

論文 サーマグラフィー法による豆板の探査

駒居 裕登*¹・尼崎 省二*²

要旨: 本研究では、サーモグラフィー法による豆板の探査限界の検討を行った。その結果、熱画像あるいは温度差画像を用いることによって、コンクリート表層部近傍の豆板探査が可能であり、温度差画像による豆板のモニタリングでは、豆板が大きいほど容易であること、コンクリート表面からの距離が短いほど探査しやすいことが判明した。コンクリート打設中には、せき板が鋼製あるいは合板製であっても、これに接する直径 100 mm 以上の豆板部の探査ができ、またコンクリート硬化後には、コンクリート表面から 30 mm 以下にある直径 100 mm 以上の豆板が探査できることが判明した。

キーワード: コンクリート、赤外線法、豆板、モニタリング、探査、

1. はじめに

コンクリートは、コンクリートの表面あるいは内部から劣化する。コンクリート表層部の豆板の存在は、劣化を促進すると考えられる。豆板は施工不良によって生じるため施工中にモニタリングすることが重要となる。また既設構造物では、表面近傍の豆板を探査することは維持管理上、重要となる。コンクリート構造物中に豆板、空隙などが存在すると、熱伝導率などの熱的特性が周囲と異なる。そのため、コンクリート表層部近傍の豆板は、コンクリート表面に温度変化を与えることによって、温度分布として現れると考えられる。この温度分布を赤外線サーモグラフィーを用いて測定することにより豆板の探査が可能であり、時系列画像間の演算処理による 2 画像間の温度変化画像（以下、温度差画像と略記）を作成することにより、コンクリートの色調、汚れなどが軽減され、コンクリート中の豆板の探査がより鮮明になると考えられる。

本研究では、温度差画像によって、コンクリート打設中における豆板の発生をモニタリングする方法、およびコンクリート硬化後の表層部近傍の豆板を探査する方法の検討を行った。なお、コ

ンクリート打設中においては、せき板の種類（鋼あるいは合板）が豆板探査に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 実験概要

本実験に使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。型枠は図-1 に示すように内寸 B250 mm × H400 mm × W400 mm とし、赤外線画像撮影面のせき板に鋼製（厚さ 5 mm）あるいは合板製（厚さ 12 mm）を用いた。

表-1 コンクリートの配合

単位量 (kg/m ³)				W/C (%)
セメント C	水 W	粗骨材 S	細骨材 G	
352	176	792	1001	50

2.1 打設中の豆板探査

(1) 豆板の作製

供試体作製に用いたコンクリートを 5 mm ふるいでウェットスクリーニングした粗骨材を直径 100 mm、200 mm および 300 mm の塩化ビニール管に詰めたものを、図-2 に示すように設置して、打設中に発生する豆板をモデル化した。また、塩

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 環境社会工学専攻（正会員）

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博（正会員）

化ビニール管の上面はビニールシートで覆った。

なお、コンクリート打設は、3層に分けて打ち込み、その時のせき板表面の熱画像を計測した。コンクリートは1層目を打ち込み、棒状バイブレーターで締固めを行った後、豆板を設置し、2層目を打ち込み、締固めを行った後、直ちに3層目を打ち込んだ。

豆板はせき板表面からの距離 T を0 mm、10 mm、20 mmおよび30 mmとした。各豆板の寸法、せき板表面からの距離を表-2に示す。

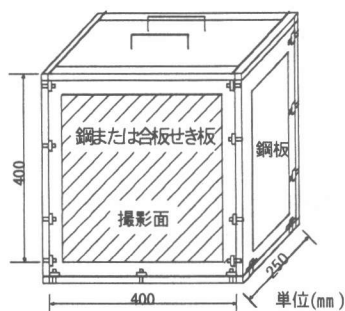


図-1 型枠

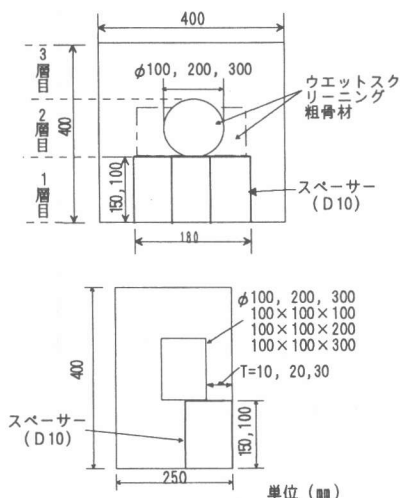


図-2 供試体および側面図

(2) 撮影方法

赤外線画像の撮影では、供試体とカメラの距離を供試体全体が撮影できるように供試面から直角方向に3 mとした。撮影時間は、打設開始時の画像を初期画像とし、30 秒間隔で5 分間、

1 分間隔で10 分、5 分間隔で45 分間とした。

なお実験は、コンクリートの打設および赤外線撮影は $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 90%以上の恒温恒湿室内で行った。コンクリートの練り上がり温度および豆板温度をコンクリート打設前に測定を行った。

表-3に本実験で使用した赤外線サーモグラフィの仕様を示す。

表-2 豆板の形状

豆板	打設中	硬化後
寸法 (mm)	$\phi 100$ $\phi 150$ $\phi 200$	$100 \times 100 \times 100$ $100 \times 100 \times 200$ $100 \times 100 \times 300$
型枠表面からの距離 (mm)	0 10 20 30	— 10 20 30

表-3 赤外線カメラの仕様

赤外線検知器	水銀・カドミウム・テルル液体窒素冷却型		
応答波長	$8.0 \sim 13.0 \mu\text{m}$	測定温度範囲	$-40 \sim 2000^{\circ}\text{C}$
温度分解能	30°C で 0.05°C	装置作動範囲	0 から 40°C
温度指示誤差	指示値の1%または 0.5°C のいずれか大きい値	指示画素数	512×480
		視野角	$30^{\circ} \times 28^{\circ}$
		焦点範囲	カメラ部前部 20 cm以上

2.2 コンクリート硬化後の豆板探索

(1) 豆板の作製

豆板はあらかじめウェットスクリーニングした粗骨材を断面 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ で長さ 100 mm、200 mmおよび 300 mm型枠に詰め硬化させた後、ビニールシートで覆ったものを豆板のモデルとして、図-2 に示すように設置した。硬化後の豆板作製では、ビニールシートの熱伝導率 $0.35 \text{ W/mK}^{1)}$ で厚さ 0.2 mm、塩化ビニール管の熱伝導率 $0.15 \text{ W/mK}^{1)}$ で厚さは 0.5 mmとビニールシートの熱伝導率が大きく、厚さも薄いことから、断熱効果が少ないと考えビニールシートを用いた。各豆板寸法および表面からの距離を表-2に示す。

(2) 撮影方法

コンクリート表面の温度変化は日射によって与えた。赤外線撮影は、日射による供試体側面の温度変化の影響をなくするために周囲に発泡スチロール板を貼り付けた。供試体を図-3に示すように、赤外線カメラから3mの位置に設置した。なお、図-4に示すように供試体中央部には、実際のコンクリート温度を測定するために外気温、健全部・豆板部に相当する供試体表面に熱電対を取り付けた。供試体表面を一樣な温度にした状態を初期画像とし、加熱開始し、30秒間隔で5分間、1分間隔で15分、5分間で20分撮影を行った。なお、赤外線撮影は無風あるいは微風程度で行った。

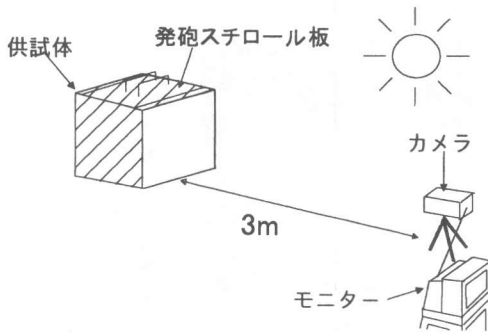


図-3 撮影風景

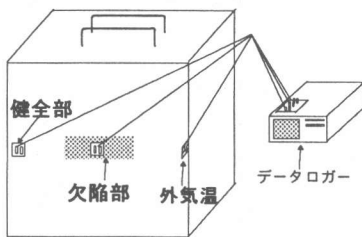


図-4 熱電対配置位

3. 実験結果および考察

3.1 打設中の探査

打設中における温度差画像による各供試体の豆板探査の結果を表-4に示す。表-4では、健全部と豆板の温度差が1℃以上であれば豆板の客観的な探査が可能であると仮定し、1℃を基準

とした。この場合、鋼製せき板では、 $T=10\text{ mm}$ 以下、 $\phi 100\text{ mm}$ 以上、一方合板せき板では $T=30\text{ mm}$ 以下、 $\phi 100\text{ mm}$ 以上の豆板が探査可能であった。この探査結果の相違は、せき板の熱伝導率が原因していると思われる。すなわち、熱伝導率は鋼が 80.3 W/mK 、合板が 0.05 W/mK であり^{2), 3)}、健全部コンクリートと豆板部の温度差がせき板に伝導しても、鋼製せき板では合板せき板に比べて、熱伝導率が大きいため、熱が早く拡散してせき板全体が一樣な温度になりやすく、表面から遠い距離に豆板部が存在する場合、健全部と豆板のせき板の表面温度差が非常に小さく探査が困難であったと考えられる。

コンクリートとせき板の温度差が鋼製せき板の場合は 2.0°C 以上、一方合板せき板の場合は 1.5°C 以上で豆板の探査が可能であった。

表-4 打設時の豆板探査結果(差画像)

豆板の大きさ(mm)	鋼製せき板				合板製せき板			
	豆板の深さ T(mm)				豆板の深さ T(mm)			
	0	10	20	30	0	10	20	30
$\phi 100$	○	○	×	×	○	○	○	○
$\phi 150$	○	○	×	×	○	○	○	○
$\phi 200$	○	○	×	×	○	○	○	○

○：健全部コンクリートと豆板の温度差が 1°C 以上

×：健全部コンクリートと豆板の温度差が 1°C 未満

探査結果の一例を図-5(鋼製せき板 $T=10\text{ mm}$ 、 $\phi 100\text{ mm}$ 、打設終了直後)、図-6(合板せき板 $T=30\text{ mm}$ 、 $\phi 100\text{ mm}$ 、打設終了10分後)に示す。

豆板探査では、同じ供試体でもコンクリート温度、外気温、豆板部温度、せき板表面温度などが豆板検出精度に大きく影響する。コンクリート温度とせき板の温度差が大きいほどせき板とコンクリート温度が一樣になる時間が長くなり、豆板検出時間は長くなる。なお、コンクリート温度がせき板温度より高い場合および、低い場合についても豆板探査は可能であった。また、豆板が小さいほどせき板表面温度において豆板周囲のコンクリート温度が豆板温度と一樣な温度になりやすく、健全部コンクリートと豆板部の

温度差がせき板表面に現れにくく探査が難しくなる。

鋼製せき板の打設終了後からの 180 秒後までの画像の経時変化を図-7に示す。打設終了後は健全部コンクリートと豆板部との温度差が3℃、90 秒後は 1.5℃、180 秒後は 1℃と時間が経過するにつれて温度差が小さくなっており、打設終了後 180 秒以上経過すると健全部コンクリートと豆板部との温度差が1℃以下になり豆板探査が困難になることが分かった。本実験では、豆板モデルを鋼製せき板部に設定した時点からせき板表面の温度変化として認識することができたが、一方合板せき板の場合は、豆板モデルを設置してから7分程度以上経過しないとせき板表面の温度変化として認識することはできなかった。なお、この時間はコンクリート打設終了からほぼ5分に相当している。また合板の熱伝導率の小ささは、健全部と豆板の温度が一樣になるまでの時間も遅くなることから、コンクリート打設終了から一時間経過しても探査可能であった(表-5参照)。

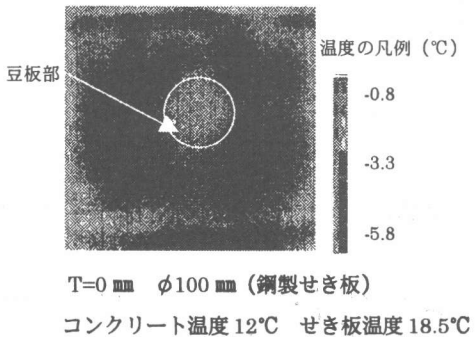


図-5 打設終了直後の赤外線温度差画像

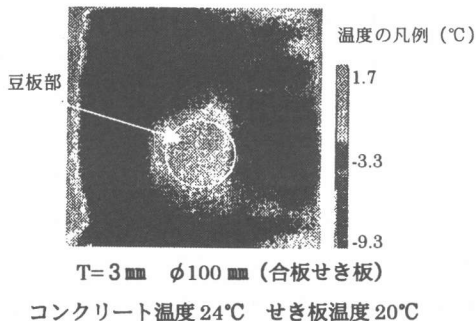


図-6 打設終了10分後の赤外線温度差画像

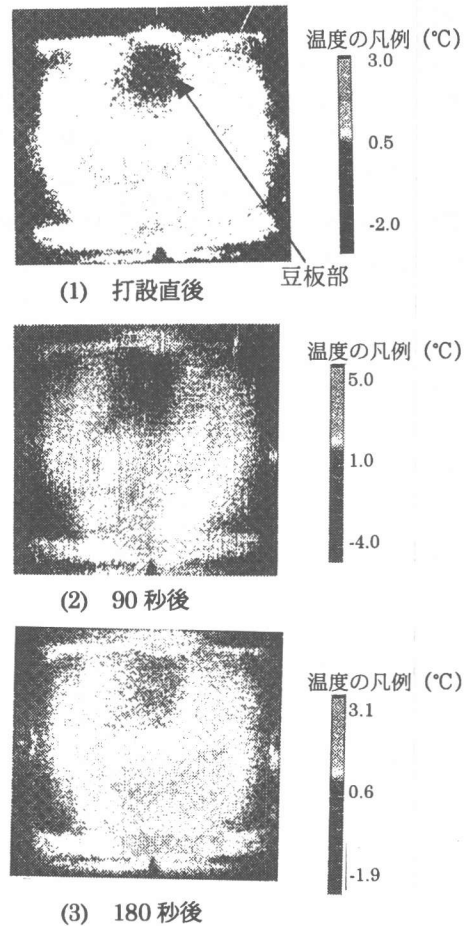


図-7 打設終了からのせき板表面の温度差画像の経時変化

表-5 豆板探査時間

せき板種類	豆板形状	豆板検出可能時間 (分)			
		0	3	5	60
鋼製せき板	T=0 φ100	→ 打設終了時から3分後			
合板せき板	T=0 φ100	← 打設終了時5分～60分 →			

← 検出可能範囲 →

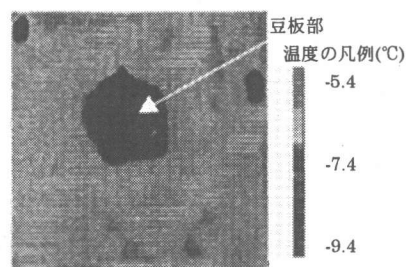
3.2 硬化後の探査

本実験では、硬化コンクリート中の豆板探査は、豆板の深さに関わらず、全ての豆板が探査可能であった。探査結果の一例を図-7、これらに対応した熱電対による供試体の経時温度変化を図-8に示す。図-7(1)は日射開始から1分30秒後の温度差画像で健全部と豆板部の温度差が2℃程度あり、図-7(2)は日射開始から1分30秒後で健全部と豆板部温度差が2℃程度あった。図-7(3)は日射開始から3分後で温度差2℃、図-7(4)日射開始から12分後で2℃の温度差が生じていることが分かった。

また、図-8(1)、(2)から日射により健全部、豆板部は上昇しており、コンクリート表面における健全部と豆板部の温度差が1℃以上になる時間は2分程度であったが、それ以降の健全部と豆板部の温度差は図-8(2)の方が大きくなっている。図-8(3)では健全部と豆板部の温度差が1℃以上となる時間は2～3分程度で、それ以降の健全部と豆板部の温度差は図-8(1)、(2)より小さくなっている。図-8(4)では、健全部と豆板部の温度差が1℃以上となる時間は12分程度で健全部と豆板部の温度差が図-8(3)より更に小さくなっている。これらの結果から豆板探査は健全部と豆板部の供試体表面温度差が1℃以上になると可能になるが、日射加熱によって1℃の温度差を生じるまでの時間は、内部豆板の深さT (mm) によって大きく異なるが、豆板の大きさは影響が少ないことが分かった。

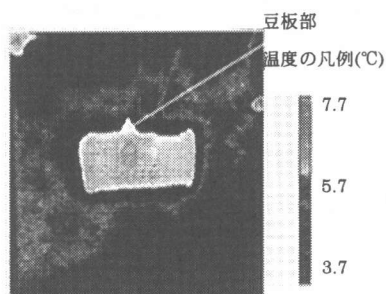
T=10 mmで大きさの異なる100×100×100 mmと100×100×200 mmでは、100×100×200 mmの方が外気温の上昇に伴って健全部と豆板の温度差が大きくなり豆板探査が容易であった。すなわち豆板の大きさが大きくなるに伴って健全部と豆板の温度差が大きくなるため、豆板探査が容易になることが分かった。

なお本実験の範囲で豆板探査は、表層部近傍(10～20 mm)の豆板は、日射開始から数分程度で豆板探査が可能であるが、深さ30 mmの豆板は、探査できるまで十数分を要したこと



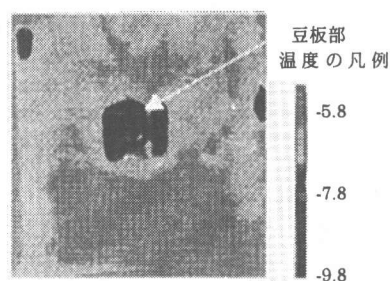
日射開始1分30秒後

(1) 100×100×100 mm T=10 mm



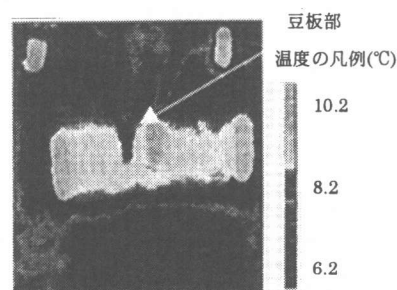
日射開始1分30秒後

(2) 100×100×200 mm T=10



日射開始3分後

(3) 100×100×100 mm T=20 mm

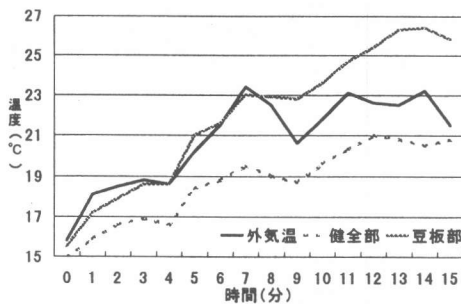


日射開始12分後

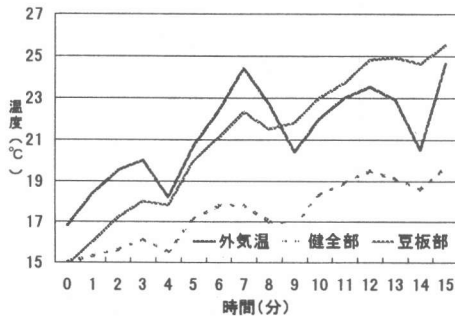
(4) 100×100×300 mm T=30 mm

図-7 日射過程による温度差画像

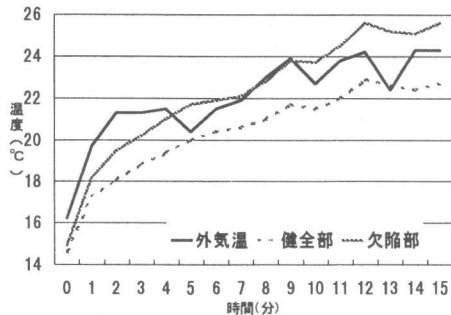
から豆板探査の可否については日射開始からの探査時間を考慮する必要がある。



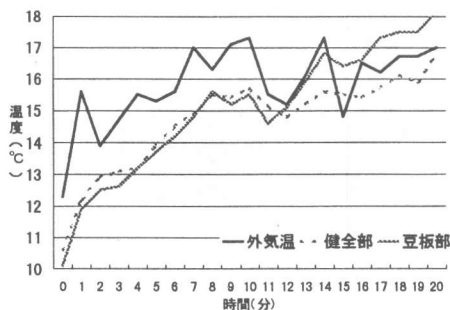
(1) $T=10\text{ mm}$ $100\times100\times100\text{ mm}$



(2) $T=10\text{ mm}$ $100\times100\times200\text{ mm}$



(3) $T=20\text{ mm}$ $100\times100\times100\text{ mm}$



(4) $T=30\text{ mm}$ $100\times100\times300\text{ mm}$

図-8 熱伝対による温度経時変化

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表層部近傍の豆板評価について検討した。その結果を要約すると、以下のようである。

- 1) 温度差画像を用いると、熱画像より表層部近傍の豆板を鮮明にモニタリングすることができる。
- 2) コンクリート打設中では、鋼製せき板は深さ 10 mm 以下で直径 100 mm 以上、合板せき板では深さ 30 mm 以下で直径 100 mm 以上の豆板がモニタリングできる。この場合、豆板探査可能時間は鋼製せき板の場合、打設中から 7 分間および合板せき板の場合打設終了から 60 分間である。
- 3) 硬化コンクリートでは、日射による加熱によって深さ 30 mm 以下で $100\times100\times100\text{ mm}$ 以上の豆板探査が可能である。この場合、コンクリート表面から 10、20 mm 程度までの深さにある豆板は数分で探査できるが、深さ 30 mm 程度になると数十分となる。
- 4) 打設過程および日射過程において、豆板検出精度は豆板からせき板あるいはコンクリート表面までの距離および豆板の大きさによって決まる。

参考文献

- 1) 日本機械学会：伝熱工学資料、日本機械学会、pp321、1959
- 2) 高木政道、尼崎省二：赤外線法によるコンクリート構造の表層部欠陥の評価、コンクリート工学年次論文報告集第 19 巻、第 1 号、pp1267-1272、1997
- 3) J.R. ホールマン：伝熱工学<下>、ブレイン図書出版株式会社、pp495、1982