

コンクリート水路橋補修工法の適用性評価 ー美瑛地区 第 1 号水路橋 モニタリング調査の報告ー

旭川開発建設部 土地改良情報対策官 ○泉 公生
工藤 幸大
佐藤 尚人

第1号水路橋の上部構造について、平成22年にストックマネジメント技術高度化事業により現地施設状況を詳細調査のうえ、長寿命化に向けた対策として、適用可能な各種補修及び補強工法の試験施工を平成23年10月に実施した。

本報告では、第1号水路橋にて実施した各種補修・補強工法のモニタリング調査に基づき、コンクリート水路橋の補修・補強工法とその診断手法の適用性について報告するものである。

キーワード：鉄筋コンクリート、開水路補修工法、長寿命化

1. はじめに

ストックマネジメント技術高度化事業は、国営土地改良事業によって造成された施設の診断、劣化予測、評価手法の技術向上及び対策工法の有効性や耐久性の検証など、機能の適切な保全に必要な技術を現地での実践を通じて向上させ、ストックマネジメント技術の高度化を図ることを目的としている。

本報告は、平成24年から令和4年にかけてストックマネジメント技術高度化事業で実施した、美瑛地区第1号水路橋の各種補修・補強工法の有効性や耐久性及びその診断手法の適用性について報告するものである。

2. 対象施設の概要

対象施設を整備した国営開墾建設事業「美瑛地区」は、北海道上川総合振興局管内の中部である美瑛町の南部丘陵地に位置する。

地区の基幹水利施設である第1号幹線用水路は、昭和31年から昭和43年にかけて築造され、昭和44年の供用開始以降、元来無水地帯であった開拓地4,078haに対して水田用水と畑地用水を送水し、現在まで利用されている。

対象施設である第1号水路橋は、第1号幹線用水路の一部であり、供用開始以降、鉄筋コンクリート水路の標準耐用年数40年以上を経過する中でコンクリートの凍害や摩耗による表面劣化が著しく、コンクリート強度の低下、中性化の進行、鉄筋露出による鉄筋腐食の進行、漏水の発生

等が進行している。(表.1)

表.1 第1号水路橋の施設諸元

前歴事業	国営美瑛地区 開墾建設事業
名 称	第1号幹線用水路 第1号水路橋
構造・形式	上部工：RC-U型/切梁方式/3径間連続梁 下部工：RC直接基礎
規 模	上部工：B1. 40m×H0. 70m×L40. 5m t1=t2=t3=0. 20m 切梁 H0. 15m×B0. 30m @3. 4m 下部工：橋台2基、橋脚2基
築造年	昭和43年
供用年	昭和44年
経 過	42年(試験施工年まで)
施工区間	SP3, 997. 00～4, 043. 50 (L=46. 5m=水路橋 L=40. 5m+上下流取付水路 3. 0m×2)



図.1 位置図

3. 対象施設の劣化状況

第1号水路橋は、林間内にあって高湿潤となる環境条件から凍害を受けやすく、コンクリートの劣化が進行していた。外力による構造ひび割れは見られないものの、鉄筋腐食や乾燥収縮によるひび割れは見られ、劣化過程は補強・補修等の対策が必要な進展期～劣化期（鋼材腐食が発生し始め、コンクリートの耐荷力の低下が発生する時期）と診断され、構造性能への影響が懸念された。劣化状況は以下のとおりであった。

- ・ひび割れ、エフロレッセンス、鉄筋腐食、漏水など、コンクリートの変状が発生していた。
- ・一部区間で実施された断面修復工の浮きからの水が浸透し、コンクリートの劣化作用が促進されていた。
- ・側壁（主構造：梁）と底版の劣化度に差異があり、特に底版の劣化の進行が著しく、全体の施設健全度はS-2（補強及び補修、至急劣化対策）の段階であった。
- ・構造耐荷性への影響は、スパン、部位毎に異なるため、複数の補修・補強工法（以下、対策工法）の試験施工が可能な状態であった。

4. 対策工法の概要

積雪寒冷地での落水後から積雪前までの短期間での施工という条件下で、部材間の構造性能低下の程度のばらつきに対して工事施工が可能で、工事途中段階での施工範囲、施工方法、工法組み合わせ、補助工法の導入等の変更が可能な対策工法を選定した。（表.2）

5. 対策工法のモニタリング調査

選定した対策工法の耐用年数は、標準では10年～40年と幅があり、技術指針等での記載年数や個別の工法での実績試験にも差があり、現時点では耐用年数は確定できない。

このため、対策実施直後（完了検査時＝初期点検）を基準に一定期間経過後の各工法の有効性及び耐久性を検証するため、10年間を目安に劣化程度の把握と効率的な再補修方法の検討及び調査方法の評価を目的とするモニタリング調査を計画した。

(1) モニタリング調査の項目と経緯

モニタリング調査は、平成22年に対策前のコンクリートの状態を把握するための調査を行い、平成23年の対策実施直後の初期値確認以降、平成24～26年（対策実施後1～3年目）、平成28年（5年目）、令和4年（10年目）と10カ年にわたって調査を継続してきている。

各年の調査実施項目は、次表（表.3）のとおりである。

調査年	近接目視	現地測量	コンクリート強度	付着強度	剥離調査	ひび割れ剥離空洞化調査	摩耗量調査	コア抜きによる室内試験
H22年	×	×	×	×	—	×	×	○
H23年	×	×	×	×	×	○	○	×
H24年	○	○	○	○	○	○	○	×
H25年	○	○	○	○	○	○	○	×
H26年	○	○	○	○	○	○	○	×
H28年	○	○	○	○	×	○	○	○
R 4年	○	○	○	○	○	○	○	○

表.3 モニタリング調査項目

バレル		S1			S2						S3					
延長 (m)		13.50			上流 6.30			下流 7.20			上流 4.50			下流 9.00		
側壁	内面	R-1	B	C	R-1	B	C	F-2	B	C	F-2	B	C	F-2	B	C
	外面	R-3			R-3			R-3			R-3			R-3		
	天端	R-1			R-1			R-1			R-1			R-1		
底版		R-1			R-1			R-1			F-2			F-2		
		R-2			R-2			F-2			R-2			J		
		F-1			R-3			R-2			B			B		
		B			B			B			R-3					
		C			C			R-3			J					
梁		B C														
橋脚		R-3 C														
F-1	CFRP工法	主桁引張鉄筋の曲げ耐力の回復のため、補強加重の増加が少ないCFRPプレート（炭素繊維強化プラスチック板）を補強材として貼り付ける。たわみの抑制等力学的安全性の有効性を検証する。														
F-2	FRPグリッド工法	側壁内面横断方向の曲げ耐力の回復のため、FRPグリッド（格子状の繊維強化プラスチックシート）を固定し、低弾性PCM（ポリマーセメントモルタル）で母材と一体化し補強する。変形抵抗性、対凍害性、対流水摩耗性等の耐久性、水密性、縦断方向変形追従性を検証する。														
R-1	靱性モルタルライニング工法	凍害、摩耗等の劣化が進展する部位に対し、靱性モルタルと被膜養生材により表面を被覆し補修する。たわみ性梁構造への縦断方向変形追従性と材料面からの対凍害性、対流水摩耗性等の耐久性、水分浸透の防止性能を検証する。														
R-2	躯体密実化工法	凍害によるアルカリ成分の溶出低下に対し、無機系コンクリートひび割れ補修材を注入し、母材性能の靱性及び密実性の回復を図る。引張強度の向上、鉄筋腐食進行の防止性能、CO ₂ 、水分阻止機能向上を検証する。														
R-3	表面含浸工法	ケイ酸リチウム系の表面含浸材を塗布することで中性化速度を抑制し、構造耐力の維持を図る。耐凍結融解性、耐中性化性、防水性、強度回復などの機能を検証する。														
B	ひび割れ補修工	ひび割れに対し、個々に断面修復材（高強度セメントモルタル）等による補修を行う。														
C	断面補修工	剥離、剥落、浮き、骨材露出、鉄筋露出に対し、断面修復材（高強度セメントモルタル）等による補修を行う。														
J	目地工法	既存の目地を厚さ30mm分除去し、高伸縮性及高接着性を兼ね備えた弾性エポキシ樹脂により施工し直す。														

表.2 選定工法一覧

(2) モニタリング調査結果の概要

a) 近接目視（近接目視調査及び外面近接目視調査）

近接目視調査は、ひび割れ（長さ・深さ）、浮き等の劣化、変形、歪み、欠損、目地の変状等について、クラックスケールやコンベックス等の簡易な器具で定量測定するとともに、目視・触診、打診等による確認を行い、変状を把握してスケッチ図を作成した。

なお、近接目視が困難な第1号水路橋の底版下面は、望遠双眼鏡を用いて、漏水、変色、湿り、エフロレッセンス、錆汁等の発生の有無について確認を行った。

近接目視調査の結果は、全体的に微少なひび割れや浮きがみられ、特にスパン2（S2）及びスパン3（S3）の韌性モルタル補修天端部では浮きの進行が顕著となっている。

b) コンクリート強度（コンクリート強度推定試験）

コンクリート強度推定試験は、リバウンドハンマーによりコンクリート表面の圧縮強度を推定する。

調査地点は、各スパン及び下部工を合わせて30地点とした。

コンクリート強度推定試験の結果は、平成24年から令和4年にかけて各年30点での調査を行った中で、設計基準強度（21N/mm²）を若干下回ったのは5点のみであり、調査期間内での平均も33N/mm²と高い値を示しており現時点で問題はない。但し、経年的な測定値は低下傾向が伺えるため、表面被覆の影響を考慮すると対策工法とコンクリート躯体との間の浮きもしくはコンクリート強度自体の低下の可能性がある。

c) 現地確認調査及び簡易計測

現地測量は、通水中と通水後の相対的な変状を把握するため、左右天端2測線、底版上面部3測線、底版下面部5測線の計13断面について縦断測量を行った。

現地測量の結果は、平成24年から令和4年にかけて、大きな計測値の変化や経年的な計測値の変化（沈下・たわみ・歪み）は確認されていない。

d) ひび割れ・剥離・空洞化調査（機械インピーダンス法）

衝撃加速度計が内蔵されているコンクリートテスターにより水路橋躯体の内面×外面を30cm×50cm間隔で打撃して圧縮強度を測定し、圧縮強度の指標値（STR値）の分布を色の濃淡（青色→黄色）で面的に図示して構造物の物性値や形状、欠陥の有無などの確認を行った。（図.2）

分析は、圧縮強度を示すSTR値、表面劣化度合いを示すIndex値、剥離浮きを示すSTAT値に区分して行う。

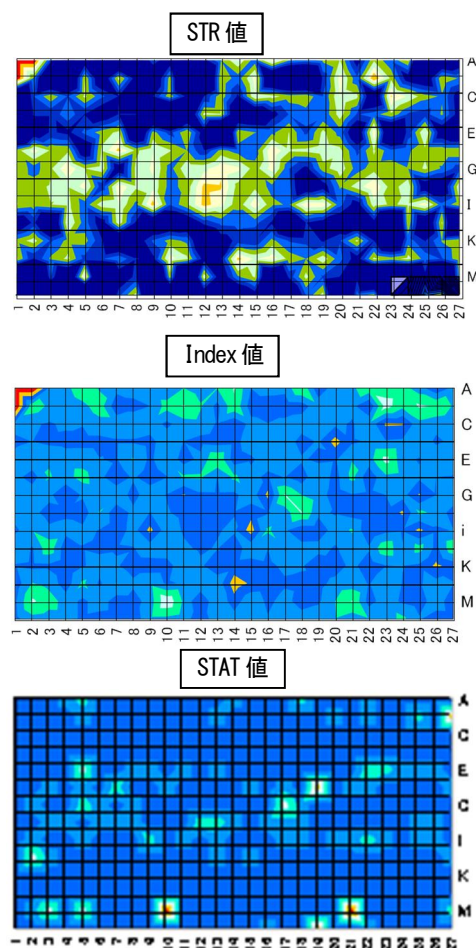


図.2 韌性モルタル工法での解析事例（平成26年）

コンクリート強度（STR値）は径間全体及び側壁天端で低下（淡色部）している。表面劣化を示すIndex値と浮き・剥離を示すSTAT値を見ると、淡色部が少なく色も薄いことから際だった表面劣化や浮き・剥離は無いものと想定される。

理由としては、STR値の経年変化に着目すると、施工後11年の経過の中で圧縮強度が高い値を示す青色から低い値を示す黄色へ移行してその範囲は拡大し、表面被覆材の材質的劣化もしくは浮きが進行している範囲との相関性が高いためである。（表.4）

e) 剥離・空洞化調査（赤外線法）

赤外線法での調査結果と近接目視による劣化場所は、ほぼ合致していることから、コンクリート表面の劣化が発生しているものと判断できる。（図.3）

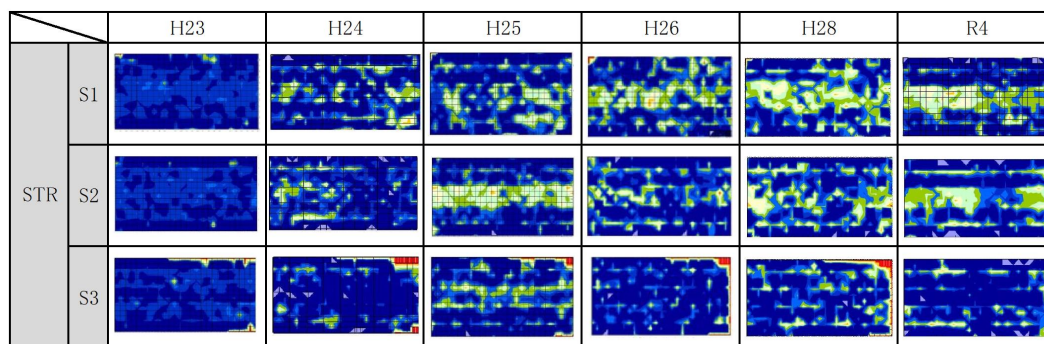


表. 4 剥離・空洞化の変遷

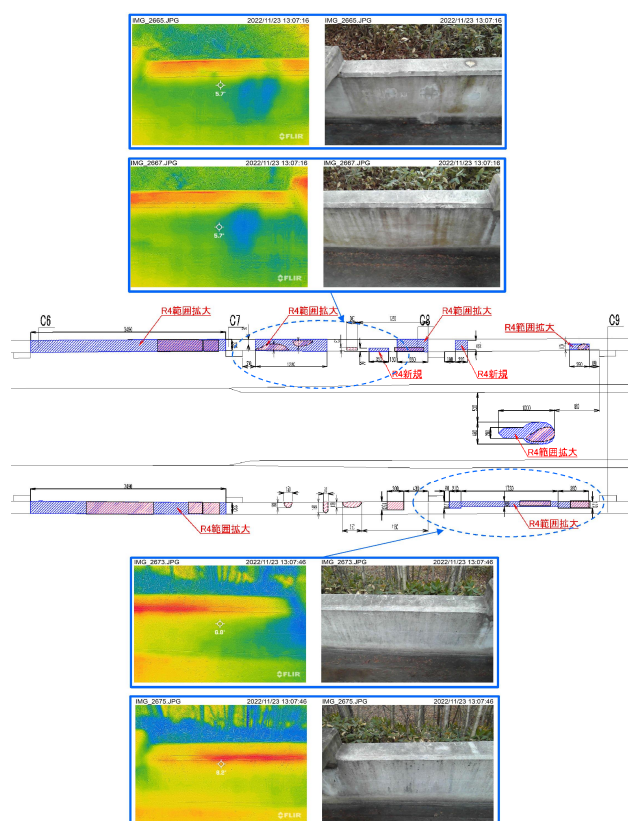


図. 3 スパン2側壁天端の赤外線サーモグラフィでの撮影

f) 付着強度（建研式引張試験機による付着強度試験）

付着強度試験は、構造物のカッティング及び研磨の後に建研式引張試験機による引張り試験を行い、表面被覆工及び下地付近の付着特性（強度）を測定した。調査地点は、各スパン及び下部工を合わせて30地点とした。

H24年、H28年、R4年の調査は全ての個所で「合格」であったのに対し、H26年調査では4箇所、H25年調査では全31箇所中17箇所（割合55%）が「NG」と高い割合であった。

原因としては、コンクリート表面の温度が低かった事や湿潤状態であったことに起因する接着剤の硬化不良が考えられる。

H28年、R4年の破断状況は、母材及び基材の何れかで強度も $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であり、劣化は無いものと判断できる。

g) 摩耗量調査（プレート法）

目印となるSUS製の板（ $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 、 $t=3\text{mm}$ ）を水路橋側壁及び底版に計4か所設置し、ガイド鋼尺をセットして対角線上4点（3回計測の平均値）ですり減り摩耗量の計測を行った。なお、プレートはH28年に新たに設置しており、これを初期値としR4年が2回目の調査となる。

単位(mm)				
部位	工法名	①H28(秋)	②R4(秋)	摩耗量 (①-②)
S1底版	韌性モルタルライニング工法 $t=10\text{mm}$	3.25	3.78	-0.53
S1側壁	韌性モルタルライニング工法 $t=10\text{mm}$	3.41	3.87	-0.46
S2底版	韌性モルタルライニング工法 $t=10\text{mm}$	3.35	3.95	-0.60
S3側壁	RCM吹付け工法 $t=14\text{mm}$	4.10	4.52	-0.42

表 5 摩耗量測定結果

6年間の摩耗量は韌性モルタルライニング工法で、 $0.46 \sim 0.60$ （年平均 $0.087\text{mm}/\text{年}$ ）、RCM吹付で 0.42mm （年平均 $0.070\text{mm}/\text{年}$ ）と微小であり、各工法とも耐摩耗性を有していると評価できる。（表. 5）

h) 室内試験

鉄筋探索後にコンクリートコア8試料を採取し、室内試験にて圧縮強度試験、静弾性係数試験、中性化深さ試験、超音波伝播速度測定を行う。

圧縮強度試験結果はすべての供試体で設計基準強度（ $21\text{N}/\text{mm}^2$ ）を上回り、凍害により伝播速度が遅くなる超音波についても特に問題となる数値傾向は確認されなかった。なお、静弾性係数と中性化深さで微細なひび割れや施工時の劣化コンクリートの残置などによるものと考えられる過少な値を示す供試体があるものの、強度低下は発生していないことから、躯体コンクリートの状態は特に問題はないと考えられる。（表. 6）

6. 対策工法とその診断手法の適用性

(1) 対策工法の適用有効性及び耐久性

第1号水路橋で実施された対策工法のモニタリング結果から、当該工法の選定目的を踏まえてその有効性及び耐久性について評価する。

経 間	部 位			工 法 名	室内試験											
					圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kn/mm ²)			中性化残り (mm)			超音波速度(μ/s) ※最小値で表示		
					基準値:21.0N/mm ² 以上			評価基準参照			評価基準参照			評価基準参照		
					H122 (改修前)	H128	R4	H122 (改修前)	H128	R4	H122 (改修前)	H128	R4	H122 (改修前)	H128	R4
S1 (C-1～5)	内面	L側 (天端含む)	気中	韌性モルタルライニング工法	35.4	36.8	35.7	22.9	20.4	20.0	30.7	32.2	50.9	2.72	3.85	3.79
		R側 (天端含む)	水中		30.1	33.4	37.6	23.8	13.7	27.3	29.1	39.1	63.0	2.72	3.68	3.74
S2 (C-5～9)	内面	L側 (天端含む)	気中	【S2起点～中間地点】: 韌性モルタル工法 【S2中間地点～終点】: FRPグリット工法 + 韌性モルタル工法(天端)		36.0	34.0		27.0	16.8		4.3	48.2		3.85	3.69
		R側 (天端含む)	水中	【S2起点～中間地点】: 韌性モルタル工法 【S3中間地点～終点】: FRPグリット工法 + 韌性モルタル工法(天端)	31.8	32.5	39.1	25.8	5.9	29.0	-24.1	29.0	26.8	2.68	3.69	3.64
	橋脚部					28.0	23.1	28.4	22.4	19.1	23.1	5.4	20.9	13.2	2.69	3.48
S3 (C-9～13)	外面	L側	気中	表面含浸工法	28.2	34.5	46.1	21.7	26.1	27.1	28.7	33.7	35.1	2.57	3.90	3.45
		R側	水中	表面含浸工法	27.7	30.1	38.5	30.5	19.4	20.0	2.6	25.1	46.8	2.76	4.06	3.77

表. 6 室内試験結果

実施された各対策工法は、11年を経過する中で大きな変状や強度低下は発生せず要求性能を満たしており、現時点ではその有効性及び耐久性については問題がない。特に、劣悪な環境条件を考慮すれば、現時点では各工法とも汎用性が高いものと判断される。ただし、各種強度等の低下傾向も一部確認されていることから、今後の劣化傾向の確認が必要である。

a) 韌性モルタルライニング工法（補修工法）

現時点では変形はなく、各種強度は基準値以上、摩耗量も0.07～0.10mm/6ヵ年と特に問題はなく、要求性能は満たされており有効性は高い。ただし、耐久性においては、経年的な浮きの発生と拡大が懸念されている。

b) 表面含浸工（ケイ酸リチウム系、補修工法）

各種強度は基準値以上で特に問題はなく、要求性能は満たされており有効性は高い。ただし、耐久性においては、経年的な浮きの発生と拡大が懸念される。

c) 躯体密実化注入工法（補修工法）

表面圧縮強度、各室内試験結果等から躯体コンクリートの強度低下に結びつく兆候は今のところ確認されず、要求性能は満たされており有効性及び耐久性は高い。

d) eプレート工法（補強工法）

対策後11ヵ年が経過したが、現地測量や断面計測、スラント傾斜計測等の結果から側壁の変形は確認されておらず、要求性能は満たされており有効性及び耐久性は高い。

e) FPCMグリッド工法+PCM吹付工法（補強工法）

対策後11ヵ年が経過したが、現地測量や断面計測、スラント傾斜計測等の結果から側壁の変形は確認されていない。また、摩耗やコンクリート強度についても劣化は確認されず、要求性能は満たされており有効性及び耐久性は高い。

f) 断面修復工法（補強工法）

摩耗の状態、コンクリート強度、付着強度等の測定結果から劣化は確認されず、要求性能は満たされており有効性及び耐久性は高い。

(2) 診断手法の適用性

第1号水路橋で実施された対策工法のモニタリング

結果から、モニタリング調査に用いた調査方法の適用性について評価する。

診断に用いた各調査手法は、強度把握、劣化変状の発生を把握することについての適用性に問題はない。

a) 近接目視調査

対策工法の外観的変状（浮き、ひび割れ、欠損、変形、歪み、漏水、変色、湿り、エフロレッセンス、錆汁等）を調査し、他の調査手法と併用することで、対策工法の劣化進行の状態の確認と要因の推定がしやすくなる等、基本となる調査であり不可欠である。

b) 現地測量

水路橋の対策工法には、たわみや横断方向の変形の抑制対策として選定された補強工法（eプレート工法、FRPグリット工法+PCM吹付工法）が含まれていることから、現地測量によって精度の高いたわみや変形を把握するのに必要な調査である。

c) コンクリート強度（リバウンドハンマー法）

リバウンドハンマーによる圧縮強度測定は、補修材表面強度の測定と確認のみであり、内部劣化等を総合的に把握するためには、付着強度試験、ひび割れ・剥離・空洞化調査、中性化試験等の他診断手法との併用が必要となる。なお、水路橋躯体のコンクリートの強度の確認には、コア抜きによる圧縮強度試験がより正確となる。

しかし、水路躯体に孔を空ける破壊試験のため、継続的な試験の実施は弱点部となり得る。

d) 付着強度（建研式引張試験機による付着強度試験）

対策工法とコンクリート躯体との間の付着性を確認することで、浮きや剥離等の変状発生との相対的な因果関係を把握することが可能となる。しかし、水路躯体のカッティングや研磨を行う破壊試験のため、継続的な試験の実施は弱点部となり得る。

e) 剥離調査（赤外線法）

平成24年から平成26年までの調査では、浮き部と健全部に明瞭な差異が確認することができなかったが、R4年調査では最新の赤外線サーモグラフィを使用したことで、浮き部と健全部に明瞭な差異が確認できた。近接目視調査と併せて実施することで、浮き部範囲の精度向上が図れる。

f) ひび割れ・剥離・空洞化調査（機械インペダンス法）

圧縮強度を示すSTR値、表面劣化度合いを示すIndex値、剥離浮きを示すSTAT値に区分し、躯体コンクリートの強度低下と各指標値との相関性を利用することで、圧縮強度の低下と、躯体コンクリートの強度低下、表面被覆材の材質的劣化もしくは浮きの発生の状況を確認することが可能である。また、STR値の分布状態の図化により、表面被覆材の劣化や浮きの発生の経年変化を視覚的に整理することが出来るなど、その適用性は高い。

但し、近年は測定精度が改善（旧型はV2、現行モデルはV4）されたコンクリートテスターが普及しており、測定精度が向上したことで表面の影響を受けにくくなり、より内部の状態を測定出来るようになっている。なお、旧モデルはデリケートな測定器で、表面の影響を過度に受けてしまう傾向にあったものを改善したのが現行モデルのV4である。これにより、過年度より良好な状態を示す結果となる場合があるので、注意が必要である。

なお、機器の取扱説明書にもIndex・STAT値は参考値として取り扱う旨の記載があることから、今後はSTR値のみで評価することも視野に入れる必要がある。

g) 摩耗量調査（プレート法）

現時点ですり減り摩耗量の計測を簡便かつ正確に行う手法としては、水路に設置したSUS製の板のすり減り摩耗量を計測するプレート法以外にはない。ただし、測定方法によっては測定誤差の影響が大きく発生する場合があります、水路に設置したプレートの剥がれ等のトラブルの発生も考えられることから、注意が必要である。

h) コア抜きによる室内試験

採取コアにより圧縮強度試験、静弾性係数試験、中性化深さ試験、超音波伝播速度測定を実施したが、それぞれについて対策工法と水路躯体コンクリートとの関連やそれぞれの劣化度合い、水路躯体のコンクリート強度等を確認することが可能であり、その適用性は高い。但し、付着試験と同様、破壊試験のため、継続的な試験の実施は弱点部となり得る。

(3) まとめ

対策工法については、一部の補修材の浮きや強度低下の傾向が見受けられるが、構造機能及び水利機能において問題となるような状況には至っていないことから各工法とも要求性能を満足した工法と評価できる。

また、診断に用いた各種調査手法についても、対策工法を評価するに当たり、十分適用可能な診断手法と言える。