

溶接止端部に生じた疲労き裂に対するストップホール法の補修効果

岐阜大学（現ジェイアール総研エンジニアリング） 正会員 ○鈴木元啓 岐阜大学 学生会員 小野友暉 正会員 木下幸治
芝浦工業大学 正会員 穴見健吾 名古屋大学 正会員 判治剛
三井造船鉄構エンジニアリング（現、法政大学） 正会員 内田大介

1. 背景

鋼構造物に生じた疲労き裂を補修する工法にストップホール法がある。ストップホール法は、疲労き裂の先端にストップホール（以下、SH）と呼ばれる円孔を設けることで疲労き裂先端の応力集中を緩和する工法であり、き裂進展の遅延や停留などの効果が期待できる。一方、溶接部にSHがかかる部位やき裂先端にSHをあけることが困難な狭隙部などの通常のSHの施工では困難が生じる箇所に疲労き裂が生じる場合には比較的小径のSHの適用例がある。しかし、小径のSHが溶接部と重なる、すなわち、小径のSHと溶接部の応力集中が重なることにより、高い応力集中が生じ、その結果、疲労き裂の早期再発が考えられる。従来より、貫通き裂の両側のき裂先端に対してSHを設ける、いわゆる眼鏡形SHに対して引張荷重が作用した場合の応力集中係数は、眼鏡形SHを楕円の切欠きとみなした次式により推定できることが知られている²⁾。

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{a/\rho}$$
 式 (1)

ここで、 α は引張荷重を受けるSHの応力集中係数、 a はSHを含むき裂の半長さ、 ρ はSHの半径である。この式より、SHの半径が小さくなるに伴い、応力集中係数が高くなることからわかる。このため、溶接止端部の疲労き裂に対しては、SHの削孔位置をき裂先端が確実に除去できる範囲で、溶接部とSHの応力集中が重ならないように工夫、さらには、そのようなSHの疲労強度評価法が必要となる。本研究では、溶接止端部の疲労き裂に対する小径のSHの疲労強度を明らかにした上で、その疲労強度評価法を構築することを目的とし、円孔・SHの削孔位置を変えた荷重非伝達型十字溶接継手試験体を用いた疲労試験と有限要素解析により検討した。

2. 疲労試験概要

図-1に試験体形状、表-1に試験体一覧を示す。試験体にはSM400鋼材を用いた。試験体の主板は板厚9mmであり、主板の長手方向中央に板厚9mmのリップをすみ肉溶接接合し、荷重非伝達型十字溶接継手とした。円孔・SHの寸法・形状の違いと疲労試験機の最大つかみ幅（最大100mm）を勘案し、各試験体のタイプにより形状を変えている。Type 4とType 9では曲率半径3mmの超硬バーを取り付けた電動式グラインダを用いて、H5-Aの溶接止端部を0.3mm程度削り込み、止端仕上げをしている。円孔を削孔しないAs-weldを除き、各試験体には、直径12mmの円孔・SHを設けている。なお、円孔・SHの直径が応力集中に及ぼす影響については後述する解析的検討において示す。円孔縁と円孔内部の処理は、粒度#80の軸付きゴム砥石を使用して行った。各試験体は2体ずつ準備した。溶接止端と円孔・SH中心までの距離については、後述の有限要素解析結果を基に1mmと5mmとしている。

本研究では、200kNの電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて、応力比をほぼ0とする一軸引張疲労試験を行った。公称

応力範囲は、円孔やSHの断面欠損を考慮せず、上述した公称応力計測位置において、50N/mm²から200N/mm²の間とした。荷重波形は正弦波にし、繰返し速度は10Hzとした。

3. 有限要素解析

疲労試験に先立ち、有限要素解析により円孔・SH周辺の応力分布と応力集中係数を確認した。試験体の解析に加えて実橋梁を想定した実物大の幅広いモデルの解析も実施し、円孔・SHの削孔位置が応力集中に与える影響について検討した。

図-2に試験体の解析モデル、図-3に実橋梁を想定した実物大モデルを示す。解析モデルは試験体と同様に鋼材は板厚9mmのSM400、リップ高さは50mmとした。溶接脚長は8mmとした。弾性係数は2.0×10⁵N/mm²、ポアソン比は0.3とした。各解析対象の対称性から、解析モデルは1/2または1/4とし、解析モデル片端を完全固定として、反対側端部に荷重を与えた。円孔近傍を最小メッシュサイズ0.05mmに細かく分割した。また、後述するが、円孔・SH削孔位置が溶接止端から離れるに伴い、応力集中発生箇所も円孔・SH中心から離れるため、円孔・SH近傍のみならず10mm~20mm離れた範囲までを細かく分割した。試験体モデルと実物を想定したモデルを用いて、溶接止端部の応力集中と重ならないように溶接止端から円孔・SH中心間距離を変化させた解析を実施した。

図-4に解析結果例として、眼鏡形SHの削孔位置が溶接止端から1mmと5mmとしたSH周辺の最大主応力分布図を示す。図-4(a)の溶接止端部とSHの応力集中が重なる場合の結果より、溶接止端部とSHの応力集中が重なるSH表面の縁において、高い応力集中が発生していることがわかる。一方、

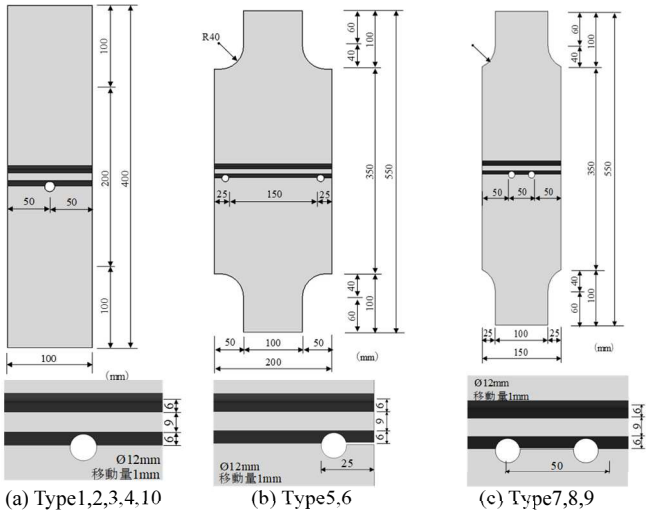


図-1 試験体形状一覧

表-1 荷重非伝達型溶接継手一覧表

Type	名前	継手の種類	試験方法	止端とSH中心の間の距離 (mm)	切欠き有無	切欠き長さ (mm)	試験数	備考
1	As-weld-A	荷重非伝達	軸方向引張	-	無	-	3	円孔無し
2	H1-A			1			2	
3	H5-A			5			2	
4	H5-A-3R			5			2	溶接止端に3Rのグラインダ処理
5	SH1-2(S25E)-A			1	有 (両端部)	25	2	
6	SH5-2(S25E)-A			5			2	
7	SH1-S50C-A			1			2	スリットの両端にSH
8	SH5-S50C-A			5			2	スリットの両端にSH
9	SH5-S50C-A-3R			5			2	溶接止端に3Rのグラインダ処理
10	P-H-A	-	-	-	無	-	2	溶接ビードとガセットなし

キーワード：ストップホール法，FEM，疲労き裂，

連絡先（岐阜大学在学時）：岐阜大学工学部社会基盤工学科 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番地1 tel：058-293-2414

図-4(b)の結果より、SHの削孔位置が溶接止端から離れることで、応力集中係数の値が小さくなるのがわかる。よって、溶接止端部に対してSHを適用する場合、SH削孔位置を溶接止端から離すことで応力集中を大きく低減できる、また溶接止端とSH削孔位置の関係により応力集中位置と大きさが変化することがわかる。

図-5に眼鏡形SHの削孔位置が溶接止端から5mm離れた試験体のSHと溶接止端部をR=3mmでグラインダ処理を再現したモデルの溶接止端部周辺の最大主応力分布図を示す。図-5より、グラインダ処理を行うことで溶接止端部の応力集中が20%程度緩和可能であることがわかる。次に、試験体モデルを対象に、眼鏡形SHを設けた解析モデルのグラインダ処理前後の溶接線方向の溶接止端部の応力分布を図-6に示す。図-6より、眼鏡形SHではAs-weldの応力集中近くまでは緩和できないが、SHの応力集中以下には緩和可能であることが明らかであり、最大の応力集中箇所がSHとなることわかる。よって、SHの削孔位置を溶接止端から離し、かつ円孔・SH近傍の溶接止端をグラインダ処理することにより、疲労き裂起点をSH孔壁とすることができ、これはSH孔壁の応力集中を算出することで疲労強度評価が可能になるといえる。ここで、グラインダ処理範囲はできる限り少ないほど作業効率が高い。図-6の溶接線方向の溶接止端の応力分布より、眼鏡形SHの切欠きの半分の長さ(図中のR)程度まで応力集中係数が高い範囲と考えられることから、その範囲をグラインダ処理することが効率的であるといえる。

4. 疲労試験結果

図-7に疲労試験結果の例として、眼鏡形SHを検討したType 1から4, 10の結果を示す。図より、溶接止端と円孔・SH中心までの距離を5mmとすることで疲労強度が向上し、さらに、グラインダ処理を施すことによってAs-weld程度の疲労強度になることがわかる。次に、図-8に各試験体のき裂発生位置の解析により求めた局部応力により整理し直した疲労試験結果を示す。図-8中には、既往の研究データとの比較を目的として、森ら³⁾により得られた各種鋼材を用いた、溶接残留応力を考慮した試験体に施した眼鏡形SHの疲労試験結果も示した。図-8より局部応力により試験結果を整理することにより、森らの試験結果³⁾と概ね一致していることがうかがえ、溶接止端部やSHを起点とするき裂起点の違いに関わらず疲労強度評価が可能であるといえる。次に、森ら³⁾が提唱したストップホール法あるいはボルト締めストップホール法により補修した軸方向力をうける面外ガセット溶接継手の基準疲労強度曲線、本実験結果の最小二乗法を基にした回帰直線、本実験結果と森らの実験結果の回帰直線も図-8に合せて示す。なお、回帰には、Run-out データや試験部位以外にピーニング処理を行い比較的疲労強度が高くなったAs-weld-Aのデータは含めていない。図より、森らが提唱した基準疲労強度曲線は、本試験結果より求めた回帰直線と本実験結果と森らの実験結果を合わせた回帰直線よりも傾きが緩やかで、かつ試験結果の下限値付近を良く評価している。

謝辞：本研究は日本鉄鋼連盟鋼構造研究・教育助成事業として日本鋼構造協会に委託している「鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会」(委員長 館石和雄 名古屋大学教授)の「疲労強度研究部会」(部会長 穴見健吾)における活動の一部として実施したものである。関係各位に深くお礼申し上げる。

<参考文献>1) 日本道路協会 (1997) : 鋼橋の疲労, 丸善, 1997. 2) 西田正孝 (1967) : 応力集中, 森北出版, 1967. 3) 森猛, 内田大介, 西尾一徹 (2002) : ストップホール補修部材の疲労強度に対する鋼材静的強度の影響, 鋼構造年次論文報告集, 第10巻, pp.297-304, 2002.

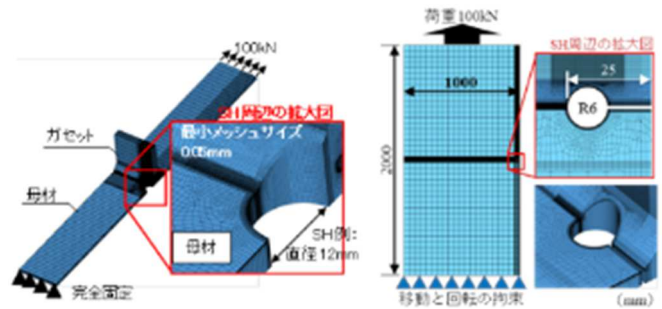


図-2 試験体解析モデル一例

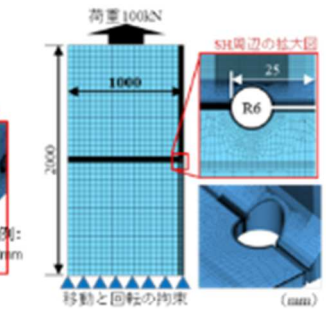


図-3 実物大解析モデル一例

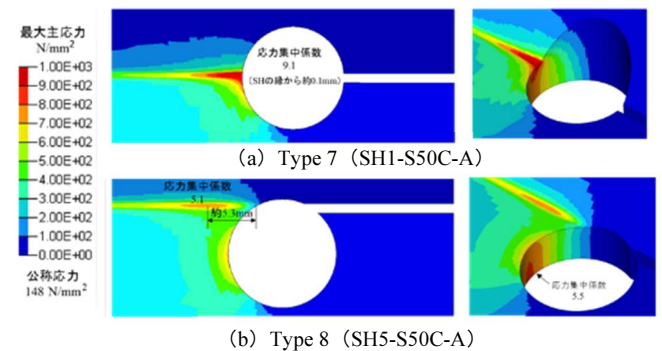


図-4 ストップホール削孔位置と応力分布の関係の例

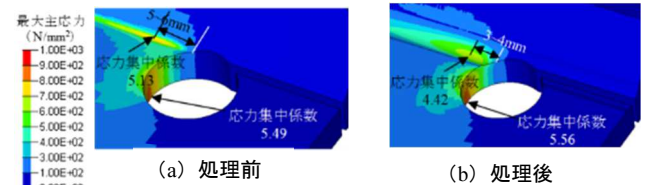


図-5 グラインダ処理前後の最大主応力分布

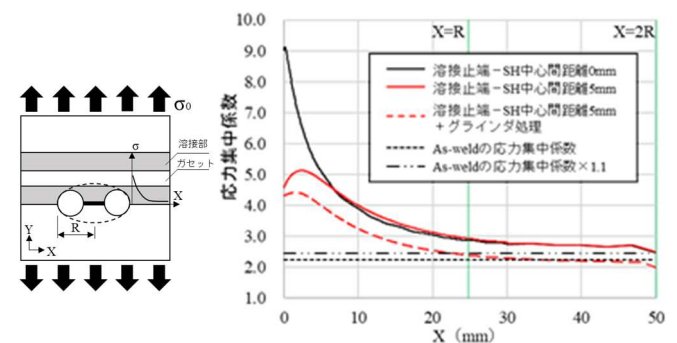


図-6 溶接線方向の溶接止端部の応力分布 (眼鏡形SH試験体)

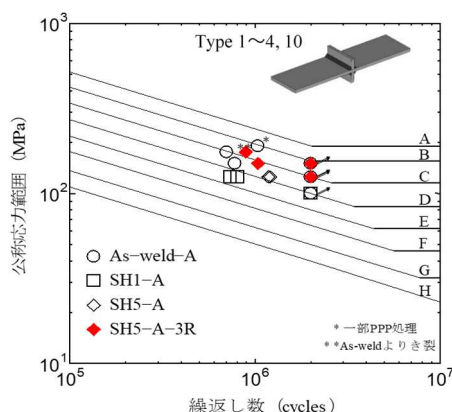


図-7 Type1, 2, 3, 4, 10の疲労試験結果(破断寿命)

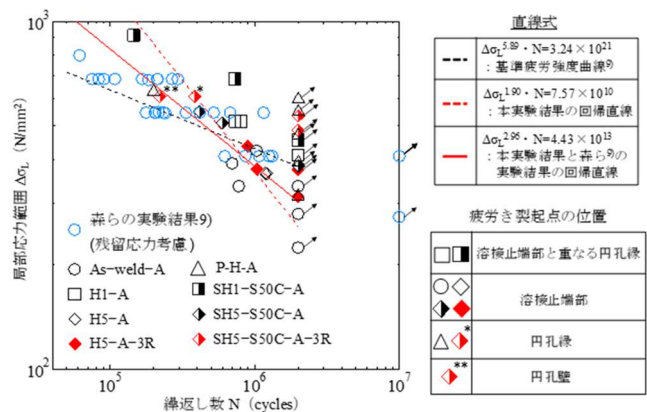


図-8 局部応力に基づく疲労強度評価