

論文 コンクリートとモルタルの接着面における欠陥検査に関する研究

石黒 覚^{*1}・和田 隆弘^{*2}

要旨：コンクリートとモルタルの接着面における剥離や空洞などの内部欠陥の検査方法として、横波共振法とサーモグラフィ法を適用した。これらの方法の適用性を検証するため、コンクリート内部に発泡スチロールなどの介在物を埋め込んだ供試体を作製して試験を実施した。室内試験では、横波共振法により介在物の種類や大きさ、モルタル厚さなどの影響について検討した。また、サーモグラフィ法の適用性を照射試験により検討した。さらに、本方法を表面被覆工法により補修したコンクリート開水路の現場調査に適用した。本研究結果から、欠陥検査に対する横波共振法とサーモグラフィ法の検査精度ならびに有効性が確認できた。

キーワード：内部欠陥, 横波共振法, サーモグラフィ法, 非破壊検査

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ダム、頭首工、用排水機場等の基幹的な農業水利施設は約7,100カ所、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ため、適切で効率的な保全技術や更新技術の確立が急務となっている。このような背景のもと、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¹⁾。

農業用のコンクリート開水路は、水流による摩耗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、補修工法の一つであるポリマーセメントモルタルによる表面被覆工法の施工が多くなされている。

本研究ではコンクリートとモルタルの接着面における剥離や空洞などの非破壊検査方法として、横波共振法とサーモグラフィ法に着目し、これらの検査方法の適用性を検証した。横波共振法は、コンクリート表面において点接触で探査できるため、センサーとの接触媒質が不要となり、短時間で多点数の測定ができる利点がある。しかし、普及した検査方法になっていない現状である。このため、コンクリート内部に発泡スチロールなどの介在物を埋め込んだ供試体を作製して確認試験を実施した。室内試験では、横波共振法による計測波形から接着面における欠陥探査が可能かどうか検討した。また、サーモグラフィ法の適用性について供試体の照射試験により検討した。さらに、表面被覆工法により補修したコンクリート開水路において現場測定を行った。これらの試験結果から、横波共振法とサーモグラフィ法の検査精度、これらの方法を適用した現場調査における剥離や空洞などの欠陥検査の有効性、などについて報告する。

2. 横波共振法による欠陥検査

2.1 横波共振法の概要

横波共振法による欠陥検査の概要を図-1に示す。また、使用した測定器とセンサーの外観を図-2に示す。コンクリート部材に横波が入射すると対象部材の固有振動数により透過しやすい波長が伝搬して共振振動を発生させる。部材の固有振動数は、内部剥離や部材厚の減少という形状的な不連続部では固有振動数が変化するため、

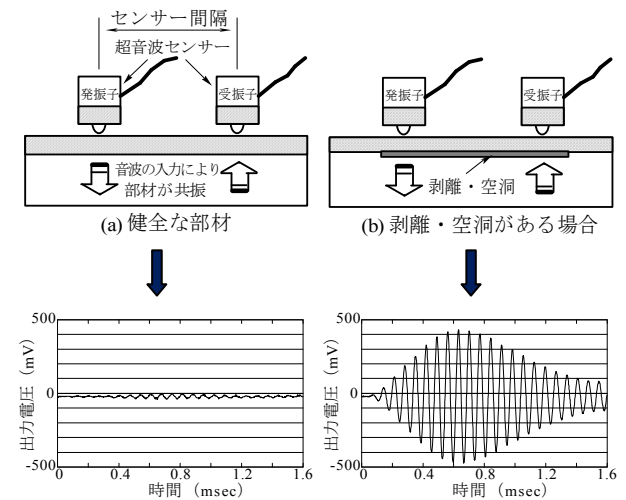


図-1 横波共振法による欠陥検査の概要



図-2 測定器とセンサーの外観

*1 三重大学 生物資源学研究科教授 農博 (正会員)

*2 三重大学 生物資源学研究科共生環境学専攻

共振振動波形も変化する、波形データを解析することにより部材中の剥離や空洞などの欠陥が検出可能になる²⁾。ここではセンサー間隔を 50mm～100mm に設定して検査を実施した。なお、入力波のパルス幅を $20\mu\text{sec}$ 、波形の取込み時間を $0.1\mu\text{sec}$ に設定した。得られた波形データから最大値および最小値の出力電圧を読み取り、(最大値－最小値)の値を最大振幅と定義し、この値に基づいて剥離や空洞などの欠陥の有無の判定を行った。

横波共振法では点接触型の超音波センサーを使用しているため、センサーとコンクリート表面の間に接触媒質を必要としない。このため、測定者がセンサーを一定の圧力で押しつけて測定した。なお、本研究で用いた発振・受振子用のセンサーは、周波数 5kHz である。

2.2 供試体の種類と形状寸法

室内試験では、図－3に示すシリーズ1とシリーズ2の供試体について実施した。シリーズ1では寸法 $450\times 600\times 70\text{mm}$ の供試体を対象とした。モルタルの厚さは $d=10\text{mm}$ および 20mm とし、コンクリート打込み後1日で上面を被覆した。供試体の全厚さは 70mm とした。

供試体 No.2 ではモルタルとコンクリートの接着面の欠陥を模擬するため、厚さ 5mm 、寸法 $150\times 150\text{mm}$ および $150\times 75\text{mm}$ の発泡スチロール板を介在物として埋め込んだ。また、比較用の欠陥のない供試体 No.1 も作製した。

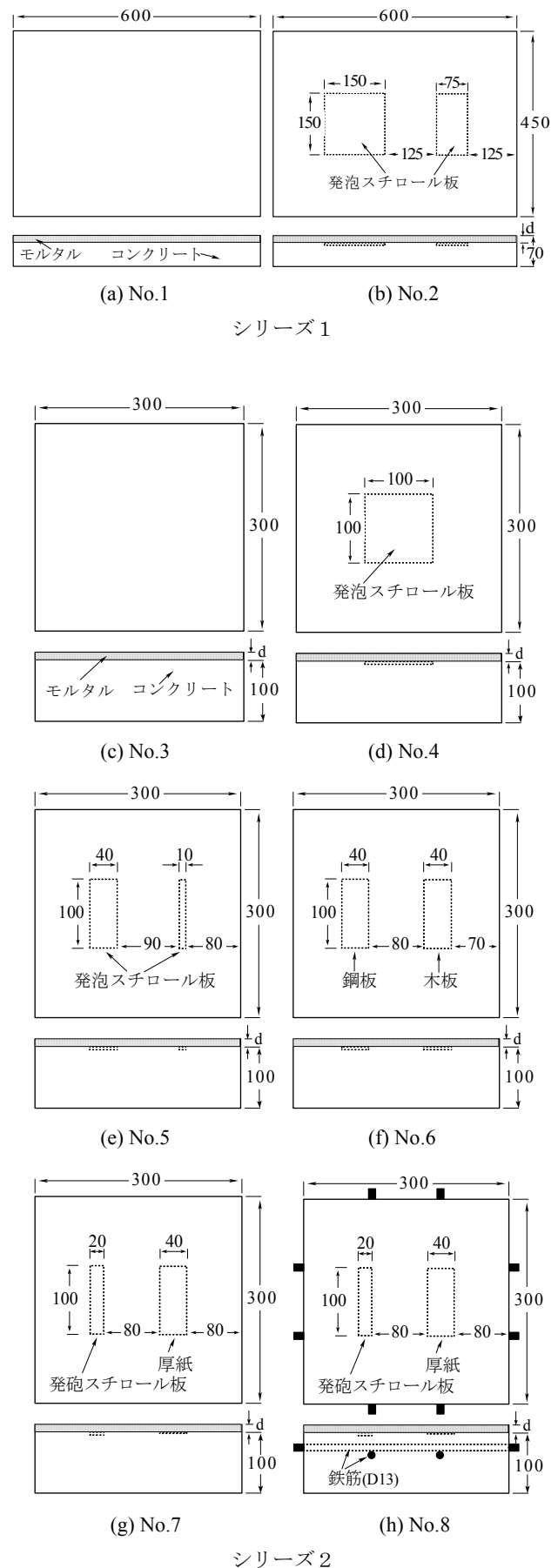
使用したコンクリートは、粗骨材最大寸法 20mm 、 $W/C=50\%$ 、 $\sigma_c=26.9\text{N/mm}^2$ である。モルタルは市販の補修用ポリマーセメントモルタルを使用し、指定の配合で練り混ぜ、コテ塗りでコンクリート表面を被覆した。2週間水中養生を行った後、室内に放置して乾燥させ、材齢28日以降に試験を実施した。

シリーズ2では介在物の種類や大きさを変えた供試体を作製した。No.3～No.6では寸法 $300\times 300\times 100\text{mm}$ のコンクリートに対して、モルタルを厚さ $d=10\text{mm}$ および 20mm で上面を被覆した。使用したコンクリートおよびモルタルはシリーズ1と同じである。No.3は欠陥のない供試体、No.4～No.6は欠陥を模擬した供試体である³⁾。

供試体 No.4～No.6では、それぞれ、厚さ 5mm の発泡スチロール板、鋼板および木板を介在物として埋め込んだ。シリーズ2のNo.7とNo.8の供試体については、厚さ $d=15\text{mm}$ のものだけを作製した。ここでは、介在物として幅 20mm の発泡スチロール板と幅 40mm で厚さ 1mm の湿らせた厚紙を埋め込んだ。なお、No.8では鉄筋(D13)をコンクリート表面から 30mm のかぶり度で埋設した。

2.3 シリーズ1の試験方法および検査結果

測定時の発振子と受振子のセンサー間隔は 50mm と 100mm とし、両センサーが欠陥部の上にある場合と一方のセンサーのみが欠陥部の上にある場合の2ケースを測定した。前者の場合、供試体上面の水平方向の中



図－3 供試体の種類と形状寸法 (mm)

心線を挟むようにセンサーを配置し、供試体の左端から右端に向かって 50mm 間隔で測点を設けて測定した。後者の場合、センサー間隔を 100mm として、一方のセンサーが欠陥部の境界から 50mm の距離となるように設置し、同様の手順で測定した。

供試体 No.2 について、センサー間隔および配置が最大振れ幅に及ぼす影響の結果を図-4 (a)および(b)に示す。同図(a)に示すように、発振子と受振子の両方が欠陥部の上にある場合、センサー間隔が 50mm と 100mm の両者において、欠陥部の上では最大振れ幅は大きく上昇し、欠陥を探索できている。また、モルタル厚さ $d=10\text{mm}$ の最大振れ幅は、 $d=20\text{mm}$ のそれに比べて大きくなり、厚さが薄いほど探索しやすいといえる。これは厚みが薄いほうが共振でよく振れるためと考えられる。ここでは欠陥のない供試体 No.1 の結果は図示していないが、各測点の最大振れ幅はセンサー間隔に関わらずほぼ一定となり、平均 52.6mV となった。これは、供試体 No.2 の健全部の上での最大振れ幅とほぼ同じであった。

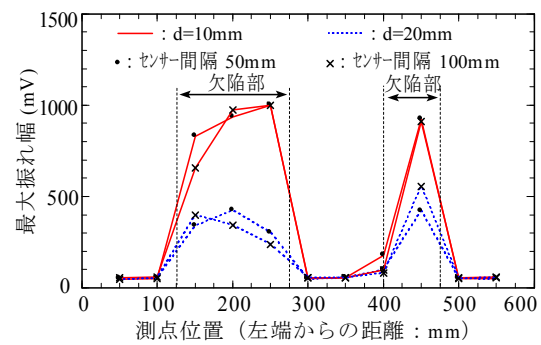
受振子のみが欠陥部の上にある場合および発振子のみが欠陥部の上にある場合の最大振れ幅を同図(b)に示す。なお、センサー間隔は 100mm とした。どちらの場合にも欠陥部の測点においては最大振れ幅が健全部に比べて若干増加し、欠陥の存在が伺える。しかしながら、最大振れ幅の増加は比較的小さく、センサーの一方が欠陥部の上からはずれなかった場合、さらに、欠陥の大きさ（介在物の幅）が小さい場合、また、モルタル厚さが大きいほど、共振法の検査精度は低下すると考えられる。このような横波共振法の結果を考慮すると、広い範囲の検査を行う場合、欠陥の存在の疑わしいところをサーモグラフィ法で検出し、共振法でもう少し詳しく調べて確認するなど、剥離や空洞などの欠陥検査法としてサーモグラフィ法との組合せも有効と考えられる。

計測波形の例を図-5 (a)～(f)に示す。これらの波形は、供試体 No.2 のモルタル厚さ $d=10\text{mm}$ 、センサー間隔 100mm のものである。なお、同図(a)～(f)の測点位置は、それぞれ、供試体の左端から 50,150,250,350,450,550mm である。同図(c)のように測定波形の出力が測定範囲を超えた場合は、測定範囲を最大振れ幅とした。

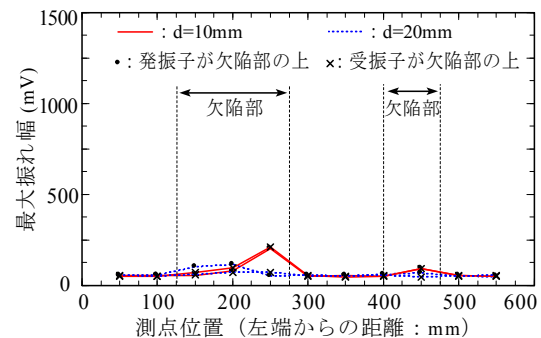
シリーズ 1 の試験結果から、モルタル厚さが 20mm 以下であれば波形の最大振れ幅から欠陥の探索は可能であることがわかった。しかしながら、センサーの一方が欠陥部の上からはずれると探索性能が低下することもわかった。本方法を現場調査に適用する場合、センサーの配置や測点の間隔を適切に設定する必要があると思われる。また、サーモグラフィ法との組合せも考えられる。

2.4 シリーズ 2 の試験方法および検査結果

測定時の発振子と受振子のセンサー間隔は 50mm と



(a) 発振子と受振子の両方が欠陥部の上にある場合



(b) 発振子と受振子の一方が欠陥部の上にある場合

図-4 センサー間隔と配置の影響（供試体：No. 2）

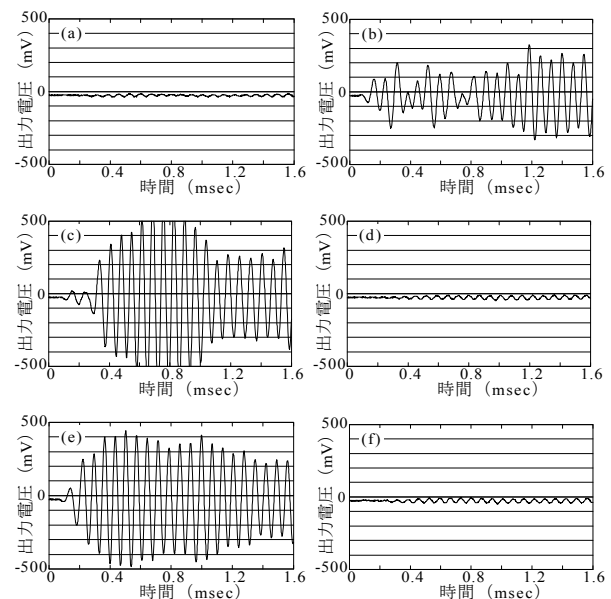


図-5 計測波形の例（供試体：No. 2, $d=10\text{mm}$ ）

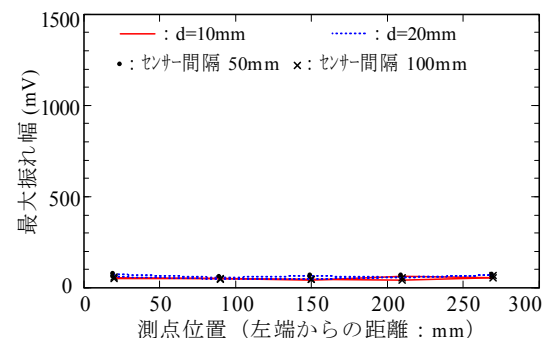


図-6 欠陥がない場合の最大振れ幅（供試体：No. 3）

100mm とし、供試体上面の水平方向の中心線を挟むように配置する。そして、供試体の左端から右端に向かって任意間隔で測点を設けて測定した。このとき、発振子と受振子のセンサー間隔が 50mm の場合、両センサーの測点は供試体の欠陥部の上を通る。一方、センサー間隔が 100mm の場合、両センサーは欠陥部と健全部の境界を通ることになる。

欠陥のない供試体 No.3 の最大振幅を図-6 に示す。また、模擬欠陥としての介在物の種類および大きさが最大振幅に及ぼす影響を図-7 (a)～(d) に示す。

図-6 の結果から、欠陥のない場合の最大振幅は小さく、各測点における最大振幅の変化も認められない。一方、図-7 (a) の No.4 の結果から、欠陥部（発泡スチロール板）の大きさが 100×100mm の測点では健全部に比べて最大振幅が顕著に大きくなり、欠陥部の探査が十分に可能である。センサー間隔が 50mm の場合、両センサーは欠陥部の上を通ることから、センサー間隔 100mm の場合に比べて最大振幅は大きくなっている。なお、 $d=10\text{mm}$ の場合、計測波形の一部が振り切れているため、実際の最大振幅は 1000mV 以上である。

図-7 (b) の No.5 の結果から、欠陥部（発泡スチロール板）の幅が 40mm の部分では最大振幅が大きくなり、欠陥の探査はできた。しかし、欠陥幅が 10mm の場合については最大振幅の変化はみられず、探査は難しいことがわかった。また、同図(c)の No.6 の測定結果から、木板部では最大振幅が大きくなり、鋼板部の最大振幅は非常に小さかった。これは鋼板の密度と剛性が比較的大きく、かつ、コンクリートとモルタルに密着しているためと考えられる。

図-7 (d) は欠陥幅が 20mm の場合および厚さ 1mm の厚紙を介在物とした場合の検査結果を示す。さらに、鉄筋の有無の場合の結果も表している。これら No.7 と No.8 の結果から、厚さ 1mm の厚紙部の最大振幅は、No.5 の厚さ 5mm の発泡スチロール部と同様に大きくなっている。また、欠陥幅が 20mm の場合も最大振幅から探査できることがわかった。さらに、鉄筋ありおよび鉄筋なしの両方で同じような検査結果となっていることから、接着面の剥離・空洞の検査においてはコンクリート中の鉄筋の影響はないものと考えられる。

シリーズ2の試験結果から、モルタルの厚さが 10mm および 20mm の場合、接着面における欠陥部（発泡スチロール板）の幅が 20mm 以上の場合、また、幅 40mm の木板や厚紙を埋め込んだ場合などでは探査波形の最大振幅が大きくなり、横波共振法により欠陥探査が可能であることが確認できた。また、コンクリート中の鉄筋の影響はないことがわかった。

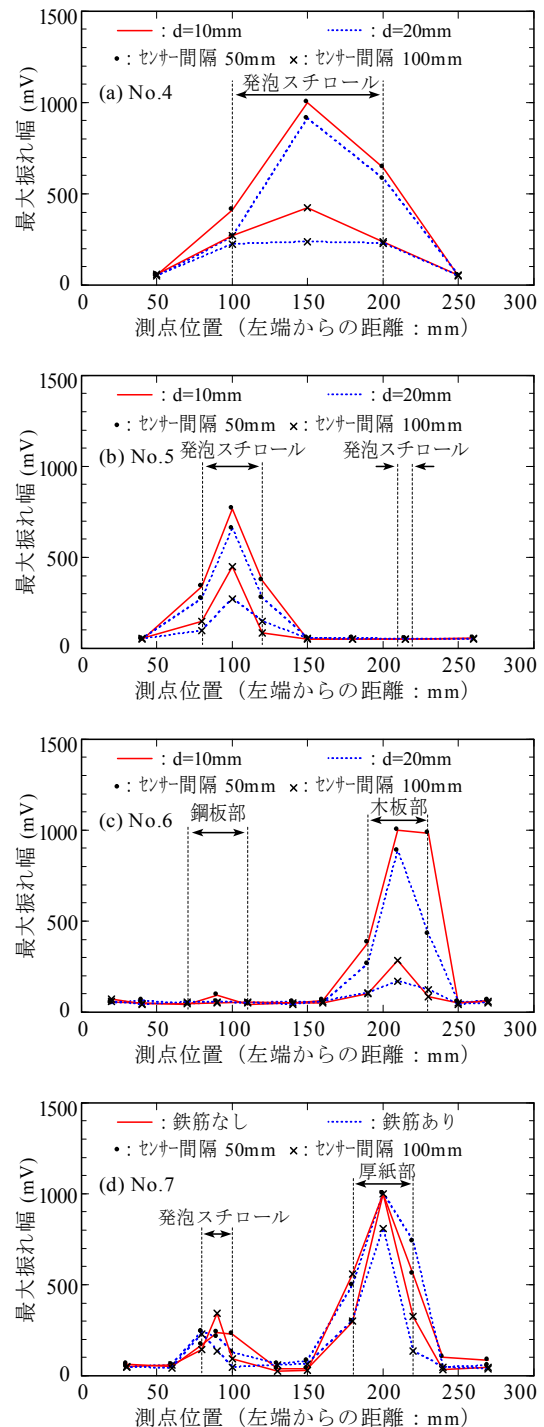


図-7 介在物の種類および大きさが最大振幅に及ぼす影響（供試体：No. 4～No. 7）

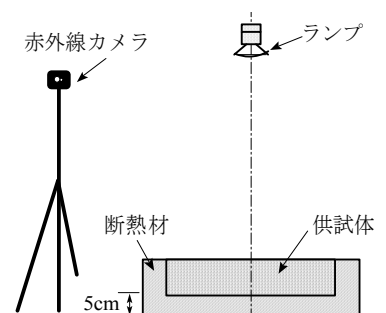


図-8 室内照射試験の概要

3. サーモグラフィ法による欠陥検査

3.1 照射試験の概要

シリーズ2の供試体 No.3～No.6 について室内照射試験を実施した。供試体は、厚さ 5cm の発泡スチロールで供試体の底面と側面を覆って断熱処理を施した。

室内照射試験の概要を図－8に示す。供試体上面から 60cm の高さに熱源となるハロゲンランプ（500W）を設置し、30 分間照射を行った。照射開始から 1 分毎に赤外線カメラを用いて供試体表面を撮影した。撮影した熱画像から、供試体の中心線に沿った表面温度を求めた。室温 24～26℃の条件で照射試験を行った。

屋外照射試験は、供試体 No.3 と No.4 について実施した。1 月上旬と 9 月上旬に屋外に供試体を並べ、日射を受けた場合の表面温度を測定した。前日から供試体を設置し、翌日の朝から夕方まで赤外線カメラを用いて 30 分間隔で供試体表面を撮影した。表面温度差は中央の温度と両端から 50mm 位置の平均温度の差として算出した。

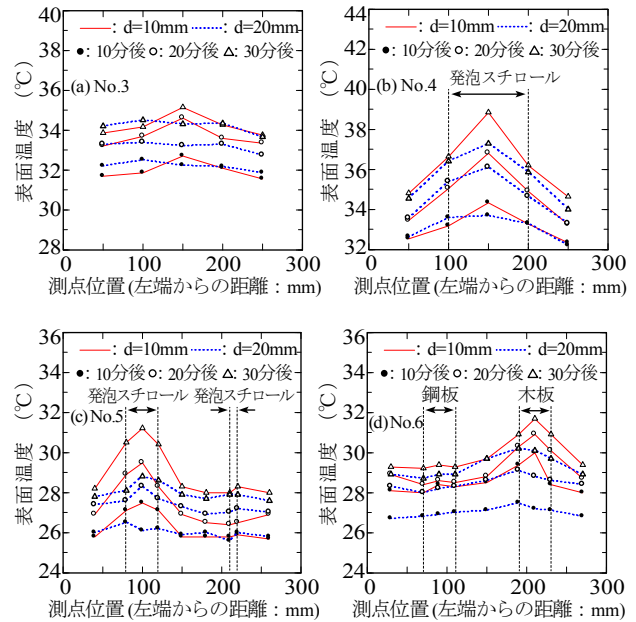
3.2 室内照射試験の結果

室内照射試験の結果を図－9 (a)～(d)に示す。これらは、照射開始から 10 分、20 分、30 分後の表面温度の分布を示している。ここでは、介在物の種類および大きさが表面温度に及ぼす影響に着目して検討した。同図(a)は欠陥のない供試体 No.3 の温度分布であり、同図(b)は 100×100mm の発泡スチロールを埋め込んだ供試体 No.4 の結果を示す。モルタル厚さが薄いほど介在物上面の温度が高くなっている。供試体 No.4 では 30 分後に 3～4℃の温度差が生じている。このときには熱画像から明瞭に欠陥部分が判定できた。

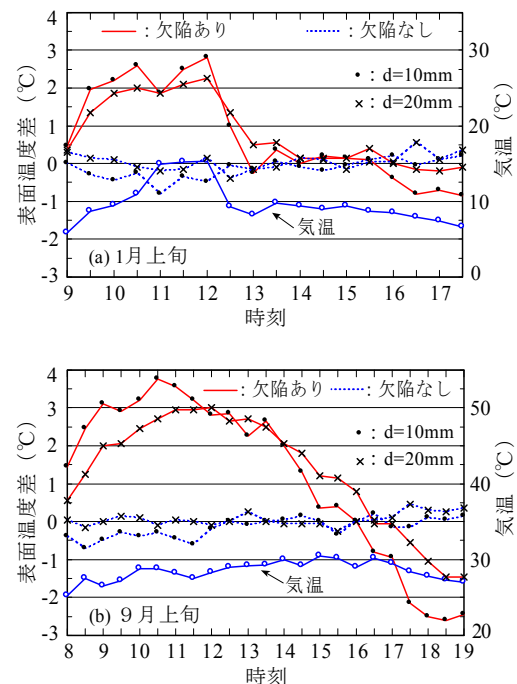
同図(c)は 100×40mm および 100×10mm の発泡スチロールを埋め込んだ供試体 No.5 の結果を示す。幅が 10mm の欠陥部では、断熱性の介在物周囲から熱が内部に伝わるため、周囲との温度差は小さくなり、熱画像から欠陥部を判定できなかった。一方、幅が 40mm の欠陥部では周囲との温度差は大きくなり、熱画像から欠陥部を判定できた。同図(d)は 100×40mm の鋼板と木板を埋め込んだ供試体 No.6 の結果を示す。鋼板は熱を良く伝えるため、欠陥がない場合と同じように熱が内部に伝わるため、周囲との温度差は小さくなり、熱画像から欠陥部を判定できなかった。一方、木板は断熱性があるため周囲との温度差は大きくなり、熱画像から欠陥部を判定できた。

3.3 屋外照射試験の結果

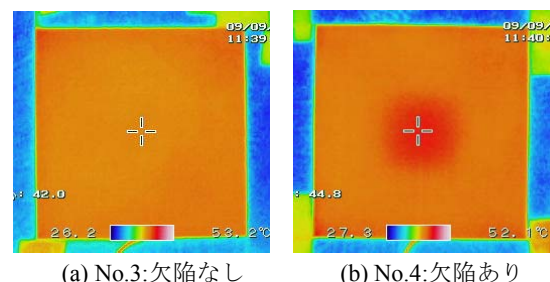
日射による表面温度差の発生状況を図－10 (a)および(b)に示す。これらは欠陥なしと欠陥ありの供試体 No.3 および No.4 について、1 月上旬と 9 月上旬に測定した結果である。欠陥がある場合の 1 月上旬と 9 月上旬の表面温度差は、日中でそれぞれ、2～3℃、3～4℃となり、熱画像から明瞭に欠陥部を判定できた（図－11 参照）。



図－9 介在物の種類および大きさが表面温度に及ぼす影響（室内照射試験，供試体：No. 3～No. 6）



図－10 日射による表面温度差の発生状況（供試体：No. 3 および No. 4）



図－11 供試体表面の熱画像（供試体：No. 3 および No. 4, d=10mm）

現場において日射のあたるコンクリート面では、欠陥がある場合には温度差が生じるため、サーモグラフィ法の適用が可能と考えられる。

4. コンクリート開水路の現場調査

4.1 現場の概要

コンクリート開水路の状況を図-12に示す。表面被覆工法により補修されてから2年経過したコンクリート開水路である。開水路の幅は7.1m、高さ2.7m、側壁コンクリートに被覆したポリマーセメントモルタルの厚さは10mm、底版のポリマーセメントモルタルの厚さは15mmである。現場調査は10月中旬に実施した。

4.2 調査結果

横波共振法による調査は、サーモグラフィ法で検出した欠陥の存在の疑わしいところを対象とした。図-13は、調査対象としたコンクリート開水路の側壁の熱画像を示す。この部分は、日射のあたる面にあり、昼頃に3℃程度の表面温度差があった。この部分は、サーモグラフィ法では検出できたが、点検棒などの打音調査では検出できなかった。

調査では対象部分をメッシュに区切り、センサー間隔100mmで計測した。各測点の最大振れ幅の値から欠陥の分布を示した結果が図-14である。この結果から、最大振れ幅が大きい部分があり、剥離や空洞などの欠陥の存在が推測できる。また、欠陥分布と表面温度差の大きいところは比較的よく一致していることがわかる。

本調査結果から、横波共振法は現場での剥離や空洞などの欠陥検査に適用できることが確認できた。このとき、サーモグラフィ法と組合せることができればより有効に調査が実施できると考えられる。

5. まとめ

本研究では、コンクリートとモルタルの接着面における剥離や空洞などの内部欠陥の検査方法として、横波共振法とサーモグラフィ法を適用した。これらの方法の適用性を検証するため、コンクリート内部に介在物を埋め込んだ供試体を作製して試験を行った。まず、横波共振法により介在物の種類や大きさ、モルタル厚さの影響について試験した。つぎに、サーモグラフィ法の適用性を照射試験により検討した。さらに、本方法を適用して表面被覆工法により補修したコンクリート開水路の現場調査を実施した。本研究結果から、接着面の欠陥検査に対する横波共振法とサーモグラフィ法の検査精度を確認することができた。また、本方法の適用性ならびに有効性を確認することができた。



図-12 コンクリート開水路の状況

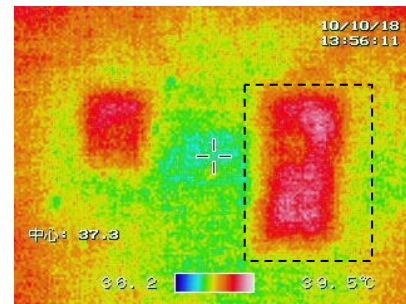


図-13 コンクリート開水路の側壁の熱画像

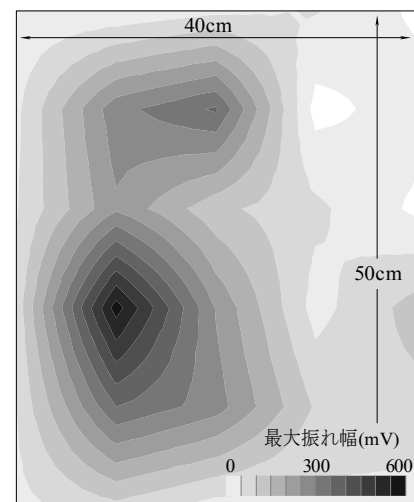


図-14 共振法による検査結果
(図-13の点線範囲)

参考文献

- 1) 森 丈久：農業水利施設へのストックマネジメント導入に向けた取組み，農業土木学会誌，vol.73，No.11，pp.3-6，2005.11
- 2) 茨田 匠，吉村 睦，河端俊典，石黒 覚：横波超音波共振法による農業用水管路の探傷の有効性，農業土木学会論文集，Vol.73，No.3，pp.123-128，2005.6
- 3) 山田和夫，安藤秀則：強制過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集，vol.24，No.1，pp.1485-1490，2002.6