

論文 シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材によるコンクリートの耐久性向上に関する検討

安田 和弘*1・渡邊 賢三*1・横関 康祐*2・坂田 昇*3

要旨: シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの塩分浸透抵抗性、中性化抑制効果に関する実験的検討を行った。また、ひび割れを有するコンクリートに適用した場合の遮水性についても検討した。その結果、浸透性吸水防止材をコンクリートに塗布することによって塩分浸透、中性化に対する抵抗性が向上し、ひび割れからの透水を抑制できることが確認された。

キーワード: 浸透性吸水防止材, 塩分浸透抵抗性, 中性化抑制効果, ひび割れ

1. はじめに

コンクリート構造物を高耐久化する手法として、構造物全体を改質する方法と、コンクリート表面のみを改質する方法が考えられる。前者は高強度、高流動コンクリートや膨張あるいは無収縮コンクリートなどの高性能コンクリートを用いて組織全体を緻密にし、ひび割れの発生を抑制することで耐久性の向上を図るものである。しかし、ひび割れの発生を完全に無くすことは極めて困難であり、また施工不良が発生した場合には耐久性が損なわれる可能性がある。一方、後者は表面改質材料を用いて、塩分や炭酸ガスなどの外部からの劣化因子の浸入を防ぎ、耐久性の向上を図るものである。表面改質は構造物全体を改質するより施工費用が少ないためコスト的に有利であり、また後施工のため確実な施工が可能である。

表面を改質する方法の一つとして、浸透性吸水防止材(以下吸水防止材)を塗布する工法がある。既往の研究¹⁾では主にシラン系の吸水防止材に関する検討が行われており、撥水性能やアルカリシリカ反応抑制効果について報告がなされているが、塗布後のコンクリートの耐久性に関しては十分な検討が行われていない。筆者らは、土木構造物に適用可能なシラン・シロキサン

系の吸水防止材を開発し、十分な撥水性能や耐凍害性、良好な施工性などについての性能を評価・確認した²⁾。本報告では、このシラン・シロキサン系吸水防止材を塗布したコンクリートの塩分浸透抵抗性、中性化抑制効果に関して実験的に検討するとともに、ひび割れを有するコンクリートに適用した場合の遮水性(以下ひび割れ透水抵抗性)に関する検討結果について示す。

2. 試験概要

2.1 検討要因と水準

検討要因および水準を表-1に示す。塩分浸透抵抗性、中性化抑制効果は吸水防止材塗布量と水セメント比の影響について検討し、ひび割れ透水抵抗性については吸水防止材塗布の有無、ひび割れ幅、作用水頭圧の影響について主に検討を実施した。

表-1 検討要因と水準

検討要因	水準
塩分浸透抵抗性	①吸水防止材塗布量(0.200g/m ²) ②水セメント比(40,50,60,70,80%)
中性化抑制効果	①吸水防止材塗布量(0,100,150,200g/m ²) ②水セメント比(40,50,60,70,80%)
ひび割れ透水抵抗性	①吸水防止材塗布量(0.200g/m ²) ②ひび割れ幅(0.05,0.1,0.2 mm) ③作用水頭(2.5,20 mm)

*1 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ 研究員 (正会員)

*2 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ 主任研究員 (正会員)

*3 鹿島技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ グループ長 工博 (正会員)

表-2 使用材料

材料名		摘要
シラン・シロキサン系 浸透性吸水防止材		密度:0.9g/cm ³ , 標準塗布量:200g/m ²
コンクリート	水(W)	水道水
	セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度=3.16g/cm ³ , 比表面積=3320 cm ² /g
	細骨材 (S)	静岡産山砂:密度=2.62g/cm ³ , 吸水率=1.09%, F.M.=2.57
	粗骨材 (G)	八王子産硬質砂岩砕石:密度=2.65g/cm ³ 吸水率=0.63%, 実積率=59.4%

2.2 使用材料

使用材料を表-2 に示す。

2.3 コンクリート配合

コンクリートの配合を表-3 に示す。単位水量 165kg/m³, 空気量 4.5±0.5%の条件を固定して水セメント比を変化させた。さらに、既設構造物の補修目的での適用性を検討するために、劣化して組織が疎になった場合を想定した水セメント比 80%, 空気量 10%の配合について検討した。なお、空気量は AE 剤を用いて調整した。

2.4 試験方法

(1) 塩分浸透試験

既往の研究では塩分浸透性を評価する試験として、塩水浸漬と乾燥を繰り返す試験や、塩水噴霧試験、急速塩化物イオン浸透性試験などが行われている^{3) 4)}。しかしシラン・シロキサン系吸水防止材は一般構造物の壁面や床版裏側などの水圧がほとんど作用しない箇所への適用を考へて開発したものであるため、浸漬試験や急速塩化物イオン浸透性試験ではその性能を適切に評価できないものと考えられる。また噴霧試験では塩分を均等に作用させることが難しく、同一供試体でもばらつきが大きくなる可能性がある。そこでコンクリート表面に少量の塩水を貯め、1時間静置後23時間乾燥させる工程を繰り返す試験を行うこととした。試験フローを図-1 に、試験の概略図を図-2 に示す。

(2) 中性化促進試験

中性化促進試験は、炭酸ガス濃度を 5% に調整した中性化促進槽(室温 20℃, 湿度 60%)にて行った。試験には 100×100×400mm の

表-3 コンクリート配合

W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
40	4.5±0.5	43.0	165	413	743	996
50		44.0	165	330	790	1017
60		45.5	165	275	838	1015
70		47.0	165	236	881	1005
80		48.0	165	206	911	999
80	10	48.0	165	206	790	976

供試体調整

供試体打設後 7 日間水中養生 (水温 20℃)
35 日間気中養生 (20℃, 湿度 60%)

1 面 (打設時の側面) に吸水防止材塗布
5 面防水処理
塗布量=0.200g/m²
塗布方法: エアレススプレー

塩水貯水用の枠の取り付け

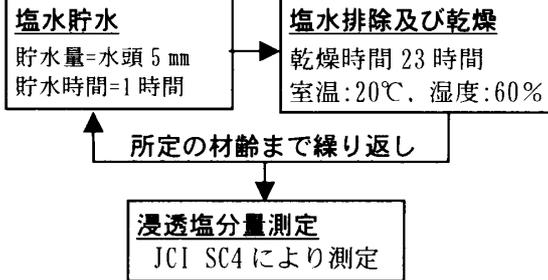


図-1 塩分浸透試験フロー

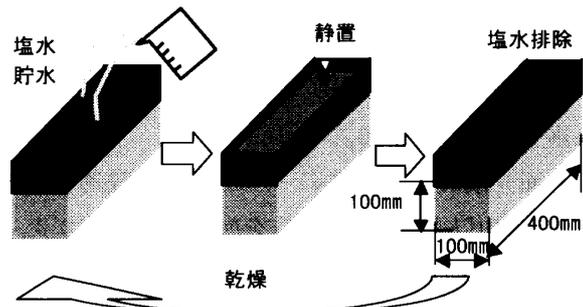


図-2 塩分浸透試験概略図

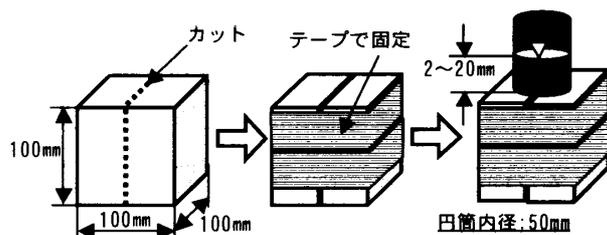


図-3 ひび割れ透水試験供試体作製方法

角柱供試体を用い、供試体の前調整は塩分浸透試験と同じ方法で行った。全ての面に吸水防止材を塗布した。試験開始後 1, 4, 9, 16 週後に供試体を割裂し、フェノールフタレイン溶液噴霧により中性化深さを測定した。

(3) ひび割れ透水試験

ひび割れ透水試験はコンクリート(表-3 に示す W/C=60%のコンクリートを使用)をカットした後にカット面を合わせて模擬ひび割れを作製し、水頭圧による水圧にて実施した(図-3 参照)。ひび割れ幅はカットしたコンクリートの間にテフロンシートを挟み込むことで調整した。ひび割れ面に円筒を接着して、その中に所定の水頭となるように貯水して、5 分間の浸透量を測定した。

ひび割れ透水試験は、吸水防止材無塗布の場合、吸水防止材塗布後に供試体をカットして模擬ひび割れを作製した場合(以下塗布後ひび割れ導入)、供試体をカットして模擬ひび割れを作製してから吸水防止材を塗布する場合(以下ひび割れ導入後塗布)の 3 ケースについて実施した。塗布後ひび割れ導入は吸水防止材を塗布した後にひび割れが入った場合を想定し、ひび割れ導入後塗布はひび割れが入った後に吸水防止材を塗布する場合を想定している。

3. 試験結果

3.1 塩分浸透試験

(1) 塩分浸透性

塩水を 45 回、90 回貯水させた場合のコンクリート表面からの距離と塩化物イオン量の関係を図-4, 5 に示す。吸水防止材を塗布していないものは表面付近で高い塩化物イオン量を示しており、塩水作用回数の増加とともに表面および内部の塩化物イオン量が増加する。これに対して吸水防止材を塗布したものは、90 回の貯水でも塩分がほとんど浸透していない。既往の研究⁴⁾では吸水防止材により塩化物イオンの浸透を 4 割程度抑制できるという結果が得られていたが、塩分浸透性の評価には急速塩化物イオン

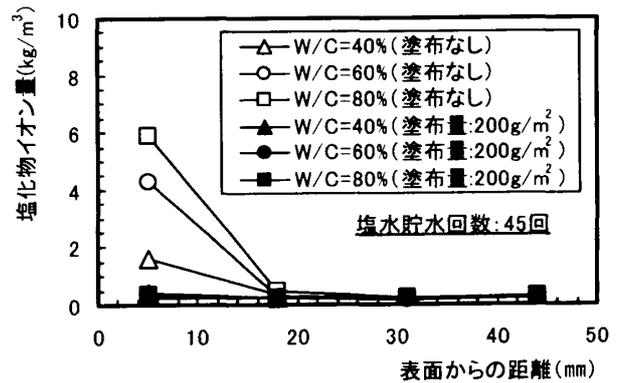


図-4 塩化物イオンの浸透状況(塩水作用 45 回)

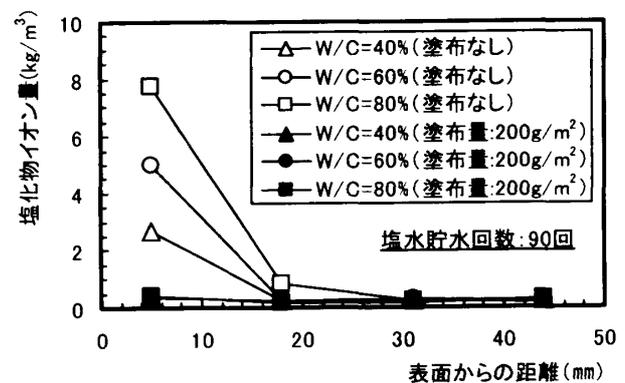


図-5 塩化物イオンの浸透状況(塩水作用 90 回)

浸透性試験(AASHTO T-277)を用いていた。急速塩化物イオン浸透性試験は電気的な力で強制的に塩化物イオンを透過させる試験であるため、今回の試験により得られた結果の方が吸水防止材の適用する箇所を考慮すると妥当なものであると考えられる。

吸水防止材による塩分浸透抑制機構は以下のように考えられる。吸水防止材を塗布していないコンクリートにおいては、塩水が接触すると拡散と水の移動によって塩化物イオンが内部に浸透する。また乾湿の繰返しによって塩分の濃縮が生じ、さらにコンクリート内部へと塩分が浸透すると考えられている。一方、吸水防止材を塗布したコンクリートにおいては、今回の試験のように水圧がかからない場合、撥水層によって塩水の浸透が生じない。そのため液体の水分の移動に伴う塩化物イオンの移動が生じにくくなる。つまり液体の水を遮断する吸水防止材の効果により塩分浸透抵抗性が向上するものと

推察される。

(2) 塩分浸透に及ぼす水セメント比の影響

塩分浸透に及ぼす水セメント比の影響を確認するために、水セメント比と表面付近(0~10mm)の塩化物イオン量の関係を整理した(図-6 参照)。この図から、吸水防止材無塗布の場合は水セメント比の増加に伴い塩化物イオン量も増加しているが、塗布した場合は水セメント比に関係なく塩化物イオンがほとんど浸透していないことが分かる。また、図中に黒塗りで示した水セメント比=80%、空気量10%のコンクリートにおいても、吸水防止材を塗布した場合はほとんど塩分が浸透していないことが分かる。これは、劣化したコンクリートにおいても吸水防止材を塗布することによって塩分浸透抵抗性を向上できることを示唆するものである。

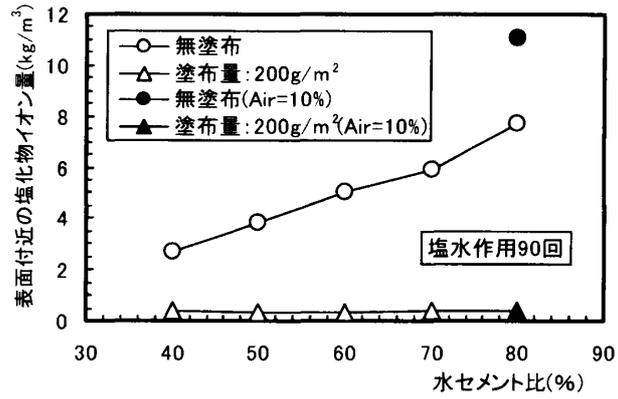


図-6 水セメント比と塩化物イオン量の関係

3.2 中性化促進試験

(1) 中性化深さの経時変化

水セメント比 40, 60, 80%における試験材齢と中性化深さの関係を図-7~9 に示す。シラン・シロキサン系の浸透性吸水防止材を塗布した場合、コンクリート表面では液体は浸透しないが気体は透過する性質を有するため、大きな中性化抑制効果は得られないと考えられていた。今回の試験結果では、ほとんどの材齢において、無塗布のものに比べて、吸水防止材を塗布したものが中性化を抑制できていることが分かる。吸水防止材を塗布することによって中性化を抑制できる理由としては、①気体を透過させる材料ではあるが、無塗布に比べると気体の透過抵抗性は高くなっており、透過する炭酸ガスが少なくなる、②吸水防止材はコンクリート表面に浸透して撥水層を形成するため、表面付近では水蒸気として内部の水分が外部へ移動することで中性化反応に必要な水が少なくなり、反応が起こりにくくなる、などが考えられるが、現段階では原因を特定することは難しく、今後更

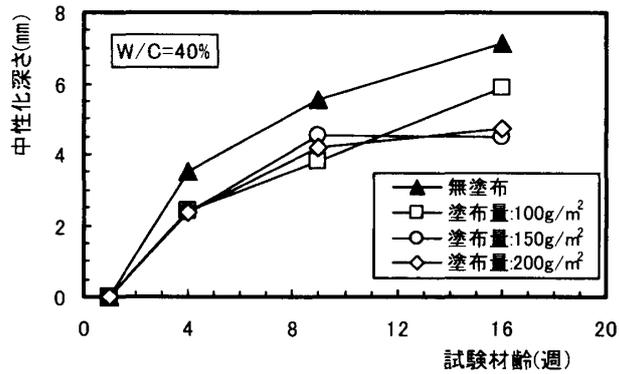


図-7 中性化深さの経時変化 (W/C=40%)

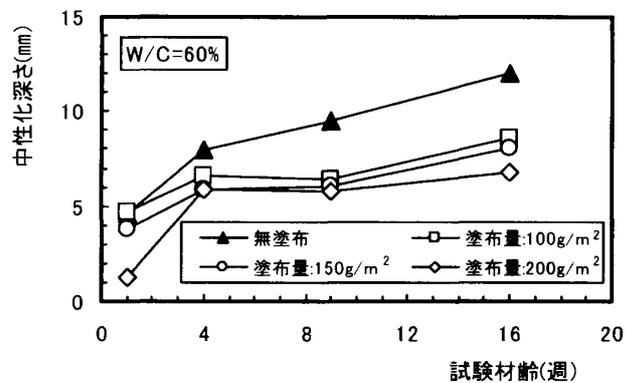


図-8 中性化深さの経時変化 (W/C=60%)

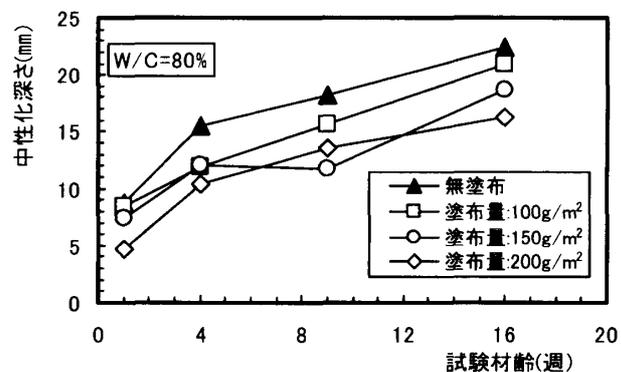


図-9 中性化深さの経時変化 (W/C=80%)

なる検討が必要である。

(2) 中性化に及ぼす吸水防止材塗布量の影響

吸水防止材塗布量と試験材齢 16 週時の中性化深さの関係を図-10 に示す。いずれの水セメント比においても吸水防止材塗布量が増加すると中性化深さが小さくなる傾向にある。吸水防止材を 200g/m² 塗布することによって、吸水防止材を塗布していないものに比べて 28~44% 中性化を抑制できていることが分かる。

なお、実構造物に吸水防止材を塗布した場合を考えると、液体は浸透せず、気体のみを透過させるという材料の特性によって、コンクリート内部の湿度は徐々に低下するものと考えられる。実際に吸水防止材無塗布のものより、吸水防止材を塗布したもののほうが、時間の経過とともに内部の湿度が低下する、といった結果も得られている⁵⁾。今回の試験では、中性化の進行速度が大きい湿度 60% 一定という環境条件で試験を行ったが、実構造物においては境界湿度が常に変動する。そのため、実環境では吸水防止材による中性化抑制効果は今回得られた実験結果よりも高くなることが考えられるが、詳細についてはさらに検討が必要である。

3.3 ひび割れ透水試験

ひび割れ透水試験の結果は、ひび割れに作用させた水頭と、円筒内に貯めた水の浸透量から換算した低下水位との関係で整理した。吸水防止材塗布無し、ひび割れ導入後塗布、塗布後ひび割れ導入の各ケースにおける作用水頭と低下水位の関係を図-11 に示す。円筒内に貯めた水が全て浸透した場合は、作用水頭と低下水位が同じになり、図中に記した破線上にデータが示されることになる。吸水防止材を塗布しない場合は作用水頭が小さくても、水が浸透しているが、吸水防止材を塗布することで浸透を抑制できる結果となっている。

ひび割れ導入後塗布と塗布後ひび割れ導入を比較すると、ひび割れ幅が小さく、作用水頭も

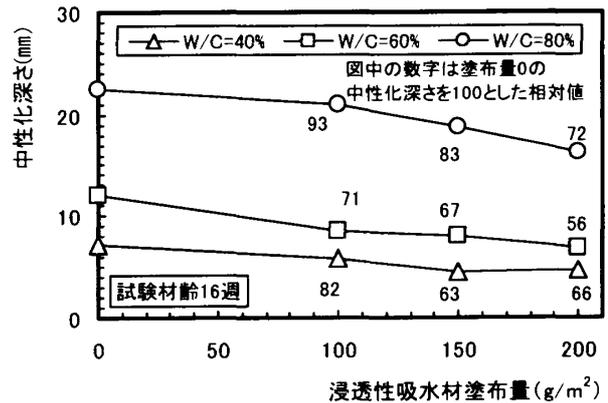
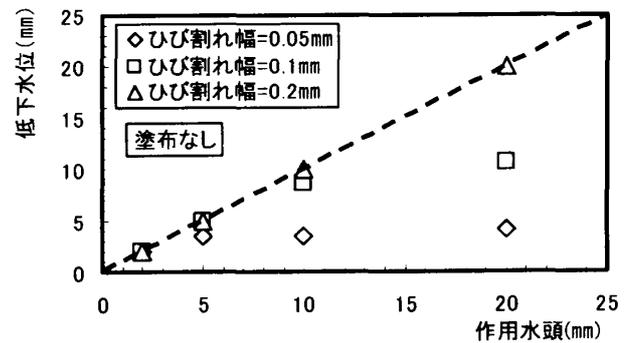
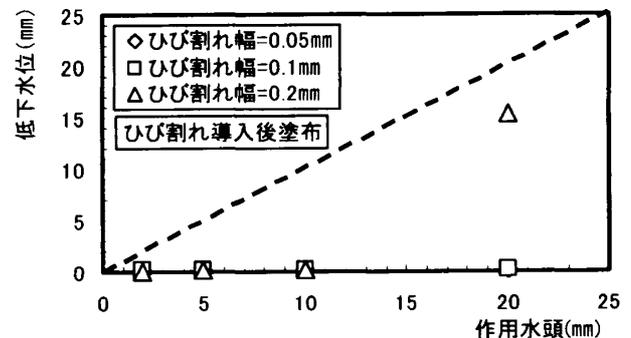


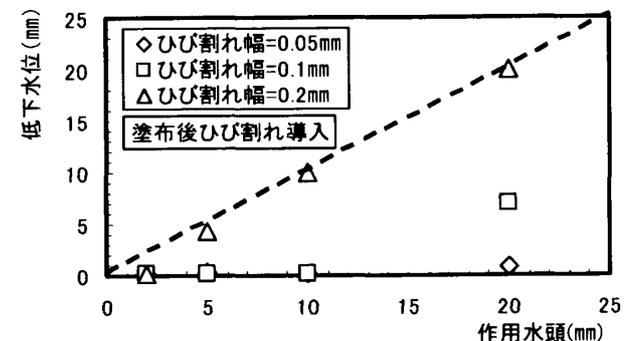
図-10 吸水防止材塗布量と中性化深さの関係



(a) 吸水防止材無塗布



(b) ひび割れ導入後塗布



(c) 塗布後ひび割れ導入

図-11 作用水頭と低下水位の関係

小さい場合はどちらの方法でも低下水位は小さくなっている。しかし作用水頭が大きくなり、ひび割れ幅も大きくなるとひび割れ導入後塗布の方が低下水位は小さくなる結果となっている。具体的には、作用水頭 2 mm、ひび割れ幅 0.05 mm の場合では、どちらの塗布方法においても低下水位は非常に小さな値となった。しかし、塗布後ひび割れ導入の場合は、作用水頭が 5 mm でひび割れ幅 0.2 mm の低下水位が大きくなっている。これに対し、塗布後ひび割れ導入の場合は、作用水頭が 10 mm でもひび割れ幅 0.2 mm で低下水位が小さい結果となった。塗布後ひび割れ導入とひび割れ導入後塗布の遮水効果の機構を比較すると、前者の場合はコンクリート表面に塗布した吸水防止材が浸透して形成した撥水層によってのみ遮水効果が得られると考えられる。これに対して、後者はひび割れに吸水防止材が浸透して、ひび割れ内部のより深い部分で撥水層が形成されるため、前者よりも高い遮水性が得られたものと考えられる。

これらの実験結果から、吸水防止材を塗布したコンクリートであればひび割れが発生しても、ひび割れの幅によっては遮水性を示すことが確認された。またひび割れ発生後に吸水防止材を塗布することにより高い遮水性が得られることが確認された。今回は、吸水防止材の塗布量 $200\text{g}/\text{m}^2$ (標準量) について検討したが、ひび割れ部分のみに集中して塗布することによって、より高い遮水性が得られることが考えられるため、さらに検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布することによって、コンクリートの水セメント比によらず塩分浸透がほとんど生じない。
- (2) シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材をコンクリートに塗布することによって3~4割程度の中酸化抑制効果が得られる。
- (3) ひび割れを有するコンクリートにシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を適用することによって、遮水性が向上する。特にひび割れ発生後に吸水防止材を塗布することによって高い遮水性が得られる。

謝辞：

本研究の実施に際しては、旭化成ワッカーシリコーン(株)三村俊幸氏、神澤 弘氏に貴重な助言と多大な協力を頂いた。この場を借りて謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、久保善司，服部篤史，宮川豊章：シラン系表面処理による A S R 補修について，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 1 巻，pp.103-pp.110，2001.1.
- 2) 林大介，坂田昇，三村俊幸，神沢弘：シラン・シロキサン系撥水材の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.301-pp.306，2000.7.
- 3) 例えば，土木学会編：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，コンクリート技術シリーズ，No.40
- 4) 林大介，坂田昇，三村俊幸，神沢弘：シラン・シロキサン系撥水材の撥水性および遮塩性に関する実験的検討，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，第 V 部門，2000.9.
- 5) 久保善司，服部篤史，栗原慎介，宮川豊章：A S R 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，土木学会論文集 No.690/V-53，95-107，2001.11