

# 構造体コンクリートの温度履歴に対応した簡易断熱養生条件の検討

## INVESTIGATION OF CONDITIONS FOR SIMPLE INSULATION CURING CORRESPONDING TO TEMPERATURE HISTORY OF CONCRETE STRUCTURE

劉 宏 涛\*, 浜 幸雄\*\*, 友澤史紀\*\*\*, 桑原隆司\*\*\*\*  
Koto RYU, Yukio HAMA, Fuminori TOMOSAWA  
and Takashi KUWAHARA

In this paper, conditions of simple insulation curing of test specimens were studied, for purposes of strength control of concrete structures in cold weather. The temperature histories of the specimens in the simple insulation curing boxes corresponding to those of the concrete structures were researched by means of concrete experiments and temperature analysis by finite element method.

Based on the result of the experiments and the analysis, the conditions of simple insulation curing of test specimens corresponding to the temperature history of concrete structures in cold weather were able to be given by empirical formulae. The accuracy of the formulae was proved by the experiment.

*KeyWords:* Concrete structure; Cold weather concreting; Insulation curing; Temperature history; Time coefficient; Strength control

コンクリート構造体; 寒中コンクリート; 簡易断熱養生; 温度履歴; 時間定数; 強度管理

### 1. はじめに

寒中コンクリートの施工では、構造体コンクリートが低温による影響を受け、強度発現が停滞して時には初期凍害を受ける危険もあるため、適切な施工計画と温度・強度管理が必要になる。

寒中コンクリートの施工に際して、構造体コンクリートの強度管理は、一般に直径が10cmで高さが20cm(Φ10×20cm)の供試体を現場封かん<sup>1),2)</sup>して行う。しかし、この強度管理方法では、供試体コンクリートの単位容積当たりの表面積は、構造体コンクリートに比べて非常に大きくなり、コンクリートの水和発熱が供試体表面から大量に発散することなどから、供試体コンクリートの温度履歴と構造体コンクリートの温度履歴は大きく相違し、適切な温度・強度管理が困難となる。

これらのことから、寒中コンクリートにおける構造体コンクリート強度管理のための合理的な供試体養生方法として、一つには温度追従養生が提案されている<sup>2),3)</sup>。構造体コンクリートの実際の温度履歴に追従する温度条件を、自動的に供試体に与える温度追従養生は、技術的にはすでに確立しているが、設備が高価であり、一般の工事現場では適用が困難な場合も多い。

一方、適当な厚さの断熱材で作った簡易断熱養生箱内に置かれた封かん養生供試体が、構造体コンクリートと類似した温度履歴、強

度発現を示すことを利用した簡易断熱養生は、比較的安価で簡便な方法であるため、近年簡易断熱養生を利用した強度管理方法の研究が行われるようになってきている。既往の研究では、高強度コンクリート<sup>4)~9)</sup>や寒中マスコンクリート<sup>10)</sup>の分野で、適切に強度管理できる可能性が確認されている。しかし、いずれの場合も限定された条件下で行われた実験研究であるため、寒中コンクリートにおける一般の構造体コンクリートに適用するためには、寒中における構造体コンクリートの温度履歴と簡易断熱養生箱の対応関係を明らかにする必要がある。

このため、本研究では、低温環境下で簡易断熱養生を行ったコンクリート供試体の温度履歴について、実験と有限要素法による温度解析を組合わせて検討を行い、構造体コンクリートと簡易断熱養生供試体との間に成り立つ関係性を求めた。また、検証実験によって、低温環境下におけるこの関係式の妥当性を確認した。

### 2. 簡易断熱養生供試体の熱物性値の検討

簡易断熱養生供試体の熱物性値の中で、断熱養生箱の熱貫流率は、環境条件、加工状態や湿度などの影響を大きく受けるため、理論計算で適切に予測することは困難な場合が多い<sup>11)</sup>。このため、実際に実験を行い、実験結果から逆解析を行い、簡易断熱養生箱の熱貫流

\* 北海道大学大学院工学研究科材料性能学研究室  
大学院生・修士(工学)  
\*\* 北海道大学大学院工学研究科材料性能学研究室  
助手・博士(工学)  
\*\*\* 北海道大学大学院工学研究科材料性能学研究室  
教授・博士(工学)  
\*\*\*\* 北海学園大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Engineering Hokkaido Univ., M. Eng.  
Research Assoc., Graduate School of Engineering Hokkaido Univ., Dr. Eng.  
Prof., Dept. Graduate School of Engineering Hokkaido Univ., Dr. Eng.  
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Hokkai-Gakuen Univ., Dr. Eng.

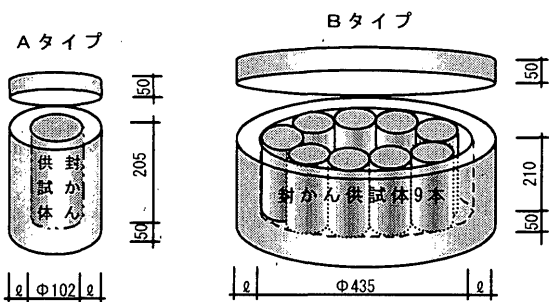
率を求めることとした。

2.1. 簡易断熱養生を行った供試体コンクリートの温度測定

実験計画を表1に示す。断熱養生箱は、図1に示すように養生箱内の全供試体の温度条件が同じとなるように、円筒状の二つタイプ(AタイプとBタイプ)を作製した。また、寸法等の異なる部材への

表1 コンクリート実験計画表

| コンクリート条件                         | 養生温度        | 養生方法            | 供試体条件          | 測定項目                           |
|----------------------------------|-------------|-----------------|----------------|--------------------------------|
| W/C:50%<br>空気量:4.5%<br>打設温度:15°C | 3°C<br>-5°C | 現場封かん<br>簡易断熱養生 | φ10×20cm<br>円柱 | 材齢7日までの<br>コンクリート温度<br>(供試体中心) |



註 φ: 10、30、50mm(Aタイプ), 30、50、70mm(Bタイプ)  
断熱材: ポリスチレンフォームB類2種[JIS A 9511]

図1 簡易断熱養生箱の概要

表2 コンクリートの調合

| 水セメント比 (%) | スランブ (cm) | 空気量 (%) | 粗骨材の最大寸法 (mm) | 細骨材率 (%) | 単位水量 (kg/m³) | 絶対容積 (l/m³) |     |     | 質量 (kg/m³) |     |     | 化学混和剤の使用量(C×%)    |       |
|------------|-----------|---------|---------------|----------|--------------|-------------|-----|-----|------------|-----|-----|-------------------|-------|
|            |           |         |               |          |              | セメント        | 細骨材 | 粗骨材 | セメント       | 細骨材 | 粗骨材 | 空気量調整剤            | AE剤   |
| 50         | 18        | 4.5     | 25            | 48       | 170          | 108         | 328 | 359 | 340        | 869 | 955 | 250ml/C<br>=100kg | 0.003 |

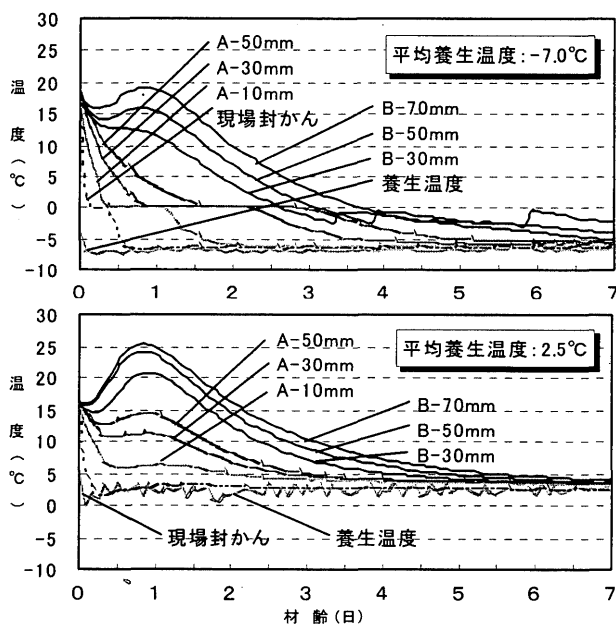


図2 各種養生供試体の温度履歴測定結果

対応を想定して、側面の断熱材の厚さを変化させた合計6種類の断熱養生箱を用いて、コンクリートを打込んだ各養生箱供試体の温度履歴を測定した。なお、実験では普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比50%、単位セメント量340kg/m³、目標空気量4.5%で、スランブ18cm程度の一般的な調合のコンクリートを作り、φ10cmの軽量型枠に入れて封かん状態にして、簡易断熱養生箱内に置いて2回実験を行った。表2に使用したコンクリートの調合を示す。

なお、コンクリートの温度履歴の測定は、-5°C(1回目)及び3°C(2回目)の環境条件での封かん養生及び簡易断熱養生された供試体の中心部とし、打込み直後から材齢7日まで行った。

コンクリートの練上がり温度は、1回目で17°C、2回目で16°Cであった。図2に各供試体の温度履歴の測定結果を示す。この図によると、断熱材が厚いほど、また養生温度が高いほど供試体が高い温度を履歴している。なお、Aタイプは供試体の本数が少ないため水和熱による発熱が少なく、Bタイプに比べ温度上昇が少ないことが分かった。

2.2. 温度解析による簡易断熱養生供試体の熱特性の検討

実験に用いた簡易断熱養生供試体の温度解析を二次元非定常熱伝導有限要素法により行い、実験結果と比較・検討した。なお、解析では、実験で使用したコンクリートと同一の条件を与えることとし、実験結果に基づき、コンクリート練上がり温度、養生温度等を与えて行った。また、コンクリートの温度解析プログラムは、「Maspa95」(清水建設㈱)及び「マスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム」((社)日本コンクリート工学協会)を用いた。解析モデルは、対称性を考慮してA、Bタイプとも1/4のモデルとし、Bタイプについては、解析の簡略化のために、9本の円柱供試体のコンクリート部分を幅100mmの円筒状のコンクリートとしてモデル化した。供試体の解析モデルを図3に示す。

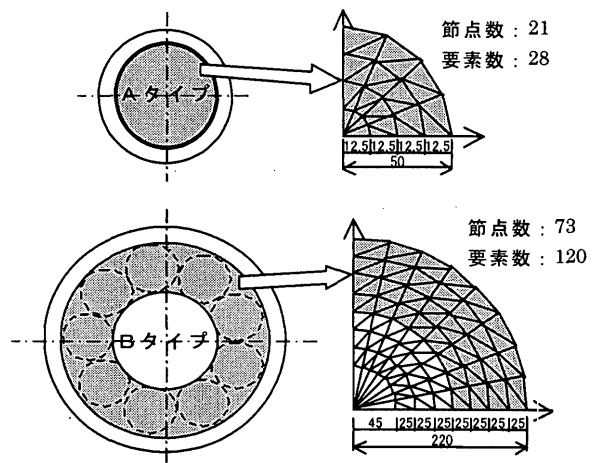


図3 簡易断熱養生供試体の解析モデル

解析結果を実験結果に対応させるためには、断熱箱の総合熱貫流率を適切に設定しなければならないため、ここでは、断熱養生箱の熱貫流率を1~11(W/m²K)までの範囲で変化させて解析を行い、実験結果と解析結果が最もよく対応する条件を求めた。なお、初期水和発熱の影響が大きい材齢7日までに得られる積算温度の実験値と解析値が同等となる条件を見出すこととした。また、コンクリート

の断熱温度上昇式<sup>12)</sup>は式(1)に、簡易断熱養生供試体の温度解析条件を表3に示す。図4に解析に用いた断熱箱の熱貫流率と材齢7日までの積算温度の実験結果と解析結果の差の関係を示す。実験結果と解析結果が最もよく対応する条件は、両者の差が最小となる熱貫流率であり、その結果を表4に示す。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $Q(t)$ : 材齢  $t$  における断熱温度上昇量(°C)  
 $Q_{\infty}$ : 実験定数(終局断熱温度上昇)  
 $r$ : 温度上昇速度に関する定数

表3 実験結果に対応する簡易断熱養生供試体の温度解析概要

| 供試体<br>コンクリート<br>条件                                      | 平均養生<br>温度<br>(°C) | 断熱温度上昇曲線の諸定数 |      |              |      | 簡易断熱養生条件 |              |                              |
|--|--------------------|--------------|------|--------------|------|----------|--------------|------------------------------|
|  |                    | 17°C         |      | 16°C         |      | 種類       | 断熱材厚<br>(mm) | 熱貫流率<br>(W/m <sup>2</sup> K) |
|  |                    | $Q_{\infty}$ | $r$  | $Q_{\infty}$ | $r$  |          |              |                              |
| 単位セメント量:<br>340kg/m <sup>3</sup><br>練上がり温度:<br>17°C、16°C | -7<br>2.5          | 50.82        | 1.07 | 50.96        | 1.01 | Aタイプ     | 10, 30, 50   | 1~11                         |
|  |                    |              |      |              |      | Bタイプ     | 30, 50, 70   | 1~11                         |

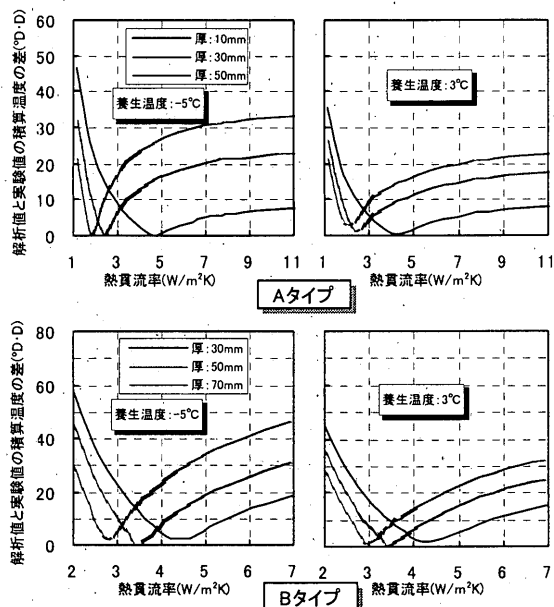


図4 断熱材の熱貫流率による実験結果と解析結果の材齢7日までの積算温度の差

表4 実験結果に対応する簡易断熱養生箱の修正熱貫流率

| Aタイプ                 |                              | Bタイプ                 |                              |
|----------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|
| 簡易断熱養生箱<br>断熱材の厚(mm) | 熱貫流率<br>(W/m <sup>2</sup> k) | 簡易断熱養生箱<br>断熱材の厚(mm) | 熱貫流率<br>(W/m <sup>2</sup> k) |
| 10                   | 4.35                         | 30                   | 4.38                         |
| 30                   | 2.32                         | 50                   | 3.42                         |
| 50                   | 2.03                         | 70                   | 2.89                         |

表4によると、簡易断熱養生箱の断熱材厚さが厚いほど、または放熱面積が小さいほど熱貫流率が小さい傾向を示している。また、このように求めた総合熱貫流率は、理論計算値<sup>13)</sup>より大きい値を示している。例えば、断熱材厚さが30mmのAタイプとBタイプの簡易断熱養生箱の熱貫流率は、理論計算値の0.97と1.23W/m<sup>2</sup>kに対して実際の修正熱貫流率は2.32と4.38W/m<sup>2</sup>Kとなった。

### 3. 部材の温度履歴に対応する簡易断熱養生の条件の検討

建築工事現場に一般に使われている壁、スラブ、柱及び梁部材を対象として構造体コンクリートの温度履歴に対応した断熱養生箱の条件を明らかにするために、部材及び簡易断熱養生供試体について、2と同様に二次元有限要素法による温度解析を行い、それぞれの解析結果を重回帰分析して、得られた回帰式から両者の対応関係式を求めた。

#### 3.1. コンクリート部材と簡易断熱養生供試体の温度解析

コンクリート部材の温度解析は、部材の大きさ、単位セメント量及び外気温を変化させ、簡易断熱養生供試体の温度解析は、断熱材厚さ、単位セメント量及び外気温を変化させて行った。簡易断熱養生箱の熱貫流率は、2で求めた値を用いた。なお、寒中コンクリートの強度管理にあたって、表面温度が内部温度より低いことを考慮してコンクリート部材の表面の温度を管理対象とした<sup>10)</sup>。コンクリート部材と簡易断熱養生供試体の温度解析の概要を表5に示す。

表5 コンクリート部材と簡易断熱養生供試体の温度解析概要

| コンクリートの条件  | 打込温度及<br>断熱諸定数                      |       | 養生<br>温度<br>(°C) | 部材・供試体の解析条件  |               |                                      |                     |             |
|--|-------------------------------------|-------|------------------|--------------|---------------|--------------------------------------|---------------------|-------------|
|  | 15°C                                |       |                  | 種 類          | 厚 さ<br>(mm)   | 養生材の<br>熱貫流率<br>(W/m <sup>2</sup> K) |                     |             |
|  | $Q_{\infty}$                        | $r$   |                  |              |               |                                      |                     |             |
| 普通ポルト<br>ドセメント<br>スラブ: 18cm<br>AE減水剤使用<br>単位セメント量:<br>(右欄) | 430kg/m <sup>3</sup><br>(W/C=40%相当) | 61.45 | 1.19             | -5<br>0<br>3 | 部 材           | 壁 120~780                            | 合板型枠<br>養生材<br>8.12 |             |
|  | 340kg/m <sup>3</sup><br>(W/C=50%相当) | 51.10 | 0.95             |              | スラブ           | 90~390                               |                     |             |
|  | 280kg/m <sup>3</sup><br>(W/C=60%相当) | 44.20 | 0.79             |              | 柱             | 120~780                              |                     |             |
|  |                                     |       |                  |              | 梁             | 180~420*                             |                     |             |
|  |                                     |       |                  |              | 供試体<br>(中心温度) | Aタイプ 10, 30, 50                      |                     | 断熱材<br>表4参照 |
|  |                                     |       |                  |              | Bタイプ          | 30, 50, 70                           |                     |             |

\*: スラブ部の厚さが150mmとし、梁の高さと幅の割合が1.5の一定とした。

表6 コンクリート部材の時間定数(τ)

| 部 材 種 類 |  | 時 間 定 数 (h)                            |  |
|---------|--|--|--|
|         |  | —                                      | 壁との換算  |
| 壁       |  | $\frac{698}{k_1+k_2} \cdot l$          | 1  |
| スラブ     |  | $\frac{698}{k_0+k_2} \cdot d$          | $\frac{k_1+k_2}{k_0+k_2} \cdot \frac{d}{l}$          |
| 柱       |  | $\frac{349}{k_2} \cdot \frac{LB}{L+B}$ | $\frac{k_1+k_2}{k_2} \cdot \frac{LB}{2(L+B)}$        |
| 梁       |  | $\frac{698(d+Bh)}{k_0+(1+2h)k_2}$      | $\frac{k_1+k_2}{k_0+(1+2h)k_2} \cdot \frac{d+Bh}{l}$ |

\*: 近似値

また、コンクリート部材の解析結果の整理にあたって、各種類の部材の大きさと保温の程度を、物体の冷え難さの指標とした部材の時間定数(τ)のパラメーターとして整理した。ニュートンの冷却式の指数部分の時間定数の算出式は、式(2)式で与えられる<sup>2)</sup>。各部材の時間定数及び壁部材に対する時間定数の換算関係を表6に示す。同表を利用することによって、多種類の部材間の温度性状の比較・換算を、容易に行うことができる。また一般に、コンクリート部材の時間定数が大きいほど、部材が冷え難いとされている。

$$\tau = 698V / \sum (k \cdot S) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\tau$ : 部材の時間定数(h)

$S$ : 部材表面放熱面積(m<sup>2</sup>)

V : 部材のコンクリート容積(m<sup>3</sup>)  
 698 : コンクリート1m<sup>3</sup>の熱容量(J/m<sup>3</sup>K)  
 k : 部材表面の熱損失係数(W/m<sup>2</sup>K)

部材及び簡易断熱養生供試体の温度解析結果から、材齢7日までの積算温度を算出し、得られた材齢7日までの積算温度を目的変数として重回帰分析を行った。説明変数は、部材では時間定数、単位セメント量及び養生温度とし、簡易断熱養生供試体では断熱材厚さ、単位セメント量及び養生温度とした。分析の結果、式(3)及び式(4)、(5)に示す重回帰式が得られた。各式ともに非常に良い相関を示していることが分かる。

部材側:

$$Y = 3.09X_1 + 0.11X_2 + 5.95X_3 + 35.11 \quad (R=0.996) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、Y : 材齢7日までの積算温度(°D·D)

X<sub>1</sub> : 部材の時間定数(h)  
 X<sub>2</sub> : 単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)  
 X<sub>3</sub> : 養生温度(°C)

簡易断熱養生供試体側:

Aタイプ:

$$Y' = 0.39X_1' + 0.04X_2' + 6.57X_3' + 69.61 \quad (R=0.994) \quad \dots\dots (4)$$

Bタイプ:

$$Y' = 0.57X_1' - 0.10X_2' + 9.40X_3' + 124.14 \quad (R=0.989) \quad \dots\dots (5)$$

ただし、Y' : 材齢7日までの積算温度(°D·D)

X<sub>1</sub>' : 断熱材厚さ(mm)  
 X<sub>2</sub>' : 単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)  
 X<sub>3</sub>' : 養生温度(°C)

3.2. コンクリート部材と簡易断熱養生供試体の対応関係

寒中コンクリートでは、初期凍害防止と初期養生打切り・型枠取外し時期の決定のための構造体コンクリートの温度・強度管理は、極めて重要である。また、一般にマッシュな部材を除いて、部材は殆ど材齢1週間以内に最高温度に到達して、その後養生温度に近づいていく。これらのことから、本研究では、材齢1週間までのコンクリート部材の温度を、簡易断熱養生供試体を用いて管理することとした。

3.1の温度解析結果を重回帰分析して得られた式(3)~(5)において、部材と簡易断熱養生供試体の材齢7日までの積算温度が同等となる条件を求めると、式(6)、(7)が得られる。

Aタイプ-部材:

$$X_1' = 7.92X_1 + 0.18X_2 - 1.59X_3 - 88.46 \quad \dots\dots (6)$$

Bタイプ-部材:

$$X_1' = 5.42X_1 + 0.37X_2 - 6.05X_3 - 156.19 \quad \dots\dots (7)$$

式(6)、(7)は、部材の時間定数、コンクリートの単位セメント量及び養生温度に基づいて、構造体コンクリートと類似の温度履歴を供試体に与える断熱養生材厚さを求めることができる式である。

なお、式(6)、(7)は、Aタイプの供試体の発熱による温度上昇がBタイプより小さいことから、コンクリート部材の温度・強度を管理する際、部材寸法または発熱量に応じて使い分けることができる。図5に単位セメント量が340kg/m<sup>3</sup>、打設温度15°Cの場合のコンクリート部材の時間定数と断熱養生箱の断熱材厚さの対応関係を

示す。同図によると部材の時間定数が多いほど、または養生温度が低いほど、積算温度が同等となる供試体の簡易断熱養生の断熱材は厚くなる事が分かる。

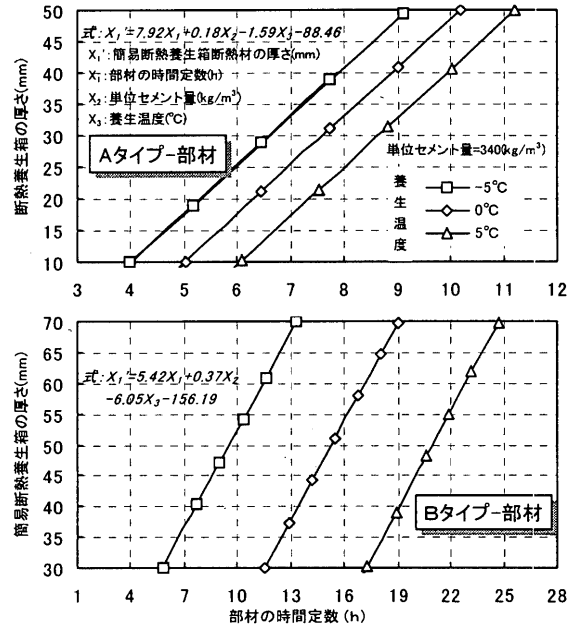


図5 部材の時間定数と簡易断熱養生箱の断熱材厚の対応関係

3.3. コンクリート部材と簡易断熱養生供試体の対応関係の適用範囲

以上の検討で求めた構造体コンクリートと簡易断熱養生供試体の対応関係は、寒中コンクリート工事で一般に取扱われるコンクリート部材、外気温及び打込み温度等の条件のもとで成り立つ。構造体コンクリートは、普通ポルトランドセメント使用、単位セメント量280~430kg/m<sup>3</sup>(W/C=40~60%相当)、部材の時間定数:2~30h(合板型枠で養生した壁部材で厚さ60~690mmに相当)で打込み温度15°C程度のもので対応する。簡易断熱養生箱は、A、Bタイプ各3種類、計6種類のいずれかの使用を想定している。また、外気温は-5~5°Cの範囲である。以上の範囲において、簡易断熱養生供試体に適用できるコンクリート部材の時間定数を、図6に示す。

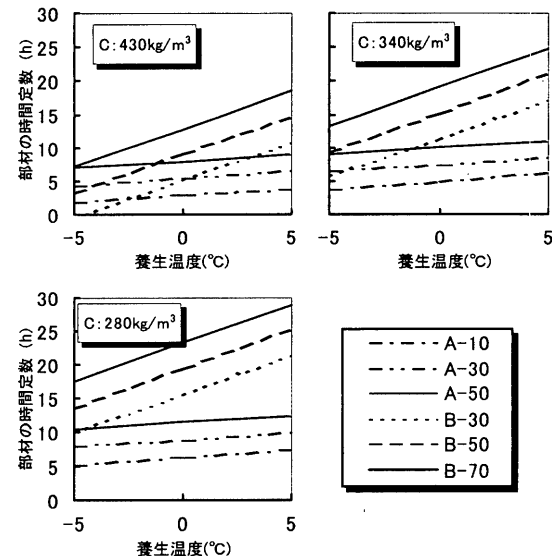


図6 簡易断熱養生供試体に適用するコンクリート部材時間定数の範囲

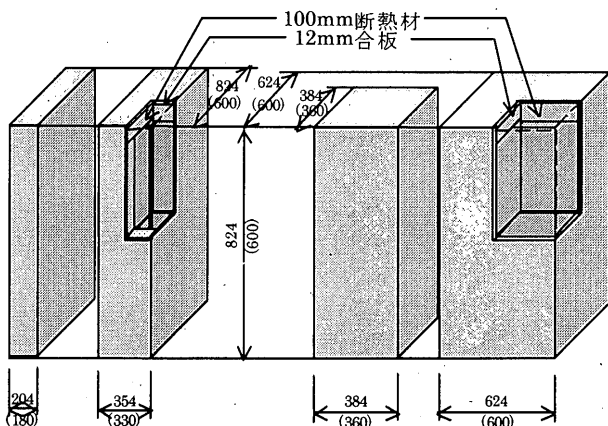
なお、外気温、セメントの種類及び打込み温度等の条件が上記と相違する場合の簡易断熱養生供試体と構造体コンクリートの対応関係を求める場合には、本研究で導入した手法に基づいて実験・検討を行えばよいものと考えられる。

また、本管理システムの実施工での利用を想定し、管理期間に外気温の変動が生じた場合を考えると、以下①、②の検討を加える必要がある。

- ①. 管理期間に外気温が予想平均外気温より低くなる場合、式(6)、(7)によって算定される簡易断熱養生箱の厚さが厚くなる。この場合は、簡易断熱養生箱を変えずに管理すると、安全側の管理が行えるものと判断される。
- ②. 管理期間に外気温が予想平均外気温より高くなる場合、式(6)、(7)によって算定される簡易断熱養生箱の厚さが薄くなる。この場合、簡易断熱養生箱を変えずに管理すると危険側の管理になると判断されるので、再計算で得られた厚さの薄い簡易断熱養生箱に移す等の措置を取る必要がある。

#### 4. 検証実験

2と3の実験・検討で得られた簡易断熱養生供試体とコンクリート部材の対応関係の妥当性を確認する目的で、低温の室内において、壁と柱のコンクリート部材と、それに対応する簡易断熱養生供試体を作製し、検証実験を行った。



注 括弧内の数字がコンクリートの実寸法である。

図7 コンクリート部材試験体の概要

表7 検証実験の概要計画

| 試験体養生方法                      | 供試体養生方法                       | 養生温度 | 測定項目                       |
|------------------------------|-------------------------------|------|----------------------------|
| 壁<br>4端100mm断熱材<br>表面12mm合板  | 現場封かん<br>簡易断熱<br>温度追従<br>標準水中 | 2.5℃ | 試験体表面、供試体中心の温度履歴(1Wまで)     |
| 柱<br>上下端100mm断熱材<br>表面12mm合板 |                               |      | 試験体(温追・コア)、供試体の材齢3、7日の圧縮強度 |

表8 コンクリートの調合と練上がり性状

| W/C (%) | s/a (%) | 質量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     | 混和剤 (kg/m <sup>3</sup> ) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 打込温度 (°C) |
|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|--------------------------|-----------|---------|-----------|
|         |         | C                       | W   | S   | G   |                          |           |         |           |
| 47      | 45      | 347                     | 165 | 817 | 980 | 3.23                     | 19        | 4.3     | 22        |

実験に用いた壁部材試験体(2水準)は、上下方向と長さ方向に無限大で、角柱部材試験体(2水準)は、高さ方向に無限大の部材を想定して、壁の両側面と柱の周囲(4面)を除いて、厚さ100mmの断熱材で覆った。部材試験体の寸法・養生方法等を図7に示す。実験の概要は表7に示す。使用したコンクリートは、水セメント比が47.6%で、普通ポルトランドセメントと標準型AE減水剤を使用したレディミクストコンクリートとした。コンクリートの調合及び練混ぜ直後の性状を表8に示す。なお、部材試験体からのコア切り位置は、各試験体の側面を均等に4つ分割にして、各部分の中心部から採取した。

4体の部材試験体の温度履歴に対応する簡易断熱養生箱の断熱材厚さは、式(6)、(7)に計画養生温度、単位セメント量及び部材表面の養生状況などの条件を与えて試算した。その結果表9に示すように、180mm壁試験体と360mm角柱試験体では、Aタイプで断熱材厚さが31.3mmとなり、330mm壁試験体、600mm角柱試験体では、Bタイプで断熱材厚さが33.9、26.9mmとなった。このため、A、Bタイプとも30mmの断熱箱を用いることにした。

材齢7日までの部材試験体と簡易断熱養生供試体の温度履歴の比較を図8に、材齢3日及び7日の試験体及び簡易断熱養生供試体の圧縮強度の比較を図9に示す。図8によると、簡易断熱養生供試体

表9 部材試験体の温度履歴に対応する簡易断熱養生箱の選定

| 部材試験体     | 時間定数 (h) | 簡易断熱養生箱 |           |      |
|-----------|----------|---------|-----------|------|
|           |          | タイプ     | 厚さ計算値(mm) | 選定   |
| 壁(180mm)  | 7.74     | A       | 31.3 (式6) | A-30 |
| 角柱(360mm) | 7.74     | A       | 31.3 (式6) |      |
| 壁(330mm)  | 14.18    | B       | 33.9 (式7) | B-30 |
| 角柱(600mm) | 12.89    | B       | 26.9 (式7) |      |

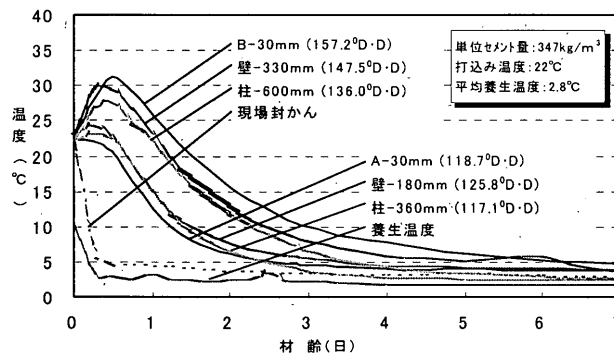


図8 部材試験体と簡易断熱養生供試体の温度履歴の比較

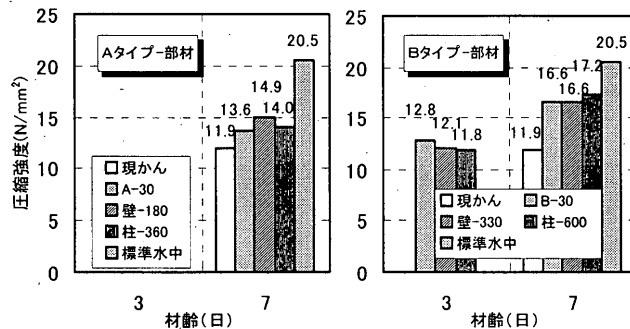


図9 部材試験体と簡易断熱養生供試体の圧縮強度の比較

と部材試験体の温度履歴は良く対応しており、それぞれの材齢7日までの積算温度は、180mm壁試験体と360mm角柱試験体では125.8と117.1( $^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ )で、Aタイプ30mm簡易断熱養生供試体では118.7( $^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ )となった。また、330mm壁試験体と600mm角柱試験体では147.5と136.0( $^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ )で、Bタイプ30mm簡易断熱養生供試体では157.2( $^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ )となった。図9によると、温度履歴の対応している部材試験体コア強度と簡易断熱養生供試体強度は、よい相関関係を示している。

また、コンクリート部材試験体の時間定数が同一(180mm壁と360mm角柱試験体)であるか、または類似(330mm壁と600mm角柱試験体)している場合には、温度履歴・圧縮強度も、ほぼ同一または類似した値を示すことが分かった。このことから、部材間の時間定数による換算式の妥当性が、実験結果で確認された。

以上の検証実験結果から、寒中コンクリート工事において、本研究で導いた関係式によって選定した簡易断熱養生供試体を使用することにより、構造体コンクリートの温度履歴・強度発現に対応する温度・強度の管理を行える可能性が確認された。

## 5. まとめ

本研究では、寒中コンクリート施工における適切な温度・強度の管理を目的として、簡易断熱養生箱内に置かれた封かん養生供試体を用いた管理方法に関する検討を行った。検討は、実験と有限要素法による温度解析を組合わせて行い、低温環境下において構造体コンクリートと簡易断熱養生供試体との間に成り立つ関係式を求めた。また、検証実験によって、低温環境下におけるこの関係式の妥当性の確認を行った。

本研究で得られた主要な結論は、以下の通りである。

- (1). 簡易断熱養生箱の熱貫流率は、理論計算に基づく小さめの値を示す傾向にあることから、実験結果に基づく逆解析によって、総合熱貫流率を求めた。この総合熱貫流率を使用することによって、簡易断熱養生供試体の温度解析精度の向上を図ることができる。
- (2). コンクリート部材の種類・大きさと保温の程度を、物体の冷え難さの指標とした時間定数の簡易算定式と部材間の換算式を求めた。その結果、部材間の温度性状の比較・検討が容易に行えるようになった。
- (3). コンクリート打込み後材齢7日までの部材積算温度は、時間定数、単位セメン量と養生温度を説明変数とする重回帰式で精度良く算定できる。
- (4). 材齢7日までのコンクリート部材の積算温度に近似した温度を、簡易断熱養生箱内の封かん養生供試体に与えるための断熱材厚さを、時間定数、単位セメン量と養生温度から算定する実験式を求めた。また、その実験式の妥当性を検証実験で確認した。

なお、本研究では実大の模擬部材による検証実験まで行ったが、実施工コンクリート部材に対する検証は、今後の課題となる。

## 謝 辞

本研究を行うに際して、故 鎌田 英治前北海道大学教授よりご指導を戴いた。先生のご冥福を祈念致します

また、実験の遂行に際しては、平成11年度の卒業生の友森 勇太氏(現東京工業大学の大学院生)、北海学園大学の菊池 守氏、岩田建設株式会社技術開発室の那須 豊治氏より多大な協力を戴いた。なお、コンクリートの温度解析に関しては、株式会社シー・アンド・アールコンサルタントの小野 定氏からご助言、ご教示を戴いた。

ここに、ご指導、ご協力の各氏に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事， pp. 351～361, 1997. 1
- 2) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説， pp. 129～133, pp. 104～109, 1998. 2
- 3) Takashi Kuwahara and Yoshiro Koh: Computerized Thermal and Strength Simulation System for Concrete Structures, ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 2, 117-125, ACI, 1995. 3-4
- 4) 太田 孝浩：簡易断熱養生による実構造体の強度予測， セメント・コンクリート， No. 586, pp. 42～47, 1995. 10
- 5) 大野 純範， 山本 晃久， 吉田 襄， 飯田 祐吉， 太田 孝浩， 飛坂 基夫：簡易断熱養生供試体による構造体強度の推定， 日本建築学会大会学術講演梗概集， pp. 291～292, 1994. 9
- 6) 依田 和久， 桜本 分敏， 吉田 宗司， 小高 蔵央：高強度コンクリート用セメントの性能評価に関する実験的研究， コンクリート工学年次論文報告集， Vol. 16, No. 1, pp. 243～248, 1994
- 7) 西田 浩和， 山尾 信一， 横須賀 誠一， 小林 仁：高強度コンクリートの強度補正值に関する検討， 日本建築学会大会学術講演梗概集， pp. 9～10, 1999. 9
- 8) 大倉 真人， 西村 進， 古賀 一八：高強度コンクリートへの低熱ポルトランドセメントの適応性について， 日本建築学会大会学術講演梗概集， pp. 11～12, 1999. 9
- 9) 陣内 浩， 早川 光敬， 並木 哲， 黒岩 秀介， 後藤 和正， 黒羽 健嗣：簡易断熱養生による高強度コンクリートの構造体強度予測手法， 日本建築学会技術報告集 第11号， pp. 17～20, 2000. 12
- 10) 劉 宏涛， 桑原 隆司， 浜 幸雄：寒冷期に施工するマスコンクリートの強度管理方法の基礎的研究， 日本建築学会構造系論文集 第541号， pp. 59～63, 2001. 3
- 11) 潮田 和司， 西田 徳行， 土橋 吉輝， 松井 邦人：熱特性同定におけるデータ長の設定と既知パラメータ誤差の影響評価， コンクリート工学論文集 第9巻第2号 pp. 53～63, 1998. 7
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編， pp. 127, 1996
- 13) 長谷川 寿夫， ほか9名：北方型住宅の熱環境計画， 社団法人 北海道住宅リフォームセンター(監修 北海道建設部)， pp. 17～25, 1998. 2

(2001年3月28日原稿受理，2001年9月4日採用決定)