

# 初期高温履歴を受ける超高強度コンクリートの強度発現特性

## Strength-Developing Properties of Ultrahigh Strength Concrete Subjected to a Temperature History at Early Age

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

設計基準強度 100~150N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートを対象とし、実構造物の温度履歴を模擬してその最高温度を変化させた温度条件下で円柱供試体を養生し、強度発現を確認した。その結果、強度発現特性が最高温度で 45℃~60℃を境として大きく変化することを明らかとした。また、高強度コンクリートの強度発現の従来予測式について、最高温度を考慮することにより、初期材齢から長期材齢まで、より高い精度で予測可能となった。

**キーワード**：超高強度コンクリート、強度発現、初期高温履歴

Strength development of ultrahigh strength concrete was examined through the test on cylindrical specimens with design strength of 100 to 150 N/mm<sup>2</sup> which are cured under temperature conditions simulating the temperature histories of actual structures with different maximum temperatures. As a result of tests, strength development changes considerably over the range of maximum temperature of 45 to 60 °C. By incorporating the maximum temperature in a conventional prediction equation, a higher accuracy of the strength development prediction was achieved for later ages as well as early ages.

**Key Words**: Ultrahigh Strength Concrete, Strength Development, Temperature History at Early Age

### 1. はじめに

構造体コンクリートの力学特性発現を精度良く予測することは、初期材齢での温度応力評価や施工時荷重の検討、さらに長期クリープ変形の予測など、さまざまな場面で求められる。一方、高強度コンクリートは単位結合材量が多いため、自らの水和発熱による初期高温履歴にその力学特性発現が大きく影響される。一般に、異なる温度条件下でのコンクリートの力学特性発現は、その終局値や発現速度を反映可能なさまざまな関数式に、養生温度条件の違いを考慮すべく、積算温度や有効材齢などのマチュリティを適用して予測される。JCI 研究委員会では、このような関数式として、CEB-FIP model code 90 式<sup>1)</sup>(以下、MC90 式)に着目し、同式を修正して初期材齢での適用性を高めた高強度コンクリートの圧縮強度発現予測式<sup>2)</sup>(以下、JCI 研究委員会式)を提案している。ただし、JCI 研究委員会式は28日圧縮強度の範囲が 89.7 ~ 127N/mm<sup>2</sup> のデータで検証されたもので、また材齢28日を越えた長期材齢への適用性については検証されてい

ない。現状では、実用化されている設計基準強度(以下、Fc)で 150N/mm<sup>2</sup> クラスの超高強度コンクリートとなると、構造体コンクリート強度補正值に初期高温履歴を考慮した強度管理手法は提案されているものの<sup>3)</sup>、その圧縮強度発現の予測式はほとんど提案されていない。

これまで筆者らは、低熱ポルトランドセメントにシリカフュームを混入した結合材(以下、LSF)を使用した Fc100~150N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートを対象に、初期高温履歴の構造体コンクリート強度への影響を検討してきた。そのなかで、水結合材比がおおむね20%以下の超高強度コンクリートでは、60℃程度の初期高温履歴を受けた場合に初期材齢での強度発現が著しく大きく、その後の強度増加が非常に小さくなることや、初期高温履歴条件と20℃封かん養生条件の強度の積算温度による統一の評価が難しいこと<sup>4)</sup>、などを確認してきた。また、施工時期が異なる模擬柱部材の構造体コンクリート強度について、初期高温履歴の最高温度(以下、T<sub>mx</sub>[°C])に着目した整理を行っている<sup>3)</sup>。その中で、T<sub>mx</sub> ≥ 50℃の場合の構造体コンクリート強度増進が T<sub>mx</sub> < 50℃の場合に

比べ極めて大きく、かつ水結合材比が14%ないし13%では材齢91日時点でも両者の強度差が解消されない結果を得ている。このことより、 $T_{max}$ を考慮した構造体コンクリート強度補正値を提案するとともに、 $T_{max} \geq 50^{\circ}\text{C}$ を確保することが構造体強度の確保に有効であることと、冬期施工での断熱型枠使用の効果をj確認している<sup>3)</sup>。

こうした背景を踏まえ、本研究では、既報<sup>3),4)</sup>と同様の超高強度コンクリートを対象とし、実構造物の温度履歴を模擬して $T_{max}$ を変化させた温度条件下で円柱供試体を養生し、圧縮強度の発現を確認した。その結果、 $T_{max}$ と圧縮強度発現特性(以下、強度発現特性)との関係より、JCI研究委員会式を修正し、初期材齢より材齢91日程度までの範囲で、初期高温履歴を受ける超高強度コンクリートの圧縮強度予測手法を提案した。ただし、本研究は、比較的断面が大きく、乾燥の影響を受けにくい部材を対象としている。

## 2. 試験概要

### (1) 使用材料および調合と試験水準

使用材料を表-1に、コンクリート調合を表-2に示す。表中の調合記号は、結合材の種類とW/Bとの組み

合わせを表している。調合条件として、単位水量と単位粗骨材量を統一し、目標空気量を2.0%，目標スランブフローをLSF14およびLSF16では $70 \pm 10\text{cm}$ ，LSF20では $65 \pm 10\text{cm}$ とした。LSF14, 16, 20は、それぞれ $\text{Fc}150, 120, 100\text{N/mm}^2$ を想定した調合である。図-1は、既報<sup>3),5)</sup>に示すLSFを用いた超高強度コンクリート部材中心および外側部分の初期温度履歴実測値である。温度履歴は調合や施工時期、型枠条件、および部材寸法や箇所により異なっている。これらを勘案し定めた試験水準を、表-3に示す。練上がり温度(以下、 $T_0[^{\circ}\text{C}]$ )は $20^{\circ}\text{C}$ と $30^{\circ}\text{C}$ の2水準とし、 $T_{max}$ はLSF16で7水準とした。また、LSF14と16の $T_0=20^{\circ}\text{C}$ のシリーズは2回に分けて実施した。

### (2) 試験体作製および圧縮強度試験

コンクリートの練混ぜには容量100Lの強制2軸練りミキサを使用し、練混ぜ前に各使用材料の温度を調整して目標とした練上がり温度を確保した。各調合とも、練上がり後にフレッシュ性状を確認し、 $\phi 100\text{mm} \times \text{H}200\text{mm}$ の、標準水中養生条件の円柱供試体(以下、標準TP)と、初期高温履歴を与える封かん条件の円柱供試体(以下、封かんTP)を作製した。封かんTPは、初期高温履

表-1 使用材料

材料	記号	諸物性
低熱ポルトランドセメント	C	密度: $3.24\text{g/cm}^3$ , 比表面積: $3310\text{cm}^2/\text{g}$
シリカフェューム	SF	
細骨材	S	千葉県万田野山砂, 密度: $2.63\text{g/cm}^3$ , FM:2.53
粗骨材	G	茨城県岩瀬産硬質砂岩砕石, 密度: $2.65\text{g/cm}^3$
化学混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表-2 コンクリート調合

調合記号	W/B [%]	単位容積質量 $[\text{kg/m}^3]$				
		W	B=(C+SF)		S	G
			C	SF		
LSF14	14	150	964	107	386	888
LSF16	16	150	844	94	499	888
LSF20	20	150	675	75	658	888

表-3 試験水準

調合記号	練上がり温度 $T_0[^{\circ}\text{C}]$	最高温度 $T_{max}[^{\circ}\text{C}]$						
		20	35	45	55	60	70	90
LSF14	20	○ <sub>1</sub>	○ <sub>1</sub>	○ <sub>2</sub>		○ <sub>1</sub>		○ <sub>1</sub>
	30				○			○
LSF16	20	○ <sub>1</sub>	○ <sub>1</sub>	○ <sub>2</sub>	○ <sub>1</sub>	○ <sub>1</sub>	○ <sub>1</sub>	○ <sub>1</sub>
	30				○			○
LSF20	20	○		○				○
	30				○			○

末尾の数字はLSF14, 16練上がり温度 $20^{\circ}\text{C}$ のケースの試験シリーズ

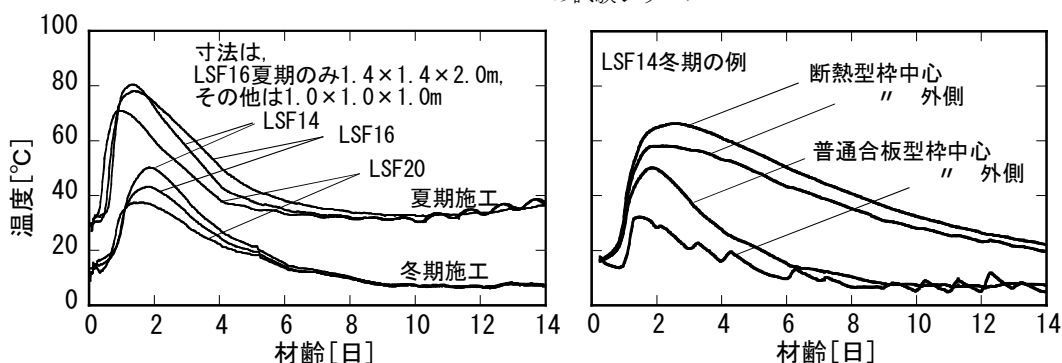


図-1 LSFを用いた構造体コンクリートの初期高温履歴

歴を模擬した温度条件下で養生し、所定材齢で圧縮強度を確認した。試験材齢は、 $T_0=20^\circ\text{C}$ の試験ケースでは 1, 1.2 ~ 1.7, 2, 3, 4, 7, 14, 28, 91日とし、 $T_0=30^\circ\text{C}$ の試験ケースでは、より初期材齢での強度発現も併せて確認すべく、試験材齢を 0.3 ~ 0.5, 0.4 ~ 0.6, 1.0, 7.0, 28日とした。また、円柱供試体と同じコンクリートを用いて、雰囲気温度を $T_0$ に制御した室内にて凝結試験を実施した。

(3) 試験体への初期高温履歴の与え方

封かん TP の養生には温度可変制御槽を用いた。あらかじめ槽内の温度を目標 $T_0$ に制御しておき、すべての封かん TP を試験室で作製後に速やかに槽内に移設した。その後、同時に実施した凝結試験において、始発時刻を確認後に温度上昇を開始した。温度上昇速度は $2.92^\circ\text{C}/\text{Hr}$ とし、各封かん TP は所定の温度に達した時点で6面周囲を断熱材で覆った養生箱に移設し温度を降下させた。また、断熱型枠の使用を想定した封かん TP については槽内に存置し、 $T_{\text{max}}=90^\circ\text{C}$ 到達後に温度を $0.25^\circ\text{C}/\text{Hr}$ の速度で非常に緩やかに降下させた。

コンクリートの温度は、同じコンクリートで作製した供試体を封かん TP と同一条件で養生し確認した。温度可変制御槽と養生箱の概観を写真-1に示す。



写真-1 温度可変制御槽と養生箱の概観

LSF14の $T_0=20^\circ\text{C}$ の試験ケースで得られた試験時のコンクリート温度の実測値を、図-2に示す。各コンクリートの最高温度は計画どおりの差がついたものとなった。

3. 試験結果

フレッシュ性状と標準 TP の材齢28日圧縮強度 (以下、 $F(28)[\text{N}/\text{mm}^2]$ )の試験結果を表-4に示す。 $T_0$ は目標値の $-2.0 \sim +2.5^\circ\text{C}$ 、空気量は $1.0 \sim 2.1\%$ 、スランブフロー値は目標値の $-5.0 \sim +10\text{cm}$ の範囲にあった。

$F(28)$  は、バッチ間や練上がり温度による差異がない結果であった。

凝結試験結果について、始発および終結の時刻と、化学混和剤添加量 (以下、 $\text{SP} / \text{B}[\%]$ )との関係を、表-5に示す。表中には、筆者らが同様のコンクリートを対象に実施した既報の結果<sup>6)</sup>を併記している。LSF14の既報 $T_0=20^\circ\text{C}$ の結果において異なる結果があったものの、全体として、結合材水比 (以下、 $\text{B} / \text{W}$ ) が大きくなると必要な  $\text{SP} / \text{B}$  は多くなり、また  $\text{SP} / \text{B}$  が多くなるほど凝結時間は長くなる傾向にあった。

材齢  $t$  日での封かんTPの圧縮強度 (以下、 $f(t)[\text{N}/\text{mm}^2]$ )の結果とコンクリート温度 (以下、 $T(t)[^\circ\text{C}]$ )の実測値を、図-3に示す。材齢の起点は注水時刻である。

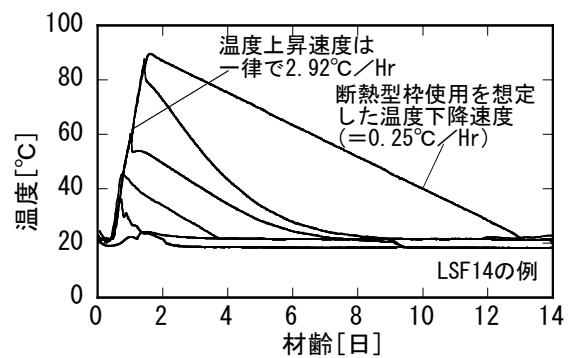


図-2 小型試験体の温度実測結果例

表-4 フレッシュ性状と標準養生28日強度試験結果

調査記号	目標練上がり温度[°C]	フレッシュ性状				F(28)		備考
		練上がり温度[°C]	空気量[%]	スランブフロー値[cm]	室温[°C]	各値[N/mm <sup>2</sup> ]	平均値[N/mm <sup>2</sup> ]	
LSF 14	20	22.5	1.5	74.0	18	158	158	1回目
		21.7	2.1	77.5	20	160		2回目
	30	32.0	1.7	80.0	20	156		
LSF 16	20	18.0	1.0	77.0	17	153	147	1回目
		22.0	1.5	78.5	22	145		2回目
	30	30.5	1.9	74.0	20	144		
LSF 20	20	20.0	2.1	60.0	20	109	111	
	30	29.0	1.8	70.0	20	112		

$F(t)$ : 標準養生円柱供試体の材齢 $t$ 日の圧縮強度[N/mm<sup>2</sup>]

$f(t)$ : 初期高温履歴を与えた封かん円柱供試体の材齢 $t$ 日の圧縮強度[N/mm<sup>2</sup>]

表-5 凝結試験結果

調査記号	練上りおよび試験時の雰囲気温度[°C]	始発時間[日]	終結時間[日]	化学混和剤SP/B[%]	備考
LSF 14	20	0.56	0.65	2.30	1回目
		0.49	0.57	2.25	2回目
	30	0.53	0.58	2.45	
LSF 16	20	0.53	-	1.80	既報 <sup>6)</sup>
		0.49	0.56	1.50	1回目
	30	0.42	0.48	1.45	2回目
LSF 20	20	0.31	0.37	1.40	
		0.40	-	1.35	既報 <sup>6)</sup>
	30	0.31	0.37	1.15	

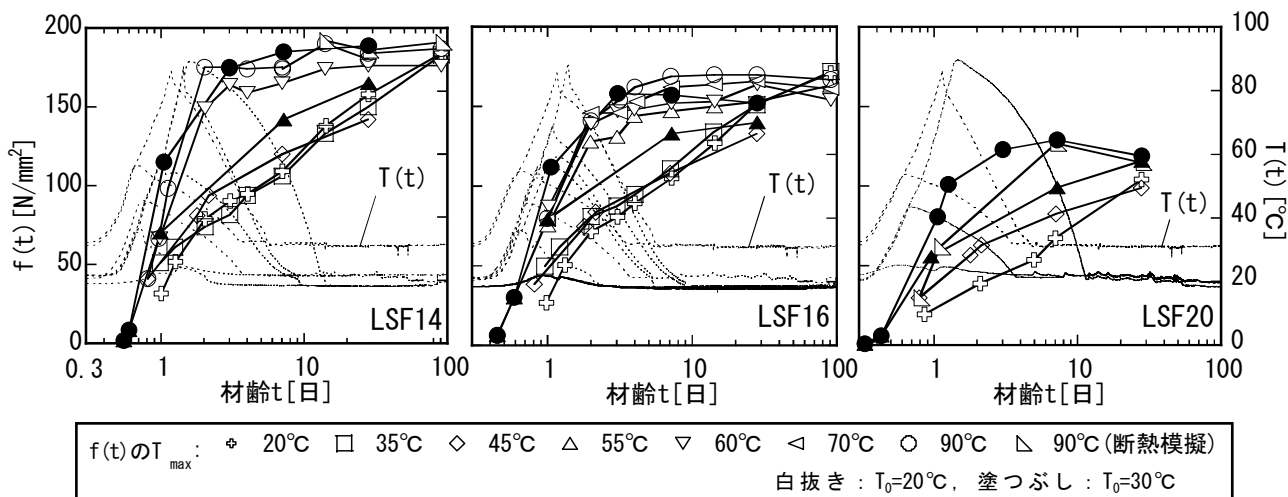


図-3 材齢と封かん養生円柱供試体の圧縮強度との関係

各調査とも、 $T_0=30^\circ\text{C}$ の試験ケース（塗つぶしたプロット）における  $f(t)$  の最初の試験材齢は、凝結始発時刻と終結時刻の間であり、その時点で  $0.8 \sim 6.3\text{N/mm}^2$  の強度発現が確認された。 $T_0$ の差異は凝結時間に影響するため、初期材齢での圧縮強度発現に若干の影響を及ぼすことが考えられるが、 $f(28)$ と $f(91)$ の試験結果をみる限り、表-4中の  $F(28)$  と同様に、長期強度への顕著な影響はない。また、LSF14 と LSF20 において実施した、断熱型枠を模擬して温度下降速度を緩やかにした試験ケース ( $\nabla$ ) の $f(28)$ および $f(91)$ は、他の試験ケースと同等であった。

$f(t)$  はこの時点までの  $T_{\text{max}}$  が高い試験ケースほど大きく、各調査の強度範囲は、LSF14で $31.5 \sim 115\text{N/mm}^2$ 、LSF16で $27.0 \sim 112\text{N/mm}^2$ 、LSF20で $19.4 \sim 80.6\text{N/mm}^2$ と幅広い結果となった。試験期間を通じ、圧縮強度発現の傾向は、 $T_{\text{max}} \leq 45^\circ\text{C}$ の試験ケース（以下、CASE-1）と  $T_{\text{max}} \geq 60^\circ\text{C}$ の試験ケース（以下、CASE-2）に大別された。CASE-1 の  $f(t)$  は初期材齢から材齢91日にかけて材齢の対数にほぼ比例する形で単調に増進した。一方、CASE-2 の  $f(t)$  は、おおむね材齢3日までに急激に発現し、その後の増進が非常に小さくなった。また、CASE-1 および CASE-2 それぞれの温度履歴の範囲内では、 $T_{\text{max}}$  が高い試験ケースほど、 $f(t)$  の発現は大きかった。今回は LSF20 の  $f(91)$  を確認していないが、LSF16 と LSF14 において、CASE-2 では  $f(28)$  は  $f(91)$  と同等の値が得られている。そして、材齢91日時点で LSF16 では CASE-1 の結果が CASE-2 の結果を上回ったのに対し、LSF14 では CASE-1 の結果が CASE-2 の結果と同等もしくはそれ以下となり、筆者らがこれまでに確認してきた傾向<sup>3),4)</sup>と同様な結果であった。また  $T_{\text{max}} = 55^\circ\text{C}$  の場合、 $f(t)$  の傾向は、 $T_0=20^\circ\text{C}$  の場合 ( $\Delta$ ) で CASE-2、 $T_0=30^\circ\text{C}$  の場合 ( $\blacktriangle$ ) で CASE-1 にそれぞれ近いものであった。

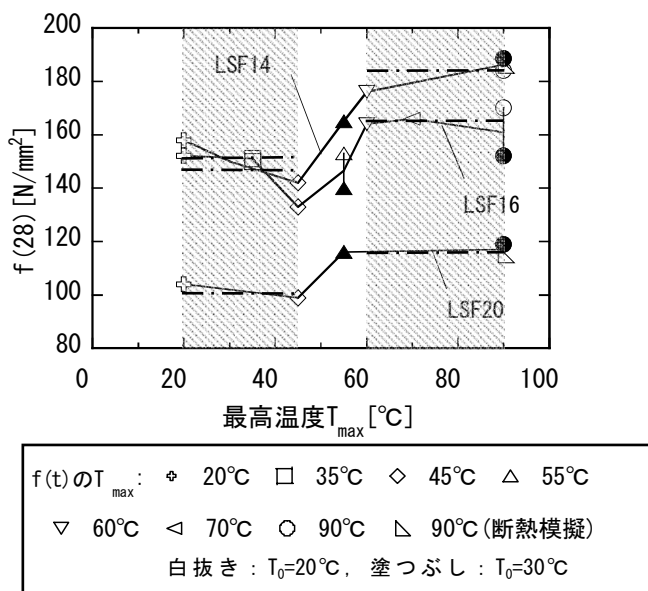


図-4  $T_{\text{max}}$  と  $f(28)$  との関係

$T_{\text{max}}$  と  $f(28)$  との関係を、図-4に示す。図中には、CASE-1 と CASE-2 それぞれの試験ケースでの  $f(28)$  の平均値を一点鎖線で示している。各調査の  $f(28)$  は、それぞれの範囲では同等であったが、CASE-1 に比べ CASE-2 のほうが高かった。また  $T_{\text{max}} = 55^\circ\text{C}$  の結果が CASE-1 と CASE-2 の中間的な値であることから、 $f(28)$  は初期高温履歴の強度発現への影響を評価する有効な指標と考えられる。CASE-1 と CASE-2 の  $f(28)$  の差は、平均値で見ると、LSF14, 16, 20でそれぞれ  $33.7, 17.7, 15.6\text{N/mm}^2$  であり、特に LSF14 の値が大きい結果となったことから、 $F_c150\text{N/mm}^2$  クラス以上の強度領域では圧縮強度に初期高温履歴の及ぼす影響が非常に大きくなると考えられる。また、CASE-1 の  $f(28)$  と標準養生条件の結果である  $F(28)$  の値は、各調査でおおむね一致していた。筆者らは、圧縮強度が  $150\text{N/mm}^2$  にいたる高強度コンクリートで

は、標準養生であっても外部からの水の浸透が少なく、20℃封かん養生の圧縮強度と大差ないことを確認している<sup>4)</sup>。今回の結果はそれと同様であり、LSF20すなわちFc100N/mm<sup>2</sup>クラス以上の強度領域のコンクリートでは、最高温度で45℃程度までの初期高温履歴を受けた場合を含め、こうした傾向が見られるものと考えられる。

#### 4. 強度発現特性の評価

試験結果について、 $f(t)$ とCEB-FIP model code 90<sup>1)</sup>における有効材齢 $t_e$ との関係に着目し、 $T_{max}$ が強度発現に及ぼす影響について考察した。また、JCI研究委員会式の実測値への適用性を検証し、その結果よりFc100～150N/mm<sup>2</sup>クラスの超高強度コンクリートを対象とした圧縮強度予測式の提案を行う。

#### (1) 有効材齢と強度発現との関係

図-5のプロットは、 $t_e$ と $f(t)$ との関係について、実験結果を調査ごとに示したものである。温度履歴による強度発現の差異は、CASE-1とCASE-2それぞれの範囲内で、図-3に示した $f(t)$ と $t$ との関係に比べ小さくなった。そして、CASE-1とCASE-2の強度発現の差異はB/Wの増加に伴い大きくなった。また、 $T_{max}=55℃$ の場合、 $f(t)$ の傾向は、 $T_0=20℃$ の場合(△)でCASE-2、 $T_0=30℃$ の場合(▲)でCASE-1にそれぞれ近いものであった。

以上のことより、圧縮強度と有効材齢との関係は、 $T_{max}=45\sim 60℃$ を境として2つの傾向に大別され、圧縮強度はそれぞれの温度履歴の範囲で、有効材齢によりおおむね統一的に評価できることが確認された。

#### (2) JCI研究委員会式<sup>2)</sup>の適用性の検討

JCI研究委員会式は、MC90式<sup>1)</sup>について、凝結時間

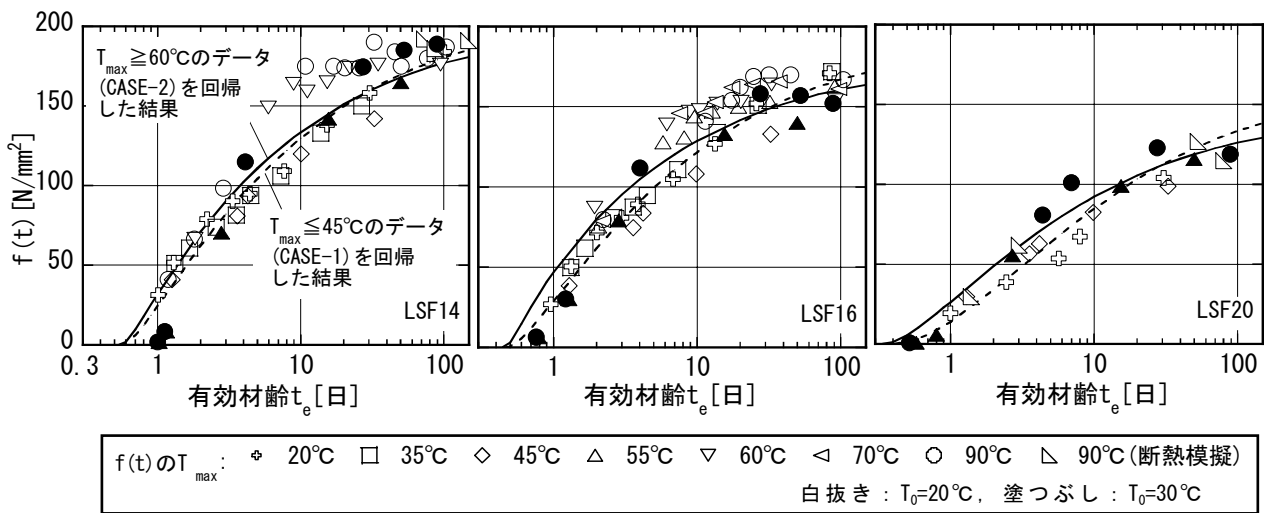


図-5 有効材齢と圧縮強度との関係 (JCI研究委員会式による評価)

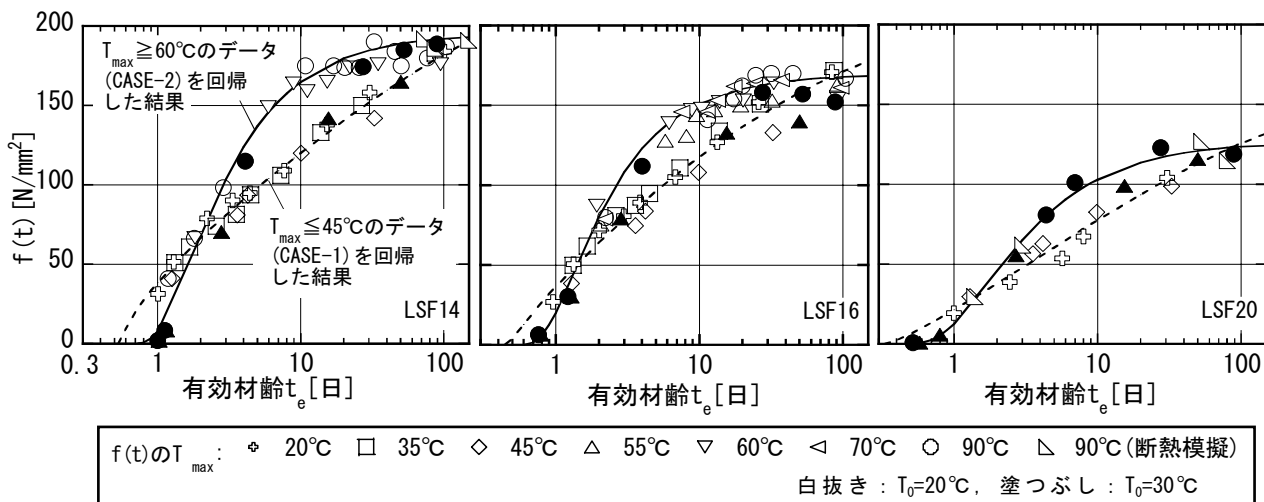


図-6 有効材齢と圧縮強度との関係 (JCI研究委員会式を修正しての評価)

の影響による係数  $t_{e0}$  [日] により、強度発現の起点とみなされる時間を考慮したもので、式 (1) で表される。

$$f(t) = F(28) \cdot \exp \left\{ s_f \left[ 1 - \left( \frac{28 - t_{e0}}{t_e - t_{e0}} \right)^a \right] \right\} \quad (1)$$

ここに、 $s_f$  : セメントの種類の影響による係数、  
 $a = 0.5$

式 (1) は、係数  $s_f$  についてデータ蓄積により一般的な値を設定し、 $t_{e0}$  と組み合わせることにより、材齢28日を越えた長期材齢まで予測が可能と考えられている<sup>2)</sup>。

式 (1) により、CASE-1 と CASE-2 それぞれのデータ範囲を回帰した結果および使用したパラメータについて、表-6および図-5に示す。F(28) には各バッチの実測値の平均値を用い、 $t_{e0}$  には、各調合において20°C条件で確認した凝結始発時間の平均値を用いた。CASE-1 では、 $s_f$  は LSF14 と16が MC90 式<sup>1)</sup>で定める普通・早強系の値である0.25に近く、LSF20が低発熱系の値である0.38に近い結果となり、JCI 研究委員会式による予測がおおむね可能な結果であった。一方、CASE-2 については、 $s_f$  の設定のみでは適当な回帰線が得られず、JCI 研究委員会式による予測が難しい結果となった。

(3) 初期高温履歴の影響を考慮した予測式の提案

a) JCI 研究委員会式の修正検討

JCI 研究委員会式は、有効材齢28日の算定結果が、標準養生材齢28日圧縮強度である F(28) を通過する形である。3章で示したように、CASE-1 では  $f(28)$  と F(28) の値は各調合でおおむね一致しているものの、CASE-2 では両者の値には差があり、 $f(28)$  は F(28) に比べ大きい。

表-6 実験データの回帰結果

調合		LSF14		LSF16		LSF20	
温度履歴の範囲 CASE-1 : $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ CASE-2 : $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$		CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2
$t_{e0}$ [日]		0.53		0.44		0.31	
式(1)により $s_f$ を回帰した結果	F(28) [N/mm <sup>2</sup> ]	158		147		111	
	$s_f$	0.28	0.24	0.27	0.19	0.39	0.27
	$R^2$	0.96	0.87	0.97	0.84	0.89	0.96
式(1)のF(28)に $f(28)$ を適用し、 $s_f$ と $a$ を回帰した結果	$f(28)$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150	184	145	163	101	117
	$s_f$	0.64	0.06	0.45	0.04	0.62	0.08
	$a$	0.28	0.98	0.36	1.02	0.34	0.91
	$R^2$	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.99

このため、CASE-1 に比べ CASE-2 は有効材齢28日付近の適用性が低くなることが考えられる。また、結合材の種類によっては、 $a$  に MC90 式で定める 0.5 以外の値を用いることで適用性が高まるとする報告<sup>7)</sup>が見られる。そこで、CASE-1 と CASE-2 それぞれのデータ範囲を、式 (1) において F(28) に  $f(28)$  を適用して回帰し  $s_f$  と  $a$  を求めた。ただし、 $t_{e0}$  には4章(2)と同じ値を用いた。検討結果を表-6および図-6に示す。得られた回帰曲線は、CASE-1、CASE-2 ともに4章(2)で得られた結果よりも相関が高かった。また、 $s_f$ 、 $a$  とともに、CASE-1 と CASE-2 とで値が大きく異なったが、それぞれの温度履歴の範囲内では、調合による明確な傾向は認められなかった。それぞれの試験ケースの回帰結果を比較すると、 $a$  の値は CASE-1 では 0.5 より小さく、CASE-2 では 0.5 よりも大きくなった。 $s_f$  の値は、CASE-2 の結果が CASE-1 の結果および MC90 式で他の結合材について用いられる範囲である 0.2 ~ 0.38 に比べ非常に小さい値となった。また、CASE-1 と CASE-2 それぞれの回帰曲線は、おおむね  $t_e = 1.65 \sim 1.70$  日付近で交点をもつが、その時点での T(t) は温度上昇過程での 50°C ~ 60°C 付近であり、強度発現傾向が変化する  $T_{max}$  として本研究で着目した範囲と符合するものであった。

以上より、JCI 研究委員会式に  $T_{max}$  を考慮しての修正を施すことにより、特に初期高温履歴の影響の大きい CASE-2 の結果に対しての適用性が高まることが判った。

b) 圧縮強度予測式の提案

$s_f$ 、 $a$ 、 $f(28)$ 、 $t_{e0}$  と、 $T_{max}$  および B/W との関係より、式 (1) を修正しての圧縮強度予測式を提案する。

図-7に、4章(3) a) での検討に用いた CASE-1、CASE-2 それぞれの B/W と、 $f(28)$  および  $t_{e0}$  との関係を示す。これより、B/W と  $f(28)$  および  $t_{e0}$  との関係式として式 (2)、式 (3)、式 (4) を得た。

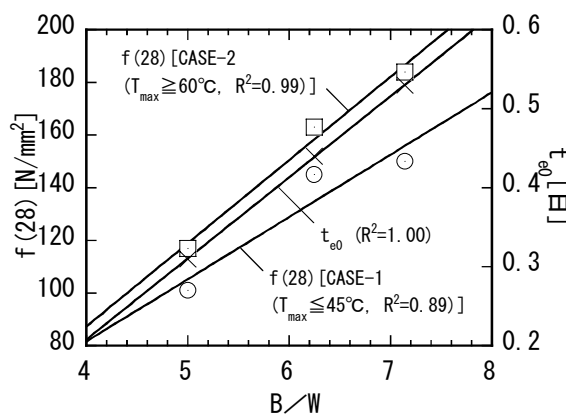


図-7 B/W と  $f(28)$  および  $t_{e0}$  との関係

$$t_{e0} = 0.103 \times B/W - 0.203 \quad (2)$$

CASE-1( $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ ) :

$$f(28) = 23.7 \times B/W - 13.1 \quad (3)$$

CASE-2( $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$ ) :

$$f(28) = 31.6 \times B/W - 39.2 \quad (4)$$

また、 $s_f$  と  $a$  については、 $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$  と  $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$  の場合でそれぞれ、CASE-1 と CASE-2 で得られた値の平均値を適用することとした。

以上の検討より、式 (5) を基本とした圧縮強度予測手法を提案する。

$$f(t) = f(28) \cdot \exp \left\{ s_f \left[ 1 - \left( \frac{28 - t_{e0}}{t_e - t_{e0}} \right)^a \right] \right\} \quad (5)$$

ここで、式 (5) における各係数は表-7より求める。

提案手法は、JCI 研究委員会式を基に、初期高温履歴の影響をより厳密に評価したものであり、 $F(28)$  に代え

て  $f(28)$  を適用する点や、JCI 研究委員会式のなかの各係数を、 $T_{max}$  に関連付ける点に特徴がある。また、係数の一部を  $B/W$  の関数として、 $W/B = 14 \sim 20\%$  すなわち  $F_c 100 \sim 150 \text{N/mm}^2$  の範囲で汎用性を持たせている。

実験結果について、提案手法による推定値と実測値との関係を、 $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$  と  $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$  の場合に分けて図-8に示す。図中には推定値  $\pm 20\%$  の線を破線で示している。実測値は初期材齢から有効材齢で 100 日を越える範囲まで、推定値のおおむね  $\pm 20\%$  内にプロットされた。図-8には  $T_{max} = 55^\circ\text{C}$  の結果もプロットしており、 $T_0 =$

表-7 提案式における各係数の設定方法

		$T_{max}$ の範囲 [ $^\circ\text{C}$ ]	
		$T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$	$T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$
各係数の 設定方法	$s_f$	0.57	0.06
	$a$	0.33	0.97
	$t_{e0}$	式(2)による	
	$f(28)$	式(3)による	式(4)による

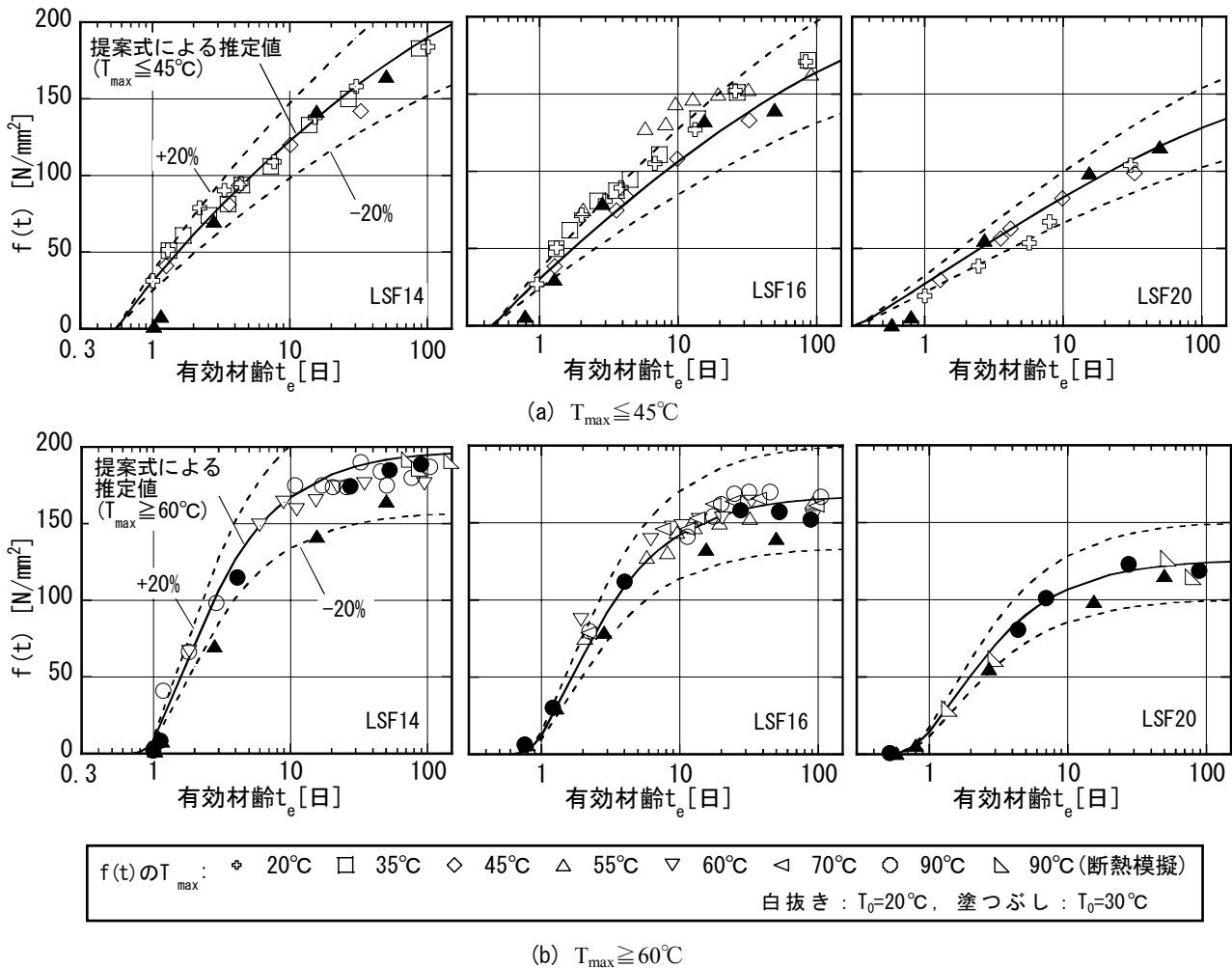


図-8 提案式による推定値と実測値との比較

20°Cの場合(△)で  $T_{\max} \geq 60^{\circ}\text{C}$ 、 $T_0=30^{\circ}\text{C}$ の場合(▲)で  $T_{\max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ の推定値の適用性が高かった。現段階では、 $45^{\circ}\text{C} < T_{\max} < 60^{\circ}\text{C}$ の場合の強度を予測するためには、目的に応じての安全等を見込み、式(5)における係数を使い分ける必要がある。また、提案手法は限られた調合条件の範囲より導かれた結果であり、調合条件や結合材、および混和剤の銘柄や種類が異なる場合などは、各係数について別途試験し確認することが望ましい。

$45^{\circ}\text{C} < T_{\max} < 60^{\circ}\text{C}$ の領域では、例えば  $T_{\max}$ の保持時間<sup>4)</sup>や練上がりからの温度上昇量など、 $T_{\max}$ 以外の温度条件が強度発現特性へ大きく影響していることも考えられる。このような温度条件下の強度発現を精度良く予測するためには、この付近で起こる強度発現特性の変化を、温度条件とシリカフェュームの活性との関係<sup>8)</sup>などさまざまな観点より検討し、そのメカニズムと関連づけることも有効と考える。また、本来ならば、 $T_{\max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ と  $T_{\max} \geq 60^{\circ}\text{C}$ それぞれの曲線は交点までは同一であるはずである。このことは、凝結時間と  $T_0$ や  $\text{SP/B}$ の関係などのデータを蓄積し式(5)を修正することで、予測式としての精度向上が期待できると考えられる。本提案手法は、こうした観点も加味したより多くのデータや知見の蓄積により、一般性が高まると考えられる。

## 5. まとめ

本研究において得た知見を以下にまとめる。

- ①強度発現特性は、初期高温履歴時における最高温度  $T_{\max}$ で  $45^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ を境とし、大きく変化する。
- ②圧縮強度と有効材齢との関係は、 $T_{\max}$ で  $45 \sim 60^{\circ}\text{C}$ を境として2つの傾向に大別され、圧縮強度はそれぞれの温度履歴の範囲で、有効材齢によりおおむね統一的に評価できる。
- ③ JCI 研究委員会式の各係数を、 $T_{\max}$ に関連付けることにより、初期高温履歴を受ける圧縮強度をより精度良く、材齢91日程度の範囲まで予測できる。

謝辞：本研究を行うに当たり、住友大阪セメント(株)の鈴木康範氏、長岡誠一氏、小出貴夫氏、嶋毅氏に貴重なアドバイスを頂きました。また、サンプル提供および実機試験でご協力頂きました、東京エスオーシー(株)の金塚美喜男氏、伊藤司氏をはじめとする関係諸氏、サンプルを提供頂きました日本シーカ(株)の関係諸氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Comite Euro-international du Beton : CEB-FIP MODEL
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，pp.93-95，1996.11
- 3) 河上浩司，松田 拓，西本好克，小出貴夫：150N/mm<sup>2</sup>級高強度コンクリートの強度発現に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.1235-1240，2006.7
- 4) 河上浩司・西本好克・榊田佳寛：低熱ポルトランドクリートの強度発現に与える初期温度履歴の影響，日本建築学会構造系論文集，No.601,pp.15-21,2006.3
- 5) 嶋 毅・松田 拓・西本好克・小出貴夫：水和発熱モデルの低水セメント比コンクリート模擬柱への適用性に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.447-453，2006
- 6) 松田 拓・嶋 毅・河上浩司・西本好克：初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの自己収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1247-1252，2006.7
- 7) 橋田 浩・山崎庸行：初期高温履歴を受ける高強度コンクリートの自己収縮応力とその算定に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.771-772，1998.9
- 8) 菅俣 匠・杉山知己・梅沢健一・岡沢 智：セメント・シリカフェューム系結合材の水和反応と強度発現の関係に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.1287-1292，2004.7