

氏 名 宇 郎 名

学 位 の 種 類 博士 (工学)

学 位 授 与 年 月 日 2021 年 3 月 31 日

学 位 論 文 名 新型高力ファスナーを活用した鋼橋の補修・補強技術に関する研究

論文審査委員 主査 山口 隆司

副査 鬼頭 宏明

副査 角掛 久雄

論文内容の要旨

本研究では、鋼橋の耐久性低下のうち課題の多い「腐食・疲労」に対する補修・補強を対象に、接合部の塗装耐久性が向上した皿型ボルトや施工性に優れた片面施工が可能な PHO ワンサイドボルトの適用を考え、これらの新型ファスナーを活用した接合方法の実用化・高度化のための力学性能の評価と腐食した桁端部への合理的な片面当て板補修・補強方法の検討を目的とした。本論文は7章より構成された。各章で得られた主な結論を以下に示す。

第1章では、鋼橋の耐久性低下の支配的要因である腐食・疲労を取りあげ、それらの損傷に対する補修・補強における技術課題を整理した。そして、それらの課題を解決するために設定した、本研究の目的を示した上で本研究の研究フローを示した。

第2章では、皿型ボルトの軸力低下を抑制することができる頭部形状の提案を目的に、皿型ボルトの頭部開き角度を変化させたすべり試験および FEM 解析により、頭部開き角度がすべり耐力に与える影響を明らかにした。その結果、頭部開き角度が大きくなるにつれて、ボルト軸力低下が抑えられ、すべり耐力が向上することを示し、すべり耐力の向上と耐久性の確保の観点から、頭部開き角度を 92° 、製作精度 $-0^\circ \sim +1^\circ$ とすることを提案した。

第3章では、皿型ボルト摩擦接合継手の高度化および製作・施工品質管理方法に着目し、各種の要因がすべり挙動に与える影響を FEM 解析と実験により明らかにした。その結果、ざぐり部の設計切削深さは 10mm、許容範囲 $-2\text{mm} \sim +0\text{mm}$ とすること、ざぐり部の表面処理がすべり耐力に及ぼす影響は小さく、現場加工後、有機ジンクを塗装した状態、もしくは加工ままの状態でも適用可能であることを示した。また、皿型ボルト摩擦接合継手のすべり係数とすべり/降伏耐力比の関係は、高力ボルトの場合と同様であり、高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数の低減式により皿型ボルト摩擦接合継手のすべり係数の低下を安全側に評価できることを示した。

第4章では、ナットの高耐久化を図ることを目指し、M22 従来高力六角ナットの締付けに支障がない部位を改

良し、耐久性を向上させた新形状ナットをFEM解析と実験から提案した。さらに、ナットの性能確認試験を実施し、新形状ナットが従来形状と同じ力学的性能を有することを示した。

第5章では、高力六角ボルトをコア部品とした新型片面施工PH0ワンサイドボルトを鋼橋の補修・補強へ適用すべく、ボルト単体の性能確認試験、一面摩擦接合継手のすべり試験、Uリブ鋼床版に載荷実験、長期間リラクゼーション試験、疲労試験などの検討を行い、それが有効であることを明らかにした。すべり試験結果より、PH0ワンサイドボルト一面摩擦接合継手のすべり係数は $0.44 \sim 0.51$ 程度であり、締付による部材間の接触力は軸力のそれより低く、継手のすべり強度は通常の高力ボルトより約30%~40%程度低下することを示した。このため、PH0ワンサイドボルトを使用する場合には、設計軸力または設計すべり係数の低減を考慮する必要があることがわかった。Uリブ鋼床版の下面補修後の載荷試験結果より、床版の設計荷重をはるかに上回る300kNを載荷した場合でも当て板とUリブとの間にすべり現象が見られず、PH0ワンサイドボルトは従来高力ワンサイドボルトとほぼ同様な挙動を示した。

第6章では、腐食した桁端部を対象に、高力ボルトや高力片面施工ボルトを用いた片面当て板施工を想定した当て板補修構造について、その補修面積とボルト位置が桁端部の補修効果に与える影響をFEM解析で明らかにし、当て板の最小寸法と望ましい接合位置について整理した。支点上補剛材の柱座屈の照査で考える有効断面積のうち、欠損範囲の全強を当て板が分担すると仮定して計算することで、当て板補修部の必要ボルト本数を設計上削減することができた。また、設計で決定されるボルト本数よりも少ないボルト本数で十分な補修効果が得られることを実験により検証した。

最後に、第7章では、本研究で得られた結論をまとめ、新型ファスナーを活用した橋梁の補修・補強技術をより発展させ、橋梁の長寿命化を実現するために、新型高力ファスナーの実用化・高度化に向けた技術課題をまとめた。今後は、皿型ボルトの現場施工管理の簡略化および施工効率の向上の点から、ピンテールの破断でトルクを管理するトルシア皿型ボルトの開発が望まれる。また、PH0ワンサイドボルト摩擦接合継手のすべり耐力低下を解決するために、一層のバルブスリーブの形状改良、新たなしくみによる部材間接触力の向上が不可欠であることを述べた。

論文審査結果の要旨

近年、社会基盤構造物の高齢化が問題となっており、鋼橋においても腐食や疲労に起因する部材耐力の低下が顕在化してきている。そのため、これら代表的な損傷である「腐食」と「疲労」に対する簡易で高耐久な補修・補強技術が求められている。本論文はこのような背景のもと、頭部形状を平滑にした皿型高力ボルトや片面施工が可能な高力ボルトなどのメカニカルな新型ファスナーを活用することで鋼橋・鋼部材接合部の耐久性の向上をはかることを考え、新型ファスナーを活用した接合・補修方法の実用化・高度化を目的に、それらを用いた接合部の力学性能の解明と性能を発揮するための仕様の設定、腐食した鋼橋桁端部の合理的な補修・補強方法について検討している。

まず、皿型高力ボルトの頭部開き角度がすべり挙動に与える影響を明らかにし、すべり耐力の向上と耐久性の確保の観点から頭部開き角度を 92° 、製作精度 $0^\circ \sim +1^\circ$ とする仕様を提案している。

さらに、皿型高力ボルト摩擦接合継手の高度化および製作・施工品質管理方法に着目し、各種の要因がすべり挙動に与える影響を明らかにしている。その結果、ざぐり部の設計切削深さは10mm、許容範囲 $-2\text{mm} \sim 0\text{mm}$ とする

こと、ざぐり部の表面処理がすべり耐力に及ぼす影響は小さく、現場加工後、有機ジンクを塗装した状態、もしくは加工時の状態で適用が可能であることを示している。また、皿型高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数とすべり/降伏耐力比の関係は、高力六角ボルトの場合と同様であり、高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数の低減式により皿型高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数の低下を安全側に評価できることを示している。

次に、ナットの高耐久化を図ることを目指し、M22 従来高力六角ナットをプロトタイプに、締付けに支障がない箇所形状改良を行い、耐久性を向上させた新形状のナットを解析と実験から提案している。

次に、高力六角ボルトをコア部品とした新型片面施工高力ボルトに対して、ボルト単体の性能確認試験、一面摩擦接合継手のすべり試験、Uリブ鋼床版載荷実験、長期間リラクゼーション試験、疲労試験を行い、当て板補修に有効であることを明らかにしている。

最後に、腐食した桁端部を対象に、新型ファスナーを含む高力ボルトを用いた片面当て板施工を想定した当て板補修構造について、その補修面積とボルト配置が桁端部の補修効果に与える影響をFEM解析で明らかにした上で、必要な当て板の最小寸法と接合位置を補修効果との関係により整理している。また、支点上補剛材の設計で決定されるボルト本数よりも少ないボルト本数で十分な補修効果が得られることを実証している。

以上より、本論文で着目した新型高力ファスナーを活用した接合・補修方法および腐食した鋼橋桁端部の合理的な当て板補修方法について多くの知見が示され、実務適用への道筋をつけている。これらの内容はいずれも新規性、かつ実用性が高く、橋梁工学の発展に寄与するところが大きい。したがって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格を有すると認める。