

東京大学生産技術研究所 正会員 ○ 辻 恒 平
 東京大学・大学院 学生会員 小 川 和 雄
 東京大学生産技術研究所 正会員 小 林 一 輔

1. はじめに

コンクリート中への塩分の浸透・拡散に関するデータの集積は、コンクリートの物性評価のみならず内部の鉄筋の腐食可能性の予測や構造物周辺の環境の定量的評価にも活用できる利点を有しており、コンクリート構造物の健全性および信頼性評価への基礎を提供するものと考えられる。本研究では、実験的手法により塩分の浸透を促進させ短期間でコンクリート内部に塩分濃度の分布を人工的に作り出し、さらにその分布挙動を予測したFickの拡散方程式で近似させることにより系統的な評価および予測を試みることを目的としている。

2. 実験概要

コンクリートの使用材料は普通ポルトランドセメント、川砂、碎石(最大寸法10mm)であり、配合は $W/C = 40\%$ および 60% 、スランプ値を $8 \pm 1\text{ cm}$ として定めた。供試体は寸法 $10 \times 10 \times 40\text{ cm}$ で中心部に直径 10 mm 、長さ 34 cm の鉄筋を埋め込んでいる。供試体内部への塩分の浸透促進は、 3.3% および 10% NaCl水溶液中に5日間、 60°C 乾燥器内で2日間乾燥することを1周期として6, 12, 18サイクルを実験期間とした。供試体中の塩分量はボール盤を用いて $\phi 30\text{ mm}$ のドリルを低速(110 rpm)で回転し、所定の深さのコンクリートを粉末状態で採取しその電位差滴定法により定量した。得られた粉末試料はJIS標準ふるいの $149\text{ }\mu\text{m}$ を全通するものであり、1供試体につき3箇所より採取したものを各深さ毎に合計約 50 g を分析に供した。分析した塩分は腐食に直接関与すると思われる可溶性塩分であり、値はコンクリート重量当りの割合としてNaCl換算にて示す。

3. 実験結果および考察

供試体の W/C 値の水準を 40% と 60% 、浸漬するNaCl水溶液の濃度的水準を 3.3% と 10% として組合わせた場合のコンクリート中の塩分含有率を図1~4に示す。図中の各プロットは分析結果であり、それぞれ○印は乾湿繰り返し数6サイクル、□印は12サイクル、●印は18サイクルにおける塩分含有率を表す。また、図中の実線は次式に示されるFickの第2法則に基づきプロットを近似した曲線である。

$$C(x, t) = C_0 \{1 - \text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})\}$$

(C_0 : 表面濃度, $\text{erf}(\cdot)$: 誤差関数,
 x : 表面からの深さ, D : 拡散係数, t : 時間)

図1は $W/C = 40\%$ 、図2は $W/C = 60\%$ の供試体の例であり、いずれも 3.3% NaCl水溶液中に浸漬した結果である。近似曲線を比較すると表面における塩分含有率(C_0)はほぼ等しいが、深さに伴う濃度変化は $W/C = 60\%$ の供試体の方がゆるやかである。この変化の程度は拡散係数 D 値により評価され、 D が大である程減少の程度はゆるやかである。これらの C_0 , D 値を各組合せ毎に表1にまとめて示す。図3および図4はそれぞれ 10% NaCl水溶液に浸漬した $W/C = 40\%$ および 60% 供試体の塩分含有率を示す。前述の図1, 2に比べ表面の塩分濃度は約1.2倍になっているが、図3と4の間には C_0 値に大きな差異を生じていない。しかし、 $W/C = 60\%$ の供試体の方は図2の場合と同様に深さに伴う減

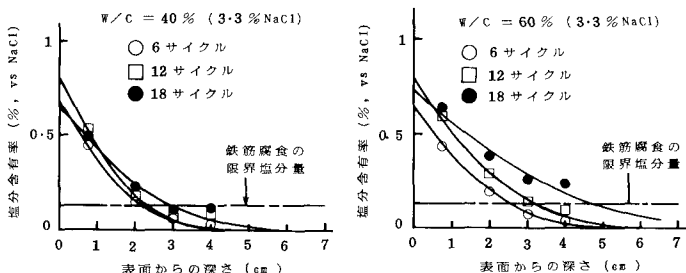


図1 表面からの深さと塩分含有率との関係 図2 表面からの深さと塩分含有率との関係

少の程度はゆるやかで、これらの傾向は表1に示される C_0 および D 値により特徴づけられる。また、各図中に鉄筋腐食の限界塩分量を一英鎖線で示したが、鉄筋の健全性を保つためには図1の W/C と乾湿繰り返し条件下では、かぶりを少くとも4cm程度必要とする。同様に図2の条件下では5cm以上、図3では7cm以上であり、図4ではこの図の範囲内では予測不可能である。

次に、図1～4に示された近似曲線を参考に C_0 と D の値を数値的に与え両者の関係ならびに鉄筋の腐食危険性に及ぼす。すなわち、図5に示される曲線aを基準に D のみを4倍にした例を曲線dで示す。また C_0 のみを2倍にした例を曲線c、さらに C_0 を2倍、 D を4倍にした例を曲線dで示す。これらのモデル化は図1～4の曲線群の傾向を代表させたもので、それぞれaは図1、bは図2、cは図3、dは図4に対応している。図5より、表面の濃度が小さくても拡散係数が大であれば曲線は途中で交わる。たとえば、bとcとを比較すると表面からの深さが約1.5cmにおいて塩分濃度に逆転を生じ、見かけ上表面濃度が小さい場合でも拡散係数が大であるコンクリートの場合には、かぶり厚さを十分確保する必要があることが示唆される。本研究結果によれば、浸漬するNaCl水溶液の濃度が同一の場合 $W/C=60\%$ の方が D 値が大きい。そのため上記のようなかぶりに対する考慮が重要であると考えられる。

図6および図7に乾湿繰り返しに伴う C_0 および D 値の変化を示すが、これらの関係より推察するとサイクル数の増大に伴い C_0 は減少し、 D は増大する傾向が予想される。この傾向をもとに長期の繰り返しに伴う塩分含有率の変化を図8に概念的に示すが、表面濃度の低下と内部濃度の増大が示唆される。

本研究で用いた促進試験

方法を検討するために、飛沫帯にて30年間使用された海洋構造物で実測された C_0 および D に基づく計算結果を図4に破線を示すが、短期間の実験にも拘らず本方法が実構造物の塩分分布状態をある程度シミュレートしていたと考えられ、乾湿繰り返し比率を適当に定めることにより種々の環境条件を与えることが可能であると思われる。

おわりに、本研究に際し御協力を賜った藤沢薬品工業(株)筑波コンクリート研究所各位に謝意を表す次第であります。

表1 各種実験条件により得られた C_0 および D 値

W / C	サイクル	3.3 % NaCl		10 % NaCl	
		C_0	$D \times 10^{-7}$	C_0	$D \times 10^{-7}$
40	6	0.673	3.726	1.041	7.169
	12	0.815	1.863	1.146	3.584
	18	0.647	2.243	0.930	8.970
60	6	0.631	5.316	1.235	8.787
	12	0.783	3.584	1.126	9.542
	18	0.723	5.741	1.074	18.979

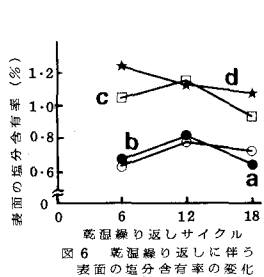


図6 乾湿繰り返しに伴う表面の塩分含有率の変化

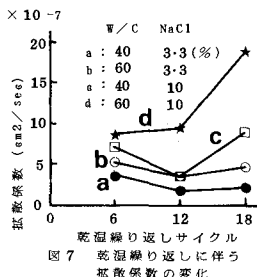


図7 乾湿繰り返しに伴う拡散係数の変化

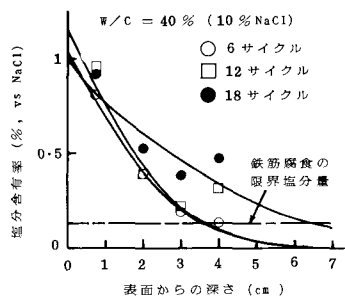


図3 表面からの深さと塩分含有率との関係

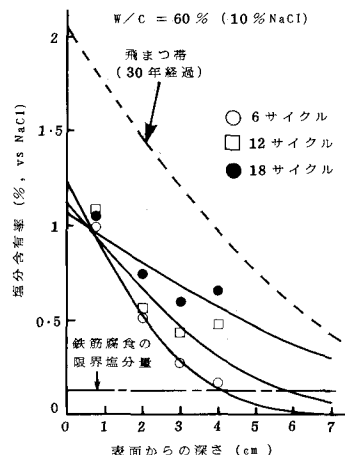


図4 表面からの深さと塩分含有率との関係

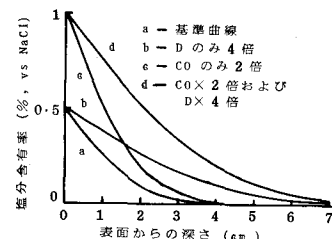


図5 C_0 および D を変化させた場合の表面からの深さと塩分含有率との関係

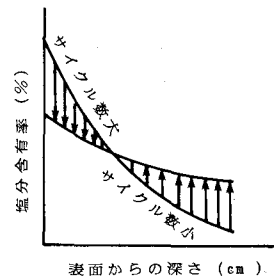


図8 乾湿繰り返しに伴う塩分含有率の変化 (概念図)

<参考文献> 1) Taylor Woodrow Research Laboratories 'Marine durability survey of the Tongue Sands Tower', Concrete in the Oceans Technical Report No. 5. The Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1980.