

論文 水中浸せきさせた模擬柱部材のコア強度に関する検討

佐々木 真宏^{*1}・中田 善久^{*2}・大塚 秀三^{*3}・春山 信人^{*4}

要旨：本研究は、製品工場で一部材ずつ生産するプレキャストコンクリート製品の利点を活かし、比較的マッシブな柱プレキャストコンクリート部材の長期強度発現性を改善するために、工場既存設備である水槽を活用し、脱型直後より部材ごと水中浸せきさせる養生方法を試みたものである。その結果、水セメント比が比較的小さい調合（配合）に関して、水中浸せきさせる養生方法はあまり効果がなく、水セメント比が比較的大きい調合（配合）に関して、最高温度に達するまでの初期に水中浸せきすれば効果がある傾向にあった。
 キーワード：プレキャストコンクリート部材、高強度コンクリート、マスコンクリート、水中浸せき、圧縮強度、S値

1. はじめに

この10年程の間、住宅の品質確保等に関する法律(通称：品確法)ならびに改正建築基準法の施行によって、建築生産を取り巻く社会情勢が変化し、構造部材の品質に対する関心が高まってきている。これに対応し、建築生産における技術開発も進歩を遂げると共に、安定した品質の構造部材の供給が望まれている。

このような背景の中、JASS5¹⁾に示される構造体の総合的耐久性の計画供用期間の級として「長期(大規模補修不要期間としておよそ100年)」を適用する事例が増え、コンクリートの高強度化及び湿潤養生の期間についても詳細な記述がある。これに対しJASS10²⁾では、計画供用期間の級をJASS5同様「長期」の記述があるものの、工場での部材製造サイクルを確保するために、打設から脱型までの「加熱養生」に関する手順・方法について明示しているが、柱部材など比較的マッシブなプレキャストコンクリート(以降：PCaと称する)部材、特にこれら部材に適用される事例の多い高強度コンクリートに対し、打設から脱型までの養生方法、ならびに脱型後の養生について、多くを言及していない。

また、比較的マッシブな断面である柱などは、コンクリートの高強度化により、単位セメント量が増加傾向に

あり、水和熱が断面内に蓄積されることにより材齢初期において高温履歴を受け、材齢初期での強度発現を期待できるが、長期材齢における強度発現が停滞することが指摘されている³⁾。

さらに、本研究の実施にあたり、管理用供試体において吸水性を検討した。使用材料は、セメントに普通ポルトランドセメント、W/C=31%および45%とした。PCa部材コンクリートの圧縮強度検査は部材と同一養生とする²⁾ことから、管理用供試体を脱型時所要強度確認後、屋外環境下において養生することが一般的になっており、脱型直後よりコンクリート中の自由水が逸散し、湿潤養生という観点からは不利な条件となる。そこで、事前実験として実施した材齢7日後に72時間吸水させた結果を図-1に示した。供試体レベルではあるが、材齢7日後の気乾状態にある供試体において吸水することが確認できたことから、部材の養生ならびに長期強度発現性改善の可能性があると考えた。

そこで本研究は、写真-1のように、模擬柱部材を大型水槽に水中浸せきさせる養生方法(以降：初期水中浸せき養生と称する)および屋外環境下における養生(以降：常温養生と称する)を試み、模擬柱部材から採取したコア供試体と模擬柱部材作製時に採取した管理用供試体の標準

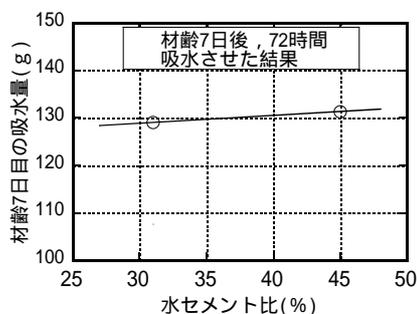


図 - 1 水セメント比と材齢7日目の吸水量の関係



写真 - 1 模擬柱部材初期水中浸せき風景

*1 フジミ工研(株) コンクリート管理課 (正会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 ものつくり大学助教 技能工芸学部 建築技能工芸学科 助教 修士(工学) (正会員)

*4 フジミ工研(株) PC営業部 (正会員)

養生，および常温養生模擬柱部材と同じ条件で養生した管理用供試体(以降:部材と同じ養生と称する)の標準期・夏期および冬期における強度発現性について検討した内容を述べる。

2. 実験概要

実験概要モデルを図-2，使用材料を表-1，実験の要因と水準を表-2，試験項目と試験方法を表-3，項目と養生方法条件を表-4，コンクリートの調合(配合)およびフレッシュコンクリートの性状を表-5に示す。模擬柱部材は，JASS 5T-704-2005「コア供試体による構造体コンクリート強度の推定方法(案)」⁴⁾に準拠し作製，コア供試体を図-3に示すように模擬柱部材の中心部および外周部より採取した。模擬柱部材を作製する型枠は，柱PCa型枠に一般的に使用される厚さ9mmの鋼板を使用し，中央

部および外周部に熱伝対により，コンクリート温度を測定した。模擬柱部材は，水セメント比を4水準で，常温養生模擬柱部材および初期水中浸せき養生模擬柱部材を各1体ずつ，1シーズン計8体作製した。模擬柱部材型枠の脱型は，夏期の場合，24時間と設定していたが，初期水中浸せき養生する以前に部材の内部温度が最高温度に到達してしまう結果になったため，標準期の場合，16時間とした。冬期の場合，W/C=27%および35%において，16時間で脱型できたものの，W/C=40%および48%においては，脱型できず，39時間とした。その後，常温養生模擬柱部材は，屋外で暴露養生し，初期水中浸せき養生模擬柱部材は，脱型後直ちに大型水槽(水温調整なし，W45×L14×D2.5m)に72時間浸せきさせた後，屋外で暴露養生するものとした。

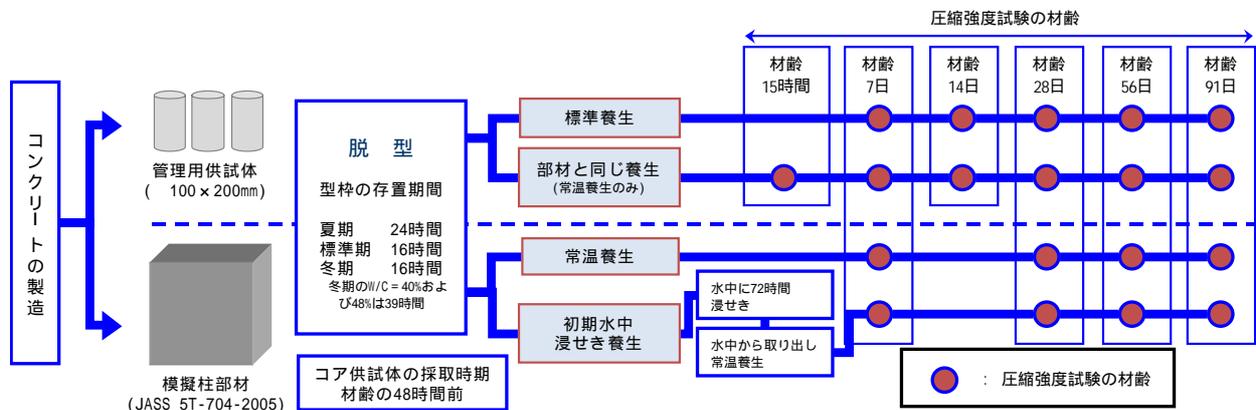


図-2 実験概要モデル

表-1 使用材料

材料名	種類・産地等	品質・性状・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 = 3.16g/cm ³ 比表面積 = 3,300cm ² /g
細骨材	埼玉県秩父郡 小鹿野町両神産 硬質砂岩(砕砂)	表乾密度 = 2.68g/cm ³ 吸水率 = 1.23% FM = 2.85 単位容積質量 = 1.77kg/L 実積率 = 57.4%
粗骨材	埼玉県秩父郡 小鹿野町両神産 硬質砂岩(砕石)	表乾密度 = 2.71g/cm ³ 吸水率 = 0.53% FM = 6.73 単位容積質量 = 1.67kg/L 実積率 = 61.0%
化学混和剤	高性能AE減水剤 AE剤	ポリカルボン酸系 -
練混ぜ水	上水道水	埼玉県比企郡滑川町

表-2 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比(%)	27, 35, 40, 48
打設時期	標準期・夏期・冬期

表-3 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	棒状温度計による

表-4 項目と養生方法条件

項目	養生方法条件		
管理用供試体	養生方法	標準養生	部材と同じ養生
	脱型まで	20 恒温室	模擬柱部材脇
	試験材齢まで	20 ± 3 標準養生	試験体脇で 常温養生
	圧縮強度	JIS A 1108, JIS A 1132	
養生水槽	既存設備の水槽 (水温調整機能ない, W45 × L14 × D2.5m)		
模擬柱部材	養生方法	常温養生	初期水中浸せき養生
	脱型まで	1 × 1 × 1m鋼製型枠内(厚さ9mm)	
	試験材齢まで	脱型後直ちに屋外暴露養生	<ul style="list-style-type: none"> 脱型後直ちに養生水槽浸せき 72時間[3日]初期水中浸せき養生 初期水中浸せき養生完了後，屋外暴露養生
	内部温度	C.C熱伝対による	
圧縮強度	JIS A 1107, JIS A 1132		

表 - 5 コンクリートの調合（配合）およびフレッシュコンクリートの性状

調合	時期	目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	目標 練上り 温度 (°C)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュコンクリート性状										
							W	C	S	G	単位粗骨材 かさ容積	Add (C x %)		スランプ (cm)	空気量 (%)	C T (°C)						
												1.00	6.23									
N-27	夏期	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	5	27.0	40.0	168	623	633	959	0.580	0.85	5.30	18.1	4.8	31.5						
	標準期											0.75	4.67	18.5	4.6	23.0						
	冬期											0.85	4.08	19.2	5.0	28.0						
N-35	夏期				18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	35	35.0	44.3	168	480	754	959	0.580	0.70	3.36	18.0	4.7	23.0			
	標準期														0.65	3.12	15.7	3.5	16.0			
	冬期														0.80	3.36	18.0	5.3	31.5			
N-40	夏期							18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	35	40.0	45.9	168	420	805	959	0.580	0.70	2.94	20.5	5.3	20.5
	標準期																	0.60	2.52	19.0	4.0	14.0
	冬期																	0.80	2.80	17.7	4.0	29.5
N-48	夏期	18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	35							48.0	47.7	168	350	864	959	0.580	0.65	2.28	19.0	4.1	20.0
	標準期																	0.60	2.10	18.7	3.8	11.5
	冬期																	0.60	2.10	18.7	3.8	11.5

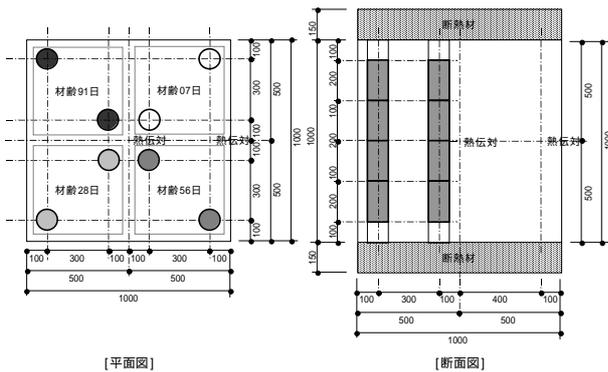


図 - 3 模擬柱部材の概要

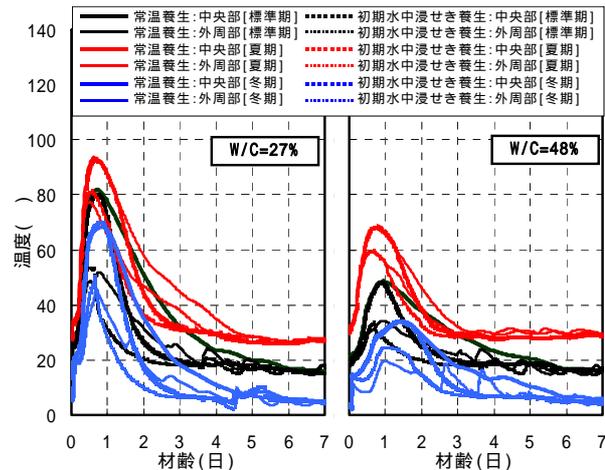


図 - 4 模擬柱部材の内部温度履歴

3. 結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリート性状の試験結果を表 - 5 に示す。空気量は、AE 剤を添加し、目標範囲内になるよう調整し、スランプ・空気量・練上りのコンクリート温度は、いずれの調合とも、目標値を満足した。

3.2 模擬柱部材の温度履歴

標準期・冬期および夏期において温度履歴を測定した。コンクリート打設後から材齢28日までの模擬柱部材内部温度測定結果を表 - 6 に示す。

各調合(配合)における常温養生と初期水中浸せき養生の中央部および外周部の最高温度は、夏期 > 標準期 > 冬期となる傾向を示した。W/C=27%における常温養生の夏期と冬期の最高温度の差は、中央部で25.4、外周部で31.7 となり、初期水中浸せき養生の最高温度の差は、中央部で22.5、外周部で30.6 となった。中央部では、水セメント比が大きくなるに従い、各打設時期による最高温度差が大きくなる傾向を示した。これは、模擬柱部材の断面が比較的マッシュであるため、模擬柱部材中央部が断熱状態となり、季節による練上がり温度の高低が、最高温度に差を生じさせたものだと考えられる。これに対し、外周部では、水セメント比の多少よりも、周辺の温度影響を受けやすい傾向を示した。従って、比較的マッシュな模擬柱部材内部における最高温度は、中央部では、単位セメント量と練上がり温度の影響を受け、外周部では、単位セ

表 - 6 模擬柱部材内部温度測定結果

調合	時期	測定箇所	練上り 温度 (°C)	最高温度 (°C)		最高温度到達 時間 (h:m)		平均外気温 (°C)			平均水温 (°C)	
				常温	水中浸せき	常温	水中浸せき	72h	7日	28日		
				72h	7日	28日	72h					
N-27	夏期	中央部	31.5	93.8	92.7	15:00	15:00	28.2	27.1	29.8	30.4	
			標準期	23.0	81.9	80.3	16:30	16:10	16.3	16.4	13.6	17.8
	冬期	中央部	19.0	68.4	70.2	19:20	18:30	4.8	5.2	6.0	4.8	
			標準期	23.0	52.0	53.8	17:50	15:30	16.3	16.4	13.6	17.8
	N-35	夏期	中央部	31.5	77.4	80.9	12:00	13:00	28.2	27.1	29.8	30.4
				標準期	23.0	52.0	53.8	17:50	15:30	16.3	16.4	13.6
冬期		中央部	19.0	45.7	50.3	16:30	16:00	4.8	5.2	6.0	4.8	
			標準期	23.0	66.6	65.9	18:00	17:20	16.3	16.4	13.6	17.8
N-40		夏期	中央部	28.0	79.5	78.0	17:30	19:00	28.2	27.1	29.8	30.4
				標準期	23.0	66.6	65.9	18:00	17:20	16.3	16.4	13.6
	冬期	中央部	16.0	55.7	56.7	28:40	22:00	4.8	5.2	6.0	4.8	
			標準期	23.0	50.7	45.6	18:50	14:50	16.3	16.4	13.6	17.8
	N-48	夏期	中央部	31.5	75.5	74.8	17:00	19:00	24.6	27.3	29.8	31.0
				標準期	20.5	55.3	53.4	21:30	19:00	15.5	15.6	13.1
冬期		中央部	14.0	40.6	41.3	25:50	28:10	4.4	5.0	6.1	4.5	
			標準期	20.5	38.5	36.2	21:40	15:20	15.5	15.6	13.1	17.1

水中浸せき中の72時間の平均外気温および平均水温

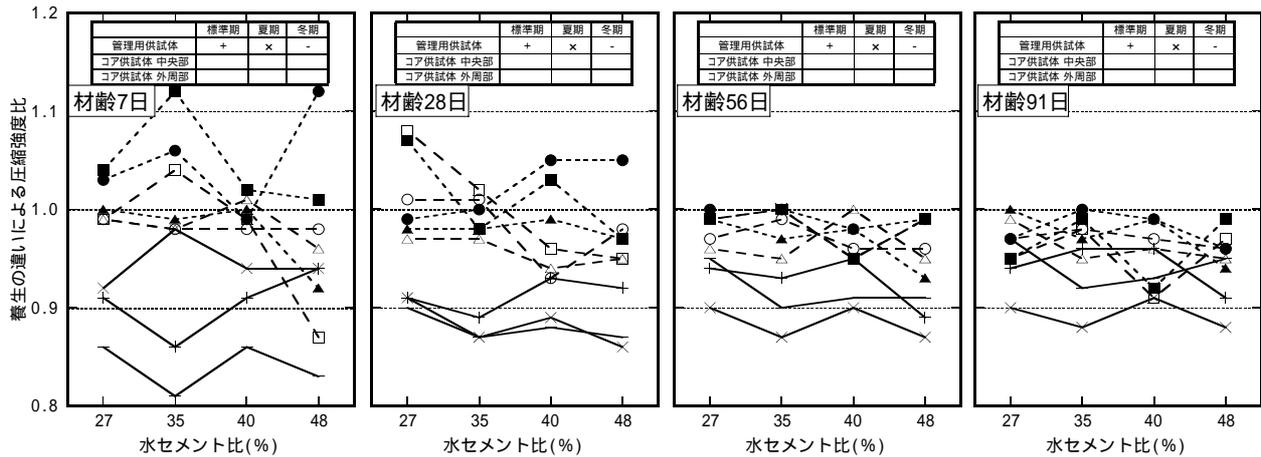


図 - 5 水セメント比と養生の違いによる圧縮強度比の関係

メント量と周辺温度の影響を受ける傾向を示した。

模擬柱部材の内部温度履歴を図 - 4 に示す。最高温度到達時間は、標準期の中央部より外周部で 10 分～1 時間 20 分遅れる傾向であった。冬期は、 $W/C=27\%$ 以外、中央部より外周部で、最高温度到達時間が早くなる傾向を示し、水セメント比が大きくなるにつれて顕著であった。夏期は、中央部よりも外周部で最高温度到達時間が 2～4 時間早くなる傾向を示した。これらの傾向から、模擬柱部材外周部のセメントの水和速度は、夏期において、模擬柱部材表面から外気を吸熱し、かつ、中央部からの吸熱により水和速度が速まり、冬期においては、模擬柱部材表面から放熱より中央部からの吸熱速度が上回ることで、水和速度を速めたものと思われる。

養生方法の違いによる温度履歴は、標準期および夏期において、各水セメント比の中央部および外周部は、常温養生と初期水中浸せき養生の最高温度に差異がほとんど認められなかった。しかし、冬期は、初期水中浸せき養生の方が最高温度が高い傾向を示し、また、水セメント比が大きくなるにつれて最高温度の差が大きくなる傾向を示し、それは、中央部よりも外周部の方が顕著であった。これは、図 - 2 の型枠存知期間に示したように、夏期の場合、模擬柱部材を水槽に投入したのが打設後 24 時間であったが、標準期の場合は打設後 16 時間であった。冬期の場合、 $W/C=27\%$ および 35% において、打設後 16 時間であったが、 $W/C=40\%$ および 48% においては、打設後 39 時間とした。これらの型枠存知期間の条件により、夏期の場合、水中浸せき養生する以前に内部温度が最高温度に到達してしまっただと考えられ、標準期の場合、内部温度が最高温度に到達するまでの時間が、同時期に近かったことによるものと考えられる。これに対し、冬期の場合には、 $W/C=40\%$ および 48% において、平均外気温が 5 程度と低く、十分な硬化に至らず脱型できなかったため、39 時間とした。また、冬期の場合には、初期水中浸せき養生期間中の外気温と水温の差はあまり見られなく、水温の変動は外気温に

比べて小さかったことが、初期水中浸せき養生期間中の保温性・保湿性を高めたこと、また、外気温に比べ水温の変動が小さかったことから、模擬柱部材表面からの放熱が小さくなり、最高温度を高めたものと考えられる。さらに、初期水中浸せき養生の場合、模擬柱部材表面からの放熱が小さくなることで中央部からの吸熱が抑制され、中央部と外周部での最高温度の差が、常温養生に比べ大きくなったものと思われる。

3.3 圧縮強度

(1) 強度発現性

水セメント比と養生方法の違いによる圧縮強度比（以降：強度比と称す）の関係を図 - 5 に示す。管理用供試体においては、部材と同じ養生供試体圧縮強度から標準養生供試体圧縮強度を除いたもの、コア供試体においては、それぞれの採取位置による常温養生コア供試体強度から初期水中浸せき養生コア供試体強度を除いたものである。

管理用供試体の各材齢における強度比は、1.00 以下（標準養生の強度が大きい）であった。また、材齢 7 日の強度比は、夏期 > 標準期 > 冬期の傾向を示し、標準期および夏期は、水セメント比が大きくなるに従って強度比が 1.00 に近づく（標準養生供試体との強度差が小さくなる）傾向を示した。これに対し、材齢 91 日における強度比は、冬期 標準期 > 夏期となり、かつ、水セメント比の違いによる強度比に差異がほとんど認められなかった。

季節による強度比は、標準期の各材齢においてほとんど差異は見られない。しかし、夏期において、材齢の進行に伴い小さくなる傾向を示したが、 $W/C=27\%$ において、各材齢における強度比に差異が認められず、ほぼ一定の結果となった。これに対し、冬期において、材齢の進行に伴い強度比が大きくなる傾向を示し、特に $W/C=27\%$ においては、強度比が大きくなる傾向が顕著であった。

これらの結果から、部材と同じ養生を行った管理用供試体は、気温の変化によって強度発現性が異なり、水セメ

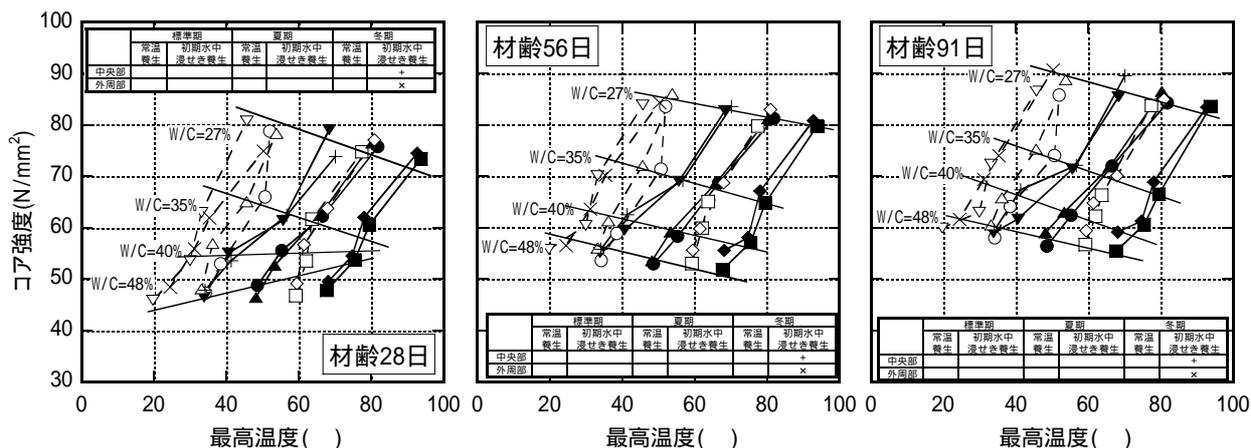


図 - 6 模擬柱部材における採取位置の最高温度とコア強度の関係

ント比の小さい比較的高強度域のコンクリートにおいて、気温が高い場合、単位セメント量増加に伴う温度影響を供試体レベルでも受け、長期強度増進を停滞させる可能性がある。これに対し、気温が低い場合、単位セメント量増加に伴う水和熱上昇より、供試体表面からの放熱が上回り、供試体内部の温度上昇が抑制されたため、強度が増進したものと考えられ、単位セメント量が同一であっても、季節により熱境界条件が異なると考えられる。

コア供試体の各材齢における強度比は、材齢7日の中央部において、強度比が概ね1.00以上（常温養生コア > 初期水中浸せき養生コア）であるが、外周部においては概ね1.00程度またはそれ以下であった。材齢28日においては、W/C=40%および48%の比較的水セメント比大きい領域の標準期および冬期において、中央部で強度比1.00以上、外周部で1.00以下を示し、以降、材齢の進行に伴い、強度比は1.00以下となり、常温養生コア供試体に対し、初期水中浸せき養生コア供試体の強度が大きくなる傾向を示した。

季節による強度比は、W/C=48%を除く夏期の材齢7日において中央部・外周部共に強度比1.00程度と、常温養生と初期水中浸せき養生で差異が認められず、材齢の進行に伴い強度比が小さくなる傾向を示した。W/C=48%で、全材齢において中央部・外周部共に強度比が0.95前後と、初期水中浸せき養生が常温養生を上回る結果であった。これに対し、標準期の材齢7日および28日は、中央部および外周部において、一部を除き強度比1.00以上と、常温養生コア強度が大きくなる傾向を示し、材齢56日および91日は、各水セメント比水準において外周部の強度比が小さくなる傾向が見られた。しかし、中央部は、W/C=27%・35%および40%において強度比1.00程度、W/C=48%において、強度比が小さくなる傾向を示した。この結果は、冬期においてもほぼ同様の傾向となった。

これらの結果から、柱模擬部材より採取したコア供試体の強度発現性への影響は、水セメント比の差異で熱境

界条件が異なること、さらに、比較的水セメント比が大きい場合および季節により、部材内部で熱境界条件が異なると考えられる。また、初期水中浸せき養生は、水セメント比の小さい高強度コンクリートの場合、養生温度の影響が大きいことから、周辺温度の影響をほとんど受けず、かつ、セメントペースト量が多く、部材表面が密実になっている可能性があるために、湿潤養生が強度発現に寄与していない可能性がある。

(2) 最高温度の関係

模擬柱部材における採取位置の最高温度とコア強度の関係を図-6に示す。常温養生コア供試体および初期水中浸せきコア供試体の材齢91日において、最高温度の高いW/C=27%および35%で、中央部および外周部共、材齢の進行に伴う強度増進が停滞する傾向となった。これに対し、W/C=40%および48%は、材齢28日で、各養生の中央部および外周部において、強度差があまり認められなかったが、材齢91日で、初期水中浸せき養生した部材の外周部で強度増進傾向が認められ、特に冬期において顕著であった。また、最高温度が約65℃を超えるコンクリートの場合、材齢28日以降の強度増進が停滞する傾向が見られ、概ね外周部より中央部において顕著であった。

これらの結果から、模擬柱部材より採取したコア供試体の強度発現性は、季節による打込み温度の高低、および、水セメント比で熱境界条件が異なるため、受ける高温履歴の差異が強度発現性に影響し、比較的水セメント比の小さいコンクリート程、長期強度が停滞するものと考えられる。また、初期水中浸せき養生した模擬柱部材は、常温養生に対し、比較的水セメント比の大きいコンクリートにおいて、外周部コアの強度が増進したことから、マッシュな断面の部材を水中浸せき養生する場合、水分供給の境界条件が異なるものと思われ、部材中央部および低水セメント比における外周部においては、封かん養生になり、水セメント比が高い場合における外周部では、湿潤養生になるものと思われる。

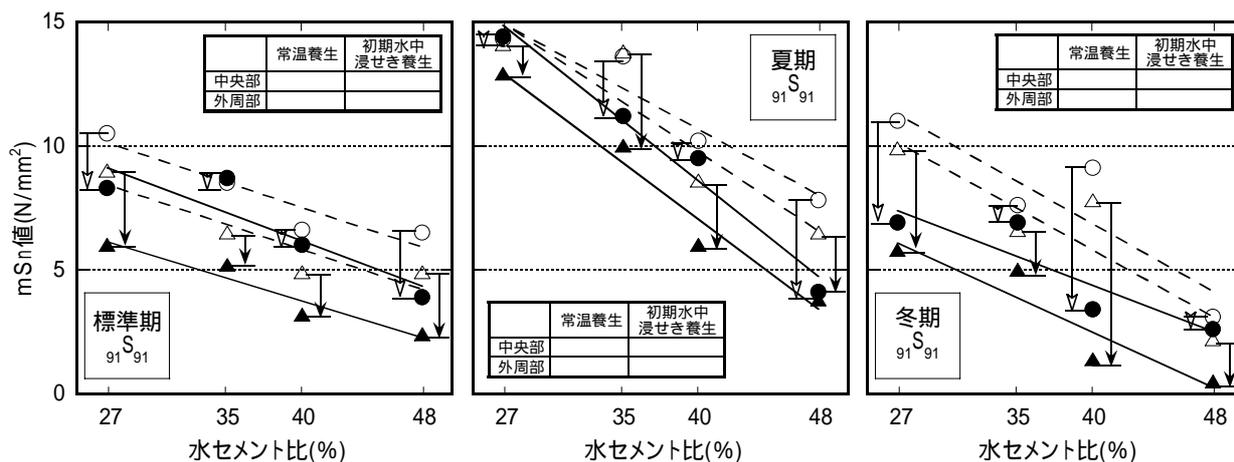


図 - 7 水セメント比と $_{91}S_{91}$ 値の関係

(3) 水中浸せきがS値に及ぼす影響

水セメント比と $_{91}S_{91}$ 値の関係を図-7に示す。図中の矢印は、水セメント比に、養生方法と採取位置ごとの $_{91}S_{91}$ 値の差を示したものである。標準期では、常温養生した場合、水セメント比による $_{91}S_{91}$ 値の相違は、ほとんど認められなかった。これに対し、初期水中浸せき養生した $_{91}S_{91}$ 値は、水セメント比が大きくなるに従い小さくなる傾向を示した。このことから、比較的水セメント比の大きいコンクリートにおいて初期水中浸せき養生は、常温養生に対し、材齢の進行に伴い管理用標準養生供試体強度とコア供試体強度との強度差を小さくできる可能性を示唆しており、夏期においても同様の傾向を示した。

冬期では、常温養生した場合、水セメント比による $_{91}S_{91}$ 値の相違は、ほとんどみられなかった。これに対し、初期水中浸せき養生した $_{91}S_{91}$ 値は、水セメント比40%を境に大きくなるに従い、大きくなる傾向を示した。この理由として、冬期における模擬柱部材の脱型が、W/C=40%および48%において、部材吊上げのための脱型時強度を確保できなかったため39時間要したこと、また、冬期において、温度の低い養生水を部材外周部に供給したことによって、セメントの水和反応を遅延したことが、初期水中浸せきに影響を及ぼしたのだと考えられる。従って初期水中浸せき養生は、最高温度に到達するまでに行うことで、水セメント比が比較的大きいものにおいて湿潤養生による効果が期待できる可能性がある。

4. まとめ

本報告において、養生方法の違いが管理用供試体および模擬柱部材の強度発現性に及ぼす影響について検討を行い以下の知見を得た。

- (1) 部材と同じ養生を行った管理用供試体において、比較的水セメント比が小さく、かつ、外気温が高い場合、供

試体レベルにおいても温度影響を受け、長期強度発現を停滞させる可能性がある。

- (2) マッシブな断面を有する模擬柱部材においては、材齢初期において水和熱による強度発現を期待できるが、材齢の進行に伴い、初期高温履歴を受けた影響で強度発現が停滞するが、その停滞の度合いは、水セメント比ならびに季節により熱境界条件が異なるため、強度発現性に差異がある。
- (3) 模擬柱部材の初期水中浸せき養生は、水セメント比の違いにより、外部からの水分供給の境界条件が異なる傾向を示し、比較的低水セメント比域において、湿潤養生効果はあまり期待できない。

謝辞

本実験を行うにあたり、日本大学理工学部非常勤講師清水五郎博士より貴重な助言を頂きました。また、フジミ工研の社員の方々、前日本大学理工学部建築学科中田研究室の熊本直輝君および学生、ならびに、ものづくり大学澤本研究室の学生より多大な協力を得ました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (社)日本建築学会, 2003.2
- 2) 日本建築学会標準仕様書・同解説 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事 (社)日本建築学会, 2003.2
- 3) 杉山央, 梶田佳寛: 初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性, 日本建築学会構造系論文集, No.515, pp.23-20, 1999.1
- 4) 高強度コンクリート施工指針(案)・同解説 (社)日本建築学会, pp.226-227, 2005.2
- 5) A.M.Neville: ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版, 2004.6