

# 塗膜剥離を抑制する新型変性エポキシ樹脂の開発

## ～線膨張係数に着目した塗料設計の今後の展望～

○西森修次<sup>1)</sup>、大捕秀基<sup>1)</sup>、坂口聡彦<sup>1)</sup>

### 1. はじめに

屋外構造物における防食耐久性は、防食塗膜の遮断性と付着性（耐剥離性）で決まる。すなわち、長期間屋外環境に曝された後の遮断性が高ければ高い程、付着性（耐剥離性）が高ければ高い程、その防食塗膜の防食耐久性は優れている。

これまでの我々の研究で、従来の防食塗膜は線膨張係数が大きいため、厚く塗装する程、剥離し易くなっていたのに対し、線膨張係数  $\alpha_1=3.2\times 10^{-5}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]という閾値より低くなると、厚く塗装する程、むしろ剥離し難くなるという知見を得ている<sup>1)</sup>。この新たな知見は、今後の防食塗膜の設計における配合裕度の大幅な改善を示唆しており、画期的な技術進歩が望める。

今回、この線膨張係数に着目した塗料（以下、 $\alpha$  シリーズと略す）という考え方が、今後の防食塗料設計に及ぼす影響や今後の展望について考察するとともに、超長期に防食塗装で設備を保守しなければならない鋼構造物の新たな超重防食塗装仕様について提案したい。

### 2. 塗膜剥離の支配的要因の考察

塗膜剥離は、塗膜が収縮・膨張した際に発生する応力によって引き起こされるが、この収縮・膨張としては、①樹脂の硬化反応によるもの（硬化収縮）や、②温度変化によるもの（熱膨張・収縮）がある。

屋外構造物用防食塗膜（硬化機構から言えば常温硬化型防食塗膜）において、①と②のどちらが支配的かという疑問に応えるべく、以下のような実験を行った。

線膨張係数  $\alpha_1$  と硬化反応度（硬化収縮の進み具合）が異なる塗膜の耐剥離性を確認するため、 $\alpha_1$  の異なる強溶剤型変性エポキシ樹脂塗料を試作し、それぞれのキュア条件を変えて、硬化反応度を変化させた塗膜剥離促進試験用ヒートサイクル試験テストピースを

---

1) (株) 四国総合研究所 化学バイオ技術部 塗料化学グループ

〒761-0113 香川県高松市屋島西町 2109 番地 8

作製した。厚く塗装すればする程、剥離し易い従来塗膜並みの線膨張係数  $\alpha_1=5.7\times 10^{-5}$  [°C]の供試塗料Aと、厚く塗装すればする程、剥離し難くなる線膨張係数  $\alpha_1=3.1\times 10^{-5}$  [°C]の供試塗料Bについて、それぞれ  $60\mu\text{m}\times 1$  回塗り、 $60\mu\text{m}\times 3$  回塗りのテストピースを準備し、そのそれぞれについて、塗装後、23°Cで1週間(168時間)養生するものと、50°Cで50日(1200時間)養生したものを準備し、耐剥離性促進試験(ヒートサイクル試験)を行った。

塗装は、素地(SPCC-SD鋼板  $70\times 150\times 3.2\text{mm}$ )に容易に剥離する層(ビニル樹脂)を形成し、十分養生をしたのちに供試塗料AおよびBを塗り重ねた。養生後、試験片の上部および下部の2箇所に素地まで達する#型のカットを挿入し、50°C(2h)→常温(1h)→-30°C(2h)→常温(1h)を繰り返すヒートサイクルに供した。

表 1  $\alpha_1$ および硬化反応度が異なる塗膜のヒートサイクル試験結果

| 塗料      | 塗料A ( $\alpha_1$ :大) |                   |                  |                   | 塗料B ( $\alpha_1$ :小) |                   |                  |                   |
|---------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|         | 23°C×168h            |                   | 50°C×1200h       |                   | 23°C×168h            |                   | 50°C×1200h       |                   |
| 養生      | 60 $\mu\text{m}$     | 180 $\mu\text{m}$ | 60 $\mu\text{m}$ | 180 $\mu\text{m}$ | 60 $\mu\text{m}$     | 180 $\mu\text{m}$ | 60 $\mu\text{m}$ | 180 $\mu\text{m}$ |
| 膜厚      |                      |                   |                  |                   |                      |                   |                  |                   |
| 初期      |                      |                   |                  |                   |                      |                   |                  |                   |
| 剥離      | 無し                   | ←                 | ←                | ←                 | ←                    | ←                 | ←                | ←                 |
| 10 サイクル |                      |                   |                  |                   |                      |                   |                  |                   |
| 剥離      | 小                    | 大                 | 小                | 大                 | 大                    | 小                 | 大                | 小                 |

ヒートサイクル試験前の塗膜外観(初期)を比較すると、どの塗膜も顕著な剥離は発生しておらず、50°C×1200時間の硬化反応が十分に進行していると予想される塗膜でも、顕著な剥離が発生していないことを確認した。ヒートサイクル試験1サイクルで50°Cの条件に晒される時間は約1時間であることから、50°C×1200時間のキュアによって、ヒートサイクル1200サイクルと同等の硬化反応が進んだものと考えられる。

次に、それぞれの養生を行った試験片をヒートサイクル試験10サイクル供した後の塗膜外観(10サイクル)を見ると、僅か10サイクルであるが、線膨張係数の大きい供試塗料Aでは、顕著な剥離が起こっており、膜厚が厚い程、剥離程度が大きかった。しかし、キュア条件の違いによる差は軽微であった。また、線膨張係数の小さい供試塗料Bでは、

供試塗料 A に比べて軽微な剥離しか起こっておらず、膜厚が厚い程、剥離程度が小さかった。しかし、供試塗料 A と同様、キュア一条件の違いによる剥離程度の差は軽微であった。

この事より、①の樹脂の硬化反応によるもの（硬化収縮）は、②の温度変化によるもの（熱膨張・収縮）に比べ、塗膜剥離に対する影響は軽微であり、少なくとも屋外構造物用防食塗膜における塗膜剥離の影響は、②が支配的であることが確認された。

これまで、塗膜の硬化収縮応力の増大によって、塗膜剥離が発生するような表現がなされるが多かったが、実環境で起こる屋外構造物用防食塗膜の剥離は、昼夜間、季節間の温度差で生じる熱膨張、熱収縮の繰り返しによって、塗膜剥離が発生するのが主であると考えるのが妥当である。

### 3. 線膨張係数に着目した塗料の設計裕度に関する考察

屋外構造物用防食塗膜の塗膜剥離は②温度変化によるもの（熱膨張・収縮）が主であることから、環境温度が  $T_1 \sim T_2$  に変化するとき、塗膜に生じる応力  $\sigma$  は下式(1)で近似される。

$$\sigma \cong \int_{T_1}^{T_g} \alpha_1 \cdot E_1 dT \quad (1)$$

$\sigma$  を小さくするためには、(1)式より、 $T_g$ 、 $\alpha_1$ 、 $E_1$  を小さくすれば良いことが判る。従来の屋外構造物用防食塗料に対する設計は  $T_g$  や  $E_1$  を下げる手法が多く用いられてきた。

屋外構造物に塗装するエポキシ樹脂（変性エポキシ樹脂塗料など）は、硬化密度を下げ、硬化収縮応力を小さくすることで、塗膜剥離を一応、抑制している。一応抑制と述べたのは、前々報で報告されたように、何層も塗り重ねて膜厚が厚くなると、やがて応力が増大し、剥離リスクが高くなるからである。この耐剥離性重視塗料は硬化密度が小さいため、ガラス転移温度  $T_g$  が低く、弾性率  $E_1$  も小さくなる。このことによって、式(1)の応力は一応、小さくなっている。

この硬化密度を下げる方法は、遮断性を犠牲にして、付着性を向上させようとした手法である。言い換えれば、これまでの変性エポキシ樹脂塗料は、防食塗膜の耐久性を決める塗膜の遮断性と付着性の内、遮断性を犠牲にして、付着性を向上させた妥協の塗料と言える。これまで、防食塗料業界は、このような遮断性と付着性のバランス取りを行ってきた訳である。

しかし、実は、遮断性を重視する塗料も簡単に  $\alpha_1$  を小さくすることができ、線膨張係数に着目した配合設計にすれば、これまでの遮断性と付着性の関係がトレードオフの関係ではなく、両立できる設計が可能となる。このように、線膨張係数に着目することによって、防食塗料の配合設計は裕度が増し、耐剥離性だけではなく、様々な性能が格段に優れた新しい塗料が開発できるようになる。

4. 超重防食塗装への線膨張係数に着目した塗料（α シリーズ）の展開

超重防食塗装と言えば、新設塗装では C-5 塗装系、塗り替え塗装では Rc- I 塗装系が浮かぶ。この塗装仕様系の特徴の一つは、最下層にジンク塗装を施すことにある。

我々は以前から、このジンク塗装に疑問を投げかけてきた。

例えば、平成 23 年には、表 2 のような結果を報告した<sup>2)</sup>。

表 2 ジンクリッチペイント劣化検証試験結果

|     | 塗料名               | 膜厚 (μm) | 塗料名                | 膜厚 (μm) | 塗料名                | 膜厚 (μm) | 塗料名          | 膜厚 (μm) |
|-----|-------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------|---------|
| 1層目 | 有機ジンクリッチペイント      | 25      | 有機ジンクリッチペイント       | 40      | 有機ジンクリッチペイント       | 15      | 有機ジンクリッチペイント | 40      |
| 2層目 | 無(微)溶剤型厚膜エポキシ樹脂塗料 | 200     | 無(微)溶剤型超厚膜エポキシ樹脂塗料 | 500     | 無(微)溶剤型超厚膜エポキシ樹脂塗料 | 500     | ケルエポキシ樹脂塗料   | 200     |
| 3層目 | 同上                | 200     | -                  | -       | -                  | -       | -            | -       |

  

|           |                    |              |                            |                    |              |                      |                    |              |                  |                    |              |  |
|-----------|--------------------|--------------|----------------------------|--------------------|--------------|----------------------|--------------------|--------------|------------------|--------------------|--------------|--|
| 試験片<br>写真 | No.1-④             |              |                            | No.5-④             |              |                      | No.10-④            |              |                  | No.15-④            |              |  |
|           |                    |              |                            |                    |              |                      |                    |              |                  |                    |              |  |
| 試験<br>結果  | 平均<br>付着力<br>(MPa) | 付着力<br>(MPa) | 剝離形態                       | 平均<br>付着力<br>(MPa) | 付着力<br>(MPa) | 剝離形態                 | 平均<br>付着力<br>(MPa) | 付着力<br>(MPa) | 剝離形態             | 平均<br>付着力<br>(MPa) | 付着力<br>(MPa) | 剝離形態                                   |
|           | 1.0                | 0.0<br>2.0   | 下塗3%、素地97%<br>接着剤40%、上塗60% | 0.0                | 0.0<br>0.0   | 下塗8%、素地92%<br>素地100% | 0.2                | 0.3<br>0.0   | 素地100%<br>素地100% | 1.7                | 1.3<br>2.0   | 接着剤60%、上塗38%、素地2%<br>接着剤69%、上塗30%、素地1% |

有機ジンクリッチペイントの上に、没水部用塗料である厚膜エポキシ樹脂塗料を 500 μm 程度塗装し、SST を 10,000 時間行った後、アドヒージョン試験を行った所、ほぼ付着力 0 MPa で有機ジンクリッチペイントと素地との間で塗膜剝離を起こしたという報告である。素地剝離を起こすような状況でも、全く外観上は問題なく、また、素地剝離した面は初期のままの金属光沢があり、全く腐食が起こっていないかった。この点は、ジンクリッチペイントによって、鉄素地面の腐食電位を下げているという素晴らしい効果と言えるが、素地剝離したことが、本来の設計思想では予期していない現象であり、望ましくない。

さらに、追加実験として、表 3 のような塗装を行い、SST を 30,000 時間、CCT を 30,000 時間行った後に、アドヒージョン試験を行った結果 (表 4) を報告した<sup>3)</sup>。

表 3 ジンクリッチペイント劣化検証 2 次試験：供試塗装系

| 仕様名称   | 合計膜厚 (μm) | 1層目               |              | 2層目                  |                        | 3層目  |                        | 4層目  |           | 5層目 |           |
|--------|-----------|-------------------|--------------|----------------------|------------------------|------|------------------------|------|-----------|-----|-----------|
|        |           | 膜厚                | 塗料           | 膜厚                   | 塗料                     | 膜厚   | 塗料                     | 膜厚   | 塗料        | 膜厚  | 塗料        |
| A社     | 超厚膜仕様①    | 540               | 有機ジンクリッチペイント | 40                   | 無(微)溶剤型超厚膜<br>エポキシ樹脂塗料 | 500  | -                      | -    | -         | -   | -         |
|        | 超厚膜仕様②    | 2040              | 有機ジンクリッチペイント | 40                   | 無(微)溶剤型超厚膜<br>エポキシ樹脂塗料 | 1000 | 無(微)溶剤型超厚膜<br>エポキシ樹脂塗料 | 1000 | -         | -   | -         |
|        | C-5仕様     | 250               | 無機ジンクリッチペイント | 75                   | エポキシ樹脂塗料<br>ミスコート      | -    | エポキシ樹脂塗料               | 120  | ふっ素樹脂塗料中塗 | 30  | ふっ素樹脂塗料上塗 |
| B社     | 超厚膜仕様①    | 515               | 有機ジンクリッチペイント | 15                   | 無(微)溶剤型超厚膜<br>エポキシ樹脂塗料 | 500  | -                      | -    | -         | -   | -         |
|        | 超厚膜仕様②    | 2015              | 有機ジンクリッチペイント | 15                   | 無(微)溶剤型超厚膜<br>エポキシ樹脂塗料 | 1000 | 無(微)溶剤型超厚膜<br>エポキシ樹脂塗料 | 1000 | -         | -   | -         |
|        | C-5仕様     | 250               | 無機ジンクリッチペイント | 75                   | エポキシ樹脂塗料<br>ミスコート      | -    | エポキシ樹脂塗料               | 120  | ふっ素樹脂塗料中塗 | 30  | ふっ素樹脂塗料上塗 |
| リファレンス | タールエポキシ仕様 | 440               | 有機ジンクリッチペイント | 40                   | タールエポキシ樹脂塗料            | 200  | タールエポキシ樹脂塗料            | 200  | -         | -   | -         |
| 新設計仕様  | 400       | 応力緩和型<br>エポキシ樹脂塗料 | 50           | 環境遮断型超厚膜<br>エポキシ樹脂塗料 | 350                    | -    | -                      | -    | -         | -   |           |

表 4 ジンクリッチペイント劣化検証 2 次試験：アドヒージョン試験結果

| 仕様名称   | SST(JIS K 5600-7-1)<br>30,000時間後 |              |                       | CCT(JIS K 5600-7-9 サイクルD)<br>30,000時間後 |              |               |         |
|--------|----------------------------------|--------------|-----------------------|--|--------------|---------------|---------|
|        | 平均<br>付着力<br>(MPa)               | 付着力<br>(MPa) | 剥離形態                  | 平均<br>付着力<br>(MPa)                     | 付着力<br>(MPa) | 剥離形態          |         |
| A社     | 超厚膜仕様①                           | 4.5          | 接着剤25%, 上塗60%, ジンク15% | 4.9                                    | 5.2          | 上塗100%        |         |
|        |                                  | 6.0          | 接着剤35%, 上塗15%, 素地50%  |  | 4.6          | 上塗100%        |         |
|        | 超厚膜仕様②                           | 7.0以上        | -                     | 5.8                                    | 7.0          | 接着剤30%, 上塗70% |         |
|        |                                  | 7.0以上        | -                     |  | 4.5          | 接着剤70%, 上塗30% |         |
| C-5仕様  | 7.0以上                            | 7.0以上        | -                     | 3.5                                    | 3.2          | 下塗5%, ジンク95%  |         |
|        |                                  | 7.0          | 下塗60%, ジンク40%         |  | 3.8          | 下塗10%, ジンク90% |         |
| B社     | 超厚膜仕様①                           | 4.4          | 素地100%                | 6.4                                    | 5.9          | 素地100%        |         |
|        |                                  | 3.5          | 素地100%                |  | 6.8          | 素地100%        |         |
|        | 超厚膜仕様②                           | 5.6          | 素地100%                | 3.8                                    | 5.0          | 素地100%        |         |
|        |                                  | 2.2          | 素地100%                |  | 2.5          | 素地100%        |         |
|        | C-5仕様                            | 2.0          | 2.0                   | ジンク100%                                | 3.1          | 3.0           | ジンク100% |
|        |                                  |              | 1.9                   | ジンク100%                                |              | 3.2           | ジンク100% |
| リファレンス | タールエポキシ仕様                        | 3.8          | 接着剤100%               | 3.4                                    | 2.7          | 接着剤100%       |         |
|        |                                  | 3.2          | 接着剤100%               |  | 4.0          | 接着剤100%       |         |
| 新設計仕様  | 4.3                              | 4.4          | 上塗100%                | 4.8                                    | 3.4          | 上塗100%        |         |
|        |                                  | 4.2          | 上塗100%                |  | 6.2          | 上塗100%        |         |

有機ジンクを塗装した系では、表 2 のような 0 MPa での素地剥離とはいかなかったが、B社超厚膜仕様①および②で素地剥離を起こすことは確認できた。

また、この時、C-5 塗装系も試験に入れ、素地剥離ではなく、2～3 MPa 程度の無機ジンク層の凝集破壊が起こることを報告した。

以上は我々の研究であったが、その他の報告においても、経年した実橋梁のジンクリッチ塗膜を調査したところ、付着力 2 MPa 以下で無機ジンク塗膜の凝集破壊となったケースが散見される<sup>4) 5)</sup>。

このような、ジンク層での凝集破壊や、ジンク/素地間での層間剥離といった現象は、その原因や対策が未だに明確になっていない。しかも、このような剥離現象は、実機においてもテストピースにおいても偶発的に発生する(いつも起こるとは限らない)ものであり、

塗装方法や塗装環境の問題ということで片づけられない厄介な問題と言える。

そこで、有機ジンクリッチペイントおよび無機ジンクリッチペイントの線膨張係数  $\alpha_1$  を測定してみた。その結果、有機ジンクリッチペイントは通常屋外防食塗料並みの  $\alpha_1 = 5.0 \times 10^{-5}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] 程度であり、無機ジンクリッチペイントは  $\alpha_1 = 3.4 \times 10^{-5}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] 程度と低かった。

この結果より、確かに有機ジンクリッチペイントや無機ジンクリッチペイントの  $\alpha_1$  が大きいから剥離し易かったという単純な話ではないことが判る。しかし、ジンクリッチペイントの犠牲陽極作用は素地の鉄面と亜鉛粒子が接触する事で起こることから、直接接触できる程度に亜鉛粉末を大量に配合している。このことから、通常の変性エポキシ樹脂塗料などよりは、かなり顔料リッチであり、素地鉄面と亜鉛粒子が接触している面積がかなりあり、付着性を確保するエポキシ樹脂と鉄素地との接触面積が、通常の塗装系と比べると、かなり少なくなっていると考えられる。とすると、有機ジンクリッチペイントでは、通常の変性エポキシ樹脂塗料と同等程度の  $\alpha_1$  ではあるが、エポキシ樹脂の接触面積が小さく、素地剥離を起こし易くなっているのではないかと考えられる。また、無機ジンクリッチペイントは、 $\alpha_1$  が通常の変性エポキシ樹脂塗料よりも小さいため、樹脂と鉄素地との接触面積が小さくとも素地剥離は起こし難いが、顔料がさらにリッチであるため、凝集破壊強度が低く、無機ジンクリッチペイント内部での凝集破壊を起こし易くなっていると考えると理解し易い。あくまでも仮説であるが、現在、有機ジンクリッチペイントと無機ジンクリッチペイントとのヒートサイクルによる剥離実験を行っており、この仮説が正しいかどうか、今後、確認する事としている。

## 5. 新たな超重防食塗装仕様の提案

有機ジンクリッチペイント素地剥離傾向と無機ジンクリッチペイント凝集破壊傾向の原因について、上記仮説が正しいかどうかは判らないが、現実的にそのような剥離リスクが高いことは認めざるを得ない事実だと考えられる。折角、超重防食という事で、高コストを掛け、耐久性に優れる筈の超重防食塗装を施したにも拘らず、塗膜剥離を起こすのは残念なことである。そこで、今後の C-5 仕様や Rc- I 仕様では、剥離リスクを低くする工夫が必要だと思われる。

そこで、今回、剥離リスクを抑制した新 C-5 仕様と新 Rc- I 仕様を提案したい (表 5、6)。

表 5 新たな C-5 仕様の提案

| 工程     | C-5 仕様             |                     | 新 C-5 仕様                              |                     |
|--------|--------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
|        | 塗料名                | 膜厚( $\mu\text{m}$ ) | 塗料名                                   | 膜厚( $\mu\text{m}$ ) |
| 素地調整   | プラスト処理 (ISO Sa2.5) | —                   | プラスト処理 (ISO Sa2.5)                    | —                   |
| 防食下地   | 無機ジंकリッチペイント       | 75                  | 無機ジंकリッチペイント                          | 30                  |
| ミストコート | 強溶剤変性エポキシ樹脂塗料下塗    | —                   | 剥離抑制型強溶剤変性エポキシ樹脂塗料下塗 ( $\alpha 2.5$ ) | —                   |
| 下塗     |                    | 120                 |                                       | 120                 |
| 中塗     | 強溶剤ふっ素樹脂塗料用中塗      | 30                  | 強溶剤ふっ素樹脂塗料用中塗                         | 30                  |
| 上塗     | 強溶剤ふっ素樹脂塗料上塗       | 25                  | 強溶剤ふっ素樹脂塗料上塗                          | 25                  |
|        | 合計膜厚 250           |                     | 合計膜厚 205                              |                     |

表 6 新たな Rc-I 仕様の提案

| 工程   | Rc-I 仕様            |                     | 新 Rc-I 仕様                             |                     |
|------|--------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
|      | 塗料名                | 膜厚( $\mu\text{m}$ ) | 塗料名                                   | 膜厚( $\mu\text{m}$ ) |
| 素地調整 | プラスト処理 (ISO Sa2.5) | —                   | プラスト処理 (ISO Sa2.5)                    | —                   |
| 防食下地 | 有機ジंकリッチペイント       | 75                  | 有機ジंकリッチペイント                          | 30                  |
| 下塗   | 弱溶剤変性エポキシ樹脂塗料下塗    | 60×2                | 剥離抑制型弱溶剤変性エポキシ樹脂塗料下塗 ( $\alpha 2.5$ ) | 60×2                |
| 中塗   | 弱溶剤ふっ素樹脂塗料用中塗      | 30                  | 弱溶剤ふっ素樹脂塗料用中塗                         | 30                  |
| 上塗   | 弱溶剤ふっ素樹脂塗料上塗       | 25                  | 弱溶剤ふっ素樹脂塗料上塗                          | 25                  |
|      | 合計膜厚 250           |                     | 合計膜厚 205                              |                     |

従来の仕様からの変更点の一つは、従来の変性エポキシ樹脂塗料の代わりに、剥離抑制型変性エポキシ樹脂塗料 ( $\alpha 2.5$ ) を採用する点である。この塗料は  $\alpha$  シリーズ第 1 弾として製品化した線膨張係数  $\alpha_1=2.5 \times 10^{-5}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] 程度の塗料で、防食性能は従来変性エポキシ樹脂塗料と同等であり、線膨張係数を従来塗料の半分以下に低減することで耐剥離性を高めている。なお、第 1 弾の  $\alpha 2.5$  は現在の所、補修塗装用の弱溶剤タイプでは  $60 \mu\text{m}$  が標準膜厚であるが、現在、C-5 仕様に反映させるため強溶剤タイプで  $120 \mu\text{m}$  が標準膜厚の  $\alpha 2.5$  を開発しており、近々、製品化される予定である。

変更点の 2 点目は、無機ジंकリッチペイントおよび有機ジंकリッチペイントの膜厚を  $30 \mu\text{m}$  程度と薄膜にしたことである。理由は、有機ジंकリッチペイントにしる、無機ジंकリッチペイントにしる、剥離リスクが高いことを考えれば、薄膜に設計する方が、剥離リスクは下げることができると考えられるからである。

過去の報告で、C-5 塗装仕様を施し、30 年程度経過した設備の塗膜を調査した結果、全く無機ジंकリッチ塗装層に変化が見られなかったとの報告がある<sup>4)</sup>。そのことから、 $75 \mu\text{m}$  という厚膜のジंकリッチペイントの塗装は不要であるとも考えられ、鉄素地の電位を継続的に下げるのに  $30 \mu\text{m}$  も膜厚があれば十分であると考えるのが妥当と思われる。無機ジंकリッチペイントを厚く塗装すればするほど、凝集破壊を起こす塗膜欠陥が発生する確率が高くなると考えるのが妥当であり、むしろ、薄い方が良いという提案である。

この仕様であれば、剥離のリスクを下げる事ができるため、以降の補修塗装は同じく  $\alpha 2.5$  の塗料で補修する事により、剥離リスクを低減して、超長期に亘って、亜鉛ジंकリッチペイントの剥離を防ぐことが可能になると考えられる。亜鉛によって鉄面の腐食電

位を下げた状況で防食性を維持しつつ、補修塗装を繰り返して膜厚が厚くなっても剥離リスクが低減できる、超長期に安価に塗装で保守できる素晴らしい仕様ではないかと思う。

## 6. まとめ

塗膜の収縮・膨張は、①樹脂の硬化反応によるもの（硬化収縮）、②温度変化によるもの（熱膨張・収縮）があり、実環境で起こる塗膜剥離は、①と②のどちらの要因が支配的かを剥離し易いビニル樹脂を塗装した試験片で検証した。その結果、50℃×1200時間の養生を行い、十分に①の硬化収縮を進行させても、塗膜剥離は起こらず、僅か10サイクルのヒートサイクルを行い、②の温度変化を与えるだけで、剥離が進行した。以上の結果から、塗膜剥離は②の温度変化によるものが支配的であり、また、線膨張係数 $\alpha$ が小さい程、塗膜剥離が起こり難いことから、結論的には塗膜剥離には線膨張係数が支配的な主要因であることが判った。

また、線膨張係数に着目した塗料の配合設計の優位性について説明し、新たな超重防食仕様について、提案した。

## 7. おわりに

塗膜剥離という現象は、線膨張係数が支配的である、という話をすると、多くの方から「式(1)が判っているのに、何故、これまで塗料メーカーは弾性率 $E$ とガラス転移温度 $T_g$ を下げる手法のみで、線膨張係数 $\alpha$ を下げるアプローチを行わなかったのか？」と質問され、いつも答え方に困っている。事実、大手塗料メーカーでも、開発当初は線膨張係数を測定する装置すら持っていなかった。

線膨張係数に着目した塗料の開発は、我々ユーザにとっても、今後のコスト低減に大きな成果が得られると考えられることから、今後、塗料メーカーで開発が進むことを期待する。

## 参考文献

- 1) 西森修次：劣化旧塗膜の剥離を抑制する新型変性エポキシ樹脂塗料の開発，防錆管理 Vol.62, No.11,2018
- 2) 西森修次：新たなミマMLCC 防食塗装仕様に関する提案，（一社）日本鋼構造協会 第30回鉄構塗装技術討論会発表予稿集（2007）
- 3) 西森修次：長期防食塗料に関する新たな考察，（一社）日本鋼構造協会 第34回鉄構塗装技術討論会発表予稿集（2011）
- 4) 中元雄治：無機ジンクリッチペイントの剥離に関する調査研究，（一社）日本鋼構造協会 第31回鉄構塗装技術討論会発表予稿集（2008）
- 5) 江成孝文：実橋りょうに適用した長期耐久型塗装系の追跡調査（その4），（一社）日本鋼構造協会 第35回鉄構塗装技術討論会発表予稿集（2012）