

赤外線サーモグラフィ法を用いた FRPシート・コンクリート間の欠陥検出

三井雅一¹・福澤公夫²・沼尾達弥³

¹学生会員 修士(工学) 茨城大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 (〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)

²正会員 工博 茨城大学教授 工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)

³正会員 工博 茨城大学助教授 工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)

FRP 接着工法では、不適切な施工や時間経過に伴う劣化により剥離が生じると所要の補強効果が得られないので、その部分を検出し補修を行う必要がある。本研究では非破壊検査法の一つである赤外線サーモグラフィ法により FRP シート・コンクリート間の剥離検出の検討を実験的・解析的に行う。まず、基本実験として周辺環境との温度差を与えた供試体を用いて FRP シートの種類および層数、欠陥厚さおよび熱負荷方法の影響について検討を行った。さらに、外気温の日較差や熱輻射の利用により欠陥検出の可能性を検討した。また、赤外線放射計より得られた温度分布から、欠陥の有無のみでなくその形状や厚さなどを定量的に同定するための支援手法を目的として、非定常熱伝導 FEM 解析によるシミュレーション手法の提案を行った。

Key Words: *infrared thermography method, FRP sheets, defects, heat transfer analysis, FEM*

1. 序論

近年、コンクリート構造物の地震時における耐力増加を目的として各種の補強工法が適用されている。その中でも、炭素繊維やアラミド繊維などの FRP シートを用いた補強工法は、施工現場の状況に柔軟に対応できる特長を有する。FRP シートを用いて補強する場合の補強効果は、母材であるコンクリートと FRP シートとの付着により応力が伝達することにより発揮されるため、両者が完全に接着している必要がある。しかしながら、不適切な施工や時間経過に伴う劣化により空隙を伴う剥離（以後、欠陥という）が生じることがある。その欠陥を、完工時点および時間経過後の維持保全時点において的確に検出し、早期段階にて修繕を行うことが、FRP シート補強工法の信頼性を高めるうえで重要である。

内部欠陥の検出は、表面に現れ出ないため、外部からの目視調査では行えないとともに、FRP シート接着工法では、施工箇所が橋梁の床版下面やトンネル内面など足場が必要な箇所用いられる場合が多く、容易に検査できる環境にない。そのため非破

壊検査法に頼らざるを得ない。対象物の表面温度分布により欠陥等の検出を行う赤外線サーモグラフィ法は、非接触であると同時に対象とする領域が広範囲であること、また欠陥の位置や形状が熱画像として視覚的に評価できる点などの特長を有している。

コンクリート構造物の欠陥検出にサーモグラフィ法を適用する場合、対象とする欠陥はコンクリートそれ自体の欠陥（主として内部の欠陥）とコンクリートと他の材料との境界部に生じる欠陥に大別できる。本研究は、後者に属するものである。研究例としては、タイルやモルタルなどの外壁仕上げ材の欠陥を気温や日射量の変動などの自然の熱源またはヒータ等の人工の熱源により熱負荷を与えて検出する研究^{1), 2), 3)}、型わくや鋼製函体のコンクリートの充填状況をセメントの水和熱を利用して検出する研究⁴⁾、鋼製函体のコンクリートの充填状況を、コンクリート硬化後に外部より熱負荷を与えて検出する研究⁵⁾などがある。鋼材あるいは外壁仕上げ材とは、熱伝導性や比熱などの熱物性的条件などの違いが多く、これらの成果を FRP シートとコンクリートとの間の欠陥の検出に反映させるためには、十分な検

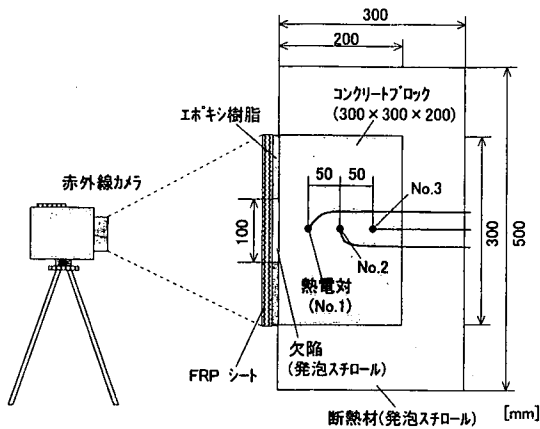


図-1 供試体

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad.**
50.0	40.9	4.0	157	315	761	1056	0.787

* スランプ : 8 ± 2cm, Gmax : 20mm

** AE 減水剤

討が必要となる。FRP シートとコンクリートとの間の欠陥検出については、ハロゲンランプを用いて外部加熱を行うアクティブサーモグラフィ法を利用した研究がある⁶⁾。実際の FRP シートの補強部位は前述のように容易に接近できる環境にあるものは少なく、均一に熱負荷を行うことが必要なアクティブサーモグラフィ法より外気温や日射量の変動を利用するパッシブサーモグラフィ法が有効であると考えられる。本研究は、そのパッシブサーモグラフィ法により、FRP シートとコンクリート間の欠陥の検出について実験的、解析的に検討したものである。内容は以下の3つに大別することができる。①供試体を機器を用いて加熱あるいは冷却して、周辺温度との温度差を設け、欠陥部の検出の可能性を検討する基本実験、②①の応用実験として、外気温の日較差や日射量などの熱輻射の利用により得られる周辺環境と被測定体との温度差から欠陥検出の可能性を検討する屋外実験、③ FRP シートとコンクリートとの間の詳細な熱移動メカニズムの解明および各種気象因子を有する屋外環境下における赤外線サーモグラフィ法の欠陥検出への適用を検討する有限要素法解析を用いた熱伝導シミュレーションである。

表-2 基本実験の要因と水準

要因	水準
FRP シートの種類	CFRP, AFRP
FRP シートの層数	1, 2, 3
欠陥厚さ (mm)	1, 2, 3
熱負荷温度 (°C)	5 (冷却), 50 (加熱)

表-3 連続繊維シートの仕様

	炭素繊維	アラミド繊維
引張強度 (MPa)	4230	2900
弾性率 (GPa)	244	111
繊維目付 (g/m ²)	200	280
シート厚 (mm)	0.11	0.19

2. 基本実験

(1) 実験概要

a) 供試体

図-1に示すように、300 × 300 × 200mm のコンクリートブロックの片面に FRP シートを接着して供試体とした。表-1に、供試体の作製に用いたコンクリートの配合を示す。水セメント比 50 %、スランプは 8 ± 2cm であり、材齢 2 日で脱型を行い、以後気中に約 3 ヶ月間静置した。FRP シートとコンクリートとの間の欠陥は、発泡スチロール薄板 (100 × 100 × 1mm) を欠陥厚さに応じた枚数設置することにより再現した⁷⁾。FRP シートは、所定の繊維シート枚数を積層し、エポキシ樹脂を含浸させ硬化板としたものを使用した。コンクリート表面にプライマー処理を行い、その後、発泡スチロール薄板を所定位置に配置した状態で FRP の接着を行った後、1 ヶ月程度にて実験した。また、図-1に示すように、測定面を除いた全ての供試体表面は厚さ 100mm の発泡スチロールで覆い断熱状態とした。

b) 要因と水準

表-2に基本実験の要因と水準を示す。要因として FRP シートの種類、層数、欠陥の厚さ (発泡スチロール厚さ) および外部より与える熱負荷温度を取り上げた。連続繊維シートとして、炭素およびアラミドの一方繊維シートを用いた。表-3には、使用した炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートの仕様を示す。また、外部から与える温度としては加熱 (50 °C) および冷却 (5 °C) の 2 水準を設定した。

c) 熱負荷の与え方

外部からの熱負荷を行う前に、供試体を恒温恒湿室において、コンクリート内部温度が約 20 °C の状態になるまで静置した。加熱を行う場合は、FRP シ

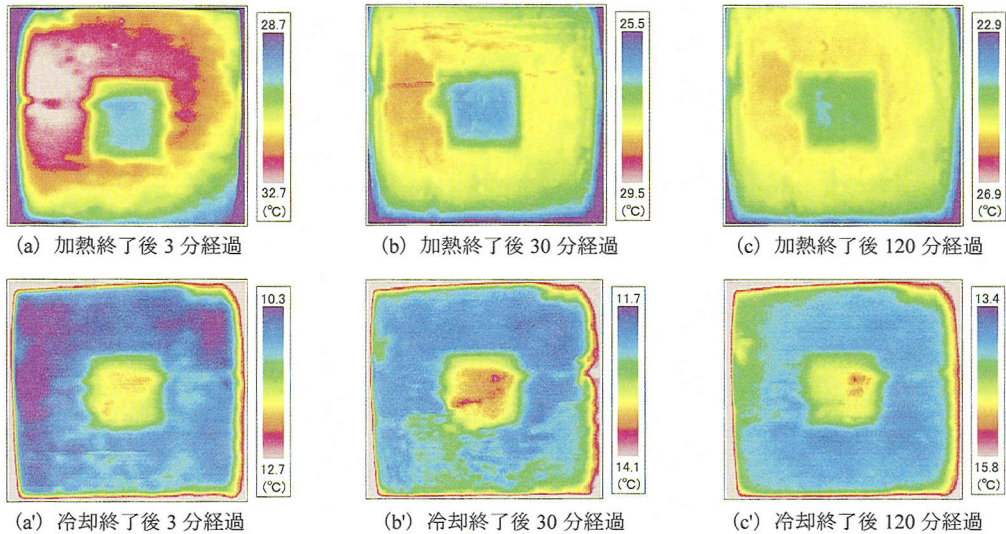


図-2 表面温度分布の変化 (CFRP シート 3 層, 欠陥厚さ 1mm, 雰囲気温度 20℃)

ート面に直接加熱器を押しあてることにより熱負荷を与えた。加熱器はテーブルヒータ（ヒータ面：450 × 300mm, 使用温度範囲：+5 ~ 80℃, 温度調節精度 ± 0.5℃）を用い、設定温度を 50℃とした。冷却を行う場合は、供試体側面を発泡スチロールによって断熱した状態にて 5℃の恒温室中に静置することにより熱負荷を与えた。両者とも熱負荷を 6 時間継続し、その後、約 20℃の雰囲気温度の場所に設置して FRP シートの表面温度分布を赤外線放射計によって測定した。

d) 赤外線計測方法

赤外線サーモグラフィ法による計測には、日本電気三栄社製の高感度放射温度計（HgCdTe 液体窒素冷却型）を用いた。この赤外線放射計は、計測範囲 20 ~ 200℃, 最小検知温度差 0.025℃（30℃黒体炉において）および 60452 画素（254 × 238）という性能を有する。測定距離は供試体測定面（300 × 300mm）が赤外線装置の測定範囲内に入る距離（約 1m）に設定した。供試体を所定の位置に置き、測定開始 30 分経過までは 3 分間隔にて測定を行い、以後、3 時間まで 30 分間隔の測定を行った。また、コンクリート内部温度、雰囲気温度は熱負荷開始時から赤外線測定終了まで 30 分間隔の計測を行った。

(2) 実験結果および考察

a) 表面温度分布

図-2に、CFRP シート 3 層, 欠陥厚さ 1mm の供試体について赤外線放射計より得られた、測定開始後 3 分, 30 分および 2 時間における熱カラー画像を示す。画像の温度と表示色との関係は、右側のカ

ラーバーで示した。(a)~(c)は加熱を行った温度分布であり、(a)~(c)は冷却を行った供試体の温度分布である。カラーバーのレベル差は、熱負荷終了後 3 分経過時において FRP シート表面の温度範囲が収まるように、加熱の場合は 4℃, 冷却の場合は 2.4℃とし、時間経過の変化を示した。

図から分かるように加熱の場合および冷却の場合ともに欠陥部と健全部との温度差により、欠陥位置および形状が明確に確認できる。供試体を加熱する場合、コンクリートからの熱移動が欠陥部で遮られ、表面温度が低くなるために、欠陥部は寒色系に示される。また、供試体を冷却する場合、外部からの熱の移動が欠陥部で遮られ、その部分に熱が滞留し高温になるため欠陥部が暖色系に示される。図より加熱および冷却を行った供試体ともに、2 時間経過した後においても欠陥部と健全部の温度差は小さくなるものの検出は可能であることが分かる。また、FRP シートの種類、層数および欠陥厚さを変化させた本研究の範囲においては、いずれの場合も 2 時間経過後であっても検出可能であった。なお、図-2から分かるように、測定面の角部位置にて他の部分と比べ加熱供試体では低温に、冷却供試体では高温となっている。これは、供試体とその側面に設置した断熱用発泡スチロールとの隙間からの熱の回り込みが生じたためと考えられる。

b) 表面温度差の経時変化

FRP シートとコンクリートの間の欠陥を赤外線サーモグラフィ法にて検出するためには、欠陥部と健全部位置にて表面温度差が生じなければならない。ここでは、図-3に示す欠陥部と健全部との表面

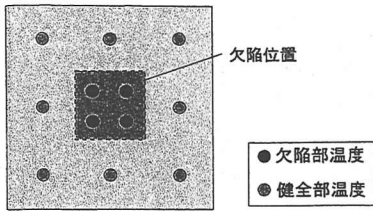
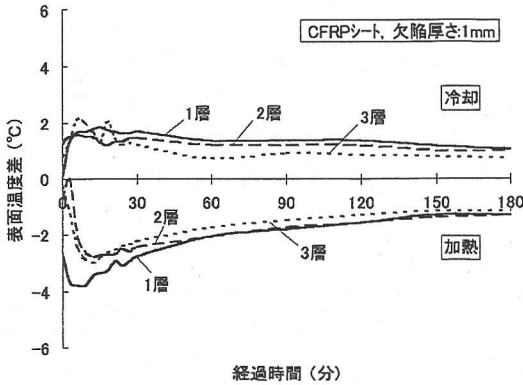
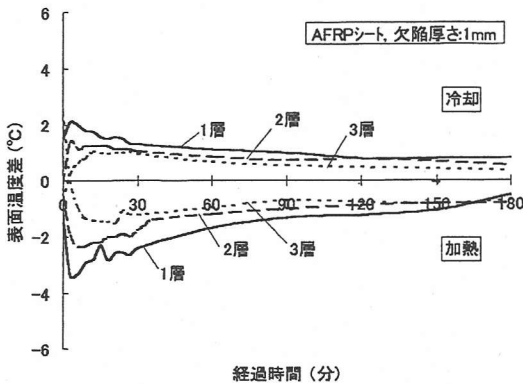


図-3 欠陥部および健全部温度



(a) CFRP シート



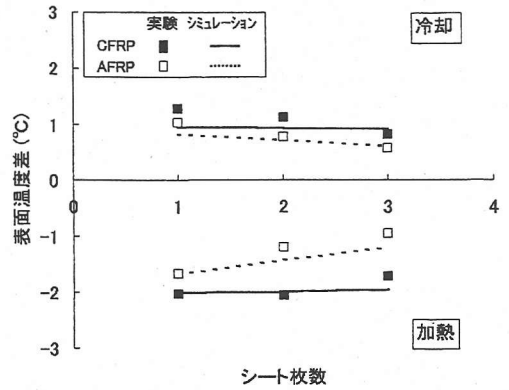
(b) AFRP シート

図-4 表面温度差の経時変化

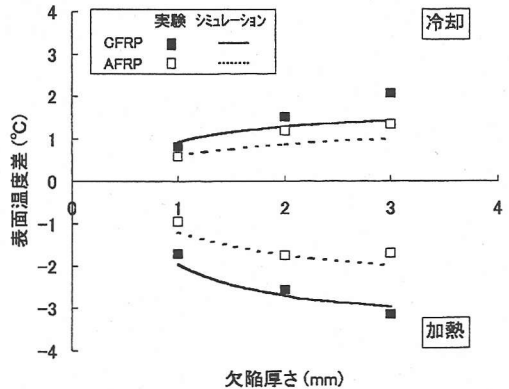
温度差の経時変化を図-4に示す。表面温度差は、(欠陥部温度-健全部温度)とし、欠陥部の方が温度の低い場合は負として表示する。図-4に示すように、CFRP シートおよび AFRP シートともに測定開始後、約 10 分間は温度差の変化が大きく、それ以降は緩やかな変化を示す。また、全般的に CFRP シートを用いる場合の表面温度差の方が AFRP シートを用いる場合に比べて大きい。

c) 各要因が表面温度差に及ぼす影響

図-5に測定開始から 1 時間経過時における表面温度差とシート層数および欠陥厚さとの関係をそれぞれ示す。図-5(a)は欠陥厚さを 1mm とする場合のシ



(a) シート層数の影響 (欠陥厚さ 1mm)



(b) 欠陥厚さの影響 (シート層数 3 層)

図-5 各要因が表面温度差に及ぼす影響 (1 時間後)

ート層数の影響を、図-5(b)はシート層数を 3 層とする場合の欠陥厚さの影響を示している。図中の実線および破線は熱伝導解析によるシミュレーション結果であるが、これについては後述する。

前述のように、図-5からも表面温度差は CFRP シートを用いる場合の方が、AFRP シートを用いる場合よりも大きいことが確認できる。図-5(a)より、CFRP シートおよび AFRP シートともに層数が増加するにつれ表面温度差が低下すること、その傾向は AFRP シートの方が CFRP シートに比べ大きいことが示されている。これは、CFRP シートに比べて AFRP シートは熱伝導性が低いため熱移動量が少なくなるため、FRP シート表面に生じる温度差が小さくなることに起因する。また、図-5(b)より、欠陥厚さが増加すると熱遮断性能が増加するためシートの種類によらず温度差が増加することが示されている。図-5より、本実験の範囲を超えるシート層数、欠陥厚さが薄いなどの温度差が小さくなる条件でも検出が可能であるといえよう。

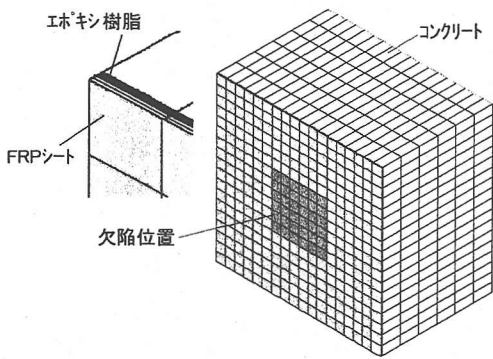


図-6 要素分割図

表-4 解析に用いた熱物性値等

材料	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (W/kgKh)	密度 (kg/m ³)
コンクリート ⁸⁾	1.4	0.196	2200
エポキシ樹脂 ⁹⁾	0.1	0.361	1200
CFRPシート ¹⁰⁾	繊維方向	18	0.333
	直角方向	0.6	
AFRPシート ¹⁰⁾	0.09	0.361	1222
発泡スチロール ⁹⁾	0.03	0.0556	28

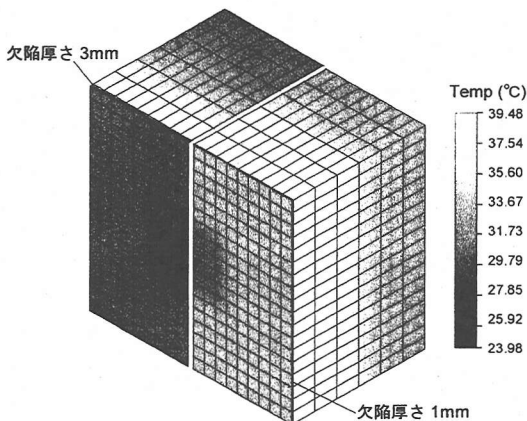


図-7 熱伝導 FEM 解析結果 (AFRP 1 層, 加熱, 10 分後)

(3) 熱伝導解析によるシミュレーション

a) 熱伝導解析の概要

本研究の FRP シートとコンクリート間の熱伝導状態のように熱流が空間において存在するとき、その現象は、式(1)に示す三次元非定常熱伝導問題に帰結する。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

ここに、 $T = T(x, y, z, t)$ はある位置における温度であり、空間座標と時間の関数として示される。また、 ρ は密度、 C は比熱および λ は熱伝導率である。また、生成項となる \dot{Q} は、単位体積および単位時間当たりの熱発生率である。時間 t は一方向性であることから、与えられる初期温度分布 (20℃) から、定義する時間刻み Δt に従い順次時間を経過させ式(1)を解くことにより $(t + \Delta t)$ における温度分布を得る。本研究では、上記の非定常熱伝導問題に基づき、有限要素手法 (FEM) を用いて要素 (3次元 20 節点要素) の各節点にて式(1)を解くことによって、前述までの基本実験の温度分布シミュレーションを行った。図-6に要素分割図を示す。FRP シート 1 層の厚さは、CFRP シートの場合 0.4mm、AFRP シートの場合 0.8mm とした。欠陥部の周りには欠陥と同一の厚さのエポキシ樹脂を配置した。また、発泡スチロールにて断熱した供試体周囲は、理想的な断熱が行われたとして完全断熱境界とした。熱負荷条件は実験に従い、まず供試体の初期温度を 20℃ とし、FRP シート面に対し 50℃ の加熱または 5℃ の冷却を 6 時間継続するものとした。その後、雰囲気温度を 20℃ と設定した熱伝導解析を行うことで FRP 面の温度分布を得た。表-4には解析に用いた各材料の熱物性値を示す。CFRP シートは、強い異方熱特性を有することから、その繊維方向と繊維直角方向にて異なる熱伝導率を設定した。各物性値の出典については表-4に併せて示す。また、FRP シート表面とこれに接する流動気体との間は熱的環境条件としての熱伝達係数 α_i を設定する必要がある。室内における実験であるため自然対流となり、一般的に対流熱伝達係数 α_c は 5W/m²K とし、放射熱伝達係数 α_r についても 5W/m²K 程度であることから¹¹⁾、熱伝達係数 $\alpha_i (= \alpha_c + \alpha_r)$ は 10W/m²K とし与えた。

なお、熱伝導 FEM 解析には、汎用 FEM プログラム、COSMOS/M Ver2.0 を使用した。

b) シミュレーション結果および考察

図-7に得られた表面温度分布の一例を示す。図に示す温度分布は、AFRP シート 1 層, 加熱供試体の 10 分間経過後の結果である。図の右側半分は欠陥厚さ 1mm の結果であり、左側は 3mm の結果であるが、どちらの場合においても基本実験における熱画像と同様に欠陥部と健全部との温度差により欠陥が確認される。またその温度差が、欠陥の厚さが 3mm の場合が 1mm に比べ大きい。図-8に FRP シート表面の横断方向の温度分布について実験値とシミュレーション結果との比較を示す。(a)は加熱の場合、(b)は冷却の場合である。得られた結果は欠陥位置の付

表-5 屋外試験の要因と水準

要因	水準
FRPシートの種類	CFRP, AFRP
FRPシートの層数	1, 2, 3
日射の有無	有(日向), 無(日陰)

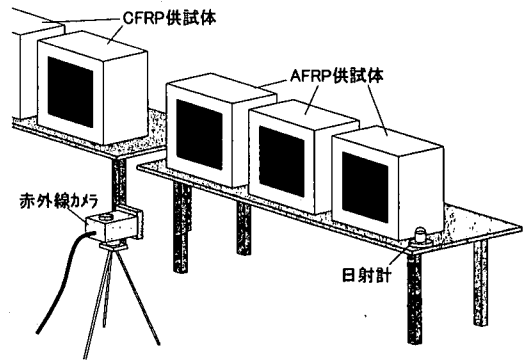


図-10 屋外試験方法

表-6 実験状況

	測定日時	天候	方向
日向実験	1998/11/13 12:00 ~ 11/15 0:00	快晴	真南
日陰実験	1998/12/11 12:00 ~ 12/13 0:00	快晴	真北

を用いた場合の方が CFRP シートに比べ、その層数が増加するに従い FRP シート表面に生じる温度差が大幅に減少する現象が再現された。また、(b)に示す欠陥厚さの増加に伴う表面温度差の変化量は、FRP の種類によらないことも再現された。

3. 輻射熱を利用した屋外実験

(1) 実験方法

前述の基本実験において温度差の最も生じにくい欠陥厚さ 1mm の供試体を用いて、表-5に示す要因と水準について実験を行った。要因としては、FRPシートの種類、シートの層数および日射の有無とした。実験は、図-10に示すように計 6 体の供試体を並べて配置し、各供試体ごと測定面 (30 × 30cm) が赤外線放射計の測定範囲に収まるように約 1m の位置で計測を行った。また、赤外線放射計の熱画像のほかに、コンクリート内部温度および外気温の経時変化を CA 型熱電対にて測定するとともにネオ型全天日射計にて日射量の変化を測定した。

日射有りの実験 (以後、日向実験という) は、表-6に示すように 1998 年 11 月 13 日から 15 日に実施し、測定面を真南に向けた。また、日射無しの実験

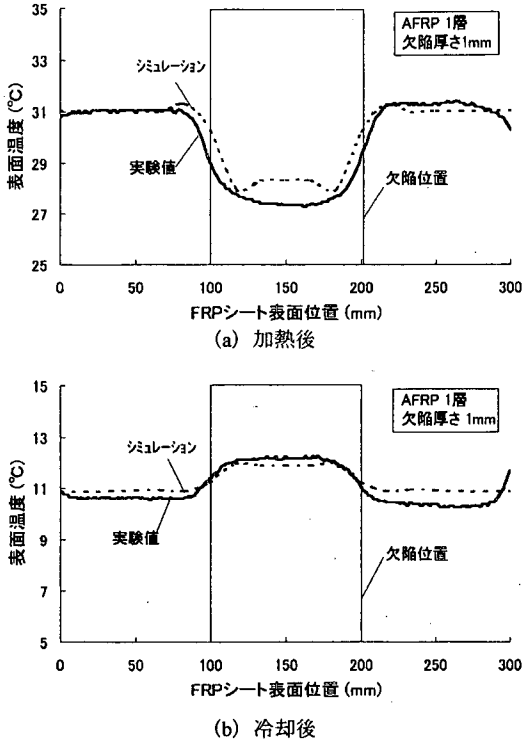


図-8 表面温度分布の比較 (30分経過)

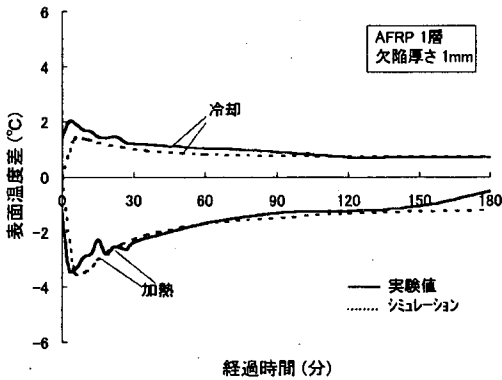


図-9 表面温度差の比較 (AFRPシート1層, 欠陥厚さ1mm)

近での温度変化を含めて的確に再現しているものといえよう。図-9に、表面温度差の経時変化の実験値とシミュレーションとの比較を示す。シミュレーション結果が加熱および冷却とも測定結果とほぼ一致していることが分かる。図-8および図-9では、AFRPシート1層の場合についての比較を示したが、他の条件においても同様な結果が得られた。

また、図-5に 60 分経過後の表面温度差のシミュレーション結果を実験値とともに示した。(a)に示す繊維層数の影響から分かるように、AFRP シート

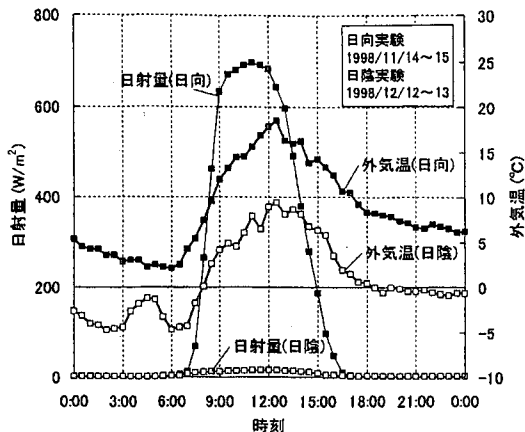


図-11 日射量および外気温の変化

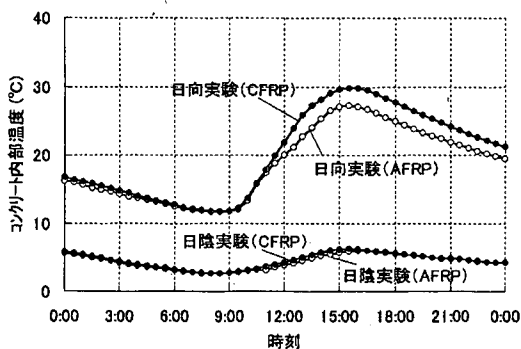


図-12 コンクリート内部温度

(FRPシート接着面から100mm内部位置, AFRPシート3層)

(以後、日陰実験という)は同年12月11日から13日に実施し、測定面を真北に向けるとともに供試体の背面からの日射の影響を遮断するため日除け板を設置した。両者の実験期間中は快晴、静穏であった。

両実験ともに、表-6に示すように36時間昼夜を通して行った。ただし、実験開始から12時間は供試体温度を屋外環境の変動に慣らす期間とし、以後の結果については、その後24時間分を用いた。測定間隔は、赤外線放射計による表面温度分布の測定は1時間間隔にて各供試体ごと計測を行った。また、コンクリート内部温度、外気温および日射量は30分間隔にて計測を行った。

(2) 測定結果

図-11に日向実験および日陰実験における日射量および外気温の変化を示す。図に示すように、両実験日における外気温はその最大値および最小値は異なるもののその日較差および変動傾向は、ほぼ同一な条件であったことが分かる。また、日向実験の最

大日射量は 700W/m^2 であり、実験時の気象条件が良好であったため理想的なサインカーブを示す日射量曲線が得られた。

図-12に、図-1に示す深さ100mmの位置に設置した熱電対 No.2 より得られた供試体内部温度の変化をCFRPシートおよびAFRPシート3層の場合について示す。図から分かるように供試体内部温度は、日向実験においてCFRPシートとAFRPシートとに違いが生じた。これは、CFRPシートを用いる場合の表面色は、黒色であるのに対し、AFRPシートを用いる場合の表面色は明るい緑色であることで、AFRPシートの方がCFRPシートに比べ日射吸収率が低いことが主たる要因として考えられる。また、同図より日陰実験では日射の影響がほとんど無いためCFRPシートとAFRPシートとは、ほぼ同じ傾向を示す。

図-13に赤外線放射計より得られた熱カラー画像の例を示す。熱画像のカラーバーは、レベル差を 4.0°C と一定にした。そのため、図-13(a)の日向実験11:00の熱画像については、表面温度差が大きいため欠陥部温度が範囲外となっている。また、熱画像の下側半分の方が高温となっているが、これは供試体を載せた台の熱反射が影響しているものと思われる。図-13から、日向実験および日陰実験ともに欠陥の検出は可能であることが分かる。また、両者ともに外気温が上昇する昼間は欠陥部が健全部に比べ温度が高くなり、日射が無い時間帯は健全部が欠陥部を上回る。また、7:00および16:00の熱画像では欠陥部と健全部温度が近い値になり欠陥部が検出しにくくなる。

図-14に、図-13の熱画像より得られた欠陥部および健全部における、表面温度の経時変化を示す。図-14の矢印は、図-13に示す熱画像の時刻を示す。図-14に示すように表面温度差の経時変化曲線は外気温の変動曲線に近い形となり、全体的な傾向として約1時間程度の遅れが生じることが確認される。

(3) 熱伝導解析によるシミュレーション

a) 解析概要

基本実験のシミュレーションと同様に、非定常熱伝導FEM解析にて、気温および日射量の変動によってFRPシートに生じる温度分布のシミュレーションを行った。用いる解析モデルおよび熱物性値は基本実験のシミュレーションの場合と同様に図-6および表-4に従った。実験結果において示したように、使用したCFRPシートとAFRPシートでは表面色が異なるため日射吸収率を変化させた。ここでは、山田ら¹²⁾の研究をもとに色の違いからCFRPシート

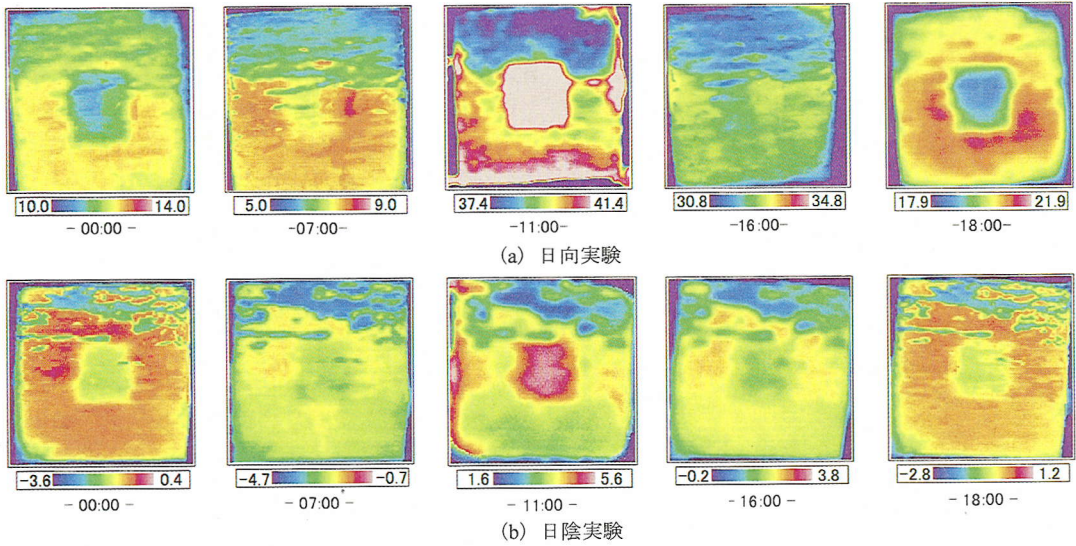


図-13 表面温度分布の経時変化 (CFRP シート 3 層)

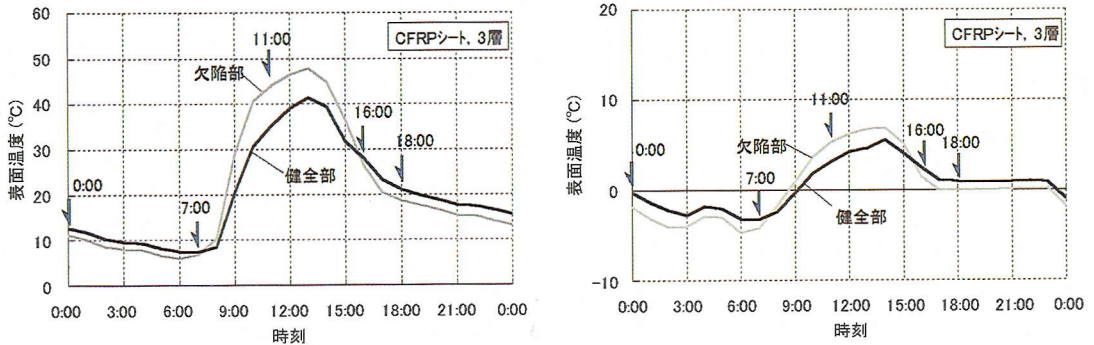


図-14 表面温度の経時変化，右：(a) 日向実験，左：(b) 日陰実験 (CFRP シート，3 層)

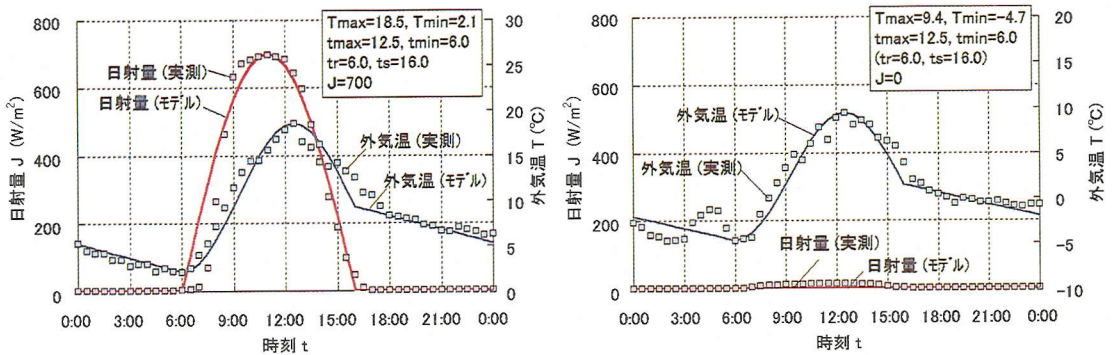


図-15 外気温および日射量の変動モデル，右：(a) 日向実験，左：(b) 日陰実験

は 0.94, AFRP シートは 0.64 の日射吸収率を与えた。屋外環境では、再現性のない外気温や日射量などの気象条件を因子として持つことになる。そこで、本研究のシミュレーションでは、より一般性を持たせるために図-15に示すような外気温 T および日射量 J の変動モデルを用いることとした。この両曲線

は式(2)から式(5)に基づき算定を行った^{13), 14)}。このうち、式(3)に示す日没から日の出までの外気温 T のモデルは、日没時外気温 $T(t_s)$ から日の出時外気温 $T(t_r)$ まで直線的に気温が低下するものとした。なお、図-15に示す実測値との比較から用いた変動モデルの妥当性が確認できる。

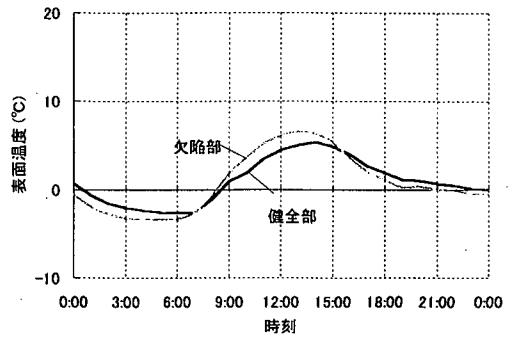
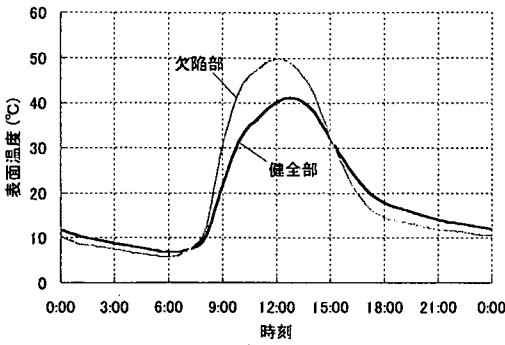


図-16 表面温度のシミュレーション結果，右：(a) 日向実験，左：(b) 日陰実験 (CFRP シート 3 層)

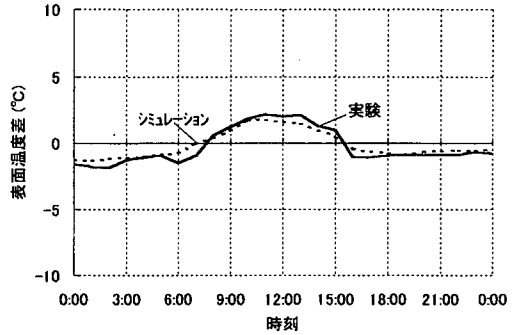
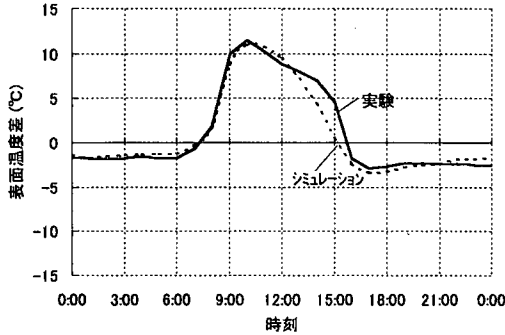


図-17 表面温度差の経時変化，右：(a) 日向実験，左：(b) 日陰実験 (CFRP シート，3 層)

$$T(t) = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \cos\left(\frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \pi\right) \quad (t_r \leq t \leq t_s) \quad (2)$$

$$T(t) = \frac{T(t_r) - T(t_s)}{(24 - t_s) + t_r} (t - t_s + a) + T(t_s) \quad (t_r > t, t < t_s) \quad (3)$$

ここに、 T_{\max} 、 t_{\max} ：最高外気温および時刻
 T_{\min} 、 t_{\min} ：最低外気温および時刻
 (=日の出時外気温 $T(t_r)$ および時刻 t_r)
 $T(t_s)$ 、 t_s ：日没時外気温および時刻
 a ： $t_r > t$ のとき=24、 $t < t_s$ のとき=0
 $(0 \leq t_{\max, \min, r, s} \leq 24, t_{\min} < t_{\max} < t_s)$

$$J(t) = J_{\max} \sin\left(\frac{t - t_r}{t_s - t_r} \pi\right) \quad (t_r \leq t \leq t_s) \quad (4)$$

$$J(t) = 0 \quad (t_r > t, t < t_s) \quad (5)$$

ここに J_{\max} ：最大日射量 [W/m^2]

また、対流に伴う熱伝達係数 α_c は、屋外環境では外部風により強制対流状態となるため屋内環境に代表される自然対流における熱伝達係数よりも大きくなることを考慮して以下のように求めた。すなわち、式(6)、(7)に示す簡易的なユルグスの強制対流

熱伝達係数算出式¹¹⁾より実験時の平均風速 2.5m/s から強制対流熱伝達係数 α_{cv} を $16.3W/m^2K$ と求めた。

$$\alpha_{cv} = 5.0 + 3.4 v \quad (v \leq 5) \quad (6)$$

$$\alpha_{cv} = 6.14 v^{0.78} \quad (v > 5) \quad (7)$$

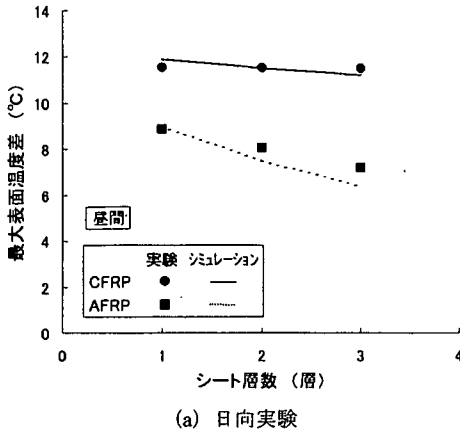
ここに、 α_{cv} ：強制対流熱伝達係数 [$kcal/m^2h^\circ C$]
 v ：外部風速 [m/s]

また、輻射に伴う熱伝達係数 α_r はほぼ $5.0W/m^2K$ 程度であることから、総合的な熱伝達係数 $\alpha_i (= \alpha_{cv} + \alpha_r)$ を $21.3W/m^2K$ と考えた。

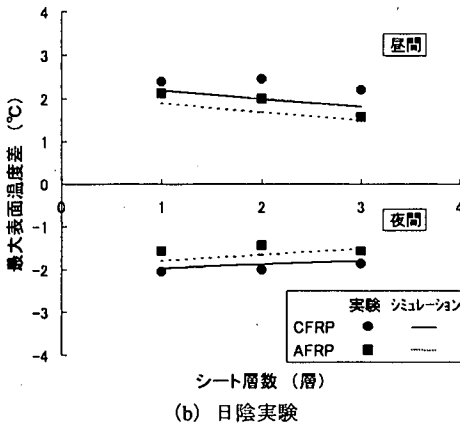
なお、解析では供試体の初期温度を $20^\circ C$ として、実験と同様に外気温の変動に慣らすための期間を 12 時間と設定した。解析の時間増分 Δt は 5 分として計 36 時間を行った。

b) シミュレーション結果および考察

図-16に日向実験および日陰実験の供試体の欠陥部および健全部の表面温度変化のシミュレーション結果を示す。図-14と同一の CFRP シート 3 層の結果である。シミュレーションの結果は、図-14に示す実測値とほぼ同様な値を示す。若干の相違点としては、欠陥部温度と健全部温度の曲線が交差する時刻が実際よりも 1 時間程度早まって表現される。こ



(a) 日向実験



(b) 日陰実験

図-18 最大表面温度差の比較

これは、14:00 から 18:00 の間における外気温が実測値 (図-11) と解析に用いた変動モデル (図-15) との間の若干の差異が影響しているものと思われる。

図-17に欠陥部と健全部との表面温度差の経時変化の実測値とシミュレーション結果との比較を示す。図から分かるように実験より得られた表面温度差のピーク時刻やその時の値またその傾向に至るまで正確にシミュレートできることが分かる。

図-18は、最大表面温度差の実験結果とシミュレーション結果との比較を行ったものである。(b)に示す日陰実験では、図-17(b)に示すように昼間と夜間における最大表面温度差がほぼ一致するため、昼間(正)と夜間(負)についてそれぞれの表面温度差の最大値を示した。図-18(a)に示す日向実験では、CFRPシートとAFRPシートの場合で最大表面温度差が大きく異なっているが、前述のようにCFRPシートとAFRPシートとの日射吸収率の違いの影響と考えられる。また、AFRPシートの場合はシート層数が増加するに従い表面温度差の低下が大きい。こ

れは、AFRPシートの熱伝導率に起因するものと思われる。そして、これらの傾向をシミュレーション結果は的確に表現しているといえよう。赤外線放射計による限界検知温度差を考慮すると、日射の影響を受ける環境ではシートの層数が本研究の範囲を超えても欠陥の検出は可能であることが分かる。

図-18(b)に日陰実験における比較を示す。図から分かるように、日射の影響がない環境下では昼間と夜間との最大表面温度差はほぼ同値を示す。また、実験およびシミュレーション結果から、シート層数が増加するに従い表面温度差が低下すること、FRPシートの熱物性の違いからAFRPシートがCFRPシートより温度差が生じにくい傾向があることが確認された。日向実験と同様に、日陰環境下においても本研究の範囲を超えるシート層数の場合も検出可能であるといえよう。

4. 結論

赤外線サーモグラフィ法によるFRPシートとコンクリートとの間に存在する欠陥検出に関する各種実験をFRPシートの種類、層数および欠陥厚さを変化させて行うとともに、FEMを用いた熱伝導シミュレーション手法を検討した。本研究の範囲から次のことがいえよう。

- (1) 供試体の加熱あるいは冷却により雰囲気温度との差を設けることにより、FRPシートの種類をCFRPシートおよびAFRPシート、FRPシート層数を1~3層、欠陥厚さを1~3mmに変化させる全ての組合せにおいて測定開始後2時間の時点において欠陥検出は可能である。赤外線放射計の検出能力を考慮すると2時間を超えても検出可能である。
- (2) 上記において、CFRPシートの方がAFRPシートに比べ欠陥検出が容易である。また、FRPシート層数の増加に伴い欠陥部と健全部との温度差が小さくなるが、層数の増加に伴う温度差の低下は、AFRPシートの方が大きい。以上の現象は、いずれもCFRPシートの熱伝導率がAFRPシートのそれに比べて大きいことに起因するものと思われる。一方、欠陥部の厚さが大きくなると熱遮断性が大きくなるため、欠陥部と健全部との温度差が増加し欠陥検出は容易となる。
- (3) CFRPシートおよびAFRPシートを用いて実験の水準の組合せの中で最も検出しにくい層数3層、欠陥厚さ1mmの場合においても、外気温の日較差や日射などの輻射熱により欠陥の検出は可能である。この場合、欠陥部は昼間においては健全部より

温度が高い部分として検出され、夜間においては逆に温度の低い部分として検出される。なお、温度差は、欠陥検出を行う時刻により変化し、朝方および夕方に両者に温度差が無くなり欠陥検出が困難となる時間帯が生じる。また、屋外においても同様にAFRPシートに比べCFRPシートの方が欠陥検出が容易である。これは、熱伝導率の相異とともに、表面色に起因する日射吸収率の相異も影響しているものと考えられる。

(4) 非定常熱伝導 FEM 解析により行ったシミュレーションに対して、各実験によって得られた温度分布との比較および検討を行った。その結果、本研究のシミュレーション手法により、各実験の結果を十分に再現できる。

謝辞:本研究を進めるにあたり有意義な御示唆を頂いた茨城大学の呉智深助教授および連続繊維シート等の実験材料の提供を頂いた日鉄コンポジット(株)の小林朗氏および吉澤弘之氏に深謝する次第である。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(代表:呉智深, 国際学術研究:09044129)によって実施されたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 込山貴士, 中野米蔵, 谷川恭雄: サーモグラフィ法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.
- 2) 山田和夫, 桃木佳子: サーモグラフィ法を適用した外壁タイルの剥離評価に関する解析的研究, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.266-271, 1993.
- 3) 河辺伸二, 岡島達雄, 武藤正樹: サーモグラフィ法による内部欠陥検出の可能性 左官モルタル塗りの施工管理に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 467 号, pp.27-33, 1995.
- 4) 渡辺正, 魚本健人: 型わく面の熱赤外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.
- 5) 岩波光保, 鎌田敏郎, 長瀧重義, 大即信明: 赤外線サーモグラフィ法による鋼・コンクリート間の空隙評価, 非破壊検査, 第 47 巻, 11 号, pp.825-829, 1998.
- 6) 岩波光保, 松本充生, 富田芳男, 大即信明: 非破壊試験法による連続繊維シート補強コンクリートの破壊進展過程の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.155-160, 1998.
- 7) 岡本芳三, 石橋英人, 稲垣照美, 福澤公夫, 沼尾達弥: 熱イメージ法による物体内部不均質空間の検出とそのモデル解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 60 巻, 573 号, pp.238-244, 1994.
- 8) Schneider, U.: コンクリートの熱的性質, 技報堂出版, 1983.
- 9) 国立天文台: 理科年表, 平成 11 年版, 丸善, 1998.
- 10) 林毅: 複合材料工学, 日科技連出版社, 1971.
- 11) 田中俊六, 武田仁, 足立哲夫, 土屋喬雄: 建築環境工学 改訂版, 井上書院, 1994.
- 12) 山田和夫, 桃木昌子, 桃木佳子: サーモグラフィ法を適用した非破壊検査結果に及ぼす測定表面色の影響に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.541-545, 1995.
- 13) 日本建築学会: 建築設計資料集成 1 環境, 丸善, 1978.
- 14) 沼尾達弥, 福澤公夫, 高根沢利夫, 岡本芳三: 内部欠陥を有するコンクリート表面の屋外における放射温度分布, サーモグラフィ法に関するコンファレンス論文集, pp.5-8, 1992.

(1999. 11. 22 受付)

DETECTION OF DEFECTS BETWEEN FRP SHEET AND CONCRETE BY INFRARED THERMOGRAPHY METHOD

Masakazu MITSUI, Kimio FUKUZAWA and Tatsuya NUMAO

Delamination between FRP sheets and concrete, which might be caused by inappropriate works or deterioration due to a time elapse, decreases bond strength between FRP sheets and concrete, and also decreases the strength of the structural element reinforced with FRP sheets. Therefore, these defects must be accurately detected and be properly repaired. This paper concerns the detection of defects between FRP sheets and concrete by measuring thermal distribution of the surface using an infrared thermography method. It is confirmed from the basic experiments using heated or cooled specimens that the detection of defects is influenced by the type and number of FRP sheets, as well as the thickness of defects. It is shown from experiments in the open air that defects can be detected from the difference between specimens and circumferential air in both clear and cloudy weather. Moreover, a non-steady heat transfer analysis by FEM is conducted and it is confirmed that the analysis can well simulate the experimental results.