

# RC 超高層建物用コンクリートに関する研究 (その6)

——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の特性——

久保田 昌 吾      中 根      淳  
永 井 康 淑      竹 田 宣 典

## Experimental Study on High-strength Concrete for High-rise Reinforced Concrete Building (Part 6)

——Properties of High-strength Concrete using Low-heat Portland Cement——

Shogo Kubota      Sunao Nakane  
Yasuyoshi Nagai      Nobufumi Takeda

### Abstract

This report presents the results of experiments on a fullscale model of high-strength concrete (properties of fresh concrete, pump pressure, temperature variations, and strength development) in summer at a specified strength of over 600 kgf/cm<sup>2</sup> using belite-type low-heat portland cement.

The results show excellent pumpability of fresh concrete with low-heat portland cement, low temperature rise of the simulated central part, around half that of ordinary portland cement, and excellent strength development.

### 概 要

本報告は、ピーライト系の低発熱ポルトランドセメントを用いた設計基準強度 600 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の夏期における高強度コンクリートの実大施工実験（フレッシュコンクリートの性状、ポンプ圧送性、履歴温度および強度発現性状）結果について述べたものである。

その結果、ピーライト系の低発熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートの模擬部材中心部の温度上昇量は普通ポルトランドセメントの約1/2と低く、強度発現性および施工性においても良好であることが分かった。

## 1. はじめに

設計基準強度（以下  $F_c$  と呼ぶ）が 600 kgf/cm<sup>2</sup> を上回るような高強度コンクリートの場合、単位セメント量が多くなるため、部材コンクリートの最高履歴温度が高くなり、水和熱による温度ひび割れの発生が懸念されるとともに、構造体の強度と標準水中養生供試体強度との差が大きくなるので、強度管理の方法をどのようにするか問題になっている。これらの状況を踏まえて水和熱の発生を押えたピーライト（ $C_2S$ ）系の低発熱ポルトランドセメント（以下 L セメントと呼ぶ）および普通ポルトランドセメント（以下 N セメントと呼ぶ）を用いた  $F_c=600$  kgf/cm<sup>2</sup> 以上の高強度コンクリートの夏期における実大施工実験を行って、フレッシュコンクリートの性質、ポンプ圧送性、部材コンクリートの強度発現性状などを調査し、L セメントの高強度コンクリートへの適応性について検討した。

表-1 実験の組合せ

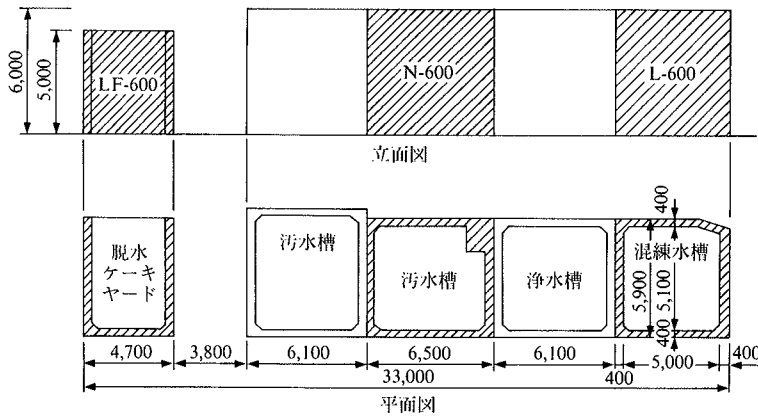
コンクリートの種類(記号)	セメントの種類	水結合材比(%)	打設方法	
			柱形模擬部材	実構造物
L -600	低発熱	30	バケツ・締固め有	ポンプ・締固め有
N -600	普通	30	同上	同上
LF-600	低発熱	30	バケツ・締固め無	ポンプ・締固め無
L -800	低発熱	25	バケツ・締固め有	* ——

\* ポンプ圧送試験のみ実施

## 2. 実験概要

表-1 に実験要因の組合せを示す。

市中の生コンプラントで製造した4種類のコンクリートを図-1 に示す実構造物（貯水槽、他）ならびに柱形実大模擬部材（図-2 参照）へ、それぞれポンプおよびバケツを用いて打設し、部材の内部温度履歴、強度発現性状を調査して、N セメントを使用した場合とで比較・検討した。またL セメントを使用したコンクリートでは、締固め無しの打設方法についても併せて検討した。



図一 実構造物建屋概要

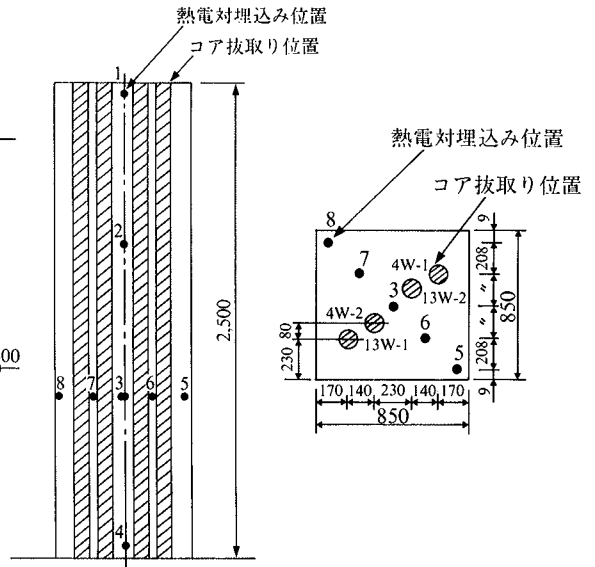
表一 コンクリートの調査

コンクリートの種類	セメントの種類	設計基準強度 $F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	目標値				単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					高性能AE減水剤 (P×wt%)	
			スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	W/P (%)	s/a (%)	W	C	SF	S		G
L-600	L	600	24±2	50±5	2	30	48.1	160	533	—	818	898	2.1
LF-600	L	600	—	60±5	2	30	50.9	162	540	—	861	844	2.4
N-600	N	600	24±2	50±5	2	30	46.1	170	567	—	755	898	2.3
L-800	L	800	24±2	55±5	2	25	46.0	160	608	32	739	879	2.6

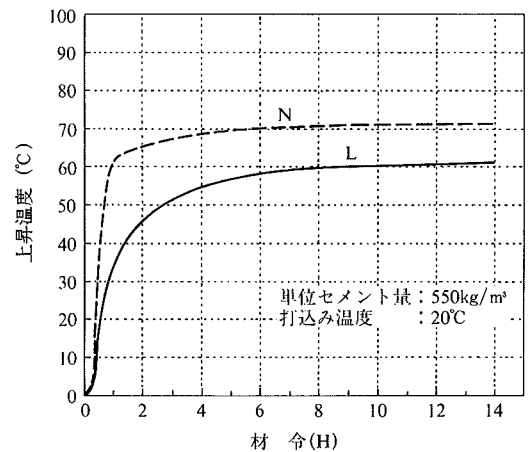
\* P は C と SF の合計を示す。

表三 試験項目と方法

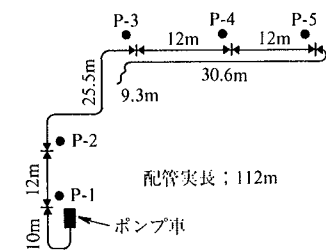
コンクリートの種類	締固め	柱形模擬部材 (バケット打設)	実施工 (ポンプ打設)
L-600 N-600 ( $F_c=600$ kgf/cm <sup>2</sup> )	有	(1)フレッシュコンクリートの品質 *スランブ (JISA1101, 1128) *スランブフロー *空気量 *分離抵抗性: O ロート (2)硬化コンクリートの品質 (JISA-1108) *シリンダー強度: 標準水中, 現場水中 (材令 7, 28, 91日) 養生	(1)フレッシュコンクリートの品質  同左 (2)硬化コンクリートの品質 *シリンダー強度: 標準水中, 現場水中養生 (材令 7, 28, 91日)
LF-600 ( $F_c=600$ kgf/cm <sup>2</sup> )	無	*コア強度: 鉛直方向 (材令 28, 91日) (3)部材内部温度測定 *測定部位: 水平方向 5 点 鉛直方向 4 点 (C-C 熱電対による)	(3)ポンプ圧送性 *配管実長: 112 m *管内圧力: 20, 40, 60 m <sup>3</sup> /h 時 *圧送前後のフレッシュコンクリートの品質
L-800 ( $F_c=800$ kgf/cm <sup>2</sup> )	有		(1)フレッシュコンクリートの品質 (2)硬化コンクリートの品質 (3)ポンプ圧送性



図二 柱形模擬部材概要



図三 材令と断熱温度上昇量の関係



図四 ポンプ圧送配管図

## 2.1 実験対象部材の形状

実構造物は生コンプラントの付帯設備（混練水貯蔵水槽、他）で、高さは6,000 mm および 5,000 mm、壁厚は400 mm である。また柱形の模擬部材の形状は850×850×2,500 mm で無筋とした。図一1～2 にこれら試験対象部材を示す。

## 2.2 使用材料と調査

2.2.1 使用材料 ①セメント；\*普通ポルトランド（比重；3.16 比表面積；3,230 cm<sup>2</sup>/g）、\*高ピーライト系低発熱ポルトランド（比重；3.22 比表面積；3,410

cm<sup>2</sup>/g）、②骨材；\*細骨材は石灰石砕砂と山砂の混合砂（比重；2.64；FM2.69）\*粗骨材は石灰石と硬質砂岩の混合砕石（比重；2.9, FM6.59）、③混和材；\*シリカフェーム（ノルウェー産、非造粒、SiO<sub>2</sub>=94%以上、比重；2.20）、\*高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）

なお、本実験に用いた L セメントは、N セメントに比べてピーライト (C<sub>2</sub>S) の比率が2倍以上も大きく、初期の強度発現性は劣るものの、水和熱が小さい（図一3 参照）という特徴をもっている。

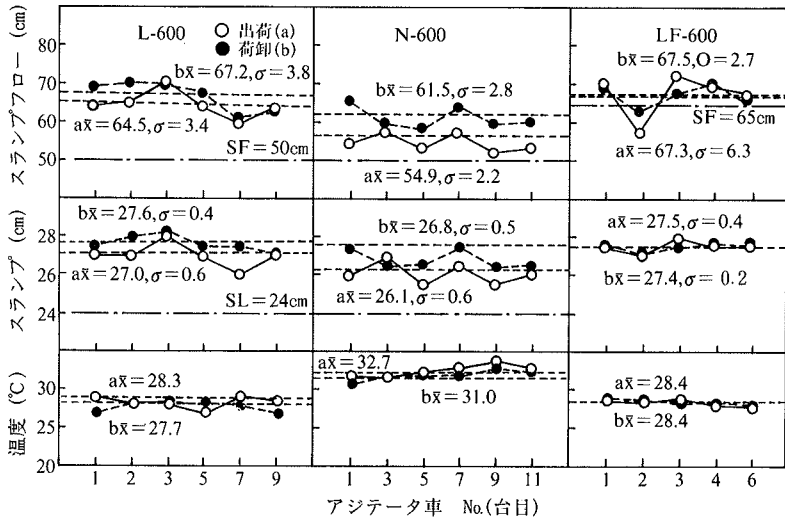


図-5 コンクリートのスランプ・スランプフロー温度測定結果

表-4 フレッシュコンクリートの性状 (出荷時)

コンクリートの種類	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
L-600	27.0	64.5	1.3	27.6
LF-600	27.4	67.3	2.9	28.3
N-600	26.1	54.9	2.5	32.4
L-800	28.0	70.0	1.2	26.0

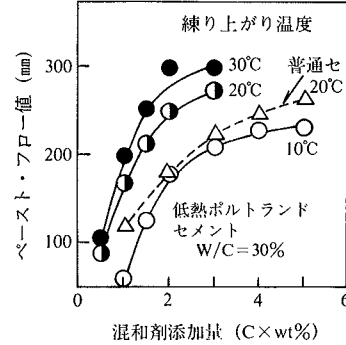


図-6 練り上がり温度別混和剤添加量とペーストフロー値の関係

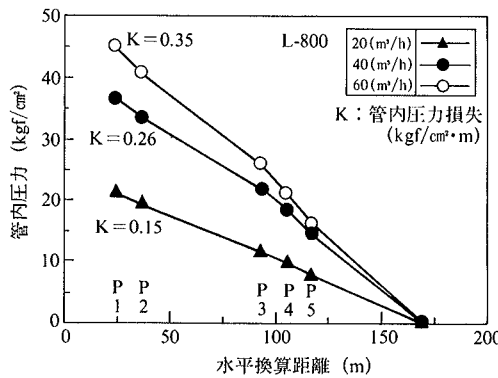
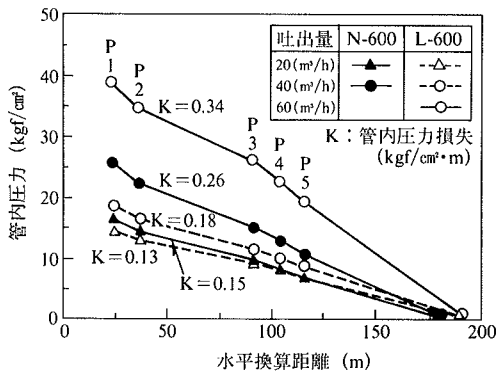


図-7 管内圧力と水平換算距離の関係

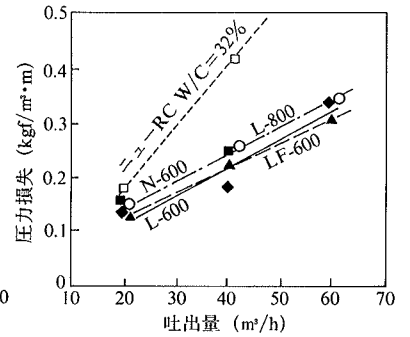


図-8 吐出量と圧力損失の関係

2.2.2 コンクリートの調合 調合はセメントをL, Nの2種類とし,  $F_c=600 \text{ kgf/cm}^2$  に対応する水セメント比30%を3種類(L, Nセメント),  $F_c=800 \text{ kgf/cm}^2$  に対応する水セメント比25%を1種類(Lセメント)の合計4種類とした。これらコンクリートの調合を表-2に示す。

なお, L-600およびN-600の調合は, 水セメント比を30%で一定としたうえで, 流動性(スランプ, スランプフロー)が同程度になるように単位水量を調整して定めた。その結果, 流動性の面で優れているLセメントを用いたコンクリートの方がNセメントに比べて単位水量で  $10 \text{ kg/m}^3$ , 単位セメント量で  $34 \text{ kg/m}^3$  少なくなっている。

### 2.3 コンクリートの製造

コンクリートの製造はデュアル型の強制練りミキサー(容量  $3 \text{ m}^3$ )を用い, 練り混ぜ量は  $1.75 \text{ m}^3/\text{バッチ}$ とした。練り混ぜ方法は, 上段でセメント, 細骨材, 練り混ぜ水を加えて45~90秒混練りした後, 下段で粗骨材を加えて60~90秒練り混ぜた。

### 2.4 コンクリートの小運搬と打設

コンクリートの打設は, 練り混ぜ1時間後に実施した。実構造物へはピストン式コンクリートポンプ(最大吐出量  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , 最大理論吐出圧力  $45.4 \text{ kgf/cm}^2$ )を用いて実長  $112 \text{ m}$ (配管径  $5 \text{ in.}$ ・図-4参照)を圧送して打設した。また柱形模擬部材はバケット打ちとした。締固めは実構造物へ打設したLF-600(締固め無し)を除いて全て内挿型バイブレーターを用いた。

### 2.5 試験項目と方法

試験項目と方法を表-3に示す。

## 3. 試験結果と結果の考察

### 3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状および各測定値の変動を表-4, 図-5に示す。LF-600を除く大半のコンクリートがスランプ, スランプフローの目標値を上回って軟練りの傾向にあった。これは, 試験練り時に比べて実験当日のコンクリートの練り上がり温度が高かったため高性能AE減水剤の減水効果が顕著に現われたものと推察

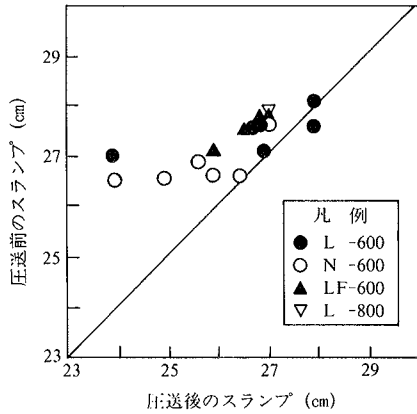


図-9 圧送前後のスランプ・スランプフロー

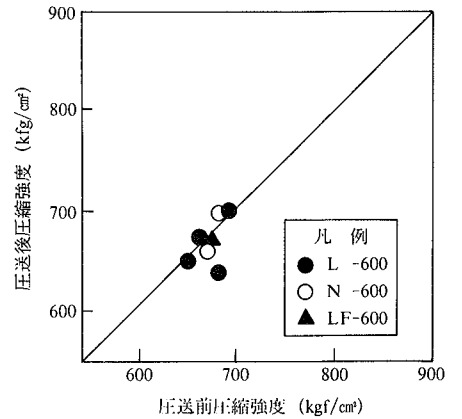
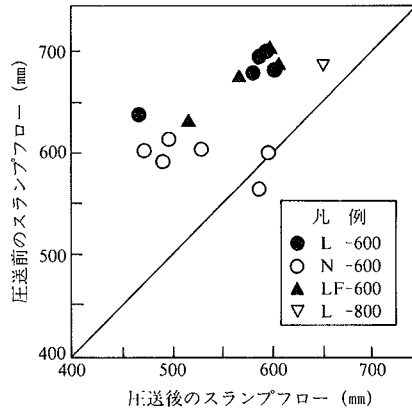


図-10 圧送前後の圧縮強度

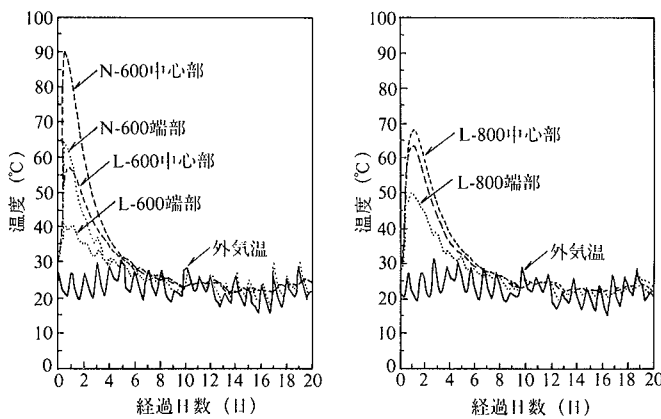


図-11 柱形模擬部材コンクリートの温度履歴

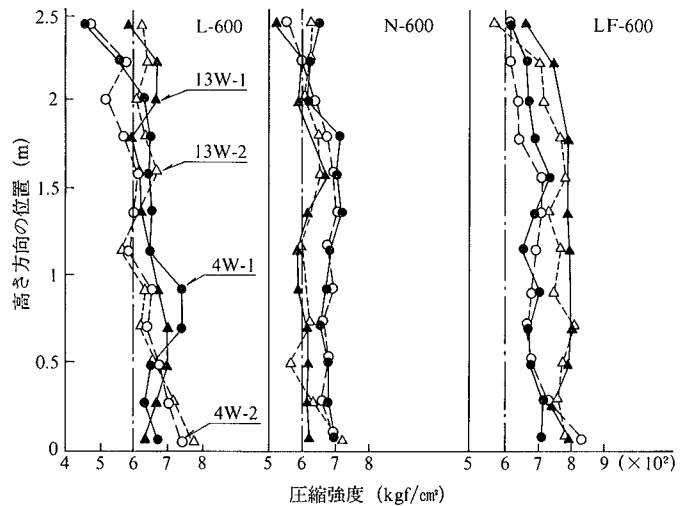


図-12 コア強度の高さ方向の分布

表-5 圧送によるOロート流下時間の変化

コンクリートの種類	Oロート流下時間 (秒)	
	圧送前	圧送後
L-600	7.7	8.9
N-600	8.3	11.0

表-7 管理用シリンダー強度

コンクリートの種類	圧縮強度 (kgf/cm²)					
	標準水中			現場水中		
	7日	28日	91日	7日	28日	91日
L-600	417	677	837	420	657	763
LF-600	428	673	844	446	661	790
N-600	686	814	849	679	769	827
L-800	561	813	971	572	799	948

表-6 抜き取りコアの圧縮強度

	L-600						N-600					
	4W-1	4W-2	全体	13W-1	13W-2	全体	4W-1	4W-2	全体	13W-1	13W-2	全体
平均値	642	620	642	649	656	652	637	656	664	607	626	616
標準偏差	76.1	70.2	76.1	41.8	56.7	48.7	33.0	45.0	39.5	24.4	39.9	33.3
試験体数	12	12	24	11	11	22	12	12	24	11	10	21

	LF-600						L-800					
	4W-1	4W-2	全体	13W-1	13W-2	全体	4W-1	4W-2	全体	13W-1	13W-2	全体
平均値	681	686	684	766	739	751	891	822	856	856	846	851
標準偏差	32.4	56.7	45.3	45.8	60.5	55.1	34.5	57.6	58.3	28.6	33.3	30.8
試験体数	12	12	24	9	12	21	12	12	24	11	11	22

される。図-6にLセメントを用いた場合(練り上がり温度20°CのみNセメントを並記)の試験例を示す。また出荷時から荷卸しまでのスランプ、スランプフローの変化は図-5に示すようにN-600のスランプフローが約6cmほどの伸びを示した以外はL-600, LF-600のいずれにも大きな変化は認められなかった。これは、前述のとおり出荷時のコンクリートが軟練りの傾向にあったためと考えられる。締固めをしないLF-600の荷卸し時の

Oロート流下時間は7~14秒程度であった。近松<sup>1)</sup>らの研究によれば、Oロート流下時間が10~30秒の範囲では締固めせずに充填できるとしており、本実験で用いたLF-600についても若干粘性が低いものの締固めせずに充填できるものと判断された。

### 3.2 ポンプ圧送性

3.2.1 管内圧力と圧力損失 管内圧力と水平換算距離の関係および吐出量と圧力損失の関係を図-7~8に示す。

図-7からは吐出量40m³/hではN-600に比べてL-

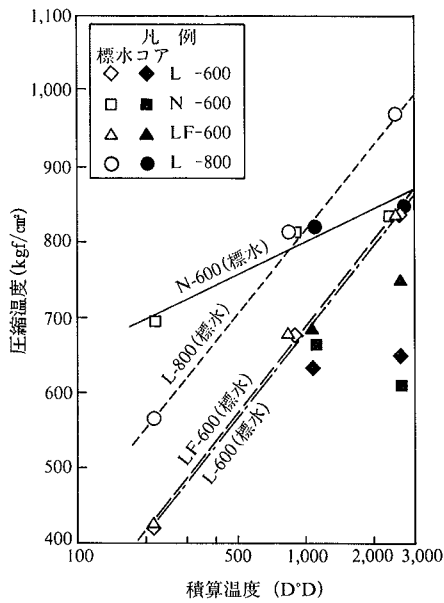


図-13 積算温度と圧縮強度の関係

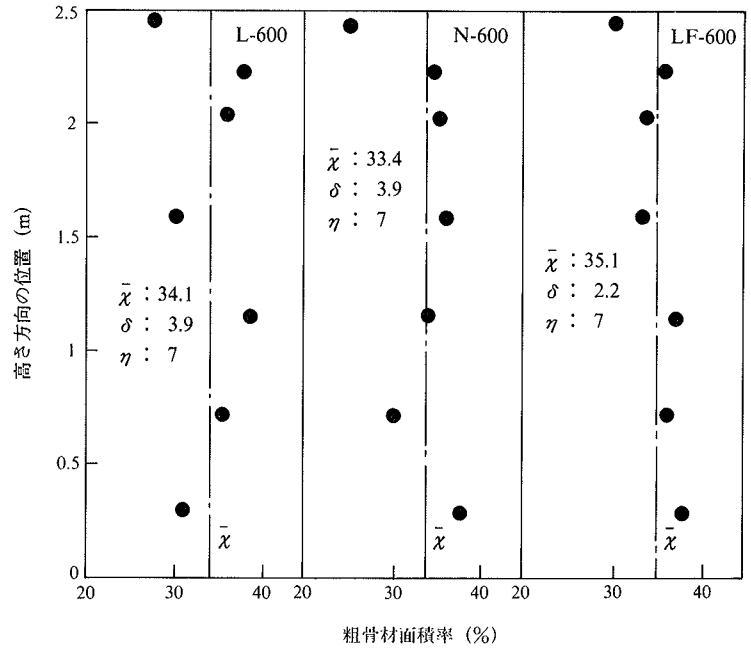


図-14 柱型模擬部の高さ方向の位置と粗骨材面積率の関係

600の方が管内圧力が小さいことが分かる。これは、Lセメントを用いたコンクリートの方がNセメントを用いたもの比べて軟練りであったことに起因しているものと考えられる。なおL-600の直管部(P-1~P-2)における吐出量40 m<sup>3</sup>/hの圧力損失は0.18 kgf/cm<sup>2</sup>・mであるが、図-8に示すニューRCポンプ圧送試験<sup>2)</sup>における高強度コンクリート(W/C=32%,スランプ25cm)の吐出量40 m<sup>3</sup>/hの圧力損失は約0.37 kgf/cm<sup>2</sup>・mで、本実験結果はこれを下回る結果となった。

3.2.2 圧送前後における性状変化 図-9に圧送前後のスランプ、スランプフローを示す。

圧送前後ではL、Nセメントともにスランプは1cm、スランプフローは約10cmの低下が見られた。一方、L-800ではスランプが1cm、スランプフローが5cm低下した。ポンプ圧送に伴うOルート流下時間の変化を表-5に示したが、N-600コンクリートの間では大差なく、流下時間は8~11秒で圧送前より若干大きめの傾向を示した。この要因としては、圧送前に比べて圧送後の方がスランプフローが低下していることから粘性が増したために生じたものと思われる。

圧送前後におけるコンクリートの圧縮強度は、図-10からL、N、LF-600の各コンクリートともにポンプ圧送による影響の少ないことが分かる。

### 3.3 部材の温度履歴と圧縮強度

#### 3.3.1 部材の温度履歴

図-11に柱形模擬部材中心部の温度履歴を示す。セメントの種類によって温度上昇量は著しく異なる。すなわち、Nセメントを用いたN-600では打込み後18時間で90.8°Cの最高温度に達し、この時の温度上昇量は56.0°Cであった。一方、Lセメントを用いたL-600およびLF-600の場合は最高温度が57.6°Cおよび59.8°Cで、温度上昇量はそれぞれ28.4°Cお

よび30.3°CとなりN-600の約1/2程度であった。また表層部と中心部との温度差はNセメントで約25°Cであるのに対してLセメントでは約15°Cであった。一方、L-800の部材中心部では打込み後26時間で68.1°Cの最高温度に達しており、この時の温度上昇量は約39°Cである。これはN-600の2/3にとどまる値である。なお、2.2.1でも述べたが、1m<sup>3</sup>当りのセメント量がN-600に比べてL-600では-34 kg/m<sup>3</sup>、LF-600では-20 kg/m<sup>3</sup>となっており、いずれも温度上昇量は低くなる方向にあるが、これらを考慮に入れてもLセメントの温度抑制効果は顕著であると言える。

#### 3.3.2 コアの圧縮強度

表-6に柱形模擬部材から採取した各種コンクリートの材令28日および91日におけるコア強度を、また図-12には高さ方向の強度分布を示す。L-600、LF-600の材令91日の平均強度は652 kgf/cm<sup>2</sup>および751 kgf/cm<sup>2</sup>、N-600は616 kgf/cm<sup>2</sup>となり、いずれの種類も設計基準強度を上回っていることを確認した。また高さ方向の強度分布は、振動締固めをしたL-600、N-600では主に粗骨材の沈降に起因すると考えられる柱頭部20cmまでの強度低下が認められ、とくにL-600の材令28日における標準偏差が76.1 kgf/cm<sup>2</sup>が大きかった。これは、3.1でも述べたようにコンクリートが軟練りであったことに加えて振動締固めをしたことに起因していると思われる。なお、振動締固めをしなかったLF-600では柱頭部の大きな強度低下は認められなかった。

#### 3.3.3 管理用供試体の圧縮強度

表-7に示したLセメント使用の管理用供試体強度と表-6に示したコア強度の関係から、管理用供試体強度が構造体強度と一致しないことが分かる。

構造体の強度発現は、構造体コンクリートの温度上昇

量と大きく関係しており、梶田ら<sup>3)</sup>は最高温度が60°Cを超えると材令91日コア強度は材令28日の標準水中養生強度を下回ると述べている。

本実験においてもNセメントを用いたN-600では、材令28日の標準水中養生強度に対する材令91日のコア強度の比率は76%であり梶田らの結果を裏付けている。

一方、最高温度が60°Cに達しないL-600、LF-600では、同比率が96%および111%となり、最高温度が68°Cに達したL-800でも105%となり長期強度の伸びが良好であった。Lセメントの場合はNセメントに比べて初期強度が低く、長期強度の伸びが良いという特性を有するため、必ずしも最高温度による影響とは言い切れない面があるものの、Nセメントのように材令91日強度が28日強度を下回るような傾向は認められなかった。N-600のコアの長期強度発現不良は、図-13に示す積算温度と圧縮強度の関係からも認められる。

**3.4 仕上がり性** 図-14に柱形模擬部材から採取したコアの長さ方向の位置と粗骨材面積率の関係を示す。フレッシュコンクリートの項でも述べたとおり、L、Nセメントともにコンクリートのスランプ、スランプフローが目標値を上回って大きかったため、バイブレーターによって振動締固めをした場合には天端面の骨材が沈降する傾向が見られ、実構造物天端面には初期ひび割れが数本ずつ見られた以外は、いずれの種類のコンクリートについてもジャンカ・す等も無く、仕上がり面は良好であった。

#### 4. まとめ

高ビーライト系のLセメントを使用した高強度コンクリートの夏期施工実験結果から概略次ぎのことが分かった。

① フレッシュコンクリートの性状はスランプ、スランプフローが若干大きかったものの、60分経過したものについては品質変化が認められなかった。

② ポンプ圧送性；40 m<sup>3</sup>/h で圧送した場合の圧力損失は、Lセメントの場合同一水セメント比のNセメントに比べて0.18 kgf/cm<sup>2</sup>・mで小さく、軟練りにすればNセメント使用の普通強度レベルの硬練りコンクリートとほぼ同程度となる。

③ 柱形模擬部材(85 cm角)中心部の温度上昇量は、Nセメントに比べてLセメントは1/2と低く、温度上昇抑制効果が見られた。

④ 標準養生の場合、Lセメントの材令28日強度は、Nセメントの約83%と低いものの材令91日ではほぼ同強度

を示した。一方、コアの強度におけるL、Nセメントの28日強度は大差なく、材令91日強度ではLセメントの方が約5%ほど高い強度を示した。

$F_c=600$  kgf/cm<sup>2</sup>級のRC造超高層建物に使用する高強度コンクリートの強度管理は、「New RC 施工標準」<sup>4)</sup>に従って、標準水中養生の材令28日強度(設計基準強度に構造体から採取したコア強度と標準水中養生の材令28日強度との強度差を加えた強度)で行っているが、Lセメントについても同様な手法で強度管理をすることが可能であると考えられる。

⑤ 仕上がり性；L、Nセメントともにスランプ、スランプフローが大きかったため、バイブレーターによって振動締固めをした場合には実構造物天端面に骨材の沈降に起因すると思われる初期ひび割れが数本ずつ見られた。なお、締固め無しの仕上がり性は良好であった。

⑥ Lセメントの場合初期の強度発現性が劣るため、冬期施工については事前検討が必要である。

### 5. 実験グループの構成

当実験グループの構成は以下の通りである。

建築第二研究室

中根 淳, 久保田 昌吾, 永井 康淑  
齊藤 裕司, 小柳 光生, 大池 武  
一瀬 賢一, 石田 和久, 川上 栄一

土木第三研究室

十河 茂幸, 竹田 宣典

### 謝 辞

最後に本実験を実施するに当たり秩父セメント株式会社中央研究所 田中光男氏、深谷康文氏、名和豊春氏、および神奈川秩父生コン株式会社本社工場の方々に多大なご協力を賜りました。ここに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 近松竜一, 竹田宣典, 十河茂幸: 超流動コンクリートと分離抵抗性に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, p. 381~386, (1992)
- 2) (社)建築業協会, ニュー RC コンクリート分科会ポンプ圧送小委員会: 高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究報告書, (1991.3)
- 3) 梶田佳寛, 他: 高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度管理法に関する考察, 日本建築学会大会学術梗概集(東北) p. 835~838, (1991)
- 4) (財)国土開発技術研究センター: 建設省 総プロ「New RC」工法分科会 報告書, (1991.3)