

# 論文 けい酸塩系表面含浸材におけるけい酸ナトリウムのモル比とモルタルの改質効果に関する検討

大嶋 俊一\*1・黒岩 大地\*2・西野 英哉\*3・宮里 心一\*4

**要旨:** モル比 (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) の異なるけい酸ナトリウムを表面含浸材として用い、モル比がモルタルの改質効果に及ぼす影響を検討するために、反応性確認試験、透水量試験、塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験を行った。また、表面および断面のビッカース硬さを測定し、表層の改質度合いについて評価した。けい酸ナトリウムのモル比が2.3~2.7の範囲において、高い透水抑制効果と高い塩化物イオン浸透抑制効果が得られた。また、モル比2.5の表面含浸材において改質深さが最も深くなり、けい酸ナトリウムのモル比を適切な範囲に設定することにより、高い改質効果が得られることが示唆された。

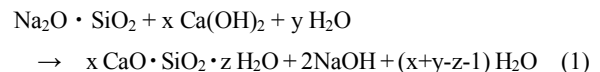
**キーワード:** けい酸ナトリウム系表面含浸材, モル比, 遮水性, 遮塩性, ビッカース硬さ

## 1. はじめに

けい酸塩系表面含浸材とは、コンクリートの補修・補強法の一つである表面含浸工法に用いられるけい酸アルカリ金属塩を主成分とする材料である。主成分として用いられるけい酸アルカリ金属塩には、けい酸ナトリウム、けい酸カリウム、けい酸リチウムがあり、これらを混合した表面含浸材も利用される。このうち、けい酸リチウムを主成分とする表面含浸材は一般的に固化型に分類され、材料自身が乾燥により固化することで、表層を緻密化するものである。一方、けい酸ナトリウムやけい酸カリウムを主成分とする表面含浸材は反応型に分類される。反応型けい酸塩系表面含浸材は、コンクリートに含浸することでコンクリート中の水酸化カルシウムと反応し、カルシウムシリケート水和物 (C-S-H ゲル) を生成することにより表層を緻密化し、劣化因子の侵入抑制効果を付与するものである<sup>1)</sup>。けい酸塩系表面含浸材は、中性化抑制効果や塩害抑制効果<sup>2)</sup>、微細ひび割れに対する補修効果<sup>3)</sup>等を有しており、その改質効果はコンクリートの品質、すなわち含水率や水セメント比、中性化の程度などにより大きく異なる<sup>4)</sup>。さらに、表面含浸材塗布後の養生方法<sup>5)</sup>、<sup>6)</sup>や塗布量<sup>7)</sup>等にも影響を受ける。当然ながら、けい酸塩系表面含浸材自身の特性、すなわち、主成分の量や主成分であるけい酸アルカリ金属塩の種類や混合割合<sup>8)</sup>によりその改質効果は大きく変化する。そのため、市販されている複数のけい酸塩系表面含浸材を用いて、表面含浸材の乾燥固形分率の観点から、ひび割れ透水抑制効果について検討した報告例などがある<sup>9)</sup>。また、改質効果向上を目的として、Ca 補助材 (反応促進材)<sup>10)</sup>、<sup>11)</sup>や添加剤の使用<sup>12)</sup>などの影響についても検討され

ている。

反応型けい酸塩系表面含浸材において、C-S-H ゲルの生成メカニズムを考えると、けい酸ナトリウムを主成分とした場合、一例として式(1)のような反応式により C-S-H ゲルが生成すると考えられている<sup>1)</sup>。



ここで、主成分であるけい酸ナトリウムに着目すると、けい酸塩のモル比 (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) は1であるが、けい酸ナトリウムには種々のモル比のものが存在し、実用的観点から、JIS K 1408 規格の 3号 (SiO<sub>2</sub> 28~30 重量%, Na<sub>2</sub>O 9~10 重量%) けい酸ナトリウム相当品がよく利用される。また、けい酸アルカリ金属塩の水溶液では、水溶液中におけるシリケートの構造がモル比により異なることが知られており<sup>13)</sup>、主成分として用いられるけい酸アルカリ金属塩のモル比が異なる場合、水酸化カルシウムとの反応性や C-S-H ゲルの生成メカニズムに影響し、得られる改質効果が異なる可能性がある。しかしながら、けい酸アルカリ金属塩のモル比が改質効果に与える影響について検討した報告例は見当たらない。また、市販されているけい酸塩系表面含浸材には、添加剤や副成分が加えられている場合が多く、モル比の影響を単純に比較することは難しい。

そこで本研究では、モル比の異なるけい酸ナトリウムをけい酸塩系表面含浸材として用いて、モル比と改質効果の関係を解明することを目的に、塗布後のモルタルの改質効果について評価した。モル比による水酸化カルシ

\*1 金沢工業大学 バイオ・化学部応用化学科 准教授 博士 (理学) (正会員)

\*2 富士化学 (株) テクニカルセンター チーム 21

\*3 富士化学 (株) テクニカルセンター チーム 21 リーダー

\*4 金沢工業大学 工学部環境土木工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

ウムとの反応性の違いについて、反応性確認試験により評価した。また、改質効果の評価として、遮水性、遮塩性、表層のビッカース硬さについて検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 モルタル供試体

本研究では、けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案）（JSCE-K 572-2012）に準拠して、モルタル供試体を作製した<sup>1)</sup>。普通ポルトランドセメントを用いて、水セメント比 0.55、砂セメント比 3.0 とし、100×100×400 mm の型枠に打設した。打設後 24 時間で脱型し、20℃で 6 日間、水中養生を行った。その後、100×100×100 mm に切断し、温度 20℃、相対湿度 60%で 28 日間気中養生を行った。

### 2.2 けい酸塩系表面含浸材

本研究では、表-1 に示すモル比の異なるけい酸ナトリウム系表面含浸材を調製し、試験に用いた。モル比の調整は、モル比 3.7 のけい酸ナトリウムと水酸化ナトリウム（特級）を用いて行い、また生成する C-S-H ゲルを同量にするために、SiO<sub>2</sub>（けい酸）濃度を 15.0 重量%に統一した。

けい酸ナトリウム系表面含浸材の塗布は、以下のように行った。気中養生終了 3 日前に、型枠側面に接した 2 面のうち 1 面を試験面とし、試験表面を研磨後に刷毛を用いてけい酸塩系表面含浸材を塗布し、散水を行った。2 時間後に、再度塗布と散水を繰り返し、温度 20℃、相対湿度 80%にて 14 日間、温度 20℃、相対湿度 60%にてさらに 14 日間気中養生を行ったものを試験体として用いた。塗布量は 1 供試体あたり、2.0 g とし、試験面の側面 4 面はエポキシ樹脂でシールした。図-1 に作製した試験体の概要を示す。

表-1 本研究で用いたモル比の異なるけい酸塩系表面含浸材のモル比、各濃度、および pH

モル比 [SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O]	SiO <sub>2</sub> 濃度 (重量%)	Na <sub>2</sub> O濃度 (重量%)	固形分 (重量%)	pH
2.1	15.0	7.4	22.4	12.3
2.3		6.8	21.8	12.0
2.5		6.2	21.2	11.7
2.7		5.7	20.7	11.5
2.9		5.4	20.4	11.4
3.2		4.8	19.8	11.2
3.5		4.4	19.4	11.1
3.7		4.2	19.2	11.0

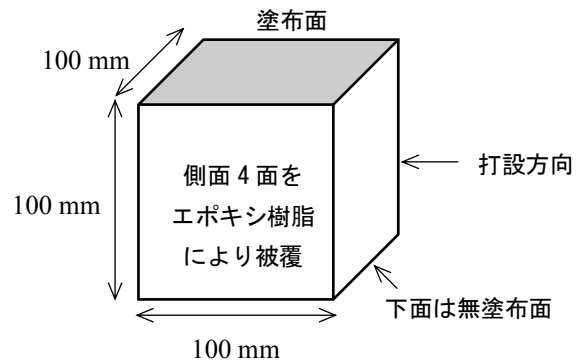


図-1 本研究で作製したモルタル試験体の概要

### 2.3 性能評価試験

本研究では、けい酸ナトリウム系表面含浸材のモル比がモルタルの塗布後の改質効果について及ぼす影響を評価するために、反応性確認試験、透水量試験、塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験の 3 つの性能評価試験を JSCE-K 572 に準拠して行った<sup>1)</sup>。透水量試験および塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験における試験体数は 3 個とし、無塗布の試験体をブランクとして用いた。

また、表層の改質深さを評価するために、表面および深さ方向に対してビッカース硬さを測定した<sup>14)</sup>。ビッカース硬さ (HV) は式(2)に示すように、試験力 F を圧子押し込み時のくぼみの表面積 d<sup>2</sup> で除した値である。

$$HV = \frac{F}{d^2} = 0.1891 \times \frac{F}{d^2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2)$$

ここに、HV: ビッカース硬さ(N/mm<sup>2</sup>)、F: 試験力(N)、d: 生じたくぼみの対角線の長さの平均(mm)、θ: 正四角錐圧子の対面角 (θ = 136°)。

ビッカース硬さの測定は、JIS Z 2244 に準拠して実施した。所定の期間養生を行った試験体をコンクリートカッターにより 10×10×30 mm 程度に切断し、表面および切断面の測定を行った。測定では、試験力が 0.09807 N、試験力の保持時間を 10 秒とした。切断面の測定は、試験体表面から深さ 10.0 mm まで 1.0 mm 間隔で実施し、1 測定深さにつき 5 点測定を行い、平均値を算出した。本研究においては、同水準で作製した 3 つの試験体の測定結果の平均値を求め、表層の改質深さについて評価した。なお、測定にあたっては、目視で測定面にひび割れが生じていないことを確認した。また、ビッカース硬さ試験機に備え付けの光学顕微鏡を用いて、明らかに骨材と分る箇所を避けながら、打撃箇所の選定を行った。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 反応性確認試験

異なるモル比のけい酸ナトリウムにおける反応性確認試験の観察結果を図-2に示す。反応開始2日後において、モル比3.5と3.7で半透明のゲルが確認でき、4日後ではモル比2.9以上で半透明のゲルが生成し、モル比が高いほど、このゲルは早期に生成する傾向がみられた。けい酸ナトリウムは、モル比によりpHが異なるため、セメントペーストからの水酸化カルシウムは異なる可能性がある。また、モル比が高くなるほど不安定になり、ゾルに近づくため、ゲル化しやすくなる。そのため、モル比が高いほど、材料自身のゲル化も含めて早期にゲルが生じたと考えられる。反応開始12日後ではすべてのモル比においてゲルの生成が確認でき、モル比2.5~2.9では、生じたゲルが他のモル比のものよりも沈降しており、生じたゲルの密度等が異なる可能性が考えられる。なお、28日経過後には、全てのモル比のけい酸ナトリウムにおいて、セメントペースト周辺にC-S-Hゲルと思われる白色のゲル状物質を確認した。

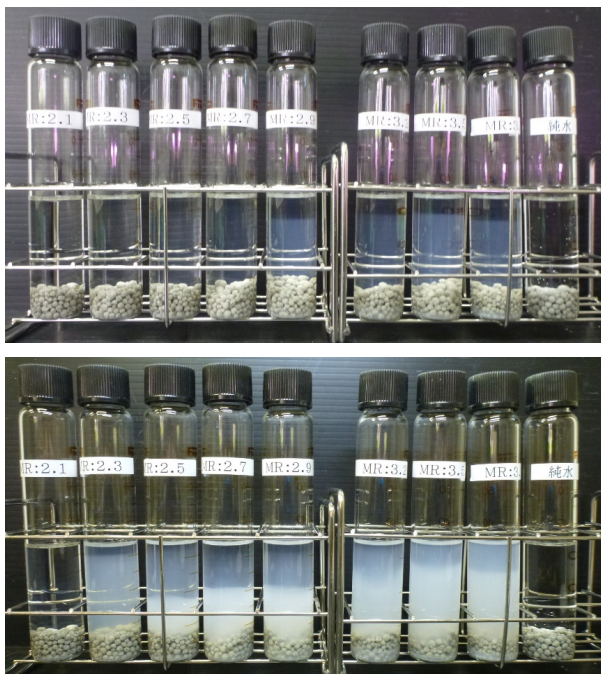


図-2 異なるモル比のけい酸ナトリウムにおける反応性試験観察結果（左からモル比2.1, 2.3, 2.5, 2.7, 2.9, 3.2, 3.5, 3.7, 純水, 上：反応開始4日後, 下：反応開始12日後）

#### 3.2 透水量試験

透水量試験の結果から、無塗布の試験体（ブランク）に対する各試験体の透水量の比を算出した。得られた透水比とモル比との関係を図-3に示す。図-3より、いずれのモル比の含浸材においても透水比が小さくなり、透

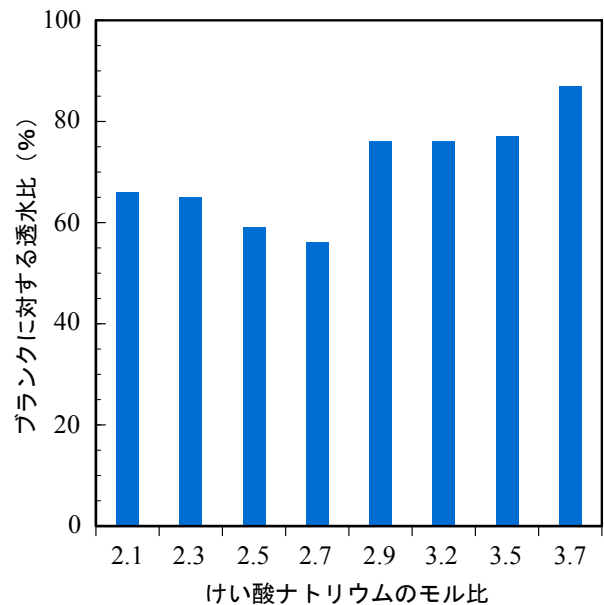


図-3 異なるモル比のけい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタルにおける透水比

水抑制効果が確認できたが、けい酸ナトリウムのモル比によりその効果、すなわち遮水性に違いが見られた。今回の試験では、低いモル比の方が透水比が小さく、特にモル比2.5と2.7では大きな遮水性が得られた。しかし、モル比が2.9以上になると透水比は大きくなる傾向を示し、遮水性が小さくなることが確認された。前述したように、けい酸ナトリウムを主成分とするけい酸塩系表面含浸材は反応型であり、表面含浸材中のけい酸がコンクリート（モルタル）中の水酸化カルシウムと反応することで、C-S-Hゲルを生成し、コンクリート表層を緻密化する。したがって、モル比により透水抑制効果に違いが見られたことは、モル比によりコンクリート表層の緻密性が異なると考えられる。表面含浸材中のSiO<sub>2</sub>濃度は、同量のC-S-Hゲルが生成するように15重量%に統一したが、3.1節に示したように、モル比2.9以上では早期のゲル化が確認でき、水酸化カルシウムと反応するけい酸量の減少に伴うC-S-Hゲル生成量の減少の可能性が考えられる。また、モル比2.5~2.9では生じたゲルの沈降が早く、けい酸ナトリウムのモル比は、けい酸の化学組成およびC-S-Hゲルの生成量や構造に影響することが示唆された。ただし、本研究で用いた表面含浸材中の固形分濃度は、モル比が高くなるに従い小さくなる。今後は、固形分濃度を一定にした場合についても、検討する必要がある。

#### 3.3 塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験

透水抑制効果の低かったモル比3.5と3.7以外のモル比のけい酸ナトリウム系表面含浸材を用いて試験を行い、ブランクにおける塩化物イオン浸透深さに対する各試験

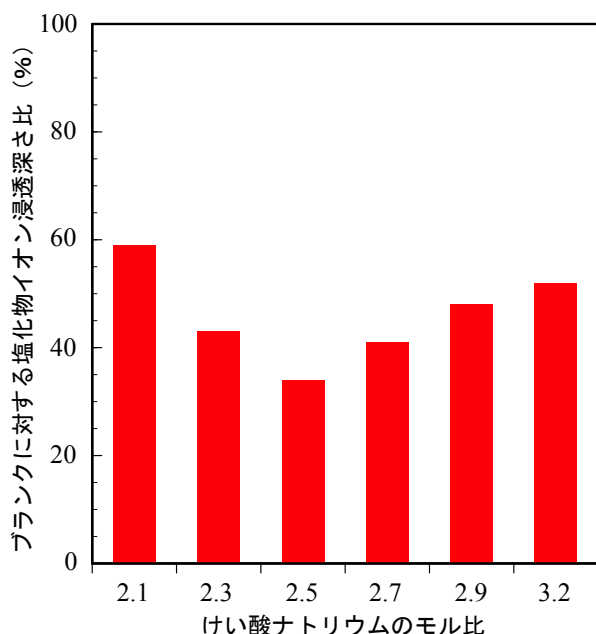


図-4 異なるモル比のけい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタルにおける塩化物イオン浸透深さ比

体の浸透深さ比を算出した。得られた結果を図-4 に示す。けい酸ナトリウム系表面含浸材は、塩化物イオンに対する浸透抑制効果を有しており、いずれのモル比においても高い遮塩性が確認できたが、透水抑制効果と同様に、けい酸ナトリウムのモル比によりその効果に差が生じた。図-4 より、けい酸ナトリウムのモル比 2.5 の表面含浸材において最も高い遮塩性が得られた。塩化物イオンに対する抵抗性試験において、塩化物イオンは水と共にモルタル内に侵入する。したがって、試験体表面の緻密性が高いほど、遮水性が高くなるため、塩化物イオンの侵入が抑制されると考えられる。3.2 節に示したように、けい酸ナトリウムのモル比が 2.5 と 2.7 のとき、特に高い遮水性が得られており、これが高い遮塩性につながったと考えられる。一方、比較的高い遮水性が得られたモル比 2.1 では、遮塩性が最も小さい結果となった。表層の緻密性が高くなるに従い塩化物イオン浸透深さ比が小さくなると考えていたが、塩化物イオンの浸透深さは、表層の緻密性以外の要因も関係していると考えられる。モル比 2.1 のけい酸ナトリウムは、アルカリ金属であるナトリウムを最も多く含み、表-1 に示したように pH が最も高い。したがって、アルカリが塩化物イオンの浸透深さに大きく関与している可能性がある。今回は、塩化物イオンの浸透深さのみを測定したが、今後、塩化物イオン量の測定や塩化物イオンの見かけの拡散係数の測定等、より詳細に検討する必要がある。

### 3.4 ビッカース硬さ測定

各試験体における深さごとのビッカース硬さ測定の結果をブランクの結果と共に図-5 に示す。なお、図-5 に

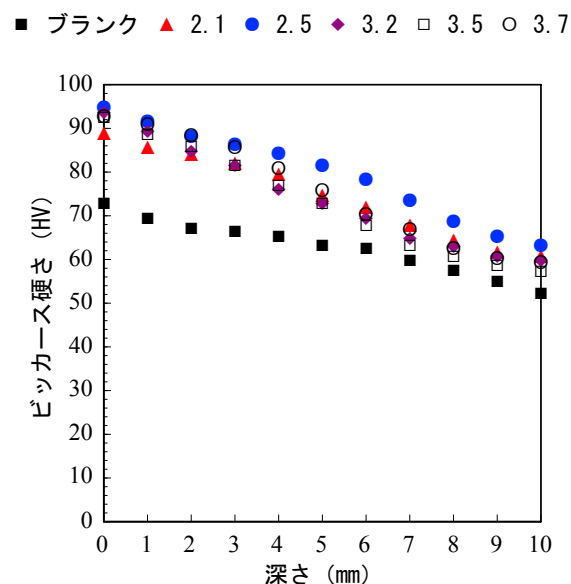


図-5 各試験体における深さごとのビッカース硬さ

において深さ 0 mm とは表面における測定結果である。著者らが以前に報告したように、ビッカース硬さとけい酸塩系表面含浸材の含浸深さには相関があり<sup>14)</sup>、ビッカース硬さが内部より大きくなっている深さまで、表面含浸材が含浸し、改質されたと考えられる。既往の研究<sup>14)</sup>などでは、ブランクの深さ方向で概ね同等のビッカース硬さが得られるのが一般的であるが、本研究ではブランクにおけるビッカース硬さは徐々に低下傾向にあった。図-5 より、けい酸ナトリウムのモル比が 2.5 の表面含浸材においては、他のモル比の表面含浸材よりも大きな値が得られており、表層の緻密性が高く、高い改質効果を得られたことが確認された。その他の 4 種類のモル比の表面含浸材では、モル比によるビッカース硬さの差は小さく、けい酸ナトリウムのモル比による改質効果はほぼ同程度と考えられる。また、モル比 2.5 以外のけい酸ナトリウムでは、ブランクにおける測定値のバラツキを考慮すると、深さ 6~7mm 程度まで改質されていると考えられる。一方、モル比 2.5 のけい酸ナトリウムでは、深さ 8~9mm 程度まで改質されていると考えられ、他のモル比の表面含浸材よりも改質深さが深いことが確認された。モル比 2.5 のけい酸ナトリウムが最も高いビッカース硬さと改質深さであった結果は、透水量試験と塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験の結果と一致しており、ビッカース硬さ試験は、けい酸塩系表面含浸材の性能評価試験のひとつの評価試験方法として有効であることが示唆された。

モル比 2.5 のけい酸ナトリウムが最も高いビッカース硬さと改質深さであった理由として、モル比が小さくなるに従い粘度が低下し、さらにモルタルとの反応が比較的穏やかなことによりモルタルへの浸透性が高くなるこ

とや生成する C-S-H ゲルの構造や量が異なると考えられる。ただし、C-S-H ゲルの生成反応は、反応場の pH やアルカリ量も関与していると考えられるため、今後検討する必要がある。

#### 4. モル比が改質効果に及ぼす影響について

けい酸ナトリウムのモル比が改質効果に及ぼす影響について、その概略を図-6 に示す。けい酸ナトリウムの水溶液では、モル比が小さい場合、シリケートイオンは、ほとんどがモノマー ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) として存在するが、モル比が高くなるにつれて自己会合し、二量体やオリゴマーとなり、さらにモル比が大きくなるとより複雑なポリマー構造となる<sup>13),15)</sup>。そのため、C-S-H ゲルの生成反応において、シリケートイオンのポリマー化の程度が重要な要因となる<sup>16)</sup>。また、シリケートイオンのシラノール基の酸解離定数  $\text{pK}_a$  の値は、モノマーとオリゴマーでは異なっており<sup>17)</sup>、モノマーとオリゴマーでは反応性が異なることが示唆される。さらに、一般的に C-S-H ゲルは 11Å のトバモライトとジャネイトの混合物と考えられており<sup>18)</sup>、C-S-H ゲル中のシリケートイオンも高次構造をとることが報告されている<sup>19)</sup>。ここで、生じる C-S-H ゲル構造は供給されるシリケート鎖長や Ca/Si 比により変化する<sup>20)</sup>。また、反応時の Ca/Si 比が大きくなると、生成する C-S-H ゲル層における構造欠陥が大きくなり、隙間の多い構造となることが示唆されている<sup>21)</sup>。本研究では、モルタル試験体および各種モル比のけい酸ナトリウムの  $\text{SiO}_2$  濃度を統一しており、すべての条件で Ca/Si は同一であるため、Ca/Si による影響は除外することができる。このことから、けい酸ナトリウムのモル比を変えた場合、溶液中のシリケートイオンの構造が、C-S-H ゲルの生成に最も影響を与えていると考えるのが妥当である。つまり、シリケートイオンのモノマーが多くなる低いモル比のけい酸ナトリウムでは、水酸化カルシウムとの反応性に富んだ活性種が多く、緻密な C-S-H ゲルの生成が多くなったと考えられる。ただし、モル比 2.1 のけい酸ナトリウムでは、けい酸ナトリウムの pH が高く、アルカリが C-S-H ゲルの生成を抑制していると考えられる。一方、けい酸ナトリウムのモル比が高くなると、自己会合によるポリマーがけい酸ナトリウム中に多く存在するようになり、その一部は早期にゲル化する。また、このポリマー化した化学種は水酸化カルシウムとの反応活性が低いと考えられ、緻密な C-S-H ゲルの生成が抑えられたのではないかと推測される。さらに、モル比の高いけい酸ナトリウム溶液では粘度が高くなるため、モルタルへの含浸性に悪影響を及ぼすと考えられる。したがって、けい酸ナトリウムのモル比 2.5 付近のけい酸塩系表面含浸材において、高い遮水性や遮塩性が得られたのは、モル比

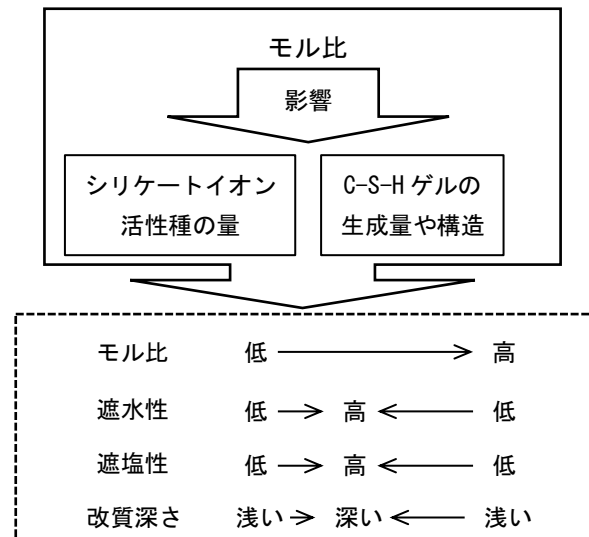


図-6 けい酸ナトリウムのモル比が改質効果に及ぼす影響についての概略図

2.5 付近のけい酸ナトリウム溶液中では反応性の高いシリケートイオン化学種が優先的であり、生じたゲルの沈降速度が早かったを考慮すると、緻密な C-S-H ゲルが多く生成したためだと考えられる。すなわち、けい酸塩系表面含浸材の主成分であるけい酸ナトリウムのモル比により、モルタル中の水酸化カルシウムとの反応性および生成する C-S-H ゲルの構造や量に違いが生じるため、表層の改質効果に影響を及ぼすことが示唆された。

以上のことから、けい酸ナトリウムを主成分とする表面含浸材においては、主成分であるけい酸ナトリウムのモル比を 2.3~2.7 とすることで、高い改質効果を得ることができる。ただし、市販のけい酸塩系表面含浸材のように添加剤等が入っているものやけい酸ナトリウムとけい酸カリウムの混合型けい酸塩系表面含浸材については、さらなる検討が必要である。

#### 5. まとめ

本研究では、モル比の異なるけい酸ナトリウムをけい酸塩系表面含浸材として用い、塗布後のモルタルの改質効果について、モル比との関係を検討した。改質効果の評価として、反応性確認試験、透水量試験、塩化物イオン浸透に対する抵抗性試験、ビッカース硬さ測定を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) けい酸ナトリウムのモル比が 2.3~2.7 の表面含浸材において、高い遮水性や遮塩性が得られた。これは、けい酸ナトリウムのモル比がシリケートイオンの反応性と生成する C-S-H ゲルの量や構造に影響するためと考えられる。
- (2) モル比 2.5 のけい酸ナトリウム系表面含浸材において、最も深くまで改質されていることが確認された。

- (3) 反応型けい酸塩系表面含浸材において、主成分であるけい酸アルカリ金属塩のモル比を適切に設定することにより、高い改質効果を得られることが示唆された。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究 C [課題番号：18K04313（代表：大嶋俊一）]と基盤研究 B [課題番号：17H03289（代表：宮里心一）]により実施した。

#### 参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案），コンクリートライブラリー137, 2012.7
- 2) 坂元貴之, 武若耕司, 山口明伸, 樋原弘貴：各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1625-1630, 2011.
- 3) 山本昌宏, 今井啓一, 宮崎保, 遠藤裕丈, 守屋進：けい酸塩系表面含浸材による微細ひび割れの透水防止製に関する検討, 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.11, pp.349-354, 2011.10
- 4) 樋原弘貴, 武若耕司, 山口明伸, 白澤直：ケイ酸塩系表面含浸材の浸透特性および保護性能に関する基礎的研究, 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.8, pp.77-84, 2008.10
- 5) 中村慎, 武若耕司, 山口明伸, 坂元貴之：塗布後の養生の違いが各種表面含浸材の効果に与える影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1630-1635, 2012
- 6) 染谷望, 加藤佳孝：塗布後の養生方法が表面含浸材の改質効果に及ぼす影響の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1687-1692, 2013
- 7) 石川健児, 福手勤, 酒井貴洋, 金子洋一：併用型表面含浸材の塗布量最適化および浸透性に関する実験的検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, V-586, pp.1171-1172, 2015.9
- 8) 樋原弘貴, 武若耕司, 山口明伸, 白澤直：各種表面含浸材の性能把握と効果の違いに関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1619-1624, 2010
- 9) 浅野純平, 長谷川雄基, 松本拓, 山本昌宏, 谷村成, 高橋慶吉, 佐藤周之：けい酸塩系表面含浸材によるひび割れからの透水抑制効果, 平成 28 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 7-36, pp.783-784,

2016

- 10) 金堀雄伍, 樋原弘貴, 添田政司, 西嶋大貴：けい酸塩系表面含浸材とカルシウム溶液を併用したコンクリートの品質改善に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1657-1662, 2015
- 11) 山田浩嗣, 樋原弘貴, 添田政司, 久保田崇嗣：反応促進材とけい酸塩系表面含浸材の併用手法におけるコンクリートの改質特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1699-1704, 2017
- 12) 黒岩大地, 宮里心一, 高島達行, 大嶋俊一：けい酸塩系表面含浸材の添加剤の種類がコンクリートの耐塩害性に及ぼす影響, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, V-015, pp.411-412, 2012.3
- 13) 荻野圭三：ケイ酸ナトリウムの物理化学的性質, 表面, Vol.8, No.3, pp.137-144, 1970.3
- 14) 大嶋俊一, 西野英哉, 高島達行, 黒岩大地, 宮里心一：けい酸塩系表面含浸材の各種試験（種類判定・含浸深さ・塗布確認）における基礎検討, 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.14, pp.573-580, 2014.10
- 15) Roller, P. S. and Ervin, G. Jr.: The System Calcium Oxide-Silica-Water at 30°. The Association of Silicate Ion in Dilute Alkaline Solution, J. Am. Chem. Soc., Vol.62, No.3, pp.461-471, Mar. 1940
- 16) Uddin, K. M. U. and Middendorf, B.: Atomistic modeling of early hydration of C3S, Proceedings of the Conference on Computational Modelling of Concrete Structure (EURO-C 2018), pp.103-108, Feb. 2018
- 17) Belton, D. J., Deschaume, O., and Perry, C. C.: An overview of the fundamentals of the chemistry of silica with relevance to biosilicification and technological advances, FEBS J., Vol.279, No.10, pp.1710-1720, Feb. 2012
- 18) Taylor, H. F. W.: J. Am. Ceram. Soc., Proposed structure for calcium silicate hydrate gel, Vol.69, No.6, pp. 464-467, June 1986
- 19) Pustovgar, E., et al.: Understanding silicate hydration from quantitative analyses of hydrating tricalcium silicates, Nat. Commun., Vol.7, 10952, Mar. 2016
- 20) 岡田能彦, 増田嗣也, 石田英輝：<sup>29</sup>Si NMR によるジャイロライトの水熱合成過程におけるケイ酸イオンの挙動, 日本セラミックス協会学術論文誌, Vol.103, No.1194, pp.124-127, 1995.2
- 21) Qomi, M. J. A., et al.: Combinatorial molecular optimization of cement hydrates, Nat. Commun., Vol.5, 4960, Sep. 2014