

開水路基礎の表面腐食鋼管杭健全度評価の事例

北海道オホーツク総合振興局産業振興部調整課 中澤 正 渥美 和哉
網走川土地改良区 工務課 小田島 龍児 加地 光幸
(株)よしだ設計コンサルタント 金 雄大

1. はじめに

網走川土地改良区が管理する東幹線用水路は、オホーツク総合振興局管内の美幌町から大空町にかけて位置し面積 602ha の受益農地に水を供給している。本受益の主要作物は、ビート、馬鈴薯、小麦である。水田については、冷涼な気候のため「もち米」の栽培が行われているが、転作率は 80%を超えている。転作田における畑作・野菜作りへの水需要に対する要望があり老朽化した用水路の長寿命化が急務となっている。オホーツク総合振興局において本用水路の機能保全計画を作成するにあたり、用水路の変状調査・劣化度判定および対策案を作成する業務を (株)よしだ設計コンサルタントで行った。

本用水路は、全長=15,687m で、それを構成する東幹線用水路(本線) 8,427m の内 5,540m が現場打鉄筋コンクリート開水路となっている。現場打鉄筋コンクリート開水路部分は、「道営かんがい排水事業網走川地区」として昭和 45 年(1970 年)～昭和 58 年(1983 年)に造成された。

現場打鉄筋コンクリート開水路の現地調査は、近接目視調査、コンクリート強度推定調査、鉄筋探査、中性化深さ調査(ドリル法)にて健全度を推定した。現場打鉄筋コンクリート開水路の内、約 2,890m の基礎地盤が泥炭であり、鋼管杭によって支持されていた。水路周辺盛土部の沈下に伴い相対的に水路が浮き水路底版下に空洞が発生していた。開水路基礎部が露出し鋼管杭表面が腐食状態にある区間が確認された。鋼管杭の腐食状態調査も含め水路の総合的な劣化度を判定し対策工法案の検討を行った。この事例について紹介する。

2. 調査水路の概要

調査対象とした東幹線用水路は、東幹線用水路(本線) 8,427m と、その支流である東第一幹線用水路(コルゲートフリューム)および本郷中幹線用水路(コルゲートフリューム)、東第 2 幹線用水路(コルゲートフリューム)からなり、総延長 15,687m を有する。

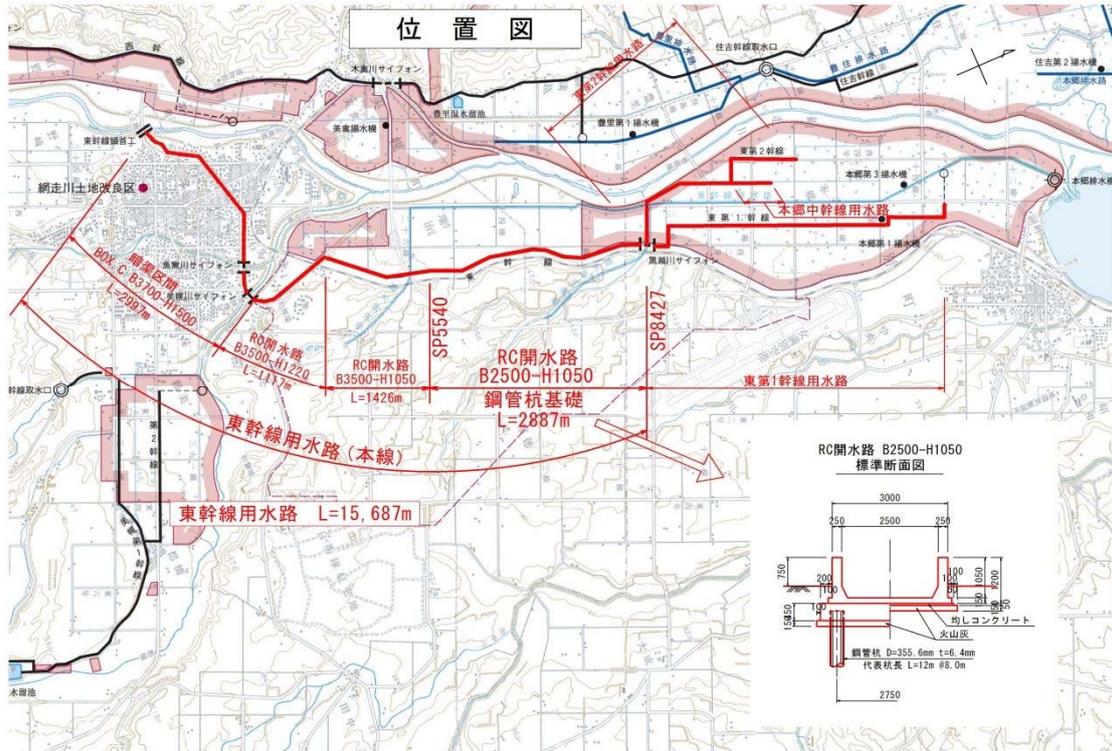


図 - 1 東幹線用水路 (L=15,687m) 位置図

3. 基礎（鋼管杭）の露出状態

基礎（鋼管杭）が露出している部分においては、水路底版に空洞が形成され窪地となり滞水していた。滞水には緩やかな流れが確認された。水路には、8m 毎に2本の杭により支持されている台座（高さ450mm）がある。



写真 - 1 (SP 7937 L) 水路側壁（底版に空洞が発生）

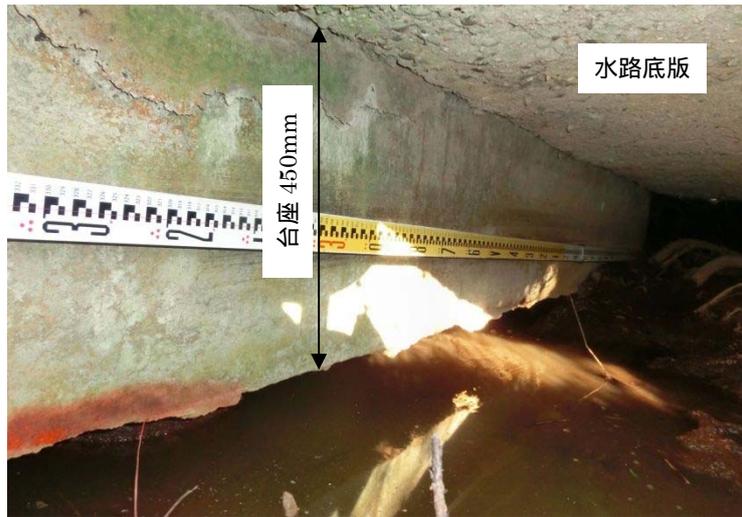


写真 - 2 (SP 7937 L)

台座 (高さ 450 mm、空洞化して水路底板が下から見える。)



写真 - 3 (SP 7937 L)

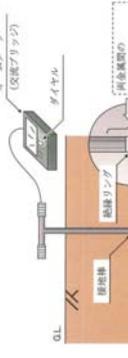
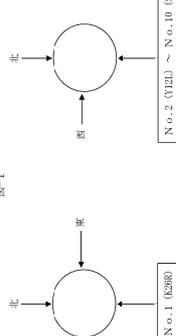
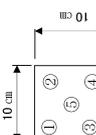
台座の下端 (鋼管杭の露出および滞水の状況)

4. 鋼管杭の調査

基礎工(鋼管杭)区間は、東幹線用水路(本線)SP5540～8427であり、鋼管杭(STK-41、D355.6mm、L=7.0～24.0m)が718本ある。

空洞形成の程度や建設当時の施工工区割りを考慮し、代表的な杭を200～300m程度に1本抽出し、合計10本(番号～⑩)を調査した。

鋼管杭の腐食状況の調査方法について (表-1)

1 調査準備	<p>①調査スペース確保のため鋼管杭周辺を掘削。 ②締切及び水替。 ③空洞化の深さについては、水替後に、台座(高さ45cm)の直下より空洞底までを測定した。</p>		<p>5 管対地電位測定</p> <p>鋼管杭と上部コンクリートとの接点において、マクロセルの有無を確認する。高抵抗電圧計、飽和硫酸銅電極 (Cu/CuSo4-sat)を用い、杭の地際から0.5m刻みで垂直方向に、その場の電位を測定した。</p> <table border="1" data-bbox="223 548 375 1041"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>埋設環境</th> <th>P/S電位</th> <th>vs: Cu/CuSO4-sat</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">鋼</td> <td>一般土中</td> <td>-500mV ~ -600mV</td> <td></td> </tr> <tr> <td>コンクリート中</td> <td>-200mV ~ -300mV</td> <td></td> </tr> <tr> <td>埋設電流の影響のある場合</td> <td>明瞭的に変動する</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">鉄筋</td> <td>コンクリート</td> <td>鋼材物から離れると-200mV ~ -600mVに移行</td> <td></td> </tr> <tr> <td>一般土中</td> <td>-500mV ~ -600mV</td> <td></td> </tr> <tr> <td>鋼</td> <td>-200mV ~ -400mV</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	種類	埋設環境	P/S電位	vs: Cu/CuSO4-sat	鋼	一般土中	-500mV ~ -600mV		コンクリート中	-200mV ~ -300mV		埋設電流の影響のある場合	明瞭的に変動する		鉄筋	コンクリート	鋼材物から離れると-200mV ~ -600mVに移行		一般土中	-500mV ~ -600mV		鋼	-200mV ~ -400mV		
種類	埋設環境	P/S電位	vs: Cu/CuSO4-sat																									
鋼	一般土中	-500mV ~ -600mV																										
	コンクリート中	-200mV ~ -300mV																										
	埋設電流の影響のある場合	明瞭的に変動する																										
鉄筋	コンクリート	鋼材物から離れると-200mV ~ -600mVに移行																										
	一般土中	-500mV ~ -600mV																										
	鋼	-200mV ~ -400mV																										
2 目視調査・ケレン前	<p>①掘削完了時にブラシ等で鋼管杭の土や表面の汚れを洗い落とし、腐食孔発生の有無(孔の発生、位置、形状、寸法)、管の塗覆層を確認。 ②赤褐色錆発生の有無(発生位置、範囲)を確認。</p>		<p>6 土壌抵抗率調査</p> <p>1) 土壌抵抗率測定(オームメーター) オームメーターを用い土壌抵抗率を測定しました。本装置では下図に示すように接地棒を打ち込み、その金属先端周囲の土壌抵抗率を測定するため、調査対象近傍の土壌抵抗率を測定することが可能です。判定基準は、下記の表をもとに判断しました。</p>  <table border="1" data-bbox="734 616 917 996"> <thead> <tr> <th>腐食性</th> <th>抵抗率 [Ω・cm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>激しい</td> <td>0 ~ 900</td> </tr> <tr> <td>やや激しい</td> <td>900 ~ 2,300</td> </tr> <tr> <td>中</td> <td>2,300 ~ 5,000</td> </tr> <tr> <td>小</td> <td>5,000 ~ 10,000</td> </tr> <tr> <td>さわめて小</td> <td>> 10,000</td> </tr> </tbody> </table> <p>表 腐食性と抵抗率の関係</p> <p>出典：電気学会・電気防衛研究会「電気防衛・電気防衛ハンドブック」P114.</p>	腐食性	抵抗率 [Ω・cm]	激しい	0 ~ 900	やや激しい	900 ~ 2,300	中	2,300 ~ 5,000	小	5,000 ~ 10,000	さわめて小	> 10,000													
腐食性	抵抗率 [Ω・cm]																											
激しい	0 ~ 900																											
やや激しい	900 ~ 2,300																											
中	2,300 ~ 5,000																											
小	5,000 ~ 10,000																											
さわめて小	> 10,000																											
3 目視調査・ケレン後	<p>①ケレンハンマーやワイヤブラシ等を用いて、付着物および厚錆を撤去し腐食孔発生の有無を確認。 * 塗覆を剥がした箇所については、防錆剤を塗布し仮補修。</p>																											
4 肉厚測定	<p>1) 肉厚測定方向 肉厚測定点で、下図の図-1のように鋼管杭3方向の肉厚を測定しました。</p>  <p>2) 電動サンダーを用いて、平滑な下地処理をした後、探触子を密着させて肉厚を測定しました。 測定は、1測定点当り5点を、それぞれ3回、2水深(-0.2m、-0.5m)測定し記録しました。 下記の図-2のように全測定箇所ケレンしました。 ※肉厚測定した箇所は測定後、防錆材を塗布し補修しました。</p> 		<p>7 土壌腐食環境調査測定</p> <p>①PHI酸化還元電位(Redox)、湧水の有無を確認する。 土壌の腐食性評価(ANSIによる埋設管に対する土壌の腐食性評価)は、測定結果表に記載。</p> 																									

鋼管杭の腐食状態の調査結果について (表-2)

測定杭番号	測定位置	空洞化配置・位置(水路・水面より)	目視調査		ケレン後	腐食
			ケレン前	塗覆層		
① SP5747	R 10cm		浮錆箇所(赤褐色:杭上端から)	30cm	赤褐色部は、塗覆なし。他は、僅全。	上部から20cmの範囲の杭表面に凸凹。
② SP5943	L 25cm		40cm、上部から15cmで錆で特に膨れている。		赤褐色部は、塗覆なし。他は所々剥けている。	上部から20cmの範囲の杭表面に凸凹。
③ SP6143	L 40cm		70cm、上部から15cmで錆が特に多く浮いている。		掘削範囲は、ほぼ塗覆なし。	鋼面は、凸凹が多い。浮錆の下は、特に腐食している。
④ SP6528	L 40cm		50cm、上部から15cmで錆が特に多く浮いている。		赤褐色部は、塗覆なし。他は所々剥けている。	全体的に凸凹。コナリノリが大きい。
⑤ SP6848	L 10cm		5cm、他は塗覆層が健全に見える。(杭Noが見える。)		赤褐色化した部分は、塗覆なし。他はまばらに塗覆している。	塗覆の無い部分は、腐食している。
⑥ SP7217	L 30cm		40cm、上部から15cmまで錆で特に膨れている。		掘削範囲は、塗覆なし。	全体的に腐食。上部から10cmの凸凹が特に大。
⑦ SP7417	L 30cm		所々塗覆が剥がれ、全体的に薄く錆が浮いている。		全体的に、塗覆なし。上部下部で、大差なし。	塗覆の無い部分は、凸凹が特に激しい。
⑧ SP7800	L 25cm		30cm、上部から15cmまで錆で特に膨れている。		上部から20cmまでは、塗覆なし。他は、所々無。	上部から20cmまで腐食が特に激しい。それ以外でも凸凹あり。
⑨ SP7937	L 30cm		40cm、上部から25cmまで錆で膨れている。		上部から20cmまでは、塗覆なし。他は、所々無。	全体的に腐食、凸凹あり。上部から20cm腐食大。
⑩ SP8161	L 5cm		40cmまで赤褐色。		赤褐色部は、塗覆なし。	全体的に多少の凸凹あり。腐食は少ない。

(*1) 鋼管杭の健全な肉厚を5.4mm(初期肉厚6.4mm-腐食しろ1.0mm)とした場合...鋼管杭の腐食しろは、1.0mmとする。(建設省(現国土交通省)仕様第123号(平成4年4月7日) H24. 3道路橋仕方書・同解説 IV下部構造編P453

(*2) 腐食により既に穴が開いている場合、あるいは腐食が進行して平均肉厚が5.0mm以下にならない場合は、腐食が進行して平均肉厚が5.0mm以下では、軸力に対して局所的な座屈を起こす危険性があることおよび溶接の信頼性が確保できないからである。[出典: 側谷岸技術センター 港湾構造物 防食・補修マニュアル2009年版 P207]

土壌の腐食性									
土壌抵抗率測定					土壌腐食環境調査				
オームメーター	L10大地比抵抗計(間隔1~20m)	PH		酸化還元電位(Redox)	水分	硫化物	合計判定	管対地電位測定	
		測定	評価					電位(mV)	C/Sのセルの有無
上段:最小	下段:最大	測定	評価	測定	評価	検出	3.5	合計点	腐食性
8.600	9.700	8.792	0	6.13	0	263	0	2	弱
4.700	6.100	9.252	0	6.50	0	330	0	2	弱
7.300	8.700	11.092	0	6.00	0	432	0	2	弱
11.000	28.000	12.246	0	6.24	0	245	0	2	弱
23.000	39.000	11.932	0	6.51	0	330	0	2	弱
15.000	18.000	12.623	0	6.30	0	420	0	2	弱
13.000	20.000	14.004	0	6.44	0	295	0	2	弱
30.000	38.000	13.565	0	5.54	0	305	0	2	弱
33.000	40.000	13.125	0	6.54	0	320	0	2	弱
13.500	17.000	12.874	0	6.17	0	451	0	2	弱
17.000		35.796	0						

杭上部の平均腐食速度	mm/年	0.040	平均	0.034
杭下部の平均腐食速度	mm/年	0.027		

(土壌抵抗率とその評価)		(PHとその評価)		(酸化還元電位とその評価)		(水分とその評価)		(硫化物の有無とその評価)		腐食性の評価	
< 700	10	0~2	5	排水が悪く常に湿潤	2	検出	3.5	合計点	腐食性		
700 ~ 1000	8	2~4	3	排水がかなり良好、一般に湿っている	1	痕跡	2	10以上	強		
1000 ~ 1200	5	4~6.5	0	排水が良好、一般に乾いている	0	なし	0	5~9	中		
1200 ~ 1500	2	6.5~7.5	0	排水良好、一般に乾燥	0		0	1~4	弱		
1500 ~ 2000	1	7.5~8.5	0		0		0	0	腐食性		
2000 ~ 2800	0	>8.5	3		0		0	0	腐食性		

* 硫化物が存在し、かつ低Redox電位を示す場合は、3を足す。

5. 鋼管杭の腐食状況および原因

(1) 鋼管杭には全体的に腐食が見られ表面が酸化鉄になっている。経年変化による塗覆層の剥がれが多く確認された。特に杭と台座の接点付近で鋼管面の凸凹が激しい。鋼管杭の下部（水路台座下端より下へ 50cm）よりも上部（同～下へ 20cm）の方に、腐食が大きい傾向が見られた。鋼管杭は、露出状態で常時湿潤であったため「酸素」と「水」が供給され易い環境にあり腐食が進行したと考えられる。

(2) コンクリート貫通部（台座と鋼管杭の結合点）では、コンクリート/土壌マクロセル¹の影響は確認されなかった。マクロセルに起因する短期的かつ部分的な腐食進行の可能性は少ないと判断される。

1：マクロセルとは・・・地中に埋設される鋼管等は、様々な環境下にあり、土質の違い等による電位差の発生、または、異種金属が電氣的に接続されることによる電位差で、電流が鋼管等から流出する地点で腐食が起こる現象。

(3) 鋼管杭の肉厚測定で平均腐食速度は、0.034mm/年である。「杭基礎設計便覧 P389 H27 年 3 月 日本道路協会」では、「一般的な土壌条件における埋設された鋼材の平均腐食減量は、0.01mm/年」であり、想定²の 3 倍の速さで腐食が進行している。また、番号 杭上部および番号 杭上部では、0.055mm/年と非常に速い腐食速度である。下欄に参考として記載した「港湾鋼構造防食・補修マニュアル P15 表 1.2.3 港湾における鋼材の腐食速度の標準値における、5) 背面土中部 a. 残留水位より上 の条件の腐食速度 0.03mm/年」と比較しても速い腐食速度である。今回測定した腐食速度は、塗覆層が健全であった期間も含めて算出したものであり、今後、腐食速度は、更に速まると推察される。

表-1.2.3 港湾における鋼材の腐食速度の標準値¹⁾

腐食環境	腐食速度 (mm/y)
1) H.W.L.以上	0.3
2) H.W.L.～L.W.L.-1.0m	0.1～0.3
3) 海水中	0.1～0.2
4) 海底土中部	0.03
5) 背面土中部	
a. 残留水位より上	0.03
b. 残留水位より下	0.02

(4) 土壌の腐食性調査（土壌抵抗率、PH, 酸化還元電位 (Redox) 水分、硫化物) による影響は「弱」という結果となった。土壌に起因する影響は少ないと判断される。また、L-10 型大地比抵抗計の測定結果は、オームメーターで測定した結果と比較すると、土壌抵抗率は、同等もしくは高い値を示している。

今回掘削を行ったG L 1 . 0 m以下では、酸素の供給も減るため地表表面ほど腐食は少ないと判断する。

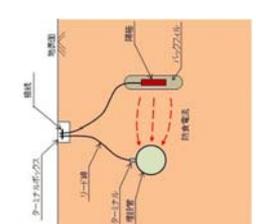
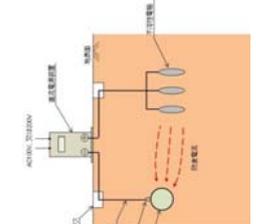
- (5) 現在の鋼管杭の腐食状態 (最小肉厚 3.96mm) で鋼管杭構造計算を行った。(計算は、省略。) 構造的には、十分な耐力を有する結果である。

6. 工法検討

- (1) 調査結果および構造検討の結果、杭の構造的な補強は必要ないと判断した。
- (2) 今後、杭の腐食速度が更に速まる可能性があること。また、局部座屈を起こす危険性が高い目安の残存肉厚 5 . 0 mm以下となっている箇所も多数あることから、この値を下回る箇所においては、防食対策による補修で腐食の進行を止め、現状維持を行う必要があると判断した。具体的には、杭番号 と杭番号 の間で防食対策を行い、杭番号 ～ および杭番号⑩の区間は、今後の腐食を経過観測し、必要により対策を行うことが望ましいと判断した。
- (3) 杭の防食対策の垂直範囲については、杭頭 (台座との結合点) より 1 . 0 mまでの補修が必要であると以下の理由で判断した。
- ・杭の上部ほど腐食が進んでいること。杭頭より 1 . 0 m以下は、土壌中にあり地表表面より腐食は少ないと考えられること。
 - ・杭に係る最大モーメント荷重が、杭頭より 0 . 5 から 0 . 9 m程度にかかり、1 . 0 m以下では、低下し負荷が小さいこと。
 - ・水路施工から 4 0 年以上経過し、周辺地盤の沈下も安定していると思われること。周辺地盤に新たな負荷が及ぼされ空洞が拡大する場合は別途対策が必要となる。
- (4) 対策工法については、耐用年数や経済性より、港湾等で実績のある「ペトロラタムライニング工法」が適していると判断した。(表 3 対策工法 参照)

対策工法 (表 3)

補修工法比較表

対象部位 防食対象		土中埋設部		基礎部 (鋼管杭)	
		電気防食工法	外部電源方式	塗装・有機ライニング工法	ベトロタムライニング工法
工法 方式		流電方式			
施工イメージ					
防食機構		鋼材とマグネシウムの電位差による電池作用により連続的に防食電流を流して防食する。	外部から入力した交流電流を直流電流に変換し、鋼材に連続的に防食電流を流して防食する。	厚膜のエポキシ塗料により外部の腐食要因から遮断する。	コンクリートのもつアルカリ性により鋼材面を腐食から保護する。
工法の特徴	長所	施工が容易であり、特別な技術を要しない。素地調整等必要ない。防食効果が非掘削にて確認可能。防食電流が届く範囲なら、非掘削部分でも防食可能。	素地調整等必要ない。防食効果が非掘削にて確認可能。防食電流が届く範囲なら、非掘削部分でも防食可能。防食電流の調整が可能であり、複数の防食対象を防食可能。	①鋼材の追補製に優れている。 ②補修や更新が容易である。 ③複雑な形状のものに対応できる。	①耐久性・耐衝撃性に優れている。 ②衝撃性に優れ、外部要因による防食層の破損が少ない。 ③簡単な下地処理でよい。
	短所	防食対象が土中埋設でない、防食効果なし。陽極1本当りの防食効果が小さいため、塗装のグレードが悪いと必要本数が増大。	防食対象が土中埋設でない、防食効果なし。外部からの電源が必要。ボーリングマシン等機器を使用するため、工事の規模が大きくなる。防食電流を供給できない。	①素地調整に手間がかかり、処理程度により耐用年数や防食効果が左右される。 ②ライニングでは技術を要する。 ③材料の使用温度により冬季間の施工は困難である。	①全工事が手作業のため作業性ははやや劣る。複雑な形状には対応し難い。 ②モルタル厚が薄い場合クラックが生じやすい。作業工程が複雑なため、施工性が劣る。構造物にかかる荷重が大きいため、C/S系マクロセル腐食の懸念があり、電気防食との併用が必要。
期待耐用年数	20	20	5-15	30	30
費用 (千円/本)		現地条件により詳細設計が必要。一般的に高価である	93	69	150
維持管理防食補修性		容易	容易	容易	困難
総合評価					x
備考		・被覆防食の費用は直接工事費とし、施工範囲は杭頭部より1m下まで(1.1m)。 ・費用は杭1本当たりの対策費とし、掘削及び養生は除く。			

上記工法比較より、コスト面・耐用年数から「ベトロタムライニング工法」による補修工法とする。

7. 考察

- (1) 泥炭等の地盤で水路周辺盛土の沈下が予想される時に、水路に基礎杭を用いた場合に相対的に水路が浮くと共に、水路底版下に窪地が形成されることがある。そのような現象が起こる場所は、地形的に低みが多く、水路周辺より雨水や地下水がその窪地に供給されやすい。供給された水は、水深の変化を伴うことが想定される。杭基礎に鋼管杭を用いた場合は、「水」や「酸素」が交互に供給され非常に腐食しやすい環境となる。
- (2) 鋼管杭を用いた施設下に「空洞」が確認された場合は、「水」や「酸素」が供給されにくい対策が必要である。鋼管杭露出がある場合は、維持管理を行う際に、「目視調査等」を定期的に行い腐食および健全度の把握が必要である。
- (3) 鋼管杭露出の場合の腐食対策は、早期には盛土等で埋めることが考えられるが、地盤の沈下を助長する場合もあるため、施設の諸条件や経済性を考慮してそれぞれの対策を検討することが必要である。

8. おわりに

今回実施した調査事例は、非常に稀なものである。

農業土木構造物に鋼管杭を用いる場合は、一般的に土中に埋設されることを条件で効果が期待される。過度な「さび」の発生は想定されない。「さび」の発生と進行は、使用される条件や環境で様々な形態を示すことに留意する必要がある。

今回の調査手法は、「港湾構造物 防食・補修マニュアル」にある一般的な手法である。農業水利施設の機能診断や長寿命化における技術の一端に参考になれば良いと思い調査事例等を紹介した。

9. 参考文献等

- 1) 杭基礎設計便覧 日本道路協会 H27年3月
- 2) 道路橋示方書・同解説 共通編 下部構造編 日本道路協会 H24年3月
- 3) 港湾構造物 防食・補修マニュアル (財)沿岸技術研究センター H26年8月
- 4) 電食防止・電気防食ハンドブック 電気学会・電食防止研究委員会 H23年1月
- 5) WSP045-2008 マクロセル腐食防食指針 日本水道鋼管協会 H20年3月
- 6) 港湾構造物 実務ハンドブック 防食・補修工法研究会 H26年3月