

報告 低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの積算温度に関する一考察

小山 宣幸*¹・平田 久則*²・植田 厚元*³・小島 利広*⁴

要旨：ビーライト含有割合の高いセメントを用い、異なる温度で水中養生したコンクリートの圧縮強度を測定し積算温度との関係を調べた。その結果、若材齢における強度増進は緩やかであるが、ある材齢から強度が著しく増進し、その材齢は養生温度が高いほど早い傾向を示した。次に、一般に用いられる定数が10℃の積算温度を指標として圧縮強度の結果を考察したが高い相関は得られなかった。しかし、定数を0℃とした積算温度では良い相関が認められた。また、積算温度と圧縮強度の関係を近似すると、250・D・D近辺を境に勾配の異なる二つの近似式で現された。

キーワード：低熱ポルトランドセメント, ビーライト, 圧縮強度, 積算温度, 養生温度

1. はじめに

近年、ポルトランドセメント中のクリンカー鉱物の組成割合を調整し、ビーライト含有割合の多い低熱ポルトランドセメントが開発されている。ビーライトはセメント中の他の構成鉱物であるエーライト、アルミネート相およびフェライト相よりも反応熱が低いため、低熱ポルトランドセメントの水和熱は低いことが知られている。また、長期強度が高いことや優れた流動性から、マスコンクリートのみならず高流動コンクリートや高強度コンクリートでも使用されている。

低熱ポルトランドセメントの材齢の進行に伴う強度増進の傾向は、普通ポルトランドセメントと比較すると大きく異なり、若材齢での強度発現は低いものの長期材齢での強度は同等以上となる。この傾向は積算温度と圧縮強度との関係にも現れ、積算温度が200～500・D・D付近から強度発現勾配が大きくなると報告[1]されている。また、ビーライトの反応は養生温度が高いほど速く、長期における反応率は養生温度が高いほど大きい[2]ことが報告されている。断熱養生と標準養生での強度を比較した結果では、ビーライト量の多いセメントでは積算温度が大きくなると、断熱養生下における強度が標準養生における強度に比べて高くなるようである[3][4]との報告もある。

以上のように低熱ポルトランドセメントでは、その期待される強度が長期材齢にあるが、強度発現は材齢初期からの熱履歴の影響を強く受けるものと思われる。効率的な配合決定には強度の推定が不可欠であり、このためには材齢と強度発現の傾向を明らかにしておかなければならない。本報告ではビーライト含有割合が60%の低熱ポルトランドセメント（以下Lと略記）を用い、10℃、20℃および35℃の水温で水中養生したコンクリートの圧縮強度を測定し、積算温度と圧縮強度との関係を調べた。また、普通ポルトランドセメント（以下Nと略記）と中庸熱ポルトランドセメント（以下Mと略記）も使用して、3者間での対比を行なった。

* 1 三菱マテリアル（株）セメント開発センター 開発研究室 研究員、工修（正会員）
 * 2 三菱マテリアル（株）セメント開発センター 開発研究室 副主任研究員
 * 3 三菱マテリアル（株）セメント開発センター 開発研究室 研究員
 * 4 三菱マテリアル（株）東京セメント支店（正会員）

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用したセメントそれぞれの諸物性を表-1に示す。また、使用した骨材と混和剤の諸元を表-2に示す。混練水には上水道水を使用した。

表-1 セメントの諸物性

セメント	比重	比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成(%)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
L	3.23	3250	21	60	3	10
M	3.21	3090	43	36	4	11
N	3.15	3170	53	25	10	8

2.2 実験の要因と水準

コンクリートの実験の要因と水準を表-3に示す。要因は養生温度とセメント種類である。実験水準は、養生温度が10, 20, 35℃の3ケースと、セメントの種類がL, M, Nの3種類であり、合計9水準である。また、養生方法は、所定材齢まで各温度での水中養生とした。

表-2 使用材料

材料	品質
細骨材	海砂, 表乾比重 2.55, 吸水率 1.71%, 粗粒率 2.20
粗骨材	安山岩(砕石 2005), 表乾比重 2.72, 吸水率 0.69%
混和剤	AE減水剤(リグニンスルホン化合物)
	空気量調整剤(アルキルアリルスルホン化合物)

2.3 配合

コンクリートの配合を表-4に示す。配合条件は水セメント比を55%とし、目標スランブを12±2.5cm, 空気量を4.5±1.0%と一定にした。AE減水剤はその標準添加量で混和した。また、スランブと空気量が目標範囲内となるように、単位水

表-3 実験要因と水準

要因	水準
養生温度	10, 20, 35℃
使用セメント	L, M, N

量と空気量調整剤を調整した。

表-4 コンクリートの配合

コンクリートの配合									コンクリートのフレッシュ性状			
試料	養生温度	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤		フランプ [°] (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
				C	W	S	G	Ad1	Ad2			
L	10℃	55.0	43.4	285	157	782	1095	C×0.25%	1.20A	12.0	4.4	10.2
M							1092		1.50A			
N							1076		0.75A			
L	20℃	55.0	43.4	285	157	782	1095	C×0.25%	1.20A	11.0	5.0	19.4
M							1092		1.50A			
N							1076		1.00A			
L	35℃	55.0	43.0	291	160	770	1095	C×0.25%	1.25A	12.0	5.0	35.2
M							1092		1.50A			
N							1076		1.25A			
			42.3	311	171	737	1076					

注) ・Ad1はAE減水剤, ・Ad2は空気量調整剤で1A=C×0.002%である。

2.4 供試体

圧縮強度試験用の供試体には、 $10\phi \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用い、JIS A 1132のコンクリートの強度試験用供試体の作り方に従い作製した。ただしコンクリートの練上り温度が実験水準の養生温度と同じとなるように室温もそれぞれ 10°C 、 20°C および 35°C に設定した。長期材齢に到る強度発現の過程を細かく調べるため、養生温度が 10°C と 20°C では材齢3日から材齢91日までの9材齢で圧縮強度を測定することにし、各材齢3本ずつの供試体を作製した。養生温度が 35°C では、材齢2日から、積算温度が $1500^\circ\text{C}\cdot\text{D}$ を越える材齢35日までの13材齢で強度を測定することにし、合計39本の供試体を作製した。なお、圧縮強度はJIS A 1108のコンクリートの圧縮強度試験方法に拠って測定した。

2.5 細孔構造

養生温度が 35°C の供試体では、材齢の進行に伴う細孔構造の変化を調べるため、細孔径分布を測定した。圧縮強度試験後に供試体を粗砕し、モルタル分を採取し、アセトンに浸漬して水和を停止させたものを試料とし、水銀圧入式ポロシメータを使用して、細孔半径 $2.4\sim 7500\text{nm}$ の細孔径分布を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 材齢と圧縮強度

材齢と圧縮強度の関係を図-1に示す。Mは材齢40日、Nは材齢30日までは養生温度の高いものほど圧縮強度が高くなっているが、それ以降は養生温度の低い 10°C の圧縮強度が高くなる傾向が見られる。

一方Lの初期強度はNとMに比べて低く、強度増進の傾きも小さいが、養生温度 35°C では材齢5日、養生温度 20°C では材齢14日、養生温度 10°C では材齢28日以降に強度の増進が顕著となっている。これは、ピーライトの反応が養生温度の高いものほどより早く活性化されたため[2]と思われる。また、LはMやNとは異なり56日を過ぎても各養生温度での強度の増進が見られる。ただし、図の傾向からはさらに材齢が経過すると、温度に関わらず同程度の強度に収束することが推測される。従って、LはMやNとは強度増進の傾向が異なることが分かる。

3.2 細孔構造と圧縮強度

細孔径分布の材齢による変化を図-2に示す。図から材齢の進行により細孔径分布は半径が小さい方向に移動し、累積細孔容積も小さくなっていることが分かる。また、Lの若

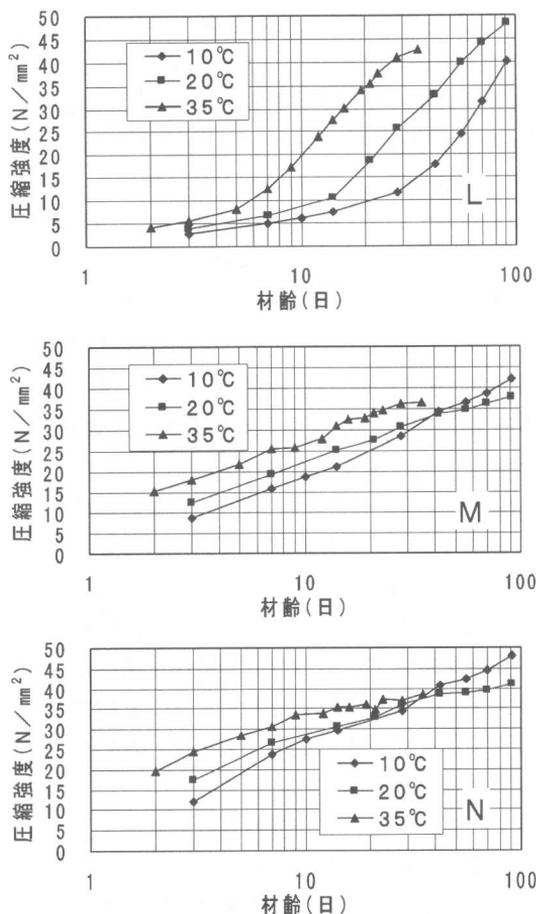


図-1 材齢と圧縮強度との関係

材齢での累積細孔容積は大きく、強度が低いことと合致している。材齢21日におけるL, M, Nの曲線を比較すると、ほとんど一致した形状となっており、累積細孔容積も等しい。この材齢における圧縮強度はNが 34.9N/mm^2 , Mが 34.3N/mm^2 , Lが 35.6N/mm^2 でありほぼ等しい。

そこで、累積細孔容積と圧縮強度との関係を調べた。図-3に示すように、セメントの種類によらず累積細孔容積と圧縮強度には相関関係が認められる。このことから、エーライトの水和反応とビーライトの水和反応との区別は、細孔容積と圧縮強度増進との関係には大きな影響を与えず、強度増進は細孔容積との関係ではほぼ表現できるものと思われる。

3.3 積算温度と圧縮強度

積算温度の定数を 10°C とした積算温度と圧縮強度の関係を図-4に示す。NとMはほぼ直線上で強度が推移しているが、 $800^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 辺りから養生温度 10°C の強度が他の場合よりも高くなっている。一方、Lは他の結果とは異なり、 $200^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 辺りから不連続点があり、養生温度の高いものほど早く不連続点が現れている。また、 $200^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 以降は同じ積算温度でも養生温度の高いものほど強度が高くなっているが、長期材齢での強度は、低温養生が高温養生よりも高くなると思われる。

3.4 積算温度計算における定数の検討

前述のように積算温度の定数を 10°C とした場合、Lにおいては積算温度では圧縮強度を精度良く表現できない。このため、積算温度の定数を変えて圧縮強度との関係を調べた。積算温度の定数を 0°C とした場合の圧縮強度との関係を図-5に示し、定数を -5°C とした場合の結果を図-6に示す。Lについて定数が 10°C , 0°C , -5°C の各図を比較すると、定数が 0°C の場合に最も相関が高くなるのが分かる。今回の結果は、ビーライト量が60%を越えるセメントでは、積算温度の定数を 0°C とした場合に良好な相関関係が得られた[5]とする報告と一致している。また、図-5に示されるように $200^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 辺りから屈折した線となっており、傾きも $200^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 以前はNやMよりも小さいが、 $200^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 以降はNやMよりも大きく、強度増進が著し

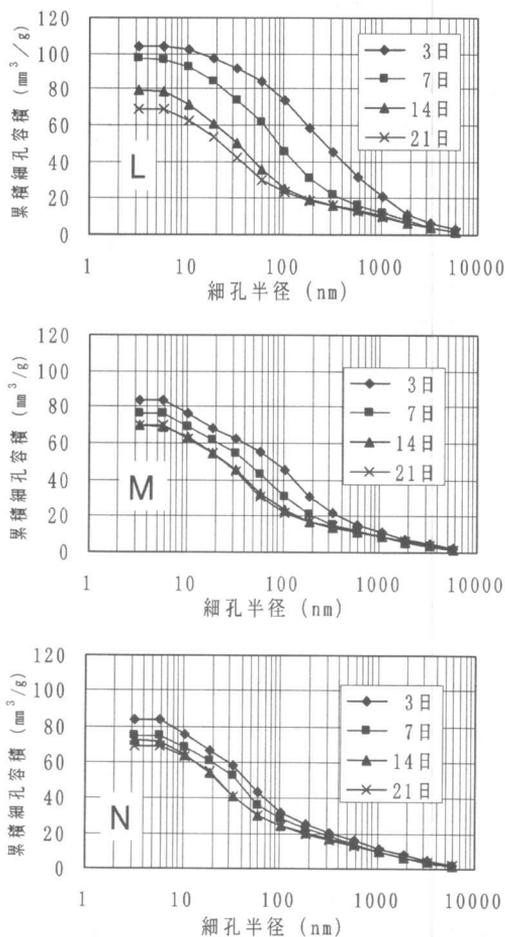


図-2 セメントごとの累積細孔容積

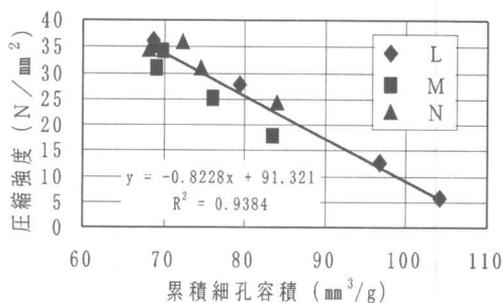


図-3 累積細孔容積と圧縮強度との関係

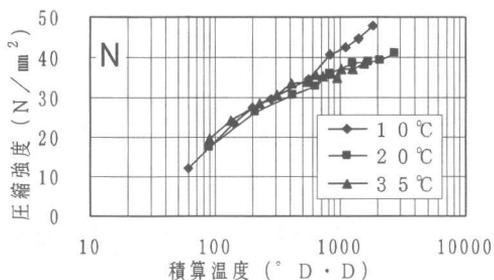
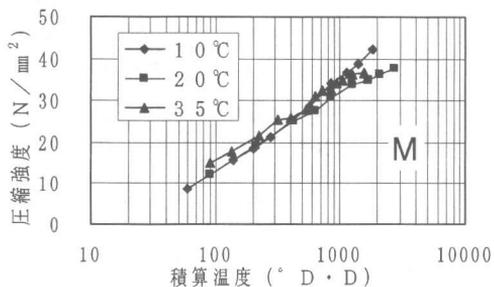
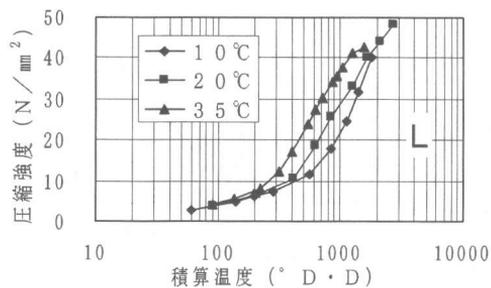


図-4 積算温度と圧縮強度との関係
(積算温度の定数=10°Cの場合)

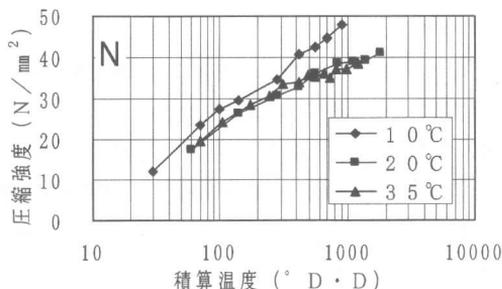
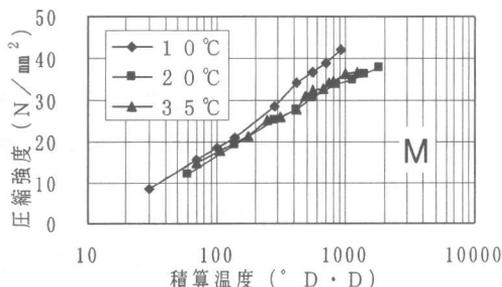
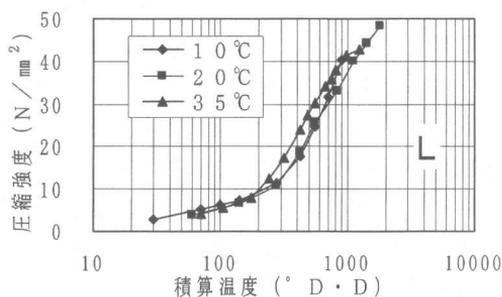


図-5 積算温度と圧縮強度との関係
(積算温度の定数=0°Cの場合)

いことが分かる。

そこで、積算温度の定数を0°Cとし、積算温度の250°D・Dが強度増進の傾きの境目になると仮定した場合について、250°D・D以前と以降のデータをそれぞれ近似したものを図-7に示す。NとMは400°D・Dからの養生温度10°Cの傾向の違いのために一つの直線で近似はできなかった。一方、Lは明らかに250°D・D近辺で異なった二つの直線で近似されることが分かる。このことから、ピーライト量の多いセメントでは、NやMとは異なり、ピーライトの水和反応が顕著になる時期から強度が著しく増進するために、積算温度と圧縮強度との関係が単一の直線で表せないものと思われる。ここで、250°D・D以前の水和の主体はエアライトが担い、250°D・D以降はピーライトが受け持つと仮定すると、エアライトの含有量は250°D・D以前の傾きに影響し、ピーライトの含有量は250°D・D以降の傾きに関係があると思われる。そこで、今回使用したそ

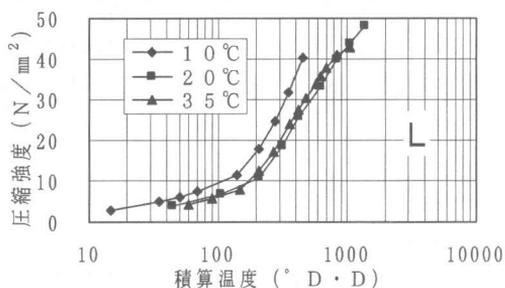


図-6 積算温度と圧縮強度との関係
(積算温度の定数=-5°Cの場合)

それぞれのセメントにおけるエアライトとビーライトの含有量と、図-7における近似式の傾きとの関係を図-8に示す。試料数は少ないが、エアライトの含有量とビーライトの含有量はともに近似式の傾きと相関関係が認められた。このことから、セメント中のエアライトとビーライトの含有割合から積算温度を指標にした圧縮強度の増進曲線の傾きが推定できる可能性があると思われる。

4. まとめ

Lを用いたコンクリートの積算温度と圧縮強度との関係を調べた。本実験の範囲内で結果をまとめる以下のおりである。

- (1) Lは若材齢における強度の増進はNとMに比べて小さいが、ある材齢以降は強度増進が活発になり、養生温度によらず材齢56日以降でも強度の増進が見られる。
- (2) セメントの種類によらず累積細孔容積と圧縮強度には相関関係が認められる。
- (3) Lは従来から使用されている積算温度の定数を10℃とした場合、積算温度と圧縮強度の関係には相関関係が見られず、養生温度の違いが顕著に現れた。
- (4) Lは積算温度の定数を0℃とした場合、積算温度と圧縮強度間には良好な相関関係が認められた。また、近似式は積算温度が250°D・D近辺で屈折した二直線で示され、250°D・D以降の強度増進は、NやMよりもはるかに著しいことが確認された。

〈参考文献〉

- [1] 原田 宏ほか：低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの特性とマスコンクリートへの適用，第47回セメント技術大会講演集，pp346-351，1993
- [2] 浅賀 喜与志ほか：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，第45回セメント技術大会講演集pp60-65，1991
- [3] 長岡 誠一ほか：セメント中のビーライト量とコンクリートの強度発現性に関する研究，第48回セメント技術大会講演集，pp122-127，1994
- [4] 青木 茂ほか：ビーライト高含有セメントを用いた高強度コンクリートの高温履歴下での強度発現性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 1, pp1317-1322，1994
- [5] 松永 篤ほか：低熱ポルトランドセメントの強度発現特性に関する一考察，土木学会第51回年次講演会講演概要集，第5部，pp404-405，1996

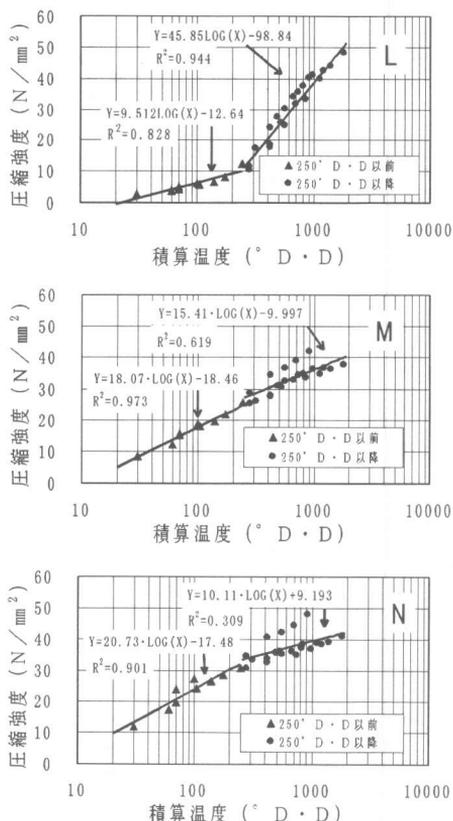


図-7 積算温度と圧縮強度の近似の関係

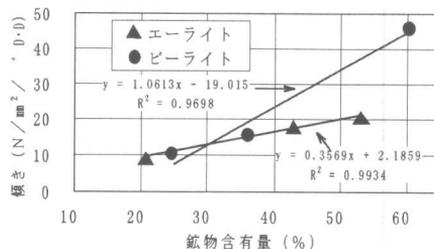


図-8 鉱物含有量と近似式の傾きの関係