

報告 超高強度コンクリートの強度発現性状におよぼす養生方法の検討

一瀬 賢一^{*1}・神代 泰道^{*2}・都築 正則^{*3}

要旨: $F_c150\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートプレキャスト部材の最適な養生方法の提案を目的として,セメントの種類,打設後の養生方法をパラメータとして実験を行い,以下のことがわかった。(1) 中庸熱ポルトランドセメント,低熱ポルトランドセメントどちらのセメントを使用しても 150N/mm^2 以上の強度を確保できる。(2) 前養生時間を長くすると強度発現が改善される。(3) 養生温度は,60℃では長期強度の増進が認められるが,90℃では長期強度の増進がほとんどないので,90℃を上限とするとよい。(4) 養生時間をできるだけ長くすると強度発現が改善される。

キーワード: 超高強度コンクリート, 養生方法, 養生温度, 養生時間, 圧縮強度

1. はじめに

近年,40層以上の高層集合住宅を中心として,設計基準強度(以下 F_c)100~130 N/mm^2 の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造(以下RC造)が設計・施工されてきている。研究レベルでは, $F_c150\text{N/mm}^2$ 以上を対象とした材料実験^{例えば1)},構造実験²⁾の結果も報告されてきている。更には, $F_c200\text{N/mm}^2$ が次の目標とされている。

また高層集合住宅では,工期の短縮と品質向上を目的として部材のプレキャスト化が進んでおり, $F_c100\text{N/mm}^2$ 以上のプレキャスト部材も製造されてきている。プレキャスト部材は,現場打設コンクリートよりも強度の保証材齢を短く設定する場合が多い。このため, $F_c100\text{N/mm}^2$ 以上のプレキャスト部材を製造する場合は,養生方法が重要となり,工夫する必要がある。しかし, $F_c100\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートを対象とした養生方法に関する研究や報告は,ほとんどないと思われる。

本報告では, $F_c150\text{N/mm}^2$ 以上の超高強度コンクリートプレキャスト部材の最適な養生方法の

提案を目的として,セメントの種類,打設後の養生方法(型枠脱型の有無,養生時間,養生温度)をパラメータとして実験を行い,検討および考察した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件の一覧を表-1に示す。また実験条件の概説図を図-1に示す。実験条件は,セメントの種類2水準,養生を開始するまでの前養生時間3水準,型枠脱型の有無,供試体の養生温度3水準,養生時間3水準とした。実験の組合せを表-2に示す。実験は,まずシリーズ1としてセメントの違い,養生方法の違いによる強度発現性状を比較した。次にシリーズ2では,シリーズ1の結果を考慮して,強度発現に

表-1 実験条件

項 目	摘 要	水準数
セメント	中庸熱(M),低熱(L)	2
前養生時間	6時間(P6),24時間(P24),48時間(P48)	3
型枠脱型	有り(D),無し(N)	2
養生温度	20℃(C20),60℃(C60),90℃(C90)	3
養生時間	12時間(T12),24時間(T24),48時間(T48)	3

*1 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ長 博(工)(正会員)

*2 同 副主査 博(工)(正会員)

*3 同 研究員 工修(正会員)

及ぼす養生温度、養生時間の影響について追加実験を実施した。

2.2 使用材料と調査

使用材料は、セメントに中庸熟ポルトランドセメント（以下Mセメント、密度 3.22g/cm^3 ）と低熟ポルトランドセメント（以下Lセメント、密度 3.22g/cm^3 ）、混和材は、ジルコニア起源シリカ質微粉末³⁾（以下ZFF）、粗骨材には安山岩砕石（表乾密度 2.62g/cm^3 、吸水率 2.26% 、粗粒率 6.71% ）、細骨材には安山岩砕砂（表乾密度 2.62g/cm^3 、吸水率 2.56% 、粗粒率 2.72% ）を使用した。ZFFの品質をJIS A 6207（コンクリート用シリカフューム）、日本建築学会の規格⁴⁾と比較して表-3に示す。ZFFは、 SiO_2 を主成分に、ジルコニアを $3\sim 5\%$ 含み、 MgO や SO_3 をほとんど含まない。比表面積は、 $10\text{m}^2/\text{g}$ 以下とシリカフュームより小さく、平均粒径は $1\mu\text{m}$ 程度でシリカフュームと比べて大きい点に特徴を有する。混和剤は、ポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能減水剤を使用した。

調査条件は、水結合材比（以下W/B比） 14% とし、単位水量 150kg/m^3 とした。また目標スランプフロー値を $70\pm 7.5\text{cm}$ 、目標空気量を $2.0\pm 1.0\%$ とした。コンクリートの調査を表-4に示す。なおMセメントとZFFを使用したコンクリートをMZF、LセメントとZFFを使用したコンクリートをLZFと略して示す。

2.3 測定項目と測定方法

測定項目は、フレッシュ性状（スランプフロー、空気量、 50cm フロー時間、単位容積質量、コンクリート温度）、供試体圧縮強度とした。各測定は、各JISに準じて実施した。供試体は、 $100\phi\times 200\text{mm}$ とし、各実験の組合せおよび材齢に対して3体とした。

2.4 コンクリートの打設と養生

コンクリートは、容量 100m^3 の強制二軸ミキサを使用し、 $55\text{L}\times 4$ バッチ（シリーズ2については3バッチ）混練した。練混ぜ方法は、モルタル先練りとし、空練り15秒、モルタル120秒の後、粗骨材を投入して90秒練り混ぜた。練

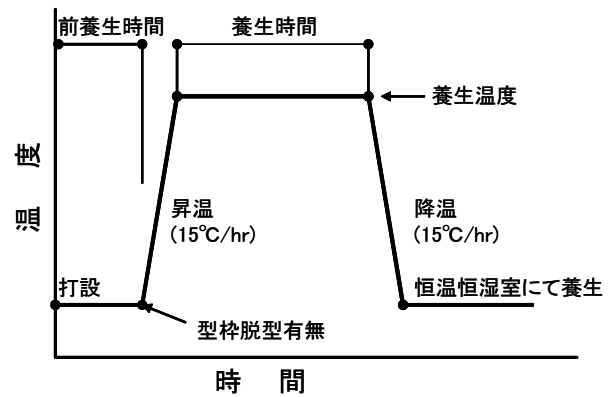


図-1 実験条件の概説図

表-2 実験の組合せ

シリーズ	試験体記号	セメント	前養生時間 (hr)	脱型有無	養生温度 (°C)	養生時間 (hr)
1 MZF	1 M-P24-D-C20	M	24	D	20	-
	2 M-P6-N-C60-T24		6	N	60	24
	3 M-P6-N-C90-T24				90	
	4 M-P6-N-C60-T48				60	48
	5 M-P6-N-C90-T48		24	D	90	
	6 M-P24-N-C60-T24				60	
	7 M-P24-N-C90-T24				90	
	8 M-P24-D-C60-T24				60	24
	9 M-P24-D-C90-T24				90	
1 LZF	1 L-P24-D-C20	L	24	D	20	-
	2 L-P6-N-C60-T24		6	N	60	24
	3 L-P6-N-C90-T24				90	
	4 L-P6-N-C60-T48				60	48
	5 L-P6-N-C90-T48		24	D	90	
	6 L-P24-N-C60-T24				60	
	7 L-P24-N-C90-T24				90	
	8 L-P24-D-C60-T24				60	24
	9 L-P24-D-C90-T24				90	
2 LZF	L-P48-D-C20	L	48	D	20	-
	L-P48-D-C60-T12					12
	L-P48-D-C60-T24				60	24
	L-P48-D-C60-T48					48
	L-P48-D-C90-T12					12
	L-P48-D-C90-T24				90	24
	L-P48-D-C90-T48					48

表-3 ZFFの品質

項目	ZFF	JIS規格	学会規格
SiO_2 (%)	94.7	85以上	85以上
ZrO_2 (%)	3.9	-	-
MgO (%)	0.0	5.0以下	5.0以下
SO_3 (%)	0.0	3.0以下	3.0以下
強熱減量 (%)	0.1	5.0以下	5.0以下
比表面積 (m^2/g)	8.7	15以上	10以上
湿分 (%)	0.28	3.0以下	3.0以下
密度 (g/cm^3)	2.4	-	-
活性度指数 (%)	7日	108	95以上
	28日	114	105以上

表-4 コンクリートの調査

セメント	W/B (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m³)					1200N (C × %)
			W	B		S	G	
				C	ZFF			
M	14	34.0	150	910	161	424	825	1.3%
L	14	34.0	150	910	161	424	825	1.1%

り混ぜ後は、5 分間静置させ、フレッシュ性状を測定した。供試体は、打設後速やかに封かん養生とし、前養生時間の間養生室(温度 20 ± 2) で養生した。前養生時間経過後は、実験の組合せに従い、型枠脱型の有無、養生温度、養生時間を調整した。養生は、水温制御式(電熱器、冷却器および循環ポンプ装備) の温度履歴追従養生水槽にて実施した。目標とする養生温度までは $15 / \text{hr}$ で昇温し、養生温度を保持した。また降温時も $15 / \text{hr}$ で冷却した。降温後は、供試体を水槽から取り出し、恒温恒湿室(温度 20 ± 2 , 湿度 $60\% \pm 5\%$) にて所定材齢まで養生した。

3. シリーズ 1 の実験結果と考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表 - 5 に示す。フレッシュ性状は、スランプフロー、空気量など概ね目標値を満足することができた。

3.2 圧縮強度

シリーズ 1 の強度試験結果を図 - 2、図 - 3 に示す。MZF の場合、材齢 7 日、28 日における圧縮強度は、標準養生した供試体よりも各種養生を行った供試体の方が高く、強度の差は大きい。しかし、材齢 91 日になると各種養生した供試体強度に概ね追いつくことがわかる。また材齢 91 日では、養生方法の違いによる強度差が小さくなる傾向を示した。

一方 LZF の場合、MZF と同様に材齢 7 日、28 日における圧縮強度は、標準養生した供試体よりも各種養生を行った供試体の方が高く、養生方法の違いによる強度の差が大きい。この強度の差は、材齢 91 日になると少し小さくなるものの、養生方法により 20N/mm^2 以上の差が生じており、バラツキが大きい。しかし、L セメントを使用した場合は、養生方法を適切に選択すれば、MZF よりも高い強度を得る可能性もあると推察する。

3.3 セメントの影響

セメントの違いによる強度発現に及ぼす影響

表 - 5 フレッシュ性状試験結果

No.		スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	50cm 70-時間 (秒)	単位容積質量 (kg/m^3)	コンクリート温度 (°C)
1 *	MZF	77.0×73.5	1.8	13.3	2448	25.0
		74.5×73.5	1.7	16.0	2455	23.5
	LZF	76.0×76.0	1.7	14.7	2448	23.0
		72.0×73.0	1.7	16.7	2452	22.0
2	LZF	73.5×76.0	1.6	12.6	2451	27.0

* : 2 パッチごとに測定

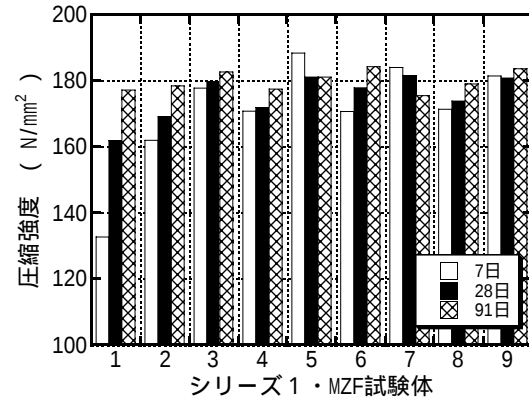


図 - 2 圧縮強度 (シリーズ 1 MZF)

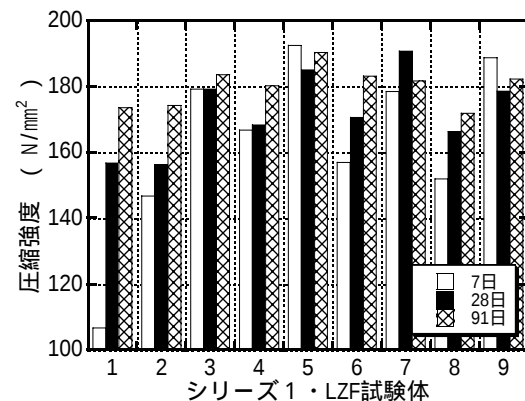


図 - 3 圧縮強度 (シリーズ 1 LZF)

を図 - 4、図 - 5 に示す。養生温度 60°C とした場合、MZF の強度発現が優れており、材齢 91 日になって LZF の強度が到達する傾向を示す。特に前養生時間 6 時間の場合、MZF と LZF の強度差が大きい。一方、養生温度 90°C の場合は、材齢 7 日で MZF、LZF 共に約 180N/mm^2 の強度発現を示す。しかし、材齢が 28 日、91 日と進んでも強度の増進は認められなかった。MZF では、むしろ材齢 28 日以降強度低下する傾向を示した。

以上の結果から、どちらのセメントを使用しても $\text{Fc}150 \text{N/mm}^2$ 以上の強度を確保できることがわかった。しかし、強度の安定性からみれば

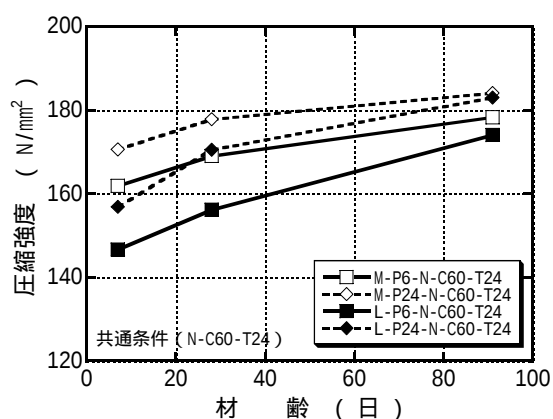


図 - 4 セメントの影響 (共通 N-C60-T24)

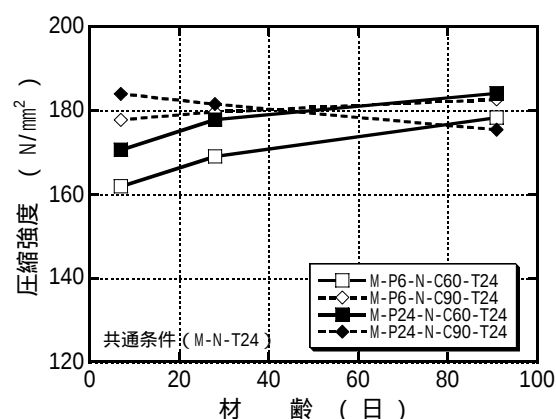


図 - 6 前養生時間の影響 (共通 M-N-T24)

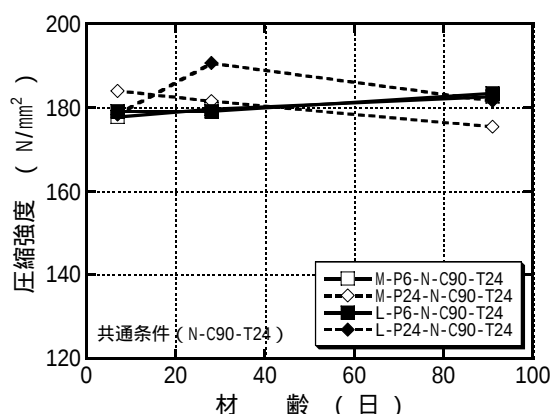


図 - 5 セメントの影響 (共通 N-C90-T24)

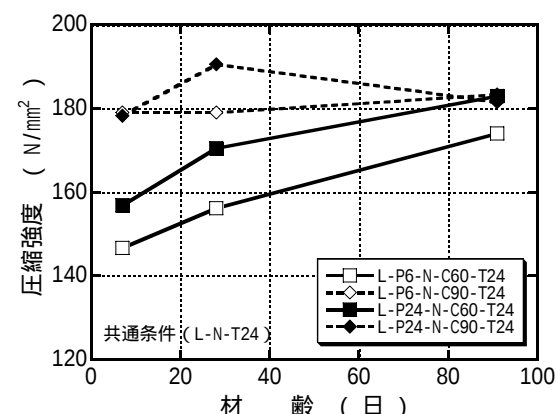


図 - 7 前養生時間の影響 (共通 L-N-T24)

Mセメントを使用したMZFの方がよい。また更に高い強度をめざすならば、Lセメントを使用したLZFの方に可能性があると思われる。

3.4 前養生時間の影響

前養生時間の強度発現に及ぼす影響を図 - 6, 図 - 7 に示す。養生温度60 の場合は, 前養生時間を6時間よりも24時間とした方が材齢7~91日までの強度発現がMZF, LZF共に良いことがわかった。養生温度90 の場合は, 前養生時間6時間では材齢7~91日にかけてわずかな強度増加が認められた。しかし, 前養生時間を24時間とした場合は, 材齢28日から91日にかけて強度の低下を示した。

以上の結果から, 養生温度60 であれば前養生時間を長くした方が強度発現がよくなると推察する。

3.5 型枠脱型有無の影響

前養生後における型枠脱型の有無による強度発現に及ぼす影響を図 - 8, 図 - 9 に示す。養

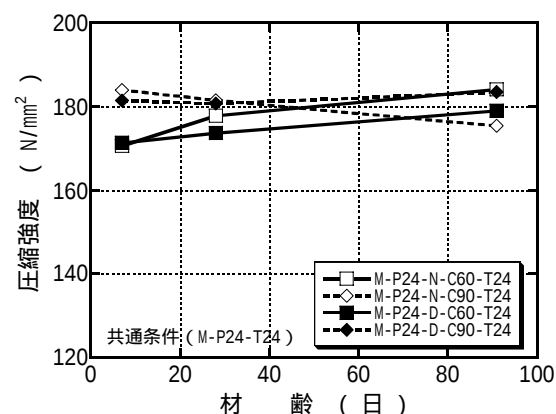


図 - 8 脱型の有無の影響 (共通 M-P24-T24)

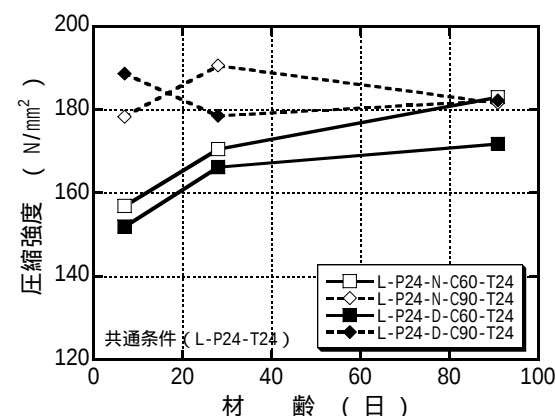


図 - 9 脱型の有無の影響 (共通 L-P24-T24)

養生温度 60 では、MZF、LZF 共に脱型しない方が材齢 28 日以降高い強度を示した。養生温度 90 では、MZF の封かん養生を続けた供試体は、材齢 28 日以降強度低下が認められた。

以上の結果から、養生温度 60 の場合ならば、脱型することなく封かん養生とした方がよいと思われる。しかし、前養生時間 24 時間後における封かん状態での加熱養生は現実的ではないと思われる。

3.6 養生温度の影響

養生温度の強度発現に及ぼす影響を図 - 10、図 - 11 に示す。前養生時間 6 時間の場合は、MZF、LZF 共に養生温度 60 よりも 90 の方が高い強度を示し、材齢 91 日でも養生温度 90 の強度に達しなかった。しかし、前養生時間 24 時間の場合、材齢 28 日までは養生温度 90 の方が高い強度を示すが、材齢 91 日では強度が低下し、LZF では 60 養生と同程度、MZF では 60 養生の方が高い強度を示した。養生温度 90 とした場合の材齢 91 日における強度低下の原因としては、乾燥による微細ひび割れの発生によるものと推察する。

以上の結果から、養生温度 60 では長期強度の増進が認められるが、90 では長期強度の増進がほとんどない。よって養生温度は、90 を上限とし、60 ~ 90 の範囲で定めるのがよい。

3.7 養生時間の影響

養生時間の違いによる強度発現に及ぼす影響を図 - 12、図 - 13 に示す。MZF の場合、材齢 7 日においては、養生時間を 24 時間から 48 時間に長くした強度発現が 10N/mm^2 程度良いものの、材齢 28 日以降の差異は認められなかった。一方 LZF の場合は、養生時間を 24 時間から 48 時間に長くした方の強度発現が良い。また養生温度を 60、90 とした場合でも養生時間を長くした場合の方が高い強度を示した。

以上の結果から、養生時間を長くした方が強度発現が改善できると推察する。

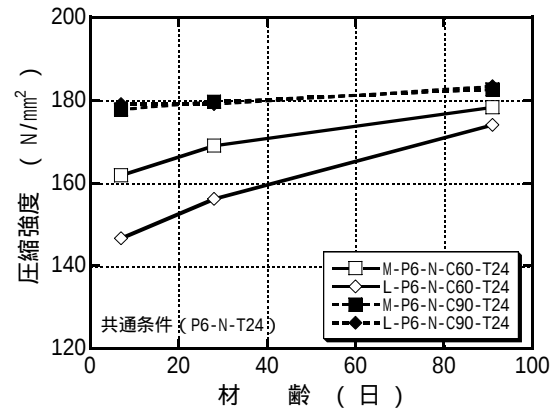


図 - 10 養生温度の影響 (共通 P6-N-T24)

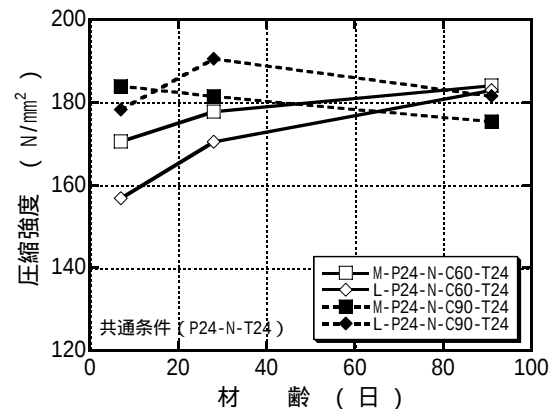


図 - 11 養生温度の影響 (共通 P24-N-T24)

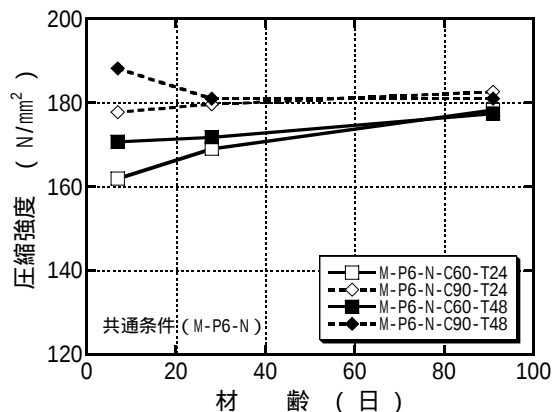


図 - 12 養生時間の影響 (共通 M-P6-N)

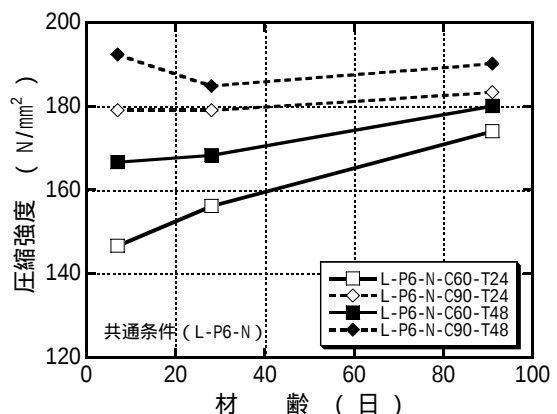


図 - 13 養生時間の影響 (共通 M-P6-N)

4. シリーズ2の実験結果と考察

シリーズ1の結果をふまえて、セメントにLセメントを使用，前養生時間48時間，型枠脱型した供試体について，養生温度2水準と養生時間3水準として追加実験を実施した。

実験結果を図-14に示す。前養生時間を48時間とした場合，材齢91日までに標準養生強度が各種養生した供試体強度を確保できない。また養生温度60とした場合は，養生時間を12時間から48時間へ長くするほど強度発現が改善されることがわかった。養生温度90の場合は，材齢7日強度は，養生時間の長い方がよいものの，材齢28日では同程度の値を示した。また材齢91日では，48時間養生したものについては，強度が伸びているが，12時間養生と24時間養生のものについては強度低下を示した。養生温度60としても養生時間を長くすれば，養生温度90の場合と同程度の強度まで到達できることがわかった。

前養生時間の違いによる強度発現の比較を図-15に示す。養生温度60，90共に前養生時間を48時間とした方がよい結果となった。

以上のことから，Lセメントを使用した場合は，前養生時間，養生時間を長くすると強度発現が改善されるといえる。

5. まとめ

$Fc150N/mm^2$ 以上の超高強度コンクリートプレキャスト部材の最適な養生方法の選定を目的として，セメントの種類，打設後の養生方法をパラメータとして実験を行い，以下のことがわかった。

- (1) 中庸熱ポルトランドセメント，低熱ポルトランドセメントどちらのセメントを使用しても $Fc150N/mm^2$ 以上の強度を確保できる。
- (2) 前養生時間を長くすると強度発現が改善される。
- (3) 養生温度60では長期強度の増進が認められるが，90では長期強度の増進がほとんどないので，90を上限とするとよい。

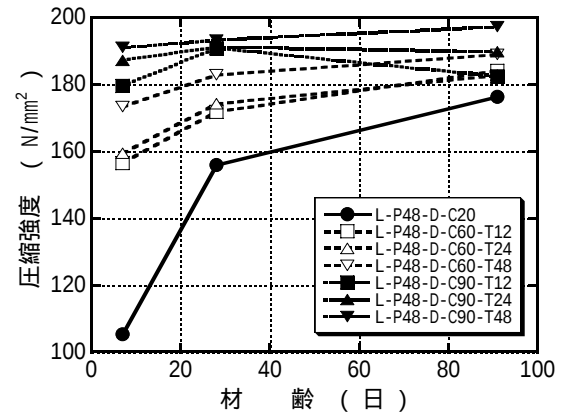


図-14 圧縮強度(シリーズ2 LZF)

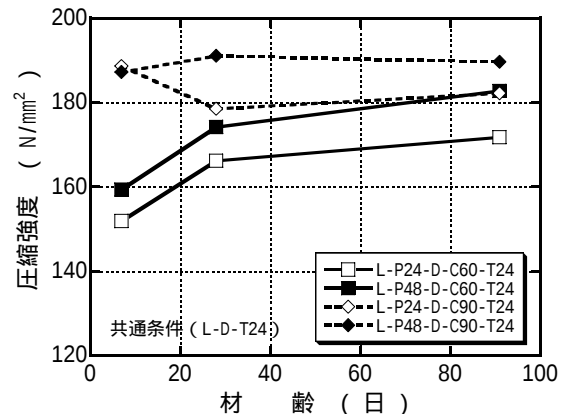


図-15 前養生時間の影響(共通 L-D-T24)

- (4) 養生時間をできるだけ長くすると強度発現が改善される。

参考文献

- 1) 百瀬晴基ほか:Fc150の超高強度コンクリートの強度性状に関する実験的研究(その1),(その2),日本建築学会大会学術講演梗概集,A-1,pp.805-808,2002.8
- 2) 小室 努ほか:150MPa超高強度コンクリートを用いたRC柱の耐震性能,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.2, pp.277-282,2002.6
- 3) 神代泰道ほか:ジルコニア起源シリカ質微粉末混合セメントを用いた超高強度コンクリートの性状,コンクリート工学年次論文集,Vol.27, No.1, pp.1057-1062,2005.6
- 4) 日本建築学会:シリカフュームを用いたコンクリートの調合設計・施工ガイドライン,pp.3-7,1996