

# ASRにより劣化したコンクリート構造物の シラン系表面処理による補修効果の検討

久保善司<sup>1</sup>・服部篤史<sup>2</sup>・栗原慎介<sup>3</sup>・宮川豊章<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学大学院助教 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>工修 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 (〒305-0003 つくば市桜 1-17)

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

ASR補修を行う場合には、コンクリート内部の水分逸散が可能なシラン系表面処理が期待されている。しかし、補修時のコンクリートの含水状態がシラン処理の補修効果に与える影響については、十分に明らかにされていないのが現状である。また、補修効果については供試体レベルの検討が多く、実構造物におけるコンクリート内部の水分移動を考慮した検討は十分に行われていない。そこで、補修時の含水状態がシラン処理の補修効果に与える影響を検討するとともに、実構造物を模擬した供試体中の水分分布および膨張挙動からシラン系表面処理による補修効果を把握し、ASR補修における適切な補修工法を検討することとした。

**Key Words :** *surface treatment, silane, water control, water content of concrete, hydrophobic effect, reduction of alkali-silica expansion*

## 1. はじめに

従来、コンクリート構造物は優れた耐久性をもつものと考えられてきたが、近年、多くの劣化損傷例が報告されている。これらの劣化原因の代表的なものとしてアルカリシリカ反応(ASR)および鉄筋腐食などが挙げられる。これらの劣化機構において水分は重要な要因となっている。特に、ASRの場合には、外部から吸水される水分および内部の水分によって膨張が進行するとされている。そこで、補修対策としてコンクリート中の水分制御を行うことがきわめて有効である。

ASR補修を行う場合、遮水系の表面処理を行った場合には、既にコンクリート中に含まれていた水分によって、ASR膨張が進行し、再変状を生じたり、場合によっては無処理の場合よりも変状が大きくなることすらある<sup>1),2)</sup>。このような再変状を防止するために、コンクリート内部の水分逸散が可能なシラン系表面処理が期待されている<sup>3),4),5)</sup>。ASR補修に表面処理が用いられる場合、補修時のコンクリートの含水状態はきわめて重要である。しかし、補修時のコンクリートの含水状態がシラン処理の補修効果に与える影響については、十分に明らかにされていないのが

現状である。また、補修効果については供試体レベルの検討が多く、実構造物におけるコンクリート内部の水分移動の影響を考慮した検討は十分には行われていない<sup>6),7),8)</sup>。

そこで、補修時の含水状態がシラン処理の補修効果に与える影響を検討するとともに、実構造物を模擬した供試体中の水分分布および膨張挙動からシラン系表面処理による補修効果を把握し、ASR補修における適切な補修方法を検討することとした。

## 2. 実験概要

本研究は、補修時の含水状態の影響を検討するシリーズ1と、実構造物での効果を把握するためにシラン系表面処理を施したコンクリート中の水分分布およびASR膨張抑制効果を検討するシリーズ2に分けて行った。

### (1) 使用材料および配合

細骨材としては野洲川産の骨材(比重:2.59, 吸水率:1.37, FM:2.50)を使用し、粗骨材として土山産の非反応性骨材(比重:2.64, 最大寸法:15mm)と

表-1 粗骨材の試験結果(ASTM C289 および C277)

骨材	化学法				モルタルバ法		
	Sc (mmol)	Rc (mmol)	Sc/Rc	判定	膨張 (μ)		
					2週	4週	8週
反応性骨材	725	190	3.82	潜在的有害	113	249	390
非反応性骨材	33	36	0.92	無害	86	158	209
混合(1:1)	616	133	4.63	潜在的有害	298	1007	1561

表-2 示方配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						減水剤 (ml)
			W	C	S	Gn*1	Gr*2	NaCl	
非反応性	51	44.8	192	377	766	944	-	-	3740
反応性	51	44.8	192	377	755	479	465	10.55	3740

\*1: 非反応性, \*2: 反応性

豊島産の反応性骨材(比重:2.56, 最大寸法:20mm)を使用した。なお、非反応性コンクリートについては前者のみを用い、反応性コンクリートについては両者をほぼベシマムに近い体積比となるように混合した。粗骨材のASTM化学法(ASTM C 289)およびモルタルバ法(ASTM C 227)による結果を表-1に示す。セメントとして普通ポルトランドセメントを用いた。コンクリートの配合を表-2に示す。短期間で大きな膨張量を得ることを期待して、等価アルカリ量は8.0 kg/m<sup>3</sup>に設定した。

### (2) 補修時の含水状態

シラン系表面処理は、高い含水状態での適用が可能であるとされ、その発水効果による質量減少は高含水状態からも発揮されることが知られている<sup>9)</sup>。また、エポキシなどの遮水系の表面処理では、内部水分のみでも膨張が生じる可能性があること、さらには、表面処理の性能に与える影響から、高周波水分計の測定値が10%以下<sup>10)</sup>であることが必要とされている。そこで、表面水分率を補修時のコンクリートの含水状態を与える指標と考え、脱型直後の比較的短い乾燥期間で達成される12%、遮水系の表面処理が可能である10%、両者の中間である11%およびきわめて乾燥した8%の4種類の表面水分率でシラン含浸を行い、補修時のコンクリートの含水状態がシラン処理の発水効果およびASR膨張抑制効果に与える影響を把握することとした。なお、表面水分率は内部の含水状態まで十分に反映するものではないため、質量含水率<sup>7),9),11)</sup>を参考とすることで、内部水分の影響についても検討することとした。

### (3) 表面処理仕様

ASR膨張に対する高い抑制効果が期待されている発水系の表面処理としてシラン含浸およびその上に透湿型モルタルを上塗りするモルタル併用<sup>12),13),14)</sup>(以下、シラン+PCMと略す)を用意した。シラン含

表-3 シラン系表面処理の性能

表面処理仕様	水分制御	透湿性	透水性	伸び能力
シラン処理	発水系	31g/m <sup>2</sup> /day	2.8g/m <sup>2</sup> /day	-
シラン+PCM		25g/m <sup>2</sup> /day	2.1g/m <sup>2</sup> /day	75%

表-4 供試体種類および数

環境	水分率	乾湿環境				室外環境			
		12%	11%	10%	8%	12%	11%	10%	8%
反応性	シラン処理	2	2	2	2	2	2	2	2
	無処理	2	2	2	2	2	2	2	2
非反応性	シラン処理	2	2	2	2	2	2	2	2
	無処理	2	2	2	2	2	2	2	2

浸には優れた発水性が期待できる分子量262(デシルトリメトキシシラン)<sup>9),15)</sup>をアルコール溶液(1 mol/kg)として用い、標準的適用量の300 g/m<sup>2</sup>を刷毛塗りで適用した。透湿型モルタルは2.0 kg/m<sup>2</sup>を刷毛塗りで適用した。表面処理性能を表-3に示す。なお、比較のため無処理の供試体も用意した。

### (4) 環境条件

乾湿環境:日本における各地方の年間の平均気温および湿度の最大値はそれぞれ約25℃, 80%R.H.である。したがって、日本で実際に生じうる最大の膨張促進環境に対応できるように、40℃, 100%R.H.と20℃, 60%R.H.とを12時間おきに繰り返すことにより、気温および湿度の平均が30℃, 80%R.H.となるように設定した。

室外環境:日光、風雨等の自然環境の影響を直接受けるように屋外に供試体を静置した。

### (5) 補修時の含水状態の影響—シリーズ1—

表面処理によるASR膨張抑制効果を把握するため、両側面に20cm間隔でひずみ測定用プラグを埋設した角柱供試体(10×10×40cm)をコンクリート打設1日後脱型し、20℃で4週間湿布養生後、高周波水分計により測定を行い、所定の表面水分率となるまで室内に静置した後、シラン含浸を行い、各環境下(乾湿環境、室外環境(京都地区、年間平均気温約15℃、年平均湿度は約75%R.H.))に静置した。供試体種類および数を表-4に示す。経時的な質量変化および膨張挙動から、補修時の含水状態がシラン処理による発水効果およびASR膨張抑制効果に与える影響を検討することとした。

### (6) シラン系表面処理を施したコンクリート中の水分分布およびASR膨張抑制効果—シリーズ2—

反応性および非反応性コンクリートの実構造物の断面を模擬した大型供試体を用意し、日光・風雨などの自然環境の影響を直接受けるように屋外(大阪地

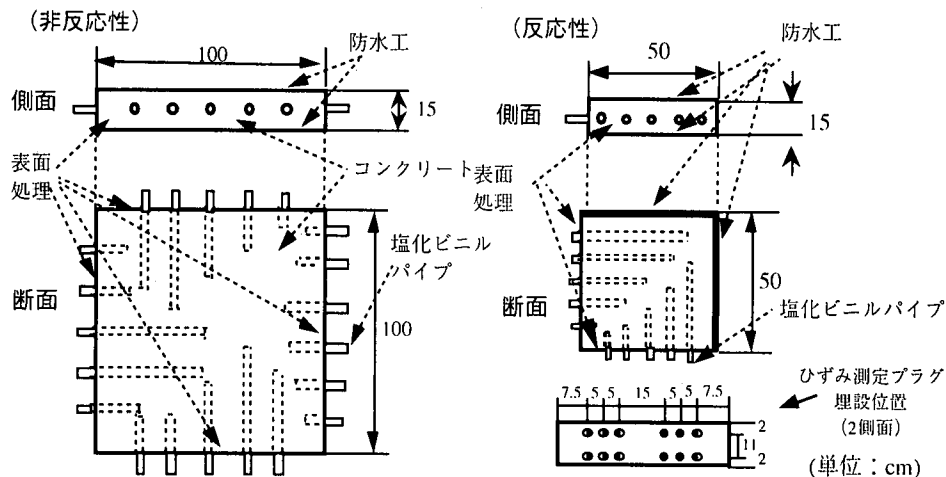


図-1 大型供試体

表-5 供試体種類および数

	無処理	シラン処理	シラン+PCM
反応性	1 (3)	1 (3)	1 (3)
非反応性	1 (3)	1 (3)	1 (3)

( ) 内は角柱供試体本数

表-6 表面からの深さ(測定数)

非反応性		反応性	
深さ(cm)	測定数	深さ(cm)	測定数
5	3	2.5	2
7.5	3	5	1
10	4	7.5	1
20	2	10	1
30	2	20	1
40	2	25	1
50	1	30	1
		35	1
		45	1

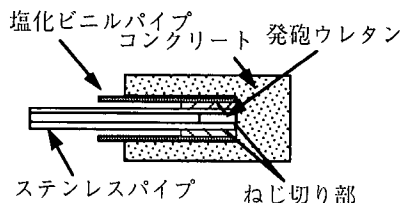


図-2 塩化ビニルパイプの構造

区)に静置した(図-1参照)。年間平均気温約16℃、年平均湿度は約65%R.H.である。非反応性コンクリートの供試体は寸法を100×100×15cmとしたが、反応性コンクリートのものについては、骨材量の制約から、寸法を50×50×15cmとした。また、角柱供試体(10×10×40cm)を同一環境下に置き、その質量変化と反応性のものについてはひずみも経時的に測定した。これは供試体レベルの補修効果を確認し、大型供試体の結果と比較検討するものである。供試体はシラン含浸のもの、透湿型モルタルによる上塗りを用いるもの、および無処理の計3種類である。供試体種類および数を表-5に示す。

大型供試体は、打設後、3日間湿布養生を行い、その後脱型した。非反応性のは鋼板の上に打設したため、下面からの水分逸散、供給はほとんどないものと考えられる。反応性のものについては、内部の水

分移動が非反応性のものの1/4モデルとなるように、下面および2側面に防水工を行った。その後、非反応性および反応性ともに2週間湿布養生後、約1週間乾燥を行い、上面の防水工を行った。防水工後は、供試体の水分逸散および吸水は防水工が施されていない側面のみで行われる。防水工3日後に、表面処理を開始し、処理後の乾燥を含めて5日間を要して処理を行い、供試体を暴露した。

大型供試体には表面から所定の深さ(図-2および表-6参照)の相対湿度を測定するための塩化ビニルパイプを埋設した。塩化ビニルパイプはステンレスパイプとの二重構造となっており、測定時にパイプ内に湿度センサーを挿入し、各供試体の所定の深さの相対湿度を経時的に測定し、水分分布<sup>(16),(17),(18)</sup>を検討した。

また、反応性大型供試体は側面にひずみ測定用プラグを埋設した。さらに、寸法を非反応性のものの1/4としたため、表面処理による効果を質量変化でも確認することができた。

角柱供試体についても、打設後、3日間湿布養生を行い、その後脱型した。脱型後の養生、乾燥および表面処理は大型供試体と同様の方法で行った。表面処理は供試体全面に行い、防水工は施していない。

表-7 ひび割れ発生時期（反応性）

	乾湿環境		室外環境	
	無処理	シラン	無処理	シラン
12%	6週	10週	6週	84週
11%	4週	13週	7週	159週
10%	3週	22週	10週	-
8%	2週	54週	5週	-

(7) 測定項目

測定結果は同一要因の平均値を用いて示す。

外観観察：ひび割れ，ゲル，塗膜のふくれなどの目視観察を行った。

質量：角柱供試体については感量0.1gのはかりにより供試体質量を測定し，暴露開始時からの変化量を開始時質量で除したものを質量減少率として求めた。質量減少を正とした。反応性の大型供試体については感量20gのものをを用いた。また，シリーズ1については，養生後の供試体が飽水状態であると仮定し，飽水状態を100%とし，絶乾状態を0%とした相対的な質量含水率<sup>7),9),11)</sup>で供試体の含水状態を示すこととした。

ひずみ：供試体に埋設したプラグの間隔を基準として，ひずみを求めた。

相対湿度：供試体中に埋設されたパイプ内の湿度を感量0.1%の静電容量式湿度センサーによって測定した。

3. 補修時の含水状態の影響—シリーズ1—

(1) 外観観察

供試体の各環境下における暴露後の外観観察によるひび割れの発生時期を表-7に示す。乾湿環境下においては，無処理のものは，補修時の含水状態にかかわらず短期間でひび割れが生じている。これに対して，シラン処理のものでは，ひび割れは生じるもののその発生時期は遅く，処理による抑制効果が認められる。また，補修時の含水状態が低いものほど高い抑制効果を示し，ひび割れ発生時期が遅くなっている。

室外環境下においても，無処理のものは，補修時の含水状態にかかわらず短期間でひび割れが生じている。これに対してシラン処理のものでは，補修時の含水状態が高い12%のものは約1年半程度でひび割れが発生した。若干低い11%のものは3年程度でひび割れを生じているものの，表面処理による抑制効果が長期間持続している。また，低い含水状態において処理されたものについては，暴露3年以後においてもひび割れは認められず，長期においても表面処理効

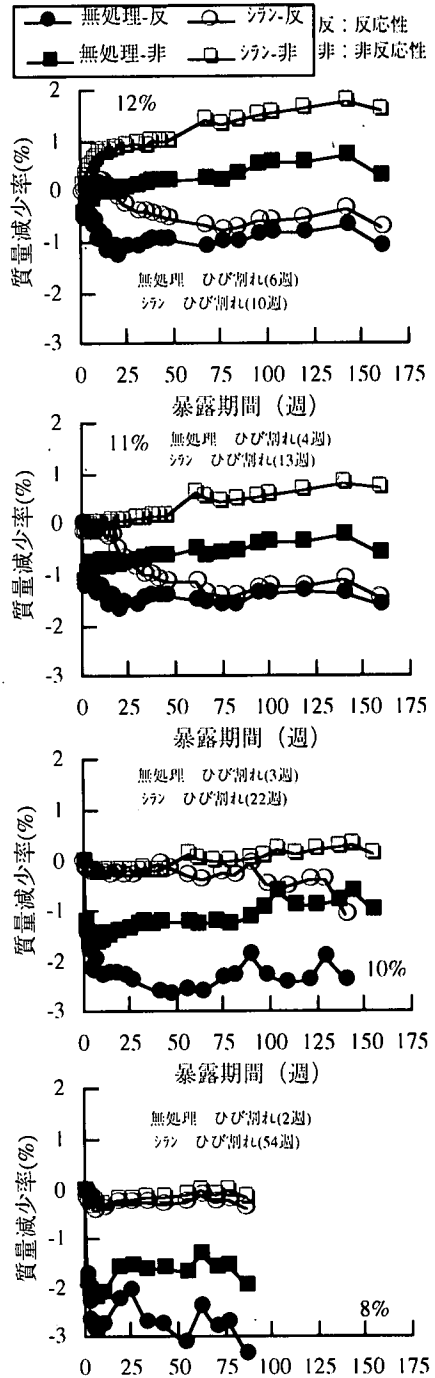


図-3 乾湿環境下における質量減少率の経時変化

果が持続している。

(2) 質量減少率

a) 乾湿環境

乾湿環境下における質量減少率の経時変化および補修時の含水状態が質量減少率に与える影響をそれ

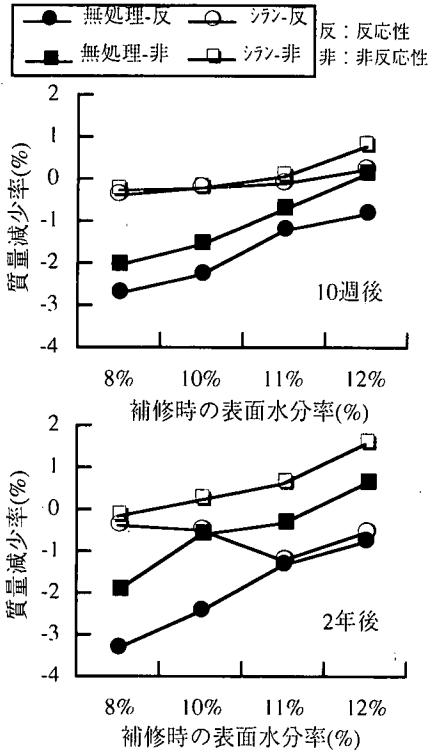


図-4 補修時の含水状態が質量減少率に与える影響(乾燥環境)

それ図-3および図4に示す。補修時の含水状態にかかわらず、反応性の無処理のものは暴露初期から大きな質量増加を示し、非反応性の無処理のものに比べて大きな質量増加が認められることから、ゲルによる吸水が生じているものと考えられる。

これに対して、反応性のシラン処理のものでは、初期においては発水効果を発揮し、補修時の表面水分率が12%のものでは水分逸散による質量減少を示し、12%以外のものは外部からの吸水を抑制している。しかし、補修時の表面水分率が12%および11%のものは、ひび割れ発生後にひび割れから供給されると推定される水分によって大きな質量増加を示し、暴露75週後程度ではほぼ無処理と同程度の質量減少率となった。ひび割れ発生後のシラン処理による抑制効果には限界があるものと考えられる。

10%および8%のものは、ひび割れ発生後、質量増加が見られるが、12%および11%ほど顕著ではない。後述するが、反応性のものは80%以上の含水率において急激に大きな膨張を生じる。補修時の表面水分率が10%以下のものでは、ひび割れ発生時において急激に膨張するような含水率ではなかったため、急激な質量増加を示さなかったものと考えられる。

非反応性のシラン処理のものについては、補修時

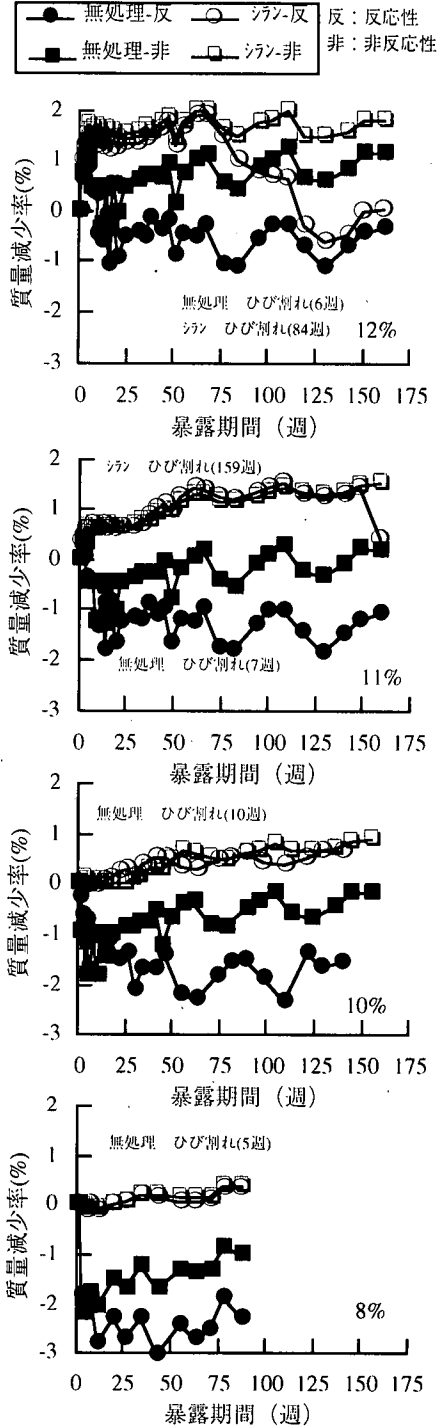


図-5 室外環境下における質量減少率の経時変化

の表面水分率が10%までは質量減少が認められるものの、発水効果による内部水分の逸散には限界があり、8%の場合には若干の質量増加が認められる。

b) 室外環境

室外環境下における質量減少率の経時変化および

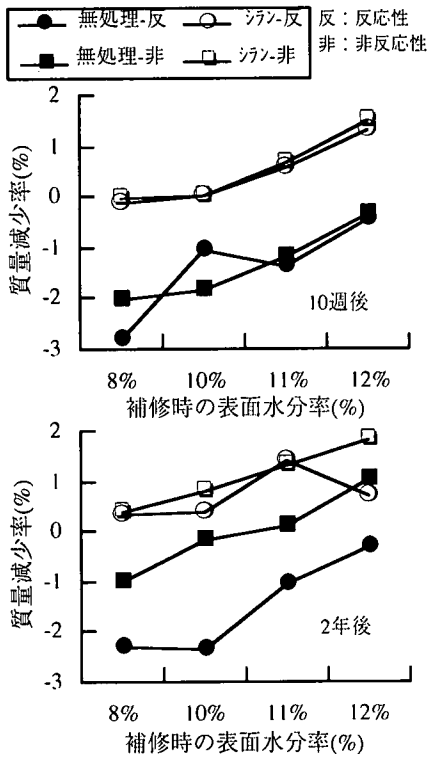


図-6 補修時の含水状態が質量減少率に与える影響（室外環境）

補修時の含水状態が質量減少率に与える影響をそれぞれ図-5および図-6に示す。補修時の含水状態にかかわらず、反応性の無処理のものは暴露初期から大きな質量増加を示し、非反応性の無処理のものに比べて大きな質量増加が認められることから、ゲルによる吸水が生じているものと考えられる。

これに対して、反応性のシラン処理のものではコンクリートの種類にかかわらず、良好な発水効果を発揮し、補修時の表面水分率が10%のものでも質量減少が認められる。しかし、補修時の表面水分率の高い12%および11%のものでは、それぞれ暴露約1年半後および3年後にASR膨張によるひび割れを生じ、ゲルの吸水によると考えられる質量増加を示した。

補修時の含水状態が高い場合には、シラン処理したコンクリートの発水効果の持続に問題が生じるものと考えられる。しかし、11%の場合でも3年程度は膨張を抑制しており、性能の低下はあるものの、遮水系などが適用できない含水状態においても、シラン処理による発水効果は期待できるものと考えられる。

### (3) ひずみ

#### a) 乾湿環境

乾湿環境下におけるひずみの経時変化および補修

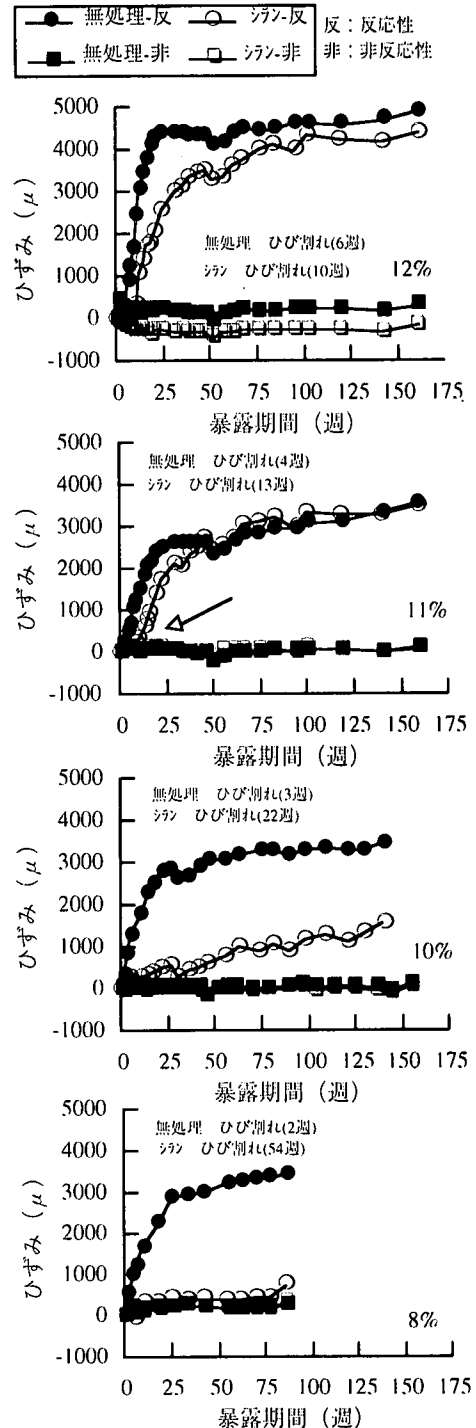


図-7 乾湿環境下におけるひずみの経時変化

時の含水状態がひずみに与える影響をそれぞれ図-7および図-8に示す。補修時の含水状態にかかわらず、反応性の無処理のものは暴露初期から大きな膨張を生じている。これに対して、反応性のシラン処理のものでは、補修時の含水状態が高いものでも、初期にお

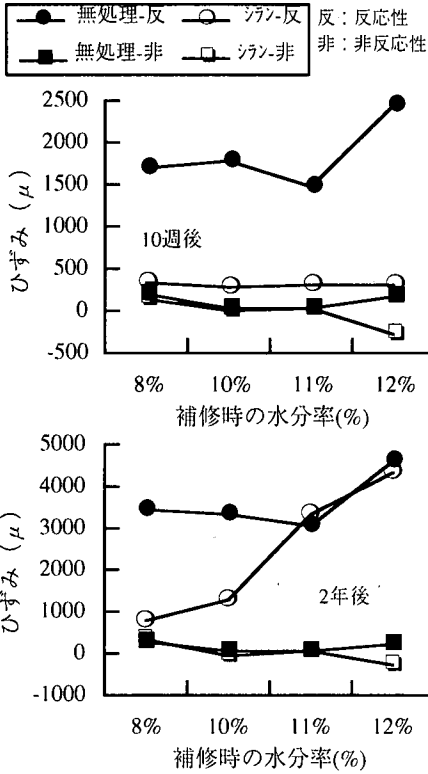


図-8 補修時の含水状態がひずみに与える影響 (乾湿環境)

いてはシラン処理の発水効果によってASR膨張を抑制している。しかし、ひび割れ発生以後、膨張を示しており、高温多湿下において促進されるASR膨張を完全に長期間抑制することは困難であると考えられる。この場合であっても、シラン処理のものは膨張速度が無処理のものに比べて小さく、シラン処理による抑制効果が認められる。

さらに、補修時の含水状態が低い10%および8%のものについては、ひび割れ発生時期がそれぞれ22週および54週後であり、無処理のものに比べてASR膨張が長期間抑制されている。また、ひび割れ発生後の膨張速度も大きく緩和され、長期においても抑制効果が認められる。補修時の含水状態が低いものについては、ひび割れ発生時に急激に膨張するような含水率でなかったため、ひび割れが軽微となり、シラン処理による抑制効果が発揮されたものと考えられる。また、その抑制効果も内部水分量が少ないものほど顕著であった。

非反応性のものは膨張を示しておらず、また、補修時の状態が高い12%および11%のシラン処理のものは乾燥収縮を生じている。

#### b) 室外環境

室外環境下におけるひずみの経時変化および補修

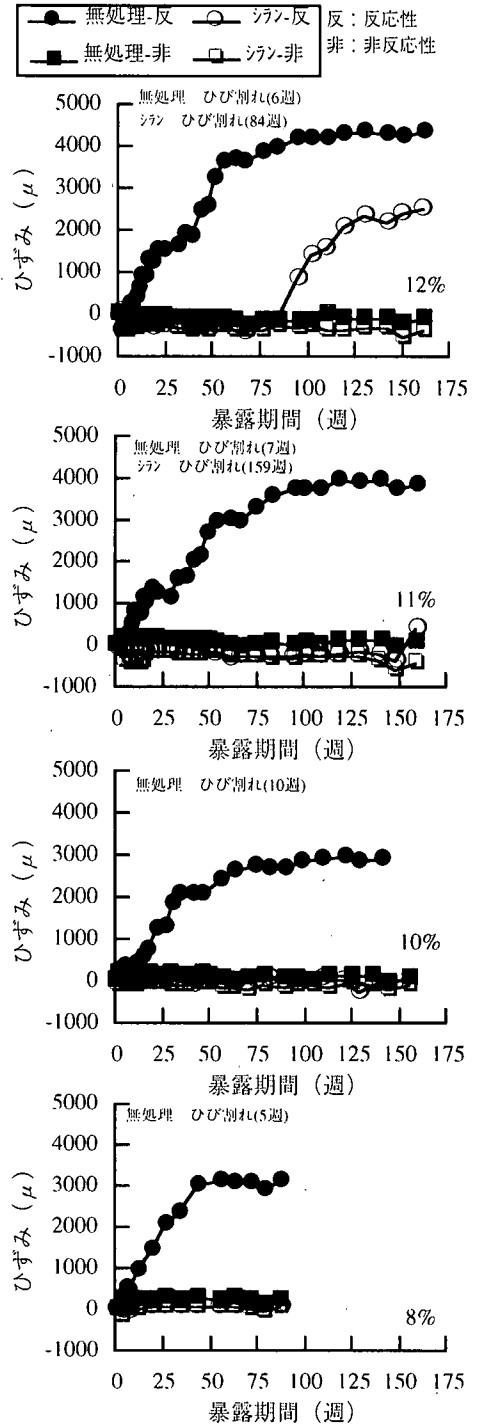


図-9 室外環境下におけるひずみの経時変化

時の含水状態がひずみに与える影響をそれぞれ図-9 および図-10に示す。補修時の含水状態にかかわらず、反応性の無処理のものは暴露初期から大きな膨張を生じている。これに対して、反応性のシラン処理のものでは、補修時の含水状態にかかわらず、シラン

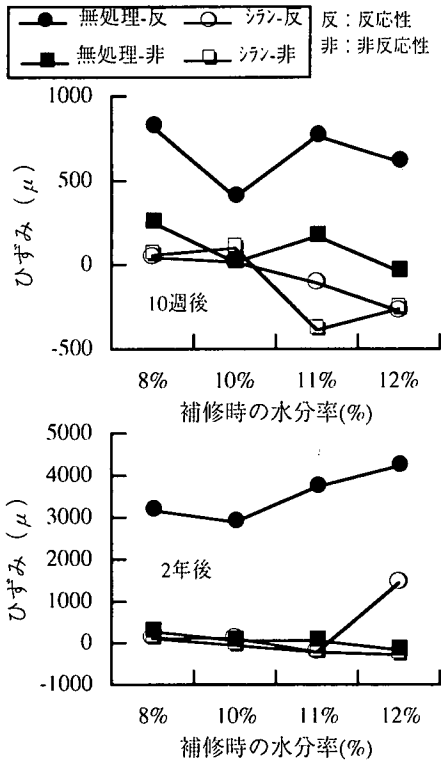


図-10 補修時の含水状態がひずみに与える影響 (室外環境)

処理の発水効果によってASR膨張を長期間抑制している。しかし、補修時の含水状態がきわめて高い12%のものは、暴露約1年で膨張が顕著となっている。また、11%のものについては暴露約3年後にひび割れが生じた。しかし、補修時の表面水分率が同一の無処理のものと比較すれば、膨張は小さく、シラン処理による抑制効果が認められる。これに対して、補修時の含水状態が低い10%のものは暴露3年後においても膨張は生じておらず、長期においてもシラン処理による抑制効果が持続している。

#### (4) 発水効果と膨張抑制効果

シラン処理の発水効果による膨張抑制効果を評価するため、各環境下における暴露10週間および2年後の含水率とひずみの関係を図-11に示す。乾湿環境下においては、初期の短期間であれば補修時の含水状態にかかわらず、シラン処理の発水効果による抑制効果が認められる。しかし、今回採用したASR促進環境下においては、シラン処理による内部水分の逸散は困難であったものと考えられる。長期においては、補修時の含水状態にかかわらず膨張を示している。しかし、補修時の含水状態が低い10および8%のものは、含水率およびひずみは無処理と比べて著

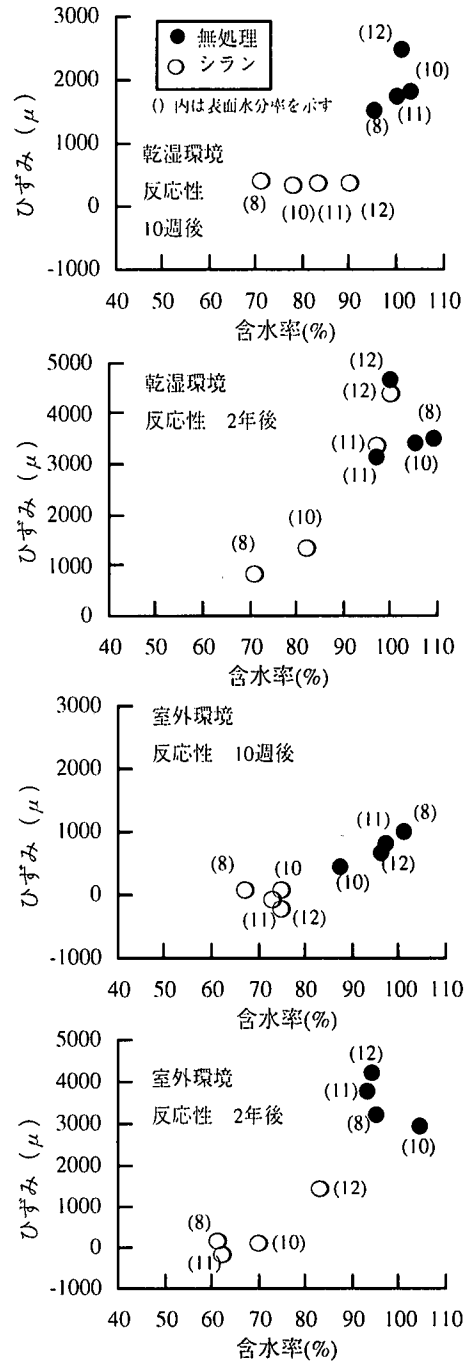


図-11 各環境下における含水率とひずみの関係

しく小さく、シラン処理による抑制効果がひび割れ後の長期においても発揮されている。

これに対して、室外環境下においては、補修時の含水状態がきわめて高い12%のものを除けば、シラン処理のものは含水率は低く、膨張も生じておらず優れた発水効果による抑制効果が持続している。また



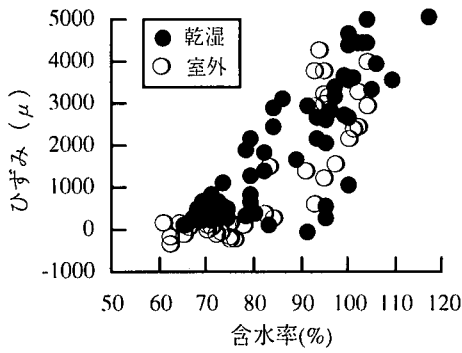


図-12 コンクリートの含水率とひずみの関係

膨張を生じた12%のものでも、無処理のものに比べてひずみは小さく、ひび割れ後の長期においても抑制効果が発揮されている。補修時の含水状態が高い場合には、発水効果の持続には問題はあるものの、11%のものでも3年程度は膨張を抑制しており、遮水系などが適用できない含水状態においても、シラン処理による発水効果が期待できる。シラン処理による効果の耐久性を高める方法については今後の検討が必要である。

両環境においてほぼ膨張が収束している12%、11%および10%の無処理のものを比べると12%のものは、他の含水状態のものに比べて大きな膨張を示している。補修時の含水状態の影響を検討するために所定の表面水分率となるまで乾燥を行った。乾燥により細孔溶液中の水酸化アルカリが固定され、アルカリ濃度が低下しゲルの生成が抑制されるとした研究結果<sup>13)</sup>を今後検討する必要がある。

#### (5) 含水率と膨張量

コンクリートの含水率とひずみの関係を図-12に示す。コンクリートの含水率が大きくなるほど、膨張によるひずみも大きくなり、ゲルの吸水と膨張が対応しているものと考えられる。80%以上の含水率においては急激に大きな膨張が生じており、急激な膨張を生じる限界の含水率は80%程度であった。したがって、表面処理を用いてコンクリート内部の含水率をこれ以下に抑制することによって、ASR膨張を効果的に抑制できるものと考えられる。

### 4. シラン系表面処理を施したコンクリート中の水分分布およびASR膨張抑制効果—シリーズ2—

#### (1) 角柱供試体

大型供試体と同一環境下に暴露された角柱供試体

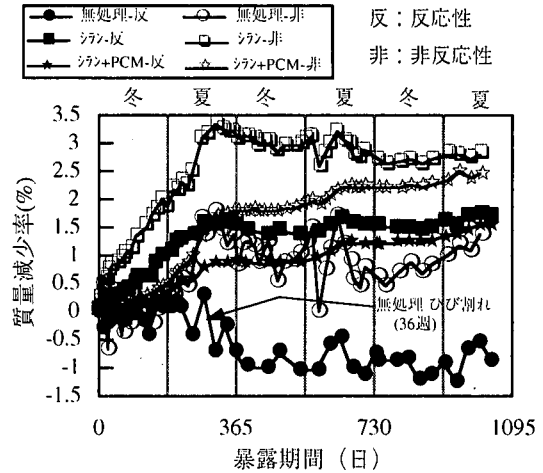


図-13 質量減少率の経時変化(角柱供試体)

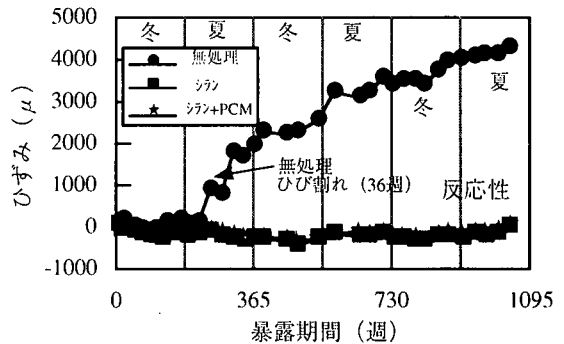


図-14 ひずみの経時変化(角柱供試体)

の質量減少率の経時変化を図-13に示す。非反応性のものについては、無処理のものは降雨の影響を受けながら徐々に乾燥し、質量減少の限界に達し、約1年でほぼ0.8%程度の質量減少率となった。これに対して、シラン処理およびシラン+PCMのものは降雨による質量増加はほとんどなく、シラン処理では約1年で質量減少の限界に達し、3.2%程度となった。シラン処理されたものは2年以降わずかながら質量増加が認められ、シラン処理による発水効果が低下しているものと考えられる。シラン+PCMのものは徐々に乾燥が進行し、3年後で2.5%程度となった。

反応性のものについては、無処理のものは1年目の夏季以降、ASRの影響が顕著となり、ゲルの吸水によると考えられる質量増加が顕著となった。これに対して、非反応性のものに比べて質量減少率は小さいものの、表面処理されたものの質量減少率の経時変化は非反応性のものと同様の傾向となった。

反応性角柱供試体のひずみの経時変化を図-14に示す。表面処理されたものは発水効果によって収縮がみられるのに対して、無処理のものには1年目の夏季以降、ASR膨張が顕著となり、大きな膨張を生じた。

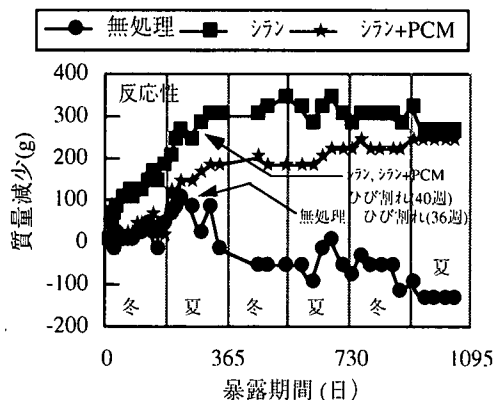


図-15 大型供試体質量減少の経時変化

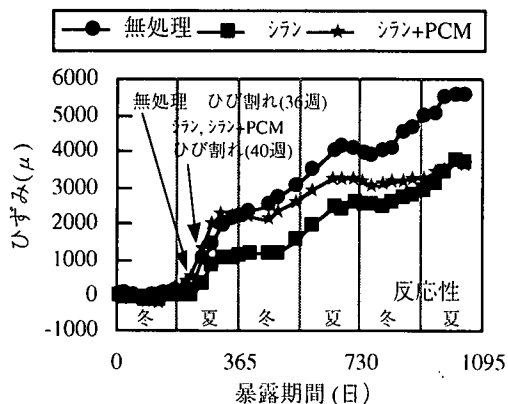


図-16 大型供試体ひずみの経時変化

シラン処理およびシラン+PCMのものいずれにも高いASR膨張抑制効果が認められた。

## (2) 大型供試体

### a) 質量減少率

反応性大型供試体の質量減少の経時変化を図-15に示す。無処理のものはASR膨張が顕著となった1年目の夏季以降は、ゲルの吸水によると考えられる質量増加が見られる。シラン処理では、初期での水分逸散が顕著であったが、ASR膨張の影響が顕著となり、ひび割れが発生した以降は、質量減少はほとんどなく、顕著な膨張が生じるような吸水は抑制しているもの、発水効果は低下したものと考えられる。シラン+PCMのものは長期にわたり徐々に乾燥し、効果が長期間持続している。暴露3年後においてシラン処理のものと同程度の質量減少を示した。

### b) ひずみ

反応性大型供試体のひずみの経時変化を図-16に示す。ASR膨張は既往の研究<sup>20),21)</sup>で報告されているような季節的な変動を示し、階段状の膨張挙動を示した。夏期の高温多湿下のもとASR膨張が促進され、冬

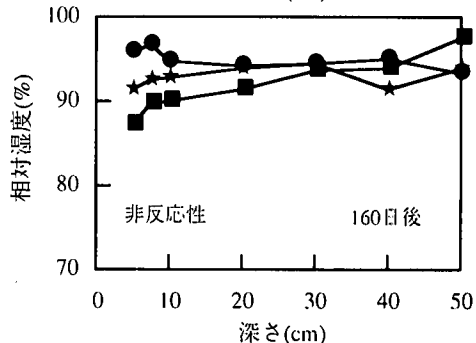
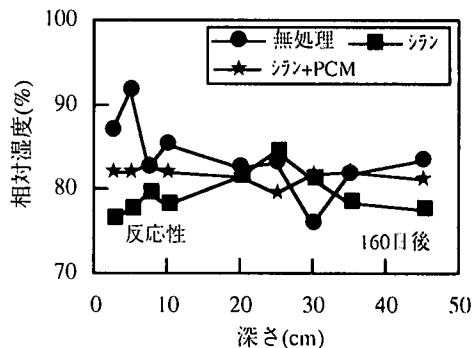


図-17 水分分布 (160日後)

期には膨張が停止するものの、無処理のものでは3年で5000 $\mu$ を越える大きな膨張を示している。

シラン処理のものは、暴露1年後においては無処理の半分程度の膨張量であり、暴露3年後においても約3分の2程度の膨張量に抑制している。シラン+PCMのものは、1年で無処理と同程度の2000 $\mu$ の膨張量を示し、膨張は進行するものの、その後の膨張の進行は遅く、3年後においてはシラン処理と同程度の膨張量となった。

シラン処理のものが1年目に他のものの半分程度の膨張となったのは、シラン+PCMのものに比べて初期での表面近傍の水分逸散能力に優れていたためと考えられる。しかし、それ以降は、膨張が大きくなっており、ひび割れ進展にともなう発水効果の低下によるものと考えられる。シラン+PCMのものは、1年後以降の膨張の進行は遅く、膨張後の抑制能力の低下はシラン処理のものより小さいものと考えられる。

### c) 水分分布

ASR膨張による影響が顕著でない段階の暴露約160日後の水分分布を図-17に示す。暴露160日後においては表面近傍に表面処理による効果が顕著に現れ、シラン処理のものは10cmないし20cm程度まで効果が認められる。シラン+PCMのものは、表面近傍における相対湿度は無処理のものより低く、降雨による吸水を抑制している。この段階においては、コンク

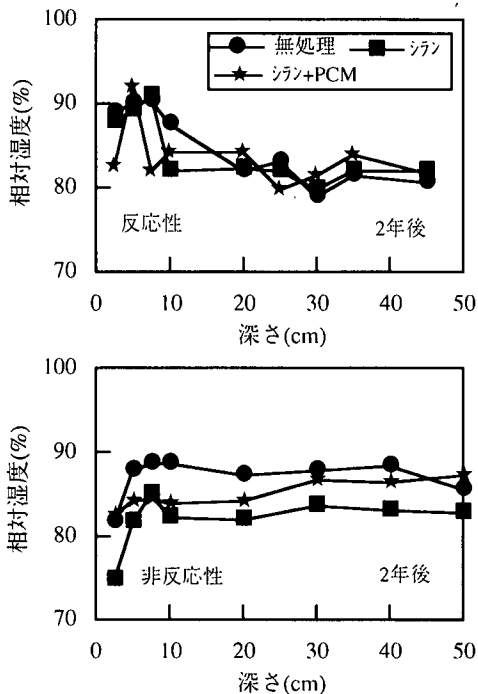


図-18 水分分布 (2年後)

リートの種類による水分制御への影響は顕著でない。

ASR膨張による影響が顕著となった以降の暴露約2年後の水分分布を図-18に示す。暴露2年後においては、ASR膨張によると考えられる影響が顕著となり、コンクリートの違いによる影響が認められる。非反応性のものについては、シラン処理ではさらに内部まで乾燥が進行し、処理による効果が40cm程度まで認められ、シラン+PCMのものも10cm程度まで効果が認められる。これに対して、反応性のものでは、表面処理されたものでも表面近傍の相対湿度が高く、ゲルの吸水およびひび割れによる影響が認められる。

暴露160日後および2年後のいずれにおいても、反応性の水分分布は非反応性のものに比べて低くなった。反応性のものは内部に生じたASRの進行とともに水分を吸湿し、非反応性のものより低い相対湿度を示したものと考えられ、反応性と非反応性の水分分布に違いが生じたものと考えられる。

表面近傍の深さ5cmおよび内部20cmの相対湿度の経時変化を図-19に示す。なお、測定値のばらつきを考慮し、傾向を明瞭にするため、前回と次に行った測定値の3つを平均したものをを用いた。深さおよびコンクリートの種類にかかわらず相対湿度は季節的な変動を示し、夏期においては湿度が高くなり、冬期には低くなった。ASR膨張が顕著となる夏期における反応性の無処理のもの深さ5cmの相対湿度は85%~95%であった。コンクリート中の相対湿度はASR膨

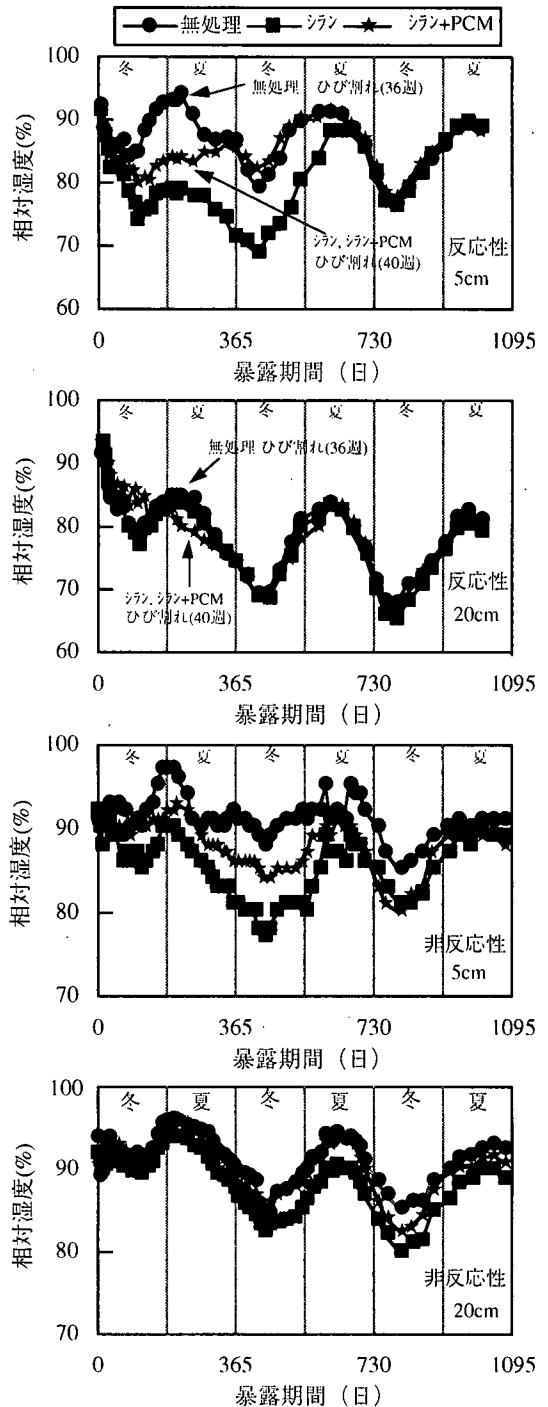


図-19 深さ5cmおよび20cmの相対湿度経時変化

張ときわめて密接な関係にあるものと考えられ、表面処理によって内部の湿度が低下あるいは低く維持される場合には、顕著なASR膨張は抑制されるものと考えられる。

表面近傍5cmにおいては、暴露初期から表面処理

による効果が顕著に現れた。シラン+PCMのものよりも初期における表面近傍の湿度の低下が顕著となったシラン処理の方が優れたASR膨張抑制効果を示した。しかし、ASR膨張による影響が顕著となった以降は、反応性のものは、表面処理されたものでも無処理の相対湿度に経時的に近づき、2年後には無処理と同程度の相対湿度となった。深さ20cmにおいては、反応性のものでは表面処理による効果は認められない。非反応性のものでは、シラン処理のものは、内部へと乾燥が進行し、他のものより相対湿度が低くなった。

コンクリート中の相対湿度はASR膨張抑制の観点からきわめて重要であり、シラン処理は表面近傍の相対湿度を顕著に低下させることが可能であり、高いASR膨張抑制効果が期待できるものと考えられる。

### (3) 補修効果の評価

角柱供試体および大型供試体における検討結果から、シラン処理は、初期の短期間での表面近傍の水分逸散が可能であるため、高いASR膨張抑制能力を有する。しかし、ひび割れが進展した場合には、顕著な膨張が生じるような吸水は抑制するものの、発水効果は著しく低下した。これに対して、シラン+PCMのものは短期間での水分逸散が十分でないため、内部水分による膨張を示すが、優れたひび割れ追従性を有するため、モルタル部のひび割れが軽微となり、膨張後の表面処理効果の低下は小さいものと考えられる。

角柱供試体と大型供試体では表面処理によるASR膨張抑制効果に違いが認められた。角柱供試体において、シラン処理およびシラン+PCMのものいずれのものも、膨張およびひび割れは生じておらず、高い抑制効果が認められた。角柱供試体中の水分移動は、大型供試体の表面近傍に対応し、表面処理による効果が顕著に発揮されたものと考えられる。大型供試体の場合には、内部からの水分移動が生じており、内部への乾燥の進行には時間を要し、ASR膨張を完全には抑制できなかったものと考えられる。そのため、大型供試体においては、シラン処理のものとシラン+PCMのものの抑制効果に違いが認められ、水分逸散能力の違いが顕著に現れた。

## 5. 結論

以下に本研究の範囲内で得られた結論を述べる。

(1) 高温多湿下のきわめて厳しい環境下においては、シラン処理のものは発水効果による内部水分の

逸散は期待できないものの、初期の短期間であれば補修時の含水状態にかかわらず、発水効果によるASR膨張抑制効果が期待できる。補修時の含水状態が低い場合には、長期においても抑制効果が期待できる。

(2) 通常的环境下においては、表面水分率12%程度のきわめて高い含水状態のものでも、シラン処理の発水効果による内部水分の逸散が期待できる。また、遮水系などの表面処理が適用できない含水状態においても、シラン処理による発水効果が期待できる。しかし、補修時の含水状態が高い場合には、シラン処理の発水効果の持続には問題がある。

(3) シラン処理には初期の短期間での表面近傍の水分逸散が期待できる。シラン+PCMのものには高い吸水抑制能力と長期での水分逸散が期待できる。

(4) シラン処理は高いASR膨張抑制の能力を有するものの、ASR膨張によるひび割れ進展以降の発水効果の低下が著しい。これに対して、シラン+PCMのものは、短期での水分逸散が十分でないため、内部水分による大きな膨張を生じるものの、ひび割れ追従性を有するため、モルタル部のひび割れが軽微となり、膨張後の抑制効果の低下は小さい。

(5) ASR膨張が顕著となったコンクリート内部の相対湿度は85~95%程度の範囲であった。また、80%以上の含水率において急激に大きな膨張を生じた。したがって、表面処理による内部湿度および含水率の低下がASR膨張抑制に対してきわめて有効であると考えられる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、ご支援いただきました田中博一氏（清水建設（株））に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 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.767-772, 1988.6.
- 2) 藤田修一, 近藤充: 表面処理材によるアルカリ骨材反応抑制効果に関する実験報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.943-948, 1997.6.
- 3) 宮川豊章, 久田真, 井上晋: コンクリートの表面処理によるASR膨張の抑制効果について, コンクリート工学論文集, Vol.2, No.1, pp.135-148, 1991.1.
- 4) 杉江攻, 杉山巧, 山口良弘: アルカリ骨材反応と補修, コンクリート工学, Vol.31, No.7, pp.69-73, 1986.11.
- 5) 沖野真, 富田稔: アルカリ骨材反応によるひびわれの補修方法の現状と今後の課題, コンクリート工学, Vol.24, No.11, pp.86-91, 1986.11.
- 6) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿過

- 程における水分移動, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.61-69, 1994.5.
- 7) 田中博一, 宮川豊章, 藤井学, 栗原慎介: シラン含浸されたコンクリートの発水性能評価, 土木学会第51回年年次講演集, 第5部, pp.362-363, 1996.9.
  - 8) 奥田由法, 石井浩司, 鳥居和之, 松田康孝: ASR 損傷コンクリート橋脚の補修・補強に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.371-376, 1998.
  - 9) 田中博一, 宮川豊章, 藤井学, 堀耕次: シラン含浸コンクリートの撥水性の評価, 材料, Vol.47, No.7, pp.699-705, 1998.7.
  - 10) 阪神高速公団, 日本材料学会: コンクリート構造物保護便覧・同解説, p.43, 1989.3.
  - 11) 久保善司, 堀耕次, 宮川豊章: 表面処理による水分制御特性の ASR 膨張抑制効果について, セメント・コンクリート論文集, No.51, 1997.12.
  - 12) 下慶漢, 西林新蔵, 吉田公, 黒田保, 小川雅彦, 中安義顕: 各種補修材料によるアルカリ骨材反応抑制効果, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文集, pp.117-122, 1994.10.
  - 13) 若杉三紀夫, 神本英喜: 弾性ポリマーセメントモルタルのアルカリ骨材反応抑制効果, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文集, pp.51-54, 1994.10.
  - 14) 阿部道彦, 若杉三紀夫, 田中政史, 神本英喜: 表面処理によるアルカリ・シリカ反応の抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.927-932, 1992.6.
  - 15) 田中博一, 堀耕次, 服部篤史, 宮川豊章: シラン系はっ水剤の分子構造がコンクリート構造のはっ水性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.789-794, 1995.6.
  - 16) 湯浅昇, 笠井芳夫: 非破壊による構造体コンクリートの水分測定方法, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.49-55, 1994.9.
  - 17) 椎名国雄: コンクリート内部湿度と変形, コンクリートジャーナル, Vol.7, No.6, pp.1-11, 1969.
  - 18) 平賀友晃, 三浦勇雄, 坂巻政義: 発色紙によるコンクリートの湿度及び含水率測定方法に関する研究, セメント技術年報 38, pp.198-201, 1984.
  - 19) Diamond, S. : "Alkali Silica reaction - some paradoxes", *Proc. of the 10th international conference on alkali aggregate reaction in concrete*, pp.3-14, 1996.8.
  - 20) 加藤雅彦, 山本親志, 銀山功, 田代芳文: アルカリ量, スラグ量を変えたコンクリートの AAR に関する屋外暴露試験, コンクリート工学論文報告集, Vol.10, No.2, pp.745-750, 1988.
  - 21) 竹内勝信, 川村満紀, 鳥居和之, 谷川伸: 自然環境下に曝露したコンクリートのアルカリシリカ反応による膨張とひび割れ, コンクリート工学論文集, Vol.6, No.1, pp.38-46, 1995.1.

(2000.11.20 受付)

## STUDY ON EFFECT OF SILANE TREATMENT SYSTEM TO REPAIR CONCRETE STRUCTURES DETERIORATED BY ALKALI-SILICA REACTION

Yoshimori KUBO, Atsushi HATTORI, Shinsuke KURIHARA  
and Toyoaki MIYAGAWA

Silane treatments which are typical hydrophobic treatment have been focused to be better performance in reducing alkali-silica expansion. However, the influence of water content of concrete on the effectiveness in reducing alkali-silica expansion by silane treatment system have not been investigated enough. In this study, silane treatments were applied on various water content of concrete and the effect of silane treatments to reduce alkali-silica expansion was discussed. Furthermore, quasi-actual size specimens were placed outdoors to take account of moisture transfer of concrete in the state of quasi-actual condition. The effect of silane treatment system to reduce alkali-silica expansion on quasi-actual specimens was investigated.