

報告番号	甲 第 12504号
------	------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 疲労き裂に対する当て板補修の設計方法に関する研究
(A Study on Design Methods of Doubler Plate Repair for Fatigue Cracks)

氏 名 清川 昇悟

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、鋼橋の疲労損傷対策として多く用いられる、ストップホール法に当て板補修を併用した場合の疲労耐久性評価法を構築し、当て板補修の合理的な設計法を確立することを目的として、実験および解析的な検討を行ったものである。

1章「序論」では、本研究の背景として、我が国の鋼橋の維持管理の置かれた状況を踏まえ、鋼橋の疲労き裂に対する補修・補強の現状について述べた。そのうえで、研究対象としたストップホール法および当て板補修についてその概要と既往の知見をレビューして現状における課題を整理し、本研究における目的を示した。

2章「高力ボルト当て板補修の補修効果に関する検討」では、高力ボルトで当て板補修することによるストップホール部の応力集中低減効果を明らかにすることを目的として、静的載荷試験および有限要素解析を実施した。検討の結果、当て板の寸法諸元はストップホールの応力集中係数に影響するが、応力集中の増減は当て板による作用応力の増減のみには依存しないことが明らかとなった。

ストップホール応力集中の低減係数は、板厚比およびボルトピッチの影響が大きく、当て板補修の効果を高めるためには、板厚比を大きく（当て板の板厚を厚く）、あるいはボルトピッチを狭くすることが効果的である。また、板厚比およびボルト列数は当て板補修による作用応力の低減に影響する。一方で、ボルトピッチおよびき裂長さは作用応力の低減にはほとんど影響せず、これらは架橋効果によるストップホール変形の抑制に寄与するパ

ラメータであると考えられる。

本検討では、当て板補修の効果を、断面増による作用応力の低減と、架橋効果によるストップホール変形の抑制によるものと考え、この二つの要因を考慮したストップホールの応力集中の推定式を構築した。提案した推定式により、当て板補修後のストップホールの応力集中係数を約 $\pm 10\%$ 以内の誤差で推定できることを示した。

3章「ストップホールにボルト締めされた当て板補修の補修効果に関する検討」では、ストップホールにボルト締めがされた場合の当て板補修の効果を明らかにするため、2章と同様な静的載荷試験と有限要素解析を行った。ストップホールへのボルト締めの効果は、ボルト締めの有無によるストップホール部の応力集中係数の比である応力緩和係数で表すことができるが、当て板補修された場合の応力緩和係数の推定式は確立されていない。よって、本検討では、その推定式を構築することを目的としている。

多くの場合、当て板補修した場合でも、ストップホールをボルト締めすることによってストップホールの応力集中係数を低減することができる。しかしながら、当て板のボルトピッチが狭い場合、あるいは板厚比が大きい（当て板の板厚が相対的に大きい）場合には、ボルト締めの効果が薄れ、場合によっては応力集中係数が微増することが明らかとなった。

本検討ではこれらの分析を踏まえ、パラメトリック解析結果から、当て板補修された場合のボルト締めによる応力緩和係数の推定式を構築した。求めた推定式により、ボルト締めされた当て板補修後のストップホールの応力集中係数を高い精度で推定できた。

4章「狭いボルト配置が摩擦接合継手の静的強度に与える影響」では、狭いボルト配置を当て板補修に適用することを目指し、摩擦接合継手を対象としたすべり耐力およびすべり後の破断耐力に関する検討を実施した。ここでは、現行の道路橋示方書におけるみなし規定の範囲外となるような狭いボルト配置、具体的にはボルト中心間距離を呼び径の3倍以下、縁端距離を1.5倍以下とした狭配置を当て板補修に採用することを目的とし、基礎的な検討として静的載荷試験および有限要素解析を行った。

狭配置としたことによるすべり係数への影響は確認されず、すべり係数は0.45以上を確保できた。一方で、狭配置とした試験体は、標準配置とした試験体に比べてすべり発生後の最大耐力は低下した。しかし、狭配置としても板厚を大きくすることですべり後耐力を標準配置と同程度まで向上することが可能であった。これらの耐力は、狭配置の継手も含め、強度のミルシート値と断面積の設計値を用いた計算式により $\pm 10\%$ 以内の誤差で推定できる。

さらに本検討では、実験の再現解析を行い、はしめけ破断、引張破断いずれの破壊モードに対しても、実験における荷重変位関係を最大耐力まで再現できる解析手法を構築した。また、その解析手法で実施したパラメトリック解析において、狭配置とすることのすべり係数への影響は確認されなかった。

これらの結果より、板厚の増厚や材料強度の向上などによりすべり後耐力を向上させれば、狭配置としても元の継手と同等の性能を確保できる可能性があることを示した。

5章「狭いボルト配置が摩擦接合継手の疲労強度に与える影響」では狭いボルト配置の摩擦接合継手を対象として、その疲労強度に関する検討を行った。

設計基準をレビューした結果、現行の設計曲線における摩擦接合継手の疲労強度等級は、既往研究の実験結果に対して1等級程度危険側の結果を与えていることが示された。

疲労試験の結果、いずれの試験体も主板接合面の表面からフレット疲労き裂が発生して破断に至った。標準配置の試験体は、現行基準と同じ JSSC-B 等級に位置していたが、作用力方向のボルト配置（ボルトピッチ、はしあき）を狭くしたケースでは疲労強度が下がった。特にはしあきの影響が大きく、はしあきを小さくした試験体は JSSC-C 等級となった。一方で、作用力直角方向のボルト配置（ボルトゲージ、へりあき）の疲労強度への影響は見られなかった。

試験体の有限要素解析から得られた最大応力の発生個所は、フレット疲労き裂の発生個所と一致した。また、解析から得られた各試験体の応力集中係数は実験から得た 200 万回疲労強度と良い相関が得られており、摩擦接合継手の疲労強度が応力集中係数を用いて評価できる可能性を示した。

次に、パラメトリック解析により応力集中係数を求め、継手形状パラメータの疲労強度への影響を分析した。その結果、現行基準のボルト継手の強度区分に用いられているボルト列数は継手の応力集中に影響せず、主板厚が継手の応力集中に影響することを明らかにした。既往研究の多列ボルト継手の疲労試験は、ボルト列数と一緒に主板厚を変化させており、主板厚が疲労強度に影響したと考えられる。

以上を踏まえ、有限要素解析の結果から得られた応力集中係数と疲労試験から得た 200 万回疲労強度を用いて、摩擦接合継手の疲労強度を板厚で区分する方法を新たに提案した。

6章「高力ボルト当て板補修の合理的な設計法の提案」では、それまでの検討結果を踏まえ、当て板補修における当て板と主板の荷重分担割合を求め、当て板補修のすべり耐力の推定式を提案した。提案式により計算した当て板のすべり係数の実験値は 0.5 であり、通常の摩擦接合継手におけるすべり係数の設計値 0.45 を上回った。また、すべり耐力比 ζ とすべり係数低下率 λ の関係についても、既往の式で評価が可能であることを示した。これにより、当て板補修におけるボルト本数の照査を行うことが可能となった。

また、提案した当て板補修後のストップホール部の応力集中係数の推定式と、既往研究のストップホール部の疲労強度評価式を用いて、当て板補修後のストップホールから疲労き裂を再発させない応力集中係数の目安を示した。

最後に、本検討で提案した当て板補修の設計法による計算の流れを示した。

7章「当て板補修の効果確認法に関する検討」では、補修効果の簡易な確認方法として、当て板補修後のストップホールのひずみを当て板上の参照ひずみから推定する方法について検討した。

ストップホール近傍に位置する当て板上のひずみはストップホールのひずみと線形の関係があり、これを参照ひずみとしてストップホールのひずみを推定することができる。ストップホールにボルト締めを行わない場合、ストップホール直上に位置する当て板上のひずみを参照ひずみとして用いることができ、ストップホールにボルト締めを行う場合には、作用力軸線上に位置するストップホール部ボルト近傍のひずみを参照ひずみとして用いることができることを示した。また、今回提案した推定式は、実験における参照ひずみからストップホールひずみを約 10%の誤差で推定できており、提案したストップホールひずみ推定法の妥当性が示された。

本研究の成果を活用すれば、疲労き裂にストップホール工法と当て板補修を併用する場合に、ストップホールの疲労耐久性を評価した上で、当て板補修の構造諸元（寸法、板厚等）を合理的に設計することが可能になる。また、補修後の効果確認も、従来に比べて簡易な方法で実施することができる。