

温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による裏面亀裂の検出

滋賀県立大学 学生会員 ○上西 広粋 滋賀県立大学 正会員 和泉 遊以  
 神戸大学 正会員 阪上 隆英 本州四国連絡高速道路 正会員 溝上 善昭  
 本州四国連絡高速道路 正会員 森山 彰

1. 緒言

道路橋鋼床版におけるデッキプレートと U リブ間の溶接部では、車両通行時の繰り返し荷重を直接受けるため、たびたび疲労亀裂が発生する。このような疲労亀裂を検出するため、低コストかつ効率的な非破壊検査法として、温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法（以下「温度ギャップ法」という）を提案した<sup>(1)</sup>。これは、赤外線サーモグラフィを用いて、亀裂の断熱効果により生じる温度差（温度ギャップ）を検知し、亀裂を検出する手法である。過去の研究により、溶接ビード貫通亀裂の検出に対する温度ギャップ法の有効性が示され、現場での実用に至った。また昨年度の研究で、温度ギャップ法の適用範囲を亀裂進展の初期段階である非貫通のビード亀裂（裏面亀裂）に広げることを目的とした検討を行った<sup>(2)</sup>。この研究では、亀裂部を完全断熱とした数値シミュレーションおよびスリット試験片での実験を行い、温度ギャップ法が裏面亀裂の検出・評価にある程度有効であることが明らかになった。しかし、実際の疲労亀裂では亀裂面どうしの接触部での熱伝導により、温度ギャップが小さくなる可能性がある。本報では、裏面亀裂に対する温度ギャップ法の有効性を亀裂の開口幅に着目して実験的に検討した結果を示す。

2. 実験方法

疲労試験により実際の亀裂を導入した試験片に対して、温度ギャップ法による亀裂検出試験を行った。試験片の材質はSS400であり、寸法は300mm×60mm×10mmである。亀裂を導入するため、試験片の中央には直径1mm、深さ1mmのドリル穴を3点連結させた切欠きを作成した。疲労試験には、油圧サーボ式疲労試験機を用い、支点間距離280mm、荷重間距離100mmの4点曲げにより、最大荷重7.8kN、応力比0.1の繰り返し荷重を与え、切欠き部から半楕円亀裂を発生・進展させた。試験片は、表1に示すように、亀裂寸法の異なる4つを用意した。ここで、亀裂最大開口幅は、表面の亀裂開口幅の最大値を示している。亀裂深さは亀裂深度計（日本マテック、RMG4015）により測定した。また、亀裂開口幅の影響について調べるため、試験片1に4点曲げによる静荷重を加えて塑性変形させ、表2に示すように亀裂開口幅を変化させた。

表1 各試験片の亀裂寸法

試験片	亀裂長さ 2a[mm]	亀裂最大 深さ d <sub>max</sub> [mm]	亀裂最大 開口幅 Δ <sub>max</sub> [μm]
1	40	6.4	59
2	30	5.4	25
3	28	5.4	8
4	27	4.6	76

表2 亀裂開口幅の変化（試験片1）

試験片	静荷重 L [kN]	亀裂最大開口幅 Δ <sub>max</sub> [μm]
1-①	初期状態	55
1-②	-6.1	80
1-③	-6.7	102
1-④	-7.8	178
1-⑤	-8.8	209

温度ギャップ法による亀裂検出試験の概要を図1に示す。実験では試験片の片端をハロゲンランプにより加熱、もう一端を保冷材により冷却し、試験片内に亀裂面と直交する方向に温度勾配を与えた。温度勾配の大きさは0.04°C/mm（4月～9月のデッキプレートとUリブ間の溶接部に生じる値に相当<sup>(1)</sup>）とした。試験片の亀裂裏面側の温度分布を赤外線サーモグラフィ（FLIR System, Phoenix, 温度分解能25mK）により測定し、亀裂による温度ギャップの検出を試みた。

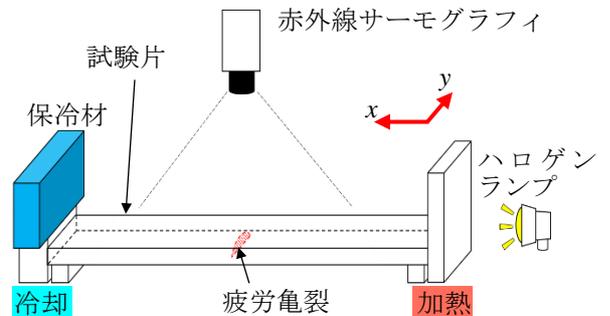


図1 温度ギャップ法による亀裂検出試験の概要

キーワード 赤外線サーモグラフィ, 非破壊検査, 温度ギャップ法, 裏面亀裂, 鋼床版  
 連絡先 〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町2500 滋賀県立大学 TEL 0749-28-8200

3. 実験結果

亀裂部では、亀裂直交方向 ( $x$  方向) に急激な温度差が生じるため、同方向の温度勾配が健全部位よりも大きくなると考えられる。そこで本研究では、温度勾配の分布から亀裂による温度ギャップを評価する。図 2(a)~(d)に、試験片 1~4 で得られた亀裂直交方向 ( $x$  方向) の温度勾配分布を示す。これらには、ノイズ改善のために  $9 \times 9$  の空間平均処理を行っている。図より、試験片 1, 2 および 4 の結果において、試験片中央の亀裂部 ( $x=150\text{mm}$ ) で温度勾配のピークが確認された。この温度勾配のピークは、裏面の亀裂による断熱効果により現れたものであると考えられ、温度ギャップ法により裏面亀裂の検出が十分に可能であることが示された。また、亀裂深さが  $5.4\text{mm}$  および  $4.6\text{mm}$  の試験片 2 および 4 で、それぞれ温度ギャップが確認できたことから、板厚の  $1/2$  程度の深さの亀裂に対しても、温度ギャップ法が有効であることがわかった。一方、図 2(c)の試験片 3 では、亀裂長さや亀裂最大深さが試験片 2 と同程度であるにもかかわらず、温度ギャップを確認することが出来なかった。これは、試験片 3 は試験片 2 と比べて亀裂の開口幅が非常に小さく、亀裂面間で熱伝導が生じたことが原因であると考えられる。

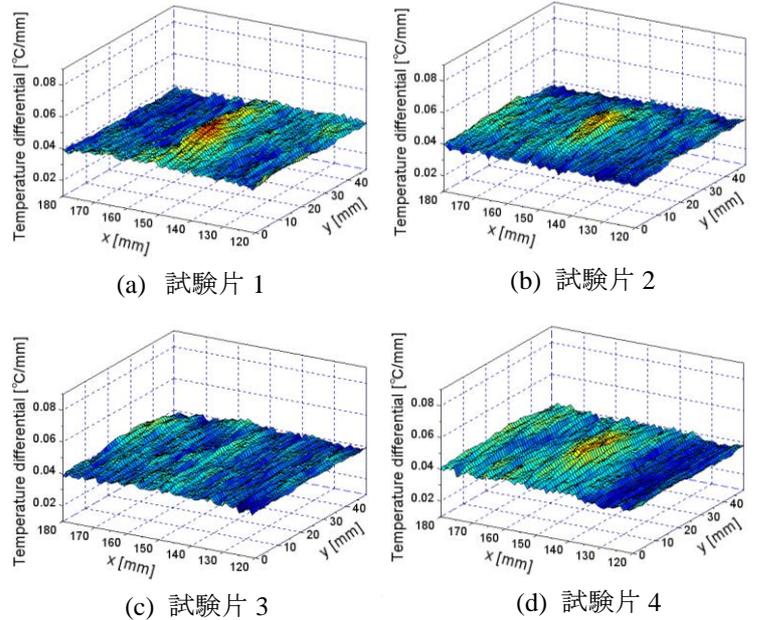


図 2  $x$  方向温度勾配分布

図 3 に試験片 1 の①~⑤で得られた亀裂開口幅と温度勾配ピーク (温度勾配分布の最大値) の関係を示す。図 3 には比較のため、試験片 1 と同じ亀裂深さ分布のスリット (完全断熱) を持つモデルでの FEM 解析により得られたピーク値を併記している。この結果から、亀裂最大開口幅が  $100\mu\text{m}$  以下では、亀裂開口幅が大きくなるにつれてピーク値が大きくなる傾向を示しているが、亀裂最大開口幅が  $100\mu\text{m}$  以上の範囲では、亀裂最大開口幅が大きくなってピーク値はあまり変化しておらず、 $0.05^\circ\text{C}/\text{mm}$  付近で頭打ちになっている。解析結果でも、ピーク値は  $0.0514^\circ\text{C}/\text{mm}$  を示していることから、亀裂最大開口幅がこれ以上大きくなってピーク値は変化しないと考えられる。このことから、亀裂がある程度開口していれば、それ以上に開口幅が大きくなって温度ギャップに大きな変化は生じないことがわかった。

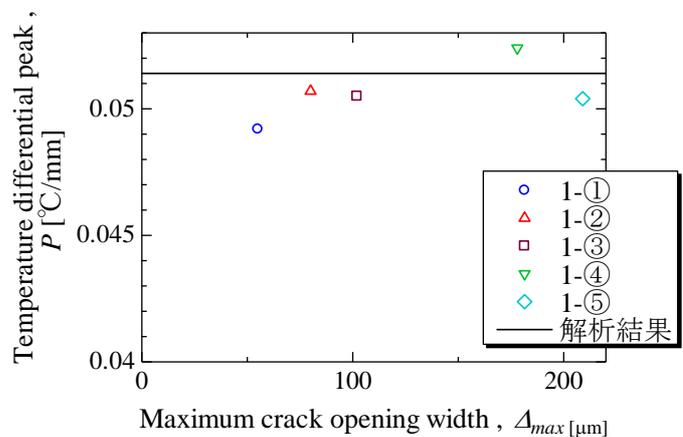


図 3 亀裂最大開口幅と温度勾配ピークの関係

4. 結言

温度ギャップ法により、裏面亀裂の検出が可能であることがわかった。しかし、亀裂開口幅がおよそ  $10\mu\text{m}$  以下の比較的閉じた亀裂では、断熱効果が小さくなり、温度ギャップが現れない場合があることが確認された。また、亀裂がある程度開口していれば、温度ギャップは亀裂開口幅によらず、ほぼ一定になることがわかった。

参考文献

(1)溝上善昭, 小林義弘, 和泉遊以, 阪上隆英, 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレート-U リブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出, 鋼構造論文集, vol.22, No.87 号 (2015), pp.47-56.  
 (2)和泉遊以, 阪上隆英, 溝上善昭, 森山彰, 三宮広之, 温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による裏面亀裂の検出・評価, 第 71 回土木学会年次学術講演会講演論文集 (2016), pp.1419-1420.