

高力ボルト摩擦接合継手の耐久性 評価システムの開発

石原靖弘¹・小林剛²・狩野正人³・谷平勉⁴・宮本文穂⁵

¹正会員 博(工) 片山ストラテック(株) 橋梁設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21)

²正会員 工修 片山ストラテック(株) 橋梁設計部 (同 上)

³正会員 工修 JIPテクノサイエンス(株) 技術研究所 (〒600-8815 京都市下京区中堂寺粟田町93)

⁴正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

⁵フェロー会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

本研究は、高力ボルト摩擦接合継手の耐久性評価システムを開発するための基礎的な研究を行ったものである。高力ボルト摩擦接合の耐力を決定付ける重要な要素はボルト軸力ならびにすべり係数であるが、著者らは経年変化に関するデータを収集するため、実橋を対象として測定および実験を行ってきた。

まず、収集されたデータを一元的に管理し、検索、引用、追加、修正が容易なデータベースシステムを構築した。次に、データベースから引用したデータを用いて、ニューラルネットワークによる高力ボルト摩擦接合軸力低下推定システムを開発した。また、システムを検証するため、実橋測定結果との比較を示し、システム推定結果が比較的良好に一致していることを示した。

Key Words : *high-strength friction grip bolted joint, maintenance, durability, bolt tension, neural network system, data base*

1. はじめに

昭和40年代を中心に数多く建設された道路構造物が供用後30年以上を経過した現在、我が国では本格的な維持管理の時代を迎えようとしている。その一方で、昨今のマスコミの論調に見られるように道路建設に対する社会的評価がますます厳しくなっており、国家財政の危機に伴う公共事業削減要請とともに、道路建設投資も抑制される傾向にある。そのような中で、新設される道路構造物の合理化はもちろんのこと、維持管理においてもその効率性がますます重要視されてくるものと考えられる。そのため最近では、ブリッジマネジメントシステム¹⁾やライフサイクルコスト²⁾といったテーマが話題となっている。

また、これらのシステムを有効にするためには、要素技術の確立が不可欠であると考えられる³⁾。鋼橋の維持管理を考えた場合、鋼の素材劣化は無いため橋を構成する様々な構造要素について、材料的、力学的あるいは機能的な面からその経年劣化特性を把握する必

要がある。そして、点検調査結果等から構造要素あるいは橋全体の余寿命を正確に予測し、適時に適切な補修を行うことが維持管理の効率性につながるものと考えられる。そのためには、膨大な知識(データ)を蓄積し、豊富な経験に基づく的確な判断力が求められることから、コンピュータの情報処理技術を利用することが有効である⁴⁾。

一方、著者らは鋼橋の一構造要素である高力ボルト摩擦接合継手に着目し、その経年劣化特性を解明すべく、実橋調査を中心に研究を行ってきた⁵⁾⁶⁾。周知の通り、高力ボルト摩擦接合は鋼板相互を高力ボルトによる高い圧縮力で締め付け、摩擦により応力伝達を図るものである。従って、その耐力はボルト軸力およびすべり係数という2大要因に左右される。これらは施工当初からばらつきを有しており⁷⁾、また経年的に変化すること⁸⁾が知られている。

このような現象は高力ボルト摩擦接合が使用され始めた昭和40年代前後から実験を中心に研究されてはきたが⁹⁾、実橋においては予想外に過酷な環境(振動、

腐食等)に曝される場合が多く、また施工管理上の問題が影響し、実験で得られたデータより危険側にあることが指摘されている⁹⁾。

このため、橋梁管理者の多くが高力ボルト継手を対象とした定期点検を行っており、特に、ボルト軸力に関しては、遅れ破壊による損傷や軸力不足の問題が指摘されている¹⁰⁾。

一方、ボルト軸力の点検手法としてはハンマーによるたたき点検が主流であるため、その作業効率や点検精度が問題となっている。従って、最近では機械的に軸力測定できる機器の開発が行われており、例えばハンマーによる打撃波形と軸力の関係をニューラルネットワークにより学習させ、軸力を推定するシステム¹¹⁾や超音波の伝播速度の相違から軸力を推定する機器¹²⁾の開発が行われている。しかし、これらの機器を用いるにしても、現場での測定作業が必要となる。

著者らは、これまで多数の実橋測定データを収集・蓄積してきたが、これらのデータを分析することにより、高力ボルト摩擦接合継手の耐久性を評価できないかと考え研究を進めてきた^{13),14)}。

その結果、高力ボルト摩擦接合継手耐久性評価システムの一部として、本格的なデータベースシステムを構築するとともに、ニューラルネットワークを用いた高力ボルト軸力推定システムを開発し、実橋において検証を行った。

2. 高力ボルト摩擦接合の耐久性評価システム

高力ボルト摩擦接合の終局耐荷力であるすべり耐力(F)は、継手形状が決まればボルト軸力(N)とすべり係数(μ)の積で表される。

$$F = m \cdot n \cdot \mu \cdot N \quad (1)$$

ここに、 m は摩擦面数、 n はボルト本数である。

耐久性を検討する場合、すべり係数(μ)およびボルト軸力(N)を時間の関数と考え、建設後 t 時間経過後のすべり耐力を推定することになる。すなわち、

$$F(t) = m \cdot n \cdot \mu(t) \cdot N(t) \quad (2)$$

である。すべり耐力 $F(t)$ が規定値以上であれば問題ないが、規定値を下回ればボルトの取り替え等補修を検討することになる。

高力ボルト摩擦接合耐久性評価システムの概念図を図-1に示す。すなわち、本システムは①高力ボルトデータベースシステム、②軸力低下推定システム、③すべり係数推定システム、④耐久性評価システムの4つのサブシステムから構成される。

高力ボルトデータベースシステムは、測定データ

(ボルト軸力、すべり係数)はもちろん、測定橋梁ならびに継手の諸元を整理して格納し、必要に応じて検索、参照等が容易に行えるシステムである。また、軸力低下推定システムは、データベースに蓄積された軸力測定データを分析し、評価対象となった橋梁のボルト軸力 $N(t)$ を推定するシステムである。

同じく、すべり係数推定システムは、データベースに蓄積されたすべり係数測定データを分析し、対象橋梁のすべり係数 $\mu(t)$ を推定するシステムであるが、残念ながら現時点ではデータ数が少ないため有効に機能しているとはいえない。

なお、④耐久性評価システムは②軸力低下推定システムおよび③すべり係数推定システムにより推定された結果を基に、現時点あるいは将来の耐荷安全性を評価するシステムである。橋梁管理者はこの結果を参考に、予算との関係を勘案しながら維持補修を検討することになる。

ここでは、①、②の内容を中心に報告する。

3. データベースシステムの構築

ここでは、これまで著者らが実橋を中心に行ってきた高力ボルト摩擦接合継手の残存ボルト軸力測定結果をもとに構築したデータベースシステムの概要を述べる。

(1) ボルト軸力の測定

ボルト軸力の測定は、大阪近辺の道路橋および歩道

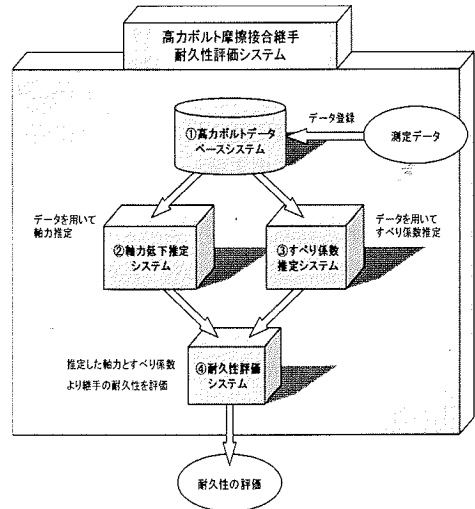


図-1 高力ボルト摩擦接合継手耐久性評価システムの概要

橋の高力ボルト摩擦接合継手を対象に行った。測定方法は最も精度の良いと思われるひずみゲージ法¹⁵⁾である。測定を行うためには、継手部に接近する必要があるため、塗装塗り替え時、ボルト取り換え時に足場がある時や、橋梁撤去時などの機会を捉えて行った。

また、測定ボルトの選定に当たっては、1継手内にあるフランジ、ウェブ等のボルト群の中からできるだけ数多くランダムに抽出するものとした。

なお、測定から直接得られるデータはボルト頭部ひずみとボルト軸力であるが、要因分析に用いるため、橋梁データ（形式、荷重、周辺環境、建設年度）、継手データ（測定部位、腐食状況、摩擦面処理方法）および高力ボルトデータ（標準軸力、設計軸力、種別、材質、ボルト径、首下長さ、腐食状況）もわかる範囲で調査した。

(2) データベースシステムの構築

データベースを構築する際に重要となるのは、調査により得られた測定データを効率的に蓄積し、データを統合的に管理・運営していくことである。従って、蓄積されたデータ群の中から検索・参照が容易であり、かつ新規データの追加が容易にできることを目的として、高力ボルトデータベースシステムを構築した。

本データベースシステムの機能を図-2に示す。登録されているデータを参照する「データ参照機能」、データの登録・変更および削除を行う「データ処理機能」、登録されたデータ群の中から特定のデータを探し出す「検索機能」の3つから構成されている。

本データベースシステムの特徴は、採取したデータを橋梁単位ではなく継手単位で時系列的に格納している点である。これは経年変化による高力ボルト軸力低下を調べるにはデータが時系列的に分けられている方が都合なためである。したがって、同一の継手から採取したデータであっても測定年月日の違うものはそれぞれ別のデータとして本データベースシステムに格納されている。また、データ入力時に起こり得るミスを減らすとともに処理の簡易化を図るため、一部の数値入力データを除き、入力項目から選択するという方法をとっている。これによりデータ入力時に起こり得るミスを減らすとともに処理の簡易化を図っている。また、データ項目間の関連を調べ、その関連性に基づいたテーブル構造で構成されているため、将来的に本データベースシステムの改良が必要となった場合でも、容易に改良できる構造となっている。

本データベースシステムの構築により高力ボルト摩擦接合継手の耐久性評価に必要なデータの一元的な管理が可能となった。

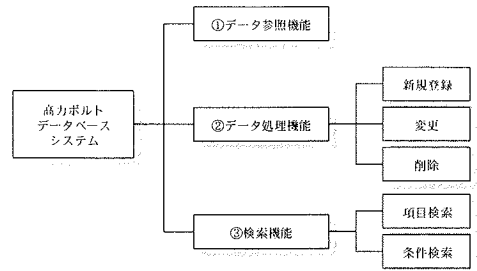


図-2 データベースシステムの概要

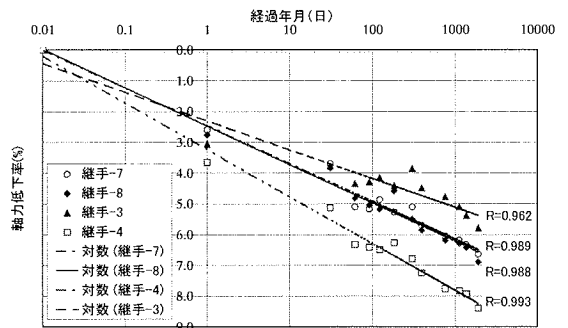


図-3 軸力低下モデルと実測値の比較

4. ボルト軸力低下推定システムの構築

(1) 軸力低下モデル

軸力低下曲線のモデル化にあたり、前研究¹⁴⁾では線形粘弾性モデルとして最も基本的な Maxwell モデルを用いてきた。しかし今回、実橋における長期測定結果⁹⁾から同一ボルトにおける時系列データが得られたため、回帰分析を行うことにより新たな軸力低下モデルを求めた。なお、回帰分析に用いたデータはボルト12本を5年間追跡調査したものである。

すなわち、軸力残存率 N_r (%), 時間 t (hour)を用いて式(3)で表わすものとした。

$$N_r = \begin{cases} 100 & 0 \leq t < 0.01 \\ 100 - a \cdot \ln(t) + a \cdot \ln(0.01) & t \geq 0.01 \end{cases} \quad (3)$$

このモデルと実測値（経年変化データ）とを比較し、図-3に示す。同図より、提案した軸力低下モデルは実測値と強い相関関係を有しており、比較的良好に一致していることがわかる。

(2) 軸力低下推定システムの構築

上記の軸力低下モデルと階層構造ニューラルネットワークを用いて高力ボルト軸力低下推定システムを構

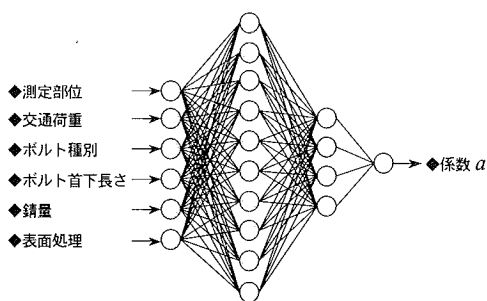


図-4 軸力低下推定システムの構造

表-1 入力項目とカテゴリー

入力項目	カテゴリー
測定部位	下フランジ
	上フランジ
	ウェブ
交通荷重	大 (幹線道路, 交通量大)
	中 (地方道路, 交通量小)
	小 (歩道橋)
ボルト種別	高力六角ボルト
	グリップ型高力ボルト
	トルシア形高力ボルト
ボルト首下長さ	短 (65mm 以下)
	中 (70~95mm)
	長 (100mm 以上)
錆量	多 (錆による断面欠損有)
	中 (全体に浮錆有)
	少 (錆無 or 点錆程度)
表面処理	ショットブラスト
	無機ジンクリッチペイント
	溶融亜鉛メッキ

築した。図-4 にシステムの構造を示す。入力層 6 ユニット、第一中間層 10 ユニット、第二中間層 4 ユニット、出力層 1 ユニットの 4 階層構造のニューラルネットワークである。ここで、入出力層のユニット数は固定しているが、中間層の構造はユーザーが自由に設定することができ、今回は試算結果より最も精度が良い中間層数およびユニット数を選定した。なお、階層構造ニューラルネットワークの入力項目は表-1 に示すように、ボルト軸力低下に影響を与える要因を検討した結果、測定部位、交通荷重、ボルト種別、ボルト首下長さ、錆量、表面処理の 6 項目を選定した。また、各項目に対して表-1 に示すカテゴリーを定義しており、それぞれ 0~1 の値に数値化している。

表-2 実橋ボルト軸力測定結果

測定部位	ウェブ	下フランジ
測定本数	12	8
測定ボルト軸力の 平均値 (kN)	184.0	177.6
設計軸力 (kN)	216.0	216.0
軸力低下率 (%)	14.8	17.8
変動係数 (%)	5.9	12.1

表-3 検証に用いた橋梁のカテゴリー

入力項目	カテゴリー
測定部位	ウェブ, 下フランジ
交通荷重	大 (幹線道路, 交通量大)
ボルト種別	高力六角ボルト
ボルト首下長さ	中 70mm (ウェブ)
	中 95mm (下フランジ)
錆量	中 (全体に浮錆有)
表面処理	ショットブラスト

なお、学習データは前述のデータベースシステムから引用しており、現在 12 橋、43 継手 (ボルト本数 726 本) のデータを用いているが、古い橋の測定データが多いため、ボルト種別は高力六角ボルトで表面処理はブラストが多いという特徴がある。

ニューラルネットワークの出力項目は軸力低下モデルにおける勾配を表す係数 a である。このシステムにより継手の状態に対応した軸力低下曲線の勾配を推定することが可能である。

5. システムの検証

本研究で構築したシステムの精度を検証するため、実橋測定データとの比較検討をおこなった。

(1) 検証データの諸元

検証用データは、システムに用いた学習データとは異なる既設橋梁の高力ボルト摩擦接合継手の実測データである。対象橋梁は 1970 年に交通量の多い幹線道路に架設された鋼 2 径間連続 1 桁橋であり、2002 年度にボルト取り替え工事が行われた際に軸力測定を行った。従って、供用後 32 年経過していることになる。

主桁の高力ボルト摩擦接合継手部より、20 本 (ウェブ 12 本, 下フランジ 8 本) の残存軸力を測定した。高力ボルトはサイズ M22, 材質 F11T であった。軸力測

定方法は頭部ひずみゲージ法¹⁵⁾である。測定結果(検証用データ)を表-2に示す。また、検証用データのカテゴリーを表-3に示す。なお、本ボルトの設計軸力は当時の基準¹⁶⁾より推定した。

(2) 推定データとの比較結果

図-5 および図-6 にウェブと下フランジにおけるシステム推定データ(軸力低下曲線)と検証データの比較結果を示す。両図より、若干の誤差はあるもののシステム推定値は、実測値を比較的精度良く推定していることがわかる。これは、今回の検証用に用いたデータのカテゴリーに着目した場合、ボルト種別(六角)、首下長さ(中)、表面処理(プラスト)といった項目がデータベースに最も多く、十分にシステムが学習できたため、精度良く推定できたものと思われる。

すなわち、データベースにデータ数が少ないカテゴリーを有する検証データであった場合、実測値とシステム推定値がかけ離れてしまう可能性もある。例えば、グリップ型高力ボルトのデータ数は極端に少ないし、首下長さ 100mm を超える長い分類のボルトのデータも少ない。また、表面処理にしてもプラストに比べて溶融亜鉛メッキのデータが不足している。これら不足しているデータをカテゴリーに有する継手の軸力低下曲線を推定した場合、信頼性は乏しいと考えられる。

ニューラルネットワークの学習機能を有効にするためには、豊富で偏りの少ないデータが必要と思われる。従って、本システムを有効に機能させるためには、多種・多様なデータを蓄積をしていく必要がある。

6. 結論および今後の課題

高力ボルト摩擦接合継手の耐久性評価システムを構築するため、実橋測定データを収集・蓄積し、データベースシステムを構築した。また、データベースを用いてニューラルネットワークによる高力ボルト軸力低下推定システムを構築するとともに、実橋測定データを用いてシステムの検証を行った。本研究のまとめと今後の課題について以下に記す。

- 1) 高力ボルトに関する過去の測定データを一元的に蓄積・管理し、検索・参照・引用が容易な高力ボルトデータベースシステムを構築した。
- 2) 実橋における高力ボルト軸力の長期測定結果から、より精度の高い対数関数で表される軸力低下曲線を同定した。
- 3) 高力ボルトデータベースのデータを、ニューラルネットワークを用いて学習させ、対象となる橋梁

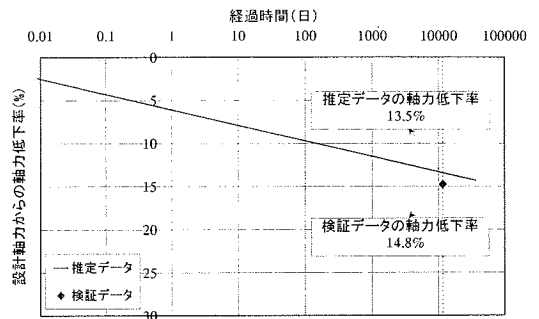


図-5 検証データとの比較(ウェブ)

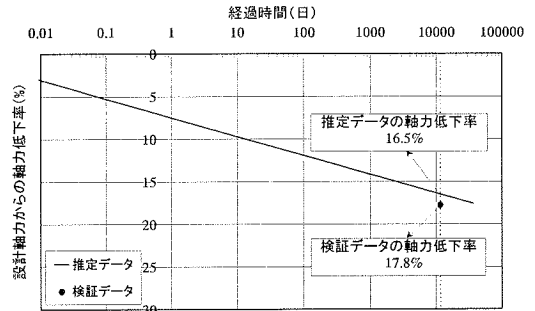


図-6 検証データとの比較(下フランジ)

のボルト軸力低下曲線を推定するシステムを構築した。この時、軸力低下に影響を及ぼすと考えられる測定部位、交通荷重、ボルト種別、ボルト首下長さ、錆量、表面処理の6項目を入力層に採用し、軸力低下曲線の勾配を出力層とした。

- 4) 全データを用いてシステムを学習させ、実橋測定データと比較したところ、比較的精度良く推定できることがわかった。これは、データベースに類似のデータが多く学習機能がうまく働いたことが一因と考えられる。今後、システムの信頼性を向上させるため、さらに幅広く多くのデータ収集が必要である。
- 5) 今後は、すべり係数のデータを充実し、すべり係数推定システムを機能させるとともに、ボルト軸力推定結果と合わせて、すべり耐力の評価を行う必要がある。なお、検証に用いた実橋測定結果ではボルト軸力低下率が10数%であったが、過去のすべり係数測定結果⁹⁾では設計値0.4を50%程度上回っており、すべり耐力に問題はないと思われる。

以上より、現状ではボルト軸力、すべり係数ともまだまだデータ数が少なく、ニューラルネットワーク本来の学習機能を発揮するまでには至っていない。従って、今後はデータフォーマットを公開する等、更に積極的にデータの蓄積を行い、システムを改良していき

たいと考えている。

謝辞：本研究は関西道路研究会 道路橋調査研究委員会 耐久性小委員会（委員長：谷平勉）の活動成果をもとに著者らがシステム構築を行ったものである。システム構築に際しては山口大学の中村秀明助教授ならびに当時大学院生の山下雅和氏にご協力頂いた。また、大阪市の亀井正博氏には多くのデータをご提供いただくとともに研究を進める上で貴重なご意見をいただいた。関係各位に、深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 例えば、宮本文穂、串田守可、足立幸郎、松本正人：Bridge Management System(BMS)の開発、土木学会論文集、No.560/VI-38, pp.91-106, 1997.3.
- 2) 西川和廣：ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案、橋梁と基礎 97-8, pp.64-72,1997.8.
- 3) (社)日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集（鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術）、JSSC テクニカルレポート、No.51, 2002.1.
- 4) 宮本文穂：構造物維持管理支援システム、土木学会誌、Vol.85, pp.10-13, 2000.2.
- 5) 谷平勉、亀井正博、石原靖弘、田井戸米好：17年間供用された高力ボルト摩擦継手のすべり耐力に関する実験、構造工学論文集、土木学会、Vol.36A, pp.1087-1096, 1990.3.
- 6) 谷平勉、狩野正人、石原靖弘、小林剛：高力ボルト摩擦接合の耐久性評価に関する一考察、鋼構造年次論文報告集、Vol.10, pp.247-254, 2002.11.
- 7) 西村昭、田井戸米好、瀬良茂、穂積重臣、三谷哲夫：現場締め高力ボルト軸力のばらつきについて、土木学会論文報告集、第180号、pp.1-9, 1970.8.

- 8) Nishimura,A., Tajima,J., Yamasaki,S. and Kikukawa,S.:The Aging of High Strength Bolted Joints in Long Service, IABSE Symposium on Maintenance Repair and Rehabilitation of Bridges, Washington D.C. Final Report, pp.149-154, 1982.
- 9) (社)日本鋼構造協会接合小委員会：鋼構造接合資料集成、技報堂出版、1977.
- 10) 西岡敬治、乙黒幸年、八幡健、長沼敏彦、吉川紀：施工後10数年経過した橋梁の高力ボルト継手の維持管理に関する諸問題、構造工学論文集、土木学会、Vol.43A, pp.961-966, 1997.3.
- 11) 三上市蔵、田中成典、樋渡達也、山浦忠彰：鋼橋の高力ボルトの軸力推定システム、土木学会論文集、No.549/I-37, pp.77-90, 1996.10.
- 12) 上野幹二、山口隆司、小林昭一：超音波縦波および横波を用いた高力ボルト軸力測定に関する基礎的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.46A, pp.1147-1152, 2000.3.
- 13) 狩野正人、石原靖弘、丹羽量久、亀井正博、谷平勉：高力ボルト摩擦接合の耐久性評価用データベースの構築と分析、構造物の診断に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp.71-76, 1998.7.
- 14) Kobayashi,G., Ishihara,Y., Kamei,M., Kano,M. and Tanihira,T.: A Research to Evaluate the Durability of Existing Bridge's Bolted Joint, 7-th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp.525-530, 1999.8.
- 15) 西村昭、加藤修吾、神田正孝、山崎信之、米谷真二：既設高力ボルトの各種非破壊検査の特質、橋梁と基礎、pp.26-33, 1983.11.
- 16) 日本道路協会：鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針、1966.7.

(2003.4.10 受付)

DEVELOPMENT OF DURABILITY ASSESSMENT SYSTEM FOR HSFG BOLTED JOINT BY USING NEURAL NETWORK

Yasuhiro ISHIHARA, Go KOBAYASHI, Masato KANO,
Tutomu TANIHIRA and Ayaho MIYAMOTO

This paper presents the development of a durability assessment system for high-strength friction grip (HSFG) bolted joint by using a neural network system. Most important factors of slip resistance on HSFG bolted joints are the bolt tension and the slip coefficient. So the authors have been investigating bolt tensions and slip coefficients of HSFG bolted joints on existing steel bridges.

Then the database system of HSFG bolted joints was constructed. And the prediction system of bolt tension by using a neural network was developed. As the result of a verification, we showed that this system will be able to predict bolt tensions of existing bridges.