鋼橋の環境・構造条件に応じた耐久性設計に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 4～令 6
担当チーム：橋梁構造研究グループ、材料資源研究グループ
研究担当者：澤田　守、高橋　実、大西　達也、西原　知彦、
盛岡　諒平、加瀬　駿介、日高　誠、
冨山　禎仁、島袋　智尋、

【要旨】
鋼橋を長寿命化するには、腐食に対する耐久性を確保することが重要であるが、その評価方法は確立されていない。本研究では、代表的な防食方法の耐候性鋼材を例に、環境・構造条件に応じて適用可否が検討できるよう、その要求水準を明確化し、性能の検証例を提示した。また、重防食塗装系について、損傷や劣化の実態を調査・整理した。さらに、高力ボルト摩擦接合継手のリラクセーションによるボルトの軸力低下について、その時間信頼性の評価に向けたデータを取得し、残存軸力率等の概略推定を行った。
キーワード：耐久性の性能規定、適用条件の明確化、耐候性鋼材、塗装、ボルトのリラクセーション

1. はじめに

道路橋の老朽化が進む中、今後、維持管理・更新コストを可能な限り抑制し持続的にインフラ機能を確保していくためには、新設や更新時において、長寿命となるよう耐久性に留意して設計することが求められる。

鋼橋の耐久性を確保するためには、代表的な損傷である腐食と疲労に対して、適切に設計を行うことが特に重要となってくる。鋼部材の疲労については、主部材に対しては、想定される自動車荷重の繰返し載荷を考慮して、継手断面に生じる応力を算出し、疲労破壊が生じないとみなせる応力範囲と載荷回数の関係を用いて、疲労破壊が生じないようにする継手の評価方法が道路橋示方書 [1]に既に規定されている。一方、防食設計の多くは仕様規定であり、新技術を活用していくためには、より具体的な要求水準の提示と性能を検証する基本的な考え方の整備が必要となる。また、仕様規定として示されている設計方法を含め、架橋環境や構造等に応じて適用できるようにする必要がある。

さらに、鋼橋で用いられる高力ボルト摩擦接合継手は、ボルト締付け後、リラクセーションによるボルト軸力の低下が知られており、長期にわたりボルト軸力とすべり係数の両方の変化に着目した試験データは少なく、継手性能の時間信頼性については明確ではない。

そこで本研究では、鋼橋の代表的な防食方法である耐候性鋼材を例に、環境・構造条件に応じて適用可否が検討できるように、既存の防食仕様の要求水準を明確化し、性能の検証例を提示するとともに、防食法のひとつである重防食塗装系について、損傷や劣化の実態を調査した。さらに、高力ボルト摩擦接合継手のリラクセーションによるボルトの軸力低下について、その時間信頼性の評価に向けたデータの取得を行った。

2. 耐候性鋼材の既存データ分析

2.1 研究概要

耐候性鋼材は、鋼材表面を緻密な錆層の形成により保護し、以降の錆の進行が抑制され、無塗装でも長期にわたり腐食量を抑えることで、塗装塗替え等の維持管理コストを低減できる利点から、これまで多くの道路橋に適用されてきた。一方、飛来塩分の多い地域や凍結防止剤散布の影響を受ける部位などでは、緻密な錆層が形成されず、錆の進行抑制が見込めない。そのため、鋼道路橋防食便覧 [2]では、過去の暴露試験 [3]から 100 年後の腐食減耗量を予測し、減耗量が 0.5mm 以下であれば影響はないものと捉え、耐候性鋼材が無塗装で使用できる地域は、所定の方法で計測した飛来塩分量が 0.05mmd を超えない地域又は超えないとみなせる地域とされている。しかし、この条件がどの程度の時間信頼性を有しているのかは明確ではない。

そこで本研究では、この過去の暴露試験結果を再分析することで、既存の仕様における要求水準を確認し、その分析方法を性能の検証例として提示する。

2.2 暴露試験の再分析手法

分析には過去の全国 41 地点での暴露試験 [3]について設置から 1 から 9 年目における板厚減少量と飛来塩分量の調査結果及び一部について設置から 17、18、38、39 年目における板厚減少量の結果を用いた。

本研究での分析は、**図-1** に示すように、実際に板厚減少が生じた範囲の飛来塩分量と想定板厚減少量に達した時間のデータを用いて、鋼部材の疲労設計を参考に非超過確率 97.7%を確保できる条件を整理し、その条件の傾向から、想定板厚減少量が 0.5mm を超えない条件を推定することで、要求水準を確認することとした。具体には、各試験体の想定板厚減少量を 0.01mm 単位ごとにプロットし、それぞれの想定板厚減少量を超えないとみなせる条件として、非超過確率が 97.7%以上となる条件が、板厚減少量が大きくなるに伴ってどのように変化するかを分析し、それらの傾向から想定板厚減少量が 0.5mm を超えない条件を推定した。

2.3　暴露試験の再分析結果

各板厚減少量を超えないとみなせる条件の一例として、想定板厚減少量が 0.03mm と 0.06mm における飛来塩分量と各想定板厚減少量への到達時間の関係を**図-2** に示す。その条件は、両対数軸上で直線の関係となることがわかる。次に、その条件となる両対数軸上での直線の傾き m と切片 K に着目し、その傾向を確認した。傾き m は、飛来塩分量と各想定板厚減少量の関係の両対数軸における直線の近似式を確認したところ、m=－0.5 で一定の傾向であった。切片 K は、飛来塩分量と各想定板厚減少量のプロットに対して、傾き m=－0.5 で非超過確率が 97.7%となる値を確認した。すると、切片 K は**図-3** に示すとおり、想定板厚減少量を片対数とした場合に直線関係の傾向であった。これらの傾向から、想定板厚減少量が 0.5mm を超えないとみなせる条件を推定すると、**図-4** に示すとおり、飛来塩分量と到達時間の関係が、m=－0.5、K=3.12 と推定される。このとき、到達時間が 100 年となるのは、飛来塩分量が 0.051mdd の場合であり、現行仕様（規定）の無塗装での使用可能地域である飛来塩分量 0.05mdd 以下の地域は、今回の分析から非超過確率 97.7%以上を有していたということができる。つまり、鋼部材の疲労と同様に、100 年に対する要求水準として非超過確率 97.7%がひとつの目安となり得ると考えられる。

3.　重防食塗装の損傷や劣化の実態調査

3.1　研究概要

鋼道路橋の防食塗装については、2005（平成 17）年度に鋼道路橋塗装・防食便覧が発刊されたのを機に、重防食塗装系が標準化された。同便覧では新設一般外面用塗装系として重防食塗装系の一種である C-5 塗装系が示され、以来、国の直轄工事においては全国的にこの塗装系が採用されている。重防食塗装系は、従来標準とされてきた塗装系（一般塗装系と称す）に対し、高性能な塗料種が適用されているのに加え、防食下地として防錆効果の高いジンクリッチペイントを用いること、塗装系の総膜厚が大きいことなどにより、防食機能の長寿命化が図られている。一方、使用する塗料種や膜厚が一般塗装系とは大きく異なるため、経年で現れる塗膜の外観変状や劣化機構も異なることが予想されるが、十分に解明されていないのが現状である。

そこで、重防食塗装系塗膜に見られる損傷や劣化の特徴を把握するために、全国の鋼道路橋を対象に、その実態を調査・整理した。

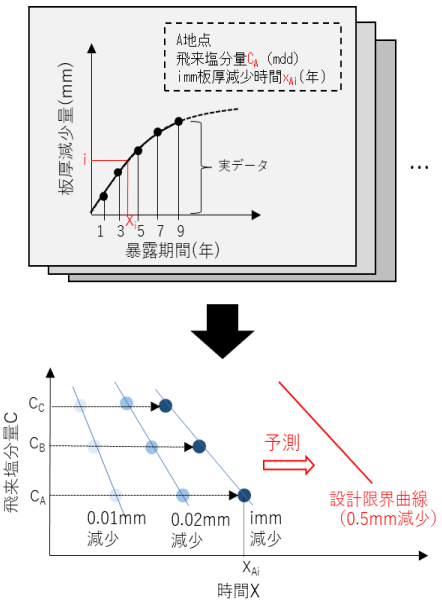


図-1　分析方法概要

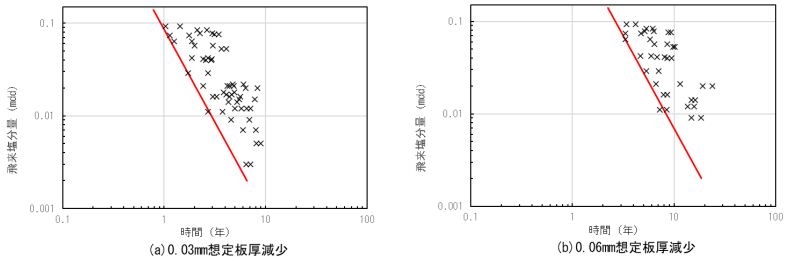


図-2　飛来塩分量と想定板厚減少量への到達時間の関係例

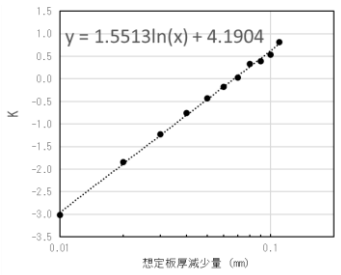


図-3　K と想定板厚減少量の関係

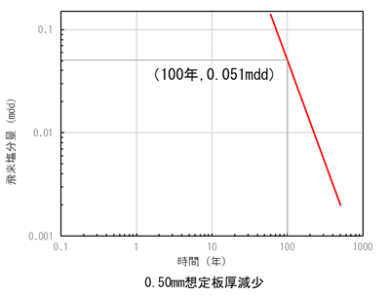


図-4　想定板厚減少量 0.5mm の飛来塩分量と到達時間の関係

3.2　研究概要鋼道路橋における重防食塗装系塗膜の劣化損傷に関する実態調査

調査は「全国道路施設点検データベース」を活用し、2005 年度以降に新設された鋼道路橋の点検表、点検調書、橋梁管理カルテ、道路管理データ（MICHI）を精査することにより行った。塗装が適用された橋梁のうち、直近の定期点検において健全性の判定区分がⅡ（予防保全段階）、Ⅲ（早期措置段階）、Ⅳ（緊急措置段階）となっているものを抽出し、ここから変状の種類として「腐食」および「防食機能の劣化」が記録されている調書の損傷状態の記録写真を確認し、損傷が発生している部位や損傷形態の観点で情報を整理した。

3.3　調査結果

国が管理する道路橋 38,943 橋のうち、2005 年度以降に建設された鋼橋は 1,828 橋で、直近の定期点検において健全性の判定区分がⅡ、Ⅲ（Ⅳは無し）とされたのは 538 橋であった。さらに、「塗装橋」でかつ変状の種類として「腐食」及び「防食機能の劣化」が挙げられているものまで絞ると、該当は 53 橋となった。

該当する 53 橋の点検調書を精査した結果、劣化・損傷の形態としては「床版・伸縮装置等からの漏水」による腐食が最も多く、次いでボルト周りの腐食、打痕傷からの腐食が特に多く見られた。この他には、支承部の腐食、溶接線を起点とした腐食、部材端部（鋭角部）の腐食が認められた（**図-5**）。部材の一部で塗膜剥離が発生している事例が 5 件あったが、いずれも無機ジンクリッチペイントからの剥離であり、過膜厚や塗装後の不適切な養生といった施工に起因するものと推察される。これらの結果から、重防食塗装系塗膜において発生している変状や腐食は、施工にまつわる要因や、漏水や打痕傷といった外的要因による局部的なものであり、一般塗装系のように塗膜の全面的に「さび」「われ」「はがれ」「ふくれ」が生じるような変状形態（**図-6 (a)**）では無いことがわかった。

一方、過去に行われた暴露試験や、一部の実橋における事例などから、重防食塗装系では紫外線や水などの作用により塗膜が劣化し、環境遮断性は保ちつつも、上塗り層の表面から徐々に塗膜の減耗が生じることが明らかとなっている（**図-6 (b)**）。今回の調査対象は長いものでも供用 20 年程度であり、このような変状は確認できなかった。さらに長い年月をかけ、緩やかに進行する劣化現象になるものと思われる。上塗り塗膜の減耗が進行すると、耐候性の低い中塗りや下塗り層が露出し、塗膜の減耗はさらに加速する。膜厚が減少することで、塗装系全体としての防食機能も損なわれていくものと考えられる。これを踏まえると、重防食塗装系においては、塗膜の減耗により塗装系としての防食機能が維持できなくなった時点を「塗装の耐久性の限界状態」とし、設計に反映させていくことが合理的であると考えられる。そのためには、様々な環境下において、塗膜の減耗と環境因子との相関を把握するためのデータを蓄積していくことが今後必要となる。

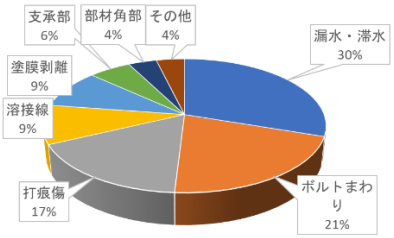
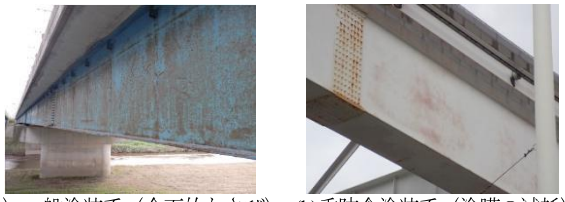


図-5　腐食・防食機能の劣化が生じた部位や損傷形態（国が管理する鋼道路橋 53 橋）



(a) 一般塗装系（全面的なさび）　(b)重防食塗装系（塗膜の減耗）

図-6　それぞれの塗装系における典型的な変状形態

4.　高力ボルトの軸力計測及びすべり試験

4.1　研究概要

本研究では、すべり強度の時間信頼性の評価に向けた基礎データ取得のため、期間の異なる無機ジンクを塗布した高力ボルト摩擦接合継手試験体で軸力計測及びすべり試験を行った。

4.2　試験体及び試験概要

試験体の寸法を**図-7** に示す。試験体の母板には 19mm の溶接構造用圧延鋼材 SM490Y、連結板には 12mm の溶接構造用圧延鋼材 SM490Y を使用し、接合面は無機ジンクを塗布した。高力ボルトには、M22（F10T）を使用し、締付けにはトルクレンチを用いた。締付け順は、継手の内側から外側に向かって順次締付けた。締付け作業は 2 度に分けて実施し、1 次締付けでは設計ボルト軸力（205kN）の 60%を導入、2 次締付けでは、すべり側は設計ボルト軸力の 10%増の軸力（226kN）を導入、非すべり側はすべり側より大きい軸力を導入した。また、軸力は**図-8** に示すように軸部に 2 枚のひずみゲージ（単軸、5mm）を対称に貼付することで計測された平均値とした。試験体の数量は、締付け後約 2 週間（Case1）、約 1 年（Case2）、の 2 回のすべり試験を想定し、各 Case 5 体の計 10 体を用意した。

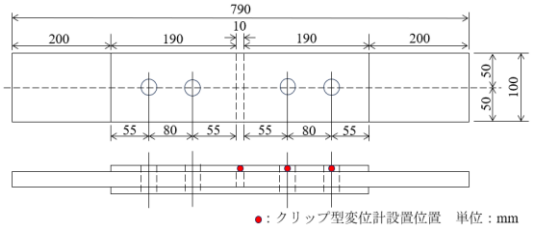


図-7　試験体寸法及び変位計設置位置

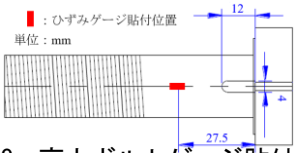


図-8　高力ボルトゲージ貼付位置

軸力計測は、一定の温度環境下（20℃前後）で行った。すべり試験は、万能試験機（載荷能力 2,000kN）を用い、標準すべり試験 [4]に準拠し行った。載荷荷重は毎秒 1kN 程度増加するよう試験機を操作し、すべり側がすべり荷重に達するまで実施した。

4.3　軸力計測及びすべり試験結果

締付け後約 2 週間、約 1 年の試験体における、残存軸力及び残存軸力率を**表-1** に示す。残存軸力率は、初期締結ボルト軸力に対する残存ボルト軸力の比率とし、初期締結ボルト軸力には、ボルト締結完了直後に計測したボルト軸部のひずみの最大値を用いて換算した軸力を用いている。締付け後約 2 週間の試験体における平均の残存軸力率は 94.1%、約 1 年の試験体における平均の残存軸力率は 92.8%であった。締付け後約 2 週間、約 1 年のすべり試験におけるすべり強度及びすべり係数を**表-1** に示す。すべり係数 μ_0 は、すべり係数の設計値（設計ボルト軸力）に対する評価を、μ_1 はすべり係数の軸力低下（すべり試験前ボルト軸力）に対する評価である。期間の違いですべり係数に大きな差は見られなかった。今回の試験結果を対数近似曲線により回帰し、設計供用期間 100 年後の残存軸力率とすべり強度を概略推定した結果を**図-9** に示す。100 年後の残存軸力率は 91.1%と設計軸力近くまで低下し、既往の試験結果 [5]と同様の傾向であった。すべり強度は 414.7kN であり、すべり係数の変化がほぼ見られなかったことから、すべり強度の経年変化は緩やかであった。また、すべり係数が設計すべり係数より十分大きかったことから、100 年後のすべり強度の推定値は、設計で想定する特性値に対して大きな値であった。

5.　まとめ

本研究で得られた成果を、以下に示す。

1）耐候性鋼材の既存データの再分析から、現行仕様が要求水準として、非超過確率 97.7%以上の時間信頼性を有していることがわかった。

2）本研究の耐候性鋼材の分析手法を、耐久性能の検証事例として提示した。

3）重防食塗装系では「塗膜の減耗」が主要な劣化機構であることを特定し、耐久性能の検証には塗膜減耗量を指標とすることが妥当であることを示した。

4）高力ボルト摩擦接合継手の時間経過に伴うすべり強度のデータを得た。今回取得したデータから 100 年後の残存軸力率等を概略推定した結果、軸力は設計軸力近くまで低下したが、すべり係数は設計すべり係数より十分大きな値であった。

表-1　軸力計測及びすべり試験結果

Case	リラクセーション期間	試験体	軸力（kN）	残存軸力率（%）	すべり強度（kN）	すべり係数 μ_0	すべり係数 μ_1
Case1	約2週間	S1	215.0	-	423.5	0.516	0.492
		S2	216.1	94.0%	444.5	0.542	0.514
		S3	214.2	94.2%	426.0	0.520	0.497
		S4	212.9	93.6%	432.0	0.527	0.507
		S7	217.9	94.4%	441.0	0.538	0.506
		平均	215.3	94.1%	435.9	0.532	0.506
Case2	約1年	S5	212.1	92.2%	424.0	0.517	0.500
		S6	211.5	92.6%	437.0	0.533	0.517
		S8	211.2	93.3%	417.0	0.509	0.494
		S9	210.4	92.6%	438.5	0.535	0.521
		S10	213.6	93.6%	419.0	0.511	0.490
		平均	211.7	92.8%	427.1	0.521	0.504

青字：最小値　赤字：最大値

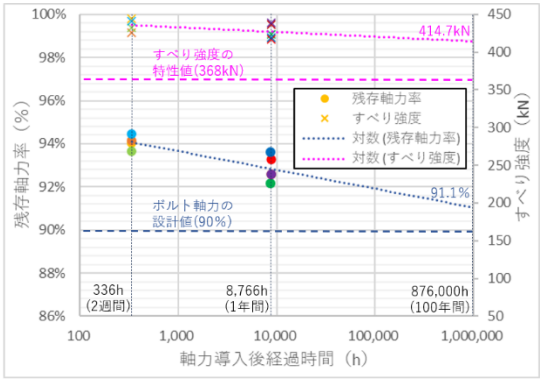


図-9　残存軸力率とすべり強度の推定結果

参考文献

1)　日本道路協会：道路橋示方書・同解説、2017.11

2)　日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、2016.4

3)　建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XⅧ)－全国暴露試験のまとめ(概要編)－、1993.5

4)　土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2006.

5)　南・筒井・田村：高力ボルト摩擦接合継手のリラクセーションによるボルト軸力低下特性に関する比較検討、土木学会論文集 A1、Vol. 78, No. 1、180-189、2022

Research on durability performance design according to environmental and structural conditions of steel bridges

Research Period: FY2022-2024
Research Team: Bridge Structure Research Group,
Materials and Resources Research Group
Author: SAWADA Mamoru, ONISHI Tatsuya,
NISHIHARA Tomohiko, MORIOKA Ryohei,
KASE Shunsuke, HIDAKA Makoto,
TOMIYAMA Sadahito, SHIMABUKURO Chihiro,

Abstract: To extend the service life of steel bridges, it is important to ensure durability against corrosion. Since the evaluation methods for this have not been established, we clarified the requirement level for the use of weathering steel and coating, which are typical corrosion prevention methods, so that the application methods can be considered according to environmental and structural conditions, and presented examples of performance verification. In addition, basic data on the axial force reduction of bolts due to relaxation of high-strength bolt friction joints was obtained for the evaluation of their time reliability, and a rough estimation of the residual axial force ratio was made.

Keywords: Performance specification of durability, Clarification of condition, Weathering steel, Coating, Relaxation of high strength bolt,