

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

松本 茂¹・新名 勉²・江良 和徳³・村橋 大介⁴・宮川 豊章⁵

¹フェロー会員 (財)阪神高速道路管理技術センター 企画研究部
(〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7)

E-mail: shigeru-matsumoto@tech-center.or.jp

²正会員 阪神高速道路(株) 技術部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

E-mail: tsutomu-niina@hanshin-exp.co.jp

³正会員 極東興和(株) 事業本部 (〒732-0052 広島市東区光町2-6-31)

E-mail: era@kkn.co.jp

⁴正会員 (株)中研コンサルタント 関西支店 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島7-1-55)

E-mail: dmura@chuken.co.jp

⁵フェロー会員 京都大学大学院 社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: miyagawa@sme.kuciv.kyoto-u.ac.jp

アルカリシリカ反応を生じた構造物におけるシラン系表面含浸材の効果的な適用に関して検討するため、実構造物を想定した供試体を作成し約1年半にわたり屋外暴露を行った。主な実験要因として施工時期に着目し、膨張抑制効果が発揮される範囲を把握するために補修面からの距離毎に膨張率を測定したほか、膨張に影響を与える供試体内部の水分量を把握するために複数の測定孔を設け相対湿度を測定した。その結果、補修面から250mm程度までの範囲で膨張抑制効果を確認した他、早期に施工する方がより大きな膨張抑制効果を発揮することが分かった。併せて、亜硝酸リチウムの内部圧入についても同様の屋外暴露に供した結果、良好な膨張抑制効果を確認した。また、実験結果に基づき、両補修材の実構造物への適用において期待される効果等について検討した。

Key Words : *silane penetrant system, lithium nitrite, alkali-silica reaction, controlling ASR expansion*

1. はじめに

シラン系表面含浸材は浸透性吸水防止材とも呼ばれ、アルカリシリカ反応（以下「ASR」と言う）を生じたコンクリート構造物において吸水膨張の抑制を目的とした使用実績も多い。その膨張抑制効果は、透水および吸水阻止性や水蒸気透過性によってアルカリシリカゲルの吸水膨張に必要なコンクリート中の水分量を低下させることにより発現される。一般的な主成分はアルキルアルコキシシランで、水または有機溶剤で希釈したものが多く¹⁾、近年では中性化に対する抵抗性を向上させたシラン系表面含浸材も開発されている²⁾。シラン系表面含浸材は、含浸により表面から数mmの範囲に疎水層を形成し、透水および吸水阻止性を発現するが、これは、コンクリート表面や細孔表面にアルキル基が外に向く形で形成されることによる³⁾。

シラン系表面含浸材をはじめとした表面保護工法の

ASR膨張抑制効果は、供試体実験により早くから確認されているが、表面積に比べて体積が大きいマッシブな部材では効果が発揮されにくいことも指摘されている⁴⁾。実構造物の維持管理においても、「外部からの水分、アルカリを遮断しても、コンクリート内にASRを進行させるのに十分な水分およびアルカリが存在する時は、ASRの進行を完全に停止することは困難である」⁵⁾とされており、「表面保護工の適用後もASRによる劣化が進行したり、部分的に保護されていない箇所から構造物中への水分の侵入が見られたりした結果、再度劣化している事例も少なくないことから、十分な補修効果が得られる見込みのある場合にのみ表面保護工法を適用するべき」⁶⁾ともされている。

このように、供試体と実構造物では表面積と体積の比が違うことから、同じシラン系表面含浸材を適用した場合でも膨張抑制効果には大きな差が生じる可能性がある。表面からの深さと膨張率の関係に関する研究としては、

1000×1000×150mmの直方体供試体を用いた実験⁷⁾やφ450×900mmの円柱供試体を用いた実験⁸⁾等が報告されているが、実構造物への適切な適用のためにはより詳細な検討とさらなる知見の蓄積が必要である。

以上の観点から、本研究では実構造物を模擬した供試体を用いてシラン系表面含浸材の水分低減効果や膨張抑制効果が発揮される範囲を評価するとともに、実構造物への適用において期待される効果について明確にすることを目的とした。さらに、シラン系表面保護工の施工時期の違いが膨張抑制効果に与える影響についても評価した。

併せて、加速期以降のASR劣化構造物への適用が増えつつある亜硝酸リチウム内部圧入工法についても、シラン系表面含浸材の評価に用いた供試体と同じ配合の供試体を用いて膨張抑制効果の評価を行った。亜硝酸リチウム内部圧入は、コンクリート躯体に削孔した小孔から亜硝酸リチウム水溶液を加圧浸透させることによってASRによる膨張を抑制する補修工法の一つである。その膨張抑制メカニズムについては、イオン交換によるゲルの非膨張化⁹⁾、リチウムシリケートによる保護層の形成¹⁰⁾、シリカ溶解量の減少によるASR反応の抑制¹¹⁾などの説が提唱されている。

2. 実験方法

本研究では、道路橋橋脚のはり部分を想定して、実構

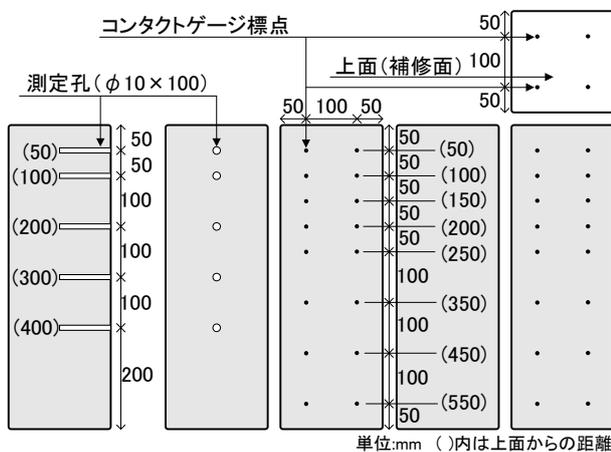


図-1 供試体寸法

造物に近い状態を供試体実験で再現することとした。このため、供試体寸法は表面保護工法の評価で使用例の多い100×100×400mmではなく図-1に示す200×200×600mmとし、これを写真-1に示すように立てた状態で屋外暴露に供した。また、供試体上面をはり部上面に見立て、シラン系表面含浸材は上面のみに施工し、側面および底面からなる残り5面はシール工によって水分の出入りを遮断した。亜硝酸リチウム内部圧入は、実構造物での圧入作業に先立ち全面にシール工を施工するのが一般的であるが、本研究では他の条件との比較を考え、上面にはシール工を施工しないこととした。

(1) 実験要因

実験要因としては、補修材の施工時期、補修方法、暴露条件の3要因とした。その組み合わせを、表-1に示す。補修材の実施時期は、上面(補修面)の膨張率が0.05%の段階と0.15%の段階の2水準とした。補修方法は、シラン系表面含浸材の表面含浸、亜硝酸リチウムの内部圧入、無補修の3種類とし、これに、暴露条件として降雨の掛かる環境と、屋根の下で降雨の掛からない環境を組み合わせた。供試体の種類は8種類で各2体、計16体で屋外暴露を行った。

(2) 供試体の配合と材料

表-2に配合を、表-3に使用材料を示す。配合は、過去



写真-1 屋外暴露状況

表-1 供試体名と実験要因、測定項目

補修材施工時期(膨張率)	補修方法	暴露条件(屋外暴露)	測定項目			
			膨張率	質量変化率	相対湿度	ひび割れ性状
0.05%	無補修	屋根下(雨掛無)	○	○	—	○
		通常(雨掛有)	○	○	—	○
	シラン系表面含浸材		○	○	—	○
0.15%	無補修	屋根下(雨掛無)	○	○	1体のみ	○
		通常(雨掛有)	○	○	1体のみ	○
	シラン系表面含浸材		○	○	1体のみ	○
	亜硝酸リチウム	○	○	1体のみ	○	

の実績から顕著なASR膨張特性を示すことが確認されているものを使用した。反応性骨材としては北海道産の安山岩粗骨材を使用し、非反応性粗骨材との混合比率は6:4とした。等価アルカリ量（ R_2O 換算）は 9.0kg/m^3 とし、アルカリ量の調整には塩化ナトリウムを使用した。

(3) 供試体の作成方法

供試体の作成手順を図-2に示す。供試体は打設翌日に脱型し、2側面と上面（補修面）に水中硬化型エポキシ樹脂パテ状接着を用いて膨張率測定用標点を貼り付けた（図-1参照）。標点の貼り付けは打設翌日、翌々日の2日間で行い、膨張率の初期値（基長）は標点の貼付が全て完了した2日目に測定した。

基長を測定した後、 40°C 、 95% R.H.以上の環境で、上面（補修面）における2方向の平均膨張率が目標の値、 0.05% 、 0.15% となるまで促進膨張させた。目標膨張率 0.05% の供試体（以下、「 0.05% 供試体」と言う）は5週で8本を選定し、残りの供試体は継続して促進膨張させた。目標膨張率 0.15% （以下、「 0.15% 供試体」と言う）では一部の供試体に膨張進行が遅いものが存在したため、7週で6本、8週で2本を選定した。供試体選定の際には、供試体間で膨張率、ひび割れ状況に大きな差異が無いよう留意した。

供試体表面の変状は、膨張率が概ね 0.05% に達した5週の時点で全ての供試体でひび割れの発生が確認され、一部の供試体に白色析出物が見られた。その後、膨張率が

が 0.15% に達する7週までにひび割れは増加し、白色析出物も多くの供試体で見られた。

目標膨張率に達した供試体に対し、上面（補修面）を除く5面にシール処理（防水塗装）を行った。シール材料は土木用超柔軟形アクリルゴム系表面被覆材を用いた。次に、これらの供試体に、2種類の補修材を施工した。シラン系表面含浸材は $100\times 100\times 400\text{mm}$ の供試体を用いた過去の実験で良好な膨張抑制効果が確認された表-4に示すものを使用し¹²⁾、上面（補修面）にのみ施工した後、1週間養生を行った。亜硝酸リチウム内部圧入は、表-5に示す仕様で実施した。圧入位置は供試体側面部とし、上面（補修面）から 100 、 200 、 300 、 400 、 500mm の位置に直径 10mm ×深さ 100mm の孔を穿孔し圧入した。亜硝酸リチウム水溶液の圧入量は、ナトリウムイオンとリチウムイオンのモル比が 1.0 となるよう決定した。圧入時間は、 0.05% 供試体で累計 20 時間、 0.15% 供試体で累計 33 時間であった。圧入後の穿孔部はグラウトによる跡埋め、再シールを行った。

(4) 暴露方法

屋外暴露は、大阪市大正区南恩加島にある3階建ビルの屋上で行った。 0.05% 供試体は2008年2月下旬より、 0.15% 供試体は同年3月中旬より屋外暴露を開始し、各々78週（約1年半）まで屋外暴露を継続した。供試体は写真-1に示すように、上面（補修面）を上向きに設置した。[無補修/雨掛無]は降雨が直接上面に掛からないよう、

表-2 配合

配合	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	目標空気量 (%)	目標スランプ (cm)	単位量(kg/m^3)					混和剤	
					水	セメント	細骨材	粗骨材		高性能AE減水剤(kg/m^3)	AE助剤 (ml/m^3)
								反応性	非反応性		
基準	50.0	44.0	4.0 ± 1.5	8.0 ± 2.5	150	300	813	641	421	3.0	12

表-3 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材(非反応性)	川砂(滋賀県 野洲川産) 化学法:無害($R_c=50, S_c=28$)
粗骨材(反応性)	安山岩碎石(北海道産) 化学法:無害でない($R_c=144, S_c=503$) 粗粒率:6.63
粗骨材(非反応性)	碎石(兵庫県 西島産) 化学法:無害($R_c=45, S_c=42$) 粗粒率:6.68
水	上水道水
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
AE助剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-5 亜硝酸リチウム内部圧入の仕様

亜硝酸リチウム水溶液濃度	40%
圧入量	38.443kg/m^3
圧入圧力	$0.7\sim 1.3\text{MPa}$

表-4 シラン系表面含浸材の仕様

成分	アルキル アルコキシ シラン
溶媒の種類	イソプロピルアルコール、メチルアルコールの混合
シランの濃度	40%
標準塗布量	0.336g/m^2
標準塗り回数	3回

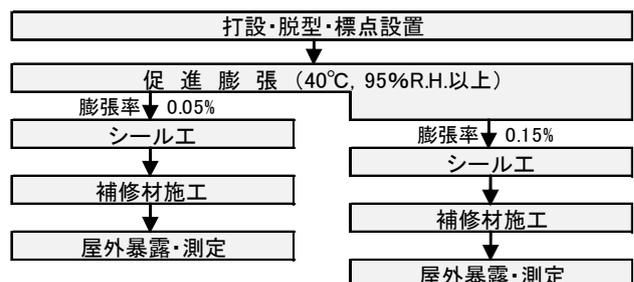


図-2 供試体作成手順

ビル屋上のペントハウスに併設された階段の下にトタン屋根を設け、その下に設置した(写真-2参照)。当該供試体は東側に壁のある場所に設置したため、直射日光は西日のみが当たることも他の供試体と異なる。

また、暴露期間中は温湿度センサー挿入用の測定孔にゴム栓を挿入した上にパラフィンを被せ、さらに炭酸カルシウム、水酸化アルミニウム、ポリブデンを主成分とするパテで密封した。図-3, 4に気象庁地域気象観測システム(AMeDAS)の大阪観測所における気温、降雨量を示す。

なお、屋外暴露開始時における各供試体の膨張率は、0.05%供試体で0.033~0.087%、0.15%供試体で0.139~0.168%、各条件2供試体の平均値では0.05%供試体で0.047~0.069%、0.15%供試体で0.142~0.163%であった。

(5) 測定項目と測定方法

測定項目は、表-1に示す膨張率、質量変化率、供試体内部の相対湿度、ひび割れ性状(スケッチ、幅ごとのひび割れ密度)とした。膨張率測定には、コンタクトゲージ(検長100および50mm, 感量0.001mm)を用いた。また、質量変化率の測定は、電子天秤(秤量60kg, 最小表示0.01kg)で行った。

相対湿度の測定は0.15%時点で補修を行った供試体について、各1体のみ実施した。相対湿度および温度の測定には、静電容量ポリマーのセンシング素子とバンドギャップ温度センサー、および、A/Dコンバーターとシリアルインターフェースがカップリングされた温湿度センサーを用いた。25°Cでの相対湿度測定誤差は10~90% R.H.の範囲で±1.8% R.H.であり、この範囲を外れるに従



写真-2 屋外暴露状況 (無補修/雨掛無)



写真-3 温湿度センサー外観

って誤差は直線的に増加し、0または100% R.H.での誤差は±4.0% R.H.である。センサーは写真-3に示すように、供試体に設けた測定孔への挿入時に先端部周辺が内壁に密着するよう作製したアルミ製プローブの先端部に取り付けた。プローブ挿入時は、水分が散逸しないよう測定孔をパテで密閉した。測定にあたっては、測定日前日に供試体を20±2°Cの室内に移し、測定値が安定するセンサー挿入後120分経過時の値を測定値とした。

ひび割れ性状を除く項目の測定頻度は、暴露開始後の経過期間、季節的要因も考慮して、暴露開始後4週までは毎週、その後26週までは隔週、その後64週までは4週または5週間に1回、その後は隔週を基本とした。なお、表面からの深さが400mm位置での相対湿度のみ、屋外暴露開始後8週経過時点から測定を開始した。また、ひび割れ性状は、0, 14, 26, 39, 52, 64, 78週に測定した。

3. 実験結果と考察

本研究では温度条件を実験要因としていないが、ASR反応は温度の影響を大きく受けること、供試体内の相対湿度も供試体温度の影響を受けると考えられることから、考察においては供試体温度も考慮する必要がある。本研究では、使用した温湿度センサーの特性上、相対湿度が高い状態では長期間の連続測定が困難であったため、暴露場所近隣の気温を用いた。

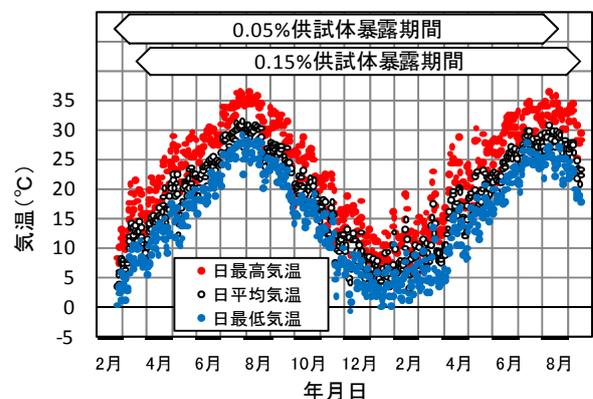


図-3 暴露期間中の気温

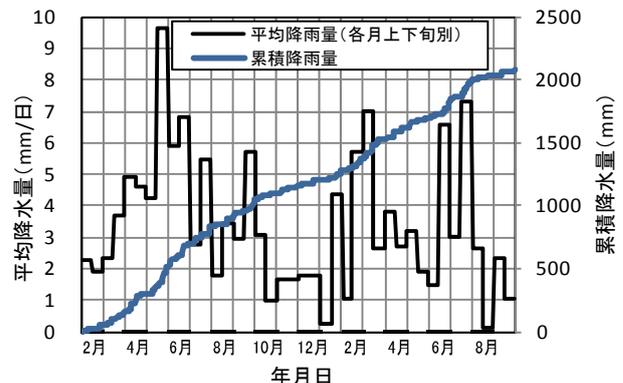


図-4 暴露期間中の降水量

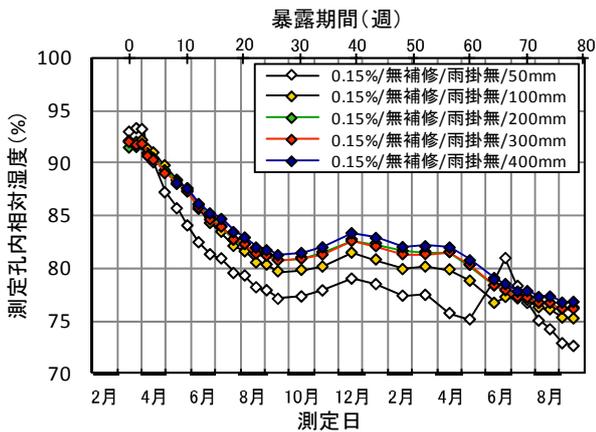


図-5 相対湿度の変化（無補修/雨掛無）

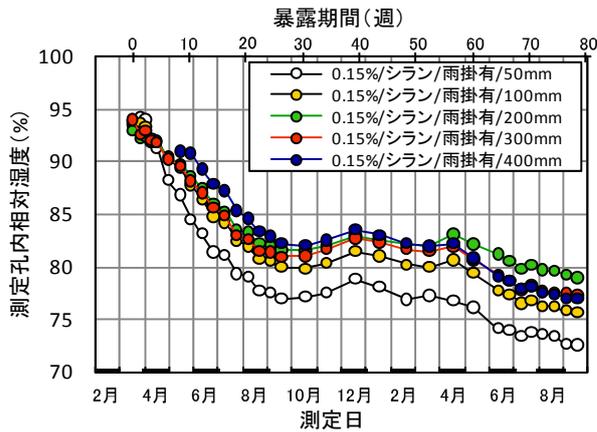


図-6 相対湿度の変化（シリム系表面含浸材/雨掛有）

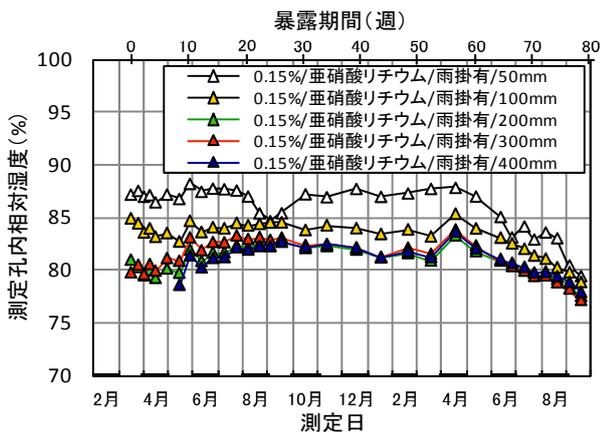


図-7 相対湿度の変化（亜硝酸リチウム/雨掛有）

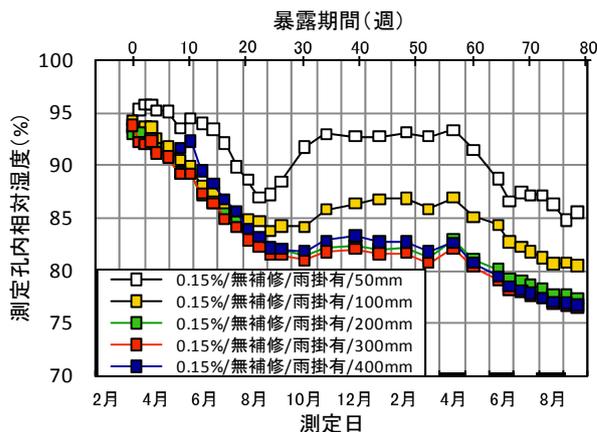


図-8 相対湿度の変化（無補修/雨掛有）

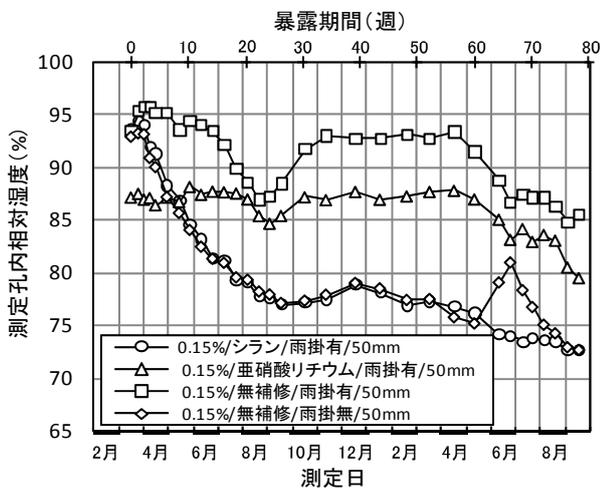


図-9 相対湿度の変化（上面から50mm位置）

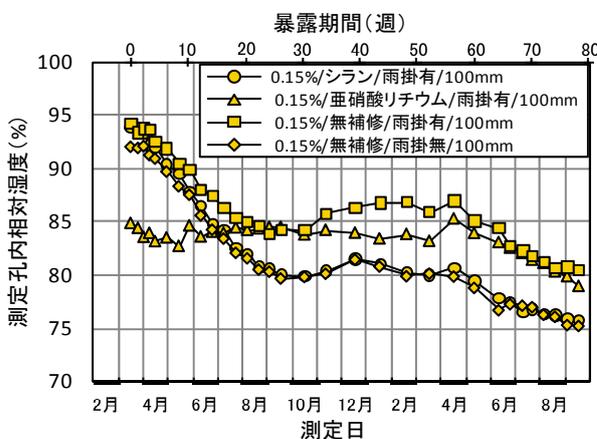


図-10 相対湿度の変化（上面から100mm位置）

(1) 相対湿度の変化

図-5~8に各供試体の測定孔内の相対湿度変化を、図-9~12に同様のデータを上面（補修面）からの深さごとに整理したものを示す。以下に、各供試体での変化について述べる。

a) 【無補修/雨掛無】（図-5参照）

相対湿度は9月頃まで低下が続いた後に上昇に転じ、12月頃をピークとして再度低下した。9月頃までの低下

は、上面（補修面）からの水分蒸発、水和反応、ゲルの吸水等が原因として考えられる。

暴露初期を除き、上面（補修面）から遠くなるほど相対湿度が高くなる傾向が見られるが、遠くなるに従いその差は小さくなっており、後述する質量の変化と併せて考えると、上面（補修面）からの水分蒸発が相対湿度低下の主要因と考えられる。

また、上面（補修面）から50mmの位置で、2年目の6~7月にかけて相対湿度の上昇と下降が見られた。後述する膨張率の変化とも符合する変化であることから、測

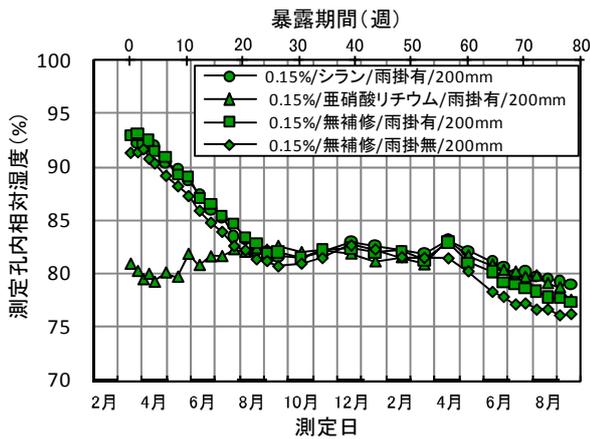


図-11 相対湿度の変化（上面から200mm）

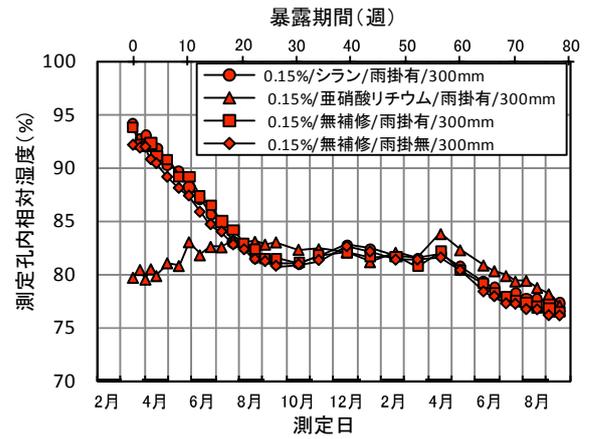


図-12 相対湿度の変化（上面から300mm）

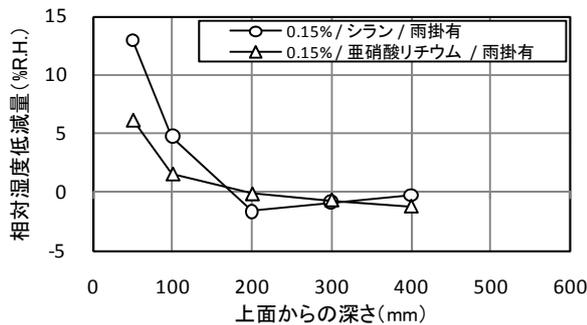


図-13 補修材による相対湿度低減効果

定機器の異常ではないと考えられる。屋根は写真-2にも示すように通常の降雨では上面に直接降雨が掛からない構造としているが、暴風雨で雨がタン屋根の下に巻き込み、上面から水分が供給された可能性も考えられる。

b) [シリラン/雨掛有] (図-6参照)

屋根下に設置した[無補修・雨掛無]とはほぼ同じ傾向を示している。上面（補修面）から200mmまでは[無補修/雨掛無]と同様に、上面（補修面）から遠くなるに従い相対湿度が高くなる傾向が見られる。シリラン系表面含浸材は、十分な水蒸気透過性、透水および吸水阻止性を発揮していると判断できる。また、シリラン系表面含浸材の施工は屋根下に設置したことと同様の効果を持つとも言える。

[無補修/雨掛無]と同様に12月頃をピークとした冬期における相対湿度の上昇がみられる。これは後述するようにこの間の質量増加が見られないことと矛盾するが、その一因としては屋外暴露時と測定時の温度差が考えられる。別途測定孔内にセンサーを約1週間に渡り挿入した状態で実施した連続測定の結果では、一日を周期とする測定孔内の温湿度変化において、温度と相対湿度には正の相関が確認されている。屋外暴露環境から $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の測定室内に供試体を移動した際に温度差がある場合にも同様の現象が生じていると考えられ、従って、水分量が一定であっても冬期は夏期よりも相対湿度が高く測定

される傾向にあると考えられる。このことが冬期の相対湿度上昇の一因と考えられる。

c) [亜硝酸リチウム/雨掛有] (図-7参照)

亜硝酸リチウムを内部圧入した供試体は他の供試体と比較して、相対湿度の変化が小さい結果となった。上面から200mmまでの範囲では上面に近いほど相対湿度が高いこと、50mmの位置では[無補修/雨掛有]と同様に8~9月に反転上昇していること(図-9参照)、さらに後述する質量変化から、長期的には水分逸散による相対湿度の低下傾向が見られるものの、その一方で、表面からの水分浸透の影響も窺える。

d) [無補修/雨掛有] (図-8参照)

200mmより深い部分での相対湿度の変化は、[無補修/雨掛無]、[シリラン/雨掛有]と同様の傾向であった。その一方、100mmまでの範囲では、上面からの水分の浸透によると考えられる相対湿度の上昇が生じた。50mmでは8月下旬頃を境として相対湿度が上昇に転じているのに対し、100mmではこれより2週間程度遅れて上昇に転じており、上面から徐々に水分が浸透している可能性が窺える。

e) 補修による湿度低減効果

無補修の場合を基準とした、シリラン系表面含浸材含浸および亜硝酸リチウム内部圧入による78週経過時点での相対湿度低減量を図-13に示す。降雨が掛かる環境でのシリラン系表面含浸材含浸による相対湿度の低減効果は、上面（補修面）から50mmの位置では13%R.H.程度であり、上面（補修面）から離れるに従い減少し、200mm弱で無補修との差が無くなる結果となった。亜硝酸リチウム内部圧入も同様の傾向であるが、相対湿度の低減量は50mmで約6%である。

(2) 質量の変化

0.15%供試体のうち、相対湿度を測定した供試体の質量変化率を図-14に示す。[無補修/雨掛有]が最も質量

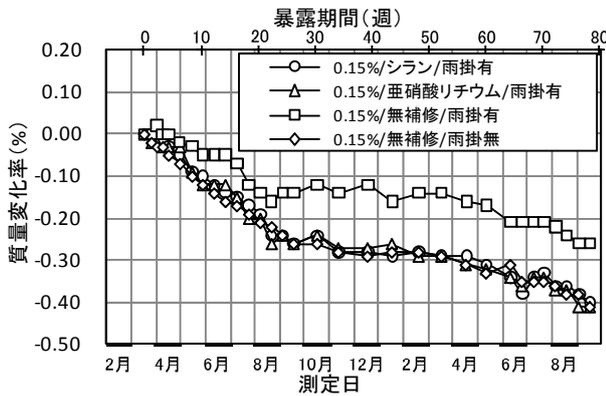


図-14 質量の変化 (0.15%供試体)

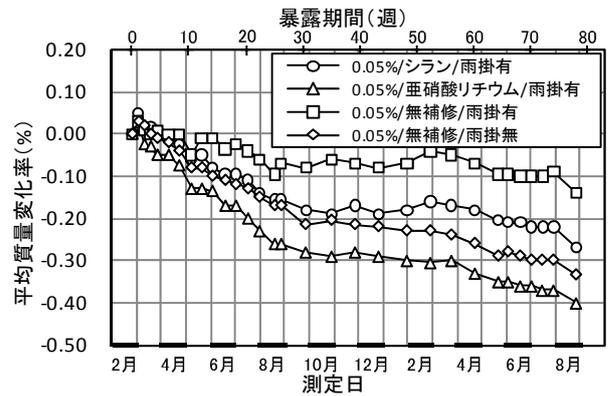


図-15 質量の変化 (0.05%供試体)

減少率が小さく、相対湿度の低下が小さい事とも一致する。[無補修/雨掛有]では9~3月頃の間、残る3種類では11~2月頃の間は質量変化がほとんど無いが、長期的には水分の逸散による質量減少がみられる。

0.05%供試体の平均質量変化率を図-15に示す。0.15%供試体と同様に季節的な要因の影響が窺える。また、[亜硝酸リチウム/雨掛有]は0.15%供試体とほぼ同じ質量変化率を示しているが、他の3種類は0.15%よりも小さな質量減少率を示した。この原因としては、0.15%供試体の方が促進膨張期間が長いために水分がより多く供試体に蓄積されたため、屋外暴露時には0.05%供試体より水分の逸散が多くなったことが考えられる。

(3) 膨張率の変化

a) 全般的な傾向

図-16に屋外暴露開始時点からの膨張率の変化を示す。値は、各2体の平均値である。全体的な傾向としては、[亜硝酸リチウム/雨掛有]を除き、相対湿度の変化と符合した変化を示している。すなわち、上面(補修面)からの水分浸透がほとんど無いと考えられる[無補修・雨掛無]、[シラン/雨掛有]は、上面(補修面)に近いほど膨張率が小さく、逆に、上面(補修面)からの水分浸透が有る[亜硝酸リチウム/雨掛有]、[無補修/雨掛有]では上面(補修面)に近いほど膨張率が大きくなる傾向を示した。また、形状による影響も一部でみられる。例えば[無補修・雨掛無]の78週経過時点では、補修面から深いほど相対湿度は大きい(図-5参照)、膨張率は0.05%供試体、0.15%供試体とも250mmが最大となっている(図-16最上段参照)。これは、供試体全体で一様な膨張力が生じたとしても、拘束条件の違いにより端部は中央部に比べて膨張量が小さくなるという、形状の影響によるものと考えられる。

季節的な要因では、[亜硝酸リチウム/雨掛有]を除く全般的な傾向として7月頃に最も膨張速度が大きくなっており、0.05%供試体よりも0.15%供試体でその傾向が強い。図-17は、膨張率の大きい250mm位置での[無補

修・雨掛無]の平均膨張速度と日最高気温の関係を示すが、気温との相関が認められる。膨張速度のピークは気温のピークよりも半月程度早くなっているが、その一因としては、直射日光の輻射熱による供試体温度の上昇が考えられる。また、同図より、1年目の夏と2年目の夏における膨張速度を比較すると、後者の方が小さい。この原因としては、図-5に見られるように2年目は1年目に比べて供試体内部の水分量が減少したことや残存膨張力が小さくなったことが考えられる。

b) 温度と水分量の影響

図-18に、温度、水分量と膨張速度との関係を示す。温度については図-3と同様に地域気象観測システムにおける近隣観測所の日平均気温を、水分量については供試体測定孔内の相対湿度を指標とした。縦軸の平均膨張速度は、各測定期間毎に平均気温、平均相対湿度、膨張速度(%/日)を算出し、平均気温(5°C刻み)、平均相対湿度(5%刻み)の組み合わせ毎に各測定期間の日数で加重平均した値である。データは、[亜硝酸リチウム/雨掛有]を除く3供試体の全測定孔位置(50, 100, 200, 300, 400mm)、全測定期間とした。300, 400mmは膨張率測定用標点が無いため、これを挟む2標点の膨張率の平均値とした。5°C, 30°Cについては、相対湿度との組み合わせで見た場合に存在しない組み合わせがあったため、図からは省いている。データ数が少ないことや、温湿度が同時に変化する状態を平均値で代表していることなどからデータにばらつきがあるものの、平均気温、平均相対湿度ともに膨張速度と正の相関があり、どちらか一方ではなく両者が同時に高い場合に、膨張速度が大きい傾向が認められる。

c) [無補修/雨掛無] (図-16 1段目参照)

78週間の屋外暴露で、0.05%供試体、0.15%供試体とも、最大で約0.2%の膨張率増加となった。0.05%供試体の方が残存膨張力は大きいと考えられるが、屋外暴露による膨張率の変化に大きな差は生じていない。また、0.15%供試体の上面と50mm位置では、暴露開始後65週頃の6~7月にかけて膨張率のピークが生じており、前述の相対

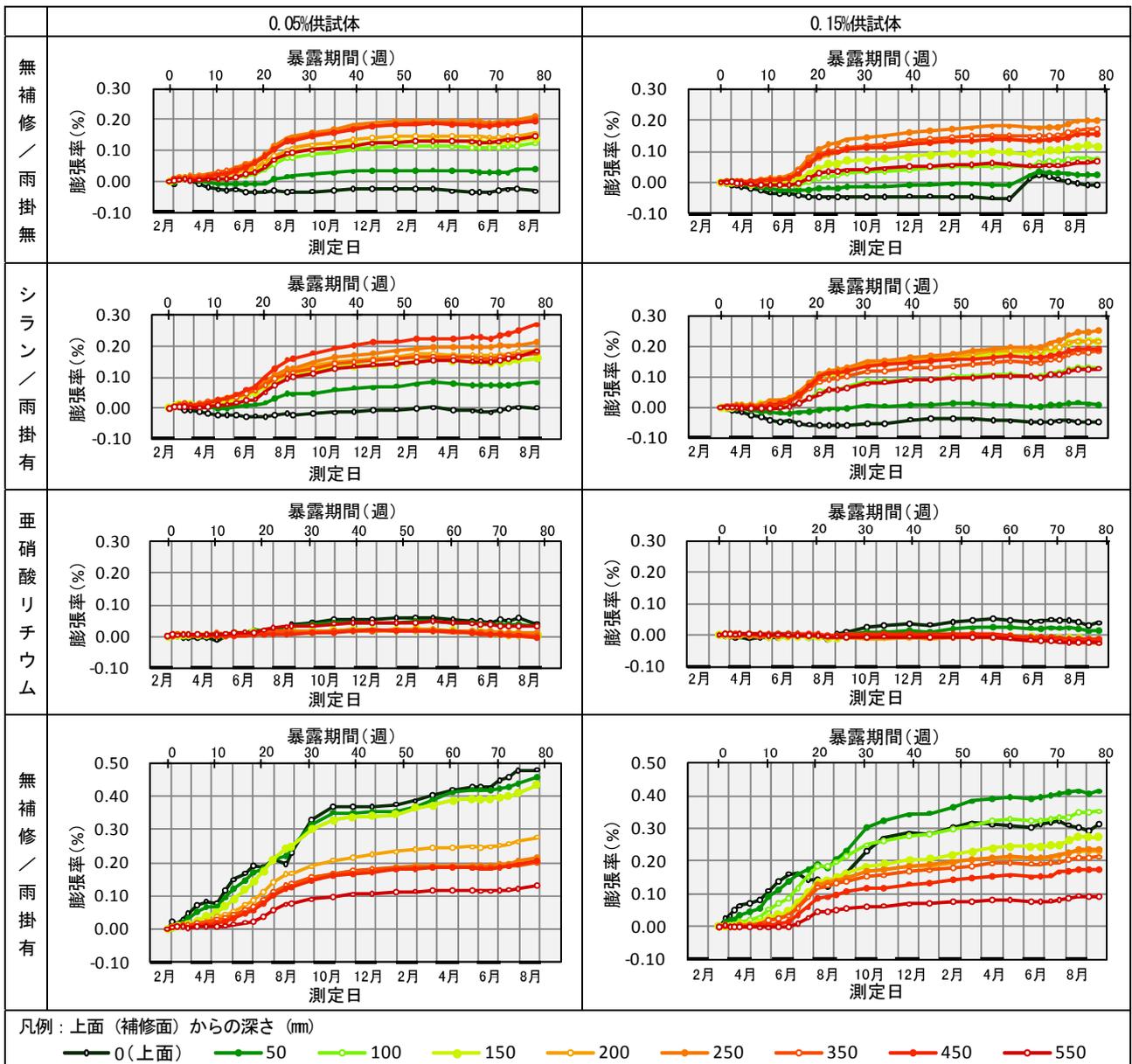


図-16 膨張率の変化

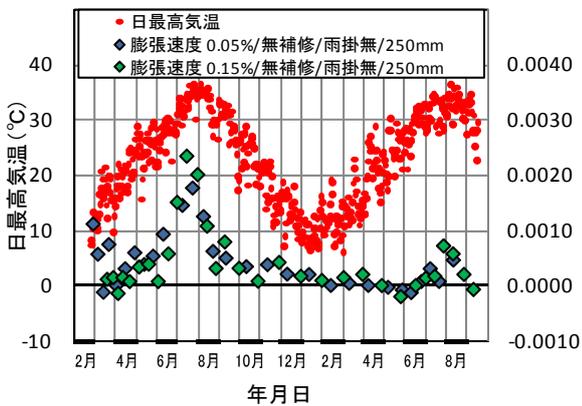


図-17 平均膨張速度と日平均気温との関係

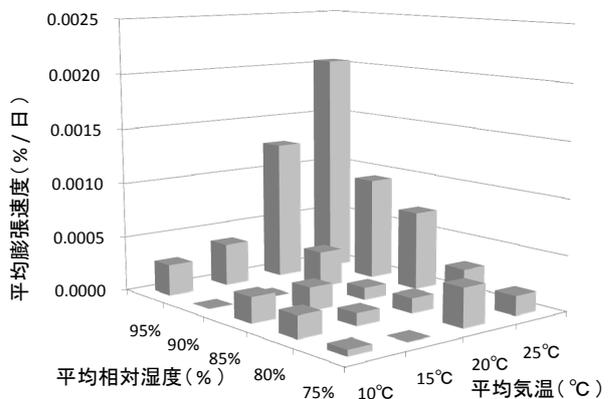


図-18 平均気温、平均相対湿度と平均膨張速度の関係

湿度のピーク（図-9参照）と符合する。

d) [シラン/雨掛有]（図-16 2段目参照）

相対湿度と同様に、[無補修/雨掛無] と近似した傾向

を示した。78週間の屋外暴露により、膨張率は0.05%供試体、0.15%供試体とも、最大で約0.26%前後の膨張率増加を示した。[無補修/雨掛無] より大きい値ではあるが、

良好な膨張抑制効果を示していると判断できる。

e) [亜硝酸リチウム/雨掛有] (図-16 3段目参照)

0.05%供試体, 0.15%供試体とも膨張率の増加は最大でも0.06%程度と他に比べて小さく, その範囲は上面から50mm程度に限られる。高温多湿の夏でも顕著な膨張が見られず, 亜硝酸リチウムによるASR膨張抑制効果が示されている。膨張率のピークは2年目の春頃であり, 気温との相関からは他の供試体と違う傾向を示した。

f) [無補修/雨掛有] (図-16 4段目参照)

0.05%供試体で0.48%, 0.15%供試体でも0.41%と非常に大きな膨張を示した。前者の方が顕著な膨張を示した理由としては, 残存膨張力の差が考えられる。また, 上面に近い部分では, 1年目の夏期に膨張率が減少する傾向が見られた。この原因としては, 日射や気温の上昇で特に供試体表面近くの温度が高くなり, 乾燥しやすい状態にあったことが一因として考えられる。

g) 補修による膨張抑制効果

補修材施工の有無による膨張率の差は, アルカリシリカゲルの吸水膨張量の差のみではなく, 乾燥収縮等の影響も含まれると考えられ, 厳密な意味でのASR膨張抑制効果ではない。しかしながら, 補修材の施工によって生じた差であるため, 本研究では, 膨張抑制効果として考える。

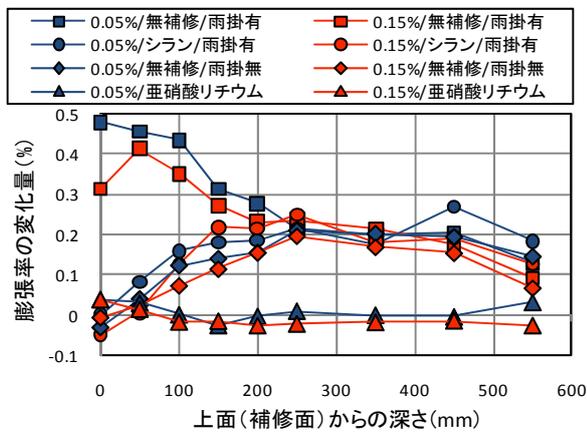


図-19 補修材による膨張抑制効果 (78週)

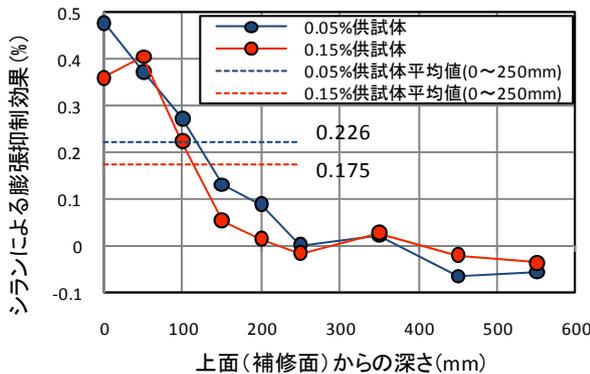


図-20 補修時期による膨張抑制効果の比較 (78週)

屋外暴露開始時点基準とした78週経過時点での各供試体の膨張率の変化量を, 図-19に示す。値は, 各2体の平均値である。補修材料, 暴露条件が同じであれば, 深さによって大小関係が逆転する場合があるものの全体的な傾向は0.05%供試体も0.15%供試体も同じである。

図-20に, 各深さにおける[シラン/雨掛有]と[無補修/雨掛有]との差によって求めたシラン系表面含浸材の膨張抑制効果を示す。0.05%供試体, 0.15%供試体とも上面(補修面)から遠ざかるに従い効果が減少し, 250mm程度で, 膨張抑制効果が無くなる。前述の相対湿度低減効果が確認された範囲が200mm程度であったことと, 概ね一致する結果である。上面(補修面)から250mmまでの平均値で評価すると, 0.05%供試体の方が0.05%程度膨張抑制効果が大きい。例として, 上面(補修面)から100mm位置での0.05%供試体と0.15%供試体の

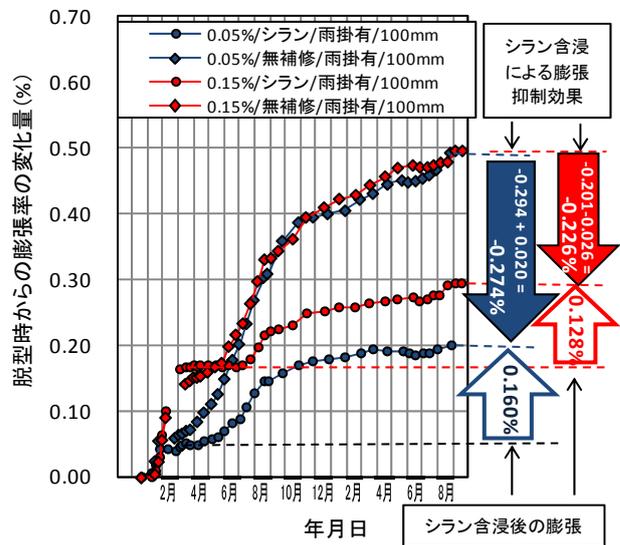


図-21 施工時期がシラン系表面含浸材の膨張抑制効果に与える影響 (100mm)

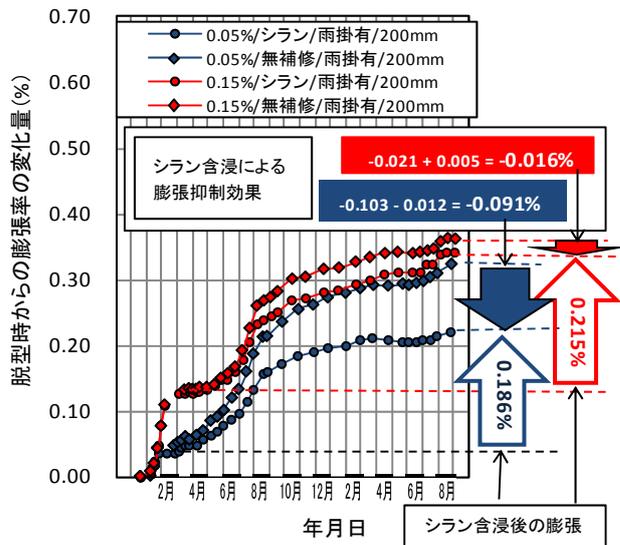


図-22 施工時期がシラン系表面含浸材の膨張抑制効果に与える影響 (200mm)

膨張抑制効果の比較を図-21に、同じく200mm位置での比較を図-22に示す。縦軸は標点貼り付け時を基準とした値であるため、グラフ右側に下向き矢印で示した膨張抑制効果の算出にあたっては、屋外暴露開始時点での無補修供試体とシラン含浸供試体の膨張率差を補正した。

図-21の0.05%供試体を例にとると、78週経過時点（8月26日）での各々の膨張率は0.494%（無補修）と0.200%（シラン）であり、その差は0.294%である。しかし、屋外暴露開始時点（2月25日）での膨張率は目標膨張率の0.05%ではなく、各々、0.060%（無補修）と0.040%（シラン）で0.02%の差があった。この差は、上面（補修面）と100mm位置、200mm位置の膨張率は違うこと、上面（補修面）でも厳密には目標膨張率とは異なることによって生じる。従って、膨張抑制効果の算出にあたっては屋外暴露開始時点での差0.02%を補正して0.274%としている。

100mm位置でのシラン系表面含浸材施工後の膨張率増加量（図中上向き矢印）は各々0.160%（0.05%供試体）と0.128%（0.15%供試体）で前者の方が大きい。その差は0.032%であり補修時点での膨張率の差（0.15% - 0.05% = 0.10%）に比べて小さい。このため、補修時期によって、膨張抑制効果に差が生じたことが分かる。

上面（補修面）から200mm位置での傾向（図-22参

照）は100mm位置と若干異なる。すなわち、100mm位置では78週経過時点で0.5%程度に達していた無補修供試体の膨張率が、200mm位置では0.3~0.4%と小さくなっており、表面からの水分供給が100mm位置に比べて少ない状況が窺える。一方、シランを含浸させた供試体は0.05%供試体、0.15%供試体とも100mm位置と概ね同じ傾向を示しており、その差は最大でも0.05%程度である。このため、シラン含浸による膨張抑制効果が100mmに比べて小さくなっている。なお、補修時期による膨張抑制効果を比較すると0.05%供試体の方が大きく、100mm位置と同様に早期に補修した方が効果が大きい結果となった。

亜硝酸リチウムを内部圧入した供試体は、前述の通り全長に渡り高いレベルで膨張が抑制されており、補修時期による差も小さい。

(4) ひび割れ性状の変化

図-23、24に、0.05%供試体および0.15%供試体のひび割れ幅別ひび割れ密度と補修面（上面）の膨張率の変化を示す。値は、各2体の平均値であり、膨張率は標点貼り付け時を基準とした値である。

膨張率の大きい〔無補修/雨掛有〕のひび割れ密度は、0.05%供試体、0.15%供試体共に40m²/m²程度が上限であり、

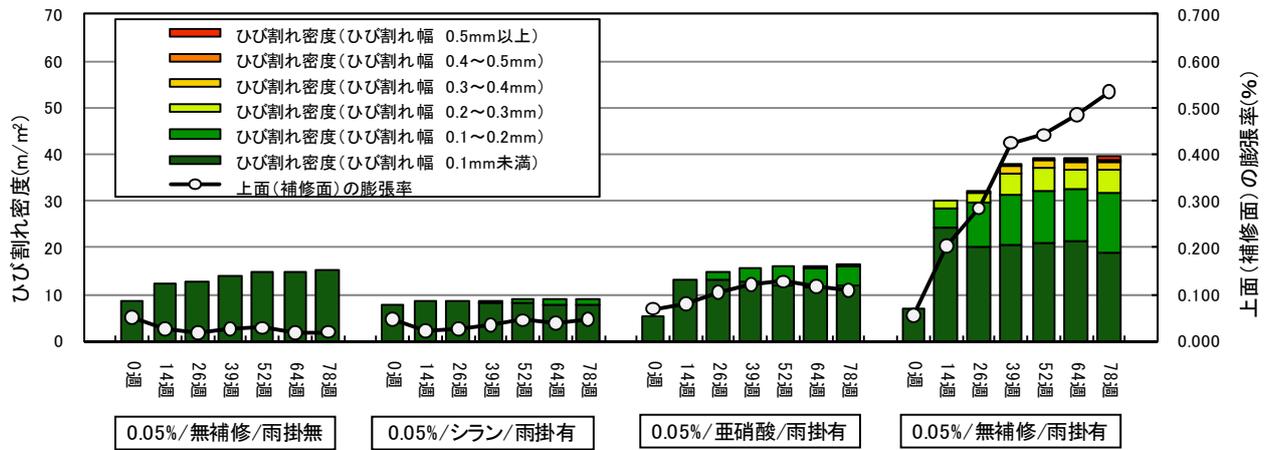


図-23 ひび割れ密度の変化 (0.05%供試体)

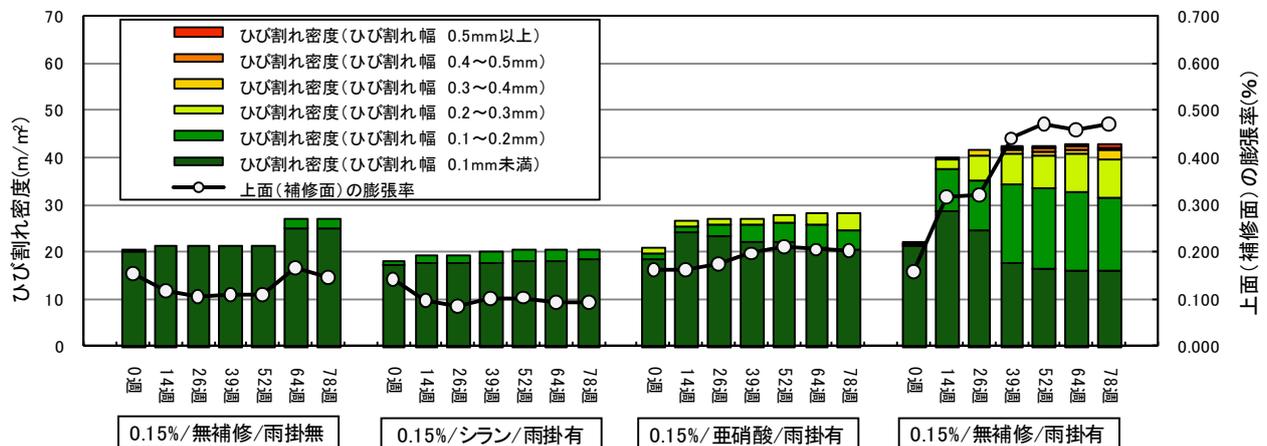


図-24 ひび割れ密度の変化 (0.15%供試体)

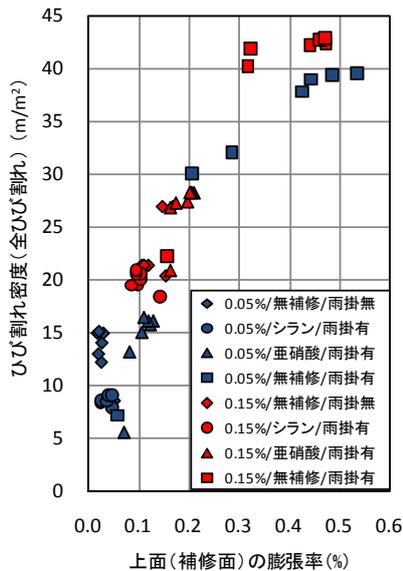


図-25 膨張率とひび割れ密度
(全ひび割れ) の関係

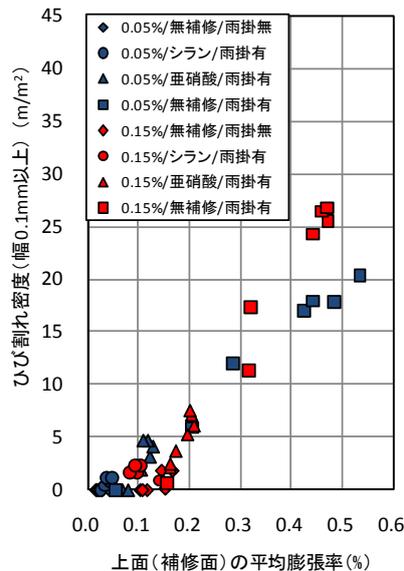


図-26 膨張率とひび割れ密度
(幅0.1mm以上) の関係

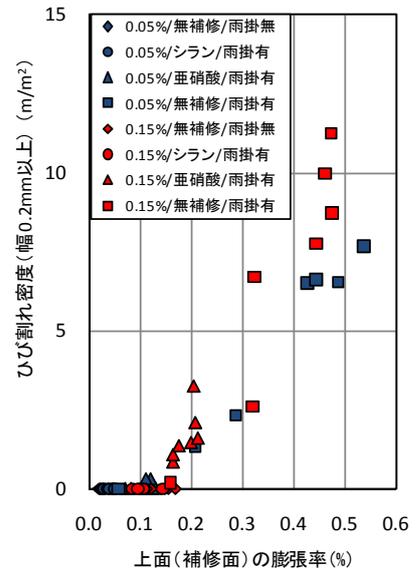


図-27 膨張率とひび割れ密度
(幅0.2mm以上) の関係

それ以上は膨張率が増加してもひび割れ密度は大きくならず、ひび割れ幅が増加する傾向にある。降雨による影響で内部よりも上面付近の膨張が大きいため（図-16参照）、上面でのひび割れ密度やひび割れ幅が増加していると考えられる。同様に上面からの水分浸透がある[亜硝酸リチウム/雨掛有]もひび割れ密度の絶対値は小さいものの、内部よりも上面付近の膨張が大きいため、ひび割れが増大していると考えられる。一方、[シラン/雨掛有]、[無補修/雨掛無]は、特に暴露初期において、膨張率が減少しているにもかかわらず、ひび割れ密度が増大する傾向にある。この理由としては、内部では膨張が継続しているのに対し、水分の浸透がない上面近くでは乾燥等による収縮が生じ、ひび割れが進展しているものと考えられる。以上のように、膨張率の変化と同様に、ひび割れ密度の変化も拘束条件の影響を受けていると考えられる。

図-25～27に、上面（補修面）の膨張率とひび割れ密度との関係を示す。膨張率は型枠脱型時を基準とした値であり、膨張率、ひび割れ密度とも各2体の平均値である。前述の通り、両者には相関関係が認められるものの、例えば膨張率0.05%の状態をひび割れ密度で推定するには、ひび割れ幅0.1mm未満も含めた全ひび割れを幅に対するひび割れ密度を把握する必要があると言える。

4. 実構造物における膨張抑制効果に関する考察

供試体実験結果および考察に基づき、シラン系表面含浸材および亜硝酸リチウムを実構造物に適用した場合の、ASR膨張抑制効果について以下に考察する。

(1) シラン系表面含浸材

a) シラン系表面含浸材の効果

本研究の条件下では、シラン系表面含浸材の水分低減効果および膨張抑制効果は表面から深くなるに従い減少し、その範囲は200～250mm程度であった（図-20参照）。相対湿度（図-6, 8参照）、質量変化率（図-14, 15参照）、膨張性状（図-16 1段目, 4段目参照）は[無補修/雨掛無]と同様の傾向を示しており、膨張力の大きい供試体への適用であるにもかかわらず、直接雨が掛かる環境にあっても屋根を設けたのと同様の効果を発揮していると言える。

長期的には内部の水分量は減少傾向にあることから（図-6参照）、今後、大きな変化が生じないとも考えられる。しかし、内部の膨張は継続しており（図-16 2段目参照）、ひび割れ幅の増大、内部への水分浸透、膨張速度の増加、ひび割れの増大と言う悪循環が生じ、実構造物で事例が報告されているいわゆる「再劣化」に転じる可能性も考えられる。

b) 実構造物への適用において期待される膨張抑制効果と留意点

一般的な道路橋橋脚のかぶりコンクリート厚は100mm程度であるのに対し、シラン系表面含浸材の水分低減効果は表面から200mm程度であり、かぶり厚よりも大きいことは重要である。すなわち、シラン系表面含浸材の施工により最外縁のスターラップの腐食環境悪化を抑制できる可能性があることを意味する。膨張に必要な水分が既に内部に蓄積されている場合には、内部のコンクリート膨張を抑制することは困難であるものの、水分や水分移動に伴う劣化因子の侵入を抑制することにより鉄筋腐食等の可能性を低減させ、これによりスターラップの拘

束を持続できれば、全体としては構造物を良好な状態に維持することに資すると考えられる。

以上のような効果を期待するためには、膨張の進行に必要な水分が内部に蓄積される前にシラン系表面含浸材を施工することが重要である。本研究の条件では、補修時期が早いほどASR膨張抑制効果も大きくなるとの結果が得られており（図-20参照）、前述の悪循環が生じるより前の段階においても、早期の補修が有効であることが明らかとなった。道路橋橋脚と供試体とは鉄筋の有無に違いはあるが、ひび割れ密度から膨張率を推定するためには、例えば膨張率0.05%の場合では幅の小さいひび割れも含めた全てのひび割れを把握することの重要性も示唆された（図-25参照）。

(2) 亜硝酸リチウム内部圧入

本研究の条件下では、亜硝酸リチウム内部圧入は、供試体全体にわたり十分な膨張抑制効果が確認された。上面近くでは相対湿度の上昇がみられ（図-7参照）、膨張率も内部より大きな値となっているが、最大でも0.06%程度であり実際の維持管理上問題となる膨張ではない（図-16 3段目参照）。亜硝酸リチウム内部圧入は近年実用化された新技术であることに加え、従来のASR補修工法に比べてコストが高いこともあり、シラン系表面含浸材に比べて実績は少ない。しかし、擁壁など表面保護工による水分浸透の防止が困難な構造物でも十分な膨張抑制効果が期待できることはシラン系表面含浸材には無い特長であると言える。

(3) 実構造物と実験との相違点

本研究は道路橋橋脚の一部を想定し、これに近い条件で実験を行ったが、短期間での評価を得るため配合においてはアルカリを添加するなどしたほか、以下の点において実構造物との差異があることを考慮する必要がある。さらなる知見の蓄積が必要と考えられる。

a) 環境条件

上部工によって大部分が日陰となる道路橋橋脚と比較した場合、本研究における屋外暴露では、日中は直射日光の影響でより高温になり易く、夜間は表面積が大きいことから低温になり易い環境にある。特に、直射日光による供試体温度の上昇は、実構造物の模擬という点でさらなる検討が必要である。すなわち、直射日光による温度上昇は、温度だけを考えた場合膨張促進側に作用するが、これによって水分の逸散が促進されるため、湿度環境からは膨張抑制側に作用すると考えられる。本研究では、[無補修/雨掛有]での膨張が上面から内部へと進行したものの、全長に渡り大きな膨張を呈するに至らなかった。仮に、膨張を促進する温度と水分量の関係が保たれた場合、[無補修/雨掛有]でより深い部分まで膨張が

進展し、その結果としてシラン系表面含浸材の膨張抑制効果も違ったものとなる可能性がある。実構造物のおかれる環境は多種多様かつ変化に富んでいる場合が多く、シラン系表面含浸材をはじめとした表面保護工の膨張抑制効果を評価するにあたっては、このことに留意する必要があると言える。

b) 拘束条件

道路橋橋脚はRCあるいはPC構造であるのに対し、供試体は無筋である。また、隣り合った部分から受ける拘束条件も違うなど、実構造物に比べて膨張しやすい条件にある。その一方で、実構造物では配筋や形状の影響から、劣化が進行するとひずみが局所化し大きなひび割れを生じることがあり、そこから内部へと水分が供給され、膨張が促進されることも考えられる。

5. 結論

反応性骨材を用いアルカリ量を調整して促進膨張させた供試体に、シラン系表面含浸材の含浸および亜硝酸リチウムの内部圧入を適用し、約1年半にわたり屋外暴露を継続した結果、以下の結論を得た。

- (1) 降雨が掛かる環境にあっても、シラン系表面含浸材は水分低減効果、膨張抑制効果を発揮し、その効果は屋根を設けた場合とほぼ同程度であった。
- (2) シラン系表面含浸材の水分低減効果、膨張抑制効果は、上面（補修面）から遠ざかるにつれて減少するが、効果の範囲は水分低減効果で深さ約200mm、膨張抑制効果で深さ約250mmまでであった。
- (3) シラン系表面含浸材の含浸による膨張抑制効果は、早期に施工する方が、より大きな膨張抑制効果を発揮した。
- (4) シラン系表面含浸材の施工をより早い劣化過程で実施することにより、降雨が掛かる環境にある構造物表面付近の膨張抑制、鉄筋の腐食環境の抑制が期待でき、もって、構造物全体の劣化進行を抑制できる可能性がある。
- (5) 亜硝酸リチウムの内部圧入は、水分浸透が影響する補修面付近を除き、圧入当初から安定した相対湿度を示すとともに、全長に渡って膨張が抑制されており、擁壁など水分供給がある実構造物への適用においても高い膨張抑制効果が期待できる。
- (6) 平均気温と平均湿度が膨張速度に与える影響を整理した結果、両者とも膨張速度と正の相関が認められたと共に、両者が同時に高い値の場合、膨張速度は特に高い値を示すことが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119「表面保護

- 工法設計施工指針（案）」, p.16, 2005.
- 2) 例えば, 榑原弘幸, 杉浦章雄, 橋修, 山口達夫: アルコキシシラン系表面含浸材によるコンクリートの耐久性向上に関する研究, 土木学会第 63 回年次学術講演概要集, 5-234, pp.647-648, 2008.
 - 3) 久保善司: アルカリ骨材反応により劣化損傷したコンクリート構造物の補修および補強に関する研究, 京都大学博士学位論文, p.11, 2000.
 - 4) 宮川豊章, 久田真, 菅島章文, 藤井学: 発水剤によるアルカリ骨材膨張の抑制, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.34-39, 1988.
 - 5) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], pp.172-173, 2007.
 - 6) ASR に関する検討委員会: アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン (案), pp.38-39, 2008.
 - 7) 久保善司, 本間英世, 服部篤史, 宮川豊章: シラン系表面処理の再補修効果について, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 2 巻, pp.35-38, 2002.
 - 8) 鍵本広之, 川村満紀: 大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定による ASR 表面ひびわ割れ発生過程の解明, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.1225-1230, 2009.
 - 9) Thomas, M. D. A., Hooper, R. and Stockes, D. B.: Use of Lithium-Containing Compounds to Control Expansion in Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, *Proc. 11th International Conference on AAR in Concrete*, pp.783-792, 2000.
 - 10) Mei, L. B., Lu, D., Deng, M. and Tang, M. S.: Expansion of Siliceous Aggregate in LiOH Solution, *12th International Conference on AAR in Concrete*, pp.399-406, 2006.
 - 11) Collins, C. L., Ideker, J. H., Willis, G. S. and Kuritis, K. E.: Examination of the Effects of LiOH, LiCl, and LiNO₃ on Alkali-silica Reaction, *Cement and Concrete Reserch*, Vol.34, No.8, pp.1403-1425, 2004.
 - 12) 松本茂, 佐々木一則, 久利良夫, 後藤年芳, 宮川豊章: 反応性骨材を用いた供試体の表面保護工による膨張抑制効果, 材料, Vol.57, No.10, pp.987-992, 2009.

(2010. 1. 26 受付)

FUNDAMENTAL STUDY FOR CONTROLLING ASR EXPANSION BY SILANE PENETRANT SYSTEM AND LITIUM NITRITE PRESSURIZED INJECTION

Shigeru MATSUMOTO, Tsutomu NIINA, Kazunori ERA, Daisuke MURAHASHI
and Toyoaki MIYAGAWA

To investigate the effective use of silane penetrant system for treating structures in which alkali-silica reactions have occurred, concrete specimens were treated and subsequently exposed to outdoor weather conditions for approximately one and a half years. Expansion ratio and internal relative humidity at incremental distances from the impregnated surface were measured following this exposure period. Results clearly indicate that expansion is effectively inhibited up to about 250 mm from the impregnated surface, and that early treatment induces a stronger controlling of ASR expansion. Effective controlling of ASR expansion was also observed following similar outdoor exposure experiments conducted using lithium nitrite pressurized injection.