

電気泳動法によるけい酸塩系表面含浸材の改質深さの推定

金沢大学大学院 学生会員 ○小出 至也
金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

けい酸塩系表面含浸工法において、改質部の物性と改質深さは、補修効果を評価するうえで重要な指標となる。しかしながら改質部における物性値は必ずしも明らかではなく、けい酸塩系表面含浸材の改質深さを測定することは困難である場合が多い。

本研究においては、けい酸塩系表面含浸材の改質効果が反映される電気伝導率を用いて、改質部の電気伝導率および改質深さの推定方法を提案し、その妥当性を論ずることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体の作製

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 ，比表面積 $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用し、けい酸塩系表面含浸材はけい酸ナトリウムおよびけい酸カリウムを主成分とする反応型を使用した。JIS R 5201 に準じて水セメント比が 0.5 のセメントペースト円柱供試体（直径 100mm，高さ 200mm）を作製した。打ち込み後 24 時間にて脱型し、水中養生(20°C)を行った。材齢 28 日にて、供試体中央部から直径 100mm，高さ 50mm の円板状供試体を切り出し、所定の仕様に従ってけい酸塩系表面含浸材を塗布した。塗布完了後、含浸材の反応を促すために所定材齢まで湿空養生（相対湿度 80%）を行った。また、原状供試体としては水中養生 28 日後に含浸処理を施さずに所定材齢まで湿空養生を行った供試体とした。

2.2 微小硬度試験

材齢 42,56 および 91 日にて供試体の中央部から約 $20\times 20\text{mm}$ の試料を含浸深さ方向に切り出し、耐水研磨紙を用いて切断面を研磨した。JIS Z 2244 に準じて微小硬度試験（ビッカース硬さ）を行い、ビッカース圧子の押し込み位置を含浸深さ方向に変化させて測定を行った。原状供試体についてはバルクセメントペースト部における微小硬度を測定した。

2.3 電気伝導率の測定

直流電源を用いた電気泳動法による電気伝導率の

測定を JSCE-G571 および ASTM C 1202 に準じて行った。所定材齢前日にて、円板状供試体側面にエポキシ樹脂を塗布し、樹脂の硬化後 24 時間の真空飽水処理を行った。セル溶液として 0.3mol/L の水酸化ナトリウム溶液を使用し、直流電源により 15V の電圧を負荷し、通電開始 15 分後の電流値を用いて、式(1)により、電気伝導率 σ を算出した。

$$\sigma(\mu\text{S/cm}) = \frac{I \cdot L}{V \cdot A} \quad (1)$$

ここに I は電流値 (amps)， L は供試体長さ (cm)， V は電圧値 (V)， A は供試体面積 (cm^2) を表わす。

3. 改質部の電気伝導率と改質深さの推定

図 - 1 に示すように塗布供試体の電気伝導率 (σ_{total}) 測定後、改質部を耐水研磨紙によってわずかに除去し、その後速やかに電気伝導率の測定を行い、改質部除去後の電気伝導率 σ_1 を得た。改質部の電気伝導率を一定と仮定し、直列モデルにおける電気伝導率の複合則である式(2)より、改質部の電気伝導率 σ_2 を求めた。

$$\frac{1}{\sigma_{\text{total}}} = \sum_{i=1}^2 \frac{V_i}{\sigma_i} \quad (V_i = \frac{A L_i}{V_{\text{total}}}) \quad (2)$$

ここに V_i は各層の体積率を表す。改質深さの推定は、無塗布および塗布供試体の電気伝導率と推定された改質部の電気伝導率を用いて、式(2)において改質深さを未知数として算出した。

4. 結果および考察

4.1 電気伝導率および微小硬度

図 - 2 に電気伝導率の測定結果を示す。いずれの材齢においても塗布供試体の電気伝導率が低い。一方、表面の改質部を除去することにより、電気伝導率が増加することが確認された。図 - 3 に微小硬度試験の結果を示す。いずれの材齢においても塗布面に近いほど微小硬度が大きく、材齢の進行にともない微小硬度が増加し、改質深さが大きくなることが確認された。微小硬度試験より求められた改質深さ

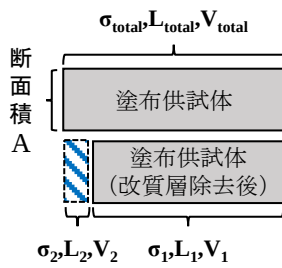


図 - 1 改質部の除去前後

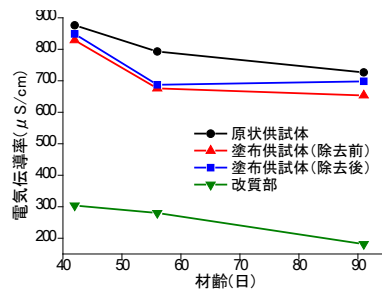


図 - 2 電気伝導率試験結果

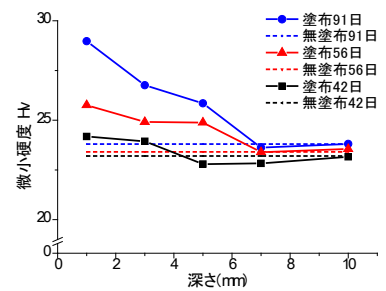


図 - 3 微小硬度試験結果

を表 - 1 に示す。

4.2 改質部における電気伝導率の推定

図 - 2 に合わせて示した推定した改質部の電気伝導率も、材齢の進行にともない低下しており、いずれの材齢においても改質部の電気伝導率は、無塗布供試体の 1/3 程度である。ところで電気伝導率と拡散係数には Nernst-Einstein 式として知られる比例関係が存在する。一方、表層の改質による物質透過性の低下を任意の深さに至るまでのかぶりの増大として評価することが可能であり、この等価かぶりは式(3)にて与えられる。右辺の各拡散係数を Nernst-Einstein 式の関係より電気伝導率を用いて書き換えると、式(4)に示すように電気伝導率と等価かぶりを関連付けることが可能となる。

$$C_i = -C_s \times \frac{\sqrt{D_c}}{\sqrt{D_s}} \quad (3)$$

$$C_i = -C_s \times \frac{\sqrt{\sigma_c}}{\sqrt{\sigma_s}} \quad (4)$$

ここに C_i は等価かぶり (mm), C_s は改質深さ (mm), σ_s は改質部の電気伝導率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$), σ_c は非改質部の電気伝導率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) を表す。電気伝導率から求めた等価かぶりを表 - 1 に示す。いずれの材齢においても等価かぶりは、微小硬度より決定した改質深さの 2 倍程度となる。すなわち、けい酸塩系表面含浸材の改質効果は改質深さの 2 倍程度のかぶりがある場合と同様の物質透過性を有することになる。黒岩ら¹⁾は改質部の見かけの拡散係数を推定することから同様の検討を行い、等価かぶりが改質深さの 2 倍程度になることを報告しており、本研究における結果と一致する。

4.3 改質深さの推定

無塗布および塗布供試体の電気伝導率と 4.2 にて求めた改質部の電気伝導率を式(2)に代入することにより推定された改質深さを表 - 1 に示す。材齢 42

表 - 1 改質深さと等価被り

材齢	改質深さ (mm)	等価被り (mm)	電気伝導率より推定した 改質深さ(mm)
42日	3	5.1	0.75
56日	5	8.4	2.25
91日	5	10	0.92

日および 56 日においては微小硬度より決定した改質深さに比べて 2mm ほど小さい結果となった。これは、改質部の電気伝導率を一定と仮定しているため、改質深さが小さく推定されることによるが、結果としては常に安全側の評価を与えている。一方、材齢 91 日においては改質深さが微小硬度に比べて非常に小さく推定された。これは表層に極めて物質透過性の低い改質層が形成されているためと考えられ、長期材齢において改質深さを推定する場合は、改質部における表層と内部での組織の相違を考慮する必要があると考えられる。

5. 結論

直列モデルを適用することで改質層の電気伝導率の推定が可能であった。塗布材齢初期には、電気伝導率から改質深さの推定が可能であるものの、実際の改質深さに比べて小さく推定される。一方、長期材齢においては、表層に極めて物質透過性の低い改質層が形成されていることが示唆された。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(A), 課題番号: 23246081, 基盤研究(C), 課題番号: 21560482)の交付を受けたものである。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 黒岩大地, 宮里心一: けい酸塩系表面含浸材による見かけの拡散係数の推定と発錆遅延期間の試算, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1669-1674, 2013