ISSN 2186-5647



4-20

# トレント法透気試験を用いた中性化抵抗性評価に関する研究

熊谷組　　○三谷 和裕　　日大生産工(院)　野中 英

## 1 まえがき

鉄筋コンクリート構造物の耐久性は、コンクリートの耐久性の低下に伴う鉄筋の腐食に支配される。鉄筋を腐食させる有害因子は、コンクリート表面から浸入にするため、コンクリート表層部の品質や鉄筋のかぶり厚さが鉄筋コンクリート構造物の耐久性にとって重要な要因となる。そのため、コンクリートの品質向上のために、表面含浸材などの塗布剤の塗布などが行われているが、最適な塗布剤の選定方法や塗布剤の養生効果の評価方法などが明確でないのが現状である。筆者らの既往の研究[1)]では、水セメント比の異なるコンクリートに収縮低減剤、表面含浸材、膜養生剤などの塗布剤を塗布し、透気性や耐久性に関する検討を行ったが、塗布剤の養生効果が十分に確認できなかった。

本研究では、既往の研究における塗布剤の塗布方法では所要の品質が得られなかったことから、塗布方法、塗布量および塗布材齢の変更により養生効果を向上させた試験体により、透気性から中性化抵抗性を評価することを目的に、シラン系表面含浸材、けい酸塩系表面含浸材および防水形外装薄塗材Eを塗布したコンクリートを対象にトレント法透気試験と促進中性化試験を行い、透気性と中性化の関係から中性化抵抗性を評価する方法を検討した。

## 2 実験概要

### 2．1　実験ケース

表1に、実験ケースを示す。実験ケースは、養生種類として比較用の塗布剤を塗布しないもの(以下、無塗布と略記)を1種類、シラン系表面含浸材(以下、シラン系と略記)を5種類、けい酸塩系表面含浸材(以下、けい酸塩系と略記)を4種類、防水形外装薄塗材E(以下、塗材と略記)を1種類の計11種類、前養生条件を変えた2ケースの合計22ケースとした。

### 2．2　試験体の作製

(1)試験体

トレント法透気試験の試験体は、寸法を300×300×150mmとし、300×300mmの面を試験面として使用した。促進中性化試験の試験体は、寸法を100×100×200mmとし、100×200mmの型枠の側面に接していた面を試験面として使用した。試験面以外の4面は乾燥の影響を受けないようにエポキシ樹脂を塗布した。図1に、300×300×150mmの試験体図を示す。

(2)コンクリートの調合および使用材料

本実験で使用したコンクリートは、水セメント比60%とし、調合および使用材料を表2に示す。

### 2．2　コンクリートの養生

図2に、試験体の養生条件を示す。前養生期間の試験体は、コンクリート打設後、材齢1日まで温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内に

表1　実験ケースおよび塗布剤の塗布量

| 実験ケース | | | | 塗布剤の塗布量 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 養生種類 | 養生種類記号 | 前養生期間 | 塗布材齢 | 目標塗布量(g/m²) | 実際の塗布量(g/m²) |
| 無塗布 | 無塗布 | 3日 | － | － | － |
| | | 7日 | － | | |
| シラン系 | シランA | 3日 | 7日 | 200 | 199 |
| | | 7日 | 7日 | | 199 |
| | シランB | 3日 | 7日 | 250 | 249 |
| | | 7日 | 7日 | | 249 |
| | シランC* | 3日 | 7日 | A剤250 B剤250 | A剤247 B剤256 |
| | | 7日 | 7日 | | A剤248 B剤247 |
| | シランD | 3日 | 7日 | 250 | 251 |
| | | 7日 | 7日 | | 253 |
| | シランE | 3日 | 7日 | 250 | 252 |
| | | 7日 | 7日 | | 262 |
| けい酸塩系 | けい酸A | 3日 | 7日 | 172 | 173 |
| | | 7日 | 7日 | | 173 |
| | けい酸A' | 3日 | 7日 | 344 | 344 |
| | | 7日 | 7日 | | 342 |
| | けい酸B | 3日 | 7日 | 150 | 188 |
| | | 7日 | 7日 | | 152 |
| | けい酸C | 3日 | 7日 | 385 | 391 |
| | | 7日 | 7日 | | 398 |
| 防水形外装薄塗材E | 塗材A | 3日 | 7日 | 700 | 822 |
| | | 7日 | 7日 | | 790 |

*：シランCでは、A剤を塗布後、B剤の塗布を行った。

Study on estimation of carbonation resistance by Torrent air permeability test

Kazuhiro MITANI、 Akira NONAKA

乾燥しないように型枠内で静置した後、材齢1日で型枠を取り外し、ビニールを用いて試験体全体を包み、乾燥を防止した。前養生期間後の試験体は、ビニールを取り外し、塗布材齢まで温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内で静置した後、塗布剤を塗布した。塗布剤は、試験面に表1に示す目標塗布量を塗布した。塗布剤を塗布した試験体は、試験材齢まで温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内で静置した。

塗布剤は、試験面が水平となるように試験体を設置した後に、表面含浸材では刷毛、塗材ではローラーを用いて塗布した。実際の塗布量は、目標塗布量に対してシラン系で99～105%、けい酸塩系で100～125%、塗材で113~118%であった。

### 2．3　試験方法

試験は、表4に示す試験項目について以下の方法により行った。

(1)含水率の測定

含水率の測定は、図1に示す位置において市販の静電容量式含水率計により9箇所測定した。

(2)トレント法透気試験

トレント法透気試験は、図1に示す位置において市販の測定装置により材齢3ヶ月で文献[2]に従いコンクリート表面に減圧したチャンバー（内部チャンバーと外部チャンバーの2つのチャンバーを有する）を設置し、内部チャンバーの気圧上昇を5箇所測定した。内部チャンバーの気圧上昇の測定値からトレント法透気係数kTを算出するために、コンクリートを均質体と仮定し、透気試験において気圧変化を生じる影響領域が時間とともに深部へ拡大するといったモデル化を行い、これに圧縮性流体の一次元流れを表すHagen-Poiseuille式を適用し、式(1)によりトレント法透気係数kTを算出した。

$$kT = \left[\frac{V_c}{A}\right]\frac{\mu}{2\varepsilon P_a}\left[\frac{\ln\frac{P_a+\Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a-\Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t}-\sqrt{t_0}}\right]^2 \quad (1)$$

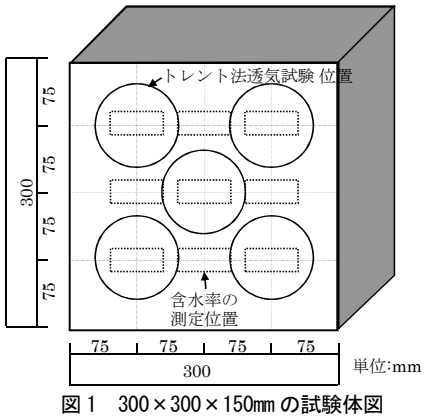


図1　300×300×150㎜の試験体図

ここに、

kT　：トレント法透気係数(m²)
$V_c$　：内部セルシステムの容積(m³)
A　：内部セルの断面積(m²)
$\mu$　：空気の粘性係数（=2.0×10⁻⁵N･s/m²)
$\varepsilon$　：かぶりの予想多孔性(=0.15)
$P_a$　：大気圧(N/m²)
$\Delta P_{ieff}$　：試験終了時内部セルの有効圧力上昇(N/m²)
$t_f$　：試験終了時間(s)

(3)促進中性化試験

促進中性化試験は、JSCE-K-571を準用し、材齢28日まで所定の養生を行った後、温度20℃、湿度60%、$CO_2$濃度5%の促進中性化試験槽に入れ、13週間静置した。中性化深さの測定は、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、コンクリート表面から赤紫色に呈色する部分までの距離を割裂面の両面の計10点を測定し、中性化深さはその平均値とした。

## 3．実験結果

(1)含水率

図3に、養生種類別の含水率を示す。含水率は、前養生期間3日において無塗布で4.4%、シラン系で3.9～4.3%、けい酸塩系で4.4～4.5%、塗材で4.1%、前養生期間7日において無塗布で4.4%、シラン系で4.2~5.1%、けい酸塩系で4.5～4.7%、塗材で4.5%であった。含水率は、無塗布と比較してシラン系では小さくなるものが多く、けい酸塩系では大きくなるものが多く認められた。

表2　コンクリートの調合および使用材料

| 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 粗骨材の最大寸法 (mm) | 単位量 (kg/m³) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 水 | セメント | 細骨材 | | 粗骨材 | 混和剤 | |
| | | | *W* | *C* | *S1* | *S2* | *G* | *Ad1* | *Ad2* |
| 60 | 46.6 | 20 | 185 | 308 | 275 | 533 | 973 | 3.08 | 0.77 |

【使用材料】セメント C　：普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)
細骨材 S1　：つくば市産川砂（密度 2.50g/cm³)
S2　：つくば市産砕砂（密度 2.59g/cm³)
粗骨材 G　：つくば市産採石（密度 2.66g/cm³)
混和剤 Ad1　：P 社製 AE 減水剤（4 倍希釈液)
Ad2　：P 社製 AE 助剤（100 倍希釈)

表3　試験項目、試験方法および試験体寸法

| 試験項目 | 試験方法 | 試験体寸法 (㎜) |
|---|---|---|
| 含水率の測定 | 市販の静電容量式含水率計により測定 | 300×300×150 |
| トレント法透気試験 | 文献[2]に準拠して測定 | 300×300×150 |
| 促進中性化試験 | JSCE-K-571 を準用 | 100×100×200 |

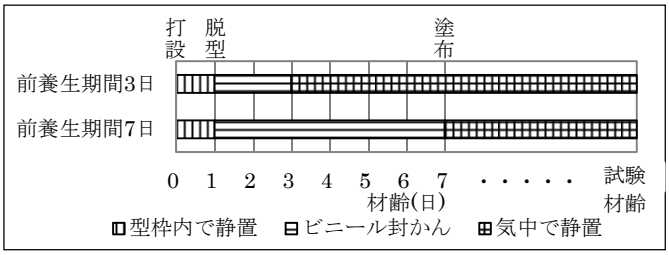


図2　試験体の養生条件

(2)トレント法透気係数

図4に、養生種類別のトレント法透気係数を示す。トレント法透気係数は、前養生期間3日において無塗布で1.2×$10^{-16}$m²、シラン系で0.60~1.5×$10^{-16}$m²、けい酸塩系で1.1～2.0×$10^{-16}$m²、塗材で0.01×$10^{-16}$m²、前養生期間7日において無塗布で1.1×$10^{-16}$m²、シラン系で0.52～1.2×$10^{-16}$m²、けい酸塩系で0.48～0.77×$10^{-16}$m²、塗材で0.00×$10^{-16}$m²であった。トレント法透気係数は、無塗布と比較して前養生期間3日におけるけい酸塩系以外は小さくなるものが多く認められた。シラン系は、コンクリートの細孔を緻密化させるような作用はないが、透気を抑制するような作用をもっており、けい酸塩系は、前養生期間により異なるがコンクリートを緻密化させ、透気を抑制する作用を持っていると考えられる。

(3)中性化速度係数

図5に、養生種類別の中性化速度係数を示す。中性化速度係数は、前養生期間3日において無塗布で4.4mm/√週、シラン系で3.3～4.0mm/√週、けい酸塩系で4.2～4.8mm/√週、塗材で0.0mm/√週、中性化速度係数は、前養生期間7日において無塗布で4.2mm/√週、シラン系で3.3～4.2mm/√週、けい酸塩系で3.8～4.7mm/√週、塗材で0.0mm/√週であった。中性化速度係数は、無塗布と比較し、シラン系および塗材では同等若しくは小さくなるものが多く認められ、けい酸塩系では若干小さいか若しくは大きくなるものが多く認められた。シラン系は、コンクリートの細孔を緻密化させるような作用とは別の作用機構の中性化抑制効果を持っていると考えられ、けい酸塩系は中性化抑制効果が少ないと考えられる。

(4)無塗布を100とした場合の変化率

図6、図7に、前養生期間3日と前養生期間7日の養生種類別の無塗布を100とした場合の変化率を示す。トレント法透気係数変化率は前養生期間3日においてシランAおよびシランDの2種類、前養生期間7日においてシランB、シランDを除く8種類で70%以下となり、前養生期間3日においてシランB、シランC、けい酸A'およびけい酸Bの4種類、前養生期間7日においてシランBおよびシランDの2種類で100%を超えた。中性化速度係数変化率は、前養生期間3日においてシラン系全て、けい酸Cの6種類、前養生期間7日においてシランB、シランCおよびシランDの3種類が90%以下となり、けい酸A'の1種類が100%を超えた。

前養生期間3日において、シラン系でトレント法透気試験変化率は49～119%であったのに対し、中性化速度係数変化率は74~90%、けい酸塩系でトレント法透気係数変化率が90～165%であったのに対し、中性化速度係数変化率は96～109%であった。前養生期間7日においてシラン系でトレント法透気係数変化率が47～113%であったのに対し、中性化速度係数変化率は79～100%、けい酸塩系でトレント法透気係数変化率は44～70%であったのに対し、中性化速度係数変化率は91～103%であった。

トレント法透気係数変化率は中性化速度係数変化率と同様に変化するものも認められたが、トレント法透気係数変化率は大きくなったが、中性化速度係数変化率は変わらないものやトレント法透気係数変化率は小さくなってい

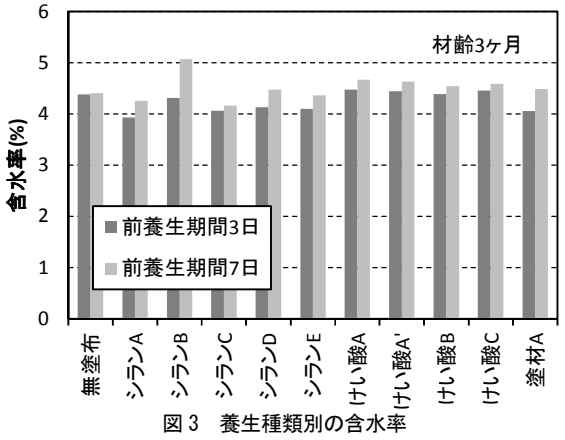

図 3　養生種類別の含水率

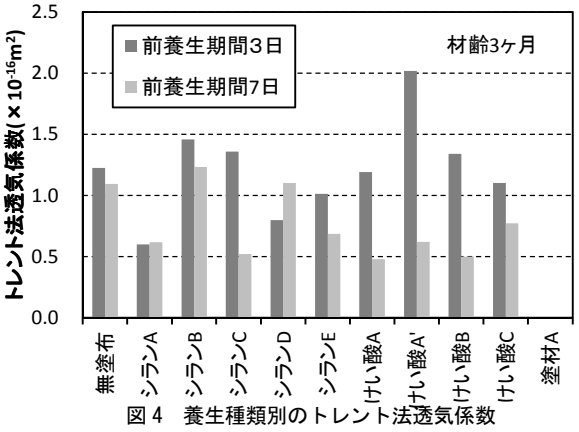

図 4　養生種類別のトレント法透気係数

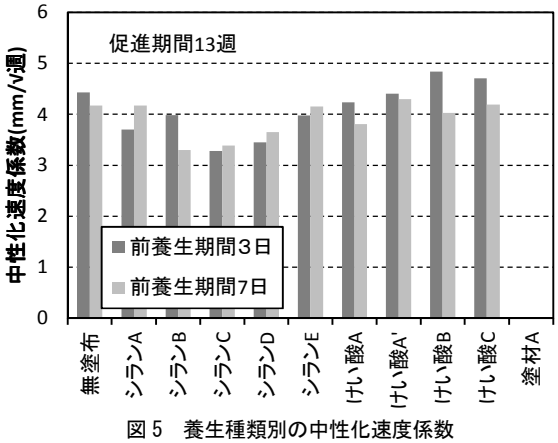

図 5　養生種類別の中性化速度係数

るが中性化速度係数が大きくなったものが認められた。トレント法透気係数変化率は、中性化速度係数変化率とは異なる増減の傾向となるものが多く認められた。このことから、塗布剤を塗布した場合のトレント法透気係数変化率と中性化速度係数変化率の関係性は低いといえる。

(5)トレント法透気係数と中性化速度係数の関係

図8に、トレント法透気係数と中性化速度係数の関係を示す。無塗布を100とした場合の変化率でシラン系とけい酸塩系において異なる傾向となったため、各々で検討を行った。また、無塗布は参考として示している。トレント法透気係数と中性化速度係数の関係は、シラン系において傾きが負になるとともに決定係数が0.05と相関は無く、けい酸塩系では傾きが正であるが決定係数が0.36と相関は弱い。以上のようにシラン系では傾向は認められず、けい酸においても若干の傾向は認められるが、透気性から中性化抵抗性の評価を行うのは困難と考える。これは、塗布剤の養生効果がシラン系において撥水効果があるものの透気性を抑制するようなコンクリートの細孔を緻密化させるような効果がないこと、けい酸塩系においてコンクリート表面から数mm程度までの効果しかなく中性化抑制効果も少ないことから考えると試験のばらつきを含め、評価が困難であったと考えられる。これらのことから、塗布剤の効果を透気性や中性化で評価することは困難であると考える。

## 4．まとめ

本研究の結果、以下の知見が得られた。

1)含水率は、無塗布と比較してシラン系では小さくなるものが多く、けい酸塩系では大きくなるものが多く認められた。

2)シラン系は、コンクリートの細孔を緻密化させるような作用はないが、透気を抑制するような作用をもっており、けい酸塩系は、前養生期間により異なるがコンクリートを緻密化させ、透気を抑制する作用を持っていると考えられる。

3)シラン系は、コンクリートの細孔を緻密化させるような作用とは別の作用機構の中性化抑制効果を持っていると考えられ、けい酸塩系は中性化抑制効果が少ないと考えられる。

4)塗布剤を塗布した場合のトレント法透気係数変化率と中性化速度係数変化率の関係性は低いと言える。

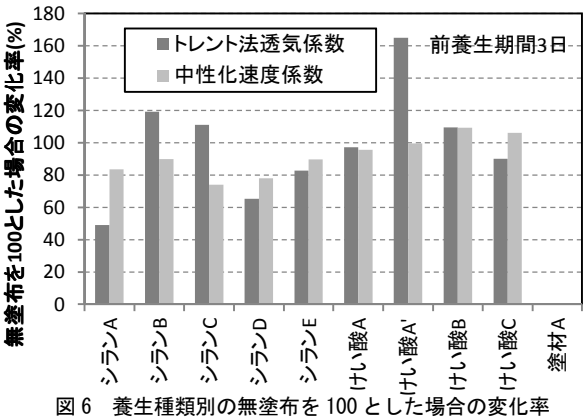


図 6　養生種類別の無塗布を 100 とした場合の変化率
（前養生期間 3 日）

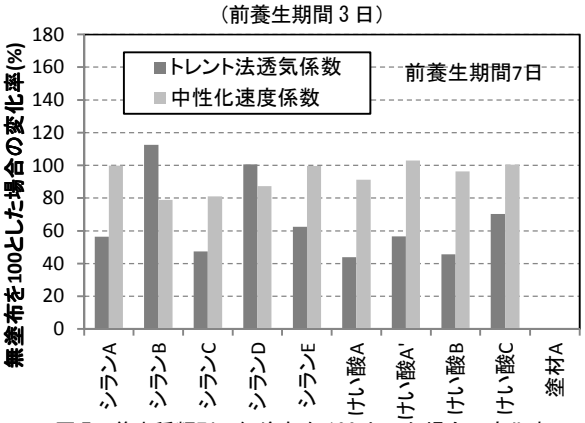


図 7　養生種類別の無塗布を 100 とした場合の変化率
（前養生期間 7 日）

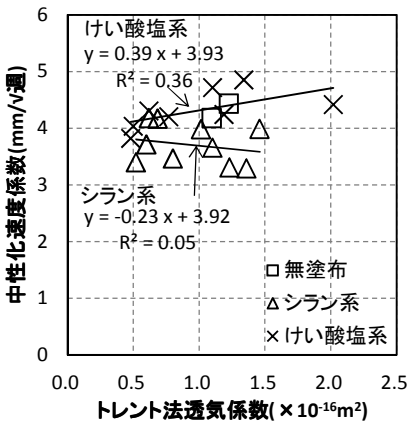


図 8　トレント法透気係数と中性化速度係数の関係

5)塗布剤の効果を透気性や中性化で評価することは困難であると考える。

「参考文献」


1) 野中ほか、養生・調合の異なるコンクリートの品質評価に関する研究　その1～その3、2012年度日本建築学会関東支部研究報告集Ⅰ、pp.109~pp.120、2013

2) R.J. Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site. Materials and Structures、 vol.25、 No.6、 pp358-365、 1992