

# 論文 ビーライト系低発熱コンクリートの温度上昇に伴う強度発現性

竹田宣典\*1・青木 茂\*2・十河茂幸\*3

**要旨：** 水和反応が緩やかに進行するビーライトを多く含むポルトランドセメントのマスコンクリートへの適用を目的として、これらのセメントを用いた低発熱コンクリートの発熱特性および水和熱による温度履歴が強度発現に及ぼす影響について検討した。その結果、ビーライト含有量が多いセメントほど、発熱速度および温度履歴を受けた場合の強度発現は遅くなるが、マスコンクリートにおいては、水和発熱により強度発現が促進され、初期強度は増加し、また、温度上昇量が抑えられることから、最終強度に及ぼす温度履歴の影響は少ないことが明らかになった。

**キーワード：** マスコンクリート、低発熱コンクリート、圧縮強度、温度履歴、水和熱

## 1. はじめに

近年、マスコンクリートの温度ひび割れの抑制を目的として、水和反応が緩やかなビーライトを多く含んだポルトランドセメントが開発され、実施工への適用が検討されている [1], [2]。これらのセメントを用いた低発熱コンクリートは、従来のコンクリートに比べて、強度発現は緩やかであるが、反応速度が遅いため打設温度や養生温度などの影響を受けやすい [3]。従来のセメントをマスコンクリートに適用した場合には、強度発現は水和熱による温度履歴の影響を受けることが報告されているが、ビーライトを多く含んだセメントを用いた場合の水和熱による温度履歴が強度発現に及ぼす影響については、十分に明らかにされていない。そこで本論文では、ビーライト含有率が異なるセメントを用いた低発熱コンクリートの発熱特性および温度履歴と強度発現性の関係について検討した結果について述べる。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは、ビーライトを多く含有したポルトランドセメント（略号：L I、L II）と中庸熱ポルトランドセメント（略号：MP）および普通ポルトランドセメント（略号：NP）を用いた。実験に用いたセメントの物性および鉱物組成を表-1に示す。ビー

表-1 セメントの物性および鉱物組成

セメントの種類と記号	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	鉱物組成 (%)				水和熱 (J/g)			圧縮強さ (MPa)				
			C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	7日	28日	91日	7日	28日	91日		
低発熱 ポルトランドセメント (ビーライト高含有タイプ)	L I	1	3.24	3040	26.3	52.8	2.5	13.1	192	260	303	7.1	28.6	47.1
		2	3.24	3060	21.0	58.0	3.2	11.0	178	245	306	6.0	21.2	54.6
		3	3.22	3420	29.3	53.4	2.9	8.2	211	270	316	11.5	32.9	59.9
中庸熱 ポルトランドセメント	MP	1	3.22	3540	12.0	76.0	2.0	10.0	124	192	252	3.8	18.2	48.8
		2	3.24	3400	9.0	72.0	2.0	9.0	115	183	256	3.3	17.0	47.1
普通 ポルトランドセメント	NP	1	3.21	3000	45.4	32.0	4.4	12.2	272	331	372	16.6	34.4	49.1
		2	3.21	3120	43.0	35.0	4.0	12.0	278	329	365	16.4	37.4	52.2
普通 ポルトランドセメント	NP	1	3.16	3390	48.0	28.0	8.0	8.0	331	384	412	26.2	42.1	-

\*1 ㈱大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員、工修（正会員）

\*2 ㈱大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員（正会員）

\*3 ㈱大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員、工博（正会員）

ライト (C<sub>2</sub>S) の含有率は、L I で52~58%、L II で72~76%、MP で32~35%、NP で28% である。使用した骨材および混和剤の性質を表-2 に示す。

### 2.2 コンクリートの配合と性質

コンクリートの配合を表-3 に示す。コンクリートの種類は、単位セメント量を300 ~400 kg/m<sup>3</sup> とした普通スランブのコンクリートと単位セメント量が500 ~607 kg/m<sup>3</sup> の高流動コンクリートとした。いずれの配合も、単位水量は160 ~170 kg/m<sup>3</sup> とし、高性能AE減水剤を使用した。

### 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-4 に示す。発熱特性を調べるため断熱温度上昇試験を行った。また、断熱温度上昇試験時に、コンクリートの温度上昇量と同様の温度履歴を与えることのできる温度追従槽（湿度100%）で、強度試験用供試体を材齢14日（L II は材齢28日）まで養生し、所定の材齢で取り出し、圧縮強度を測定した。材齢14日（L II は材齢28日）以降は標準養生とし、材齢28日、91日、180 日で圧縮強度を測定した。標準養生を行った場合についても、断熱温度履歴養生と同じ材齢において圧縮強度を測定した。さらに、断熱材で覆った立方体型枠（内寸：一辺1.0m）中に、コンクリートを打込み、中心部の温度上昇量を測定した。温度が降下した後コアを採取し、水中養生の後、材齢91日、180 日において圧縮強度を測定した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 フレッシュコンクリートの性質

フレッシュコンクリートの試験結果を表-5 に示す。普通コンクリートのスランブは11.5~17.5cm、高流動コンクリートのスランブフローは49~70cmの範囲であった。

凝結時間は、高性能AE減水剤の添加量の影響も受けるが、ビーライト含有率

表-2 骨材および混和剤の性質

種類	記号	分類	比重	物性・主成分
細骨材	S1	山砂	2.61	吸水率：1.97%，F.M.：2.69
	S2	陸砂・川砂混合	2.60	吸水率：1.34%，F.M.：2.74
	S3	山砂	2.60	吸水率：1.80%，F.M.：2.95
粗骨材	G1	碎石 (Gmax20mm)	2.64	吸水率：0.64%，F.M.：6.68
	G2	碎石 (Gmax20mm)	2.70	吸水率：0.77%，F.M.：6.70
	G3	碎石 (Gmax20mm)	2.64	吸水率：0.57%，F.M.：6.69
混和剤	SPA	高性能AE減水剤	1.05	ポリカルボン酸エーテル系架橋ポリマーの複合体

表-3 コンクリートの配合

コンクリートの種類	配合記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	SPA
普通コンクリート	A	MP-1	5.5	4.7	165	300	S1:865	G1:983	3.3
	B	L I-1					S1:858	G1:983	0.9
	C	L II-1					S1:865	G1:983	1.2
	D	NP-1	4.1	4.5	165	400	S2:769	G2:986	8.8
	E	MP-2					S2:771	G2:988	4.4
	F	L I-2					S2:774	G2:991	3.0
高流動コンクリート	G	MP-1	3.3	5.3	165	500	S1:888	G1:792	6.0
	H	L I-1					S1:886	G1:792	8.5
	I	L I-3	2.8	4.3	160	571	S3:707	G3:952	12.0
	J	L II-2					4.4	170	607

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	試験材齢
断熱温度上昇試験	空気循環式装置	
圧縮強度試験	標準養生	水中養生 (水温：20±2℃)
	断熱温度履歴養生	断熱温度上昇に追従した温度履歴を与える養生槽中で養生
マスブロック試験	一辺1.0 mのマスブロックの温度上昇量、材齢91日、180 日におけるコアの圧縮強度	(1, 3), 7, 14, 28, 91 (180) 日 ( ) は一部

表-5 フレッシュコンクリートの試験結果

コンクリートの種類	配合記号	セメントの種類	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	スランブ・スランブフロー (cm)	空気量 (%)	フリーゾーン率 (%)	凝結時間 (h-m)		練上り温度 (℃)
							始発	終結	
普通コンクリート	A	MP-1	300	14.5	4.8	7.0	6-20	8-25	23.2
	B	L I-1		17.5	4.6	3.2	6-05	8-10	23.0
	C	L II-1		16.0	4.9	4.5	8-15	12-12	20.3
	D	NP-1	400	13.0	4.2	2.7	7-00	9-00	20.0
	E	MP-2		13.0	4.0	2.2	6-35	10-05	20.0
	F	L I-2		11.5	3.0	2.6	5-40	10-00	19.8
高流動コンクリート	G	MP-1	500	54×51	4.7	1.6	7-45	9-00	23.2
	H	L I-1		71×69	5.4	2.3	8-40	10-20	22.9
	I	L I-3	571	49×48	2.9	0.0	10-11	11-51	22.7
	J	L II-2	607	66×67	3.3	0.0	20-24	24-10	20.0

(以下  $C_2S$ 率と呼称) が70%以上のセメント (L II) を用いた場合、遅れる傾向が見られた。

### 3.2 発熱特性

断熱温度上昇試験の結果を図-1に示す。 $C_2S$ 率が60%以下のセメントを用いた場合は、セメント量にかかわらず材齢14日までで温度上昇は終了するが、 $C_2S$ 率が70%以上のセメント (L II) の場合は、温度上昇速度は前者に比べて遅くなり、材齢28日以降も温度が若干上昇する傾向を示した。

これらの試験結果を式(1)で近似させた場合、式(1)の適合性は、 $C_2S$ 率が60%以下のセメントでは高いが、L IIの場合は、前者に比べて低い。L IIの様に発熱速度が遅いセメントに対しては、他の近似式を適用した方が適合性は良いと考えられるが、各種のセメントの発熱特性を相対的に比較するために、式(1)における定数  $Q_\infty$  および  $\gamma$  と  $C_2S$  率の関係について調べた。

$$Q(t) = Q_\infty (1 - e^{-\gamma t}) \dots\dots (1)$$

$Q(t)$ : 材齢  $t$  の断熱温度上昇量 (°C)

$t$ : 経過時間 (日)

$Q_\infty$ : 終局断熱温度上昇量

$\gamma$ : 温度上昇速度に関する定数

式(1)によって計算された  $Q_\infty$  および  $\gamma$  を表-6に示す。 $C_2S$ 率が70%以上のセメント (L II) では、近似式の適合性が低いため、 $Q_\infty$ は実際より大きく計算されたものと考えられる。

単位セメント量と終局断熱温度上昇量 ( $Q_\infty$ ) の関係を図-2に示す。 $C_2S$ 率が32~58% (MPおよびL I) の範囲では、単位セメント量の増加に伴い  $Q_\infty$ は増加し、その増加割合は、 $C_2S$ 率が異なっても大差ない。また、単位セメント量が300~500 $kg/m^3$ の範囲において、L Iの  $Q_\infty$ は同一セメント量のMPと比較して15%程度減少した。 $C_2S$ 率と温度上昇速度に関する定数 ( $\gamma$ ) の関係を図-3に示す。 $\gamma$ は単位セメント量の影響も受けるが、 $C_2S$ 率と強い相関関係

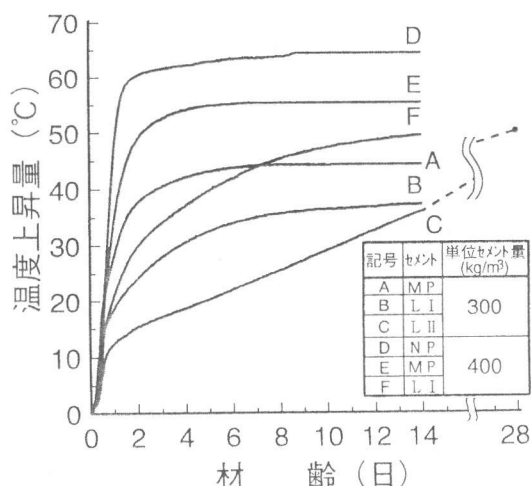


図-1 断熱温度上昇試験結果

表-6 断熱温度上昇試験による温度特性

配合	セメントの種類	$C_2S$ 率 (%)	単位セメント量 (kg/m³)	$Q(t) = Q_\infty (1 - e^{-\gamma t})$	
				$Q_\infty$	$\gamma$
A	MP-1	32.0	300	43.9	0.95
B	L I-1	52.8		36.1	0.55
C	L II-1	76.0		49.0	0.10
D	NP-1	28.0	400	64.0	1.09
E	MP-2	35.0		55.9	0.90
F	L I-2	58.0		47.8	0.42
G	MP-1	32.0	500	64.6	1.10
H	L I-1	52.8		54.8	0.71
I	L I-3	53.4		571	58.5
J	L II-2	72.0	607	74.7	0.11

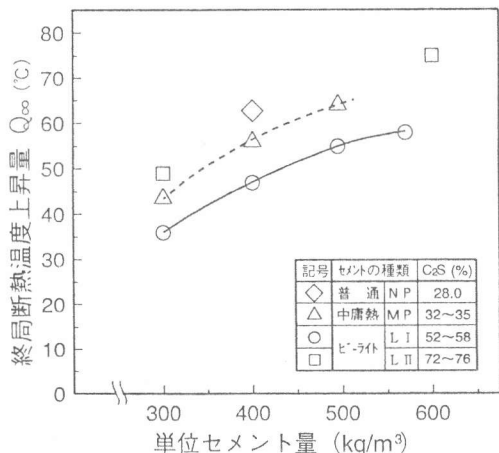


図-2 単位セメント量と定数  $Q_\infty$  の関係

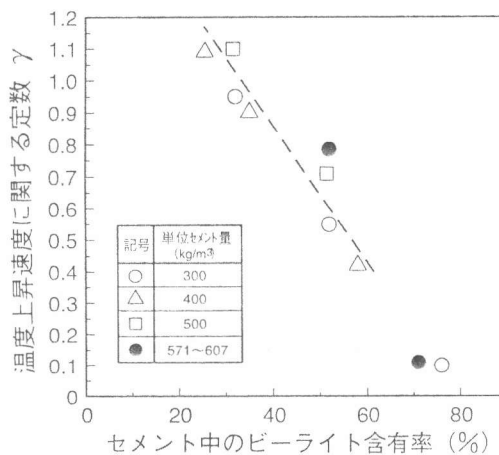


図-3 ビーライト含有率と定数  $\gamma$  の関係

が認められ、 $C_2S$  率の増加により発熱速度が遅くなることが確認された。

### 3.3 標準養生における強度発現性

標準養生における圧縮強度と材齢の関係を図-4に示す。水セメント比が33%以上の場合、同一水セメントであれば、 $C_2S$  率が異なっても、材齢91日でほぼ同等の強度が発現し、それ以降は $C_2S$  率が高いほど強度の増加は大きい。

水セメント比が28%の場合、 $C_2S$  率が70%以上のセメント (L II) を用いたものの強度は、 $C_2S$  率が52~58%のセメント (L I) を用いたものと、材齢180日で同等となった。

材齢91日の強度に対する強度発現率は、材齢7日において、MPで40~60%程度、L Iで20~45%程度、L IIで5~20%程度であり、材齢28日では、MPで75~90%程度、L Iで65~85%程度、L IIで30~60%程度であった。

強度発現は、 $C_2S$  率が高いセメントほど遅く、低水セメント比となるほど速い傾向が見られた。

### 3.4 温度履歴が強度発現に及ぼす影響

断熱温度履歴を受けた場合の圧縮強度と材齢の関係を図-5に示す。標準養生を行った場合と比較して、断熱温度履歴を受けた場合の強度発現は速いが、材齢28日以降の強度の伸びは少ない。また、最終強度は $C_2S$  率が高いセメントほど、高くなる傾向が見られる。

断熱温度履歴を受けた場合の材齢91日の圧縮強度に対する強度発現率を図-6に示す。材齢

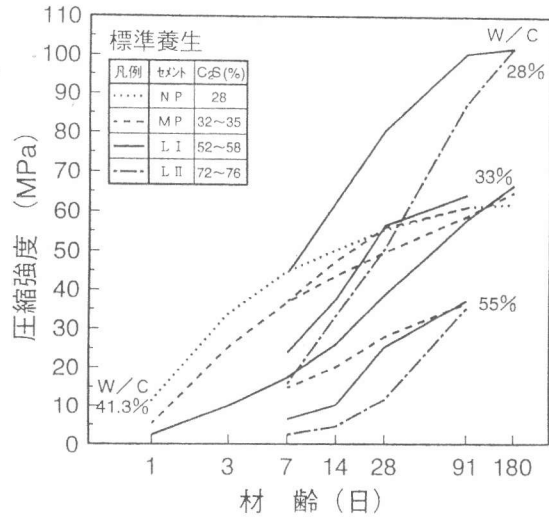


図-4 圧縮強度と材齢の関係 (標準養生)

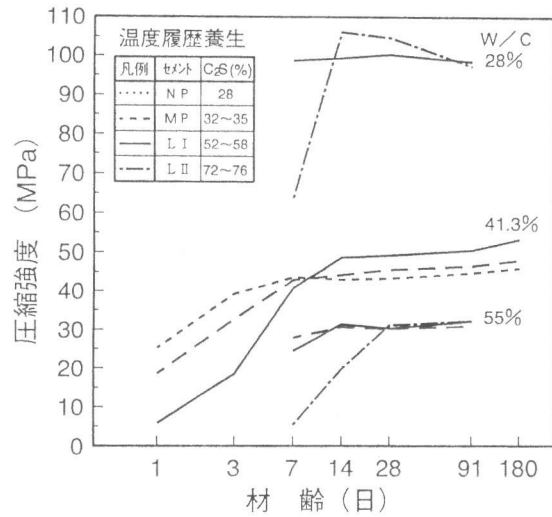


図-5 圧縮強度と材齢の関係 (温度履歴養生)

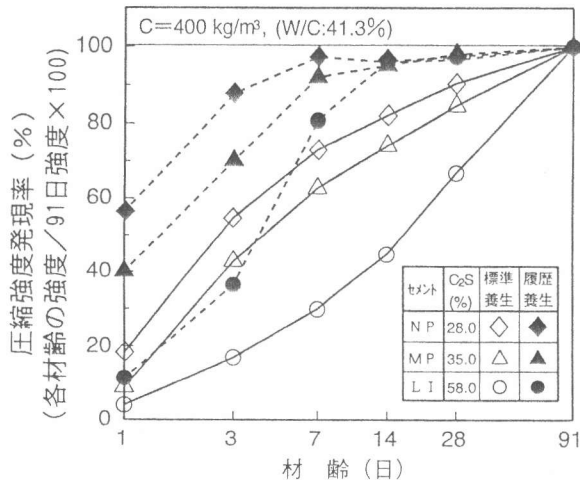
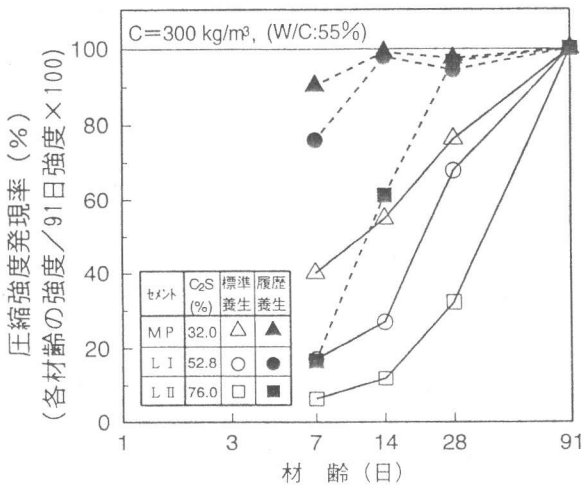


図-6 温度履歴を受けた場合の強度発現率

91日の強度に対する強度発現率が90%以上となる材齢は、NP、MPについては、水セメント比にかかわらず7日、LIについては、水セメント比が40%以上の時14日、水セメント比が35%以下の高流動コンクリートでは7日以前であった。LIIにおいては、水セメント比が55%の時は材齢28日で、水セメント比が28%の時は材齢14日で、材齢91日とほぼ同等の強度が発現する。このように、断熱状態における温度履歴を受けた場合の強度発現も、標準養生と同様にC<sub>2</sub>S率の高いセメントほど遅くなり、低水セメント比となるほど速い傾向が見られる。

断熱温度履歴を受けた場合の圧縮強度の標準養生に対する強度比は、材齢91日において、NPで75%程度、MPで80%程度、LIでは85%以上、LIIでは90%以上であり、C<sub>2</sub>S率が高いセメントほど、より標準養生の場合に近い最終強度が得られる。また、C<sub>2</sub>S率が50%以上のセメントを、水セメント比35%以下の高流動コンクリートに用いた場合は、材齢91日において、断熱温度履歴を受けた場合と標準養生では、ほぼ同等の強度が得られた。

積算温度と圧縮強度の関係を図-7に示す。断熱温度履歴を受けたNP、MPの圧縮強度は、単位セメント量が400kg/m<sup>3</sup>の場合、積算温度が100℃・日以上では標準養生より小さくなり、500℃・日以上となると強度の伸びは少なくなる。また、単位セメントが400kg/m<sup>3</sup>以下の場合のLIおよびLIIの圧縮強度は、積算温度が1500℃・日程度以下では、断熱温度履歴を受けた方が標準養生に比べて大きい。1500℃・日程度以上となると強度の伸びは少なくなり、標準養生の方が大きくなる傾向がある。

単位セメント量が550kg/m<sup>3</sup>以上の高流動コンクリートにLIおよびLIIを用いた場合の圧縮強度は、積算温度にかかわらず、断熱温度履歴を受けた方が標準養生に比べて大きい。

以上より、C<sub>2</sub>S率が高いセメントを用いる場合、積算温度が小さい範囲では、温度履歴による強度の増加率が高いため、マスコンクリートにおいては、水和発熱に起因する温度履歴による初期強度の増加割合が、MP、NPに比べて大きいものと考えられる。

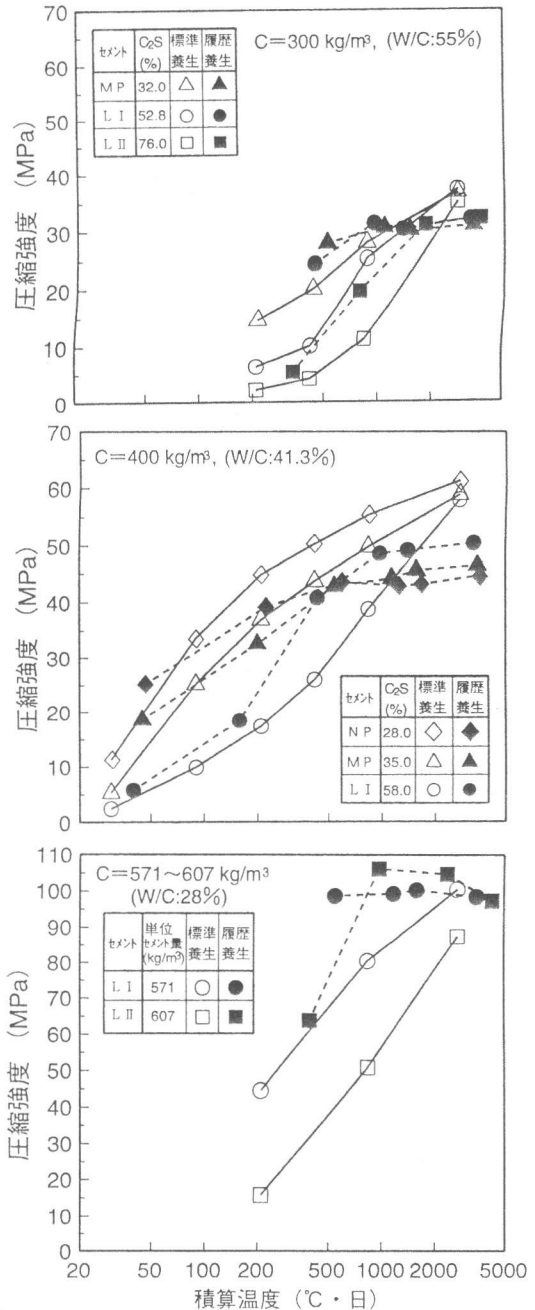


図-7 積算温度と圧縮強度の関係

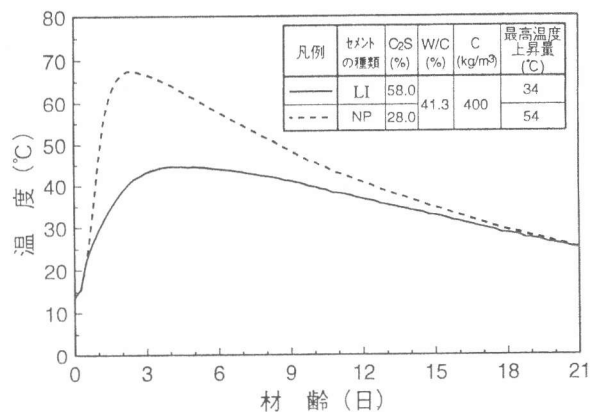


図-8 マスブロック中の温度の経時変化

### 3.5 マスブロックにおける温度上昇と強度発現

LIおよびNPを用いた場合のマスブロックの中心部の温度上昇曲線を図-8に示す。最高温度は、LIで34℃、NPで54℃であり、約20℃の温度上昇量の差があった。

標準養生供試体とマスブロックから採取したコアの圧縮強度を図-9に示す。材齢180日におけるコアの圧縮強度は、LIでは標準養生した場合とほぼ同等であるが、NPでは標準養生の約75%程度であった。よって、マスコンクリートにピーライトを多く含むセメントを用いた場合、温度履歴が最終強度に及ぼす影響は少ないと考えられる。これは、ピーライトを高含有したセメントを用いることにより、温度上昇速度が遅くなり、温度上昇量が少なくなることも理由の一つとして考えられる。

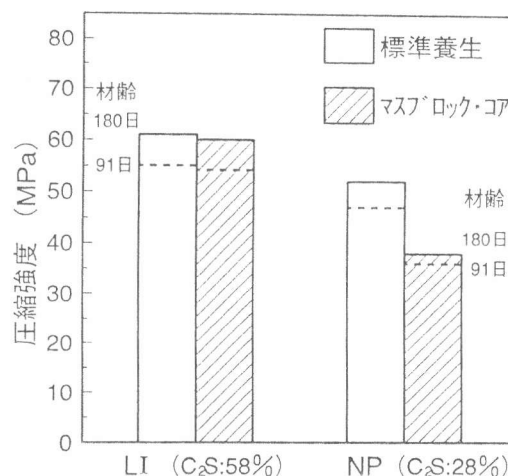


図-9 マスブロックから採取したコアの圧縮強度

## 4. 結論

本研究で明らかになった結果を以下にまとめる。

- (1) ピーライト含有率の高いセメントを用いた場合、ピーライト含有率の増加に伴い、終局断熱温度上昇量は減少し、発熱速度は遅くなる傾向が確認された。
- (2) 断熱状態で温度履歴を受けた場合、ピーライト含有率の高いセメントの強度発現は、標準養生を行った場合に比べて速いが、材齢28日以降の強度の伸びは少ない。断熱温度履歴を受けた場合、ピーライト含有率が高いほど最終強度は高くなるが、強度発現は遅くなる傾向が見られる。
- (3) 断熱状態での強度発現は、水セメント比が低くなるほど速い傾向が見られる。単位セメント量が600kg/m<sup>3</sup>以上の高流動コンクリートに、ピーライト含有率が70%以上のセメントを用いた場合には、断熱状態において材齢14日で材齢91日と同等の強度が得られる。
- (4) ピーライトの含有率が50%以上のセメントの場合、積算温度が1500℃・日程度以下では、圧縮強度は温度履歴を受けた方が標準養生に比べて大きい。
- (5) マスコンクリートにおいて、ピーライト含有率の高いセメントを用いた場合は、中庸熱ポルトランドセメントや普通ポルトランドセメントに比べて、水和発熱に起因する温度上昇による初期強度の増加割合が大きく、また最終強度に及ぼす温度履歴の影響は少ないと考えられる。

### [参考文献]

- 1) 久保田昌吾ほか；低熱セメントを用いた高強度コンクリートの施工性および強度発現性に関する検討；コンクリート工学年次論文報告集 Vol.16 No.1 pp277-282, 1994.6
- 2) 三浦律彦ほか；高ピーライトセメントの高強度地下連続壁コンクリートへの適用性に関する基礎的研究；コンクリート工学年次論文報告集 Vol.16 No.1 pp271-276, 1994.6
- 3) 竹田宣典ほか；ピーライト系低発熱性コンクリートの養生条件と耐久性の関係について、セメント・コンクリート論文集 No.48, pp.298-303, 1994.12