論文　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

臼井　達哉[*1]・木ノ村　幸士[*1]・坂本　淳[*2]・斎賀　雄[*3]

要旨：重複複数シールドによる地下空間構築工法における中詰コンクリートに適用する鋼繊維補強高流動コンクリートの配合選定行いポンプ圧送試験を実施し，圧送によるフレッシュ性状，圧縮強度等の品質の変化，圧送可能距離について評価した。その結果，圧送によるスランプフローの低下量は，通常の高流動コンクリートと比較し非常に大きく，自己充填性を確保できる圧送可能距離，吐出量は，水平換算距離 200m，吐出量 25m^3/h であった。また，自己充填性を確保できる範囲においては，圧送前後の圧縮強度，引張軟化曲線で大きな差がないことが明らかになった。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート，高流動コンクリート，圧送性，管内圧力損失，水平換算距離

1. はじめに

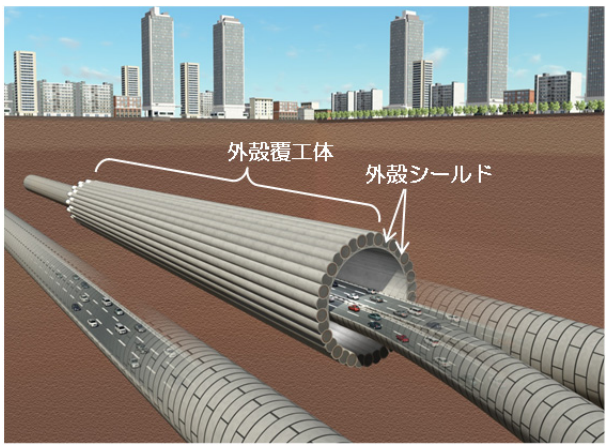
重複複数シールドによる地下空間構築工法は，多数の小断面シールド（外殻シールド）を重ねあわせて一体化し，大断面の外殻覆工体を構築した後に内部土砂を掘削することで，非開削で大空間を構築することができる技術である（**図－1**）[1)]。その中で，外殻シールド内に充填する中詰コンクリートは，せん断補強鉄筋のない構造とするため，土木学会「鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）」[2)] をもとに鋼繊維を 1.0vol%添加した鋼繊維補強コンクリートを用いることを想定している（**図－2**）。

この鋼繊維補強コンクリートは，シールド内を確実に充填するために自己充填性が求められ，加えて想定される施工条件では，水平換算距離 200m 以上の長距離圧送が必要となる。このことから，中詰コンクリートは，長距離圧送が可能な自己充填性を有する鋼繊維補強高流動コンクリートとなる。しかし，鋼繊維を 1.0vol%添加した鋼繊維補強高流動コンクリートの圧送性に関する報告事例は極めて少ない[3), 4)]。

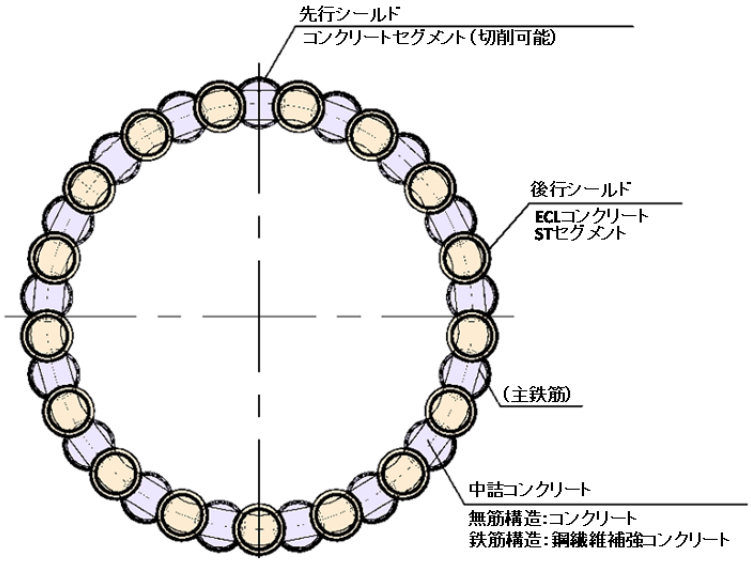
そこで，本研究では，鋼繊維を 1.0vol%添加した鋼繊維補強高流動コンクリートの配合を選定し圧送試験を行った。試験では，実施工を想定した長距離圧送を実施し，圧送前後のフレッシュ性状，硬化物性等の品質の変化および管内圧力を測定し自己充填性を確保できる圧送可能距離について評価した。本研究では，本検討において得られた結果について報告する。

2. 鋼繊維補強高流動コンクリートの目標値

圧送前（荷卸し時）の品質目標値を**表－1**に示す。長距離圧送を前提としたコンクリートであることから，スランプフローは材料分離抵抗性が確保できる範囲の中で高い流動性となる目標値 700mm を設定した。また，中詰コンクリートの施工部位では，主鉄筋が約 200mm 間隔での配置が想定されていることから自己充填性ランクをランク 2 とした。



図－1　工法のイメージ図



図－2　外殻覆工体の構造例

*1 大成建設（株）　技術センター土木技術研究所土木構工法研究室　修（工）　（正会員）
*2 大成建設（株）　技術センター土木技術研究所土木構工法研究室　博（工）　（正会員）
*3 大成建設（株）　東京支店

3. コンクリートの配合と製造方法

3.1 使用材料とコンクリートの配合

使用材料を**表－2**，コンクリートの配合を**表－3** 示す。セメントは，普通ポルトランドセメントを使用し，材料分離抵抗性は石灰石微粉末を使用することで確保した。鋼繊維は，長さ 30mm，アスペクト比 40 のものを 1.0vol%添加した。粗骨材の単位絶対容積は，室内試験における U 形容器を用いた充填試験（以降，U 形充填高さ試験と記載）結果をもとに自己充填性ランク 2 を確保可能な量としている（**図－3**）。混和剤は，高性能 AE 減水剤[標準型]および減水剤[遅延型]，空気量調整剤を用いた。また，製造時の骨材の表面水の変動によるフレッシュ性状の安定性を考慮し，増粘剤を使用した。

3.2 コンクリートの製造方法

製造方法の概要，ベースコンクリートの製造方法を**図－4** に示す。

ベースコンクリートは，圧送試験実施場所である二次製品工場所有の二軸強制練りミキサ（容量 $2m^3$）により，$1.75m^3$/バッチとして製造した。トラックアジテータ車に $3.50m^3$ 積載しベースコンクリートの品質確認試験を実施後，投入機ベルトコンベアを用いて鋼繊維を投入した。鋼繊維は，1 袋 20 kgを 20 秒間隔の投入とし，投入時はアジテータを高速回転させた。全鋼繊維を投入後，120 秒間の高速撹拌を行った。

鋼繊維投入，撹拌によるスランプフローの低下，空気量の増加に対して鋼繊維投入後の品質確認試験結果をもとに高性能 AE 減水剤，空気量調整剤，遅延剤を適量トラックアジテータ内に後添加し，スランプフロー，空気量の調整を行った。

4. 実験概要

試験ケース，コンクリートの品質確認項目を**表－4** に示す。水平換算距離 200m，400m の輸送管の配置を**図－5**，圧力計と水平換算距離の関係を**表－5** に示す。水平換算距離は，土木学会「コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版]」[5] に記載されている普通コンクリートの水平換算係数で変換したものである。輸送管は 125A（5B）を使用している。

表－1　圧送前のコンクリートの品質目標値

項　目	試験方法	目標値
スランプフロー	JIS A 1150	700±50mm
500mmフロー到達時間	JSCE-F 503	3～15秒
空気量	JSCE-F 513	4.5±1.5%
U形充填高さ	JSCE-F 511	300mm以上 （障害条件：R2）
鋼繊維混入量	JSCE-F 554	1.0±0.2%
圧縮強度	JIS A 1132	40N/mm^2
破壊エネルギー	JCI-S-002	設計指針[2]

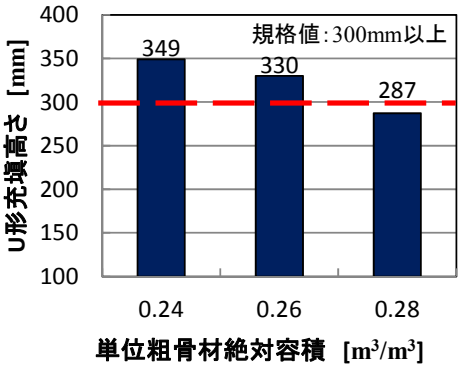
表－2　使用材料

記号	材料名	品　質
C	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm^3，比表面積3330cm^2/g
LP	石灰石微粉末	密度2.70g/cm^3，比表面積5120cm^2/g
S	細骨材	表乾密度2.60g/cm^3 吸水率　0.81%，FM2.74
G	粗骨材	表乾密度2.65g/cm^3 吸水率　0.62%，FM6.73
SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
Ad	減水剤（遅延形）	リグニンスルホン酸系
AE助	空気量調整剤	空気連行剤
		消泡剤
SF	鋼繊維	アスペクト比：40　長さ30mm
V	増粘剤	多糖類系増粘剤

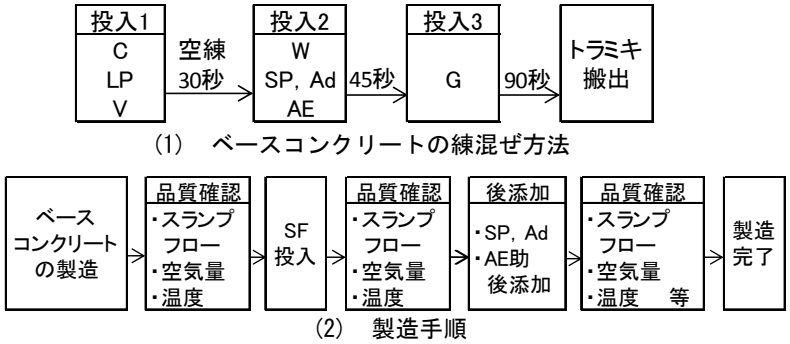
表－3　鋼繊維補強高流動コンクリートの配合

呼び強度	スランプフロー	air	W/C	s/a	Vg	単位量（kg/m^3）									
						W	C	LP	S	G	SP	Ad	AE助	V	SF
	(mm)	(%)	(%)	(%)	(m^3/m^3)						P×%	P×%	P×%		
40	700	4.5	50.0	58.4	0.24	175	350	290	837	636	0.80-0.93 [0.03-0.05]	0.5 [0.1]	適量 [適量]	0.1	80

[]内は，鋼繊維投入後の後添加量



図－3　室内における充填高さ試験結果



(1)　ベースコンクリートの練混ぜ方法

(2)　製造手順

図－4　コンクリートの製造方法

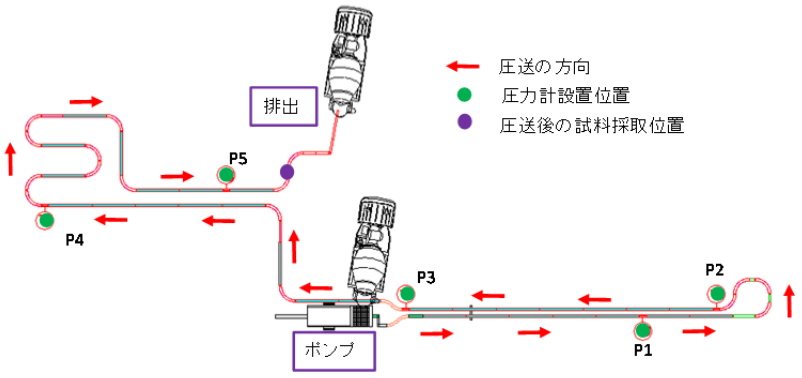
表－4　試験ケースとコンクリートの品質確認項目

測定項目	圧送前	200m圧送後 ケース1：25m³/h スランプフロー大	200m圧送後 ケース1：25m³/h スランプフロー小	200m圧送後 ケース2：35m³/h スランプフロー大	200m圧送後 ケース2：35m³/h スランプフロー小	ケース3 400m圧送後 35m³/h スランプフロー大
コンクリート温度	○	○		○		○
スランプフロー	○	○		○		○
500mmフロー通過時間	○	○		○		○
空気量	○	○		○		○
U形充填高さ(R2)	○	○		○		－
鋼繊維混入量	○	○		－		－
圧縮強度	○	○		－		－
破壊エネルギー	○	○		－		－

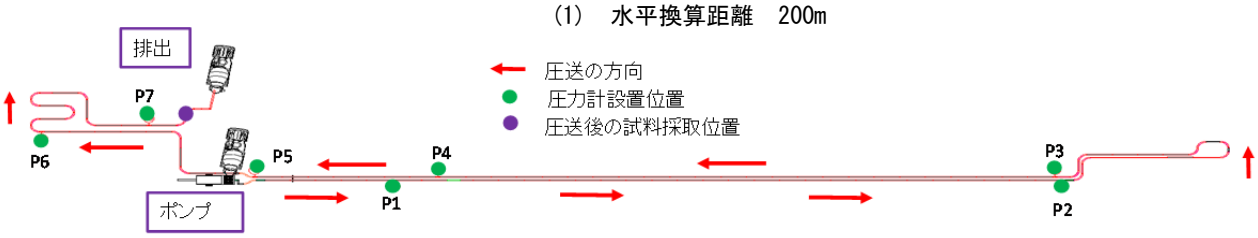
スランプフロー大：700-750mm，スランプフロー小：650-700mm

表－5　圧力計の設置位置

圧力計No.	水平換算長[m]	圧力計No.	水平換算長[m]
P1	33.0	P1	33.0
P2	65.8	P2	111
P3	87.3	P3	191.1
P4	130.8	P4	264.6
P5	198.3	P5	286.1
試料採取地点	207.3	P6	329.6
排出	239.7	P7	397.1
		試料採取地点	406.1
		排出	438.5



(1)　水平換算距離　200m



(2)　水平換算距離　400m

図－5　圧送試験における輸送管の配置

輸送管長，吐出量を検討要因とし，圧送前後の品質変化，管内圧力損失の変化を測定した。圧送前の試料については製造完了時の試料をプラスチック容器内に静置し，スランプフロー，空気量の経時変化を適宜測定した。

水平換算距離 200m の試験ケースについては，700-750mm，650-700mm とスランプフローの大小の違いによる圧送性の差異について検討している。吐出量は，実施工を想定し，25m³/h，35m³/h の 2 ケースとし，圧送試験時のコンクリートの吐出量は，ポンプのストローク数とストローク速度に圧送効率（0.85 と仮定[5]）を考慮することにより算出した。ポンプは最大吐出圧 22MPa，最大吐出量 102m³/h のものを使用した。

輸送管内の圧力を測定するにあたり，はじめに**表－3** 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，圧送前の品質確認試験が完了した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。管内圧力の測定が終了後に試料採取位置から圧送後のコンクリート試料を採取し，圧送後の各種品質確認試験を実施した。

5. コンクリートの品質確認試験結果

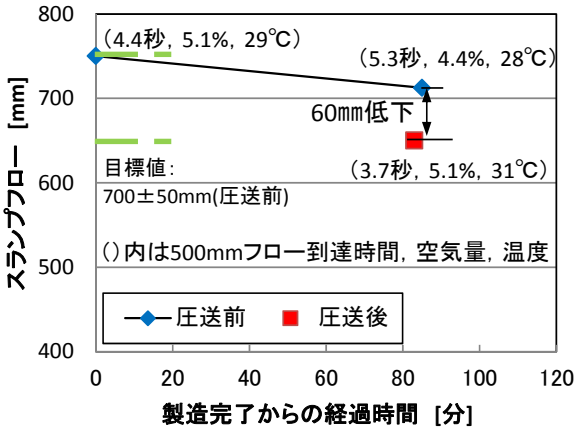
5.1 ケース 1 水平換算距離 200m－25m³/h

(1)　フレッシュ性状試験結果

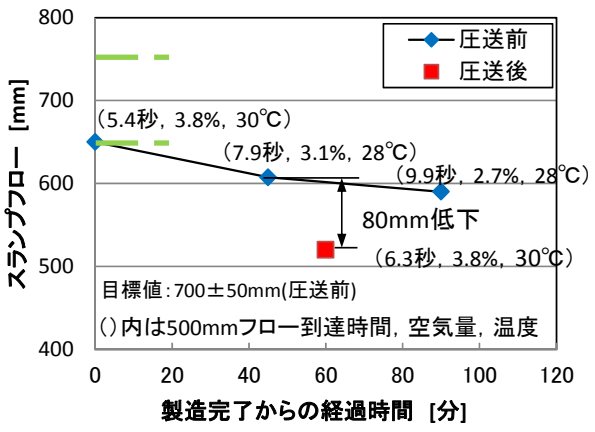
スランプフロー，500mm フロー到達時間，空気量の試験結果を**図－6**，U 形充填高さ試験結果を**表－6** に示す。

圧送後のスランプフローの低下量は，60～80 ㎜程度であり圧送前のスランプフローの大きさに関わらず同程度の値となった。また，500mm フロー到達時間，空気量は，スランプフローの大きさ，低下量に関わらず圧送前後でも大きく変化しない結果であった。

圧送前のスランプフローが 700-750mm と大きい場合



(1) スランプフロー700-750mm



(2) スランプフロー650-700mm

図－6 スランプフロー，500mm フロー到達時間，空気量の圧送前後の試験結果 [200m-25m³/h]

表－6 U 形充填高さおよび鋼繊維混入量の試験結果

試験項目	スランプフロー 700-750mm		スランプフロー 650-700mm	
	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
充填高さ(mm)	354	338	350	306
鋼繊維混入量(%)	0.95	1.04	0.92	1.01

には，圧送後においてもスランプフローが 650mm と高い流動性を有しており，加えて，U 形充填高さも 338mm であることから良好な自己充填性を有していることが確認できた。それに対して，圧送前のスランプフローが 650-700mm の場合では，経時的なスランプフローの低下もあったことから，圧送後にスランプフローが 520mm まで低下した。コンクリートの流動性が低下したため，充填高さは 306mm と目標値 300mm 以上を満足しているが，自己充填性は圧送前よりも大きく低下している。

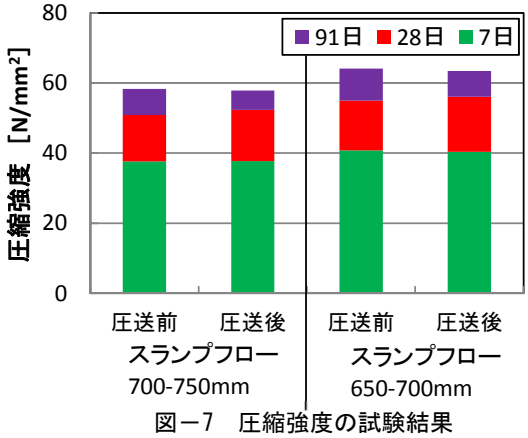
(2) 鋼繊維混入量

鋼繊維混入量の試験結果を**表－6** に示す。圧送前の鋼繊維混入量の方が圧送後の鋼繊維混入量よりも若干小さな値を示しているが，1.0±0.2%の範囲内にあることから，ポンプ圧送による変動は小さいと考えられる。

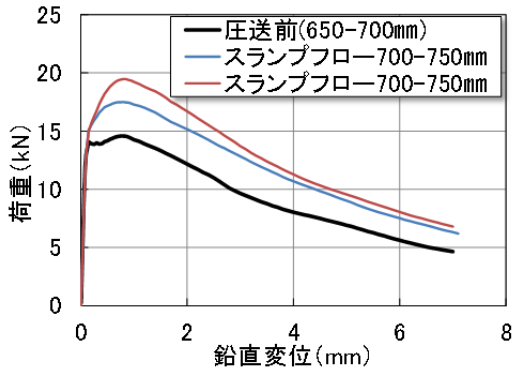
(3) 圧縮強度と破壊エネルギー試験

圧縮強度の試験結果を**図－7** に示す。それぞれの試験ケースとも圧送前後において圧縮強度は変化していない。このことからスランプフローは低下しているが，圧送によるコンクリートの脱水等の現象は発生していないと推測される。

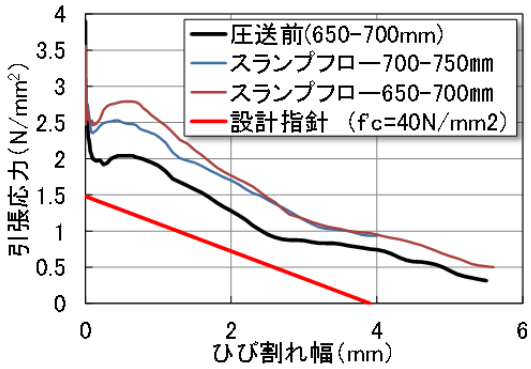
破壊エネルギー試験結果および破壊エネルギー試験結果得られた荷重－開口変位曲線を供試体中央に仮想ひび割れモデルを組み込んだ多直線近似解析法により逆解析し，算出された引張軟化曲線を**図－8** に示す。いずれの引張軟化曲線も設計指針[2)]における規定値を満足していることが確認された。引張軟化曲線は，圧送後の方が高い値を示しているが，これは採取した試料における鋼



図－7 圧縮強度の試験結果

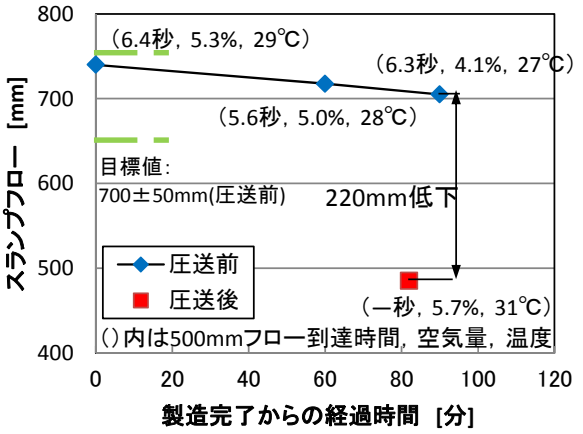


(1) 破壊エネルギー試験

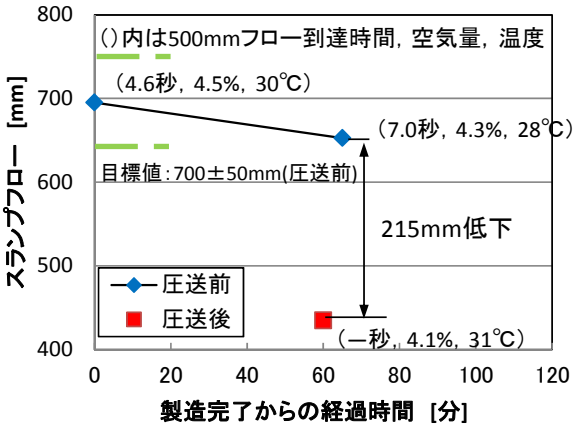


(2) 算出された引張軟化曲線

図－8 破壊エネルギー試験結果
および算出された引張軟化曲線



(1) スランプフロー700-750mm



(2) スランプフロー650-700mm

図－9 スランプフロー，500mm フロー到達時間，空気量の圧送前後の試験結果 [200m-35m³/h]

繊維混入量が若干多いことが要因であると考えられる（表－6）。

以上のフレッシュ性状，鋼繊維混入量，圧縮強度と破壊エネルギー試験結果を考慮すると圧送前のスランプフローを 700-750mm と大きくすることで，200m-25m³/h の圧送が可能であると評価できる。

5.2 ケース 2 水平換算距離 200m－35m³/h

スランプフロー，500mm フロー到達時間，空気量の試験結果を図－9，U 形充填高さ試験結果を表－7 に示す。

圧送後のスランプフローの低下量は，220mm 程度であり圧送前のスランプフローの大きさに関わらず同程度の値となった。圧送前のスランプフローが大きい場合でも，圧送後においてもスランプフローが 485mm と流動性が低下した。そのため，充填高さは目標値を満足しているが 302mm と低下している。圧送前のスランプフローが 650-700mm の場合では，経時によるスランプの低下もあり，圧送後には，スランプフローが 435 ㎜まで低下した。流動性が低下したため，充填高さも目標値を満足していない。500mm フロー到達時間は，圧送前後でも大きく変化しない結果であった。製造時のスランプフローを 700-750mm と大きくしても，200m-35m³/h の圧送は難しいと評価できる。また，空気量は，スランプフローの大きさ，低下量に関わらず，圧送前後での変化は小さいことがわかった。

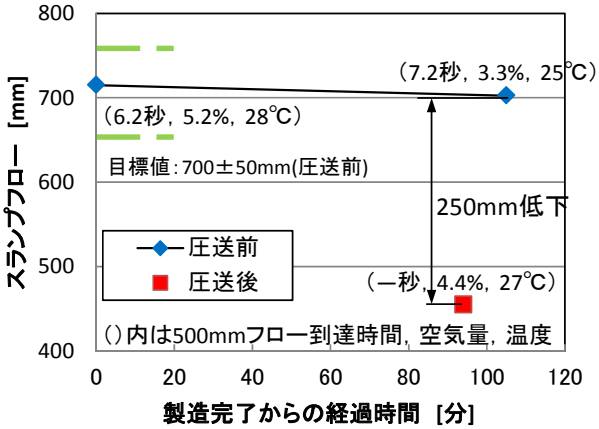
5.3 ケース 3 水平換算距離 400m－25m³/h

輸送管長 400m では，輸送管内に 25m³/h の履歴を受けたコンクリートを充填している途中でコンクリートの流動性の低下により輸送管内が閉塞した（図－10）。そのため，閉塞した個所のコンクリートを取り除いた後に 15m³/h の吐出量で再圧送を行った。15m³/h の吐出量で再圧送している途中で，図-3（2）に示す試料採取位置からコンクリート試料を採取し品質確認試験を行った。ポンプのストローク数からこの試料は，はじめに 25m³/h の吐出量で約 270m 圧送され，残りの約 130m を 15m³/h の吐出量で圧送されたコンクリート試料となっている。なお，輸送管長 400m の圧送試験では輸送管閉塞が発生したため輸送管内圧力を測定することができなかった。

表－7 U 形充填高さの試験結果

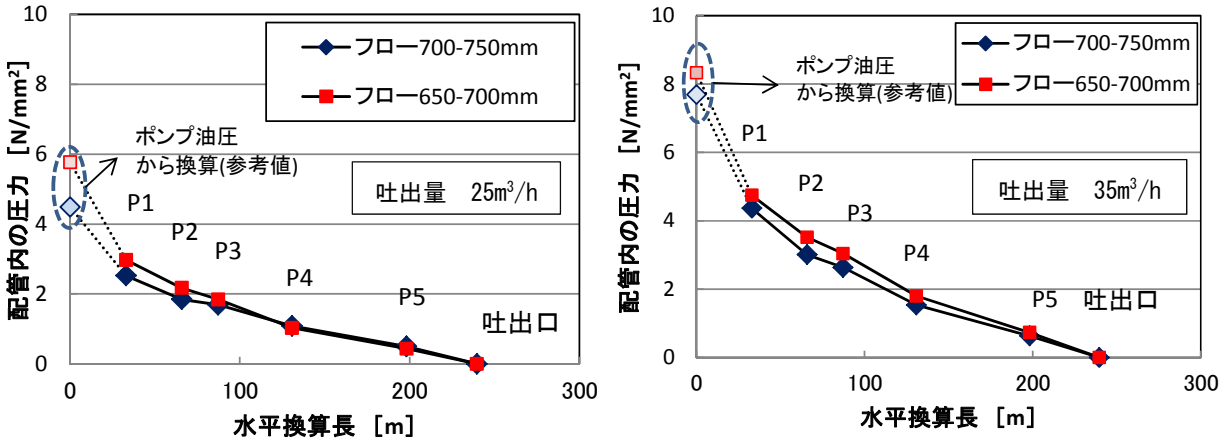
試験項目	スランプフロー 700-750mm		スランプフロー 650-700mm	
	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
充填高さ(mm)	354	302	350	283

図－10 閉塞状況 [400m-25m³/h]



図－11 水平換算距離 400m のフレッシュ性状試験結果

スランプフロー，500 ㎜フロー到達時間，空気量の試験結果を図－11 に示す。輸送管閉塞に伴い途中から 15m³/h の吐出量に低下したにも関わらず，スランプフロ



図－12　管内圧力の測定結果

ーは 250mm 低下しており，圧送距離が長くなることでスランプフローの低下量が大きくなることがわかった。また，これだけのスランプフローの低下量にも関わらず，空気量の変化は小さいことがわかった。

6. 輸送管内の圧力測定結果

輸送管長 200m における管内圧力の測定結果を**図－12** に示す。スランプフローが大きい 700-750mm のコンクリートを用いた方が，管内圧力が若干低下するがその差は小さいことがわかる。また，P1～吐出口までの勾配がほぼ一様であることがわかる。水平換算距離を算出する際には，ベント管等の換算長を含んでいることから，鋼繊維補強高流動コンクリートにおいても，一般的なコンクリートにおける水平換算係数を用いることができると考えられる。

管内圧力の計測結果から得られた単位長さ当りの圧力損失を**表－8** に示す。単位長さ当りの圧力損失は，P1～吐出口までの水平換算距離と輸送管内圧力の勾配から求めたものである。算出された単位長さ当りの圧力損失は，スランプフローが大きいほど，また吐出量が少ないほど小さい値を示した。また，単位長さ当りの圧力損失は，0.012～0.022MPa/m となっており，125A（5B）輸送管を使用した粉体系および併用系高流動コンクリートにおける単位長さ当りの管内圧力損失[5]と同程度であった。

7. まとめ

圧送試験を通じて，鋼繊維補強高流動コンクリートの圧送性，圧送前後のコンクリートの品質変化の確認を行った。その結果，以下の知見を得た。

(1) 圧送後のスランプフローの低下量は，圧送前のスランプフローの大きさによらずほぼ同程度であった。水平換算距離 200m 圧送時には，25m³/h で 60~80mm，35m³/h で約 220mm のスランプフローの低下量であった。それに対して，500mm のスランプフロー到達時間，空気量は，圧送前後において変化は小さかった。

(2) 圧縮強度と破壊エネルギー試験から算出した引張軟化曲線は圧送前後の大きな差はなかった。

(3) 本コンクリートは圧送前のスランプフローを 700-750mm と大きくすることで，200m-25m³/h の圧送は可能であると評価できる。

(4) 本コンクリートにおいても，一般的なコンクリートにおける水平換算係数を用いることができることがわかった。また，算出された単位長さ当りの圧力損失は，高流動コンクリートにおける単位長さ当りの管内圧力損失と同程度であることがわかった。

表－8　単位長さ当たりの圧力損失

スランプフロー：700-750mm		スランプフロー：650-700mm	
吐出量 [m³/h]	単位長さ当りの圧力損失 [MPa/m]	吐出量 [m³/h]	単位長さ当りの圧力損失 [MPa/m]
24.2	0.0115	23.4	0.0138
34.4	0.0198	34.0	0.0221

参考文献

1) 一般社団法人国土技術研究センター：リボルバー工法（重複複数シールドによる地下空間構築技術）建設技術審査証明事業報告書，2015.9

2) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー97，pp3-6，1999

3) 田中栄治他：鋼繊維を混入した高流動コンクリートのポンプ圧送性，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，V-336，pp.672-673，1996.9

4) 栗田守郎，田中博一：ECL 工法の一時覆鋼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状に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.767/V-64，pp174-184，2004.8

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