

## 温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による非貫通ビード亀裂の形状評価

滋賀県立大学  
神戸大学  
本州四国連絡高速道路

学生会員 ○吉川 知秀  
正会員 阪上 隆英  
正会員 溝上 善昭

滋賀県立大学  
本州四国連絡高速道路

正会員 和泉 遊以  
正会員 有馬 敬育

## 1. 緒言

鋼床版ビード亀裂の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）が開発された<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）を検知して、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た。また、平板の亀裂試験片を用いた実験室レベルの検討により、非貫通亀裂の検出に対しても本手法が有効であることが明らかになった<sup>(2)</sup>。本研究では、温度ギャップ法を用いた鋼床版非貫通ビード亀裂の形状評価法を確立することを最終目的とし、その基礎検討として、亀裂を模擬したスリットを有する平板試験片を用いた温度ギャップ計測実験および FEM 解析を行った。

## 2. 亀裂形状評価法

亀裂部では、亀裂の断熱効果により温度のギャップが現れるため、温度勾配が局部的に大きくなる。そこで、亀裂部の温度勾配と残存のど厚の関係有限要素法による数値解析により調査した。解析モデルの概要を図 1 に示す。解析モデルの寸法は 300mm×200mm×10mm とし、モデル中央部には深さの異なる幅 1mm のスリットを導入した。材質は鋼（熱伝導率 51.6W/m・K）とし、モデル両端の温度を変更して、試験片の長手方向（x 方向）の温度勾配を変化させた。導入した温度勾配は 0.039K/mm, 0.026K/mm, 0.013K/mm であり、このうち 0.026K/mm は、実際の鋼床版で 4~8 月の日中に生じる温度勾配の最小値に相当する<sup>(1)</sup>。解析には NX-Nastran を使い、定常熱伝導解析を行った。導入した温度勾配が異なる場合、同じ残存のど厚においても、亀裂部に現れる温度勾配の値（以下、

ピーク値とする）は変化する。そこで亀裂の影響を受けない健全部の温度勾配でピーク値を除いて、ピーク値の基準化を行った。基準化したピーク値と残存のど厚の関係を図 2 に示す。図より、基準化したピーク値と残存のど厚に相関があることがわかる。本手法では、このピーク値から、亀裂部の残存のど厚を求めて亀裂形状を推定する。

## 3. 提案した亀裂形状評価法の有効性検討

実験結果および FEM 解析結果に対して提案する亀裂形状評価法を適用し、同手法の有効性を検討する。実験に用いた試験片の概要を図 3 に示す。試験片の材質は SS400 であり、寸法は 300mm×60mm×10mm である。試験片中央部には、放電加工により幅 1mm の直線形状および半楕円形状のスリットをそれぞれ導入した。導入したスリットの寸法を表 1 に示す。実験は図 4 に示すように、周囲からの反射防止のための囲いを設置し、試験片の端部を加熱、冷却し、亀裂に対して直交する方向に温度勾配を与えた。温度勾配の大きさは、半楕円形状スリットの試験片

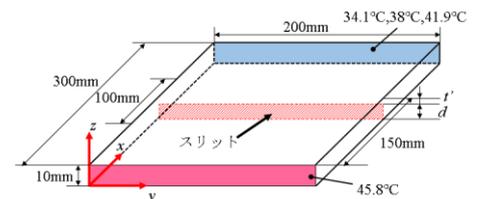


図 1 FEM 解析モデルの概要

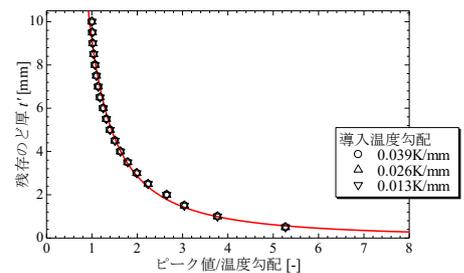


図 2 基準化したピーク値と残存のど厚の関係

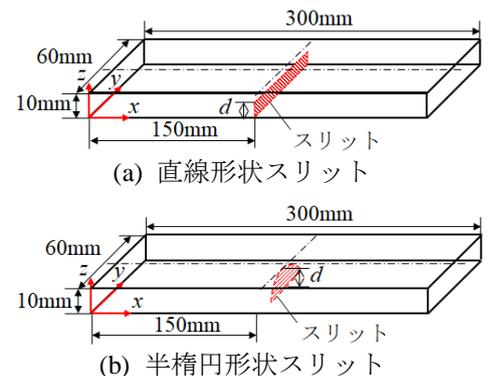


図 3 試験片の概要

キーワード 赤外線サーモグラフィ, 温度ギャップ法, 鋼床版, ビード亀裂, 非貫通亀裂

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

表1 スリット寸法

導入形状	半楕円	直線
スリット 深さ $d$ [mm]	9.0	5.5, 6.0, 7.0, 8.0
スリット 長さ $2a$ [mm]	実験: 30.1, 45 数値解析: 30.1, 45, 60, 80, 100, 120	60

では 0.04K/mm とし、直線形状スリットの試験片では 0.02K/mm～0.08K/mm とした。試験片スリット開口部の裏面の温度分布を赤外線サーモグラフィにより計測した。赤外線サーモグラフィは温度分解能 25mK の FLIR System 社製 Phoenix を用い、計測時の撮影解像度は 1mm/pixel とした。また、温度測定面には赤外線放射率の向上化・均一化のための黒色塗料を塗布した。さらに、ノイズ低減のため、温度分布に対して空間平均処理 (3×3pixels) を行った。

有限要素法による数値解析では、解析モデル中央部に幅 1mm の半楕円形状および直線形状のスリットをそれぞれ導入した。スリット寸法は表 1 に示した通りであり、スリット長さに応じて解析モデルの幅を変化させた。解析モデルのメッシュサイズは亀裂周辺を 1mm とし、解析に導入した温度勾配は実験と同様である。

提案した形状評価方法による実験および数値解析に対する亀裂形状の推定結果を図 5 に示す。図の (a) および (b) は、それぞれ直線形状スリットの残存のど厚 3mm、温度勾配 0.04K/mm の場合、および半楕円形状スリットの亀裂深さ 9mm、き裂長さ 30.1mm、温度勾配 0.04K/mm の場合の結果である。直線形状スリットでは、実験および数値解析による推定結果と実際の形状に大きな差はなく、これは導入する温度勾配が異なる場合 (結果は省略) でも同様の傾向となった。一方、半楕円形状スリットでは、実験と数値解析による推定結果は概ね一致しているが、それらの推定結果と実際の形状の間には大きな違いがみられた。本評価法は、直線形状スリットで得られる温度勾配値を用いて亀裂形状を評価している。したがって、半楕円形状の場合では、直線形状には見られない板幅方向の熱の流れが生じるため、温度勾配のピーク値が低下し、残存のど厚が大きく推定されたと考えられる。図 6 に半楕円形状スリットの亀裂長さを変化させたときの残存のど厚 (残存のど厚が最小となる場所) の推定結果を示す。この結果から、亀裂が長くなるにつれて推定誤差が小さくなっていることがわかる。鋼床版ビード部に発生する亀裂は、亀裂深さに対して十分に大きい亀裂長さを有しており、実際の鋼床版ビード亀裂の形状評価に対しても、本手法がある程度有効であると考えられる。

#### 4. 結言

非貫通亀裂の形状評価に対する温度ギャップ法の有効性が明らかになった。また、健全部の温度勾配で基準化した亀裂部の温度勾配ピーク値を用いることにより、温度条件に依存しない形状評価が可能であることが示された。今後は、U リブ試験体を用いた実験を行い、鋼床版構造における本手法の有効性について検討する予定である。

#### 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) 上西広幹, 和泉遊以, 阪上隆英, 溝上善昭, 森山彰, 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, 第 72 回土木学会年次学術講演会講演概要集 (2017), pp.1887-1888.

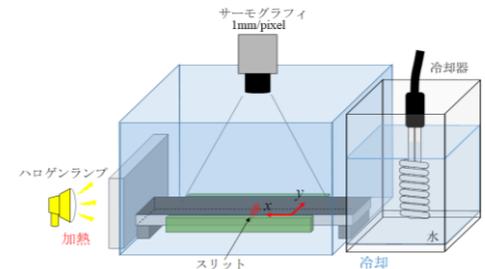
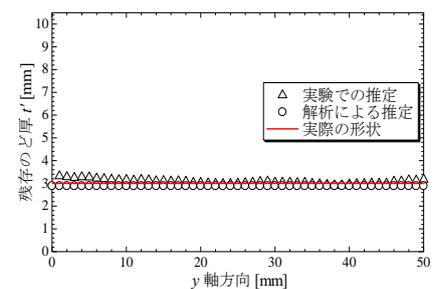
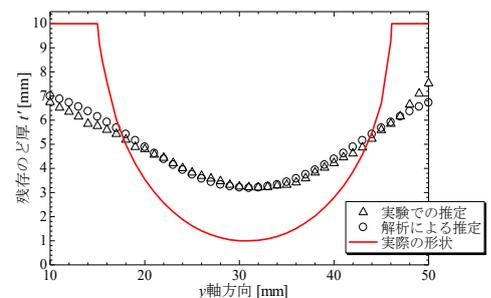


図4 実験装置の概要



(a) 直線形状スリット



(b) 半楕円形状スリット

図5 亀裂形状評価の結果

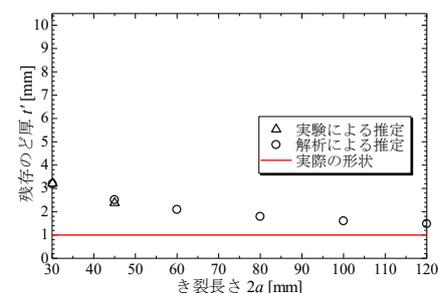


図6 半楕円形状スリットの亀裂長さの変化に伴う推定誤差の変化