

# 論文 熱減容インゴット破砕材を用いたコンクリートの熱的特性に関する基礎的研究

井上 智広\*1・長坂 慎吾\*2・大下 英吉\*3

**要旨:** 廃発泡スチロールを熱融解減容させ製造したインゴットを破砕し、骨材として再利用すると、従来のコンクリートに比べ熱伝導率が大幅に小さい(0.25~0.77[kcal/m・hr・°C]程度)コンクリートが製造できることが報告されているが、熱伝導率以外の熱的特性は未解明のままである。そこで本研究では、インゴット細骨材の体積含有率における変化率と比熱、線膨張係数での変化量を計測し、一般式を明らかにした。また、外気温変化にともなうインゴット細骨材モルタルの断熱性状を測定し解明した。

**キーワード:** 廃発泡スチロール, インゴット, 熱伝導率, 線膨張係数, 比熱

## 1. はじめに

発泡スチロールは軽量で断熱性に優れ安価なことから、魚箱や包装材等の広い用途で大量に使用されている。しかしながら、廃発泡スチロールの多くは、埋め立てや焼却において処分されており、再利用率はきわめて低く、その方法も海外への輸出に委ねられている。一方で、今後の社会情勢の変化による輸出の制限や容器包装リサイクル法の施行に伴う発泡スチロール回収量の増大が考えられることから、国内の廃発泡スチロールの再利用率を大幅に増大させる方法の開発が急務となっている。

現在、その再利用法の一つとして、廃発泡スチロールを主に熱処理により熔融減容化させ、固化させたインゴット塊を破砕し、コンクリート骨材として利用する方法<sup>1)</sup>に関する研究が盛んに実施されている。発泡スチロールは断熱性や保温性に優れ、比重が軽い特性を有することから、インゴット破砕材をコンクリート骨材に利用することで従来のコンクリートには無い高い断熱性や保温性を有した軽量コンクリートの製造が可能であると考えられる。利用法としては例えば、道路の舗装に用いることで路面の凍結防止、建築構造物の仕上げ材に用いることで、

断熱効果の高い表面舗装が可能と推察される。

既往の研究<sup>2)</sup>では、インゴット破砕材の基礎的物性やインゴット破砕材を骨材として利用したコンクリートの力学的基礎物性および熱的特性について評価検討が行なわれている。その結果、単位容積質量が1.76~1.83(t/m<sup>3</sup>)で、圧縮強度が15~33(N/mm<sup>2</sup>)程度の軽量コンクリートが製造できることが示されている。また、従来の人工軽量骨材コンクリートに比べ熱伝導率が大幅に小さい(0.25~0.77[kcal/m・hr・°C]程度)軽量コンクリートが製造できることも示されている。しかしながら、その他の比熱、線膨張係数および断熱性状については、未解明な部分が多い。

そこで本研究では、熱的特性としてインゴット破砕材およびインゴット破砕材を用いたモルタルの比熱および線膨張係数を測定し、インゴット破砕材の体積含有率をパラメータとした比熱と線膨張係数の一般式を導出した。また、外気温変化に伴うモルタルにおける内・外部の温度変化を実験的に評価することで、断熱性状や蓄熱性状を確かめた。

## 2. インゴットの熱的特性評価概要

コンクリートの熱的特性は、比熱、熱伝導率

\*1 中央大学 理工学部土木工学科

\*2 中央大学大学院 理工学部研究科土木工学専攻 (正会員)

\*3 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

表－１ 比熱測定用モルタル供試体配合

記号	水セメント比 (%)	細骨材(インゴット)体積比率 (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )		
			水	セメント	細骨材(インゴット)
CP	50	0	613	1226	0
I3	50	30	429	858	318
I5	50	50	306	613	530

表－２ 使用材料の基礎物性

使用材料	種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>
骨材	プラスチック骨材 (魚箱を融解放泡)	表乾密度: 1.05g/cm <sup>3</sup>
		吸水率: 4.0%
		Gmax: 5.0mm

或いは、熱拡散係数等によって評価される。インゴット破砕材を粗骨材として用いたコンクリートや細骨材として用いたモルタルの熱伝導率については、既往の研究<sup>2)</sup>において実験的に評価されている。そこで本実験ではインゴット破砕材自体およびインゴット破砕材を細骨材として用いたモルタルの比熱、線膨張係数を評価する。

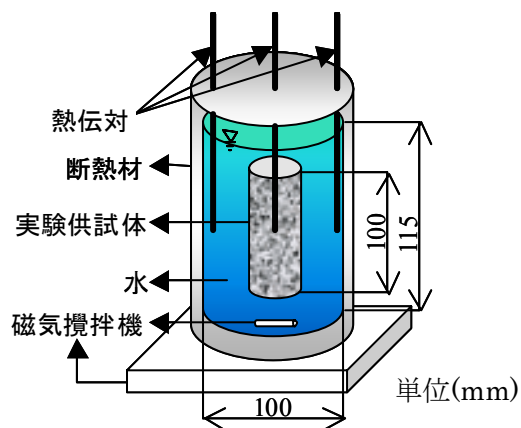
## 2.1 比熱則定

### (1) 使用材料およびモルタルの配合

ペーストおよびモルタルの配合ならびに使用材料の物性は、表－１および表－２に示す通りである。モルタルに占めるインゴットの体積含有率は0%、30%および50%とした。なお、インゴット含有率の影響を検討するために、W/Cを一定とし、細骨材には全てインゴット破砕材を用いた。

### (2) 供試体の製作および試験方法

インゴットを細骨材として用いたモルタル(以下、インゴット細骨材モルタルと称す)の供試体寸法は直径 50mm、高さ 100mm の円柱形状とした。練り混ぜ手法は、モルタルミキサーを用いて実施した。なお、割裂試験による供試体の目視観察からインゴット細骨材の材料分離は生じていないことが確認された。比熱の測定方法は、最も一般的な方法である等温型熱量計であり、その概要は図－１に示す通りである。その具体的な測定方法であるが、インゴット破砕材およびインゴット細骨材モルタルは、100℃に設



図－１ 比熱測定用実験装置

定した加熱炉に、24 時間以上入れて加熱を行い、比熱測定用実験装置にて比熱を測定した。温度の測定には熱電対を用い、その測定位置は供試体内部と水温計測用に設置した。本実験は、水を媒介に用いたが、温度変化を正確に測定することで、0.0005℃程度の精度を得ることが可能である<sup>3)</sup>。また、断熱材には高性能断熱材を使用した。なお、細骨材の比熱測定に関しては、インゴット塊に対して測定を行った。

### (3) 比熱測定結果

インゴット破砕材および各種モルタルの比熱試験結果を図－２に示す。実験値より、インゴット細骨材の体積含有率の増加に伴い、比熱は増加する。これらの実験結果に対する近似式を求めたものを図中に示すが、インゴット細骨材含有率とともに比熱は放物線的に増大する。インゴット破砕材自体の比熱は 1.67(J/g・℃)程度になり、発泡スチロールの原材料であるポリスチレンの比熱 1.34(J/g・℃)<sup>4)</sup>より増加した。これは、発泡スチロールを熱処理減容化によって加工を行っても内部に多くの空洞が存在するため発泡スチロールの持つ高い比熱の値は失われていないものと考えられる。

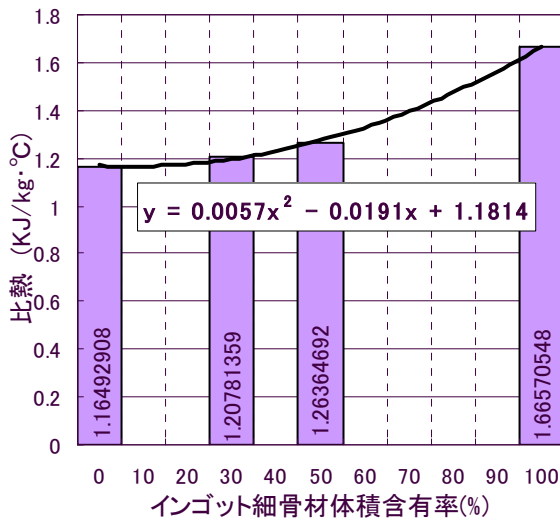


図-2 比熱測定結果

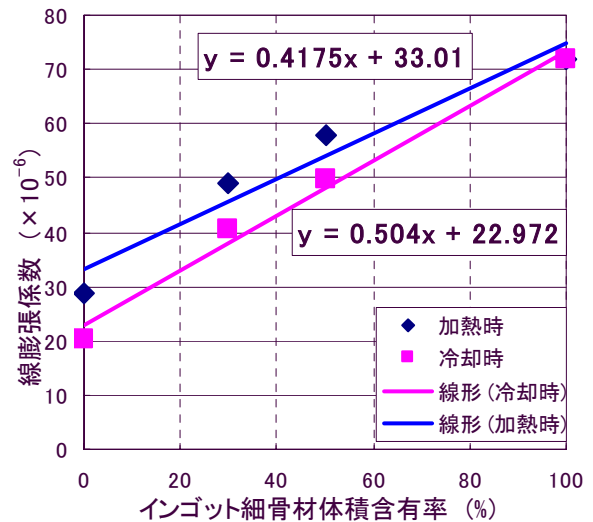


図-4 線膨張係数測定結果

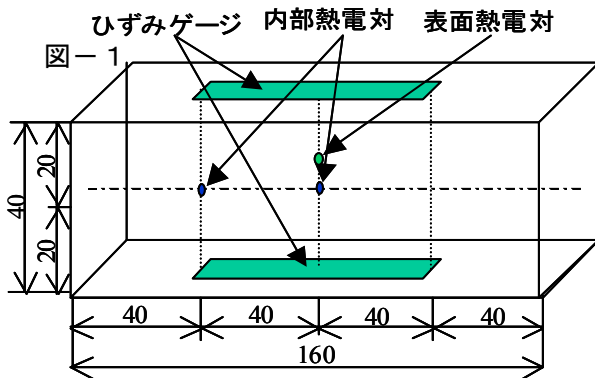


図-3 線膨張係数測定用

## 2.2 線膨張係数測定

### (1) 使用材料およびモルタルの配合

ペーストおよびモルタルの配合ならびに使用材料の物性は、表-1および表-2に示したものと同一とした。モルタルに占めるインゴットの体積含有率は2.1節に同じく0%、30%、および50%とした。なお、インゴット含有率の影響を検討するために、W/Cを一定とし、細骨材には全てインゴット破砕材を用いた。

### (2) 供試体の製作および試験方法

供試体寸法を図-3に示す。インゴット細骨材モルタルの供試体寸法は40×40×160mmの型枠を用い、打ち込みから24時間後に脱型、7日間水中養生(20°C)したものを実験供試体とした。具体的な測定方法であるが、供試体は恒温・恒湿槽に静置し、温度上昇過程における雰囲気温度は20°Cから60°Cまで3.33°C/hrの速度で

昇温させることによる熱膨張ひずみを測定する。

一方、温度下降過程においては、実験供試体の内部温度を完全に一樣にするため雰囲気温度を60°Cのまま12時間持続させた後、雰囲気温度を60°Cから20°Cまで-3.33°C/hrの速度で降温することによる熱収縮ひずみを測定する。雰囲気温度および湿度はプログラムで制御し、槽内湿度は50R.H±1%とした。熱膨張および熱収縮により生じるひずみの測定は、ひずみゲージを用いた。なお、測定は供試体毎に3回行い、測定値はその平均を用いた。

### (3) 線膨張係数測定結果

各インゴット骨材モルタルの線膨張係数測定結果を図-4に示す。ここで示すインゴット自体の線膨張係数は既往の研究より参照した。また、セメントペーストの線膨張係数は10~20(10<sup>-6</sup>/°C)<sup>2)</sup>で表されるが、加熱時ではその値を上回り、冷却時では同程度の値となった。インゴット細骨材モルタルの線膨張係数は、骨材含有率の増加により大きくなり、温度変化による熱変形が大きくなる。すなわち、気温の変動が激しい場合には、線膨張係数の差によりセメントペーストとインゴット細骨材モルタル内部にクラックの発生が生じ易いと推察され、耐凍害性を向上させるためには、何らかの対策を講じる必要性が生じる。

表-3 コンクリート配合表

水セメント比(%)	s/a (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )				AE減水剤 C×%	SL (cm)	空気量 (%)
		水	セメント	細骨材	粗骨材			
54	50	180	333	852	874	0.1	15	5

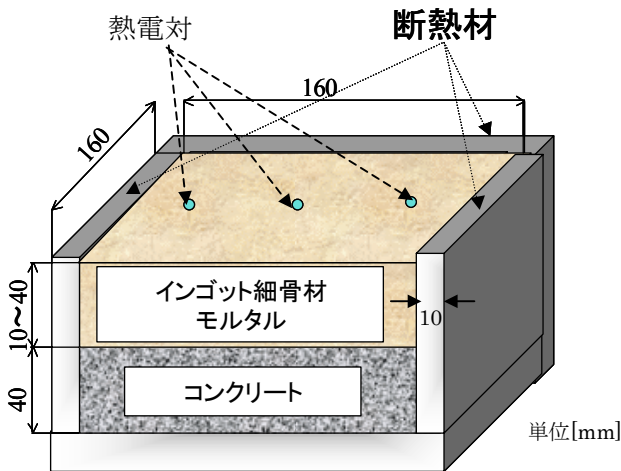
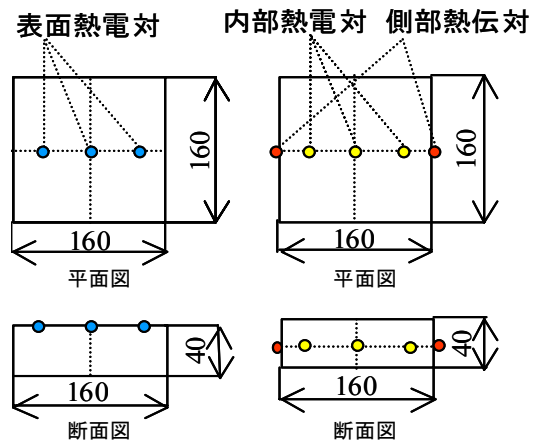


図-5 温度履歴測定用実験装置



a) インゴット細骨材モルタル b) コンクリート

図-6 熱電対設置位置

### 3. 外気温変動に伴うモルタルの断熱性状

本章では、インゴット細骨材モルタルの断熱特性について断熱層の厚さを変数とした、内部温度の温度差履歴から温度の傾きおよび流入熱量を比較し検討する。

#### 3.1 使用材料および配合設計

上部における各種モルタルの配合および使用材料の物性は表-1および表-2に示したものと同一とした。モルタルに占めるインゴットの体積含有率は2.1節に同じく0%、30%、および50%とした。なお、インゴット含有率の影響を検討するために、W/Cを一定とし、細骨材には全てインゴット破砕材を用いた。下部コンクリート使用材料および配合は表-2、表-3に示す。なお骨材には市原市万田野産細骨材(表乾密度 2.59g/cm<sup>3</sup>)および荒川水系粗骨材(表乾密度 2.63g/cm<sup>3</sup>, 最大寸法:20 mm)を用いる。

#### 3.2 供試体の製造および試験方法

供試体形状寸法を図-6に示す。供試体寸法は上部にはインゴット細骨材モルタル 160×160×(10~40)mmとし、下部にはコンクリート 160×160×40 mmとした。実験パラメータはインゴット細骨材モルタルの厚さとし、1cmごとに1~4cmまで厚みを変化させた。なお、製造方法

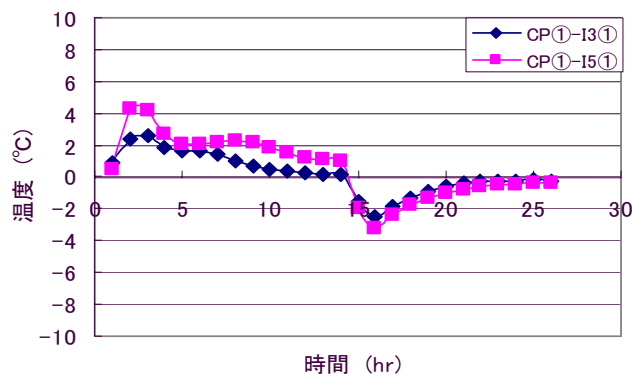
においては、コンクリートを打設後、24時間で脱型、1日間水中養生した後、インゴット細骨材モルタルを同様に打設する。測定箇所はインゴット細骨材モルタルの供試体表面温度とコンクリート内部および側面部の温度履歴、そして恒温・恒湿槽内における雰囲気温度である。熱電対の設置位置は図-6に示す。

インゴット細骨材上における表面に限る雰囲気温度を20℃~60℃まで40℃/hrの速度で急速に昇温し、加熱時の内部温度履歴を測定する。そして、内部温度および雰囲気温度を完全に一樣にするために雰囲気温度を60℃のまま12時間保持した。その後、インゴット細骨材上における表面に限る雰囲気温度を60℃から20℃まで-40℃/hrの速度で降温させ内部温度履歴を測定する。この際、上部モルタルにおける断熱効果を測定するために、供試体の底面および側面は断熱材により熱移動を遮断する。温度の測定には熱電対を用いた。

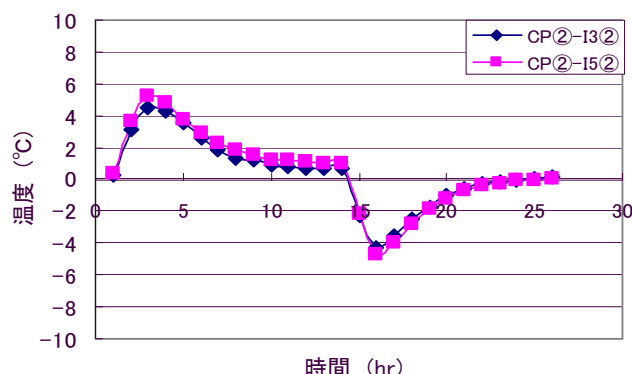
#### 3.3 測定結果

##### (1) コンクリート内部の温度差履歴

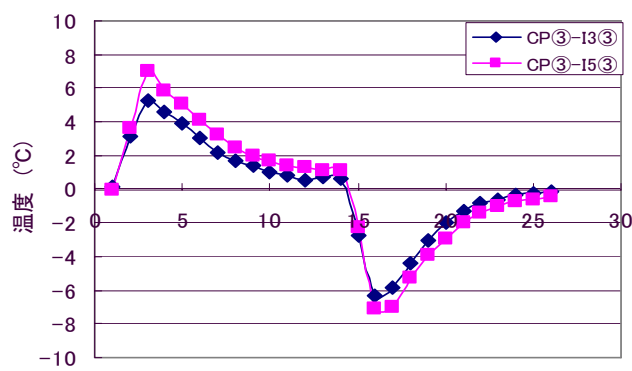
本来であれば、本供試体のような温度境界条件では、インゴット細骨材モルタル上表面からコンクリート底面に向かう熱伝導が支配的にな



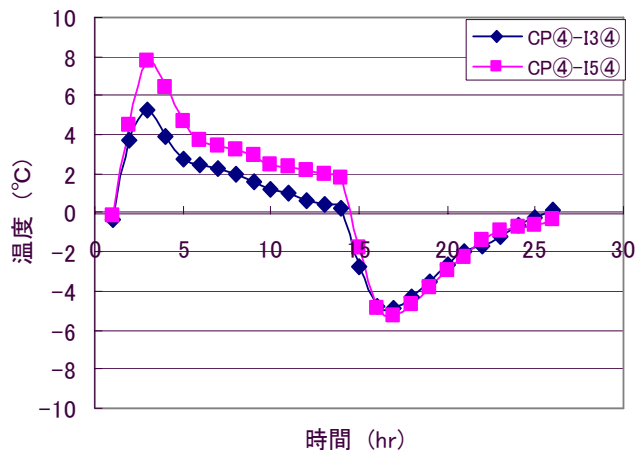
a) 上部 1cm



b) 上部 2cm



c) 上部 3cm



d) 上部 4cm

図-7 CPを基準とした温度差歴

り、モルタル上表面から深さ方向に同位置の断面内では熱伝導は全く生じないことになる。しかしながら、モルタル或いはコンクリートと断熱材との界面において空気が存在した場合や断熱材自体の断熱効果が低いと、断面内において温度勾配を生じることとなる。本実験においてもわずかな勾配を生じる結果となった。したがって、以下の試験においては、図-6に示す断面内の中心位置に設置した熱電対の測定温度に対して行うこととする。

CPを基準としたI3およびI5の温度、すなわちCPとI3およびI5の温度差を図-7に示す。同図(a)~(d)はそれぞれ図-6に示したインゴット細骨材モルタルとコンクリートの境界面から1cm, 2cm, 3cm, 4cmにおける温度差を示している。

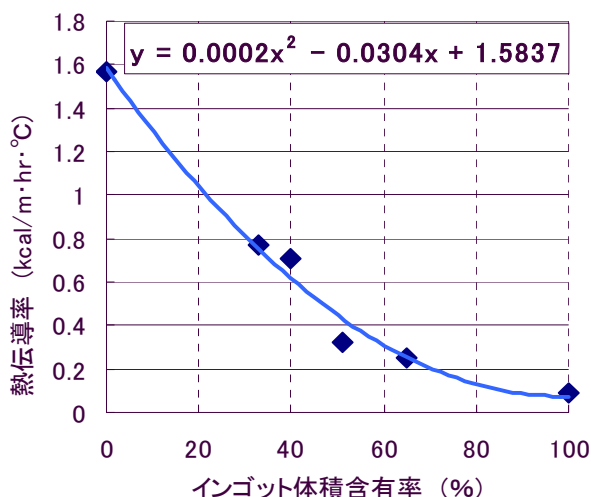
加熱および冷却時において温度差の絶対値を比較すると、その最大値は上部モルタルの厚さに伴い増加する傾向にあり、その傾向はI5において顕著にみられる。加熱時での最大温度差は7.8°Cであり、冷却時の最大温度差は-7.1°Cとなった。以上の結果より、インゴット細骨材モルタルは普通セメントペーストと比較して断熱効果が認められ、断熱材としての有効性が確認された。

## (2) 熱貫流値

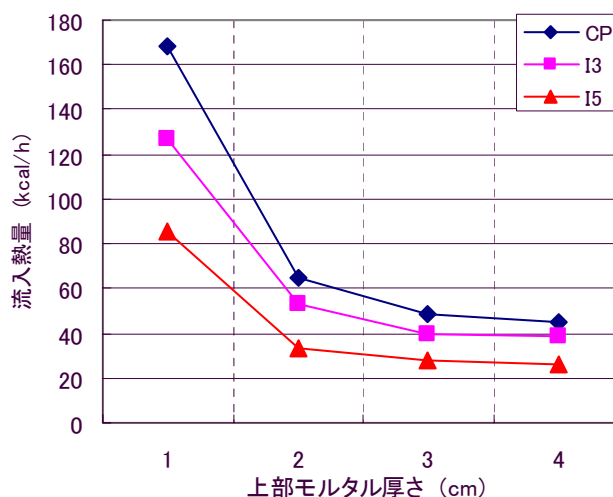
本項では、インゴット細骨材モルタルの断熱効果に関して、インゴット細骨材モルタル層の表面からコンクリート内部に至るまでに流入した熱量の観点から議論する。まず、内部に流入する熱量  $Q$  [kcal/h] を求める。熱貫流抵抗:  $R$  [(h · m<sup>2</sup> · °C)/kcal] は次式で与えられる。

$$R = r_0 + r_i + r_k \quad (1)$$

ここで壁面の境界層における熱伝達抵抗:  $r_0$ ,  $r_i$  [(h · m<sup>2</sup> · °C)/kcal], 熱伝導抵抗:  $r_k$  [(h · m<sup>2</sup> · °C)/kcal] である。 $r_0$  は室内側熱伝達抵抗 0.13, を用いる。また  $r_i$  は室外側熱伝達抵抗であるが本実験において熱の入出はインゴット細骨材モルタル表面上のみを考えるので、 $r_i = 0$  とする。また、 $r_k$  は次式で与えられる。



図－8 既往の研究による熱伝達率



図－9 通過熱量

$$r_k = \Sigma \lambda / d \quad (2)$$

ここで熱伝導率:  $\lambda$  [kcal/m · hr · °C], 材料厚さ:  $d$  [cm]である。ここで用いる熱伝導率は、既往の研究<sup>2)</sup>で得られた測定値から2次の近似式を導出し、その近似式から求めた値とし、その測定値および近似式を図－8に示す。壁面積:  $A$  [m<sup>2</sup>], 雰囲気温度:  $t_0$  [°C], コンクリート内部温度:  $t_i$  [°C]を用いて次式のように示すことができる。

$$Q = A/R(t_0 - t_i) \quad (3)$$

式(3)を用いて、実験パラメータであるインゴット細骨材モルタル厚さ毎にコンクリート内部への流入熱量、すなわちインゴット細骨材モルタル中を通過した熱量を算出した結果を図－9に示す。上部モルタルを通過する熱量は、インゴットの体積含有率および厚さを増加させることにより減少する。しかし、その変化率は線形的に変化せず、一定量に収束する非線形となる。上部モルタルの厚さが2cmを超えると供試体内部に流入する熱量は減少するが、その減少量に著しい変化は見られない。断熱材を用いる場合、その厚さの決定は重大な要因であるが、インゴット細骨材モルタルにおける断熱では、モルタル厚さが2cmを越えると非効率になる。

## 5. まとめ

本研究内の範囲で以下の結論が得られた。

- (1) インゴット破砕材を細骨材として用いたモルタルにおいて、体積含有率を増加させると増加割合に比例して、比熱の値も増加する。
- (2) インゴット破砕材を細骨材として用いたモルタルにおいてその線膨張係数に与える影響は大きく、体積含有率を増加させることにより、線膨張係数の値も増加する。
- (3) インゴット細骨材を用いたモルタルは断熱性に優れ、温度上昇および下降時においてその温度変化の傾きを緩やかにする働きがある。
- (4) プラスチック骨材は標準的なセメントペーストやコンクリートと比較し、断熱において有効であるといえるが蓄熱性には、断熱性ほどの大きな差異は見られない。

今後は、線膨張係数が大きい点と、蓄熱性が低いという点を考慮し、建築物での仕上げ材としての適用を検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 福晶誠司, 谷山潤, 吉田晋, 笠井哲郎: 廃 EPS 熱減容インゴット破砕材を用いた軽量コンクリートの諸物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vo1.25, No.1, pp1391-1396.2003
- 2) 理科年表, 熱化学, p489, 平成 15 年
- 3) 杉山幸男, 長坂克巳: 断熱工学