

7. 超高強度コンクリートの研究開発 (その1. フレッシュ性状、力学的特性および耐久性について)

Study on Development of Super High-Strength Concrete (Part 1. Properties of Fresh Concrete, Mechanical Properties and Durability)

山崎 順二* 立松 和彦*
高見 錦一*² 木村 建治*
池内 昌志*³

要 旨

本研究は、設計基準強度が36～100N/mm²までの超高強度コンクリートの調合技術の確立と実構造物への適用を目的として行ったものである。今回、超高強度コンクリートのフレッシュ性状とその評価手法、硬化コンクリートの力学的特性および耐久性状に関する実験を行った。

実験の結果から、レディーミクストコンクリート工場で製造された36～100N/mm²の超高強度コンクリートは、フレッシュ性状、強度発現性および耐久性状について、構造体コンクリートとしての要求性能を満足し、実構造物に適用できることを確認した。

キーワード：超高強度／50cmフロー到達時間／流入モルタル量／圧縮強度／凍結融解抵抗性／中性化抵抗性

1. はじめに

近年、総合設計制度による容積率の緩和から、建築物がますます高層化する傾向にある。超高層鉄筋コンクリート造建築物の場合、下層階に多大な応力が発生するために、鉄筋やコンクリートを高強度化することで断面が過大にならないように設計することが必要となる。これに対応すべく、100N/mm²級の超高強度コンクリートの調合技術を確立することを目的として、これまで室内試験練りによって研究開発を進めてきた。さらに、超高強度コンクリートを実構造物へ適用するためには、室内実験に加え、実際の工事に係わるレディーミクストコンクリート工場での製造性、実機で練混ぜたフレッシュコンクリートの性状、経時変化性状、強度発現性、耐久性などについて評価しておくことが必要となる。

そこで、本報その1では、関西地域の3工場で行った室内および実機実験の結果をもとに、36～100N/mm²の超高強度コンクリートのフレッシュ性状とその評価手法、硬化コンクリートの力学的性質および耐久性について検討した。

なお、超高強度コンクリートのポンプ圧送性については本報（その2. ポンプバリティ）で、コア強度と簡易断熱養生の関係、構造体コンクリートの強度管理手法に

については本書9. 簡易断熱養生を用いた高強度コンクリート(Fc60N/mm²クラス)の構造体強度管理手法で述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料とその品質を工場別に表-1に示す。48N/mm²を超え60N/mm²までの高強度コンクリートには、水和発熱による温度ひび割れの発生や部材中心部でのコンクリートの強度発現性の停滞を抑制するために、高ビーライト系のセメントを使用した。また、A工場における60N/mm²を超え100N/mm²までの超高強度コンクリートには、高ビーライト系セメントにシリカフュームをプレミックスしたシリカフュームセメントを使用した。細骨材は、海砂と砕砂を粗粒率に応じて80:20～60:40の割合で混合したものを使用した。化学混和剤は各結合材に応じた経時保持性と減水性を有するポリカルボン酸系高性能AE減水剤を選定して使用した。

一方、100N/mm²級の超高強度域では骨材の強度でコンクリートの圧縮強度が決定される場合がある。そのため、超高強度域を対象とするA工場の粗骨材については、4.3に述べるように骨材強度を調査し、100N/mm²級の超高強度域まで適用できることを確認して使用した。

*建築工法・材料研究室 *²東京分室 *³大阪本店 建築部技術課

2.2 実験の種類

指定強度が40N/mm²～100N/mm²の広範囲の高強度コンクリートの調合を決定するために、結合材の種類と水結合材比の組み合わせを表-2のように計画した。なお「指定強度」とは、圧縮強度の基準値（設計基準強度）に構造体コンクリート強度の補正值（mSn値）を加えたものである。

水結合材比30%以下の領域において高ビーライト系セメントもしくはシリカフュームセメントを適用しているのは、①水和発熱による内部温度上昇量の低減、②硬化後のコンクリートの強度発現性の改善、③シリカフュームのボールベアリング効果によるワーカビリティの改善、④マイクロファイラ効果とポゾラン反応による強度発現性の向上、⑤結合材による自己収縮率や乾燥収縮率の低減などを図ったためである。なおS7N3およびS6N4は、シリカフュームセメントに普通ポルトランドセメントを、重量比でそれぞれ30%および40%の割合で内割置換して使用したものである。なお、表-2の中での○印で示した実機試験練りは、すべて冬期から標準期の間に行ったものである。

2.3 コンクリートの調合

試験練りを行ったコンクリートの調合概要を表-3に示す。単位水量はすべての調合において175kg/m³とした。単位粗骨材かさ容積は、フレッシュコンクリートに要求される流動性に基づき設定し、設定値の適否を試験練りによって確認した。高性能AE減水剤およびAE助剤の添加量についても試験練りによって決定した。

スランプフローの目標値は、ワーカビリティとコンシステンシー、打設方法などを考慮して決定した。すなわち、A工場では鋼管への圧入施工を考慮して水結合材比32%以下のコンクリートのスランプフローを60cm～65cmとし、B工場およびC工場においてはバケットによる打設を考慮してスランプフローを50cm～55cmとした。空気量は強度発現性とワーカビリティを考慮して、シリカフュームを含むものについては2.0%、スランプで管理するコンクリートは4.5%、それら以外のものは3.0%とした。

表-1 使用材料とその品質

	材料	種類	銘柄・産地・品質
A工場	結合材	S	シリカフュームセメント（U社製） 密度3.08g/cm ³
		L	低熱ポルトランドセメント（U社製） 密度3.24g/cm ³
		N	普通ポルトランドセメント（U社製） 密度3.16g/cm ³
	水		工業用水
	細骨材	海砂	岡山県日比産、表乾密度2.55g/cm ³ 吸水率1.83%、FM2.56
		砕砂	赤穂産、表乾密度2.57g/cm ³ 吸水率0.67%、FM3.15
	粗骨材	砕石	赤穂産、表乾密度2.63g/cm ³ 吸水率0.66%、実積率59.8%
	混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 SP-8シリーズ
		AE	AE助剤
B工場	結合材	HF	ハイフローセメント（T社製） 密度3.20g/cm ³
		L	低熱ポルトランドセメント（T社製） 密度3.22g/cm ³
		N	普通ポルトランドセメント（T社製） 密度3.16g/cm ³
	水		工業用水
	細骨材	海砂	岡山県大槌産、表乾密度2.55g/cm ³ 吸水率1.93%、FM2.50
		砕砂	西宮産、表乾密度2.57g/cm ³ 吸水率1.98%、FM2.87
	粗骨材	砕石	西宮産、表乾密度2.65g/cm ³ 吸水率1.00%、実積率58.0%
	混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 マイティ3000S
		AE	AE助剤
C工場	結合材	L	低熱ポルトランドセメント（T社製） 密度3.22g/cm ³
		N	普通ポルトランドセメント（T社製） 密度3.16g/cm ³
		BB	高炉セメントB種（T社製） 密度3.04g/cm ³
	水		工業用水
	細骨材	海砂	岡山県大槌産、表乾密度2.57g/cm ³ 吸水率1.53%、FM2.73
		砕砂	宝塚産、表乾密度2.63g/cm ³ 吸水率1.13%、FM2.88
	粗骨材	砕石	宝塚産、表乾密度2.63g/cm ³ 吸水率0.62%、実積率59.3%
	混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 SP-8シリーズ
		AE	AE助剤

表-2 結合材と水結合材比の組み合わせ

	結合材	水結合材比（%）										
		16	20	24	28	30	32	34	36	38	40	42
A工場	S	●	○	●								
	S7N3		●	○	●							
	S6N4			●	○		○					
	L				●		○		●		●	
	N						○		●		●	
B工場	HF					●	○	●		●		
	L					○		●		●		●
	N						○		●		●	
C工場	L					●		●		●		●
	N						○		●		●	
	BB						○		●		●	

（凡例）●：室内実験 ○：室内実験および実機試験

2.4 試験項目および試験方法

フレッシュコンクリートの試験項目について、ワーカビリティとコンシステンシーを評価するための試験としては、スランプフロー試験、Lフロー試験、Vロート試験および円筒貫入試験とした。単位水量の測定は、200Vの高周波加熱乾燥機を用いて行った。水和発熱温度の測定には熱電対を使用した。

実機試験時には一辺が約1mの模擬柱供試体（立方体）

を作製し、供試体の中央部と隅角部で水和発熱温度の測定と構造体コンクリート強度測定のためのコア採取を行った。

硬化コンクリートの試験項目は、圧縮強度、単位容積質量、静弾性係数および動弾性係数とした。

耐久性に関する試験は、自己収縮率、長さ変化率、凍結融解試験および促進中性化試験とした。自己収縮率は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 供試体を脱型後封かん養生し、埋込み型ひずみゲージを用いて凝結終了後から測定した。以上の試験は、該当するJISもしくは指針等に準じて行った。

2.5 練混ぜ方法

室内試験練りは、温度 20°C 、相対湿度60%の環境下で行った。コンクリートの練混ぜには容量 $100(\ell)$ の強制2軸練りミキサーを使用し、1バッチ $80(\ell)$ として練混ぜた。練混ぜ方法は、モルタルを30秒先練りした後、粗骨材を投入し、90秒間練混ぜることを原則とした。ただし、水結合材比20%以下のコンクリートについては必要に応じて練混ぜ時間を延長した。練上がり後、ミキサー内でコンクリートを10分間静置した。その後30秒間再攪拌してからフレッシュコンクリートの試験を行った。

実機試験練りでは、各調合のコンクリートを $3\text{m}^3 \sim 4\text{m}^3$ 練混ぜた。アンペアメータが安定してから30秒以上練混ぜることとしたが、すべての調合において1バッチ当たりの練混ぜ時間は90～120秒程度であった。

3. フレッシュコンクリートの性状

3.1 スランプフローと50cmフロー到達時間

フレッシュコンクリートに分離が生じた場合や粘性が増大した場合は、スランプフローが同じであっても50cmフロー到達時間が極端に変化すると考えられるので、50cmフロー到達時間を測定することによって、コンクリートのレオロジー的性質を間接的に評価した。

図-1(a)に、A工場におけるコンクリートのスランプフローと50cmフロー到達時間の関係を示す。50cmフロー到達時間は、同一結合材においては水結合材比の低減およびスランプフローの低下に伴って長くなる傾向にあった。16S、20S7N3および24S6N4は、スランプフローが60cmを超えているにもかかわらずその他のコンクリートと比較して50cmフロー到達時間が長くなっており、ワーカビリティの低下が認められた。

これより、シリカフェームセメント(S)に普通ポルトランドセメント(N)を内割置換して使用する場合、良好なワーカビリティを確保するためには、普通ポルトランドセメントの混合率が30%の場合(S7N3)は水結合材

表-3 コンクリート調合概要

	調査記号	W/B (%)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	S/a (%)
A	16S	16	65	2.0	28.1
	20S	20	65	2.0	36.7
	24S	24	65	2.0	42.5
	20S7N3	20	65	2.0	38.1
	24S7N3	24	65	2.0	42.6
	28S7N3	28	65	2.0	45.8
	24S6N4	24	65	2.0	42.7
	28S6N4	28	65	2.0	45.9
	32S6N4	32	60	2.0	48.0
	28L	28	65	3.0	47.2
	32L	32	60	3.0	49.2
	36L	36	55	3.0	50.2
	40L	40	(23)	4.5	49.3
	32N	32	60	3.0	48.8
	36N	36	55	3.0	49.0
	40N	40	(23)	4.5	47.6
B	30HF	30	55	3.0	46.1
	34HF	34	55	3.0	48.9
	38HF	38	50	3.0	50.2
	30L	30	55	3.0	47.1
	34L	34	55	3.0	48.9
	38L	38	50	3.0	49.3
	42L	42	(23)	4.5	49.2
	32N	32	55	3.0	47.8
	36N	36	50	3.0	48.4
	40N	40	(23)	4.5	48.5
C	30L	30	55	3.0	47.1
	34L	34	55	3.0	48.9
	38L	38	50	3.0	49.3
	42L	42	(23)	4.5	49.2
	32N	32	55	3.0	47.8
	36N	36	50	3.0	48.4
	40N	40	(23)	4.5	48.5
	32BB	32	55	3.0	47.2
	36BB	36	50	3.0	48.9
	40BB	40	(23)	4.5	48.0

(23)はスランプ

比を20%以上として、また混合率40%の場合(S6N4)は水結合材比を24%以上として調合設計を行う必要があると考えられる。

図-1(b)に、B工場およびC工場における50cmフロー到達時間とスランプフローの関係を示す。50cmフロー到達時間は結合材の種類にほとんど無関係であり、スランプフローが大きくなるほど到達時間が短くなった。しかし、分離などの不具合は認められなかったため、これらのコンクリートは適度なコンシステンシーと良好なワーカビリティを有していると判断できる。

一方、50cmフロー到達時間は結合材の粘性の違いに

よって差が生じ、Sではフロー到達時間がやや短く、Nではやや長くなる傾向にあるが、図-1より、良好なコンシステンシーとワーカビリティを有したコンクリートは、スランプフローが55cm～65cmにおいて50cmフロー到達時間が4～12秒程度であった。

これより、スランプフローが55cm以上の一般的な高流動コンクリートにおいては、50cmフロー到達時間が5～10秒程度であれば、フレッシュコンクリートが良好なコンシステンシーとワーカビリティを有していると評価できる。

3.2 Lフロー初速度とスランプフロー

文献¹⁾によると、ワーカビリティ評価のためのLフロー初速度の目標値は、ポンプ圧送の場合で10～25 cm/sec(100mを超える圧送の場合は20cm/sec以上)、バケット打ちではコンクリートの粘性が施工性に及ぼす影響が小さいことから6cm/sec以上としている。

図-2(a)に、A工場におけるLフロー初速度(3～8cm)とスランプフローの関係を示す。16S、28Lおよび32Nを除いて、Lフロー

初速度はスランプフローの大きさに関わらず約10cm/sec以上であり、これらのコンクリートはポンプ圧送が可能であると判断できる。Lフロー初速度が10cm/sec以下のコンクリートは、各種セメントにおいて水結合材比の最も小さいものであり、粘性の高いコンクリートであった。図-2(b)に、B工場およびC工場におけるLフロー初速度(3～8cm)とスランプフローの関係を示す。Lフロー初速度はいずれもほぼ6cm/sec以上であり、スランプフ

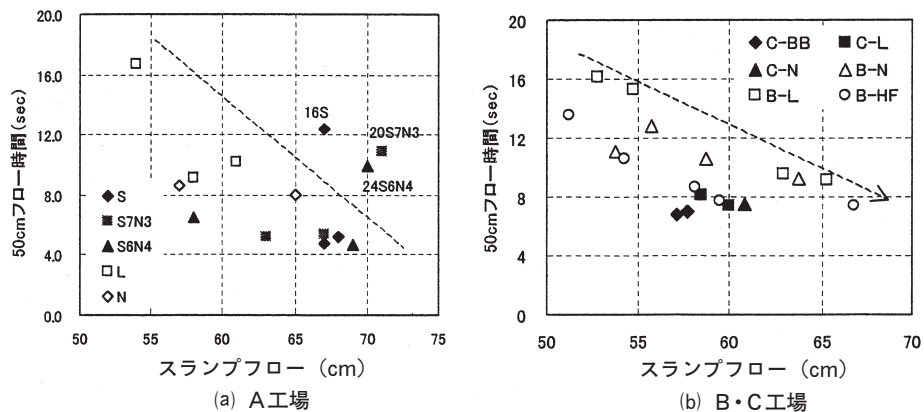


図-1 50cmフロー到着時間とスランプフローの関係

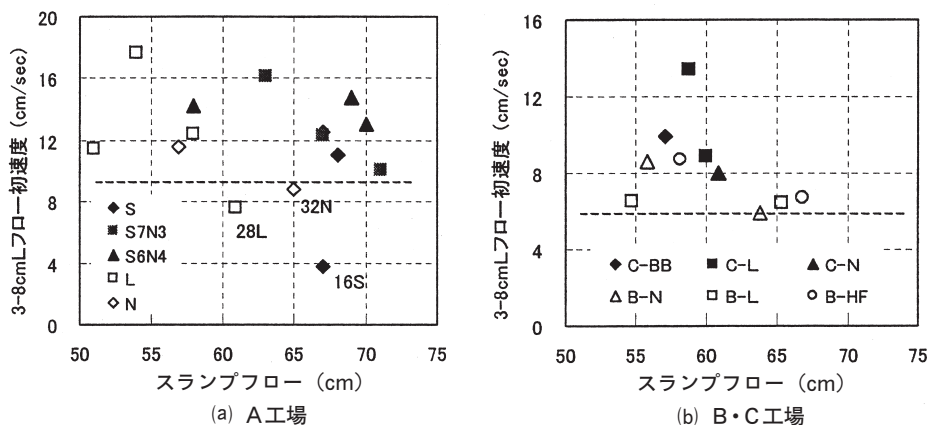


図-2 Lフロー初速度(3～8cm)とスランプフローの関係

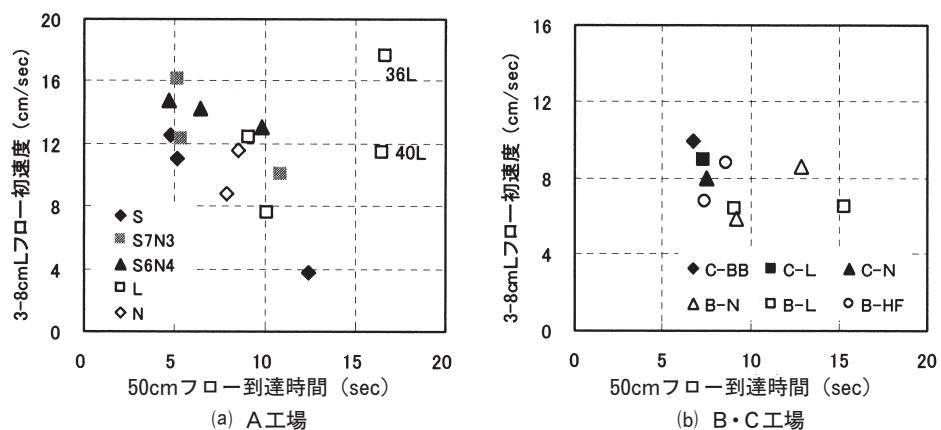


図-3 Lフロー初速度と50cmフロー到着時間の関係

ローが大きくなるほど初速度が速くなる傾向にあった。文献¹⁾より、これらのコンクリートはバケットでの打設が十分に可能であると判断できる。

3.3 Lフロー初速度と50cmフロー到達時間

図-3(a)に、A工場におけるLフロー初速度と50cmフロー到達時間の関係を、図-3(b)に、B工場およびC工場におけるそれらの関係を示す。

図-3(a)から、初速度とフロー時間の間にはゆるや

かな相関があり、Lフロー初速度が約10cm/sec以上となるコンクリートの50cmフロー到達時間は約10sec以下であった。

一方、本報(その2)図-10もしくは図-12より、50cmフロー到達時間が10sec以下もしくはLフロー初速度が10cm/sec以上のコンクリートは、圧送速度を35m³/hとした場合でも水平管内圧力損失係数が約30KPa/mとなることが分かる。

これより、受入れ時の検査において50cmフロー到達時間を測定することにより、フレッシュコンクリートのポンパビリティーが評価でき、本実験の結果からは、50cmフロー到達時間が10sec以下であればポンプ圧送が十分に可能であると判断できる。ただしその2の結果は160mの水平配管による結果であるので、200mを超える長距離圧送や100m以上の高所圧送を行う場合は、マトリックスの粘性を低減させる等の対策を講じることによって50cmフロー到達時間が6～8秒程度となるよう、ワーカビリティーを改善することが必要と考える。

3.4 Vロート流下時間

Vロート流下時間は、調合計画における単位粗骨材かさ容積(または細骨材率)の設定値の適否を評価するために有効な指標となる。またフレッシュコンクリートのコンシステンシーの良否を評価できる。

一般に、低水結合材比のコンクリートは粘性が大きいために、また、単位粗骨材かさ容積が過大な場合や分離傾向のコンクリートでは粗骨材のアーチングが生じやすくなるために、Vロート流下時間が長くなる傾向にある。

一般に、適度なコンシステンシーを有する高流動コンクリートのVロート流下時間は10～20秒程度であると考えられるので、バケット打設の場合のVロート流下時間の目標値を20sec以下に設定した。

試験の結果、各結合材の最も低水結合材比のものと分離傾向のものは、Vロート流下時間が30sec以上となったが、それ以外のコンクリートでは概ね10～20secの範囲であり、目標スランブフローに対する単位粗骨材かさ容積の設定値はほぼ適正であり、コンクリートは適度なコンシステンシーを有していると判断できる。

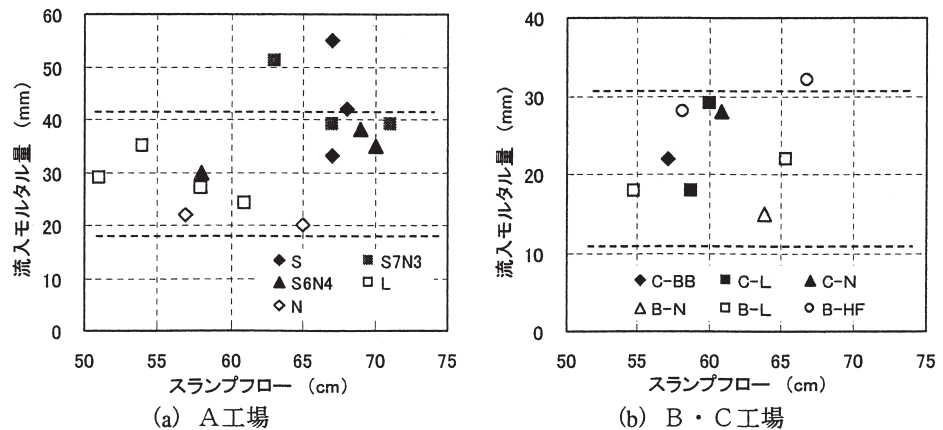


図-4 流入モルタル量とスランブフローの関係

3.5 円筒貫入試験

円筒貫入試験によるモルタル流入量は、同じスランブフローであっても、マトリックスの粘性の違いによって大きく異なる。つまり、単位水量が多い場合は極端に流入モルタル量が多くなり、反対に、高性能AE減水剤の添加量が過多の場合はマトリックスの粘性が高くなるために流入モルタル量が少なくなる。これを指標とすれば、円筒貫入試験を行うことによって、主として単位水量の変動に起因するマトリックスの粘性の変動が即座に把握できる。

一般に、スランブフローが60cm程度の高流動コンクリートでは、流入モルタル量が20mm～40mm程度の場合にコンシステンシーが良好であり、50mm以上になると粘性が小さく分離傾向にあると判断される。

図-4(a)より、流入モルタル量はスランブフローの大きさに関わらずほぼ20mm～40mmであった。なお、これらのコンクリートは、目視および触診においても良好なコンシステンシーを有していると判断できるものであった。

一方、結合材にシリカフュームを含むSやS7N3などでは、流入モルタル量がやや多くなる傾向にあったが、コンクリートに分離は認められなかった。これはシリカフューム微粉末のボールベアリング効果に起因するものと考えられるため、シリカフューム微粉末を含む結合材を使用するコンクリートを評価する場合は、流入モルタル量の上側目標値を50mm程度に設定することが必要と考える。

図-4(b)に、B工場およびC工場での結果を示す。スランブフローの目標値を55cmとしたコンクリートでは、流入モルタル量が10mm～30mmの範囲であった。スランブフローが65cmを超えている(管理値は55±10cm)コンクリートはやや分離傾向にあり、流入モルタル量も

30mmを超える結果となった。

以上より、良好なコンシステンシーを有するコンクリートにおける流入モルタル量は、スランプフローが60cm程度の場合は20mm～40mm（シリカフェームでは30mm～50mm）、スランプフローが55cm程度の場合は10mm～30mm程度であった。

円筒貫入試験は、試験練りや既往の結果から各々のコンクリートに応じた管理値を定めることによって、極めて簡便かつ迅速にフレッシュコンクリートのコンシステンシーや粘性の変動が把握できる。そのため、作業所に荷卸しされるコンクリートの変動を評価する手段として円筒貫入試験を採用することは、極めて有効である。

3.6 簡易断熱温度上昇および模擬柱の温度上昇量

各面の断熱材厚さが150mmの簡易断熱温度上昇測定箱に、約250mm角の大きさ（立方体）のコンクリートを打込み、中央部に埋め込んだ熱電対を用いて水和発熱による温度上昇量を測定した。

また、実機試験時に作製した模擬柱供試体は、上下に厚み150mmの断熱材を施した、一辺が1mの供試体（立方体）とし、柱中央部と隅角部の温度上昇量を測定した。温度測定後、材齢28日、56日および91日において、中央部と隅角部で上下方向にコア供試体採取し、圧縮試験に供した。

表－4に、簡易断熱試験における最高温度、最高温度到達時間および最高温度時の外気温を示す。表中には、簡易断熱養生箱に封入した断熱供試体中心部の温度測定結果も示した。また、図－5に、簡易断熱試験における最高温度と水結合材比の関係を示す。なお、高強度コンクリートの単位水量はすべて175kg/m³であるので、同一水結合材比における結合材量は、すべて同じである。

測定の結果、水結合材比が小さくなるほど最高温度が高くなる傾向が認められた。また、同一水結合材比において、高ピーライト系の結合材を使用したコンクリートは、水和反応が緩やかであるために最高温度がやや低く、最高温度に到達する時間が長くなった。また、Sを含むコンクリートの温度上昇量は、Nの混合割合が30%から40%に増加するのに伴い最高温度が高くなった。

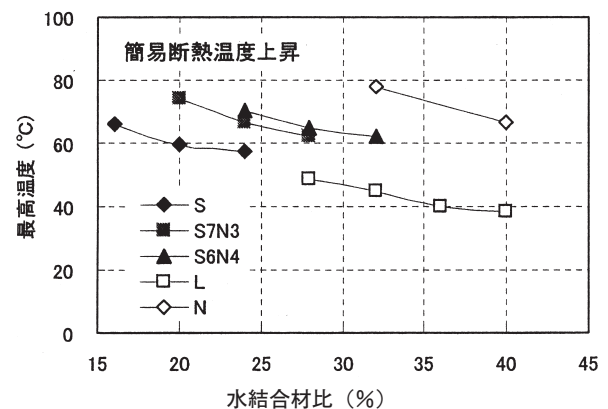
一方、簡易断熱試験による最高温度と断熱供試体の最高温度は、5℃程度供試体の温度が低くなるものがみられたが、最高温度到達時間は同程度であるので、両者はほぼ同等の温度履歴を受けていると考えられる。

表－5に、模擬柱試験体の中央部および隅角部の最高温度および模擬柱打設時の外気温を示す。

A工場において、20S、24S7N3、28S6N4および32Nの

表－4 簡易断熱温度上昇

調査記号	最高温度 (℃)	最高温度 到達時間 (h)	最高温度時 外 気 温 (℃)	断熱供試体 最 高 温 度 (℃)	供 試 体 最高温度 到達時間 (h)
16S	66.1	29.8	18.5	62.5	30.1
20S	59.4	27.3	18.6	55.6	28.6
24S	57.1	30.6	18.6	51.1	31.9
20S7N3	74.1	21.6	18.2	67.4	23.4
24S7N3	66.6	22.6	17.2	64.9	23.6
28S7N3	62.4	25.4	17.8	59.4	27.5
24S6N4	70.3	22.6	14.9	65.1	24.4
28S6N4	64.6	26.8	16.0	62.8	28.1
32S6N4	62.0	26.4	16.0	60.1	28.9
28L	48.7	36.6	17.1	44.2	32.8
32L	45.1	35.6	17.7	41.5	30.7
36L	40.0	32.1	17.6	37.3	30.0
40L	38.2	32.8	17.6	35.3	30.6
32N	77.9	20.6	16.1	75.7	21.8
40N	66.4	23.5	16.0	64.3	24.1



図－5 最高温度と水結合材比の関係

柱中央部の最高温度は、水結合材比が異なるにもかかわらずほぼ同程度となった。これより、水結合材比が大きい場合でも、Sに対するNの混合量が多くなると温度上昇量が大きくなるのがわかる。

B工場およびC工場において、中央部の最高温度はNが最も高く72～78℃であり、BBは67℃程度であった。また、高ピーライト系セメントではセメント量が最も多いにも関わらず最高温度が低く、Lでは49℃、HFでは52℃であり、両者ともほぼ同程度の温度上昇量であった。

4. 硬化コンクリートの力学的特性

4.1 初期強度発現性

図－6に、材齢1日封かん養生供試体の圧縮強度をセメント別かつ工場別に示す。

同日に供試体を作製したB工場のHFとLを比較すると、

表－5 模擬柱試験体の温度上昇

	調査記号	中央部 (°C)	隅角部 (°C)	外気温 (°C)
A工場	20S	72.4	44.0	10.8
	24S7N3	70.1	42.0	10.6
	28S6N4	71.0	42.9	10.5
	32S6N4	52.1	31.1	7.1
	32L	33.6	22.2	8.0
	32N	71.3	43.5	6.9
B工場	32HF	52.0	37.0	19.0
	30L	49.0	33.0	18.0
	32N	78.0	50.0	21.0
C工場	32N	72.0	52.0	19.0
	32BB	67.0	42.0	20.0

HFの初期強度発現性がLよりも1.5～2倍程度大きく、Nと同程度となった。高ピーライト系セメントは、特に冬期において初期強度発現の遅れが問題となる場合があるが、HFを使用することによって改善されることが分かった。HFは高ピーライト系のセメントであるために長期強度の増進も期待でき、かつ水和発熱による温度上昇も少ないことから、標準期だけでなく、特に冬期に打設する60N/mm²級のコンクリートに適用することは有効である。

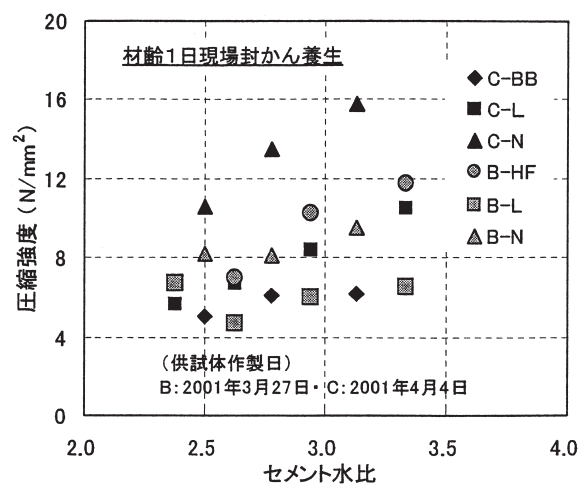
4.2 結合材水比と圧縮強度の関係

図－7 (a)～(e)に、A工場における結合材水比と材齢28日圧縮強度の関係をS、L、Nに分けて示す。標準水中養生供試体については、いずれの結合材においても、圧縮強度と結合材水比との相関係数 r が0.985以上であり、高い相関関が得られた。

図中には、夏期を模擬した30℃水中養生および冬期を模擬した5℃水中養生での材齢28日における圧縮強度もあわせて示した。養生温度別にみると、Nでは養生温度に関わらず材齢28日においてほぼ同等の強度発現性を示した。Lについてはセメントの性質から低温時の強度発現が他の結合材よりも緩やかであった。Sは高ピーライト系セメントにシリカフェーム微粉末をプレミックスしたものであるため、Nの混合割合が増加するとともに低温時の強度発現の遅れが小さくなった。

一方、Sの場合、結合材水比が5.0を超えると強度発現性がやや低下した。これは、結合材水比5.0以上(水結合材比20%以下)になるとモルタルマトリックスの強度が骨材強度に近づくために、それ以下の結合材水比の場合とは異なる強度発現性を呈するためと考えられる。

また、図－7 (f)に示すようにS10、S7N3およびS6N4



図－6 セメント別の初期強度発現性

は同一結合材水比においてはほぼ同等の強度発現性であるので、シリカフェームセメントに対する普通ポルトランドセメントの混合割合が40%程度以下であれば、強度発現性を1つの関係式で表現できる。

これらのことから、Sを含むコンクリートについては、結合材水比(B/W)5.0以下を1つの回帰式で、B/Wが5.0を超える場合をもう1つの回帰式で表現した。

4.3 砕石用原石の圧縮強度

A工場で使用している粗骨材は、兵庫県赤穂産の流紋岩である。粗骨材原石の圧縮強度試験結果は、骨材の一部に節理を含んだ場合でも180～300N/mm²程度であり、この骨材は、100N/mm²級の高強度コンクリートに十分に適用できる性能を有していると判断できた。

4.4 標準養生供試体と現場水中養生供試体の関係

建告1102号に基づき構造体コンクリート強度の管理を標準養生強度で行う場合は、現場水中養生28日強度と標準水中養生28日強度との関係もしくはコア強度と標準養生強度の関係を把握しておくことが必要となる。

図－8に、標準水中養生28日強度と現場水中養生強度の関係を示す。夏期を模擬した30℃水中養生の場合は、結合材の種類に関わらず標準水中養生とほぼ同等の強度となった。5℃水中養生の場合は、それぞれの結合材には相関係数 $r = 0.95$ と高い相関があるが、Lが養生温度の影響を最も大きく受け、SではNの混合割合が増加するほど標準養生強度に近づいていくことが分かる。なお、Nについては養生温度が低いにも関わらず標準養生強度と同等の強度発現性が得られた。

4.5 現場封かん養生強度と簡易断熱養生強度

コア供試体の強度は、同一材齢の簡易断熱養生供試体との相関が高いと考えられる。このことは本書9.で述

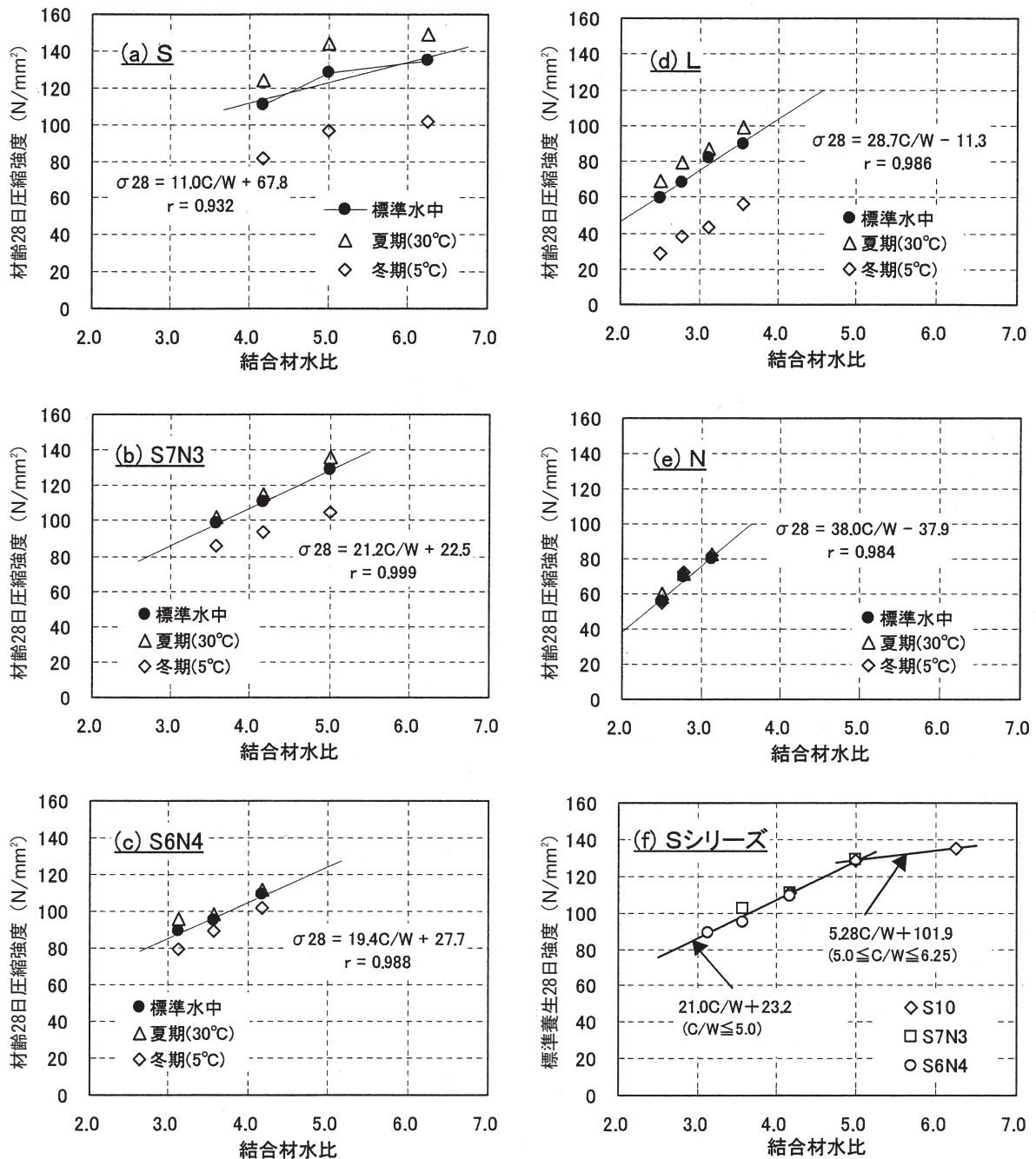


図-7 材齢28日における圧縮強度と結合材水比の関係

べることとし、本報では、室内試験練り時の簡易断熱養生56日強度をコア56日強度とみなして検討する。

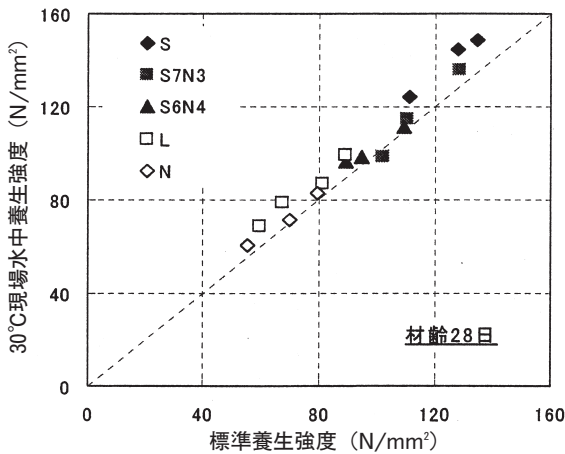
図-9に、A工場の簡易断熱56日強度と現場封かん56日強度の関係を示す。20°Cおよび30°C封かん56日強度では、結合材の種類にかかわらず相関係数 $r = 0.80 \sim 0.99$ と、両者にはゆるやかな相関が認められるが、現場水中養生の場合と同様に、5°C現場封かん養生56日強度は結合材ごとに異なる強度発現性を示した。

現場封かん養生は、床・壁部材の温度履歴と類似しており、柱部材を模擬した簡易断熱養生とは異なる温度履

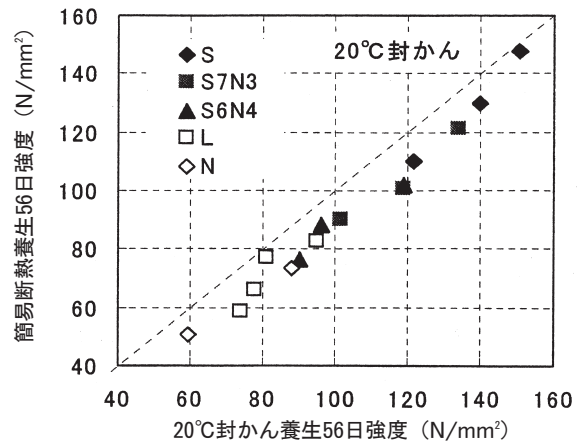
歴を受けていると思われるため、部材形状によっては現場封かん養生が有効となる場合がある。しかし、現場封かん養生および前述の現場水中養生を行った供試体の強度発現は季節による変動が大きく、簡易断熱養生強度よりも大きくなる場合があり、危険側の判定となるので、現場封かん養生や現場水中養生で高強度コンクリートの強度管理を行うためには、さらにデータを蓄積し検討を加えることが必要と考える。

4.6 管理用供試体による圧縮強度の変動係数

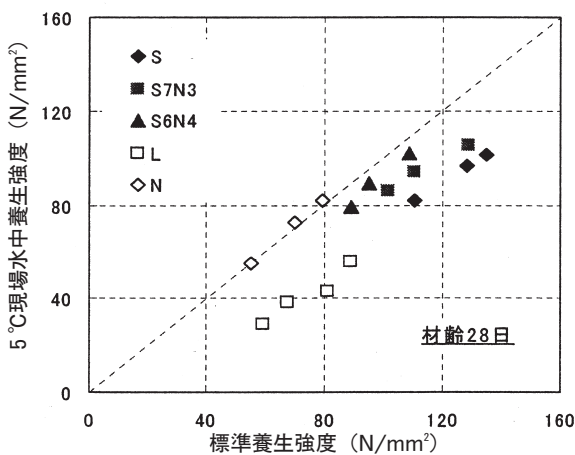
強度管理用供試体による圧縮強度の変動係数は、図-



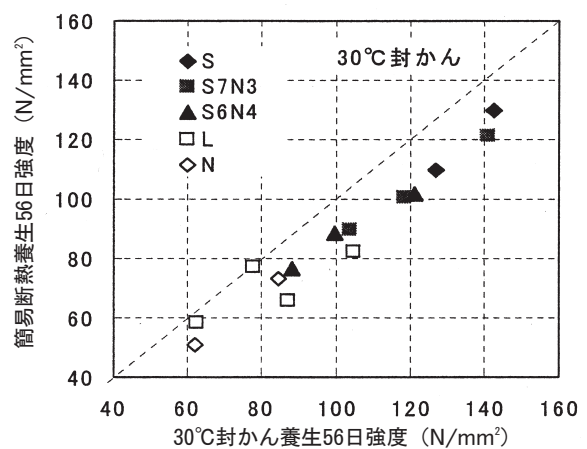
(a) 30°C水中養生



(a) 20°C封かん養生強度



(b) 5°C水中養生



(b) 30°C封かん養生強度

図-8 現場水中養生と標準水中養生の関係

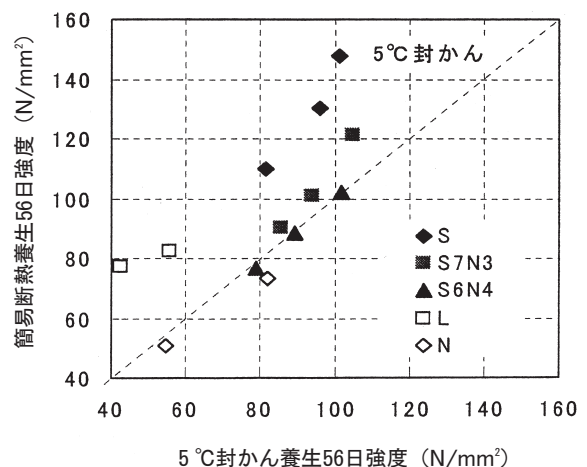
10に示すように、20°Cにおいて平均値2.33%、最大値4.27%であった。水結合材比の違いによる変動係数の差異は明確には認められないが、低水結合材比になるほどやや大きくなる傾向にあった。

30°C現場水中養生および5°C現場水中養生における変動係数もあわせて示したが、養生温度による大きな差異は認められなかった。

4.7 単位容積質量および弾性係数

図-11に、A工場のコンクリートの単位容積質量と水結合材比との関係を結合材別に示す。コンクリートの単位容積質量は、水結合材比が小さくなるほど大きくなるが、その程度は、水結合材比が10%低減するのに対して0.05~0.06kg/l程度の増大であった。結合材の種類による単位容積質量の差異は明確ではないが、水セメント比40%においてのみ、セメントの違いがコンクリートの単位容積質量に影響を与えていることがわかる。

図-12に、A工場のコンクリートのヤング係数と圧縮



(c) 5°C封かん養生強度

図-9 簡易断熱養生強度と封かん養生強度

強度の関係を示す。図中には、日本建築学会RC規準に示されるヤング係数の計算式を用い、単位容積質量を $\gamma=2.3\sim 2.5\text{kg/l}$ として求めた値を示した。高強度コンクリートのヤング係数は、 $\gamma=2.4$ とした計算値よりも大き

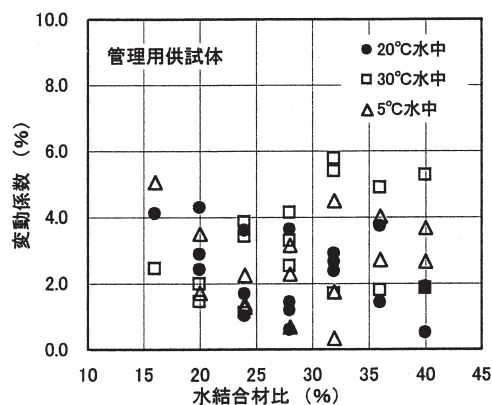


図-10 構造体コンクリート強度の管理用供試体による圧縮強度の変動係数

い値となっている。圧縮強度が 50N/mm^2 以上のコンクリートについては、コンクリートの単位容積質量を $2.45\text{kg}/\ell$ として計算した場合でも測定値は計算値を上回ると思われる。

図-13に、A工場のコンクリートの動弾性係数と圧縮強度の関係を示す。結合材やコンクリートの密度に関係なく両者の相関係数 r は 0.972 であり、両者には高い相関が認められる。

これより、動弾性係数を用いて非破壊的に圧縮強度を

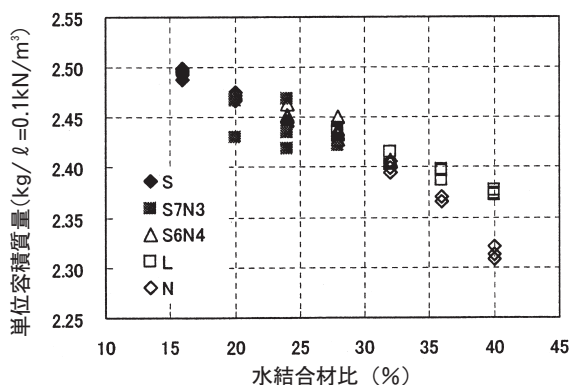


図-11 単位容積質量と水結合材比の関係

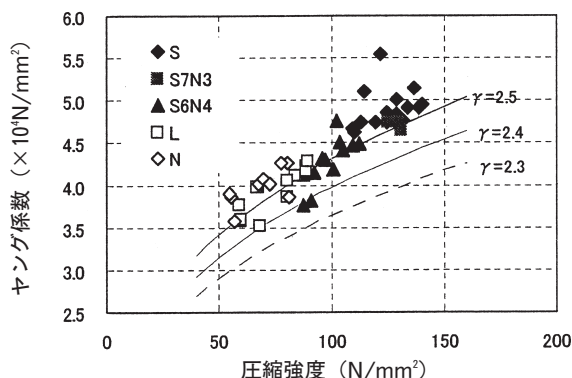


図-12 ヤング係数と圧縮強度の関係

W/B16~40%の範囲の変動係数と標準偏差

	20℃水中	30℃水中	5℃水中
個数	54	48	48
変動係数(%)			
平均値	2.33	3.16	2.55
最大値	4.27	5.76	5.05
標準偏差(N/mm²)			
平均値	2.35	3.05	1.81
最大値	5.52	5.54	5.11

推定することが可能であると考えられる。

図-14に、A工場の高強度コンクリートの動弾性係数とヤング係数の関係を示す。通常、一般強度のコンクリートのヤング係数は、動弾性係数の80~85%程度と考えられる。高強度コンクリートにおいては、図に示すようにLおよびNのヤング

係数は動弾性係数の90%程度付近に散布しているが、S、S7N3においてヤング係数が $4.5 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 以上になると、ヤング係数と動弾性係数との差が小さくなる傾向にあった。この関係を適用すれば、動弾性係数を用いて非破壊的にヤング係数が推定できる。

5. 収縮特性

高強度コンクリートや高流動コンクリートのように、水結合材比が小さく単位結合材量の多いコンクリートで

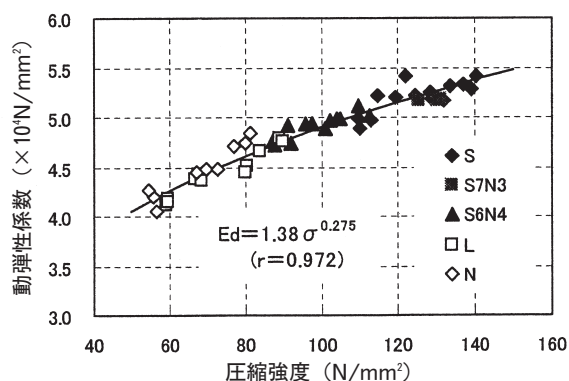


図-13 動弾性係数と圧縮強度の関係

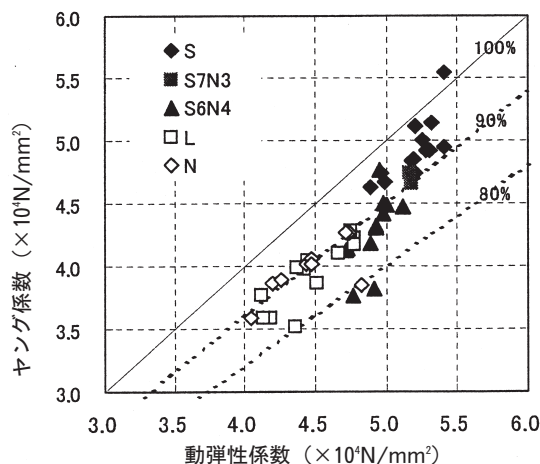


図-14 ヤング係数と動弾性係数の関係

は、自己収縮が大きくなることが知られている。また、低熱ポルトランドセメントは自己収縮が小さく、シリカフューム微粉末は自己収縮を増大させると考えられている。そこで、コンクリートの収縮特性を評価し、構造体コンクリートのひび割れ発生の危険性を把握するために、自己収縮率および乾燥収縮率の測定に加えて、乾燥収縮ひび割れ試験を行った。実験を行ったコンクリートの種類は、A工場の24S、24S7N3、28S6N4、32L、40Lおよび32Nの6種類とした。

自己収縮測定用供試体は10×10×40cmの角柱供試体とし、各3本ずつとした。型枠底面にはテフロンシートを敷き、供試体中央部に埋込み型ひずみ計を設置した。供試体の作製は室内試験時に行い、打込み直前からひずみ測定を開始した。打込み後すぐに上面を湿布養生し、水分の逸散がないようにして、温度20℃・相対湿度60% RHの恒温恒湿室で脱型まで静置した。脱型は材齢2日とし、脱型後すぐに供試体を封かん状態にして恒温恒湿室内で養生した。長さ変化率の測定はJIS A 1129 に準じ、コンタクトゲージ方法により行った。

5.1 自己収縮率

図-15に、自己収縮率の測定結果を示す。材齢7日までの測定結果から、40L、32Lおよび24Sでは自己ひずみがほぼ0以上であり、自己収縮が生じていない。32Nは自己収縮率が最も大きく、またSに対するNの混合割合が多くなるほど自己収縮率が大きくなった。水結合材比による影響はあまり明確ではなく、セメントクリンカー鉱物の影響の方が顕著であり、間隙相が多い結合材ほど、かつエーライト量が多い結合材ほど自己収縮率が大きくなっていることが分かる。

5.2 長さ変化率

図-16に長さ変化率測定結果を、図-17に質量変化率測定結果を示す。コンクリートの乾燥収縮率は、32Lおよび40Lを除いて大きな差はなく、乾燥材齢120日において $450 \sim 500 \times 10^{-6}$ と、一般強度のコンクリートよりも小さい値であった。

自己収縮率が最も小さかったLにおいて、乾燥収縮率がその他のセメントよりも大きくなっているのは、JISに示される方法に準じて試験を行ったため、水和反応が十分に進行していない状態で乾燥を受けたことによるものと推察される。このことは、Lの重量減少率が他の結合材と比較して約3倍以上の値となっていることから理解できる。

5.3 乾燥収縮ひび割れ試験

構造体コンクリートのひび割れの程度を考える場合は、

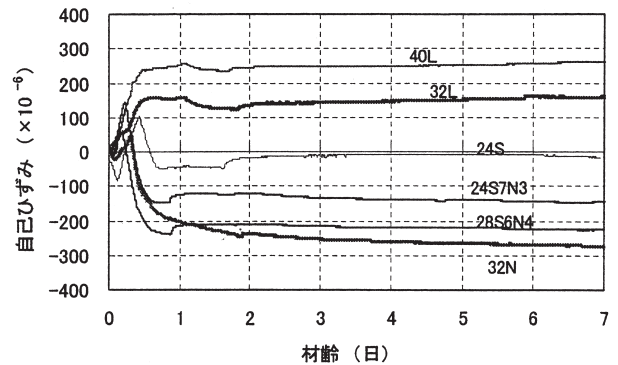


図-15 コンクリートの自己収縮ひずみ

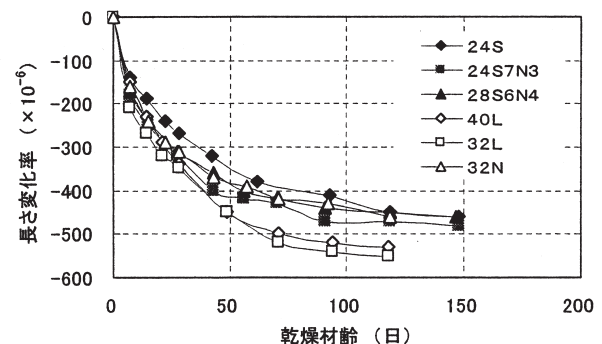


図-16 コンクリートの長さ変化率

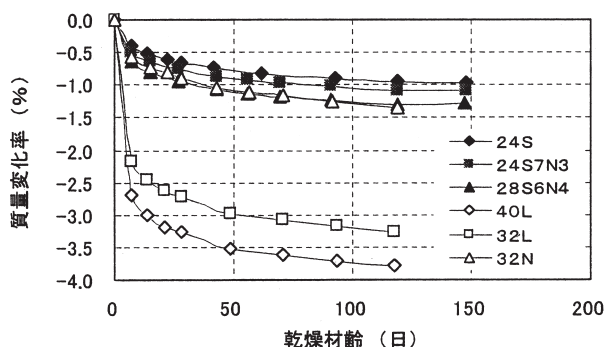


図-17 コンクリートの質量変化率

自己収縮率と長さ変化率の両方を考慮する必要がある。高強度コンクリートにおいては、低熱ポルトランドセメントを使用する場合を除けば、水和反応の進行が普通コンクリートと比較して比較的速いと考えられており、自己収縮率と乾燥収縮率の重ね合わせが成り立つと仮定して良いと思われる。図-15および図-16より、両者を重ね合わせると、コンクリートの収縮率は32Nが最も大きく約 700×10^{-6} 、28S6N4が 650×10^{-6} 程度、24S7N3が 600×10^{-6} 程度、24Sが約 450×10^{-6} となり、普通ポルトランドセメントが多いほど収縮率が大きくなっている。Lについては、乾燥開始材齢を少し遅らせることによって、その他のセメントの同等以下の収縮率となることが、

セメントクリンカーの組成割合からも推察できる。

一方、鉄筋コンクリート構造物のひび割れ発生時のコンクリートの乾燥収縮率は、一般に $300\sim 400\times 10^{-6}$ 程度であり、これを超えなければひび割れは発生しにくくなると考えられる。RC構造物では、コンクリートが鉄筋に拘束されているので、部材としての収縮率を $300\sim 400\times 10^{-6}$ 程度にするためには、拘束率を $0.6\sim 0.7$ とすると、無拘束状態のコンクリート供試体での収縮率が $500\sim 600\times 10^{-6}$ 程度であれば、ひび割れ発生危険性は小さいと考えて良い。

今回の結果から、いずれのコンクリートも収縮率は高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針の目標値である 700×10^{-6} 以下となっているが、32Nおよび28S6N4以外は重ね合わせ後の収縮率が 600×10^{-6} 以下であり、材料および調合に起因するひび割れ発生危険性は少ないと考えられる。

そこで、実機試験を行った6種類の調合（A工場）において、高強度コンクリートのひび割れ特性を把握するために、JIS原案（改正案）に示されている乾燥収縮ひび割れ試験を行った。

ひび割れ試験体は1調合につき3体とし、打込み後上面をビニールシートで覆い、温度 20°C ・相対湿度60%の恒温恒湿室内に打設後7日間湿潤状態を保った。その際、材齢1日以降は、拘束板以外の応力がコンクリートに作用しないように配慮した。材齢7日で試験体を倒立させ、恒温恒湿室内で試験に供した。試験体表裏面のひずみ測定はコンタクトゲージを用い、拘束板のひずみは拘束板側面に貼付したワイヤストレインゲージにより測定した。ひび割れ試験体のひずみ測定と同時にコンクリートの自由収縮ひずみも測定した。自由収縮ひずみ測定用供試体はJIS A 1129に準じて作製し、養生条件および測定方法はひび割れ試験体と同様とした。

(1) ひび割れ発生日数と拘束板のひずみ

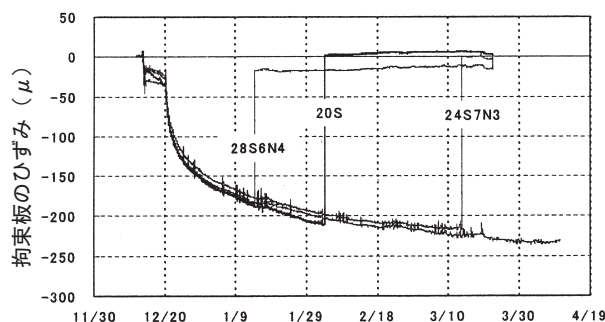
表－6にコンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生日数（乾燥開始材齢からの日数）と拘束板のひずみを示す。ひび割れ発生日数はばらつきが大きい、NおよびS6N4においてひび割れ発生日数がやや早くなる傾向にあった。

図－18に拘束板ひずみの測定結果の例を示す。ひび割れ発生時の拘束板のひずみはいずれも 200μ 前後であり、ひび割れ発生時には約 $3.0\sim 3.5\text{N/mm}^2$ の拘束収縮応力度がコンクリートに作用していることになる。

一方、材齢7日までの拘束板のひずみから、コンクリートに生じる自己収縮応力が計算できる。表－6より、32Nには乾燥開始時に約 50μ のひずみが生じており、約0.8

表－6 ひび割れ発生日数と拘束板のひずみ

供試体 記 号	拘束板のひずみ			ひび割れ 発生日数 (日)
	材齢 1 日 (μ)	材齢 7 日 (μ)	ひび割れ 発生時 (μ)	
20S-1	-20	-39	-215	44
20S-2	-20	-40	-227	68
20S-3	-17	-37	-181	39
24S7N3-1	-10	-24	-231	未発生
24S7N3-2	-11	-23	-232	未発生
24S7N3-3	-9	-23	-216	82
28S6N4-1	-20	-27	-214	未発生
28S6N4-2	-26	-31	-180	24
28S6N4-3	-23	-28	-148	14
32S6N4-1	-4	6	-200	48
32S6N4-2	-8	-2	-144	21
32S6N4-3	-4	-3	-202	未発生
32L-1	-11	1	-195	48
32L-2	-9	12	-220	46
32L-3	-6	8	-202	38
32N-1	-32	-54	-195	19
32N-2	-31	-53	-209	54
32N-3	-33	-50	-204	20



図－18 拘束板のひずみ測定結果(例)

N/mm^2 と最も大きい自己収縮応力が発生している。このことは、図－15に示したように、Nの自己収縮率が最も大きいことから理解できる。

図－19に、コンクリートの自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみの測定結果を示す。ひび割れ発生時のコンクリートの引張伸び能力（自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみとの差）は、いずれも 100×10^{-6} 程度であった。一般強度のコンクリートでは引張伸び能力が 150×10^{-6} 程度であると思われるが、高強度コンクリートでは弾性係数が大きい、一般強度のコンクリートよりも若干小さい値になったと考えられる。

以上より、高強度コンクリートのひび割れ抵抗性は、結合材にNを用いた場合にひび割れ発生日数がやや早くなるが、それ以外の結合材を使用した場合には大きな差

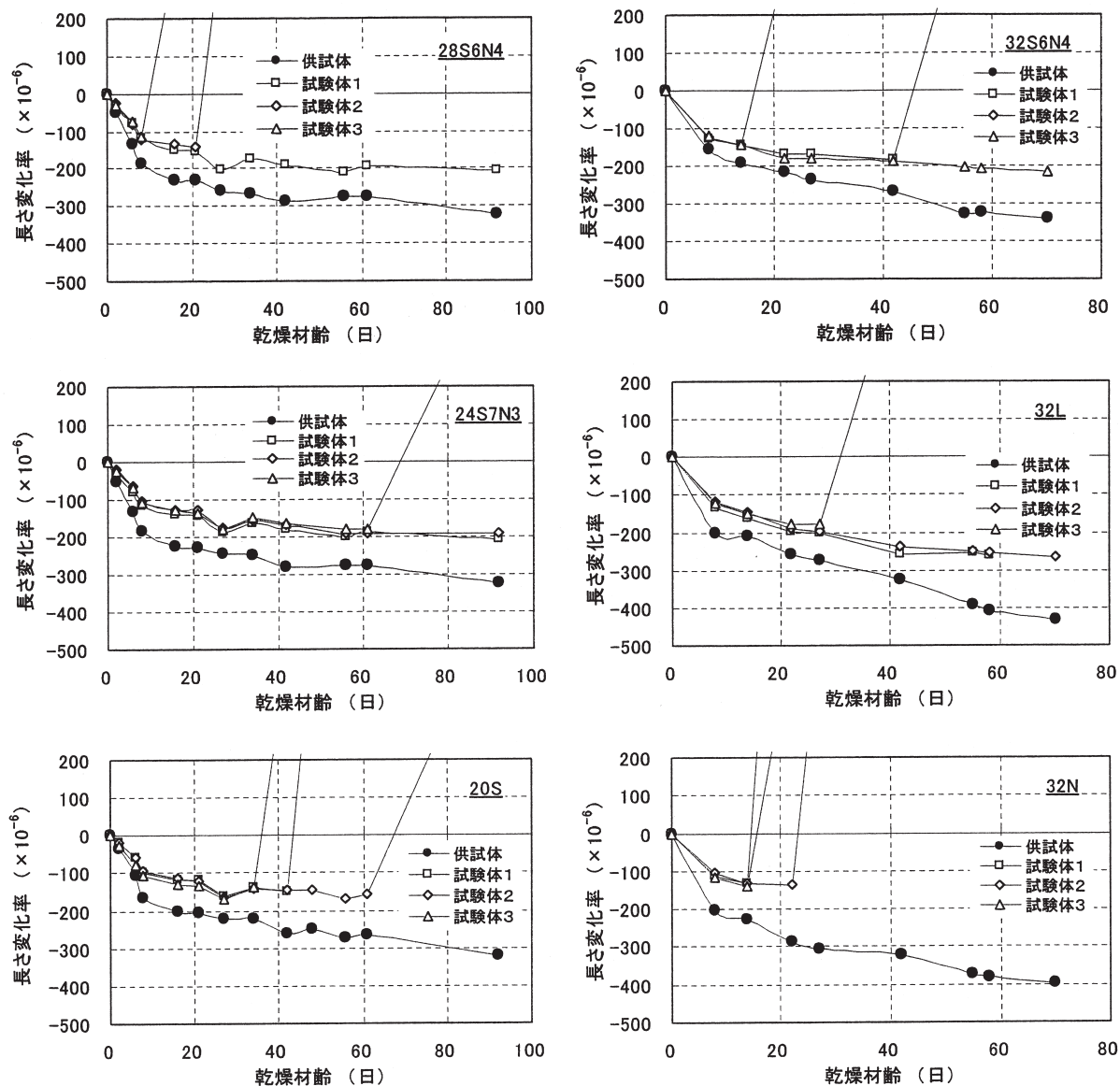


図-19 コンクリートの自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみの関係

異はなく、かつ図-16に示したように乾燥収縮率が小さいため、一般強度のコンクリートと同等以上の乾燥収縮ひび割れ特性を有していると考えられる。

6. 凍結融解抵抗性

空気量の増大による強度低下を抑制するために、S、S7N3およびS6N4においては、空気量を2.0%として計画した。しかし、凍結融解抵抗性を確保するためには、一般に空気量を3.0%以上とすることが必要と考えられている。そこで、20S・24S7N3・28S6N4の3種類のコンクリートの凍結融解抵抗性を評価することとした。練上がり時のフレッシュコンクリートの空気量は、それぞれ2.1%、1.6%、1.9%であった。

試験は、ASTM C 666(A法)に準じて300サイクルまで

行った。ただし、高ピーライト系のセメントは水和反応が緩やかであるため、供試体の前養生期間を14日間として試験に供すると、凍結融解による劣化が激しくなることが予測されたため、前養生期間を28日とした。30サイクルごとの測定は共振周波数と供試体質量とした。

試験の結果、300サイクル終了後の相対動弾性係数は、20S、24S7N3、28S6N4の順に97.9%、99.5%、99.3%であり、極めて良好な凍結融解抵抗性を有していることが確認できた。

7. 中性化抵抗性

水結合材比40%のコンクリートについて促進中性化試験を、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)同解説」に示される方法に準じて行った。

試験は現在継続中であるが、いずれの供試体も促進材齢13週において中性化はほとんど進行していない。現在提案されている各種の中性化速度式から、水セメント比40%以下では中性化はほとんど進行しないことになるが、本試験の結果も同様であり、高強度コンクリートは高い中性化抵抗性を有していると判断できる。

8. まとめ

設計基準強度が36~100N/mm²までの超高強度コンクリートのフレッシュ性状とその評価手法、硬化コンクリートの力学的特性および耐久性状に関する実験の結果、以下の知見を得た。

- (1)本実験に示す範囲の高強度コンクリートは、室内試験および実機試験において適度なコンシステンシーを有しており、設定したスランプフローと空気量の目標値を満足する。
- (2)スランプフロー試験に加えて、50cmフロー時間および流入モルタル量を測定することによって、フレッシュコンクリートの性質やその変動が評価できる。
- (3)高ビーライト系セメントを使用することによって、低水結合材比での水和発熱が低減される。
- (4)材齢28日標準養生供試体におけるコンクリートの圧縮強度は、水セメント比16%~40%において135N/mm²~55N/mm²である。
- (5)ヤング係数は、RC規準式を用いてほぼ安全側に推定できる。

(6)高強度コンクリートの乾燥収縮率は、NおよびS6N4が $600\sim650\times10^{-6}$ 、その他は 600×10^{-6} 以下であり、一般強度のコンクリートに比べて小さい。

(7)高強度コンクリートのひび割れ抵抗性は、一般強度のコンクリートと同等以上の性能を有する。

(8)空気量を2%とした場合でも、十分な凍結融解抵抗性を有し、中性化抵抗性にも問題はない。

今後、本書9.に示したmSn値（材齢m日での標準養生供試体強度と材齢n日での構造体コンクリート強度の推定値との差）を検証することによって、100N/mm²級の超高強度コンクリートの実構造物への適用を目指したい。

[謝 辞]

本実験を行うに当たり、ご協力いただきました、新関西菱光(株)、伊丹コンクリート工業(株)、海山コンクリート(株)、宇部三菱セメント(株)、太平洋セメント(株)、(株)ボゾリス物産、(株)花王、当社作業所（敬称略、順不同）の関係者各位には、ここに記して感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 財団法人日本建築総合試験所：Hi-TECセミナー2001、「コンクリートの諸問題と性能評価／現状と今後の展望」、p.84、2001.3.19