

塗装鋼橋の防食性向上を目的とした塗替え施工時の素地調整手法

坂本 達朗* 鈴木 慧* 鈴木 隼人**

Surface Preparation Method of Painted Steel Bridges during Repainting to Improve Corrosion Resistance

Tatsuro SAKAMOTO Akira SUZUKI Hayato SUZUKI

It has been reported that corrosion progresses prematurely under the coating film due to the remaining rust during the repainting process in painted steel bridges. Therefore, the authors have investigated a method of rust removal using a laser and a corrosion prevention method using a corrosion prevention cap as a method to improve the corrosion resistance of steel bridge coatings. In addition, the authors have studied a covering method to form an enclosed space to apply the blasting method to open deck railway bridges. This paper reports these methods developed to improve anti-corrosion.

キーワード：鋼橋，腐食，塗膜，ブラスト，レーザ，素地調整

1. はじめに

塗装鋼橋を長期間使用する場合、塗膜の劣化程度に応じて塗替え施工が実施され、その際に行われる素地調整作業では主に、円盤状の砥石材で表面を切削するグラインダなどの汎用動力工具が使用される。一方、日本海沿岸などの海塩が飛来する環境に架設された鋼鉄道橋では、部材が局所的に著しく腐食することが多く、こうした腐食箇所の鋼材表面には、腐食の進行によって凹凸が形成される。このような箇所では、動力工具による素地調整作業において、凹部のさびは除去困難である（図1）。また、部材同士の添接のために使用されるボルト・ナットが腐食した場合も、複雑な形状であるためにさびの除去が困難である。さびを残して塗装すると、塗膜下でさびを起点とした腐食が比較的早期に進行し、図2のようなさび膨れが発生する。この場合には塗膜の損傷に発展してさらに腐食が進行するため、腐食の程度が大きくなる。このため、鋼橋塗装の防食性を向上させるためには、塗替え施工時の素地調整手法の更なる改善が必要

と考える。

さびの除去が困難な箇所に対する動力工具以外の素地調整手法として、ブラスト工法が挙げられる。これは粒子状の研削材を高圧で吹き付ける手法であり、対象物の表面形状によらずさびを破碎・除去することができる。ただし、鋼鉄道橋では桁にまくらぎを直載した開床式構造が多く存在し、破碎したさびや研削材に由来する大量の粉塵を外部に流出させないための密閉空間を構築することが難しい。このため、ブラスト工法を積極的に適用するには至っていない。

以上の背景を受けて、本研究では動力工具以外の素地調整手法として、近年注目されているさびの除去方法であるレーザを用いた手法を調査した。また、ボルト・ナット部に対する防錆効果を目的として適用される防錆キャップの積極的運用に向けて検討した。また、開床式構造の鉄道橋へのブラスト工法の適用を推進するため、当該構造に対する密閉空間の形成に適した養生方法についても検討した。

2. レーザによるさびの除去性評価

レーザを用いたさびの除去はレーザクリーニングと呼ばれ、レーザ照射によって被照射面に付着する物質が熔融、蒸散、熱破壊されるアブレーションと呼ばれる現象を利用したものである²⁾。レーザクリーニングでは付着物の除去に際して使用機材を物理的に接触させる必要がなく、動力工具ではさびの除去が困難な部材でもさびを除去できる可能性がある。ここでは、鋼構造物への適用が期待できるものとして、高出力のレーザ光を高速に回転させて円環状に照射する円環状レーザスキャン方式に着目した³⁾。本手法によりレーザを腐食鋼板へ照射し、さびの除去程度と残留塩分量の測定や作業時間を測定す



図1 素地調整後のさびの残留¹⁾ 図2 塗膜下の腐食進行例¹⁾

* 材料技術研究部 防振材料研究室
** 材料技術研究部 防振材料研究室
(現 建設塗装工業株式会社)

るとともに、従前の素地調整手法として、手工具であるワイヤブラシを用いた処理（以下、ワイヤブラシ処理とする）、カップワイヤを装着した動力工具を用いた処理（以下、カップワイヤ処理とする）、ブラスト処理との比較評価を行った。

2.1 試験方法と評価方法

試験鋼板には SS400 熱間圧延鋼板（150×70×3.2mm、ブラスト処理）を用い、腐食条件には、防食設計の技術マニュアルとして用いられている鋼構造物塗装設計施工指針¹⁾の附属書 C に記載される複合サイクル条件（表 1）を採用した。

表 1 複合サイクル条件の概要

工程	試験名	条件	試験時間
1	人工海水噴霧	噴霧量：水平捕集面積 80cm ² に対して 1~2cm ³ /h、 温度：40±2°C、RH：95±3%	4h
2	模擬濃縮雨水噴霧	噴霧量：水平捕集面積 80cm ² に対して 1~2cm ³ /h、 温度：40±2°C、RH：95±3%	44h
3	乾燥	45±2°C、RH：30%以下	16h

注：上記工程を 5 回繰り返す。

レーザーの出力は 3kW とし、約 20mm/sec の移動速度でレーザーを照射した。予備試験の結果、作製した腐食鋼板のさびは同一箇所に対して 8 回レーザーを照射することで概ね除去された。ただし、さびが比較的厚い箇所ではさびの残存が確認されたため、レーザー照射前に網状研磨具を用いて浮きさびを除去した。また、同一箇所に複数回のレーザー照射を行うと試験鋼板自体が高温となり、厚さの薄い鋼板では反りの発生が懸念された。このためレーザー照射回数を 4 回ずつの 2 工程に分け、その間に放冷する時間を設定した。また、放冷中にも 10 秒間のワイヤブラシ処理を実施した。

従来の素地調整手法について、ワイヤブラシ処理とカップワイヤ処理では、同工具を用いて粉化物が発生しなくなるまでさび除去作業を実施した。ブラスト処理では、研削材の噴射時間によってさびの除去程度が異なる。本試験では、さびの除去程度として現場施工で主に目安とされることの多い ISO 8501-1 に規定される Sa 2 1/2（目視ではさびの残存が確認されない程度）を目標にブラストした。

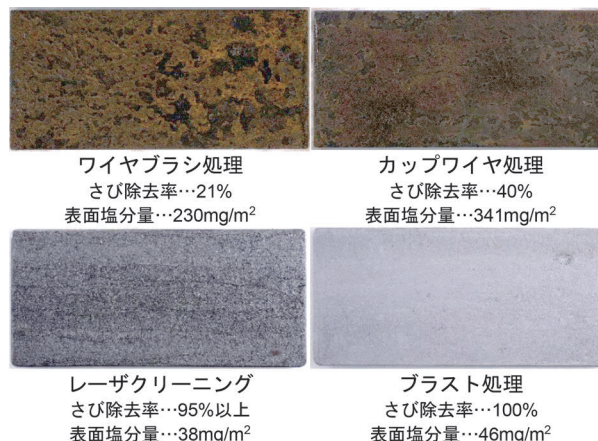
さびの除去程度の評価のため、各さび除去作業前後の腐食鋼板の質量を測定した。続いて、ブラスト処理によってさびを完全に除去した腐食鋼板の質量を測定し、式 (1) を用いて算出したさび除去率からさびの除去程度を評価した。

$$R = \frac{A - B}{A - C} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 R はさび除去率 [%]、 A はさび除去作業前の腐食鋼板の重量 [g]、 B は各除去作業後の腐食鋼板の重量 [g]、 C はブラスト処理後の腐食鋼板の重量 [g] である。塗膜の防食性は、被塗面に存在する塩化物イオンが影響することが知られている¹⁾。そこで、各手法を実施した後の鋼板表面に残留する塩化物イオン量を測定した。塩化物イオン量の測定には、現場で一般的に用いられる吸着型の表面塩分計を使用し、表面に接触させた水に溶解した塩化物イオン濃度を測定した。評価にあたっては、単位面積あたりの塩化ナトリウム量に換算した値（以下、表面塩分量とする）を用いた。作業性については、レーザークリーニングまたは各種素地調整手法を適用した場合の作業時間から評価した。

2.2 試験結果と考察

各手法を実施した後の腐食鋼板の外観写真を図 3 に示す。また、算出したさび除去率と表面塩分量を併せて示す。各手法による腐食鋼板のさび除去率は、ワイヤブラシ処理とカップワイヤ処理ではそれぞれ 20%、40% 程度であり、双方ともさびが比較的多く残留した。これに対してレーザークリーニングのさび除去率は 95% 以上となり、動力工具よりも遥かに多くのさびを除去できることが分かった。ただし、さび除去率が 100% であるブラスト処理と比較すると若干のさびが残っていた。なお、レーザークリーニングした場合のさび除去率を 95% 以上としたのは、計算上は 100% であるが、アブレーションによる鋼板自体の重量減少によって正確な計算が困難であったためである。また、レーザークリーニングした表面の色相はブラスト表面と比較して濃いグレーであった。これはレーザー照射時に表面が高温となり、酸化皮膜が生成されたためである。酸化皮膜は塗料との付着性に影響する可能性があり、残存した点さびの効果も含めて塗膜の防食性への影響が懸念される。



注：レーザークリーニングの表面に点在する染みが残存さびである。

図 3 各手法を実施した後の腐食鋼板の外観写真

各手法を実施した後に鋼板表面に残留する表面塩分量は、ワイヤブラシ処理とカップワイヤ処理ではそれぞれ230mg/m²、341mg/m²であったのに対して、レーザクリーニングとブラスト処理ではそれぞれ38mg/m²、46mg/m²であった。これより、レーザクリーニングは動力工具よりも表面塩分量を低減可能であり、ブラスト処理と同程度のさびの除去水準を達成できることが分かった。

各手法の作業時間の測定結果を図4に示す。さびの除去程度が同程度であるブラスト処理の作業時間を基準として比較すると、レーザクリーニングでは約2倍の作業時間となった。また、当該の結果には作業中の放冷時間を考慮していないため、レーザクリーニングの作業ではさらに時間を要することが分かった。

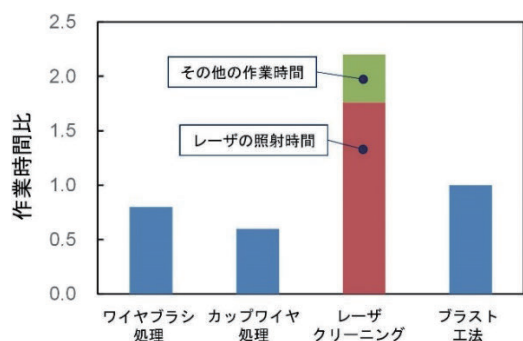


図4 各手法の作業時間の測定結果

2.3 レーザの適用可能性について

本試験では、レーザを用いてさびを除去する場合、動力工具よりもさびや表面塩分を除去することができ、ブラストと同程度のさびの除去水準が期待できることが分かった。現状ではレーザによる施工の実績がほとんど無くコスト面の比較は難しいが、ブラスト工法の課題の1つである粉塵の発生がないため、ブラスト工法を採用し難い鋼橋におけるさびの除去方法としての適用が期待できる。その一方で、多くの作業時間を要することや、塗膜の防食性への影響が明らかになってないことから、実用化にあたっては作業工程の適正化や塗膜防食性への影響把握が課題と考える。

3. 防錆キャップ適用時の素地調整手法

腐食したボルト・ナットを防食する場合、角部の多い形状のため、所定の膜厚に塗装することが困難であり⁴⁾、一般外面と比較して早期に再度の腐食に至る場合が多い。このため、塗装による防食には限界があるとして、防錆キャップなどの被覆工法（以下、防錆キャップ工法と呼ぶ）が提案されている⁵⁾。現状の防錆キャップ工法の多くは、塗装と同様にボルト・ナットを含む添接部全

体の素地調整を実施した後に、キャップ内部の隙間を埋めるための充填材（以下、コーキング材とする）を塗布してから設置するものである。キャップには塗装された金属材料や数mm厚のプラスチック材料が用いられ、環境遮断による防食効果が期待できる。しかしながら、動力工具を用いる場合には腐食したボルト・ナットやボルト・ナット近傍の部材に対する素地調整が構造上困難である。このため、既設構造物へ防錆キャップ工法を適用する際、さびや劣化した塗膜を残した状態でキャップを設置することがある。

図5に、防錆キャップ工法を適用した鋼鉄道橋を示す。当該の鋼橋ではキャップのつば部分が部材と密着していない。そのため、キャップ/ボルト間、またはコーキング材/ボルト・ナット間への水分や酸素の浸入による腐食進行が懸念される。一方、部材とキャップが十分に密着された場合には、腐食性の高い環境に架設された鋼橋に適用しても20年以上に渡りキャップ内のボルトの腐食は進行していないとの報告もみられる⁶⁾。

これらの事象を受けて、本研究ではコーキング材の塗布範囲と部材の素地調整程度に着目した。つば部分と部材を十分に密着させれば、キャップ内部は環境遮断された状態となり、ボルトの状態に関わらず長期間防食性を維持できると考えられる。上記の考えの妥当性を示すため、腐食鋼材と防錆キャップ模擬材（以下、模擬材とする）を用いて環境遮断性を評価した。

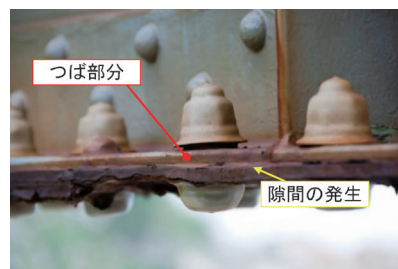


図5 防錆キャップが密着していない状態

3.1 試験方法

片面を塗装したSS400熱間圧延鋼板（150×150×3.2mm、ブラスト処理）に対して表1の複合サイクル条件を通常より多く15回繰り返して、さび厚みが約300μmの腐食鋼板を作製した。キャップの模擬材としては、内径が約80mmのつば付半球ガラスを用いた。腐食鋼板のさびの除去条件は2通りとし、ワイヤブラシを用いて腐食鋼板全面の緩く付着するさびを除去した条件と、模擬材内部以外のさびをブラストで除去した後に、グラインダを用いて模擬材のつば部分が接触する部分の鋼板を研磨し、金属光沢面を露出させた条件とした（図6）。模擬材の接着には、汎用のコーキング材であるポリサルファイド系コーキング材を用いた。模擬材のつば部

にコーキング材を塗布して押し付ける際に、コーキング材の厚みを一定とするため、銅片（30×30×1mm）をスペーサとして四方に配置した。このとき、スペーサ除去後のコーキング材の接着や密閉状態への影響を極力小さくするため、スペーサの角部とつば部が接触するように配置し、その接触面積を約1~2mm²とした。また、コーキング材の硬化後にスペーサを取り外した後は、その場所にコーキング材を注入した。

模擬材の内部に浸入する水蒸気量の測定は JIS Z 0208「透湿カップ法」に準じ、無水塩化カルシウム（CaCl₂）約2gを投入したシャーレを模擬材内部に設置した状態で30℃、95%RHの恒温恒湿槽に設置した。設置した試験体数は各々のさびの除去条件で4体とし、所定期間毎に1体ずつ模擬材を取り外してCaCl₂の重量を測定し、初期状態からの増加量により環境遮断性を評価した。

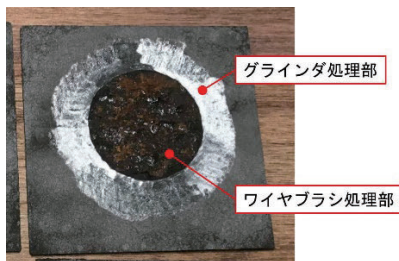


図6 ワイヤブラシとグラインダを用いた試験鋼板

3.2 試験結果と考察

試験結果を図7に示す。ワイヤブラシを用いた条件では試験時間の経過とともにCaCl₂の重量が増加した。これはさび中やコーキング材/さび間の界面を通じて水蒸気が浸入した結果と考えられる。一方、グラインダを用いた条件では初期に重量がわずかに増加したものの、その後はほとんど増加しておらず、模擬材の内部が十分に環境遮断されたことが確認された。なお、初期の重量増加は模擬材取付け時に内部に存在する水蒸気をCaCl₂が吸収したことによるものと考えられる。

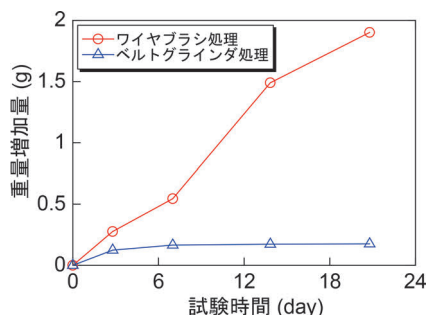


図7 CaCl₂の重量増加量

以上の結果から、新規の防錆キャップ工法として、ボルトを支点にして円形に切削できるホールカッター状の

工具を開発し、キャップと部材の接触部分のみを素地調整する方法を考案した（図8）。工程は以下の通りである。

- ①開発工具を用いて、ボルト近傍のキャップのつば部分が接触する部材表面を金属光沢が出るまで切削する。
- ②キャップのつば部分にコーキング材を塗布する。
- ③キャップ/ボルト間が環境遮断するように、キャップのつば部分を部材の金属光沢面に密着させる。

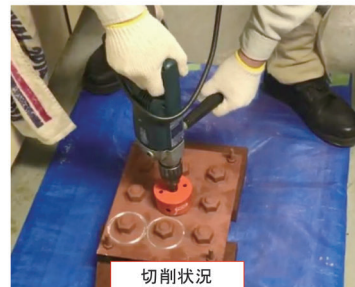
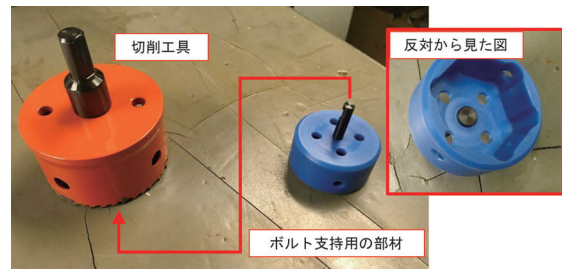


図8 開発した工具を用いた塗膜の切削概要

4. ブラスト工法の適用推進に向けた養生方法

動力工具を用いた通常の塗替え施工では、建築限界を支障しない範囲で足場が組まれる。足場には塗膜片やさび片の落下防止のためのシートが配置され、側面には落下防止や比較的大きなさび片等の飛散防止を目的としてメッシュシートが配置される。一方、上空方向への飛散防止対策は講じられていない。

ブラスト工法を適用する場合には、研削材や微細なさび片等が飛散するため、メッシュシートを密閉性の高い材料に変更し、上空方向も養生する必要がある。メッシュシートをパネル材に変更する板張りと呼ばれる方法があるが、上路プレートガーダ構造の場合、多数存在するまくらぎとまくらぎとの間の空間を養生する必要があり、板張りによる養生は困難と考えられる。

そこで本研究では、高温によって加工可能な熱収縮シートに着目した。熱収縮シートは高温を与えることで収縮するため、たわみの少ない養生空間を作製できる。また、熱収縮シート同士を融着できるため、シート同士で隙間を埋めることが可能となり、上路プレートガーダに対しても図9に示すような隙間の少ない空間の作製が期待できる。ただし、鉄道橋への施工実績が少なく、使用時の安全性への影響については検討されていない。

また、熱収縮や融着による機械的特性への影響についても十分に把握されていない。そこで、電気炉を用いて熱収縮シートを所定の温度に昇温した際の寸法変化や強度について評価した。また、熱収縮シートの現場への適用可能性を判断するため、鋼鉄道橋の塗替え塗装施工会社が採用する安全基準と強度計算方法による安全性評価を実施した。



図9 熱収縮シートを用いた鋼橋の養生例

4.1 熱収縮シートと温度の関係

熱収縮シートを現場で適用する際にはジェットヒーターを用いて収縮させるため、加熱温度にむらが生じる。そこで温度範囲を150℃、200℃、250℃に温度設定した電気炉内に300×200mmの熱収縮シートを静置し、収縮挙動を評価した。試験結果を図10に示す。温度によって収縮する速度が異なるが、いずれの温度においても一方向（長さ300mmの方向）にのみ収縮が生じ、初期寸法からの収縮率は60%前後であった。

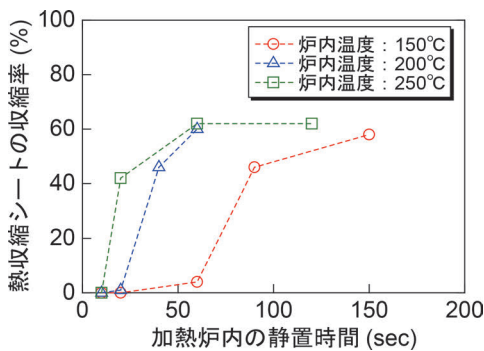


図10 熱収縮シートの収縮率

4.2 熱収縮シートの機械的特性

加熱温度や収縮の有無による強度の変化を評価するため、150℃、200℃、250℃とした電気炉内への設置時間を10秒間もしくは収縮率が60%程度となる時間として熱収縮シートを収縮させた。これをダンベル状（評価部分の寸法：20×5mm）に打ち抜いたものを試験片として静的引張試験を実施した。引張速度は100mm/minとし、破断時応力を算出した。試験の結果、収縮する方向と収縮しない方向の双方を長手方向として引張試験を実

施したところ破断時の伸び率や応力に大きな違いは見られず、破断時伸び率は200%以上、破断時応力は20MPa程度であった。ここでは収縮方向を長手方向とした試験片の破断時応力を図11に示す。n=3で評価し、エラーバーは最小値と最大値を示している。いずれの加熱条件においても初期値と同程度の破断時応力を有し、収縮による強度低下は生じていないことが分かった。

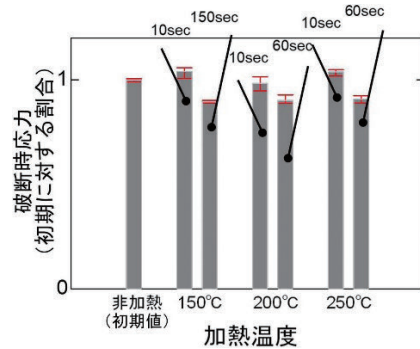


図11 熱収縮シートの破断時応力

続いて、融着した場合の熱収縮シートの機械的特性を評価するため、熱収縮シートを10mm重ね合わせて融着させた場合の静的引張試験を実施した。融着の温度条件は外観の仕上がりが良好だった250℃、180秒間とした。試験の結果、重ね合わせ箇所付近で破断した。融着しない場合と比較して破断時応力は約60%、伸び率は約70%となり、融着しない場合よりも強度が低下することが分かった。これは、破断箇所付近に応力が集中したためと考えられる。

4.3 熱収縮シートの現場への適用可能性評価

現場で熱収縮シートを適用した場合の足場モデル図を図12に示す。シートの寸法は2000×3000mmであり、シートの4方を部材に固定する場合よりも厳しい条件として、赤線で示すシートの水平方向のみを部材と固定し、シートに風荷重が作用した際に生じる最大張力が

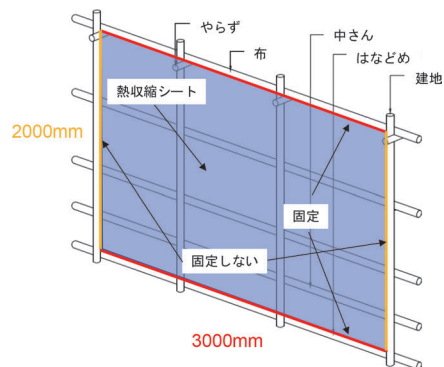


図12 足場モデル図

シートの破断時応力以下であれば安全性に問題が無いと考えた。風荷重に対する最大張力の算出には、ケーブルの耐力を評価する際に一般的に用いられる放物線の式(図13)⁷⁾を用いた。最大張力 T_{max} の算出式を式(2)に示す。

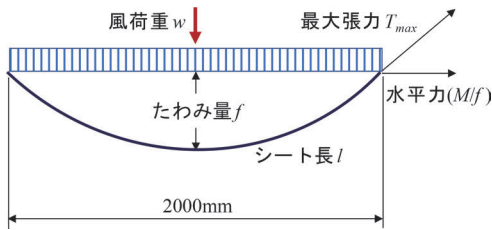


図13 放物線の式のモデル図

$$T_{max} = \sqrt{1 + 16 \left(\frac{f}{l}\right)^2} \times \frac{M}{f} \quad (2)$$

ここで、 f はたわみ量、 l はシート長、 M はモーメントである。このように、最大張力はたわみ量 f の増加とともに減少する。4.2節の試験結果から分かるように、熱収縮シートは伸びやすい素材のため、設置時にたわみを持たせなくとも風荷重を受けてシートが伸長し、 l および f は増加すると考えられる。シートをたわませずに部材に固定し、風荷重が作用してたわみ量が増加した場合のシートの伸び率と最大張力の関係を図14に示す。このときの単位面積当たりの風荷重は、風速30m/sを想定して850N/m²とした。伸び率が約0.5%以上になると最大張力は約25N以下となり、この値から算出される熱収縮シートへの応力(約0.008MPa以下)は4.2節で得られる融着部の破断時応力(約20MPa)を下回る。また、4.2節の非加熱シートの引張試験において、伸び率0.5%は約0.3Nといった非常に小さい試験力で達成された。このため、現場においても小さな風荷重の付与によって上記伸び率に達することが推定される。以上の計算結果から、熱収縮シートは現場への適用に安全面で十分な性能を有すると考えられる。

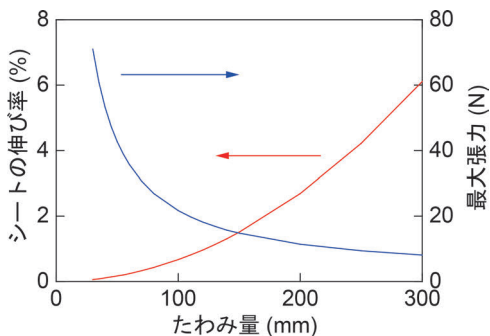


図14 たわみ量に対するシートの伸び率と最大張力の計算結果

5. まとめ

鋼橋塗装の防食性向上を目的として、レーザを用いたさびの除去方法や防錆キャップを用いた防食工法について検討した。また、開床式構造の鉄道橋に対するプラスト工法の適用を目標に、密閉空間を形成するための養生方法を検討した。得られた知見を以下に述べる。

- (1) レーザを用いたさびの除去手法は、さびの除去や表面塩分量の低減程度について、プラスト工法と同水準であることを確認した。ただし、現場へ適用する場合には作業工程の最適化が必要である。
- (2) 防錆キャップ工法におけるキャップ内の環境遮断性を向上させるため、キャップと部材の接触部分を素地調整した後に防錆キャップを適用する方法を考案した。
- (3) プラスト工法の適用を推進するため、熱収縮シートを養生材料として使用する方法を提案した。材料の機械的特性を踏まえた上で風荷重に対する影響を考慮した結果、安全性の観点から十分な性能を有することを試算により示した。

今後は本研究で得られた知見に基づき、腐食が進行した鋼橋を適切に塗替え施工していくための実施方針をまとめるとともに、防食性のさらなる向上が可能な素地調整手法の開発に取り組む予定である。

文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，2013
- 2) 大脇桂：レーザクリーニング装置の適用 - レーザクリア紹介 -，溶接技術，No.62，pp.61-64，2014
- 3) 藤田和久，豊澤一見，沖原伸一郎，前橋伸光，高原和弘，秋吉徹明：レーザクリーニングによる鋼構造物のメンテナンス，レーザー研究，Vol.45，No.7，pp.418-422，2017
- 4) 村越潤，名取暢：塗装の品質管理と塗膜欠陥，橋梁と基礎，Vol.27，No.10，pp.37-41，1993
- 5) 岩本達志，今井学，吉田利樹，清水隆，赤嶺健一：防錆キャップの防錆性および長期耐久性に関する調査報告，鉄構塗装技術討論会発表予稿集，Vol.36，pp.121-126，2013
- 6) 鈴木実，園佳寿郎，後藤宏明，江成孝文，橋本康樹，山本基弘，吉田陽一，木村武久，真田祐介：実橋りょうに適用した長期耐久型塗装系の追跡調査(その2)，鉄構塗装技術討論会発表予稿集，Vol.35，pp.7-12，2012
- 7) 北村慎悟：足場工・防護工の施工計画の手引き，日本橋梁建設協会，p.33，2018