

1. はじめに

鋼床版は、薄い鋼板を溶接により組み合わせた鋼構造であり、大型自動車荷重の通過によって、デッキプレートやトラフリップ部材に複雑な板曲げ変形や極めて高い局部応力を発生させる¹⁾。このことから鋼床版は疲労に対して非常に厳しい環境におかれていると言える¹²⁾。

近年、鋼床版橋において、多数の疲労き裂(図 1.1)が発生しており、その疲労損傷対策が急務となっている。実際の鋼床版橋で適用されている補修法は、き裂の急激な進展を防止するストップホール法(以下「SH」)、損傷した部材の荷重伝達を回復させる当板ボルト工法、損傷したリブを取替えるリブ取替え工法(以下「リブ取替え」)が用いられている。しかしながら、SH 孔の応力集中や当板による剛性増加などによって、局部応力が大きくなり、十分な疲労耐久性を有していない可能性がある。よって、補修後早期に疲労損傷が発生する危険性があるため、補修鋼床版の疲労評価手法の確立が必要である。

鋼構造物の一般的な疲労強度評価は、公称応力範囲に基づいた疲労設計 (S-N 評価)が行われる。

複雑な応力状態下の疲労強度評価手法として、日本鋼構造協会の疲労設計指針 (以下「JSSC 指針」)³⁾では、溶接止端部近傍の局部応力を実測あるいは解析により求め、疲労評価をおこなうホットスポット法が規定されている⁴⁾。しかし、鋼床版の疲労き裂発生点である溶接ルート部の評価や、当板による局部応力の非線形分布により、ホットスポット法を適用できない場合がある。

一方、国際溶接学会の疲労設計指針 (以下「IIW 指針」)では、Effective Notch Stress (以下「ENS」)を用いた疲労評価法が提案されている⁵⁾⁶⁾。ENS は、溶接ルート部・止端部の疲労破壊点における応力を直接解析により求める手法である。しかし、実験での検証や実橋梁における実測評価を行えず、そのため疲労破壊点の ENS と高い相関関係にある実測可能な評価手法を検討する必要がある。

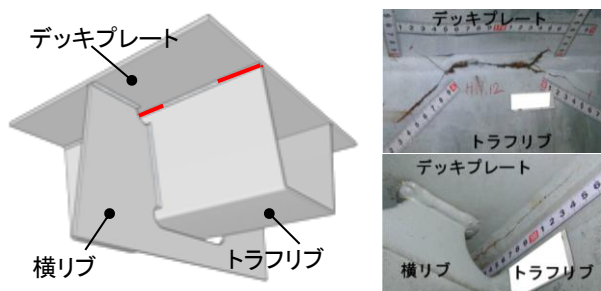


図 1.1 疲労き裂の事例¹⁾

そこで本研究では、より複雑な局部応力性状を有する補修鋼床版を対象として、ENS と相関性の高い応力参照範囲(リファレンスエリア RA)を用いた疲労耐久性評価法の提案を目的とした。なお、本研究では実橋サイズの鋼床版試験体を用いた静的載荷試験、疲労載荷試験および FEM 解析を行った。

2. 補修鋼床版における疲労耐久性の相対的評価

2.1 解析手法

本研究で用いた FEM 解析モデルの全体図を図 2.1 に示す。図 2.2 に載荷ケース (S・R・M) を示した。溶接サイズは 6mm とし、破壊点となる溶接ルート部、リブ止端部、およびデッキ止端部の 3 点に半径 1mm の円孔ノッチモデルを用いた。解析には Msc.Marc 2007 r1、モデル化には Msc.MD R2 Patran を用いた。ENS 適用溶接部の拡大を図 2.3 に示す。

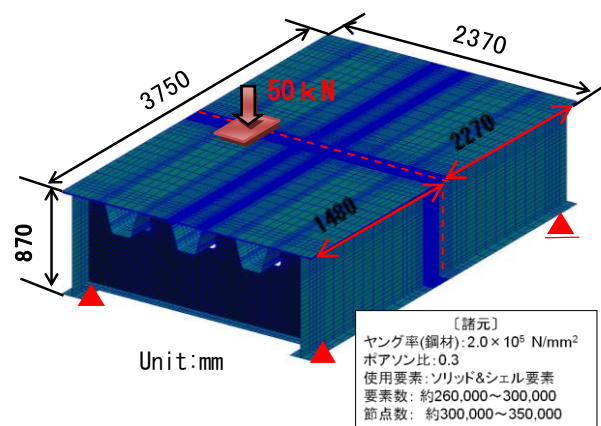


図 2.1 解析モデル(全体)

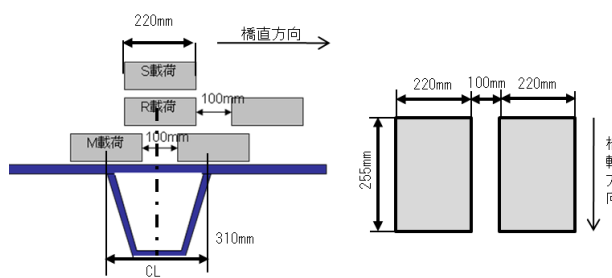


図 2.2 載荷ケース

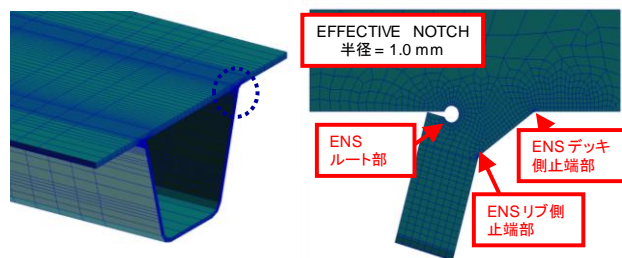


図 2.3 Effective Notch Stress の適用溶接部

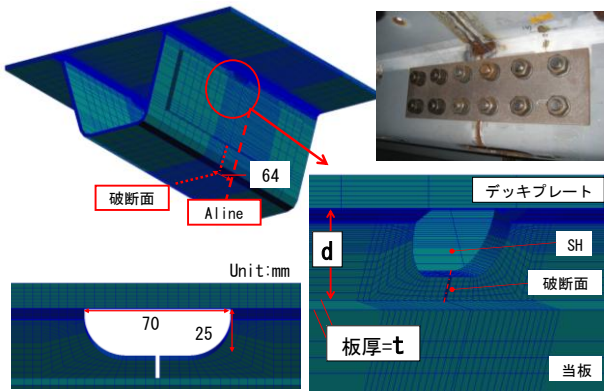


図 2.4 当板ボルト工法+SH モデル

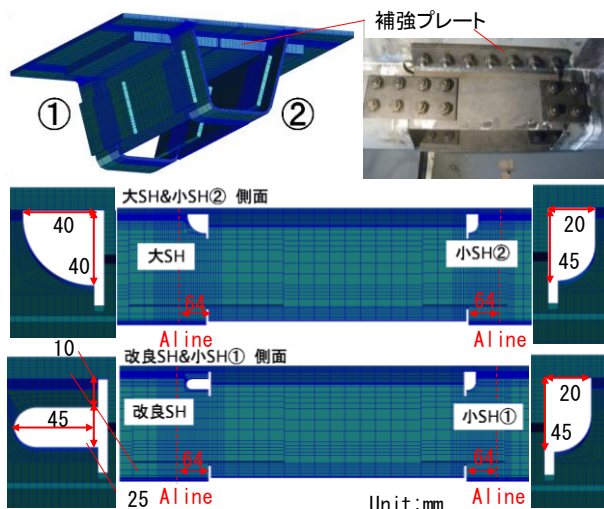


図 2.5 リブ取替え工法+SH モデル

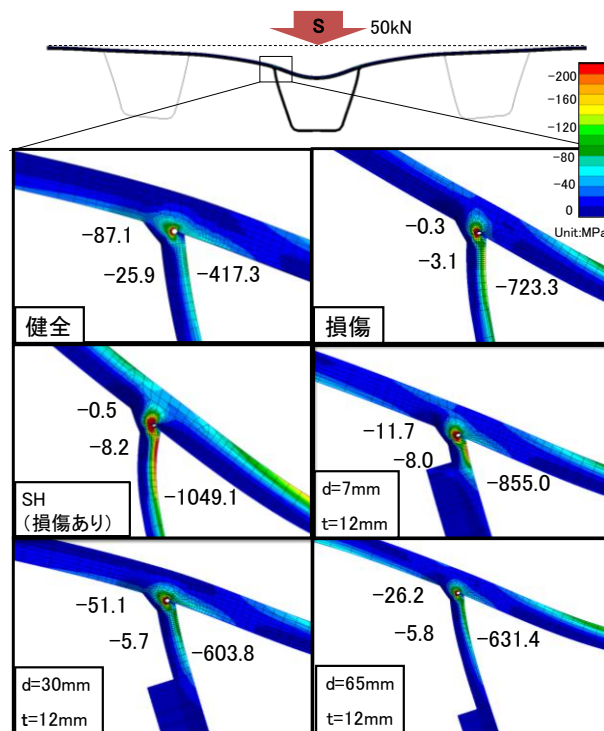


図 2.6 ENS による評価 (当板ボルト工法+SH)

2.2 解析パラメータ

図 2.4 に当板ボルト工法+SH モデルを示す。本工法ではき裂先端に SH を適用し、当板により補強した。解析パラメータは、当板の厚さ $t: 6 \cdot 12 \cdot 22\text{mm} \times$ 当板設置位置 $d: 7 \cdot 30 \cdot 65\text{mm}$ の計 9 ケース、健全、損傷(リブ突合せ溶接破断)、SH(損傷あり・なし)計 4 ケースの合計 13 ケースにて検討を行った。

図 2.5 にリブ取替え工法+SH モデルを示す。図中①側に孔による応力集中を緩和する改良 SH および小 SH①をモデル化し、②側には大 SH および小 SH②をモデル化した。解析パラメータは、改良 SH、大 SH、小 SH①および小 SH②の 4 ケース、健全、損傷(デッキプレート・トラフリブ間溶接の溶接ビード破断)の計 6 ケースの検討を行った。各 SH の寸法形状を図 2.5 に示す。

2.3 Effective Notch Stress 法を用いた疲労耐久性の相対的評価

本検討では、各補修時の ENS を用いて補修効果の比較検討を行った。図 2.6 に当板ボルト工法の一例、図 2.7 にリブ取替え工法 (小 SH②) の検討結果の一例を示す。载荷位置は S 载荷、検討位置は Aline である。また、ルート部、リブ止端部、デッキ止端部の円孔ノッチに発生した最小主応力を図中に示した。

当板ボルト工法+SH の結果として、SH (損傷あり) および当板位置 $d=7\text{mm}$ のモデルでは、損傷時より ENS が増加したことから、補修後の疲労耐久性は低下する。当板位置 $d=30\text{mm}$ 、 65mm では、損傷時に比べると ENS が低下し疲労耐久性は向上するが、健全時の状態までは回復できない。次に、リブ取替え工法+SH の結果として、小 SH②において溶接ルート部 ENS が損傷時と比べて大幅に低減した。また、健全時と比べても ENS が低減した。よって、リブ取替え工法における疲労耐久性の補修効果が高い。

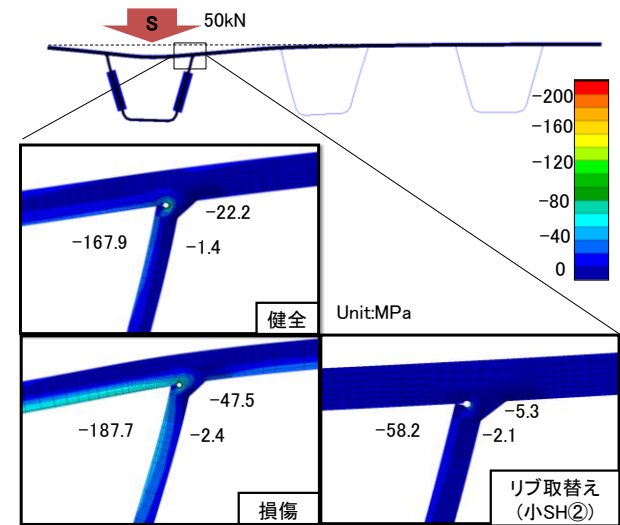


図 2.7 ENS による評価 (リブ取替え工法+SH)

3. 疲労耐久性評価手法の提案

3.1 RA の設定

鋼床版の疲労破壊点となる溶接ルート部および止端部の ENS と相関性の高い評価位置(リファレンスエリア；以後「RA」)の検討を行う。RA はホットスポット法の基本概念に基づき以下とした。

条件①：ホットスポット応力の基本概念を適用し、溶接ビードの形状により発生するピーク応力の影響を含まない範囲にて RA を検討する。

条件②：補修によって発生する局部応力の特性を含む RA を検討する。

条件③：実橋梁および疲労試験で補修後の疲労評価を行うため、ひずみゲージを貼れる箇所とする。

条件④：疲労破壊点である溶接のルート部、止端部の ENS と高い相関関係にある。

以上、①～④の条件を満たす RA の提案を行う。

3.2 RA の検討

(1) トラフリブ方向の RA 検討

図 3.1a)、図 3.1b)に、当板ボルト工法+SH(d=7、t=12)、リブ取替え(改良 SH)のトラフリブ方向応力分布および応力勾配を示す。ここで、応力勾配の算出は、各応力間の勾配 α を求めたものである。また、図中には静的载荷実験の結果も比較としてプロットした。図より得られた結果として、各補修を行った際に、局部的な板曲げ変形がみられる。また、静的実験でもその傾向が概ね一致した。応力勾配では、溶接止端から 1mm の範囲に、ピーク応力の影響(条件①)がみられる。溶接止端 3mm 位置から溶接止端に近づくにつれて応力勾配が線形的に上昇し、条件②を満足する挙動が確認できた。さらに、溶接止端から 5mm 位置以降では、当板(d=7mm)の干渉がみられる。

以上の結果から、RA の条件を満足するトラフリブ方向 RA を溶接止端 3mm 位置とする。

(2) 橋軸方向 RA の検討

図 3.2a)、図 3.2b)に、溶接止端 3mm 位置におけるトラフリブ側面の橋軸方向主応力分布および応力勾配を示す。縦軸に 3mm 位置の主応力および応力勾配、横軸に SH 中央部からの距離を示した。得られた結果としては、SH 近傍で主応力が低下した。これは SH 孔による応力集中の影響と思われる。また、当板+SH では Aline 付近で応力が卓越する。SH 中央から 55mm ~70mm では安定した応力勾配が得られている。

以上のことより、RA の条件を満足する橋軸方向 RA を SH 中央から約 55mm ~70mm の範囲とする。また、応力分布が比較的高い Aline (SH 中央から 64mm 位置)で検証する。

3.3 RA の提案

各補修における、疲労破壊点の ENS と RA(Aline) との相関関係を検討した。検討結果の一例を図 3.4 -a)、図 3.4-b)に示す。また、図 3.4-c)にルート部およびリ

ブ止端部について相関係数 R を整理した。図より当板ボルト工法・SH、リブ取替え工法・SH のいずれも高い相関が得られた。しかし、図 3.4-c)に示すように、载荷位置の違いにより、相関が得られなかったケースもあった。

以上の結果より、疲労破壊点と高い相関にある溶接の止端から 3mm-Aline を RA と提案する。

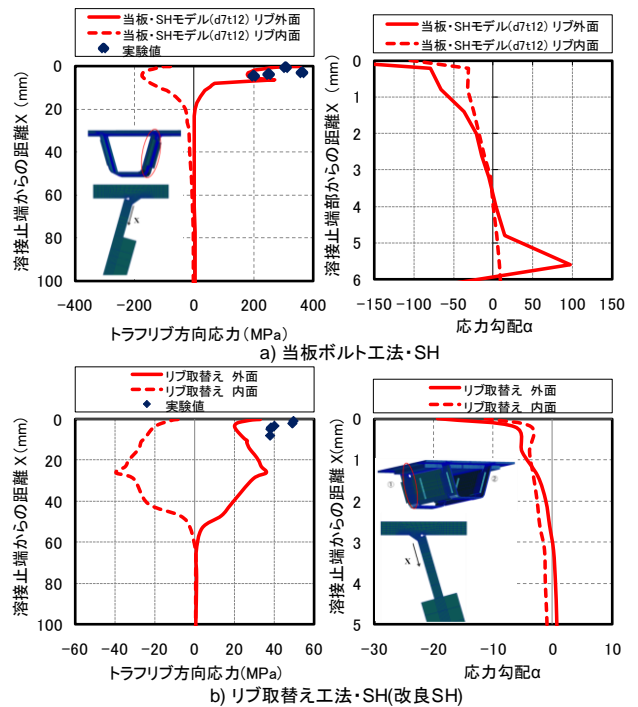


図 3.1 トラフリブ方向応力分布および応力勾配

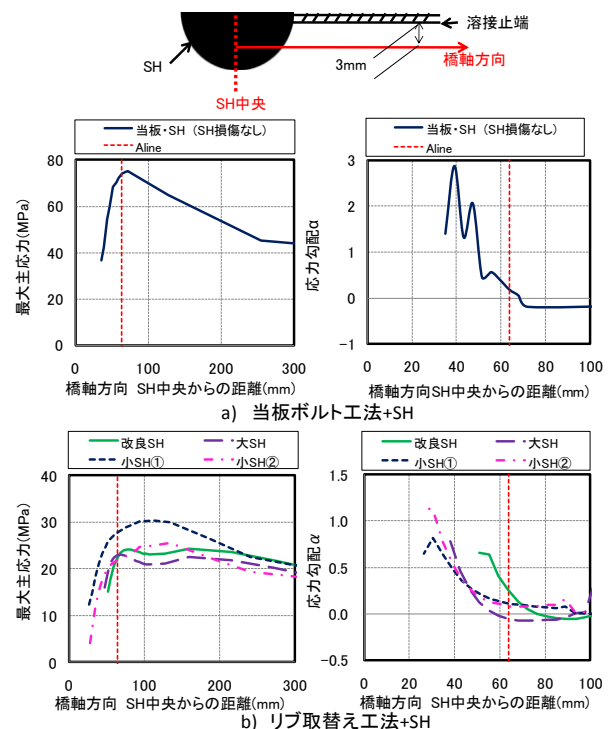


図 3.2 主応力分布および応力勾配分布

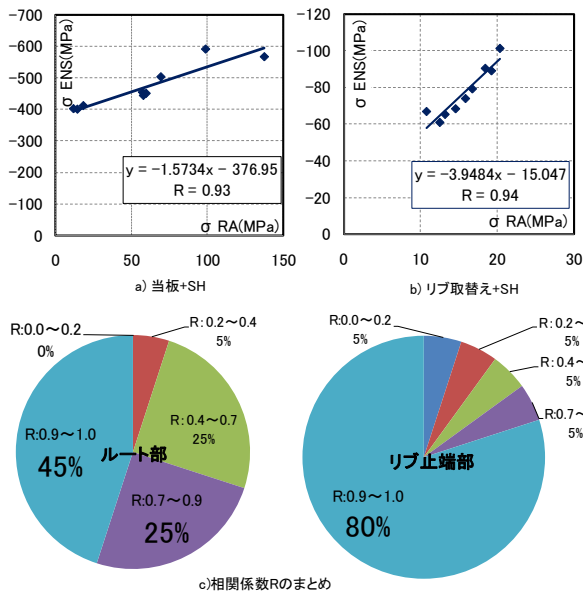


図 3.4 疲労破壊点 ENS と RA 応力の相関

4. 補修鋼床版における疲労耐久性評価法の検証

4.1 実物大鋼床版試験体を用いた疲労試験

提案した RA (溶接止端部 3mm-Aline) の検証として、実物大鋼床版試験体を用いた疲労試験を行った。

試験条件について、写真 4.1 は実物大鋼床版試験体および RA 応力計測の様子を示す。疲労試験の荷重は当板ボルト工法で荷重振幅を 45kN・1.5Hz、リブ取替え工法で荷重振幅 70kN・1.5Hz で行った。

4.2 疲労試験結果

図 4.1 に JSSC-SN 曲線および検出されたき裂の一例を示す。図 4.1 に当板ボルト工法+SH およびリブ取替え工法+SH の結果を示す。また、縦軸に実計測より得られた RA(3mm-Aline) の応力、横軸に繰り返し回数 N を示す。図 4.1 より、リブ 2-②は疲労強度等級 F 等級に相当し、リブ 3-③は疲労強度等級 C 等級が得られた。また、リブ取替え工法後では改良 SH で C 等級、小 SH②で D 等級の結果を示した。

以上の結果から、RA の応力を実測することにより、補修鋼床版の疲労耐久性評価が概ね可能となる。

5. 結論

複雑な局部応力性状を有する補修鋼床版における疲労耐久性評価手法の提案を目的として、疲労破壊点と高い相関関係にあり、実計測可能な評価範囲 (RA) の検討を行った。提案した RA 応力を用いた実物大鋼床版試験体における疲労試験により検証した。

- 本研究で得られた結論を以下に示す。
- (1) ENS法により、補修鋼床版における定性的な疲労耐久性評価が可能である。
 - (2) RAとしては、トラフリブ方向溶接止端部から3mm位置、SH中央から橋軸方向に約55mm~70mmの範囲を提案した。
 - (3) 疲労破壊点のENSと提案RAとの相関関係を検討した結果、補修鋼床版モデルにおいて高い相関が得

られた。ただし、荷重位置によっては相関が得られないケースもあった。

(4) 提案したRAを用いて、補修鋼床版における疲労試験と比較検証した結果、概ね評価可能である。ただし、本検証で行った疲労試験体が大型であり、試験体数も少ないことから、今後疲労試験での追加検証が必要である。



写真 4.1 疲労試験の様子

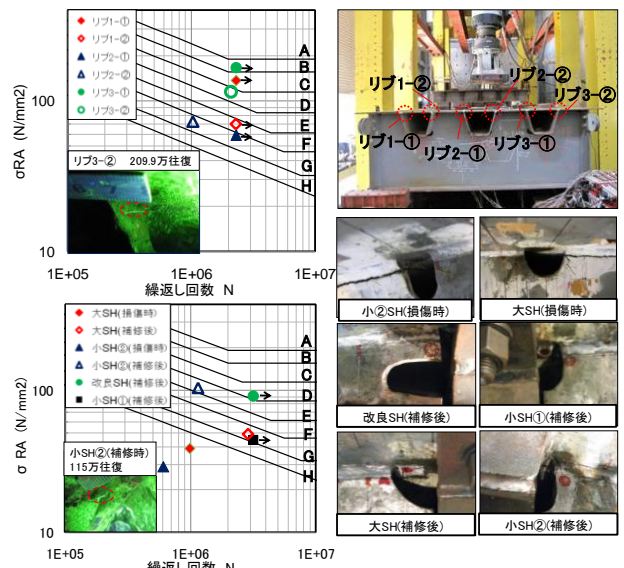


図 4.1 SN 曲線 (JSSC) およびき裂の一例

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造シリーズ4: 鋼床版の疲労 (2010年改訂版), 丸善, 2010.12
- 2) 平林泰明, 下里哲弘, 若林登: 首都高速道路の疲労損傷とその対策, 橋梁と基礎, 2005. 11.
- 3) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 丸善, 2002.3
- 4) 三木千壽, 館石和雄, 山本美博, 宮内政信: 局部応力を基準とした疲労評価手法に関する一考察, 構造工学論文集 Vol.38A, 1992.3.
- 5) Hobbacher, A: Recommendation for Fatigue Design of Welded Joints and Components, XIII-2151r1-07/XV-1254r1-07, 2007.
- 6) 菅沼久忠, 三木千壽: 鋼床版のデッキプレート・トラフリブ間の縦方向溶接部の疲労に対するEFFECTIVE NOTCH STRESSによる評価, 土木学会論文集A, Vol.63 No.1, pp35-42, 2007.