

# Fc100N/mm<sup>2</sup> 高強度コンクリートの 超高層集合住宅への適用

## Application of Fc100N/mm<sup>2</sup> High-strength Concrete to High-rise Reinforced Concrete Building

河野政典\* 起橋孝徳\* 吉本竜也\*\* 飯塚宏行\*\*\*

### 要 旨

設計基準強度 100N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを超高層鉄筋コンクリート造の集合住宅へ適用した。コンクリートの品質管理として、受入れ時のフレッシュコンクリート試験、単位水量測定、および圧縮強度試験を実施した。コンクリートの打設ではポンプ圧送を試み、圧送前後のフレッシュ性状の変化を確認した。また、構造体コンクリートの長期性状として圧縮強度発現の推移、および実柱部材の長さ変化を把握するため、模擬柱部材によるコア圧縮強度試験、実柱部材のひずみ測定を行った。実施工の結果、受入れ試験結果から、安定したフレッシュ性状のコンクリートが製造されていたことが確認され、コンクリート打設ではポンプ圧送が十分可能であることがわかった。打設後の柱コンクリート打ち上がり面の充填状況は良好で、圧縮強度は所要の強度を十分上回っており、高品質な構造躯体を施工することができた。

キーワード：100N/mm<sup>2</sup> 高強度コンクリート、品質管理、ポンプ圧送、長期強度、ひずみ

### 1. まえがき

近年、都心部の集合住宅では、土地の高度利用から、超高層化が進みつつあり、また、平面設計の自由度、快適空間の確保から大スパン化が望まれている。超高層化、大スパン化により、柱には高軸力が作用することとなるが、柱部材は居住性確保から断面の大きさが制限される。コンクリートの高強度化は、建物の超高層化、大スパン化を実現する有効な手段であり、昨今、都市部では、超高層鉄筋コンクリート造集合住宅に 100N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートが適用される事例が増えつつある<sup>1)</sup>。

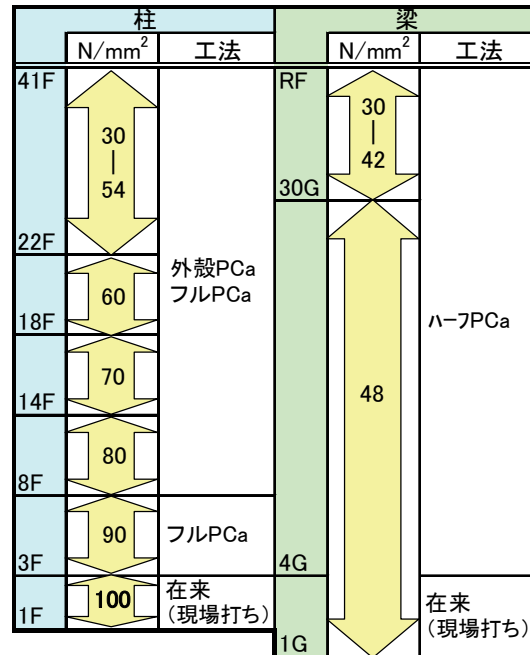
当社においても設計基準強度（以下、「Fc」と称す）100N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを地上 41 階建ての超高層鉄筋コンクリート造集合住宅の柱部材に適用した。本報では、適用した高強度コンクリートの調合、フレッシュ性状、圧縮強度、施工状況、および柱部材のひずみ測定結果について報告する。

### 2. 施工概要

#### 2.1 強度コンクリートの適用部位

鉄筋コンクリート架構のコンクリート強度、および部材の施工方法を図-1に示す。1階および2階の柱部材（計 74 本）に Fc100N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを適

用し、全て現場打ちコンクリートで柱部材を施工した。Fc100N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートの総打設量は 540m<sup>3</sup> で、打設時期は 11 月から 12 月である。



\* パネルゾーンは現場打ち

図-1 鉄筋コンクリート架構の  
コンクリート強度と施工方法

\*技術研究所 \*\*東日本支社建築第1部 \*\*\*東日本支社建築工務部

Fc90N/mm<sup>2</sup> の柱部材にはフルプレキャストコンクリートを用い、Fc80N/mm<sup>2</sup> 以下の柱部材にはフルプレキャストと外殻プレキャストコンクリートを部位ごとに使い分けた。なお、柱梁接合部には全て現場打ちコンクリートを用いた。

2.2 コンクリートの使用材料と調合

Fc100N/mm<sup>2</sup> コンクリートの使用材料を表-1、調合および調合強度の算定方法を表-2に示す。セメントには、シリカフェームプレミックス低熱ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントを、質量比4：6の割合で混合使用した。また、添加材としてポリエステル繊維(密度 1.39g/cm<sup>3</sup>)を 0.1vol%添加した。スランブフローの管理値は、繊維添加後荷卸しの段階で 65±10cm、空気量は 2.0±1.5%とした。

圧縮強度の管理材齢は 28 日とし、強度補正值(<sub>28</sub>S<sub>91</sub>)は実機実験の結果から冬期で 7N/mm<sup>2</sup> とした。調合管理強度(Fc + <sub>28</sub>S<sub>91</sub>)は 107N/mm<sup>2</sup> で、水セメント比は 19.7%である。

2.3 コンクリートの製造と打設方法

コンクリートの製造を、都内のレディミクストコンクリート工場で行った。3.0m<sup>3</sup> 練り強制二軸ミキサーで、1 バッチ 2.25m<sup>3</sup> を製造し、アジテータ車 2 バッチ練合わせで出荷した。繊維は、1 バッチ目のコンクリートをアジテータ車に積込み、その後、所定量の繊維をアジテータ車に投入して 2 バッチ目のコンクリートを積重ね、2 分間アジテータ車のミキサーを高速回転させ練り混ぜた。この方法で、ミキサー内のコンクリート中に繊維が一樣に分散することを事前の実機実験で確認している。低水セメント比であるためコンクリートの製造に時間を要したが、工場から時間あたりアジテータ車 4～5 台の出荷が可能であった。

コンクリートの打設は、コンクリートバケット、およびポンプ圧送で行った。

3. 測定項目

3.1 品質管理項目

コンクリートの品質管理項目を表-3に示す。受入れ試験では、単位水量の測定を実施した。単位水量の測定は、従来のエアメータ法を改良した当社開発のエアメータ骨材洗出し法<sup>2)</sup>で行った。

3.2 長期測定項目

100N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートの長期性状に関する測定項目を表-4に示す。長期性状として構造体コンクリートの圧縮強度、および 1 階柱部材の軸方向のひずみを測定した。

構造体コンクリートの圧縮強度は、1 階柱部材と同一断面寸法(1.1×1.1m)で高さ 1.0m の模擬柱部材を製造して、模擬柱からコア供試体を採取し確認した。

表-1 使用材料

種別	記号	銘柄・産地等	物性値
セメント	SFC	シリカフェームプレミックス 低熱ポルトランドセメント	密度:3.08, 水中密度:3.09, 比表面積:6350cm <sup>2</sup> /g シリカフェーム内割り 10%
	MC	中庸熱 ポルトランドセメント	密度:3.21, 水中密度:3.29, 比表面積:3760cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	富津産山砂	密度:2.60, 吸水率:1.27%, F.M. 2.46
粗骨材	G	桜川産硬質 砂岩砕石	密度:2.65, 吸水率:0.62%, 実積率:61.5%
化学 混和剤	Add	高性能減水剤	ポリカルボン酸系 密度:1.07

表-2 Fc100N/mm<sup>2</sup> コンクリートの調合

調合管理 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					空気量 (%)
		W	C		S	G	
			SFC	MC			
107	19.7	165	335	503	621	824	2.0

・調合強度

$$F_m = F_c + \substack{28}S_{91} + 2\sigma = 127\text{N/mm}^2$$

F<sub>m</sub>: 調合強度 (N/mm<sup>2</sup>)

F<sub>c</sub>: 設計基準強度 F<sub>c</sub>=100N/mm<sup>2</sup>

nS<sub>m</sub>: 強度補正值 <sub>28</sub>S<sub>91</sub>=7N/mm<sup>2</sup> (冬期)

σ: 標準偏差 σ=10N/mm<sup>2</sup>

表-3 品質管理項目

	項目	方法
フレッシュ コンクリート (受入れ 試験)	スランブフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	塩化物イオン量	JASS 5T-502
	単位水量	改良エアメータ法 <sup>2)</sup>
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108 標準水中養生 材齢 4 週

表-4 長期性状に関する測定項目

種別	項目	方法	
柱部材	構造体圧縮強度	JIS A 1107 (圧縮強度)	
	ヤング係数	模擬柱のコア供試体	
		材齢 4, 13, 26, 52 週	
	柱 ひずみ	1 階柱部材	柱部材にひずみ計を設置
		無載荷柱	模擬柱にひずみ計を設置
1 階柱軸力	応力計を設置		
コンクリート温度 環境温度	熱電対		

1 柱部材のひずみを、ひずみ計により測定した。また、柱部材に軸力が生じていない状態、すなわち、無載荷状態の柱部材のひずみを把握するため、1 階柱部材と同一断面寸法、同一鉄筋量(主筋 28-D41、芯筋 8-D41、フープ筋 田-K16@80)の模擬柱部材を製造して、ひずみ計を設置し、自由収縮ひずみを測定した。

4. 施工結果

4.1 レッシュコンクリートの品質

Fc100N/mm<sup>2</sup> コンクリートの打込み工区ごとの打設量を表-5 に示す。コンクリートは部位ごと、工区ごとに計6回打設した。

フレッシュコンクリートの受入れ試験結果として、スランプフローと空気量の結果を図-2、図-3 に、フレッシュコンクリートの性状を写真-1 に示す。受入れ試験の結果、スランプフロー、空気量共に管理範囲内である

表-5 Fc100N/mm<sup>2</sup> コンクリートの工区ごとの打設量

部位	1階柱					2階柱				
	梁下		パネルゾーン			梁下		パネルゾーン		
工区	A	B	1	2	3	A	B	1	2	3
打設日	11/17	11/21	11/29	12/1	12/3	12/11	12/13	12/18	12/20	12/21
打設量 m <sup>3</sup>	83	79	40	43	50	74	73	28	30	40
総量	295					245				

あり、スランプフローの多くは 65cm±5cm、空気量は 1.5±0.5%の範囲内で、安定した品質のコンクリートが出荷されていることを確認した。工場から現場までの運搬時間は約 40 分であったが、事前の実機実験においてフレッシュ性状は、練り上がり 120 分までは管理範囲内であることを確認している。

単位水量の測定結果の一例として、1 階柱 1 回目(A 工区)と 2 回目(B 工区)の打設時の結果を図-4 に示す。単位水量の管理基準は、調合計画水量に対し±15kg/m<sup>3</sup>とした。測定の結果、単位水量誤差は-7.6~+0.8kg/m<sup>3</sup>で、全て管理基準値内であった。1 回目(A 工区)の標準偏差は 1.0kg/m<sup>3</sup>、2 回目(B 工区)は 2.2kg/m<sup>3</sup>であり、スランプフローおよび空気量同様、安定した品質のコンクリートが出荷されていた。



写真-1 フレッシュコンクリートの性状 (受入れ試験状況)

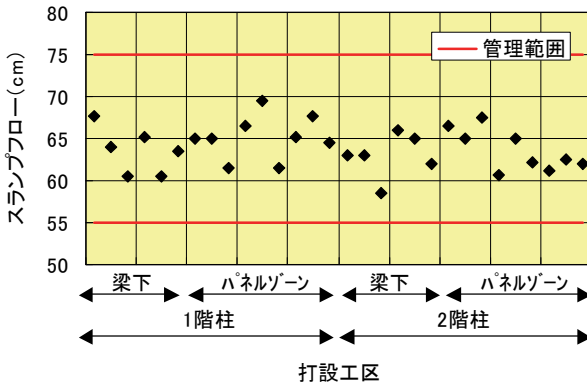


図-2 スランプフローの受入れ試験結果

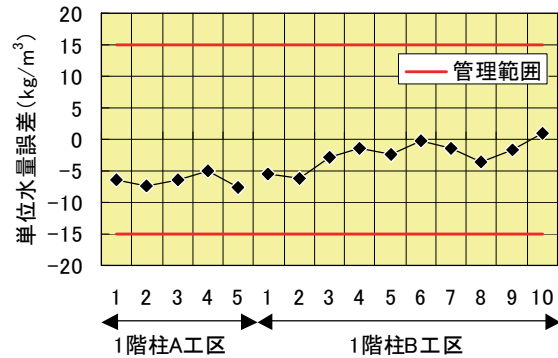


図-4 単位水量の受入れ試験結果

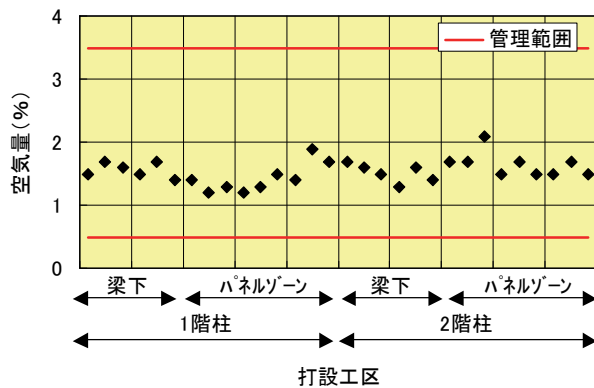


図-3 空気量の受入れ試験結果

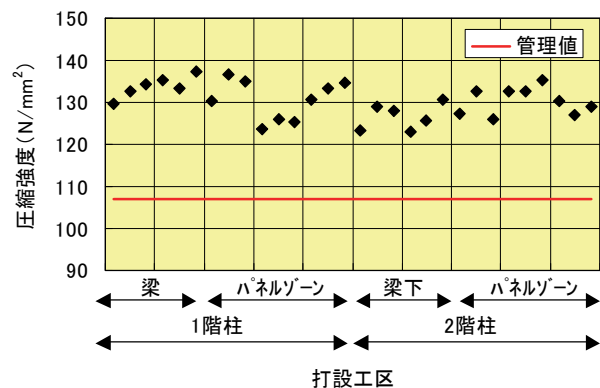


図-5 標準水中養生材齢 28 日の圧縮強度の試験結果



写真-2 コンクリートバケットによる打設状況



写真-3 ポンプ車による打設状況

#### 4.2 縮強度

標準水中養生材齢 28 日の圧縮強度試験結果を図-5 に示す。全ての試験結果は、判定基準  $107\text{N}/\text{mm}^2$  を満足した。標準偏差は  $4.1\text{N}/\text{mm}^2$  で、変動係数は 3.1% であり、ばらつきは小さく、フレッシュ性状と同様に安定した圧縮強度が確認された。また、圧縮強度の平均値は  $130.4\text{N}/\text{mm}^2$  で、調合強度の  $127\text{N}/\text{mm}^2$  よりやや大きかった。

#### 4.3 設状況

$\text{Fc}100\text{N}/\text{mm}^2$  コンクリートの打設状況として、コンクリートバケットによる打設状況を写真-2 に、ポンプ車による打設状況を写真-3 に示す。

コンクリートバケットには容量  $2.0\text{m}^3$  のものを用い、コンクリート落とし込み時の材料分離を防止するため、バケットの打込み口先端にはサニーホースを取り付けた。 $\text{Fc}100\text{N}/\text{mm}^2$  のコンクリートは低水セメント比で、かつ、有機繊維を添加しているため粘性が大きく、アジテータ車からバケットへの積込み、バケットから柱部材への落とし込み打設に非常に時間を要した。特に、サニーホース中のコンクリートの通過に時間を要し、柱 1 本(約  $4.6\text{m}^3$ )あたり約 30 分の打設時間を要した。したがって、コンクリートバケットによる打設においては、サニーホースに代わる落とし込み方法の検討が今後の課題である。

一方、ポンプ圧送には最大吐出圧  $13.0\text{MPa}$  のコンクリートポンプを用い、ポンプ車のブーム配管により打設した。コンクリートの粘性は大きかったものの、十分ポンプ圧送が可能で、時間あたり約  $30\text{m}^3$  の打設が可能であることが確認された。ポンプ圧送によるフレッシュ性状の影響を確認するため、筒先から試料を採取し、スランプフローと空気量を測定した。その結果を表-6 に示す。ポンプ圧送によりスランプフローは約 5 cm 小さくなり、空気量はやや大きくなった。

#### 4.4 の出来型

型枠の脱型は、コンクリートのひび割れ発生を防止す

表-6 ポンプ圧送後のフレッシュ性状

		圧送前	圧送後
1 回目	スランプフロー cm	60.8	53.5
	空気量 %	1.5	1.8
2 回目	スランプフロー cm	61.2	57.8
	空気量 %	1.5	1.7

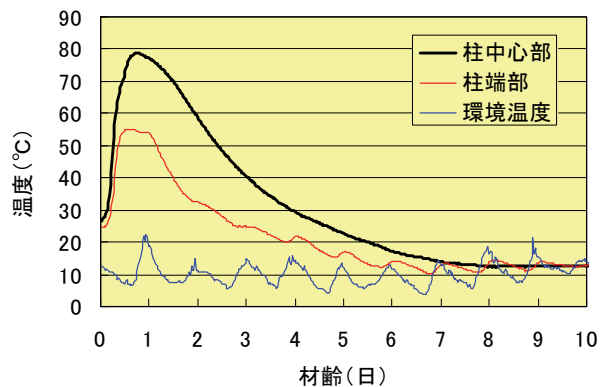


図-6 柱中心部と端部のコンクリート温度

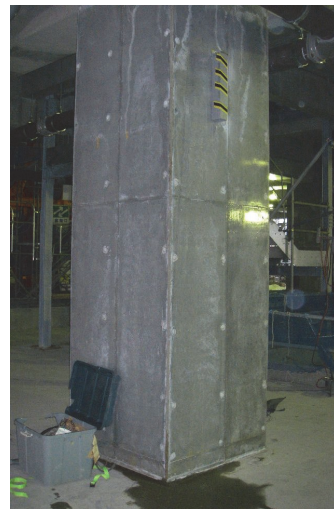


写真-4 脱型後の柱出来型

るため、コンクリート温度が外気温とほぼ同じとなる材齢 10 日以降に行った。模擬柱部材で計測した柱中心部と端部のコンクリート温度を図-6に示す。柱中心部のコンクリートの最高温度は約 80℃で、柱端部のコンクリート温度との最大差は約 25℃であった。

脱型後の打ち上がり面には、ひび割れや大きな気泡はみられず、良好な充填が確認できた。脱型後の柱部材の出来型を写真-4に示す。

5. 構造体コンクリートの長期強度と柱ひずみ

5.1 造体強度

模擬柱部材から採取したコアの圧縮強度とヤング係数の測定結果を図-7に示す。材齢 91 日の圧縮強度は 121N/mm<sup>2</sup> であり、設計基準強度を十分上回っていた。材齢 26 週の圧縮強度は、123N/mm<sup>2</sup> で強度増進は小さいが、1年後の材齢 52 週の圧縮強度は 137N/mm<sup>2</sup> で、材齢 4 週から 26 週の強度増進に比べ、材齢 26 週以降の強度増進の方が大きくなった。これは、コンクリートの打設が 11 月 17 日で、打設日以降は冬期となり、外気温が低いことため圧縮強度の増進が鈍かった。また、材齢 26 週以降で夏期となり外気温の温度上昇に伴い、水和反応が促進され強度が増進したと考えられる。一方、ヤング係数は、材齢 26 週までほとんど変わらず約 42kN/mm<sup>2</sup> であった。1年後の材齢 52 週では、圧縮強度の増進に伴い微増し、44.4kN/mm<sup>2</sup> となった。

5.2 ひずみ

無載荷状態の模擬柱部材の自由ひずみの変化を図-8に示す。ひずみは、既往文献からコンクリートの線膨張係数を  $9.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  とし、温度変化によるひずみ変化分を補正した。得られたひずみは、自己収縮と乾燥収縮ひずみによるものと考えられる。コンクリートの水セメント比は 20%以下で、かつ、部材断面が大きいことため、測定されたひずみのほとんどが自己収縮ひずみと考えられる。材齢 5 日のひずみは約  $300 \times 10^{-6}$  で、それ以降はひずみの変化はほとんどみられなかった。

1 階柱部材に作用する圧縮応力とひずみの変化を図-9に示す。ひずみは図-8同様、コンクリートの線膨張係数を  $9.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  とし、温度補正を行った。躯体コンクリートの打設は 1 階コンクリート打設から約 400 日後に完了した。躯体の構築に伴い、柱ひずみも増加していることがわかる。材齢 400 日において 1 階柱部材に生じた圧縮応力は約 19N/mm<sup>2</sup> で、コンクリートの圧縮強度 137N/mm<sup>2</sup> に対して、軸力比 0.14 であった。

測定されたひずみは、乾燥収縮、自己収縮、圧縮応力による弾性ひずみ、およびクリープひずみによるものと考えられる。ここで、クリープひずみを除いたひずみ量について検討する。柱部材に加わる圧縮応力は、測定対象柱上部におけるパネルゾーンのコンクリート打設以降

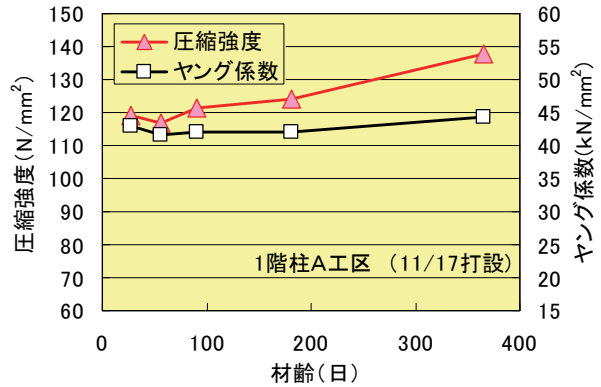


図-7 構造体コンクリートの圧縮強度とヤング係数

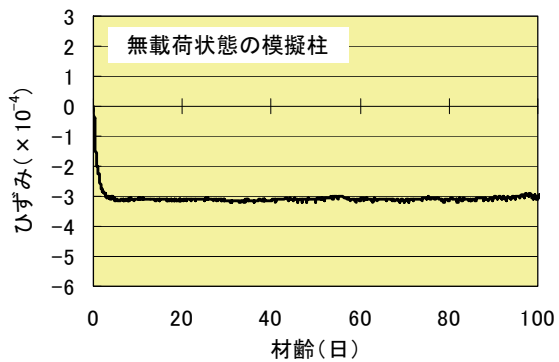


図-8 模擬柱部材の自由ひずみ

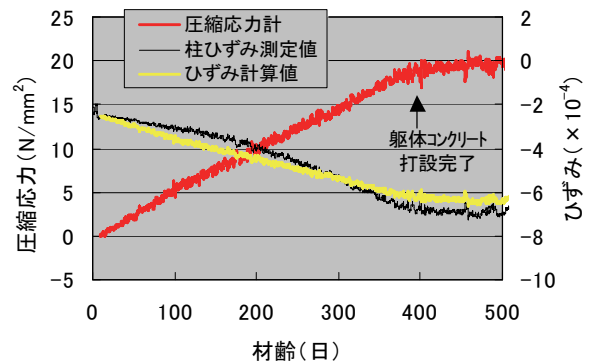


図-9 1 階柱部材の圧縮応力とひずみの変化

に生じるものとした。パネルゾーンの打設は柱打設後の材齢 12 日である。したがって、材齢 12 日までに生じるひずみは、乾燥収縮と自己収縮ひずみによるものと仮定した。また、乾燥収縮と自己収縮ひずみは、無載荷状態の模擬柱部材のひずみの測定結果において、材齢 5 日以降はひずみの変化がほとんどみられなかったことから、材齢 12 日以降、それらのひずみ増加は生じないことと仮定した。そこで、本検討では、クリープひずみを除いたひずみ量の計算値は、材齢 12 日までの測定ひずみに、圧縮応力による弾性ひずみを加えたものとした。弾性ひずみの算出に用いる柱部材のヤング係数は、コンクリー

トのヤング係数についてはコア強度の測定結果から得られた平均値の  $43.0\text{kN/mm}^2$ 、鉄筋のヤング係数については  $210\text{kN/mm}^2$  とし、部材断面の形状から  $51.0\text{N/mm}^2$  とした。クリープひずみを除いたひずみ量の計算値を図-9に示す。計算値は、測定値とおおよそ同じ結果となった。本来、測定値にはクリープひずみが含まれるため、計算値より大きくなると考えられるが、本検討結果からはクリープひずみと考えられる測定値と計算値の明確な差は、材齢 500 日まではみられなかった。

## 6. まとめ

設計基準強度  $100\text{N/mm}^2$  の高強度コンクリートを地上 41 階建ての超高層鉄筋コンクリート造集合住宅の柱部材に  $540\text{m}^3$  適用し、以下の施工結果が得られた。

- i. 受入れ試験として実施したスランプフロー、空気量の測定結果は、共に管理範囲内であり、変動幅は小さく、また、単位水量の測定結果は、計画水量との差が  $-7.6 \sim +0.8\text{kg/m}^3$  で標準偏差も小さく、安定した品質のコンクリートが出荷されていた
- ii. コンクリートの圧縮強度は判定基準  $107\text{N/mm}^2$  を満足し、標準偏差は  $4.1\text{N/mm}^2$  で、変動係数は 3.1% であり、ばらつきは小さかった
- iii. フレッシュコンクリートの粘性は大きかったものの、ポンプ圧送が可能で、時間あたり約  $30\text{m}^3$  の打設が可能である
- iv. 構造体コンクリートの強度は 1 年間にわたり強度が増進し、1 年後の圧縮強度は  $137\text{N/mm}^2$  であった
- v. 1 階柱部材のひずみ計測の結果、躯体の構築に伴い柱ひずみも増加するが、材齢 500 日までは、明確なクリープひずみは確認されなかった

## 7. あとがき

今回、当社で初めて設計基準強度  $100\text{N/mm}^2$  の高強度コンクリートを実建物に適用して、高品質な構造躯体を施工することができた。今後は、ここで得られた実績、経験を水平展開し、次の  $100\text{N/mm}^2$  級高強度コンクリートの現場適用に繋げたい。また、当社では設計基準強度  $130\text{N/mm}^2$  までの高強度コンクリートの大臣認定を取得済みであるが、今後研究開発を進め、さらなる高強度コンクリートの実用化を実現したい。

## 【参考文献】

- 1) 例えば 黒岩秀介、河合邦彦、小田切智明、嵐山正樹、「 $\text{Fc}130\text{N/mm}^2$  の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工」、コンクリート工学、Vol.42、No10、pp.44-49、2004
- 2) 起橋孝徳、上西 隆、河野政典、小竹琢雄、「コンクリートの単位水量管理方法に関する研究—エアメータを使用した高精度推定方法の開発—」、奥村組技術研究年報、Vol.35、2009
- 3) 梶田秀幸ほか、「超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究 その 3 線膨張係数」、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、pp.259-260、2007