

超速硬セメントコンクリートの緊急工事への応用に関する研究

STUDIES ON APPLICATION OF REGULATED SET CEMENT CONCRETE TO EMERGENCY WORKS

中嶋清実*・吉田弥智**

By Kiyomi NAKASHIMA and Hirotomo YOSHIDA

The thing most demanded in emergency works is to accurately grasp the strength at early age after concrete is placed. The strength of regulated set cement concrete is affected by the cement content, temperature of placing concrete, atmospheric temperature, the quantity of concrete to be placed and so on, accordingly so far, it has been difficult to accurately estimate the strength at early age.

Therefore in this study, the method of accurately estimating the strength at early age of the regulated set cement concrete for emergency works was devised. Besides, it was clarified by using a statistical method what extent of reliability this estimating method has.

Keywords: emergency work, regulated set cement concrete, early age, estimating method, cumulative temperature

1. ま え が き

超速硬セメントが幅広く知られ、これに対する認識が深まるにつれて、種々の分野で用いられるようになったが、最近では緊急工事に多く使用されている。

特に、近年の交通量の著しい増加は道路の損耗を早め、補修頻度の増加をきたし、しかも道路の閉鎖時間を長くとれない場合が多く、超速硬セメントを緊急舗装工事に用いることが一般化してきた。その他の用途としては、橋梁の伸縮装置、鉄道踏切等の緊急を要する箇所の補修のほかに、工期を短縮して操業の休止期間をできるだけ少なくする目的で、工場内の床版、機械基礎等に使用される場合も多い。

これまでに超速硬セメントの緊急工事への応用を主体的に行われた主な研究を挙げると以下のとおりである。

低温度下で使用する場合には減水剤の利用が特に短期の強度発現に有効であるという鎌尾¹⁾らの研究、超速硬コンクリートを緊急舗装工事に用いる場合、早期強度については低温度時から高温時まで、3~5時間で十分な実

用強度が得られること、また温度応力については、床版の温度はかなり上昇するが、床版内部の各部の温度差の割合は小さく、特に問題はないとする内川²⁾らの研究、超速硬コンクリートは鋼繊維を適量添加することによって、特に早期の曲げ強度の増進が顕著であるという内川³⁾らの研究がある。これらの研究は緊急工事に超速硬セメントを用いる場合大変有用となるものである。しかしながら、緊急工事において最も要求されることは、コンクリート打込後、若材令での強度を正確に把握することである。

これまで、超速硬コンクリートはセメント量、打込温度、外気温、および打込量等が影響し、若材令での強度を正確に推定するのが困難であった。

したがって、本研究は緊急工事用超速硬コンクリートの若材令での強度を正確に推定する方法を考案しようとするものである。

緊急工事では、短期間（たとえば、舗装工事においては3~4時間材令で圧縮強度250 kgf/cm²程度）を得るために富配合とし、高性能減水剤を用いるのが一般的である。それゆえ、本研究で取り扱うコンクリートはすべて高性能減水剤を用いたコンクリートを対象としている。

研究は以下の順序で行った。

* 正会員 工博 豊田工業高等専門学校助教授 土木工学科 (〒471 豊田市栄生町2-1)

** 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市中区和区御器所町)

研究の第1として、積算温度と強度の関係を現場コンクリートに適用することにより、その実用性を明らかにしようとするものである。適用した現場コンクリートとは橋梁の床版打替工事の際に床版の近くで3種類の方法で養生した円柱供試体（ $\phi 10 \times 20$ cm）である。

研究の第2は断熱温度上昇曲線の推定を行うことである。部材断面中の温度上昇を予測するには、まず最初に断熱温度上昇曲線の推定を行わなければならない。ここでは大塩ら⁴⁾の行った超速硬コンクリートの発熱特性に関する研究の実験データをもとに著者らが解析を行った。そして実用化するためにその諸係数を図表化した。

研究の第3はかなりの正確さで推定できるといわれているシュミット（Schmidt）の方法⁵⁾で、コンクリート打込後からの温度推定を行うことである。研究の第2で求めた断熱温度上昇をもとにして、これを外界に放熱する冷却降下を加味して計算する。ここで考えているモデルは床版の補修工事の増厚である。

研究の第4は基準積算温度（セメント量 400 kg/m^3 、打込温度 20°C 、打込高さ 10 cm の場合）を用いて任意材令での強度を求められるようにすることである。シュミットの方法でコンクリート内部の温度推定曲線が求めたならばこれより積算温度を求め、研究の第1で求めた積算温度と強度の関係を重ね合わせるにより任意材令での強度が推定できる。

研究の第5はセメント量、打込温度、打込量が任意の場合にも強度を求められるようにすることである。ここでは基準積算温度に補正係数を乗ずる方法を考案した。

研究の第6は、モデルが少し異なる場合の強度に及ぼす影響を明らかにすることである。本研究では道路橋の床版の補修工事を想定して、4面断熱状態の2面放熱のモデルで強度推定を行った。さらに、この2面放熱の場合と、比較的大型部材を想定した5面断熱の1面放熱のモデルでは強度にどのような差が生ずるかを比較検討した。

研究の第7は本研究で提案した強度推定方法がどの程度の信頼性をもっているかを、統計的方法を用いて明らかにすることである。また、超速硬コンクリートの強度はセメント量、温度（打込温度、外気温）、打込量等によって影響を受けるが、そのうちでも温度による影響は著しく大きい。したがって、温度の変化が強度にどのように影響するかを強度推定方法を用いて明らかにした。

2. 現場コンクリートの積算温度と強度の式の適用

(1) 現場コンクリートの諸条件と積算温度の算出

昭和58年12月に緊急舗装工事としてO社が尾張大橋床版打替工事を行った。その際、O社は現場の床版の近

くに $\phi 10 \times 20$ cm の供試体を置き、下記の3種類の養生を行った。

- ① 外気養生： $\phi 10 \times 20$ cm の供試体を外気にさらしたまま養生したもの。
- ② 保温養生： $\phi 10 \times 20$ cm の供試体をグラスウールにつめたダンボール箱内で養生したもの。
- ③ 加熱養生： $\phi 10 \times 20$ cm の供試体を床版上の保温マット内に置き床版と同様に熱風養生したもの。

また、同様にそれぞれの供試体の中心に熱電対を設置し、供試体内部の温度履歴を自動温度記録計にて計測した。

図-1が現場での各種養生方法による供試体の中心部温度と時間材令強度を示したものである。

このときのコンクリートの配合は、スランプ 12 ± 2.5 cm、 $W/C=37\%$ 、 $s/a=38\%$ 、 $C=400 \text{ kg/m}^3$ 、 $S=707 \text{ kg/m}^3$ 、 $G=1177 \text{ kg/m}^3$ 、減水剤：MT-150（ $C \times 2.0\%$ ）、遅延剤： $C \times 0.1\%$ であった。

図-1よりプランメーターで面積を測り、 -10°C を基準として積算温度を算出した。それぞれの積算温度を示すと、3h 外気養生： $53^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 、3h 保温養生： $80^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 、5h 外気養生： $91^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 、5h 加熱養生： $100^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 、5h 保温養生： $145^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ となる。

(2) 積算温度と強度の式へのあてはめ

積算温度と圧縮強度のグラフ上にプロットすると図-

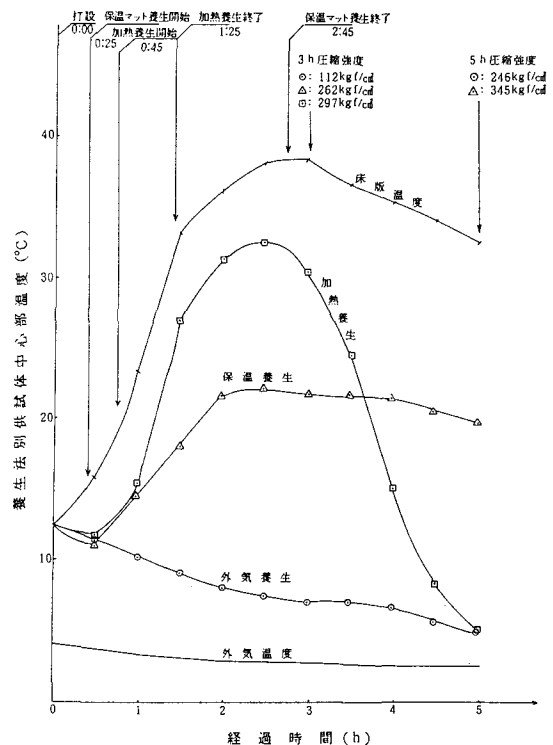


図-1 各種養生法による供試体中心部温度と時間材令強度

2 になる。実験室で求めた著者の配合 (C=400 kg/m³, W/C=34%) と現場コンクリートの配合 (C=400 kg/m³, W/C=37%) とは多少異なるが、それでも積算温度と強度のグラフが現場強度を推定するのに、かなり効果的であることがわかる。

3. 断熱温度上昇曲線の推定方法

コンクリート打込後、部材断面中の温度上昇を予測するには、まず最初に断熱温度上昇曲線の推定を行わなければならない。断熱温度上昇曲線の推定には、大塩ら⁴⁾の行った断熱温度上昇試験の実測値を用いた。解析方法は大塩らの方法と同じ方法で解析を行った。大塩らの研究によると、超速硬コンクリートの断熱温度上昇曲線は、従来提唱されている1つの指数関数式で表現するのは困難であると考え、図-3に示すごとく、それぞれ次式で示される指数関数式 [(1) および (3)], およびこれらを変曲点 A, B によって接続する直線式 (2) で回帰を行った方がよいとしている。

$$t_0 \leq t < t_1$$

$$T = K_1(1 - e^{-B_1(t-t_0)}) \dots \dots \dots (1)$$

$$t_1 \leq t < t_2$$

$$T = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} (t - t_1) + T_1 \dots \dots \dots (2)$$

$$t \geq t_2$$

$$T = K_2(1 - e^{-B_2(t-t_2)}) + T_2 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、T : 上昇温度 (°C)

- t₀ : 発熱開始の遅れ時間 (h)
- t₁, t₂ : 変曲点 A, B の生ずる時間 (h)
- T₁, T₂ : 変曲点 A, B の生ずる温度 (°C)
- K₁, K₂ : 指数式 (1), (3) の収束値 (°C)
- B₁, B₂ : 指数式 (1), (3) の指数部
- T_{max} : 断熱温度上昇終局値 (°C = T₂ + K₂)⁴⁾

回帰は、最小二乗法により、次の手順で行った。すなわち、式 (1) および式 (3) は式 (4) を最小ならしめる条件として、

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [T_i - K(1 - e^{-Bt_i})]^2 \dots \dots \dots (4)$$

T₁, T₂ は図-3に示すとおり、指数関数式の終点および始点にあたる温度であるので、K および B を求めるためには必要がない。したがって式 (4) 中には入っていない。また、式 (1) および式 (2) の (t-t₀), (t-t₂) を t_i と置いた。

$\frac{\partial S}{\partial K} = 0$ として K を求めると、式 (5) となる。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n T_i(1 - e^{-Bt_i})}{\sum_{i=1}^n (1 - e^{-Bt_i})^2} \dots \dots \dots (5)$$

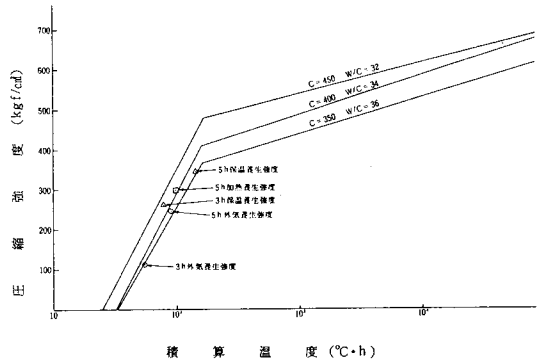


図-2 現場コンクリートの積算温度と圧縮強度

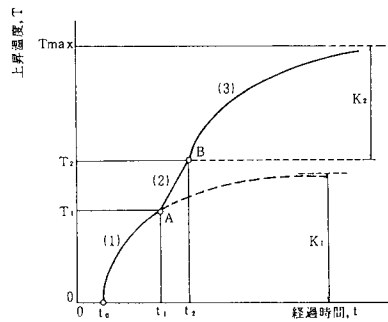


図-3 断熱温度上昇の回帰式の模式図⁴⁾

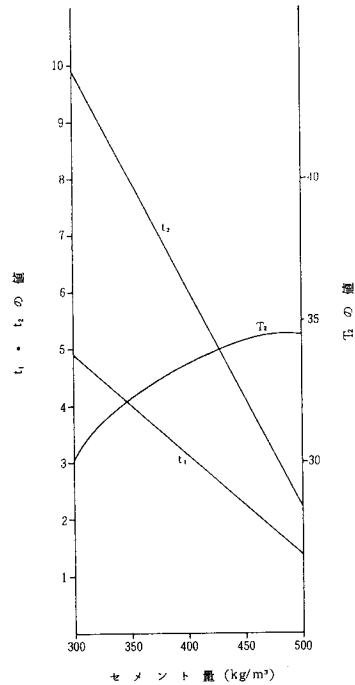


図-4 t₁, t₂ および T₂ の値

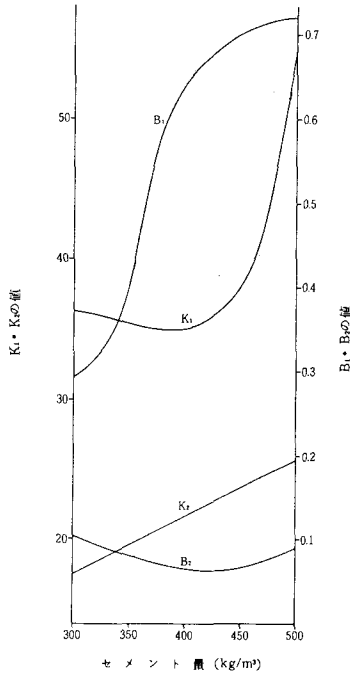


図-5 K_1, K_2 および B_1, B_2 の値

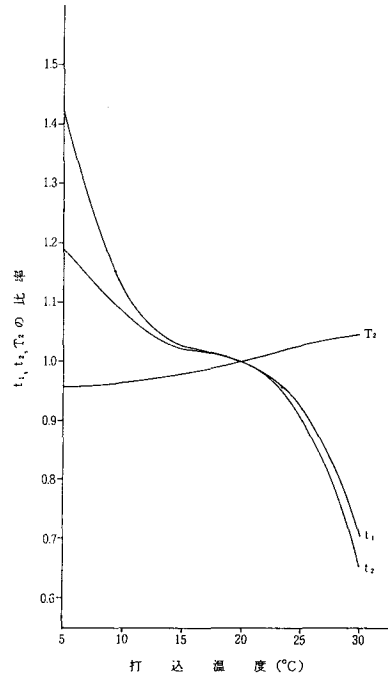


図-6 t_1, t_2, T_2 の補正

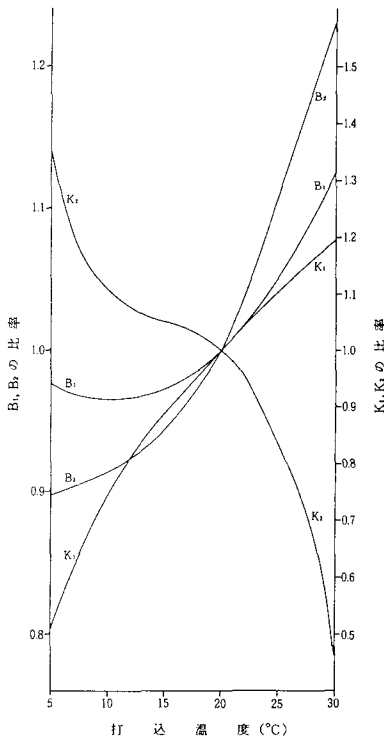


図-7 K_1, K_2 および B_1, B_2 の補正

を求めた^{4),6)}。なお、このときのデータ数 n は 16 個であった。

$$\sum_{i=1}^n (1 - e^{-Bt_i})^2 \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot t_i e^{-Bt_i} - \sum_{i=1}^n T_i (1 - e^{-Bt_i}) \cdot \sum_{i=1}^n t_i e^{-Bt_i} \cdot (1 - e^{-Bt_i}) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

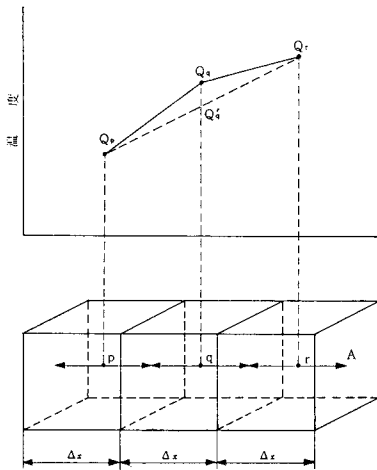
図-4 は打込温度 20°C の断熱温度上昇曲線を図-3のごとく (1), (2), (3) の部分に分割し求めた値 t_1, t_2 および T_2 の値である。 t_0 は実験よりゼロ、 T_1 は超速硬コンクリートの断熱温度上昇式を推定するのに、式 (1) に t_1 を代入して得られる値であるので図-4 に示してない。 図-5 は図-4 の値を用いて回帰式より求めた K_1, K_2 および B_1, B_2 の値である。 図-6, 図-7 は打込温度 20°C の諸係数を X_{0i} とし、それぞれの打込温度における諸係数を X_i として、打込温度別に X_i/X_{0i} を計算してグラフに表わしたものである。 したがって、単位セメント量 300~500 kg/m³、打込温度 5~30°C の範囲において、所定の単位セメント量および打込温度における超速硬コンクリートの断熱温度上昇式を図-4, 図-5 の諸係数に図-6, 図-7 の比率を乗じて補正すれば、推定することができる。

4. シュミット法によるコンクリート内部の温度推定方法

コンクリート部材の温度推定には種々の方法がある

一方、 $\frac{\partial S}{\partial B} = 0$ より得られる式に式 (4) を代入することにより、式 (6) が得られる。

式 (5), (6) にデータ T_i, t_i を代入し、 B および K



図—8 Schmidt法の原理 (一次元の場合)⁵⁾

が、実用上、十分な精度が得られ、かつ一般的に用いられるシュミット (Schmidt) の方法を用いる。

シュミットの方法は三次元の熱の流れにまで適用できるが、ここでは最も簡単な一次元の場合について、その原理を述べる。実際の構造物としては上面と下面のみから熱が逃げるスラブ、内面と外面のみから熱が逃げる壁等の場合に相当する。

いま、図—8に示すように、コンクリートの細長い棒 (面積 A) を考え、熱は軸方向のみに流れるものとする。棒を Δx の長さで分割し、隣り合う3つのブロックを p, q, r, それぞれの温度を Q_p, Q_q, Q_r とすれば、 Δt 時間後の q の温度上昇、 ΔQ_q は式 (7) で示される。

$$\Delta Q_q = \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} (Q_p + Q_r - 2Q_q) \dots \dots \dots (7)$$

ここに、a: 熱拡散係数 (m²/day)

Δt : 次のステップの時間 (day)

Δx : 部材の間隔 (m)

したがって、 Δt 時間後の q 点の温度 Q'_q は、 Q_q に ΔQ_q を加えて式 (8) で示される。

$$Q'_q = Q_q + \Delta Q_q = Q_q + \frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} (Q_p + Q_r - 2Q_q) \dots \dots \dots (8)$$

ここで式 (9) を満足するような $\Delta x, \Delta t$ (a は定数) を選定すれば式 (8) は式 (10) で示される。

$$\frac{a \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{2} \dots \dots \dots (9)$$

$$Q'_q = Q_q + \frac{1}{2} (Q_p + Q_r - 2Q_q) = \frac{1}{2} (Q_p + Q_r) \dots \dots \dots (10)$$

すなわち、式 (10) は、2点の温度の平均値はその中点における Δt 時間 (ただし $\Delta t = (\Delta x)^2 / 2a$) 後の温度に等しい、ということである。

したがって、コンクリート部材の打設後の温度上昇を

求めるには、初期条件と境界条件を定め、式 (10) の Q'_q を求め、それに Δt 時間における断熱温度上昇の増分を加算し、逐次数値計算をすれば経時ごとの温度分布を求めることができる。これをシュミット法という^{5),7)}。

5. モデル実験によるコンクリート内部の温度推定方法

3. で断熱温度上昇曲線が求まったならば、緊急補修工事を仮定して、そのときのコンクリートの内部温度の推定を行う。

モデルは図—9に示すごとく、道路橋の補修工事である既設床版の増厚 (縦横が十分に大きい旧コンクリートに打継ぐ場合) を行う場合を想定し、4面を断熱状態として既設版上に10 cm 厚の超速硬コンクリートを打継ぎ、上・下面から放熱させるものを考える。

部材の温度推定には、以下の条件を用いてシュミットの方法を用いて解析する。

(i) 初期条件

時間=0で、コンクリート温度=打込温度

(ii) 境界条件

(I) 外気温は打込温度と等しい。

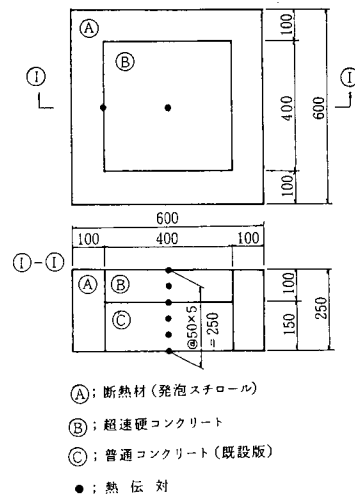
(II) コンクリートの表面温度は外気温より高いことを考慮して、次式で求まる厚さ H だけ増したもものとして、表面温度を求める⁷⁾。

$$H = \frac{\lambda_c}{\alpha} = 0.2 \text{ m}$$

ここに、 λ_c : コンクリートの熱伝導率 (2.0 kcal/m \cdot h \cdot °C)

α : 空気の熱伝導率 (10 kcal/m² \cdot h \cdot °C)

(III) 打継ぎ面の断熱温度上昇は打込部分の半分とす



図—9 モデル実験に用いた供試体の形状および寸法 (2面放熱)⁵⁾

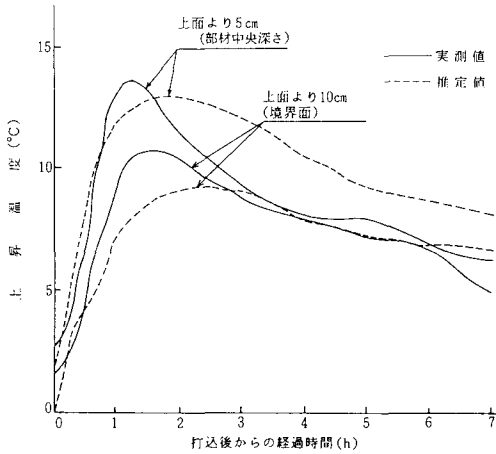


図-10 部材内部の温度の経時変化

る。

- (IV) 表面の断熱温度上昇はないものとする。
- (V) 熱拡散率は超速硬および普通コンクリートとも $0.083 \text{ m}^2/\text{day}$ とする。

このようにして、解析した結果が図-10である。

図-10は単位セメント量 400 kg/m^3 で打込温度約 20°C の場合の、コンクリート打込後からの温度履歴である。実線はそれぞれのコンクリート表面からの実測温度であり、破線はシュミットの方法により計算した推定値を示す。

これより、新コンクリート中心部（上面より 5 cm の深さ）の最高温度に達するまでの温度履歴はほぼ推定値と一致していることがわかる。しかし、最高温度に達してからの温度降下は実測値の方がかなり早いことが認められた。また、旧コンクリートとの境界面においては、最高温度に達するまでの温度履歴は多少のくい違いを生じているが、最高温度に達してからの温度履歴は推定値とよく一致していることが認められる。

最高温度に達するまでの時間は、コンクリート中心部、境界面とも実測値の方が早いことが認められる。これらのことより、超速硬コンクリートの発熱はきわめて短時間での現象と考えることができる。

また、シュミットの方法を行う場合、境界条件 Δx 、または仮想厚のとり方により温度推定曲線は多少異なる。

今回のモデルについては実測値と最も近似する値として、 $\Delta x = 2.5 \text{ cm}$ 、仮想厚 $H = 0.2 \text{ m}$ とした。

6. 温度推定曲線を利用した強度推定方法

(1) 打設コンクリートの中央部深さの強度推定

打設コンクリートの平均強度を求めるために、ここでは打設コンクリートの中央部深さの温度推定曲線を使用することにする。5.において、シュミットの方法により、温度推定曲線が求まったならば、基準として打込温度 20°C でセメント量 400 kg/m^3 の場合の中央部深さ（表面から 5 cm ）の積算温度を時間材令ごとに算出する。そして、超速硬コンクリートの積算温度と強度の関係の近似直線を重ね合わせると図-11となる。この図から、打込温度 20°C でセメント量 400 kg/m^3 の場合の任意材令での強度を推定することができる。

(2) セメント量、打込温度、打込高さが異なる場合の補正

セメント量、および打込温度が上記（基準）と異なる場合には、図-4、図-7の補正を行い、断熱温度上昇曲線を求め、さらにシュミットの方法により、温度推定曲線を描き、積算温度 M を求める。積算温度 M が求まったならば、基準積算温度（セメント量 400 kg/m^3 、打込温度 20°C 、打込高さ 10 cm ）を M_0 として、各時間材令の打込温度別に $M/M_0 = \alpha$ を計算する。このように計算して求めたセメント量 450 kg/m^3 の場合のものが図-12である。

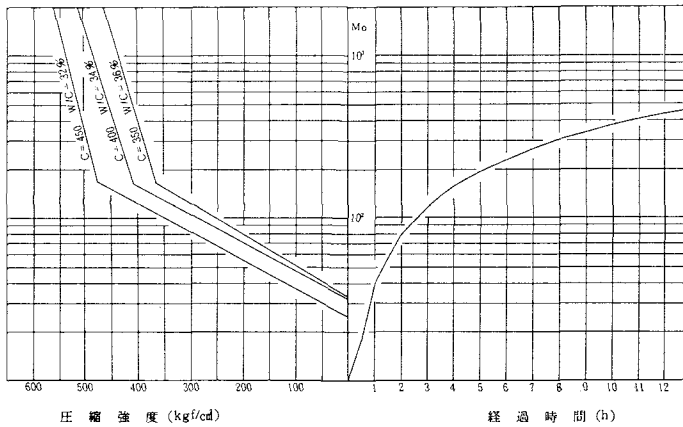


図-11 任意材令での強度推定

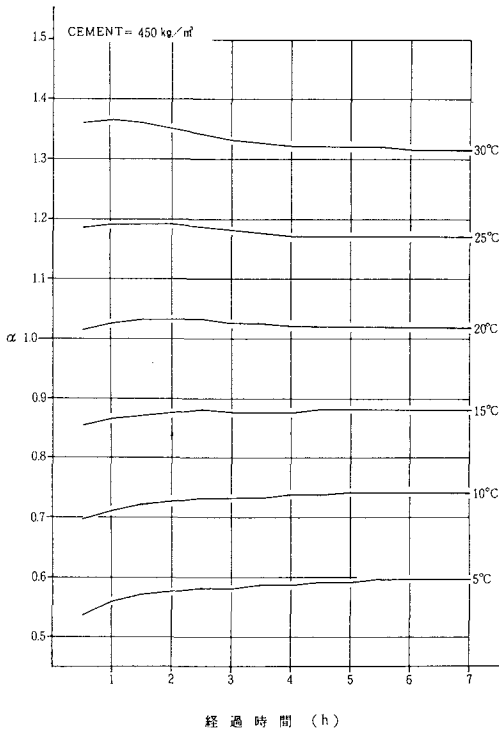


図-12 セメント量および打込温度に対する補正係数 $\alpha (M/M_0)$

また、打込高さが変化する場合にはシュミットの方法により、それぞれの打込高さ 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm の温度推定曲線を求める。

推定曲線が求まったならば、各時間材令ごとの積算温度を算出し、その値を M_p とする。次に、上記計算値の打込高さ 10 cm の積算温度を M_q とし、 $M_p/M_q = \beta$ として図に表わした打込高さ 20 cm の場合のものが図-13 である。

したがって、基準積算温度 M_0 に α と β を乗ずれば、任意のセメント量および打込高さの補正ができ、そのコンクリートの任意材令でのコンクリート強度を図-11 より求めることができる。

(3) 温度 (打込温度, 外気温) と強度との関係

2面放熱で打込高さ 10 cm の場合の温度と圧縮強度の関係を図-14 に示す。セメント量 350 kg/m³, 400 kg/m³, 450 kg/m³ の場合の材令 3 時間, 5 時間での各温度における圧縮強度である。

図-14 における変曲点とは、図-2 に示すごとく超速硬コンクリートは積算温度と圧縮強度の関係において、積算温度を対数にとった場合、積算温度 150°C・h 付近に強度発現勾配が変化する点が認められたので、これを変曲点とよんだ。これは超速硬セメントの水和物の生成時期に起因するものである。

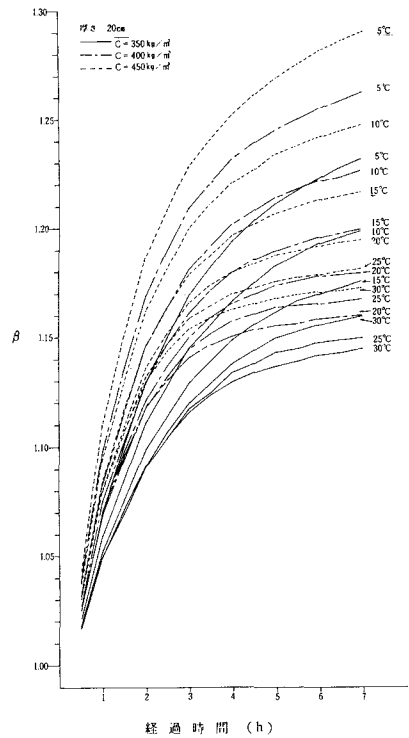


図-13 打込高さに対する補正係数 $\beta (M_p/M_q)$

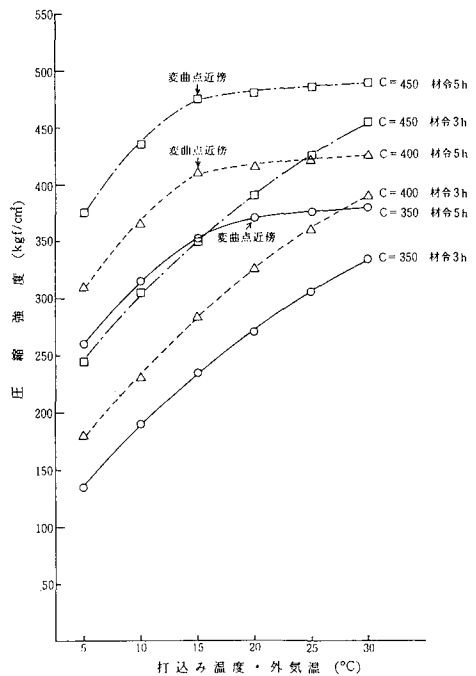


図-14 2面放熱で打込み高さ 10 cm の場合の温度と圧縮強度の関係

図-14 より変曲点前においては温度が強度に及ぼす影響は著しく大きいことがわかる。変曲点前までは温度

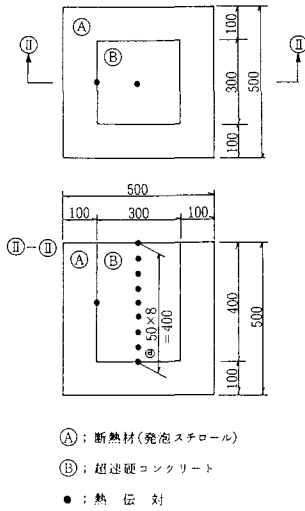


図-15 モデル実験に用いた供試体の形状および寸法（1面放熱）⁵⁾

が増加するに従い強度は急激に増加し、変曲点以後は温度増加に対する強度増加の程度は緩慢である。

ちなみに、セメント量 400 kg/m^3 の材令5時間の場合では温度 $5^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ （変曲点近傍、積算温度 $163^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ ）の温度差 10°C に対する強度差は 100 kgf/cm^2 程度あるのに対し、 $15^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ の温度差 15°C に対する強度差は 15 kgf/cm^2 程度である。

このことからわかるように、超速硬コンクリートは変曲点前までは著しく温度の影響を受けるので、材令3時間とか5時間の早期強度を目標とする場合には温度管理はきわめて重要となる。

(4) モデルが少し異なる場合（1面放熱）との比較

モデルは図-15に示すように比較的大型の部材を想定し、5面を断熱状態とし、40cm厚の超速硬コンクリートの上面のみから放熱させる場合を考える。温度推定曲線の解析結果は図-16に示すとおりである。実線は大塩⁴⁾が熱電対により計測した値であり、破線は著者がシュミットの方法により計算した推定値である。このモデルの方が2面放熱の場合よりも実測値と推定値がよく近似していることがわかる。

ここで1面放熱と2面放熱が強度にどのように影響するかを検討してみる。2面放熱の場合で行ったことと同様に打込温度 20°C で、セメント量 400 kg/m^3 の場合の表面から5cmの積算温度を時間材令ごとに算出すると図-17のようになる。そして、打込後3時間（変曲点前）

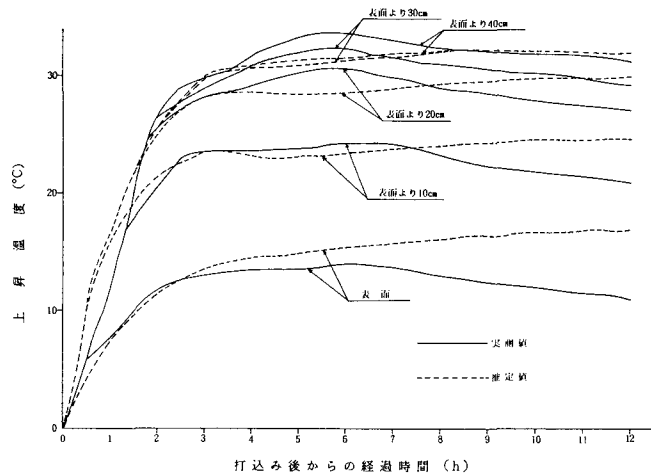


図-16 部材内部の温度の経時変化（1面放熱）

および5時間（変曲点以後）の強度を図-17に従って求めてみる。1面放熱の材令3時間での強度 380 kgf/cm^2 に対し、2面放熱は 320 kgf/cm^2 であり、その差は 60 kgf/cm^2 である。変曲点後の材令5時間での強度は1面放熱が 430 kgf/cm^2 に対して2面放熱が 415 kgf/cm^2 であり、差は 15 kgf/cm^2 である。

したがって、1面放熱の方が2面放熱の場合よりも材令3時間で約20%、材令5時間では約5%ほど高くなるということである。

(5) 強度推定方法の信頼性

2面放熱のモデルについての強度推定方法の信頼性を検討する。

積算温度はシュミットの方法で求められた温度推定曲線より求めている。したがってコンクリートの内部温度より求めた積算温度とは多少の相違を生ずる。この相違の程度が強度にどの程度表われるかを調べた。

図-18は前述（図-10参照）の2面放熱の場合の実

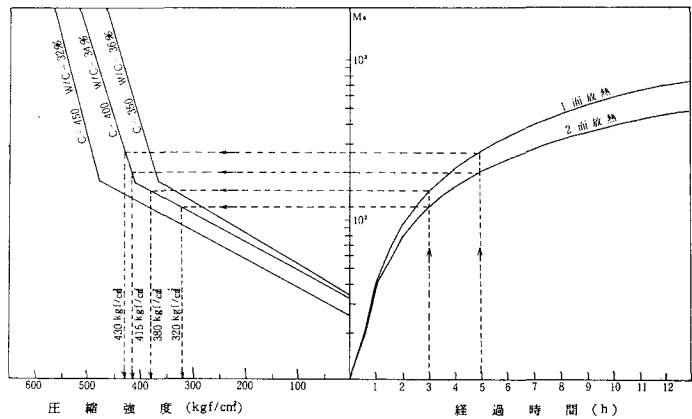
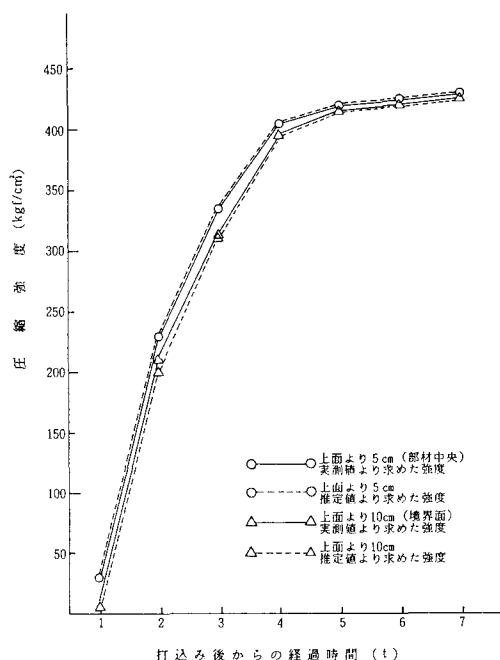


図-17 1面放熱の場合と2面放熱の場合の強度の比較



図—18 実測値および推定値の積算温度より求めた圧縮強度

測値および推定値の積算温度より求めた圧縮強度の値である。図—18 からわかるように、実測値と2面放熱モデルの推定値との差はほとんど認められない。

このことから、推定値より積算温度を求めてもかなり正確なことが確認された。次に、上面より5cm(部材中央深さ)と上面より10cm(旧コンクリートとの境界面)における深さ方向の差が強度に及ぼす影響について述べる。温度履歴の異なる初期、すなわち打込後1時間、2時間においては20 kgf/cm²~25 kgf/cm²程度境界面の強度が低くなるが、時間が経過するに従って、中央部との差が少なくなり、7時間後においてはほぼ等しくなることが認められた。

また、図—11において、積算温度より強度を推定する場合、この回帰直線がどの程度の信頼性をもっているのかを明確にしておく必要がある。ここでは統計的方法⁸⁾を用いて回帰直線の90%の信頼区間を求めた。表—1は平均積算温度 \bar{M} における90%の信頼区間を求めたものである。変曲点前(0<M<150°C·h)と変曲

表—1 平均積算温度 \bar{M} における信頼区間

コンクリートの種類	区 間	平均積算温度 \bar{M} (°C·h)	信頼区間(kg/cm ²)	*誤差(%)
C=350	0<M<150	68.8	$\sigma = 170.1 \pm 17.2$	10.1
	150<M<20160	4208.5	$\sigma = 495.6 \pm 11.9$	2.4
C=400	0<M<150	67.8	$\sigma = 190.8 \pm 16.3$	8.5
	150<M<20160	3842.1	$\sigma = 547.0 \pm 7.4$	1.4
C=450	0<M<150	67.9	$\sigma = 254.0 \pm 24.3$	9.6
	150<M<20160	4580.7	$\sigma = 593.1 \pm 12.1$	2.0

* 90%の信頼区間の上下端値の推定値に対する誤差

点後(150°C·h<M<20, 160°C·h)に分けて計算した。この表より、いずれの場合も90%の信頼区間の上、下端値の推定値に対する誤差は10%以内であることから、かなり信頼性は高いものと考えられる。

(6) 超速硬コンクリートの強度推定方法の一例

セメント量、打込温度、打込高さが基準と異なる2面放熱の場合の、部材中央部の強度推定方法を例題で説明する。

例題の条件は以下のとおりとする。

- セメント量 450 kg/m³
- 打込温度 10°C
- 打込厚さ 20 cm
- 強度推定 打込後5時間

まず、図—11より打込後5時間での基準積算温度 M_0 を読み取る。この場合の M_0 は190°C·hと読み取ることができる。

次に、セメント量450 kg/m³、打込温度10°Cの補正係数 α を図—12より求める。この場合の α は0.74である。そして最後に打込高さの補正係数 β を図—13より求めると $\beta=1.23$ となる。したがって、5時間後の積算温度 M は

$$M = M_0 \cdot \alpha \cdot \beta = 190 \times 0.74 \times 1.23 = 172.9 \text{ (°C·h)}$$

となる。

5時間後の積算温度(M)=172.9(°C·h)が求まったならば、図—11より、M=172.9(°C·h)とセメント量450 kg/m³の強度推定曲線の交点から、圧縮強度は470 kgf/cm²と推定できる。

7. 結 論

超速硬コンクリートを緊急工事に使用する場合に要求されることはコンクリート打込後、短期材令での強度を正確に知ることである。そのために、超速硬コンクリートの発熱特性を利用した強度推定方法を考案し、また以下のことを明らかにした。

(1) 積算温度と強度の式を現場コンクリートに適用した場合、現場で保温、外気養生を行うなど、養生方法が異なってもよく近似することから、積算温度と強度の関係を利用することが、現場強度を推定するのに、かなり効果的である。

(2) 道路橋の緊急補修工事である既設床版の増厚を想定し、モデル実験によりコンクリートの内部温度をシュミットの方法で推定した。その結果実測値において多少のくい違いを生じた。しかし、推定値をもとにコンクリート中心部の積算温度を算出した場合、実測値との誤差は打込7時間後でもわずか3.7%であった。したがって、シュミットの方法により求めた温度推定曲線より積算

温度を求めてもかなり正確な値が得られるといえる。

(3) (2)と同様に既設床版の増厚を行う場合に、新コンクリート打設時より任意材令での圧縮強度を推定する方法を考案した。その手順を述べると、①任意材令での基準積算温度 M_0 を求める、②セメント量、打込温度による補正係数 α を求める、③打込高さによる補正係数 β を求める、④ M_0 に α と β を乗じて任意材令での積算温度を算出し、推定圧縮強度を求める。以上のように行えば、任意材令での圧縮強度を簡単に求めることができる。さらに実用性を考えて①～④のすべてをグラフ化し、グラフから読み取れるようにした。

(4) 超速硬コンクリートの強度の温度(打込温度、外気温)による影響は、変曲点前まではきわめて大きく、変曲点以後では非常に小さい。したがって、材令3時間とか5時間の早期強度を目標とする場合には温度の管理は大変重要となる。

(5) セメント量 400 kg/m^3 、打込温度および外気温 $=20^\circ\text{C}$ で、2面放熱と1面放熱の場合の強度の比較を行った。その結果、1面放熱の方が2面放熱よりも材令3時間(変曲点前)で約20%、材令5時間(変曲点以後)で約5%高くなった。

(6) 本研究で提案した強度推定方法の信頼性を統計的手法を用いて検討した。この結果、表-1に示したように積算温度より強度を推定する場合、変曲点前と変曲点以後の平均積算温度 \bar{M} における90%の信頼区間の上、下端値の推定値に対する誤差は10%以内であることから、かなり信頼性は高いといえる。

本論文は著者の1人である中嶋清実が昭和62年1月16日付で東京大学より工学博士の学位を受けた学位論文³⁾の内容の一部である。

謝 辞：この論文をまとめるにあたり、東京大学教

授 岡村 甫博士には貴重なご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

また、本研究を遂行するうえで、多大なご協力を頂きました名古屋工業大学および豊田工業高等専門学校のコンクリート研究室卒業研究生の諸君、および貴重な資料の提供とご支援を賜った小野田セメント中央研究所主席研究員 大塩 明博士、小野田ケミコ株式会社副部長 仰木 肇氏、同社技師 岡田光芳氏、住友セメント株式会社中央研究所研究員 峰松敏和博士に対し厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 鎌尾・浅野・小出：超速硬セメントを用いたコンクリートへの高性能減水剤の利用，セメント技術年報，28，pp.267～271，1974.
- 2) 内川・宇都：超速硬セメントの舗装コンクリートへの適用，セメント技術年報，31，pp.427～430，1977.
- 3) 内川・宇都・遠藤：超速硬セメントコンクリートの鋼繊維補強コンクリートへの適用，セメント技術年報，pp.339～342，1979.
- 4) 大塩・遠藤・曾根・岡田・中村：超速硬セメントコンクリートの発熱特性，セメント技術年報，37，pp.264～268，1983.
- 5) Ross, A. D. et al. : The prediction of temperatures in mass concrete by numerical computation, Magazin of Concrete Research, 1941.1.
- 6) 塚山・宮地：各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇，セメント技術年報，25，pp.220～224，1971.
- 7) 塚山・木挽：マッシュな鉄筋コンクリート構造物の温度上昇，セメント技術年報，18，pp.517～523，1964.
- 8) 松本嘉司：土木解析法，技報堂出版，pp.278～288.
- 9) 中嶋清実：超速硬セメントコンクリートの緊急工事および寒中工事への利用に関する基礎研究，東京大学学位論文，pp.55～87，1986.1.

(1987.7.3・受付)