

端補剛材溶接部の疲労損傷に対する予防保全に関する検討

法政大学大学院 学生会員 ○杉山 拓也 法政大学 正会員 内田 大介
(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 吉田 善紀, 小林 裕介

1. はじめに

鋼鉄道橋の主桁や縦桁の支承との接合部近傍では、端補剛材と下フランジの溶接部に図1のような疲労き裂が確認されている。このき裂は沓座モルタルの劣化等で、支承部が不均等支持状態となることで生じる端補剛材下端の高い応力集中に起因する。根本的な対策は、沓座モルタルの打ち直しなど、支点部を補修し健全に保つことであるが、ジャッキアップなどが必要となり手間や費用を要す課題がある。本研究では簡便な予防保全対策として溶接止端部のグラインダー処理を考えた。その効果を検証するために、FEM 解析により実橋の応力状態を模擬できる小型試験体の形状を検討するとともに、グラインダー処理を施した場合の応力低減効果を確認した。さらに疲労試験を実施し、グラインダー処理による疲労強度改善効果を示した。

2. 試験体モデルの検討

2.1 試験体モデルの応力状態

図2に示すような中板(下フランジ)に主板(端補剛材)を完全溶込み溶接で接合した回し溶接部を有する試験体を想定し、別途実施された実橋モデルの応力状態の再現を試みた。解析は汎用解析コード Simcenter Nastran ver2022.1 を用いた線形弾性解析である。試験体モデル、実橋モデルとも、溶接止端部に止端半径を $\rho=1\text{mm}$ を挿入している。双方のモデルの端補剛材側の溶接止端部に沿った最小主応力の分布図を図3に示す。試験体モデルでは着目する溶接角部の最小主応力度が実橋モデルと一致するように荷重値を調整している。試験体モデルでは溶接角部から $\pm 2\text{mm}$ 程度の範囲では最小主応力の分布を概ね再現できており、き裂の発生と初期の進展までは実橋を模擬できる可能性が高いと考えた。なお、着目部以外の発生応力は、試験体モデルの方が実橋モデルよりも大きく、安全側の評価になると判断した。

2.2 止端仕上げの研削深さと応力低減効果

JSSC 指針²⁾を参考に、主板側の溶接止端全周の溶接止端半径 $\rho=3\text{mm}$ として、仕上げによる応力低減効果を確認した。この際、主板の研削深さ d も解析パラメータとし、 $d=0.3\text{mm}$, 0.5mm , 1.0mm のケースで解析を実施した。ここで、1983年の設計基準³⁾以前は、当該箇所の溶接は部分溶込み溶接となっている場合もある。そのため、主板に両開先を設け、未溶着幅 a が異なる2種類の部分溶込み溶接の解析モデルも作成し、有効切欠き応力(以下、ENS)を用いてルート部に生じる応力も確認した。なお、後述する試験体に合わせ、中板側の溶接止端部の止端半径も $\rho=3\text{mm}$ としている。図4は止端仕上げを行った溶接角部における最小主応力の低減率を研削深さ毎に整理した結果である。図中の最小主応力の低減率とは、溶接のままの解析モデル ($\rho=1\text{mm}$)

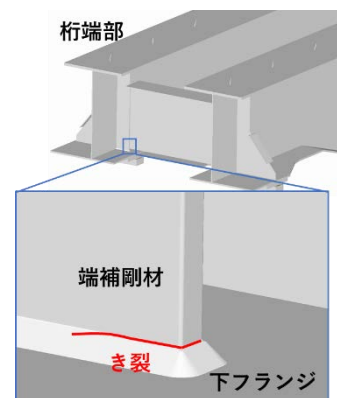


図1 端補剛材下端の疲労き裂

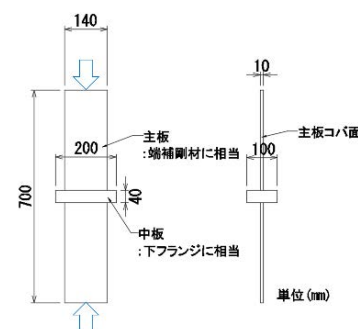


図2 試験体モデル

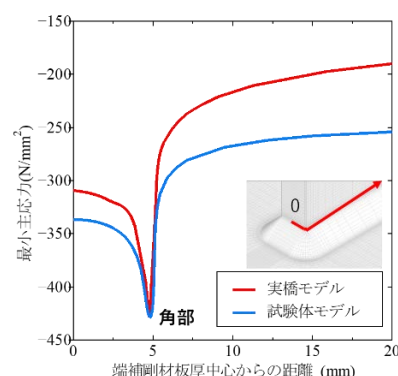


図3 最小主応力の分布図

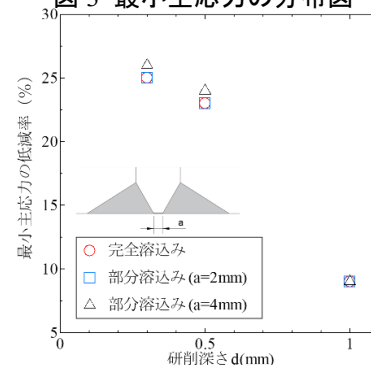


図4 仕上げによる応力低減率

キーワード 端補剛材, 疲労き裂, グラインダー処理

連絡先 〒184-8584 東京都小金井市梶野町3丁目7番地2号 法政大学鋼構造研究室 TEL042-387-6279

の最小主応力度に対する値である。図4の結果をみると、研削深さ $d=0.3\text{mm}$ のケースの応力低減効果が高い。また、研削深さ d が 0.5mm 以内であれば20%強の応力低減効果があり、JSSC 指針の1等級程度の疲労強度向上を期待できることがわかる。図5に主板側溶接止端部と溶接ルート部に沿ったENSの分布図を示す。基準点からの距離は、溶接角部では仕上げ状態によって仕上げ部の底の位置が異なるため、AWの角部の円弧に一致するように放射状に投影している。着目する角部ではすべてのケースで溶接止端部の応力が卓越するが、仕上げを施すことにより、角部の円弧の端部から主板側面において、溶接ルート部のENSの方が溶接止端のENSより値が大きくなることわかる。

3. 疲労試験

AW試験体は溶接のままの試験体、G05、G10試験体は主板側の溶接止端全周を溶接止端半径 $\rho=3\text{mm}$ とし、研削深さ $d=0.5\text{mm}, 1.0\text{mm}$ を目標にグラインダー処理を施した試験体である。中板側溶接止端は着目部でないが、念のため仕上げを行っている。図6にAW試験体の切断法による残留応力計測結果を示すが、着目部近傍では圧縮の残留応力が確認された。

疲労試験では応力比 R の影響も確認し、着目部近傍では図7に示す位置で5千回毎にひずみ範囲を測定した。き裂は主板コバ面の片側の溶接角部から発生したため、き裂発生寿命は、主板コバ面の溶接止端から 2mm 位置のき裂が発生した側のゲージのひずみ範囲の減少率が5%となったときの载荷回数、疲労寿命は、主板側面の溶接止端から 2mm 位置の両側のひずみ減少率が5%に達し、板を貫通したと考えられる際の载荷回数とした。また、ひずみ範囲の変動や磁気探傷試験により、き裂が認められない場合は500万回で試験を終了している。表1に疲労試験の条件と結果を示す。実橋の応力状態に近い応力比 $R=-\infty$ としたAW-1では5万回毎に磁気探傷試験を行ったが、き裂の発生を目視で確認することができなかった。一方、応力比 $R=-1$ で行ったAW-2、 $R=0$ で行ったAW-3では図8のようなき裂が発生し、応力比による疲労寿命の差は小さかった。この結果を受け、G05、G10試験体では応力比 $R=0$ で試験を実施した。なお、G05-2では溶接による曲げ変形の影響を小さくするため、下限荷重を 50kN とした。G05-1、G10-1では500万回でき裂が発生せず、応力範囲を大きくしたG05-2、G10-2では500万回に達する前にひずみ変動し、いずれも主板が破断に至った。これらの破断面やひずみ範囲の変動から判断すると、き裂の起点は主板幅中央近傍の未溶着部であり、着目箇所の溶接角部に対しては、グラインダー処理による高い疲労強度改善効果を確認することができた。止端仕上げに伴うルート破壊については実橋の応力状態での検証が必要である。

4. まとめ

(1)解析的検討により、研削深さ $d=0.5\text{mm}$ 以内とした止端仕上げでは、1等級程度の疲労強度向上効果を期待できることが分かった。(2) $R=-\infty$ で疲労試験を実施したAW-1では、き裂の発生を確認することができなかった。試験体数を増やす必要もあると思われるが、溶接残留応力が実橋と異なる可能性も考えられる。(3)疲労試験により、着目する溶接角部に対するグラインダー処理による高い疲労強度改善効果を確認した。参考文献 1)増田ら：検査記録を用いた鉄道縦桁支承部の変状発生傾向分析，土木学会第77回年次学術講演会，VI-865，2022。2)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012。3)日本国有鉄道：建造物設計標準解説(鋼鉄道橋)，1983。

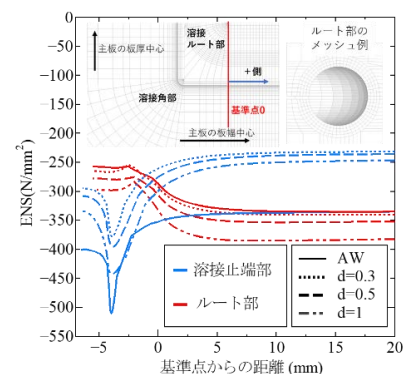


図5 ENSの分布図

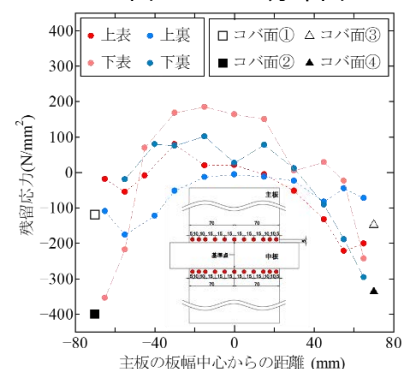


図6 残留応力計測結果

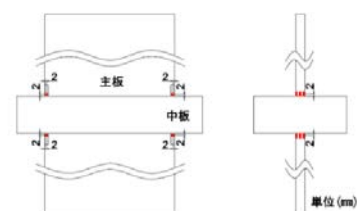


図7 着目部のひずみ測定位置

表1 疲労試験結果

試験体名	応力比	応力範囲 (N/mm²)	下限荷重 (kN)	き裂発生寿命 (万回)	疲労寿命 (万回)	備考
AW-1	$R=-\infty$	120	-173	×	>500	き裂発生せず
AW-2	$R=-1$	120	-82	186	352	
AW-3	$R=0$	150	190	349.5		
AW-4	$R=0$	150	24	75.5		
G05-1	$R=0$	120	×	>500		き裂発生せず
G05-2	$R=0.2$	150	50	×	>628	ルート破壊
G10-1	$R=0$	120	10	×	>500	き裂発生せず
G10-2	$R=0$	150	×	>481.5		ルート破壊

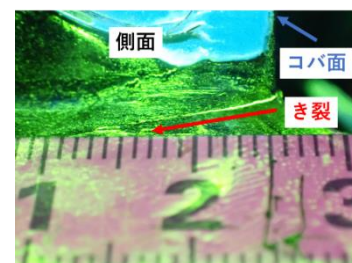


図8 疲労寿命時のき裂 (AW-2)