

各種セメントを用いた 暑中コンクリートの諸性質に関する研究 ～環境温度と強度発現性について～

(社)セメント協会 コンクリート専門委員会*

1. はじめに

土木学会「コンクリート標準示方書 施工編」および日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5」には、暑中コンクリートの打込みまたは荷卸し時のコンクリート温度を35℃以下とすることが記載されている^{1, 2)}。生コン工場では打込みまたは荷卸し時のコンクリート温度が35℃を超えないようにさまざまな対策を講じている。しかし、近年、夏期の気温が高く、日平均気温が25℃以上の期間および日数が増えており³⁾、練上りから荷卸しまでのコンクリートの温度上昇に伴い、コンクリート温度が35℃を超えることが避けられない事態が想定される。

そこで、本委員会では、今後の留意すべき暑中コンクリート対策のための基礎データを収集することを目的に、温度が35℃を超えるコンクリートの各種性状に関する実験を行った。

本稿は、2012年6月に刊行したコンクリート専門

*【委員長】中山英明(三菱マテリアル(株)) 【委員】小倉 束(日鐵セメント(株))、加藤弘義(株)トクヤマ、田中敏嗣(太平洋セメント(株))、大和功一郎(宇部興産(株))、川原正秀(電気化学工業(株))、大塚勇介(新日鐵高炉セメント(株))、草野昌夫(住友大阪セメント(株))
【事務局】佐藤智泰、小林幸一、島崎 泰、泉尾英文((社)セメント協会)
A STUDY ON HOT WEATHER CONCRETE USING VARIOUS CEMENTS (by TECHNICAL COMMITTEE ON CONCRETE/ JCA)

委員会報告F-57⁴⁾から環境温度と強度発現性に関する結果を抜粋して要約したものである。

2. 実験概要

2-1. 実験条件

実験は、表1に示した4種類のセメント(以下、略称で表記)を用い、水セメント比(以下、W/Cと略)および環境温度をそれぞれ3水準に変化させた条件のコンクリートを用いて圧縮強度試験を実施し、検討した。これらの実験条件を表2に示す。

表1 セメントの種類

系	セメントの種類	略称
ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	N
	中庸熱ポルトランドセメント	M
	低熱ポルトランドセメント	L
混合セメント	高炉セメントB種	BB

表2 実験条件

W/C(%)	環境温度(℃)	セメントの種類			
		N	M	L	BB
52.0	20	○	○	○	○
	30	○	○	○	○
	40	○	○	○	○
43.0	20	○	○	○	○
	30	○	○	○	○
	40	○	○	○	○
33.3	20	○	○	○	
	30	○	○	○	
	40	○	○	○	

表3 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

W/C (%)	環境温度 (°C)	セメントの種類	細骨材率 (%)	単位量							フレッシュ性状		
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤または高性能AE減水剤 ^{※1}	AE剤	空気量調整剤	スランブまたはスランブフロー ^{※2※3}	空気量 ^{※4}	練上り温度 (°C)
				(kg/m ³)				(ml/m ³)			(cm)	(%)	(°C)
52.0	20	N	47.0	170	327	848	953	818	9	-	18.5	4.6	22.0
		M	47.0	169	325	852	957	813	10	-	18.5	4.5	20.7
		L	47.0	169	325	853	959	813	10	-	19.5	4.3	21.9
		BB	47.0	170	327	842	946	818	10	-	17.0	4.5	21.2
	30	N	47.0	175	337	839	942	843	9	-	18.5	4.6	30.0
		M	47.0	169	325	853	958	813	23	-	19.5	5.0	31.1
		L	47.0	169	325	854	959	813	46	-	19.5	4.7	30.6
		BB	47.0	172	331	839	943	828	20	-	19.5	4.1	30.9
	40	N	47.0	175	337	839	942	843	35	-	18.5	4.8	39.1
		M	47.0	169	325	853	958	813	36	-	18.5	5.0	38.8
		L	47.0	169	325	854	959	813	59	-	20.5	4.1	39.2
		BB	47.0	172	331	839	943	828	31	-	19.5	4.1	39.0
43.0	20	N	45.0	178	414	769	937	1035	11	-	18.5	4.3	22.4
		M	45.0	174	405	780	950	1013	19	-	18.0	4.9	22.1
		L	45.0	174	405	781	952	1013	28	-	18.5	4.6	22.1
		BB	45.0	178	414	762	929	1035	15	-	19.5	4.5	21.3
	30	N	45.0	183	426	760	925	1065	14	-	18.0	4.8	31.1
		M	45.0	177	412	775	943	1030	40	-	18.5	4.1	30.9
		L	45.0	177	412	776	945	1030	62	-	19.0	4.1	30.9
		BB	45.0	180	419	759	925	1048	28	-	19.0	4.5	30.5
	40	N	44.0	197	458	715	906	1145	64	-	19.0	5.0	38.7
		M	44.0	197	458	717	910	1145	65	-	19.5	4.0	38.5
		L	45.0	177	412	776	945	1030	75	-	19.0	4.7	38.1
		BB	44.0	200	465	701	889	1163	62	-	20.0	3.7	37.8
33.3	20	N	49.0	168	504	835	865	(8064)	-	38	(64.0×62.0)	1.4	22.1
		M	49.0	168	504	837	869	(6552)	-	38	(68.0×66.0)	1.2	21.2
		L	49.0	168	504	839	871	(5544)	-	38	(54.0×53.0)	0.9	21.9
	30	N	49.0	173	520	821	852	(8060)	-	39	(59.0×57.0)	0.9	31.3
		M	49.0	168	505	837	868	(6616)	-	38	(66.0×66.5)	1.0	30.9
		L	49.0	168	505	839	870	(5909)	-	38	(67.0×67.0)	0.7	31.0
	40	N	49.0	173	520	821	852	(7280)	-	39	(66.0×64.5)	0.7	38.7
		M	49.0	168	505	837	868	(5606)	-	38	(65.5×63.5)	0.8	37.6
L	49.0	168	505	839	870	(5808)	-	38	(64.5×62.5)	1.4	38.2		

備考 ※1 ()内は高性能AE減水剤の単位量を指す。

※2 ()内はスランブフローを指す。

※3 W/C52.0および43.0%は目標スランブを18±2.5cmとし、W/C33.3%は目標スランブフローを60±7.5cmとした。

※4 W/C52.0および43.0%は目標空気量を4.5±1.0%とし、W/C33.3%は目標空気量を3.0%以下とした。

2-2. 使用材料

2-2-1. セメント

セメントは、JIS R 5210(ポルトランドセメント)およびJIS R 5211(高炉セメント)の品質値を満足する、市販のN, M, LおよびBBの4種類を使用した。

2-2-2. 骨材

骨材は、JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)附属書A(規定)の粒度および品質値を満足する、東京都青梅市産の硬質砂岩砕石(最大寸法20mm, 表乾密度2.64g/cm³, 吸水率0.82%, 粗粒

率6.60)を粗骨材に、千葉県君津産の山砂(表乾密度2.65g/cm³, 吸水率1.37%, 粗粒率2.77)を細骨材に使用した。

2-2-3. 混和剤

混和剤は、AE減水剤に標準形(I種)および遅延形(I種)を、高性能AE減水剤に標準形(I種)および遅延形(I種)を使用した。環境温度20℃では標準形を、30および40℃では遅延形を使用した。また、AE減水剤を使用したコンクリートにはAE剤(I種)で、高性能AE減水剤を使用したコンクリートには空気量調整剤で空気量を調整した。

2-3. コンクリートの配合およびフレッシュ性状

コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表3に示す。コンクリートの配合は、W/Cを52.0, 43.0および33.3%の3水準とし、目標スランプまたは目標スランプフローが得られるように、W/Cが52.0および43.0%の配合では単位水量で、W/Cが33.3%の配合では高性能AE減水剤の使用量で調整した。なお、AE減水剤の使用量は単位セメント量に対する0.25%の容量一定とし、高性能AE減水剤の使用量は環境温度やセメントの種類に応じて適宜、変化させた。

2-4. コンクリートの練混ぜおよび成形

コンクリートの練混ぜおよび成形は、JIS A 1132(コンクリート強度試験用供試体の作り方)およびJIS A 1138(試験室におけるコンクリートの作り方)に準じて行った。使用する材料は、成形日の前日に20±2および30±2, 40±2℃で管理した各環境温度内で保存し、各材料が各環境温度に対して±2℃の範囲内であることを確認してコンクリートを成形した。

ミキサは、パン型強制練りミキサ(公称容量55ℓ)を使用し、W/C52.0および43.0%の配合は材料投入

表4 圧縮強度の試験条件

W/C (%)	環境温度 (℃)	セメントの種類	標準水中養生 ^{※1} の材齢			簡易断熱養生条件 ^{※2}
			7日	28日	91日	
52.0	20	N	○	○		
		M	○	○		
		L	○	○	○	
		BB	○	○		
	30	N	○	○		
		M	○	○		
		L	○	○	○	
		BB	○	○		
	40	N	○	○		
		M	○	○		
		L	○	○	○	
		BB	○	○		
43.0	20	N	○	○	○	
		M	○	○	○	
		L	○	○	○	
		BB	○	○	○	
	30	N	○	○	○	○
		M	○	○	○	○
		L	○	○	○	○
		BB	○	○	○	○
	40	N	○	○	○	○
		M	○	○	○	○
		L	○	○	○	○
		BB	○	○	○	○
33.3	20	N	○	○		
		M	○	○		
		L	○	○	○	
	30	N	○	○	○	
		M	○	○	○	
		L	○	○	○	
	40	N	○	○	○	
		M	○	○	○	
		L	○	○	○	

※1 練上り温度と同一環境温度に保管し、翌日(材齢1日)に脱型した後、標準水中養生した。

※2 簡易断熱養生における試験材齢は7, 28, 56, 91日とした。

後、2分間練混ぜて排出した。W/C33.3%の配合は材料投入後、2分間練混ぜ、ミキサ内で5分間静置させた後、再度30秒間練混ぜて排出した。

2-5. 圧縮強度の試験条件

圧縮強度は、供試体の寸法をφ10×20cmの円柱供試体とし、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度

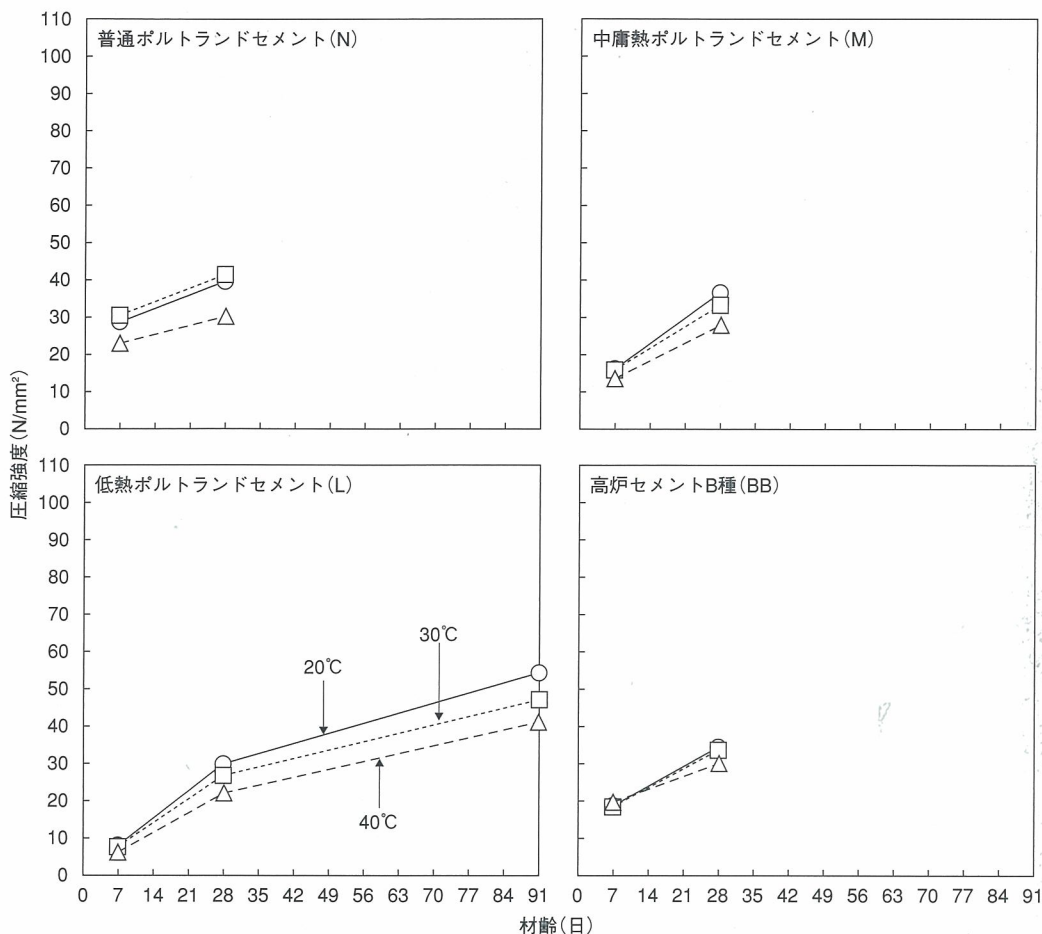


図1 圧縮強度(W/C52.0%)

試験方法)に準拠して行った。

供試体は作製後、上面をビニールで密封して各温度環境下に翌日まで保管した後に脱型し、所定の材齢まで標準水中養生(20±2°C)して圧縮試験に供した。

「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5」では、セメントの種類に関わらず、特記がない場合の暑中期間における構造体強度補正值 S_{28} の標準値を6 N/mm²としている²⁾。そこで、各種セメントを使用したコンクリートのS値を把握するため、W/C43.0%の配合で、環境温度を30、40°Cで簡易断熱養生した圧縮強度を測定した。供試体は簡易断熱養生箱に静置し、それぞれの環境下に約7日間保管した後、供試体を取り出し、20±2°Cの環境下で所定の材齢まで封かん養生して圧縮試験に供した。以後、簡易断

熱養生による構造体強度補正值をS'と表記する。実施した圧縮強度の試験条件を表4に示す。

3. 試験結果および考察

3-1. 標準水中養生

3-1-1. 圧縮強度発現性

標準水中養生したW/C52.0, 43.0および33.3%の圧縮強度を図1~3に示す。

環境温度30°Cでは20°Cと比較するとセメントの種類やW/Cに関わらず、圧縮強度の差は小さかった。しかし、環境温度40°Cでは総じて圧縮強度が低くなる傾向を示した。

材齢7日では、Nは環境温度30°Cに比べて40°Cの方が、圧縮強度はW/C52.0%で7.4N/mm²、W/C43.0%で5.5N/mm²、W/C33.3%で6.5N/mm²低かった。

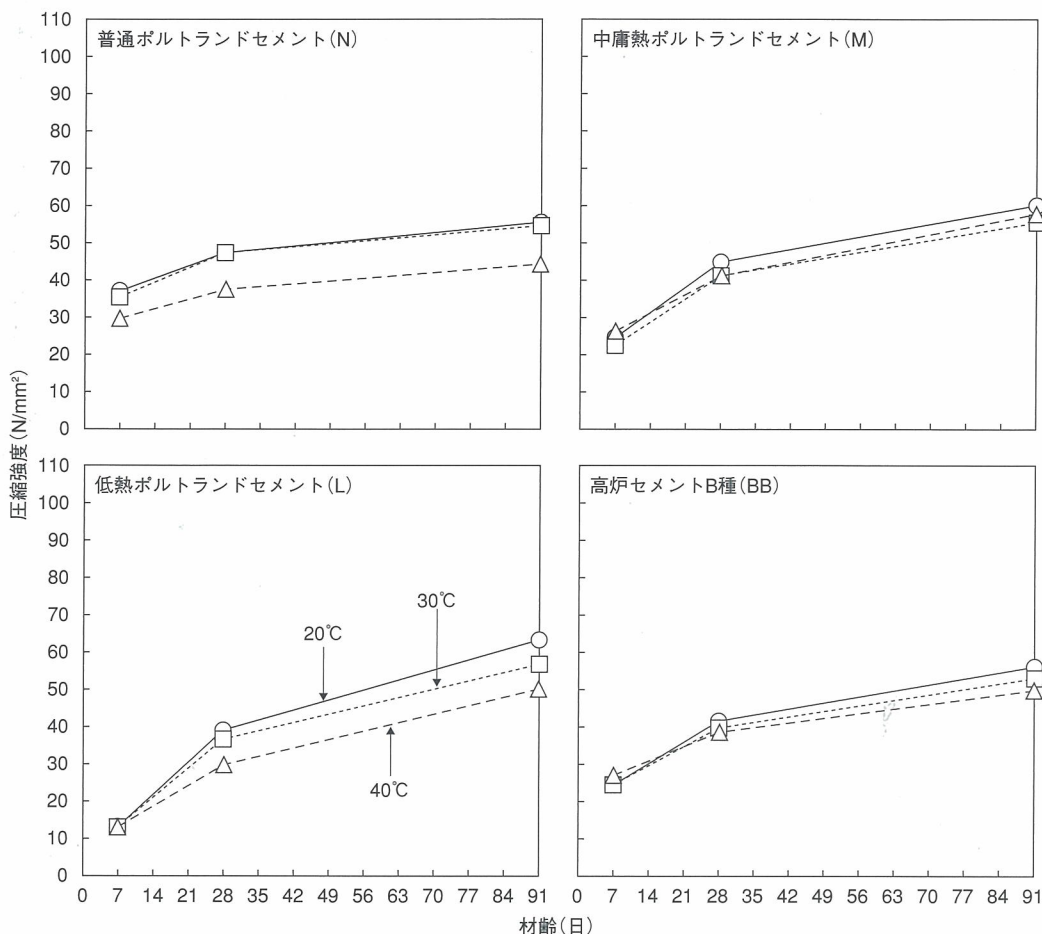


図2 圧縮強度(W/C43.0%)

一方、M、LおよびBBは環境温度30と40℃の圧縮強度がほぼ同等となった。

材齢28日では、Nは環境温度30℃に比べて40℃の方が、圧縮強度はW/C52.0%で11.0N/mm²、W/C43.0%で9.7N/mm²、W/C33.3%で6.0N/mm²低くなり、W/C52.0および43.0%で材齢7日より環境温度の影響が大きくなった。M、LおよびBBは材齢7日で環境温度の影響は小さかったが、材齢28日ではセメントの種類やW/Cで傾向が異なるが、圧縮強度は低くなる傾向を示した。Mで3.8~8.5N/mm²、Lで6.3~9.0N/mm²、BBはW/C52.0、43.0%の二つの配合条件に限られるが3.4~3.9N/mm²低くなり、全てのセメントの種類で材齢7日に比べて材齢28日の方が環境温度の影響を受けた。

材齢91日では、環境温度30℃に比べて40℃の方が、

全てのセメントの種類、W/Cにおいても材齢28日より圧縮強度の差が大きくなる傾向を示し、材齢28日から91日にかけての圧縮強度増進が鈍化した結果となった。

松藤ら⁵⁾はNを使用したW/C57%のコンクリートを用いて、また、關ら⁶⁾はNおよびM、Lを使用したW/C39.5%のコンクリートを用いて、打込みから脱型までの環境温度を変え、環境温度が強度発現性に与える影響を評価している。これらによると、長期強度に最も影響を及ぼすのは打込みから脱型までの環境温度であり、材齢が長期になるに伴い、また、強度発現の早いセメントほど強度が低くなることが示されており、今回得られた結果はこれらの既往の結果と同様の傾向を示している。

また、練上り温度、環境温度により強度発現性が

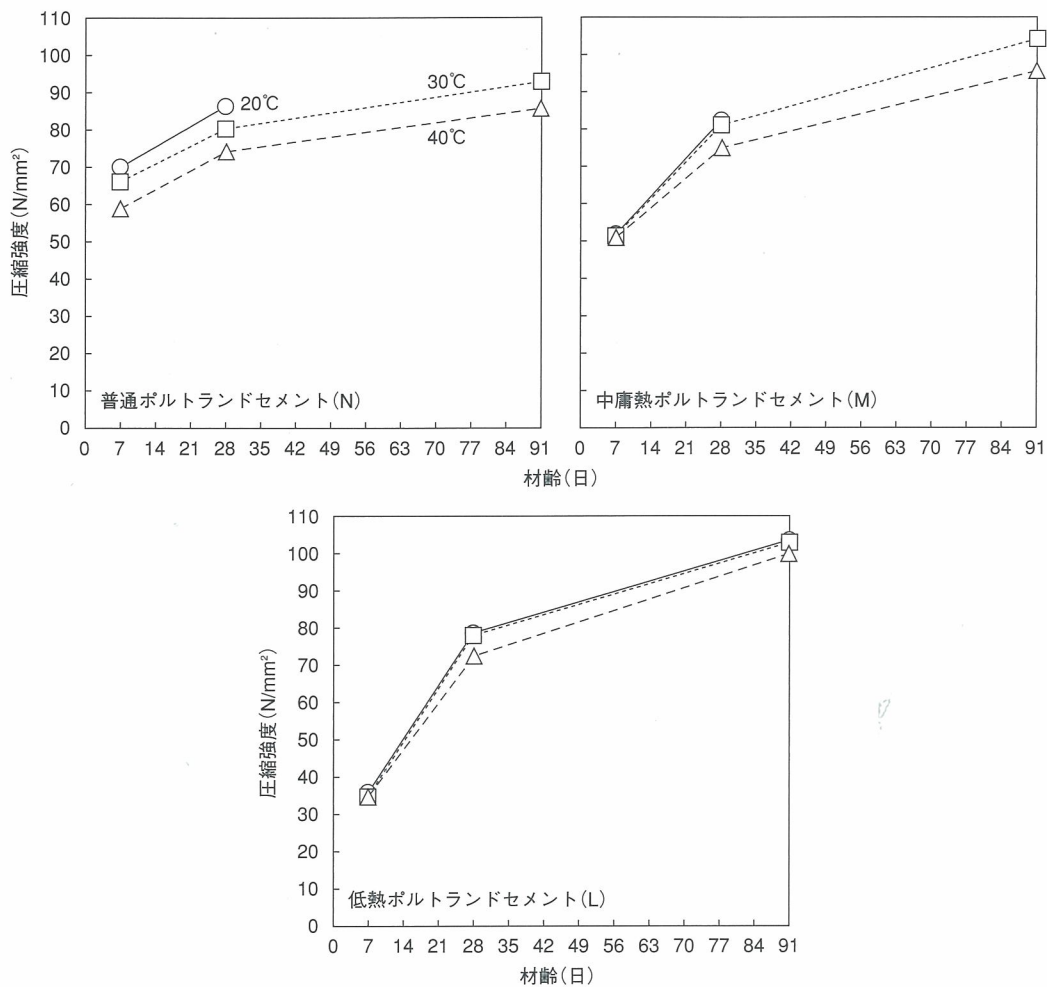


図3 圧縮強度(W/C33.3%)

低下する原因について、地濃ら^{7,8)}は超早強、早強、NおよびMのポルトランドセメントを使用し、久我ら⁹⁾はNおよびBBを用いて、高温履歴を受けたセメントペーストの水和反応や細孔組織等について実験を行っている。これらによると、材齢24時間までの初期養生で高温で養生された場合、セメントペースト硬化体は、材齢24時間で総細孔量は小さくなるものの、その後養生において、初期に形成された粗大な空隙が埋まらずに長期にわたり残存するため、強度発現性が鈍化するとしている。

3-1-2. C/Wと圧縮強度の関係

材齢28日のC/Wと圧縮強度を図4に示す。N、MおよびLについては、環境温度ごとに近似式を求めた。C/Wと圧縮強度の相関係数は全ての近似式で

0.97以上であり、高い相関性が認められた。

セメントの種類に関わらず、環境温度20と30°Cでは、C/Wと圧縮強度の関係はほぼ同等であるが、環境温度40°Cでは、N、MおよびLは20°Cのものに比べ圧縮強度が低くなっている。BBは環境温度に関わらず、C/Wと圧縮強度の関係はあまり変わらず、本実験の範囲では、今回使用した4種類のセメントの中で最も温度の影響が小さかった。

N、MおよびLにおいて、図中の近似式を用いて、環境温度20と40°Cの材齢28日における圧縮強度の差がどの程度のW/Cに相当するかを推定した。

その結果、Nの場合、環境温度20°CにおけるW/C52.0%と同一の圧縮強度が得られる環境温度40°CでのW/Cは47.0%となり、その差は5.0%であった。

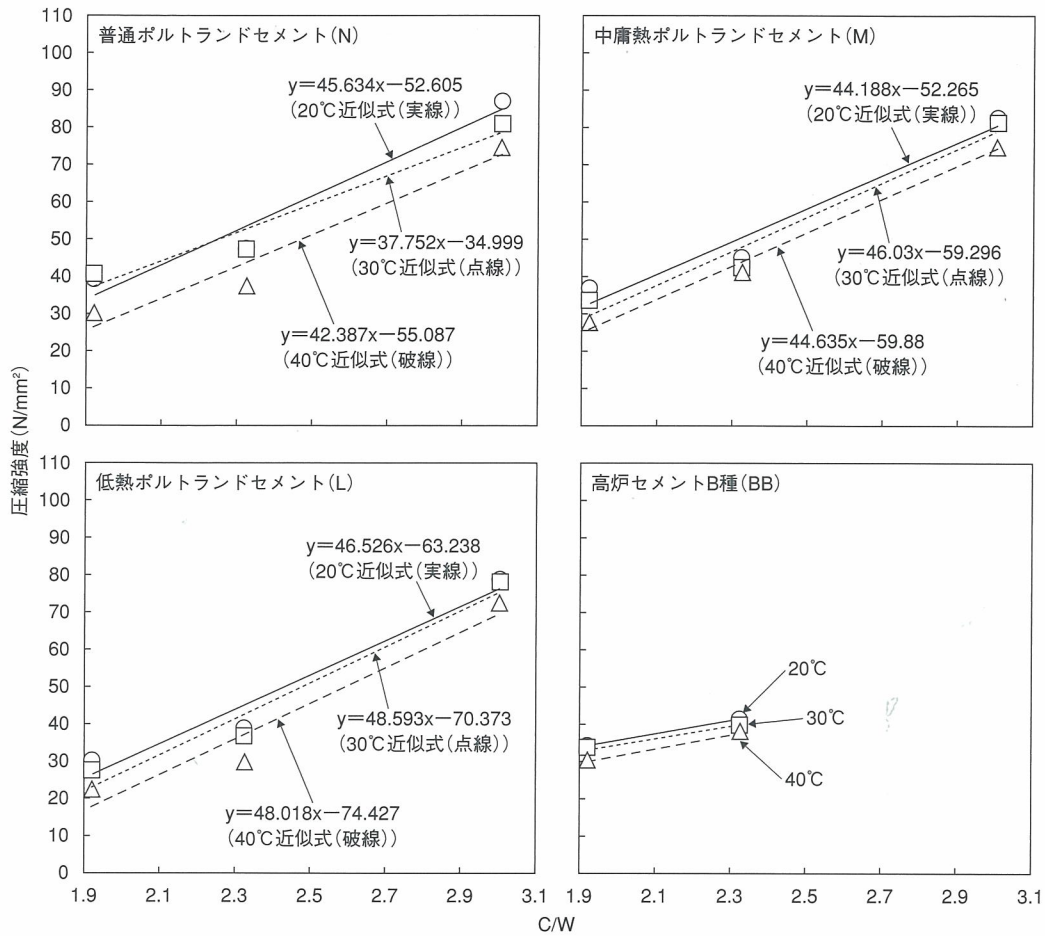


図4 C/Wと圧縮強度(材齢28日)

同様にW/C33.3%では30.4%となり、その差は2.9%であった。同様にMおよびLでも推定した結果、環境温度40°Cの場合、Mは1.5~3.8%の範囲で、Lは1.5~4.3%の範囲でW/Cを低減すれば、20°Cの場合と同等の圧縮強度を得られることが計算で示された。

3-2. 簡易断熱養生

3-2-1. 圧縮強度発現性

簡易断熱養生したW/C43.0%の圧縮強度を図5に示す。簡易断熱養生によるコンクリートの圧縮強度発現は、標準水中養生と比較して材齢7日で高い値を示したものの、それ以降の材齢で停滞する傾向が認められ、既往の研究^{10, 11)}と同様の傾向となった。

圧縮強度は、環境温度30°Cでは材齢7日を除く材齢でL>M>N>BBの順で、環境温度40°Cでは全て

の材齢でおおむねM>L>BB>Nの順となり、強度発現性が遅いMおよびLが圧縮強度は高くなる傾向となった。また、環境温度30と40°Cの圧縮強度の差はセメントの種類によって異なり、材齢の経過とともに大きくなる傾向を示した。この差をセメントの種類で見ると、N>L>M≒BBの順となり、標準水中養生の結果と同様の傾向であった。

最も差が大きかった環境温度40°CにおけるNの圧縮強度は、測定開始材齢である7日から低めに推移し、環境温度30°Cと比較して材齢7日で6.8N/mm²、材齢28日で8.6N/mm²、材齢56日で11.2N/mm²、材齢91日で9.7N/mm²低くなった。Lは材齢28日までは環境温度の違いによる影響はほとんど見られないものの、材齢28日以降から圧縮強度に差が見受けられ、環境温度40°Cでの材齢91日の圧縮強度は、環境

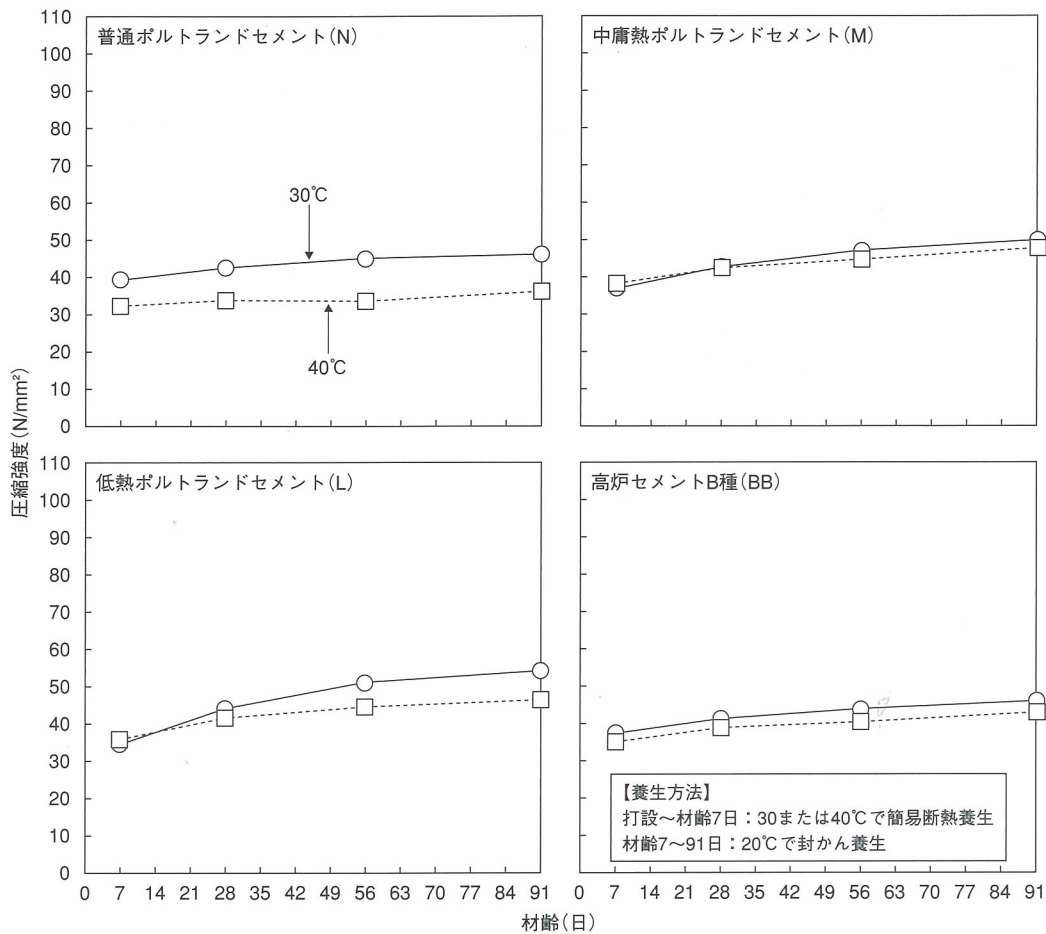


図5 環境温度30と40℃で簡易断熱養生した圧縮強度(W/C43.0%)

温度30℃に比べ7.5N/mm²低くなった。MおよびBBは、環境温度30と40℃の圧縮強度の差はわずかな値で推移した。

セメントの種類によって簡易断熱養生した圧縮強度の発現性が異なった一因として、環境温度と温度履歴が関係しているものと推測され、それらの温度が高くなると材齢の経過とともに圧縮強度が低めに推移すると考えられる。

3-2-2. 構造体補正強度

環境温度30および40℃における各種セメントを使用したコンクリートの標準水中養生の材齢28日での圧縮強度と簡易断熱養生の材齢91日での圧縮強度の差($S'_{28'91}$)を算出した。結果を図6に示す。

3-2-1.で述べたように、全てのセメントの種類で環境温度が30から40℃となると、簡易断熱養生

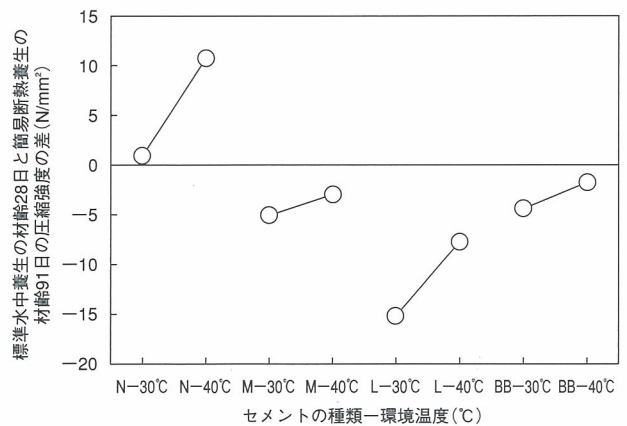


図6 標準水中養生の材齢28日と簡易断熱養生の材齢91日の圧縮強度の差(W/C43.0%)

における材齢91日の圧縮強度は低くなる。このため、 $S'_{28'91}$ は、Nは0.9から10.6N/mm²に、Mは-5.1から-2.9N/mm²に、Lは-15.2から-7.7N/mm²に、BBは-4.4から-1.6N/mm²となり、いずれも40℃の方

が大きくなった。

今回の試験では、環境温度40℃でNを用いたW/C43.0%のコンクリートの $_{28}S'_{91}$ は、JASS 5に記述されている特記がない場合の構造体強度補正值の標準値(6 N/mm²)よりも大きくなったが、M、LおよびBBの $_{28}S'_{91}$ はいずれも0となった。

以上の結果より、環境温度40℃では、30℃の場合に比べ、標準水中養生および簡易断熱養生のいずれでも、コンクリートの強度発現性に及ぼす影響が大きくなることおよびその影響はセメントの種類により異なることが明らかとなった。

4. まとめ

普通(N)、中庸熱(M)、低熱(L)および高炉B種(BB)の合計4種類のセメントを用い、W/Cおよび環境温度をそれぞれ3水準に変化させたコンクリートの諸性質に関して実験した。環境温度と強度発現性に関する結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 標準水中養生による強度発現性

① 環境温度が20および30℃では、セメントの種類やW/Cに関わらず、圧縮強度は同等となった。しかし、環境温度が40℃になると、圧縮強度の増進が小さくなり、Nは材齢7日以降、他のセメントは材齢28日以降で他の環境温度より圧縮強度が低くなった。

② 環境温度40℃で、環境温度が20℃のときの圧縮強度と同一圧縮強度を得られるW/Cを推定した。その結果、Nは2.9~5.0%、Mは1.5~3.8%、Lは1.5~4.3%の範囲でW/Cを低減すれば同程度の圧縮強度が得られることが計算で示された。

(2) 簡易断熱養生の強度発現性

① W/C43.0%の配合条件で、圧縮強度は、環境温度30℃では材齢7日を除く材齢でL>M>N>BBの順で、環境温度40℃では全ての材齢に

おいておおむねM>L>BB>Nの順となり、強度発現性が遅いMおよびLが圧縮強度は高くなる傾向であった。また、環境温度30℃と40℃の圧縮強度の差は、N>L>M≒BBの順となり、標準水中養生の結果と同様の傾向であった。環境温度40℃では、30℃のものに比べて、材齢91日の圧縮強度が、Nは9.7N/mm²、Lは7.5N/mm²低くなった。MおよびBBは、環境温度30℃と40℃の圧縮強度の差は相対的に小さかった。

② 環境温度40℃における構造体強度補正值 $_{28}S'_{91}$ は、Nが10.6N/mm²、M、LおよびBBが0 N/mm²となり、セメントの種類で異なることが明らかとなった。

[引用文献]

- (公社)土木学会/2007制定 コンクリート標準示方書 施工編, 2007年12月
- (一般社)日本建築学会/建築工事標準仕様書・同会説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009, 2009年1月
- 小山智幸, 小山田英弘, 伊藤是清/暑中コンクリートの現状と対策, コンクリート工学, Vol.50, No.3, pp.239~244, 2012年3月
- (社)セメント協会/各種セメントを用いた暑中コンクリートの諸性質に関する研究, コンクリート専門委員会F-57, 2012年6月
- 松藤泰典, 大久保孝昭, 原田志津男, Victor SAMPEBULU/暑中環境下で製造・施工されるコンクリートの強度性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.277~280, 1988年
- 關 裕司, 三本 敏, 女屋英明, 齊藤丈士/打込みから養生までの温度の違いが硬化コンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.527~532, 2010年
- 地濃茂雄, 川瀬清孝/暑中環境下コンクリートの凝結硬化・強度発現性状に関する考察, 自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム 論文集, JCI-C32, pp.1~8, 1993年5月
- 地濃茂雄, 仕入豊和/練混ぜ時および養生初期に高温下にあるコンクリートの長期強度増進性の改善方法に関する研究—初期の水和温度の制御からの検討—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第350号, pp.1~8, 昭和60年4月
- 久我龍一郎, 森 寛見, 鷗澤正美/初期高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末添加セメントの水和に及ぼす養生条件の影響, 材料, Vol.60, No.8, pp.693~700, 2011年
- 西田 朗, 橘 大介, 江原恭二, 熊谷仁志/高強度コンクリートの高層建築物への適用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.375~380, 1993年
- 西田 朗, 森田 武, 大田達見/暑中環境における高強度コンクリートの諸性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1111~1116, 2005年