

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の診断法の提案

四国電力 総合開発研究所 正会員 〇横田 優
 四国電力 総合開発研究所 正会員 重松俊一
 四国電力 建設部 正会員 藤枝正夫
 ㈱四電技術コンサルタント土木第2部 吉平勝吉

1. まえがき

近年、コンクリート構造物の塩分(Cl⁻)による早期劣化(塩害)が大きな社会問題となっている。そこで、当社では既設構造物の維持管理に関する劣化度判定基準確立のために必要な基礎資料を得る目的で、四国内の経年および環境条件の異なる海岸部コンクリート構造物を対象に塩分浸透量などを調査した。その結果、海岸部に位置する構造物では外部から浸透する塩分が格段に多く、その劣化は、塩分の浸透・蓄積→鉄筋の腐食→外観の変状という段階を経て進行することが確認できた。一方、一般にはひび割れ、剥離等の目視により確認される状態は、構造物の性能(耐力、美観等)の面とか腐食の面から見ると、末期的な段階である場合が多いと言われている(図-1)[1]。そこで本報告は、塩害に対する重要な調査項目である含有塩分量分析結果をもとに、劣化過程のうち鉄筋腐食発生時点を補修時期の目安とする鉄筋コンクリート構造物の診断法を提案するものである。

2. コンクリート中への塩分浸透過程

2.1 実構造物への塩分侵入状況 海岸部コンクリート構造物への塩分侵入状況例を図-2に示す。コンクリート中の塩分量分布は、いずれも表面付近でピークを呈し、内部に向かって徐々に減少し、最終的には練り混ぜ時混入塩分量に収れんしていることがわかる。また、構造物Aの分析結果を正規確率紙にプロットしてみると図-3のようになる。これによると比較的きれいな直線関係を呈しており、コンクリート中への外部からの塩分浸透は拡散現象で近似できることがわかる。

2.2 拡散の基礎方程式および解 2.1で述べたようにコンクリート中の塩分浸透は、一次元の拡散現象として取り扱うことができ、塩分浸透量はFickの第2法則として知られている1次元の非定常方程式(1)の解として表現できる。その解については、構造物の位置する環境(海水中か、飛沫帯か)や初期塩分量の有無により表-1のように考えられる。なお、4.のプログラム化に際しては、式中の誤差関数及び指数関数は参考文献[2]の近似式を用いて計算した。

3. 許容塩分量の設定

硬化したコンクリート中の鉄筋の発錆に関する限界塩分量について記述している文献は少ない。筆者等が調査した範囲のものを挙げると表-2のようになる。国や考え方により異なるが、コンクリート重量に対するCl⁻の重量パーセントに換算すると、0.03~0.07wt%となる。一方、海岸部土木構造物を対象に

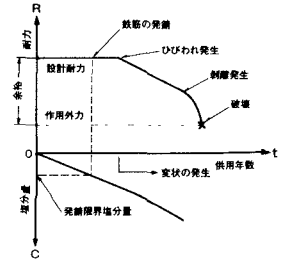


図-1 塩分汚染程度とコンクリート構造物の耐力との関係

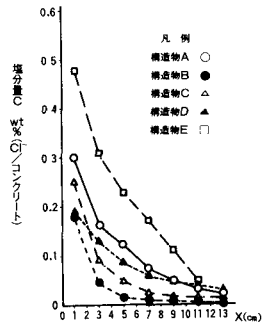


図-2 塩分侵入状況例

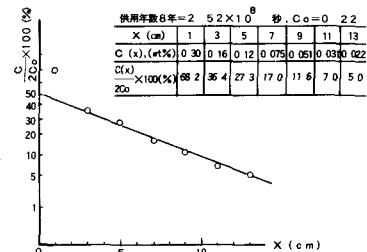


図-3 正規確率紙へのプロット(構造物A)

表-1 拡散方程式の解

海水中(干満等含む)		発 生 場 所
鉄筋の位置	コンクリート表面に接する海水	コンクリート表面に付着した塩分(飛沫等)による
条 件	コンクリート表面の塩分量は、海水の塩分量によって決定される。	初期塩分と環境によってコンクリート表面の塩分量が時間とともに大きく変化する。
計算上の仮定	コンクリート表面に接する塩分量(C ₀)が、時間t>0において常に一定である。 即ち、C ₀ (t)=C ₀ =const	コンクリート表面に接して塩分が付着し、そのすべてがコンクリート中へ浸透する。 なお、塩分付着量W(t)=W=constとする。
解	(1) 初期(コンクリート練り混ぜ時)に塩分侵入がない場合 C(x,t)=C ₀ [1-erf($\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$)] (2) ここで、C(x,t) コンクリート表面からx(cm)の深さにあるt時刻の塩分量 (コンクリート重量に対する重量% w t%) C ₀ コンクリート表面の塩分量(w t%) D 拡散係数 erf 誤差関数 $erf(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-y^2)dy$	(1) 初期(コンクリート練り混ぜ時)に塩分侵入がない場合 C(x,t)=W [2\sqrt{\frac{t}{\pi D}} \exp(-\frac{x^2}{4Dt}) - \frac{x}{D} [1-erf(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})]] (4) ここで、W 単位時間、単位長さあたりの塩分付着量(一定) その定義を左に同じ (2) 初期に塩分侵入がある場合 C(x,t)-C' = W [2\sqrt{\frac{t}{\pi D}} \exp(-\frac{x^2}{4Dt}) - \frac{x}{D} [1-erf(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})]] (5) ここで、C' 初期塩分侵入量(w t%)
	(2) 初期に塩分侵入がある場合 C(x,t)-C' = (C ₀ -C') [1-erf($\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$)] (3) ここで、C' 初期塩分侵入量(w t%)	

実施した当社の調査結果でも、0.05wt%以上の鉄筋は全て腐食していた(図-4)。この限界発錆塩分量については、今後の研究成果を反映しなければならないが、材料中の塩分量規制値や、筆者等が実施した調査結果を踏まえて、塩分汚染を受ける鉄筋コンクリート構造物の補修時期を決定する上での目安として、

鉄筋発錆に対する許容塩分量 (Ca)

$$Ca = 0.05 \text{ (0.04) wt\%}$$

但し、() 内は予防保全的数値

を暫定的に提案したい。

4. 鉄筋発錆時期予測プログラム

本診断法は 以上、2. 及び3. よりコンクリート中への外部からの塩分浸透は拡散現象として近似できること、また、鉄筋位置での塩分量がある値を越えると発錆するという2点に着目し、実構造物の含有塩分量データより拡散理論を応用してコンクリート中の鉄筋腐食発錆時期を予測するものであり、今回開発したプログラムは主に以下の2つから成っている(図-5も参照)。

- ① コンクリート中の塩分分布データを、最小2乗法を用いて拡散方程式の解に近似させることにより、塩分拡散現象の物理常数(コンクリート中の塩分拡散係数、コンクリート表面への付着塩分量、または表面の塩分量)などを算定するプログラム
- ② ①で求めた物理常数を用いて、鉄筋位置での塩分量が3. で提案した許容塩分量に達する時期を算定するプログラム

5. 許容塩分量に基づいた診断法

4. で開発したプログラムを用いて診断した例を以下に示す。

調査時点から何年後に鉄筋が発錆する可能性があるのかを、構造物Cを対象に説明する。

① 構造物Cの入力データ

○塩分量分布(深さ(cm), 塩分量(wt%))

(1,0.25), (3,0.091), (5,0.047), (7,0.026),

(9,0.017), (11,0.014), (13,0.015)

○供用年数: 9年, ○環境: 飛沫帯, ○初期塩分量: 有

② 拡散現象の物理常数の算定(図-6)

③ 鉄筋発錆時期の算定(図-7)

したがって、構造物C(対象かぶり深さ5cm, $Ca = 0.05\text{wt\%}$)は、調査時点より2年後に発錆する危険性があると診断され、早急に塩分の浸透を防止する処置等が必要となる。

【参考文献】

〔1〕永野英雄: 塩分汚染コンクリート構造物の診断手法の提案, 大成建設技術研究所報第18号, pp.67~73

〔2〕新数表シリーズ3, 正規分布表, コロナ社, pp.13, 1961 (C.Hasting: Approximations for Digital Computers 1955参照)

表-2 発錆限界塩分量に関する文献調査

研究名	環境	発錆限界塩分量
研究A	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.4wt% (0.4wt% (0.4wt%))
研究B	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.34wt% (0.34wt% (0.34wt%))
研究C	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.30wt% (0.30wt% (0.30wt%))
研究D	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.2wt% (0.2wt% (0.2wt%))
研究E	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.2wt% (0.2wt% (0.2wt%))
研究F	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.18wt% (0.18wt% (0.18wt%))
研究G	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.15wt% (0.15wt% (0.15wt%))
研究H	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.12wt% (0.12wt% (0.12wt%))
研究I	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.10wt% (0.10wt% (0.10wt%))
研究J	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.08wt% (0.08wt% (0.08wt%))
研究K	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.06wt% (0.06wt% (0.06wt%))
研究L	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.04wt% (0.04wt% (0.04wt%))
研究M	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.03wt% (0.03wt% (0.03wt%))
研究N	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.02wt% (0.02wt% (0.02wt%))
研究O	飛沫帯・凍結帯	コンクリート表面に付着塩分量 0.01wt% (0.01wt% (0.01wt%))

注) C: 飛沫帯・凍結帯; コンクリートの塩分濃度は2.350 kg/m³と設定

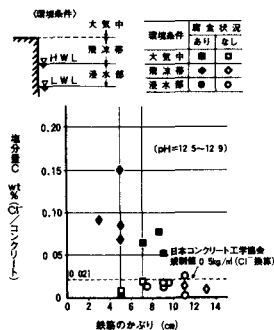


図-4 鉄筋のかぶり、塩分量と腐食の関係

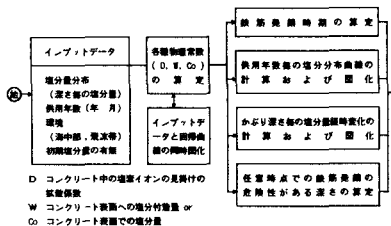


図-5 鉄筋発錆時期予測プログラムの流れフロー

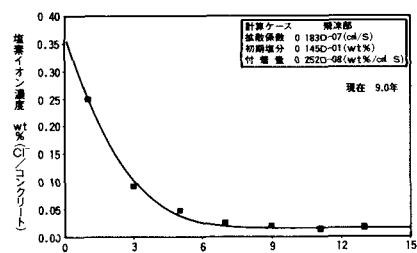


図-6 インプットデータと同時図化の同時図化

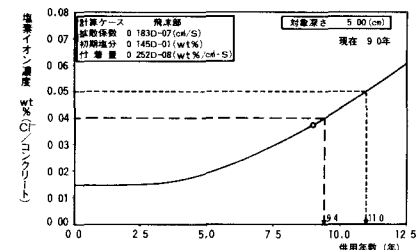


図-7 鉄筋発錆時の算定(かぶり深さ5cmの場合)

表-3 診断結果

対象かぶり深さ	鉄筋発錆限界塩分量, $Ca(\text{wt\%})$	
	0.04	0.05
5 cm	9.4年(0.4年後)	11.0年(2.0年後)