

報告

[1066] 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と温度上昇

榎木 隆\*1・高野幸男\*2・佐藤孝一\*3・菅 一雅\*4

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の大型化、高層化に伴い、高強度コンクリートの使用例が増加しているが、通常のコンクリートに比べて単位セメント量が増すことから、部材の温度上昇が大きくなり、温度ひびわれ発生の危険性が增大する。

本報は、混合材を用いない、高ビーライト型の低熱セメントを高強度コンクリートに適用した場合の強度発現性および温度上昇低減効果について検討した結果をとりまとめたもので、水セメント比45%, 35%, 25%のコンクリートにおける圧縮強度、断熱温度上昇および表部材における温度上昇測定結果等について報告する。

2. 使用材料

(1) セメント

低熱ポルトランドセメント（以下Lセメントと略す）および比較用として普通ポルトランドセメント（以下Nセメントと略す）を用いた。その物理的性質、構成化合物割合を表-1に示す。これに見られる様にLセメントは構成化合物中のビーライト（ $C_2S$ ）量を増し、エーライト（ $C_3S$ ）および間隙相（ $C_3A$ ,  $C_4AF$ ）量を減じて低熱化を図ったセメントであり、Nセメントと比較して、材令28日までの強度は小さいが、長期強度の発現性が大きく、また水和熱は28日で30%程度小さい。

(2) 骨材

細骨材として、千葉県佐原市産陸砂（粗粒率1.66, 表乾比重2.61）, 埼玉県熊谷市産陸砂（同3.17, 2.64）, 東京都奥多摩町産砕砂（同2.89, 2.66）を15:30:55の比率で用いた。また粗骨材として、東京都青梅市産2005砕石（粗粒率6.68, 表乾比重2.65）を用いた。

(3) 混和剤

ポリカルボン酸系の高性能A E減水剤を用いた。

表-1 セメントの物理的性質と構成化合物

セメントの種類	比重	比表面積 ( $cm^2/g$ )	水量 (%)	凝 結		モルタル圧縮強さ ( $kgf/cm^2$ )				水和熱 ( $cal/g$ )			構成化合物 (%)			
				始 発 (h-m)	終 結 (h-m)	3日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
L	3.22	3410	27.8	2-35	4-05	76	118	317	580	48.3	63.3	74.6	27	58	2	8
N	3.16	3220	28.0	2-30	3-40	148	262	425	493	77.5	89.6	95.1	52	23	8	9

\*1 秩父セメント(株) 中央研究所 技術部 (正会員)

\*2 秩父セメント(株) セメント営業本部 技術部

\*3 (株)熊谷組 技術研究所 材料研究部 主任研究員 (正会員)

\*4 (株)熊谷組 技術研究所 材料研究部 研究員 (正会員)

### 3. 実験項目

- (1) 室内試験：①調合試験，②圧縮強度試験（標準養生），③断熱温度上昇試験（空気循環式試験槽使用，供試体寸法35φ×35cm，供試体容積33.5ℓ，打設温度20℃，30℃で実施）  
 (2) 実機試験：①圧縮強度試験（標準，20℃封かん養生），②静弾性係数試験（標準養生）  
 ③実部材（厚さ80cmの基礎スラブ）の温度上昇測定

### 4. 練り混ぜ方法

表-2 練り混ぜ方法

練り混ぜ方法を表-2に示す。

項目	ミキサの型式	ミキサ容量 (ℓ)	練り混ぜ量 (ℓ)	練り混ぜ時間 (秒)	
				粗骨材投入前	粗骨材投入後
室内試験	パン型	100 (55)	70 (33.5)	30 <sup>1)</sup> , 2), 150 <sup>3)</sup>	90 <sup>1)</sup> , 2), 60 <sup>3)</sup>
実機試験	強制練り	2500	2000 <sup>1)</sup> , 2), 1250 <sup>3)</sup>	15 <sup>1)</sup> , 25 <sup>2)</sup> , 35 <sup>3)</sup>	60 <sup>1)</sup> , 2), 90 <sup>3)</sup>

1)W/C 45%, 2)W/C 35%, 3)W/C 25%

\*ミキサ容量, 練り混ぜ量における( )内数値は断熱温度上昇試験について

### 5. 実験結果と考察

#### 5.1 室内試験

##### (1) 調合試験

表-3に各コンクリートの調合

およびフレッシュコンクリートの性質を示す。本実験では、W/C 45%調合については単位水量を170kg/m<sup>3</sup>、W/C 35%およびW/C 25%調合については165kg/m<sup>3</sup>と設定し、目標スランプを得るための混和剤添加率を求めた。なおW/C 25%調合は粘性が大きくなるため、作業性を考慮して目標スランプを25cmとした。これによれば、W/C 45~35%の範囲では、W/Cやセメントの種類が違ってても混和剤添加率にほとんど差は見られない。一方W/C 25%の場合では、目標スランプを大きくしたこともありW/C 45%, 35%調合に比べて混和剤添加率は増大したが、その程度はセメントの種類により異なり、Lセメントの方が少なかった。一般に減水剤はセメント中の間隙相に多く吸着されるため<sup>1)</sup>、その含有量が少ないLセメントでは減水剤が有効に作用したものと考えられる。

表-3 調合試験結果

調合記号	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤添加率 (Cx%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G					
L45	21.0	4.0	45	47.3	0.58	170	378	843	941	1.5	21.5	35.0	3.6	19.5
L35	21.0	4.0	35	42.5	0.61	165	471	731	989	1.5	22.0	39.5	3.1	20.0
L25	25.0	3.0	25	43.8	0.55	165	660	697	893	1.9	26.0	60.5	2.8	20.5
N45	21.0	4.0	45	47.0	0.58	170	378	835	941	1.5	21.5	37.0	4.0	20.0
N35	21.0	4.0	35	42.3	0.61	165	471	723	989	1.6	21.0	36.5	4.5	21.0
N25	25.0	3.0	25	43.5	0.55	165	660	686	893	3.0	24.0	55.0	3.0	20.0

##### (2) 圧縮強度試験

図-1に材令（対数）と圧縮強度の関係を、図-2にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。

これらによれば、LセメントはNセメントに比べて初期材令での強度発現は小さく、Nセメントの強度に対する比率は材令7日で45~70%、材令28日で80~90%程度であった。なおその比率は水セメント比が小さいほど大きくなる傾向が認められた。また材令28日でのLセメントとNセメントの強度差はほぼ100kgf/cm<sup>2</sup>程度であり、Lセメントの28日強度はNセメントの7日強度とほぼ一致していた。一方、長期材令においては、高ビーライト型のLセメントは良好な強度発現性を示し、材令56日でNセメントとほぼ同等、材令91日では若干大きい強度を示し、W/C 25%調合では材令91日において1200kgf/cm<sup>2</sup>程度の圧縮強度が得られた。

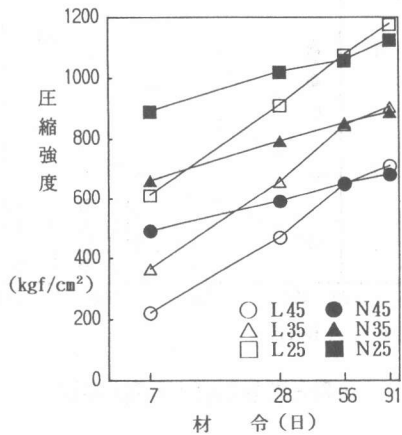


図-1 材令と圧縮強度の関係

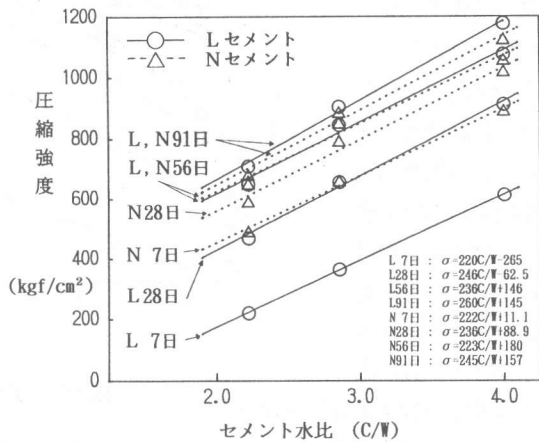


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係

### (3) 断熱温度上昇

図-3, 4に断熱温度上昇試験結果を示す。(なお打設温度20℃のN25調合および打設温度30℃のL25調合については、試料温度が装置の許容測定温度を越えたため途中材令で試験中止。)これによれば、LセメントはNセメントと比較して温度上昇量が小さく、例えば、W/C 45%調合、打設温度20℃の場合、材令7日でその差は18℃程度である。またLセメントは温度上昇速度が小さいため、ほぼ材令1日までに大部分の発熱が終了するNセメントに対して、特に初期材令での温度上昇量が極めて小さくなっており、材令2日以前では、Lセメント使用のW/C 25%調合(単位セメント量660kg/m³)の温度上昇がNセメント使用のW/C 45%調合(単位セメント量378kg/m³)の温度上昇よりも小さい。実際の高強度コンクリート部材では、材令2日以内に中心温度がピークとなるケースが多いと思われるため、高強度コンクリートの温度上昇低減にLセメントの適用は極めて有効と考えられる。

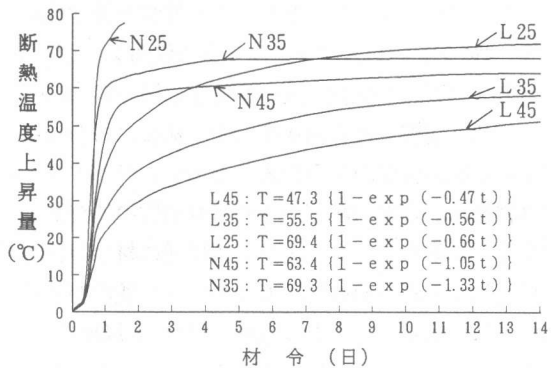


図-3 断熱温度上昇試験結果 (打設温度20℃)

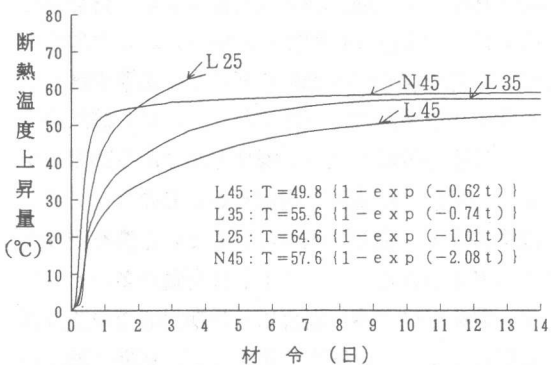


図-4 断熱温度上昇試験結果 (打設温度30℃)

図-5に単位セメント量と断熱温度上昇量の関係を示す。これによればLセメントの断熱温度上昇量は、各材令とも単位セメント量とほぼ直線関係にある。また、Lセメントの材令14日の温度上昇量は、おおむねNセメントの材令1日の温度上昇量に一致する結果となった。

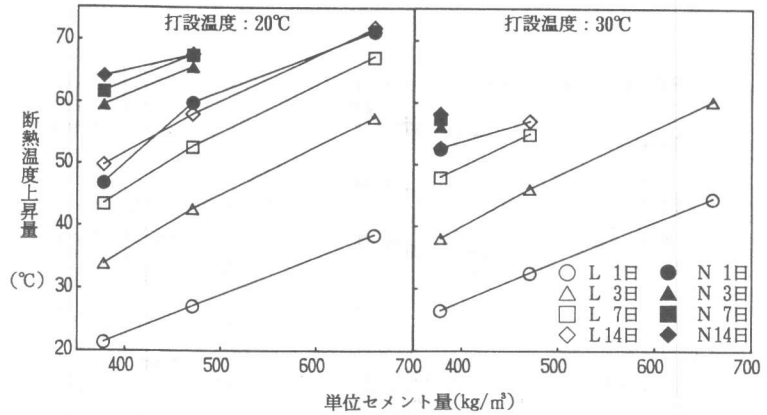


図-5 単位セメント量と断熱温度上昇量の関係

なお、打設温度30°CのNセメントにおいては、材令3日以降の温度上昇が、打設温度20°Cの場合を下回っていた。これは高温によりセメントの水和反応の進行が阻害されたためと考えられる。

### 5. 2 実機試験結果

(1) フレッシュコンクリートの性質と強度性状  
表-4にフレッシュコンクリートの性質を、図-6に材令(対数)と圧縮強度の関係を、図-7にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。横軸に材令の対数を取り圧縮強度の発現を表した場合、Nセメントでは材令7日以降勾配が小さくなり強度の伸びが鈍化するのに対して、Lセメントでは逆に材令7日以降の勾配がそれ以前に比べてやや大きい傾向が見られた。これはビーライトの水和が材令7日以降に活発となることを示していると考えられる。また封かん養生強度は標準養生強度に比べてやや小さく、材令56日では85~90%程度の値であった。なお、室内試験と比較して実機試験での圧縮強度は、材令28日以降では、100kgf/cm<sup>2</sup>程度小さかった。この理由としては、練り混ぜ時の骨材の表面水の影響や練り混ぜ条件の相違等が考えられるが、さらに実機試験においては室内試験に比べて練り上がりから20°C水中および20°C封かん養生を開始するまでのコンクリート温度が高く、強度発現においてその影響を受けたことも考えられる。ビーライト含有量の多いセメントでは養生温度が高い場合にも長期材令での強度低下を受けにくいとの研究<sup>2)</sup>があるが、初期の温度条件とコンクリートの長期強度発現性との関係に対して、セメント中のビーライト含有量が及ばず影響に

表-4 フレッシュコンクリートの性質 (実機試験)

調査記号	スランブ (cm)	スパンフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
L 4 5	20.0	37.0	3.2	32.5
L 3 5	21.0	42.5	3.6	35.0
L 2 5	24.0	54.0	2.0	37.0
N 4 5	20.0	37.0	4.3	31.5

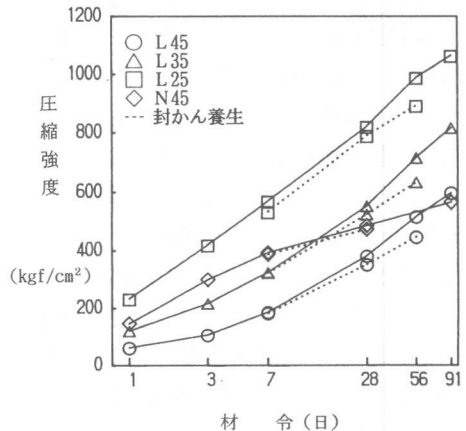


図-6 材令と圧縮強度の関係 (実機試験)

については今後検討する必要があるものと思われる。

図-8に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。今回の結果を建築学会式と比較すると圧縮強度200~300kgf/cm<sup>2</sup>程度の範囲ではほぼ一致するが、高強度になるほど本試験結果が小さい傾向を示し、圧縮強度1000kgf/cm<sup>2</sup>の場合は $0.7 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>程度小さかった。一方、ACI 363式との比較では、高強度域においても良い一致を示していた。

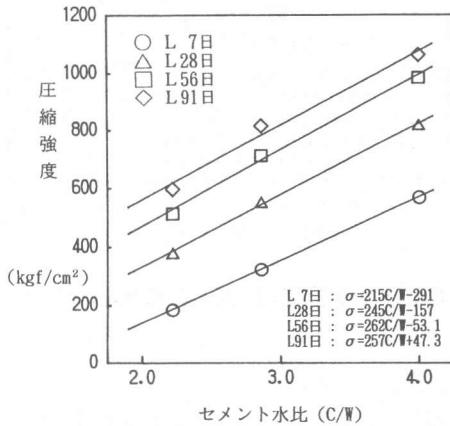


図-7 セメント水比と圧縮強度の関係  
(実機試験)

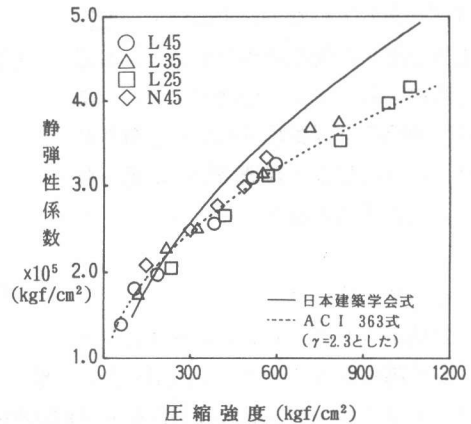


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係  
(実機試験)

## (2) 実部材の温度上昇

図-9に各コンクリートを打設した厚さ80cmの基礎スラブの盤厚方向中心部の温度履歴を示す。これより、単位セメント量が同一のW/C 45%調合におけるLセメントとNセメントを比較すると、最高温度に20℃以上の差を生じており、Lセメントの温度上昇量はNセメントの50%程度であった。また、LセメントのW/C 25%調合は、NセメントのW/C 45%調合に比べて最高温度が3℃程度低く、打設温度の差を考慮すれば8℃程度の温度上昇量の差を生じた。この結果は、図-3, 4の断熱温度上昇試験結果と良く対応しているものと考えられる。

図-10にW/C 45%調合のLセメントとNセメントについて、部材中心部の温度履歴と断熱温度上昇試験結果から計算した温度履歴を比較した。なお計算に用いた断熱温度上昇式中の、終局温度上昇量を表す定数Kについては30℃の試験結果と同一の値とし、一方、温度上昇速度を表す定数 $\alpha$ については20℃および30℃の試験結果から実際の打設温度での値を推定した。これによれば、Lセメントにおいて、温度上昇の速度や部材温度がピークとなる材令に関して実測値と計算値の間にやや差が見られ、またLセメント、

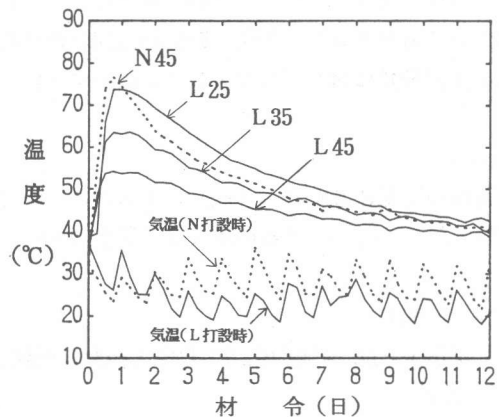


図-9 実部材の温度測定結果

Nセメントとともに温度下降速度が実測値より大きい、最高温度についてはLセメント、Nセメントともに実測値と計算値はほぼ一致していた。なおLセメント使用のW/C 35%, 25%調合についても最高温度の実測値と計算値はほぼ一致していた。以上の様に、温度上昇や降下の速度については差があるものの、Lセメントの適用により、ほぼ断熱温度上昇試験結果から計算されたとおりの温度上昇低減効果が得られたことが確認された。

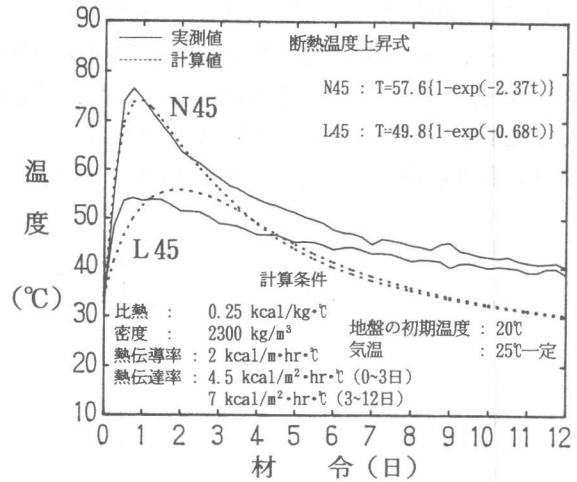


図-10 実部材の温度測定結果と計算値との比較

## 6. まとめ

低熱ポルトランドセメント (Lセメン

ト) を高強度コンクリートに用いた本実験より次のことがわかった。

(1) ポリカルボン酸系の高性能A E減水剤を用いた場合、LセメントはNセメントに比べて、低水セメント比において同一の流動性を得るために要する混和剤使用量が少なく、Lセメントの使用は高強度コンクリートの練り混ぜに対して有効と考えられる。

(2) LセメントはNセメントに比べて初期材令での強度が小さく、28日強度はNセメントの7日強度と同程度であるが、長期材令での強度発現が大きく、材令56日でNセメントと同程度の強度を示す。

(3) Lセメント使用、W/C 25%調合のコンクリートの場合、室内試験において材令91日で1200 kgf/cm<sup>2</sup>程度の圧縮強度が得られた。

(4) LセメントはNセメントに比べて、特に初期材令での温度上昇量が小さく、実際の高強度コンクリート部材の温度上昇低減に対してLセメントの適用は極めて有効と考えられる。

(5) 厚さ80cmの実部材の温度履歴測定結果によれば、W/C 45%調合においてLセメントの温度上昇量はNセメントに比べて20°C以上小さく、またLセメント使用、W/C 25%調合の温度上昇量についてもNセメント使用、W/C 45%調合のそれを8°C程度下回り、高強度コンクリート部材の温度上昇低減に対してLセメントの適用が有効であることが確認された。

## 「謝辞」

本実験の実施にあたり、(株)エヌエムビー中央研究所、(株)ポゾリス物産混和剤技術部および秩父生コン(株)の皆様の多大なる御協力を得ました。ここに深謝致します。

## 〔参考文献〕

- 1) 岡田英三郎：流動化剤の化学と流動化機構、セメント・コンクリート、No. 479、pp. 22-29、1987. 1
- 2) 五十畑達夫 ほか：ビーライト系低発熱セメントの熱/強度特性と硬化体組織、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 134~139、1991