

ダクトイル鋳鉄管外面特殊塗装の耐食性の検証(第二報)

Inspection of Corrosion Resistance of Special Exterior Coatings for DCI Pipes (Report2)

廣島聡子* 道浦吉貞** 左海義文*** 井村敏二***

Satoko Hirohata, Yoshisada Michiura, Yoshifumi Sakai, Toshiji Imura

ダクトイル鋳鉄管の防食法のひとつに、ポリエチレンスリーブ工法があり、多くの事業者で採用されている。当社では、施工性の向上を考慮し、ポリエチレンスリーブなしでも防食効果の得られるポリエチレンスリーブレス仕様の外面特殊塗装の検討を行い、亜鉛-アルミニウム擬合金溶射管やポリウレタン樹脂塗装管を開発した。

その耐食性検証として、徳島市水道局と共同で、徳島市内の腐食性土壌地域において、埋設試験を実施し、経時での追跡調査を行ってきた。今回、埋設10年目の経年調査を行ったので、結果を報告する。

Polyethylene encasement has been adopted in many cities as corrosion protection for DCI pipe systems under corrosive environments. In consideration of construction, a zinc-aluminum pseudo-alloy thermal spray coating and polyurethane resin coating have been developed.

For the purpose of inspecting corrosion resistance of applications, Kurimoto has been testing special exterior coatings under severely corrosive conditions in cohort with the Tokushima Waterworks Bureau since 1996.

This paper reports the results of 10 years of corrosion tests.

1. はじめに

徳島市は、吉野川の沖積平野に発達した都市であり、特に沿岸部においては、ダクトイル鋳鉄管の管体腐食やT頭ボルト・ナットの腐食による事故を経験してきた。そこで、徳島市水道局では、腐食性土壌地域にはポリエチレンスリーブ工法を採用し、管路全体の防食対策に取り組んできた。また、ポリエチレンスリーブ工法よりも防食効果・施工性に優れた外面特殊塗装の検討も進めてきた。

一方、当社では、ポリエチレンスリーブレスの外面特殊塗装の検討を行っており、亜鉛-アルミニウム擬合金溶射やポリウレタン樹脂塗装を開発した。

そこで、徳島市水道局と共同で、平成8年度より、腐食性土壌地域におけるダクトイル鋳鉄管の外面特殊塗装に関する埋設実験を開始した。これまでに3年目、6年目の調査を行い、その防食効果が持続していることを確認している¹⁾。

今回10年目の調査を行ったので、その結果を報告する。

2. 外面特殊塗装について

2.1 亜鉛-アルミニウム擬合金溶射

一般的に亜鉛溶射皮膜は、鉄に対して電気化学的に卑であるため、犠牲陽極として働く。一方、アルミニウム溶射皮膜は、表面に緻密な不動態膜を形成し、その遮断効果により優れた耐食性を示す。それぞれの長所を組合わせたものが亜鉛-アルミニウム擬合金溶射である。その溶射断面の元素分析結果を図1に示す。亜鉛とアルミ

ニウムが層状になっており、アルミニウム層の非常に緻密な不動態膜により亜鉛の溶出を抑制し、長期にわたる耐食性を発揮する。

亜鉛-アルミニウム擬合金溶射+合成樹脂塗装を施したダクトイル鋳鉄片の耐中性塩水噴霧性試験結果を図2に示す。亜鉛-アルミニウム擬合金溶射+合成樹脂塗装は、600日を経過しても赤錆の発生は認められず、優れた耐食性を示している。なお、標準塗装(亜鉛溶射+合成樹脂塗装)を比較材とし、試験は塗料一般試験方法JIS K 5600に準拠した。

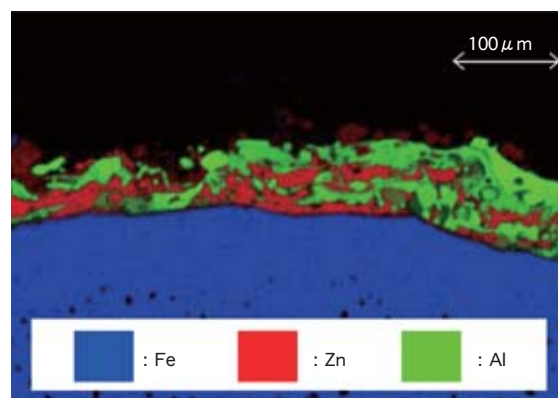


図1 Zn-Al擬合金溶射皮膜断面図

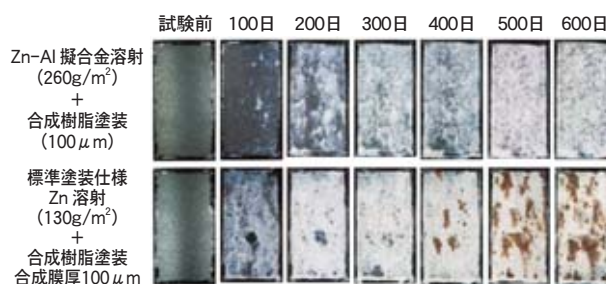


図2 耐中性塩水噴霧性試験結果

* パイプシステム事業本部 鉄管事業部 技術本部 研究部

** パイプシステム事業本部 鉄管事業部 技術本部

*** 徳島市水道局

2.2 ポリウレタン樹脂塗装

ポリウレタン樹脂塗膜は、付着性、耐衝撃性に優れた強靱な塗膜である。また透水性が小さいため、絶縁抵抗が高く、さらに塗膜厚さが1.5mm以上と厚膜であることから、ポリウレタン樹脂塗膜は、腐食因子の遮断効果に優れ、長期にわたり防食効果を維持するものである。

ポリウレタン樹脂塗装を施したダクタイル鋳鉄片の耐中性塩水噴霧性、耐酸性、耐アルカリ性試験結果を図3に示す。全ての試験において、2ヵ月経過しても赤錆の発生はなく、塗膜にフクレや割れなどの異常も認められず、優れた耐食性を示している。なお、各試験はJIS K 5600に準拠した。

	耐中性塩水噴霧性	耐酸性 5w/v% H_2SO_4	耐アルカリ性 5w/v% Na_2CO_3
試験前			
2ヵ月後			

図3 ポリウレタン樹脂塗装 耐食性評価結果

3. 埋設実験

3.1 埋設年月

平成8年11月～平成9年2月

3.2 調査年月

平成11年5月(3年目)

平成14年11月(6年目)

平成18年9月～10月(10年目)

3.3 埋設場所

徳島市川内町加賀須野地内の図4に示す4箇所で埋設実験を行った。埋設場所の北側には今切川が流れてお

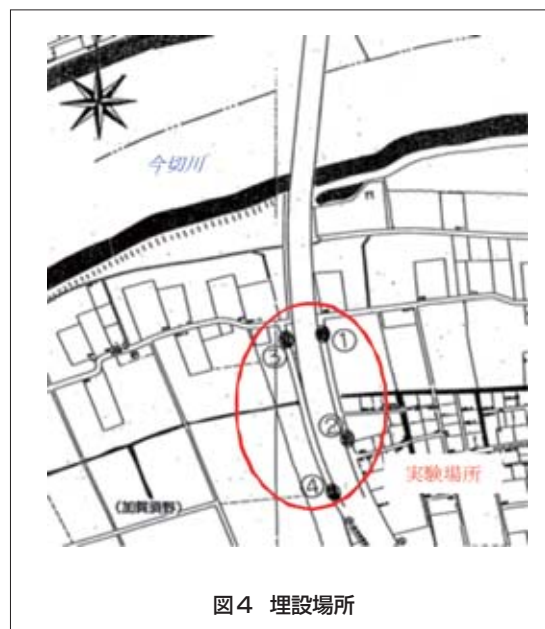


図4 埋設場所



ポリウレタン樹脂塗装 φ150



Zn-Al 擬合金溶射+合成樹脂塗装 φ200

図5 埋設状況

り、地下水位の干満差が大きく、常に地下水が流れている非常に厳しい埋設環境である。調査箇所①、②はφ200、③、④はφ150である。

埋設状況を図5に示す。

3.4 試験材料

供試材を表1に、ダクトイル鋳鉄管の外面塗装仕様について、表2に示す。なお、標準塗装管を比較管とした。

3.5 調査箇所の配管図

調査箇所の配管図を図6に、接合内容を表3に示す。接合形式はK形で、今回の実験では、接合部のみポリエチレンスリーブを施工した。また、6年目調査時に、標準塗装管を比較管として、ポリエチレンスリーブで被覆せずに、10年目調査管路に並列に埋設した。

表1 供試材

		仕様	
		内面	外面
K形 ダクタイル鋳鉄管	φ 200×2,500	エポキシ樹脂 粉体塗装	Zn-Al擬合金溶射 + 合成樹脂塗装
	φ 150×2,500		ポリウレタン樹脂塗装
押輪	K形押輪 φ 200	－	エポキシ樹脂 粉体塗装
	K形押輪 φ 150	－	
	特殊押輪 φ 200	－	合成樹脂塗装 (標準塗装)
	特殊押輪 φ 150	－	
継ぎ輪	K形継ぎ輪 φ 200	エポキシ樹脂 粉体塗装	合成樹脂塗装 (標準塗装)
	K形継ぎ輪 φ 150		
ボルト・ナット	M20×90	SUS304	

表2 外面特殊塗装仕様

	K形 ダクトイル鋳鉄管		
呼び径	φ200	φ150	φ100
プライマー	Zn-Al擬合金溶射 (Al含有率27%) 塗布量：260g/m ²	—	Zn溶射 塗布量：130g/m ² + 合成樹脂塗装 合計膜厚：100μm (標準塗装)
一次塗装	合成樹脂塗装 膜厚：80μm	ポリウレタン樹脂塗装 膜厚：1.5mm以上	合成樹脂塗装 合計膜厚：100μm (標準塗装)
二次塗装	合成樹脂塗装 膜厚：20μm	—	
備考			比較管

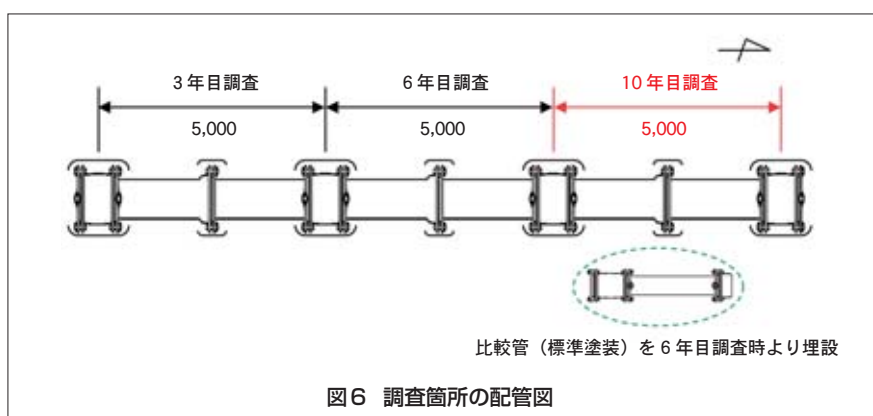


図6 調査箇所の配管図

表3 調査箇所の接合内容

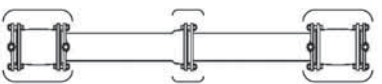
					
接合形式	K 形継ぎ輪		K 形	K 形継ぎ輪	
押輪	特殊押輪		K 形押輪	特殊押輪	
ボルト・ナット	SUS 304	SUS 304	SUS 304	SUS 304	SUS 304
スリーブの有無	あり		あり	あり	

表4 現地土壌調査項目

調査項目	調査内容
比抵抗	土壌棒およびオームメータ（交流抵抗計）により測定
土壌、湧水の採取	各調査箇所（4箇所）で、室内調査用の土壌および湧水を採取

4. 調査項目および調査内容

4.1 土壌調査

4.1.1 現地調査

掘上げ調査を行った4箇所の土壌について、表4に示す項目の調査を行った。なお、室内調査用の土壌は、各調査箇所の任意の2点から採取した。

4.1.2 室内調査(土壌)

採取した土壌を試験土壌として、表5に示す項目の調査を行った。

4.1.3 室内調査(土壌抽出水および湧水)

土壌抽出水は、採取した土壌を風乾した後、2.5倍の重量の純水により24時間以上抽出し、その上澄み液を試験水とした。また、湧水はサンプルをそのまま試験水とし、表6に示す項目について調査を行った。

表5 室内土壌調査項目

調査項目	調査内容
比抵抗	未処理 試料土をアクリル製土壌箱（15×20×30mm）に固く詰め、交流抵抗計にて測定
	水飽和 試料土に純水を添加して飽和させた状態で未処理と同様に測定
Redox 電位 (酸化還元電位)	Redox電位計にて測定した値を補正して算出 ^{※1)}
強制酸化試験	土壌に30%過酸化水素水を加えて強制的に酸化させ、pH値を測定
含水比	JIS A 1203（土の含水比試験方法）
硫化物測定	ナトリウムアジドヨウ素溶液を用いて、窒素ガスの発生状況により硫化物を判定
硫黄含有率測定	乾燥した土壌をJIS Z 2616の赤外線吸収法（積分法）により測定

※1) 算出方法 $E_{Redox} = E + 247 + E_{pH}$
 E_{Redox} : Redox電位 (mV)
 E : 電位計メータ直読値 (mV)
247 : 水素電極（標準）補正值 (mV)
 E_{pH} : pH値による補正值 (mV)
 $E_{pH} = (pH - 7) \times 60$

表6 土壌抽出水および湧水の調査項目

調査項目	調査内容
比抵抗	上水試験方法により電気伝導度を測定して算出 比抵抗 = 1 / 電気伝導度
pH	JIS Z 8802 (pH 値測定方法) により測定 (ガラス電極式 pH 計法)
硫酸イオン	JIS Z 0101 (工業用水試験方法) により測定 (重量法)
塩素イオン	上水試験方法により測定 (モール法)
過マンガン酸 カリウム消費量	上水試験方法により測定 (酸性法)
蒸発残留物	上水試験方法により測定 (蒸発残留物)
酸度測定	上水試験方法により測定 (総酸度)
アルカリ度測定	上水試験方法により測定 (総アルカリ度)

4.1.4 土壌の腐食性評価

上記の土壌分析を実施後、ANSI A21.5-1999 (アメリカ国家規格) に示される腐食性評価方法および、DVGW GW9-1971 (ドイツガス水道技術者協会規格) により、土壌の腐食性を評価した。表7にANSIによる評価基準を、表8にDVGWによる評価基準を示す。

ANSIでは、比抵抗、pH、Redox 電位、水分および硫化物の有無を点数化し、その合計点数が10点以上になれば腐食性の土壌と判断して、ポリエチレンスリーブ工法による防食対策を考慮することとされている。

DVGWでは、その合計点数を表9に示す腐食性判定基準に基づいて土壌の腐食性を判定する。

表7 ANSI A21.5-1999による土壌の腐食性評価基準

測定項目	測定値	点数	測定項目	測定値	点数
比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	< 1,500	10	Redox 電位 (mV)	> 100	0
	1,500 ~ 1,800	8		50 ~ 100	3.5
	1,800 ~ 2,100	5		0 ~ 50	4
	2,100 ~ 2,500	2		< 0	5
	2,500 ~ 3,000	1	水分 (%)	排水悪い、常に湿潤	2
	> 3,000	0		排水かなり良好 一般に湿っている	1
pH	0 ~ 2	5		排水良好 一般に乾燥している	0
	2 ~ 4	3	硫化物	検出	3.5
	4 ~ 6.5	0		痕跡	2
	6.5 ~ 7.5	0 ^{※2)}		なし	0
	7.5 ~ 8.5	0			
	> 8.5	3			

※2) pH が中性域 (6.5 ~ 7.5) で硫化物が存在し、かつ Redox 電位が低い場合には3点を加算する。

表8 DVGW GW9-1971による土壌の腐食性評価基準

測定項目	測定値	点数	測定項目	測定値	点数
土壌の種類	石灰質	2	含水比 (%)	20% 以下	0
	泥灰状石灰岩	2		20% 以上	- 1
	砂状泥灰土	2	pH	6 以下	- 2
	砂	2		6 以上	0
	砂質ローム (ローム含有 75% 以下)	0	総酸度 (mg/l)	125 以下	0
	泥灰ローム	0		125 ~ 250	- 1
	砂質粘土 (シルト含有 75% 以下)	0		250 以上	- 2
	粘土	- 2	Redox 電位 (mV)	400 以上	2
	泥灰粘土	- 2		200 ~ 400	0
	腐植土	- 2		0 ~ 200	- 2
	泥炭	- 4		0 以下	- 4
	重質ローム	- 4	アルカリ度 (mg/l)	50,000 以上	2
	沼沢地土壌	- 4		10,000 ~ 50,000	1
埋設位置での 地下水	なし	0		10,000 以下	0
	あり	- 1	硫化水素 および 硫化物	なし	0
	変動あり	- 2		微量	- 2
土壌の条件 (掘返しの有無)	掘返していない	0		あり	- 4
	掘返した土壌	- 2	石灰がラクース の存在	なし	0
土壌の条件 (構造物周辺との 土質差)	構造物周辺と同質	0		あり	- 4
	構造物周辺と異質	- 3	塩化物 (mg/kg)	100 以下	0
比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	10,000 以上	0		100 以上	- 1
	10,000 ~ 5,000	- 1	硫酸塩含有量 (mg/kg)	200 以下	0
	5,000 ~ 2,300	- 2		200 ~ 500	- 1
	2,300 ~ 1,000	- 3		500 ~ 1,000	- 2
	1,000 以下	- 4		1,000 以上	- 3

4.2 腐食調査

4.2.1 外観調査

掘上げた試験材料の外観状況の調査を行った。外面塗膜は、ショットブラスト処理にて除去し、ボルト・ナットについては、ブラッシングを行い、外観観察を行った。

ポリウレタン樹脂塗装については、ショットブラストによる塗膜の除去が困難であったため、塗膜を焼落とした後、ショットブラスト処理をし、外観観察を行った。

4.2.2 塗膜断面観察

亜鉛-アルミニウム擬合金溶射管について、走査型電子顕微鏡(以下SEM)で塗膜断面の観察、およびX線マイクロアナライザ(以下EPMA)で定性分析を行った。

4.2.3 インピーダンス測定

ポリウレタン樹脂塗装管について、塗膜のインピーダンスを測定し、その劣化度を評価した。

5. 調査結果

5.1 土壌調査結果

土壌調査結果を表10に、土壌抽出水(湧水)の調査結果を表11に示す。また、ANSIおよびDVGWによる土壌の腐食性評価結果を表12に示す。

表9 DVGW GW9-1971による土壌腐食性判定基準

点数の合計	土壌の腐食性
0	腐食性なし
0～-4	やや腐食性あり
-5～-10	腐食性あり
-11以下	著しく腐食性あり

表10 土壌分析結果

調査地点	サンプルNo	土壌の種類	土壌の色	比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)			Redox 電位 (mV)	含水比 (%)	硫化物	pH (H_2O_2)	硫黄含有率 (%)
				現地	未処理	水飽和					
埋設箇所①	1-1	粘土	灰色	730	942	925	464	35.7	あり	4.57	0.044
	1-2	シルト	オリーブ黒色	1,300	2,130	1,890	410	27.3	あり	5.04	0.136
埋設箇所②	2-1	粘土混じりシルト	オリーブ黒色	1,800	2,010	1,950	540	42.1	あり	3.23	0.134
	2-2	粘土	灰色	-	1,325	1,189	555	28.1	あり	3.32	0.450
埋設箇所③	3-1	シルト	オリーブ黒色	-	3,790	2,280	513	17.7	あり	4.59	0.054
	3-2	粘土	灰オリーブ色	1,500	2,430	1,960	457	31.3	あり	4.65	0.043
埋設箇所④	4-1	シルト混じり粘土	オリーブ黒色	8,800	1,794	1,652	531	38.7	あり	3.22	0.172
	4-2	粘土	灰オリーブ色	5,500	4,010	3,380	539	25.4	あり	5.35	0.035

表11 土壌抽出水(湧水)分析結果

調査地点	サンプルNo	比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	pH	硫酸イオン (mg/l)	塩素イオン (mg/l)	KMnO ₄ 消費量 (mg/l)	蒸発残留物 (mg/l)	総酸度 (mg/l)	アルカリ度 (mg/l)
埋設箇所①	1-1	3,145	6.95	8	82	208	1,818	14	21
	1-2	3,610	7.42	45	25	17	210	3	56
	湧水	1,101	8.39	100	96	10	569	-	225
埋設箇所②	2-1	4,630	6.38	52	18	49	241	4	16
	2-2	6,863	7.06	41	2	81	556	7	23
	湧水	671	8.09	120	425	6	941	3	98
埋設箇所③	3-1	3,802	6.43	74	10	36	205	3	10
	3-2	5,165	5.84	29	28	184	2,135	33	7
	湧水	1,151	8.35	32	145	11	520	-	223
埋設箇所④	4-1	3,322	6.91	120	3	22	219	3	9
	4-2	7,519	6.54	47	2	23	141	4	3
	湧水	1,151	8.24	170	45	8	503	1 未満	128

表12 土壌の腐食性評価結果

調査地点	サンプル No.	土壌の種類	ANSI A21.5-1999		DVGW G9-1971	
			点数	腐食性評価	点数	腐食性評価
調査箇所①	1-1	粘土	15.5	腐食性が強い	- 13	著しく腐食性あり
	1-2	シルト	15.5	腐食性が強い	- 11	著しく腐食性あり
調査箇所②	2-1	粘土混じりシルト	13.5	腐食性が強い	- 11	著しく腐食性あり
	2-2	粘土	15.5	腐食性が強い	- 11	著しく腐食性あり
調査箇所③	3-1	シルト	7.5		- 11	著しく腐食性あり
	3-2	粘土	13.5	腐食性が強い	- 13	著しく腐食性あり
調査箇所④	4-1	シルト混じり粘土	13.5	腐食性が強い	- 12	著しく腐食性あり
	4-2	粘土	5.5		- 10	腐食性あり

表13 外観調査結果

調査管	外面塗装仕様	埋設期間	腐食調査結果	
			ショットブラスト前	ショットブラスト後
φ 200	Zn-Al 擬合金溶射 + 合成樹脂塗装	3 年	全面白錆発生	腐食はなく良好
		6 年	全面白錆発生	腐食はなく良好
		10 年	ほぼ全面白錆発生 一部赤錆発生	概ね良好
φ 150	ポリウレタン樹脂塗装	3 年	塗膜の密着性良好 特殊押輪の爪痕あり	腐食はなく良好
		6 年	塗膜の密着性良好 特殊押輪の爪痕あり	腐食はなく良好
		10 年	塗膜の密着性良好 特殊押輪の爪痕あり	腐食はなく良好
φ 100	Zn 溶射 + 合成樹脂塗装 (標準塗装)	4 年	ほぼ全面白錆発生 一部赤錆発生	深さ 0.9mm の腐食

5.2 腐食調査結果

5.2.1 外観調査結果

埋設後3年目、6年目、10年目に掘上げたダクトイル鋳鉄管の外観写真を図7に、外観調査結果を表13に示す。

Zn-Al擬合金溶射+合成樹脂塗装管では、6年目までは全面に白錆が発生し、ショットブラスト後の管体には、腐食は認められなかった。10年目では、ほぼ全面に白錆が発生し、一部赤錆も認められた。ショットブラスト後の管体には、一部わずかに腐食が認められたが、概ね良好であった。

ポリウレタン樹脂塗装管は、10年目でも塗膜のフレなどはなかった。また、ショットブラスト後の管体には、腐食は認められず良好であった。

標準塗装(亜鉛溶射+合成樹脂塗装)管は、4年目で全面に白錆が発生し、一部赤錆も認められた。また、

ショットブラスト後の管体には、一部深さ0.9mmの腐食が認められた。

5.2.2 塗膜断面観察結果

亜鉛-アルミニウム擬合金溶射+合成樹脂塗装の塗膜断面のSEM写真、およびEPMAによる定性分析結果を図8に示す。塗膜中には、亜鉛やアルミニウムが残っていることが確認できた。塗膜中の亜鉛やアルミニウムは腐食生成物となり、塗膜内の空隙および鉄面に沈着して、塗膜に環境遮断作用を付与するなどの作用により、腐食の進行を抑制する。このことから、亜鉛とアルミニウムによる防食作用は持続していると考えられる。

5.2.3 インピーダンス測定結果

ポリウレタン樹脂塗装管のインピーダンス測定結果を図9に示す。表14に示す水門鉄管塗替指針(1969)による評価基準では、10年間埋設後も塗膜劣化度Ⅰ(異常なし)であった。

調査管	外面塗装仕様	埋設期間	外観	
			ショットブラスト前	ショットブラスト後
φ200	Zn-Al 擬合金溶射 + 合成樹脂塗装	3 年		
		6 年		
		10 年		
φ150	ポリウレタン樹脂塗装	3 年		
		6 年		
		10 年		
φ100	Zn 溶射 + 合成樹脂塗装 (標準塗装)	4 年		

図7 外観調査結果

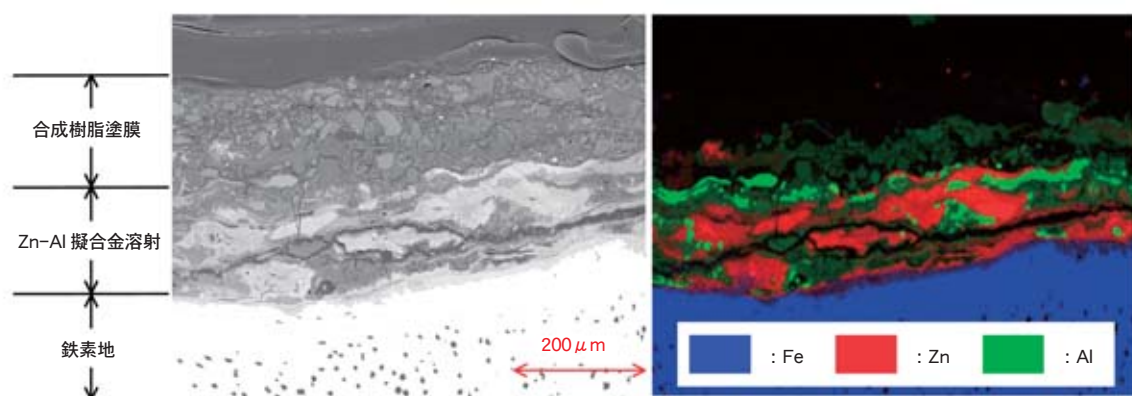


図8 Zn-Al 擬合金溶射 + 合成樹脂塗装 塗膜断面

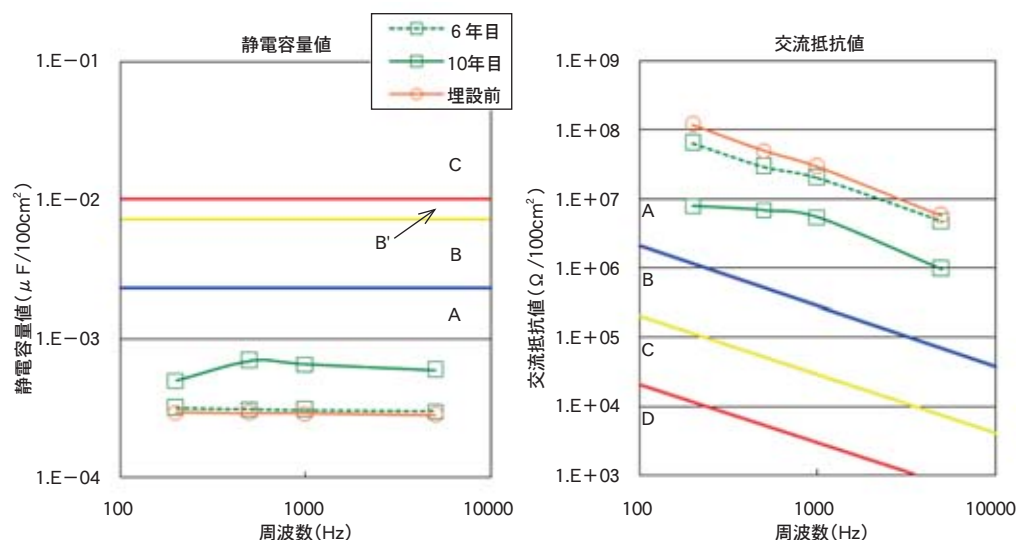


図9 インピーダンス測定結果

表14 水門鉄管塗替指針(1969)

劣化度	インピーダンス		塗膜の状態
	容量値	抵抗値	
I	A	A・B	異常なし
II	B	C	塗膜が完全に固く付着し上塗りだけが劣化している
III	B'	C	塗膜に発錆・ふくれなどを生じている
IV	C	D	塗膜の劣化が著しい

6. まとめ

腐食性の激しい土壤中に、ポリエチレンスリーブで被覆せずに、亜鉛-アルミニウム擬合金溶射+合成樹脂塗装、ポリウレタン樹脂塗装の2種類の外面特殊塗装管の埋設試験10年目の調査を実施した結果、その防食効果は持続しており、標準塗装管(亜鉛溶射+合成樹脂塗装)よりも耐食性に優れていることを確認した。

7. おわりに

徳島市水道局では、亜鉛-アルミニウム擬合金溶射が高い防食効果を有していることから、耐食性だけでなく、美観も重視される水管橋の一部に、平成12年度より、亜鉛-アルミニウム擬合金溶射をプライマーとした外面特殊塗装管を採用している(図10参照)。また、埋設管路については、採用を検討中である。

当社は、今後も腐食性土壌地域における管路全体の防食方法について、検討を行っていく所存である。

最後に、本報告が、腐食性土壌地域におけるダクトイル鑄鉄管敷設工事の一助となれば幸いである。



図10 φ300 SⅡ形 内面粉体塗装管 平成15年敷設

外面塗装仕様：Zn-Al擬合金溶射+エポキシ樹脂塗料
+ポリウレタン樹脂塗料

参考文献

1) 道浦吉貞・喜多川真好：ダクティル鑄鉄管外面特殊塗装の耐食性の検証、クリモト技報、No.49(2003)、pp.16-25

執筆者

廣島聡子

Satoko Hirohata

平成11年入社

ダクティル管の研究・開発に従事



道浦吉貞

Yoshisada Michiura

昭和58年入社

ダクティル管の研究・開発を経て

技術本部長

工学博士



共同研究者

左海義文

Yoshifumi Sakai

徳島市水道局



井村敏二

Toshiji Imura

徳島市水道局

