

# 報告 促進養生したコンクリートの初期強度発現性状

蓮尾 孝一<sup>\*1</sup>・西本 好克<sup>\*1</sup>・松田 拓<sup>\*2</sup>・河上 浩司<sup>\*2</sup>

要旨:最近の建築部材の施工では,品質管理や施工速度の向上を目的として,システム化工法や,サイトPCa工法が多くなっている。これらの施工法では,コンクリート工事について時間を一定とするタイムスケジュールが要求される場合が多く,コンクリートの初期強度管理の検討が重要である。本報ではセメント種類,調合及び養生温度がコンクリートの強度発現に与える影響を把握し,水セメント比,積算温度,標準養生7日強度より初期強度を推定する方法を提案した。また,本推定法の精度について実施工のコンクリートにより検証した。

キーワード: 強度発現,初期強度,セメント種類,積算温度

## 1. はじめに

コンクリートの耐久性を確保する上で,打設後の初期養生は重要である。特にせき板の取外し時期は,コンクリートの中酸化や乾燥収縮への影響が大きいため,取外し時のコンクリート強度は5ないしは8 N/mm<sup>2</sup>以上と規定されている<sup>1)</sup>。

一方,最近の建築躯体の施工方法として大型型枠によるシステム化工法や,サイトPCa工法による部材製造等が取り入れられ,部材の品質管理や施工速度の向上が図られている。これらの施工法では,コンクリートの打設からせき板の取り外しや,部材の取付けまでの時間を一定とするタイムスケジュールが要求される場合が多い。したがって,脱型や部材取付け時のコンクリート強度を確保するため,コンクリートの材料,調合および養生方法の検討が必要とされる。これまで初期材齢のコンクリート強度の推定は多くの研究がされてきた<sup>2)~4)</sup>。しかし低熱系のセメントや高強度域での研究は少ない。これらの背景により,ここではセメント種類,調合及び養生温度がコンクリートの強度発現に与える影響を室内実験により確認した。また,初期材齢におけるコンクリート強度を推定する方法を検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験概要

実験の要因と水準を表-1に示す。今回の実験ではセメントの種類,水セメント比,養生方法(温度履歴)を要因として,強度発現性状を把握した。

使用材料を表-2に,調合を表-3に示す。調合は,普通セメント(以下,Nセメントと記す)では水セメント比25,30,35,40,45,50%の6種類,中庸熱(以下,Mセメントと記す)および低熱セメント(以下,Lセメントと記す)では30%の各1種類の計8調合とした。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
セメント	普通ポルト,中庸熱ポルト,低熱ポルト
水セメント比	25,30,35,40,45,50%
養生	一定温度(10,20,30°C),促進(3水準:PCa模擬)

\*:W/C=25,30%のコンクリートを除く

表-2 使用材料

材料	記号	種類	品質
セメント	N	普通ポルトランド	密度:3.15g/cm <sup>3</sup> 比表面積3310cm <sup>2</sup> /g
	L	低熱ポルトランド	密度:3.24g/cm <sup>3</sup> 比表面積3350cm <sup>2</sup> /g
	M	中庸熱ポルトランド	密度:3.21g/cm <sup>3</sup> 比表面積3260cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	鬼怒川産川砂	表乾密度:2.58g/cm <sup>3</sup> 吸水率:2.09%,粗粒率:2.47
粗骨材	G	栃木県阿蘇郡葛生町産碎石2005	表乾密度:2.67g/cm <sup>3</sup> 吸水率:0.97%,粗粒率:6.47
混和剤	Ad <sub>1</sub>	AE減水剤標準型I種	リグニンスルホン酸系
	Ad <sub>2</sub>	高性能AE減水剤標準型I種	ポリカルボン酸系
	Ad <sub>3</sub>	高性能AE減水剤標準型I種	ポリカルボン酸系

\*1 三井住友建設(株)技術研究所(正会員)

\*2 三井住友建設(株)技術研究所 工修(正会員)

## 2.2 供試体作製および養生

コンクリートの練混ぜは、容量50lのパン型強制練りミキサを用い各調合、養生条件別にバッチを分けて行った。1バッチの練混ぜ量は、40～50lとした。また練混ぜ時間は、W/C=45.50%ではコンクリート練り60秒、その他の調合ではモルタル練り30～60秒+コンクリート練り60～180秒とした。コンクリートの練り混ぜ後フレッシュ性状を測定し、圧縮試験用供試体(100×200mm)を採取した。

供試体の養生は、図-1中の太線に示すような各養生温度に制御された養生槽内にて封かん状態で養生した。コンクリートの材齢72時間までの養生温度を10, 20, 30の一定温度条件、および現場でのPCa製造を模擬した温度条件の計6条件とした。PCa製造時の養生は、パターンA(冬期施工、加熱養生)、パターンB(冬期施工、自然養生)及びパターンC(標準期施工、加熱養生:普通コンクリート、自然養生:高強度コンクリート)の3条件である。ただしW/C=25.30%のコンクリートでは30一定温度を除く5条件とした。また材齢72時間以降は、全て20一定温度で封かん養生した。コンクリートの温度履歴は、圧縮試験用と同一の供試体を別途作製しその中心に熱電対をセットし測定した。圧縮強度の試験材齢は、一定温度養生では18, 24, 48, 72時間、7, 28日の6材齢、PCa模擬養生では18, 42, 72時間、7, 28日の5材齢である。また各バッチ間の相違を確認するために、標準養生供試体による圧縮強度試験(材齢7, 28日)も行った。なお練上がり時のコンクリート温度を各養生条件の

初期温度に近づけるため、使用材料の温度を調整した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 温度履歴

各養生条件でのコンクリート供試体の温度履歴の例を図-1中に示す(細線:N40, 破線:N30)。供試体内部のコンクリート温度は、ほぼ設定した温度(太線)で推移した。

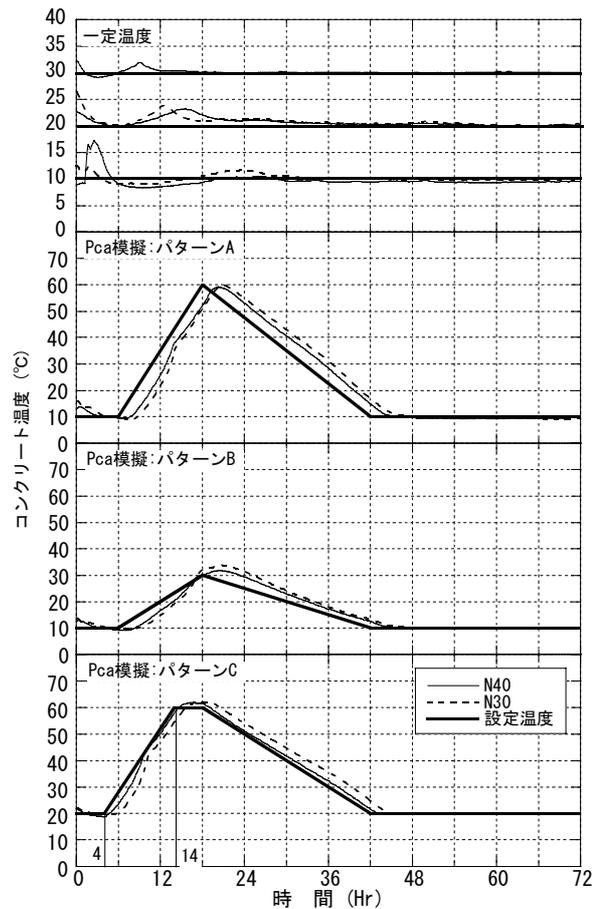


図-1 養生温度履歴

表-3 コンクリートの調合

調合記号	セメント	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 Ad <sub>1</sub> , Ad <sub>2</sub> , Ad <sub>3</sub> * (C×%)	目標値	
				W	C	S	G		スランプ スランプ・フロー (cm)	空気量 (%)
N25	N	25.0	45.0	170	680	684	858	1.20～1.30	60±10	2.5±1.0
N30	N	30.0	48.2	170	567	777	858	1.45～1.70	60±10	2.5±1.0
N35	N	35.0	49.5	175	500	819	858	1.00～1.85	55±10	2.5±1.0
N40	N	40.0	47.2	175	438	780	897	0.75～1.25	21±2.5	4.5±1.0
N45	N	45.0	48.4	170	389	820	897	0.65～0.85	21±2.5	4.5±1.0
N50	N	50.0	43.8	180	360	747	983	0.31～0.50	18±2.5	4.5±1.0
L30	L	30.0	48.6	170	567	790	858	1.15～1.40	60±10	2.5±1.0
M30	M	30.0	48.5	170	567	786	858	1.20～1.60	60±10	2.5±1.0

\*: Ad<sub>1</sub>はN50、Ad<sub>3</sub>はN25、Ad<sub>2</sub>はその他の調合に使用。

### 3.2 圧縮強度

各調合および養生条件における圧縮強度の試験結果を表 - 4 に示す。圧縮強度はそれぞれ供試体 3 体(一部 2 体)の平均値である。材齢28日標準養生の圧縮強度を比較すると、N25では97.2~108N/mm<sup>2</sup>、N30では90.9~101N/mm<sup>2</sup>、N35では78.3~88.2N/mm<sup>2</sup>、N40では61.7~66.5N/mm<sup>2</sup>、N45では49.2~57.7N/mm<sup>2</sup>、N50では36.8~45.6N/mm<sup>2</sup>であった。またM30では90.0~107N/mm<sup>2</sup>、L30では89.5~99.8N/mm<sup>2</sup>であった。同一調合でもバッチ間の標準養生強度に若干の差が見られるのは、練り上がりコンクリート温度や空気量等が影響していると考えられる。

N50,N30,L30について養生条件、材齢と封かん養生圧縮強度の関係を図 - 2 に示す。各コンクリートとも、養生条件によって強度発現性状が異なり、特に材齢100時間までの強度発現に与える影響が顕著であった。

### 3.3 圧縮強度と積算温度

次にコンクリートの初期強度発現について笠井らの研究<sup>2)</sup>を参考として検討する。

図 - 3 は、コンクリート積算温度と圧縮強度比の関係を示している。文献<sup>2)</sup>では仮想養生温度から積算温度を求め、圧縮強度比は1440T<sup>0.2</sup>(20 材齢3日)を基

表 - 4 圧縮強度

調合記号	養生温度	封緘養生						標準養生 <sup>*2</sup>	
		18Hr	24Hr	42Hr 48Hr <sup>*1</sup>	72Hr	7day	28day	7day	28day
		(N/mm <sup>2</sup> )							
N25	10℃一定	4.8	16.3	38.6	54.4	-	-	89.0	108
	20℃一定	32.1	39.8	60.4	70.7	-	98.0	87.7	104
	パターンA	35.4	-	75.4	78.1	81.7	97.5	86.0	105
	パターンB	16.8	-	51.4	58.7	79.9	90.2	83.2	98.4
N30	パターンC	53.5	-	76.3	83.0	86.3	98.1	89.3	97.2
	10℃一定	1.7	6.7	24.1	37.7	-	-	73.4	90.9
	20℃一定	17.9	27.3	46.8	57.9	-	89.5	78.0	97.7
	パターンA	22.6	-	64.6	70.0	73.8	88.6	82.9	101
N35	パターンB	12.1	-	52.3	59.5	81.5	98.4	85.0	97.7
	パターンC	43.0	-	62.6	69.1	75.1	81.3	80.9	94.9
	10℃一定	1.5	5.1	16.1	25.1	-	-	59.8	78.3
	20℃一定	10.4	17.1	35.3	45.4	-	78.5	64.0	85.7
N40	30℃一定	21.5	28.5	42.4	45.2	-	-	64.3	83.5
	パターンA	18.7	-	49.8	54.9	-	72.5	67.5	82.7
	パターンB	7.1	-	33.0	41.1	61.7	77.2	68.6	86.6
	パターンC	34.2	-	52.2	52.6	-	65.7	67.4	88.2
N45	10℃一定	1.0	2.8	11.9	19.3	-	-	49.3	66.5
	20℃一定	6.6	10.9	24.8	32.6	-	59.0	49.4	65.1
	30℃一定	13.7	18.3	29.1	35.3	-	-	44.6	61.7
	パターンA	9.8	-	34.8	41.0	-	58.3	51.0	64.8
N50	パターンB	4.7	-	21.9	28.8	44.0	59.4	52.1	65.9
	パターンC	21.7	-	36.6	38.4	-	48.8	48.4	63.6
	10℃一定	0.5	1.6	8.5	12.7	-	-	40.5	55.0
	20℃一定	4.5	7.2	17.5	23.8	-	46.2	33.4	49.2
M30	30℃一定	10.3	14.3	22.8	27.0	-	-	36.6	50.8
	パターンA	7.1	-	27.6	32.2	-	47.4	42.0	57.7
	パターンB	4.7	-	21.9	28.8	35.1	48.3	40.9	56.9
	パターンC	14.5	-	25.9	26.3	-	39.2	35.9	51.6
L30	10℃一定	0.3	0.9	5.8	8.7	-	-	23.2	36.8
	20℃一定	2.5	5.0	13.5	17.4	-	38.4	27.9	44.3
	30℃一定	7.5	10.5	18.7	21.8	-	-	29.8	45.2
	パターンA	3.8	-	20.6	22.4	-	38.3	31.1	45.6
N50	パターンB	1.7	-	10.2	14.0	26.1	37.7	29.7	41.4
	パターンC	9.4	-	20.3	21.9	-	33.1	30.3	42.5
	10℃一定	2.4	7.6	23.5	35.2	-	-	69.8	97.5
	20℃一定	17.4	24.5	37.8	47.1	-	83.8	65.7	94.9
M30	パターンA	23.9	-	59.7	65.1	73.7	93.4	72.7	107
	パターンB	9.3	-	35.7	43.5	65.5	89.3	71.7	93.8
	パターンC	34.9	-	57.9	59.8	68.5	84.4	63.7	90.0
	10℃一定	0.8	2.9	18.6	28.0	-	-	55.6	97.6
L30	20℃一定	8.4	17.9	29.6	35.3	-	92.2	54.2	99.8
	パターンA	19.6	-	51.4	55.1	61.9	93.3	58.6	96.5
	パターンB	6.1	-	28.1	34.1	54.6	89.7	60.0	89.5
	パターンC	30.3	-	55.0	58.3	69.6	84.7	58.2	95.3

\*1一定温度養生は48Hr、PCa 模擬養生は42Hr。

\*2標準養生試験体は、温度履歴を与えたそれぞれの供試体と同バッチのコンクリートより作製した。

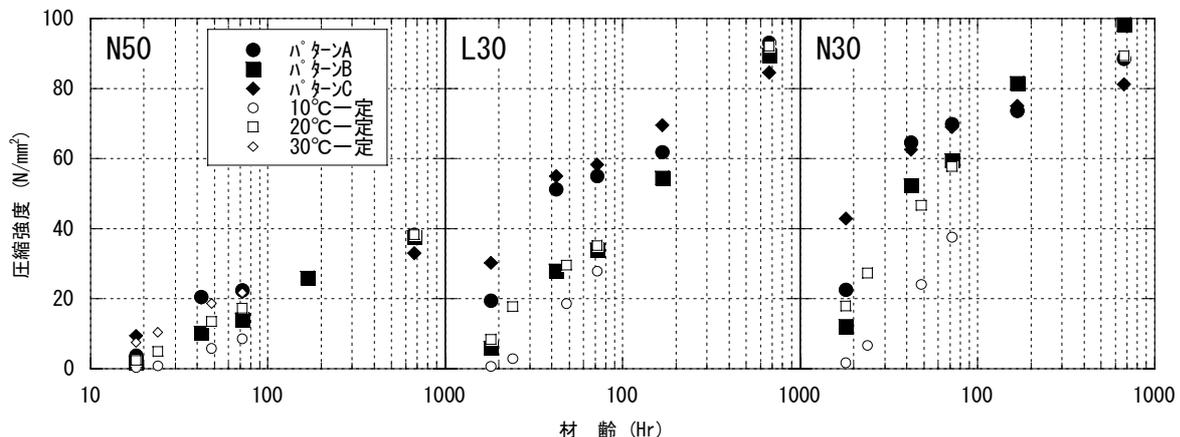


図 - 2 養生条件、材齢と封緘養生圧縮強度の関係

準としている。本報では 積算温度については、実施工での品質管理を簡便にするため、 $\rho$  を基準とした単純積算温度とし式(1)より求め、圧縮強度比については、レディミクストコンクリート工場での品質管理として一般的に用いられている標準養生材齢7日を基準とし式(2)より求めた。図中の曲線は、積算温度と圧縮強度比の関係を式(3)に示すゴーラル関数<sup>5)</sup>で回帰したものである。それぞれの回帰で求められた曲線式の係数および相関係数を表 - 5 に示す。コンクリートの積算温度と圧縮強度比は、養生条件によらず高い相関関係が見られた。

$$M = (\rho \cdot T) \quad (1)$$

ここに  $M$  : 積算温度(  $\rho \cdot \text{Hr}$  )       $T$  : 時間(Hr)  
 $\rho$  : コンクリート温度( )

$$R_{77} = \left( \frac{\sigma_{R7}}{\sigma_7} \right) \times 100 \quad (2)$$

ここに  $R_{77}$  : 圧縮強度比 (%)  
 $\sigma_{R7}$  : 各材齢での圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_7$  : 標準養生材齢7日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$$R_{77} = (M - c) / \{a + b \cdot (M - c)\} \quad (3)$$

ここに  $a, b, c$  : 回帰曲線における係数

式(3)の係数 $a$ の逆数は、回帰曲線の  $R_{77}$  が増大する局面での曲線の傾き、すなわち強度増進速度を示している。係数 $b$ の逆数は、積算温度無限大時の強度比  $R_{77}$ 、すなわち材齢7日以降の強度増進を示している。また係数 $c$ は、 $R_{77}=0$ における積算温度、すなわち強度発生点を示している。これらの係数は、セメントの種類や調合に関連していると考えられる。そこで係数 $a, b, c$ と水セメント比の関係を検討した。その結果を図 - 4 に示す。図中の線は、 $N$ セメントについて一次または二次式で回帰したものである。 $N$ セメントでは係数 $a$ および係数 $b$ は、ばらつきも小さく水セメント比との相関も極めて高い。一方係数 $c$ は、他の係数と比較して

ややばらつきが大きい。これは強度発生点を表す係数 $c$ は、練り上がり時のコンクリート温度や混和剤の種類、添加量による影響が他の係数よりも大きいためと考えられる。係数 $a$ は、水セメント比が大きくなるにしたがって大きくなっており、強度上昇も緩やかになっている。係数 $b$ は、水セメント比30%以下ではほとんど一定であるが、30%以上

表 - 5 回帰式係数および相関係数

調査記号	a	b	c	R
N25	4.567	8.739E-03	146.92	0.995
N30	5.826	8.728E-03	180.21	0.993
N35	7.467	8.576E-03	174.95	0.985
N40	8.472	8.276E-03	193.27	0.991
N45	9.133	7.768E-03	191.46	0.983
N50	11.363	7.234E-03	197.92	0.990
M30	7.374	7.309E-03	142.43	0.992
L30	9.198	5.810E-03	144.80	0.984

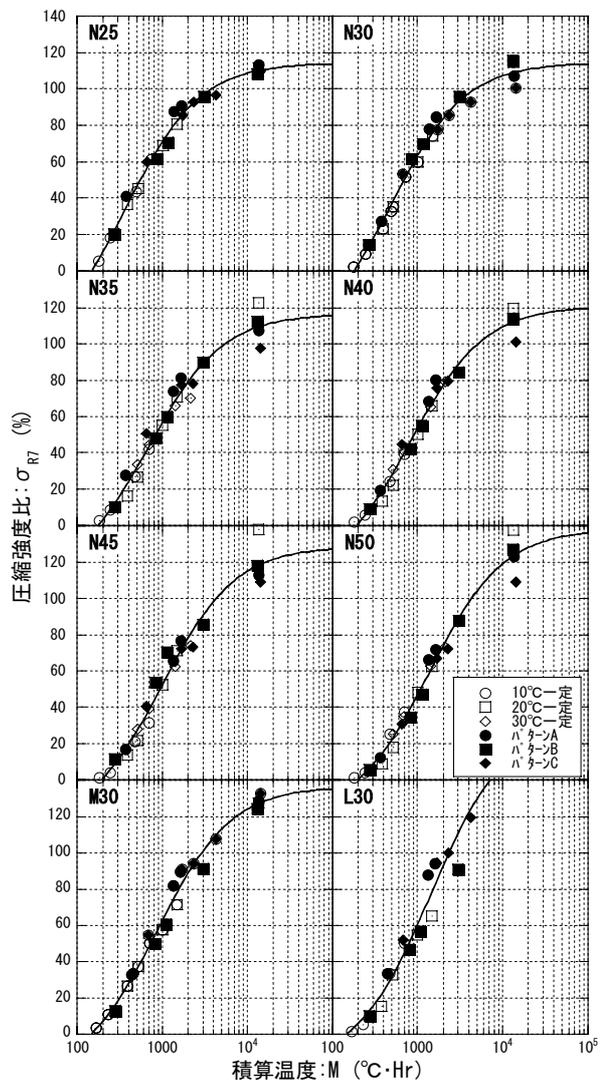


図 - 3 積算温度と圧縮強度比の関係

では水セメント比が大きくなるにしたがって小さくなっており、材齢7日以降の強度増進が大きくなっている。係数cは、水セメント比が大きくなるにしたがって大きくなっており、強度発生に必要な積算温度が大きくなっている。

一方セメント種類の比較では係数aはN<M<L、係数bはN>M>Lであり、発熱の少ないセメント程、強度上昇が緩やかになり、材齢7日以降の強度増進が大きくなる。係数cは、N>M、Lであった。

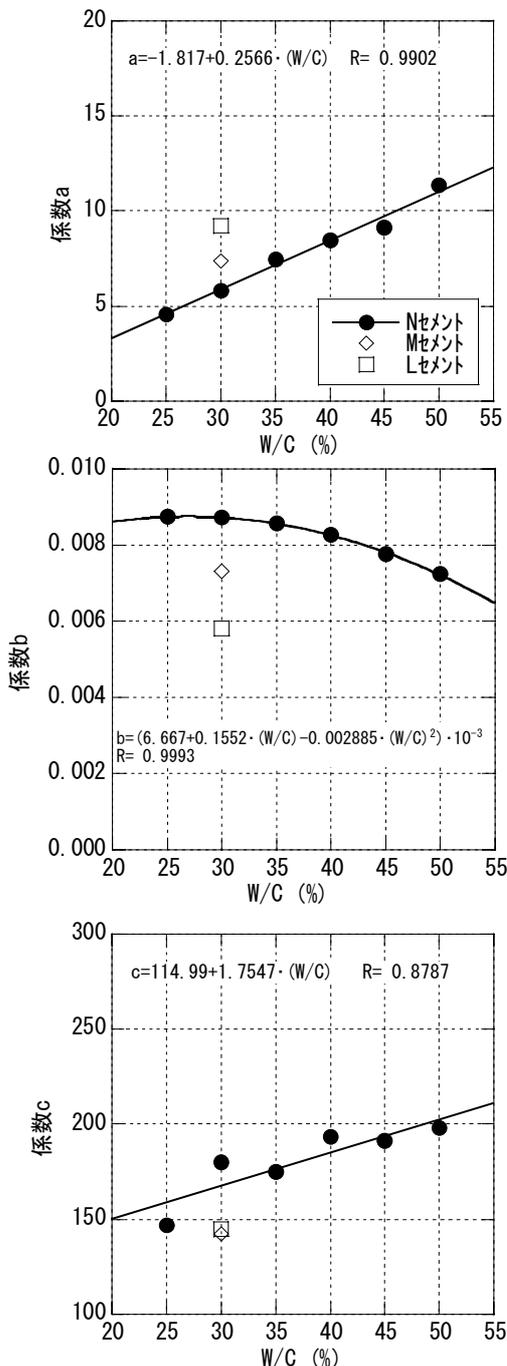


図 - 4 水セメント比と回帰式係数の関係

### 3.4 圧縮強度の推定

以上より、コンクリートのセメント種類 および水セメント比が定めれば、図 - 4より、式(3)の係数が求まる。さらに標準養生材齢7日の圧縮強度が求まると式(2)より、任意の積算温度におけるコンクリートの圧縮強度が推定できる。

次に本実験で得られた圧縮強度の実測値と標準養生7日強度、水セメント比から得る各係数およびコンクリートの積算温度測定値を用いて式(1)、(2)、(3)から求まる圧縮強度の推定値を比較した。その結果を図 - 5および図 - 6に示す。図中の太線および式は、圧縮強度の実測値と推定値を原点を通過する直線で回帰した線および式、細線は回帰式から±20%の範囲を示している。これらより、圧縮強度の推定値は実測値と相関が高く、ほぼ実測値±20%の範囲にあり、養生条件にかかわ

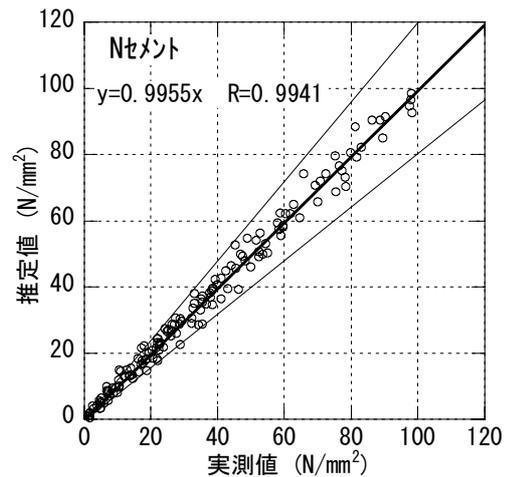


図 - 5 圧縮強度の実測値と推定値の関係 (Nセメント)

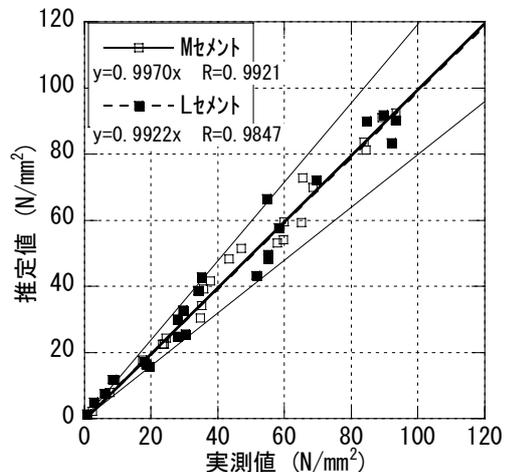


図 - 6 圧縮強度の実測値と算定値の関係 (M, Lセメント)

ら圧縮強度を精度よく推定する事が出来た。

### 3.5 実施工での検証

前述した推定方法を用いて、実際のサイトPca製造における脱型時強度の実測値と推定値を比較した。使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメント 水セメント比43.5%、スランプ18cm、空気量4.5%のレディミクストコンクリートである。また施工条件としては、コンクリート打設後に型枠をシート保温し、かつ必要に応じて温風による加熱養生を行った。また養生シート内の温度を測定し、脱型時の積算温度を求めた。脱型は打設約18時間後に行い、同時に養生シート内で養生した供試体により圧縮強度を確認している。また推定値は、事前の試し練りで確認した材齢7日の圧縮強度、および式(1)、(2)、(3)により算定した。図-7にその結果を示す。

実施工時の推定値は、実験時のものと比較してややばらつきが大きいものの、概ね実測値 $\pm 20\%$ の範囲にあることを確認した。

## 4. まとめ

システム化工法や、サイトPca工法におけるコンクリート部材の品質管理を目的として、セメント種類、調合及び養生条件がコンクリートの強度発現に与える影響確認し、コンクリート強度を推定する方法を検討した。また、実際の施工において推

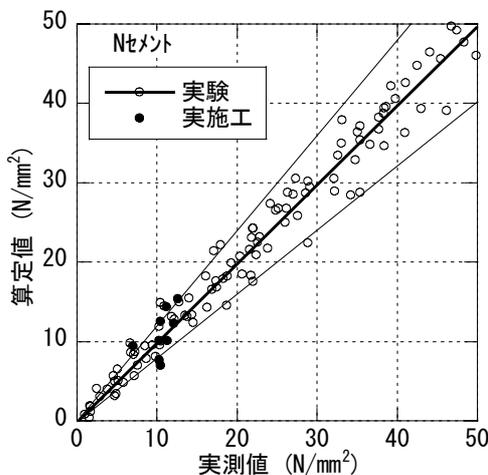


図-7 圧縮強度の実測値と算定値の関係  
(実施工時)

定方法を検証した。以上より得られた知見をまとめる。

- (1)各コンクリートとも、養生条件によって強度発現性状が異なり、特に材齢100時間までの強度発現に与える影響が顕著であった。
- (2)0 を基準とした積算温度と標準養生材齢7日を基準とする圧縮強度比の関係は、セメント種類、調合、養生条件に係わらず式(3)に示すゴッタル関数で表すことができる。
- (3)水セメント比、積算温度、標準養生7日強度および式(1)、(2)、(3)を用いて、コンクリートの圧縮強度をほぼ $\pm 20\%$ の範囲で推定できた。
- (4)実際のサイトPca製造において、上記の推定方法を検証した結果、脱型時の圧縮強度を概ね $\pm 20\%$ の範囲で推定できた。

今回は、普通ポルトランドセメントを中心として、初期強度発現について検討した。今後の課題として、中庸熱、低熱ポルトランドセメントについて、より広範囲な水セメント比のコンクリートによる検討、および早強セメントや高炉セメント等についても検討する予定である。

### 参考文献

- 1) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事: 日本建築学会, 2003.2
- 2) 笠井芳夫, 他: コンクリートの初期強度に関する研究, セメント技術年報, 第16回, pp.255-259, 1962
- 3) 笠井芳夫: コンクリートの初期圧縮強度推定方法, 日本建築学会論文報告集, 第141号, pp.1-9, 1967.11
- 4) 鎌田英治, 他: 各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性状, セメン・コンクリート論文集, No.44, pp.360-365, 1990
- 5) コンクリート標準示方書「施工編」: 土木学会, 2002.3