

# シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による コンクリートの水分浸透抑制効果に関する研究

大原 涼平

## シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修によるコンクリートの水分浸透抑制効果に関する研究

## 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 本研究の背景と目的 .....	1
1.1.1 コンクリートの水分浸透と表面保護工法 .....	1
1.1.2 ひび割れによる水分浸透の促進とひび割れ補修 .....	2
1.1.3 表面含浸材のひび割れ補修への適用と課題 .....	3
1.1.4 本研究の目的および方法 .....	5
1.2 本研究の基礎となる既往研究 .....	6
1.2.1 ひび割れがコンクリート中の水分浸透におよぼす影響に関する研究 .....	6
1.2.2 シラン系表面含浸材によるコンクリートの表面保護に関する研究 .....	7
1.2.3 シラン系表面含浸材によるひび割れ補修に関する研究 .....	12
1.3 本論文の構成 .....	15
第1章の参考文献 .....	16
第2章 シラン系表面含浸材の塗布条件およびひび割れに対する水分浸透抑制効果の検証 .....	19
2.1 はじめに .....	19
2.2 塗布前の養生および乾燥期間と塗布量の影響に関する吸水実験 .....	19
2.2.1 実験方法および実験水準 .....	19
2.2.2 供試体作成および表面含浸材の塗布方法 .....	22
2.2.3 実験結果：各水準の含浸深さ .....	23
2.2.4 実験結果：乾燥期間および吸水期間の質量の経時変化 .....	26
2.2.5 実験結果：吸水量と含浸深さの比較 .....	29
2.3 シラン系表面含浸材の含浸方向とひび割れの影響に関する吸水実験 .....	30
2.3.1 実験方法および実験水準 .....	30
2.3.2 供試体作成および表面含浸材の塗布方法 .....	32
2.3.3 実験結果：ひびなし試験体の塗布面(含浸方向)と含浸深さの比較 .....	34
2.3.4 実験結果：ひび割れ部の塗布面(含浸方向)と含浸深さの比較 .....	36
2.3.5 実験結果：吸水期間中の質量の経時変化 .....	38
2.3.6 実験結果：ひび割れ幅ごとの吸水量の比較 .....	39
2.4 第2章のまとめ .....	40
第2章の参考文献 .....	40

第3章 シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修後の乾湿挙動に関する屋外暴露実験 .....	41
3.1 はじめに .....	41
3.2 屋外暴露実験の概要 .....	41
3.2.1 実験水準および供試体作製方法 .....	41
3.2.2 暴露環境 .....	45
3.3 実験結果 .....	46
3.3.1 屋外暴露実験終了後の表面含浸材の含浸状況 .....	46
3.3.2 ひび割れの無い供試体の乾湿挙動 .....	47
3.3.3 ひび割れを有する供試体に表面含浸材を塗布していない場合の乾湿挙動 .....	49
3.3.4 ひび割れを有する供試体に表面含浸材を塗布した場合の乾湿挙動 .....	50
3.3.5 表面含浸材を用いたひび割れ補修による水分浸透抑制効果の検討 .....	51
3.4 第3章のまとめ .....	53
第3章の参考文献 .....	53
第4章 シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果の持続性に屋外暴露がおよぼす影響 .....	54
4.1 はじめに .....	54
4.2 吸水実験の概要 .....	54
4.2.1 吸水試験体の作製方法 .....	54
4.2.2 実験方法 .....	56
4.3 実験結果 .....	57
4.3.1 シラン系表面含浸材の含浸状況 .....	57
4.3.2 表面含浸材塗布後に屋外暴露された供試体の吸水特性 .....	57
4.3.3 屋外暴露後に表面含浸材を塗布した供試体の乾湿挙動 .....	60
4.4 第4章のまとめ .....	61
第4章の参考文献 .....	61
第5章 シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果のモデル化と補修効果の再現 .....	62
5.1 はじめに .....	62
5.2 シラン系表面含浸材およびひび割れを考慮した数値計算モデル .....	62
5.2.1 ひび割れを有するコンクリートの水分移動モデルの概要 .....	62
5.2.2 コンクリート中の水分移動[5.1] .....	65
5.2.3 コンクリート中への吸水[5.3] .....	66
5.2.4 ひび割れへの吸水[5.2] .....	66
5.2.5 ひび割れ表面からコンクリート中への吸水[5.2] .....	67
5.2.6 コンクリート表面およびひび割れ表面の境界条件[5.3] .....	68
5.2.7 シラン系表面含浸材による撥水効果のモデル化 .....	69

5.3 シラン系表面含浸材による撥水効果のパラメータスタディ .....	70
5.3.1 パラメータスタディの計算条件 .....	70
5.3.2 含浸部での吸水移動に対する低減率 $\beta_{cap}$ に関するパラメータスタディ .....	71
5.3.3 含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ に関するパラメータスタディ .....	73
5.4 計算結果 .....	75
5.4.1 シラン系表面含浸材を塗布していない供試体の乾湿挙動の再現結果 .....	75
5.4.2 シラン系表面含浸材による撥水効果の感度解析 .....	77
5.4.3 シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修後の乾湿挙動の再現結果 .....	79
5.5 第 5 章のまとめ .....	80
第 5 章の参考文献 .....	81
第 6 章 結論 .....	82
謝辞 .....	83

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景と目的

#### 1.1.1 コンクリートの水分浸透と表面保護工法

コンクリートは多孔材料であり、降雨、滞水や結露などによりコンクリート表面で乾湿が繰り返される環境では、細孔空隙からコンクリート内部に水分が供給される。コンクリート中の水分は、鋼材腐食、ASR や凍害などの様々な劣化現象の要因であり、コンクリート内部への水分の供給はコンクリート構造物の劣化の発生と促進につながる。土木学会 コンクリート標準示方書[設計編] [1.1]では、水の浸透に伴うコンクリート中の鋼材腐食に対する照査が導入された。土木学会 コンクリート標準示方書 [維持管理編] [1.2]では、構造物の診断において水掛かりへの注意を促している。これらの規準では、水の作用による劣化の対策として、適切な排水処理や部材表面の保護による水の浸透の制限を基本とし、コンクリート構造物の耐久性の確保においてコンクリート中への水分の浸透を抑制することの重要性が認識されている。

コンクリート中への水分などの劣化因子の浸透を抑制し、コンクリート構造物の耐久性の向上、劣化の抑制または補修を目的とした代表的な工法として、コンクリート表面を被覆あるいは改質する表面保護工法がある[1.3]。表面保護工法の一般的な分類を表-1.1 に示す。表面保護工法は、「表面処理工法」とも呼ばれ、コンクリート構造物の表面に被覆を施す「表面被覆工法」と表面に表面含浸材を含浸させる「表面含浸工法」に分けられる。表面被覆工法は、有機系または無機系の材料を用いてコンクリート構造物表面を被覆することで、劣化因子の侵入を抑制または防止する工法である。使用材料によってひび割れ追従性や対候性が得られる。コンクリートの剥落防止も目的とする場合はメッシュ工法やシート工法が併用される。

表-1.1 表面保護工法の一般的な分類

工 法	表面含浸工法		表面被覆工法	
	シラン系	けい酸塩系	有機系	無機系
主 材	アルキルアルコキシシ ラン アルキルシリコネート など	けい酸リチウム けい酸ナトリウム	エポキシ樹脂 ポリウレタン樹脂 アクリル樹脂 ゴム系樹脂 など	ポリマーセメント
性 能	塩化物イオン侵入抑制 凍結融解抵抗性 ASR 反応抑制	けい酸リチウム： ASR 反応抑制 けい酸ナトリウム： 中性化抑制 塩化物イオン侵入抑制 凍結融解抵抗性	中性化抑制 塩化物イオン侵入抑制 化学的侵食抑制 ひび割れ追従性	中性化抑制 塩化物イオン侵入抑制 凍結融解抵抗性 ひび割れ追従性

表面含浸工法は、所定の効果を発揮する材料をコンクリート構造物表面に含浸させることで、コンクリート表層部を改質して、劣化因子の侵入抑制または新たな性能を付与する効果をもたらす工法である。表面含浸工法に用いられる含浸材は、その主成分に応じてシラン系、けい酸塩系に分類される。けい酸塩系表面含浸材は、浸透性固化材とも呼ばれ、コンクリート表層部にけい酸リチウムやけい酸ナトリウムを主成分とする水溶液を含浸させることで、コンクリート中の水酸化カルシウムとの反応による C-S-H ゲルの生成ならびに主成分の乾燥固化によってコンクリートの空隙構造を緻密化する。シラン系表面含浸材は、浸透性吸水防止材とも呼ばれ、コンクリート表層部にシランなどのシリコン類を含浸させることで数 mm の厚みの撥水層(吸水防止層)を形成し、水分や劣化因子の侵入を抑制する。また、撥水層は細孔を埋めることがないため、コンクリートが本来有する呼吸性(気体の透過性)を損なわない。

表面被覆工法と表面含浸工法を比べると、表面含浸工法はコンクリートの外観を損ねることなく、少ない工程かつ短期間で施工できる。また、被覆材は紫外線による劣化や被覆材とコンクリート境界部の水分などの膨張の影響を受けることで被膜のひび割れや浮き、剥離が生じる場合があるが、含浸材はコンクリート内部に含浸するためこれらの影響を受けにくく、経年後に再施工する場合、表面含浸材を再度含浸させるだけで効果を発揮できる特徴を有する。

これらの表面保護工法の設計の基本的な考え方は、新設構造物と既設構造物での考え方の違いはなく、鋼材腐食や補修材料の劣化などの耐久性に関する要求性能を明確にし、想定される耐用期間内で満足するように行う[1.2]。また、ひび割れが生じている構造物に表面保護工法を適用する場合では、ひび割れが表面保護工のひび割れや浮き、剥離を生じさせる原因となるため、事前にひび割れ補修を行うなど適切な処置が必要である。

### 1.1.2 ひび割れによる水分浸透の促進とひび割れ補修

一般的なコンクリート構造物では、荷重、乾燥収縮、水和熱や鋼材腐食などの配合から施工、供用中の様々な影響によってひび割れが生じる。ひび割れによって生じる空隙は、コンクリートと比べて物質透過抵抗性が極めて小さく、水分をはじめとする劣化因子のコンクリート中への侵入を促進させる。例えば、降雨などによりひび割れからコンクリート内部に水分が供給された場合、短い時間で多くの水分がコンクリート内部に供給され、適切にかぶりが確保されたコンクリート構造物と比べて鋼材腐食や ASR などの劣化が短期間で生じる可能性がある。さらに、ひび割れ幅やひび割れ深さといったひび割れの形態に注目すると、ひび割れ幅が大きくなるほどひび割れ深さも大きくなり、ひび割れ空隙が拡大することで、劣化因子のコンクリート中への侵入を促進させることにつながる。そのため、ひび割れが生じたコンクリート構造物の耐久性を確保するには、ひび割れの発生原因に応じた適切な評価と補修を行う必要がある。

乾燥収縮や温度ひび割れなど打込みから数年の間に収束すると考えられる非進行性のひび割れでは、図-1.1に示すようなひび割れ幅に応じた補修工法が適用される[1.4]。ひび割れ幅が 1.0mm 以上と比較的大きい場合は、ひび割れ部分にエポキシ樹脂やポリマーセメントモルタルなどを充填する充填工法が採用される。ひび割れ幅 0.2mm～1.0mm 前後では、ひび割れに樹脂系あるいはセメント系の材料を圧入することでひび割れ空間を閉塞させる注入工法が採用される。ひび割れ幅 0.2mm 以下の微細なひび割れでは、樹脂やセメント系材料によるひび割れ内部の処理が困難な

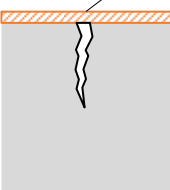
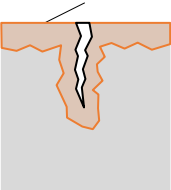
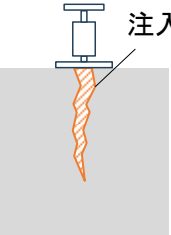
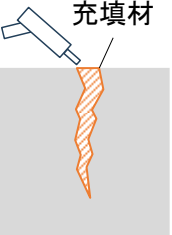
ひび割れ幅			
0.2mm以下		0.2～1.0mm	1.0mm以上
被覆工法	表面含浸工法	注入工法	充填工法
			

図-1.1 ひび割れ補修工法の分類

ため、ひび割れのみあるいはひび割れを含むコンクリート表面を被覆材で被覆する被覆工法が採用される。また、含浸材の含浸性の高さと作業の容易さから表面含浸工法の適用も推奨されている。表面含浸材をひび割れ補修に用いることで、少ない工程かつ短期間でひび割れ補修と表面保護を同時に行うことが可能となり、コンクリート構造物の経済的な耐久性向上が期待される。

### 1.1.3 表面含浸材のひび割れ補修への適用と課題

けい酸塩系表面含浸材は、ひび割れに対しても含浸させることで、ひび割れ空間も表層部と同様に C-S-H ゲルや固化物による閉塞が期待される。けい酸塩系表面含浸材によるひび割れ補修に関する性能評価は、土木学会規準 JSCE-K 572-2012 けい酸塩系表面含浸材の試験方法(案)のひび割れ透水性試験により、ひび割れ部の閉塞の有無を加圧された水の透水量で評価される[1.5]。しかし、改質効果を発現させるためには塗布後十分な反応・乾燥期間を設ける必要があること、より大きなひび割れ幅やひび割れ幅が変動するような場合には C-S-H ゲルや固化物による閉塞が難しい点に注意する必要がある。

一方、シラン系表面含浸材は、ひび割れへの含浸によりひび割れ表面をコンクリート表面と同様に撥水性に改質することで、ひび割れを含む構造物表面全体の撥水による水分浸透の抑制効果が期待される。また、塗布後数日の乾燥で十分な改質効果が得られること、ひび割れ空間を閉塞する必要がないことから、コンクリート中への水分浸透の抑制を目的としたシラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修は、けい酸塩系表面含浸材と比べて施工および維持管理が容易でコストに優れた工法であるといえる。しかし、土木学会規準 JSCE-K 571-2004 表面含浸材の試験方法(案)[1.3]では表面保護の性能確認が目的であり、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修の効果を評価する試験方法は確立されていない。そのため、シラン系表面含浸材をひび割れ補修に用いる場合は、適切な試験方法、使用実績あるいは信頼できる資料により品質や効果を確認する必要がある。

図-1.2 にひび割れを有するコンクリートに低粘度のシラン系表面含浸材を塗布した場合に、コンクリート中に形成されるひび割れ周辺の撥水部分を示す。低粘度のシラン系表面含浸材はコンクリート表面への含浸性が高く、ひび割れ内部へも浸透しやすいため、ひび割れ近傍と表層のコ

ンクリートに撥水性が付与されたことがわかる。また、ひび割れ補修にシラン系表面含浸材を使用した既往の研究では、多数の実験的検討から、表面含浸材の種類や粘度、実験条件によって補修効果の程度が異なるが、ひび割れ補修効果が得られることを報告している[1.6]～[1.16]。しかし、シラン系表面含浸材によりひび割れ補修を行ったコンクリートの、温湿度の変動、降雨および日射の影響を受ける実環境下における乾湿挙動についての知見はなく、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修により期待される水分浸透抑制効果およびコンクリートの乾湿挙動におよぼす影響は不明確である。

シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修後の水分浸透抑制効果と乾湿挙動の評価は、ひび割れ補修後の水分移動解析に基づいた耐久性の将来予測手法の確立において必要不可欠である。そのため、図-1.3 に示すようなひび割れ補修後の水分浸透抑制効果の検討より、実環境下におけるシラン系表面含浸材の長期的な水分浸透抑制効果について明らかにし、その効果を生み出すメカニズムについて検討する必要があると思われる。

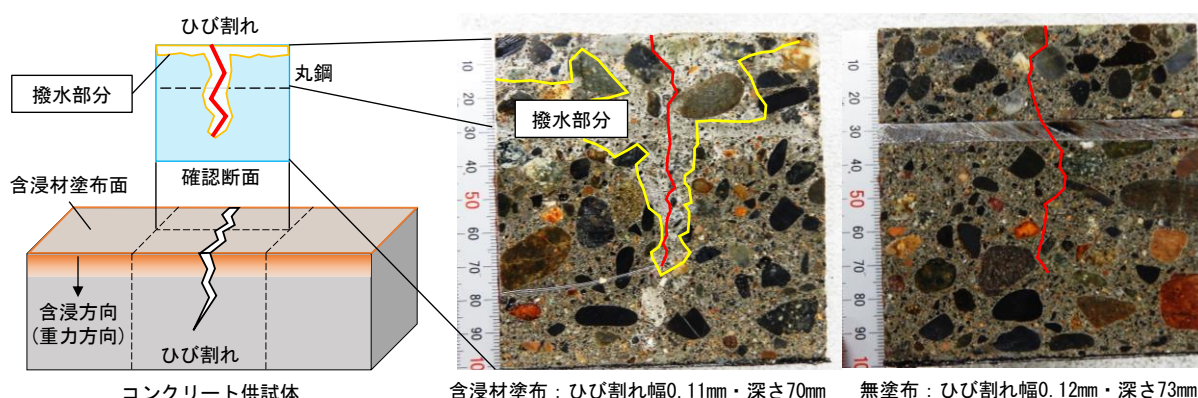


図-1.2 ひび割れを有するコンクリート断面の撥水状況

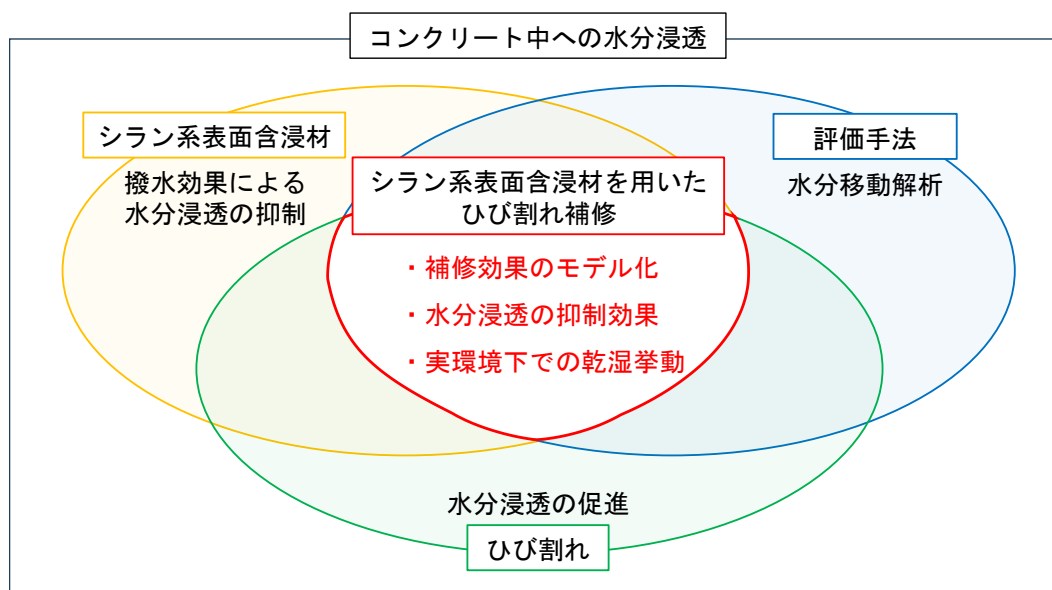


図-1.3 水分浸透に関するシラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修のイメージ図



### 1.1.4 本研究の目的および方法

以上のことから，本研究では，シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による実環境下での水分浸透抑制効果の検証とその効果を生み出すメカニズムの解明を目的とする．さらに，シラン系表面含浸材によるひび割れ補修効果の評価手法を提案することで，水分浸透の抑制によるコンクリート構造物の耐久性向上の合理化を図る．

本研究では，図-1.4 に示すように，シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果とシラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修がコンクリートの乾湿挙動および吸水移動におよぼす影響を室内実験および屋外暴露実験より検討する．その後，温湿度の変動・降雨・ひび割れの影響を考慮したコンクリートの水分移動解析によりシラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果をモデル化することで，シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による実環境下でのシラン系表面含浸材の長期的な水分浸透抑制効果とその効果を生み出すメカニズムについて明らかにする．

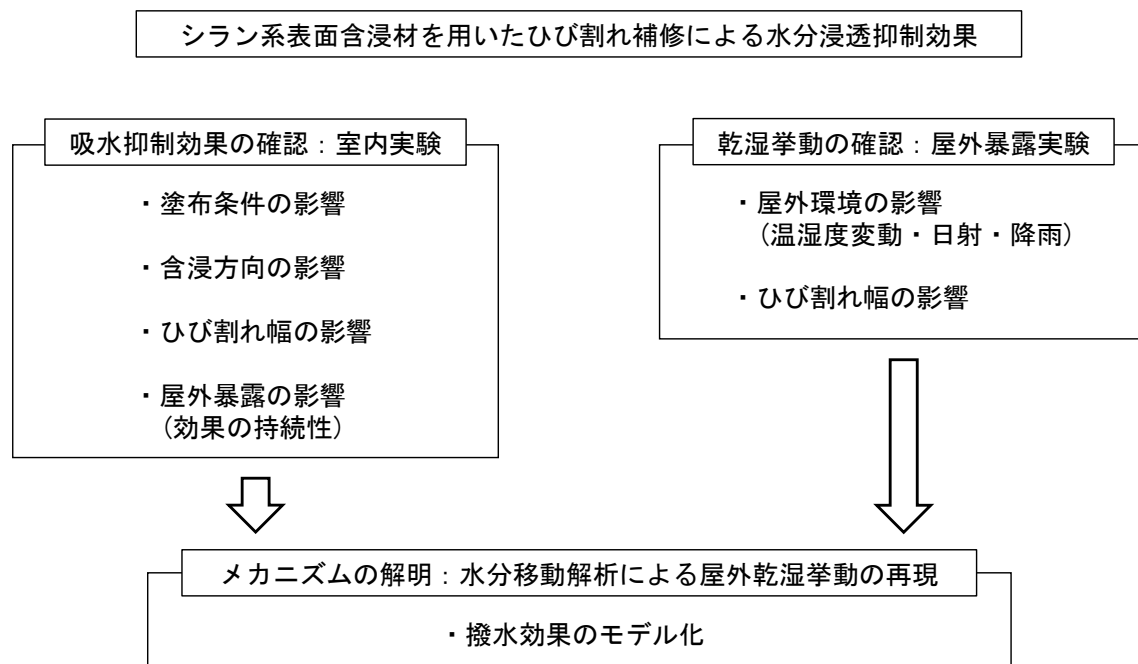


図-1.4 本研究の方法

## 1.2 本研究の基礎となる既往研究

### 1.2.1 ひび割れがコンクリート中の水分浸透におよぼす影響に関する研究

ひび割れがコンクリート中の水分浸透に影響をおよぼす代表的な環境として、降雨により乾湿が繰り返される環境が挙げられる。柳らは、ひび割れを有するコンクリートの降雨時の吸水現象に着目し、コンクリート中に埋め込んだ温湿度センサーを用いて乾湿を繰り返す模擬環境でのコンクリート中の水分分布の測定結果から、ひび割れ幅が大きいほどコンクリート内部への水分の浸透が速くなり、コンクリート深部への水分浸透が促進されることを報告している[1.17]。同様に、Zhang らは、曲げひび割れを有するモルタルおよびコンクリートのひび割れへの吸水を対象とし、中性子ラジオグラフィによる吸水浸透過程の観測結果から、液状水がコンクリートのひび割れに接すると毛管現象によりひび割れ内部に吸水されること、ひび割れ内部の水分はコンクリート中に吸水されること、ひび割れ内部からの吸水により鉄筋周辺の界面に水分が浸透することを報告している[1.18], [1.19]。

これらのひび割れに起因する水分移動現象に関して、Hien らは、曲げひび割れを有するコンクリートを対象とし、乾湿繰り返しによる水分および塩化物の侵入・拡散におよぼすひび割れの影響を実験および数値解析により評価した。数値解析において、ひび割れ空間および鉄筋周辺の空隙への水分の侵入を平行平板間の毛管吸水現象としてモデル化し、ひび割れ面からの乾燥速度を表す無次元定数  $\beta_{cr}$  を提案している。これにより、ひび割れ幅が大きいほどひび割れを侵入経路とした吸水による水分浸透が促進され、塩化物の侵入量が大きくなることを報告している[1.20]。

工藤らは、1本あるいは複数本の曲げひび割れを有するコンクリートを用いた乾湿繰り返し試験を行い、コンクリートの吸水・乾燥挙動におよぼすひび割れの影響を実験と水分移動解析により検討した。実験結果より、ひび割れ幅が大きいほど、吸水と乾燥が促進されることを明らかにした。また、コンクリート中とひび割れ内の水分移動およびそれらの相互作用を考慮した水分移動解析手法を提案し、乾湿が繰り返される環境下でのコンクリートの長期的な乾湿挙動にひび割れがおよぼす影響を検討している[1.21]。

これらの実験的あるいは解析的検討により、乾湿が繰り返される環境では、ひび割れ幅が大きいほど、ひび割れからの吸水によりコンクリート中への水分浸透が促進されること、乾燥が促進されることが明らかとなり、ひび割れを考慮した水分移動解析手法が構築されている。

### 1.2.2 シラン系表面含浸材によるコンクリートの表面保護に関する研究

シラン系表面含浸材の撥水層を形成する主成分は、アルキルアルコキシシランモノマーあるいはオリゴマーまたはこれらの混合物である。撥水層を形成する主な流れを以下に示す。

- ① コンクリート表層部の細孔に対して毛管力によって浸透する。
- ② 溶媒が乾燥し、シラン系表面含浸材の主成分がコンクリート中の水分と加水分解反応を起こし、アルキルシラノールを生成する。
- ③ アルキルシラノールは、コンクリート表層部にあるヒドロキシ基と脱水反応を起こして縮合し、アルキルシラン基(Si-R)をもつシロキサン結合を形成する。
- ④ アルキルシラン基は疎水性のため、シロキサン結合が形成されたコンクリート表面は疎水層で覆われ、撥水効果が発現する。

シラン系表面含浸材による撥水効果を利用したコンクリート構造物の表面保護に関する研究は、ASR による膨張対策としての表面処理をはじめとして、水分浸透の抑制による塩害や凍害対策など多くの知見が蓄積されており、既往研究を表-1.2、表-1.3、表-1.4 に示す。

先ず、シラン系表面含浸材を用いた ASR 膨張の抑制に関する検討として、Lenzner and Ludwing は、外部からの水分供給の遮断が ASR 反応の抑制に有効であることに着目し、アルキルアルコキシシランを主成分としたシラン系表面含浸材を塗布したことで ASR 膨張が抑制されたことを報告している[1.22]。日本国内では、宮川らは、各種表面処理による透湿度、透湿度および ASR 膨張の関係を実験的に検討し、シラン系表面含浸材を塗布した場合は透湿度が小さく、透湿度が大きくなることから ASR 膨張の抑制に有効であることを報告している[1.23]。その後、水分浸透の抑制による ASR 膨張の抑制に関する検討が行われ、田中らや久保らは、室内環境および屋外環境でシラン系表面含浸材塗布後の ASR 膨張と質量変化を 1~3 年間測定し、シラン系表面含浸材の撥水効果による水分浸透の抑制および水分逸散の維持であることを報告している[1.14], [1.25]。

ASR に関する検討に対応して屋外環境でのシラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果に関する検討も行われている。久保らは、シラン系表面含浸材の分子量の違いと塗布時のコンクリートの含水状態の違いが撥水層の形成と水分浸透の抑制効果におよぼす影響を屋外暴露期間中の質量変化より検討し、塗布時のコンクリートの含水状態が高いと撥水層が小さくなること、紫外線による表面の撥水層の減少と乾湿および酸化作用による内部の撥水層の減少が示唆されたこと、屋外暴露 2 年後も水分浸透抑制効果は維持されることを報告している[1.25]。古賀らは、撥水効果による水分浸透の抑制がコンクリート内部の水分状態におよぼす影響についてセラミックセンサを埋め込んだコンクリートを屋外環境に暴露することで検討した。その結果、シラン系表面含浸材を塗布することで降雨による水分浸透が抑制され、コンクリート表面から 100mm 程度の範囲の含水率を抑制できること、含浸材を塗布した場合も降雨時に表面付近の含水率が上昇することを報告している[1.26]。また、遠藤らは、寒冷環境下での水分浸透抑制効果に着目し、凍結融解試験と寒冷環境かつ沿岸部での屋外暴露実験を実施し、シラン系表面含浸材の吸水抑制効果によるスケールリングの抑制と塩化物イオンの浸透抑制を報告している[1.27]。

シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果による塩化物イオンの浸透抵抗性の向上に関する検討では、Vries らは、10%NaCl 水溶液の吸水が 24 時間、20°C50%RH での乾燥が 6 日間で 1 サイクルとなる乾湿繰り返しを最大 12 か月間実施し、塩化物イオンの浸透量が無塗布の場合と比べて

1/5 に低下したことを報告している[1.28]. 久保らは、部材端部の形状に着目し、鉛直面および水平面の違いがシラン系含浸材と塩分浸透におよぼす影響について NaCl 水溶液の吸水と乾燥を繰り返すことで検討した. その結果、シラン系表面含浸材を塗布することで塩分浸透を抑制できること、鉛直面と水平面の違いが抑制効果におよぼす影響は小さいことを報告している[1.29].

シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果は 5~10 年間程度持続することが報告されている. 緑川らは、塩害環境下での 5 年間の屋外暴露実験から塩化物イオンの浸透を抑制できることを報告している[1.30]. 櫻庭らは、沿岸部に 5 年間暴露された試験体の追跡調査を実施し、含浸深さと塩分浸透の抑制効果が維持されること、無塗布の場合と比べて中性化が進行しやすい傾向にあること、塗布後の含浸深さが 3mm 前後と小さい場合は撥水層が消失している場合があることを報告している[1.31]. 鈴木らは、塗布後 10 年以上経過した塗布面に対して表面の撥水性および透水性を確認し、材料によって撥水性や透水性が低下・消失する場合と持続している場合があることを報告している[1.12]. 遠藤らは、塗布後 15~16 年経過した橋梁の地覆コンクリートへの追跡調査を実施し、材料によっては撥水層が残存していること、水分逸散の維持により中性化が進行する傾向を示すことを報告している[1.32]. また、Hosoda らは、キセノンアークランプ式対候性試験により屋外暴露 2.8 年相当の紫外線劣化に対する抵抗性を検討し、吸水および塩分浸透抑制効果が持続していることを報告している[1.33].

シラン系表面含浸材による中性化の進行に関して、鶴田らは、中性化促進環境での乾燥と塩分浸漬の繰り返し実験より中性化と塩分浸透の複合劣化がシラン系表面含浸材におよぼす影響について検討し、シラン系表面含浸材の撥水効果による水分浸透の抑制と水分逸散の維持により中性化が促進されることを報告している[1.34]. 叶らは、屋外暴露実験と室内促進試験より中性化と塩分浸透について検討し、シラン系表面含浸材の撥水効果により塩分浸透が抑制されたこと、中性化促進試験ではシラン系表面含浸材による中性化の進行が確認されたこと、屋外環境では気象条件によって中性化の進行速度が変化したことを報告している[1.35].

シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果におよぼす塗布時のコンクリートの水分状態に関する検討では、Hosoda らは、塗布直前に 2 分間の吸水を行うことで水分状態を変化させた室内実験より、短時間の吸水による湿潤状態では含浸深さにおよぼす影響は小さく、吸水抑制効果は変化しないことを報告している[1.33]. 飯野らは、塗布時の水分状態と塗布後の湿度の影響に着目した低圧・高圧水下の透水実験を実施している. その結果、含浸材塗布時のコンクリートが湿潤状態にあると含浸深さが小さくなること、塗布後の湿度が含浸深さにおよぼす影響は小さいこと、シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果は 0.4MPa の高水压下での透水に対しても効果を発揮することを報告している[1.36].

シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果を設計に反映するために数値解析による評価も試みられている. 遠藤ら[1.32]や緑川ら[1.30]は、2 層材料による塩化物イオンの見かけの拡散係数を算出し、含浸部の見かけの拡散係数は無塗布部と比べて 1/2~1/100 程度低下したことを報告し、鉄筋位置での塩化物イオン量を指標とした補修性能評価手法を提案している. Sadouki and Wittmann は、コンクリート中の水分浸透および水分逸散に関して、水分逸散実験よりシラン系表面含浸材は水分逸散の速度を低下させることを確認し、相対湿度に応じた塗布部と含浸部の水分拡散係数を算出し、含浸部の水分拡散係数は低下することを報告している[1.37]. また、本馬らは、

室内および屋外環境での暴露試験より降雨による吸水が抑制されることを確認し、含浸部分においてコンクリートと水滴の接触角の増大させることにより細孔構造に基づいた水分移動解析での吸水抑制効果を表現している[1.38]. そのほかに、遠藤らはシラン系表面含浸材の塗り替え年数を10,30年と仮定したライフサイクルコストの試算を試みている[1.27].

これらの多くの検討により、シラン系表面含浸材の表面保護効果は含浸部の撥水性によって得られ、その効果は、外部からの水分・塩分浸透の抑制とコンクリート内部の水分逸散の維持であること、水分逸散の維持により中性化が進行すること、撥水層が維持されることで5~10年以上効果が持続することが明らかになった。シラン系表面含浸材の評価手法は国内外で検討され[1.39], [1.40], 補修工法の1つとして整備されている[1.2], [1.3], [1.4], [1.41]. しかし、数値計算による実環境での撥水性の影響の評価を試みた知見は少ない。

表-1.2 シラン系表面含浸材によるコンクリートの表面保護に関する研究(その1)

著者 文献番号	検討の種類	主成分 塗布量 含浸深さ (不明：表記せず)	確認された効果 (解析モデルの有無)
ASR 膨張の抑制			
Lenzner and Ludwing(1978) [1.22]	室内実験	アルキルアルコキシシラン 115g/m <sup>2</sup>	ASR 膨張の抑制
宮川ら(1991) [1.23]	室内実験	シラン 400ml/m <sup>2</sup>	透水性の抑制, 透湿性の維持, ASR の膨張抑制
田中ら(1998) [1.24]	室内実験 屋外暴露 (約1年)	アルキルアルコキシシラン 300g/m <sup>2</sup>	水分浸透の抑制, 水分逸散の維持, ASR 膨張の抑制, 鋼材腐食の抑制
久保ら(2001) [1.14]	室内実験 屋外暴露 (約3年)	アルキルアルコキシシラン 300g/m <sup>2</sup>	水分浸透の抑制, 水分逸散の維持, ASR 膨張の抑制, 効果の持続性(3年間)
屋外での水分浸透の抑制			
久保ら(2001) [1.25]	屋外暴露 (約2年)	アルキルアルコキシシラン 1~3mm (W/C 0.6)	水分浸透の抑制, 表面および内部の撥水層の減少, 効果の持続性(2年間)
古賀ら(2009) [1.26]	屋外暴露 (約1年)	シラン 200g/m <sup>2</sup>	水分浸透の抑制, 水分逸散の維持, 降雨時の表面の含水率の一時的な上昇
遠藤ら(2011) [1.27]	室内実験 屋外暴露 (約4~5年)	シラン・シロキサン 200g/m <sup>2</sup> 2~3mm (W/C 0.5)	水分浸透の抑制, スケーリングの抑制, 塩分浸透の抑制 無塗布部と含浸部の2層の塩化物イオン拡散係数の算出

表-1.3 シラン系表面含浸材によるコンクリートの表面保護に関する研究(その2)

著者 文献番号	検討の種類	主成分 塗布量 含浸深さ (不明：表記せず)	確認された効果 (解析モデルの有無)
塩化物イオンの浸透抑制			
Veris ら(1997) [1.28]	室内実験	シラン 160ml/m <sup>2</sup> 2mm (W/C 0.5)	塩分浸透の抑制
久保ら(2015) [1.29]	室内実験	シラン・シロキサン 200g/m <sup>2</sup>	塩分浸透の抑制，鉛直面と水平面の違いによる影響は小さい
効果の持続性			
緑川ら(2011) [1.30]	屋外暴露 (約 5 年)	シラン 210g/m <sup>2</sup> 0.4mm (W/C 0.35) 1.0mm (W/C 0.475)	塩分浸透の抑制，効果の持続性(5 年間) 無塗布部と含浸部の 2 層の塩化物イオン拡散係数の算出
櫻庭ら(2023) [1.31]	屋外暴露 (約 5 年)	シラン 200~400g/m <sup>2</sup> 1~10mm (W/C 0.55)	水分浸透の抑制，塩分浸透の抑制，中性化の進行，効果の持続性(5 年間)
鈴木ら(2019) [1.12]	屋外暴露 (約 10 年)	アルキルアルコキシシラン 250g/m <sup>2</sup> (W/C 0.5)	水分浸透の抑制，塩分浸透の抑制，材料によって効果の持続性に差が生じた(10 年間)
遠藤ら(2022) [1.32]	屋外暴露 (約 15 年)	アルキルアルコキシシラン 200~300g/m <sup>2</sup> 2~3mm (W/C 0.45)	塩分浸透の抑制，中性化の進行，スケーリングの抑制，材料によって効果の持続性に差が生じた(15 年間)
Hosoda ら (2010) [1.33]	室内実験	アルキルアルコキシシラン 400g/m <sup>2</sup> 4~10mm (W/C 0.35~0.65)	水分浸透の抑制，塩分浸透の抑制，効果の持続性(キセノンアークランプ式対候性試験屋外 2.8 年相当)
中性化の進行			
鶴田ら(2021) [1.34]	室内実験	アルコキシシラン 300g/m <sup>2</sup>	塩分浸透の抑制，中性化の進行
叶ら(2005) [1.35]	室内実験 屋外暴露 (約 2 年)	シラン 150~200g/m <sup>2</sup> 1~2mm (W/C 0.545)	水分浸透の抑制，塩分浸透の抑制，中性化の進行

表-1.4 シラン系表面含浸材によるコンクリートの表面保護に関する研究(その3)

著者 文献番号	検討の種類	主成分 塗布量 含浸深さ (不明：表記せず)	確認された効果 (解析モデルの有無)
含浸材塗布時のコンクリートの水分状態			
飯野ら(2012) [1.36]	室内実験	シラン 100~400g/m <sup>2</sup> 0.2~1.0mm (W/C 0.55)	低圧・高水圧下での透水の抑制，塗布時にコンクリートが湿潤状態の場合は含浸深さが小さくなる
数値解析による評価			
Sadouki and Wittmann(1998) [1.37]	室内実験 (乾燥のみ)	シラン 1mm (W/C 0.4) 4mm (W/C 0.5)	水分逸散の速度低下 無塗布部と含浸部の2層の水分拡散係数による水分移動計算
本馬ら(2011) [1.38]	室内実験 屋外暴露実験 (約1年)	シラン 600g/m <sup>2</sup> (W/C 0.5)	水分浸透の抑制，水分逸散の維持 細孔構造モデルに基づく水分移動解析 (吸水移動のみ低減)
その他(指針など)			
Bashher(1997) [1.39]		各種評価手法の紹介	
伊達ら(2012) [1.40]		土木学会規格と欧州規格との比較	
土木学会(2022) [1.2]		コンクリート標準示方書 [維持管理編：標準] 7章	
土木学会(2005) [1.3]		コンクリートライブラリー119 表面保護工法 設計施工指針(案)	
日本コンクリート工学会(2022) [1.4]		コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2022 第6章	
土木研究所(2022) [1.41]		コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル 2022年版	

### 1.2.3 シラン系表面含浸材によるひび割れ補修に関する研究

シラン系表面含浸材によるひび割れ補修効果に関する既往研究を表-1.5, 表-1.6に示す.

シラン系表面含浸材の一般的な性能評価は表面含浸材の試験方法 JSCE-K 571-2013[1.42]で提案されている. JSCE-K 571-2013 に準じた吸水試験や透水試験では, 澤田らは, ひび割れ導入後にシラン系表面含浸材を塗布した試験体を用いて1週間の水中浸漬による吸水試験を実施し, ひび割れ幅 0.1~0.2mm においてひび割れからの吸水が抑制されることを確認した. また, 温度ひび割れが生じた部材のコアを用いて1週間の透水試験を実施し, ひび割れ幅 0.05mm~0.2mm において, ひび割れ内部にシラン系表面含浸材が含まれていること, ひび割れがある場合の透水抑制効果は小さいことを報告している[1.6]. 久保らは, ひび割れ部分のみを対象に, 作用水頭 250mm の塩水を用いた1週間の透水試験を実施し, ひび割れ幅 0.4mm 深さ 50mm において, 含浸材がひび割れ先端まで含浸していたこと, ひび割れを有するコンクリートの透水量を抑制したが, ひび割れからの塩分浸透の抑制効果は確認できなかったことを報告している[1.7].

シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修におけるひび割れ部の水分浸透や塩分浸透がおよぼす影響に関して, Wittmann らは, 曲げひび割れを有するコンクリートを対象に塩分浸透実験と中性子ラジオグラフィによる吸水浸透過程の観測を行い, 曲げひび割れにシラン系表面含浸材を塗布することで, コンクリート表面およびひび割れ面からの塩分浸透が抑制されたこと, 72時間の吸水後もひび割れ内部への吸水浸透がほとんどないことを確認している. また, 塗布後にひび割れが生じた場合では, ひび割れ発生後にシラン系表面含浸材を塗布した場合と比べて吸水・塩分浸透の抑制効果が低下することを報告している[1.8], [1.9].

ひび割れ発生前後でのシラン系表面含浸材の塗布が補修効果におよぼす影響に関して, 安田らは, ひび割れを有するコンクリートに2~20mmの水頭を作用させた透水試験を実施し, ひび割れ導入後にシラン系表面含浸材を塗布した場合は作用水頭が10mm以下かつひび割れ幅0.05mm~0.2mmの範囲で透水を抑制できること, シラン系表面含浸材を塗布後にひび割れを導入した場合はひび割れ幅0.2mmの透水をほとんど抑制できないことを報告している[1.10].

細田らは, コンクリート表層部に生じるマイクロクラックが吸水抵抗性に影響をおよぼすことに着目し, マイクロクラックが生じる前後でのシラン系表面含浸材の塗布による水分浸透抑制効果を表面吸水試験により検討した. その結果, マイクロクラックの進展とともに表層部の吸水抵抗性が著しく低下すること, マイクロクラックの進展にかかわらずシラン系表面含浸材を塗布した場合は吸水抵抗性が向上することを報告している[1.11]. また, 鈴木らは, ひび割れ幅0.2mm以下の微細なひび割れが生じたコンクリート壁に対して表面吸水試験を実施し, 無塗布と比べて吸水量が抑制されたことを報告している[1.12].

ASR膨張によって生じるひび割れを対象とした場合では, 古賀, 渡辺は, ASR膨張によるひび割れ発生後にシラン系表面含浸材を塗布したコンクリートの屋外暴露実験を行い, コンクリートに埋め込んだセラミックセンサから内部の水分状態について検討した結果, 塗布後にひび割れが進展しない場合は, 水分逸散が維持され水分浸透が抑制されることを報告している[1.13]. 一方, 久保らは, シラン系表面含浸材塗布後にASR膨張によるひび割れが進展した場合では, ひび割れが進展しない場合と比べて吸水抑制効果が著しく低下することを報告している[1.14].

Dai らは, 飛沫帯を模擬した吸水と乾燥を繰り返す塩害環境下でひび割れ導入前後でのシラン



系表面含浸材の塗布が質量変化および塩分浸透におよぼす影響について検討した。その結果、ひび割れ幅 0.15mm 前後において、ひび割れ導入後にシラン系表面含浸材を塗布した場合は吸水が抑制され、ひび割れ内部への塩化物の侵入も抑制されたこと、シラン系表面含浸材塗布後にひび割れを導入した場合は吸水抑制効果が低下し、ひび割れ内部に塩化物イオンが侵入したことを報告している。また、ひび割れ内部で鉄筋が露出する場合は、鉄筋までシラン系表面含浸材が含浸することで鋼材腐食を抑制できることも報告している[1.15]。

Lunk and Wittmann は、シラン系表面含浸材を塗布したひび割れを有するコンクリートの吸水実験から、ひび割れ幅と含浸深さをを用いた吸水係数の推定式を検討し、ひび割れの影響およびシラン系表面含浸材による補修効果を提案している[1.16]。

以上の研究より、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修効果は、ひび割れを含めた含浸部の撥水性により得られる水分浸透の抑制や塩分浸透の抑制であることがわかる。しかし、表面含浸材の種類や粘度、実験条件によって報告される補修効果の程度が異なることから、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による水分浸透抑制効果および実環境下での乾湿挙動を実験および解析により定量的に評価した研究は見当たらない。

よって、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による実環境下での水分浸透抑制効果を実験により検証し、その効果を生み出すメカニズムをひび割れを考慮したコンクリート中の水分移動解析に組み込み、実環境下での乾湿挙動を再現することでシラン系表面含浸材によるひび割れ補修効果の評価手法を提案する。

表-1.5 シラン系表面含浸材によるひび割れ補修に関する研究(その1)

著者 文献番号	検討・ひび割れの種類	主成分 塗布量 含浸深さ	確認されたひび割れに対する補修効果 解析モデルの有無
澤田ら(2010) [1.6]	室内実験 模擬・割裂ひび割れ	シラン 150~200g/m <sup>2</sup>	ひび割れ補修効果あり：ひび割れ面からの吸水抑制効果(ひび割れ幅の影響は検討できず) ひび割れ補修効果なし：透水の抑制効果(作用水頭 375mm)
久保ら(2016) [1.7]	室内実験 模擬ひび割れ	シラン・シロキサン 200g/m <sup>2</sup>	ひび割れ補修効果あり：透水の抑制 ひび割れ補修効果なし：塩分浸透 (作用水頭 250mm, ひび割れ発生後塗布：ひび割れ幅 0.4mm まで)
Wittmann(2009) [1.8]	室内実験 曲げひび割れ	シラン 1 時間含浸 8.9mm (W/C 0.5)	ひび割れ補修効果あり：ひび割れからの塩分浸透の抑制(ひび割れ幅 0.1~0.4mm まで) 塗布後ひび割れ発生の場合は、ひび割れ発生後塗布と比べて抑制効果が低下

表-1.6 シラン系表面含浸材によるひび割れ補修に関する研究(その2)

著者 文献番号	検討・ひび割れの種類	主成分 塗布量 含浸深さ	確認されたひび割れに対する補修効果 解析モデルの有無
Wittmann(2013) [1.9]	室内実験 曲げひび割れ	シラン 100,400g/m <sup>2</sup> 2.2,4.4mm (W/C 0.6)	ひび割れ補修効果あり：ひび割れ部への吸水の抑制 中性子ジオグラフィによる水分浸透の可視化
安田ら(2002) [1.10]	室内実験 模擬ひび割れ	シラン・シロキサン 200g/m <sup>2</sup>	ひび割れ補修効果あり：透水の抑制(作用水頭 2~20mm, ひび割れ発生後塗布：ひび割れ幅 0.2mm まで, 塗布後ひび割れ発生：ひび割れ幅 0.1mm まで)
細田ら(2009) [1.11]	室内実験 マイクロクラック	シラン・シロキサン, アルキルアルコキシシラン 200,400g/m <sup>2</sup>	ひび割れ補修効果あり：吸水の抑制(マイクロクラックの進展前・後に塗布)
鈴木ら(2019) [1.12]	屋外実験 収縮ひび割れ	シラン・シロキサン 200g/m <sup>2</sup>	ひび割れ補修効果あり：吸水の抑制(収縮ひび割れ発生後塗布)
古賀, 渡辺 (2012) [1.13]	屋外暴露 (約2年) ASR ひび割れ	シラン, シラン・シロキサン 200g/m <sup>2</sup>	ひび割れ補修効果あり：吸水抑制効果の維持(ASR 膨張によるひび割れ発生後に塗布した場合)
久保ら(2001) [1.14]	室内実験 屋外暴露 (約3年) ASR ひび割れ	アルキルアルコキシシラン 300g/m <sup>2</sup>	ひび割れ補修効果なし：ひび割れによる吸水抑制効果の低下(塗布後に ASR 膨張のひび割れが発生した場合)
Dai ら(2010) [1.15]	屋外実験 割裂ひび割れ	シラン, シラン・シロキサン 100~500g/m <sup>2</sup> 2~25mm (W/C 0.68)	ひび割れ補修効果あり：水分浸透の抑制, 塩分浸透の抑制(ひび割れ発生後塗布：ひび割れ幅 0.15mm まで)
Lunk and Wittmann(1998) [1.16]	室内実験 曲げひび割れ	シラン 2.5~7.5mm(W/C 0.5)	ひび割れ補修効果あり：吸水の抑制(ひび割れ発生後塗布：ひび割れ幅 0.8mm まで) ひび割れ幅と含浸深さの関係を吸水係数として定式化

### 1.3 本論文の構成

第1章では、本研究の背景と目的、方法および本研究の基礎となる研究について述べた。

第2章では、シラン系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体を用いた室内吸水実験より、シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果を検討する。また、曲げひび割れを導入したコンクリート供試体を用いた室内吸水実験より、シラン系表面含浸材のひび割れに対する含浸性と水分浸透抑制効果について検討する。

第3章では、曲げひび割れを導入後にシラン系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体の屋外暴露実験より、実環境下におけるシラン系表面含浸材の長期的な水分浸透抑制効果およびコンクリート供試体の乾湿挙動について検討する。

第4章では、ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布後、屋外環境に1年以上暴露した試験体を用いた吸水実験より、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による吸水抑制効果の持続性について検討する。

第5章では、第2章、第3章、第4章の実験結果で得られた知見より、シラン系表面含浸材の撥水効果・温湿度の変動・降雨・ひび割れの影響を考慮したコンクリートの水分移動解析を行い、シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果のモデル化と補修効果の再現を行う。

第6章では、本研究で得られた知見を総括する。

## 第1章の参考文献

- [1.1] 土木学会：2022年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2022.
- [1.2] 土木学会：2022年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，2022.
- [1.3] 土木学会：コンクリートライブラリー119号 表面保護工法 設計施工指針（案），2005.4.
- [1.4] 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針2022, 2022.
- [1.5] 土木学会：コンクリートライブラリー137号 けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案），2012.7.
- [1.6] 澤田巧，福手勤，内藤英晴，小笠原哲也，酒井貴洋：表面含浸材のひび割れ改質効果に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 10, pp. 413-418, 2010.10.
- [1.7] 久保善司，阿部花香，菊池創太：ひび割れ部におけるシラン系含浸材の適用性に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 16, pp. 545-550, 2016.10.
- [1.8] Wittmann, F. H., Zhao, T., Ren, Z. and Guo, P.: Influence of surface impregnation with silane on penetration of chloride into cracked concrete and on corrosion of steel reinforcement, *International Journal of Modelling Identification and Control*, Vol. 7, No. 2, 2009.
- [1.9] Wittmann, F. H., Zhao, T., Li, W. and Zhang, P.: Increasing service life of reinforced concrete structures in marine environment by water repellent treatment, *Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 19, No. 1, pp. 39-48, 2013.
- [1.10] 安田和弘，渡邊賢三，横関康祐，坂田昇：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，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24, No. 1, pp. 705-710, 2002.
- [1.11] 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およぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No. 63, pp. 196-203, 2009.
- [1.12] 鈴木世二，浅野康寛，戸高英二：シラン系表面含浸材塗布後の長期経過観察による吸水抑制評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41, No. 1, pp. 1709-1714, 2019.
- [1.13] 古賀裕久，渡辺博志：コンクリート用表面含浸材の含水率低減効果に関する屋外暴露試験，土木技術資料，Vol. 54, No. 3, pp. 26-29, 2012.3.
- [1.14] 久保善司，服部篤史，栗原慎介，宮川豊章：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，土木学会論文集，No. 690, pp. 95-107, 2001.11.
- [1.15] Dai, J.-G., Akira, Y., Wittmann, F. H., Yokota, H. and Zhang, P.: Water repellent surface impregnation for extension of service life of reinforced concrete structures in marine environments: The role of cracks, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 32, pp. 101-109, 2010.
- [1.16] Lunk, P. and Wittmann, F. H.: The behavior of cracks in water repellent concrete structures with respect to capillary water transport, *2nd International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials (Hydrophobe II)*, pp. 63-76, 1998.
- [1.17] 柳東佑，高正遠，兼松学，野口貴文：打放しコンクリート中の水分分布におよぼす降雨の影響，日本建築学会構造系論文集，No. 619, pp. 21-26, 2007.9.
- [1.18] Zhang, P., Wittmann, F.H., Zhao, T. and Lehmann, E.H.: Neutron imaging of water penetration into cracked steel reinforced concrete, *Journal of Physica B*, Vol. 405, pp. 1866-1871, 2010.1.
- [1.19] Zhan, P., Wittmann, F.H., Haist, M., Muller, H.S., Vontobel, P. and Zhao, J.: Water Penetration into Micro-cracks in Reinforced Concrete, *Journal of Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 20, No. 2, pp. 85-94, 2014.

- [1.20] Hien, N. T. and Shimomura, T.: Evaluation of critical crack width for reinforcement corrosion in RC member based on numerical simulation of transport of chloride ions in concrete, *Journal of Asian Concrete Federation*, Vol. 3, No. 2, pp. 67-81, 2017.12.
- [1.21] 工藤めい, 下村匠: コンクリート部材への水の浸透・乾燥におよぼすひび割れの影響に関する実験と数値解析, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 75, No. 3, pp. 196-207, 2019.
- [1.22] Lenzner, D., and Ludwing, U.: The Alkali Aggregate Reaction with Opaline Sandstone from Schleswig-Holstein, *Proceedings of the 4th International Conference on the Effects of Alkalies in Cement and Concrete*, 1978.3
- [1.23] 宮川豊章, 久田真, 井上晋, 藤井学: コンクリート表面処理による 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.
- [1.24] 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.
- [1.25] 久保善司, 玉井譲, 栗原慎介, 宮川豊章: シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 421-426, 2001.
- [1.26] 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.
- [1.27] 遠藤裕丈, 田口史雄, 宮本修司, 村中智幸, 後藤浩之, 林大介, 坂田昇, 名和豊春: シラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 67, No. 1, pp. 69-88, 2011.
- [1.28] de Vries, I. J. and Polder, R. B.: Hydrophobic treatment of concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 11, Issue 4, pp. 259-265, 1997.
- [1.29] 久保善司, 矢野峻規, 樺山好幸, 橋爪康憲: 凍結防止剤の影響を受ける橋梁端部の塩分浸透とその抑制に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol. 69, No. 1, pp. 448-454, 2015.
- [1.30] 緑川猛彦, 武田三弘, 小山田哲也, 阿波稔: 長期暴露試験による表面含浸材を塗布したコンクリートの塩化物イオン浸透性状, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 67, No. 3, pp. 451-461, 2011.
- [1.31] 櫻庭浩樹, 小沢拓弥, 佐々木巖, 古賀裕久: 各種シラン系表面含浸材の塩害環境下での適用効果に関する暴露試験, セメント・コンクリート, No.922, pp. 16-22, 2023.12.
- [1.32] 遠藤裕丈, 島多昭典: シラン系表面含浸材を塗布して 15~16 年経過した北海道の道路橋地覆コンクリートでの追跡調査, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 1, 2022.
- [1.33] Hosoda, A., Matsuda, Y. and Kobayashi, K.: Optimum Surface Protection System with Silane Type Water Repellents, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.8, No.3, pp.291-302, 2010.10.
- [1.34] 鶴田浩章, 丸山徹, 東口剛士: アミノ基を有するシラン系表面含浸材によるコンクリートの乾湿繰り返しに対する効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 1091-1096, 2021.
- [1.35] 叶健児, 守屋進, 石川一郎, 林大介: 表面含浸工法による土木構造物の耐久性向上に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 1897-1902, 2005.
- [1.36] 飯野将広, 齋藤俊克, 出村克宣: 各種表面含浸材の低圧・高圧水下における透水に対する抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1612-1617, 2012.
- [1.37] Sadouki, H. and Wittmann, F. H.: Influence of water repellent treatment on drying of concrete, 2nd

- International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials (Hydrophobe II), pp. 177-188, 1998.
- [1.38] 本馬幸治, Thynn, T. H., 下村匠 : 乾湿を受ける実環境下におけるコンクリート中の水分量におよぼす表面含浸材の効果とそのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1631-1636, 2011.
- [1.39] Basheer, P. A. M., Basheer, L., Cleland, D. J. and Long, A. E.: Surface treatments for concrete assessment methods and reported performance, *Construction and Building Materials*, Vol. 11, pp. 413-429, 1997.
- [1.40] 伊達重之, 御領園悠司, 橋本紳一郎, 宮里心一 : シラン系浸透性吸水防止材の性能評価 - 欧州規格 (EN 1504-2) との比較-, コンクリート工学, Vol. 50, No. 4, pp. 331-337, 2012.4.
- [1.41] 土木研究所 : コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル 2022 年版, 土木研究所資料, 第 4433 号, 2022.12.
- [1.42] 土木学会 : 2018 年制定 コンクリート標準示方書 [規準編] , 2018.

## 第2章

### シラン系表面含浸材の塗布条件およびひび割れに対する水分浸透抑制効果の検証

#### 2.1 はじめに

本章では、シラン系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体を用いた室内吸水実験を行い、コンクリート供試体の質量変化より、シラン系表面含浸材の塗布条件が水分浸透抑制効果について確認した。また、曲げひび割れを導入後にシラン系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体を用いて室内吸水実験を行うことで、シラン系表面含浸材のひび割れに対する含浸性と水分浸透抑制効果について検討した。

#### 2.2 塗布前の養生および乾燥期間と塗布量の影響に関する吸水実験

シラン系表面含浸材塗布前のコンクリートの養生および乾燥期間と表面含浸材の塗布量を変化させた供試体による吸水実験を行うことで、各種条件がシラン系表面含浸材の吸水抑制効果におよぼす影響について検討した。また、含浸深さを測定することで、含浸深さが吸水抑制効果におよぼす影響も検討した。

##### 2.2.1 実験方法および実験水準

吸水実験の概要図を図-2.1 に示す。吸水実験は1面のみ開放したコンクリート角柱を用意し、開放面に水を浸した吸水スポンジに当てることで吸水させた。吸水実験の流れを図-2.2 に示す。表面含浸材を塗布する供試体は養生明けから2週間の乾燥期間中に塗布し、乾燥終了後に吸水実験を開始した。吸水期間は2週間とし、吸水実験終了後、供試体は室内で2週間乾燥させた。実験期間中は定期的に質量を測定し、吸水開始時からの質量変化量より供試体の吸水量を求めた。乾燥後、湿式コンクリートカッターを用いて供試体を半分に切断し、切断面で含浸深さをJSCE-K571-2013[2.1]に準拠して測定した。

実験期間中の温湿度を図-2.3 に示す。養生明けからの乾燥期間の温湿度は、養生期間7日で平均温度18℃、湿度55%、養生期間28日で平均温度14℃、湿度48%であった。吸水実験中の平均温度は養生期間7日、28日ともに15℃であった。吸水後の乾燥期間の温湿度は、養生期間7日で平均温度16℃、湿度43%、養生期間28日で平均温度22℃、湿度24%であった。

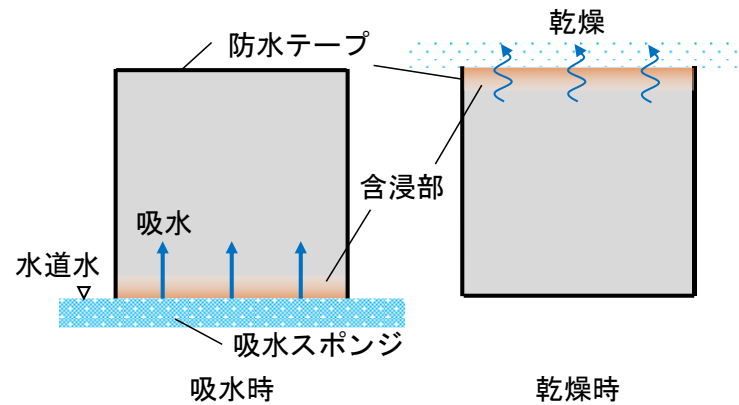


図-2.1 吸水実験の概要図

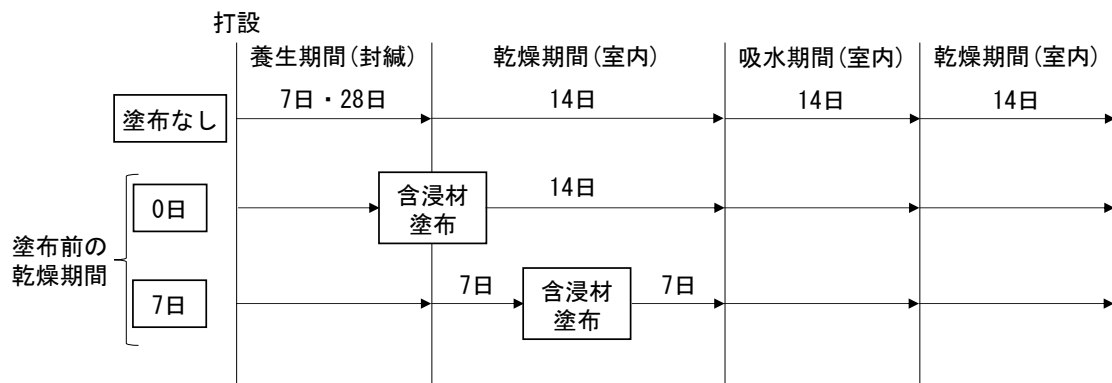


図-2.2 含浸材塗布と吸水実験の流れ

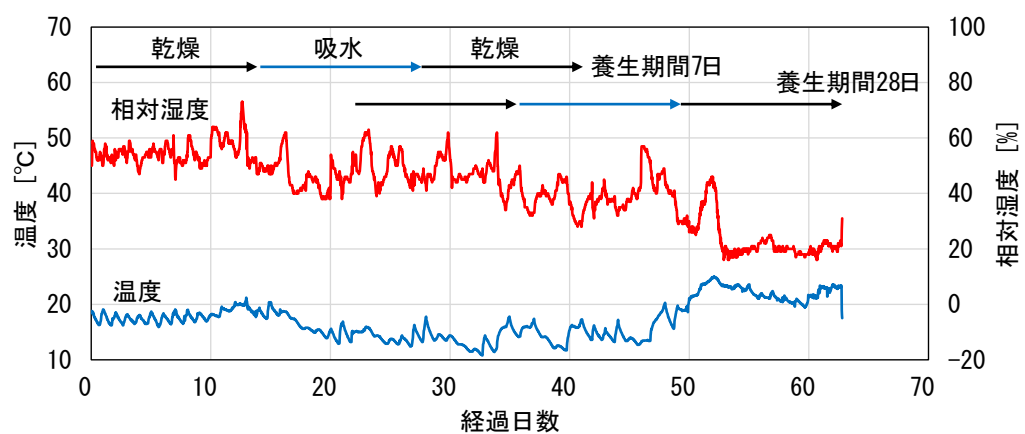


図-2.3 実験期間中の温湿度



実験水準を表-2.1に示す。養生期間は7日と28日の2水準とした。シラン系表面含浸材を塗布する時期は、養生明けから乾燥期間を設けずに塗布する場合(乾燥期間 0 日)と養生明けから7日間室内で乾燥させた後に塗布する場合(乾燥期間 7 日)の2水準を設け、表面含浸材塗布時のコンクリート表面の水分量を変化させた。シラン系表面含浸材の塗布量は、メーカー規定の標準使用量である600ml/m<sup>2</sup>を基準とし、400ml/m<sup>2</sup>と200ml/m<sup>2</sup>の3水準とした。また、参考値として、シラン系表面含浸材塗布前のコンクリート表面の水分状態を電気抵抗式水分計(ケツト科学研究所 HI-100)で測定した結果を表-2.1に合わせて示す。乾燥期間の違いによりコンクリート表面の水分状態が異なること、吸水開始時点でのコンクリート表面の水分状態の差がほとんどないことを確認した。

表-2.1 養生および乾燥期間と塗布量に関する実験水準と  
コンクリート表面の水分状態測定結果

水準名	養生期間 [日]	塗布前の 乾燥期間 [日]	塗布量 [ml/m <sup>2</sup> ]	個数	(参考値) コンクリート表面の水分値 塗布直前-吸水直前 [%]
7d-N	7	なし	0	3	なし-1.4
7d-D0-200		0	200	3	4.8-1.1
7d-D0-400			400	3	5.0-1.2
7d-D0-600			600	3	4.4-1.2
7d-D7-200		7	200	3	2.1-1.0
7d-D7-400			400	3	2.1-1.2
7d-D7-600			600	3	1.9-1.1
28d-N	28	なし	0	3	なし-1.6
28d-D0-200		0	200	3	3.6-1.6
28d-D0-400			400	3	3.7-1.7
28d-D0-600			600	3	3.2-1.7
28d-D7-200		7	200	3	1.8-1.4
28d-D7-400			400	3	1.7-1.4
28d-D7-600			600	3	2.0-1.5

## 2.2.2 供試体作成および表面含浸材の塗布方法

吸水実験に用いる供試体は、100mm×100mm×100mm のコンクリート角柱とした。実験に用いたコンクリートの配合を表-2.2 に示す。供試体は材齢 5 日で脱型し、既定の養生日数に達するまで封緘養生を行った。養生終了後、打設時の側面を表面含浸材の塗布面とし、塗布面以外は水の出入りが生じないように気密防水テープを用いた防水処理を施した。

防水処理後、2 週間の乾燥期間中に市販のアルキルアルコキシシランを主成分としたシラン系表面含浸材を塗布した。今回の実験で用いたシラン系表面含浸材の諸元を表-2.3 に示す。シラン系表面含浸材塗布時の様子を図-2.4 に示す。塗布前に紙やすり(粒度 150)で塗布面を研磨し、汚れなどを除去後、プラスチック製のヘラを使用し、所定の塗布量に達するまで繰り返し塗布した。

表-2.2 コンクリートの配合

W/C [%]	s/a [%]	Air [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
			W	C	S	G	Ad [g/m <sup>3</sup> ]
50	43.8	5.0	168	336	775	990	3.36
セメント：普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )							
細骨材：千曲川産川砂(表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> ・吸水率 1.63%)							
粗骨材：千曲川産川砂利(最大寸法 25mm・表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> ・吸水率 1.39%)							
混和材：AE 減水剤・標準形(I 種)							

表-2.3 使用したシラン系表面含浸材の諸元

主成分	pH	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	動粘性率 [mm <sup>2</sup> /s]
アルキルアルコキシシラン	11 (20℃)	0.882 (25℃)	0.9 (45.9℃)

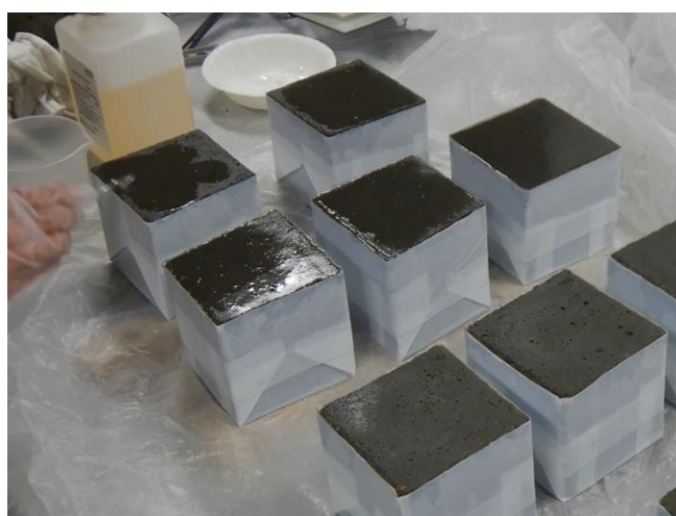


図-2.4 シラン系表面含浸材塗布時の様子

### 2.2.3 実験結果：各水準の含浸深さ

全ての水準の含浸深さの測定結果を図-2.5に示す。含浸深さは、半分に切断された供試体を水に1分間浸漬後、目視で確認された撥水領域を切断面ごとにノギスを用いて3か所測定し、2つの切断面での平均値を各供試体の含浸深さとした。また、養生期間7日の供試体の含浸深さ測定時の断面の様子を図-2.6に、養生期間28日の供試体の含浸深さ測定時の断面の様子を図-2.7に示す。

養生期間7日・乾燥期間0日では、塗布量の増加に伴い含浸深さは大きくなる傾向を示した。特に、含浸材を600ml/m<sup>2</sup>塗布した場合の含浸深さは、塗布前に7日間乾燥させた場合よりも大きくなった。これは、養生期間が短く、塗布前の乾燥期間を設けない場合、コンクリート表層部の水分が多い状態となることで含浸材の浸透速度が遅くなり、含浸材の塗布量が少ない場合は含浸深さが小さくなること、含浸材の塗布量が多い場合は規定量の塗布に要した時間が他の水準と比べて2倍程度長くなったことで内部まで浸透したことが考えられる。

一方、養生期間7日・乾燥期間7日および養生期間28日・乾燥期間0日、7日では、塗布量にかかわらず含浸深さが10mm前後を示し、水準間の差は小さかった。Hosodaらは、材齢4日で脱型後、材齢7,14,35日まで乾燥させた場合の含浸深さを確認し、乾燥期間が長いほど含浸深さが大きくなることを報告している[2.2]。今回の結果より、塗布前の乾燥期間の差が7日程度であれば含浸深さにおよぼす影響は小さいことが確認された。

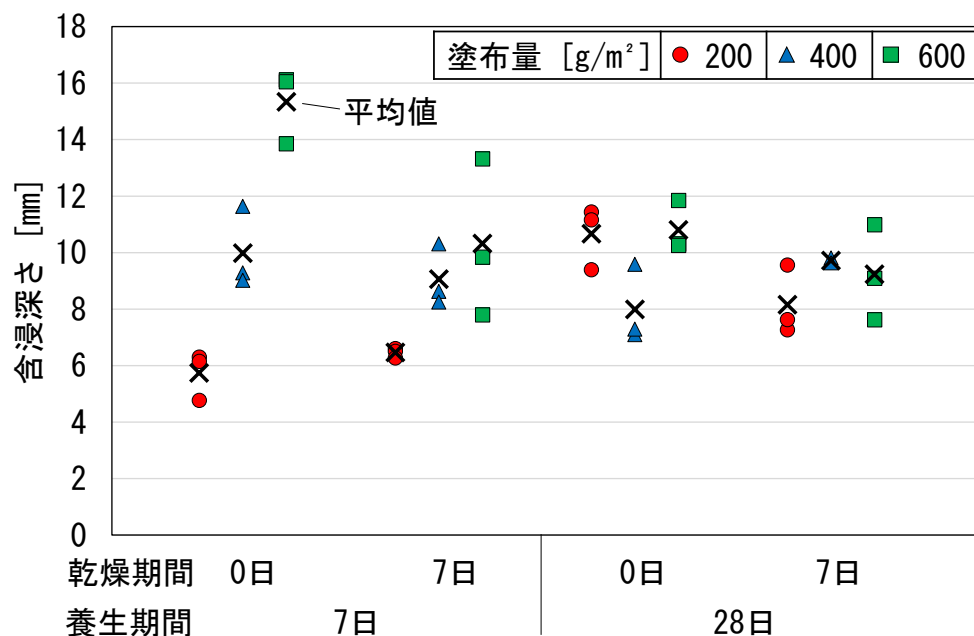


図-2.5 含浸深さの測定結果

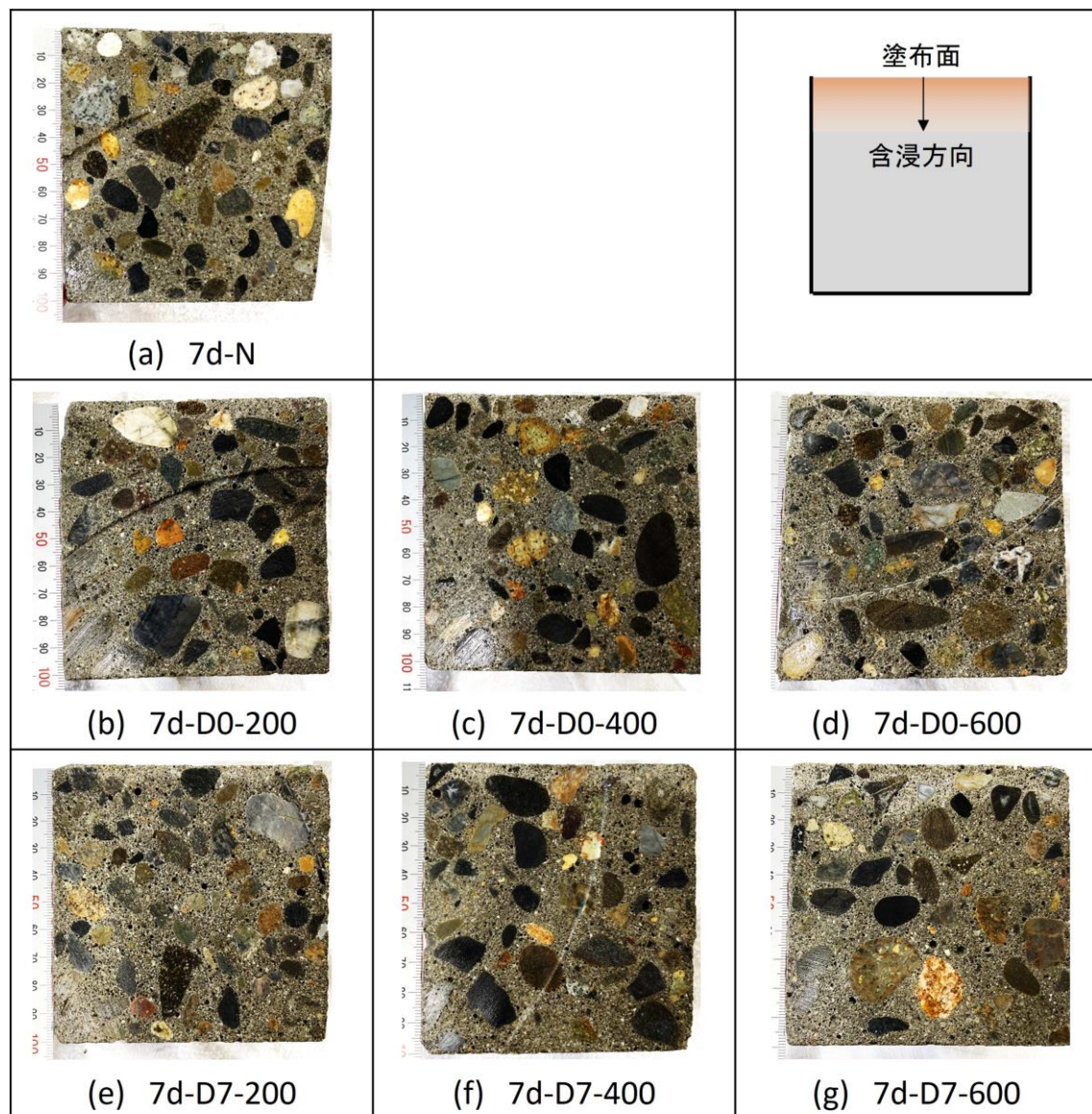


図-2.6 養生期間7日の含浸深さ測定時の断面



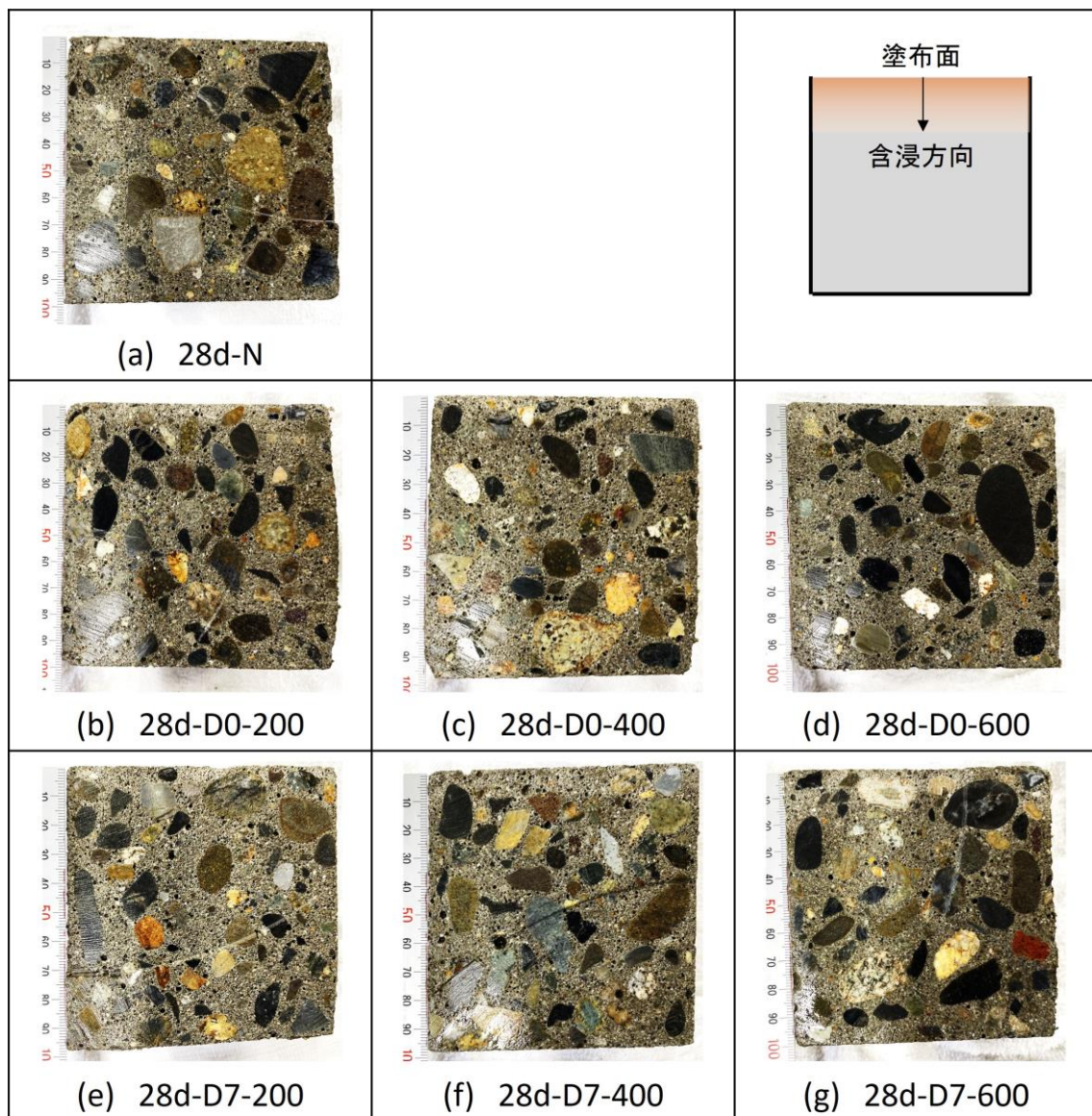


図-2.7 養生期間 28 日の含浸深さ測定時の断面

#### 2.2.4 実験結果：乾燥期間および吸水期間の質量の経時変化

養生期間 7 日・乾燥期間 0 日の供試体の実験期間中の乾燥と吸水による質量の経時変化を図-2.8 に、乾燥期間 7 日の質量の経時変化を図-2.9 に示す。養生期間 28 日・乾燥期間 0 日の質量の経時変化を図-2.10 に、乾燥期間 7 日の質量の経時変化を図-2.11 に示す。単位体積あたりの質量変化は養生明けの防水処理後からの質量の変化量を供試体体積で除した値とし、負の変化は乾燥を、正の変化は吸湿あるいは吸水を表す。各水準の質量変化は複数の供試体の平均値である。

養生明けから吸水開始までの乾燥期間では、養生期間 7 日、28 日ともに含浸材の塗布により供試体の質量は増加したが、含浸材の揮発により塗布直後は大きく乾燥し、その後の乾燥傾向は無塗布の供試体と同様の傾向を示した。含浸材を塗布後 7 日間乾燥させた供試体での乾燥速度の差は小さいこと、塗布後の乾燥期間の違いが吸水試験の結果にほとんど影響を与えないと考えられる。また、養生期間の違いによりコンクリートの細孔組織の緻密さが異なることから、養生期間 28 日の供試体の乾燥速度は養生期間 7 日と比べて小さいことがわかる。

吸水期間では、含浸材を塗布していない供試体では、吸水開始直後に吸水量が急激に増加した。含浸材を塗布した供試体では、養生期間、乾燥期間および塗布量にかかわらず吸水による質量の増加が抑制された。吸水 1 日目以降は質量の増加が抑制されたことは、含浸材塗布後の表面に液状水が接触すると、ごく表面の空隙に浸透するが、コンクリート中への水分浸透の速度が著しく低下しているとみられる。

吸水後の乾燥期間では、含浸材を塗布した供試体は乾燥開始から 2 日経過時点で吸水により増加した質量以上に乾燥し、その後の乾燥傾向は無塗布の供試体と同様の傾向を示した。なお、養生 28 日の吸水後の乾燥挙動は養生 7 日と比べて乾燥が大きくなる傾向を示したが、実験環境の温度の上昇および湿度の低下が原因である。

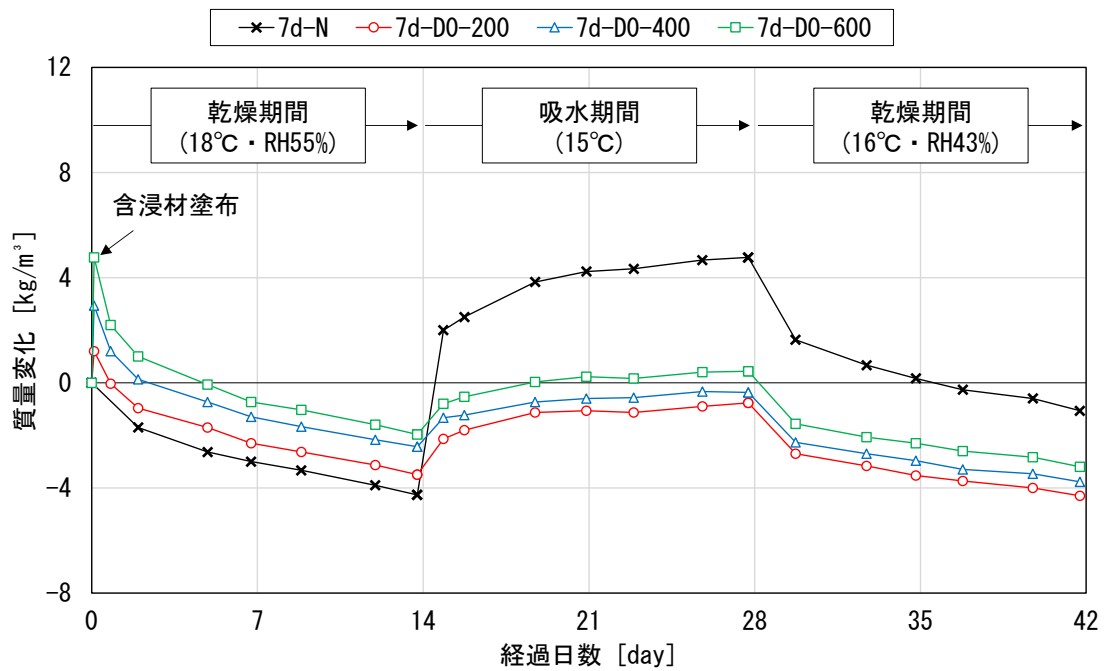


図-2.8 養生期間 7 日・乾燥期間 0 日の実験期間中の乾燥と吸水による質量変化

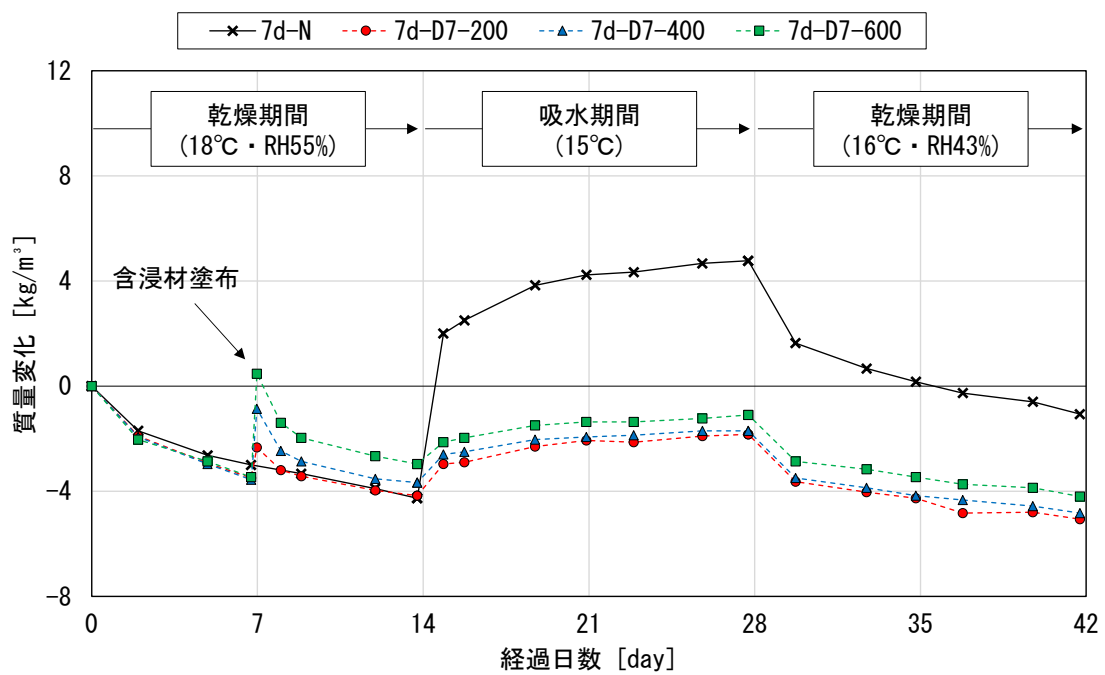


図-2.9 養生期間 7 日・乾燥期間 7 日の実験期間中の乾燥と吸水による質量変化

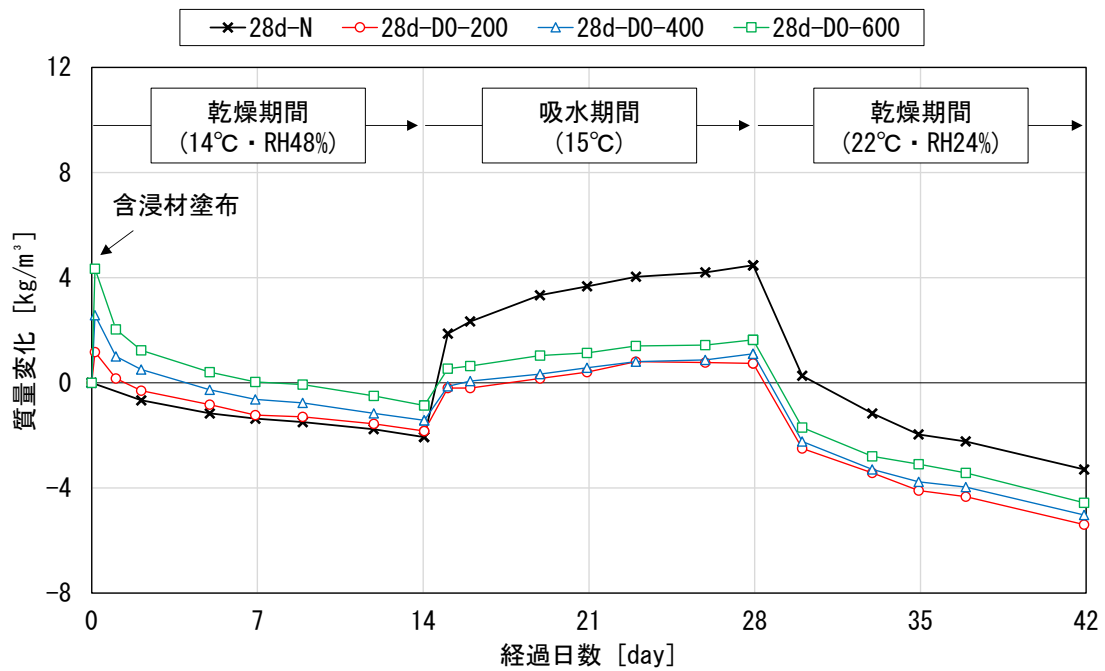


図-2.10 養生期間 28 日・乾燥期間 0 日の実験期間中の乾燥と吸水による質量変化

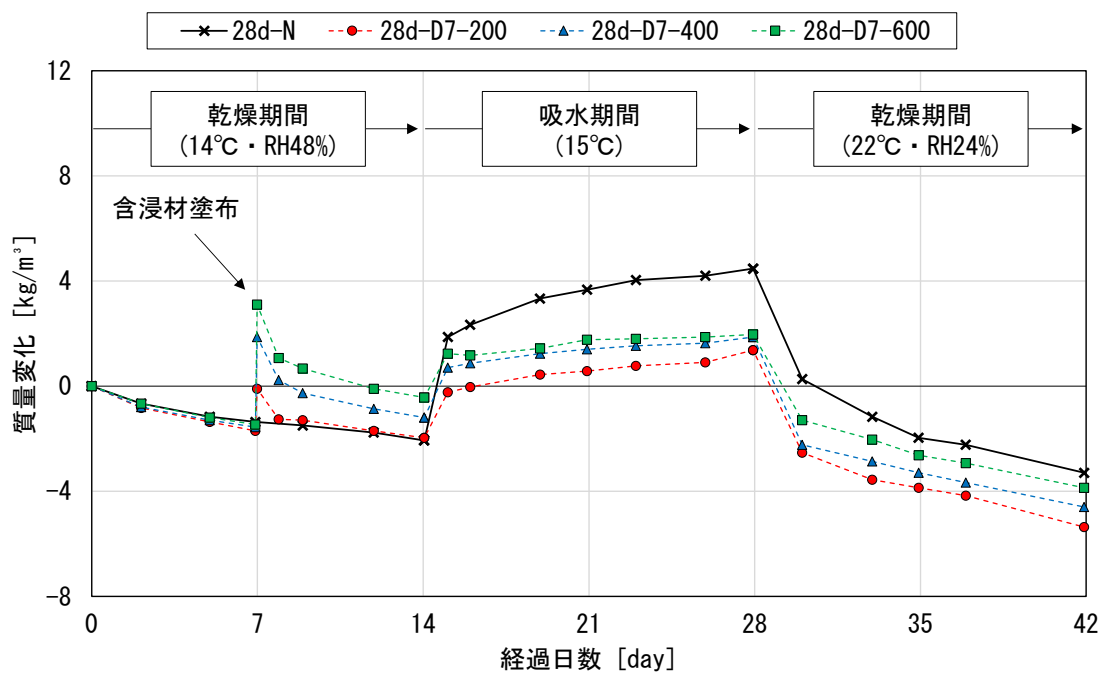


図-2.11 養生期間 28 日・乾燥期間 7 日の実験期間中の乾燥と吸水による質量変化



### 2.2.5 実験結果：吸水量と含浸深さの比較

各水準の2週間後の吸水量と吸水実験後に測定した含浸深さを図-2.12に示す。単位体積あたりの吸水量は吸水開始時から2週間経過後の質量増加量を試験体体積で除した値であり、各水準の吸水量は複数の供試体の平均値と最大・最小値を示す。

表面含浸材を塗布していない供試体では、養生期間28日の吸水量は養生7日と比べて小さい。これは、養生期間が長くなったことでコンクリートが緻密化し、吸水量が減少したことを示している。表面含浸材を塗布した供試体では、乾燥期間、養生期間および含浸深さにかかわらず吸水量は約 $2.0[\text{kg}/\text{m}^3]$ と同程度に抑制されることが確認された。これは、Hosodaらの報告[2.2]と同様に、養生による吸水特性や塗布前の乾燥条件が異なる場合でも、シラン系表面含浸材を塗布したことでコンクリート表面から数mm程度の浅い表層部分でコンクリート内部への吸水浸透が停止したことを示している。今回の実験結果より、コンクリート内部の水分が多い状態では塗布量に応じて含浸深さが変化すること、養生期間や乾燥期間にかかわらず表面から6mm程度の含浸深さが得られれば十分な吸水抑制効果が得られることがわかった。

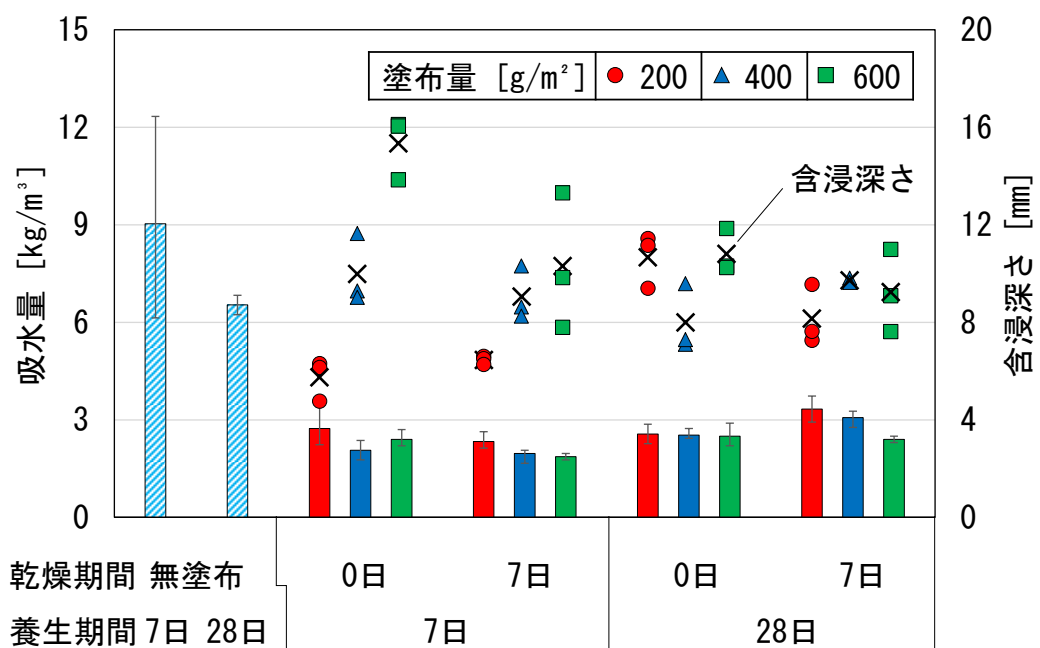


図-2.12 各水準の2週間後の吸水量と含浸深さ

## 2.3 シラン系表面含浸材の含浸方向とひび割れの影響に関する吸水実験

シラン系表面含浸材の含浸方向(塗布面)が異なるひび割れを有する供試体を用いた吸水実験を行うことで、含浸方向およびひび割れがシラン系表面含浸材の吸水抑制効果におよぼす影響について検討した。また、ひび割れ部を含めた含浸深さを測定することで、含浸材のひび割れ内部への含浸性についても検討した。

### 2.3.1 実験方法および実験水準

今回の実験における含浸材の塗布面および含浸方向の種類を図-2.13 に、吸水実験の概要図を図-2.14 に示す。表面含浸材の塗布面(含浸方向)は、上面(鉛直下方向)、側面(水平方向)、底面(鉛直上方向)の3水準とした。吸水実験は1面のみ開放したひび割れを有するコンクリート角柱を用意し、開放面に水を浸した吸水スポンジに当てることで吸水させた。実験期間中は定期的に質量を測定し、吸水開始時からの質量変化量より供試体の吸水量を求めた。

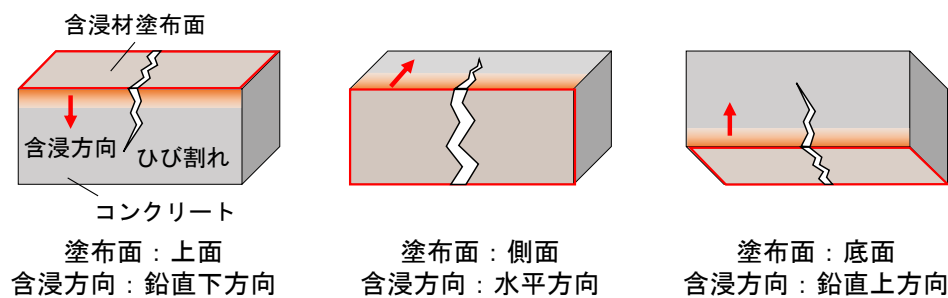


図-2.13 含浸材の塗布面および含浸方向の種類

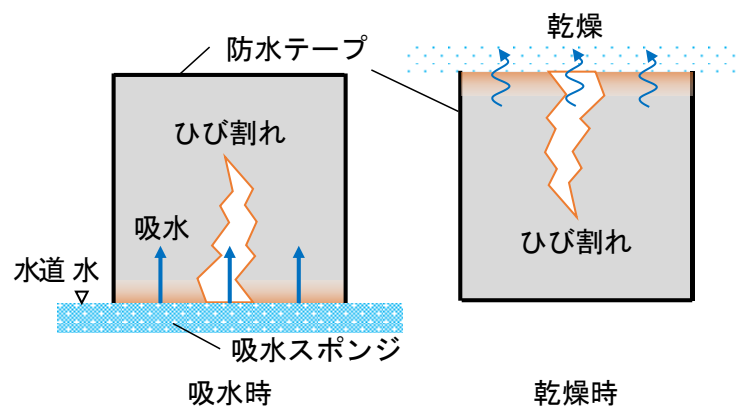


図-2.14 吸水実験の概要図

実験水準を表-2.4に示す。ひび割れ幅は、ひび割れ無し、0.1mm、0.5mmの3水準とした。各供試体のひび割れ幅およびひび割れ深さの値はひび割れ導入後の除荷された状態での値であり、ひび割れ幅はマイクロスコープを用いて等間隔に3点測定した平均値を、ひび割れ深さはノギスを用いて測定した2つの側面の平均値である。

実験期間中の温湿度を図-2.15に示す。吸水実験開始時の初期水分量は、含浸深さの測定後に室内で20日間乾燥(平均温度15℃、平均湿度48%)させることで全ての供試体が同様の水分状態となるように調整した。吸水期間は2週間とし、吸水実験中の平均温度は15℃であった。

表-2.4 含浸方向に関する実験水準

水準名	表面含浸材の含浸方向 (塗布面)	個数	ひび割れ幅 (平均) [mm]	ひび割れ深さ (平均) [mm]
N-w0	無塗布	12	—	—
N-w0.1		6	0.12	70
N-w0.5		6	0.52	87
T-w0	鉛直下方向 (上面)	12	—	—
T-w0.1		6	0.12	66
T-w0.5		6	0.52	86
S-w0	水平方法 (側面)	12	—	—
S-w0.1		6	0.12	73
S-w0.5		6	0.52	88
B-w0	鉛直上方向 (底面)	12	—	—
B-w0.1		6	0.13	74
B-w0.5		6	0.51	88

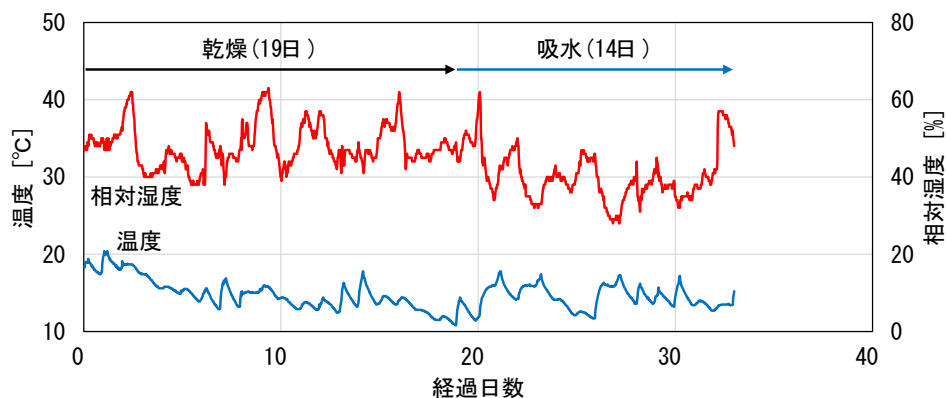


図-2.15 実験期間中の温湿度

### 2.3.2 供試体作成および表面含浸材の塗布方法

供試体の作成方法および寸法を図-2.16に示す。実験に用いた配合は2.2の配合と同じである。打設後8日で脱型し、41日間封緘養生を行った。養生終了後、3点曲げ載荷により供試体中央部に1本の曲げひび割れを導入した。ひび割れ導入面は打設時の側面とし、ひび割れ幅の平均値が目標値の0.1mm、0.5mm程度になるまで除荷と載荷を繰り返した。ひび割れ導入後、ひび割れ導入面以外を開放面とし、開放面以外からの表面含浸材の含浸を防ぐために、開放面以外に気密防水テープを用いた防水処理を施した。

防水処理後から8日間室内に静置して開放面を乾燥させた。図-2.13に示す3種類の向きでシラン系表面含浸材を塗布した。含浸材塗布時の様子を図-2.17に示す。2.2と同じシラン系表面含浸材を使用し、刷毛を用いてメーカー指定の塗布量(600ml/m<sup>2</sup>)に達するまで塗布を繰り返した。塗布後から3日間室内で静置した後に、湿式コンクリートカッターを用いて角柱を切断し、ひび割れを有する供試体とひび割れない供試体を各2体作成した。含浸材を塗布しない供試体は塗布した供試体と同じ室内に静置した。供試体作成後、室内で3日間乾燥させ、切断面で含浸深さをJSCE-K571-2013[2.1]に準拠して測定した。含浸深さは、図-2.18に示すように、ひび割れ部とひび割れない部分の2種類に分けて測定した。

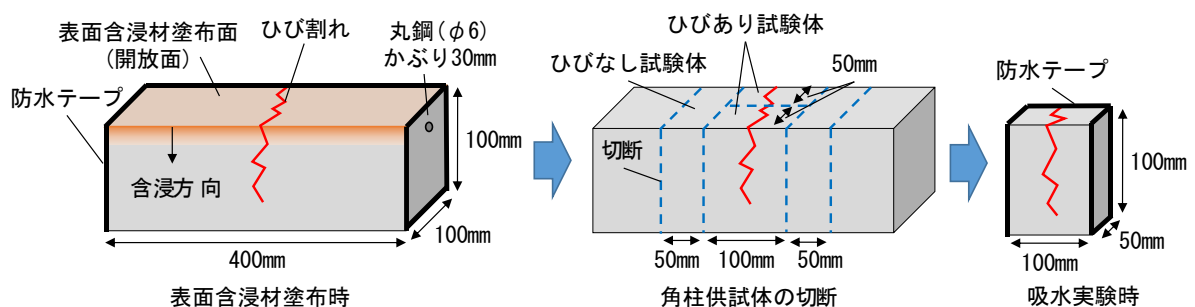
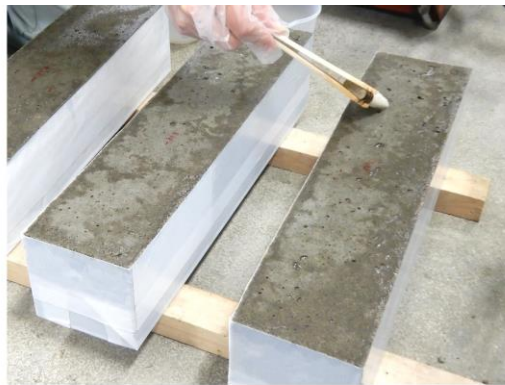
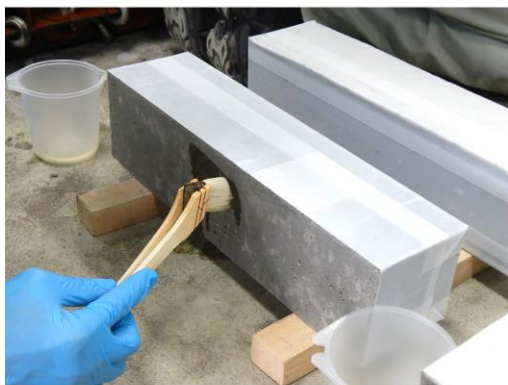


図-2.16 供試体の作成方法および寸法



(a) 塗布面：上面



(b) 塗布面：側面



(c) 塗布面：底面

図-2.17 塗布面ごとの含浸材塗布時の様子

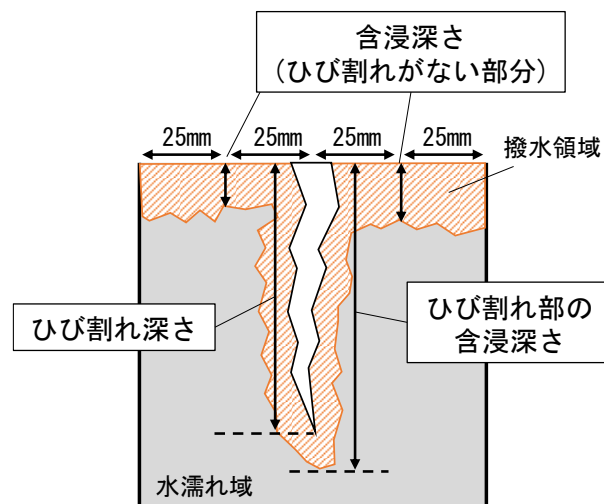


図-2.18 ひび割れを考慮した含浸深さの測定位置(ひびあり試験体)

### 2.3.3 実験結果：ひびなし試験体の塗布面(含浸方向)と含浸深さの比較

ひびなし試験体(w0 シリーズ)の塗布面ごとの含浸深さの測定結果を図-2.19 に示す。また、含浸深さ測定時の断面の様子を図-2.20 に示す。含浸深さは、半分に切断された供試体を水に1分間浸漬後、目視で確認された撥水領域を切断面ごとにノギスを用いて3か所測定し、その平均値を各試験体の含浸深さとした。

シラン系表面含浸材の含浸深さは、塗布面にかかわらず概ね5mm前後を示した。これより、ひび割れがない表面では含浸方向が含浸深さにおよぼす影響は小さいことが確認された。しかし、底面に塗布した場合は、含浸深さのばらつきが大きく、ごく表面のみの撥水が確認されたが含浸深さの測定ができない試験体が半数であった。これは、塗布面の凹凸や傾きにより塗布後の含浸材に偏りが生じたことが原因と考えられる。

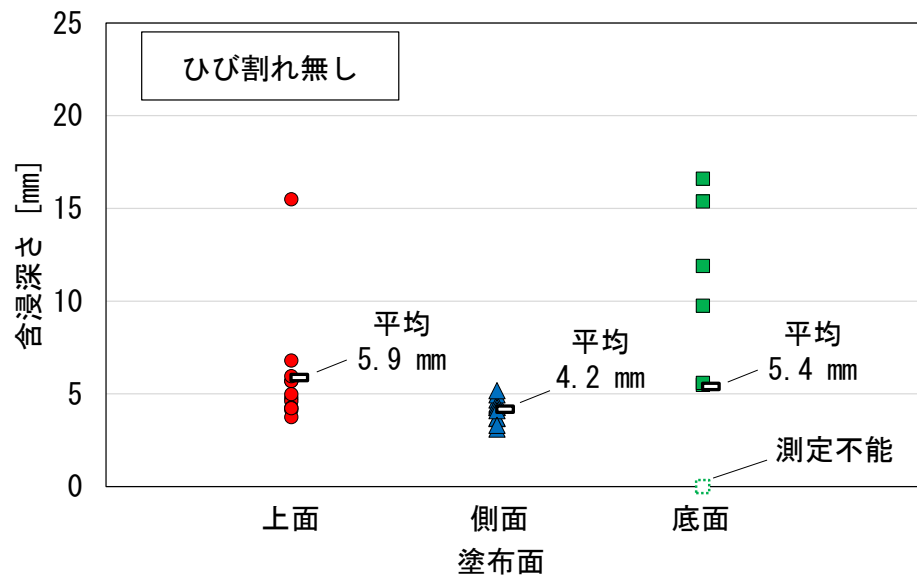


図-2.19 ひびなし試験体 (w0 シリーズ) の含浸深さの測定結果



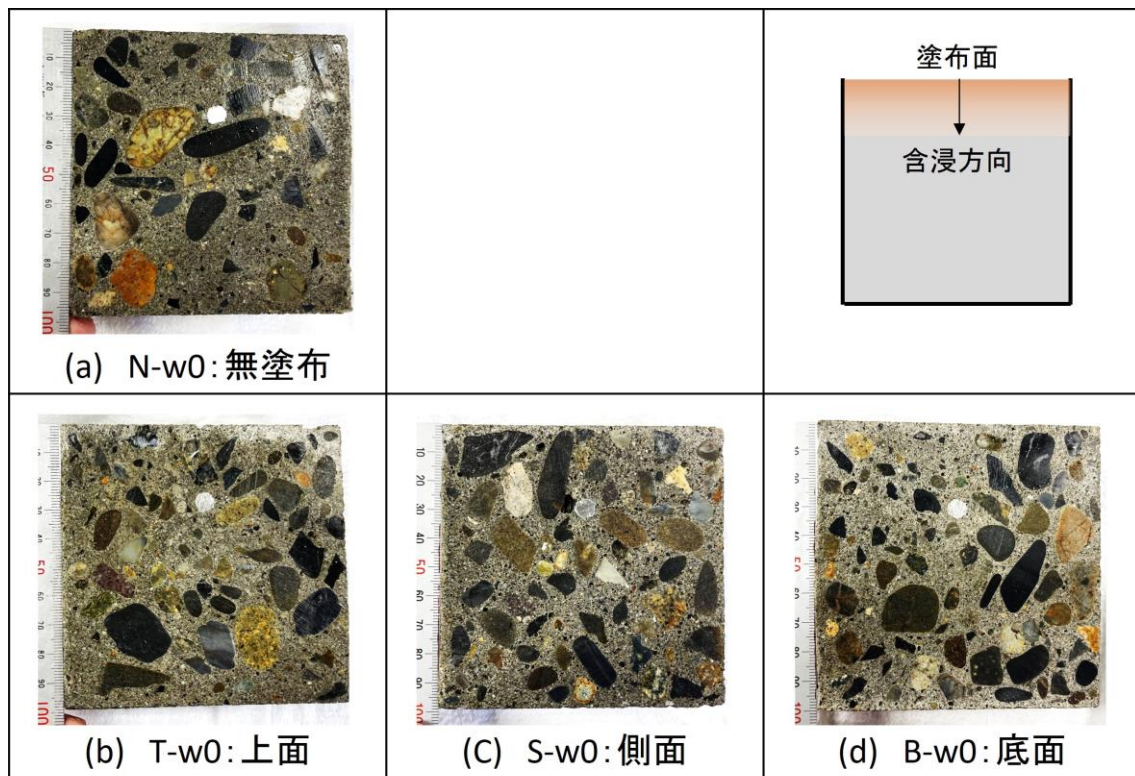


図-2.20 ひびなし試験体(w0 シリーズ)の含浸深さ測定時の断面

### 2.3.4 実験結果：ひび割れ部の塗布面(含浸方向)と含浸深さの比較

ひび割れ部の塗布面ごとの含浸深さの測定結果を図-2.21 に示す。また、含浸深さ測定時の断面の様子を図-2.22 に示す。ひび割れ部の含浸深さは、半分に切断された供試体を水に1分間浸漬後、目視で確認された撥水領域のひび割れ周辺の最大含浸深さを切断面ごとにノギスを用いて1か所測定した値である。

表面含浸材の塗布面が上面あるいは側面の場合、含浸深さはひび割れ幅の大小にかかわらずひび割れ深さよりも大きくなる傾向を示した。一方、塗布面が底面の含浸深さは、ひび割れ深さよりも小さくなり、ひび割れ幅 0.5mm では 0.1mm と比べて含浸深さのばらつきが大きくなる傾向を示した。これより、含浸材を上面あるいは側面に塗布し、含浸方向が鉛直下方向あるいは水平方向となる場合は、ひび割れへの含浸におよぼす含浸方向の影響は小さく、ひび割れ先端まで含浸されることが確認された。また、含浸材を底面に塗布し、含浸方向が鉛直上方向となる場合は、重力の影響によりひび割れ先端まで含浸されないことが示唆された。

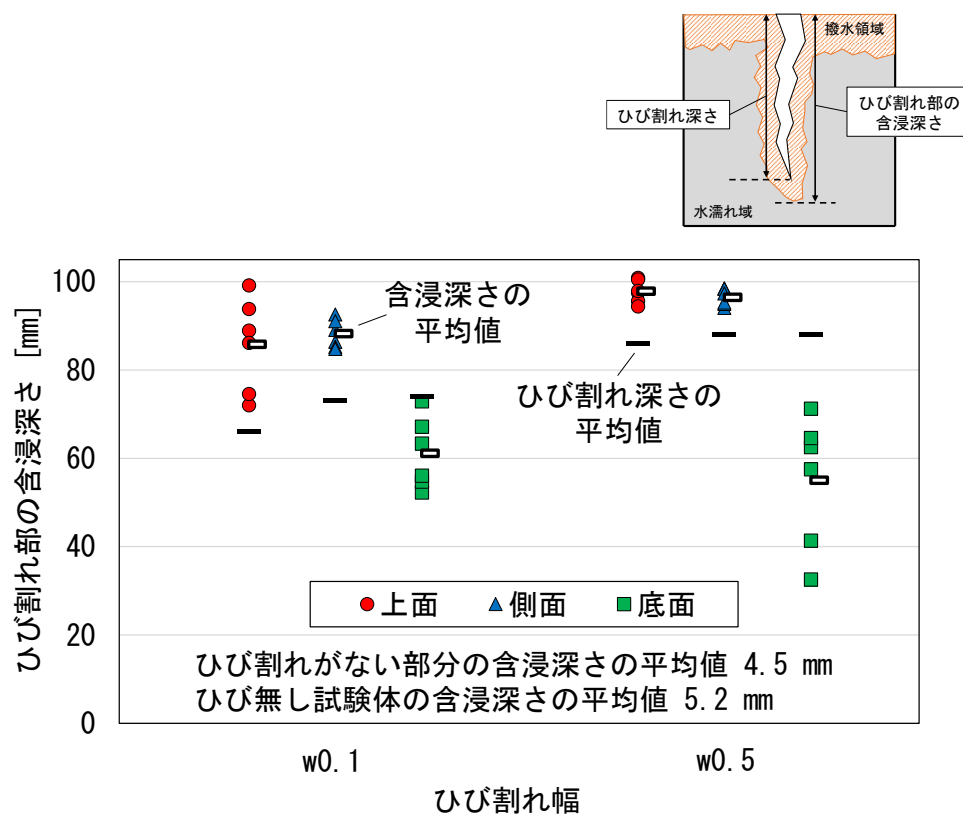


図-2.21 ひび割れ部の塗布面ごとの含浸深さの測定結果



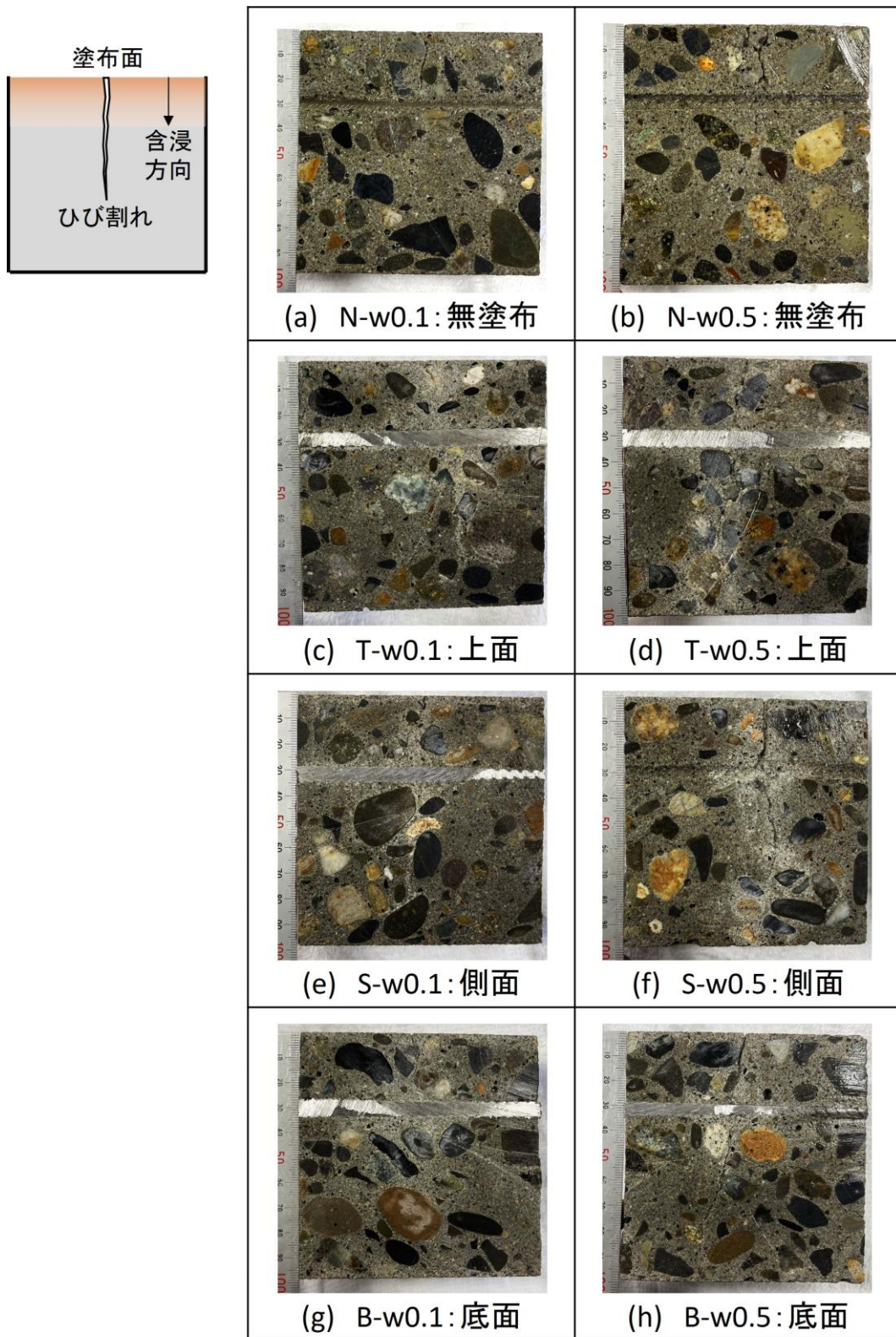


図-2.22 ひび割れがない供試体の含浸深さ測定時の断面

### 2.3.5 実験結果：吸水期間中の質量の経時変化

無塗布および塗布面ごとの吸水期間中の質量の経時変化を図-2.23に示す。単位体積あたりの質量変化は吸水開始時からの質量の変化量を試験体体積で除した値とし、正の変化は吸水を表す。各水準の質量変化は複数の供試体の平均値と最大・最小値を示す。

シラン系表面含浸材を塗布していない場合、ひび割れを有する試験体では吸水による質量増加が大きくなり、ひび割れ幅が大きいほど吸水が促進された。これは、工藤ら[2.3]の報告と同様である。

含浸材を塗布した場合、いずれの含浸方向においても、ひび割れによる吸水量の増加を抑制し、ひび割れがない試験体に表面含浸材を塗布した場合と同程度の吸水量となることが確認された。

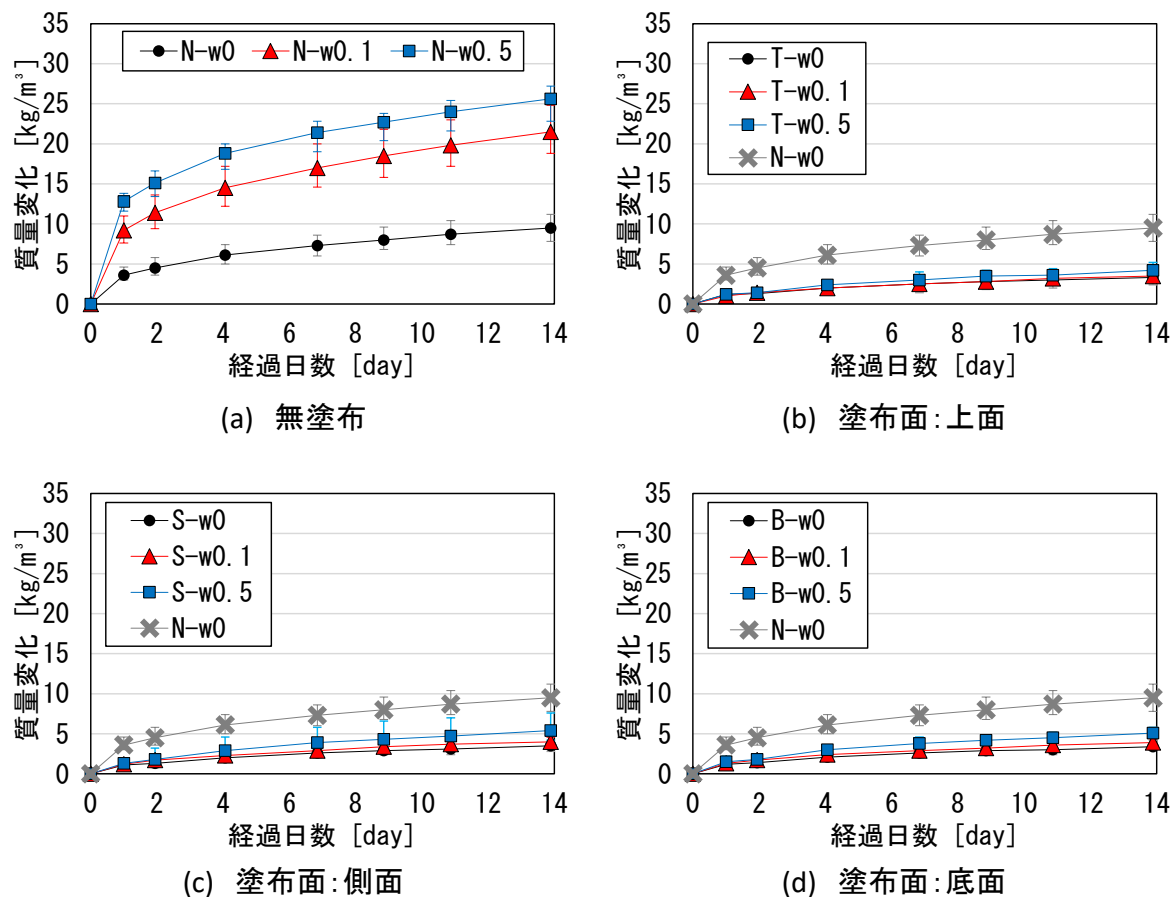


図-2.23 無塗布と塗布面ごとの吸水期間中の質量の経時変化

## 2.3.6 実験結果：ひび割れ幅ごとの吸水量の比較

全ての水準のひび割れ幅ごとの吸水量を図-2.24 に示す。単位体積あたりの吸水量は吸水開始時から2週間経過後の質量増加量を試験体体積で除した値である。

シラン系表面含浸材を塗布していない場合、ひび割れ幅の増加とともに吸水による質量増加が大きくなる傾向を示している。一方、表面含浸材を塗布した場合では、ひび割れ幅および含浸方向にかかわらず表面含浸材を塗布したひび割れの無い試験体と同程度の吸水量を示している。

含浸材塗布後の吸水抑制において、ひび割れ幅の影響は、澤田らの吸水試験[2.4]、久保らの透水試験[2.5]から得られた、ひび割れ幅が異なる場合でも吸水量の差が小さい傾向と一致する。含浸方向に関しては、塗布面が底面の場合では、含浸深さはひび割れ深さよりも小さくなるが、他の含浸方向と同程度の吸水抑制を示した。これは、コンクリート表面付近のひび割れが撥水性に改質されたことで、ひび割れ内部への吸水が抑制されたことを示唆している。

これらより、ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布した場合では、ひび割れ内部まで含浸させることでひび割れ幅の大小や含浸方向の違いにかかわらず、ひび割れの無いコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布した場合と同程度の吸水抑制効果が得られることが明らかとなった。

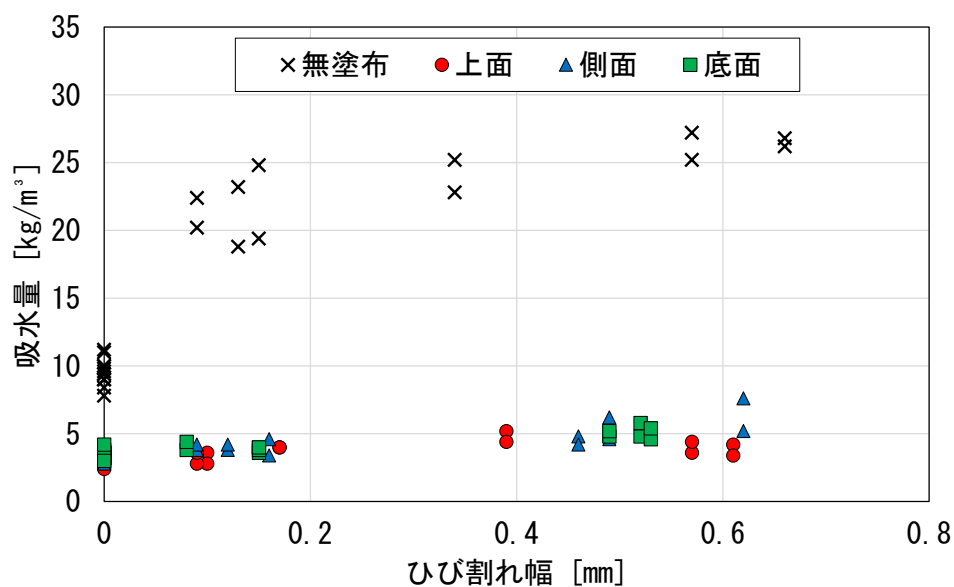


図-2.24 ひび割れ幅ごとの吸水量

## 2.4 第2章のまとめ

シラン系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体を用いた室内吸水実験を行い、コンクリート供試体の質量変化より、シラン系表面含浸材の塗布条件が水分浸透抑制効果について確認した。また、曲げひび割れを導入したコンクリート供試体にシラン系表面含浸材を塗布し、室内吸水実験を行うことで、シラン系表面含浸材のひび割れに対する含浸性と水分浸透抑制効果について検討した。第2章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 材齢が短く、塗布時の表面が乾燥していない場合では塗布量に応じて含浸深さが変化した。養生期間、塗布前の乾燥期間および塗布量が含浸深さにおよぼす影響は小さいことを確認した。
- 2) ひび割れがないコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布する場合は、含浸方向が含浸深さにおよぼす影響は小さいことを確認した。
- 3) ひび割れを有するコンクリートに塗布する場合は、含浸方向が鉛直下方向あるいは水平方向では、ひび割れへの含浸におよぼす影響は小さく、ひび割れ先端まで含浸されること。含浸方向が鉛直上方向では、ひび割れ先端まで含浸されないことを確認した。
- 4) 養生期間や乾燥期間にかかわらずコンクリート表面から 6mm 程度の含浸深さが得られれば十分な吸水抑制効果が得られることを確認した。
- 5) ひび割れ幅 0.1~0.5mm 前後のひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布した場合は、ひび割れ内部まで含浸させることで含浸方向の違いにかかわらず、ひび割れの無いコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布した場合と同程度の吸水抑制効果が得られることが明らかとなった。

## 第2章の参考文献

- [2.1] 土木学会：2018年制定 コンクリート標準示方書〔規準編〕，2018.
- [2.2] Hosoda, A., Matsuda, Y. and Kobayashi, K.: Optimum Surface Protection System with Silane Type Water Repellents, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.8, No.3, pp.291-302, 2010.10.
- [2.3] 工藤めい，下村匠：コンクリート部材への水の浸透・乾燥におよぼすひび割れの影響に関する実験と数値解析，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol. 75, No. 3, pp. 196-207, 2019.
- [2.4] 澤田巧，福手勤，内藤英晴，小笠原哲也，酒井貴洋：表面含浸材のひび割れ改質効果に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 10, pp. 413-418, 2010.10.
- [2.5] 久保善司，阿部花香，菊池創太：ひび割れ部におけるシラン系含浸材の適用性に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 16, pp. 545-550, 2016.10.

## 第3章

### シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修後の乾湿挙動に関する屋外暴露実験

#### 3.1 はじめに

前章では、室内吸水実験より、シラン系表面含浸材をひび割れに含浸させることでコンクリート表面およびひび割れからの水分浸透を抑制できることを確認した。本章では、曲げひび割れを導入後にシラン系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体の屋外暴露実験を行い、実環境下におけるコンクリート供試体の乾湿挙動より、実環境下におけるシラン系表面含浸材の長期的な水分浸透抑制効果について検討した。

#### 3.2 屋外暴露実験の概要

##### 3.2.1 実験水準および供試体作製方法

屋外屋根ありシリーズの実験水準を表-3.1 に、屋外屋根なしシリーズの実験水準を表-3.2 に示す。屋外屋根ありシリーズのひび割れ幅は、ひび割れ無し、0.1mm、0.5mm、1.5mm の4水準とし、屋外屋根なしシリーズでは、ひび割れ無し、0.1mm、0.5mm の3水準とした。供試体の形状を図-3.1 に示す。供試体は曲げひび割れを導入するためにφ6の丸鋼を1本埋め込んだ100×100×400mmの角柱である。

実験に用いたコンクリートの配合を表-3.3 に示す。屋外屋根ありシリーズの供試体は2020年8月に、屋外屋根なしシリーズの供試体は2021年6月に作製した。コンクリート打込み後、材齢1日で脱型し、28日間の封緘養生を行った。養生終了後、3点曲げ载荷により供試体中央部に1本の曲げひび割れを導入した。ひび割れ導入面は打設時の底面とした。除荷後のひび割れ幅をマイクロスコープを用いて等間隔に3点測定し、ひび割れ幅の平均値が目標値の0.1mm、0.5mm、1.5mm 程度になるまで除荷と载荷を繰り返した。各供試体のひび割れ幅およびひび割れ深さはひび割れ導入後の除荷された状態での値である。

ひび割れ導入後、ひび割れ導入面を開放面とし、開放面以外は水の出入りが生じないように防水処理を施した。防水処理には、屋外屋根ありシリーズの供試体では気密防水テープを使用した。屋外屋根なしシリーズの供試体ではブチルゴムを粘着剤とする防水アルミテープで被覆後、気密防水テープを重ねた。曲げひび割れの導入と防水処理は同日に行った。

防水処理後から7日間室内に静置して開放面を乾燥させた。開放面を上向きにした状態でシラン系表面含浸材を塗布した。市販のアルキルアルコキシシランを主成分としたシラン系表面含浸材を使用し、刷毛を用いてメーカー指定の塗布量(600ml/m<sup>2</sup>)に達するまで塗布を繰り返した。塗布後から7日間室内で静置した後に屋外暴露実験を開始した。含浸材を塗布しない供試体は塗布した供試体と同様に、屋外暴露開始まで室内に静置した。室内での乾燥時、塗布時および静置時の環境条件は、屋外屋根ありシリーズで平均温度27℃、平均湿度57%、屋外屋根なしシリーズで平均温度27℃、平均湿度66%であった。

表-3.1 実験水準(屋外屋根ありシリーズ)

水準名	環境 条件	含浸材の 塗布	個数	平均 ひび割れ幅 [mm]	平均 ひび割れ深さ [mm]	ひび割れ 幅 [mm]	ひび割れ 深さ [mm]（注）
1-N-w0	屋外屋根あり （温湿度の変動）	無塗布	2	－	－	－	－
1-N-w0.1			3	0.14	73	0.09	欠測
						0.12	75
						0.22	70
1-N-w0.5			3	0.45	84	0.39	85
						0.41	78
						0.54	90
1-N-w1.5			3	1.46	97	1.11	92
						1.26	100
		2.01				100	
1-I-w0		含浸材 塗布	2	－	－	－	－
1-I-w0.1			3	0.15	70	0.12	欠測
						0.13	欠測
						0.19	70
1-I-w0.5			3	0.41	78	0.24	65
	0.42					欠測	
	0.56					91	
1-I-w1.5	3		1.44	98	1.15	100	
					1.56	100	
		1.62			93		
含浸材：市販のアルキルアルコキシシランを主成分としたシラン系表面含浸材 ひび割れ幅：デジタルマイクロスコープにより測定した3点の平均値 （注）屋外屋根ありシリーズのひび割れ深さ：鋼尺により測定した2つの側面の平均値							

表-3.2 実験水準(屋外屋根なしシリーズ)

水準名	環境 条件	含浸材の 塗布	個数	平均 ひび割れ幅 [mm]	平均 ひび割れ深さ [mm]	ひび割れ 幅 [mm]	ひび割れ 深さ [mm]（注）
2-N-w0	（温湿度の変動・日射・降雨） 屋外屋根なし	無塗布	3	－	－	－	－
2-N-w0.1			3	0.12	72	0.10	65
						0.12	73
						0.14	78
2-N-w0.5			3	0.48	89	0.40	欠測
						0.49	90
		0.50				88	
2-I-w0		含浸材 塗布	6	－	－	－	－
2-I-w0.1			6	0.12	71	0.10	70
						0.11	70
						0.11	70
						0.12	70
						0.12	73
						0.15	73
2-I-w0.5	6		0.49	88	0.41	85	
					0.44	90	
					0.45	欠測	
		0.49			85		
		0.50			90		
					0.62	90	
含浸材：市販のアルキルアルコキシシランを主成分としたシラン系表面含浸材 ひび割れ幅：デジタルマイクロスコープにより測定した3点の平均値 （注）屋外屋根なしシリーズのひび割れ深さ：2つの側面の写真から判定した平均値							

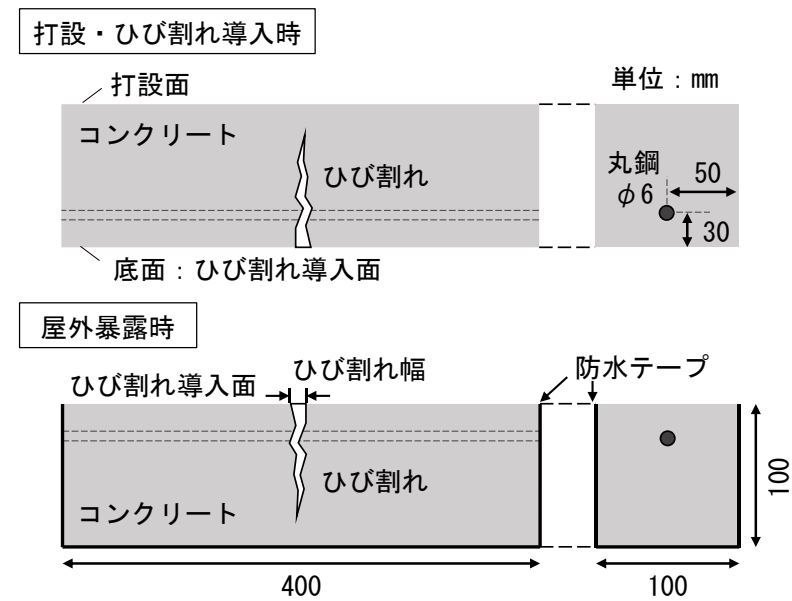


図-3.1 供試体形状

表-3.3 コンクリートの配合

W/C [%]	s/a [%]	Air [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
			W	C	S	G	Ad [g/m <sup>3</sup> ]
50	43.8	5.0	168	336	775	990	3.36
セメント：普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )							
細骨材：千曲川産川砂(表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> ・吸水率 1.63%)							
粗骨材：千曲川産川砂利(最大寸法 25mm・表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> ・吸水率 1.39%)							
混和材：AE 減水剤・標準形(I 種)							



### 3.2.2 暴露環境

屋外屋根あり環境および屋外屋根なし環境の供試体の設置状況を図-3.2、図-3.3にそれぞれ示す。屋外屋根ありシリーズの供試体は、降雨の影響を受けないように設けた屋根の下で、地表から1.6mの日射のほとんど当たらない場所に静置した。屋外屋根なしシリーズの供試体は、降雨や日射の影響を受ける3階建て建物の屋上の床から1.5mの場所に静置した。いずれの暴露環境も長野県長野市の長野工業高等専門学校の構内であり、供試体の質量を電子天びんにより定期的に測定することで供試体の乾湿挙動を確認した。

暴露環境と同じ地域の長野地方気象台の実験期間中の日平均気温・湿度・降水量を図-3.4に示す。屋外屋根ありシリーズの実験開始日は2020年9月23日、屋外屋根なしシリーズの実験開始日は2021年7月14日である。実験期間中は夏季と冬季で日平均気温に30度ほど寒暖差が生じている。屋外屋根あり環境において供試体と同位置で温湿度を1年間測定し、長野気象台が公開している温湿度とほとんど一致していることを確認している。暴露環境と同じ地域の長野地方気象台の2021年の気象は、平均温度13℃、平均相対湿度75%、年降水量1075mm、年日照時間2080hrであった。



図-3.2 屋外屋根あり環境の様子



図-3.3 屋外屋根なし環境の様子

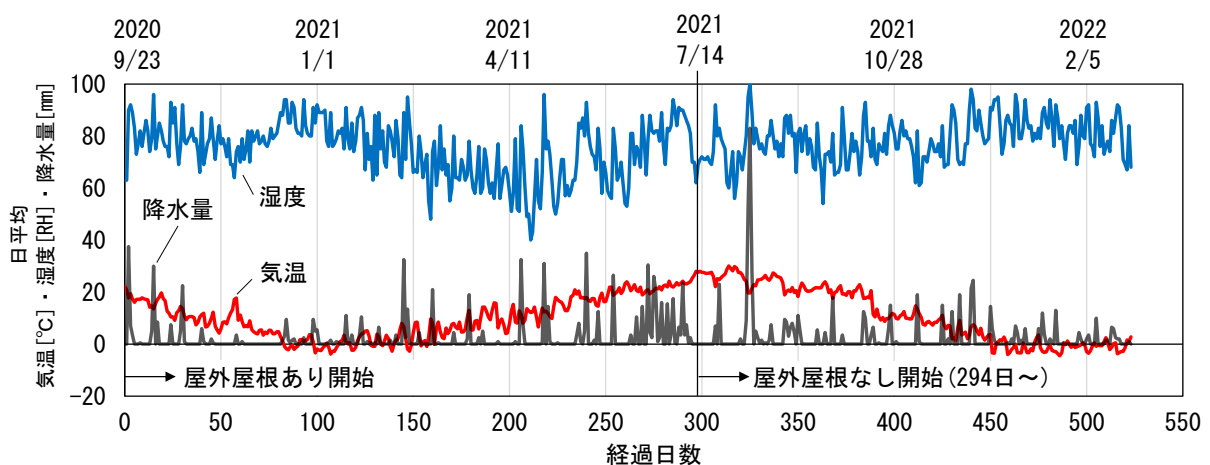


図-3.4 暴露期間の気象データ(日平均・長野気象台)

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 屋外暴露実験終了後の表面含浸材の含浸状況

ひび割れ幅ごとの供試体断面の表面含浸材の含浸状況を図-3.5 に示す。これらは今回の屋外暴露実験終了後にひび割れを有する試験体を各水準1体ずつ取り出し、コンクリートカッターを用いて切断し、室内で1週間程度乾燥後、水中に1分間浸漬したものである。表面含浸材の撥水効果により変色していない領域を目視とノギスで確認した。目視で確認できた撥水部の境界を黄色に、ひび割れ部を赤色に着色している。いずれの試験体もひび割れの有無にかかわらずコンクリート表面からの含浸深さは10mm程度であった。ひび割れ近傍の撥水部分に注目すると、コンクリート表面からの含浸深さより小さいが、ひび割れ面からもコンクリート中に5mm~10mmほど含浸していることが確認された。また、図-3.5(d)に示すように曲げひび割れを導入した供試体では、ひび割れから丸鋼に沿って含浸材が含浸している試験体も確認された。

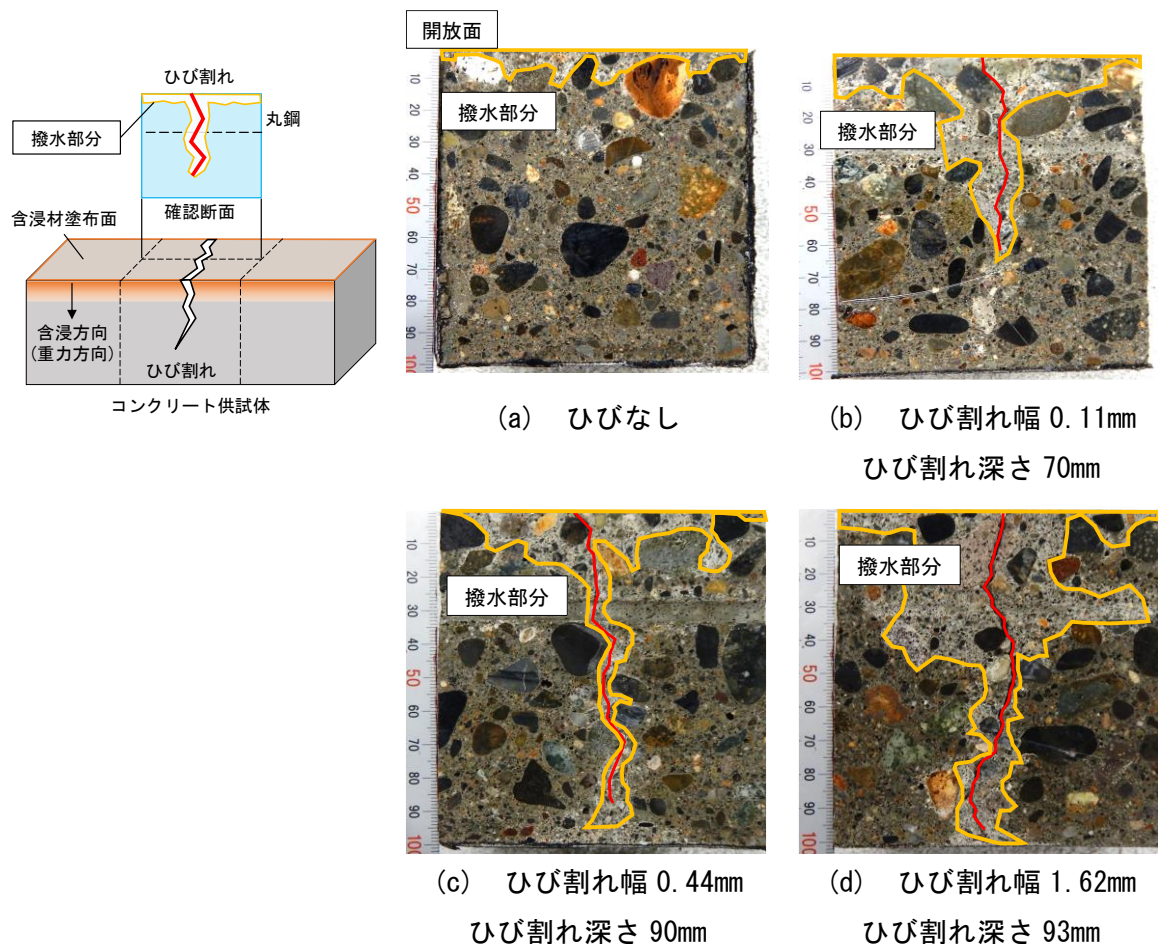


図-3.5 ひび割れを有するコンクリート断面の撥水状況

### 3.3.2 ひび割れの無い供試体の乾湿挙動

図-3.6 に屋外屋根あり環境と屋外屋根なし環境におけるひび割れの無い供試体の単位体積あたりの質量変化を示す。単位体積あたりの質量変化は実験開始時からの質量の変化量を供試体体積で除した値とし、負の変化は乾燥を、正の変化は吸湿あるいは吸水を表す。各水準の質量変化は複数の供試体の平均値と最大・最小値を示す。

屋外屋根あり環境では、全ての供試体で実験開始時から乾燥する傾向にある。表面含浸材を塗布した供試体は、無塗布の供試体と比べて乾燥がわずかに低減される傾向を示す。しかし、両者の差は小さく、降雨による吸水を受けない環境下では、含浸材を塗布することによる乾燥挙動への影響は大きくないといえる。既往研究[3.1], [3.2]によると、多孔材料にシラン系表面含浸材を含浸させることで水蒸気の透過抵抗性が増加することが報告されており、本実験において乾燥による質量減少が低減したと符合する。

屋外屋根なし環境では、供試体間のばらつきがみられるが、表面含浸材を塗布していない供試体は降雨による吸水で質量が増加する傾向を示す。一方、表面含浸材を塗布した供試体は降雨による吸水の影響が小さく、乾燥する傾向を示しており、降雨による吸水の影響が大きく低減されたことがわかる。

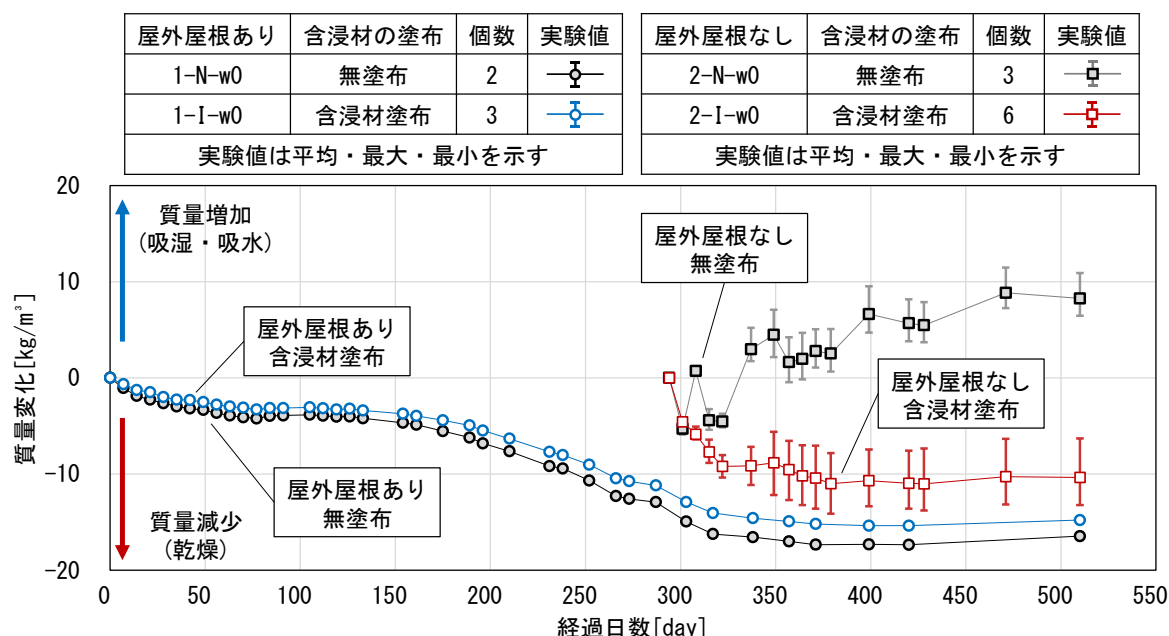


図-3.6 ひび割れの無い供試体の乾湿挙動におよぼす暴露環境とシラン系表面含浸材の影響

暴露期間中の降雨時の屋外屋根なし環境下の供試体の表面の様子を図-3.7に示す。表面含浸材を塗布したコンクリート表面は、塗布していないコンクリート表面と同様に、降雨時に濡れにより変色していた。コンクリート表面に液状水が滞水することで表面近傍ではコンクリート細孔中に液状水が吸水されたことを示す。しかし、表面含浸材を塗布した供試体の質量変化は乾燥傾向を示したことから、含浸部から内部への液状水の吸水浸透はほとんど生じていないと考えられる。既往研究[3.3], [3.4]によると、表面含浸材の含浸深さが10mm程度の試験体の塩分浸透が表面から数mmまでに留まっていたことが報告されており、本実験における液状水の浸透も同様に表面付近に留まっていたと考えられる。

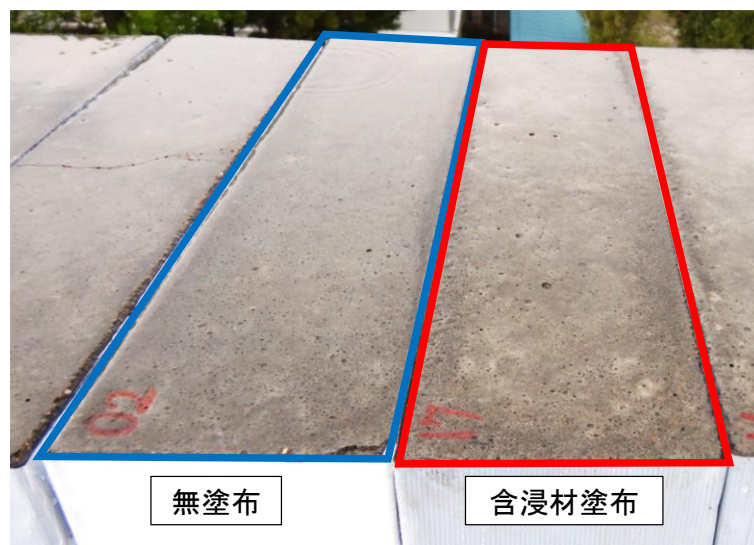


図-3.7 降雨時の供試体表面の様子



### 3.3.3 ひび割れを有する供試体に表面含浸材を塗布していない場合の乾湿挙動

図-3.8 に表面含浸材を塗布していない供試体の単位体積あたりの質量変化を示す。屋外屋根あり環境の各供試体の質量変化を比較すると、ひび割れにより生じる乾湿挙動の変化は小さいことがわかる。

屋外屋根なし環境では、ひび割れ幅が大きいほど吸水により質量が増加する傾向を示した。工藤らは、ひび割れと乾湿条件を考慮した水分移動解析より、ひび割れは乾燥および吸水の双方を促進し、乾湿サイクルにおける吸水時間の割合が小さい環境ほど定常状態における水分量がひび割れの存在により乾燥側にシフトすることを報告している[3.5]。したがって、降雨を受けない屋外屋根あり環境では吸水が生じないためひび割れによる乾湿挙動の変化は小さく、降雨による吸水が生じる屋外屋根なし環境ではひび割れにより吸水量が増加したと考えられる。

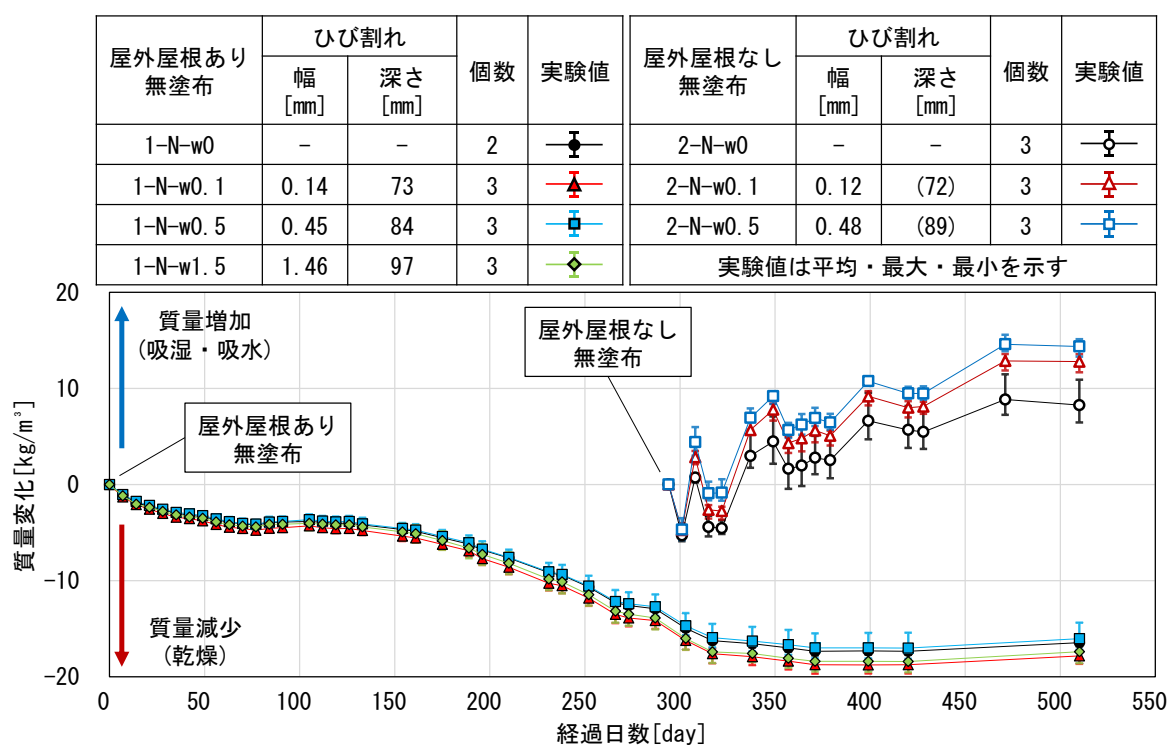


図-3.8 表面含浸材を塗布していない供試体の乾湿挙動におよぼす暴露環境とひび割れの影響

### 3.3.4 ひび割れを有する供試体に表面含浸材を塗布した場合の乾湿挙動

図-3.9 に表面含浸材を塗布したひび割れを有する供試体の単位体積あたりの質量変化を示す。屋外屋根あり環境では、表面含浸材を塗布していない供試体と同様にひび割れにより生じる乾湿挙動の変化は小さいことがわかる。

一方、屋外屋根なし環境では、表面含浸材を塗布したことでひび割れの有無にかかわらず降雨による吸水の影響が小さくなり、ひび割れ幅 0.1mm 前後の供試体ではひび割れの無い供試体よりも乾燥がわずかに増加する傾向を示している。ひび割れ幅 0.5mm 前後では、供試体間のばらつきが大きく、表面含浸材による吸水の抑制が小さくなる傾向を示した。

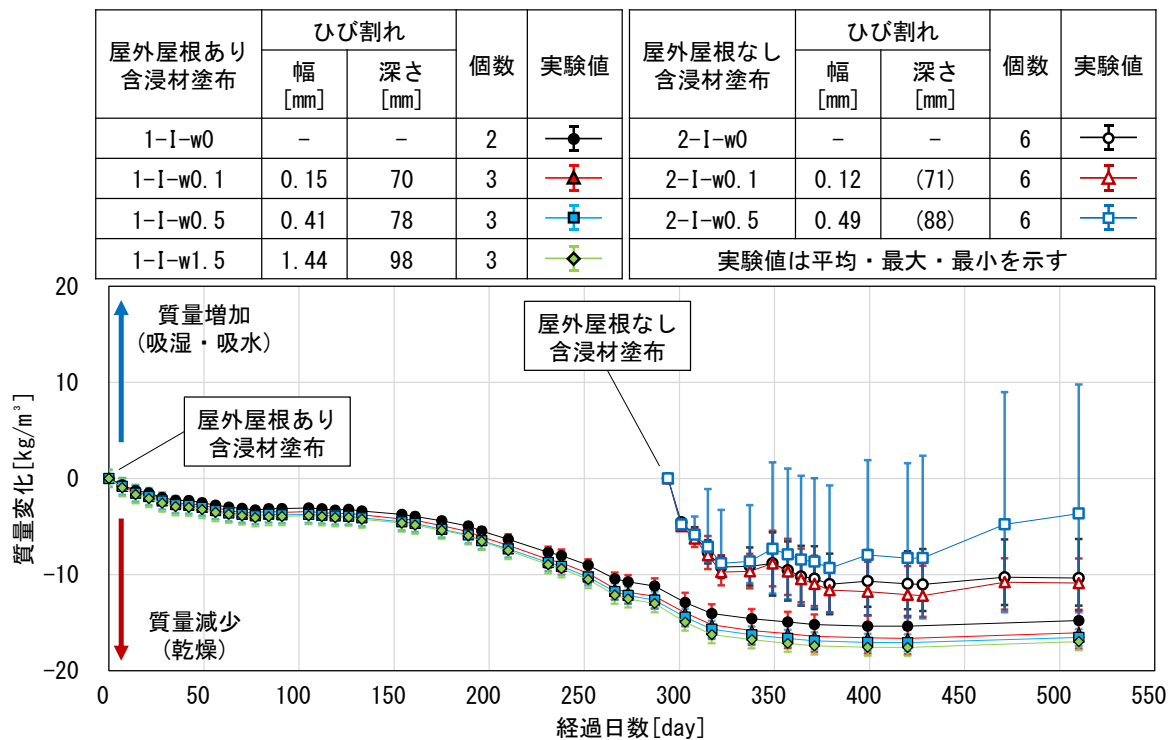


図-3.9 表面含浸材を塗布した供試体の乾湿挙動におよぼす暴露環境とひび割れの影響

### 3.3.5 表面含浸材を用いたひび割れ補修による水分浸透抑制効果の検討

図-3.10 に屋外屋根あり環境における，実験開始より 510 日経過後の供試体の単位体積あたりの質量変化とひび割れ幅の関係を示す．この時点では，実験開始より 399 日から 510 日の期間での質量変化率が 0.0004%以下であり，概ね平衡状態となっているといえる．本実験条件下では，屋外屋根あり環境では，ひび割れ幅の大小がコンクリートの長期暴露後の平衡水分量におよぼす影響は小さい．また，表面含浸材の塗布の有無が平衡水分量におよぼす影響も認められない．これより，表面含浸材の塗布により，乾燥速度はわずかに低減されるが，平衡水分量におよぼす影響は小さいことが確認された．

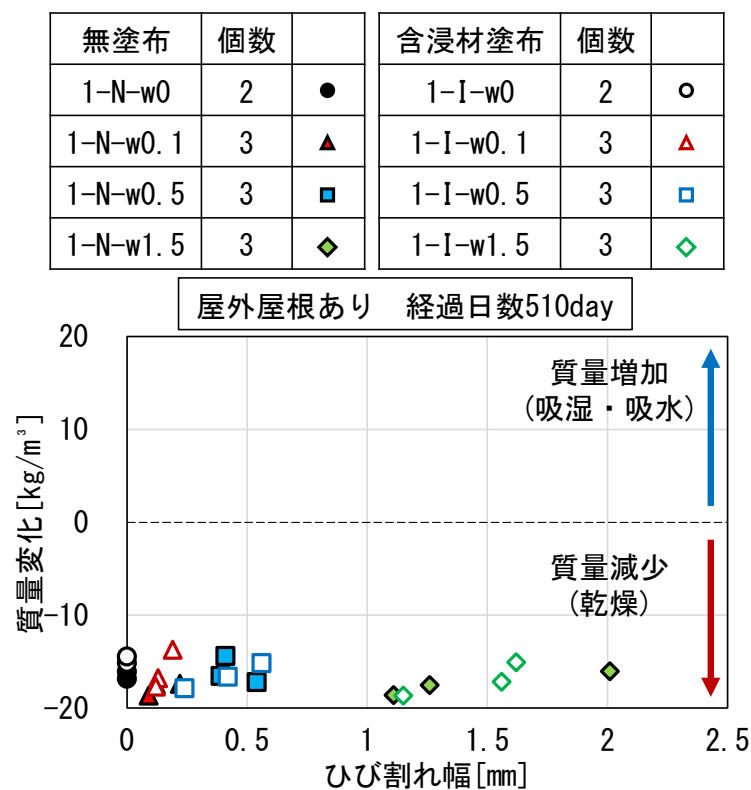


図-3.10 屋外屋根あり環境における長期水分量（510 日）

図-3.11 に屋外屋根なし環境における，実験開始より 216 日経過後の供試体の単位体積あたりの質量変化とひび割れ幅の関係を示す．本シリーズはこの時点では暴露期間が短いので水分量はまだ平衡状態となっていないと考えられるが，時間変化は小さくなってきている．表面含浸材を塗布していない供試体では，ひび割れ幅の増加とともに降雨による吸水の影響が大きくなる傾向を示している．一方，表面含浸材を塗布した供試体では，ひび割れ幅にかかわらずほとんどの供試体で表面含浸材を塗布したひび割れの無い供試体と同程度の乾燥量を示している．

なお，表面含浸材を塗布したひび割れ幅 0.5mm 前後のみ実験結果のばらつきが大きかった原因として，今回の 3 点曲げ載荷によるひび割れ導入では，ひび割れ幅 0.5mm 前後，1.5mm 前後の供試体の載荷時の変形が大きく，目標のひび割れ幅が得られるまで除荷と載荷を繰り返したことで鉄筋周りのコンクリートが損傷し，ひび割れ内部に滞水した液状水が損傷部分から浸透したことが考えられる．

これらより，図-3.5 に示すようにひび割れを通じてシラン系表面含浸材がひび割れ近傍のコンクリートに含浸することで，ひび割れ内部に液状水が浸入した場合でもコンクリート中への液状水の吸水浸透はほとんど生じないと考えられる．これは，表面含浸材を塗布することでひび割れからの塩分浸透が抑制されたことを実験により確認した既往研究と傾向が一致する[3.6]，[3.7]．

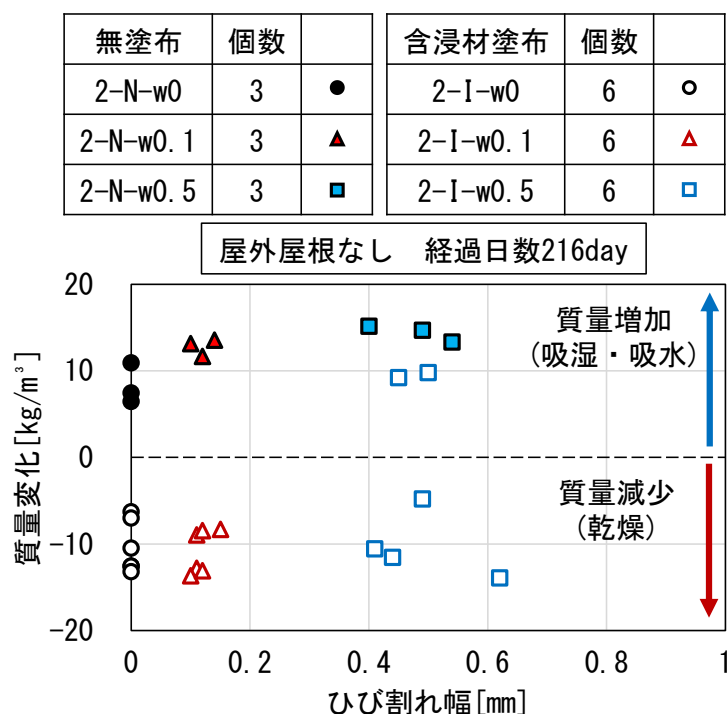


図-3.11 屋外屋根なし環境における長期水分量（216 日）



### 3.4 第3章のまとめ

曲げひび割れを導入後にシラン系表面含浸材を塗布したコンクリート供試体の屋外暴露実験を行い、実環境下におけるコンクリート供試体の乾湿挙動より、実環境下におけるシラン系表面含浸材の長期的な水分浸透抑制効果について検討した。第3章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 降雨を受けない屋外屋根あり環境では吸水が生じないためひび割れによる乾湿挙動の変化は小さく、降雨による吸水が生じる屋外屋根なし環境ではひび割れにより吸水量が増加することを確認した。
- 2) シラン系表面含浸材は、温湿度の変動や降雨の影響を受ける実環境下では、乾燥速度をわずかに低減させるが水蒸気透過を維持しつつ、コンクリート内部への吸水を抑制する効果があることを確認した。
- 3) ひび割れ補修にシラン系表面含浸材を使用した場合、シラン系表面含浸材がひび割れ近傍のコンクリートに含浸することでひび割れからコンクリート内部への吸水を抑制し、ひび割れの無いコンクリートに表面含浸材を塗布した場合と同等の吸水抑制効果が得られることを明らかにした。

### 第3章の参考文献

- [3.1] Sadouki, H. and Wittmann, F. H.: Influence of water repellent treatment on drying of concrete, 2nd International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials (Hydrophobe II), pp. 177-188, 1998.
- [3.2] Carmeliet, J.: Water transport – liquid and vapor – in porous materials : understanding physical mechanisms and effects from hydrophobic treatments, *3rd International Conference on Surface Technology with Water Repellent Agents (Hydrophobe III)*, pp. 171-178, 2001.
- [3.3] Zhan, H., Wittmann, F. H. and Zhao, T.: Chloride barrier for concrete in saline environment established by water repellent treatment, *Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 9, No. 5, pp. 535-550, 2003.
- [3.4] 久保善司, 矢野峻規, 樫山好幸, 橋爪康憲: 凍結防止剤の影響を受ける橋梁端部の塩分浸透とその抑制に関する実験的研究, *セメント・コンクリート論文集*, Vol. 69, No. 1, pp. 448-454, 2015.
- [3.5] 工藤めい, 下村匠: コンクリート部材への水の浸透・乾燥におよぼすひび割れの影響に関する実験と数値解析, *土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)*, Vol. 75, No. 3, pp. 196-207, 2019.
- [3.6] Wittmann, F. H., Zhao, T., Ren, Z. and Guo, P.: Influence of surface impregnation with silane on penetration of chloride into cracked concrete and on corrosion of steel reinforcement, *International Journal of Modelling Identification and Control*, Vol. 7, No. 2, 2009.
- [3.7] Dai, J.-G., Akira, Y., Wittmann, F. H., Yokota, H. and Zhang, P.: Water repellent surface impregnation for extension of service life of reinforced concrete structures in marine environments: The role of cracks, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 32, pp. 101-109, 2010.

## 第4章

### シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果の持続性に屋外暴露がおよぼす影響

#### 4.1 はじめに

前章では、屋外暴露実験より、実環境下におけるシラン系表面含浸材の長期的な水分浸透抑制効果について確認した。実環境下では温湿度の変動、降雨や日射の影響を受ける。そのため、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修効果の持続性や再補修の必要性について検討する必要がある。本章では、ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布後、屋外環境に1年以上暴露した試験体を用いて吸水実験を行い、塗布後の屋外暴露の有無による差を比較することで、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による吸水抑制効果の持続性について検討した。

#### 4.2 吸水実験の概要

##### 4.2.1 吸水試験体の作製方法

吸水試験体作製の状況を図-4.1に、吸水試験体の水準を表-4.1に示す。吸水試験体は第3章の屋外暴露実験に用いた角柱供試体を使用した。屋外暴露終了後、 $10 \times 10 \times 5\text{cm}$ になるようにコンクリートカッターで切断した。屋外暴露された角柱供試体1体につき、ひび割れを有する区間からひびあり試験体を2体、ひび割れの無い区間からひびなし試験体を1体取得した。切断後の試験体を室内で1週間程度乾燥後、水中に1分間浸漬し、シラン系表面含浸材の含浸状況を確認した。含浸状況を確認後、試験体の水分量を調整するために約2か月間室内で乾燥させ、吸水面以外にエポキシ樹脂による防水処理を施した。

屋外暴露環境は、温湿度変化が作用する屋外屋根あり環境と温湿度変化に加えて日射と降雨が作用する屋外屋根なし環境とした。屋外屋根あり環境は日射と降雨の影響を受けない屋外に2020年9月23日より1年10か月間、屋外屋根なし環境は日射と降雨の影響を受ける屋外に2021年7月14日より1年間、暴露した。

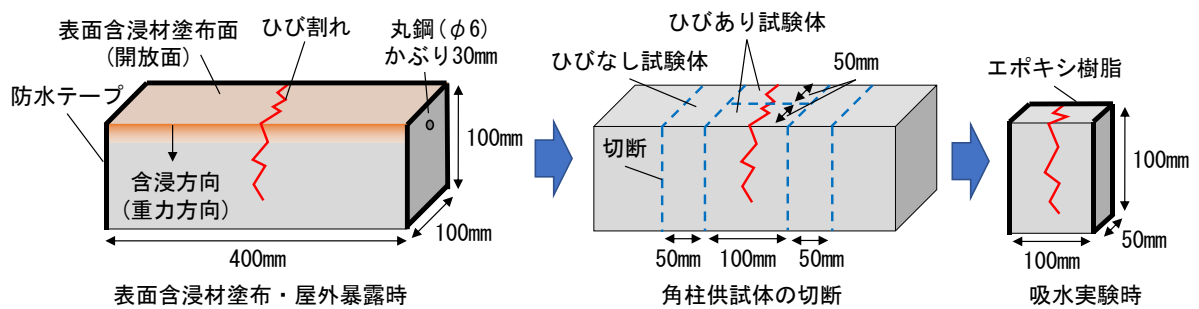


図-4.1 吸水試験体の作製状況

表-4.1 実験水準

試験体名	暴露環境 暴露期間	表面含浸材	平均 ひび割れ幅 [mm]	平均 ひび割れ深さ [mm]	試験体個数
1-N-w0	屋外屋根あり (温湿度変化) 1年10か月間	無塗布	0	0	2
1-N-w0.1			0.22	63	2
1-N-w0.5			欠測	欠測	欠測
1-N-w1.5			2.01	100	1
1-I-w0		含浸材塗布	0	0	3
1-I-w0.1			0.19	62	2
1-I-w0.5			0.56	77	2
1-I-w1.5			1.62	99	2
2-N-w0	屋外屋根なし (温湿度変化・ 日射・降雨) 1年間	無塗布	0	0	2
2-N-w0.1			0.12	72	2
2-N-w0.5			0.54	87	2
2-I-w0		含浸材塗布	0	0	4
2-I-w0.1			0.13	71	4
2-I-w0.5			0.47	87	4

#### 4.2.2 実験方法

吸水実験では、吸水過程と乾燥過程を複数サイクル実施し、吸水過程での質量増加量よりシラン系表面含浸材の吸水抑制効果を検討する。吸水過程および乾燥過程の概略図を図-4.2 に示す。吸水過程では、試験体はひび割れが開口している吸水面を下にし、吸水クロスを通して水道水を吸水させ、質量増加量を測定した。乾燥過程では、吸水面を上にして乾燥させ、質量減少量を測定した。吸水14日と乾燥14日を1サイクルとした。吸水過程・乾燥過程ともに温湿度が比較的安定した室内で実施した。実験期間中は30分間隔で温湿度を記録して温度 $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $36\pm 10\%$ で概ね安定していたことを確認した。また、屋外の環境作用を受けない場合のシラン系表面含浸材の吸水抑制効果を確認するために、2サイクル目の乾燥7日目で屋外屋根あり環境の各水準の試験体1体ずつにシラン系表面含浸材を塗布し、3サイクル目の測定を行った。

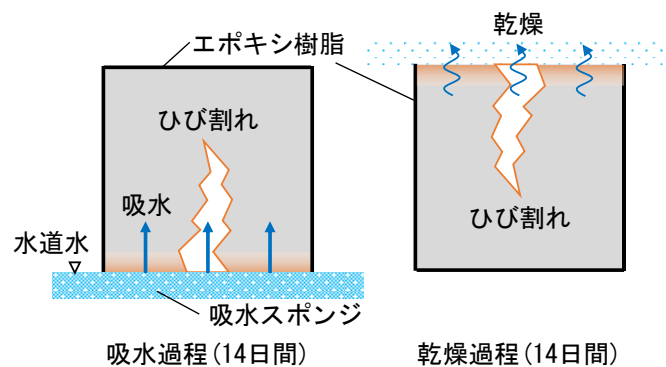


図-4.2 吸水過程と乾燥過程の概略図

## 4.3 実験結果

### 4.3.1 シラン系表面含浸材の含浸状況

実験に用いる吸水試験体は第3章の屋外暴露実験に用いた角柱供試体を切断したものである。そのため、シラン系表面含浸材の含浸状況は、第3章の3.3.1 屋外暴露実験終了後の表面含浸材の含浸状況に示す。

### 4.3.2 表面含浸材塗布後に屋外暴露された供試体の吸水特性

屋外屋根あり環境および屋外屋根なし環境の2サイクル目の吸水終了までの質量変化を図-4.3, 図-4.4に示す。質量変化は1サイクル目の吸水開始時点からの質量差である。

ひび割れの無いw0シリーズは各ひび割れ幅の角柱供試体から1体ずつ取得した試験体であるが、最大値と最小値の差はほとんどなく、各水準のコンクリート部の吸水特性のばらつきは小さい。

シラン系表面含浸材を塗布していない場合、ひび割れを有する試験体に注目すると、いずれの環境もひび割れの無い試験体と比べて吸水による質量増加が大きくなり、ひび割れにより吸水が促進されたことがわかる。各環境のひび割れの無い試験体の吸水過程を比較すると、屋外屋根なし環境の吸水による質量増加は屋外屋根あり環境よりも少ない。ひび割れを有する試験体も同様に屋外屋根なし環境の吸水速度は屋外屋根あり環境と比べて低下する傾向を示した。櫻庭らも5年間暴露した無塗布の試験体の吸水率が低下したことを報告している[4.1]。この屋外屋根なし環境での吸水速度の低下は、降雨により定期的に水分が供給されたことで暴露期間中もコンクリート表面付近で水和が進行し、緻密化したことが原因であると推察される。

シラン系表面含浸材を塗布した場合、ひび割れの有無および屋外暴露環境に関係なく、シラン系表面含浸材により吸水が抑制されたことがわかる。また、吸水過程での質量増加量と乾燥過程での質量減少量はほとんど等しく、含浸材を塗布していない場合の吸水と乾燥による質量増加の傾向と異なる。この傾向は、2.2.4で確認されたシラン系表面含浸材を塗布したひび割れの無い試験体での室内吸水実験結果と同様であり、ひび割れおよび屋外暴露の有無にかかわらずシラン系表面含浸材の撥水作用によりコンクリート内部への吸水浸透がほとんど抑制されたこと、吸水浸透した水分が乾燥過程でコンクリート表面から逸散したことを示している。

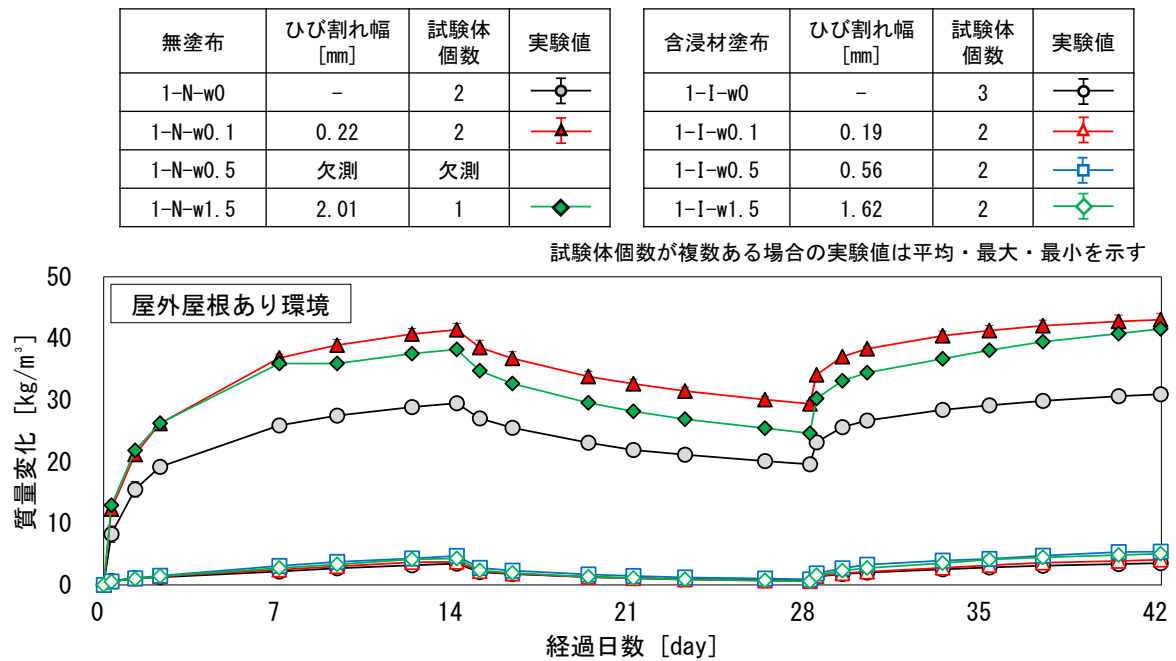


図-4.3 2サイクル目の吸水過程までの質量変化(屋外屋根あり環境)

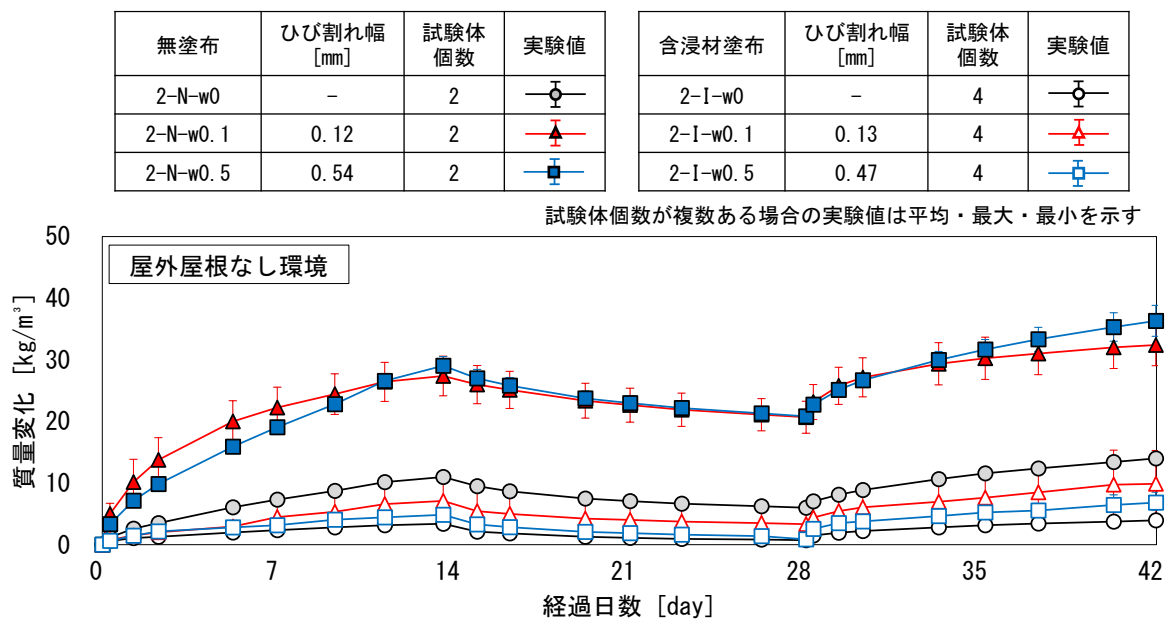


図-4.4 2サイクル目の吸水過程までの質量変化(屋外屋根なし環境)

屋外屋根あり環境および屋外屋根なし環境の1サイクル目の吸水量を図-4.5に示す。吸水量は1サイクル目の吸水過程での質量増加量である。シラン系表面含浸材を塗布した場合、ひび割れの無い試験体では、屋外暴露環境に関係なくシラン系表面含浸材により吸水が抑制され、屋外屋根あり環境と屋外屋根なし環境の吸水量はほぼ同じであった。ひび割れを有する試験体では、いずれの環境も表面含浸材を塗布していない試験体と比較して吸水による質量増加は小さく、ひび割れの無い表面含浸材を塗布した試験とシラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による吸水抑制効果が1年以上持続することが確認された。

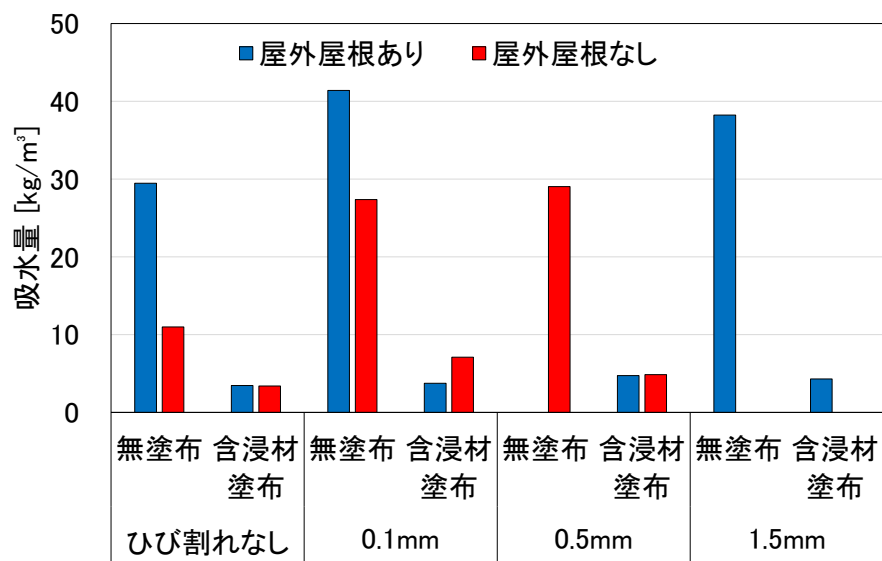


図-4.5 1サイクル目の吸水量(平均値)

### 4.3.3 屋外暴露後に表面含浸材を塗布した供試体の乾湿挙動

2 サイクル目の乾燥過程で無塗布の屋外屋根あり試験体にシラン系表面含浸材を塗布することで1年以上の屋外暴露がシラン系表面含浸材におよぼす影響について検討した。屋外屋根あり試験体の2サイクル目の乾燥開始から3サイクル目の吸水終了までの質量変化を図-4.6に、3サイクル目の吸水量を図-4.7に示す。質量変化は1サイクル目の吸水開始時点からの質量差、吸水量は3サイクル目の吸水過程での質量増加量である。

シラン系表面含浸材を塗布したひび割れの無い試験体では、塗布するタイミングに関わらず吸水量はほぼ同じであり、無塗布の試験体と比べて吸水が抑制された。ひび割れ幅0.1mmの試験体においても塗布するタイミングに関わらず吸水が抑制されることが確認された。

久保らは、屋外環境と室内環境に約2年暴露した実験結果より、室内環境においても内部の撥水層が減少すること、その原因は紫外線による表面からの劣化と乾湿作用や酸化による内部からの劣化であると推察している[4.2]。しかし、今回の屋外屋根あり環境では、ひび割れの有無にかかわらず屋外暴露前後の塗布による吸水抑制効果の差は確認されなかった。

これより、表面含浸材を塗布したタイミングが異なる試験体では3サイクル目の吸水開始時点での試験体内の水分量が異なることに注意する必要があるが、屋外環境に1年以上暴露した場合でもシラン系表面含浸材の吸水抑制効果は維持されることが確認された。

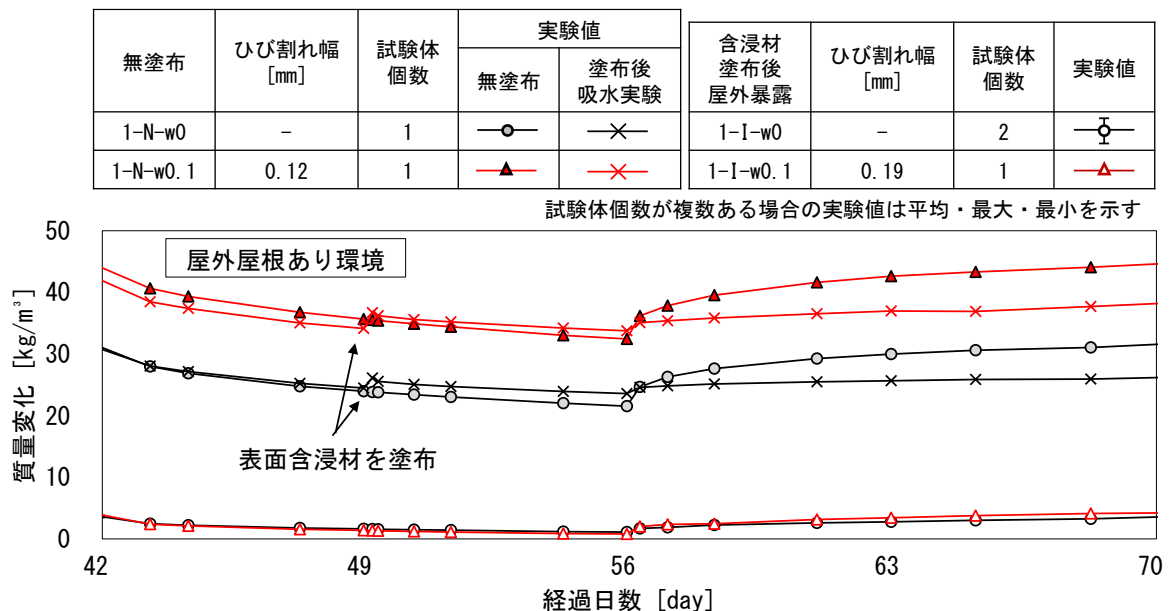


図-4.6 3サイクル目の吸水過程の質量変化(屋外屋根あり環境)



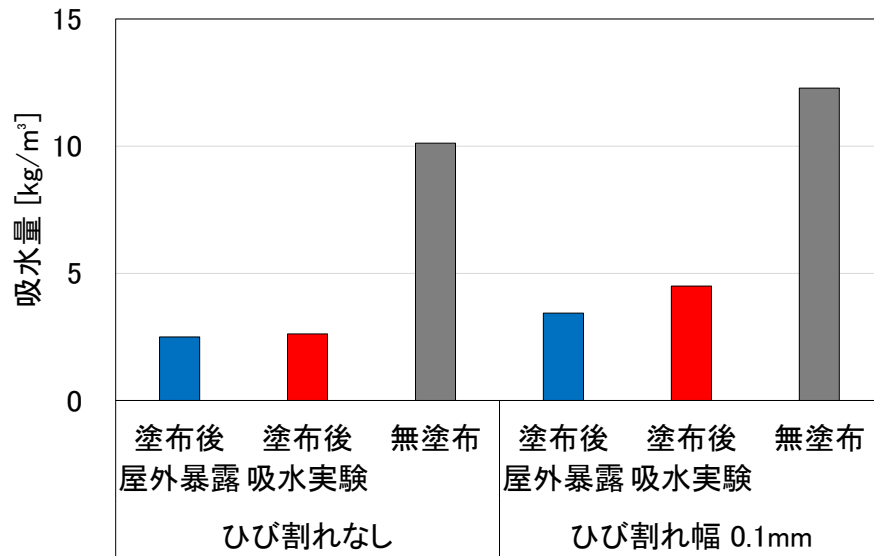


図-4.7 3サイクル目の吸水量(平均値)

#### 4.4 第4章のまとめ

ひび割れを有するコンクリートにシラン系表面含浸材を塗布後、屋外環境に1年以上暴露した試験体を用いて吸水実験を行い、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による吸水抑制効果の持続性について検討した。第4章で得られた知見を以下に示す。

- 1) シラン系表面含浸材を塗布したコンクリートの吸水抑制効果は、ひび割れの有無にかかわらず屋外環境に1年以上暴露後も維持されることを確認した。

#### 第4章の参考文献

- [4.1] 櫻庭浩樹, 小沢拓弥, 佐々木巖, 古賀裕久: 各種シラン系表面含浸材の塩害環境下での適用効果に関する暴露試験, セメント・コンクリート, No.922, pp. 16-22, 2023.12.
- [4.2] 久保善司, 玉井譲, 栗原慎介, 宮川豊章: シラン含浸コンクリートの発水効果の耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 421-426, 2001.

## 第5章

### シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果のモデル化と補修効果の再現

#### 5.1 はじめに

シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による水分浸透抑制効果について、第2章では室内実験より、第3章では屋外暴露実験より確認した。第4章では、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による吸水抑制効果の持続性について、屋外環境に1年以上暴露した試験体を用いた吸水実験より確認した。本章では、第2章、第3章および第4章の実験結果で得られた知見より、シラン系表面含浸材の撥水効果・温湿度の変動・降雨・ひび割れの影響を考慮したコンクリートの水分移動解析を行い、シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果のモデル化と補修効果の再現について検討した。

#### 5.2 シラン系表面含浸材およびひび割れを考慮した数値計算モデル

##### 5.2.1 ひび割れを有するコンクリートの水分移動モデルの概要

細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動モデル[5.1]およびひび割れ内における水分移動を考慮した水分移動モデル[5.2], [5.3]を用いて、屋外環境におけるひび割れを有したコンクリートの乾湿挙動を再現する。さらに、シラン系表面含浸材の撥水効果をモデル化して組み込み、ひび割れを有するコンクリートへのシラン系表面含浸材による補修効果の再現を試みる。

図-5.1 に今回の再現計算の解析対象領域を示す。供試体はひび割れに関して対称であるとし、2分の1の領域を解析対象とした。側面は防水面であるので2次元解析を行った。シラン系表面含浸材の含浸深さは、2.3.1のシラン系表面含浸材の含浸状況の観察結果に基づき、コンクリート表面およびひび割れ表面ともに10mmと設定した。

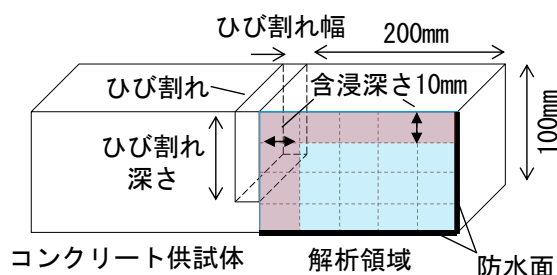


図-5.1 解析対象領域

図-5.2 に水分移動解析のフローを示す。降雨の有無により乾燥・吸湿計算と吸水計算に分け、それぞれの計算において新たにモデル化したシラン系表面含浸材の撥水効果を組み込んだ。

降雨が生じていない時間帯では、コンクリート表面およびひび割れ表面からの水蒸気の出入りを考慮した乾燥・吸湿計算を行う[5.2]，[5.3]。このとき、境界での水分の出入りおよびコンクリート中における水分移動特性におよぼす温度の影響を考慮するために、屋外屋根あり環境では気温のみを考慮した熱伝導解析を、屋外屋根なし環境では気温と日射を考慮した熱伝導解析を並行して行う[5.4]。

降雨が生じている時間帯では、屋外屋根なし環境に置かれた供試体は、乾燥・吸湿計算を行わず、コンクリート表面とひび割れ表面からの液状水の吸水計算を行う[5.3]。ひび割れ内への液状水の浸透は並行板間の吸水モデルにより計算し、液状水が浸透した領域ではひび割れ表面からコンクリート中への吸水が生じるとした[5.2]。なお、屋外屋根あり環境の供試体は、降雨時間帯も乾燥・吸湿計算を行った。

計算の時間ステップは1時間とし、気温、相対湿度、日照時間、全天日射量、降水量の1時間ごとの値を長野地方気象台の観測記録から取得し、入力した。降水量の記録の最小量である0.5mm以上が観測された時間帯を降雨時間帯と判定した。図-5.3に再現計算に用いた長野気象台の気象データ(気温・相対湿度・降水量)を示す。

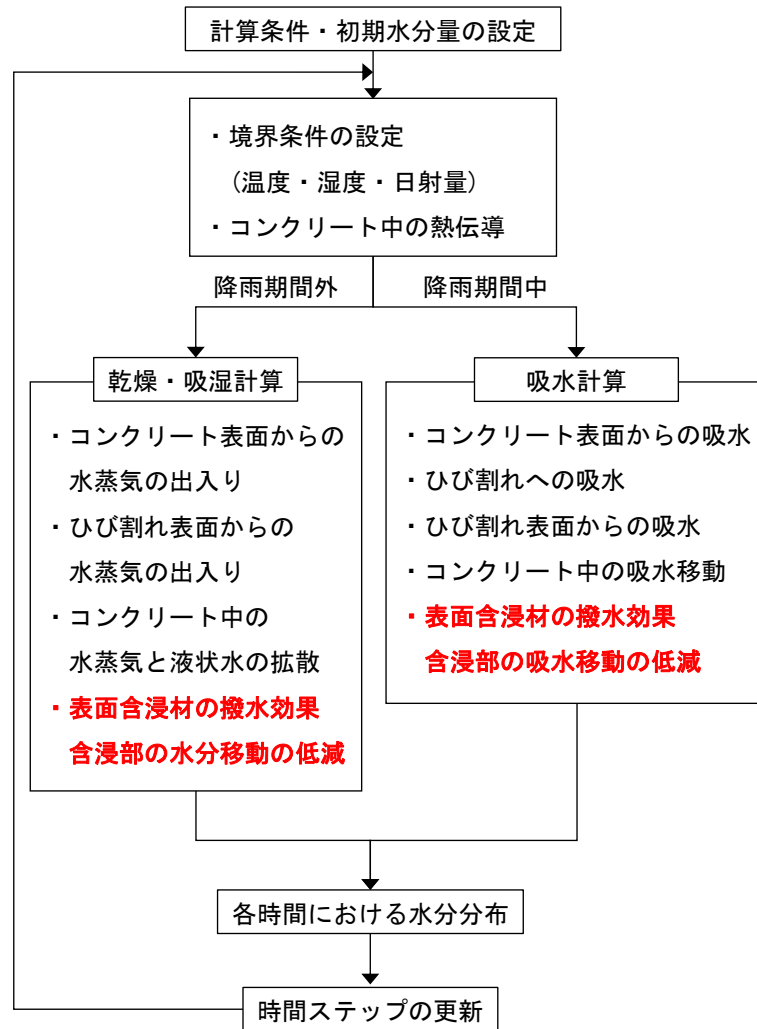


図-5.2 水分移動解析のフロー

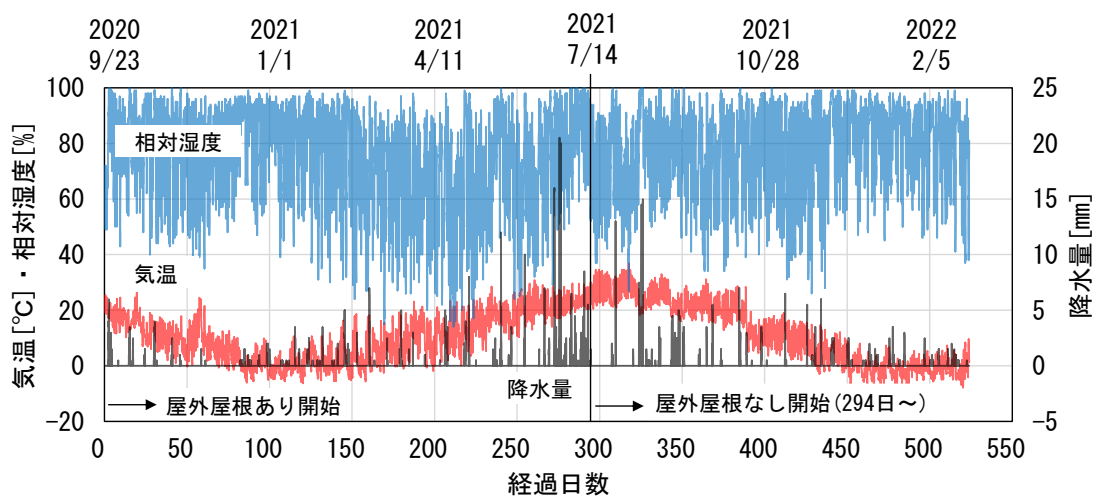


図-5.3 再現計算に用いた気象データ(気温・相対湿度・降水量@長野気象台)

### 5.2.2 コンクリート中の水分移動[5.1]

コンクリートの細孔組織中の水分移動は細孔構造に基づくモデルを用い、コンクリートの細孔構造を以下の細孔容積分布関数で表す.

$$V(r) = V_0\{1 - \exp(-Br^C)\} \quad (5.1)$$

ここに、 $V(r)$ ：コンクリート単位体積中の半径  $r$  以下の累積細孔容積[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$V_0$ ：コンクリート単位体積中における総細孔容積[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$r$ ：細孔半径[m]

$B, C$ ：細孔容積分布関数の形状を決定するパラメータ[無次元]

である. コンクリート細孔組織中の液状水と水蒸気の平衡関係は毛細管凝縮理論に従うとし、凝縮と蒸発は可逆とする. コンクリート中の水分の移動は水蒸気と液状水のそれぞれ考慮し、水分移動の質量保存則は式(5.2)に、水蒸気の移動流束は式(5.3)に、液状水の移動流束は式(5.4)に表す.

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} = -\text{div}(J_v + J_l) \quad (5.2)$$

$$J_v = -K_v V_g D_{v0} \text{grad}(\rho_v) \quad (5.3)$$

$$J_l = \int_0^{r_s} \rho_l \frac{dV(r)}{dr} \left\{ -K_l \frac{r^2}{8\mu} \text{grad} \left( -\frac{2\gamma}{r_s} \right) \right\} \quad (5.4)$$

ここに、 $w_l$ ：コンクリート単位体積当たりの水分量[kg/m<sup>3</sup>]

$J_v$ ：水蒸気の移動流束[kg/m<sup>2</sup>・s]

$J_l$ ：液状水の移動流束[kg/m<sup>2</sup>・s]

$K_v, K_l$ ：水蒸気移動、液状水移動に関する特性を表す材料係数[無次元]

$V_g$ ：コンクリート単位体積中における気相体積 ( $=V_0 - V(r_s)$ ) [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$r_s$ ：液状水が存在する最大細孔半径[m]

$D_{v0}$ ：水蒸気と乾燥空気の相互拡散係数[m<sup>2</sup>/s]

$\rho_v, \rho_l$ ：水蒸気、液状水の密度[kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$ ：液状水の粘性係数[Pa・s]

$\gamma$ ：液状水の表面張力[N/m]

である.

### 5.2.3 コンクリート中への吸水[5.3]

降雨などによりコンクリート表面に液状水が接したとき、コンクリート中への吸水が起こる。コンクリート中への吸水現象は、重力の支配を受けない表面張力を駆動力とした円管における毛細管現象を考慮した吸水モデルにより表現する。吸水時間  $t$  [s]における液状水の浸透距離  $x$  [m]を式(5.5)に、吸水による水分移動流束を式(5.6)に表す。

$$x = K_{lp} \sqrt{\frac{r\gamma}{2\mu} t} \quad (5.5)$$

$$J_{lp} = \int_{r_a}^{\infty} \rho_l \frac{dV(r)}{dr} \left\{ K_{lp} \sqrt{\frac{r\gamma}{8\mu t}} \right\} \quad (5.6)$$

ここに、 $J_{lp}$ ：吸水による液状水の移動流束[kg/m<sup>2</sup>・s]

$K_{lp}$ ：吸水による液状水移動に関する特性を表す材料係数[無次元]

$r_a$ ：吸水浸透する液状水が存在する最小細孔半径[m]

である。

### 5.2.4 ひび割れへの吸水[5.2]

ひび割れが存在するコンクリートの表面に液状水が接したとき、コンクリート中への吸水と同時に、ひび割れへの吸水が起こる。ひび割れへの吸水現象は、表面張力を駆動力とした平行板間における毛細管現象を考慮した吸水モデルにより表現する。吸水時間  $t$  [s]におけるひび割れ内の液状水の浸透距離  $x$  [m]を式(5.7)に、ひび割れ内の液状水の浸透速度  $v$  [m/s]を式(5.8)に表す。

$$x = \sqrt{\frac{2w\gamma}{f} t} \quad (5.7)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{w\gamma}{2ft}} = \frac{w\gamma}{f} \cdot \frac{1}{x} \quad (5.8)$$

ここに、 $w$ ：ひび割れ幅[m]

$f$ ：摩擦係数[kg/m・s]

である。なお、ひび割れ幅が大きくなると浸透方向によっては浸透速度におよぼす重力の影響および液状水の最終上昇高さを考慮しなければならない場合もあると考えられるが、今回の解析では簡単のため重力の影響を無視することとした。

## 5.2.5 ひび割れ表面からコンクリート中への吸水[5.2]

ひび割れ内に液状水が浸透した領域では、ひび割れ表面からコンクリート中への吸水が起こる。図-5.4に模式的に示したように、コンクリート表面からひび割れ内への液状水の浸透距離は、ひび割れ内への吸水量、ひび割れ内の液状水の変化量、ひび割れ表面からコンクリート中への吸水量の質量保存の間に成り立つ質量保存により表現する。ある時間  $t$  におけるひび割れ内への浸透距離を  $x_{cr}$ 、時間  $t$  から時間ステップ  $\Delta t$  の間のひび割れ内への浸透距離  $\Delta x_{cr}$  とすると、式(5.9)が成り立つ。

$$\Delta x_{cr} \cdot w = \Delta t \cdot v \cdot w - \Delta w_{suc} \quad (5.9)$$

ここに、 $\Delta t$ ：時間増分[s]

$\Delta w_{suc}$ ：時間  $t$  から時間ステップ  $\Delta t$  でのひび割れ表面からコンクリート中への吸水量[m<sup>2</sup>]である。時間  $t$  から時間ステップ  $\Delta t$  でのひび割れ表面からコンクリート中への吸水量  $\Delta w_{suc}$  は、コンクリート中への吸水モデルにより時間  $t$  におけるひび割れ表面からコンクリート中に吸水した液状水の総吸水量  $w_{suc}$  [m<sup>2</sup>]を算定し、時間ステップごとの総吸水量の差分とする。

$$w_{suc}(t) = \rho_l \int_V V_{suc} dV = \rho_l \int_V V_0 \cdot \exp(-Br_a^c) dV \quad (5.10)$$

$$\Delta w_{suc} = w_{suc}(t) - w_{suc}(t - \Delta t) \quad (5.11)$$

ここに、 $V_{suc}$ ：コンクリート単位体積中の浸透した液状水の体積[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]である。

以上より、式(5.9)の時間  $t$  から時間ステップ  $\Delta t$  の間のひび割れ内への浸透距離  $\Delta x_{cr}$  を求めることができる。ひび割れ内はコンクリート表面からひび割れ内への浸透距離  $x_{cr} + \Delta x_{cr}$  まで液状水で満たされているとし、コンクリート表面およびひび割れ表面からのコンクリート中への吸水計算を行う。

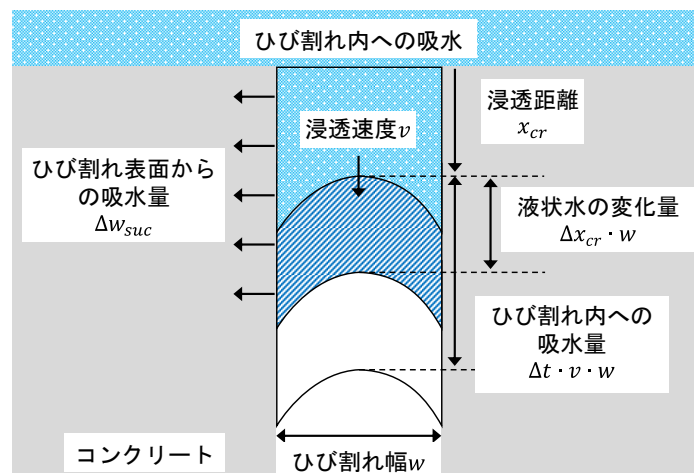


図-5.4 ひび割れ内への吸水とひび割れ表面からのコンクリート中への吸水

### 5.2.6 コンクリート表面およびひび割れ表面の境界条件[5.3]

コンクリート表面が大気に接する場合、コンクリート表面近傍に湿度勾配を持った大気境界層を考慮した水分移動流束により表す.

$$J_B = \frac{D(w_l)}{h}(w_l - w_{lB}) \quad (5.12)$$

ここに、 $J_B$ ：コンクリート表面の水分移動流束[ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$w_{lB}$ ：雰囲気の相対湿度に平衡するコンクリート単位体積当たりの水分量[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$D(w_l)$ ：コンクリート中の水分拡散係数[ $\text{m}^2/\text{s}$ ]であり、水分量の関数として評価される

$h$ ：コンクリート表面に形成される仮想湿度勾配層の厚さ[m](本研究では 0.00075[m])

である.

ひび割れ幅が小さいほどひび割れ内空間と外部との湿度交換が行われにくいと考えられることから、ひび割れ面からの乾燥速度はコンクリート表面に比べて小さくなることを考慮したモデルにより表す.

$$J_{Bcr} = \beta_{cr} \cdot J_B \quad (5.13)$$

ここに、 $J_{Bcr}$ ：ひび割れ表面からの水分移動流束[ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$\beta_{cr}$ ：コンクリート表面に比べたひび割れ表面からの水分逸散の低減率[無次元]

である. コンクリート表面に比べたひび割れ表面からの水分逸散の低減率 $\beta_{cr}$ は式(5.14)に示す.

$$\beta_{cr} = \begin{cases} \frac{w}{w_0} & (0 \leq w \leq w_0) \\ 1 & (w_0 \leq w) \end{cases} \quad (5.14)$$

ここに、 $w_0$ はこれより大きいひび割れはコンクリート表面からの乾燥と同様に扱うひび割れ幅の値であり、本研究では $w_0=0.004[\text{m}]$ とした.



## 5.2.7 シラン系表面含浸材による撥水効果のモデル化

シラン系表面含浸材の撥水作用によりシラン系表面含浸材が含浸しているコンクリートの水分移動は、乾燥速度がわずかに低減されること、吸水が抑制されることが確かめられた。固体表面の撥水効果は液体との接触角の違いに現れる。今回のコンクリート中の水分移動モデルでは、コンクリート細孔中では液状水と固体壁の接触角が0と仮定している[5.3]。そのため、本馬らの撥水効果のモデル化では、コンクリート細孔中の液状水と固体壁の接触角を大きくし、毛細管現象による液状水の浸透速度を遅らせることで吸水抑制効果を表現している[5.5]。新たに撥水効果による乾燥速度の低減を接触角の変化により表現する場合、コンクリート細孔組織中の液状水と水蒸気の平衡関係が変化すると考えられるが、その影響は不明確である。そこで、本論文では単純化された法則による撥水効果の表現を優先し、図-5.5に示すように乾燥・吸湿計算および吸水計算時のシラン系表面含浸材の含浸部分における水分移動速度を低減することで撥水効果をモデル化した。乾燥・吸湿計算時の含浸材含浸部の水分移動流束を式(5.15)に、吸水計算時の含浸材含浸部の水分移動流束を式(5.16)に示す。

$$J_{Re}^{dif} = \beta_{dif} \cdot (J_v + J_l) \quad (5.15)$$

$$J_{Re}^{lp} = \beta_{cap} \cdot J_{lp} \quad (5.16)$$

ここに、 $J_{Re}^{dif}$ ：含浸材含浸部の水蒸気および液状水の移動流束[kg/m<sup>2</sup>・s]

$J_{Re}^{lp}$ ：含浸材含浸部の吸水による液状水の移動流束[kg/m<sup>2</sup>・s]

$\beta_{dif}$ ：含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率[無次元] ( $0 \leq \beta_{dif} \leq 1$ )

$\beta_{cap}$ ：含浸部での吸水移動に対する低減率[無次元] ( $0 \leq \beta_{cap} \leq 1$ )

である。

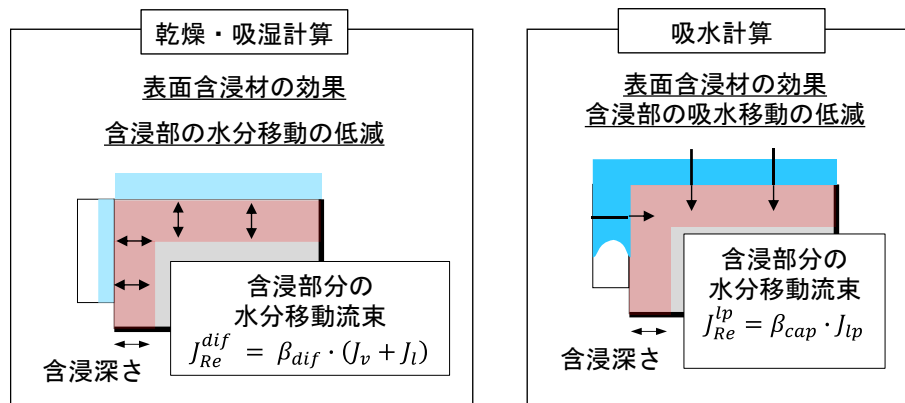


図-5.5 シラン系表面含浸材の撥水効果のモデル化

### 5.3 シラン系表面含浸材による撥水効果のパラメータスタディ

#### 5.3.1 パラメータスタディの計算条件

提案する撥水効果の水分移動低減モデルを用いて、低減率および撥水する含浸深さを系統的に変化させた計算結果からモデルの妥当性を検討する。検討の指標として水分の流入出による質量変化を用い、2.2で行った吸水実験の吸水期間と吸水後の乾燥期間を想定環境とする。

計算に用いる材料係数は、5.3の再現計算と同一の値とし、表-5.1に示す。想定環境は、温湿度が変動する環境で14日間吸水させた後、14日間乾燥させるものとする。計算の時間ステップは1時間とし、温湿度は2.2の吸水実験中に測定された値とした(図-2.3)。解析領域は図-5.6に示すように、吸水試験体と同一の1面開放で100mmの深さをもつものとし、1次元水分移動問題として解析した。

表-5.1 計算に用いた材料係数

$V_0$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$B$	$C$	$K_v$	$K_l$	$K_{lp}$	$iRH$ [%]
0.155	21500	0.5	0.075	0.0015	0.14	94

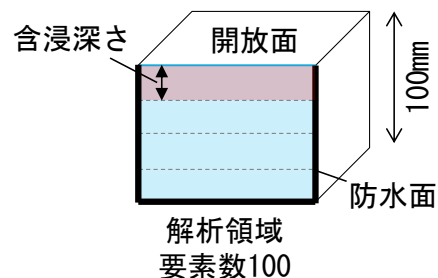


図-5.6 パラメータスタディでの解析領域

### 5.3.2 含浸部での吸水移動に対する低減率 $\beta_{cap}$ に関するパラメータスタディ

図-5.7 に含浸部での吸水移動に対する低減率 $\beta_{cap}$ の大きさを変化させた結果を示す．含浸部での吸水移動の低減を大きくすることで、吸水による質量増加を抑制できることがわかる．今回の計算結果と2.2の吸水実験結果から、吸水計算時の含浸部での水分移動を低減する今回の解析手法により、シラン系表面含浸材の吸水抑制効果を再現できることが確認された．

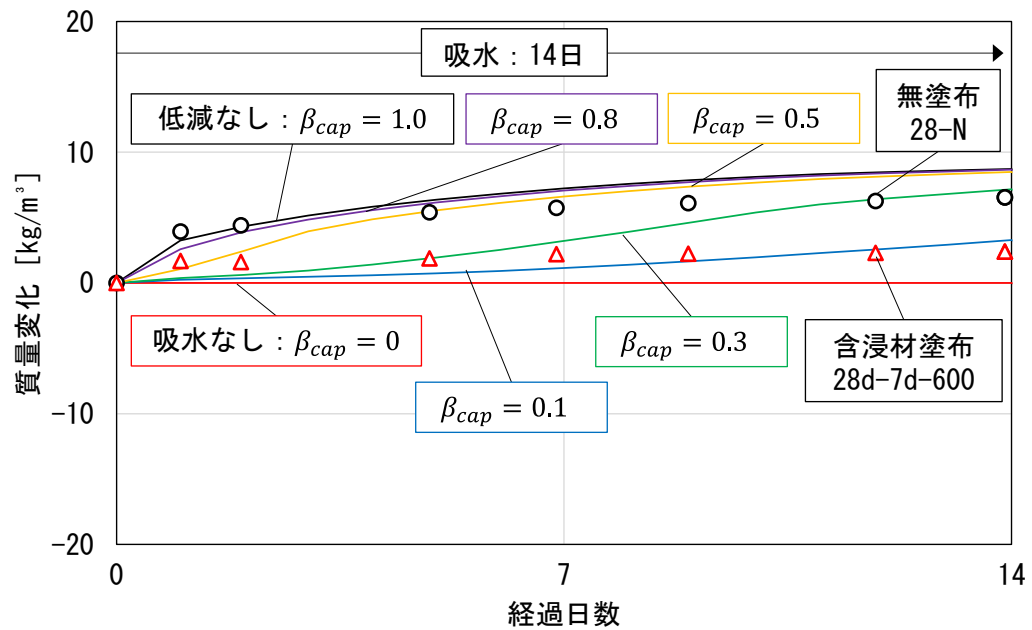


図-5.7 含浸部での吸水移動に対する低減率 $\beta_{cap}$ の大きさの検討(含浸深さ 10mm)

図-5.8 に含浸部での吸水移動に対する低減率 $\beta_{cap}$ の含浸深さを变化させた結果を示す．実験結果を良好に再現する $\beta_{cap} = 0.1$ を基準とした場合，含浸深さが吸水速度におよぼす影響は大きいことがわかる．これは，今回の計算モデルでは，撥水による吸水移動の低減効果が大きい場合でも含浸深さが吸水抑制効果におよぼす影響は大きいことを示している．

これらの結果より，コンクリート表面およびひび割れ表面ともに含浸深さを 10mm とし，含浸部の吸水移動を低減する手法は妥当であるといえる．

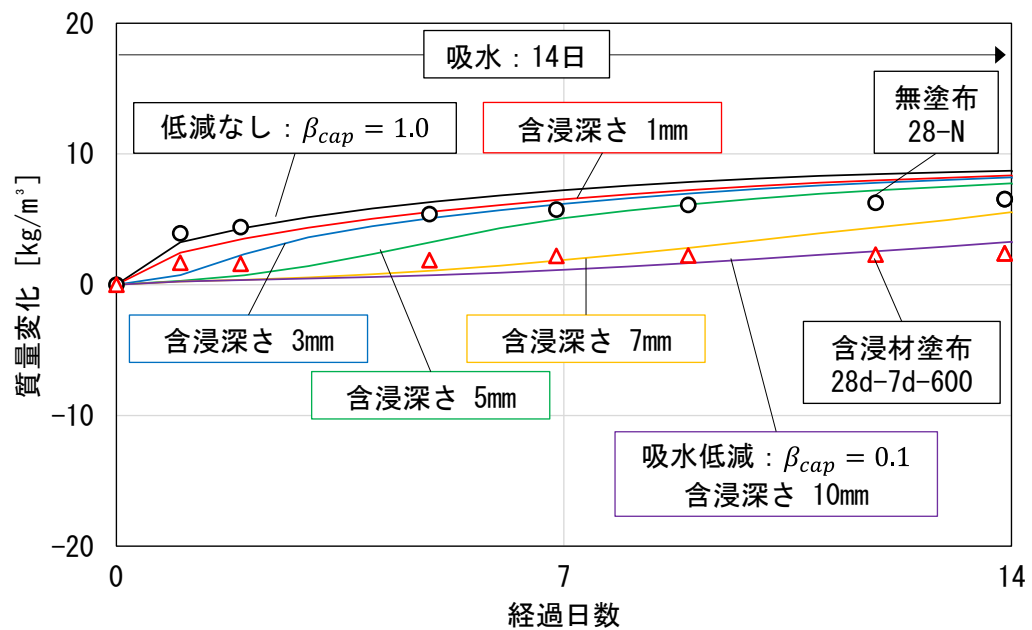


図-5.8 含浸部での吸水移動に対する低減率 $\beta_{cap}$ の含浸深さの検討 ( $\beta_{cap} = 0.1$ )

### 5.3.3 含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ に関するパラメータスタディ

図-5.9 に含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ の大きさを変化させた結果を示す。含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動の低減することで、乾燥による質量減少を抑制できることがわかる。

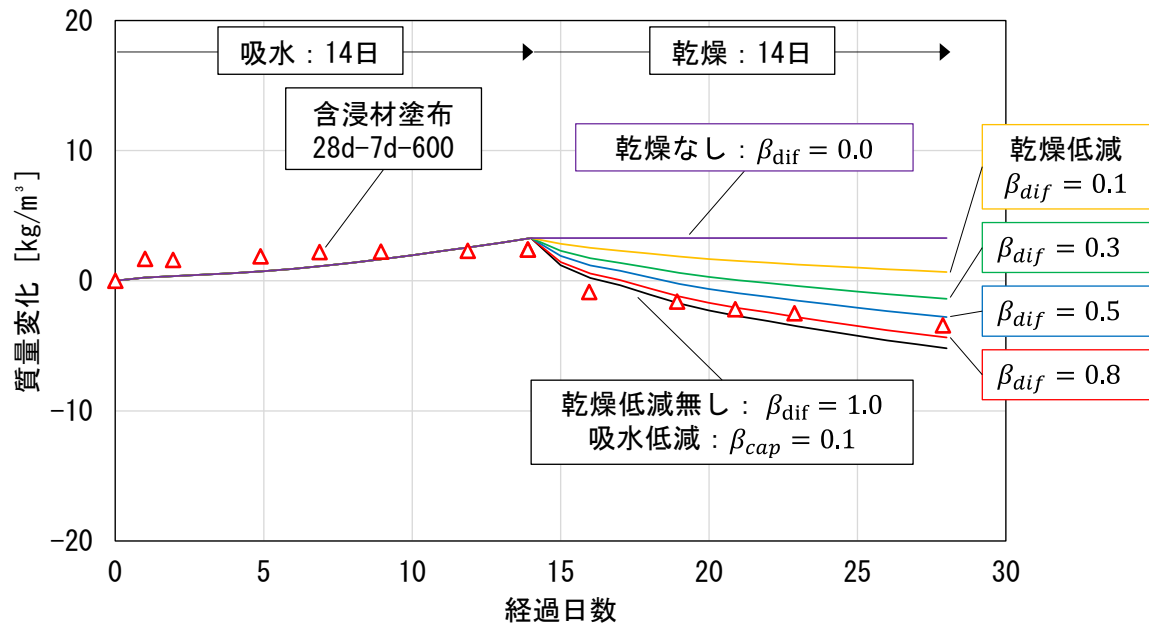


図-5.9 含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ の大きさの検討  
( $\beta_{cap} = 0.1$ ・含浸深さ 10mm)

図-5.10 に含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ の含浸深さを变化させた結果を示す。吸水移動に対する低減率 $\beta_{cap}$ と乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ に関する含浸深さは同一の領域であるとした。実験結果を再現する $\beta_{cap} = 0.1$ ,  $\beta_{dif} = 0.8$ を基準とした場合、含浸深さが乾燥速度におよぼす影響は小さく、吸水抑制効果におよぼす影響が大きいことがわかる。

これらの結果より、今回の解析において、コンクリート表面およびひび割れ表面ともに含浸深さを 10mm とし、含浸部の乾燥・吸湿移動を低減する手法は妥当であるといえる。

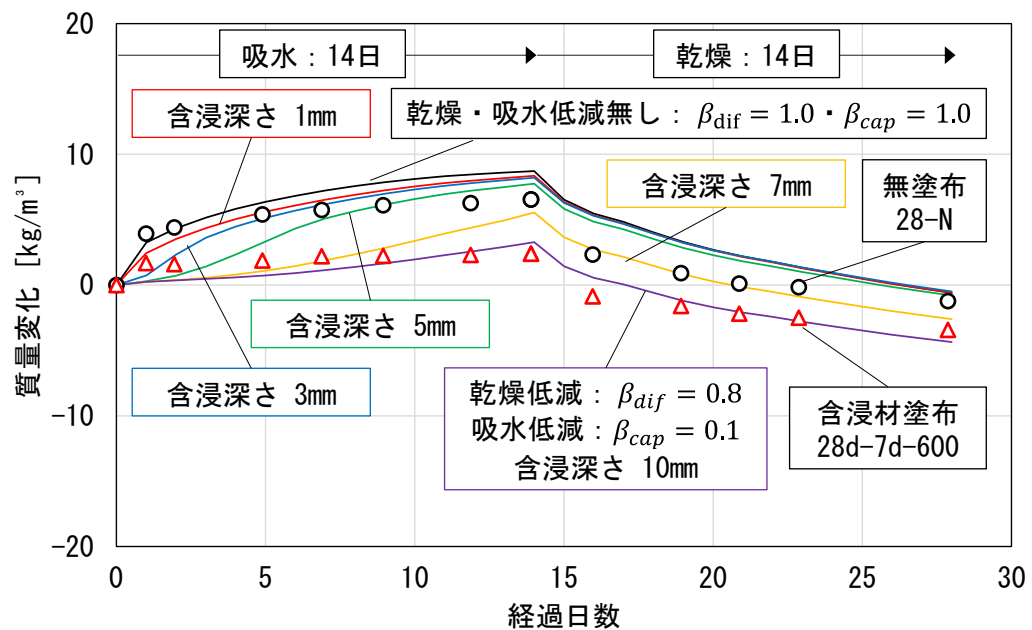


図-5.10 含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ の含浸深さの検討  
( $\beta_{cap} = 0.1$ ・ $\beta_{dif} = 0.8$ )

## 5.4 計算結果

### 5.4.1 シラン系表面含浸材を塗布していない供試体の乾湿挙動の再現結果

ひび割れの無い含浸材を塗布していない供試体の再現計算結果を図-5.11に示す。再現計算に用いる材料係数は、同一配合の既往研究[5.4]と今回のひび割れの無い表面含浸材を塗布していない供試体の実験結果より同定し、表-5.2に示す。屋外屋根あり環境の再現計算では、実験開始後150日以降の冬季の乾燥の速度と270日前後の梅雨時期の吸湿の速度が実験結果と乖離しているが、今回は、屋外屋根あり環境の実験開始後150日までの初期の乾燥挙動の再現を優先することで屋外屋根なし環境の全体の吸水および乾燥挙動を再現した。そのため、再現計算の妥当性の検証は、屋外屋根あり環境での実験開始後150日までの乾燥挙動と屋外屋根なし環境での全期間の乾湿挙動で検証した。

屋外屋根あり環境での実験開始後150日以降の冬季の乾燥傾向の乖離は、長野気象台の2021年2月から3月の平均気温が2.1℃から7.4℃に上昇し、平均相対湿度が74%から67%に低下したことによる乾燥を表現できているが、最低気温が氷点下を下回るような低温環境での乾燥挙動を過大に評価している可能性が考えられる。

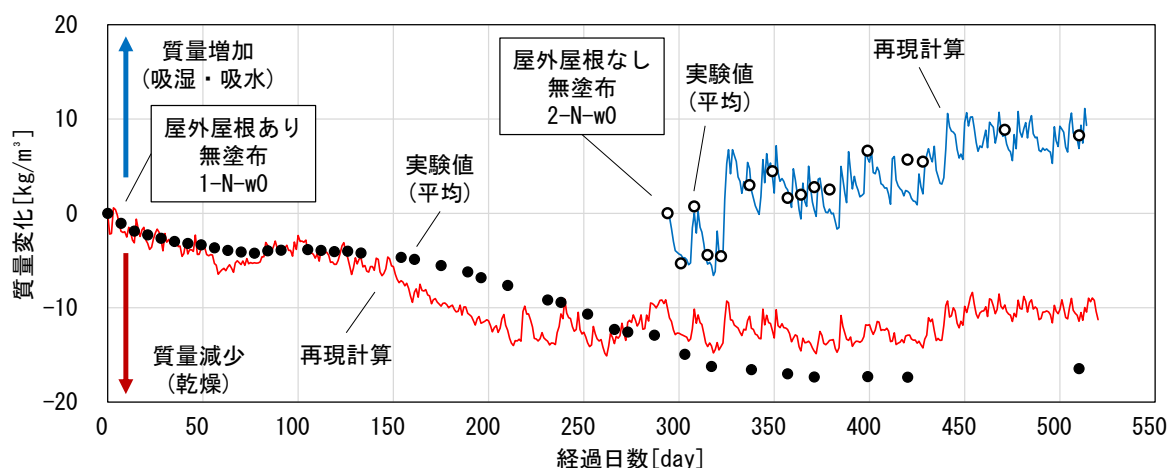


図-5.11 ひび割れの無い含浸材を塗布していない供試体の再現計算結果

表-5.2 再現計算に用いた材料係数

$V_0$ [m³/m³]	$B$	$C$	$K_v$	$K_l$	$K_{lp}$	$f$ [kg/m·s]	$iRH$ [%]
0.155	21500	0.5	0.075	0.0015	0.14	15	92(屋外屋根あり) 90(屋外屋根なし)

ひび割れを考慮した含浸材を塗布していない供試体の再現計算結果を図-5.7に示す。再現計算結果は、屋外屋根あり環境でのひび割れにより生じる乾湿挙動の変化は小さいこと、屋外屋根なし環境でのひび割れにより吸水が促進される傾向を再現できている。

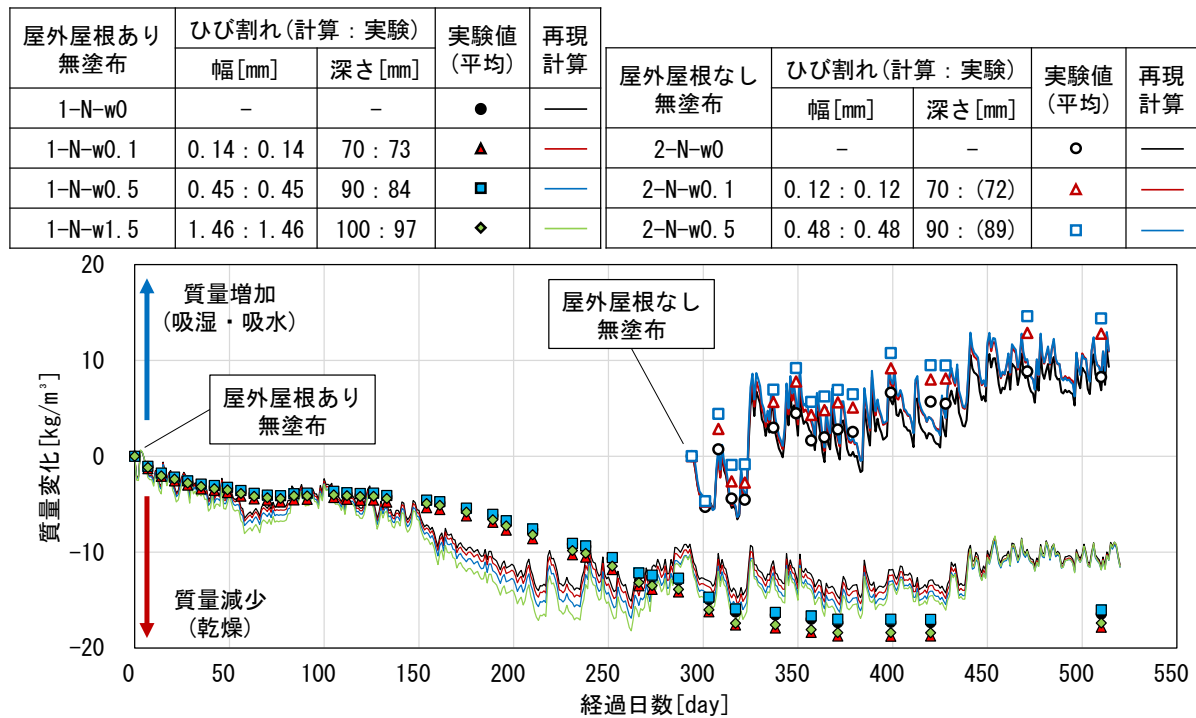


図-5.7 ひび割れを考慮した表面含浸材を塗布していない供試体の再現計算結果



### 5.4.2 シラン系表面含浸材による撥水効果の感度解析

図-5.8に屋外屋根あり環境におけるひび割れの無い供試体の含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ に関する感度解析結果を示す。シラン系表面含浸材を塗布していない場合は $\beta_{dif} = 1$ とした。含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動を低減することで、屋外屋根あり環境でのシラン系表面含浸材を塗布した供試体の乾燥が低減される傾向を表現することができた。今回の屋外屋根あり環境の再現計算結果は実験開始から150日以降で乖離する傾向となるため、低減率 $\beta_{dif}$ を詳細に検討することはできない。しかし、実験結果より表面含浸材を塗布した供試体は無塗布の供試体と比べて乾燥がわずかに低減される傾向を確認したこと、Sadouki and Wittmannの水分拡散係数の推定結果[5.6]を参考とし、今回の含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率は $\beta_{dif} = 0.5$ とする。

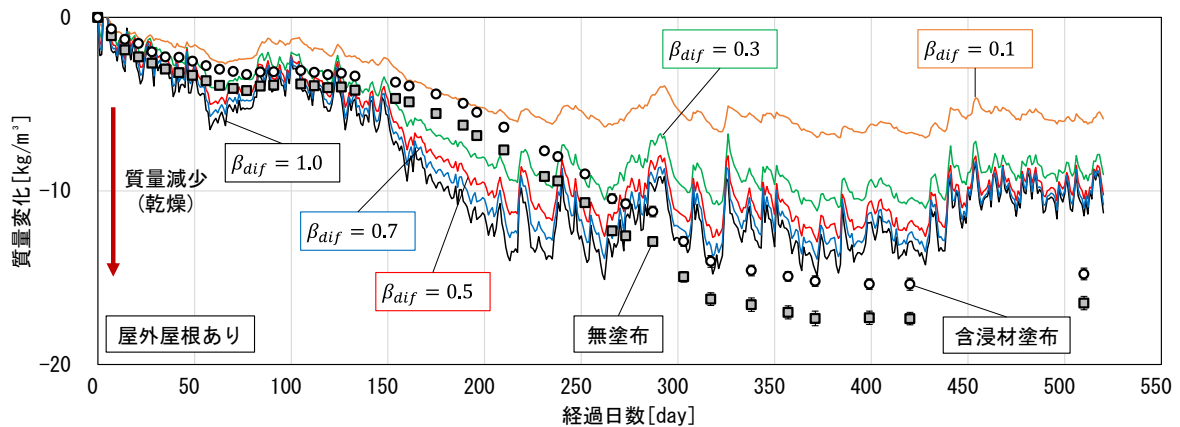


図-5.8 屋外屋根あり環境におけるひび割れの無い供試体での撥水による乾燥・吸湿時の水分移動の低減率 $\beta_{dif}$ の感度解析結果

図-5.9 に屋外屋根なし環境におけるひび割れの無い供試体の含浸部での吸水移動に対する低減率 $\beta_{cap}$ と乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減率 $\beta_{dif}$ に関する感度解析結果を示す。シラン系表面含浸材を塗布していない場合は $\beta_{cap} = 1, \beta_{dif} = 1$ とした。含浸材含浸部での乾燥・吸湿時の水分移動が生じない場合は $\beta_{dif} = 0$ とし、吸水が生じない場合は $\beta_{cap} = 0$ と設定した。含浸材含浸部において吸水移動が完全に生じない( $\beta_{cap} = 0, \beta_{dif} = 1, 0.5$ )とした解析結果は、乾燥・吸湿時の水分移動に対する低減の有無にかかわらず屋外屋根なし環境でのシラン系表面含浸材を塗布した供試体の乾燥傾向を良好に再現できた。含浸材含浸部において吸水移動は生じ乾燥・吸湿時の水分移動のみ生じない( $\beta_{cap} = 1, \beta_{dif} = 0$ )とした解析結果は、屋外屋根なし環境でのシラン系表面含浸材を塗布した供試体の吸水抑制効果を表現できなかった。

これらの結果より、シラン系表面含浸材の撥水による水分浸透抑制効果は、含浸材含浸部において、吸水移動の低減と乾燥・吸湿を低減することでいずれの環境下でも表現できることが明らかとなった。今回の感度解析結果より、本研究での再現計算に用いるシラン系表面含浸材による含浸部での水分移動に対する低減率は $\beta_{cap} = 0, \beta_{dif} = 0.5$ とする。

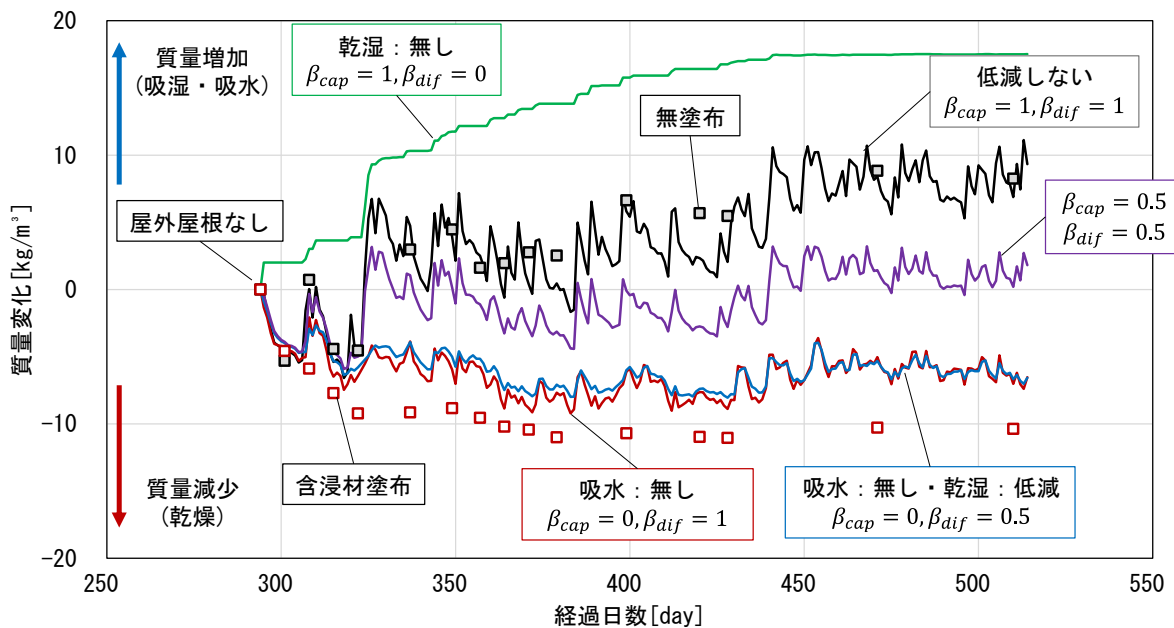


図-5.9 屋外屋根なし環境におけるひび割れの無い供試体での撥水による吸水と乾燥・吸湿の水分移動の低減率 $\beta_{cap}$ ,  $\beta_{dif}$ の感度解析結果

### 5.4.3 シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修後の乾湿挙動の再現結果

屋外屋根あり環境における表面含浸材を塗布したひび割れを有する供試体の再現計算結果 ( $\beta_{cap} = 0, \beta_{dif} = 0.5$ ) を図-5.10 に示す。屋外屋根あり環境では、ひび割れにより生じる乾湿挙動の変化が小さい傾向を再現できている。

屋外屋根なし環境における再現計算結果 ( $\beta_{cap} = 0, \beta_{dif} = 0.5$ ) を図-5.11 に示す。屋外屋根なし環境では、含浸材含浸部において吸水が完全に生じないとして降雨によるコンクリート表面およびひび割れ内部からの吸水が抑制され、ひび割れの無い表面含浸材を塗布した供試体と同程度の乾燥傾向を再現できている。

これらより、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による水分浸透抑制効果は、コンクリート表面およびひび割れ内部の含浸部の吸水移動の低減と乾燥・吸湿時の水分移動の低減によりもたらされることが確認された。

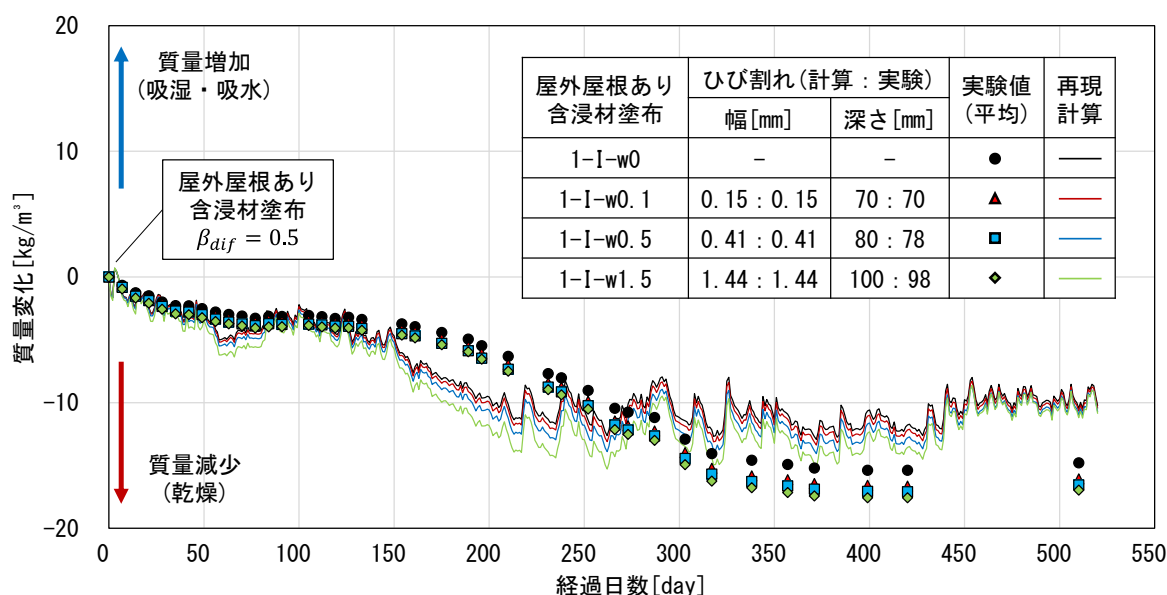


図-5.10 屋外屋根あり環境における表面含浸材を塗布した供試体の再現計算結果

( $\beta_{cap} = 0, \beta_{dif} = 0.5$ )

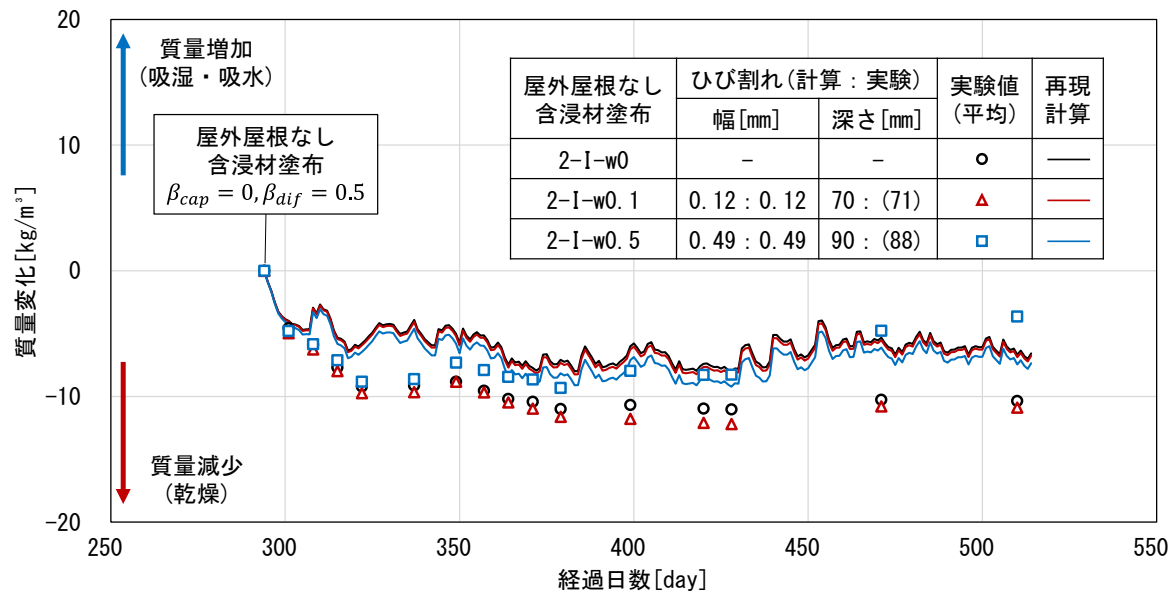


図-5.11 屋外屋根なし環境における表面含浸材を塗布した供試体の再現計算結果  
( $\beta_{cap} = 0, \beta_{dif} = 0.5$ )

## 5.5 第5章のまとめ

シラン系表面含浸材の撥水効果・温湿度の変動・降雨・ひび割れの影響を考慮したコンクリートの水分移動解析を行い、シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果のモデル化と補修効果の再現について検討した。第5章で得られた知見を以下に示す。

- 1) シラン系表面含浸材の吸水抑制効果は、含浸材含浸部において吸水による水分移動が低減されること、乾燥・吸湿時の水分移動が低減されることで表現できることを確認した。
- 2) シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修の吸水抑制効果は、コンクリート表面およびひび割れ表面の含浸部の吸水移動の抑制と乾燥・吸湿時の水分移動の低減によりもたらされることが明らかとなった。

## 第 5 章の参考文献

- [5.1] 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No. 520, pp. 35-45, 1995.8.
- [5.2] 工藤めい, 下村匠: コンクリート部材への水の浸透・乾燥におよぼすひび割れの影響に関する実験と数値解析, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 75, No. 3, pp. 196-207, 2019.
- [5.3] Hien, N. T. and Shimomura, T.: Evaluation of critical crack width for reinforcement corrosion in RC member based on numerical simulation of transport of chloride ions in concrete, *Journal of Asian Concrete Federation*, Vol. 3, No. 2, pp. 67-81, 2017.12.
- [5.4] 蓑輪圭祐, 下村匠, 川端雄一郎, 藤井隆史, 富山潤: 屋外における環境作用がコンクリートの乾燥収縮におよぼす影響に関する共通暴露試験と数値解析による検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 77, No. 4, pp. 134-149, 2021.
- [5.5] 本馬幸治, Thynn, T. H., 下村匠: 乾湿を受ける実環境下におけるコンクリート中の水分量におよぼす表面含浸材の効果とそのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1631-1636, 2011.
- [5.6] Sadouki, H. and Wittmann, F. H.: Influence of water repellent treatment on drying of concrete, 2nd International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials (Hydrophobe II), pp. 177-188, 1998.

## 第6章 結論

本研究では、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による水分浸透抑制効果の検証とその効果を生み出すメカニズムの解明およびシラン系表面含浸材によるひび割れ補修効果の評価手法の提案を目的とし、低粘度のシラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修がコンクリートの乾湿挙動および吸水移動におよぼす影響を室内実験、屋外暴露実験および水分移動解析より検討した。これらの結果をまとめ、本論文の結論とする。

シラン系表面含浸材を用いた補修は、コンクリート表面からの水分浸透を抑制でき、簡易な補修によるコンクリート構造物の耐久性向上につながる。既往の研究の多くは、透水、塩分浸透、ASR 膨張や凍害などに対するシラン系表面含浸材の補修効果を実験により検証するものであった。本研究では、シラン系表面含浸材の撥水作用による水分浸透抑制効果と実環境下での乾湿挙動に着目し、乾湿挙動に関する知見の蓄積および水分移動解析による乾湿挙動の再現は、シラン系表面含浸材を用いた補修が耐久性におよぼす影響を定量的に示し、設計時の性能評価手法の確立に寄与すると考察した。

シラン系表面含浸材を用いた補修後のコンクリートの吸水・乾湿挙動に関する実験より、シラン系表面含浸材を塗布量や含浸方向などの塗布条件にかかわらず、コンクリート表面から5~10mm 程度含浸させることで、無塗布と比べて吸水が大きく抑制されること、乾燥速度をわずかに低減させるが水蒸気透過性を維持することを確認した。ひび割れに対しては、コンクリート表面およびひび割れ幅 0.1mm~1.5mm 前後のひび割れ内部に含浸するが、部材底面に塗布することで含浸方向が鉛直上方向となる場合はひび割れ先端まで含浸されない可能性があること、塗布後の吸水抑制効果は含浸方向にかかわらず、ひび割れの無いコンクリートに塗布した場合と同等の吸水抑制効果が得られること、シラン系表面含浸材による吸水抑制効果はひび割れの有無にかかわらず屋外環境に1年以上暴露後も維持されることを確認した。

さらに、シラン系表面含浸材の撥水効果をモデル化し、細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動およびひび割れ内の水分移動を考慮した水分移動解析に組み込むことで、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による水分浸透抑制効果の定量的な評価手法の提案を試みた。屋外環境下でのコンクリートの乾湿挙動を水分移動解析により再現することで、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修による水分浸透抑制のメカニズムは、コンクリート表面およびひび割れ表面の含浸部の吸水移動と乾燥・吸湿時の水分移動の低減によりもたらされることを明らかにした。

以上のように、実験によるシラン系表面含浸材の補修効果の検証に加えて、コンクリートの細孔構造に基づいた水分移動解析を用いてコンクリート中の水分移動現象としての体系化を試みたことで、シラン系表面含浸材のひび割れ補修効果を水分移動解析により評価する手法を構築し、実環境下でのシラン系表面含浸材の吸水抑制効果を適切に表現できると結論した。

今後の課題として、シラン系表面含浸材を用いたひび割れ補修効果をより合理的に設計に反映すべく、補修効果の持続性と再塗布に関する評価、水分・塩分連成移動解析への展開と検証に関する検討を重ねる必要があり、今後も検討を継続する。

## 謝辞

本論文を審査いただきました、長岡技術科学大学 下村匠博士（主査）、丸山久一博士（副査）、岩崎英治博士（副査）、宮下剛博士（副査）、中村文則博士（副査）、金沢工業大学 田中泰司博士（副査）、皆さまに深く感謝申し上げます。

下村匠博士には、遅々として進まぬ小生に対して丁寧で示唆に富むご指導を賜りました。研究者としての心構えから物事の捉え方、表現方法だけでなく、人としての素養を学ばせていただきました。研究と論理の道を導いていただいたことに心より御礼申し上げるとともに、歩み続けることでご指導に報いる次第です。

中村文則博士には、研究室での修士・博士課程の学生の在り方、研究に取り組むうえでの必要な表現力、心構え、体力に関する多くのご指導を賜り、研究を続けるための素養を学ばせていただきました。丸山久一博士には、コンクリート工学だけにとどまらず土木工学に携わる者としての使命、責任に関するご指導を賜り、維持管理の奥深さを学ばせていただきました。田中泰司博士には、学士課程での学生の在り方だけでなく学内外での研究者としての在り方に関するご指導を賜り、コンクリート工学の楽しさを学ばせていただきました。岩崎英治博士、宮下剛博士には、本論文をまとめるにあたり貴重なご意見を賜り、研究者としての論理的な考え方を学ばせていただきました。先生方のご指導に深く感謝申し上げますとともに、より一層精進する所存です。

技術職員の山口貴幸氏には、実験の立案から片付けまでの多くのご協力と研究室内外でのご助言を賜りました。研究室秘書の水澤氏、廣川氏には、研究活動に関する諸手配を賜りました。長岡技術科学大学の教職員、研究室スタッフの皆さまのご協力により本論文は完成いたしました。心から感謝申し上げます。

苦楽を共にしたコンクリート研究室では、原田健二博士(木更津高専)には、水分移動に関する現象の理解や解析に関するご助言と研究に対する熱意、行動力を学ばせていただきました。武田健太博士(名古屋工業大学)には、経験に基づく多くのご助言と研究に対する論理的思考を学ばせていただきました。Dr. NGUYEN THI HIEN には、研究に取り組む姿勢とひび割れの面白さを学ばせていただきました。荻輪圭祐博士(福井高専)には、研究につまづいたときの相談役としてお力添えをいただきました。井向日向博士(岐阜高専)には、研究を見つめなおすためのお力添えをいただきました。工藤めい氏には、ひび割れに関する実験と解析でお力添えをいただきました。辛苦を共に乗り越えた、阿部哲雄氏、菊池慶一氏、工藤進平氏、小松駿氏、志賀暢氏、番場俊介氏、井野裕輝氏、多くの先輩、同輩、後輩に心から感謝申し上げます。

現職の長野工業高等専門学校では、遠藤典男博士、古本吉倫博士、松下英次博士、奥山雄介博士ら教職員の皆さまには、校務、予算、設備など至る所でご配慮くださり、学位取得に向けてのご指導とご協力に心から感謝申し上げます。小生とともに研究に取り組んだ、宮澤一平氏、平澤太我氏、山下和海氏、吉塚優騎氏、青柳涼太氏、矢島大也氏、山崎萌々子氏、菊池大輔氏、松山広輝氏、木船琢馬氏、小林かんろ氏、中村凜太氏、廣田龍之介氏、藤岡寛人氏ら環境都市工学科の学生諸氏なくしては実験について語ることはできません。心から感謝申し上げます。

出身校の鹿児島工業高等専門学校では、内谷保博士、池田正利博士、前野祐二博士には、研究の道に進むきっかけをいただきました。長岡工業高等専門学校、鹿児島大学など各所でお世話になった皆さまには、研究を始める、続ける、見直すの過程で貴重なご助言を賜りました。心から感謝申し上げます。

多くの方のご支援を賜り、これまでの研究成果をまとめる機会をいただきました。現時点までの取り組みでは、本研究を進める際に生じた疑問やいただいた課題を解決しきれておりません。改めて自身を見つめなおし、研究者として価値ある成果につなげていくこと、教育者として高専学生を社会に送り出すこと、いずれも歩み続けることをお世話になった皆様への恩返しといたします。

最後に、ここまでの道程を見守り、支えていただいた祖父母、母、妻をはじめとする家族の皆様に深く感謝申し上げます。