

サーモグラフィによる CFRP 補強の損傷検知精度の検証

東北大学 非会員 ○櫻田 尚大
 東北大学 正会員 運上 茂樹
 東北大学 非会員 顧 建成

1. はじめに

古い時代に建設された構造物は、現在のレベルから見ると相対的に耐震性が低く、その弱点を補うための一つの方法として繊維シート巻立てにより補強が行われてきた。しかし、長い年月が経つ間に繊維シートと構造物間に剥離が生じる事例も見られ、剥離が生じるとその補強によって想定していた性能が低下することになる。そこで、繊維シート巻立て部の健全性についての簡便な点検を可能にすべく、サーモグラフィを使用した検査法が提案されている¹⁾。本論では、繊維材の剥離が発生した部位を対象に、サーモグラフィによる表面の温度変化と打音検査との比較によりその検知精度を検討した結果を報告する。さらに、剥離によって発生し得る温度変化を解析的にシミュレーションし、剥離位置の特定可能性や剥離を特定するにあたり必要な条件および今後の課題について検討した。

2. 現場調査

仙台市内にある鉄筋コンクリート橋脚を対象に、温度測定及び打音検査を行った。対象橋脚の繊維材の巻立て範囲は幅 22m、高さ 2.1m である。炭素繊維シート (CFRP) が 2 層 (縦及び横方向) 貼られており、その上にモルタルによる保護層 10mm が施されている。表-1 にサーモグラフィの撮影条件を示す。打音検査については、繊維材巻立て範囲を 1cm ピッチで分割し、その分割範囲に対し 2 回ずつの打音を聞きとり、コンクリート部の打音と比較して明らかに異なる場合に剥離が発生していると判断した。

表-1 撮影条件

撮影日時	2018年11月14日14時
使用機材	FLIR T400
画像解像度	320×240
天気	晴れ
日射	無し(上部構造により遮断)
気温	14.3℃

3. 現場調査結果および考察

写真-1 に撮影画像の一例を示す。剥離によって発生した空隙の断熱効果により周辺温度より高くなる部分が剥離していると推定することができ、例えば右上の三角形部分が該当する。写真-2 は、写真-1 の部分に対する打音検査結果を示したものである。ここで 10cm ピッチ毎に剥離範囲を示している。青いマークをしたものが剥離部で、黄色のマークは若干異なる音が出た部分である。これらから、右上の部分についてはサーモグラフィによって剥離の検知が出来たことがわかる。なお、写真-1 に示す赤丸部分については打音検査では明らかな剥離が検出されたが、サーモグラフィでは明確な温度差(写真-1 内に各領域の平均的な温度を示す)として検出できていない。これについては後述する。

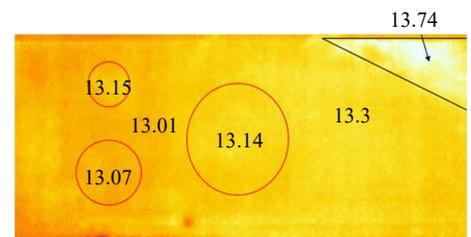


写真-1 撮影結果

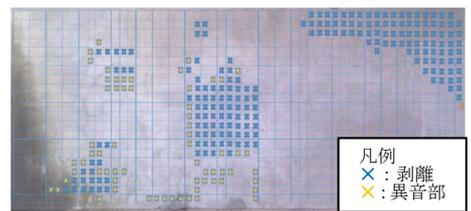


写真-2 打音検査結果

サーモグラフィの検知精度を検証するために、剥離していると判定するための温度範囲を決める式(1)を考案した。式(1)における係数 0.3 は今回の実験から最もの中率が高くなるように設定したものである。

$$(\text{剥離予想部温度}) \geq (\text{平均温度}) + (\text{シート内最大温度} - \text{平均温度}) \times 0.3 \quad (1)$$

これにより算出された的中率は 81% となる。的中率を下げた要因としては、写真-2 のようにシートの赤丸部分

キーワード：非破壊検査法，サーモグラフィ，CFRP，耐震補強，鉄筋コンクリート橋脚

連絡先：〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学工学部建築・社会環境工学科

構造設計学研究室 022-795-7453

の剥離を温度差から検知できなかったことが挙げられる。この要因としては剥離厚や、端部の剥離部と異なり外気の侵入がなかったことが考えられる。

4. 再現解析

表-2 熱物性値

今回は剥離厚に着目し、写真-1,2の撮影範囲を対象としたモデルの作成し、それにより内部の剥離状況の把握とサーモグラフィでの検証可能範囲について検討した。解析ソフトは（公社）日本コンクリート工学会（JCI）のFEMソフトJCMAC3を使用した。まず、簡易的な要素モデル（一面に空隙（70×70cm）を模擬した一辺150cmの立方体モデル）を作成し、剥離厚の変化による表面温度の変化について解析した。その後、端部の剥離厚は実際に計測した値（1mm）を与え、その他の剥離部については、要素モデルにより検討した剥離厚を仮定した。橋脚モデルは橋脚の片面の1/4を対象として、境界条件に影響を与えないような要素区間を追加している。解析をするにあたり入力した熱物性値を表-2に示す。外気温としては、1時間刻みの1週間の実測値を与えている。熱伝達係数 α_r は基準を5(W/m²K)として、平均風速 v (m/s)から以下のユルゲスの強制対流熱伝達係数算出式(2)を用いて求めた強制対流熱伝達係数 α_{cv} を考慮した⁴⁾。風速は、実測された値を使用し、はじめの6日間は日平均風速を、最終日は1時間ごとの風速を与えた。

材料	熱伝導率 (W/mk)	比熱 (kJ/kgK)	密度 (kg/m ³)
コンクリート ²⁾	1.6	0.88	2300
CFRP ³⁾	18	1.39	1268
モルタル ²⁾	1.5	0.8	2000
空気	0.025	1.0	1.2

$$\begin{cases} \alpha_{cv} = 5.0 + 3.4v & (v \leq 5.0) \\ \alpha_{cv} = 6.14v^{0.78} & (v > 5) \end{cases} \quad (2)$$

5. 解析結果および考察

まず、11月の外気温を与えた要素モデルから、剥離厚0.1mm毎に表面温度に約0.05°Cの差が生じることが分かった。このことと写真-1から、橋脚モデルのシートの赤丸部分温度差は0.06°C~0.14°Cであり、剥離幅は0.3mm以下で、付着していないがほぼ接触している状態であると予想される。図-1,2は調査を実施した11月及び8月のある1週間の外気温を与えた際の予想温度分布を示している。解析の結果、端部の三角形部分はどちらも健全部に対し0.5°C以上の差が出ており、気温によらず剥離の検出がほぼ可能であると考えられる。8月であればシート赤丸部分の温度差は0.3°Cまで上昇し、検出できる可能性があることが分かった。

6. まとめ

本研究の結果を以下にまとめた。

- (1) 保護層を有するCFRPにより耐震補強された橋脚において、熱源による加熱や直射がない状況でもサーモグラフィによって剥離欠陥が検出できた。
- (2) 剥離厚によって断熱効果は異なる。剥離厚が小さくても多少の温度変化はみられるが、0.3mm以下の剥離特定は難しいが、気温の上昇により検出可能性が高まることが分かった。

参考文献

- 1) 三井雅一 他：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，土木学会論文集，No.655，V-48，pp107-117，2000。
- 2) 日本建築学会編：建築学便覧I，丸善，1980。
- 3) 林毅：複合材料工学，日科技連出版社，1971。
- 4) 田中俊六 他：建築環境工学，改訂版，井上書院，1994。

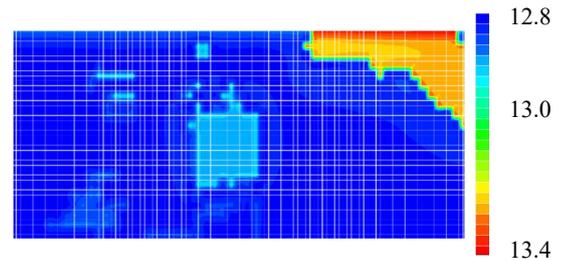


図-1 橋脚モデルの11月14日
14時の予想温度分布

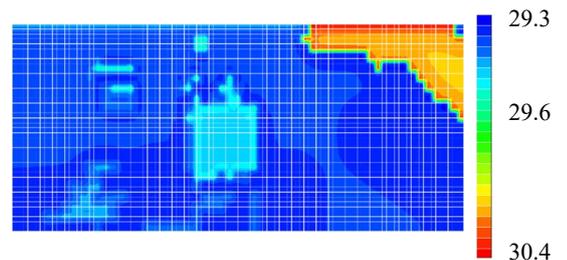


図-2 橋脚モデルの8月4日
13時の予想温度分布