

平成26年度

塩害により劣化したコンクリートの 機能診断事例について

—潮見幹線排水路開渠工の機能診断から設計まで—

留萌開発建設部 天塩地域農業開発事業所

○竹内 基裕

金谷 雅宏

留萌開発建設部 技術管理課

梶 雅之

潮見幹線排水路は、国営更岸土地改良事業「更岸地区」（昭和49～59年度）の基幹排水路であり、河口閉塞防止のために延長186mの開渠工が昭和51年度から昭和53年度に建設された。潮見幹線排水路は日本海に突出した位置にあり、日本海特有の西風による波浪、波力を直接受けるなど過酷な海象条件と塩害によるコンクリートの劣化が著しく進行しており、排水機能の安全性が低下している。本報では、開渠工の改修に向けての機能診断と、対策方針並びに設計事例について報告する。

キーワード：機能診断、塩害、防食対策

1. はじめに

本地区は、天塩郡天塩町に位置し、日本海に面した受益面積1,510 haの酪農を中心とした農業地帯である。戦前には地区中央の沼地の干拓に始まり、戦後の緊急開拓事業（工期：S22～34）による湿地帯の開発が行われてきた。地形的には、日本海に面した平坦地と河川上流部の緩傾斜地からなり、平坦地は3°以下の殆んど勾配のない低平地であり、上流部の丘陵地帯は、日本海に向かって3°～15°の傾斜をなす緩傾斜地となっている。

国営造成土地改良施設整備事業「更岸地区」（工期H24～H31）において潮見幹線排水路開渠工の改修を行い、施設の機能維持させることにより排水機能の安定的な確保及び維持管理の軽減を図り、農業生産の維持及び農業経営の安定に資するものである。

潮見幹線排水路開渠工

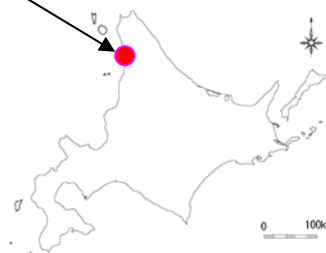


図-1 位置図



写真-1 開渠工全景

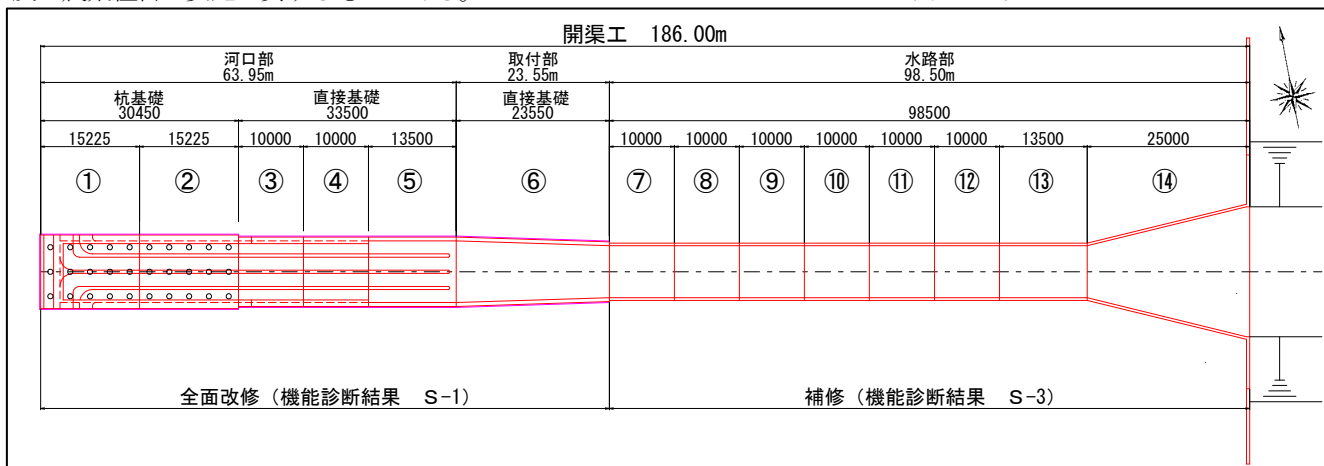


図-2 開渠工 計画平面図

2. 開渠工概要

現潮見幹線排水路開渠工は、河口部、取付部、水路部から構成しており、施設形状は、模型実験により現施設の形状で検証されているため整備にあたって現施設を踏襲する計画となっている。

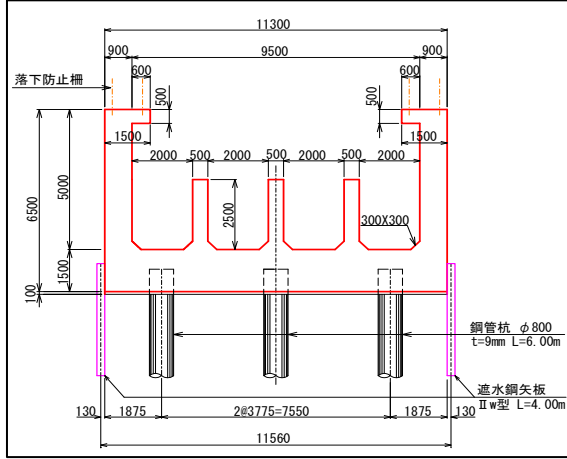


図-3 開渠工 計画断面図

(1) 構造

開渠工の本体は図-2及び図-3に示すようなコンクリート開水路であり、海中へ突き出ている先端部分は4連水路である。4連水路の吐口は直角方向に曲げられていて、右岸側の2連が北側へ向き、左岸側の2連は南側へ向いている。この先端構造によって波浪の直接侵入が防止され、4分割された吐口の掃流力が高められて、片岸で堆砂しても対岸の吐口から排水できるようになっている。汀線からの突き出し延長は建設当時の模型実験で30mに決定され、水路敷から天端までの側壁の高さは排水流下断面と堆砂の掃流を考慮して5mになっている。開渠先端付近の基礎は鋼管杭であり、基礎保護工（鋼管矢板）で囲まれているが、その上流側は直接基礎である。

(2) 現状

塩害によるコンクリートの劣化が顕著であり、露出した鉄筋が腐食している。基礎保護工の腐食・欠損も著しく、開渠本体に不同沈下が生じている。



写真2 開渠工河口部全景



写真3 開渠工河口部鉄筋腐食状況

(3) 開渠工機能診断調査方法

「ストックマネジメントマニュアル」¹⁾及び「機能保全の手引き」²⁾に基づき、機能診断と健全度評価を行った。その調査項目は表-1のとおりである。

表-1 機能診断の調査項目

調査項目	内容
全般目視調査	構造物全般の目視観察
近接目視調査	目視、打撃、クラックスケールによるひび割れ調査
中性化試験	ドリル法による中性化調査
コア採取	電磁波レーダーによる鉄筋探査、コンクリートコア採取
鉄筋腐食度調査	コンクリートかぶりをはつりとして鉄筋の腐食状況を目視観察
室内試験	コアの中性化状況、圧縮強度、塩化物イオン量測定

(4) 機能診断調査結果

機能診断調査は、開渠工を河口部 L=63.95m と取付部 L=23.55m をあわせた L=87.50m と、汀線よりも上流区間の水路部 L=98.50m に区分して調査を行った。

全般目視調査と継手部の鉛直変位測定の結果、直接基礎である汀線付近の左岸側（南側）には最大箇所でも100mmの不同沈下が生じていて、目地にクラックが認められ、コンクリートには幅0.2~0.8mmのひび割れが多数発生している。剥離・欠損は開渠先端左岸側の側壁に集中し、鉄筋が露出している。

ドリル法による中性化深さは最大地点でも2mm程度であったが、コンクリートコアでは開渠先端から汀線までの区間で、表面からの深さ10~12cmの範囲に塩化物イオンが確認された。また、主鉄筋の深さで発錆限界値³⁾の1.2kg/m³を超えている箇所があり、開渠先端付近で行った鉄筋腐食調査でも、はつり出した鉄筋に腐食が確認された。

汀線よりも上流の区間は、コンクリート内部の中性化は認められず、塩化物イオン濃度も少ない。

開渠工先端付近は、基礎保護工の腐食が著し

く、外海面は全て欠損し、流出している。そのため、波浪時の引き潮によって基礎地盤の細粒土砂が吸出しを受けていると考えられる。

河口部・取付部は、主鉄筋の腐食や遮水鋼管矢板杭の欠損及び不同沈下から、地盤の脆弱化が考えられる。以上から総合評価は S-1 評価となり、河口部・取付部は改修、水路部はひび割れ補修・表面補修によって構造物機能の健全化が図られることから、総合評価が S-3 となるため改修を行わず、補修のみとした。

施設の構造、立地条件を踏まえて施設の性能低下に起因する要因と評価区分を設定した施設状態評価表により判定した結果を表-2に示した。

表-2 健全度評価総括表

調査部位	劣化内容	変状別評価	主要因別評価	総合評価	対策
河口部 (L=63.95m) +取付部 (L=23.55m) ①~⑥	ひび割れ	S2	S2	S1	改修
	ひび割れ以外の劣化	S3			
	圧縮強度	S4			
	中性化	S5			
	欠損・損傷	S3	S2		
	不同沈下	S2			
	地盤変形	S5	S1		
	目地の変状	S3			
鋼材の腐食・欠損	S1				
水路部 (L=98.50m) ⑦~⑭	ひび割れ	S3	S3	S3	補修
	ひび割れ以外の劣化	S5			
	圧縮強度	S5			
	中性化	S5			
	欠損・損傷	S5	S5		
	不同沈下	S5			
	地盤変形	S5	S4		
	目地の変状	S4			

(5) 劣化要因

潮見幹線排水路は、日本海北部の過酷な海象条件の下、以下の要因により劣化が著しい状況となっている。主な劣化要因については、表-3に示した。

表-3 劣化要因

劣化の状況	劣化要因
ひび割れ (開渠工躯体コンクリート)	<ul style="list-style-type: none"> ・本施設は、海に突出しており、日本海北部の過酷な海象条件にあること、また、前歴事業時には塩害に対するコンクリート配合等の技術が発展途上にあった。 ・平成20年度の施設機能診断でコンクリートの塩化物イオン濃度を測定した結果、主鉄筋位置で最大2.8kg/m³ (発錆限界値: 1.2kg/m³) あり、コンクリート内部に塩化物イオンの浸透が確認された。 以上から開渠工本体は、塩害によりコンクリートの著しい劣化が発生し、鉄筋の露出及び腐食が進行している。
鋼材の腐食・欠損 (基礎保護工(鋼管矢板杭))	<ul style="list-style-type: none"> ・日本海北部の過酷な海象条件にあること、また、前歴事業時は、塩害に対する鋼材の防食技術が発展途上であった。 このことから、現在、排水路基礎保護工(鋼管矢板杭)は塩害により腐食・欠損している。
不同沈下	<ul style="list-style-type: none"> ・排水路基礎保護工の腐食・欠損に伴い、基礎杭(鋼管杭)が腐食し、不同沈下が生じていると想定される。 ・直接基礎の地盤が波浪による吸出しにより脆弱化し、不同沈下が生じていると想定される。

(6) 対策方針の概要

a) 河口部・取付部の対策

健全度が S1 と評価された河口部・取付部は、既設構造物の取り壊し撤去を行い改修とする。

河口部・取付部は、塩害、凍害、波浪による摩耗など躯体部の劣化が激しく、鉄筋露出による腐食が進行し、遮水鋼管矢板は波浪により躯体工先端部が全て流失、側面の地上部分は著しい腐食により欠損している状態で遮水機能が失われている。また、基礎地盤の吸出しによる脆弱化による不同沈下が確認されている。開渠工の劣化要因を踏まえると塩害による影響が非常に大きく、立地条件から塩害対策が特に重要と考える。そこで躯体工、鉄筋工、基礎工、遮水工について塩害、凍害、摩耗対策を行い、長期に亘り排水機能の保持を図る。

b) 水路部の対策

健全度が S3 と評価された水路部は、現時点ではコンクリートの中酸化及び塩化物イオンによる鉄筋の腐食は認められないが、海岸に位置することから塩害・凍害対策として既設コンクリートの表面をポリマーセメントモルタルで被覆し耐久性の向上を図る。



図-4 塩害と凍害による複合劣化の可能性がある地域⁴⁾

3. 開渠工河口部・取付部

(1) 躯体工

開渠工の塩害対策として、コンクリート表面からの腐食性物質の侵入防止・劣化因子の遮断を優先することが有効であり、また摩耗や凍害に対しても表面からの水分侵入防止等が重要となる。

開水路が変状、劣化が生じている場合の補修工法を参考にすると、劣化機構に適合する主な対策工法は表-4 に示すような工法である。

表-4 対策工法の比較

劣化機構	補修方針	補修工法	補修水準を満たすために考慮すべき要因
塩害	・侵入したCl ⁻ の除去	・断面修復工	・侵入部除去の程度
	・補修後のCl ⁻ 、水分、酸素の浸入抑制	・表面保護工 ・脱塩工	・鉄筋の防錆処理 ・断面修復材の材質 ・表面処理の材質と厚さ ・Cl ⁻ 量の除去程度
摩耗	・鉄筋の電位制御	・陽極材料 ・電源装置	・陽極材の品質 ・分極量
	・摩耗したコンクリートの除去	・断面修復工	・断面修復材の材質
凍害	・補修後の水分の浸入抑制	・表面保護工	・表面処理の材質と厚さ
	・劣化したコンクリートの除去	・断面修復工	・劣化コンクリートの除去程度
凍害	・補修後の水分の浸入抑制	・ひび割れ注入	・断面修復材の凍結融解抵抗性
	・コンクリートの凍結融解抵抗性の向上	・表面保護工	・ひび割れ注入材の材質と施工法 ・表面処理の材質と厚さ

表-4 に示す補修工法のうち新設構造物に適用可能な対策工法は、表面保護工のみである。

a) 躯体保護工

開渠工躯体の現状は、河口部①ブロックから取付部⑥ブロックまでは塩化物イオンにより鉄筋の腐食がかなり進行中であると推定できる。塩害・摩耗対策として、コンクリート表面からの腐食性物質の侵入防止・劣化因子の遮断が重要であり、有効な工法は、表面保護工法である。

この表面保護工法のうち表面被覆工法、含浸材塗布工法が適用可能である。

しかし、表面被覆工法のうち無機系、有機系、含浸材塗布工法は、耐用年数が10年程度と短期であることから改修区間に採用する工法の対象からは除外した。他の対策工法としては、塩害抵抗性、波浪による耐摩耗性、耐用年数等から優位性のある埋設型枠工法及びパネル工法(接着方式とアンカー固定式)が対象工法となる。両者の経済性について比較検討を行った。

パネル工法のうち接着方式は、開水路表面にパネル板を接着材により貼り付ける方式であり、アンカー固定方式は、開水路表面にパネル板を金属拡張式アンカーまたは、接着系アンカーにより設置し、裏込材等により間隙を充填する方式である。パネル材料としてはFRPM板が、遮塩性、耐候性、耐食性、耐摩耗性、寒冷地での凍結融解抵抗性に優れ、軽量で施工が容易であり、一般的に40年以上の耐久性があるとされ、これまで約25年の使用実績がある。

一方の接着方式には、レジンコンクリート系のパネルが使用されるが、FRPM板に比較し、強度が1/5と小さく長期的な耐久性が期待できないことから不採用とした。

表-5 表面保護工の比較

対策工法	工法の概要	工法名	耐用年数	適用	
補修工法	表面被覆工法 劣化因子の侵入やコンクリート剥落を抑制、または防止する効果を有する被覆をコンクリート構造物の表面に形成させる工法。無機系、有機系、パネルまたはシートの被覆材が用いられる。	無機系	10年	△	
		有機系	10年	△	
		パネル アンカー固定方式	40年	○	
	接着方式	40年	○		
	含浸材塗布工法	所定の効果を発揮する材料をコンクリート表面から含浸させ、コンクリート表層部の組織を改質して、コンクリート表層部への特殊機能の付与を実現させる工法。		10年	△
	断面修復工法	劣化によって剥落した箇所や、かぶりコンクリートをはつり落した箇所を、元の形状に修復する工法。		10年	△
ひび割れ補修工法	ひび割れ内部に樹脂系、またはセメント系の補修材料を圧力注入あるいはV字カット後充填材を充填する工法。		10年	△	

埋設型枠工法は、遮塩性、耐摩耗性、凍結融解抵抗性、コンクリートとの固着性に優れているが高価であるため、経済性を比較した結果、埋設型枠工法に比較し、約33%安価となったパネル工法(アンカー固定方式)を採用した。

また、パネル工法は、躯体コンクリートが所要の強度に達してから、型枠及び支保工を取り外したのちパネル貼り付け作業を行うが、脱型後は時間を置かず緩衝材及びパネル貼り付け、アンカー打込み作業を開始してもパネルや緩衝材に影響は無いため工期に及ぼす影響が少ない。

パネル工法の材料であるFRPM板に使用されているFRPは、耐海水性試験の結果から良好であると報告されている。⁷⁾

パネル工法に用いる目地材の遮塩性については、目地材料を塩化ナトリウム溶液に23℃で1ヶ月間浸漬したのち取り出し、浸漬前との比較を行っており、浸漬した試験片には影響が見られなかったことが、メーカー試験結果から報告されている。このことから目地材は、遮塩性に問題ないと判断した。

(2) 鉄筋工

a) 鉄筋かぶりの決定

躯体部コンクリートの欠損・剥離は、河口部の①ブロック～④ブロックに集中しており、その箇所は目地部、安全施設建込部、鉄筋露出部に見られる。この発生状況から欠損・剥離の原因は、厳寒の海象による凍結融解、鉄筋の腐食によるものと考えられ、塩害及び凍結融解作用を受けていると判断される。これより塩害、摩耗、凍害対策については、「コンクリート標準示方書」³⁾から、塩化物イオン濃度を基準値以下に配合したレディーミクストコンクリートを使用し、必要なかぶりを確保した鉄筋との組合せによる対策工法とした。

表-6 鉄筋かぶりの決定経緯

参考文献	塩害の影響度合い	必要最少かぶり
土地改良事業計画設計基準「水路工」 ⁵⁾	海水に直接接するか、海水に洗われる部材	70mm
道路橋下部構造編 ⁶⁾	塩害の影響が著しい部材	90mm
最少かぶりは、道路橋下部構造編より90mmとした。		
コンクリート標準示方書 ³⁾ より安全率計算から		100mm
上記のかぶりから、鉄筋かぶりを計算で求めた結果		120mm

鉄筋かぶりは、現行の「コンクリート標準示方書」³⁾等を参考に必要なかぶりを算定した結果、表-6の通りとなることから、鉄筋中心かぶりを120mmとした。

b) 採用鉄筋の決定

塩化物イオンに対し耐食性を有す鉄筋としては、エポキシ樹脂被覆鉄筋、ステンレス鉄筋等がある。しかし、エポキシ樹脂被覆鉄筋は、塗膜によって鉄筋を保護しているが、運搬や施工時において塗膜に疵が付きやすく、施工時に生じた疵や溶接により脱膜した部分を現地で補修する必要があり、

また、曲げ加工の際に、疵を生じない特殊な加工機が必要となる。さらに、塗膜表面は節やリブにおいても素材表面に比べて滑らかであるため、コンクリートとの付着強度には限界がある。

この他ステンレス鉄筋の採用も考慮されるが、塩害防止に必要なかぶりを確保し、躯体コンクリート表面を遮塩性に優れるパネルをアンカー固定とする方式であるため塩害防止が図られると考え、最安価となった普通異形鉄筋を採用した。

表-7 に普通異形鉄筋とエポキシ樹脂塗装鉄筋及びステンレス鉄筋の経済比較表を示した。

表-7 各種鉄筋比較表

鉄筋比較表					
項目	鉄筋種類	ステンレス異形棒鋼 SUS304鉄筋 ※1	ステンレス異形棒鋼 SUS410L鉄筋 SUS410鉄筋 ※2	エポキシ樹脂塗装鉄筋 ※3	普通(異形)鉄筋 ※4
腐食発生限界塩化物イオン濃度		15kg/m ³	9kg/m ³	1.2kg/m ³	1.2kg/m ³
コンクリートの鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値		0.5mm	0.005cあるいは0.5mmのいずれか小さい値	0.0055c	0.0055c
コンクリートとの付着強度		普通鉄筋と同等	普通鉄筋と同等	普通鉄筋の85%	—
施工時および曲げ加工によるキスの補修		補修は不要	補修は不要	タッチアップによる補修が必要	補修は不要
切断部の端部の補修		補修は不要	補修は不要	タッチアップによる補修が必要	補修は不要
継手		原則として溶接継手や圧接継手は適用不可	原則として溶接継手や圧接継手は適用不可	ガス圧接等可能であるが圧接端部の塗膜除去が必要	ガス圧接等可能
トン当たり単価(円)	D13	1,000,000	450,000	146,000	74,000
	D16	1,000,000	450,000	139,000	72,000
	D19	1,000,000	450,000	134,000	72,000
	D22	1,000,000	450,000	134,000	72,000
	D25	1,000,000	450,000	134,000	72,000
	D29	1,000,000	450,000	130,000	74,000

※1 メーカー見積(SD295B)
 ※2 メーカー見積(SD345)
 ※3 メーカー見積(SD345)留萌地区
 ※4 建設物価H26.11月(SD345)
 ※1.2新日鉄住金ステンレス株式会社

(3) 躯体工コンクリート

塩害及び摩耗さらに凍結融解作用を受けることを考慮してレディーミクストコンクリート(以下“レミコン”と記す)の配合を決定する。レミコンに使用する各種セメント類の塩化物イオン濃度は、現行「コンクリート標準示方書」³⁾により規定されている。塩化物イオン濃度を基準値以下とするには、水セメント比 55%以下とすること、また凍結融解作用を受けることを考慮すると、さらに値を小さくしたレミコンを使用する対策とした。

以上から躯体工は、計算より求めた鉄筋かぶり 12cmを確保し、RC-6S(高炉 B 種～漁港・港湾用)のレミコンを使用する。

なお、工事時期が冬期施工となる場合は、使用セメントの種類(高炉B種)を変更するなど、冬期施工に対応可能となるレミコンについて再度検討を行う必要がある。

表-8 躯体工対策のまとめ

項目	塩害対策		摩耗対策		凍害対策	
	評価	対策	評価	対策	評価	対策
劣化因子の遮断	◎	鉄筋かぶり大	◎	鉄筋かぶり大	◎	鉄筋かぶり大
	○	パネル接着	○	パネル接着	○	パネル接着
劣化速度の抑制	◎	適合コンクリート	○	適合コンクリート	◎	適合コンクリート

(4) 基礎工

基礎杭(鋼管杭)の塩害・摩耗防止については、防食対策を行う。代表的な防食の方法は、被覆防食工法や電気防食工法の 2 通りの方法が考えられ表-9に示す特長がある。

電気防食工法には、流電陽極方式と外部電源方式があるが、流電陽極方式は陽極が消耗し、耐用年数に限度がある。さらに発生電流量に限度があり、防食効果が不十分になる場合がある。これにより比較検討の対象を外部電源方式と被覆防食工法とした。

外部電源方式は、防食電流を供給する方式のため電源装置の点検や、防食電流の継続的なモニタリングなどの維持管理を必要とし、電気代が高価となる。これに比較して被覆防食法は、工場や現地での防食が可能であり、施工及び施工後の維持管理が容易である。

以上から、被覆防食工法を採用した重防食塗装とした鋼管杭は、耐海水性等に優れ接着力も強く、損傷が生じ難いうえに取り扱いやすい。被覆した鋼材を打設する際の打撃にも耐え、長期にわたる耐久性が期待できる。鋼管杭の被覆処理範囲は、全延長(L=6m)被覆を行い、防食材のウレタンエラストマーを厚膜ライニング(2.5mm以上)した製

品を採用した。

表-9 鋼管杭防食工法の比較表

工法 項目	被覆防食工法			電気防食工法		
	耐久性	施工性 維持管理	経済性	耐久性	施工性 維持管理	経済性
工法の特長	・腐食反応に必要な水・酸素等の腐食因子を被覆材で物理的に遮断する。			・腐食電流に打ち勝つ防食電流を外部から流し、鉄のイオン化を防止し、サンドエロージョンのような腐食にも効果がある。		
適用範囲	・一般的には海上大気中～海水中が適用範囲である。			・一般的には干満帯～海底土中が適用範囲である。		
代表的 工法	・塗装工法		◎	◎	◎	
	・一般的な工法で施工性が高い。初期コストが抑えられるが耐久性が低い。	△	◎	◎		
	・重防食工法		◎	◎	○	
	・重防食被覆工法～塗装工法よりは膜厚が厚く初期コストは若干上がるが、耐久性に優れる。	◎	◎	○		
・ペトラタム工法		◎	○	△		
・ペトラタム系防食材をカバーで保護する構造で耐久性に優れる。現地施工となるためコストは割高。	◎	○	△			
・モルタル被覆・鉄筋コンクリート被覆工法		◎	○	△		
・ペトラタム被覆工法とほぼ同等の耐久性があるが、現地施工のためコストは割高になる。	◎	○	△			
耐用期間	・中長期の防食が可能である。			・長期の防食が可能である。		

(5) 遮水工

開渠工が、波浪の影響を受けると予想される河口部・取付部の①ブロックから⑥ブロックまでの全区間を改修するが、基礎地盤の細粒部分の吸出し防止を目的とした鋼矢板を使用した遮水工を計画する。

遮水工の塩害・摩耗対策は、被覆防食法を採用する。防食鋼矢板は、耐海水性等に優れており、長期間の耐久性が期待できる。

防食は、ブラスト処理+タールエポキシ樹脂塗装2回塗り(t=0.4mm以上)とした製品を採用した。

防食の範囲は、鋼矢板の一部分を防食しない場合、防食対策した部位との電位差が生じ、腐食する要因となるため、遮水鋼矢板の両面及び矢板全長(L=4.00m)を被覆する。

4. 開渠工水路部

a) 補修工法の決定

水路部⑦～⑭ブロックの機能診断調査の結果、主な劣化は、ひび割れと目地開きであり、補修により健

全化を図る。「農業水利施設のコンクリート構造物調査・評価・対策工法選定マニュアル」⁸⁾の選定フロー図より、対策工法を表-10のとおり決定した。

表-10 対策工法

補修箇所	対策工法
ひび割れ	注入工法及び充填工法
目地部	目地補修工法
表面補修	表面被覆工法
	(有機系、無機系、柔軟系)

水路部は、河口部に対して劣化度合が少ないといえるが、機能診断調査結果からは、ひび割れは0.2mm～最大3.0mmとなる箇所も報告されていることから、工事着手前まで劣化状況を経過観察するなど、詳細な現地調査を行って再度対策工法を確認し、補修にあたりたい。

5. おわりに

今回報告した開渠工は、平成26年度より工事着手しており、平成27年度に水路改修の本体着手を予定している。開渠工の改修により、河口閉塞防止等の安定的な排水機能の確保及び維持管理費の軽減を図ることを目的とし、着実に工事を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 保全対策センター：農業水利施設ストックマネジメントマニュアル, p. (2007)
- 2) (社)農業土木事業協会：農業水利施設の機能保全の手引き, p.54 (2009)
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編:標準, p.150 (2012)
- 4) 日本コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会, p.62
- 5) 農林水産省：土地改良事業計画設計基準 水路工, p.314 (2001)
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書 下部構造編, p.179 (2012)
- 7) 土木学会：第49回年次学術講演会資料 (1994)
- 8) (社)農業土木事業協会：農業水利施設のコンクリート構造物調査・評価・対策工法選定マニュアル, p.175