

# 逆解析による高強度コンクリートの発熱特性値の評価

## Evaluation of Heat Generation Characteristic Values of High Strength Concrete with Inverse Analysis

河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI

蓮尾 孝一 KOICHI HASUO

松田 拓 TAKU MATSUDA

西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO

低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを用いた高強度コンクリートの発熱特性を評価し、温度解析へ適用するため、周囲を断熱した小型試験体の打ち込み直後からの温度履歴を測定した。その後、小型試験体の温度履歴を逆解析して再現し、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 $\alpha$ 値を求め、それぞれ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。さらに、この提案式により求めたK値と $\alpha$ 値を用いて模擬柱試験体の温度解析を行い、実測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、シリカフューム、温度解析

The purpose of this study is to evaluate the heat generation characteristic of high strength concrete using low heat Portland cement and silica fume, and to apply to temperature analysis. Small models with thermal insulation were made of high strength concrete and temperature histories of the models were measured. Moreover, the temperature history was reproduced by the inverse analysis, and a formula calculating coefficient of temperature rise was proposed. Finally, comparing the analytical result using the proposed formula with the observed one for the model column, verification of the formula was demonstrated.

**Key Words:** High Strength Concrete, Low Heat Portland Cement, Silica Fume, Temperature Analysis

### 1. はじめに

近年では、設計基準強度が  $100\text{N/mm}^2$  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いる。特に、 $150\text{N/mm}^2$  級の高強度コンクリートでは、水和初期に  $60^\circ\text{C}$  以上に到達するような温度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  $20^\circ\text{C}$  だと比較的長期に渡って得られる強度が低くなる傾向が示唆されている<sup>2,3,4)</sup>。すなわち、正確に温度履歴を予測することは、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うえでも非常に重要と考えられる。

一方、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 FEM 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、 $Q(t)$ ：断熱温度上昇量 ( $^\circ\text{C}$ )

$K$ ：最終断熱温度上昇量 ( $^\circ\text{C}$ )

$t$ ：材齢 (h)

$\alpha$ ：温度上昇速度に関する係数

$\beta$ ：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

式 (1) 中の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、 $\alpha$  値と称す) は、結合材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 種の場合で、かつ単位結合材量が  $400\text{kg/m}^3$  程度までであれば、過去に多くの研究成果があり標準値や算定式が示されている<sup>1)</sup>。しかし、結合材が低熱ポルトランドセメントの場合や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の場合は、断熱温度上昇に関す

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	混合後 FM:2.62
	千葉君津産山砂	表乾密度:2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:2.41%	
	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砕石	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砕石	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

る研究報告が少なく標準値や算定式は示されていない。

本研究では、結合材として低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを用い、圧縮強度が100～180N/mm<sup>2</sup>級の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）に打ち込み、打ち込み直後からの温度履歴を測定した。そして、この測定結果を再現するように、式(1)に入力するK値とα値を調整して温度解析を実施し、K値とα値を算定した（以下、逆解析と称す）。その後、この逆解析により得られたK値とα値を単位結合材量やコンクリート温度で整理することでK値とα値の算出式を提案した。さらに模擬柱試験体の温度測定結果を対象に、提案式により算出されるK値やα値を式(1)に代入した断熱温度上昇曲線を用いて温度解析を行い、その妥当性を検証した。なお、本研究の一連の検討に際し、β値は1.0の一定値とし、DI値は温度の上昇開始が合うように調整した。

## 2. 検討方法

### (1) 概要

検討フローを図-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>などを参考に設定した。続いて、周囲を断熱した20体の小型試験体のうち5体の温度データを対象に逆解析を行い、コンクリートの温度降下曲線が一致するように断熱材の熱伝達率を決定した。その後、全小型試験体を対象に逆解析

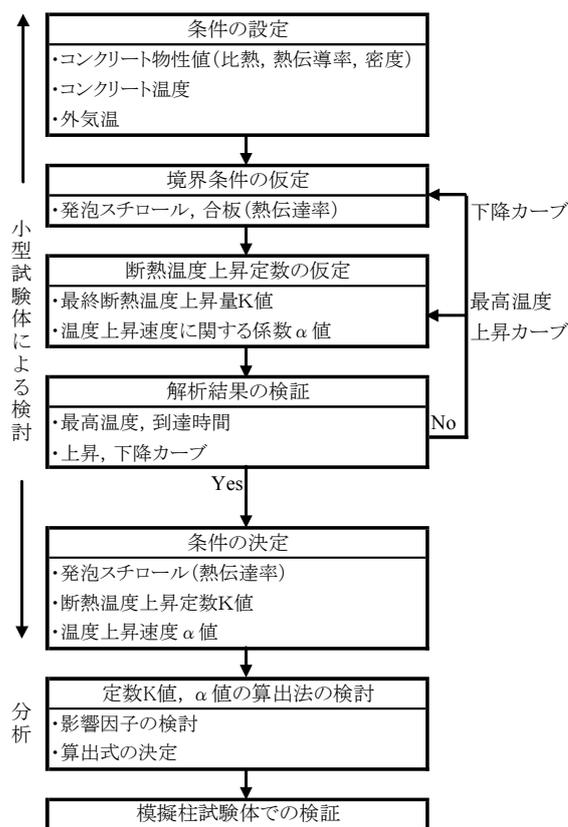


図-1 検討フロー

を行い、温度履歴がほぼ一致するまでK値とα値を調整しながら繰り返し逆解析を行うことでK値とα値を算出し、それ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

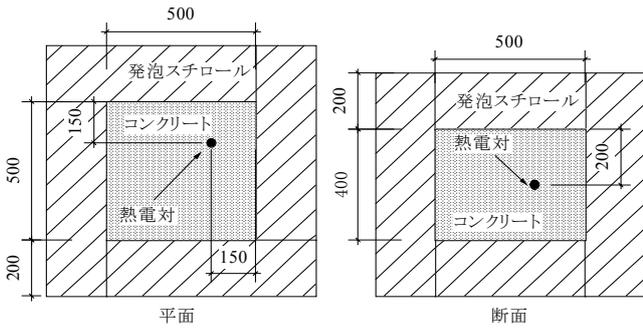


図-2 小型試験体

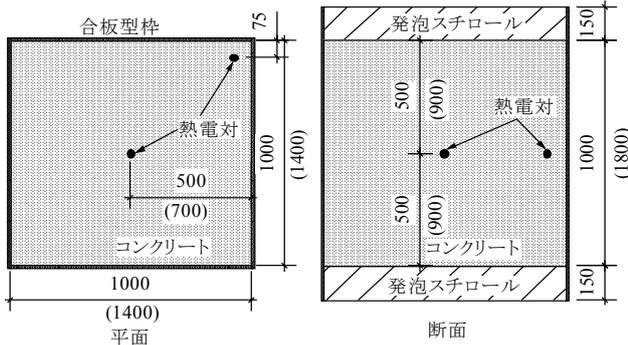


図-3 普通柱試験体（括弧内は1,400mm断面柱の寸法）  
※断熱柱では側面にも50mmの断熱材を配置

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、模擬柱試験体は実機試験にて製作したものである。

温度解析は、(社)日本コンクリート工学協会によるマスコンクリートの温度応力解析プログラムを使用し、二次元有限要素法（FEM）で行った。

## (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、シリカフェームの置換率は内割りで10%とした。シリカフェームの混合方法は、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、実機試験ではあらかじめ水で溶いたシリカフェームスラリーを混合した。また、使用骨材は、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、産地は異なるがどちらも硬質砂岩砕砂を使用した。

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（W/B）の範囲は30～13%に設定した。その他の調合条件として、単位水量は室内試験では150kg/m<sup>3</sup>の一定値とし、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～

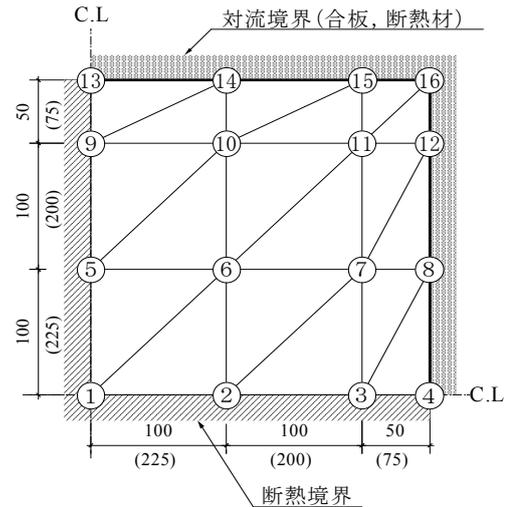


図-4 解析モデル  
（括弧内は模擬柱試験体の寸法）

180N/mm<sup>2</sup>程度、小型試験体や模擬柱試験体より採取したコア供試体では最高で180N/mm<sup>2</sup>を超える強度が得られた<sup>2)</sup>。

## (3) 小型試験体

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、コア供試体を採取し強度確認<sup>2)</sup>を行うため内寸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。温度測定は、コア供試体の採取に支障がないよう中心から若干ずれた位置に熱電対を設置して行った。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α値の検討に小型試験体を用いた理由は、発泡スチロールによる高い断熱性のため、気温変動や日射あるいは風などの外的要因による温度変化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。

## (4) 模擬柱試験体

K値とα値に関する算出式の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1,000×1,000×1,000mmないし1,400×1,400×1,800mm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（以下、普通柱と称す）と、1,000×1,000×1,000mmの寸法で側面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（以下、断熱柱と称す）の2種類を製作した。模擬柱試験体の温度測定は、試験体中心と角部の2箇所に熱電対を設置して行った。

表-3 物性値

材料	物性	単位	入力値
コンクリート	比熱	J/kg・℃	942
	熱伝導率	W/m・℃	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> ・℃	0.50
化粧合板	熱伝達率	W/m <sup>2</sup> ・℃	4.64
断熱型枠(合板+EPS50mm)	熱伝達率	W/m <sup>2</sup> ・℃	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					逆解析により求めた係数	
		練上がり温度(℃)	最高温度(℃)	温度上昇量(℃)	最高温度到達時間(h)	平均外気温(℃)	K	α
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

(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ではNo.6の位置の温度、模擬柱試験体ではNo.1とNo.11の位置の温度を用いた。

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た。K値、α値の算出は、温度上昇勾配、最高温度ならびに最高温度到達時間の3要素が小型試験体の測定結果に一致するまで、K値は1.0刻み、α値は0.05刻みで変化させて温度解析を繰り返し計算した。この計算をするに際してβ値は1.0の一定値、DI値は温度上昇の開始時刻が一致するよう調整した。なお、模擬柱試験体の温度解析の場合は、外気温の変動の影響が大きいため、試験ヤード近傍での実測値を入力した。

小型試験体において、今回の検討ではK値を1.0刻みとしα値を0.05刻みで調整したが、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の両者を一致させることは不可能であった。ここで、K値とα値の調整幅を細かくしても、最終的な目標であるK値と

α値の回帰式の算出には大きな影響を与えないと考えられた。そこで、K値とα値が算定されたと判断する基準として、最高温度を優先させて±3℃以内とし、最高温度到達時間は±4時間をはずれないことを目安とした。

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

(1) 逆解析結果

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α値の一覧を表-4に示す。また、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、ピーク近辺で測定結果と多少ずれる事例もあったが、試験時期や調査にかかわらず測定結果をおおむね再現できた。コンクリートの練上がり温度は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。この条件のもと、逆解析により

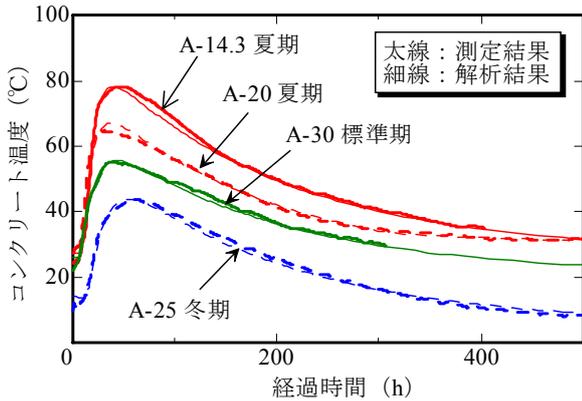


図-5 温度解析の一例

算出されたK値は40～60程度、 $\alpha$ 値は1.5～2.5程度となった。普通ポルトランドセメントで単位セメント量が $400\text{kg/m}^3$ のときには、K値が約62、 $\alpha$ 値が1.36程度と算出される<sup>6)</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。

(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線形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への依存性は認められない。そこで、K値については単位結合材量のみで回帰分析を行い、 $\alpha$ 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、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。

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

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

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 ( $\text{kg/m}^3$ )  
 CT：コンクリート温度 (°C)

4. 模擬柱試験体による検証

前章において、K値と $\alpha$ 値の算出式として提案した式

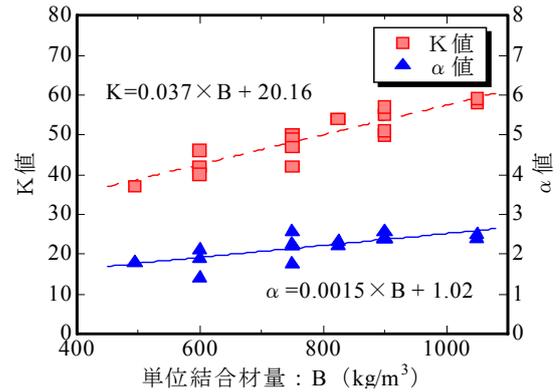


図-6 単位結合材量と係数

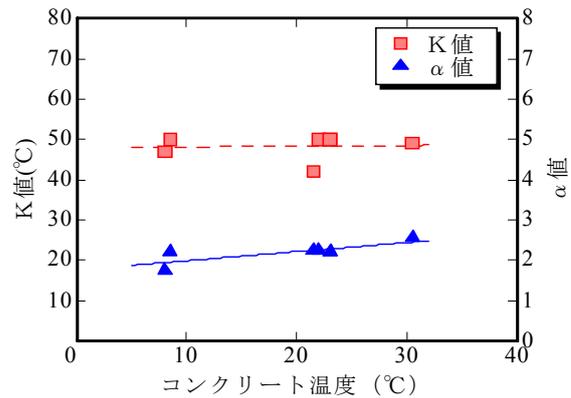


図-7 コンクリート温度と係数 (B/W 5.0)

(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 $6.8^\circ\text{C}$ 、標準期が $20.7^\circ\text{C}$ そして夏期が $32.2^\circ\text{C}$ 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を、普通柱については図-8に、断熱柱については図-9に示す。図はそれぞれ左側が試験体中心部の結果で、右側が角部の結果である。解析結果をみると、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。このうち、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見られたが、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。

以上の検証結果より、小型試験体の温度履歴を逆解析して得られたK値と $\alpha$ 値を、単位結合材量やコンクリート温度で整理した提案式は、模擬柱試験体の温度解析を行ううえで、十分な精度を持つことが確認された。

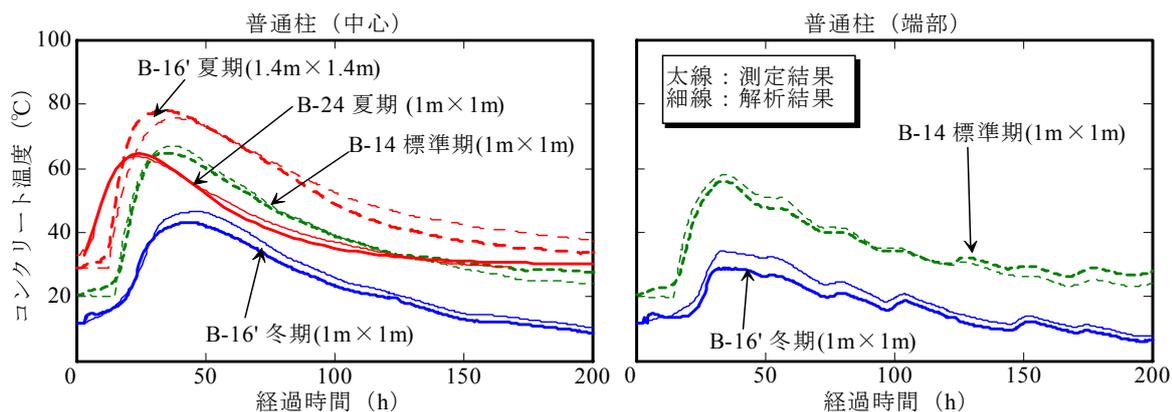


図-8 模擬柱試験体 (普通柱) の温度解析結果と実測値 (左: 中心部, 右: 角部)

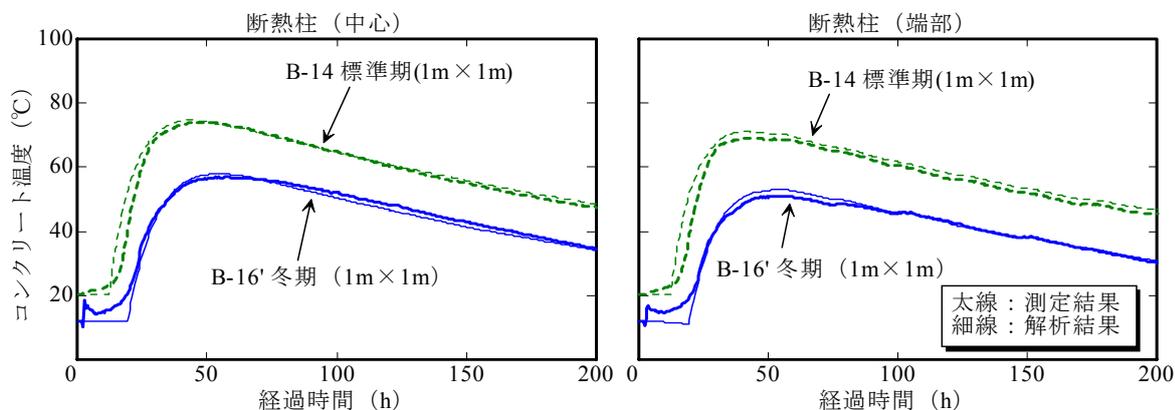


図-9 模擬柱試験体 (断熱柱) の温度解析結果と実測値 (左: 中心部, 右: 角部)

## 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について、温度解析の計算条件として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 $\alpha$ 値の検討を行った。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により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：本研究に当たり、住友大阪セメント(株)、東京エスオーシー(株)、日本シーカ(株)ならびに BASF ポゾリス(株)の関係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，pp1235-1240，2006
- 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