

# 論文 簡易断熱容器の形状が断熱温度上昇特性の推定に及ぼす影響

室野井 敏之<sup>\*1</sup>・井上 量介<sup>\*1</sup>・溝渕 利明<sup>\*2</sup>

**要旨:** マスコンクリート構造物の施工においてセメントの水和発熱に起因する温度ひび割れが問題となる場合がある。現在、温度ひび割れの検討として温度応力解析が広く行われている。温度応力解析の更なる精度向上のために、実際の構造物の物性値を用いて解析を行うことが望ましい。本研究では発泡スチロール製の簡易断熱容器を用いて断熱温度上昇特性を推定することを目的として検討を行った。また断熱温度上昇試験機より得られた断熱温度上昇特性と比較し供試体に対する簡易断熱容器の容積率がコンクリートの温度上昇特性に与える影響を確認できた。

**キーワード:** 温度ひび割れ, マスコンクリート, 断熱温度上昇特性, 高炉セメント

## 1. はじめに

マスコンクリート構造物の耐久性を損なう要因としてセメントの水和熱による温度ひび割れがある。コンクリートの温度ひび割れに影響する因子は、セメントの発熱率、コンクリートの熱伝導率、比熱、熱膨張係数、外気温等数多い。現在温度ひび割れの検討は温度応力解析が広く行われている。温度応力解析では、これらの因子を過去のデータを参考とした標準値を用いて行っている。正確な温度分布やひび割れ発生の予測を行うためには、実際に近い物性値を用いた解析モデルによる温度応力解析が必要となる。

本研究では、コンクリートに温度ひび割れを生じさせる要因となるセメントの水和熱に伴うコンクリート温度変化をより精度よく把握することを目的に、温度変化に大きな影響を与える断熱温度上昇特性をできるだけ簡便に推定するための検討を行った。

## 2. 検討の概要

通常、断熱温度上昇特性を把握するためには高価で大型な断熱温度上昇試験機を用いる場合があるが、施工現場での断熱温度上昇試験機の適用は不向きといえる。本検討では、断熱温度上昇試験機に替わり、安価な発泡スチロール製の簡易断熱容器を用いた簡易断熱温度上昇試験を行った。また、本検討では簡易断熱容器で断熱温度上昇試験を行うために用いるコンクリートの容積と断熱容器の容積との割合の容積率を変え、断熱温度上昇特性をより正確に把握するために必要な簡易断熱容器

の形状の推定を行った。さらに、簡易断熱容器を用いて断熱養生下での強度特性を推定することを目指すためφ100×200mmの円柱供試体で試験が行えるように設計した。

本検討では、コンクリートの容積と簡易断熱容器の容積との割合の容積率が異なる簡易断熱容器を5種類使用して実験を行った。各簡易断熱容器ともに中心に配置されたコンクリート供試体で温度計測を行い、温度応力解析ソフトを用いて実測値との同定解析を行って、断熱温度上昇特性を推定した。各簡易断熱容器と断熱温度上昇試験機より得られた断熱温度上昇特性を比較して断熱温度上昇特性を推定するのに適した簡易断熱容器のコンクリートの容積と断熱容器の容積との割合の容積率を選定した。

## 3. 使用材料およびコンクリート配合

本検討では、東京都の自動車橋の橋脚部（高さ42m×幅12m×奥行き7.4m 中心部中空・最大部材厚さ1.5m）に使用されたコンクリートと同等な配合で実験を行った。使用したコンクリートの示方配合を表-1、使用材料の詳細を以下に示す。

### 3.1 コンクリート配合

本研究で行った実験で使用した配合は対象となる実構造物の配合を用いた。

#### (1) セメント

本研究で使用するセメントは温度ひび割れが発生していると多く報告を受けている高炉セメントB種のひ

表-1 示方配合

組骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE 減水剤
20	8.5±2.5	50	4.5±1.5	47.7	164	328	852	947	4.264

\*1 法政大学 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

\*2 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科教授 博士 (工学) (正会員)

び割れ抵抗性を高めるべく、高炉スラグセメントの比表面積、高炉スラグ微粉末の置換率およびせっこう量を JIS の範囲内で調整した低発熱・収縮抑制型の高炉セメント B 種<sup>1)</sup>を使用した。密度は  $2.98\text{g/cm}^3$  である。

(2) 細骨材

細骨材は、青梅産の砕砂と市原産の山砂を 7 : 3 の割合で混合して使用した。砕砂の表乾密度は、 $2.61\text{g/cm}^3$ 、吸水率は 1.05%、山砂の表乾密度は  $2.52\text{g/cm}^2$ 、吸水率は 2.28% であった。

(3) 粗骨材

粗骨材は、青梅産の硬質砂岩碎石を用いた。粗骨材の最大寸法は 20mm、表乾密度は  $2.66\text{g/cm}^3$ 、吸水率は 0.50% のものを使用した。

(4) 混和剤

AE 減水剤はリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体を使用し、AE 剤は変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を使用した。

4. 実験概要

4.1 簡易断熱容器

断熱温度上昇特性の推定では簡易断熱容器内のコンクリート供試体中心部に熱電対を埋設し温度計測を行い、温度履歴より断熱温度上昇特性を推定した。使用した簡易断熱容器の概略と概略図(図-1 から 図-5)を以下に示す。

(1) 簡易断熱容器 (A タイプ)

図-1 に示す簡易断熱容器は、幅 900×長さ 900×高さ 900mm の発泡スチロール製の容器で中心部に六角形のスペースに  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の供試体を 13 本養生でき、供試体の間隙を発泡ビーズにより充填し断熱状態を再現できるように設計された簡易断熱容器である。以降これを A タイプと称す。実験では、中心に配置される供試体の中心部に熱電対を埋設し温度計測を行った。

(2) 簡易断熱容器 (B タイプ)

図-2 に示す簡易断熱容器は、幅 900×長さ 1200×高さ 900mm の発泡スチロール製の容器で  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の供試体を 15 本養生でき、A タイプでの簡易断熱容器の供試体の間隙を埋設していた発泡ビーズに代わり写真-1 に示す供試体形状にあわせた発泡スチロール製のブロック (140×140×220mm) を用いて断熱効果をより向上させるようにして供試体の間隙を充填するように改良した簡易断熱容器である。また強度試験等で供試体採取した際には写真-2 に示す写真-1 と同寸法の発泡スチロール製のブロックを詰め替え断熱状態を保つように設計されている。さらに内蓋をつけ、断熱効果を高めるように設計されている簡易断熱容器である。以降これを B タイプと称す。実験では、中心に配置される供試体

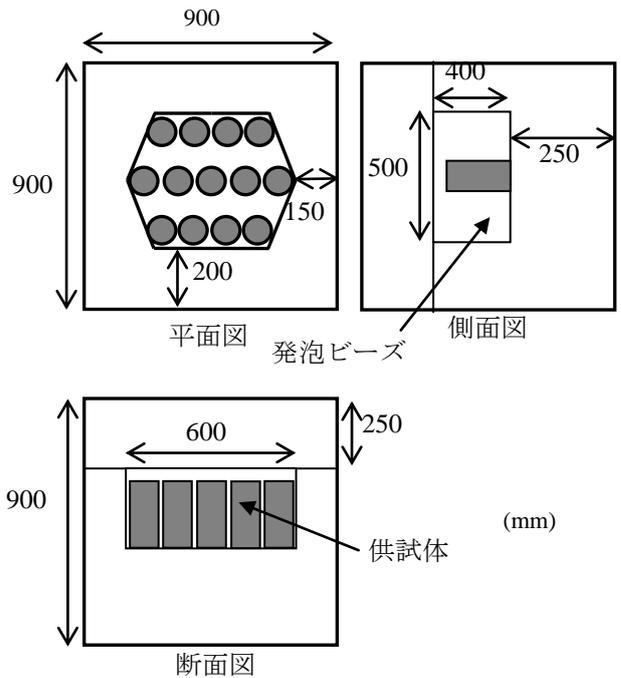


図-1 Aタイプ概略図

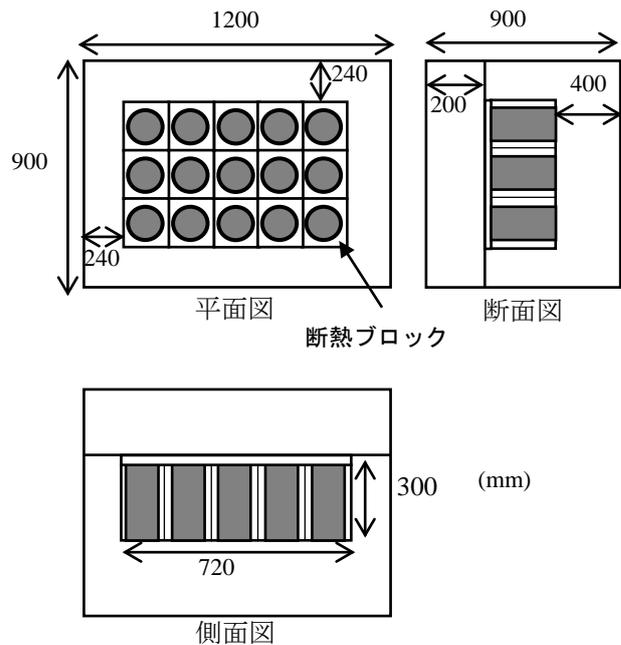


図-2 Bタイプ概略図



写真-1 断熱ブロック



写真-2 詰換えブロック

の中心部に熱電対を埋設し温度計測を行った。

図-3 に示す簡易断熱容器は断熱温度上昇特性の推定の精度を高めるために中央部の発泡スチロール製のブロック 9 個分にコンクリート (400×400×200mm) を打ち込み、コンクリート量を増やしたものである。この増量した供試体中心位置に熱電対を埋設し温度計測を行った。

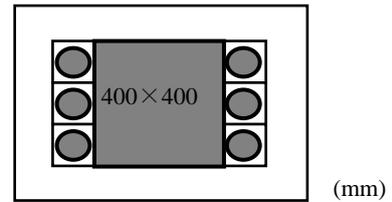


図-3 コンクリート増量Bタイプ概略図

図-4 に示す簡易断熱容器は、B タイプの簡易断熱容器の周囲に断熱材を増量できるように改良した簡易断熱容器である。簡易断熱容器の短辺側で断熱材を 0～100mm (20mm ピッチ) で断熱容積を調節できるように改良した。長辺部側には、調整する断熱材を簡易断熱容器の周囲で固定できるように厚さ 200mm の断熱材を配置し、ボルトを通して調整する断熱材を挟み、固定できるようにした。

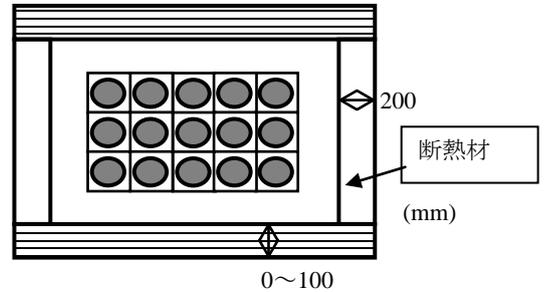


図-4 断熱材増量Bタイプ概略図

(3) 簡易断熱容器 (C タイプ)

図-5 に示す簡易断熱容器は幅 900×長さ 1460×高さ 935mm の発泡スチロール製の容器でφ100×200mm の供試体を 12 本養生でき、発熱量を増やすために容器の中央に容量φ300×450mm の供試体を設置できるようにした。また中心部の供試体を大きくしたことや現場で使用するための十分な強度を得るために図-1 から図-4 に示す簡易断熱容器よりも密度を高くした。φ300×450mm の供試体の中心部で温度計測を行った。

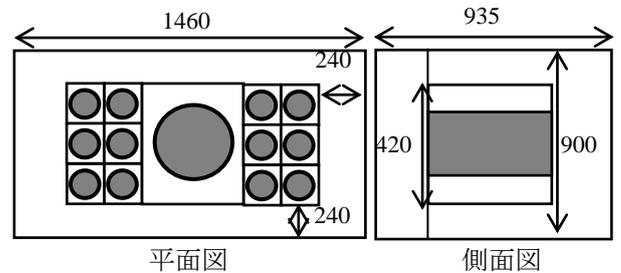


図-5 Cタイプ概略図

4.2 簡易断熱温度上昇試験

簡易断熱容器を用いて行った断熱温度上昇特性の推定は、簡易断熱容器を用いて得られたコンクリートの温度履歴より温度解析ソフトを用いて同定解析を行った。同定解析はコンクリートの打込み温度から温度が収束するまでの区間で同定解析を行い、得られた結果を断熱温度上昇特性とした。表-2 に解析に用いた物性値を示す。また、表-3 に簡易断熱容器の断熱材の物性値を示す。同定解析で使した断熱温度上昇式を式 (1) に示す。

$$T = K \left[ 1 - \exp \left\{ -\alpha (t - t_0)^\beta \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、Kは終局断熱温度量 (°C)、αは上昇速度に関する定数、βは上昇速度に関する定数、t<sub>0</sub>発熱遅れ時間 (日)、t 齢 (日) とする。

4.3 簡易断熱容器に必要な発熱量の検討

本検討では、断熱温度上昇試験で得られる断熱温度上昇式と簡易断熱温度上昇試験結果から同定される断熱温度上昇式が一致するのに必要な発熱容積を検討するために、図-1～図-5 に示す簡易断熱容器のコンクリートの容積に対する簡易断熱容器の容積の容積率と断熱温度上昇特性との関係について比較を行った。ここで、容積率は、次式で定義することとした。

表-2 解析条件

項目	種別	解析条件
熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> °C]	コンクリート	2.7
	発泡ビーズ	0.05
	断熱材	0.027
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	コンクリート	2400
	発泡ビーズ	12
	断熱材	11

表-3 簡易断熱容器の断熱材の物性値

	熱伝導率 (W/m <sup>2</sup> °C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (kJ/kg°°C)
A タイプ	0.06	11.0	1.15
発泡ビーズ	0.05	12.0	1.15
B タイプ	0.06	11.0	1.25
C タイプ	0.03	66.7	1.16

$$\text{容積率} = V_c / V_a \quad (2)$$

ここで  $V_c$  は簡易断熱容器中のコンクリート容積の合計 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $V_a$  は簡易断熱容器の容積 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) とする。

#### 4.4 供試体寸法と断熱温度上昇特性の関係

簡易断熱容器を用いて断熱温度上昇特性を推定する場合の測定点となるコンクリート供試体の寸法が推定精度に及ぼす影響を把握するため、図-6 に示す簡易断熱容器に  $\phi 300 \times 200\text{mm}$ 、 $\phi 150 \times 200\text{mm}$ 、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  を簡易断熱容器の中心に各一本のみを配置して間隙を発泡ビーズで充填し、簡易断熱試験を行った。得られた断熱温度上昇特性と断熱温度上昇試験機の断熱温度上昇特性の比較を行った。

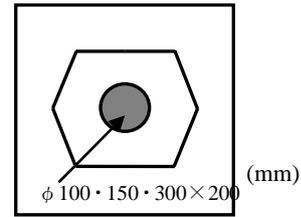
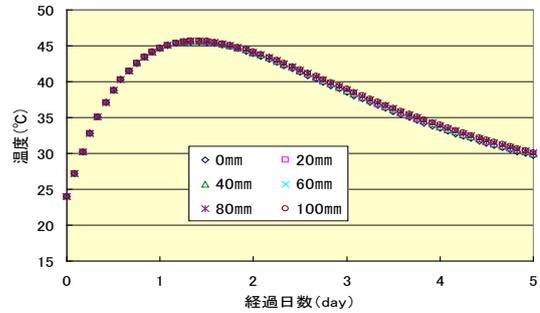


図-6 供試体寸法別での簡易断熱試験



### 5. 実験結果

#### 5.1 簡易断熱容器の断熱材厚さ変化

断熱材の厚さが断熱効果に及ぼす影響を確認するために断熱材の厚さを調整した図-4 の簡易断熱容器で 0～100mm (20mm ピッチ) での温度解析を行い、解析で得られた温度履歴を図-7 に示す。断熱材を 0mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm, 100mm と調整して行った温度解析による温度履歴は最高温度の違いはほとんど確認できなかった。一方、最高温度到達後の温度収束時には断熱材厚くすることで僅かではあるが断熱効果を確認することができた。また、断熱材の厚さを調整した図-4 の簡易断熱容器で断熱材を 0mm(外付け断熱材不使用時)の簡易断熱容器と断熱材を短辺に 20mm 配置し簡易断熱容器で実際にコンクリートを打込み、温度測定を行った。得られた温度履歴を図-8 に示す。実際にコンクリートを打ち込み行われた図-8 の温度履歴では、図-7 の温度履歴同様に最高温度での違いに大きな違いは確認できなかった。最高温度到達後の温度収束時には簡易断熱容器の短辺側に断熱材を 20mm 配置することで温度収束が緩やかになることが確認できた。

図-7 断熱材厚さ別の解析結果

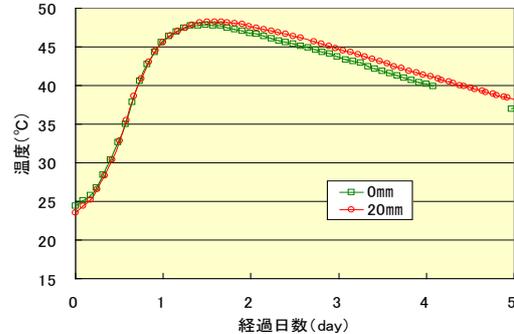


図-8 断熱材厚さ別の実測値

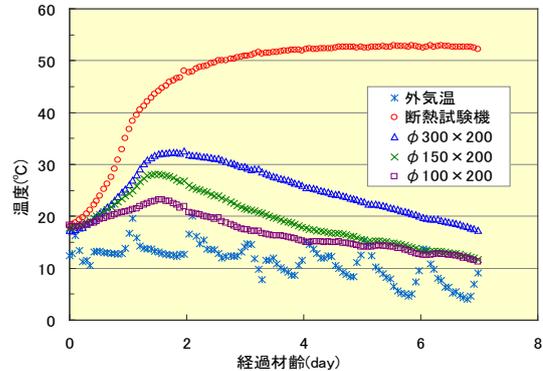


図-7 および図-8 の結果より、簡易断熱容器の断熱材の厚さを増やしても簡易断熱容器内で養生されるコンクリートの最高温度には大きな影響はないが、温度収束時には断熱材の厚さを増やすことで温度収束が緩やかになることが確認できた。

#### 5.2 供試体寸法と断熱温度上昇特性の関係

簡易断熱温度上昇試験でのコンクリート供試体の寸法が断熱温度上昇特性の推定精度に及ぼす影響を把握するために、図-6 の各ケースについて、簡易断熱温度上昇試験と断熱温度上昇試験機を行った。温度履歴を図-9 に示す。図-9 から、供試体寸法が大きくなるにつれて最高温度、上昇時の温度勾配、温度収束が断熱温度上

図-9 供試体寸法別の解析結果

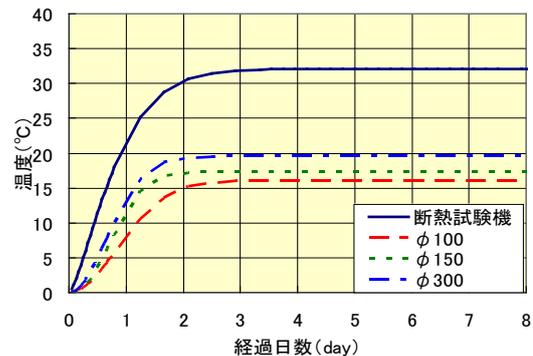


図-10 寸法別断熱温度上昇特性

昇試験結果に近似する結果となった。また、図-9 に示される温度履歴より同定解析を行い、得られた断熱温度上昇特性を比較した結果を図-10 に示す。図-9 の温度履歴と同様に供試体の寸法が大きくなるにつれて断熱温度上昇試験で得られた断熱温度上昇特性に近似する結果となった。

#### 4.3 容積率と断熱温度上昇特性の関係

簡易断熱容器で断熱温度上昇特性を推定するための容積率を把握するために、図-1～図-5 に示す簡易断熱容器で簡易断熱試験を行い、断熱温度上昇特性の推定を行った。推定された断熱温度上昇特性の各係数と各種簡易断熱容器の容積率を表-4 に示す。また、断熱温度上昇特性の各係数と容積率の関係を図-11～図-13 に示す。

図-11 の終局断熱温度上昇量と容積率との関係より、容積率と終局断熱温度上昇量は相関性が確認でき、容積率が増加するに連れて断熱温度上昇試験で得られた終局断熱温度上昇量に収束していくことが確認できた。断熱温度上昇試験で得られる終局断熱温度上昇量とするためには、5%程度の容積率が必要であると考えられる。図-12 に示す上昇速度 $\alpha$ と容積率の関係では、寸法効果による上昇速度に関する定数 $\alpha$ の値との相関は確認できなかった。図-13 に示す上昇速度に関する定数 $\beta$ と容積率の関係では、容積率が増加するに連れて断熱温度上昇試験で得られた上昇速度に関する定数 $\beta$ に収束していくことが確認できた。断熱温度上昇試験で得られる上昇速度に関する定数 $\beta$ とするためには、3%程度の容積率が必要であると考えられる。

#### 5 まとめ

本検討では、簡易断熱容器を用いた断熱温度上昇特性を簡便に推定するための実験を実施した。その結果、簡易断熱容器の断熱材の厚さを変化させた実験では、断熱材の容積がコンクリートの温度履歴に及ぼす影響は小さいものの、若干ではあるが最高温度到達後の温度収束速度は抑制されている結果となった。また、供試体寸法と断熱温度上昇特性の関係については、 $\phi 300 \times 200\text{mm}$ 、 $\phi 150 \times 200\text{mm}$ 、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ と3種類の供試体別で簡易断熱温度上昇試験を行った結果、終局断熱温度上昇量と上昇速度 $\beta$ は容積率と相関があり、いずれも断熱温度試験で得られる断熱温度上昇式と同等とするためには、容積率が5%程度必要であると考えられる。

今後は、容積率を増やして実験を行い、簡易断熱容器の測定精度の向上を目指すとともに、マス養生下での強度特性や、温度測定用の容器にひずみ計を設置して、熱膨張係数の測定などを行い、温度応力解析に必要な物性値を評価できるための検討を行っていくつもりである。

表-4 簡易断熱容器別の断熱温度上昇特性係数

	Bタイプ	コンクリート 増量	断熱材増量	Cタイプ
k	31.00	34.00	29.00	33.00
$\alpha$	1.30	1.50	1.10	1.60
$\beta$	2.00	1.30	1.50	1.30
容積率 (%)	3.35	5.34	2.72	4.30

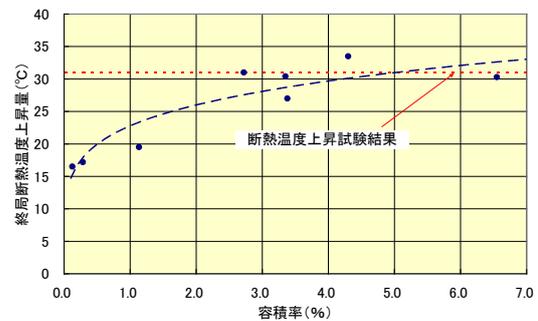


図-11 終局断熱温度上昇量と容積率の関係

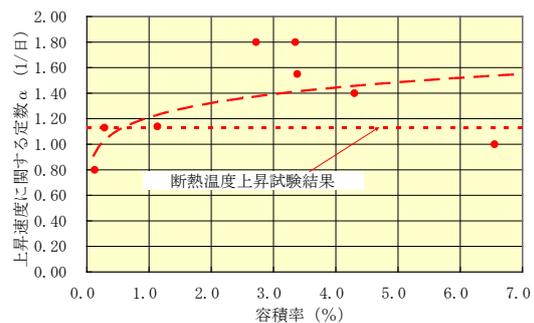


図-12 上昇速度 $\alpha$ と容積率の関係

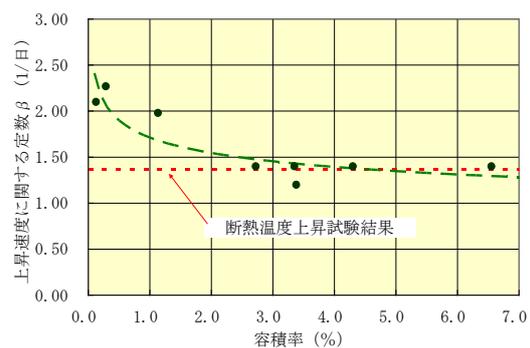


図-13 上昇速度 $\beta$ と容積率の関係

#### 参考文献

- 1) 大友健, 府川徹, 安藤公一, 柳栄治, 廣島明男, 宮澤信吾: 収縮を抑制した高炉セメントB種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用, 大成建設技術センター報, pp1-2, 2005

