

# タイル張り仕上げコンクリートの中性化進行予測に関する 解析的検討

## Analytical Study on Prediction of Carbonation Progress of Tile-Finished Concrete

河野政典\*

### 要 旨

タイル張り仕上げを施したコンクリートの中性化進行について理論的検討を行うため、タイル張りの目地部分から二酸化炭素が侵入し中性化が進行するモデルによる中性化進行予測手法を提案した。既往文献のタイル張りコンクリートの促進中性化試験のデータと、提案式から求めた予測値との比較検討を行った結果、予測値は実験値におおよそ対応した結果となり、予測手法の適用性が確認された。そして、実建物におけるタイル張りコンクリートの中性化予測を行った結果、タイル張り仕上げは高い中性化抑制効果を有することを確認し、目地幅による中性化への影響を定量的に示した。また、タイル長さ目地幅から求められる中性化速度係数比の収束値を用いた簡略的なタイル張りコンクリートの中性化予測手法を併せて提案した。

キーワード：コンクリート、中性化、タイル張り仕上げ

### 1. まえがき

鉄筋コンクリート造建築物の外壁には、意匠性、美観性から仕上げが施されていることが多く、代表的な仕上げの一つとしてタイル張りが挙げられる。タイル張り仕上げについては、建物の耐久性の重要な評価指標であるコンクリートの中性化を抑制する効果を有することが広く知られている<sup>1)</sup>。その効果に基づき、住宅性能表示制度の劣化対策等級では、タイル張り仕上げが施された場合、最小かぶり厚さを 1cm 減ずることができると記されている<sup>2)</sup>。

これまでのタイル張り仕上げを施したコンクリート（以下、タイル張りコンクリートと称す）の中性化に関する研究報告では、タイル張りの中性化抑制効果の評価については、仕上げ材のないコンクリートの中性化深さに対するタイル張りコンクリートの中性化深さの比（以下、中性化率と称す）で表されていることが多い。例えば、和泉ら<sup>3)</sup>は、実建物の調査結果からタイル張りの中性化率は屋内で  $0.31 \pm 0.18$ 、屋外で  $0.16 \pm 0.09$  と報告している。また、磯田ら<sup>4)</sup>は、促進中性化試験の結果から目地下部分で  $0.14 \sim 0.35$ 、タイル下部分で  $0.08 \sim 0.27$  と報告しており、いずれにおいても高い中性化抑制効果が示されている。ただし、この中性化率は中性化深さの測定結果の数値を用いて中性化の度合いを表したものであり、理論的な中性化進行を捉えて評価したもので

はない。

一般的な環境においては、コンクリートの中性化は二酸化炭素の侵入により生じる。外装に用いられるタイルの多くは磁器質の施釉タイルであるため、タイル面の透気性は極めて小さく、二酸化炭素のコンクリートへの侵入は目地部分からに限られる。したがって、コンクリートの中性化は目地の幅やタイルの大きさに影響することが考えられる。そこで、鉄筋コンクリートの耐久設計にタイル張りの中性化抑制効果を有効に取り入れるためには、それらの影響について検討する必要がある。そのためには、タイル張りコンクリートの理論的な中性化進行について明らかにする必要がある。しかしながら、タイル張りコンクリートの理論的な中性化進行予測に関する研究報告は少ない。

そこで、タイル張りの目地部分から二酸化炭素が侵入しコンクリートの中性化が進行するモデルによる中性化進行予測手法の提案を行い、既往のタイル張りコンクリートの促進中性化実験データと、提案式から求めた予測値との比較検討により、予測手法の適用性について検証した。そして、実建物におけるタイル張りコンクリートの中性化予測、目地幅の違いによる中性化の影響、および中性化予測方法の簡略化について検討を行った。本報では、それらの検討結果について報告する。

\*技術研究所

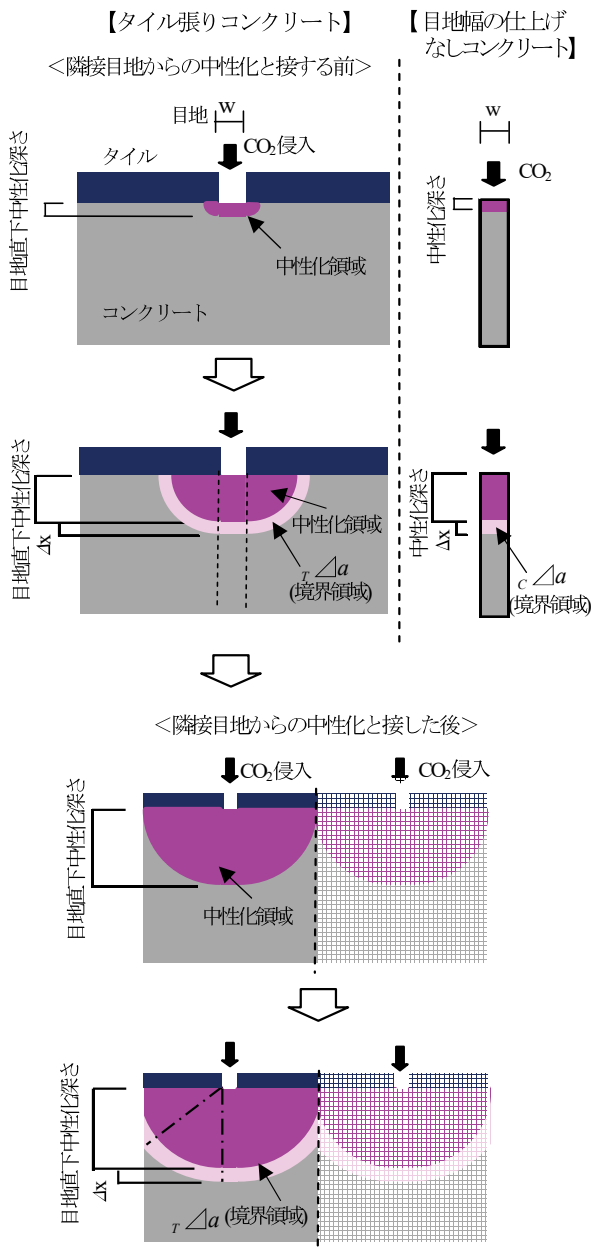


図-1 タイル張りコンクリートの  
中性化進行のモデル

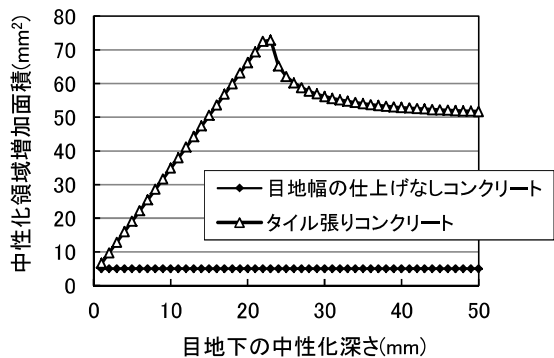


図-2 中性化深さと中性化領域増加面積

## 2. 中性化進行予測の検討方法

### 2.1 中性化進行モデル

タイル張りコンクリートの中性化進行の模式図を図-1に示す。ここでは、コンクリートにタイルが密着した状態で、目地部分からのみ二酸化炭素が侵入し、放射状に中性化が進行するモデルを想定した。

目地下のコンクリートの中性化深さに着目すると、目地直下の中性化が進行するためには、目地から半円状に広がるタイル下部分も同時に中性化が進行することとなる。隣接目地の中性化領域と接触するまでは、目地下の中性化深さが進行するほど、中性化領域の増加割合が大きくなる。図-2に、タイルの長さが45mm、目地幅が5mmの場合について、目地下の中性化深さが1mmずつ増加したときの中性化領域増加面積(図-1中の境界領域)の変化を示す。図中には、タイルの目地幅と同じ幅(5mm)の仕上げなしコンクリート(以下、目地幅コンクリートと称す)の場合の増加面積変化も併せて示す。図-2から、目地幅コンクリートの増加面積は一定であるが、タイル張りコンクリートの場合は、まず、直線的に増加面積が増し、隣接目地からの中性化領域と接触した後は、徐々に減少することがわかる。本条件によるタイル張りの場合の増加面積は、タイル長さに目地幅を加えた50mmと中性化深さ1mmの積である50mm<sup>2</sup>に収束する。

### 2.2 中性化速度係数

コンクリート中を二酸化炭素が定常拡散によって移動し、中性化領域と未中性化領域の境界で水酸化カルシウムと反応して、中性化が進行する模式図を図-3に示す。この時の、仕上げのないコンクリートの中性化深さは式(1)から求められ、中性化速度係数は式(2)で表されることが報告されている<sup>5)</sup>。

$$x = A\sqrt{t} \tag{1}$$

$$A = \sqrt{\frac{2D \cdot C_0}{H}} \tag{2}$$

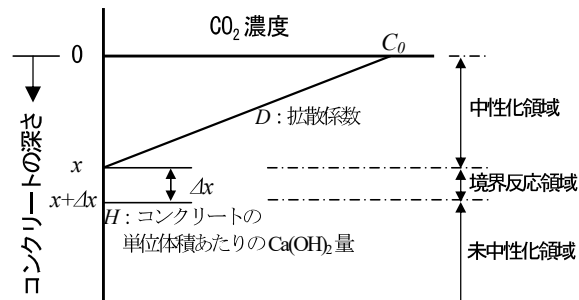


図-3 中性化進行の模式図  
(CO<sub>2</sub>の拡散とCa(OH)<sub>2</sub>との反応の模式図)

ここで、 $x$  : 中性化深さ  
 $t$  : 時間  
 $A$  : 中性化速度係数  
 $D$  : 拡散係数  
 $C_0$  : コンクリート表面の  $\text{CO}_2$  濃度  
 $H$  : コンクリートの単位体積あたりの  $\text{Ca(OH)}_2$  量

したがって、**図-1**に示す目地幅コンクリートが深さ  $\Delta x$  中性化するときの中性化速度係数は式(3)となる。

$${}_c A = \sqrt{\frac{2D \cdot C_0}{{}_c H}} \quad (3)$$

ここで、 ${}_c A$  : 目地幅コンクリートの中性化速度係数  
 ${}_c H$  : **図-1**の  ${}_c \Delta a$  中の  $\text{Ca(OH)}_2$  量

タイル張りコンクリートの目地下が、目地幅コンクリートと同じ  $\Delta x$  中性化するときの中性化速度係数は式(4)で表される。目地下が、目地幅コンクリートと同じ深さ分、中性化が進行するためには、目地幅コンクリートの水酸化カルシウム  $\Delta x$  の量  ${}_c H$  より、中性化増加(境界領域)面積比 ( ${}_T \Delta a / {}_c \Delta a$ ) 分多い水酸化カルシウム量が反応することとなる。

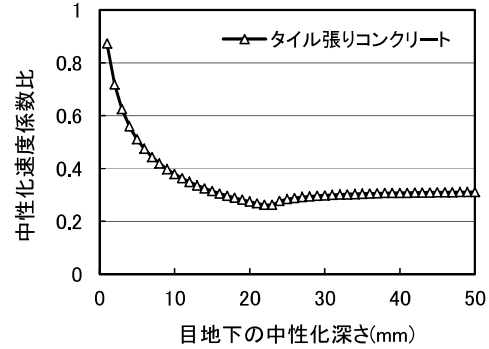
$${}_T A = \sqrt{\frac{2D \cdot C_0}{{}_T H}} = \sqrt{\frac{2D \cdot C_0}{{}_c H \cdot \left(\frac{{}_T \Delta a}{{}_c \Delta a}\right)}} \quad (4)$$

ここで、 ${}_T A$  : タイル張りコンクリートの中性化速度係数  
 ${}_T H$  : **図-1**の  ${}_T \Delta a$  中の  $\text{Ca(OH)}_2$  量

式(3)と式(4)から、目地幅コンクリートとタイル張りコンクリートの中性化速度係数比については、式(5)で表される。

$$\frac{{}_T A}{{}_c A} = \sqrt{\frac{{}_c \Delta a}{{}_T \Delta a}} \quad (5)$$

**図-2**の条件におけるタイル張りコンクリートの目地下の中性化深さと式(5)から求められる中性化速度係数比の関係を**図-4**に示す。この図から、中性化深さの進行ステップごとに中性化速度係数比が変化することがわかる。**図-2**に示すように、隣接目地からの中性化領域と接触するまでは、中性化領域が拡大するため、中性化速度係数比においては減少し、その後、微増に転じる。なお、本条件の場合、中性化速度係数比は 0.316 に収束する。



**図-4** 中性化深さと中性化速度係数比の関係

以上より、中性化進行に応じ、ステップごとの中性化速度係数を算出することによって、タイル張りコンクリートの中性化進行の予測が可能と考えられる。

### 3. 中性化予測式

前述の中性化進行モデルに基づく、中性化予測式を式(6)に示す。タイル張りコンクリートの中性化測定においては、目地下とタイル下部分の中性化深さを数点測定し、平均値として表されることが多い。ここでは、中性化面積を一組のタイルと目地幅長さの和で除した式(7)を平均中性化深さとした。

$$t_{(i)} = t_{(i-1)} + \frac{C_{(i)}^2 - C_{(i-1)}^2}{{}_T A_{(i)}^2} \quad (6)$$

$$C_{(i)} = C_{(i-1)} + \Delta C$$

$${}_T A_{(i)} = {}_c A \sqrt{\frac{{}_c \Delta a_{(i)}}{{}_T \Delta a_{(i)}}}$$

$${}_T \Delta a_{(i)} = {}_T a_{(i)} - {}_T a_{(i-1)}$$

$${}_c \Delta a_{(i)} = {}_c a_{(i)} - {}_c a_{(i-1)}$$

$${}_{ave} C_{(i)} = {}_T a_{(i)} / Tw \quad (7)$$

$$\text{条件 } \Delta C=1, C_{(0)}=0, {}_T a_{(0)}=0, {}_c a_{(0)}=0$$

ここで、 $t_{(i)}$  : ステップ  $i$  の材齢 (年)

$C_{(i)}$  : ステップ  $i$  での目地下の中性化深さ (mm)

${}_T A_{(i)}$  : ステップ  $i$  での中性化速度係数 ( $\text{mm} \cdot \text{年}^{-1/2}$ )

${}_c A$  : 仕上げなしコンクリートの中性化速度係数 ( $\text{mm} \cdot \text{年}^{-1/2}$ )

${}_T a_{(i)}$  : 目地下中性化深さが  $C_{(i)}$  の時の中性化面積 ( $\text{mm}^2$ )

${}_c a_{(i)}$  : 目地幅と同じ幅のコンクリートの中性化深さが  $C_{(i)}$  の時の中性化面積 ( $\text{mm}^2$ )

${}_{ave}C_{(i)}$  : ステップ  $i$  での平均中性化深さ (mm)  
 $Tw$  : 一組のタイルと目地幅長さの和 (mm)

#### 4. 予測式の適用性の検証

提案した予測式の適用性を検証するため、既往文献の促進中性化試験による実験データ<sup>6)</sup>と提案式から求めた予測値との比較を行った。

既往文献における実験概要を表-1に示す。試験体は、10×10×40cmのコンクリートに一般的な外装タイルを、張付けモルタルを用いて直張りしたものである。タイルは磁器質の施釉タイルで、寸法は45×95mm、目地幅5mmである。なお、比較対象とした試験体は、目地材が充填されていないものである。

中性化予測に必要な仕上げなしコンクリートの中性化速度係数  $ca$  は、上記文献中の仕上げなしコンクリートの中性化データから求めた。また、文献では、張付けモルタルが用いられているが、その中性化速度は、コンクリートとほぼ同じと報告されている。そこで、ここでは、張付けモルタルをコンクリートとして扱った。さらに、張付けモルタルの厚さは1~2mmと考えられることから、ここではその厚さを中間値である1.5mmと仮定し、実験値との比較では、予測計算値から張付けモルタル分の1.5mmを差し引いた。

予測値と既往文献の実験データの比較を図-5に示す。文献では、「目地下」と「タイル下」の中性化深さが報告されており、「目地下」は予測式の  $C_{(t)}$  と、「タイル下」については  ${}_{ave}C_{(t)}$  (平均値) と比較した。平均の予測値は、実験値と良い対応を示した。目地下については、初期材齢、すなわち、中性化が小さい範囲においては、予測値と実験値に違いがみられるものの、材齢の経過とともに中性化が大きくなるにつれ、予測値は実験値に近づく傾向にある。したがって、耐久設計上、本手法がタイル張りコンクリートの中性化予測に十分、適用できるものと考えられる。

#### 5. タイル張りコンクリートの中性化進行の検討

##### 5.1 実建物における中性化進行

暴露環境、すなわち、RC造建物における壁面のタイル張りコンクリートの中性化の進行予測を行った。コンクリートの水セメント比を60%とし、中性化速度係数については岸谷式<sup>6)</sup>から3.78mm/年<sup>0.5</sup>とした。張付けるタイルの長さは45mm、目地幅は5mmとした。経過100年までの中性化深さの推移を図-6に、仕上げなしコンクリートに対する中性化率を図-7に示す。100年後の仕上げなしコンクリートの中性化深さ38mmに対して、タイル張りコンクリートでは平均値、目地下とも15mm以下となり高い中性化抑制効果が確認された。

表-1 既往文献の実験概要<sup>6)</sup>

		内容
試験体形状		試験体：10×10×40cmのコンクリートにタイルを直張り タイル寸法：45×95mm 目地幅：5mm (ただし、比較対象の試験体は目地材の充填はなし)
コンクリート		水セメント比：62.1% 使用セメント：普通ポルトランドセメント 材齢28日標準養生強度：29.6N/mm <sup>2</sup>
タイル張り材料	タイル	材質：磁器質 釉薬の有無：施釉タイル 吸水率：0.2% 厚さ：7.0mm(裏あし含む) 裏あしの高さ：1.3mm
	吸水調整材	EVA系合成樹脂エマルジョン
	張付けモルタル	既製調合モルタル セメント：普通ポルトランドセメント 骨材：配合珪砂 保水増粘材：メチルセルロース 接着増強材：再乳化形粉末樹脂(EVA系)
促進中性化試験条件		温度：20±2℃ 相対湿度：60±5% CO <sub>2</sub> 濃度：5±0.2% 中性化測定位置：磁器質タイル下部分と目地下位置で測定

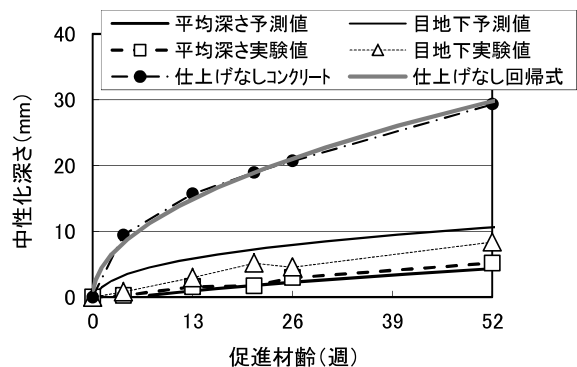


図-5 実験データと予測値の比較

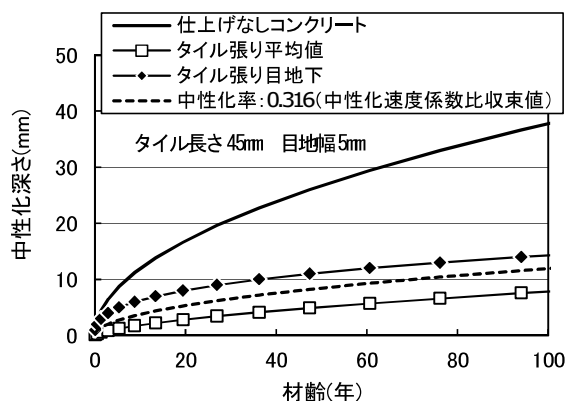


図-6 実建物におけるタイル張りコンクリートの中性化進行予測

中性化率については、目地下では初期材齢において大きいものの材齢の経過に伴い小さくなり、平均値の中性化率は初期材齢では小さく、材齢経過に伴い微増する傾向が確認された。経過 100 年時点の中性化率は、目地下で約 0.4、平均値で約 0.2 であった。

さらに、長期材齢での中性化深さの推移を図-8 に示す。目地下と平均値の中性化は材齢経過に伴い徐々に近づくことがわかる。なお、200 年時点の中性化は 20mm 以下であり、水セメント比 60% の場合においても、タイル張り仕上げによって日本建築学会の「建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009」で示される超長期の耐久性を満足することが示された。

5.2 目地幅の違いによる中性化の影響

目地幅の違いによる中性化の影響を検討するため、長さ 45mm のタイルについて、目地幅 2、5、10mm で張付けた場合の中性化進行予測を行った。予測結果として、目地幅 10mm の場合における中性化深さの推移を図-9 に示す。目地幅が 10mm の場合、5mm よりも中性化の進行が速くなるものの、100 年経過時でも 20mm 以下となった。

また、材齢 100 年時の中性化率と目地幅の関係を図-10 に示す。目地幅が大きいほど中性化の進行が速いことが定量的に確認された。

5.3 予測式の簡略化の検討

提案式では、タイル張りコンクリートの中性化進行に応じ中性化領域をステップごとに求め、仕上げなしコンクリートとの面積比から中性化速度係数比を計算して、目地下と平均値の中性化深さを算出する。この中性化速度係数比の収束値については、タイル長さと目地幅から式(8)より求められ、長さ 45mm のタイルで、目地幅 2、5、10mm の場合、収束値はそれぞれ 0.206、0.316、0.426 となる。

$$s_{\infty} = \sqrt{\frac{w}{Tw}} \tag{8}$$

ここで、 $s_{\infty}$  : 中性化速度係数比の収束値  
 $w$  : 目地幅 (mm)

中性化速度係数比の収束値を中性化率とし、仕上げなしコンクリートの中性化深さにその中性化率を乗じたときの中性化深さの推移を図-6、8、9 に併せて示す。収束値を用いた場合、図-6、9 の経過年数の範囲では平均値よりも中性化深さが大きく、目地下よりも小さい。目地下はタイル仕上げ全体の一部であり、ばらつきと捉え、そして、収束値を用いた場合は平均値よりも大きいことを考慮すると、耐久設計上、中性化速度係数比の収束値を中性化率として中性化深さを予測する簡略な方法でも、タイル張りコンクリートの中性化の評価が可能であると考えられる。なお、図-8 に示すように、長期

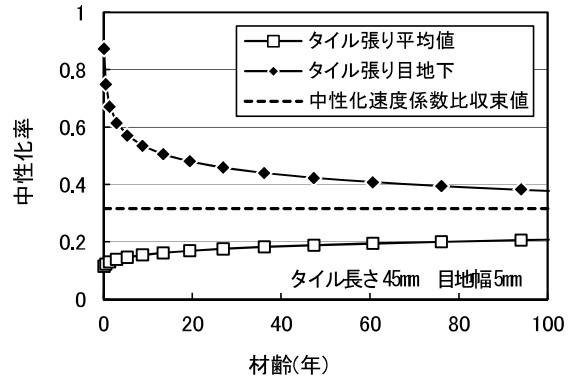


図-7 実建物におけるタイル張りコンクリートの中性化率

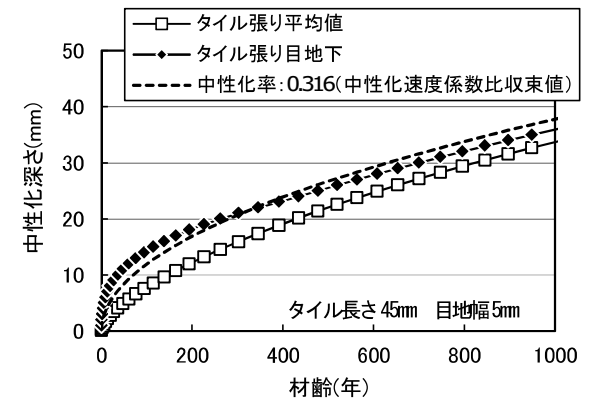


図-8 実建物におけるタイル張りコンクリートの中性化進行予測 (長期材齢)

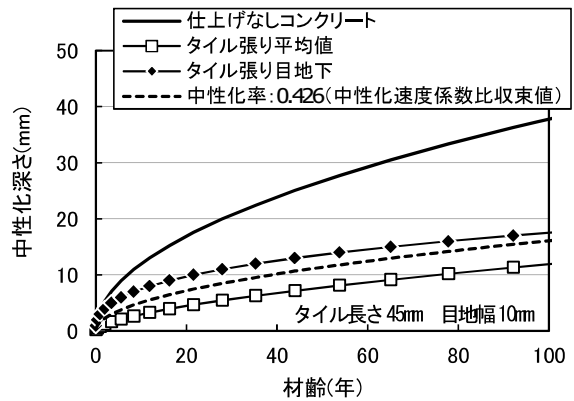


図-9 実建物におけるタイル張りコンクリートの中性化進行予測 (目地幅 10mm)

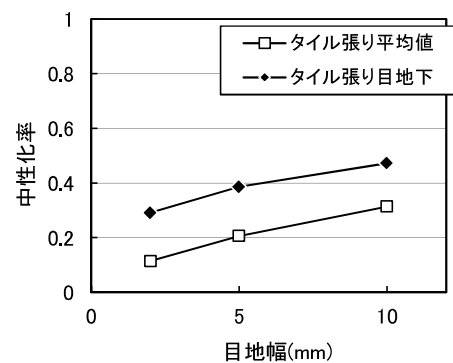


図-10 材齢 100 年時の中性化率と目地幅の関係

的には、目地下よりも収束値を用いた中性化深さのほうが大きくなる。

## 6. 予測式の適用範囲

提案した中性化予測式は、コンクリートにタイルが密着した場合の中性化進行をモデルとしている。したがって、適用範囲としては打込みタイル仕上げが対象の一つとなる。張付けモルタルを用いて張付けた場合は、そのモルタルが躯体コンクリートと同等以上の中性化抵抗を有する材料で、かつ、密着した張付け施工が実施された場合に限られる。これは、下地コンクリートの不陸調整に用いられる下地調整塗材の材料品質や、施工・養生方法によっては、期待される中性化抑制効果が得られない場合がある<sup>7)</sup>からである。本予測式の適用においては、使用するモルタルの材料品質の確認は重要事項となる。

使用するタイルの選定においては、二酸化炭素の透過がないことが条件となる。一般的に外装に用いられている磁器質の施釉タイルであれば、透気性は極めて小さいため考慮する必要はないと考えられるが、それ以外のタイルについては事前に透気性を確認する必要がある。透気性の評価方法には、ダブルチャンバー法（トレント法）があり、唐沢ら<sup>8)</sup>は、仕上材を施したコンクリートを対象としてトレント法による透気係数と中性化率の関係を報告している。その実験データによれば、透気係数が  $0.15 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  以下で中性化率がほぼ 0.1 未満であることが示されている。したがって、トレント法によりタイルの透気係数を測定し、 $0.15 \times 10^{-18} \text{ m}^2$  以下であれば、十分透気性は小さいものと判断でき、本予測手法の適用条件を満足するものと考えられる。

## 7. まとめ

タイル張りの目地部分から二酸化炭素が侵入しコンクリートの中性化が進行するモデルによる中性化進行予測手法の提案を行い、既往のタイル張りコンクリートの促進中性化実験データと提案式から求めた予測値との比較検討を行って、予測手法の適用性について検証した。そして、実建物におけるタイル張りコンクリートの中性化予測、目地幅の違いによる中性化の影響、および、中性化予測方法の簡略化について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- i. 促進中性化試験による実験データと提案式から求めた予測値との比較を行った結果、予測値は実験値におおよそ対応した結果となり、予測手法の適用性が確認された
- ii. 実建物において、長さ 45mm のタイルを目地幅 5mm で張付けた場合の中性化進行予測を行った結果、材齢 100 年時点の中性化率は目地下で約

0.4、平均値で約 0.2 であり、高い中性化抑制効果を有することを確認した

- iii. タイルの目地幅が大きいほど中性化の進行が速いことを定量的に確認した
- iv. タイル長さ目地幅から求められる中性化速度係数比の収束値を中性化率とし、その中性化率を仕上げなしコンクリートの中性化深さに乗じて中性化を予測する簡略な方法でも、タイル張りコンクリートの中性化の評価が可能である

## 8. あとがき

今回、タイル張りの目地部分から二酸化炭素が侵入しコンクリートの中性化が進行するモデルによる中性化進行予測手法の提案を行った。本文でも触れたようにモルタルを用いてタイル張りを行った場合、中性化の進行はそのモルタルの品質に影響を受ける。今後は、張付けモルタルの品質を考慮した中性化進行予測について検討を進めたい。

### 【参考文献】

- 1) 例えば、国土開発技術センター建築物耐久性向上技術普及委員会、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術」、1986.6
- 2) 日本住宅性能表示基準・評価基準 技術解説 編集委員会、「日本住宅性能表示基準・評価基準 技術解説 2006」、2006.10
- 3) 和泉意登志、押田文雄、「経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食」、日本建築学会構造系論文報告集、第 406 号、pp.1-12、1989.12
- 4) 磯田穰治司、陶 雪峯、奈良利男、田中享二、「有機系弾性接着剤を用いた外装タイル張りにおけるコンクリートの中性化抑制効果」、日本建築学会大会梗概集(関東)A-1、pp.563-564、2001.9
- 5) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説」、2004.3
- 6) 河野政典、長瀬公一、都築正則、金森誠治、久保田浩、井上和政、「躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価 その 9 外装タイルの中性化抑制効果確認実験」、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)A-1、pp.957-958、2008.9
- 7) 親本俊憲ほか、「仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する基礎的研究 その 4 促進中性化試験(その 2)」、日本建築学会大会技術講演梗概集、pp.465-466、2012.9
- 8) 唐沢智之、古賀一八、浦川和也、河野政典、「仕上塗材の中性化抑制効果と透気性に関する考察」、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、pp.645-650、2008.7