

厚膜形ふっ素樹脂塗装による外部鉄骨の防錆技術

奥田 章子 堀 長生

Rust-proofing Exterior Steel Frames Using Thick Film Fluoro Coating

Akiko Okuda Nagao Hori

Abstract

The exterior steel frame of the Tokyo Sky Tree[®] will function as a communications tower as well as a sightseeing tower for tourists for the next one hundred years and more. At the civil structure about a bridge, it has long history about the rust-proofing technology of the steel frame, and rust-proofing is important function more than beauty. We collaborated on developing a new rust-proofing technology that would meet the aesthetic and architectural requirements of the tower's exterior steel frame. We proposed a new high-performance paint system referred to as thick film fluoro coating. We successfully developed a high durability paint, that provides long-term aesthetic appeal, reduces the need for repainting, and lowers volatile organic compounds emissions.

概 要

東京スカイツリー[®]塔体の外部鉄骨は、電波塔としての機能に加え、観光塔としての美観性を100年以上維持することが要求される。一方で、重防食塗装による鉄骨の防錆技術の歴史が長い橋梁などの土木構造物では、従来防食の機能が重視されてきた。ここでは、建築的視点による意匠性の向上と土木構造物で培われた外部鉄骨の防錆技術を融合し、厚膜形ふっ素樹脂塗料による新しい重防食塗装仕様の開発を行った。その結果、高い防食性および美観性を維持でき、工程数の削減、VOC排出量の抑制が達成できた。

1. はじめに

本州四国連絡橋に代表される橋梁では、美観性よりも、外部鉄骨の耐食性の維持が重要視された。しかし、東京スカイツリー[®]のように都心部に建つ超高層建築物では、外部鉄骨の耐食性に加え、観光塔としての美観性の維持が強く要求された。そこで、建築的視点による意匠性の向上を図るため、塗料の中で最も耐候性に優れ、耐薬品性や耐熱性も良好なふっ素樹脂塗料に着目し、耐食性に優れ、かつVOC(揮発性有機化合物)排出量を抑制できる重防食塗装仕様を開発し、適用したので報告する。

2. 高機能型ふっ素樹脂塗料の概要

2.1 ふっ素樹脂塗料の特徴

ふっ素樹脂塗料は、ふっ素原子が結合した樹脂とイソシアネート樹脂が硬化反応して塗膜を形成する。ふっ素原子と炭素原子との化学結合のエネルギーが非常に高いため、耐候性、耐熱性において非常に良好な性能を示す。各種原子間の結合エネルギーをTable 1で比較する¹⁾。例えばTable 1に示すようなふっ素原子を含まず、炭素(C)と水素(H)原子のみで構成される結合においては、その結合エネルギーが太陽光由来の自然光における最大エネルギー411kJ/molよりも小さいために、自然光の照射によって結合が切れ易い。一方、ふっ素原子を含んだ場合の結合エネルギーは自然光のエネルギーよりも高いため、

自然光では切断されにくい。結合が切断されると、樹脂が保有する特性が失われていくため、結合エネルギーが高いふっ素樹脂は、その他の樹脂と比較して、耐候性に優れた樹脂であるといえる。

現在塗料として実用化されている常温硬化形ふっ素樹脂塗料には、三ふっ化(3F)樹脂系と四ふっ化(4F)樹脂系との2種類がある。三ふっ化樹脂系塗料の有機化学構造は、樹脂骨格の炭素鎖に3つのふっ素原子が結合したユニットが規則的に繰り返し存在する。モデル図をFig. 1に示す。樹脂骨格部には、水や溶剤への溶解性、塗膜の耐候性、硬度、透明性、光沢、柔軟性、架橋性、密着性等を制御する成分を結合させている。

Fig. 1 に示すとおり、塗膜表面には、原子半径の大きいふっ素原子が表層を埋める構造となる。硬化塗膜表面に並んだふっ素原子は、前述したとおり、樹脂骨格の炭

Table 1 原子間の結合エネルギー
Combination Energy of Resin

結合の種類	結合エネルギー	樹脂の種類
F-CF ₂ -CH ₃	523 kJ/mol	ふっ素樹脂 (主鎖以外)
CF ₃ -CH ₂ -H	447 kJ/mol	ふっ素樹脂 (主鎖以外)
CF ₃ -CH ₃	424 kJ/mol	ふっ素樹脂 (主鎖)
CF ₃ -CF ₃	414 kJ/mol	ふっ素樹脂 (主鎖)
CH ₃ -CH ₂ -H	411 kJ/mol	一般樹脂
CH ₃ -CH ₃	379 kJ/mol	一般樹脂

素とのふっ素結合(C-F結合)の結合エネルギーが非常に高いため、耐候性、耐熱性において非常に良好な性能を示す。三ふっ化樹脂系塗料は1982年に実用化されてから25年以上が経過し、塗装実績も非常に多い。また、ふっ素原子は原子半径が大きいため、電気陰性度(負の電荷を示す程度)が大きいため、静電気の発生や撥水性を示す。塗膜の場合、これらの性質は防汚性を低下させる要因となるため、現在では、防汚性能向上の目的で、シリカ系の親水化剤を添加して塗膜表面の親水化を図り、低汚染化処理を施している塗料が一般的となっている。

次に、四ふっ化樹脂系塗料のモデル図をFig. 2に示す。四ふっ化樹脂系塗料の有機化学構造は、樹脂骨格の炭素鎖に4つのふっ素原子が結合したユニットが不規則に繰り返し存在する。ふっ素結合が多くなる分、理論上は三ふっ化樹脂よりも耐候性に優れる。しかし、一方で、樹脂を塗料にする際、四ふっ化樹脂は溶解性が悪いため、溶解性をあげるための成分を骨格樹脂に結合させる必要があり、その影響でふっ素原子が4つ結合した炭素鎖ユニットが規則的に配列できず、不規則に配列する。また、三ふっ化樹脂と同様に、防汚性付与のために硬化塗膜の親水化を図る必要があるが、樹脂の溶解性が低いためシリカ系の親水化剤や顔料等の添加成分の分散性が悪くなり、それらの分離が起こりやすい。そのため、実用化した当初は特別な施工技術を要し、防汚性のばらつきによるぶち状汚れや色むらが発生した事例もある。現在では実用化されてから10年以上が経過しているが、実績も三ふっ化樹脂と比較すると少ない。以上のように、ふっ素樹脂塗料は、高い耐候性、耐熱性、非付着性、低摩擦性、耐薬品性等、様々な特性を有しており、数多く上市されている塗料の中で、最も高性能な塗料として位置づけられている。

本論文においては、建築分野で実績が多く、溶剤可溶性や顔料分散性に優れた三ふっ化樹脂系塗料にて、検討を進めた。

2.2 厚膜形ふっ素樹脂塗料の性能

厚膜形ふっ素樹脂塗料は、固形分量を増やすことによって厚塗りを可能とし、一度に55 μ mの膜厚を確保できる、新しい高耐久性ふっ素樹脂塗料である。

上塗の耐久性は、Table 1に示すように、塗料の樹脂の種類に由来する。しかし、経年で樹脂が劣化し、塗膜が減耗していくため、樹脂の種類に加え、膜厚も耐久性を左右する。つまり、膜厚が厚い程、耐久性が向上する。ふっ素樹脂塗膜とポリウレタン塗膜を海洋技術総合施設(静岡県大井川町沿岸)で21年間にわたって屋外暴露した試験結果によると^{2) 3)}、ポリウレタン塗膜の減耗量が11 μ mであるのに対し、ふっ素樹脂塗膜は0.4 μ mと極めて小さいことが確認されている。その他の既往研究によると、厳しい腐食環境下の塗膜の減耗量がエポキシ樹脂塗膜で10 μ m/年、ポリウレタン塗膜で2 μ m/年であるのに対し、ふっ素樹脂塗膜では0.5 μ m/年という実験結果

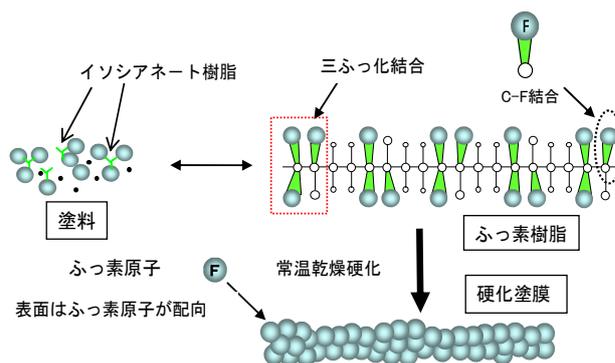


Fig. 1 三ふっ化樹脂塗料のモデル図
Model of Tri-fluoro Coating

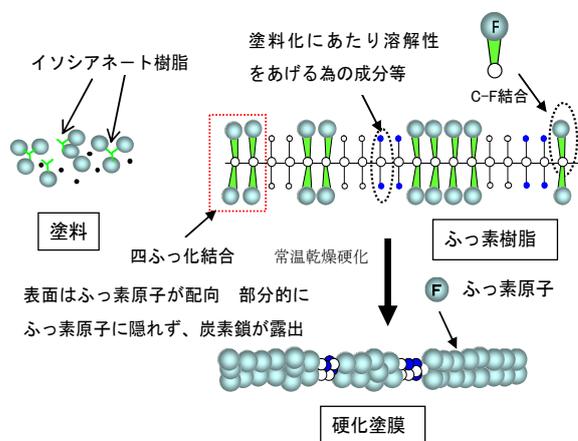


Fig. 2 四ふっ化樹脂塗料のモデル図
Model of Tetra-fluoro Coating

も報告されており、他の樹脂塗膜と比較してふっ素樹脂塗膜の減耗量が非常に小さいことが確認されている。「日本道路協会編；鋼道路橋塗装・防食便覧：H17.12」に規定される最も防食性および耐久性の高いC-5塗装系では、ふっ素樹脂塗料は上塗1回塗で25 μ mとなる。厚膜形ふっ素樹脂塗料によれば、この25 μ mを55 μ mと厚くすることが可能で、ふっ素樹脂塗膜の厚さが従来のおおよそ2倍にできる。したがって、耐用年数の長期化が期待できる。

一方、建築分野においては、保護のみならず美観の維持も重視されることから、美観を左右する艶(光沢)の維持性能について検討した。艶有り(全艶)の厚膜形ふっ素樹脂塗料および従来のふっ素樹脂塗料の耐候性をサンシャイン式促進耐候性試験によって評価した結果をFig. 3に示す。艶の変化を初期の60度鏡面光沢度の保持率(%)で評価した。日本建築仕上材工業会では、サンシャイン式促進耐候性試験3500時間で光沢保持率80%以上を示す塗料を高耐候性塗料と規定しており、従来のふっ素樹脂塗料とともに、厚膜形ふっ素樹脂塗料は、4000時間試験後も光沢保持率80%以上を満足することを確認した。

また、土木構造物では全艶の採用が多いが、建築においては、色彩と同様に艶の調整が要求される。一般的に

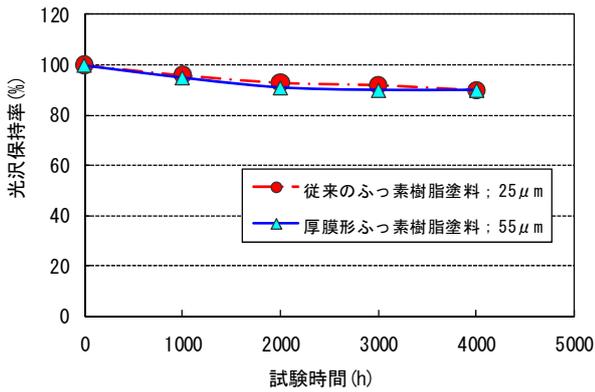


Fig. 3 サンシャイン式促進耐候性試験結果³⁾
Result of Accelerated Weathering Test

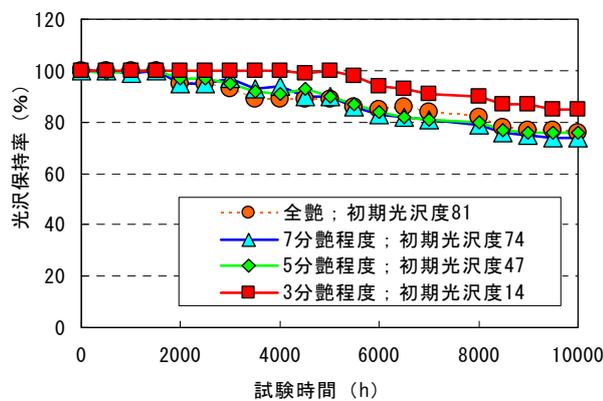


Fig. 4 艶の異なる塗膜のサンシャイン式促進
耐候性試験結果³⁾
Result of Accelerated Weathering Test for
Difference Gloss paint

塗料に艶消し剤を混入すると耐候性が低下すると言われているため、艶を変えた厚膜形ふっ素樹脂塗料について耐候性を評価、比較した。初期の60度鏡面光沢度が81(全艶)、74(7分艶程度)、47(5分艶程度)、14(3分艶)のふっ素樹脂塗膜(膜厚25μm)について、サンシャイン式促進耐候性試験を実施した結果をFig. 4に示す。これより、艶消し剤の含有量が最も多い初期光沢度14の塗膜が最も高い光沢保持率を示した。また、いずれの艶の塗膜も、6000時間実施後まで80%を上回っており、良好な光沢保持率を保持している。これらのことから、艶消し剤配合技術を駆使した結果、高耐候性のふっ素樹脂塗料において、艶が異なっても耐候性に差異がないことを確認した。

3. 外部鉄骨の防錆技術

3.1 防食法の種類と性能

鉄骨タワーの外部鉄骨を長期間さびからまもるため、防食性能の高い防食法を選定する必要がある。

鋼材の防食法としては、Fig. 5⁴⁾に示すように、腐食環境から遮断する表面被覆法、電気化学的にさびを抑制する電気防食法、鋼材自体を改良して腐食を抑制する手

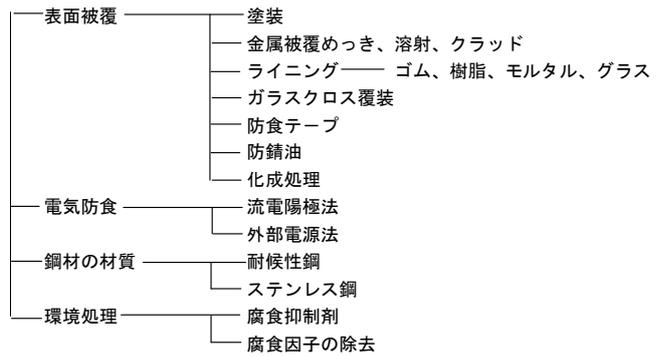


Fig. 5 鋼材の防食法⁴⁾
Corrosion-proofing of Steel

Table 2 代表的な防食法の比較と適用環境⁴⁾

Method of Typical Corrosion-proofing and
Environment of Application

防食法	劣化因子/劣化促進因子	低い	防食性能	高い
塗装	一般塗装	紫外線、水、酸素/塩分、亜硫酸ガス等	■■■■■	
	重防食塗装	紫外線、水、酸素/塩分、亜硫酸ガス等	■■■■■	
耐候性鋼材	水、酸素/塩分、亜硫酸ガス等	■■■■■		
溶融亜鉛めっき	水、酸素/塩分、亜硫酸ガス等	■■■■■	+	重防食塗装
金属溶射	封孔処理	水、酸素/塩分、亜硫酸ガス等	■■■■■	
	重防食塗装	紫外線、水、酸素/塩分、亜硫酸ガス等	■■■■■	

注)1.本表は、確実な施工が行われた場合の適用環境区分を示す。確実な施工が行われなかった場合は耐久性が著しく低下することがある。
2.適用環境は主に飛来塩分の影響の有無により区分したものであり、凍結防止剤の影響は考慮していない。
3.温泉地帯等で亜硫酸ガス等塩分以外の腐食を促進する物質の影響を強く受ける環境では別途検討が必要である。
4.金属溶射の適用可能範囲は使用する溶射材料により異なる。亜鉛溶射皮膜は溶融亜鉛めっきと同じと考えられるが、亜鉛・アルミニウム合金溶射皮膜や合金金属溶射皮膜、アルミニウム溶射皮膜の適用可能範囲はもう少し広くなる。
5.適用可能範囲を超えた厳しい環境では、防食の耐用年数が短くなることから鋼道路橋ではその防食法の使用を極力避けるのが望ましい。

法、腐食環境を腐食抑制剤で制御する手法等がある。これらの防食法のうち、施工性、防錆力等を考慮の上、表面被覆法を選定した。

3.2 表面被覆法の種類と性能

表面被覆法のうち、建築物に採用されてきた代表的な手法について、その適用環境をTable 2⁴⁾で比較する。これより、重防食塗装を施した溶融亜鉛めっきおよび金属溶射、重防食塗装は、いずれも飛来塩分量が多く厳しい環境にも適用可能な防食法である。なお、重防食塗装とは、一般的にジンクリッチペイントを防食下地とし、耐候性のある塗料で被覆した塗装系のことで、「海岸または海面上のような腐食性の厳しい環境に建設される鋼構造物の塗り替え周期が10年以上となる性能を有する塗装系」とされている⁴⁾。

3.3 重防食塗装の適用性

溶融亜鉛めっき、金属溶射と重防食塗装について、いずれも高耐候性塗料(ふっ素樹脂塗料)で仕上げ塗装した際の性能を比較し、東京スカイツリーを例として挙げ、

外部鉄骨への適用性を評価・比較した。特に、土木構造物と異なり、塗膜性能による鋼材の『保護』と併せて、『美観』の維持が要求される点に注意して評価した。評価結果をTable 3にまとめる。

3.3.1 施工性 634mの高さを組み上げるために必要な鋼材は膨大な量となる。また、鋼材のサイズは、直径2mを超えるものや長さ10mを超えるものもある。したがって、溶融亜鉛めっきは、めっき槽に入らないサイズの部材があり、製作が困難となる。また、高張力鋼の場合、450～500℃でめっき処理すると鋼材に熱割れを起こす危険性がある。溶接部においては、重防食塗装の防食下地と同じジンクリッチペイントの塗装となる。金属溶射による表面被覆は、溶射業者が限られるため、処理能力不足により工期に影響を及ぼす恐れがある。また、溶接部においては、常温溶射(MS工法)となり、プラスト処理が必要で、施工が困難となる。さらに、溶射困難な場所については、ジンクリッチペイントの塗装となる。以上の手法と比較して、重防食塗装は特に問題はなく、防食下地がジンクリッチペイント塗装となるため、施工性に優れている。

3.3.2 総合評価 防食下地は、Table 2に示すようにいずれも良好な防食性を示す。

塗装性・付着性については、溶融亜鉛めっきの場合、新設時に、溶融亜鉛めっき層と塗装との界面で剥離する不具合が過去に発生している。塗装前処理としては、スィーププラストや燐酸塩処理が必須となる。付着性を上げるための変性エポキシ樹脂系プライマーが開発されているが、現在ではまだ信頼性に欠ける。一方、金属溶射の場合には、溶射表面に形成される凸凹の効果で塗膜の付着性は良好となり、何ら問題ない。重防食塗装の場合にも、塗膜の付着性は良好である。

仕上がり性については、溶融亜鉛めっきや金属溶射では平滑になりにくいのが、重防食塗装の場合には、それらと比較して平滑に仕上がる。

耐候性は、上塗りのふっ素樹脂塗料の耐候性に因るため、いずれも高耐候性となる。

補修性については、溶融亜鉛めっきの場合、塗膜の付着性が良好ではないため、塗膜が剥がれた際の補修も困難となる。金属溶射の場合には、補修の際の素地調整が困難となる上、実績が少ない。一方、重防食塗装の場合には、塗装仕様も確立しており、橋梁やプラント等での実績が多い。

コストについては、工場塗装面積80%、現場塗装面積20%として試算した結果、重防食塗装を100とすると、溶融亜鉛めっきが233と2倍以上、金属溶射で321と3倍以上となり、重防食塗装のコストメリットが大きいことがわかった。

以上のことから総合的に評価すると、溶融亜鉛めっきは、高張力鋼でめっき時の熱割れの懸念があり、また、部材形状および部材の大きさから適用できない。金属溶射では、施工可能な溶射業者が限られ、また、新設時の

Table 3 各防食法の適用性
Performance of Application
about each Method of Corrosion-proofing

防食法	溶融亜鉛めっき	金属溶射	重防食塗装
防食下地の種類	溶融亜鉛めっき	Zn-Al合金溶射	ジンクリッチペイント
塗装(仕上げ)	高耐候性塗料(ふっ素樹脂塗料)		
工期	△ 対応不可	× 溶射業者が限られ、 工期に支障が出る	○ 対応可
防食下地	作業性	× 部材の大きさに制約 を受ける	○
	下地鋼材への影響	× 高張力鋼の場合、 熱割れ懸念	◎
塗装	塗装性、付着性	△ 前処理必要、新設 時の塗膜はく離有り	◎
	仕上がり性	△ 平滑になりにくい	◎
	補修性	△ 補修が困難	△ 実績が少ない
実績	△ 塗装した実績 が少ない	△ 実績が少ない	◎ 橋梁・プラント等での 実績が多い
新設コスト;防食下地+塗装 (重防食塗装を100とした場合 の比率)	233	321	100
総合評価	×	△	◎

コストが大幅にあがる。それらに比べて、重防食塗装では、防食性能は他の防食法と同等で、本州四国連絡橋などの大規模構造物での実績が多く、補修・改修の事例も多い。東京スカイツリーが観光塔であることも考慮すると、美観・メンテナンス性および工期の点から重防食塗装が適切であると判断された。

4. 厚膜形ふっ素樹脂塗装の外部鉄骨への適用

4.1 新しい重防食塗装仕様の提案

橋梁等の土木構造物に適用される重防食塗装仕様において、現在最も耐久性の高い塗装仕様は、Table 4に示すC-5塗装系である。これは、防食下地にジンクリッチペイントを適用し、下塗、中塗、上塗で仕上げる塗装仕様で、工場塗装の塔体部の仕様となる。また、C-5塗装系に対応した溶接部のF-13塗装系の仕様をTable 5に示す。

次に、提案した仕様をTable 4およびTable 5に併記し、比較する。

提案仕様の防食下地には、無機ジンクリッチペイントに換えて有機ジンクリッチペイントを採用した。無機ジンクリッチペイントは、工場塗装において厳しい湿度管理が必須となるが、有機ジンクリッチペイントの場合、それらの管理が緩和されるため、品質が確保し易いという利点がある。また、無機ジンクリッチペイントの膜は多孔質なため、ミストコートが必須となるが、有機ジンクリッチペイントでは緻密な膜が形成できるため、ミストコートが削減可能で、これによって、VOC排出量の大幅な削減を期待した。さらに、中塗のエポキシ樹脂塗料と上塗のふっ素樹脂塗料とを1回で厚塗りできる厚膜形ふっ素樹脂塗料を採用することにより、ふ

つ素樹脂塗料の膜厚を大幅に増加させ、防錆性や耐候性向上を図った。

現場塗装の溶接部においては、工場塗装の塔体部と比較して、素地調整や塗装管理が工場塗装よりも難しくなるため、一般的に塗膜の付着不良や膜厚不足等の不具合が起りやすく、耐久性を左右する箇所となる。そのため、F-13塗装系を基本とし、さらに防食性を向上させた塗装仕様を提案した。つまり、下塗1層目および2層目の変性エポキシ樹脂塗料120 μm を200 μm と厚くして、水分や酸素の遮断性を更に向上させることをねらった。

4.1.1 防食性 無機ジंकリッチペイントと有機ジंकリッチペイントの両者について、単膜で防食性を比較した場合、無機ジंकリッチペイントの方が優れていると言われてきた。しかし、耐候性に優れ、酸素透過率や水分透過率の低いふっ素樹脂塗料が開発され、これを上塗に塗装することによって、複合膜として防食性を評価した場合、無機ジंकリッチペイントも有機ジंकリッチペイントも防食性に差がないことが確認されている。そこで、部材形状が非常に複雑な東京スカイツリーにおいては、膜厚が厚い部分が生じて塗膜にひび割れが起りにくく、湿度管理が緩和されるために塗装作業性が良好な有機ジंकリッチペイントが適すると判断し、これを採用した。有機ジंकリッチペイントの膜厚は、C-5塗装系と同じ75 μm とした。

4.1.2 耐候性 C-5塗装系における中塗のふっ素樹脂塗料用中塗は、エポキシ樹脂塗料である。そこで、中塗のふっ素樹脂塗料用中塗と上塗のふっ素樹脂塗料上塗を厚膜形ふっ素樹脂塗料上塗の1回塗りとし、膜厚を中塗のふっ素樹脂塗料用中塗(エポキシ樹脂塗料)30 μm と上塗のふっ素樹脂塗料上塗25 μm とを合わせた55 μm として、耐候性を向上させた。ふっ素樹脂塗料の膜厚を増加したことにより、C-5塗装系の塗替え間隔の目安が20年であるのに対し、提案した採用仕様は25年と設定可能で、長期化することができた。

4.2 厚膜形ふっ素樹脂塗装の適用による効果

4.2.1 耐久性の向上と工程削減効果 4.1.2項で記述したとおり、採用仕様では、厚膜形ふっ素樹脂塗料の適用により、ふっ素樹脂塗膜の膜厚が25 μm から55 μm となり、耐久性が向上するとともに、塗替え間隔も長期化した。

4.2.2 VOC排出量の削減効果 新設時の塗装工事において排出されるVOC量をTable 6に示す。従来のC-5塗装系と比較して、有機ジंकリッチペイントを採用することによって、VOC排出量の多いミストコート工程が削減され、大幅なVOC量削減につながった。また、有機ジंकリッチペイント、下塗、上塗に用いた各塗料について、塗料中の固形分量を上げることによって含有溶剤量を削減し、同じ塗料使用量でもVOC排出量の低減に成功した。さらに、厚膜形ふっ素樹脂塗料上塗の採用による中塗工程の削減もVOC排出量削減に寄与した。

Table 4 工場塗装部のC-5塗装系と提案仕様 C-5-paint System and Proposal Paint System

工程	C-5塗装系			提案仕様		
	塗料名	使用量 g/m ² (希釈%)	膜厚 μm	塗料名	使用量 g/m ² (希釈%)	膜厚 μm
プライマー*	無機ジंकリッチプライマー	160 (10)	15	無機ジंकリッチプライマー	160 (10)	15
防食下地	無機ジंकリッチペイント	600 (10)	75	有機ジंकリッチペイント	600 (10)	75
ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	160 (50)	—	—	—	—
下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	540 (20)	120	厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗	540 (20)	120
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗 (エポキシ樹脂塗料)	170 (20)	30	厚膜形ふっ素樹脂塗料	260 (15)	55
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	140 (20)	25	—	—	—
工程数	5工程			3工程		

*：プライマーの膜厚は総膜厚に加えない

Table 5 現場塗装部のF-13塗装系と提案仕様 F-13-paint System and Proposal Paint System

工程	F-13塗装系			提案仕様		
	塗料名	使用量 g/m ² (希釈%)	膜厚 μm	塗料名	使用量 g/m ² (希釈%)	膜厚 μm
プライマー*	無機ジंकリッチプライマー	160 (10)	15	無機ジंकリッチプライマー	160 (10)	15
防食下地	有機ジंकリッチペイント	300 (5)	75	有機ジंकリッチペイント	300 (5)	75
	有機ジंकリッチペイント	300 (5)		有機ジंकリッチペイント	300 (5)	
下塗1層目	変性エポキシ樹脂塗料下塗	200 (10)	60	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料下塗	300 (5)	100
下塗2層目	変性エポキシ樹脂塗料下塗	200 (10)	60	厚膜形変性エポキシ樹脂塗料下塗	300 (5)	100
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗 (エポキシ樹脂塗料)	140 (10)	30	厚膜形ふっ素樹脂塗料	200 (10)	55
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	120 (10)	25	—	—	—
工程数	6工程			5工程		

*：プライマーの膜厚は総膜厚に加えない

Table 6 新設時におけるVOC排出量の削減効果 Effect of Reduction about Amount of Exhaust VOC at New Construction

塗装仕様	東京都VOC対策ガイド記載						提案仕様					
	C-5塗装系(現行)			低VOC塗装			提案仕様					
工程	塗料名	使用量 g/m ² (希釈%)	膜厚 μm	VOC量 g/m ²	塗料名	使用量 g/m ² (希釈%)	膜厚 μm	VOC量 g/m ²	塗料名	使用量 g/m ² (希釈%)	膜厚 μm	VOC量 g/m ²
プライマー	無機ジंकリッチプライマー	160 (10)	15	64	無機ジंकリッチプライマー	160 (10)	15	64	無機ジंकリッチプライマー	160 (10)	15	54
防食下地	無機ジंकリッチペイント	600 (10)	75	200	無機ジंकリッチペイント	600 (10)	75	200	有機ジंकリッチペイント	600 (10)	75	156
ミストコート	エポキシ樹脂塗料下塗	160 (50)	—	139	エポキシ樹脂塗料下塗	160 (50)	—	139	—	—	—	—
下塗	エポキシ樹脂塗料下塗	540 (20)	120	330	低溶剤形エポキシ樹脂塗料下塗	410 (5)	120	91	厚膜形エポキシ樹脂塗料下塗	540 (20)	120	281
中塗	ふっ素樹脂塗料用中塗	170 (20)	30	88	水性ポリウレタン樹脂塗料用中塗	170 (水10)	30	10	厚膜形ふっ素樹脂塗料	260 (15)	55	127
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗	140 (20)	25	78	水性ポリウレタン樹脂塗料上塗	140 (水10)	25	8	—	—	—	—
合計	6工程			899	6工程			512	4工程			618
VOC削減率	0%				4.3%				3.1%			
耐候性	A				B*				AA			
防食性	A				A				A			
参考塗替え間隔	約20年				約7年				約2.5年			

■注
1) 塗料の使用量：「鋼道路橋塗装・防食便覧」に準じて設定し、便覧に記載のない材料は塗料製造メーカーの社内基準で設定。
2) 希釈率(%)は、「鋼道路橋塗装・防食便覧」規定の最大値を採用。但し、便覧に記載のない材料は塗料製造メーカーの社内基準値の最大値で算出
3) VOC削減率は、東京都VOC対策ガイド記載のC-5塗装系のTVOC量899g/m²を基準値として算出

これより、C-5塗装系のトータルのVOC(TVOC)量899g/m²と比較して、提案仕様のTVOC量は618g/m²へ低減し、トータルでC-5塗装系から31%のVOC排出量を削減したことになる。これは、東京都推奨の低VOC塗装(512g/m²)におけるVOC削減量387g/m²の73%

にあたり、耐久性を重視して溶剤系を採用していることを考慮すると、かなり高い目標達成率と考える。

次に、塗替え時に排出されるVOC量をTable 7に示す。塗料中の固形分量を上げて溶剤分を削減し、さらに、中塗と上塗を厚膜形ふっ素樹脂塗料上塗1回で仕上げることに、VOC量を削減した。結果的に、C-5塗装系の塗替え仕様Rc-IV塗装系のTVOC量208 g/m²と比較して、提案仕様のTVOC量は142 g/m²へ低減し、Rc-IV塗装系のTVOC量から32%のVOC排出量の削減を達成した。また、東京都推奨の低VOC塗装(TVOC量96 g/m²)のVOC削減量112g/m²と比較して、提案仕様は耐久性や付着性を重視して弱溶剤系を採用しているにも係わらず、VOC削減量は66 g/m²で、59%のVOC削減率を達成した。

前述の新設時および塗替え時に排出されるVOC量をもとに、ライフサイクルを考慮し、100年間のうちに実施される全ての塗装工事において排出される総VOC量を試算した。結果をFig. 6に示す。

これより、C-5塗装系では、新設時から20年毎に塗替えを実施するため、ライフサイクル25年で見れば、7年毎に塗替える東京都推奨の低VOC塗装系と比較してTVOC量は38%増となり、25年毎に塗替える提案仕様で最もTVOC量が低く、東京都推奨の低VOC塗装系と比較してTVOC量23%の削減となる。

100年のライフサイクルで見れば、20年毎に塗替えるC-5塗装系では、7年毎に塗替える東京都推奨の低VOC塗装系と比較してTVOC量が7%の削減となり、25年毎に塗替える提案仕様で最もVOC量が低く、東京都推奨の低VOC塗装系と比較してTVOC量が44%の削減となる。このように、1回の塗装で排出されるVOC量が多くても塗替え周期を長期化することによって、25年以上の長いライフサイクルを考慮した場合、提案仕様のVOC排出量の抑制効果が高くなる。

5. まとめ

重防食塗装による外部鉄骨の防錆技術の歴史が長い土木構造物においては、美観よりも耐食性が重視されてきた。本報告では、超高層建築物の外部鉄骨を念頭におき、建築的視点による美観の維持技術と、土木構造物で培われた外部鉄骨の防錆技術とを融合し、厚膜形ふっ素樹脂塗料による新しい重防食塗装仕様を開発し、実用化した。

- 1) 上塗塗料として、耐薬品性、耐熱性に優れ、顔料分散性や溶剤可溶性に優れる三ふっ化樹脂を選定した。さらに、樹脂固形分量を増やして厚膜形とし、ふっ素樹脂塗膜の膜厚を25μmから55μmとすることによって、従来仕様から更なる長期耐久性を確保した。
- 2) 厚膜形ふっ素樹脂塗料を採用した結果、工程が1工程削減され、新設時のトータルVOC排出量を従来工法と比較して31%削減した。

Table 7 塗替え時におけるVOC排出量の削減効果
Effect of Reduction about Amount of Exhaust VOC at Repaint

塗装仕様	東京都VOC対策ガイド記載						提案仕様					
	Rc-IV塗装系 (現行)			低VOC塗装								
工程	塗料名	使用量 ¹⁾²⁾ g/m ² (希釈%)	膜厚 μm	VOC 量 g/m ²	塗料名	使用量 ¹⁾²⁾ g/m ² (希釈%)	膜厚 μm	VOC 量 g/m ²	塗料名	使用量 ¹⁾²⁾ g/m ² (希釈%)	膜厚 μm	VOC 量 g/m ²
プライマー												
防食下地 ミナート												
下塗	弱溶剤形 変性エポキシ 樹脂塗料下塗	200 (10)	60	94	低溶剤形変性 エポキシ樹脂 塗料	200 (5)	60	82	厚膜形弱溶剤形 変性エポキシ 樹脂塗料下塗	200 (10)	60	66
中塗	弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料 用中塗	140 (10)	30	53	水性ふっ素樹 脂塗料用中塗	140 (水5)	30	8	厚膜形弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料 上塗	180 (10)	55	76
上塗	弱溶剤形 ふっ素樹脂塗料 上塗	120 (10)	25	61	水性ふっ素樹 脂塗料上塗	120 (水5)	25	6				
合計 TVOC g/m ²	3工程			208	3工程			96	2工程			142
VOC 削減率				0% ³⁾				5.4% ³⁾				3.2% ³⁾
耐食性				A				-				A
耐候性				A				A ⁺				AA
参考塗替え 間隔				約20年				-				約25年

■注
1) 塗料の使用量:「鋼道路橋塗装・防食便覧」に準じて設定し、便覧に記載のない材料は塗料製造メーカーの社内基準で設定。
2) 希釈率(%)は、「鋼道路橋塗装・防食便覧」規定の最大値を採用。但し、便覧に記載のない材料は塗料製造メーカーの社内基準値の最大値で算出
3) VOC削減率は、東京都VOC対策ガイド記載のRc-IV塗装系のTVOC量208g/m²を基準値として算出。

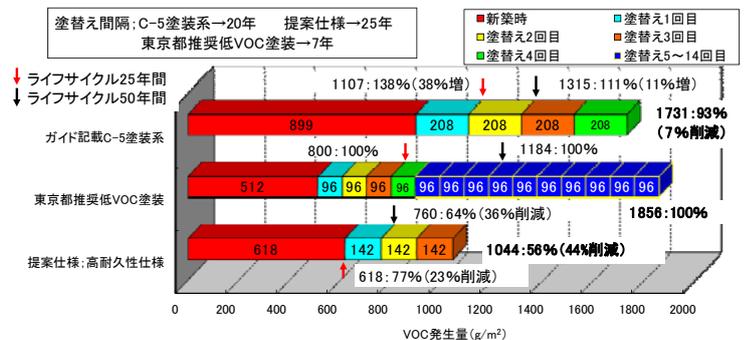


Fig. 6 ライフサイクル (100年間) における
塗装工事から排出されるTVOC量
Amount of Exhaust Total VOC by Painter's Work
until Hundred Years Life-cycle

参考文献

- 1) 高柳敬志：地球環境保全に貢献する塗料用樹脂の最新動向—ふっ素樹脂—, 防錆管理, pp.453-466, Vol.53, No.12, (2009)
- 2) 里隆幸, 田邊弘征, 山本基弘, 岩瀬嘉之, 山内健一郎, 定石圭司：ふっ素樹脂塗料による重防食塗装系の高耐久化, 第57回材料と環境討論会講演集, pp.324-325, (2010)
- 3) 山本基弘, 山内健一郎, 堀長生, 奥田章子：ふっ素樹脂塗料の高耐久性と東京スカイツリー-外部鉄骨の防錆技術, 日本接着学会誌, vol.47, No.9,(2011.9)
- 4) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧, (2005)
- 5) 慶伊道夫, 堀長生, 奥田章子：東京スカイツリーの建設概要と外部鉄骨の防錆技術, 防錆管理, pp149-150, (2009.9)