

報告 現場内プレキャスト部材に用いるコンクリートのマチュリティ則に基づく初期強度発現の推定

菊地 俊文^{*1}・片山 行雄^{*2}・瀧 諭^{*3}・黒田 泰弘^{*4}

要旨: 現場敷地内で製造するプレキャスト鉄筋コンクリート部材の脱型および吊上げ時期を事前に把握し、製造および品質管理の計画の目安を得ることを目的とする。設計基準強度 24~80N/mm² (呼び強度 27~83) のレディーミクストコンクリートを対象に、若材齢における強度管理用供試体の温度と圧縮強度に関するデータを調査し、マチュリティ則の観点から強度発現について整理した。また、対数曲線型の強度発現式を拡張し、セメント条件およびセメント水比に基づく初期強度発現の推定式を提案し、その適合性を確認した。

キーワード: マチュリティ, 有効材齢, 圧縮強度, 強度発現, 初期強度, プレキャストコンクリート

1. はじめに

高層 RC 造住宅等の建設現場において、構造体である柱・梁を対象としてプレキャスト鉄筋コンクリート部材 (PCa 部材) を現場敷地内で製造するケースが増加している。現場における PCa 部材の製造は、予め選定した数社のレディーミクストコンクリート工場からレディーミクストコンクリートを受け入れて行われる。そのため、PCa 部材として要求される設計基準強度が同じであっても、出荷工場が異なれば、使用するコンクリートの配合も異なる現状がある。

さて、PCa 部材の製造では、脱型および吊上げ時にひび割れや破損防止のために、8~12N/mm² 程度の圧縮強度が必要である^{1,2)}。一部の現場では、午後に打設し、翌朝脱型を行い、吊上げるサイクルでの製造工程を組むため、打込み終了から約 16 時間後に 8~12N/mm² 程度の圧縮強度が要求されることがある。また、強度管理は、PCa 部材と比較して寸法が小さい供試体によって行われる。このため、発熱量の違いによる温度差が生じ、強度発現も異なることから、強度管理用供試体と PCa 部材では、若材齢において強度差が大きく生じる懸念がある。特に、注意を要するのは、養生温度が低くなる冬期であり、PCa 部材では十分な強度が発現していても、一般的に行われている PCa 部材同一養生の供試体による強度管理では強度が不十分となり、脱型・吊上げが出来ず、製造工程に悪影響を及ぼすケースが考えられる。この場合、PCa 部材の温度履歴と類似の温度履歴を与える PCa 部材温度追従養生の供試体による強度管理が行われることがある。しかしながら、温度追従養生設備の数には制限があり、複数の PCa 部材の品質管理を同時に行うためには、これと併せて、PCa 部材の温度データ等から強度試験に依ら

ない強度推定を行うことも重要となる。一方、PCa 部材の品質管理における現場での主な関心は、構造体コンクリート強度等に代表されるような強度の合否判定にあり、特に、若材齢 (脱型および吊上げ時に必要となる強度程度が発現する材齢) における温度と圧縮強度に関する情報は、十分に整理されていない状況にある。

本報告では、現場敷地内で製造する PCa 部材の脱型および吊上げ時期を事前に把握し、製造および品質管理の計画の目安を得ることを目的とし、首都圏の現場にて蓄積した設計基準強度 24~80N/mm² (呼び強度 27~83) のレディーミクストコンクリートの若材齢における強度管理用供試体の温度と圧縮強度に関するデータを調査し、マチュリティ則の観点から強度管理用供試体の初期強度発現について整理した。また、対数曲線型の強度発現式を拡張し、セメント条件及びセメント水比に基づく初期強度発現の推定式を提案し、その適合性を検討した。

2. 調査および整理概要

2.1 コンクリートの種類

2005 年から 2012 年に首都圏で現場内 PCa 部材の製造を行った 7 現場に対してレディーミクストコンクリートを出荷した 14 工場 (a~n 工場) の 102 配合を対象として、調査した。

表-1 調査対象コンクリート

種類	セメント		配合数	呼び強度	水セメント比 (%)
	メーカー				
N	A		35	33~69	49.0~30.2
	B		16	27~66	54.0~30.3
	C		22	33~70	47.5~29.8
M	A		9	45~83	44.9~26.3
	B		15	45~83	45.0~26.0
	C		5	46~64	38.8~31.9

*1 清水建設 (株) 技術研究所 構造・生産技術センター 工修 (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所 構造・生産技術センター (正会員)

*3 清水建設 (株) 技術研究所 構造・生産技術センター 主任研究員 工修 (正会員)

*4 清水建設 (株) 技術研究所 構造・生産技術センター グループ長 工博 (正会員)

調査対象としたコンクリートをセメント条件によって整理した概要を表-1に示す。セメントメーカー3社(A~C社)の普通ポルトランドセメント(N)または中庸熱ポルトランドセメント(M)を使用しており、内訳は、普通ポルトランドセメントを使用した73配合、中庸熱ポルトランドセメントを使用した29配合である。前者は呼び強度が27~70、対応する水セメント比は54.0%~30.2%である。後者は呼び強度が45~80、対応する水セメント比は45.0%~26.0%である。

骨材(粗骨材は碎石のみ、細骨材は砂、砕砂またはそれらの混合)は、各工場によって異なる。骨材条件はコンクリートの強度に影響を及ぼすが、粗骨材強度よりもモルタル強度が低い場合には、コンクリート強度に影響しない³⁾との報告もあり、本報告では考慮しない。

混和剤(AE減水剤, 高性能AE減水剤)も、各工場によって異なるが、全ての配合は標準形である。

2.2 供試体および養生

強度管理用供試体および温度測定用供試体は、軽量鋼製型枠に打込み、打込み直後から上面を二重にラップし

て、封緘養生とした。なお、温度測定用供試体は供試体中央部に熱電対を埋設した。

また、同一配合であっても、製造日によって封緘養生供試体の(温度)養生条件が異なり、20±3℃の室内、屋外(PCa部材同一養生相当)および任意の温度履歴(PCa部材の打込み面から50mmの位置の温度履歴)が与えられる水中(PCa部材温度追従養生相当)の3種類の養生条件のいずれかに静置した。

2.3 温度および圧縮強度の測定

温度の測定は、熱電対を用いて、10分間隔で供試体温度を測定した。なお、同時に雰囲気温度も測定した。

圧縮強度の測定は、レディーミクストコンクリート工場の試験室または第三者機関にて、供試体の移動時間も含めた材齢14~72時間の範囲で圧縮試験を適宜行った。

2.4 初期強度発現の評価方法

(1) マチュリティ則

温度条件がコンクリートの強度発現への影響は大きく、養生温度が異なるコンクリートの強度発現を評価するた

表-2 回帰式の係数および相関性

工場名	配合名	セメント		係数 a	係数 b	決定係数 r ²	データ数 n	f(t)=0となる有効材齢(時間)	工場名	配合名	セメント		係数 a	係数 b	決定係数 r ²	データ数 n	f(t)=0となる有効材齢(時間)
		種類	メーカー								種類	メーカー					
d	69-23-20 N	A	N	50.2	-51.8	0.988	5	10.8	e	70-23-20 N	C	47.2	-42.6	0.984	6	8.0	
k	66-60-20 N			68.5	-67.6	0.974	12	9.7	e	66-60-20 N		62.5	-64.5	0.967	22	10.8	
d	66-60-20 N			51.7	-53.7	0.989	6	10.9	e	64-23-20 N		41.8	-38.2	0.996	6	8.2	
d	62-23-20 N			46.2	-48.1	0.981	5	11.0	e	59-23-20 N		55.3	-56.2	0.904	5	10.4	
k	57-60-20 N			46.7	-45.6	0.907	20	9.5	e	59-21-20 N		44.4	-45.0	0.999	6	10.3	
d	57-60-20 N			48.3	-51.1	0.866	39	11.4	e	58-21-20 N		42.4	-43.1	0.990	6	10.4	
d	55-21-20 N			45.2	-48.2	0.966	5	11.7	e	57-60-20 N		41.3	-42.7	0.932	31	10.8	
b	54-21-20 N			45.1	-44.5	0.956	7	9.7	e	53-21-20 N		26.9	-24.7	0.978	6	8.3	
i	51-21-20 N			44.9	-48.9	0.981	5	12.3	e	52-21-20 N		22.3	-19.8	0.982	6	7.7	
i	49-21-20 N			36.7	-39.5	0.993	5	11.9	a	51-21-20 N		46.0	-45.4	0.970	7	9.7	
g	48-21-20 N			37.0	-39.7	0.970	5	11.8	j	46-21-20 N		48.3	-55.8	0.970	5	14.3	
d	48-21-20 N			36.1	-39.6	0.931	4	12.5	j	45-18-20 N		48.1	-54.7	0.976	5	13.7	
i	48-21-20 N			41.1	-44.9	0.993	5	12.4	a	45-21-20 N		46.1	-50.4	0.977	8	12.4	
i	47-21-20 N			35.5	-38.4	0.990	5	12.1	j	42-18-20 N		47.0	-54.0	0.975	5	14.1	
n	45-12-20 N			39.5	-38.5	0.950	7	9.4	a	40-12-20 N		33.7	-35.9	0.981	8	11.7	
h	45-18-20 N			45.2	-50.3	0.996	5	12.9	j	39-18-20 N		40.3	-46.6	0.980	5	14.3	
i	45-18-20 N			37.8	-41.1	0.996	5	12.2	e	39-12-20 N		28.2	-27.5	0.992	8	9.5	
i	45-18-20 N			43.6	-48.6	0.995	5	13.0	e	39-21-20 N		19.2	-18.9	0.934	5	9.6	
g	45-18-20 N			37.5	-41.7	0.964	5	13.0	e	39-21-20 N		23.6	-23.6	0.995	4	10.0	
h	42-18-20 N			42.2	-46.8	0.993	5	12.9	a	36-12-20 N		33.8	-37.2	0.965	8	12.6	
i	42-18-20 N	36.7	-40.3	0.988	5	12.5	j	33-18-20 N	31.6	-36.8	0.981	5	14.6				
i	42-18-20 N	37.9	-42.1	0.994	5	12.9	e	33-12-20 N	22.9	-22.3	0.990	8	9.5				
g	42-18-20 N	33.4	-37.4	0.972	5	13.2	k	83-65-20 M	66.1	-59.4	0.956	16	7.9				
n	39-12-20 N	35.2	-34.5	0.943	7	9.6	d	63-60-20 M	52.4	-56.3	0.988	27	11.9				
h	39-18-20 N	35.4	-39.5	0.993	5	13.0	d	57-55-20 M	41.9	-46.2	0.984	24	12.7				
i	39-18-20 N	29.7	-32.4	0.984	5	12.3	b	51-21-20 M	49.5	-56.3	0.985	7	13.7				
i	39-18-20 N	32.9	-36.6	0.991	5	12.9	k	51-50-20 M	31.8	-31.2	0.927	16	9.6				
g	39-18-20 N	30.6	-34.9	0.965	5	13.9	d	51-50-20 M	43.4	-48.3	0.963	8	13.0				
d	39-21-20 N	31.7	-34.3	0.988	5	12.1	b	49-21-20 M	45.0	-50.8	0.987	7	13.5				
d	39-21-20 N	32.5	-37.4	0.868	4	14.2	k	45-23-20 M	29.2	-29.6	0.881	16	10.3				
n	33-12-20 N	26.9	-24.9	0.924	7	8.4	d	45-23-20 M	27.3	-29.7	0.961	29	12.2				
h	33-18-20 N	28.0	-31.6	0.990	5	13.4	l	83-65-20 M	74.2	-78.7	0.966	15	11.5				
g	33-18-20 N	25.3	-28.8	0.957	5	13.7	m	83-65-20 M	51.2	-41.1	0.978	8	7.7				
i	33-18-20 N	22.3	-24.5	0.993	5	12.6	f	64-60-20 M	37.0	-37.0	0.947	32	9.9				
i	33-18-20 N	21.2	-23.1	0.986	5	12.2	l	63-60-20 M	44.9	-43.4	0.976	24	9.3				
m	66-60-20 N	70.0	-74.9	0.984	6	11.7	m	63-60-20 M	36.8	-33.3	0.971	16	8.0				
f	66-23-20 N	88.0	-91.7	0.959	6	11.0	c	57-23-20 M	42.0	-44.9	0.971	7	11.7				
f	66-23-20 N	91.7	-93.9	0.838	6	10.6	l	57-55-20 M	38.3	-35.8	0.999	8	8.6				
f	63-23-20 N	66.6	-67.5	0.997	6	10.3	m	57-55-20 M	32.9	-31.5	0.980	32	9.1				
f	60-23-20 N	81.6	-86.8	0.971	6	11.6	f	57-55-20 M	34.3	-38.9	0.974	16	13.6				
f	60-21-20 N	68.0	-69.2	0.896	6	10.4	l	51-50-20 M	27.1	-25.3	0.977	12	8.6				
m	57-60-20 N	48.3	-47.9	0.957	40	9.8	m	51-50-20 M	25.2	-23.7	0.974	16	8.7				
f	57-21-20 N	52.7	-52.7	0.934	6	10.0	f	51-50-20 M	28.3	-31.4	0.947	16	12.9				
f	57-60-20 N	50.1	-54.2	0.816	8	12.1	l	45-23-20 M	26.5	-26.8	0.942	26	10.2				
f	54-21-20 N	61.5	-65.2	0.900	6	11.5	m	45-23-20 M	23.7	-23.2	0.979	14	9.5				
f	51-21-20 N	38.1	-38.7	0.964	6	10.4	f	45-23-20 M	19.9	-20.9	0.894	27	11.2				
f	39-21-20 N	33.4	-35.1	0.949	6	11.2	e	64-60-20 M	48.8	-55.4	0.979	36	13.6				
l	39-12-20 N	24.2	-23.5	0.981	8	9.3	e	57-55-20 M	43.9	-51.1	0.958	24	14.6				
f	39-21-20 N	31.6	-31.7	0.993	4	10.1	e	51-50-20 M	32.5	-34.1	0.992	8	11.1				
l	33-12-20 N	21.5	-21.7	0.996	8	10.1	a	46-21-20 M	33.1	-36.5	0.987	8	12.7				
l	27-12-20 N	20.0	-21.5	0.982	8	11.9	a	46-21-20 M	34.6	-38.1	0.969	8	12.6				

※ 工場、配合が同一であっても、水セメント比、混和剤銘柄等が異なっているため、別途分けている。

めに、マチュリティの概念が用いられる。本報告では、強度管理用供試体と同時に採取し、同一の養生を行った温度測定用供試体の温度と作用時間をマチュリティの対象とした。

マチュリティ則としては、国内では、積算温度方式⁴⁾、有効材齢方式⁵⁾が代表的である。既往の研究⁶⁾により、高強度コンクリートの初期強度の評価には、積算温度方式よりも有効材齢方式が適しているため、有効材齢方式を採用した。なお、有効材齢方式は相当材齢方式⁷⁾を簡易化しており、相当材齢方式でも同程度の適合性があると推察される。

有効材齢方式を以下の式(1)に示す。

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (1)$$

ここに、

- t_T : 有効材齢 (時間)
- $T(\Delta t_i)$: 期間における温度 (°C)
- Δt_i : 温度の継続時間 (時間)
- T_0 : 1 (°C)

(2) 強度発現式

マチュリティと圧縮強度の関係を表す強度発現式としては、対数曲線型⁸⁾、指数曲線型⁵⁾、双曲線型⁹⁾などが提案されている。既往の研究⁶⁾と同様に、対数曲線型を採用し、調査データの回帰を行った。

対数曲線型の強度発現式を以下の式(2)に示す。

$$f(t_T) = a \cdot \log_{10} t_T + b \quad (2)$$

ここに、

- $f(t_T)$: 圧縮強度 (N/mm²)
- a : 定数
- b : 定数

3. 調査結果および考察

3.1 有効材齢と圧縮強度との関係

各配合を式(2)によって回帰し、回帰した式の各係数、決定係数および強度発現の起点となる有効材齢を算出した結果を表-2に示す。また、調査における有効材齢と圧縮強度の関係のうち、セメント種類およびセメントメーカー (A~C 社) によって整理した代表的な結果を図-1に示す。表-2 および図-1 に示すように、回帰式の決定係数は 0.816~0.999 の範囲にあり、平均値は 0.965 となり、既往の研究⁶⁾と同様に極めて高い正の相関性を示した。回帰式の係数 a は図-1 中の直線の傾きで示され、強度の増進速度を示すが、呼び強度が大きいほど、つまり、セメント水比が大きいほど、大きくなる傾向が認められた。

3.2 セメント水比と回帰式の係数との関係

セメント水比と回帰式の係数 a の関係を図-2に示す。また、セメント水比と回帰式の係数 b の関係を図-3に示す。図-2に示すように、係数 a はセメント水比と高い正の相関性を示し、セメント水比が大きくなるほど、大きくなる傾向が認められた。また、図-2 中の直線の傾きはセメント種類およびセメントメーカーによって異なり、この観点から整理した結果は、C 社の普通ポルトランドセメントを用いた結果を除くと、決定係数は

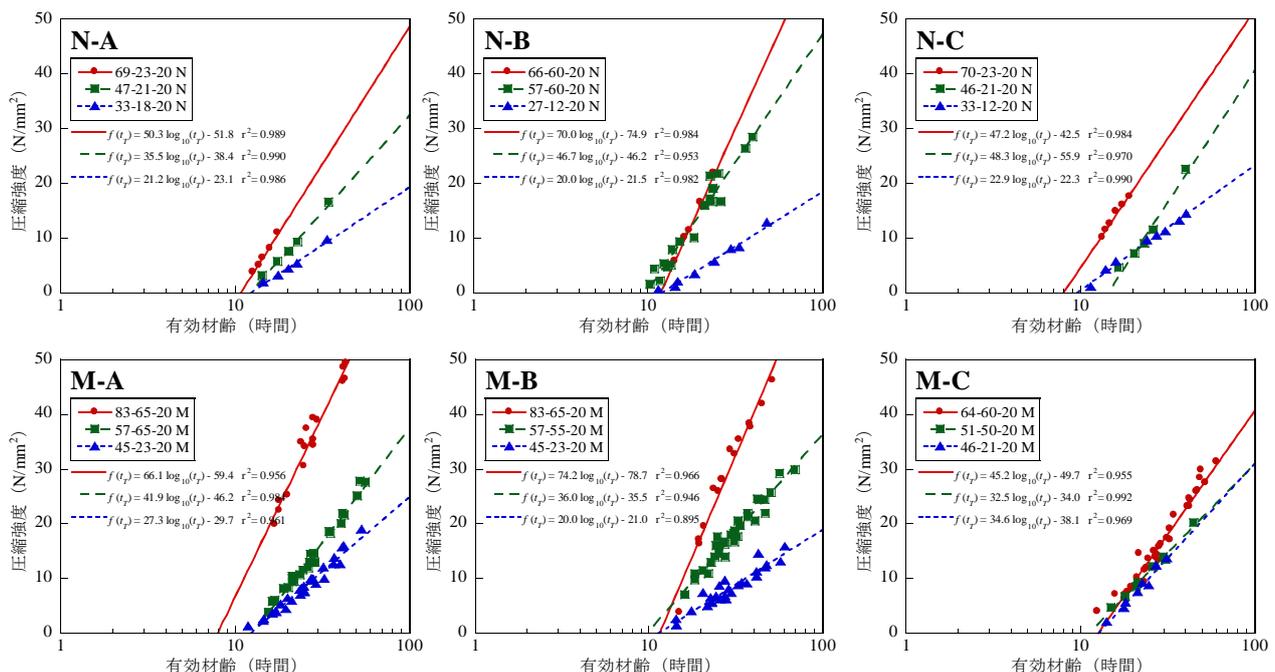


図-1 有効材齢と圧縮強度の関係

0.836~0.893 の範囲にあり、平均値は 0.859 となり、極めて高い正の相関性を示した。

一方、図-3 に示すように、係数 b はセメント水比と高い負の相関性を示し、セメント水比が大きくなるほど、小さくなる傾向が認められた。また、同様に、図-3 中の直線の傾きはセメント種類およびセメントメーカーによって異なり、この観点から整理した結果は、C 社の普通ポルトランドセメントを用いた結果を除くと、決定係数は 0.705~0.866 の範囲にあり、平均値は 0.798 となり、より高い負の相関性を示した。

C 社の普通ポルトランドセメントを用いた結果のみが、相関性が低い理由は定かではないが、係数 a および係数 b はセメント以外にも、混和剤（銘柄および使用量）等の配合条件の影響を受けることがわかっている。これらの関係を考慮することが今後の検討課題となる。

さて、セメント条件（セメント種類およびセメントメーカー）によって、回帰する場合でも、回帰した式の各係数とセメント水比の関係は一定の高い相関性が得られた。よって、初期強度の推定式として、式(2)における

係数 a および係数 b を拡張し、以下の式(3)および式(4)に示す。

$$a = \alpha \cdot (C/W) + \beta \quad (3)$$

$$b = \gamma \cdot (C/W) + \delta \quad (4)$$

ここに、

C/W : セメント水比

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: セメント条件に関わる定数

最後に、本報告の範囲で得られたセメント条件に関わる定数を表-3 に示す。

表-3 セメント条件に関わる定数

セメント		セメント条件に関わる定数			
種類	メーカー	α	β	γ	δ
N	A	26.1	-27.9	-24.0	19.8
	B	49.7	-84.4	-51.8	88.3
	C	23.0	-22.3	-19.5	11.5
M	A	24.9	-25.3	-22.3	14.5
	B	26.3	-37.8	-32.3	53.2
	C	30.4	-45.7	-38.7	64.3

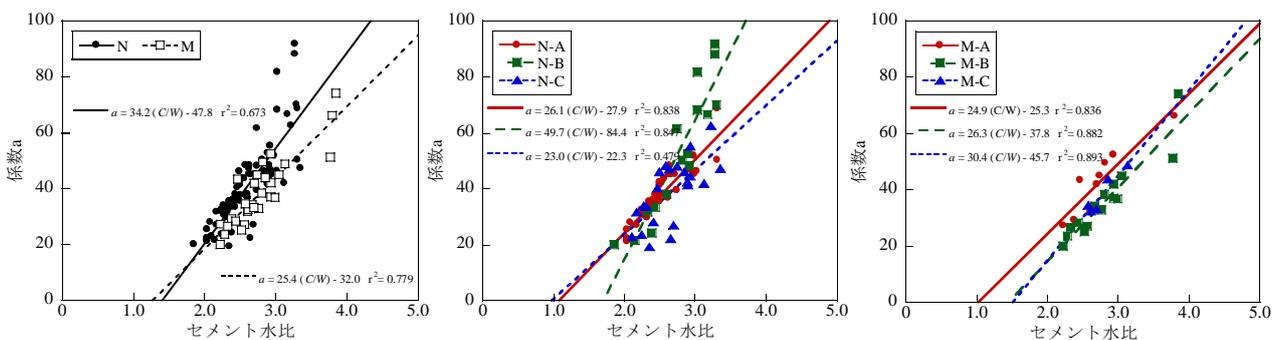


図-2 セメント水比と回帰式の係数 a の関係

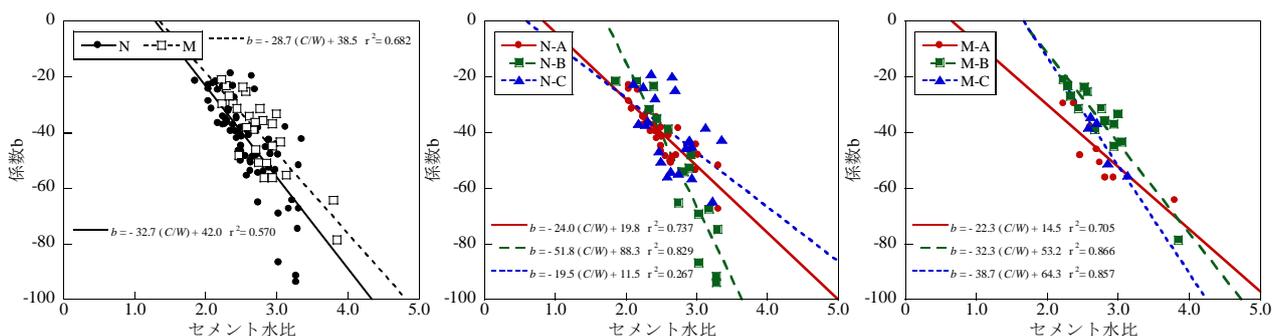


図-3 セメント水比と回帰式の係数 b の関係

4. 初期強度発現の推定と精度

前節で提案した式(3)および式(4)に対して、表-3 に示されるセメント条件に関わる定数およびセメント水比が定めれば、係数 a および係数 b が求まる。つまり、任意の配合（本報告の範囲では、呼び強度が 27~80、対応する水セメント比が 54.0%~26.0%である。）の初期強度発現の推定が可能となる。推定式による算定強度と実測強度の関係を図-4 に示す。図中の x は算定強度、y は実測強度を表す。なお、図中には 95%信頼限界の近似式も併せて示す。図-4 に示すように、算定強度と実測強度の対応として、95%信頼限界は普通ポルトランドセメントを用いた場合で、A 社から順番に $\pm 4.2\text{N/mm}^2$ 、 $\pm 4.0\text{N/mm}^2$ 、 $\pm 4.1\text{N/mm}^2$ 、中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合で、A 社から順番に $\pm 4.8\text{N/mm}^2$ 、 \pm

6.2N/mm², ±3.4N/mm²であることから、中庸熟ポルトランドセメントを用いた場合の方が、算定精度が若干劣った。既往の研究¹⁰⁾によれば、セメント水比が大きいほど係数 a、つまり、初期の強度発現が大きくなるため、算定精度が劣ることがわかっている。

さて、得られた結果を使用する場合には、要求される脱型・吊上げ強度に対して、必要となる材齢を把握することがPCa部材製造を計画する上で重要となる。同時に、脱型・吊上げ強度を仮に満たさなかった場合に、どの程度材齢が経過すれば脱型・吊上げ強度を満たすのかを把握してことも重要となる。ここでは、脱型・吊上げ

強度を 12N/mm²とした場合の 95%信頼下限値の強度から強度発現により 12N/mm²となるまで有効材齢の差分を検討する。なお、有効材齢の差分は推定式の強度誤差を有効材齢に換算したものに相当する。まず、12N/mm²の 95%信頼下限が強度発現により 12N/mm²となるまでの有効材齢の差分とセメント水比の関係を図-5に示す。なお、図中には具体的な一例として後述する配合 47-21-20 N (C/W=2.5)の結果を併せて示す。セメント条件に関わらず、高セメント水比では、強度発現が早く、有効材齢の差分は小さくなった。また、同セメント水比で比較すると、中庸熟ポルトランドセメントよりも普通

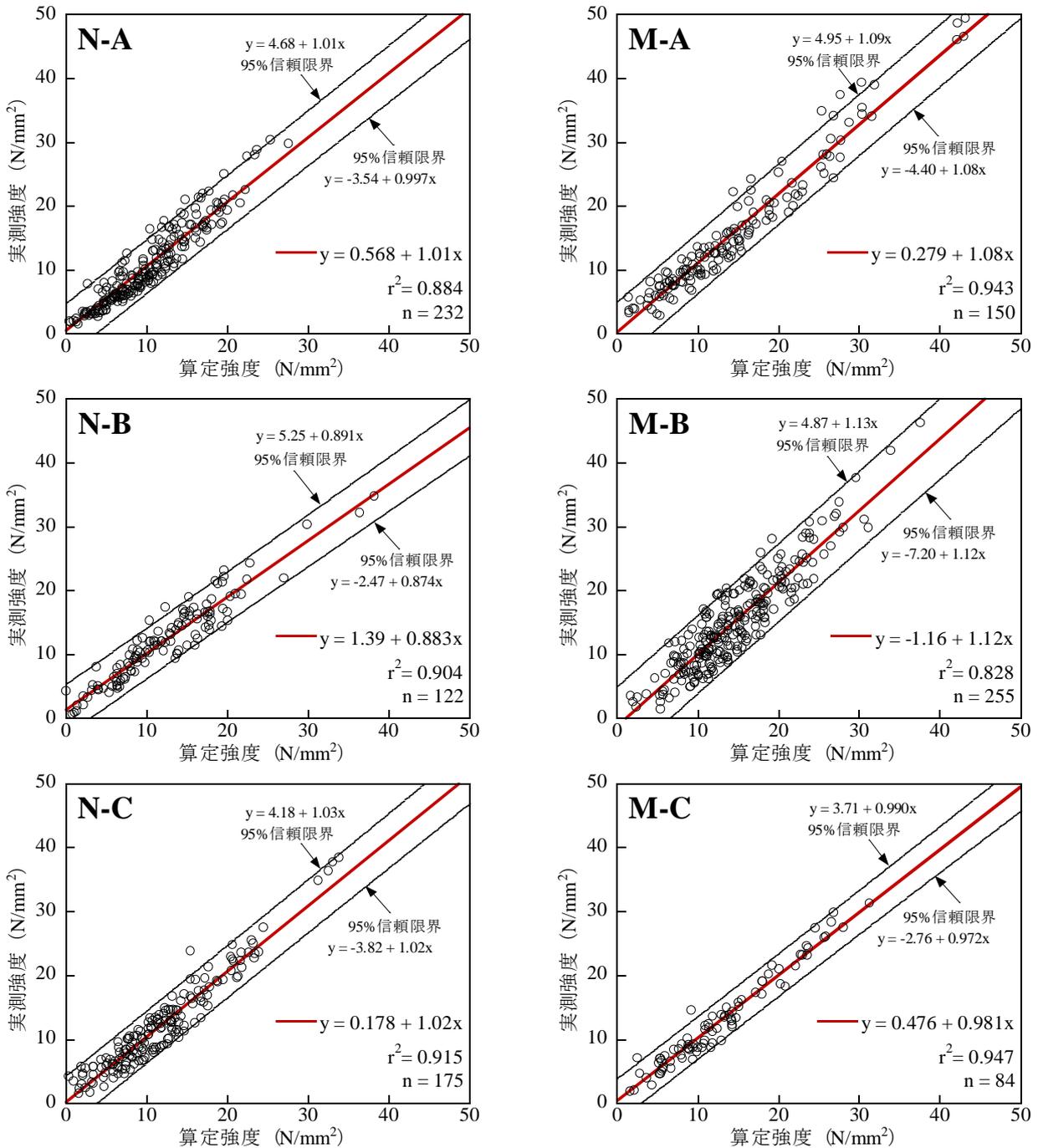


図-4 算定強度と実測強度の関係

ポルトランドセメントの方が有効材齢の差分は小さくなる傾向が認められた。

さて、実際のPCa部材では水和発熱も期待できるため、PCa部材温追養生による強度管理を行うのであれば、この有効材齢の差分を材齢に換算した場合に、さらに小さくなる可能性がある。一例として、実際に得られた冬期のPCa部材（梁）の材齢と温度の関係を図-6に示す。なお、配合は図-1（N-A）中にも示した47-21-20Nである。PCa部材における有効材齢は、材齢16、20、24時間で、それぞれ14.5、20.4、27.2時間であった。脱型・吊上げ強度を12N/mm²とした場合の推定式による有効材

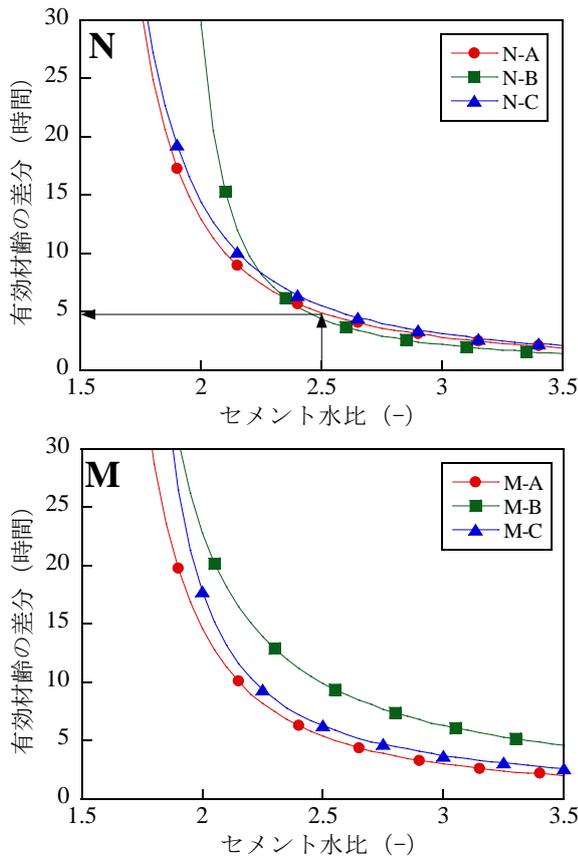


図-5 セメント水比と有効材齢の差分
(脱型・吊上げ強度12N/mm²の場合)

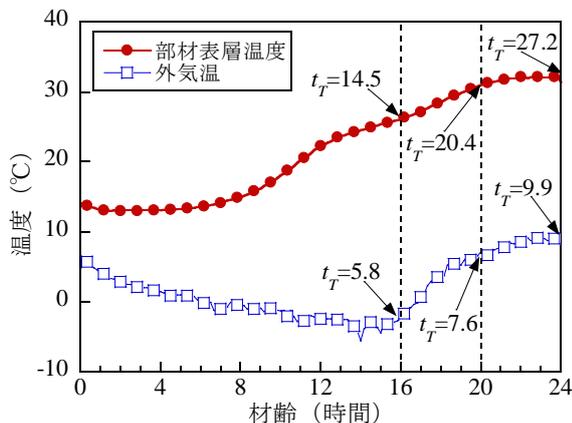


図-6 材齢と部材温度の一例

齢は26時間程度となることから、材齢換算で23時間程度に相当した。上記の事例では有効材齢の差分は5.0時間程度であり、図-6の関係から材齢換算で3.5時間程度に相当した。

本報告で示す初期強度の推定式は、12N/mm²程度までの範囲に限定されるが、一般的なPCa部材の脱型・吊上げ強度の品質管理を行う上では適用が可能である。また、具体的なPCa部材の品質管理を想定することでより有効性が増すものと考えられる。

5. まとめ

本報告の検討範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 対数曲線型の強度推定式を採用し、有効材齢と圧縮強度の回帰を行った。その結果、セメント条件によってデータを整理することで係数aおよび係数bはセメント水比と高い相関性が確認された。
- (2) 上記のセメント条件を限定することにより、初期強度を対象とした対数曲線型の強度推定式を提案し、その適合性を確認した。

参考文献

- 1) 社団法人日本建築学会：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，2005.2
- 2) 社団法人日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事，2003.2
- 3) 技術書院：コンクリート総覧，pp.397-415，1998.3
- 4) 社団法人日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2010.1
- 5) Comité Euro-international du Béton：CEB-FIP Model Code 1990，Thomas Telford，1993
- 6) 西田朗，小澤貴史，太田達見：高強度コンクリートの初期強度発現の評価（その1 マチュリティ則の検討），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.73-74，2006.9
- 7) Freiesleben Hansen, P. and Pedersen, Erik J.: Maturity of Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, Nordisk Betong, Vol.1, No.19, pp.21-25,1977
- 8) 友澤史紀，牛島栄：最近の積算温度方式の発展とその応用，セメント・コンクリート，No.527，pp.66-74，1991.1
- 9) Tank, Rajesh C. and Carino, Nicholas J.: Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete, ACI Materials Journal, 1-2, pp.74-83, 1991
- 10) 小澤貴史，西田朗，太田達見：高強度コンクリートの初期強度発現の評価（その3 調合条件の影響），日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.79-80，2007.8