

# 論文 含水率による表層の吸水抵抗性と表面含浸材の効果の分析

下田 智也\*1・細田 暁\*2・松田 芳範\*3・小林 薫\*4

**要旨:** コンクリート構造物の表層品質を評価する指標の一つである吸水抵抗性について検討を行った。柱試験体において表面吸水試験を行った結果、表層にマイクロクラックを有することで吸水抵抗性が低下することを明らかにした。材齢の経過にしたがい、マイクロクラックの発生・進展により表層部の吸水抵抗性が低下するが、若材齢でシラン系表面含浸材を塗布した場合、良好な吸水抑制効果を継続することが分かった。表面吸水試験後の試験体内部の含水率を測定することにより、表面吸水により吸水された水分の分布を明らかにし、含浸材塗布面における吸水が極表層部で抑制されていることが分かった。

**キーワード:** 表層品質, 吸水抵抗性, 表面吸水試験, マイクロクラック, シラン系表面含浸材, 含水率

## 1. はじめに

コンクリート構造物の表層品質は構造物の耐久性に大きく影響する。土木学会の「構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会」は、表層の物質移動抵抗性が耐久性に影響することを指摘し<sup>1)</sup>、表層の品質を確保することで、コンクリート構造物の耐久性向上につながると考えている。そのため、非破壊試験による竣工検査システムの構築が検討されている。

表層品質を評価する指標の一つに吸水抵抗性が挙げられる。吸水抵抗性が小さいとコンクリート内へ水分が浸入し、鋼材腐食、アルカリ骨材反応、凍害などによる損傷の促進が懸念される。良好な吸水抵抗性を有することで、これらの不具合はかなり改善されると考えられる。

吸水抵抗性が小さい場合、吸水抵抗性を改善し、水の浸入を抑制する必要がある。その手段の一つに、表面含浸材を用いた表面含浸工法<sup>2)</sup>がある。近年、材料の性能が大幅に改善されてきており、コンクリート構造物の耐久性向上において今後大きな役割が期待される<sup>3)</sup>。

吸水抵抗性の評価は表層品質検査システムにおける重要な技術要素になると考えており、筆者らは非破壊で表層部の吸水抵抗性を評価する表面吸水試験の確立を目指している。複数の構造物で表面吸水試験を行ってきたところ、表層にマイクロクラックを有する場合、吸水抵抗性が著しく低下することが分かった<sup>4),5)</sup>。ここでは、マイクロクラックを鉄筋拘束、湿度勾配、乾燥収縮等により生じたコンクリート表層の微細ひび割れとする。

表面含浸工法を用いることで、マイクロクラックにより低下した吸水抵抗性の改善を期待できる。しかし、マイクロクラックに着目した含浸材の研究はほとんどなく、マイクロクラックが顕著に生じたコンクリートにお

ける表面含浸材の最適な使用方法が確立されていない。そのうえ、新設構造物に若材齢で含浸材を塗布した場合、その後発生・進展するマイクロクラックにより、含浸材の吸水抑制効果に影響を与えることが懸念される。

本研究では室内で作製した実物に近いコンクリート柱試験体でマイクロクラックが吸水抵抗性に与える影響および表面含浸材による吸水抵抗性改善効果について検討を行う。これまで筆者らは、表面含浸材による吸水抵抗性改善効果の検討に関して、表面吸水試験のみで評価を行ってきた<sup>4),5)</sup>。試験中に生じた微量な吸水が柱内部に到達している可能性が考えられるため、吸水された水の分布を知る必要がある。そこで、本研究では、表面吸水試験後に柱内部の含水率を測定することにより、試験中に生じた吸水の奥行き方向における分布を明らかにする。マイクロクラックを有するコンクリートにおける表面含浸材の吸水抵抗性の改善効果および含浸材塗布後に生じるマイクロクラックの吸水抵抗性に与える影響についても検討する。

## 2. 評価方法

### 2.1 表面吸水試験

表面吸水試験により、表層部の吸水抵抗性の評価を行う。吸水試験器を図-1に示す。コンクリート表面に吸水試験器を取り付け、水を満たし、注水完了時からの経過時間とコンクリート中への吸水量の測定を行う<sup>4)</sup>。

一般に、コンクリート中への吸水量は時間の平方根に比例すると考えられている<sup>6)</sup>。そこで、横軸に注水完了時からの経過時間の平方根、縦軸に単位面積当たりの吸水量をプロットし、最小二乗法を用いて原点を通る近似直線の比例定数を求め、これを吸水係数と定義した。吸

\*1 横浜国立大学 大学院環境情報学府 環境システム学専攻 (正会員)

\*2 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 准教授 博(工) (正会員)

\*3 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター (正会員)

\*4 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センター フロンティアサービス研究所 博(工) (正会員)

水係数は吸水のしやすさを表し、表層部の吸水抵抗性の評価に用いられる。

筆者らは、吸水時間による吸水係数の違いを既往の研究において報告している<sup>4)</sup>。吸水時間が4時間以上になると、吸水量は時間の平方根に比例しない場合がある。吸水が1次元方向でないこと、単純な吸水現象でないためと考えている。そこで、マイクロクラック等の欠陥の影響も含む表層品質を評価するため、最長4時間までのデータで吸水係数を求め、吸水抵抗性の評価を行った。

## 2.2 含水率の測定

コンクリート柱の含水状態および表面吸水試験後の含水状態の変化を検討するため、柱内部の含水率の測定を行う。ケット科学研究所社製の電気抵抗式コンクリート・モルタル水分計 HI-800 を用いた。測定方法の概要を図-2 に示す。コンクリート柱にφ6mm の穴を削孔し、ブラシ型センサを挿入する。2 点間の電気抵抗を測定することで、装置内部で含水率に換算され、表示される。含水率への換算は、いくつかの配合のコンクリートについて様々な水分状態で測定されたカウントと、加熱乾燥法によって求められた含水率との関係をもとに装置内部で行われている。既往の研究を参考に<sup>7)</sup>、骨材等の影響を考慮し、測定は図-2 のように1箇所あたり2点間を3回測定し、平均した値をコンクリート柱の含水率とした。含水率の測定にあたり、ブラシ型センサの中央をコンクリート表面からの深さとする。

## 3. 実験概要

### 3.1 コンクリート柱試験体作製方法

マイクロクラックが吸水抵抗性に与える影響、表面含浸材による吸水抵抗性の改善を検討するために、コンクリート柱 A (800×800×1600mm) とコンクリート柱 B (800×800×1430mm) を1体ずつ作製した。レディーミクストコンクリートを用いた。使用したコンクリート材料および配合を表-1、表-2 に示す。コンクリート標準示方書を参考に運搬、打込み、締固めおよび仕上げを行った。

コンクリート柱 A は主鉄筋比 4.1%、帯鉄筋比 0.75% である<sup>4)</sup>。鉄筋配置を図-3 に示す。打設 7 日後に脱型を行い、試験室内の気中に静置した。コンクリート柱 B は無筋である。打設 1 日後に一面を脱型、残りの三面を 3 日後に脱型し、試験室内の気中に静置した。

### 3.2 使用した表面含浸材について

検討に用いた表面含浸材を表-3 に示す。これらは実構造物を用いて行った暴露試験<sup>8)</sup>の結果、良好な吸水抑制効果を発揮し続けているシラン系表面含浸材 2 種類であり、MR は 8 年を経過し、AS は 5 年を経過しても効果

を発揮し続けている。MR は、有機溶剤を使用していない水系の材料であり、大小のシリコン分子で構成される

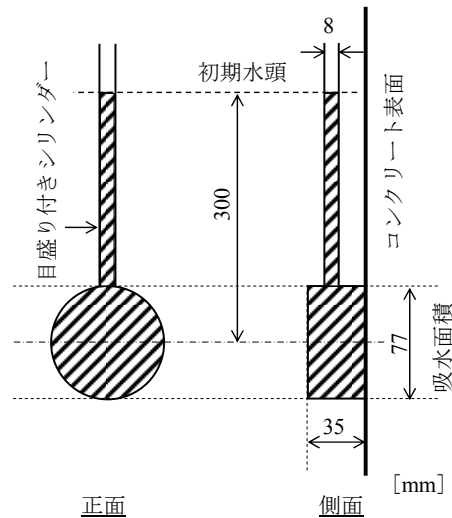


図-1 表面吸水試験器

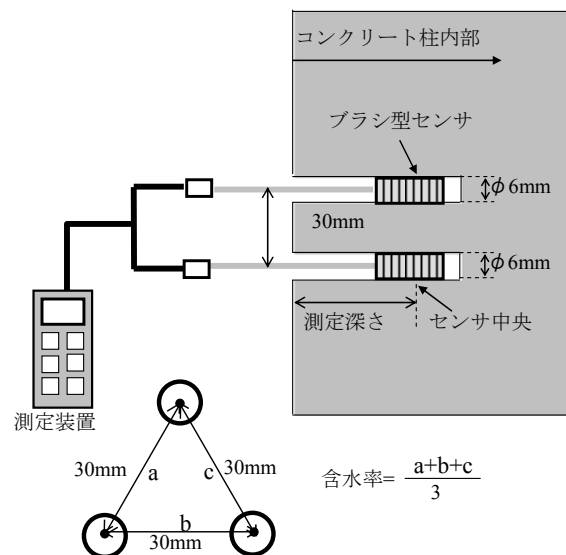


図-2 含水率測定概要

表-1 使用材料

材料名	種類および物性値	
セメント	柱 A	N:普通セメント (密度 3.13g/cm <sup>3</sup> )
	柱 B	H:早強セメント (密度 3.13g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S:千葉県君津市産山砂 (密度 2.61g/cm <sup>3</sup> )	
粗骨材	G:埼玉県秩父郡横瀬町砕石 (密度 2.70g/cm <sup>3</sup> )	
混和剤	A:AE 減水剤 (ポゾリス 78S (T))	

表-2 コンクリート柱配合

柱	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	A
A	54	44.2	165	305	799	1045	3.1
B	40	39	173	433	655	1061	4.33

シラン・シロキサン系含浸材に分類される。AS は、有機溶剤を使用しないジェル状の材料であり、撥水効果の高いアルキルアルコキシシランを主成分とするシラン系含浸材である。

### 3.3 実験方法について

#### (1) マイクロクラックの幅および深さ

マイクロクラックの定量的評価を行うため、各試験体からコアを採取し、真空タンク内で赤インクに浸し、常圧に戻す過程で赤インクをマイクロクラックに注入する方法により、マイクロクラックの幅および深さの測定を行う。<sup>4)</sup> コンクリート柱 A では材齢約 1 年、柱 B では材齢約 2 ヶ月、材齢約 6 ヶ月で測定を行った。

#### (2) マイクロクラックが吸水抵抗性に与える影響

ここではコンクリート柱 B を用いる。マイクロクラックが吸水抵抗性に与える影響を検討するため、コンクリート柱 B からコアを採取し、表面、表面から 1cm、表面から 30cm 部で表面吸水試験を実施した。コアで表面吸水試験を実施する前に、水分状態を考慮して、柱 B が静置してある試験室内に 10 日ほど静置してコア内の水分状態を一定にした後、表面吸水試験を行った。

#### (3) 含浸材塗布前に存在するマイクロクラックの影響

ここではコンクリート柱 A を用いて検討を行う。試験時には材齢約 1 年経過しているため、コンクリート柱表面にマイクロクラックが観察された。

マイクロクラック部での表面含浸材による吸水抑制効果を確認するため、コンクリート柱にシラン系表面含浸材を塗布した。面 2 に AS、面 3 に MR を材齢 321 日で塗布した。なお、面 2、3 で事前に表面吸水試験を行ったところ、ほぼ同様の吸水係数を示し、同様の吸水抵抗性を有した。含浸材塗布後に含浸材塗布面、無塗布面（以下 BL 面）で表面吸水試験を実施し、表面含浸材の吸水抵抗性改善効果を検討する。

#### (4) 含浸材塗布後に発生するマイクロクラックの影響

含浸材塗布後に発生・進展したマイクロクラックが吸水抑制効果に与える影響を検討するため、コンクリート柱 B の 3 日で脱型した面へ材齢 14 日で含浸材塗布を行った。水セメント比 40% 程度の低水セメント比のコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布する場合、含浸深さと吸水抑制効果の観点から材齢 14 日から材齢 28 日に塗布することが望ましい<sup>9)</sup> との報告を参考にした。含浸材塗布後、BL 面と含浸材塗布面において経時的に表面吸水試験を実施した。

#### (5) 含水率の測定

2.2 に示した方法でコンクリート柱 A、B 内部の含水率を測定した。吸水試験を実施する前の測定は、BL 面、

塗布面において各 3 箇所で行い、平均値をそれぞれの含水率とした。コンクリート柱 A の BL 面において 3 箇所で行った測定した含水率とその平均値を図-4 に示す。図-4 から、柱 A 内部の含水率はほとんどばらつきがないことが分かった。他の面においても同様の結果が得られた。

吸水試験後の測定については、吸水試験面の中央に削孔し、3 点間の平均値を含水率とした。試験器を取り外した後、すぐに削孔し、測定を開始した。

## 4. 結果および考察

### 4.1 マイクロクラックの定量的評価

材齢約 1 年時におけるコンクリート柱 A のマイクロクラックの深さは約 8.3mm、幅は  $2.8 \times 10^{-2}$  mm であった。一方、コンクリート柱 B では、材齢約 2 ヶ月時における

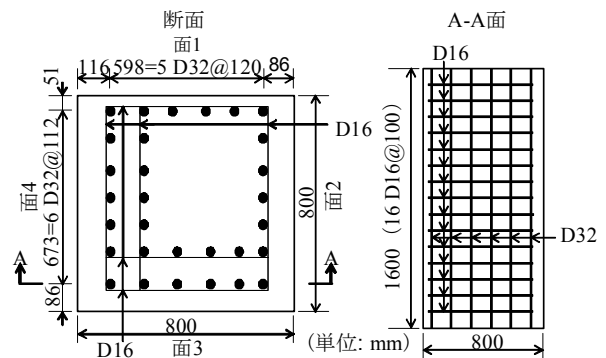


図-3 柱 A の鉄筋配置

表-3 使用したシラン系表面含浸材

含浸材	MR	AS
外観性状	白色ペースト状	淡白色ジェル状
主成分	アルキルアルコキシシラン・シロキサン	アルキルアルコキシシラン
主成分率	80%	90%以上
系	水系	無溶剤
標準塗布量	0.2kg/m <sup>2</sup>	0.4kg/m <sup>2</sup>
塗布回数	1	1

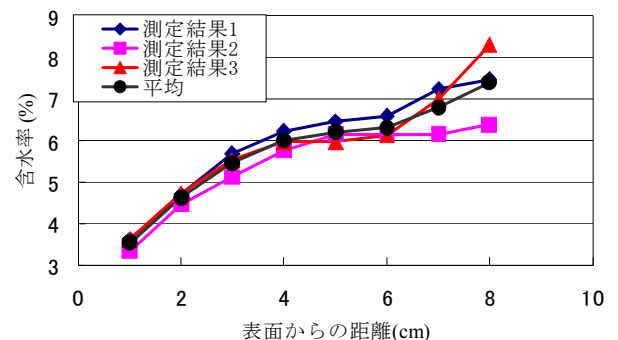


図-4 柱 A における BL 面内部の含水率測定結果

マイクロクラックの深さは約 2.8mm, 幅は  $7.7 \times 10^{-3}$ mm であった。柱 B 材齢約 6 ヶ月では深さは約 6.0mm, 幅は  $4.9 \times 10^{-2}$ mm となり, マイクロクラックが進展しているのを確認できた。コンクリート柱 A は表層部の乾燥と鉄筋の拘束の影響により, また, コンクリート柱 B は表層部の乾燥による湿度勾配によって, マイクロクラックが生じたと考えている。

#### 4.2 柱 B のマイクロクラックが吸水抵抗性に与える影響

コンクリート表面, 表面から内部 1cm, 30cm 部の箇所で行った表面吸水試験結果を図-5 に示す。図-5 からコンクリート表面の吸水係数がコンクリート内部と比べて著しく大きいことがわかる。これは, 表層に生じたマイクロクラックの影響であると考えられる。柱内部はマイクロクラックの影響を排除したことに加え, 養生の違いも考えられる。コンクリート表面は気中養生だが, 柱内部のコンクリートは封緘養生に近い状態である。

#### 4.3 各コンクリート柱内部の含水状態

各コンクリート柱内部の含水率の測定結果を図-6 に示す。含水率の測定は, 表面吸水試験を実施する前に行った。コンクリート柱 A では BL 面と含浸材塗布面の含水率はほぼ同様となった。一方, コンクリート柱 B では BL 面に比べて, 含浸材塗布面の方が含水率は大きいことがわかった。

柱 A では材齢 321 日に含浸材を塗布したため, 柱表層部の乾燥状態はほぼ定常状態にあったと考えられる。コンクリート中の水分の移動は活発でなく, 含浸材を塗布してもコンクリート柱内部の含水率に影響を与えなかったと考えている。

一方, 柱 B では材齢 14 日に含浸材を塗布した。材齢 14 日では, 柱内部では水和反応も活発であり, 柱表面からの水分の逸散も活発である。この状態で表面含浸材を塗布することにより, 柱内部の水分の逸散を妨げている可能性がある。既往の研究において, 含浸材を塗布した場合, 透湿性が若干劣る可能性があることが報告されている<sup>10)</sup>。水分の逸散を妨げ, 柱内部の急激な乾燥を防ぐことにより表層部と柱内部の湿度勾配が起因となるマイクロクラックを抑制する可能性があると考えており, 今後の検討項目である。

#### 4.4 含浸材塗布前のマイクロクラックの影響

##### (1) 吸水抵抗性による評価

柱 A においてマイクロクラックが存在する箇所での含浸材塗布前後の表面吸水試験の結果を図-7 に示す。コンクリート柱 A は水セメント比が 54%と大きく, 材料分離による吸水抵抗性への影響を与えることが懸念されるため, 高さ方向(上部:100~150cm, 中央部 60~100cm, 下部 0~60cm)に分割して, 結果をまとめた。図-7 を見ると, やや上部の吸水抵抗性が劣るものの, 高さ方向の位置によって BL 面の吸水抵抗性はほぼ同じであった。シラン系表面含浸材 2 種類を塗布することにより, マイクロクラック部の吸水抵抗性改善効果を確認することができた。吸水抑制効果により水の浸入を表面含浸材の含浸領域で抑えたと考えられる。しかし, 柱 A の内部コンクリートが有する吸水抵抗性よりも劣ることが報告されている<sup>4)</sup>。これは, 内部コンクリートが置かれている封緘状態に相当する養生が, 吸水抵抗性の向上に与える好影響が大きいことを示している。

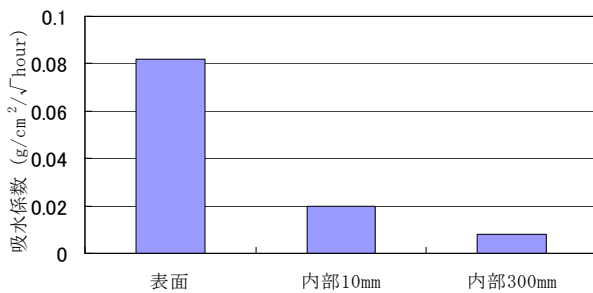


図-5 柱 B の表面吸水試験結果

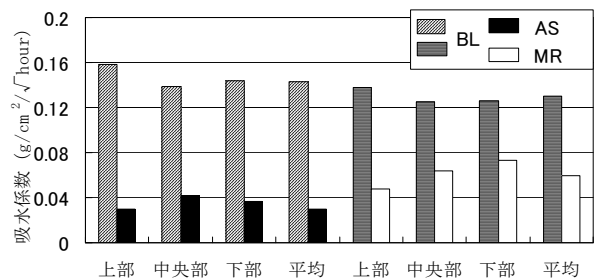


図-7 柱 A マイクロクラック部の表面吸水試験結果

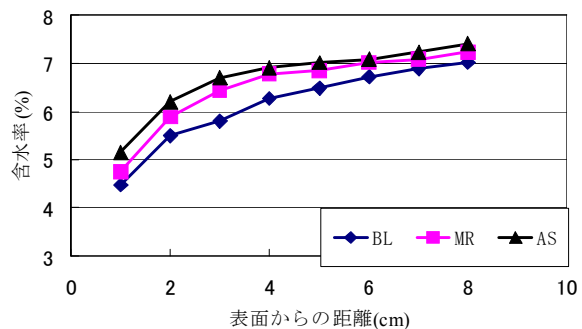
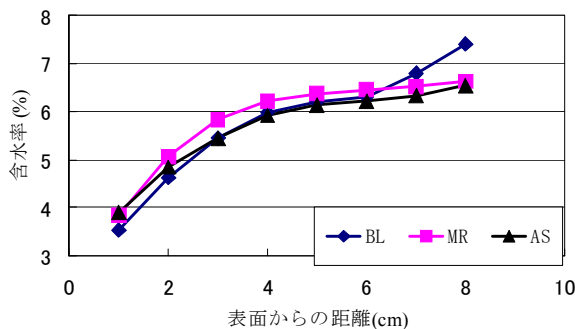


図-6 各コンクリート柱内部の含水率(左:コンクリート柱 A, 右:コンクリート柱 B)

## (2) 含水率による評価

表面吸水試験終了後に吸水をしていた箇所では含水率を測定した。試験器を取り外した後、すぐに測定を開始した。試験前の BL 面、含浸材塗布面の含水率と比較した結果をそれぞれ図-8 に示す。BL 面では表面吸水試験を開始したあと 1 時間で十分な吸水が確認されたため、吸水開始 1 時間後に内部の含水率を測定した。AS 塗布面では 1 時間の吸水では微量な吸水のため、吸水時間を 4 日に増やし、測定を行った。MR 塗布面でも AS 塗布面と同様の結果が得られたので、ここでは AS 塗布面についてのみ示す。なお、含水率の測定においては削孔を必要とするため、吸水試験の前後で全く同じ箇所ではできず、同じ面で測定した結果を示している。図-8 より、コンクリート柱 A で吸水させた結果、柱内部 8cm においても含水率が増加しているのがわかる。特に表面から柱内部 3cm までは含水率の増加が大きいことがわかる。この結果より、室内に置かれた表層が乾燥したコンクリート柱では、1 時間の表面吸水試験において、コンクリー

ト表面付近だけでなく、内部においても含水率が増加することがわかった。

一方、図-8 より AS 塗布面では表面吸水試験後も、含水率の増加が見られないことがわかる。表面吸水試験により微量な吸水量が確認されており、マイクロクラックを通じ内部に水が浸入していることを懸念していたが、吸水は柱の極表層部、おそらく含浸層内で生じていた。この結果、マイクロクラック部にシラン系表面含浸材を塗布することにより、吸水抑制効果を発揮し、含浸層より奥のコンクリート内部に含水率の増加を生じないことが分かった。

## 4.5 含浸材塗布後のマイクロクラックの影響

### (1) 吸水抵抗性による評価

コンクリート柱の表層にマイクロクラックが発生・進展することにより吸水抵抗性が低下する。柱 B の 1 日の脱型した面で柱表層部の吸水係数を経時的に測定した結果を図-9 に示す。材齢が経過するにしたがい、表層部の吸水係数が増大することを確認した。マイクロクラ

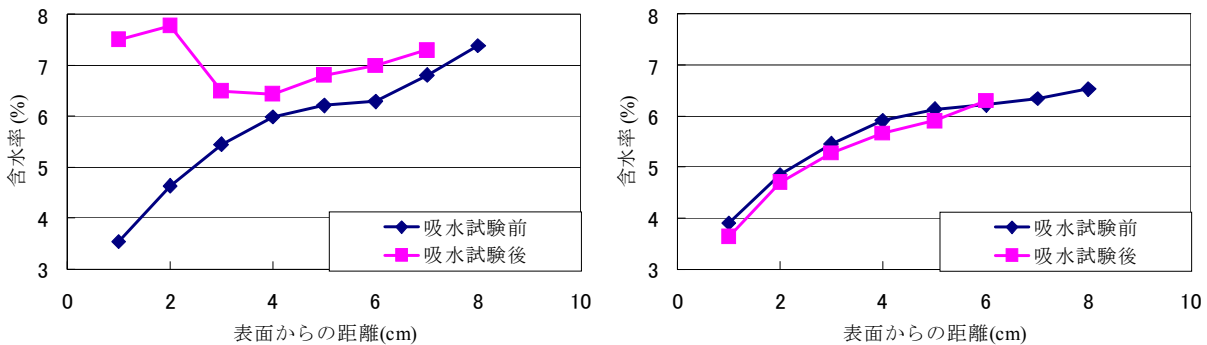


図-8 吸水試験後の柱 A 内部の含水率変化 (左: BL 面, 右: AS 塗布面)

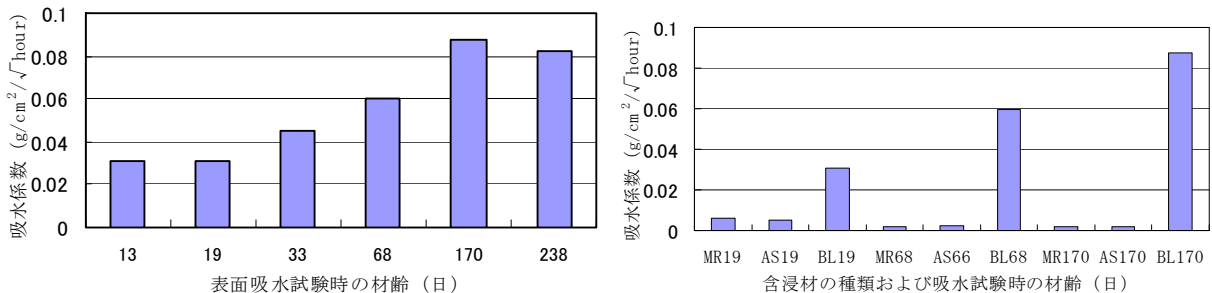


図-9 柱 B 吸水抵抗性の経時変化

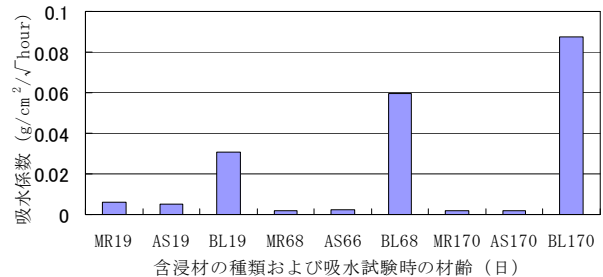


図-10 柱 B 含浸材塗布面の表面吸水試験結果

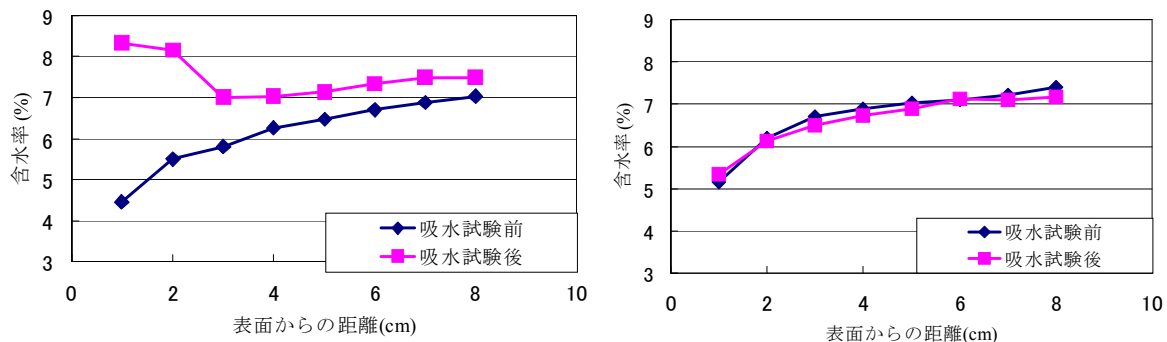


図-11 吸水試験後の柱 B 内部の含水率変化 (左: BL 面, 右: AS 塗布面)

ックの幅、深さの進展も確認されており、乾燥およびマイクロクラックの影響であると考えている。材齢 170 日から 238 日にかけて吸水係数に大きな変化が見られないのは、材齢 170 日が経過した段階で、マイクロクラックの進展、柱表層部の乾燥状態が落ち着いたためと考える。

含浸材塗布面で表面吸水試験を経時的に行った結果を図-10 に示す。横軸は吸水試験を実施した面に塗布した含浸材の種類と試験時の材齢を表す。図-9 に示したように、BL 面では材齢が経過するにしたがい、吸水係数が増大するのに比べ、含浸材塗布面では材齢が経過しても吸水係数の増大は見られない。これより、若材齢時に含浸材を塗布しても、その後、発生・進展したマイクロクラックは吸水抑制効果に影響を与えないことを確認した。材齢が経過しても吸水抑制効果は持続しているが、マイクロクラック部から微量な水が浸透している可能性もあるため、この点に関し、次の項で検討を行った。

## (2) 含水率による評価

表面吸水試験をした箇所での含水率を測定し、試験前の含水率と比較した。BL 面、AS 塗布面での測定結果を図-11 に示す。吸水時間を 4 時間とした。MR 塗布面の結果も AS 塗布面と同様となった。BL 面では吸水により柱内部 8cm までは含水率の増加が見られるが、AS 塗布面では増加が見られない。この結果、若材齢で含浸材を塗布しても、塗布後、発生・進展したマイクロクラックから柱内部に吸水が生じていないことが確認できた。

しかし、コンクリート柱 B では、マイクロクラックの深さ、幅が小さかったために含浸材の吸水抑制効果に顕著な影響を与えなかった可能性があり、マイクロクラックが含浸材深さより大きくなった場合に、影響を与える可能性もある。今後もマイクロクラックが吸水抑制効果に与える影響の検討を深度化する予定である。

## 5. まとめ

柱試験体を作製し、マイクロクラックが吸水抵抗性に与える影響、シラン系表面含浸材による吸水抵抗性改善効果を調べ、以下の知見を得た。

- (1) 脱型後に室内に静置した柱試験体では、内部に比べて、ごく表層のコンクリートの吸水抵抗性が著しく低いことが分かった。マイクロクラック、養生の違いの影響と考えた。
- (2) マイクロクラックがある場合に、表面含浸材による吸水抵抗性の改善効果を確認した。本研究の範囲内では、含浸材塗布後に発生・進展したマイクロクラックが吸水抵抗性改善効果に影響しないことを明らかにした。
- (3) 若材齢で含浸材を塗布した場合、柱内部の水分の逸散を妨げる可能性を指摘した。

- (4) 含水率の測定により、表面吸水試験による水分の移動形態を示した。含浸材を塗布した面で生じた吸水は含浸層で抑えられていた。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり、鈴木雄大氏（JR 東日本研究開発センター）との議論が参考になりました。ここに感謝いたします。本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構の委託研究「耐久性能検証技術の構築を柱とした RC 構造物群の合理的維持管理体系へのパラダイムシフト」の一部として実施しました。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 80 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会成果報告書，2008.4
- 2) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針（案），コンクリートライブラリー119，2005
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 68 コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告，2006.4
- 4) 細田暁，林和彦，下田智也，吉田早智子：コンクリート表層のマイクロクラックが表面の吸水性と透気性に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.63，2010
- 5) 下田智也，吉田早智子，細田暁，林和彦：表層にマイクロクラックを有するコンクリートの物質移動抵抗性，歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会成果報告書，pp.105-112，2009.11
- 6) A.M.Neville（三浦尚訳）：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂，pp.600-604，2004.6
- 7) 上田洋，玉井譲：コンクリート構造物の表層付近における水分分布の検討，コンクリート技術シリーズ 87 歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会成果報告書，土木学会，pp.113-120，2009.11
- 8) 網島和彦，松田芳範，津吉毅，石橋忠良：撥水・浸透性防水塗膜材の暴露試験 3 年目の評価について，コンクリート技術シリーズ 68 コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告，土木学会，pp.225-236，2006.4
- 9) 兼子弘，細田暁，小林薫，松田芳範：低水セメント比のコンクリートにおけるシラン系表面含浸材の含浸深さと吸水抑止効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.655-660，2008
- 10) 細田暁，今野拓也，松田芳範，小林薫：シラン系表面含浸材を用いた最適な表面保護システムのための基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol.64，No.2，pp.323-334，2008.