

目次

研究概要.....	1
第1章 序論.....	3
1. 1 研究背景と目的.....	3
1. 2 研究内容.....	4
(1) 腐食した鋼材に対する Cold Spray 表面処理技術の防食性能の検証.....	4
(2) 腐食した鋼桁端部における Cold Spray 工法の実証試験.....	4
(3) Cold Spray 皮膜を防食下地とした鋼桁端部の耐荷力回復効果の評価.....	4
1. 3 レポート構成.....	4
第2章 腐食した鋼材に対する Cold Spray 表面処理技術の防食性能の検証.....	6
2. 1 さび鋼板面上での CS 防食皮膜の特性.....	6
(1) 試験方法.....	6
(2) 試験結果および考察.....	6
(3) まとめ.....	8
2. 2 防食効果の高い CS 配合比率に関する検討.....	8
(1) 試験方法.....	9
(2) 試験結果および考察.....	9
(3) まとめ.....	10
2. 3 初期さび厚が成膜性に及ぼす影響に関する検討.....	11
(1) 試験方法.....	11
(2) 試験結果および考察.....	11
2. 4 施工角度が成膜性に及ぼす影響に関する検討.....	12
(1) 試験方法.....	12
(2) 試験結果および考察.....	12
2. 5 狭隘な施工条件に対する検討.....	13
(1) 試験方法.....	13
(2) 試験結果および考察.....	14
2. 6 施工効率化のための検証.....	15
(1) ノズル径拡張による性能検証.....	15
(2) 施工半自動化による性能検証.....	17
2. 7 まとめ.....	18

第3章 腐食した鋼桁端部における Cold Spray 工法の実証試験	19
3. 1 はじめに.....	19
3. 2 対象橋梁.....	19
3. 3 腐食環境調査.....	20
(1) 調査方法	20
(2) 調査結果	21
3. 4 Cold Spray 実証試験方法.....	23
(1) 施工対象	23
(2) 施工範囲	23
(3) 施工手順	24
(4) 施工条件	25
3. 5 Cold Spray 実証試験結果（平成 27 年度施工）	28
(1) 除錆度の影響に関する現場検証.....	28
(2) 膜厚・密着力測定結果	28
3. 6 Cold Spray 実証試験結果（平成 28 年度施工）	29
(1) 施工条件別による CS 施工結果.....	29
(2) 施工効率化のための CS 施工結果	30
(3) 密着力・膜厚測定結果	30
3. 7 腐食外観モニタリング結果	32
3. 8 まとめ.....	33
第4章 Cold Spray 皮膜を防食下地とした鋼桁端部の耐荷力回復効果の評価	35
4. 1 はじめに.....	35
4. 2 中型せん断試験体を用いた耐荷力回復効果の検証	35
(1) 腐食鋼板の凹凸度の評価.....	36
(2) 載荷方法及び試験体.....	36
(3) 試験パラメータ	37
(4) せん断耐荷力回復効果の評価.....	39
4. 3 大型せん断試験体を用いた耐荷力回復効果の検証	42
(1) 試験体	42
(2) 載荷方法	44
(3) せん断耐荷力回復効果の評価.....	45
4. 4 まとめ	46
第5章 結論.....	47

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 26 年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.26-4	表面処理技術を応用した腐食鋼桁端部の性能回復技術に関する研究開発	琉球大学 准教授 下里哲弘

腐食鋼桁端部に対し高耐久性の防食技術開発を目的として、アルミナと亜鉛の混合粉体を用いた低温低圧型金属溶射「Cold Spray 表面処理技術」を応用し、防食性能の解明、現場適用技術の開発、実橋実証、及び CS 防食面に適用した当板と炭素繊維工法の耐荷性能を検証した研究開発。

1. 研究の背景・目的

本研究では、鋼橋の腐食部位の中で最も厳しい腐食環境と施工条件を有する鋼桁端部に対する高耐久性の防食技術の開発を目的として、ブラスト効果を持つアルミナと犠牲防食効果を持つ亜鉛の混合粉体を用いた低温低圧型金属溶射工法「Cold Spray 表面処理技術」(以下、CS)に着目して、その防食性能の解明と現場適用技術の開発を行った。また、研究成果は CS 施工要領にまとめ、実橋での実証試験で検証した。次に、腐食で部材破断した鋼桁端部に対する性能回復工法として、腐食凹凸面に CS で防食下地を形成し、その CS 面上に当板ボルト工法および炭素繊維接着工法を施した際のせん断耐荷力の回復効果を実験的に検証した。

2. 研究内容

鋼桁端部の腐食レベルに応じた耐食性および耐荷力を持つ性能回復技術の開発を目標として、以下の研究内容を実施した。

(1) 腐食鋼材面に対するCS工法の防食性能評価

鋼桁端部の防食補修は狭隘な施工条件下で残存するさびに対する防食技術が要求される。本研究では、先ず残存さび面での亜鉛・アルミナ混合粉体の皮膜形成メカニズムの解明と最適配合比率を検討した。次に狭隘な施工条件に対応可能なCS装置を開発し、それらの防食性能を評価した。

(2) 腐食した実桁端部の防食性能回復を目的としたCS実証試験

腐食鋼材面に対するCS工法の防食性能実験と狭隘な施工条件に対応可能なCS装置の開発に基づき、CS施工要領を作成し、腐食した実橋桁端部の防食性能回復を目的とした実証試験を行った。

(3) CS防食下地面に施した当板及び炭素繊維技術の耐荷力回復効果の検証

激しい腐食で部材破断した桁端部の耐荷力回復を目的に、腐食凹凸面に CS 工法で防食下地を施した接合面に当板ボルト/炭素繊維補修を適用した場合のせん断耐荷力特性を実験検証した。

3. 研究成果

(1) 腐食鋼材面に対するCS工法の防食性能評価

大気暴露試験でさびた鋼板を用いて、亜鉛、アルミナ、亜鉛・アルミナ混合粉体別で実験を行い、さび面でのCS皮膜形成メカニズムを解明した。また、最適配合比率(亜鉛:アルミナ=60:40)を設定した。

(2) 腐食した実桁端部の防食性能回復を目的としたCS実証試験

・実装対象の国道管理の鋼桁橋における調査および実証試験を踏まえ、桁端部の狭隘な施工条件に対応可能で防食性能のあるCS装置のエクステンションを開発した。また、CSノズルを増径(5→7mm)し施工能率を向上できた。さらに高品質な防食皮膜を形成できる半自動施工装置を開発した。

・さび鋼板面に対するCS工法の防食性能実験、狭隘な施工条件に対応可能なCS装置の開発等に基づき、CS施工要領を作成し、腐食した実橋桁端部(国道管理橋)で実証試験を行った。



写真1 CS装置

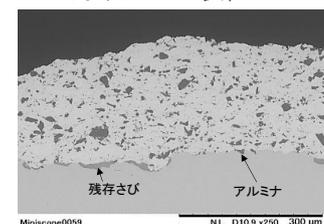


図1 さび面でのCS皮膜
(亜鉛 60 : アルミナ 40)

(3) CS面上の当板及び炭素繊維技術の耐荷力回復効果検証
実腐食凹凸を持つ鋼板に対して、CS防食下地処理を施した鋼板面に当板ボルト接合および炭素繊維接着を施し、せん断耐荷力実験（1/3スケールと実大スケール）を行い、CS防食面と耐荷力回復効果との関係を実験的に検証した。



4. 主な発表論文

・下里哲弘，日和裕介，有住康則，山城慶：さび鋼板面に対するコールドスプレー法の防食皮膜形成に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol.24，No.93，2017.4.



・加藤祐介，下里哲弘：腐食損傷を受けた実橋鋼桁端部への低温低压型溶射工法（Cold Spray工法）の実証試験，平成29年度沖縄ブロック国土交通研究会，2017.7

・高橋鴻，下里哲弘：腐食鋼I桁端部の損傷レベルに応じたせん断耐荷力回復工法の検討，平成29年度沖縄ブロック国土交通研究会，2017.7

写真2 狭隘な条件でのCS施工

5. 今後の展望

1) 本研究で実証したCS防食技術は、ケレン後の残存さび面上でも高耐久性が期待できる。今後の展開としては、海塩粒子の飛来する沿岸地域や凍結防止剤の散布地域など様々な腐食環境にある実橋にCS防食技術を適用し、その防食効果を検証することが求められる。



写真3 実大試験体による耐荷力実験

2) 本研究では、狭隘な桁端部や支承部とその周辺部材に対するCSの防食性を実証した。今後の展開としては、鋼橋の腐食弱点部である鋼材のエッジ部や高力ボルトの角部のような局部でも十分な防食皮膜の形成が可能な技術への発展が求められる。

3) 現行基準では、当て板接触面や炭素繊維接着面はさび除去や腐食凹凸の不陸処理が求められる。本研究では、それらの補修面の防食下地としてのCS皮膜が、耐荷力回復効果に及ぼす影響はないことを実験的に実証した。また、本研究の当て板試験体等に用いた腐食凹凸程度であれば、腐食凹凸面の不陸処理なしでも十分な耐荷力回復効果が期待できる。今後は、各腐食凹凸に対する当て板ボルト工法等の実験データを積み重ね、適用範囲を明確にする必要がある。

6. 道路政策の質の向上への寄与

○鋼橋の長寿命化と低LCCメンテナンスへの寄与

鋼橋の腐食は桁端部で最も早く発生しやすく、鋼橋のメンテナンスコストの増大の主要原因となっている。また、桁端部の補修塗装の寿命は短く、場合によっては数年で再発するケースもある。原因としては、狭隘な施工環境で部材数も多い桁端部では、十分なケレンが行えないことが挙げられ、残存さびの状態でも早期発さびとなりやすい。本CS工法は残存さびのある状態でも、ブラスト効果を持つアルミナと犠牲防食効果を持つ亜鉛の混合粉体を音速でさび鋼板面に衝突させることで、さびの除去効果、高い付着特性および防食性の高い亜鉛皮膜を形成でき、腐食した鋼桁端部の高耐久化を図る技術として期待できる。今後、様々な環境や構造形式を有する実桁端部でのCS実証例を増やし、信頼性の高い防食技術への発展が期待される。

○防食便覧、マニュアル等への組み込み

本研究成果のCS工法を一般的に適用されている塗装・金属溶射と並ぶ防食工法として、便覧や各団体で発刊しているマニュアル等に盛り込まれることが必要である。そのためには、実橋での実証試験の実施を踏まえ、適用範囲の設定や施工管理方法の規定等を十分に議論する必要がある。本CS工法による防食は、腐食損傷を受けた鋼橋の増加が顕著になっている我が国にとって、道路資産の安全性の確保と対策後の耐久性の確保に大きく貢献できるものと考えている。

7. ホームページ等

<http://www.structures.u-ryukyu.ac.jp/>

(琉球大学工学部 構造工学研究室)

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

我が国の重要な社会基盤施設である橋梁は、高度経済成長期に多く架設され、近年、重度の腐食劣化により大規模な補強や通行止め等が行われている¹⁾²⁾。今後も腐食劣化した鋼橋が著しく増加することが予測されており、腐食減肉した鋼橋の適切な維持管理手法の構築が重要となっている。

鋼橋の腐食部位の中でも、湿気や塩分が溜まりやすい環境であることや伸縮装置からの漏水が生じやすい鋼桁端部、塗装膜厚の確保が困難な高力ボルトや部材のコバ面は、写真 1-1 に示すように他の部位と比べて早期に著しい損傷が生じる場合が多い。これらの損傷は、支点部の座屈やウェブのせん断座屈、高力ボルトの軸力低下を引き起こし、橋梁の耐荷力を低下させることが懸念されている³⁾⁴⁾。それゆえ、既設鋼橋の長寿命化を図り、ライフサイクルコストを低減させるためにも、このような既設鋼橋の腐食弱点部位に対する防食メンテナンス技術の開発が強く求められている。

今日行われている、一般的な腐食劣化対策は、防食下地にジンクリッチペイントや金属溶射が適用された重防食塗装への塗り替えがある。この防食効果は、防食下地の皮膜が鋼材表面に密着し、環境遮断と犠牲防食作用によるものである。このジンクリッチペイントや金属溶射による防食下地が十分な防食効果を発揮するためには、それぞれ含有溶剤や熔融金属粒子と鋼素地と強固に密着している必要がある。それゆえ、既設鋼橋に適用する場合、ブラスト処理などによる錆等の腐食生成物質や水・塩分等の腐食促進因子の除去と粗面化処理が必要である。しかしながら、腐食損傷が激しい鋼桁端部等は構造上ブラスト処理を適用することが困難であるため、除去されずに残存した錆を起点として、写真 1-2 に示すように、早期に再劣化が生じる事例が数多く報告されている。それゆえ、このような施工困難箇所且つ残存錆を有する状態下でも有効な防食技術の開発を行



(a) 桁端部



(b) 高力ボルト

写真 1-1 鋼橋の腐食損傷部位例



写真 1-2 鋼橋の腐食再劣化例

う必要がある。

1.2 研究内容

本研究では、腐食損傷を受けた鋼桁端部の性能回復を目的に、現場施工性と高い防食性および十分な耐久性を有する表面処理技術を開発し、腐食減厚および断面欠損した桁端部の性能回復技術の開発を目標とする。本研究で開発対象の表面処理技術の Cold Spray 工法（以下、CS 工法とする）は、1980 年代半ばにロシア科学アカデミーの A.Papyrin らによって考案され、金属粒子の融点・軟化温度より低温のガスを専用ノズルで加速させ、溶融させることなく固相状態のまま超音速で鋼材面に衝突させ、その金属粒子が塑性変形を生じ鋼材面に密着させ積層させる技術である（図 1-3）。以下に CS 成膜の特徴を示す。

- ① 亜鉛粉体を成膜させるため、溶融亜鉛めっきと同程度以上の防食性を有する。
- ② 一定比率のアルミナ (Al_2O_3) の混入によりブラスト効果が付与できる。
- ③ 成膜の付着力が高い（溶融亜鉛めっきと同程度）。
- ④ 成膜の気孔率が小さく、従来の金属溶射で必要であった封孔処理を必要としない。
- ⑤ CS 装置がコンパクトで（重量 20 kg 以下）、現地施工が可能である。
- ⑥ 成膜時の基材瞬間のスポット温度が 200°C 程度で衝突直後は 60°C 程度であり、鋼材質に適用しても変質が生じない。
- ⑦ 低温施工であるため、成膜の厚盛り、肉盛が可能である。

本研究では、CS 工法に用いる金属粒子として、ブラスト効果が期待できるアルミナ粉体と犠牲防食効果を持つ亜鉛 (Zn) 粉体を腐食鋼材面に音速以上で強力で密着させ、高防食化を図るものである。また、腐食による減厚凹凸や腐食破断による断面欠損の補修を目的に適用する当板ボルト工法や炭素繊維接着工法の接触面に対して、CS 処理を行い、その耐力回復効果に及ぼす影響を検証する。

以上のことより、本研究では CS 工法の適用によって腐食損傷レベルに応じた補修効果性・高耐久性・経済的合理性を有する性能回復技術の開発を図るものである。以下に本研究内容を示す。

(1) 腐食した鋼材に対する Cold Spray 表面処理技術の防食性能の評価

CS 工法による成膜メカニズムを明らかにするために、まず、鍍鋼板面に対する CS 工法による防食皮膜の特性を解明する。また、より高い防食効果を得るための CS 工法の金属粒子に用いるアルミナ粉体と亜鉛粉体の配合比率を検討する。さらに、現場での適用性を検証するために、施工角度やノズル形状をパラメータとし、CS 皮膜の成膜特性を評価し、腐食鋼材に対する Cold Spray 工法の施工要領を作成する。

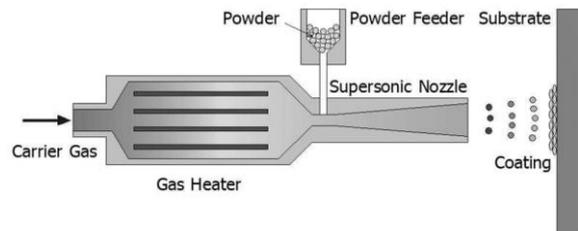


図 1-3 Cold Spray 工法概略図

(2) 腐食した鋼桁端部における Cold Spray 工法の実証試験

(1)で作成した施工要領に基づき、桁端部に腐食損傷が生じた実橋梁に対して、CS 工法の実証試験を行う。対象橋梁は沖縄県北谷町において、離岸距離約 300m に位置し、供用より約 40 年が経過した塗装鋼 I 桁橋梁とする。対象橋梁には支承周辺や垂直補剛材、フランジ面などに激しい損傷が生じている。これらの異なる施工環境にある損傷に対して、CS 施工とその機器（ノズル形状、半自動施工機器）の施工性・効率性の検証を行うとともに、現場での品質確保を付着力及び膜厚により評価を行う。さらに施工箇所のモニタリング調査を実施し、防食効果の検証を行う。

(3) Cold Spray 皮膜を防食下地とした鋼桁端部の耐力回復効果の評価

腐食損傷が生じた鋼橋の補修工法として、当て板ボルト工法と炭素繊維接着工法に着目し、当て板面や炭素繊維接着面の防食下地として CS 工法を施し、CS 皮膜が耐力回復効果に及ぼす影響を実験的に明らかにする。検討には、実腐食鋼橋から採取した腐食部材を用いた中型試験体及び実大試験体を製作し、せん断耐力試験を行う。

1.3 レポート構成

本レポートは全5章により構成されている。以下に各章の内容について概説する。

「第1章 序論」では、本研究の背景と目的、研究内容、本レポートの構成を示している。

「第2章 腐食した鋼材に対する Cold Spray 表面処理技術の防食性能の検証」では、まず、鍍鋼板面に対する CS 工法による防食皮膜の特性について解明を行い、防食効果が高い CS 配合比率を明らかにする。また、施工角度やノズル形状が CS 皮膜の成膜性に及ぼす影響の検討を行い、腐食鋼材に対する Cold Spray 工法の施工要領を作成する。

「第3章 腐食した鋼桁端部における Cold Spray 工法の実証試験」では、桁端部に腐食損傷が生じた実橋梁に対して、CS 工法による防食効果の実証試験を行う。CS 工法の適用にあたっては、施工困難箇所な狭隘部に対する施工性や、大面積に対する施工効率性を確保するために改良したノズル形状や半自動施工機器の現場適用性について評価を行う。また、施工箇所のモニタリング調査を行い、防食効果の評

価を行う。

「第4章 Cold Spray皮膜を防食下地とした鋼桁端部の耐荷力回復効果の評価」では、腐食した鋼橋桁端部に対する補修工法として、当て板ボルト工法と炭素繊維接着工法を取り上げ、当て板設置面や炭素繊維接着面の防食下地としてのCold Spray皮膜が耐荷力回復効果に及ぼす影響を実験的に検討した。検討に際しては、実腐食橋梁から採取したウェブを用いた中型及び大型試験体を作成し、せん断耐荷力試験を行った。

「第5章 結論」では、腐食鋼板面に対するCS工法による成膜特性、実腐食橋梁に対するCS工法の現場適用性、腐食部材に対する補修工法の防食下地としてのCS皮膜の適用性について述べる。

参考文献

- 1) 山田健太郎：(速報) 国道 23 号木曾川大橋の斜材の破断，橋梁と基礎，Vol.41，pp.54-55，2007.9
- 2) 下里哲弘，村越潤，玉城喜章，高橋実：腐食により崩落に至った鋼橋の変状モニタリングの概要と崩落過程，橋梁と基礎，Vol.43，pp.55-60，2009.11.
- 3) Vo Thamh Hung，佐々木栄一，市川篤司，三木千壽：腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析，構造工学論文集，Vol.48A，2002.3.
- 4) Vo Thamh Hung，永澤洋，佐々木栄一，市川篤司，名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.141-15，2002.7.
- 5) 海田辰将，藤井堅，原孝志，中村秀治，上野谷実：腐食鋼板のせん断耐力とその評価法，構造工学論文集，Vol.50A，pp.121-130，2004.3.
- 6) 海田辰将，藤井堅，宮下雅史，上野谷実，中村秀治：腐食したプレートガーダーの残存曲げ強度に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.139-148，2005.3.
- 7) 中山太士，木村元哉，石川敏之，松井繁之：ウェブ孔食を持つ鋼桁のせん断耐荷力，構造工学論文集，Vol.52A，pp.49-56，2006.3.
- 8) 下里哲弘，玉城喜章，有住康則，矢吹哲哉，小野秀一，三木千壽：実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断強度特性に関する実験的研究，土木学会論文集 A1，Vol.70，No.3，359-376，2014.
- 9) 下里哲弘，田井政行，長嶺由智，有住康則，矢吹哲哉：実腐食減肉形状を有する摩擦接合用高力六角ボルトの残存軸力特性，構造工学論文集，Vol.62A，pp.503-513，2016.

第2章 腐食した鋼材に対するCold Spray表面処理技術の防食性能の検証

2.1 さび鋼板上でのCS防食皮膜の特性

CSによる金属粒子の密着メカニズムは、粒子の高速衝突の際の塑性変形によるものであると考えられているが^{1,2)}、さびが残存した状態での皮膜密着メカニズムの検証研究はない。本節では、さび鋼板面に対する亜鉛とアルミナの混合粒子を用いたCS防食皮膜の密着性と防食性の検証を実施した。

(1) 試験方法

試験には現場施工性の良い小型（重量20kg以下）の低圧低温型CS装置を適用した。この低圧低温型CSは粒子速度300m/s前後、ガス圧力0.5~0.6MPa、使用温度400°C程度であり、緻密で高い付着力の皮膜形成が特徴である^{2,3)}。また、亜鉛粒子はZn成分99%以上/粒径17~21 μ m/Hv硬度35~55、アルミナ粒子はAl₂O₃成分99%以上/粒径45~55 μ m/Hv硬度1800~2000を使用した。試験に使用したさび鋼板は、SM400 (JIS G3106材)を琉球大学構内曝露試験場（年平均気温23.0°C、年平均相対湿度79.6%、年平均飛来塩分量0.12mdd、年平均腐食速度0.01mm/y、離岸距離約2.0km）で大気暴露したさび厚約100 μ mの鋼板を使用した。表2.1.1に検証パラメータを示す。表に示すように、検証パラメータは、亜鉛単体、アルミナ単体を新材鋼板とさび鋼板に対しCS施工したCase.1~3および亜鉛とアルミナの混合粒子を新材鋼板とさび鋼板に対しCS施工したCase.4~5とした。

CS施工後の各試験片に対し、SEM断面観察を実施しさび鋼板面に対するCS防食皮膜の密着性の検証を実施した。また、腐食促進試験を実施しCS防食皮膜の防食性能の検証を実施した。

(2) 試験結果および考察

a) SEM断面観察による密着性検証

図2.1.1にCase.1のさび鋼板（さび厚100 μ m）にアルミナ粒子100%をCS施工した結果を示す。図のSEM観察結果から、アルミナを用いたCS施工により、さびが除去されていることが確認できる。一方、鋼材内にアルミナ粒子が突き刺さっていることも確

表 2.1.1 検証パラメータ一覧

Case	基材種類	使用粉末	検証目的
Case.1	さび鋼板	アルミナ100%	さび面に対し、アルミナ単体による除錆効果の検証
Case.2	新材	亜鉛100%	新材鋼材面に対する亜鉛単体の密着部の検証
Case.3	さび鋼板	亜鉛100%	さび鋼板面に対する亜鉛単体皮膜の密着部の検証
Case.4	新材	亜鉛:アルミナ=50:50	新材鋼板面に対し、除錆と亜鉛皮膜形成の同時施工の検証および亜鉛皮膜の密着部の検証
Case.5	さび鋼板	亜鉛:アルミナ=50:50	さび鋼板面に対し、除錆と亜鉛皮膜形成の同時施工の検証および亜鉛皮膜の密着部の検証

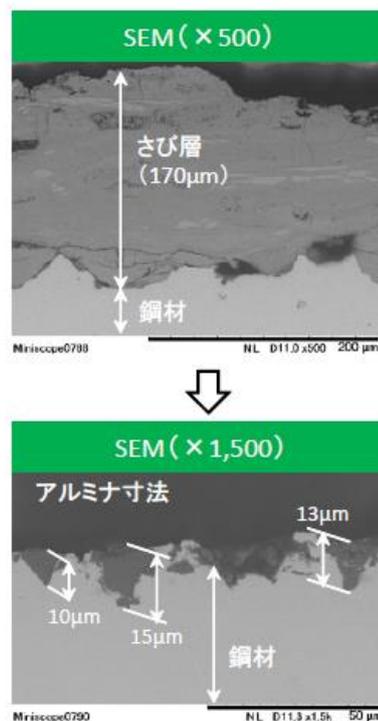


図 2.1.1 さび鋼板へのCS（アルミナ100%）の施工前後の断面（Case.1）

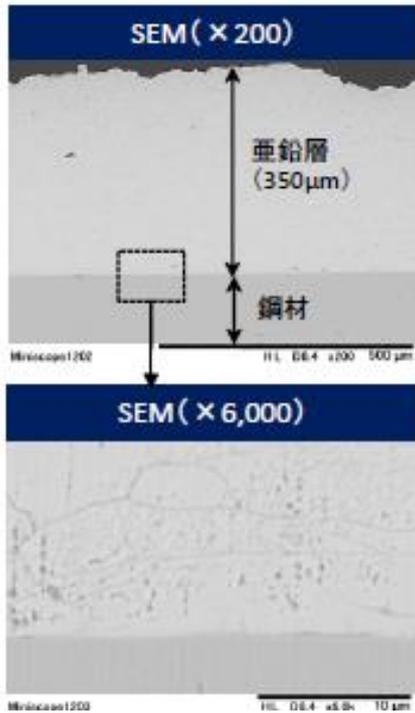


図 2.1.2 新材鋼板（鏡面仕上げ）へのCS（亜鉛100%）の施工後断面観察結果（Case.2）

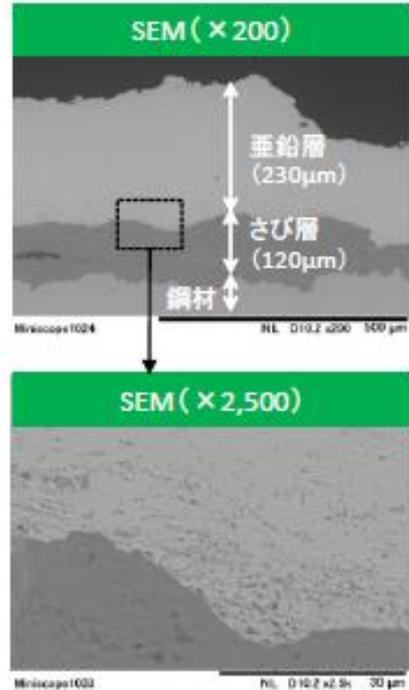


図 2.1.3 さび鋼板へのCS（亜鉛100%）の施工後断面観察結果（Case.3）

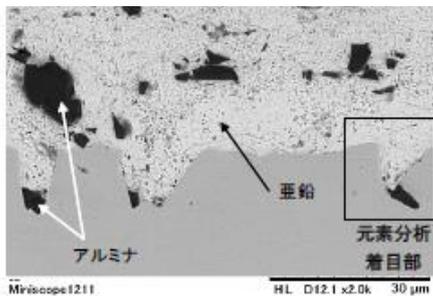


図 2.1.4 新材鋼板へのCS（亜鉛：アルミナ=50：50）の施工後断面観察結果（Case.4）

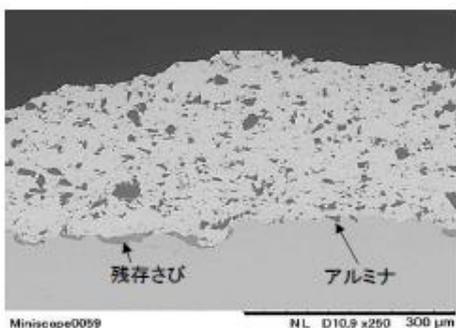
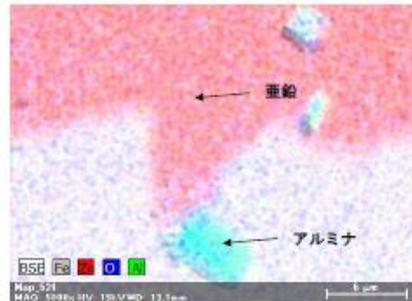
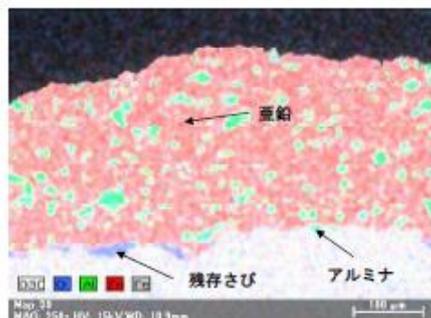


図 2.1.5 さび鋼板へのCS（亜鉛：アルミナ=50：50）の施工後断面観察結果（Case.5）



認できる。この現象については、アルミナ粒子の硬度（Hv 硬度 1800~2000，新モース硬度 9~12（ダイヤモンドが 15））は鋼材の硬度（Hv 硬度 120~150 程度）よりも高く、アルミナ粒子は、鋼材との衝突エネルギーによる塑性変形が生じないと考えられる。つまり、鋼材-アルミナ粒子間では、硬度差により衝突時に基材である鋼側が局部的に変形もしくは切

削されると理解できる。一方で、アルミナ粒子-アルミナ粒子同士では、中心粒径 45~53µm の粒子が施工後の SEM 観察画像で 10µm 程度になっていることが観察できるため、衝突時に粒子が粉碎されていると考えられる。CS 施工におけるアルミナ粒子の一部は鋼材内に残存し、多くは飛散していることが推測される。図 2.1.2 に Case.2 の新材鋼板表面を番手

500・800・1000・1500 番のサンドペーパーとアルミナ水溶液による仕上げを研磨機にて行った鏡面仕上げ状態の鋼板表面に対し、亜鉛粒子 100%にて CS 施工した結果を示す。図より、亜鉛粒子が鋼材面とほぼ平行に扁平化し、塑性変形を伴って密着している状態が確認できる。この現象については、亜鉛粒子の硬度 (Hv 硬度 35~55, 新モース硬度 2) は鋼より低く、鋼との衝突で亜鉛粒子が塑性変形した結果と推察される。図 2.1.3 に Case.3 の平均さび厚 100 μ m のさび鋼板表面に対し亜鉛粒子 100%にて CS 施工した結果を示す。図より、さびは 100 μ m の厚さのまま残存しているが、さび面と亜鉛の拡大画像では、さび面と亜鉛の境界に亀裂は確認できず、密着している状態が確認できる。図 2.1.4 に Case.4 の鏡面仕上げを行った新材鋼板表面に対し、亜鉛 50% : アルミナ 50%の混合粒子を CS 施工した結果を示し、その元素分析結果も併せて示す。図より、鋼板面と皮膜層の境界では、アルミナにより目粗しされた凹凸面に亜鉛粒子が密着し、アンカーパターン状態が形成されたことが観察できる。図 2.1.5 に Case.5 の平均さび厚 100 μ m のさび鋼板表面に対し亜鉛 50% : アルミナ 50%の混合粒子を CS 施工した結果を示し、その元素分析結果も併せて示す。図より、アルミナによる除錆と亜鉛皮膜形成が同時に施工されていることが確認できる。また、図 2.1.4 と同様に鋼材表面と皮膜の間には、アルミナの目粗し状態も観察できる。一部アルミナでさびが除去されず残存さび上に亜鉛皮膜が形成されている状態も観察できる。

以上より、CS による防食皮膜の形成メカニズムとして、鋼材面およびさび面に衝突するアルミナ粒子と亜鉛粒子の硬度差により、除錆効果、鋼材面の目粗し効果および亜鉛皮膜の密着効果が異なる特性を示すと推定される。

b) 残存さびに対する CS 防食皮膜の防食性能検証

鋼材さび面に対して CS 施工を実施した場合、一部残存さび上に亜鉛皮膜が形成されていることを確認した (図 2.1.5 参照)。そこで、この残存さび上に対する防食性能の検証として、恒温恒湿機による乾湿繰り返し腐食促進試験を実施した。試験は 2 時間の湿潤状態 (35 $^{\circ}$ C, RH90%) と 6 時間の乾燥状態 (40 $^{\circ}$ C, RH50%) の 8 時間を 1 サイクルとし、3 サイクル毎に、塩水 (1% or 5%) を表面に塗布した。

126 サイクル (1008 時間経過) 後の腐食断面観察結果を図 2.1.6 に示す。試験終了後においても、鋼材表面には赤さび発生は認められず、亜鉛皮膜表面に亜鉛の腐食生成物 (白色) が全面に確認され、さび鋼板面への CS 亜鉛皮膜による防食性が確認された。

(3) まとめ

本節では、さび鋼板上での CS 防食皮膜の特性を明らかにすることを目的に、さび鋼板面に対する亜鉛とアルミナの混合粒子を用いた CS 防食皮膜の

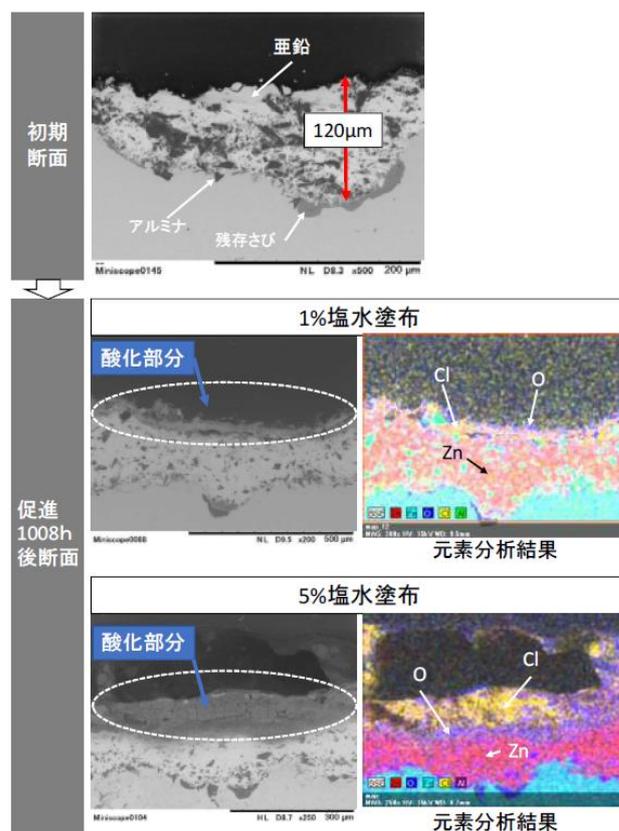


図 2.1.6 促進試験後の SEM 断面観察と元素分析

表 2.2.1 さび鋼板への配合比率評価パラメータ

評価パラメータ	条件
パウダー配合比率 (Zn:Al ₂ O ₃)	10:90~70:30 0:100+50:50
移動速度	5mm/s(一定)
ノズル角度	90度(一定)
ガス圧力	0.55Mpa(一定)

密着性と防食性の検証を実施した。

CS による防食皮膜形成のメカニズムとして、鋼材面およびさび面に衝突するアルミナ粒子と亜鉛粒子の硬度差により、除錆効果、鋼材面の目粗し効果および亜鉛皮膜の密着効果が異なる特性を示すことが明らかとなった。また、凹凸状のアンカーパターンの皮膜が形成されることが確認できた。

また、鋼材さび残存状態においても、亜鉛皮膜により下地の鋼材は防食され、防食性能を満足することが明らかとなった。

2.2 防食効果の高い CS 配合比率に関する検討

亜鉛アルミナ混合粒子を用いた CS では、亜鉛粒子の配合比率が皮膜厚に影響し、アルミナ粒子の配合比率が除錆度と密着性に影響すると考えられる。本節では、亜鉛粒子とアルミナ粒子の配合比率を変化させ、皮膜厚、除錆処理及び密着性の評価を行った。

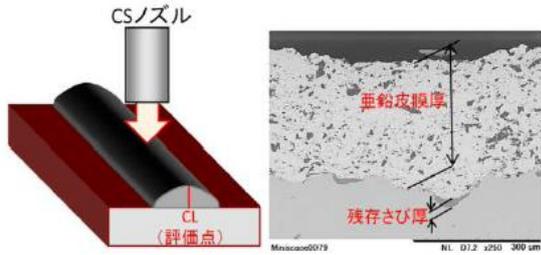


図 2.2.1 CS 皮膜計測厚計測点

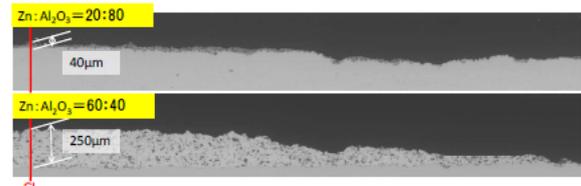


図 2.2.2 配合別 1pass 断面観察

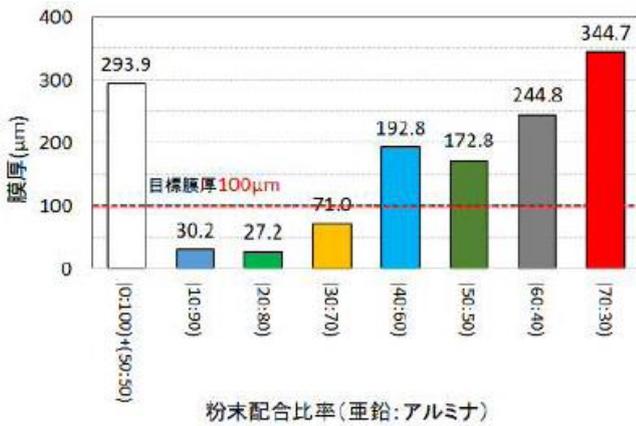


図 2.2.3 さび面に形成された防食皮膜厚

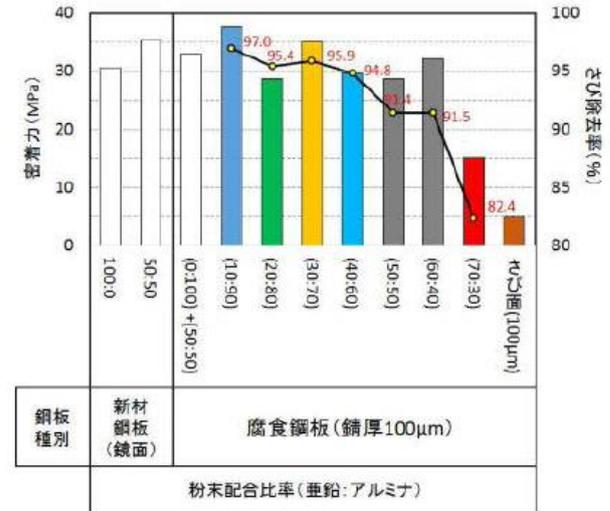


図 2.2.4 さび面に形成された CS 防食皮膜の密着力

(1) 試験方法

表 2.2.1 に示すように、亜鉛粒子とアルミナ粒子の配合比率を重量比で 10% 刻みで変化させ、その他の試験条件は一定とした。ここで、CS (0 : 100+50 : 50) とは、一度アルミナ 100% で除錆した後に CS (50 : 50) を施工したケースであり、評価の参考とした。試験に使用したさび鋼板は、平均さび厚約 100μm の鋼板を使用した。

図 2.2.1 に CS 皮膜厚の算定方法を示す。さび鋼板に 1 ライン 1 層施工時 (1pass 施工) の最も皮膜が厚い CS ノズルの中心点の膜厚を皮膜厚とした。図 2.2.2 のように 1pass 断面を SEM 観察画像上でスケール計測を行った。ここで CS 皮膜厚の目標膜厚は、鋼道橋防食便覧⁴⁾ に示される金属溶射の最小皮膜厚さ 100μm 以上とした。

次に、除錆処理能力の検証評価としては、図 2.2.1 に示すように、CS ノズルの中心点の初期さび厚に対する残存さび厚の割合を「さび除去率」と定義し、配合比率毎に算出した。また、CS により形成した皮膜の密着力を測定するため、皮膜表面に端子 (ドリ) を接着し、アドヒージョンテスター (引張速度 1.0MPa/s) による垂直引張試験を行った。アドヒージョン試験については、直径 10mm のアルミニウム製のドリを用いて密着力を測定した。

(2) 試験結果および考察

図 2.2.3 に亜鉛とアルミナの配合比率別の CS 防食皮膜厚の計測結果を示す。計測結果より、亜鉛配合比率が 40% の含有率以上から目標膜厚 100μm 以上が得られた。図 2.2.4 に新材鋼板およびさび鋼板に対する各配合比率を変化させた密着力 (棒グラフ) およびさび除去率 (折れ線グラフ) の関係を示す。新材鋼板 (鏡面) 上に亜鉛 100% の CS 施工と亜鉛 50% : アルミナ 50% の CS 施工で形成した皮膜の密着力試験結果の比較では、亜鉛 100% の CS 皮膜より亜鉛 50% : アルミナ 50% の CS 皮膜の方が密着力が高い結果を示した。これは、アルミナ粒子が混合されたことにより鋼材表面に凹凸が形成され、これに亜鉛粒子が噛み込みアンカー効果が生まれた結果と考えられる。次に、さび鋼板上に CS 施工した皮膜の密着力の計測結果より、亜鉛とアルミナの配合比率が 60 : 40 までは、新材に鏡面仕上げを行った鋼板に対する亜鉛皮膜の密着力と同程度の 30MPa 程度の密着力を示しているが、70 : 30 とすると半分の 15MPa に低下した。さび除去率は、アルミナ配合比率 100% ~ 40% まではさび除去率 90% 以上を有しているが、30% 配合比率では、さび除去率が急激に低下した。密着力とさび除去率の関係より、アルミナ比率が 30% 以下では除錆処理能力が少なくなり、密着力が低下したと考えられる。

表 2.2.2 密着力試験後の接着面観察一覧

鋼板種別	CS種別	引張後鋼板状態			剥離面	平均密着力
新材鋼板 (鏡面)	CS(亜鉛100%)				亜鉛皮膜内	30.6MPa
		30.3MPa	31.6MPa	29.8MPa		
	CS(亜鉛:アルミナ =50:50)				亜鉛皮膜内	35.3MPa
		35.9MPa	38.0MPa	32.1MPa		
さび鋼板 (さび厚 100μm)	CS(亜鉛:アルミナ =0:100+50:50)				亜鉛皮膜内	33.0MPa
		32.3MPa	37.5MPa	29.3MPa		
	CS(亜鉛:アルミナ =10:90)				亜鉛皮膜内	37.6MPa
		36.8MPa	34.8MPa	41.0MPa		
	CS(亜鉛:アルミナ =20:80)				亜鉛皮膜内	28.7MPa
		29.5MPa	24.6MPa	31.9MPa		
	CS(亜鉛:アルミナ =30:70)				亜鉛皮膜内	35.1MPa
		31.5MPa	40.0MPa	33.8MPa		
	CS(亜鉛:アルミナ =40:60)				亜鉛皮膜内	29.7MPa
		28.4MPa	30.1MPa	30.5MPa		
	CS(亜鉛:アルミナ =50:50)				亜鉛皮膜内	28.7MPa
	29.8MPa	32.5MPa	23.7MPa			
CS(亜鉛:アルミナ =60:40)				亜鉛皮膜内	32.2MPa	
	36.7MPa	30.7MPa	29.2MPa			
CS(亜鉛:アルミナ =70:30)				さび層内	15.2MPa	
	13.4MPa	16.2MPa	15.9MPa			
CS(亜鉛:アルミナ =100:0)				さび層内	2.8MPa	
	2.8MPa	3.2MPa	2.4MPa			
	さび面				さび層内	5.0MPa
		5.5MPa	4.9MPa	4.7MPa		

表 2.2.2 にさび鋼板上の CS 皮膜密着力試験後の観察結果を示す。表より配合比率 60 : 40 までは、亜鉛皮膜内の凝集破壊により剥離したことが確認できる。一方、配合比率 70 : 30 では、亜鉛皮膜とさび面の界面、またはさび層内で剥離する状態となり、密着力試験面にさびの残存が確認された。この結果より、アルミナのさび除去率が低下し、鋼板と亜鉛皮膜の密着性が低下したと推察される。

(3) まとめ

亜鉛とアルミナの混合粒子を用いた皮膜厚は、亜

鉛比率 40%以上で目標皮膜厚 100μm 以上を確保できた。また、混合粒子で CS 施工した皮膜の密着力は、アルミナ配合比率 40%以上で鏡面仕上げ鋼板上の亜鉛単体皮膜の密着力と同等程度であることを確認した。なお、アルミナ配合比率 30%以下では除錆処理能力の低下により、密着力も著しく低下した。これにより、約 100μm 厚のさび面上に適用可能な亜鉛とアルミナの配合比率は 40 : 60, 50 : 50, 60 : 40 の 3 配合であり、60 : 40 が密着力を保持しながら防食皮膜厚が最大となる最適配合と考えられる。

2.3 初期さび厚が成膜性に及ぼす影響に関する検討

鋼材錆面に対して亜鉛アルミナ混合粉体を用いたCS施工を実施する場合、鋼材表面の初期錆厚がCS防食皮膜の成膜性に影響を及ぼすと考えられる。そこで本節では、初期錆厚がCS工法の成膜性に及ぼす影響について検証した。

(1) 試験方法

前節2.2では、初期さび厚100 μm を対象としたが、本試験では初期さび厚150 μm の腐食鋼板を用いた。CS施工は、前節2.2と同様に1pass施工を実施し、断面観察により膜厚測定を実施した。また、アドヒージョンテスターにより密着力測定を実施した。粉体配合条件は、前節2.2で用いた8配合に(65:35)を加えた9配合とした。前節2.2と同様に、SEM断面観察により粉体配合別の皮膜厚測定を実施した。また、密着力測定を実施し、粉体配合別の皮膜密着力を評価

した。

(2) 試験結果および考察

図2.3.1に各配合の密着力測定結果を示す。初期錆厚100 μm 時（前節2.2）の結果と比較して、全配合において密着力の低下が確認された。また、密着力自体は低くないものの、初期錆厚100 μm での試験において、最適配合の条件内であった(50:50)、(60:40)の2配合が一部錆面で剥離した。(65:35)・(75:25)の2配合は明確に錆層で剥離した。

図2.3.2に吹き付け中央部より3.5mmまでの断面観察結果を示す。断面観察結果より、初期錆厚100 μm のものよりも、鋼材に錆が残存している様子が確認できた。図2.3.3に吹き付け中央部でのCS皮膜厚と除錆率を示す。初期錆厚100 μm の場合よりも、成膜性能が低下していることが確認できた。従って、CS施工においては、初期錆厚が100 μm 以下となるように事前にケレンを実施することが望ましいと考えられる。

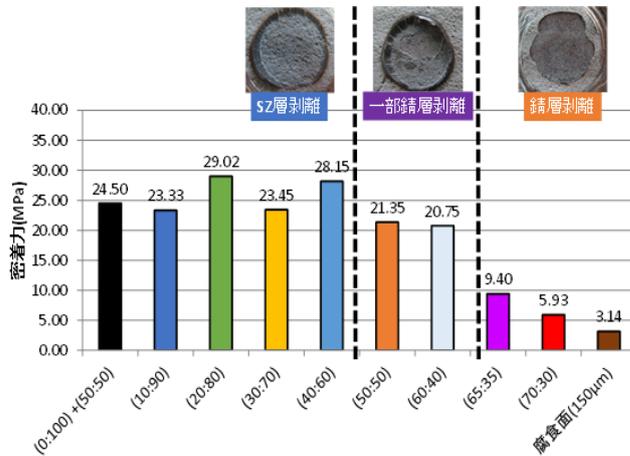


図 2.3.1 各配合の密着力試験結果

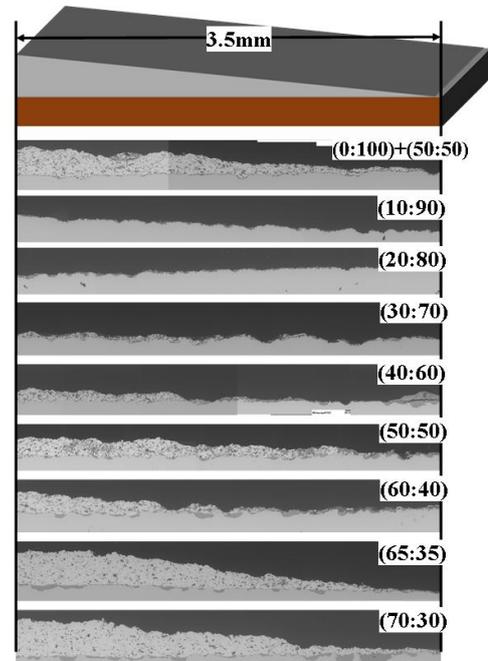


図 2.3.2 断面観察結果

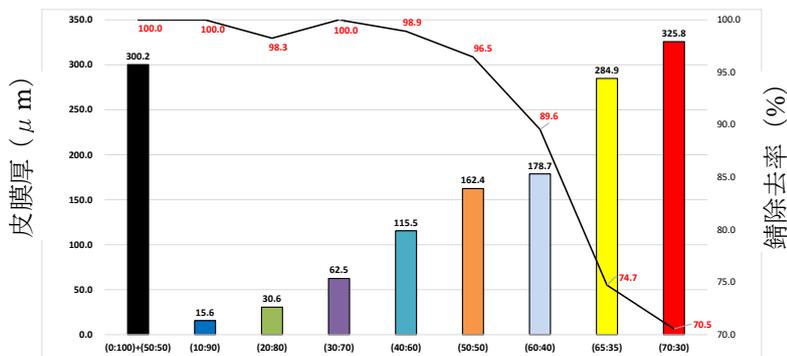


図 2.3.3 吹き付け中央部での配合別膜厚・除錆率

2.4 施工角度が成膜性に及ぼす影響に関する検討

CS工法では、亜鉛アルミナ混合粉体を専用ノズルにより加速させて基材面に衝突させ皮膜を形成する。そのため、基材面に対する粉体の衝突角度が重要になると考えられる。そこで本節では、ノズル施工角度が成膜性に及ぼす影響について検証した。

(1) 試験方法

写真2.4.1に示すように、ノズル先端と供試体との角度を80°~45°まで変化させ、CS施工を実施した。写真2.4.2にCS施工後の試験体を示す。全て3パス施工を行い、試験条件を同一とするため、1枚板の腐食鋼板より試験体を作成した。CS施工に用いた粉体は、亜鉛とアルミナの配合比率40 : 60, 50 : 50, 60 : 40の3配合を用いた。

CS施工後の各試験片に対してSEM断面観察を実施し、断面観察により各施工角度条件の膜厚を計測した。

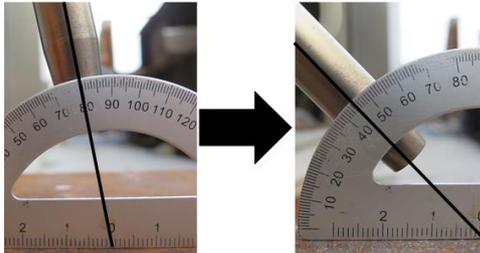


写真 2.4.1 吹き付け角度計測方法

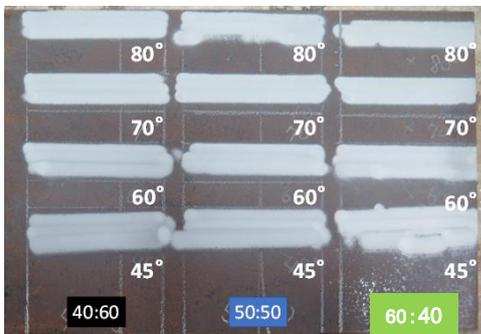


写真 2.4.2 吹き付け後の外観

(2) 試験結果および考察

図2.4.1に断面観察によるCS配合(亜鉛50%:アルミナ50%)でのCS皮膜の膜厚計測結果を示す。施工角度80°では100μmあった膜厚が、施工角度の減少に伴い次第に低下し、45°では全く膜厚が形成されていないことが確認できた。この傾向は、その他の配合比率においても同様であった。

図2.4.2に施工角度と膜厚減少率の関係を示す。施工角度90°を膜厚基準にすると、全配合において角度が下がるにつれ、膜厚が減少する傾向が確認された。施工角度が80°になると60%程度まで膜厚が減少し、施工角度70°では50%程度まで膜厚が減少する。

従って、実際の施工に際しては、ノズルと基材面との施工角度は概ね90°に維持することが重要であると考えられる。しかしながら、実橋梁の場合には、狭隘な施工箇所が多く存在するため、通常使用する直線型のノズルでは90°の施工角度を保てないと考えられ、成膜性が悪くなることが想定される(狭隘な施工条件に対する検討は2.5節にて実施)。

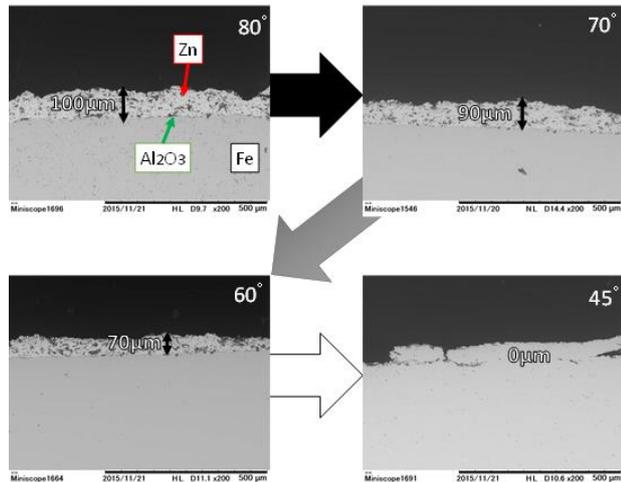


図 2.4.1 CS(50 : 50)での角度別断面観察結果

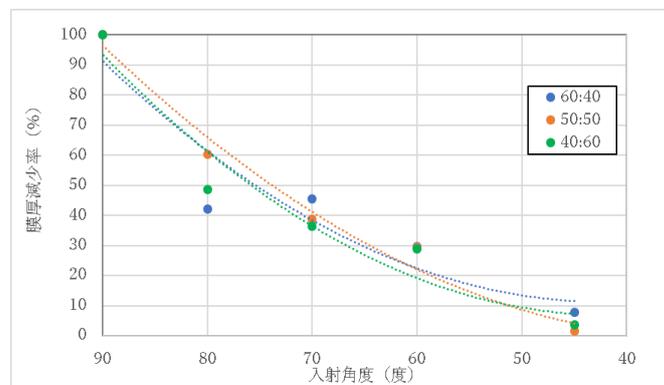


図 2.4.2 角度別膜厚減少率

2.5 狭隘な施工条件に対する検討

支承周りや下フランジ下面などの特殊な施工条件箇所（施工困難箇所）に対する高耐食性の確保を目的に、ノズル角度や施工距離を変化させることが可能な付属品（エクステンション）を開発し、それらの基本性能の検証を行った。本節では、開発付属品を適用したノズルによるCS施工を実施し、基本性能の検証として膜厚測定を実施した。

(1) 試験方法

a) 開発付属品（エクステンション）

CS工法で使用するノズルの適用範囲を広げるために、各種エクステンションを開発した。開発したエクステンションの例を図2.5.1に示す。これらのエクステンションを組み合わせることで、CS工法の適用範囲は格段に向上すると考えられる。各種エクステンションの適用例を写真2.5.1に示す。

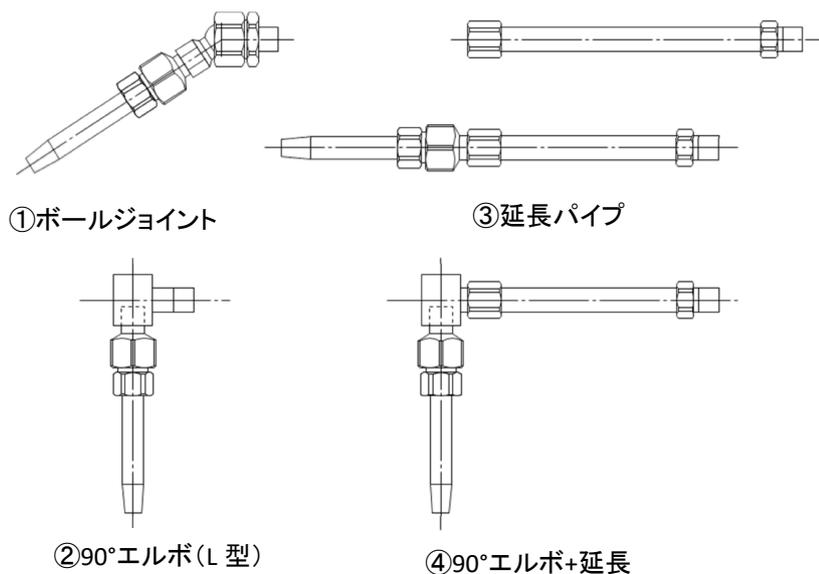


図 2.5.1 開発した各種エクステンション



写真 2.5.1 各種エクステンションの適用例

表 2.5.1 試験条件と試験パラメータ概要

試験条件と試験パラメータ	
ノズル	TFノズル（形状：直線型，長さ：90mm，径：7mm）
エクステンション	①ボールジョイント（最大角度 66°） ②90°エルボ ③延長パイプ ④90°エルボ+延長
CS 施工条件	CS 粉体：亜鉛+アルミナ混合粉体（重量比 60：40） 施工速度：5mm/sec 施工面との距離：15mm 施工面との角度：90° ヒーター温度：低温（500℃），高温（600℃）

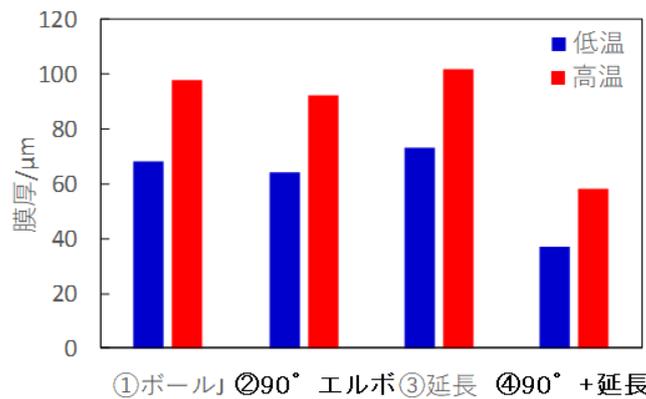


図 2.5.2 各種エクステンション装着時の膜厚測定結果 (平均値)

b) 試験条件

試験条件と試験パラメータ概要を表2.5.1に示す。本試験では、全条件においてTFノズル（形状：直線型，径：7mm）を使用した。各種エクステンションの基本性能を検証するために、前述の各種エクステンション（図2.5.1参照：①～④）を使用した。これらのエクステンションを装着し、同一の施工条件にてCS施工を実施した。CS施工に使用した粉体は、亜鉛とアルミナの混合粉体を使用し、その配合比率は最適配合比率である亜鉛とアルミナの重量比率60：40とした。本試験には、現場施工性の良い小型（重量20kg以下）の低圧低温型CS装置を適用した。CS装置のヒーター温度は低温条件の500℃，高温条件の600℃とし、それぞれのヒーター温度にて施工を実施した。今回の試験におけるエクステンションのエルボに関しては、最も厳しい成膜条件の角度90°エルボを対象に性能検証を実施した。

c) 各種エクステンションの基本性能の検証方法

各種エクステンションの基本性能の検証は、膜厚測定を基本とした。膜厚測定は1パス成膜時の成膜幅センターの膜厚（n=3の平均値）で評価した。目標膜厚を100μm，膜厚管理基準を70μm以上とした。

(2) 試験結果および考察

各種エクステンション装着時の膜厚測定結果の平

均値（n=3）を図2.5.2に示す。なお、検証の目標膜厚は100μm，管理膜厚は70μmである。低温条件（500℃）では、延長のエクステンションを除き管理膜厚を下回ったが、高温条件（600℃）では膜厚の向上が認められ、ボールジョイント，90°エルボ及び延長パイプのエクステンションにおいて、要求膜厚を満足した。一方，90°エルボ+延長パイプでは、要求膜厚を下回る結果となった。

90°エルボ+延長パイプのエクステンションは、そのエクステンションの構造上の特徴として、特に下フランジ下面などの狭隘箇所への適用が見込まれる。CS工法は通常塗装（有機ジンクリッチペイント）の場合と異なり、乾燥時間が不要なため、連続施工が可能である。そのため、施工した箇所に対して、更に重ねて施工することが可能である。エクステンションを組合せて使用した場合には、膜厚が小さくなる傾向にあるが、実橋梁への狭隘部施工を実施する場合には、施工速度の低速化や重ね施工などの施工上の工夫を行うことで要求膜厚が得られるものと考えられる。このように、各種エクステンションを現場適用する際には、施工上の工夫（施工低速化，重ね施工など）を行うことで、現場においても各種エクステンションの適用が可能となり、狭隘な施工条件箇所に対して、CS工法を十分適用することが可能になると考えられる。

2.6 施工効率化のための検証

CS工法は、施工時に使用するノズル径が小さいこと、手動施工であること等が原因で、施工面積が大きい場合には、施工効率が良いとは言い切れない。今後、鋼橋の維持補修技術としてCS工法を広く展開するにあたり、施工効率向上を図ることが重要である。そこで、下フランジ上面などの施工条件良好箇所に対する施工効率の向上を目標に、ノズル径拡張と施工半自動化により、その施工効率向上の評価と基本性能の検証を行った。本節では、ノズル径拡張による性能評価として粒子速度測定、膜厚・密着力測定を実施した。また、施工効率向上に向けて半

自動化施工装置を用い、施工速度が成膜厚に及ぼす影響を検討した

(1) ノズル径拡張による性能評価

a) 試験条件と試験パラメータ

試験条件と試験パラメータ概要を表2.6.1に示す。本試験では、施工効率向上の検証を目的とするため、試験パラメータはノズル径（5mm, 7mm）を選定した。ノズルの外観状況を写真2.6.1に示す。その他のCS施工条件は表2.6.1に示す通りとした。

b) 性能評価方法

【粒子速度測定】

CS工法では、ノズル性能が施工性や品質において

表 2.6.1 試験条件と試験パラメータ概要

試験条件と試験パラメータ	
ノズル	①オリジナルノズル（形状：直線型，径：5mm） ② TF ノズル（形状：直線型，径：7mm）
CS 施工条件	CS 粉体：亜鉛+アルミナ混合粉体（重量比 60：40） 施工速度：5mm/sec 施工面との距離 L：15mm（図 2.2.1 参照） 施工面との角度 θ ：90°（図 2.2.1 参照） ヒーター温度：低温（500℃），高温（600℃）



写真 2.6.1 ノズルの外観

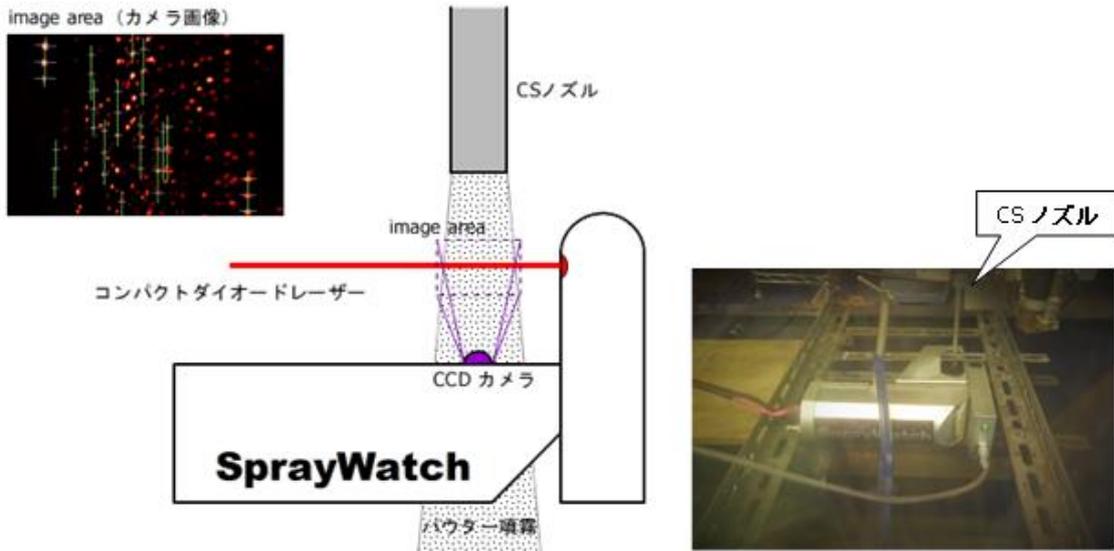


図 2.6.1 HiWatch CS 装置概要

写真 2.6.2 測定状況



写真 2.6.3 電磁膜厚計



写真 2.6.4 アドヒージョンテスター

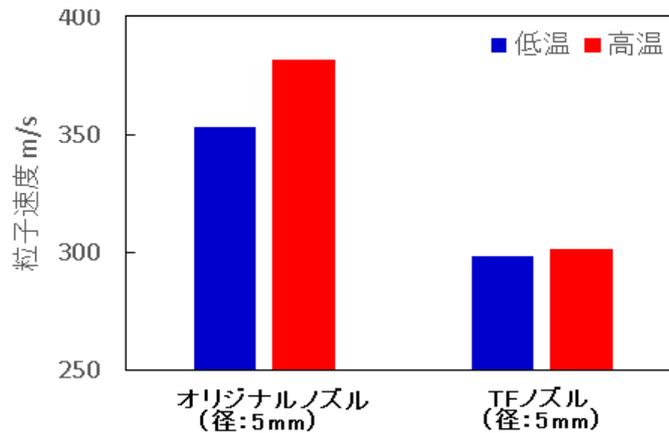


図 2.6.2 各ノズルの平均粒子速度

表 2.6.2 各ノズルの膜厚測定結果・密着力測定結果 (ヒーター温度: 高温)

ノズル	最大膜厚 (μm)					アドヒージョン (MPa)			
	1	2	3	4	平均	1	2	3	平均
オリジナル	187	134	142	123	146.5	27.0	19.0	20.0	22.0
TFノズル	174	231	256	250	227.8	19.0	27.0	21.4	22.5

重要なファクターとなっている。そこで今回、ノズル性能を定量的に評価することを目的に、高速飛翔粒子解析装置 (HiWatch CS) を用いて各ノズルの粒子速度測定を実施した。HiWatch CS は、フィンランドOseir 社製の飛翔粒子解析装置であり、図2.6.1の装置概要に示す通り、高感度CCD カメラとコンパクトなダイオードレーザーの組合せにより、瞬時に飛翔粒子の速度および粒子径を測定する解析装置である。今回この解析装置を用い、各ノズルの平均粒子速度の比較検証を実施した。測定状況を写真2.6.2に示す。

【膜厚測定・密着力測定】

鋼材はSS400材 (黒皮表面) を用い、施工速度5mm/sとしてCS 施工を行った。なお、1 パス直線でラップ (2mm 程度) 有りとし、目標膜厚を100μm 以上とした。膜厚測定は、写真2.6.3に示す英国elcomter社製Elcomter 456 膜厚計を用い4 点平均で膜厚を測定した。また、測定箇所は山部 (計測近傍の最大値) とした。密着力測定は、JIS H 8300 付属書A (規定)

密着性試験方法 A.2.2 引張密着強さ試験方法 (A法) により、写真2.6.4 に示すelcomter 社製Elcomter 506 を用いて行った。付着力測定は3 点を測定し、平均値を付着力とした。

c) 試験結果

【粒子速度測定】

高速飛翔粒子解析装置 (HiWatch CS) により測定した各ノズルの平均粒子速度の結果を図2.6.2に示す。図より、オリジナルノズル (径: 5mm) の平均粒子速度はTF ノズル (径: 7mm) に比べて大きいため、衝突エネルギーが高くなることで高い密着性が期待できると考えられる。また、各ノズルとも、ヒーター温度を上げることで粒子速度が向上する傾向が認められた。なお、オリジナルノズルの平均粒子速度は低温条件 (500°C) で約353m/s、高温条件 (600°C) で約382m/s、TF ノズルの平均粒子速度は低温条件で約298m/s、高温条件で約301m/s であった。

【膜厚測定・密着力測定】

表 2.6.3 試験条件と試験パラメータ概要

試験条件と試験パラメータ	
ノズル	TF ノズル (形状：直線型, 径：7mm)
施工速度	①5mm/sec ②10mm/sec ③15mm/sec
CS 施工条件	CS 粉体：亜鉛+アルミナ混合粉体 (重量比 60 : 40) 施工面との距離 L : 15mm 施工面との角度 θ : 90° ヒーター温度：高温 (600°C)



写真 2.6.5 半自動施工装置

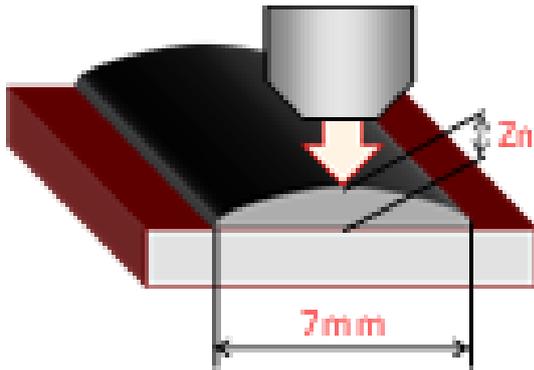


図 2.6.3 膜厚測定方法

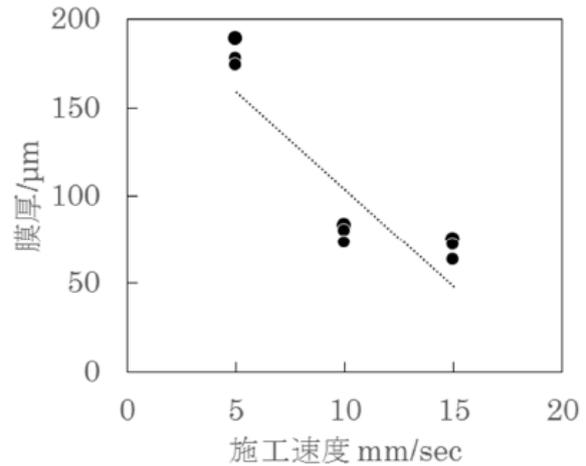


図 2.6.4 施工速度と膜厚の関係

図2.6.2 における高温時の各ノズルの膜厚測定結果と密着力測定結果を表2.6.2 に示す。前述したように、TF ノズルはオリジナルノズルに比して粒子速度が小さくなるが、表よりTF ノズルはオリジナルノズルと比べて膜厚は厚くなり、密着力は同程度以上の性能を発揮することが確認された。なお、TF ノズルによる膜厚が厚くなった要因としては、オリジナルノズルに比べてパウダー供給量が多くなったためであると考えられる。また、粒子速度が遅くても密着力には影響を与えないことが確認された。

(2) 施工半自動化による性能評価

a) 試験条件と試験パラメータ

前項2.6.2 の結果から、TF ノズルは施工速度 5mm/s 時に目標膜厚を十分満足する結果が得られており、施工速度を上げることで施工効率化が図れることが期待できる。そこで本項では、施工速度をパラメータとして、施工効率化の検討を行った。試験条件と試験パラメータ概要を表2.6.3に示す。本試験では、施工能率向上の検証を目的とするため、試験パラメータは施工速度 (5, 10, 15mm/sec) を選定した。なお、施工速度は半自動化施工装置 (写真 2.6.5 参照) により制御した。鋼材はSS400材 (黒皮表面) を用いた。その他のCS 施工条件は表2.6.3 に示す通りとした。

b) 性能評価方法

各施工速度にてCS 施工を実施し、各条件での成

膜厚を測定した。成膜厚測定は、1 パス成膜時の成膜幅センターの膜厚 (n=3 の平均値) で評価した。膜厚測定の概要を図2.6.3に示す。目標膜厚を100 μ m、膜厚管理基準を70 μ m 以上とした。

c) 試験結果

施工速度と膜厚の関係を図2.6.4に示す。施工速度 5mm/s では、CS 施工による成膜厚が100 μ m以上と良好であった。一方、施工速度10mm/s 以上では、成膜厚が低下する傾向が認められ、これについては施工速度が上がることでパウダー供給量が低下するためであると考えられる。しかしながら、施工速度が10mm/s で成膜厚約78 μ m、施工速度15mm/s で成膜厚約70 μ m と管理膜厚を満足する結果が得られた。これより現地施工においては、施工環境が良好で腐食損傷が激しくない下フランジ上面やウェブ面などに対しては、施工速度10mm/s 及び15mm/s の適用が可能と考えられる。1 m^2 当たりの施工能率を考えた場合、施工速度5mm/secでは、約9時間程度の時間を要するが、施工速度10mm/secでは約4.5時間、施工速度15mm/secでは約3時間となり、施工能率がそれぞれ2倍、3倍に向上すると推測される。

一方、激しい腐食部位や狭隘な施工環境 (支承部など) に対しては、成膜性・効率性・防食性の確保の観点から、施工速度5mm/s が最も望ましい施工速度であると考えられる。

2.7 まとめ

本章では、腐食した鋼材に対するCold Spray表面処理技術の防食性能の検証として、さび鋼板上でのCS防食皮膜の特性、防食効果の高いCS配合比率、初期錆が成膜性に及ぼす影響、施工角度が成膜性に及ぼす影響について検証した。また、実橋梁への施工を考慮し、狭隘な施工条件に対する検討、施工効率化のための検証を実施した。本章で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) さび鋼板面に対して、亜鉛アルミナ混合粉体を用いたCS施工を実施することで、アルミナが鋼材表面にアンカーのように食い込み、その隙間に亜鉛が入りこむことで皮膜形成され、その結果、強固な密着力を有する亜鉛皮膜が形成されることが明らかとなった。
- 2) さび面に対してCS施工を実施した場合、残存さび上に亜鉛皮膜が形成されるが、このような鋼材さび残存状態であっても犠牲防食作用を発揮可能であり、高い防食効果が得られるものと考えられる。
- 3) 腐食面に対するCS皮膜の密着力は、アルミナ配合比率30%以下で著しく低下する。CS皮膜厚は目標膜厚100 μ m以上とすると、亜鉛の配合比率が40%以上で満足する。最大膜厚が確保でき、高い密着力が得られる粉体配合比率は亜鉛：アルミナ（60：40）である。
- 4) 初期錆厚が厚くなるほど、CS工法の成膜性は低下する。CS施工を実施するにあたり、初期錆厚100 μ m以下まで事前にケレンを行うことが望ましい。
- 5) 施工角度が低下するほど成膜性は低下するため、施工角度は、施工面に対して90°を基本とする。
- 6) 各種エクステンションを適用しても、CS工法により成膜形成が可能である。ただし、エクステンションを組み合わせる装着した場合、膜厚が薄くなる傾向にあるため、現場施工の場合には、施工速度の低速化や重ね施工などの工夫が必要になると考えられる。
- 7) TFノズル（径：7mm）はオリジナルノズル（径：5mm）に比して粒子速度が小さくなるが、TFノズルはオリジナルノズルと比べて膜厚は厚くなり、密着力は同程度以上の性能を発揮することが確認された。なお、TFノズルによる膜厚が厚くなった要因としては、オリジナルノズルに比べてパウダー供給量が多くなったためであると考えられる。
- 8) 施工速度が大きいほど、皮膜厚が低下する傾向が認められた。しかしながら、施工速度15mm/sまでは管理膜厚を満足する結果が得られた。これより、現地施工においては、施工環境が良好で腐食損傷が激

しくない下フランジ上面やウェブ面などに対しては、施工速度10mm/s及び15mm/sの適用が可能と考えられる。一方、激しい腐食部位や狭隘な施工環境（支承部など）に対しては、成膜性・効率性・防食性の確保の観点から、施工速度5mm/sが最も望ましい施工速度であると考えられる。

参考文献

- 1) 福本昌宏，田部心有，山田基宏，山口英二：コールドスプレー法における銅粒子堆積機構の解明，溶接学会論文集，第25巻，第4号，pp.537-541，2007
- 2) 小川和洋：コールドスプレー法における固相粒子の付着メカニズム：表面技術，vol.63，No.9，pp.548-552，2012
- 3) DYMET model 423 Operator's Manual
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，2014.3.

第3章 腐食した鋼桁端部におけるCold Spray工法の実証試験

3.1 はじめに

2章「腐食した鋼材に対するCold Spray表面処理技術の防食性能の検証」の各検証結果を踏まえ作成した施工要領素案に基づき、桁端部に腐食損傷を受けた実橋梁に対して、現場施工性と施工効率化の検証を目的に実橋梁へのCS施工実証試験を行った。本実証試験は、平成27年度と平成28年度の計2回実施した。先ず実証実験に先立ち、当該橋梁の腐食環境モニタリング調査を実施した。その後、平成27年度に、現場適用性検証の第一歩として、施工条件良好な個所に対してCS施工（手動施工）を実施した。また、平

成28年度では、桁端部への施工性検証を目的とし、施工困難箇所に対してCS施工を実施した。また、半自動施工装置を用いた施工効率化検証も行った。

3.2 対象橋梁

対象橋梁を図3.2.1に示す。対象橋梁は沖縄県北谷町に位置する供用約40年経過した塗装鋼I桁橋（橋長：25m、幅員：15.6m、主桁数：17）である。本橋梁は離岸距離300mに位置し、河川に面している。海

架設	1975年3月
場所	沖縄県北谷町
橋長	25m
幅員	15.6m
上部構造	鋼I桁橋(17主桁)

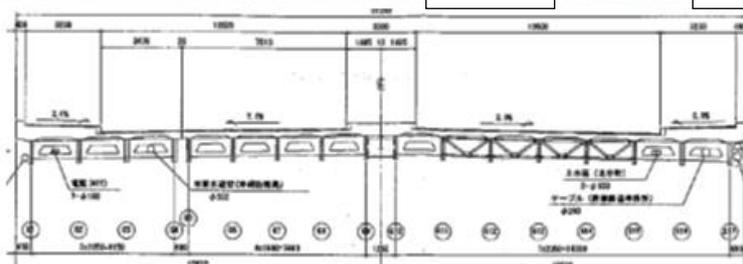
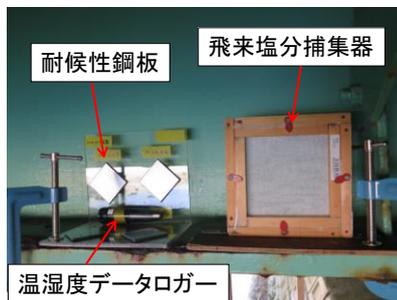
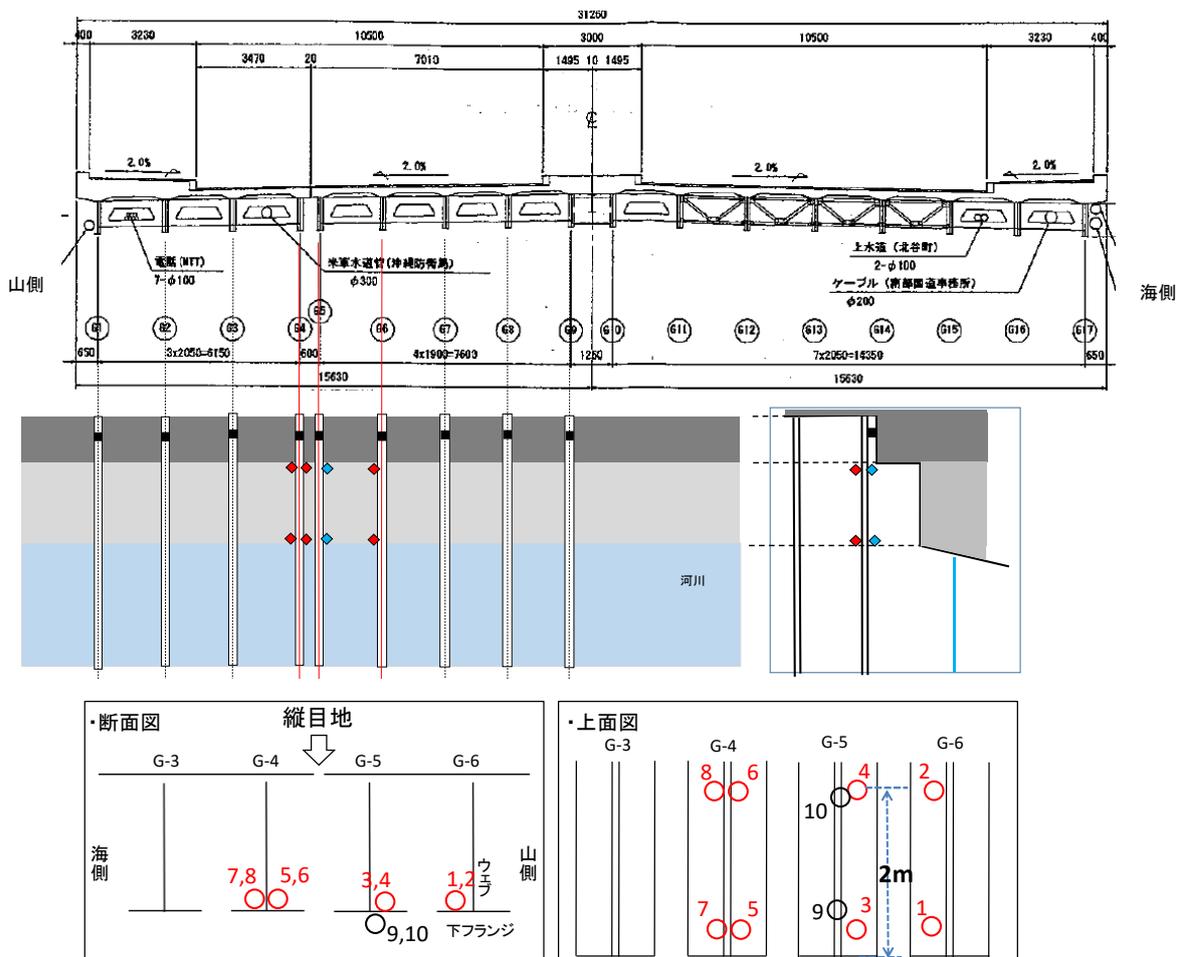


図 3.2.1 施工対象橋梁



1~8に設置



9,10に設置

図 3.3.1 測定器設置位置

と対象橋梁の間には障害物は少なく、潮風の影響を直接受けるため厳しい腐食環境であることが予想される。本施工では、那覇側の鋼桁端部を施工対象とし、山側から順に桁番号をG1とし、最も海側の桁をG17とする。桁間構造としてはG4、G5の間に縦ジョイントによる継ぎ目があり、雨天時には漏水発生が確認されている。

3.3 腐食環境調査

本節では、施工対象橋梁の腐食環境特性の把握を目的として、飛来塩分量測定、温湿度測定、ワッペン鋼板の暴露試験による腐食減耗量測定を実施した。

(1) 調査方法

a) 調査地点

図3.3.1に腐食環境特性を計測する機器の設置位置を示す。機器は、桁の端部から1.0m地点（支点位置）と2.0m地点のそれぞれに設置し、G4桁は、山側・海側の下フランジ上面、G5桁は、海側の下フランジ上面と吊り下げ式、G6桁は、山側の下フランジ上面へ設置した。計測数は、飛来塩分量計測が10地点、温湿度計測が8地点、腐食減耗量計測が8地点である。

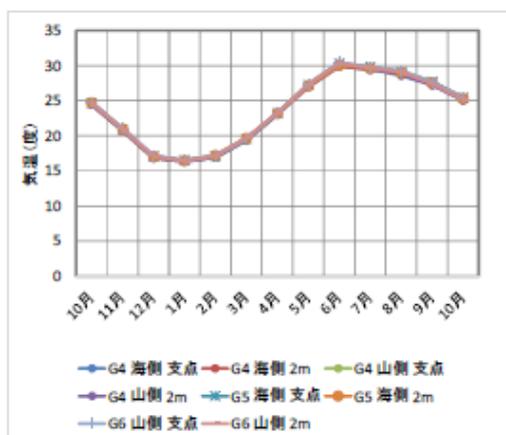
b) 試験方法

【飛来塩分捕集試験】

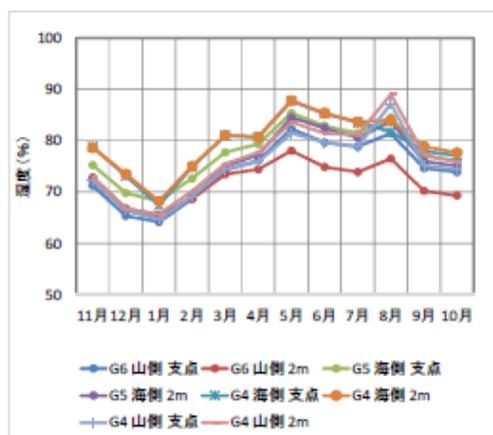
飛来塩分捕集試験は、JIS Z 2382のドライガーゼ

表 3.3.1 ワッペン鋼板化学成分

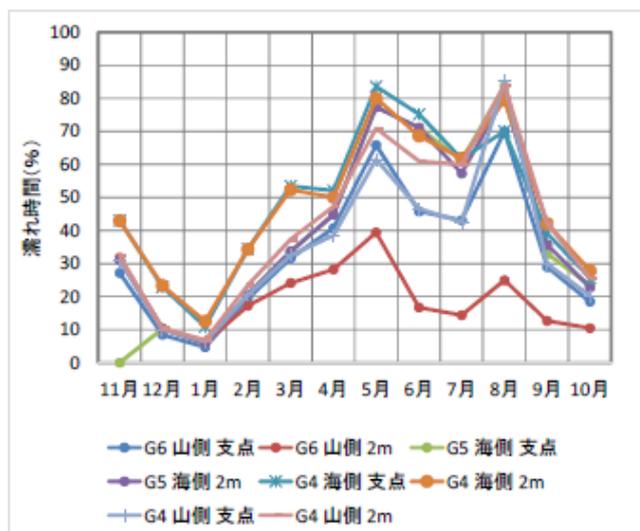
化学成分CHEMICAL COMPOSITION %							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
12	26	107	11	3	31	7	45



月平均温度 (2014/10～2015/10)



月平均湿度 (2014/10～2015/10)



1 カ月濡れ時間割合 (2014/10～2015/10)

図 3.3.2 温湿度計測結果

法に準じて実施し、雨がかりの無い橋梁桁下フランジなどに設置して捕集を行った。塩分を捕集する面は100×100mmである。塩分捕集期間は約1ヶ月とし、1ヶ月毎にガーゼの交換・回収を行った。飛来塩分量は、イオンクロマトグラフ分析法にて算出計量した。

【鋼板暴露試験による腐食減耗量測定】

鋼板暴露試験には、SMA鋼材（50×50×2mm，鏡面仕上げ，以下，ワッペン試験片という）を用いた。ワッペン試験片は化学成分を一定にコントロールし，鋼板表面は鏡面仕上げしている。表3.3.1にワッペン試験片の化学成分表を示す。ワッペン試験片を1年間暴露し，重量換算により腐食減耗量の算出を行った。

(2) 調査結果

a) 温湿度測定結果

計測地点別の1年間の温湿度の推移を図3.3.2に示す。計測結果から得られた知見を下記に示す。

① 月平均気温は夏場（6月）30℃，冬場（1月）16℃ほどであった。

② 月平均湿度は夏場に高く，冬場に低くなる傾向にあり，夏場（6月）は75～85%程度，冬場（1月）は65～70%程度であった。また，海側を向いている桁のほうが高湿度となる傾向にあった。

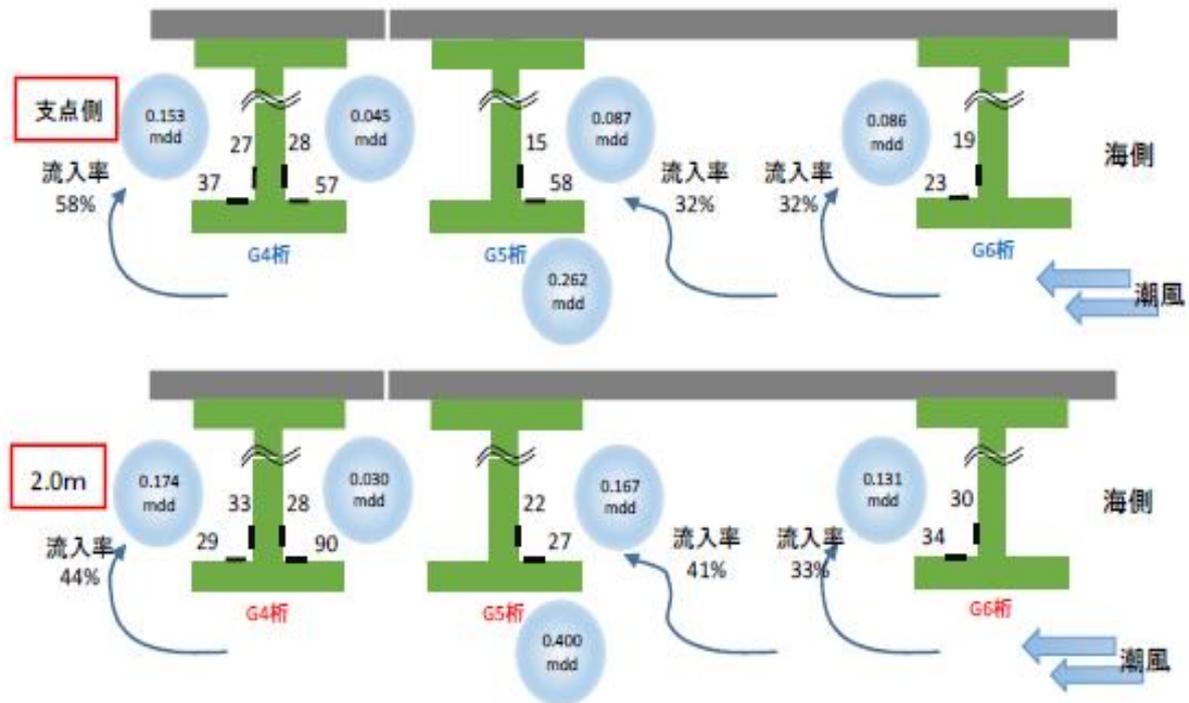


図 3.3.3 計測位置別の平均飛来塩分量

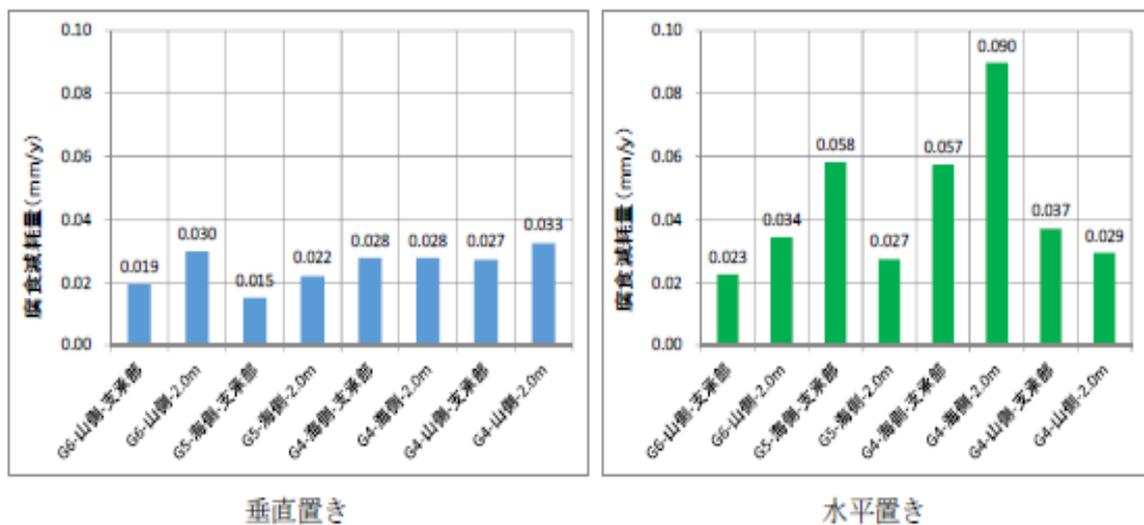


図 3.3.4 1年間の腐食減耗量

b) 飛来塩分測定結果

計測位置毎の平均飛来塩分量を図3.3.3に示す。得られた知見を下記に示す。

- ① 海側から来ると想定される塩分を含む潮風は、G5下に設置した吊り下げ式計測器を通過するものを100とした場合、桁の内面に流入する塩分は、およそ50~30%ほどとなる。
- ② G4桁海側に設置した計測器は飛来塩分量が小さい値を示している。これは、桁間が一般部の1900mmに比べ600mmと狭いため流入量が少なかったことが考えられる。

c) 腐食減耗量測定結果

図3.3.4に計測地点別に設置した1年間のワッペン鋼板の暴露試験後の腐食減耗量を示す。計測結果から得られた知見を下記に示す。

- ① 1年間の腐食減耗量の最大値はG4海側2.0m地点の水平置きで0.09mmであった。
- ② 垂直置きより水平置きのほうが、腐食減耗量が大きくなる傾向が見られた。

3.4 Cold Spray実証試験方法

(1) 施工対象

本施工では、まず、平成27年度に施工条件良好箇所を対象としてG4、G5、G6の桁端部（狭隘部以外）にCS施工を実施した。また、翌年の平成28年度に、狭隘部への施工を対象としてG1、G4（支点部）の桁端部にCS施工を実施し、CS工法の現場適用性に関する検討を実施した。

施工対象桁（桁端部）の腐食外観を図3.4.1に示す。桁毎に腐食損傷度合の差はあるが、支承部周辺、下フランジ上面、下フランジ下面（コバ部）、垂直補剛材等に著しい腐食劣化が生じていた。



図 3.4.1 施工対象桁の腐食状況の例

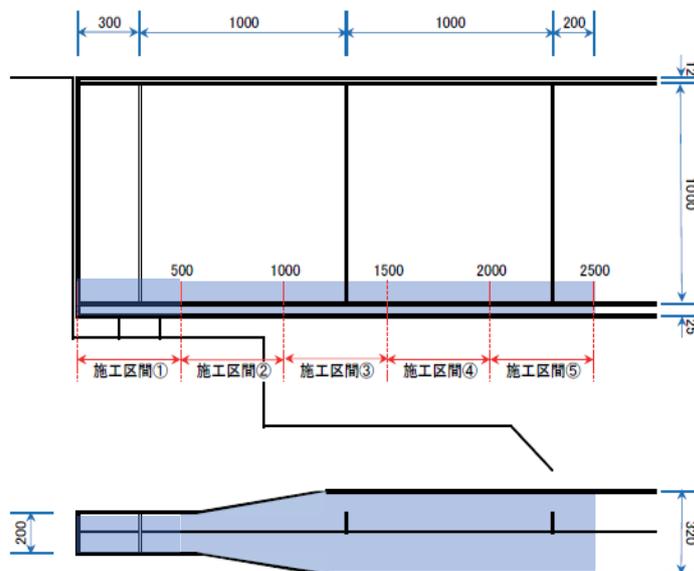


図 3.4.2 施工範囲概要

(2) 施工範囲

施工範囲概要を図3.4.2に示す。施工範囲は、G1、G4、G5、G6桁の下フランジの上面、下面と下フランジからの立ち上がりウェブ100mmを対象とし、G6桁は桁端部より支点上を除く施工区間②～⑤の範囲に、G1、G4、G5桁は支点上も含む全施工区間（①～⑤）とした。G4、G5、G6桁は、施工区間内において健全な塗膜箇所も確認されたため、腐食部のみを対象としてCS施工を実施した。G1、G4に関しては、垂直補剛材についてもCS施工を実施した。

(3) 施工手順

本施工は、表3.4.1に示す施工条件（施工要領素案）を基に実施した。本施工で使用したCS装置を図3.4.3に示す。CS装置は、現場施工に適した携帯型低圧CS装置（DYMET412k）を用いた。本CS施工では、ノズルの移動速度は5mm/sとし、スプレーと施工面との距離は5mm、ノズル施工角度は施工面に対して90°とした。また、CS装置のヒーター温度は約500°Cである。本施工で使用した亜鉛アルミナ混合粉体は、これまでの検討同様に亜鉛とアルミナの重量比率60：40の粉体を用いた。

全体の施工フローを図3.4.4に示す。まず、施工対象部の腐食状況調査を実施した。その後、素地調整を実施し、初期錆厚100μm以下となるまで除錆を行

った。素地調整終了後、施工要領素案（表3.4.1参照）に基づきCS施工を実施した。CS施工後、生成した亜鉛皮膜の品質（成膜状態）を確認するために、外観観察を実施した。また、電磁膜厚計を使用して膜厚測定、アドヒージョンテスターを使用して密着力測定を実施した。品質が確保されていることを確認した後に、防食下地のCS皮膜（亜鉛皮膜）の上から塗装を施した。

CS防食下地の実環境における長期防食性能を把握するために、腐食外観モニタリング調査を実施した。なお、本論文では、最長1.5年のモニタリング結果について後述するが、今後もモニタリング調査は継続する予定である。

表 3.4.1 施工条件（施工要領素案）

項目 (1)	施工条件	項目 (2)	施工条件
使用CS機械	低圧CS装置	パウダー配合	Zn:Al ₂ O ₃ =60:40(重量比)
移動速度	5mm/s	CS目標膜厚	100 μm以上
スプレー距離	5mm	ノズル角度	90度
作動ガス	圧縮空気	施工前錆厚	100 μm以下
ガス圧力	0.50MPa~0.80MPa	CS面塗装	フッ素樹脂塗装
ヒーター温度	500°C		



図 3.4.3 CS 施工装置（DYMET412k）

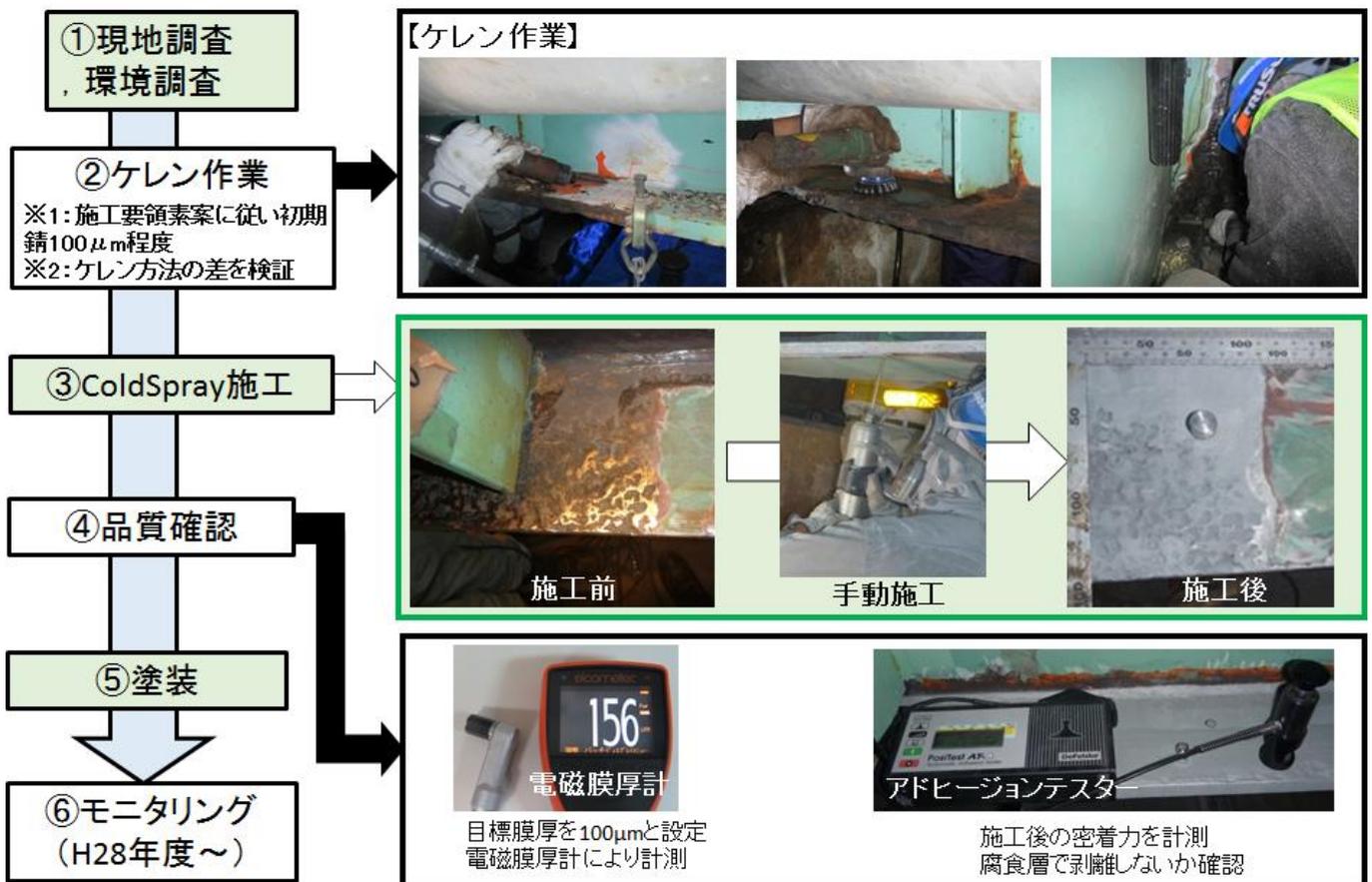


図 3.4.4 全体の施工フロー

(4) 施工条件

a) 平成27年度のCS施工

現場適用性検証の第一歩として、G4、G5、G6桁の施工条件良好箇所を対象にCS施工を実施した。各施工箇所の施工条件を図3.4.5に示す。

実腐食における除錆度がCS工法の成膜性に及ぼす影響を検証するために、桁毎にケレン方法を変え検証した。G4桁に関しては、漏水による層状さびの発生位置に固着さびが残存しており、固着さびを除去せずにCSを行った場合、亜鉛皮膜の十分な付着力が確保できないことが想定されたため、素地調整時に固着さびを完全に除去することとし、ブラスト処理（1種ケレン）した後、 $Zn : Al_2O_3 = 60 : 40$ （重量比）の粉体をCSにより吹きつけ亜鉛皮膜を生成した。また、G5およびG6桁に関しては、CS工法の施工の合理化を念頭にケレンの簡素化を図った。G5桁については、各種電動工具による2種ケレンを実施し、 $Zn : Al_2O_3 = 60 : 40$ （重量比）の粉体をCSにより吹きつけ亜鉛皮膜を生成した。一方、G6桁については、各種工具により浮きさびを除去し、活膜は残存させた（3種ケレン）。その後、 $Zn : Al_2O_3 = 60 : 40$ （重量比）の粉体をCSにより吹きつけ亜鉛皮膜を生成した。本施工では施工条件良好箇所を対象としたため、全てTFノズル（直線型）を使用し、手動施工を実施した。

b) 平成28年度のCS施工

狭隘部などの施工困難箇所への施工性検証を目的とし、G1、G4（支点部周辺）の狭隘部（桁端部）を対象にCS施工を実施した。各施工箇所の施工条件を表3.4.2に示す。

事前に実施した現地調査から、下フランジ上面（G1：海側）とウェブの施工条件は良好であった。一方、下フランジ上面（G1：山側）、下フランジ下面（桁端部）、垂直補剛材、支承部に関しては狭隘な構造空間であるため、施工条件が劣悪であり、施工困難となることが想定された。従って、各施工条件に応じてノズルや付属品を使い分け、各種エクステンションを適用したノズルを用いることとした。現場施工にて使用するノズルと付属品の例を写真3.4.2に示す。

施工条件良好箇所では、平成27年度施工と同様にTFノズル（直線型）を使用することとした。一方、施工困難箇所では、TFノズル（直線型）での施工が困難であることが想定された。そのため、施工困難箇所については、前述の2.5節にて予め性能を確認している90°+延長や60°エルボなどの各種エクステンションノズルを使用することとした。なお、本施工では、各種電動工具を用いて2種ケレンを実施し、初期錆厚100μm以下まで除錆を行った後に、 $Al_2O_3 = 60 : 40$ （重量比）の粉体をCSにより吹きつけ亜鉛皮膜を生成した。

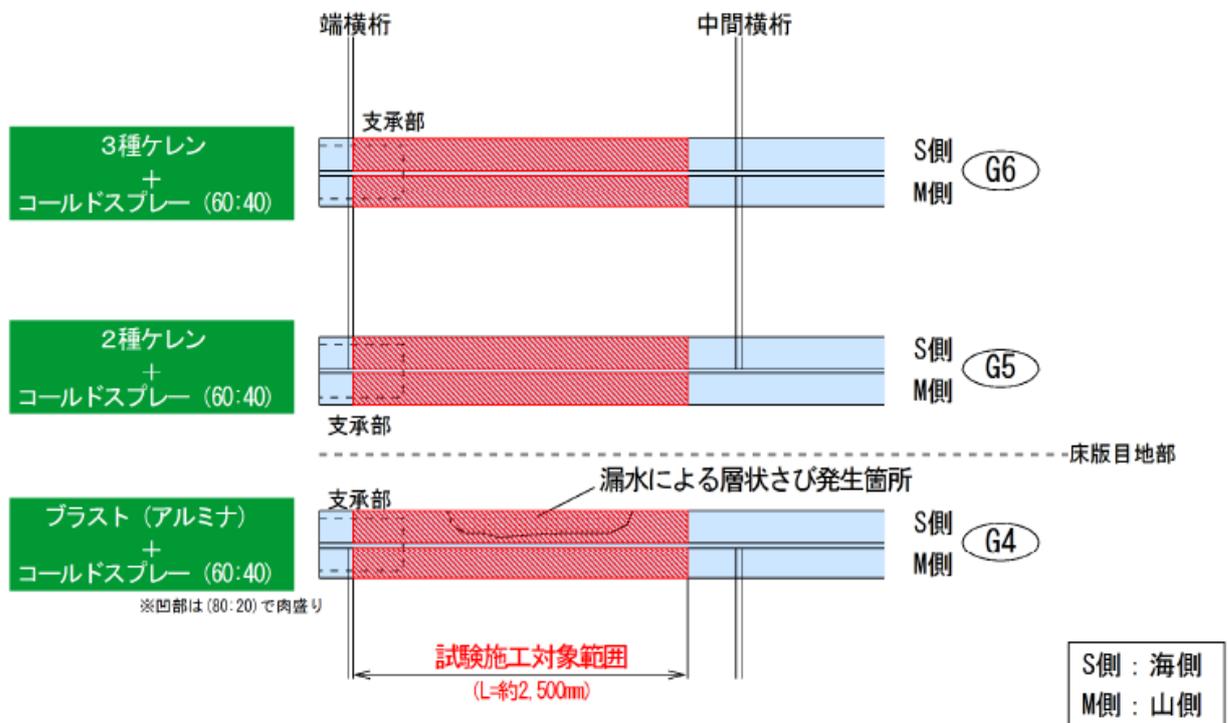


図 3.4.5 施工条件（平成 27 年度 CS 施工）

表 3.4.2 各施工箇所の施工条件 (G1, G4 主桁)

施工箇所	施工条件	状況詳細(写真 3.4.1)
下フランジ上面 (G1:海側)	良好	図 a
ウェブ	良好	図 b
下フランジ上面 (G1:山側)	劣悪	配管により施工困難 (図 c)
下フランジ下面 (桁端部)	劣悪	狭隘部により施工困難 (図 d)
垂直補剛材	劣悪	狭隘部により施工困難 (図 e)
支承部	劣悪	狭隘部により施工困難 (図 f)



(a) 下フランジ上面 (海側)



(b) ウェブ



(c) 下フランジ上面 (山側)



(d) 下フランジ下面 (桁端部)

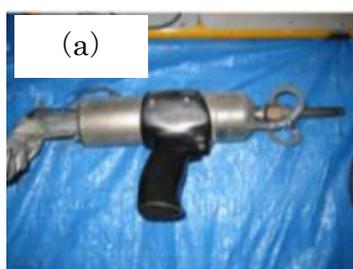


(e) 垂直補剛材

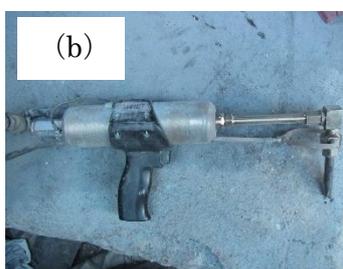


(f) 支承部

写真 3.4.1 施工条件の状況詳細



(a)



(b)



(c)

写真 3.4.2 使用するノズル, 付属品の例

(a) 直線型, (b) 90°エルボ+延長, (c) 60°エルボ



写真 3.4.3 下フランジ上面 (G1 主桁)



写真 3.4.4 半自動化施工装置



図 3.5.1 各種ケレン状況

(a) ブラスト処理 (1種ケレン), (b) 2種ケレン (電動工具), (c) 3種ケレン (電動工具)



(a) 1種ケレン

(b) 2種ケレン

(c) 3種ケレン

図 3.5.2 各種ケレンによる成膜状況

前年度の現場実証実験を実施した際の課題の1つとして、施工条件良好箇所における施工効率向上が挙げられる。CS工法は、施工時に使用するノズル径が小さいこと、手動施工であること等が原因で、作業員への負担が大きくなるため長時間の手動施工による連続施工ができない。そのため、特に施工面積が大きくなる場合には、施工効率が低下してしまうという弱点がある。今後、鋼橋の維持補修技術としてCS工法を広く展開するにあたり、施工効率向上を

図ることが重要である。そこで、平成28年度の施工では、実橋梁での施工効率化の検証についても実施した。施工効率化の検証は、施工条件良好箇所であるG1主桁下フランジ上面(写真3.4.3参照)を対象とした。この対象部位に対して、半自動化施工装置(写真3.4.4参照)を用いたCS施工を実施した。事前に現地調査を実施し、半自動化施工装置の取り付け治具を予め設計・製作した。当日の作業開始前に、専用治具を下フランジ上面に設置し、半自動化施工装置を用いたCS施工を実施し、施工効率化検証を行った。

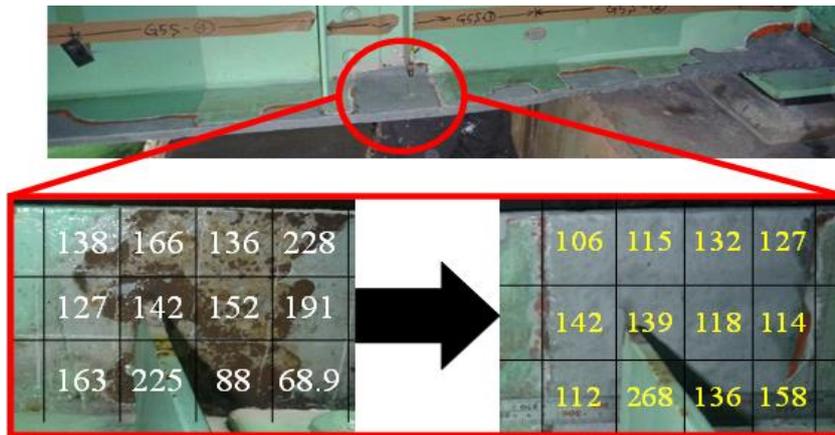


図 3.5.3 施工前の錆厚，施工後の膜厚測定結果

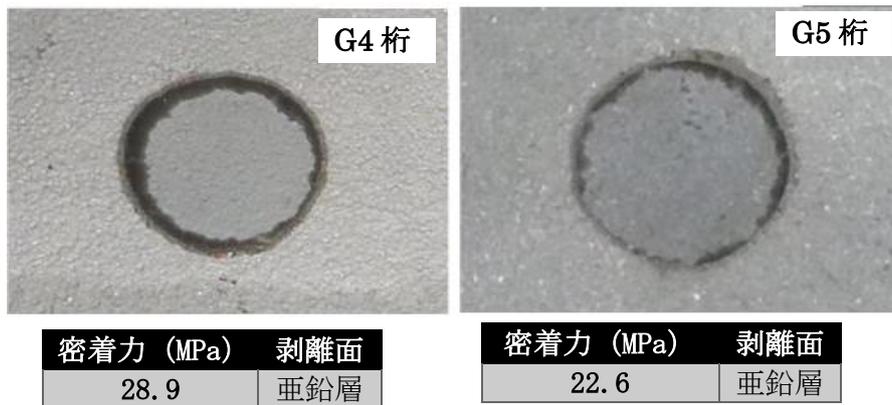


図 3.5.4 密着力測定結果

3.5 Cold Spray実証試験結果（平成27年度施工）

(1) 除錆度の影響に関する現場検証

実腐食における除錆度が成膜性に及ぼす影響を検証するために、桁毎にケレン方法を変え検証した。各種ケレン状況を図3.5.1に示す。ブラスト処理（1種ケレン：アルミナ100%粉体によるCS施工）では、ケレン後の鋼材表面に錆はほぼ確認されなかったが、電動工具を用いた素地調整の2種・3種ケレンでは、鋼材表面のさびを完全に除去することが出来ないため、ケレン後の鋼材表面に錆が残存していた。これらの各種ケレン（1種，2種，3種）を実施した後に、CS施工を実施した。各種ケレンによるケレン後状況と成膜状況の例を図3.5.2に示す。ブラスト処理した1種ケレンでは、鋼材表面のさびは概ね除去できていたが、2種ケレンと3種ケレンでは鋼材表面のさびが残存していた。しかしながら、このような鋼材さび残存状態においても亜鉛アルミナ混合粉体を用いたCS施工を実施することで、素地調整効果と同時に鋼材表面に亜鉛皮膜が十分に形成されることを確認した。事前に実施した室内試験では、大気曝露試験片（初期錆厚100 μ m）を用いた検討であったが、実橋梁における実腐食状態においても室内試験同様に鋼材さび残存状態においてCS工法が十分適用可能であることを実証し、2種ケレン程度の素地調整を実施することでCS施工が適用できることを確認した。

(2) 膜厚・密着力測定結果

CS施工後の品質状態（成膜状態）を確認するためにCS皮膜の膜厚測定と密着力測定を実施した。CS皮膜の膜厚は電磁膜厚計により測定を実施した。また、CS皮膜の密着力は現場において端子ドリリー（ ϕ 10mm）を取り付け、アドヒージョンテスターにより測定を実施した。

CS施工後の膜厚測定結果の例を図3.5.3に示す。外観状況を確認すると鋼材表面に均一な亜鉛皮膜が形成されており、CS施工後の亜鉛膜厚は、目標膜厚の100 μ m以上を十分に満足していた。このように、下フランジ上面のような施工条件良好箇所では、現場施工においても室内試験同様に十分な膜厚が確保できることが実証された。

CS施工後に行った密着力測定試験結果を図3.5.4に示す。G4桁はブラスト処理（1種ケレン）後にCS施工を実施し、G5桁は2種ケレン後にCS施工を実施した箇所である。どちらの箇所も、鋼材/亜鉛皮膜界面の破壊は認められず、亜鉛皮膜の凝集破壊であった。密着力はいずれの測定部位においても20 MPa以上を記録し、十分な密着力を有する亜鉛皮膜が形成されていた。

このように、施工条件良好箇所（下フランジ上面）に対しては、実施工においても十分な成膜性能を発揮可能であることを確認した。

表 3.6.1 施工条件別による CS 施工一覧 (G1, G4 主桁)

施工箇所	施工条件	使用したノズル	施工状況 図 3.6.1
下フランジ上面	施工良好	直線型ノズル	図 (a)
ウェブ			図 (b)
下フランジ上面 (G1 : 山側)	施工困難	90°エルボ+延長 60°エルボ	図 (c)
下フランジ下面 (桁端部)		90°エルボ+延長 60°エルボ+延長	図 (d)
垂直補剛材		60°エルボ 60° エルボ+延長	図 (e)
支承部		60°エルボ+延長 直線型ノズル	図 (f)



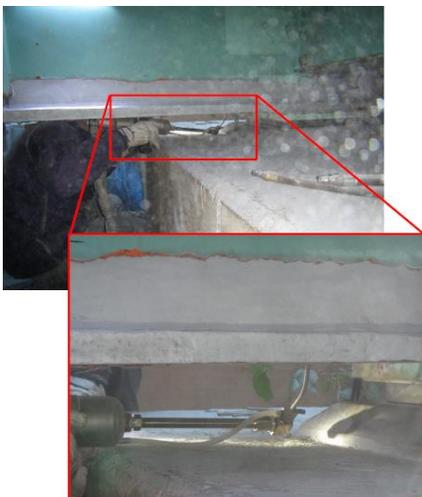
(a) 下フランジ上面



(b) ウェブ



(c) 下フランジ上面 (G1 : 山側)



(d) 下フランジ下面 (桁端部)



(e) 垂直補剛材



(f) 支承部

図 3.6.1 施工条件別の CS 施工状況

3.6 Cold Spray実証試験結果 (平成28年度施工)

(1) 施工条件別によるCS施工結果

施工条件別によるCS施工一覧を表3.6.1に示す。また、それぞれの施工状況を図3.6.1に示す。下フランジ上面やウェブ等の施工条件良好箇所では、主として直線型ノズルによるCS施工を実施した。施工状況をそれぞれ図3.6.1(a), (b)に示す。前述した前年度

の施工試験と同様に、下フランジ上面やウェブ等の施工条件良好箇所では2種ケレン程度の素地調整を実施することで、鋼材さび残存状態においても亜鉛皮膜が十分に形成されることを確認した。

一方、下フランジ上面 (G1 : 山側), 下フランジ下面 (桁端部), 垂直補剛材, 支承部等の施工困難箇所 (狭隘部) では、直線型ノズルによるCS施工が困難であるため、部材毎の施工条件に応じて各種エクステンションを用いたノズル (例えば、写3.4.2



写真 3.6.1 手動による CS 施工

(b), (c) によるCS施工を実施した。各施工箇所の施工状況を図3.6.1 (c) ~ (f) に示す。通常、下フランジ上面は施工条件良好箇所であるが、下フランジ上面 (G1 : 山側) は、ウェブ側面に配管が存在するため施工困難な状態となっていた (図3.6.1 (c) 参照)。この箇所に対しては、主として90°エルボ+延長のエクステンションを適用したノズルを用いて施工を行った。配管の下側からスプレーガンを通して施工を行うことで、施工面に対して施工角度90°にてCS施工を行うことが可能であり、亜鉛皮膜の形成が確認された。下フランジ下面 (桁端部) は、コンクリート橋台があるため非常に狭隘な構造空間となっている (図3.6.1 (d) 参照)。そのため、現状の補修塗装における最大の弱点部である。このような狭隘部に対しては、主として90°エルボ+延長のエクステンションを適用したノズルを用いて施工を実施した。非常に狭い作業空間であるが、エクステンションを適用した施工を実施することで、施工面に対して施工角度90°を維持しながらCS施工を実施することが可能であり、鋼材さび残存状態においても亜鉛皮膜の形成が確認された。また、垂直補剛材 (図3.6.1 (e) 参照) や支承部 (図3.6.1 (f) 参照) に関しても、複数の部材が存在するため狭隘構造となっている。このような施工箇所に対しては、主として60°エルボや60°エルボ+延長のエクステンションを適用したノズルを用いて施工を実施した。このような施工困難箇所に対しても、エクステンションを用いることで施工面に対して施工角度90°にてCS施工が実施可能であり、亜鉛皮膜の形成が確認できた。

以上から、各種エクステンションを用いたノズルを適用することにより、施工困難な桁端部狭隘箇所に対してもCS施工が十分に適用可能であることを実証した。

(2) 施工効率化のためのCS施工結果

前年度 (平成 27 年度) の現場実証実験では、施工条件の良い一般部 (下フランジ上面) に対して、手動による CS 施工を実施した (写真 3.6.1 参照)。しかしながら、施工時に使用するノズル径が小さいこ



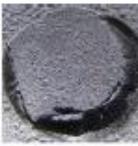
写真 3.6.2 半自動化施工装置を用いた CS 施工

と、手動施工であること等が原因で、作業員への負担が大きくなるため長時間の連続施工が行えず、特に施工面積が大きくなる場合には施工効率が低下してしまうという弱点があった。そのため、施工効率や成膜品質の観点からも施工半自動化の開発が今後の課題であった。そこで今回、施工条件良好箇所である下フランジ上面 (G1 : 海側) を対象として、半自動化施工装置を用いた CS 施工を実施した。半自動化施工装置を用いた CS 施工状況を写真 3.6.2 に示す。まず施工開始前に、予め製作した半自動化施工装置の専用レール・治具を設置した。この専用レールや治具などの設置に要する時間は、数十分程度であり、施工に要する時間に対して短時間である。また、作業員への負担も小さい。専用レール・治具を設置した後に、半自動化施工装置を用いた CS 施工を実施した。施工条件良好な下フランジ上面に対して、半自動化施工を適用することが可能となった。これにより、作業員への負担が大幅に低減し、施工面積が大きい場合でも長時間連続施工を実施することが可能である。そのため、従来の手動施工に比べて施工効率が大幅に向上すると考えられる。また、安定した施工を長時間実施可能なため、均質な亜鉛皮膜の形成が可能であり、成膜品質も大幅に向上した。

(3) 密着力・膜厚測定結果

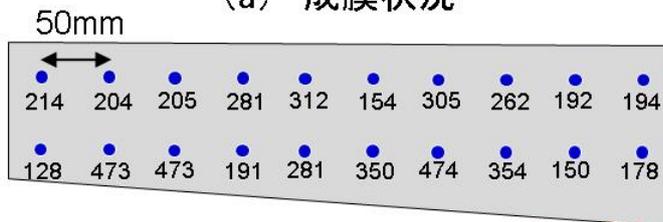
CS施工後の防食皮膜の成膜状態を把握するために、現場で端子 (φ10mmドリリー) を接着しアドヒージョンテスターによる密着力測定を実施した。施工条件毎の成膜状態を把握するために、使用したノズルが異なる領域にて測定を実施した。密着力測定は、それぞれの測定領域で計3回実施した。密着力測定結果を表3.6.1に示す。60°エルボの場合では、亜鉛皮膜の破壊は確認されなかったが、その他のケースでは、破壊形態は亜鉛皮膜の凝集破壊であった。いずれのケースにおいても鋼材/亜鉛皮膜界面の破壊は認められず亜鉛皮膜の密着性は良好であった。直線型ノズル (エクステンション無し) の密着力 24.5MPaを基準にすると、60°エルボの場合には密

表 3.6.1 密着力測定結果

使用したノズル	平均MPa	破壊形態	ドリー側表面外観	母材側表面外観
直線型ノズル	24.5	凝集破壊		
90°エルボ+延長	14.2	凝集破壊		
60°エルボ	33.4	破壊無し		
60°エルボ+延長	21.8	凝集破壊		



(a) 成膜状況



(b) 膜厚結果

Ave. 269 μ m
(目標:100 μ m以上)



(c) ノズル：90° エルボ+延長

図 3.6.1 成膜状況と膜厚測定結果の例
箇所：下フランジ上面，ノズル：90°エルボ+延長

着力の低下は認められなかったが、90°エルボ+延長、60°エルボ+延長のエクステンションを適用したノズルの場合には、密着力が低下する傾向にあった。これは、複数のエクステンションの装着に伴い、金属粒子の衝突速度が低下したためであると考えられる。一般的に、防食塗装に必要な塗膜密着力の目安は2MPa以上とされている¹⁾。このことから、エクステンション装着による密着力の低下は認められたものの、いずれのケースにおいても十分な密着力を有する防食皮膜が形成可能であると判断される。

最も低い密着力を記録した90°エルボ+延長のエクステンションノズルを用いた施工箇所（下フランジ上面：G1山側）における成膜状況と膜厚測定結果

の例を図3.6.1に示す。なお、防食皮膜の膜厚は電磁膜厚計により測定した（測定ピッチ：約50mm）。施工条件毎に各種エクステンションを適用することにより安定した防食皮膜が形成され、平均膜厚は目標膜厚の100 μ m以上を満足した。

以上から、各種エクステンションを用いたノズルを適用することにより、実橋梁の施工困難箇所（桁端部狭隘箇所）に対しても室内試験同様に密着性の高い安定した亜鉛皮膜形成が可能であり、本工法が実橋鋼桁端部への補修工法として十分に適用可能であることを実証した。

3.7 腐食外観モニタリング結果

CS防食下地の実環境における長期耐食性に関しては、実証データが数少ない。そこで本節では、CS防食下地の実環境における防食性能を検証することを目的に、平成27年度と平成28年度に実証実験を実施した施工箇所に対して腐食外観モニタリング調査を実施した。平成27年度施工箇所については、施工後約1.5年が経過しており、平成28年度施工箇所については、施工後約0.5年が経過している。なお、本報に関わらず、今後も腐食外観モニタリング調査を継続的に実施予定である。

(1) 腐食外観モニタリング結果（平成27年度施工）

平成27年度に施工条件良好箇所に対してCS施工したG4、G5、G6の腐食外観モニタリング結果の例を図3.7.1に示す。全てのCS施工箇所において、施工

直後から1.5年経過後においても、赤さび発生や塗膜劣化は確認されず、外観良好状態を維持していた。特にG4桁は、伸縮装置からの漏水発生もあり、腐食環境がもっとも過酷な環境であるが、CS施工箇所において耐食性が発揮されていた。このことから、鋼材さび残存状態において本工法を適用しても、実環境にて高耐食性を十分発揮可能であることが示された。

(2) 腐食外観モニタリング結果（平成28年度施工）

平成28年度に施工困難箇所（狭隘部）に対してCS施工したG1、G4の腐食外観モニタリング結果の例を図3.7.2に示す。G1、G4ともに施工前には著しい腐食損傷が発生していた。今年度は狭隘部施工を対象としたため、各種エクステンションノズルを適用したCS施工を実施した。施工困難箇所における

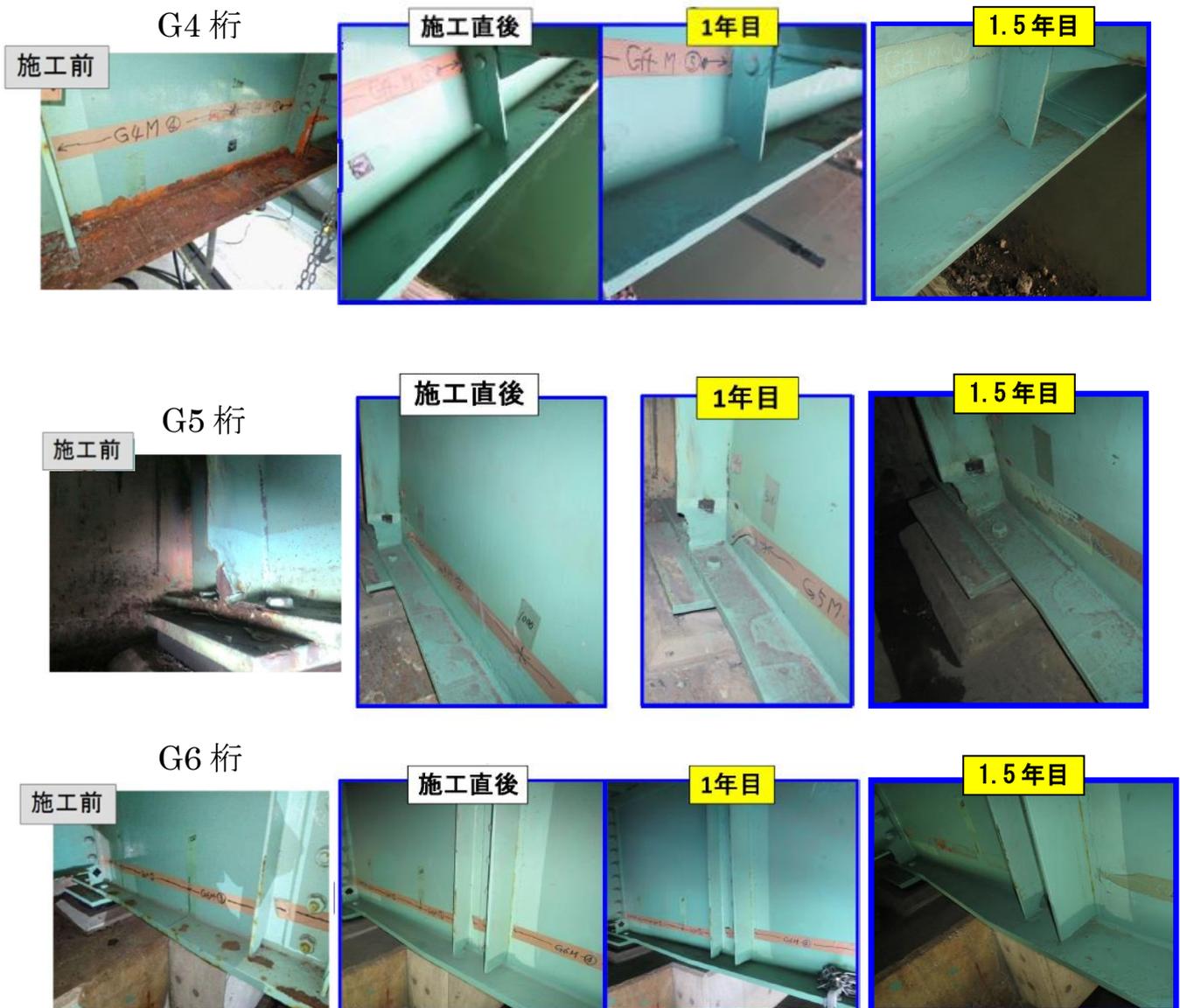


図 3.7.1 腐食外観モニタリング結果の例
平成27年度施工箇所：G4、G5、G6

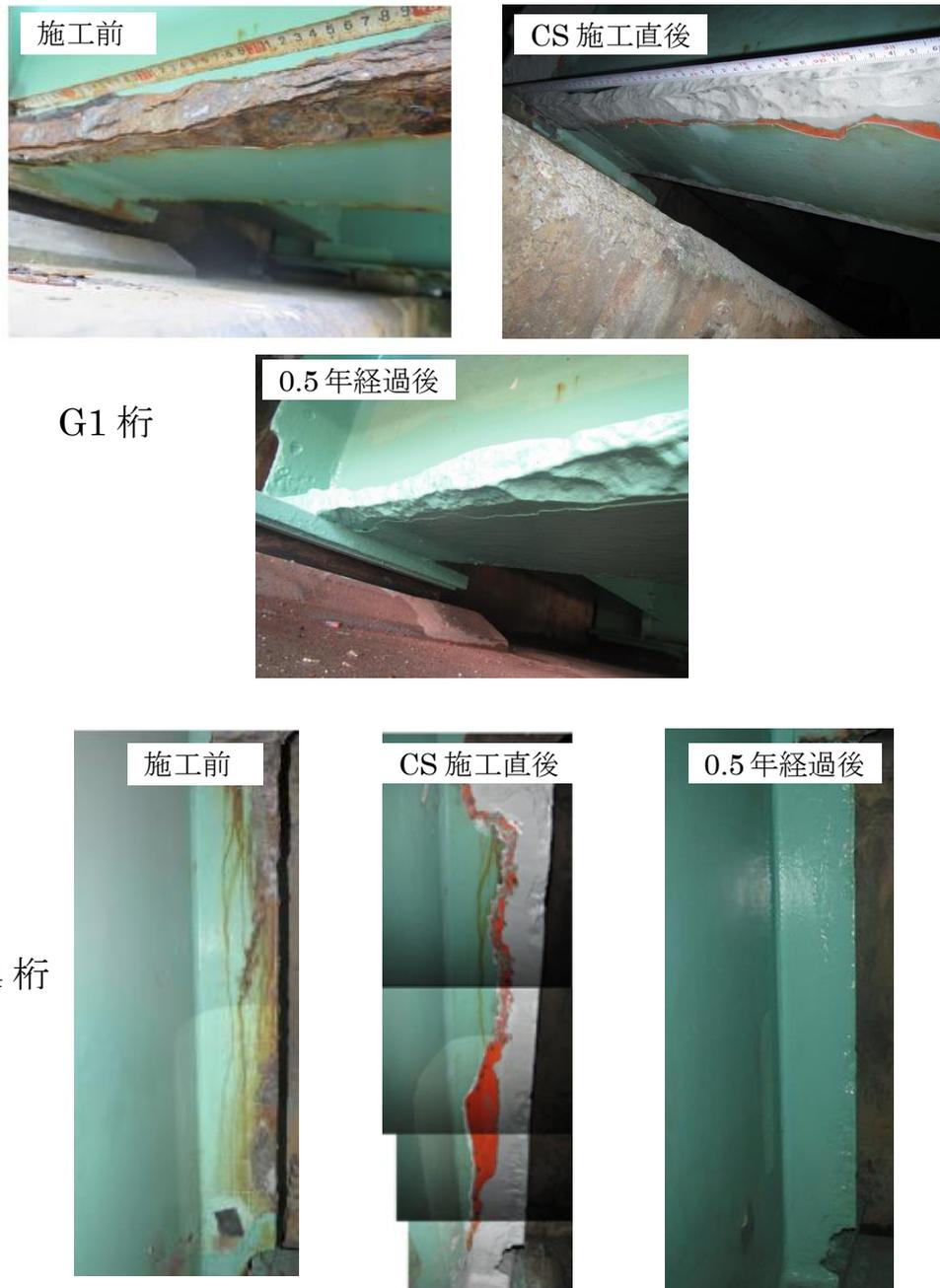


図 3.7.2 腐食外観モニタリング結果の例
平成 28 年度施工箇所：G1, G4

施工であったが、全ての施工箇所においても、施工直後から 0.5 年経過後においても、赤さび発生や塗膜劣化は確認されず、外観良好状態を維持していた。このことから、狭隘部施工に対しても、本工法が実環境にて高耐食性を十分発揮可能であることが示された。

3.8 まとめ

本章では、2 章「腐食した鋼材に対する Cold Spray 表面処理技術の防食性能の検証」の各検証結果を踏まえ作成した施工要領素案に基づき、桁端部に腐食損傷を受けた実橋梁に対して、現場施工性と施工効

率化の検証を目的に実橋梁への CS 施工実証試験を行った。先ず実証実験に先立ち、当該橋梁の腐食環境モニタリング調査を実施した。その後、平成 27 年度に、現場適用性検証の第一歩として、施工条件良好な個所に対して CS 施工（手動施工）を実施した。また、平成 28 年度では、桁端部（狭隘部）への施工性検証を目的とし、施工困難箇所に対して CS 施工を実施した。また、半自動施工装置を用いた施工効率化検証も行った。本章で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 施工対象橋梁の腐食環境モニタリング調査を実施

し、当該橋梁の桁端部周辺の季節毎の腐食環境（湿度，飛来塩分）を把握した．また，ワッペン鋼板曝露試験により，1年間の平均腐食速度を把握した．

2) 施工条件良好箇所（下フランジ上面など）へのCS施工では，直線型のノズルを用いることで，室内試験同様に現場においても十分な密着力を有する亜鉛皮膜の形成が可能であることを実証した．

3) 施工困難箇所（狭隘部）へのCS施工では，各種エクステンションを適用することで，鋼材錆残存状態においても強固な密着力を有する亜鉛皮膜の形成が十分可能であり，現場においても各種エクステンションを装着することで，施工困難箇所においてもCS施工が十分適用可能であることを実証した．

4) 施工条件良好箇所（下フランジ上面）では，専用のレール・治具を用いることで，半自動化施工装置を適用することが可能であった．施工半自動化により，作業者への負担が大幅に低減し，施工面積が大きい場合でも長時間連続施工を実施することが可能である．そのため，従来の手動施工に比べて施工効率が大幅に向上すると考えられる．また，安定した施工を長時間実施可能なため，均質な亜鉛皮膜の形成が可能であり，成膜品質も大幅に向上した．

参考文献

1) 例えば富山禎仁，西崎到：構造工学論文集，Vol.61A，pp.552-561，2015.3

第4章 Cold Spray皮膜を防食下地とした鋼桁端部の耐荷力回復効果の評価

4.1 はじめに

鋼橋の腐食損傷は、伸縮装置からの漏水や湿気・塩分が溜まりやすい環境下であるため、写真4-1(a)に示すように桁端部に発生するケースが多い。そして、著しい損傷が生じた場合、ウェブの板厚の減少だけでなく、写真4-1(b)に示すようなウェーブ下フランジの首溶接部やウェーブ垂直補剛材の境界部で破断が生じる場合があり、これにより橋梁の耐荷力を大きく低下させる可能性が報告されている¹⁾。

このような損傷に対する補修方法として、当て板ボルト工法や炭素繊維接着工法が挙げられる²⁾。当て板ボルト工法では、腐食部材の凹凸面の調整や防食性能向上のために、腐食鋼板面の除錆・素地調整後、無機系ジンク塗装を行うのが一般的である。また、炭素繊維接着工法でも同様に腐食鋼板面の除錆・素地調整を行った後に、接着剤塗布による炭素繊維の貼付けが行われている。しかしながら、実橋の桁端部の腐食部位では、完全に除錆することが困難な場合が多く、完全に除錆ができない場合には錆が早期に再発し、再劣化が生じる可能性がある。それゆえ、現場でも施工が可能且つ再劣化を予防できる防食技術の確立が求められる。

そこで本章では、腐食した鋼部材に対する補修工法として、当て板ボルト工法と炭素繊維接着工法を取り上げ、当て板面や炭素繊維接着面の防食下地としてのCold Spray処理が耐荷力回復効果に及ぼす影響を実験的に検討した。検討に際しては、鋼桁端部の腐食を模擬した中型及び大型試験体に対して、当て板ボルト工法及び炭素繊維接着工法を適用し、せん断耐荷力試験を行った。



(a) 桁端部の損傷例



(b) ウェーブ下フランジ破断事例
写真 4-1 鋼橋桁端部の損傷事例

4.2 中型せん断試験体を用いた耐荷力回復効果の検証

腐食損傷に対する耐荷力回復工法として、当て板ボルト工法と炭素繊維接着工法に着目し、防食下地にCold Spray皮膜を適用した場合の耐荷力回復効果を中型せん断耐荷力試験により検討した。なお、新

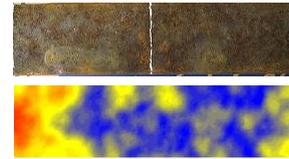


(a) 腐食鋼板用レーザー計測装置

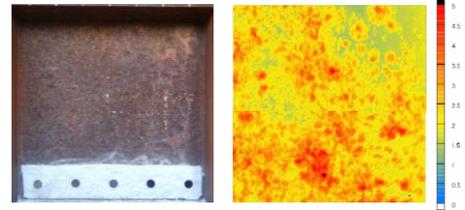


(b) せん断試験体用レーザー計測装置

写真 4-2 レーザー形状計測装置

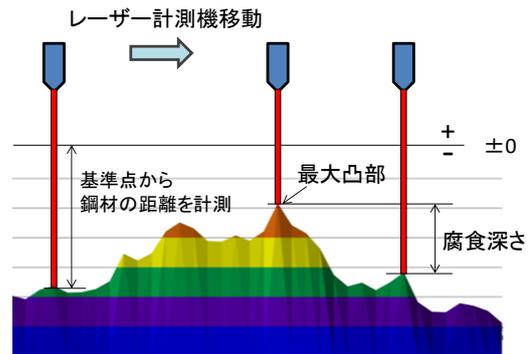


(a) 腐食鋼板の計測結果例



(b) 中型せん断試験体の計測結果例

図 4-1 レーザー形状計測結果



A-A 断面図
腐食深さ=最大凸部-各計測値

図 4-2 腐食深さの定義

材の鋼板で製作した試験体に加えて、実腐食鋼橋より採取したウェブ板を試験体とし、腐食凹凸面に対する適用性の評価を行った。

(1) 腐食鋼板の凹凸度の評価

腐食凹凸面に対する Cold Spray 皮膜が耐荷力回復効果に及ぼす影響を評価するために、本試験で用いる実腐食鋼板の腐食凹凸度の評価を行った。腐食凹凸度の評価には、実腐食鋼橋より採取した腐食鋼板 200 枚に対して、写真 4-2(a) に示すレーザー計測装置により、70mm×70mm の領域を 2mm 間隔で表面形状の計測を行った結果（計測点約 1300 点）を用いた。なお、せん断試験体については、写真 4-2(b) に示す大型レーザー計測装置を用いて計測を行った。計測結果より得られた表面形状のコンター図例を図 4-1 に示す。

計測結果より平均腐食深さと腐食深さの標準偏差を算出した。平均腐食深さ及び腐食深さの標準偏差は図 4-2 に示すように、計測領域内の最大凸部から各位置の腐食深さを算出し、平均値とその標準偏差としている。平均腐食深さと腐食深さの標準偏差の関係を図 4-3 に示す。図に示すように、平均腐食深さと標準偏差は強い相関性を有しており、標準偏差が大きくなるほど腐食深さが深くなる、すなわち腐食凹凸の程度が激しくなることがわかる。

この平均腐食深さと標準偏差の係数に、後述する中型せん断試験体に当て板ボルト工法を適用した際のボルト孔近傍のデータ（1 試験体当たり 5 本のボルトを使用）をプロットすると、標準偏差は 0.2-0.8mm

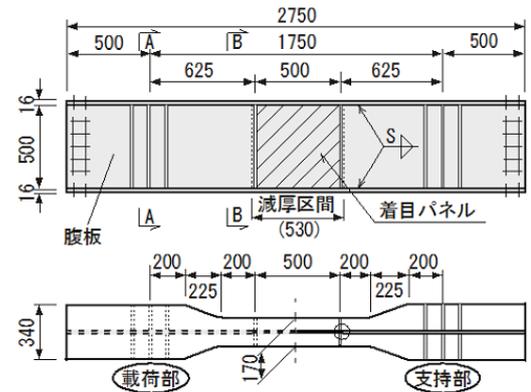


図 4-4 中型せん断試験体寸法

程度、平均腐食深さは 0.7-1.7mm 程度と、腐食レベルが小から中程度の腐食凹凸状態を有する試験体であるといえる。

(2) 荷重方法及び試験体

試験体寸法を図 4-4 に示す。着目パネルは試験体中央部の 500mm×500mm のウェブである。図 4-5 に荷重方法を示す。試験体の両側を高力ボルトにて荷重桁に接合し、2 点荷重、2 点支持することで着目するパネル付近に発生する曲げモーメントを小さくし、せん断力が卓越する実験装置とした。荷重には荷重装置 1 および 2 の 2 台の油圧ジャッキ（最大荷重 1000kN/台）を使用し、P1 : P2 が概ね 1 : 3 の荷重を保つよう

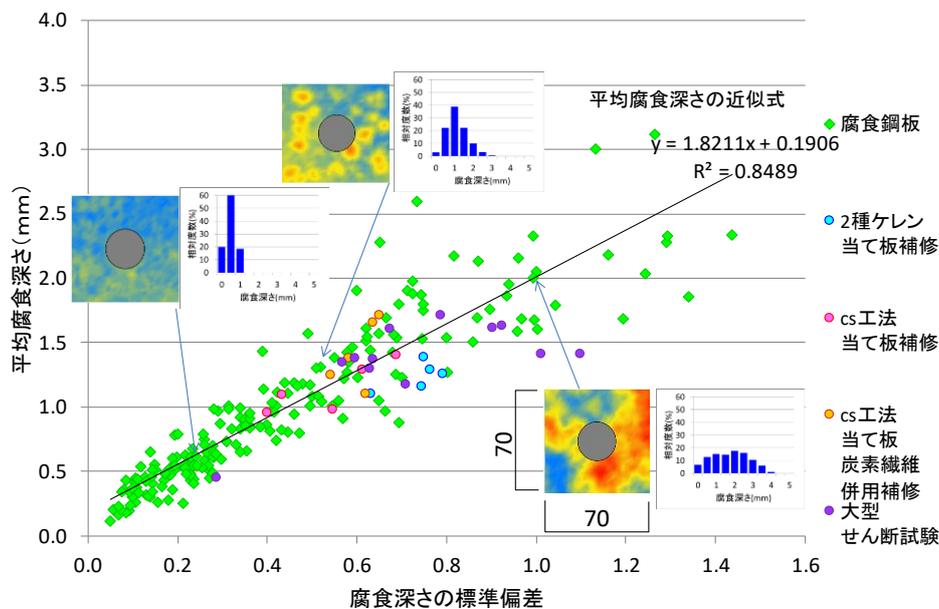


図 4-3 平均腐食深さと腐食深さの標準偏差の関係

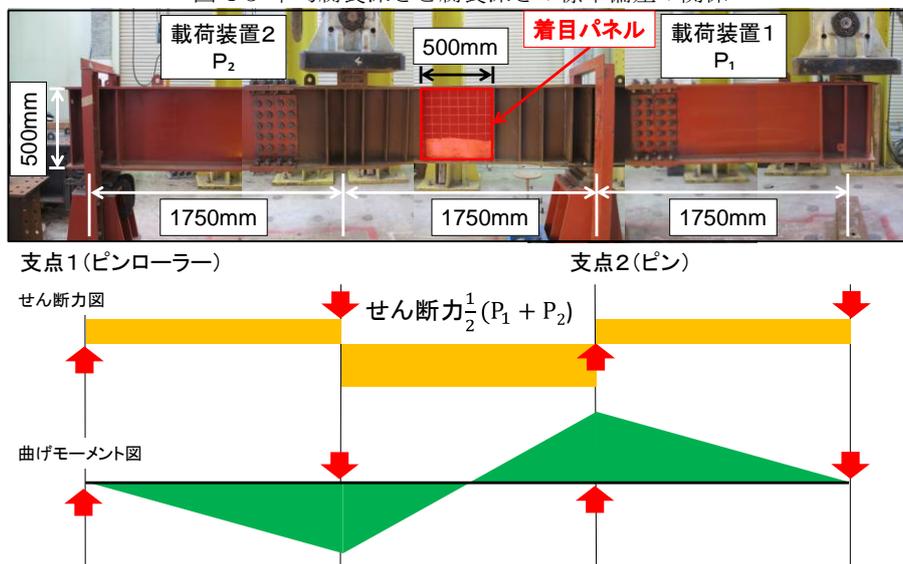


図 4-5 中型せん断試験載荷試験状況

変位制御にて載荷した。支持条件は支点1をピンローラー支持，支点2をピン支持とした。なお，着目パネルのせん断力は $(P_1+P_2)/2$ となっている。

(3) 試験パラメータ

a) 腐食損傷模擬

実橋で生じる腐食形態の分析結果と事前に実施したFE解析より，ウェブ下フランジの首溶接部及びウェブ垂直補剛材の境界部の破断したモデルを鋼桁のせん断耐荷力に最も影響を及ぼす腐食損傷形態と本研究では定義した。なお，ウェブと垂直補剛材の境界部の切り上げ高さについては，当板ボルト補修においてボルト1行で補修可能な下フランジから75mmとした。

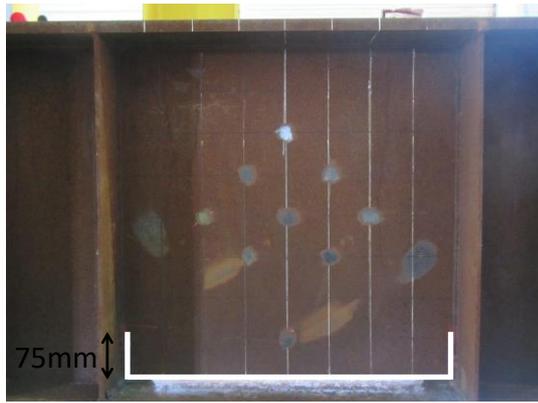
ウェブの腐食減厚については，健全時を想定した板厚4.5mmから腐食による一様減肉を模擬した板厚

3.2mmの鋼板をウェブに用いた場合及び実腐食鋼板を用いた場合の2種類とした。写真4-3に損傷模擬試験体例を示す。

b) 補修工法

補修工法には当て板ボルト工法のみと当板ボルト工法及び炭素繊維接着工法併用の2種類を用いた。当て板ボルト工法に用いた当て板の概要を図4-6に示す。なお，当板に用いる高力ボルトにはM20F10Tを使用し，軸力はトルク値により管理した。補修後の試験体を写真4-4に示す。

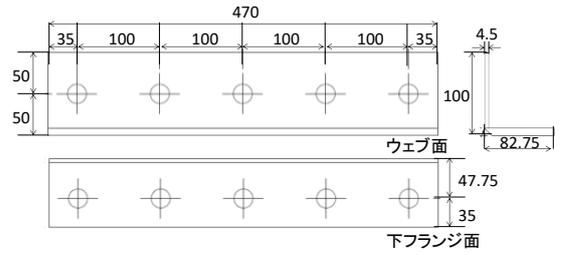
炭素繊維接着工法に用いた炭素繊維はヤング率 $2.45 \times 10^5 \text{MPa}$ ，繊維目付量 300g/m^2 ，設計厚さ 0.167mm ，引張強度 3400MPa のものを使用した。炭素繊維の接着には，急激な剥離の抑制効果³⁾を有するポリウレアパテを塗布後に，ヤング率 1000MPa 以上，



(a) 新材試験体損傷模擬状況



(b) 実腐食試験体損傷模擬状況
写真 4-3 損傷模擬状況



(a) 当て板寸法



(b) 実験に用いた当て板

図 4-6 中型せん断試験に用いた当て板概要



写真 4-4 当て板ボルト工法適用後の試験体例

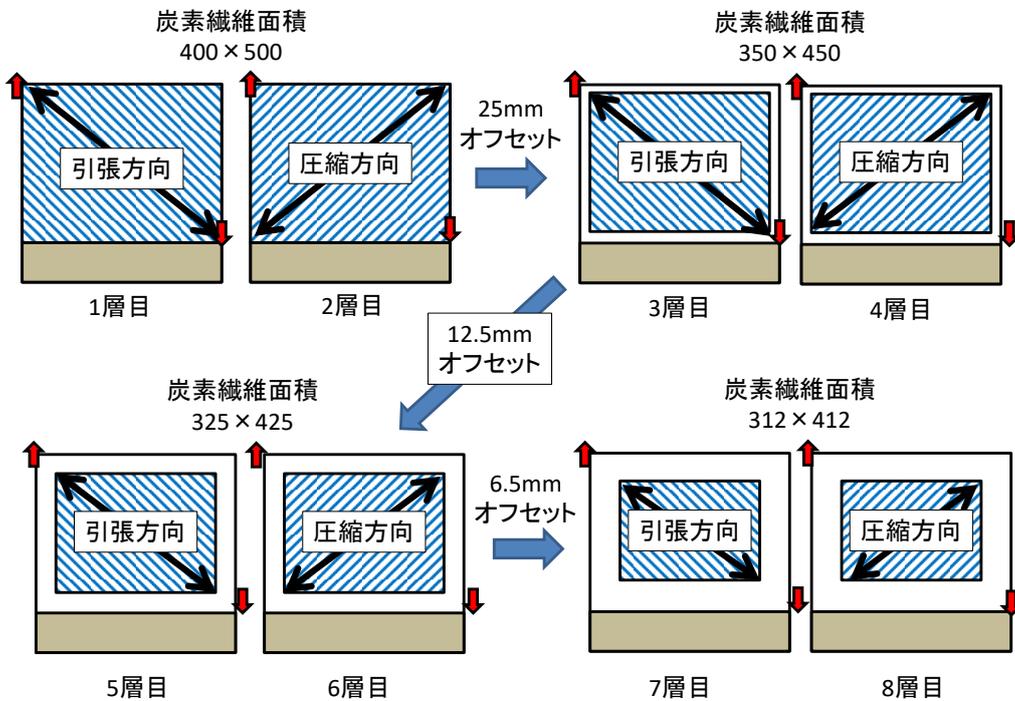


図 4-7 炭素繊維接着方法

引張強度45MPaのエポキシ樹脂系接着剤を用いた。ここで炭素繊維はせん断座屈時に生じる斜め張力

場方向に対して、1層目に引張方向、2層目に圧縮方向と交互に接着し、接着領域は当て板上部のウェブ



写真 4-5 当て板ボルト・炭素繊維接着工法
適用試験体例

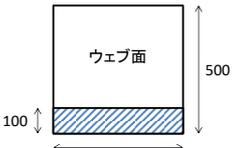
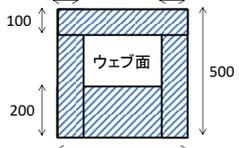
試験体	試験体写真	施工範囲
当て板ボルト補修		
当て板ボルト補強 炭素繊維補強		

図 4-8 Cold Spray 工法による下地処理範囲

とした。炭素繊維1層あたりの鋼換算板厚は0.205mmであり、接着層数は片面あたり4層(鋼換算板厚1.6mm)及び8層(鋼換算板厚3.2mm)とした。各層数毎の貼り付け面積の詳細を図4-7に、補修後の状況を写真4-5にそれぞれ示す。

c) 下地処理

当て板部及び炭素繊維接着部の下地処理には、除錆を目的とした従来手法の2種ケレン及び除錆・防食皮膜形成を目的としたCold Spray工法(亜鉛:アルミナ=60:40)の2種類を用いた。下地処理の範囲は、当て板ボルト工法については、図4-8(a)に示すように当て板設置面とし、炭素繊維接着工法については、2種ケレンについては炭素繊維接着面全域、Cold Spray工法については、図4-8(b)に示すようにウェブ面において垂直補剛材と上フランジから100mm及び下フランジ200mmの範囲を額縁状とした。なお、Cold Spray皮膜の膜厚は、概ね100 μ mとなるように施工を行った。下地処理後の試験体例を写真4-6に示す。

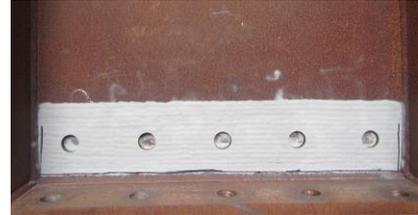
上記のパラメータを用いて製作した試験体のパラメータの一覧を図4-9に示す。

(4) せん断耐荷力回復効果の評価

当て板ボルト工法及び炭素繊維接着工法によるせん断耐荷力回復効果に及ぼすCold Spray皮膜の影響の評価を行った。回復効果については、せん断耐荷力、変形保持性能、座屈後の斜張力場の形成の観点より評価を行った。せん断耐荷力の評価は、実験よ



(a) 2種ケレン状況(当て板ボルト工法)



(b) Cold Spray 工法状況(当て板ボルト工法)



(c) 2種ケレン状況(炭素繊維接着工法)



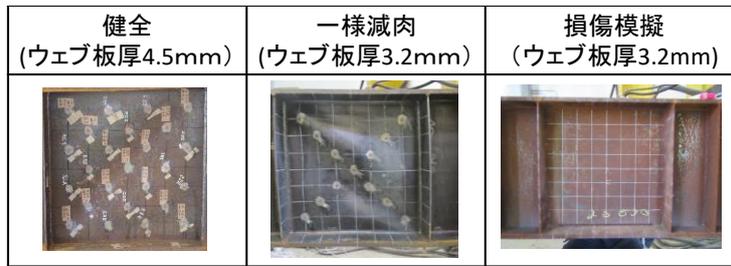
(d) Cold Spray 工法状況(炭素繊維接着工法)

写真 4-6 下地処理後の試験体例

り得られた最大せん断耐荷力の比較により、変形保持性能の評価は、せん断力と鉛直変位関係から、斜張力場形成の評価は、試験後のウェブ形状を用いてそれぞれ行った。

a) 当て板ボルト工法に及ぼすCold Spray皮膜の影響

実験より得られたせん断力と鉛直変位の関係を図4-10に示す。腐食による一様減肉を模擬したウェブ板厚3.2mmのケース(以下、一様減肉モデル)と比較して、新材で損傷を模擬したモデル(以下、損傷模擬モデル)は、最大せん断耐荷力が50%近く低下したことがわかる。この損傷模擬モデルに対して、当て板ボルト工法を施した場合(以下、新材当て板モデル)、一言肉モデルと比較して剛性が早期に低下する傾向が見られたが、せん断耐荷力は一様減肉モデルと同程度まで回復しており、当て板ボルト工法によりウェブ下フランジの首溶接部及びウェブ垂直補剛材の境界部の破断に対して十分な補修効果が得られたと考えられる。



(a) 無補修試験体一覧

	新材損傷模擬 当て板	腐食材損傷模擬 当て板	新材損傷模擬 当て板+炭素繊維	腐食材損傷模擬 当て板+炭素繊維
2種 ケレン			4層 	
CS 工法		4層 	8層 	

(b) 補修試験体一覧

図 4-9 試験体パラメーター一覧

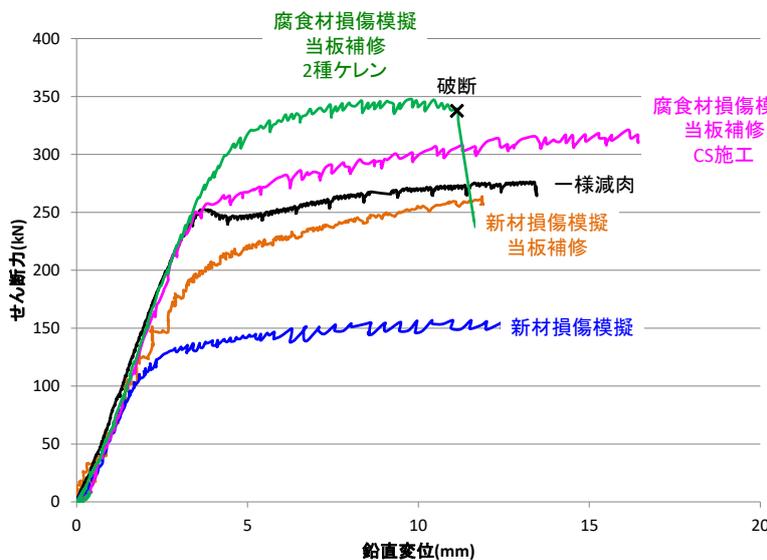


図 4-10 せん断力-鉛直変位の関係 (当て板中型せん断試験)

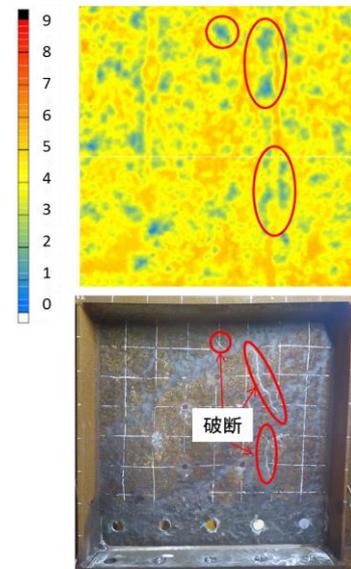


図 4-11 実腐食当て板-2種ケレンモデル破断状況

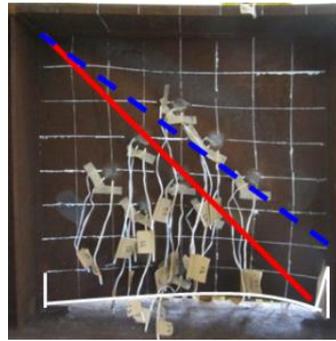
実腐食鋼板を用いた試験体に当て板ボルト工法を適用したケースでは、下地処理を2種ケレンとした場合（以下、実腐食当て板-2種ケレンモデル）とCold Spray皮膜とした場合（以下、実腐食当て板-CSモデル）の両ケースともに一様減肉モデルのせん断耐力以上の耐力を有する結果が得られた。つまり、本研究で用いた腐食凹凸度程度であれば、下地処理としてCold Spray工法を適用した場合でも、2種ケレンによる素地調整と同程度の耐力回復効果が期待で

きる可能性がある。

変形保持性能においては、図4-10より実腐食当て板-2種ケレンモデルを除くモデルでは、最大せん断耐力に達した以降も大きな耐力低下を生じることなく変形しており、十分な変形保持性能を有しているといえる。一方、実腐食当て板-2種ケレンモデルでは、鉛直変位が10mmを超えた際に急激な耐力の低下が見られた。これは、図4-11に示すように斜張力場領域の板厚が、腐食により局部的に減肉した箇所



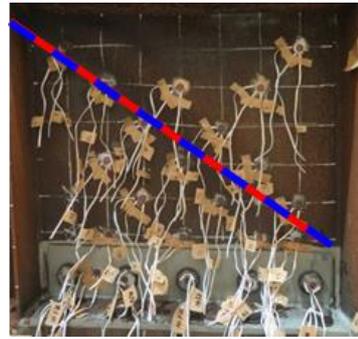
(a) 一様減肉モデル



(b) 損傷模擬モデル



(c) 新材当て板モデル



(d) 実腐食当て板-CS

写真 4-7 試験終了後の変形状 (炭素繊維中型せん断試験)

において破断が生じたためであるといえる。これより、ウェブ面に局部的に著しい腐食減肉が生じた場合、耐荷力や変形保持性能を急激に低下させる要因となると考えられるため、減肉に対する補修を行う必要があると考えられる。

試験終了後のウェブの面外変形状況を写真4-7に示す。図内の赤線は、ウェブを対角線上に結んだラインであり、青の点線は実験により得られた斜張力場を結んだラインである。健全時では対角線上に斜張力場が形成され、アンカー部が上下コーナーに形成された。一方、無補修の試験体では、アンカー位置が欠損位置の上部に形成され、斜張力場が対角線よりも上部で形成されていることが確認できる。当て板ボルト工法を施した試験体は、いずれも当て板上部のウェブ面で、対角線上に斜張力場が形成されており、破断部により失われた斜張力場での荷重伝達が、当て板ボルト工法により回復したと考えられる。

これより、本研究で用いた腐食凹凸度程度であれば、凹凸面の平滑化を図ることなくCold Spray工法を施した後に当て板ボルト工法を適用することで、防食皮膜を形成させるとともに、ウェブ下フランジの首溶接部やウェブ垂直補剛材境界部の破断に対して十分な耐力の回復効果が得られるものと考えられる。しかし場合は、減肉部で破断が生じる可能性があるため、減肉の程度によってはウェブ面の補修を行う必要があるといえる。ながら、ウェブ面に局部的な減肉が生じている

b) 炭素繊維接着工法に及ぼすCold Spray皮膜の影響

各実験で得られた、せん断力-鉛直変位関係を図4-12に示す。図中には、炭素繊維接着によりウェブ板厚が回復したことを想定した際の耐荷力の理論値を座屈設計ガイドライン⁴⁾を基に算出した結果も併せて表示している。

図より、炭素繊維接着工法を施した全てのケースで、新材当て板モデルと比較してせん断耐荷力が増加しており、炭素繊維接着工法によりせん断耐荷力が回復したことがわかる。新材試験体に対する補修効果に着目すると、炭素繊維の接着層数の増加に伴い、せん断耐荷力は増加する傾向が見られた。接着層数が4層のケースでは、鋼換算板厚により回復したことを想定した理論強度と概ね等しい結果が得られたが、8層の結果では理論強度より低い耐荷力を示す結果となった。これは層数の増加により、貼り付け部端部での応力集中が増加し、炭素繊維の剥離を助長したものと考えられる。

下地処理の違いについて比較した場合、2種ケレンとCold Spray工法による耐荷力に差異はなく、Cold Spray皮膜が耐荷力回復効果に及ぼす影響は少ないと考えられる。

最大せん断耐荷力以降の変形保持性能の比較を行うと、新材試験体に炭素繊維接着を施した試験体では、急激な耐力低下を引き起こすことなく、変形に追従しており、Cold Spray皮膜が炭素繊維の剥離等に悪影響を及ぼす可能性が低いことが確認された。しかしながら、実腐食部材に炭素繊維接着工法を適用した試験体では、最大耐荷力以降に急激な荷重低下

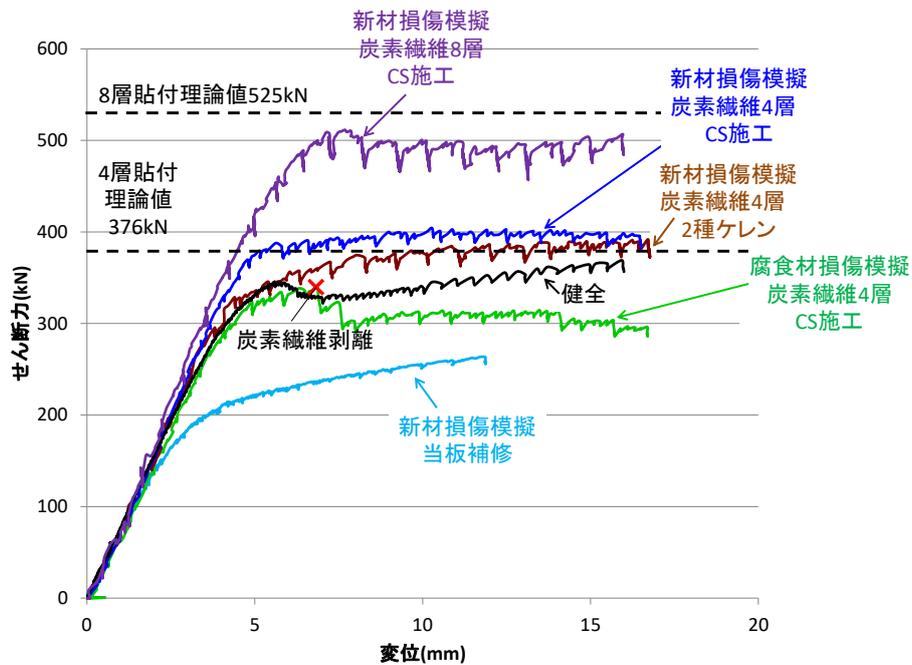


図 4-12 せん断力-鉛直変位の関係 (炭素繊維中型せん断試験)

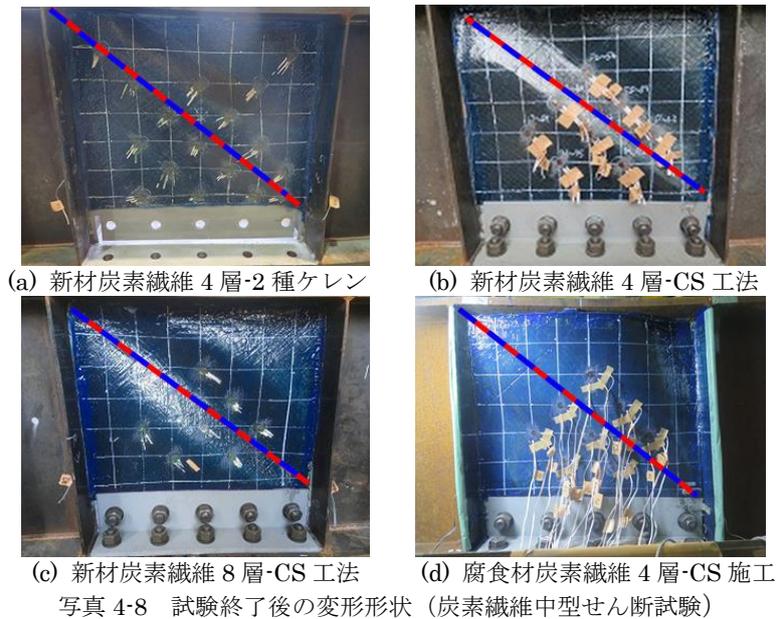


写真 4-8 試験終了後の変形状 (炭素繊維中型せん断試験)

が見られた。これは腐食凹凸もしくはCold Spray皮膜を原因として炭素繊維の剥離が生じたためであると考えられる。それゆえ、腐食凹凸面にCold Spray工法を適用し、防食下地とする場合は、適用可能な腐食凹凸度の範囲について、さらなる検討が必要であるといえる。

試験終了後のウェブの変形状況を写真4-8に示す。いずれの試験体においても当て板ボルト工法を適用した場合と同様に、当て板上部で斜張力場のアンカーが形成されており、せん断力に対してウェブ面が十分に抵抗力を発揮したものと考えられる。

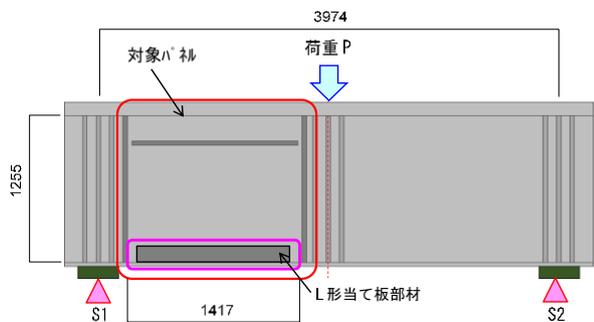
4.3 大型せん断試験体を用いた耐荷力回復効果の検証

前節の中型せん断耐荷力試験で検討を行ったCold Spray皮膜を防食下地とした当て板ボルト工法及び炭素繊維接着工法によるせん断耐荷力回復工法を、実大スケールの大型せん断試験体を用いた耐荷力実験により耐荷力回復性能の検証を行った。

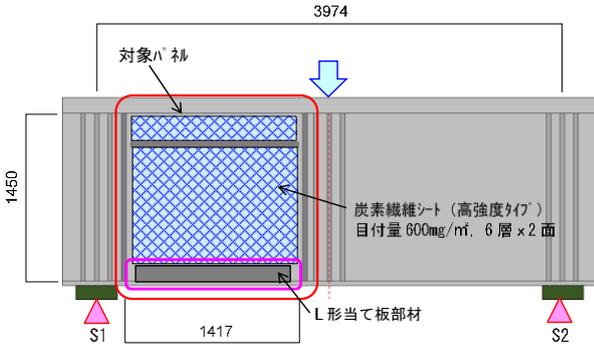
(1) 試験体

a) 試験体寸法

試験体は腐食材を用いた実腐食せん断試験体と新材を用いて腐食損傷を模擬した腐食模擬せん断試験体の2体とした。試験体形状を図4-13に示す。



(a) 実腐食せん断試験体寸法



(b) 腐食模擬せん断試験体

図 4-13 大型せん断試験体寸法

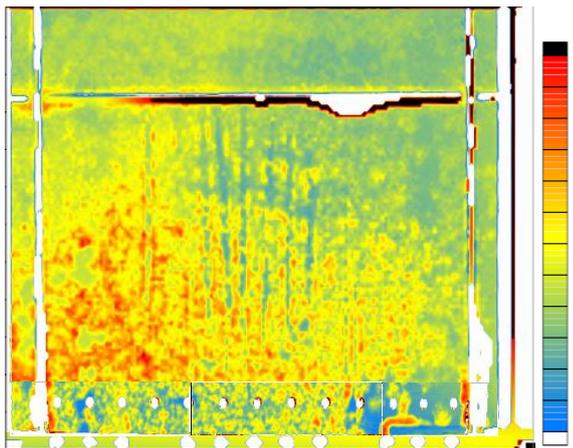


図 4-14 大型せん断試験体の表面形状コンター図

実腐食せん断試験体は、実橋より採取したウェブと下フランジを用いて製作した実大スケール試験体である。試験対象パネルのウェブと下フランジに腐食材を、それ以外の部材は全て新材とした。なお、もう一方のウェブではせん断座屈を回避するために板厚32mmとし、上フランジは実橋梁でのRC床版による合成効果を考慮して板厚50mmとし、横倒れ座屈の防止効果も図っている。

腐食ウェブの板厚及び腐食凹凸は、写真4-2(b)に示した大型レーザー変位計を用いてウェブ全体を10mm間隔で計測を行い、後述する当て板設置面は2mm間隔で計測を行った。

計測結果より得られた腐食深さのコンター図を図4-14に、当て板設置面の各ボルト孔近傍70mm×70mmの領域の平均腐食深さと腐食深さの標準偏差の関係を図4-3に示す。腐食ウェブの板厚は平均



写真 4-9 大型桁試験体損傷模擬状況



(a) 当て板設置面への Cold Spray 施工状況



(b) Cold Spray 工法施工後の実腐食せん断試験体

写真 4-10 実腐食せん断試験体に対する Cold Spray 施工



写真 4-11 当て板ボルト工法施工後の実腐食せん断試験体

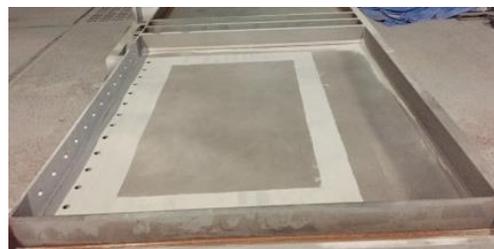


写真 4-12 Cold Spray 施工後の腐食模擬試験体

8.3mmであり、設計板厚9mmから減肉量1mm未満の軽微な腐食損傷であるといえる。一方、腐食凹凸度については、ボルト孔近傍の腐食深さの標準偏差が約1mmと、中型試験体と比較して大きい腐食凹凸を有しているといえる。



写真 4-13 炭素繊維接着状況



写真 4-14 補修後の腐食模擬試験体

新材を用いて製作した腐食模擬せん断試験は、試験対象パネルのウェブ板厚を腐食損傷による減肉を想定して6mmの鋼板 (SM490) を利用した。なお、実腐食せん断試験体と同様に、もう一方のウェブの板厚は32mm、上フランジの板厚は50mmとした。

b) 損傷模擬状況

中型せん断試験体と同様に、実腐食せん断試験体及び腐食模擬試験体の両試験体に対して、ウェブ下フランジの首溶接部とウェブ垂直補剛材の境界部を破断させ、損傷模擬を行った。なお、ウェブ垂直補剛材の境界部の破断高さは75mmとした。破断模擬状況を写真4-9に示す。

c) 下地処理と補修工法

ウェブ下フランジの首溶接部とウェブ垂直補剛材の境界部の破断による耐力低下を補うために、中型せん断試験体と同様に当て板ボルト工法による補修を行った。当て板に用いた高力ボルトはF10TM22とした。当て板設置面の下地処理には、Cold Spray工法を適用した。Cold Spray工法の施工状況を写真4-10に、施工後の試験体状況を写真4-11に示す。

上述したように、実腐食せん断試験体ウェブ鋼板の板厚は、平均8.3mmであり、設計板厚9mmからの



(a) 6000kN 荷重試験機



(b) 荷重試験セットアップ

写真 4-15 荷重試験状況

減肉量がわずかであったため、ウェブ面への補修は行わないこととした。一方、腐食模擬試験体では、ウェブ面の板厚が6mmであるため、この減肉模擬に対する補修を炭素繊維接着により行った。使用した炭素繊維は、高強度 (低弾性) タイプ、目付量600g/m²を用い、片側6層 (計12層) により板厚総計8.4mm相当の補強を施した。炭素繊維接着面に対する下地処理にも、中型せん断試験体と同様にCold Spray工法を適用し、写真4-12に示すように額縁状に施工を行った。炭素繊維接着状況を写真4-13に示す。

また、腐食模擬試験体では水平・垂直補剛材の減厚も模擬しているため、この損傷に対する補修として、当て板ボルト工法により健全時相当まで板厚を回復させた。腐食模擬試験体の補修後の状況を写真4-14に示す。

(2) 荷重方法

荷重試験には最大荷重容量6000kNの大型試験機を利用した。試験状況を写真4-15に示す。支持条件はS1側がピンローラー (可動)、S2側をピン (固定) とした単純支持とした。荷重は試験桁中央のP点に鉛直荷重し、2000kNまでの初期段階では100kNピッチの荷重制御、2000kN以上では0.5~1.0mmピッチの変位制御による漸増荷重にて実施した。

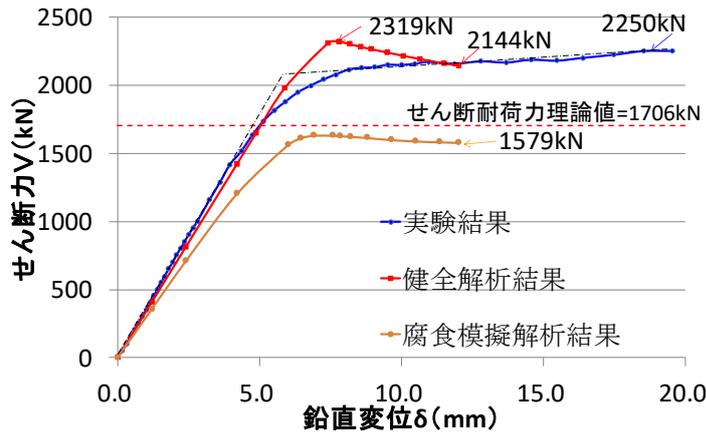


図 4-15 せん断力と鉛直変位の関係
(実腐食せん断試験体+当て板ボルト工法)



写真 4-16 試験終了後のウェブの面外変形状況

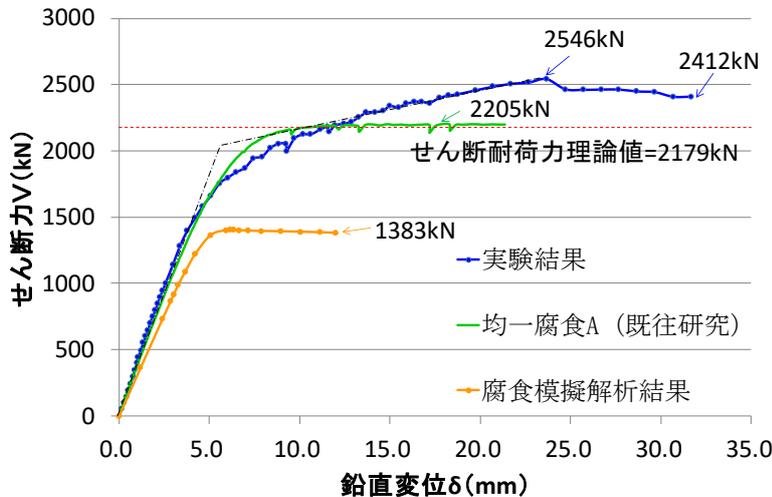


図 4-16 せん断力と鉛直変位の関係
(腐食模擬試験体+当て板ボルト工法+炭素繊維接着工法)

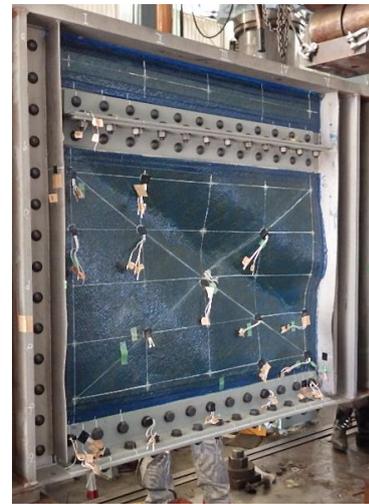


写真 4-17 試験終了後のウェブの面外変形状況

(3) せん断耐力回復効果の評価

a) 当て板ボルト工法による耐力回復効果(実腐食せん断試験体)

実験より得られたせん断力 V と桁中心の鉛直変位 δ の関係を図4-15に、試験終了後の面外変形状況を写真4-16にそれぞれ示す。図中には、ウェブ平均板厚から算出したせん断耐力(後座屈強度)の理論値、事前に実施したFE解析によって得られたせん断力-鉛直変位曲線を併記している。

図4-15に示すとおり、損傷を再現したFE解析結果と比較すると、耐力は大幅に改善されており、当て板ボルト工法により耐力が回復したことが推察される。せん断耐力については、実験値が理論値を上回り、健全時相当の耐力となった。また、最大せん断力到達後も急激に耐力が低下することなく、十分な変形性能を有しているといえる。したがって、実物大の試験体においても当て板ボルト工法により十分な補修効果が得られ、当て板設置面の下地処理としたCold Spray皮膜が耐力の回復効果に悪影響を及ぼすことはないと考えられる。

b) 炭素繊維接着工法による耐力回復効果(実腐食せん断試験体)

実験より得られたせん断力 V と桁中心の鉛直変位 δ の関係を図4-16に、試験終了後のウェブの面外変形状況を写真4-17に示す。図中には腐食せん断試験体と同様にウェブ平均板厚から算出したせん断耐力(後座屈強度)の理論値、損傷模擬モデルのFE解析結果に加え、耐力回復の目安として既往研究で示された均一腐食(腐食板厚8.1mm)のせん断力-鉛直変位曲線も併記している。

図4-16に示すとおり、損傷を再現したFE解析の結果に対し、大幅に耐力が回復したことが推察され、また、せん断耐力の実験値が理論値を上回っている。さらに、既往研究で得られた均一腐食の耐力を上回り、塑性域に達してもせん断力は徐々に上昇し、急激な耐力の低下なく、変形も追従する結果が得られた。また、当て板ボルト部の急激なずれ変位やボルトの破断などは見られなかった。これより、炭素繊維接着工法の下地処理として、Cold Spray工法を適用した場合においても、当て板ボルト工法の場合

合と同様に、Cold Spray皮膜が耐荷力の回復効果に悪影響を与える可能性は低いと考えられる。

4.4 まとめ

本章では、鋼橋の腐食部位に対する補修工法として当て板ボルト工法と炭素繊維接着工法を取り上げ、その防食下地処理としてCold Spray工法を適用した場合のCold Spray皮膜が耐荷力の回復効果に及ぼす影響の検討を行った。なお、補修対象は腐食鋼桁端部に生じるウェブ下フランジ首溶接部の破断、ウェブ垂直補剛材境界部の破断及びウェブの減肉とした。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) ウェブ下フランジ破断に対して当て板補修を行い、せん断耐荷力試験を行った結果、破断により失われた耐荷力が回復する。ウェブ面に炭素繊維接着工法を行った場合、積層数を増やすことで耐荷力が向上する傾向が得られた。
- 2) 当て板ボルト工法の摩擦面及び炭素繊維接着工法の接着面の防食下地としてCS工法を適用した結果、本研究で用いた腐食凹凸程度得あれば2種ケレンと同程度以上の耐荷力回復効果を

有することが示唆され、CS工法を各補修工法の防食下地処理としての適用可能性が確認された。

- 3) 腐食凹凸ウェブ面にCS工法を適用し炭素繊維接着工法を施したところ、最大荷重発生後に炭素繊維接着面の防食下地にCold Spray皮膜を用いる場合、適用可能な腐食凹凸度について十分な検討が必要である。

参考文献

- 1) 下里哲弘, 玉城喜章, 有住康則, 矢吹哲哉, 小野秀一, 三木千壽: 実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断強度特性に関する実験的研究, 土木学会論文集A1, Vol.70, No.3, 359-376, 2014.
- 2) 土木学会 鋼構造委員会: 鋼構造シリーズ23 腐食した鋼構造物の性能回復事例と性能回復設計法, 2014.8.
- 3) 下里哲弘, 長坂康史, 矢吹哲哉, 有住康則: 腐食鋼桁端部の性能回復技術に関する基礎的実験, 鋼構造論文集, Vol.62A, pp.559-570, 2016.
- 4) 土木学会: 座屈設計ガイドライン(2005年度版), 2005.

第5章 結論

本研究では、腐食損傷を受けた鋼桁端部の性能回復を目的に、現場施工性と高い防食性および十分な耐久性を有する表面処理技術を開発することを目的に、Cold Spray工法に着目し、腐食鋼板に対するCold Spray防食皮膜の成膜特性を明らかにし、実腐食橋梁での実証試験を行い、現場適用性及び防食効果の評価を行った。また、鋼桁端部の損傷部位に対する補修工法の防食下地としての適用性の検証を耐荷力の回復効果より検証した。以下に本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 腐食した鋼材に対するCold Spray表面処理技術の防食性能の評価
 - 1) さび鋼板面に対して、亜鉛アルミナ混合粉体を用いたCS施工を実施することで、アルミナが鋼材表面にアンカーのように食い込み、その隙間に亜鉛が入りこむことで皮膜形成され、その結果、強固な密着力を有する亜鉛皮膜が形成されることが明らかとなった。
 - 2) さび面に対してCS施工を実施した場合、残存さび上に亜鉛皮膜が形成されるが、このような鋼材さび残存状態であっても犠牲防食作用を発揮可能であり、高い防食効果が得られるものと考えられる。
 - 3) 腐食面に対するCS皮膜の密着力は、アルミナ配合比率30%以下で著しく低下する。CS皮膜厚は目標膜厚100 μ m以上とすると、亜鉛の配合比率が40%以上で満足する。最大膜厚が確保でき、高い密着力が得られる粉体配合比率は亜鉛：アルミナ（60：40）である。
 - 4) 初期錆厚が厚くなるほど、CS工法の成膜性は低下する。CS施工を実施するにあたり、初期錆厚100 μ m以下まで事前にケレンを行うことが望ましい。
 - 5) 施工角度が低下するほど成膜性は低下するため、施工角度は、施工面に対して90°を基本とする。
 - 6) 各種エクステンションを適用しても、CS工法に

より成膜形成が可能である。ただし、エクステンションを組み合わせて装着した場合、膜厚が薄くなる傾向にあるため、現場施工の場合には、施工速度の低速化や重ね施工などの工夫が必要になると考えられる。

- 7) TFノズル（径：7mm）はオリジナルノズル（径：5mm）に比して粒子速度が小さくなるが、TFノズルはオリジナルノズルと比べて膜厚は厚くなり、密着力は同程度以上の性能を発揮することが確認された。なお、TFノズルによる膜厚が厚くなった要因としては、オリジナルノズルに比べてパウダー供給量が多くなったためであると考えられる。
- 8) 施工速度が大きいほど、皮膜厚が低下する傾向が認められた。しかしながら、施工速度15mm/sまでは管理膜厚を満足する結果が得られた。これより、現地施工においては、施工環境が良好で腐食損傷が激しくない下フランジ上面やウェブ面などに対しては、施工速度10mm/s及び15mm/sの適用が可能と考えられる。一方、激しい腐食部位や狭隘な施工環境（支承部など）に対しては、成膜性・効率性・防食性の確保の観点から、施工速度5mm/sが最も望ましい施工速度であると考えられる。
- (2) 腐食した鋼桁端部におけるCold Spray工法の実証試験
 - 1) 施工条件良好箇所（下フランジ上面など）へのCS施工では、直線型のノズルを用いることで、室内試験同様に現場においても十分な密着力を有する亜鉛皮膜の形成が可能であることを実証した。
 - 2) 施工困難箇所（狭隘部）へのCS施工では、各種エクステンションを適用することで、鋼材錆残存状態においても強固な密着力を有する亜鉛皮膜の形成が十分可能であり、現場においても各種エクステンションを装着することで、施

工困難箇所においても CS 施工が十分適用可能であることを実証した。

- 3) 施工条件良好箇所（下フランジ上面）では，専用のルール・冶具を用いることで，半自動化施工装置を適用することが可能であった。施工半自動化により，作業者への負担が大幅に低減し，施工面積が大きい場合でも長時間連続施工を実施することが可能である。そのため，従来の手動施工に比べて施工効率が大幅に向上すると思われる。また，安定した施工を長時間実施可能なため，均質な亜鉛皮膜の形成が可能であり，成膜品質も大幅に向上した。
- (3) Cold Spray 皮膜を防食下地とした鋼桁端部の耐荷力回復効果の評価
 - 1) ウェブ下フランジ破断に対して当て板補修を行い，せん断耐荷力試験を行った結果，破断により失われた耐力が健全相当まで回復することが示唆された。ウェブ面に炭素繊維接着工法を行った場合，積層数を増やすことで耐力が向上する傾向が得られた。
 - 2) 当て板ボルト工法の摩擦面及び炭素繊維接着工法の接着面の防食下地として CS 工法を適用した結果，本研究で用いた腐食凹凸程度であれば 2 種ケレンと同程度以上の耐荷力回復効果を有することが示唆され，CS 工法を各補修工法の防食下地処理としての適用可能性が確認された。
 - 3) 腐食凹凸ウェブ面に CS 工法を適用し炭素繊維接着工法を施した場合，最大荷重発生後に炭素

繊維の剥離が生じ，急激な耐力低下が生じたため，炭素繊維接着面の防食下地に Cold Spray 被膜を用いる場合，適用可能な腐食凹凸度について十分な検討が必要である。

以上の結果を踏まえて，今後の展望と道路政策の質の向上への寄与について以下に示す。

- 1) 十分なケレン作業が実施できない鋼桁端部のような狭隘箇所に対して，各種エクステンションを用いた Cold Spray 工法を適用することにより，鋼材残存状態においても高耐食性を発揮することが可能であり，鋼橋の長寿命化に期待できる。
- 2) 当て板ボルト工法及び炭素繊維接着工法における補修面の防食下地とした CS 皮膜が，耐荷力回復効果に及ぼす影響は小さく，素地調整効果は 2 種ケレンと同程度以上の効果を有すると思われる。これより，補修箇所の再劣化を抑制し，補修箇所の高耐久化が期待できる。
- 3) 桁端部の破断部位に対する当て板ボルト補修に関しては，本研究で検討を行った程度の腐食凹凸度程度であれば，腐食凹凸面の平滑化を目的とした表面処理を行うことなく，十分な耐荷力回復効果が期待できる。今後，各腐食凹凸度に対する適用範囲を検討することで，補修・補強の省力化につながり，効率的な維持管理の適用における重要なデータとなる。