

超高強度コンクリートを用いたCFT圧入施工実験

神代 泰道 大池 武
川口 徹

Experimental Study on Application of Ultra High Strength Concrete for Filling CFT

Yasumichi Koushiro Takeshi Oike
Toru Kawaguchi

Abstract

In order to establish $F_c=100-120\text{N/mm}^2$ class CFT construction technology, Ultra-High-Strength Concrete was placed experimentally on a CFT full size specimen with inner diaphragms, by pump injection. Concrete aiming at $F_c=100\text{N/mm}^2$ using Blite-rich cement and a newly developed Hybrid admixture, and concrete aiming at $F_c=120\text{N/mm}^2$ using Silicafume premixed cement were tested. Concrete was manufactured at a conventional ready-mixed concrete plant. In the experiment, the pump pressure loss became larger than for conventional Self compacting concrete because of its high viscosity. However, the pressure on the steel column was the same level. Furthermore, filling of the steel columns was good even though the opening of the inner diaphragms and the size of the air hole were smaller than normal. The concrete reached the target strength.

概要

近年、CFT構造は高層建物から超高層建物へ用途が拡大し、コンクリートの設計基準強度も超高強度化が求められている。 $F_c=100 \sim 120\text{N/mm}^2$ に対応したCFT施工技術の確立を目的とし、超高強度コンクリートを用いて内ダイアフラムを有するCFT模擬柱に圧入施工実験を行った。コンクリートは、高ピーライト系セメントを用いて、練り混ぜ時に今回開発した複合混和材を添加して $F_c=100\text{N/mm}^2$ を目標としたものと、シリカフュームプレミックスセメントを用いて $F_c=120\text{N/mm}^2$ を目標としたものの2種類とし、それぞれ市中の生コン工場で製造した。圧入施工実験の結果、両コンクリートとも、施工性は良好で、従来の高流動コンクリートを用いた場合と比べて、高粘性のためポンプ圧力損失は大きくなるが、鋼管に作用する圧力は同程度であった。また、充填性についても、内ダイアフラムの開口率を10%と小さくし、板厚40mmに対して空気抜き孔を30mmとした条件でも良好であった。構造体コンクリート強度もそれぞれ目標とした強度を確保できた。

1. はじめに

近年、CFT構造は高層建物から超高層建物へ用途が拡大し、コンクリートの設計基準強度（以下、 F_c ）も超高強度化が求められている。筆者らは、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ についてコンクリートの調合設計法をほぼ確立¹⁾、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ についても超高層CFT建物へ適用した²⁾。 $F_c=100 \sim 120\text{N/mm}^2$ に対応したCFT施工技術を確立するためには、コンクリートの高粘性化にともなう、施工性および充填性の確保が課題となる。ここでは2種類の超高強度コンクリートを用いて、実大規模のCFT模擬柱へ圧入施工実験を行った結果について述べる。

2. 超高強度コンクリート

2.1 超高強度コンクリートの結合材

これまで $F_c=60 \sim 80\text{N/mm}^2$ のCFT充填コンクリートで

は、結合材として低熱ポルトランドセメントあるいはハイフローセメントなどの高ピーライト系セメントが主に用いられてきた。これらのセメントは、普通セメントと

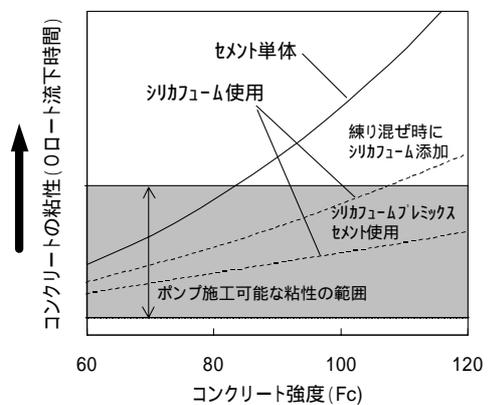


Fig. 1 コンクリートの F_c と粘性の概念図
Conceptual Figure of F_c and Viscosity

Table 1 超高強度コンクリートの結合材
Binder of Ultra High Strength Concrete

Fc	想定 W/P	結合材		
60~80	25~30%	セメント単体	シリカフューム 添加	シリカフューム プレミックス セメント
~100	20~25			
~120	20%以下			

比べると、発熱が小さいだけでなく、流動性と強度発現に優れる。このため高強度コンクリートへの適用事例は多い。しかし、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ 以上に適用するには、Fig. 1に示すようにセメント単体では、コンクリートの粘性が著しく高くなるため、打設が困難になる。そこでシリカフュームの使用が不可欠となる。シリカフュームは、主成分が SiO_2 で、平均粒径が $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ の超微粒子である。そのためセメント粒子間を充填し、最密充填効果が得られ、高性能減水剤との併用により、コンクリートの粘性を低減できる³⁾。さらにポゾラン反応によりコンクリートの強度を増進させる。

シリカフュームの使用方法としては、シリカフュームをコンクリート練り混ぜ時に添加する方法とセメントにプレミックスする方法の2種類ある。後者の場合、事前にセメント中にシリカフュームが均一に分散しているため、より粘性が低減され、超高強度化へも対応しやすくなる。Table 1に F_c ごとに対応する結合材の種類の目安を示す。

2.2 複合混和材の開発

シリカフュームをコンクリート練り混ぜ時に添加する方法では、シリカフュームが超微粒子であるため、飛散しやすく、ミキサ内での均一な練り混ぜが困難であった。また、シリカフュームのかさ密度が大きいいため、運搬・貯蔵の効率が悪く、取り扱い難かった。ここでは、これらを解決するため、シリカフュームと特殊な炭酸カルシウムを事前に混合した複合混和材を開発した。

この炭酸カルシウムは、Fig. 2に示すように平均粒径 $1 \mu\text{m}$ 程度のシャープな粒度分布を有するものである。表面はカチオンポリマーで改質され、シリカフュームと微弱に電氣的に結合する。このためTable 2に示すように、シリカフュームと比較して飛散性をほぼ半減でき、かさ密度を1.5~2.5倍程度に増大できた。なお、水と接すると電氣的結合は消失する。

複合混和材(混合比率50:50)をモルタル及びコンクリートに適用した結果を、シリカフュームと比較してFig. 3に示す。JIS A 6207(コンクリート用シリカフューム)によるモルタルの活性度指数は、シリカフュームの使用量が半分になるため低下する。しかし、超高強度コンクリート(高ピーライト系セメントを使用、 $W/P=20\%$)で同一の置換率(10%)とした場合では、O-ポート流下時間が短くなり、シリカフューム単体よりもコンクリートの粘性が低くなった。これは炭酸カルシウムがセメントとシリカフュームの粒子間を充填することで、さ

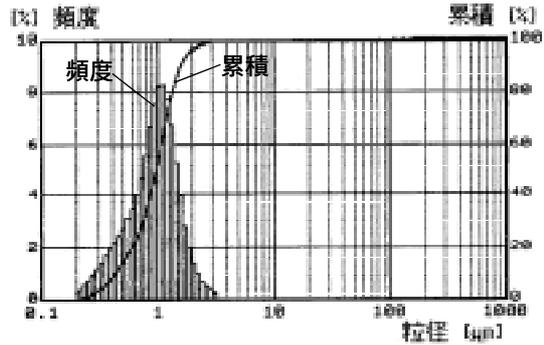


Fig. 2 炭酸カルシウムの粒度分布
Particle Size Distribution of Calcium Carbonate Filler

Table 2 飛散性とかさ密度
Properties of Fine Powder

項目	シリカフューム	複合混和材
密度	2.2	2.4
かさ密度*	0.25	0.39(50) 0.63(70)
飛散性**	44%	20.5%(50) 17.0%(70)

()内は炭酸カルシウムの比率(%)

*:JIS R 1929 に準じた、 **: Carr 法⁴⁾に準じた

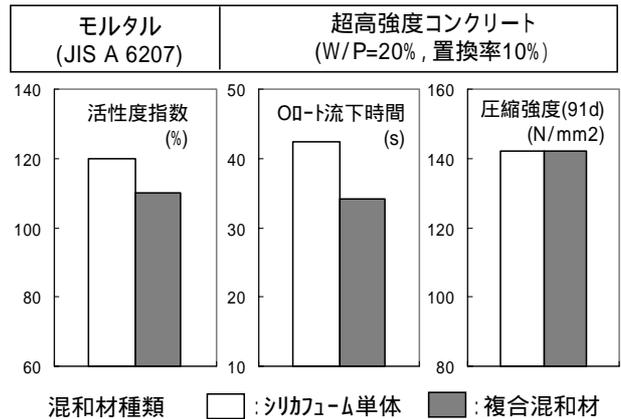


Fig. 3 複合混和材とシリカフュームの性能比較
Performance Comparison of Hybrid Admixture and Silica-fume

らに最密充填効果が高まったためと考えられる。圧縮強度については、シリカフュームの使用量が少ないながら、ほぼ同等となることが確認された。

2.3 コンクリート調合の検討

2.3.1 検討概要 $F_c=100 \sim 120\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリートの結合材については、シリカフュームをコンクリート練り混ぜ時に添加する場合とシリカフュームプレミックスセメント(以下、シリカフュームセメント)を用いる場合の2種類について検討することとし、前者の場合、高ピーライト系セメントを用いて、複合混和材を添加することとした。また、後者の場合、市販されているシリカフュームセメントを用いることとした。

Table 3 コンクリートの使用材料

Material of Concrete		
工場	A	B
セメント (C)	高ビークライト系セメント T社製 密度 3.20	シリカフェウムプレミックスセメント UM社製 密度 3.08
混和材 (AD)	複合混和材 (シリカフェウム+炭酸カルシウム) 比率 50:50 密度 2.45	-
細骨材 (S)	陸砂(粗目+細目) 密度 2.61 FM2.76	石灰石砕砂+山砂 密度 2.65 FM2.92
粗骨材 (G)	石灰石系砕石 密度 2.70 FM6.54 実績率 61.8%	硬質砂岩系砕石 密度 2.70 FM6.55 実績率 60.6%
高性能減水剤(SP)	ポリカルボン酸エーテル系化合物(N社製)	同左

CFT模擬柱を用いた圧入施工実験に際しては、市中の生コン工場においてコンクリートを製造することとなる。そのため調合の検討は、生コン工場において行った。生コン工場は結合材の種類に応じて、高ビークライト

系セメントに対応できる工場Aとシリカフェウムセメントに対応できる工場Bを選定した。

2.3.2 使用材料 生コン工場における使用材料をTable 3に示す。骨材はそれぞれの工場の常用品とした。なお、粗骨材の超高強度コンクリートへの適用性については、60℃の温水で促進養生した供試体の強度試験を行い、いずれもコンクリート強度として150N/mm²以上が確保できることを事前に確認した。

高性能減水剤はポリカルボン酸系の中でも超高強度コンクリート用のものを用いた。

2.3.3 室内試験練り Table 4に実施調合を示す。高ビークライト系セメントと複合混和材を用いる工場Aでは水粉体比(以下、W/P)を20~25%(Aシリーズ)とし、シリカフェウムセメントを用いる工場BではW/C=17~23%(Bシリーズ)で検討した。単位粗骨材量については容積で

310kg/m³一定とした。スランブフローおよび空気量はそれぞれ60~75cm、2±1%に設定した。

Fig. 4にW/PとOロート流下時間の関係を示す。プロットしたデータは練り上がり直後だけでなく、経時変化試験やバッチの異なるものも包括して示している。W/Pが低くなるほどOロート流下時間は増大し、計測される流下時間の範囲も大きくなった。Fig. 5に粉体水比(以

Table 4 コンクリートの調合表(室内試験)

シリーズ	記号	W/P (%)	s/a (%)	単位重量(kg/m ³)					SP (P×%)
				W	C	AD	S	G	
A	A1	20.0	45.0	160	720	80	661	837	1.50
	A2	22.5	47.6	160	640	71	736	837	1.45
	A3	25.0	49.6	160	576	64	796	837	1.45
B	B1	17.0	41.4	155	912	-	580	837	1.40
	B2	20.0	44.7	160	800	-	662	837	1.15
	B3	23.0	47.8	160	696	-	752	837	1.10

Aシリーズ: 高ビークライト系セメント+複合混和材 Bシリーズ: シリカフェウムセメント

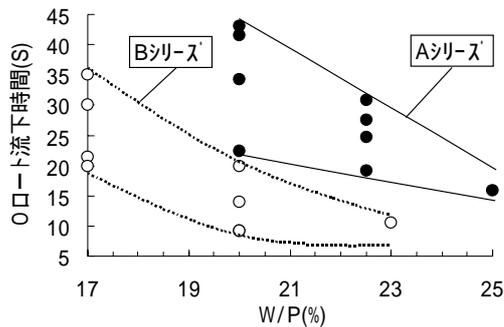


Fig. 4 Oロート流下時間とW/Pの関係
Relationship of O-Funnel Time and W/P

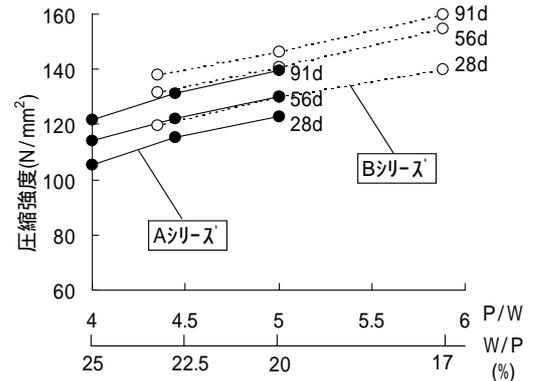


Fig. 5 P/Wと圧縮強度の関係(標準養生)
Relationship of Compressive Strength and P/W

Table 5 各種コンクリートの試験結果(実機試験)
Properties of Concrete

記号	W/P (%)	スランブフロー(cm)	Oロート(s)	空気量 (%)	CT (°C)	沈下量 (mm)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
A1	20.0	69.5	29.0	1.6	29.5	1.05	0
A2	22.5	66.0	19.2	2.0	28.5	1.35	0
B1	17.0	66.8	28.3	1.4	33.0	1.45	0
B2	20.0	70.5	10.4	1.2	32.0	1.20	0

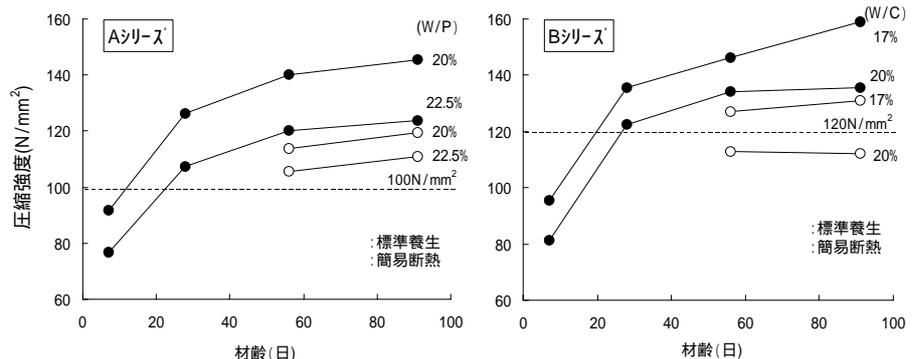


Fig. 6 圧縮強度の発現性状 Compressive Strength of Concrete

下、P/W)と圧縮強度の関係を示す。検討したP/Wの範囲で、強度の頭打ちもないことが確認された。

2.3.4 実機試験練り 実機試験練りの調合は、工場AのA2(W/P=22.5%)と工場BのB1(W/C=17%)について実施することとした。これは、室内試験練りの結果からOロート流下時間の測定範囲が20~35秒で、コンクリートの粘性がほぼ同程度となる点に着目して選定した。ま

た、それぞれW/P=20%としたA1およびB2についても行うこととした。コンクリートの製造方法は、いずれも2軸強制練りミキサを使用し、工場Aではモルタル先行(モルタル120秒 粗骨材投入後90秒)で、工場Bでは一括方式(B1 90秒, B2 60秒)で練り混ぜた。コンクリートは生コン工場から実験予定地まで運搬した。荷卸地点におけるコンクリートの試験結果をTable 5に示す。いずれも目標としたスランブフローおよび空気量が得られた。また、CFT構造技術指針

5)で規定される沈下量およびブリーディング量についても同指針の範囲内であることを確認した。圧縮強度の発現性状をFig. 6に示す。いずれの工場においても目標とした超高強度コンクリートを製造できることが確認された。

2.4 コンクリート調合の決定

圧入施工実験は、高ビーク系セメントと複合混和材を用いてW/P=22.5%とし、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ を目標としたコンクリートと、シリカフェームセメントを用いてW/C=17%とし、 $F_c=120\text{N/mm}^2$ を目標としたコンクリートの2種類のコンクリートについて実施することとした。コンクリートの実施調合をTable 6に示す。

3. 実験概要

これら2種類のコンクリートA, BをFig. 7に示すCFT模擬柱(以下、それぞれ試験体A, Bとする)へ圧入施工を行った。試験体の高さは10mとし、内ダイアフラムを有する角形鋼管とした。圧入口に設ける誘導管はなしとした。通常の鋼管の内ダイアフラムの形状としては、ダイアフラムの開口率は15%以上、空気抜き孔の大きさは板厚以上とされる5)。しかし、超高層建物においては、メガストラクチャーの採用など必ずしもこれらを満足できないことが想定される。そこで試験体は以下を考慮した。1)ダイアフラム開口率を15%以下とした場合の施工性・充填性を確認するため、開口率を15%, 12.5%, 10%に設定した。2)ダイアフラム板厚が大きい場合の適切な空気抜き孔の大きさを検証するため、一部のダイアフラムの板厚を40mmとし、空気抜き孔の大きさを指針5)より小さい30mm(板厚×0.75)と40mm(板厚×1.0)にした。圧入は高圧タイプのピストン式ポンプ

Table 6 コンクリートの調合表
Mix Proportion of Concrete

コンクリート記号	W/P (%)	s/a (%)	単位重量(kg/m ³)					SP (P×%)
			W	C	AD	S	G	
A	22.5	47.6	160	640	71	736	837	1.45
B	17.0	41.4	155	912	-	580	837	1.45

コンクリートA:高ビーク系セメント+複合混和材 コンクリートB:シリカフェームセメント
スランブフロー:60~75cm, 空気量:2±1%

Table 7 各種コンクリートの試験結果
Properties of Concrete

試験体	採取場所	スランブフロー(cm)	フロータイム(s)	空気量(%)	CT()	圧縮強度(N/mm ²)
A	荷卸	71.5	26.6	1.8	19.5	127.6(28d)
	筒先	60.0	23.9	2.4	20.8	140.3(56d)
	柱頭	48.0	72.4	1.6	20.1	149.0(91d)
B	荷卸	65.0	33.9	2.5	21.5	131.1(28d)
	筒先	69.5	24.1	2.6	21.7	142.6(56d)
	柱頭	63.8	38.4	2.3	19.9	152.0(91d)

車(K社製, 試験体A:PY115, 試験体B:PT80を使用)を用い、配管径は5インチ、配管長はおよそ30mとした。圧入速度は1.0m/分を目標とした。コンクリート配管内および鋼管柱に作用する圧力を計測した。また、打設後のコンクリート天端の沈下量をレーザー変位計で計測した。充填性の確認は、圧入施工終了後、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、目視によって行った。また、試験体の中心部および外周部でコアボーリングを行い、圧縮強度試験を実施した。

4. 実験結果

4.1 コンクリートの試験結果と打設状況

Table 7に各コンクリートの試験結果を示す。荷卸時点でのスランブフロー、空気量は、いずれも目標値の範囲内であった。試験体Aでは柱頭部におけるスランブフローが小さくなり、それに伴って粘性も増大した。しかし、打設状況としては、試験体A, Bともに途中で閉塞することなく、平面を保持しながら上昇し、Photo 1に示すように、ダイアフラム通過時には、これまでと同様に打設開口と空気抜き孔から同時にコンクリートが上昇する様子が観察された。

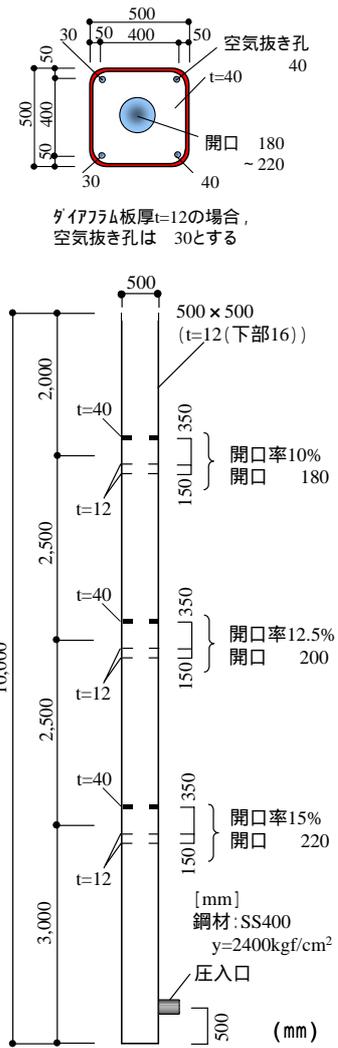
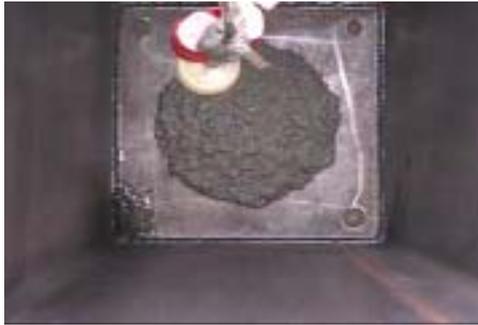


Fig. 7 試験体の概要図
Schematic Drawing of Model Test Specimen



(1) 試験体A



(2) 試験体B

Photo 1 各試験体の打設状況 (最上部)
Placing Situation at the Top of Specimen

4.2 ポンプ圧力損失

コンクリート配管内の圧力測定結果をFig. 8に示す。直線の傾きから、水平管におけるポンプ圧力損失を算出した結果、試験体Aで39.9(kPa/m)、試験体Bで41.5となり、ほぼ同等であった。コンクリートの粘性が高いため、従来の高流動コンクリート(粉体量500kg/m³、Oロート流下時間10秒程度)の圧力損失⁶⁾と比べると2.5~3倍に相当し、かなり大きい。

4.3 圧入圧力

各試験体に設置した圧力計(h=1m)による圧力の測定結果をFig. 9に示す。使用したポンプ車が異なるためストローク数は違うものの、最終的に鋼管に作用した圧力は、コンクリートの液圧に対して1.12~1.14倍とこれまでの結果⁶⁾と比較しても特に大きい値ではなかった。なお、いずれの場合も、ダイアフラムを通過する毎に圧力が大きくなったが、これは上部ほどダイアフラムの開口率を小さく設定したためと考えられる。したがって、ダイアフラムの開口率が15%未満の場合には、鋼管に作用する圧力として、開口率を15%以上とした場合よりも10%程度大きく見込む必要がある。なお、圧入後はコンクリートの硬化にともない次第に小さくなり、15時間後にほぼ消失した。

4.4 沈下量

圧入後のコンクリートの天端の沈下量の測定結果をFig. 10に示す。Table 5で示した沈下試験結果と同様に、試験体Bの天端の沈下量が大きくなった。しかし、

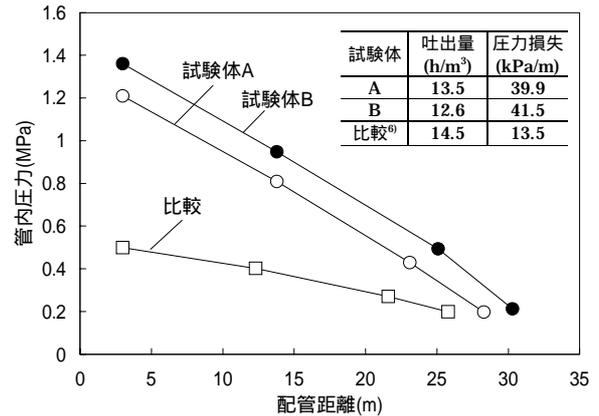


Fig. 8 コンクリート配管内圧力
Pumping Pressure Measured on Concrete Pipe

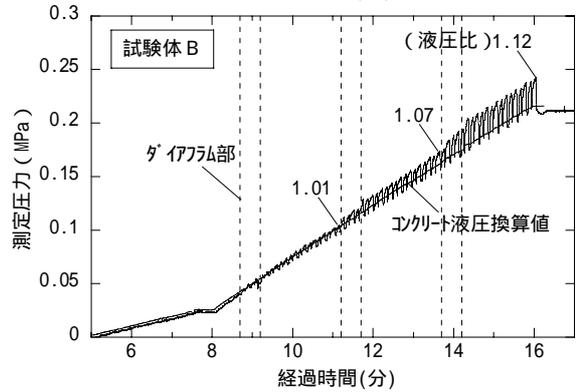
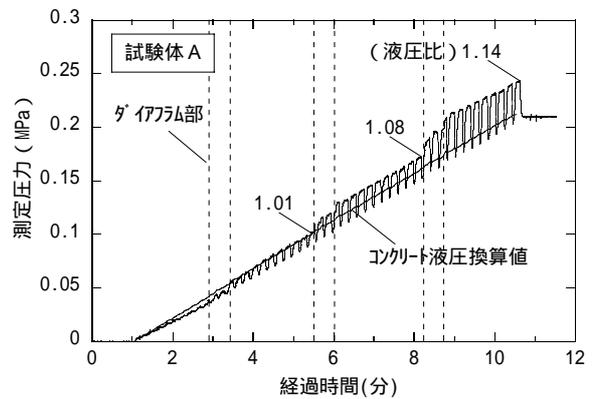


Fig. 9 鋼管に作用する圧力
Pumping Pressure Measured on Steel Column

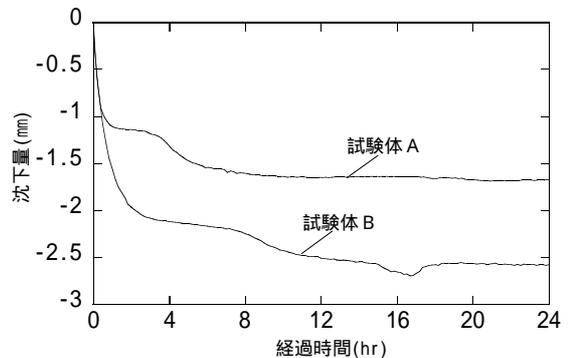


Fig. 10 柱頭部での沈下量
Settlement Measured on the Top of Concrete



(1) 試験体A



(2) 試験体B

Photo 2 各試験体の充填状況
Filling of Steel Columns with Diaphragms

沈下量としてはこれまでの計測結果⁶⁾の範囲内であった。

4.5 充填状況

一例として、試験体の最上部のダイアフラム部の充填状況を Photo 2 に示す。ダイアフラムの開口率を 10% とし、板厚 40mm に対して空気抜き孔を 30mm とした場合でも良好な充填状況が観察された。

4.6 構造体コンクリート強度

Fig. 11 に材齢 91 日における各試験体から採取したコア供試体による構造体コンクリート強度の高さ方向の分布状況を示す。ダイアフラム近傍においても特に大きな強度低下もなく、変動係数はいずれも 6% 程度であった。構造体コンクリート強度としては試験体 A で平均 122N/mm²、最低で 110N/mm² を確保できた。また、試験体 B では平均で 142N/mm²、最低で 123N/mm² を確保できた。さらに材齢 182 日では、それぞれ平均で 137, 157N/mm² であり、強度が増進していることを確認した。

5. まとめ

$F_c=100 \sim 120\text{N/mm}^2$ に対応した CFT 施工技術の確立を目的とし、 $F_c=100\text{N/mm}^2$ を目標として高ピーライト系セメントと今回開発した複合混和材を用いたコンクリートと $F_c=120\text{N/mm}^2$ を目標としてシリカフェームプレミックスセメントを用いたコンクリートの 2 種類のコンクリートを用いて、それぞれ内ダイアフラムを有する CFT 模擬柱に圧入施工実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 両コンクリートとも市中の生コン工場で製造できた。
- 2) ポンプ圧入施工における施工性も良好で、従来の高流動コンクリートを用いた場合と比べて、高粘性のためポンプ圧力損失は大きくなるが、鋼管に作用する圧力は同程度であった。
- 3) 鋼管内部の充填性についても、内ダイアフラムの開口率を 10% と小さくし、板厚 40mm に対して空気抜き孔を 30mm とした条件でも良好であった。
- 4) 構造体コンクリート強度もそれぞれ目標とした強度を十分に確保できた。

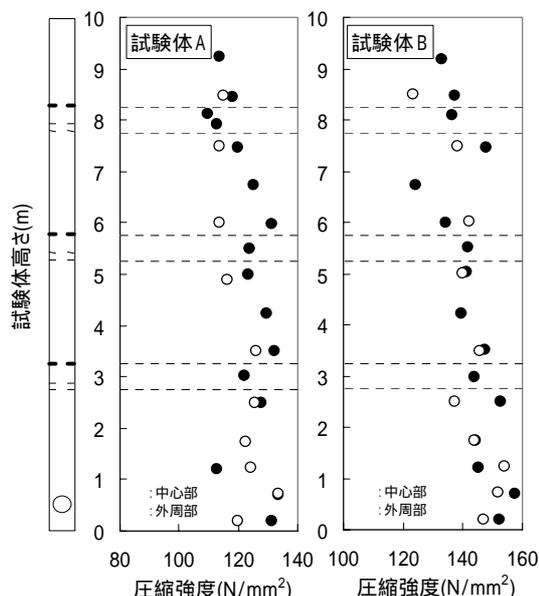


Fig. 11 構造体コンクリートの強度試験結果
Compressive Strength of Core Test Specimen

謝辞

コンクリートの製造にあたっては、ポゾリス物産、宇部三菱セメント、埼玉太平洋生コン所沢第一工場、大和菱光の皆様には多大なご協力を戴きました。

参考文献

- 1) 神代, 大池, 川口: 高強度・高流動コンクリートによる CFT 構造柱の充填施工, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.481 ~ 486, (1998)
- 2) 神代, 藤田: 国内最大規模の CFT 充填施工を完了, コンクリート, vol.20, No.10, pp.17 ~ 21, (2001)
- 3) 坂井悦郎: 高強度・超高強度コンクリート用セメント, セメント・コンクリート, No.535, pp.42 ~ 49, (1991)
- 4) R.L.Carr, Chem. Eng., Jan., pp.163, 1965
- 5) 新都市ハウジング協会: CFT 構造技術指針・同解説, (2000)
- 6) 神代, 大池, 川口: 粉体量の少ない高流動コンクリートの CFT 圧入工法への適用, 大林組技術研究所報, No.62, pp.7 ~ 12, (2001)