

# 報告 超高強度コンクリートによるCFT圧入施工に関する実験的研究

神代泰道<sup>\*1</sup>・大池 武<sup>\*2</sup>・川口 徹<sup>\*3</sup>

要旨： $F_c=100 \sim 120\text{N/mm}^2$ 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，シリカフュームの添加方法が異なる2種類とし，それぞれ $F_c=100$ および $120\text{N/mm}^2$ を目標として，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，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これまでと同程度であった。また，内ダイアフラム下面の充填性についても良好であった。構造体コンクリート強度は目標とした強度を確保できた。

キーワード：超高強度コンクリート，シリカフューム，CFT構造，ポンプ圧入工法

## 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し<sup>1)</sup>， $F_c=80\text{N/mm}^2$ についても超高層CFT建物へ適用した<sup>2)</sup>。 $F_c=100 \sim 120\text{N/mm}^2$ に対応したCFT施工技術を確立するため，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。

## 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

$F_c=100\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートの結合材としては，セメント単体では，コンクリートの粘性が著しく高くなり，粘性低減および強度増進のためシリカフュームの使用が不可欠となる。シリカフュームの使用方法としては，セメントにプレミックスする方法とコンクリート練混ぜ時に添加する方法の2種類ある。前者の場合，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。一方，練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混ぜが困難である。また，かさ密度が小さいため，運搬・貯蔵の効率が悪く，取り扱いが難しい。そこで，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。

### 2.2 複合混和材の開発

ここで用いた炭酸カルシウムは，表面をカチオンポリマーで改質し，凝集を低減したものである。図-1に示すように平均粒径が $1\mu\text{m}$ 程度のシャープな粒度分布を有する。平均粒径が $0.1 \sim 0.3\mu\text{m}$ のシリカフュームと混合すると最密充填効果により，かさ密度をシリカフュームの $1.5 \sim 2.5$ 倍程度に増大でき，飛散も低減することが分かった。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図-2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ロ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

\*1（株）大林組 技術研究所 建築材料研究室 副主任研究員（正会員）

\*2 同 主任研究員（正会員），\*3 同 室長（正会員）

リートの粘性が低くなった。また、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。これは炭酸カルシウムがセメント粒子とシリカフューム粒子間を充填することで、最密充填効果が高まったものと考えられる。

### 2.3 コンクリート調合の検討

#### (1) 検討概要

超高強度コンクリートの結合材については、コンクリート練混ぜ時に複合混和材を添加する場合とシリカフュームプレミックセメント（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た。前者の場合、セメントは高ビーライト系セメントを用い、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。そこで、結合材の種類に応じて、高ビーライト系セメントに対応できる工場Aとシリカフュームセメントに対応できる工場Bを選定し、試験練りを行うこととした。

#### (2) 使用材料

生コン工場における使用材料を表-2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/mm<sup>2</sup>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。

#### (3) 室内試験練り

表-3に実施調合を示す。高ビー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、シリカフュー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310L/m<sup>3</sup>一定とした。スランプフローおよび空気量の目標値は、それぞれ60～75cm、2±1%に設定した。

図-3にW/PとOロート流下時間の関係を示

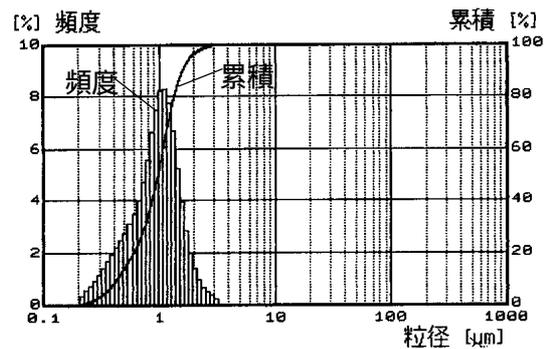


図-1 炭酸カルシウムの粒度分布

表-1 複合混和材の性質

項目	複合混和材 (シリカフューム+ 炭酸カルシウム)	シリカフューム
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.4	2.2
かさ密度* (g/cm <sup>3</sup> )	0.39(50) 0.63(70)	0.25

( ) 内は炭酸カルシウムの比率, \*:JIS R 1929 に準じた

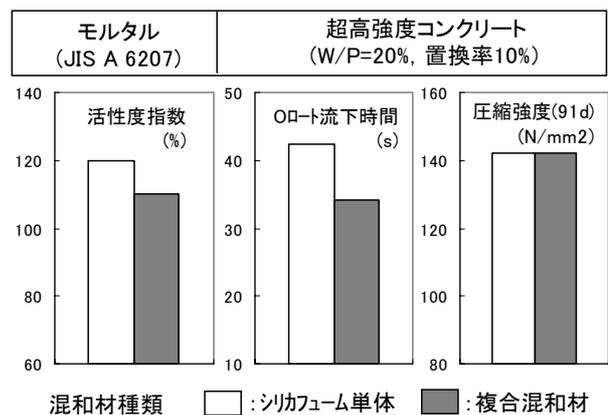


図-2 複合混和材の性能

表-2 コンクリートの使用材料

工場	A	B
セメント (C)	高ビーライト系セメント T社製 密度 3.20	シリカフュームプレミックセメント UM社製 密度 3.08
混和材 (AD)	複合混和材 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 化合物(N社製)	同左

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ばらつきの範囲も大きくなった。図-4に粉体水比（以下、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。

#### (4) 実機試験練り

実機試験練りの調査は、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ポ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表-4に示す。いずれも目標としたスランプフローおよび空気量を得られた。また、CFT構造技術指針<sup>3)</sup>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図-5に示す。この結果から、超高強度コンクリートが市中の生コン工場で製造でき、 $F_c=100\text{N/mm}^2$  に対してはAシリーズでW/P=22.5%、BシリーズでW/C=20%、 $F_c=120\text{N/mm}^2$  に対してはBシリーズでW/P=17.0%のコンクリートで対応できることを確認した。

#### 2.4 コンクリート調合の決定

圧入施工実験は、Aシリーズ(高ビークライト系セメント+複合混和材)で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、Bシリーズ(シリカフェュームセメント)で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種類について実施することとした。コンクリ

表-3 コンクリートの調合表(室内試験)

シリーズ	記号	W/P (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )					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：シリカフェュームセメント

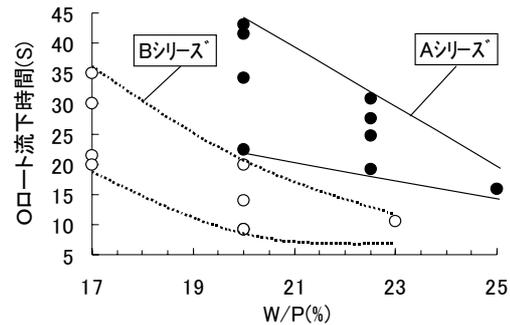


図-3 Oポート流下時間とW/Pの関係

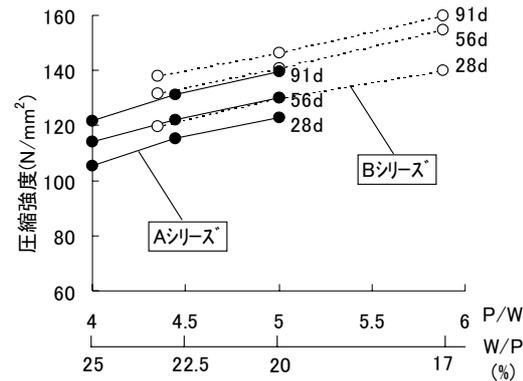


図-4 P/Wと圧縮強度の関係(標準養生)

表-4 各種コンクリートの試験結果(実機試験)

記号	W/P (%)	スランプフロー (cm)	Oポート (s)	空気量 (%)	CT (°C)	沈下量 (mm)	ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
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

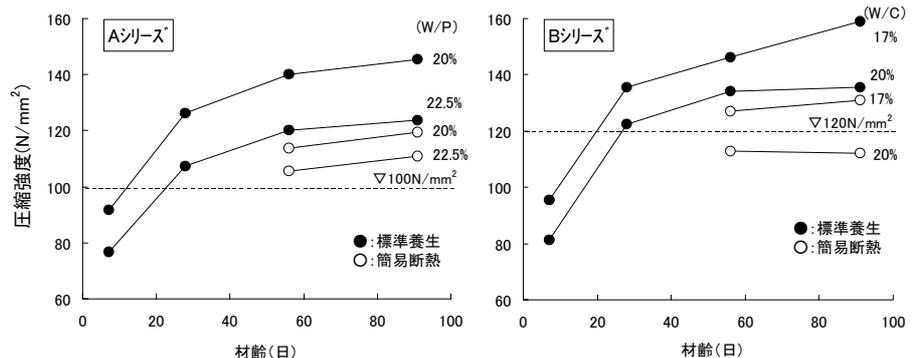


図-5 圧縮強度の発現性状

ートの実施調査を表  
- 5 に示す。

### 3. 実験概要

これら 2 種類の  
コンクリートを図  
- 6 に示す C F T  
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 1 0  
m とし、内ダイヤ  
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ヤフラムの形状とし  
ては、ダイヤフラムの開口率は 15% 以上、空気  
抜き孔の大きさは板厚以上とされる<sup>3)</sup>。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)ダイヤフラム開口率を 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% と小さく設定した。(2)ダイヤ  
フラムの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、一部のダイヤフラム  
については板厚を 40mm とし、空気抜き孔の大  
きさを指針<sup>3)</sup>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 寸、配管長はおよそ 30 m 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  
らダイヤ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

表 - 5 コンクリートの調査表

コンクリート 記号	W/P (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )					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 : 高比重・ライト系セメント + 複合混和材    コンクリート B : シリカフォームセメント  
スランプ 70- : 60 ~ 75cm    空気量 : 2 ± 1%

表 - 6 各種コンクリートの試験結果

試験体	採取 場所	スランプ フロー (cm)	オポート (s)	空気量 (%)	CT (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
A	荷卸	71.5	26.6	1.8	19.5	127.6(28d)
	筒先	60.0	33.9	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)

験を実施した。

### 4. 実験結果

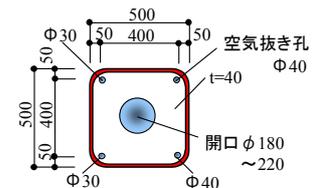
4.1 コンクリ  
ートの試験結  
果と打設状況  
表 - 6 に各コ  
ンクリートの試  
験結果を示す。

荷卸時点でのス  
ランプフロー、

空気量は、いずれも目標とした 60 ~ 75cm およ  
び 2 ± 1% の範囲内であった。試験体 A では柱  
頭部におけるスランプ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  
の一例として試験体 A の場合を写真 - 1 に示す  
が、いずれの場合も途中で閉塞することなく、  
先端のコンクリートは平面を保持しながら上昇  
し、ダイヤフラム通過時には、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。

### 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図 - 7  
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



ダイヤフラム板厚 t=12 の場合、  
空気抜き孔は φ30 とする

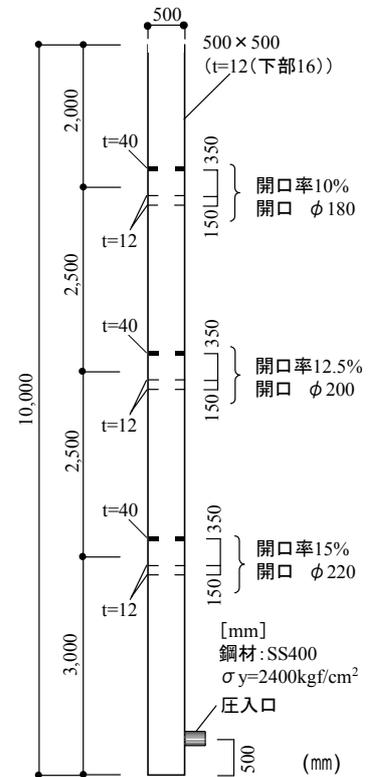


図 - 6 試験体の概要図



写真 - 1 試験体Aの打設状況（最上部）

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  $500\text{kg}/\text{m}^3$ 、Oポート流下時間 10 秒程度）の圧力損失<sup>4)</sup>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 ( $h=1\text{m}$ ) による圧力の測定結果を図 - 8 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<sup>4)</sup>とほぼ同程度であった。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。このように、ダイアフラムの開口率が 15% 未満とした場合には、鋼管に作用する圧力を大きく見込む必要があることを示している。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図 - 9 に示す。表 - 4 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、沈下量としてはこれまでの計測結果<sup>4)</sup>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写真 - 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。

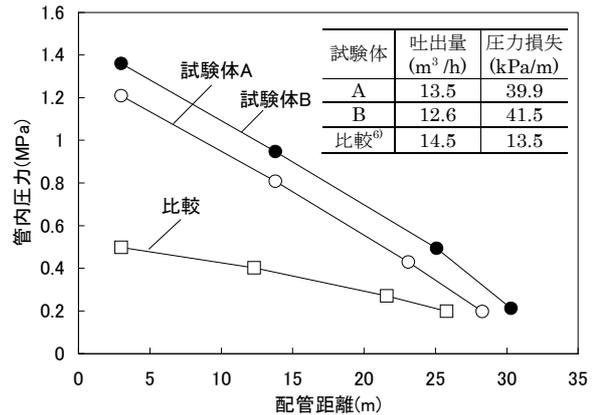


図 - 7 コンクリート配管内圧力

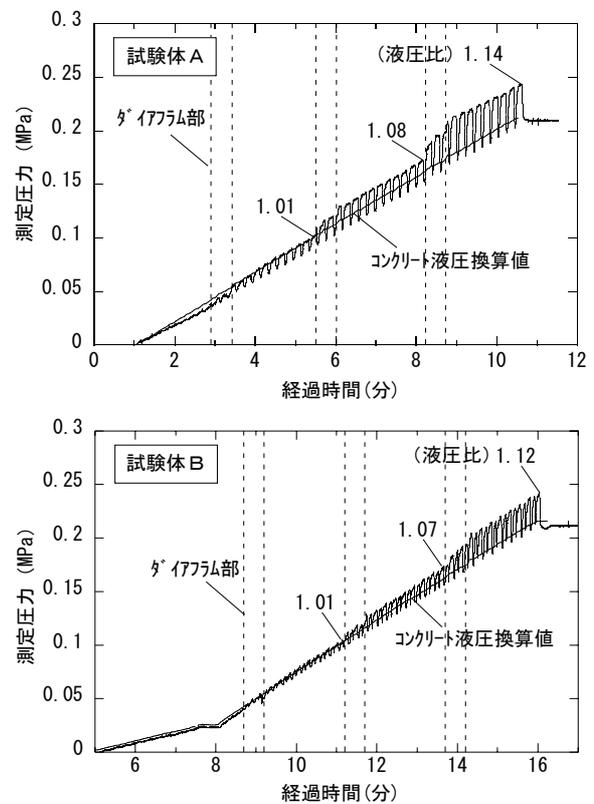


図 - 8 鋼管に作用する圧力

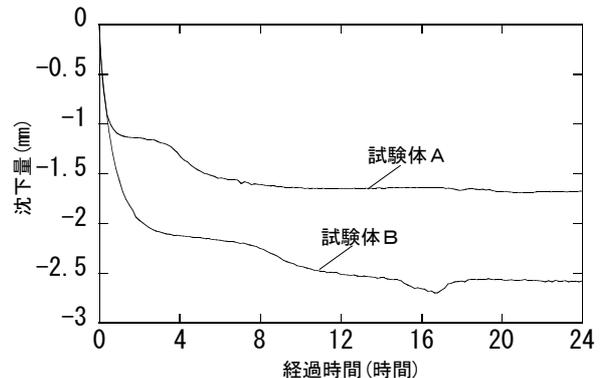


図 - 9 柱頭部での沈下量



(1)試験体 A



(2)試験体 B

写真 - 2 各試験体の充填状況

#### 4.6 構造体コンクリート強度

図 - 10 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。ダイヤ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  $122\text{N/mm}^2$ 、最低で  $110\text{N/mm}^2$  を確保できた。また、試験体 B では平均で  $142\text{N/mm}^2$ 、最低で  $123\text{N/mm}^2$  を確保できた。さらに材齢 182 日では、それぞれ平均で 137,  $157\text{N/mm}^2$  であり、強度が増進していることを確認した。

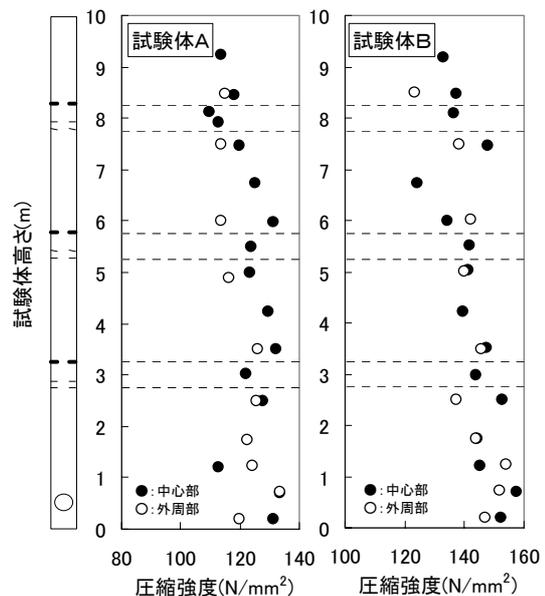


図 - 10 構造体コンクリートの強度試験結果

#### 5. まとめ

$F_c=100 \sim 120\text{N/mm}^2$  に対応した C F T 施工技術の確立を目的として、2 種類の超高強度コンクリートを用いて C F T 模擬柱に圧入施工実験を行った。

- (1)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て  $F_c=100\text{N/mm}^2$  を目標としたコンクリートとシリカフェームプレミックセメントを用いて  $F_c=120\text{N/mm}^2$  を目標としたコンクリートを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より、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)ダイヤフラムの開口率を 15% 未満以下と小さくした場合には、鋼管に作用する圧入圧力は大きくなる傾向であった。
- (4)鋼管内部の充填性は、ダイヤフラムの開口率を

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。

(5)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。

#### 参考文献

- 1) 神代泰道, 大池武, 川口徹: 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) 神代泰道, 藤田宣光: 国内最大規模の CFT 充填施工を完了, コンクリートテクノ, Vol. 20, No. 10, pp. 17-21, 2001
- 3) 新都市ハウジング協会: CFT 構造技術指針・同解説, 2000
- 4) 神代泰道, 大池武, 川口徹: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 2, pp. 1021-1026, 2001