

設計基準強度 200N/mm²級の超高強度コンクリートの実用化に関する実験的検討宮野 和樹^{*1}・梶田 秀幸^{*2}・太田 健司^{*1}

Experimental Study on Practical Application of Ultra High Strength Concrete with Design Strength of 200MPa

Kazuki MIYANO, Hideyuki KAJITA, Kenji OHTA

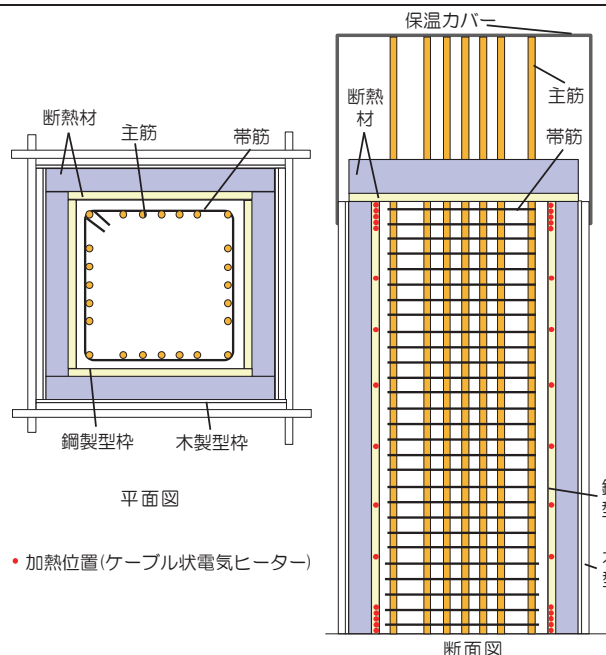


図-1 柱部材試験体の型枠の概要



写真-1 フレッシュコンクリートのスランプフローの状況



写真-2 実機実験時の柱部材試験体の打込み状況

研究の目的

設計基準強度 200N/mm²級の超高強度コンクリートを現場施工にて実用化することを目的に、室内における供試体および小型試験体を用いた基礎的性状の検討、ならびに、実機バッチャープラントにおける製造および実大規模の試験体の作製による、フレッシュコンクリートの性状の検討、施工性の確認および硬化コンクリートの性状の検討を実施した。

技術の説明

設定した使用材料、調合、製造方法、打込み方法、締固め方法、養生方法とすることにより、すべての季節において、トラックアジテータ車による運搬およびコンクリートバケットによる打込みに支障のないフレッシュコンクリートの性状を有するコンクリートが得られる。また、材齢 91 日に 200N/mm²以上の構造体コンクリート強度が得られる。

主な結論

- 設定した材料・調合・製造方法とすることにより、水結合材比 14.0～11.5%の範囲で、すべての季節において、適切な流動性と材料分離抵抗性があり、かつ、所要の空気量となるコンクリートが得られた。
- 設定した材料・調合・製造方法のコンクリートを用い、設定した模擬柱および柱部材の仕様およびコンクリートの打込み・締固め・養生方法とした場合、いずれの季節においても模擬柱、柱部材ともに、良好な施工性が得られ、かつ、材齢 91 日に 200N/mm²以上の圧縮強度が得られた。
- 測定した単位水量と調合上の単位セメント量から算出した結合材水比と圧縮強度の関係による、設計基準強度 200N/mm²級の超高強度コンクリートの調合設計の可能性が示唆された。

* 1 本店 技術研究所

* 2 本店 技術研究所 材料研究室

設計基準強度200N/mm²級の超高強度コンクリートの 実用化に関する実験的検討

宮 野 和 樹^{*1} 梶 田 秀 幸^{*2}
太 田 健 司^{*1}

要 旨

設計基準強度200N/mm²級の超高強度コンクリートを現場施工にて実用化することを目的に、室内における供試体および小型試験体を用いた基礎的性状の検討、ならびに、実機パッチャープラントにおける製造および実大規模の試験体の作製による、フレッシュコンクリートの性状の検討、施工性の確認および硬化コンクリートの性状の検討を実施した。

その結果、設定した材料・調合・製造方法とすることにより、水結合材比14.0～11.5%の範囲で、すべての季節において、適切な流動性と材料分離抵抗性を有し、所要の空気量となるコンクリートが得られた。また、設定した実大規模の試験体の仕様およびコンクリートの打込み・締固め・養生方法とした場合、いずれの季節においても良好な施工性が得られ、かつ、材齢91日に200N/mm²以上の圧縮強度が得られた。

キーワード 200N/mm²／超高強度コンクリート／室内実験／実機実験／フレッシュコンクリート／養生温度／圧縮強度

目 次

- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1. はじめに | 4. 実機実験による構造体コンクリートの性状の検討 |
| 2. 室内実験による基礎的性状の検討 | |
| 3. 実機実験によるフレッシュコンクリートの経時変化の検討 | 5. まとめ |

EXPERIMENTAL STUDY ON PRACTICAL APPLICATION OF ULTRA HIGH STRENGTH CONCRETE WITH DESIGN STRENGTH OF 200MPa

Kazuki MIYANO
Kenji OHTA

Hideyuki KAJITA

Synopsis:

This study is aimed at practical application of ultra high strength concrete with design strength of 200MPa. At first, we examined the basic property using test piece and small specimen in examination room. Then, we examined the property of the fresh concrete and hardening concrete, by the production in the batcher plant and the specimen of the true size scale. We carried out the experiment in the range of 14.0-11.5% of water-binder ratio in winter, spring and summer. We obtained the following results by assuming it materials, mix proportion, the manufacturing method that we set. Concrete had appropriate fluidity and segregation resistance, and appropriate air content. Also, when specification of true size scale specimens were set and placing, compaction and curing method, good workability was obtained in any seasons, and compressive strength of 200MPa or more was obtained on the day 91 of the material.

* 1 本店 技術研究所

* 2 本店 技術研究所 材料研究室

1. はじめに

近年，設計基準強度（以下， F_c と略記する） 200N/mm^2 以上の超高強度コンクリートが開発され^{1)~4)}，超高層建築物の下部の柱や開放的な空間を確保するための細径の鉄筋コンクリート柱等への適用が報告されている^{5)~7)}。

$\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリート部材の実用化においては，プレキャストコンクリート工場にて部材を製造する方法とレディーミクストコンクリート工場にてコンクリートを製造・トラックアジテータ車にて運搬・現場にて打込む方法（以下，現場施工と略記する）が考えられ，本研究では，現場施工での実用化について検討した。

$\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートを現場施工にて実用化するためには，材料・調合の選定により適切な流動性や所要の空気量となるフレッシュコンクリートが得られること，実機バッチャープラントにおける製造およびトラックアジテータ車による運搬が可能であること，現場にて実部材へ密実に打ち込むことが可能であること，材料・調合・打込み・締固め・養生方法の選定により構造体コンクリートの圧縮強度が 200N/mm^2 以上となること，調合設計方法および強度管理方法が設定できることが必要である。

そこで本研究では， $\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを現場施工にて実用化することを目的に，室内における供試体および小型試験体を用いた基礎的性状の検討，ならびに，レディーミクストコンクリート工場の実機バッチャープラントにおける製造および実大規模の試験体の作製による，フレッシュコンクリートの性状の検討，施工性の確認，硬化コンクリートの性状の検討を実施した。

2. 室内実験による基礎的性状の検討

2.1 実験概要

(1) 要因と水準，使用材料および調合

室内実験の要因と水準を表-1 に，供試体の高温養生方法を図-1 に，小型ブロック試験体の概要を図-2 に示す。実験シリーズ 1 では，水結合材比（以下， W/B と略記する）がフレッシュコンクリートの性状および圧縮強度へ及ぼす影響，供試体の養生方法が圧縮強度へ及ぼす影響を検討した。実験シリーズ 2 では，シリカフェウム混合セメント中のシリカフェウムとは別にシリカフェウムを別添し，置換率を変化させた場合のフレッシュコンクリートの性状および圧縮強度への影響，供試体の養生方法が圧縮強度へ及ぼす影響を検討した。また，構造体コンクリートへ適用する際の養生方法の検討のために，6 面を断熱した $450\text{mm} \times 450\text{mm} \times 450\text{mm}$ の小型ブロック試験体にて，試験体の温度履歴および圧縮強度を確認した。

室内実験の使用材料を表-2 に示す。 $\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートに関する既往の文献^{1)~8)}および

表-1 室内実験の要因と水準

実験シリーズ	要因	水準
1	水結合材比(%) (以下， W/B と略記)	14.0, 13.0, 12.5, 12.0, 11.5
	供試体の養生方法	・標準養生 ・高温養生A ^{*1}
2	シリカフェウムの置換率 ^{*2} (%)	0, 5, 10
	供試体および試験体の養生方法	・高温養生B ^{*1} ・ 40°C 温水養生 ・小型ブロック試験体 ^{*3} による断熱養生

*1：高温養生方法は図-1 に示す

*2：シリカフェウム混合セメントと置換

*3：概要を図-2 に示す

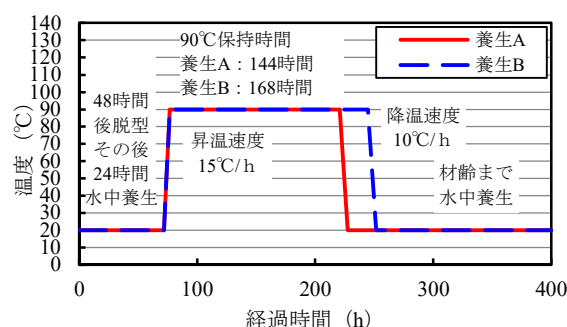


図-1 室内実験の高温養生方法

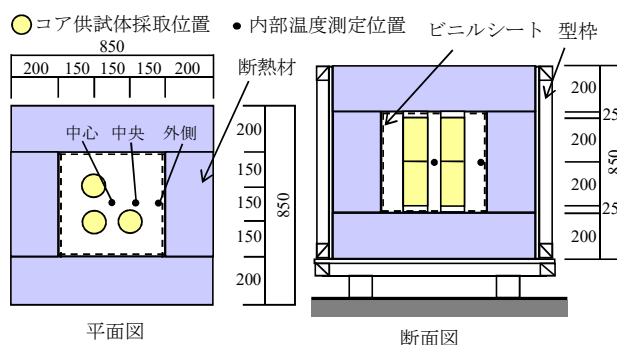


図-2 室内実験の小型ブロック試験体の概要

表-2 室内実験の使用材料

材料	種類	記号	種類・特性・主成分
セメント	シリカフェウム混合セメント	C	密度: 3.08g/cm^3
細骨材	硬質砂岩砕砂	S	表乾密度: 実験1 2.58g/cm^3 実験2 2.55g/cm^3
粗骨材	硬質砂岩砕石	G	表乾密度: 実験1 2.64g/cm^3 実験2 2.66g/cm^3
水	上水道水	W	—
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
混和材	シリカフェウム	SF	密度: 2.25g/cm^3 比表面積 $7.2\text{m}^2/\text{g}$
	鋼繊維	Sfb	密度: 7.85g/cm^3 $\phi 0.62 \times 30\text{mm}$

事前の室内実験による材料選定の検討結果から，セメント，骨材，混和剤を選定した。また，実験シリーズ 2 では，フレッシュ時のコンクリートの粘性抑制および硬化時の強度確保のために，シリカフェウム混合セメントと

表-3 室内実験の調査

実験 シリー ーズ	調合 No.	W/B*1 (%)	細骨 材率*2 (%)	単位粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	シリカ フェュームの 置換率(%)	単位量(kg/m ³)					使用量 (kg/m ³) Sfb*3	添加率 (B*1×%) SP
						W	C	SF	S	G		
1	1-1	14.0	36.8	0.50	0	155	1107	0	452	794	0	1.5
	1-2	13.0	32.8				1192		379			1.7
	1-3	12.5	30.3				1240		338			1.8
	1-4	12.0	27.6				1292		297			1.9
	1-5	11.5	24.2				1348		248			2.1
2	2-1	12.5	31.0	0.50	0	155	1240	0	342	794	39	2.2
	2-2		29.9		5		1178	62	324			2.2
	2-3		28.7		10		1116	124	306			2.2

*1：Bは結合材（セメントとシリカフェュームの和）の記号である，*2：以下，s/aと略記する，*3：外割で使用

表-4 室内実験の試験項目および試験方法

試験項目		試験方法・測定方法	試験実施の有無	
			シリーズ1	シリーズ2
フレッシュ コンク リート	スランプフロー	JIS A 1150	○	○
	500mmフロー到達時間	JIS A 1150 附属書JA	○	○
	空気量	JIS A 1128	○	○
	コンクリート温度	JIS A 1156	○	○
硬化 コンク リート	試験体の内部温度	T型熱電対により測定	—	○*1
	圧縮強度	JIS A 1108 標準養生供試体	○	—
		高温養生供試体*2	○	○
		40℃温水養生供試体	—	○
		小型ブロック試験体(コア)	—	○*3

*1：小型ブロック試験体を測定，*2：シリーズ1は高温養生A，シリーズ2は高温養生Bである なお，同一条件の場合の高温養生AとBによる強度発現は同程度であることを事前に確認している，*3：調合No.2-3のみ実施

は別にシリカフェュームを使用した．さらに，地震時の変形による破壊の抑制および自己収縮抑制のために鋼繊維を外割で使用した．

室内実験の調査を表-3に示す．実験シリーズ2において，シリカフェュームは，シリカフェューム混合セメントと置換し，鋼繊維は0.5vol%となる39kg/m³を外割で使用した．

(2) 練混ぜ方法

練混ぜは，容量50リットルの二軸強制練りミキサを用いて，1回の練混ぜ量を35リットルとして実施した．練混ぜ方法はモルタル先練りとし，順序は，細骨材，結合材を投入し15秒，水，混和剤を投入し120～360秒練り混ぜ，かき落とし後，粗骨材を投入し120秒間練り混ぜた．その後，300秒静置し，さらに30秒間練混ぜた後に排出した．鋼繊維を使用する際は，300秒静置時に投入し，静置後の練混ぜ時間は，鋼繊維を使用しない場合と同様とした．水，混和剤投入後の練混ぜ時間は，調合により上記の範囲内で変化させ，目視によりモルタルの粘性を判断し設定した．

(3) 試験項目および試験方法

室内実験の試験項目および試験方法を表-4に示す．フレッシュコンクリート試験はコンクリート排出直後に実施し，フレッシュコンクリートの目標範囲を満足した場合，供試体および試験体を作製した．室内実験における

表-5 室内実験のモルタルの練混ぜ時間およびフレッシュコンクリート試験結果

調合 No.	W/B (%)	SFの 置換 率(%)	モル タルの 練混ぜ 時間(s)	スラ ンプ フロー (cm)	500mm フロー 到達 時間(s)	空気 量 (%)	コンク リート 温度 (℃)
1-1	14.0	0	180	65.5	10.9	1.7	25
1-2	13.0	0	180	73.5	10.9	1.8	25
1-3	12.5	0	240	72.5	12.1	1.5	26
1-4	12.0	0	300	71.0	14.8	2.0	26
1-5	11.5	0	360	73.0	16.0	1.6	26
2-1	12.5	0	240	65.0	38.4	1.5	23
2-2	12.5	5	150	70.0	14.0	1.4	23
2-3	12.5	10	120	72.5	10.3	0.7	22

フレッシュコンクリートの目標範囲は，スランプフローが70±5cm，空気量が2.0%以下とした．

2.2 実験結果および考察

(1) 練混ぜ時間およびフレッシュコンクリートの性状

室内実験のモルタルの練混ぜ時間およびフレッシュコンクリート試験結果を表-5に示す．スランプフローは65.0～73.5cm，空気量は0.7～2.0%となり，すべて目標の範囲内であった．また，目視によりコンクリートの分離や粗骨材・鋼繊維の偏りは確認されなかった．

シリーズ1において，W/Bが小さくなるほど，モルタルの練混ぜ時間および500mmフロー到達時間は長くなった．W/Bが小さくなることによりコンクリートの粘性が増大したためと考えられる．

シリーズ 2 において、シリカフュームの置換率が大きくなるほど、モルタルの練混ぜ時間および 500mm フロー到達時間は短くなった。シリーズ 2 では、鋼繊維を外割で 39kg/m³ 使用したため、W/B12.5%で 500mm フロー到達時間が 38.4 秒と長くなったが、シリカフュームの置換により粘性を低減することができた。

(2) 小型ブロック試験体のコンクリート温度履歴

小型ブロック試験体のコンクリート温度履歴を図-3 に示す。試験体中心における最高温度は 73.5℃となり、中心と外側の温度差は 0.4~0.8℃であった。200mm の断熱材にて養生することにより、試験体周囲の温度の影響を受けにくく、コンクリートの水和熱によりコンクリート温度を上昇させることが可能であることが確認できた。

(3) 圧縮強度

シリーズ 1 の圧縮強度試験結果を図-4 に示す。図では養生条件ごとに結合材水比（以下、B/W と略記する）と圧縮強度の関係を示した。標準養生は、材齢 28 日で 180N/mm²程度、材齢 91 日で 200N/mm²程度となり、B/W と圧縮強度に明確な傾向はみられなかった。高温養生 A は、すべての W/B および材齢において 200N/mm²以上となり、B/W が大きくなると圧縮強度が高くなる傾向がみられた。高温養生を実施した供試体の圧縮強度を用いることにより、B/W と圧縮強度の関係による調合設計の可能性があると考えられる。

シリーズ 2 の圧縮強度試験結果を図-5 に示す。高温養生 B、40℃温水養生ともに、シリカフュームの置換率が 0%より、5%または 10%とするほうが圧縮強度は大きくなった。また、40℃温水養生より高温養生 B が圧縮強度は大きくなる傾向がみられた。結合材にシリカフュームを使用した場合、材齢初期に高温履歴を受けると反応が促進し、良好な強度発現性を得られるとの文献⁹⁾もあり、同様の結果となった。さらに、小型ブロック試験体のコア強度は 194N/mm²となり、200N/mm²に近い圧縮強度となった。断熱した小型ブロック試験体により、水和熱による材齢初期の高温履歴を得ることが可能なことから、200N/mm²近い圧縮強度になったと考えられる。

3. 実機実験によるフレッシュコンクリートの性状の経時変化の検討

3.1 実験概要

(1) 使用材料および調合

実験は、冬期、標準期、夏期に実施し、レディーミクスドコンクリート工場の実機バッチャープラントにてコンクリートを製造し、実験実施時期におけるフレッシュコンクリートの経時変化について検討した。

実機によるフレッシュコンクリートの経時変化実験の使用材料を表-6 に示す。材料は室内実験と同様とした。

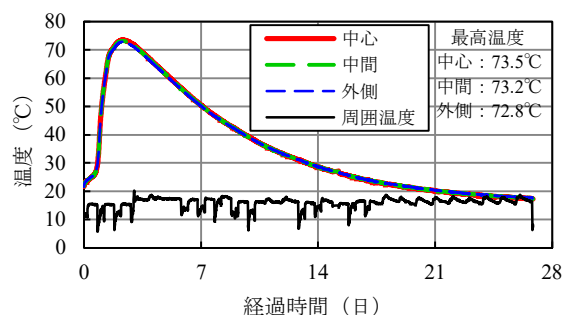


図-3 小型ブロック試験体のコンクリート温度履歴

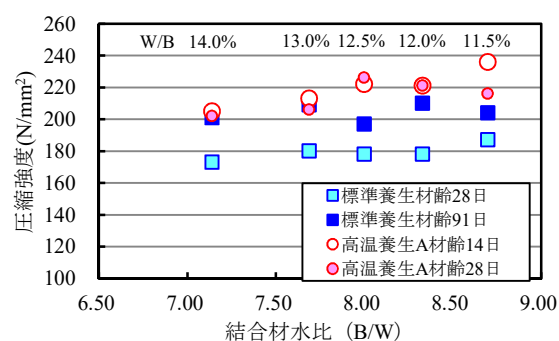


図-4 シリーズ 1 の圧縮強度試験結果

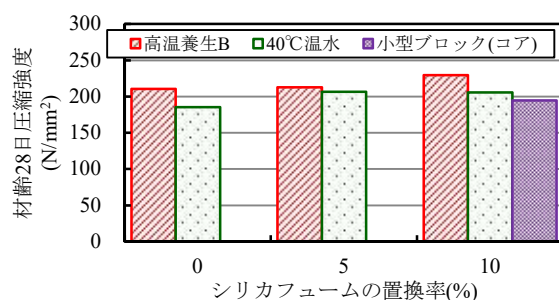


図-5 シリーズ 2 の圧縮強度試験結果

表-6 実機実験によるフレッシュコンクリートの経時変化の使用材料

材料	種類	記号	種類・特性・主成分
セメント	シリカフューム 混合セメント	C	密度3.07g/cm ³
細骨材	硬質砂岩砕砂	S	表乾密度2.59g/cm ³
粗骨材	硬質砂岩碎石	G	表乾密度2.64g/cm ³
水	上水道水	W	—
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	収縮低減剤	Sr	ポリエーテル系
混和材	シリカフューム	SF	密度2.25g/cm ³ 比表面積6.6~11.0m ² /g
	鋼繊維	Sfb	密度7.85g/cm ³ φ 0.62×30mm

表-7 実機実験によるフレッシュコンクリートの経時変化の調合

W/B ^{*1} (%)	s/a (%)	単位 粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)					使用量 (kg/m ³)	
			W	C	SF	S	G	Sfb ^{*2}	Sr ^{*3}
12.5	33.5	0.45	155	1116	124	363	734	79	10

*1: Bは結合材（セメントとシリカフュームの和）の記号、*2: 外割で使用、

*3: 水の一部として使用

ただし、室内実験の材料に追加して、自己収縮低減のため、収縮低減剤を使用した。調査を表-7 に示す。調査はいずれの実験実施時期においても同一とした。シリカフュームはシリカフューム混合セメントと 10%置換し、鋼繊維は 1.0vol%となる 79kg/m³ を外割で使用し、収縮低減剤は水の一部として 10kg/m³ 使用した。ただし、高性能減水剤は、目標のフレッシュコンクリートの性状が得られるよう、実験実施時期により添加率を結合材の質量に対して 1.35～1.70%の範囲で変化させた。

(2) コンクリートの製造および運搬

練混ぜは、レディーミクストコンクリート工場において容量 5m³ の二軸強制練りミキサーを用いて、1 回の練混ぜ量を 1.5m³ として実施した。練混ぜ方法はモルタル先練りとし、順序は、細骨材、水、セメント、シリカフュームを投入し 360～420 秒練り混ぜ、粗骨材を投入し 180 秒間練り混ぜた後にトラックアジテータ車に排出した。モルタルの練混ぜ時間は、時期により上記の範囲内で変化させ、シリカフュームの投入状況およびミキサーの動力負荷により判断し設定した。鋼繊維は、トラックアジテータ車にコンクリート積載後、必要量を 3 分割して投入・練混ぜを実施した。なお、トラックアジテータ車によるコンクリートの運搬時間は 80～100 分程度であった。

(3) 試験項目および試験方法

実機によるフレッシュコンクリートの経時変化実験の試験項目および試験方法を表-8 に示す。フレッシュコンクリート試験は、出荷時（練上がり時）、実験場到着直後、荷卸し時、注水から 180、210、240、270 分経過後を目安に実施した。荷卸し時のフレッシュコンクリートの目標範囲は、スランブフローが 60～75cm、空気量が 2.0% 以下とした。なお、標準期では注水から 160 分（実験場到着時）の試験後、夏期では注水から 285 分の試験後に高性能減水剤を後添加した。

3.2 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

スランブフローの経時変化を図-6 に示す。スランブフローは、冬期では経過時間 330 分まで、標準期では経過時間 160 分試験後に高性能減水剤の後添加を実施することで経過時間 285 分まで、夏期では経過時間 285 分まで、目標範囲を満足した。経時によるスランブフローの低下が大きい場合、高性能減水剤の後添加によりスランブフローを調整することが可能であると考えられる。また、目視により材料分離を確認し、経時および時期によるコンクリートの分離や粗骨材および鋼繊維の偏りはみられなかった。

500mm フロー到達時間の経時変化を図-7 に示す。500mm フロー到達時間は、標準期、夏期では、時間の経

表-8 実機によるフレッシュコンクリートの経時変化実験の試験項目および試験方法

試験項目	試験方法・測定方法
スランブフロー	JIS A 1150
500mmフロー到達時間	JIS A 1150 附属書JA
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
外気温	温度計により測定
圧縮強度	JIS A 1108 40℃温水養生供試体

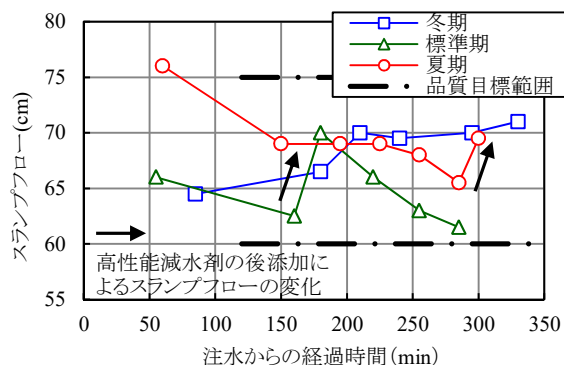


図-6 スランブフローの経時変化

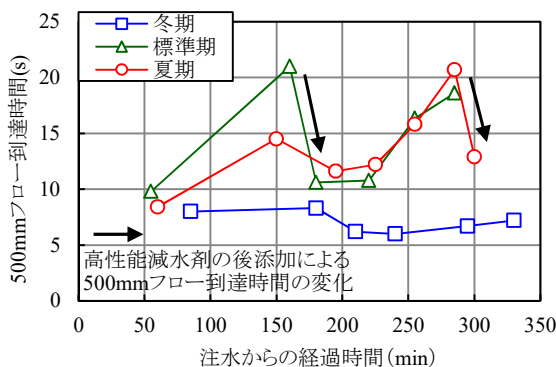


図-7 500mm フロー到達時間の経時変化

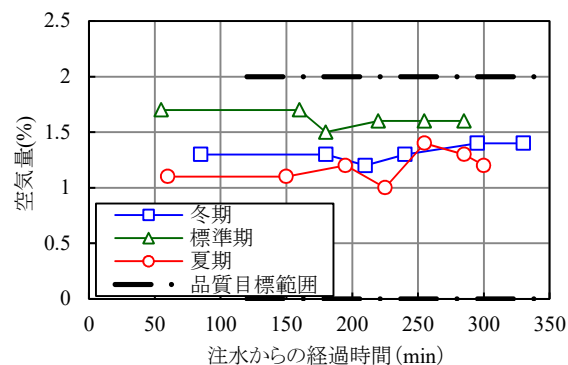


図-8 空気量の経時変化

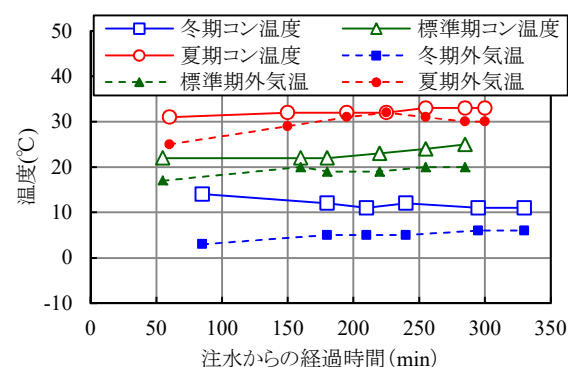


図-9 コンクリート温度および外気温の経時変化

過に伴い大きくなったが、冬期では経過時間 330 分まで同程度であった。標準期、夏期では、冬期と比べてコンクリート温度が高く、セメントの水和反応が促進されて、時間の経過とともに粘性が増大したと考えられる。

空気量の経時変化を図-8 に示す。空気量はいずれの時期においても経過時間 285～330 分まで目標範囲を満足した。また、空気量の経時変化は小さく、出荷時から試験終了まで 0.2～0.4%程度の変化であった。

コンクリート温度および外気温の経時変化を図-9 に示す。コンクリート温度は経時変化が小さく、出荷時から試験終了まで 2～3℃程度の変化であった。

以上より、各時期において、荷卸し時に所要のフレッシュコンクリートの性状を得られるコンクリートの製造が可能と考えられる。

(2) 圧縮強度

40℃温水養生した供試体の圧縮強度は材齢 28 日で 203～206N/mm²、材齢 91 日で 206～218N/mm² となり、大きな差はみられなかった。

4. 実機実験による構造体コンクリートの性状の検討

4.1 実験概要

(1) 要因と水準、使用材料および調合

実機実験による構造体コンクリートの性状の検討の要因と水準を表-9 に示す。実験では、レディーミクストコンクリート工場の実機バッチャープラントにてコンクリートを製造し、実部材レベルの試験体を作製することに

より、各要因がフレッシュコンクリートの性状、コンクリートの養生温度、圧縮強度に及ぼす影響を検討した。

実機実験による構造体コンクリートの性状の検討の使用材料は実機実験によるフレッシュコンクリートの性状の経時変化の検討と同様とした。

実機実験による構造体コンクリートの性状の検討の調合を表-10 に示す。調合はいずれの実験実施時期においても同一とした。シリカフュームはシリカフューム混合セメントと 10%置換し、鋼繊維は 1.0vol%となる 79kg/m³ を外割で使用し、収縮低減剤は水の一部として 10kg/m³ 使用した。ただし、高性能減水剤は、目標のフレッシュコンクリートの性状が得られるよう、実験実施時期により添加率を結合材の質量に対して 1.45～1.90%の範囲で変化させた。

(2) コンクリートの製造

練混ぜは、レディーミクストコンクリート工場において容量 5m³ の二軸強制練りミキサを用いて、1 回の練混ぜ量を 1.5m³ または 1.75m³ として実施した。練混ぜ方法は、実機によるフレッシュコンクリートの経時変化実験と同様とした。ただし、モルタルは 360～450 秒練り混ぜた。また、トラックアジテータ車によるコンクリートの運搬時間は 75～90 分程度であった。

表-9 実機実験による構造体コンクリートの性状の検討の要因と水準

要因	水準
W/B ^{*1} (%)	14.0, 12.5, 11.5
実験実施時期	冬期, 標準期, 夏期

*1: 柱部材試験体は W/B12.5%のみ

表-10 実機実験による構造体コンクリートの性状の検討の調合

W/B ^{*1} (%)	s/a (%)	単位粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	シリカ フュームの 置換率(%)	単位量(kg/m ³)					使用量 (kg/m ³)	
				W	C	SF	S	G	Sfb ^{*2}	Sr ^{*3}
14.0	40.0	0.45	10	155	996	111	479	734	79	10
12.5	33.5				1116	124	363			
11.5	27.0				1213	135	267			

*1: Bは結合材(セメント, シリカフューム)の記号, *2: 外割で使用, *3: 水の一部として使用

表-11 実機実験による構造体コンクリートの性状の検討の試験項目および試験方法

試験項目		試験方法・測定方法	
フレッシュ コンク リート	スランブフロー	JISA 1150	
	500mmフロー到達時間	JISA 1150 附属書JA	
	空気量	JISA 1128	
	コンクリート温度	JISA 1156	
	外気温	温度計により測定	
	単位水量	モルタルエアメーター法 ^{*1}	
	塩化物量	JASS 5T-502	
硬化 コンク リート	試験体の内部温度 ^{*2}	T型熱電対により測定	
	圧縮強度	JISA 1108	標準養生供試体
			40℃温水養生供試体
			模擬柱試験体(コア) ^{*3}
			柱部材試験体(コア) ^{*4}

*1: 文献10)の方法により鋼繊維投入前の試料にて実施, *2: 模擬柱試験体および柱部材試験体にて測定,

*3: 図-10 に概要を示す, *4: 図-11 に概要を示す

(3) 試験項目および試験方法

実機実験による構造体コンクリートの性状の検討の試験項目および試験方法を表-11 に示す。フレッシュコンクリート試験は、練上がり時、荷卸し時に実施し、荷卸し時のフレッシュコンクリートの目標値を満足した場合、試験体および供試体を作製した。実機実験による構造体コンクリートの性状の検討におけるフレッシュコンクリートの目標範囲は、スランプフローが 60～75cm、空気量が 2.0%以下とした。また、構造体コンクリート強度確認のため、模擬柱試験体および柱部材試験体のコア供試体の圧縮強度試験を実施した。

模擬柱試験体の概要を図-10 に示す。模擬柱試験体は、超高層鉄筋コンクリート造建築物の柱で一般的と考えられる 1000×1000mm の断面寸法とし、無筋とした。また、側面 4 面にケーブル状電気ヒーターを用いて加熱可能とした鋼製型枠を使用し、所定の温度となるように制御した。鋼製型枠の外側および上下面は、200mm の断熱材および保温材を用いて 6 面を断熱した。

柱部材試験体の概要を図-11 に示す。側面 4 面にケーブル状電気ヒーターを用いて加熱可能とした鋼製型枠を使用し、所定の温度となるように制御した。鋼製型枠の外側および上面は、200mm の断熱材、保温材、保温カバーを用いて 5 面を断熱した。鋼板型枠の温度設定は、事前の室内および実大規模の実験により決定し、96 時間以上、試験体中心部の温度が 80℃以上となるように実施した。

供試体および試験体の作製は、荷卸し後に実施した。また、圧縮強度試験は、標準養生供試体および 40℃温水養生供試体については 4 本の平均を、模擬柱試験体のコア供試体については図-10 に示す箇所の 6 本の平均を、柱部材試験体のコア供試体については図-11 に示す箇所の 10 本を用いた。

4.2 実験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状および施工性

実機実験による構造体コンクリートの性状の検討の荷卸し時のフレッシュコンクリート試験結果を表-12 に示す。荷卸し時のスランプフローは 60.5～75.0cm、空気量は 0.9～1.9%となり、すべて目標の範囲内であった。コンクリート温度は、冬期に 12～13℃、標準期に 22～23℃、夏期に 32℃となった。500mm フロー到達時間は、室内試験と比較すると大きくなったが、試験体作製時のコンクリートの打込みおよび締固めに支障はみられなかった。

柱部材試験体の材齢 91 日のコア供試体の密度の高さ方向の分布を図-12 に示す。なお、密度は、コア供試体の質量、および、直径と高さから算出した体積により求めた。図より、高さ方向による密度の大きな差はみられなかった。また、それぞれのコア供試体の目視確認において豆板や大きな空隙はみられなかった。これは、材齢 28、56 日においても同様であった。以上より、本実験のコンクリ

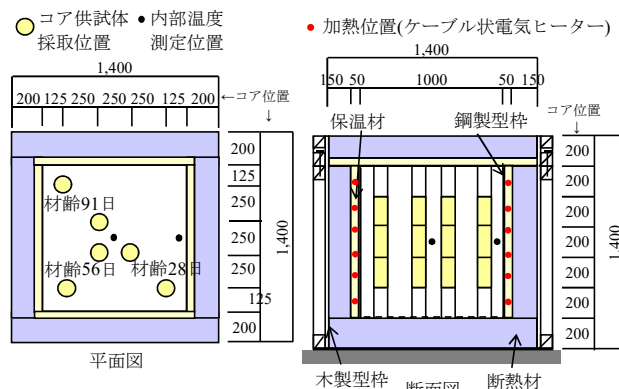


図-10 模擬柱試験体の概要

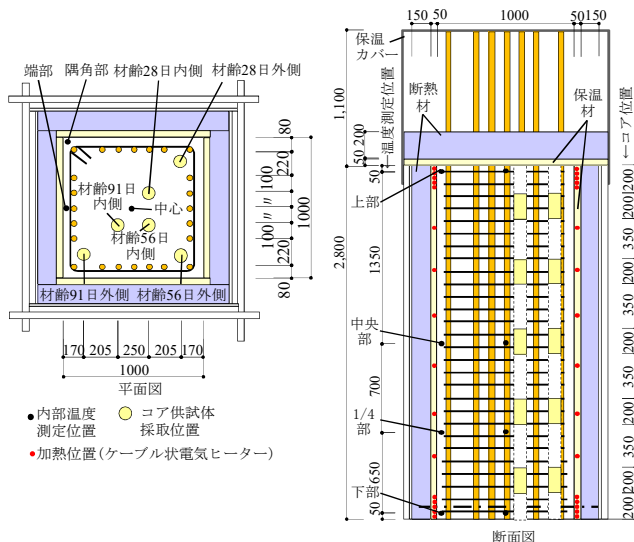


図-11 柱部材試験体の概要

表-12 実機実験による構造体コンクリートの性状の検討のフレッシュコンクリート試験結果

時期	W/B (%)	試験体	スランプフロー (cm)	500mm フロー到達時間 (s)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	単位水量 (kg/m³)	塩化物量 (kg/m³)
冬期	14.0	模擬柱	70.0	23.7	1.5	12	148.2	0.07
	12.5	模擬柱	67.0	27.2	1.8	12	151.4	0.08
	11.5	模擬柱	67.0	42.3	1.9	13	154.2	0.06
	12.5	柱部材	65.5	31.9	1.7	13	153.3	0.06
標準期	14.0	模擬柱	63.0	15.1	1.3	23	155.1	0.03
	12.5	模擬柱	63.0	22.2	1.6	23	153.6	0.05
	11.5	模擬柱	60.5	29.1	1.6	22	155.1	0.04
	12.5	柱部材	62.5	18.0	1.6	22	154.3	0.04
夏期	14.0	模擬柱	69.0	13.3	0.9	32	158.5	0.04
	12.5	模擬柱	69.0	14.5	1.1	32	157.4	0.04
	11.5	模擬柱	75.0	9.9	1.0	32	165.8	0.02
	12.5	柱部材	66.0	18.7	1.0	32	158.9	0.02

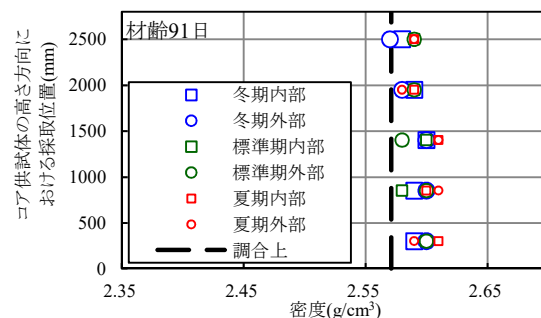


図-12 柱部材試験体の密度の高さ方向の分布

表-13 模擬柱試験体の最高温度とその時間

W/B (%)	測定 位置	実験実施時期					
		冬期		標準期		夏期	
		温度 (°C)	時間 (h)	温度 (°C)	時間 (h)	温度 (°C)	時間 (h)
14.0	中心	88.7	76.5	85.1	63.6	94.3	75.0
	端部	88.2	77.7	83.5	58.6	91.8	75.0
12.5	中心	92.9	76.5	85.9	67.7	95.4	78.7
	端部	91.3	79.6	82.6	75.2	92.7	78.2
11.5	中心	94.1	79.3	85.2	66.7	105.2	77.7
	端部	92.2	78.6	82.0	66.7	95.4	76.2

ートの打込みおよび締固め方法とした場合、いずれの時期においても良好な施工性を確保できると考えられる。

(2) コンクリートの温度履歴

模擬柱試験体の最高温度とその時間を表-13 に示す。W/B12.5%の試験体中心部の最高温度は、冬期が 92.9℃、標準期が 85.9℃、夏期が 95.4℃となった。また、すべての実施時期および W/B の中心部と端部の温度差は、0.5～9.8℃となり大きな差はみられなかった。模擬柱試験体の温度履歴の一例として、W/B12.5%の温度履歴を図-13 に示す。すべての実施時期において、あらかじめ設定した試験体中心部の温度を所定時間確保できた。これは、W/B が異なる場合も同様であった。以上より、本実験の模擬柱試験体の仕様により、あらかじめ設定した試験体中心部の温度を所定の時間確保することが可能と考えられる。

柱部材試験体の温度履歴の一例として、夏期の各高さの試験体中心の温度履歴を図-14 に示す。試験体の高さおよび断面方向の中心部の温度は、198 時間 80℃以上となった。これは、冬期、標準期においても同様の傾向となった。これより、本実験の柱部材試験体の仕様により、あらかじめ設定した試験体中心部の温度を所定の時間確保することが可能と考えられる。また、高さの上部、1/4 部、下部は、中央部より温度が低い傾向がみられた。

柱部材試験体の最高温度の高さ方向の分布を図-15 に示す。断面方向の位置による夏期の中心、端部、隅角部の温度差は、最大で 5.4℃となり、最高温度の差は小さかった。これは、冬期、標準期においても同様であった。また、隅角部の季節による温度差は、最大で 6.1℃となり、季節による最高温度の差も小さかった。これは、中心部、端部においても同様であった。

(3) 圧縮強度

材齢 91 日の圧縮強度は、標準養生供試体が 178～195N/mm² (4 本の平均)、温水養生供試体が 205～217N/mm² (4 本の平均)、模擬柱試験体のコア供試体が 220～248N/mm² (6 本の平均)、柱部材試験体のコア供試体が 227～228N/mm² (10 本の平均) となった。本実験の仕様による模擬柱試験体および柱部材試験体にて、材齢

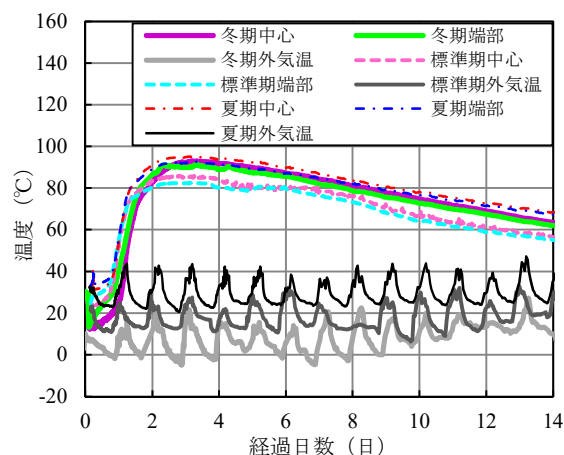


図-13 模擬柱試験体の温度履歴 (W/B12.5%)

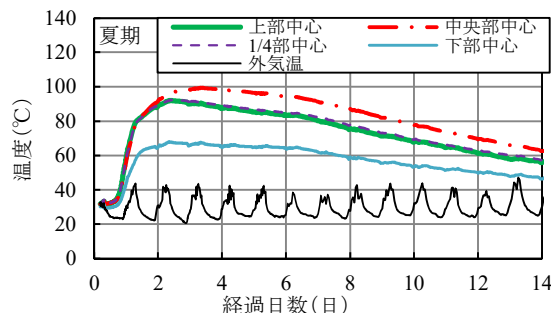


図-14 柱部材試験体の各高さの試験体中心の温度履歴

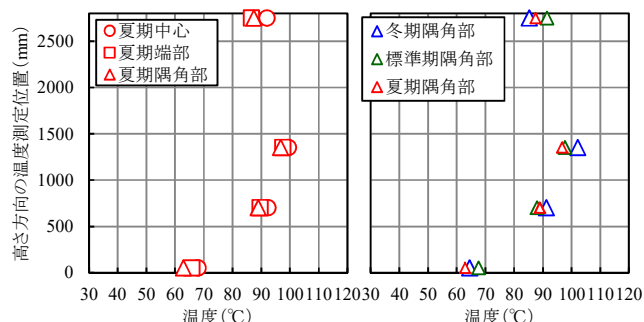


図-15 柱部材試験体の最高温度の高さ方向の分布

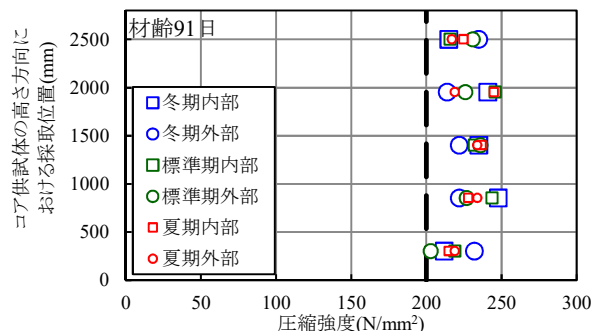


図-16 柱部材試験体の圧縮強度の高さ方向の分布

91 日に 200N/mm² を得ることが可能であった。また、模擬柱試験体のコア供試体の材齢 91 日の圧縮強度の各 W/B における変動係数は 5%以下となり、ばらつきは小さく、実施時期によるコア供試体の圧縮強度は同程度となった。

柱部材試験体のコア供試体の材齢 91 日の圧縮強度の高

さ方向の分布を図-16に示す。高さ方向について、下部のコア供試体の圧縮強度が他部よりやや低い傾向がみられたが、すべて 200N/mm^2 以上となった。また、同一高さにおける季節による圧縮強度の明確な差、内側と外側のコア供試体の圧縮強度の明確な差はみられなかった。以上より、本実験の W/B の範囲、模擬柱試験体および柱部材試験体の仕様により、すべての時期において、 200N/mm^2 以上の構造体コンクリート強度が得られると考えられる。

B/W と材齢 28 日の圧縮強度の関係を図-17に示す。ここで、B/W は、単位水量試験にて測定した単位水量と調合上の単位セメント量から算出した値を用いた。図より、測定した単位水量と調合上の単位セメント量から算出した B/W と圧縮強度には、正の線形関係がみられた。測定した単位水量と調合上の単位セメント量から算出した B/W と圧縮強度の関係による $\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートの調合設計の可能性が示唆された。

5. まとめ

設計基準強度 200N/mm^2 級の超高強度コンクリートの実用化を目的に、室内実験および実機実験を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 設定した材料・調合・製造方法とすることにより、水結合材比 $14.0\sim11.5\%$ の範囲で、すべての季節において、適切な流動性と材料分離抵抗性があり、かつ、所要の空気量となるコンクリートが得られた。
- 2) 設定した材料・調合・製造方法のコンクリートを用い、設定した模擬柱および柱部材の仕様およびコンクリートの打込み・締固め・養生方法とした場合、いずれの季節においても模擬柱、柱部材ともに、良好な施工性が得られ、かつ、材齢 91 日に 200N/mm^2 以上の圧縮強度が得られた。
- 3) 測定した単位水量と調合上の単位セメント量から算出した結合材水比と圧縮強度の関係による、設計基準強度 200N/mm^2 級の超高強度コンクリートの調合設計の可能性が示唆された。

謝辞

本研究の実験に関して、晴海小野田レミコン（株）、竹本油脂（株）にご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡邊悟士，黒岩秀介，陣内浩，山本佳城，並木哲，寺内利恵子：Fc 200N/mm^2 の超高強度コンクリートの実用化に関する研究，大成建設技術センター報，第 42 号，pp.03-1-03-6，2009
- 2) 小島正朗，三井健郎，辻大二郎，鴉越元紀：Fc 200N/mm^2 超高性能コンクリートの開発 その 1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），A-1 材

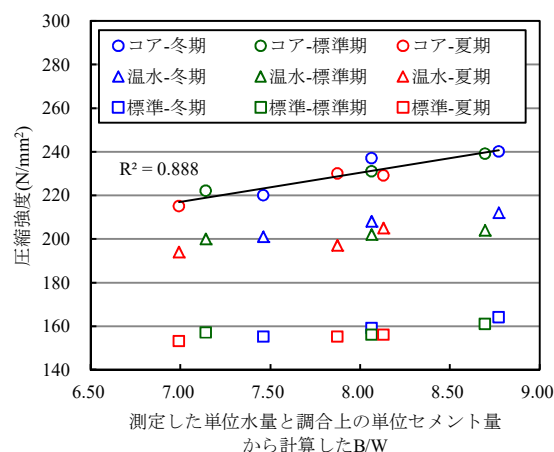


図-17 B/W と模擬柱試験体のコア供試体の材齢 28 日の圧縮強度の関係

料施工，pp.1087-1092，2008.9

- 3) 蓮尾孝一，松田拓，河上浩司： 200N/mm^2 級超高強度コンクリートの構造体強度および力学特性評価に関する検討，三井住友建設技術研究開発報告，第 7 号，pp.113-120，2009
- 4) 井戸康浩，梅本宗宏，端直人： 200N/mm^2 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，No.1，pp.1249-1254，2013
- 5) 梅本宗宏，端直人，井戸康浩，右田周平：Fc 200N/mm^2 超高強度コンクリートの現場適用 その 1～4，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），材料施工，pp.95-102，2014.9
- 6) 太田貴士，山本佳城，今井和正，清水良広，村松晃次：設計基準強度 300N/mm^2 の超高強度コンクリートの実用化 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），材料施工，pp.103-106，2014.9
- 7) 三井健郎，小島正朗，米澤敏男，菅田昌宏，三橋博三：設計基準強度 $150\sim200\text{N/mm}^2$ 超高強度繊維補強コンクリートの開発と実建物への適用，日本建築学会技術報告集，Vol.16，No.32，pp.21-26，2010.2
- 8) 松田拓，本田和也，蓮尾浩一，野口貴文：シリカフェュームとフライアッシュを併用した超高強度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.36，No.1，pp.1462-1467，2014
- 9) 石中正人，中山英明，鳴瀬浩康：シリカフェュ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
- 10) 杉山英佑，梶田秀幸，宮野和樹：モルタル試料を用いた単位容積質量法による超高強度コンクリートの単位水量管理，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1115-1120，2006

