

道路橋鋼床板デッキ貫通疲労き裂周辺の熱弾性温度変動分布の有限要素解析

千代田アドバンスト・ソリューションズ（株） 正会員 ○小島 浩二
 大阪大学 正会員 和泉 遊以
 神戸大学 正会員 阪上 隆英
 大阪大学 非会員 久保 司郎

1. はじめに

近年道路鋼床版溶接部付近で発生する疲労き裂が問題となっている。中でも鋼床板の溶接ルート部から発生し、デッキプレートに至るデッキ貫通疲労き裂は、外部から直接目視することが不可能であり、また貫通に至った場合は重大な損傷になる可能性があるため、早期に検出する方法が望まれている。阪上ら¹⁻³⁾は、車両が当該疲労き裂付近を通過する際、トラフリブ表面の溶接部に現れる応力集中に起因する温度変動に注目し、これを赤外線サーモグラフィで検出することにより、鋼床版の疲労き裂を検出する手法を開発している。本研究では、赤外線サーモグラフィによるデッキ貫通疲労き裂の検出の妥当性を有限要素法解析により検証した。

2. 数値解析方法

(1) 数値解析方法全般

本数値解析の目的は、デッキ貫通疲労き裂と赤外線サーモグラフィで検出されるトラフリブ表面溶接部に現れる応力集中箇所の熱弾性温度変動との関係を調べることである。この関係を調べるため、以下の手順で解析を行った。①疲労き裂付近の応力状態を模擬するための溶接残留応力解析 ②その状態を初期状態として車両通過相当の荷重を負荷したときの、トラフリブ溶接部表面に現れる熱弾性温度変動を求めるための応力解析。解析モデルとしては、図1に示すような、阪上ら^{2,3)}の実験と同じ試験体、支持条件、負荷

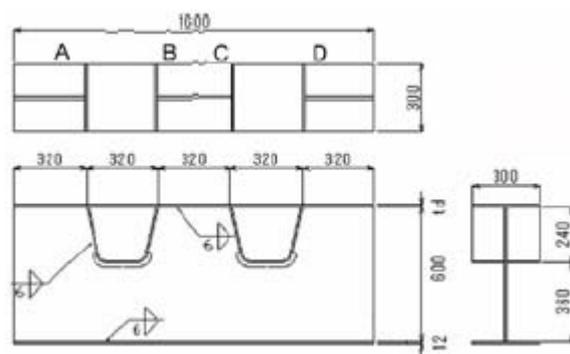


図1 実験装置

条件を採用した。また、疲労き裂としては、同実験により観察された疲労き裂長さ40mm、疲労き裂深さ6.66mmの半楕円疲労き裂を予め導入・モデル化した。解析ソフトは汎用有限要素法解析ソフト ABAQUS Version 6.7、要素は6面体1次要素(C3D8)を用いた。総要素数は36万要素である。なお、本解析では疲労き裂先端近傍の特異性を表すための特別な要素は用いていない。

(2) 溶接残留応力解析

き裂が進展するためには、き裂面が開くことが必要であることが、一般に知られている。当該道路鋼床版溶接部等の複雑な構造においては、どのような力により疲労き裂が開くかは必ずしも明確ではない。そこで、本解析では、疲労き裂が溶接ルート部を起点にしていることを考えて、溶接残留応力により疲労き裂の開閉口がどのようになるかを検討した。溶接の残留応力場を再現する方法として熱弾塑性解析を採用した。解析方法を以下に示す。母材、溶接材ともに材料試験で得られた母材特性を与えた上で、非定常熱弾塑性解析を行う。実際の溶接施工では入熱、パス数等の施工管理がなされているが、解析では簡便のため固定熱源、すなわち溶接部全てに所定の熱量を同時に加えた。熱量は溶接部の最高到達温度が1600℃程度になるように調整した。このとき疲労き裂は開口量をゼロにしておき、疲労き裂面の上面と下面は離れないものとした。この解析を行った後、疲労き裂面の上面および下面の拘束を除去し、疲労き裂が開くかどうかの確認を行った。この疲労き裂上面と下面の拘束を除去する際、外力等の作用はないものとした。

キーワード 道路橋鋼床版, 赤外線サーモグラフィ, デッキ貫通疲労き裂, 有限要素法

連絡先 〒221-0031 横浜市神奈川区新浦島町1-1-25 テクノエブ 100ビル 千代田アドバンスト・ソリューションズ（株）

(3) 荷重を負荷したときのトラフリブ表面の溶接部に現れる熱弾性温度変動解析

(2)の解析結果を初期状態として、車両が通過した状態を想定した負荷状態での応力解析を行った。負荷は、初期状態→負荷→除荷→負荷→除荷の手順で行った。荷重は、55kN をデッキプレートの上から下方向に、トラフリブ内側に作用させた。

3. 解析結果

(1) 溶接残留応力解析結果

疲労き裂面が閉じた状態で溶接残留応力を模擬し、溶接部での残留応力が降伏応力(290MPa)程度になることが確認された。その後、疲労き裂面の上面と下面の拘束を除去したときの疲労き裂面の開口状態を図2に示す。図から分かるように溶接の残留応力により疲労き裂面が開くことが分かる。開口領域は全面に広がっており、疲労き裂前縁近傍でも開いていることが確認された。疲労き裂前縁近傍の開口量は、 $1\sim 6\times 10^{-6}$ (mm)のオーダーであった。但し、この結果は、溶接過程を近似化して解析しているため定性的なものである。

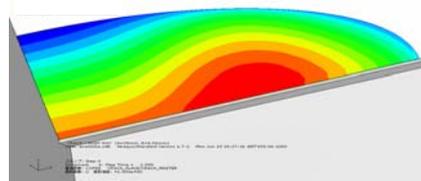


図2 疲労き裂面開口量コンター図

(2) 荷重を負荷したときのトラフリブ表面の溶接部に現れる応力および熱弾性温度変動解析結果

赤外線応力測定は、物体が断熱的に弾性変形するときの主応力と変動に比例して発現する熱弾性温度変動計測に基づくものである¹⁾。実験ではトラフリブ表面の溶接部に疲労き裂前縁の応力集中が確認されている^{2,3)}。そこで、本解析においても赤外線サーモグラフィで検出される温度変動の元になる負荷時と除荷時の主応力との変動を可視化した。主応力との変動の有限要素解析結果を図3に示す。これを、図4に示す赤外線サーモグラフィによる計測結果の結果と比較すると、表面の温度変動、すなわち主応力との変動分布の傾向が良く一致していることが確認できる。

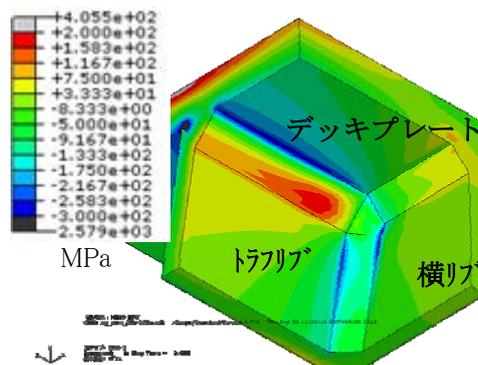


図3 解析結果 (主応力との変動)

4. 考察

本数値解析結果から、赤外線サーモグラフィによるデッキ貫通疲労き裂の測定が有効であることが確認された。トラフリブ外面溶接部で観察される応力集中が発生するメカニズムは次のように考えられる。

- ① 疲労き裂は溶接の残留応力により開口する。
- ② 車両等の負荷が作用することにより疲労き裂はルート部近傍で閉じる力を受け、疲労き裂前縁付近で疲労き裂は開口し圧縮応力が発生する。
- ③ 疲労き裂の反対側のトラフリブ外面の溶接部すなわち赤外線サーモグラフィによる観察面では、③と反対に引張応力が現れる。

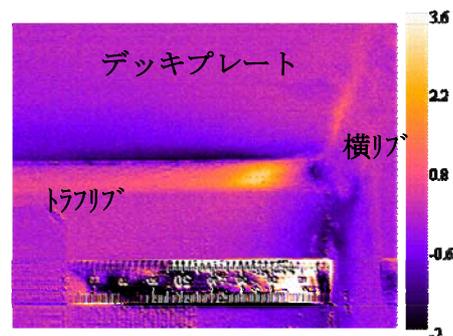


図4 実験結果 (温度変動)

参考文献

- 1) 阪上隆英, ほか4名: 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔非破壊検査技術の開発, 日本機械学会論文集 A72-724, (2006), pp. 1860-1867
- 2) 阪上隆英, ほか4名: 自己相関ロックインサーモグラフィ法による鋼床板の疲労き裂遠隔検出技術, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, (2006), pp. 1171-1172
- 3) 阪上隆英, ほか4名: 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法によるデッキ貫通疲労き裂検知, 土木学会第20年度全国大会講演概要集, (2008), pp. 937-938