

京都大学	博士（工学）	氏名	飯田哲也
論文題目	既設橋梁の高力ボルト残存軸力と軸力管理方法に関する研究		

（論文内容の要旨）

本論文は、鋼道路橋の現場継手において、昭和 40 年頃からリベットに代わって高力ボルトが使用されるようになり、その設計・施工では、ボルト強度が 7T から始まり 13T まで高強度化される中、主に摩擦接合継手が適用され、高力ボルトに導入する軸力の管理が安全上重要であるが、供用後、F11T 強度以上の高力ボルトに遅れ破壊が生じたり、数十年が経過して、F10T 強度の高力ボルトの残存軸力が大きく低下している現状を踏まえて、軸力低下の特徴・原因究明ならびに現有軸力・すべり係数に基づく摩擦接合継手の残存性能、鋼橋の品質確保のための高力ボルトの軸力管理法について取りまとめたものであり、7 章からなっている。

第 1 章では、研究の背景および高力ボルトの変遷・種類、高力ボルトの締付け規定の変遷、高力ボルト摩擦接合継手面の変遷、高力ボルト軸力の経年変化、研究目的および論文の構成について述べており、現在のわが国の鋼道路橋で使用されている高力ボルト摩擦接合継手におけるボルト種類、締付方法および締付け機械、摩擦接合面の違いが継手の力学的事項へ及ぼす影響を取りまとめている。

第 2 章では、供用中の鋼橋における高力ボルト摩擦接合継手の残存ボルト軸力評価のため、供用中の実橋において、建設年・橋梁形式・ボルト種類・摩擦接合面、架橋環境が異なる橋梁から高力ボルトを抜取り、その残存軸力を整理・分析し、I 桁より箱桁、狭隘な締付部位で顕著な軸直低下を生じていることを示している。また、溶融亜鉛めっきおよび耐候性仕様の特種高力ボルト (F8T・F10TW) の残存軸力評価も行い、一般的高力ボルトとは異なる残存軸力の傾向であることを示している。なお、供用中の実橋から高力ボルトを抜取り、そのデータ信頼性を高めるためには、より多くの標本が必要となるため、効率的に残存軸力を測定するためのキャリブレーション装置の開発が必要であり、取扱いが簡易でどこでも計測が可能な測定精度の高い装置を開発した。

第 3 章では、34 年間供用され撤去した鋼板桁橋の高力六角ボルト摩擦接合継手の残存性能評価を行っている。長期間使用された実橋継手部の各種評価をおこなっている。ここでは、残存軸力の調査に加え、摩擦接合面を温存した降伏先行型継手を製作し、引張耐力確認試験を行った結果、34 年の経過後においても高力ボルト摩擦接合継手の残存性能が高いことを確認している。また、実構造物の継手は、母板降伏先行型の高力ボルト摩擦接合継手であるため、継手部から小型試験体を切出し、摩擦接合面の摩擦係数確認試験を実施し、摩擦係数が設計基準で規定されている値以上であることを確認している。

京都大学	博士（工学）	氏名	飯田哲也
------	--------	----	------

第4章では、製作工場内で仮組立検査後から工場塗装および現場搬入までの限られた時間で、実物大鋼箱桁試験体を用いた高力ボルト導入軸力確認試験として、鋼箱桁断面の部材寸法計測、摩擦接合面の計測、締付け部位別の高力ボルト導入軸力確認と締付け直後のリラクゼーション確認に加え、様々な締付け順序の違いによる高力ボルトの導入軸力を検証している。その結果、安定した環境で精度の高い桁の組立てができれば、その締付け部位に関係なく、高力ボルトの導入軸力のばらつきは非常に低くなることを確認している。また、桁連結時の目違い確認においては、高力ボルトを本締めするまで、判断ができないため、テーパをつけたり、フィラーを入れたりすることでの補正は不可能であり、工場製作時に十分検討して、対策処理をすることが必要であることを確認している。さらに、現場における桁架設においては、組立精度が導入軸力に影響を与えるため、現場ではその精度確保するための対策も重要であるとしている。なお、高力ボルトの締付け順序について、様々な方向からその導入軸力の影響について評価しており、故意に締付け順序を怠らない限り、その締付け順序の影響は無視する程度の結果であることを確認している。

第5章では、高力ボルト継手の性能の変動特性を把握するため、多様な条件下で高力ボルト締付け作業を実施し、トルクやマーキング回転角量、ピンテールの破断による定性的な管理では、作業環境に左右されるため、導入軸力を直接管理することが重要であることを確認している。特に、高力六角ボルト締付けにおいて、締付け機械特性である鏝の配置位置に対して、その回転角の違いによる軸力測定を行った結果、回転角の大きい方が、導入軸力が大きくなるなり、ばらつきの要因となることを確認している。また、ボルト中心間隔が大きくなるにつれて、導入軸力が低くなることを確認している。なお、高力ボルトの長期軸力低下は、ボルトの長さや遊びねじ長さの違いよりも、摩擦接合面の塗膜やフィラーの影響を受けることを長期リラクゼーション試験により明らかにしている。

第6章では、デジタル画像処理による高力ボルト軸力評価およびボルト継手の信頼性確保の方策として、誰でも簡単に評価できることを意識したデジタル画像解析による非破壊ボルト軸力測定方法として、最小2乗マッチング法による高力ボルト導入軸力の測定評価法を開発している。ここでは、固定望遠撮影方式により単視点での2次元的な画像変位計測法を用いて、M22(F10T)の高力六角ボルト頭頂部の締付け段階ごとの軸力変化を検出することが可能であることを確認するとともに、近接マクロ撮影方式を採用することで、固定望遠撮影方式のように高い精度で軸力推定できないものの、多様な橋梁架設現場で高力ボルト導入軸力の計測方法として適用可能であることを示している。

第7章では、本研究で得られた成果および結論を要約して述べ、将来的な信頼ある高力ボルト摩擦接合継手の設計施工に関する課題について示している。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、鋼道路橋の現場継手に関するものである。昭和40年頃からリベットに代わって高力ボルトが使用されるようになり、高力ボルトの高強度という特徴を活かし、鋼構造物では主に摩擦接合継手が採用され、高力ボルトに導入する軸力は、安全上重要な管理項目である。供用後、F11T強度以上の高力ボルトに遅れ破壊が生じたり、数十年が経過して、F10T強度の高力ボルトの残存軸力の大きな低下が明らかになり、継手の健全度評価が重要な課題となっている。この課題を解決すべく、軸力低下の特徴・原因究明ならびに現有軸力・すべり係数に基づく摩擦接合継手の残存性能評価、鋼橋の品質確保のための高力ボルトの軸力管理法についてまとめている。

- ①建設年・橋梁形式・ボルト種類・摩擦接合面、架橋環境が異なる供用中の鋼橋から高力ボルトを抜取り、その残存軸力を整理・分析している。I桁より箱桁、締付作業空間が十分確保できない部位において顕著な軸力低下が生じていることを確認している。また、溶融亜鉛めっきおよび耐候性仕様の特種高力ボルトにおいては通常の高力ボルトとは異なる残存軸力の傾向であることも確認している。
- ②34年間の供用後、撤去された鋼板桁橋の高力六角ボルト摩擦接合継手の残存性能評価を評価している。高力ボルトの残存軸力は設計値をほぼ満足しており、実橋継手の引張耐力試験の結果、降伏先行型継手として十分な残存性能を有し、また、切り出した小型試験片を用いた摩擦接合面のすべり試験を行った結果、設計で用いられるすべり係数は確保されていることを確認している。
- ③高力ボルトの現有軸力の低さが建設時の施工管理上の問題と考え、実物大鋼箱桁試験体に対する高力ボルト導入軸力の確認試験を実施した結果、高力ボルトの導入軸力は、安定した環境で精度の高い桁組立てができれば、その締付け部位・締付け順序に関係なく、高力ボルトの導入軸力のばらつきは非常に小さくなるとしている。
- ④高力ボルト締付け実験を実施し、トルクやマーキング回転角量、ピンテール破断による定性的な管理は環境に左右され、導入軸力を直接管理することが望ましいとしている。首下長さと遊びねじ長さが異なる高力ボルトの1年間の長期リラクセーションを検証している。高力ボルトの軸力低下は、ボルトの長さや遊びねじ長さ違いよりも、摩擦接合面の塗膜やフィラー等の影響を大きく受けることを明らかにしている。
- ⑤摩擦接合継手の信頼性確保にはボルト軸力管理が重要であり、デジタル画像処理による高力ボルトに導入した軸力評価手法として、ボルト頭部変形を撮影した画像を用いた最小2乗マッチング法による高力ボルト導入軸力の測定評価法を開発している。

本論文は、以上のように、既設橋梁の摩擦接合継手の残存性能評価、特に橋梁の品質確保のための高力ボルトの軸力管理法について取りまとめたものであり、学術上、実務上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年8月18日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 令和4年12月26日以降