

# 論文 簡易断熱容器を用いたコンクリートの物性評価に関する基礎的研究

竹内 直也\*1・室野井 敏之\*2・満木 泰郎\*3・溝淵 利明\*4

**要旨:** 簡易断熱容器を用いて、現場の施工条件にできるだけ近づけたコンクリートの発熱特性および力学特性の物性値を一度に把握するための方法について検討を行った。これまで、実用化に向けて簡易断熱容器の改良を重ねてきた<sup>1)2)</sup>。本検討は、さらに改良を施した簡易断熱容器を用いて温度応力解析に必要な設計用値の取得を目的に実験を行った。検討要因としては、セメント種類及びセメント量を変化させて行った。その結果、本検討で用いた容器を用いることで、実際の現場においても温動応力解析に必要な設計用値を一度に取得することができる可能性を見出すことができた。

**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

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を損なう要因のひとつとして、セメントの水和熱による温度ひび割れがある。温度ひび割れ発生が事前に懸念される場合には、温度応力解析を行い、ひび割れ発生の有無やひび割れ抑制のための検討が行われている。しかし、事前検討の場合、入力値として用いる設計用値が必ずしも現場の条件と一致しているとは限らない場合が多い。温度応力解析に用いる設計用値は、コンクリートの熱特性値、力学的特性値等があり、これらの値は過去のデータを参考とした標準的な値が用いられている場合が多い。より精度の高い予測を行うためには、実際に近い物性値を用いた温度応力解析を行う必要がある。ただし、これらの設計用値を得るためには断熱温度上昇試験機等の高価で大型な機器を用いる必要があり、また、それらの機器を用いて行える試験機関は限られているのが現状である。そこで本研究では、現場への運搬も比較的簡便に行うことができ、1つの容器で温度応力解析に必要な設計用値の大半を取得できる物性評価のためのシステム開発を行っている<sup>1)2)</sup>。

本論文は、これまでの研究成果を基に1つの容器で、コンクリートの断熱温度上昇特性、圧縮強度、ヤング係数、引張強度の力学的特性ならびに熱膨張係数の測定が可能な容器を製作し、セメント種別・単位セメント量等を変化させて現場への適用が可能かどうかの検討を行った結果についてとりまとめたものである。

## 2. 簡易断熱容器を用いたこれまでの研究

本研究では、温度応力解析に必要な設計用値の取得のために、簡易断熱容器の実用化を目指し、これまでに実

際の施工現場でのコンクリート構造物の断熱温度上昇特性と力学的特性の物性値との比較、簡易断熱容器内のコンクリート容積率が断熱温度上昇特性に及ぼす影響に関する検討<sup>2)</sup>等、様々な研究を行ってきた。また、簡易断熱容器自体もより精度の高い発熱特性を把握できるように、いくつかの改良を行ってきた<sup>1)2)</sup>。以下に簡易断熱容器に関するこれまでの検討経緯の概要を示す。

### (1) 簡易断熱容器(Aタイプ)

研究当初使用した図-1の簡易断熱容器は、幅900×長さ900×高さ900mmの発泡スチロール製の容器で中心部の六角形のスペースにφ100×200mmの供試体を13本養生することが可能である。供試体は、紙製型枠にコンクリートを打ち込み、養生方法は封かん養生とした。簡易断熱内の間隙は発泡ビーズにより充填し、できるだけ断熱状態を保持できるようにした。この簡易断熱容器の容積率は2.89%である。容積率は、コンクリートの容積を簡易断熱容器の容積で除した値とした。断熱温度上昇特性の推定は、簡易断熱容器の中心に配置されている供試体の中心部に熱電対を埋設し、そこから得た温度履歴を同定解析することで推定した。しかし、発泡ビーズによる断熱効果が不十分であったため、容器外への放熱が大きくなり、比較のために実施していた断熱温度上昇試験機による試験結果よりも断熱温度上昇量などが小さくなる結果となった。したがって、より断熱性状を向上させるために、供試体周囲の発泡ビーズによる充填ではなく、供試体自体を発泡スチロールで囲む形状に変更した。

### (2) 簡易断熱容器(Bタイプ)

Aタイプの欠点を改良した図-2の簡易断熱容器は、幅900×長さ1200×高さ900mmの発泡スチロール製の容器でφ100×200mmの供試体を15本養生することが可

\*1 法政大学 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 (正会員)

\*2 鹿島建設 技術研究所 (正会員)

\*3 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科教授 工学博士 (正会員)

\*4 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)

能である。前回使用した発泡ビーズに代わり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)を用いることで、Aタイプに比べて断熱部分の空隙を減少させたことにより、断熱効果が向上する結果となった。また、強度試験等で供試体を採取した際には、同寸法で直方体の発泡スチロール製のブロックを詰め替えることで断熱状態を保つようにした。さらに、簡易断熱容器内に内蓋をつけることで、断熱効果の向上を目指した。この簡易断熱容器の容積率は3.35%である。断熱温度上昇特性の推定は、Aタイプと同様に簡易断熱容器の中心に配置されている供試体の中心部に熱電対を埋設し、そこから得た温度履歴を同定解析することで推定した。また力学的特性は15本の供試体から求めるようにした。

本容器を用いて、実際のコンクリート構造物の施工現場で物性評価の比較検討を行った。その結果、実際の構造物の温度測定結果を基に算出した断熱温度上昇特性は、簡易断熱容器から推定した断熱温度上昇特性に比べて終局断熱温度上昇量が大きくなる結果となった。その原因としては、簡易断熱容器の温度を計測しているコンクリートの容量が少なく、十分な発熱量を得られなかったのではないかと考えられる。

### (3)簡易断熱容器(Cタイプ)

Bタイプで行った現場での比較検討の結果を踏まえて、発熱量を大幅に向上することとし、図-3に示す簡易断熱容器をあらたに製作した。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本養生することを可能とし、断熱温度上昇特性を推定するために容器の中央に容量φ300×450mmの供試体を設置し、コンクリートの容量を大幅に増加させた。これにより、簡易断熱容器の中心にあるコンクリートの中心部にひずみ計を埋設することができるようになり、熱膨張係数の測定を行うことが可能となった。さらに、断熱効果を向上させるために発泡スチロールの密度をBタイプに比べ約6倍増加させた。この簡易断熱容器の容積率は4.30%である。断熱温度上昇特性の推定は、φ300×450mmの供試体の中心部に熱電対およびひずみ計を埋設し、測定された温度履歴を同定解析することで推定した。ただし、力学的特性の推定は12本の供試体から求めるようにしたため、力学特性が大きく変化する若材齢時での圧縮強度、ヤング係数および引張強度を得るには十分な材齢を確保することができないという課題があった。

### (4)簡易断熱容器(Dタイプ)

本検討で使用した簡易断熱容器は、Cタイプにおいて課題であった力学的特性把握のための供試体本数を12本から24本に増加させ、圧縮強度、ヤング係数、引張

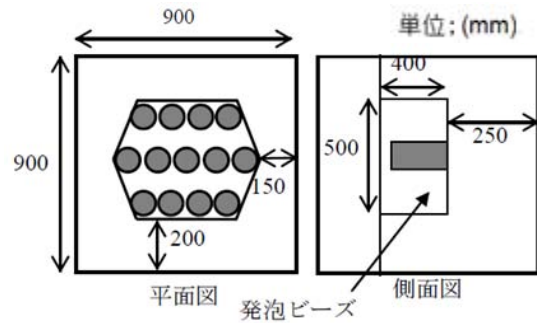


図-1 Aタイプ概略図

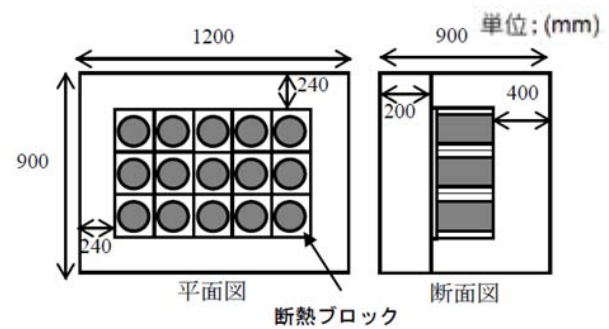


図-2 Bタイプ概略図

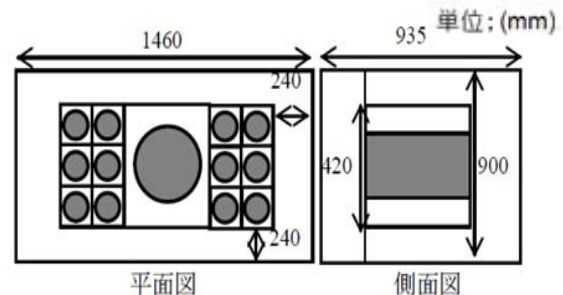


図-3 Cタイプ概略図

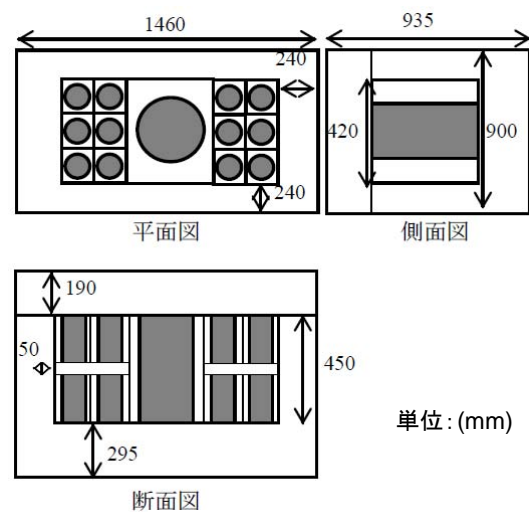


図-4 Dタイプ概略図

強度がそれぞれ4材齢分行えるようにした。簡易断熱容器は、図-4に示すようにCタイプと同様の寸法の幅900×長さ1460×高さ935mmの発泡スチロール製の容器でφ100×200mmの供試体を上段下段12本ずつの計24本養生することができるようにした。この簡易断熱容器の容積率は、断熱温度上昇特性と容積率の関係を踏まえて5.99%とした<sup>1)</sup>。断熱温度上昇特性は、Cタイプと同様にφ300×450mmの供試体の中心部に設置した温度センサで測定された温度履歴を同定解析することで推定した。

### 3. 検討の概要

本研究は、これまで行ってきた研究成果を踏まえて、温度応力解析に必要な設計用値をひとつの容器で取得することが可能な方法を提案することを目的としている。

本検討では、その一環としてセメントの種類および単位セメント量を変化させて試験を行った。セメントの種類は、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種の2水準とし、単位セメント量は250、300、350、400kg/m<sup>3</sup>の4水準として、断熱温度上昇特性と力学的特性等について試験を行った。力学的特性は、同配合で標準養生用の供試体を作製し、その強度試験を行うことで簡易断熱養生の供試体と比較を行った。本検討の要因と水準および実施した試験項目を表-2に示す。

## 4. コンクリート配合及び使用材料

### 4.1 コンクリート配合

セメントの種類は、普通ポルトランドセメント(以降、Nと称する)および高炉セメントB種(以降、BBと称する)の2種類で、単位水量を160kg/m<sup>3</sup>に固定し、単位セメント量を250、300、350、400kg/m<sup>3</sup>の4水準として実験を行った。単位水量を固定したため、水セメント比は

64%、53%、46%、40%となる。細骨材率はセメント量300kg/m<sup>3</sup>の時の43.6%を基準とし、水セメント比の変化に応じて補正を行った。表-3に各配合を示す。

### 4.2 使用材料

#### (1) セメント

実験に用いた普通ポルトランドセメントは、密度3.15g/cm<sup>3</sup>、比表面積3450cm<sup>2</sup>/g、高炉セメントB種は密度3.04g/cm<sup>3</sup>、比表面積4090cm<sup>2</sup>/gのものを使用した。

#### (2) 細骨材

細骨材は、大井川水系の陸砂であり、表乾密度2.59g/cm<sup>3</sup>、吸水率2.06%、粗粒率2.47である。

#### (3) 粗骨材

粗骨材は、東京都青梅産の硬質砂岩砕石であり、表乾密度2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.50%、粗粒率6.75である。

#### (4) 混和剤

AE減水剤は、リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体を主成分とするAE減水剤標準型を使用し、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。

表-1 解析に用いた物性値

項目	種別	解析条件
熱伝導率 [W/m°C]	コンクリート	2.70
	簡易断熱容器	0.03
密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	コンクリート	2400
	簡易断熱容器	66.7
比熱 [kJ/kg°C]	コンクリート	1.15
	簡易断熱容器	1.16
熱伝達率 [W/m°C]	簡易断熱容器	12

表-2 要因と水準および実施した試験項目

セメント種類	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	断熱温度上昇特性		力学的特性						熱膨張係数	
		断熱試験機	簡易断熱容器	圧縮		引張		ヤング			
				標準養生	簡易断熱養生	標準養生	簡易断熱養生	標準養生	簡易断熱養生		
N	250	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	300	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	350	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	400	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○
BB	250	—	○	○	○	○	○	○	○	○	—
	300	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	350	—	○	○	○	○	○	○	○	○	—
	400	—	○	○	○	○	○	○	○	○	—

## 5. 実験概要

### 5.1 断熱温度上昇特性の把握

Dタイプの簡易断熱容器を用いて温度測定を行った。得られた温度履歴を基に同定解析を行い、断熱温度上昇特性を推定した。同定解析は、ひび割れ制御指針の値を参考にして断熱温度上昇特性を推定し、その値から温度履歴を算出する逆解析を繰り返すことで、実際の温度履歴と同様な断熱温度上昇特性を求めた。温度応力解析は3次元有限要素法を用いた。解析に用いた物性値は、これまでの研究成果<sup>1),2)</sup>を参考にした。その値を表-1に示し、簡易断熱容器の1/4の解析モデルを図-5に示す。この解析モデルの境界条件は、図-5の簡易断熱容器の側面、上面を熱伝達率 $12(W/m^2C)$ とした。また、簡易断熱容器の外側を外気温とし、試験室内の簡易断熱容器の周囲の温度を用いた。同定解析で使用した断熱温度上昇式<sup>3)</sup>を以下に示す。

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

ここで、 $K$ は終局断熱温度量(°C)、 $\alpha$ は上昇速度に関する定数、 $t_0$ は発熱遅れ時間(日)、 $t$ は材齢(日)とする。

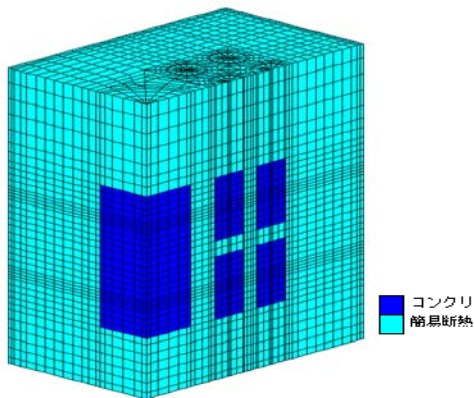


図-5 簡易断熱容器解析モデル

### 5.2 熱膨張係数の測定

Dタイプの簡易断熱容器の中心にあるコンクリートの中心部にひずみ計を埋設し、ほぼ無拘束に近い状態のひずみ計測を行った。

### 5.3 強度試験

Dタイプの簡易断熱容器を用いて簡易断熱養生下での力学的特性と、比較のために標準養生用の供試体を作製し、力学的特性の把握を行った。標準養生の供試体は材齢2日で脱型を行い、強度試験まで標準養生を行った。本実験は材齢3, 7, 13, 28日で圧縮強度試験と引張強度試験を行った。

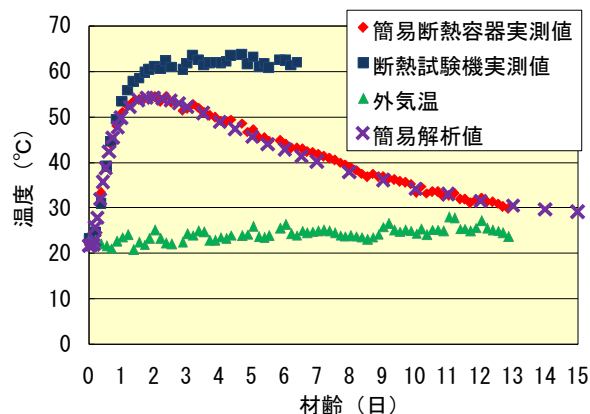


図-6 実温度と解析値(N300)

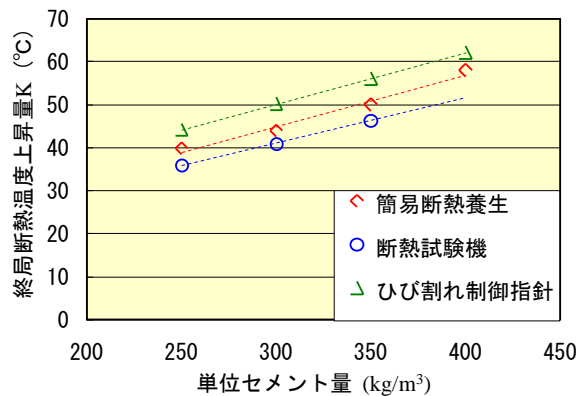


図-7 終局断熱温度上昇量 K と単位セメント量の関係(N)

表-3 各配合

セメント種類	組骨材の最大寸法(mm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 (ml/c=100kg)	AE 剤 (C×%)
N	20	64	4.5±0.5	45.8	160	250	849	1032	250	0.003
	20	53	4.5±0.5	43.6	160	300	790	1050	250	0.004
	20	46	4.5±0.5	42.2	160	350	747	1051	250	0.003
	20	40	4.5±0.5	41.0	160	400	709	1048	250	0.003
BB	20	64	4.5±0.5	45.8	160	250	846	1028	250	0.004
	20	53	4.5±0.5	43.6	160	300	786	1045	250	0.004
	20	46	4.5±0.5	42.2	160	350	743	1045	250	0.004
	20	40	4.5±0.5	41.0	160	400	704	1041	250	0.003

## 6. 実験結果および考察

### 6. 1 断熱温度上昇特性の把握

Dタイプの簡易断熱容器および断熱温度上昇試験機を用いてそれぞれ温度測定を行った。また、これらの結果を用いて式(1)から断熱温度上昇特性の算定を行った。

図-6に結果の一例として普通ポルトランドセメントの単位セメント量  $300 \text{ kg/m}^3$  の温度履歴と計測期間の外気温、簡易断熱容器で得られた温度履歴をもとに同定解析した結果を示す。

同定解析から得られた終局断熱温度上昇量  $K$  および断熱温度上昇速度  $\alpha$  について、JCI ひび割れ制御指針の断熱温度上昇特性式の係数の標準値<sup>3)</sup>より得られた値と比較した結果を図-7～図-10に示す。ここで、図-7、図-8には普通ポルトランドセメントにおいて比較した結果を示し、図-9、図-10には高炉セメントB種での比較した結果を示す。

図-7～図-10から、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の簡易断熱容器から得られた断熱温度上昇特性は、断熱試験装置から得られた断熱温度上昇特性およびJCI ひび割れ制御指針の値と比較して各単位セメント量ともほぼ同等の値を示す結果となった。したがって、本検討で用いた簡易断熱容器によって、コンクリートの断熱温度上昇特性をほぼ推定することは可能であると考えられる。

### 6. 2 熱膨張係数の測定

Dタイプの簡易断熱容器の中心にあるコンクリートの中心部に埋設したひずみ計のひずみ変化量と温度変化から熱膨張係数を算定した。図-11に結果の一例として普通ポルトランドセメントの単位セメント量  $300 \text{ kg/m}^3$  と高炉セメントB種の単位セメント量  $300 \text{ kg/m}^3$  の熱膨張係数を示す。また表-4にそれぞれの熱膨張係数の値を示す。

温度降下時において、普通ポルトランドセメントは  $10 \times 10^{-6}/\text{C}$  程度の値となり、高炉セメントB種は普通ポルトランドセメントよりも  $2\sim 3 \times 10^{-6}/\text{C}$  程度大きい値となり、JCI ひび割れ制御指針で示されている値とほぼ同様の結果となった<sup>3)</sup>。したがって、本検討で用いた簡易断熱容器によって、熱膨張係数を算定することは可能であると考えられる。

### 6. 3 強度試験

Dタイプの簡易断熱容器を用いて簡易断熱養生下での力学的特性と比較のために標準養生下での力学的特性の試験を行った。

図-12に結果の一例として普通ポルトランドセメントの単位セメント量  $300 \text{ kg/m}^3$  の圧縮強度と有効材齢との関係を示す。図中の参考資料とは、JCI ひび割れ制御指針に記載されている普通ポルトランドセメントの水

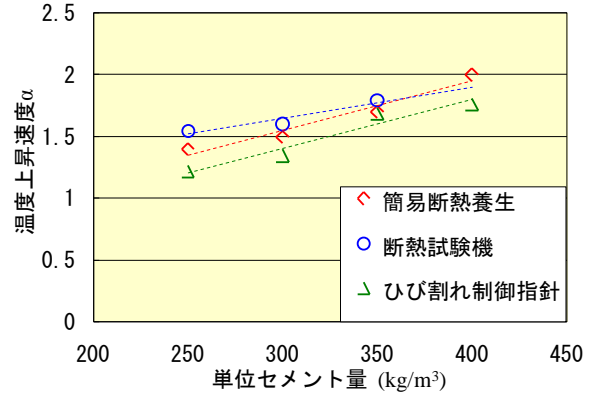


図-8 断熱温度上昇速度  $\alpha$  と単位セメント量の関係(N)

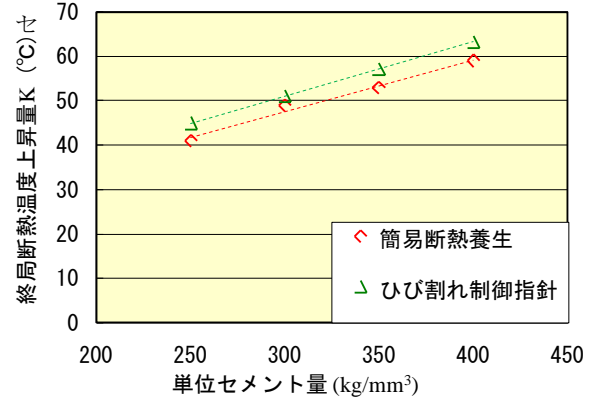


図-9 終局断熱温度上昇量  $K$  と単位セメント量の関係(BB)

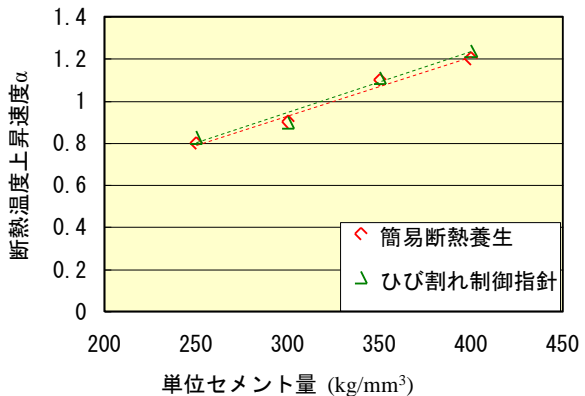


図-10 断熱温度上昇速度  $\alpha$  と単位セメント量の関係(BB)

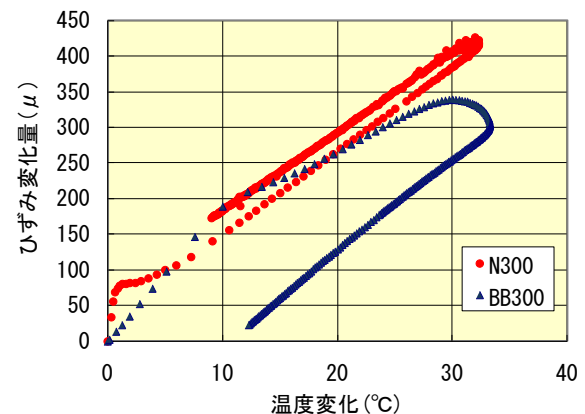


図-11 熱膨張係数

メント比55%の供試体を簡易断熱養生したときに得られた圧縮強度の試験結果である<sup>3)</sup>。また、図-12の図中に示すひび割れ制御指針とは、JCI ひび割れ制御指針の強度発現式より算定した値である<sup>3)</sup>。図-12から、簡易断熱養生下での圧縮強度はJCI ひび割れ制御指針の強度に比べて低い結果となった。これは、簡易断熱養生下の供試体が標準養生下の供試体と比べて水和するために必要な水分が不足し、強度増進が見られなかったためではないかと思われる。

図-13に引張強度と圧縮強度の関係を示す。図-13から、引張強度と圧縮強度の関係は養生状態にほとんど影響を受けない結果となった。

図-14にヤング係数と圧縮強度の関係を示す。図-14から、引張強度と圧縮強度の関係と同様に、ヤング係数と圧縮強度の関係も養生状態にほとんど影響を受けない結果となった。

簡易断熱養生は、マスコンクリートの内部に近い状態になっていると考えられることから、簡易断熱容器で得られた力学的特性の物性値は、マスコンクリートの物性値に類似した値になっているものと思われる。したがって、実際のコンクリート構造物の力学的特性の物性値には、簡易断熱容器を用いて得られる物性値を用いたほうがよいと考えられる。

## 7. まとめ

本検討では、温度応力解析に必要な設計用値を一度に把握するための方法について検討を行った。

Dタイプの簡易断熱容器の断熱温度上昇特性の推定では、ひび割れ制御指針に示されている値に比較的近い値を得られた。また、熱膨張係数もほぼ測定可能であることを確認した。力学的特性はマス養生下での物性値の推定が可能であることを確認した。

以上のことから、本検討で用いた容器を用いることで、実際の現場においても温動応力解析に必要な設計用値を一度に取得することができる可能性を見出すことができた。

今後は、物性評価システムの実用化を目指すために現場での簡易断熱容器を用いた試験による比較検討を行っていく必要がある。

## 参考文献

- 1) 藤森勇希, 安紀幸, 田中友樹, 溝渕利明: 温度依存性を考慮したコンクリートの力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp543-548, 2007
- 2) 室野井敏之, 井上量介, 溝渕利明: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp1283-1288, 2010

表-4 熱膨張係数

セメント種類	単位セメン量 (kg/m <sup>3</sup> )	熱膨張係数 (μ/°C)	
		温度上昇時	温度降下時
N	250	10.73	10.73
	300	11.95	10.67
	350	12.96	10.28
	400	7.23	10.36
BB	300	12.94	13.06

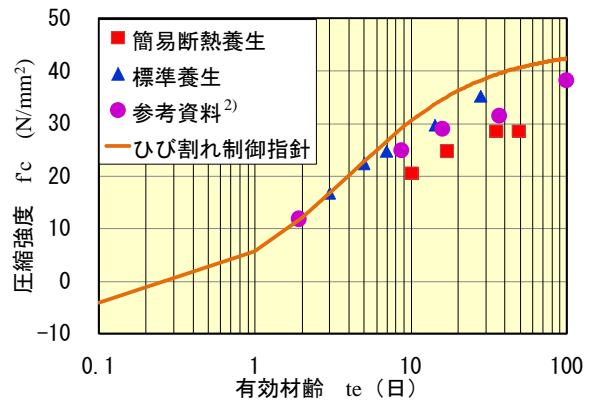


図-12 圧縮強度と有効材齢の関係(N300)

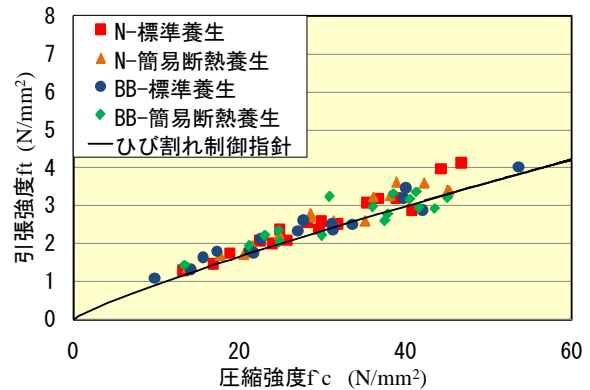


図-13 引張強度と圧縮強度の関係

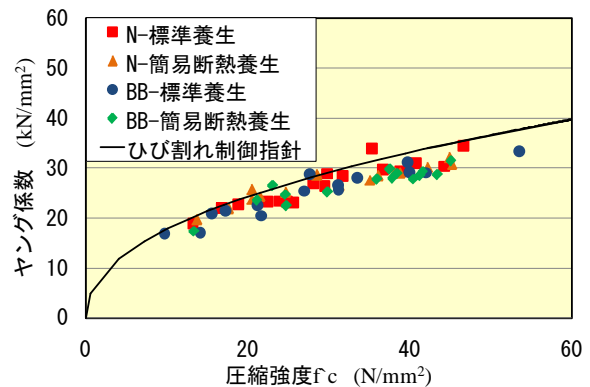


図-14 ヤング係数と圧縮強度の関係

- 3) JCI 社団法人 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp47-52,104-114, 2008