

200N/mm²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

Study on Evaluation for Strength of Concrete in Structure and Mechanical Properties of Ultra-High-Strength Concrete up to 200N/mm²

蓮尾 孝一 KOICHI HASUO

松田 拓 TAKU MATSUDA

建築技術部 河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI

200N/mm²級の超高強度コンクリートを対象に、模擬試験体での構造体コンクリート強度確認と強度管理手法の検討に加え、初期高温履歴条件下の力学特性発現に着目した室内試験を実施した。その結果、コンクリート強度は初期に高温履歴を受けると 200N/mm² を超え、構造体コンクリート強度の管理に加熱養生が有効なことを示唆した。また、初期高温履歴条件下での強度発現特性は、最高温度が 60°C を超える付近で二つの傾向に大きく変化することが判った。

キーワード：超高強度コンクリート、200N/mm²、初期高温履歴、構造体コンクリート

For ultra-high-strength concrete up to 200N/mm², the authors investigated the quality control method on strength of concrete in structure with mock-up columns, and conducted laboratory tests about the development of mechanical properties under temperature history at early age. As the result, it was suggested that strength exceeds 200N/mm² with high temperature at early age and heat-cured specimen is effective for quality control. Furthermore, it was also revealed that the strength development characteristics are changed into two tendencies with the diverging point being maximum temperature over 60°C.

Key Words: Ultra-High-Strength Concrete, 200N/mm², High-Temperature Histories at Early age, Concrete in Structure

1. はじめに

近年、集合住宅をはじめとする超高層建築物へ適用されるコンクリートは高強度化が進んでおり、すでに設計基準強度（以下、 F_c と称す）として 150N/mm² までの高強度コンクリートが実用化されている¹⁾。また、研究は、さらに強度の高い 200N/mm² 級超高強度コンクリートも対象となりつつある²⁾。

高強度コンクリートの圧縮強度（以下、強度）は、若材齢時の水和反応が顕著な時期での温度条件（以下、初期高温履歴）に非常に大きく影響され、初期高温履歴の条件によっては標準養生供試体では到達できない強度を発現することが知られている³⁾。しかし、2009年度版 JASS5では、標準養生m日（28日ないし91日）強度とコア91日強度の差（ mS_{91} 値）を0[N/mm²]以上にすると定められているため⁴⁾、標準養生による強度管理では水セメント比をより小さくしなければならないことによる不合理が生じる懸念がある。このため、加熱養生した供試体での強度管理についての検討結果も報告されている⁵⁾。

また、超高強度コンクリートは、自己収縮やクリープ

特性についても初期高温履歴の影響を大きく受けることが知られており⁶⁾、自己収縮応力および施工時・長期荷重による内部応力状態や部材変形を予測するためには、初期高温履歴条件下の強度や弾性係数等の力学特性を、凝結開始付近から長期材齢にかけて精度良く把握する必要がある。筆者らは、低熱ポルトランドセメント（以下、LC）にシリカフューム（以下、SF）を混合した結合材を使用した 150N/mm² 級の超高強度コンクリートの力学特性が、初期高温履歴の最高温度（以下、 T_{max} ）に大きく影響されることを明らかにし、 T_{max} に着目した構造体コンクリートの管理手法³⁾や強度予測手法⁶⁾を提案している。また、ジルコニア起源シリカ質微粉末（以下、ZSF）やフェロニッケルスラグ細骨材および硬質砂岩砕石にて 200N/mm² 以上の強度が得られるコンクリートを製造できたことを報告している⁷⁾。

本稿では、200 N/mm² を超える超高強度コンクリートを対象に、①模擬試験体による構造体コンクリートの強度確認および強度管理手法の検討を行った結果、②室内試験により、初期高温履歴条件下での若材齢から長期材齢にかけての力学特性発現を確認した結果を報告する。

表-1 使用材料

	種類	記号	物性
セメント	低熱ポルトランドセメント	LC	密度:3.24g/cm ³ , 比表面積:3300cm ² /g, C ₂ S:55%
	早強ポルトランドセメント	HC	密度:3.13g/cm ³ , 比表面積:4550cm ² /g, C ₃ S:66%
混和材	ジルコニア起源シリカ質微粉末	ZSF	密度:2.25g/cm ³ , 比表面積:10.2m ² /g, SiO ₂ :96.0%
細骨材	フェロニッケルスラグ	S	密度:2.96g/cm ³ , 吸水率:0.76%, F.M.:2.2
粗骨材	硬質砂岩砕石(6号)	G	密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:0.84%, 実積率:58.5%, 最大寸法:13mm
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-2 コンクリート調合

記号	W/B (%)	B/W	目標フロー (cm)	結合材比率(%)			g/glim (m ³ /m ³)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)					
				LC	HC	ZSF				W	LC	HC	ZSF	S	G
W/B13	13.0	7.69	75±10	70	10	20	0.547	25.8	1.5±1.0	150	808	115	231	373	848
W/B14	14.0	7.14	75±10	70	10	20	0.547	32.5	1.5±1.0	150	750	107	214	456	848
W/B16	16.0	6.25	70±10	70	10	20	0.547	38.4	1.5±1.0	150	656	94	188	590	848
W/B18	18.0	5.56	70±10	70	10	20	0.547	42.3	1.5±1.0	150	583	83	167	693	848

表-3 確認事項

		室内試験		実機試験	
フレッシュ性	スランプフロー	練上がり直後		経時変化を確認	
	フロー時間				
	空気量				
	コンクリート温度				
供試体	標準養生	材齢7,28,91日	材齢7,28,56,91日,1年		
	加熱養生	材齢7,28日	材齢7,28日		
模擬柱試験体	温度履歴	—	中心部, 端部		
	圧縮強度	—	中心部, 端部で材齢28,91日,1年		
小型試験体	温度履歴	中心部	中心部		
	圧縮強度	材齢28,91日	材齢28,91日		

2. 模擬試験体による構造体コンクリートの強度確認および管理手法の検討

コンクリートの強度確認および管理手法の検討では、室内試験と実機試験を実施した。室内試験は、円柱供試体と小型試験体を製作した。実機試験では、円柱供試体と小型試験体および模擬柱試験体を製作した。円柱供試体の養生条件は、標準養生および加熱養生とし、所定の材齢で圧縮強度を確認した。なお、加熱養生とは封かん状態で材齢2日より7日まで70℃の温度環境下で養生する方法である。小型試験体と模擬柱試験体は、コアを採取して所定材齢での圧縮強度を確認した。

(1) 実験概要

コンクリートの使用材料を表-1に示す。使用材料は過去に筆者らが行った検討^{7),8)}をもとに、LCとZSFを主材料とした。ただし、ZSFを大量使用することによる凝結遅延対策⁸⁾として、LCの一部を早強ポルトランドセメント(以下、HC)で置換した。細骨材はフェロニッケルスラグ細骨材を、粗骨材は茨城県桜川産硬質砂岩砕石(6号)を使用した。化学混和剤はポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。

コンクリートの調合を表-2に示す。室内試験の水結合材比(記号, W/B)の範囲は14%~18%の間で3水準とし、実機試験の範囲は13%を加えた4水準とした。結合材中のLCとHCおよびZSFの構成比は、質量比で7:1:2とした。単位水量は150kg/m³に、単位粗骨材量は848kg/m³に統一した。目標スランプフロー値はW/Bに応じて設定し、高性能減水剤の使用量にて調整した。目標空気量はすべて1.5±1.0%とした。

室内試験および実機試験における確認項目を表-3に示す。フレッシュ性状として、スランプフロー試験と空気量試験およびコンクリート温度の確認を行った。供試体の養生方法は、標準養生と加熱養生の二通りとした。

模擬試験体として、図-1に示す1.0×1.0×1.0m角ブロックの上下に断熱材を施した模擬柱試験体と、図-2に示すような内寸が500×500×400mmで、周囲6面を断熱材で覆った小型試験体を用意した。室内試験では小型試験体のみを製作し、実機試験では模擬柱試験体と小型試験体の両方を製作した。試験体の温度履歴は、図中に示す位置に熱電対を設置し30分間隔で測定した。

室内試験は2008年5月下旬に実施した。コンクリートの練混ぜは、容量100Lの強制二軸練りミキサを用いて70L/バッチをモルタル先練り方式で行い、モルタル練り

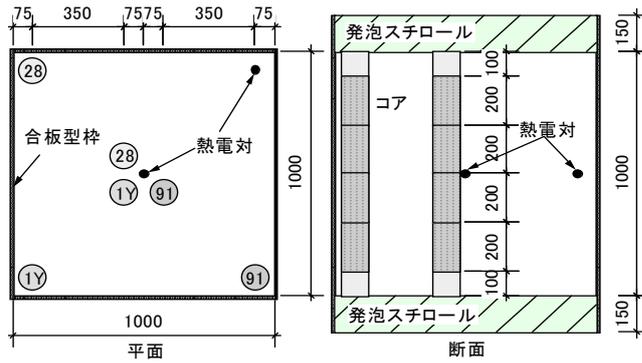


図-1 模擬柱試験体

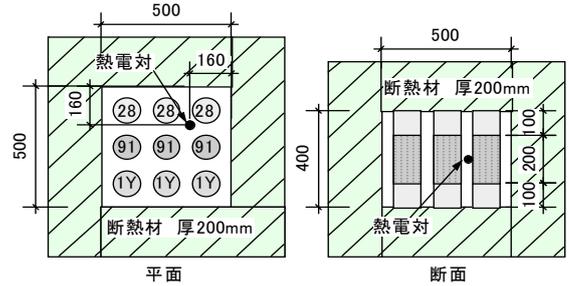


図-2 小型試験体

表-4 フレッシュ性状

	記号	SP使用量 (B*%)	フロー時間(sec)		スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(°C)	外気温 (°C)	単位容積質量 (ton/m ³)
			50cm	停止					
室内試験	1 W/B14	1.9	5.8	>180	78.0	1.5	25.5	22.1	2.52
	2 W/B16	1.7	4.3	>180	77.5	0.9	25.5	22.0	2.53
	3 W/B18	1.1	3.9	>180	80.5	0.7	24.5	22.6	2.54
実機試験	1 W/B13	1.9	5.1	>180	81.5	1.7	33.0	33.9	2.51
	2 W/B14	2.0	3.5	114	83.0	1.1	29.0	32.7	2.52
	3 W/B16	1.0	4.0	114	75.5	1.5	32.0	31.2	2.51
	4 W/B18	1.1	3.9	102	76.5	1.4	32.0	32.9	2.51

時間と本練り時間は性状をみて調整した。なお、三種類の結合材は、水投入前の空練り時にミキサで混合した。

実機試験は2008年7月下旬に実施した。練混ぜは容量3.0m³の強制二軸練りミキサを用い、室内試験と同様にモルタル先練り方式で行った。なお、三種類の結合材は練混ぜ時にミキサで混合せずに、事前にプレミックスしたものを使用した。

実機試験の手順を図-3に示す。バッチあたりのコンクリート練混ぜ量は、結合材の計量器の最大秤量とミキサの能力に余裕を持たせるため1.0～1.5m³とし、2ないし3バッチを混合して実験に供した。

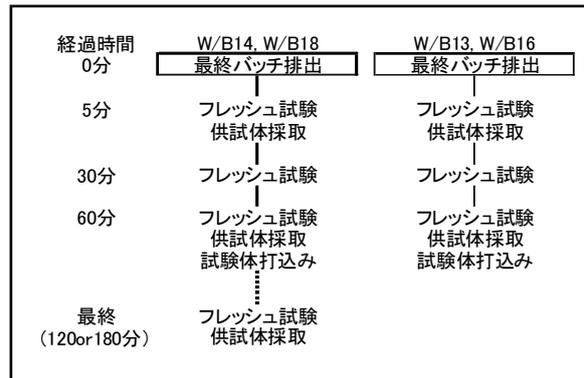


図-3 実機試験手順

(2) 実験結果および考察

a) フレッシュ性状

フレッシュ試験の結果の例を表-4に示す。室内試験は練上がり直後の結果を、実機試験は60分後(W/B18は90分後)での結果を示している。全体的にスランプフローは大きく一部では目標範囲をわずかに超えたが、材料分離はなく良好な状態だったので、試験に用いた。空気量は目標範囲内にあるが全体的に小さく、室内試験では1.0%未満の結果もみられた。なお、全試験結果について2.0%を超えることはなかった。

b) 温度履歴

模擬試験体の温度履歴の例として、実機試験のW/B14の結果を図-4に示す。模擬柱試験体のコンクリート温度

は、材齢7日頃までに中心部と端部とも外気温近くまで降下したが、小型試験体では降下するまでに材齢20日近くまでかかった。

温度測定結果の一覧を表-5に示す。小型試験体は、室内試験と実機試験で製作時期が2ヶ月ほど異なるが温度上昇量はおおむね一致した。小型試験体では厚さ200mmの断熱材で覆っているため、外気温の影響を受けにくいことが理由と考えられる。模擬柱中心部と小型試験体を見ると最高温度とその到達時間はほぼ同じであった。

c) 圧縮強度発現

実機試験における経時60分採取供試体と、その他の時間に採取した供試体の圧縮強度比較結果を図-5に示す。経時60分で採取した供試体と練上がり直後ないし試験最

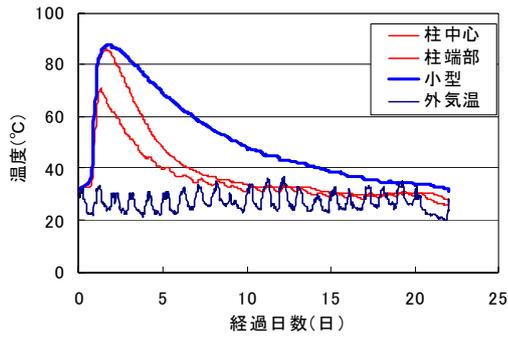


図-4 温度履歴の一例（実機試験 W/B14%）

	W/B	模擬柱試験体 (上段:中心/下段:端部)			小型試験体		
		最高温度 (°C)	上昇量 (°C)	到達時間 (h)	最高温度 (°C)	上昇量 (°C)	到達時間 (h)
室内試験	14%	—	—	—	79.0	56.6	49.8
	16%	—	—	—	76.8	54.3	49.6
	18%	—	—	—	73.8	51.3	42.7
実機試験	13%	88.6	55.1	35.8	90.6	56.7	38.8
		74.3	40.8	28.3			
	14%	85.5	53.8	40.3	87.5	55.8	40.3
		70.5	38.8	30.8			
	16%	83.0	50.5	25.5	84.8	52.7	32.5
		66.5	34.0	22.0			
18%	79.7	47.4	32.0	80.4	47.8	36.5	
	66.9	34.6	25.0				

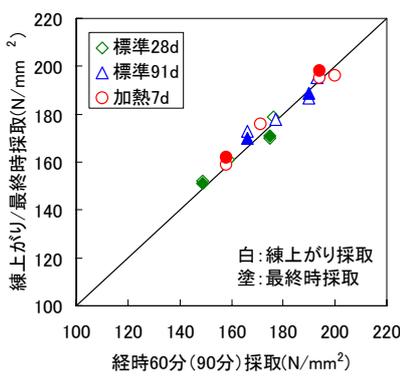
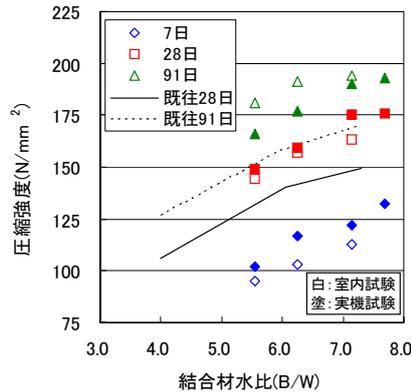
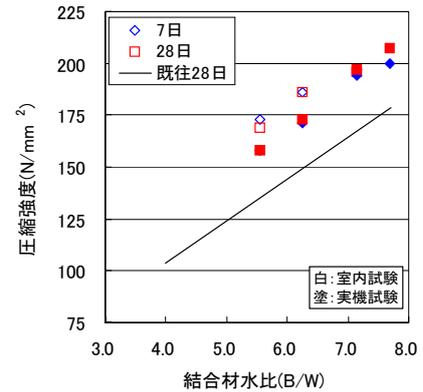


図-5 採取時期と圧縮強度



(a) 標準養生



(b) 加熱養生

図-6 供試体の圧縮強度³⁾

後に採取した供試体の圧縮強度は、養生や試験材齢にかかわらずほぼ 1 : 1 の関係にあり、採取時期の影響はみられなかった。以降、実機試験における供試体の圧縮強度は、模擬試験体の打込みを行った経時60分ないし90分に採取した供試体で検討する。

各種供試体の圧縮強度試験結果を図-6に示す。なお、図中には筆者らが過去に報告³⁾した Fc150N/mm² 級に対応する結合材（低熱ポルトランドセメントの質量比10%を金属シリコン起源シリカフェームにて置換）の結果（回帰線）を併せて示している。

標準養生をみると、白抜で示した室内試験の圧縮強度は、材齢7日では実機試験よりも低いが、最終的には実機試験に比べ高くなる傾向となった。これは、実機試験のコンクリート温度が高いため、初期強度は大きい長期強度の増進が少なかったことが要因と考えられる。標準水中養生では圧縮強度は材齢とともに増加していく傾向がみられたが、長期材齢において 200N/mm² 手前で横ばいとなった。一方、加熱養生では材齢7日以降28日までの強度増加はほとんどないが、結合材水比との比例関係を維持し 200N/mm² を上回る圧縮強度が得られた。

今回開発した超高強度コンクリートの圧縮強度は、全体的に Fc150N/mm² 級のコンクリート³⁾と比べて、同一

結合材水比において 20N/mm² 程度高い。これは、ZSFの分散性が優れていることや細骨材の強度が高いこと、粗骨材を最大寸法が13mmと小さい6号砕石とすることで脆弱部が減少していることなどが考えられる。

模擬試験体より採取したコア供試体の圧縮強度試験結果を、室内試験結果については Fc150 N/mm² 級コンクリートで製作した小型試験体の回帰線³⁾とともに図-7に、実機試験結果については模擬柱試験体の回帰線³⁾とともに図-8に示す。

今回、W/B13の模擬柱中心および小型試験体より採取したコア、およびW/B14の小型試験体より採取したコアの一部で 200N/mm² 以上の圧縮強度が得られた。実機試験において模擬柱中心部と小型試験体の圧縮強度はほぼ等しく、全体的に材齢28日から91日までの強度の増加量は小さかった。一方、模擬柱試験体の端部の圧縮強度をみると、材齢28日強度は、模擬柱中心や小型試験体に比べ低い。W/B18 や W/B 16 では材齢28日から91日までに増加する傾向がみられ、模擬柱中心部や小型試験体の強度に近づいたが、W/B14や W/B 13 では圧縮強度の増進が小さい。この原因として、模擬柱端部では、図-4に示したように最高温度が70°Cを超えても高温の保持時間が短いという、温度履歴が影響していると考えられる。

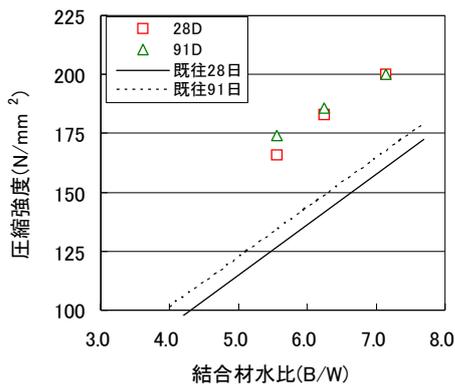


図-7 構造体コンクリート強度 (室内試験)

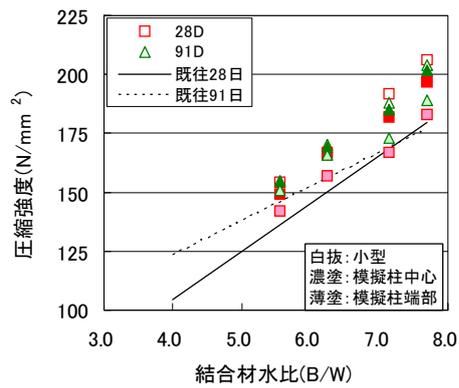


図-8 構造体コンクリート強度 (実機試験)

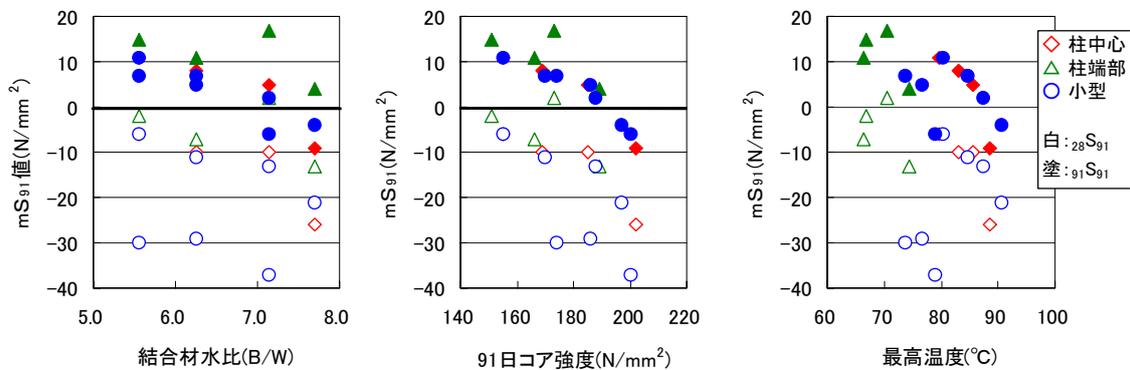


図-9 標準養生によるmS₉₁値算出結果

今回の結果からは、200N/mm²級超高強度コンクリートを実現するためには、夏期施工であっても型枠面に断熱材を施すなどして高温の保持時間を長くすることが、強度確保に有効な可能性があると考えられた。また、断熱材の採用は部材内部での温度履歴の差も小さくなるため、部材内強度差の解消にも繋がると考えられた。

(3) 強度管理手法の検討

a) 標準養生

標準養生m日(28日ないし91日)強度とコア91日強度の差(mS₉₁値)を、結合材水比と91日コア強度ならびに最高温度で整理した結果を図-9に示す。既往の報告³⁾で発表されているように、結合材水比の増加(強度の増加)や部材最高温度の上昇に伴いmS₉₁値は低下する傾向が確認された。28S₉₁値はそのほとんどが、91S₉₁値でもいくつかは0以下、すなわちコア強度が標準養生強度よりも大きいことを示している。

b) 加熱養生

加熱養生m日(7日ないし28日)とコア91日強度との差(mS₉₁値)を、結合材水比と91日コア強度ならびに最高温度で整理した結果を図-10に示す。加熱養生との関

係で整理すると、m日をどちらに設定してもmS₉₁値は多くが0以上、すなわち加熱養生強度がコア強度より大きいことを示している。その範囲は0~12N/mm²程度となった。

現状の基準⁴⁾ではmS₉₁の値は0以上とされている。これは管理用供試体で強度保証をすることであり、管理用供試体を標準養生とした場合、コア強度すなわち構造体コンクリート強度が初期高温履歴により標準養生強度より高強度になるとしても、調合算定には反映されない。その結果、構造体コンクリートには必要以上の強度を要求することになり、結合材の増加による自己収縮等の問題の懸念が大きくなる。

一方、加熱養生供試体は、構造体と同様に高温履歴するため、その強度もコア強度と同等ないしはそれ以上、すなわちmS₉₁値が0以上となる。したがって管理用供試体を加熱養生とした場合、高温履歴による強度増進を調合算定に考慮でき、より合理的と考えられる。

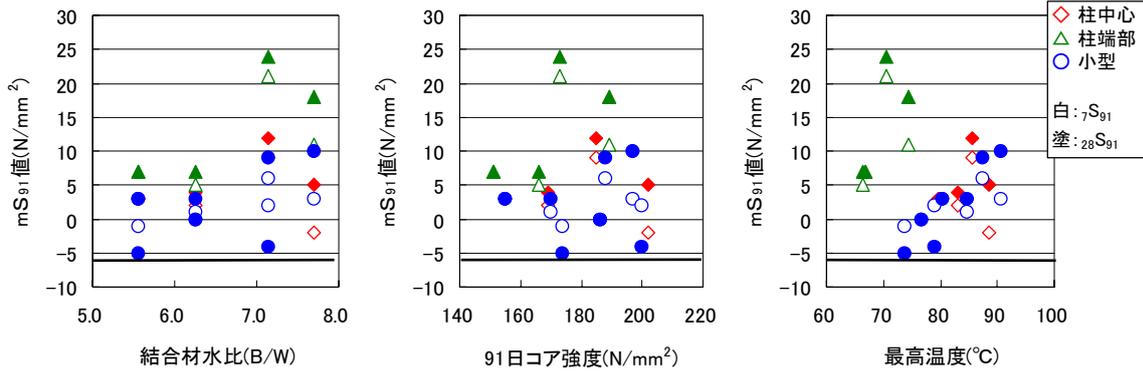


図-10 加熱養生によるmS₉₁値算出結果

3. 力学特性発現の検討

初期高温履歴条件下でT_{max}を変化させた室内試験を実施し、低強度から高強度領域までの力学特性発現を確認した。

(1) 実験概要およびフレッシュコンクリートの性状

使用材料を表-6に示す。結合材は、2.と同様に、LCとZSF、HCを質量比で7:2:1に混合したものを使用した。調合とフレッシュ性状を表-7に示す。

50cmフロー通過時間とスランブフロー値は、それぞれ6.2秒、78.5cmとなり、目視観察の範囲で流動性・分離抵抗性に優れた性状が得られた。フレッシュ性状を確認後、φ100×200mmの円柱供試体を製作した。本検討では、標準水中養生と封かん養生の円柱供試体を、それぞ

れ標準TP、封かんTPと呼称し、それぞれの材齢t[日]強度[N/mm²]をF(t)、f(t)と表記する。初期高温履歴は、封かんTPを温度可変制御槽に存置し、槽内温度の制御により与えた。円柱供試体の養生種類を表-8に示す。温度履歴-1は、断熱もしくは加熱養生により初期高温履歴の影響を大きく受ける構造体コンクリートを想定し、封かんTPを20℃に制御した温度可変制御槽内に存置して、槽内温度を凝結始発時刻よりT_{max}90[℃]まで上昇させ、3日間保持した。温度履歴-2は、柱端部などの温度降下の速い養生条件を想定し、温度履歴-1と同環境に存置した封かんTPを、T_{max}到達後に断熱容器に移設し速やかに温度降下させた。70℃加熱は、封かんTPを存置した温度可変制御槽内の温度を、材齢2日より20℃から70℃に上げて7日まで保持するものであり、筆者らが構造体コンクリート管理用TPの養生として2.

表-6 使用材料

	種類		記号	物性	
結合材	低熱ポルトランドセメント		LC	密度: 3.24g/cm ³	比表面積: 3300cm ² /g, C ₃ S: 55%
	早強ポルトランドセメント		HC	密度: 3.13g/cm ³	比表面積: 4550cm ² /g, C ₃ S: 66%
	ジルコニア起源シリカ質微粉末		ZSF	密度: 2.25g/cm ³	比表面積: 10.2m ² /g, SiO ₂ : 96.0%
細骨材	フェロニッケルスラグ		S	密度: 2.96g/cm ³	吸水率: 0.76%, F.M.: 2.2
粗骨材	硬質砂岩1305		G	密度: 2.66g/cm ³	吸水率: 0.84%, 最大寸法: 13mm
混和剤	高性能減水剤		SP	ポリカルボン酸系	

表-7 コンクリート調合とフレッシュ性状

W/B [%]	結合材比率[%]			単位量[kg/m ³] (B=LC+HC+ZSF)						SP量 [B] × %	フロー時間 [sec.]		スランブフロー [cm]	空気量 [%]	コンクリート温度[°C]	室温 [°C]	凝結[hr]	
	LC	HC	ZSF	W	LC	HC	ZSF	S	G		50cm	停止					始発	終結
13.0	70	10	20	150	808	115	231	374	851	1.9	6.2	>180	78.5	1.7	20.5	17.8	15.0	17.0

表-8 φ100×200mm円柱供試体の養生条件

養生種類		温度上昇 開始材齢[日]	温度上昇 速度[°C/hr]	最高温度 T _{max} [°C]	最高温度 保持時間[日]	温度降下 速度[°C/hr]	備考
標準水中	水中	-	-	20	-	-	20℃一定条件
20℃封かん	封かん	-	-	20	-	-	20℃一定条件
温度履歴-1		0.63	4.0	90	3.0	2.2	T _{max} =90[°C]を3日間保持
温度履歴-2		0.63	4.0	90	0.0	0.7→10.4	T _{max} =90[°C]到達後、速やかに温度降下
70℃加熱		2.00	12.5	70	4.8	10.0	材齢2日より70℃一定加熱養生

※いずれの養生種類も、材齢7日以降は20℃一定条件である。

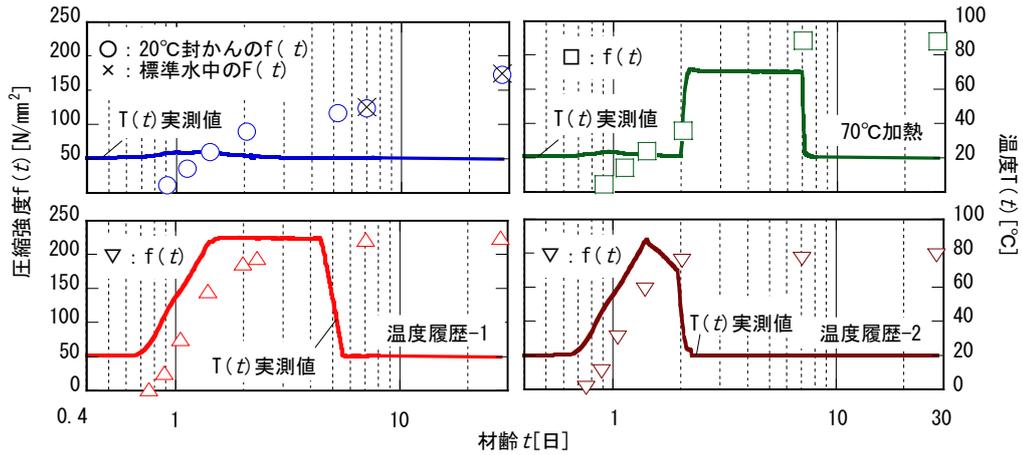


図-12 封かん TP の強度と温度

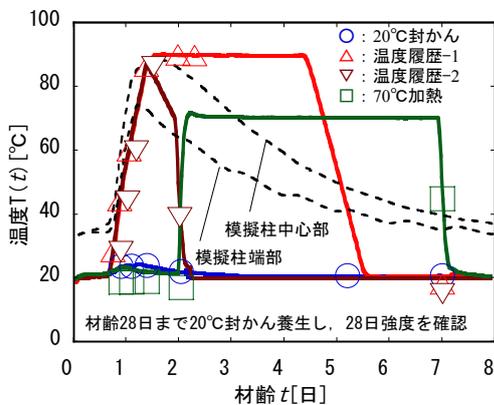


図-11 温度の実測値と強度および静弾性係数の試験材齢

で提案した加熱養生である。それぞれの封かんTPより、所定の材齢で $f(t)$ および静弾性係数 $E(t)$ [kN/mm²] を確認した。コンクリート温度 $T(t)$ [°C] は、それぞれの養生種類の封かんTPについて温度測定用の供試体を製作して測定した。温度測定結果を図-11に示す。図中の凡例は、養生種類について、圧縮強度と静弾性係数を確認した材齢を示している。図中には、2. で示した同じコンクリートで製作した模擬柱部材の温度履歴を併記している。温度履歴-1および温度履歴-2の温度上昇開始時期と上昇速度は、模擬柱部材の温度履歴とおおむね一致した。

(2) 実験結果

養生種類別の $f(t)$ および $T(t)$ の実測値を図-12に示す。温度履歴-1の強度は材齢7日で 222N/mm² に達し、28日にかけて顕著な増進が見られなかったことから、コンクリートのポテンシャルに近い強度発現が得られたと考えられる。温度履歴-2の強度は、7日から28日にかけて若干増進したが、温度履歴-1の強度を下回った。20°C封かんの強度 $f(t)$ と標準水中の強度 $F(t)$ は同等であり、それらと温度履歴-1とは、材齢28日で 50N/mm² 以上の

強度差が認められた。70°C加熱の7日強度は、温度履歴-1の7日結果と同等かつ28日にかけて増進しないことから、ポテンシャル強度の判定に有効と考えられる。

(3) 力学特性発現予測手法の検討

強度 $f(t_e)$ と有効材齢 t_e [日] との関係を図-13に示す。強度発現傾向は、途中から20°C一定条件とそれ以外の温度条件とに分かれ、それぞれの範囲では有効材齢により統一的にプロットされた。図中に、温度履歴-1の温度 $T(t_e)$ 実測値および強度発現の分かれ始めと $T(t_e)$ との関係点を点線で示す。150N/mm² 級コンクリートと同様に⁵⁾、20°C一定条件とそれ以外の温度条件の強度発現は $T(t_e)$ がおおむね60°Cを超えて以降、乖離する結果となった。

20°C封かんとそれ以外の封かん TP の強度について、式(1)のJCI研究委員会式⁹⁾を用い既報⁶⁾と同様に $F(28)$ に $f(28)$ を採用し、それぞれ回帰した結果を図-14に示す。

$$f(t_e) = F(28) \cdot \exp \left\{ s_f \left[1 - \left(\frac{28 - t_{e0}}{t_e - t_{e0}} \right)^a \right] \right\} \quad (1)$$

ここに、 s_f : セメントの種類の影響による係数、
 $a=0.5$, t_{e0} : 凝結時間の影響による係数 [日]

図中に、2. で示した実機試験の模擬柱部材のコアと標準養生の結果を併記する。中心コアと標準養生の結果は回帰結果の±20%の範囲にプロットされたが、コア強度は今回の実験結果よりも低く、端部コアの結果は±20%を外れた。端部コアの T_{max} が中心コアに比べ低く、28日強度で温度履歴-2が温度履歴-1に比べ低かったことを鑑みると、 T_{max} の大きさや保持時間も強度発現特性に影響することが考えられる。

強度と静弾性係数との関係を、図-15に示す。両者の関係は、養生種類によらず同一の関係にあり、強度が30 N/mm² 以上では強度の三乗根に、それ以下では二乗根

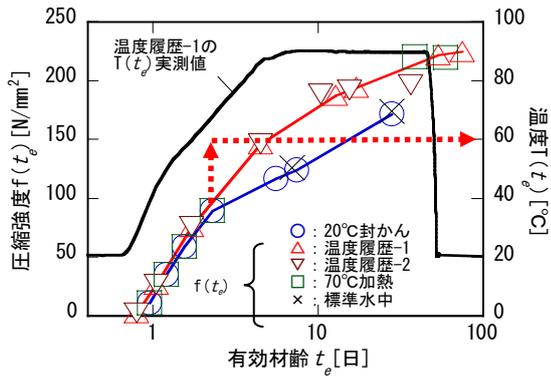


図-13 有効材齢と強度および温度の関係

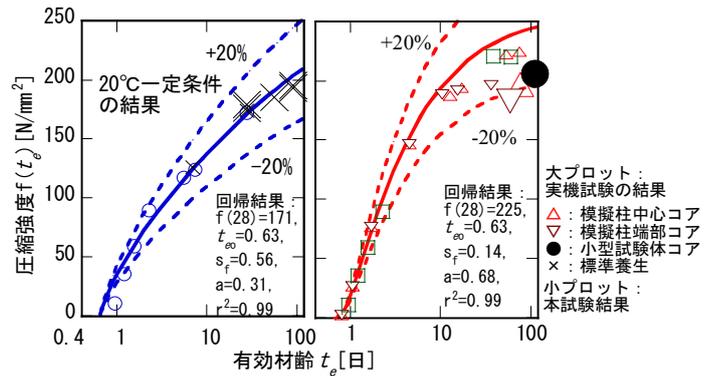


図-14 封かん TP の強度と温度

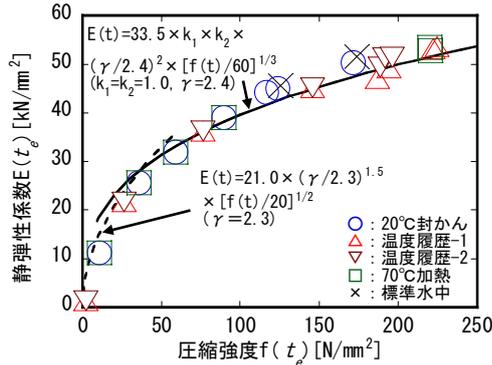


図-15 圧縮強度と静弾性係数

に比例する関係式との適合性が高いとする既往の研究⁹⁾と、同様な結果となった。

4. まとめ

- ① 材齢91日までの範囲において得られた最高強度は、標準養生では 194N/mm^2 であるのに対し、高温履歴を受けた加熱養生や模擬試験体より採取したコア供試体では 200N/mm^2 を超えた。
- ② 大型の部材では中心部と表面部で温度履歴が異なり、結果として強度差が生じることを確認した。
- ③ 200N/mm^2 級の超高強度コンクリートは、標準養生での強度管理よりも加熱養生での強度管理が合理的であることを示唆した。
- ④ $T_{\text{max}}90^\circ\text{C}$ 温度履歴条件と 70°C 加熱養生の強度発現は、有効材齢でおおむね統一的に評価でき、温度が 60°C を超えるまでは 20°C 一定条件と同じであるが、それ以降になると、 20°C 一定条件の傾向から乖離した。
- ⑤ 圧縮強度と静弾性係数との関係は、低強度から高強度領域まで、養生温度によらず同一の関係にある。

謝辞：本稿は住友大阪セメント(株)との研究成果の一部を取り纏めたものです。また、実験に際し協力いただきま

した、佐倉エスオーシー(株)ならびに(株)日本シーカをはじめとする各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 飯島真人ほか：設計基準強度 150N/mm^2 の低収縮型超高強度コンクリートの適用および品質管理結果，その1 工事概要およびレディーミクストコンクリート工場における製造管理，その2 粗骨材選定技術および構造体コンクリートの強度管理，日本建築学会学術講演梗概集，A-1，pp.37-40，2007.8
- 2) 小島正明ほか： $\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ 超高性能コンクリートの開発，（その1）フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の発現性状，（その2）自己収縮およびその他の力学特性，（その3）補強用鋼繊維の発錆特性，日本建築学会学術講演梗概集，A-1，pp.1087-1092，2008.9
- 3) 河上浩司ほか： 150N/mm^2 級超高強度コンクリートの強度発現に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1235-1240，2006.7
- 4) (社)日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2009，pp.72-73，2009.1
- 5) 例えば小泉信一ほか：超高強度コンクリートの潜在的な強度発現性および水和反応に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.115-120，2008.7
- 6) 松田拓ほか：初期高温履歴を受ける超高強度コンクリートの強度発現特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.73-78，2008
- 7) 小出貴夫ほか： 200N/mm^2 級超高強度コンクリートにおける使用材料が強度特性に及ぼす影響の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.61-66，2008.7
- 8) 河上浩司ほか：シリカ質微粉末を用いた超高強度モルタルの物性に関する一検討，第62回セメント技術大会講演要旨，pp.164-165，2008.5
- 9) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，1996