

論文 Fc200N/mm² 超高強度コンクリートの製造品質に関する研究

井戸 康浩^{*1}・梅本 宗宏^{*2}・右田 周平^{*1}・諏訪 一広^{*3}

要旨：設計基準強度（以下、Fc）200N/mm² 超高強度コンクリートを施工現場に初適用した。レディーミクストコンクリート工場の実機プラントで製造し、工程検査、アジテータ車による運搬、製品検査を実施し、超高強度コンクリートの製造品質に関して検討した結果を報告する。製造に際し適切な品質管理を行うことで、Fc200N/mm² 超高強度コンクリートにおいても、スランプフローおよび空気量のフレッシュ性状や、圧縮強度において、ばらつきの小さい安定したコンクリートの品質を得られた。

キーワード：Fc200N/mm²、超高強度コンクリート、実機プラント製造、工程管理、製品管理

1. はじめに

筆者らは、これまで RC 造建築物の更なる高層化や設計プランの自由度向上などの要求に対応するため、設計基準強度（以下、Fc）200N/mm² 級超高強度コンクリートの実用化を目的とした研究開発を進め、すでに模擬柱や実大柱試験体を用いた超高強度コンクリートの構造体コンクリートに関する実験結果を報告している¹⁾³⁾。

一般に、シリカフェームを結合材に使用している Fc150 N/mm² を超える超高強度コンクリートは、シリカフェームのポゾラン反応（硬化反応）の温度依存性によって、材齢初期の高温履歴がコンクリート強度発現に大きく寄与することが報告⁴⁾⁵⁾されているため、現場施工する場合にはコンクリート温度の確保が非常に重要となる。したがって、現場適用に先立ち、コンクリート強度確保のために保温・加熱養生装置を用いた Fc200 N/mm² 超高強度コンクリートの実大施工実験³⁾を実施し、構造体コンクリート強度について確認した。

今回、筆者らは東京都内の 55 階建ての超高層 RC 造住宅に Fc200N/mm² 超高強度コンクリートの初適用を行った。すでに、200N/mm² 超高強度コンクリートは、低層建物やプレキャスト部材として地下部に用いられた例は報告されている⁶⁾が、本格的な現場打込みのコンクリートとしては国内初の施工となっている。

本報告では、レディーミクストコンクリート工場の実機プラントで製造した Fc200 N/mm² 超高強度コンクリートについて、現場適用時に実施した工程検査、アジテータ車による運搬および製品検査の製造品質について検討した結果について報告する。

2. 超高強度コンクリートの製造

コンクリートは、東京湾岸地区のレディーミクストコンクリート工場で製造し、アジテータ車により施工現場

まで約 45 分間運搬した。製造時期は 2013 年の 5 月および 7 月で計 3 回である。

2.1 使用材料および調合

表-1~表-3 に使用材料、調合条件およびコンクリートの調合を示す。結合材として、セメントはシリカフェーム混入セメントとし、さらに産地の異なるシリカフェーム

表-1 使用材料

種類	記号	物性等
セメント	C	シリカフェーム混入セメント(密度=3.08g/cm ³)
混和材	SF	シリカフェーム (密度=2.2g/cm ³ , 比表面積=7.32~7.86m ² /g)
水	W	上水道水
細骨材	S	硬質砂岩砕砂 (表乾密度=2.59g/cm ³)
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 (表乾密度=2.64g/cm ³)
混和剤 1	SP	特殊高性能減水剤 (ポリカルボン酸系)
混和剤 2	SRA	収縮低減剤 (ポリエーテル誘導体)
鋼繊維	SFb	直径 0.16mm, 長さ 13mm, 引張強度 2,000N/mm ² 以上

表-2 調合条件

管理強度 ^{*1} (N/mm ²)	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	目標スランプフロー (cm)	目標空気量 (%)
200	12.5	155	0.47	70.0	1.0

*1 管理強度用の供試体は、模擬柱試験体および小型柱から採取したコア供試体とした。

表-3 コンクリートの調合

水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³) ^{*1}					添加量 (kg/m ³)		外割 (kg/m ³)
		W	C	SF	S	G	SRA ^{*2}	SP ^{*3}	
12.5	32.4	155	1116	124	350	744	10	27.3	40

*1 記号は、表-1 使用材料の記号を参照。

*2 SRA は練混ぜ水 (W) に含む。

*3 SP は、固形分の水量を別添加した。添加量は標準量。

*4 SFb の密度は 8.0g/cm³ として外割添加。

*1 戸田建設(株) 開発センター社会基盤ユニット構造材料チーム 工修 (正会員)

*2 戸田建設(株) 開発センター社会基盤ユニット構造材料チーム 主管 工修 (正会員)

*3 晴海小野田レミコン(株) 常務取締役工場長

ームをセメントの内割で10%を置換して使用し、水結合材比は、12.5%とした。シリカフュームは、比表面積および活性度指数については、JIS A 6207とは異なるが、ロットごとに品質試験を実施し、本出荷で定めた製造品質基準に合格したものを受け入れて使用した。管理強度用の供試体は、模擬柱試験体および小型柱試験体から採取したコア供試体とした。混和剤は、低水結合材比に対応した特殊高性能減水剤と、自己収縮対策として、10kg/m³の収縮低減剤を練混ぜ水の一部として用いた。また、超高強度コンクリートの脆性的な破壊を緩和する目的として、鋼繊維（直径0.16mm、長さ13mm）を調合上の容積の外割で1m³あたり0.5vol.%（40kg/m³）添加した。

2.2 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜ手順を表-4に示す。練混ぜは、モルタル先練りとし、セメントと別に添加するシリカフュームは作業員によるミキサ手投入とした。練混ぜ量は、1バッチあたり1.5m³から2.75m³とし、1バッチまたは2バッチを合わせてアジテータ車に積み込んだ。モルタルの練混ぜ時間は、シリカフューム投入完了後約60秒とし、ミキサの動力負荷および目視の判断により、モルタルの練混ぜ状況を確認した。モルタルの練混ぜ完了後、粗骨材を投入し、120秒練り混ぜた。その後、ファイバーボールを防止するために、鋼繊維を投入機により分散させながら、ミキサ上部の投入口より投入した。鋼繊維投入完了後、60秒間練り混ぜた後、アジテータ車に積み込んだ。

2.3 品質管理項目

品質管理項目を表-5に示す。フレッシュコンクリートの性状は、材料分離状況、スランプフロー、空気量、

表-4 練混ぜ手順

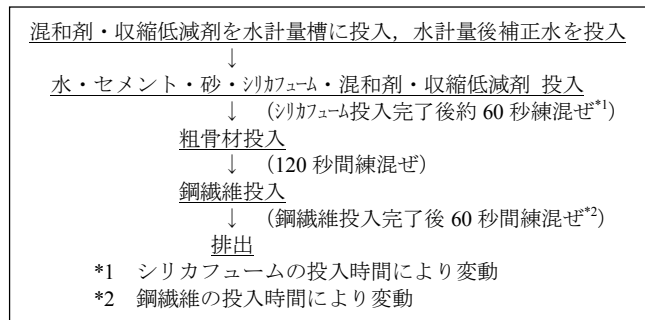


表-6 製品検査強度管理用の柱試験体

種類	寸法(mm)	養生方法ほか
模擬柱	□1000×1050	部材温度追従養生，1車目採取
小型柱	□400×700	断熱養生，2車目で降採取

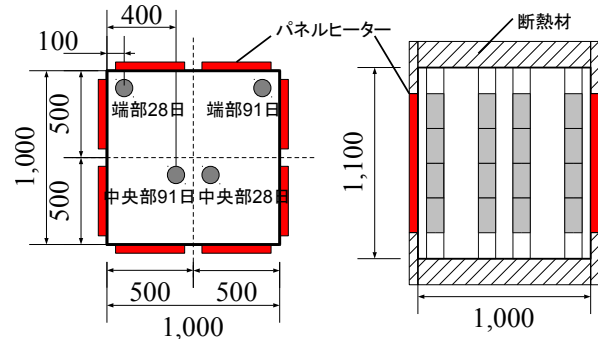


図-1 模擬柱試験体

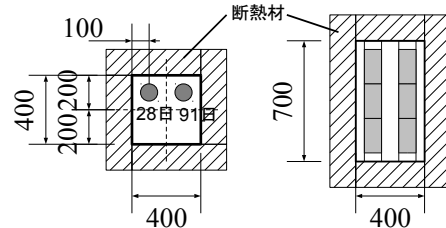


図-2 小型柱試験体

表-5 品質管理項目

分類	試験項目	試験方法	試験時期等		
			工程検査(出荷時)	製品検査(荷卸時)	その他
フレッシュコンクリートの性状	材料分離状況	目視	全車	全車	
	スランプフロー	JIS A 1150 50cm フロー時間およびフロー停止時間も測定	全車 (全バッチ)	全車	
	空気量	JIS A 1128	全車	全車	
	コンクリート温度	JIS A 1156	全車	全車	
	塩化物量	JASS5 T-502	1回/日	1回/日	
	単位水量	改良型高周波加熱法 ⁷⁾	1回/日以上 (出荷の1車目)	—	
硬化コンクリートの性状	圧縮強度 (40℃温水養生)	円柱供試体 JIS A 1108, 試験材齢 7, 28 日	全車	—	○ (荷卸時)
	圧縮強度 (模擬柱・小型柱)	コア供試体 JIS A 1107, JIS A 1108 試験材齢 28 または 91 日 ^{*1}	—	全車 1車目: 模擬柱 その他: 小型柱	
	ヤング係数	JIS A 1149	—	—	○

*1 試験材齢 28 日で管理強度以上となった場合は合格とする。

コンクリート温度、塩化物量に加え、出荷時に工程管理として単位水量測定を行った。単位水量の測定方法は、改良型高周波加熱法⁷⁾とした。

硬化コンクリートの性状は、圧縮強度およびヤング係数を測定した。圧縮強度は、工程管理としてφ100×200mmの円柱供試体を採取し、40℃温水養生とした。表-6、図-1および図-2に、製品検査強度管理用の柱試験体、模擬柱試験体および小型柱試験体を示す。柱試験体は、模擬柱と小型柱の2種類とした。模擬柱は、構造体コンクリートのコンクリート打込み日のアジテータ1車目から採取し、試験体寸法を1000×1000×1050mmとし、上下面を厚さ150mmの断熱材、側面の4面にパネルヒーターを設置した。また、実柱の構造体コンクリート（柱下端からの高さ50mmの出隅部）の温度を追従するよう温度制御機能を有するコントローラーによりパネルヒーターで模擬柱の温度を制御し養生した。小型柱は、2車目以降のアジテータ車に対して1車につき1体採取し、試験体寸法を400×400×700mmとし、厚さ150mmの断熱材を6面に設置して断熱養生とした。試験材齢の2日前に、図に示す位置でコア供試体を採取し、強度試験に供した。一部の圧縮強度試験は、異なる試験所の試験機を用いているため、事前に圧縮強度試験機の比較実験を行い、試験機の違いによる圧縮強度の差を確認した。

3. 超高強度コンクリートの製造品質結果

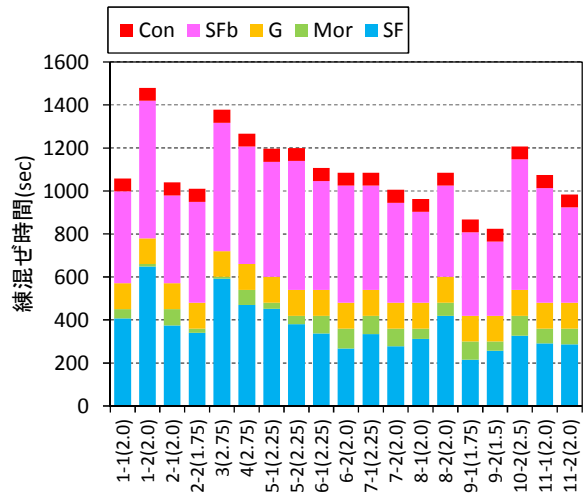
3.1 コンクリートの練混ぜ結果

コンクリートの練混ぜ時間結果を図-3に示す。モルタルの練混ぜは、練混ぜ量によってシリカフェーム投入量が異なるため、投入時間は216~648秒となった。鋼繊維も同様に投入時間は、344~640秒となり、コンクリート1バッチあたりの練混ぜ時間は、約14~25分で、平均18.3分となった。練混ぜバッチごとの計量誤差を図-4に、計量誤差の結果を表-7に示す。各材料とも動荷重計で表示された計量値と設定値との誤差であり、手動で調整後の結果である。計量誤差は、粗骨材が最も大きく±1%程度で、セメントが最小で、各材料とも非常に小さい誤差であった。なお、その他の材料はすべて個別にはかりで当量を計量している。

3.2 フレッシュ性状

フレッシュ試験の結果を表-8に示す。フレッシュ性状は、いずれの試験項目も管理値を満足する結果であった。出荷時および荷卸時に目視により材料分離状況を確認したが、練混ぜや運搬による骨材とモルタルの分離やファイバースト発生は見られず、鋼繊維も均等に分散して良好なフレッシュ性状であった。図-5~図-7および表-9にスランプフロー、空気量および50cmフロー時間の試験結果を示す。スランプフローは、管理値70±

SF ... シリカフェーム投入時間(練混ぜ開始からSF投入完了までの時間)
 Mor ... シリカフェーム投入完了から粗骨材投入までの時間
 G ... 粗骨材投入開始から鋼繊維投入開始までの時間
 SFb ... 鋼繊維投入時間 (SFb投入開始から完了までの時間)
 Con ... 鋼繊維投入完了から排出までの時間



練混ぜバッチ(カッコの数字は練混ぜ量(m³))
 図-3 コンクリートの練混ぜ時間結果

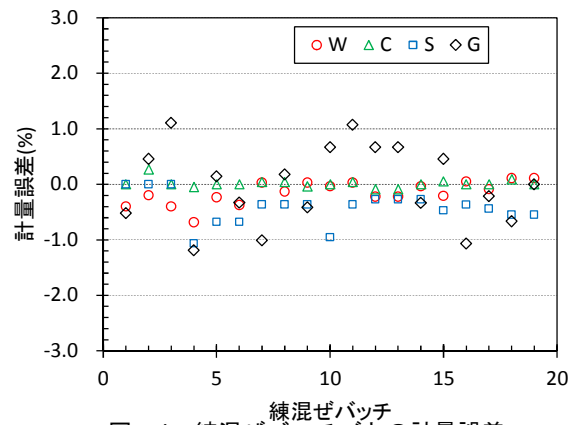


図-4 練混ぜバッチごとの計量誤差

表-7 計量誤差結果

項目		W	C	S	G
計量誤差 (%)	平均値	-0.15	0.01	-0.42	-0.02
	最大値	0.11	0.27	0.00	1.11
	最小値	-0.68	-0.09	-1.07	-1.19
	標準偏差	0.21	0.08	0.29	0.70

10cmに対して、出荷台数の1車目の荷卸時のスランプフローは57.5cmとなり、管理値を下回ったが、現場にて混和剤を後添加し、管理値の範囲でコンクリートを打ち込んだ。2車目以降は、スランプフローの低下を見込み、出荷時のスランプフローをやや大きくし、荷卸時のスランプフローはすべて管理値を満足した。全出荷台数11車の平均値は、出荷時は74.2cm、荷卸時は71.1cmで、運搬でスランプフローは若干低下する傾向にあった。空気量は、出荷時の平均値は1.4%、荷卸時の平均値は1.2%となり、空気量の変化はほぼなかった。50cmフロー時間

表-8 フレッシュ試験の結果

出荷台数	打込み車	練混ぜ量 (m ³)	試験項目	スランブフロー (cm)	50cm フロー時間 (sec)	フロー停止時間*2 (sec)	空気量 (%)	塩化物イオン量 (kg/m ³)	コンクリート温度 (°C)	材料分離性状	外気温 (°C)
				管理値	70±10	—	—	1.0±1.0	0.30 以下		
1	1回目 1車	2.0+2.0 計 4.0	出荷時	65.0	18.3	166.0	1.6	0.04	26	良好	—
			荷卸時*1	72.0	11.4	164.0	1.6	0.04	27	良好	23
2	1回目 2車	2.0+1.75 計 3.75	出荷時	72.5	9.8	180.0	1.5	—	28	良好	—
			荷卸時	67.5	10.1	180.0	1.3	—	29	良好	25
3	1回目 3車	2.75	出荷時	79.0	9.5	180.0	1.5	—	28	良好	—
			荷卸時	67.0	13.6	180.0	1.1	—	30	良好	28
4	1回目 4車	2.75	出荷時	75.5	9.9	180.0	1.2	—	29	良好	—
			荷卸時	69.5	12.5	180.0	1.1	—	30	良好	26
5	2回目 1車	2.25+2.25 計 4.5	出荷時	76.0	10.5	180.0	1.4	0.06	30	良好	—
			荷卸時	75.5	10.5	180.0	1.3	0.06	31	良好	27
6	2回目 2車	2.25+2.0 計 4.25	出荷時	78.0	6.7	180.0	1.2	—	34	良好	—
			荷卸時	76.5	11.2	180.0	1.3	—	31	良好	27
7	2回目 3車	2.25+2.0 計 4.25	出荷時	74.5	9.4	180.0	1.5	—	34	良好	—
			荷卸時	72.5	13.5	180.0	1.3	—	32	良好	27
8	2回目 4車	2.0+2.0 計 4.0	出荷時	73.5	10.4	180.0	1.2	—	34	良好	—
			荷卸時	73.5	11.5	180.0	1.3	—	33	良好	27
9	3回目 1車	1.75+1.5 計 3.25	出荷時	74.0	7.9	166.0	0.8	0.06	30	良好	—
			荷卸時	72.0	9.6	180.0	1.1	0.04	34	良好	32
10	3回目 2車	2.5	出荷時	75.5	7.3	180.0	1.6	—	34	良好	—
			荷卸時	66.5	12.1	180.0	1.0	—	35	良好	34
11	3回目 3車	2.0+2.0 計 4.0	出荷時	73.0	9.4	180.0	1.4	—	35	良好	—
			荷卸時	69.5	11.2	180.0	1.0	—	36	良好	36

*1 荷卸時に混和剤を後添加し測定した値。

*2 フロー停止時間は、180秒で停止しない場合、測定を終了し、その時点のスランブフローを測定した。

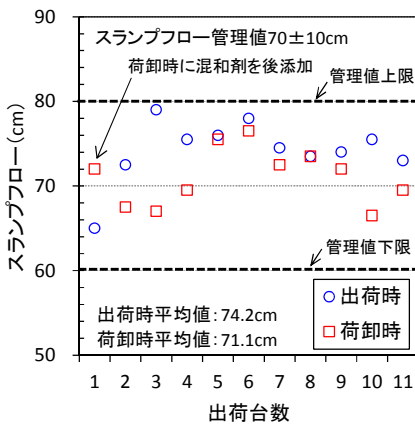


図-5 スランブフロー試験の結果

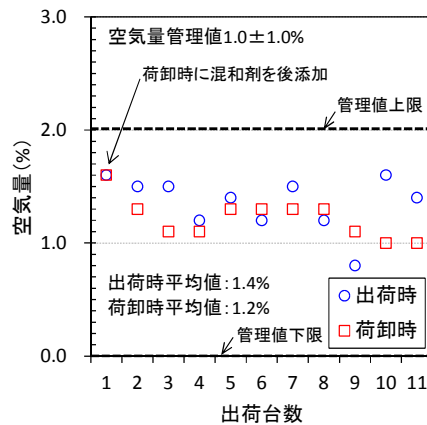


図-6 空気量試験の結果

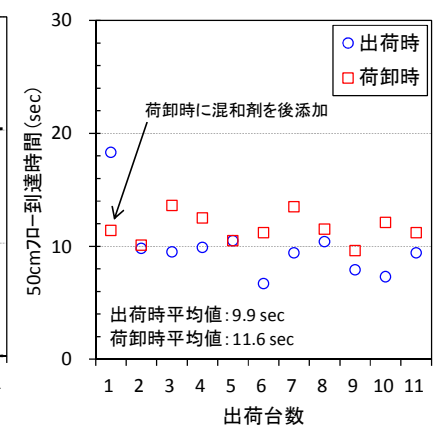


図-7 50cm フロー時間の結果

表-9 スランブフローおよび空気量の試験結果

項目	試験場所	平均値	標準偏差	変動係数(%)
スランブフロー (cm)	出荷時	74.2	3.66	4.93
	荷卸時	71.1	3.38	4.75
空気量 (%)	出荷時	1.4	0.24	17.1
	荷卸時	1.2	0.18	15.0
50cm フロー時間(sec)	出荷時	9.9	3.05	30.81
	荷卸時	11.6	1.28	11.03

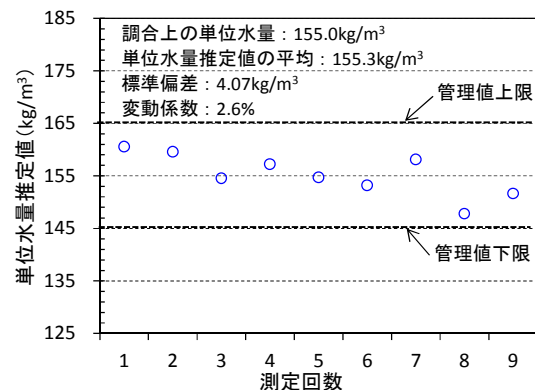


図-8 単位水量測定の結果

は出荷時の平均値は 9.9 秒，荷卸時の平均値は 11.6 秒となり，若干大きくなった。単位水量測定の結果を図-8 に示す。測定回数 9 回の平均値は 155.3kg/m³，標準偏差は 4.07kg/m³で，管理値の±10.0kg/m³の範囲を十分に満足した。

3.3 硬化性状

(1) 工程管理の圧縮強度

図-9 および表-10 に材齢 7・28 日圧縮強度の変動 (40℃温水養生) を示す。材齢 7 日において，出荷時の平均値は 171.4N/mm²，荷卸時の平均値は 172.5N/mm²，材齢 28 日では出荷時の平均値は 213.7N/mm²，荷卸時の平均値は 211.7N/mm² となり，運搬の影響による圧縮強度の変化はほとんど見られなかった。圧縮強度の標準偏差および変動係数は，材齢 7 日において，出荷時は 6.47N/mm² と 3.77%，荷卸時は 4.18N/mm² と 2.42%，材齢 28 日において出荷時は 3.55N/mm² と 1.66%，荷卸時は 5.45N/mm² と 2.57%であった。今回の Fc200N/mm² 超高強度コンクリートの製造において，圧縮強度の変動はいずれも 4%以下で，Fc100N/mm² 級の高強度コンクリートと同等であり⁸⁾，安定した品質のコンクリートを製造していると考えられる。

(2) 製品検査の圧縮強度

コア供試体による圧縮強度試験の結果を図-10 および図-11 に示す。また，コア供試体の圧縮強度結果を表-11 に示す。いずれのコア強度も材齢 28 日において，管理値の 200N/mm² 以上の結果を得て合格とし，材齢 91 日は参考値とした。材齢 28 日のコア強度の平均値は 206.5N/mm² で，標準偏差 3.01N/mm²，変動係数 1.46% であり，コア強度においても Fc100N/mm² 級の高強度コンクリートと同程度の安定した製造を確認した。圧縮強度試験機の比較を表-12 に示す。材齢 28 日と 91 日のコア強度試験は，異なる試験所の試験機を使用して実施しているため，今回のコンクリート出荷にあたって，事前に同一バッチのコンクリートで作製した供試体を用いて，圧縮試験機の強度比較実験を実施した。強度レベルによって試験を 3 回実施しているが，圧縮強度が大きくなると，試験機 A の強度は小さくなる傾向が見られた。この

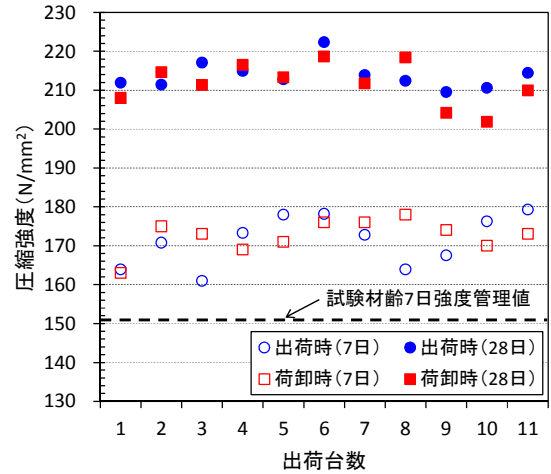


図-9 材齢 7・28 日圧縮強度の変動 (40℃温水養生)

表-10 圧縮強度の試験結果 (40℃温水養生)

材齢 (日)	試験場所	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)
7	出荷時	171.4	6.47	3.77
	荷卸時	172.5	4.18	2.42
28	出荷時	213.7	3.55	1.66
	荷卸時	211.7	5.45	2.57

表-11 コア供試体の圧縮強度試験

材齢 (日)	試験場所	平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)
28	荷卸時	206.5	3.01	1.46
91	荷卸時	212.2	5.14	2.42

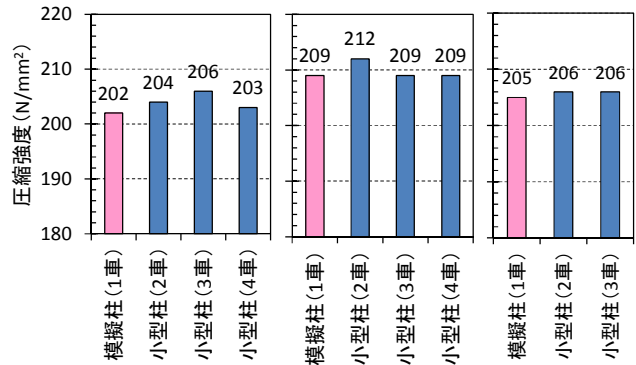


図-10 コア強度試験の結果 (材齢 28 日)

*1 材齢 28 日で合格したため試験を実施していない。

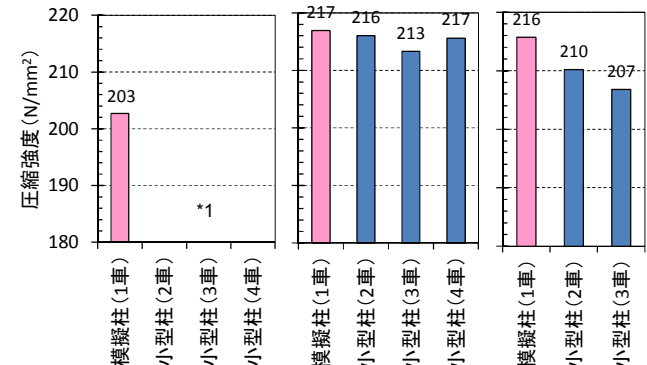


図-11 コア強度試験の結果 (材齢 91 日)

表-12 圧縮強度試験機の比較

試験機	項目	試験1	試験2	試験3
試験機A (材齢28日 で使用)	平均値(N/mm ²)	171.7	194.0	219.8
	標準偏差(N/mm ²)	5.42	6.29	3.08
	変動係数(%)	3.16	3.24	1.40
試験機B (材齢91日 で使用)	平均値(N/mm ²)	167.8	199.5	230.8
	標準偏差(N/mm ²)	1.70	5.77	1.25
	変動係数(%)	1.01	2.89	0.54
圧縮強度の増減*1(%)		-2.27	+2.84	+5.00

*1 試験機Aを基準とした場合の試験機Bの強度増減の割合。

原因として、参考文献⁹⁾にあるとおり、試験機の剛性が低いと圧縮強度が低下する可能性があると考えられており、コンクリートの圧縮強度試験において、試験機の剛性の違いが圧縮強度に影響を及ぼしたと考えられる。よって、材齢 28 日から材齢 91 日にかけて強度増進があったが、同一試験機で強度試験を実施した実大施工実験³⁾ではこのような傾向がなく、試験機の違いによるものと考えられる。

(3) ヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-12 に示す。図中のプロットは、40℃温水養生は 3 本の供試体の平均値とし、コアは柱の平均値とした。また、文献³⁾ の実大施工実験で実施した結果を合わせてプロットし、JASS5 式から求めたヤング係数とそれに対して±10%と±20%の線を示した。今回の結果は、実大施工実験の結果とほぼ同等であった。試験値は、JASS5 式と比較すると若干下回っているが、すべて JASS5 式の±10%に収まっており、概ね JASS5 式で評価できると考えられる。

4. まとめ

Fc200N/mm² 超高強度コンクリートの現場適用時において実施した製造、工程検査、アジテータ車による運搬および製品検査の製造品質について検討した結果、本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) コンクリート 1 バッチあたりの練混ぜ時間は、約 14 ～25 分で、平均 18.3 分となった。練混ぜバッチごとの計量誤差は小さかった。
- (2) アジテータ車による運搬では、鋼繊維によるファイバーボールの発生や材料分離はなかった。また、スランプフローはやや低下する傾向があったが、良好なフレッシュ性状を得られた。
- (3) 工程管理として採取した円柱供試体の 40℃温水養生圧縮強度は、材齢 7 日、材齢 28 日とも変動係数が小さく、安定した品質のコンクリートを製造することができた。
- (4) 製品検査として構造体コンクリートの強度を模擬柱および小型柱のコア供試体で管理した結果、いずれも 200N/mm² 以上の管理値を満足し、変動係数 1.46% と安定した製造を確認した。

以上より、Fc200N/mm² 超高強度コンクリートの実機プラントによる製造では、練混ぜ時間が長くなるが、適切な品質管理をすることで、Fc100N/mm² 級の高強度コンクリートと同様に安定した品質（フレッシュ性状および硬化性状）を得られることがわかった。

参考文献

- 1) 井戸康浩, 菊田繁美, 梅本宗宏, 端直人: 200N/mm²

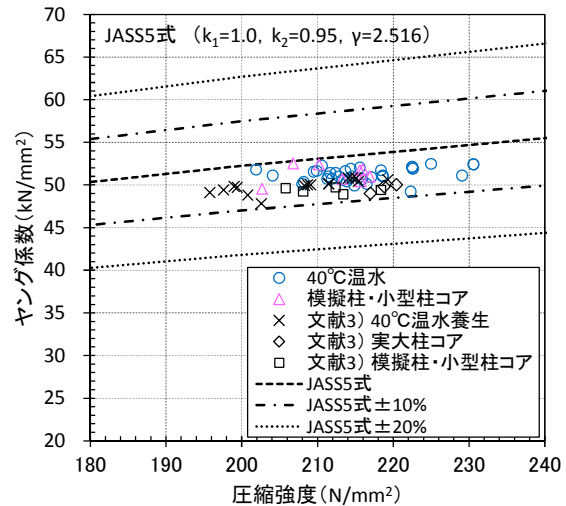


図-12 圧縮強度とヤング係数の関係

級超高強度コンクリートの基礎的研究 (その 1 ～その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), A-1, pp.997-1000, 2010.9

- 2) 井戸康浩, 梅本宗宏, 端直人: 200N/mm² 級超高強度コンクリートの構造体コンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.1249-1254, 2013
- 3) 井戸康浩, 菊田繁美, 梅本宗宏, 端直人, 右田周平: Fc200N/mm² 級超高強度コンクリートの実大施工実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 材料施工, pp.105-106, 2013.8
- 4) 菅俣匠, 小泉信一, 原田健二, 岡澤智: 150N/mm² 級コンクリートの強度発現性に及ぼすシリカフェーム反応率の影響, コンクリート工学論文集, Vol.18, No.2, pp.1-11, 2007.5
- 5) 石中正人, 山中英明, 鳴瀬浩康: シリカフェーム混合セメントにおける加熱養生時の強度発現性に及ぼす最高温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.91-96, 2008
- 6) 山本佳城, 中島徹, 渡邊悟士, 清水良広: 設計基準強度 200N/mm² の超高強度プレキャストコンクリートの超高層鉄筋コンクリート造住宅への適用, コンクリート工学, Vol.49, No.8, pp.37~42, 2011.8
- 7) 井戸康浩, 梅本宗宏: 超高強度コンクリートの単位水量測定方法に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.381-382, 2011.8
- 8) 寺井靖人, 端直人, 梅本宗宏, 大内一之, 長田眞一: 超高層 RC 造集合住宅に用いた 100MPa 級高強度コンクリートの品質, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) A-1, pp.997-998, 2003.9
- 9) 野口貴文: コンクリートの圧縮強度試験結果に影響を及ぼす各種試験条件, コンクリート工学, Vol.35, No.9, pp.12-18, 1997.9