

積算温度方式による若材齢強度の推定法

- 主に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの検討 -

Estimate of Concrete Strength in Early Age using the Maturity Method
- Study on Concrete using Ordinary Portland Cement -

蓮尾 孝一 KOICHI HASUO
西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO
松田 拓 TAKU MATSUDA
河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI

最近の建築施工では、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工法が多く採用されるようになってきている。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。本報では普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象として、調合およ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、初期強度を推定する方法を提案した。また、低熱系のセメントについても一部検討した。

キーワード：強度発現，初期強度，セメント種類，積算温度

In recent building works, there has been an increase in application of a systematization industrial method and on-site precast-concreting. The estimate of concrete strength at an early age is important for these constructions. The influence that the variables of cement type, mix proportion and curing temperature have on compressive strength was experimentally investigated, and a method of estimating the strength in early age concrete was proposed. In addition, concrete using low heat Portland cement was partially studied.

Key Words: Strength Development, Compressive Strength in Early Age, Cement Type, Maturity

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、コンクリートの中性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/mm²以上と規定されている¹⁾。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については多くの研究がされてきた^{2)~4)}。しかし低熱系のセメントでの研究や、普通ポルトランドセメントにおいても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、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートについて、調合およ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、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。また、低熱系のセメントについても一部検討した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
セメント	普通, 中庸熱, 低熱ポルトランド*
水セメント比	25, 30, 35, 40, 45, 50%
養生	一定温度(10, 20, 30 [°]), 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 ³ 比表面積3310cm ² /g
	L	低熱ポルトランド	密度: 3.24g/cm ³ 比表面積3350cm ² /g
	M	中庸熱ポルトランド	密度: 3.21g/cm ³ 比表面積3260cm ² /g
細骨材	S	鬼怒川産川砂	表乾密度: 2.58g/cm ³ 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 ³ 吸水率: 0.97%, 粗粒率: 6.47
混和剤	Ad ₁	AE減水剤標準型 種	リグニンスルホン酸系
	Ad ₂	高性能AE減水剤標準型 種	ポリカルボン酸系
	Ad ₃	高性能AE減水剤標準型 種	ポリカルボン酸系

表-3 コンクリートの調合

調合 No	セメント	C/W (%)	S/a (%)	単用量 (kg/m ³)				混和剤 Ad ₁ , Ad ₂ , Ad ₃ (C × %)	目標値	
				W	C	S	G		スラブ スラブ フロー (cm)	空気量 (%)
N25	N	25.0	45.0	170	680	684	858	Ad ₃ 1.20 ~ 1.30	60 ± 10	2.5 ± 1.0
N30	N	30.0	48.2	170	567	777	858	Ad ₂ 1.45 ~ 1.70	60 ± 10	2.5 ± 1.0
N35	N	35.0	49.5	175	500	819	858	Ad ₂ 1.00 ~ 1.85	55 ± 10	2.5 ± 1.0
N40	N	40.0	47.2	175	438	780	897	Ad ₂ 0.75 ~ 1.25	21 ± 2.5	4.5 ± 1.0
N45	N	45.0	48.4	175	389	820	897	Ad ₂ 0.65 ~ 0.85	21 ± 2.5	4.5 ± 1.0
N50	N	50.0	43.8	180	360	747	983	Ad ₁ 0.31 ~ 0.50	18 ± 2.5	4.5 ± 1.0
L30	L	30.0	48.6	170	567	790	858	Ad ₂ 1.15 ~ 1.40	60 ± 10	2.5 ± 1.0
M30	M	30.0	48.5	170	567	786	858	Ad ₂ 1.20 ~ 1.60	60 ± 10	2.5 ± 1.0

2. 実験方法

(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(温度履歴条件)を要因として、材齢18時間から28日までにおける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、普通強度から高強度域を想定して、普通ポルトランドセメント(以下、Nセメントと記す)で水セメント比25,30,35,40,45,50%の6種類、また比較のため、中庸熱ポルトランド(以下、Mセメントと記す)および低熱ポルトランドセメント(以下、Lセメントと記す)で30%の各1種類の計8調合とした。

(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ーを用い各調合、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)およびパターン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、すべて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

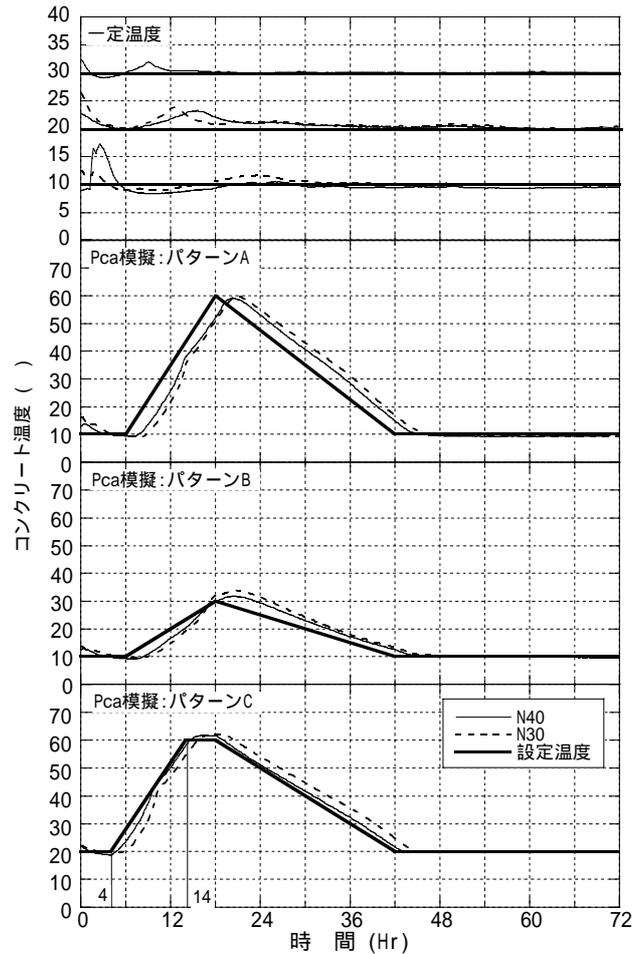


図-1 養生温度履歴

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。なお練り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

(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

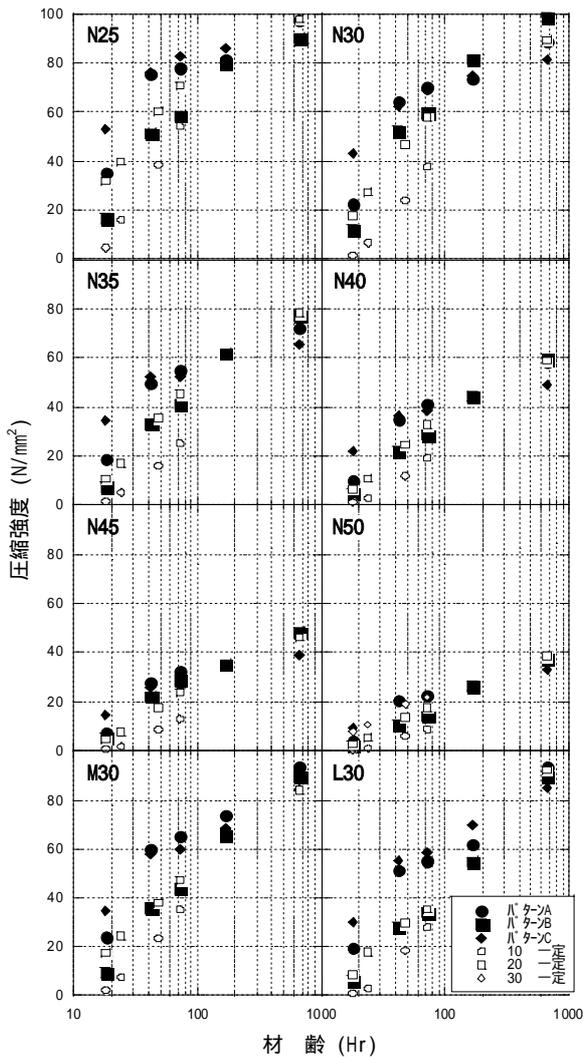


図-2 養生条件、材齢と封緘養生圧縮強度の関係

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。

(2) 圧縮強度

各調査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/mm² N30では90.9~101N/mm² N35では78.3~88.2N/mm² N40では61.7~66.5N/mm² N45では49.2~57.7N/mm² N50では36.8~45.6N/mm²であった。またM30では90.0~107N/mm² L30では89.5~99.8N/mm²であった。同一調査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。各コンクリートの養生条件、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。また高強度(=

表-4 圧縮強度

調査記号	養生温度	封緘養生					標準養生 ²⁾		
		18Hr	24Hr	42Hr 48Hr ¹⁾	72Hr	7day	28day	7day	28day
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
	パターンC	53.5	-	76.3	83.0	86.3	98.1	89.3	97.2
N30	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
	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
N35	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
	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
N40	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
	パターンB	4.7	-	21.9	28.8	44.0	59.4	52.1	65.9
N45	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
	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
N50	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
	パターンB	1.7	-	10.2	14.0	26.1	37.7	29.7	41.4
M30	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
	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
L30	10 一定	0.8	2.9	18.6	28.0	-	-	55.6	97.6
	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。

低水セメント比)のものほど初期強度の変動が大きく、養生条件が初期強度発現に与える影響が大きい。

(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²⁾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²⁾では仮想養生温度から積算温度を求め、圧縮強度比は1440T T(20 材齢3日)を基準としている。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、 θ 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)に示すゴール関数⁵⁾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。

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

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

$$R_{77} = (/ \cdot) \times 100 \quad (2)$$

ここに R_{77} : 圧縮強度比(%)
 \cdot : 各材齢での圧縮強度(N/mm²)
 \cdot : 標準養生材齢7日の圧縮強度(N/mm²)

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

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。これは強度発現点を表す係数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、 $N >$

表-5 回帰式係数および相関係数

調合記号	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

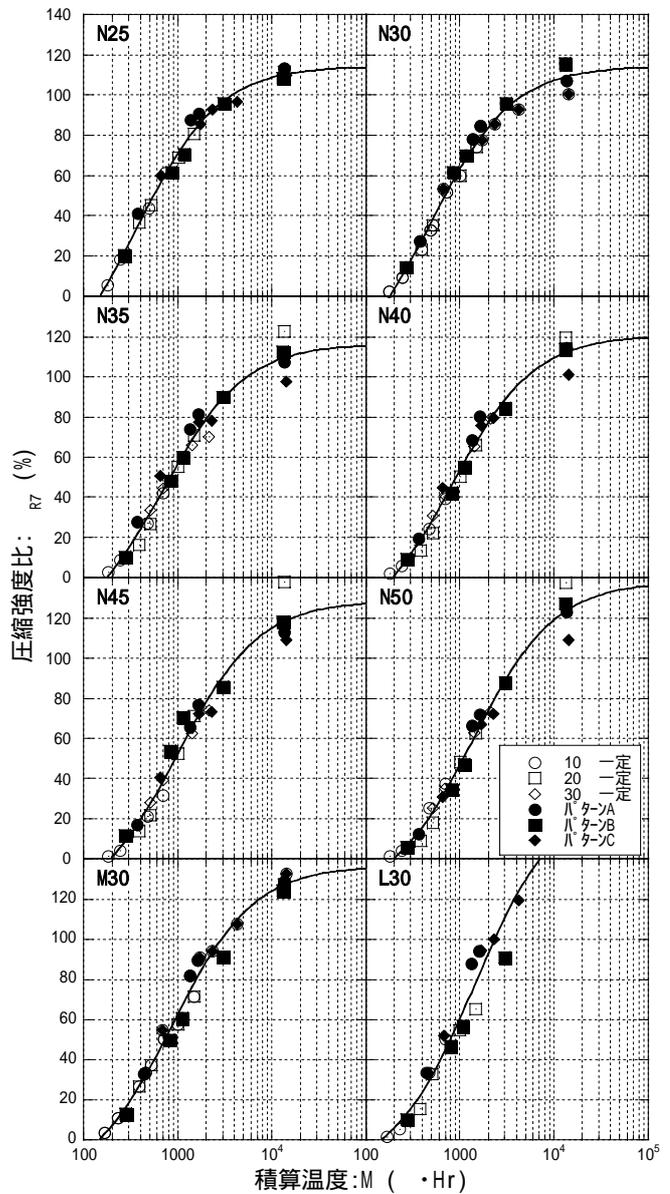


図-3 積算温度と圧縮強度比の関係

M Lであった。

(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まれば、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、

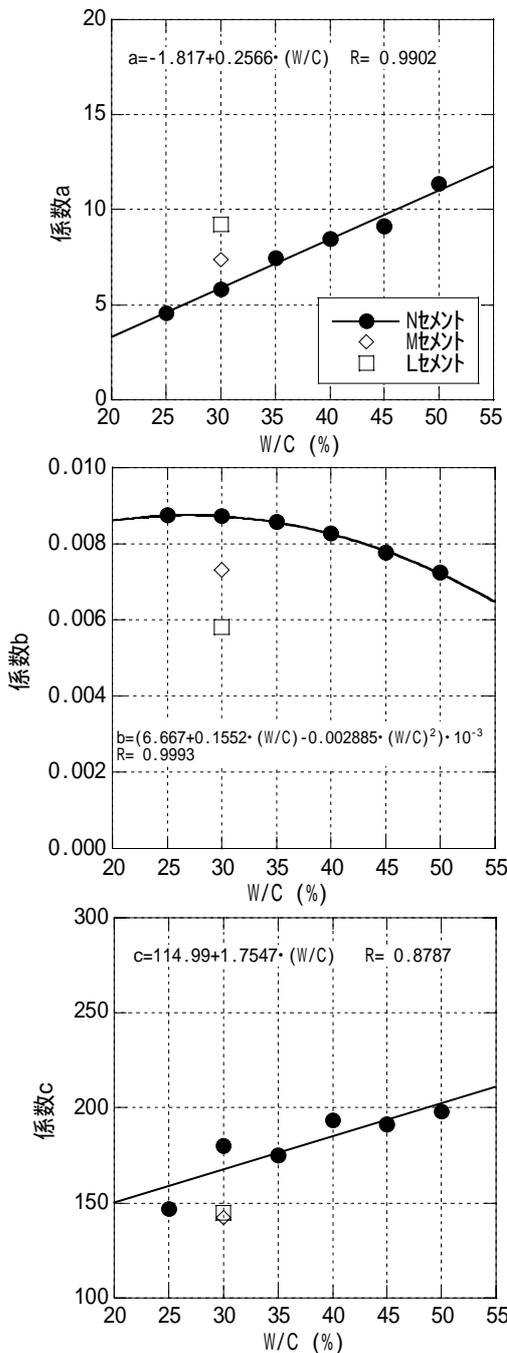


図-4 水セメント比と回帰式係数の関係

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、養生条件にかかわらず圧縮強度を精度よく推定することができた。

(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。検証は2箇所で行い、いずれもレディミクストコンクリートである。その概要は以下である。

[実施工-1]

- ・施工地区 : 東京都
- ・測定時期 : 2003年4～6月
- ・セメント : 普通ポルトランドセメント
- ・水セメント比: 43.5%
- ・スランブ : 18cm

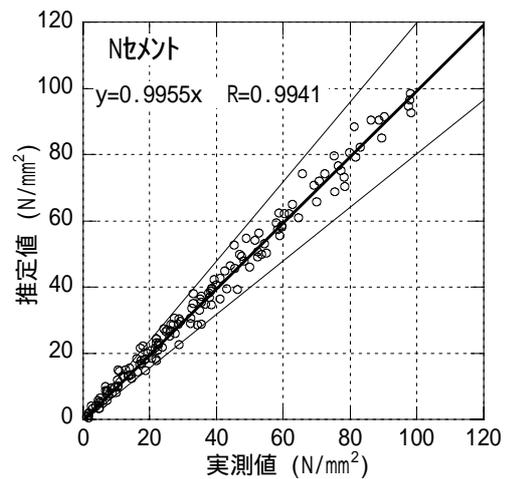


図-5 圧縮強度の実測値と推定値の関係 (Nセメント)

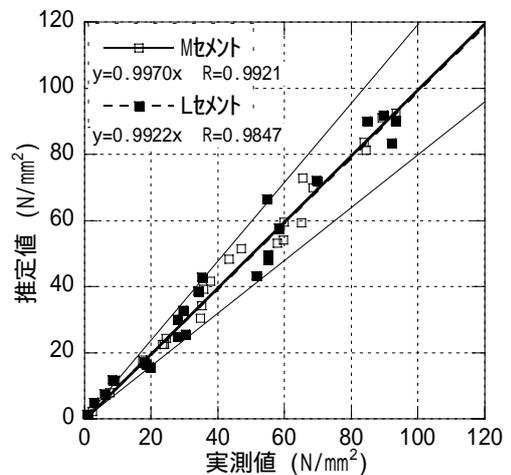


図-6 圧縮強度の実測値と算定値の関係 (M, Lセメント)

・空気量 : 4.5%

[実施工-2]

・施工地区 : 神奈川県
 ・測定時期 : 2003年5～6月
 ・セメント : 普通ポルトランドセメント
 ・水セメント比: 39.2～47.7%
 ・スランプ : 21～23cm
 ・空気量 : 2.5%

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、脱型時および揚重時の積算温度を求めた。脱型は打設約18時間後、揚重は約42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±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、調合および養生条件がコンクリートの強度発現に与える影響を確認し、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定方法を検証した。以上より得られた知見をまとめる。

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。

高強度(=低水セメント比)のものほど初期強度のバラツキが大きく、養生条件が初期強度発現に与える影響が大きい。

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との関係は、セメント種類、調合、および養生条件に係わらず、式(3)に示すグローバル関数で表すことができる。

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±20%の範囲で推定できた。

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、初期材齢時の圧縮強度を概ね±20%の範囲で推定できた。

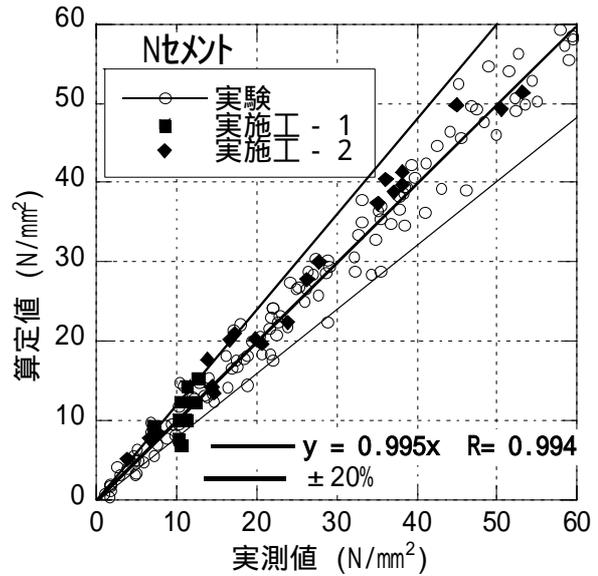


図-7 圧縮強度の実測値と算定値の関係 (実施工時)

今回は、普通ポルトランドセメントを中心として、養生温度10～60 の範囲について初期強度発現の検討を行った。

今後の課題として、中庸熱、および低熱ポルトランドセメントについては、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を行う予定である。

また寒冷地での施工を対象とする場合は、より低温域での検討も必要である。これらにより、種々の施工条件、使用材料における初期強度発現について、より広範囲な推定が可能となる。

謝辞:本研究を進めるに当たり、住友大阪セメント(株)、(株)エヌエムビーの各社より材料を提供して頂きました。また、実施工における測定につきまして、三井プレコン(株)の方々にも多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

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, ほか: 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, ほか: 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