

# 論文 サーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査結果に及ぼす日射量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>

**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日射量の影響を明らかにすることを目的として一連の検討を行った。その結果、サーモグラフィー法による埋設物の検出能力は、測定面が日射量の大きい南側を向いている場合が最も優れていること、測定結果に及ぼす日射量の影響は、測定表面の日射吸収率が小さくなるに従って小さくなり、とくに測定表面が白色の場合には、測定表面が南側を向いている場合でも埋設物の検出が難しいこと、表面温度分布性状を解析的に追跡する際には、日射量や日射吸収率の影響を考慮できる解析手法を用いる必要があること、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、日射量、日射吸収率

## 1. はじめに

近年、サーモグラフィー法を適用したコンクリートの内部評価試験法が注目を集めている<sup>1)</sup>が、測定結果は、一般的に測定物の内部状況以外にも測定表面の材質、汚れや色、日射・日照や風速といった測定時の気象環境、測定物裏面の状態などの相違によっても著しく影響を受けるため、測定結果を正しく評価するためには、これらの影響についても十分に把握しておく必要がある。

筆者らは、この点を踏まえて、別報<sup>2)~5)</sup>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結果に及ぼす各種要因の影響について検討を行った。本研究は、これら一連の研究の延長線上のもので、測定表面が打放し状態の試験体、並びに白色および黒色塗料で塗装した試験体を用いて、サーモグラフィー法による測定結果と埋設空隙との関係に及ぼす測定方向（日射量）の影響について、実験的および解析的に検討を行ったものである。

## 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（100(縦)x100(横)x5(厚さ)mm）が試験体中央の所定深さに埋設されている寸法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

表-1 実験の概要

介在物の種類	介在物の埋設深さ (mm)	介在物の寸法 (mm)	測定方向	測定表面の色 (内は日射吸収率)
発泡スチロール	20	100×100×5	南北	白色 (0.33)
	40			打放し (0.67)
				黒色 (0.94)

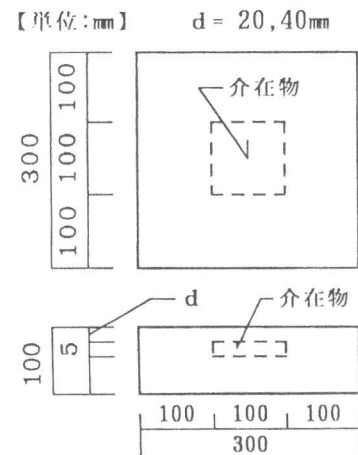


図-1 試験体の形状・寸法

\*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)

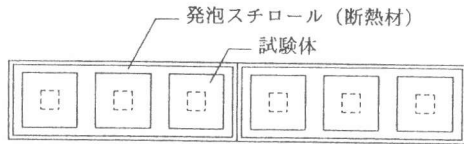


図-2 表面温度測定用試験箱

度分布状況と日射量との関係について調査を行った。実験要因としては、空隙モデルの埋設深さ（ $d=20$ および $40\text{mm}$ の2種類）、測定表面色（白色、黒色および打放し（ペイントなし）の3種類）および測定方向（北面および南面の2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試験体を表面温度測定用試験箱（図-2、3参照）にセットし、測定表面を測定方向（真南および真北）に向け、赤外線カメラを試験体の真正面に設置して時刻6:00～19:00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）、測定方向の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、既報<sup>3)~5)</sup>と同様に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 $0.1^\circ\text{C}$ の精度で読み取った。使用した計測システムを図

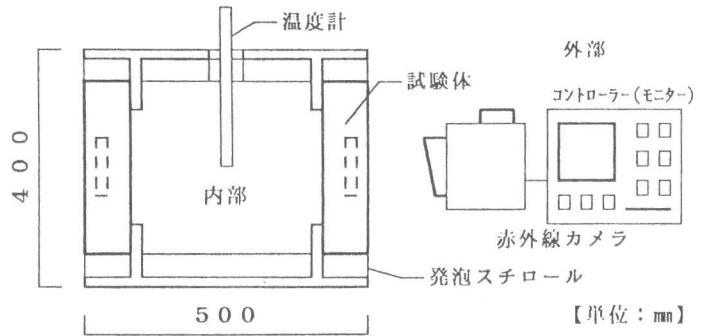
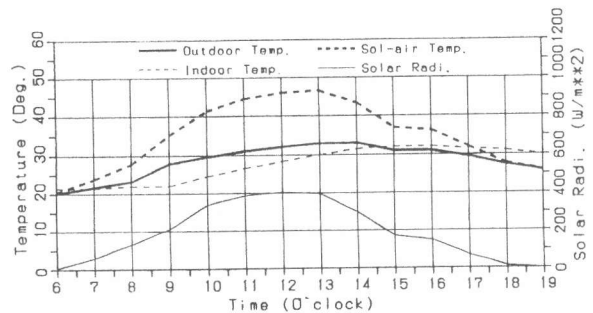
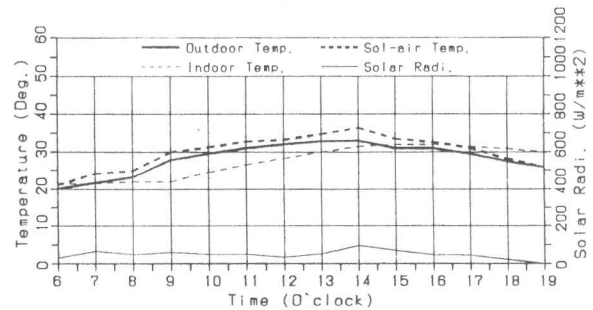


図-3 計測システム



(a) 南面



(b) 北面

図-4 測定日（1995.9.1）の気温・日射量の経時変化

一3に示す。なお、測定は愛知工業大学2号館屋上で1995年9月1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 $0.00072\text{cal}/\text{cm}^2\cdot^\circ\text{C}$ と仮定して算定した相当外気温の経時変化を示す。

## 2.2 解析の概要

本解析では、図-5に示すような1/4解析モデルを使用して、既報<sup>2)~5)</sup>と同様に内・外気温および日射量の経時変化の影響を考慮できる3次元定常および非定常熱伝導有限要素解析を行った。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に示す実測値を使用し、構成材料の熱特性は前報<sup>5)</sup>と同様とした。ただし、測定表面の日射吸収率としては、予備測定によって得られた値（ $0.33$ （白色）、 $0.67$ （打放し）、 $0.94$ （黒色））を用いた。

解析に際しては、まず時刻6:00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

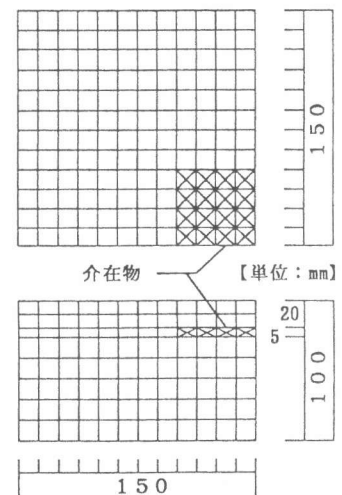


図-5 解析モデル

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15分に設定して時刻19:00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 試験体の表面温度分布性状

図-6(a)~(d)は、空隙モデルが深さ20mmの位置に埋設されている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の例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。まず、測定表面が南側を向いている場合に注目してみると、図-6(a)および(b)に示すように、相当外気温が最高となる時刻10:00~14:00(図-4(a)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、さらに相当外気温が内気温より低くなる時刻17:00以降になると、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、測定表面の日射吸収率が小さくなると表面温度差も小さくなっているのがわかる。一方、測定表面が北側を向いている場合は、図-6(c)および(d)に示すように、定性的な傾向は南側の場合と同様であるが、測定表面色にかかわらず表面温度差はかなり小さくなっているのがわかる。このことは、空隙の検出精度が測定方向(日射量)によって著しく影響を受けることを示唆している。なお、空隙モデルが深さ40mmの位置に埋設されている場合も、定性的な傾向はほぼ同様であった。

#### 3.2 表面温度に及ぼす空隙モデルの埋設深さの影響

図-7は、測定表面が黒色で、測定表面が南側を向いている試験体の中央部の表面温度(中心位置から1cmの範囲における平均表面温度)と表面温度差(試験体中央部の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表面温度との差)の経時変化に及ぼす空隙モデルの埋設深(d)の影響を示したものである。図によれば、一般的に空隙モデルの埋設深さが浅

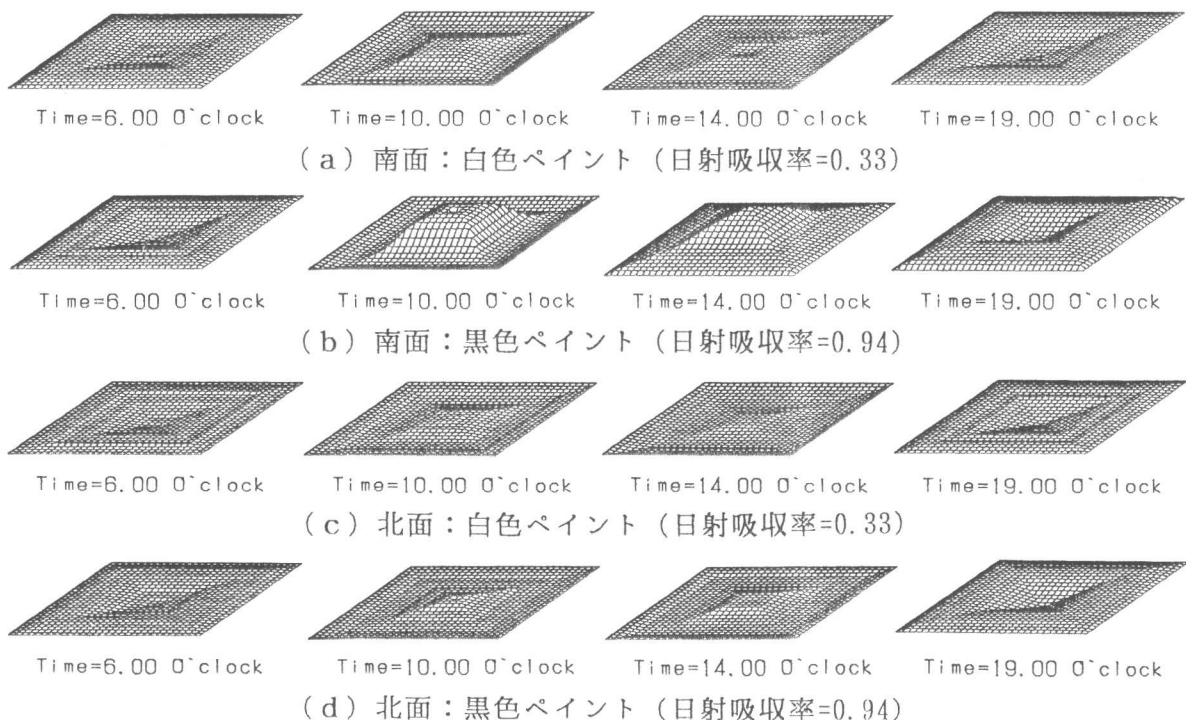
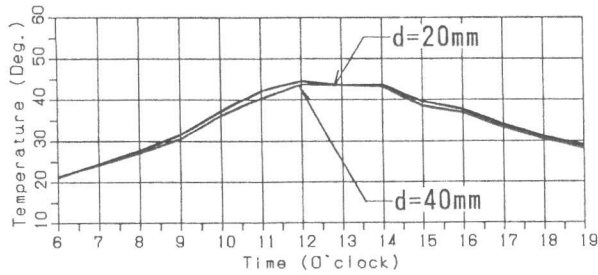
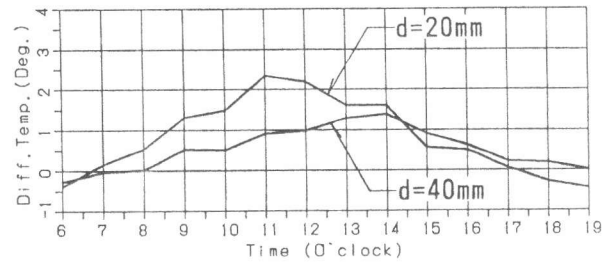


図-6 表面温度分布 (埋設深さ=20mm)

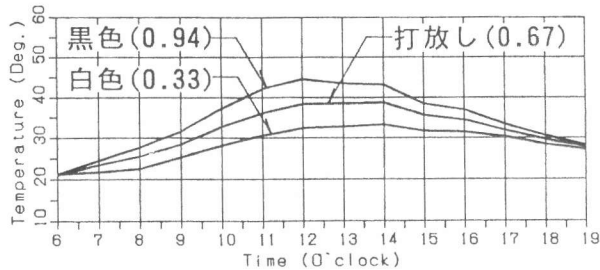


(a) 試験体中央部の表面温度

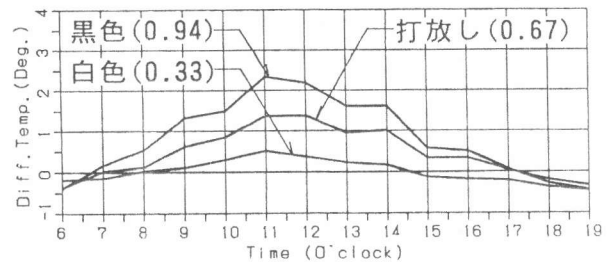


(b) 試験体表面温度差

図-7 試験体表面温度の経時変化に及ぼす埋設深さの影響 (南面:黒色ペイント)



(a) 試験体中央部の表面温度



(b) 試験体表面温度差

図-8 試験体表面温度の経時変化に及ぼす測定表面色の影響 (南面:d=20mm)

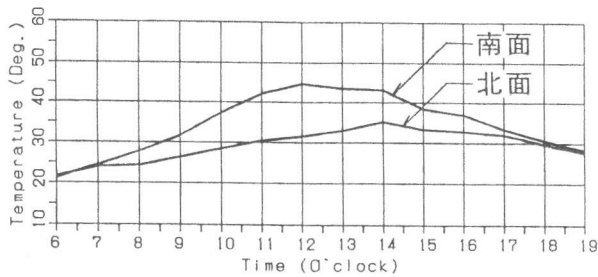
いほど、試験体中央部の表面温度および表面温度差は大きくなっており、空隙モデルの検出が容易であることがわかる。すなわち、最大表面温度差は、埋設深さが20mmの場合が2.3°C (時刻11:00)、埋設深さが40mmの場合が1.4°C (時刻14:00)であり、かつ最大表面温度差となる時刻は、埋設深さが20mmの場合には試験体中央部の表面温度が最大となる時刻 (12:00) よりも早くなっているが、埋設深さが40mmの場合には表面温度が最大となる時刻よりも遅くなっている。

### 3.3 表面温度に及ぼす測定表面色の影響

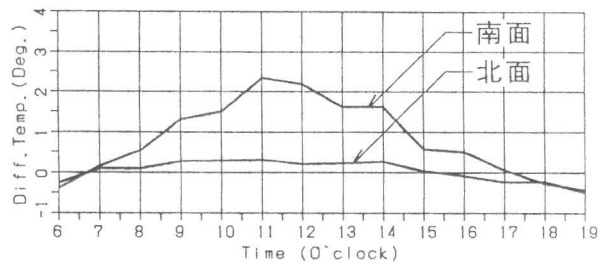
図-8は、空隙モデルの埋設深さが20mmで、測定表面が南側を向いている試験体の中央部の表面温度と表面温度差の経時変化に及ぼす測定表面色の影響を示したものである。図-8(a)によれば、試験体中央部の表面温度は日射吸収率が大きくなるほど高くなっており、最高表面温度は白色測定表面の場合が33.2°C、打放しの場合が38.8、黒色の場合が44.7°Cで、日射吸収率約0.1の相違に対して2°C前後の変化が認められる。また、図-8(b)によれば、表面温度差も日射吸収率が大きくなるほど増大する傾向を示しており、最高表面温度差は白色測定表面の場合が0.5°C、打放しの場合が1.4°C、黒色の場合が2.3°Cとなっている。以上のことから、空隙モデルの埋設状況が同じであっても、測定表面が黒っぽくて日射吸収率が大きいものほど空隙モデルの検出が容易であり、日射吸収率が小さ過ぎると空隙モデルの検出が困難になることがわかる。

### 3.4 表面温度に及ぼす日射量の影響

図-9~図-11は、空隙モデルが深さ20mmの位置に埋設されている試験体の中央部の表面温度と表面温度差の経時変化に及ぼす測定方向の影響を測定表面色別に示したものである。これらの図によれば、試験体中央部の表面温度および表面温度差は、一般的に測定表面が南側を向いている方が大きくなっており、サーモグラフィー法による空隙モデルの検出能力は、北面よりも日射量の大きい南面の方が優れていることがわかる。例えば、測定表面が黒色の試験体の最大表面温度差は、測定表面が南側の場合が2.3°C (時刻11:00)であるのに対して、北面の場合が0.3°C (時刻11:00)であり、日射量が十分でない方向の空隙モデルの検出は、極めて困難であるといえる。ただし、表面温度および表面温度差の測定方向による差 (南側と北側との差) の最大値は

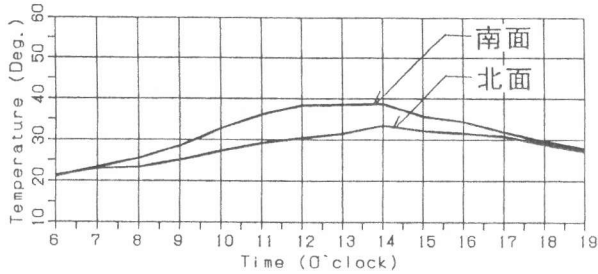


(a) 試験体中央部の表面温度

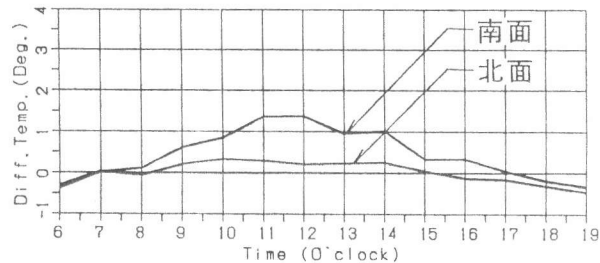


(b) 試験体表面温度差

図-9 試験体表面温度の経時変化に及ぼす測定方向の影響 (黒色ペイント:d=20mm)

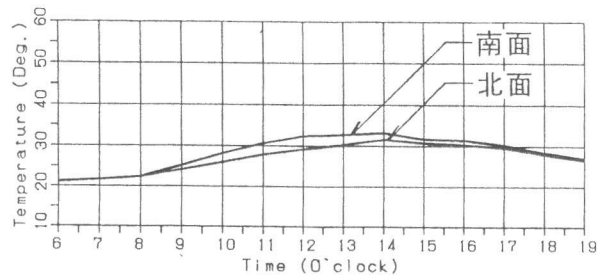


(a) 試験体中央部の表面温度

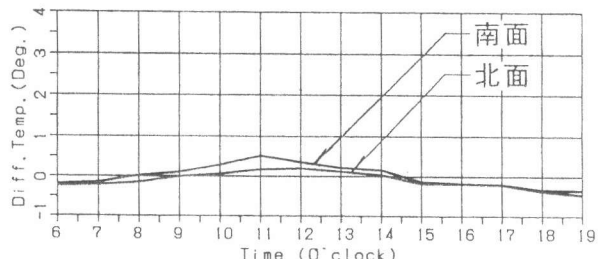


(b) 試験体表面温度差

図-10 試験体表面温度の経時変化に及ぼす測定方向の影響 (打放し:d=20mm)



(a) 試験体中央部の表面温度



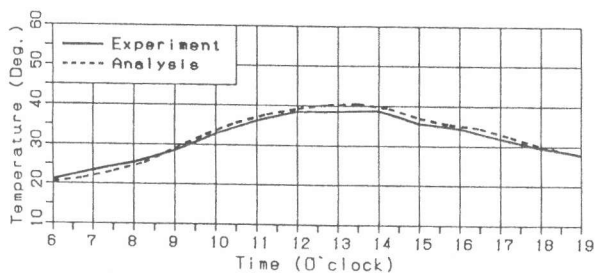
(b) 試験体表面温度差

図-11 試験体表面温度の経時変化に及ぼす測定方向の影響 (白色ペイント:d=20mm)

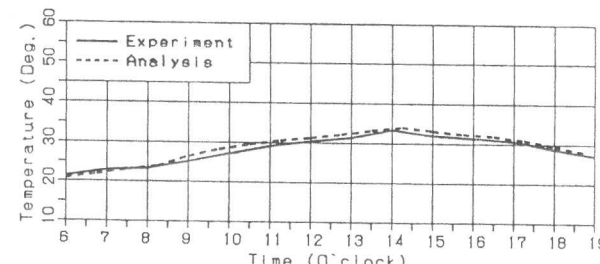
黒色測定表面の場合がそれぞれ12.2°C (時刻12:00) および2.0°C (時刻11:00)、打放しの場合が7.8°C (時刻12:00) および1.1°C (時刻12:00)、白色の場合が3.1°C (時刻12:00) および0.3°C (時刻11:00) というように、測定表面の日射吸収率が小さくなるに従って測定方向の影響が小さくなる傾向を示しており、とくに測定表面が白色の場合には、測定表面が南側を向いている場合も空隙モデルの検出が非常に難しいことがわかる。

### 3.5 測定結果と解析結果との比較

図-12および図-13は、それぞれ試験体表面が打放し状態で、空隙モデルが深さ20mmの位置に埋設されている試験体の中央部の表面温度および表面温度差の経時変化に関する測定結果と解



(a) 南面



(b) 北面

図-12 試験体中央部の表面温度に関する測定結果と解析結果の比較 (打放し:d=20mm)

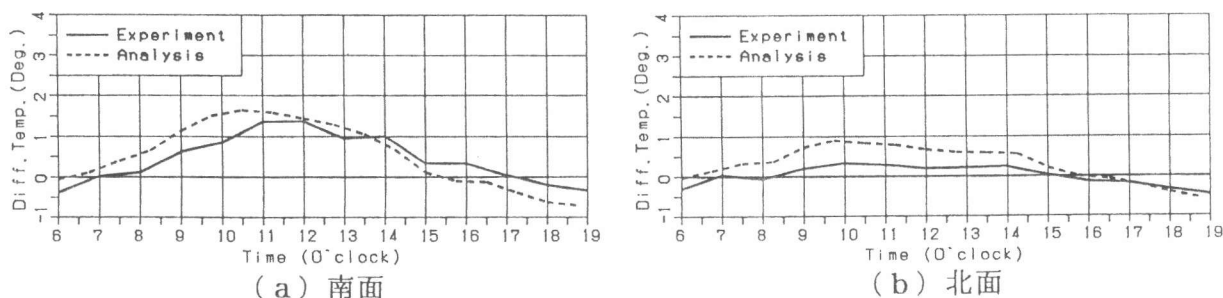


図-13 試験体表面温度差に関する測定結果と解析結果の比較 (打放し:d=20mm)

析結果との比較を日射量の異なる測定方向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表面温度分布の経時変化に及ぼす日射量および日射吸収率の影響をかなりの精度で追跡できることがわかる。

#### 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的研究として、コンクリートの表面温度分布性状に及ぼす日射量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) サーモグラフィー法による埋設物の検出能力は、測定表面が北側を向いている場合よりも日射量の大きい南側を向いている方が優れており、日射量が十分でない方向の埋設物の検出は極めて困難である。
- 2) 埋設物の検出性能に及ぼす測定方向の影響は、測定表面の日射吸収率が小さくなるに従って小さくなり、とくに測定表面が白色の場合には、測定表面が南側を向いている場合であっても埋設物の検出は非常に難しい。
- 3) 試験体表面の温度分布性状は、試験体内部の状況以外に日射量や試験体表面の日射吸収率によっても著しく影響を受けるが、本解析手法を用いることによって、表面温度分布の経時変化に及ぼすこれらの影響をかなりの精度で追跡できる。

#### 謝辞

本実験に際してご助力を得た愛知工業大学学生の恵美正博君および山本直規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・神谷清仁助教、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) 桃木昌子・山田和夫・桃木佳子：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.655-660、1995.6
- 5) 山田和夫・桃木佳子・桃木昌子：サーモグラフィー法による映像解析結果に及ぼす測定表面色の影響、セメント・コンクリート論文集、No.49、pp.622-627、1995.12