

# 論文 コンクリートの表面温度に及ぼす内部空隙の影響に関する 基礎的研究

桃木 昌子\*<sup>1</sup>・山田 和夫\*<sup>2</sup>・桃木 佳子\*<sup>3</sup>

**要旨：**本研究では、コンクリートの表面温度分布性状に及ぼす空隙の埋設深さと大きさの影響について実験的および解析的に検討を行った。その結果、本研究で採用した3次元熱伝導有限要素解析の結果は、空隙が埋設されているコンクリートの表面温度に関する実測結果と極めてよく一致すること、空隙埋設部と周辺部との最高表面温度差は空隙の埋設深さが浅くなるに従って増大し、空隙の検出精度は著しく向上すること、空隙厚さが5～14mmの範囲であれば、空隙厚さの増大によって最高表面温度差は約20～40%程度増大し、空隙の検出精度が若干向上すること、などが明らかとなった。

**キーワード：**サーモグラフィー法、コンクリート、内部探査、空隙、3次元熱伝導解析

## 1. はじめに

従来、コンクリートに関する非破壊試験方法は、構造体に打設されたコンクリートの強度を推定することを目的としたものが多かったが、近年はコンクリート構造物の劣化度診断や外壁タイルの剥落による人身事故が大きな社会問題となったことなども関連して、コンクリートの強度推定以外の内部探査の試験方法も重要となってきている。

赤外線カメラによって測定物の表面温度を撮影し、その温度分布から測定物内部の状況を推定しようとするサーモグラフィー法は、測定結果が視覚的に把握できること、一度に広範囲の調査が可能であること、経時的な計測も容易であることなど、従来の試験方法にはない多くの利点を有しているため、医療・機械の分野ではすでに計測システムの一つとして定着しており、コンクリート工学の分野でも、その応用という面で極めて有効な測定手段になり得るものと注目を集めている[1]。筆者らは、別報[2,3]においてサーモグラフィー法による外壁タイルの剝離評価およびコンクリートの内部探査の適用性について実験的および解析的に検討を行い、その可能性について報告した。本研究は、これら一連の研究の延長線上のもので、コンクリートの表面温度分布性状に及ぼす空隙の埋設深さおよび大きさの影響を明らかにするための基礎的研究として、まずモルタル試験体を用いた実験によって検討するとともに、3次元熱伝導解析の結果と比較を行い、本解析手法の適用性について検討したものである。

## 2. 実験および解析方法

### 2.1 実験の概要

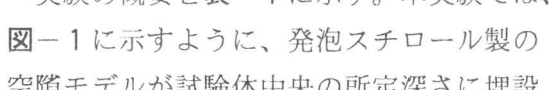
実験の概要を表-1に示す。本実験では、図-1に示すように、発泡スチロール製の空隙モデルが試験体中央の所定深さに埋設

表-1 試験体の概要

| 介在物の種類           | 介在物の埋設深さ (mm) | 介在物の寸法 (mm) |
|------------------|---------------|-------------|
| 発泡スチロール<br>介在物なし | 15            | 100×100×5   |
|                  | 30            | 100×100×14  |
|                  | 60            | 100×100×14  |

\*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

\*2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

\*3 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

【単位：mm】 D=15, 30, 60 mm  
d=5, 14 mm

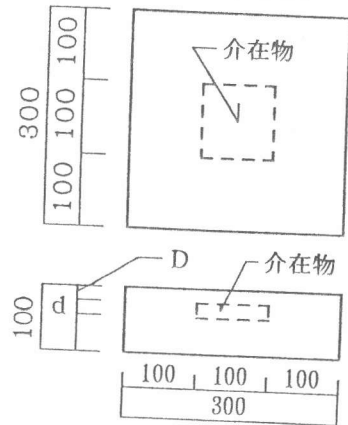


図-1 試験体の形状・寸法

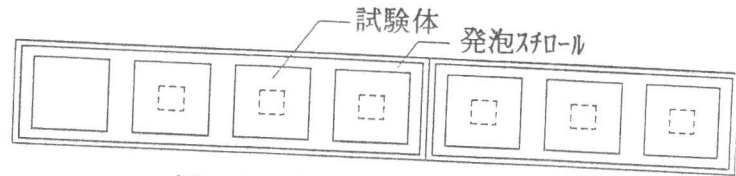


図-2 表面温度測定用試験箱

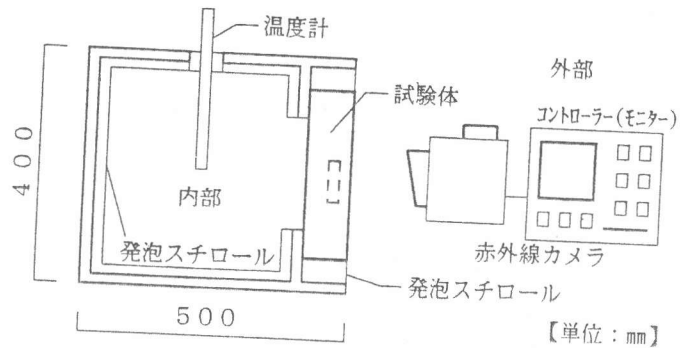


図-3 計測システム

されている寸法 300(縦)x300(横)x100(厚さ)mm の平板モルタル試験体を用いて、試験体の表面温度分布と空隙の埋設状況との関係について調査を行った。実験要因としては、空隙モデルの大きさ (100(縦)x100(横)x5(厚さ)mm および 100(縦)x100(横)x14(厚さ)mm の2種類) および空隙モデルの埋設深さ (15、30、60 および 100(空隙モデル無し)mm の4種類) を取り上げた。全ての計測は、測定条件が同じとなるように同じ日に実施し、試験体側面を発泡スチロールで断熱した後に表面温度測定用試験箱 (図-2、3参照) にセットし、測定表面を真南の方向に向け、赤外線カメラを試験体の真正面に設置して時刻 7:00 ~ 17:00 の間 1 時間毎に外気温、試験箱内部の温度 (以下、内気温と略記する)、南側鉛直面日射量および試験体表面温度を測定した。試験体表面の温度測定には、偏向変調表示モードで撮影された赤外線写真を使用し、試験体表面の縦・横方向をそれぞれ 1cm 間隔に分割した各ポイントの温度を 0.1℃ の精度で読み取った。使用した計測システムおよび赤外線カメラの性能を、それぞれ図-3 および表-2 に示す。なお、測定は、愛知工業大学 2 号館屋上で 1994 年 11 月 28 日の晴天日に行った。図-4 に、測定日の内・外気温、日射量および日射吸収率を 0.7、熱伝達率を  $0.00072 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{℃}$  と仮定して算定した相当外気温の経時変化を示す。

表-2 赤外線カメラの性能

|        |              |
|--------|--------------|
| 測定温度範囲 | -20℃~1,600℃  |
| 赤外線検出器 | 液体窒素冷却型 InSb |
| 走査線数   | 240本         |
| 走査時間   | 2.0秒         |
| 測定温度精度 | 0.1℃         |

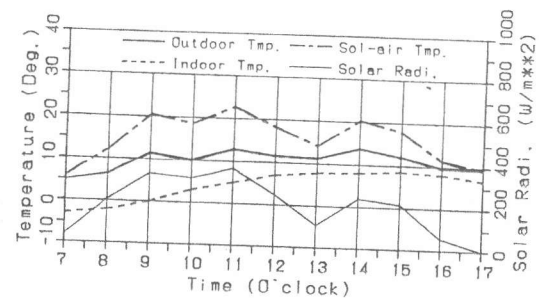


図-4 測定日(1994.11.28)の気温・日射量の経時変化

## 2.2 解析の概要

本解析では、前掲の図-1 に示した平板モルタル試験体の対称性を考慮して図-5 に示すような 1/4 解析モデルを使用し、8 節点アイソパラメトリック要素を用いた 3 次元定常および非定常

表-3 材料の熱特性

| 媒体の種類   | 密度 $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 比熱 $c$<br>(cal/g $\cdot$ °C) | $\rho \cdot c$ | 熱伝導率 $\kappa$<br>(cal/cm $\cdot$ s $\cdot$ °C) | 熱伝達率 $\alpha$<br>(cal/cm <sup>2</sup> $\cdot$ s $\cdot$ °C) |
|---------|-----------------------------------|------------------------------|----------------|--|---|
| モルタル    | 2.0                               | 0.19                         | 0.38           | 0.0031   | 外壁 : 0.00072<br>中間層 : 0.00010<br>内壁 : 0.00024               |
| 発泡スチロール | 0.028                             | 0.30                         | 0.0084         | 0.000088                                       |   |

熱伝導有限要素解析を行った。本解析で用いた構成材料の各種物性値 [4] を表-3 に示す。なお、解析に必要な各時刻における内・外気温および日射量としては、前掲の図-4 に示す実測値を用いた。ただし、コンクリートの日射吸収率は 0.7 とした。解析に際しては、まず時刻 7:00 における内・外気温に対して定常熱伝導解析を行い、その時点での試験体内部の温度分布を求めた。次に、得られた結果を試験体の初期内部温度分布と仮定し、時間増分を 10 分に設定して時刻 17:00 までの非定常熱伝導解析を行った。

### 3. 結果とその考察

#### 3.1 表面温度分布に関する測定結果

図-6 は、空隙モデルが埋設されていない試験体によって実測された試験体の表面温度分布の経時変化を示したものである。なお、表面温度は測定結果の対称性を考慮して平均化処理が施してある。この図によれば、外気温の変化にもかかわらず試験体表面各位置における温度差は殆ど認められないが、厚さ 5mm の空隙モデルが深さ 15mm の位置に埋設されている試験体の場合には、図-7 に示すように、相当外気温が最高となる時刻 9:00 ~ 11:00 (図-4 参照) の範囲で、試験体の中央部 (空隙モデル埋設部) と周辺部との表面温度差 (以下、単に表面温度差と呼ぶことにする) が最も大きく、その後相当外気温が低下すると表面温度差も減少するようになり、さらに時刻 17:00 になると、相当外気温はまだ内気温よりも高いにもかかわらず空隙モデル埋設部の表面温度は周辺部の表面温度よりも低くなっているのが読み取れる。また、埋設深さが 30mm の場合の結果を示した図-8 によれば、定性的な傾向は前掲の図-7 の場合と同様であるが、表面温度差は埋設深さが 15mm の場合と比べてかなり小さくなり、さらに埋設深さが 60mm の場合になると、図-9 に示すように表面温度差は殆ど認められなくなっているのがわかる。このことは、空隙の検出精度が埋設深さ

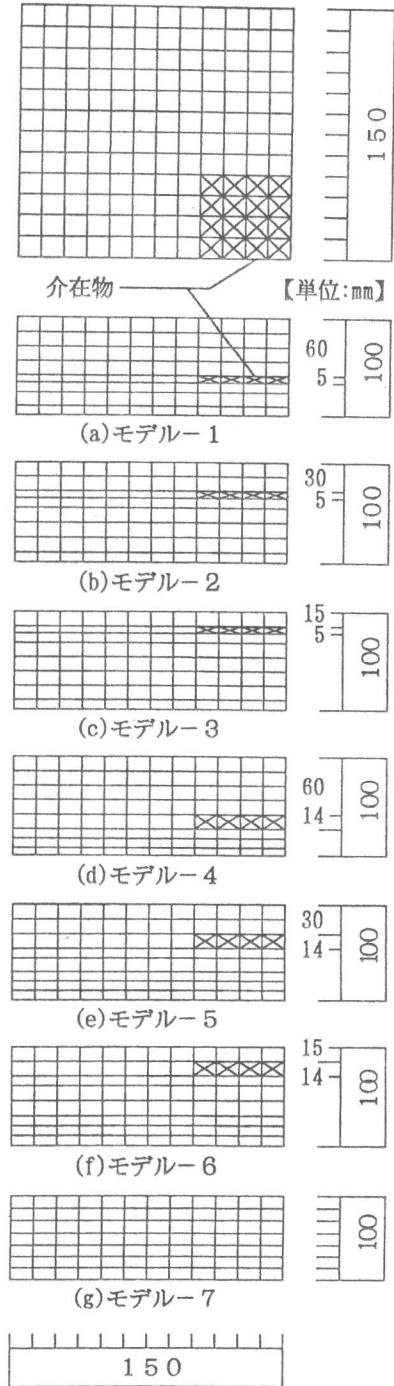


図-5 解析モデル

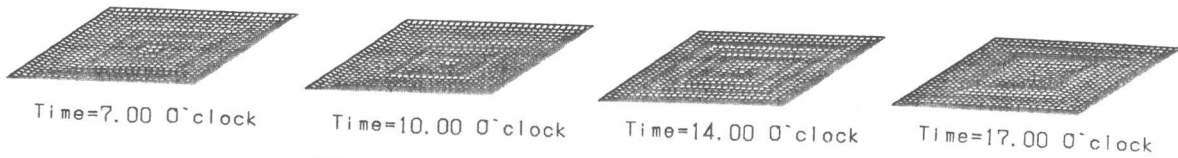


図-6 試験体表面の温度分布 (介在物なし)

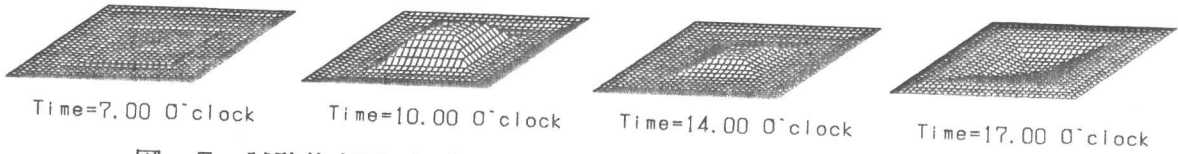


図-7 試験体表面の温度分布 (空隙モデル: 厚さ=5mm, 埋設深さ=15mm)

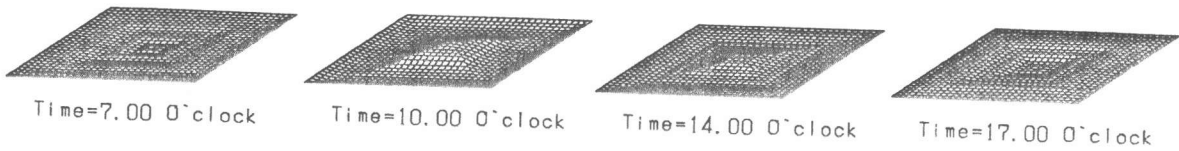


図-8 試験体表面の温度分布 (空隙モデル: 厚さ=5mm, 埋設深さ=30mm)

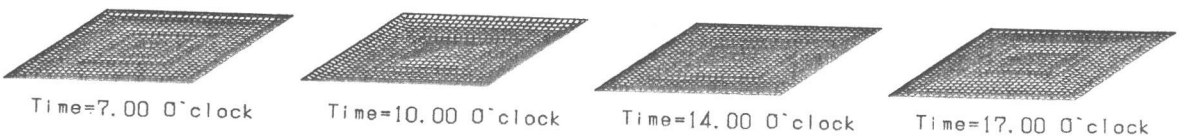


図-9 試験体表面の温度分布 (空隙モデル: 厚さ=5mm, 埋設深さ=60mm)

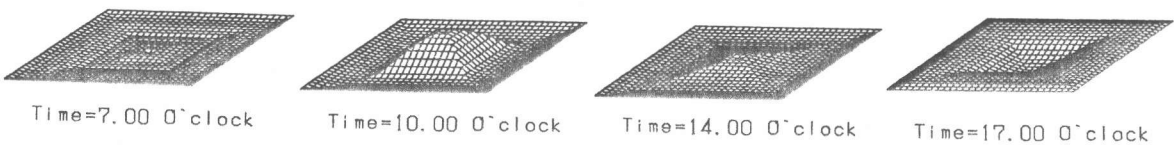


図-10 試験体表面の温度分布 (空隙モデル: 厚さ=14mm, 埋設深さ=15mm)

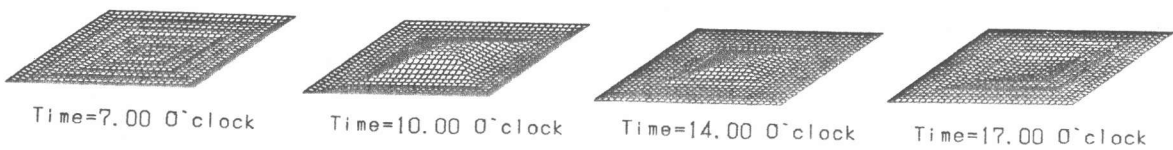


図-11 試験体表面の温度分布 (空隙モデル: 厚さ=14mm, 埋設深さ=30mm)

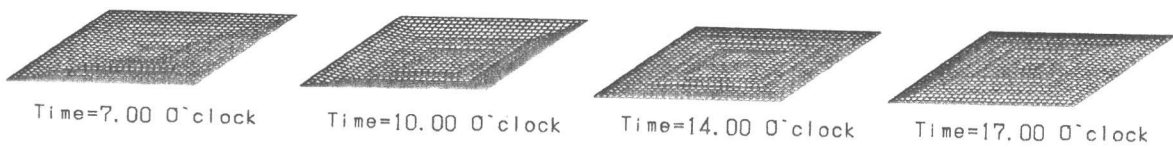


図-12 試験体表面の温度分布 (空隙モデル: 厚さ=14mm, 埋設深さ=60mm)

によって著しく影響を受けることを示唆している。なお、厚さが 14mm の空隙モデルの場合も、図-10～図-12に示すように、定性的な傾向はほぼ同様である。

### 3.2 測定結果と解析結果との比較

図-13および図-14は、それぞれ試験体中央部の表面温度（中心位置から1cmの範囲における平均表面温度）および表面温度差（図-13に示す表面温度と試験体側面から中心に向かって1cmの範囲における平均値表面温度との差）の経時変化に関する測定結果と解析結果との比較を試験

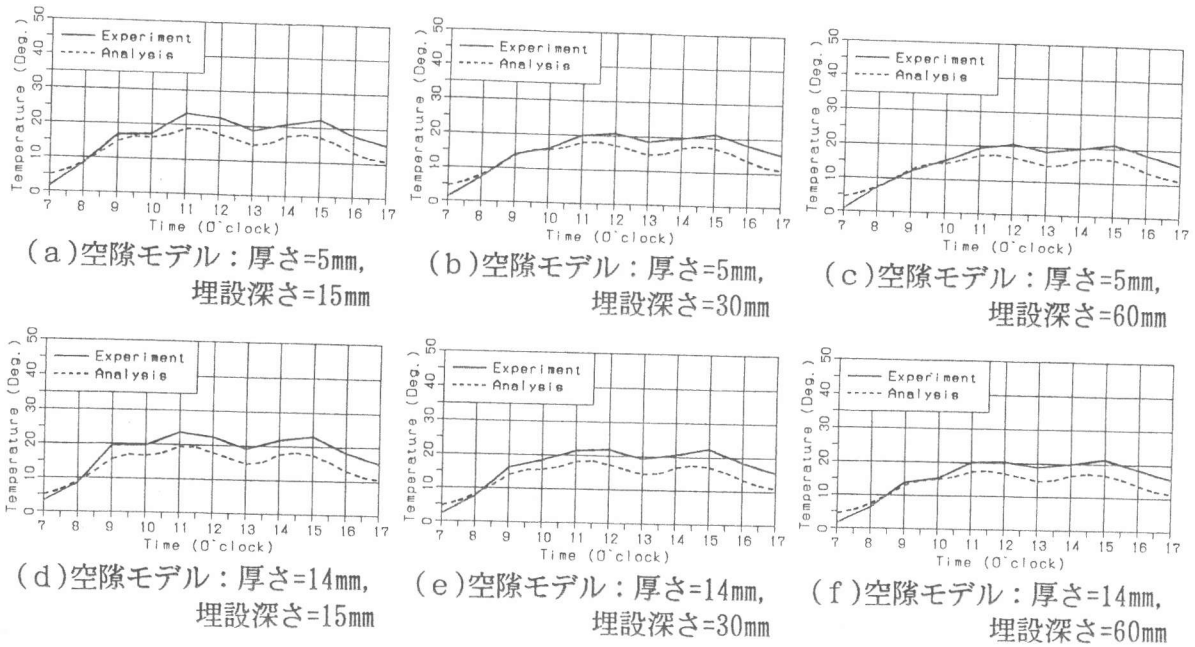


図-13 試験体中央部の表面温度に関する測定結果と解析結果との比較

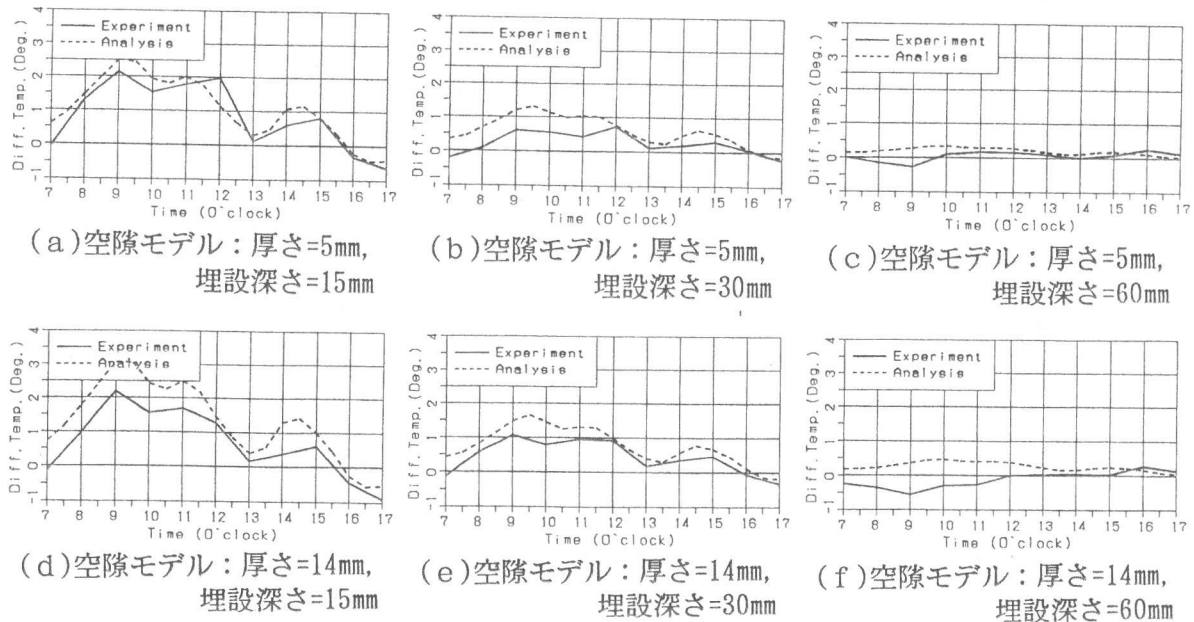


図-14 試験体表面温度差に関する測定結果と解析結果との比較

体別に示したものである。これらの図によれば、測定結果と解析結果とは比較的大きな数値となる試験体中央部の表面温度だけでなく、かなり小さな数値となる表面温度差についてもよく一致しており、本解析手法を用いることによってコンクリート表面の温度分布の経時変化に及ぼす埋設空隙の影響をかなりの精度で追跡できることがわかる。一般的に、試験体中央部の表面温度の経時変化は、空隙モデルの埋設深さや厚さによってそれほど明確な影響を受けないが、表面温度差は、空隙モデルの埋設状況の相違によって著しく影響される。すなわち、空隙モデルが厚く、かつ埋設深さが浅いほど表面温度差の経時変化は著しくなる傾向を示している。

### 3.3 空隙の検出性能

図-15(a)および(b)は、それぞれ空隙モデルが埋設された試験体によって得られた表面温度

埋設深さとの関係を示したものである。これらの図によれば、試験体中央部と周辺部との最低温度差に関する実測値はそれほど明確な傾向を示さないが、最高表面温度差は、実測結果および解析結果ともに空隙モデルの埋設深さが浅くなるに従って指数的に増大し、空隙の検出精度が加速度的に向上することがわかる。また、空隙モデルの厚さが5mmから1へと厚くなると、最高表面温度差は平均で約1.2倍(測定値)~約1.4倍(解析値)の増大を示し、空隙の検出精度も若干向上する。なお、表面温度差に関する測定値は、解析値よりも若干小

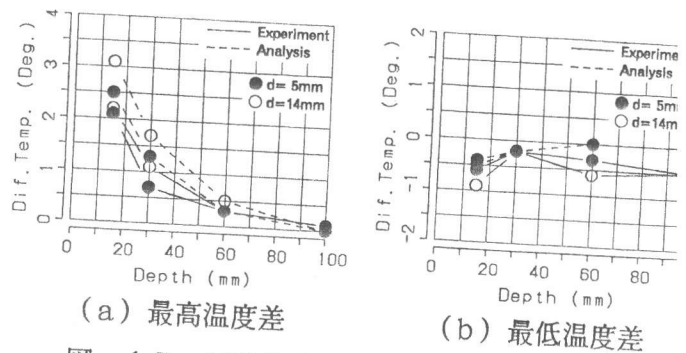


図-15 試験体表面の最高および最低温度差

なっているが、これは試験体側面の断熱条件が実験と解析とで相違していたためと思われる。

#### 4. 結論

本研究では、サーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査方法を確立するための基礎研究として、コンクリートの表面温度分布性状に及ぼす空隙の埋設深さと大きさの影響について実験的および解析的に検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 本研究で採用した3次元熱伝導有限要素解析の結果は、実測結果と極めてよく一致し、コンクリートの表面温度分布性状に及ぼす埋設空隙の影響を総合的に調査する解析手法として効である。
- 2) 空隙埋設部と周辺部との最高表面温度差は空隙の埋設深さが浅くなるに従って指数的に増するため、空隙の検出精度も加速度的に向上する。
- 3) 空隙の厚さが5~14mmの範囲であれば、空隙の厚さが大きくなるとともに最高表面温度差は約20~40%程度の増大を示し、空隙の検出精度が若干向上する。

#### 謝辞

本実験に際してご助力を得た愛知工業大学学生の本多貴広君および松井 勝君に対して謝意を表します。また、実験の実施に際して赤外線カメラを提供して頂いた愛知工業大学・神谷清仁教授、気象観測データを提供して頂いた愛知工業大学・比嘉俊太郎教授に対して謝意を表します。

#### 引用文献

- 1) コンクリートの非破壊試験法研究委員会：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書(コンクリートの非破壊試験法に関する技術の現状)、日本コンクリート工学協会、pp.1-243、1992.3
- 2) 山田和夫・桃木佳子：サーモグラフィー法を適用した外壁タイルの剝離評価に関する解析的研究、セメント・コンクリート論文集、No.47、pp.266-271、1993.12
- 3) 山田和夫・桃木佳子・小林 健：サーモグラフィー法を適用したコンクリートの内部探査に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.48、pp.180-185、1994.12
- 4) 日本建築学会：建築設計資料集成1(環境・熱)、pp.97-134、1978