

鋼管杭の防食法に関する研究

(波崎海洋研究施設における重防食被覆鋼管杭の30年暴露試験結果の概要)

鋼管杭・鋼矢板技術協会 防食技術委員会

1. はじめに

鋼管杭・鋼矢板技術協会では、1984年度(昭和59年度)より、運輸省港湾技術研究所(現(独)港湾空港技術研究所)および(財)沿岸開発技術センター(現(一財)沿岸技術研究センター)と共同で、鋼構造物の防食技術の向上を図るため、茨城県波崎にある波崎海洋研究施設波砕帯観測用栈橋の47本の鋼管杭を利用して、有機被覆、ペトロラタム被覆、無機被覆、電気防食、塗装系の5種類における防食技術の防食効果や材料の耐久性に関する現地試験を開始している。各種防食工が施工されて以降、毎年現地調査を実施し、2014年度には暴露開始から30年が経過した。本稿では、鋼管杭・鋼矢板技術協会が長年に渡り調査を実施してき

たポリエチレン被覆(有機被覆)工法の30年経過時の調査結果¹⁾の概要を報告するとともに調査結果を踏まえた防食性能低下評価手法について紹介するものである。

2. 研究施設の概要

長期暴露試験は、波砕帯の研究施設である「波崎海洋研究施設波砕帯観測用栈橋(以下栈橋と呼ぶ)」を使用している。本栈橋は図1に示すように茨城県の鹿島と銚子の中間付近に位置し、海岸線に直角に突き出しているため、防波堤に囲まれた一般的な港湾施設とは異なり、年間を通じて太平洋の荒波を受け、しかも砂浜海岸であるため漂砂による摩耗作用を無視することができない等、防食環境としては極めて過

酷な条件にある。

栈橋は全長427m、先端の水深は約-5mで、ポリエチレン被覆工法が施されている鋼管杭は栈橋の最先端となるNo.31~35であり、栈橋の中でも最も過酷な環境下にある。

3. ポリエチレン被覆工法の概要

ポリエチレン被覆は、ウレタンエラストマー被覆と並んで「重防食被覆」と呼ばれ、鋼管杭の防食工法の中で最も広く普及している工法の一つである。工場で鋼材に被覆施工されるため一貫した管理が行われ、品質が安定している。また、施工法および材料の特性から、耐久性、耐薬品性、耐海水性に優れ、カーボンブラックを配合する

ことで耐候性を向上させている。図2にポリエチレン被覆工法の構造を示す。なお、現状ではポリエチレン被覆よりも様々な鋼材形状に対応できるウレタンエラストマー被覆が一般的に使用されている。

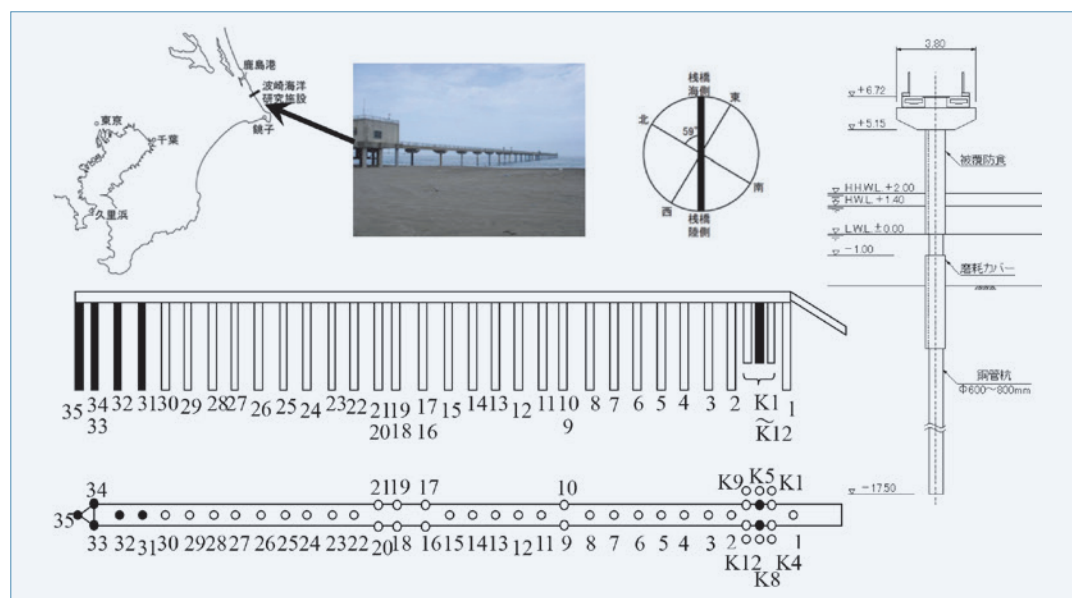


図1 波崎観測栈橋の概要図

4. 調査内容

ポリエチレン被覆工法の調査対象杭の概要を表1に、30年経過時の調査項目を表2に示す。調査は20年経過時からの10年間の経年変化の把握、及び性能低下予測に向けた基礎データの取得を目的に、20年経過時と同様の調査（付着力、被膜厚み、鋼材板厚、採取サンプルの被膜厚さ、引張強度、体積固有抵抗、吸水率）を実施した。

また、30年経過時の調査では、新たな調査を試みている。まず、被膜劣化の定量的な評価を目的に、

- ①水分・塩分除去によって現地での計測精度を向上させた体積固有抵抗の現地測定
- ②吸光度による劣化評価（FT-IR分析）を実施した。

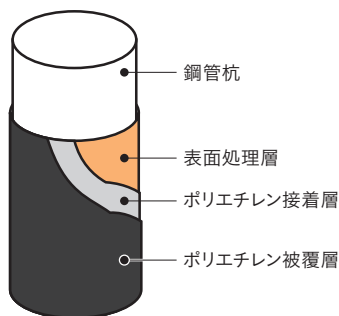


図2 ポリエチレン被覆工法の構造

表1 ポリエチレン被覆工法の調査対象杭の概要

No.	防食工法	防食範囲 (m)	施工時期	現地補修仕様
31	ポリエチレン被覆	- 1.75 ～ + 5.15	1984.6	防食シート・防食テープ + FRPカバー（1985 施工）
32				
33		- 1.77 ～ + 5.25		ベトロラタムテープ + チタンカバー（2012 施工）
34				
35				

表2 30年経過時の調査項目

項目	計測位置	No.31	No.32	No.33	No.34	No.35
外観	—	○	○	○	○	○
絶縁抵抗測定	+5.0、陸側	○	○	○	○	○
付着力試験（ピール強度）	+3.5、陸側	○	○	○	○	○
被膜厚み測定	+3.5、+5.0（各4点）	○	○	○	○	○
鋼管杭の板厚測定	+2.5、陸側	○	○	○	○	○
打音検査	—	○	○	○	○	○
サンプル調査	被膜の厚さ	○	○	○	○	○
	被膜の機械的性質（引張強度、伸び）	○	○	○	○	○
	被膜の体積固有抵抗	○	○	○	○	○
	被膜の吸水率	○	○	○	○	○
	被膜の吸光度					○

さらには、疵部からの被膜の接着劣化を把握することを目的に、

- ①人工的に被膜を剥離して鋼面を露出させた人工疵部周辺の被膜と鋼面の接着劣化進展距離の測定
- ②人工疵部周辺の接着劣化を簡易に検出するための打音検査を実施した。

5. 調査結果

主要な調査結果を以下に示す。

(1) 外観観察

杭No.33~35の外観写真を写真1に示す。すべての調査杭において、ポリエチレン被覆の防食機能低下に繋がる大きな変状（浮き、剥離等）は観察されず、光沢の経時低下及び若干の変色が確認される程度であった。

(2) 体積固有抵抗（絶縁抵抗）

10年、20年及び30年経過時に現地で測定した体積固有抵抗の結果を図3に示す。経時とともに体積固有抵抗の増加傾向がみられるが、材料性能が向上したとは考えにくいので、現地での測定精度の向上が要因と考えられる。ただし、室内試験結果と比較すると現地計測ではバラツキが大き。20年経過時の調査では環境遮断法により、30年経過時の調査では乾燥雰囲気とし

て測定を行うなど、測定方法の改善を行ってきているものの一層の精度向上を図る必要がある。

(3) 付着力試験（ピール強度試験）

JIS G 3469に準拠したピール強度測定で各杭の付着力を測定した結果、30年経過時においても294N/cm（計測器の上限値）以上の高い値を示し、製品仕様の35N/cm以上を満たしていた。

(4) 被覆厚み

+3.5m、+5.0mの各断面で円周方向に4点の被膜厚みを電磁誘導方式膜厚計で測定した。各杭における平均厚みを図4に示す。30年経過時においても変動が少なく、製品仕様である2.5mm以上を満たしていた。



写真1 外観写真（杭No.33、34、35）

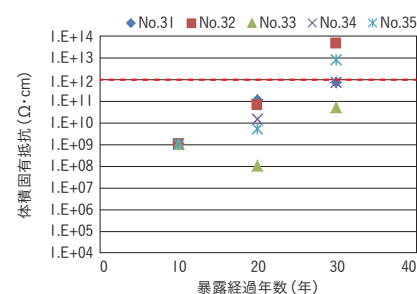


図3 現地測定による体積固有抵抗の経時変化

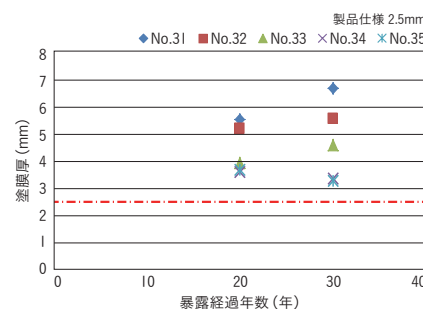


図4 被膜厚の経時変化

(5) 鋼管杭の板厚測定

30年経過時の調査では20年経過時の調査でサンプル採取した隣接の被膜を採取（30年経過時のサンプル）し、鋼面を露出させた部分で板厚の測定を実施した。その結果、各杭の平均板厚は11.8mmと設計値12mmに対して微量の減肉傾向が見られた。これは20年経過時にサンプルを採取した箇所にした部分補修（ペトロラタム+FRPカバー）が、早期の段階で変状し最終的にはFRPカバーが破損脱落したことによるものと考えられる。つまり、20年経過時のサンプル採取部が鋼面まで露出した人工的な疵部となり、その疵部の端部から接着劣化が進行し、鋼材板厚の減少につながったものと推察される。

次に、接着劣化進展距離の測定状況と測定結果の最大値を写真2および表3に示す。接着劣化が20年経過以降の10年間で進展したと仮定すると、最大で0.7~1.8cm/年の割合で進行する可能性があることが示唆された。既往の研究^{2,3)}によれば接着劣化進展距離は0.3~1.5cm/年であることから、今回の結果は既往の研究と同等ないしはそれ以上となり、過酷な環境が影響した可能性がある。なお、接着劣化によって直ちに鋼材の減肉が大きく進展するわけではないが、鋼面が露出した疵部の検出と疵部周囲の劣化の進展は、維



写真2 接着劣化進展距離測定状況 (No.31)

表3 接着劣化進展距離の最大値

No.	接着劣化進展距離の最大値	備考
31	15cm	20年目採取部に積層錆
32	7cm	
33	15cm	
34	12cm	
35	18cm	

持管理の上で重要な調査・点検項目になるといえる。

(6) ポリエチレン被覆のサンプル採取による評価

前述で採取したポリエチレン被覆を試験室に持ち帰り、各種試験を行った。なお、サンプルは各杭とも+2.5m付近の陸側から採取している。

1) 引張強度

JIS K 7113に準拠し引張試験を行った結果、引張破断強度は30年経過時においても製品仕様の12.0N/mm²以上を満たしていた。また、引張破断時の伸びについても製品仕様の300%以上を満たしていた。

2) 室内試験による体積固有抵抗

印加電圧を100Vとして絶縁抵抗計により測定した結果、図5に示すように30年経過時において製品仕様の10¹²Ω・cm（図中の破線）に近似するまで減少していた。

一方で、被覆の絶縁抵抗は10⁸Ω・cm²以上の場合には被覆下の鋼は腐食していないと報告されていること⁴⁾、及び絶縁抵抗は体積固有抵抗と被覆の厚みの積であって試験杭のポリエチレン被覆の厚みは図4より0.3~0.7cmであることから、体積固有抵抗は1.4

×10⁸Ω・cm（=10⁸Ω・cm²/0.7cm）以上が劣化の限界値の目安となる。従って、30年経過時において、ポリエチレン被覆の体積固有抵抗は、防食性能の限界値までは低下していないと考えられる。

3) 吸光度分析 (FT-IR分析)

ポリエチレンの分子レベルでの酸化進展度から被覆材の劣化進行度を把握する目的で、今回はじめて吸光度分析⁵⁾を実施した。

試験は、採取したサンプルを透明エポキシ樹脂に埋め込み研磨後に表面から400μm深さまでと、表面から2000~2400μm深さまでの2点について、微小領域FT-IR分析（CH₂ 1450cm⁻¹、C=O 1740cm⁻¹）を行い、ポリエチレン被膜の厚み方向での紫外線劣化有無

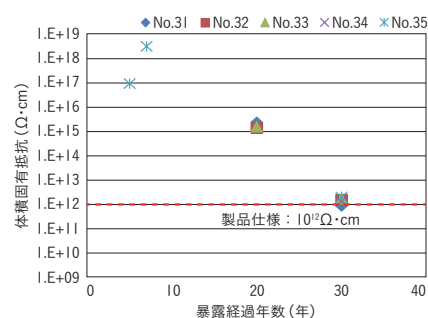


図5 室内測定による体積固有抵抗の経時変化

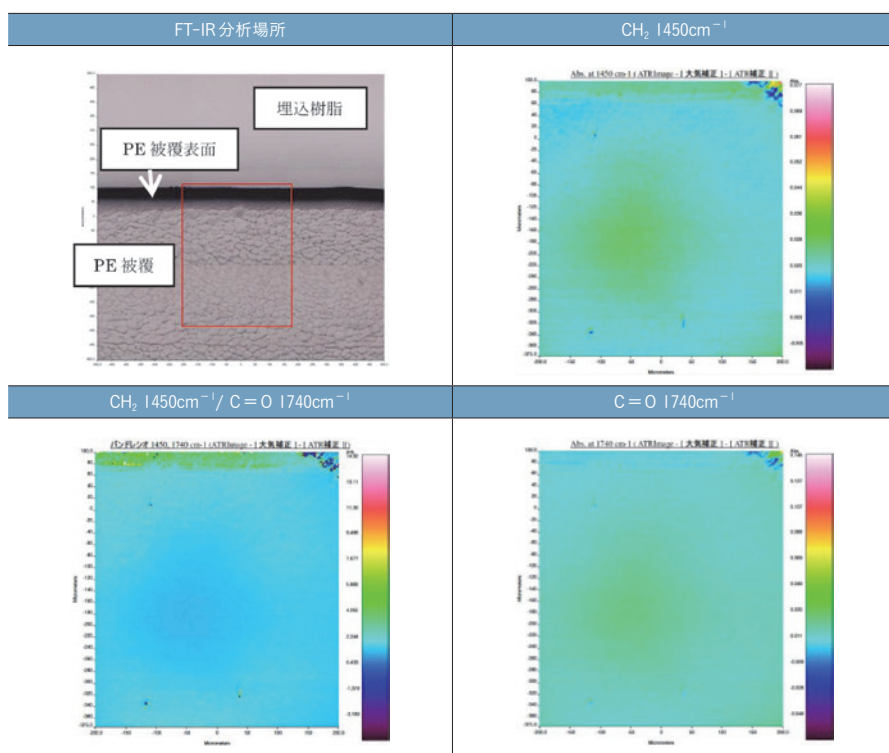


図6 表面から400μm深さまでのFT-IR分析

め、防食機能が低下することも注意が必要である。

7. まとめ

30年経過時の調査によって、ポリエチレン被覆工法の長期耐久性が確認されるとともに、銅面まで達する疵部の影響が確認され、疵部に対する補修対策が維持管理上重要であることがわかった。

また、簡易な補修方法としての部分補修の試験も開始しており、今後の追跡調査を通じて適正な評価と工法を確立する必要がある。

また、被膜の疵等によって被膜厚が小さくなった場合、体積固有抵抗が同じ値であっても絶縁抵抗は低下するた

- 1) 鋼管杭の防食法に関する研究グループ：鋼管杭の防食法に関する研究（2014年度（平成26年度）調査）報告書、2015年3月
- 2) 原田佳幸・阿部正美・福手勤・濱田秀則・是永正・江田和彦・岩倉肇・元木卓也・佐藤一昌：重防食鋼欠板における被覆材の接着耐久性に関する研究、港湾技術資料 No.984、2001年3月
- 3) 審良善和・山路徹・岩波光保・原田典佳・吉崎信樹・村瀬正次・斎藤勲・上村隆之・北村卓也：重防食被覆を適用したハット形鋼欠板の耐久性に関する基礎的研究、港湾空港技術研究所資料 No.1230、2011年3月
- 4) R.CHARLES BACON, JOSEPH J.SMITH, AND FRANK M.RUGG: Electrolytic Resistance in Evaluating Protective Merit of Coatings on Metals, INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY, Vol.40, No.1, January 1948.
- 5) 森北浩通・田中伸幸・畑千登・高木光司：カルボニル基分布によるポリエチレンの寿命予測、パナソニック電工技報、Vol.58、No.1、2010年3月
- 6) 久保内昌敏：耐食用有機材料の腐食劣化とその機構、第26回防錆防食技術発表大会 特別講演、2006年7月

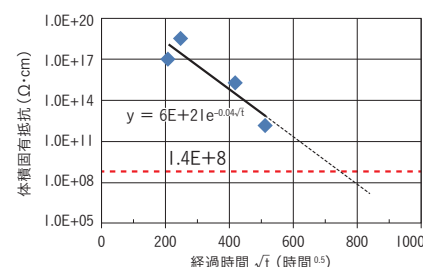


図8 体積固有抵抗経時変化
(片対数グラフ：Fickの拡散モデル)