

別海地域における肥培施設の防食・補修対策 工法の評価と適用について —比較試験とモニタリング方法の検討—

釧路開発建設部 農業開発課

○渡邊 一浩
佐藤 勇造
村井 優峰

別海地域において、国営環境保全型かんがい排水事業で整備された肥培施設の調整槽内壁コンクリート部に、硫化水素の影響による劣化現象が発生している。

そのため、肥培施設の機能維持及び長寿命化に向け、コンクリートの防食及び補修に関する対策工法の比較試験を計画している。

本報告では、これまで実施してきた暴露試験結果を報告するとともに、効果的な防食塗装規格を検討するためのストックマネジメント技術高度化事業による比較試験計画について報告する。

キーワード：ストックマネジメント、長寿命化、硫化水素、健全度

1. はじめに

北海道東部の大規模酪農地帯（図1）では、家畜ふん尿の有効活用と地域環境保全を目的とした国営環境保全型かんがい排水事業が実施されている。事業で整備される施設の一つに、家畜ふん尿に水を加えたスラリーに空気を送り込んで曝気攪拌し、ほ場へ散布する肥培かんがい施設（図2）がある。

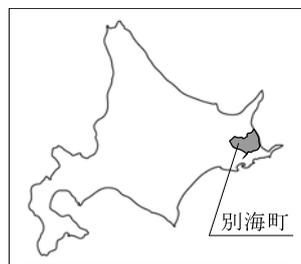


図1 位置図

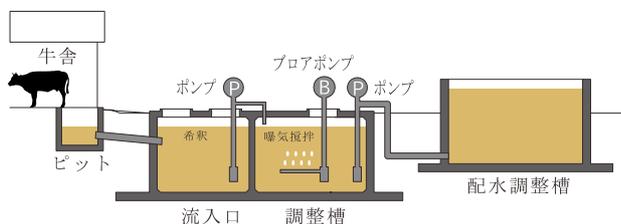


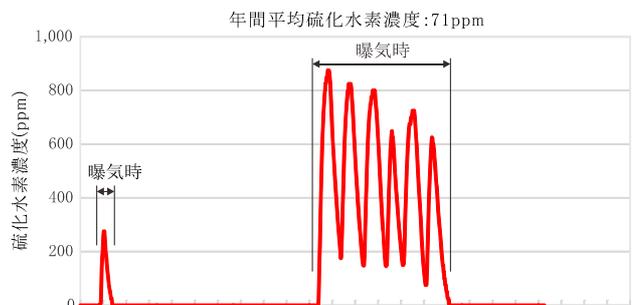
図2 肥培かんがい施設の概要

肥培かんがい施設の構成要素の一つである調整槽では、スラリーを曝気攪拌する際に発生する硫化水素の影響により、調整槽気相部内壁のコンクリートに劣化現象が発生する。このため、調整槽気相部内壁の防食対策の選定において、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術

及び防食技術マニュアル（平成24年）」（以降：下水道防食技術マニュアルと呼称）を参考に対策が検討されてきた。

しかしながら、図3に示すように、肥培施設では、下水道施設のように常時硫化水素が発生する環境ではなく、曝気攪拌時のみ高濃度の硫化水素が発生する特徴を持つ。つまり、下水道施設と肥培施設の硫化水素発生形態が異なるため、「下水道防食技術マニュアル」に基づく対策方法が適合しない可能性がある。

このような背景から、肥培施設の調整槽環境に適した防食対策工法を明らかにすることを目的に、各種の防食塗装を施した供試体を用いた暴露試験結果を報告するとともに、効果的な防食塗装規格を検討するための比較試験計画について報告する。



Q施設の硫化水素濃度経時変化（9月19日11:59～20日09:17）
図3 肥培施設（調整槽内）の硫化水素濃度の挙動

2. 調査対象施設の概要

本調査は、国営環境保全型かんがい排水事業「別海地区」において、平成16年に建設された肥培施設を対象とした。

本施設は、建設後 12 年が経過しており、調整槽は多槽式構造である。本施設の一次槽の調整槽内における年間平均硫化水素濃度は 131ppm であり、地区内においても高濃度の硫化水素が発生している施設と位置付けられる(表1)。なお、硫化水素中毒対策として、平成 25 年に一次槽と四次槽に自然換気を前提とした換気塔が設置され、平成 25 年度調査において設置前後の硫化水素濃度が測定された。その結果、設置前に比べて硫化水素濃度は軽減しているものの、設置後においても攪拌曝気時等の硫化水素濃度のピークが 500ppm 前後と依然高い状態で推移していることを確認している。

表1 施設毎の年間平均硫化水素濃度調査結果

調査年次	地区名	施設名	調整槽形式*	曝気時間	曝気回数	年間平均硫化水素濃度
平成24年 業務	別海	A施設	多槽	270分	7回	131ppm
		B施設	多槽	240分	13回	20ppm
		C施設	単槽	195分	3回	1ppm
	はまなか	D施設	単槽	90分	3回	11ppm
		E施設	単槽	240分	4回	25ppm
		F施設	単槽	180分	12回	10ppm
	別海南部	G施設	単槽	120分	2回	7ppm
		H施設	単槽	240分	8回	80ppm
		I施設	多槽	270分	12回	1ppm
		J施設	多槽	240分	2回	91ppm
		K施設	多槽	300分	6回	204ppm
		L施設	単槽	585分	6回	11ppm
		M施設	単槽	255分	5回	47ppm
	別海西部	N施設	多槽	180分	3回	72ppm
O施設		単槽	120分	8回	59ppm	
平成26年 業務	別海南部	P施設	単槽	240分	8回	24ppm
		Q施設	多槽	165分	6回	71ppm
		R施設	単槽	30分	2回	24ppm
		S施設	多槽	120分	5回	2ppm

*多槽式の場合は一次槽の値を示す。

本調査対象施設 供試体設置施設

3. 暴露試験調査

(1) 暴露試験の概要

肥培施設の調整槽環境に適した防食対策工法を検討するため、各種の防食塗装を施した供試体を用いて、平成25年度から暴露試験を実施してきた。

暴露試験に使用した各供試体の概要を表2に示す。

表2 各供試体の概要

供試体の概要(10cm×10cm×10cm)
①普通コンクリート
②防菌コンクリート
③耐硫酸コンクリート
④普通コンクリート+塗布型ライニングA種塗装
⑤普通コンクリート+塗布型ライニングB種塗装
⑥普通コンクリート+塗布型ライニングC種塗装
⑦普通コンクリート+塗布型ライニングD種塗装

※各供試体の粗骨材最大寸法は20~25mm、スランブは8cm、最大水セメント比は55%、空気量は5%、最小単位セメント量は280kg/m³である。

供試体は、10cm×10cm×10cmの立方体で平成25年12月に別海南部地区の3施設に設置した(表1)。供試体は、普通コンクリートと防菌コンクリート、耐硫酸コンクリート、さらに普通コンクリートにエポキシ樹脂でA種、B種、C種、D種相当の規格(表3)の防食塗装(塗布型ライニング)を施したものの7種類で、継続試験を4回行えるよう、合計で28個設置した。

防食塗装を行った供試体は、各規格の基準を満たすため、A種では上塗り厚を0.20mm以上、B種は上塗り厚を0.35mm以上、C種は上塗り厚と補強層の総厚を0.70mm以上、D種は上塗り厚と補強層の総厚を1.30mm以上として作成されている(図4)。

A種及びB種とC種及びD種との大きな相違点は補強層の有無であり、暴露試験に利用した供試体の補強層は、ガラスクロスに上塗り剤が含浸されている。

なお、供試体を設置した施設は、表1のJ施設、K施設、N施設であり、それらの調整槽内の年間平均硫化水素濃度¹⁾は72~204ppmで、比較的地域の中でも高い硫化水素濃度が発生する施設に位置づけられる。

1) 3時季(夏季、秋季、冬季)の硫化水素濃度測定結果に基づき、以下の式により算出(秋季と春季の濃度が同程度であると仮定)。
年間平均硫化水素濃度=(夏季日平均)+(秋季日平均×2)+(冬季日平均))/4

表3 塗布型ライニングの品質規格

規格項目	A種	B種	C種	D種
被覆の外観	被覆にしわ、むら、はがれ、われのないこと	同左	同左	同左
コンクリートとの接着性	標準状態 1.5N/mm ² 以上 吸水状態 1.2N/mm ² 以上	同左	同左	同左
耐酸性	pH3の硫酸水溶液に30日間浸漬しても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと	pH11の硫酸水溶液に30日間浸漬しても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと	10%の硫酸水溶液に45日間浸漬しても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと	10%の硫酸水溶液に60日間浸漬しても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと
硫黄侵入深さ	-	-	10%の硫酸水溶液に120日間浸漬した時の侵入深さが設計厚さに対して10%以下であること、かつ200μm以下であること	10%の硫酸水溶液に120日間浸漬した時の侵入深さが設計厚さに対して5%以下であること、かつ100μm以下であること
耐アルカリ性	水酸化カルシウム飽和溶液に30日間浸漬しても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと	同左	水酸化カルシウム飽和溶液に45日間浸漬しても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと	水酸化カルシウム飽和溶液に60日間浸漬しても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと
透水性	透水量が0.30g以下	透水量が0.25g以下	透水量が0.20g以下	透水量が0.15g以下

注)硫黄侵入深さにおける設計厚さは、各工法の防食被覆材料製造業者が規定する設計厚とする。



※ 厚さには素地調整層は含まない

図4 供試体の各規格における防食塗装の概要

(2) 暴露試験の調査結果

暴露試験開始後から2年8ヶ月が経過した平成28年8月に供試体を引き上げ、その外観調査と中性化試験を実施した。その一例を写真1に示す。



写真1 供試体の中性化試験例 (K施設)

写真の施設では、コンクリートの種類に関係なく、防食塗装が行われていない供試体ではコンクリートが剥落し、原型を留めていなかった。それに対して防食塗装を行った供試体では各規格とも原型を留めており、外観上の明確な変化はなかった。この傾向は他の2施設においても同様であった。

中性化試験の結果は外観調査と一致しており(写真1、表4)、防食塗装を行っていない供試体については種類に関係なく、7.0~15.3 mm程度の中性化の進行が見られたが、防食塗装を行った供試体では規格に関係なく、いずれの供試体も中性化は見られなかった。

2年8ヶ月という短期間での暴露試験であるが、硫化水素濃度が一時的に高濃度になるという特徴を持つ肥培施設においては、コンクリートに防菌や耐硫酸性等の工夫を加えるよりも、防食塗装によりコンクリートと硫化水素を遮断する工法が効果的と考えられる。

今回の試験から、耐硫酸性に最も劣るA種においても変状が見られなかったことから、高い硫酸耐性が求められるB~D種の規格においても(表3)、より長期間の硫化水素遮断効果が期待される。

表4 各コンクリート供試体の中性化試験結果

	J施設	K施設	N施設
普通コンクリート	7.0 mm	10.8 mm	6.0 mm
防菌コンクリート	7.3 mm	12.3 mm	13.5 mm
耐硫酸コンクリート	8.5 mm	15.3 mm	14.0 mm
普通コンクリート +塗布型ライニングA種	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
普通コンクリート +塗布型ライニングB種	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
普通コンクリート +塗布型ライニングC種	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
普通コンクリート +塗布型ライニングD種	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm

※過年度調査によるとJ施設、K施設、N施設の年間平均硫化水素濃度は、それぞれ91ppm、204ppm、72ppmである。

4. 比較試験とモニタリング計画

(1) 比較試験方法の検討

前述のように、曝気攪拌時等急激に硫化水素濃度が高くなることが特徴の肥培施設においては、塗布によりコンクリートと硫化水素を遮断する工法が効果的と考えられた。

このことから、比較試験では塗布型ライニングの各規格の耐久性（防食塗装を硫黄が貫通するまでの期間）を明らかにし、供用40年を想定した際に、最もライフサイクルコストを軽減できる規格を明らかにすることが重要と考えられる。

表5に示すように、塗布型ライニングのA種及びB種と、C種及びD種には補強層の有無という相違点がある。このことから、各規格の耐久性を明らかにするためには、上塗り層と補強層、それぞれで硫黄侵入速度を把握することが必要である。

表5 塗布型ライニングの各規格の特徴と試験の適合性

規格	A種	B種	C種	D種
塗装内訳	上塗り	上塗り	上塗り+補強層	上塗り+補強層
総塗総厚	薄	中	厚	極厚
施工コスト	低	中	高	極高
上塗りの耐久性試験	利用可能	利用可能	利用可能	利用可能
補強層の耐久性試験*	利用不可	利用不可	利用可能	利用可能
防食塗装環境**	腐食が生じていない	腐食が明らかに見られる	腐食が顕著に見られる	腐食が極度に見られる

*上塗りを行わないことを前提とする。

**適用場面は点検・補修を「容易」と設定した場合の基準。「容易」「困難」の判断基準を(表6)に示す。

表6 防食設計の判断基準（点検・補修・改築の難易）

分類	判断基準
容易	<ul style="list-style-type: none"> ・代替施設があり、更新時に休止できる。 ・仮施設が建設でき、総合的に経済的である。 ・日常点検・定期点検が可能である。
困難	<ul style="list-style-type: none"> ・構築後、狭いため人が入りにくい ・代替施設がないので休止期間を長期間とれない ・代替施設を建設するのが総合的に不経済である ・腐食環境の改善が困難である ・日常点検・定期点検が困難である

資料：下水道防食技術マニュアル

上塗り層の硫黄侵入速度は、どの規格の防食塗装においても把握することが可能である。しかし、その中でもA種は、腐食の未発生施設に対する防食塗装方法として位置づけられており、肥培施設に腐食が発生している現状から既設施設の補修を考えると、A種を上塗り層の耐久性試験に用いるのは現実的ではないと判断した。

このことから、上塗り層の耐久性試験においてはB種以上の規格を用いることとし、試験には、その中でも最も低コストのB種を採択した。

一方、補強層についてはC種、D種に利用されているが、いずれもその上部に上塗りが行われており、補強層の硫黄侵入速度の把握には、上塗りを行わない条件で試験を行うことが必要である。

このことから、補強層の硫黄侵入速度把握においては、上塗りを行わないことを前提とし、比較的 low コストであるC種相当の補強層を採択することとした(図5)。

以上を踏まえ、図5に示すように対象施設の調整槽内壁に防食被覆工法-I(塗布型ライニングB種相当の上塗り)と防食被覆工法-II(C種相当の補強層のみ上塗り層無し)を、それぞれ壁面2面と頂板で行い、比較試験を行う計画とした。

これにより、上塗り層、補強層それぞれの硫黄の侵入速度を把握することが可能になり、その速度と塗装厚の関係から、肥培施設の防食塗装に最も適切な塗布型ライニングの規格を明らかにすることができる。

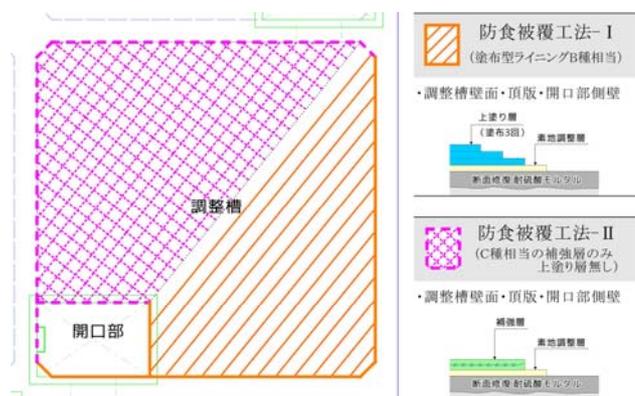


図5 各防食補修工の比較試験施工図

(2) モニタリング計画

調整槽内において、スラリーポンプの噴流が衝突する側壁の一部で劣化が顕著になることが想定される等、側壁の劣化が不均一に進行することが想定される。

このことから、比較試験を行うためには、同一の劣化状況を示す箇所を予め把握し、その場所でモニタリングを行うことが重要である。

表7に、モニタリング計画の概要を示す。

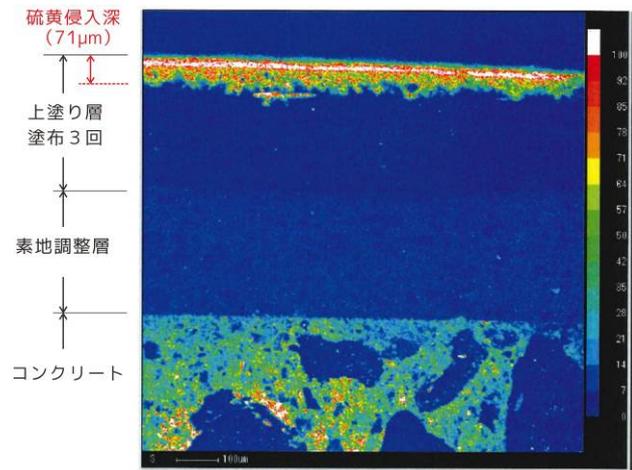
比較試験のため防食塗装を行う際には、一時的に調整槽内が空になる。そこで、防食塗装前に、調整槽内の目視観察や中性化等の簡易試験を行い、側壁の劣化程度の不均一性を把握し、比較試験に適切な箇所を数箇所選定し、その場所でモニタリングを行うこととする。

その際、複数年に渡るモニタリング試験であることを考慮し、比較可能なエリアを最大限に把握することに留意する。

施工後については、施工1～3年目の各年を対象とし、調整槽の基本的条件の把握のため、曝気時間測定、調整槽内の硫化水素濃度及び流入するふん尿のTS濃度の測定を行う計画とする。

また、施工2年目、3年目については、一時的に調整槽内を空にし、防食塗装前に選定したモニタリング実施箇所において、コンクリート推定強度試験²⁾、中性化試験³⁾、EPMA試験⁴⁾（写真2）による各防食塗装の硫黄侵入深を測定する。その際、上塗りと補強層の劣化の差異を評価するため、統計処理が可能な3反復以上で試験を実施する計画とする。

その際、モニタリング実施箇所においては、予めピンホール試験を実施し、コンクリートと防食塗装との間に浮きがないことを確認し、試験を実施することに留意する。



硫黄の濃度分布（塗布型ライニングB種）

写真2 EPMA試験結果の一事例

表7 モニタリング計画の概要

試験施工	調査内容	作業内容
防食塗装時	環境調査	曝気時間測定
		TS濃度測定
	劣化度調査 (ふん尿搬出後)	硫化水素濃度測定
		目視観察
施工後1年目	環境調査	コンクリート推定強度測定
		中性化深さ測定
		曝気時間測定
施工後2年目	環境調査	TS濃度測定
		硫化水素濃度測定
		曝気時間測定
	劣化度調査	ピンホール試験
		コンクリート推定強度測定
		中性化深さ測定
施工後3年目	環境調査	EPMA試験
		曝気時間測定
		TS濃度測定
	劣化度調査	硫化水素濃度測定
		ピンホール試験
		コンクリート推定強度測定
		中性化深さ測定
		EPMA試験

2) コンクリート推定強度試験：コンクリートの反発度の測定方法（JIS A 1155）に従い、コンクリート表面をリバウンドハンマーで打撃し、その反発度から圧縮強度を測定。

3) 中性化試験：ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法（NDIS 3419）に従い、フェノールフタレイン試薬を染みこませたる紙でコンクリートドリルの削孔粉を受け、削孔粉が赤紫色に呈色し始めた時の孔深さを計測。

4) EPMA試験：コンクリートコアをサンプリングし、電子線マイクロアナライザー（EPMA：Electron Probe Micro Analyzer）法により、試料の断面に存在する物質（元素）を判別し、硫黄侵入深さを測定。

5. おわりに

暴露試験を行った調整槽の平均年間硫化水素濃度は、各施設でも72～204ppm以上を示し、「下水道防食技術マニュアル」に基づくと腐食環境（表8）はI類に区別される。この場合、施工が「容易」の条件でも、必要となる工法は塗布型ライニングD種またはシートライニングD種となる（表9）。

表8 腐食環境分類

分類	腐食環境
I類	年間平均硫化水素ガス濃度が50ppm以上で、硫酸によるコンクリート腐食が極度に見られる腐食環境
II類	年間平均硫化水素ガス濃度が10ppm以上50ppm未満で、硫酸によるコンクリート腐食が極度に見られる腐食環境
III類	年間平均硫化水素ガス濃度が10ppm未満ではあるが、硫酸によるコンクリート腐食が明らかに見られる腐食環境
IV類	硫酸による腐食はほとんど生じないが、コンクリートに接する液相が酸性状態になりえる腐食環境

資料：下水道防食技術マニュアル

表9 設計腐食環境と工法規格の関係

		工法規格					
		塗布型ライニング工法		シートライニング工法		耐硫酸モルタル防食工法	
設計腐食環境	I類	D種	-	D種	D種	-	-
	II類	C種	D種	-	D種	C種	-
	III類	B種	C種	-	-	B種	C種
	IV類	A種	A種	-	-	-	-
点検・補修・改築の難易		容易	困難	容易	困難	容易	困難

資料：下水道防食技術マニュアル

しかし、暴露試験の結果は2年8ヶ月という短期間ながら、防食塗装を行った供試体において、最も耐硫酸性の低いA種においても、全く劣化が認められない状態であったことから、次年度以降は計画した比較試験工事の施工及びモニタリング調査も行いつつ、防食効果の持続性等を検証していく。