

## 論 文

## [1097] コンクリート構造の寿命予測に関する一考察

正会員 関 博（早稲田大学理工学部）  
 正会員 松井邦人（東京電機大学理工学部）  
 正会員 松島 学（東電設計技術開発本部）  
 正会員 金子雄一（東電設計第二土木本部）  
 正会員○田畠 裕（東海旅客鉄道株式会社）

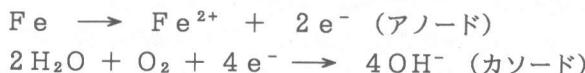
## 1. まえがき

近年、コンクリート構造物の劣化が問題となっており、大きな原因の一つとして塩分のコンクリート中への浸透による鉄筋の腐食があげられている。鉄筋の腐食膨張はかぶりのコンクリートの剥離および剥落を誘起することになる。

コンクリート構造物の寿命の一つとして、鉄筋腐食による軸方向ひびわれの発生時点を設定することができる。本研究では、海洋環境に建設された構造物に関して外部から侵入する塩分による鉄筋の腐食およびそれに伴うかぶりコンクリートのひびわれ発生に着目し、塩素イオンのコンクリート中への浸透をモデル化して鉄筋の腐食発生時間を算定し、さらに鉄筋の腐食機構をモデル化して腐食速度を推定することにより、かぶりコンクリートにひびわれが発生するまでの時間を推定することを試みた。

## 2. コンクリート中における鉄筋の腐食機構

コンクリート中の空隙の液相は、通常水酸化カルシウムを主体とする水酸化物を溶解しており高アルカリ（pH=12.5 以上）に保持されているため、コンクリート中の鉄筋は表面に不動態皮膜を形成し、腐食しないと言われている。しかし、塩素イオンの侵入や、空気中の炭酸ガスの吸収による中性化等の影響によって不動態皮膜が破壊され、鉄筋の腐食が開始される。腐食現象は、鉄筋にアノード部とカソード部からなる腐食電池が形成され、腐食電流が流れることによるとされており、その反応式は、



で表され、全体の腐食電池は、以下の式で表される。



さらに、 $\text{Fe}^{2+}$ は酸化され、鏽を形成する。



## 3. 解析方法

本研究では、腐食の過程を次のようにモデル化した。

- ① コンクリートに塩素イオンが浸透し始めてから鉄筋の不動態が破壊するまでは、鉄筋の腐食速度は0である。
- ② 鉄筋の不動態が破壊された時点を腐食開始とし、この時、鉄筋の腐食速度は一気に初期の腐食速度に達する。
- ③ 腐食速度は時間とともに減少するが、かぶりコンクリートの表面にひびわれが達するまで腐食は常に進行し続ける。

以上のように腐食過程をモデル化すると、鉄筋コンクリート構造物が海洋環境に設置されてから、かぶりのコンクリートの表面にひびわれが発生するまでの時間（ひびわれ発生時間） $t_{cr}$ は、腐食開始までの時間（腐食開始時間） $t_p$ と腐食開始後ひびわれ発生までの時間（腐食進行時間） $t_{cor}$ との和、

$$t_{cr} = t_p + t_{cor}$$

で表される。

### (1) 塩素イオンの浸透過程に関するモデル化および解析方法

塩素イオンの浸透に関しては、次のように仮定した。

- ① 塩素イオンの浸透は見掛け上一次元の拡散現象として取り扱い、Fickの拡散法則が成立する。
- ② 塩素イオンは、外部から浸透してくる塩素イオンのみであり、骨材に含まれるような内在イオンについては考慮しない。すなわち、塩分環境に最初に暴露された時点のコンクリート中の塩素イオン濃度は0であるとする。
- ③ 外部から浸透してくる塩素イオンは、今回の計算では他の物質とは反応しないとする。
- ④ 塩素イオンの拡散係数は、時間によらず一定である。
- ⑤ コンクリート表面における塩素イオン濃度（以下、塩素イオンの表面濃度とする）は、時間によらず一定である。
- ⑥ 腐食が開始した後は、鉄筋の腐食機構に対して塩素イオンの影響はないものとする。

上記の仮定をもとにして次のように解析を行なった。

塩素イオンの浸透が、Fickの拡散法則に従うとすると、Fickの拡散方程式の解は、

$$C_c(x, t) = C_c^s \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 D_c t} \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $C_c(x, t)$ ：コンクリート表面から深さ  $x$ 、浸透開始からの時間  $t$  におけるコンクリート中の塩素イオン濃度

$C_c^s$  : 塩素イオンの表面濃度

$D_c$  : 塩素イオンの拡散係数

である。ここで、 $\operatorname{erf}(x)$ は誤差関数であり、本解析では、永野<sup>4)</sup>らの用いた近似式を用いることとした。塩素イオンの拡散係数  $D_c$  および表面濃度  $C_c^s$  を定め、鉄筋の不動態皮膜が破壊される限界の塩素イオン濃度  $C_{limit}$  を設定すると、鉄筋の位置 ( $x = L$  ;  $L$  はかぶり) において塩素イオンの濃度が限界濃度に達するまでの時間、すなわち腐食開始時間  $t_p$  を求めることができる。

### (2) 腐食速度推定におけるモデル化と推定式の誘導

腐食速度を推定するにあたっては、鉄筋の腐食機構を次のようにモデル化した。

- ① 酸素の浸透は、一次元のFickの拡散法則に従うものとし、拡散係数および表面濃度は時間によらず一定とする。
- ②  $t = 0$  のとき、コンクリート中の酸素濃度は0であるとする。
- ③ 鉄筋表面とコンクリートの間には、コンクリート中の空隙の飽和度にしたがってキャピラリーウォータが存在している。
- ④ 鉄筋の表面に到達した酸素(gas)は、その大部分が鉄筋を通過するが、一部は溶存酸素として水に溶ける。
- ⑤ 溶存酸素および電流に関しての質量保存則、Faradayの法則が成立する。
- ⑥ 鉄筋の腐食形態は、カソード支配とする。

⑦ 鉄筋上のカソードとアノードの面積比は、時間とともに減少するものとする。

⑧ 鉄筋を通過した酸素(gas)は、鉄筋の腐食には一切関与しない。

以上の仮定をもとに腐食速度の推定式を誘導する。コンクリート中に拡散浸透した酸素の一部が、鉄筋の表面に存在する水に溶解すると考えると、水中の酸素量  $f_o$  は Fick の第一法則より、

$$f_o = -\kappa \times D_o \frac{\partial C_o(L, t)}{\partial x}$$

で与えられる。ここで、

$C_o(x, L)$  : 鉄筋位置での浸透開始からの時間  $t$  における酸素の濃度

$D_o$  : 気体状態の酸素の拡散係数 [m<sup>2</sup>/s]

$\kappa$  : 水中に溶ける酸素の割合を示す係数 ( $= 0.03 \times S / 100$ : S は飽和度)

次に、溶存酸素の質量保存則について考える。鉄筋表面に流入してくる溶存酸素がすべて腐食反応に使用されると仮定すると、(酸素の流入量) = (腐食による酸素の消費量)となり、これより鉄筋の腐食速度  $F_r$  は、

$$F_r = \frac{k_{ri}^A}{k_{oi}^C} \cdot \frac{C}{A} \cdot (\kappa \times D_o \frac{\partial C_o(L, t)}{\partial x}) \quad \dots \dots (2)$$

で表される。ここで、

$k_{ri}^A$  : 電流密度を錆生成速度に変換する電気化学当量 ( $= 5.55 \times 10^{-4}$  [g/c])

$k_{oi}^C$  : 電流密度を酸素消費速度に変換する電気化学当量 ( $= 8.29 \times 10^{-5}$  [g/c])

$C/A$  : カソードとアノードの面積比

である。電気化学当量は Faraday の法則より、また、酸素濃度  $C_o(L, t)$  は(1)式と同様に Fick の法則より求められる。腐食反応は、常に平衡状態を保ちながら進行するものとし、さらに、カソードとアノードの面積比  $C/A$  の経時変化を設定することにより、(2)式から任意の時間  $t$  における腐食速度  $F_r$  を求めることができる。しかしながら、カソード・アノードの面積比およびその時間的変化に関する研究は見当らず、参考となるデータはない。現象としては、腐食開始直後のカソード・アノードの面積比は  $C/A = \infty$  であり、腐食が進行するにつれて  $C/A$  の値は小さくなっていくと推定される。本研究では、自然界で最も一般的である指指数型の減少を想定し、

$$C/A = \alpha \exp(-\beta \times T[\text{年}]) \quad \dots \dots (3)$$

という経時変化式を考え、 $\alpha$ 、 $\beta$  の値をパラメーターとして様々な場合について腐食速度を求め実際の現象と比較して適当と思われる  $\alpha$ 、 $\beta$  の値を決定することとした。

### (3) 解析に用いたモデル構造

解析に用いたモデル構造を図 1 に示す。

### (4) ひびわれ発生時の腐食量の算定

本論文では、二次元平面モデル（厚肉円筒型モデル）による弾性解析を行った。コンクリートのひびわれ発生条件は、修正平均応力説に基づいて判定した。なお、コンクリートの弾性係数は、クリープによる低減を考慮した弾性係数を用いた。

### (5) 諸数値の決定

解析に用いた諸数値を表 1 ~ 表 3 に示す。ここで、表 2 の塩素イオンおよび酸素の拡散係数はおもに文献 1 ) 、

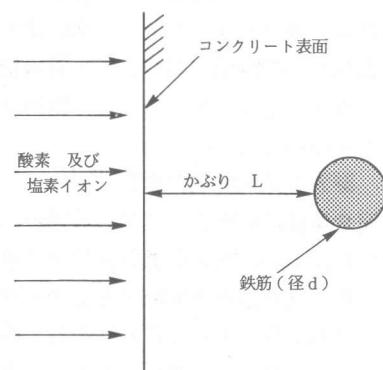


図 1 解析モデル

2) および5) を参考として、数値を定めた。

表1：材料の諸元

| 水セメント比 [%]                        | 40                 | 45                 | 50                 | 55                 | 60                 |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 圧縮強度 $f_c'$ [kg/cm <sup>2</sup> ] | 516                | 443                | 384                | 335                | 296                |
| 引張強度 $f_t$ [kg/cm <sup>2</sup> ]  | 37.3               | 33.7               | 30.6               | 28.0               | 25.7               |
| 弾性係数 $E_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]  | $3.21 \times 10^8$ | $3.05 \times 10^8$ | $2.91 \times 10^8$ | $2.78 \times 10^8$ | $2.66 \times 10^8$ |
| クリープ係数 $\phi_c$                   |                    |                    | 2.0                |                    |                    |
| ボアソン比 $\nu_c$                     |                    |                    | 0.2                |                    |                    |
| 弾性係数 $E_s$ [kg/cm <sup>2</sup> ]  |                    |                    | $2.10 \times 10^8$ |                    |                    |
| ボアソン比 $\nu_c$                     |                    |                    | 0.3                |                    |                    |
| 比重 $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]  |                    |                    | 7.85               |                    |                    |
| 弾性係数 $E_r$ [kg/cm <sup>2</sup> ]  |                    |                    | 2000               |                    |                    |
| ボアソン比 $\nu_r$                     |                    |                    | 0.3                |                    |                    |

### 3. 解析結果および考察

#### (1) 腐食開始時間の解析

塩素イオンの拡散係数の影響は、図2に示すように拡散係数の増大に伴い腐食開始時間の値が小さくなる、すなわち腐食開始が早くなる傾向を示している。したがって、塩素イオンの拡散係数を小さくするような処置をコンクリートに施せば、腐食開始までの時間を長くすることができると考えられる。一方、図3はコンクリートのかぶりの影響を示したものであり、かぶりの増大に伴い、腐食開始時間は指数的に大きくなるといえる。

#### (2) 腐食速度の推定

##### ① カソード・アノード面積比の影響

$\alpha > 100$  とすると腐食速度が非常に速く、腐食開始後1年以内にひびわれが発生する結果が得られた。これは、実際の現象と矛盾すると考え、本研究では  $\alpha = 10$  と仮定した。 $\alpha = 10$  のとき、腐食開始時点でのアノードの面積は  $1/10$  程度であり、鉄筋表面において腐食反応が進行している部分がアノードであることを考えると、概ね妥当であると思われる。カソード・アノード面積比をパラメーターとした腐食速度の経時変化についての解析結果の一例を図4に示す。本研究では、図4に示した結果から比較検討し、 $\beta = 0.05$  を用いることにした。

##### ② 酸素の拡散係数の影響

腐食速度に対する酸素の拡散係数の影響を図5に示す。これによると、酸素の拡散係数が大きい程腐食速度は大きくなる。腐食速度を低減するためには、酸素の拡散係数を低減すれば良いということになる。酸素の拡散係数の影響因子の一つは、コンクリートの含水率であり<sup>5)</sup>、大きな含水率では腐食速度が小さくなり、ひびわれ発生時間が長く

表2：水セメント比に対する拡散係数の値(飽和度S=60[%])

| 水セメント比 [%] | 塩素イオンの拡散係数 [m <sup>2</sup> /s] | 酸素の拡散係数 [m <sup>2</sup> /s] |
|------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 40         | $1.0 \times 10^{-12}$          | $1.5 \times 10^{-8}$        |
| 45         | $1.2 \times 10^{-12}$          | $1.6 \times 10^{-8}$        |
| 50         | $1.3 \times 10^{-12}$          | $1.7 \times 10^{-8}$        |
| 55         | $1.5 \times 10^{-12}$          | $2.1 \times 10^{-8}$        |
| 60         | $2.0 \times 10^{-12}$          | $2.5 \times 10^{-8}$        |

表3：飽和度に対する拡散係数の値(水セメント比W/C=60[%])

| 飽和度 [%] | 塩素イオンの拡散係数 [m <sup>2</sup> /s] | 酸素の拡散係数 [m <sup>2</sup> /s] |
|---------|--------------------------------|-----------------------------|
| 40      | $1.0 \times 10^{-12}$          | $1.0 \times 10^{-7}$        |
| 60      | $2.0 \times 10^{-12}$          | $2.5 \times 10^{-8}$        |
| 80      | $4.0 \times 10^{-12}$          | $1.0 \times 10^{-8}$        |
| 100     | $1.0 \times 10^{-11}$          | $1.0 \times 10^{-10}$       |

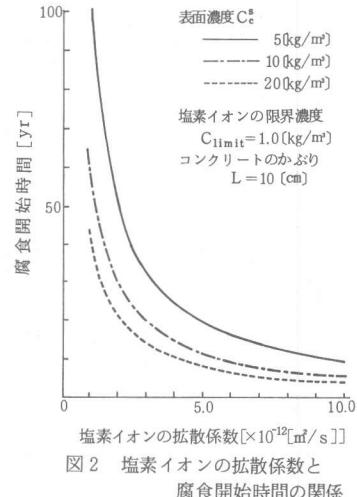


図2 塩素イオンの拡散係数と腐食開始時間の関係

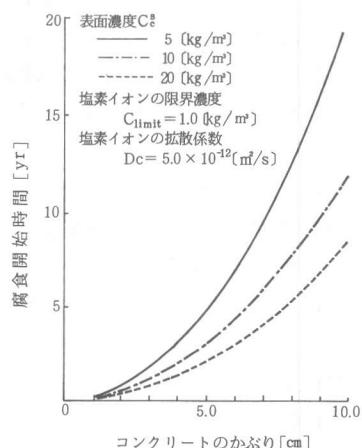


図3 コンクリートのかぶりと腐食開始時間との関係

なると予想される。これは、海水中よりも飛沫帶の方がコンクリート中の鉄筋が腐食しやすいという知見とも一致している。

### (3) コンクリートのかぶりの影響

解析結果によると、通常のかぶりの範囲では、腐食速度に与えるかぶりの影響は、無視し得る程度であった。

### (4) ひびわれ発生時の腐食量の算定

腐食生成物をマグネタイトと仮定して、ひびわれ発生時の腐食量を算定した結果を、表4に示す。この数値は既往の研究における腐食量<sup>6)</sup>と大差ない値であった。

### (5) ひびわれ発生時間の算定

#### ① 水セメント比の影響

図6から水セメント比の増大に伴い腐食開始時間、ひびわれ発生時間ともに減少することがわかる。本図の結果から塩分環境に設置される鉄筋コンクリート構造物は、水セメント比を小さくする必要があると同時に、水セメント比の低減がひびわれ発生までの時間を延ばすには有効であるといえる。

#### ② 空隙含水率(飽和度)の影響

図7は、コンクリート中の空隙の含水率(飽和度)の影響を示したものである。本図によると、空隙含水率の増大に伴い、腐食開始時間は短くなるが、一方、腐食開始からひびわれ発生までの時間は長くなるようである。空隙含水率が40%程度の場合、腐食速度は大きいが、腐食開始までの時間が長いため、ひびわれ発生までの時間は長いものとなっている。一方、空隙含水率が100%に近い場合すなわち海水中に没しているような場合には、腐食開始までの時間は非常に短いが、酸素の拡散が遅いため腐食速度はきわめて小さく、全体としてひびわれ発生まで長時間を要する結果となっている。これらの中間に位置する空隙含水率60～80%程度の場合、ひびわれ発生までの時間は相対的に短くなっている。この傾向は、実際の海洋環境におかれた鉄筋コンクリート構造物において、海水中に没している部分よりも飛沫帶にある部分の方が、腐食による損傷が大きいという結果と一致している。

## 4. 結論

コンクリート中における鉄筋の腐食機構のモデル化を行ない、既往の研究の結果から諸数値を仮定して、ひびわれ発生までの時間を解析的に検討した。本結果から得られた傾向は以下の通りである。

表4：ひびわれ発生時の腐食量 [mg/cm<sup>2</sup>]

| W/C [%]     | 40 | 45  | 50  | 55  | 60  |
|-------------|----|-----|-----|-----|-----|
| かぶり<br>(cm) | 5  | 72  | 67  | 64  | 61  |
|             | 10 | 145 | 135 | 127 | 121 |
|             |    |     |     |     | 115 |

酸素の表面濃度  $C^s = 0.26 \text{ [kg/m}^3]$

コンクリートのかぶり  $L = 10 \text{ [cm]}$

腐食開始時間  $T_p = 10 \text{ [yr]}$

鉄筋径  $\phi = 25 \text{ [mm]}$

$C/A = \alpha \exp(-\beta \times T \text{ [年]})$

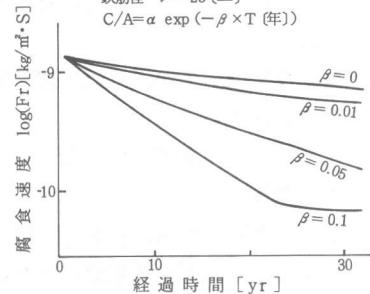


図4 腐食速度の経時変化の一例  
( $\alpha=10$  の場合)

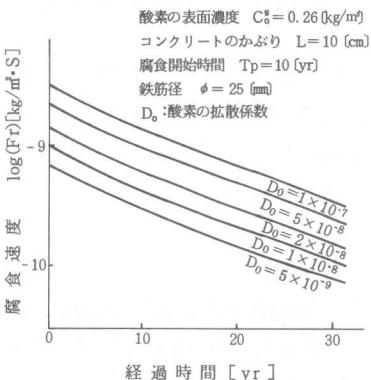


図5 腐食速度に対する酸素の拡散係数の影響  
( $\alpha=10$ 、 $\beta=0.05$  の場合)

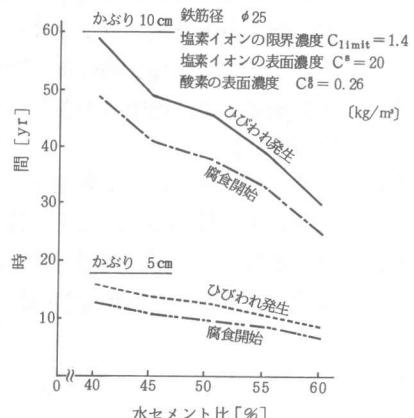


図6 ひびわれ発生時間に対する  
飽和度の影響

- ① 塩素イオンの拡散係数の増大に伴い腐食開始時間は短くなる。また、塩素イオンの表面濃度も腐食開始時間に影響する。
- ② コンクリートのかぶりが大きくなると、腐食開始時間が遅くなる。
- ③ 酸素の拡散係数は、腐食速度に対する最も重要な影響である。
- ④ コンクリートのかぶりは、腐食速度にはほとんど影響を及ぼさない。
- ⑤ 水セメント比が大きい場合には、ひびわれ発生時間が短くなる。
- ⑥ 空隙含水率（飽和度）の増大に伴い、腐食開始時間は短くなるが、腐食開始後ひびわれ発生までの時間は長くなる。このため、海洋環境下の状況と考えられる空隙含水率（飽和度）=60~80%の範囲では、比較的早い時点でひびわれが発生するが、海水中に没している場合（飽和度S=100%）には、ひびわれ発生までの時間は遅くなる。

本研究の一部は、文部省科研費総合(A)「コンクリート構造物の維持管理システムの確立」(代表者 岐阜大 小柳 治教授)として実施したことと付記する。また、解析に当って、山本英夫氏(小野田セメント株式会社)よりいろいろと御意見を頂いた。慎んで感謝の意を表する次第である。

#### 【参考文献】

- 1) Zdenek P. Bazant : Physical Model For Steel Corrosion in Concrete Sea Structures—Theory, Journal of the Structural Division, Vol.105, No. ST6, June. 1979, pp.1137~1153
- 2) 武若耕司, 松本 進: 塩害を受けるコンクリート構造物の耐久性評価に関する一実験的検討, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集, V-71, 1985, pp.141~142
- 3) 関 博, 山本英夫: コンクリート中鉄筋における腐食速度の解析に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 1, 1987, pp. 381~386
- 4) 永野宏雄: 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.69~73
- 5) 小林一輔, 出頭圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, Vol. 24, No. 12, 1986. 12, pp. 91~106
- 6) 森川雅行, 関 博, 奥村 隆: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集第378号, V-6, 1987. 2, pp. 97~105

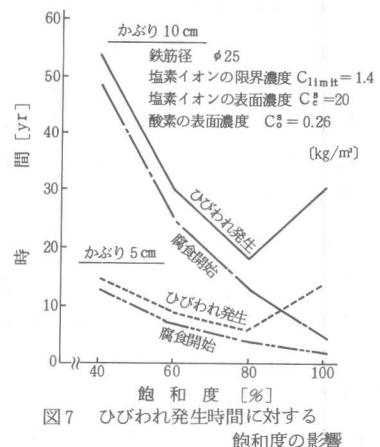


図7 ひびわれ発生時間に対する  
飽和度の影響