

論文 サーモグラフィー法による内部探査結果に及ぼすブリージングの影響

山田 和夫*1・高倉 真司*2

要旨：本報では、強制加熱を利用したサーモグラフィー法による内部探査結果に及ぼす加熱距離、介在物の種類および埋設深さ、埋設物の上・下面に存在する空隙層などの影響について一連の検討を行った。その結果、介在物の検出精度を向上させるためには、介在物の種類と埋設深さに応じて、最適な加熱距離と加熱時間を設定する必要があること、ブリージングなどにより鉄板の上・下面に空隙層が存在すると、鉄板の確認が困難となること、鉄板上面に空隙層が存在する場合、表面温度差に及ぼす空隙層厚の影響は顕著であるが、下面に空隙層が存在する場合は、空隙層厚さの影響は小さいこと、などが明らかとなった。

キーワード：非破壊検査、内部探査、サーモグラフィー法、強制加熱、ブリージング

1. はじめに

近年、コンクリートの内部探査を目的とした極めて有効な測定方法としてサーモグラフィー法が注目を集めている^{1),2)}が、サーモグラフィー法を利用した内部探査結果の信頼性を向上させるためには、強制熱源を利用したアクティブな測定方法についても検討しておく必要がある。この点を踏まえて、筆者らは、これまでに強制的な加熱や冷却を利用したアクティブな測定方法についての検討を行った^{3),4)}が、本研究では、引き続き強制加熱を利用したサーモグラフィー法による内部探査結果に及ぼす各種要因の影響について一連の実験的・解析的検討を行った。

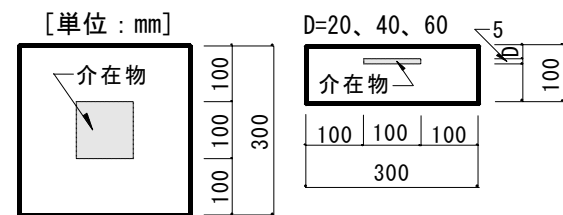
2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験の概要を表－1に示す。本実験では、図－1に示すように、寸法100(縦)×100(横)×5(厚さ)mmの介在物(発泡スチロール板、低発泡塩化ビニール板、木板および鉄板の4種類)が試験体中央の所定の深さ(表－1参照)に埋設されている寸法300(縦)×300(横)×100(厚さ)mmの平板モルタル試験体を用いて、試験体の

表－1 実験の概要

介 在 物		加熱時間 (分)	赤外線ヒータ の距離 d (m)
種 類	埋設深さ (mm)		
発泡スチロール板	20	120	1.0
低発泡塩化 ビニール板			
木 板			
鉄 板			
介在物なし	——		2.0
発泡スチロール板	40、60		
鉄 板			
(低発泡塩化ビ ニール板)+(鉄板)	20+上空1		3.0
	20+上空3		
	20+上空5		
(鉄板)+(低発 泡塩化ビニール板)	20+下空1		
	20+下空3		
	20+下空5		

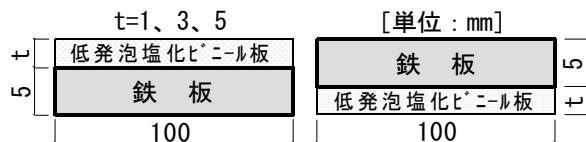


図－1 試験体の形状・寸法

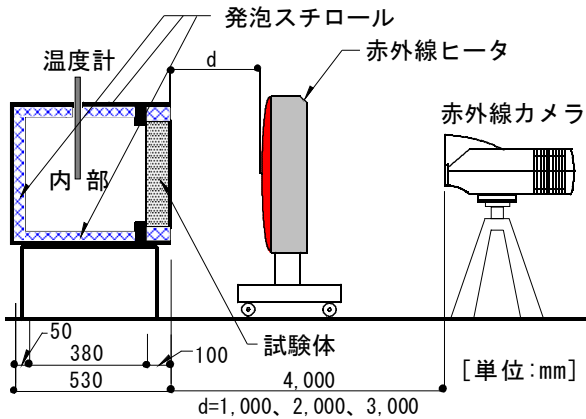
表面温度分布性状に及ぼす介在物の種類および埋設深さ、赤外線ヒータによる強制熱源の距離の影響について調査を行った。また、本実験では、前掲の表－1および図－2に示すように、

*1 愛知工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*2 東京鐵鋼(株)技術部 修士(工学)



図－２ 沈下・ブリージングモデル介在物の概要

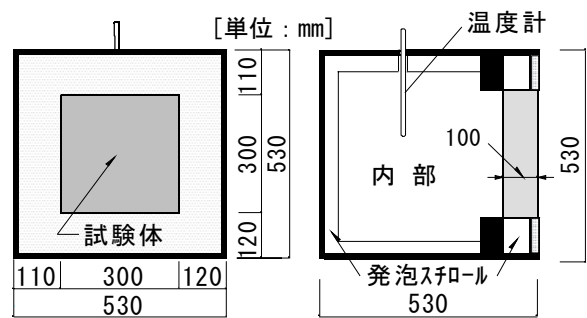


図－３ 計測システム

表面温度分布性状に及ぼすコンクリートの沈下またはブリージングなどにより介在物の上・下面に生じた空隙層の影響を調査するために、鉄板の上面または下面に低発泡塩化ビニール板を速効性接着剤により圧着させた沈下・ブリージングモデル介在物についての調査も行った。

2.2 計測・処理方法

実験は、全て愛知工業大学構造・材料実験室内で行い、測定条件が同じになるように配慮して実施した。本実験で用いた計測システムを図－３に示す。計測に際しては、まず試験体側面を発泡スチロールで断熱した後に図－４に示す表面温度測定用試験箱に試験体をセットし、赤外線ヒータ (VAL6YDK) を試験体表面から表－１に示す所定位置に設置して試験体表面の強制加熱を行った。なお、本実験では、いずれの計測も赤外線写真の撮影にコンパクトサーモ (TVS-2000MK II LW) を使用し、試験体の正面 4.0m の位置に赤外線カメラを設置して強制加熱中および加熱終了後試験体の表面温度がほぼ常温となるまで試験体の表面温度の測定を所定の時間間隔毎に行った。測定された表面温度データをまず縦・横各方向に 1.25cm 間隔の格子状に分割平均化した後、各節点の表面温度を求めた。



図－４ 表面温度測定用試験箱

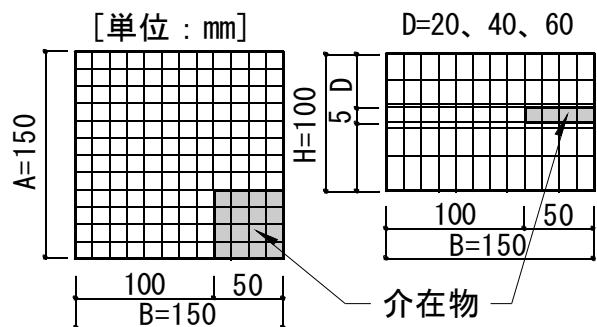
表－２ 赤外線カメラの性能

測定温度範囲	-40℃～300℃
赤外線検出器	MCT単素
検出波長領域	8～12μm
冷却方式	スターリング・クーラ方式
赤外線走査線数	100本
最小検知温度差	0.1℃
検出スピード	約15フレーム/秒

使用した赤外線カメラの性能を表－２に示す。

3. 解析方法

本研究では、沈下やブリージングなどによって生じた埋設物の上・下面に存在する空隙層の影響を解析的に検討することを目的として、図

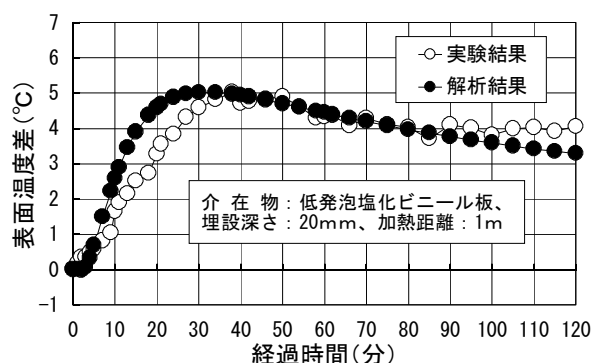


図－５ 解析モデル

表－３ 解析に用いた構成材料の熱的特性

媒体の種類	密度 (g/cm ³)	比熱 (KJ/kg・K)	熱伝導率 (W/m・K)	熱伝達率 (W/m ² ・K)
モルタル	2.00	0.80	1.30	外*: 30.1 中*: 4.2 内*: 10.1
発泡スチロール	0.03	1.26	0.04	
低発泡塩化ビニル	0.70	1.05	0.08	
木板	0.40	1.30	0.12	
鉄板	7.86	0.46	44.80	
空気	0.00	1.00	0.06	

[注] *: 外壁面、中間層および内壁面の値。



図－6 表面温度差の経時変化に関する実測結果と解析結果との比較の一例

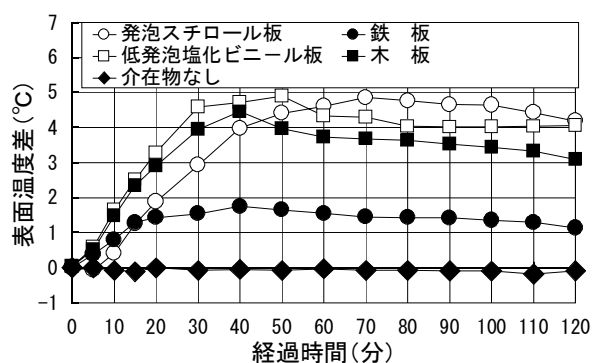
－5に示す1/4解析モデルを使用し、8節点アイソパラメトリック要素を用いた3次元非定常熱伝導有限要素解析を行った。解析に用いた各構成材料の熱的特性を表－3に示す。なお、解析に際しては、まず赤外線ヒータによる熱量を経過時間に関わらず一定と仮定し、逆解析を適用することにより推定した。加熱距離が1.0mの場合の試験体表面における赤外線ヒータの熱量として $1,444.2\text{W/m}^2$ が得られた。図－6は、低発泡塩化ビニールが深さ20mmの位置に埋設されている場合の試験体表面中央部（介在物が埋設されている場合は埋設部と呼ぶ）の表面温度（中心位置から1.25cmの範囲（2格子間隔）の平均表面温度）と周辺部（介在物が埋設されている場合は非埋設部と呼ぶ）の表面温度（試験体表面の周端から中心に向かって1.25cmの範囲（1格子間隔）の平均表面温度）の差（以下、単に表面温度差と略記する）に関する実測結果と非定常熱伝導解析結果とを比較した一例である。

4. 結果とその考察

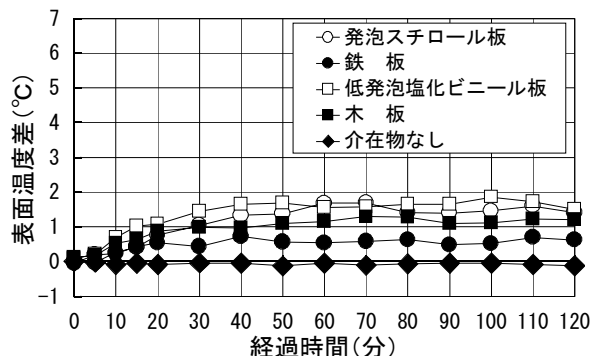
4.1 表面温度差に及ぼす介在物種類の影響

図－7～図－9は、それぞれ加熱距離（d）を1.0、2.0および3.0mに設定した場合に得られた試験体表面温度差の経時変化に及ぼす介在物種類の影響を示したものである。

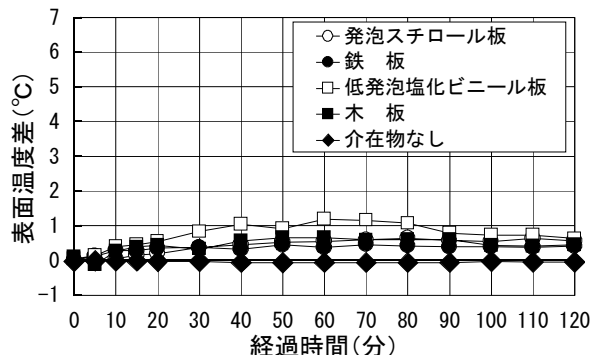
まず、試験体中に介在物が存在しない場合について注目してみると、加熱距離を1.0、2.0および3.0mとした場合の最高表面温度差は、それぞれ -0.12 、 -0.13 および -0.06°C となっており、



図－7 表面温度差の経時変化（d=1.0mの場合）



図－8 表面温度差の経時変化（d=2.0mの場合）



図－9 表面温度差の経時変化（d=3.0mの場合）

加熱距離に関わらずほぼ試験体の表面を均一に加熱することができ、本実験で用いた赤外線ヒータによる加熱は、 $30\times 30\text{cm}$ 程度の表面であれば有効な加熱方法であることが確認できた。

次に、加熱距離を1.0mに設定した場合の結果を示した図－7によれば、熱伝導率が比較的類似している木板の場合および低発泡塩化ビニール板の場合は、最高表面温度差を示す時刻に多少の相違は認められるものの表面温度差の経時変化については、ほぼ同様の傾向を示しているのがわかる。また、介在物が熱伝導率の小さい発泡スチロール板の場合と熱伝導率の大きい鉄板の場合の結果を比較してみると、表面温度差

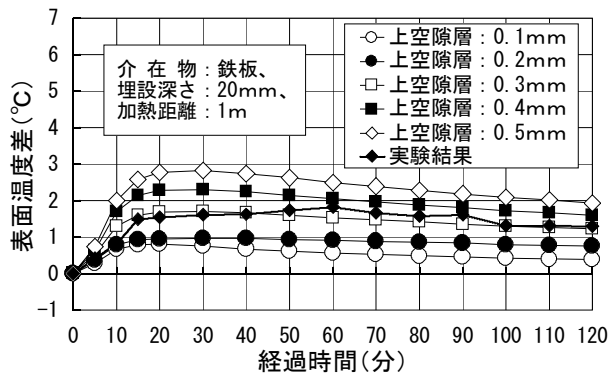


図-10 表面温度差の経時変化に及ぼす鉄板上面の空隙層の影響に関する解析結果例

は、最高で3.1℃程度の相違が観察された。

加熱距離を2.0mに設定した場合については、図-8からわかるように、加熱距離が1.0mの場合と比較して表面温度差は、介在物種類に関わらず著しく小さくなっているのがわかる。特に、発泡スチロール板、低発泡塩化ビニール板および木板が埋設されている場合の表面温度差の経時変化は、極めて類似した傾向を示しており、表面温度差の測定のみからこれらの介在物を識別するのは極めて困難となっている。ただし、介在物が鉄板の場合および介在物が存在しない場合との識別は可能であるといえる。

一方、加熱距離を3.0mに設定した場合については、図-9に示すように、表面温度差の経時変化に及ぼす介在物種類の影響は、さらに介在物が鉄板の場合も含めて類似した傾向を示しており、表面温度差のみから介在物の種類を判別するのは極めて困難であることがわかる。

4.2 表面温度差に及ぼす沈下・ブリー징の影響

ところで、前掲の図-7～図-9中の鉄板埋設の表面温度差の経時変化によれば、いずれの場合も表面温度差は、正の値を示しているが、試験体内部に熱伝導率の大きな介在物が埋設されている場合には、一般的に非埋設部よりも埋設部の方が表面温度は小さくなる。図-10は、鉄板上面にブリー징などによって生じた空隙層がある場合を想定した解析結果を示したものであるが、図によれば、鉄板上面に0.3mm程

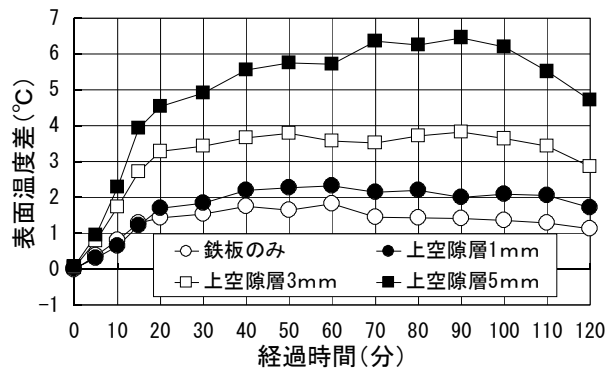


図-11 表面温度差の経時変化 (鉄板上面空隙層モデル、d=1.0mの場合)

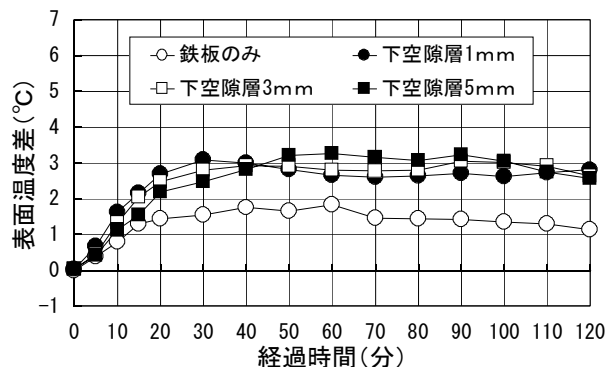


図-12 表面温度差の経時変化 (鉄板下面空隙層モデル、d=1.0mの場合)

度の空隙層がある場合に、実測結果と比較的良好に一致していることがわかる。以下では、介在物の上面または下面に沈下やブリー징などによって空隙層が生じている場合に、表面温度差の経時変化がこれらの空隙層によってどのような影響を受けるかについて検討してみる。

図-11および図-12は、それぞれ介在物の上面および下面に空隙層（低発泡塩化ビニール板でモデル化した）が存在する場合の表面温度差の経時変化に及ぼす空隙層厚（存在しない場合、1, 3および5mmの4種類）の影響を、介在物の種類が鉄板（厚さ5mm）で埋設深さが20mm、加熱距離を1.0mに設定した場合について示したものである。これらの図によれば、空隙層が介在物の上面に存在する場合は、図-11に示すように、一般的に空隙層が厚くなるに従って鉄板のみの場合と比較して表面温度差が増大する傾向を示し、鉄板上面の空隙層厚が1, 3および5mmの場合の最高表面温度差は、鉄板のみの場合よりもそれぞれ約0.5, 2.0および4.6℃大きくなっている。また、空隙層が鉄板下面に存在する場

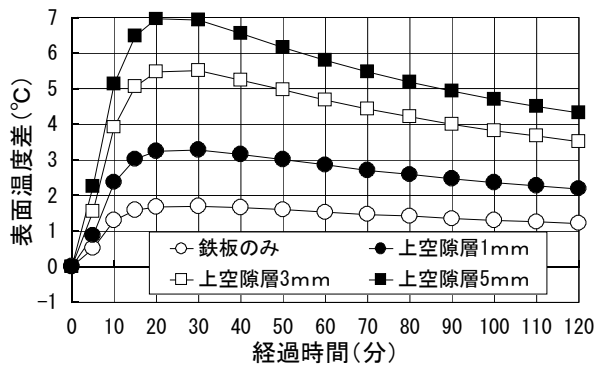


図-13 鉄板上面空隙層モデルの解析結果の一例

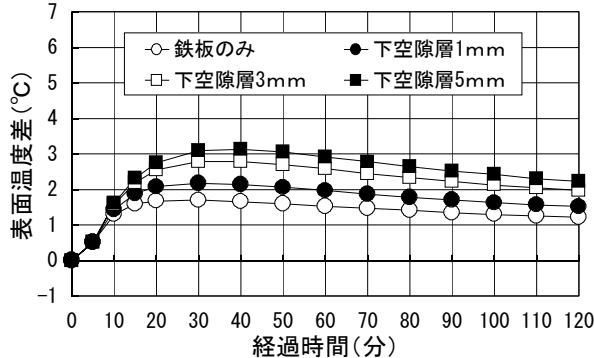


図-14 鉄板下面空隙層モデルの解析結果の一例

合の結果を示した図-12によれば、下面空隙層厚を1, 3および5mmに設定した場合の最高表面温度差は、鉄板のみの場合に比べてそれぞれ約1.2, 1.3および1.4°C大きくなっており、空隙層厚が厚くなるに伴って若干最高表面温度差も増大する傾向を示しているが、上述の鉄板上面に空隙層がある場合と比較して、表面温度差に及ぼす空隙層厚の影響は、小さくなっている。

図-13および図-14は、鉄板の上・下面に空隙層が存在する場合の解析結果を示したものであるが、前掲の実測結果と同様の結果が得られた。

以上のことから、コンクリートの沈下やブリージングなどによって鉄板の上面または下面に空隙層が存在していると、鉄板のみが存在する場合と比較して表面温度差が著しく増大して空隙層の影響が卓越するため、コンクリート内部の鉄板の抽出が困難になることがわかる。

4.3 表面温度差に及ぼす加熱距離の影響

図-15～図-17は、加熱30分が経過した時点における表面温度差と加熱距離との関係を、それぞれ介在物種類、鉄板の上面および下面に存在する空隙層厚別に示したものである。まず、

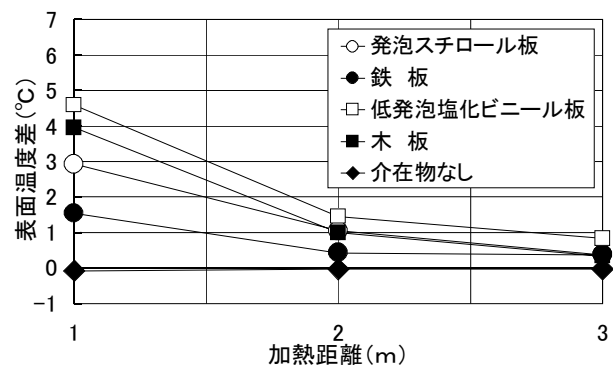


図-15 表面温度差と加熱距離との関係 (30分経過時)

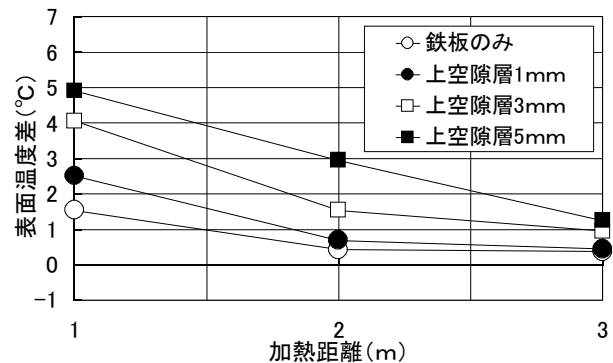


図-16 表面温度差と加熱距離との関係 (鉄板上面空隙層モデル、30分経過時)

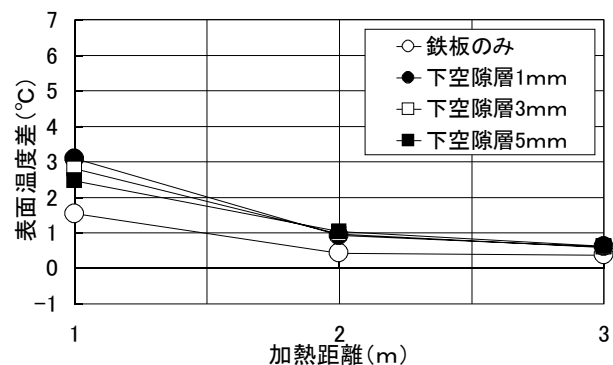


図-17 表面温度差と加熱距離との関係 (鉄板下面空隙層モデル、30分経過時)

介在物種類の影響を示した図-15によれば、介在物種類に関わらず加熱距離が大きくなるに従って表面温度差は低下する傾向を示している。すなわち、加熱距離が1.0mの場合は、表面温度差に及ぼす介在物種類の影響は明確に認められるが、加熱距離が2.0mの場合には、介在物種類の識別が若干難しくなり、さらに加熱距離が3.0mになると、表面温度差の絶対値は著しく小さく、低発泡塩化ビニール板を除けば、介在物の種類の識別だけでなく介在物の存在自体検出が困難であるといえる。また、鉄板の上・下面に空隙層が存在する場合の結果を示した図-16

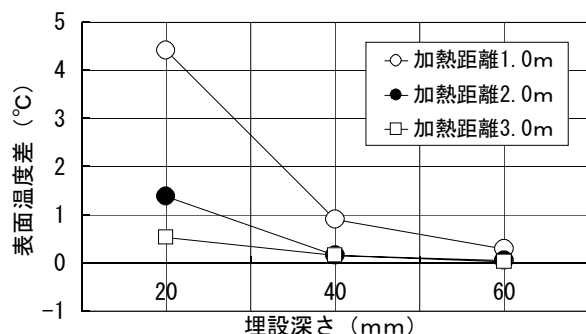


図-18 表面温度差と埋設深さとの関係
(介在物：発泡スチロール板、30分経過時)

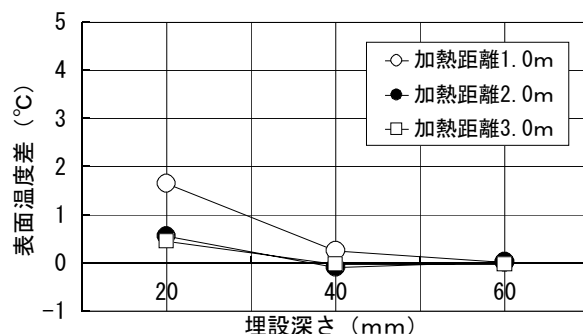


図-19 表面温度差と埋設深さとの関係
(介在物：鉄板、30分経過時)

および図-17についても、図-15の場合と同様に加熱距離が大きくなるに従って表面温度差が低下する傾向を示し、表面温度差に及ぼす鉄板上・下面に存在する空隙層の影響も次第に小さくなっている。なお、鉄板上面に空隙層が存在する場合には、加熱距離に関わらず表面温度差に及ぼす空隙層厚の影響が明確に認められるが、下面に空隙層が存在する場合には、加熱距離に関わらず空隙層の存在の有無の影響が卓越しており、加熱距離が2.0m以上の範囲になると、空隙層の厚さの影響は殆ど認められなくなっている。これらの傾向は、前掲の図-13および図-14の解析結果においても確認できる。

4.4 表面温度差に及ぼす介在物埋設深さの影響

図-18および図-19は、介在物の種類がそれぞれ発泡スチロール板および鉄板で、加熱30分が経過した時点における表面温度差と埋設深さとの関係を加熱距離別に示したものである。介在物種類が発泡スチロール板の結果を示した図-18によれば、介在物が熱伝導率の小さい発泡スチロール板であっても埋設深さが60mmになると、加熱距離が2.0m以上では介在物の検出は困難であることがわかる。また、介在物種類が熱伝導率の大きい鉄板の結果を示した図-19によれば、加熱距離を1.0mに設定すると、埋設深さが40mmまでの検出は可能であるが、加熱距離を2.0m以上に設定した場合には、埋設深さが40mm以上の介在物は検出が不可能となっている。特に、介在物の埋設深さが60mmになると、加熱距離に関わらず表面温度差は殆ど0°Cとな

っており、埋設深さが深い場合の介在物の検出を行うためには、加熱距離および加熱時間などについての工夫が必要であることがわかる。

5. 結 論

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) 介在物の検出精度を向上させるには、介在物の種類と埋設深さに応じた最適な加熱距離および加熱時間を設定する必要がある。
- 2) 沈下やブリージングなどによって鉄板の上面または下面に空隙層が存在していると、鉄板の正確な抽出が困難となる。
- 3) 鉄板の上面に空隙層が存在する場合、表面温度差に及ぼす空隙層厚の影響は明確に認められるが、鉄板の下面に空隙層が存在する場合は、空隙層厚さの影響は小さい。

参考文献

- 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.138-198, 1992.
- 2) コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書（Part II 電磁波法），日本コンクリート工学協会，pp.83-131, 2001.
- 3) 安藤秀則・山田和夫：サーモグラフィ法による内部探査結果の精度向上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.23, No.1, pp.607-612, 2001.
- 4) 山田和夫・安藤秀則：強制加熱を利用したサーモグラフィ法によるコンクリートの内部評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, No.1, pp.1485-1490, 2002.