

120N/mm²級高強度コンクリートの基礎的性状に関する実験的研究

西 田 浩 和 渡 辺 直 樹
横 須 賀 誠 一 塩 田 博 之 *1

概 要

近年、都心部での企業保有地の大量放出などにより、良質で安価な超高層住宅の供給が続いている。一方、熟年層は安全性と永住性、若年層は利便性を求め、都心生活への回帰現象が生じており、今後も都心部における超高層住宅の需要は増加すると考えられる。このような背景のもと、耐久性に富み、更新性に優れ、自由設計に対応した都市型超高層住宅（例えば、60階建て、高さ200m）を開発することが望まれるようになってきている。

本研究は、都市型超高層住宅を実現するために設計基準強度（以下、 F_c とする）120N/mm²級高強度コンクリートの開発および品質管理システムの確立を目指す一環であり、室内におけるフレッシュ性状および強度性状に関する実験と、市中の生コン工場を使った実大模擬柱の充填施工実験について報告するものである。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 水結合材比が25%程度以下のコンクリートにおいて、当社独自のコンシステンシー試験であるバリアフロー試験によって、フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性や間隙通過性などを評価できることが確認された。
- (2) 強度性状に関する室内実験からは、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを結合材とすることで $F_c=120\text{N/mm}^2$ を満足するような結果が得られた。
- (3) 市中の生コン工場で製造した $F_c=120\text{N/mm}^2$ 級の高強度高流動コンクリートを実大模擬柱に施工し、所要の構造体コンクリート強度を確保できることを実証した。

Experimental Study on Fundamental Properties of 120 N/mm² class High-Strength Concrete

Abstract

Research was carried out to develop a high-strength concrete with a specified design strength (hereafter referred to F_c) of 120N/mm² for use in the development of super-high-rise condominium buildings. This report shows the experiment results of its fresh and strength properties in laboratory tests and placing performance tests with full-scale columns using the high-strength concrete mixed at a factory. The experiment and test results are shown as follows;

- (1) For the concrete with a water- binder ratio of about 25% or less, it was confirmed that the material separation resistance and porosity of fresh concrete can be evaluated by the barrier-flow testing method originally developed by Fujita Corporation as one of test methods for consistency examination.
- (2) Laboratory tests to examine strength properties show that the strength ($F_c= 120\text{N/mm}^2$) can be obtained by using low-heat Portland cement and silica fume as binding materials.
- (3) From the test results with full-scale columns, it was confirmed that the concrete with high strength ($F_c= 120\text{N/mm}^2$) and high flowability can be manufactured at ready-mixed concrete factory with enough workability to secure necessary structure strength at sites.

キーワード: 高強度コンクリート, フレッシュコンクリート, 材料分離, 構造体コンクリート, 圧縮強度

*1 横浜支店 建築部

§1. はじめに

本研究は、RC造建築物の主要な材料であるコンクリートの更なる高強度化および品質管理システムの確立を目指すものである。ここでは、室内におけるフレッシュ性状・強度性状に関する実験と、実大模擬柱の充填施工実験について報告する。

§2では、従来のスランプフロー試験と当社独自のコンシステンシー試験であるバリアフロー試験の試料を用いて、高強度コンクリートの材料分離(粗骨材分離)に関する実験結果について報告する。

§3では、実験因子としてセメント銘柄と水結合材比の違いによるフレッシュ性状、強度性状の試験結果について報告する。

§4では、 $F_c=120\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートを生コン工場で製造し、試設計の結果に基づく寸法・配筋状況を考慮した模擬柱に打設した場合の施工性・充填性・構造体強度などについて報告する。

§2. 材料分離に関する実験

2.1 実験概要

高流動コンクリートの材料分離抵抗性や間隙通過性などのコンシステンシーを評価する試験方法は、既報¹⁾において提案している。ここでは、従来のスランプフロー試験と既報で提案したバリアフロー試験の試料を用いて、高強度コンクリートの材料分離に関する評価を行うための実験結果について報告する。

2.2 調 合

供試コンクリートの調合は、表1に示すように $F_c=60\sim 120\text{N/mm}^2$ を想定し、水結合材比(W/B)を4種類とした。粉体シリカフュームは調合により混入率(セメントの内割で5~10%)を変えて用いた。単位粗骨材量は $0.530\text{m}^3/\text{m}^3$ (一定)とし、目標スランプフローは65cm、目標空気量を2%とした。

2.3 試験方法

バリアフロー試験とは、スランプフロー試験においてコーン軸を中心とする直径30cmの同心円上に、図1に示すような丸鋼($\phi 10\text{mm}$)を等間隔(ここでは16等分)に配した流動に対する抵抗(バリア)を設けて試験したものである。

試験結果は、次のような指標で表す。

内外粗骨材比 $=A_i / A_o$

(A_i :バリア内部粗骨材質量比, A_o :バリア外部粗骨材質量比)

通過率 $=\{(B_f-30)/(S_f-30)\} \times 100$ (%)

(B_f :バリアフロー (cm), S_f :スランプフロー (cm))

ここでは、上記試験に加えて別途図2に示すようにスランプフローおよびバリアフローを測定した後、 $\phi 20\sim 60\text{cm}$ の鋼環をコンクリート中に同心円上に差し込み、分断された試料をそれぞれ採取した。各コンクリート試料について、質量を測定した後、5mmのふるいをを用いてウェットスクリーニングを行い、粗骨材の採取・質量測定を行った。粗骨材質量を試料コンクリートの質量で除した値を粗骨材比とした。その後、粗骨材試料は乾燥炉(約 105°C)で24時間乾燥させて、ふるい分け試験を行った。

表1 コンクリートの調合

調合 No.	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 使用量 (B×%)
		W	C	S	G	SF	
G060	33	165	500	886	853	—	1.15
G080	30	165	550	844	853	—	1.00
G100	25	160	608	770	853	32	1.15
G120	18	160	800	550	853	89	1.20

【使用材料】水(W):上水道水

セメント(C):低熱ポルトランドセメント, 密度 3.22g/cm^3 ($B=C+SF$)

細骨材(S):君津産山砂, 表乾密度 2.62g/cm^3 , 吸水率1.89%

粗骨材(G):青梅産碎石, 表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率0.63%

シリカフューム(SF):粉体シリカフューム, 密度 2.20g/cm^3

混和剤:高性能AE減水剤, ボリカルボン酸系

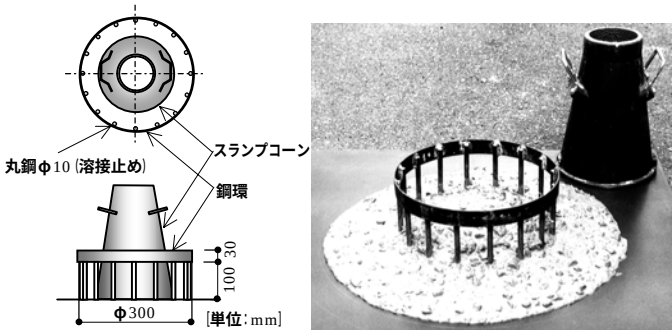


図1 バリアフロー試験

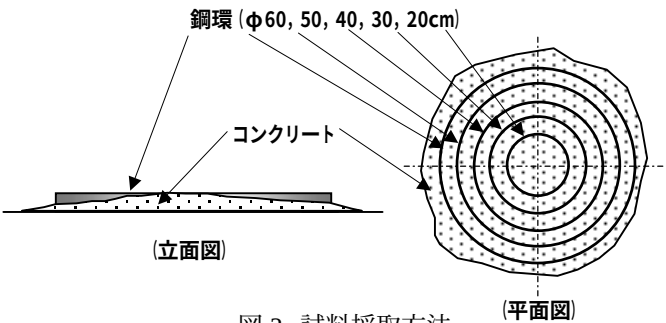


図2 試料採取方法

2.4 試験結果

(1) フレッシュ性状

練混ぜは、セメント・シリカフューム・砂を15秒間、水を加えて目視でモルタルとなるまで60～120秒間、粗骨材を加えて90秒間行った。フレッシュコンクリートの試験結果を表2に示す。いずれのコンクリートとも、目視による材料分離は確認されず、良好な高流動コンクリートであった。

(2) 内外粗骨材比と通過率

各調合における内外粗骨材比および通過率の算定結果を表3に示す。スランブフローにおける内外粗骨材比は1.00～1.05となり、中央部と外周部における粗骨材量の差がほとんどなかった。一方、バリアフローにおける内外粗骨材比は、1.06～1.20となり、判定基準(当社)としている1.30以下を満足した。通過率は、90～100%となり、良好な流動性が確認できた。

(3) 粗骨材比

銅環で分断された各試料について、スランブフローおよびバリアフロー試験における粗骨材比をそれぞれ図3、図4に示す。

スランブフロー試験における粗骨材比は、G100およびG120のスランブフロー60cmを超える試料で1割程度下がる傾向にあったものの、各試料間のバラツキは小さかった。

バリアフロー試験における粗骨材比は、全調合において設置したバリア(φ30cm)内外の差と60cmを超える試料における1～2割程度の減少が顕著にみられた。

(4) 粒度

採取試料ごとの粒度の一例として、G120のスランブフロー、バリアフロー試験におけるふるい分け試験結果をそれぞれ図5、図6に示す。

スランブフロー試験およびバリアフロー試験における粒度は、いずれも60cmを超える試料において、10mm程度以下の骨材の割合が多い傾向にあるものの、全体的には中央部と外周部の粒度の差が小さいと言える。このスランブフロー試験とバリアフロー試験における差は、水結合材比の増大に伴い、わずかに大きくなる傾向にあった。

表2 フレッシュ性状

調合 No.	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	50cmフロー到達 時間 (s)	バリアフロー (cm)
G060	65.5	1.3	17.6	5.2	65.5
G080	64.0	1.6	17.0	5.3	63.5
G100	66.5	2.0	16.9	6.1	63.0
G120	66.0	2.4	17.3	8.9	62.5

表3 内外粗骨材比と通過率

調合 No.	内外粗骨材比		通過率 (%)
	スランブフロー	バリアフロー	
G060	1.02	1.20	100
G080	1.05	1.16	99
G100	1.04	1.17	90
G120	1.00	1.06	90

※判定基準値 内外粗骨材比:1.30以下, 通過率80%以上

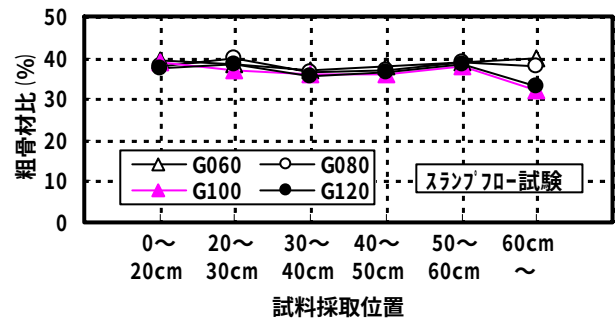


図3 粗骨材比(スランブフロー試験)

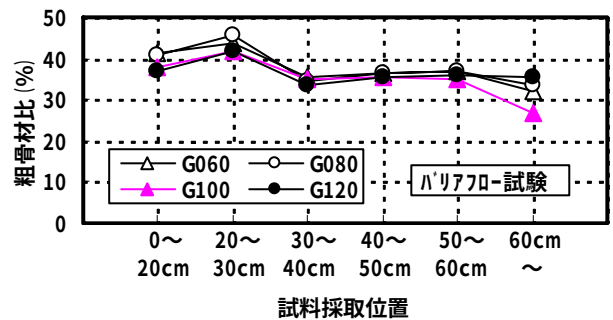


図4 粗骨材比(バリアフロー試験)

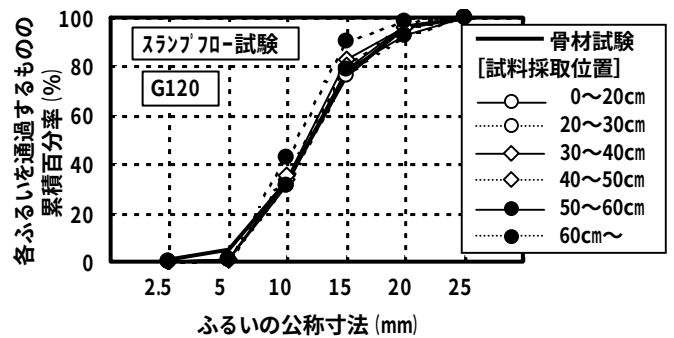


図5 粒度の一例(スランブフロー試験)

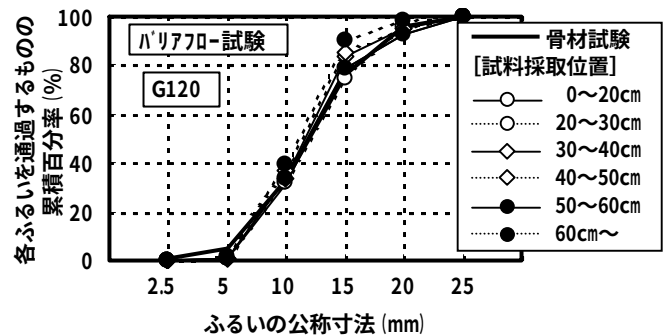


図6 粒度の一例(バリアフロー試験)

§3. 強度性状に関する室内実験

3.1 実験概要

コンクリートの更なる高強度化を目指し、 $F_c=60\sim120\text{N/mm}^2$ を確保できる材料を選定し、強度に影響する要因について実験的に検討した。ここでは、表4に示すように水結合材比 (17, 20, 25%) とセメント種類 (4種類) の試験結果について報告する。

3.2 調 合

コンクリートの基本調合を表5に示す。目標スランプフローは65cm(許容差 $\pm 7.5\text{cm}$)、目標空気量を2%(許容差 $\pm 1\%$)とした。単位水量は 160kg/m^3 (一定)とし、シリカフェュームの混入は低熱セメントを用いる場合に限定し、セメントの内割りで10%(質量比)とした。コンクリートの練上り温度は $20\pm 3^\circ\text{C}$ 、単位粗骨材かさ容積は $0.530\text{m}^3/\text{m}^3$ (一定)とした。

3.3 試験方法

練混ぜには、容量55ℓの二軸強制練りミキサを使用し、各調合とも1回の練混ぜは35ℓとした。練混ぜは、細骨材、セメントを投入して空練りを15秒、水を投入して90～180秒間(90秒:W/B=25%, 180秒:W/B=17, 20%),最後に粗骨材を投入して60秒間行った。

フレッシュコンクリートにおける試験項目は、スランプフロー、空気量、コンクリート温度とした。

硬化コンクリートの試験項目は圧縮強度とヤング係数(強度の1/3応力時のセカントモデュラス)とした。

3.4 試験結果

(1) フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表6に示す。

全ての調合において、目標スランプフローの65cm(許容差 $\pm 7.5\text{cm}$)および目標空気量の2%(許容差 $\pm 1\%$)を満足するものが得られた。スランプフローが70cmを超えるものが散見されたが、いずれのコンクリートとも材料分離傾向は認められなかった。

(2) 強度性状

代表的な圧縮強度発現状況を図7に示す。最も良好な強度発現を示したのは、低熱ポルトランドセメント+シリカフェュームの組合せであった。市中の生コン工場が通常扱っている骨材でも、 $F_c=120\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートの製造が可能であることが確認された。ただし、強度管理する材齢は28日を超えた長期(例えば、56日や91日)に設定する必要がある。

圧縮強度とヤング係数の関係は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説1999」で提案されているヤング係数推定式(以下、RC規準式とする)よりやや高い傾向が確認された。

表4 実験因子・水準および組合せ

W/B (%)	セメント種類
17, 20, 25	L1, L2, VKC, SFC

表5 コンクリートの基本調合

調合 No.	W/B (%)	単位量 (kg/m^3)					混和剤 使用量 (B $\times\%$)
		W	C	S	G	SF	
17L1	17	160	847	503	853	94	1.60
20L1	20	160	720	624	853	80	1.30
25L1	25	160	576	760	853	64	1.40

[使用材料] 水(W): 上水道水

セメント(C): L1 低熱ポルトランドセメント, 密度 3.22g/cm^3 (B=C+SF)

L2 低熱ポルトランドセメント, 密度 3.24g/cm^3

VKC 混合セメント, 密度 2.99g/cm^3

SFC 混合セメント, 密度 3.08g/cm^3

細骨材(S): 君津産山砂, 表乾密度 2.62g/cm^3 , 吸水率1.89%

粗骨材(G): 青梅産碎石, 表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率0.63%

シリカフェューム(SF): 粉体シリカフェューム, 密度 2.20g/cm^3

混和剤: 高性能AE減水剤, ポリカルボン酸系

※調合No.は、水結合材比・セメント種類を示す。

表6 フレッシュコンクリートの試験結果

調合 No.	W/B (%)	スランプ フロー (cm)	50cm フロー到達時間(s)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)	混和剤 使用量 (B $\times\%$)
17L1	17	71.5	7.0	1.4	22.0	1.60
20L1	20	70.0	5.1	1.6	21.8	1.30
25L1	25	61.0	6.0	3.0	21.0	1.40
17L2	17	66.0	11.0	1.7	21.2	1.70
20L2	20	71.0	5.8	1.7	20.2	1.35
25L2	25	59.0	5.2	3.0	19.9	2.30
17VKC	17	70.0	13.5	1.7	22.9	5.00
20VKC	20	72.5	17.9	1.3	21.1	4.70
25VKC	25	63.5	8.1	1.6	20.9	2.80
17SFC	17	68.0	6.7	1.8	22.1	2.10
20SFC	20	72.0	4.4	1.8	21.3	1.65
25SFC	25	61.5	4.5	2.2	20.9	2.30

※調合No.は、水結合材比・セメント種類を示す。

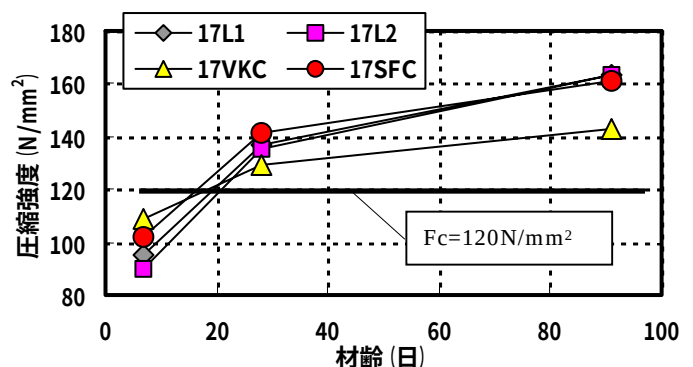


図7 圧縮強度発現状況

§ 4. 実大柱充填施工実験

4.1 実験概要

本実験は、 $F_c=120\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートを生コン工場で製造し、実大模擬柱に打設した場合の施工性・充填性・構造体強度の確認などを目的としている。

4.2 調 合

コンクリートの使用材料および調合を表7に示す。目標スランプフローは65cm（許容差 $\pm 7.5\text{cm}$ ）、目標空気量は2%（許容差 $\pm 1\%$ ）とした。フレッシュコンクリートの試験項目は、スランプフロー、空気量、コンクリート温度とした。

4.3 試験体形状および試験方法

有筋試験体の形状・寸法を図8に示す。同時に、上下を断熱した無筋試験体²⁾（ $1000 \times 1000 \times 1000$ ）も作製した。温度計測は、有筋・無筋試験体中心部および表面部、簡易断熱養生試験体中心部²⁾に加え、試験体からの放熱を確認するために試験体上部から突出している芯筋上下の温度履歴についても材齢7日まで行った。

圧縮強度（ヤング係数も含む）試験は、コア供試体、標準養生供試体、簡易断熱養生供試体を用いて行った。有筋試験体の材齢91日用コア供試体は、コア側面（切断面）における最小径5mm以上の骨材を粗骨材とし、粗骨材面積をコア側面積で除して粗骨材面積率を算出した。

水平方向のコア採取は、コンクリート表面から芯筋のフープ筋にビットが届くまでとし、上中下3本ずつ採取した。鉛直方向のコアは、芯筋の内部と外部から1本ずつ採取した。鉛直方向の供試体は、高さ2,300mmのコアより水平方向から採取した供試体位置にほぼ対応するように、上中下3本ずつ採取した。

コンクリートの打込みは、バケット（容量 0.5m^3 ）を用いて、試験体上部からの落し込みとした。コンクリートの締固めは、1回の打込み層の厚さを約50cmとし、層毎に材料分離が生じない程度（10～15秒間）にバイブレータを用いて締め固め、下部は叩きも行った。

4.4 実験結果

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を表8に示す。荷卸し時におけるスランプフロー試験結果はやや大きめであったが、目視によって分離傾向は認められず、所定の許容差を満足した。

(2) 温度履歴

温度履歴の計測結果を図9に示す。有筋試験体および無筋試験体中心部は、材齢が約30時間程度で最高温度に達した。前者の方が後者より 8.9°C 低いことから、突出鉄筋によってコンクリートの水和熱が放熱したものと推察される。

表7 コンクリートの調合

W/B (%)	単位量 (kg/m^3)						混和剤 使用量 (B×%)
	W	C	S1	S2	G	SF	
16	160	900	136	317	848	100	1.50

〔使用材料〕水(W):地下水

セメント(C):低熱ポルトランドセメント、密度 3.22g/cm^3 ($B=C+SF$)

細骨材(S1):市原産山砂、表乾密度 2.57g/cm^3 、吸水率3.02%

細骨材(S2):相模川水系陸砂、表乾密度 2.60g/cm^3 、吸水率2.96%

粗骨材(G):青梅産碎石、表乾密度 2.65g/cm^3 、吸水率0.63%

シリカフューム(SF):粉体シリカフューム、密度 2.20g/cm^3

混和剤:高性能AE減水剤、ポリカルボン酸系

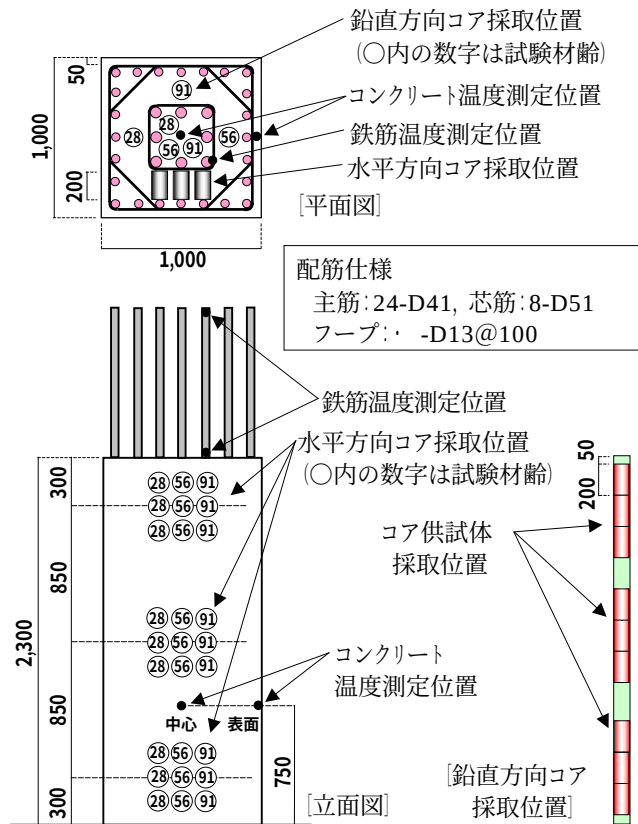


図8 有筋試験体形状

表8 フレッシュコンクリートの性状

試験場所	試験時刻 (h:m)	スランプフロー (cm)	50cm フロー到達時間 (s)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)
出荷時	12:30	76.5	—	—	—
荷卸し時	13:00	72.5	5.8	2.2	20.8

(3) 強度発現性状

圧縮強度発現性状を図10、圧縮強度とヤング係数（強度の1/3応力時のセカントモデュラス）の関係を図11、有

筋試験体の高さ方向の強度分布を図12に示す。

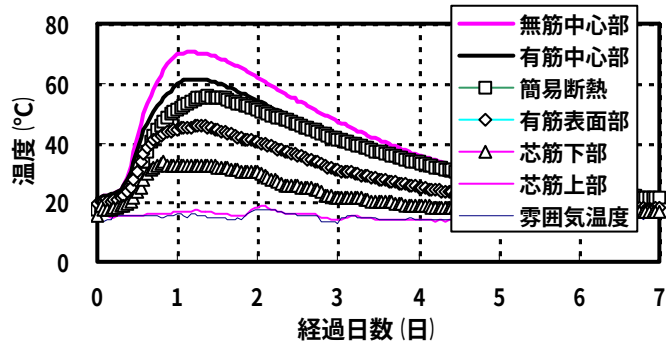


図9 温度履歴

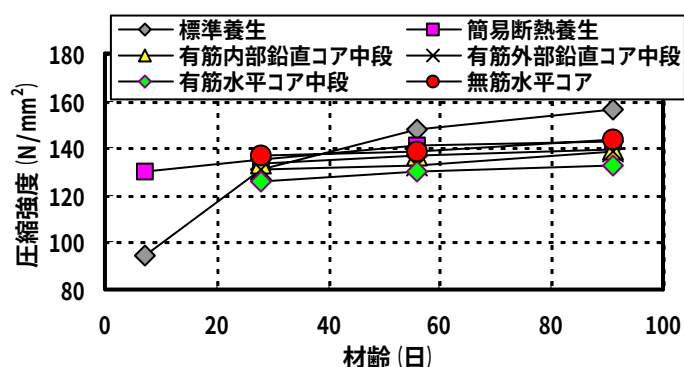


図10 圧縮強度発現状況

これにより、強度管理材齢を91日に設定すれば本調査で $F_c=120\text{N/mm}^2$ を十分確保できる。ヤング係数は、RC規準式に比べると下回った。高さ方向の分布では、有筋試験体上部のコア強度がやや低い傾向にあった。

(4) 粗骨材面積率

有筋試験体の粗骨材面積率測定結果を図13に示す。柱最上部の粗骨材面積率だけやや小さくなる傾向にあったものの、その他の粗骨材面積率は調合計算上の粗骨材絶対容積 320kg/m^3 に近似する値となった。

§ 5. まとめ

本実験で得られた知見は以下の通りである。

スランプフロー試験およびバリアフロー試験において、水結合材比が25%程度以下のコンクリートは、内外粗骨材比が低く、また各採取試料間の粗骨材比もほぼ一定であった。

強度性状に関する室内実験からは、低熱ポルトランドセメント＋シリカフュームを結合材とすることで $F_c=120\text{N/mm}^2$ を満足するような結果が得られた。

市中の生コン工場を用いて $F_c=120\text{N/mm}^2$ 級の高強度高流動コンクリートの施工ができた。型枠に接した面の仕上がり状態は良好で、気泡もほとんど認められなかった。コア強度試験結果より、硬質砂岩の粗骨材を用いて水結合材比を16%とすることで、構造体コンクリートにおいて

$F_c=120\text{N/mm}^2$ を確保できた。

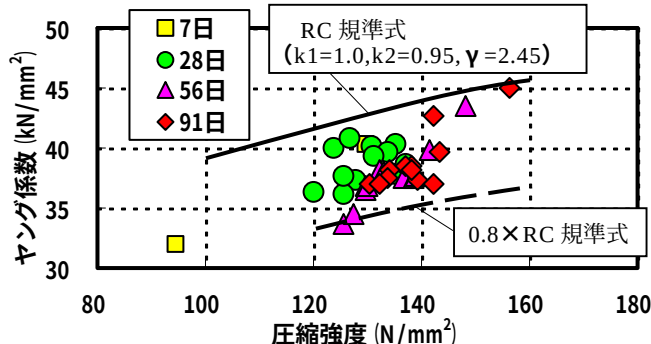


図11 圧縮強度とヤング係数の関係

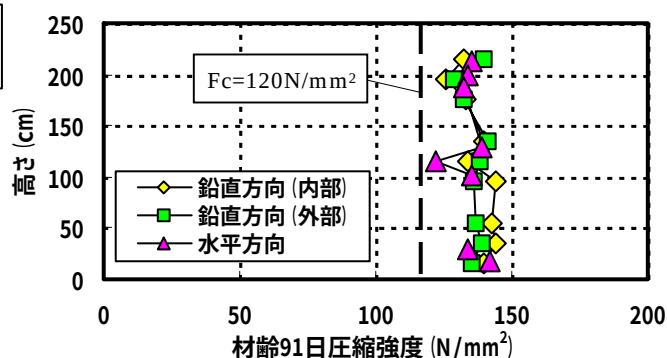


図12 コア圧縮強度分布

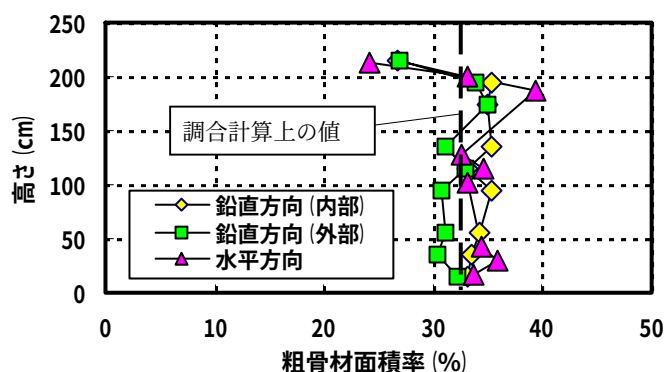


図13 粗骨材面積率分布

参考文献

- 1) 西田浩和ほか：高流動コンクリートの現場適用性に関する研究（その2. コンシステンシー簡易試験方法に関する検討），日本建築学会大会学術講演梗概集A-1，1020，pp.39-40，1996.
- 2) 西田浩和ほか：高強度コンクリートの強度補正値に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集A-1，1005，pp.9-10，



西田浩和

：高流動コンクリートの現場適用性に関する研究
度コンクリートの材料分離に関する検討），日本建
術講演梗概集A-1，1221，pp.475-476，2002.
：超高強度コンクリートの実大模擬柱充填施工実
学会大会学術講演梗概集A-1，1501，2003.

ひとこと

$F_c=100\text{N/mm}^2$ を超える高強度コンクリートの早期実現に向けて、微力ながら今後の普及に努めていきたいと思っています。