

鋼管杭の防食工法に関する研究

茨城県鹿島灘における長期暴露試験
20年目の調査結果

Research on the Corrosive Protection Method for
Steel Pipe Piles

Result on the Long-term Exposure Test for 20 Years
at Kashima-nada Coast in Japan.



関西ペイント販売(株)
建設塗料本部
防食技術部(東京)
浦野一臣
Kazuomi
Urano



関西ペイント販売(株)
建設塗料本部
防食技術部(大阪)
糟谷 誠
Makoto
Kasuya



関西ペイント販売(株)
建設塗料本部
防食技術部(大阪)
増田平隆
Hirataka
Masuda

SUMMARY

Various corrosion protection methods were applied to steel pipe piles at Kashima-nada coast in 1984 and since then, condition of the piles has been periodically inspected. The latest inspection, after 20 years exposure, proves that Non-solvent, super high-build epoxy mastic have excellent durability despite extremely severe corrosive condition at coastal environment.

要 旨

茨城県鹿島灘にある栈橋の鋼管杭を用いて各種防食工法の調査を1984年から行っている。今回、各種の防食技術の防食効果およびその耐久性を確認するため、20年経過後の現地調査を行った。その結果、超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料を用いたそれぞれの防食工法は有効であり、高い耐久性を期待できることが実証された。

1. はじめに

港湾鋼構造物や海洋鋼構造物は、鋼材にとって非常に厳しい腐食環境に曝されるにもかかわらず、その期待耐用年数が長い。最近では100年を超える防食設計の要請もある。また、これらの構造物は、大事な社会資本である場合が多く、供用期間中、鋼構造物を健全な状態で維持していくこと、および、延命するための防食対策には万全を期す必要があり、これまで鋼材を腐食から守るための防食工法として、さまざまな技術が開発され、応用されてきている。

このような鋼構造物の防食技術の評価・検討を実際の海洋環境で行うため、独立行政法人 港湾空港技術研究所、財団法人 沿岸開発技術センター、鋼管杭協会の共同研究グループによる「鋼管杭の防食法に関する研究」として、茨城県波崎町の碎波帯総合観測用栈橋の鋼管杭を利用して、各種防食技術の防食効果および防食材料の耐久性の評価試験を1984年(昭和59年)に開始し、現在に至っている。

ここで検討されている防食工法は、有機ライニング工法、無機ライニング工法、ペトロラタムライニング工法、塗装工法、電気防食工法などであり、この中の有機ライニング工法、塗装工法において当社も本研究に参画している。

本報では、2004年(平成16年)に実施した20年目の調査結果から得られた「超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料による防食塗装システムの防食効果と耐久性」について紹介する。

2. 海洋環境と腐食性

海洋環境は、海上大気部、飛まつ帯、干満帯、海中部、海底土中部の大きく5つのゾーンに区分され、それぞれ異なった腐食挙動をとる¹⁾。無防食の鋼管杭におけるそれぞれの板厚減少プロファイルを図1に示す。

腐食速度は、飛まつ帯が最大であり、次いで海中部の表層部、表層部を除く海中部の順に減少する。各ゾーンに連続している鋼構造物の特異現象として、干満帯は常に海水浸漬と水面上露出の繰り返し(乾湿交番)の続く厳しい腐食環境にあるにもかかわらず腐食速度が他の環境より小さいことが挙げられる。これは、干満帯とその直下の海中部との間に酸素濃度の差が生じることによりマイクロセル(酸素濃淡電池)が形成され、保護されるためである。

2.1 各ゾーンの防食工法

(1) 古くから防食効果が高く、経済性に優れた防食工法として電気防食工法があるが、原理的に電解質に接している金属が対象となるため、その適用は海中部や海底土中部に限定される。海洋鋼構造物に用いられている電気防食工法は、直流電流を流すことによる鋼の防食電位(自然電位)を下げる陰極防食が主流である。

なお、大型プロジェクトにおいては電気防食コスト低減と信頼性向上のため、塗装と併せた複合防食が適用されてい

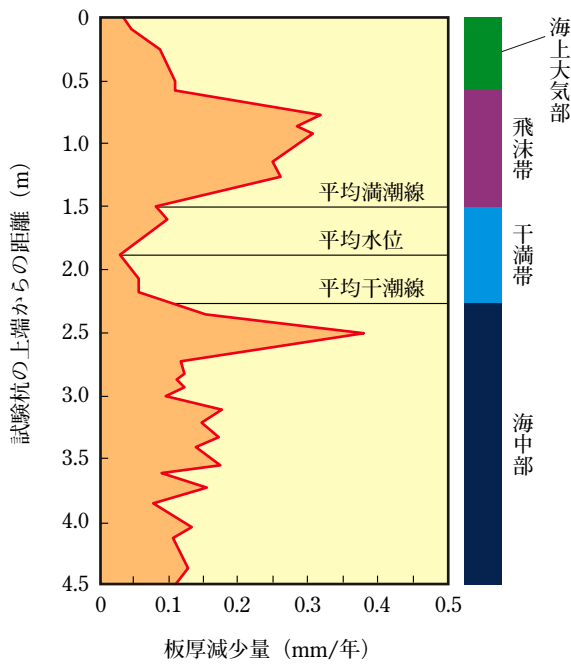


図1 海洋鋼構造物の板厚減少プロファイル

有効であることが確認され、国家プロジェクトレベルの大型海洋鋼構造物の防食工法に採用されるに至っている。

3. 茨城県鹿島灘における長期暴露試験20年目の調査概要

3.1 試験対象

独立行政法人 港湾空港技術研究所が建設した波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋（全長427m、先端水深 約-5m：写真1）の最も海岸側にある観測室下の鋼管杭2本（No.K2, K3：写真2）、及び、栈橋中央付近の1本（No.18：写真3）を対象とした。図2に試験杭の配置図を示す²⁾。なお、この観測用栈橋は、波崎海岸の中に直角に突き出した形で設置されている。また、砕波は250m付近と145m付近で作られ、この影響による波の飛沫が常時発生しており、この観測用栈橋に設置されている鋼管杭は、天候の順・不順にかかわらず、常に波や波の飛沫に曝された環境条件に置かれている³⁾。

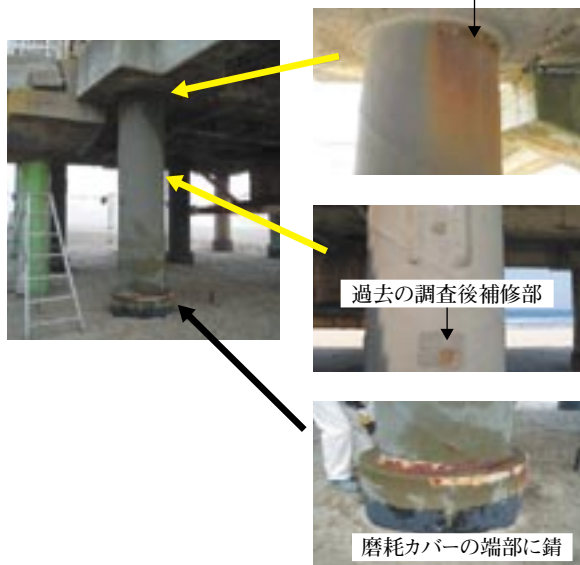
るケースがある。

(2) 干満帯～飛まつ帯の防食対策が重要となるが、これらのゾーンの特徴は、① 腐食が最も厳しい ② 電気防食が不可 ③ 流木等の漂流物による衝撃 ④ 海洋生物付着による腐食作用 ⑤ 架設後は全面的な補修が困難などが挙げられ、検討の結果、これらのゾーンの防食工法として、超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料をミリ単位で適用する厚膜仕様による高度な環境遮断と強靱な塗膜物性を発現させることが



写真1 波崎海洋研究施設砕波帯総合観測用栈橋

杭No.K2



杭No.K3

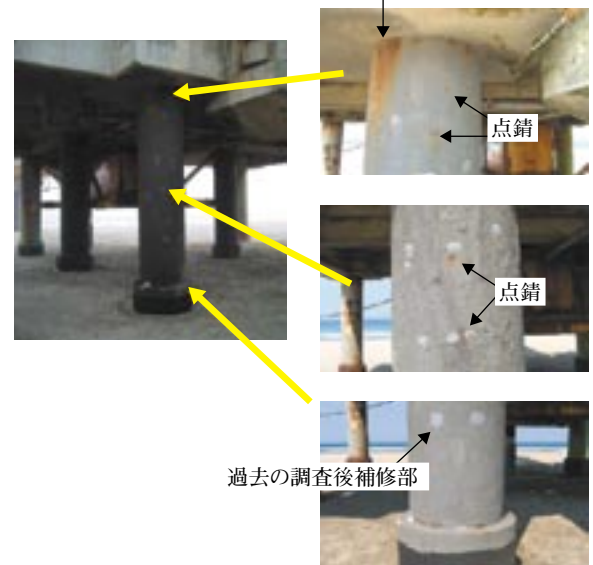


写真2 外観写真

杭No.18

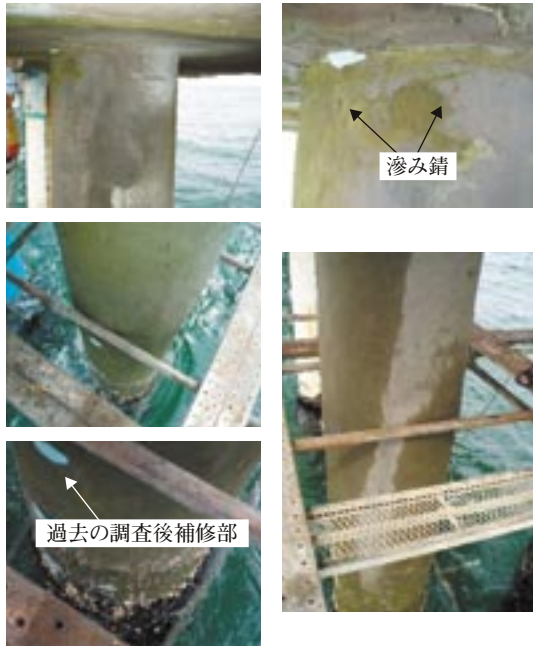


写真3 外観写真

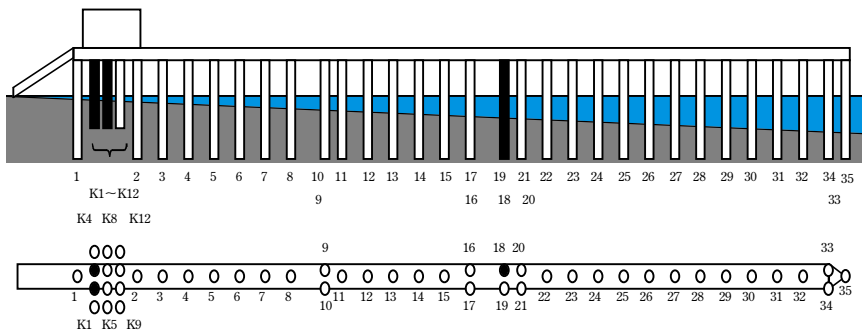


図2 配置図

3.2 供試塗装仕様

当社の供試明細を表1に示す。供試しているナプコバリヤー2M, ナプコバリヤー5M, ナプコバリヤーNは、いずれも一度にミリ単位の厚膜被覆が可能な超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料である。なお、ナプコバリヤーNは海中でも塗膜が硬化する水中硬化形被覆材料である。No.18杭の防食被覆の施工状況を図3に示す。

表2 調査項目

杭No.	調査項目			
	外観調査	杭素地表面の発錆状況観察	付着力測定 (アドヒージョン)	塩素イオン浸透深さ
K2	○	○	○	○
K3	○	○	○	○
18	○	○	○	○

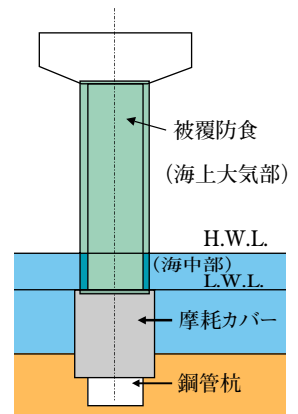


図3 防食被覆の施工状況

表1 当社の供試試料の明細

杭No.	K2	K3	18	
工法の種類	塗装工法	塗装工法	有機ライニング工法	
防食法の種類	超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料	超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料	水中硬化形超厚膜無溶剤エポキシ被覆材料	
施工年月日	1985.11.22	1985.11.22	1985.11.22	
防食施工範囲	杭径(mm)	700	700	
	施工範囲(m)	+3.0~+6.6 ※	+3.0~+6.6 ※	±0~+5.5 ※
	施工面積(m ²)	8.5	8.5	12
素地調整	サンドブラスト SIS Sa2 1/2	サンドブラスト SIS Sa2 1/2	サンドブラスト SIS Sa2 1/2	
塗装仕様	1. SDジンク100 20 μ m	1. SDジンク100 20 μ m	1. 亜鉛めっきされた金網を被塗面に溶接	
	2. ナプコバリヤー 2M 1,000 μ m	2. ナプコバリヤー 5M 2,000 μ m	2. ナプコバリヤーN 5,000 μ m	
	3. ナプコバリヤー 2M 1,000 μ m			
	計 2,020 μ m	計 2,020 μ m	計 5,000 μ m	

※朔望平均干潮位(L.W.L.)を中心として

表3 調査項目と評価基準

外観調査項目	評価基準
1: チョーキング	A: 異常なし (良好)
2: ふくれ	B: 少々
3: われ	C: 小
4: はがれ	D: 中
5: 錆	E: 大

3.3 現地調査概要

それぞれの試験杭について、陸側（陸に面している側）と海側（海に面している側）に区分して、表2に示す調査項目について、現地調査を実施した^{4), 5)}。

表4 鋼管杭素地表面の発錆状況評価基準

ランク	発錆状況
0	発錆なし
1	発錆あり：極めて局所的（例えば点錆1～2ヶ所）
2	発錆あり：部分的に点錆数ヶ所
3	発錆あり：全面的に錆が発生（例えば鋼管に錆が固着）
4	発錆あり：全面錆（例えば浮き錆の状況）

3.3.1 外観調査

陸側、海側それぞれについて、表3に示す調査項目と評価基準に準じて外観調査を行った^{4), 5)}。

3.3.2 杭素地表面の発錆状況観察

陸側、海側のそれぞれ杭上部より2m下の位置において、鋼管杭の素地に達するまでナイフ等で枠を切り（20cm×20cm程度）、スクレーパー等で塗膜を強制的にはぎ取り、表4に示す評価基準に基づき鋼管杭素地表面の発錆状況観察を行った^{4), 5)}。

3.3.3 付着力の測定

測定対象の塗膜表面を#240サンドペーパーで軽く研磨し、シアノアクリレート系接着剤（瞬間接着剤）を用い、陸側、海側、それぞれ杭上部より2m下の位置で2箇所についてアドヒージョンテスターで測定した^{4), 5)}。

3.3.4 塩素イオン浸入深さ測定

陸側、海側のそれぞれ杭上部より2m下の位置（No.K2、K3杭では飛まつ帯から、No.18杭では干満帯から）において、5cm×5cm程度の塗膜を素地から強制的に剥離して測定サンプルとした。それぞれの塗膜の断面について、EPMA（電子線マイクロアナライザー）を用いて塩素イオン濃度を

表5 調査結果

杭No.	K2	K3	18
防食法の種類	超厚膜形無溶剤 エポキシ被覆材料	超厚膜形無溶剤 エポキシ被覆材料	水中硬化形超厚膜 無溶剤エポキシ被覆材料
素地調整	サンドブラスト SIS Sa2 1/2	サンドブラスト SIS Sa2 1/2	サンドブラスト SIS Sa2 1/2
塗装仕様	1. SDジンク100 20 μ m 2. ナブコバリヤー 2M 1,000 μ m 3. ナブコバリヤー 2M 1,000 μ m 合計 2,020 μ m	1. SDジンク100 20 μ m 2. ナブコバリヤー 5M 2,000 μ m 合計 2,020 μ m	1. 亜鉛めっき金網を溶接で固定 2. ナブコバリヤーN 5,000 μ m 合計 5,000 μ m
外観観察結果 (表6, 図4, 写真2, 3)	・ 摩耗カバーの端部及び上部コンクリート部取り合い個所に錆の発生が認められたが、全般的に良好な塗膜外観と防食性を保持していた。 外観観察：錆評価B	・ 同 左 ・ 膜厚が設定値より薄かったことやピンホールなど、施工時のエラーによるものと思われる点錆が確認された。（それらの部分は、設定膜厚2,000 μ mに対し700～1,000 μ mであった。） 外観観察：錆評価B	・ 非常に良好な塗膜外観と防食性を保持していた。 外観観察：錆評価A
付着力測定結果	陸側：4.1 (N/mm ²) 海側：3.1 (N/mm ²) ※超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料 表層の凝集破壊が40～95% (残りは接着剤とスペシメンの間)	陸側：3.9 (N/mm ²) 海側：4.1 (N/mm ²) ※超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料 表層の凝集破壊が50～90% (残りは接着剤とスペシメンの間)	陸側：2.6 (N/mm ²) 海側：2.6 (N/mm ²) ※素地と超厚膜形無溶剤エポキシ 被覆材料との層間100%
塗膜除去後の鋼管杭素地表面の発錆状況観察結果 (写真4)	陸側、海側共に錆の発生、その他異常はなく、良好な防食性が保持されていた。 素地表面の発錆状況： 陸/海側共にランク0（発錆なし）	同 左 素地表面の発錆状況： 陸/海側共にランク0（発錆なし）	陸側に錆の発生、その他異常はなく、良好な防食性が保持されていた。 素地表面の発錆状況： 陸側 ランク0（発錆なし） ※海側は悪天候で採取せず
塩素イオン浸透深さ測定結果（写真5）	陸側：約25 μ m 海側：約50 μ m	陸側：約100 μ m 海側：約200 μ m	陸側：約500 μ m 海側：悪天候でサンプリングできず

表6 試験鋼管杭の外観調査経年変化

杭 No.	防食工法	環境	大気～飛沫帯 (H.W.L. 以上)												
			年 度	昭和61年	昭和62年	昭和63年	平成元年	平成2年	平成3年	平成4年	平成5年	平成16年	総合		
			経過年数	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	20年			
K2	超厚膜形無溶剤 エポキシ被覆材料	外観調査項目	チョーキング	A	A	A	A	A	A	A	B	B	C	C	
			ふくれ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			われ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			はがれ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			錆	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B
K3	超厚膜形無溶剤 エポキシ被覆材料	外観調査項目	チョーキング	A	A	A	A	A	A	A	B	B	C	C	
			ふくれ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			われ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			はがれ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			錆	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B
18	超厚膜形無溶剤 エポキシ被覆材料 (水中硬化形)	外観調査項目	チョーキング	B	B	C	C	C	C	C	D	D	D	D	
			ふくれ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			われ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			はがれ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
			錆	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

評価基準： A：異常なし(良好) B：少々 C：小 D：中 E：大

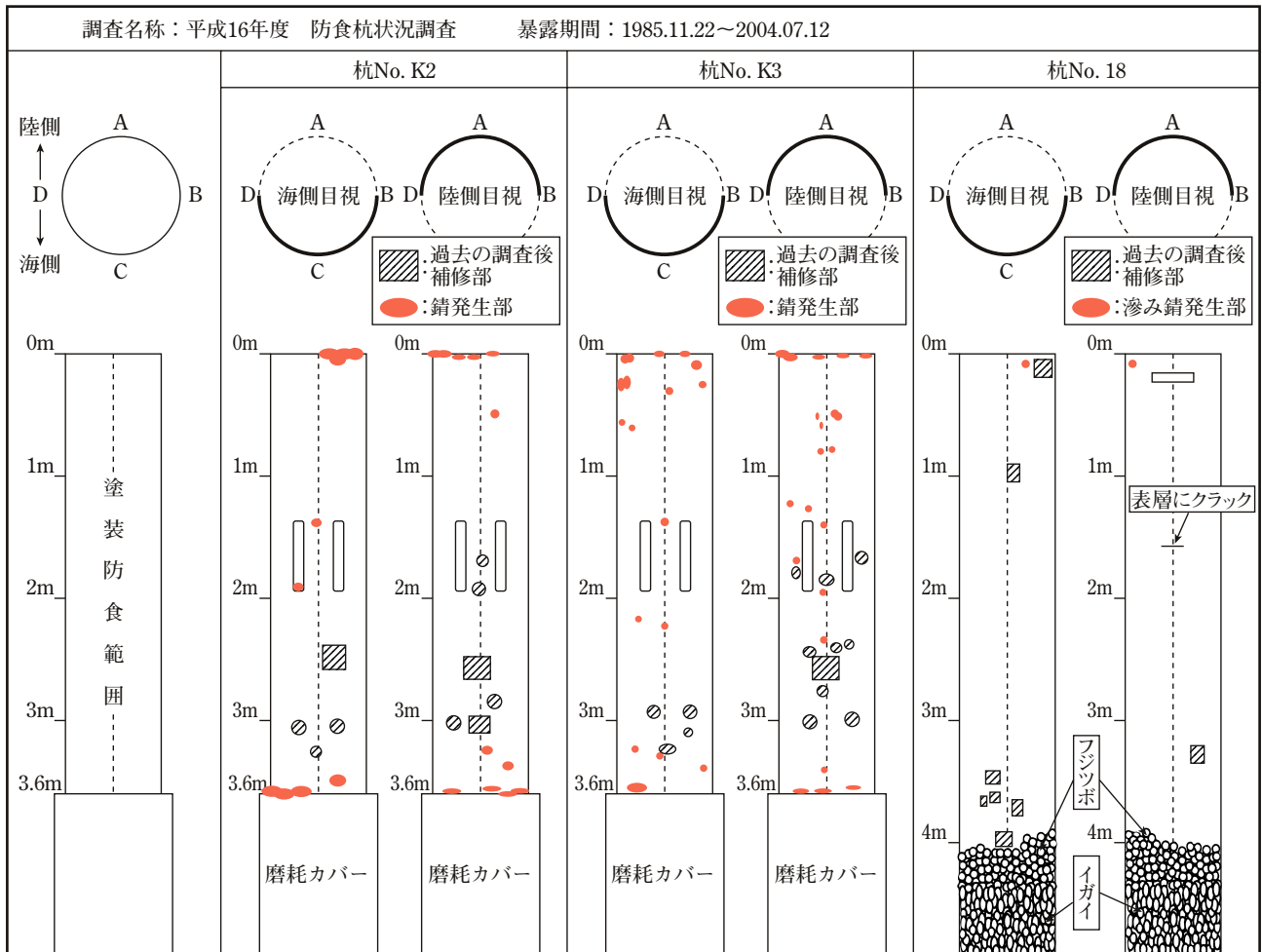


図4 防食杭外観調査結果

測定し、塗膜表層からの塩素イオン浸入深さ(単位: μm)とした⁵⁾。ただし、No.18杭については、天候不順で陸側のみのサンプリングとなった。

4. 調査結果

調査結果の概要を表5に、また、調査項目毎の結果を表6および図4(試験鋼管杭の外観調査結果)、写真4(鋼管杭素地の表面状態)、写真5(塩素イオン浸入深さ調査結果)に示す。以下に各試験鋼管杭の調査結果を示す。

調査名称：平成16年度 防食鋼管杭素地の表面観察記録		暴露期間：1985.11.22~2004.07.12
杭No.K2	杭No.K3	杭No.18
<p>陸側面</p> <p>残存エポキシ塗膜</p> <p>グレー部:SDジンク100塗膜</p>	<p>陸側面</p> <p>残存エポキシ塗膜</p> <p>グレー部:SDジンク100塗膜</p>	<p>陸側面</p>
<p>海側面</p> <p>残存エポキシ塗膜</p> <p>グレー部:SDジンク100塗膜</p>	<p>海側面</p> <p>残存エポキシ塗膜</p> <p>グレー部:SDジンク100塗膜</p>	<p>海側面</p> <p>採取できず</p>

写真4 鋼管杭素地の表面状態

4.1 No.K2杭について
(海上大気部、飛まつ帯、干満帯環境：最も海岸側にある観測室下で試験)

①外観

塗膜のチョーキング現象は、供試後7年経過の時点から認められ始め、20年経過後の状態は小程度であった。ただし、膜厚の定点測定を行っておらず、チョーキングによる塗膜厚の経時変化の知見は得られていない。

防食性については、摩耗カバーの端部及び上部コンクリート部取り合い個所に錆の発生が認められた。また、一般部では、過去の調査時に塗膜採取を行った部分への補修が不十分であったことやメカニカルダメージによるものと思われる点錆が局部的・部分的に確認された。

ふくれ、われ、はがれは認められず、総合的に判断すると、全般的に良好な塗膜外観と防食性を保持していた。

②付着性

付着力は、陸側、海側でそれぞれ4.1、3.1(N/mm²)の値を示し、良好な付着性を保持していた。

③鋼管杭素地表面の状態

塗膜を強制的にはぎ取り鋼管素地表面を観察した結果、陸側、海側共に錆は認められなかった。

杭No.K2	杭No.K3	杭No.18
<p>陸側面</p> <p>約25μm</p> <p>塗膜表面</p>	<p>陸側面</p> <p>約100μm</p> <p>塗膜表面</p>	<p>陸側面</p> <p>約500μm</p> <p>塗膜表面</p>
<p>海側面</p> <p>約50μm</p> <p>塗膜表面</p>	<p>海側面</p> <p>約200μm</p> <p>塗膜表面</p>	<p>海側面</p> <p>試料なし</p>

写真5 塩素イオン浸入深さ調査結果

④塩素イオン浸入深さ

サンプリングした塗膜片の塩素イオンの浸入深さは、陸側で約25 μm /約20年、海側で50 μm /約20年でそれぞれ年当たり約1 μm 、3 μm の結果であり、優れた遮断性を発揮していた。

4.2 No.K3杭について

(海上大気部、飛まつ帯、干満帯環境：最も海岸側にある観測室下で試験)

①外観

塗膜のチョーキングについては、No.K2杭と同様であった。

防食性については、No.K2杭と同様に摩耗カバーの端部及び上部コンクリート部取り合い個所に錆の発生が認められた。一般部の点錆発生状況については、No.K2杭と同様であったが、その発生量はNo.K2杭より若干多い傾向が確認された。これは、2,000 μm の塗装を1回塗りで施工したことによる膜厚のバラツキやピンホールなど、施工時のエラーによるものに起因すると思われる。(それらの部分は、設定膜厚2,000 μm に対し700~2,000 μm の実測膜厚であった。)

ふくれ、われ、はがれは認められず、総合的に判断すると、全般的に良好な塗膜外観と防食性を保持していた。

②付着性

付着力は、陸側、海側でそれぞれ3.9、4.1(N/mm²)の値を示し、良好な付着性を保持していた。

③鋼管杭素地表面の状態

塗膜を強制的にはぎ取り鋼管素地表面を観察した結果、No.K2杭と同様に、陸側、海側共に錆は認められなかった。

④塩素イオン浸入深さ

サンプリングした塗膜片の塩素イオンの浸入深さは、陸側で約100 μm /約20年、海側で200 μm /約20年でそれぞれ年当たり約5 μm 、10 μm の結果であり、優れた遮断性を発揮していた。なお、No.K2杭と同様に陸側に比べ海側の方が高い値を示した。

4.3 No.18杭について

(海上大気部、飛まつ帯、干満帯、海中部環境：棧橋中央部で試験)

①外観

海上大気部～飛まつ帯における塗膜のチョーキング現象は、供試後2年経過の時点から認められ始め、20年経過後の状態は中程度であった。ただし、No.K2、K3杭と同様に膜厚の定点測定を行っておらず、チョーキングによる塗膜厚の経時変化の知見は得られていない。

防食性については、No.K2、K3杭で認められた上部コンクリート部取り合い個所にも錆の発生はなく、一般部についてもごく小さな滲み錆が2箇所認められただけであった。

ふくれ、われ、はがれは認められず、非常に良好な塗膜外観と防食性を保持していた。

②付着性

付着力は、陸側、海側共に2.6(N/mm²)の値を示し、良好な付着性を保持していた。

③鋼管杭素地表面の状態

陸側の塗膜を強制的にはぎ取り鋼管素地表面を観察した結果、錆は認められなかった。

④塩素イオン浸入深さ

陸側の干満帯からサンプリングした塗膜片の塩素イオンの浸入深さは、約500 μm /約20年で年当たり約25 μm の結果であり、優れた遮断性を発揮していた。なお、海側については天候不順のためサンプリングができなかったが、干満帯では、塗膜が海水に漬かっている時間が長く、飛まつ帯ほどの陸側、海側での有意差は無いと推察する。

上記の暴露20年目の調査結果から、超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料を用いたそれぞれの防食工法は有効であり、長期耐久性を有していることがあらためて実証された。

5. あとがき

今日、港湾鋼構造物や海洋鋼構造物の防食・延命の方策として、このような超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料をミリ単位で適用する厚膜仕様による高度な環境遮断と強靱な塗膜物性を発現させることが有効であることが種々の研究機関でも確認され、当社の「テクトバリヤーSP」(スプレー塗装による施工が可能な超厚膜形無溶剤エポキシ被覆材料)が、①関西国際空港の連絡橋②本州四国連絡橋③東京湾横断道路 川崎人工島(現アクアラインの排気塔基礎)など、国家プロジェクトレベルの大型海洋鋼構造物の防食工法に採用されるに至っている。尚、本研究は今後とも継続される予定である。

6. 参考文献

- 1) 尾島啓介、石田雅巳：「棧橋式空港施設の超長期防食法」沿岸センター研究論文集No.2(2002)
- 2) (独)港湾空港技術研究所、(助)沿岸技術研究センター、鋼管杭協会「海洋鋼構造物へ適用される防食工法に関する研究 一実構造物による長期暴露試験一」小冊子、2004.9
- 3) 福手 勤、阿部正美、杉本達彦、栗栖孝雄、飯田真司：「海洋環境条件における鋼構造物のための厚膜防食システムの防食効果と耐久性」、第19回 鉄構塗装技術討論会発表予稿集、1996.10
- 4) 福手 勤、阿部正美、杉本達彦、栗栖孝雄、土居一幸：「海洋環境条件における有機ライニングの耐久性」、第18回 鉄構塗装技術討論会発表予稿集、1995.9
- 5) 運輸省港湾技術研究所、(助)沿岸開発技術センター、鋼管杭協会：「鋼管杭の防食法に関する研究総括報告書」1995.4