

# 「海外の事例を交えた鋼素地調整の課題と対策」

特定非営利活動法人 鋼構造物塗膜処理等研究会  
池田龍哉



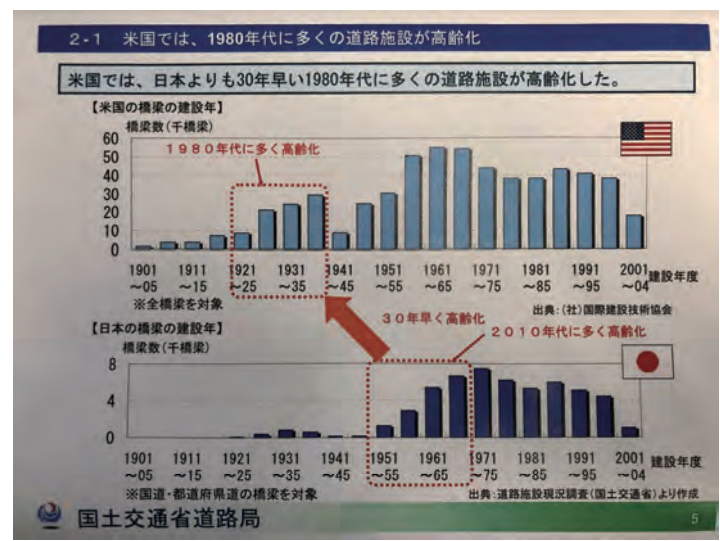
橋梁の長寿命化工事でRC-I 塗装系が一般化  
しかし、**早期発錆**など**品質トラブル**が起  
こっており、**エラーの原因**がはっきりしな  
いものも多い

## ▶なぜ**塗装エラー**が起こるのか？

要因	影響度
素地調整（1種、2種の差）	49.5%
塗り回数（1回塗りと2回塗りの差）	19.1%
塗料の種類（塗料系の違いなど）	4.9%
その他（塗装技術、気候など）	26.5%

【表】各種の要因が塗膜寿命に及ぼす影響  
出展：関西鋼構造物塗装研究会 編『塗る：やさしい塗装のはなし』

## ▶なぜ**塗装エラー**が起こるのか？



国土交通省道路局 「荒廃する日本」としないための道路管理 より

## ▶なぜ塗装エラーが起こるのか？

### 素地調整と

### 可溶性塩の影響を中心に

ブラスト素地調整発祥の国であり、  
日本より30年早く道路設備が高齢化していて  
日本同様有機ジンクシステムを採用している  
米国の対策を参考に問題を検討する

## 鋼の腐食～塩化物の影響

- 長年に渡って、鋼の腐食に可溶性塩が有害であることは認識されてきた



## 米国の用語解説

- **SSPC**～Steel Structures Painting Council 鋼構造物塗装協会  
QP～Qualification Procedures 会社認定制度  
SP～Surface Preparation 素地調整規格
- **NSRP**～National Shipbuilding Research Program 米国造船研究プログラム
- **NACE**～National Association of Corrosion Engineers 米国防蝕技術協会
- **OSHA**～Occupational Safety and Health Administration 米国労働省労働安全衛生庁
- **EPA**～United States Environmental Protection Agency 米国環境保護庁
- **NASA**～National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局

## 可溶性塩はなぜ有害なのか？

- 塩は空気中の水分を吸収して保持する。
- 塩は塗膜を通して水を引込む浸透作用を起こす



- 腐食セル内電解質の導電率が増加、他の低汚染部位間の塩濃度差で腐食電流が流れる電圧が発生
- 塗膜を通して酸素を導入し鉄塩 $\text{FeCl}_2$ が酸化され塩酸を放出する



- 塗膜下腐食が起こる  
※可溶性塩は腐食プロセス中に消費されない

塗膜欠陥部における腐食と素地調整の品質が低い部位における塗膜下腐食進行の概略図

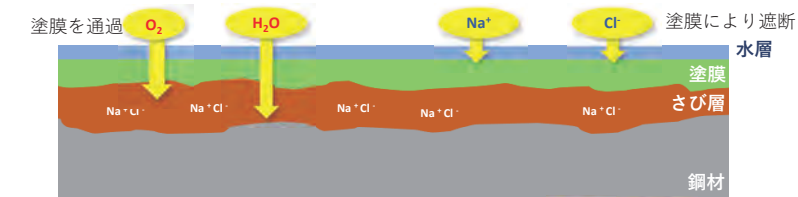
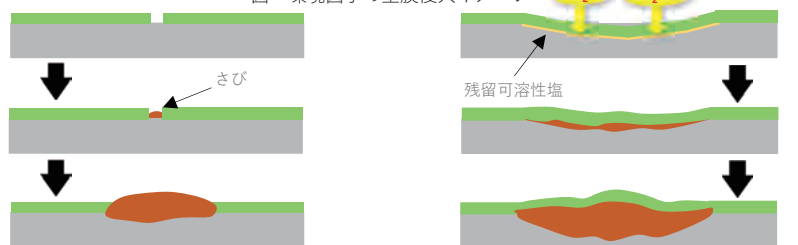


図 環境因子の塗膜侵入イメージ



(a) 塗膜欠陥部における腐食

(b) 素地調整不足部位における塗膜下腐食

何故**近年**、**可溶性塩**が引起こす問題を**重要視**するようになったのか？

## 旧塗装～**ユニークな鉛錆止塗料**

- 旧錆止めに含まれる**鉛顔料**は**微アルカリ性雰囲気**で**鋼材表面を不動態化**し、**脂肪酸と反応し生成する金属石鹸により塗膜を緻密に硬化**することで腐食因子を遮断、**腐食を低減**してきた



- 健康障害**が認識され、現在は**鉛含有塗料は厳しく制限**されている
- 鉛塗料生産廃止：米国1978-1992、日本1996-2016
- 鉛含有塗料の廃止**によって**塩の影響**をより考慮した**表面処理の要件**を検討しなければいけない状況。

素地調整終了後の鋼材表面に許される**可溶性塩の残留許容値**は？

# 可溶性塩の残留許容値は？

【日本国内】

- 「一般に旧塗膜上には50mg/m<sup>2</sup>以上の塩分が付着していると塗装後早期に塗膜欠陥を生じやすい。高圧水洗い等によって塩分が50mg/m<sup>2</sup>以下になるまで除去する必要がある」

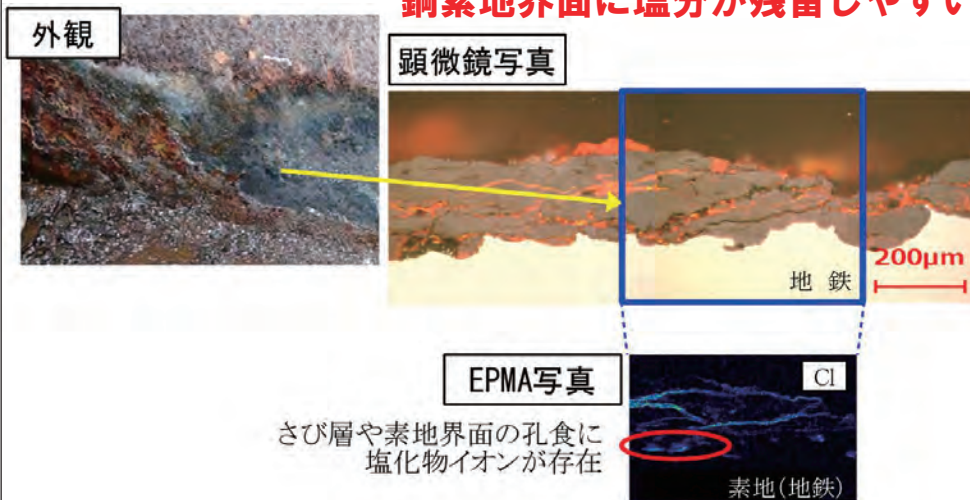
鋼道路橋防食便覧平成26年3月Ⅱ - 145Pより

※水道水の塩化物イオン量基準  
基準値:200mg/l以下  
北海道内:10~30mg/l前後



# 耐候性鋼材における層状さび層の断面偏光顕微鏡写真とEPMAにおけるCl分布

鋼素地界面に塩分が残留しやすい

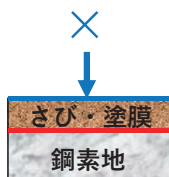


さび層や素地界面の孔食に塩化物イオンが存在

土木学会 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策より

# 可溶性塩の残留許容値は？

鋼素地の表面の塩分が重要  
(塗膜や錆の表面ではない)



錆の表面から洗浄しても錆の中に入り込んだ塩は除去できない

- 鋼素地の表面に塩分付着
- 塗装後早期に塗膜下腐食が発生

# 可溶性塩の残留許容値は？

【アメリカ】

- 可溶性塩の1970年代から許容値の研究
- 各機関でさまざまな閾値が公表されている



- 塩化物が塗膜不良を引き起こし始める閾値に影響を与える可能性がある変数が多くある為、最大許容塩化物レベルの統一基準は合意されていない

## 可溶性塩の残留許容値は？

【アメリカ】

- 1970年代後半、NASAが $5\mu\text{g}/\text{cm}^2$  ( $50\text{mg}/\text{m}^2$ ) の塩化物閾値を設定

1962年：ケネディ宇宙センター(KSC)NASAの発射センターとして運用開始。海洋環境は、多くの腐食障害を引き起こした。

1966年：炭素鋼の腐食保護を目的とした塗装鋼板の大気暴露試験がジェミニ/アポロ計画中にケネディ岬発射台近傍で開始

## 可溶性塩の残留許容値は？

【アメリカ】

- 米海軍 (+NSRP) は1990年代初頭に塩化物の制限を開始

暴露部： $100\text{mg}/\text{m}^2$ ・没水部： $50\text{mg}/\text{m}^2$



→ 早期腐食などエラーが続き、より厳しい基準に

暴露部： $50\text{mg}/\text{m}^2$ ・没水部： $30\text{mg}/\text{m}^2$

- 州政府の道路橋の多くは $100\text{mg}/\text{m}^2$ を採用しているが早期腐食が多く基準変更または変更を検討中

## 可溶性塩の残留許容値の研究

【アメリカ】

- 塩化物量 $100\text{mg}/\text{m}^2$ と比較した $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下の有用性の検証
- 10mil ( $254\mu\text{m}$ ) 未満の塗膜下での試験
- 10mil ( $254\mu\text{m}$ ) 以上の塗膜下での試験
- NSRPでは没水部基準をより厳しくする $20\text{mg}/\text{m}^2$ 未満への検討
- フィールドでの塩分測定技術の精度の向上

▶ 塗膜下腐食による塗装エラーによる期待する耐用年数を満たせず、コスト面で重篤な問題となっている。

1990年代後半に塗膜下腐食の危険性を訴える声があったが、近年実際塗装エラーが起きて、急いで水洗及び関連する技術の研究・開発・テストが行われている

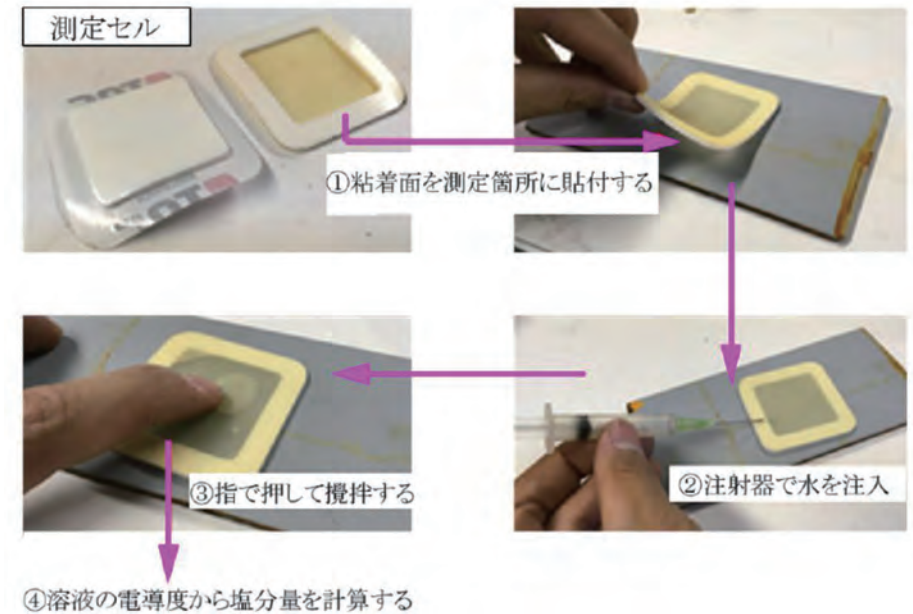
## 塩分測定技術の課題

## 塩分測定技術 電導度法



土木学会 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策より

## 塩分測定技術 ブレッセル法



土木学会 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策より

## 塩分測定技術の課題

①測定できる面積が少ない (0.0016m<sup>2</sup>/箇所)

→塩は高濃度で偏在している為拾いきれない  
→孔食部や重度の錆部、凹凸部位の測定ができない

②測定箇所数などの運用ルールが整備されていない

## 湿式素地調整工法の規格

## 乾式ブラスト素地調整規格と塩の関係性

乾式ブラスト素地調整程度ISO Sa3、Sa2 ½は目で見える鋼表面の清浄度

→目視出来ない可溶性塩の清浄度判定とは関連しない

▶乾式ブラストのみでは塩分を完全に除去できない

「動力工具や乾式ブラストでの塩分の除去効果についてはいくつかの調査事例が報告されているが、元々の腐食状況や塩分付着量、素地調整資機材が異なる為、定量的な評価ではない事に留意する必要がある」

土木学会 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策より

※研削材の鋼表面への刺さりこみにより塩を埋め込む可能性

## 湿式素地調整工法の規格

• WAB－ウェット・アブレッシブ・ブラスト－湿式ブラスト

WABは、水と研削材との混合物を使用し、乾式ブラスト（DAB）と同様の表面清浄度および表面プロファイル（粗さ）を生成することができる。

粉塵抑制や可溶性塩汚染を減少させることができる。

「ウェットアブレッシブブラスト洗浄によるニアホワイトメタル表面処理」は2015年作成

Degree of Surface	Cleanliness Designation
• White Metal	SSPC-SP 5 (WAB) →ISO Sa3
• Near-White Metal	SSPC-SP 10 (WAB) →ISO Sa2 1/2
• Commercial	SSPC-SP 6 (WAB) →ISO Sa2
• Industrial	SSPC-SP 14 (WAB)
• Brush-Off	SSPC-SP 7 (WAB) →ISO Sa1

## 湿式素地調整工法の規格

塩を除去する最も有効な方法は  
水を使った湿式洗浄工法

- A) 湿式ブラスト～水と研削材をブラストする工法  
※研削材に水を添加する方法と水量による工法分け  
A-①スラリーブラスト工法  
A-②モイスクチュアブラスト工法
- B) 水洗工法～水に圧力を掛けて噴射し洗浄する工法  
※掛ける圧力により工法を分ける  
B-①高压洗浄工法（圧力34MPa以下）  
B-②ウォータージェット工法

## 湿式素地調整工法の規格

• WJ－ウォータージェット－超高压水洗浄

WJは加圧された水で汚染物質を含む塗料および他の物質を鋼素地から除去し、規定された表面清浄度を達成する。

水溶性の表面汚染物質、特に腐食した鋼素地表面の孔食底に見られる汚染物質を低減もしくは完全に除去することができる

Degree of Surface	Cleanliness Designation
White Metal	SSPC-SP WJ-1 Clean to Bare Substrate
Near-White Metal	SSPC-SP WJ-2 Very Thorough Cleaning /ISO Wa2 1/2
Commercial	SSPC-SP WJ-3 Thorough Cleaning/ISO Wa2
Brush-Off	SSPC-SP WJ-4 Light Cleaning/ISO Wa1

# 湿式素地調整工法の規格

• SSPC (NACE共通) 規格 - ウォータージェット

水道水: 圧力0.2MPa~0.6MPa (2kgf/cm<sup>2</sup> ~6kgf/cm<sup>2</sup>)

低圧水洗浄 (LP WC): 圧力34 MPa未満の水洗浄

高圧水洗浄 (HP WC): 圧力34~70 MPaの水洗浄

ウォータージェット (WJ):

圧力70 MPa以上のウォータージェット。噴射速度340m/s以上

高圧ウォータージェット (HP WJ):

圧力70~210 MPaのウォータージェット

超高压ウォータージェット (UHP WJ):

圧力210MPa(2143kgf/cm<sup>2</sup>) 以上のウォータージェット

# 湿式洗浄工法の利点と課題

## 湿式工法の利点と課題

A-①スラリーブラスト (通称:湿粒ブラスト)

噴射圧力:0.7MPa 流速300m/s未満 水量:4~5ℓ/min

研削材:フェロニッケルスラグ

【原理】ブラストタンク内で研削材と水を混ぜスラリー状でブラスト噴射する

【利点】洗浄能力と研削能力を有する

- 5ℓ/minの水で洗浄しながら研削できる工法
- 研削能力が高く、鏽中・孔食内の塩分除去に効果的

【課題】機械本体から20~40mの施工範囲、施工条件が限定される。大量のスラリー状の研削廃材が発生。産廃回収と養生など環境面の問題が多い

## 湿式工法の利点と課題

A-②モイスチュアブラスト

噴射圧力:1MPa 流速340m/s 水量:0.5ℓ/min

研削材:フェロニッケルスラグ

【原理】ブラストノズル内で研削材を水でコーティングしてブラスト噴射する

【利点】少量の水で抑塵しながら研削する

- 0.5ℓ/minの水で粉塵を抑えて研削できる工法
- 原理的に除鏽能力は高いが洗浄能力は低い

【課題】スラリーブラストと同様に産廃回収と養生など環境面の問題が多い。洗浄より環境面での抑塵目的のブラスト作業に用いられる。



## 湿式工法の利点と課題

### B-②ウォータージェット

噴射圧力:245MPa 流速1020m/s 水量:12ℓ/min

研削材:なし 噴射後水温60~70℃前後

【原理】水を245MPaに加圧し噴射する

【利点】12ℓ/minの超高压水で洗浄する

- 洗浄能力が高く、70℃前後の温水洗浄効果も期待できる工法。機械本体から100~140mの施工範囲
- 原理的に洗浄能力は高いが研削能力は低い

【課題】研削能力が低い為、厚い錆などは別方法で除去しなければならない。研削材を用いない為、産廃は少ないが、廃水処理は必須

## 湿式工法の共通の課題

ターニング=戻り錆

フラッシュ錆=早期に起る戻り錆

### 第5章 素地調整

場合によっては4時間以内にターニング



ブラスト処理後30分



ブラスト処理後4時間

耐候性鋼材における素地調整程度1種(ブラスト処理)  
実施後のターニング発生状況

土木学会 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策より



## フラッシュ錆(ターニング)

「汚染されていない清浄な鋼表面は、湿度が100%あっても数百時間錆びない」



フラッシュ錆が短時間でかなりの程度まで発生した場合は何らかの汚染を疑うべきである



フラッシュ錆発錆前に素早く塗装することは不適切であり、エラー原因の隠蔽につながる

G.C. Soltz NSAP

## 米国における現場での取り組み事例

### ルイジアナ州 THE HUEY P. LONG BRIDGE 視察



### SSPC-QP (Qualification Procedures) 会社を対象とした認証システムの種類

- QP1 重防食塗装業者の資格を評価
- QP2 有害物質含有塗膜除去塗装業者を評価
- QP3 工場塗装業者の資格を評価
- QP4 非塗装作業の有害物質含有塗膜除去資格評価
- QP5 検査機関の認定基準を評価
- QP6 金属溶射業者の資格を評価
- QP7 限られた作業経験を有する塗装業者を評価
- QP8 コンクリート保護塗装業者の資格を評価
- QP9 建築塗装業者の資格を評価

## QP1 工業用/船舶塗装業者の資格を評価

- 権限と責任を明確に定義した**企業組織**
- 適格**管理職**、資格ある**技術者**、**労働者**を雇用
- **品質管理システム**を確立し実施
- **作業安全衛生プログラム**を確立し実施
- **環境保護手順**を確立し実施
- 業界の**技術基準**と優れた**塗装実践**の知識をもつ

## QP2 有害塗膜を除去する塗装請負業者の資格を評価

発注者は、**封じ込め要件**及び**換気要件**に基づいて、工事に適切な認証カテゴリを決定。有害塗膜除去作業中に労働者の**安全衛生プログラム**および**環境保護プログラム**の最小要件も定めている。

カテゴリ A：換気式封じ込めシステム内で乾式ブラスト、電動工具、湿式砥粒ブラスト、ウォータージェットで構成。**負圧で設計された換気システムの使用**



## 3-1SP (SurfacePreparation) 素地調整規格

**SP5 ホワイトメタル ブラストクリーニング = ISO Sa3**  
**SP6 コマーシャル ブラストクリーニング = ISO Sa2**  
**SP7 ブラッシュオフ ブラストクリーニング = ISO Sa1**  
**SP10 ニアホワイト ブラストクリーニング = ISO Sa2 1/2**  
**SP14 インダストリアル ブラストクリーニング**  
**SP16 塗装及び未塗装の亜鉛メッキ鋼、ステンレス鋼及び非鉄金属のブラッシュオフブラスト洗浄**

ブラスト洗浄の主な機能は、(a) コーティングの早期破壊を引き起こす可能性のある物質を**表面から除去**する事、(b) 新しいコーティングシステムの**接着性を高める**ための適切な**表面プロファイル (粗さ)**を得ることである。

※SSPC SP COMより



## 封じ込め養生の特徴 熱収縮シート



- 従来シートに比べ**強度**があり、**破れにくく**、**ほつれにくい**。
- 重量が**軽く**、死荷重の減少が見込める
- **採光性**が高い
- **耐水性**が高く、漏水しにくい
- シート**接合部**を**圧着**する為**密封性**が高い
- **難燃性**

## 封じ込め (密封養生) 状況 ロスハイウェイ 塗替え現場より

封じ込め (熱収縮シート)  
外観朝顔部



集塵ダクト及び  
封じ込め朝顔内部区画



## 封じ込め（密封養生）状況

床面養生・熱収縮シート



床面養生熱収縮シート 端部処理



## 米国の事例まとめ～技術面・運用面

- 発注時の情報（既存塗膜厚、有害物質含有量）
  - 発注時に施工困難部位の指定と施工法を明記
  - 施工前検討会議の実施
  - 素地調整（SP）にて表面粗さや生産性、研削材の種類による影響を定義
  - 封じ込め「密閉養生」（CONTAINMENT）のガイドラインを制定
- ※耐水・耐塵養生

## 米国の事例まとめ～安全面

- 1985年より鉛含有粉塵の剥離問題に取り組む  
安全基準→OHSА、EPAの法令を基にSSPCで規定運用  
→QP 2 など
- QP（会社単位）→安全・品質基準担保
- 資格認定（個人）→作業者の安全・技能水準担保

- 運用面と同じく州により安全基準が違う。連邦OSHAを批准しているのは50州中23州
- 非QP業者の取り締まりの問題

## 鋼材表面残留可溶性除去技術

# 鋼材表面**残留塩**除去技術の一例

旧塗装面 塩分付着確認

塗膜表面**塩分50mg/m<sup>2</sup>以下**確認

※構造上、塩が付き**やすい部分**を想定し計測箇所を検討する

- ① **腐食部先行** 乾式ブラスト
- ② 高圧水洗（圧力20MPa以上）
- ③ 全体乾式ブラスト

素地調整後の鋼材表面**塩分50mg/m<sup>2</sup>以下**確認

※可能な限り腐食箇所を測定

→50mg/m<sup>2</sup>以下④へ →50mg/m<sup>2</sup>超②へ

- ④ 仕上がり品質管理（除錆度・表面粗さ・付着粉塵）
- ⑤ 塗装

**土木学会 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策より**

※塩分測定による濡れにより生じた軽度のフラッシュ錆は縦回転式動力工具にて再素地調整

# 鋼材表面**残留塩**除去技術の一例

【耐候性鋼材や重度の錆】

- ① 厚い錆部→ハンマリング・パワーツール
- ② 全体**ウォータージェット（210～245MPa）**
- ③ 一定の時間後、孔食部・**重度錆部**で重度フラッシュ錆発生錆状況を確認

⇒**重度フラッシュ錆が確認できた場合②**

- ④ 全体乾式ブラスト

素地調整後の鋼材表面**塩分50mg/m<sup>2</sup>以下**確認

※可能な限り腐食箇所を測定

→50mg/m<sup>2</sup>以下⑤へ →50mg/m<sup>2</sup>超②へ

- ⑤ 仕上がり品質管理（除錆度・表面粗さ・付着粉塵）
- ⑥ 塗装

※塩分測定による濡れにより生じた軽度のフラッシュ錆は縦回転式動力工具にて再素地調整

## 今後の鋼素地調整の**課題と対策**

## 今後の鋼素地調整の**課題と対策**

### 【問題】

▶鋼材表面素地に**可溶性塩が付着したまま塗装**され**塗膜下腐食**が発生し、**早期に腐食**を起す

### 【方向性】

- ▶表面付着**塩分測定**の徹底と確認
- ▶**水**を用いた**湿式洗浄**工法の積極的な活用

## 今後の鋼素地調整の課題と対策

### 【課題】

- ①洗浄水の廃水処理の問題→廃水産廃コスト問題
- ②足場からの水漏れの問題→周辺環境問題
- ③鋼素地での塩分測定個所数→規格化の問題
- ④高濃度塩偏在による塩分測定の精度の問題
- ⑤ブラスト後の水洗いによる清掃作業の煩雑化

### 【対策】

- ①廃水の無害化処理などによるコストダウンなど
- ②熱収縮シートなど耐水養生の開発・採用
- ③今後研究の進展による規格化
- ④錆部への重点的な施工とターニングによる目視
- ⑤歩掛の見直し及び施工業者の意識改革

## 今後の鋼素地調整の課題と対策

### 【技術的な積み残し課題】

塗替え塗布塗膜厚さ毎の許容塩分閾値

ターニング速さと残留可溶性塩濃度の関係

屋外での高濃度に偏在する可溶性塩を測定する技術の開発・手法の構築

## まとめ

近年頻発している塗装エラーの大きな要因のひとつとして鋼材表面に残留する可溶性塩が考えられる。

鋼材を長持ちさせる為には鋼材表面の可溶性塩の除去洗浄は必須である。

廃塗膜回収困難化、廃水処理の問題、養生の問題などで嫌煙されがちな水を使った洗浄工法を工夫し、所定の耐用年数を確保する為、関与する技術者全てが意識を変えていかなければならない。