

## 高力ボルト当て板補修された疲労き裂の応力集中に与える影響

名古屋大学 学生会員 ○中山 裕哉 正会員 清川 昇悟  
 名古屋大学 正会員 判治 剛 フェロー会員 館石 和雄 正会員 清水 優

### 1. はじめに

鋼構造物に疲労き裂が発生した場合、応急対策としてその先端にストップホールを削孔し、その後に恒久対策として当て板を高力ボルトで接合する補修方法が広く用いられる。当て板が作用力を分担することによりストップホールの応力集中のさらなる低減が期待できるが、当て板のサイズやボルト配置がストップホールの応力集中に与える影響は明らかにされていない。本研究では、き裂の先端にストップホールを削孔した帯板に対して当て板を高力ボルトで添接した試験体の静的引張試験を行い、当て板の断面やボルト間隔、ボルト配置がストップホール縁の応力集中に与える影響を検討した。また有限要素解析による実験の再現を試みた。

### 2. 静的引張試験

試験体の形状と寸法を図-1 に示す。主板にき裂を模擬した人工スリットを設け、その先端にはストップホールを削孔している。当て板は主板両側から添接して2面摩擦とした。鋼板の接合面には無機ジンクリッチペイントを目標膜厚 75 $\mu$ m で塗布した。表-1 に試験ケースを示す。ボルト配置や板厚などの異なる8つの試験体を製作した。case4 は道路橋示方書に規定される高力ボルト継手の最小ボルト間隔よりも狭いボルト間隔（以下、狭配置という）とした試験体であり、ボルトピッチを 40mm とした。case7, case8 では当て板補修に加えて、ストップホールにボルト締め（以下、当て板ボルト締めという）を行った。試験体に使用した鋼材は SM490、ボルトの呼び径は M16、強度は F10T である。締付軸力は設計ボルト軸力 106kN の 1.1 倍とし、リラクセーションの影響を考慮して組立から 1 週間後に実験を行った。荷重は試験体の両側を固定し引張荷重を加えた。ストップホール縁のひずみは円孔壁の板厚中心に 1 軸のひずみゲージ（ゲージ長 1mm）を貼り付けて計測した。

### 3. 試験結果

case1, case2 のストップホール縁の応力と公称応力の関係を図-2 に示す。ストップホール縁応力は 2 箇所のゲージの平均値、公称応力は荷重を主板の総断面積で除した値とした。グラフの傾きが応力集中係数を意味する。各ケースにおける主板の総断面降伏荷重の 30% 荷重時の応力集中係数を表-2 に示す。当て板をした case2 は当て板なし

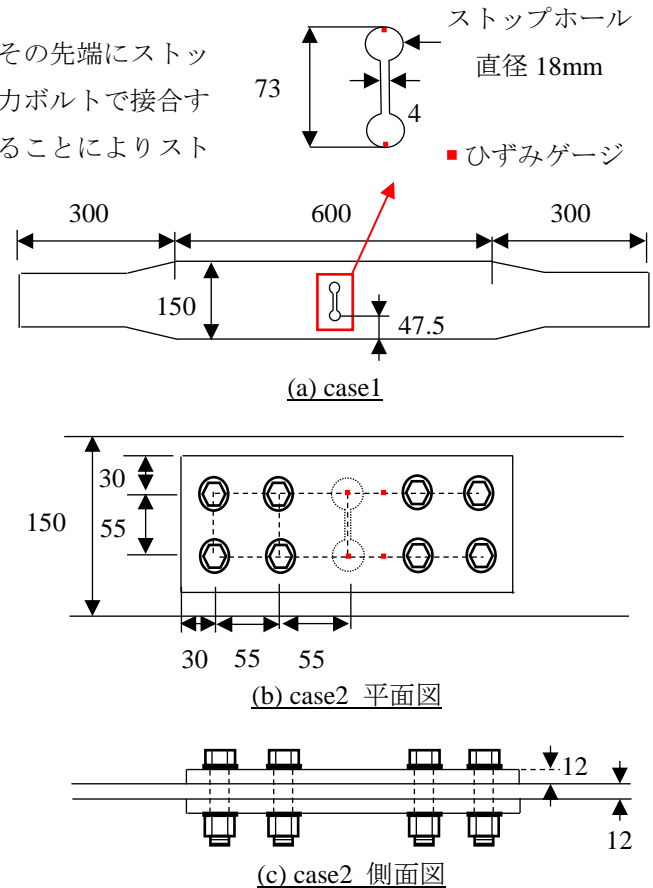


図-1 試験体形状と寸法（単位 mm）

表-1 試験一覧

試験 case	ケース名	主板厚 (mm)	当て板厚 (mm)	SH ボルト締め
case1	当て板なし	12	12	なし
case2	基本ケース	12	12	なし
case3	片側ボルト 2 本	12	12	なし
case4	狭配置	12	12	なし
case5	薄板 1	12	6	なし
case6	薄板 2	6	6	なし
case7	当て板ボルト締め	12	12	あり
case8	狭配置+ 当て板ボルト締め	12	12	あり

キーワード 当て板補修, 高力ボルト, 疲労き裂, ストップホール, 応力集中係数

連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院 工学研究科 TEL: 052-789-4620

の case1 に比べて応力集中が 1/5 まで低減している。ボルト 2 本の case3 や当て板が薄い case5 は、当て板の荷重分担が小さくなるため応力集中低減の効果が小さくなっている。主板と当て板の板厚がともに薄い case6 は case2 と同程度である。断面積比が case2 と同じであり、作用荷重の分担割合も同じためであると推察される。狭配置とした

表-2 応力集中係数まとめ

ケース	実験	FEM
case1	6.01	6.88
case2	1.22	1.47
case3	1.19	1.58
case4	0.88	1.15
case5	2.03	2.39
case6	1.21	1.48
case7	1.19	1.28
case8	1.15	1.18

case4 が最も応力集中係数は小さい。ボルト間隔が狭くなったことで当て板の架橋効果が高まり、き裂の開口変位が抑制されたことが原因と推察される。当て板ボルト締めをした case7, case8 は、case2 に比べて応力集中が低減するが、その割合は比較的小さい。

4. 有限要素解析

解析コードに MSC/Marc2015 を用いて 3 次元複合非線形解析を行った。使用要素はソリッド要素，最小要素サイズは 0.5mm とした。図-3 に case2 の解析モデルを示す。対称性を考慮し 1/8 をモデル化した。ボルト，ワッシャー，当て板，主板をそれぞれ独立した接触体として摩擦接触を考慮した。主板と当て板間の摩擦係数は 0.6 とし，その他は 0.4 とした。ボルト軸力は，実験で計測された載荷開始時の初期軸力をボルト下端面全体に強制変位として与えた。ボルトの締め付け順序も考慮した。ボルト軸力導入のステップ終了後，次のステップで主板に引張方向の変位を与えた。

解析結果は図-2 に示すとおりであり，解析は実験を比較的良好に再現できている。表-2 より，応力集中係数は解析値が実験値より若干大きくなる傾向がみられるが，各ケース間での傾向は概ね一致している。

5. ストップホール縁に生じるひずみの推定

当て板上のひずみからストップホール縁のひずみを推定することを試みた。図-4 に参照としたひずみゲージの位置を示す。実験より得られたひずみの比較を図-5 に示す。グラフ中には，切片を 0 とした近似式と決定係数を示す。(a)のひずみはストップホール縁のひずみと非常に良い相関がある。ただし，当て板ボルト締めの case7, case8 には適用できない。当て板ボルト締めの場合でも計測できる(b)のひずみは(a)に比べてばらつきはあるものの，こちらも比較的良好な相関が得られている。

6. まとめ

高力ボルト当て板補修における板厚構成やボルト配置がストップホール縁の応力集中に与える影響を検討した。また，当て板補修を再現できる解析モデルを構築した。さらに，当て板上のひずみからストップホール縁のひずみを推定できる可能性を示した。

謝辞：本研究は日本鋼構造協会「鋼橋の強靱化・長寿命化研究委員会 疲労強度研究部会（委員長 舘石和雄，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。関係各位に深く御礼申し上げます。

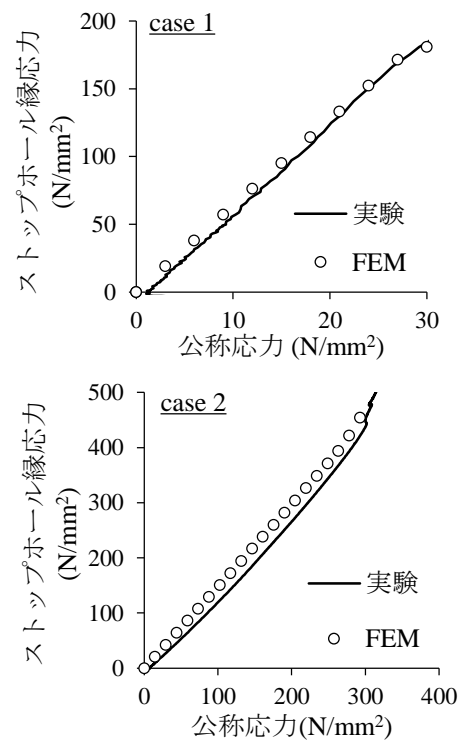


図-2 SH 応力と公称応力の関係

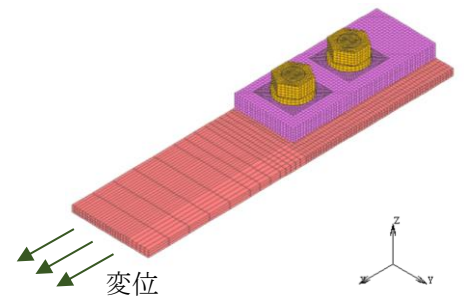


図-3 解析モデル(case2)

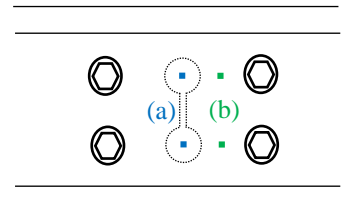


図-4 リファレンス位置

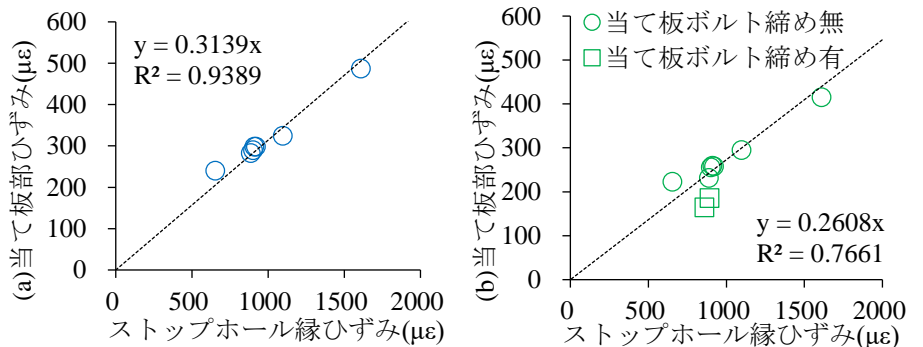


図-5 ストップホール縁と当て板上のひずみの比較