

高性能な流動化コンクリートの開発

神 代 泰 道 並 木 憲 司
(東京本店生産技術部)

Development of High-flowing Concrete with New Fluidity Agent

Yasumichi Koshiro Kenji Namiki

Abstract

High-flowing concrete having fluidity and material separation resistance was developed using a new fluidity agent. Adding it to normal concrete of slump 18cm in an agitator truck provided by a ready mixed concrete, high-flowing concrete of slump-flow 60cm could be manufactured in the construction site. Our Flowing concrete was examined for the applicability of the pump injection method for CFT(Concrete filled steel tube) using an actual-sized CFT. As a result, the quantity of bleeding water and settlement of high flowing concrete were less than the value of the CFT guideline. The pump pressure loss was less than the conventional flowing concrete. The filling situation inside CFT was good. It was confirmed that the developed flowing concrete using a new fluidity agent had the applicability of the pump injection method for CFT.

概 要

増粘成分を有する新規の流動化剤を用いて、高い流動性を有する流動化コンクリートを開発した。レディーミクストコンクリート工場で製造される呼び強度45以下の普通コンクリートに添加することで、高流動コンクリートを製造できる。この流動化コンクリートについて実大のCFT模擬柱を用いて圧入施工実験を行った。その結果、流動化コンクリートは所要のスランプフローを確保でき、ブリーディング量および沈降量はCFT造の指針の規定値以内であった。さらにポンプ圧送時の圧力損失は小さく、圧送後の流動性の低下も小さかった。鋼管内部の充填性は良好であり、CFT造の圧入工法に適用できることを確認した。

1. はじめに

鋼管にコンクリートを充填して柱として使用するCFT造は、構造性能、耐火性能に優れることから事務所ビル等の高層建築物をはじめ、工場や病院などの中低層建築物にも多く適用されている。鋼管柱内にコンクリートを充填する方法は、鋼管柱の下部に設けた圧入口から高流動コンクリートをポンプで圧入する工法が主流である。充填するコンクリートの流動性が十分でないと圧入中に閉塞が発生したり、鋼管柱内にコンクリートを隅々まで均質に充填するのが難しくなる。このため、単位セメント量を多くして流動性と分離抵抗性を高めた高流動コンクリートを用いることが多く、建物に要求される設計基準強度が36N/mm²以下の通常強度レベルであっても、強度レベルを上げた高強度コンクリートを用いることで対応してきた。

しかし、CFT造の普及に伴い、高強度コンクリートの製造実績のない地区や運搬距離の長い現場への高流動コンクリートの供給が課題になってきた。そこで、JIS A 5308レディーミクストコンクリートに適合する呼び強度45以下のスランプ18cm程度の普通コンクリートに対し、現場において新規の流動化剤を添加して従来よりも高い流動性と材料分離抵抗性を有する流動化コンクリートを開発した。本論文では、この高性能な流動化コンクリートを対象として、CFT造のポンプ圧入工法への適用性

を実験的に検討した結果を述べる。

2. 高性能な流動化コンクリートの概要

高性能な流動化コンクリートは日本シーカ株式会社と当社が共同開発した新規の流動化剤「シーカメント®OVSP」を用いる。この流動化剤は多糖類であるデュータンガムと曳糸性を有するポリアルキレンオキサイド系水溶性ポリマーの2種類の増粘成分と分散剤（ポリカルボン酸系）を組み合わせたもので、JIS A 6204「流動化剤」の規格に適合する。JASS5（2009）における流動化コンクリートは調合管理強度が33N/mm²以上の場合、ベースコンクリートのスランプは18cm以下、流動化後でスランプ23cm以下である¹⁾。従来の流動化剤をそのまま用いてこれより流動性を高めると材料分離のおそれがある。これに対して新規の流動化剤は増粘成分の効果により、高い流動性に見合う材料分離抵抗性を付与できるため、流動化後のスランプをさらに大きくでき、ブリーディングが少なく、均質性に優れる。また、流動化後の流動性の保持能力が高い。

単位セメント量を増加させずにコンクリートの流動性を高められるため、従来の高流動コンクリートに比べて水和発熱によるひび割れの発生リスクが低減され、経済性に優れる。トラックアジテータによる攪拌で製造可能であり、特別な装置・設備は不要で、従来のCFT造と

同様の施工設備(コンクリートポンプ車)で施工できる。

3. CFT造への適用性確認

3.1 概要

新規の流動化剤を用いた高性能な流動化コンクリートを対象に、CFT造の充填コンクリートの圧入工法への適用性を検討した。試験練りではフレッシュコンクリートの経時変化、ブリーディング量、沈降量等を確認した。流動化剤は、増粘成分の比率が異なる2種類とし、ベースコンクリートおよび従来の高流動コンクリートと性状を比較した。

3.2 コンクリートの調合

高性能な流動化コンクリートのベースコンクリートは、市中のレディーミクストコンクリート工場において供給できることを念頭において、呼び強度45以下とし、スランプ18cmとした。流動化剤は増粘成分の比率が異なるV1とV2の2種類とし、V2はV1より増粘成分の比率を高めたものとした。これをベースコンクリートに添加し、スランプフロー65cmの高流動コンクリートを製造した。従来の高流動コンクリートは単位セメント量を500kg/m³とし、スランプフロー65cmとした。

コンクリートの使用材料をTable 1に示す。セメントは高炉セメントB種、細骨材は陸砂、粗骨材は硬質砂岩を用いた。化学混和剤は高性能AE減水剤を用いた。コンクリートの調合をTable 2に示す。呼び強度40以上とすればほとんどのレディーミクストコンクリート工場において水セメント比は40%未満となる。そこで水セメント比は37.7%とした。C450は単位セメント量を450kg/m³とし、スランプ18cmのベースコンクリートである。C450_V1およびC450_V2は、C450に流動化剤V1、V2をそれぞれ添加したスランプフロー65±5cmの高性能な流動化コンクリートである。C500は単位セメント量を500kg/m³とし、スランプフロー65±5cmの従来の高流動コンクリートである。粗骨材のかさ容積は0.525m³/m³、空気量は3.0±1.5%とした。なお、ベースコンクリートの練混ぜ直後のスランプは20cmを目標とした。コンクリートの練混ぜは室内用二軸強制練りミキサを用い、セメント・骨材を投入後10秒空練りし、水・化学混和剤を投入してから90秒間練り混ぜた。流動化剤は、ベースコンクリートを練り混ぜてから15分後に添加し、60秒間練り混ぜた。

3.3 試験項目

フレッシュコンクリートの試験は、スランプ(JIS A 1101)、スランプフロー(JIS A 1150)、Oロート流下時間(JSCE-F512)、空気量(JIS A 1128)について行った。また、C500については製造後、C450_V1およびC450_V2については流動化後からそれぞれ30分、60分および90分でこれらの経時に伴う変化を確認した。硬化過程として凝結試験(JIS A 1147)、ブリーディング試験(JIS A 1123)、沈降試験(JASS5 T 503)、硬化コンクリートの性状とし

Table 1 コンクリートの使用材料

Materials		
種類	記号	概要
セメント	C	高炉セメントB種, 密度3.04g/cm ³
細骨材	S	陸砂, 表乾密度2.62g/cm ³
粗骨材	G	硬質砂岩碎石, 表乾密度2.64g/cm ³
水	W	上水道
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	V1	流動化剤
	V2	流動化剤 (増粘成分増)

Table 2 ベースコンクリートの調合

Mixture Proportions of Base-concrete							
記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (%)
			W	C	S	G	
C450	37.7	52.7	170	450	899	815	0.75
C450_V1	37.7	52.7	170	450	899	815	0.75
C450_V2	37.7	52.7	170	450	899	815	0.75
C500	34.0	51.4	170	500	856	815	1.30

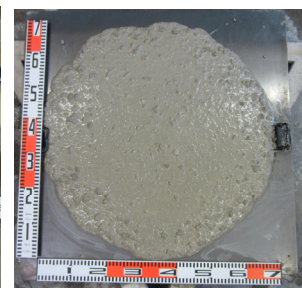
Table 3 フレッシュコンクリートの試験結果

Test Results of Fresh concrete					
記号	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	フロー時間 (秒)	空気量 (%)	Oロート (秒)
C450	19.5	33.5	-	3.4	-
C450_V1	20.0	35.0	-	3.6	--
	27.5	70.0	4.1/27.8	3.5	5.3
C450_V2	20.0	35.0	-	4.0	-
	27.5	69.0	5.0/27.3	4.5	6.8
C500	27.0	68.0	4.9/28.0	2.4	8.6

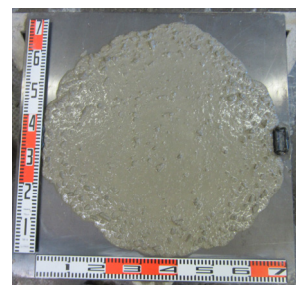
流動化剤の添加率: V1:C×0.5%, V2:C×0.8%
フロー時間: 50cm フロー到達時間/停止時間



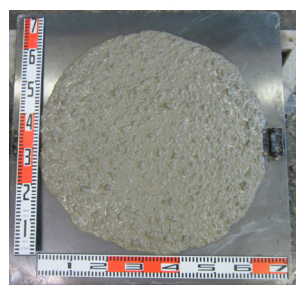
C450 (練混ぜ直後)



C450-V1 (流動化直後)



C450-V2 (流動化直後)



C500 (練混ぜ直後)

Photo 1 スランプフローの広がり状況

Test results of slump-flow

て圧縮強度(JIS A 1108)を実施した。試料採取後は20±3℃の温度で脱型まで静置した。

3.4 試験結果

3.4.1 フレッシュコンクリート 試験結果をTable 3に示す。流動化剤の添加率はV1でC×0.5%, V2でC×0.8%となり、増粘成分を多くしたV2の方が多くなった。スランプフロー試験における広がり状況をPhoto 1に示す。流動化コンクリートについては、流動化直後のスランプフロー値が許容値上限に近かったため、きれいな円形ではないが、粗骨材の偏在はなく、セメントペーストの先走りなど分離は認められなかった。

3.4.2 フレッシュコンクリートの経時変化 スランプフローとOロート流下時間の経時変化をFig. 1示す。C500については練混ぜからの変化を示した。スランプフローは時間の経過とともに低下するが、C500と同程度の保持性を示した。Oロート流下時間はC500よりも短く、粘性は小さい傾向を示した。

3.4.3 硬化過程 凝結時間、ブリーディング量および沈降量の測定結果をTable 4に示す。流動化コンクリートの凝結はベースコンクリートより1時間程度遅れ、C500より1時間程度早くなった。ブリーディング量はC500より多くなるが、ベースコンクリートよりも少なくなった。これは流動化剤の増粘成分がコンクリート中の自由水の粘性を高めたためと思われる。沈降量は、C450_V1ではベースコンクリートとほぼ同等となり、C450_V2では凝結が遅くなった分、大きくなった。なお、新都市ハウジン協会「コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説の運用及び計算例等」(以下、CFT指針)で規定されるブリーディング量は $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下、沈降量は2mm以下²⁾であり、流動化コンクリートはいずれも満足することを確認した。

3.4.4 硬化コンクリート 圧縮強度の試験結果をFig. 2に示す。流動化コンクリートの圧縮強度はベースコンクリートとほぼ同等であった。以上、新規の流動化剤を用いた高性能な流動化コンクリートのブリーディング量、沈降量はCFT指針の規定値を満足し、スランプフローの保持性能は従来の高流動コンクリートと同等であった。このことからCFT造の充填コンクリートへ適用できる見通しが得られた。

4. CFT実大施工実験

4.1 概要

実際のレディーミクストコンクリート工場(以下、生コン工場)においてベースコンクリートを出荷し、トラックアジテータに流動化剤を添加して流動化コンクリートを製造した。さらに実大のCFT模擬柱を用いて圧入施工実験を行い、高性能な流動化コンクリートに対するCFT造の圧入工法への適用性を確認した。

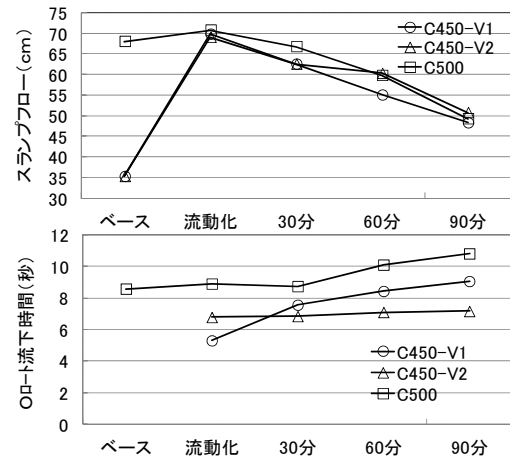


Fig. 1 フレッシュコンクリートの経時変化
Slumpflow and O-funnel time after mixing

Table 4 硬化過程の性状
Test Result of Setting time, Bleeding and settlement

記号	始発 (時:分)	終結 (時:分)	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)	沈降量 (mm)
C450	6:11	8:27	0.052	-1.13
C450_V1	7:05	9:21	0.032	-1.10
C450_V2	7:38	9:52	0.034	-1.39
C500	8:45	11:08	0.004	-0.97

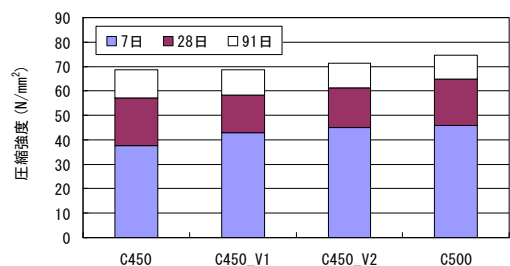


Fig. 2 圧縮強度
Compressive Strength of Concrete

4.2 コンクリートの調合

ベースコンクリートは当該生コン工場における呼び強度40、スランプ18cm、高性能AE減水剤を用いたコンクリートとした。なお、①粗骨材のかさ容積は $0.525\text{m}^3/\text{m}^3$ 、②空気量は3.0%、③回収水は使用しないことを指定した。ベースコンクリートの使用材料をTable 5に、調合をTable 6に示す。流動化剤は3章で検討したもののうちフレッシュ性状の安定性を考慮して増粘成分の多いV2を用いた。

4.3 実機試験練り

実機試験におけるベースコンクリートの練混ぜは容量 2.25m^3 の二軸強制練りミキサに材料を一括投入後、40秒間練り混ぜて排出し、トラックアジテータ(容量 4.0m^3)に 2.0m^3 積載した。練混ぜから30分後にベースコンクリートに流動化剤を添加した。流動化剤の添加は、Photo 2に示すように所定量を計量してから、トラックアジテータ

に投入し、中速（10rpm）で60秒間攪拌した。試験項目はスランプ（JIS A 1101）、スランプフロー（JIS A 1150）、Oロート落下時間（JSCE-F512）、空気量（JIS A 1128）、コンクリート温度（JIS A 1156）、ブリーディング試験（JIS A 1123）、沈降試験（JASS5 T 503）、圧縮強度（JIS A 1108）、静弾性係数（JIS A 1149）とした。標準養生供試体はJASS5に従い、成形後 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の温度で脱型まで静置した。

フレッシュコンクリートの試験結果をTable 7に示す。ベースコンクリートに対し、流動化剤の添加率を0.8%とすることで、所要のスランプフローおよび空気量が得られた。流動化後の経時に伴うスランプフローは90分後までほとんど低下がなかった。これは当日のコンクリート温度が 10°C 程度と比較的低かったことも保持の要因と考える。ブリーディング試験、沈降試験の結果をFig. 3に示す。ブリーディング量および沈降量はC F T 指針の規定値を満足した。圧縮強度はTable 8に示すようにベースコンクリートと流動化コンクリートには大きな差異はなかった。以上、生コン工場で製造されたベースコンクリートに対してアジテータトラックに流動化剤を添加することにより、高性能な流動化コンクリートを製造できることを確認した。

4.4 C F T 模擬試験体

CFT模擬柱はFig. 4に示すように高さ10m、 $\square$ -500×500mm、板厚22mmの角型鋼管とし、4層分の柱梁接合部を想定しダイアフラムを合計9枚設けた。ダイアフラムの板厚は22mmとし、中央に開口率15%（径200mm）の打設開口を設け、四隅に ϕ 30mmの空気孔を設けた。圧入口には誘導管を設置しなかった。

4.5 配管計画

Fig. 5に示すように配管は配管径5インチとし、圧入口までの配管長は109.5mとした。圧入速度は高さ1.0m/分とし、C F T 柱の圧入口を含む7点で管内圧力を測定した。ポンプはピストン式ポンプ車を用いた。

4.6 試験項目

コンクリート試験については、ベースコンクリートの荷卸し時、流動化後、筒先採取時、柱頭部採取時に行った。また、流動化直後、30、60および90分後にアジテータトラックから試料を採取し、経時によるフレッシュ性状の変化を確認した。配管には圧力計を設置し、管内圧力を測定した。圧入施工中はC F T 圧入管理システム「CFTpro Σ 」³⁾を用いて鋼管に作用する圧力と打設高さの管理を行った。C F T 模擬柱内に管内カメラを設置して、打込み状況を確認した。なお、打設高さはカメラの映像からダイアフラムの通過状況によって記録した。コンクリートが充分硬化してから、ダイアフラムを含む試験体を縦に切断し、目視によって充填状況を確認した。材齢91日においてC F T 模擬柱の中心部および外周部からコア供試体を採取し、圧縮強度および単位容積質量を

Table 5 使用材料

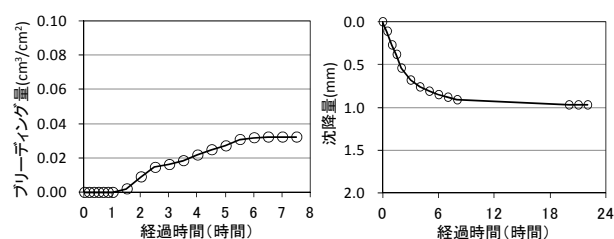
Materials		
種類	記号	概要
セメント	C	高炉セメントB種、密度 $3.04\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	S	千曲川水系川砂 表乾密度 $2.58\text{g}/\text{cm}^3$
粗骨材	G1	千曲川水系川砂利 表乾密度 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$
	G2	下濁川産山砂利 表乾密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$
水	W	地下水
混和剤	SP	高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）
	VSP	流動化剤 V2

Table 6 ベースコンクリートの調合
Mixture Proportions of Base Concrete

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					SP (%)
		W	C	S	G1	G2	
37.8	49.2	170	450	828	434	430	0.55

Photo 2 流動化剤の添加状況
Situation of addingTable 7 コンクリートのフレッシュ試験結果
Test Result of Fresh concrete

分類	状態	スランプ (cm)	スランプ・フロー (cm)	フロー 時間 (秒)	空気量 (%)	Oロート (秒)	コンクリート 温度 ($^{\circ}\text{C}$)
ベース	直後	20.5	-	-	2.5	-	10
	30分	20.0	-	-	2.5	-	10
流動化	直後	-	69.5	3.96/29.4	1.5	6.4	10
	30分	-	69.5	3.37/29.9	1.7	5.5	11
	60分	-	68.5	3.64/27.2	2.0	5.7	11
	90分	-	69.5	3.11/34.8	2.1	10.6	11

Fig. 3 ブリーディング・沈降試験結果
Test Result of Bleeding and settlementTable 8 圧縮強度
Compressive Strength of Concrete

分類	圧縮強度 (N/mm^2)			
	7日	28日	56日	91日
ベース	38.3	59.8	65.5	69.7
流動化	36.7	58.3	65.0	69.1

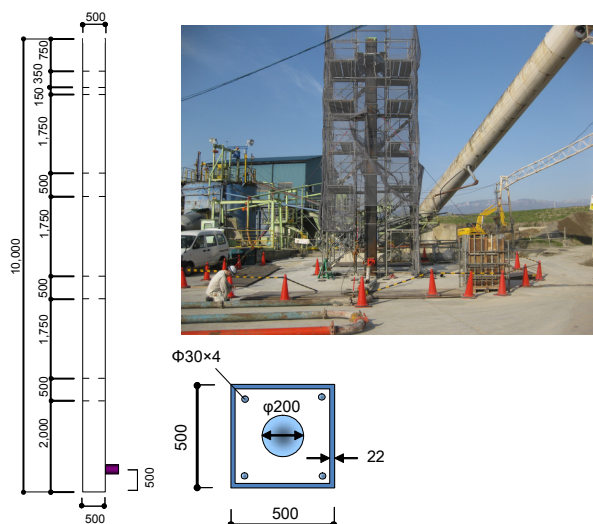


Fig.4 CFT模擬柱の概要
CFT mock-up models

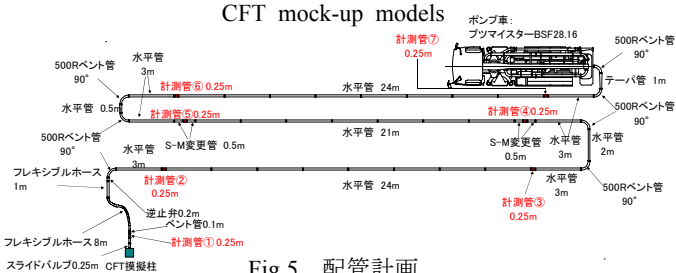


Fig.5 配管計画
Illustration of the pumping pipe

測定した。

4.7 試験結果

4.7.1 コンクリートの試験結果 コンクリートの試験結果をTable 9に示す。また、スランプフローの経時変化をFig. 6に示す。流動化後90分でもスランプフロー55 cmを保持できた。図中には筒先および柱頭部で採取した試料の試験結果を併記したが、経時変化を考慮してもポンプ圧送によるスランプフローの低下はなかった。これはポンプによる吐出量が10～15m³/hと小さいため、圧送による性状の変化が小さかったものと思われる。

4.7.2 管内圧力測定結果 Fig. 7に管内圧力の分布を示す。この傾きから算出される管内の圧力損失は3.4～3.8kPa/mであり、従来の単位セメント量を500kg/m³とした高流動コンクリートの10kPa/m程度⁴⁾と比較して小さかった。これはコンクリートの粘性が小さいため圧力損失も小さくなったものと思われる。圧入口に設置した圧力計の測定結果をFig. 8に示す。ダイアフラム通過による圧力の増大も見られず、鋼管に作用する圧力は液圧の1.1倍程度と従来の1.25倍²⁾以内であった。これは柱頭部で採取した試料のスランプフロー値から分かるように高い流動性が保持されたためと思われる。

4.7.3 打設状況 鋼管内のコンクリートの打設状況をPhoto 3に示す。ダイアフラムの通過状況は打設開口および四隅の空気抜き孔から同時にコンクリートが打ち上がり、ほぼ平面を保持しながら打ち上がる状況が確認で

Table 9 コンクリートの試験結果

Test results of concrete

採取 位置	経過 時間	スラン プ フロー (cm)	フロー時間 (秒)	Oポート (秒)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)	28日 圧縮強度 (N/mm ²)
ベース	0分	36.0	3.2/34	-	2.6	18	54.1
流動化	13分	68.0	4.5/13.4	6.6	1.6	18	54.0
筒先	51分	67.0	2.8/23.9	4.2	1.5	17	58.0
柱頭部	64分	65.5	3.2/34	4.4	2.1	17	57.5

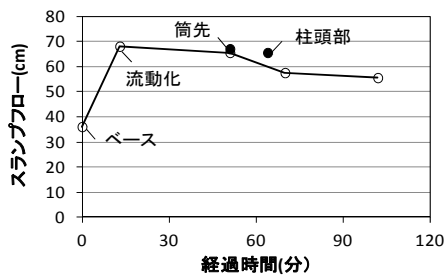


Fig.6 スランプフローの試験結果
Test Result of slumpflow

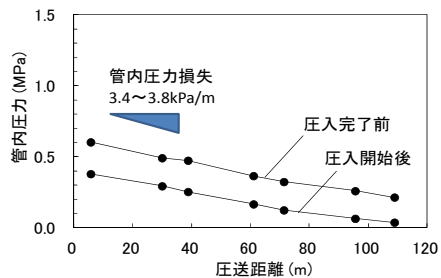


Fig.7 管内圧測定結果
Pumping pressure vs. conveying distance

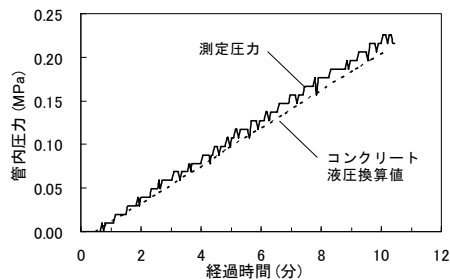


Fig.8 管内圧測定結果
Measured pressure inside steel tube

きた。

4.7.4 充填状況 硬化後、試験体を縦に切断してダイアフラム部の充填状況を目視で確認した。ダイアフラム間隔を150mmとした箇所における充填状況をPhoto 4に示す。部分的なエアだまりがあるが、密実な充填状況であった。

4.7.5 構造体コンクリート強度 Fig. 9に材齢91日におけるコア強度の分布状況を示す。単位容積質量は試験体下部ほど大きくなる傾向であった。圧縮強度も試験体下部ほど大きくなる傾向であるが、ダイアフラム部近傍において若干強度が低い部分が見られた。Table 10に圧縮強度試験結果を示す。材齢91日のコア供試体の圧縮強度は平均で 67.3N/mm^2 、標準偏差は 6.9N/mm^2 であった。

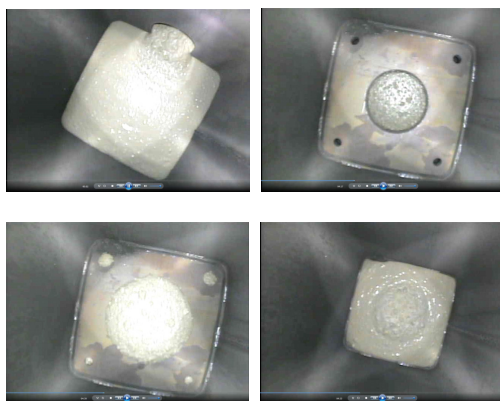


Photo 3 鋼管内の打設状況
Test Result of Bleeding and Setting time

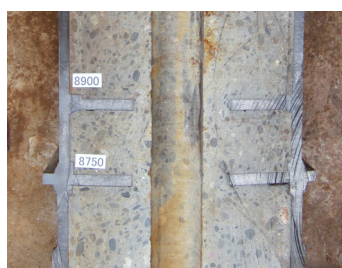


Photo 4 ダイアフラム部の充填状況
Filling quality at the diaphragms

コア強度はTable 9に示した材齢28日における標準養生供試体の強度 (54N/mm^2) より大きく、強度補正値 $_{28}S_{91}$ は 0N/mm^2 となった。またダイアフラム近傍と一般部の強度差は 5.8N/mm^2 であり、CFT指針におけるダイアフラム近傍の強度低下を考慮した補正値 Sc は 6N/mm^2 を採用すればよいことが分かった。

5. まとめ

新規の流動化剤を用いた高い流動性と材料分離抵抗を有する高性能な流動化コンクリートについて、CFT造における圧入工法への適用性を実験的に検討した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) レディーミクストコンクリート工場で製造された呼び強度40、スランプ18cmの普通コンクリートに新規の流動化剤を添加することによりスランプフロー65cmの高流動コンクリートを製造できた。
- (2) ベースコンクリートよりブリーディング量は低減し、流動化後のスランプフローの保持性能は従来の高流動コンクリートと同程度であった。
- (3) 流動化コンクリートのブリーディング量および沈降量はCFT指針の規定値を満足した。
- (4) ポンプ圧送による流動性の低下は小さく、圧力損失は 4kPa/m 以下であった。鋼管内部においてはほぼ平面を保持しながら打ち上がり、鋼管に作用する圧力はコンクリート液圧換算値の1.1倍であった。

Table 10 コア供試体の圧縮強度の試験結果

Results of compressive strength of core-specimens

分類	全体	一般部	ダイアフラム近傍
個数	84	52	32
平均値(N/mm^2)	67.3	69.5	63.7
最大値(N/mm^2)	78.5	78.5	72.7
最小値(N/mm^2)	48.7	51.6	48.7
標準偏差(N/mm^2)	6.9	6.2	6.5

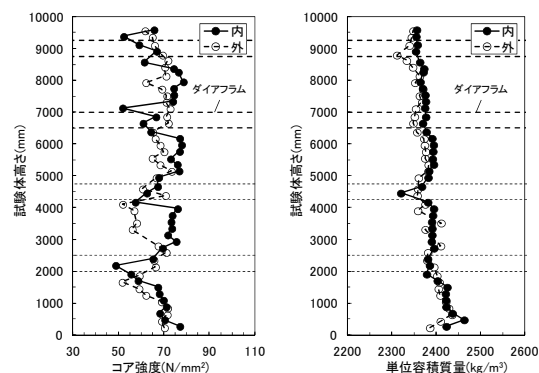


Fig. 9 コア強度と単位容積質量 (材齢91日)

Results of compressive strength and mass of unit volume of core-specimens

(5) 鋼管内部のコンクリートの充填性は良好であり、材齢91日におけるコア強度は平均で 67.3N/mm^2 であった。

以上のように本技術は、CFT造の圧入工法に適用でき、高強度コンクリートの製造実績がない地区や運搬距離の長い地域におけるCFT造の普及に役立つものと考ええる。

謝辞

本研究を進めるにあたり日本シーカ株式会社の方々には多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS5, pp.440～442, (2009)
- 2) 新都市ハウジング協会：コンクリート充填鋼管 (CFT) 造技術基準・同解説の運用及び計算例等, pp.2～36, (2009)
- 3) 神代泰道, 金子智弥, 内田茂, 並木憲司：CFT圧入施工管理システムの開発 (その1), (その2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.981～984, (2009)
- 4) 神代泰道, 都築正則, 一瀬賢一, 堀長生： $F_c=50\sim 120\text{N/mm}^2$ 級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, 大林組研究所報, No.70, (2006)