

土木建築における腐食に関する研究 (その13)

—PCCVアンボンドテンドン用防錆材の性能試験結果—

喜 田 大 三 守 屋 正 裕

Study on Corrosion in Civil Engineering and Building Construction (Part 13)

—Results of Performance Tests on Anti-corrosion Materials for PCCV Tendons—

Daizo Kita Masahiro Moriya

Abstract

The authors conducted performance tests of every kind on two anti-corrosion materials intended for the unbonded tendon system of a containment vessel made of prestressed concrete to prove the soundness of the materials.

The materials were VISCONORUST 1702 and 2090P-4 made by Viscosity Oil Co., Ltd., the top producer in this field in the United States. The tests were conducted referring to relevant standards concerning basic physical properties, corrosion resistance, and durability.

After review and assessment of the results in relation to their required performances, e.g., conformity with the relevant standards, safety, corrosion resistance, durability, and workability, both materials were judged to be satisfactory.

概 要

プレストレストコンクリート製原子炉格納容器 (PCCV) のアンボンドテンドンシステムに使用する防錆材 (一次防錆材, 充填防錆材) について, 健全性立証のために各種の性能試験を実施した。

供試した防錆材は, 米国で最も実績の多い, VISCOSITY OIL社製のVISCONORUST 1702, 2090P-4である。試験項目を, 基本物性, 防錆防食性能, 耐久性に分けて選定し, 関連規格類を参考に試験を行なった。試験結果を, 関連規格類との適合性, 安全性, 防錆防食性能, 耐久性, 施工性などの要求性能との関連で検討, 評価し, その結果, 十分な性能を有する材料であると判定された。

1. はじめに

我が国で初めての, PCCVを採用した原子力発電プラントの建設工事が現在進められている。

PCCV (Prestressed Concrete Containment Vessel) は, 原子炉格納容器の一種で, コンクリート内にあらかじめ配置されたテンドンダクト内に, PC 鋼線またはPC 鋼より線 (以下 PC 鋼材とする) の束を挿入し, 所定の緊張力を与える構造である。

充填防錆材は, テンドンおよび定着金具の防錆防食を主目的として, テンドンダクト内に注入充填される材料である。

充填材にセメントペーストを使用するタイプをボンド方式と言い, ヨーロッパで実績が多い。グリース状の半固形防錆材を使用するタイプをアンボンド方式と言い, こちらは米国での実績が多い。

アンボンド方式の最大の特徴は, 発電プラントの使用期間中 (30~40年間), テンドンの応力状態や防食状態などを任意に検査でき, 必要があれば PC 鋼材を抜き取って取替えるなどの対応も可能な点である。

ここに報告する内容は, アンボンド方式の PCCVに最も実績が多く, 国内のプラントでも採用が予定されていた (現在すでに使われている) 米国製の充填防錆材について, その健全性確認のための資料を得る目的で, 基本

物性ならびに防錆防食性能に関する試験を行なった結果である。

この試験は、原子力発電プラントの建設計画に際し、客先電力会社殿からのご要請に基づいて、三菱重工業(株)、大林・清水・竹中 QGN-3/4 共研 JV をはじめとする関係各方面の御指導のもとに実施した。

2. 防錆防食システムの概要

今回の試験に供試した防錆材を使用する場合の、 tendon の防錆防食システムの概要を以下に説明する。

防錆材は、一次防錆材と充填防錆材の二種類を使用する。

一次防錆材は溶剤タイプの塗付型で、 tendon の製作から保管、運搬、ダクト内挿入、緊張後、充填防錆材注入までの間、 tendon や定着金具類を腐食から保護する目的で使用する。また、 tendon を緊張する際の減摩効果や、後から注入する充填防錆材のプライマー的な役割も有している。一次防錆材は、浸漬や吹付けによって塗付され、溶剤が自然に揮散して数十 μm の防錆材皮膜(油膜状)が形成される。

充填防錆材は、 tendon 緊張後に、約 90°C 前後に加熱した液状でダクト内に注入充填する。加熱して液状化することによって、注入が容易となり、細部への充填性も向上する。注入完了後、自然に冷却され、常温に戻るともとの半固形状となる。充填防錆材は、一次防錆材と一体化して tendon や定着金具類に対して、酸素や水との接触を防ぎ、長期間にわたってそれらを腐食から保護する。

3. 充填防錆材の要求性能

アンボンド方式のプレストレスシステムに使われる充填防錆材としては、基本的に次のような性能が要求される。

(1) 変形追従性 適切な軟度を有し、PC 鋼材の延びに追従する。

(2) 防錆防食性能 腐食の原因となる水や酸素を遮断し、プラントの全使用期間にわたって PC 鋼材や定着金具類に対する十分な防錆効果を示す。

(3) 安定性、耐久性 使用環境の温度条件下において、液化流出や脆化が起こらず、全使用期間にわたって化学的に安定で、コンクリート、PC 鋼材、ダクト材料などに悪影響をおよぼさず、放射線に対しても安定で変質しない。

(4) 施工性(充填性) ダクト内への充填作業に伴う作業性、充填性が良好で、一環した施工システムが確立されている。

(5) 安全性 作業に際し、施工システムとの関連で、引火、発火、有毒ガスの発生などの危険性がなく、安全に取り扱える。

4. 供試防錆材

(1) 充填防錆材: 米国 VISCOSITY OIL 社製 VISCONORUST 2090P-4……性状は、ワックスタイプの半固形状で、石油ワックス、ペトロラタム、鉱物油、防錆添加剤(石油スルフォネート)、アルカリ付与材などが主成分である。

(2) 一次防錆材: 同上、VISCONORUST 1702……性状は、溶剤タイプで、主成分は上記充填防錆材と類似している。

5. 試験内容与方法

試験の計画段階において、供試防錆材の健全性を評価する上で、どのような項目をどのような方法で試験し、どう評価するかが問題となった。

この用途に使われる充填材料に関する規格類としては、通商産業省資源エネルギー庁(MITI)の原子力発電所用コンクリート格納容器技術基準(案)以下 MITI CCV 規準(案)とするおよび、ASME (Section III, Division 2)があるが、そこに示されている品質規格は水溶性イオン量のみであった(ASMEはその後改訂され、内容が充実された)。そこで、それらを参考にし、さらに、間接的に関連のある JIS 規格なども参考に、試験項目を選定し、基本物性、耐久性、防錆防食性能の三つに分類して整理したうえ、試験項目、試験法を決定した。

なお、一次防錆材の VISCONORUST 1702 については、項目によって、原試料と、溶剤を揮散させた後の不揮発分について試験した。

6. 試験結果

試験の状況を写真-1, 2に示す。試験結果は、総括的に表-1, 2に示した。

試験項目および試験結果について、いくつかの点を以下に説明する。

(1) 充填防錆材の基本物性のうち、膜厚試験は、JISの方法と PC 鋼線を浸漬する方法の二種類で行なった。後者は、所定温度に保持した試料中に、径 7 mm の PC 鋼線を垂直に浸漬して引上げ、浸漬前後の質量差から防錆材の付着量を求め、膜厚に換算する方法で実施した。試験条件および結果を図-1に示す。

(2) 充填防錆材の滴点が、日本建築学会 PC 設計施工規準の規格を満足していないが、同規格は、アスファルト類とグリース類についてのもので、PC 鋼材に塗布し

試験項目	試験法		試験結果	評価	関連規格			参考規格	
	JIS	(ASTM他)			MITI CCV標準案	ASME ☆	建築学会 PC設計施工規準		
基本物性	1.融点	K 2235	D 938	63℃	◎	—	57℃以上 (凝固点)	—	55℃以上
	2.引火点	K 2265	D 92	236℃	◎	—	205℃以上	200℃以上	175℃以上
	3.ちょう度	K 2220	D 937	206 (不混和) 280 (混和)	◎	—	260以下 (不混和)	250~350 (混和)	200~325
	4.比重	K 2249	D 287	0.925 (15/4℃)	○	—	0.88~1.10 (16℃)	—	—
	5.粘度	K 2283	D 88	39.0cst (100℃)	○	—	—	—	—
	6.滴点	K 2220	—	50℃	○	—	—	100℃以上	—
	7.膜厚	K 2246	—	168.0μm(75℃) 116.7μm(90℃)	○	—	—	—	—
	8.膜厚	※ (PC鋼線を浸漬)	—	324~1,123μm (70℃) 225~ 850μm (85℃) 152~ 700μm(100℃)	○	—	—	—	—
	9.水分含有率	K 2275	D 95	0.1%以下	—	—	—	—	—
b 耐久性	1.離油度	K 2220	FTMS 791a	0%(37.8℃) 100%(100℃)	◎	—	3Wt%以下 (37.8℃)	—	—
	2.酸化安定度	K 2220	—	0.3kg/cm ²	◎	—	—	2kg/cm ² 以下	—
	3.耐放射線	※	—	1X10 ⁷ ラドで顕著な変化なし *	○	—	1X10 ⁶ でTBN25以上, 他の全項目を満足のこと	—	—
	4.耐バクテリア	※	—	良好 *	○	—	—	—	—
c 防錆性能	1.水溶性イオン	Cl ⁻	K 0102	D 512	1ppm以下	◎	<10ppm	<10ppm	—
		NO ₃ ⁻	K 0102	D 992	1ppm以下	◎	<10ppm	<10ppm	—
		S ⁻	K 0102	APHA 427	0.1ppm以下	◎	<10ppm	<10ppm	—
	2.中和価	—	D 974 (modified)	61.8mg KOH/g	◎	—	35mg KOH/g 以上	—	—
	3.低温付着	K 2246	—	はがれなし	◎	—	—	膜にはがれないこと	膜にはがれないこと
	4.銅板腐食	K 2220 (100℃ 24hr)	—	変色: 1a以下 錆なし	◎	—	—	変色や錆が生じないこと	—
	5.浸漬腐食	K 2246 (80℃ 14日間)	—	Fe : 0.0mg Cu-Zn : 0.0 Al : 0.0 Pb : -0.1 Zn : 0.0 Mg : 0.2 Cr : 0.0 Cd : -0.0	◎	—	—	—	Fe : <0.2mg Cu-Zn : <0.2 Al : <0.2 Pb : <1.0 Zn : <0.2 Mg : <0.5 Cd : <0.2
	6.塩水噴霧	K 2246	B 117	720hr以上A級 (膜厚: 116.7, 168μm)	◎	—	200hr以上 (0.5mil)	—	120hr以上 A級
7.湿潤	K 2246	—	1,440hr以上A級 (膜厚: 116.7, 168μm)	◎	—	—	—	720hr以上 A級	
8.塩水浸漬	—	—	720hr以上A級 (膜厚: 119, 162μm)	○	—	—	—	—	

※: 規格にない試験方法による。 ◎: 関連規格に合格し良好である。 △: 性能が劣る。
 * : メーカーのデータを確認した。 ○: 十分な性能を有する。 ×: 規格を満たさない。
 ☆: ASME SECTION III, DIVISION 2 - SUBSECTION CC(1983年改訂)

表一1 充填防錆材の性能試験結果

て使用することを前提としたものであり、今回のようにテンドン緊張後に注入して使用する防錆材とは材質そのものが異なる。

(3) 耐久性に関する試験項目のうち、耐放射線性は、メーカーが米国の公的機関に依頼して実施した試験結果を確認したが、ASME規格の十倍に相当する 1×10^7 ラドのガンマー線照射によっても性状、性能に顕著な変化が生じていない。

また、耐バクテリア性は、メーカーのデータを確認するとともに、硫酸塩還元バクテリア (SRB) の繁殖試験も行なったが、結果は陰性であった。

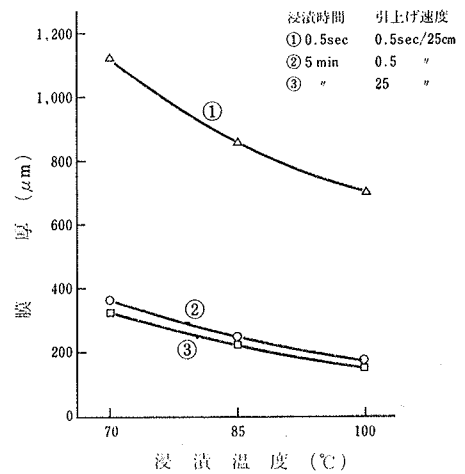
SRBは、硫酸塩を還元して硫化水素 (H_2S) を発生させ、腐食を促進することが知られており、防錆材に添加されている石油スルフォネートがSRBによって還元されるかどうか懸念された。

しかし、問題ないと判定された。

(4) 防錆防食性能に関する試験項目のうち、中和価は、防錆材の有する潜在アルカリ度 (酸中和力) を示している。もし仮に防錆材の変質によって酸性物質が生成したり、外部から酸性物質が作用したとしても、この潜在アルカリ度がそれらを中和し無害化するように機能する。

浸漬腐食試験は、各種の金属に対する腐食性を評価しており、例えば、テンドンダクトに亜鉛めっき鋼板が使われることがあるが、試験の結果によると亜鉛に対しても腐食作用を示す恐れはない。

塩水噴霧試験、湿潤腐食試験、塩水浸漬試験は、いずれも試料の膜厚が非常に薄く、きわめて過酷な条件で行なっているが、いずれの試験でも非常に良好な性能を示した。なお、一次防錆材は、塩水噴霧試験で、膜厚 $15.1\mu m$ の場合が360Hrで、 $31.7\mu m$ の場合が490Hrで発錆した。

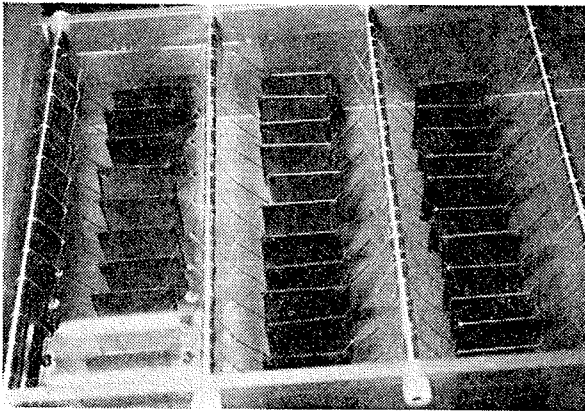


図一1 膜厚試験結果 (2090P-4)

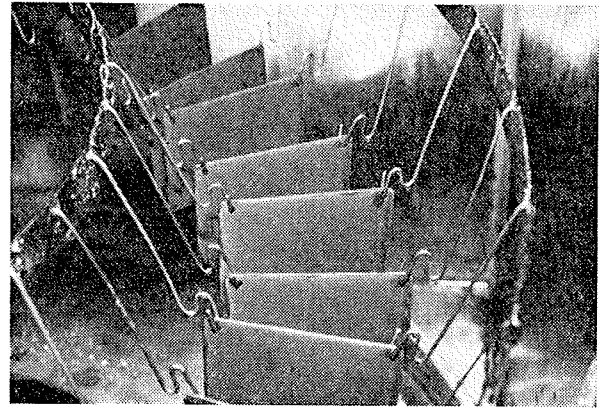
試験項目	試験法		試験結果		評価	参考規格				
	JIS	ASTM他	原試料	不揮発分						
a 基 本 物 性	1.融点	K 2235	D 938	—	48°C	○	—			
	2.引火点	K 2265	D 92	47°C	—	◎	38°C以上			
	3.比重	K 2249	D 287	—	0.944 (15/4°C)	○	—			
	4.粘度	K 2283	D 88	22.7cst (40°C)	—	○	—			
	5.滴点	K 2220	—	—	39.5°C	○	—			
	6.膜厚	K 2246	—	15.1μm (1回浸漬) 31.7μm (2回浸漬)	—	◎ ○	25μm以下 (NP-3)			
	7.膜厚	*	—	31.5μm (1回浸漬) (PC鋼線を浸漬)	—	○	—			
	8.水分含有率	K 2275	D 95	0.1%以下	—	○	—			
b	1.酸化安定度	K 2220	—	—	2.9kg/cm ²	○	—			
c	1.水溶性イオン	Cl ⁻	K 0102	D 512	1 ppm以下	—	○	—		
		NO ₃ ⁻	K 0102	D 992	1 ppm以下	—	○	—		
		S ⁻	K 0102	APHA	0.1ppm以下	—	○	—		
防	2.低温付着	K 2246	—	はがれなし	—	◎	はがれないこと			
	3.銅板腐食	K 2220 (50°C 24hr)	—	変色: 1a以下 錆なし	—	○	—			
防 食 性 能	4.浸漬腐食	K 2246 (55°C 7日間)	—	Fe : 0.0mg Cu-Zn : 0.0 Al : 0.0 Pb : -0.5 Zn : 0.0 Mg : 0.0 Cr : 光沢保持 Cd : -0.0	—	◎	Fe : <0.2mg Cu-Zn : <1.0 Al : <0.2 Pb : — Zn : <7.5 Mg : <0.5 Cr : 光沢保持 Cd : <5.0			
				5.塩水噴霧	K 2246	B 117	336hr以上A級 (膜厚: 15.1, 31.7μm)	—	◎	336hr以上 A級
				6.湿潤	K 2246	—	1,440hr以上A級 (膜厚: 15.1, 31.7μm)	—	◎	720hr以上 A級
				8.塩水浸漬	—	—	720hr以上A級 (膜厚: 21.4, 32.6μm)	—	○	—

*: 規格にない試験方法による。 ◎: 参考規格に合格し良好である。 △: 性能が劣る。
b: 耐久性 ○: 十分な性能を有する。

表一2 一次防錆材の試験結果



写真一 塩水浸漬試験



写真二 湿潤試験

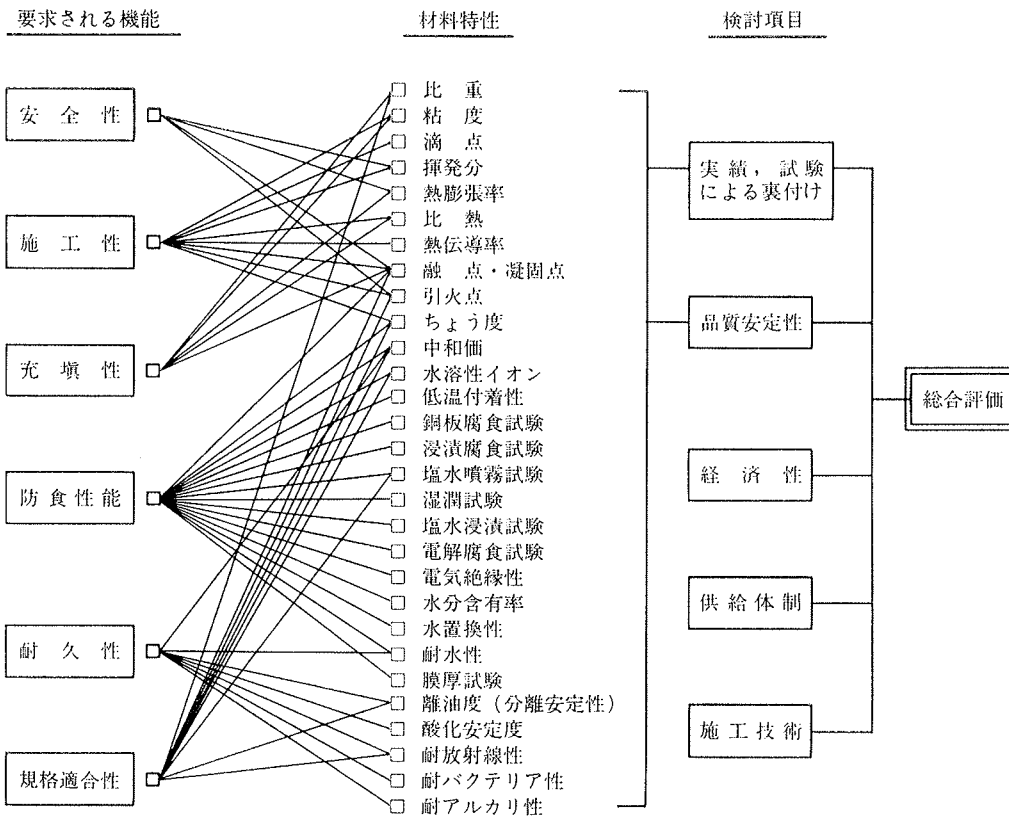


図-2 アンボンドレンドン充填防錆材の性能評価体系図

7. 試験結果の評価

表一, 2から明らかなように, 供試した防錆材は, 関連規格をいずれも満足し, 参考規格に照らしても良好な性能を有していると判断される。

表一に併記した ASME の規格は, 当試験の後に大幅に改訂, 整備された内容であるが, それも十分にクリアしている。

なお, これらの試験結果のうち, メーカーの品質仕様で規定されている項目については, やはり問題なくその

規格値と一致した。

さて, 総合的には, 要求される機能と特性, 実績などを図一2のように体系づけて整理し, ここに示した試験結果だけでなく, 実績の調査, 製造工場における品質管理体制の確認, 現在の品質に至るまでの品質改良の経過および施工に関連した周辺技術なども考慮した上で, 十分な性能を有する材料であると評価した。

なお, 国内においては, 同用途に使われるこの種の材料について, 現在まだ品質規格が十分に整備されている状態とは言えず, 今後の課題であろう。