# 論文 コンクリート用表面被覆材の欠陥が物質遮蔽性能に及ぼす影響

小倉 孝道\*1·山下 寬生\*1·下村 匠\*2

**要旨**:表面被覆材のピンホールや浮き,剥がれ等の欠陥が物質遮蔽性能へ与える影響につい て実験的に検討するために,模擬欠陥を設けた供試体に電位差を与えてイオンを透過させる 通電試験を行った。ピンホール,剥がれなどの穴状の欠陥は表面被覆材の領域平均的な物質 遮蔽性を損なうことが明らかとなった。試験結果より,欠陥を含む被覆材の平均塩化物イオ ン拡散係数を導出し,比較,考察を行った。

キーワード:表面被覆材,欠陥,塩化物イオン拡散係数,物質遮蔽性能

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化対策として,コン クリート表面を保護することによって塩化物イ オンや水分,酸素等の劣化因子の侵入を抑制す る工法が有効であると考えられる。コンクリー トの表面保護工法のひとつとして,エポキシ樹 脂等の樹脂をコンクリート表面に塗布,硬化さ せ,水分や塩分などの劣化因子のコンクリート 中への侵入を物理的に遮蔽する被膜をコンクリ ート表面に形成する工法がある。

表面被覆材を構造物の維持管理に合理的に取 り入れるために,試験方法の開発など,表面被 覆材による耐久性向上効果の定量化が試みられ ている<sup>1)</sup>。著者らは,連続繊維シート接着工法の 物資遮蔽性能の評価に用いた通電試験と数値解 析を併用する方法<sup>3)</sup>を応用し,各種表面被覆材の 塩化物イオン拡散係数を評価した<sup>2)</sup>。その結果, いずれの表面被覆材も物質遮蔽効果はコンクリ ートに比べてはるかに大きく,構造物の実際的 な供用寿命の範囲内で問題となるほど腐食因子 の透過を許さないことが明らかとなった。

ただし、これは、実験室で得られた遮蔽性能 が実構造物でもそのまま実現され、その効果が 持続すると仮定した場合である。換言すると、 実構造物では施工時の初期欠陥や供用中の被覆 材の経年劣化が実質的に表面被覆材の効果を支 配する可能性がある。現状では、これらの欠陥 が表面被覆材の遮蔽効果に与える影響について 定量評価法がない。

本研究では、被覆材を適用したコンクリート 供試体に模擬欠陥を導入し、欠陥が物質遮蔽性 に及ぼす影響を通電試験により実験的に評価す る。次に、通電試験と拡散移動解析を併用する 方法<sup>2)</sup>により、欠陥の影響を領域平均化して含ん だ被覆材層の平均拡散係数を実験的に導出する。 さらにその平均拡散係数が、線形平均化モデル を用いて健全な被覆材の拡散係数と欠陥面積率 から予測できるかどうか検討する。

# コンクリート供試体の通電による物質透過 試験

#### 2.1 供試体

コンクリート供試体の配合を表-1に,供試 体の種類を表-2に示す。供試体は,中心にD10 鉄筋を1本埋め込んだコンクリート円柱供試体 とし、 φ10×20cmとφ15×20cmを用いる。表面被覆 材はエポキシ樹脂(比重 1.15,引張強度 49[N/mm<sup>2</sup>],弾性係数 3.5[kN/mm<sup>2</sup>])とし,円柱 の全表面に塗布した。供試体は,母材コンクリ ートの配合,供試体寸法(かぶり厚さ),欠陥の 種類を実験パラメータとして,全部で16種類と した。供試体数は各種類1体とした。

- \*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)
- \*2 長岡技術科学大学助教授 工学部 環境・建設系 博士(工学) (正会員)

W/C (%)	Ĺ	単位量	(kg/n	混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )						
	W	С	S	G	AE 減水剤	AE 剤				
45	153	339	804	1037	0.0152	0.75				
55	165	300	804	1037	0.0135	0.75				
65	175	269	804	1037	0.0121	0.75				

表-1 コンクリートの配合



表-2 供試体の種類

供試体 No。	W/C (%)	かぶり (mm)	被覆材	欠陥		欠陥 面積率 (%)
1	45	45				
2		70	なし			
3	55	45		_		_
4		70				
5	(5	45				
6	65	70				
7	- 55	45	あり	なし		0
8				ピンホール	10 個	0.03
9					20 個	0.06
10					30 個	0.09
11					5個	3
12				浮き	10 個	6
13					15 個	9
14				剥がれ	2cm×1 本	
15					1cm×2 本	10
16					0.5cm×4本	



供試体はコンクリート打設後28日間水中養生 し,通電時に円柱の半径方向の電流が卓越する ように,上下面に側面より厚くエポキシ樹脂を 塗布した。

#### 2.2 模擬欠陥の導入

欠陥は、ピンホール、浮き、剥がれ(隙間) を模した3種類とした。各種類に対して欠陥量 や欠陥の大きさを3パターン変化させた。図-1に模擬欠陥を導入した供試体を示す。

ピンホールは、被覆材を塗布後、キリ(径 1mm) によって供試体側面を1周するように施工した。 実験ケースは、ピンホール数が供試体当たり 10 個、20個、30個(側面積に対する欠陥面積率 0.03, 0.06、0.09%)の3種類とした。

浮きは、予め供試体表面にスポンジシート(縦 2cm×横2cm、厚さ1mm)を貼付けておき、その 上から被覆材を塗布することにより導入した。 実験ケースは、欠陥数が供試体当たり5個、10 個、15個(欠陥面積率3、6、9%)とした。

剥がれは, 被覆材塗布前にテープを供試体周

りに貼付け, 塗布後にそれを取り除くことで設けた。実験ケースは, 剥がれの面積を同一として,幅を変化させた 2cm×1本, 1cm×2本, 0.5cm×4本(全て欠陥面積率 10%)の3種類とした。

## 2.3 通電方法

通電試験装置を図-2に示す。供試体を 3%NaCl溶液に入れ,鉄筋を陽極,供試体外部の 銅板を陰極として,直流電源装置を接続し,30V の定電圧を加えた。試験中は,供試体を流れる 電流の経時変化を測定した。

# 3. 被覆材の塩化物イオン拡散係数の導出方法<sup>2)</sup> 3.1 概要

本法は、表面被覆材を施した供試体の通電試 験結果と、濃度拡散メカニズムを仮定した塩化 物イオンの移動解析結果が、経験上一定の相関 関係を満足することを利用し、表面被覆材の塩 化物イオン拡散係数を同定するものである。既 報<sup>2)</sup>において、方法を詳述したので、ここでは概 略のみ述べる。

# 3.2 被覆材中における塩化物イオンの拡散移動 モデル

まず,コンクリート表面における塩化物イオンの移動に関する境界条件は,熱伝導問題における熱伝達境界と類似の考え方を適用し,表面における塩化物イオンの流束を次式で表す。

$$J_{cldif} = -D_{Cl} \frac{C_{clf}^s - V_o \cdot C_{ext}}{h_{Cl}}$$
(1)

ここに、 $J_{cldif}$ :境界における塩化物イオンの拡散 流束[kg/m<sup>2</sup>/s]、 $D_{Cl}$ :水中における塩化物イオン の拡散係数(=1.35×10<sup>-9</sup> [m<sup>2</sup>/s])、 $C^{s}_{clf}$ :コンクリ ート表面における単位体積中の自由塩化物イオ ン濃度[kg/m<sup>3</sup>]、 $V_{o}$ :コンクリート単位体積中の 総細孔量[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]、 $C_{ext}$ :外部の液状水中の自由塩 化物イオン濃度[kg/m<sup>3</sup>]、 $h_{Cl}$ :コンクリート表面 近傍に形成される塩化物イオン濃度勾配の層

(境界層)の厚さ[m]である。h<sub>cl</sub>の値は既報<sup>2)3)</sup>と 同様に 0.00075mとする。この値は、物理的意味 が類似していることから、大気中におけるコン クリートの乾燥現象の解析の際にコンクリート 表面の湿度勾配層の厚さとして用いた値<sup>4)</sup>を準 用したものである。式(1)中のD<sub>cl</sub>/h<sub>cl</sub>は、数式表現 の上では熱伝導解析における熱伝達率に相当し、 境界の物質透過性状を表現する。

次に,コンクリート表面に被覆材を施工した 場合,被覆材を透過してコンクリートに流入す る塩化物イオン流束を,この境界条件式を拡張 した以下の式により表現することとする。

$$J_{cldif} = -D_{Cl} \frac{C_{clf}^s - V_o \cdot C_{ext}}{h'_{Cl}}$$
(2)

ここに, h'<sub>cl</sub>は表面被覆材による遮蔽効果を含ん だ仮想的な境界層厚さである。実際には表面近 傍の濃度勾配層と被覆材中を透過することから,

$$h'_{Cl} = h_{Cl} + t_s \frac{D_{Cl}}{D_s} \cong t_s \frac{D_{Cl}}{D_s}$$
(3)

ここに、 $D_s$ :被覆材および改質材の塩化物イオン拡散係数 $[m^2/s]$ ,  $t_s$ :被覆材および改質材の厚さ[m]である。式(2)(3)より、

$$J_{cldif} = -D_s \frac{C_{clf}^s - V_o \cdot C_{ext}}{t_s}$$
(4)

被覆材の実際の厚さを正確に測るのは困難であること、本モデルでは被覆材の物質遮蔽性能はts とDsの比によって決まるので、物質透過現象を 計算する際にはその比さえ正確に求まっていれ ばよいことから、ここでは被覆材の厚さを 1.0mmと仮定してその条件下での塩化物イオン 拡散係数を同定し検討することとした。

## 3.3 供試体中の塩化物イオン拡散の解析法<sup>2)3)</sup>

本研究では、塩化物イオンを含む水溶液中に 浸漬されたコンクリート円柱供試体内の半径方 向(側面より中心部に向かう方向)の塩化物イ オンの移動を考えることになる。数値計算は差 分法により行う。解析モデルの概念図を図-3 に示す。コンクリート内部の塩化物イオンの拡 散移動解析は、著者らが開発したコンクリート の細孔構造に基づく解析手法を用いて行う<sup>3)4)</sup>。



図-3 円柱供試体中の塩化物イオン移動解析 の概念図

## 4. 実験結果と解析結果

## 4.1 通電試験結果

図-4に、かぶり45mm、W/C55%のコンクリ ートを用いた供試体のシリーズの電流の経時変 化を示す。供試体 No.3 と 16 は、試験期間中に 電流が急に増加している。これは、鉄筋の腐食 膨張によりコンクリートに腐食ひび割れが発生 したためである。No.3 以外の供試体は電流が概 ね一定となる定常状態が現れている。この電流 値はかぶりコンクリートと表面被覆材のトータ ルの物質透過抵抗性の指標と考えることができ る。そこで,試験終了時まで(ひび割れが生じ た供試体は腐食ひび割れが発生するまで)の積 算電流量をそれまでの時間で除した平均電流 *I* を試験結果の代表値として抽出する。平均電流 が小さいほど,物質遮蔽性が大きいことになる。

図-5は、かぶり45mm、W/C55%のコンクリ ートを用いた供試体のシリーズの平均電流を示 している。被覆材に欠陥を導入した供試体はい ずれも、被覆材なしの供試体と健全な被覆材に 覆われた供試体の中間の結果となった。

被覆材がコンクリートから浮いた状態を再現 した供試体 No.11, 12, 13 の物質遮蔽性能は健 全な被覆材の供試体 No.7 の結果に近い。浮きが あっても物理的な穴があいていない限り,物質 遮蔽性能はそれほど損なわれないことがわかる。

被覆材のピンホールや剥がれを模擬し物理的 な穴を設けた供試体は、それぞれ物質遮蔽性能 が損なわれた。ピンホールを再現した供試体 No.8, 9, 10 では、ピンホールの量に応じて順次 物質遮蔽性能が低下した。

### 4.2 実験結果と解析結果の相関性の検討

平均電流は本実験条件下における供試体のト ータルの物質遮蔽性能の相対比較には便利であ るが,結果に一般性がないので,そのままでは 知見を他の問題に応用できない。そこで,実験 結果と解析結果を比較することにより,被覆材 の拡散係数を導き出す。その準備として,各供 試体の通電試験結果と拡散移動解析結果が経験 的な相関関係を満たすことを確認する。

各供試体中の塩化物イオンの拡散移動解析値 の代表値として,定常状態における塩化物イオ ン流束 Jを抽出する。

図-6に、被覆材を施工していない供試体に おける通電試験結果と拡散移動解析結果の相関 を示す。解析に必要なコンクリートの物質移動 特性に関する材料パラメータは、著者らの既往 の研究<sup>3)4)</sup>に基づきコンクリート配合より決定し た。図-6には本研究の実験結果の他に、池津 らの実験結果<sup>2)</sup>もプロットしている。

水セメント比, かぶり厚さによらず, 実験結



果と解析結果との間には一定の関係が認められる。この相関関係を以下の近似曲線で表した。

$$J = 1.6 \times 10^{-8} \times I^{1.15} \tag{5}$$

4.3 欠陥を有する被覆材の平均塩化物イオン拡 散係数の同定

4.2 で得られた相関関係が被覆材を有する供 試体にも成立すると仮定し,解析結果と実験結 果が近似曲線上に位置するように被覆材の拡散 係数D<sub>s</sub>の値を決定する。 このようにして求めた欠陥を有する被覆材の 平均塩化物イオン拡散係数を図-7に示す。

欠陥のない健全な被覆材(No.7)の塩化物イ オン拡散係数は、コンクリート(No.3)の塩化 物イオン拡散係数に比べ3オーダー小さい結果 となった。これは、著者らの既往の研究<sup>2)</sup>におい ても同程度の値が得られている。

拡散係数で比較した場合であっても,浮きを 模擬した欠陥を導入した被覆材は,健全な被覆 材と大差ない拡散係数となった。ピンホールの 場合約 1~1.5 オーダー,剥がれの場合約 2~2.5 オーダー,健全な被覆材に比べて平均拡散係数 が大きくなるという結果となった。ピンホール や剥がれはコンクリートが外部に直接さらされ るため,優先的な侵入経路となり,平均的な物 質遮蔽性能が大きく低下したと考えられる。

# 5. 被覆材の欠陥が物質遮蔽性能に与える影響 に関する検討

#### 5.1 欠陥面積率を用いた平均拡散係数

欠陥を有しない表面被覆材は, コンクリート 中への腐食因子の侵入を実用上許さないと考え てよいほど高い物質遮蔽性能を有するが, 欠陥 を有する場合無視できないほど物質遮蔽性能が 損なわれることが実験結果より明らかとなった。 したがって, 既知情報をもとに欠陥の影響を考 慮した表面被覆材の物質遮蔽効果を予測できる ことが工学的に重要といえる。本論文では, そ の第1段階として単純なモデルにより欠陥の影 響を表すことができるか検討することにする。

欠陥の状態を一元化した簡単な指標により定 量化する場合,まず面積率で表すことが考えら れる。欠陥面積率とは表面被覆材の単位面積当 たりに存在する欠陥の面積の割合であり,欠陥 の形状,大きさ,個数によらない。図-8はこ れを1次元で模式的に表したものである。

次に、欠陥を有する表面被覆材の平均拡散係 数を簡単に表すことを考える。この場合、面積 率を考慮して線形に平均化するモデルが考えら れる。欠陥部分の境界条件が式(1)、健全な被覆



材部分の境界条件が式(4)で表されることに整合 させると、欠陥を含む被覆材の塩化物イオン平 均拡散係数Daveは、以下の式で表される。

$$\frac{D_{ave}}{t_s} = \alpha \frac{D_{cl}}{h_{cl}} + (1 - \alpha) \frac{D_s}{t_s} \tag{6}$$

 $t_s$ =1.0mm,  $h_{cl}$ =0.75mmであることを考慮し,近似的に以下で表す。

$$D_{ave} = \alpha D_{cl} + (1 - \alpha)D_s \tag{7}$$

ここに、 $D_{ave}$ : 欠陥を含む被覆材の塩化物イオン 平均拡散係数 $[m^2/s]$ 、 $\alpha$ : 欠陥面積率、 $D_{cl}$ : 水中 における塩化物イオン拡散係数 $[m^2/s]$ ,  $D_s$ : 被覆 材の塩化物イオン拡散係数である。なお本式は、 欠陥部分は表面被覆材に覆われておらずコンク リート表面が直接露呈している部分としてモデ ル化している。したがって本研究の実験で模擬 した欠陥のうち、ピンホールや剥がれに対応し、 浮きは本来このモデルでは表せない。

図-9に欠陥面積率と塩化物イオン拡散係数 の関係の実験値を式(7)のモデルとともに示す。 浮きを導入したシリーズも浮きの面積率を欠陥 面積率としてプロットした。ピンホールの面積 率は浮きや剥がれに比べてオーダーが小さいの で,同一グラフ上で比較するために欠陥面積率 は対数で表した。

ピンホールと剥がれを導入したシリーズの結 果を見ると、欠陥面積率に応じて平均拡散係数 が増加する傾向が確認できる。浮きを導入した 供試体はそれらの傾向からやや外れている。す なわち、欠陥により物質遮蔽性能が損なわれる ことは認められるものの、欠陥面積率と平均拡 散係数の間には明確な相関は認められない。

欠陥を導入したいずれの供試体の結果も,式 (7)で表される曲線よりも拡散係数が小さい側に 位置している。つまり,欠陥量を面積率で表し て線形平均化モデルを用いて予測した場合より も,実際には物質遮蔽性は損なわれないといえ る。このような結果が得られた理由は明らかで はないが,平均化モデルにより予測することで, 安全側の結果を与えることが明らかとなったこ とはひとつの知見として意義がある。

剥がれを導入した供試体3体は、欠陥の大き さと数は異なるが欠陥面積率は同一である。こ れら3体は、拡散係数に若干の相違がみられ、 0.5cm×4本(No.16)のように、面積の小さい剥 がれが多数あるものは、大きい剥がれが少数あ るものよりも物質遮蔽性能が低下した結果とな っている。同一欠陥面積率の場合個々の欠陥寸 法が小さいほうが物質遮蔽性を損なう傾向が一 般的なものであるのかどうかは、今回のデータ だけでは確言し難い。この範囲の近傍で欠陥の 大きさと面積率をパラメータとした実験を行う ことにより明らかにしたいと考えている。

# 6. まとめ

本研究において、以下の知見が得られた。

(1) コンクリート表面被覆材は欠陥がない場合, きわめて高い物質遮蔽性を有するが,欠陥が ある場合その影響が無視できないと考えら れる程度に物質遮蔽性が損なわれることが ある。したがって,実構造物における表面被 覆材の物質遮蔽効果を評価する場合,欠陥の 影響を考慮することが重要である。



因 5 天歌 6 7 年 前 6 0 比 较

- (2) コンクリート用表面被覆材に発生すると考 えられる欠陥のうち、ピンホール、剥がれな ど物理的な穴状の欠陥が物質遮蔽性に及ぼ す影響が大きい。一方、コンクリートと表面 被覆材との間に浮きが生じても、穴があいて いなければ物質遮蔽性が大きく損なわれる ことはない。
- (3) 欠陥を有する表面被覆材の平均的な物質遮 蔽性能は単位面積当たりの欠陥面積率と相 関がある。
- (4) 実験で得られた欠陥を有する表面被覆材の 平均拡散係数は、欠陥量を面積率で表して線 形平均化モデルを用いて予測される拡散係 数よりも小さい。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:表面保護工法設計施工指針,コン クリートライブラリー119,2005
- 2) 池津和弘,下村 匠:コンクリート用被覆材 および改質材による塩分遮蔽メカニズム,コ ンクリート工学論文集, Vol.27, No.1, pp.895-900, 2005.6
- 3) 笠原裕子,下村 匠,YCHENNA:連続繊 維シート接着によるコンクリート中への塩 分侵入抑制効果の定量評価,コンクリート工 学論文集,Vol.25, No.1, pp.311-316, 2003.6
- 下村 匠,福留和人,前川宏一:微視的機構 モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動 の解析,土木学会論文集,No.514/V-27, pp.41-53,1995.5