

厚膜形エポキシ樹脂塗装による 洋上風力発電設備基礎の長期防食

～海洋環境に24年間暴露した厚膜形エポキシ樹脂塗装の耐久性～

Long-term corrosion protection of offshore wind turbine foundation with
high build epoxy coating

～Durability of high build epoxy coating exposed
to marine environment for 24 years～

佐藤 弘隆 Hiroataka SATO
技術開発研究所 材料・防食技術室
シニアマネジャー

大嶽 敦郎 Atsuo OOTAKE
海洋本部 洋上風力設計室
シニアマネジャー

片山 能輔 Yoshisuke KATAYAMA
海洋本部 洋上風力設計室 室長

抄 録

洋上風力発電設備のジャケット式基礎、モノパイロ式基礎および浮体構造への厚膜形エポキシ樹脂塗装の適用を検討するために、厚膜形エポキシ樹脂塗装を施した鋼管を24年間海洋に暴露し、塗装の長期防食性を評価した。評価結果から、①供用期間中、約120 μ m以上の膜厚を確保できていれば長期防食が可能である、②長期供用する際は、紫外線により塗膜が劣化・減耗する「チョーキング」への対策が必要である、という有用な知見を得た。洋上風力発電設備基礎に厚膜形エポキシ樹脂塗装を適用した際の耐久性は、エポキシ層に十分な減耗予備厚を設け、さらに耐候性上塗りを適用することで、暴露試験の実績である24年を上回る期間が期待できる。

Abstract

High build epoxy coating was considered for application to jacket foundations, monopile foundations, and floating structures of offshore wind turbine. Steel pipes coated with high build epoxy were exposed to marine environment for 24 years, and the corrosion protection properties of the coating were evaluated. We obtained the useful knowledge that 1) Long term corrosion protection can be achieved if the coating thickness of 120 μ m or more is maintained during the service life, and 2) Ultraviolet rays cause “chalking”, the deterioration and thickness loss of the coating, so if long durability is required, it is necessary to take countermeasures against chalking. The durability of high build epoxy coating applied to the offshore wind turbine foundation can be extended to over 24 years, as demonstrated by exposure tests, through the application of sufficient additional film thickness in the epoxy layer and the use of a weather-resistant topcoat.

1 緒言

近年、カーボンニュートラルの実現やエネルギー自給率の向上を図る有効な手段として、再生可能エネルギーが注目を集めている。当社においても、再生可能エネルギーの普及に貢献するために、バイオマス発電、地熱発電、洋上風力発電、下水汚泥固形燃料化等の設備の開発・設計・建設に取り組んでいる。洋上風力発電に関しては、2013年に北九州沖で発電を開始したNEDOの洋上風力発電システム実証研究にてジャケット式基礎(図1)の設計・製作¹⁾を担当し、2022年には商用洋上風力発電設備のジャケット式基礎²⁾を初受注している。洋上風力発電の国内での本格的な普及に向け、大水深化や風車の大型化に対応するべく、当事業分野の強化に取り組んでいる。

洋上風力発電設備の下部構造は、ジャケット式基礎、モノパイル式基礎、浮体構造等いくつかの種類があるが、いずれも洋上という厳しい腐食環境に設置され、20年を超える長い期間供用されるため、鋼材への防食工法の適用が不可欠となる。経済産業省と国土交通省が策定した「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」³⁾においては、鋼材に適用する防食工法は、「構造物の設置環境、期待寿命、



図1 洋上風力発電設備のジャケット式基礎(写真)
Fig.1 Jacket Foundation for Offshore Wind Turbine (Photo)

必要とされる防食性能、耐久性及び経済性、施工性の他に維持管理のし易さ、外観といった要素について十分考慮して決定することが望ましい。」と記されている。だが、上記解説には具体的な防食仕様までは記されていないため、多くの要素を考慮した適切な防食設計^{1), 2)}を行う必要がある。

当社では、国内港湾設備向けジャケット構造物を多く製作してきており、それらの干満帯～飛沫帯～海上大気部の防食被覆として、超厚膜形エポキシ樹脂被覆⁴⁾および当社の差別化防食技術である耐海水性ステンレス鋼被覆^{4), 5)}のいずれかを適用してきた。これらを洋上風力発電設備基礎に適用することもできるが、港湾向けジャケットの設計供用期間が30年～50年以上であるのに対し、洋上風力発電設備の設計供用期間は25年程度であるため、ライフサイクルコストの観点からは、より汎用的な防食被覆の方が好ましい。また、洋上風力発電設備基礎は、船舶の衝突防止のため黄色の塗装を施す必要がある⁶⁾。そのため、当社では、洋上風力発電設備基礎の防食被覆については、経済性、施工性、着色自由度等に優れ、さらに、「港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル」に記載されている海洋厚膜エポキシ塗装系⁴⁾への準拠や、沖合構造物の防食塗装に関する規格であるISO12944-9⁷⁾への準拠が可能な厚膜形エポキシ樹脂塗装⁴⁾を有力候補とした。なお、超厚膜形エポキシ樹脂被覆と厚膜形エポキシ樹脂塗装の違いは、主に塗膜の厚みであり、超厚膜形エポキシ樹脂被覆は1mm以上(港湾設備向けジャケット構造物：標準厚みは2.5mm)、厚膜形エポキシ樹脂塗装は1mm未満(数100 μ m)が目安となる。

洋上風力発電設備基礎に厚膜形エポキシ樹脂塗装の適用を検討するにあたり、国内海洋環境における厚膜形エポキシ樹脂塗装の実績を調べてみたが、長期実績がほとんどないことが判明した。長期実績が乏しい理由は、2000年頃までは経済性と防食性に優れた海洋鋼構造物の塗装としてタールエポキシ樹脂塗装が広く適用されていたためである。なお、タールエポキシ樹脂塗料は、発がん性の疑いがあるコールタールを含んでいるため、現在ではほとんど使われていない。そこで、タールエポキシ樹脂塗装の代替として1996年から社内にて暴露試験を実施している厚膜形エポキシ樹脂塗装の試験体を回収し、長期



図2 海洋暴露試験場(写真, 左:全景, 右:試験体の引き上げ状況)
Fig. 2 Marine Exposure Test Site (Photo)

防食性に関して評価した⁸⁾。

本報では、海洋暴露試験体の評価結果と、長期供用される洋上風力発電設備基礎に厚膜形エポキシ樹脂塗装を適用する際の塗装設計の考え方について述べる。

2 試験方法

2.1 海洋暴露試験場

海洋暴露試験は、福岡県北九州市若松区の日鉄鋼構造(株)の構内岸壁にある海洋暴露試験場を利用して実施した。

本試験場は洞海湾入口に位置し、大型構造物出荷用泊地に面しているため、波浪や潮流に関しては比較的穏やかな環境である。暴露試験状況を図2に示す。

2.2 塗装試験体の製作

鋼管(STPG300A, $\phi 318.5 \times 5, 500 \times 10.3\text{mmt}$)にプラスト処理による素地調整を施し、図3にグレーで示す範囲にジンクリッチ塗料と厚膜形エポキシ樹脂塗料を塗装した。なお、図3における左側の数値は、試験体を海洋暴露試験場に設置した際の高さを示しており、L.W.L. (Low Water Level, 朔望平均干潮位)を海面高さの基準面としている。H.W.L.は朔望平均満潮位(High Water Level)を示している。

防食下地となるジンクリッチ塗料としては、有機ジンクリッチ塗料と無機ジンクリッチ塗料の2種類

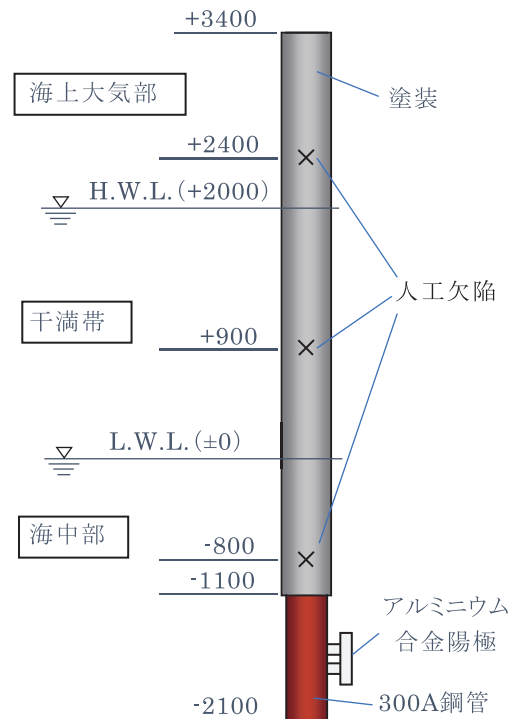


図3 暴露試験に供した塗装鋼管
Fig. 3 Coated Steel Pipe for Exposure Test

を用いた。厚膜形エポキシ樹脂塗料としては、当時、タールエポキシ樹脂塗料の代替品として当社と新日鐵化学(当時)が共同で開発した内部応力低減タイプの微溶剤形エポキシ樹脂塗料⁹⁾を用いた。塗装の施工は、エアレススプレーにて実施した。塗装試験体の仕様を表1に示す。ジンクリッチ塗料以外は同じ仕様となるため、有機ジンクリッチ塗料を用いた試験体はOZ(OZ: Organic zinc rich primer), 無機ジンクリッチ塗料を用いた試験体はIZ(IZ: In-

表1 暴露試験体の塗装仕様
Table1 Paint System of Exposed Coated Steel Pipes

呼称および仕様概要	OZ	IZ
	有機ジンク+厚膜形エポキシ	無機ジンク+厚膜形エポキシ
鋼管	STPG300A (φ318.5×5500×10.3mmt)	STPG300A (φ318.5×5500×10.3mmt)
素地調整	ブラスト処理 (ISO 8501-1 Sa2.5)	ブラスト処理 (ISO 8501-1 Sa2.5)
防食下地	有機ジンクリッチ塗料 (狙い膜厚: 20μm)	無機ジンクリッチ塗料 (狙い膜厚: 75μm)
1層目	微溶剤形エポキシ樹脂塗料 (狙い膜厚: 200μm)	微溶剤形エポキシ樹脂塗料 (狙い膜厚: 200μm)
2層目	微溶剤形エポキシ樹脂塗料 (狙い膜厚: 200μm)	微溶剤形エポキシ樹脂塗料 (狙い膜厚: 200μm)
総膜厚	420μm (実測した初期膜厚は411~703μm)	475μm (実測した初期膜厚は468~629μm)

organic zinc rich primer)と記す。塗膜欠陥部からの剥離進行を評価するために、海上大気部(海面高さの基準面から+2400mm)・干満帯(同+900mm)・海中部(同-800mm)に相当する位置に、鋼面まで達するXカットの人工欠陥を付与した。鋼管の下部1,000mmは未塗装部とし、海洋鋼構造物の海中部を模擬して、電気防食用にアルミニウム合金陽極を取り付けた。

2.3 海洋暴露試験

塗装試験体は1996年に海洋暴露試験場に設置した。

1年, 3.5年, 5.5年, 19年経過時に引き上げて、外観調査, 膜厚, 密着力等を調査し, 調査後は再設置した。24年が経過した2020年に回収し, 暴露試験を終了した。設置時および引き上げ調査後に再設置する際は, Xカット人工欠陥を付与した面を沖合に向けるようにし, 暴露試験期間中の試験体の向きを一定にした。沖合方向を0時方向として, 上から見て3時方向, 6時方向(陸側), 9時方向と定めた場合, 方位は0時: 東南東, 3時: 南南西, 6時: 西北西, 9時: 北北東となる。外観観察は, 付着していた海生生物を除去して実施した。膜厚は, 図3の人工欠陥の高さ付近で, 0時, 3時, 6時, 9時の4方向を測定した。塗膜の密着力は, 人工欠陥近傍にてプルオフ法で測定し, 測定後に生じる塗膜欠陥は水中硬化形エポキシ樹脂にて補修した。

3 結果と考察

3.1 外観観察

今回は, 24年経過時の外観について述べる。

岸壁から引き上げた直後の外観および除員後のXカット人工欠陥付近の外観を図4に示す。なお, Xカットは図3に示すように海上大気部・干満帯・海中部の3箇所であるが, OZの干満帯上部(L.W.L.+1800mm付近)にて塗膜下腐食が確認されたので, 図4では「H.W.L.近傍」として図3における+1800付近の外観も載せている。

[海上大気部]

チョーキング(紫外線により塗膜の表層が劣化し, 粉状になって減耗していく現象)により光沢は失われていたが, 塗膜の割れや膨れ, 剥がれは認められなかった。Xカット部からの塗膜剥離はほとんど進行していなかった。

剥離が進行しなかった理由は, 鋼管が鉛直方向に設置されており, 降雨時の濡れ時間が短かったことに加えて, ジンクリッチ塗装の犠牲防食効果や, 塗膜の内部応力低減を狙って開発したエポキシ樹脂塗装の内部応力緩和効果のため⁹⁾と考えている。

[H.W.L.近傍]

OZの0時方向にて190×130mmの範囲で塗膜下腐食が認められた。腐食範囲周辺の膜厚は約100~120μmであった。該当箇所は, 19年経過時の調査では膜厚は測定していないが外観は健全であった。19年目・24年目の調査において, いずれも衝突物の痕跡等はなかったことから, 膜厚が100~120μm程度未満まで減耗した部位にて, 塗膜の環境遮断性能

	OZ(有機ジンク+厚膜エポキシ)		IZ(無機ジンク+厚膜エポキシ)	
	除貝前	除貝後	除貝前	除貝後
海上大気部 (+2400付近) (0時方向)				
H.W.L. 近傍 (+1800付近) (0時方向)				
干満帯 (+900付近) (0時方向)				
海中部 (-800付近) (0時方向)				

図4 24年経過時の塗装試験体の外観(写真, H.W.L. 近傍は X カットなし)
Fig. 4 Appearance of Coated Steel Pipes after 24 Years Exposure (Photo)

が低下して塗膜下の鋼材の腐食に至ったと考えている。腐食していた部位以外は、塗膜の割れや膨れ、剥がれは認められなかった。

IZにおいては、腐食は認められなかったが、OZで腐食していた高さと同様の高さ、方向にてエポキシ層の消失と防食下地である無機ジンクリッチ塗装の露出が認められた。このことから、H.W.L. 近傍、0時方向のみ特異的に、塗膜の減耗が著しく進行したと考えられる。

H.W.L. 近傍の0時方向のみ、エポキシ層の減耗が著しく進行していた理由としては、海上大気部と同等に長時間紫外線に曝されるが、チョーキングにより粉状になった劣化塗膜が満潮時や高波浪時に洗い流され、紫外線に対する劣化塗膜によるバリア効果が薄れたためと考えている。

なお、IZではエポキシ層が消失しても腐食しておらず、OZ(有機ジンク、20 μ m)よりもIZ(無機ジ

ンク、75 μ m)の方が防食下地の防食効果が優れていると推察できるが、最適な防食下地の種類、膜厚については今後の課題としたい。また、長期供用する場合の塗装仕様は、防食下地が露出しないように安全側に設計するべきと考えている。

[干満帯]

引き上げ直後の状態は、フジツボが塗膜表面を覆っていた。除貝後の塗膜表面は、フジツボの付着跡である石灰質が固着していたが、塗膜の割れや膨れ、剥がれは認められなかった。Xカット部も、電気防食が効いているらしく、欠陥部からの腐食は認められなかった。また、Xカット部での塗膜の剥離の進行も認められなかった。

[海中部]

引き上げ直後の状態は、フジツボやカキ、ホヤ類等の海生生物が塗膜表面を覆っていた。除貝後の塗膜表面は、フジツボやカキの付着跡である石灰質が

固着していたが、塗膜の割れや膨れ、剥がれは認められなかった。Xカット部も、鋼面の腐食や塗膜の膨れ・剥離は認められなかった。

3.2 膜厚測定

初期および1年、3.5年、5.5年、19年、24年経過時に膜厚測定した結果を表2、表3にグラフで示す。グラフにおける点線は直線近似線である。また、各グラフの直線近似線の傾きから得た塗膜の減耗速度を表4にまとめて示す。

[海上大気部]

いずれの方位も年月の経過とともに膜厚が減耗していたが、方位に対する依存性が認められた。0時方向(東南東)の減耗速度が最も大きく、OZの0時方向は、24年間で約320 μm (13.3 $\mu\text{m}/\text{年}$)減耗していた。一方、6時方向(西北西)の減耗速度は最も小さく、OZの6時方向の減耗量は、24年間で約70 μm (3.1 $\mu\text{m}/\text{年}$)であった。方位による減耗速度の差異の原因は、0時方向(東南東)は直射日光および海面からの日光の照り返しが当たる時間が長い、風雨も直接当たりやすい等により、チョーキングが進行しやすかったためと考えている。

[干満帯]

方位による差異はほとんどなく、24年間で20~50 μm 程度の膜厚減耗であった。膜厚の測定部位は干満帯のほぼ中央であり、試験体を回収した際の塗膜はフジツボ等の海生生物で覆われていたが、季節によっては日中の干潮時に日光が当たることもあるため、わずかではあるが、チョーキングによる塗膜減耗が生じたと考えている。

[海中部]

測定結果にはばらつきがあるが、膜厚はほとんど減耗していなかった。ばらつきの主な原因は、フジツボやカキの付着跡を避けて膜厚測定しており、定点にて測定できなかったためと考えている。

本結果から、供用中の塗膜の減耗は、主に紫外線によるチョーキングであり、干満帯上部~海上大気部の南面でチョーキングが進行しやすく、塗膜の減耗速度は10 $\mu\text{m}/\text{年}$ を上回る場合もあることが明らかになった。

3.3 密着力測定

今回は代表として、24年経過時に測定した密着力の値および剥離形態を表5に示す。チョーキングに

表2 OZ(有機ジンク+厚膜エポキシ)の塗膜厚の経時変化
Table2 Thickness Loss of OZ as a Function of Exposure Duration

OZ(有機ジンク+厚膜エポキシ)				
方角	0時(東南東)	3時(南南西)	6時(西北西)	9時(北北東)
海上大気部				
干満帯				
海中部				

表3 IZ(無機ジンク+厚膜エポキシ)の塗膜厚の経時変化
Table3 Thickness Loss of IZ as a Function of Exposure Duration

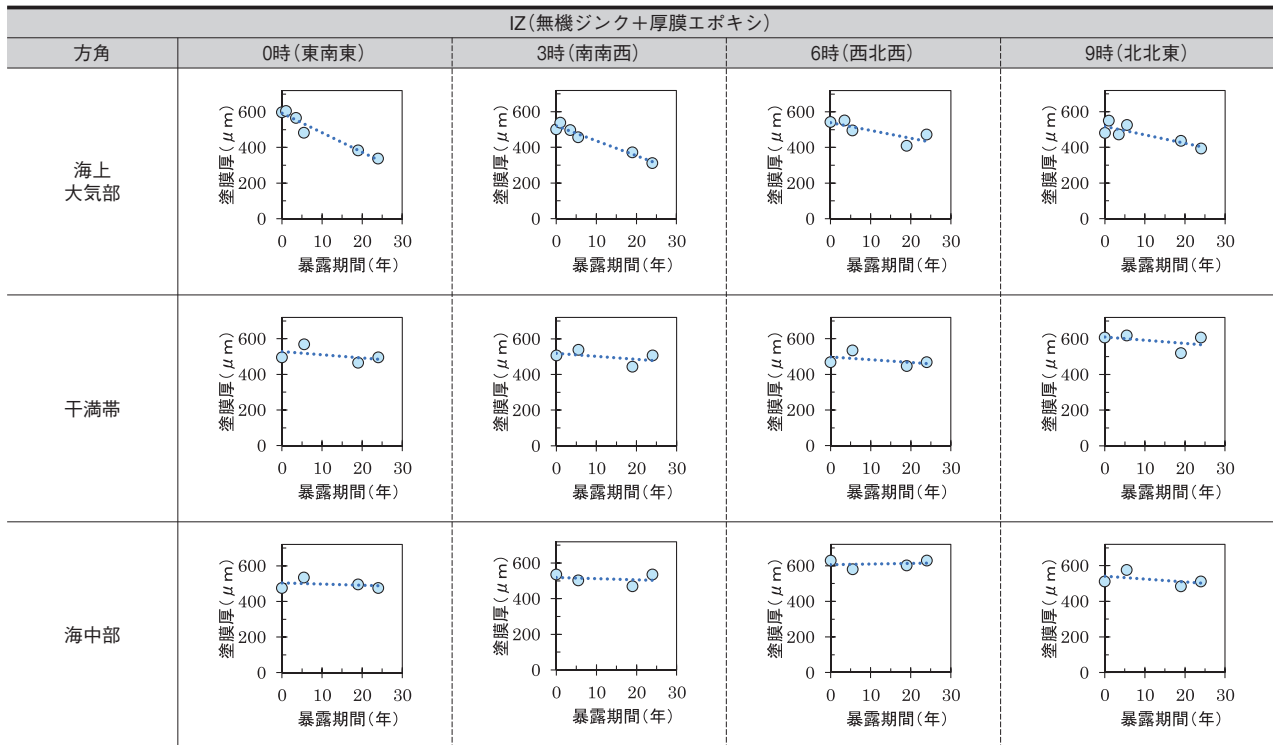


表4 24年経過時の厚膜形エポキシ樹脂塗装の膜厚減少速度(μm/年)
Table4 Thickness Loss Results of the High Build Epoxy Coatings after 24 Years(μm/year)

	0時(南南東)		3時(西南西)		6時(北北西)		9時(東北東)	
	OZ	IZ	OZ	IZ	OZ	IZ	OZ	IZ
海上大気部	13.3	11.0	7.3	8.4	3.1	4.4	6.3	4.7
干満帯	1.3	1.8	2.0	1.7	1.0	1.5	0.9	1.8
海中部	1.8	0.7	3.0	0.6	1.2	0.3	0.3	1.6

表5 24年経過時の厚膜形エポキシ樹脂塗装の密着力測定結果
Table5 Adhesion Test Results of the High Build Epoxy Coatings after 24 Years

	OZ(有機ジンク+厚膜エポキシ)		IZ(無機ジンク+厚膜エポキシ)	
	密着力 ^{※1)} (MPa)	剥離形態	密着力 ^{※2)} (MPa)	剥離形態
海上大気部	4.2	塗膜/接着剤界面	3.5	塗膜/接着剤界面
	3.8	塗膜/接着剤界面	3.8	塗膜/接着剤界面
干満帯	4.2	塗膜/接着剤界面	6.0	塗膜/接着剤界面+ジンク層凝集
	5.9	塗膜/接着剤界面	2.1	塗膜/接着剤界面
海中部	>7.0	塗膜/接着剤界面+エポキシ層凝集	6.4	塗膜/接着剤界面+エポキシ層凝集
	6.5	塗膜/接着剤界面+エポキシ層凝集	3.5	塗膜/接着剤界面

※1)初期密着力は5.1~6.1MPa, ※2)初期密着力は5.1~5.6MPa

よる塗膜の減耗程度に関わらず、いずれも十分な付着力の基準とされる2.0MPa以上の値であった。剥離形態は、塗膜/接着剤界面が多いが、その場合は塗膜本来の密着力(もしくは塗膜の凝集力)は測定値以上であると見なせるので、いずれの部位も良好な密着力を保持していると判断した。

4 厚膜形エポキシ樹脂塗装の期待耐用年数について

今回の長期暴露試験では、H.W.L.の近傍の1箇所において塗膜下腐食が認められた。腐食箇所周辺の膜厚は紫外線劣化(チョーキング)により約100~120 μmまで減耗していたことから、今回の塗装仕様で

は残存膜厚が約120 μm を上回っていれば、防食機能を発現できると考えている。大気部にエポキシ樹脂塗装を適用する場合は、チョーキングによる塗膜の減耗を考慮して塗装設計する必要がある。「港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル」⁴⁾に海洋厚膜エポキシ塗装系の塗装仕様例として示されている標準IM-A仕様(有機ジンク:75 μm +厚膜形エポキシ樹脂塗装:480 μm)に準拠して、本報の厚膜形エポキシ樹脂塗装を洋上風力発電設備基礎に適用した場合、24年間でチョーキングによって塗膜の減耗が320 μm 程度進行しても、残存している塗膜の厚みは160 μm となるため、24年経過後も防食機能の保持が期待できる。ただし、今回の暴露試験では、H.W.L.付近で塗膜のチョーキングによる減耗が促進されるという知見を得たが、洋上風力の設置される沖合の洋上においては、波浪や強風等により塗膜の減耗がさらに促進される可能性がある。また、今回は日光の当たりやすい南面で減耗速度が早くなっていたが、沖合の洋上では海面からの日光の照り返し等により南面以外でも、チョーキングによる塗膜の減耗が進行する可能性がある。そのため、厚膜形エポキシ樹脂塗装に20年を超えるような防食期間を期待する場合は、供用中のエポキシ層のチョーキングを想定して、膜厚120 μm 未満まで減耗しないような劣化対策が必要である。具体的には、エポキシ層に十分な減耗予備厚を設け、さらに耐候性上塗り⁴⁾を適用するといった減耗対策を講じることで、暴露試験の実績である24年を上回る防食期間が期待できると考えている。洋上風力発電設備基礎に適用する場合は、耐候性上塗りを黄色にすればよい。

なお沖合の洋上においては、漂流物の衝突等の偶発的な要因で塗膜が損傷する場合もあり、耐衝撃性は塗膜の厚さに比例するため、偶発的な要因による塗膜の損傷リスクを低減するためにも、膜厚は厚い方が好ましい。

5 洋上風力発電設備仕様の塗装鋼管の長期暴露試験について

当社では、実績のない新たな防食被覆工法を社会インフラに適用する際は、防食被覆の信頼性を確認するために、ラボでの促進劣化試験に加え、実環境

での長期暴露試験を実施している。例えば、半世紀前に埋設ガス導管に外面ポリエチレン被覆工法を適用した際は、各種防食被覆の長期埋設試験を実施しており、本試験は51年が経過した現在でも継続中である¹⁰⁾。また、東京湾横断道路の川崎人工島ジャケットに超厚膜形エポキシ被覆工法を適用した際や、羽田空港D滑走路栈橋ジャケットに耐海水性ステンレス鋼被覆工法を適用した際にも、実構造物と同様の防食工法を施した鋼管試験体の長期海洋暴露試験を開始しており、それぞれ現在でも経過観察を継続している^{5), 11)}。今回も、洋上風力発電設備基礎への厚膜形エポキシ樹脂塗装の適用にあたり、防食下地の種類や、エポキシ樹脂塗料の環境遮断性の差異、耐候性上塗りの種類・膜厚を振った仕様の異なる10本の塗装鋼管を製作し、長期海洋暴露試験を開始している(図5)。今後は、これらの暴露試験体の経過観察と各種促進劣化試験を行い、得られた知見を実案件の防食被覆に反映させていくことで、より信頼性とライフサイクルコストに優れた防食工法を提供していきたい。

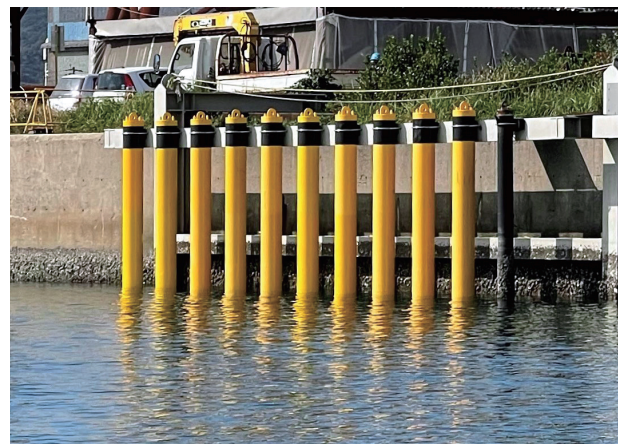


図5 洋上風力基礎の仕様に合わせた厚膜形エポキシ樹脂塗装鋼管の海洋暴露試験(写真)

Fig. 5 Marine Exposure Test of Steel Pipes Coated with High Build Epoxy for Offshore Wind Turbine Foundation (Photo)

6 まとめ

洋上風力発電設備基礎に厚膜形エポキシ樹脂塗装の適用を検討するにあたり、24年間海洋暴露した厚膜形エポキシ樹脂塗装鋼管を回収・評価し、以下の有用な知見を得た。

①直射日光が当たる海上大気部～干満帯上部では、

厚膜形エポキシ樹脂塗装は紫外線劣化(チョーキング)により減耗し、塗膜の減耗速度は $10\mu\text{m}/\text{年}$ を上回る場合もある

- ②朔望平均満潮位(H.W.L.)付近は、チョーキングにより粉状となった劣化塗膜が洗い流され、紫外線に対する劣化塗膜によるバリア効果が薄れるため、塗膜の減耗速度が海上大気部よりも大きくなる
- ③残存膜厚が $120\mu\text{m}$ を上回る部位では、24年経過後も防食性を保持していた
- ④残存膜厚が $100\sim 120\mu\text{m}$ を下回ると、環境遮断性が低下し、鋼材が腐食しやすくなる
- ⑤干満帯・海中部の塗膜は、電気防食併用下でも膨れや剥がれは発生しなかった
- ⑥チョーキング対策として、エポキシ層に減耗予備厚を設け、耐候性上塗りを積層すれば、24年を超える耐久性が期待できる

参考文献

- 1) 犬飼壯典, 鈴木三樹雄, 片山能輔, 入江敬: 洋上風力発電設備基礎の設計技術の確立～北九州市沖における国内初のジャケット式洋上風力基礎の実現～, 新日鉄住金エンジニアリング技報, Vol. 4, pp. 30-38(2013)
- 2) 大嶽敦郎, 風野裕明, 森下和帆, 笹井綾乃, 加賀美暢一, 福田渚, 中野雄太, 藤土尚也: 洋上風力発電設備におけるジャケット構造の設計技術の確立～詳細設計における風波連成解析, 耐震設計手法及び設計留意点について～, 日鉄エンジニアリング技報, Vol. 14, pp. 18-31(2023)
- 3) 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説, 洋上風力発電施設検討委員会(2020)
- 4) 港湾鋼構造物 防食・補修マニュアル(2022年版), (一財)沿岸技術研究センター(2022)
- 5) 松永修平, 片山翼, 佐藤弘隆, 木村文映, 関口太郎: 耐海水性ステンレス鋼被覆による海洋鋼構造物の防食技術, 日本製鉄技報, Vol. 416, pp. 154-159(2020)
- 6) 航路標識の設置及び管理に関するガイドライン, 海上保安庁(2020)
- 7) ISO12944-9: 2018 Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures
- 8) 佐藤弘隆: 海洋環境に24年間暴露した厚膜形エポキシ樹脂塗装の防食性, 第40回防錆防食技術発表大会講演予稿集, pp. 161-166(2020)
- 9) 中嶋泰治, 鈴木恵太, 石田雅己, 石川慎也, 小林一雅, 山本正弘: 傷部からの剥離進行を抑制した新しい重防食塗料について, 防錆管理, Vol. 46, No. 2, pp. 41-45(2002)
- 10) 鈴木恵太, 佐々木信博: 土中に35年間埋設された各種塗覆装鋼管の評価結果, 防錆管理, Vol. 58, No. 11, pp. 403-408(2014)
- 11) 佐々木信博: 電気化学インピーダンス法による超厚膜形エポキシ樹脂被覆の劣化診断, 第39回防錆防食技術発表大会講演予稿集, pp. 169-174(2019)

