

# 高強度プレキャストコンクリートの実用化に関する研究

## Study on Utilization of High-Strength Precast Concrete

河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI

蓮尾 孝一 KOUICHI HASUO

松田 拓 TAKU MATSUDA

住建コンクリート工業(株) 新妻 大治 DAIJI NIIZUMA

三井プレコン(株) 松丸 真 SHIN MATSUMARU

今回、設計基準強度  $100\text{N/mm}^2$  クラスに対応できる高強度プレキャストコンクリートの実用化を目標として 2 工場での強度確認実験を行った。その結果、両工場で設計基準強度  $120\text{N/mm}^2$  の部材製作が可能であることを確認し、強度管理手法を提案した。

**キーワード：**高強度コンクリート、プレキャストコンクリート、強度発現、構造体コンクリート

Series of the strength confirmation experiments were conducted at two precast concrete production factories for using high-strength precast concrete corresponded to  $F_c100\text{N/mm}^2$ . As the result, it has been confirmed that the both factories have abilities to product the members of  $F_c120\text{N/mm}^2$ , and the strength management system were proposed.

**Key Words:** High-strength concrete, Precast concrete, Strength development, Structural concrete

### 1. はじめに

近年、建築工事においてはプレキャスト化されていない部材はないといえるほど、多種多様な部材がプレキャスト工場で製造されている。

プレキャストコンクリート部材を使用する場合、現場での組み立て精度、一体化のための現場打ちコンクリートやグラウト施工など注意を要する作業も多い。しかし、プレキャスト部材の使用は、工期短縮や個々の部材品質の安定化につながる。また、高強度コンクリートを使用する場合、粘性が大きくなるため現場での施工性が悪化する、あるいは、厳しい品質管理が求められるなど、高強度プレキャストコンクリート部材を使用するメリットは多い。しかしながら、プレキャストコンクリートの製造は、翌日に脱型を行うこと前提とした製造サイクルや、初期強度を確保するために蒸気養生を行うなど特殊な状況にある。また、多くのプレキャストコンクリート工場では、保有しているセメントの種類は、ほとんど普通ポルトランドセメントや早強ポルトランドセメントに限られており、高強度化に適した様々な混和材を添加した結合材や、高強度コンクリート用の特殊な混和剤については使用実績が少ない。

そこで今回、設計基準強度 ( $F_c$ )  $100\text{N/mm}^2$  クラスの高強度プレキャストコンクリートを製造することを目指し、2 工場において合計 5 種類の結合材を用いて実機試験を行った。本論では、その結果より初期の強度発現や強度補正值、構造体コンクリートの強度管理手法について検討を行った結果について述べる。

### 2. 実験概要

#### (1) 工場の概要とコンクリート

今回、2 工場（以下、A 工場と B 工場と称する）で練混ぜ試験を行い、それぞれ管理用供試体の強度発現と、構造体コンクリートの温度履歴や強度発現を確認した。

A 工場での使用材料を表-1に、B 工場での使用材料を表-2に示す。どちらの工場も使用している粗骨材の岩種は、硬質砂岩である。また、どちらの工場も強制 2 軸練りミキサを保有しており、ミキサ容量は A 工場が  $1.0\text{m}^3$ 、B 工場が  $1.5\text{m}^3$  である。

コンクリート調合の概要と試験時期、ならびに確認事項を、A 工場については表-3に、B 工場については表-4に示す。A 工場で確認を行った結合材の種類は、普通ポルトランドセメントの質量の内割り 30%を高炉スラグで

表-1 A工場の使用材料

		種類, 産地	諸物性	記号
結合材	セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.15 (g/cm <sup>3</sup> ) 比表面積 3370 (cm <sup>2</sup> /g)	N1
		低熱ポルトランドセメント	密度 3.24 (g/cm <sup>3</sup> ) 比表面積 3300 (cm <sup>2</sup> /g)	L1
	混和材	高炉スラグ	密度 2.88 (g/cm <sup>3</sup> ) 比表面積 4000 (cm <sup>2</sup> /g)	BF1
		シリカフェーム	密度 2.20 (g/cm <sup>3</sup> ) 比表面積 22.6 (m <sup>2</sup> /g)	SF1
骨材	細骨材	栃木県鬼怒川産川砂	表乾密度 2.61 (g/cm <sup>3</sup> ) 吸水率 1.57 (%) 粗粒率 2.75	S1
	粗骨材	栃木県野産硬質砂岩砕石	表乾密度 2.63 (g/cm <sup>3</sup> ) 吸水率 0.77 (%) 実積率 59.0 (%)	G1
化学混和剤		高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	SP
		高性能減水剤(超高強度用)		

表-2 B工場の使用材料

		種類, 産地	諸物性	記号
結合材	セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16 (g/cm <sup>3</sup> ) 比表面積 3440 (cm <sup>2</sup> /g)	N2
		3成分系特殊セメント※)	密度 2.99 (g/cm <sup>3</sup> )	VKC
骨材	細骨材	茨城県岩瀬産砕砂	表乾密度 2.58 (g/cm <sup>3</sup> ) 吸水率 1.89 (%) 粗粒率 2.83	S2
	粗骨材	茨城県岩瀬産硬質砂岩砕石	表乾密度 2.64 (g/cm <sup>3</sup> ) 吸水率 0.91 (%) 実積率 61.1 (%)	G2
化学混和剤		高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	SP
		高性能減水剤(超高強度用)		

※) 3成分系特殊セメント…Nセメント:スラグ石膏:シリカフェームを7:2:1で混合

表-3 A工場の試験概要と調査概要

結合材種類	試験時期	試験日	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	供試体種類と試験材齢(日)		
					標準	製品同一	コア
NBF (N+BF)	夏期 標準期 冬期	2002/9/11	35.0, 30.0, 27.0	160	7, 14, 28, 91	1, 7, 14, 28, 91	7, 14, 28, 91
		2002/10/24	36.3, 32.5, 29.5				
		2003/1/31	35.0, 30.0, 27.0				
L	夏期 標準期 冬期	2003/8/20	33.0, 29.0, 25.0	160	7, 14, 28, 91	1, 7, 14, 28, 91	7, 14, 28, 91
		2003/5/22					
		2002/12/11					
LSF (L+SF)	夏期 標準期 冬期	2003/8/29	25.0, 22.0, 18.0	150	7, 14, 28, 91	1, 7, 14, 28, 91	7, 14, 28, 91
		2002/5/30					
		2002/12/17					

NBFはN+BF (高炉スラグ) 内割30%置換

LSFの冬期はσ14試験なし

LSFはL+SF (シリカフェーム) 内割10%置換

表-4 B工場の試験概要と調査概要

結合材種類	試験時期	試験日	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	供試体種類と試験材齢(日)		
					標準養生	製品同一	コア
N	夏期 標準期 冬期	2001/8/1	40.0, 35.0, 30.0, 27.5	165	7, 28, 56, 91	1, 7, 28, 56, 91	7, 28, 56, 91
		2001/11/5					
		2002/2/6					
VKC	夏期 標準期 冬期	2002/7/24	28.0, 24.0, 20.0, 18.0	155	7, 28, 56, 91	1, 7, 28, 56, 91	7, 28, 56, 91
		2003/5/13					
		-					

置換した結合材 (NBF) と低熱ポルトランドセメント (L), そして低熱ポルトランドセメントの質量の内割り10%をシリカフェームで置換した結合材 (LSF) の3種類である。ただし, NBFについては, 品確法に対応するため純粋な水セメント比が50%を超えることがないように置換率の調整を行った。その結果, 標準期の水結合材比36.3%の調査では, 高炉スラグの置換率は27.4%となった。B工場では, 普通ポルトランドセメント (N) と, 普通ポルトランドセメントとスラグ石膏, シリカフェームを7:2:1で混合した, 3成分系の特殊セメント (VKC) の2種類について強度確認を行った。以下, 結合材種類は記号で表記する。今回, 検討を行った供試体の種類は, 標準養生と, 模擬柱試験体より採取したコア, そして, 打設当初は模擬柱試験体の傍らに存置し被せたシート内で一緒に養生し, シート撤去後は現場封か

ん養生 (製品同一養生と称する) の3種類である。

それぞれの結合材に対応する設計基準強度としては, NBFとNは60N/mm<sup>2</sup>まで, Lは80N/mm<sup>2</sup>まで, そしてLSFとVKCは80~100N/mm<sup>2</sup>, もしくはそれ以上と設定した。

(2) 練混ぜ方法

A工場で行った試験のうち, NBFは練混ぜ量を1.0m<sup>3</sup>とし, すべての材料を一回で投入し一括で練り混ぜた。なお, コンクリートの練混ぜ時間は工場実績に基づき決定した。一方, LやLSFでは, 事前の室内試験で粘性が非常に大きくなる場合があることを確認したので, 練混ぜ量は余裕を持たせて約0.7m<sup>3</sup>とした。練混ぜ順序は, モルタル先練りを行いモルタルの性状を確認した後, 粗骨材を投入し本練りを行った。練混ぜ時間は,

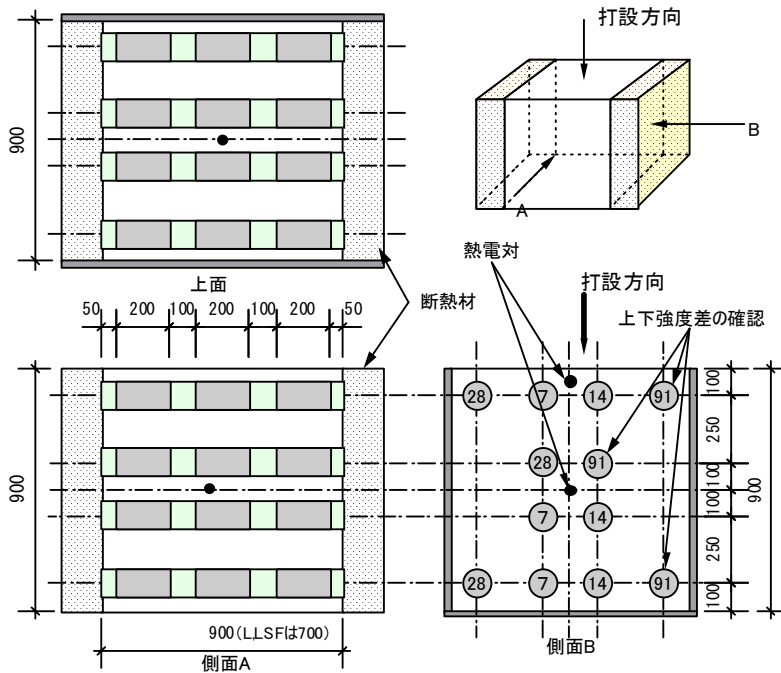


図-1 A工場模擬柱試験体

電流計や目視により状態を確認しながら決定した。

B工場では、NとVKCのどちらも練混ぜ量を $0.7\text{m}^3$ として2バッチ練り混ぜたコンクリートを併せて使用した。練混ぜ順序は、まずモルタルの先練りを行い、その後粗骨材を投入して本練りを行った。練り時間はNではモルタル練りを30秒、本練りを90秒に固定した。VKCは、事前の試験練りによって時間を定め、モルタル練りは、結合材水比の増加に伴い75秒から165秒まで30秒ずつ長くしていき、本練りは150秒に固定した。

### (3) 模擬柱試験体

今回、すべての結合材で模擬柱試験体を製作した。試験体からは所定の材齢でコアを採取し、構造体コンクリート強度の確認を行った。また、試験体に熱電対を埋め込み、水和初期のコンクリート温度履歴を測定した。A工場で作成した模擬柱試験体の形状を図-1に、B工場で作成した模擬柱試験体の形状を図-2に示す。

A工場で作成した模擬柱試験体は横打ちを模擬した。寸法は900mm角のブロックを基本としたが、LとLSFについては、コンクリート練混ぜ量を約 $0.7\text{m}^3$ 程度としたため、断熱材方向の長さは700mmと若干小さい。コアは、高さ方向3カ所で採取を行い、模擬柱内の高さ方向の強度分布について確認を行った。

B工場で作成した模擬柱試験体は、縦横1000mmで高さを1100mmとした。コンクリートは、Nでは横打ちとしVKCでは縦打ちとしている。コア抜きは縦方向に行

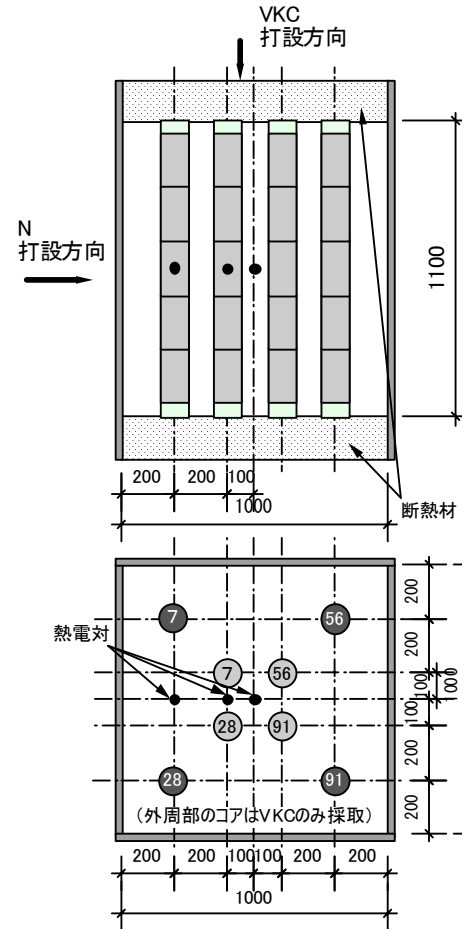


図-2 B工場模擬柱試験体

い、一本のコアから5つの供試体を成型している。コアは、Nでは中心部のみ採取を行い、VKCでは中心部と外周部で採取している。

## 3. 実験結果

### (1) 各種供試体の強度発現

各種の結合材について、結合材水比と圧縮強度の関係を、標準養生については図-3に、製品同一養生については図-4に、模擬柱試験体から採取したコア強度については図-5に示す。

標準養生の強度発現をみると、A工場で行ったNBFとL、そしてLSFでは、冬期試験の強度がほかの2時期に比べて高強度となった。原因として、各試験時期で同じ生産者の材料を使用しているが、厳密には製造ロットや採取場所などが異なる材料であること、骨材の表面水の変動などが考えられるが明らかではない。B工場で行ったNとVKCについては、試験時期ごとの強度の変動は確認できなかった。

強度発現状況について比較を行うと、Nでは材齢7日

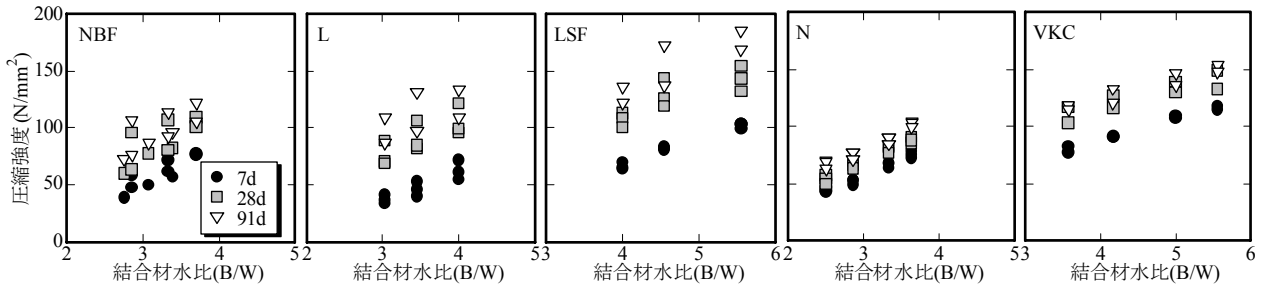


図-3 標準養生圧縮強度発現

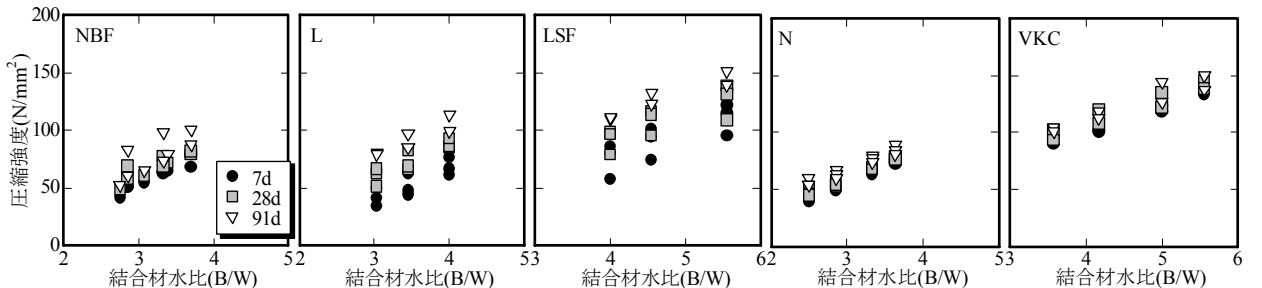
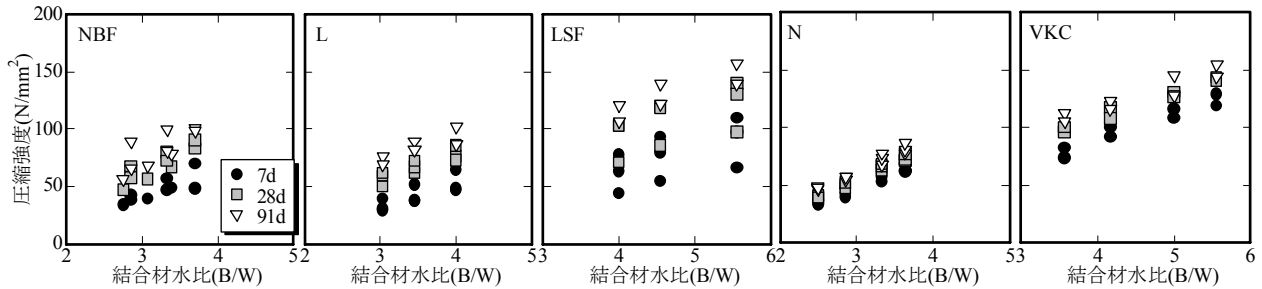


図-5 コア圧縮強度発現

以降の強度増加が小さいが、NBFとVKCの長期的な強度増加量はNよりも若干大きい。これらの結合材は、普通ポルトランドセメントをベースとしているが、添加された各種の混和材により長期強度発現が大きくなったと考えられる。一方、LとLSFでは、低熱ポルトランドセメントをベースとしているため材齢7日強度は他の結合材より低い。しかし、材齢7日から28日までの強度増加量は非常に大きく、また、材齢28日から91日までの強度増加量も比較的大きい。本実験の範囲で、標準養生28日強度は、NとNBF、そしてLでは最高で90～100N/mm<sup>2</sup>程度、そしてLSFとVKCでは130～150N/mm<sup>2</sup>程度であった。

製品同一養生の強度発現をみると、強度増加量は全体的に標準養生より小さくなる。結合材別にみると、普通ポルトランドセメントをベースとするNやNBF、そしてVKCの3種類では試験時期による変動が比較的小さいが、低熱ポルトランドセメントをベースとするLとLSFの2種類では、冬期試験の材齢7日と28日の強度が極端に低い。低熱ポルトランドセメントはC<sub>2</sub>S含有量が多く発熱量が小さいのに加え、冬期試験では材齢91日までの

平均外気温度が約2.7℃と、養生温度が低いと周囲からの熱の供給もなく、水和反応が大きく遅れたと考えられる。

コア供試体の強度発現をみると、普通ポルトランドセメントをベースとする3種類の結合材では、材齢7日の時点で91日強度に近い強度が発現していることを確認できる。セメントの水和熱が大きく、また、模擬柱試験体はある程度の部材寸法を有しているため、試験時期に関係なく温度上昇がみられ、若材齢での強度発現が顕著になっていると考えられる。

一方、低熱ポルトランドセメントをベースとするLやLSFは、材齢7日強度は小さいがその後の強度増加があり、材齢91日強度は普通ポルトランドセメントをベースとする結合材と同等以上の強度が得られる。冬期試験での強度発現の遅れは、製品同一養生と同様に他の試験時期より大きい。しかし、模擬柱試験体では初期の温度上昇により、強度発現の遅れは製品同一養生より小さい。

標準養生強度とコア強度との関係を図-6に示す。材齢7日では、結合材種類に関わらずコア強度は標準養生強度と同等か若干高く、初期養生温度が高くなる影響がみ

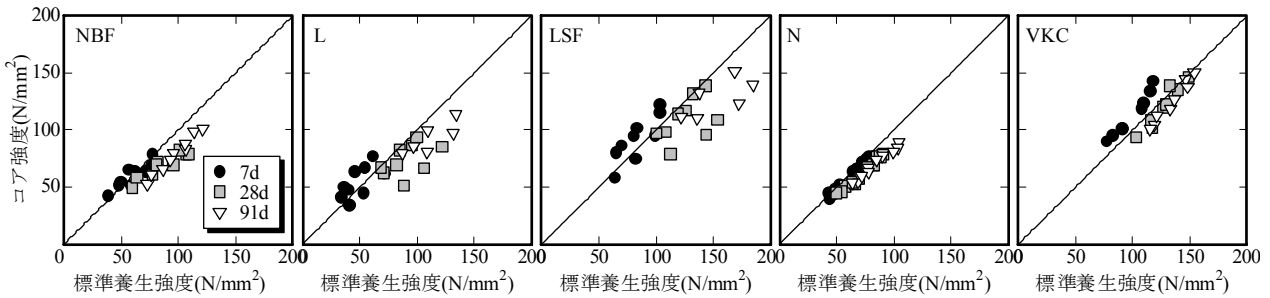


図-6 標準養生強度とコア強度

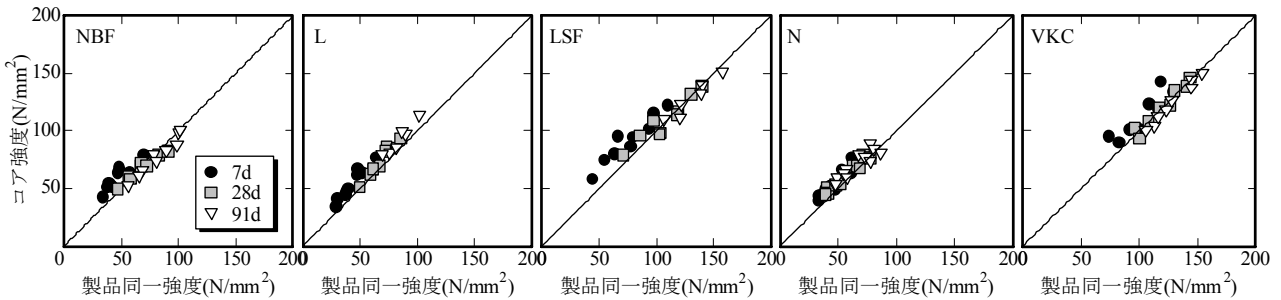


図-7 製品同一養生強度とコア強度

られる。しかし、長期材齢では標準養生のほうが高強度となる。材齢28日や91日における標準養生強度とコア強度との差は最大で15N/mm<sup>2</sup>程度だが、LとLSFではさらに強度差が大きい結果がある。これは平均外気温が極端に低い冬期試験の結果である。

製品同一養生強度とコア強度との関係を図-7に示す。標準養生との比較結果と同様に、材齢7日ではコア強度は製品同一養生より高強度となる傾向がある。また、長期材齢でも、コア強度は製品同一養生と同等かより高強度となる。その傾向は、低熱ポルトランドセメントを使用したLやLSFでより顕著であり、特にLではすべてのコア強度が製品同一養生強度を上回った。

以上の結果から、長期材齢であれば製品同一養生で、構造体コンクリート強度を管理できると考えられる。

(2) 脱型強度の確保

プレキャストコンクリート部材では、その製作サイクル上、翌日（厳密には18時間程度）に脱型が行われ、その後速やかに所定の養生場への移動が行われる。普通ポルトランドセメントをベースとした場合、高強度コンクリートであれば自己発熱が充分であり、また、高強度コンクリートは柱や梁などの大断面部材に使用することが多いため、蒸気養生を行わず保温することで脱型強度を得ることができる。また、脱型強度を確認する製品同一養生供試体も、製作部材の傍らに置き一緒に保温養生することで、部材から熱を供給され初期強度を確保することが可能である。

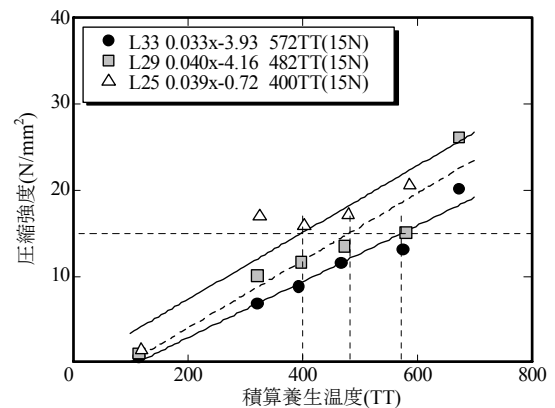


図-8 Lシリーズの初期強度発現

しかし、低熱ポルトランドセメントをベースとした場合、部材断面が大きくても水和熱が小さいため初期強度を確保できない場合がある。特に冬期では、初期の養生温度不足が増長される。また、製品同一養生供試体では養生温度不足が更に顕著になると考えられる。そこで、低熱ポルトランドセメントをベースとする場合は、補助的に蒸気養生が必要となる場合が生じると考えられる。

そこで、式(1)で示される一時間ごとの平均養生温度の和と圧縮強度との関係を検討した。

$$M(TT) = \sum T_{ave} \tag{1}$$

M：積算温度 (TT)

Tave：平均温度 (°C)

Lシリーズの検討結果を図-8に示す。ごく初期での圧縮強度発現は積算養生温度 (TT) を用いることで直線

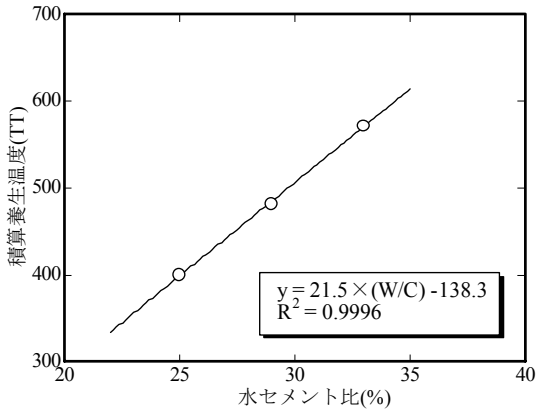


図-9 15N/mm<sup>2</sup> を得るための必要積算温度 (1)

近似できた。仮に、18時間後に15N/mm<sup>2</sup>を確保するとした場合、L33では、572TT/18h=31.8(°C)となり、平均養生温度で32°Cを確保するための養生を行う必要がある。同様の検討を行うと、L29では26.7°C、L25では22.2°Cとなった。この結果は、製品同一養生供試体についての検討結果であり、内部発熱量が大きい模擬柱試験体については、強度は充分安全側に発現していると考えられる。

続いて、Lについて15N/mm<sup>2</sup>の強度を得るために必要となる積算温度(TT)を水セメント比で整理した結果を図-9に示す。必要積算温度は水セメント比と共に増加する傾向を示しており、本試験結果は式(2)で近似された。

$$M'(TT) = 21.5 \times W/C - 138.3 \quad (2)$$

M' : 必要積算温度 (TT)

W/C : 水セメント比 (%)

### (3) 部材内コンクリート強度分布

冬期と夏期試験の材齢28日における、模擬柱試験体内のコンクリート強度分布の例を表-5に示す。

今回、Nの変動係数が非常に小さい。それは、図-2に示したように、コア採取高さが1カ所であり、試験数が少ないことが理由と考えられる。他の4シリーズでは試験体内の様々な位置からコアを採取しているが、強度が高いほど強度の変動が小さく傾向にある。LとLSFでは冬期の変動係数が大きくなる傾向があり、特にL25では夏期に比べ3%以上の高い。これは、冬期試験では、外周部の温度上昇量が少なく、また平均外気温が低いため、材齢28日の時点では内外で積算温度差の影響が大きいことによる。材齢が経過し積算温度差の影響が小さくなる材齢91日では変動係数は3.5%まで低下し、部材内で強度が均一になっていくことが確認できた。冬期に低熱ポルトランドを用いて部材を製作する場合、部材の養生温度に配慮する必要がある。

表-5 試験体内の強度分布

試験時期	記号	試験数	平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	最大値 (N/mm <sup>2</sup> )	最小値 (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差 (N/mm <sup>2</sup> )	変動係数 (%)
冬期	NBF27.5	9	79.0	88.1	72.7	4.9	6.2%
	L25	9	85.2	97.5	76.7	7.4	8.7%
	LSF22	9	95.7	102.7	91.0	4.5	4.7%
	VKC20						
夏期	N30	5	69.36	70.8	68.2	1.0	1.4%
	NBF27.5	9	81.3	88.8	76.2	4.5	5.6%
	L25	9	92.7	99.4	84.0	5.1	5.5%
	LSF22	9	113.9	120.4	107.8	4.3	3.8%
	VKC20	10	124.4	130	119	3.7	3.0%
N30	5	67.6	69.5	65.6	1.5	2.2%	

## 4. まとめ

今回の2つのプレキャストコンクリート工場において、高強度プレキャストコンクリートの実用化のための実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 結合材種類ごとに対応しうる設計基準強度として、NとNBFでは60~70N/mm<sup>2</sup>程度、Lでは80N/mm<sup>2</sup>、LSFやVKCでは120N/mm<sup>2</sup>まで対応できる。
- 2) 材齢28日以降であれば、プレキャスト部材のコンクリート強度は、製品同一養生供試体で強度管理が可能である。
- 3) コンクリート強度が高強度であるほど、部材内のコンクリート強度は均一になっていく。
- 4) 低熱ポルトランドセメントを使用した場合、製作時期によっては脱型強度を得るための保温養生が必要となる。脱型に必要な積算温度は水セメント比で評価できた。

### 謝辞:

今回の一連の実験において、ご協力いただいた住建コンクリート工業(株)小山工場、三井プレコン(株)関東工場の関係諸氏に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 佐藤幸恵, 榊田佳寛: 高強度コンクリートの構造体中での圧縮強度の変動, 日本建築学会構造系論文集, 第562号, pp9-14, 2002.12
- 2) 河上浩司, 西本好克: Fc100N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートの強度発現性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.369-374, 2002
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 1997, 2003
- 4) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事, 1991, 2003