

赤外線技術による構造物点検の精度向上に関する研究：米国での研究成果報告

西日本高速道路(株) 正会員 ○日浅 崇平

1. はじめに

米国連邦法では全ての橋梁にて2年以内に1度の頻度での遠方目視点検が義務付けられているのみであり、近接目視及び打音点検は各州政府の判断にて、橋梁の重要度や健全度、交通量などによって実施の有無、内容、頻度などが決められている。米国の道路橋点検においては、路面点検が最優先事項となっている。これは、橋梁路面の大半(2015年時点で93%(343/369 km²))がコンクリートであり、直に交通に曝され他の部材よりも劣化が早いためである。しかし、従来の点検手法では非常に時間がかかる、点検者が危険に晒される、判定が主観的であるといった課題がある。そのような背景の下、ひび割れ等の表面の損傷を検出する画像及びレーザーセンサ技術や、内部の浮きや剥離等を検出するインパクトエコー、GPR、超音波表面波、電気抵抗法、赤外線などの複数の非破壊検査が開発されてきたが、スタンダードな方法は未だ確立されていない状況である。本報文は、著者が米国セントラルフロリダ大学(University of Central Florida:通称UCF)へ留学・研修中に赤外線技術による橋梁点検の普及・標準化を目的として、精度や信頼性向上のための使用条件、能力、限界、データの解釈方法等を明らかにするために行ってきた研究内容¹⁾⁻⁴⁾について取り纏めたものである。

2. 赤外線技術の課題と検証方法

赤外線を用いた橋梁点検に関する既存の研究は、浮き・剥離等を検出可能か否かのみで、検出可能という物もあれば不可能という物もあるという状況であ

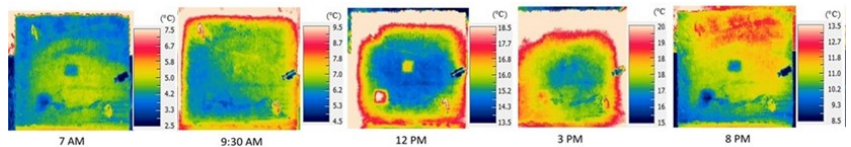


図1. データ取得時間帯の違いによる赤外線画像事例(中央と左下が損傷部)

った。これは赤外線法の使用条件等が明らかにされず、異なる条件下で使用したためだと考えられた。既存の文献等を調査し、赤外線による点検へ影響を及ぼす課題を次の通り抽出し、実験や解析を通して明らかにした。①損傷サイズ(各研究で異なるサイズの損傷を用い、異なる検出可能深さ(3~15 cmのばらつき)が報告)、②データ収集時間(昼間の計測が一般的だが、図1のように昼間はノイズが多く、早朝・夜間の方がクリアという報告も有り)、③カメラスペック(安価な非冷却型が一般的)、④データ収集スピード(米国の基準(ASTM)では、データ収集速度は最高16 km/hだが高速走行も可能か?)、⑤データ解析及び解釈方法(赤外画像の色の違いで判断)。

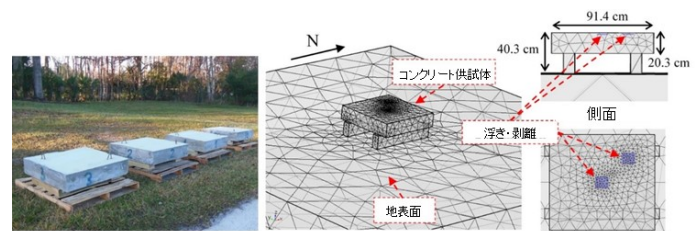


図2. 実験で用いた供試体と再現 FEM モデル

非破壊検査の実験検証の課題として、多数の供試体を製作することが困難(1つ1つが大きい)な点がある。それを解決するため、人工的な損傷を有した供試体の実験時の温度状況を再現した FEM モデルを構築し、赤外線技術に関する課題の検証を行った(図2)。また、カメラスペックの比較として、3種類のカメラスペックを車両に搭載し、複数の非破壊検査技術比較試験を行った橋梁路面を走行しながら同時に撮影することで、カメラの違いや他の技術との比較検証を行った。

3. 検証結果

FEM 解析の再現性検証は、赤外線法で重要となる損傷部と健全部の温度差を実験結果と比較した。FEM 及び3種類のカメラスペックの温度差の差は各赤外線カメラの精度(最小で $\pm 1^{\circ}\text{C}$ or $\pm 1\%$)よりも低い結果となり、モデルの再現性が確認できた(図3)。また、赤外線画像からは損傷が検出できなかった供試体の結果から、凡そ $\pm 0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ の範囲以上の温度差が赤外線法による損傷検出可能温度差であることが分かった。これにより、FEM 解析によって赤外線による損傷検出可能条件が実験無しに検証可能となった。

キーワード 非破壊検査、赤外線法、IRT、橋梁点検

連絡先 〒567-0871 西日本高速道路(株)関西支社 建設事業部 建設第一課 TEL06-6344-99052

損傷の深さを通常の鉄筋かぶり程度 $t=5.08\text{cm}$ (2in)としたこの FEM モデルを用い、厚さ(T)を $0.1\text{cm}\sim 10\text{cm}$ 、面積(A)を $100\text{cm}^2\sim 900\text{cm}^2$ 、体積(V)を $10\text{cm}^3\sim 1000\text{cm}^3$ と変化させることで、損傷サイズの影響を検証した。面積が大きくなるにつれ温度差も大きくなること、面積が大きくなるにつれ厚さの影響も大きくなっていくこと (図 4)、体積は大きな影響がないこと (図 5) が明らかとなった。また、面積が小さい (10cm 未満) と $2\sim 3\text{cm}$ 程の深さまでしか検出できないという結果となり、実験結果と同様の結果が得られた。

赤外線データ収集の望ましい時間帯についても、実験と FEM 解析を用いて検証した。午前7時から深夜0時まで30分から1時間間隔でデータ取得を行った (図 6)。その結果、損傷部の温度が健全部よりも低くなる冷却サイクルとその逆の加熱サイクルの切替期間 (朝:1時間程度、夕方:2時間程度) については赤外線法によって損傷の検出ができなくなることが分かり (図 1 の 9:30AM、3PM)、少なくとも解析によって得られたサイクルの切替前後1時間 (図 6 黄色着所色部) は赤外線の利用を避けるべきという事が分かった。また、昼間の加熱サイクル中に境界部分の温度変化が大きいことから、太陽照射の影響が顕著であり誤検出が増える可能性があるという事が判明し、太陽光の影響が少なくサイクル時間も長い夜間が最も赤外線調査に適しているという結論が得られた。

また、過去に行われた他の非破壊検査試験との実橋での結果比較について、精度の高い3種類 (インパクトエコー、赤外線、チェーンドラッグ) と3台のカメラを比較したところ、冷却型カメラを用いた赤外線法では、高速走行でデータ取得をしても精度が高いことが分かった (図 7)。非冷却型カメラはシャッタースピードが遅いため、高速走行時には画像のブレを生じさせたり、反射した温度を計測したりと誤計測する可能性があることが分かり、冷却型赤外線カメラが橋梁点検 (特に高速でのデータ取得) に最も適しているということが分かった。

4. おわりに

本報文で述べた通り、赤外線を用いた橋梁点検は、損傷サイズやデータ収集時間、カメラスペック等の影響を大きく受けることが分かった。しかし、赤外線の使用条件や能力、制限等を十分に把握し、適切な条件下で使用することで非常に効率的に精度が高い橋梁点検が可能となると考えられる。なお、本研究は米国の主にフロリダ州の環境下での研究結果のため、日本の異なる環境下での最適な使用条件等を検証する必要がある。

参考文献

- 1) Hiasa, S., Birgul, R., Catbas, F. N. : Effect of Defect Size on Subsurface Defect Detectability and Defect Depth Estimation for Concrete Structures by Infrared Thermography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 36, No. 3, 2017.
- 2) Hiasa, Shuhei, Birgul, Recep, Catbas, F. Necati : Investigation of effective utilization of infrared thermography (IRT) through advanced finite element modeling, *Construction and Building Materials*, Vol. 150, pp. 295-309, 2017.
- 3) Hiasa, Shuhei, Necati Catbas, F., Matsumoto, Masato, Mitani, Koji : Considerations and Issues in the Utilization of Infrared Thermography for Concrete Bridge Inspection at Normal Driving Speeds, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 22, No. 11, pp. 04017101, 2017.
- 4) Hiasa, Shuhei, Birgul, Recep, Matsumoto, Masato, Necati Catbas, F. : Experimental and Numerical Studies for Suitable Infrared Thermography Implementation on Concrete Bridge Decks, *Measurement*, 2018.

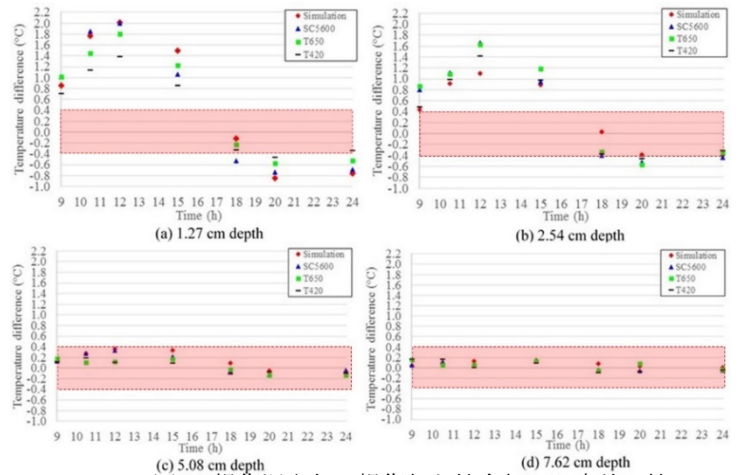


図 3. 損傷深さ毎の損傷部と健全部の温度差比較

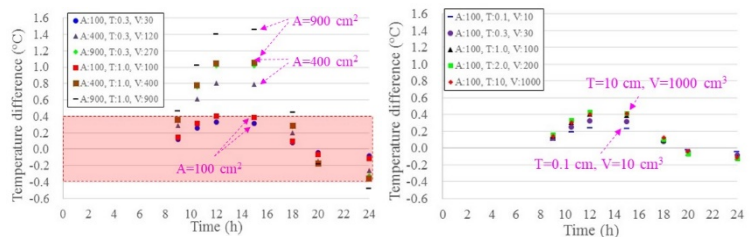


図 4. 損傷面積の影響

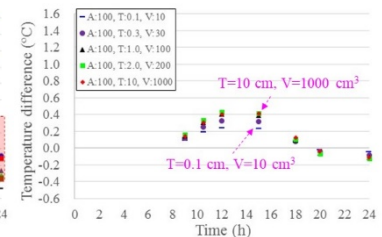


図 5. 損傷厚さ・体積の影響

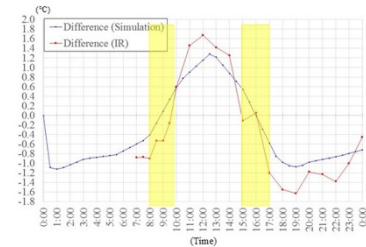


図 6. 実験と解析による温度差比

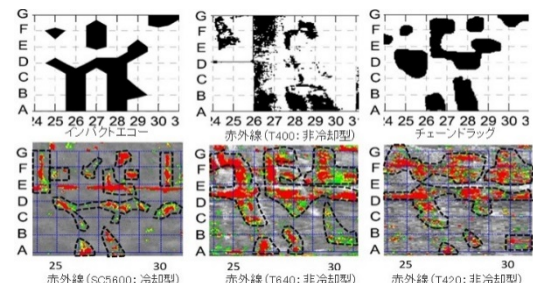


図 7. 実橋での比較結果