

長期暴露試験による含浸材の耐久性評価

佐々木崇人*1・松田 芳範*2

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、コンクリート内部への水の浸透を抑制することが重要となる¹⁾。近年、コンクリート表層部に撥水層を形成するシラン系や、コンクリート中に含浸して、細孔内部に結晶体を生成し組織を緻密にするけい酸塩系など、撥水性や遮水性能の向上を目的とした含浸材が多く販売されている。含浸材は、コンクリート内部に含浸することからコンクリートの質感を変えることなく、刷毛やローラーによる塗布やスプレーなどで容易に施工できることが特徴である。施工が容易であることから、労務費や仮設費が安価となるなど多くのメリットがある。しかし、含浸材は早期に遮水性能が消失するなどといった耐久性についての課題があった。そこで、実際に市販されている含浸材について実構造物を用いた長期暴露試験を行い、耐久性の評価を行うこととした。

当初は、シラン系を主体とした9種類の含浸材について、施工性をはじめ、撥水性や材料のコンクリート内部への浸透性、経時に伴う性状変化について追跡調査を行い、材料の遮水性と耐久性について検証を行った²⁾。その後、新たな材料を追加施工して、最終的に31種類の材料の追跡調査を行った³⁾。

2. 長期暴露試験の条件

長期暴露試験は、経年35年の新幹線高架橋で、高架橋内側の場所打ちRC構造の防音壁を用いて行った。構造物が位置する地域は、寒冷な降雪地帯で、冬季には最低気温が氷点下となり、線路内を消雪するための散水が行われている区間である。散水量は時間雨量40mmにも相当するため、降雨以上の水の影響があると考えられる。また、夏季には盆地特有の高温高湿となる気候であり、さらに、暴露試験面は直射日光にさらされるところである。このように、比較的低温域から高温域となり、水や紫外線の影響をよく受ける環境で長期暴露試験を行った。写真-1に長期暴露試験の実施場所の全景を、図-1に試験体の施工部位、表-1に防音壁のコンクリート示



写真-1 長期暴露試験実施場所

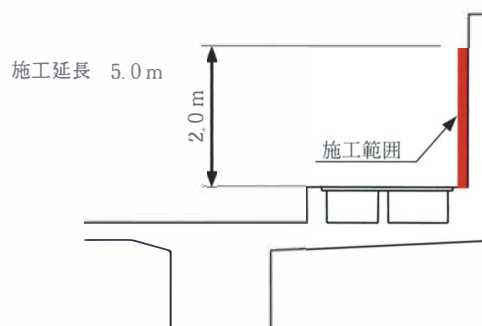


図-1 試験体の施工部位

表-1 防音壁の示方配合

設計基準 強度 (N/mm ²)	セメントの種類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラブの 範囲 (cm)	空気量の 範囲 (%)	耐久性から 定まる W/C (%)
24	普通ポルトランド セメント	25	12±2.5	4±1	53

方配合を示す。

材料は撥水性および浸透性を有するとされるものを使用した。表-2に試験に用いた材料の一覧を示す。表示名、主成分については、各社からの報告であるが一部カタログ等から抜粋したものも示している。

試験体の施工は、それぞれの材料の施工要領に沿って行うこととし、共通の仕様は定めていない。ほとんどの材料では下地処理としてコンクリート表面の洗浄を行った後、乾燥させた状態で塗布している。中には、サンドペーパーにより表面を研磨したり、軽く表面を清掃する

*1 ささき・たかひと／仙建工業(株) 土木エンジニアリング部 担当課長(元 東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター)(正会員)

*2 まつだ・よしのり／東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター 副課長(正会員)

表-2 試験に用いた材料の一覧

記 号	施工年	表 示 名	主 成 分
MA	2001	無機質浸透性吸水・劣化防止材	アルカリ金属珪酸化合物＋特殊触媒
ME		無機質浸透性吸水・劣化防止材	アルカリ金属珪酸化合物＋特殊触媒（エマルジョンタイプ）
BC		撥水性塗膜	—
MR		浸透性吸水防止材	シラン・シロキサン系
ES		水性シラン系浸透性吸水防止材	水性シラン系
TS		コンクリート水性型浸透性吸水防止材	水性シラン系アルキルアルコシシラン
HS		無機質水系浸透性劣化吸水防止材	珪酸系
AS		浸透性吸水防止材	シラン・シロキサン系化合物
AT	2004	コンクリート保護材	シラン・シロキサン系化合物およびシラン・フッ素化合物
ATH		浸透性吸水防止材	シラン系（アルキルアルコキシシラン）
AS 14		シラン系浸透性吸水防止材	シラン・シロキサン系化合物
AS 14 C		シラン系浸透性吸水防止材	シラン・シロキサン系化合物
RAD		無機質コンクリート改質材	珪酸ナトリウム系
OT		無機質コンクリート改質材	珪酸ナトリウム系
C 2		珪酸質系表面含浸改質材	珪酸ナトリウム系
C 2 CX		珪酸質系表面含浸改質材＋高濃度アルカリ金属水溶液	珪酸ナトリウム＋マグネシウム・カルシウム塩
AEX		高分子系浸透性防水材	(防水塗膜成分) 特殊水性アクリルウレタン樹脂 (浸 透 成 分) コロイダルシリカ (撥 水 成 分) フッ化ビリニデン
AEX 1		高分子系浸透性防水材	(防水塗膜成分) 特殊水性アクリルウレタン樹脂 (浸 透 成 分) コロイダルシリカ (撥 水 成 分) フッ化ビリニデン
L 1	2005	無機質高浸透性劣化防止剤	アルカリ金属シリケート（珪酸質系）
L 2		無機質高浸透性劣化防止剤	アルカリ金属シリケート（珪酸質系）
AEX 2		高分子系浸透性防水材	(防水塗膜成分) 特殊水性アクリルウレタン樹脂 (浸 透 成 分) コロイダルシリカ (撥 水 成 分) フッ化ビリニデン
MW		高分子系浸透性防水材	(防水塗膜成分) 特殊水性アクリルウレタン樹脂 (浸 透 成 分) コロイダルシリカ (撥 水 成 分) フッ化ビリニデン
H 1	2007	シラン系表面含浸材	アルキルアルコシシシラン
H 2		シラン系表面含浸材	アルキルアルコシシシラン
PC 7	2008	撥水材	シリコーン混和物
PC 3		撥水材	シリコーン混和物
SS 36	2009	コンクリート浸透性改質材	アルコシシシラン化合物
SS 30		コンクリート浸透性改質材	アルコシシシラン化合物
EP		珪酸塩系含浸 コンクリート保護材	ナトリウムシリケート、カリウムシリケートおよびリチウムシリケートからなるアルカリ混合効果を利用した混合溶液
IGP		浸透含浸型無機質塗料	シラン・シロキサン系化合物
IGAP		(下) 浸透含浸型無機質塗料	(下) シラン・シロキサン系化合物
		(上) 浸透含浸半膜型無機質塗料	(上) ポリアルキルアルコキシシロキサン化合物

等、それぞれの施工者がそれぞれの材料に最適と考える下地処理を行った。

3. 調査の方法

調査方法は、新幹線の営業運転が行われない夜間の数時間の中で、多くの試験体を評価することができるような簡便な方法とした。

基本は外観調査であり、現況のコンクリート表面に散水して撥水性の有無や濡れ具合などを目視にて定性的に評価した。

しかし、ある程度の経年になるとコンクリートの表面

には埃や汚れが付着する。また、シランは有機物であるため紫外線による劣化が進み、表層部の撥水性が消失してしまう。これらのことから、現況の外観調査（以下、現況外観調査）のみでは、埃や汚れの影響を受けて、コンクリート表面に水が保持されて濡れ色になり、水が浸透している状態と判断されて正しい評価とならないことが想定された。

そのため、コンクリート表面の埃や汚れを除去した面と、コンクリート表面を1 mm 程度削り取った面に散水し、撥水性について観察する調査（以下、表面研磨調査）を行うこととした。

これにより、コンクリート表面の埃を除去した状態を正しく確認でき、表面の撥水性が消失しているような状態でも、紫外線の影響を受けにくい深層部において、撥水性が存在していればコンクリート内部への水の浸透を抑制できるものと考え、表面から1mm程度内部の状態を観察することとした。

4. 外観調査結果

4.1 現況外観調査

現況外観調査は、表面に散水して撥水性の有無や濡れ具合などを目視にて定性的に評価したものである。

表-3 に調査結果を示し、写真-2 に、○、△、× それ

表-3 現況外観調査および表面研磨調査結果

施工年	記 号	主成分系統	現況外観調査											表面研磨調査					
			経年 [M:月, Y:年]											2004 年調査		2014 年調査			
														経年 [年]	撥水領域の割合 [%]		経年 [年]	撥水領域の割合 [%]	
															表面	1 mm		表面	1 mm
2001	MA	けい酸塩系	○	△	—	△	△	—	—	×	×	—	×	3	70	40	13	0	0
	ME	けい酸塩系	○	△	—	△	△	—	—	×	×	—	×		80	0		0	0
	BC	—	△	×	—	×	×	—	—	×	×	—	×		60	0		0	0
	MR	シラン系	○	○	—	○	○	—	—	×	×	—	×		90	60		30	50
	ES	シラン系	△	×	—	×	×	—	—	×	×	—	×		50	30		10	10
	TS	シラン系	○	×	—	×	×	—	—	×	×	—	×		90	50		100	20
	HS	けい酸塩系	×	×	—	×	×	—	—	×	×	—	×		0	0		0	0
	AS	シラン系	△	△	—	×	×	—	—	×	×	—	×		100	50		50	30
	AT	シラン系	△	△	—	×	×	—	—	×	×	—	×		0	0		0	0
2004	ATH	シラン系	—	○	×	—	×	×	—	—	—	×	—	—	—	—	10	50	70
	AS 14	シラン系	—	○	○	—	○	○	—	—	—	△	—		—	—		40	100
	AS 14 C	シラン系	—	○	○	—	○	○	—	—	—	△	—		—	—		50	80
	RAD	けい酸塩系	—	×	×	—	×	×	—	—	—	×	—		—	—		0	0
	OT	けい酸塩系	—	×	×	—	×	×	—	—	—	×	—		—	—		0	0
	C 2	けい酸塩系	—	×	×	—	×	×	—	—	—	×	—		—	—		0	0
	C 2 CX	けい酸塩系	—	×	×	—	×	×	—	—	—	×	—		—	—		0	0
	AEX	ウレタン系	—	△	△	—	×	×	—	—	—	×	—		—	—		0	0
2005	L 1	けい酸塩系	—	×	—	—	×	—	—	—	×	—	—	—	—	—	9	0	0
	L 2	けい酸塩系	—	×	—	—	×	—	—	—	×	—	—		—	—		0	0
	AEX 2	ウレタン系	—	—	—	—	×	—	—	—	×	—	—		—	—		0	0
	MW	ウレタン系	—	—	—	—	○	—	—	—	×	—	—		—	—		0	0
2007	H 1	シラン系	—	—	—	×	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	7	0	0
	H 2	シラン系	—	—	—	×	—	—	×	—	—	—	—		—	—		80	80
2008	PC 7	シリコーン系	—	○	○	—	—	△	—	—	—	—	—	—	—	—	6	60	20
	PC 3	シリコーン系	—	○	○	—	—	×	—	—	—	—	—		—	—		60	10
2009	SS 36	シラン系	—	○	—	—	△	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	0	20
	SS 30	シラン系	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—		—	—		80	20
	EP	混合溶液	—	×	—	—	×	—	—	—	—	—	—		—	—		0	0
	IGP	シラン系	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—		—	—		80	10
	IGAP	シラン系	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—		—	—		70	10

【現況外観調査】凡例

○：撥水性良好
△：撥水性はあるが、表面に水を保持し若干濡れ色になる
×：撥水性は見られず、濡れ色になる

【表面研磨調査】凡例

0% 撥水領域の割合 100%



(a) ○の例：IGAP
(経年5年)



(b) △の例：AS14
(経年10年)



(c) ×の例：MA
(経年13年)



参考：無処理

写真-2 現況外観調査の判定例

ぞれの状態の例と、材料を施工していない「無処理」の部分の散水直後の様子を示す。

(1) 2001年に施工した材料

2001年に施工した材料は、施工1カ月後、MA、ME、MR、TSの撥水性が良好であり、全く水の浸透が見られない。BCは、撥水しているところもあるが、水が浸透している部分が多くみられる。ESは撥水しているがムラがあり、水が浸透しているところもある。HSは散水した部分に、すべてといってよいほど水が浸透して濃い濡れ色となり、撥水しているところは見られない。ASは表面に水が保持されるが浸透は見られない。ATは良好な状態であるが、一部水が浸透するところが見られる。なお、MAとMEは、けい酸塩系の材料と分類しているが、シラン系の材料も併用している。

施工1年後、MA、MEには撥水性の低下が見られ、表面に水を保持して若干濡れ色になるところが見られた。BC、ESについては、撥水性はほとんど見られず、コンクリートに水が浸透し、濃い濡れ色となった。AS、ATは、施工1カ月後と比較して大きな差は見られなかった。MRは、良好な撥水性を保持していた。

施工3年後は、AS、ATの撥水性が失われ、散水により表面に水が保持されて濃い濡れ色となった。MA、MEは1年後の調査時に見られた状態と同様であった。MRは1年後に比べてわずかに水を保持する箇所も見られるが、ほとんど濡れ色になっていない。

施工5年後は、各材料とも施工3年後の評価と変わらない状態であった。

施工8年後は、すべての材料において散水によりコンクリート表面が濡れ色となり、9年後、13年後も同様の結果が見られた。

(2) 2004年に施工した材料

2004年に施工した材料は、施工1年後、ATH、AS14、AS14Cの撥水効果は良好で、水滴は水玉状となり水の浸透は全く見られない。RAD、OT、C2、C2CXは、散水により全体的に水の浸透が見られ、撥水性は見られなかった。

施工2年後、ATHは散水により表面に水は保持される状態であったが、よく観察すると水が浸透している様子は見られない。AS14、AS14Cは1年後と同等の状態であり撥水性は良好であった。その他の材料は1年後と同様、撥水性は失われたままとなっている。

5年後、6年後の現況外観調査でもAS14、AS14Cはその撥水性を保持していたが、10年後の調査では、コンクリート表面に撥水性は見られず、表面に水を保持するものの、濡れ色は薄いものであり、内部に水が浸透していない状況となっていた。

AEXとAEX1は、コンクリート表面に塗膜が形成される材料（以下、塗膜材）であり、含浸材の部類からは除外されるため参考とするが、表面に形成された塗膜に

はふくれが見られ、散水により塗膜のふくれ箇所に水が保持され斑点状となった。ふくれ以外の箇所には、塗膜表面に水滴が形成されている。ふくれ箇所の塗膜を剥がして散水を行うと無処理の箇所と同じように水が保持され濃い濡れ色になった。

(3) 2005年に施工した材料

L1、L2は、施工1年後、表面での撥水性は見られず、5年後、9年後も同様の結果であった。AEX2はAEXやAEX1と同じ塗膜材であるため参考とするが、5年後、9年後ともに散水による撥水性は見られず、表面には水が浸透して濃い濡れ色となった。MWは、施工5年後、撥水状況は良好であったが、9年後は撥水性が見られなかった。

(4) 2007年に施工した材料

2007年に施工したH1、H2は、3年後、7年後の調査において、コンクリート表面に撥水性状は見られず、表面に水が保持されて濡れ色となった。

(5) 2008年に施工した材料

2008年に施工したPC7とPC3は、施工1、2年後は良好な撥水性状を示した。施工6年後、PC7は撥水こそしないものの、濡れ色は薄く水の浸透は見られない状態となった。PC3は撥水性が消失して表面が濡れ色となった。

(6) 2009年に施工した材料

2009年に施工した材料は、施工1年後、EPに撥水性は見られず、コンクリート表面は濡れ色となった。一方、SS36、SS30、IGP、IGAPは良好な撥水性を保持していた。5年後、SS36は撥水こそしないものの、表面の濡れ色は薄く、遮水性は保持する状態となった。その他のSS30、IGP、IGAPは依然として、良好な撥水性状を保持していた。

4.2 表面研磨調査

表面研磨調査は、コンクリート表面をディスクグラインダーにより研磨し、研磨表面への散水後、表面の撥水領域の割合を目視により定性的に評価したものである。表-3に表面研磨調査の一覧を示している。2001年に施工した材料は、2004年にも同様な調査を行っており²⁾、その結果も併せて表中に示している。表中の「表面」はコンクリート表面を軽く研磨し、表面の汚れや埃を除去する程度で平滑にしたものを示し、「1mm」は、細骨材の表面が現れる深さ1mm程度まで研磨したものを表す。また、表中に示す数字は、研磨面における撥水領域の割合を示したものである。「0%」は撥水領域が存在しないことを示し、「100%」は全域に撥水領域が存在していることを示している。写真-3に代表的な材料の状況を示す。左から「1mm」「表面」「無処理」を示しており、「無処理」とは研磨を行わない状態を表している。

2001年施工の材料を2014年に調査した結果では、撥水性が存在していたMA、ME、BCの撥水性はほとんど失われていた（写真-3(a) MA）。ESは表面の気泡に

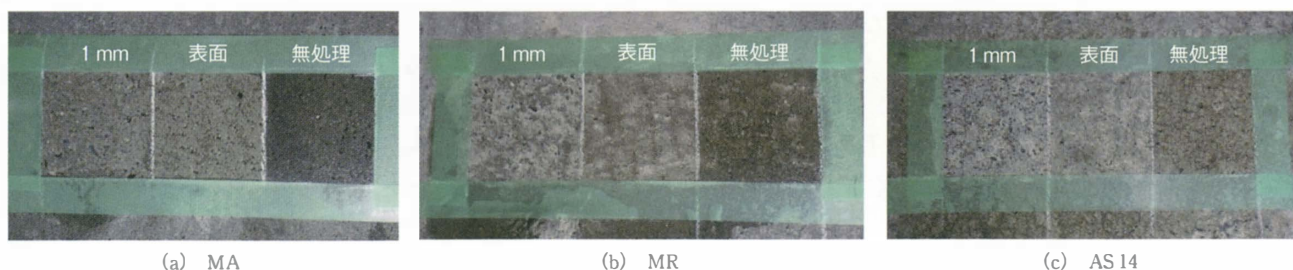


写真-3 表面研磨調査結果

沿ってわずかに撥水領域が残る程度であり、ほとんど消失している状態である。MRにおいては、「表面」よりも「1 mm」の方が撥水領域の割合が多くなっている(写真-3 (b) MR)。TSについては、表面の埃や汚れを除去するとほぼ全域に撥水領域が存在しており、「1 mm」でも2割程度であった。HS、ATは、2004年の調査時と変わらず「表面」、「1 mm」ともに撥水領域は全く見られなかった。

2004年以降に施工した材料では、ATH、AS 14、AS 14 C、H 2、PC 7、PC 3、SS 36、SS 30、IGP、IGAPでは撥水域が存在していた(写真-3 (c) AS 14)。RAD、OT、C 2、C 2 CX、AEX、AEX 1、L 1、L 2、AEX 2、MW、H 1、EPでは、「表面」、「1 mm」とも、水が浸透して濡れ色となり撥水域は全く確認できなかった。

5. 考 察

現況外観調査の結果、2001年に施工した材料では撥水性を確認できるものはなかった。経年10年の2004年施工の材料でも、撥水性を確認できるものはほとんどなかったが、AS 14、AS 14 Cは撥水こそしないものの、コンクリート表面の濡れ色は薄いものであり、内部には水が浸透していない状況であった。経年5年の2009年施工の材料は、表面の汚れや埃の付着の影響が比較的小ないためか、良好な撥水性状を確認することができた。SS 36も撥水こそしないものの、表面への水の浸透は見られなかった。

表面研磨調査の結果、経年10年程度の材料でコンクリート表面に埃や汚れが比較的多く付着し、見かけ上撥水性を失ったような状態でも、埃や汚れを除去することで、コンクリート内部への水の浸透が抑制されているものの(表-3、表面研磨調査(2014年)「表面」の撥水領域の割合が0以外のもの)が13種類確認された。また、表面から1 mm程度内部で撥水領域が存在している材料(表-3、表面研磨調査(2014年)「1 mm」の撥水領域の割合が0以外のもの)が14種類あった。その内12種類がシラン系の材料である。

シランは紫外線の影響により劣化し、表層部の撥水性状が消失するが、紫外線の影響を受けにくい表層より1 mm程度内部では、撥水領域が存在している材料が多かった。その中でも、撥水領域の割合が50%以上であっ

たのは5種類であった。古谷らの研究⁴⁾によると、シラン系の材料は経年3年程度では紫外線劣化の影響は受けて、おおむね良好な吸水防止効果を示すとされているが、経年5年程度でも紫外線の影響により、撥水性が消失するまでには至らない材料(表-3、現況外観調査、5 Y、×以外)が10種類あった。さらに、経年10年以上で撥水領域の割合が50%以上であった材料(表-3、表面研磨調査(2014年)「表面」の経年10年以上、50%以上)が4種類あった。コンクリート表面へ散水することで、撥水性や水の浸透状況を目視により確認できる材料は、シラン系の材料であり、中でもシラン・シロキサン系の材料は、比較的内部まで浸透してその機能が保持されているものが多かった。

シリコン系の材料は、現況外観調査により経年6年で撥水性の消失が確認されたが、表面研磨調査では撥水領域が存在していることが確認できた。コンクリート表面から1 mm程度内部においても撥水領域が見られ、コンクリート内部に材料が浸透していることが確認された。

図-2は、現況外観調査および表面研磨調査結果をまとめたものであり、縦軸を表面研磨調査結果の撥水領域の割合、横軸を現況外観調査結果としており、それぞれの調査結果をプロットしたものである。シラン系およびシリコン系の材料は、現況外観調査による評価が「×」であっても、表面研磨調査結果では、ほとんどの材料で撥水領域が存在していることがわかる。一方、けい酸塩系とウレタン系の材料は、現況外観調査と表面研磨調査で撥水域が確認されない傾向となっている。

2004年の調査結果と2014年の調査結果とを比較しても、けい酸塩系の材料は撥水性が完全に消失しているが、シラン系の材料は、調査位置の違いによる差はあるものの大きな違いは見られない。3年程度の暴露期間でも、その材料が有する耐久性のおおむねの傾向がつかめるようである。

6. ま と め

暴露試験の結果、経年10年以上の材料で、コンクリート表面に埃や汚れが比較的多く付着し、見かけ上撥水性を失ったような状態でも、埃や汚れを除去することで、遮水性能を有しているものや全くないものなどその差が大きいことがわかった。シランは紫外線の影響により劣

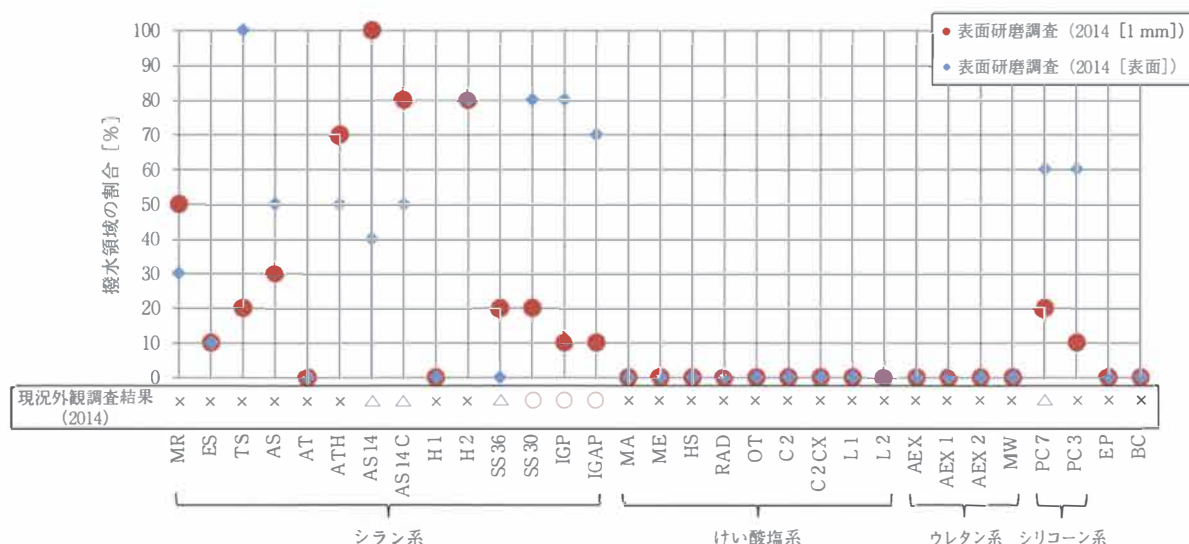


図-2 現況外観調査および表面研磨調査結果

化し、表層部の撥水性状が消失するといわれているが、調査の結果でコンクリート表層内部では、撥水領域が存在している材料が多いこともわかった。また、シラン系の材料の中でもシラン・シロキサン系の材料は、比較的内部まで浸透してその機能が保持されているものが多かったことから、撥水系含浸材で良好なものを選択することができれば相当期間の遮水性能を維持する可能性が高いことがわかった。

シリコーン系の材料にも、シラン系と同等な撥水性能とコンクリート内部への含浸性能を有するものが存在し、シラン系の含浸材と同様な遮水性能が期待できるものがあることもわかった。

一方、当然のことながら、けい酸塩系の含浸材はこれらの方法により遮水性能の優劣を確認することができなかった。近年、測定精度の高い表面吸水試験機が開発されており、このような機器を用いた試験を行うなど、別途評価が必要である。

7. おわりに

従来、シラン系の含浸材は、紫外線による劣化が懸念

されてきたが、10年程度の耐久性を有する材料があることがわかった。また、シラン系の含浸材は、表面上撥水性が消失していても必ずしも遮水性能が低下しているものではなく、適切な調査方法により機能の有無を評価する必要がある。

現在、社会には膨大な量のコンクリート構造物がストックされており、近い将来補修が必要な構造物も数多く存在する。比較的低コストで一定の効果が得られる含浸材を適切に用いたメンテナンスを行うことで、コンクリート構造物の長寿命化に寄与できるものと考ええる。

参考文献

- 1) 松田芳範：構造物の耐久性向上に向けた含浸材の適用について、防水ジャーナル、2016. 2
- 2) 網嶋和彦・松田芳範・津吉 毅・石橋忠良：撥水・浸透系防水塗膜材の暴露試験3年目の評価について、コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告書、pp.225～236、2006. 4
- 3) 佐々木崇人・松田芳範：撥水・浸透系防水材の暴露試験による耐久性の評価について、コンクリート工学論文集、Vol.37、No.1、2015. 6
- 4) 古谷英彦・細田 暁・鈴木雄大・松田芳範：シラン系表面含浸の紫外線劣化の吸水試験による評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.1945～1950、2009