寒中コンクリート断熱養生温度履歴の予測計算

THE METHOD OF CALCULATING CONCRETE TEMPERATURE BY INSULATION FOR CURING IN WINTER CONCRETING

長 島 弘*

Hiroshi NAGASHIMA

The purpose of our study is finding the curing method to keep the concrete which was placed in constructin work of winter warm without warming up the concrete with the heat. I measured concrete rising adiabatic temperature of four kinds of cements with several different concrete placing temperature. Through this experiment, I determined the system of calcurating the experimental constants of the accumulative calorie of hydration from time-temperature functions.

I also made the graph which made the plan easy to do in winter construction work.

Keyword : Winter concreting, Insulation for curing of new Concrete in Winter, Hydration of cement,

The method calculating of the concrete temperature after placing

寒中コンクリート工事、寒中コンクリートの保温養生、セメントの水和熱、打込み後のコンクリート温度の計算法

1. はじめに（今までの経過を含む）

この研究は、寒中コンクリート工事の断熱養生計画で、部材コンクリートの発熱条件と放熱条件に応じて部材の温度履歴を予測し、初期養生を合理的に計画するためのものである。

マスコンクリートでは打込後の温度履歴を予測する方法として、多種類の単位セメント量と多種類の打込み温度のコンクリートの断熱温度上昇実験が行われ、セメントの種類、打ち込み温度別に実験式とその実験定数が整理されている。その式で打込み条件に応じた部材中心部の温度履歴を求めて、部材内部の熱伝導と表面の放熱条件から、冷却中の温度履歴を計算する方法が用いられている。しかし建築の寒中コンクリート工事のように部材が薄く、気温が低いために冷却が早い場合、セメント水和熱の発生はかなり遅れる。そのため部材中心部の温度は、断熱温度上昇している温度履歴の計算値と、実状との差が大きくなり、その計算誤差は危険側になる。

セメント水和熱発生履歴を時間温度関数を用いて予測する計算方法として、Rastrup¹⁾は温度が10℃高くなると反応速度は2倍になることから、時間温度関数Rの式(1)を提案した。

$$R = \sum_{0}^{h} 2^{0.1 \cdot T_n} \cdot \Delta h \quad (1)$$

ここに

R : 主として中期以降の水和熱進行度を示す時間温度関数

h : セメントの水和開始からの時間 (hour)

Δh : 微小時間 (hour)

T : セメントまたはコンクリートの温度 (℃)

T_n : 同上の Δh 時における温度 (℃)

【今までの研究経過】

今回のコンクリートの断熱温度上昇実験で、混和剤を用いない普通ポルトランドセメントの単位セメント量300kg/m³のコンクリートで、打込み温度が3.7, 10, 15, 23℃のセメントの水和熱発生量と時間温度関数Rの関係を図1の右に示したが、打込み初期に打込み温度の影響が大きい。前回の研究²⁾では、セメントの水和熱進行度をコンダクションカロリメーターで測定した。その実験結果の解析から、時間温度関数Rが初期に温度影響を受ける欠点を補う目的で、時間温度関数Gとして式(2)を提案²⁾した。その時間温度関数Gと

図1 時間温度関数G、Rとセメント水和熱発生熱量の例

前記Rと同条件の水和熱発生量との関係例を図1の左に示した。

$$G = \sum_{h=0}^n \{ \log(h+\Delta h) - \log(h) \} / (115 - T_h) \quad (2)$$

ここに

G: 初期の水和発熱を分担する時間温度関数

そしてセメントの発熱過程を予測する計算では、GとRの二種類の時間温度関数により、セメントの水和熱発生程度を表現することを提案した。また、二種類の時間温度関数(GとRの各累積値)とセメントの累積発熱量との関係は、正規分布累積曲線によると仮定し、セメントの発熱量の予測計算方法として式(4)を提案したものである。式(4)は第一項にセメントの融解熱があり、引き続き二種類の時間温度関数のG(第二項)と、R(第三項)の増加に応じて水和熱の発生量が増加するように発熱を分担させたものである。

第一項: 最初にセメントと水が接触した直後に融解熱 Q_1 の16.7J/g(4cal/g)が発生する。2時間以降には融解熱は発生しない。

第二項: 次に初期(ドルマント期)は時間温度関数Gの進行に伴い Q_2 のおよそ83.7J/g(20cal/g)が急速に発熱する。

第三項: そして、時間温度関数Rの進行に伴い Q_3 の251.2~334.9J/g(60~80cal/g)が、発熱中期に多く発熱する。

そして発熱量 Q_2 と Q_3 は、時間温度関数GとRの累積値で評価される進行度に応じて、正規分布型で整理した。そして実験結果に適合する実験定数を定めたものである。

$$Q_E = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (3)$$

$$Q_n = Q_1 + Q_2 \cdot \sum_{G=0}^n \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \sigma_G}} \right) \frac{-(\bar{G} - G)^2}{2 \cdot \sigma_G} + Q_3 \cdot \sum_{R=0}^n \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \sigma_R}} \right) \frac{-(\log_{10} \bar{R} - \log_{10} R)^2}{2 \cdot \log \sigma_R} \quad (4)$$

ここに

Q_E : セメントの実験最終水和熱発生量(J/g)

Q_1, Q_2, Q_3 : セメントの発熱過程で各期の全水和熱量(J/g)

Q_n : セメントの水和開始からh時間経過までの累積水和熱発生量(J/g)

$\bar{G}$: 時間温度関数Gの分布の平均値

σ_G : 同上の正規確率分布の標準偏差

$\bar{R}$: 時間温度関数Rの分布の平均値

σ_R : 同上の正規確率分布の標準偏差

前報告では、普通ポルトランドセメントで、混和剤を用いないコンクリートのみにについて考察を進めた。

以上が前報告までの研究経過の概要であるが、時間温度関数の式(1)(2)では、当時強度増進との関連づけを考慮して-10℃を基準としたが、強度との相関は少ないことが分かり、今回0℃を基準に改めた。しかし水和熱発生量を計算する式(4)は変更していない。

今回は普通ポルトランドセメント以外のセメントの種類についてまた各種の混和剤を用いた場合について、コンクリートの断熱温度上昇実験を行った。その実験結果から実験定数を求めて、セメントの水和熱発生量の計算法として整理し、断熱養生計画用図表として提案するものである。

また図2は、断熱温度上昇実験の実測温度履歴と、「温度応力解析」ソフト(日本コンクリート工学協会)が採用している塚山の断

熱温度上昇曲線の温度履歴と、本研究による2種類の時間温度関数を用いた温度履歴計算値とを比較した例である。本研究の計算方法の方が、初期の温度履歴実測値に近似している。

図2 断熱温度上昇実測温度履歴と予測温度履歴の例

2. コンクリートの断熱温度上昇実験

2.1 コンクリートの材料

(1) セメント

- a: 普通ポルトランドセメント(普通セメントと略す)
- b: 早強ポルトランドセメント(早強セメントと略す)
- c: 高炉セメントB種(高炉セメントと略す)
- d: フライアッシュセメントB種(フライアッシュと略す)

(注) いずれも日本セメント(株)上磯工場製

(2) 骨材

- 粗骨材: 幕別町依田産25mm 比重2.66
- 細骨材: 幕別町依田産2.5mm 比重2.62

(3) 混和剤

混和剤は、北海道内で販売されている主要銘柄を選択した。
(注) 英小文字の後ろの数字はメーカー番号

A E 剤

- a 2: 天然樹脂塩

A E 減水剤

- b 1: リグニンスルホン酸塩
- b 2: オキシカルボン酸塩
- b 3: ビドロキシ系複合体天然樹脂塩
- b 4: リグニンスルホン酸塩+ポリオール複合体

高性能A E 減水剤

- c 1: ポリカルボン酸
- c 2: アニオン型
- c 3: アミノスルホン酸系

流動化剤

- d 1: 変性メチロールメラミン縮合物
- d 2: 特殊高分子系
- d 3: ポリアルキルスルホン酸塩
- d 4: メラミンスルホン酸

A E 減水剤(促進型)

- e 1: リグニンスルホン酸ロダン化合物
- e 3: オキシカルボン酸含窒素系化合物

耐寒剤

- f 1: ポリグリコールエステル

f 2 : 窒素系化合物

f 3 : 窒素系化合物+ヒドロキシ

2. 2 断熱温度上昇実験装置

コンクリートの断熱温度上昇の実験装置は、図3のようにコンクリートを魔法ビン（柴田科学器械工業株式会社・試料実容積9.5ℓ）に入れ、容器内のコンクリート試料中心温度と、その周囲の水温が常に同じ温度を保つ温度追従制御装置で、ヒーターおよび冷凍機により水温を管理する（田尻機械工業株式会社）。この一連の実験を始める前に、この装置と試料30ℓの断熱温度上昇実験装置（空調型）と、同じコンクリート試料で比較実験を行い、ほとんどの時刻で温度が一致（最大で0.2℃の誤差）することを確認した。また魔法ビン中のコンクリート温度および水槽の水温は、銅コンスタンタン線でアナログ&デジタル印字記録計（千野AH520-RNN）と繋ぎ、温度を一時間間隔で記録した。しかし水槽がプラスチック製であることと、冷却能力がやや劣ることから、温度が約90℃以上の実験結果に多少疑問が残るために、80℃以上のDATAは、実験定数の選定DATA、および計算誤差の計算から除外した。

図3 断熱温度上昇実験装置

3. 実験計画および実験結果

コンクリートは単位セメント量は300kg/m³、打込み目標温度15℃±1.5℃、スランプ15cm±2.5cmを「基準条件」とし、各シリーズの目的で変更する条件以外の項目は基準条件によった。

コンクリートの断熱温度上昇実験は、材齢10日まで温度測定を行った。

(1) 単位セメント量・打込み温度シリーズ

4種類のセメントについて、単位セメント量200, 300, 400kg/m³（普通セメントだけ250, 350 kg/m³を含む）について、打込み温度23±1.5℃、15±1.5℃、5±2.5℃、スランプ15±2.5cmのコンクリートで実験を行った。その実験結果を図4に示す。

(2) 混和剤シリーズ

普通ポルトランドセメントの単位セメント量300kg/m³だけについて、空気量4.5±1%、打ち込み目標温度15±1.5℃のコンクリートで実験した。その実験結果を図5に示す。

4. 実験結果の整理

4. 1 セメントの水和熱発生量

コンクリートの断熱温度上昇実験で、1時間ごとの温度差について、式(5)から1時間当たり発熱量を計算した。これをコンクリー

図4 単位セメント量・打込み温度シリーズの断熱温度履歴

図5 混和剤シリーズの断熱温度履歴

ト打込み直後から累加して水和熱発生履歴とした。

$$\Delta H = \Delta T \cdot 2512 / C \quad (\text{kJ/kg} \cdot \text{h}) \quad (5)$$

ここに

ΔH : 1時間当たりセメントの水和熱発生量 (kJ/kg·h)

ΔT : 前時間とのコンクリートの1時間当たり温度差 (℃/h)

2512: コンクリートの容積比熱の仮定値 (kJ/m³·K)

注) コンクリートの容積比熱の仮定値 600 (kcal/m³·℃) と同じ

C : 単位セメント量 (kg/m³)

4. 2 第一項の発熱量Q₁

セメントの初期の融解熱Q₁を、既報では16.7J/g (4cal/g)で一定としていた。今回データを解析中に、第二項と第三項の熱量のごく少量(1.5cal/g)が、水和開始時に算入されていることが分った。

それで、各セメント共通にその分を差し引き、各セメント共通に $Q_1=10.5\text{J/g}(2.5\text{cal/g})$ に変更した。

4. 3 第二項および第三項の実験定数 $\bar{G}$ 、 $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}_G$ 、 $\bar{Q}_R$ 、 $\bar{Q}_3$

セメントの水和熱発生量は式(4)によるものとし、コンクリート温度は、コンクリートの単位セメント量、熱容量から、断熱状態のコンクリート温度を計算するパソコンの「断熱温度履歴計算ソフト」を作成した。しかし式(4)の第2項および第3項で、未知な実験定数は、 $\bar{G}$ 、 $\bar{Q}_G$ 、 $\bar{Q}_2$ 、 $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}_R$ 、 $\bar{Q}_3$ の6種類がある。これらの実験定数を求めるために、過去の経験²⁾から各変数で予想される範囲内の仮定値を、前記ソフトに逐次代入して温度履歴を計算し、打込み後から6, 12, 24, 48, 76, 120時間の6材齢について、次の予測誤差を自動的に計算する「断熱予測誤差計算ソフト」も作成した。

予測誤差 = (断熱温度上昇実験温度) - (温度履歴計算温度)

各変数の広範囲な仮定値による計算で、6材齢の予測誤差が平均 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内で得られた場合に、各変数の仮定値の組み合わせをパソコンのDISKに記録した。このような検討は、単位セメント量シリーズ・打込み温度シリーズおよび混和剤シリーズについて、各実験の実測温度履歴ごとに、それぞれ、次のような五段階で検討し、実験定数を決定した。

第一段階： 6種類の各変数の予想される値の範囲内で、それぞれ大まかな数値間隔の組み合わせについて、パソコンによる断熱温度履歴の計算を行い、実験値との予測誤差を求めた。そして予測誤差の少ない仮定値の組み合わせを多数選出し、各平均値を求めた。

第二段階： 前記で求めた第二項の予測誤差の少ない変数の仮定値の平均値を用いて、第三項の実験定数の仮定値を細かな間隔で仮定して、それぞれ実験の温度履歴との予測誤差を求めた。そして予測誤差の少ない第三項の各変数の平均値を求めた。

第三段階： セメントの各種類ごとに前記第三項の各変数のそれぞれの平均値を用い、第二項の仮定値を細かな間隔で予測計算を行い、予測誤差の少ない第二項の $\bar{G}$ 、 $\bar{Q}_G$ 、 $\bar{Q}_2$ を決定した。

第四段階： 決定した第二項の値を用いて、第三項の $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}_R$ 、 $\bar{Q}_3$ 値を適当な範囲内で細かく仮定し、同様に断熱温度履歴の予測計算を行った。その予測誤差が平均 1°C 以内（一部の実験については 1.5°C とした）の変数仮定値を多数選出した。

第五段階： 第四段階で選出された多数の実験定数 $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}_R$ 、 $\bar{Q}_3$ の値は、各実験シリーズごとに共通な値であることが望ましい。それで各実験シリーズごとに、予測誤差が平均 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下であった

場合の $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}_R$ の値の組合わせについて、一実験ごとに色と形を変えた記号でパソコンの画面に重複して表示した。普通セメントの単位セメント量シリーズの例を図6に示す。多くの記号が重複する部分の値が、各実験で共通に適用できる $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}_R$ の値であるから、重複部分の中心付近の値に決定した。その方法で選出したセメントの各種類の、コンクリートの基準条件の実験定数の値を表1に示す。

(注) ただし、これらの実験定数の値により式(4)で水和熱発生履歴を計算した場合には、熱量の単位が cal/g であるため、SI単位の J/g に換算する必要がある。このことは表1、表3、式(6)～式(13)に共通である。

表1 式(4)におけるコンクリートの基準条件の第2項および第3項の実験定数

セメントの種類	普通	早強	高炉	フライアッシュ
$\bar{G}$	0.0213	0.0198	0.0200	0.0200
σ_G	0.001	0.001	0.001	0.001
Q_2 (kcal/kg)	20	21.3	12	12
$\bar{R}$	550	250	450	450
σ_R	8.0	6.5	6.0	7.0
Q_3 (kcal/kg)	76	58	60	78

注 表の Q_2 、 Q_3 は単位セメント量 300kg/m^3 、打込み温度 15°C の場合である。

4. 4 打ち込み温度・単位セメント量と実験定数 $\bar{Q}_3$ の影響

前項の第五段階で選出された $\bar{R}$ 、 $\bar{Q}_R$ と同時に仮定されていた $\bar{Q}_3$ の値を中心に、多少増減した値を前記ソフトの $\bar{Q}_3$ に代入して、予測誤差を計算し、誤差の少ない $\bar{Q}_3$ を決定した。その結果単位セメント量と打込み温度の基準条件を一項目づつ変更した場合の実験定数は、表1の基準条件の実験定数の中で $\bar{Q}_3$ だけを変更して予測誤差を計算すると、 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 以内の誤差で済むことが分かった。断熱予測誤差計算ソフトで予測誤差が小さい $\bar{Q}_3$ の値を求め、単位セメント量および打込み温度に対応する $\bar{Q}_3$ の値は図7のように得られた。また表1の $\bar{Q}_3$ への補正値として求め、式(6)～式(13)が得られた。

図7 打ち込み温度、単位セメント量と $\bar{Q}_3$ の関係

$\bar{Q}_3$ の単位セメント量および打ち込み温度による補正

普通セメントの場合

$$\Delta Q_{3T} = 16.7 - 2.54T + 0.0937T^2 \quad (6)$$

$$\Delta Q_{3C} = 57.0 - 0.325C + 0.000445C^2 \quad (7)$$

早強セメントの場合

$$\Delta Q_{3T} = 52.7 - 6.98T + 0.2311T^2 \quad (8)$$

$$\Delta Q_{3C} = 192.0 - 1.15C + 0.0017C^2 \quad (9)$$

高炉セメントの場合

$$\Delta Q_{3T} = 51.0 - 6.74T + 0.2218T^2 \quad (10)$$

図6 第三項の誤差の少ない変数値をグラフ表示した例

$$\Delta Q_{3c}=120.0-0.76C+0.0012C^2 \quad (11)$$

フライアッシュセメントの場合

$$\Delta Q_{3T}=23.3-3.94T+0.1233T^2 \quad (12)$$

$$\Delta Q_{3c}=-24.0+0.200C-0.00040C^2 \quad (13)$$

ここに

ΔQ_{3T} : 打ち込み温度による Q_3 の補正量 (kcal/kg)

ΔQ_{3c} : 単位セメント量による Q_3 の補正量 (kcal/kg)

T : 打ち込み温度 (°C)

C : 単位セメント量 (kg/m³)

4. 5 混和剤使用による実験定数の影響

(1) AE剤の場合

前述の2つの実験シリーズは、プレーンコンクリートを基準としているが、単位セメント量・打ち込み温度の実験シリーズでは、各セメントの単位セメント量300kg/m³の場合だけ、AEコンクリートの実験も行った。それで、パソコンの断熱温度履歴計算ソフトを改造して、 $\bar{G}$, σ_G , Q_2 , R および σ_R は表1の値を用い、第三項の Q_3 の値だけを増減して、実験の温度履歴に適合する Q_3 の値を求めた。それで試算した結果、 Q_3 の値を少し増加させるだけで、実験との予測誤差が±1.5°C以内で得られることが分かった。その結果を表2に示す。

表2 プレーンとAE剤使用の式(4)の Q_3 の比較

単位セメント量 kg/m ³	打込温度 ℃	混和剤	セメントの種類				平均
			普通	早強	高炉B種	フライアッシュB種	
300	15	AE	85	84	85	80	
300	15	プレーン	76	58	60	78	
Q ₃ (kcal/kg)		差	+ 9	+16	+15	+ 2	+10.5

(2) その他の混和剤の場合

図5からも考察されるように、混和剤の種類ごとに差が生じている。同一種類でのメーカー間の差は多少あるが、極端に大きな差はない。前記同様にパソコンの断熱温度履歴計算ソフトで、 Q_3 だけを変更し他の定数は表1のままで試みたが、予測誤差は小さく出来なかった。それで R , Q_3 も変更し、他の定数は表1の値のままで、予測誤差を1.5°C以下にできた実験定数の値を表3に示す。

(3) 複数の補正条件で補正を行った予測誤差の例

4種類のセメントについて、コンクリートの基準条件以外に単位セメント量は350 kg/m³、打ち込み温度を5°Cとして、AE剤を用いたコンクリートの場合について断熱温度上昇実験を行った。その実験結果の温度履歴と、断熱温度履歴計算ソフトに同実験条件を入力し

て、予測誤差が小さい実験定数 Q_3 を求め、その実験定数を表4最下欄に示した。また表1のコンクリートの基準条件の Q_3 との差を、式(6)～式(13)により単位セメント量+50kg/m³、打ち込み温度-7.5°Cの補正值 ΔQ_{3c} , ΔQ_{3T} を求め、更にプレーンコンクリートとAEコンクリートの Q_3 の差を表2から求め、それら基準条件の Q_3 への補正値を算術計算した計算上補正值 Q_3 の値を表4下から2段目に示した。最下欄 Q_3 と下から2段目の Q_3 の差は、普通・早強セメントでは特に小さく、寒中施工では簡易な補正で済むことが分かった。

表4 複合条件の計算上補正值 Q_3 と実測値 Q_3 の比較

(単位セメント量350kg/m³、打ち込み温度7.5°Cの場合)

基準 Q_3	単位セメント量 350kg/m ³	打ち込み 温度 15°C	普通 早強 高炉 フライアッシュ			
			76	58	60	78
補正 値	式(8)	ΔQ_{3T}	3.8	14.7	14.3	1.8
	式(9)	ΔQ_{3c}	-2.2	-2.2	1	3.0
	表2	AE剤補正	9	16	15	2
補正計算値合計 Q_3 (kcal/kg)			86.6	86.5	90.3	84.8
実測値 Q_3 (kcal/kg)			85	84	85	80

5. 断熱保温養生施工現場への適用例

1993年12月～1995年2月に北海道大学内の建築工事で、シート(一重)上屋の中で、外階段の厚さ40cmの壁のコンクリートが断熱養生(無採暖)で施工された。その壁の両面の型枠は、厚12mmの合板型枠に発泡ウレタンフォーム50mmを吹きつけた保温型枠が用いられた。コンクリートの調査は普通セメントを単位セメント量340kg/m³使用し、各打ち込み階ごとに耐寒剤のメーカーを変えて施工した実験的施工現場である。しかし同現場の型枠脱型材齢は、施工会社の都合でAE剤a2は1日、耐寒剤は2日であった(耐寒剤f2の2回目だけは正月休みのために7日)。各施工階ごとにコンクリート部材中心温度と表面部の温度を、あらかじめ埋設した熱電対で測定した。

打ち込み後のコンクリート温度の予測計算は、図2の断熱温度履歴計算ソフトに、部材内の熱伝導と部材表面からの放熱を加えて「温度履歴計算ソフト」を作り、またその計算の気温は、同材齢の現場の上屋内温度を読み込ませて、計算を行った。

型枠の熱損失係数は、日本建築学会・寒中コンクリート施工指針・同解説(1998)の104ページの解説表9.3の「養生上屋内断熱材50mm+シート」から、 $K=1.5\text{W/m}^2\cdot\text{°C}$ と仮定した。また、参考までに多少増減したKの値で計算し、実測積算温度と計算積算温度との誤差を比較したが、前記の $K=1.5\text{W/m}^2\cdot\text{°C}$ の場合が、各打ち込み階の多くの材齢での誤差が少なかった。

各施工階ごとに、部材中心部と部材表面の実測温度履歴と計算の温度履歴の比較を図8に示した。また、表5には部材中心部と表面

表3 各種混和剤の第三項の実験定数(単位セメント量300kg/m³で打ち込み温度15°Cの場合)

混和剤種類		AE減水剤			高性能AE減水剤			流動化剤			AE減水剤促進型			耐寒剤		
実験定数		R	σ_R	Q_3	R	σ_R	Q_3	R	σ_R	Q_3	R	σ_R	Q_3	R	σ_R	Q_3
銘柄	1	550	8.0	82	400	8.0	84	450	8.0	98	500	8.0	100	550	8.0	100
	2	400	8.0	73	550	8.0	90	550	8.0	95				550	8.0	100
	3	550	8.0	93	350	8.0	80	550	8.0	93	550	8.0	98	550	8.0	90
	4	550	8.0	80				550	8.0	88						
平均		512	8.0	82	433	8.0	85	525	8.0	94	525	8.0	99	550	8.0	97

図8 断熱養生の施工現場での実測温度履歴と計算温度履歴の比較

について、各階の奇数材齢ごとに実測温度履歴の積算温度と、計算温度履歴による積算温度とを示し、また、両積算温度の誤差の比も示した。その中には誤差が大きい部分もあるが、発熱ピーク直後だけのため、積算温度の誤差としては最大16% (f2の表面部のセンサー取り付け位置不良の疑いを除いて) で済んでいる。

気温日較差: 1.0℃

(注) 壁・床の両表面の熱損失係数和は、寒中工事で常識的に予想される最大値として、寒中コンクリート指針1998年104ページ・解説表9.3で上屋内の床板(風速1m, 合板型枠湿潤7.5, 保温材なし17.4で計24.9⇒26.1 W/m²℃)を想定し、26.1 W/m²℃とした。

表5 断熱養生の実測温度から計算した積算温度と予測計算温度履歴の積算温度との比較 (D-D)

混和剤	材齢日	実測		計算		計算/実測	
		表面	中心	表面	中心	表	中
a2	1	35	36	35	36	1.00	1.00
	3	70	73	79	85	1.13	1.16
	5	92	95	99	106	1.08	1.12
	7	111	114	117	123	1.05	1.08
f3	1	31	32	36	36	1.16	1.13
	3	102	114	102	109	1.00	0.96
	5	118	133	108	117	0.92	0.88
	7	127	141	113	121	0.89	0.86
f1	1	28	28	28	29	1.00	1.04
	3	89	94	91	96	1.02	1.02
	5	106	112	105	112	0.99	1.00
	7	117	124	115	122	0.98	0.98
f2	1	26	34	33	33	1.27	0.97
	3	71	105	99	106	1.39	1.01
	5	89	125	117	124	1.31	0.99
	7	106	142	135	142	1.27	1.00

6. 寒中コンクリート工事断熱養生計画用図の作成

6. 1 仮定条件

寒中コンクリートのコンクリートの打ち込み条件として、次のような計算範囲を設定した。

○仮定したコンクリートの条件

セメントの種類: 普通、早強、高炉B種、フライアッシュB種
コンクリートの単位セメント量: 300kg/m³, 350kg/m³の2種類
混和剤: AE剤使用

打ち込み温度: 20℃, 10℃, 5℃ の3種類

部材は壁・床(無限平板)とし、その厚さは次の8種類とした。

15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 (いずれもcm)

両面の型枠の熱損失係数の和は次の5種類とした。

26.1, 17.4, 12.8, 5.8, 2.3 (W/m²℃)

併上記は22.5, 15, 11, 5, 2 (kcal/m²h℃)と同じ

仮定した気象条件: 平均気温 -10℃, -5℃, 0℃

6. 2 温度履歴計算

温度履歴の計算は5の温度履歴計算ソフトに、打ち込み温度、平均気温、および型枠の熱損失係数の各条件の総組合せを、逐次計算するソフトを作成して行った。その温度履歴計算結果は、コンクリート打ち込み後から部材の表面が0℃に冷えるまでに得られる積算温度としてDISKに記録した。また、その結果の整理に当たり、部材の冷却し難さを示す指数として式(14)の時間定数 τ を用いた。

$$\tau = 698 \cdot V / \Sigma (K \cdot S) \quad (14)$$

ここに

τ : 部材の時間定数 (h)

698: コンクリート1m³の熱容量 (W/m³・℃) (600kcal/m³・℃)

V: 部材のコンクリート容積 (m³)

K: 部材表面の熱損失係数 (W/m²・℃)

S: 部材の表面積 (m²)

(注) 部材の時間定数 τ は、寒中コンクリート施工指針1998年105頁、式(解説9.2)と同じである。この部材の時間定数 τ は、部材の厚さ、表面の保温程度、風速などによる熱損失の増減などの冷却し難さの指数として、一元化した図にすることができた。

6. 3 断熱保温養生計画用図作成

前記のコンクリート温度履歴の計算結果から、セメントの種類・単位セメント量・打ち込み温度別に、コンクリートを打ち込み後部材表面が0℃に冷えるまでに得られる積算温度を、外気温別に各マークで打点して図9に示し、各図で平均気温別に積算温度の下限線を設定した。ただし、下限線よりも10D-D程度小さい点があるが、その部材表面が0℃以下となる時間が2時間以内で短いこと、またコンクリートの凍結温度は0℃より低い(およそ-1.5℃)ことから多少の点は許容して下限線を設定したものである。

(注) フライアッシュB種セメントは殆ど使用されていないので、安全側の高炉セメントの図にまとめた。

図9 部材の時間定数とコンクリートが0℃に冷えるまでに得られる積算温度

6. 4 断熱養生に図9が利用できる範囲の考察

1) 図9の気温別で求める積算温度は $28 \cdot D$ 以上とする。

断熱養生に必要な積算温度は、寒中コンクリート施工指針の解説表9.1 または、解説表9.2 の最右欄に掲載されている。その積算温度の最小値は28である。そのため図9の各気温の下限線は、積算温度が27以下を無視して設定したが、実用上は問題にならない。

2) 部材放熱面の熱損失係数の和は $26.1 \text{ W/m}^2\text{℃}$ 以下とする。

図9の作図に当たり計算した熱損失係数の和の範囲は6.2 (注)にも述べたが、 $26.1 \text{ W/m}^2\text{℃}$ 以上の値では計算していない。もし更に大きな熱損失係数の和の場合、図9の下限線より小さな値で部材表面が0℃以下になる恐れがある。また熱損失係数Kの仮定は、寒中コンクリート指針1998年104 頁・解説表9.3 を参照されたい。

3) 床で保温材料が非対称に配置されていても使用できる。

コンクリート部材の温度履歴計算ソフトで、部材内部の温度分布は、差分的解析手法で計算している。それで図9では、保温材料が非対称な床の場合には、熱損失係数の大きい部材表面が先に0℃に冷え、それまでの部材の平均積算温度で作成してある。実際には上屋内(風速 1 m/s)で床(15cm)を施工する例では、下面が湿潤型枠で上面が無被覆の場合は、時間定数 τ は4(h)程度で、0℃に冷えるまでの積算温度は少なく、上面も保温しなければ断熱養生はできない。

7. おわりに

前報から21年経過してしまった。その間にセメントおよび混和剤

の性状も変わったが、今回は断熱養生の実用化の実験を行うことが出来た。今後寒中の養生計画に役立てていただければ幸いである。

謝辞

この研究は、小生が北見工大に在職中に、土木開発工学科鮎田耕一教授の絶大なご好意により実験を行うことができました。また北見工大卒業生田中聡君、酒井秀一君、片桐礼博君および猪狩平三郎技官のお世話になりました。また施工例としてフジタ札幌支店佐藤民佳課長、今野実所長、同温度測定には北大工学部浜幸雄氏のお世話になりました。ここに、皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Erik Rastrup : Heat of Hydration in Concrete
Magazine of Concrete Research PP.79 ~92, Sep. 1954
- 2) 長島弘 : コンクリート打ち込み後の温度変化に関する研究
第1報 普通ポルトランドセメントの水和熱と時間温度関数
日本建築学会論文報告集 第268号 PP.1~8, 1978, 6
- 3) 長島弘 : コンクリート打ち込み後の温度変化に関する研究
第2報 打ち込み後に得られる各材齢の積算温度
日本建築学会論文報告集 第269号 PP.31 ~38, 1978, 7
- 4) 長島弘 : コンクリート打ち込み後の温度変化に関する研究
第3報 冷却して凍結までに得られる積算温度
日本建築学会論文報告集 第273号 PP.1~12, 1978, 11
- 5) 日本建築学会 寒中コンクリート施工指針・同解説
第4版 PP.105, 1998, 2

(1999年11月5日原稿受理, 2000年4月13日採用決定)