

特集 「技術研究所再整備」

超高強度コンクリート充填鋼管 (CFT) 柱

鈴木康正 丹羽博則 瀧田安浩
 時野谷浩良 山中昌之 遠藤文明
 (本社設計本部) (本社設計本部)

Ultra High Strength Concrete-Filled Steel Tube Column

Yasumasa Suzui Hironori Niwa Yasuhiro Fuchita
 Hiroyoshi Tokinoya Masayuki Yamanaka Fumiaki Endo

Abstract

The Obayashi Corporation has developed ultra high strength concrete filled steel tube columns and has used it in the construction of the new main building of the Technical Research Institute (TRI). The ultra high strength concrete filled steel tube (CFT) column uses high strength steel and concrete that is twice as strength as conventional steel and concrete. H-SA700 is a type of ultra high strength steel having tensile strength of 780N/mm^2 . The compressive strength of ultra high strength concrete is 160N/mm^2 . Ultra high strength CFT columns are robust against earthquakes and fires. It also enables the construction of buildings with superior design. This paper presents the properties of the ultra high strength steel and concrete and describes its structural and fire-resistant properties when applied to CFT columns. Furthermore, the paper also describes its application to the design and construction of new main building of the TRI.

概要

高度な耐震性・耐火性の確保と意匠性・快適性に優れた建築空間の実現に資する柱部材として、国内最高強度レベルの超高強度CFT柱を開発し、実建物（大林組技術研究所新本館）に初適用した。超高強度CFT柱には、国家プロジェクトで開発された引張強さ 780N/mm^2 の超高強度鋼「H-SA700」と大林組が開発した設計基準強度 160N/mm^2 の超高強度コンクリートを使用している。また、鋼管表面に耐火塗料を塗布し、耐火被覆厚さを低減することにより、柱の細径化を図っている。超高強度CFT柱の開発に当たり、超高強度鋼や超高強度コンクリートの基本性状を材料試験等により確認した。また、柱部材としての構造性能を短柱圧縮実験と長柱曲げせん断実験により、耐火性能を載荷加熱実験により検証した。さらに、設計・施工面での事前検討を行った上で、実建物での施工（鋼管柱継手溶接、充填コンクリート）を実施した。

1. はじめに

近年、建築分野で使用する鋼材やコンクリートなどの構造材料の高強度化が進展している。また、巨大地震の発生に対する備えとして、建物に一層高度な耐震性が求められる状況にある。こうした中で、鋼材とコンクリートを組合せた合理的な柱部材であるコンクリート充填鋼管 (CFT) 柱の高強度化に対するニーズは増大している。

今回、従来の約2倍の強度を有する鋼材とコンクリートを使用した国内最高強度レベルの超高強度CFT柱を開発した。超高強度CFT柱を適用することにより、高度な耐震性・耐火性を確保しつつ、細い柱で意匠性・快適性に優れた建築空間を実現することが可能となる。

超高強度CFT柱には、国家プロジェクトで開発された超高強度鋼「H-SA700」（引張強さ 780N/mm^2 ）を鋼管に使用し、大林組が開発した超高強度コンクリート（設計基準強度 160N/mm^2 ）を内部に充填している。また、鋼管表面に耐火塗料を塗布することで耐火被覆厚さを低減し、柱の細径化を図っている (Fig.1)。

本稿では、開発した超高強度CFT柱の特徴と効果、および使用する超高強度材料の特性について述べる。また、柱部材としての構造性能を短柱圧縮実験と長柱曲げせん断実験により、耐火性能を載荷加熱実験により検証した結果について報告する。さらに、実建物（大林組技術研究所新本館）への適用に際しての設計・施工面での検討内容や実施工の状況について紹介する。

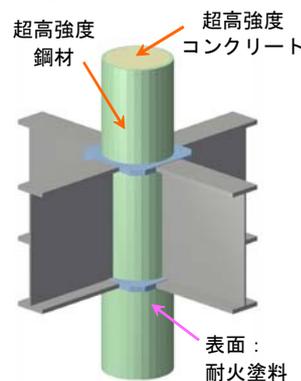


Fig. 1 超高強度CFT柱
Ultra High Strength CFT Column

2. 特徴と効果

今回開発した超高強度CFT柱は以下の特徴を有する。

- 1) 高い意匠性：細い柱で大スパンや吹抜けのある開放的な空間を実現することができ、意匠性・快適性に優れた建築環境の創出に貢献する。すなわち、スパンの拡大という要求に対して、鋼管の外径や板厚を増大させずに、細い柱で対応することを可能にする (Fig. 2)。
- 2) 高い耐震性：阪神大震災クラスの大地震に対しても、少ない柱本数で高い安全性を実現できる。
- 3) 高い耐火性：鋼管の表面に耐火塗料を塗布することにより、耐火被覆厚さや仕上げ寸法を大幅に低減した細い柱で、火災時の安全性を確保することができる。

さらに、超高強度材料の採用により、鋼材・コンクリートの使用量を削減でき、環境負荷低減にも貢献できる。

3. 材料特性

3.1 鋼材

超高強度CFT柱の鋼管には、国家プロジェクト^{*}で開発された「建築構造用高強度780N/mm²鋼材 (H-SA700)」を国内で初めて適用している (※プロジェクトの正式名称は、「革新的構造材料を用いた府省連携新構造システム建築物 研究開発プロジェクト」)。H-SA700の規格値 (化学成分、機械的性質) をTable 1に示す。また、H-SA700と通常の鋼材 (SM490A) に関して、引張試験により得られる応力-ひずみ関係を比較した例をFig. 3に示す。H-SA700は降伏点700N/mm²以上、引張強さ780N/mm²以上であり、降伏比 (=降伏点/引張強さ) が通常の鋼材と比較して大きい。なお、H-SA700では従来の高強度鋼材と異なる高強度化手法を採用しており、3つの高強度化技術 (細粒化・析出強化・変態制御) をバランスよく組み合わせることにより、合金元素の低減と熱処理工程の省略、簡略化を目指している¹⁾。

3.2 コンクリート

超高強度CFT柱の充填コンクリートには、大林組が開発した超高強度コンクリート (設計基準強度160N/mm²) を用いている。

超高強度コンクリートに使用した材料をTable 2に示す。高強度化を実現するには、水結合材比を低減するとともに、結合材の一部をシリカフェームに置換し、コンクリートを緻密化させることが一般的となっており、本コンクリートでもその効果を利用している。なお、混和材に膨張材を使用しているのは、自己収縮による若材齢でのひび割れの発生を抑制するためである。骨材は、産地を限定し、骨材JIS規格を満足するものの中から、高強度化に適した骨材を選定した。有機繊維は、鉄筋コンク

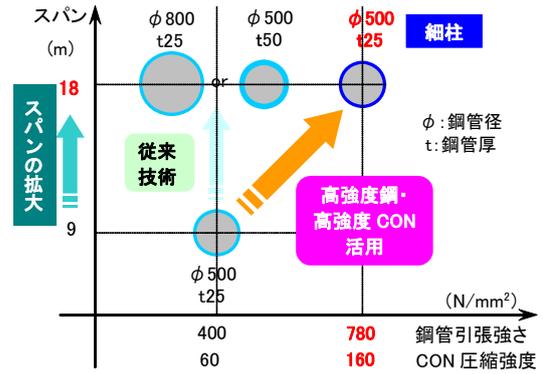


Fig. 2 超高強度CFT柱の特徴 (概念図)
Feature of Ultra High Strength CFT Column

Table 1 超高強度鋼 (H-SA700) の規格
Properties of H-SA700 Steel

(a) 化学成分

鋼種	板厚 (mm)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Ceq (%)	P _{CM} (%)
H-SA700A	≧6	≦0.25	≦0.55	≦2.00	≦0.030	≦0.015	≦0.65	≦0.32
H-SA700B	≦50	≦0.25	≦0.55	≦2.00	≦0.025	≦0.015	≦0.60	≦0.30

[凡例] C_{eq}: 炭素当量, P_{CM}: 溶接割れ感受性組成

(b) 機械的性質

鋼種	降伏点又は 0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	伸び (%) (板厚 (mm))		
				[板厚 (mm)]		
				≧6	>20	
				≦20	≦50	
				JIS 5号	JIS 4号	JIS 5号
H-SA700A	700	780	≦98	≧16	≧16	≧24
H-SA700B	~900	~1000				

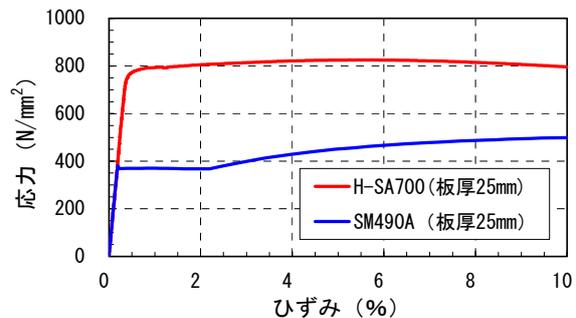


Fig. 3 鋼材の応力-ひずみ関係
Stress-Strain Relationship of Steel Material

Table 2 超高強度コンクリートの使用材料
Material Properties of Ultra High Strength Concrete

材料	種類
セメント	シリカフェームセメント
混和材	石灰系膨張材
骨材	硬質砂岩碎石・砕砂
化学混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤
爆裂防止用繊維	有機繊維

リート造向けに、火災時の爆裂防止のために混入するものであり、CFT構造では本来不要なものである。



Photo 1 スランプフローと空気量の測定状況
Measurement of Slump Flow and Air Volume

調査は、構造体コンクリート強度で 160N/mm^2 を満足するものとして、水結合材比14%とした。コンクリートの練混ぜは、強制2軸練りミキサ（容量 3.250m^3 ）を用い、1バッチ 1.25m^3 とした。練混ぜ時間は、モルタル状態で120～180秒、粗骨材投入後180～480秒とした。有機繊維は、現場到着後フレッシュ性状を確認してから、トラックアジテータに投入し、攪伴した。

実打設に先立ち、プラントの実機ミキサにて試験練りを行い、トラックアジテータにて実際の運搬経路を輸送し、コンクリートのフレッシュ性状の経時変化、強度および施工性などを確認した。Photo 1にスランプフローと空気量の測定状況を示す。目標スランプフローは70cm、目標空気量は2%とした。Fig. 4に、スランプフローおよび空気量の経時変化を示す。

コンクリート強度の管理は、標準養生および簡易断熱養生とし、管理材齢は91日とした。また、構造体コンクリート強度の確認は、簡易断熱養生したコンクリート供試体の強度で行うこととした。これは簡易断熱養生強度とコア強度の相関性が高いことに基づいている。既往の実験結果から、標準養生の管理強度を 166.2N/mm^2 、簡易断熱養生の管理強度を 160N/mm^2 とした。Fig. 5に実機試験練りにおける圧縮強度の変化を示す。標準養生では、初期材齢での強度発現は小さいが、管理材齢と設定した91日では、簡易断熱養生強度を若干上回っている。

4. 構造性能の検証

4.1 短柱圧縮実験

4.1.1 目的 超高強度鋼(H-SA700)と超高強度コンクリート($\text{Fc}160$)で構成される超高強度CFTの短柱が圧縮力を受ける場合の基本構造性能（降伏耐力，終局耐力，破壊性状）を載荷実験により確認した。

4.1.2 実験計画 試験体一覧をTable 3，試験体形状・寸法をFig. 6に示す。試験体は，超高強度鋼(H-SA700B)の円形鋼管に超高強度コンクリート($\text{Fc}160$)を充填したCFT柱2体と純鉄骨柱1体の計3体である。試験体の断面形状は外径240mmの円形断面，径長比 (h_0/D ， h_0 ：高さ， D ：外径)は3である。実験パラメータは構造

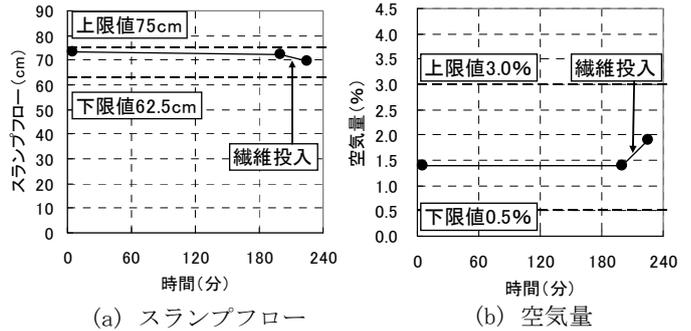


Fig. 4 実機試験練りにおける経時変化
Slump Flow of Fresh Concrete and Air Volume

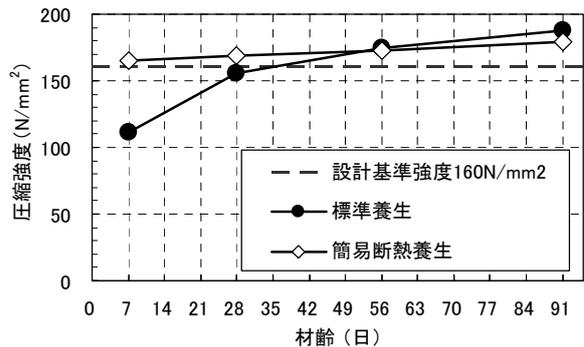


Fig. 5 実機試験練りの圧縮強度の経時変化
Compressive Strength of Concrete

Table 3 試験体一覧（短柱圧縮実験）
List of Test Specimens

試験体 No.	構造種別	鋼種	外径 D (mm)	板厚		径厚比 D/t	径長比 h_0/D	高さ h_0 (mm)	コンクリート設計基準強度 F_c (N/mm^2)
				公称値 t_0 (mm)	実測値 t (mm)				
1	S	H-SA700B	240	12	13.3	18.0	3	720	—
2	CFT			8	8.14				160
3				—	—				—

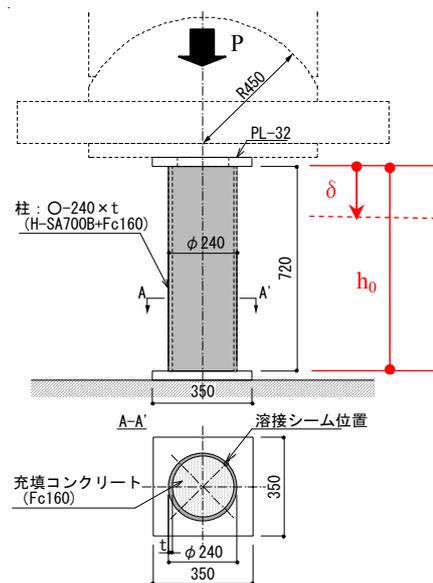


Fig. 6 試験体形状・寸法（短柱圧縮実験）
Configuration and Dimensions of Test Specimens

Table 4 鋼材の引張試験結果
(短柱圧縮実験・長柱曲げせん断実験)
Mechanical Properties of Steel

鋼種	板厚		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	破断伸び (%)
	公称値	実測値				
	(mm)	(mm)				
H-SA700B	12	13.3	783	833	93.9	27.2
	8	8.14	777	827	94.0	20.8

※降伏点は0.2%オフセット耐力
※試験片形状はJIS 12B号で、製管後の鋼管(外径240mm)より採取

種別(S, CFT)および径厚比(D/t₀=20, 30, t₀:板厚の公称値)とした。なお、鋼管シーム溶接部には、780N/mm²級溶接ワイヤーを用いた。

鋼材の引張試験結果をTable 4, コンクリートの圧縮試験結果をTable 5に示す。鋼材の引張試験片は鋼管(外径240mm)より採取した。以下、後述する設計式による耐力は、コンクリート強度を180N/mm²として計算した。

載荷方法は20MN載荷装置を使用した単調圧縮載荷とした。また、試験体の上下エンドプレート間の軸方向変位を高感度変位計により、鋼管軸方向・周方向のひずみを2軸ひずみゲージにより計測した。

4.1.3 実験結果 試験体の荷重-変形関係をFig. 7, 試験体の最終破壊状況をPhoto 2に示す。変形は軸変位(δ)を試験体長さ(h₀)で除し、平均ひずみ(δ/h₀)に換算した値である。図中には、鋼管降伏(ひずみゲージにより判定)時荷重, 最大荷重の実験値をプロットで、終局耐力の計算値(単純累加強度)を破線で併記している。単純累加強度(cN_u)については次式で算出した。

$$cN_u = c\sigma_b \cdot cA + s\sigma_y \cdot sA$$

ここで、

cσ_b: コンクリートの圧縮強度 (=180N/mm²)

cA: コンクリートの断面積, sσ_y: 鋼管の降伏点,

sA: 鋼管の断面積

鋼管が降伏(ひずみゲージでミーゼスの降伏条件式により判定)するまでは概ね弾性挙動を示し、最大荷重以降については鋼管の局部座屈の進行に伴い、荷重が緩やかに低下した。

実験結果一覧をTable 6に示す。弾性軸剛性は、鋼管とコンクリートの各断面の軸剛性を累加した計算値と概ね対応しており、最大荷重の実験値は、単純累加強度による計算値とほぼ一致した。なお、Photo 2より、CFT柱の試験体(試験体No.2, No.3)においては、鋼管内部のコンクリートがせん断滑り破壊を起こしていることが推測される。

4.2 長柱曲げせん断実験

4.2.1 目的 超高強度鋼(H-SA700B)と超高強度コンクリート(Fc160)で構成される超高強度CFTの長柱が軸力・曲げモーメント・せん断力を受ける場合の構造性能(降伏耐力, 終局耐力, 破壊性状)を載荷実験により確認した。

Table 5 コンクリートの圧縮試験結果
(短柱圧縮実験・長柱曲げせん断実験)
Mechanical Properties of Concrete

試験体の種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	材令 (日)
短柱用	179.8	46.9	0.22	177
長柱用	182.4	48.6	0.22	202

※試験体(外径240mm)とほぼ同径の鋼管(φ216.3×8.2)にコンクリートを充填し、コア抜きを実施。
※試験結果はシリンダー(φ100×h200)3本の平均値

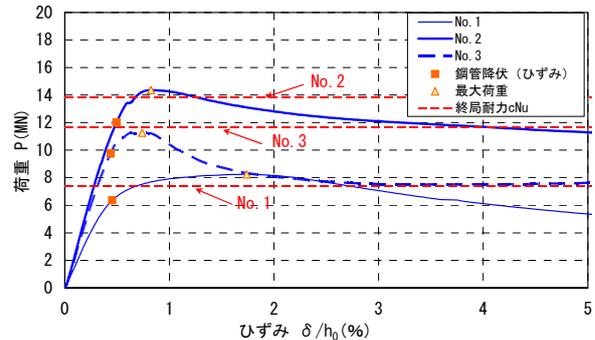


Fig. 7 荷重(P) - 変形(δ/h₀)関係
Load P vs. Deformation δ/h₀



(a) No. 1 (b) No. 2 (c) No. 3

Photo 2 破壊状況(短柱圧縮実験)
Failure Mode of Stub Column Tests

Table 6 実験結果一覧(短柱圧縮実験)
List of Test Results

試験体 No.	弾性剛性			終局耐力		
	実験値	計算値	実験値 計算値	実験値	計算値	実験値 計算値
	cK (kN/mm)	cK (kN/mm)	cK/cK	cN _u (kN)	cN _u (kN)	cN _u /cN _u
1	2359	2697	0.87	8,240	7,417	1.11
2	5040	5027	1.00	14,367	13,855	1.04
3	4156	4249	0.98	11,261	11,683	0.96

Table 7 試験体一覧(長柱曲げせん断実験)
List of Test Specimens

試験体 No.	鋼種	外径 D (mm)	板厚		径厚比 D/t	径長比 L _k /D	高さ h ₀ (mm)	コンクリート設計基礎強度 F _c (N/mm ²)	軸力比 N/N ₀
			公称値	実測値					
			t ₀ (mm)	t (mm)					
1	H-SA700B	240	12	13.3	18.0	18	160	0.2	
2			8	8.14	29.5	12			
3			12	13.3	18.0	18			
4			12	13.3	18.0	18			

〔凡例〕 N₀: 単純累加強度 N₀=cσ_b・cA+sσ_y・sA
(コンクリートの圧縮強度cσ_b=180N/mm²として算出)

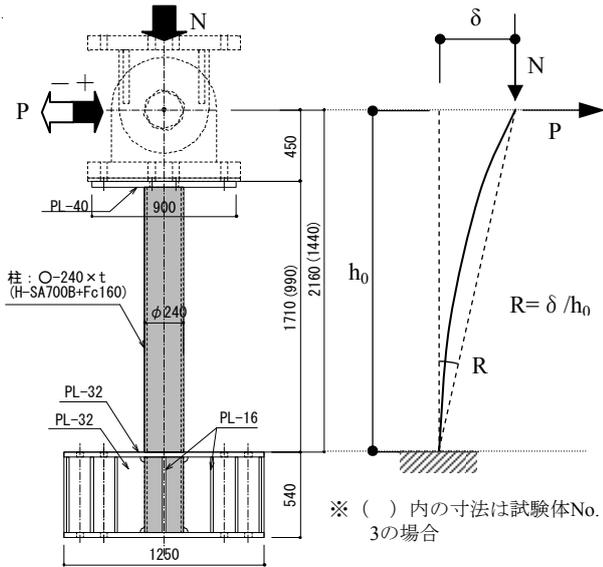


Fig. 8 試験体形状・寸法 (長柱曲げせん断実験)
Configuration and Dimensions of Test Specimens

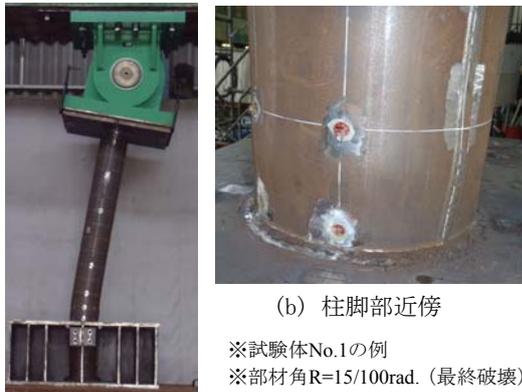


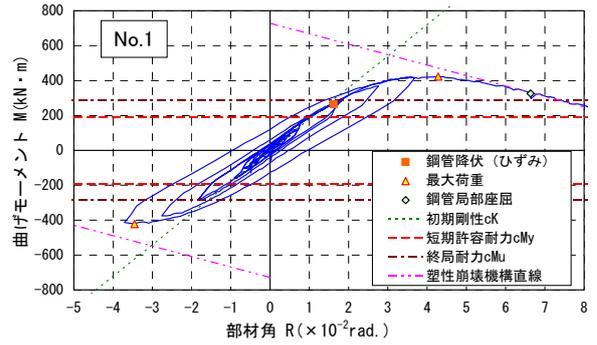
Photo 3 破壊状況 (長柱曲げせん断実験)
Failure Mode of Beam Column Tests

Table 8 実験結果一覧 (長柱曲げせん断実験)
List of Test Results

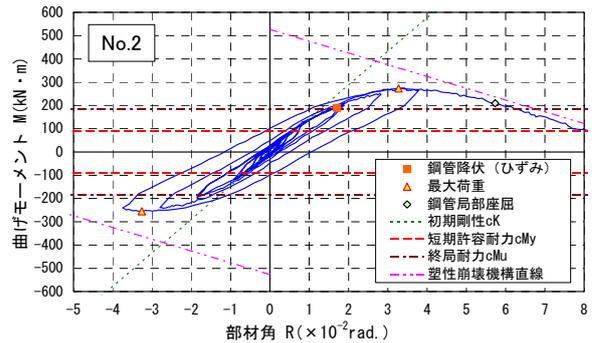
試験体 No.	初期剛性		鋼管降伏耐力				終局耐力		
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値
	c_k	c_k	c_{My}	c_{My}	c_{Mu}	c_{Mu}	c_{Mu}	c_{Mu}	c_{Mu}
1	169	180	0.94	265	192	1.38	422	285	1.48
2	132	144	0.92	189	90.9	2.08	274	184	1.48
3	286	286	1.00	269	208	1.29	532	370	1.44
4	138	135	1.02	156	56.0	2.79	275	79.6	3.45

[凡例] c_k : 学会CFT指針²⁾による初期剛性, c_{My} : 学会CFT指針²⁾による短期許容耐力, c_{Mu} : 学会CFT指針²⁾による終局耐力, c_k : 部材角 $R=1/200$ 時の割線剛性

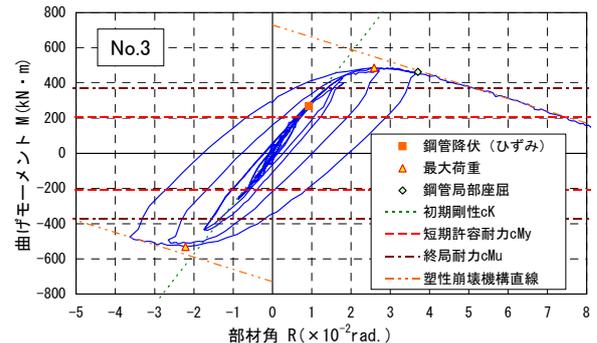
4.2.2 実験計画 試験体一覧をTable 7, 試験体形状・寸法をFig. 8に示す。試験体は、超高強度鋼(H-SA700B)の円形鋼管に超高強度コンクリート(Fc160)を充填したCFT柱4体である。試験体の断面形状は外径240mmの円形断面である。実験パラメータは径厚比($D/t_0=20, 30$, t_0 : 板厚の公称値), 径長比($L_k/D=12, 18$), 軸力比($n=0.2, 0.35$)とした。加力形式は一端固定, 他端ピンによる片持梁形式とし, 加力点であるピン中心か



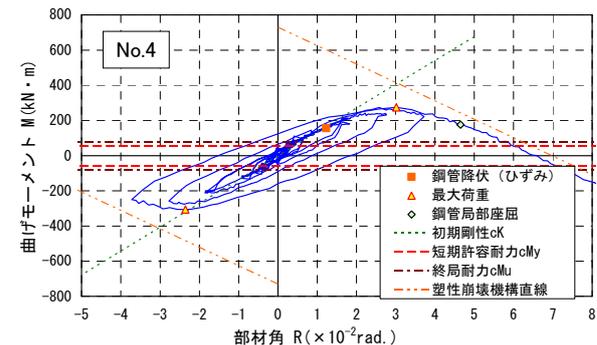
(a) No. 1 [$N/N_0=0.2$, $t_0=12$, $L_k/D=18$]



(b) No. 2 [$N/N_0=0.2$, $t_0=8$, $L_k/D=18$]



(c) No. 3 [$N/N_0=0.35$, $t_0=12$, $L_k/D=12$]



(d) No. 4 [$N/N_0=0.35$, $t_0=12$, $L_k/D=18$]

Fig. 9 曲げモーメント (M) - 部材角 (R) 関係
Moment M vs. Deformation Angle R

ら試験体スタブ上面までの高さ (h_0) が径長比の算定で用いた長さ (L_k) の1/2となるように設定した。試験体の柱部分と固定用スタブは柱通しにより接合し, スタブ内の鋼管部分にもコンクリートを充填した。柱シーム溶接部, および柱-スタブ溶接部には $780N/mm^2$ 級溶接ワイヤ

一を用いた。鋼材の引張試験結果、コンクリートの圧縮試験結果については4.1.2項のTable 4, Table 5に併記している。

荷重方法は、一定軸力下で水平力を作用させる正負交番の曲げせん断加力とした。荷重スケジュールは柱の部材角R (Rの定義については、Fig. 8の右図を参照) で±1/400, ±1/200, ±1/150, ±1/100, ±1/50を各2サイクル, ±1/33, ±1/25を各1サイクルとし、以降は正側への単調載荷とした。載荷は、鋼管に破断が発生するか、あるいは載荷装置である水平アクチュエータのストローク限界 (±400mm) に達するまで行った。

4.2.3 実験結果 試験体の荷重-変形関係をFig. 9、破壊状況をPhoto 3に示す。Fig. 9の縦軸は、水平荷重 (P) と試験体高さ (h₀) の積で得られる曲げモーメント (M) であり、横軸は柱の部材角 (R) である。同図中には、鋼管降伏 (ひずみゲージにより判定) 時荷重, 最大荷重, 鋼管局部座屈時荷重の実験値をプロットで併記している。また、初期剛性の計算値, 建築学会CFT指針²⁾に基づく短期許容耐力・終局耐力の計算値, 同指針による短柱の終局曲げ耐力を用いて計算した塑性崩壊機構直線³⁾についても同図に併記している。

全ての試験体で部材角R=1/100程度までは、ほぼ弾性

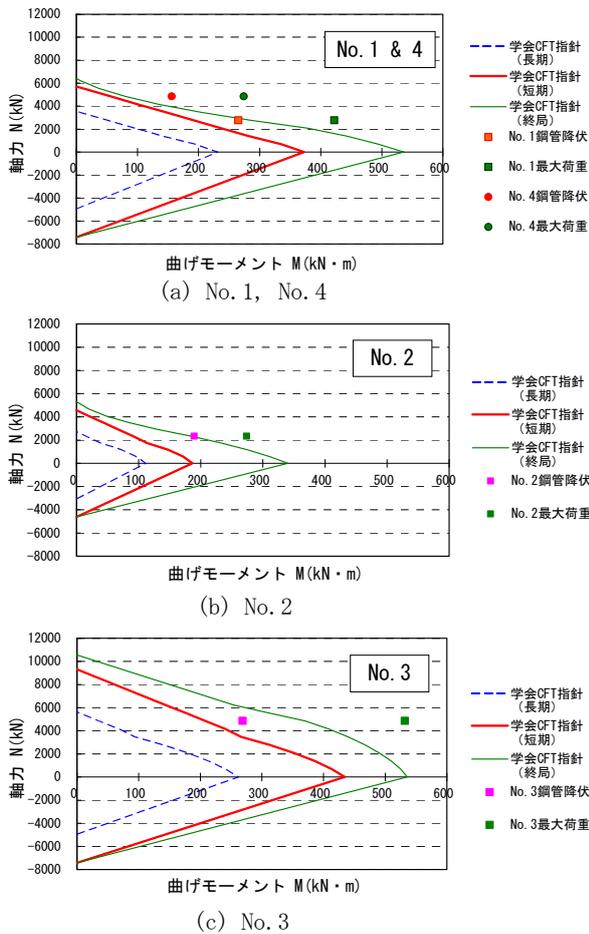


Fig. 10 曲げモーメント (M) - 軸力 (N) 相関関係 M-N Interaction Curve

挙動を示した。その後、柱脚部近傍で曲げ圧縮側鋼管が降伏 (ひずみゲージでミーゼスの降伏条件式により判定) し、最大荷重に到達した後、鋼管の局部座屈の進展により荷重が緩やかに低下した。

実験結果一覧をTable 8に示す。初期剛性の実験値は、鋼管とコンクリートの全断面を有効とした曲げせん断剛性の計算値と良い対応を示している。また、鋼管降伏時荷重, 最大荷重の実験値は建築学会CFT指針式²⁾による短期許容耐力, 終局耐力の計算値を大きく上回っている。

材料強度に基づく試験体の曲げモーメント (M) - 軸力 (N) 相関曲線と実験値との関係をFig. 10に示す。図中には、鋼管降伏時荷重, 最大荷重の実験値をプロットしている。超高強度CFT柱に使用されている鋼材とコンクリートの強度は建築学会CFT指針式²⁾の適用範囲外であるが、上述の式を準用することにより、柱部材としての耐力を安全側に評価できることがわかる。

5. 耐火性能の検証

5.1 耐火実験の目的

前章までに示した超高強度CFT柱を対象に、その耐火性能を確認することを目的として載荷加熱実験を実施し

Table 9 試験体一覧 (載荷加熱実験) Properties of Specimens

試験体名		No.1	No.2	No.3
鋼管	鋼管サイズ	○-500×25 mm		
	鋼種	H-SA700B		
CON	設計基準強度	Fc 160 N/mm ²		
	水結合材比	W/B = 14.0 %		
耐火塗料厚さ		0.75 mm		
載荷軸力比		0.41	0.20	0.41
加熱時間		崩壊まで載荷加熱を継続		加熱90分後 載荷のみ継続

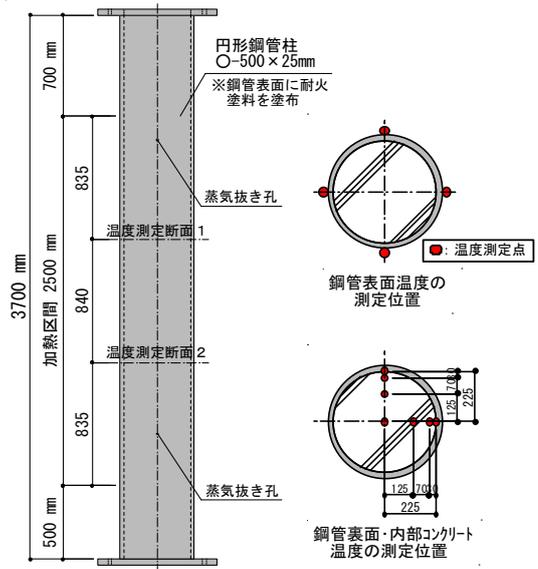


Fig. 11 試験体の形状寸法 (載荷加熱実験) Configuration of Specimens

Table 10 鋼材の引張試験結果 (载荷加熱実験)
Mechanical Properties of Steel

鋼種	板厚		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比 (%)	破断伸び (%)
	公称値 (mm)	実測値 (mm)				
H-SA700B (○-500×25mm)	25	25.7	763	865	88.2	36.7

※降伏点は0.2%オフセット耐力
※試験片形状はJIS 12B号で、製管後の鋼管(外径500mm)より採取

た。本実験では、超高強度CFT柱に施す耐火被覆として、仕上げ寸法の縮小化を図ることが可能な耐火塗料(加熱発泡性を有する塗料系の耐火被覆)を適用し、载荷軸力や加熱条件の違いが耐火性能に及ぼす影響を確認した。

5.2 耐火試験体

载荷加熱実験に供した試験体の一覧および形状寸法をTable 9とFig. 11に示す。試験体は、円形断面CFT柱(全3体)とし、柱長さは3,700mm(加熱区間2,500mm)で全試験体共通とした。鋼管および充填コンクリートの使用材料は、前章に示した構造実験用の試験体と同じく、鋼管にH-SA700B(φ500×25mm)を、充填コンクリートにはFc160N/mm²の超高強度コンクリートを用いた。鋼管およびコンクリートの力学的性質をTable 10, 11に示す。なお、鋼管表面にはTable 12に示す塗装仕様に基づき、耐火塗料を0.75mm厚にて塗布した。

5.3 载荷加熱実験

载荷加熱実験は、大林組技術研究所が保有する汎用耐火炉を用いて実施した。試験体のセットアップ状況をFig. 12に、また実験時の炉内状況の写真をPhoto 4に示す。

载荷条件は、試験体の柱頭・柱脚をピン支持とした中心圧縮载荷とし、所定の軸力を载荷した後に加熱を開始し、実験終了時まで一定軸力を保持させるものとした。载荷軸力は、鋼材の基準強度(630N/mm²)およびコンクリートの設計基準強度(160N/mm²)に基づく単純累加強度に対して、試験体No.1とNo.3は軸力比0.41(载荷軸力20MN)、試験体No.2は軸力比0.20(载荷軸力10MN)とした。

加熱条件は、ISO834⁴⁾標準加熱温度曲線に従い、試験体が軸力支持能力を喪失するまで加熱を継続することを基本とした。ただし試験体No. 3のみは、加熱終了後の冷却過程における軸力支持能力および軸変形挙動を確認するため、加熱時間は90分間とし、それ以降は炉内を自然冷却させた条件下にて、断面中心部のコンクリート温度がピークを示すまで载荷のみを継続した。

温度測定項目は、炉内温度、鋼管の表面および裏面温度、内部コンクリート温度とし、鋼管表面温度はFig. 11に示す温度測定断面1, 2にて、鋼管裏面および内部コンクリート温度は温度測定断面1にて測定した。また、試験体の軸方向変形挙動を計測するため、柱頭部の载荷盤上部に変位計を設置し、試験体の軸方向変位を測定した。

Table 11 コンクリートの圧縮試験結果 (载荷加熱実験)
Mechanical Properties of Concrete

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	材齢 (日)	含水率 (%)
No.1	173.1	46.0	0.21	91	4.3
No.2	172.8	46.0	0.21	101	4.3
No.3	181.2	47.7	0.22	103	4.1

※試験体(外径500mm)とほぼ同径の鋼管(φ508×22)にコンクリートを充填し、コア抜きを実施

※試験結果はシリンダー(φ100×h200)3本の平均値

Table 12 塗装仕様
Specification of Coating

工程	塗装仕様	
	種類	膜厚(μm)
素地調整	ISO S13 (2種ケレン)	—
下塗り	変性エポキシ樹脂塗料	40
耐火塗料	SKタイカコート主材EX	750
上塗り	アクリル樹脂系上塗り塗料	40

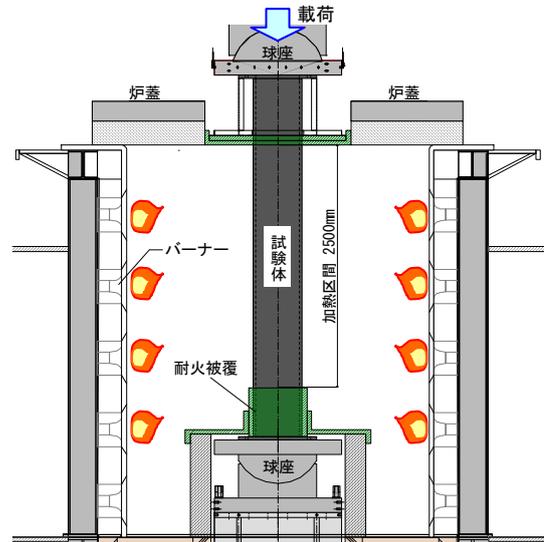


Fig. 12 载荷加熱実験のセットアップ状況
Setup of Fire Resistance Test



Photo 4 実験状況
Fire Resistance Test

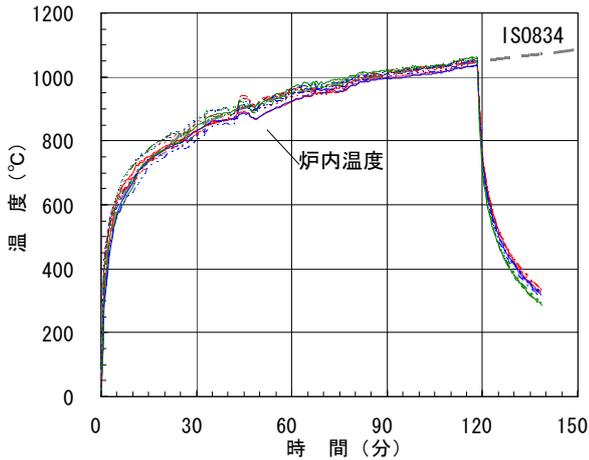


Fig. 13 炉内温度の例 (試験体No.1)
Heat Temperature (No.1)

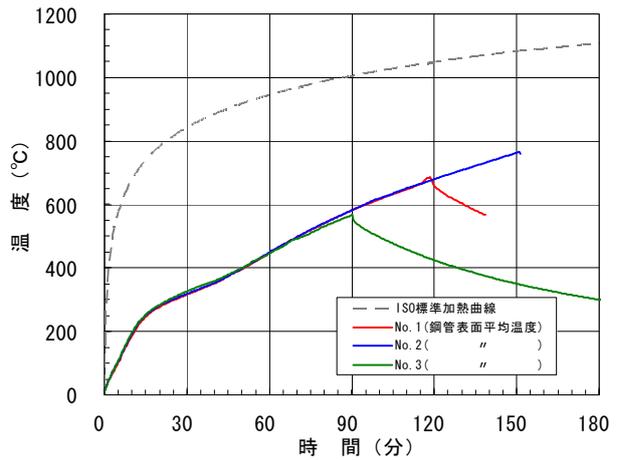


Fig. 14 鋼管表面平均温度の比較
Temperature of Steel Surface

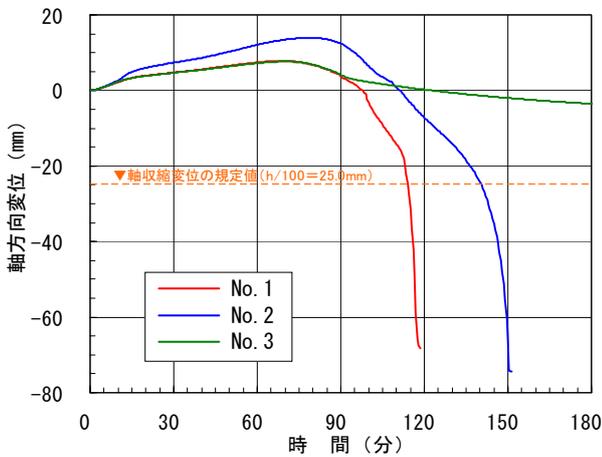


Fig. 15 軸方向変位の比較
Axial Displacement

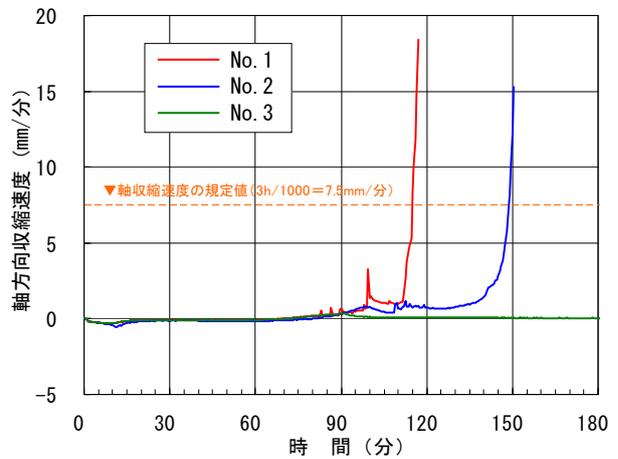


Fig. 16 軸方向収縮速度の比較
Axial Displacement Rate

5.4 実験結果

5.4.1 温度測定結果 温度測定結果の一例として、試験体No.1における炉内温度の経時変化をFig. 13に示す。いずれの試験体においても、炉内温度はISO834標準加熱温度曲線にほぼ一致しており、加熱制御は良好に行われている。

次に、各試験体の鋼管表面温度(平均値)の経時変化をFig. 14に示す。鋼管温度は、加熱開始と同時にほぼ直線的に急増するが、これと同時に耐火塗料が発泡して断熱層を形成することにより、加熱開始後15分以降は温度上昇勾配が軟化し、耐火塗料が鋼管温度の上昇を有効に抑制していることがわかる。また、各試験体の鋼管表面温度はほぼ等しい時間推移を示していることから、鋼管表面に施した耐火塗料は安定した発泡・断熱性能を示していることが確認できる。

5.4.2 軸方向変位 各試験体の軸方向変位の経時変化をFig. 15に、また軸方向収縮速度の経時変化をFig. 16に示す。なお、Fig. 15に示す軸方向変位は、加熱開始時の変位をゼロとして示している。試験体No.1とNo.2を比較すると、軸力比の小さい試験体No.2の方が鋼管の熱膨

張変形量大きい傾向を示しており、No.1の最大伸び量7.8mm(加熱開始後68分)に対して、No.2では13.9mm(同80分)に達している。伸び変形がピークを示した後は、両試験体とも徐々に収縮速度が増してゆき、試験体No.1は加熱開始118分後、No.2は同151分後に軸力支持能力を喪失し、実験を終了した。

これに対して試験体No.3の軸方向変位は、加熱中においては軸力比が等しい試験体No.1とほぼ同様な挙動を示すが、加熱を終了した90分以降は他の試験体と比べて軸収縮速度が緩慢となっている。試験体No.3は実験終了時まで軸力支持能力を保持しており、実験を終了した加熱開始後8時間経過時の軸収縮変位は8.0mmであった。

5.4.3 耐火時間 ISO834では、載荷加熱実験における軸収縮変位($h/100$ [mm], h:柱長さ)および軸方向収縮速度($3h/1000$ [mm/分])の限界値を規定しており、本試験体の加熱長さ2500mmに基づくと、それぞれ25mmおよび7.5mm/分となる。本規定値によれば、試験体No.1とNo.2は、軸力支持能力を喪失する直前に上記の限界変位量を超過しており、試験体No.1の耐火時間は114分、試験体No.2の耐火時間は140分と評価される。

6. 実建物への適用

6.1 設計

今回開発した超高強度CFT柱を大林組技術研究所新本館に初適用した。構造体（主架構）アクソメ図をFig. 17に示す。建物の桁行方向18m、張間方向16~20mであり、建物の南面を中心に計12本の柱に超高強度CFT柱を採用している。鋼管には超高強度鋼（H-SA700B），充填コンクリートには超高強度コンクリート（Fc160）を使用している。鋼管は円形断面で外径500mm，板厚25mmである。

なお、実建物の構造設計においては、鋼材の基準強度を630N/mm²と設定し、レベル2（極稀）地震に対して、CFT柱の応力が建築学会SRC規準式⁵⁾によるCFT柱の短期許容耐力（建築学会CFT指針式²⁾と同様の内容）以下となることを確認している。

6.2 施工

6.2.1 鋼管柱溶接 超高強度CFT柱の鋼管部の柱一柱継手には、現場溶接を採用した。780N/mm²級の超高強度鋼を対象にした現場溶接の既往事例が少ないため、事前に溶接施工試験や溶接部の強度試験を実施し、実現場での溶接条件を確認した上で溶接施工を実施した。溶接方法は780N/mm²溶接ワイヤーを用いたCO₂半自動溶接とし、溶接条件は入熱≦30kJ/cm，パス間温度≦150℃，予熱≧50℃とした。実現場での溶接施工状況をPhoto 5に示す。

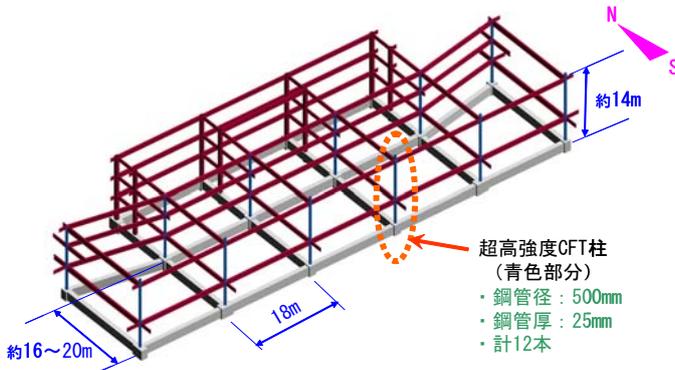


Fig. 17 超高強度CFT柱の実建物への適用
Application of Ultra High Strength CFT Column



Photo 5 鋼管柱継手の現場溶接状況
Onsite Welding of Joint of Steel Pipe Column

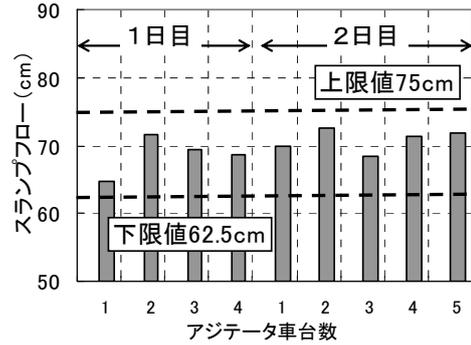


Fig. 18 実打設時のスランプフローの実績
Slump Flow of Fresh Concrete on Construction

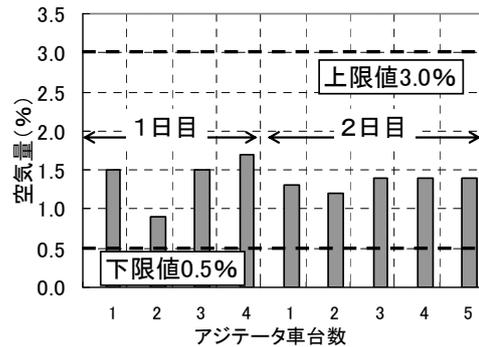


Fig. 19 実打設時の空気量の実績
Air Volume of Fresh Concrete on Construction



Photo 6 コンクリートのフレッシュ試験状況
Test of Fresh Concrete



Photo 7 CFT柱のコンクリート打設状況
Application of Fresh Concrete into a CFT Column

6.2.2 充填コンクリート 超高強度CFT柱に充填したコンクリートのスランプフローおよび空気量の実績をFig. 18およびFig. 19に示す。荷卸し時点および繊維投入後において、管理目標範囲内の安定した品質に管理することができた。Photo 6に打設したコンクリートのフレッシュ試験の状況を示す。スランプフロー70cm程度の、分離のない流動性の良い状態であることを確認した。

Photo 7にCFT柱のコンクリート打設状況を示す。ホッパーおよびフレキシブルホースを用い、落とし込み打設とした。柱1本ずつを打ち込める容量分のコンクリートをホッパーに入れ、柱1本ごとに打設が完了するように調整した。また、ホース筒先の自由落下高さを1m以下、打込み速さを1m/分以下とし、材料分離が生じないように管理した。コンクリート天端高さを連続的に計測し、自由落下高さおよび打込み速さを管理しながら打設した。打設後のCFT柱天端部は、水湿しを実施後、保水養生マットで養生した。

コンクリートの圧縮強度の経時変化をFig. 20に示す。管理材齢91日において、標準養生の管理強度166.2N/mm²に対して187N/mm²、簡易断熱養生の管理強度160N/mm²に対して164N/mm²となり、設計基準強度を満足することを確認した。

大林組技術研究所新本館における超高強度CFT柱の適用状況をPhoto 8に示す。

7. まとめ

高度な耐震性・耐火性の確保と意匠性・快適性に優れた建築空間の実現に資する柱部材として、国内最高強度レベルの超高強度CFT柱を開発した。本稿では、超高強度CFT柱を構成する超高強度材料(鋼材、コンクリート)の材料特性を示すととともに、柱部材としての構造的な性能および耐火性能を実験により検証した結果について報告した。また、実建物(大林組技術研究所新本館)への適用に際しての設計・施工面での検討内容、および鋼管柱継手溶接、充填コンクリートの施工状況についても紹介した。

超高強度CFT柱は、オフィスや商業建築など「高度な耐震性」と、大スパン・吹抜けのある「快適な建築空間」の実現を同時に求められる建物に最適な工法であると考えられる。さらに、鋼材・コンクリートの使用量低減と長寿命建築を両立した環境にやさしい建物を実現できるため、今後の更なる適用拡大が期待される。

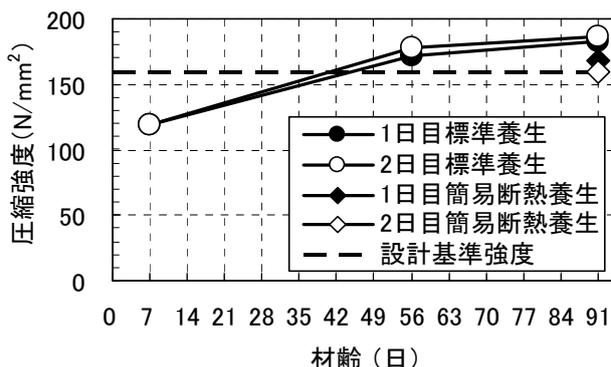


Fig. 20 適用したコンクリートの圧縮強度の変化
Compressive Strength of Concrete on Construction



Photo 8 超高強度CFT柱の適用状況
Application of Ultra High Strength CFT Column

参考文献

- 1) 吉田：建築構造用高強度鋼材H-SA700の開発，JSSC会誌，pp.4-5，No.74，(2009.10)
- 2) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，(2008.10)
- 3) 松井：建築学構造シリーズ 建築合成構造，オーム社，pp.141-147，(2004)
- 4) ISO 834-1: Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements, (1999)
- 5) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算造計規準・同解説，(2001.1)