

高周波誘導加熱による垂直補剛材上端の疲労強度改善効果

名古屋大学 学生会員 ○富田泰生 正会員 判治剛 フェロー会員 舘石和雄 正会員 清水優
横河ブリッジホールディングス 正会員 前田諭志 正社員 笹島純司

1. 研究の目的 垂直補剛材上端溶接部では止端だけでなく、ルートからの疲労き裂が確認されており、それらのき裂に対する簡易な対策の確立が望まれている。本研究では、補剛材上端からのき裂を対象とし、高周波誘導加熱を用いた後熱処理（以下、IH処理）による疲労強度改善効果を検討した。IH処理は、溶接部周辺を加熱して新たに圧縮残留応力を付与することにより、き裂の発生を抑制する手法である。まず、補剛材上端を模した試験体に対してIH処理を施し、疲労強度と残留応力分布を明らかにした。さらに、IH処理をシミュレートし、処理条件が溶接部近傍の残留応力に与える影響を検討した。

2. 試験体 疲労試験体は、図-1に示すように、鋼床版デッキプレート（以下、デッキ）を模した板厚12mmの鋼板に、主桁ウェブと垂直補剛材を模した鋼板（各板厚14mmと12mm）をすみ肉溶接により接合したものであり、奥行方向の幅は300mmとした。垂直補剛材にはSM400Aを、その他の鋼板にはSM490Aを用いた。溶接ままのAW試験体とIH処理を施したIH試験体をそれぞれ2体ずつ製作した。

3. IH処理 IH処理は2つのStepに分けて行った。Step1では垂直補剛材とデッキの表面および溶接ビード上に入熱し、十分に冷却した後、Step2では溶接部から44.5mm離れた位置のデッキ下面に入熱した。各Stepでは補剛材を挟んで両側に入熱している。入熱の位置や順序は事前の簡易解析に基づき決定した。IH処理における目標温度は600°C程度に設定し、入熱領域内に設置した熱電対の測定値が600°Cを超えた時点で入熱を終了した。

4. 疲労試験 荷重はゴム板を介して左右対称となるようにデッキ上面に与えた。荷重範囲は35kN（-40~-5kN）とした。デッキ側および補剛材側の止端から2mmの位置にひずみゲージを貼付し、定期的にひずみ範囲を記録するとともに、磁粉探傷試験などによりき裂発生の有無を確認した。AW試験体では、50万回（L側）と70万回（R側）載荷時にデッキ側のひずみ範囲が急減し、実際にき裂の発生を確認した。どちらのき裂もデッキ側まわし溶接止端に沿った状態で発見された。その後、き裂をバグラインダーにより除去した上で載荷を継続したが、溶接ルートや補剛材側止端からの新たなき裂は確認されなかった。IH試験体では450万回まで載荷しても止端部近傍でのひずみ範囲の低下はみられず、き裂は発生しなかった。デッキ側のき裂に対して、止端から10mm位置でのひずみから求めた応力範囲で整理した結果を図-3に示す。図中には既往研究の溶接ままの疲労試験結果も併記している。デッキ側止端部に対しては、IH処理により大幅に疲労強度を改善できていることがわかる。

5. 残留応力解析 IH処理後の残留応力分布を明らかにするために、X線回折法（cosa法）による残留応力計測とIH処理を再現した熱弾塑性解析を実施した。解析にはABAQUS Ver.6.14を用い、試験体形状の対称性と、各補剛材に対する溶接とIH処理が互いに影響しないことを踏まえ、1/2モデルを採用した。溶接部近傍の要素分

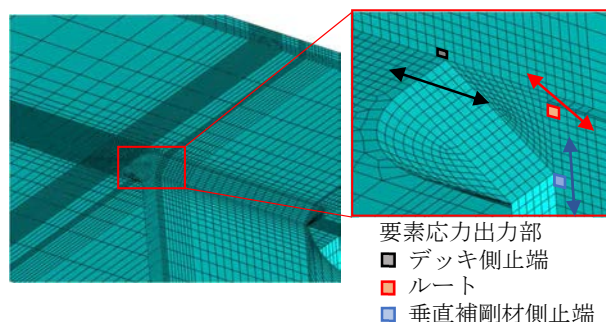
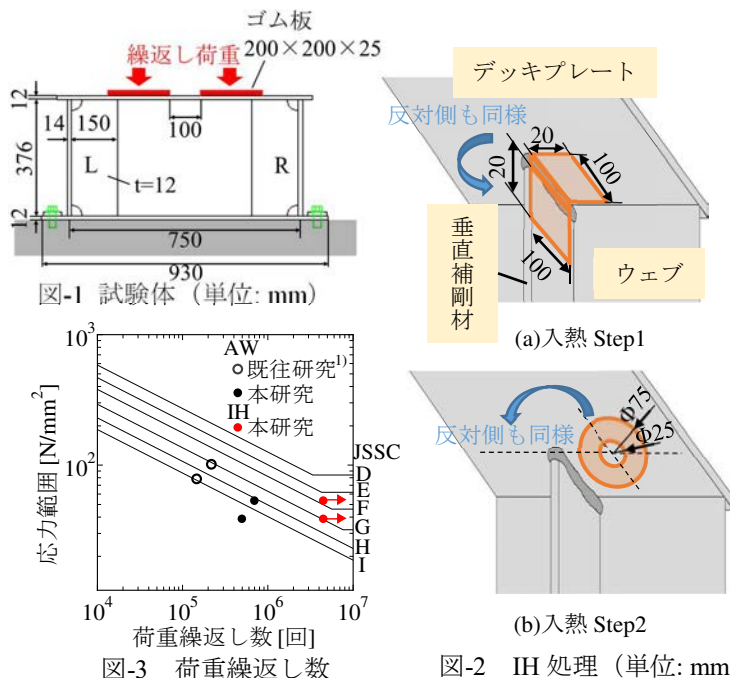


図-4 着目した要素応力と応力方向

キーワード 高周波誘導加熱, 後熱処理, 垂直補剛材上端, 疲労強度改善, 残留応力

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 TEL:052-789-4620

割を図-4に示す。着目する止端およびルートには $1 \times 1 \times 1 \text{mm}$ の要素を配置している。鋼材の機械的性質および物理定数の温度依存性は既往研究²⁾を参考に設定した。対称面には幾何学的および熱的対称条件を与え、物体表面での熱伝達と輻射(輻射率0.8)を考慮した。溶接シミュレーションでは、溶接部に相当する要素の出現と入熱を繰り返した後、十分な冷却過程を設けることにより溶接を再現した。またIH処理は、溶接完了後、入熱領域に位置する要素の表面に、加熱時のみ微小厚さのシェル要素を出現・結合させ、そのシェル要素表面に熱流束を一定時間与えることにより再現した。溶接およびIH処理中の温度履歴を図-5,6に示す。なお、図-6は各Stepにおいて片側を処理したときの温度履歴であり、各部位に設置した熱電対の平均値を用いて比較している。図より、解析値は実測値と比較的によく一致しているといえる。図-7にIH処理前後のデッキ下面における残留応力分布を示す。これは、デッキ側止端から5mm位置を原点とした試験体奥行方向の分布であり、応力成分はまわし溶接に直交する方向である。解析値は実測値に比べて大きめの値ではあるが、IH処理による分布傾向の変化は捉えられている。図-8には、図-4に示した止端およびルートに位置する要素の応力履歴を示す。溶接により導入された引張残留応力がIH処理により圧縮側にシフトする様子を確認できる。これは、実験により疲労強度が改善したと整合している。

6. IH処理条件の影響分析 図-8より、詳細な解析の結果、デッキ下面への入熱(Step2)による残留応力の低減が大きいことが示された。そこで、Step2の入熱条件を変化させた解析を実施し、処理条件が止端およびルートの残留応力に与える影響を検討した。具体的には、入熱範囲を一定とし、単位時間当たりの入熱量を変えることにより、最高到達温度と入熱時間を変化させた。図-4に示した着目要素のIH処理後の残留応力を図-9に示す。図より、最高到達温度が高くなるほど、また処理時間が短くなるほど、各着目位置の圧縮残留応力は大きくなるのがわかる。

7. まとめ 本研究では、IH処理によりデッキ側止端部近傍の溶接残留応力が低減され、その結果、疲労強度が改善したことを示した。また、IH処理によってデッキ側を加熱する場合は、まわし溶接部の両脇を加熱する方法が効果的であり、その際のIH処理条件と溶接部に導入される残留応力の関係を明らかにした。入熱位置や入熱範囲が及ぼす影響や、ルートき裂に対する疲労強度改善効果については今後の検討課題としたい。

参考文献 1) 内田ら：上端カットした鋼床版垂直補剛材の引張応力下における疲労強度，令和元年度土木学会全国大会第74回次学術講演会，I-215，2019。
2) 金ら：すみ肉溶接で生じる面外変形の高精度予測，溶接学会論文集，第23巻，第3号，pp.431-435，2005。

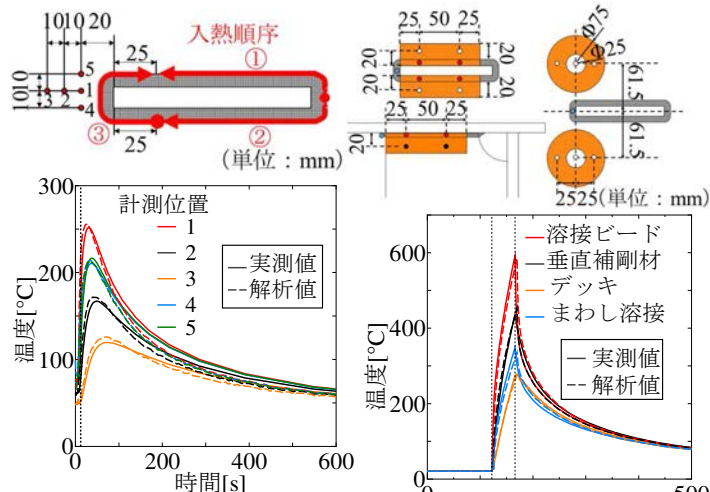


図-5 溶接温度履歴

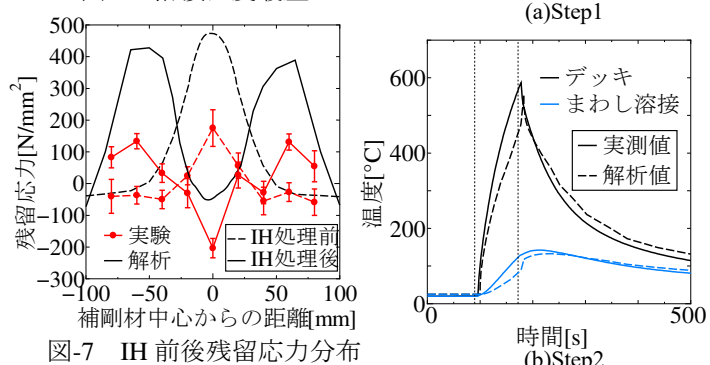


図-7 IH前後残留応力分布

図-6 IH処理温度履歴

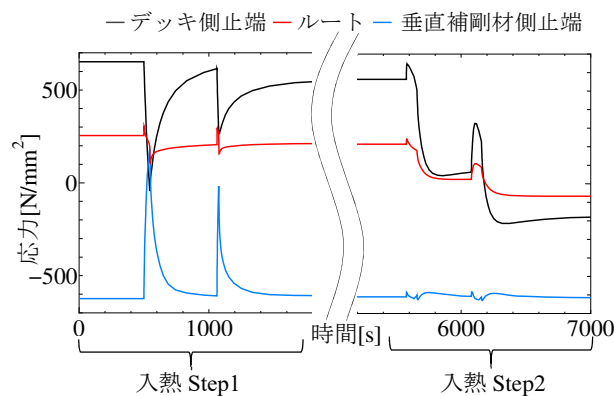


図-8 各要素の応力履歴

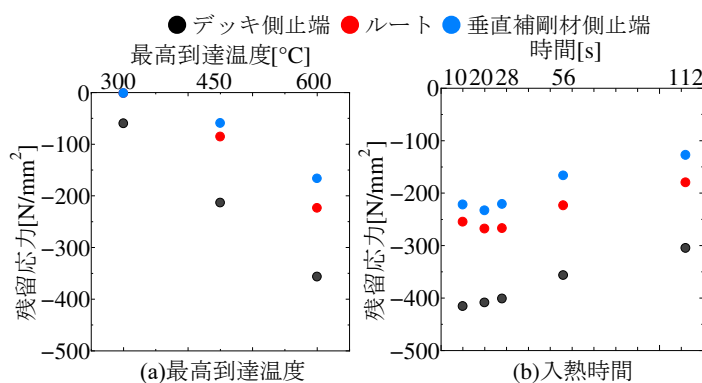


図-9 各着目部における要素応力