

# アルカリ骨材反応により損傷が生じた構造物の補修方法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平19～平21

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：渡辺 博志、木村 嘉富、  
古賀 裕久

## 【要旨】

アルカリ骨材反応により損傷が生じた構造物の補修方法には種々の提案があるが、その補修材料やディティールの選定については、十分な知見のない箇所が多い。この課題では、そのうち、表面含浸材の含水率低減効果、断面修復箇所の一体性確保のために用いられるあと施工アンカーの引抜き耐力などについて検討した。その結果、表面含浸材については、材料や適用箇所によっては補修効果が得られにくいことがわかった。また、あと施工アンカーについては、今回の実験の範囲では、アルカリ骨材反応が生じていないコンクリートと同程度の耐荷性状が得られていた。

キーワード：コンクリート構造物、アルカリ骨材反応、ASR、補修、表面含浸材、あと施工アンカー

## 1. はじめに

アルカリ骨材反応は、コンクリート構造物の代表的な劣化原因の一つで、骨材に含まれるアルカリ反応性の鉱物等がコンクリート中（高アルカリ環境下）で反応しアルカリシリカゲルを生じて、このアルカリシリカゲルの吸水膨張により、コンクリートのひび割れ等を生じさせるものである。このような反応を生じせしめる骨材には種々のものが存在し、従来は、アルカリシリカ反応（以下、ASR）を含む数種に分類されていた。しかし、近年の研究結果から、膨張を生じさせる反応そのものに大きな違いはないものとされている。また、我が国で見られる劣化事例は、いずれもASRによるものである。したがって、以降は、略称としてASRを用いる。

ASRによる構造物の劣化は、我が国では、昭和57年ごろに社会問題になり、建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」（昭和58～60年度）でその抑制対策や補修方法が検討されてきた。この時の検討では、コンクリートにASRによるひび割れ等が生じていても、鉄筋コンクリート部材としての耐荷性状には、通常大きな影響が生じていないこと、補修方法としてはASRの膨張に不可欠な水分が外部から供給されること防ぐのがよく、コンクリートの表面に表面保護を設けて遮水するのが有効と考えられることなどが示された。

しかし、平成12年になって、ASRによる劣化が

著しい国道の橋脚で、コンクリート中の鉄筋が破断している事例があることが明らかになった。また、その後、同様な事例が複数報告された。そこで、国土交通省では、平成15年に「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）」を通達した<sup>1)</sup>。また、平成20年に「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）」（以下、H20ガイドライン（案）<sup>2)</sup>を定めて、ASRにより劣化した部材の耐荷性能評価について、現状で妥当と思われる方法を示してきた。土木研究所は、国土技術政策総合研究所と協力し、これらの技術基準の原案を作成するなどしてきた。

一方、これらの策定の過程で、ASRによる劣化が生じた構造物に対して行う補修について、未解明な部分も多いことが明らかになった。そこで、ASRによる補修として用いられることが多いいくつかの材料・工法について、その有効性を検証することにした。

## 2. ASRに対する補修方法と課題

### 2.1 ASRに対する補修方法

H20ガイドライン（案）では、ASRにより劣化した部材の補修方法（耐荷力に関する補修・補強が必要な場合を除く）を表-2.1.1のように整理している。しかし、ASRに対する補修方法として行われる表面保護工法や断面修復工法には課題もある。

## 2. 2 この研究で取り上げた個別の課題

### 2. 2. 1 表面含浸材の補修効果

ASR 劣化に対する補修としては、従来は、コンクリートの表面に水分を通さない表面保護（遮水系表面保護）を施すことが多かった。しかし、土木研究所が行った調査では、遮水系表面保護塗装がひび割れたり、はがれたりする再劣化の事例が少なくないことが明らかになっている（図-2.2.1）<sup>4)</sup>。この原因としては、補修後も部材の内部に残った水分によって、ASR による膨脹が継続していることが考えられる。

そこで、近年、外部からの水の供給を防ぐ一方で、内部からの水の逸散は妨げない撥水系の表面保護工法（表面含浸材）が着目されている。しかし、撥水系表面含浸材を適用したコンクリートの含水率低減効果について、屋外環境下で検証した事例は、必ずしも十分とは言えない。そこで、種々の実験を行って検討することにした。

### 2. 2. 2 あと施工アンカーの耐荷性状

断面修復工法による補修では、コンクリートをはつりとして断面を新しくする部分と既設部分との一体性を確保することが重要である。このため、あと施工アンカーを設けている場合がある。しかし、ASR により劣化したコンクリートには、細かなひび割れなどが生じているおそれがあるので、健全なコンクリートに適用する場合と同程度の耐荷性状が得られるか、必ずしも明確ではなかった。そこで、引抜き試験を行って、ASR コンクリートに設けたあと施工アンカーの耐荷性状を確認した。

### 2. 2. 3 膨脹拘束の影響

部材の耐荷性状を向上させるため鋼板接着や RC 巻立てなどを行って ASR により劣化したコンクリートを拘束した場合、その後の ASR による膨脹を抑制できると考えられている。しかし、その程度については必ずしも明確ではない。また、拘束されたコンクリートの膨脹挙動が変化することによって、予期せぬ損傷が生じるおそれもある。そこで、実験を行って基礎的検討を行った。

## 3. 表面含浸材の補修効果に関する検討

### 3. 1 表面含浸材を用いた補修に関する課題

コンクリート表面に塗布して含浸させることで、コンクリート表面に撥水性を付与することができる補修材料がある。この種の補修材は、シランを有効成分とするものが多いので、以下、シラン系表面含

表-2.1.1 代表的な ASR 補修工法<sup>3)</sup>

補修工法	主たる補修目的		副次的な効果
	内部の鋼材を腐食から守る	ASR の更なる進行を防ぐ	断面の一体性を高める
ひび割れ注入工法	○	—	○
ひび割れ充填工法	○	—	—
断面修復工法	○	○	△
撥水系表面保護工法	—	△	—
遮水系表面保護工法	—	△	—

※○：ほとんどの部材、部位で効果が期待できる。

△：効果が期待できない場合もある。

—：当該補修工法単独では、効果は期待できない。



図-2.2.1 表面保護による補修箇所の再劣化事例<sup>4)</sup>



※表面に撥水性を付与するが、物理的な膜は形成しない。

図-3.1.1 シラン系表面含浸材による補修のイメージ<sup>5)</sup>



※表面の微細な空隙を埋め、緻密化する。

※けい酸塩系表面含浸材と文献<sup>5)</sup>で想定されている材料は必ずしも合致しないが、補修のイメージが似ていることから引用した。

図-3.1.2 けい酸塩系表面含浸材による補修のイメージ<sup>5)</sup>

浸材とする。

シラン系表面含浸材を適用したコンクリート（図-3.1.1）は、表面からの吸水を抑制できるとともに、内部からの水分の逸散は妨げない点で、表面に遮水性の膜を形成する補修方法よりも優れていると考えられている。なお、シラン系表面含浸材を用いた補修は、表-2.1.1 という撥水系表面保護工法と同じである。

一方、シラン系表面含浸材は、遮水系の表面保護工法と比較すると実績が少ないので、その補修効果に関して不明な点も少なくない。シラン系表面含浸材の補修効果に関する疑問点を整理して表-3.1.1 に示す。

本研究課題では、表-3.1.1 に示した項目の(1)～(3)について検討した。それぞれの検討結果を、3.2～3.4 節に示す。

なお、シラン系表面含浸材にも数多くの提案がある。この研究では、含浸材そのものの撥水性や耐久性を相互に比較し評価することは、検討の範囲に含めず、既往の研究<sup>9)</sup>から良好な性能を有していると考えられる材料などを選定し、ASR に対する補修の観点から評価した。

また、表面含浸材には、コンクリート中の物質と反応して表面を緻密化（図-3.1.2）することでコンクリート表面からの吸水を抑制でき、ASR による膨脹を抑制上でも有効性があるとする商品もある。この種の材料から、本研究では、けい酸塩系表面含浸材の1種を選定し、シラン系表面含浸材を用いた場合との比較などを行った。

### 3. 2 含水率低減効果の及ぶ範囲に関する検討<sup>9)</sup>

#### 3. 2. 1 検討の概要

既往の研究事例では、表面含浸材の含水率低減効果を評価する際に、100×100×400mm の角柱供試体など、比較的小型の供試体を用いたものも多い。しかし、実構造物では、部材の断面がより大きいことから、コンクリート内部に含まれる水分も多く、また蒸発面から距離が長くなると含水率低減の効果が及ぶか明確でない。

一方、実構造物を用いた調査等では、含水率を非破壊で正確に測定することが困難なので、コンクリート表面の撥水状況などを定性的に評価するにとどまっている場合が多い。

そこで、比較的大型のコンクリート供試体を作製して屋外に暴露し、含水率の変化をモニタリングした。また、暴露終了後の供試体の一部を用いて、種々

表-3.1.1 シラン系表面含浸材を ASR に対する補修として用いる場合の疑問点

項目	疑問点
(1) 含水率低減効果の及ぶ範囲	シラン系表面含浸材の含水率低減効果については、小型の供試体での実験結果が多数ある。しかし、断面が大きい実構造物では、コンクリート表面からの放湿の効果が、内部には及ばないことも考えられる。 また、コンクリート内部の水分を逸散させる程度は、構造物が置かれた場所の気候や日射や雨掛かりなどの環境条件に影響されるものと考えられる。 これらを考え合わせると、構造物に適用した際に、ASR を抑制するのに十分な程度まで含水率を抑制できるか、必ずしも明確ではない。
(2) ひび割れの影響	ASR による膨脹でコンクリートにひび割れが生じると、ひび割れ面からの吸水が生じるおそれがある。コンクリート表面から塗布する含浸材で、これを十分に抑制できるか、必ずしも明確ではない。
(3) 性能評価手法	近年、シラン系表面含浸材の評価手法が提案されているが、試験結果と、ASR を抑制するのに求められる性能の関係は明確ではない。 ※項目(1)とも関連
(4) 補修効果の耐久性	シラン系表面含浸材の補修効果がどの程度継続するかは、十分には明確になっていない。 ※この研究では、検討の対象としなかった。

の試験を行って表面含浸材の補修効果を調べた。

#### 3. 2. 2 検討方法

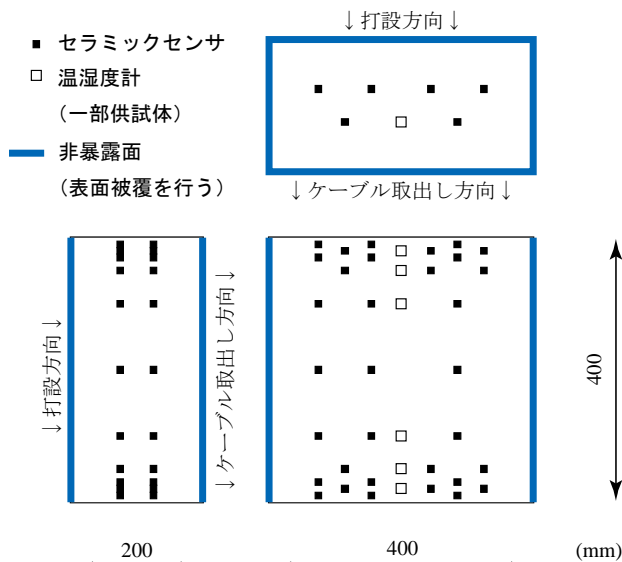
##### (1) 供試体の形状

実験に用いた供試体の形状を、図-3.2.1、図-3.2.2 に示す。実験の目的から、供試体の寸法は大きければ大きいほどよいとも考えられるが、過去に行った実験結果<sup>7)</sup>から、コンクリート表面から 200mm の位置の含水率は大きく変化しないと予想されたこと、人力で移動できる程度の重量とすることなどを考慮し、形状、寸法を決定した。図-3.2.1 のものを標準としたが、塩分を含むコンクリートにおける腐食速度を測定するため、図-3.2.2 の形状のものも作製した（本報では、腐食速度に関する結果は省略する）。

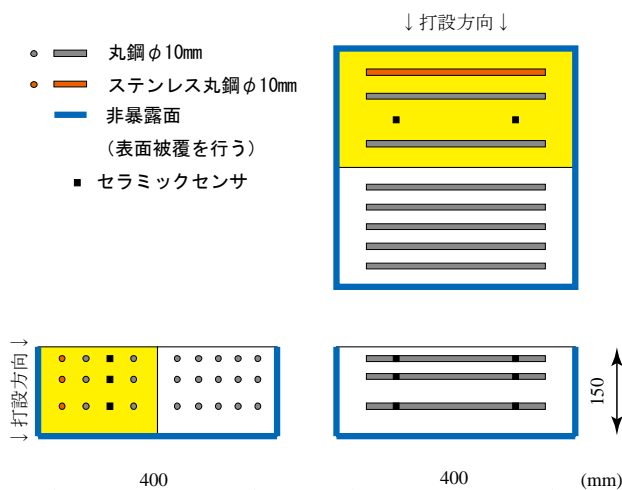
供試体は暴露面を限定するため、二面または一面を残してロウ及びアルミテープを用いて被覆した。

##### (2) コンクリートの配合

コンクリートの配合を、表-3.2.1 に示す。含浸材の検討は、水セメント比 50% のコンクリートを用いて行ったが、比較用として水セメント比の異なるコ



※センサの埋込み位置は、暴露面から 10、20、30、50、100、200mm で、上図のようにずらして配置した。  
図-3.2.1 供試体の形状 (含水率測定用供試体)



※センサの埋込み位置は、20、50、100mm とした。  
※着色 (黄色) 部のコンクリートには塩分を混入したものを、非着色部には塩分を含まないものを用いた。  
図-3.2.2 供試体の形状 (腐食速度測定用供試体)

ンクリートも作製した。

供試体は、コンクリートの打設後材齢 28 日まで湿布養生した。その後、表面含浸材を施工するため、約 2 週間程度屋内に保管してコンクリート表面を乾燥させた。

### (3) 表面含浸材

使用した表面含浸材を、表-3.2.2 に示す。シラン系表面含浸材には、種々の製品があり、その撥水性能も大きく異なるものと考えられる。この実験では、既往の検討結果<sup>8)</sup>から比較的撥水性に優れていると考えられるもの二種類を用いた。また、比較用とし

表-3.2.1 コンクリートの配合

種類	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				Air (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		W	C	S	G		
50	50	170	340	887	900	4.5	45.4
40	40		425	817			55.4
70	70		243	967			26.6
Cl	50		340	887			35.8

※配合 Cl では、セメントの 2.4% に相当する量の塩化物イオンを含むように塩化ナトリウムを混入した。  
※セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。  
※細骨材は砂 (表乾密度 2.60g/cm<sup>3</sup>)、粗骨材には砕石 (表乾密度 2.68g/cm<sup>3</sup>) を用いた。

表-3.2.2 使用した表面含浸材

種類	有効成分	有効成分量 (%)	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )
A	シラン・シロキサン	80	200
B	シラン	20	200
D	けい酸	21~30	250

※塗布量や方法は、各材料の施工手順に従った。標準塗布量が幅を持って示されている材料は、最大値を用いた。

表-3.2.3 実験ケース

No.	配合	形状	暴露面の方向	含浸材			
1	50	含水率測定用	水平	適用せず			
2			垂直				
3			水平				
4			水平				
5	50	含水率測定用	水平	A			
6			垂直				
7			水平	B			
8			垂直				
9	50	含水率測定用	水平	D			
10			垂直				
11			Cl		腐食速度測定用	垂直	適用せず
12						A	

※腐食速度測定用供試体は、塩分を混入したコンクリートと、混入していないコンクリートからなるが、含水率の測定は、塩分を混入した部分で行った。

て、けい酸塩系表面含浸材の一種類を用いた。

含浸材の適用後、シラン系表面含浸材の性能が安定するように約 2 週間屋内に保管した。含浸材を適用していないものやけい酸塩系表面含浸材を適用したものについても、同様に保管した。

(4) 実験ケース

実験を行ったケースの一覧を、表-3.2.3 に示す。表面含浸材の種類や適用の有無について検討ケースを設定するとともに、暴露面の角度・方向によって降雨による水分供給状況や日射の影響が異なると考えられるので、暴露面を水平とする場合と、垂直とする場合を設けた。

(5) 含水率測定方法

a) セラミックセンサによる方法

暴露期間中の含水率の変化は、供試体内部に埋め込んだセンサを用いて推定した。センサには、日本大学の湯浅准教授らが開発したセラミックセンサ(図-3.2.3)を用いた<sup>9)</sup>。

LCRメータを用いてセンサの電気抵抗を測定し、図-3.2.4 に示す電気抵抗とモルタル含水率の関係から、粗骨材は電気抵抗や含水率に影響しないものと仮定して、コンクリート供試体の含水率を推定した。なお、屋外で測定した電気抵抗は、供試体の温度変化を考慮して文献<sup>9)</sup>の式で補正した。

電気抵抗と含水率の関係は、文献<sup>9)</sup>の方法を参考に求めたものである。すなわち、コンクリート供試体の作製時にコンクリートの一部をウェットスクリーニングして粗骨材を取り除いた。このモルタルを用いて、セラミックセンサを埋めた/埋めていないモルタル供試体(一辺 40mm の立方体)を複数作成した。これらを室内に保管し、複数の時点で LCRメータを用いて内部のモルタル内部のセラミックセンサの電気抵抗を求めた。また、センサを埋めていない供試体の質量を測定した後に、105℃の乾燥炉で乾燥させて絶乾質量を測定し、モルタルの含水率を求めた。さらに、粗骨材の含水率変化は無いものと仮定して、モルタル含水率からコンクリートの含水率を推定した。これらを複数の供試体を用いて行い、電気抵抗と含水率の関係を求めた。

セラミックセンサは、供試体中で同一と見なせる箇所に 2~3 個設置した。コンクリートの含水率はそれぞれのセンサごとに推定した上で、その平均値を用いた。

b) 加熱乾燥による方法

暴露期間終了後、一部の供試体を解体し、試料を採取して質量を測定した。その後、105℃の乾燥炉で一週間乾燥させ、絶乾質量を測定した。この間の質量の変化から、暴露期間終了直後のコンクリートの含水率を求めた。

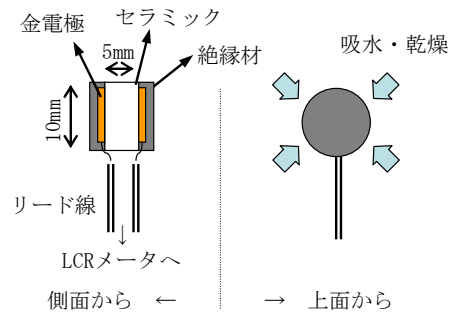
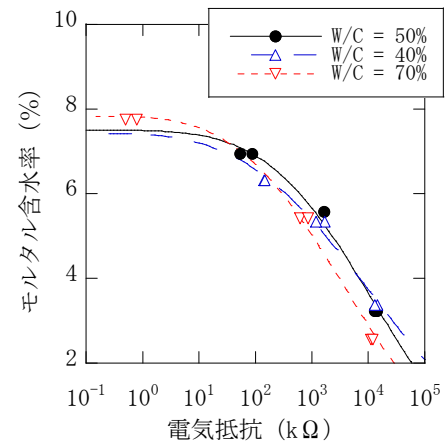


図-3.2.3 セラミックセンサ



※塩分を混入した場合についても、別途供試体を作製していたが、強度管理用供試体の結果から、供試体 11、12 と同じコンクリートが製造できていないおそれがあったので、本報では、上に示す混入していない場合と同じ関係を用いて含水率の推定を行った。

図-3.2.4 電気抵抗とモルタル含水率の関係



図-3.2.5 屋外暴露状況

(6) 屋外暴露試験

供試体は、土木研究所(茨城県つくば市)構内に暴露した。暴露場所は、直射日照や降雨を遮るものがない箇所を選定した。暴露状況を図-3.2.5 に示す。

屋外暴露は 2007 年 12 月に開始し、2010 年 1 月まで行った。暴露 1 年目は 2 週間、2 年目は 4 週間程度の間隔を空けてセラミックセンサの電気抵抗を測定し、コンクリート中の含水率を推定した。測定



は 24 時間程度降雨のない日を選定した。

また、短期的な含水率の変化を調べる目的で、セラミックセンサの測定をほぼ毎日行う期間を、暴露期間中に数回設けた。これらの期間には、雨天でも測定を行った。

(7) 解体調査

屋外暴露試験を行った供試体の一部を解体し、種々の調査を行った。行った調査の一覧を表-3.2.4 に示す。

3. 2. 3 セラミックセンサ法による含水率推定結果

(1) 含浸材を適用していない場合

供試体 No.1 の推定含水率の変化を図-3.2.6 に示す。供試体は、暴露前の保管時に少しコンクリート表面からの乾燥が進んでいたが、暴露開始直後の降雨の影響で、短期間で推定含水率が上昇した。その後、天端の暴露面から 10mm の位置では、吸水・乾燥による変化が見られる。しかし、表面から 20mm 以上の位置では、推定含水率は比較的安定していた。一方、底面となる暴露面からは、供試体が乾燥しているものと見られた。ただし、底面側でも降雨の影響がある場合は、推定含水率が上昇していた。

暴露面が鉛直となるように設置した供試体 No.2 の推定含水率の変化も、その傾向は、供試体 No.1 と類似していた。

(2) シラン系含浸材 A を適用した場合

供試体 No.5 の推定含水率の変化を図-3.2.7 に示す。暴露面天端からの推定含水率の分布を見ると、暴露面から 50mm までは、それより内部のよりも推定含水率が小さかった。また、底面側の推定含水率は、供試体 No.1 よりも全体的に小さかった。

表-3.2.4 解体調査で行った試験

試験項目	方法
含水率の測定 (加熱乾燥法)	乾式カッターを用いて供試体からブロック状のコンクリートを切り出し、質量を測定した。また、105℃の環境で約 1 週間乾燥させ、含水率を測定した。
平衡含水率測定	供試体から試料を切り出し、絶乾状態にして質量を測定した。その後、湿度を調整した容器に試料を静置し、質量が安定するまで待って測定した (供試体 No.1、3、4、11 のみ)。なお、気温 40℃の環境で行った。
吸水率試験	供試体から暴露面を含む試料を切り出し、暴露面以外をシールして水中に浸せきし、質量の変化を測定した。JSCE K571 を参考に行った。
透湿度試験	供試体から暴露面を含む試料を切り出し、JSCE K571 を参考に行った。

※解体調査は、供試体 No.1、3、4、5、7、9、11、12 で行った。

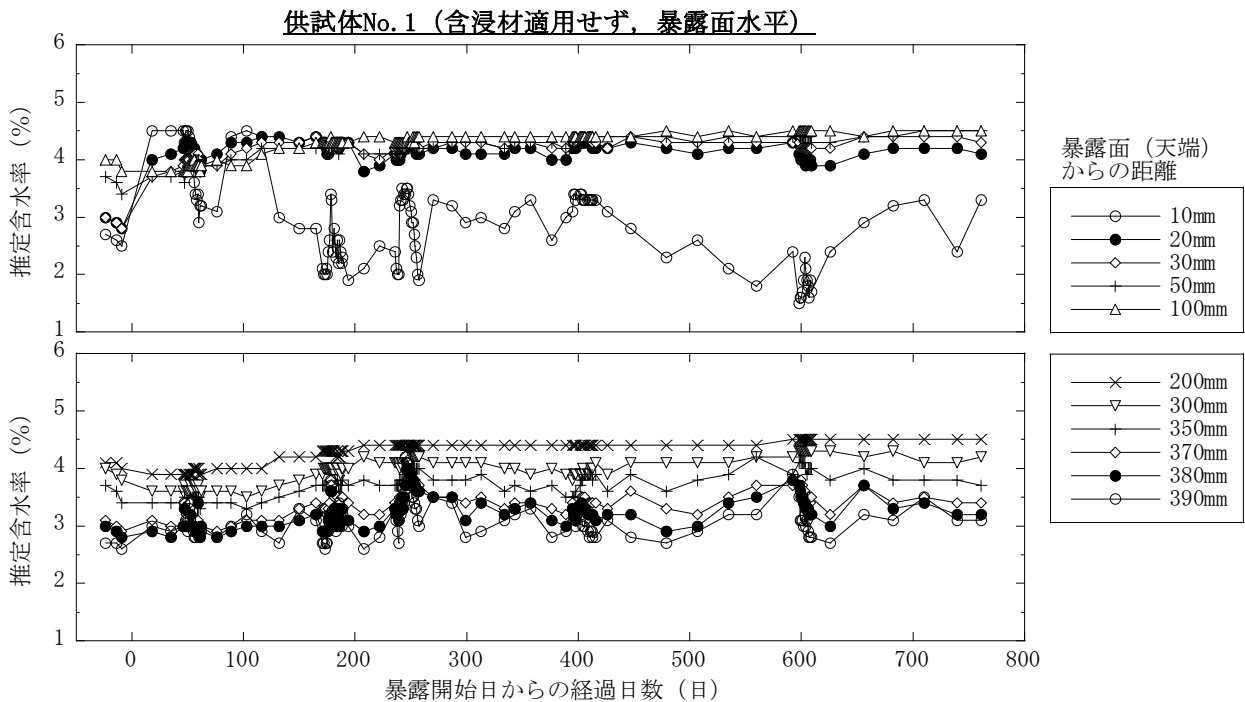


図-3.2.6 含水率の長期的な変化 (供試体 No.1)

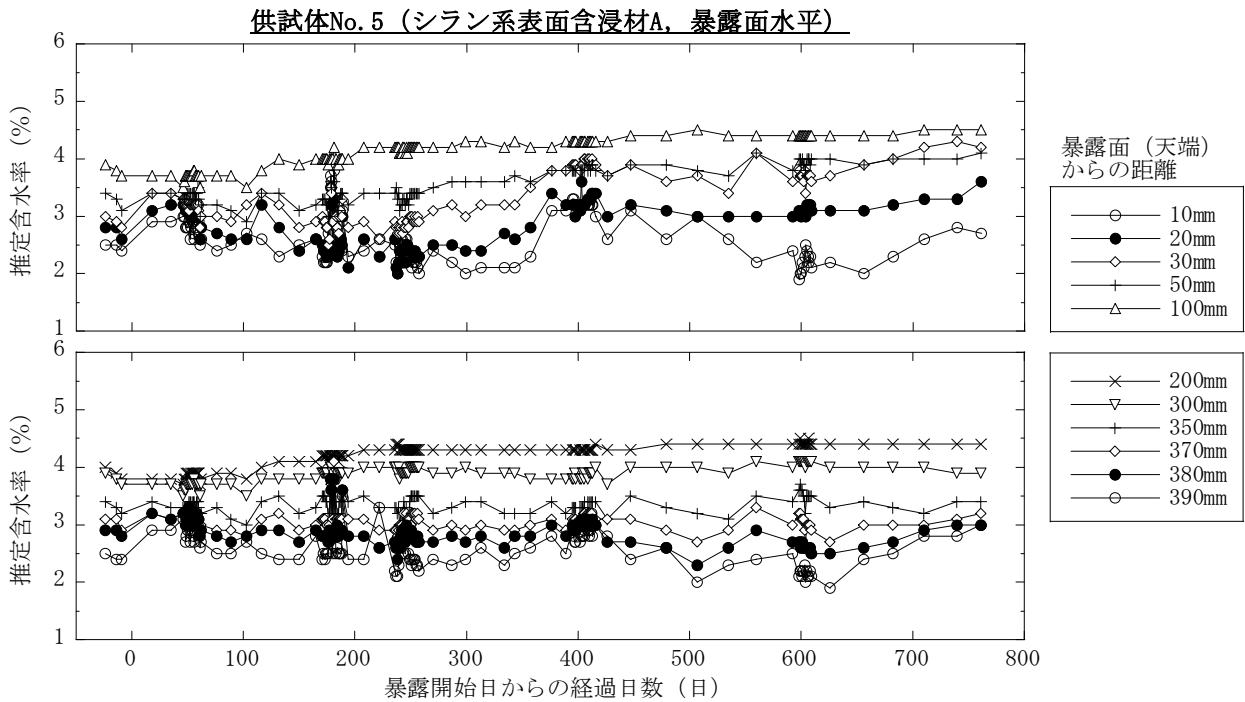


図-3.2.7 含水率の長期的な変化 (供試体 No.5)

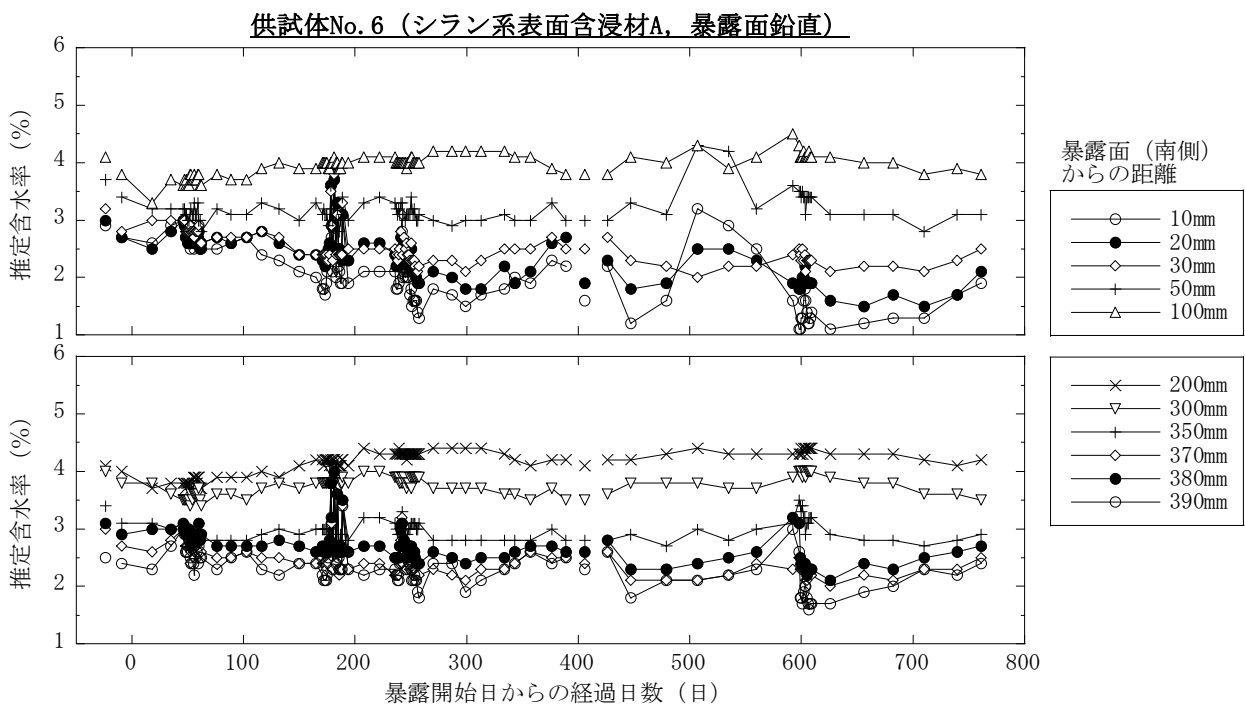


図-3.2.8 含水率の長期的な変化 (供試体 No.6)

次に、暴露面が鉛直となるように設置した供試体 No.6 の推定含水率を図-3.2.8 に示す。暴露面を鉛直とした場合は、暴露面からの乾燥の範囲が 100mm まで及んでおり、暴露面が底面となるように設置した場合 (図-3.2.7 の下図) よりも乾燥の程度が大きかった。

なお、シラン系表面含浸材Aを適用した場合でも、降雨による吸水がある場合には、短期的に含水率が上昇している。測定例を図-3.2.9 に示す。

(3) シラン系含浸材 B を適用した場合

シラン系表面含浸材 B を適用した場合も、シラン系表面含浸材 A を適用した場合とほぼ同様な傾向を

示した。ただし、含浸材 A の場合よりも、若干、推定含水率が大きくなった。

(4) けい酸塩系含浸材 D を適用した場合

供試体 No.9 の推定含水率は、当初は含浸材を塗布していない供試体と同様であったが、暴露から半年以上が経過すると、コンクリート表面からの乾燥の範囲が、含浸材を適用しない場合よりもより大きいように見受けられた。けい酸塩系表面含浸材とコンクリート中の水分等の反応が長期間にわたって生じ、暴露期間が経過するに従って補修効果が発生したものと考えられる。

この傾向は、暴露面を鉛直とした供試体 No.10 でより顕著に見られた (図-3.2.10)。

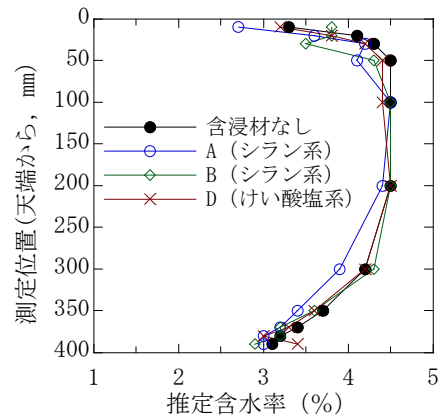


図-3.2.11 暴露終了時の推定含水率 (暴露面水平)

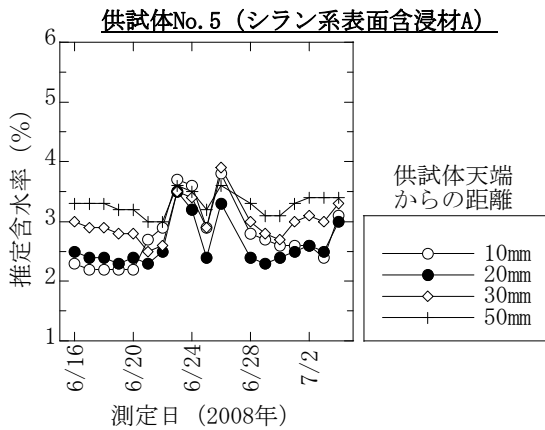


図-3.2.9 含水率の短期的な変化 (供試体 No.5)

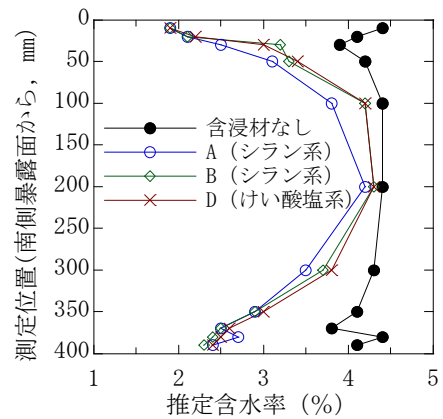


図-3.2.12 暴露終了時の推定含水率 (暴露面鉛直)

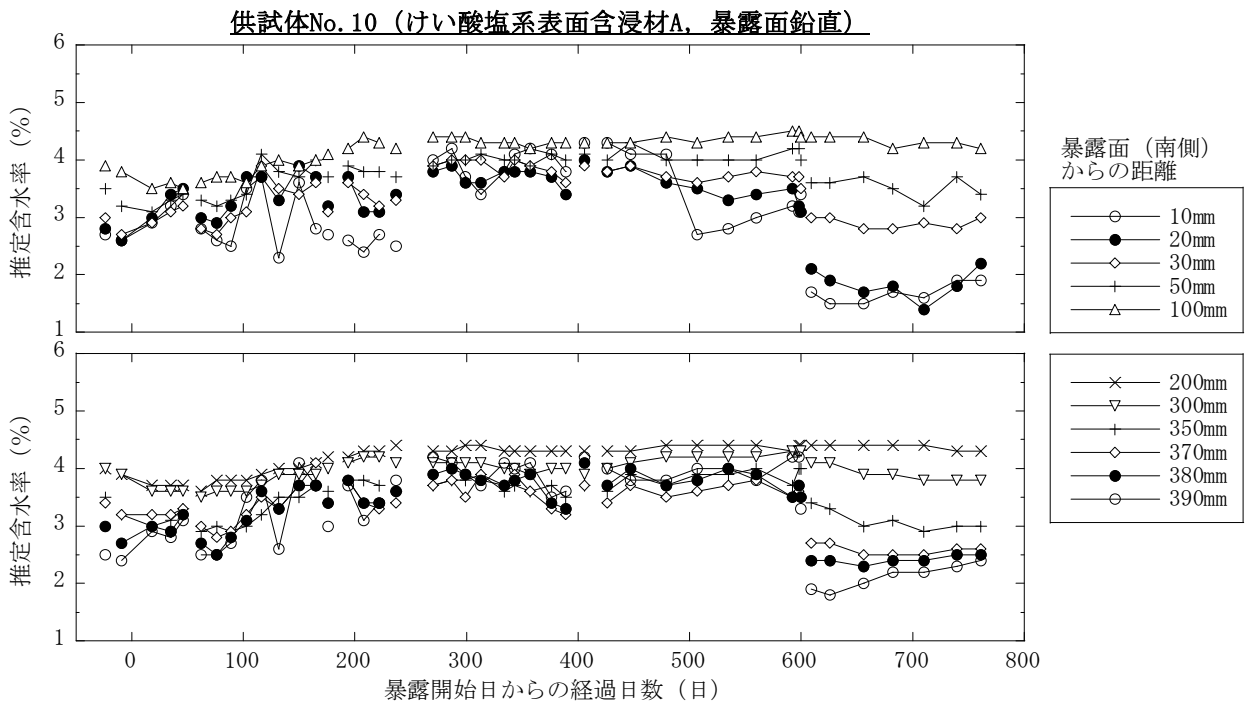


図-3.2.10 含水率の長期的な変化 (供試体 No.10)



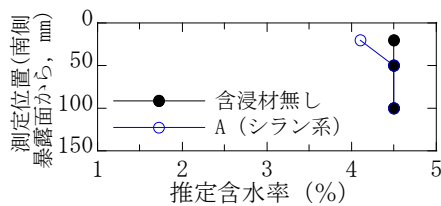


図-3.2.13 暴露終了時の推定含水率（腐食速度測定用供試体、暴露面鉛直）

(5) コンクリート中に塩分を多量に含む場合

練混ぜ時に多量の塩化ナトリウムを混入した供試体 No.11 の推定含水率は、いずれの測定箇所でも暴露期間を通じて高く、安定していた。シラン系表面含浸材 A を適用した供試体 No.12 では、暴露面から 20mm の位置のみ、若干乾燥気味に推移したが、その値は、塩分を含んでいない他の供試体よりも大きく、測定日による含水率の変化が顕著ではなかった。

(6) 含浸材の有無による比較

暴露終了時の推定含水率分布を比較して、図-3.2.11、図-3.2.12、推定含水率の測定結果では、暴露面が鉛直の場合に、含浸材の有無による違いが顕著であった。しかし、塩分を多量に含む供試体では、推定含水率が大きくなり、暴露面が鉛直の場合でも、乾燥の範囲が狭かった（図-3.2.13）。

3. 2. 4 加熱乾燥法による含水率測定結果

暴露終了後に供試体を解体し、加熱乾燥法で含水率を測定した結果を図-3.2.14、図-3.2.15 に示す。なお、腐食速度測定用を除く暴露面を鉛直にした供試体は、今回、解体調査を行なわなかった。

図-3.2.14 を、セラミックセンサ法による推定含水率（図-3.2.11）と比較してみると、含浸材を塗布していない供試体については、含水率の大きさややや天端側で含水率が大きい含水率分布の特徴といった点で、解体調査の結果とセラミックセンサ法による推定含水率は比較的良好一致していた。

表面含浸材を塗布した供試体に着目して見ると、暴露面からの含水率分布が明確に認められる範囲が約 50mm の位置までで、この点では、セラミックセンサ法による推定含水率は比較的良好一致していた。しかし、供試体中心部の測定結果を比較すると、加熱乾燥法の測定結果では、含浸材を塗布した供試体で含水率抑制効果が見られるのに対して、セラミックセンサ法による推定含水率では含水率抑制効果が明確ではなかった。セラミックセンサ法による含水率推定では、あらかじめ試験をして求めた電気抵抗

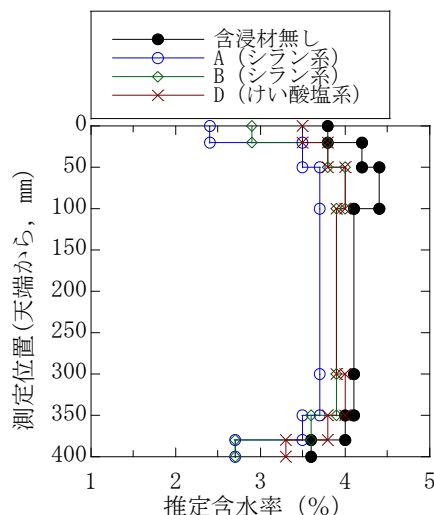


図-3.2.14 加熱乾燥法による含水率（暴露面水平）

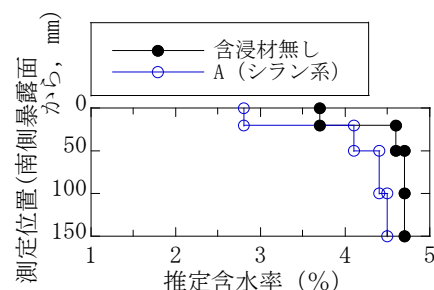


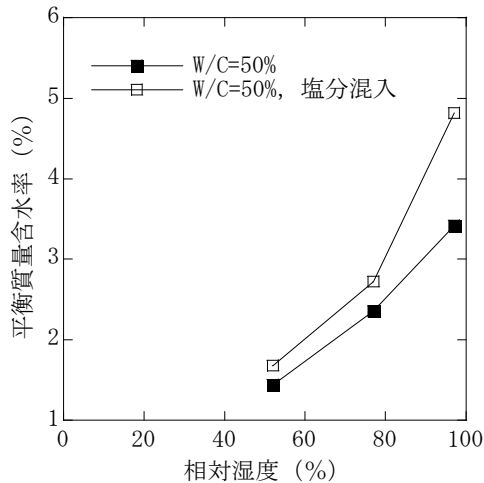
図-3.2.15 加熱乾燥法による含水率（腐食速度測定用供試体、暴露面鉛直）

と含水率の関係から含水率を推定するが、今回の予備試験（図-3.2.4）では、電気抵抗が小さい領域でのデータが十分には多くなかったので、含浸材の効果を十分に把握できなかったおそれがある。

加熱乾燥法による含水率測定から、塩分を混入した供試体の含水率は、混入していない場合よりも高いことが確認された（図-3.2.15）。塩分を混入した供試体については、セラミックセンサ法では表面含浸材の効果が顕著には認められなかったが、加熱乾燥法では、適用の有無によって含水率に違いが見られた。

3. 2. 5 平衡含水率試験結果

平衡含水率試験の結果を、図-3.2.16 に示す。既往の研究から、ASR による膨脹が生じる供試体を保管する環境条件として、相対湿度が 90%以上の環境では膨脹するが、85%以下程度まで湿度を低下させると、ASR による膨脹が停止すると考えられている<sup>10</sup>。また、相対湿度が 90%以上の範囲でも、わずかな湿度の違いによって膨脹量は大きく変わらう



※開始後 43 日の値で厳密には平衡に達していない試料も含まれる。

図-3.2.16 平衡含水率の測定結果

る。

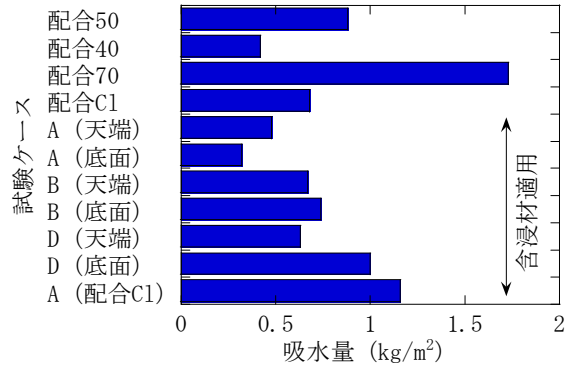
これに対し、今回の測定結果から、塩分を含まない水セメント比 50%のコンクリートの平衡質量含水率は、相対湿度が 90%の場合 3.0%程度であると推定された。この結果は、20℃の環境下で測定された結果 11)とほぼ同程度であった。ただし、平衡含水率については、今回試験したように吸湿によって平衡に達する場合と、放湿によって平衡に達する場合で異なることが知られている。文献 11)の実験結果では、放湿過程の平衡含水率は、吸湿過程の約 1.6 倍となっていた。これらの結果から、ASR による膨脹が停止する含水率は、3.0~4.8%の範囲にあると考えられる。

塩分を含んだ供試体では、特に相対湿度が高い環境では、平衡含水率が大きく上昇する傾向が認められた。供試体 No.12 で、含浸材を適用したにもかかわらず含水率が高かったのは、このためと考えられる。

### 3. 2. 6 吸水率・透湿度試験結果

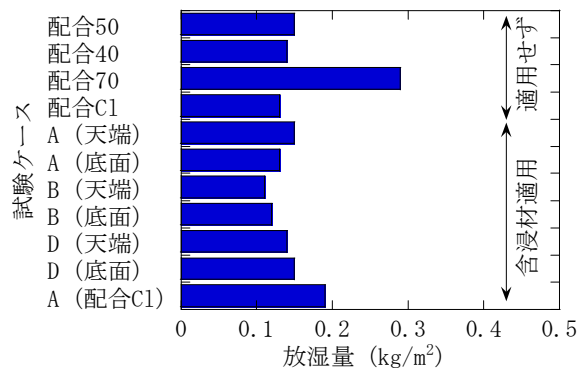
浸せき期間中の質量変化から単位面積当たりの吸水量を算出し図-3.2.17 に示す。シラン系表面含浸材 A を適用した供試体 No.5 では吸水量が半分程度に、含浸材 B を適用した供試体 No.7 でも 8 割程度に抑制されていた。

けい酸塩系表面含浸材 D を適用した供試体では、暴露時に天端であった暴露面では、シラン系表面含浸材 B と同程度に吸水が抑制されている一方、底面であった暴露面では、含浸材を適用していない場合



※含浸材を適用していない供試体については、暴露面を天端とした場合と、底面とした場合の平均値を示した。

図-3.2.17 吸水率試験結果



※含浸材を適用していない供試体については、暴露面を天端とした場合と、底面とした場合の平均値を示した。

図-3.2.18 透湿度試験結果

と同程度の吸水量があった。暴露中の水分の供給量が少なかったと考えられる底面では、けい酸塩系表面含浸材の反応が十分には進んでおらず、今回の暴露期間の範囲では吸水を抑制する効果が発揮されていないものと考えられる。

なお、今回の吸水率試験は、解体時に採取した試料を 1 週間程度自然乾燥させてから行ったが、試験開始時の含水状態は、供試体の種類により異なり、含浸材を適用していない供試体で高い。仮に同一の含水状態から試験を開始できた場合は、含浸材の有無による違いがより顕著になるものと予想される。

透湿度試験の結果を図-3.2.18 に示す。含浸材 T は、他の試料と比較すると、透湿性に若干劣る結果であったが、その差は顕著ではなかった。

### 3. 2. 7 種々の条件が含水率効果に及ぼす影響に関する考察

供試体の含水率に関する測定結果を整理して表-3.2.5 に示す。

表-3.2.5 屋外暴露試験を行った供試体の含水率測定結果のまとめ（塩分を混入していない場合）

供試体の種類	測定方法	暴露面の向き、測定部位			
		水平		鉛直	
		表層部 (50mm まで)	中心部	表層部 (50mm まで)	中心部
W/C=50%、 含浸材適用 せず	セラミック センサ法	・天端側では、乾燥が明確な 範囲は、20mm 程度。	・約 4.5%で安定	・天端側では、乾燥が明 確な範囲は、30mm 程度。	・約 4.4%で安定
	加熱乾燥法	・含水率 3.6~4.2%	・含水率 4.1 ~ 4.4%	(測定データ無し)	
W/C=50%、 含浸材 A	セラミック センサ法	・天端側、底面側ともに、乾 燥が明確な範囲は、50mm 程度。	・約 4.4%で安定	・50mm の位置の推定 含水率は、暴露面水 平で天端から 20mm の位置と同等。	・両側面から 100mm の位置は中心部よ りも乾燥。 (約 4.3%で安定)
	加熱乾燥法	・コンクリート表面からの乾 燥が明確な範囲は、50mm 程度。 ・含水率 2.4~3.5%	・含水率 3.7%	(測定データ無し)	
W/C=50%、 含浸材 T	セラミック センサ法	・天端側、底面側ともに、乾 燥が明確な範囲は、50mm 程度。	・4.5%で安定	・50mm の位置の推定 含水率は、暴露面水 平で天端から 20mm の位置と同等。	・両側面から 100mm の位置は中心部よ りもやや乾燥。 (約 4.4%で安定)
	加熱乾燥法	・コンクリート表面からの乾 燥が明確な範囲は、50mm 程度。 ・含水率 2.9~3.8%	・含水率 3.9 ~ 4.0%	(測定データ無し)	
W/C=50%、 含浸材 E	セラミック センサ法	・暴露当初は含浸材を適用し ていない場合と同様。 ・天端側では、暴露後約半年 以降から乾燥し、その範囲 は表面から 50mm 程度。	・4.5%で安定	・暴露当初は含浸材を 適用していない場合 と同様。 ・暴露後、500~600 日が経過した時点 で、含水率が急激に 低下。	・両側面から 100mm の位置は中心部よ りもやや乾燥。 (約 4.3%で安定)
	加熱乾燥法	・コンクリート表面からの乾 燥が明確な範囲は、50mm 程度。 ・含水率 2.7~3.8%	・含水率 3.9 ~ 4.0%	(測定データ無し)	

(1) シラン系含浸材 A を用いた場合

まず、暴露面を水平とした場合に着目すると、含浸材 A を適用した供試体は、コンクリート表面から 20mm 程度までの試料の含水率は、3%を下回っており、湿度 90%の環境下での含水率が 3.0~4.8%程度に落ち着くと予想されることをふまえると、ASR による膨脹は生じないものと考えられる。一方、これ以外の範囲では、含水率が 3.5~3.7%であり、膨脹が抑制されることは期待できるが、停止するかどうかは必ずしも明確ではない。

暴露面を鉛直にした場合、暴露面から 50mm の位置の推定含水率が、暴露面水平の場合の天端から 20mm の位置の推定含水率よりも小さかった。したがって、コンクリート表面から 50mm 以上 100mm

未満の深さまで、ASR による膨脹を停止できると期待される。また、それ以外の部位でも、暴露面水平の場合とより推定含水率が小さいので、ASR による膨脹がさらに抑制されることが期待される。

(2) シラン系含浸材 B を用いた場合

含浸材 A と同様の考え方で ASR による膨脹が停止できると期待される範囲を求めると、その範囲は、含浸材 A の場合と同様であった。ただし、含浸材 B を適用した供試体の中心部の含水率は、含浸材 A の場合よりも大きかったこと、吸水率試験時の吸水量が含浸材 A よりも大きかったことなどから、膨脹抑制効果は含浸材 A よりも劣るおそれもある。

(3) けい酸塩系含浸材 D を用いた場合

けい酸塩系表面含浸材 D を用いた場合は、コンク

リート表面付近の含水率が顕著には低下しなかった。これは、この材料が撥水性を有しないためと考えられる。

また、暴露期間中の推定含水率の推移から、含浸材による補修効果が生じるには、降雨の影響を受ける期間が相当必要であることがわかった。けい酸塩系表面含浸材の反応速度は製品によって異なると考えられるので、一概には言えないが、補修効果が得られるまでの期間は膨脹が継続するおそれがある点について検討が必要である。

#### (4) 補修の効果の及ぶ範囲についての考察

以上の結果から、部材の断面が大きい場合、シラン系表面含浸材を適用した場合でも、断面全体にわたって完全に膨脹を停止させることは困難と考えられる。しかし、ASR が生じた実構造物のひび割れを観察すると、コンクリート表面から連続したひび割れは、かぶりコンクリートの範囲にとどまる場合が多い。これは、かぶりより内部のコンクリートの膨脹が鉄筋で拘束されるためと考えられる。

今回の実験結果から、塗布する面が鉛直の場合、通常の鉄筋コンクリート部材のかぶりの範囲については、その大部分において膨脹を停止できるものと期待される。したがって、部材内部の ASR による膨脹が鉄筋により拘束されることが期待される場合は、シラン系表面含浸材を適用することで、コンクリート表面のひび割れ発生やひび割れ幅の増加を抑制することが可能と期待される。

一方、無筋コンクリートの場合は、シラン系表面含浸材を適用しても、内部のコンクリートの膨脹が継続するおそれがあり、注意が必要である。また、含浸材を適用する面が水平の場合は、かぶりの範囲についても、膨脹を停止できるかどうかは必ずしも明確ではなかった。

### 3. 2. 8 含水率低減効果の及ぶ範囲に関する検討のまとめ

屋外暴露試験を行って含水率低減効果の及ぶ範囲に関する検討を行った結果、次の知見を得た。

- (1) 水セメント比 50% のコンクリートに、シラン系表面含浸材を適用すると、コンクリート表面からの吸水を抑制し、含水率を低下させることが可能であることが確認された。ただし、含水率の抑制の程度は暴露面の向きやコンクリート表面からの距離によって異なっていた。
- (2) (1) から、シラン系表面含浸材を適用することで、ASR による膨脹を抑制することが期待される

が、これをほぼ停止させることが可能とまで考えられる範囲は限られていた。

- (3) 鉄筋コンクリート部材の鉛直面では、シラン系表面含浸材を適用することの効果が高いと期待できる。一方、適用する場所が水平面で降雨の影響を受ける場合や、無筋コンクリートの場合は、シラン系表面含浸材を適用しても、膨脹が継続するおそれがある。
- (4) けい酸塩系表面含浸材は、補修効果が発揮されるまでにコンクリートが吸水できる期間が相当程度必要であった。この間は、ASR による膨脹が継続すると考えられ、適用に注意が必要である。

これらの結論は、既往の研究から比較的撥水性や耐久性に優れていると見られる材料を使用した実験の結果で得られたものである。今回の実験では、表面含浸材 A と B で評価が分かれる部分があったが、暴露環境によっては、両者共に ASR 抑制効果が得られる／得られない結果となることも十分に考えられるので、注意が必要である。

## 3. 3 ひび割れの影響に関する検討

### 3. 3. 1 検討の概要

前節に示したように、コンクリート表面にシラン系表面含浸材を適用すると、塗布した部分からの吸水を抑制することができるので、コンクリート中の含水率を低下させる一定の効果を得られるものと考えられる。しかし、前節の検討では、ASR を生じさせていないコンクリートを用いて行っていることから、ASR の影響で多数のひび割れが見られるような場合でも同様な効果が得られるか、必ずしも明確ではない。

そこで、ASR によるひび割れが生じているコンクリート供試体を用いた屋外暴露試験を行い、ひび割れの程度が表面含浸材の含水率抑制効果に与える影響について確認した。

### 3. 3. 2 検討方法

#### (1) 使用した供試体

すでに他の目的のために製作されていた角柱供試体、および円筒形供試体を用いた。

角柱供試体 (100×100×400mm) の配合等を表 3.3.1 に示す。これらの供試体は、材齢 28 日以降気温 40℃湿度 100% の環境で 6 箇月間の促進養生試験を行って膨脹量を測定した後、約 4 箇月間は、気温や湿度を制御していない屋内に保管されていた。配合条件等によって膨脹量が異なっていたが、ほと

表-3.3.1 角柱供試体

No.	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						アルカリの添加 (kg/m <sup>3</sup> )	促進養生終了時の膨張量 (μ)
	W	C	Si	Sd	Gi	Gd		
1	165	300	417	434	502	503	NaOH、3.10	48
2							NaOH、6.19	3,196
3							NaOH、9.29	3,163
4							NaCl、13.59	5,677
5			208	651	252	755	NaOH、	2,307
6			0	868	0	1009	9.29	1,636



図-3.3.1 円筒形供試体

んどのケースでは、ひび割れは析出物によって充填されていた。

円筒形供試体は、配合や打設時期等が不明なコンクリートであるが、ASRを生じさせる目的で製造されたことは明らかなもので、含浸材塗布時には顕著なひび割れが見られた。この供試体は、含浸材の塗布を行う前も長期間屋外に暴露されていた。円筒形供試体は、その形状からバケツを型枠として用いたものと考えられる。寸法には個々の供試体で若干の違いが見られたが、直径は21cmから25cm（底部が小さく、頂部が大きい）、高さは21cm程度であった。最大ひび割れ幅は約1mmで、幅の大きいひび割れは開口しており、ASRゲルなどの析出物は外観上認められなかった（図-3.3.1）。

(2) 含浸材の適用

前節と同じ3種類の表面含浸材を用い、供試体の全面に含浸材を塗布した。なお、この実験では、適用の1日後から屋外に暴露した。

(3) 屋外暴露

茨城県つくば市にある土木研究所の構内に暴露した。暴露場所は、土の上にモルタル製のタイルが敷き詰められた場所で、このタイルの上に3cmほど浮かせるようにして供試体を設置した。供試体の設置場所は、日射や降雨をさまたげるものがない場所と

表-3.3.2 供試体一覧

No.	供試体の種類	配合 No.	表面含浸材の塗布	暴露場所
1-1	角柱	1	適用せず	屋外
1-2			A	
1-3			B	
2-1		2	適用せず	
2-2			A	
2-3			B	
3-1		3	適用せず	屋内
3-2			D	
3-3			D	
4-1		4	適用せず	屋外
4-2			A	
4-3			B	
5-1	5	適用せず		
5-2		A		
5-3		B		
6-1	6	適用せず		
6-2		A		
6-3		B		
7-1	円筒形	不明	適用せず	
7-2			A	
7-3			B	
7-4			D	

した。

なお、供試体の一つは、気温や湿度が制御されておらず、外気温や湿度の変化の影響を受けやすい屋内に保管した。

(4) 実験ケース

同一配合の供試体が3体ずつあったので、シラン系表面含浸材を適用した供試体2体と表面含浸材を適用しない供試体1体を設けることを原則として実験を計画した。試験ケースを表-3.3.2に示す。

(5) 含水率抑制効果の確認方法

a) 角柱供試体

暴露期間中、1ヶ月に1回程度の頻度で供試体の質量を測定した。測定は、24時間程度降雨の無かった日に行った。また、暴露終了後には、供試体の長さを測定した。

その後、JSCE K571の吸水率試験に準じて供試体を水中に1週間浸漬し、全面から吸水させて質量の変化を測定した。吸水前の含水率の調整は特にやっていないが、角柱供試体の暴露終了前には、約2週間1mm以上の降雨がない期間が続いており、供

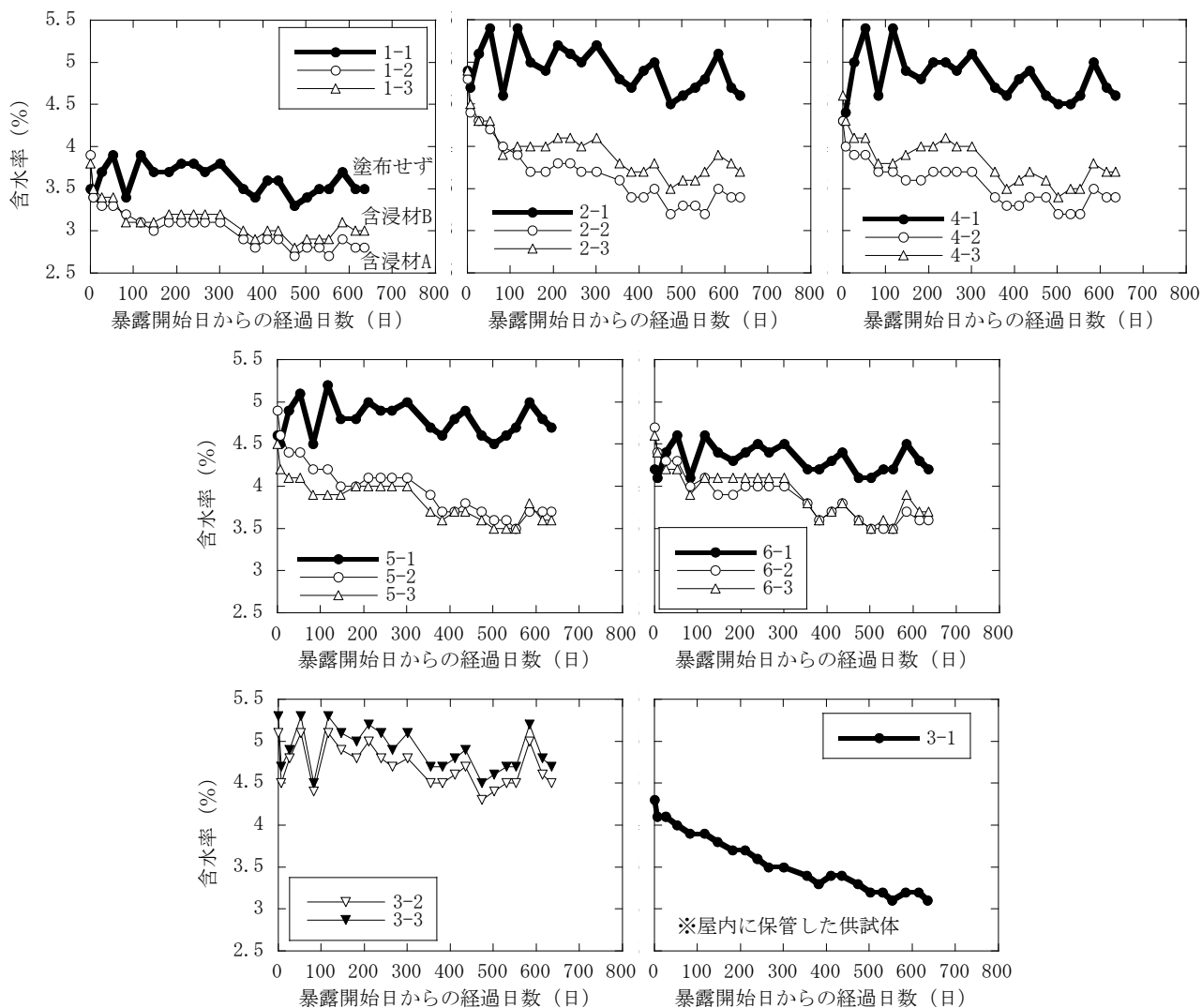


図-3.3.2 暴露期間中の含水率変化（角柱供試体）

試体は比較的乾燥した状態にあったものと考えられる。

最後に供試体を、105℃の乾燥炉で乾燥させて絶乾質量を測定した。その結果から、暴露期間中や吸水前後の供試体の含水率を求めた。

#### b) 円筒形供試体

暴露期間中、角柱供試体と同様に、供試体の質量を測定した。暴露終了後、乾式のコアドリルを用いて供試体中央部からφ50mmのコアを採取した。これを適宜分割して試料とし、加熱乾燥法で暴露終了時点での供試体中の含水率分布を求めた。なお、採取中にコアが折損するなどの影響で、供試体によって測定位置や範囲に違いがある。

### 3. 3. 3 検討結果

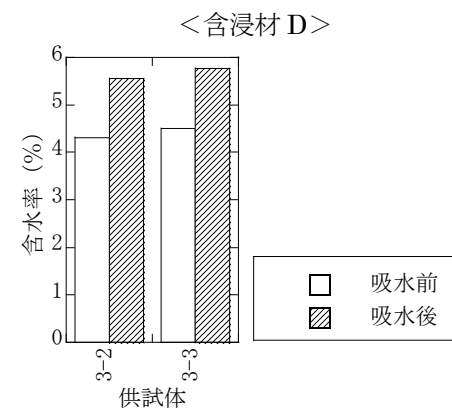
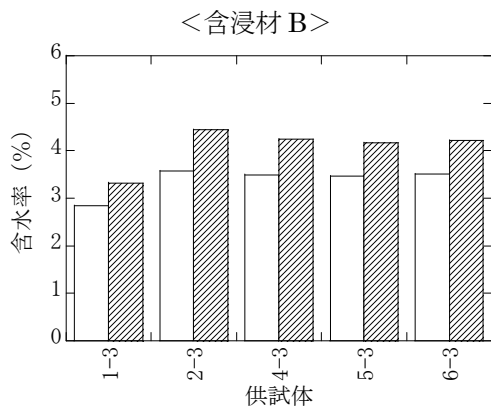
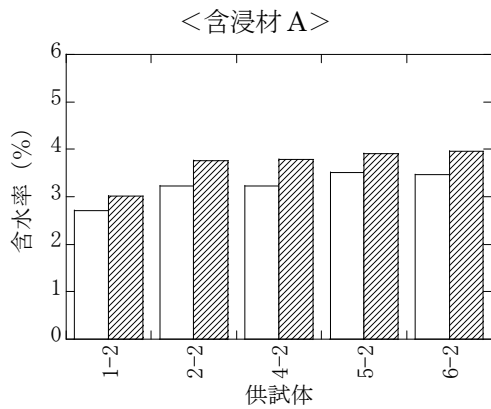
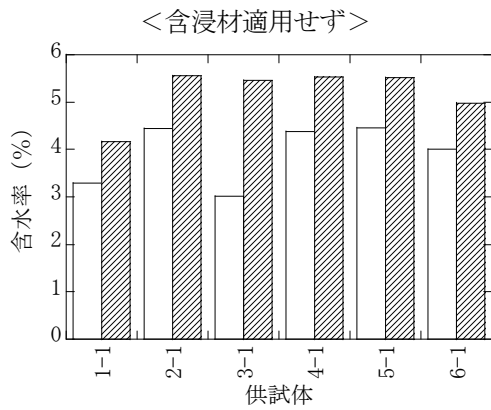
#### (1) 角柱供試体

##### a) 暴露期間中の含水率変化

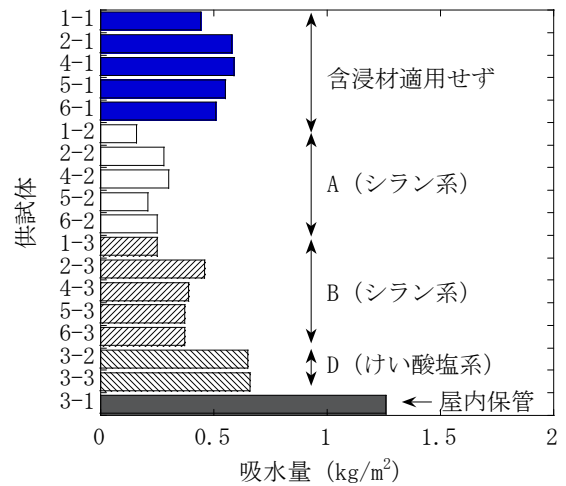
暴露期間中の含水率の変化を図-3.3.2に示す。まず、同一配合の供試体について、含浸材を適用しない、含浸材Aを適用、含浸材Bを適用と条件を変化させた場合に注目すると、表面含浸材を適用していない供試体では、測定日による含水率の上下があったが、長期的にほぼ同程度の含水率が保たれていた。これに対し、シラン系の表面含浸材を適用した供試体では、暴露期間中に安定して含水率が低下する傾向が見られた。また、含浸材を塗布する前の膨張量をもっとも大きい配合 No.4 のケースでも、シラン系表面含浸材を適用した後の含水率は明確に抑制されていた。

一方、けい酸塩系表面含浸材を適用した供試体は、含水率の変化の傾向が、含浸材を適用していない場合と大きくは異ならなかった。

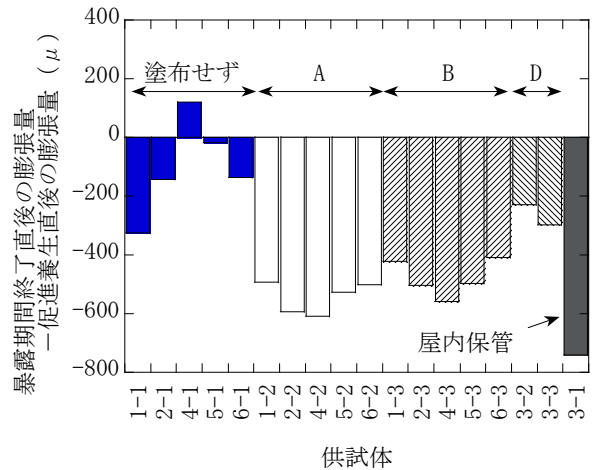




図一3.3.3 吸水試験時の含水率変化（角柱供試体）



図一3.3.4 吸水率試験結果（角柱供試体）



図一3.3.5 長さ変化の測定結果（角柱供試体）

### b) 吸水試験の結果

吸水試験（7日間）中の供試体の含水率の変化を図一3.3.3に示す。

まず、含浸材を塗布していない供試体に着目すると、ASRによるひび割れが生じていない供試体1-1を除き、吸水試験後の含水率は5%程度以上と大きくなっていった。ひび割れが生じた供試体では、水がひび割れを通じて容易に供試体内部まで到達し、含水率を急激に上昇させたと考えられる。

一方、シラン系表面含浸材を適用した供試体に着目すると、無塗布の場合よりも吸水前の含水率が小さく、吸水試験後も含水率が抑制されていた。試験中の吸水量は、含浸材Aを適用した場合は適用しない場合の半分以下に、含浸材Bを適用した場合は6割から8割に抑制されていた（図一3.3.4）。

なお、けい酸塩系の含浸材を適用した供試体は、

含水率の変化が含浸材を塗布していない場合と同程度で、吸水を抑制する効果は認められなかった。

### c) 長さ変化測定の結果

促進養生後の供試体の長さ、暴露終了後の供試体の長さを測定した結果から、この間の供試体の寸法変化を求めて図-3.3.5に示す。

まず、表面含浸材を適用しなかった供試体に注目してみると、ASRが生じていないと考えられる供試体 1-1 では、約 300 $\mu$  収縮していた。促進養生直後と比較すると供試体が乾燥したためと考えられる。これに対し、暴露前に ASR による膨張が生じていた供試体では、その膨張量が大きいものほど、暴露期間中の供試体の収縮量が小さくなっており、供試体 4-1 は暴露期間後の長さの方が大きかった。したがって、表面含浸材を適用していない供試体では、程度の大小はあるが、屋外暴露中にも ASR による膨張が継続しているものと考えられる。

これに対して、シラン系の表面含浸材を適用した供試体は、いずれも 400~600 $\mu$  程度の収縮が生じていた。コンクリート中の含水率が抑制され、乾燥による収縮が生じたものと考えられる。収縮量は、屋内に設置した供試体 3-1 ほどではなかったが、これは、シラン系表面含浸材を適用していても、降雨時は若干の吸水があるためと考えられる。

シラン系の表面含浸材を適用した供試体では、暴露前の膨張量と暴露中の収縮量の間に関係が認められなかった。このことから、表面含浸材の含水率抑制効果により、ASR による膨張が停止しているものと考えられる。

けい酸塩系表面含浸材を適用した供試体では、300 $\mu$  程度の収縮が生じていた。収縮量は、当初の膨張量が同程度で、表面含浸材を適用していない供試体 2-1 と比較するとやや大きく、ASR が生じていない供試体 1-1 と同程度であった。

### (2) 円筒形供試体

暴露期間中の質量の変化を図-3.3.6に示す。シラン系表面含浸材を適用した供試体では、暴露直後の質量を基準として考えると、供試体の質量が 1% 程度低下していた。含浸材を適用していない供試体やけい酸塩系表面含浸材を適用した供試体でも、質量がわずかに低下したが、その程度は、シラン系表面含浸材を塗布した場合ほどではなかった。

次に、暴露期間終了後に測定した供試体中央部の含水率分布を図-3.3.7に示す。表面含浸材を適用していない供試体では、コンクリート表面から 20~

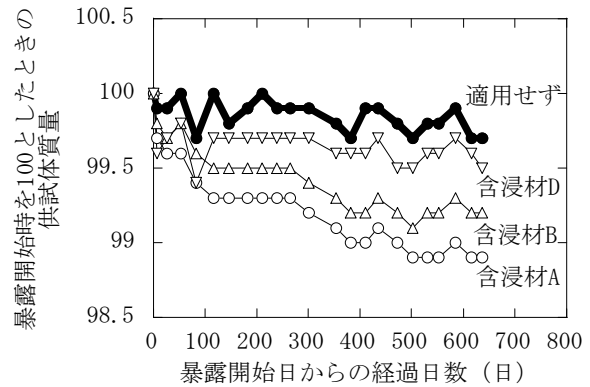


図-3.3.6 暴露期間中の含水率変化 (円筒形供試体)

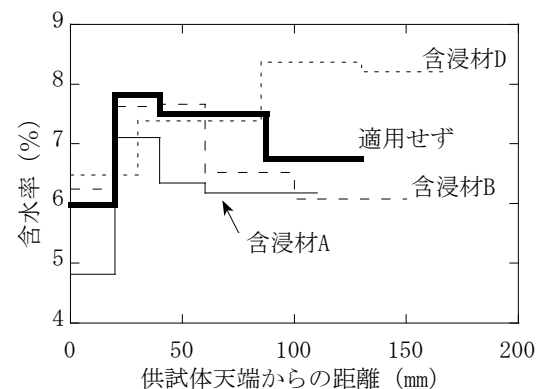


図-3.3.7 含水率分布測定結果 (円筒形供試体)

40mm 程度の位置で含水率が高く、その内部や若干小さくなっていた。含水率は、測定した 4 点の平均で 7.0%と、コンクリートとしては大きかった。

これに対し、シラン系の表面含浸材 A を適用した供試体では、適用しなかった場合と比較すると、部位にもよるが、含水率が 1% 程度低下していた。シラン系の表面含浸材 B を適用した供試体でも、A ほどではないが、含水率が低下していることが確認された。これらの差は、供試体全体の質量変化の傾向とも概ね整合していることから、シラン系の表面含浸材を塗布したことによる含水率低下は、表層付近のコンクリートだけでなく、表面から 100mm 程度入った部位でも生じていると考えられる。

一方、けい酸塩系表面含浸材 E を適用した供試体では、適用しなかった場合よりも含水率が大きくなる場合もあった。

### 3.3.4 ひび割れ供試体の試験結果のまとめ

ひび割れの程度が表面含浸材の含水率抑制効果に与える影響について試験を行って検討し、次の知見を得た。

- (1) 含浸材の適用前に最大で約 6000  $\mu$  の膨脹が生じていた角柱供試体に表面含浸材を適用し、屋外に暴露した。その結果、シラン系表面含浸材を適用した場合には、含水率の抑制効果が認められた。けい酸塩系表面含浸材では、含水率の抑制効果が明確ではなかった。
- (2) コンクリート表面に約 1mm の幅のひび割れが開口している円筒形供試体にシラン系表面含浸材を適用した。その結果、含水率の抑制効果が認められ、抑制された水分量は、コンクリート質量に対し 0.5~1%程度であった。採取したコアの含水率分布から、含水率の低下は、表層付近だけではなく、表面から 100mm 程度の範囲にも及んでいると推測された。これに対し、けい酸塩系表面含浸材では、含水率の抑制効果が認められなかった。
- (3) 含浸材を適用しなかった角柱供試体の長さを屋外暴露終了後に測定した結果、ASR による膨脹が継続していると見られるものがあつた。これに対し、シラン系表面含浸材を適用した角柱供試体では、ASR による膨脹は生じていないものと推測された。けい酸塩系表面含浸材を適用した角柱供試体では、含水率の抑制効果は顕著ではなかったが、無塗布の供試体と比較すると、ASR による膨脹が抑制されているように推測された。
- (4) 上記(1)~(3)から、ASR により多数のひび割れが生じたコンクリートでも、ひび割れのほとんどが析出物で埋められているような場合であれば、表面含浸材による含水率抑制効果を得ることができるものと考えられる。また、ひび割れが開口しているような場合でも、シラン系表面含浸材を塗布することで、塗布しない場合よりも含水率を抑制できる可能性があることが示された。
- (5) 二種類のシラン系表面含浸材について比較すると、吸水試験中の質量変化、屋外暴露中の質量変化ともに、含浸材 A を用いた供試体の方が、含浸材 B を用いた場合より吸水を抑制できる結果であつた。室内試験（吸水試験）の結果から屋外環境下における含水率抑制効果の良否を評価できる可能性がある。ただし、今回の供試体・環境条件においては、含浸材 B でも十分な性能を有していると認められる。

以上のように、本実験の範囲内では、ASR によるひび割れが生じているコンクリート構造物でも、適切なシラン系表面含浸材を適用することでコンクリ

ート中の含水率を抑制し、ASR による膨脹を抑制することが可能と考えられる。ただし、この実験では、ひび割れ近傍の含水率を局所的に捉えることが困難なので、ひび割れ近傍のコンクリートに限ってみると含水率が十分に抑制されていないおそれもある。したがって、幅の大きな開口ひび割れがある場合には、ひび割れ注入工法などを併用することが望ましい。

### 3. 4 性能評価手法に関する検討

#### 3. 4. 1 検討の概要

表面含浸材の効果については、これまで種々の検討が行われているが、現状では、その程度を定量的に評価できるような性能評価手法が、確立されているとは言えない。一方で、多数の製品が表面含浸材として市場に流通しており、補修を行う際の材料を適切に選定する手法が求められている。

そこで、近年提案されている土木学会規準および欧州規準に準じて、表面含浸材を適用したモルタルおよびコンクリートの試験を行い、ASR に対する補修として、表面含浸材を用いる場合の、性能評価手法を検討した。本報では、その一部を紹介する。

#### 3. 4. 2 検討した試験方法

##### (1) 土木学会規準

表面含浸材の試験方法として、土木学会から、JSCE-K 571-2005（表面含浸材の試験方法（案））が示されている。本検討では、ここで示されている試験のうち、ASR に対する補修という観点からは重要性が高いと考えられる含浸深さ試験、透水量試験、吸水率試験、透湿度試験を実施した。

土木学会規準では、試験方法が示されているのみで、試験結果の評価については記述がない。試験結果を用いた評価については、土木学会の表面保護工法設計施工指針（案）に収録された表面含浸工マニュアルの解説中に記載があり、表面含浸材の性能をグレードで分類する方法が提案されている（表-3.4.1、表-3.4.2）<sup>12)</sup>。しかし、この表で言うグレードと ASR 抑制効果の関係については、これまで検討されていない。

##### (2) 欧州規格

表面含浸材を含む表面保護系の補修材に関する欧州規格として、EN 1504-2 (Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity —) がある。

表-3.4.1 劣化要因に対する性能のグレード<sup>12)</sup>

評価項目		グレード		
性能	評価値 (%)	A	B	C
透水に対する抵抗性	透水抑制率	80 以上	80~60	60 以下
吸水性に対する抵抗性	吸水抑制率	80 以上	80~60	60 以下
透湿性	透湿比	80 以上	80~60	60 以下
中性化に対する抵抗性	中性化抑制率	30 以上	30~10	10 以下
塩化物イオン浸透抵抗性	塩化物イオン浸透抑制率	80 以上	80~60	60 以下

表-3.4.2 評価項目と評価基準

要求性能	評価項目	評価基準	
		シラン系	けい酸ナトリウム系
コンクリート構造物の劣化を抑制する性能	中性化深さ	C	B
	塩化物イオン浸透抵抗性	A	C
	透水性	A	C
	吸水性	A	C
	水蒸気透過性	B	B

※文献 12)の表を整理して、本報の関心と比較的関係のある評価項目のみ示した。

表-3.4.3 表面含浸材に対する要求性能 (EN 1504-2 による)

性能の特性	試験方法	要求性能
凍結防止剤の影響による質量損失 ※凍結防止剤の影響を受ける場合のみ	EN 13581	質量損失の開始が、表面含浸材を適用していない場合と比較して、20 サイクル以上遅いこと
含浸深さ ※EN1766 に従って作成された、配合 C (0.70) のコンクリート供試体における含浸深さ	prEN 14630 (破断面において 0.5mm の精度で測定)	クラス I : 10mm 未満 クラス II : 10mm 以上
吸水及びアルカリ抵抗性	EN 13580	吸水比率 7.5%未満* アルカリ浸せき後の吸水比率 : 10%未満
乾燥速度係数	EN 13579	クラス I : 30%より大 クラス II : 10%より大
塩化物イオンの拡散係数	各国の規準による	

\* EN 13580 でいう吸水比率 (absorption ratio) は、骨材の試験等で用いられる吸水率とは大きく異なり、含浸材を適用した場合と適用していない場合の結果を比較する算定式から算出される。

また、これに関連した表面含浸材の試験方法が示されている。そこで、これらのうち ASR に対する補修という観点から重要性が高いと考えられる乾燥試験 (EN 13579) および吸水試験 (EN135780) を行った。

なお、EN 1504-2 には、表面含浸材に求められる性能 (表-3.4.3) が示されているが、この性能は劣化機構に応じたものではなく、ここで達成される性能と ASR 抑制効果の関係は明確ではない。

### (3) その他の試験

種々の試験で得られる試験結果と、実環境下での含水率抑制効果の良否との関係を検討するため、供

試体を屋外に暴露し、1日1回質量を測定した。

### 3. 4. 3 実験方法

(1) モルタル供試体を用いた実験

a) 供試体

JSCE-K 571 に従って、水セメント比 50%のモルタル供試体を作製した。モルタルの品質が試験結果に与える影響を検討するため、JSCE-K 571 には記載のない水セメント比の異なる供試体や、練混ぜ水に塩化ナトリウムを混入した供試体も作製した。供試体に使用したモルタルの配合を表-3.4.4 に示す。

b) 使用した表面含浸材

使用した表面含浸材を表-3.4.5 に示す。シラン系

表-3.4.4 モルタルの配合・試験結果

種類	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			NaCl 混入量 (kg/m <sup>3</sup> )	試験結果	
	W	C	S		空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
50	257	513	1540	0.00	10.9	43.5
40	216	541	1623		9.2	52.2
70	326	465	1396		3.7	31.7
50-0.8	257	513	1540	6.76	10.0	42.5
50-1.6				13.53	9.1	41.2

※セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材はセメント強さ試験用の砂を用いた。

※基準とした配合が水、セメント、砂の容積配合であるため、混和剤は使用せず、空気量を0と仮定して配合を定めた。

表-3.4.5 使用した表面含浸材

種類	有効成分	有効成分量 (%)	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )
A	シラン・シロキサン	80	200
C	シロキサン	10	200
D	けい酸	21~30	250

表-3.4.6 実験ケース (モルタル供試体)

記号	モルタル配合	含浸材
1	50	適用せず
2	40	
3	70	
3	50-0.8	
5	50-1.6	
1A	50	A
2A	40	
3A	70	
4A	50-0.8	
5A	50-1.6	
1C	50	C
1D		D
1AH		Aを半量使用
1AQ		Aを1/4量使用

表-3.4.7 コンクリートの配合・試験結果

単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
W	C	S	G		
162	360	759	1034	4.5	57.9

※セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産 (表乾密度 2.56g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.27%)、粗骨材は笠間産砕石 (5号、表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.48%、6号、表乾密度 2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.61%) を用いた。

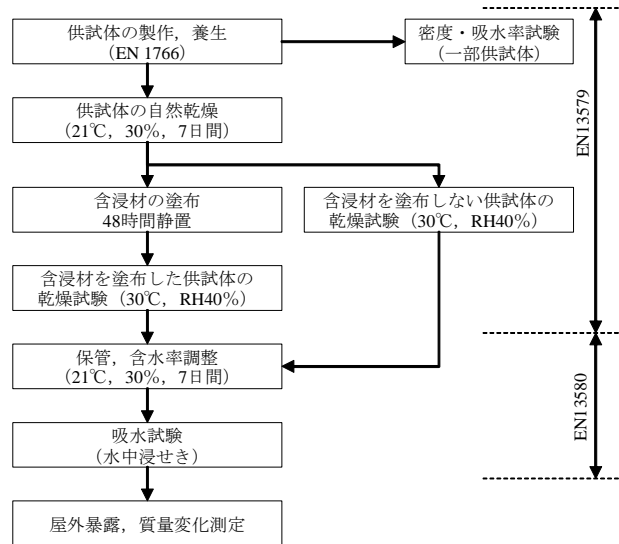


図-3.4.1 コンクリート供試体を用いた試験の流れ

表-3.4.8 実験ケース (コンクリート供試体)

記号	含浸材
NA	適用せず
A	A
C	C
D	D
AH	Aを半量使用
AQ	Aを1/4量使用
AX	Aを1/8量使用

表面含浸材 A、けい酸塩系表面含浸材 D は、前節までの試験に用いたものと同じである。

シラン系表面含浸材 C は、他の塗料を塗布する前の下塗りとして用いられている製品であり、単独で評価することは適切でない可能性があるが、比較的性能に優れていると見られる含浸材 A と比較するため、これを採用したものである。

表面含浸材の塗布は、材料ごとに指定された施工方法に従って行った。

c) 実施した試験

JSCE-K 571 に準じて含浸深さ試験、透水量試験、吸水率試験、透湿度試験を実施した。

d) 実験ケース

実験したケースの一覧を表-3.4.6 に示す。

(2) コンクリート供試体を用いた実験

a) 供試体

EN 1766 に準じて、EN 13579 および EN 13580 で指定されている Type C (0,45)の配合のコンクリートを練混ぜ、100mm 立方の供試体を作製した。コンクリートの配合を表-3.4.7 に示す。供試体の養

生や表面含浸材塗布までの自然乾燥等は EN 13579 の記述に従って行った。

しかし、得られた材齢 28 日の圧縮強度は、EN 1766 の指定 ( $40 \pm 5 \text{N/mm}^2$ ) を大幅に上回っていた。また、EN 13579 では、供試体の乾燥速度試験を行う前に含水率が  $5.0\% \pm 0.5\%$  であることを確認するよう定めているが、今回の供試体では、この範囲に入らなかった。供試体の含水率は、28 日間の水中養生を終えた時点で 4.8% であり、表面含浸材の適用や適用後の室内保管期間を経過すると、含水率が 3.8% 程度まで低下していた。

指定された配合や養生方法で製作したにもかかわらず強度や含水率が規格の範囲に入らなかったのは、セメントとして規格に指定された CEM I 42.5 ではなく、我が国の普通ポルトランドセメントを使用したためと考えられる。今回のコンクリート供試体は、EN で想定されているよりも、高強度で緻密なものと考えられる。

#### b) 使用した表面含浸材

使用した表面含浸材は、モルタル供試体と同じである (表-3.4.5)。表面含浸材の塗布は、材料ごとに指定された施工方法に従って行い、供試体の 6 面に含浸材を塗布した。EN 13579 の方法 (含浸材に塗布面を浸せきする) は採用しなかった。これは、今回用いた材料に、EN 13579 の方法では適切に塗布できないおそれがあるものが含まれたためである。

#### c) 実施した試験

コンクリート供試体を用いて行った試験の流れを、図-3.4.1 に示す。試験結果から EN 13579 および EN 13580 に従い、乾燥速度係数と吸水比率を求めた。算出式を式 (3.4.1)、式 (3.4.2) に示す。

$$DRC = \frac{D_{tm}}{D_{um}} \cdot 100 \quad (3.4.1)$$

ここに、DRC：乾燥速度係数 (%)、 $D_{tm}$ ：含浸材を適用した供試体の乾燥開始から 24 時間～48 時間の平均乾燥速度 ( $\text{g/m}^2\text{hr}$ )、 $D_{um}$ ：含浸材を適用していない供試体の乾燥から 6 時間～24 時間の平均乾燥速度 ( $\text{g/m}^2\text{hr}$ )。

$$AR = \frac{I_{tm}}{I_{um}} \cdot 100 \quad (3.4.2)$$

ここに、AR：吸水比率 (%)、 $I_{tm}$ ：含浸材を適用した供試体の吸水開始から 24 時間の質量増加率 ( $\text{g/m}^2\text{hr}^{0.5}$ )、 $I_{um}$ ：含浸材を適用していない供試体の吸水開始から 1 時間の平均乾燥速度 ( $\text{g/m}^2\text{hr}^{0.5}$ )。

これらの評価式は、含浸材を適用した場合と適用していない場合で、試験期間の異なる結果を用いていることに留意が必要である。ただし、今回の実験では土木学会規準等のため吸水試験は 7 日間行い、データを収集した。

これらの試験の終了後、供試体を屋外 (つくば市) に設置し、その質量変化を調べた。

#### d) 実験ケース

実験したケースの一覧を表-3.4.8 に示す。なお、各ケース 3 体の供試体を用意し、試験結果は、その平均値を採用した。

### 3. 4. 4 モルタル供試体を用いた実験の結果

#### (1) 含浸深さ

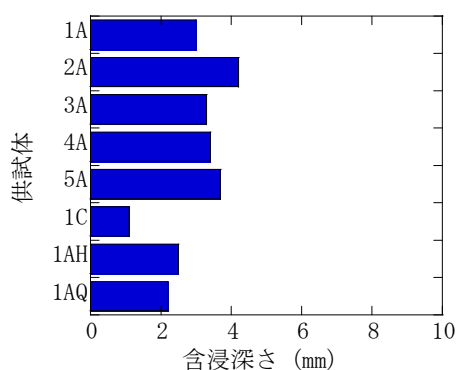
含浸深さの測定結果を図-3.4.2 に示す。供試体 1A～5A の結果から、モルタル種類の影響は明確ではなかった。塗布する含浸材の量を減少させた場合、含浸深さが減少した。

#### (2) 吸水率試験、透水量試験

吸水率試験の結果を図-3.4.3 に示す。また、透水量試験の結果を図-3.4.4 に示す。

いずれの試験でも JSCE-K 571 で指定されている水セメント比 50% のモルタルを用いた場合は、含浸材を適用していない場合と、シラン系表面含浸材 A や C を適用した場合の違いが明確ではなかった。このため、これらの結果から表-3.4.1 でいう吸水抑制率や透水抑制率を算出すると、グレード C に該当する。

土木学会で行われた共通試験<sup>13)</sup>の結果を参照すると、今回用いた含浸材 A を用いた場合の吸水率は 0.15% 程度、含浸材を適用していない場合は 1.22% 程度、吸水抑制率が 90% 程度となっていた。また、単位面積あたりの吸水量 (図-3.4.5) を算出すると、



※けい酸塩系表面含浸材 D には撥水性がないため、土木学会規準の方法では、含浸深さを測定できない。

図-3.4.2 含浸深さ (モルタル)



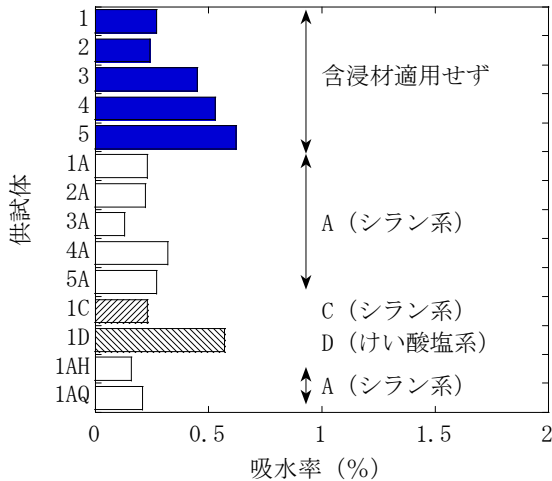


図-3.4.3 吸水率試験結果 (モルタル)

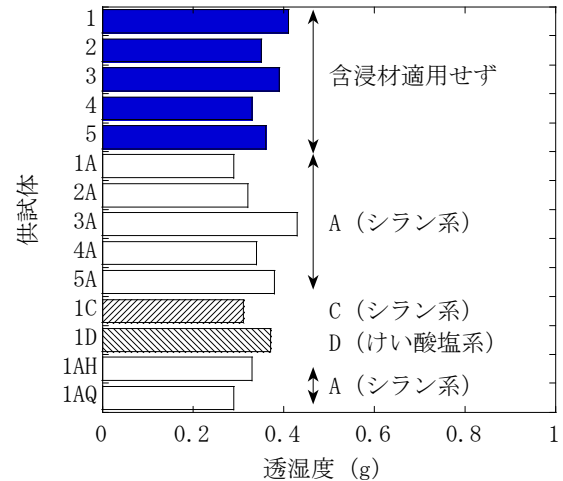


図-3.4.6 透湿度試験結果 (モルタル)

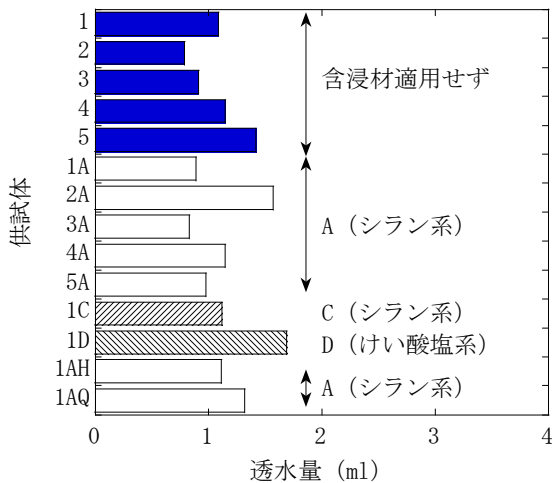


図-3.4.4 透水量試験結果 (モルタル)

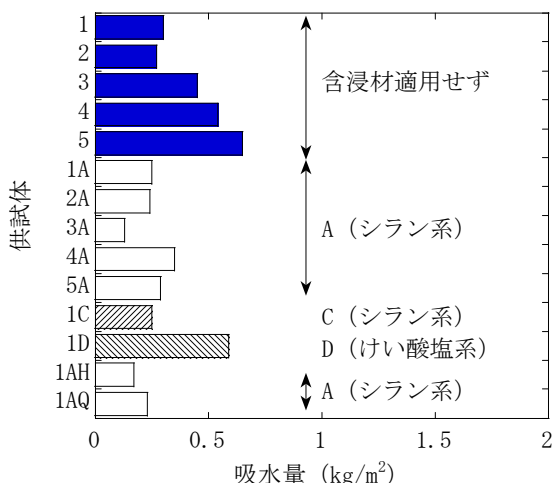


図-3.4.5 吸水試験中の吸水量 (モルタル)

含浸材を適用した供試体の吸水量は、これまでに実施した吸水試験 (図-3.2.17、図-3.3.4) の結果と

同程度であった。

今回の実験で用いたモルタル供試体は、含浸材を塗布していない場合でも吸水量が少なく、含浸材を塗布してもこれを改善する大きくなかったものと考えられ、この理由は明確にはできなかった。

なお、けい酸塩系表面含浸材 D を適用した場合は、吸水率や透水量が適用しない場合より大きくなった。塗布から試験までの期間が短いため補修効果が得られない上、補修材に含まれる成分の影響で吸湿しやすくなっているものと考えられる。

### (3) 透湿度試験

透湿度試験の結果を図-3.4.6 に示す。透湿比は、最も小さい場合 (水セメント比 50% のモルタルに含浸材 A を適用した場合) でも 70% 以上となり、表-3.4.2 の水蒸気透過性の評価基準と合致した。

## 3. 4. 5 コンクリート供試体を用いた実験の結果

### (1) 吸水試験

式 (3.4.2) より算出した吸水比率を図-3.4.7 に示す。吸水比率は、最も小さいケースでも 30% を超えており、EN1504-2 に示された要求性能とは大きな乖離があった。我が国のセメントを使用した結果、EN 規格で想定しているよりも緻密なコンクリートとなったため、含浸材の有無による差が顕著でなくなったものと思われる。

ここで、JSCE 規準を参考に 24 時間または 7 日間の吸水量を算出した結果を図-3.4.8 に示す。元々の吸水量が小さいので差が目立たないが、シリラン系含浸材を適用した場合は、EN 規格のように吸水から 24 時間までの範囲で評価した場合の方が、7 日間の吸水量で評価した場合よりも含浸材の効果が目立

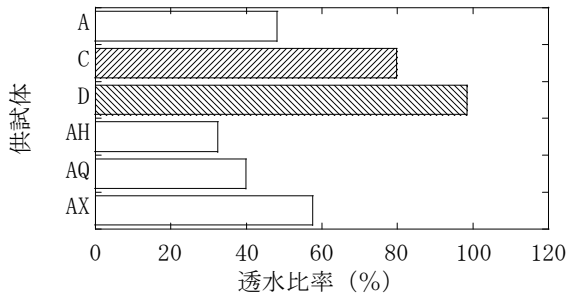


図-3.4.7 吸水試験結果 (コンクリート)

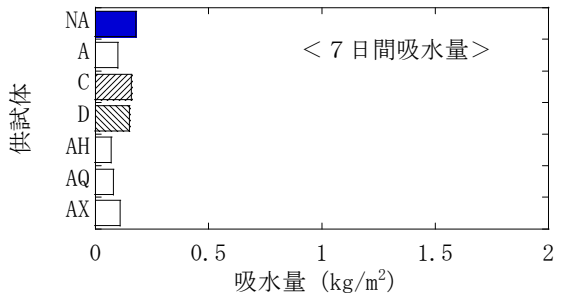
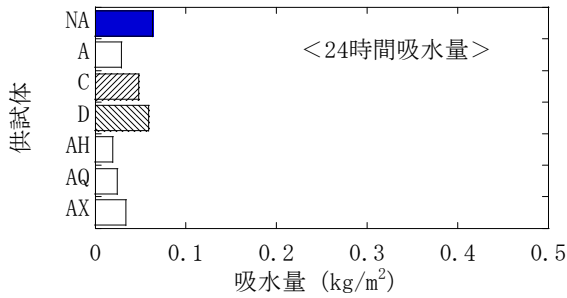


図-3.4.8 吸水試験中の吸水量 (コンクリート)

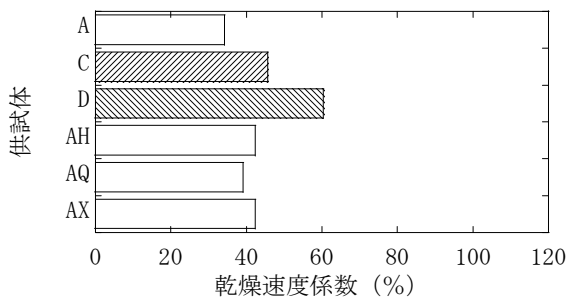


図-3.4.9 乾燥試験結果 (コンクリート)

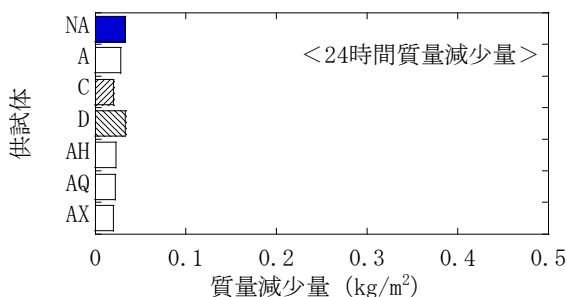


図-3.4.10 乾燥試験中の質量減少量 (コンクリート)

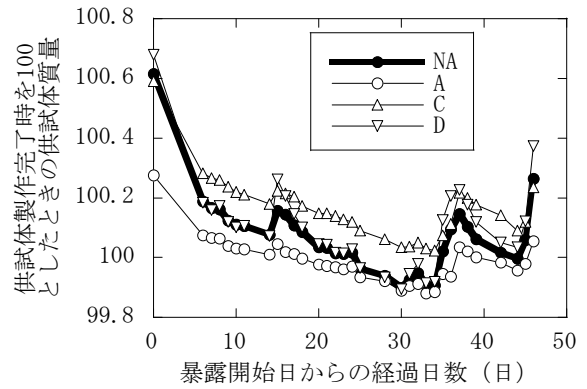
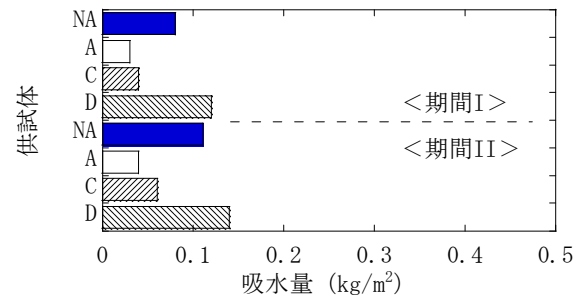


図-3.4.11 屋外暴露中の質量の推移 (コンクリート)



※期間 I：暴露開始後 34～36 日  
 期間 II：暴露開始後 44～46 日

図-3.4.12 暴露試験中の吸水量 (コンクリート)

つ結果であった。例えば、含浸材 C の場合、24 時間で評価すると含浸材を適用していない場合の 75%の吸水量であったが、7 日間では 88%と違いが小さくなった。このように、試験期間によって含浸材の評価結果が異なりうるということがわかった。

なお、含浸材 A の量を減じて塗布した場合について見ると、塗布量と吸水量の関係は必ずしも明確ではなかった。ただし、使用量を 1/8 と顕著に低下させた場合は、若干吸水量が大きくなった。

## (2) 乾燥試験

式 (3.4.1) より算出した乾燥速度係数を図-3.4.9 に示す。なお、乾燥環境に静置して 24 時間後までの質量変化量に着目して整理し、図-3.4.10 に示す。

## (3) 屋外暴露試験

屋外暴露中のコンクリート供試体の質量変化を、図-3.4.11 に示す。ここでは、供試体の製作が終わった時点 (含浸材の塗布後 48 時間自然乾燥させ、乾燥試験に移行する直前) の質量を 100 と整理した。吸水試験後の供試体を用いたこともあり、暴露開始直後は供試体の質量が急速に減少した。

ここで、屋外暴露中に比較的まとまった降雨のあった期間（暴露開始から 34～36 日、44～46 日）に着目して、降雨による吸水量を算出し図-3.4.12 に示す。いずれの期間でも、含浸材 A を適用した場合は、含浸材を適用していない場合の約 1/3、含浸材 C を適用したい場合は、約半分の吸水量に抑制されていた。図-3.4.8 と比較すると、含浸材の性能は、24 時間までの吸水量で評価した場合に近かった。これは、降雨の継続時間が 24 時間よりも短いためと考えられる。

### 3. 4. 6 試験方法の課題

#### (1) 供試体の種類・配合

今回、土木学会規準および EN 規格に準拠した事件を行ったが、室内試験の結果では、いずれの場合も含浸材の吸水抑制効果が不十分という試験結果となった。いずれの規準・規格でも、含浸材を塗布した／しない場合を比較して含浸材の評価を行っているため、何らかの理由で含浸材を塗布しない供試体の吸水量が大きく／小さくなると材料の評価が適切に行われなくなることがわかった。

なお、EN 規格については、我が国の普通ポルトランドセメントを用いて試験するとコンクリートの品質が大きく異なってしまうため、評価指標等をそのまま活用できないものと考えられる。

#### (2) 吸水試験の期間

吸水試験の期間については、土木学会規準（7 日間）と EN 規格（24 時間）で違いがあり、試験期間の長さによって、含浸材を塗布した／しない供試体の吸水量の比が一定しないことがわかった。今回の屋外暴露試験の結果からは、吸水期間は 24 時間と短くする方が実態に即しているものと考えられた。

#### (3) 塗布量の確認

シラン系表面含浸材について、塗布量を標準量から大幅に減じた供試体を作製して試験したが、吸水や放湿に関する試験結果では、標準量を用いた場合との差が顕著ではなかった。したがって、これらの試験では、適切な施工が行われていることを確認することが困難と考えられる。

このため、塗布量については、材料使用量や含浸深さの測定などにより確認することが必要と考えられる。

### 3. 4. 7 シラン系表面含浸材に求められる性能水準の提案

#### (1) 吸水性状に関する試験

吸水性状に関連した試験項目には、吸水率試験と

透水試験がある。このうち透水試験の結果については、本報では詳しくふれなかったが、吸水試験と類似の試験結果が得られていた。加えて透水試験を行うためには、供試体の上部に試験用の装置を設置する必要があり、試験の熟練度によって結果が変わりうるということが予想された。このため、吸水性状に関しては、吸水率試験を行うとよいと考えられる。

今回の実験結果から、含浸材の試験に使用するモルタル・コンクリート供試体の品質・含水状態によって、含浸材を塗布した場合と塗布しない場合の吸水量の比が変わりうるということがわかった。このため、性能の指標としては、吸水量そのものを用いるのがよいと思われる。また、屋外暴露試験の結果と比較すると、24 時間程度の短時間の吸水量で評価することが適当と考えられた。

ただし、含浸材を適用していない場合でもほとんど吸水しないような供試体を用いても、含浸材の適

表-3.4.9 ASR 抑制対策として用いるシラン系表面含浸材の要求性能

	要求される性能の種類	
	吸水性に対する抵抗性	透湿性
試験方法	JSCE-K 571 に準じて行う。 吸水開始から 24 時間後に質量を測定する。	JSCE-K 571 に準じて行う。
要求される性能水準	吸水 24 時間の時点で、単位面積当たりの吸水量を算出した数値が、いかの数値以下。 水準 I : 0.20kg/m <sup>2</sup> 水準 II : 0.30kg/m <sup>2</sup> ただし、同様に製造・保管した含浸材を塗布しない供試体においては、0.50kg/m <sup>2</sup> 以上の吸水が認められること。	適用した場合の透湿量が、適用しない場合の 60% 以上。
備考	供試体は、JSCE-K 571 で指定される水セメント比 50% のモルタルでもよい。この場合、試験までに十分に乾燥させることが重要である。材料に極端な不均質性が生じない限り、水セメント比が比較的大きなコンクリートなどを用いてもよい。	

※吸水性に対する抵抗性の性能水準は、約 2 年間の屋外暴露試験を経過した後の、含浸材 A（水準 I に該当）、含浸材 B（水準 II に該当）の試験結果から定めた。なお、今回の実験では、垂直の面に塗布した場合の含水率の抑制範囲に顕著な違いはなかったが、暴露される環境の微妙な違いによって、両者の性能差が ASR 抑制の程度に影響を与えることが考えられるので、可能であれば水準 I に相当する含浸材を用いることが望ましい。

否は評価できない。このため、含浸材を適用しない供試体も作製し、この場合は一定の吸水量があることを確認しておく必要がある。

#### (2) その他の性状に関する試験

透湿度試験については、土木学会規準による試験を行った結果、特に試験上の問題はなかった。また、今回実施した限りでは、透湿度が小さいことがコンクリートの性能に悪影響を与えている事例がなかった。以上から、現状では、土木学会から提案されている手法を踏襲できるものと考えられる。

なお、使用量と吸水性状などの関係が明確でなかったため、施工にあたっては、施工管理の方法を定める必要が有ると考えられる。

#### (3) シラン系表面含浸材に求められる性能水準以上をまとめ、表-3.4.9に示す。

### 3. 4. 8 性能評価手法に関する検討のまとめ

表面含浸材の性能評価試験方法について試験を行って検討し、次の知見を得た。

- (1) 土木学会規準にしたがって試験を行った結果、今回の実験では、含浸材を塗布していない場合でも吸水量が小さく、塗布した／していない場合との比較で含浸材の性能を評価する手法の適用が困難であった。EN規格については、流通するセメントの品質が我が国とはことなると考えられることから、そのままでは適用できなかった。
- (2) 屋外暴露中の吸水量の違いを評価するには、比較的短時間で吸水性試験の結果が有効であった。
- (3) (1)(2)を考慮して、屋外暴露試験の結果から、ASR抑制のために求められる性能水準を提案した。
- (4) なお、今回の試験では、含浸材の塗布量が吸水性上に与える影響は明確でなかった。この結果から、施工時の品質管理においては、材料使用量や含浸深さの測定などを行って確認する必要があると考えられる。

### 3. 5 表面含浸材の補修効果に関する検討のまとめ

主としてシラン系の表面含浸材について着目し、ASRに対する補修として用いる場合の課題について検討した。今回の実験の範囲で、補修効果を期待するために求められる条件を整理して、表-3.5.1に示す。これらの条件に該当しない場合でも、補修効果が得られることも考えられるが、膨脹が抑制できないおそれがあるので、補修計画の妥当性を検討することが求められる。

表-3.5.1 シラン系表面含浸材の補修効果が得られる条件

項目	条件
(1) 補修材の性能	JSCE-K 571 に準じた試験で、24 時間の吸水量が 0.30kg/m <sup>2</sup> 以下 (表-3.4.9 参照)。
(2) 適用する部位	鉛直面か、雨水が速やかに流下しうるような面。 ※含浸材を塗布していない面からの吸水がないことを前提とする。
(3) 配筋など	鉄筋 (かぶり 100mm 以下) によって、部材内部の ASR による膨脹が拘束されていると考えられるような断面。
(4) コンクリート表面の軽微なひび割れ	ひび割れの有無は、補修効果に顕著には影響しない。

なお、今回用いたけい酸塩系表面含浸材は、吸水を抑制する効果が発揮されるまでに長期間を要し、それまでは降雨などによる吸水の影響を受けることが必要であったので、すでに ASR による劣化が生じている部材に補修として適用するのが適当な場合は、限定されるものと考えられた。

## 4. あと施工アンカーの引抜き耐力に関する検討

### 4. 1 検討の概要

ASR による劣化が生じた部材の補修では、既設コンクリート部と断面修復を行う部位の一体性を確保するために、樹脂を用いるあと施工アンカーが使用される場合がある。また、ASR に対する補修と、耐震補強 (コンクリート巻立て工法等) を併せて行う場合にも、同様にあと施工アンカーが用いられる場合がある。

付着型のあと施工アンカーの耐力は、アンカー筋が降伏する場合を除くと、コーン破壊が生じる場合と、樹脂とコンクリートの間の付着破壊が生じる場合が考えられるが、いずれもコンクリートの強度の影響を受ける。

しかし、ASR により劣化したコンクリートの場合には、コンクリート中に微細なひび割れが生じていることも考えられるので、あと施工アンカーの耐力を、通常のコンクリートと同じ評価式で評価して良いかどうか、必ずしも明確ではなかった。そこで、ASR を生じさせたコンクリート供試体を用意して、あと

表-4.2.1 供試体の種類

記号	ASR劣化	アンカー鉄筋	埋込み長さ	備考
15A	有	D16	240mm (15φ)	凸部に配筋
15B				
15N				
8A	有	D22	176mm (8φ)	
8N				

※15Bは、アンカーを設置する凸部にも鉄筋（D16、合計8本、図-4.2.1参照）を配置した。

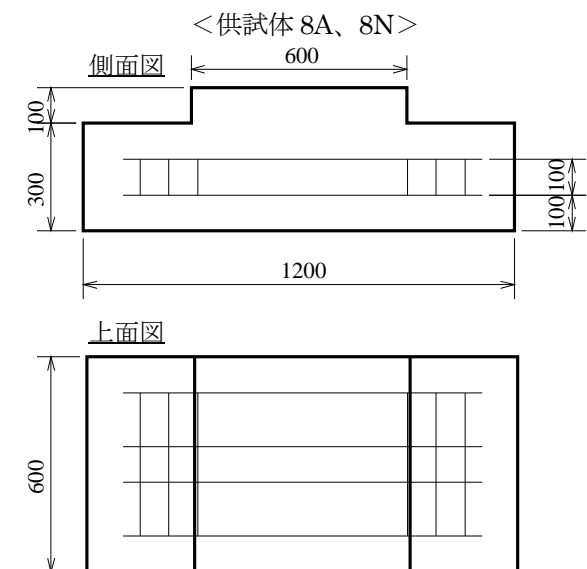
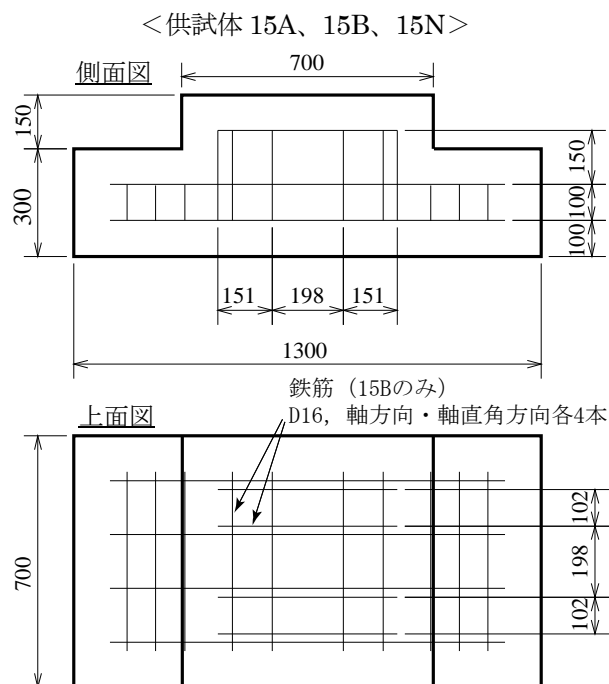


図-4.2.1 供試体の形状

表-4.2.2 コンクリートの配合

ASR劣化	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 (%)	添加 NaOH (kg/m <sup>3</sup> )	骨材比率 反応性:非反応性
有	55	165	46.0	9.29	50:50
無					0:100

表-4.2.3 コンクリートの試験結果

供試体	ASR劣化	測定時期	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
15A	有	暴露前	19.8	28.4	2.08
		暴露後	28.0	12.9	2.03
15C	無	暴露前	17.4	30.8	2.13
		暴露後	28.4	25.6	2.32
8A	有	暴露前	24.8	31.0	—
		暴露後	28.9	14.9	2.19
8B	無	暴露前	19.4	30.1	—
		暴露後	31.1	24.9	2.66

※暴露後の試験は、あと施工アンカーの引張試験と同時期に行った。

※同時に暴露した 100×100×400mm の角柱供試体の長さ変化は、供試体 15A、15B のコンクリートは 1,850μ、供試体 8A のコンクリートは 3,360μであった。

表-4.2.4 アンカー筋の試験結果

記号	呼び名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
SD345	D16	374.4	185.2
SD345	D22	384.8	195.3

施工アンカーの耐荷性状を確認した。

## 4.2 検討方法

### 4.2.1 供試体の種類

引抜き試験を行った供試体の種類を表-4.2.1に、供試体の形状を図-4.2.1に示す。形状は凸型とし、上面の寸法はアンカーの底面から45度のコーン状の部位が確保されるように決定した。また、底部には、供試体のつり上げに必要な鉄筋を配置した。

供試体には、あと施工アンカーの埋込み長さが15φのケースと8φのケースがあり、それぞれの埋込み長さで、ASRが生じた場合と健全なコンクリートの場合を比較した。また、15φのケースでは、あと施工アンカー設置箇所の周囲に鉄筋を配置したケースも設けた。これは、鉄筋コンクリート部材の場合は、部材の内部では、鉄筋の拘束によりASRによる膨脹が抑制され、アンカー筋の耐荷性状が改善される可能性があると考えたためである。

#### 4. 2. 2 使用したコンクリート

コンクリートの配合を表-4.2.2 に示す。ASR を生じさせる供試体には、反応性のある安山岩砕石、砕砂を混入した。供試体は、コンクリートの打設後、材齢 21 日 (15A、15B、15N) または 28 日 (8A、8N) まで、湿布を用いて養生した。その後、土木研究所内の屋外に約半年間暴露して ASR による劣化を生じさせた。

コンクリートの強度試験結果、割裂試験結果を表-4.2.3 に示す。なお、実験は二回の時期にわけて実施しており、屋外暴露期間がやや短い 15A~15N と 8A~8N では試験結果が異なった。

ASR を生じさせたコンクリートでは、いずれも、特徴である顕著な静弾性係数の低下が見られた。圧縮強度や引張強度の低下も認められたものの、顕著ではなかった。強度低下の割合は、既往の文献<sup>13)</sup>と比較しても小さいように見受けられた。

#### 4. 2. 3 あと施工アンカー

あと施工アンカーに使用した鉄筋の試験結果を表-4.2.4 に示す。あと施工アンカーは鉛直下向きに施工した。接着剤には、あと施工アンカー用として実績のあるエポキシ樹脂系接着剤を用いた。あらかじめ所定の位置に鉄筋をセットした上で、エポキシ樹脂を注入した。

アンカー筋のひずみ測定が付着に与える影響をなるべく小さくするため、アンカー筋には溝きり加工を行ってひずみゲージを貼付した。

#### 4. 2. 4 載荷試験

供試体の上に鋼製の載荷装置を組み、載荷試験を行った (図-4.2.2)。載荷中は、ロードセルで荷重を測定するとともに、アンカー筋のひずみ、アンカー筋に設置した標点 (コンクリート表面付近) の変位を測定した。



図-4.2.2 引抜き試験の状況

#### 4. 3 実験結果

##### 4. 3. 1 引抜き供試体の膨張量

引抜き供試体の表面で測定した膨張量を、表-4.3.1 に示す。引抜き供試体の膨張量は、いずれも短辺方向で大きく、長辺方向では比較的小さかったが、これは、基部に設置した鉄筋の影響を受けている可能性がある。鉄筋を配置した供試体 15B では、膨張量が抑制されていた。

ASR を生じさせた供試体のひび割れは不規則で、全体的に広がっており、局所的に集中したひび割れは認められなかった。

##### 4. 3. 2 破壊性状

各供試体の最大荷重、破壊性状を表-4.3.2、表-4.3.3 に示す。埋込み長さが 15φ のケースでは、いずれの供試体でも鉄筋が降伏した。また、降伏後も試験を続けると、鉄筋が破断した。

一方、埋込み長さが 8φ のケースでは、いずれもコンクリート表面にコーン状の破壊が生じ、その後

表-4.3.1 引抜き供試体の膨張量

供試体	膨張量 (μ)		
	長辺方向	短辺方向	高さ方向
15A	2,778	3,810	2,790
15B	2,182	2,326	960
8A	2,920	5,124	4,190

表-4.3.2 引抜き試験結果及び耐力計算値 (15φ)

		供試体		
		15A	15B	15N
試験結果	最大荷重 (kN)	92.1	99.3	98.2
	破壊性状	鉄筋降伏	鉄筋降伏 (破断)	鉄筋降伏 (破断)
計算結果	鉄筋降伏により決まる耐力 (kN)	63.1	63.6	63.5

※降伏荷重は、溝きり加工による鉄筋断面積の減少を考慮して算出した。

表-4.3.3 引抜き試験結果及び耐力計算値 (8φ)

		供試体	
		8A	8N
試験結果	最大荷重 (kN)	81.0	75.8
	破壊性状	コーン+付着破壊	コーン+付着破壊
計算結果	鉄筋降伏により決まる耐力 (kN)	140	



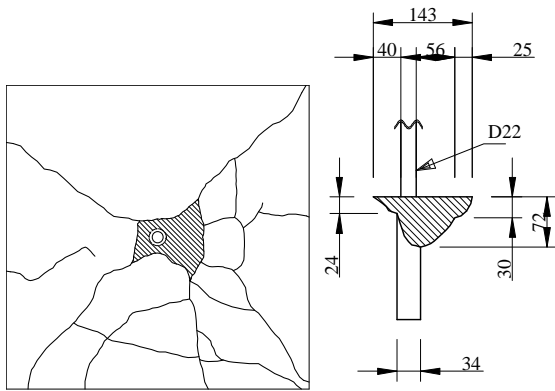


図-4.3.1 ひび割れ観察結果 (供試体 8A)

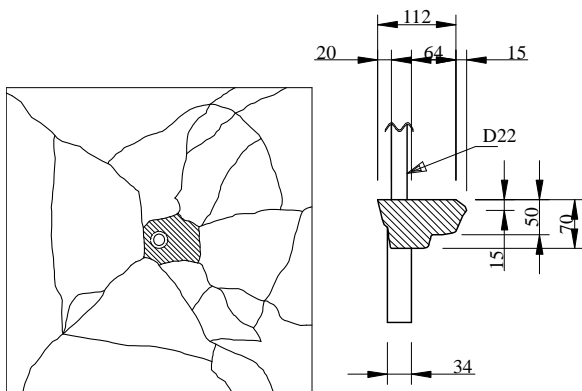


図-4.3.2 ひび割れ観察結果 (供試体 8N)

も荷重を続けると、鉄筋が抜け出した。供試体 8A の破壊時のひび割れ状況を図-4.3.1、図-4.3.2 に示す。

破壊性状の異なる二種類の実験シリーズで、ASR が生じた供試体と生じていない供試体の耐力に大きな差が生じなかったことから、ASR により  $3000\mu$  程度の膨張が生じたコンクリートで、無筋コンクリートの場合でも、あと施工アンカーの耐力には、顕著な影響はないものと考えられる。

#### 4. 3. 3 附着性状

埋込み長さが  $15\phi$  のケースで、鉄筋が降伏する直前の鉄筋ひずみの分布を図-4.3.3 に示す。ASR が生じた供試体と生じていない供試体でひずみの分布に顕著な違いはなかった。

#### 4. 4 あと施工アンカーに関する検討のまとめ

ASR による劣化が生じたコンクリートに設けたあと施工アンカーの耐荷性状を、引抜き試験を行って検討した。その結果、今回の実験（コンクリートの膨張量は  $3,000\mu$  前後）の範囲では、耐力やアンカー筋のひずみ分布への影響が明確ではなかった。

ただし、今回の供試体には、目視で調べた範囲では、ASR によるひび割れが連続してはいなかった。

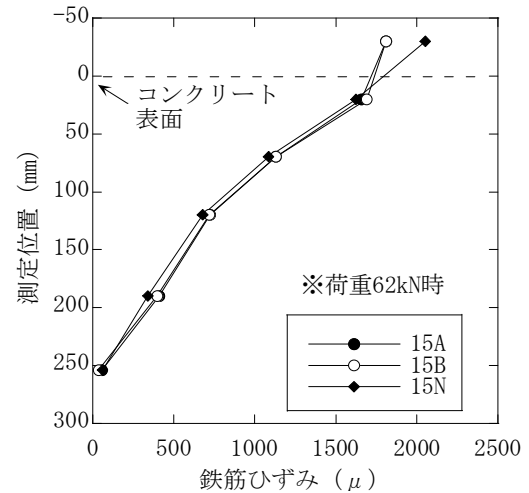


図-4.3.3 荷重中の鉄筋ひずみ分布

実構造物で幅の大きなひび割れが連続してみられるような場合には、別途その影響を検討することが必要と考えられる。また、今回の試験は単調な引張試験の結果であり、今後、繰返し荷重の影響については今後の課題である。

## 5. 膨張拘束の影響に関する検討

### 5. 1 検討の概要

ASR により劣化した構造物の補修・補強として、接着工法や巻立て工法などがある。これらの工法では、耐荷性を改善するとともに、補修・補強後の ASR による膨張を拘束する効果があると期待されている。しかし、その効果を予想することは現状では困難である。また、ASR による劣化事例を見ると、主筋に直角な方向など、拘束力の弱い方向に膨張が大きくなる傾向があり、補修・補強を行ったことで、膨張の性状が変化することも考えられる。そこで、本研究では、拘束方向と直交する方向の膨張量に着目し、補修・補強による拘束の影響について基礎的検討を行った。

### 5. 2 検討方法

供試体の種類を表-5.2.1 に示す。拘束を行わない供試体 (A) を 3 体、PC 鋼棒と鉄板を用いて一方向を拘束した供試体 (B) を 3 体、二方向を拘束した供試体 (C) を 1 体作成した。なお、拘束供試体においては、拘束量による違いを確認するために、 $\phi 9.2\text{mm}$ 、 $\phi 13\text{mm}$ 、 $\phi 19\text{mm}$  の径の異なる PC 鋼棒を配置した。

コンクリートの配合を表-5.2.2 に示す。供試体は、材齢 28 日まで湿布養生した。その後、材齢 35 日か

表-5.2.1 供試体の種類

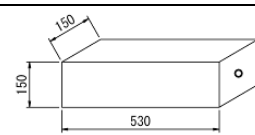
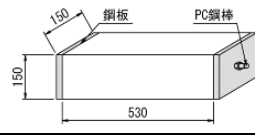
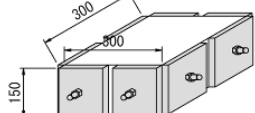
種類	拘束	形状	拘束量
A	非拘束		—
B	一方向拘束		φ 9.2 (p <sub>s</sub> =0.3%) φ 13 (p <sub>s</sub> =0.6%) φ 19 (p <sub>s</sub> =1.3%)
C	二方向拘束		φ 13 (p <sub>s</sub> =0.6%) φ 9.2 (p <sub>s</sub> =0.3%)

表-5.2.2 コンクリートの配合

W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	NaOH
55	4.5	165	300	850	1010	9.29

※細骨材、粗骨材は、反応性骨材（安山岩砕石、砕砂）と非反応性骨材を体積比 1 : 1 で混合して用いた。

ら湿布とビニールシートによって保湿した上で、促進養生環境（気温 40℃、湿度 95%以上）に保管した。

促進養生中は、1ヶ月に1回、コンタクトゲージを用いてコンクリートの膨張ひずみを測定した。測定したコンタクトチップの配置を図-5.2.1に示す。また、1日1回、拘束供試体のPC鋼棒のひずみを記録した。

### 5.3 実験結果と考察

#### 5.3.1 基本膨張ひずみ

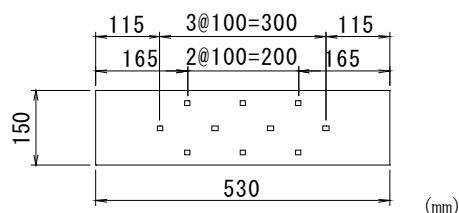
膨張を拘束していない供試体Aの膨張ひずみを図-5.2.2に示す。供試体3体の膨張ひずみを調べた結果、平均では、長辺方向および短辺方向に同程度の膨張ひずみが発生していた。そこで、これらの平均値を拘束の影響がない場合のひずみ量と考えた（基本膨張ひずみ、促進養生終了時約 3,200 μ）。

#### 5.3.2 一方向拘束の影響

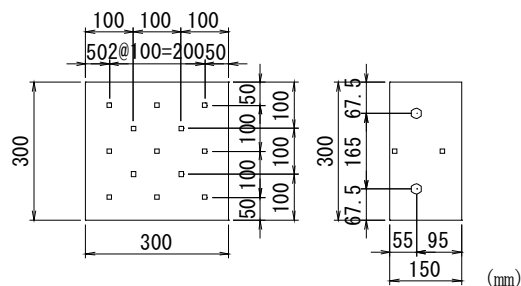
一方向を拘束した供試体 B の膨張ひずみを図-5.2.3に示す。

コンクリート表面で測定した拘束（長辺）方向の膨張ひずみは、基本膨張ひずみに対して、約3割減少していた。PC鋼棒の径の違いによる差は明確ではなかった。一方、PC鋼棒のひずみ量は、径によって異なっていた。拘束方向のひずみ量がコンクリ

<A、B 供試体>



<C 供試体>



□ : コンタクトチップ、○ : PC鋼棒

図-5.2.1 膨張ひずみ測定位置

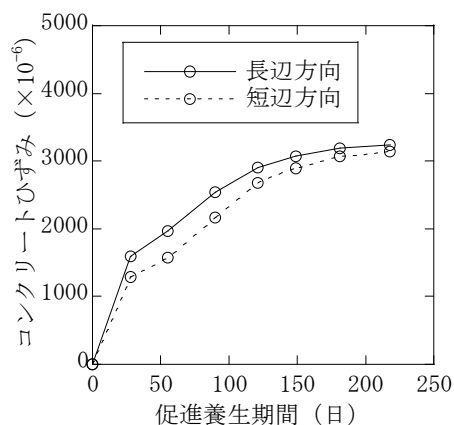


図-5.2.2 基本膨張ひずみ

ート表面と鋼材位置で異なっていた原因は、必ずしも明確ではない。

一方、非拘束（短辺）方向では、基本膨張ひずみよりも大きな膨張ひずみが発生し、拘束量が多い試体ほど膨張ひずみも大きかった。拘束の影響により拘束されていない方向へ膨張ひずみが移動したと考えられる。

#### 5.3.3 二方向拘束の影響

二方向を拘束した供試体 C の膨張ひずみを図-5.2.4に示す。

コンクリート表面で測定した膨張ひずみに着目すると、φ 9.2mm の鋼棒を配置した拘束（横）方向は、基本膨張ひずみに対して、膨張ひずみが約5割減少していた。一方、φ 13mm の鋼棒を配置した拘束（縦）方向は、膨張ひずみが基本膨張ひずみと同程

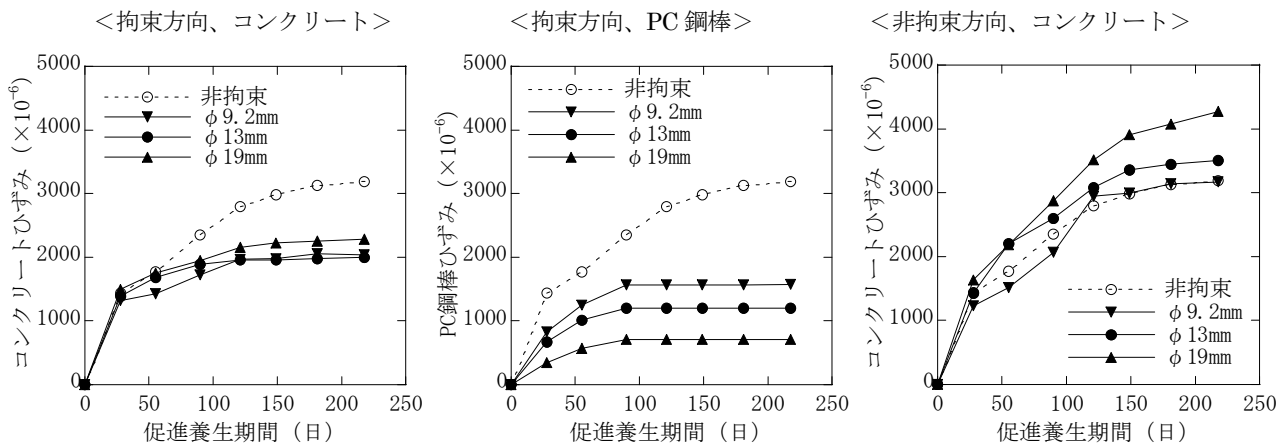


図-5.2.3 一方向拘束供試体のひずみ

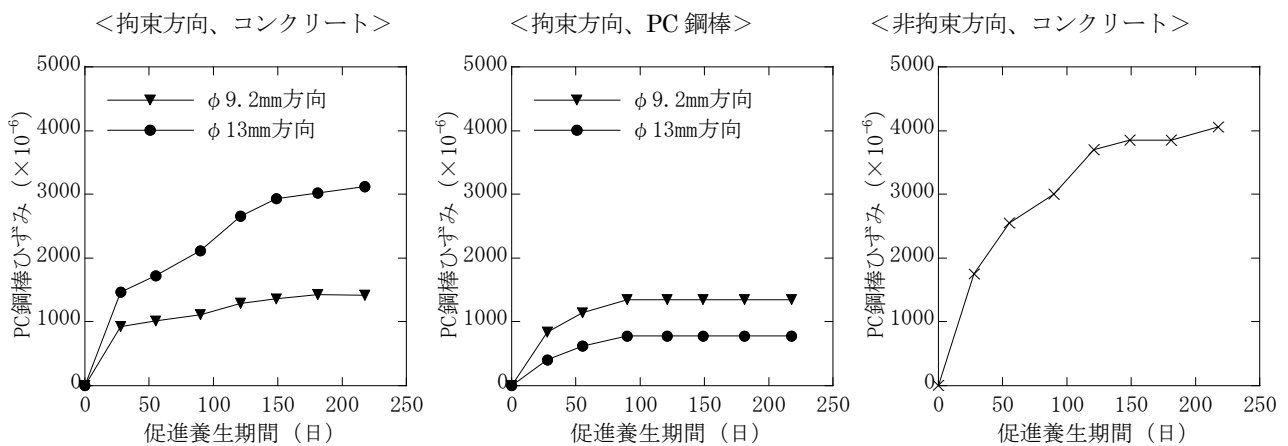


図-5.2.4 二方向拘束供試体のひずみ

度であり、拘束効果が明確ではなかった。一方、PC 鋼棒のひずみでは、 $\phi 13\text{mm}$  の鋼棒の方が、 $\phi 9.2\text{mm}$  の鋼棒よりも、促進養生中のひずみの増加量が小さかった。このようにコンクリート表面のひずみ量と、鋼棒のひずみ量で傾向が異なった理由は、必ずしも明確ではない。

非拘束（鉛直）方向では、基本膨張ひずみに対して、膨張ひずみが約3割増加しており、一方向拘束供試体と同様、拘束されていない方向へ膨張ひずみが移動したことが考えられる。

### 5. 3. 4 膨張拘束の影響に関する検討のまとめ

今回の実験では、拘束によって ASR による膨張を抑制できることが確かめられたが、一方で、拘束した方向とは異なる方向の膨張ひずみは増大した。ASR により劣化した構造物の補修工法を検討する場合には、拘束する方向とは異なる方向の膨張についても考慮する必要があると考えられる。

## 6. まとめ

アルカリ骨材反応により損傷が生じた構造物の補修方法のうち、特に、近年注目されている撥水性を有する表面含浸材の補修効果について、種々の実験を行って検討した。

また、劣化した箇所を部分的にはつりとして補修する方法を念頭に置き、特に、新旧の部材の一体化のために設けるあと施工アンカーの引抜き耐力について検討した。また、補修により膨張を拘束した場合の影響について基礎的な検討を行った。

その結果、以下の知見が得られた。

### <表面含浸材による補修について>

- (1) シラン系表面含浸材を適用した際の、含水率の抑制の程度は暴露面の向きやコンクリート表面からの距離によって異なっていた。
- (2) 鉛直面では、シラン系表面含浸材を適用することの効果が高いと期待できる。一方、適用する場所が水平面で降雨の影響を受ける場合や、断

面の大きい無筋コンクリートの場合は、シラン系表面含浸材を適用しても、膨脹が継続するおそれがある。

- (3) コンクリート表面に ASR によるひび割れが生じている場合でも、シラン系表面含浸材の補修効果を期待できる。
- (4) 土木学会規準や欧州規格等で提案されているように、塗布していない供試体と塗布している供試体の比較によって評価する方法では、シラン系表面含浸材の吸水抑制結果を適切に評価できない場合があった。
- (5) 今回の実験の結果、吸水抑制効果を有していたシラン系表面含浸材は、JSCE-K 571 の吸水試験で、24 時間の吸水量が  $0.3\text{kg/m}^2$  以下であった。
- (6) けい酸塩系表面含浸材は、補修効果が発揮されるまでにコンクリートが吸水できる期間が相当程度必要であった。この間は、ASR による膨脹が継続すると考えられ、適用に注意が必要である。

<アンカー引抜き耐力について>

- (7) ASR により約  $3,000\mu$  の膨脹が生じているコンクリートに用いた場合でも、あと施工アンカーの耐力に顕著な影響は認められなかった。

<拘束の影響について>

- (8) 膨脹を拘束すると膨脹量を減少させることが可能であったが、非拘束方向膨脹量が増大した。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）」、<http://www.mlit.go.jp/>、2003.3
- 2) ASR に関する対策検討委員会：「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）」、<http://www.kkr.mlit.go.jp/>、2003.3
- 3) 前掲 2)、p.29
- 4) 土木研究所：「アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物の追跡調査」、土木研究所資料、第 3955 号、2005.2
- 5) EN15-4-2:2004, “Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity — Part 2: Surface protection systems for concrete“
- 6) 古賀裕久、青山尚、渡辺博志、木村嘉富：表面含浸材のコンクリート含水率抑制効果に関する屋外暴露試験、コンクリート工学年次論文集、Vol.31、No.1、pp.1939-1944、2009.6
- 7) 土木研究所：「屋外にあるコンクリートの含水率変化」、土木研究所資料、第 3993 号、2006.1
- 8) 土木研究所：「被覆系コンクリート補修補強材料の耐久性に関する研究—浸透性コンクリート保護材の性能評価方法の検討—」、土木研究所資料、第 4085 号、2008.1
- 9) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案、日本建築学会構造系論文集、第 498 号、pp.13-20、1997.8
- 10) 森永繁：「環境条件とアルカリ骨材反応」、コンクリート工学、Vol.24、No.11、pp.29-32、1986.11
- 11) 恩村定幸ほか：「強度の異なるコンクリートの熱・湿気特性」、GBRC、Vol.119、pp.24-32、2005.1
- 12) 土木学会：「表面保護工法設計施工指針（案）[工法別マニュアル編] 表面含浸工マニュアル」、コンクリートライブラリー119、pp.165-167、2005.4
- 13) 土木学会：「ASRが生じたコンクリートの力学特性」、アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、コンクリートライブラリー124、pp.II81-89、2005.8