

要旨：本研究では、サーモグラフィ法を適用したコンクリートの充填性評価方法を確立するための基礎的研究として、型枠表面の温度分布性状と充填不良部の検出精度に及ぼす強制冷却・加熱の影響について検討を行った。その結果、打設後の時間経過によって充填不良部の検出が困難になった場合でも、型枠表面を強制的に冷却または加熱することによって検出性能を回復させることができること、特にコンクリート打設時に充填不良部の検出が困難な鉄製型枠の場合に、検出精度は飛躍的に向上することが明らかとなった。

1. はじめに

サーモグラフィー法を適用したコンクリートの充填性評価の可能性については、既に魚本ら¹⁾²⁾による研究成果がいくつか報告されているが、これらの研究は、いずれもサーモグラフィー法をコンクリート打設時のモニターとして使用することを目的としているため、コンクリート打設後における型枠温度分布の経時変化、すなわちコンクリート打設終了後における充填性不良部の検出精度や検出限界などについては不明な点が多い。しかしながら、サーモグラフィー法を試験方法として標準化するためには、打設時の充填性評価だけでなく、打設後にサーモグラフィー法を適用した場合の充填性評価性能についても詳細に検討しておく必要がある。

筆者らは、この点を踏まえて、打設終了後の型枠表面の温度分布性状と充填不良との関係の経時変化に及ぼす各種要因の影響について一連の検討を行った^{3),4)}結果、打設後ある一定の時間が経過すると、充填不良部の検出が著しく困難になることが明らかとなった。そのため、本研究では、打設後の時間経過によって充填不良部の確認が困難になった型枠表面を強制的に冷

却または加熱することによって検出性能がどの程度回復するかについて一連の検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本研究では、図-1に示すように、厚さ $t=12$ および 24mm の合板（表面に油性ペイントが塗布してある）、並びに厚さ $t=4\text{mm}$ の鉄板で製作した $500\times 500\times 90\text{mm}$ の型枠中央部に充填不良部をモデル化した $100\times 100\times 90\text{mm}$ の発泡スチロールが型枠面から深さ $d=0, 5$ および 10mm の位置に埋設されているモデル型枠を用いて一連の実

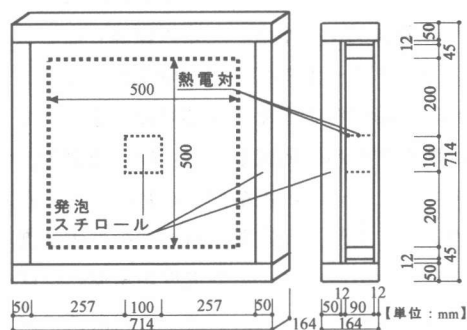


図-1 試験体の形状・寸法

* 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 愛知工業大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

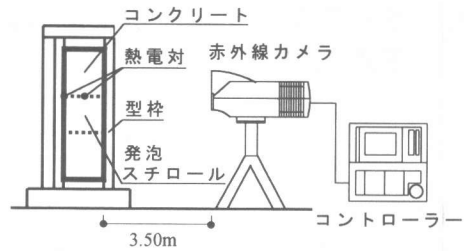
表－１ コンクリートの調合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (%)	スランプ (cm)
	水	セメント	砂	砂利		
50	180	360	829	1000	0.70	15.0

験的検討を行った。本実験では、型枠表面温度がセメントの水和熱による温度上昇後、ほぼ室温まで低下して充填不良部の検出が困難となった時点で、型枠表面を強制的に冷却（室温からの温度差 $dt=-2$ 、 -6 および -10°C の3種類）および加熱（室温からの温度差 $dt=+2$ 、 $+6$ および $+10^{\circ}\text{C}$ の3種類）し、打設後の時間経過に伴って充填不良部の確認が困難となった状態から強制冷却・加熱によって充填不良部の検出性能がどの程度回復するかについて調査を行った。

2.2 試験体の製作方法

コンクリートの製作に際しては、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂（最大寸法 $=5\text{mm}$ 、表乾比重 $=2.60$ ）および川砂利（最大寸法 $=25\text{mm}$ 、表乾比重 $=2.65$ ）、並びに高性能減水剤を使用した。コンクリートの調合は、水セメント比（W/C）を50%、設計スランプを15cmに設定して試し練りによって決定した。本実験で用いたコンクリートの標準調合表を表－１に示す。本実験では、コンクリートの打設および測定時の環境ができる限り一定の環境となるように、コンクリートの打設約24時間前からモデル型枠と使用材料を室温が $21\pm 3^{\circ}\text{C}$ に設定されている恒温養生室内に放置した後、同じ恒温養生室内でコンクリートの混練および打設を行った（このことにより、測定開始時点での型枠温度とコンクリートの練り上がり温度が室温とほぼ同じ温度となった）。コンクリートの混練には容量60lの可傾式ミキサーを使用し、材料を粗いものから順番に投入して約10分間混練した後コンクリートを型枠内に連続投入しながら棒状パイプレータを用いて十分に締固めを行った。なお、コンクリートの打設後、モデル型枠の上面を合板で塞ぐとともに、型枠表面温度分布の



図－２ 計測システム

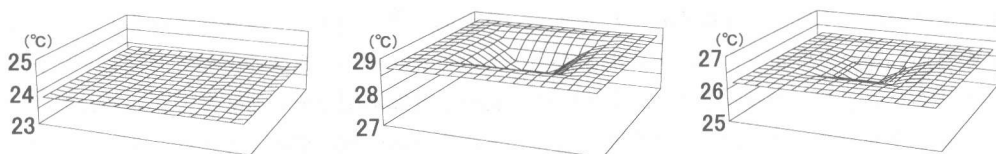
表－２ 赤外線カメラの性能

表面温度範囲	$-40^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$
赤外線検出器	水銀カドミウム（MCT）単素子
検出波長領域	$8\sim 12\mu\text{m}$
冷却方式	スターリング・クーラー方式
外線走査線数	100本
温度制度	フルスケールの $\pm 0.4\%$ 、または $\pm 4^{\circ}\text{C}$
検出スピード	約15フレーム/秒

測定面を除く型枠裏面、側面および底面に厚さ50mmの発泡スチロールを張り付けることによって、これらの面からの熱の放出を防いだ。

2.3 計測・処理方法

本実験は、すべて上述の室温を $21\pm 3^{\circ}\text{C}$ に設定した恒温養生室内で行った。計測は、図－２に示すように赤外線カメラを型枠の正面3.5mの位置に設置して、まずコンクリート打込み終了直後の時点からこれまでと同様の方法でコンクリート内部の中央部と側面部温度、室温、並びに型枠壁面の表面温度分布を45時間測定した後、充填不良部の確認が困難になった時点で、型枠表面温度と室温との温度差が所定の温度差となるまで撮影型枠表面（垂直面）を強制的に冷却（ $dt=-2$ および -6°C の場合は 8°C の冷水をそれぞれ10および30秒間、 $dt=-10^{\circ}\text{C}$ の場合は 0°C の氷水を60秒間かけた）または加熱（ $dt=2^{\circ}\text{C}$ の場合は 50°C の温水を10秒間、 $dt=6$ および 10°C の場合は 90°C の温水をそれぞれ30および60秒間かけた）を行い、その直後から30分間型枠表面温度の計測を行った。本実験で用いた赤外線カメラの性能を表－２に示す。実験で撮影した $500\times 500\text{mm}$ の型枠壁面のデジタル赤外線熱画像

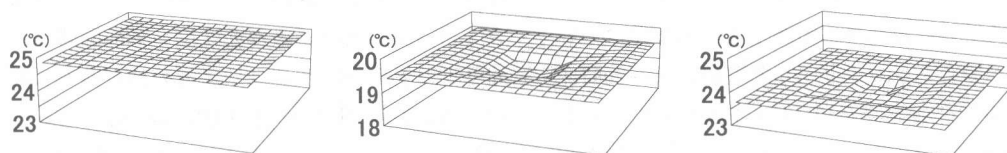


(a) 打設直後

(b) 打設後16時間

(c) 打設後32時間

図-3 打設後の型枠表面温度分布の経時変化の一例 ($t=12\text{mm}$ の合板, $d=5\text{mm}$ の場合)



(a) 冷却直前

(b) 冷却直後

(c) 冷却後20分

図-4 強制冷却後の型枠表面温度分布の経時変化の一例 ($t=12\text{mm}$ の合板, $d=0\text{mm}$ の場合)

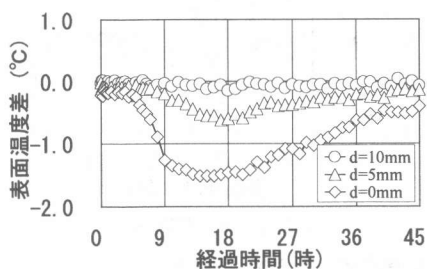
写真データは、 21×21 節点のデータに変換した後に、各節点の温度を求めた。図-3および図-4は、それぞれコンクリート打設後および強制冷却後の型枠表面温度分布の経時変化に関する測定結果の一例を示したものであるが、本研究では、測定結果の対称性を考慮して型枠壁面温度に平均化処理を施した。なお、コンクリート内部の中央部と側面部の温度および室温は、

前掲の図-1および図-2に示す位置にセットした熱電対と静ひずみ計を用いて赤外線熱画像の撮影時に併せて自動計測した。

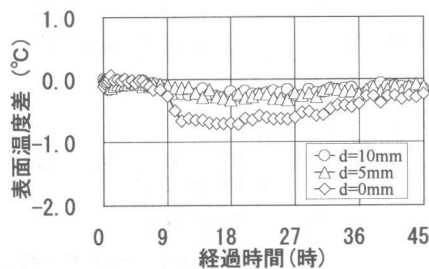
3. 実験結果とその考察

3.1 セメントの水和熱を利用したコンクリートの充填性評価

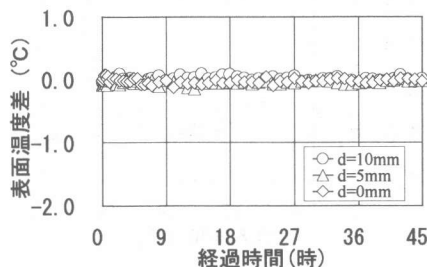
図-5(a)~(c)は、セメントの水和熱によ



(a) $t=12\text{mm}$ の合板



(b) $t=24\text{mm}$ の合板



(c) $t=4\text{mm}$ の鉄板

図-5 型枠表面温度差の経時変化

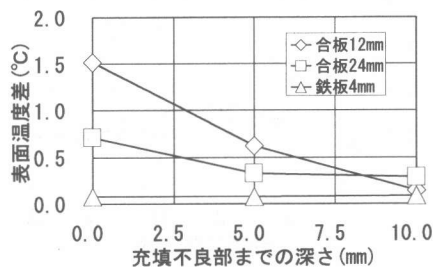


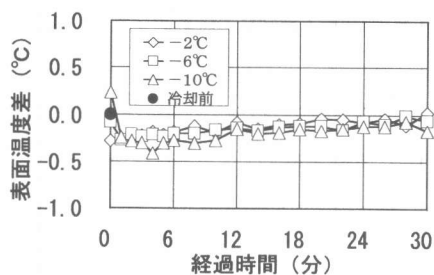
図-6 最小型枠表面温度差

って生じる型枠表面中央部（充填不良部）と周辺部（充填部）との温度差（以下、単に表面温度差と呼ぶことにする）の経時変化に及ぼす型枠面から充填不良部までの深さ（ d ）の影響を型枠の種類別に示したものである。これらの図によれば、表面温度差は、型枠の種類および型枠面から充填不良部までの深さによって著しく相違することがわかる。すなわち、コンクリート打設終了後に観察される最小表面温度差は、いずれの場合もコンクリート打設後約10～20時間の範囲で、板厚が $t=12\text{mm}$ の合板で $d=0, 5$ および 10mm の場合が、それぞれ $-1.51, -0.62$ および -0.15°C 、板厚が $t=24\text{mm}$ の合板の場合が、それぞれ $-0.71, -0.33$ および -0.29°C であるのに対して、板厚が $t=4\text{mm}$ の鉄板の場合では、それぞれ $-0.08, -0.08$ および 0.09°C となっている。図－6は、最小温度差の絶対値と型枠面から充填不良部までの深さ（ d ）との関係を型枠の種類別に示したものであるが、図から明らかなように、撮影した型枠表面が合板の場合には、型枠面から充填不良部までの深さが 10mm 程度以上になる

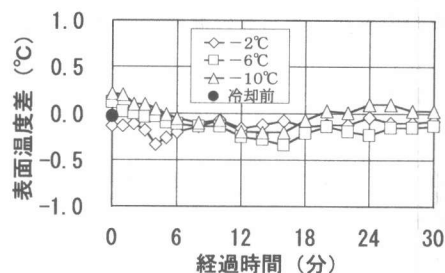
と充填不良部の検出が困難になることがわかる。このことから、合板製の型枠でコンクリートの充填不良部が型枠面に接していない場合には、充填不良部の検出精度はそれほど期待できない。一方、撮影型枠表面が鉄板の場合には、型枠面から充填不良部までの深さにかかわらず表面温度差は極めて小さくなっており、鉄製の型枠の場合には、充填不良部が型枠面に接している場合であっても充填不良部の検出が極めて困難であることがわかる。これは、鉄板の熱伝導率（約 $80\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）が合板（約 $0.15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）と比べて著しく大きいため、セメントの水和反応による発熱のように温度変化が比較的緩やかな場合には、コンクリート内部の温度変化の状況を型枠表面温度に反映し難くなっているためと考えられる。

3.2 強制冷却・加熱によるコンクリートの充填性評価

図－7および図－8は、それぞれ強制冷却後および加熱後の表面温度差の経時変化を、図－9は、強制冷却および加熱によって生じた最大

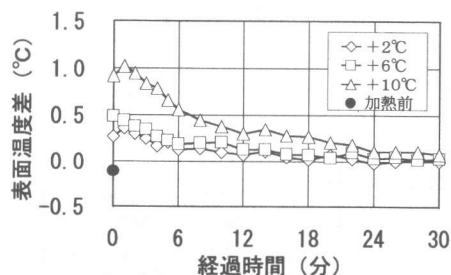


(a) $d=0\text{mm}$ の場合

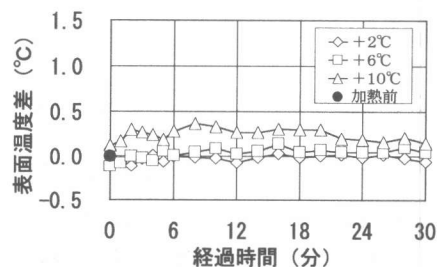


(b) $d=10\text{mm}$ の場合

図－7 強制冷却後の型枠表面温度差の経時変化（ $t=12\text{mm}$ の合板）

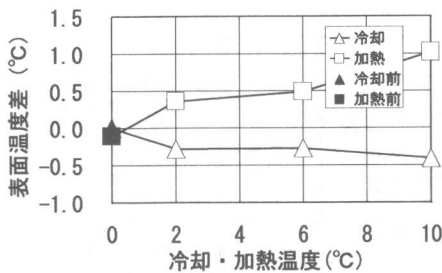


(a) $d=0\text{mm}$ の場合

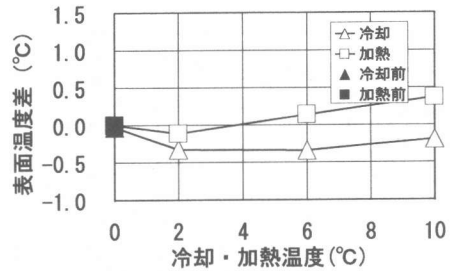


(b) $d=10\text{mm}$ の場合

図－8 強制加熱後の型枠表面温度差の経時変化（ $t=12\text{mm}$ の合板）



(a) $d=0\text{mm}$ の場合



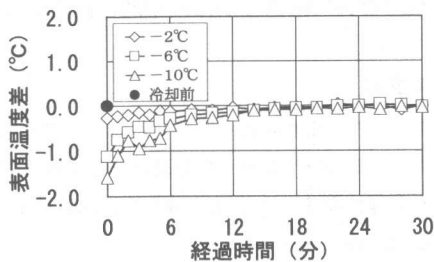
(b) $d=10\text{mm}$ の場合

図-9 強制冷却・加熱後に観察される最大・最小型枠表面温度差 ($t=12\text{mm}$ の合板)

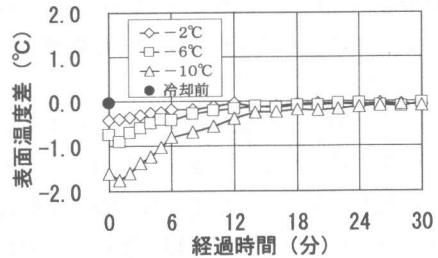
(または最小) 表面温度差と強制冷却・加熱温度との関係を撮影面型枠が $t=12\text{mm}$ の合板の場合について示したものである。これらの図によれば、打設後の時間経過によって充填不良部の検出が困難になった場合であっても、型枠表面を強制的に冷却または加熱することによって充填不良部の検出性能を回復させることが可能であることがわかる。例えば、型枠面から充填不良部までの深さが $d=0\text{mm}$ で、表面温度差がない状態にある型枠表面を強制冷却した場合には、冷却温度と室温との差(dt)の絶対値を2, 6および 10°C に設定した時、表面温度差は、それぞれ

-0.28 , -0.27 および -0.41°C まで回復し、強制加熱した場合には、表面温度差は、それぞれ 0.36 , 0.49 および 1.02°C まで回復しており、一般的に冷却した場合よりも加熱した方が表面温度差がかなり大きくなる傾向を示している。ただし、充填不良部までの深さが $d=10\text{mm}$ の場合には、強制冷却または加熱によって表面温度差が $0.11 \sim 0.37$ 程度までしか回復しておらず、型枠面から充填不良部までの深さが大きくなると、強制冷却または加熱による効果がそれほど期待できないことがわかる。

図-10～図-12は、撮影面型枠が $t=4\text{mm}$ の鉄

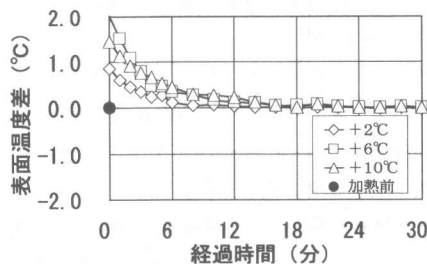


(a) $d=0\text{mm}$ の場合

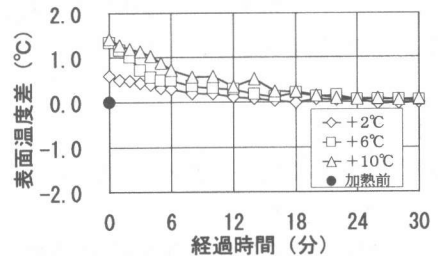


(b) $d=10\text{mm}$ の場合

図-10 強制冷却後の型枠表面温度差の経時変化 ($t=4\text{mm}$ の鉄板)

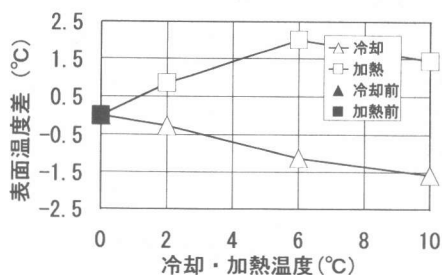


(a) $d=0\text{mm}$ の場合

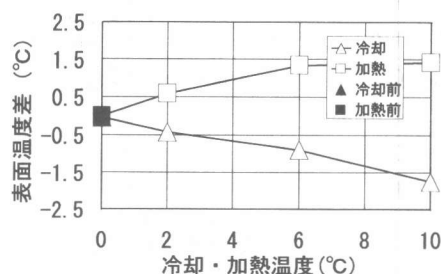


(b) $d=10\text{mm}$ の場合

図-11 強制加熱後の型枠表面温度差の経時変化 ($t=4\text{mm}$ の鉄板)



(a) d=0mmの場合



(b) d=10mmの場合

図-12 強制冷却・加熱後に観察される最大・最小型枠表面温度差 (t=4mmの鉄板)

板の場合の結果を前掲の図-7～図-9と同様の方法で整理したものである。型枠が鉄製の場合には、前述したように、型枠面から充填不良部までの深さにかかわらずセメントの水和熱を利用して充填不良部を検出することは極めて困難であった。しかし、これらの図によれば、型枠面から充填不良部までの深さがd=10mmの場合であっても、冷却温度と室温との差(dt)の絶対値を2, 6および10°Cに設定した時の表面温度差は、それぞれ-0.42, -0.90および-1.75°C, また強制加熱した場合の表面温度差は、それぞれ0.59, 1.34および1.42°Cまで回復しており、型枠が鉄製の場合には、型枠面を強制冷却または加熱することによって充填不良部の検出性能が飛躍的に向上することがわかる。

以上のことから、打設時にコンクリートの充填状況のモニターができなかった場合や、その後の時間経過によって充填不良部の確認が困難となってしまった場合などには、型枠の種類にかかわらず型枠表面を室温からの温度差dtが $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以上となるように強制的に冷却または加熱することによって、充填不良部の検出精度を向上させることが可能であるといえる。

4. 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) 合板製型枠の場合には、型枠面から充填不良部までの深さが10mm程度以上になると水和熱を利用した充填不良部の検出が困難

となるため、型枠面に接していない充填不良部の検出精度はそれほど期待できない。

- 2) 鉄製型枠の場合には、型枠面から充填不良部までの深さにかかわらず水和熱によって生じる表面温度差は極めて小さいため、充填不良部が型枠面に接している場合であっても充填不良部の検出は困難である。
- 3) 打設後の時間経過によって充填不良部の検出が困難になった場合でも、室温からの温度差が $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以上となるように型枠表面を強制的に冷却または加熱すると、検出性能を回復させることができる。特に、鉄製型枠の場合に検出性能は飛躍的に向上する。

参考文献

- 1) 渡部 正・魚本健人：型わく外面の熱赤外線画像によるコンクリートの打込み管理手法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.435/VI-15，pp.121-128，1991
- 2) 渡部 正・魚本健人：型わく面の熱線画像解析によるコンクリート打込み時の欠陥検出法に関する研究，土木学会論文集，No.478/V-21，pp.51-59，1993
- 3) 山田和夫・勝見 隆：サーモグラフィ法を適用したコンクリートの充填性評価に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.222-227，1997
- 4) 山田和夫・勝見 隆：サーモグラフィ法を適用したコンクリートの充填性評価性能に及ぼすコンクリート温度の影響，建築学会東海支部報告集，Vol. 36，pp.85-88，1998