

塩類で腐食した耐候性鋼材に対する高出力連続波レーザー表面処理の 除塩・除せい効果

九州大学大学院 学生会員 ○余 カク江 九州大学大学院 フェロー会員 貝沼 重信
九州大学大学院 学生会員 王 啓迪 トヨタ(株) 非会員 霍 鵬

1. はじめに 海塩などの塩類が付着する鋼構造物では、進行性が高い重度の局部腐食が生じやすい。この腐食孔の底部では、ブラスト処理などの素地調整後にも塩類を含む腐食生成物が残留することが多い。これが主要因となり、塗替え塗装後の早期に塗膜下腐食が生じるため、塗膜の耐久性や防食性能を長期間維持する上で、塩類を含む腐食生成物を極力除去することが重要になる。そこで、本研究では高出力連続波レーザー技術（以下、CWL (Continuous-wave Laser)）を用いた表面処理²⁾⁴⁾に着目し、塩類で腐食した耐候性鋼材に対するCWL処理の除塩・除せい効果を検討した。そのために、ブラスト処理、CWL処理およびこれらの処理を組み合わせた方法により、塩類で腐食させた耐候性鋼板を素地調整した。また、素地調整後の鋼材表面の戻りさび試験（以下、ターニング試験）⁵⁾を実施することで、戻りさびの面積の経時性に基づき、除塩・除せい効果を残留塩分量で評価した。

2. 試験方法 試験体の供試鋼材には、板厚6mmの耐候性鋼板（JIS G 3114 SM490AW, 150×70mm）を用いた。また、この鋼板に図-1に示す寸法の腐食孔を複数個した円錐形の凹みを機械切削で設けた⁵⁾。各人工腐食孔には、26.5wt%のNaCl溶液（1ml/腐食孔）で満たした。この後、1年間の定露点腐食促進サイクル試験⁵⁾を行うことで、図2(a)に示す腐食試験体を作成した。なお、本試験に用いた定露点サイクルは、沖縄本島の夏季の昼夜の温湿度データに基づき、その定露点を27°Cとした。CWLおよびブラスト処理に先立って、現場施工を考慮して、ワイヤブラシ（線径0.3mm, 毛丈20mm）で粗さびを除去した。デジタルマイクロスコープによるスキャンした腐食孔底の残留さび層の厚さは350~400μmであった。ワイヤブラシ処理後の試験体の表面状態を図2(b)に示す。

本研究の素地調整法は、塩類で腐食した耐候性鋼材に対するCWLの除塩・除せい効果、およびブラスト処理とCWLの併用による除塩・除せい効果を検証するため、表-1に示す4種類とした。CWL処理の条件を表-2に示す。この処理条件では、1回の処理で厚さ約200μmのさび層を除去できる。また、その単位時間あたりに処理可能な鋼板の表面積は0.84 m²/hである。ブラスト処理は一般的な現場施工条件を考慮して、投射の圧力、角度および距離をそれぞれ0.7MPa, 60°および300mmとした⁶⁾。研削材にはモース硬度7.50のガーネット、およびモース硬度9の溶融アルミナを用いた。これらの投射時間は、鋼板表面の錆を完全に除去できるため、それぞれ20secと10secとした。なお、これらの単位時間あたりに処理可能な鋼板の表面積は、それぞれ1.89 m²/hと3.79 m²/hである。

素地調整後の試験体は、ターニングの経時挙動を評価するために、前述の促進試験と同じ露点に基づき、30°Cと90%RHの腐食環境で7日間（168h）暴露した。なお、試験体は1, 4, 24および168hで回収し、その表面性状をデジタルカメラ（約1800万画素, 5,184×3,456 pixel）で撮影した。なお、試験体表面の戻りさびの領域はImageJを用いて、分析条件を色相: 190~250, 彩度: 20~160および明度: 20~100として判定した。判定結果を図-3に示す。この結果に基づき、試験体の投影表面積A₀に対するさび領域面積A_{cr}の比を算出した。ターニングは塩類残留領域で発生することから、このさび領域面積比から塩類の残留面積を算出することで、表-1に示す4種類の素地調整法の除塩・除せい効果を定量評価した。

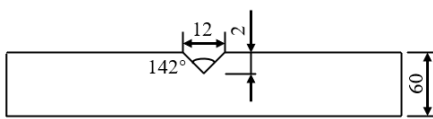


図-1 腐食孔の形状・寸法(単位: mm)

表-1 素地調整の方法

Surface Treatment	Process
G	ABT(Garnet)
G-A	ABT(Garnet)→ ABT(Fused Alumina)
L-G	CWL→ ABT(Garnet)
2L-G	CWL→CWL→ ABT(Garnet)

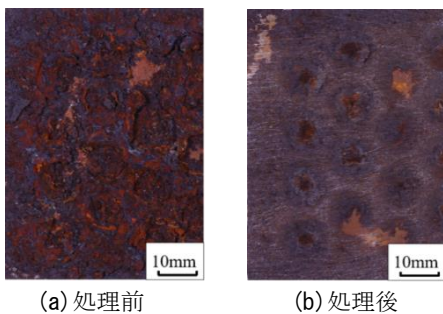


図-2 ワイヤブラシ処理前後の表面状態

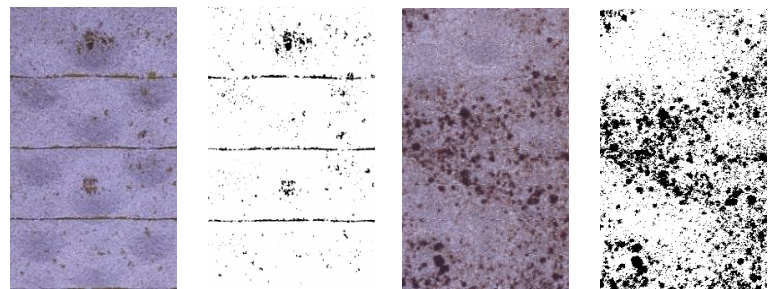


図-3 戻りさびの領域

表-2 CWL 処理の条件

Output (kW)	Spot diameter (μm)	Focal depth (mm)	Focal length (mm)	Motor speed (rpm)	Irradiation ring diameter (mm)	Spot irradiation speed (cm/s)	Interaction time (μs)	Energy density (kW/m^2)	Cleaning efficiency (m^2/h)
3	430	20	200	5000	26	680	63.2	2070	0.84

表-3 ターニングの面積比 $\alpha(A_{cr}/A_0)$

Treatment method	1h	4h	24h	168h
G	0.096	0.198	0.271	0.713
G-A	0.017	0.025	0.104	0.232
L-G	0.109	0.138	0.179	0.270
2L-G	0.015	0.029	0.035	0.037

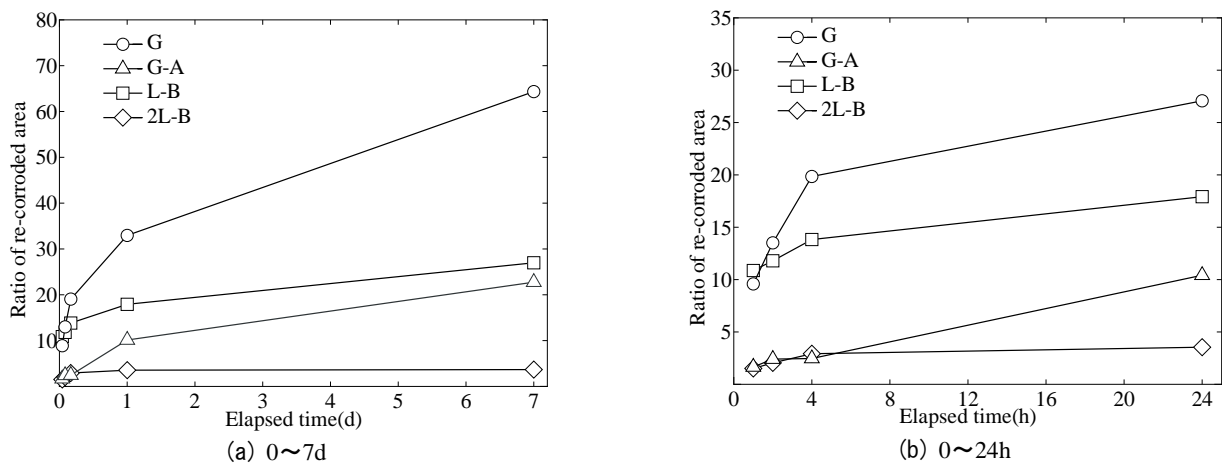


図-4 戻りさびの経時性面積比

3. 試験結果 1, 4, 24 および 168h 後における試験体の画像に対する戻りさび領域面積 A_{cr} と投影表面積 A_0 の面積比 α の結果を表-3 に示す。これらの画像に対する α の経時性を図-4 に示す。素地調整方法が G の場合は、ブラスト処理で外観上、さびを除去できているが、他の方法に比して、ターニングの速度と α が最も大きくなっている。また、4h 後の α は 0.2 であり、試験終了後の 7d では 0.71 となっており、7d 以降も α は増加すると考えられる。これらの結果から、試験体表面のさびは、外観上除去できているが、塩類が多量に残留すると言える。したがって、本研究の条件下ではガーネットを用いたブラスト処理を 1 回実施しても、付着塩分を十分に除去することは困難であると言える。G-A の場合については、G に比して、ターニングの速度と α が小さくなっており、7d 後の α は 1/3 以下になっており、除塩・除せい効果が著しく向上している。しかし、 α は 20% 程度であることから、除塩は不十分であり、塗膜下腐食の発生が懸念される。L-G の場合では、素地調整直後の α は、G の方法と同程度になっているが、ターニングの速度と α は経時的に低くなっている。一方、G-A の方法に比して、ターニングの速度と α は高くなっている。2L-G の方法については、他の方法に比して、ターニングの速度と α が最も低くなっている。また、これらは素地調整直後と 7d でほとんど変化しておらず、ターニングはほとんど生じていない。したがって、2L-G が塩類で腐食した耐候性鋼材の除塩・除せいに最も優れている素地調整方法と言える。また、耐候性鋼材に塗装する場合、塗膜下腐食の発生を予防し、塗膜の耐久性や防食性能を長期間維持する上で有効になることが期待される。

4. まとめ 本研究で用いた人工腐食孔を有する腐食耐候性鋼板および素地調整方法（ブラスト処理，高出力連続波レーザー）から得られた主な知見を以下に示す。1) ガーネットや溶融アルミナを用いたブラスト処理では、塩類で腐食した耐候性鋼材を除塩・除せいすることは困難である。2) レーザー処理 2 回とガーネットを用いたブラスト処理 1 回を併用して行うことで、1) の素地調整方法に比して、優れた除塩・除せい効果が得られる。

参考文献 1) 土木学会：大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策，鋼構造シリーズ 30，丸善，2019. 2) S. Zhuang, S. Kainuma, M. Yang, M. Haraguchi and T. Asano : Characterizing Corrosion Properties of Carbon Steel Affected by High-power Laser Cleaning, Construction and Building Materials, Vol.274, 122085, 2021. 3) 貝沼重信, 庄樹森, 劉偉傑, 原口学 : 高出力連続波レーザーで素地調整した鋼材の表面特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A1, Vol.78, No.2, pp.210-230, 2022. 4) Q. Wang, S. Kainuma, S. Zhuang, K. Shimizu and M. Haraguchi : Laser Cleaning on Severely Corroded Steel Members: Engineering Attempt and Cleanliness Assessment, Journal of Cleaner Production, Vol.376, 134224, 2022. 5) Q. Wang, S. Kainuma, P. Huo and R. Morikawa : Quantitative Evaluation of Surface Cleanliness of Weathering Steel Treated by Continuous Wave Laser, Optics & Laser Technology, Vol.158, Part A, 10886, 2023. 6) 貝沼重信, キム アラン, 池田龍哉, 小寺健史 : ブラスト処理の研削材と施工条件が鋼素地表面性状と研削材の残留度に及ぼす影響, 防錆管理, Vol.63, No.8, pp.285-300, 2019.