

# 論文 初期高温履歴を受ける高強度コンクリートの強度推定に関する研究

田中敏嗣\*1・竹内 良\*2・石田 征男\*2・下山 善秀\*3

**要旨：**養生温度の異なる条件で得られた圧縮強度を、断熱温度上昇の推定に用いられる指数式  $\sigma = \sigma_{\infty}(1 - \exp(-\alpha t))$  によって回帰し、係数  $\sigma_{\infty}$  および  $\alpha$  と養生温度の関係を求めることにより強度発現の温度依存性を評価し、初期高温履歴を受けるコンクリートの強度発現性の推定法について検討した。その結果、本研究で検討した推定法による推定結果は、実測値の強度発現傾向を比較的良好に表現した。また、マチュリティー則の場合より初期の高温履歴を受けた場合の強度発現性を精度よく推定できることが認められた。

**キーワード：**高強度コンクリート、温度履歴、温度依存性、低熱ポルトランドセメント、普通セメント、圧縮強度

## 1. はじめに

高強度コンクリートや高流動コンクリートは単位結合材量が多いため、部材の内部は初期に水和熱による高温履歴を受け、その後の強度発現性に大きく影響することが一般に知られている。したがって、このような条件での強度発現性を精度よく推定することは構造体コンクリートの品質管理の上で重要となる。

強度発現性に及ぼす温度の影響の評価法として、積算温度（マチュリティー）則が一般に知られているが、初期に高温履歴を受ける場合には必ずしも適切に評価できないことが示されている<sup>1)2)</sup>。このような背景から従来のマチュリティー則によらない強度発現モデルを用い、初期の温度履歴を考慮した強度発現に関する研究が行われている<sup>3)4)5)</sup>。

本研究は、この手法の一つとして、養生温度別に得られた圧縮強度を断熱温度上昇の回帰に一般に用いられている指数式により回帰し、回帰係数と養生温度の関係を求めることにより強度発現の温度依存性を評価し、初期高温履歴を受けるコンクリートの強度推定法について検討したものである。

## 2. 解析方法

図-1に実験および解析のフローを示す。以下にその概要を説明する。

### 2.1 圧縮強度の測定および温度依存性の評価

養生温度 ( $\theta$ ) の異なる条件において、圧縮強度を測定し、結果を曲線回帰する。回帰曲線には、終局強度の推定が可能な断熱温度上昇の回帰で一般に使用されている指数式を用いた。

$$\sigma = \sigma_{\infty}(1 - \exp(-\alpha t)) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_{\infty}$ ：終局強度、 $\alpha$ ：強度発現速度に関する定数

回帰係数の  $\sigma_{\infty}$  および  $\alpha$  と養生温度 ( $\theta$ ) の関係を求めることにより強度発現の温度依存性を評価した。本研究では、20℃養生で得られた  $\sigma_{\infty,20^{\circ}\text{C}}$  および  $\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$  を基準として係数化し、それらを

$$\text{強度補正係数} : k_{\sigma_{\infty}} = \sigma_{\infty, \theta} / \sigma_{\infty, 20^{\circ}\text{C}} \quad (2)$$

$$\text{速度補正係数} : k_{\alpha} = \alpha_{\theta} / \alpha_{20^{\circ}\text{C}} \quad (3)$$

とした。

### 2.2 構造体コンクリートに関する試験

計算条件（諸係数）の決定のためには、次のデータが必要となる。

①対象とする構造体コンクリートの履歴温度

\*1 日本セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 副主任研究員 工修 (正会員)

\*2 日本セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 研究員 工修 (正会員)

\*3 日本セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 主席研究員 工博 (正会員)

②構造体に用いたコンクリートの 20℃養生条件での強度試験結果を式(1)で帰した時の  $\sigma_{\infty,20^{\circ}\text{C}}$  および  $\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$

### 2.3 計算条件の設定

推定計算には、①セメント水比、②計算材齢および③上記構造体コンクリートに関するデータが必要である。

セメント(比重:3.16, NC と略記)および低熱ポルトランドセメント (C<sub>2</sub>S=60.9%, 比重:3.23, プレーン値 3090 cm<sup>2</sup>/g, LC と略記)である。なお、低熱ポルトランドセメントの品質は、JIS R 5210「ポルトランドセメント」の規格を満足するものである。

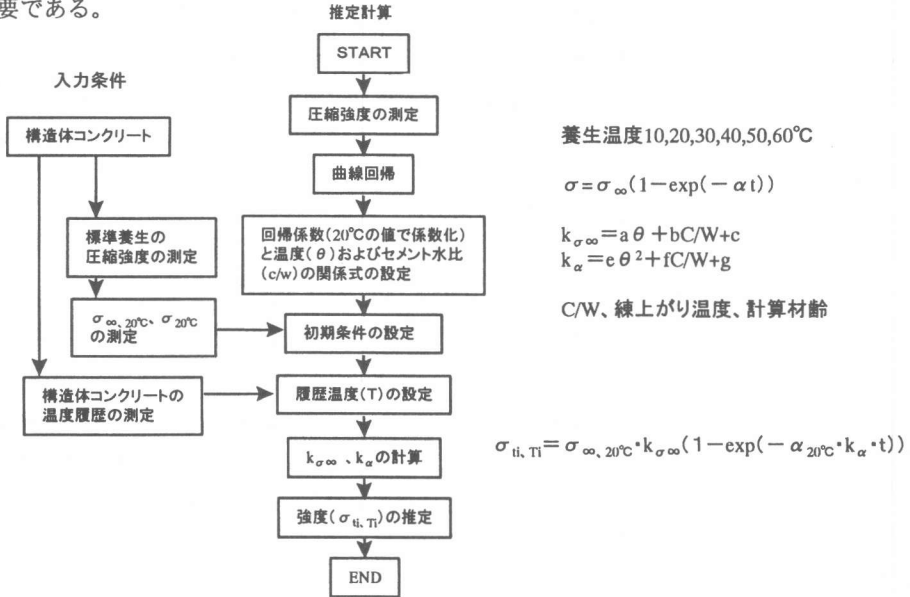


図-1 強度推定に関する実験および解析のフロー

### 2.4 コンクリート強度の推定計算方法

ある時間  $t_i$  日の履歴温度  $T_i$ ℃における強度補正係数 ( $k_{\sigma_{\infty}}$ ) および速度補正係数 ( $k_{\alpha}$ ) を求め、強度  $\sigma_{t_i, T_i}$  を次式にて計算する。

$$\sigma_{t_i, T_i} = \sigma_{\infty, 20^{\circ}\text{C}} \cdot k_{\sigma_{\infty}} (1 - \exp(-\alpha_{20^{\circ}\text{C}} \cdot k_{\alpha} \cdot t)) \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_{t_i, T_i}$  : 時間  $t_i$  の履歴温度  $T_i$ ℃における強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{\infty, 20^{\circ}\text{C}}$  : 20℃標準養生での終局強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$  : 20℃標準養生での強度発現速度に関する定数、 $k_{\sigma_{\infty}}$  : 強度補正係数、 $k_{\alpha}$  : 速度補正係数、 $t$ : 材齢(日)

## 3. 実験概要

### 3.1 使用材料

#### (1)セメント

実験に用いたセメントは、普通ポルトランド

#### (2)骨材

細骨材は、北九州市小倉南区産砕砂(表乾比重 2.66)を、粗骨材は北九州市門司区鹿喰産砕石(表乾比重 2.84)を用いた。

#### (3)混和剤

混和剤として、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。また、空気量を調整するため、粉末の消泡剤を用いた。

### 3.2 養生温度が強度発現に及ぼす影響実験

#### (1)コンクリート配合

コンクリート配合は、単位水量を 180kg/m<sup>3</sup> と固定とし、単位セメント量を 300, 400 および 600kg/m<sup>3</sup> の3水準とした。したがって、水セメント比は、60, 45 および 30%となる。スランブは 15~18cm となるよう混和剤添加量で調整し、空気量は消泡剤を用い 2.0%以下に調整した。

(2)養生および強度試験方法

コンクリートの練上り温度は20℃とした。材齢1日で脱型し、水温を10, 20, 30, 40, 50および60℃に設定した養生水槽にて水中養生を行った。材齢1, 3, 7, 28, 56および91日において圧縮強度試験を行った。

3.3 簡易断熱養生実験

本実験は、3.2 養生温度が強度発現に及ぼす影響実験とは別途実施した。

(1)コンクリートの配合

コンクリートの配合は、単位水量を180kg/m<sup>3</sup>、単位セメント量を300及び600kg/m<sup>3</sup>とし、スランプが15~18cmとなるよう混和剤添加率により調整した。また、空気量は2%以下となるよう消泡剤により調整した。練上がり温度は20℃を目標とした。

(2)養生および強度試験方法

Φ10×20cmのプラスチック型枠に成形後、ビニール袋で型枠ごと密封した供試体を、20±2℃に制御された恒温室内に設置した発泡スチロール(厚さ20cm, 内寸48×48×45cm)製の簡易断熱養生容器内で2段重ねとして養生した。容器の上段および下段の中心部の供試体に熱電対を埋め込み、コンクリート温度を測定した。

簡易断熱養生の場合、材齢14日で槽から全供試体を取り出し、脱型後20℃水中養生を行った。強度試験材齢は、1, 3, 7, 14, 28, 56, 91日とした。また、比較のため材齢14日まで20℃封緘養生を行い、その後20℃水中養生を実施した。強度試験材齢は、3, 7, 28, 56, 91日とした。

4. 結果および考察

4.1 圧縮強度の回帰計算結果

表-1に圧縮強度の回帰計算結果を示す。相関係数は、0.96~0.99程度と良い相関を示し、式(1)の適合性が確認された。

図-2および図-3に、それぞれ養生温度と20℃の値で係数化した $k_{\infty}$ および $k_{\alpha}$ の関係を示す。 $k_{\alpha}$ は、低熱ポルトランドセメントの場合、温度とともに二次関数的に増加した。普通セメントの場合は暫定的に二次関数で近似することとした。

また、 $k_{\infty}$ は普通セメントの場合、温度とほぼ比例関係にあることが認められた。低熱ポルトランドセメントの場合は、10℃においては材齢91日では十分に強度が発現していないため終局強度を過少に推定しており、見かけ上二次関数が適していると思われるが、ここでは一次関数で近似することとした。

以上に基づき、表-1のデータを用いて重回帰分析を行った。結果は有意となり、次の強度補

表1 圧縮強度の回帰計算結果

C (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	C/W	養生 温度 (°C)	NC						LC					
				回帰係数			20℃の値を基準			回帰係数			20℃の値を基準		
				$\sigma_{\infty}$	$\alpha$	R	$\sigma_{\infty}$	$\alpha$	R	$\sigma_{\infty}$	$\alpha$	R	$\sigma_{\infty}$	$\alpha$	
300	60	1.7	10	44.9	0.161	0.974	1.054	0.729	45.0	0.03	0.991	0.902	0.667		
			20	42.6	0.221	0.985	1.000	1.000	49.9	0.045	0.996	1.000	1.000		
			30	42.9	0.325	0.982	1.007	1.471	53.6	0.068	0.997	1.074	1.511		
			40	41.1	0.364	0.984	0.965	1.647	47.7	0.101	0.984	0.956	2.244		
			50	35.3	0.506	0.980	0.821	2.091	37.2	0.178	0.989	0.894	3.490		
			60	34.3	0.545	0.988	0.798	2.252	34.5	0.25	0.995	0.829	4.902		
400	45	2.2	10	61.5	0.220	0.973	1.013	0.751	63.9	0.048	0.982	0.915	0.727		
			20	60.7	0.293	0.982	1.000	1.000	69.8	0.066	0.987	1.000	1.000		
			30	60.1	0.360	0.973	0.990	1.229	71.2	0.093	0.994	1.020	1.409		
			40	59.1	0.408	0.981	0.974	1.392	70.0	0.139	0.998	1.003	2.106		
			50	54.1	0.430	0.988	0.893	1.463	60.3	0.192	0.991	0.916	3.491		
			60	51.9	0.489	0.979	0.856	1.663	57.2	0.216	0.985	0.869	3.927		
600	30	3.3	10	82.6	0.324	0.976	1.055	0.788	83.2	0.097	0.970	0.954	0.802		
			20	78.3	0.411	0.964	1.000	1.000	87.2	0.121	0.976	1.000	1.000		
			30	79.2	0.433	0.968	1.011	1.054	92.4	0.159	0.982	1.060	1.314		
			40	80.7	0.483	0.967	1.031	1.175	97.0	0.198	0.993	1.112	1.636		
			50	84.7	0.459	0.980	1.042	1.080	95.3	0.318	0.996	1.024	2.304		
			60	84.2	0.473	0.969	1.036	1.113	93.1	0.436	0.999	1.000	3.159		

正係数 ( $k_{\sigma_{\infty}}$ ) および速度補正係数 ( $k_{\alpha}$ ) が得られた。

NCの場合

$$k_{\sigma_{\infty}} = -0.003 \theta + 0.055C/W + 0.939 \quad (5)$$

(R=0.796)

$$k_{\alpha} = 0.00024 \theta^2 - 0.285C/W + 1.589 \quad (6)$$

(R=0.847)

LCの場合

$$k_{\sigma_{\infty}} = -0.001 \theta + 0.052C/W + 0.881 \quad (7)$$

(R=0.534)

$$k_{\alpha} = 0.00095 \theta^2 - 0.362C/W + 1.467 \quad (8)$$

(R=0.969)

ここに、 $\theta$  : 温度(°C), C/W:セメント水比

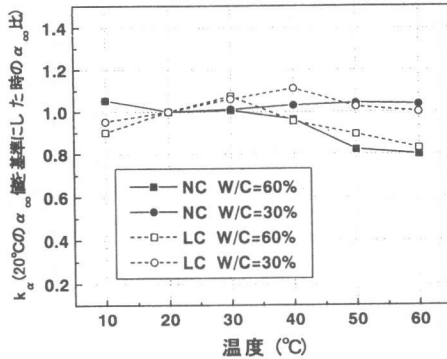


図-2 温度と  $k_{\sigma_{\infty}}$  の関係

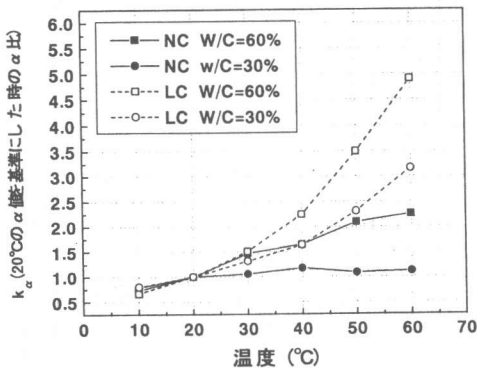


図-3 温度と  $k_{\alpha}$  の関係

4.2 簡易断熱養生試験結果

(1)温度履歴

図-4 に下段の供試体温度の経時変化を示す。上段と下段の最高温度時の温度差は、普通セメ

ント使用のセメント量  $600\text{kg}/\text{m}^3$  の場合で最大で約  $2^{\circ}\text{C}$  であり、全供試体ほぼ均一な温度履歴を受けたものと推察される。

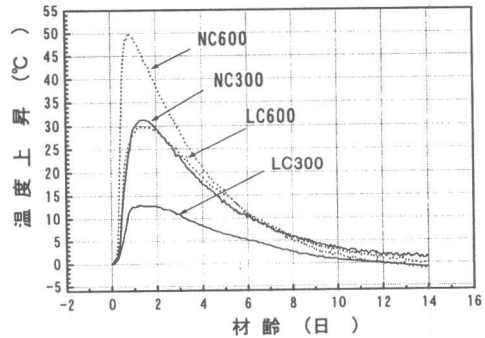


図-4 簡易断熱養生時の供試体の温度変化

(2)標準養生による強度試験結果

表-2 に標準養生した場合の圧縮強度試験結果を用いて式 (1) で回帰した結果を示す。これらの値を式 (2) に代入し、推定計算に用いた。

表-2 標準養生強度の回帰結果

セメント	水セメント比 (%)	$\sigma_{\infty}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\alpha$	R
LC	60	44.5	0.043	0.999
	30	82.0	0.144	0.980
NC	60	38.2	0.219	0.975
	30	79.4	0.425	0.961

4.3 解析結果

(1)強度推定結果

図-5 に、強度推定結果を水セメント比 60% および 30% の場合について示す。推定にあたり、温度履歴が強度発現に及ぼす影響の計算への取り込みについては、これまでの研究結果を参照し、次のようにした。

- ①計算条件 1: 終局強度は履歴した最高温度に大きく影響されることが示されていることから<sup>1)2)</sup>、履歴した最高温度において  $\sigma_{\infty}$  の推定値を固定する。
- ②計算条件 2: 強度発現速度に及ぼす温度履歴の影響を調べるため、最高温度において  $\sigma_{\infty}$  に加えて  $\alpha$  の推定値を固定する。

水セメント比 60% の場合、セメントの種類によらず、計算条件 1 の場合の推定値のほうが、実測値の傾向をよりよく表現している。

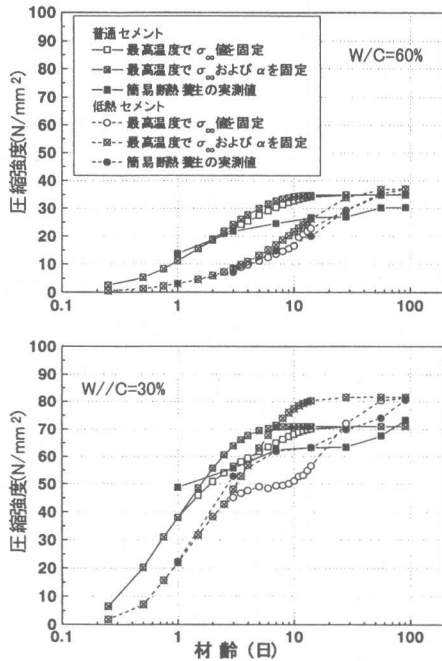


図-5 推定値と実測値の比較

水セメント比 30% の場合においては、普通セメントを用いた場合、計算条件 1 の場合の推定値のほうが、実測値の傾向をよりよく表現している。一方、低熱ポルトランドセメントの場合、いずれの計算条件においても材齢 3 日～14 日にかけて推定値と実測値の乖離が認められる。しかしながら、計算条件 1 の場合の方が実測の強度発現傾向により近いことが認められる。

以上より、終局強度は履歴した最高温度によりほぼ決定される計算モデルが妥当と考えられた。また、強度発現速度については、温度の変化にほぼ対応して変化する計算モデルが妥当と考えられたが、この点についてはさらに検討する必要があると思われる。

(2) 推定強度/20℃養生強度比の比較

図-6 から図-9 に、各種推定法による推定強度と 20℃養生強度の比の経時変化を示す。ここで、マチュリティー則による推定とは、簡易断熱養

生実験で 20℃標準養生した場合の強度結果より、次式に示す積算温度と強度の関係式を求め、温度履歴を受けた場合の強度を推定したものである。各条件で直線回帰により求めた係数を表-3 に示す。

$$\sigma = a \log M + b \quad (9)$$

ここで、M: 積算温度 (日・℃, 基準温度-10℃), a, b: 係数

表-3 積算温度式における係数

セメント	水セメント比 (%)	a	b	R
LC	60	28.3	-51.62	0.988
	30	40.44	-44.86	0.999
NC	60	14.07	-5.86	0.999
	30	17.11	26.80	0.988

マチュリティー則で推定した場合、若材齢時には比較的精度よく推定できるが、温度履歴を受けた場合の長期強度発現性の低下傾向は十分に推定されていない。

一方、本推定法での強度比は、いずれの配合条件においても実測値の強度比より若干大きく推定するが、マチュリティー則で求めた場合より実測値の強度比に近いことが認められる。すなわち、本推定法に示すような温度依存性の評価によっても、任意の温度履歴を有するコンクリート強度を、マチュリティー則の場合より精度よく推定できることを示唆しているものと考えられる。なお、今後の課題として、既往の研究で示されている方法<sup>3)4)5)</sup>と比較検討し本推定法の特徴を明らかにすることが挙げられる。

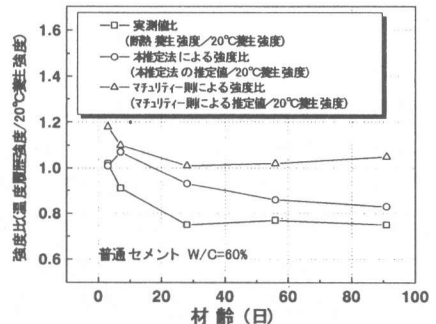


図-6 推定値と 20℃養生強度の比

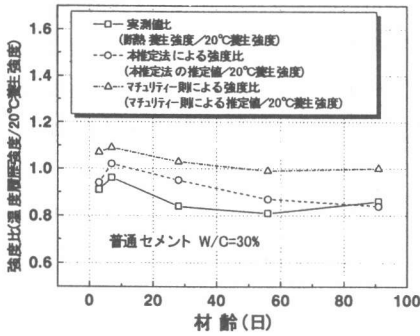


図-7 推定値と20℃養生強度の比

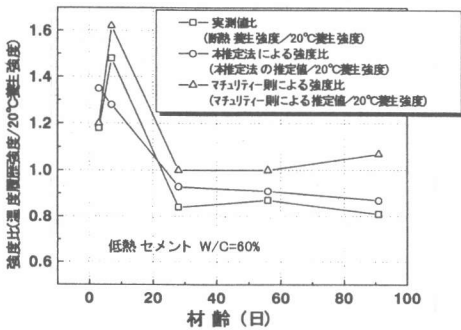


図-8 推定値と20℃養生強度の比

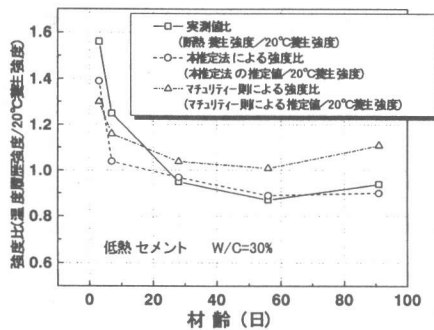


図-9 推定値と20℃養生強度の比

## 5. まとめ

本研究は、指数式  $\sigma = \sigma_{\infty}(1 - \exp(-\alpha t))$  を用い、強度発現の温度依存性を評価し、初期高温履歴を受けるコンクリートの強度発現性の推定法について検討したものである。本研究の範囲内で得られた結論を要約すると次のようになる。

- (1) 強度発現性の温度依存性を、終局強度推定値  $\sigma_{\infty}$  と温度を一次関係、強度発現速度に関する係数  $\alpha$  と温度を二次関係により評価した。

このような方法で強度発現性の温度依存性を考慮した強度推定結果は、実測値の強度発現傾向をある程度表現できた。

- (2) 初期の高温履歴が強度発現性に及ぼす影響の計算モデルとしては、終局強度は履歴した最高温度で決定される方法が適していると考えられた。また、強度発現速度についてはコンクリートの温度変化に対応して変化する方法が妥当と考えられた。
- (3) 本研究で検討した推定法は、マチュリティー則に基づいた推定法より、初期の高温履歴を受けた場合の強度発現性を精度よく推定できる。
- (4) 今後さらに種々の条件での強度データを蓄積し、強度発現速度の温度履歴依存性等について検討することにより、任意の配合条件において初期高温履歴を受けるコンクリートの強度発現性が推定可能になると考えられる。

## 参考文献

- 1) 田中敏嗣・丸岡正知・竹内良・富田六郎: ビーライトセメントを用いた高強度コンクリートの強度発現に及ぼす温度履歴の影響, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No.1, pp237-242, 1996
- 2) 田中敏嗣・竹内良・丸岡正知・富田六郎: 初期材齢に高温履歴を受けた高強度コンクリートの強度発現性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.193-198, 1997
- 3) Rajesh C. Tank and Nicholas J. Carino: Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete, ACI Materials Journal/Jan.-Feb., 1991
- 4) 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, pp66-74, No.527, 1991
- 5) 高範勲・近藤吾郎・森田司郎: 水和熱による初期高温履歴を考慮したコンクリートの強度発現則に関する研究, セメント・コンクリート論文集 No.46, pp.820-825, 1992