

設計基準強度 120N/mm² 工場製品用超高強度コンクリートの調合決定

本社 小山田哲也
 本社 長井 健雄
 本社 皆川 潤
 本社 鈴木 雅博

概要：コンクリートの高強度・高耐久化を図るため、設計基準強度を 120N/mm² とした超高強度コンクリートを検討した。試験室による基礎試験により骨材の選定および調合条件を検討し、適切な骨材を用いることで設計基準強度 120N/mm² の超高強度コンクリートの製造ができるとの見地を得た。そこで、実構造物の製造を想定して、その調合をもとに工場において実機試験を行い、実物大模擬部材を作製し、コア強度を測定した。その結果、練混ぜを適切に行えば、当社工場の既存設備により設計基準強度 120N/mm² の建築プレキャスト部材が製造可能である見通しが得られた。さらに、膨張材を用いることにより、低水結合材比のコンクリートで発生する自己収縮ひずみを抑制できるとの結果を得た。

キーワード：超高強度コンクリート，構造体強度，温度補正值，骨材選定，簡易断熱養生強度，自己収縮ひずみ抑制

1. まえがき

近年、高層・超高層建築物への関心が高まり、New RC 総プロの研究結果が発表されて以来、施工実績も多くなっている。居住空間を広く確保した超高層建築物の施工を可能にするには、高強度材料の活用が不可欠であり、コンクリートの高強度化が図られている。コンクリートの高強度化において品質の安定は必要命題であり、工期短縮、作業安全性の向上および環境負荷の低減などの特長をも併せ持つコンクリート工場製品への注目が高まっており、近年の高層・超高層建築物では、いずれの部位においても PCa 化を行わないオール在来工法は姿を消しつつある。

このような背景のもと、前報¹⁾では設計基準強度 63, 70, 80, 100N/mm² を満たす超高強度コンクリートのプレキャスト部材への適用を検討した。その結果、現行の工場設備で超高強度プレキャスト部材の製造が可能であるとの見通しを得、実構造物への PCaPC 部材製作および架設を開始している。低水結合材比となる超高強度コンクリートの製造を可能にしたのは、セメント量の増加が招くワーカビリティの悪化やセメントの水和による過度の温度上昇等の問題を混和材料やセメントの種類等で改善できた効果が大きい。現在、超高層建築部材の更なる高強度化のニーズが求められているが、前報に示した調合のコンクリート強度では、100N/mm² 以上の設計基準強度を有する PCa 部材の製造は望めない。しかし、コンクリートのワーカビリティ等の観点から、現在使用している材料および調合では水結合材比を低下させて強度を高めるのは困難である。そこで本研究では、圧縮強度増進に効果の高い高強度の骨材を選定することで、設計基準強度 120N/mm² を満たす PCa 部材製造を目的に検討した。

PCa 部材の製作寸法を決定するために、構造物構築後のクリ - プ変形量を予測する必要があるが、設計基準強度 100N/mm² を超える場合のデータは少ないのが現状である。さらに、クリープ係数は低水



小山田哲也
技術本部
技術研究所



長井健雄
技術本部
技術研究所



皆川潤
技術本部
技術研究所



鈴木雅博
技術本部
開発技術
第一部

結合材比の場合には小さいが、セメントペースト量が多い場合には大きくなる傾向があり、調合を決定したコンクリートの特性は定かでない。そこで、本試験で検討したコンクリートのクリープ係数を把握するため、クリープ試験を行った。

また、単位粉体量が多く、かつ、低水結合材比 20%を下回るような超高強度コンクリートでは、拘束を生じる場合には結合材の水和による自己収縮ひずみによりひび割れの問題が発生する可能性がある。この問題を解消する手段として、膨張材を使用し自己収縮を低減する方法が報告²⁾されているが、水結合材比が30%であり、室温 20℃の恒温室での断面 100×100×1500mmの試験体を用いた試験である。そのため、本試験で対象としている低水結合材比でかつ実構造物を想定したコンクリート温度履歴を受けた場合においても同様な効果があるか定かではない。そこで、本検討では温度履歴を受ける低水結合材比コンクリートの膨張材による自己収縮低減効果を検証した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

a) 骨材

図 - 1 に設計基準強度 120N/mm² の条件を満たすコンクリートの圧縮強度と温度補正值(以下 S 値)の関係を示す。図中には、前報で述べた設計基準強度 100N/mm² を満たすコンクリートの圧縮強度も示している。図より、標準養生供試体の強度と構造物強度を推定するコア強度との差 S 値を仮に 15N/mm² とすれば、設計基準強度 120N/mm² を満たすには、それぞれ標準養生供試体で 158N/mm²、コア強度で 143N/mm² の圧縮強度が必要となる。使用するシリカフェームセメントの特性から、管理材齢を長くすれば標準養生供試体の圧縮強度は高まるが、コア強度の発現は初期に高温履歴を受けるため標準養生と比較し小さい。通常、コンクリートの強度を高めるには、水結合材比を小さくするが、練混ぜの性能や作業性の観点から、この方法では、品質の確保が難しい。そこで本試験では、強度の高いとの報告がある関東地方の骨材を使用し強度増進を図った。使用骨材を表 - 1 に示す。骨材はいずれも中・古生層の堆積岩(砂岩(細粒から粗粒)、泥岩、場合によってシャルスタイン、石灰岩等)を起源とするが、産地によって種々の岩質によって構成され、地域差がある。つまり、三重の骨材は、主として砂岩(ただし、細粒から粗粒)であり、青梅のものはやや泥分質を含むものもあるが概ね砂岩よりなり、骨材としては均一

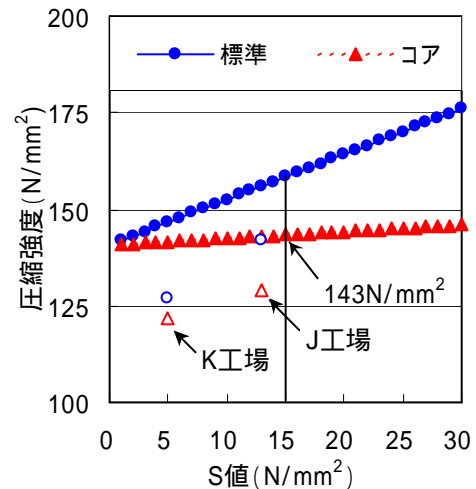


表 - 1 使用骨材の物性 図 - 1 圧縮強度と S 値の関係

	材料	備考
細骨材	東京都青梅産(硬質砂岩)	表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.98%, FM3.03, 実績率 65.1%
	埼玉県両神産(硬質砂岩)	表乾密度 2.68g/cm ³ , 吸水率 0.85%, FM2.88, 実績率 65.9%
	茨城県岩間産(硬質砂岩)	表乾密度 2.68g/cm ³ , 吸水率 0.95%, FM3.26, 実績率 63.4%
	栃木県葛生産(石灰岩)	表乾密度 2.57g/cm ³ , 吸水率 1.60%, FM2.65, 実績率 72.5%
	静岡県浜岡産(硬質砂岩)	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 0.78%, FM2.98, 実績率 67.5%
粗骨材	東京都青梅産(硬質砂岩)	表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.42%, FM6.56, 実績率 61.6%
	埼玉県両神産(硬質砂岩)	表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 0.43%, FM6.46 (1505) 実績率
		表乾密度 2.71g/cm ³ , 吸水率 0.41%, FM7.02 (2015) 60.7%
	茨城県岩間産(硬質砂岩)	表乾密度 2.71g/cm ³ , 吸水率 0.68%, FM6.66, 実績率 61.7%
	栃木県葛生産(石灰岩)	表乾密度 2.76g/cm ³ , 吸水率 1.19%, FM6.57, 実績率 61.0%
	三重県東員産(硬質砂岩)	表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.67%, FM6.58 (1505) 実績率
		表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.37%, FM6.91 (2015) 61.2%

なものである。両神の骨材は、砂質泥岩、細粒砂岩で、一部シャルスタインよりなり、骨材としてはやや不均質である。岩間産の骨材は、堆積岩起源であるが、花崗岩の接触変成を被りホルンフェルス化し、通常のものよりさらに硬質となった岩石を起源としている。ただし、ヘアークラック状の不連続面が入るものもあり、その面は鏡肌状を呈する場合が多い。葛生産の骨材は、石灰岩起源である。以上の骨材は砕石から得られているが、浜岡の細骨材は川砂起源の陸砂である。

各岩石の強度は、経験的な判断から、いずれも 100N/mm² 以上をクリアするものと判断されるが、石灰岩の強度はやや低めである可能性がある。

b)セメント等材料

セメントには、三菱マテリアル社製のシリカフュームセメントを使用した。膨張材は、石灰系のもを4種類用いた。内訳は2社の製品で標準型と水和熱抑制型である。本試験で使用した膨張材は従来の使用量の約 2/3 で同等の効果を示す高性能タイプの材料である。高性能減水剤はポリカルボン酸系のものとし、特に減水率が大きい高強度コンクリート用の混和剤を使用した。また、シリカフュームを混入したコンクリートの場合には空気量の増加が認められるため、消泡剤を使用して所定の空気量になるようにした。

2. 2 試験方法

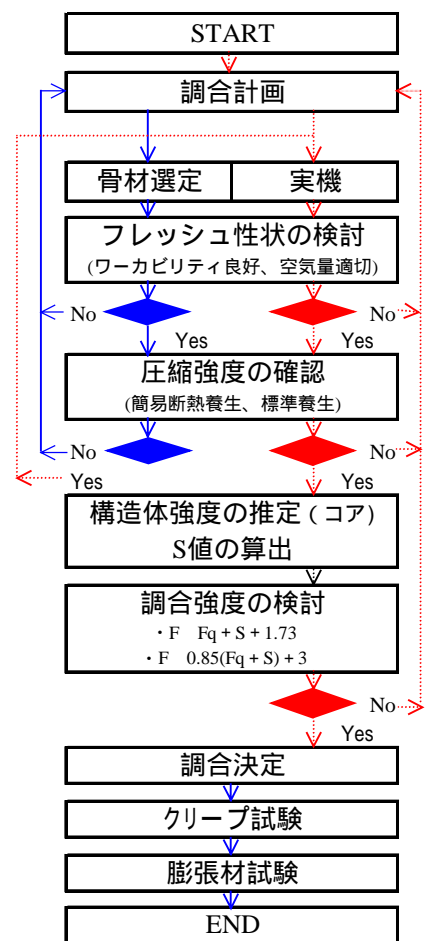
(1)検討方法

本試験の調査検討は、材料と調査の選定および短期的なコンクリートの特性を把握すべく、図 - 2 に示す過程に従って試験を行った。

シリーズ1：骨材選定試験

骨材選定試験の調査を表 - 2 に示す。No.1~4 では、セメントペーストの量および調査を同一にし、細骨材および粗骨材を表に示す容量として試験練りを実施し、骨材自体の強度性状を比較できるようにした。この際に、筆者らは本目的でのコンクリートの製造を可能にするためには、粗骨材だけでなく、細骨材の組合せも重要な点であることを明らかにしており³⁾、第一の試験では同一の産地の細骨材と粗骨材とを組み合わせて圧縮強度を比較した。試験結果から圧縮強度が高い骨材については、No.5~10 において細骨材および粗骨材の組合せを種々に設定して強度比較を行った。以上の試験から最も圧縮強度の高い骨材を選定し、再度、No.11 および No.12 で調査条件を検討した。試験項目およびその目標値を表 - 3 に示す。圧縮強度は、簡易断熱養生および標準養生供試体について測定した。試験材齢は、それぞれ7日、28日とした。

簡易断熱養生は強度試験用供試体を図 - 3 に示す発泡スチロール製の容器に封入した。供試体は、鋼製軽量モールドを用い、コンクリート面をポリ塩化ビニリデンフィルムで被覆し、内部の水分が蒸発しないようにした。供試体は、成型直



実線：室内試験
点線：実機試験

図 - 2 試験の概略

表 - 2 コンクリートの調査

No.	Air (%)	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (m ³ /m ³)	G (m ³ /m ³)
1~10	2 ± 1%	16.0	155	969	0.201	0.310
11	2 ± 1%	16.0	145	906	0.231	0.310
12	2 ± 1%	14.0	155	1107	0.156	0.310

表 - 3 試験項目およびその目標値

試験項目	目標値	試験方法	備考
スランプフロー値	55 ± 10cm	JIS A 1150-2001 に準拠	
50cm フロー到達時間	15 ± 5 秒	JIS A 1150-2001 に準拠	T ₅₀ と略す
フロー流動停止時間	-	JIS A 1150-2001 に準拠	T _{end} と略す
空気量	2.0 ± 1.0%	JIS A 1128 に準拠	圧力法
練上り温度	5 ~ 30	温度計	
圧縮強度		JIS A 1108 に準拠	材齢 7, 28, 56, 91 日

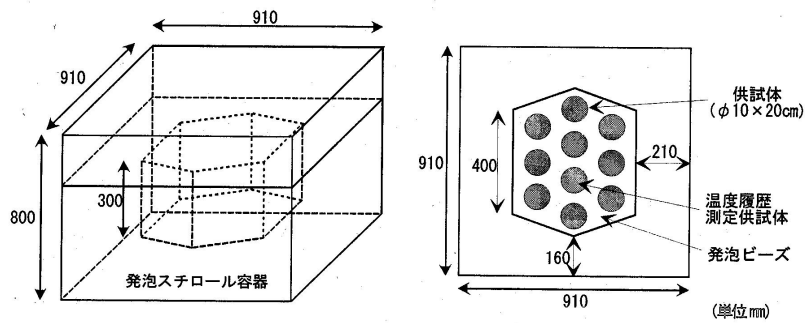


図 - 3 簡易断熱養生容器

後から材齢 7 日まで簡易断熱養生し，材齢 7 日以降に簡易断熱養生容器から取出し，所定の材齢まで封かん養生した．簡易断熱養生時の供試体温度は，ダミー供試体に熱電対を取付けて計測した．圧縮強度は，標準養生供試体と同様に，材齢 7 日，28 日，56 日および 91 日に測定した．

シリーズ 2：実機試験

骨材選定試験により決定した調合について，社内 J 工場にて実構造物の製作を想定して工場のコンクリートプラントで製造したコンクリートを用いて以下に示す各種の試験（以下実機試験と示す）を実施した．コンクリートの品質安定のため，細骨材の表面水率を水分計により計測し，随時水量を補正した．併せて，高周波加熱乾燥法¹⁾による推定水結合材比も確認した．フレッシュ性状を満足したコンクリートにより，柱模擬部材を作製し，所定の材齢にてコアを抜き出し，構造物強度を推定した．部材内には熱電対を取付け，コンクリートの温度履歴もあわせて計測した．実物大模擬部材の形状およびコア採取位置を，図 - 4 および図 - 5 にそれぞれ示す．模擬部材の製作は，実柱部材の

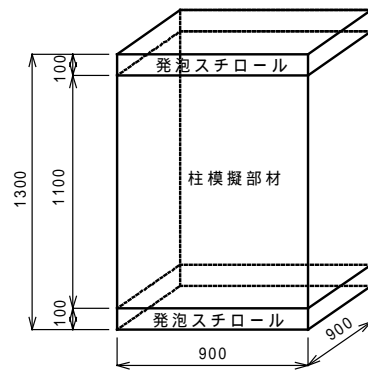


図 - 4 実物大模擬部材の寸法

コンクリート温度履歴とほぼ同一にするため，鋼製型枠を使用し，上下に厚さ 100 mm の発泡スチロールを配置し，熱の放散を防ぐこととした．模擬部材の脱型は翌日とし，強度試験の直前にコアを採取した．コアは直径 100 mm，長さ 1100 mm で採取し，図 - 5 に示すとおり，上下端各 50 mm 取り除き，長さ 200 mm ずつ 5 等分して

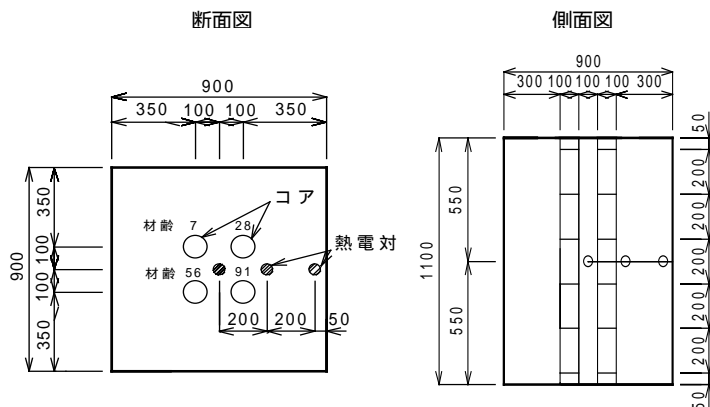


図 - 5 コア採取位置

圧縮強度を測定した。なお、5本分の強度測定値の内、最も平均から離れたものを除き、4本の平均をコア強度とした。圧縮強度は、標準養生供試体と同様に、材齢7日、28日、56日および91日に測定した。また骨材選定試験と同様、簡易断熱養生および標準養生供試体により圧縮強度を測定した。

シリーズ3：クリープ試験

骨材選定試験の結果をもとに最も実用的と考えられる調合についてクリープ試験を行った。試験方法はJIS原案に準拠した。クリープ試験の供試体は10×20cmの円柱供試体であり、載荷材齢を28日とした。載荷材齢までの供試体は、7日間簡易断熱養生および水中養生を行った後、気中により養生した。載荷応力度は0.25fc'の持続荷重とし、1年間継続して載荷することを予定しているが、本報では、5ヶ月までの途中結果を報告する。

シリーズ4：膨張材混合の検討

膨張材を内割で35kg/m³混合したコンクリートを、厚さ200mmの発泡スチロールにて作製した型枠に打設し、断熱養生した供試体の膨張率を測定した。供試体の寸法は15×15×53cmである。なお、膨張材量は結合材量と置き換えている。比較のため、膨張材を混合しない調合も検討に加えている。測定にはひずみゲージを用い、供試体中央部に埋め込んだ。確認のため、温度履歴を計測し、既往のデータと照合した。なお、膨張材を混合したコンクリートは、設計基準強度80N/mm²の調合である。

2. 3練混ぜ方法

練混ぜ方法を図-6に示す。コンクリートは、小型ミキサおよび実機プラントにおいて練身混ぜた。実機上段はパン型ミキサであり、小型ミキサおよび実機下段ミキサは強制二軸ミキサである。

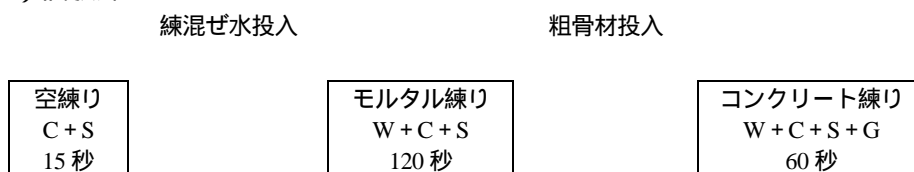
実機練りは、練り混ぜ効率を考慮し、上段ミキサで空練りを行い、攪拌後直ちに下段ミキサに排出し、モルタル練りの負荷電流が一定になる時間まで十分に練り混ぜた。その後粗骨材を投入し、60秒練混ぜた。

3. 試験結果および考察

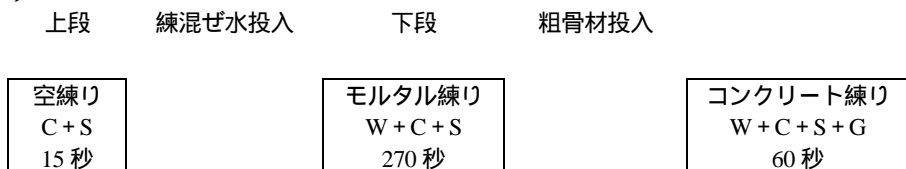
シリーズ1：骨材選定試験

コンクリートのフレッシュ性状を表-4に示す。スランプフローおよび空気量は、目標値をほぼ満足しており、すべての調合において良好なワーカビリティが得られた。ただし、その範囲内においてNo.1~10のように細骨材と粗骨材を同一容積比で混合した調合でも、使用する骨材によりフレッシュコンクリートの流動性は大きく異なる。特に、浜岡産の細骨材を使用した調合No.9および

1) 試験練り



2) 実機試験



注1) W, C, S および G はそれぞれ、水、セメント、細骨材および粗骨材を示す。

注2) 高性能減水剤などの混和剤は練混ぜ水と同時に投入した。

図-6 コンクリートの練混ぜ方法

表 - 4 コンクリートのフレッシュ性状 (骨材選定試験1)

No.	細骨材	粗骨材	SP/SFC (%)	スランブフロー (cm)	T ₅₀ (秒)	T _{end} (秒)	空気量 (%)	練上り温度 ()
1	青梅	青梅	1.30	61.1	16.6	88.7	1.2	23.0
2	両神	両神	1.30	53.9	21.2	70.5	1.5	23.6
3	岩間	岩間	1.30	60.2	16.8	73.5	3.1	24.5
4	葛生	葛生	1.30	57.2	18.6	73.6	1.1	24.1
5	青梅	両神	1.30	63.8	18.1	98.1	1.2	24.7
6	青梅	三重	1.30	65.8	13.7	97.0	1.3	24.5
7	両神	青梅	1.30	60.8	15.6	76.5	1.2	23.1
8	両神	三重	1.30	65.3	12.6	85.4	1.2	23.5
9	浜岡	青梅	1.25	63.5	11.2	71.9	1.5	22.3
10	浜岡	三重	1.25	52.3	38.0	51.8	1.5	23.6
目標値	-	-	-	55 ± 10	15 ± 5	-	2.0 ± 1.0	-

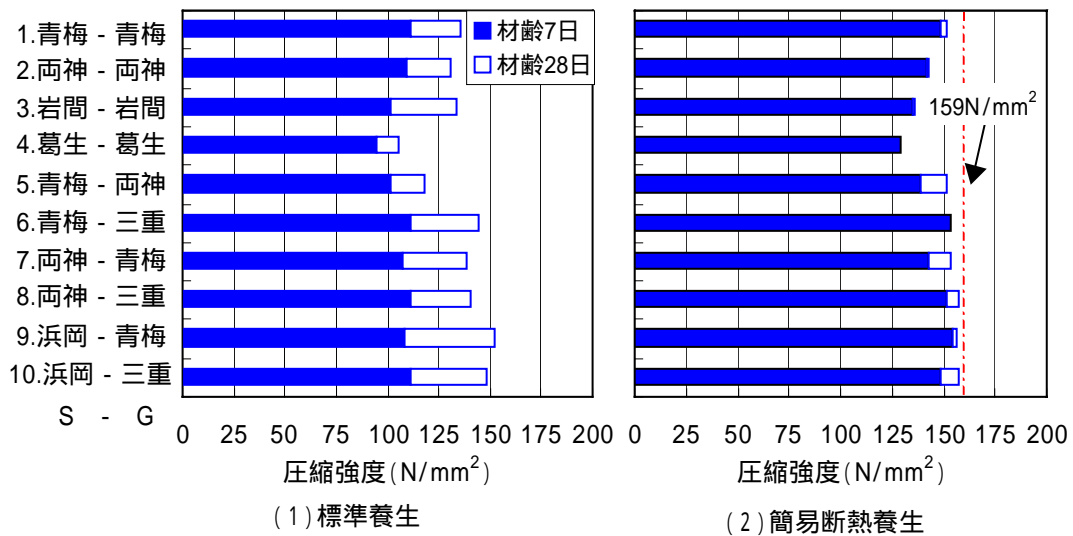


図 - 7 圧縮試験結果 (骨材選定試験1)

No.10 では、他の骨材の場合と比較し、高性能減水剤の量を低減させても、コンクリートの流動性が高い。さらに、細骨材に浜岡産を用い、青梅産の粗骨材を使用した No.9 では、50cm フロー到達時間 (表中の T₅₀) が速く、コンクリートの粘性が低い。浜岡産の細骨材は、川砂を起源とした陸砂であり、粒子が丸みを帯びているため、流動性が高まったものと推察される。

図 - 7 に圧縮強度の試験結果を示す。調合 No.1 ~ 4 は細骨材と粗骨材の産地を同一にしたものであるが、使用する骨材により圧縮強度が大きく異なる。また、No.4 のものが、他に比べ強度が明らかに低いが、これは他岩石に比べ、低い石灰岩の強度特性が現れているとみられる。使用した骨材はいずれも強度が高い骨材であるが、本試験で検討した調合の場

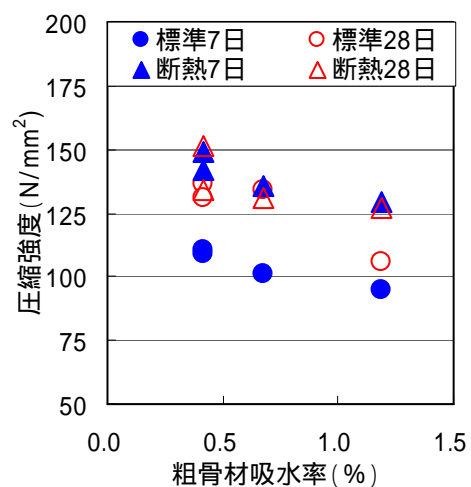


図 - 8 粗骨材吸水率と圧縮強度の関係

合は、低水結合材比であり、ペースト硬化体および骨材との界面が堅固であるため、骨材の物性によっては、骨材の破壊が起こったものと考えられる。この原因を明らかにするため、調合 No.1~4 について粗骨材吸水率との圧縮強度の関係を検証した。結果を図-8に示す。本試験で使用した骨材は、一般に用いられている骨材と比較し、吸水率は非常に小さい。しかし、その中でも吸水率が比較的大きい骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は小さくなることが判る。コンクリートの圧縮強度が 40N/mm^2 程度では、吸水率が3%以上となる場合には吸水率が高くなる程、強度が小さくなるが、吸水率3%以下の場合には明瞭な強度低下は起こらないと考えられている⁴⁾。一方、セメントペースト部分に欠陥の少ない超高強度コンクリートでは、粗骨材内部の空隙から破壊が起きると考えられ、粗骨材の吸水率が小さい範囲でも強度に影響を及ぼす。

以上の結果より、吸水率の小さい細・粗骨材を3種類ずつに限定し、組合せの効果を期待して以下の試験を行った。結果を図-7のNo.5~10に示す。骨材の強度特性を検討してみる。No.5で使用した両神の粗骨材は標準養生の圧縮強度が極めて低く、同一粗骨材を使用したNo.2の圧縮強度と明らかに異なっている。これは両神産骨材の原岩が岩質的に不均質である点が強度上の不均質となって現れたものと判断される。つまり両神産の骨材は、砂岩系が集中するような場合、他と同等の強度が出るであろうが、泥岩系やシャルスタイン系の岩石が多く混入してくるような場合にはやや強度低下するものと予想される。No.5~10の圧縮強度は標準養生と簡易断熱養生の場合では必ずしも対応しているわけではない。部材厚が大きいPCaPC部材中のコンクリートは高温履歴を受けると考えられるため、骨材の選定には簡易断熱養生の場合の圧縮強度を採用した。前報の試験結果から、設計基準強度 120N/mm^2 を満たすコンクリートを得るには、高温履歴を受ける構造体のコア強度との関係¹⁾より、簡易断熱養生供試体の強度は 159N/mm^2 を必要とする。しかし、検討したいずれの調合も目標強度には達していない。

そこで、更なる強度増進を期待し、調合を再度検討した。現状の材料を使用し、超高強度コンクリートの圧縮強度をさらに高めるには、以下の2つの方法があると考えられる。一つは単位セメント量を小さくし、構造体内部の水和熱を極力小さくする方法、もう一つはさらに低水結合材比とし、セメント硬化体の強度を高める方法である。いずれの方法もワーカビリティを悪化させるが、浜岡産の細骨材の調合はフレッシュコンクリートの流動性が高く、検討の余地がある。そこで、骨材はNo.9で使用した浜岡産の細骨材を用い、調合検討することにした。また、青梅産と三重産の粗骨材を比較すると、材齢28日での圧縮強度はほぼ同等であるが、関東地方への運搬を想定し、青梅産の骨材を使用することとした。No.11は水和熱の発生の緩和を図った調合であり、No.12はセメン

表-5 コンクリートのフレッシュ性状(骨材選定試験2)

No.	細骨材	粗骨材	SP/SFC (%)	スランプフロー (cm)	T ₅₀ (秒)	T _{end} (秒)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
11	浜岡	青梅	1.50	66.5	12.5	123	1.7	23.0
12	浜岡	青梅	2.30	60.5	29.0	139	1.7	23.0
	目標値	-	-	55±10	15±5	-	2.0±1.0	-

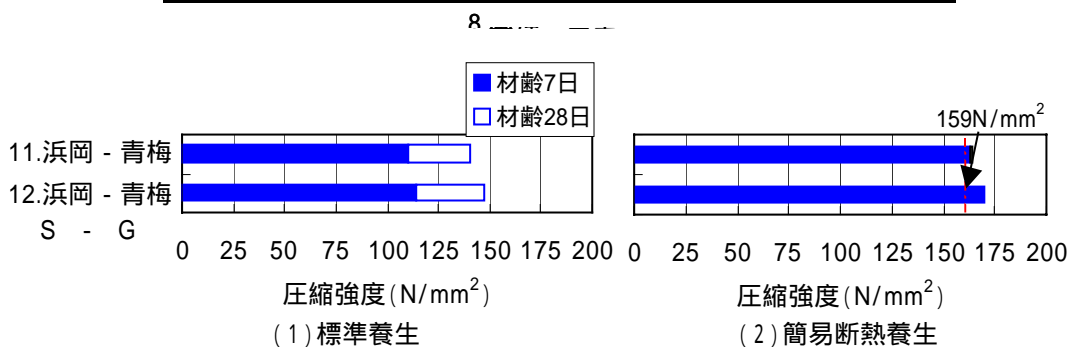


図-9 圧縮試験結果(骨材選定試験2)

表 - 6 コンクリートのフレッシュ性状

No.	細骨材	粗骨材	SP/SFC (%)	スランプフロー (cm)	T ₅₀ (秒)	T _{end} (秒)	空気量 (%)	練上り温度 ()	モルタル練り (秒)	コンクリート練り (秒)	推定 W (kg/m ³)	推定 W/P (%)
11	浜岡	青梅	1.80	61.5	22.4	105.1	1.6	27.0	270	60	144.8	16.0

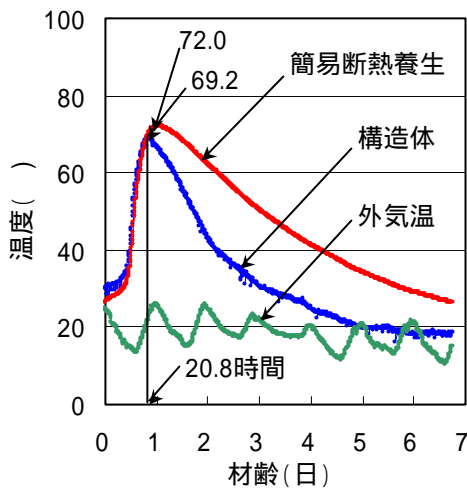


図 - 10 構造体中心温度の推移

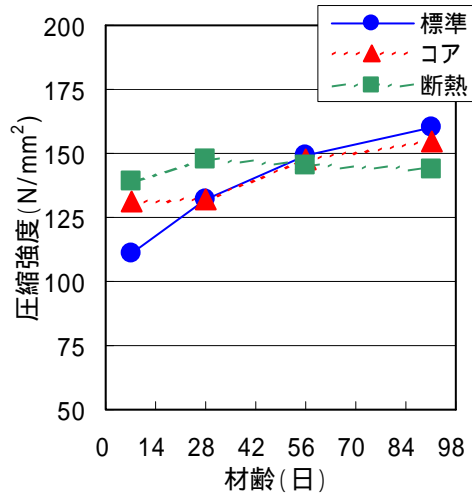


図 - 11 圧縮強度(実機試験)

ト硬化体の強度増進を狙った調合である。フレッシュコンクリートの試験結果を表 - 5 に示す。単位水量を小さくした調合 No.11 では、No.9 と比較すれば粘性が高まったが、コンクリートの作業性は悪くは無い。また、水セメント比を 14% とした No.12 では、粘性が高まり、作業性の観点から実用的でない判断した。フレッシュコンクリートの試験結果と兼ね合わせ細骨材には浜岡産のものを選定した。圧縮強度の試験結果を図 - 9 に示す。いずれの場合も簡易断熱養生供試体の圧縮強度は増進し、目標強度に達している。

以上より、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、水和熱による温度履歴、経済性などの観点から、最も優位となる調合 No.11 を選定した。

シリーズ 2：実機試験

選定した調合 No.11 を用いて社内 J 工場にて実機試験を行った。実機試験のフレッシュコンクリートの試験結果を表 - 6 に示す。単位水量が小さいため、上段のパン型ミキサでは練混ぜが困難であり、上段で空練りを行った後、ただちに下段の強制二軸練りミキサに入れ、水を全量加えて練り混ぜた。試験練りの場合と比較し、水を混合後モルタルが流動性を持つまでの時間はほぼ 2 倍となり、高性能減水剤の量も多くなるが、流動性は高く、型枠への打込みも順調であった。

柱模擬部材の中心温度の推移を図 - 10 に示す。本試験の柱模擬部材の中心温度は、前報に示した設計基準強度 100N/mm² を満たすコンクリートと比較し、最高温度が約 10 低い。結合材量の多いコンクリートでは、水和熱による温度ひび割れや自己収縮による収縮ひび割れが問題となるが、結合材量を低減することで、これらのひび割れの発生を緩和する効果が期待できる。図 - 11 に実機試

表 - 7 圧縮強度の判定 (N/mm²)

調合名	SFC-16 (J工場)	備考
設計基準強度 F _c	120	
供試体強度 F _{s56}	149	標準養生(材齢56日)
コア強度 F _{c56}	148	模擬部材コア強度(材齢56日)
強度補正值 ₅₆ S ₅₆	1	$\sub{56}S_{56} = F_{s56} - F_{c56}$
標準偏差	12.1	$0.1(F_c + mS_n)$
調合強度 ₅₆ F	141.9	$F_c + mS_n + 1.73$ 又は $0.85(F_c + mS_n) + 3$
判定	OK	$F_{s56} \geq \sub{56}F$

験により採取した供試体の圧縮強度を示す。前報の結果では、コア供試体の強度発現は材齢 28 日以降ほとんど増進していないが、本試験のコア強度は材齢 91 日においても強度増進が見られる。このことから、S 値は材齢 56 日における標準養生供試体とコア供試体の強度差 $_{56}S_{56}$ とし、構造体強度は材齢 56 日の標準養生供試体により管理することとした。

設計基準強度 120N/mm^2 調合における圧縮強度の判定結果を表 - 7 に示す。表中の は標準偏差であり、本試験では、 $0.1(F_c + _{56}S_{56})$ と仮定して求めることにした。結果より、標準養生供試体の圧縮強度 F_{s56} は調合強度以上となり、JASS 5-2003⁵⁾ に示す基準を満足することがわかる。

シリーズ3：クリープ試験

クリープ試験の試験結果を図 - 12 に示す。試験は表 - 5 に示す調合 No.11 を対象とした。材齢 3 ヶ月程度からのクリープの変化はほとんど無く、ほぼ一定に推移しており、5 ヶ月を経過した時点で 0.5 程度と値は小さい。ペースト量は多いもののペースト硬化体自体が緻密で、空隙が少ないため、クリープ係数が小さいものと考えられる。

シリーズ4：膨張率試験

図 - 13 に膨張材を混合したコンクリートの自己収縮ひずみの推移を示す。また、図 - 14 には供試体の内部温度を示している。本試験では実構造物を想定したコンクリートの温度履歴をある場合の試験を行った。膨張材 1 と 2 が A 社製、膨張材 3 と 4 が B 社であり、それぞれ膨張材 1 と 4 が標準型、膨張材 2 と 3 が水和熱抑制型である。図に示すひずみは測定ひずみからコンクリート温度による体積変化の影響を線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ として差し引いた値である。また有効材齢 (t_e) は式(1)に示すようにア - レニウス式を用いてコンクリートの温度履歴を 20 に換算して図に示している。

$$t_e = \exp\{13.65 - 4000/(T+273)\} \cdot t \quad \text{式(1)}$$

ここで、 T はコンクリート温度、 t はコンクリート温度が T である期間の日数(日)である。

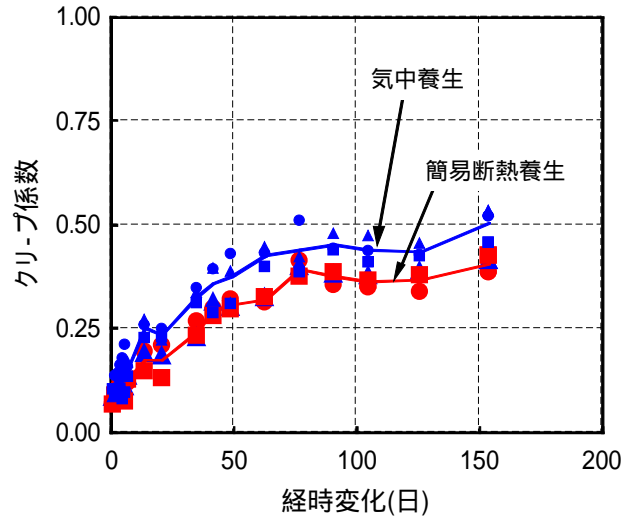
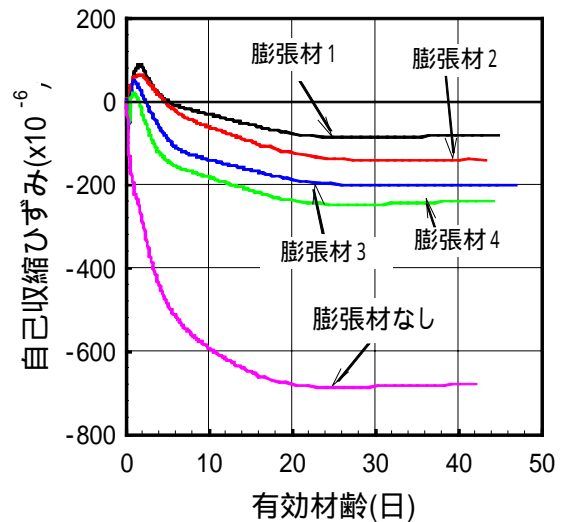


図 - 12 クリープ試験結果



(コンクリート温度による体積変化は線膨張係数 $10/^\circ\text{C}$ で補正)

図 - 13 自己収縮ひずみの推移

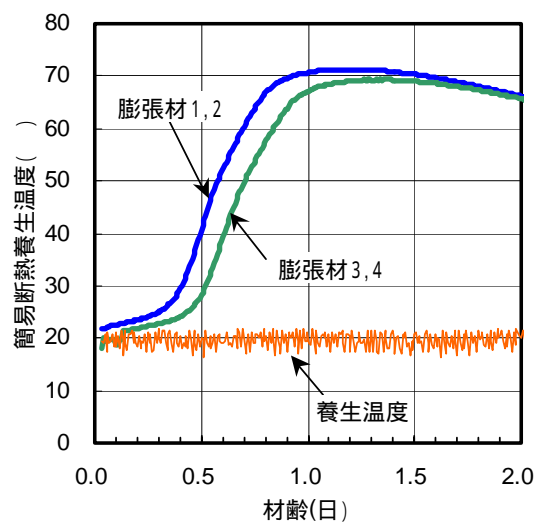


図 - 14 供試体の内部温度 (膨張材試験)

膨張材を用いない調合では、1日で 650×10^{-6} もの自己収縮ひずみが発生している。これに対し、膨張材を混合すれば、最も効果のある膨張材では、 100×10^{-6} 程度にまで自己収縮ひずみが抑えられている。膨張率試験の調合は設計基準強度 80N/mm^2 の調合であり、水セメント比は19%であるため、本試験で検討している設計基準強度 120N/mm^2 コンクリートとは若干性質が異なることが予想される。しかし、膨張材の効果があることは確かであり、今後実構造物についても検討していきたい。

4. まとめ

設計基準強度 120N/mm^2 の超高強度コンクリートの実用化に関する検討により、以下の結果が得られた。

検討した調合において、良好なワーカビリティが得られ、実機による製造が可能であることが明らかとなった。

実機試験の試験結果により、標準偏差を $0.1(F_{c+m}S_n)$ とした場合でも、調合強度を満たすコンクリートの製造ができた。ただし、実機による試験回数が不足しており、今後さらにデータを蓄積し、より信頼性の高いものとしていきたい。

同一調合の場合でも、使用する骨材の種類により、超高強度コンクリートの圧縮強度は大きく異なる。

本試験で使用した骨材は、一般の骨材と比較し、吸水率が低いものであるが、その中でも粗骨材の吸水率が大きくなれば超高強度コンクリートの圧縮強度は低下する傾向がみられた。より圧縮強度の高い設計基準強度 120N/mm^2 を満足する超高強度コンクリートを製造するには、吸水率の小さい骨材を選定することが望ましい。

本試験で検討した超高強度コンクリートのクリープ係数は5ヶ月を経過した時点でほぼ一定となり、その値は0.5程度と小さい。

膨張材の混合は、自己収縮ひずみの発生を抑制する方法として効果が高いと考えられる。今後、実構造物における効果を検証したい。

以上のように設計基準強度 120N/mm^2 を満足する超高強度コンクリートの製造には骨材の選定が不可欠であるが、さらに超高強度コンクリートの品質を管理するには、骨材の均一性、骨材の表面水率管理(水分計による自動計量システムなど)、定期的な推定単位水量の測定(高周波加熱乾燥法など)、に留意する必要がある。また、超高強度コンクリートでは単位セメント量が多く、水和熱が高いため、工場製品のように効率を高めて製造する場合には、脱型までの湿潤養生(養生シート、散水、膜養生剤など)、脱型時の雰囲気等の環境(気温、風など)等の養生方法に格段の注意を払わなければならない。

謝辞

本研究遂行に際し、多大なご助言、ご協力を賜った宇部三菱セメント(株)、(株)宇部三菱セメント研究所、花王(株)をはじめとする関係各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 小山田, 鈴木, 桜田: 超高強度コンクリートを用いた建築プレキャスト部材の実用化に関する検討, 株式会社ピー・エス 技術資料, 第18号, pp.149-158, 2002
- 2) 谷村, 兵頭, 大森, 佐藤: 高強度コンクリートの収縮応力の低減化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001, p.p.1075-1080
- 3) 長井, 小倉, 古賀, 笠井: 蒸気養生したシリカフュ-ム混入超高強度コンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.1, 1993, p.p.81-86
- 4) 藤原: 低品質骨材の有効利用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.408, pp.101-110, 1989
- 5) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, p441, 2003