

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「橋梁鋼構造物の施工現場における高力ボルト接合部への
長期防錆金属溶射施工技術の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成23年 9月

委託者	中部経済産業局
委託先	財団法人富山県新世紀産業機構
再委託先	シーケー金属株式会社 株式会社新免鉄工所 富山県工業技術センター

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 サブテーマ①金属溶射が可能な熔融亜鉛めっき技術の開発
 - (1) 研究課題及び成果目標
 - (2) 実施内容
 - (3) 研究成果
- 2-2 サブテーマ②接合部の性能調査
 - (1) 研究課題及び成果目標
 - (2) 実施内容
 - (3) 研究成果
- 2-3 サブテーマ③小型接合試験体での溶射皮膜の性能調査
 - (1) 研究課題及び成果目標
 - (2) 実施内容
 - (3) 研究成果
- 2-4 サブテーマ④狭隘部溶射施工のための溶射ガンの改良
 - (1) 研究課題及び成果目標
 - (2) 実施内容
 - (3) 研究成果
- 2-5 サブテーマ⑤実施工を想定した高力ボルト接合体の評価モデル
 - (1) 研究課題及び成果目標
 - (2) 実施内容
 - (3) 研究成果

第3章 全体総括

- 3-1 成果の総括
- 3-2 今後の取り組み

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

近年、我が国の財政状況の低迷を受け、インフラ整備において橋梁等の鉄鋼構造物には、長寿命化及びライフサイクルコスト低減のニーズが急速に高まっている。長寿命化の最大の課題は防錆性能を高めることであり、かつライフサイクルコストの低減には塗装仕様から長期防錆効果が期待できる金属溶射仕様が求められている。現在、橋梁分野では橋梁躯体は、工場内での溶射施工により実用化しているが、躯体締結部であるボルト接合部においては、組み立て現場でのボルト締結部への溶射施工技術が確立していないため、溶融亜鉛めっきボルトで対応しており、長期防錆達成の課題となっている。本研究は構造物全体の長寿命化・維持管理の軽減を飛躍的に向上させるために接合部の高力ボルトに金属溶射ができる技術を開発する。

(2) 研究目的及び目標

橋梁等の鋼構造物については、長期防錆のため躯体に対して工場内で金属溶射施工が実施されている。しかし、橋体の現場組み付けにおいては、高所作業に適した溶射装置を用いた狭隘部のボルトへの溶射施工技術がないため、現状では、橋体の接合部においては亜鉛めっきボルトの使用に留まり、鋼構造物全体の長期防錆が達成できていない。

本研究では、高所作業現場で溶射を可能にする締結ボルトへの溶融亜鉛めっきによる下地処理技術及び小型可搬溶射ノズルの開発による溶射施工技術を確立する。そして、開発技術による実施工を想定した高力ボルト溶射接合体モデルを試作し、施工確認試験や耐食性試験による評価を実施する。このため下記5項目のサブ研究課題に取り組むこととする。

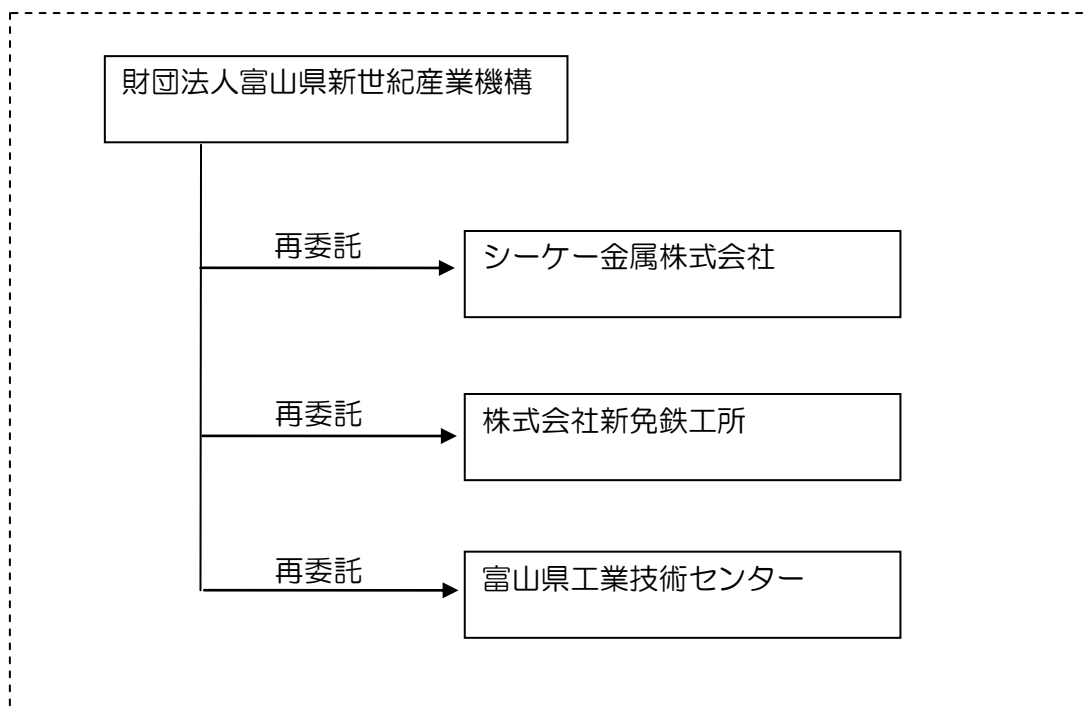
- ① 金属溶射が可能な溶融亜鉛めっき技術の開発
- ② 接合部の性能調査
- ③ 小型接合試験体での溶射皮膜の性能調査
- ④ 狭隘部溶射施工のための溶射ガンの改良
- ⑤ 実施工を想定した高力ボルト接合体の評価モデル

本研究における最終的な技術目標値を下記に示す。

項目	技術目標値
1.溶射皮膜設計	自然電位： 母材>めっき>溶射膜
2.溶射層密着力	4.0N 以上
3.ボルト締結	120° 回転接合 滑り試験(摩擦係数 0.4)
4.複合サイクル試験	3600 時間防錆

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

（1）研究組織



総括研究代表者（PL）

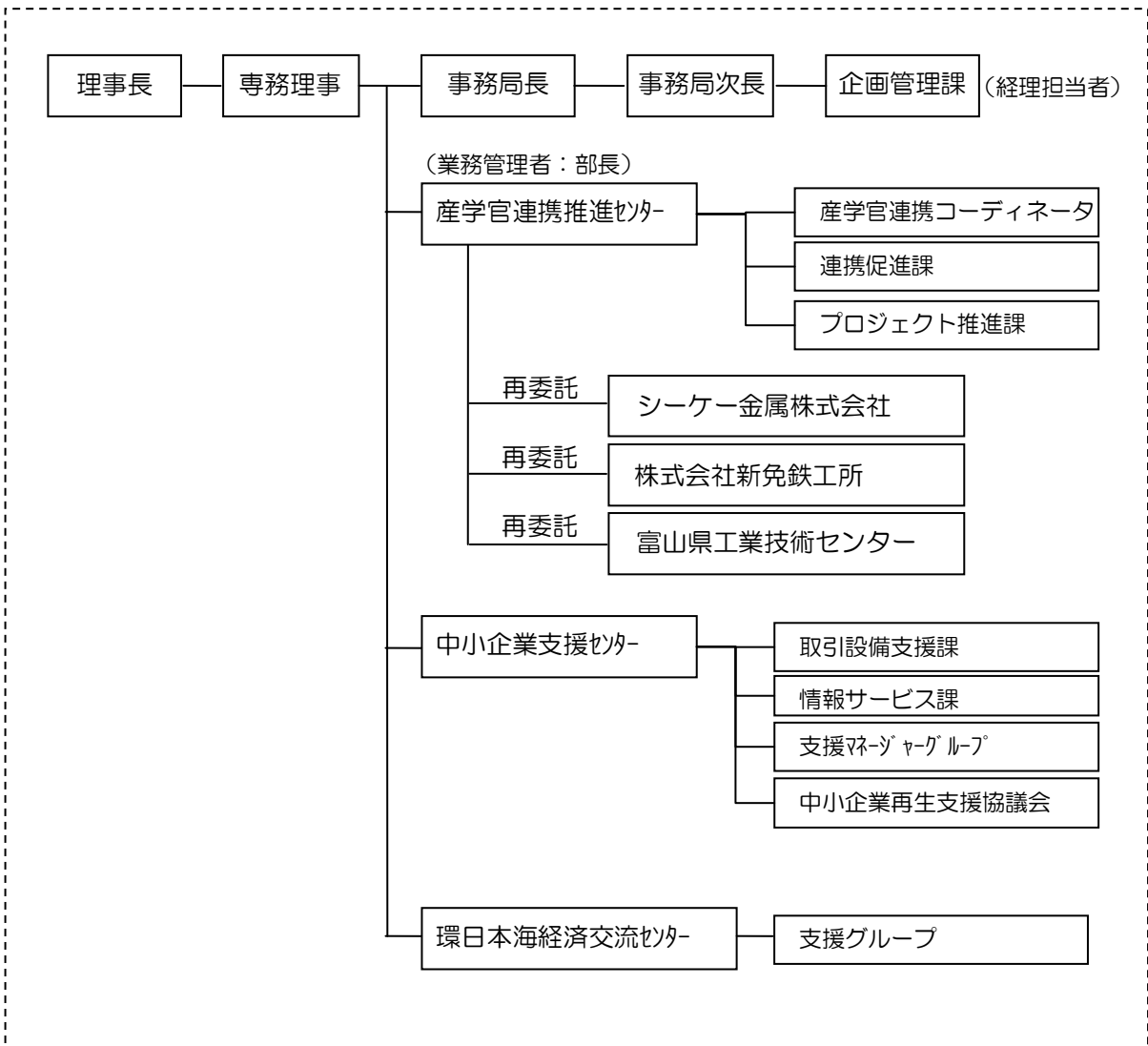
シーケー金属株式会社
取締役 技術部長 大橋 一善

副総括研究代表者（SL）

株式会社新免鉄工所
取締役 開発部長 新免 僖秀

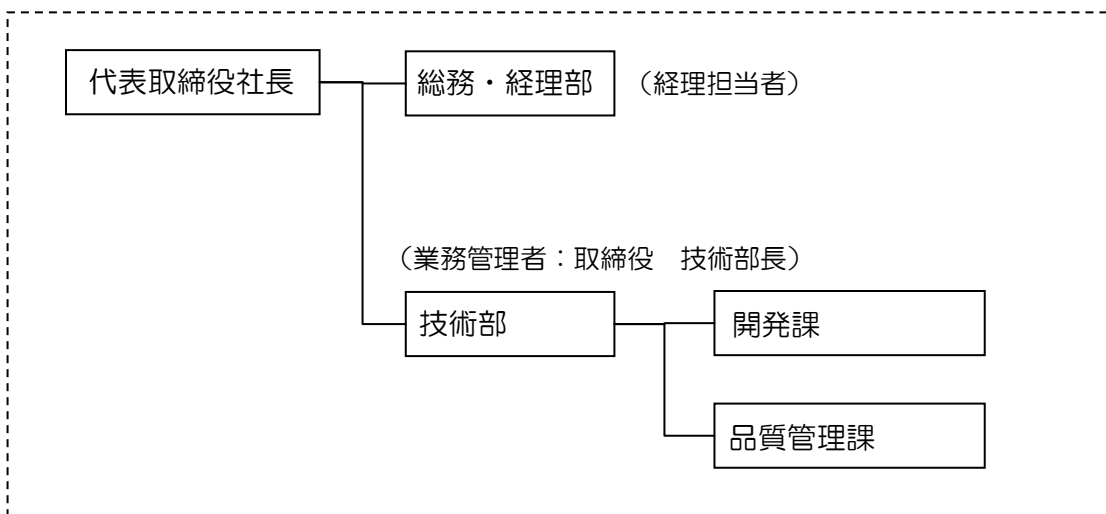
管理体制①事業管理機関

[財団法人富山県新世紀産業機構]

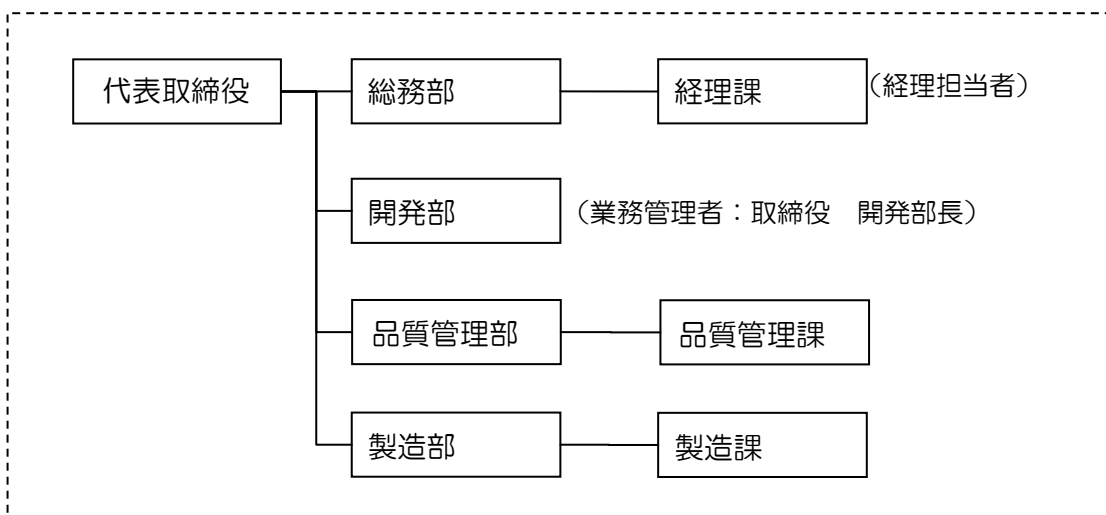


管理体制②再委託先

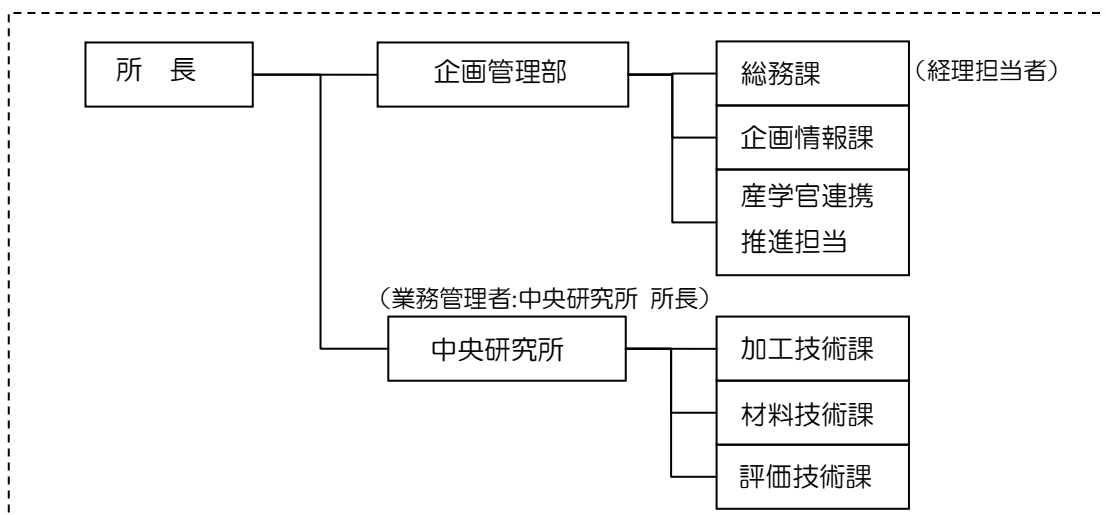
[シーケー金属株式会社]



[株式会社新免鉄工所]



[富山県工業技術センター]



(2) 研究者氏名

シーケー金属株式会社

氏名	所属・役職
大橋 一善	取締役 技術部長
坂 秀樹	技術部 品質管理課長
吉田 守	技術部 品質管理課 係長
森田 一也	技術部 品質管理課 課員
西田 雄治	技術部 開発課 課員

株式会社新免鉄工所

氏名	所属・役職
新免 僖秀	取締役 開発部長
葭本 俊介	品質管理部長
有田 豊	品質管理部 品質管理課 課員
石田 武志	製造部 製造課 課員
高塚 哲郎	品質管理部 品質管理課 課員
福島 正一	富山事業所 所員

富山県工業技術センター

氏名	所属・役職
富田 正吾	中央研究所 加工技術課 課長
山岸 英樹	企画管理部 産学官連携推進担当 主任研究員
柿内 茂樹	中央研究所 加工技術課 主任研究員

(3) 協力者

川田工業株式会社 橋梁事業部 技術提案室 部長 米田 達則
川田工業株式会社 富山工場 製造課 課長代理 早川 清
川田工業株式会社 富山工場 生産技術二課 課長代理 滝谷 茂生
株式会社NSボルテン 製造本部 技術部長 畑中 清
株式会社NSボルテン 本社技術管理課 東京試験所 東京試験所長 原田 宏明
北陸電力株式会社 電力流通部 課長 高田 勉
北陸電力株式会社 電力流通部 課長代理 河野 義弘

1-3 成果概要

(1) サブテーマ①金属溶射が可能な溶融亜鉛めっき技術の開発

- ① 試験体において、10日間の屋外暴露後に溶射を行っても、溶射皮膜の密着力が4.0N以上となる下地亜鉛めっきを開発した。
- ② 評価モデルに締結後1ヶ月間の屋外暴露を行っても、良好な密着性のある溶射皮膜を形成することが出来るボルト、ナット、座金を開発した。

(2) サブテーマ②接合部の性能調査

- ① 120°回転接合が可能である下地亜鉛めっきを施したボルト、ナット、座金を開発した。
- ② 下地亜鉛めっきを施したボルト、ナット、座金において、トルク係数、 $n-\theta$ 、機械的特性を評価したところ、全ての項目において性能基準を満足しており、従来のめっきボルトと同等以上であることを確認した。
- ③ すべり試験で摩擦係数0.4以上の接合耐力の確認についてはボルト、ナット、座金の性能よりも鉄板の状態、表面粗さ、硬さ、密着度が大きく影響していることが分かったが、ガス溶射においてAl-Mg、Zn-Alの溶射材ともに摩擦係数0.4以上の値となり、すべての接合性能基準を満足した。

(3) サブテーマ③小型接合試験体での溶射皮膜の性能調査

- ① 専用締込み機によって発生したナット六角部の治具傷においては、そのまま溶射しても溶射皮膜の剥れは無く、目視では良好な溶射皮膜が形成されていた。
- ② ボルト、ナット、座金部と躯体部分を完全に区分できるマスキング方法を確立することは出来なかったため、マスキング不足によって発生する重ね塗り部分及び未溶射部分が発生した試験体の耐食性を実機試験及び促進試験を実施中である。
- ③ 実機試験及び促進試験（キャス試験、複合サイクル試験）において耐食性を評価しており、現在のところ、亜鉛めっき仕様のボルトには赤錆の発生が見られることから、この度の溶射可能なめっきボルトを用いた工法は従来の工法よりは耐食性に優れていると判断される。
- ④ 調整した化学成分のめっき皮膜が、各種溶射皮膜より高い表面電位となっており、電位順列が鉄地>下地めっき（亜鉛めっき）>各種溶射皮膜となり中性領域での表面電位では犠牲防食効果があることを確認した。

(4) サブテーマ④狭隘部溶射施工のための溶射ガンの改良

- ① ガスフレーム溶射ガンを改良して、平面部に取り付けられている締込後ボルト頭部及びナット部へ、均一かつ迅速に施工するため、偏心回転型延長ノズル溶射ガンを開発した。
- ② コーナー部に取り付けられている締込後ボルト頭部及びナット部へ、溶射施工を可能にするため、小型延長ノズル溶射ガンを開発した。

(5) サブテーマ⑤実施工を想定した高力ボルト接合体の評価モデル

- ① 改良開発した溶射ガンで、実施工を想定した試験体に対して溶射施工ができることを確認した。
- ② 改良開発した溶射ガンでの溶射施工を行い、施工時間、溶射皮膜厚み等などにおける今後の課題を確認した。
- ③ 締込後ボルト頭部及びナット部に対して、実施工と同条件での溶射施工が出来ることを確認した。
- ④ 改良開発した溶射ガンにより形成された組付後の座金、ボルト及びナットの各境界における溶射皮膜の密着性を確認し、当該箇所についても安定した皮膜を形成可能となった。
- ⑤ 改良開発した溶射ガンにより形成された溶射皮膜の密着性、防錆性能を確認するため、実環境における長期暴露用の試験ボルトを設置し、溶射施工した。(長期暴露とは、年単位での確認であるため、腐食度合いの確認等は期間後も行う必要がある。)

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(1) 事業管理機関

法人名：財団法人 富山県新世紀産業機構（代表者 理事長 石井隆一）
住 所：〒930-0866 富山県富山市高田529番地
連絡担当者名、所属役職名：藤城 敏史 産学官連携推進センター部長
TEL：076-444-5636 FAX：076-444-5630
e-mail：fjk@tonio.or.jp

(2) 総括研究代表者（PL）

氏 名：大橋 一善
組織名：シーケー金属株式会社
所属役職名：取締役 技術部長
TEL：0766-22-4604 FAX：0766-22-5830
e-mail：oohashi@ckmetals.co.jp

(3) 副総括研究代表者（SL）

氏 名：新免 僖秀
組織名：株式会社新免鉄工所
所属役職名：取締役 開発部長
TEL：06-6471-9555 FAX：06-6471-9015
e-mail：yoshi@shinmen-tekko.co.jp

(4) 研究実施者

機関名	代表者役職氏名	連絡先
シーケー金属株式会社	代表取締役社長 釣谷 宏行	〒933-0983 富山県高岡市守護町2-12-1 TEL : 0766-22-4604 FAX : 0766-22-5830 E-mail : oohashi@ckmetals.co.jp
株式会社新免鉄工所	代表取締役社長 新免 俊典	〒555-0013 大阪府大阪市西淀川区千舟3丁目9-7 TEL : 06-6471-9555 FAX : 06-6471-9015 E-mail : yoshi@shinmen-tekko.co.jp
富山県工業技術センター	所長 榎本 祐嗣	〒933-0981 富山県高岡市二上町 150 番地 TEL : 0766-21-2121 FAX : 0766-21-2402 E-mail : tomida@itc.pref.toyama.jp

第2章 本論

2-1 サブテーマ①金属溶射が可能な溶融亜鉛めっき技術の開発

(1) 研究課題及び成果目標

【研究課題】

従来の橋梁や鉄鋼構造物の躯体においては、長期防錆を目的に金属溶射仕様になっているが、躯体接合部のボルト・ナットのみが溶融亜鉛めっき仕様となっており、鉄鋼構造物全体の長期防錆効果が保てていなかった。このボルト・ナットに金属溶射を行うことで、構造物の躯体と同等の長期防錆を付与する技術を確立する。

現場で高力ボルトに溶射するためには、高力ボルト締め付け後に溶射が付着するための下地を形成する工程があり、従来技術では現場ブラスト後三時間以内に溶射を施す必要があった。しかし、実際にはそのような設備の設置と施工量への追従はできない。また現場では、締め付け後の雨水等による発錆は避けられず、溶射施工を困難にしている。そこで、本開発では現場で高力ボルトを締め付け後、雨水等の影響を受けないで溶射が可能な溶融亜鉛めっきを下地とした溶射用高力ボルトを開発する。

※1 2003年4月に土木構造物常温溶射研究会から発行された「鋼橋の常温金属溶射設計・施工・補修マニュアル(案)」に溶射皮膜にとって好ましい密着性は4.0N と記載。

【成果目標】

- ① 表面調整した下地溶融亜鉛めっきを1ヶ月間の屋外暴露後に、溶射しても密着力が4.0N以上であること。
- ② 溶射皮膜構造が、ボルトの母材(躯体)→下地溶融亜鉛めっき(溶融亜鉛めっき)→溶射皮膜の順番で自然電位が低くなっていること。(サブテーマ③で報告)

(2) 実施内容

従来の溶融亜鉛めっきへの溶射は、溶射皮膜の密着性が十分でないため剥れてしまう。これは、溶融亜鉛めっき加工の際に不可欠なCd、Pbと言った低融点金属が、めっき皮膜に固溶する事無く点在しており、溶射の際の溶射熱によって溶解又は気化することで溶射材が弾かれるためである。この低融点金属の含有量を低減することで、密着性を向上させた。

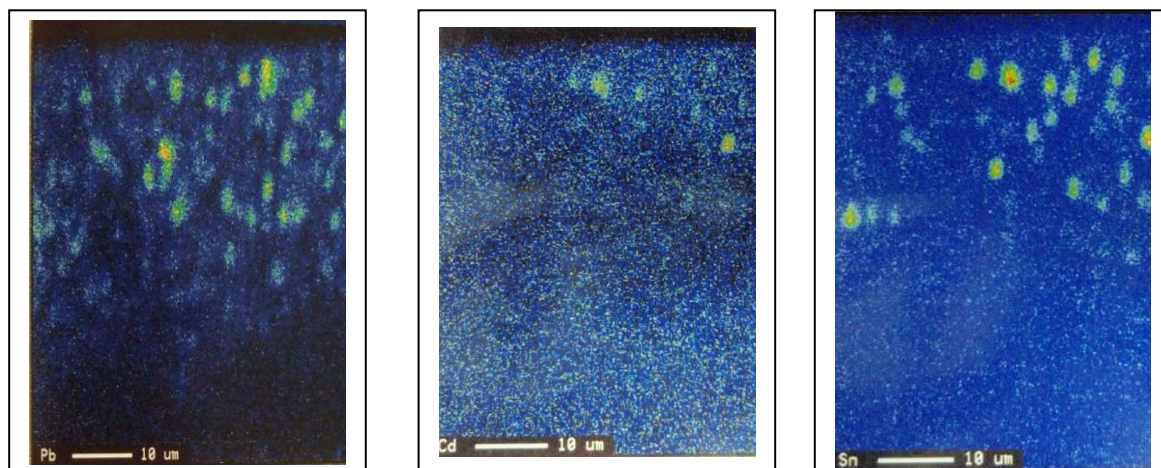


写真-1 従来の溶融亜鉛めっきへの溶射

① 従来の溶融亜鉛めっき皮膜における密着不良の原因調査

(a) 低融点金属による密着性の影響

従来の溶融亜鉛めっき皮膜には、Pb、Cd、Sn といった低融点成分が比較的多く含有している。これらの低融点成分は、Zn と化合物を作らずに、局部的に濃度の高い状態で点在しているために、溶射時の熱でこれらの低融点成分が融解またはガス化し、溶射皮膜の密着性を低下させていると推定される。



めっき皮膜中の Pb

めっき皮膜中の Cd

めっき皮膜中の Sn

写真-2 溶融亜鉛めっき皮膜中における低融点元素

従来の溶融亜鉛めっき皮膜に対して DSC 測定（融解熱分析）を行ったところ、300℃以下で融解するものが確認された。このことから、溶射材によりめっき皮膜の最表面において、低融点金属が融解して溶射材の密着性を低下させていると想定されるため、低融点金属の含有量を出来る限り減少させる必要がある。

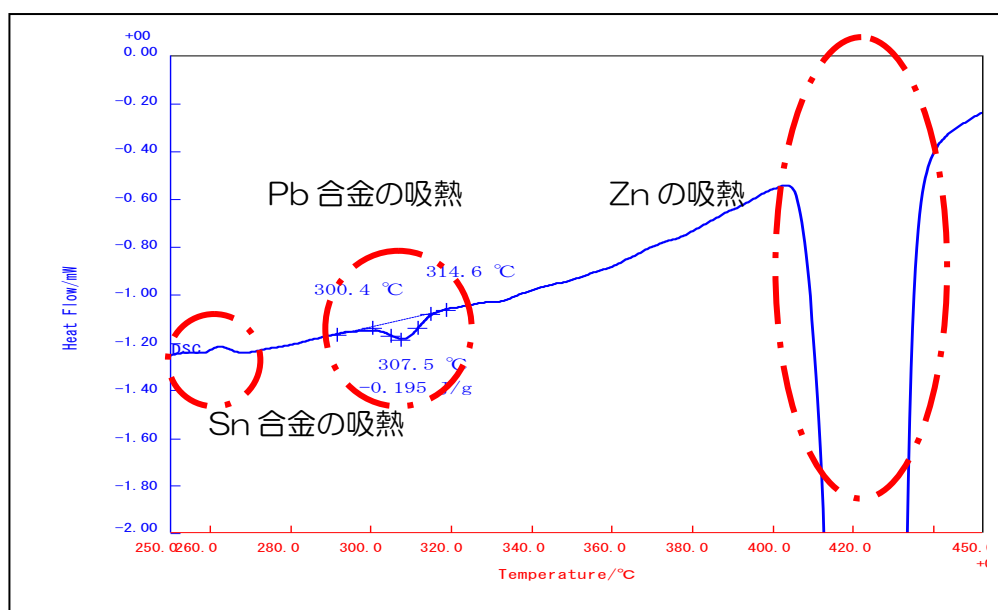


図-1 従来の溶融亜鉛めっき皮膜の DSC 測定結果

②溶融亜鉛めっき皮膜中の含有元素による密着性改善

Pbは、めっきタレ性、隙間への浸透性といっためっき加工性を向上させるためにあえて投入している元素である。そこで、Pbと同様にめっき加工性を向上させる金属元素であるBiを代替元素としてめっき浴に投入した。BiはPbに比べめっき浴中の含有量が1/20程度で、十分なめっき加工性を有するため、Pbの代替金属としてBiを添加することでめっき皮膜中の低融点金属含有量を低減することができる。

しかし、Biは亜鉛より貴な金属であるため、めっき表面に多く分布すると亜鉛の酸化が顕著に発生し、めっき皮膜表面の腐食生成物の発生を促進させる。腐食生成物が発生すると溶射材を弾くなど、溶射皮膜の密着力低下の原因となるため対策が必要となる。そこで、腐食生成物の発生を抑制するためにAl及びCuを添加した。Cuの投入量を調整することで密着性を向上させることが出来た。しかし、亜鉛めっき自体が酸化しやすいため、目標密着力4.0N以上をクリアするためにはめっき皮膜の化学成分調整に加え、溶射面の素地調整や表面処理などによりさらに腐食性生物の発生を抑制する必要がある。なお、密着力の評価は、溶射面に専用治具（ドリル）を接着して、専用の引張り試験機（テクノテスター）で専用治具を引張り、被溶射面から溶射皮膜が剥離する力を測定して行っている。

表-1 各めっき皮膜成分における溶射皮膜の密着性

No.	めっき浴の化学成分(wt%)	溶射皮膜の密着力(N)
1	従来亜鉛めっき(Pb:1.0+ Al: 0.005+ Cu)	剥離
2	電気亜鉛のみ+Bi	剥離
3	電気亜鉛+Bi +Al(0.005)	剥離
4	電気亜鉛+Bi +Al(0.005)+Cu(a)	0.84
5	電気亜鉛+Bi +Al(0.005)+Cu(a×4倍)	2.3
6	電気亜鉛+Bi +Al(0.005)+Cu(a×10倍)	3.2

※1 めっき加工後ブラストなしで溶射した試験体の密着力

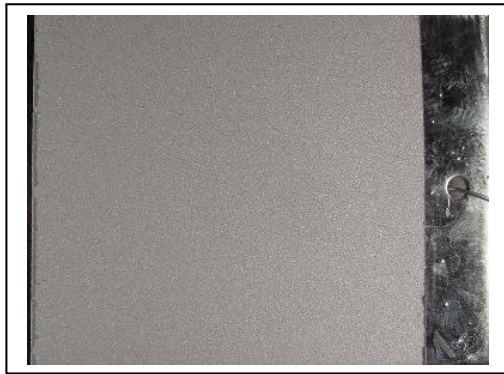


電気亜鉛のみ

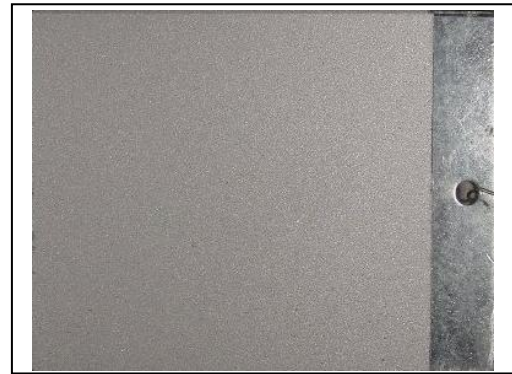


電気亜鉛+Bi+Al(0.005)

写真-3 各めっき皮膜における溶射皮膜の状態



電気亜鉛+Bi+Al(0.005)+Cu(0.05)



電気亜鉛+Bi+Al(0.005)+Cu(0.5)

写真-3 各めっき皮膜における溶射皮膜の状態

③溶射下地処理（プラスト処理）による溶射密着力の改善

溶射は、被覆対象物に対して物理的に付着するため、溶射皮膜の密着性は被覆対象物の粗面化処理の状態に大きく影響を受ける。また、溶射方法（溶射工法、溶射材）によっても溶射皮膜の密着力が異なる。特にボルト、ナットといった複雑形状のものに対しては、溶射方法によって顕著な密着力の差が見られる。

3種類の溶射方法で溶射を行い、表-2の条件のボルト・ナット・座金に溶射ができるか確認した。その結果、Al-Mg+ガス工法は他工法に比べ密着しにくく、剥がれてしまった。

表-2 溶射方法及び被溶射体による溶射皮膜の密着性結果

No.	溶射工法	溶射材	ボルト	ナット	座金
1	ガス	Zn-Al	密着 OK	密着 OK	密着 OK
2	ガス	Al-Mg	剥離あり	剥離あり	密着 OK
3	プラズマ	Al-Mg	密着 OK	密着 OK	密着 OK

※被溶射面の粗さ：Ra≒6μm


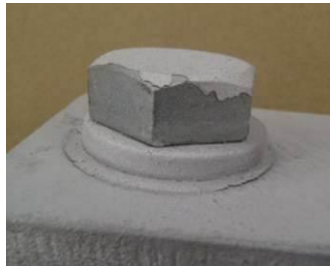




	Zn-Al ガス	Al-Mg ガス	Al-Mg プラズマ
ボルト			
ボルトねじ・ナット			

写真-4 溶射方法及び被溶射体による溶射皮膜の状態

めっき皮膜の表面にアンカーパターンを作ることによって、溶射の密着性を向上させることを検討した。試験体は、表-1No.4の化学成分のサンプルを使用した。試験結果を表-3に示す。

めっき皮膜に適切な粗さのアンカーパターン ($Ra \approx 9 \mu m$) を付ける事で、溶射材 Al-Mg、溶射工法ガスを用いた場合でもボルト、ナット、座金に対して剥離の無い溶射皮膜を形成することが出来た。

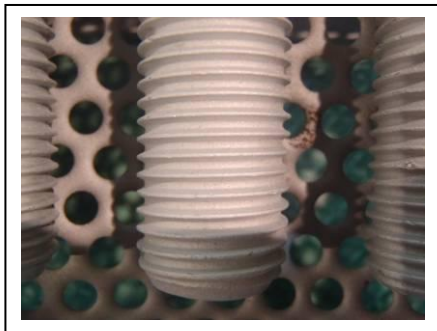
表-3 被溶射面の表面粗さと溶射皮膜の密着性

ブラスト材 (研掃材WA)	めっき 剥離	表面粗さ (μm)		Zn-Al+ガス溶射
		Ra ^{*2}	Rz	
#24	無し	20	100	密着力 OK
#46	無し	9	55	密着力 OK
#60	無し	6	40	密着性不十分
#100	無し	2	10	剥離が見られた

しかし、めっき皮膜へのアンカーパターンはブラスト処理により行ったが、アンカーパターンを深く作るためには、粗い研掃材を使う必要があるが、粗い研掃材を使用した場合には、研掃材の衝撃によりめっき皮膜が剥れるため、適度な研掃材を選定する必要があった。従来のめっきボルトでは必要粗さを得ることが出来なかったため、鉄素地とめっき皮膜の密着性を向上させためっき皮膜を施したボルトを作製して、めっき表面に $Ra > 9 \mu m$ のアンカーパターンを付けた。

表-4 めっき前の素材表面粗さとめっき皮膜の密着性

ブラスト材	Ra(Rz) μm	ボルトのめっき状態	
		従来のめっき	改良しためっき
#46	9 (55)	剥離有り	剥離無し
#60	6 (40)	剥離有り (小)	剥離無し
#100	2 (10)	剥離無し	剥離無し



めっき皮膜へのブラスト状態 (ボルトネジ) めっき皮膜へのブラスト状態 (ナット)

写真-5 $Ra \approx 9 \mu m$ でブラストした改良めっきの表面



溶射後のボルト・ナット



溶射後のボルト

写真-6 Ra≒9μmのめっき表面への溶射状態

④被溶射面への溶射角度

一般的な溶射方法は、被溶射体に対して 90° の角度で溶射を行うが、今回の被溶射体は、ボルト、ナットといった複雑形状であるため、被溶射面に対して最適な角度 (90°) で溶射をすることが出来ない。そこで、溶射角度を 45° と 90° で溶射した試験体を作製し、溶射皮膜の密着性が溶射角度にどの程度するか調査した。

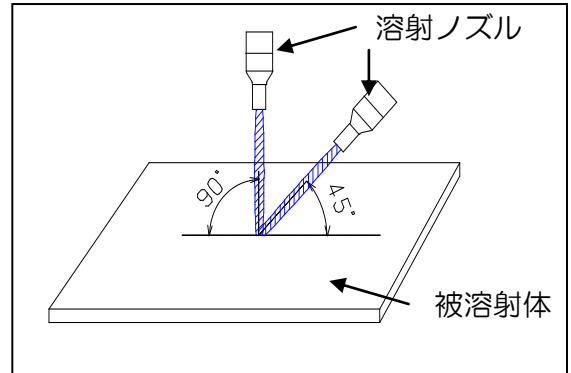


図-2 溶射角度

●密着力試験 (アドヒージョンテスト)

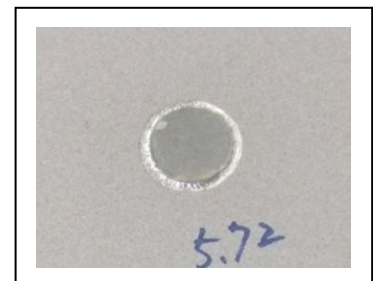
溶射面に専用治具 (ドリ) を接着して、専用の引張り試験機 (テクノテスター) で専用治具を引張り、被溶射面から溶射皮膜が剥離する密着力を測定する。



引張り試験風景



試験体に取り付けた専用治具



引張り試験後の試験体

写真-7 アドヒージョンテスト

溶射角度を 45° と 90° に変更して、密着力を測定したが、溶射角度による違いは確認できなかった。このことから溶射角度が 45° から 90° の間では大きな密着力の違いはなく、溶射角度をこの範囲にすることで溶射角度による密着力の低下はないと思われる。※1 従来の溶射ガンを使用。※2めっき化学成分：表 1No.4、プラスト粗さ：Ra≒9μm

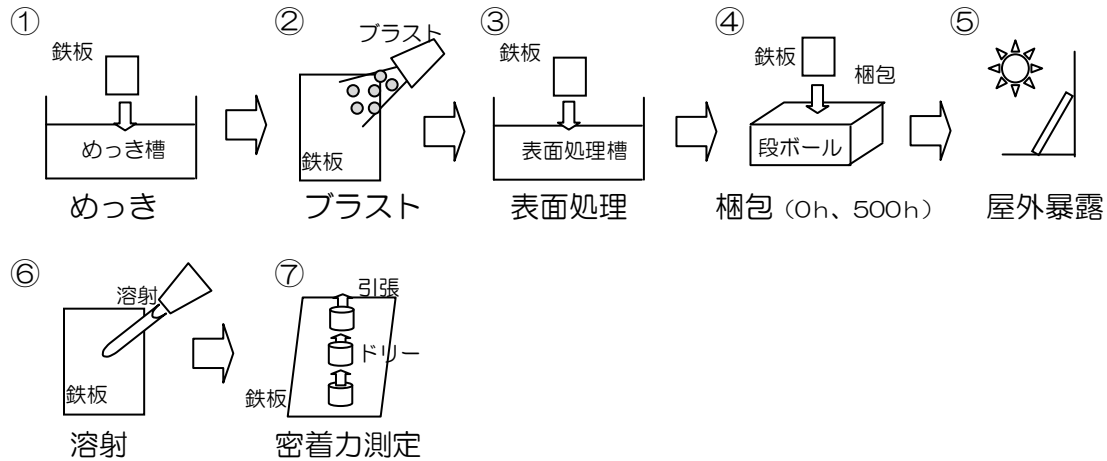
表-5 各溶射方法における溶射角度と溶射皮膜の密着力

溶射の種類	溶射材	溶射角度	密着力(N)
ガス	Zn-Al	45°	3.9
		90°	4.4
	Al-Mg	45°	4.5
		90°	4.1
プラズマ	Al-Mg	45°	-
		90°	(8.4)

⑤めっき加工後から溶射するまでの保管期間

溶融亜鉛めっき加工後、0h、500h、1000h 後梱包状態で保管したものを 10 日間の屋外暴露したのに対して密着力測定を行った。

●試験体の作製手順



梱包期間 500h の方が密着力が良い結果となった。これは、梱包期間より 10 日間の暴露期間中の天候による影響が大きかったと思われる。梱包期間が 0h の試験体は 500h の試験体より、10 日間の暴露期間中に雨の日が多く暴露条件が悪かったと思われる。

表-6 各溶射方法における保管期間と溶射皮膜の密着力

溶射の種類	溶射材	溶射角度	密着力 (N)	
			0h	500h
ガス	Zn-Al	45°	3.9	5.6
		90°	4.4	5.6
	Al-Mg	45°	4.5	3.3
		90°	4.1	5.1
プラズマ	Al-Mg	45°	-	-
		90°	8.4	-

表-7 暴露期間中の天候

梱包状態での保管期間	1 日目	2 日目	3 日目	4 日目	5 日目	6 日目	7 日目	8 日目	9 日目	10 日目
0 時間	晴れ	晴れ	雨	晴れ	晴れ	雨	雨	晴れ	晴れ	雨
500 時間	雨	晴れ	晴れ	曇り	晴れ	晴れ	晴れ	晴れ	曇り	晴れ

⑥溶融亜鉛めっき皮膜表面の腐食生成物

溶融亜鉛めっきの表面に腐食生成物が発生すると溶射材を弾くなど、溶射皮膜の密着力低下の原因となるが、溶融亜鉛めっき表面の腐食生成物の生成スピードは大変早く、数日でめっき加工品の表面全体が白色に覆われる。



めっき加工後すぐの表面状態



めっき加工後 1 週間屋外暴露後の表面状態

写真-8 亜鉛めっき表面の状態

下記にエスカによる表面分析を行った結果を示す。

めっき加工後数時間では、めっき皮膜表面に $20\mu\text{m}$ 程度の厚さの腐食生成物が生成されているが、それを管理された環境（室温 25°C 、湿度 40% ）で 24 時間放置すると、 $60\mu\text{m}$ 程度の厚さまで腐食生成物の生成が進行した。

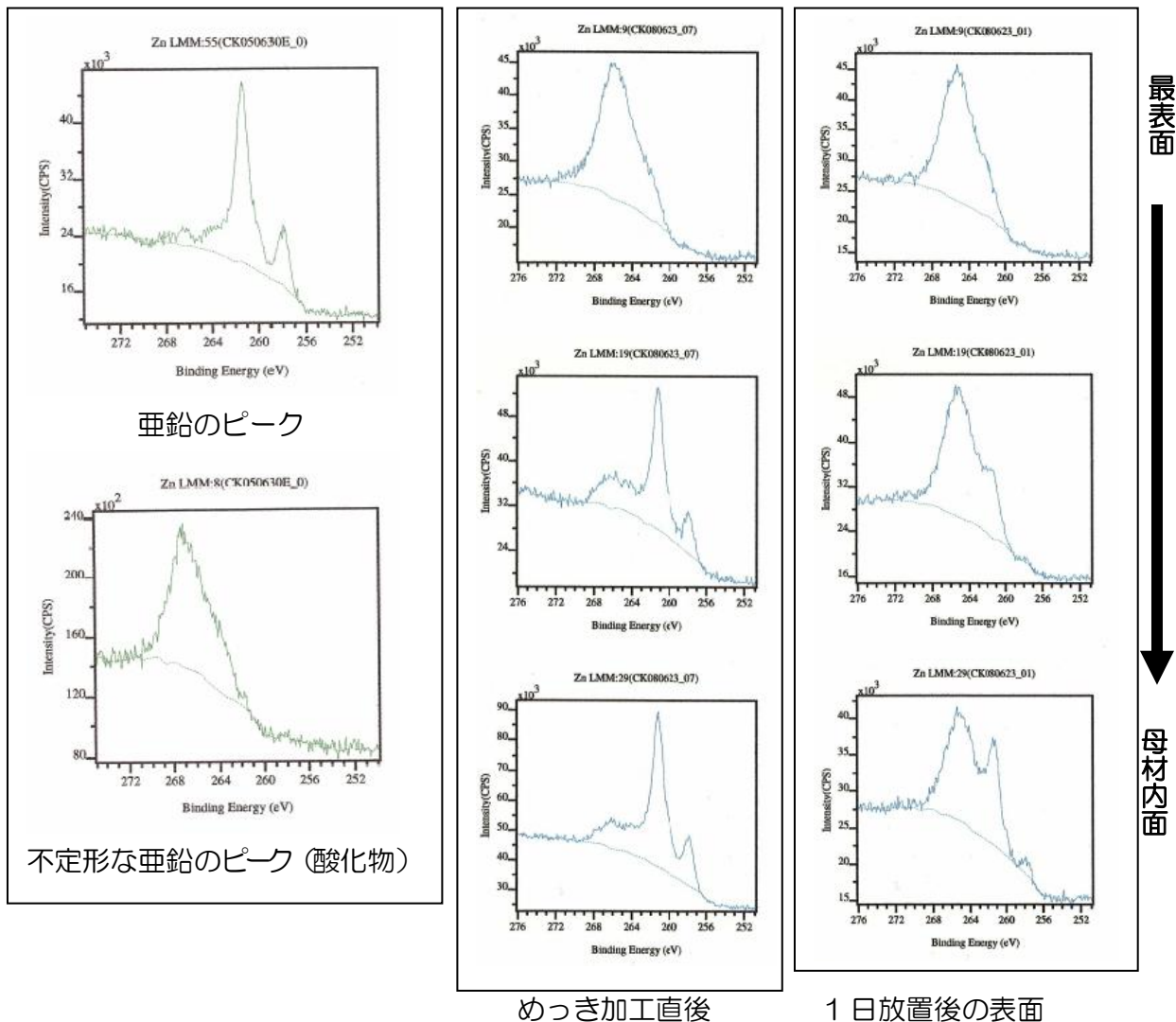


図-3 亜鉛めっき皮膜の腐食生成物

⑦一次防錆処理による腐食生成物の抑制

屋外暴露期間やその期間中の環境条件の違いによる密着力の低下を軽減させるために、めっき皮膜への一次防錆処理方法を検討した。

溶融亜鉛めっき処理後の一次防錆処理剤によって腐食生成物の発生を抑制させることで、溶射皮膜の密着性を向上させることを目的として、各防錆処理剤（6種類）による腐食生成物の生成速度を調査した。

試験方法としては、鉄板に表-1No.4 のめっき加工した試験体に対して、各防錆処理剤を塗布したものを、表-8 に示した腐食条件で促進試験を行った。

表-8 腐食促進試験条件

恒温槽	槽内温度	湿度	雰囲気
VTFH-512-2T	70℃	100%	硫酸ナトリウム 0.01wt%

表-9 各防錆処理剤の仕様

No.	防錆処理剤	濃度	試験結果※
1	バナジン・リン化合物	10%	4
2	アクリル樹脂	15%	5
3	重クロム酸ナトリウム	10%	5
4	芳香族化合物	15%	3
5	ジルコンフッ化アンモニウム	50%	5
6	アルミ化合物	10%	4
7	ブランク（めっきのみ）	-	2

※試験結果の数字は表-10 による腐食の状態を表す



写真-9 促進試験

表-10 腐食の状態区分

5	光沢が残っている
4	無光沢だが、粉状の白錆なし
3	部分的な粉状の白錆発生
2	全面に薄い白錆
1	白錆及び灰色の錆発生

No.2、3、5 の防錆処理剤がめっき皮膜の腐食生成物の生成を抑制させる事に効果的である事が分かった。

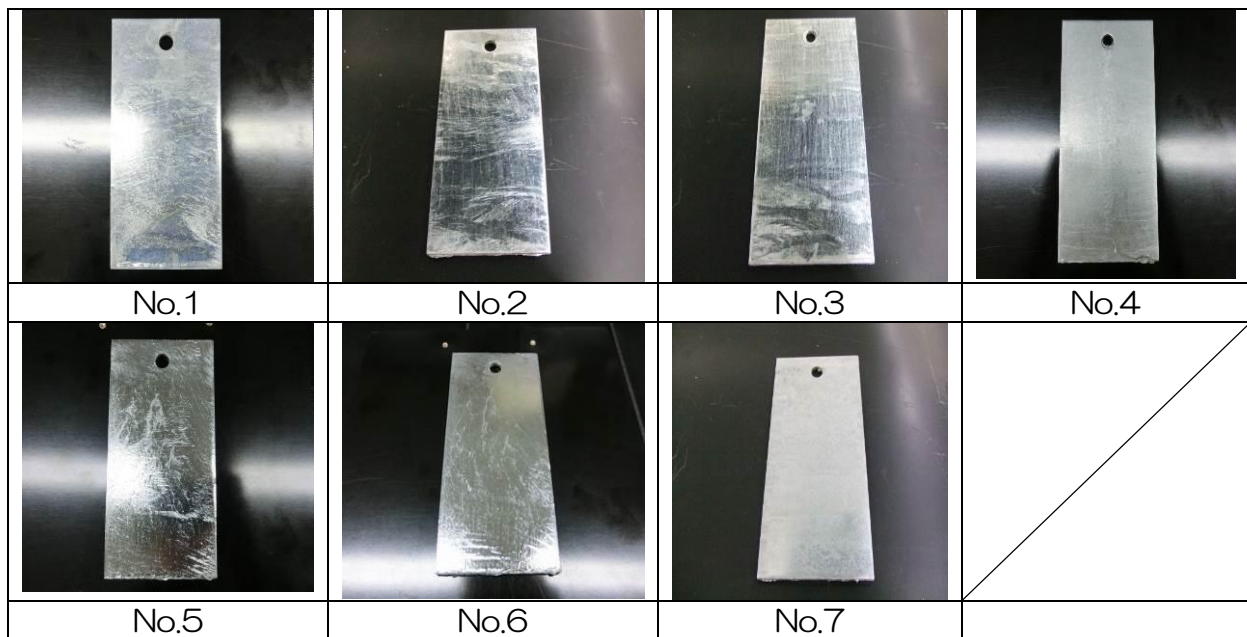


写真-10 促進試験 360h 後の各試験体の状態

(3) 研究成果

めっき皮膜の化学成分、被溶射面（めっき皮膜）への粗面化処理、溶射角度、及び亜鉛めっき表面への一次防錆処理を施すことで、500h の梱包内保管後に 10 日間の屋外暴露を行っても **4.0N 以上の密着力がある溶射皮膜が得られた**。また、**ボルト締結後 1 ヶ月間の屋外暴露においても良好な密着性のある溶射皮膜を形成することが出来た。**

表-11 下地めっきボルト、ナット、座金の条件

項目	条件
めっき皮膜の化学成分	表-1 No.4 のめっき浴化学成分
めっき表面の状態	プラスチック材：#46、表面粗さ：Ra≒9
1次防錆処理剤	重クロム酸ナトリウム
溶射角度	45° ~90°

①10日間の屋外暴露した試験体の溶射皮膜の密着力

10日間の屋外暴露した試験体に対して密着力試験をおこなったところ、



写真-11 10日間暴露した試験体

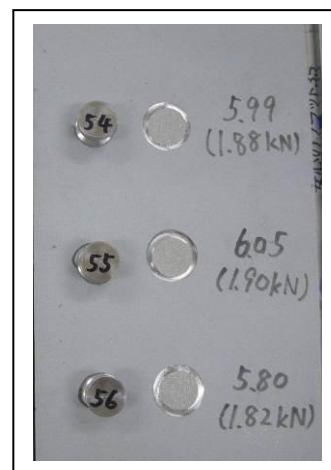


写真-12 10日間暴露しためっき面に溶射した試験体の密着力

②ボルト締結後 1 ヶ月の試験体への溶射

実機に一ヶ月間取付けたボルト、ナットに溶射を行ったが、溶射皮膜の浮き、剥離などは見られなかった。

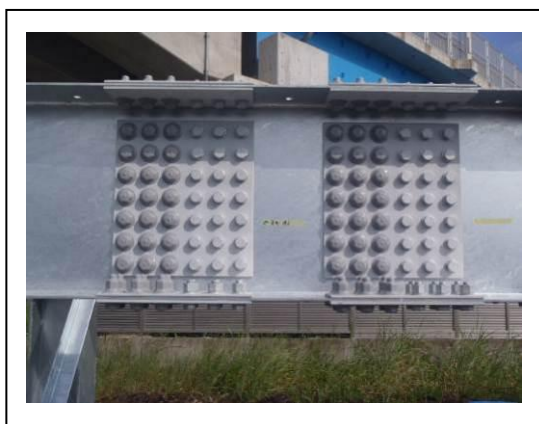


写真-13 ボルト締結後 1 ヶ月の試験体



写真-14 1 ヶ月暴露後に溶射した状態



写真-15 ボルト、ナットの溶射状態

2-2 サブテーマ②接合部の性能調査

(1) 研究課題及び成果目標

【研究課題】

建築鋼構造物に使用する溶融亜鉛めっき超強力六角ボルト(12GSHTB)のセットは、建築基準法第 37 条第二号の規定に適合するものとして国土交通大臣の認定を得たものであり、表面は JIS H 8641 (溶融亜鉛めっき) を施された製品です。この 12GSHTB20 のボルト接合方法は、プレセット形トルクレンチなどで 300N-m のトルクでナットの一次締めを行った後に、ボルト、ナット、座金及び部材にわたりマーキングを施し、ナットを 120° 回転させて完了とする。この 120° 回転を行う際には、ボルトへの軸力導入や、ボルトの捻れなど長期品質に影響を及ぼす項目においても評価を行う必要がある。

また、めっき部材の接合部における性能については、ボルト軸力のリラクゼーションと部材間のすべり係数の性状を確認する必要がある。

【成果目標】

- ① 120° 回転接合が可能なこと。
- ② トルク係数が従来のめっきボルトと同等であること。
- ③ すべり試験で摩擦係数 0.4 の接合耐力の確認。

(2) 実施内容

① 120° 回転接合について

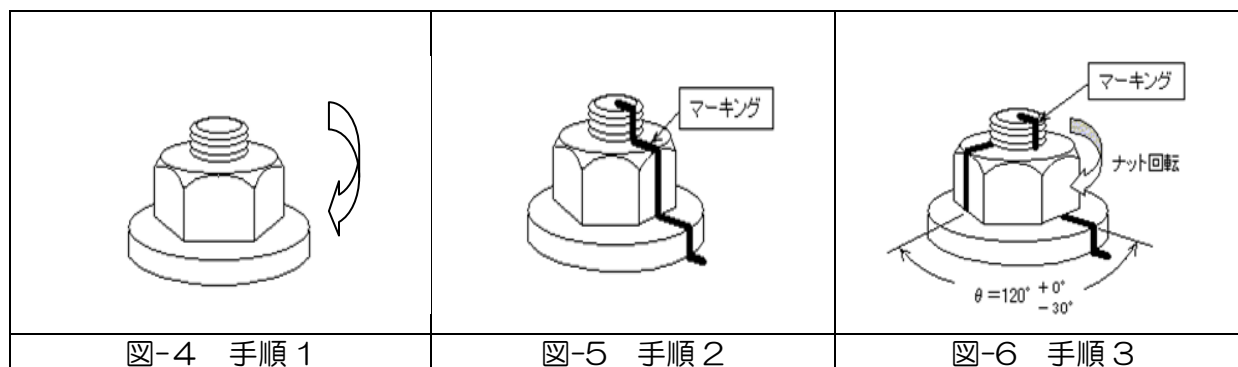
(a) 120° 回転接合とは

高力ボルトは 120° 回転接合で施工されます。ボルト、ナット、座金を手締めした後に専用レンチ等を用いて以下の手順 1~3 で施工します (図-4~6)。

手順1 ボルトの呼び径 にあわせて1次締めを行なう。

手順2 1次締め後、ボルト、ナット、座金、部材にマーキングする。

手順3 専用レンチ等を用いて、1次締め後のマーキングを起点としてナットを 120° 回して締付けるナット回転法で行う。



②低融点金属であるPb、Cdを添加しないめっきを施した試作

(a) めっき条件

試作を行ったときのめっき条件を表-12に示す。

表-12 めっき条件

項目	ボルト	ナット	座金
めっき前処理	ブラスト WA #100	脱脂、酸洗、 フラックス	脱脂、酸洗、 フラックス
めっき化学成分	Al 0.005% Cu 0.04% Bi 0%		
めっき浴温	495-500	495-500	450-500
めっき浸漬時間	180s	120s	60s
遠心分離機	1.5s	1.5s	無し
冷却	20s	20s	20s

(b) 試作したボルト、ナット、座金の外観

試作したボルト、ナット、座金の外観状態を表-13 写真-16~18に示す。ボルトには不めっきや剥離が発生し、密着性が不十分であることが分かった。ナットはねじ部にめっき溜りが残りボルトが通らない状態であった。

表-13 めっき外観状態

品名	不具合点	判定
ボルト	剥離	不合格
ナット	ねじ部のめっき	不合格
座金	めっき垂れ（後処理で補修可能）	合格



写真-16 ボルト（剥離部）

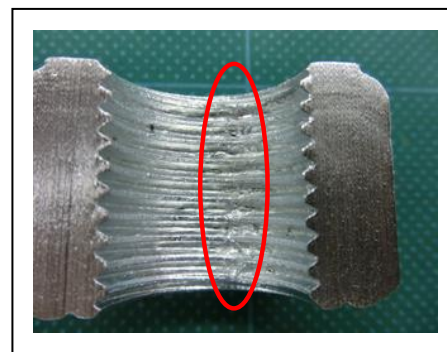


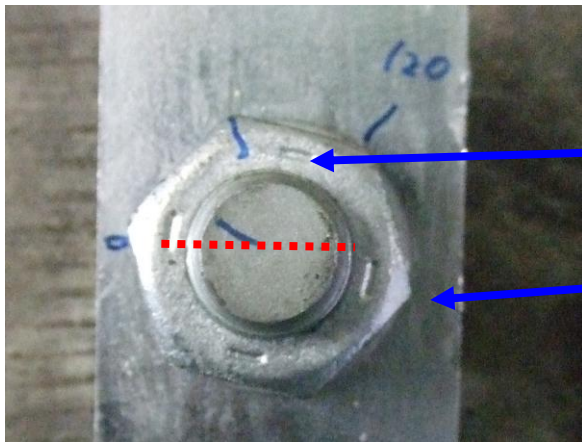
写真-17 ナット（めっき溜り部）



写真-18 座金（めっき溜り）

(C) 120° 回転施工結果

試作した高力ボルトは 120° 回転による施工を行なうと、ボルトの共回り、及びナットが止まってしまい、120° 回転接合が出来なかった。(写真-19)



ナットが120° 回らない

ボルトが共回り

写真-19 施工不可

ねじ接合部を切断し、ボルトとナットの接触状態を確認したところ、ナットねじ谷部にめっきの溜りがあり、このめっき溜りがボルトのねじ山と接触することで、ナットのねじ込み抵抗が高くなり、120° 回転接合が出来なかったと考えられる。

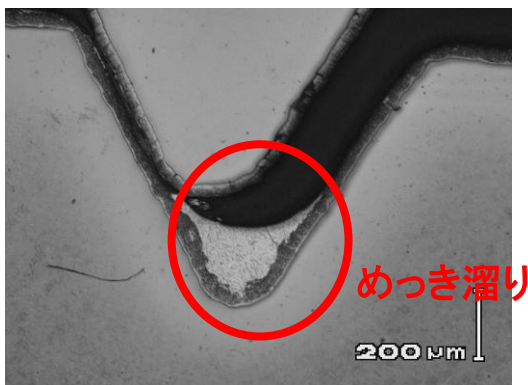


写真-20 現状のねじ部

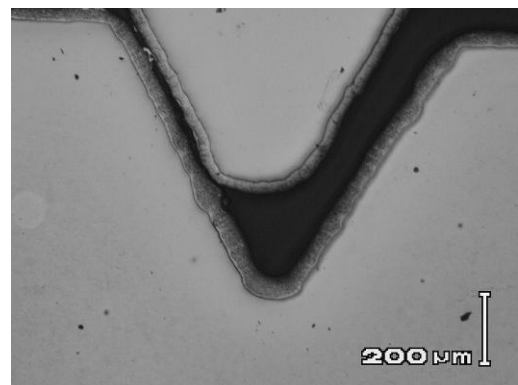
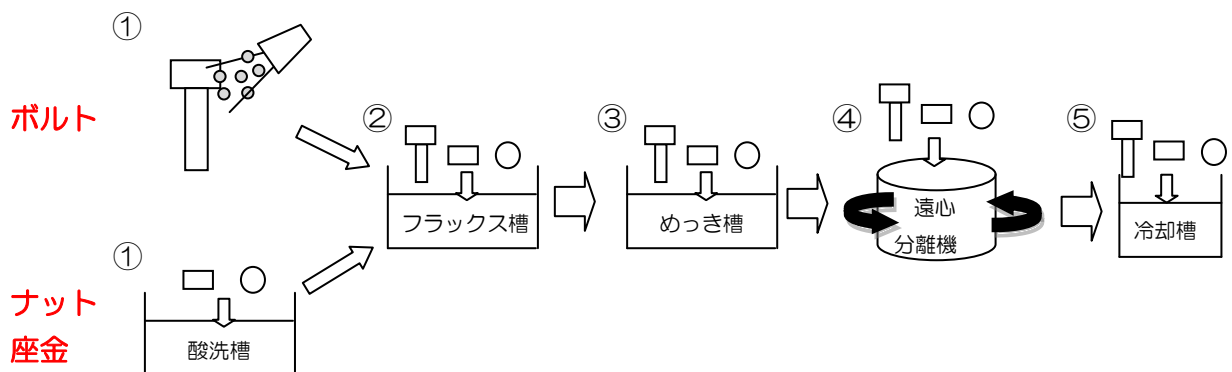


写真-21 従来品のねじ部

●めっき加工工程



③ナットのねじ部の改善

溶射を可能にするためにめっき浴化学成分の調整を行っており、開発品のめっき特性は鉛及びカドミウムが入った従来品と異なるため、新たに調整しためっき浴化学成分に適しためっき加工条件を設定する必要がある。そこで、めっき剥離、めっきカスといった外観不良の改善及びや亜鉛溜りを無くし 120° 回転接合を可能にするためのめっき加工条件を調査した。めっき加工条件としては、フラックス、遠心分離機、めっき浴温、めっき浸漬時間の4項目に対して条件出しを行った。(表-14、15)

表-14 フラックス及び遠心分離機の設定

めっき浴			塩化アンモニウム	結果			判定
温度	化学成分	浸漬時間		分離機	カス	亜鉛溜り	
480°C	調整済み	90s	有り(2g)	2.0s	無	有	×
				1.5s	有	無	○
				0s	無	有	×
			無し	2.0s	有	無	×
				1.5s	有	無	×
				0s	有	無	×

表-15 めっき浴温度及び浸漬時間の設定

フラックス	遠心分離機	めっき浴			結果		判定
		温度	化学成分	浸漬時間	亜鉛溜り	膜厚 77μm以上	
有	1.5s	480°C	調整済み	60s	無	無	×
				90s	無	有	○
				120s	無	有	×
		500°C		60s	有	有	×
				90s			×
				120s			×

各項目に対して、表-16 に設定しためっき加工条件で試作を行ったところ、外観及びねじ部部の亜鉛溜りが改善されたものを加工することができた。

表-16 めっき浴温度及び浸漬時間の設定

めっき浴			塩化アンモニウム	分離機
温度	化学成分	浸漬時間		
480°C	調整済み	90s	有(2g)	1.5s



写真-22 試作ナットの外観

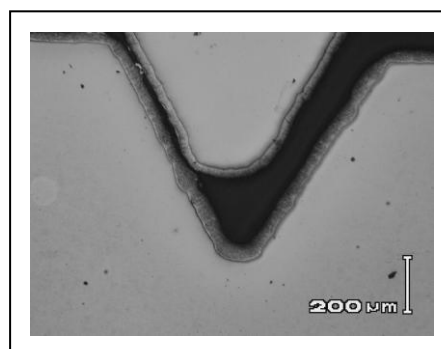


写真-23 試作ナットのねじ部状態

④ボルトのねじ部の改善

溶射を可能にするため、めっき浴化学成分の調整を行っているため、開発品のめっき特性は鉛及びカドミウムが入った従来品と異なるため、めっき加工条件のフラックス及び遠心分離機の設定を行った。

表-17 フラックス及び遠心分離機の設定

めっき浴			塩化アンモニウム	分離機	結果		判定
温度	化学成分	浸漬時間			カス	亜鉛溜り	
520℃	調整済み	120S	有り (1g)	2.0s	無	無	○
				1.5s	無	有	×
			無し	2.0s	有	無	×

表-18 めっき浴温度及び浸漬時間の設定

塩化アンモニウム	遠心分離機	めっき浴			結果		判定
		温度	化学成分	浸漬時間	不めっき	膜厚	
有	2.0s	500℃	調整済み	120s	有	有	×
		520℃		90s	無	無	×
				120s	無	有	○

上記の試験結果から以下の最適条件でめっき加工を行なうことでボルトねじ部の亜鉛溜りが解消された。



写真-24 ボルトめっき外観

表-19 ボルトのめっき加工最適条件

めっき浴			塩化アンモニウム	分離機
温度	化学成分	浸漬時間		
520℃	調整済み	120S	有り (1g)	2.0s

⑤120° 回転接合試験（ブラスト粗さと120° 回転施工の関係）

調整しためっき浴条件でめっき加工したボルトに対して、溶射皮膜を密着させるために、めっき表面に粗面化処理を行った。粗面化処理の方法としては、ブラスト機による研掃とした。ブラストによる表面粗さは120° 回転施工に影響を及ぼすと想定されるため、ブラスト粗さによって120° 回転施工が可能か調査した。

表-20 プラスト条件一覧

No.	プラスト材 (研掃材 WA)	プラスト方式	噴霧圧力 (単位:MPa)	粗さ(Ra) μm
①	#100	直圧式	4.5~6.0	1.2
②	#46			9
③	#24			20

全ての試験体でナットは締め込み工具の設定値まで機械締めすることが出来た。機械締めの際にボルトの共回りは発生しなかったが、座金の一部には共回りが発生した。

表-21 結果一覧

No.	回転角度	ナット回転量	座金の共回り	ボルトの共回り
①	120°	○	△	○
②	120°	○	△	○
③	100°	×	△	○

- ナット回転量 ○：ナット回転量が締め付け機の設定値と同じ程度。
 ×：ナット回転量が締め付け機の設定値未満。
- 座金、ボルトの共回り ○：共回り無し。
 △：軽度の共回り有り。
 ×：共回り有り。

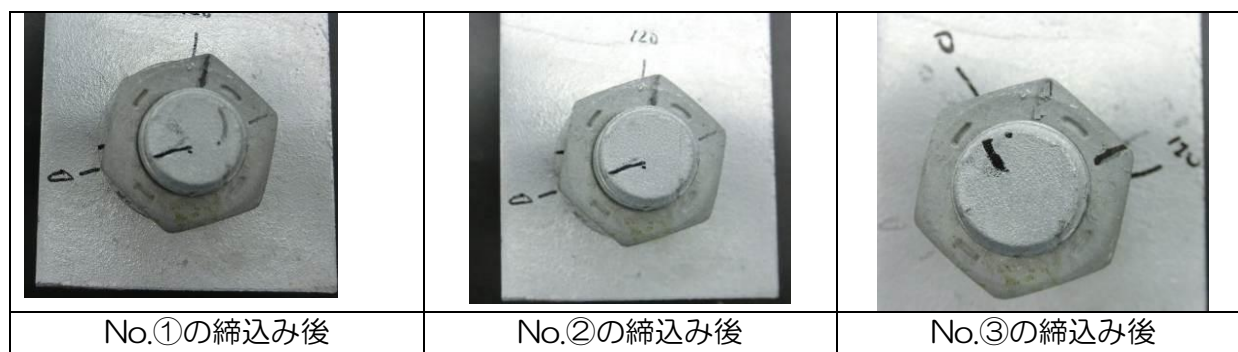


写真-25 120° 回転施工後の状態

表面粗さ $Ra=9\mu\text{m}$ で表面処理を行なった試験体で 120° 回転を行なうことが出来た。座金の一部に共回りが見られたが、実機では座金の接触面は、表面粗さの粗い溶射皮膜となるので共回りは解消され、120° 施工に不具合は発生しないと考えられる。

また、接合に用いる鋼板は前回まで 2 枚であったが、今回は 3 枚としたため機械締めを行なった際に、鋼板同士の隙間が潰れることで、施工しやすい条件であったことが考えられる。したがって、次回は鋼板を 2 枚にし、同様の施工確認を行なうことを検討する。

⑥120° 回転接合試験（従来品との比較）

従来品と試作品において、施工性が異なるか調査を行った。

従来のボルト、ナット、座金の組合せ、及び試作のボルト、ナット、座金に加え、従来品と試作品を混合した組合せにおいても 120° 回転施工を行い、試作のボルト（Ra=9.0 の表面処理）、ナット、座金において不具合点、改善点が無いか調査した。

ボルト、ナット、座金の組合せは、表-22 に示す。

試験結果は従来品においては、200° 回転させることが出来るものがあるのに対して、試作品は、120° 回転させることが出来なかった。しかし、ナットを従来品に変えることで 120° 回転が可能となったことから、ナットにおいて改良が必要であると考えられる。また、ナットと座金の接合面が焼付いた状態になっていたことから、改良点としてはめっき表面に溶射皮膜の密着性を向上させるために行ったブラスト処理方法を見直すこととした。

※使用した鋼板は 2 枚組とした。

表-22 120° 回転締込み試験結果

No.	ボルト	ナット	座金	試験結果
④	NS	NS（金属石鹸有り）	NS	S
⑤	CK+ブラスト	CK +ブラスト	CK+ブラスト	D
⑥	CK+ブラスト	CK+金属石鹸+ブラスト	CK+ブラスト	B
⑦	CK+ブラスト	NS（金属石鹸有り）+ブラスト	CK+ブラスト	A

S:供回り無し 200° 回転合格。A:供回り無し 120° 回転合格。B:供回り有り 120° 回転合格。C:供回り無し 120° 回転不合格。D:供回り有り 120° 回転不合格。

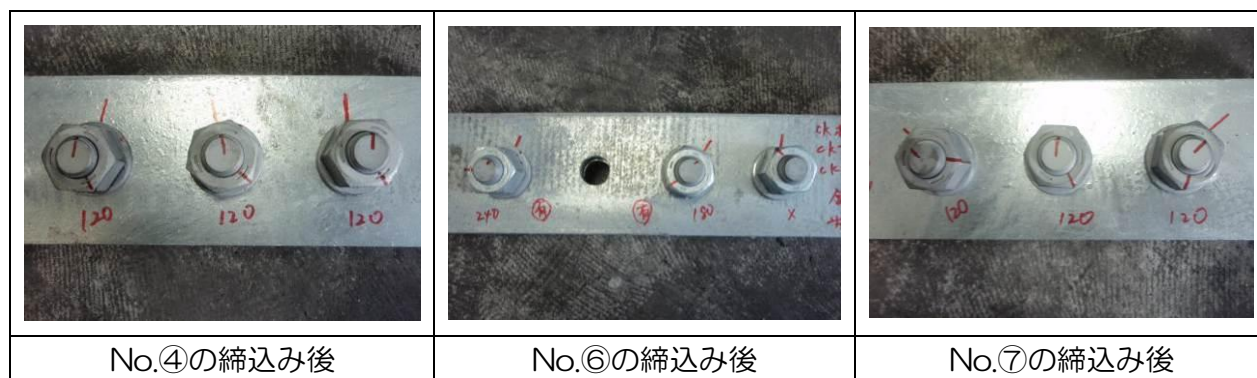


写真-26 120° 回転施工後の状態



写真-27 120° 回転施工後の
ナットと座金の接合面

⑦トルク係数が従来のめっきボルトと同等であること

溶射可能な化学成分に調整した亜鉛めっきを施したボルト、ナット、座金への溶射皮膜の密着力を向上させるために、めっき後にプラストを施す。プラストを施したボルト・ナット・座金を施工する際には、めっき表面の粗さの違いから、通常の白ボルトとは締付けトルクが異なると想定される。そこで、開発品においても、施工する際の性能が従来品と同等であることをトルク係数試験によって確認した。

試験条件を表-23 に示す。k 値が大きい程、必要な軸力を加えるために大きなトルクが必要となるため、ボルトのねじれ等が発生する。

表-23 試験条件

項目	内容
試験先	NSボルテン
サイズ	M22
ボルト種類	12G
測定項目	①締付けトルク (図 1 参照) と軸力 (図 2 参照) の関係 ②k 値=トルク (N・m) / {軸力 (kN) * 呼び径 (mm)}
合格値 ^{※1}	①締付けトルク 750 N・m で軸力 282 kN が加わること ②0.11 ≤ k 値 ≤ 0.15

※1 NS ボルテンの推奨値

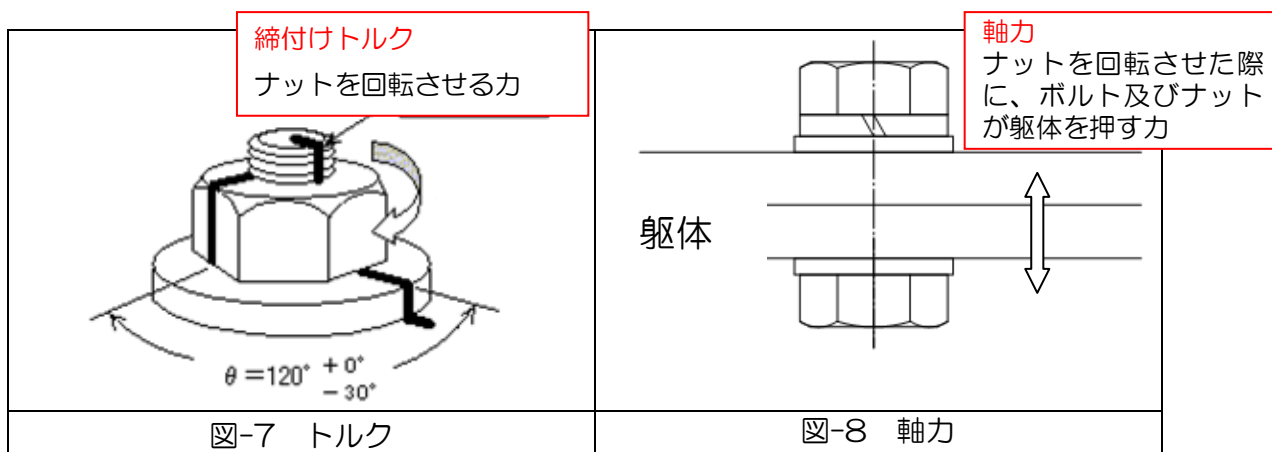


表-24 トルク係数試験体

No.	ボルト 研掃材	ナット			座金	
		めっき	研掃材	潤滑処理	研掃材	処理面
A	WA #100	改良前	WA #100	W1	WA #100	両面
B		改良後		石鹸	無	無
C		改良前			WA #24	WA #100
D			WA #24 座面処理無し		WA #46	片面
E					無	無
F				改良後	WA #46	片面
G		WA #100	無		無	
H	WA #46		片面			
I	WA #60	改良後	WA #24 座面処理無し	石鹸	WA #46	片面
J	WA #46					
K	WA #100					
L	WA #46	改良後	WA #24 座面処理無し	石鹸	WA #46	片面
M	WA #100					

ブラスト工程でナットの座面にマスキングを行ってブラスト処理する。

調整を行なっためっき浴で作製したボルト、ナット、座金を使用した試験体 A は不合格であった。ナットのめっきを改良し、金属石鹸処理をした試験体 B,C は合格したことから、ナットの状態に影響されることがわかった。ナットの溶射皮膜の密着力を上げるため、表面粗さを粗くしたところ、試験体 E,F は不合格となった。そこで、座面をブラストから保護した試験体 G では合格したことから、ねじ部への石鹸処理及びナットの座面にブラストをしない仕様にする事で、合格することがわかった。ボルト及び座金の溶射皮膜の密着力を上げるため、表面粗さを粗くした試験体 H では不合格となったので、更に試験体 B,C と同様にめっき加工を改良したナットを使用した試験体 N、O では合格となった。

上記の試験から開発品のめっき条件はナット「改良後」を使用し、ねじ部への金属石鹸処理を行い、座面へのブラストから保護することで、従来品と同等の施工性を有することがわかった。

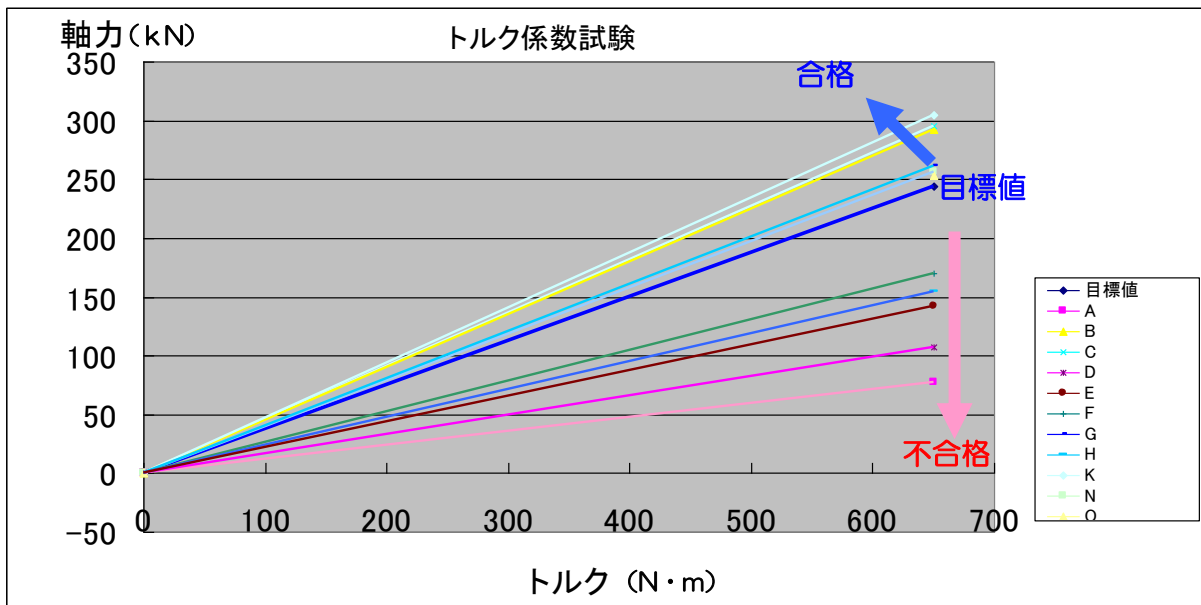


図-9 トルク係数試験

⑧ ボルト、ナットの必要性能確認

(a) n - θ 評価

ボルト、ナットに求められる性能を評価する項目としては、トルク係数に加え n - θ 及び機械的特性がある。

適切な条件で下地めっきを施したボルト、ナットにおいて、トルク係数の性能基準をクリアしたので、当該条件のボルト、ナットの組合せで n - θ を評価した。

試験条件を表-25 に示します。ボルト及びナット間で摩擦が大きい程、必要な軸力を加えるために大きな締め付け角度が必要となるため、ボルトのねじれ等が発生する。

表-25 試験条件

項目	内容
サイズ	M22
ボルト種類	12G
測定項目	①締め付け角度 θ (図 1 参照) と軸力 n (図 2 参照) の関係
合格値	①締め付け角度 120° の際に、軸力が 280N 以上であること。

表-26 試験体条件

No.	ボルト	ナット	座金
N	①CK でめっき ②WA46 で全面ブラストした	①CK でめっき ②WA46 でねじ部及び座面以外ブラストした。	①CK でめっき ②WA46 で軽く片面ブラストした。(躯体側はめっき面)

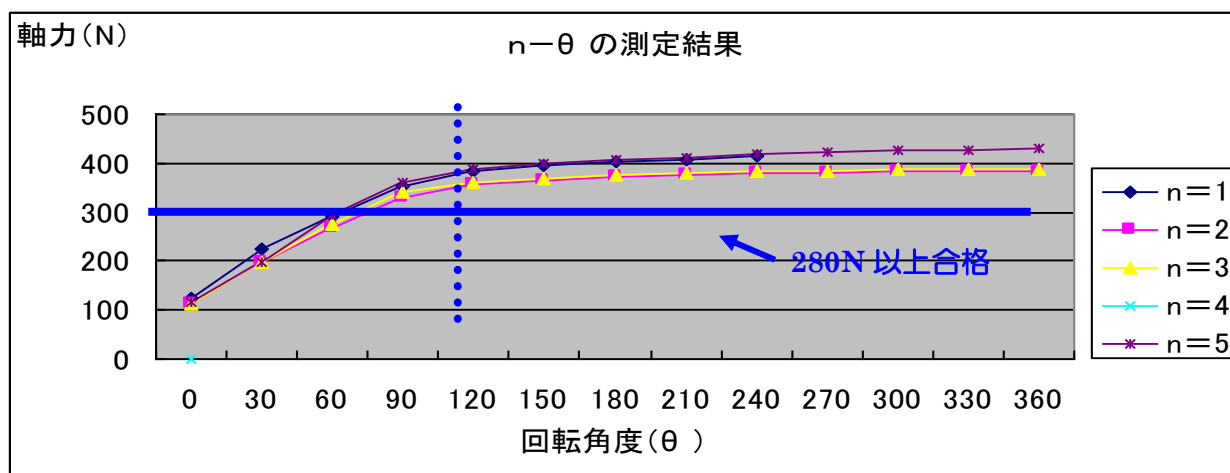


図-10 測定結果

全ての試験体において、ナットを 120° 回転させた際の軸力は 280N を超えていたため n - θ は合格と判断する。

(b)機械的特性評価

適切な条件で下地めっきを施したボルト、ナットにおいて、トルク係数、及び $n-\theta$ の性能基準をクリアしたので、当該条件のボルト、ナットの組合せで機械的特性を評価した。試験条件を表-27 に示す。各項目において測定結果が従来品と同等以上になっていることを確認した。

表-27 試験条件

項目	内容
試験先	NSボルテン
サイズ	M22
ボルト種類	12G
測定項目	ボルトの項目 ①耐力 (N/mm ²)、②引張強さ (N/mm ²)、③伸び (%)、④絞り (%)、⑤頭部硬さ (HRC) ⑥最大荷重 (kN) ナットの項目 ⑦座面硬さ (HRC)、⑧保証荷重 (kN) 座金の項目 ⑨硬さ (HRC)
合格値 ^{※1}	① 耐力 ≥ 1080 (N/mm ²) ② 引張強さ 1200~1300 (N/mm ²) ③ 伸び ≥ 14 (%) ④ 絞り ≥ 40 (%) ⑤ 頭部硬さ 35~45 (HRC) ⑥ 最大荷重 ≥ 379 (kN) ⑦ 座面硬さ 25~35 (HRC) ⑧ 硬さ (HRC)

表-28 試験体条件

No.	ボルト	ナット	座金
N	①CK でめっき ②WA46 で全面ブラストした	①CK でめっき ②WA46 でねじ部及び座面以外ブラストした。	①CK でめっき ②WA46 で軽く片面ブラストした。(躯体側はめっき面)

全て試験の項目において判定基準を超えていたので、機械的特性は合格と判断する。

表-29 試験結果①

検査項目	ボルト試験片 (SHTB)							
	径 mm	断面積 mm ²	降伏荷重 (kN)	耐力 N/mm ²	最大荷重 kN	引張強さ N/mm ²	伸び %	絞り %
判定値	—	—	—	≥ 1080	—	1200 ~ 1300	14 以上	40 以上
試料No.	—	—	—	—	—	—	—	—
1	12	113	135.0	1195	145.5	1288	17	56
2	//	//	135.5	1199	141.1	1247	17	55
3	—	—	—	—	—	—	—	—
平均値	—	—	—	1197	—	1268	17	56

表-30 試験結果②

検査項目	ボルト製品 (SHTB)					破断部	ナット製品 (SHTB)					判定	座金製品 (SHTB)			
	最大荷重 (kN)	頭部硬さ HRC			平均		座面硬さ HRC			保証荷重 (kN)	判定		硬さ HRC		平均	
判定値	≥379	35~45				平均	25~35					平均	判定	25~45		平均
試験No														合格		
1	397	40	41	41	41	ねじ部	31	32	33	32	379	合	33	34	31	33
2	400	40	39	40	40	//	30	33	33	32	//	合	32	32	33	32
3	406	41	39	40	40	//	32	34	33	33	//	合	32	31	33	32
平均値	401	—			40	—	—			32	—		—		33	

上記の試験結果より、溶射を可能にする下地めっきを施したボルト、ナット、座金は、要求される性能基準（トルク係数、 $n - \theta$ 、機械的特性）を満足していることを確認した。

◎ すべり試験で摩擦係数 0.4 の接合耐力の確認

(a) リラクセーション試験

ボルト、ナットに求められる性能を評価する項目として、リラクセーション試験がある。適切な条件下で下地めっきを施したボルト、ナットにおいて、ボルトを締めつけたときの軸力から時間による軸力の抜け（リラクセーション）を調査する。

試験方法としては、東京測器製 データロガー TDS-30 を用いて、歪みゲージの歪みを測定し、軸力へ換算する。締め完了時を 100% とし、時間経過と軸力の減衰を歪みにより測定する。試験体は表-31 の通りである。

表-31 試験体条件

番号	鋼板	ボルト仕様	N 数	試験期間
①	Zn-Al 溶射×ガス	eめっき+ブラスト	3	14 日間
②	Al-Mg 溶射×ガス			
③	Al-Mg 溶射×プラズマ			
④	eめっき	eめっき		
⑤	従来めっき	NS 製白 12GM22		
⑥	C5 塗装 (無機ジंक)	黒 F10T		
⑦	ノーマル (無塗装)	黒 F10T		
⑧	Al-Mg 溶射×ガス	eめっき+ブラスト +Al-Mg 溶射×ガス		

試験結果を表-32、図-11 に示す。無塗装の鉄板に対しては軸力の抜けはほとんど無かったが（0.4%減）、Al-Mg 溶射、めっき、無機ジंकなど鉄板に表面処理することで軸力の抜けが大きくなることを確認した（7~9%減）。Zn-Al 溶射は Al-Mg 溶射よりも軸力の抜けが大きい結果から（Zn-Al：12%減、Al-Mg：7%減）、溶射材によって軸力の抜けが影響することが確認できた。

(b) すべり係数試験

リラクゼーション試験が終了した試験体に対して、引張試験を行い（写真-28）、締結した鉄板が滑り出すときの荷重とすべり係数値 $\mu = \text{すべり荷重} / \text{軸力} / 4$ を測定する。

試験結果を表-32、図-12 に示す。試験体の表面粗さが大きく影響することから、無塗装の鉄板のすべり係数値は低い値となった。すべり係数値においては溶射材よりも溶射工法による違いが大きいことが確認できた。Zn-Al、Al-Mg のガス溶射のすべり係数値は（0.6～0.7）ほぼ同様の値であったが、Al-Mg プラズマ溶射においては低い値となった（0.3）。



写真-28 引張試験外観

表-32 リラクゼーション試験結果 単位：%

番号	0h	0.5h	1h	2h	3h	6h	12h	24h	48h	72h	120h	168h	240h	336h
①	100	93.2	92.6	92.0	91.7	91.2	90.6	90.2	89.7	89.3	88.9	88.6	88.2	88.1
②	100	96.2	96.0	95.5	95.3	95.1	94.7	94.5	94.3	94.2	93.8	93.5	93.4	93.3
③	100	95.6	95.2	94.6	94.3	94.1	93.6	93.2	92.8	92.6	92.2	91.9	91.7	91.6
④	100	95.4	94.9	94.5	94.4	94.1	93.8	93.6	93.2	93.0	92.6	92.4	92.2	92.1
⑤	100	95.4	94.8	94.5	94.2	93.9	93.5	93.2	92.8	92.7	92.3	92.1	91.9	91.8
⑥	100	95.4	94.9	94.7	94.3	94.0	93.6	93.4	93.0	92.8	92.4	92.2	92.1	92.1
⑦	100	99.0	99.1	99.0	99.3	99.2	99.3	99.3	99.4	99.6	99.4	99.5	99.6	99.6
⑧	100	96.7	96.2	95.8	95.8	95.3	95.0	94.6	94.3	94.1	93.7	93.5	93.3	93.2

N数3の平均値を示す

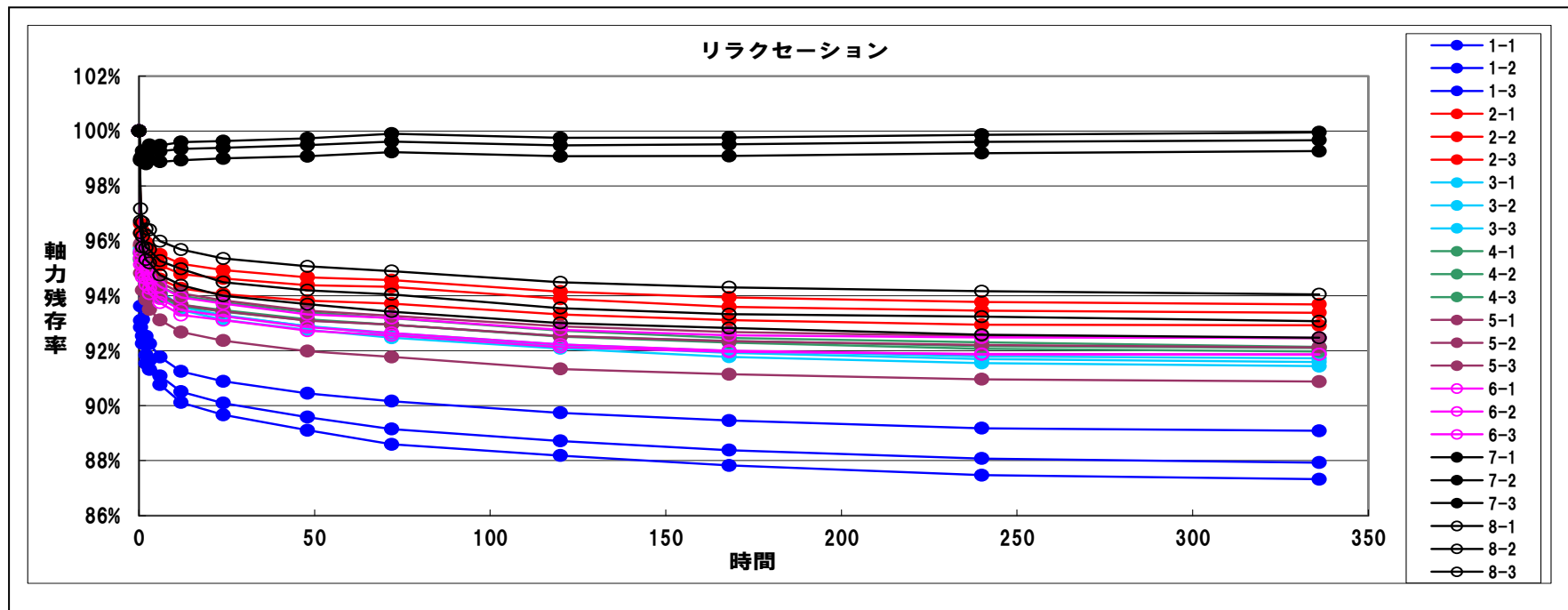


図-11 リラクゼーション試験結果

表-33 すべり係数試験

番号	軸力		すべり荷重	すべり係数値	
	締付け直後	試験直前		締付け直後軸力 μ_1	試験直前軸力 μ_2
①	361	318	980	0.679	0.771
②	362	338	904	0.625	0.669
③	362	331	487	0.336	0.367
④	372	342	586	0.394	0.428
⑤	354	325	637	0.450	0.490
⑥	282	260	571	0.506	0.550
⑦	293	292	256	0.218	0.219
⑧	361	337	882	0.610	0.654

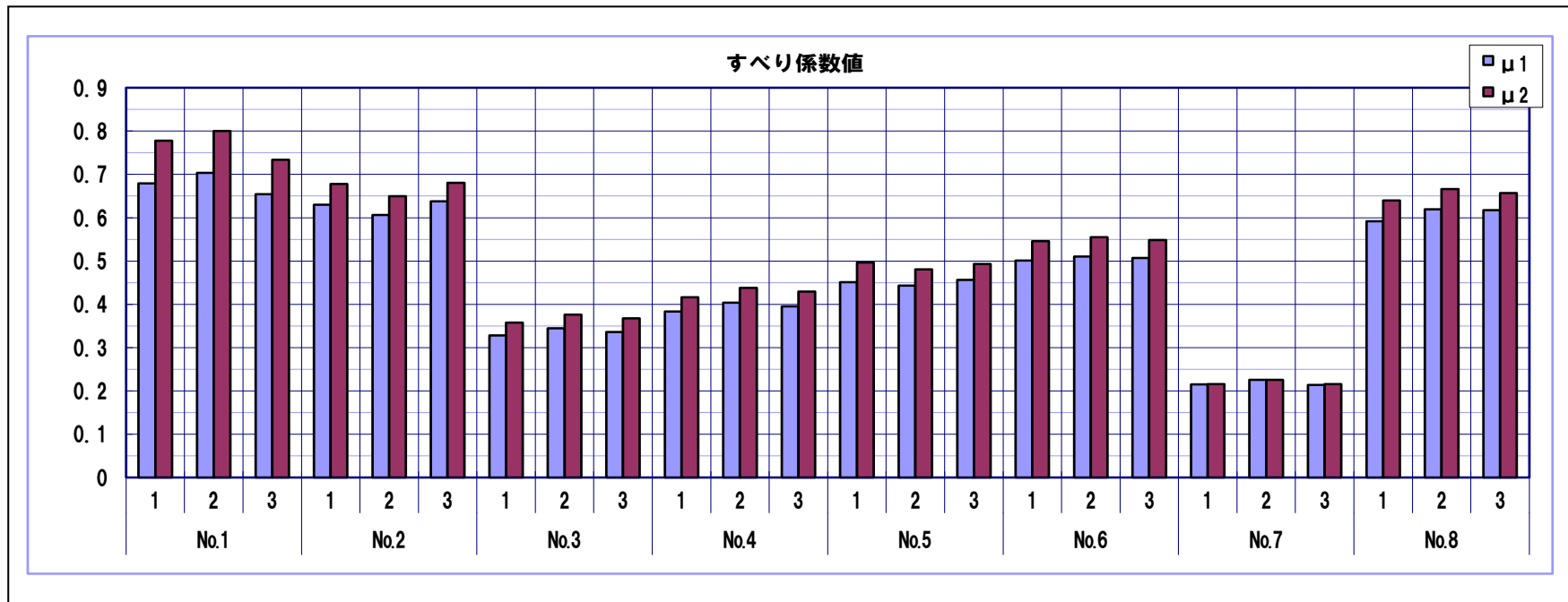


図-12 すべり試験値試験

(3) 研究成果

ボルトに施した下地めっきへの素地調整としては、めっき加工後に $Ra > 8 \mu m$ ($Rz > 50 \mu m$) でブラストを行うことでめっき剥離が無く、溶射皮膜の密着性も良好な製品となる。ナットにおいても同様に、めっき加工後に潤滑を目的とした金属石鹸を塗布したのに対して $Ra > 8 \mu m$ ($Rz > 50 \mu m$) でブラストを行う。座金においては溶射皮膜の密着性向上を目的とした $Ra > 8 \mu m$ ($Rz > 50 \mu m$) のブラストを行う。ボルト、ナット、座金に対してのブラスト箇所を図-13に示す。(赤線部が対象箇所)。

上記の条件でめっき後の素地調整を行った下地めっきを施したボルト、ナット、座金において接合性能を評価したところ、120° 回転接合が可能であり、トルク係数においても従来のめっきボルトと同等であることを確認した。また、 $n - \theta$ 、機械的特性の評価についても性能基準を満足した。すべり試験で摩擦係数 0.4 以上の接合耐力の確認についてはボルト、ナット、座金の性能よりも鉄板の状態、表面粗さ、硬さ、密着度が大きく影響し、ガス溶射においては、Al-Mg、Zn-Al の溶射材ともに摩擦係数 0.4 以上の値となり、すべての接合性能基準を満足した。

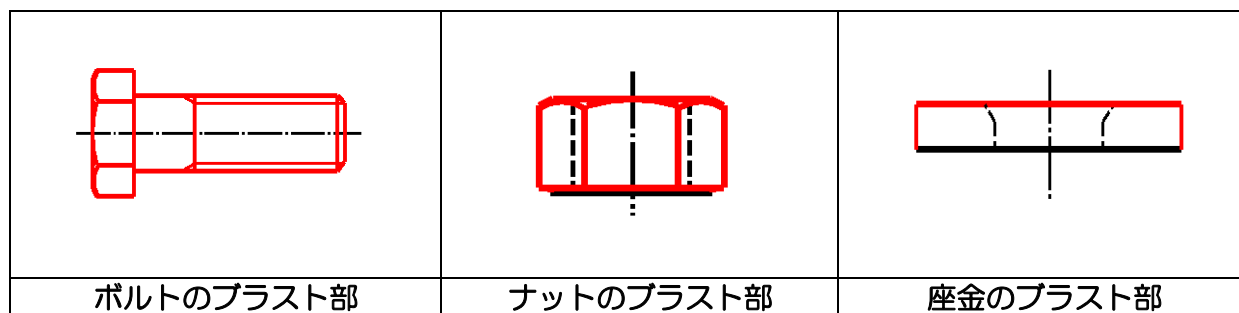


図 - 13 ボルト、ナット、座金へのブラスト箇所

2-3 サブテーマ③小型接合試験体での溶射皮膜の性能調査

(1) 研究課題及び成果目標

【研究課題】

溶射皮膜を形成させることが困難なボルト・ナット、座金の角部、接触面の R 面、谷部において、溶射皮膜の密着力、防食性能促進試験によって対象箇所の凸部の付着、凹部の溶射皮膜の性能を評価する。また、SPL（躯体部分）は溶射先塗り（封孔処理）でボルト部は締付け後溶射処理をするので、重ね塗りを最小限にするため、マスキングを行う。マスキング部の境界部は、密着力試験及び、表面電位測定を行ない、溶射皮膜の性能を確認する。

【成果目標】

①密着力試験

ボルト角落ち、回し傷における溶射の剥離、剥がれが無い事を確認する。

②マスキングの評価

マスキング方法による溶射状態の確認を行う。

③防食性能促進試験。

試験体における耐食性を確認する。

④表面電位測定。

溶射材、めっきにおける電位を測定する。

(2) 実施内容

①密着力試験

橋梁でのボルトの接合は専用の締め込み工具（写真-29 参照）を用い、1 次締め、本締めを行います。締め込みの際はボルトに専用工具の跡が付き、その傷が溶射の密着性に影響を与えるか確認する。



写真-29 専用締め込み工具

(a) 締め込み傷による影響調査

専用締め込み工具はでナットを締めつけたときの傷の状態を確認した。ナットの角部に深い傷が残りアンカーパターンが無くなっていた。そこで、アンカーパターンを残すために、締め込み治具の傷を浅くするような工具の改良を行った。締め込み傷は浅くなったが傷の面積は大きくなった。実際に溶射を行い、組込み治具傷の違いによる密着性の確認を行った。

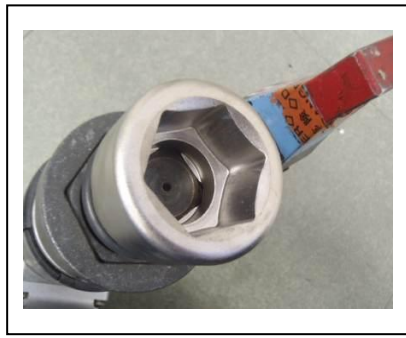


従来の締め込み治具



締め込み傷（深い傷）

写真-30 従来の締め込み治具と締め込み傷



治具跡を浅くする治具



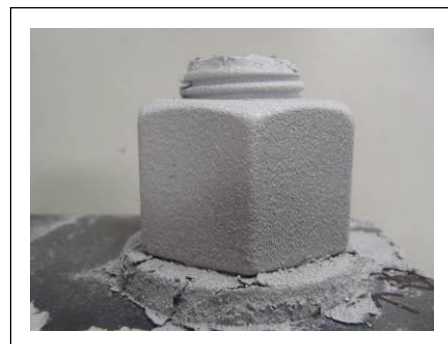
締め込み傷（浅い傷）

写真-31 従来の締め込み治具と締め込み傷

Zn-Alの通常ガンにて溶射を行ったところ、どちらの傷においても溶射は密着しているように見えた。今後、この締め込み傷が溶射皮膜の密着性や耐食性にどのような影響を及ぼすか調査をしていく。



深い傷への溶射後



浅く広い範囲の傷への溶射後

写真-32 傷部への溶射

(b) 治具傷への溶射皮膜の密着性

実機で使用するボルト、ナットは 300N-m の仮締め後、120° 回転法による本締めを行う。そのため、ナットには締め込み治具キズが残るのでそれを想定した傷を付けた下地めっき済の鉄板に溶射を行い引張試験を行った。

試験結果を表-34 に示す。傷有りの試験体は傷無し試験体に比べて密着力が低下したが、これは圧痕の部分においては溶射皮膜の密着力がほとんどないため、プラスト面と圧痕の面積比率分の密着力が低下したと考えられる。



写真-33 鉄板の傷

表-34 傷による密着力の評価

溶射の種類	溶射材	密着力(N)		面積比率
		傷無し	傷有り	
ガス	Zn-Al	5.6	4.2	80%
	Al-Mg	5.1	4.7	

締め込み傷があっても、溶射ができ、密着力があることが分かった。今後、促進試験や荒田式試験、仮設橋梁を用いた実機試験で必要性能を満たしていることを確認する。

②マスキングの評価

添接板 SPL（躯体部分）は溶射先塗り（封孔処理）でボルト部は締付け後溶射処理をするので、重ね塗り部分を最小限にするため、マスキングを行う。

重ね塗りを最小限にするためにマスキング方法としては、締結したボルトに合わせてパンチングしたステンレス板を用いた方法と、座金の形状に合わせてガムテープを張る方法で行った。この 2 種類の方法で試験体にマスキングを行い、溶射後の状態を確認する。



ステンレス鋼板によるマスキング



ガムテープによるマスキング

写真-34 マスキング方法

ステンレス鋼板とガムテープによるマスキングを行い Zn-Al の溶射を行ったものを試験体とする。ステンレス鋼板を用いると、ボルトの周りには溶射の膜ができた。この膜を除去すると座金の溶射部分まで剥がれる可能性がある。またガムテープを使用すると座金とのクリアランスを無くした状態でマスキングでき、重ね塗りによる溶射の膜は無いが、ガムテープの厚み分だけ座金に溶射ができなかった。

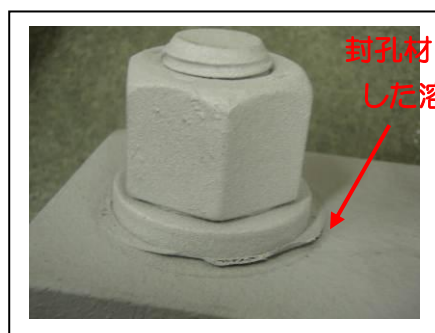


写真-35 重ね塗りが発生した試験体



写真-36 未溶射部分が発生した試験体

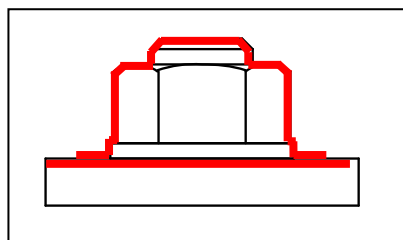


図-14 試験体断面

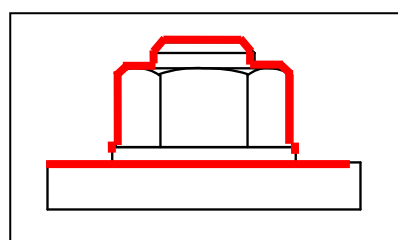


図-15 試験地断面

どのようなマスキング方法を用いても、重ね塗り部や未溶射の部分ができるので、これらの試験体を用いて、耐食性を主点としてどのような不具合が発生するのか、腐食促進試験（キャス試験、複合サイクル試験）によって調査する。

③防食性能促進試験

ボルト・ナットの耐食性をキャス試験、複合サイクル試験によって評価する。締め込み傷部の溶射の耐食性やボルトや座金の隙間部（接触部）の耐食性、マスキングによる耐食性の違いを評価した。

(a) 試験体

試験体は 2 枚の板を 2 本のボルト・ナットで締め込んだものとする。溶射材が接合部分の隙間に入りやすくするためにナットに面取りを行ったものと通常のナットを使用した。

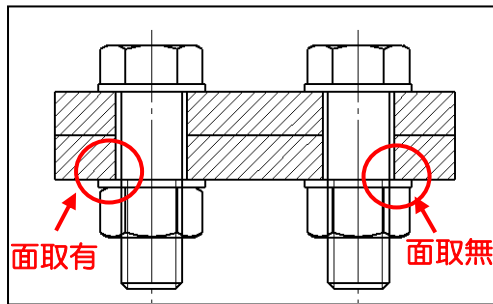


図-16 試験体断面



写真-37 試験体外観

表-35 に示す 5 種類の試験体を評価する。また、各試験体における外観状態を表-35、写真-38 に示します

表-35 試験体条件

番号	溶射	試験	N=1	N=2	N=3
①	Zn-Al ガス	キャス	○	①ボルト部溶射の膜あり	○
		複合	○	○	①ボルト部溶射の膜あり
②	Al-Mg ガス	キャス	①ボルト部溶射の膜あり ②座金に溶射のカス付着あり	①ボルト部溶射の膜あり	①ボルト部溶射の膜あり ②座金に溶射のカス付着あり ③ナット部の溶射に剥離あり
		複合	①ボルト部溶射の膜あり	○	○
③	プラズマ Al-Mg	キャス	○	①ボルト部溶射の膜あり	①ボルト部溶射の膜あり
		複合	①ボルト部溶射の膜あり	○	○
④	従来 めっき	キャス	○	○	○
		複合	○	○	○
⑤	C5 塗装	キャス	④ボルト気泡有り	④ボルト気泡有り	○
		複合	○	④ボルト気泡有り ⑤剥離有り	④ボルト気泡有り

○：目視による異常なし



写真-38 各試験体における外観状態

(b) キャス試験

表-36に示した試験液を用いて JIS H 8502 (めっき耐食性試験方法) に従って試験を行った。

表-36 キャス試験条件

項目	調整時	試験中
塩化ナトリウムの濃度 g/l	50±5	50±5
塩化第二銅 (CuCl ₂ · 2H ₂ O) 濃度 g/l	0.26±0.02	—
pH	3.0	3.0~3.2
噴霧量 ml/80 cm ² /h	—	1.5±5
試験槽内温度°C	—	50±2
塩水タンク温度°C	—	50±2
空気飽和器温度°C	—	63±2
圧縮空気圧力	—	70~167

72 時間経過したときの試験体の状態を表-37、写真-39 に示す。72 時間経過したとき従来めっき品は赤さびが発生し、腐食したことを確認できた。また、溶射材 Zn-Al、Al-Mg では腐食の状態が異なっていた。Zn-Al は黒い斑点が発生したが Al-Mg では斑点は無かった。Al-Mg の腐食の特徴としては封孔材が膨潤し、溶けて垂れたような状態であった。C5 塗装においては気泡や傷などの欠陥部から赤さびが発生していた。

表-37 キャス試験 72 時間経過時の試験体

番号	溶射	経過時間	試験結果
①	Zn-Al ガス	72 時間	黒く斑点が発生した。
②	Al-Mg ガス		封孔材が膨潤し、溶けてきた。
③	Al-Mg プラズマ		封孔材が膨潤し、溶けてきた。
④	従来めっき		赤さび発生
⑤	C5 塗装		塗装不足の部分や気泡部から赤さびが発生した。

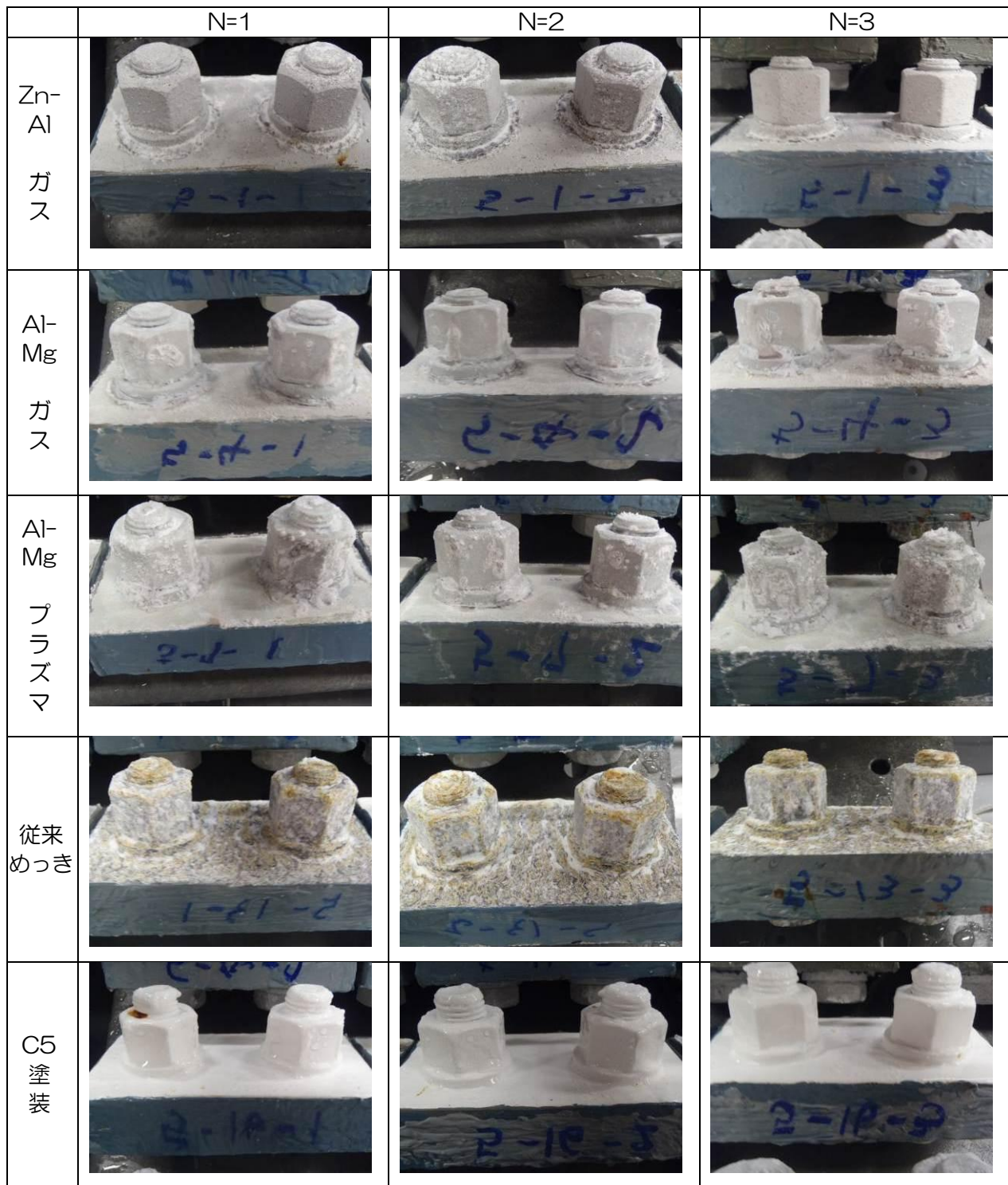


写真-39 キャス試験 72 時間後の外観

(c) マスキングの状態による腐食の影響

未溶射部分のある試験体においては、未溶射の部分は亜鉛めっきとなっているため、この部分が優先的に腐食が進み、従来めっきの試験体と同じ様な赤錆の発生が予想されていたが、腐食生成物が表面を覆い腐食が抑制されたためか、赤錆の発生などの大きな変化は見られなかった。

重ね塗りした試験体においても、重ね塗りされた部分においては、密着性がないため溶射皮膜に浮きが見られたが、隙間からの腐食は確認されなかった。

表-38 キャス試験 240 時間経過時の試験体

番号	溶射	マスキング	経過時間	試験結果
①	Zn-Al ガス	ステンレス板	240 時間	溶射膜の周りに腐食性生物が堆積していた。
②	Zn-Al ガス	ガムテープ		座金の周りに腐食性生物が堆積していた。
③	Al-Mg ガス	ガムテープ		座金の周りに腐食性生物が堆積していた。



① Zn-Al (ステンレス板)

② Zn-Al (ガムテープ)

③ Al-Mg (ガムテープ)

写真-40 キャス試験 240 時間経過時の試験体

(d) 複合サイクル試験

表-39 に示した試験液を用いて JIS H 8502 (めっき耐食性試験方法) に従って試験を行った。

表-39 複合サイクル試験条件

項目	調整時	試験中
塩化ナトリウムの濃度 g/l	50±5	50±5
pH	6.5	6.5~7.2
噴霧量 ml/80 cm ² /h	—	1.5±5
試験槽内温度℃	—	35±2
塩水タンク温度℃	—	35±2
空気飽和器温度℃	—	47±2
圧縮空気圧力	—	70~167

72 時間経過したときの試験体の状態を表-40、写真-41 に示す。72 時間経過したとき従来めっき品は赤さびが発生し、腐食したことを確認できた。溶射材 Zn-Al、Al-Mg を比較してもまだ顕著な際は確認できなかった。また、ガスやプラズマといった溶射方法による違いも確認することができなかった。C5 塗装の試験体においてはナットの間隙から赤さびが発生しており、隙間部まで塗装できてないことが分かる。

表-40 複合サイクル試験 72 時間経過時の試験体

番号	溶射	経過時間	試験結果
①	Zn-Al ガス	72 時間	うっすら黒く変色していた。
②	Al-Mg ガス		腐食無し
③	Al-Mg プラズマ		腐食無し
④	従来めっき		赤さび発生
⑤	C5 塗装		塗装不足の部分や気泡部から赤さびが発生した。
















	N=1	N=2	N=3
Zn-Al ガス			
Al-Mg ガス			
Al-Mg プラズマ			
従来 めっき			
C5 塗装			

写真-41 複合サイクル試験 72 時間経過時の試験体

キャス試験、複合サイクル試験共に同じ傾向が確認できた。亜鉛メッキのボルトではキャス試験、複合サイクル試験共に 72 時間で腐食し、耐食性は他の試験体に比べ低いと想定される。溶射材 Zn-Al、Al-Mg で腐食状態が異なりますが、亜鉛メッキのボルトより耐食性があることが確認できた。今後も観察を行い、溶射材や溶射方法による差異を確認する必要があると考える。

④ 表面電位測定

被膜の構成としては、鉄面から順番に表面電位が低くなる必要があるため、添加元素の調整を行い、溶射皮膜（Zn-Al もしくは Al-Mg 溶射）よりボルトへの下地めっきの方が表面電位が高くなるように調整を行った。

試験条件を表-41 に示す。

表-41 試験条件

項目	内容
試験先	富山県工業技術センター
試験液	中性 (Na ₂ SO ₄)、及び酸性 (HCl)
サイズ	20mm×50mm×3.2mm
コーキング材	10mm ² を除く全面に絶縁のため、コーキング材を塗布。
測定時間	72 時間
合格値	母剤>めっき>溶射の順に表面電位測定の結果が位置すること。

中性領域における鉄、下地めっき（化学成分を調整しためっき）及び各溶射方法による溶射皮膜の表面電位を測定したところ、全ての溶射皮膜より下地めっきの方が表面電位が高くなっていることを確認した。

表-42 試験体条件

No.	項目	成分	溶射方法	作製先
①	鉄	SS400	—	マエダ
②	電気めっき	Zn	—	三光めっき
③	溶射可能な溶融亜鉛めっき	Al : 0.004 Cu : 0.025 Bi 0.115	L ライン	シーケー金属株式会社
④	溶射可能な溶融亜鉛めっき②	Al : 0.005 Cu : 0.5 Bi 0	L ライン	
⑤	溶射	Zn-Al	ガス 良い条件	川田工業株式会社
⑥			ガス 良い条件	新免鉄工所
⑦		Al-Mg	プラズマ 良い条件	山田金属防蝕
⑧			プラズマ 良い条件	プラズワイヤー
⑨	溶射+封孔処理	Al-Mg	ガス 良い条件	新免鉄工所

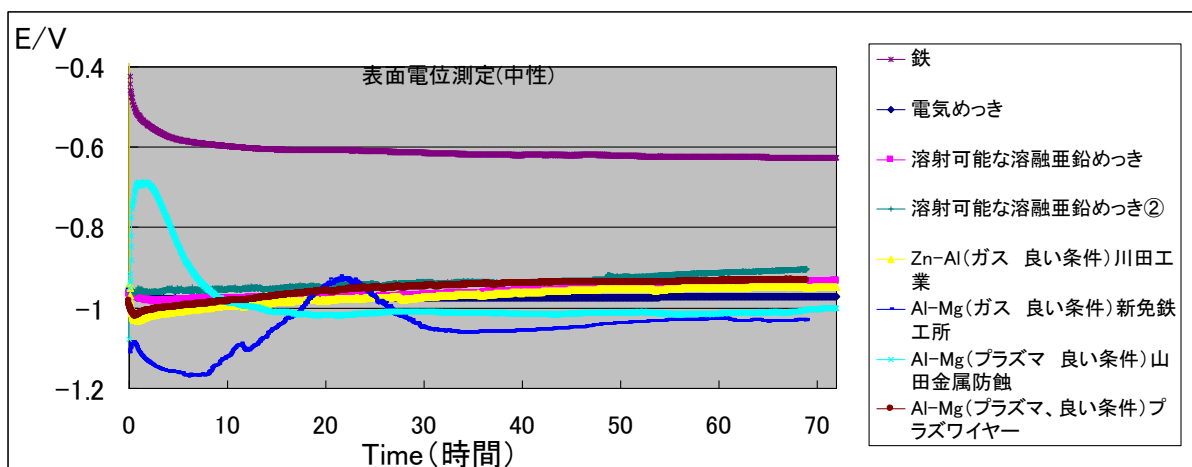


図-16 表面電位測定結果（中性）

⑤荒田式ブラストエロージョン試験機による密着力評価

Al-Mg 合金系及び Zn-Al 合金系溶射材料について、従来のフレーム溶射ガンによる溶射試験及び試作開発した狭隘部用溶射ガンによる溶射試験を実施し、各溶射皮膜の組織観察による比較検討を実施した。また、各溶射皮膜の溶射粒子及び皮膜層間の密着力を評価するためにブラスト摩耗試験による比較検討を実施した。写真-42 に本事業で導入した荒田式ブラストエロージョン試験機の外観を示す。装置は、ブラスト前処理及びブラスト試験を行う本体部と試験に供する圧縮空気の製造部で構成されている。試験の原理及び手順を図-17 に示す。試験では一定量(70g)のアルミナ粒子を一定の圧力及び流量の圧縮空気で行い、試験前後の重量測定により摩耗減量を測定する。試験条件は、表-43 のとおりである。



写真-42 荒田式ブラストエロージョン試験機の外観

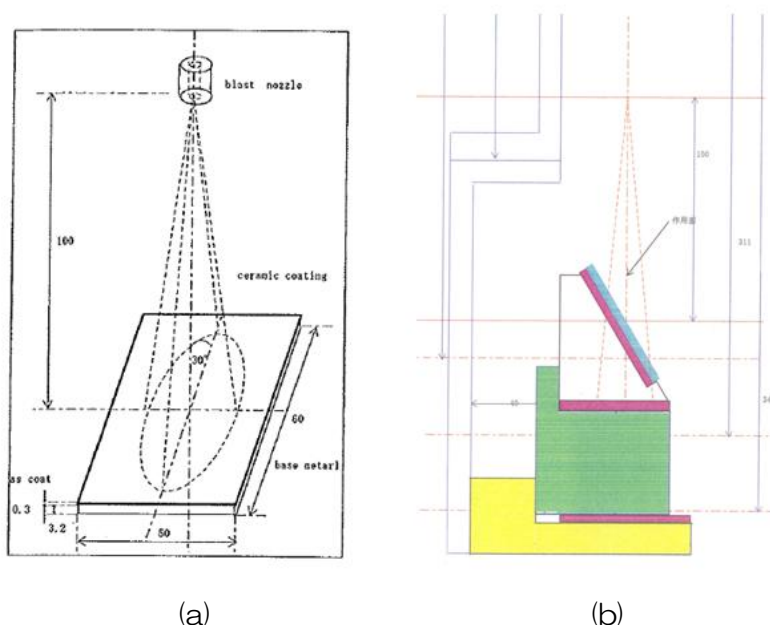


図-17 (a)試験原理及び(b)試験治具の形状・寸法

表-43 プラストエロージョン試験の試験条件

噴射材	噴射材重量(g)	噴射圧力(MPa)	噴射加速流量(L/min)	入斜角度(°)
アルミナ	70	263	252	30

噴射材：褐色アルミナ#54

(a) 溶射層のマイクロ組織観察結果

一般構造用圧延鋼板 (JIS SS400 寸法：60×50×厚 3.2mm) に対して従来型のフレーム溶射ガンを使用して Al-Mg 系合金及び Zn-Al 系合金を溶射し、各溶射層の断面マイクロ組織を写真-43 及び 44 に示す。

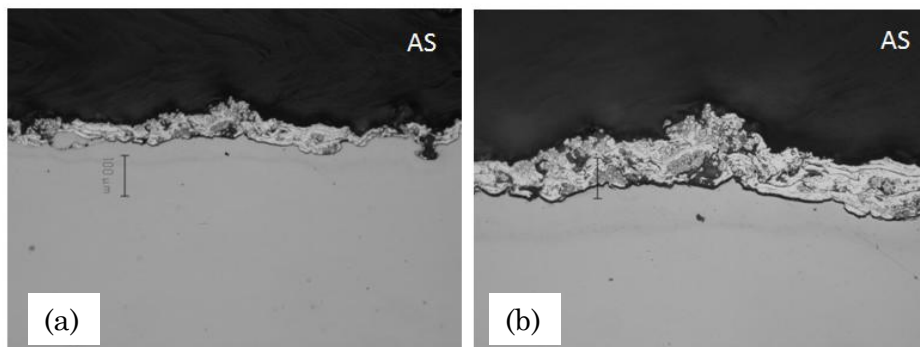


写真-43 従来型のフレーム溶射ガンを用いた Al-Mg 系合金溶射の断面マイクロ組織
(b)は(a)の拡大

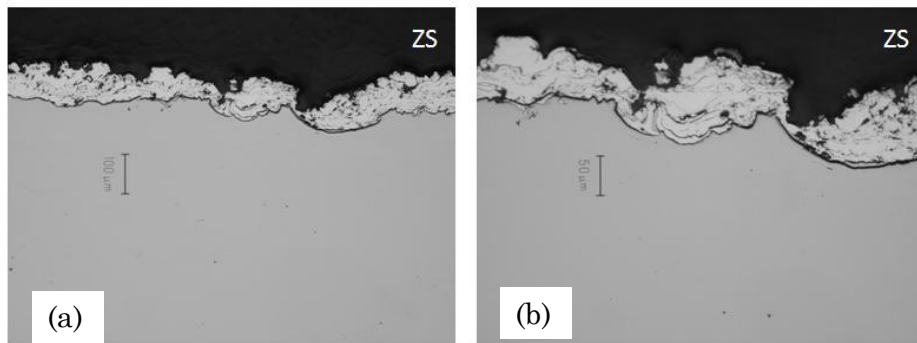


写真-44 従来型のフレーム溶射ガンを用いた Zn-Al 系合金溶射の断面マイクロ組織
(b)は(a)の拡大

いずれの溶射膜についても溶射層の厚さは 50 μm 程度であり、前処理のプラスト処理による表面形状に追従して溶射層が形成されていた。溶射層内部には微小な気孔が観察された。

また、溶射層内部では、溶射粒子が扁平状に堆積している形態が観察された。

写真-45 及び 46 には試作開発した狭隘部用溶射ガンを用いて Al-Mg 系合金及び Zn-Al 系合金の溶射皮膜の断面マイクロ組織を示す。溶射膜の厚さは、いずれの溶射材においても 70~100 μm 程度であり、従来型の溶射ガンの場合に比べて 10~20 μm 程度厚く、比較的均一に膜形成が行われた。また、溶射層表面の状態は、従来型溶射ガンの場合に比べて、凹凸が小さくなっている傾向を示した。

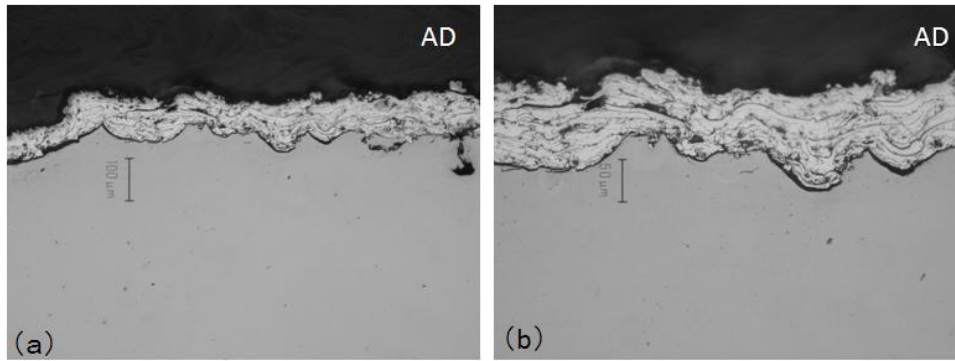


写真-45 試作開発型のフレイム溶射ガンを用いた Zn-Al 系合金溶射の断面マイクロ組織
 ((b)は(a)の拡大)

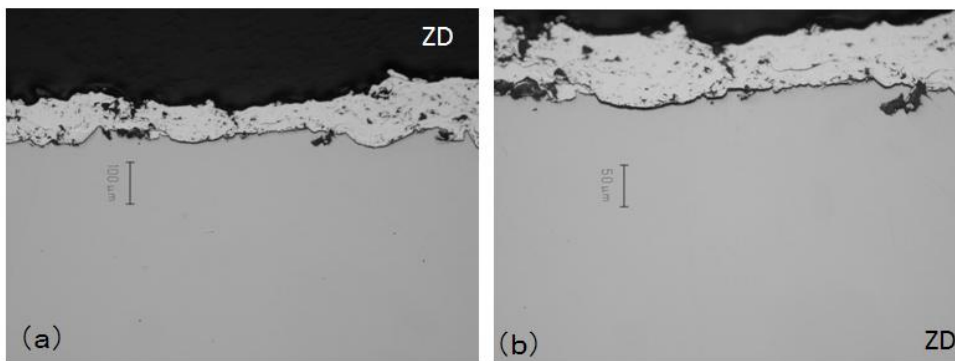


写真-46 試作開発型のフレイム溶射ガンを用いた Zn-Al 系合金溶射の断面マイクロ組織
 ((b)は(a)の拡大)

(b)ブラストエロージョン試験結果

Al-Mg 系及び Zn-Al 系合金溶射材料について、各溶射ガンで溶射した試験片のブラストエロージョン試験後の試験片の表面外観を写真-47 に示す。試験はそれぞれ 5 回行っており、5 回の試験終了後の表面外観を示している。いずれも噴射領域の中心付近が最も荒れた状態となっていた。

試験では、1 条件あたり 3 回試験を繰り返し、各試験回数毎に摩耗減量を測定した。正確な摩耗減量を得るため、基準試験片でのブラスト試験データを基に補正計算を行い、各試験回数毎の摩耗減量を算出した。

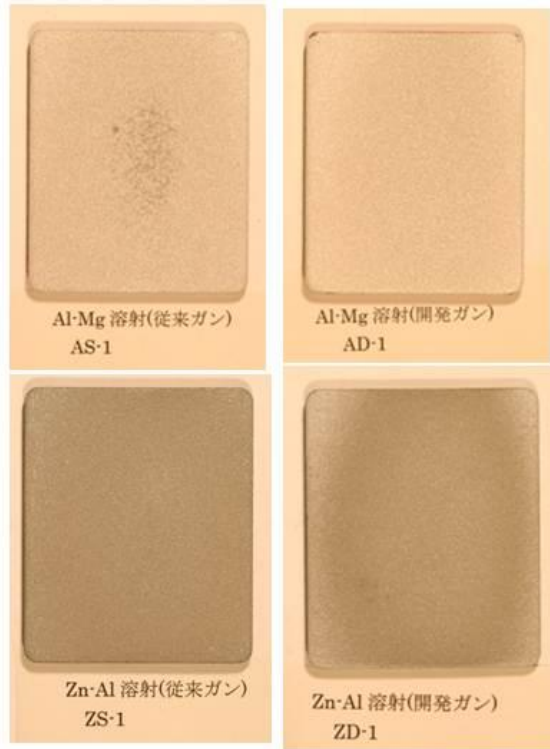


写真-47 プラストエロージョン試験(繰り返し5回)後の試験片の表面外観

図-18 及び 19 には Al-Mg 系合金溶射材について、溶射ガンを従来型及び開発品を用いて作製した溶射皮膜のプラスト試験後の摩耗減量を示す。図-18 の場合、1 回目のプラスト

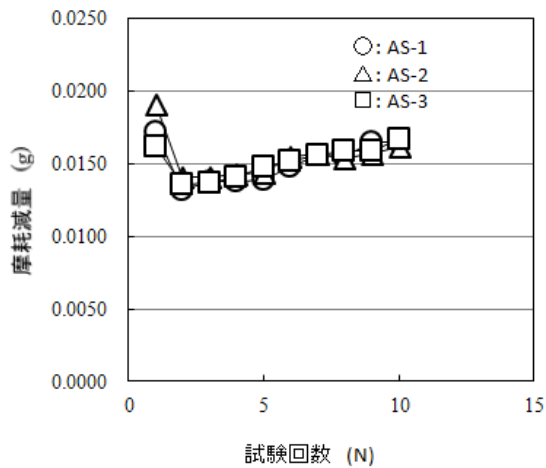


図-18 従来溶射ガンによる Al-Mg 系合金溶射皮膜の摩耗減量の変化

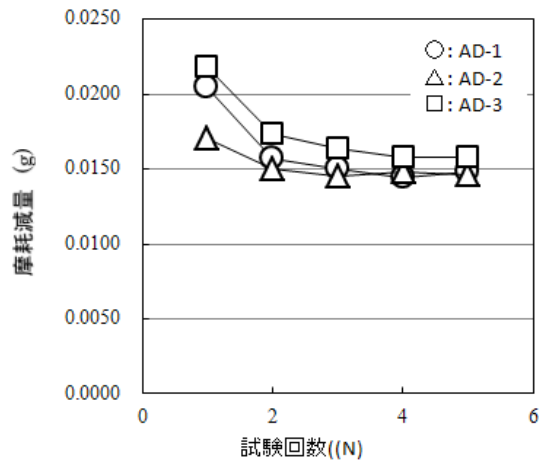


図-19 開発した溶射ガンによる Al-Mg 系合金溶射皮膜の摩耗減量の変化

試験で大きく減量した後、2 回目では摩耗減量は減少し、それ以降摩耗減量は微量であるが増加する傾向を示した。図-19 の開発ガンを用いた場合には、2 回目以降、

摩耗減量は徐々に減少し、4回目以降で一定値に収斂する傾向を示した。

図-20 及び 21 には Zn-Al 系合金溶射材について、溶射ガンを従来型及び開発品を用いて作製した溶射皮膜のブラスト試験後の摩耗減量を示す。Al-Mg 系合金溶射材に比べて摩耗減量は3倍程度多くなる傾向を示した。2回目以降の試験では摩耗減量はほとんど変化がなくなる。1回目のブラスト試験では、溶射皮膜表面が溶射ままの状態凹凸も大きいことから摩耗減量が増加したものと考えられ、2回目以降の試験でブラストにより表面性状が均一化していくと一定の摩耗量に収斂するものと考えられる。表-44 に試験回数が5回時の摩耗減量の平均値を示す。従来型と本事業で試作開発した溶射ガンによる摩耗減量の差はほとんど認められなかった。

以上のことから、試作開発した溶射ガンによる溶射皮膜の密着性能は従来の溶射施工と同等の性能を示すものと考えられる。

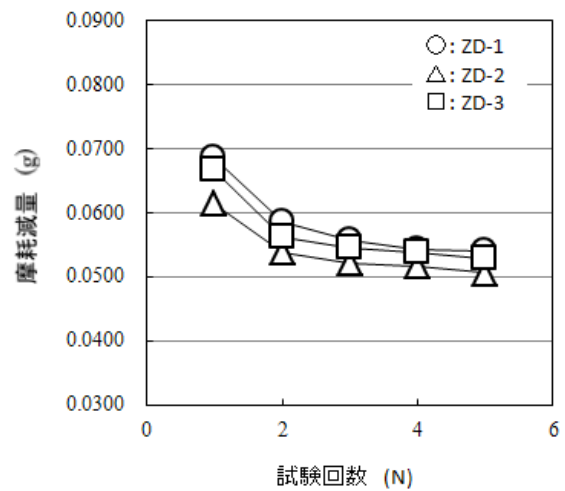
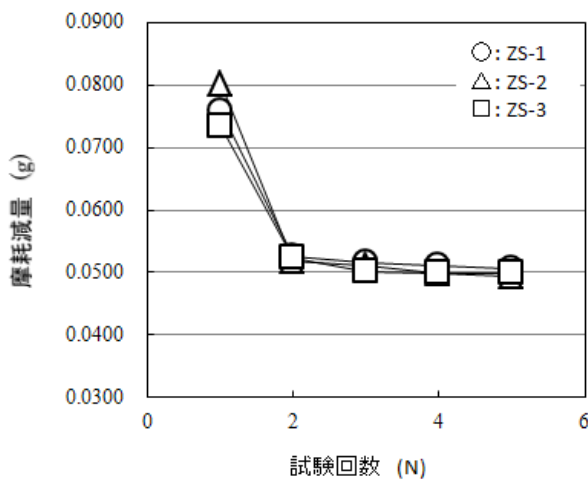


図-20 従来溶射ガンによる Zn-Al 系合金溶射皮膜の摩耗減量の変化

図-21 開発した溶射ガンによる Zn-Al 系合金溶射皮膜の摩耗減量の変化

表-44 試験回数5回後の各溶射皮膜のブラスト試験による摩耗減量値

(g)			
AS材	AD材	ZS材	ZD材
0.0144	0.0151	0.0496	0.0525
(5回試験後の平均摩耗減量)			

(3) 研究成果

専用締込み機によって発生したナット六角部の治具傷においては、そのまま溶射しても溶射皮膜の剥れは無く、目視では良好な溶射皮膜が形成されていた。治具傷部の密着性及び耐食性の評価においては、実機試験及び促進試験（キャス試験、複合サイクル試験）で評価している。現在のところ、亜鉛めっき仕様のボルトには赤錆の発生が見られることから、この度の溶射可能なめっきボルトを用いた工法は従来の工法よりは耐食性に優れていると判断される。しかし、これらの試験においては、明確な評価を行うには長期間の試験が必要となるため今後も継続していく予定である。

現場で躯体にボルト、ナットを締結してから溶射をする場合は、躯体部分の溶射が工場などで事前に溶射+封孔処理を行っているため溶射皮膜が躯体部分に密着しない。そのため、躯体部分への溶射の飛散を防止するためにマスキング方法を検討したが、ボルト、ナット、座金部と躯体部分を完全に区分できるマスキング方法を確立することは出来なかったため、マスキング不足によって発生する重ね塗り部分及び未溶射部分が発生した試験体の耐食性を実機試験及び促進試験を実施中である。

表面電位においては、溶射が可能な下地めっきとして調整した化学成分のめっき皮膜が、各種溶射皮膜より高い表面電位となったことで、電位順列が鉄地>下地めっき（亜鉛めっき）>各種溶射皮膜となり中性領域での表面電位では犠牲防食効果があることを確認した。犠牲防食効果においても、実機試験及び促進試験で確認していく予定である。

溶射層表面の状態は、従来溶射ガンに比べて、凹凸が小さくなった。従来型と本事業で試作開発した溶射ガンによる磨耗減量の差はほとんど見られず、試作開発した溶射ガンによる溶射皮膜の密着性は従来の溶射施工と同等を示すと考えられる。

2-4 サブテーマ④狭隘部溶射施工のための溶射ガンの改良

(1) 研究課題及び成果目標

一般に橋梁部材（鋼橋）に、防錆溶射を施すための溶射ガンの種類としては、ガスフレーム溶射ガン、アーク溶射ガン、プラズマ溶射ガンが用いられている。今回の研究で求められる、施工対象は締込後のボルト頭部及びナット部であり、各溶射ガン共に現行の溶射ガンでは、溶射に必要な距離、角度を保つ事が困難で、耐食性のある健全な溶射皮膜を形成する事が不可能である。

現地において締込後のボルト頭部及びナット部に溶射を施すに当たり、この課題を解決するために、下記3項目を成果目標とした。

【成果目標】

- ① 均一な溶射皮膜を形成可能にする。
- ② 工場内でのボルト溶射と同程度以上の施工スピードを確保する。
- ③ 締込み後のすべての箇所のボルト頭部及びナット部に溶射可能にする。

(2) 実施内容

① 開発溶射ガンの検討

ガスフレーム溶射ガン、アーク溶射ガン、プラズマ溶射ガンの違いは、吹付ける金属材料を溶融させる熱源により異なる。

各溶射ガンの特徴を検討した結果、現地狭隘部溶射施工のための利点の多い、ガスフレーム溶射ガンにて改良開発を行う事とした。

② 改良開発内容

現行のガスフレーム溶射ガンにて施工を試みたところ、ボルト頭部及びナット部の側面に正常な溶射皮膜を形成できず、施工対象に対して熱ボリュームが大きいため均一な皮膜を形成し難かった。また、1つのボルトに対し、工場内にて施工を行った場合と比べ、2倍以上の施工時間を要するなどの問題点があったため、ボルト頭部及びナット部の周囲を自動で回転し溶射を可能にする溶射ガンを開発した。

コーナー部に取り付けられているボルト頭部及びナット部への溶射が出来ないといった問題点もあったが、橋梁に取り付けられているボルト同士のピッチで、最小であると想定される箇所へ挿入可能な溶射ガンを開発した。

(3) 研究成果

① ボルト頭部及びナット部の周囲を自動で回転し溶射を可能にする溶射ガンの開発

開発が完了し、高力ボルト接合体の評価モデルに対し、試験施工を行った。

【成果】

- ・ 溶射対象に必要な以上の皮膜形成を防ぎ、均一な溶射皮膜を形成する事が可能となった。
- ・ ボルト頭部及びナット部に対し、一定の角度を保ち、一定のスピードで回転しているため、均一な皮膜が形成できた。
- ・ 1対のボルト頭部及びナット部に対し、概ね 10 秒～20 秒で、溶射皮膜を成膜可能である。これは工場内において現行の溶射ガンで施工した場合（1 対 30 秒～40 秒）よりも早く施工を終えている事になる。

【課題】

- ・溶射ガン自体が大きく、重い為、長時間人力で作業する事が困難である。
⇒小型化を目指す必要がある。
- ・溶射粒子が粗く緻密な溶射皮膜とは言い難い。
⇒今回は溶射皮膜を形成する事を目指したが、さらにエア量、ガス量の調整を行い、溶射粒子を細かくし、緻密で良好な皮膜にする必要がある。

② 橋梁ボルトの最小ピッチであると想定される箇所へ挿入可能な溶射ガンの開発
開発が完了し、高力ボルト接合体の評価モデルに対し、試験施工を行った。

【成果】

- ・溶射対象に必要以上の皮膜形成を防ぎ、均一な溶射皮膜を形成する事が可能となった。
- ・コーナー部も含めて、取り付けられている全てのボルト頭部及びナット部へ、溶射が可能となった。

【課題】

- ・概ね、完成されているが、今後、溶射皮膜の密着性と防錆力の関係等の検証を行い、必要であるならば、より密着力の高い溶射皮膜を形成できるよう検討、改良が必要である。

2-5 サブテーマ⑤実施工を想定した高力ボルト接合体の評価モデル

(1) 研究課題及び成果目標

試験体レベルでの評価では、実施工で発生する不具合を全て想定することが出来ないの
で、現場を想定した仮設橋を建設して評価する。

本研究では、橋梁に取り付けられた締込後ボルト頭部及びナット部への溶射施工を想定
した高力ボルト接合体の評価モデルを設置し、検証を行う事とした。

また、組付後の座金、ボルト及びナットの各境界における溶射皮膜の密着性が不明であ
るので、並行して当該箇所の密着性についての検証を行う事とした。

現地での施工を再現し、施工性及び形成された溶射皮膜の性能を確認するため、成果目
標は下記の6項目とした。

【成果目標】

- ① 改良開発した溶射ガンによる施工可否を確認する。
- ② 改良開発した溶射ガンでの施工性（施工時間、溶射皮膜厚み等）を確認する。
- ③ 締込後ボルト頭部及びナット部に対する実施工と同条件での施工性を確認する。
- ④ ①～③で確認をされた課題の検証を行い、課題を解決または、解決の方向性を
確認する。
- ⑤ 改良開発した溶射ガンにより形成された組付後の座金、ボルト及びナットの各境界
における溶射皮膜の密着性を確認し、当該箇所についても安定した皮膜を形成可能
とする。
- ⑥ 改良開発した溶射ガンにより形成された溶射皮膜の密着性、防錆性能を確認するた
め、実環境における長期暴露用の試験ボルトを設置し、溶射施工する。
（長期暴露とは、年単位での確認であるため、腐食度合いの確認等は期間後も行う
必要がある。）

(2) 実施内容

① 高力ボルト接合体の評価モデルの設置

設置するに当たり長期暴露を踏まえて、鋼材の腐食が顕著にみられる、海岸地域を
選択し、設置した。

② 改良開発した溶射ガンによる施工可否、施工性の確認

改良開発した、溶射ガンが 検討通りの施工性を発揮できるかを繰り返し確認した。
確認後、課題、改良点などを洗い出し、改良を施し、再度高力ボルト接合体の評価
モデルにて、確認を行った。

③ 実施工を想定した試験体における、荒田式ブラストエロージョン試験機による密着 力評価

本項では、実施工でのボルト締結を想定してボルト、座金、ナット及び試験体を組
み合わせたモデルを作製し、これに対して溶射試験を実施する。そして、締結部の各
部位の境界における荒田式ブラストエロージョン試験機を用いて、ブラスト試験を実
施して密着性の評価を行った。実験はあらかじめ板状試験片表面に溶射皮膜を作製し
た後、座金、ボルト及びナットを組み付ける。そして、ボルト設置側から各種溶射を
行い、溶射皮膜を形成させた。ブラスト試験では、次の 3 か所の場所での摩耗減量
を測定することとした。すなわち、ボルト頭部の角、ボルトー座金の境界及び座金一試
験片の境界の 3 か所に対してブラスト試験を実施し、密着性の評価を行った。

(3) 研究成果

- ① 改良開発した溶射ガンによる施工可否、施工性の確認及び確認された課題の対応策または方向付けを行い、改良開発を行った溶射ガンにて実際に締込後ボルト頭部及びナット部に対して施工した。

【成果】

- ・平面部に取り付けられているボルト頭部及びナット部に対して、迅速かつ均一な溶射が可能となった。1 対のボルト頭部及びナット部に対し、概ね 10 秒～20 秒で、溶射皮膜を形成可能である。
- ・コーナー部も含めて、取り付けられている全てのボルト頭部及びナット部へ、溶射が可能となった。また、熱ポリウムも通常の溶射ガンに比べ、小さく出来た結果、溶射皮膜の厚みも極端に厚い部分を発生させず、均一な皮膜を形成可能となった。

【課題】

- ・ボルト頭部及びナット部の周囲を自動で回転し溶射を可能にする溶射ガンについて、溶射皮膜を形成可能であるが、溶射粒子が粗く、緻密な溶射皮膜とは言い難い。今後、エアー、ガスの流量をさらに調整する必要がある。
- ・改良開発した溶射ガンについて、溶射皮膜の密着性と防錆力の関係等の検証を行い、必要であるならば、より密着力の高い溶射皮膜を形成できるよう検討、改良が必要である。
- ・現地施工時に、工場内にて塗布された封孔剤が溶射ガンより発生した炎によって焼かれてしまう、または封孔剤の上に溶射皮膜を形成してしまう。そのため、当該箇所では防錆力の検証が行えない状態であった。今後、工場内溶射施工部の保護方法を検証していく必要がある。
- ・工場内溶射施工部の保護方法を検討中の為、長期暴露用の試験体が未完了である。今後は、保護方法の確定次第、長期暴露の試験体を用意し、溶射皮膜の防錆力を検証していく必要がある。

- ② 正確に境界部にブラスト照射の中心が設定されるよう専用治具を設計製作し、ボルト締結部の各部位の境界部での溶射皮膜の密着性を荒田式ブラストエロージョン試験機にて評価した。

Al-Mg 系合金溶射材について、従来の溶射ガン及び本研究で開発した溶射ガンによる試験体に対するブラストエロージョン試験を行った。いずれも 10 回のブラスト試験を行い、いずれの場合も、ボルト頭部の角部及び座金の角部においては、溶射皮膜の一部剥離が認められた。また、各部位の境界（ボルト—座金及び座金—試験片）での摩耗による表面外観の色調、凹凸状況は変化しているが、皮膜剥離はなかった。

つぎに、Zn-Al 系合金溶射材について、従来の溶射ガン及び本研究で開発した溶射ガンによる試験体に対するブラストエロージョン試験を行った。いずれも 10 回のブラスト試験を行い、Zn-Al 系合金溶射の場合、ボルト頭部の角部や座金の角部での皮膜の剥離は観察されなかった。Al-Mg 系合金溶射と同様にいずれの部位においても摩耗は認められたが、溶射皮膜の剥離は観察されなかった。

図-22 及び 23 に Al-Mg 系合金溶射材について、溶射ガンを従来型及び開発品を用いた場合のボルト締結部の各部位におけるブラスト試験後の摩耗減量を示す。図-

22の従来型の溶射ガンを使用した場合、ボルト頭部での溶射皮膜の剥離があったにもかかわらず摩耗減量は比較的少なかった。いずれの部位においても試験回数により摩耗減量にバラツキが認められた。図-23の開発した溶射ガンを使用した場合には、初期の摩耗減量は、やや多いが試験回数とともに減少する傾向を示し、試験回数によるデータのバラツキも比較的少なかった。

試験片の形状が異なるため、厳密な比較はできないが、試験回数10回における摩耗減量は、平板試験片での摩耗減量とほとんど同じであった。

また、いずれの溶射ガンの場合もブラスト試験の対象部位による摩耗減量の差はほとんど認められなかった。

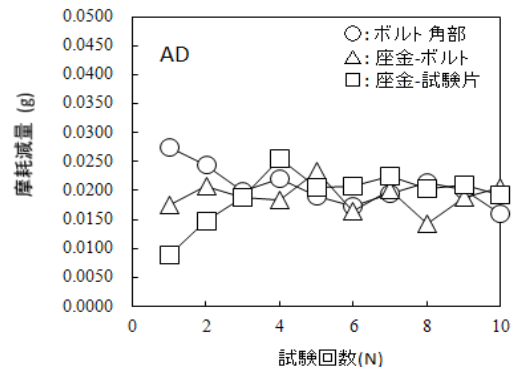
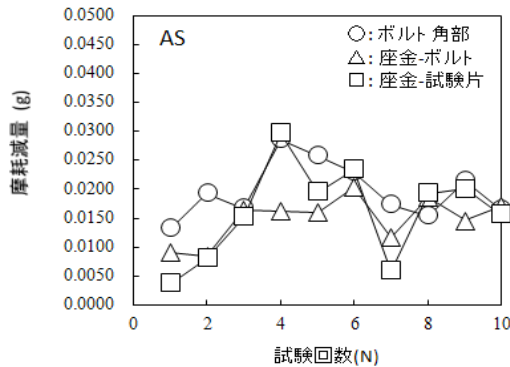


図-22 従来溶射ガンによる Al-Mg 系合金溶射皮膜の摩耗減量の変化

図-23 開発した溶射ガンによる Al-Mg 系合金溶射皮膜の摩耗減量の変化

つぎに、図-24 及び 25 には Zn-Al 系合金溶射材について、溶射ガンを従来型及び開発品を用いて作製したボルト締結部の溶射皮膜のブラスト試験後の摩耗減量を示す。試験回数は、10回までとした。Zn-Al 系溶射の場合、Al-Mg 系溶射に比べて摩耗減量は多くなることは平板での試験と同様な傾向を示した。図-24の従来型の溶射ガンを使用した場合、試験初期の摩耗減量は50~80mg程度と大きかった。ボルト頭部では70mgであったが、前述したように溶射皮膜の剥離は観察されなかったことから、摩耗による減量であると推察される。また、ブラスト試験の照射部位にほとんど関係なく、試験回数の増加とともに摩耗減量は減少する傾向を示した。しかし、図-25に示した試作開発した溶射ガンの場合は、徐々に一定の摩耗減量値になっていく傾向が認められた。これは、開発ガンが従来型の場合に比べて溶射皮膜の厚さ方向で均一な溶射層が形成されていることを示唆する現象とも考えられる。

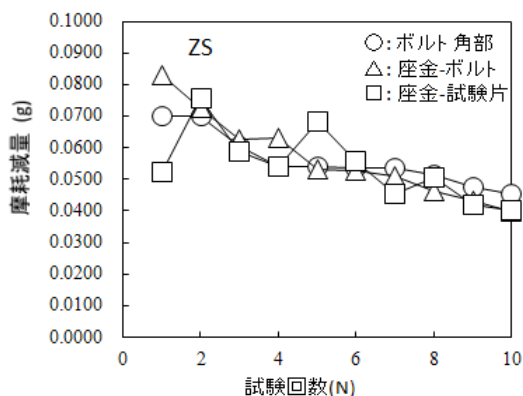


図-24 従来溶射ガンによる Zn-Al 系合金溶射皮膜の摩耗減量の変化

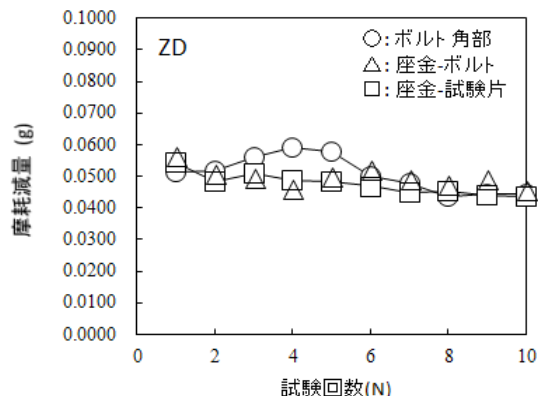


図-25 開発した溶射ガンによる Zn-Al 系合金溶射皮膜の摩耗減量の変化

以上のように、溶射施工が困難なボルト頭部の角部や座金の角部などでは、ブラスト試験の初期の段階では、皮膜剥離などが認められたが、その後の試験においては、摩耗減量は比較的少なく安定した摩耗挙動を示したものと考えられる。特に本研究で開発した溶射ガンは、狭隘部での溶射に適するような設計をしたため、ブラスト試験で数回の試験後からより安定した摩耗挙動を示していた。このことは、溶射角度をボルトへの溶射に適したような角度にしたことが溶射皮膜内部の層間の密着性の改善に効果があったものと考えられる。

第3章 全体総括

3-1 成果の総括

亜鉛めっき皮膜成分を調整することで、溶射が可能な下地亜鉛めっきが開発できた。また、下地亜鉛めっき表面に素地調整や一次防錆処理することで、屋外暴露した鋼板における密着力 4N 以上を実現した。実施工を想定した実機橋梁に締結した後に屋外暴露 1 ヶ月たったボルト、ナット、座金などの複雑構造に対しても溶射が可能となった。

建築構造物に使用する溶融亜鉛めっき超高力六角ボルト(12GSHTB)のセット(ボルト、ナット、座金)には、締結時に規定の施工方法(120°回転方法)で必要軸力の導入が出来ること、及びボルトの捻れがないことなどの性能を満足する必要があるため、下地亜鉛めっきを施したボルト、ナット、座金に対して、トルク係数、 $N-\theta$ 、機械的特性を測定したところ全ての必要性能項目において基準値を満足することを確認できた。また、これらの部材を用いた接合部の性能としてボルト軸力のリラクゼーション(軸力の減衰 12%以下)と部材間のすべり係数(摩擦係数 0.4 以上)が要求されるが、当該開発案件の溶射仕様においては、全ての性能基準を満足していることを確認した。

防錆溶射をする溶射ガンの種類として、ガスフレーム溶射ガン、アーク溶射ガン、プラズマ溶射ガンがあるが、現地狭隘部溶射施工において利点の多いガスフレーム溶射ガンの改良を行うこととした。改良した溶射ガンは、橋梁に取り付けられているボルト間にも入るように溶射材の線径が 2.0mm(通常は 3.2~4.7mm)のものを使用できる小型延長ノズルを装着させることで、狭隘部、コーナー部への溶射が可能となった。また、ボルト、ナットの側面へ均一な溶射を可能にする、ノズルに自動回転させる機構を設けた溶射ガンも製作することで、橋梁に取り付けられる全てのボルト頭部及びナット部の側面に対しても均一な溶射皮膜を形成できるようになった。

当該開発案件は、躯体部は工場での溶射を行うが、ボルト、ナット、座金においては躯体への締付け後に溶射を行うため、躯体部への溶射材の飛散を防止するためにマスキングする必要がある。しかし、この度の小型試験体でマスキング不良の発生が確認されたため、マスキング不良によって発生した溶射の重り塗り部や未溶射部に対して促進試験を実施しており、120h 経過したサンプルにおいて局所的な腐食などは確認されていない。亜鉛めっきのみの接合試験体においては赤錆が発生していた。

従来のフレーム溶射ガンによる溶射皮膜と試作開発した狭隘部用溶射ガンによる溶射皮膜に対して金属組織観察及び荒田式ブラストエロージョン試験機を用いた溶射皮膜の性状調査を行ったところ、密着性能は同等の性能を有すると推定される。

一般的に溶射施工が困難なボルト頭部の角部や座金の角部などに対して、改良した溶射ガンで溶射した溶射皮膜の性状を荒田式ブラストエロージョン試験機を用いて評価したところ、改良した溶射ガンは狭隘部への溶射に適するように設計をしているため、溶射皮膜内部の層間の密着性が従来の溶射ガンで溶射した場合より改善されていることが確認できた。

3-2 今後の取り組み

- ① 下地亜鉛めっきしたボルト、ナット、座金を建築構造物に仮締め、本締めから溶射までの期間及び環境において想定できないところが多々あるため、塩害区域における実機橋梁における施工実験を継続して行う。

- ② 試験レベルでの表面電位測定においては、構造物（鉄地）＞下地亜鉛めっき＞各溶射皮膜の電位順列となっているが、当該溶射工法を用いた施工における接合部が構造物の設置環境が異なっても犠牲防食が成り立つか確認していく。
- ③ 当該の溶射工法は、躯体は溶射＋封孔処理を工場で行うが、ボルト、ナットは締込み後溶射を行うため、ボルト、ナット以外をマスキングする必要がある。（封孔処理した溶射皮膜には溶射は密着しない。）このたびの開発では、薄板やガムテープでマスキングをしているので、溶射の重り塗りや未溶射部分が発生したため、簡易で溶射範囲制限できるマスキング方法の検討を行うとともに、溶射の重り塗りや未溶射部分が発生した箇所に対して、実機試験及び促進試験（キャス試験、複合サイクル試験など）による耐食性評価を行っていく予定である。
- ④ 改良した溶射ガンは大きく、重いため、長時間の作業が困難なため、小型化していく必要がある。この溶射ガンを用いて形成された溶射皮膜は、溶射粒子が粗く防食溶射としては不十分と考えるため、溶射粒子を細かく、緻密で良好な皮膜を形成できるようにエア量やガス量の条件を詰めていく。
- ⑤ 実機橋梁において、実際の施工工数を算出するために、改良開発した小型延長ノズル溶射ガンと回転型ノズル溶射ガンを用いた溶射テストを予定している。実機橋梁に取付けた溶射後のボルト、ナットに対しては、塩害地域における経時変化を観察していく予定である。

事業化の取り組み

- ・ 本事業の成果は、「橋梁の長期防錆金属溶射施工法」として技術的に実用化に至る見通しは立っており、本事業を通して明確になった実施工における課題を確実にクリアしていきたいと考える。試験施工で一定の評価を得ると同時にコスト面での優位性を裏付けて新設橋梁及び既設橋梁保全への普及拡大を図る。
- ・ 並行して『狭隘部対応溶射ガン』の精度向上及び小型軽量化を目指した次期モデルの開発を進め、高所作業を伴う鉄塔等の防錆事業の事業化を目指す。

以上