

論文 ASR 劣化状態の異なるコンクリートにおけるシラン系表面含浸材の水分逸散性能と劣化抑制効果に関する検討

川合 将斗*1・谷河 雅大*1, 森川 英典*2・楠原 栄樹*3

要旨: ASR 劣化状態の異なるコンクリート供試体に、シラン系表面含浸材で補修し、補修面以外から水分の供給を行い、シラン系表面含浸材の水分逸散性能の評価を行った。水分逸散性能の評価は供試体の質量と含水率を、劣化抑制効果については膨張量とひび割れ性状を測定して行った。その結果、ASR 劣化が進みひび割れを有する供試体においても、シラン系表面含浸材を塗布することで撥水性や透湿性が付与されることが確認された。さらには、無補修のものと比較して、膨張量の増加やひび割れの進展を抑制できることが確認された。

キーワード: シラン系表面含浸材, アルカリシリカ反応 (ASR), 水分逸散性能, 劣化抑制効果

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (以下、「ASR」) は劣化機構が極めて複雑であることや同じ条件下でも劣化程度が様でないなどの理由から、有効な維持管理対策が確立されていない。ASR による膨張を抑制するためには、ASR 膨張の発生要因であるコンクリート内部の水分量を減少させることが重要である。

シラン系表面含浸材は、含浸によりコンクリート表層部に、撥水性和透湿性を付与する機能を有する疎水層を形成し、ASR を生じた構造物において吸水膨張の抑制を目的として使用されることが多い¹⁾。しかし、補修面以外からの水分供給が完全に遮断できない場合には、補修後に再度 ASR による膨張が進行している事例もみられる。実構造物へ適用するためには、外部からの水分供給を考慮した上でシラン系表面含浸材の性能を検討する必要がある。既往の研究²⁾では、ASR 劣化前のコンクリートに対してシラン系表面含浸材を塗布し、外部からの水分供給を考慮しシラン系表面含浸材の水分逸散性能を評価した。しかし、ASR が進行したひび割れを有するコンクリートにおいてシラン系表面含浸材を施工する場合も考えられることから、本稿では ASR 劣化程度の異なるコンクリート供試体においてシラン系表面含浸材の水分逸散性能および ASR の劣化抑制効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 コンクリート供試体の概要

表-1 にコンクリートの配合を、図-1 にコンクリート供試体の概略図を示す。コンクリート供試体は、鉄筋腐食の影響を排除するために無筋とし、200×200×150mm の寸法で作製した。また、道路橋を想定し水セメント比 (以下、「W/C」) は 50% とした。供試体は、普通ポルトランドセメントおよび反応性骨材 (安山岩砕砂および碎石) と非反応性骨材 (揖斐川産川砂, 兵庫県姫路市西島産碎石) を用いて作製した。反応性骨材は、骨材の反応性試験である化学法およびモルタルバー法のいずれにおいても「無害でない」と判定されている。反応性・非反応性骨材の混合比率は、骨材供給元で行ったデータ

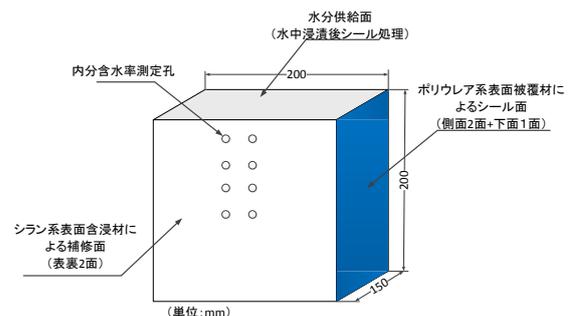


図-1 コンクリート供試体概要

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						AE 減水剤 (kg/m ³)	NaCl (kg/m ³)
			W	C	S1	S2	G1	G2		
50	20	45	144	290	430	430	532	532	0.724	16.1

S1:非反応性細骨材, S2:反応性細骨材, G1:非反応性粗骨材, G2:反応性粗骨材

*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (学生会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 教授 (正会員)

*3 本州四国連絡高速道路株式会社 長大橋技術センター

を参考に50%ずつとした。また、ASR劣化を促進させるため、供試体内の等価Na₂O総量が10kg/m³となるように塩化ナトリウムを添加した。

本稿では、ASR劣化程度の違いによる影響を検討することを目的として、ASR劣化程度の異なる供試体で実験を行った。ひび割れ等の外観では劣化が確認されていないものを劣化前、ASRによるひび割れが見られるが膨張量が比較的小さく、ひび割れも大きく進展していないものを劣化小、ASRの劣化が進行し、大きな膨張量やひび割れ幅の大きなひび割れが多数確認された供試体を劣化大と本論文では定義した。

実験順序を図-2に示す。各供試体は打設後、気温約20℃での2日間の湿布養生および気温約22℃、相対湿度約55%の環境にて26日間の気中養生を行った。劣化前については、気温10~25℃の室内環境に静置し、材齢300日程度で試験を行った。劣化小および劣化大は、屋外暴露を実施し劣化促進させた。劣化小については高温多湿になる夏季に約100日間、劣化大については1年間の屋外暴露を行った。

静置または暴露完了後、補修面2面および水分供給面を除いてポリウレタ系表面被覆材によるシール処理を実施した。そして、計28日間のシール材の養生期間を経て、補修面に対してシラン系表面含浸材を施工した。その後、含浸材の養生を約3週間行った。

供試体の準備が完了した後、上面は水分供給面とし、各供試体を24時間水中に浸漬させることで補修面以外からの水分供給を模擬した。24時間の水中浸漬による水分供給後、上面にシール処理を施し、室内環境において約40日間の経過観察を実施した。経過観察期間では、一部の供試体の補修面（表裏2面）に対し降雨を模擬した散水を行った。散水の詳細については、2.4節にまとめる。

2.2 シラン系表面含浸材

実験に使用した表面含浸材の一覧を表-2に示す。実験ではシラン・シロキサン系（含浸材S1, S3）およびアルキルアルコキシシラン系（含浸材A）の表面含浸材を使用した。表面含浸材の施工時には高周波式含水率計により補修面含水率がメーカーの定める基準である6%以下であることを確認した。

2.3 測定項目および測定方法

測定項目は、供試体質量、内部含水率、膨張量、ひび割れ性状とした。図-3に測定位置を示す。供試体質量の測定には電子天秤（秤量20kg, 最小表示0.1g）を用いた。内部含水率の測定は、電気抵抗式コンクリート水分計を用いた。測定孔を4セット設け、各測定孔にて試験面からの深さ30mm, 45mm, 60mm, 75mmで測定をし、計16箇所測定を行った。また、膨張量の測定にはコンタクトゲージ（検長100mm）を用い、図-3に示すコンタクトゲージ標点間の膨張量（8箇所）を測定した。ひび割れ性状に関しては、補修面（表裏2面）にOHPシートをかぶせ、クラックゲージを用いて補修面のひび割れを幅ごとに分類しながら最小で0.1mm程度のひび割れを写し取った。その後、写し取ったひび割れ図をパソコンに取り込み、データ処理をし、ひび割れ長さ・密度を測定した。

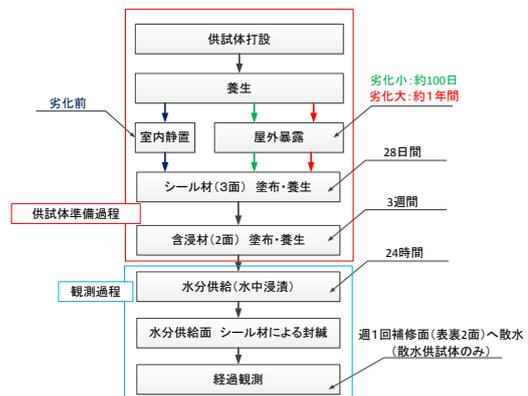


図-2 実験順序

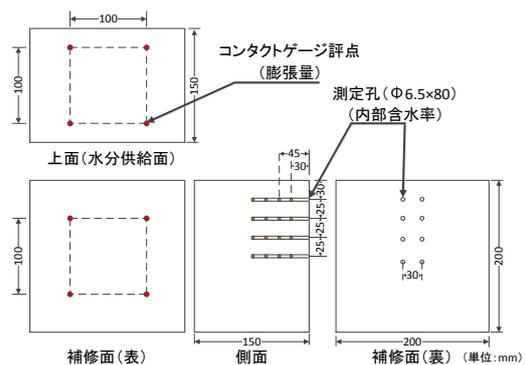


図-3 測定位置

表-2 シラン系表面含浸材一覧

含浸材名	分類	標準塗布量 (g/m ²)	主成分濃度 (%)	性状	系
S1	シラン・ シロキサン系	200	約80	白色ペースト状	水系
S3		200	約95	半透明ジェル状	無溶剤系
A	アルキルアルコキ シラン系	220	98~100	無色透明液体	無溶剤系

2.4 実験要因

実験要因を表-3に示す。実験要因をASR劣化程度、補修面への散水条件およびシラン系表面含浸材の種類とした。ASR劣化程度については、屋外暴露にて劣化させを行った。表-4にひび割れ長さ密度を、表-5にひび割れ面積密度を示す。劣化前は材齢300日程度のひび割れ等の外観では劣化が確認されていないものを用いた。劣化小は、膨張量は1000 μ 程度、劣化大は膨張量が3000~4000 μ 程度の供試体を使用した。測定方法はいずれも前節にまとめた方法を用いた。

散水供試体に対しては、経過観測期間内に補修面表裏2面に対して降雨を模擬した毎週1回の散水を実施した。散水は含浸材の撥水性の検証を目的とし行った。散水は流量計を用いて、15分ごとに5L/minの水量で8回シャワーホースにて行った。

3. 実験結果

3.1 含浸深さ

図-4に含浸深さ試験の結果を示す。含浸深さは、含浸材を塗布することで形成される疎水層の厚さであり、含浸材の性能評価には重要な要素であるとされている。

含浸深さ試験は、同寸法、同配合のコンクリート供試体を用いてJSCE-K571-2013³⁾を参考に実施した。図-1の補修面の中央を割裂し、割裂面で20mm間隔の9箇所、2面の合計18箇所の平均値を1供試体の含浸深さとした。測定には最小表示0.01mmの電子ノギスを使用した。

含浸深さの結果からは、ASR劣化程度の違いで比較したところ、ASR劣化の進んだ劣化大の供試体の方が、含浸深さが大きい傾向が確認された。これについては、劣化を進めた供試体は、コンクリート表面に微細なひび割れが多数存在し、さらに表面がより乾燥状態であり、含浸材が浸透しやすくなると考えられる。シラン系表面含浸材は、コンクリートに浸透し、コンクリート中の強アルカリの水と反応し、加水分解することによって疎水層が形成されるため、乾燥が進めばより内部で反応する可能性が考えられる。また、S3については劣化が進むにつれて含浸深さの増加量がS1やAに比べて深くなることが見受けられる。この原因としてひび割れの影響が考えられる。劣化が進むにつれ、ひび割れ幅の大きいひび割れが確認された。特に、劣化大では、最大で0.8mm程度のひび割れも確認されている。S3ではこうしたひび割れを介して内部にまで含浸材が浸透し、含浸深さが大きくなったのではないかと考えられる。一方、補修材S1やAは、ひび割れによる影響を受けにくい可能性がある。しかし、本研究では十分な考察が行えず、今後、補修材の特性などを踏まえさらに検討していきたい。

表-3 実験要因

ASR劣化程度	補修面への散水条件	補修材名	供試体名※
劣化前	非散水	N(無補修)	1-NI
		S1	1-S1I
		S3	1-S3I
		A	1-AI
	散水	N(無補修)	1-NO
		S1	1-S1O
S3		1-S3O	
A		1-AO	
劣化小	非散水	N(無補修)	2-NI
		S1	2-S1I
		S3	2-S3I
		A	2-AI
	散水	N(無補修)	2-NO
		S1	2-S1O
S3		2-S3O	
A		2-AO	
劣化大	非散水	N(無補修)	3-NI
		S1	3-S1I
		S3	3-S3I
		A	3-AI
	散水	N(無補修)	3-NO
		S1	3-S1O
S3		3-S3O	
A		3-AO	

※略称 (非散水: I, 散水: O, 劣化前: 1, 劣化小: 2, 劣化大: 3)

表-4 ひび割れ長さ密度

ひび割れ長さ密度 (mm/mm ²)	劣化小	劣化大
NO	0.0090	0.0236
NI	0.0162	0.0176
S1O	0.0147	0.0177
S1I	0.0128	0.0218
S3O	0.0112	0.0123
S3I	0.0067	0.0178
AO	0.0012	0.0019
AI	0.0162	0.0160

表-5 ひび割れ面積密度

ひび割れ面積密度 (mm ² /mm ²)	劣化小	劣化大
NO	0.0013	0.0058
NI	0.0016	0.0047
S1O	0.0015	0.0035
S1I	0.0032	0.0057
S3O	0.0020	0.0027
S3I	0.0011	0.0047
AO	0.0021	0.0063
AI	0.0022	0.0044

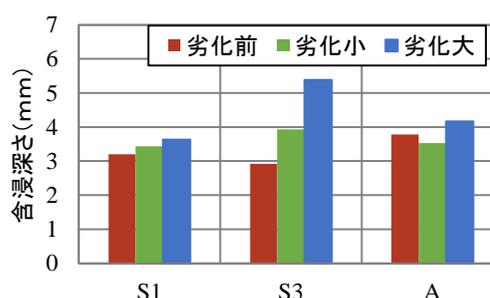


図-4 含浸深さ試験結果

3.2 供試体質量

図-5 に吸水量を，図-6 に累計逸散質量を示す。結果は非散水供試体のみ示している。吸水量は，経過観測開始前である水中浸漬直前の質量と，水中浸漬 24 時間直後の質量の差から算出した。累計逸散質量は，水中浸漬終了後 40 日間に減少した質量を示している。

この結果からは，吸水量の大きい供試体ほど，逸散させる質量が大きいことが確認された。特に，無補修供試体 (NI) の吸水量が補修供試体と比べて大きい傾向が見

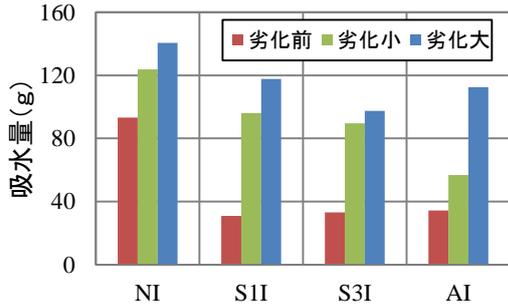


図-5 吸水量

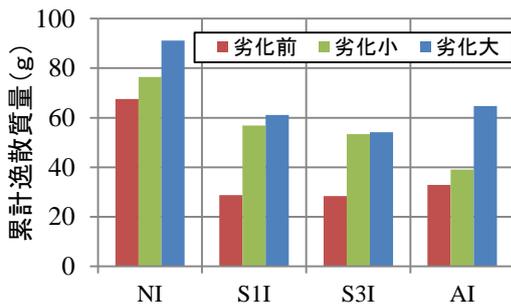


図-6 累計逸散質量

受けられる。これは，含浸材による補修により，コンクリートに撥水性がもたらされ，吸水を防止したことが要因と考えられる。また，ひび割れを有する劣化小や劣化大においては補修を施した供試体においても吸水量が大きいことが確認できる。これは，ひび割れを介して水分が浸入した影響であると考えられる。

また，いずれの補修材においても累計逸散質量が散水による増加質量より多いことから，どの ASR 劣化状態においても補修材の水分逸散性を確認することができた。

図-7 に散水による増加質量を示す。これは散水前後の質量の差から算出し，計 5 回の散水分の増加量を示している。この結果からは，劣化が進行するほど散水によって質量増加することが確認できた。しかし，劣化大の大きいひび割れを有する供試体においても，含浸材による補修を行うことで，散水による質量の増加を抑制することが確認された。

3.3 内部含水率

図-8 に各劣化状態における NO 供試体，S1O 供試体

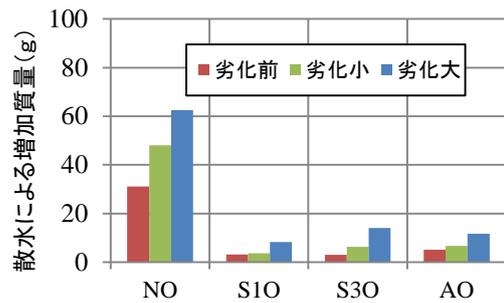


図-7 散水による増加質量

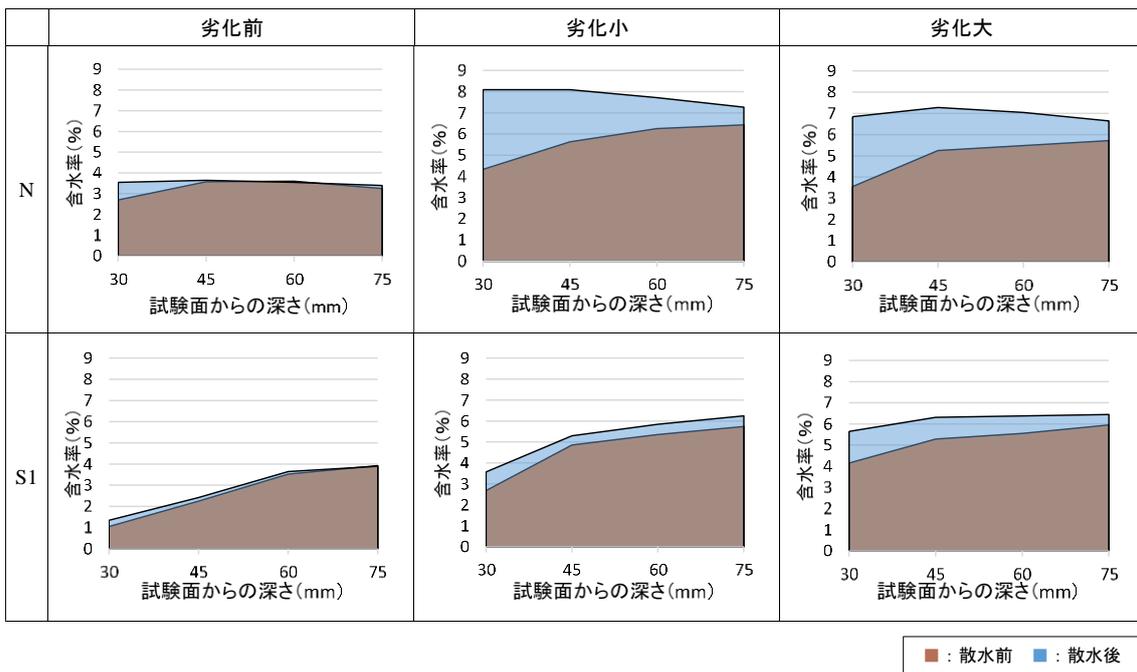


図-8 散水前後の内部含水率の断面変化

の散水前後の内部含水率の断面変化を示す。これは、含水率を深さ方向の断面で表し、散水での内部含水率の変化を示している。含水率はすべての測定孔の平均値で示す。これは、水分供給面からの距離によらず、含水率がほぼ同程度であったことから平均値を用いた。水色の箇所が散水により増加した内部含水率を表している。

劣化前の結果から、補修の有無で比較すると、表面付近の水分の増加を抑制できている様子が確認できる。また、劣化小や劣化大といったひび割れを有した供試体においても内部含水率の増加が抑制される傾向が見受けられる。いずれの結果からも含浸材による撥水性が確認された。一方、劣化大では、劣化小よりも補修をしても内部の水分の増加が大きいことが確認された。これはひび割れ幅の増加により、内部に水分が浸入しやすくなったと考えられる。

3.4 ひび割れ性状

図-9に散水供試体の、図-10に非散水供試体のひび割れ面積密度の結果を示す。横軸を経過日数とし水中浸漬が終わった日を0日とする。

この結果から、劣化大の散水供試体においてひび割れ面積密度の増加が確認された。これは、非散水の劣化大供試体においても、緩やかなひび割れ面積密度の増加が確認できることから、散水による影響だけではなく、当初の水中浸漬による水分の供給も影響していると考えら

れる。一方、劣化小の非散水供試体では、ひび割れ幅がほとんどの供試体では変化していないことが確認された。これに対して、劣化小の散水供試体では、無補修供試体のひび割れ面積密度のみ増加する傾向が見受けられる。これらのことから、劣化小の無補修供試体は、散水の影響を受けてひび割れ面積密度が増加したことが考えられる。よって、劣化小においては、補修を行うことで撥水性により散水の影響を軽減し、ひび割れ面積密度の増加を抑制できる効果が確認された。

3.5 膨張量

図-11に散水供試体における、図-12に非散水供試体における膨張量の変化を示す。横軸を経過日数とし水中浸漬が終わった日を0日とする。縦軸は水中浸漬前の膨張量を初期値とした際の変化量で示している。

この結果から、散水を行っていない非散水供試体の劣化小では、当初の水中浸漬による水分供給により膨張し膨張量が増加するものの、40日後には、乾燥により収縮し、膨張量が水中浸漬前の値に近づく傾向が見受けられる。一方、非散水の劣化大供試体では、膨張量が減少することなく増加する傾向が確認された。これらのことから、劣化大では、当初の水中浸漬による水分の浸入によりASR劣化が進行したのではないかと考えられる。

一方、散水を行った供試体において、劣化大については非散水供試体同様に、補修の有無によらず、すべての

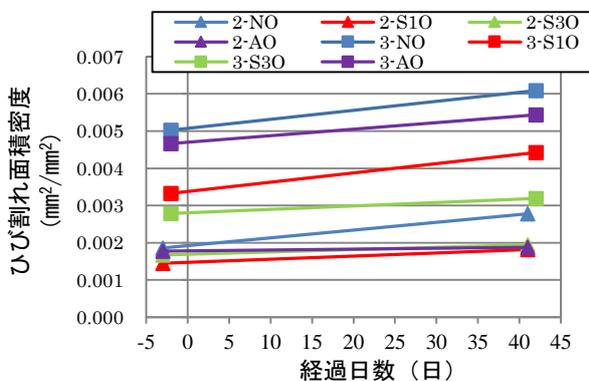


図-9 ひび割れ面積密度 (散水)

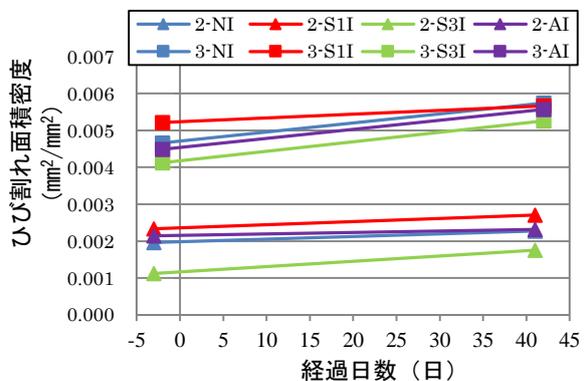


図-10 ひび割れ面積密度 (非散水)

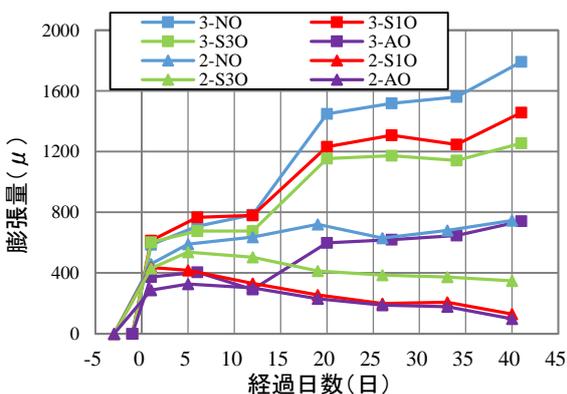


図-11 膨張量の変化 (散水)

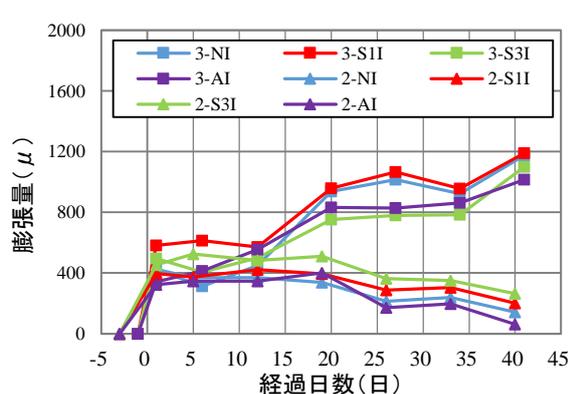


図-12 膨張量の変化 (非散水)

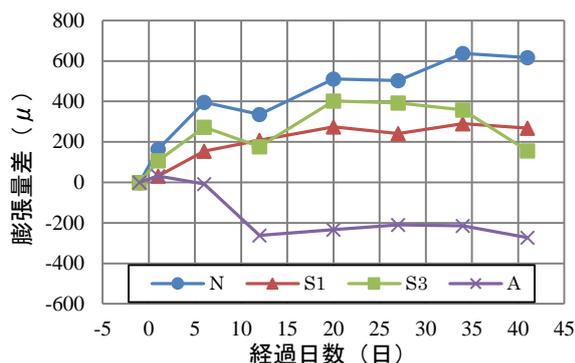


図-13 膨張量の差 (劣化大)

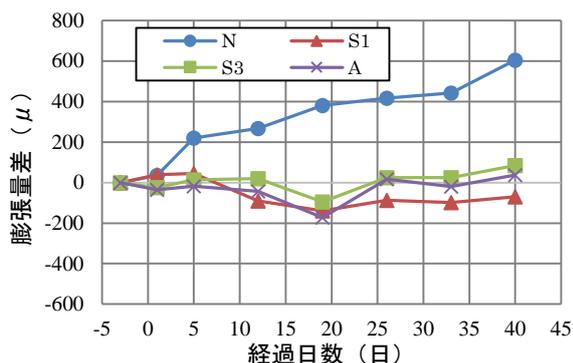


図-14 膨張量の差 (劣化小)

供試体において膨張量が増加する傾向が確認された。しかし、劣化小においては、供試体ごとの傾向に違いが確認された。特に、補修の有無で比較した際、補修供試体では、非散水供試体と同様に当初の水中浸漬による水分供給により膨張量が増加し、観測期間で徐々に減少する傾向が見受けられた。一方、無補修供試体では、膨張量が減少せず増加を続ける傾向が確認できる。これは、散水の影響を受け ASR 劣化による膨張が進行したのではないかと考えられる。これらの、結果をより検討するために、次に当初の水中浸漬の影響を除き、散水の影響のみを確かめ考察を行った。

図-13 に劣化大の、図-14 に劣化小の散水供試体と非散水供試体の膨張量の差を示す。つまりは、図-11 の値から図-12 の値を引いた値を示している。これは、非散水供試体は水中浸漬による水分供給以外に水分を与えておらず、水中浸漬の影響の膨張量の変化であると考えられる。一方、散水供試体は、水中浸漬の影響と散水の影響を受けるため、非散水の値を引くことで散水の影響のみの膨張量の変化を考察した。ただし、非散水供試体と散水供試体は同じ劣化段階にあるものの、厳密にはひび割れ発生状況が異なることに注意を要する。

この結果から、劣化大では、補修を施しても膨張量が増加するものの無補修供試体と比べて、散水による膨張量の増加を抑制できることが確認された。A 供試体の膨張量が減少していることは、散水供試体のひび割れが非散水供試体に比べて小さかった影響であると考えられる。実際に、表-4 の劣化大の AO 供試体のひび割れ長さ密度が極めて小さいことから確認できる。一方、劣化小では、補修供試体では散水の影響による膨張量の変化は見られず、無補修供試体のみ膨張量が増加する傾向が確認できた。以上のことから、劣化小、劣化大といった ASR 劣化が進行し、ひび割れを有する供試体においても、含浸材の撥水性により、散水の影響による膨張量の増加を抑制できることが確認できた。

4. まとめ

本稿では、ASR 劣化程度の異なる供試体にシラン系表面含浸材による補修を適用し、補修面以外からの水分供給を行った上でシラン系表面含浸材の水分逸散性能と劣化抑制効果を検討した。

本研究の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 含浸材の含浸深さの測定結果から、ASR 劣化が進行するほど含浸深さが大きくなる傾向が確認された。
- (2) 散水による増加質量の結果から、ASR 劣化が進むとひび割れにより水分が浸入しやすくなるが、補修をすることで無補修のものに比べて散水による浸入を抑制できることが分かった。
- (3) 散水前後の内分含水率の断面変化の結果から、含浸材による補修を行うことで、表面に近い部分の含水率の増加を抑制できることが分かった。
- (4) ひび割れ面積密度の結果から、ひび割れを有する供試体において含浸材による補修をすることで、降雨を模擬した散水によるひび割れの進展を抑制できることが確認された。
- (5) 膨張量変化の結果、ひび割れ幅の大きい供試体においても、含浸材の撥水性が降雨を模擬した散水による膨張量の増加を抑制できることが確認できた。

参考文献

- 1) 松本茂, 新名勉, 江良和徳, 村橋大介, 宮川豊章: シラン系表面含浸材および亜硝酸リチウムの ASR 膨張抑制効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.288-300, 2010.8
- 2) 川合将斗, 中島朗博, 森川英典, 中西智美, 楠原栄樹: ASR 潜伏期のコンクリートにおけるシラン系表面含浸材の水分逸散性能, 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, No.15, pp.535-540, 2015, 10
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[基準編], pp.471-475, 2013