

論文 赤外線サーモグラフィ法による表面被覆後の開水路に発生する剥離の診断方法

西原 正彦*1・浅野 勇*2・渡嘉敷 勝*3・森 充広*3

要旨： 農業用のコンクリート開水路では、補修工法の変状調査として打音法が用いられているものの、長大な水路での作業には多くの時間と労力が必要である。そこで本研究では、打音法に換わる変状の診断方法として赤外線サーモグラフィ法に着目し、現地調査及び模擬実験により赤外線サーモグラフィ法の適用性について検討した。その結果、限定的な条件下ではあるが、剥離等の調査に赤外線サーモグラフィ法が適用できることが明らかとなった。

キーワード： 赤外線サーモグラフィ, 剥離, 表面被覆, コンクリート水路

1. はじめに

現在までに国営土地改良事業等により造成された農業用の用排水路の延長は約 4 万 5 千kmに達する。これらの農業水利施設の多くは建設後数十年が経過し、今後耐用年数を迎える施設が急増する。施設の適切な維持管理のために、予防保全による施設の長寿命化の推進、施設の機能診断に基づく機動的かつ効率的な更新整備への転換など、ストックマネジメントの導入による農業水利施設の有効活用が推進されている。

農業用のコンクリート開水路は、水流による摩擦などにより劣化しているものが多数見受けられる。このため、表面粗度の改善などを目的として、ポリマーセメントモルタル等による表面被覆工法の施工が多くなされているが、補修工事後比較的早期に剥離等の変状が発生するケースも散見される。このような変状を目視で検出することは困難である。浮き・剥離の調査には、打音法が用いられているが、長大な水路での作業には多くの時間および労力が必要となる。

本研究では、打音法に代わる浮き・剥離（以下欠陥部と呼ぶ）の診断方法として、太陽光を利用した赤外線サーモグラフィ法に着目する。赤外線サーモグラフィ法は、コンクリート表面の健全部分と欠陥部分の温度差を赤外線カメラで撮影するのみで欠陥部の検知が可能であり、打音法に較べて短時間で診断を行えるが、計測時の環境条件（日射等）により欠陥部の検出ができない場合もある。赤外線サーモグラフィによる剥離検知の基礎研究としては、渡部らの検知限界に関する研究¹⁾、込山らの表面温度変化と検知限界の研究²⁾がある。これらの研究によれば、欠陥部の検知限界は主に欠陥部の深さと日射量に依存すること、測定時の環境条件（日射、気温）等に

より検出可能な時間帯が存在することが明らかにされている。しかし、これらの研究は主に表面からの深さが 30mm 以上の欠損部を対象とした研究であり、表面被覆工法で発生する深さ 10mm 以下の欠損に対するものではない。このような浅い部分に発生する欠損部に対する赤外線サーモグラフィの適用性に関しては十分研究が行われていないのが現状である。

そこで本研究では、まず、打音法によって剥離が検出された農業用開水路を対象に赤外線サーモグラフィ法による現地調査を行い、剥離検知への適用可能性について検討した。つぎに、現地調査の結果に基づき、現場計測の剥離等を模擬した供試体を作成し、表面被覆工法の欠陥部の検出可能な計測条件について検証した。

2. サーモグラフィによる剥離調査

ポリマーセメントモルタル(PCM)により表面被覆された農業用コンクリート開水路を対象に、2011 年 10 月中旬に赤外線サーモグラフィによる剥離調査を実施した。調査は過去に打音調査によって剥離が確認された箇所と打音では検知されなかったがサーモグラフィで温度異常が確認された箇所とした。

2.1 対象水路の概要

現地調査は水路 A, B の 2 箇所で行った。水路 A は昭和 36 年に建設され、平成 16~18 年の間に表面被覆工法により補修された。開水路は幅 13.1m, 高さ 3.0m である。PCM により表面被覆が行われ、設計被覆厚は側壁が 10mm, 底版が 15mm である。水路 B は昭和 36 年に建設され、平成 20~21 年の間に表面被覆工法により補修された。開水路は幅 7.1m, 高さ 2.7m である。水路 A と同じく PCM にて側壁 10mm, 底版 15mm の表面被覆が

*1 (独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員

*2 (独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 上席研究員 農博 (正会員)

*3 (独) 農研機構 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員 農博 (正会員)

行われた。水路は通年通水されており、今回一週間の期間のみ施設点検のため落水された。水路Aの状況を図-1に示す。



図-1 農業用コンクリート開水路の状況

2.2 剥離調査概要

(1) 調査対象および測定条件

水路側壁を対象に診断を行った。調査対象および測定条件を表-1に示す。測定箇所は、あらかじめ打音調査を行い異常音の有無を確認し、想定される欠損種別を浮きと何らかの原因による高温異常部に分類し調査を行った。

表-1 調査対象および測定条件

調査地点	水路壁向き	気象条件 (天気・風速 (m/s))	測定時刻	泥の有無	打音診断
A-1	東向き	晴れ 1~2	10~11時	有り	浮き検知
			11~13時	無し	浮き検知
A-2	西向き	晴れ 1~2	13~16時	無し	浮き検知
B	南向き	晴れ 3~4	8~16時	無し	浮き無し

(2) 測定装置

赤外線サーモグラフィの仕様を表-2に示す。今回使用した機材では、5mの撮影距離で1画素あたりの視野範囲はおよそ8.4mmである。なお、現場計測では、モニタに表示される温度の等高線の最大温度と最小温度の表示幅を最も感度が高くなる最小幅7.0°Cに設定し、モニタ画面のみで現場で欠損部を探知できるか検討した。

(3) 測定方法

測定の概要を図-2に示す。調査対象は水路の側壁である。測定範囲は3m×4mとし、測定面から約5m離れた位置に赤外線サーモグラフィを三脚で固定し水路Aでは30分ごと、水路Bでは1時間ごとに撮影を行った。水路Aでは、日射と欠損部探知の関係を調べるために、午前中は東向きの側壁(A-1)、午後は西向きの側壁(A

2)で計測を行った。側壁には2年ぶりの落水のため大量の泥や藻が付着していた。東向きの側壁では付着物がある状態と付着物を除去した状態で計測を行った。一方、西向きの側壁では付着物を除去した状態で計測を行った。水路Bでは南向きの側壁を対象に計測を行った。水路Bでは水路側壁表面の付着物は少なかった。

表-2 赤外線サーモグラフィの仕様

型番	TVS-200
測定範囲	-20°C~300°C
最小温度分解能	0.08°C以下
検出素子	2次元非冷却マイクロボロメータ
有効画素数	320H×240V

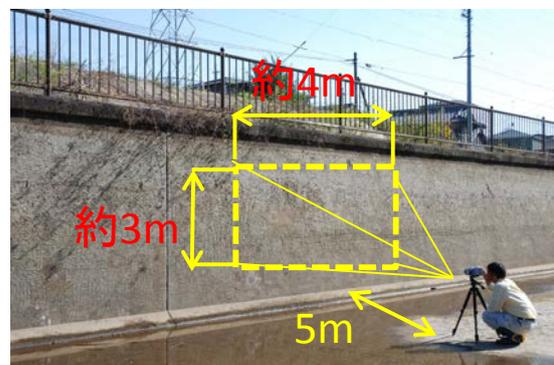


図-2 現地調査実施状況

2.3 調査結果及び考察

(1) 剥離部の調査結果及び考察 (調査地点A-1, 2)

水路地点A-1では朝から日射が当たっていた。赤外線カメラでは欠損部を探知することはできなかった。また、打音による異常音の測定も困難であった。そこで、表面の付着物を除去し赤外線カメラによる撮影を行った。図-3に付着物を除去してから30分後の可視画像と熱画像を示す。可視画像のチョークで囲んだ部分は打音法で推定した欠陥範囲である。図では暖色が高温部を表す。図から表面温度が高い領域と剥離部分がほぼ一致することが分かるが、健全部でも高温の箇所があり熱画像のみから一意的に剥離の位置を特定するのは難しいことが分かる。しかし、熱画像の高温部から欠陥部を絞り込める可能性があるため剥離の位置を絞り込む概査には有効と思われる。水路A-2では午後から日射が当たり始めた。A-2では付着物除去した後13時から熱画像を計測した。その結果、A-1と同様、打音法で推定した欠陥範囲と熱画像で高温となった箇所がほぼ一致した。しかし、熱画像の高温箇所から欠陥部の形状については十分判別できなかった。

(2) 高温異常部における調査及び考察 (調査地点 B)

対象水路壁は南向きであり日射が当たる時間は 8 時～17 時である。前に述べた剥離部 (A-1) とは異なり長方形の高温異常部が検知された。高温異常部の範囲は横約 15cm, 縦約 30cm の長方形であった。この箇所を打音法で計測したが、異常音は認められなかった。そこで、温度異常のない健全部、温度異常のある異常部、健全部と異常部の境界となる境界部の 3 点で内径 30mm の小口径コアの採取を行った。コアを調査したところ、異常部および境界部コアには PCM の下層に軽量ポリマーセメントモルタル(LPCM)が存在することが分かった。LPCM の厚みは 40mm 以上と推定される。軽量コンクリートの熱伝導率が普通コンクリートの半分程度であることを考えれば、LPCM の熱伝導率は PCM より小さいと推定できる。したがって、LPCM は PCM より熱が流れにくい材料と言える。このため、表面から貫入した熱は LPCM 層で遮られ、上部の PCM 層に熱が溜まり温度が上昇したことで、高温異常が検出されたと考えられる。

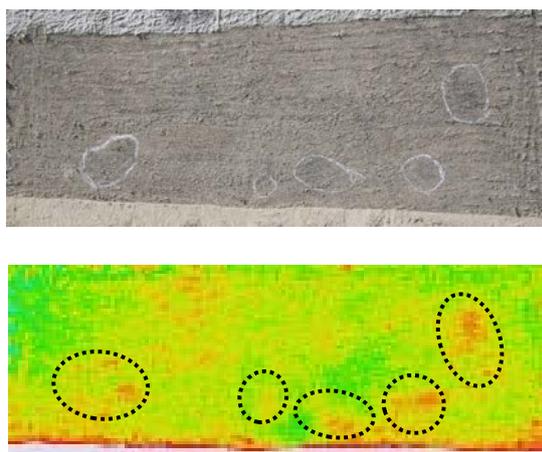


図-3 水路 A-1 の可視画像と熱画像 (12:00)

3. 屋外実験

3.1 実験概要

開水路の浮き・剥離の現地調査から赤外線サーモグラフィ法による欠陥部の検知の可能性が示唆されたが、欠陥部を探知するための最適な計測条件については十分検証することができなかった。そこで、欠陥部の探知に適した計測条件を明らかにするために現地調査で確認した欠陥部を模擬した供試体を作成し、屋外にて経時的な温度測定を行った。測定は水路調査が実施される冬期を選定し、2011 年 12 月に農村工学研究所の屋上で実施した。供試体は日射が最も当たる南向きに設置した。

3.2 供試体および試験条件

供試体および試験条件を表-3に示す。3種類の供試体を作成した。CASE 1, 2 は表面被覆後に発生した浮き・

剥離を模擬した供試体であり、現地で見られた浮き・剥離の形状は楕円であることから、模擬欠陥部の形状は円形とし、深さを 2 水準 (10, 20mm) 設け、深さと探知限界の関係を調べた。CASE 3 は現場水路で確認された LPCM の断面修復による高温異常を模擬する供試体であり、CASE 1, 2 と欠陥部との温度分布の違いを調べるために作成した。欠陥部は直方体とした。

図-4 に供試体の寸法および断面図を示す。供試体の寸法は 3 種類とも幅 300×300×厚さ 50mm である。CASE1 及び CASE 2 では、供試体の中央に模擬欠陥部として直径 100mm 厚さ 1mm の円板状のスチレンペーパーを設置した。CASE 1 の断面を図-4 (a) に示す。供試体は 2 層で打設した。まず基盤のモルタル (W/C=45%, S/C=2.2, 空気量約 4%) を下層に打設した。下層を約 1 週間湿潤養生した後に表面のレイタンスを除去し、プライマー塗布した後にスチレンペーパーを置き、その上から PCM を層厚 10mm (CASE 1), 20mm (CASE 2) になるようにコテを用いて被覆した。CASE 3 の供試体作製方法は CASE 1 及び CASE 2 とほぼ同様であるが、CASE 3 ではモルタル層、LPCM, PCM の順番で 3 回に分けて打設を行った。屋外実験では、図-4 に示すように断熱のため表面を除く 3 面を厚さ 5cm の発泡スチロールで断熱した。また、各供試体ともに、表面、側面、裏面の 3 箇所に熱電対を設置した。更に CASE 1 については、円形スチレンペーパーを設置した上部の供試体表面に円板の中心位置、中心から 25mm, 50mm の 3 箇所に熱電対を設置した。

表-3 供試体および試験条件

供試体記号	供試体寸法 (mm)	欠陥部の大きさ・厚さ (D) (mm)	欠陥部の材質	欠陥部の深さ (mm)
CASE1	300×300	円板 φ 100・D1.0	PCM	10
CASE2				20
CASE3		角形 100×100×D40	LPCM	10

PCM: ポリマーセメントモルタル, LPCM: 軽量ポリマーセメントモルタル

3.3 測定方法および環境条件

現場計測に用いた赤外線カメラを用いて測定距離 5m で時刻 9 時から 17 時まで 1 時間間隔で熱画像を撮影した (図-5)。供試体は前日の夜から屋上に設置した。供試体の向きは南向きであり日の出から日没までほぼ全ての時刻で日射を受ける環境にある。計測日の天候は晴天、日の出は 6:48, 日没は 16:30, 最大日射量は 568W/m² (11:30), 最高最低気温はそれぞれ 8.8, -4.7℃, 平均風速は 3.4m/s であった。高周波容量式コンクリートモルタ

ル水分計にて計測した供試体表面（厚み補正 10mm）の平均含水率は 7.6%であった。

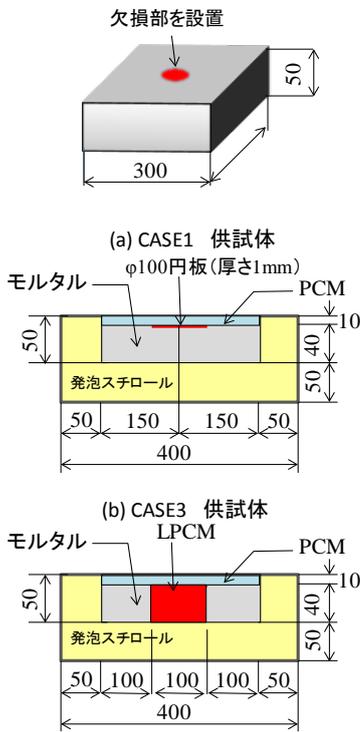


図-4 供試体の寸法及び断面図

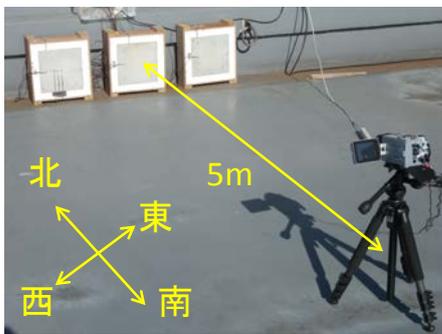


図-5 屋外実験の実施状況

3.4 実験結果及び考察

(1) 熱画像による欠陥部の探知

各供試体の熱画像の経時変化を図-6に示す。図はモニターで確認された熱画像であり、暖色は相対的に高温部、寒色は低温部を表す。熱画像から 10:00 の段階では模擬欠陥部表面が健全部表面より高温になり、すべての供試体で温度分布から明確に欠陥部の探知が可能であった。CASE1, 2 で変化させた欠陥部の深さは欠陥部の探知に大きく影響を及ぼさなかった。14:00 の段階では欠陥部と健全部の温度差が小さくなりモニター画像では欠陥部の形状の確認が困難であった。日没後の 17:00 の段階

では温度分布の逆転が生じ、欠陥部表面が健全部より低温になった。この段階においてもモニターにより欠陥部の範囲を確認することができた。

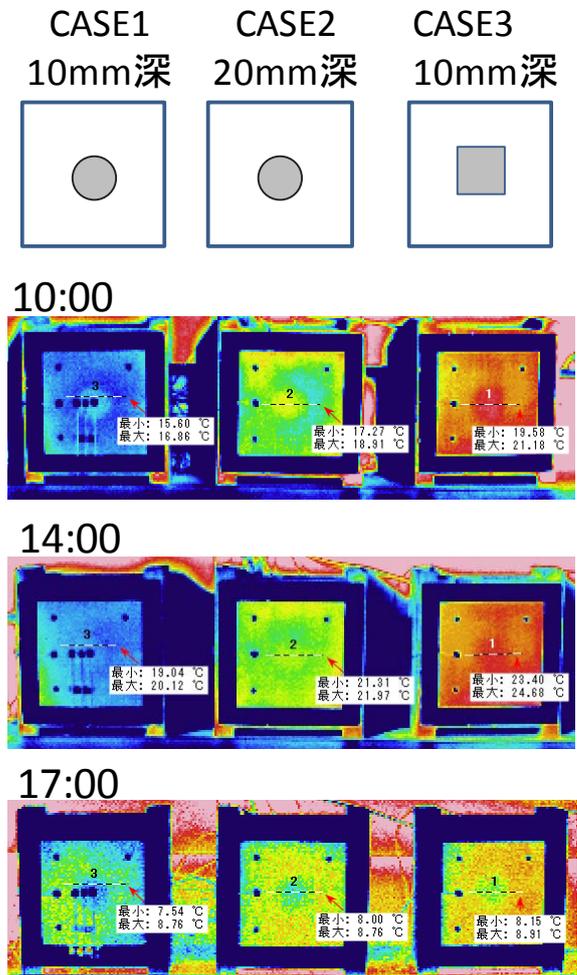


図-6 供試体の熱画像の経時変化

(2) 欠陥部横断方向の温度分布

図-6に示す各時刻における CASE2, 3 の欠陥部の温度分布の経時変化を図-7に示す。測線は水平に欠陥部の中心から 1cm 上に設定した。図の赤い縦線の範囲が欠陥部の範囲に相当する。それぞれのグラフには欠陥部の中央部 5cm および境界外 5cm の平均表面温度を青線横棒で示した。欠陥中央部と境界部の温度差を見ると、図-6に示した熱画像と対応し、10:00, 17:00, 14:00 の順に温度差が大きくなるのが分かる。これはモニター画像の結果とも一致する。CASE2, 3 の 10:00 に計測した温度分布の境界部から中央部に向かう温度分布に着目すると、空気層を模擬した CASE2 の温度勾配が断面修復材を模擬した CASE3 より大きいことが分かる。これは CASE3 では連続的に温度が変化していることを示す。このような温度分布を用いることにより欠陥部の種別を推定できる可能性がある。

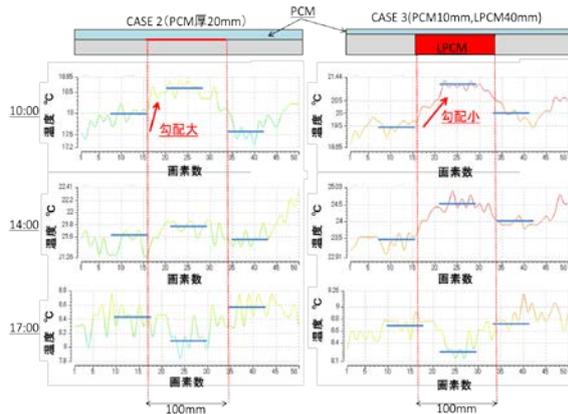


図-7 温度分布の経時変化

(3) 欠陥部中央と健全部の温度差の変化

CASE1 の健全部表面と欠陥部表面との温度差の経時変化を調べるために図-8に示す4点で熱画像による温度 (S1, S2) 及び T 型熱電対 (T1, T2) による温度計測を行った。熱電対は模擬欠陥部の中心 (T2) と T2 から 100mm 離れた健全部 (T1) にアルミテープで接着した。熱画像の表面温度はアルミテープの影響を避けるため熱電対の測線から約 10mm 離れた測線で計測を行った。熱電対とアルミテープを用いて供試体の表面温度を計測する方法は、供試体と計測系が絶縁された状態であれば短絡およびノイズによる影響を受けないことを予備試験により確認している。

試験結果を図-9に示す。図-9から熱電対および赤外線から得た表面温度変化の上昇および下降の傾向はほぼ一致するが、熱電対の温度が熱画像の温度より高温であることが分かる。熱電対はアルミテープにより表面を覆われているため、温度が高く計測された可能性がある。熱画像の温度差は計測を開始した 9:00 (0.5°C) から上昇し 12:00~13:00 でピークを迎え (温度差約 0.5~1.0°C), その後日没に向かい急激に減少した。温度差がほぼ 0°C になった時間は 14:00~14:30 であり、この時間を境に欠陥部の表面が相対的に低温になる温度分布の逆転が発生したと考えられる。これはモニタによる熱画像の観測とも一致した。日射量がほぼ 0 となった 16:00 以降も約 1°C の温度差が発生しており、モニタ画像で明確に欠陥部を確認することができた。このことは、冬期の晴天時に十分日射を受ける水路側壁では日没時にかけて欠陥部と健全部の温度差が大きくなることを示唆する。現場におけるモニタ熱画像の目視から、今回の実験では健全部と欠陥部の温度差が 0.5°C 程度あれば、欠陥部の形状を即時にモニタで確認することができた。そこで、0.5°C の温度差を現場でモニタ確認が可能な限界値と仮定し、図-9から温度差 0.5°C を越える時間を最適温度測定時間と推定した。その結果、次のことが分かった。

- (1) 測定最適時間は午前中 (9:00~12:30) と夕方 (15:30~17:00) の 2 回発生し、午前中は欠陥部が高温に、夕方は欠陥部が低温になる
- (2) 温度分布の逆転が発生する午後 (12:30~15:30) は計測困難な時間帯が存在する

ただし、実験では発泡スチロールで 3 面を断熱しているため、供試体の厚さ方向の熱勾配が実際の水路に比べて小さいことに注意が必要である。

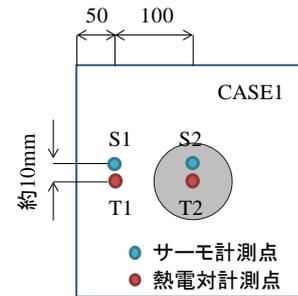


図-8 温度差を計算するための測定点の位置

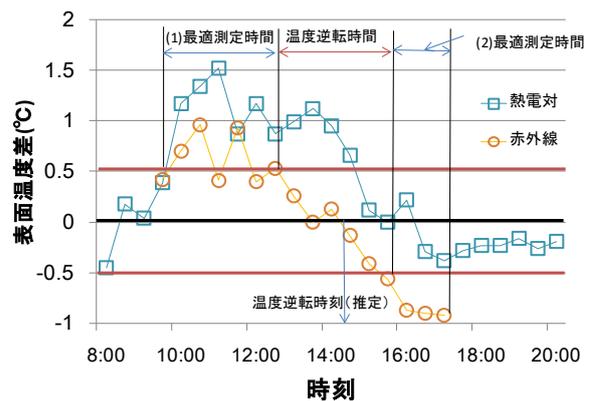


図-9 表面温度差と最適測定時間の関係

4. 室内実験

4.1 室内実験の概要

野外実験で用いた模擬供試体と同様の形状の供試体を使い、表面被覆材である PCM を打設する際の供試体の温度変化を赤外線サーモグラフィにより計測した。供試体の寸法は野外実験の供試体と同じく 300×300×60mm で、PCM は CASE1 と同様 10mm とした。ただし、コンクリート接着面の欠陥を模擬した厚さ 1mm のスチレンペーパーは直径 20mm, 40mm, 60mm, 80mm の 4 種類を用意した(図-10)。基盤となるモルタルの温度は 15°C, PCM は 7°C と 21°C の 2 種類を用意した。赤外線サーモグラフィによる撮影は 1 分毎とし、温度差がなくなるまで撮影した。なお、モニタに表示される温度の等高線の最大温度と最小温度の表示幅は最も感度が高い 7.0°C に設定し、7°C の表面被覆材では 9.0~

16.0℃, 21℃の表面被覆材では 15.0~22.0℃に固定して撮影した。

4.2 室内実験の結果

PCM を打設した直後から 10 分後までの熱画像を図-11 に示す。図-11 によると、直径 40mm から 80mm の欠陥部は温度差が発生したものの、直径 20mm の欠陥部は打設直後から温度差が発生しなかった。図-12 は直径 80mm の欠陥部の中心と供試体全体の中心（健全部）の表面温度差を表している。この図によると、打設後 5 分で温度差は半減し、10 分後には温度差が 0 になっている。表面被覆工法施工時において、短時間の期間ではあるが赤外線サーモグラフィによる欠陥部の検出が可能であることが判明した。したがって、施工時に発生する施工不良を管理できる可能性が示唆された。

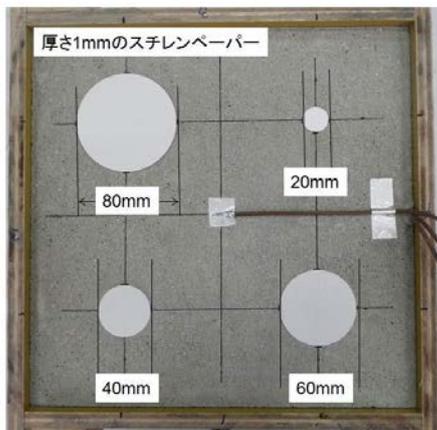


図-10 室内試験の供試体(表面被覆材打設前)

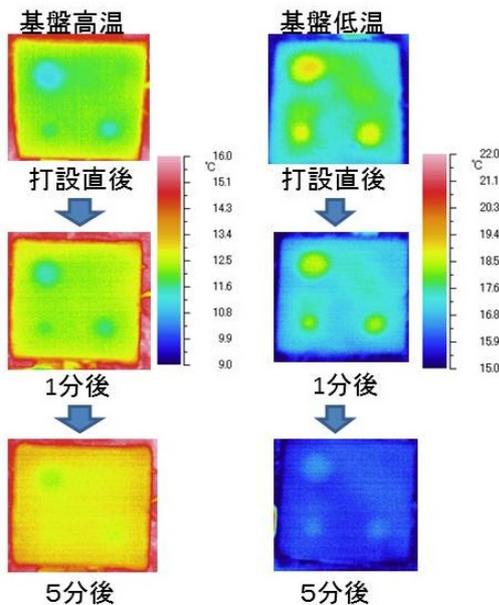


図-11 室内試験の熱画像

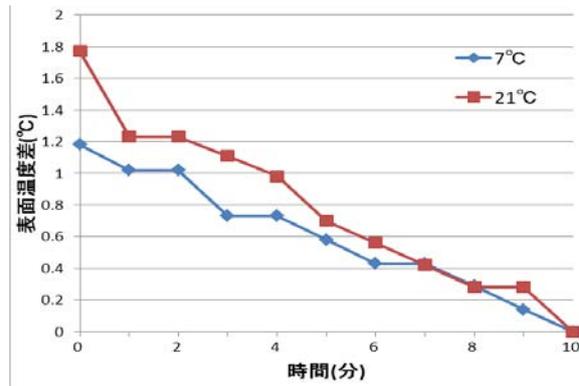


図-12 欠陥部と健全部の表面温度差

5. まとめ

現地調査および屋外実験および室内実験から以下の知見が明らかになった。

- (1) 表面補修された水路に発生する浮きは、健全部との温度差が 0.5℃以上であれば剥離が発生する位置の検出が可能である。
- (2) 剥離部分に検出可能な温度差が発生するのは、冬期晴天時に南面では、10時から14時が最適な計測時間である。
- (3) 剥離部分に泥などが付着している場合は、検出することができない。泥はあらかじめ取ってから測定する必要がある。
- (4) 冬期晴天時の条件では、日没時に欠陥部と健全部の表面温度差が逆転し、欠陥部の温度が低い状態で剥離部分の検出が可能である。
- (5) 表面被覆工法施工時において、施工後5分以内であれば施工不良で発生した剥離部分を赤外線サーモグラフィで検出できる。

参考文献

- 1) 渡部哲己, 黒川善幸, 森 博嗣, 谷川恭雄: サーモグラフィによるコンクリートの内部欠陥の推定に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol15, No1, pp.589-594, 1993
- 2) 込山貴仁, 中野米蔵, 谷川恭雄: サーモグラフィによる外壁仕上げ材の剥離検知の適用限界に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第484号, pp.13-20, 1996