に示す。シリーズ I の結果から、2B については、桁下空間における輸送管の移動をしやすくするために、水平配管部に 10m のゴム製の輸送管を使用した。3B については、2B の結果を踏まえて圧送負荷を低減するために、水平配管についても鋼製の輸送管を配置した。圧送距離は、2B については 21.0m とした。3B については、シリーズ I の結果から 2B より管内圧力を低減できるため、圧送距離は 35.6m とし、水平配管を長くした。吐出量については、2B、3B とともに 3 水準変えて実験を行った。

4.2 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、良好な状態で圧送できた。管

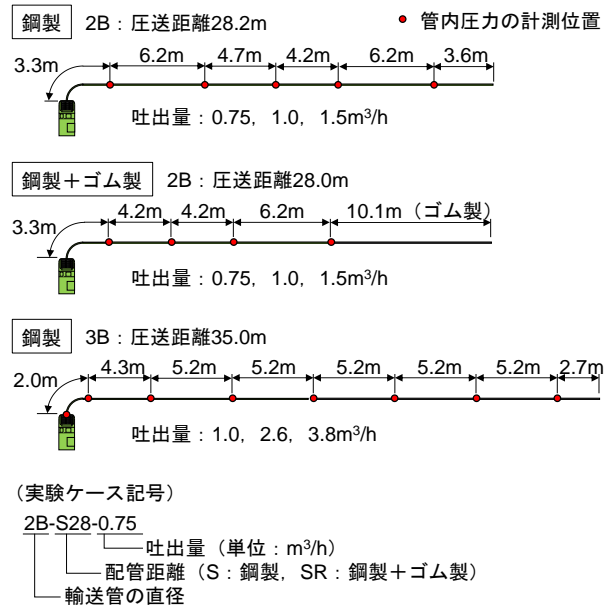


図-2 配管の概要 (シリーズ I)

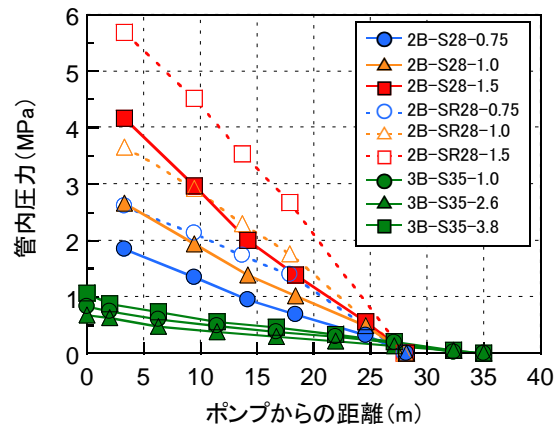


図-3 管内圧力の測定結果 (シリーズ I)

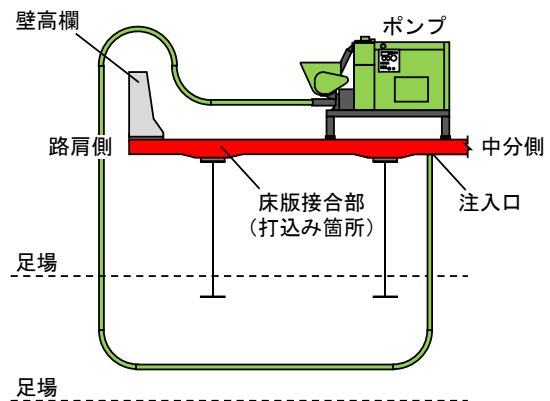


図-4 床版接合部への圧送における施工の概要

内圧力の測定結果を図-6 に示す。シリーズ I と同様に、2B の吐出量は、ポンプに設定した理論吐出量と同程度であったが、3B については、理論吐出量 1.0m³/h で 0.8m³/h、理論吐出量 2.6m³/h で 1.6m³/h となり、理論吐出量 3.8m³/h

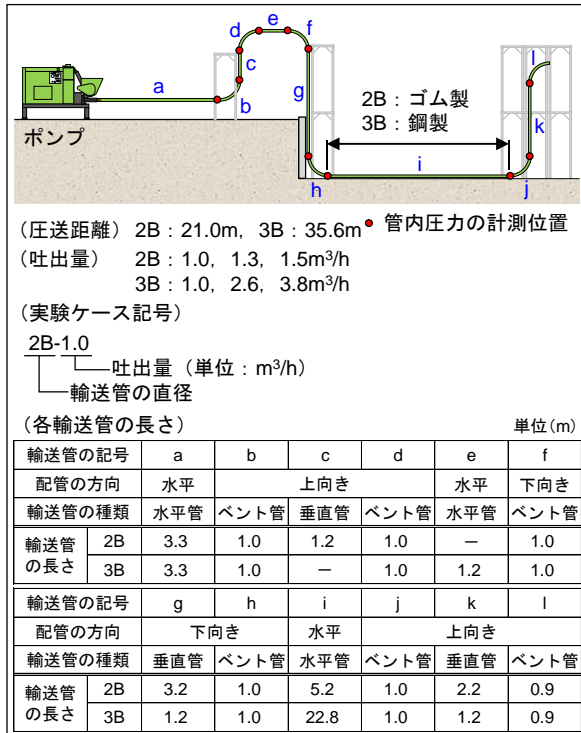


図-5 配管の概要 (シリーズII)

では 1.5m³/h であった。2B では、吐出量の増加に伴い、管内圧力が増大したが、3B では、理論吐出量 2.6m³/h と 3.8m³/h のケースにおいては、実際の吐出量がほぼ同等であったため、管内圧力に顕著な差は認められなかった。

3B は、2B に比べて管内圧力が低減された。2B および 3B の両者とも、上向き配管部は管内圧力損失の勾配が大きい結果となった。また、2B では、ゴム製の水平配管部も勾配が大きい結果であった。現場の施工を模擬して、上向き配管や下向き配管を設けた場合にも、無事圧送を行うことができた。

5. 管内圧力損失の算出

シリーズ I および II 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。実際に測定した吐出量と管内圧力損失の関係を図-7 に示す。ポンプ指針に示されている一般的な強度の普通コンクリートや、既往の文献に示されている圧縮強度 120N/mm² 程度の超高強度のコンクリートと同様に、圧縮強度 180N/mm² 以上の UFC においても、吐出量と管内圧力損失の間に相関関係が認められた⁴⁾。3B より 2B の方が、鋼製よりゴム製の方が、また、水平管より上向き垂直管の方が、管内圧力損失が増加することが分かった。下向き垂直管については、水平管と同程度の値であった。

各輸送管について、原点を通る一次関数で近似した直線と近似式を併せて記載した。3B の管内圧力損失は、2B と比べて水平管で 13%、上向き管で 18%、下向き管で 5% であり、3B を使用することで、圧送負荷が 8~9 割程度

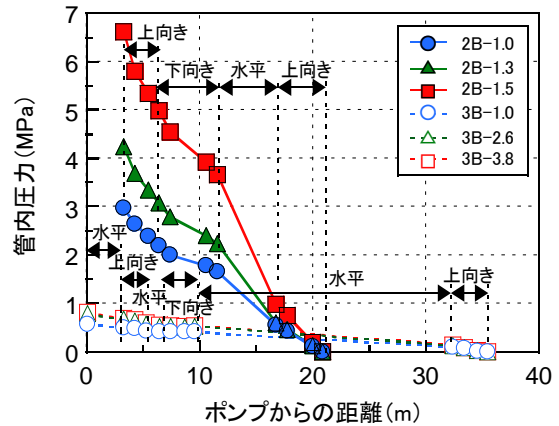


図-6 管内圧力の測定結果 (シリーズII)

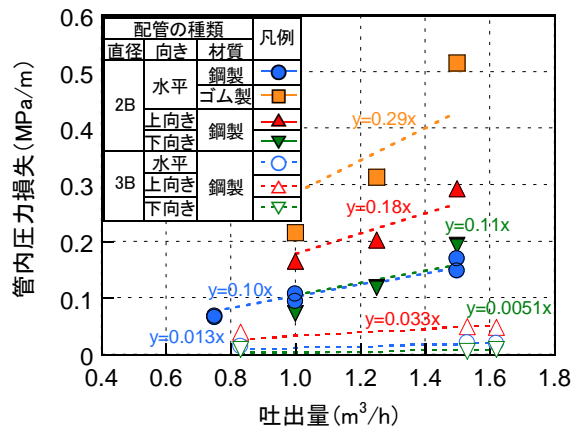


図-7 吐出量と管内圧力損失の関係

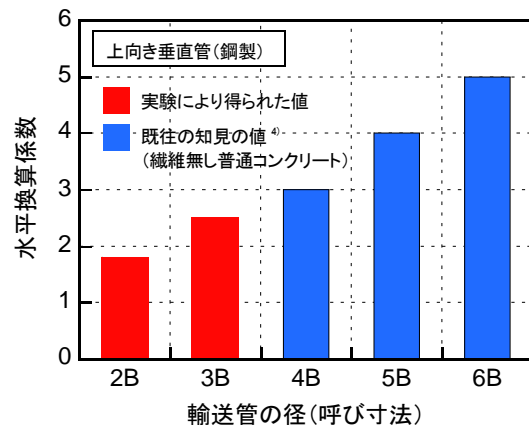


図-8 上向き垂直管の水平換算係数の比較

低減できることが分かった。鋼製の上向き垂直管について、水平管との比率を計算し、水平換算係数を算出した。輸送管の直径における水平換算係数の比較を図-8 に示す。比較として、ポンプ指針に示されている 4B~6B の輸送管の水平換算係数も併記した⁵⁾。直径が小さいほど、水平換算係数も低下しており、ポンプ指針と同様の傾向を示した。ポンプ指針では繊維のない普通コンクリートを対象としているが、UFC についても同様に扱える可能性がある。

今回得られた知見から、2B および 3B を使用し、吐出量 0.8~1.6m³/h 程度の範囲において、UFC の圧送が可能であることが分かった。ゴム製の輸送管を使用する場合には管内圧力が增大するため、注意が必要である。

6. 圧送実験 (シリーズⅢ)

6.1 実験概要

シリーズⅢの実験では、床版接合部の内部を模擬したアクリル板を用いた型枠へ圧送し、UFC の充填性の確認を行った。圧送時はアクリル板の外から目視にて、圧送後は脱型して充填状況を確認した。型枠の概要を図-9 に示す。型枠側面の片側はアクリル板のみとし、充填状況を確認できるようにし、もう片方の側面は、せん断キヤを模擬して発砲スチロールを設置した。水平方向については、PCa 床版に配置される軸方向鉄筋を模擬して、型枠内部に鉄筋を 2 段で配置した。鉛直方向については、図-1 に示す上蓋のプレートを固定するためのアンカーボルトを 1 箇所につき 2 本配置した。型枠の天端には、アンカーボルトを固定するための突起を設けた。

輸送管の直径は 2B および 3B の 2 種類で実験を行った。配管の概要を図-10 に示す。実際の施工を模擬して、型枠の下方から充填することとした。輸送管の種類は鋼製とし、上りや下りを含んだ配管とした。

2B, 3B ともに圧送は片側から開始し、片押しで充填を行った。2B については、充填させる型枠の延長を 12m とし、注入口を 3 箇所設置した。注入口の移動に伴い配管を移動させるため、取回しを考慮して水平方向にゴム製の輸送管を使用した。最初の注入口から圧送を開始し、次の注入口に UFC が到達した時点で、輸送管を接続しなおし、圧送を継続した。3B については、型枠の延長を 5m とし、注入口を 1 箇所とした。注入口の位置、配管の方向および輸送管の種類や長さを図-10 に併記した。

シリーズⅠおよびⅡの実験結果から、圧送距離は 2B では 16.4m, 3B では 34.7m とした。吐出量は、2B および 3B ともに 1.0m³/h とした。実際の施工では締固めを行うことはできないため、型枠パイプレータなどの振動は与えず、圧送のみで充填させた。型枠の両端の上部には、空気を抜くための排出口を設置した。

6.2 実験結果

2B, 3B ともに圧送途中で閉塞することなく、順調に圧送することができた。図-10 に示す箇所(端部と中央部)にて撮影したアクリル板から観察した側面の充填状況を写真-3 および写真-4 に示す。20 秒ごとに観察した UFC の表面の位置を黄色のラインで併記した。流動勾配は、打込みの初期は 15~30° 程度であるが、打込みが進むにつれて勾配が大きくなり、後半は 30~45° 程度の勾配で充填された。後半は若干流動性が低下したのものと

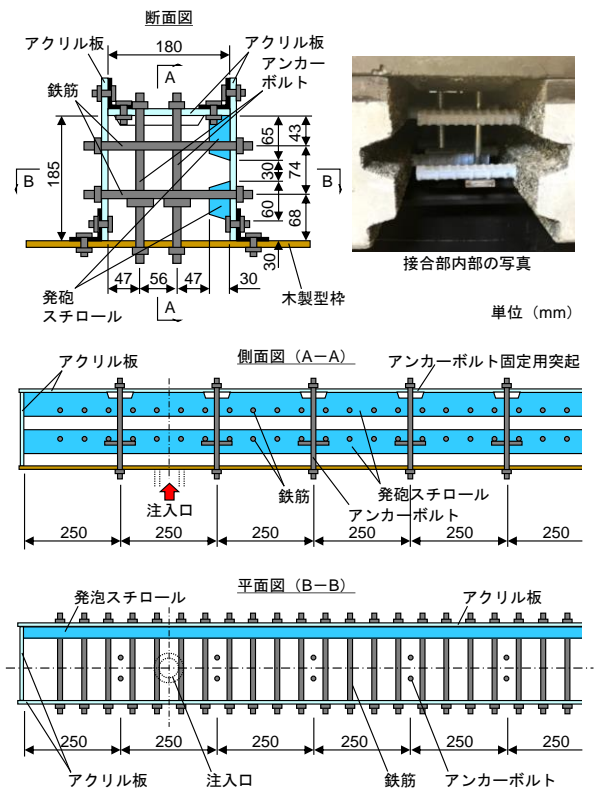


図-9 アクリル板を用いた型枠の概要

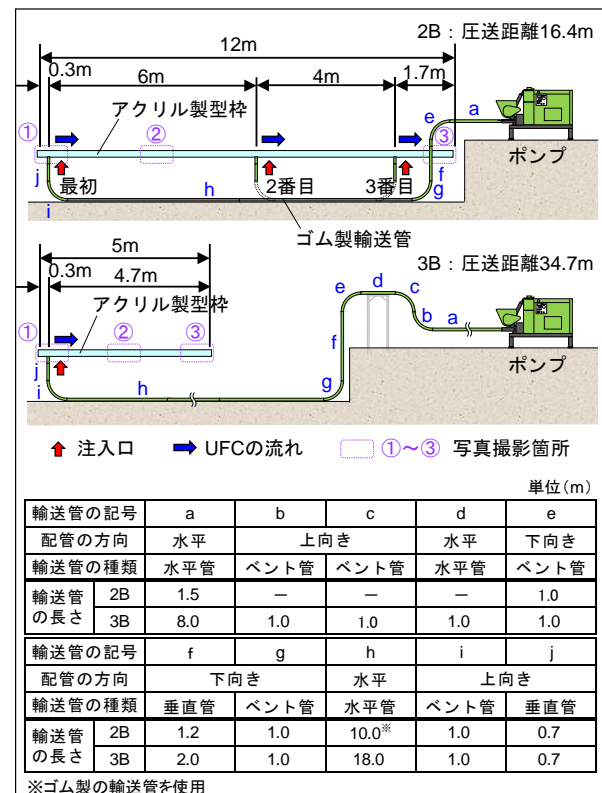


図-10 配管の概要 (シリーズⅢ)

考えられる。両端部の上部に設けた排出口より排出されたことを確認して排出口を閉じて圧送を終了した。特に大きな空隙などは発生せず、密実に充填されていた。

側面と同様に、図-10 に示す端部と中央部について撮

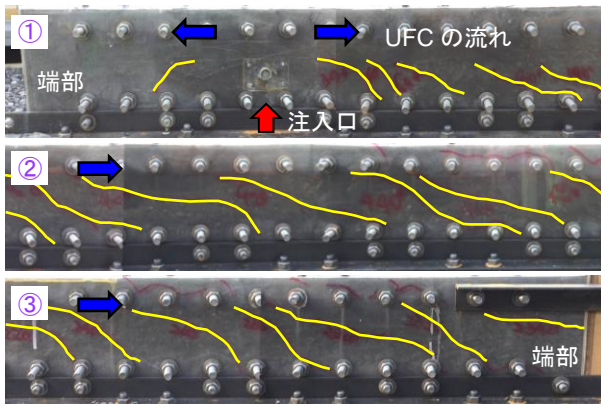


写真-3 充填状況 (型枠側面：2B)

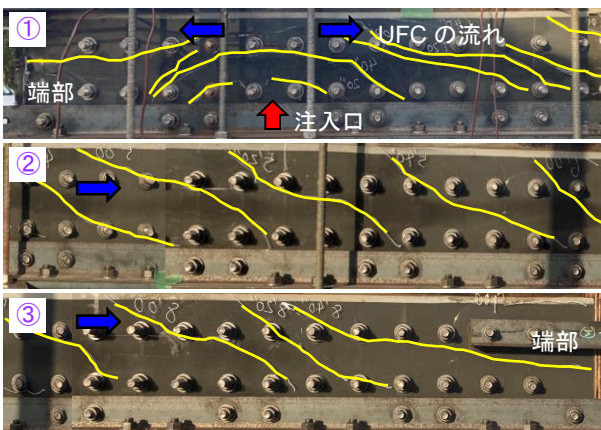


写真-4 充填状況 (型枠側面：3B)

影した脱型後の試験体天端の状況を写真-5 および写真-6に示す。深さ1mm程度の空気泡が認められたが、大きな空隙や未充填部は認められず、良好な充填性が得られることが確認できた。上蓋のプレートに設置されているアンカーボルトの固定用突起の周辺についても特に空気あばたは認められず密実に充填されていた。

7. まとめ

床版取替工事における床版接合部へ超高強度繊維補強コンクリート (UFC) を圧送して充填させる工法の確立を目的に、輸送管の種類、吐出量、配管の向き、圧送距離などの条件を変化させた圧送実験を行った。また、接合部を模擬した型枠に UFC を圧送し、充填性を確認した。実験により得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大吐出量 7m³/h のピストンポンプを用いた場合、輸送管の直径が2インチでは28m、3インチでは36mの圧送が可能である。
- (2) 管内圧力損失は、輸送管の直径が小さいほど、吐出量が増加するほど増大し、ゴム製の輸送管の方が鋼製の輸送管に比べて大きい。
- (3) 3インチの輸送管を使用することで、2インチの輸送管と比べて、管内圧力損失を8~9割程度に抑えることができ、圧送負荷を大幅に低減できる。

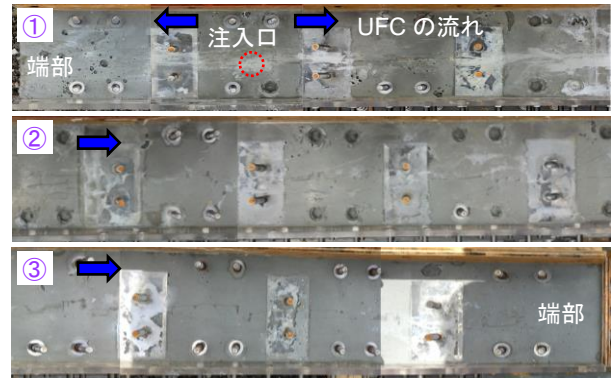


写真-5 脱型後の充填状況 (天端：2B)

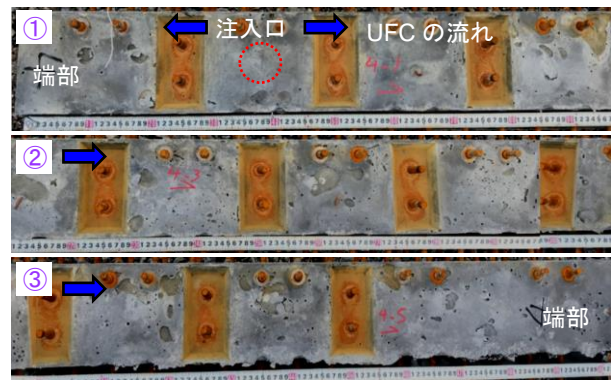


写真-6 脱型後の充填状況 (天端：3B)

- (4) 上向き垂直管の水平換算係数は、輸送管の直径が大きいほど大きく、吐出量 0.8~1.6m³/h の範囲において2インチでは1.8、3インチでは2.5となった。
- (5) 床版の接合部の配筋やアンカーボルトを模擬した型枠内に、両端部に設けた排出口から空気を抜きながら片押しで圧送することで、密実に充填できる。

参考文献

- 1) 長谷俊彦：高速道路橋における長寿命化の取組み、コンクリート工学, Vol.57, pp.329-334, 2019.5
- 2) 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
- 3) 岩城孝之・仲田宇史・川西貴士・村上隆弘・酒井修平・小野聖久：夜間1車線規制下での床版取替工法の技術開発と施工 - 中央自動車道弓振川橋床版取替工事 -, 橋梁と基礎, Vol. 5, pp. 21-25, 2021.5
- 4) 渡部孝彦, 島崎利孝, 臼井達哉, 武田均：超高強度繊維補強コンクリートのポンプ圧送性, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.898-903, 2023.6
- 5) 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
- 6) 川西貴士・岩城孝之・仲田宇史・村上隆弘：超高強度繊維補強コンクリートの圧送性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, pp.179-184, 2021.6