

論文 各種セメントを用いたコンクリートの暑中期における強度発現に関する検討

中里 剛^{*1}・中山 英明^{*2}

要旨: 近年の猛暑では、荷卸し時のコンクリート温度が 35℃を超える可能性が高まっている。そこで、暑中期におけるセメント種類がコンクリートの強度発現性に与える影響について調査した。その結果、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いた設計基準強度 80N/mm²以下のコンクリートは、簡易断熱養生によって算出した構造体強度補正值($_{28}S_{91}$)が 0 となり、強度の割増しは不要となった。また、これらのコンクリートでは、初期に受ける温度履歴の最高温度が 85℃となっても、普通ポルトランドセメントより高い C₃S の反応性を維持し、緻密な硬化体組織を形成していることを確認した。

キーワード: コンクリート温度, 強度発現, 構造体強度補正值, 硬化体組織, 細孔径分布, 水和反応

1. はじめに

近年の気候変動に伴う気温の上昇で、夏期の気温が 35℃を超える猛暑を記録することも珍しくない。特に、首都圏ではヒートアイランド現象と相まって、生コンクリートの運搬時の温度上昇により、荷卸し時のコンクリート温度が 35℃を超えることが危惧されている。

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 2009(以下, JASS 5-2009)では、暑中コンクリートにおいて、事前の対策立案と監督者の承認を受けることを前提とすれば、荷卸し時のコンクリート温度が 35℃を超えても使用できるとし、特記がない場合、コンクリートの構造体強度補正值($_{28}S_{91}$)は、一律に 6N/mm²と規定している。一般に、 $_{28}S_{91}$ はセメント種類によって異なり、中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントよりも小さくなる¹⁾。したがって、セメント種類や調査種類によらず、一律に 6N/mm²を割り増すことは不経済となる可能性がある。

また、設計基準強度(Fc)が 36N/mm²を超える高強度コンクリートでは、荷卸し時のコンクリート温度が上昇すると、さらに構造体中心の温度が高くなり、構造体の強度発現性に及ぼす影響が普通コンクリートよりも大きくなる可能性がある。しかし、荷卸し時のコンクリート温度が 35℃を超えた場合での高強度コンクリートに関する知見はほとんどない。

そこで、各種セメントを用いた普通コンクリートおよび高強度コンクリートについて、35℃を超える環境下でコンクリートの圧縮強度発現性について検討した。また、初期に高温履歴を受けたコンクリートは、標準養生より硬化体組織が粗大となり、その後の強度発現に影響を及ぼす可能性があるため、セメントペーストにより硬

化体組織および水和反応性を調査した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

使用材料の一覧を表-1 に示す。セメントには、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) および低熱ポルトランドセメント(L)を用いた。骨材には、山砂(S)および石灰石砕石(LG)を用い、比較として一部の調査に山砂(S)および硬質砂岩砕石(TG)を用いた。

2.2 コンクリートの調査および練上がり温度

コンクリートの調査は、首都圏の生コンクリート工場で使用する調査を参考にして、Fc=33N/mm²の普通コンクリートおよびFc=50N/mm², 80 N/mm²の高強度コンクリートを選定した。コンクリートの調査を表-2 に示す。練上がり温度は、荷卸し時のコンクリート温度が 35℃を超えることを想定して 40±1℃とし、一部の調査について、練上がり温度 33℃と比較した。

表-1 使用材料一覧

材料	記号	種類と品質
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³ , C ₃ S:57%, C ₂ S:17%)
	M	中庸熱ポルトランドセメント (密度:3.22g/cm ³ , C ₃ S:37%, C ₂ S:43%)
	L	低熱ポルトランドセメント (密度:3.24g/cm ³ , C ₃ S:22%, C ₂ S:58%)
細骨材	S	山砂(表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:1.57%, FM:2.54)
粗骨材	LG	石灰石砕石(表乾密度:2.71g/cm ³ , 吸水率:0.30%, 実積率:63.2%)
	TG	硬質砂岩砕石(表乾密度:2.72g/cm ³ , 吸水率:0.61%, 実積率:61.0%)
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 主成分:ポリカルボン酸系

^{*1} 三菱マテリアル(株)セメント研究所 副主任研究員(正会員)

^{*2} 三菱マテリアル(株)セメント研究所 主任研究員(正会員)

表-2 コンクリートの調合

記号	設計基準強度 (N/mm ²)	セメント種類	スランブ/スランブフロー (cm)	空気量 (%)	練上がり温度(°C)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
								W	C	S	LG	TG		
33N-LG	33	N	18±2.5	4.5 ±1.5	40±1,33±1	46.6	43.6	163	350	781	1037	—		
33N-TG					40±1			163	350	781	—	1037		
33M-LG		M			48.0	45.7	160	334	831	1013	—			
50N-LG	50	N	21±1.5	3.0 ±1.0	40±1,33±1	37.7	42.6	170	451	734	1018	—		
50N-TG					40±1			37.7	42.6	170	451	734	—	1028
50M-LG		M	55±7.5		40±1	38.0	49.2	162	427	873	926	—		
50L-LG		L			36.4	48.9	161	443	863	929	—			
80N-LG	80	N	65±10	2.0 ±1.0	40±1	20.0	37.0	174	870	514	905	—		
80M-LG		M						20.0	37.3	174	870	520	905	—
80L-LG		L						20.0	37.5	174	870	523	905	—

*1 記号は、設計基準強度・セメント種類-粗骨材を示す。

2.3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3 に、コンクリートの養生条件を図-1 に示す。

(1) 簡易断熱養生による構造体強度補正值(₂₈S'91)

圧縮強度は、図-1 に示す標準養生および簡易断熱養生した供試体について実施し、これらの測定結果よりコンクリートの構造体強度補正值(₂₈S'91)を算出した。なお、Fc=36N/mm²以下の普通コンクリートの₂₈S91は、現場の温度変化に近い現場水中養生または現場封かん養生した供試体の強度より算出するのが一般的である²⁾が、本試験は実施時期が暑中期ではなく、これらを再現するのが困難であった。そこで、普通コンクリートにおける構造体コンクリート強度の推定は、簡易断熱養生した供試体により行い、高強度コンクリートと同様に、構造体補正値を₂₈S'91とした。

(2) 硬化体組織および水和反応性の調査

硬化体組織および水和反応性の調査には、Fc=80N/mm²の高強度コンクリートと同一水セメント比としたセメントペーストを用いた。供試体(Φ50×100mm)は、練上がり温度 40°C で 12 本作製し、図-1 に示す簡易断熱養生と同一の温度の履歴で養生した。また、比較として、練上がり温度 20°C で標準養生したものをを用いた。

硬化体組織の調査は、水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布の測定により行った。試料は、供試体を 2.5 ~ 5.0mm に粉碎調製し、アセトンで 24 時間浸漬後に真空乾燥(D-dry)したものをを用いた。

水和反応性の調査は、既往の文献³⁾を参考にして、粉末 X 線回折によるエーライト(C₃S) およびビーライト(C₂S)の回折強度比により行った。試料は、供試体を粗粉碎し、これにアルミナ(α-Al₂O₃)を加え、アセトンとともに

表-3 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101:2005 「コンクリートのスランブ試験方法」
スランブフロー	JIS A 1150:2007 「コンクリートのスランブフロー試験方法」
空気量	JIS A 1128:2005 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」
コンクリート温度	JIS A 1156:2006 「フレッシュコンクリートの温度測定方法」
圧縮強度	JIS A 1108:2006 「コンクリートの圧縮試験方法」 以下の養生で、試験材齢 7,28,56,91 日で実施 ①標準養生 ②簡易断熱養生(JASS 5T-705-2005)
細孔径分布	①細孔径分布:水銀圧入式ポロシメータによる (日本電子社製, JSM-6330F)
水和反応性	粉末 X 線回折(XRD)による (ブルカーエイエックスエス社, D8 ADVANCE)

練上がり温度	成型後から脱型まで	脱型以降		記号
	40°C または 33°C	20°C 封かん養生	標準養生	
簡易断熱養生		材齢 28 日まで 練上がり温度と同一の封かん養生	材齢 28 日以降 20°C 封かん養生	簡易断熱

図-1 養生条件

に 100 μ m 以下に微粉碎・吸引ろ過後、20℃で 24 時間以上真空乾燥させたものを用いた。ここで、クリンカーの主要鉱物である C₃S および C₂S の水和反応性は、 α -Al₂O₃ を内部標準として、C₃S または C₂S の回折強度を α -Al₂O₃ の回折強度で除した相対回折強度で評価した。なお、測定対象の回折線は、C₃S の(040)面(2 θ =51.7deg.)、C₂S の(121)面(2 θ =31.0deg.)のおよび α -Al₂O₃ の(024)面(2 θ =52.6deg.)とした。

3. 試験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状を表-4 に示す。

練上がり直後のスランブまたはスランブフロー、空気量はいずれも目標の範囲内となり、練上がり温度も目標値 \pm 1℃以内となった。Nを用いた普通コンクリートおよび高強度コンクリートでは、練上がり温度が 40℃においても、同一スランブまたはスランブフローを得るための高性能 AE 減水剤の添加量が練上がり温度 33℃と大差はなかった。

3.2 簡易断熱養生の温度推移

簡易断熱養生の温度推移を図-2 に示す。

練上がり温度 40℃における簡易断熱養生の最高温度は、同一単位セメント量の条件となる Fc=80N/mm² の高強度コンクリートにおいて、N で 98℃、M で 86℃、L で 78℃となった。また、Nを用いた普通コンクリートおよび高強度コンクリートでは、粗骨材を石灰石碎石から硬質砂岩碎石に置き換えても、簡易断熱養生の最高温度に及ぼす影響はなかった。

3.3 強度発現性

各種コンクリートの圧縮強度を図-3～図-5 に示す。簡易断熱養生での材齢7日の圧縮強度は、標準養生の場合に比較して、MやLで高くなるものの、Nでは10%程度低くなった。一方、簡易断熱養生での材齢91日の圧縮強度は、標準養生の場合に比較して、普通コンクリートのNで20%程度、Mで10%程度低下した。また、Fc=50N/mm² 以上の高強度コンクリートでは、Nで20～25%、Mで10～15%、Lで15～20%低下し、MやLは、簡易断熱養生での圧縮強度の低下がNより5～10%低くなった。若材齢に高温履歴を受けると、セメント粒子の近傍に緻密で微細な凹凸を有するC-S-Hゲルや六角板状結晶の水酸化カルシウムなどが析出し、それ以後の反応が阻害され、長期的な反応が停滞する⁴⁾と報告されており、本試験での材齢7日以降の強度発現に影響したと推察される。Nを用いた普通コンクリートおよび高強度コンクリートでは、練上がり温度が40℃となっても、強度発現性に33℃と大差はなかった。また、石灰石碎石を用いたコンクリートは高温履歴を受けると強度の低下が危惧されるが、石灰石

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

記号*	コンクリート温度(℃)	スランブ/スランブフロー(cm)	空気量(%)	混和剤添加量(C×%)
33N-LG	40.5	19.0	4.9	0.80
	33.7	19.5	4.1	0.75
33N-TG	40.6	18.0	5.0	0.60
33M-LG	40.6	18.5	4.6	0.70
50N-LG	40.3	20.0	3.5	0.65
	33.5	21.5	2.7	0.55
50N-TG	40.2	21.0	3.4	0.65
50M-LG	39.8	56.0	3.0	0.90
50L-LG	40.2	56.5	3.7	0.75
80N-LG	40.0	57.5	2.1	1.90
80M-LG	40.8	65.0	1.7	1.70
80L-LG	40.1	63.5	1.5	1.45

* 記号は、設計基準強度・セメント種類-粗骨材種類を表す。

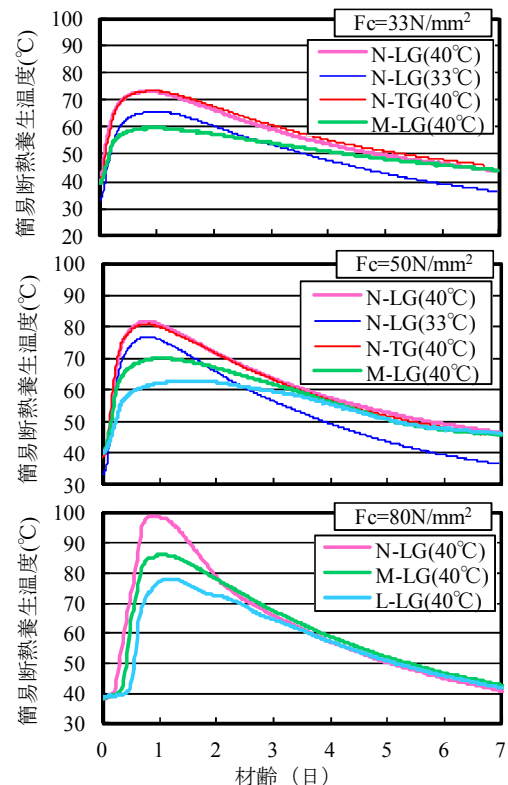
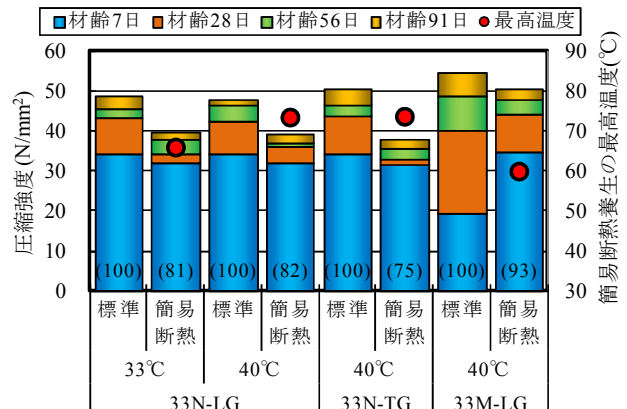


図-2 簡易断熱養生の温度推移



注) 図中の()は、標準養生材齢91日の圧縮強度に対する比

図-3 普通コンクリートの圧縮強度

砕石と硬質砂岩砕石で大差がなかった。筆者らは、練上がり温度20℃において、簡易断熱養生での圧縮強度は石灰石砕石と硬質砂岩砕石で差がないこと、また、標準養生の場合と比較して25~30%低下することを明らかにしている⁵⁾。練上がり温度が40℃における本結果も同様に、強度発現性に及ぼす粗骨材の岩種の違いは認められなかった。

3.4 ペーストの硬化体組織および水和反応性の調査

セメントペーストの総細孔容積および細孔径分布を図-6に示す。

MやLでは、材齢7日における総細孔容積が標準養生と簡易断熱養生した場合で同程度となった。一方、Nの簡易断熱養生では、標準養生の場合に比較して、総細孔容積が2倍程度となった。

細孔径分布に着目すると、簡易断熱養生した場合は、いずれのセメントも標準養生の場合に比較して、細孔半径25~100nmの空隙が増加した。また、MやLは細孔半径100nm以上の空隙量に変化はなく、細孔半径7.5nm以下の空隙が増加した。セメントペーストの強度増大にともない細孔半径3~5nmの空隙量が増加する⁶⁾と報告されており、本試験と一致した。これに対し、Nは細孔半径100nm以上の空隙が標準養生の場合に比較して10%程度増加しており、初期に高温履歴を受けた場合、セメント種類により細孔構造が異なり、NはMやLよりも粗い組織形成となっていることが確認された。

材齢28日における総細孔容積は、材齢7日に比較して、Nの簡易断熱養生を除くいずれの場合で減少しており、

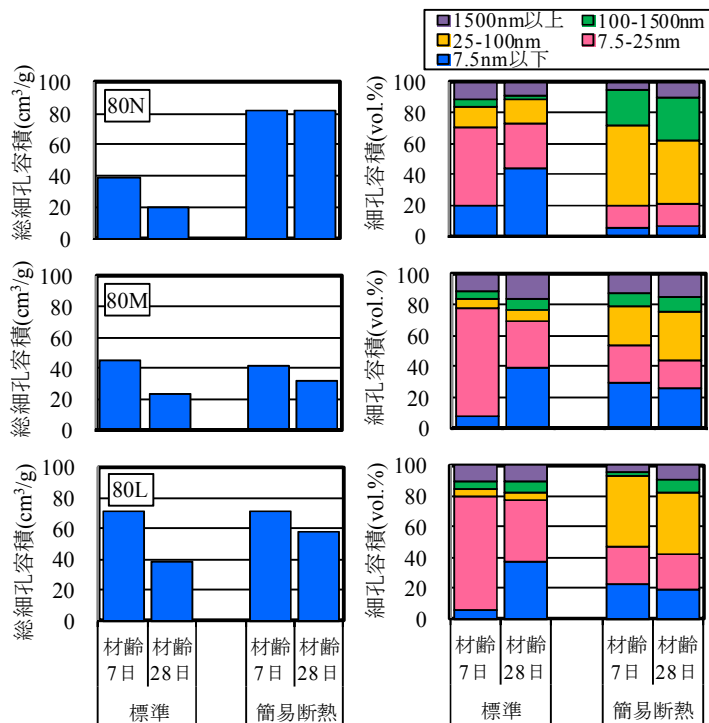
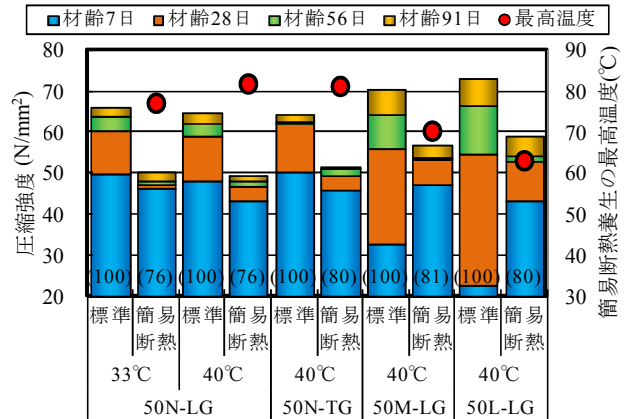
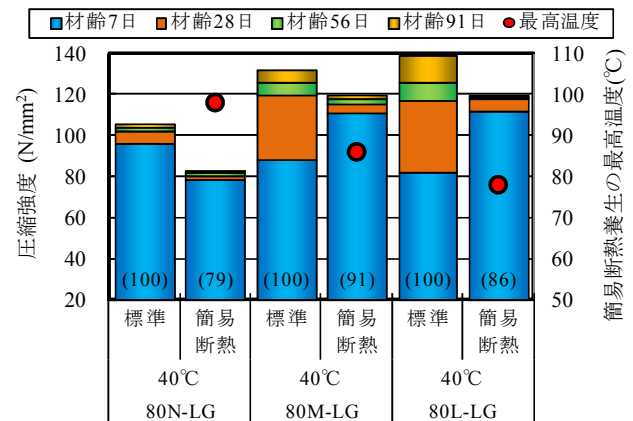


図-6 セメントペーストの総細孔容積および細孔径分布



注) 図中の()は、標準養生材齢91日の圧縮強度に対する比
図-4 Fc=50N/mm²の高強度コンクリートの圧縮強度



注) 図中の()は、標準養生材齢91日の圧縮強度に対する比
図-5 Fc=80N/mm²の高強度コンクリートの圧縮強度

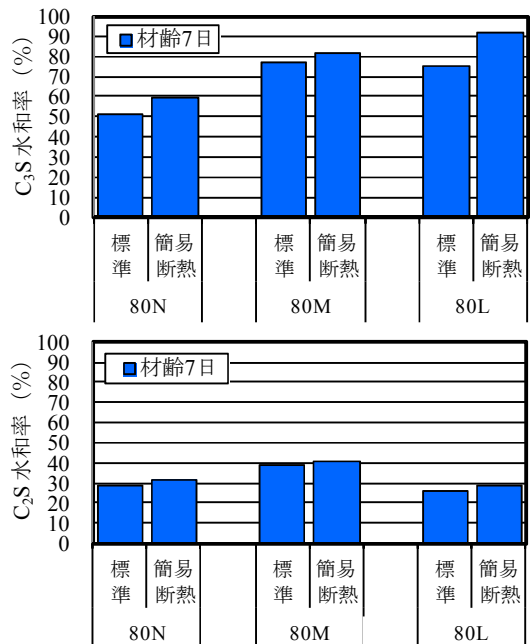


図-7 C₃SおよびC₂Sの水和反応率(材齢7日)

本試験での材齢 7 日以降の強度増進と一致する。また、いずれのセメントの標準養生においても、細孔半径 7.5nm 以下の空隙の増加が認められ、強度発現との関連が高いと推察される。

材齢 7 日における C_3S および C_2S の水和反応率を図-7 に示す。

簡易断熱養生した場合の C_3S の水和反応率は、N で 60%、M で 80%程度、L で 90%程度となり、いずれのセメントも標準養生に比較して 5~15%高くなった。浅賀らは、N および L を用いた水セメント比 0.3 のセメントペーストで水和反応に及ぼす養生温度の影響を検討している。これによると、養生温度が高くなると C_3S の反応率が高くなり、養生温度 80°C で材齢 7 日の C_3S の水和反応率が N で 80%程度、L で 90%程度となることを報告している^{7),8)}。本試験では、M や L において、それと同等となるものの、N は小さくなった。 C_3S の水和は C_2S の共存量が多いほど促進される⁹⁾ことや N の簡易断熱養生の最高温度が 98°C となることが影響したと考えられる。これらセメント種類による C_3S の水和反応率の違いは、本試験の材齢 7 日までの強度発現と一致する。

一方、 C_2S の水和反応率は、いずれのセメントも標準養生と簡易断熱養生で同程度となった。 C_2S の水和反応率は、 C_3S と同様に、養生温度が高くなると大きくなる⁶⁾と報告されているが、本結果はそれと異なる傾向となった。今後、長期材齢でのデータを加え、強度発現との関連について検討する必要がある。

以上より、M や L は最高温度 85°C となる温度履歴を受けても、N より高い C_3S の水和反応性を維持し、かつ、緻密な組織を形成していることが判明した。

3.5 簡易断熱養生による構造体強度補正值($_{28}S'_{91}$)

暑中期における普通コンクリートの $_{28}S'_{91}$ を表-5 に、高強度コンクリートの $_{28}S'_{91}$ を表-6 に示す。

N を用いた普通コンクリートは、暫定の $_{28}S'_{91}$ が 3~6N/mm² となり、練上がり温度 40°C であっても JASS 5 の値(6N/mm²)と同等以下となった。一方、M を用いた普通コンクリートの $_{28}S'_{91}$ は 0 となり、本結果の範囲では、強度の割増しは不要と判断できる。

N を用いた $F_c=50N/mm^2$ の高強度コンクリートは、 $_{28}S'_{91}$ が 10N/mm² となり、練上がり温度 40°C であってもこれまでの暑中コンクリートと同様となった。ただし、 $F_c=80N/mm^2$ の高強度コンクリートでは $_{28}S'_{91}$ が 19N/mm² となり、大幅な強度の割増しが必要となることが明らかとなった。一方、M または L を用いた高強度コンクリートは、 $_{28}S'_{91}$ が設計基準強度によらず 0 となり、練上がり温度 40°C であっても、強度の割増しは不要であると判断できる。

表-5 暑中期における普通コンクリートの $_{28}S'_{91}$ ^{*1}

記号 ^{*2}	練上がり温度(°C)	圧縮強度(N/mm ²)		$_{28}S'_{91}$ (N/mm ²)	JASS 5 の $_{28}S'_{91}$ ^{*3} (N/mm ²)
		標準養生材齢 28 日	簡易断熱材齢 91 日		
33N-LG	40	42.7	39.1	3.6	6
	33	43.6	39.7	3.9	
33N-TG	40	44.0	38.1	5.9	
33M-LG	40	40.2	53.0	0	

*1 高強度コンクリート指針(案)による暫定の $_{28}S'_{91}$

*2 記号は、設計基準強度・セメント種類-粗骨材の種類を示す。

*3 JASS 5-2009「暑中コンクリート」における特記がない場合の構造体強度補正值 $_{28}S'_{91}$

表-6 暑中期における高強度コンクリートの $_{28}S'_{91}$

記号 ^{*1}	練上がり温度(°C)	圧縮強度(N/mm ²)		$_{28}S'_{91}$ (N/mm ²)
		標準養生材齢 28 日	簡易断熱材齢 91 日	
50N-LG	40	59.1	49.3	9.8
	33	60.2	50.3	9.9
50M-LG	40	55.8	57.1	0
50L-LG	40	54.6	56.8	0
80N-LG	40	102	83.5	18.5
80M-LG	40	119	120	0
80L-LG	40	117	120	0

*1 記号は、設計基準強度・セメント種類-粗骨材の種類を示す。

4. まとめ

暑中期における各種セメントを用いた普通コンクリートおよび高強度コンクリートについて、圧縮強度発現性を調査した。また、セメントペーストにより硬化体組織および水和反応性を調査した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 練上がり温度が 40°C においても、コンクリートのフレッシュ性状、簡易断熱養生の温度推移および強度発現性は、練上がり温度が 33°C と大差はない。
- (2) 普通コンクリートでは、簡易断熱養生での材齢 91 日の圧縮強度が標準養生の場合より N で 20%程度、M で 10%程度低下する。
- (3) 設計基準強度 50N/mm² 以上の高強度コンクリートでは、簡易断熱養生での材齢 91 日の圧縮強度が標準養生の場合より N で 20~25%、M で 10~15%、L で 15~20%低下する。
- (4) 初期に高温履歴を受けた場合の細孔構造は、セメン

トの種類によって異なり、Nは細孔半径100nm以上の空隙が標準養生より増加し、MやLよりも粗い組織形成となっている。

- (5) 初期に高温履歴を受けた場合のエアライト(C₃S)の水和反応率は、Nで60%、Mで80%程度、Lで90%程度となり、いずれのセメントも標準養生より5~15%大きくなった。また、MやLのC₃Sの水和反応率は、Nよりも大きく、簡易断熱養生した材齢7日の強度発現に影響したと考えられる。
- (6) Nを用いた普通コンクリートの暫定の $_{28}S_{91}$ は3~6N/mm²となり、JASS 5-2009に規定される6N/mm²を割増した調査設計が安全側である。
- (7) MやLを用いた設計基準強度80N/mm²以下のコンクリートは、練上がり温度が40°Cとなっても、 $_{28}S_{91}$ は0となり、これまでの暑中コンクリートと同様の調査設計ができると考えられる。

以上より、35°Cを超える環境下においても、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いた設計基準強度80N/mm²以下のコンクリートは、簡易断熱養生による構造体強度補正值($_{28}S_{91}$)が0となり、強度の割増しが不要であることが明らかとなった。この理由の一つとして、これらのコンクリートは、初期に受ける温度履歴の最高温度が85°Cとなっても、普通ポルトランドセメントより高いC₃Sの水和反応性を維持しており、かつ、緻密な組織形成となっているためと考えられる。

参考文献

- 1) 高強度コンクリート施工指針(案)・解説, (社)日本建築学会, pp.92-94, 2005
- 2) 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 2009, (社)日本建築学会, pp.179-184, 2009
- 3) 石橋倫朗, 浅賀喜与志, 大門正機, 高橋 茂: ポルトランドセメントの水和反応における各構成鉱物の反応率の測定, セメント技術年報, Vol.42, pp.40-43, 1988
- 4) 小田部裕一ほか: 温度ひび割れ照査の効率化・高精度化に向けた水和発熱・強度発現モデル, マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム論文集, pp.27-34, 2005
- 5) 中里 剛ほか: 石灰石骨材を用いた高強度コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関する研究, セメント研究所研究報告, No.12, pp.51-58, 2011
- 6) 松本健一, 丸山一平, 谷村 充: 低水結合材比におけるシリカフェーム混入セメントの若材齢時力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.103-108, No.2, 2008
- 7) 浅賀喜代志, 大門正機, 小西和夫, 吉田孝三郎: 低熱セメントの各構成鉱物の水和反応に及ぼす養生温度の影響, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.58-63, 1991
- 8) 小西和夫, 浅賀喜与志, 鶴見敬章, 大門正機: 80°Cにおけるポルトランドセメントの各構成成分の水和に及ぼす昇温過程の影響, 第44回セメント技術大会講演集, pp.80-85, 1990
- 9) 吉田孝三郎: 低発熱セメントの水和反応による組織形成と強度発現, 東京工業大学橋論文, pp.55-65, 1994