

論文 低熱ポルトランドセメントの暑中コンクリートへの適用

竹内 良*1・石田 征男*1・田中 敏嗣*2・下山 善秀*3

要旨: 暑中環境下でマッシュな高強度コンクリート模擬部材を作製し、その強度発現性を低熱ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントを用いた場合について比較検討した。この実験結果から、温度履歴を受けたコンクリート強度を標準養生強度と比べると、低熱ポルトランドセメントの場合、強度低下は比較的小さいが、普通ポルトランドセメントの場合は大きな強度低下が生じることが実証できた。これらより、暑中環境下における高強度コンクリート、特にマスコンクリート部材の打設には、低熱ポルトランドセメントの使用が有効である。

キーワード: 暑中コンクリート, 低熱ポルトランドセメント, 高強度コンクリート, 普通ポルトランドセメント, 温度履歴, 細孔量

1. はじめに

近年、構造物の高層化、大型化、高耐久化に伴い、コンクリートの高強度化が進んでいる。一般に高強度コンクリートは、単位セメント量が多く、水和発熱によるコンクリートの温度上昇が普通コンクリートより大きくなる。したがって、高強度コンクリートは、温度ひび割れの発生の可能性が高くなるだけでなく、初期材齢に受ける高温の履歴によって強度発現性が影響を受けることが知られている¹⁾²⁾。

特に暑中環境下においては環境温度の影響を受け、その傾向が顕著となることが予想される。

低熱ポルトランドセメントはその特性から、低発熱コンクリートのみならず、高流動・高強度コンクリートへの適用が期待されている³⁾⁴⁾。また、低熱ポルトランドセメントは、これまでの研究により、強度発現性に及ぼす温度履歴の影響が小さいことが示されているが¹⁾⁵⁾、これを実証したデータはまだ少ない⁶⁾。

そこで、本研究では、低熱ポルトランドセメントを用いて、暑中環境下における高強度コンクリートの強度発現性を室内試験およびマッシュな模擬部材試験によって調べた結果について示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1)セメント

実験に用いたセメントは普通ポルトランドセメント(NC と略記)および低熱ポルトランドセメント(LC と略記)である。セメントの品質を表-1に示す。なお、低熱ポルトランドセメントの品質は、JIS R 5210「ポルトランドセメント」の規格を満足するものである。

(2)骨材

細骨材は、市原産丘砂(表乾比重:2.58、粗粒率:1.67)および葛生産砕砂(表乾比重:2.66、粗粒率:2.98)を、粗骨材は岩舟産天然砂岩(表乾比重:2.70)、葛生産砕石(表乾比重:2.66)を用いた。

(3)混和剤

混和剤として、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(標準形および遅延形)を用い、空気量の調整に AE 剤を用いた。

表-1 セメントの品質

セメント種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成 (%)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
LC	3.22	3454	27	53	3	11
NC	3.15	3089	60	16	8	9

*1 日本セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 研究員 工修 (正会員)

*2 日本セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 副主任研究員 工修 (正会員)

*3 日本セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 主席研究員 工博 (正会員)

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合は、表-2に示す配合条件に基づき、スランプ $21 \pm 1.5 \text{ cm}$ となるように、高性能 AE 減水剤で、空気量は $4.5 \pm 1.5 \%$ となるように AE 剤により調整を行ない、表-3のように定めた。その時のフレッシュコンクリートの性状を表-4に示す。なお、模擬部材試験は生コンプラントで製造したコンクリートを用いた。

表-2 コンクリートの配合条件

項目	条件および管理範囲
配合強度	36 N/mm^2
単位水量	175 kg/m^3
スランプ	$21 \pm 1.5 \text{ cm}$
空気量	$4.5 \pm 1.5 \%$
練り上がり温度	30°C

表-3 コンクリート配合

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 (C×%)
			W	C	S	G	
LC	46.4	47	175	377	820	941	1.1
NC		46			796	957	1.2

表-4 フレッシュコンクリート性状

セメント種類	測定時間	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^\circ \text{C}$)	凝結時間 上段:始発 下段:終結	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)
LC	0分	21.5	6.5	32.0	4:40	0.47 (3時間)
	60分	18.0	6.0	31.0	6:20	
NC	0分	19.5	7.0	34.0	3:20	0.08 (3時間)
	60分	6.5	5.0	33.0	4:20	

2.3 試験項目および方法

(1) 室内試験

成形後、型枠ごと供試体をビニール袋で密封し、封かん状態にした後、温度可変式養生槽に入れた。温度履歴は表-3に示すコンクリートの部材内部の温度を想定し、図-1に示すパターンとした。すなわち、昇温速度を普通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についてそれぞれ 2.1°C/h および 0.8°C/h となるようにし、材齢 12 日で 30°C に戻して、その

後 20°C 封かん養生を行なった。

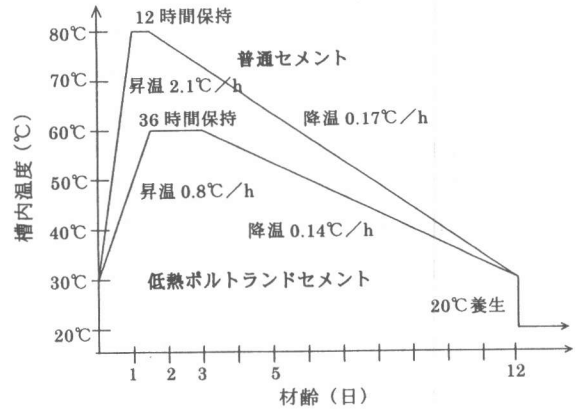


図-1 温度履歴パターン

(2) 模擬部材試験

強度試験用供試体の養生は 20°C 水中養生、現場封かん養生および模擬部材のコアとした。試験材齢は 20°C 水中養生および現場封かん養生が 1、3、7、28、56 および 91 日とし、模擬部材のコアは 28、91 日で測定を行なった。なお、コア供試体は、中心部から垂直方向に各材齢 1 本ずつ抜き取った。

2.4 模擬部材の形状および温度測定位置

模擬部材の寸法は $80 \times 80 \times 80 \text{ cm}$ の立方体とし、全体を厚さ 10 cm の発砲スチロールで覆うことによって、ほぼ断熱に近い状態とした。また、図-2に示す位置(9点)で温度の測定を行なった。

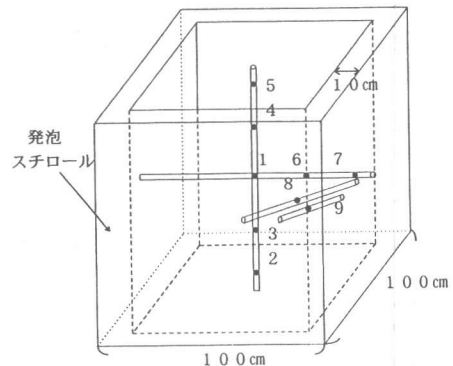


図-2 模擬部材の形状

3. 結果および考察

3.1 室内試験

普通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コンクリートの強度試験結果をそれぞれ図-3および図-4に示す。また、図-5に材齢と強度比（断熱養生強度/20℃標準養生強度）の関係を示す。普通ポルトランドセメントについては、標準形と遅延形の混和剤を使用した場合について比較した。普通ポルトランドセメントの場合、断熱養生を行なうと初期強度が大きくなるが、その後の強度増進が非常に小さくなり、材齢3日以降において20℃標準養生強度の約80%程度となった。

遅延形の混和剤を用いた場合、材齢1日の水中養生の強度は小さくなるが、断熱養生の強度は標準形の混和剤を使用した場合といずれの材齢においてもほぼ同一になった。また、強度比についても材齢3日以降、標準形の混和剤とほぼ同一になったことから、混和剤の種類による高温履歴を受けたコンクリートの強度発現性への影響は小さいと思われる。

それに対して低熱ポルトランドセメントを用いた場合、普通ポルトランドセメントを用いた場合と傾向が大きく異なり、20℃標準養生の強度が低いのに対して、断熱養生を行なった場合においても材齢14日以内の強度増進が大きく、その後の強度増進も普通ポルトランドセメントの場合より大きくなっている。

これより、普通ポルトランドセメントを用いた場合、標準形あるいは遅延形の混和剤に関わらず、初期に高温履歴を受けると長期強度の増進が小さくなり、低熱ポルトランドセメントを用いた場合では、初期の高温履歴が長期強度の発現に及ぼす影響は小さくなることが認められた。

これらの試験結果を基に、暑中環境下において模擬部材を作製し、実証試験を行なった。

3.2 模擬部材試験

(1) 部材の温度履歴

部材中心部の温度履歴の測定結果を図-6に

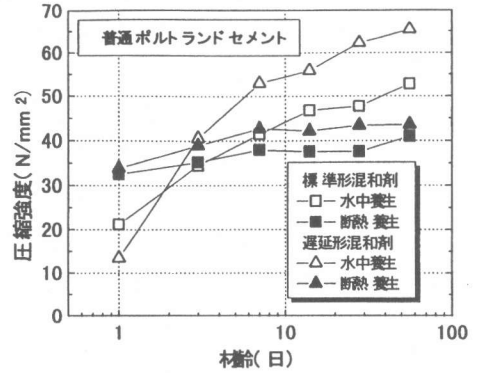


図-3 強度試験結果（普通ポルトランドセメント）

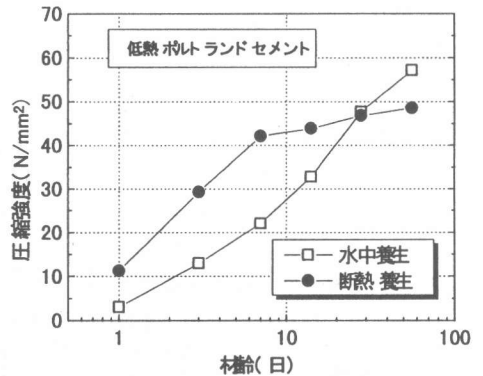


図-4 強度試験結果（低熱ポルトランドセメント）

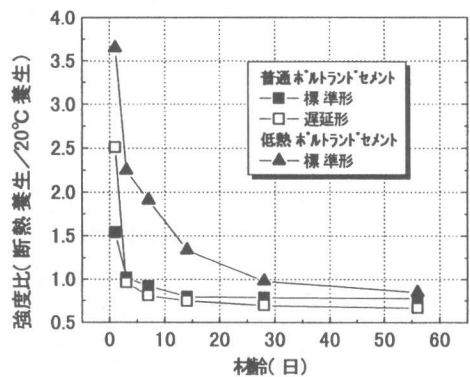


図-5 材齢と強度比の関係

示す。また、表-5に最高温度とそれに到達する材齢および部材内部の温度差を示す。なお、混和剤は標準形の混和剤を用いた。模擬部材内の最高温度を示した時の温度差は、低熱ポルトランドセメントの場合2.8℃、普通ポルトランドセメントの場合5.0℃となり、内部拘束による応

力差は生じていないと推察される。また、最高温度は普通ポルトランドセメントが約 83℃であるのに対して、低熱ポルトランドセメントは約 63℃となっており、20℃の温度差が生じた。さらに温度降下が普通ポルトランドセメントより低熱ポルトランドセメントの方が緩やかであることから、発熱低減とともに温度応力ひび割れに対して有効であると考えられる。

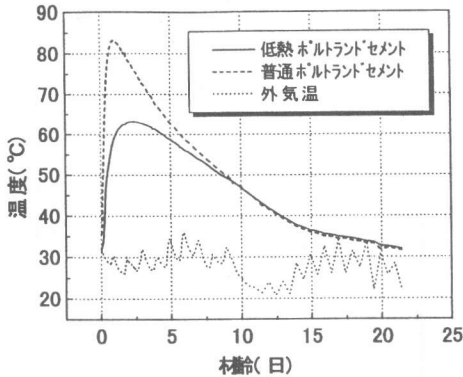


図-6 模擬部材温度測定結果 (中心部)

表-5 最高温度と最高温度到達材齢

セメント	最高温度 (°C)	温度比 (LC/NC)	最高温度到達材齢 (日)	部材内の最高温度差 (°C)
LC	63	0.76	2.17	2.8
NC	83	-	0.98	5.0

(2)強度試験結果

図-7および図-8にそれぞれ普通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コンクリートの圧縮強度試験結果を示す。また、材齢28日から91日の強度増進率を表-6に示す。

普通ポルトランドセメントを用いた場合、材齢28日のコア強度は20℃水中養生の93%であった。また、その後91日の強度増進が20℃水中養生で約16%、コア供試体が約11%であり、コア強度の増進率が小さかった。また、材齢91日におけるコア強度は20℃水中養生の約88%程度であり、室内試験と同様の傾向を示した。

低熱ポルトランドセメントを用いた場合、材齢28日から91日の強度増進は、20℃水中養生

の場合37%、コア強度が19%であり、20℃水中養生の場合よりも強度増進率が小さくなっているが、普通ポルトランドセメントを用いた場合より大きくなっている。さらに、コア強度は20℃水中養生よりも材齢28日で22%、材齢91日で6%上回っている。室内試験とは若干異なる結果となっているが、初期に高温履歴を受けた場合においても長期強度の増進が大きい点で一致している。このことより、初期に高温履歴を受けた場合において、普通ポルトランドセメントを用いた場合、長期強度の増進が緩慢になるが、低熱ポルトランドセメントでは強度発現性の低下が認められず、初期高温履歴による影響は普通ポルトランドセメントよりも小さいことが確認できた。

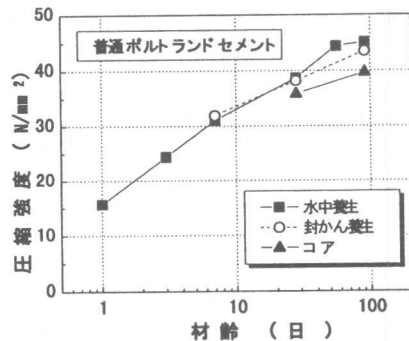


図-7 圧縮強度試験結果 (普通ポルトランドセメント)

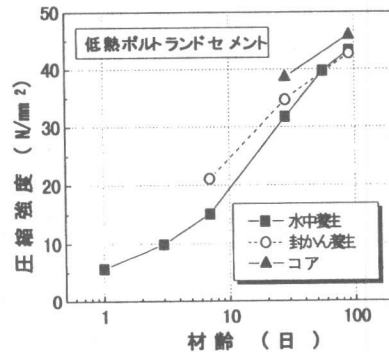


図-8 圧縮強度試験結果 (低熱ポルトランドセメント)

表-6 材齢28日から91日の強度増進率 (%)

セメント	水中	現場封かん	コア
LC	36.6	23.1	18.9
NC	16.5	13.9	10.9

表-7 温度測定および強度試験結果

	NC		LC	
	20℃	コア	20℃	コア
28d	38.7N/mm ²	35.8N/mm ²	31.7N/mm ²	38.6N/mm ²
	-7.5%*)		+21.8%*)	
91d	45.1N/mm ²	39.7N/mm ²	43.3N/mm ²	45.9N/mm ²
	-12.0%*)		+6.0%*)	
最高温度	83.3℃		63.2℃	

*)20℃水中養生に対するコア強度の割合

(3)水セメント比の補正に関する検討

温度測定結果、強度試験結果および20℃水中養生に対するコア強度の割合を表-7に示す。

材齢91日のコア強度は20℃養生と比較すると普通ポルトランドセメントは12.0%減少しており、低熱ポルトランドセメントは6.0%増加している。

また、普通ポルトランドセメントの場合、91日のコア強度として、20℃水中養生の強度(約45N/mm²)を得るためには12%の強度減少分を考慮して20℃水中養生の強度を50N/mm²(45N/mm²×1.12)として配合設計する必要がある。低熱ポルトランドセメントについても同様に行なうと39N/mm²(43N/mm²×0.94)として配合設計を行なう必要がある。

配合強度からセメント水比、および単位セメント量(単位水量175kg/m³)を算出すると、表-8のようになる。

なお、材齢91日のセメント水比と強度の関係式は、セメント水比を変化させて、強度試験を行なった結果より算出し、以下の通りとした。

$$(NC) \cdots F_{91} = 29.3C/W - 18.2 \quad (1)$$

$$(LC) \cdots F_{91} = 32.7C/W - 26.9 \quad (2)$$

表-8 水セメント比の補正

	NC	LC
σ_{91}	50.0N/mm ²	39.0N/mm ²
C/W	2.16 (46.4%)	2.16 (46.4%)
	↓	↓
	2.33 (42.9%)	2.02 (49.6%)
セメント量	408kg(+31kg)	361kg(-24kg)
配合補正による温度の変動	+5℃	-3℃
配合補正による強度の変動	-1~-2%	+0~1%

表-8に示すように配合強度を補正すると、普通ポルトランドセメントの場合、単位セメント量が31kg増加し、低熱ポルトランドセメントで24kg減少する。それに伴い、コンクリートの温度が普通ポルトランドセメントで約5℃上昇し、低熱ポルトランドセメントで約3℃減少する。その結果、普通ポルトランドセメントの場合、温度履歴の影響をさらに受けることになり、強度が1~2%減少する。それに対して、低熱ポルトランドセメントの場合、温度履歴の影響が少なくなり、強度が大きくなる傾向になる。

(4)空隙分布

低熱ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントの養生条件および材齢と細孔量の関係をそれぞれ図-9および図-10に示す。

低熱ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントを用いた全細孔量を比較すると、いずれの養生条件および材齢においても、低熱ポルトランドセメントの場合の方が多くなった。

また、コアおよび水中養生を行なった場合の全細孔量を比較すると、低熱ポルトランドセメントの場合、いずれの材齢においても、コアの方が水中養生を行なった場合より全細孔量が少なくなっている。一方、普通ポルトランドセメントの場合は、低熱ポルトランドセメントとは異なり、コアの場合の方が、全細孔量が多くなっている。これは、低熱ポルトランドセメントの場合、水和反応がゆっくりと進むピーライトの含有量が多いため、初期に高温履歴を受けた場合においても、その後、ピーライトの水和反応が徐々に進むためであると思われる。

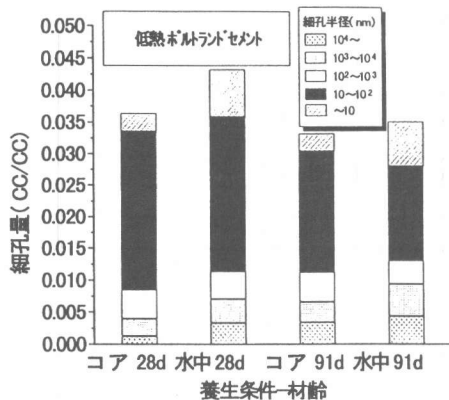


図-9 養生条件および材齢と細孔量の関係
(低熱ポルトランドセメント)

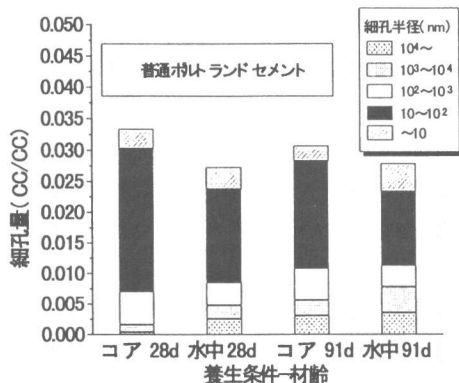


図-10 養生条件および材齢と細孔量の関係
(普通ポルトランドセメント)

4. まとめ

本研究では、暑中環境下でマッシュな高強度コンクリート模擬部材を作製し、高強度コンクリートの強度発現性を低熱ポルトランドセメントと普通ポルトランドセメントを用いた場合について比較検討した。本研究で得られた結果を要約すると次のようになる。

(1)普通ポルトランドセメントを用いた場合、初期に高温履歴を受けると材齢1日の強度発現が非常に大きい、その後の強度増進が緩慢になる。一方、低熱ポルトランドセメントを用いた場合、水中養生を行なった場合より、初期強度が大きくなり、その後の強度増進も良好であることから、初期高温履歴による強度発現性の低下の影響は普通ポルトランドセメントよ

りも小さいと言える。

(2)模擬部材によるコア強度と水中養生の強度を同じにするために水セメント比の補正を行なう(単位水量を固定)と、低熱ポルトランドセメントを用いた場合、水セメント比を大きく(単位セメント量を減少)することができ、その結果温度上昇が小さくなることから、さらに温度履歴の影響が小さくなると考えられる。一方、普通ポルトランドセメントの場合は、水セメント比を小さく(単位セメント量を増加)する必要があり、温度上昇が大きくなることから、さらに強度低下を招くと考えられる。

(3)以上の結果より、暑中環境下における高強度コンクリート、特にマスコンクリート部材等の打設には、低熱ポルトランドセメントの使用が有効であると考えられる。

参考文献

- 1)田中敏嗣、竹内良、丸岡正知、富田六郎；初期材齢に高温履歴を受けた高強度コンクリートの強度発現性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.1, pp.193-198, 1997
- 2)高範勲、近藤吾郎、森田司郎；水和熱による初期高温履歴を考慮したコンクリートの強度発現則に関する研究、セメント・コンクリート論文集 No.46, pp.820-825, 1992
- 3)田中光男、原田宏、名和豊春；高比・ライト系ポルトランドセメント、コンクリート工学, Vol.31, No.31, pp.18-27, 1993.9
- 4)丸岡正知、田中敏嗣、富田六郎；比・ライトセメントの高強度コンクリートへの適用、セメント・コンクリート論文集 No.50, pp.702-707, 1996
- 5)田中敏嗣、丸岡正知、竹内良、富田六郎；比・ライトセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現に及ぼす温度履歴の影響、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No.1, pp.237-242, 1996
- 6)一瀬賢一、淵田安浩、中根淳；高強度・高流動コンクリートの暑中環境下における強度発現性状の検討、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No.1, pp.297-302, 1996