

# 論文 各種形状・断面厚を有する高強度プレキャストコンクリートの強度特性に関する基礎研究

峯 竜一郎<sup>\*1</sup>・杉山 央<sup>\*2</sup>・榊田 佳寛<sup>\*3</sup>

**要旨:**本研究では、9種類の温度履歴パターンでモルタルを養生し、所定材齢での圧縮強度を調べることで、プレキャストコンクリートの強度特性を解明することを目的とした。温度履歴パターンは各種形状・断面厚を有するプレキャストコンクリートの温度履歴をモデル化したものである。実験より、履歴最高温度が高いほど初期強度が高く、長期的な強度の伸びが小さくなることが明らかになった。また、履歴最高温度または材齢1日までの積算温度を指標とした強度推定手法を提案した。

**キーワード:** 高強度, プレキャストコンクリート, 加熱養生, 積算温度

## 1. はじめに

プレキャストコンクリート(以降、PCaと略記。)による工法は、部材の高品質化、工期短縮など様々な利点を有する。このため、従来からの床や壁などの部材厚の小さなPCaに加えて、近年では柱や梁などの部材厚の大きなPCaも増えている。図-1に示すように、柱など部材厚の大きなPCaは外部からの加熱養生に加えてセメント水和熱が内部に蓄積されて温度上昇が生じる。さらに、高層建物に使用される柱PCaは高強度化される傾向にあり、セメント水和による発熱量が大きくなるため、部材厚の小さなPCaとは大きく異なる温度履歴特性を示す。そこで、本研究では各種形状・断面厚を有するPCaの温度履歴の違いに起因した強度特性を明らかにすることを目的とし、計画した温度履歴パターンで養生したモルタルの強度特性を調べた。さらに、初期温度履歴の強度特性への影響を表す指標を検討し、それらを用いた強度推定手法を提案した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

モルタルに使用した材料は、普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3310cm<sup>2</sup>/g), シリカフュー

ム(平均粒径: 0.2~0.4μm, 密度: 2.2~2.6g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 150000~250000cm<sup>2</sup>/g), 細骨材(大井川産川砂, 表乾密度: 2.51g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 2.24%), 混和剤(ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤)とした。モルタルの調合を表-1に示す。調合は、水結合材比(W/B)40%についてはフロー値が180~200の範囲に、また20%についてはフロー値が230~250の範囲になるようにそれぞれ事前に試し練りを行い決定した。供試体はφ50×100mmの円柱形とした。

### 2.2 養生方法

プログラム式チャンバーを用い、供試体を図-2に示す温度履歴パターンと同じ温度を履歴するように養生した。なお、本実験では小型のモルタル供試体を用いており、チャンバー内の雰囲気温度と供試体温度の差は無視できると仮定している。表-2に温度履歴パターンの概要と要因を示す。AシリーズはPCa工場における加熱養生パターンであり、壁や床などの部材厚の小さなPCaはほぼこれと同じ温度履歴を示す。Bシリーズは柱や梁など部材厚の大きなPCaの中央部の実際の温度履歴をモデル化したものである。温度履歴パターンは、既往の研究報告<sup>1),2)</sup>等を参考にして各種PCa部材を想定して計画した。AおよびBシリーズに共通して温度上昇勾配は20°C/h以下、最高温度保持時間は3hとした。チャンバーで

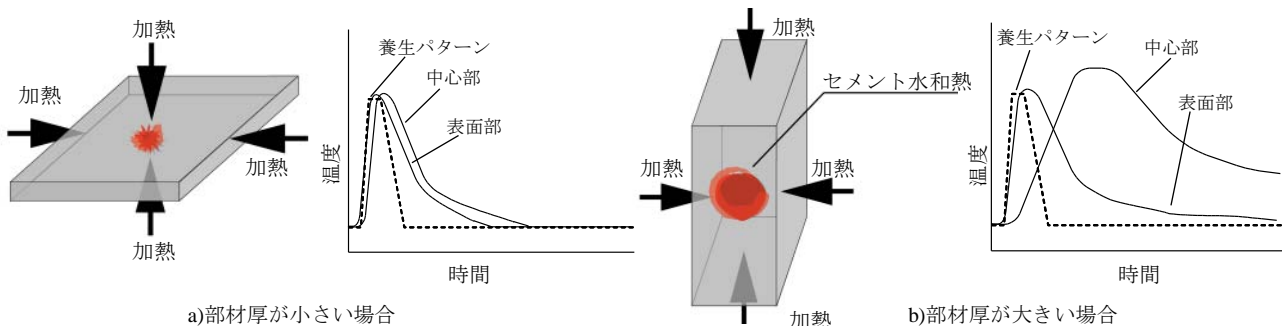


図-1 プレキャストコンクリートの部材厚の違いによる温度上昇傾向の比較

\*1 宇都宮大学大学院 工学研究科 (学生会員)  
 \*2 宇都宮大学大学院 工学研究科 教授 博士(工学) (正会員)  
 \*3 宇都宮大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

72h 養生した後、20°C一定の養生室にて強度試験材齢まで養生した。AおよびBシリーズはすべて封かん状態で養生した。なお、比較のため20°C一定の封かん養生(20S)および水中養生(20W)も加えた。

### 2. 3 圧縮強度試験

各養生を行った後、材齢1, 3, 28および91日に圧縮強度試験を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 材齢と強度の関係

図-3に材齢と強度の関係を示す。AシリーズにおいてW/B=40%の場合、材齢1日では高温を履歴したA1およびA2が20Sよりも高い強度を示したが、材齢28日以降は20Sよりも低い強度を示した。W/B=20%の場合も同様の傾向であったが、材齢91日ではA1が20Sよりも著しく低い強度を示した。

BシリーズにおいてW/B=40%の場合、材齢1日では

表-1 モルタルの調合およびフロー値

水結合材比 (W/B)(%)	質量比					フロー値
	普通ポルトランドセメント(C)	シリカフェーム(SF)	水(W)	川砂(S)	高性能減水剤(SP)	
20	0.9	0.1	0.2	1.1	C×1.5%	243
40	1.0	—	0.4	1.2	—	189

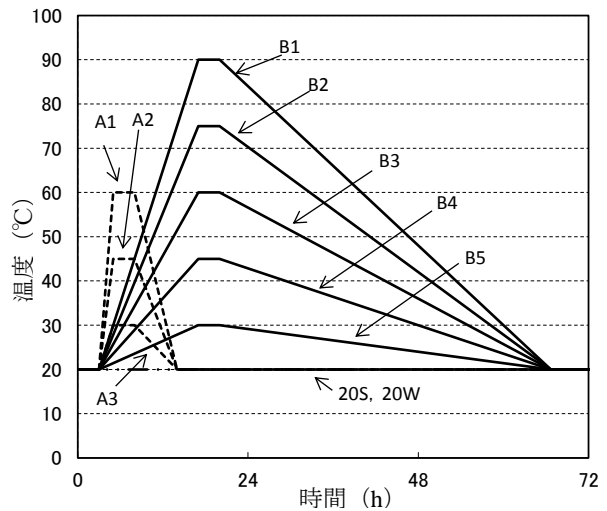


図-2 温度履歴パターン

表-2 温度履歴パターンの概要と要因

記号	想定している部材 ( )内は部材厚	強度レベル	PCa製造時の加熱養生の有無	前置き時間 (h)	前養生温度 (°C)	温度上昇速度 (°C/h)	最高温度 (°C)	最高温度保持時間 (h)	温度下降時間 (h)	後養生温度 (°C)
A1	壁や床(200mm程度)	普通	有	3	20	20	60	3	6	20
A2	壁や床(200mm程度)	普通	有			12.5	45			
A3	壁や床(200mm程度)	普通	有			5	30			
B1	柱(600~1000mm程度)	高強度	有			5	90			
B2	柱(600~1000mm程度)	高強度	無			3.9	75			
B3	柱(600~1000mm程度)	普通	無			2.8	60			
B4	梁(400mm程度)	普通	無	1.8	45	46.7				
B5	円柱供試体	高強度	無	0.7	30					
20S, 20W	円柱供試体	普通	無	—	—	—	—	—	—	—

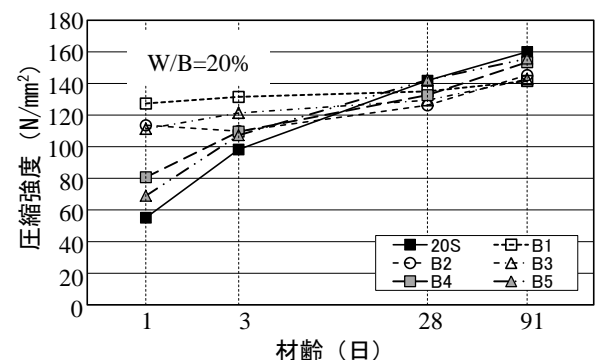
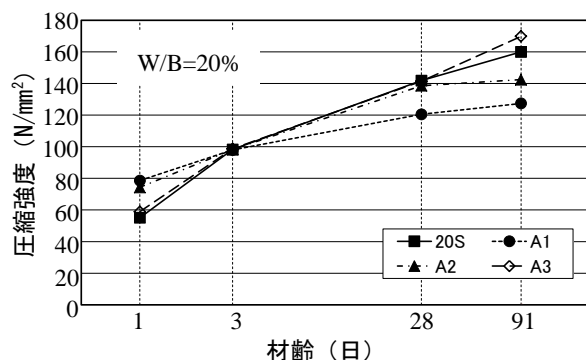
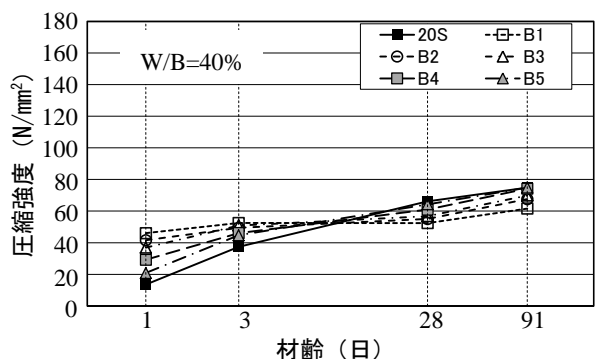
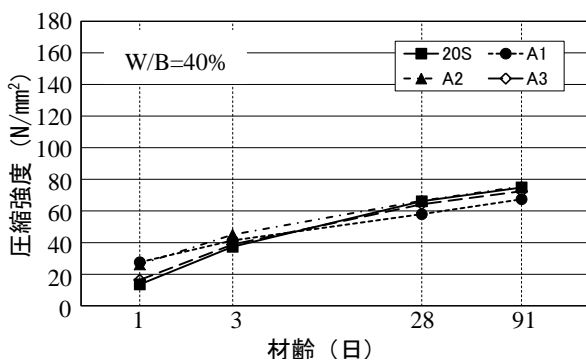


図-3 材齢と強度の関係

高温を履歴した B1, B2 および B3 は 20S よりも非常に高い強度を示し、この傾向は A シリーズよりも著しかった。しかし、材齢 91 日においては 20S よりも低い強度を示した。W/B=20% の場合、A シリーズに比べて B1, B2 および B3 は材齢 1 日の強度が著しく高くなったが、その後の強度の伸びは小さくなった。これはシリカフェームを使用したコンクリートに特徴的な傾向<sup>3)</sup>であり、初期高温による初期強度発現の傾向がより顕著であった。

### 3.2 最高温度と強度の関係

図-4 に最高温度と強度の関係を示す。W/B=40% および 20% に共通して、最高温度が高いと材齢 1 日強度が高く、材齢 91 日強度は低くなる。また、同じ最高温度であっても、それに達する時期の違いが原因となって強度発現に差が生じている。この傾向は W/B=20% において顕著である。W/B=40% において、材齢 1 日では最高温度が 10°C 上がると強度が約 5N/mm<sup>2</sup> 高くなる傾向にある。材齢 91 日では最高温度が 10°C 上がると強度が約 2N/mm<sup>2</sup> 低下する傾向にある。W/B=20% において、材齢 1 日では最高温度が 10°C 上がると強度が約 8N/mm<sup>2</sup> 高くなる。また、B シリーズにおいては最高温度 45°C と 60°C の強度差が大きくなった。材齢 91 日では最高温度が 10°C 上がると A シリーズは約 10 N/mm<sup>2</sup>, B シリーズは約 3 N/mm<sup>2</sup> 強度が低下する傾向にある。これらの傾向は既往の研究報告<sup>4)</sup>と同じである。

### 3.3 積算温度と強度発現の関係

コンクリートの強度発現を養生温度の時間積分(積算温度)と関連づけて次のように表す方法がある。

$$M = \sum (T + 10) \Delta t \quad (1)$$

ただし、 $M$ : 積算温度(° D·D)

$T$ : コンクリートの養生温度(°C)

$\Delta t$ : 温度  $T$  で養生した期間(日)

$$F = A \log M + B \quad (2)$$

ただし、 $F$ : 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$A, B$ : 係数

図-5 に積算温度と強度の関係を示す。図中に 20S のデータをもとにした(2)式の近似直線も示す。積算温度は養生温度や養生期間が異なってもそれらの積が等しければ同一の強度が得られているという理論に基づいている。例えば、20S のデータより求めた近似直線上には、高温養生したデータも分布するという仮説に基づいている<sup>5)</sup>。しかし、高温養生したものは 200° D·D 以下では 20S による近似直線よりも高い強度を示し、800° D·D 以上では 20S による近似直線よりも低い強度を示した。この傾向は W/B=20% において顕著である。このため、材齢 1 ~ 91 日を通しての強度発現の推定には有用でないとい

える。

### 3.4 積算温度の範囲と近似直線

3.3 の結果を受け、積算温度を利用できる範囲を検討した。すなわち、強度データの範囲をグループ分けし、(2)式と強度データとの整合性を調べた。その結果を表-3 および図-6 に示す。W/B=40% では材齢 1 日の強度に限れば R<sup>2</sup> が 0.982 と非常に高い値を示し、積算温度による強度推定は可能である。W/B=20% でも材齢 1 日の強度に限れば R<sup>2</sup> が 0.973 であり、積算温度による強

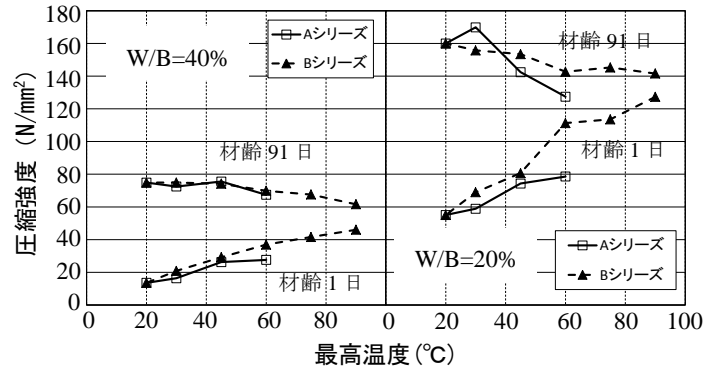


図-4 最高温度と強度の関係

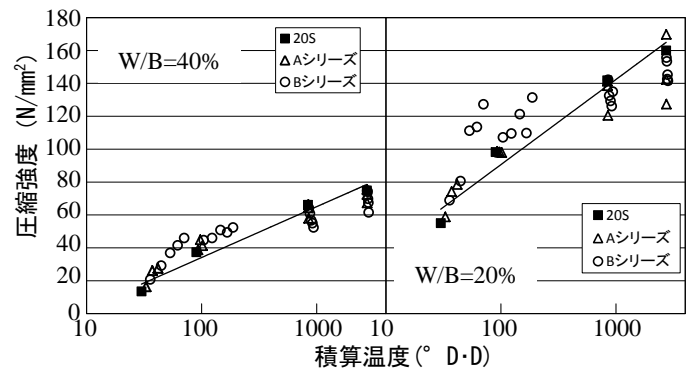


図-5 積算温度と強度発現の関係

表-3 係数 A, B の値

強度データの範囲	W/B=40%			W/B=20%		
	A	B	R <sup>2</sup>	A	B	R <sup>2</sup>
材齢1日	37.9	-114	0.982	87.6	-245	0.973
材齢1~3日	19.0	-44.2	0.865	31.7	-38.9	0.669
材齢1~28日	10.7	-9.8	0.827	17.2	21.2	0.728
材齢1~91日	9.9	-6.28	0.883	15.5	29.3	0.786

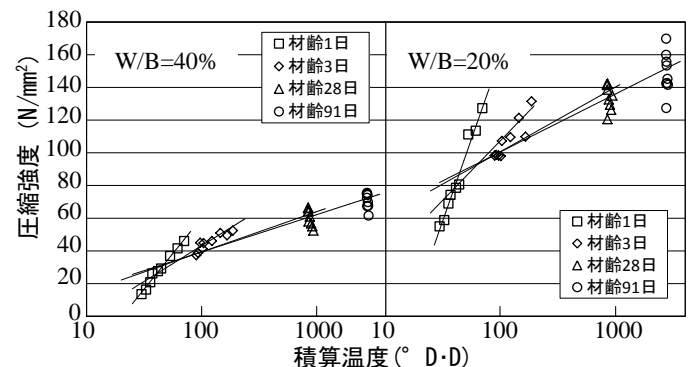


図-6 積算温度の範囲と近似直

度推定が可能である。材齢3日までの強度を含めるとW/B=40%のR<sup>2</sup>が0.865であり,W/B=20%のR<sup>2</sup>が0.669と相関が大きく低下する。

### 3.5 初期高温履歴の各種要因と強度発現性

強度発現性を考察するのに先立ち、次式のような各材齢における強度比 $f_t$ を定義した。

$$f_t = \frac{F_t}{{}_{20W}F_{91d}} \quad (3)$$

ただし、 $f_t$ : 材齢 $t$ 日における強度(N/mm<sup>2</sup>)

${}_{20W}F_{91d}$ : 20Wの材齢91日における強度(N/mm<sup>2</sup>)  
強度比 $f_t$ を次式で表わし、強度発現性を定量化した。

$$f_t = \alpha \log t + \beta \quad (4)$$

ただし、 $t$ : 材齢(日)

$\alpha$ : 材齢1日から91日までの強度増進性を表す係数

$\beta$ : 材齢1日における初期強度を表す係数

図-7に材齢と強度比の関係を示す。また、(4)式による回帰直線も示す。回帰分析により求めた $\alpha$ および $\beta$ の値を表-4に示す。係数 $\alpha$ および $\beta$ と初期高温履歴の関係調べるために次式を設定した。

$$\alpha = aX + b \quad (5)$$

$$\beta = cX + d \quad (6)$$

ただし、 $X$ : 初期高温履歴を定量化するための指標

$a, b, c, d$ : 係数

$X$ として、最高温度 $T_{max}$ (°C)、材齢0~1日、0~2日、0~3日のそれぞれの積算温度 $M_{0-1d}$ 、 $M_{0-2d}$ 、 $M_{0-3d}$ を取り上げ、 $\alpha$ 、 $\beta$ との相関を調べた結果を表-5に示す。なお、材齢1日強度を表す係数 $\beta$ を材齢0~2日または0~3日の $M_{0-2d}$ 、 $M_{0-3d}$ で表すことは適切ではないため、 $\beta$ の検討から除外している。また、すべての指標 $T_{max}$ 、

表-4 係数 $\alpha$ および $\beta$ の値

記号	W/B=40%			W/B=20%		
	$\alpha$	$\beta$	R <sup>2</sup>	$\alpha$	$\beta$	R <sup>2</sup>
20W	0.182	0.178	0.991	0.145	0.374	0.968
A1	0.093	0.320	0.989	0.062	0.475	0.969
A2	0.116	0.320	0.979	0.090	0.452	0.959
A3	0.133	0.224	0.969	0.136	0.373	0.985
B1	0.030	0.509	0.792	0.017	0.736	0.943
B2	0.068	0.560	0.928	0.041	0.622	0.839
B3	0.069	0.427	0.921	0.036	0.647	0.954
B4	0.101	0.345	0.976	0.086	0.494	0.970
B5	0.123	0.281	0.958	0.107	0.446	0.956

表-5 係数 $a, b, c$ および $d$ の値

水結合材比(W/B)	要因	$\alpha$			$\beta$		
		a	b	R <sup>2</sup>	c	d	R <sup>2</sup>
40%	$T_{max}$	-0.0018	0.194	0.906	0.0051	0.093	0.854
	$M_{0-1d}$	-0.0030	0.235	0.864	0.0087	-0.044	0.909
	$M_{0-2d}$	-0.0012	0.210	0.751	—	—	—
	$M_{0-3d}$	-0.0011	0.236	0.778	—	—	—
20%	$T_{max}$	-0.0020	0.175	0.915	0.0051	0.255	0.848
	$M_{0-1d}$	-0.0030	0.216	0.847	0.0090	0.108	0.946
	$M_{0-2d}$	-0.0012	0.187	0.708	—	—	—
	$M_{0-3d}$	-0.0011	0.215	0.750	—	—	—

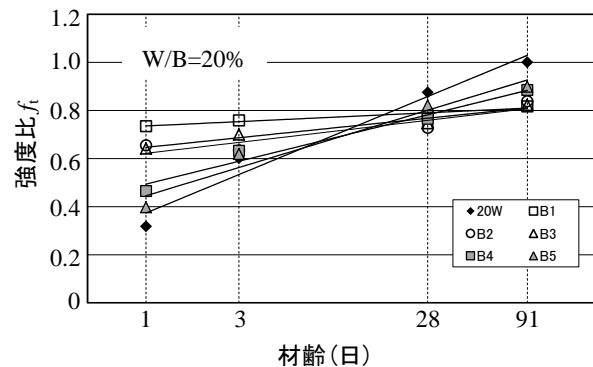
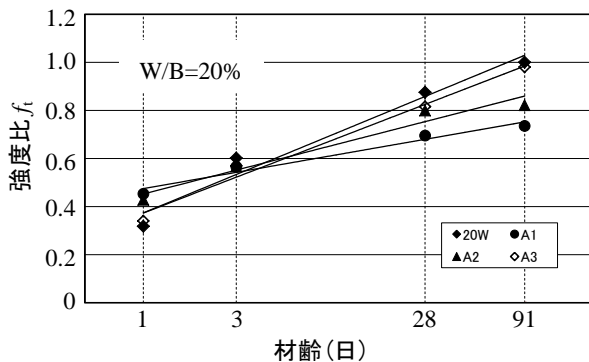
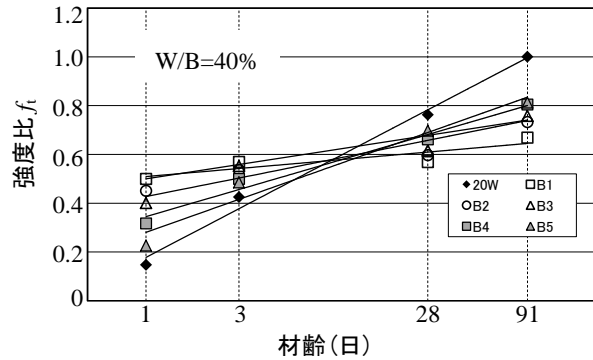
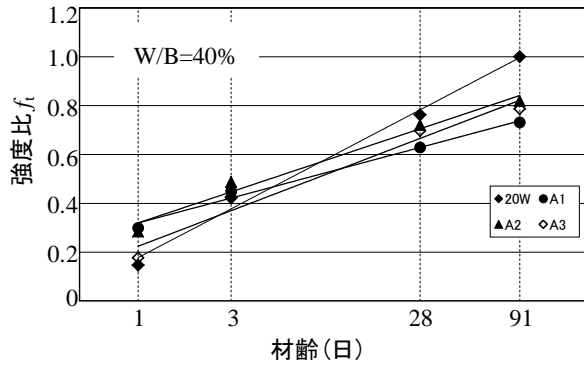


図-7 材齢と強度比 $f_t$ の関係

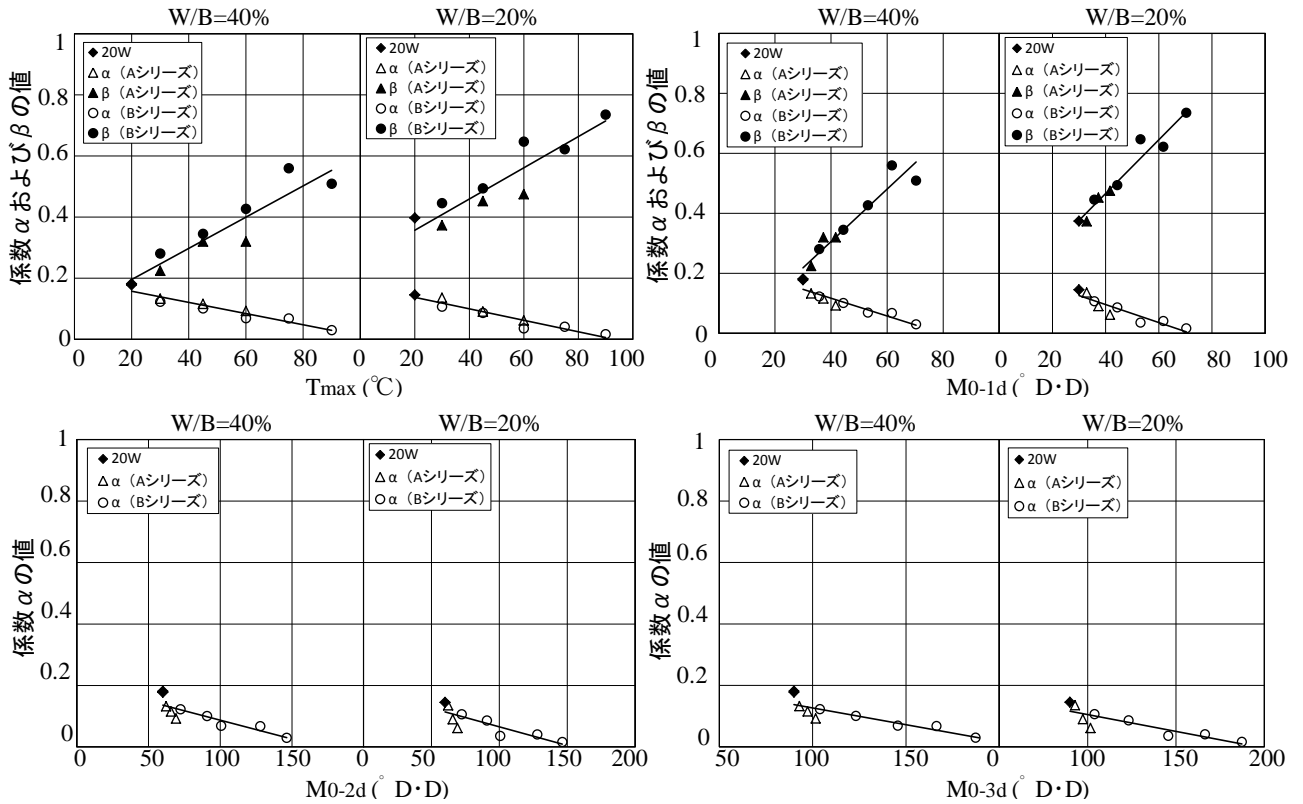


図-8 初期高温履歴を定量化する指標と係数 $\alpha$ および $\beta$ の関係

M0-1d, M0-2d, M0-3d を取り上げ、係数 $\alpha$ および $\beta$ との関係をそれぞれ図-8 に示す。W/B=40%と20%に共通して、係数 $\alpha$ ではTmaxの $R^2$ が最も高く、係数 $\beta$ ではM0-1dの $R^2$ が最も高くなった。初期高温履歴が強度発現に及ぼす影響を定量化する指標としてTmaxとM0-1dは有用であることがわかる。

### 3. 6Pcaの簡便な強度発現推定法

まず、図-9 に示すように初期養生時の温度履歴を実験による測定または温度上昇シミュレーション解析等<sup>6)</sup>により把握し、履歴最高温度(Tmax)または材齢1日の積算温度(M0-1d)を求める。次にM0-1dまたはTmaxをXとして、(5)、(6)式に代入し $\alpha$ 、 $\beta$ を計算する。求めた $\alpha$ 、 $\beta$ の値を(4)式に代入すると、強度発現式(強度比)が求められる。これに20°C一定水中養生した材齢91日強度を乗じれば、当該Pcaの強度が算出される。

一例として、著者らが過去に行ったPca試験体の製造実験<sup>1),2)</sup>より得られたデータを用いて強度推定計算および適合性の検証を試みた。計算対象としたのは、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比40%のPca試験体であり、部材厚が200, 400, 600mm, 加熱最高温度が40, 60, 80°Cの試験体である。その概要を表-7に示す。なお、N40-A-80W, N40-A-60W, N40-A-40Wの末尾に付したWは冬期の実験であることを示している。原論文でこれらの記号を用いたため、本論文でも便宜上同様の記号としている。表-7において、材齢28日の実測コア強度と本推定手法による28日強度を比較すると、全

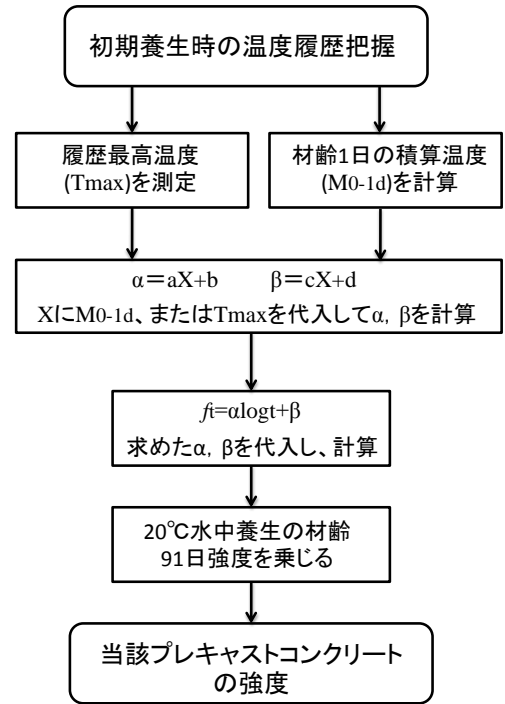


図-9 強度推定のフローチャート

体的に推定強度が実測コア強度より大きくなる傾向がある。この傾向は中心部において顕著だった。また、Tmaxによる強度推定とM0-1dによる強度推定に大きな差は見られなかった。

N40-A-80W, N40-A-60W, N40-A-40Wを比較すると、履歴最高温度が高いほど28日推定強度が低くなった。N40-A-60, N40-B-60, N40-C-60を比較すると、Pca試験

表-6 計算例として用いた PCa 試験体の概要および測定結果ならびに推定結果

記号	試験体寸法(mm)	加熱最高温度(°C)	温度測定結果				強度試験結果(N/mm <sup>2</sup> )			本推定結果28d (N/mm <sup>2</sup> )			
			履歴最高温度Tmax(°C)		材齢0~1日までの積算温度		標準養生 供試体91d	コア供試体28d		Tmax		M0-1d	
			中心	表面	中心	表面		中心	表面	中心	表面		
N40-A-80W	600×600×700	80	79.7	65.1	59.6	59.9	79.0	46.2	52.4	52.8	53.8	52.3	52.3
N40-A-60W	600×600×700	60	64.5	48.5	51.5	50.6	77.6	48.9	52.2	52.9	54.0	52.2	52.3
N40-A-40W	600×600×700	40	50.9	42.0	43.2	41.2	85.1	44.6	51.7	59.1	59.8	58.1	58.4
N40-A-60	600×600×700	60	73.8	59.1	64.9	59.1	81.9	43.7	47.0	55.2	56.2	53.6	54.3
N40-B-60	400×600×700	60	70.8	61.8	63.3	61.7	73.0	44.3	46.1	49.4	50.0	48.0	48.1
N40-C-60	200×600×700	60	68.1	64.8	61.7	60.9	73.0	51.5	52.0	49.5	49.8	48.1	48.2
20W	φ 100×200	無	20		30		79.0	72.6		57.0		55.3	

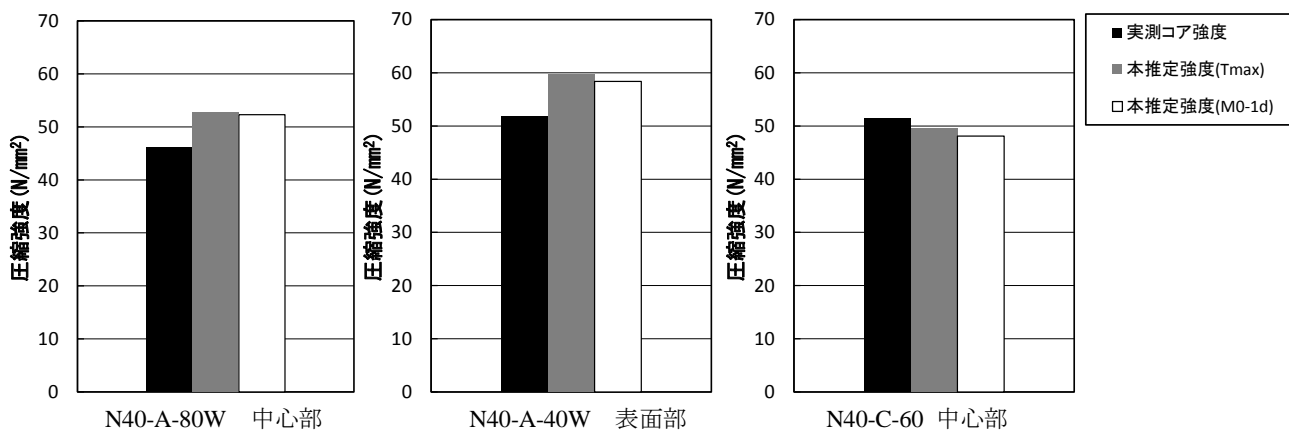


図-10 実測コア強度と推定強度の比較(材齢 28 日)

体の断面厚が小さくなるほど強度が低くなる傾向が見られた。一般的に同じ材料，調合の PCa であれば，部材厚が大きいほど Tmax および M0-1d が大きくなると考えられるが，ここで用いた実測値では部材厚による Tmax および M0-1d の差異があまり認められなかったことが推定結果に現れたものである。図-10 に強度推定結果の一部を示す。N40-A-80W 中心部および N40-A-40W 表面部に共通して，実測コア強度よりも推定強度の方が 10%程度大きくなる傾向が認められたが，Tmax および M0-1d の大きな N40-A-80W 中心部の方が N40-A-40W 表面部より強度が小さくなる傾向を推定することができた。N40-C-60 中心部においては 3%程度の推定誤差で実測コア強度を推定することができた。本推定手法は，PCa の諸条件によってある程度の強度差が発生するが，強度特性の目安を推定するために有用であることが明らかになった。

#### 4. 結論

本研究によって以下のことが明らかになった。

- (1) 柱プレキャストコンクリートなどの断面厚の大きな形状ほど，また強度レベルが高くなるほど履歴温度が高くなるが，この影響により初期強度が高く，長期的な強度の伸びが小さくなることを確認した。
- (2) 積算温度による強度推定は，W/B=40%と 20%に共通して，材齢 1 日においては可能である。
- (3) 初期高温履歴を定量化するための指標として履歴最高温度(Tmax)および材齢 0~1 日までの積算温度(M0-1d)を用いて強度発現性を表すことができる。

- (4) Tmax または M0-1d を指標としたプレキャストコンクリートの簡便な強度発現推定手法を提案した。
- (5) 本手法による推定強度は，コア採取による実測強度と概ね一致し，強度特性の目安を得るために有用である。

#### 参考文献

- 1) 杉山央，榎田佳寛ほか：大断面プレキャストコンクリート部材製造時の温度履歴特性，日本建築学会技術報告集 第 14 号，pp.13-18，2001.12
- 2) 杉山央，榎田佳寛ほか：大断面プレキャストコンクリート部材の強度特性，日本建築学会技術報告集 第 14 号，pp.19-24，2001.12
- 3) 小泉信一，菅保匠ほか：Fc=150N/mm<sup>2</sup> 級の強度発現性に及ぼすシリカフェームの温度依存性と養生方法の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.383-384，2005.9
- 4) 杉山央，榎田佳寛：初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性，日本建築学会構造系論文集 第 515 号，pp.23-30，1991.1
- 5) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧，技報堂出版株式会社，pp.403-404，1976.2
- 6) 日本建築学会：構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点，pp.277-292，2008