

論文 表面含浸材と表面コーティング材によるコンクリート躯体保護性能に関する基礎的研究

御園 麻衣子*1・今本 啓一*2・永井 香織*3・清原 千鶴*4

要旨: 本研究では、RC 建築物の劣化予防保全に資する材料として、表面含浸材と表面コーティング材を取り上げ、それらの中性化および水分の浸透抑制効果について実験を行った。その結果、表面コーティング材は塗布後に視覚的変化が生じるが、高い中性化抑制効果が見られ、それに対し表面含浸材は視覚的変化は少ないが、中性化抑制効果は見られなかった。水分抑制効果については、表面含浸材の中でも撥水性能を有するシラン系のものが高い効果を発揮した。また透気係数と中性化深さには一定の相関があることが分かったが、透気係数と含水率には相関が見られなかったため、コンクリート躯体への水分浸透抑制効果を評価するには別手法を検討する必要がある。

キーワード: コンクリート, 表面含浸材, 表面コーティング材, 中性化, 保存

1. はじめに

文化財などの資産を後世に遺すために保存・修復の果たす役割が重要であることは言を俟たない。この保存・修復にあたって留意されていることの一つに、見映えを含めた「オリジナルの状態を維持すること」という原則がある。これは木材や石材など様々な材料分野の保存作業において見て取ることができる。

一方、鉄筋コンクリート造 (RC) 建築物の歴史は約 100 年を迎え、この分野においても保存のための具体的技術を整備する必要性が生じている。

しかし、昨今 RC 建造物の新築や補修など幅広く使用されるようになった各種の材料は、施工の容易さなどに着目されるが、上記の視点に立つ性能に関しては、まだ十分に整理されていないのが現状である。

そこで、本研究ではこのような保存に資する劣化予防保全のための材料として、表面含浸材と表面コーティング材 (以下塗布材) を取り上げ、色差・光沢度、中性化および水分の浸透抑制効果について検討した結果を報告する。

施工した。

表-1 コンクリートの使用材料

| | |
|----------|---|
| 水 (W) | 上水道水 |
| セメント (C) | (太平洋セメント社製) |
| | 普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ |
| 粗骨材 (G) | G1 栃木県鹿沼産砂岩 2005 表乾密度 2.65g/cm ³ |
| | G2 栃木県栃木産石灰岩 2005 表乾密度 2.70g/cm ³ |
| 細骨材 (S) | S1 茨城県神栖産陸砂 表乾密度 2.60g/cm ³ |
| | S2 栃木県鹿沼産砕砂 表乾密度 2.63g/cm ³ |
| 混和剤 | AE 減水剤 |

表-2 コンクリートの計画調査

| W/C (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | |
|---------|----------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | W | C | G | | S | |
| | | | | G1 | G2 | S1 | S2 |
| 60 | 48.5 | 172 | 287 | 613 | 266 | 655 | 289 |

2. 実験概要

2.1 試験体概要

基材となるコンクリートは、水セメント比を 60% とし、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、JIS A 1132 に準じて製作を行った。コンクリートの使用材料と計画調査を表-1 および表-2 に示す。また、試験体に塗布した各材料の仕様を表-3 に示す。塗布方法や塗布量は、各材料で標準とされている仕様に則って

2.2 実験方法

研究では、各塗布材に対して、10×10×40 cm を 2 体、15×15×10 cm を 1 体の計 3 体を作製し、無塗布の試験体と比較した。各試験体とも、塗布面は 1 面とし、側

*1 東京理科大学大学院 工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 准教授・博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 生産工学部建築工学学科 准教授・博士(工学) (正会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託捕手・博士(工学) (正会員)

面と塗布面の裏面の5面はアルミ箔テープを貼り、塗布面と側面の境には水分および気体の浸入を防ぐためにエポキシ樹脂でシールを施した。

試験体はJIS A 1132 に準じて製作した。脱型は翌日とし、使用温度 20℃で材齢 28 日まで封かん養生後、温度 20℃、R.H.60%の恒温恒湿室で乾燥させた。その翌日、各材を塗布し、再度 28 日間、温度 20℃、R.H.60%の環境下で存置した後、後述の実験に供した。

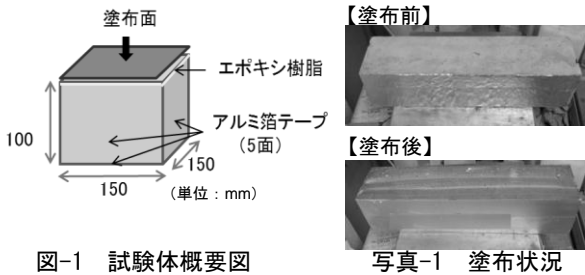


図-1 試験体概要図

写真-1 塗布状況

2.3 実験内容

(1) 促進中性化試験

促進中性化は JIS A 1153 に準拠し、各試験体を促進中性化室に存置した。

(2) 熱劣化試験

室内にて試験体に図-2 の熱 (STEP1~5) と降水 (STEP6) を繰り返し、合計 100 サイクル与えた。これは熱と降水を短時間に繰り返し試験体に与えることで、実環境より過酷な状況下を再現している。表-4 に示すように、STEP2~5 は照射温度の違いを示している。

また、熱劣化試験終了後、各試験体を促進中性化室に存置した。

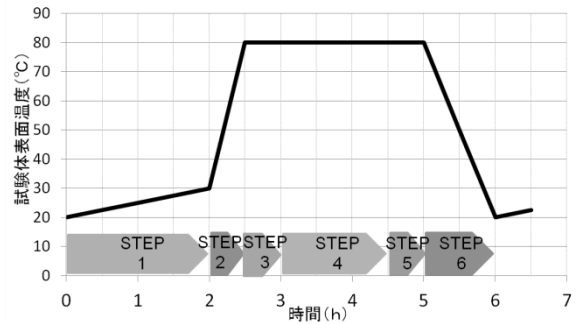


図-2 熱劣化サイクル概念図

表-4 各STEP詳細

| Step | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 状態 | 温湿度 | 照射 | 照射 | 照射 | 照射 | 降雨 |
| Time (h) | 2 | 0.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | 1 |
| 槽内温度(°C) | 30 | 50 | 50 | 50 | 50 | 10 |
| 照射温度(°C) | 0 | 65 | 55 | 60 | 65 | 0 |



写真-2 熱劣化試験写真 (右: 熱, 左: 散水)

表 3 塗布剤一覧

| 種類 | 主成分 | 記号 | 施工方法 | | | |
|-----------|-----------------|------|------|------|------|-------------------------|
| | | | 前処理 | 塗布回数 | 希釈有無 | 塗布量(kg/m ²) |
| 表面含浸材 | シラン・シロキサ | SS-1 | 乾燥 | 1 | | 0.2 |
| | | SS-2 | 乾燥 | 1 | | 0.2 |
| | シラン | S-1 | 乾燥 | 2 | | 0.3~0.4 |
| | | S-2 | 乾燥 | 2 | | 0.6 |
| | | S-3 | 乾燥 | 2 | | 0.9 |
| | ケイ酸塩 | K-1 | 湿潤 | 3 | | 0.35 |
| | | K-2 | 湿潤 | 2 | ○ | 0.15~0.1 |
| | アクリル・カリウム・ナトリウム | AKN | 乾燥 | 1 | | 0.28 |
| 表面コーティング剤 | 水性アクリルシリコン樹脂 | E-AS | 乾燥 | 3 | | 0.1~0.15 |
| | フッ素 | E-F | 乾燥 | 3 | ○ | 全 0.1~0.15 |
| 無塗布 | | N | | | | |

2.4 測定項目

(1) 光沢度

光沢度は JIS 規格に準拠したハンディ光沢計を用い、各試験体の表面を無作為に 6 か所選定し測定した。

(2) 色差

色差は色差計を用いて、L*a*b*表色系 (JIS Z 8729) に準じて、各試験体の表面を無作為に 3 か所選定し測定し、以下式(1)にて算出した ΔE を色差の値とした。

$$\Delta E = (\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2)^{1/2} \quad (1)$$

ここに、ΔL：色の明度を示し、黒(-) < ΔL < 白(+)

Δa：緑(-) < Δa < 赤(+)

Δb：青(-) < Δb < 黄(+)

(3) 含水率

含水率は LCR メータを用いて、あらかじめ試験体中央部、表面より 2cm の深さに埋め込まれているセラミックセンサ¹⁾の静電容量を測定することにより試験体内の含水状態を評価した。

また、中性化促進試験の試験体の質量含水率は、JIS A 1125 に基づき以下式(2)にて求めた。

$$w = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

ここに、w：質量含水率 (%)

W：乾燥前の試料の質量(g)

W₀：乾燥後の試料の質量(g)

(4) 透気係数

図-3 にトレント試験機概念図を、写真-3 に計測の様子を示す。この方法は、チャンパー内を負圧にし、圧力が大気圧に回復するまでの圧力の経時的変化を測定することで透気係数を算出するものであり、コンクリート表層の緻密性を非破壊で定量的に評価するものである。

このトレント法を用いて、試験体の塗布後 30 日後と、熱劣化試験後に計測をした。

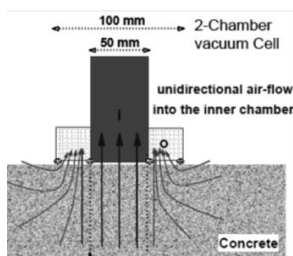


図-3 試験機概要図²⁾



写真-3 計測風景

(5) 中性化深さ

中性化深さは、促進中性化期間 8 週、15 週、26 週、52 週で、また熱劣化試験後に促進中性化室に存置した試験体は、促進中性化期間 8 週、13 週、26 週で、JIS A 1152 に準拠してノギスを用いて測定した。

(6) 吸湿率

写真-4 に示すように、調湿材として簡易チャンパー内の底面に水を張り、相対湿度 100% の環境下において吸湿率を測定した。なお吸着期間は 16 日とした。

また、吸湿率は、試験体の大きさのばらつきを考慮して以下式(3)にて求めた。

$$c = \frac{C}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

ここに、c：吸湿率 (%)

C：試料の総吸湿量(g)

C₀：105° の加熱乾燥後の試料の質量(g)

表-5 測定項目一覧

| | 熱劣化前 | 熱劣化後 |
|-------|------|------|
| 光沢度 | ○ | - |
| 色差 | ○ | - |
| 静電容量 | ○ | ○ |
| 透気係数 | ○ | ○ |
| 中性化深さ | ○ | ○ |
| 吸湿率 | ○ | ○ |
| 接触角 | ○ | ○ |

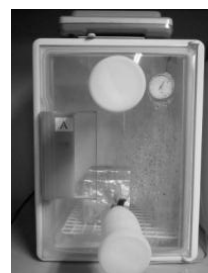


写真-4 吸湿量測定器
(簡易チャンパー)

(7) 接触角

試験体の塗布面にスポットで水滴を垂らし、その水滴の接触角をマイクロスコープ (KEYENCE 社製、VHX-2000) を用いて測定した。

3. 実験結果・検討

3.1 光沢度・色差

図-4 に各塗布材塗布後の試験体表面の光沢度および色差を示す。光沢度は 0 に近い程、視覚的变化が少ないことを示している。E-AS、E-F の表面コーティング材は相対的に高い光沢度を示している。表面含浸材では、シラン・シロキサン系、シラン系は無塗布のものに比較的近い数値が計測された。また表面含浸材の中で光沢度の高いケイ酸塩系は、塗布前処理が湿潤であり、シラン・シロキサン系、シラン系の含浸材に比べ濡れ色に近いことが影響していると考えられる。

色差については、表面含浸材および表面コーティング材の種類間で大きな差異は認められないが、表面含浸材が無塗布のものに比較的近い数値になることが伺える。また、表面含浸材の中でも特にシラン・シロキサン系、シラン系のものがより無塗布に近い結果となった。

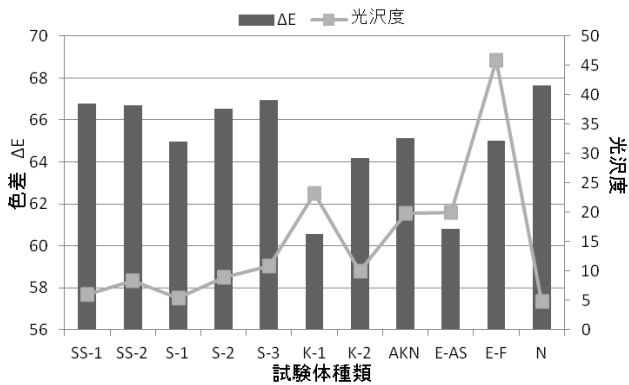


図-4 光沢度と色差の測定値

3.2 含水率

図-5 に熱劣化試験を行った試験体の静電容量のイニシャル値と 96 サイクル目の値を示す。イニシャル値と比較して一番差異の大きかった STEP5 における静電容量の値を、測定周波数は既往の研究¹⁾より 1kHz を採用し測定した。また、その静電容量の値を含水率に変換²⁾し、イニシャル値から 96 サイクル値への UP 率として図-6 に示した。

イニシャル値との差が大きいものは、熱劣化試験を通して内部へ水分が浸入したことを示している。表面含浸材の水分浸透抵抗性の相対評価としては S-2, S-3 がイニシャル値と 96 サイクル値との差が小さいことから、最も優れると判断される。これはシラン系含浸材の撥水効果が顕著に表れたためと考えられる。

図-7 に JIS A 1125 に基づき算出した、熱劣化試験を行わなかった試験体の促進中性化期間 52 週における質量含水率を示す。前述した撥水効果の高い S-2, S-3 を比較しても明確であるように、水としての水分浸透抵抗性ほど、水蒸気としての水分浸透抵抗性は高いことが分かる。

3.3 透気係数

図-8 に試験体の塗布後 30 日と、熱劣化試験後の透気係数の変化を示す。塗布後 30 日では、表面含浸材の要因別による差異は見られず、全種類において無塗布のものより大きくなる傾向にあった。これは後述 3.5 吸湿率の結果にも示すように、含浸材はコンクリート表面に塗布することで、湿気などの水蒸気の浸入を抑制するため、無塗布と比較してコンクリート内部の水分状態が低くなったことが影響していると推察される。

一方、表面コーティング材では、E-F のように無塗布に比べ透気係数が大きく低下することが確認された。これは、表面コーティング材は表面に塗膜を形成し、表層を緻密にするため、気体の浸入を抑制したものと考える。

また、熱劣化試験後では、含水率の変化が少なく撥

水効果が高いと予想される S-2, S-3 のシラン系の含浸材において、高い数値が確認された。これは、シラン系含浸材はコンクリート表層部に撥水層を形成することにより、内部への水分浸入を抑制する性質であるため、試験体に内在していた水分が外部へ放出され透気係数がさらに高くなったと考えられる。その他の含浸材や表面コーティング材においては、熱劣化試験の降水過程により水分が内部へ浸透したことによって、透気係数が低くなったと考えられる。

また、熱劣化試験後に透気係数が高くなった表面コーティング材 E-F の熱劣化試験前後の試験体写真を、写真-5 に示す。表面の塗膜層には気泡がはじけたような跡があり、熱と散水の繰り返しにより、表面に目視上明らかな変化をもたらすことが確認された。

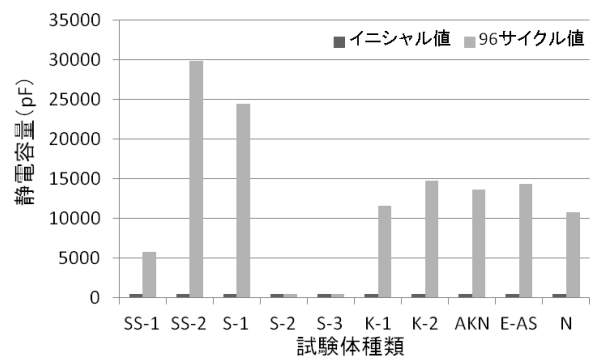


図-5 静電容量の変化

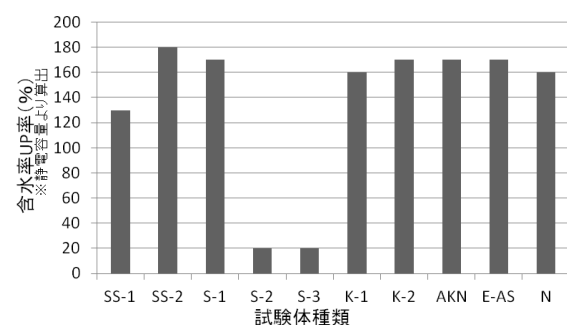


図-6 熱劣化試験体の含水率の変化

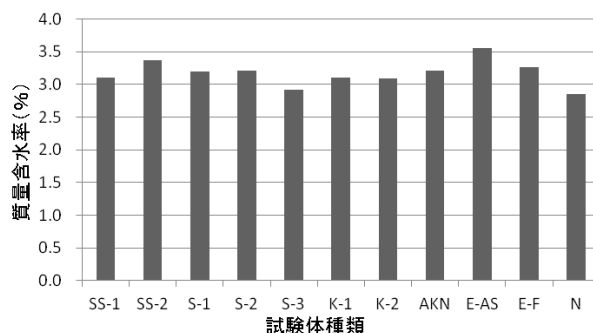


図-7 促進中性化試験体の含水率

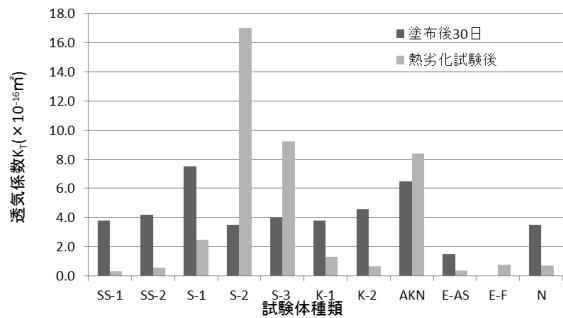


図-8 透気係数 K_T の比較

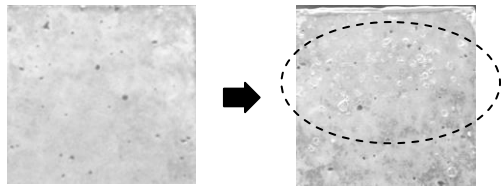


写真-5 E-F 試験体 熱劣化試験後の変化

3.4 中性化深さ

図-9 に中性化深さの変化を示す。表面含浸材では、シラン系およびケイ酸塩系とも無塗布と大差はなく中性化抑制効果は認められない。これは、シラン系表面含浸材は前述の通り、撥水性が高いため透気性に現れる通り、コンクリート中の含水率が低下し、中性化の主たる要因である CO_2 の浸入を許容しているために中性化抑制効果が見られないと考察される。またケイ酸塩系含浸材は、塗布後に湿潤状態を保つことが必要であり、実環境と比較して雨水や高湿度などの環境条件にさらされなかったことにより、コンクリート組織を緻密にする効果が発揮されなかったためと推察される。

一方、表面コーティング材では中性化がほとんど進んでおらず、この抑制効果が高い結果となった。表面コーティング材は表層に緻密な膜を形成することにより、 CO_2 の浸入を抑制するため中性化が進行しなかったと考えられる。また図-10 に熱劣化試験後の中性化深さの経過を示す。無塗布と比べてケイ酸塩系含浸材 (K-1, K-2) が抑制効果を発揮している結果となっている。これは前述の結果にも示したように、熱劣化試験により散水と高湿度の状態が繰り返されることで、ケイ酸塩系含浸材のコンクリート表層部の改質機構の成分が、コンクリート中の Ca イオンと反応していき、コンクリート表層を緻密化したことが考えられる。また、熱劣化試験の有無の違いによる差を比較するため、図-11 に各々の試験体の中性化速度係数を示す。前述の通り、特にケイ酸塩系含浸材 (K-1, K-2) が熱劣化によって中性化抑制効果を発揮していることが分かる。

図-12 に中性化深さと、塗布後 30 日の透気係数との

関係を示す。透気係数と中性化深さには概ね相関があり、既往の研究³⁾の通り、透気係数により中性化深さを概ね評価できると考える。透気係数が $1 \times 10^{-16} m^2$ 以下であれば中性化はかなり抑制されると考える。また、今回の結果により、特に表面コーティング材を使用した構造物においては、経年による中性化抑制効果の変化を、透気試験によるモニタリングにより管理できると考えられる。

図-13 に静電容量と、熱劣化試験後の透気係数の関係を示す。透気係数と静電容量の間には相関がみられず、この水分浸透抑制効果については、別の観点からの評価方法の検討が必要になるとと思われる。

3.5 吸湿率

図-14 に吸湿率の変化を示す。表面含浸材、表面コーティング材での抑制効果の差は見られなかった。撥水効果の有無が吸湿抑制効果には現れないことが分かる。しかし、各塗布材とも無塗布と比べ吸湿率は低下しており、コンクリート表面に塗布することで、湿気などの水蒸気の浸透抑制効果が期待できると考える。

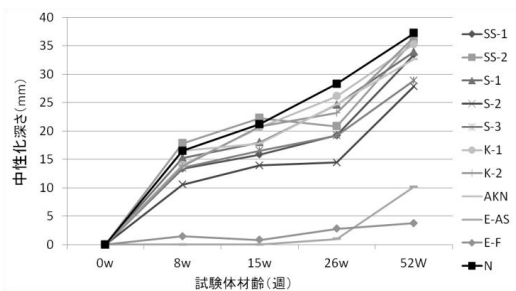


図-9 中性化深さ経過状況 (熱劣化試験無)

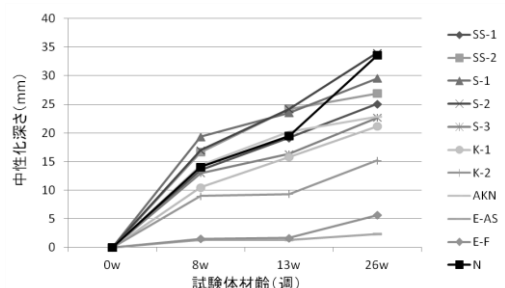


図-10 中性化深さ経過状況 (熱劣化試験有)

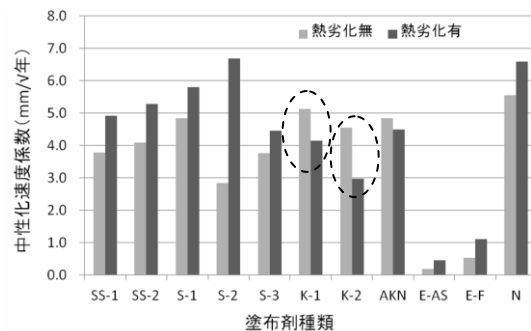


図-11 中性化速度係数の比較

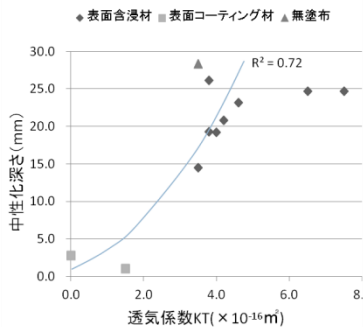


図-12 中性化深さと透気係数

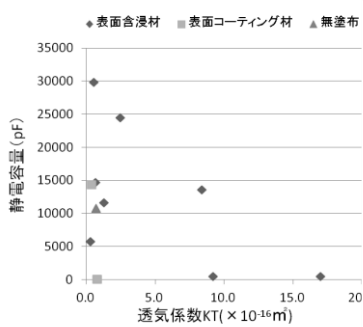


図-13 静電容量と透気係数

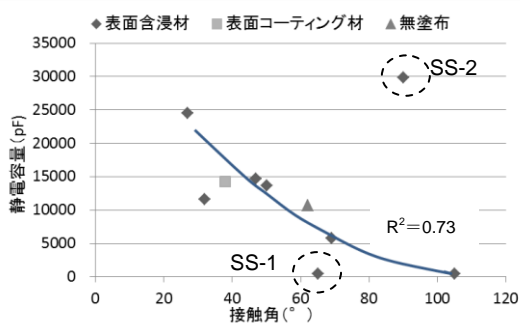


図-15 接触角と静電容量

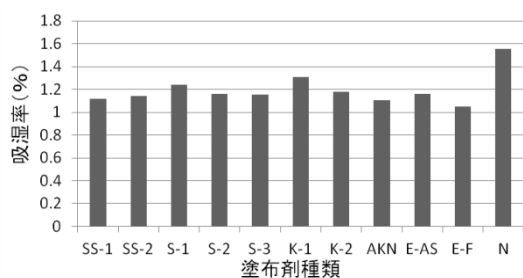


図-14 吸湿率の比較

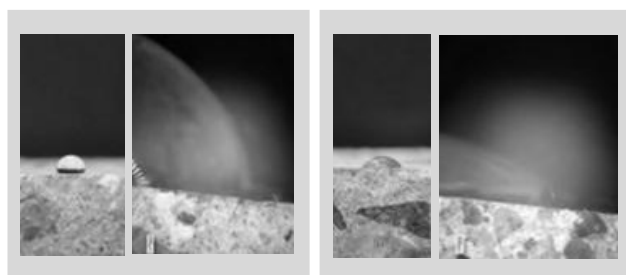


写真-5 S-1 接触角写真 (左; 熱劣化無, 右; 熱劣化)

3.6 接触角

図-15 に熱劣化試験を与えた試験体の接触角と静電容量の関係を示す。表面含浸材の一種類 (SS-2) を除いて、静電容量と接触角に概ね相関が見られる。接触角が大きいくほど撥水性が高く、逆に小さいほど撥水効果が低いことを示している。このことからコンクリート表面の接触角の評価によって、コンクリートの撥水性能を評価できると考えられる。なお、相関線から外れる SS-2 に関しては、同主成分の SS-1 と比較して表面から内部への水分の浸透時間が遅いことが影響しており、時間の経過と共にこの接触角は小さくなることを確認されている。また目視でも熱劣化前後で接触角の違いが明らかであった S-1 の様子を写真-5 に示す。

4. まとめ

本検討における各塗布材の中性化および水分浸透抑制効果を以下にまとめる。

- 1) 表面コーティング材は一定の中性化抑制効果が期待されるが、コンクリート表面は光沢度および色差による視覚的変化が生じる。
- 2) 表面含浸材は、視覚的変化は少ないが、無塗布と比較して中性化の進行が同等かそれ以上である。
- 3) シラン系表面含浸材では、比較的高い水分浸透抑制効果が見られるものがあつた。
- 4) ケイ酸塩系含浸材は、熱と散水が繰り返されることによって内部に浸透し、表層が緻密化し、中性化を抑制する。

- 5) 中性化深さは透気試験で評価できると考えられるが、コンクリート内への水分浸透性については別の観点からの評価方法を検討する必要がある。
- 6) 表面含浸材、表面コーティング材の塗布剤の違いによる吸湿抑制効果の差は見られなかったが、塗布することで吸湿抑制効果は認められた。
- 7) 表面の接触角によって、コンクリート中への液体の浸透抑制効果を評価できると考えられる。

参考文献

- 1) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案 日本建築学会構造系論文集第 498 号, 13-20, 1997 年 8 月
- 2) 今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: かぶりコンクリートの透気性に基づく RC 構造物の耐久性能検証に向けた基礎的研究 - 各種試験方法における透気性の指標値と中性化深さの関連 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 638 号, 593-599, 2009 年 4 月
- 3) 田中章夫, 今本啓一, 唐沢智之, 山崎順二, 下澤和幸: 仕上げ材を有するコンクリートの通気係数 K_{torr} と促進中性化深さ, 歴史構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会 (216 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演会梗概集, コンクリート技術シリーズ No.87, pp129-134. 2009.11