論文　中庸熱ポルトランドセメントを用いた Fc100N/mm^2 の CFT 造用高強度コンクリートの開発

全　振煥[*1]・依田　和久[*2]・淺岡　茂[*3]・小野田　紀之[*4]

要旨：建築物の超高層化は，コンクリート充填鋼管（CFT）造を中心に進んでおり，充填コンクリートとして設計基準強度（Fc）100N/mm^2 以上の高強度コンクリートの需要が増えている。本研究では，専用の化学混和剤を使用し，シリカフュームセメントの代わりに中庸熱ポルトランドセメント単味を用いた Fc100N/mm^2 の CFT 造用高強度コンクリートを開発し，経過時間によるフレッシュ性状や見かけの塑性粘度，模擬部材による充填性及びダイアフラム近傍の強度補正値（Sd 値）について検討した。その結果，経時保持性が優れたフレッシュ性状を有し所定強度を満足するコンクリートが得られ，実工事への適用の見通しを得た。

キーワード：CFT 造，高強度コンクリート，見掛けの塑性粘度，模擬柱試験体，コア強度，強度補正値

1. はじめに

超高層建築物には，主にコンクリート充填鋼管（CFT）造が適用されており，充填コンクリートとして設計基準強度（以下 Fc）100N/mm^2 以上の高強度コンクリートの適用が増える傾向にあり，今後も超高層化に向けて需要が増えると見込まれる。Fc100N/mm^2 以上の高強度コンクリートでは，水セメント比（以下 W/C）が低くなり単位セメント量が増大するため，粘性の低減や流動性保持などの施工性の確保を目的にシリカフュームセメントを用いているが，コストが高い。一方，中庸熱ポルトランドセメント単味を用いた充填コンクリートについては，現状 Fc80N/mm^2 まで適用している [1)]。それ以上の高強度コンクリートは上記の施工性確保の懸念があるため，過去に実験レベルの検討は行っているが [2)]，実適用レベルまでに至っていない。また，CFT 造コンクリートの調合設計の際，新都市ハウジング協会の技術基準 [3)]で定めた強度補正値（以下 Sc）を求める必要がある。Sc 値は，強度補正値（以下 mSn）にダイアフラム（以下 DF）近傍の強度低下の補正値（以下 Sd）を加えて算出することができる。

ここで，本研究では，実適用及びコスト低減を目的に，分散性や流動性保持に優れた専用の化学混和剤を使用し，シリカフュームセメントの代わりに，中庸熱ポルトランドセメント単味を用いた Fc100N/mm^2 の CFT 造用高強度コンクリートを開発し，フレッシュ性状や見掛け塑性粘度を確認した。さらに，調合設計に必要な構造体試験体による mSn 値及び CFT 模擬柱試験体による充填性や Sd 値について検討した。

2. 実機実験

2.1 実験概要

(1) 実験計画

実機実験の実施計画を**表－1** に示す。コンクリートは，中庸熱ポルトランドセメントを用いて Fc90～110N/mm^2 を想定し，単位水量を 170kg/m^3 に固定した W/C24，22，20%の 3 調合とした。練り混ぜは，容量 3.3m^3 の強制 2 軸ミキサを使用し，練り上がり後経過時間 180 分まで所定間隔においてフレッシュ性状や見掛けの塑性粘度による粘性特性を調べた。また，強度特性を把握するため，標準水中養生及び簡易断熱養生の供試体を作製し，構造体試験体のコア強度と比較検討した。

(2) 使用材料と調合

使用材料を**表－2** に，コンクリートの調合を**表－3** に示す。セメントは中庸熱ポルトランドセメントとし，細骨材は山砂，粗骨材は砕石を使用した。

表－1　実機実験の実施計画

記号	Fc (N/mm^2)	ｾﾒﾝﾄ種類	W/C (%)	単位水量 (kg/m^3)	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ (cm)	構造体試験体
M24	90	中庸熱 (M)	24.0	170	65.0±10.0	○
M22	100		22.0		70.0±10.0	○
M20	110		20.0			○

表－2　コンクリートの使用材料

種類		産地・商品名	密度 (表乾) (g/cm^3)	粗粒率 (FM) (%)
ｾﾒﾝﾄ	C	中庸熱ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ(U 社)	3.21	－
細骨材	S	山砂，千葉県富津市鶴岡産	(2.62)	(2.64)
粗骨材	G	砕石(硬質砂岩)，茨城県桜川市産	(2.64)	60.0
水	W	工業用水	1.0	－
混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤 (S 社) (ポリカルボン酸系)	1.0	－

*1 鹿島建設(株)　技術研究所　建築生産グループ　上席研究員　博士(工学) (正会員)
*2 鹿島建設(株)　技術研究所　建築生産グループ　グループ長　博士(工学) (正会員)
*3 鹿島建設(株)　建築管理本部　技術コンサルグループ　専任部長
*4 日本シーカ株式会社　技術研究所　コンクリートシステム　R&D マネージャー

(3) 試験項目と方法

試験項目と方法及び目標値を**表－4** に示す。レディミクストコンクリート工場（以下生コン工場）の実験室にて各種フレッシュ試験を実施し，目標値を満足していることを確認した後，構造部材試験体や供試体を作製した。測定項目は，スランプフロー，空気量，単位容積質量（空気量測定後の試料を使用），ブリーディング，コンクリート温度を測定した。粘性特性は見掛けの塑性粘度で評価した。コンクリートの施工性を評価するために回転粘度計を用いて練上りから経過時間 5，60，120，180 分で測定した。回転粘度計装置と測定原理を**図－1** に示す。回転粘度計は，羽根が付いた棒を所定の回転数で回転させ，軸に作用するトルク値を測定し，これらの関係から見掛け塑性粘度の算出ができる。この見掛けの塑性粘度と圧力損失の間に線形の相関関係があることを見出し，コンクリートのポンプ圧送に必要な圧力損失の推定手法として有効に利用している [4]。圧縮強度の供試体は，標準水中養生と簡易断熱養生の両方とも材齢 28，56，91 日の 3 材齢分を作製し，圧縮強度試験を実施した。簡易断熱養生（JASS 5 T-606）の供試体は，材齢 28 日にて容器から取り出し所定材齢まで室内（20±2℃）にて養生した。

(4) 構造部材試験体

構造部材試験体は，コア供試体による強度補正値や温度履歴を確認するため，**図－2** に示すように柱を模擬し上下に発泡スチロール（厚さ 200mm）を設置した構造体試験体（1.0×1.0×1.0m）を作製した。構造部材試験体の温度は，中心部と端部，外気温の 3 ヶ所に熱電対を設置し材齢 28 日まで測定した。コンクリート打設後，材齢 7 日で側面型枠を脱型し材齢 28，56，91 日にて中心部と端部の指定箇所からコア試験体を採取して圧縮強度試験を実施した。コア強度は中心部及び端部の平均値とした。

2.2 実験結果及び考察

(1) フレッシュ性状

スランプフロー試験の結果を**図－3** に示す。M20 と M22 のスランプフローは経過時間に伴い徐々に増加し，120 分以降から若干低下する傾向が見られたが，練り上り後 180 分まで目標値の 70.0±10.0cm を満足した。M24 のスランプフローは，経過時間 90 分以降から大きく低下したが，概ね目標値を満足した。これは，他調合に比べて混和剤の添加量が少なかったため，スランプフローの保持が低下したと思われる。なお，空気量は 1.4～2.3%を示し目標値を満足し，ブリーディング量は 0 であった。コンクリート温度は 17～21℃であった。

(2) 見掛けの塑性粘度

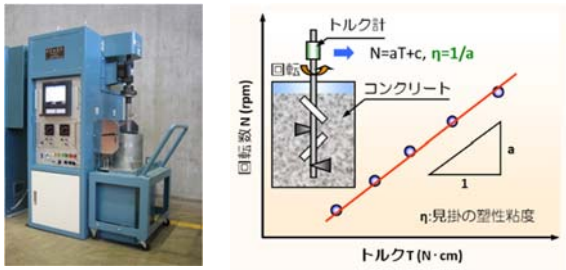
見掛けの塑性粘度の結果を**図－4** に示す。見掛けの塑性粘度は，M20 が経過時間 60 分以降から大きく増加し，ポンプ圧送時に必要な施工上の上限値 [4]である 25N· cm·

表－3　コンクリートの調合

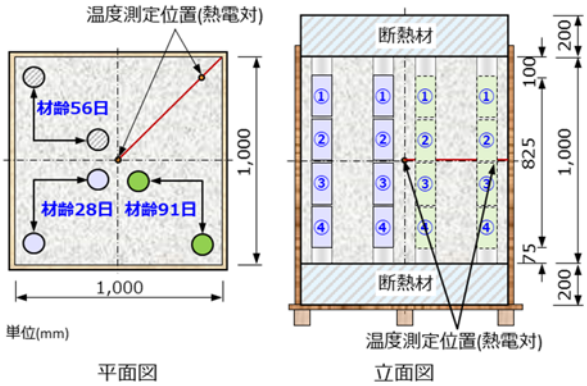
記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				Ad (Cx%)
			W	C	S	G	
M24	24.0	47.0	170	709	762	824	1.28
M22	22.0	45.2	170	773	673	824	1.43
M20	20.0	42.8	170	850	610	824	1.58

表－4　試験項目と方法及び目標値

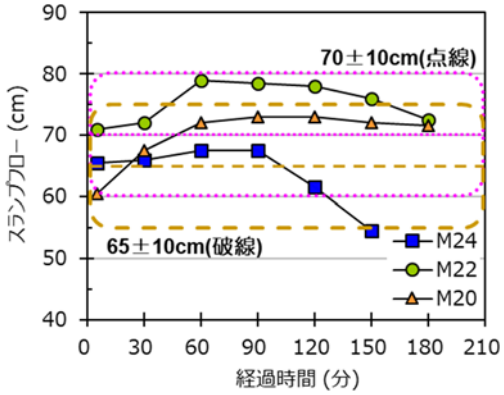
区分	試験項目		測定方法	目標値	備考
フレッシュ	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ(cm)		JIS A 1150	65.0±10.0 70.0±10.0	
	空気量(%)		JIS A 1128	2.0±1.5	
	ｺﾝｸﾘｰﾄ温度(℃)		JIS A 1156	35 以下	
	見掛けの塑性粘度 (N･cm･min)		回転粘度計	25 以下	･180 分まで 60 分間隔で測定
硬化過程	ﾌﾞﾘｰﾃﾞｨﾝｸﾞ量 (cm³/cm²)		JIS A 1123	0.1 以下	･練上り直後
硬化	圧縮強度	標準水中	JIS A 1108	所定強度	･材齢 28, 56, 91 日
		簡易断熱			
		コア	JIS A 1107		



図－1　回転粘度計装置と測定原理



図－2　構造部材試験体とコア採取位置



図－3　スランプフロー試験の結果

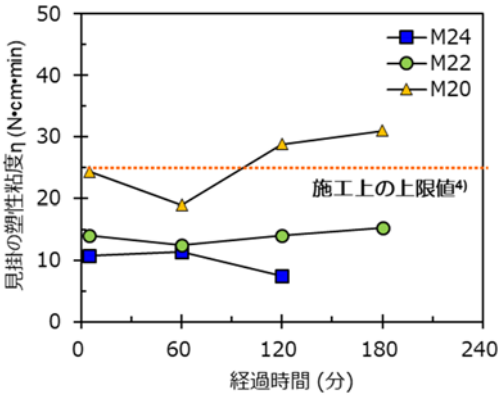
min を上回ったが，M22 は経過時間 180 分まで大きな変化がなく良好な状態であった。M24 は，経過時間 120 分まで低い粘性を示したが，それ以降から粘性が高くなり，180 分では測定できなかった。各調合の見掛けの塑性粘度の平均値は，M24 が 9.9N· cm· min，M22 が 13.5N· cm· min，M20 が 25.8N· cm· min であった。M20 は，**図－3** に示すスランプフローの経時変化による様子と異なり，スランプフロー値が管理範囲を満足しても，コンクリートの粘性が高くなる傾向を示した。

(3) 構造体試験体の温度履歴

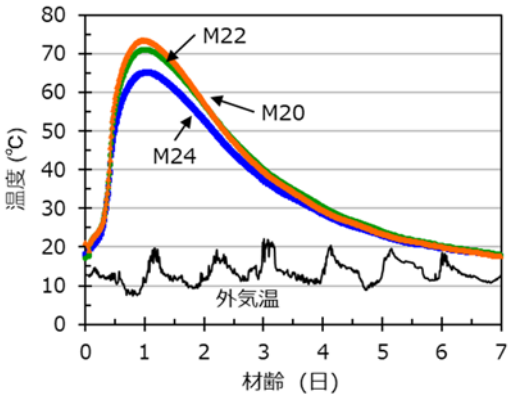
模擬体試験体の温度履歴の結果を**図－5** に示す。模擬部材の中心部の最高温度は，M24 が 65.2℃，M22 が 71.1℃，M20 が 73.4℃で，到達時間は 22～23 時間であった。端部の温度は，M24 が 45.1℃，M22 が 48.4℃，M20 が 49.7℃で，中心部との最高温度との差は 20.1～23.7℃であった。単位セメント量による差は少なかった。

(4) 圧縮強度と強度補正値（$_{28}S_{91}$）

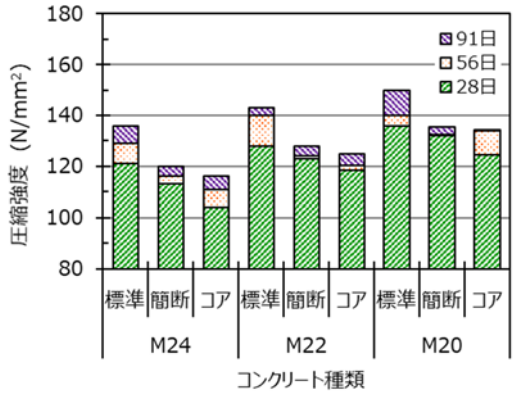
養生条件による圧縮強度の結果を**図－6** に示す。圧縮強度は，材齢と共に概ね増進しており，W/C が小さいほど高くなる傾向を示した。材齢 28 日の圧縮強度は，標準水中養生供試体が 121～136N/mm² を，簡易断熱供試体が 113～132N/mm² を，コア供試体が 104～125N/mm² を示し，養生条件が異なっても材齢 28 日で 100N/mm² を上回った。また，養生条件による圧縮強度は同一材齢において標準水中＞簡易断熱＞コアの傾向であった。**図－7** に材齢 28 日の標準水中養生供試体のセメント水比と圧縮強度の関係を示す。図中の式は実験回帰式であり，良い相関があることが確認できた。これらの結果から本実験の範囲において Fc90～110N/mm² を十分満足することが可能であるといえる。簡易断熱養生供試体とコア供試体の強度補正値 $_{28}S_{91}$ の結果を**図－8** に示す。強度補正値 $_{28}S_{91}$ は，簡易断熱養生供試体が 0～1.0N/mm² で，コア供試体が 2.0～5.0N/mm² となった。以上の結果から，$_{28}S_{91}$ はコア供試体の最大値である 5.0N/mm² を次の 4 章の調合設計に用いることとした。



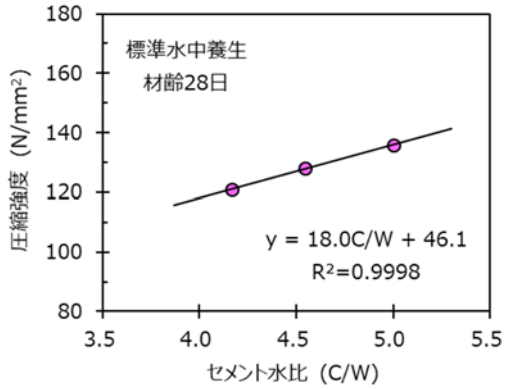
図－4　見掛け塑性粘度の結果



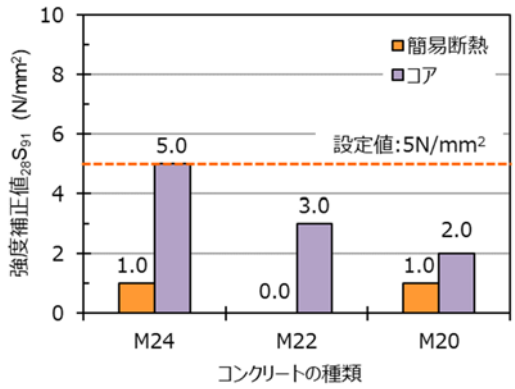
図－5　模擬体試験体の温度履歴（中心部）



図－6　養生条件による圧縮強度の結果



図－7　セメント水比と圧縮強度の関係



図－8　簡易断熱とコア強度の強度補正値

3. 実大模擬柱部材実験

3.1 実験概要

(1) 実験計画

実大模擬柱部材実験は，模擬柱試験体を作製し，鋼管内でのコンクリートの充填性及びコア強度によるDF近傍の強度低下の強度補正値であるSd値を確認することを目的に実施した。要因と水準を**表－5**に示す。充填コンクリートの種類は，実機実験の結果を参考とした。W/C22%については，スランプフローの違いによる充填性を確認するため，スランプフローの目標値を65±10cm（S22）と70±10cm（H22）とし，W/C21%はスランプフローの目標値を70±10cm（H21）の計3ケースとした。スランプフローを大きくしたのは，施工性を考慮したためである。CFT造模擬柱試験体は，600×600×4,800mmの3体（打設孔φ250mm，空気抜き孔φ30mm）とし，DFは650mm間隔に加えて，新都市ハウジング協会の技術基準[3)]で定めた最小間隔の芯々寸法(DF厚さの重心間距離)である150mmを設けて3枚とした。充填コンクリートは圧送速度を1.0m/min以下として圧入工法により打設した。

(2) 使用材料とコンクリート調合

コンクリートの使用材料は，前項の**表－2**と同じ材料を使用した。コンクリートの調合を**表－6**に示す。

(3) 試験項目と方法及び目標値

試験項目と方法及び目標値を**表－7**に示す。フレッシュ試験は，生コン工場の出荷時と荷卸し時に実施した。試験項目は，スランプフロー，空気量，単位容積質量，コンクリート温度，沈降量（φ150×300mm型枠）を測定した。また，標準水中養生の圧縮強度供試体を作製し，材齢28，56，91日にて測定した。

(4) 模擬柱試験体の沈降量と充填率及びコア強度

模擬柱試験体の概要とコア採取位置図を**図－9**に示す。模擬柱試験体の沈降量は，充填コンクリートを圧入打設した後上面を金鏝で仕上げを行い，ビニルで被った後中心部と端部にてレーザー変位計で測定した。充填率は日本免震構造協会（JSSI）の免震構造施工標準の90%を目標値とし，各パーツで分割した後，DF1～3の下面の充填状況を確認した。充填率の測定は，DF下面のコンクリート表面の空隙部を着色し，写真撮影後画像処理を行い，DF下面のコンクリートの面積から空隙全面積を差引いたものを全面積で除して充填率を算出した。コア供試体（φ100×200mm）を材齢91日に指定箇所の中心部と端部から採取し、圧縮強度試験を実施した。Sd値は，一般部とDF部の二つに分けた平均値で評価した。

(5) コンクリート打設

充填コンクリートの打設は，高圧用のコンクリートポンプ車（P社）を使用し，高圧用の輸送管（5B管）を用いて圧入工法により打設した。打設状況を写真－1に示す。

表－5　実大模擬柱部材実験の要因と水準

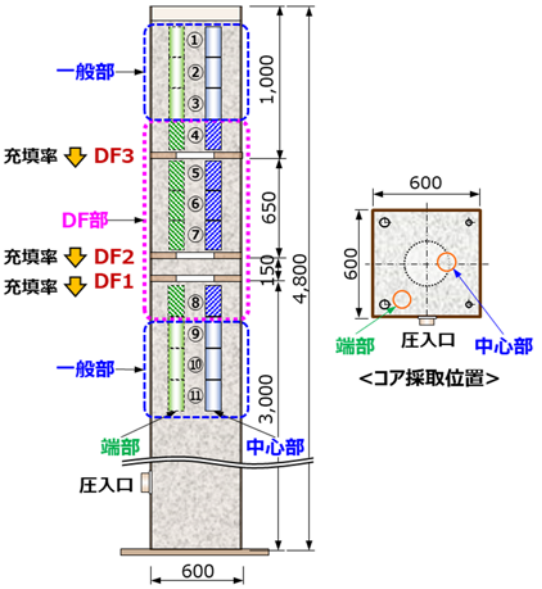
No.	W/C (%)	セメント	目標スランプフロー (cm)	模擬部材 寸法(mm)	模擬部材 DF(枚)	打設工法 (圧送速度)
S22	22	中庸熱 (M)	65±10	600×600 ×4,800	3 (φ300mm)	圧入 (1.0m/min 以下)
H22	22		70±10			
H21	21		70±10			

表－6　コンクリートの調合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³) W	C	S	G	Ad (Cx%)
S22	22.0	45.2	170	773	673	824	1.50
H22	22.0	45.2	170	773	673	824	1.55
H21	21.0	44.1	170	810	645	824	1.60

表－7　試験項目と方法及び目標値

区分	試験項目	測定方法	目標値	備考
フレッシュ	スランプフロー(cm)	JIS A 1150	65.0±10.0 70.0±10.0	
	空気量(%)	JIS A 1128	2.0±1.5	
	コンクリート温度(℃)	JIS A 1156	35 以下	
硬化過程	沈降量(mm)	JASS5T-503	2.0 以下	・φ150×300mm
	ブリーディング量 (cm³/cm²)	JIS A 1123	0.1 以下	・練上り直後
硬化	圧縮強度(標準)	JIS A 1108	所定強度	・材齢 28, 56, 91 日
	模擬柱 沈降量(mm)	レーザー変位計	所定量	
	模擬柱 充填率(%)	写真撮影	90 以上	JSSI 免震構造施工標準
	模擬柱 コア強度	JIS A 1107	所定強度	・材齢 91 日



図－9　模擬柱試験体の概要とコア採取位置図

写真－1　模擬柱試験体の打設状況

3.2 実験結果

(1) フレッシュ性状

スランプフロー試験の状況を写真－2 に，その結果を**図－10** に示す。スランプフローは，出荷時が 61.5～72.1cm で，荷卸時が 66.0～75.5cm で，荷卸時の方が 4.5～9.3cm 高くなる傾向であったが，いずれも目標値を満足した。空気量は，1.1～1.9%の範囲を示した。ブリーディング量は 0 であり，コンクリートの温度は，24.0～26.0℃であった。

(2) 沈降量

供試体と模擬柱試験体の沈降量の結果を**図－11** に示す。供試体の沈降量はいずれも 0.6mm であり，模擬柱試験体の中心部と端部の沈降量は 0.2～0.5mm を示し，中心部が端部より若干大きくなる傾向であった。なお，スランプフローが異なる S22 と H22 の違いでは H22 が若干大きかった。模擬柱部材試験体の高さは供試体（φ150×300）の高さの約 15 倍であるが，沈降量は供試体のものより小さくなる傾向であった。

(3) 充填性（DF 下面）

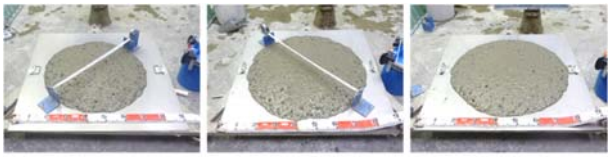
各模擬柱試験体において充填性が低下すると予想される最小間隔の 150mm の DF2 の充填状況を**図－12** に示す。いずれも，空隙は打設孔の周りに比較的に集中して形成されていた。なお, DF 下面の充填率の結果(平均値)を**図－13** に示す。充填率は，全ての調合で 96%以上を示し，目標値以上の良好な充填性が確認できた。

(4) 供試体の圧縮強度

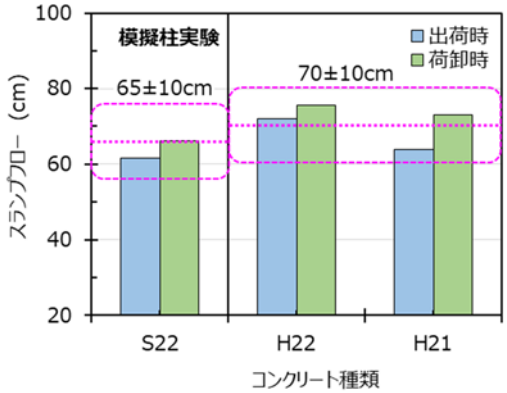
標準養生の圧縮強度は，材齢に伴って増進しており，いずれも材齢 28 日で 128.5～134.2N/mm^2 で 120N/mm^2 を上回った。W/C22%のスランプフローが異なる S22 と H22 の圧縮強度は，H22 が S22 より若干 2～3N/mm^2 高い傾向であった。

(5) コア強度と DF 強度補正値（Sd 値）

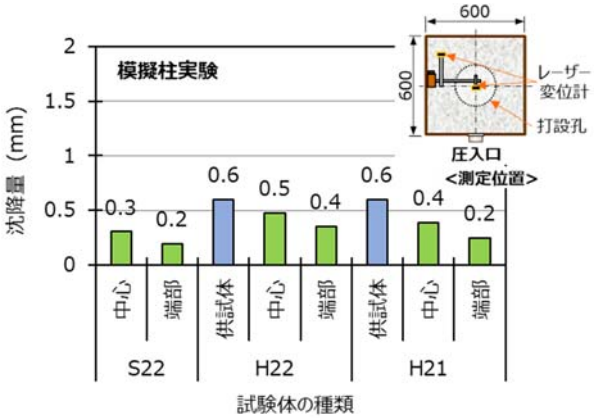
模擬柱部材試験体の中心部と端部より採取したコアの圧縮強度の結果を**図－14** と**表－8** に示す。材齢 91 日のコア強度の平均値は，S22 の中心部が 131.9N/mm^2，端部が 132.4N/mm^2 で，H22 の中心部が 130.8N/mm^2，端部が 132.3N/mm^2 であり，スランプフロー違いの差は少なかった。なお, H21 の中心部が 132.7N/mm^2, 端部が 132.4N/mm^2 であり，いずれも 130N/mm^2 を上回った。H22 は，コア採取時に他のケースに比べて側面の凹凸が多少あり, 供試体の成形に影響があったため, ばらつきが生じたと思われる。**図－15** に示す模擬柱試験体のコア強度による強度補正値（Sd 値）は，一般部と DF 部（点線部）の強度差とし，S22 が－1.3N/mm^2, H22 が－3.5N/mm^2 で, 平均値で－2.4N/mm^2 であった。なお，H21 の Sd 値は 2.2N/mm^2 を示した。以上の結果より，Sd 値は S22 と H22 が負の値であるが，H21 の Sd 値を考慮し，安全側とするために 3.0N/mm^2 と設定し，次の 4 章の調合設計に用いた。



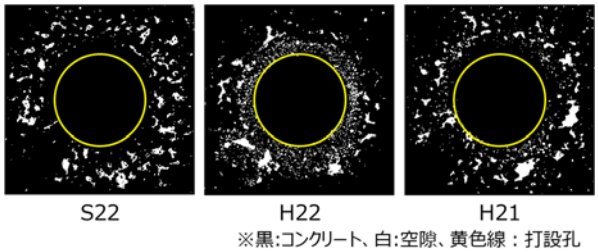
写真－2　スランプフロー試験の状況



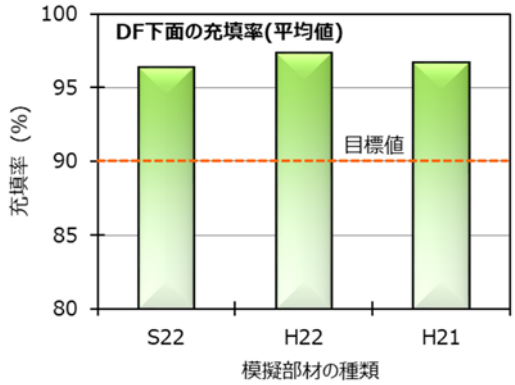
図－10　スランプフロー試験の結果



図－11　沈降量の結果



図－12　模擬柱試験体の充填状況の一例（DF2）



図－13　模擬柱試験体の充填率(平均値)

4. 調合設計

4.1 強度補正値 Sc 値の算出と水セメント比の試算

CFT 造の充填コンクリートの調合強度式は，(1) 式および (2) 式から定められる。

$Fm \geqq Fc + Sc + K\sigma$ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ (1)

$Sc = mSn + Sd$ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ (2)

ここで，Fm：調合管理強度（呼び強度）(N/mm²)

Fc：設計基準強度（N/mm²）

Sc：強度補正値（N/mm²）

mSn：標準養生供試体の材齢 m 日（m＝28）における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢 n 日（n＝91）における圧縮強度との差による強度補正値 (N/mm²)

Sd：ダイアフラム近傍の強度変動を考慮した強度補正値（N/mm²）

K：構造体補正強度に対する変動を考慮した正規偏差，80N/mm² 以上では 2.0 以上とする（N/mm²）

σ：構造体コンクリート強度管理用供試体の圧縮強度の標準偏差（N/mm²）

上記の式を用いて，実機実験及び実大模擬柱実験の結果から得られた mSn 値（5N/mm²）と Sd 値（3N/mm²）を用いて Sc 値を算出した。なお，σ は大臣認定取得の生コン工場の高強度コンクリートの過去実績により 6.5N/mm² とし，**図－7** に示した回帰式を用いて設計基準強度別の W/C を算出した。その結果を**表－9** に示す。これらの結果から，調合設計に必要な強度補正値を示すことができ，Fc90～110N/mm² の範囲の高強度コンクリートにおいて実用的な W/C の試算ができた。

5. まとめ

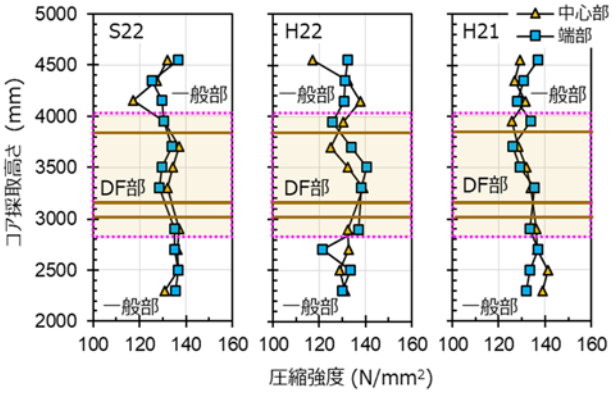
中庸熱ポルトランドセメントを用いた Fc100N/mm² の CFT 造用高強度コンクリートの開発に当たり，実機実験及び実大模擬柱部材実験について以下の知見が得られた。

(1) 実機実験において，コンクリートのスランプフローや空気量などのフレッシュ時の性状及び圧縮強度は目標値を満足し，施工性は良好であると判断される。

(2) 模擬体試験体のコア強度による強度補正値 $_{28}S_{91}$ 値は，Fc110N/mm² まで 5.0N/mm² とすることができた。

(3) 実大模擬柱部材実験により鋼管内で良好な充填性が確認でき，コア強度によるダイアフラム近傍の強度補正値 Sd を 3N/mm² で設定することで，Fc90～110N/mm² の範囲の高強度コンクリートにおいて概ね実用的な W/C の試算ができた。

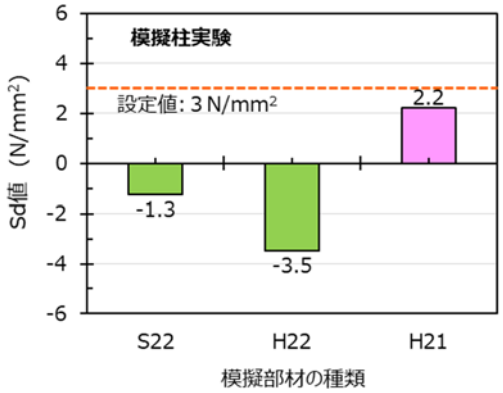
以上の結果より，中庸熱ポルトランドセメントを使用した Fc110N/mm² までの調合設計を実施した。今後，同コンクリートを用いてポンプ圧送実験による施工性を確認する予定である。



図－14　模擬柱試験体のコア強度

表－8　コア強度と強度補正値 (Sd 値) (N/mm²)

記号	コア強度平均値		DF 近傍のコア強度		強度補正値	
	中心部	端部	一般部	DF 部	Sd	Sd 平均
S22	131.9	132.4	131.6	132.8	-1.3	-2.4
H22	130.8	132.3	129.9	133.4	-3.5	(0)
H21	132.7	132.4	133.5	131.3	2.2	2.2



図－15　模擬柱試験体のコア強度による Sd 値

表－9　強度補正値と W/C の試算結果 (管理材齢 28 日)

Fc (N/mm²)	強度補正値(N/mm²) $_{28}S_{91}$	Sd	Sc	Fm (N/mm²)	σ (N/mm²)	C/W	W/C (%)
90	5	3	8	98	6.5	3.61	27.7
100	5	3	8	108	6.5	4.16	24.0
110	5	3	8	118	6.5	4.72	21.2

※調合強度採用式：F＝18.0C/W+46.1

参考文献

1) 依田 和久他：中庸熱セメントを用いた高強度 CFT 充填コンクリート工事，コンクリート工学，Vol.50，No.11，pp.1022-1028，2012

2) 伊藤 智章他：中庸熱ポルトランドセメントを用いた Fc100N/mm² 級の高強度コンクリートの基礎的性質，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.1043-1044，2008.9

3) 国土交通省国土技術政策総合研究所編：コンクリート充填鋼管(CFT) 造技術基準・同解説，(社)新都市ハウジング協会，2017.12

4) 全 振煥他：高粘性の CFT 構造用高強度充填コンクリートを対象としたポンプ圧送性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1231-1236，2013