

論文 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

田中敏嗣*1・竹内 良*2・丸岡正知*3・富田六郎*4

要旨：初期の高温履歴が低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現性に及ぼす影響を、普通セメントを用いた場合と比較検討した。低熱ポルトランドセメントを用いた場合、初期の高温履歴は、普通セメントを用いた場合と比較して、初期強度を大幅に増進させるとともに長期強度への影響も小さいこと、履歴した最高温度を説明変数とした回帰式により、それらの強度発現が推定できることがわかった。したがって、初期に高温履歴を受ける高強度な配合条件で、低熱ポルトランドセメントを用いることは良好な強度発現性を持つコンクリートを得る上で有利と考えられる。

キーワード：高強度コンクリート、温度履歴、低熱ポルトランドセメント、普通セメント、圧縮強度、断熱

1. 目的

コンクリート構造物の大型化、高層化に伴い設計基準強度 60N/mm^2 以上の高強度コンクリートの研究開発、施工事例が増えつつある。一般に高強度コンクリートは、単位セメント量が多いため水和発熱により部材内部では温度上昇が大きくなり、初期材齢の高温履歴が強度発現性に大きく影響することが知られている。

低熱ポルトランドセメントは、低発熱性、高流動性および高強度性の性質を持ち合わせていることから[1][2][3][4][5][6]、近年高強度コンクリートへ適用される機会が増加している[7]。しかしながら、低熱ポルトランド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初期高温履歴の影響に関する研究はいくつかあるものの[8]、まだ十分でないと思われる。

そこで本研究では、初期の高温履歴が低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現性に及ぼす影響を、普通セメントを用いた場合と比較検討した。さらに、履歴最高温度と強度の関係により、温度履歴を受ける場合の強度を推定する方法について検討した。

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(比重:3.16、NCと略記)および低熱ポルトランドセメント ($C_2S=60.9\%$ 、比重:3.23、ブレン値 $3090\text{ cm}^2/\text{g}$ 、LCと略記)である。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、北九州市小倉南区産砕砂(表乾比重 2.66)を、粗骨材は北九州市門司区鹿喰産砕

*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副主任研究員、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研究員、工修(正会員)

*4 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部長、工博(正会員)

石（表乾比重 2.84）を用いた。

(2)混和剤

混和剤として、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。また、空気量を調整するため、粉末の消泡剤を用いた。

2. 2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表 1 に示す。単位水量を 175 及び 180 kg/m³、また単位セメント量を 300,500 及び 600kg/m³とし、スランプが 15~18cm となるよう混和剤添加率により調整した。また、空気量は 2%以下となるよう消泡剤により調整した。練上がり温度は 20℃を目標とした。

表 1 コンクリートの配合

セメント	配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (C×%)	フレッシュコンクリート性状		
				W	C	S	G		スランプ (cm)	空気量(%)	温度(℃)
低熱セメント	LC300	60	47	180	300	896	1079	1.60	17.0	0.6	19.5
	LC500	35	43	175	500	755	1069	1.00	16.6	1.2	21.0
	LC600	30	40	180	600	664	1064	1.00	17.0	1.8	21.0
普通セメント	NC300	60	47	180	300	894	1076	1.95	15.8	0.7	20.0
	NC500	35	42	175	500	751	1063	1.20	17.0	1.2	21.0
	NC600	30	40	180	600	660	1057	1.10	18.5	1.5	22.0

2. 3 試験方法

(1)供試体成形方法および養生方法

練混ぜは、公称容量 55リットルのパン型一軸強制練りミキサを用い、1 バッチ 30リットルとした。スランプ、空気量およびコンクリート温度を測定した後に、内径 100mm×高さ 200mm のプラスチック製の軽量型枠を用いて供試体を成形した。成形後、型枠ごと供試体をビニール袋で密封し、

20±2℃に制御された恒温室内に設置した発泡スチロール製の簡易断熱養生容器内(図 1)で養生した。容器の上段および下段の中心部の供試体に熱電対を埋め込み、コンクリート温度を測定した。また、比較のため 20℃養生を実施した。すなわち、ビニール袋で型枠ごと密封した供試体を、20±2℃の恒温室内に材齢 14 日まで静置し、脱型後 20℃の水中養生を行った。

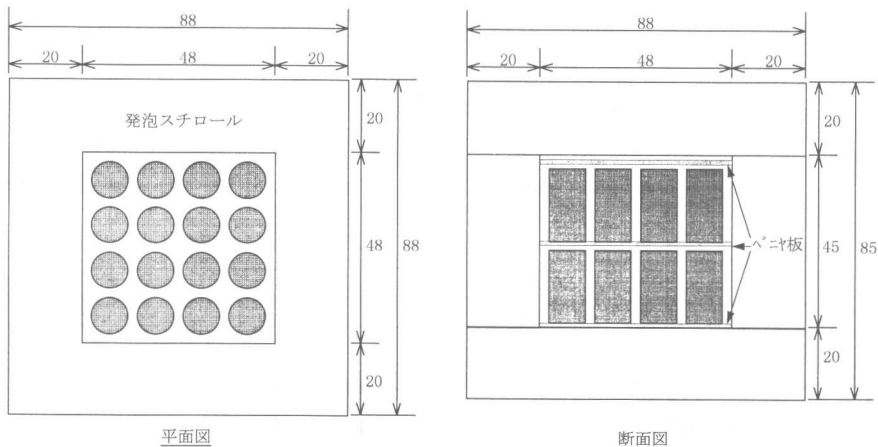


図 1 簡易断熱養生装置概要図

(2) 圧縮強度試験方法

強度試験材齢は、簡易断熱養生および 20℃養生いずれの場合も 1,3,7,14,28,56,91,182 および 365 日とした。簡易断熱養生の場合、材齢 14 日までの圧縮強度試験は、熱の流出を最小限に押さえるよう容器から供試体を取り出し、試験を行った。簡易断熱養生槽の内部と外部の温度差が 2℃以下になった材齢 14 日で槽から全供試体を取り出し、脱型後 20℃水中養生を行った。

3. 結果および考察

3. 1 供試体温度履歴測定結果

図 2 に下段の供試体温度の経時変化を示す。また、表 2 に各配合における供試体温度の最高値とそれに到達する材齢を示す。上段と下段の最高温度時の温度差は、普通セメント使用のセメント量 600kg/m³ の場合で約 2℃であった。最高温度ピーク付近の温度は、普通セメントの場合鋭く変化したのに対して、低熱ポルトランドセメントの場合は比較的緩やかに変化した。これは低熱ポルトランドセメントの発熱が、長時間にわたり緩やかに生じ、放熱量と発熱量が釣り合ったためと考えられる。また、最高温度は、NC600 の場合が最も高く、50.2℃であった。LC600 の場合と NC300 の場合は、今回の試験条件では、温度変化および最高温度とも類似しており、低熱ポルトランドセメントの発熱低減効果が確認された。

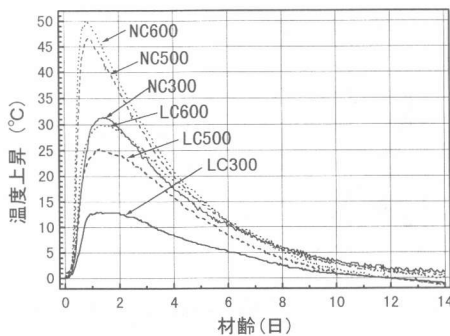


図 2 供試体温度測定結果

表 2 各配合における最高温度と最高温度到達材齢

セメント	配合名	最高温度 (°C)	温度比 (LC/NC)	最高温度到達材齢
普通	NC300	31.4	—	1.42 日
	NC500	46.7	—	0.88 日
	NC600	50.2	—	0.79 日
低熱	LC300	13.0	0.414	1.17 日
	LC500	25.3	0.542	1.29 日
	LC600	29.9	0.597	1.33 日

3. 2 強度試験結果

図 3 及び図 4 に、それぞれ普通セメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いた場合について材齢と強度の関係を示す。また、図 5 及び図 6 にそれぞれ普通セメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いた場合について材齢と強度比（断熱養生強度/20℃養生強度）の関係を示す。

普通セメントを用いた場合、いずれの配合においても、大きな温度上昇の見られる材齢 3 日以内の温度履歴による強度増進はほとんど認められない。また、長期強度については温度履歴を受けた場合の方が受けない場合（20℃養生）より小さくなる傾向を示した。その低下の比率は、配合条件によらず概略 20%である。これより、普通セメントを用いた場合、初期の温度上昇は長期強度の増進に悪影響を与えることが確認された。

一方低熱ポルトランドセメントを用いた場合、普通セメントを用いた場合と傾向が大きく異なり、温度履歴により材齢 7 日以内の強度増進が非常に大きかった。この強度増進の割合は、単位セメント量が少なく温度上昇が小さい 300kg/m³ の場合においても他の場合とほぼ同程度であり、

配合によらず 1.2 倍から 1.5 倍程度であった。普通セメントを用いた場合、極初期材齢において温度履歴により強度増進が生じていると推測されるが、低熱ポルトランドセメントを用いた場合その傾向が長期にわたり強度増進効果が継続すると考えられる。また、長期強度については、普通セメントを用いた場合と同様に、温度履歴を受けた場合の方が受けない場合（20℃養生）より小さくなる傾向を示した。しかし、その低下の比率は、10%程度であり、普通セメントの場合より小さい。したがって、初期の高温履歴が強度発現に及ぼす影響は、普通セメントの場合より小さいと考えられる。

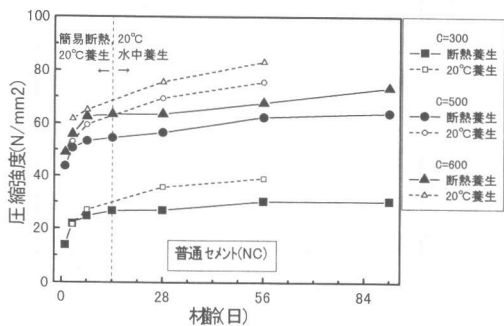


図3 材齢と圧縮強度の関係（普通セメント）

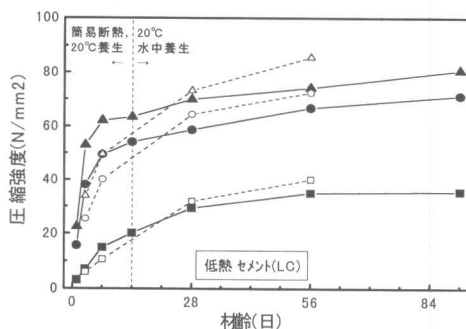


図4 材齢と圧縮強度の関係（低熱セメント）

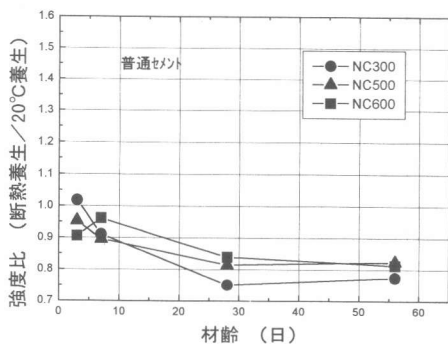


図5 材齢と強度比の関係（普通セメント）

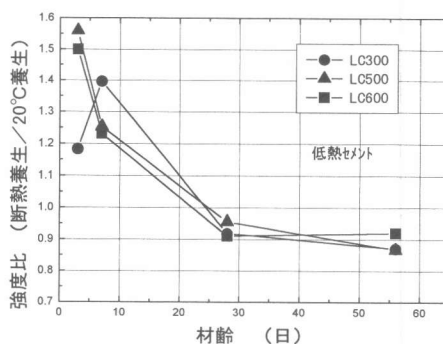


図6 材齢と強度比の関係（低熱セメント）

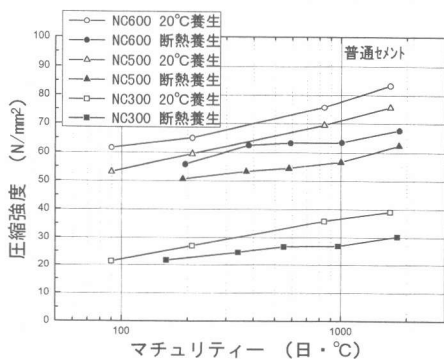


図7 マチュリティーと圧縮強度（普通セメント）

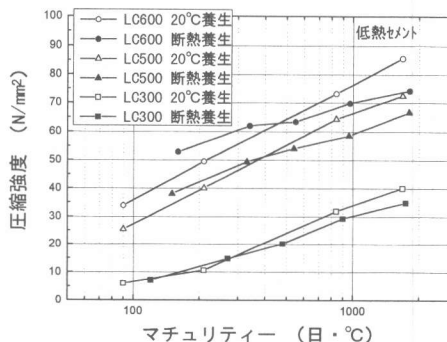


図8 マチュリティーと圧縮強度（低熱セメント）

図7および図8に、マチュリティーと圧縮強度の関係を示す。これまでの研究で初期材齢に高温履歴を受けたコンクリートの強度発現性は従来のマチュリティー則では必ずしも適切に評価できないことが指摘されているが[9]、本研究においても初期に温度履歴を受けた場合、いずれのセメントを用いた場合でも、20℃養生の関係では適正に評価できないことが認められた。

3. 3 履歴最高温度による強度増減を考慮した強度推定

上記のように初期の温度履歴が強度発現に影響を及ぼすことが明らかとなったが、この影響を履歴した最高温度で評価することを試みた。筆者等のこれまでの研究により履歴最高温度と強度発現の関係が示されているが[8]、これより求めた強度比（断熱養生/20℃養生）を表3に示す。これらのデータより、目的変数を強度比（ α ）、説明変数をセメント水比（C/W）、材齢（ \sqrt{t} ：強度比は時間の平方根にほぼ比例して減少することから、材齢の平方根を用いた）および最高上昇温度（Tmax）とし重回帰分析を行った。なお、強度発現速度に及ぼす温度依存性をアレニウス則に代表される非線形式により考慮した強度推定式が示されているが[9]、ここでは簡便な推定式を求めるため線形式とした。重回帰分析の結果は有意となり、得られた式を次に示す。

低熱ポルトランドセメントの場合：

$$\alpha = 0.021C/W - 0.063 \sqrt{t} + 0.001T_{max} + 1.327 \quad (r=0.759) \quad (1)$$

普通セメントの場合：

$$\alpha = 0.038C/W - 0.012 \sqrt{t} - 0.003T_{max} + 0.978 \quad (r=0.813) \quad (2)$$

ここに、 α ：強度比（断熱養生の強度/20℃養生の強度）、C/W：セメント水比、t：材齢（日）、Tmax：履歴した最高上昇温度（℃）

図7に実測値から求めた強度比と強度比の推定値の比較結果を、単位セメント量500kg/m³の場合について示す。なお、履歴した最高上昇温度は表2に示すように、低熱ポルトランドセメントの場合25.3℃、普通セメントの場合46.7℃である。これより、

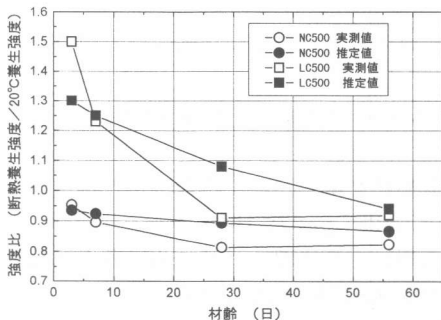


図7 強度比の推定結果

表3 圧縮強度試験および強度比計算結果[5]

セメント	セメント量 (kg/m ³)	最高温度 (°C)	強度比	材齢 (日)			
				7日	28日	56日	91日
NC	300	20		29.9	39.7	44.7	45.1
		50(30)		30	38.9	40.7	42.9
			50/20	1.003	0.980	0.911	0.951
		65(45)		24.7	29.7	30.4	31.8
			65/20	0.826	0.748	0.680	0.705
		80(60)		26.6	31.2	33.6	34.5
		80/20	0.890	0.786	0.752	0.765	
	600	20		67.6	77.4	88.7	91.1
		50(30)		65.1	74.8	81.3	83.4
			50/20	0.963	0.966	0.917	0.915
		65(45)		67.4	71.5	75.4	80.6
			65/20	0.997	0.924	0.850	0.885
80(60)			65.3	71.5	73	76.8	
	80/20	0.966	0.924	0.823	0.843		
LC	300	20		15.6	36.9	49.3	55.6
		50(30)		20.1	35.6	43.1	46.8
			50/20	1.288	0.965	0.874	0.842
		65(45)		24.1	33.8	37.8	41.7
			65/20	1.545	0.916	0.767	0.750
		80(60)		26.9	34.3	38.5	37.8
		80/20	1.724	0.930	0.781	0.680	
	600	20		51.3	77.9	89.9	99.1
		50(30)		59.8	76.2	84.3	87.4
			50/20	1.166	0.978	0.938	0.882
		65(45)		70.8	81.8	87.4	92.1
			65/20	1.380	1.050	0.972	0.929
80(60)			73.2	77.6	88.2	90.6	
	80/20	1.427	0.996	0.981	0.914		

注1) ()内の数字は最高上昇温度

注2) 温度履歴は、温度制御可能な養生槽を用いて強制的に与えられた。すなわち、昇温速度は2.5℃毎時、最高温度を50, 65及び80℃で24時間保持し、材齢4日で20℃まで冷却された。

いくつかの材齢で乖離が見られるが、何れのセメントを用いた場合も、強度発現の傾向は比較的よく表現されている。よって、今後温度履歴を受けた場合の強度と標準養生の場合の強度比と履歴した最高上昇温度、材齢および配合等に関するデータを蓄積することで、温度履歴を受けた場合の強度発現性状がより精度よく推定できると考えられる。特に、低熱ポルトランドセメントを用いた場合、温度上昇の影響が大きく、温度履歴から強度を推定することは意義あることと思われる。

4. 結論

本研究では、初期の高温履歴が低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現性に及ぼす影響を、普通セメントを用いた場合と比較検討した。さらに、履歴温度による強度の増減を考慮し、温度履歴を受ける場合のコンクリートの強度発現性を評価した。本研究で得られた結論を要約すると次のようになる。

(1)普通セメントを用いた場合、初期材齢の高温履歴は、初期強度への影響は小さく、長期強度の増進に悪影響を与える。一方、低熱ポルトランドセメントを用いた場合、初期の高温履歴は初期強度を大幅に増進させ、また長期強度への影響も比較的小さい。したがって、初期材齢に高温履歴を受ける高強度な配合条件で、低熱ポルトランドセメントを用いることは良好な強度発現性を持つコンクリートを得る上で有利と考えられる。

(2)温度履歴を受けた場合の強度と標準養生の場合の強度比を、履歴した最高上昇温度、材齢および配合の関数で表すことにより、初期材齢に高温履歴を受けた場合の強度発現の傾向が評価可能である。今後データを蓄積し、より汎用性の高い初期材齢に高温履歴を受けた場合の強度発現性の評価方法について検討する必要がある。

参考文献

- [1]寺田了司、富田六郎、田中敏嗣；低・ライト系ポルトランドセメントを用いたコンクリートの諸特性、セメント・コンクリート論文集 No.47, pp.142-147,1993
- [2]堂園昭人、丸岡正知、神省吾、広瀬哲；低・ライト系セメントを用いたコンクリートの高温環境下における特性、セメント・コンクリート論文集 No.49, pp.456-461,1995
- [3]丸岡正知、田中敏嗣、富田六郎；低・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
- [4]田中光男、原田宏、名和豊春；高・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
- [5]竹村英樹、大塚昭男、堀口浩司、五十嵐達夫；低発熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートについて、セメント・コンクリート論文集 No.47, pp.690-695,1993
- [6]松永篤、大西利勝、大高聡；高・ライト系セメントを使用した低水セメント比コンクリートの強度発現性、第49回セメント・コンクリート論文集 No.49, pp.300-305,1995
- [7]三浦彦彦、青木茂、神代泰道、河村秀紀；超高強度・低発熱連壁コンクリートの配合選定と実施工時のフレッシュ性状、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp267-pp272,1996
- [8]田中敏嗣、丸岡正知、竹内良、富田六郎；低・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.16, No.1, pp267-pp272,1996
- [9]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