

# 論文 100N/mm<sup>2</sup> を超える高強度コンクリートにおける発熱特性の逆解析による評価

河上 浩司\*1・松田 拓\*2・嶋 毅\*3・鈴木 康範\*4

**要旨:** 低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを用いた高強度コンクリートを対象に、発熱特性を評価し温度解析へ適用するため、周囲を断熱した小型ブロック試験体を製作し温度履歴を測定した。小型ブロック試験体にて測定された温度履歴を逆解析して、最終断熱温度上昇量であるK値と温度上昇速度の係数であるα値を求め、単位結合材量とコンクリート温度をパラメータとする算出式を提案した。最後に、この提案式により求めたK値とα値を用いて模擬柱試験体の温度解析を行い、実際の温度測定結果との比較により提案式の妥当性を検証した。

**キーワード:** 高強度コンクリート, 低熱ポルトランドセメント, シリカフェーム, 温度解析

## 1. はじめに

一般に、コンクリート部材の温度履歴の推定は、式(1)で表されるコンクリートの断熱温度上昇曲線とコンクリートの比熱や熱容量等の諸物性、外気温、部材形状そして境界条件などの諸条件を考慮した温度解析によって行われている。

$$Q(t) = K \left( 1 - e^{-\alpha(t-DI)^\beta} \right) \quad (1)$$

ここに、 $Q_0$ : 断熱温度上昇量 (°C)

K: 最終断熱温度上昇量 (°C)

t: 材齢 (h)

α: 温度上昇速度に関する係数

β: セメントの特性に関する係数

DI: 遅延剤の効果を表す係数

ここで、式(1)における最終断熱温度上昇量 (以下、K値と称す) や温度上昇速度に関する係数 (以下、α値と称す) については、結合材の種類が早強ポルトランドセメントや普通ポルトランドセメントあるいは高炉セメントB種であり、また、その単位結合材量が 400kg/m<sup>3</sup> 程度までであれば、過去において数多くの研究がなされ標準値が示されている<sup>1)</sup>。しかし、結合材として低熱ポルトランドセメントを使用したり、各種の混和材を混合した場合、あるいは単位結合材量が極端に多い高強度コンクリートについては、断熱温度上昇に関する研究報告が少なく、標準値は提案されていない。

一方、近年では設計基準強度が 100N/mm<sup>2</sup> 以上の高強度コンクリートの強度発現に関する研究が数多くなされており、特に、150N/mm<sup>2</sup> 級の高強度コンクリートでは、水和初期に 60°C 以上に到達するような高温履歴を受

けると若材齢から非常に高い強度が得られる反面、初期の養生温度が 20°C だと高温履歴を受けた場合より得られる強度が低くなる傾向が示唆されている<sup>2),4)</sup>。すなわち、正確な温度解析を行うことは、温度ひび割れ解析の実施だけでなく、コンクリート強度発現の推定や初期の養生計画を策定する上でも非常に重要と考えられる。

そこで今回、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを混合した結合材を用いて、実強度 100~180N/mm<sup>2</sup> 程度が得られるコンクリートを練り混ぜ、周囲を断熱した小型ブロック試験体 (以下、小型試験体と称す) を製作し温度履歴を測定した。その後、温度履歴を再現するように、式(1)に入力するK値やα値を調整、算定し (本論では逆解析と称する)、これらの値を算定する式の提案を行った。また、その提案式により算出されるK値やα値を用いて模擬柱試験体の温度解析を行い、提案式の妥当性について検証を行った。

## 2. 検討方法

### 2.1 概要

検討を行うにあたってのフローを図-1に示す。はじめに、コンクリートの各種物性や断熱材の熱伝達率を、既往の文献<sup>1),5)</sup>などを参考に仮定した。

続いて、周囲を断熱した 20 体の小型試験体のうち 5 体程度の温度データを対象に逆解析を行い、コンクリートの発熱が終了した後の温度降下曲線が一致するまで境界条件の値を変化させ繰り返し解析を行い、断熱材の熱伝達率を推定した。その後、全小型試験体を対象に逆解析を行い温度履歴がほぼ一致をみるまでK値とα値を調整し逆解析を行うことでK値とα値を算出し、それ

\*1 三井住友建設 (株) 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

\*2 三井住友建設 (株) 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

\*3 住友大阪セメント (株) 東京支店 (正会員)

\*4 住友大阪セメント (株) セメントコンクリート研究所 工博 (正会員)

ぞれ単位結合材量やコンクリート温度で整理して算出式を提案した。最終的に模擬柱試験体を対象に温度解析を実施し提案式の妥当性を検証した。なお、小型試験体は室内試験で製作したもので、模擬柱試験体は実機試験にて製作したものである。

解析は(社)日本コンクリート工学協会(JCI)のプログラムを使用し2次元有限要素法で行った。

## 2.2 コンクリート

使用材料とその代表的な物性値を表-1に示す。結合材は、室内試験と実機試験ともに低熱ポルトランドセメントとシリカフェームの組合せとし、シリカフェームは内割りで10%置換した。シリカフェームの混合方法として、室内試験では粉体のシリカフェームを練混ぜ時に混合し、実機試験では予め水で溶いたシリカフェームスラリーにして混合した。また、使用骨材のうち、細骨材は室内試験では川砂を単独で使用し、実機試験では山砂と石灰石砕砂を混合して使用した。粗骨材は、産地は異なるものの、どちらも硬質砂岩を使用した。

使用した骨材の組合せとコンクリート調合を表-2に示す。水結合材比の範囲は30~13%に設定した。その他の調合条件として、単位水量は室内では150kg/m<sup>3</sup>に固定したのに対し、実機試験では140~160kg/m<sup>3</sup>の範囲で水結合材比が小さくなるにつれ若干増加させた。なお、材齢91日において得られたコンクリート強度は、室内試験と実機試験ともに標準養生供試体で100~180N/mm<sup>2</sup>程度、模擬試験体より採取したコア供試体では180N/mm<sup>2</sup>を超える強度が得られた<sup>2)</sup>。

## 2.3 小型試験体

逆解析によるK値とα値の検討に使用した小型試験体の形状を図-2に示す。小型試験体は、コアを採取し

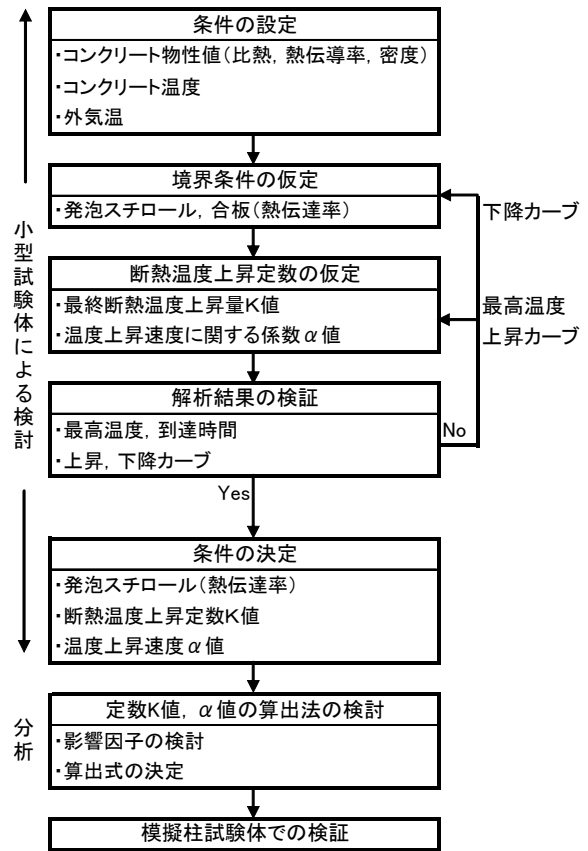


図-1 検討フロー

表-1 使用材料

材料名	材料名	諸物性	記号
結合材	低熱ポルトランドセメント	密度:3.24g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3300cm <sup>2</sup> /g, C <sub>3</sub> S:24%, C <sub>2</sub> S:57%	C
	シリカフェーム	密度:2.20g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:22.6m <sup>2</sup> /g, SiO <sub>2</sub> :95.6%, Ig loss:1.3%	SF
細骨材	栃木鬼怒川産川砂	表乾密度:2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:2.29%, FM:2.60	S1
	千葉君津産山砂	表乾密度:2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:2.41%	混合後 FM:2.62
	高知鳥形山産石灰石砕砂	表乾密度:2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.60%	
粗骨材	栃木葛生産硬質砂岩碎石	表乾密度:2.67g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.97%, FM:6.47	G1
	茨城岩瀬産硬質砂岩碎石	表乾密度:2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.81%, FM:6.76	G2
化学混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP

表-2 コンクリート調合

シリーズ	調合	W/B (%)	B/W	s/a (%)	空気量 (%)	使用骨材		単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
						S	G	W	C	SF	S	G
室内試験 100L強制二軸ミキサ	A-30	30.0	3.33	52.8	2.0	S1	G1	150	450	50	907	842
	A-25	25.0	4.00	50.4	2.0	S1	G1	150	540	60	824	842
	A-20	20.0	5.00	46.3	2.0	S1	G1	150	675	75	699	842
	A-16.7	16.7	6.00	40.8	2.0	S1	G1	150	810	90	558	842
	A-14.3	14.3	7.00	35.7	2.0	S1	G1	150	945	105	450	842
実機試験 6m <sup>3</sup> 強制二軸ミキサ	B-24	24.0	4.17	51.5	2.0	S2+S3	G2	140	525	58	521+356	837
	B-20	20.0	5.00	48.6	2.0	S2+S3	G2	140	630	70	462+317	837
	B-16	16.0	6.25	43.3	2.0	S2+S3	G2	140	788	88	374+255	837
	B-16'	16.0	6.25	44.0	2.0	S2+S3	G2	145	816	91	359+245	827
	B-14	14.0	7.14	35.4	2.0	S2+S3	G2	150	966	107	273+182	827
	B-13	13.0	7.69	26.1	2.0	S2+S3	G2	160	1108	123	172+117	827

強度確認を行う<sup>2)</sup>ため、内寸500×500×400mmのブロック状とし、試験体の周囲6面を発泡スチロールで断熱したもので、コア供試体の採取に支障が無いよう中心から若干ずれた位置に熱電対を設置して温度測定を行った。なお、この小型試験体では、最高温度は実大柱部材と同等程度まで上昇するが、温度の降下は実大柱部材より緩やかとなる。K値と $\alpha$ 値の検討に小型試験体を用いた理由は、発泡スチロールが十分な厚みを持っているため気温変動や日射あるいは風などの影響を受けにくく、また試験体内における温度差が小さいためである。

## 2.4 模擬柱試験体

K値と $\alpha$ 値の算出式について、最終的な検証に用いた模擬柱試験体の形状を図-3に示す。模擬柱試験体は、寸法が1000×1000×1000mmないし1400×1400×1800mmで、上下のみを150mm厚以上の発泡スチロールで断熱した普通柱試験体（普通柱）と、1000×1000×1000mmの上下に加えて側面4面も厚さ50mmの発泡スチロールで断熱した断熱柱試験体（断熱柱）の2種類を製作した。なお、模擬柱試験体の温度測定は、図-3に示すように試験体中心と端部の2箇所に熱電対を設置して行った。

## 2.5 温度解析

温度解析に使用した要素モデルを図-4に示す。モデ

ルは、各試験体断面の1/4を切り出したモデルとした。なお、温度測定結果と解析結果の比較は、温度測定位置に対応するように小型試験体についてはNo.6の位置で、模擬柱試験体についてはNo.1とNo.11の位置でそれぞれ行った。

小型試験体の逆解析を行う場合、断熱材により外気温の短期的な変化の影響は小さくなることから、温度測定期間である20日間の平均外気温を入力し、温度上昇勾配、最高温度ならびに最高温度到達時間の3要素が実測値に近づくようにK値は1.0刻みで、 $\alpha$ 値を0.05刻みで調整して温度解析を繰り返し実施した。なお、小型試験体において、K値と $\alpha$ 値が算定されたと判断する基準として、最高温度は $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内、最高温度到達時間は $\pm 4$ 時間とした。

K値と $\alpha$ 値が算定されたと判断した基準を上記のように定めた理由として、K値を1.0刻みとし $\alpha$ 値を0.05刻みで調整したところ、最高温度到達時間が50時間を超える場合などは、最高温度と到達時間を一致させることが非常に困難となった。ここで、K値と $\alpha$ 値の調整幅を細かくしても、K値と $\alpha$ 値の回帰式には大きな影響を及ぼさないと考えられたことから上記の判断基準とした。ただし、最高温度到達時間が30時間程度までであれば、到達時間の誤差は $\pm 2$ 時間程度まで調整を行うこ

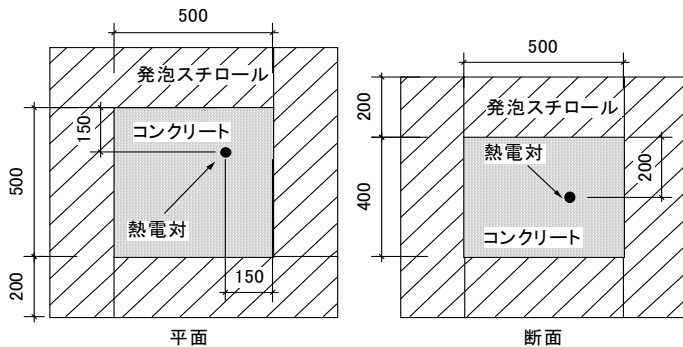


図-2 小型試験体

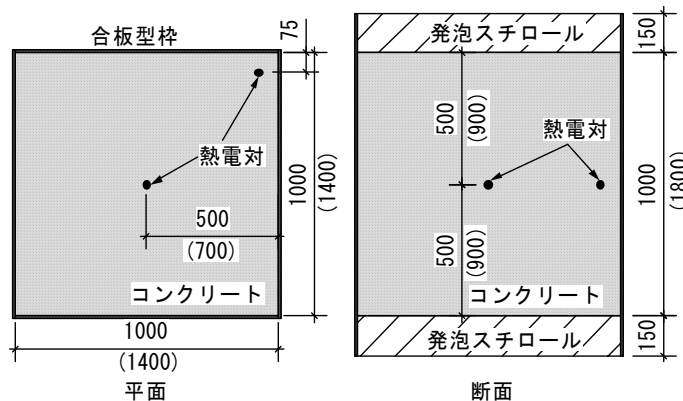


図-3 普通柱試験体（括弧内は1400断面角柱の寸法）  
※断熱柱では側面に500mmの断熱材を配置

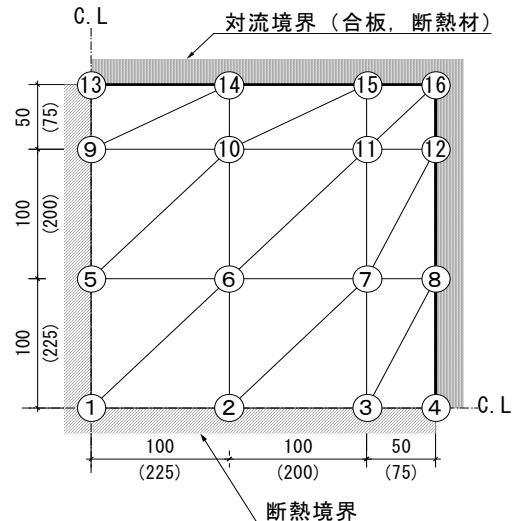


図-4 解析モデル  
（括弧内は模擬柱試験体の寸法）

とができた。

なお、本検討において $\beta$ 値は1.0に固定し、DI値は温度上昇の開始時間が合う様に調整した。模擬柱試験体の温度解析の場合、外気温の変動の影響が大きいことから、試験ヤード近傍での実測値を入力した。

最終的に入力した物性値の一覧を表-3に示す。断熱柱試験体の側面に配置した断熱型枠の熱伝達率は、小型試験体の発泡スチロールの値をもとに厚さで補正し、合板の値と組み合わせて決定した。

### 3. 小型試験体の検討結果

#### 3.1 逆解析結果

小型試験体を逆解析した温度履歴の例を、実際の測定結果とともに図-5に示す。逆解析結果は、ピーク付近で測定結果と多少ずれている事例もみられたが、試験時期やコンクリート調合にかかわらず、測定結果を概ね追従できた。

小型試験体 20 体分について、コンクリート温度履歴に関する主要な実測値、材齢 20 日までの平均外気温そして逆解析により算出したコンクリートのK値ならびに $\alpha$ 値の一覧を表-4に示す。練り上がりは温度8~30℃程度、最高温度は40~80℃程度そして到達時間は30~60時間程度であった。また、逆解析により算出されたK

値は40~60程度、 $\alpha$ 値は1.5~2.5程度の範囲となった。普通ポルトランドセメントで単位セメント量が $400\text{kg/m}^3$ の時には、K値が約62、 $\alpha$ 値が1.36程度と算出される<sup>9)</sup>が、それと比較するとK値は小さい反面、 $\alpha$ 値は大きく評価された。低熱ポルトランドセメントをベースにすることで発熱量は抑えられるが、高強度コンクリートでは、一度反応が始まると自らの水和熱により反応が加速的に進行すると推察される。

#### 3.2 K値と $\alpha$ 値の評価

単位結合材量と逆解析により算出された係数K値なら

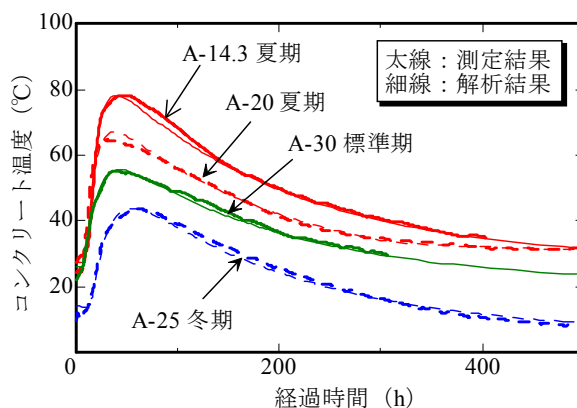


図-5 逆解析結果の例

表-3 物性値

材料	物性	単位	入力値
コンクリート	比熱	J/kg°C	942
	熱伝導率	W/m°C	2.67
	密度	kg/m <sup>3</sup>	2450
発泡スチロール(EPS:200mm厚)	熱伝達率	W/m <sup>2</sup> °C	0.50
化粧合板	熱伝達率	W/m <sup>2</sup> °C	4.64
断熱型枠(合板+EPS50mm)	熱伝達率	W/m <sup>2</sup> °C	0.90

表-4 温度実測値と逆解析による算出係数<sup>3)</sup>

B/W	単位結合材量(kg/m <sup>3</sup> )	実測値					逆解析による係数	
		練上がり温度(°C)	最高温度(°C)	温度上昇量(°C)	最高温度到達時間(h)	平均外気温(°C)	K	$\alpha$
7.0	1050	23.0	72.0	49.0	50.4	23.1	58.0	2.40
7.0	1050	25.5	78.2	52.7	43.4	24.4	59.0	2.50
6.0	900	22.0	68.7	46.7	43.1	23.1	55.0	2.40
6.0	900	29.0	76.5	47.5	41.8	24.7	55.0	2.50
6.0	900	23.5	73.3	49.8	44.6	24.4	57.0	2.40
6.0	900	29.5	76.3	46.8	41.5	20.8	50.0	2.55
6.0	900	11.5	57.6	46.1	41.0	2.3	51.0	2.40
5.5	825	22.0	64.8	42.8	40.6	24.4	54.0	2.30
5.5	825	22.5	70.4	47.9	52.3	23.1	54.0	2.20
5.0	750	23.0	65.7	42.7	27.7	23.1	50.0	2.20
5.0	750	29.0	71.1	42.1	40.8	24.7	50.0	2.25
5.0	750	23.0	65.7	42.7	53.5	24.4	50.0	2.20
5.0	750	8.5	54.5	46.0	37.0	20.8	50.0	2.20
5.0	750	21.5	65.8	44.3	51.5	20.8	42.0	2.25
5.0	750	30.5	75.2	44.7	39.4	20.8	49.0	2.55
5.0	750	8.0	51.0	43.0	53.9	2.3	47.0	1.75
4.0	600	19.0	59.6	40.6	35.8	20.8	46.0	1.90
4.0	600	29.5	66.5	37.0	46.8	20.8	42.0	2.10
4.0	600	8.0	43.8	35.8	57.9	2.3	40.0	1.40
3.3	495	19.0	55.0	36.0	35.5	16.4	37.0	1.80

びに  $\alpha$  値の関係を図-6 に示す。今回、検討対象とした範囲内では、K 値と  $\alpha$  値は、どちらも単位結合材量の増加に伴い直線的に大きくなる傾向が確認できる。

次に、データ数が最も多い結合材水比 5.0 の逆解析結果について、算出された K 値と  $\alpha$  値をコンクリート温度で整理した結果を図-7 に示す。同一結合材量で比較した場合、 $\alpha$  値はコンクリート温度の上昇とともに直線的に大きくなっていく傾向が見られるが、K 値はコンクリート温度との相関関係は明らかではない。そこで、K 値については単位結合材量のみで回帰を行い、 $\alpha$  値については単位結合材量とコンクリート温度を変数として回帰分析を行った。その結果、対象とした結合材の K 値と  $\alpha$  値について、式(2)ならびに式(3)という算出式が得られた。なお、 $\alpha$  値について、単位結合材量のみで回帰を行った式(4)を併せて示す。

$$K = 0.037 \times B + 20.16 \quad (2)$$

$$\alpha = 0.00126 \times B + 0.0213 \times CT + 0.773 \quad (3)$$

$$\alpha = 0.0015 \times B + 1.02 \quad (4)$$

ここに、K：最終断熱温度上昇量 (°C)

$\alpha$ ：温度上昇速度に関する係数

B：単位結合材量 (kg/m<sup>3</sup>)

CT：コンクリート温度 (°C)

$\alpha$  値についてコンクリート温度を考慮する式(3)ならびに考慮しない式(4)による算出値と、表-4 に示した小型試験体の逆解析で算出した値との関係を図-8 に示す。どちらも 1:1 の関係式上に分布しており、それぞれの回帰式もほぼ  $y=x$  となったが、コンクリート温度を考慮しない式(4)による場合では、 $\pm 15\%$  をはずれる算出値が 2 点みられることから、コンクリート温度は考慮した方が良いと判断した。

#### 4. 模擬柱試験体による検証

前章において提案した式(2)ならびに式(3)を用いて K 値と  $\alpha$  値を算出して温度解析を行い、実機試験にて製作した模擬柱試験体の温度実測値と比較して、提案式の妥当性について検証を行った。なお、コンクリート温度は試験体への打込み直前のフレッシュコンクリート試験結果を用い、入力した外気温は日陰部分における実測値を使用した。なお、測定期間中の平均外気温は冬期が 6.8°C、標準期が 20.7°C そして夏期が 32.2°C であった。

模擬柱試験体の温度履歴実測結果と温度解析結果の数例を、普通柱については図-9 に、断熱柱については図-10 に示す。図はそれぞれ左側が試験体中心部の結果で、右側が角部分の結果である。解析結果は、最高温度やその到達時間については、実測値を比較的精度良く再現できた。普通柱については、一部で解析結果と実測値の温度カーブが異なる部分がみられたが、これは日射や

風の影響とともに、試験体をシート養生していた点などが、その原因と考えられた。一方、外的要因の影響を比較的受けにくい断熱柱については、図-10 に示すように解析結果は実測値とほとんど一致した。

以上の結果より、小型試験体の温度履歴を逆解析して提案した K 値や  $\alpha$  値の算出式は、模擬柱試験体の温度解析を行う上で、十分な精度を持つことが確認された。

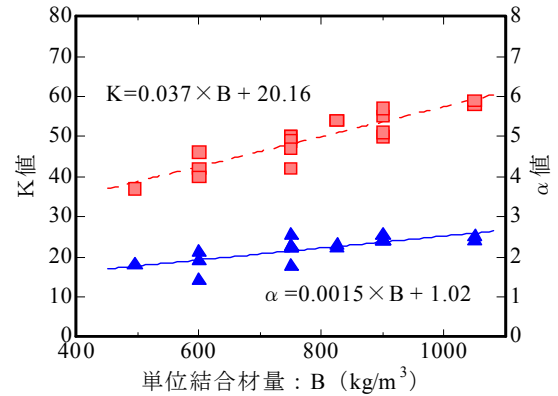


図-6 単位結合材量と係数

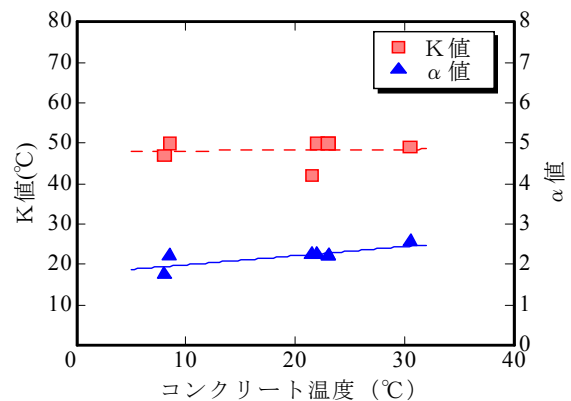


図-7 コンクリート温度と係数 (B/W 5.0)

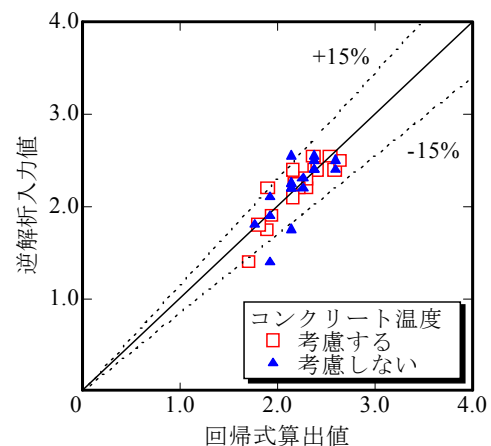


図-8 算出した  $\alpha$  値の検証

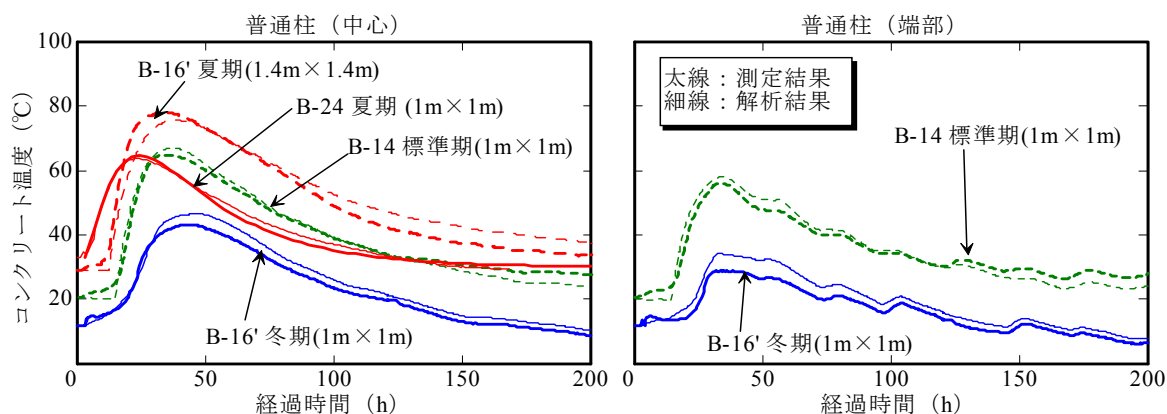


図-9 模擬柱試験体（普通柱）の温度解析結果と実測値（左：中心部，右：角部）

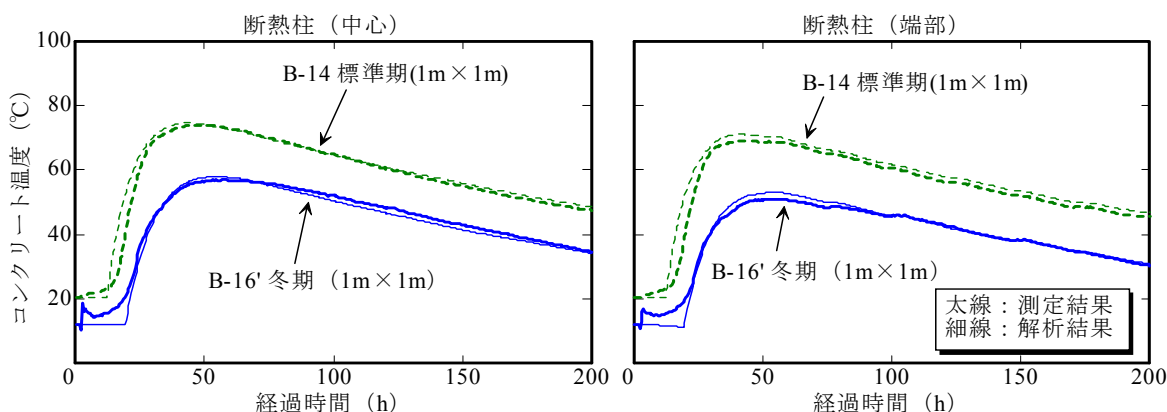


図-10 模擬柱試験体（断熱柱）の温度解析結果と実測値（左：中心部，右：角部）

## 5. まとめ

本研究では、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームの混合した結合材を対象として、温度解析に必要な最終断熱温度上昇量  $K$  値と、温度上昇速度に関する係数  $\alpha$  値について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 周囲を断熱した小型試験体の温度測定データを逆解析することで  $K$  値と  $\alpha$  値を評価し、それぞれの算出式を提案した。
- (2)  $K$  値は単位結合材量のみで、 $\alpha$  値は単位結合材量とコンクリート温度を組み合わせて評価が可能であった。
- (3) 提案式により算出した  $K$  値ならびに  $\alpha$  値を用いて温度解析を行い、1.0~1.4m 角程度の寸法を持つ部材の温度履歴を推定できることを確認した。

## 謝辞

本研究のデータ収集にあたり、東京エスオーシー（株）と日本シーカ（株）ならびに BASF ポゾリス（株）の諸氏にご助力いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 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，1986
- 2) 河上浩司ほか：150N/mm<sup>2</sup> 級高強度コンクリートの強度発現に関する実験研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.1235-1240，2006
- 3) 河上浩司・西本好克：Fc100N/mm<sup>2</sup> 級の高強度コンクリートの強度発現性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.369-374，2002
- 4) 陣内 浩ほか：設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup> クラスの高強度コンクリートによる実大 RC 柱の施工性と構造体強度発現性状の検討，日本建築学会技術報告集，Vol.17，pp.1-5，2003.6
- 5) 村上祐次ほか：コンクリートの保温養生に関する養生材料について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1333-1338，1999
- 6) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，pp.7-8，2008