

論文 コンクリート橋梁の劣化対策に適用した防水工の追跡調査と考察

高山 充直*1・清水 達哉*2・池田 泰博*1・松田 芳範*3

要旨： ASR や凍害および鉄筋の腐食など、コンクリート構造物の劣化には水の作用が深く関わる。この対策として、床版や主桁などに様々な防水工を施す対策が行われているが、これら対策工に関する長期耐久性や対策効果について整理された知見は少ない。本調査では、それらの各種防水工について実態調査を実施し、長期耐久性を評価した。その結果、各種防水工の長期耐久性や防水効果には、防水塗膜の膜厚や主材を保護する上塗材の有無のほか、防水塗膜の硬軟性などが影響することを確認した。

キーワード： 水の作用, 防水工, ASR, 凍害, 長期耐久性

1. はじめに

コンクリート構造物に生じる塩害、凍害、アルカリシリカ反応（以下、ASR）などの劣化現象には、水の作用が影響している。そのため、コンクリート構造物を長期間、健全な状態で維持するためには、水切りや防水工の施工、排水方法の改良など水の動きに着目したメンテナンスの実施が重要である¹⁾。劣化したコンクリート構造物の耐久性の回復や向上を目的とした補修工法には、いくつかの種類があり、水をコンクリート表面に出来るだけ接触しないようにすること（止水処理）が基本的な対策工となる²⁾。なかでも、防水工は外部からコンクリート中への水の浸入を直接的に抑制することができる有効な対策工である。本稿では、樹脂材料を主成分とした液体状またはシート状の塗膜材料をコンクリート表面に塗布あるいは、貼り付けることで防水膜を形成し、雨水などをコンクリート中に浸透させない止水処理を防水工と称する。一般的にコンクリート構造物は長期にわたり風雨に曝らされる環境で供用されるため、それぞれ環境や使用条件などが異なる。そのため、防水性は勿論、耐候性や付着性およびひび割れ追従性など現場が要求する性能に対応した多くの防水工が開発され実用されている。しかし、それらの中には、想定よりも早期に要求性能が損なわれている防水工が存在する。したがって、コンクリート構造物の劣化原因や使用条件に応じた防水工の選定が必要と考えるが、それらを整理した知見は少ない。そこで、コンクリート橋梁における劣化対策として適用された各種防水工について実態調査を実施した。

2. 調査概要

最初に、机上調査として、コンクリート橋梁において、過去にコンクリートの劣化対策として施工された防水工の記録を調査し、目的や施工内容を整理する。次に、現

地調査を実施し、現在の防水塗膜の実態から損傷程度を分類する。さらに、防水性能が低下した防水塗膜について原因を分析し、今後の防水工を適用するための知見として整理する。

2.1 机上調査

(1) 調査対象の抽出

コンクリート橋梁に生じる劣化現象のうち、過去に防水工が適用されたものとしては、ASR によるひび割れ、凍害によるスケーリングやポップアウト、部材の収縮ひび割れなどが挙げられる。これらについて、過去の施工記録を調査して対象を抽出した。施工記録から、対策前のコンクリートの劣化状況と対策に至った背景および具体的な対策工の施工内容を把握した。

(2) 各種防水工の概要

補修工事を行う際には、環境作用や施工性および経済性などの諸条件を踏まえ、その当時最も確からしいと判断された補修材料や工法が適用されている。これは、防水工においても同様と考える。ここで、修繕工事で用いられる防水工は、コンクリート面との接着剤（以下、プライマー）と中塗材（主材）および上塗材からなる防水塗膜（以下、防水塗膜）から構成されているものとする。前述の施工記録から抽出された防水塗膜について、施工当時の技術資料の調査を行い、適用された防水塗膜の特徴や使用条件などを確認した。

2.2 既存防水工の現場実態調査

(1) 調査方法および評価項目

防水塗膜は、外観で状態の把握が可能であることから、目視を主体とした調査を実施した。防水塗膜の防水性能を低下させる損傷としては、塗膜の消失、ひび割れ、浮き・剥がれ、破れが考えられる。本調査の評価項目は、耐候性、ひび割れ追従性、付着性・接着性、耐損傷性の4項目とした。

*1 東日本旅客鉄道㈱ 構造技術センター（正会員）

*2 東日本旅客鉄道㈱ 大宮土木設備技術センター（正会員）

*3 東日本旅客鉄道㈱ 構造技術センター 工博(正会員)

(2) 評価方法

図-1 に防水塗膜の損傷分類例を示す。外観目視調査では、防水塗膜の損傷状態を定量的に評価することが難しい。そのため、前述の4項目について着眼点を整理した。健全度は「I：問題なし」、「II：部分的な損傷であり防水性能への影響は限定的」、「III：連続的な損傷であり防水性能が損なわれている」の3段階で評価することとした。ここで、「問題なし」とは、防水塗膜上面の雨水等が防水塗膜下のコンクリート表面まで到達しない状態とする。「部分的な損傷であり防水性能への影響は限定的」とは、防水塗膜に断続的な損傷があり、その部分についてはコンクリート面への水分浸透を許している可能性があるが局所的であり、防水工を施した部材の大部分には影響がない状態とする。「連続的な損傷であり防水性能が損なわれている」とは、防水塗膜の損傷が連続的に生じており、コンクリート面までの水分浸透が広範囲に生じている状態とする。なお、損傷分類のうち、耐候性の「上塗材の部分消失」と耐損傷性の「部分的な外傷」など区別しにくい損傷がある。「上塗材の部分消失」は、上塗材の塗膜が部分的に消失して中塗材が露出している状態を指す。「部分的な外傷」は、塗膜の全厚で外力による傷や破れがある損傷とした。防水効果の有無は、母材のコンクリート面が露出するほど防水塗膜が消失している場合や防水塗膜に割れ・剥がれなどが生じ、母材コンクリートの間に水や空気が回っているような状態を防水効果がないものとして判断した。防水塗膜の評価は、著者らの目視による主観的な評価とし、防水塗膜の特徴や使用時の課題を整理した。

3. 調査結果

3.1 対象とする防水工

コンクリート中への水の浸透抑止に着目した防水工として、これまでの施工記録が取得可能な防水工から調査対象を抽出した。表-1 に調査対象箇所を示す。表のとおり、調査を行った防水工は防水塗膜種別毎に、ポリウレタ樹脂系3工法(5橋梁)、ゴムアスファルト系2工法(6橋梁)、アクリルゴム系1工法(1橋梁)、弾性エポキシ樹脂系2工法(3橋梁)、粘着シート系1工法(6橋梁)の計21ケースとした。対象とした橋梁は、A橋梁からP橋梁までの16橋梁であるが、同じ橋梁で別の防水工を施しているケースがあることから、表-1内では、重複した対策橋梁を枝番で示している。その他、対策工の経年、目的、部位のほか、上塗材の有無と防水工の環境暴露条件を示した。

3.2 既存防水工の実態調査

以下に各防水工の長期耐久性とコンクリート劣化対策の効果について、調査結果を述べる。






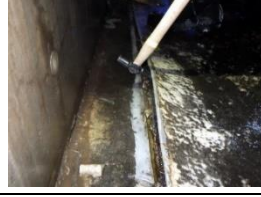


	
健全度：II (上塗材の部分消失)	健全度：III (塗膜の全面消失)
耐候性	
	
健全度：II (部分ひび割れ)	健全度：III (全面ひび割れ)
ひび割れ追従性	
	
健全度：II (角部の部分浮き)	健全度：III (端部の全面浮き)
付着性・接着性	
	
健全度：II (部分的な外傷)	健全度：II (部分的な外傷)
耐損傷性	

図-1 防水塗膜の損傷分類例



図-2 ポリウレタ樹脂系塗膜の損傷
(塗膜の消失とコンクリートのひび割れ)

(1) ポリウレア樹脂系

ポリウレア樹脂系防水の調査対象は、3 工法 5 橋梁である。ASR 対策のほか、吸水膨張が著しい骨材を含むコンクリート橋梁において、骨材のポップアウト対策として使用されている。本調査対象のうち最も実績が多いのは PS 工法である。PS 工法を使用した A 橋梁では、図-2 のように、主桁上面の防水塗膜がほぼ消失し、コンクリート面には ASR によると思われるひび割れが生じていた。また、主桁側面では、ASR により生じたと思われるひび割れは現在も確認することができた。一方、B、C 橋梁で適用された MU 工法や SW 工法では防水塗膜の厚さは 2mm 以上であり、現在も防水塗膜は残っている。しかし、端部で防水塗膜が剥がれ、母材との付着面に雨水が浸透していた。防水塗膜は残っているが、防水機能は損なわれている状態であった。E 橋梁は、消雪のための散水区間に位置する橋梁で、骨材のポップアウトが顕著に生じていたことから、PS 工法による防水工が施された。主桁上面に部分的な防水塗膜の剥がれが生じていたが、対策から 24 年が経過した現在でも防水塗膜が残っている範囲が多く、骨材の異常な膨張は生じていない。



図-3 ゴムアスファルト系塗膜の状況
(桁下面のひび割れと析出物の状況)

(2) ゴムアスファルト系

ゴムアスファルト系防水の調査対象は 2 工法 6 橋梁である。主に凍害環境における道床バラスト下の床版の防水に適用されている。施工方法は、道床バラストを一時除去して床版を露出させ、防水塗膜を塗布する施工方法 (SD-A) と、道床バラストはそのままバラスト上から

表-1 防水工の調査箇所一覧

No.	防水塗膜の種別	工法種別	橋梁名	対策経年	対策目的	対策部位	上塗材の有無	環境暴露条件
1	ポリウレア樹脂系	PS	A	23	ASR	主桁	無し	屋外大気環境
2		MU	B-1	20	骨材	床版	有	屋外大気環境
3		SW	C	13	ASR	床版	有	屋外大気環境
4		PS	D-1	20	ASR	主桁	無し	屋外大気環境
5		PS	E	24	骨材	主桁	無し	屋外大気環境
6	ゴムアスファルト系	SD-B	F	24	凍害	床版	無し	道床バラスト下
7		SD-A	B-2	20	骨材	床版	無し	箱桁内部
8		SD-A	G	6	凍害	床版	無し	道床バラスト下
9		SD-B	H	35	凍害	床版	無し	道床バラスト下
10		SD-B	I	35	凍害	床版	無し	道床バラスト下
11		SD-B	J	35	凍害	床版	無し	道床バラスト下
12	アクリルゴム系	AC	K	23	ASR	主桁	有	屋外大気環境
13	弾性エポキシ樹脂系	DP	L-1	2	ASR	主桁	不明	屋外大気環境
14		EP	B-3	11	凍害	高欄	有	屋外大気環境
15		EP	M	27	防水	主桁	有	屋外大気環境
16	粘着シート系	RS	L-2	16	ASR	主桁	有	屋外大気環境
17		RS	D-2	3	ASR	主桁	有	屋外大気環境
18		RS	N	13	防水	床板	有	屋外大気環境
19		RS	O	8	防水	床板	有	屋外大気環境
20		RS	B-4	3	凍害	高欄	有	屋外大気環境
21		RS	P	10	ASR	橋脚	有	屋外大気環境

床版上面に向けて防水塗膜を充填する施工方法(SD-B)がある。G 橋梁では、凍害劣化により張り出し床版を中心に断面欠損やひび割れが生じたことから、SD-A 工法による防水工を施しているが、6 年が経過した現在も張り出し床版下面や桁下面にひび割れの発生や漏水および析出物などの再発は確認されていない。H 橋梁では、同様の凍害による劣化対策として SD-B 工法による防水工を施しているが、図-3 のように主桁下面に白色析出物の滲出を伴うひび割れが生じており防水効果は認められなかった。F 橋梁においても SD-B 工法による施工を行ったが、桁下面のひび割れから析出物があるなど、防水効果は認められない。一方、紫外線の影響を受けない箱桁内部の下床版の上面に SD-A 工法を施した B-2 橋梁は、施工経年 20 年であるが防水塗膜の損傷は生じていなかった。

(3) アクリルゴム系

アクリルゴム系防水の調査対象は 1 工法 1 橋梁である。対象の K 橋梁は、1976 年に建設された PC 下路桁である。施工後の初期から主桁にひび割れが発生しており、現地調査と採取コアによる試験から、ASR の進行が懸念されていた。そのため、エポキシ樹脂系接着材のひび割れ注入やシラン系含浸材の塗布による防水工などの対策を施しているが効果が認められなかった。記録では、1999 年にひび割れ追従性があるとされていたアクリルゴム系の防水工が実施されている。本調査は防水工の施工から 23 年が経過した時点で実施した。防水塗膜の一部に浮きや主桁の打ち継ぎ界面にひび割れが生じていたが、塗膜の中塗り材は母材に付着しており、ASR によるひび割れにより防水工にひび割れが生じている様子も確認されなかった。塗膜の膜厚は 2mm 以上であり、現在も防水工として機能している範囲が多いと考えられた。一方、図-4 のように、桁端部の打ち継ぎ界面では、幅 1 mm 程度のひび割れが生じていた。

(4) 弾性エポキシ樹脂系

弾性エポキシ樹脂系防水工の調査対象は 2 工法 3 橋梁である。L 橋梁では、ASR によるひび割れが生じた PC 斜版桁の斜材と主桁に、B 橋梁では、凍害により劣化した RC 高欄に、M 橋梁では、PC 下路桁の主桁、横桁の防水工としてそれぞれ適用されている。このうち L 橋梁は、施工後 2 年で図-5 のようにひび割れが発生し、防水工の性能を発揮することが出来なかった。M 橋梁は、防水工の施工から 27 年が経過している。PC 下路桁の主桁上面は外観で異常は認められなかったが、横桁上面では防水塗膜の消失が確認された。当時の施工記録によれば、横桁上面には上塗材が施されていなかった。また、主桁では、中塗材の露出や劣化は認められないが、上塗材のチョーキングや打ち継ぎ部のひび割れが生じていた。



図-4 アクリルゴム系塗膜の損傷
(桁下面のひび割れと析出物の状況)



図-5 弾性エポキシ樹脂系塗膜の損傷
(桁下面のひび割れと析出物の状況)

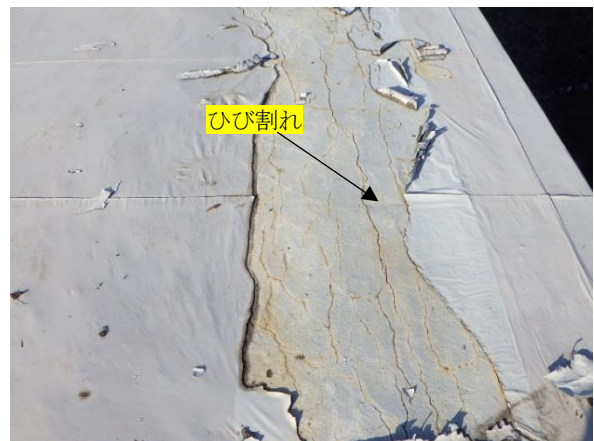


図-6 粘着シート系塗膜の損傷
(塗膜の外傷とコンクリートのひび割れ)

(5) 粘着シート系

粘着シート系防水工の調査対象は 1 工法 6 橋梁である。そのうち 4 橋は ASR 対策として適用され、2 橋梁は防水対策として適用されている。前述した L 橋梁では、ASR 対策として適用した弾性エポキシ樹脂の補修として粘

着シートを適用した。施工から16年が経過するが、ASRによる粘着シートの変化などは確認されない。一方で、軟質な材料であるため、図-6のような鉄道の保守作業に伴う裂けや剥がれといった外傷が生じていた。コンクリート面には、ASRによるものと思われるひび割れが生じていた。粘着シート系塗膜が剥がれた箇所の床版裏面では、当該の部分だけコンクリートにひび割れが生じていた。防水塗膜の部分的な外傷箇所には、同じ粘着シートが切り貼りされていたが、剥がれているものはなかった。N橋梁は、桁下面からの漏水により交差する道路への漏水対策として、軌道面に粘着シート系防水工を適用したが、施工から16年が経過するが目立った損傷はなく、漏水の再発も生じていない。

4. 考察

各種防水工の調査結果一覧を表-2に示す。前述のとおり、長期耐久性の評価は、耐候性、ひび割れ追従性、付着性・接着性、耐損傷性の4項目で行う。各項目における調査結果の評価は、表-3に示す条件毎に分類した各種要素を着眼点とする。これらの要素は、実態調査や過去の施工記録などから防水塗膜の耐久性に影響を与える可能性があるキーワードから抽出している。防水塗膜のうち、アクリルゴム系(AC工法)は1例のみの評価となるため、同種の防水塗膜による比較ができない。そのため、ASR対策などの対策目的を同一とする他の防水塗膜との比較も行い考察する。なお、表-2における損傷の評価において、塗膜の消失、ひび割れ、剥がれなどが著しく生じ、4項目すべての評価が困難と判断されたものは表中で「-」と示す。また、ゴムアスファルト系のSD-AおよびSD-B工法の防水塗膜は、既知の情報として、紫外線により著しく劣化が生じることがわかっている。そのため、本調査では耐候性の評価対象から除外する。以下に、長期耐久性に関する調査結果から得られた知見を示す。

4.1 ポリウレア樹脂系

防水塗膜の消失や剥がれを生じているものが多かった。塗膜の性能を発揮するには膜厚の管理が重要であり、2mm程度以上の膜厚が必要であることがわかった。また、当時使われたプライマーは、ウレタン系の材料が使用されていることが多く、付着性にばらつきが見られた。特に排水周りや地覆などの立ち上がり部で剥がれが生じていることから、施工時には防水塗膜とプライマーの付着性などを確認する必要がある。硬質な材料であるため、地覆などの立ち上りや部材の隅部の形状に適応しにくいことが剥がれの原因となっていると考えられる。そのため、施工の下地処理を行う際には、可能な限り平坦な面に対して施工を行うとするなどの工夫が必要である。

表-2 防水工の調査箇所一覧

No.	工法種別	上塗材の有無	橋梁名	長期耐久性			
				耐候性	ひび割れ追従性	付着性・接着性	耐損傷性
1	PS	無し	A	III	-	-	-
2	MU	有	B-1	II	I	III	I
3	SW	有	C	II	I	II	I
4	PS	無し	D-1	III	-	-	-
5	PS	無し	E	II	II	I	I
6	SD-B	無し	F		-	III	-
7	SD-A	無し	B-2		I	I	I
8	SD-A	無し	G		I	I	I
9	SD-B	無し	H		III	III	-
10	SD-B	無し	I		III	III	-
11	SD-B	無し	J		III	III	-
12	AC	有	K	II	II	II	I
13	DP	不明	L-1	III	III	-	-
14	EP	有	B-3	III	III	III	-
15	EP	有	M	II	II	I	I
16	RS	有	L-2	I	I	I	II
17	RS	有	D-2	I	I	I	I
18	RS	有	N	I	I	II	II
19	RS	有	O	I	I	II	II
20	RS	有	B-4	I	I	I	I
21	RS	有	P	I	I	I	II

長期耐久性の健全度評価の凡例
 I:「問題なし」
 II:「部分的な損傷であり防水性能への影響は限定的」
 III:「連続的な損傷であり防水性能が損なわれている」
 -:「評価が困難」

表-3 調査結果分析の各種条件と要素

条件	要素
対策目的	ASR,凍害,漏水対策 他
母材条件	ひび割れの有無,打ち継ぎ部,湿潤面 他
施工部位	床版,桁・梁上面,地覆・高欄 他
材料仕様	塗膜厚,上塗材の有無,防水塗膜の硬軟性

また、適切な膜厚があれば一軸引張には抵抗性がある可能性があるものの、打継ぎ界面など母材コンクリートの既存ひび割れが開閉を繰り返していると想定される箇所においてひび割れが生じている。このことから、列車振動や温度変化によってひび割れ幅が繰り返し変動す

るものには抵抗性が低いと考えられる。

4.2 ゴムアスファルト系

本調査の対象橋梁では、凍害対策への適用が多い。バラスト上からの充填作業により床面上面に防水層を形成するとされているが、本調査では、施工後の効果が良い橋梁は確認されなかった。施工時には、塗膜形成状況の確認といった品質管理が必要である。基本的にはバラストを一時的に撤去し、床版を完全に露出したうえで施工を行うように努めなければならない。湿潤面での施工も可能であるため、バラストの復旧にはさほど時間を要さず施工性は良い。耐候性に劣る材料であるため紫外線に曝される環境には不向きである。本調査から、紫外線が及ばない環境においては、比較的長期の耐久性が得られていると考えられる。

4.3 アクリルゴム系

膜厚は2mm以上であり、上塗材も施工されていた。現在も防水塗膜は残存しており、中塗材の浮きも生じていなかったことから、長期耐候性を有していると考えられる。硬質な材料で付着性を有すると推定されるが、コンクリート面の打ち継ぎに生じた開閉を伴うと想定される比較的幅の大きなれひび割れには追従できていなかった。ポリウレタ樹脂と同様に、列車振動や温度変化によってひび割れ幅が繰り返し変動するものには抵抗性が低いと考えられる。

4.4 弾性エポキシ樹脂系防水工

ひび割れが生じた橋梁では、防水工施工後も著しくひび割れが進展した。また、PC桁の定着部あと埋め部の打ち継ぎ界面でひび割れが生じていた。このことから、温度変化や列車振動により繰り返しひび割れ幅が変動するものには追従できないことがわかった。母材コンクリートに既存のひび割れが無い状態もしくは繰り返しの開閉や進展性のないひび割れであれば上塗材まで設けることで長期耐久性が期待できる材料と考えられる。既

存変状に対する対策ではなく、予防保全を目的とした防水工として効果が期待される。

4.5 粘着シート系

粘着性のある軟質性の材料で一軸引張に対するひび割れに対する追従性能だけでなく、繰り返しひび割れに対しての追従性を有する³⁾。実態調査より、例えばASR対策として粘着シート系を適用したL橋梁では、弾性エポキシ樹脂系防水が対策から2年経過時点でひび割れが生じたのに対して、粘着シートは対策から16年経過時点の現在においても外観では塗膜の変化は生じていない。これらの結果から、ASRなど進行性のあるひび割れなどに対する適応性が高い材料と考えられる。軟質な材料であることで、損傷(傷)が生じ易いことが欠点であるが、切り貼りによる簡易な補修で復旧することが可能であることから、修復性も高い。

5. おわりに

防水工は多様な種類があることから、実構造物に適用された環境での評価が重要である。また、施工時の配慮が耐久性に影響を与えており、材料の特性を理解したうえで使用の適否や施工について判断する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編：標準付属書〕，pp.90-98，2022.12
- 2) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル 2022版 1章総則，土木研究所資料，pp.15-30，2022.12
- 3) 松田芳範，三村典正，本田 誠：粘着材を用いた塗膜防水シート工法の開発，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第8巻，pp.349-356，2008.10