

# コンクリート構造物における鋼材の腐食とその対策

宮 川 豊 章\*

## Corrosion and Protection of Reinforcing Steel in Concrete

Toyooki MIYAGAWA

### 1. はじめに

近年コンクリート構造物の劣化損傷例が数多く報告された。特に、除塩不足の海砂使用あるいは海洋環境での海塩による鋼材腐食に起因する損傷（塩害）と、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張に起因する損傷に関する報告例は多く、補修例も増加している。しかも、前者については、食孔による鋼材伸び能力の低下あるいは鋼材断面積の減少による耐荷力の低下等について懸念されている。

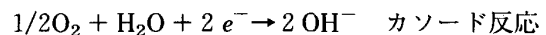
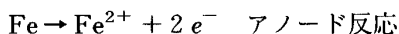
コンクリート構造物は一般には鋼構造物と比べて耐久性に富むものと考えられてはいるものの、その有する性能は長期的には低下するものであり、低下の速度は設計、施工、維持管理など種々の要因に影響を受ける。これらに対する対応策として、耐久性設計の適用が提案されているが、概念的には種々の形で述べられているものの、まだ一般化された実用的なものはみられないのが現状である。

本文においては、土木用のコンクリート構造物を中心として、塩害の発生機構、塩害によるコンクリート構造物の劣化機構および健全度の考え方について述べ、劣化対策を耐久性設計および補修設計として紹介する。

### 2. コンクリート中での鋼材の塩化物腐食

#### 2.1 コンクリート中における鋼材の腐食

健全なコンクリート中においては、鋼材は一般には腐食しないと考えられている。これは、健全なコンクリート中の孔隙に存在する液相の pH が 12~13 程度であって鋼材表面に緻密な不動態被膜が生成されるため、腐食速度がきわめて小さく、鋼材は工学上腐食しないと考えるもよいことによる。コンクリート中における反応式は一般に次式で示される。



アノード反応は電子 2 個を鋼材中に残して鉄が水和イオンとなって溶出する、鉄筋が“腐る”ことそのものである。これに対しカソード反応は鋼材中に取り残された 2 個の電子を消費して、鉄筋が“腐る”ことを助けるものである。これらが同時に生じることが腐食反応である。

腐食現象からみた場合に、不健全なコンクリートとして最も一般的なものは、中性化したコンクリートと塩化物イオン（以後、 $\text{Cl}^-$  と略記）を多量に含んだコンクリートであろう。中性化による腐食については参考文献 1) 等を参照されたい。 $\text{Cl}^-$  が存在する場合の腐食の特徴は孔食を生じることである。 $\text{Cl}^-$  によって不動態被膜が破れた場合、孔食にまで発展するかどうかは鋼材近傍の環境条件に大きく左右される。 $\text{OH}^-$  イオンや溶存酸素のような不動態被膜の生成を助ける成分が多い場合には、破れはすぐに修復される可能性が高いのに対して、 $\text{Cl}^-$  のような不動態被膜を破る成分が存在すると不動態被膜は再生しにくくなる。

腐食反応はすでに示したように電子あるいはイオンの移動を伴う電気化学反応の一種であるため、反応を電気量に置き換えた形式での表現が可能である。したがって、腐食するかどうかについては電位-pH 図を、腐食速度についてはアノードおよびカソード分極曲線を取り上げて説明される場合も多い<sup>2)</sup>。

#### 2.2 コンクリート中における鋼材の塩化物腐食

コンクリート中での塩化物腐食における各種要因および相互関係は一般に図 1<sup>3)</sup> のように示されている。ここでは  $\text{Cl}^-$  量、電位、コンクリートの電気伝導度および溶存酸素が前提条件として示されている。これらの前提条件に対して、前提条件に直接関与する要因、コンクリート構造物の設計に関する間接要因、さらに腐食防止あるいは抑制の方法が示されている。この図は必ずしも完璧なものではないが、コンクリート中における鋼材の塩化

平成元年 12 月 4 日受付 (Received Dec. 4, 1989)(依頼解説)

\* 京都大学工学部講師 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sakyo-ku Kyoto 606)

**Key words** : reinforced concrete ; corrosion of reinforcing steel ; corrosion protection ; durability design ; repair design ; diffusion of chloride and oxygen ; deterioration model ; longitudinal cracking ; service life.

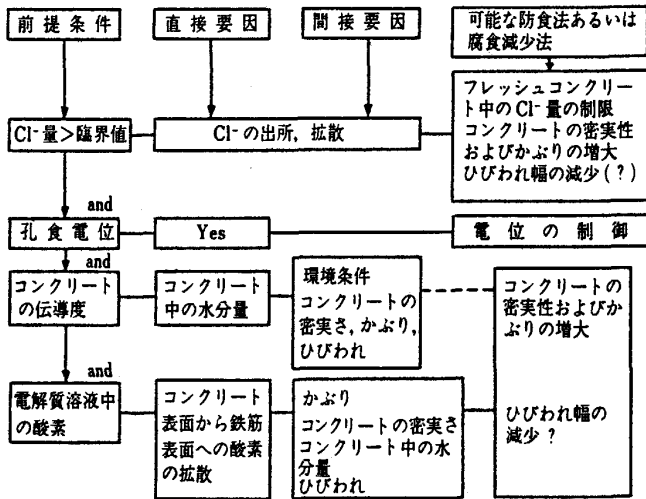


図1 コンクリート中での塩化物腐食における各種要因

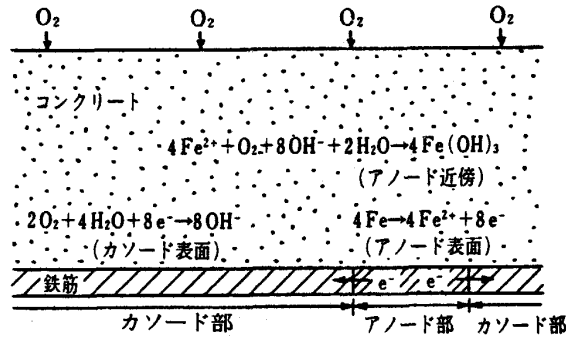


図2 コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食

物腐食の概要がわかりやすくまとめられている。

この図から明らかなことは、Cl<sup>-</sup>量、コンクリートの密実さ、かぶり（鋼材表面からコンクリート表面までの距離）、ひびわれおよび環境条件が非常に重要な因子としてとり上げられていることである。しかも、これらの要因はその絶対値のみではなく、コンクリート構造物中におけるばらつきも重要である。これは、コンクリート中において激しい塩化物腐食が生じるのは、マクロセルによることが多いためである。マクロセル腐食では、アノード反応とカソード反応が離れた場所で生じ、そうでないミクロセルと比べて腐食速度が極めて大きくなることが知られている。

コンクリート中における鋼材のマクロセル腐食の様子を図2に示す。アノード部のコンクリートとしては、高い水セメント比あるいはひびわれを生じているなど品質において若干劣る部分、あるいは環境作用の特に激しい箇所などをあげることができる。

2・2・1 塩化物イオン (Cl<sup>-</sup>) 量

pH は腐食速度に大きな影響を与える。この観点から Cl<sup>-</sup> 量を pH と関係づけた報告として、ERLIN ら<sup>4)</sup> のも

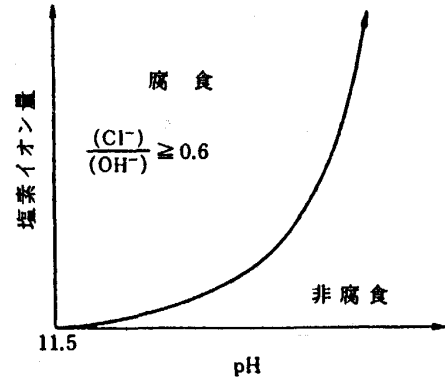


図3 塩化物イオンと pH が腐食発生に与える影響

のがある。図3に示すように、pHが増大するに伴って、腐食を発生し始める Cl<sup>-</sup> 量は増大することがわかる。しかし、環境に起因していわゆる塩害として問題となっている場合、コンクリートの pH はあまり低下していないことが知られている。しかも、図3の結果は水溶液実験によるものであり、必ずしもコンクリート中における許容 Cl<sup>-</sup> 量の正確な目安ではない。

コンクリート中の材料に起因する許容 Cl<sup>-</sup> 量については、まだ世界的に一致を見てはいないが、種々の規格等に定められている。一般に、Cl<sup>-</sup> はセメント質量の約 0.4% までがフリーデル氏塩<sup>3)</sup>として固定され、腐食とは無関係の形になるとされている。このため、セメント量に対する比率として定められている例も多い。しかし、その場合、単位セメント量（コンクリート 1m<sup>3</sup> を造るときに用いるセメントの量）を大きくすれば許容 Cl<sup>-</sup> 量も増大してしまうため、コンクリートに対する比率で表されている場合も多い。また、海洋環境等においては外部より浸透する Cl<sup>-</sup> 量が非常に大きな場合が多く、しかも、フリーデル氏塩は常に安定しているとは限らない。大即ら<sup>5)</sup> や宮川<sup>6)</sup> は、激しい腐食が生じる臨界値として 2 kg/m<sup>3</sup> 以上の値を報告しており、これはセメント量に対して 0.6% 程度以上の値となる。

しかし、大即らや宮川の結果は、実験室で注意深く製作された供試体によるものであり、必ずしも現実の臨界値そのものであるとはいえない。例えば、冬季に散布される融雪剤の浸透による橋床版中の鉄筋の腐食・劣化の場合では、酸素の供給が豊富で非常に激しい腐食性環境のため、コンクリート中の Cl<sup>-</sup> により腐食する臨界値を 0.89 kg/m<sup>3</sup>、および激しい腐食を生じるのは 1.19 kg/m<sup>3</sup> と報告している例<sup>7,8)</sup> もある。これらの値は、大即らや宮川の示した値と比べて小さな値である。したがって、コンクリート構造物の設計施工上の Cl<sup>-</sup> 量の限界値としては、単位セメント量が小さくなる場合があること、Cl<sup>-</sup> の測定精度および安全率等を考慮して、材料中に許容する Cl<sup>-</sup> 量としては 0.6 kg/m<sup>3</sup> 前後、環境作用により浸透する Cl<sup>-</sup> も含めた場合 1.2 kg/m<sup>3</sup> 程

度が目安となるものと考えられている。

2.2.2 コンクリートの密実性

コンクリート構造物における鋼材防食の基本は、密実なコンクリートを用いることと考えられている。コンクリートが鋼材防食のうえで果たす主要な役割には、3種類のものがある。一つは、その高い pH によって鋼材表面に堅固な不動態被膜を作ることである。もう一つは、水分、塩分、酸素などの侵入を抑制することである。さらに、最後に、高い電気抵抗性によって腐食電流の流れにくくすることを挙げることができよう。コンクリートの密実性とは、主として2番目の種々の物質の侵入防止を意味するものと考えられ、さらに3番目の抵抗についても高いことを期待できる。

コンクリートを密実なものとするために一般に採用されている方法は、コンクリートの単位セメント量を適切に増大させ、W/C(水セメント比)を減少させることである。例えば、セメントペーストの圧力水の作用下における透水係数は、図4<sup>9)</sup>に示すように、W/Cが0.50をこえると急激に増大することが知られている。しかし、腐食作用が非常に厳しい環境条件は、海洋を考えた場合、海中ではなく、飛沫帯であるとされており、圧力水の作用下ではない。しかも、圧力の効果そのものは、長期的にみれば必ずしも有意なものではないと考えられている<sup>10)</sup>。したがって、毛細管などを伝わっての水の吸水、浸透が最も重要な問題である。筆者らの行った吸水試験結果<sup>11)</sup>によれば、吸水質量、吸水高さともにW/Cの増大にともなって増加し、W/Cが大きな場合には、乾湿繰返し作用下において相当の水の出入りを生じ、水ばかりか酸素の浸透をも許す可能性が高いようである。

さらに、この密実性は構造物内部でばらついている。このばらつきは、すでに述べたようにマクロセル腐食を成立させることとなる。W/Cの小さい密実なコンクリートにあってはこのばらつきの小さいことが知られており、マクロセルの観点からも防食上有利である。

2.2.3 ひびわれ、かぶり

コンクリート構造物にしばしば発生するひびわれは、

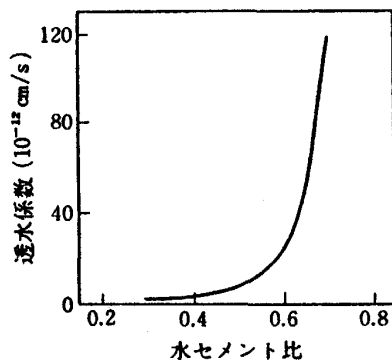


図4 セメントペーストの透水係数に与える水セメント比の影響

水分、塩分などを鋼材にまで容易に侵入させる道になるとともに、かぶりコンクリートに著しい不均質を生じさせることになる。したがって、マクロセル成立の大きな原因となる。ひびわれに起因する腐食を考える場合、二つの側面を念頭に置く必要がある。それは、腐食が生じるのかどうかということ、腐食する速度である<sup>12)</sup>。

腐食の発生の観点からは、それ以上のひびわれ幅となった場合に腐食が激しくなるという、限界ひびわれ幅が存在するものと考えられる。しかし、限界ひびわれ幅というものはW/Cがある程度小さな場合についてのみ意味を持つものであって、海洋環境等においてW/Cが大きな場合にはひびわれ部以外からのCl<sup>-</sup>の浸透も大きなため、いくらひびわれ幅を制御しても意味がない。この観点から、ひびわれ制御が意味を持つ限界W/Cは0.60程度である<sup>13)</sup>。

コンクリート中での鋼材の腐食速度は、一般に酸素が鋼材表面に拡散到達する速度で決まるとされている。この酸素はカソード反応で必要とされるものであり、ひびわれのない部分がカソードとなると考えると、ひびわれ幅と腐食速度とは直接的な関係はない。また、アノードとカソード間のコンクリートの電気抵抗が大きい場合、腐食を生じさせる起電力の大部分がアノードとカソード間の電気抵抗による電位降下に消費されてしまうため、電気抵抗は腐食速度に影響するが、やはりひびわれ幅とは直接関係がない。酸素の拡散や、かぶりコンクリートの電気抵抗は、主としてコンクリートの密実性や環境条件に関係する要素である。図1において「ひびわれ幅の減少」に対して?が付されているのは、このためである。

許容ひびわれ幅はかぶり(鋼材表面からコンクリート表面までの距離)の関数として与えられる場合が多い。これは、同一ひびわれ幅であっても、かぶりの大きな方が鋼材露出面積が小さいと考えられるためである。さらに、かぶりが大きくなるにしたがって、水分、塩分などの浸透を防ぐ能力は増大するものと考えられる。

2.2.4 環境条件

一般には、波しぶきのかかるようなところ、海水による乾湿繰返し作用を受けるような箇所、つまり飛沫帯が、塩分の濃縮と酸素の十分な供給が可能のため、最も腐食作用が激しいとされている。また、季節風などにより海から陸へ向けて海水飛沫あるいは海塩粒子の飛来が多い箇所として、現在、東北・北海道の日本海沿岸で塩害が問題となっているのは周知の事実である。海洋環境条件は一般に、海中、飛沫帯、海上大気中の3種類に区分される。飛沫帯において最も腐食作用が厳しいことは既に述べたが、最も小さいのは海中であり、これは酸素の供給が少ないためとされている。わが国ではまだ顕著な塩害は出ていないが、冬季に融氷剤を散布する橋床版については、海洋環境でいえば飛沫帯と海上大気中の間あたりに位置するものと考えられる。

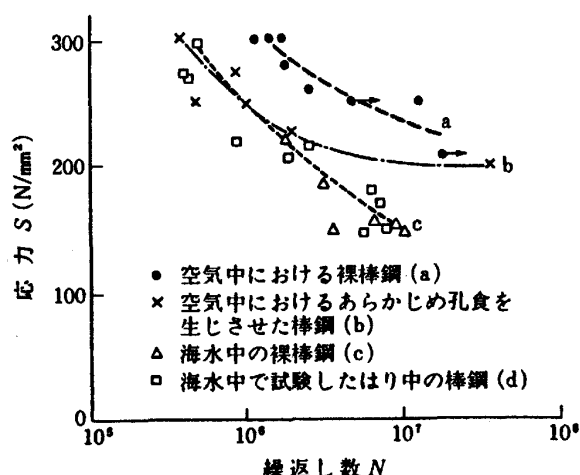


図5 種々の環境中における鉄筋の S-N 曲線

### 2.2.5 その他

以上述べてきた腐食機構と様子を異とするものとして腐食疲労、応力腐食がある。

鋼材が腐食性環境において繰返し応力を受けるとき疲労強度が著しく低下し、これを腐食疲労と呼ぶ。例えば、TAYLOR ら<sup>14)</sup>は、海水中においては図5に示すように、 $10^8$  回程度の繰返し回数まででは疲労限度が存在しないことを報告しており、疲労限界の考え方が使えないことが知られている。

応力腐食は、高引張応力を与えられた PC 鋼材にひびわれが発生する限界で、遅れ破壊と呼ばれる場合もある。塩分雰囲気中では孔食より割れに至る場合が多く、鋼材そのものとしては非常に脆性的に破断するため、危険な破壊形式となる。しかし、現実には、一度にすべての鋼材が破断することはまれであり、実際に応力腐食が生じた構造物<sup>15)</sup>であっても崩壊に至ったものはきわめて少ない。なお、現在わが国で用いられている鋼材については、応力腐食は生じにくいとされている。応力腐食を生じる境界応力は、引張強度の 60% 程度が目安である<sup>16)</sup>。

### 3. 塩害におけるコンクリート構造物の劣化機構

一般に、コンクリート構造物の塩害劣化過程は、図6<sup>17)</sup>の、第Ⅰ・潜伏期、第Ⅱ・進展期、第Ⅲ・加速期、第Ⅳ・劣化期、の4段階に区分することができ、以下のような特徴を有している。

第Ⅰ期(潜伏期):  $\text{Cl}^-$  がかぶりコンクリート中を浸透し、鋼材近傍に蓄積される過程で、主として  $\text{Cl}^-$  のコンクリート中での拡散速度に支配される。したがって、材料に起因する塩化物、例えば海砂中の塩化物の量が多い場合には潜伏期は存在しない。

第Ⅱ期(進展期): 鋼材が塩化物により腐食し始め、腐食生成物が蓄積され、その膨張圧によってかぶりコン

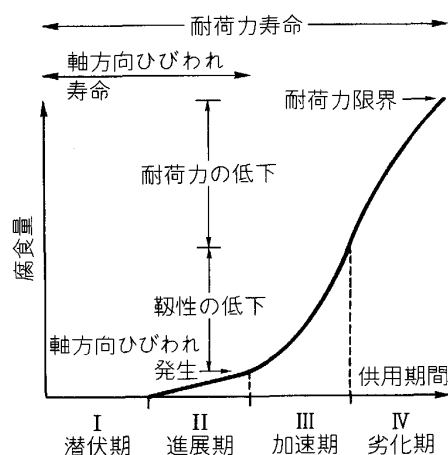


図6 塩害における劣化過程

クリートにひびわれが入る過程で、主として溶存酸素と水分の供給量およびコンクリートの電気抵抗に支配される。

第Ⅲ期(加速期): 鋼材に沿うひびわれ(軸方向ひびわれ)の発生によって、腐食速度が促進され、かぶりコンクリートの剥離、剥落が生じる過程で支配要因は第Ⅱ期(進展期)とほぼ同様であるが、荷重作用等の影響も受ける。軸方向ひびわれが生じても静的な耐荷力は低下しないが、食孔等により、高応力の繰返し荷重が作用する場合などでは耐荷力および靱性の低下が生じ始める<sup>18)</sup>。

第Ⅳ期(劣化期): 鋼材腐食が進み、断面積の減少が顕著となり、耐荷力の低下が明らかとなる過程で、支配要因は第Ⅲ期(加速期)とほぼ同様である。

これらの区分を特徴づける主要因として、 $\text{Cl}^-$  および酸素の拡散がある。前者は腐食の発生、後者は腐食の速度を大きく支配する要因であり、耐久性設計、補修設計を検討するにあたって極めて重要な項目である。

$\text{Cl}^-$  および酸素の拡散問題は従来種々な手法によって取り扱われてきており、さまざまな報告が行われている。 $\text{Cl}^-$  の拡散については、大即ら<sup>19)</sup>、片脇ら<sup>20)</sup>、武若ら<sup>21)</sup>の報告によればコンクリート中における見掛けの拡散係数は  $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$  程度であり、従来考えられてきたよりもかなり速く  $\text{Cl}^-$  が拡散・浸透し蓄積されることが明らかとなってきた。さらに酸素については、小林(一)ら<sup>22)</sup> および筆者ら<sup>23)</sup>の研究があり、 $\text{Cl}^-$  の蓄積によりいったん腐食が発生しさらに継続的に進行するような、塩害が具体的に問題となる環境下では、腐食による軸方向ひびわれが発生するのに必要とされる期間は、かぶりが 50 mm でもわずか2か月程度となる場合があるなど、 $\text{Cl}^-$  の蓄積期間(10年オーダー)に比べてはるかに短くなる可能性が高いことが指摘されている。

塩害を受けるコンクリート構造物の寿命としては種々

のレベルのものが想定可能である。比較的 safety 側ではあるものの、合理的な寿命設定方法は、腐食による軸方向ひびわれの発生まで、すなわち潜伏期と進展期との和をもって寿命とすることであろう。しかし、酸素の拡散によって支配される進展期が  $Cl^-$  の拡散によって支配される潜伏期に比べてはるかに短いものであるなら、潜伏期を寿命として用いる方が簡便であり実用的である。

したがって、耐久性設計のレベルについても種々のものが想定できるものの、最も基本的な考え方は、この潜伏期を設計供用期間より長くすることである。これに対して、補修設計にあっては、補修仕様に要求される性能を把握する必要性のうえから、対象とする構造物が潜伏期にあるのかあるいは進展期にあるのか等の非破壊判定手法が必要とされる。

4. 塩害を防止するための耐久性設計の考え方

既に述べたように、塩害におけるコンクリート構造物の寿命は、腐食による軸方向ひびわれの発生として設定し、潜伏期と進展期との和と定義することが最も合理的である。しかし、進展期は短いため、寿命を  $Cl^-$  量が腐食発生臨界量以上となったとき、すなわち潜伏期としてもよいと考えられる。この寿命をある信頼性で保証するためには、現実における設計、施工、維持管理のばらつきを考慮した確率論的な検討が必要とされるが、ここでは、劣化メカニズムから導かれる最も基本的なアプローチについて述べる。

$Cl^-$  のかぶりコンクリート中への浸透蓄積は、一般に見掛け上は拡散過程として解釈することができる。最も基本的な拡散過程は次式で表現することができる<sup>24)</sup>。

$$C(x, t) = C(0) + [C(s) - C(0)] \{1 - \text{erf}(x/2\sqrt{Dt})\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $C(x, t)$ : コンクリート表面からの距離  $x$ , 時間  $t$  後の  $Cl^-$  濃度,  $C(0)$ : コンクリート中の初期  $Cl^-$  濃度,  $C(s)$ : かぶりコンクリート表面  $Cl^-$  濃度, erf: 誤差関数,  $D$ : 見掛けの拡散係数

$C(s)$  は無限に増大するのではなく、ある程度の短い期間が経過すれば一定値に収束するものとし、 $23 \text{ kg/m}^3$ <sup>21)</sup> と仮定する。安全側をとれば、表面濃度は初期から  $23 \text{ kg/m}^3$  であると仮定してよい。ここで、腐食発生臨界量としては、実用上は、軸方向ひびわれ発生時に対応するものとして  $2 \cdot 2 \cdot 1$  に述べた  $1.2 \text{ kg/m}^3$  を用い、寿命として 30 年を与える。見掛けの拡散係数  $D$  が水セメント比 ( $W/C$ ), 単位セメント ( $C$ ), 設計要因 ( $f_d$ ), 施工要因 ( $f_c$ ) および維持管理要因 ( $f_m$ ) などの関数  $f(W/C, C, f_d, f_c, f_m)$  で表現できるものとし、寿命として 30 年を与えれば、次式のように変形できる<sup>2)</sup>。

$$x^2 = 8.51 \cdot 10^9 \cdot f(W/C, C, f_d, f_c, f_m) \dots\dots\dots (2)$$

見掛けの拡散係数について普通ポルトランドセメントが用いられるものとし、その最も基本的な要因に着目し、

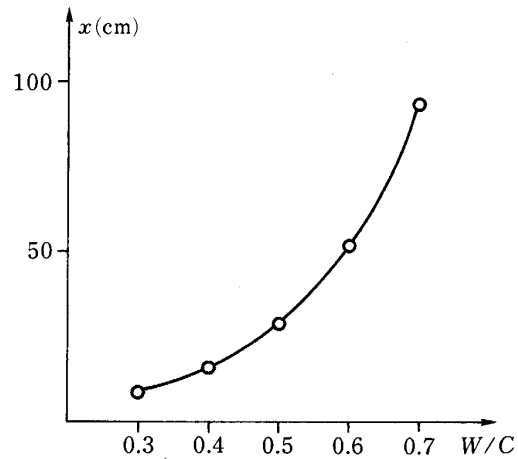


図 7 寿命 30 年において要求される水セメント比とかぶりの関係

簡略に  $W/C$  のみの指数関数

$$f = \exp(11.5(W/C) - 21.85)$$

として表現すれば、

$$x^2 = 8.51 \cdot 10^9 \cdot \exp(11.5(W/C) - 21.85) \dots\dots (3)$$

が得られ (図 7), 例えば  $W/C = 0.30$  でかぶり  $x$  は約 9 cm となる。この値が対象部材にとって大きすぎるようであれば、 $W/C$ , セメントの種類等の配合条件の変更あるいは 5 で紹介する第 2 種防食法の適用を検討しなければならない。式 (2), (3) では、見掛けの拡散係数のばらつきが表現されていないが、当面は割増し係数によって対応する簡便法が現実的であろう。

ここでは、かなり safety 側での、塩害を対象とした耐久性設計に対する基本的手法を示したにすぎない。手法としても最も簡便な表面濃度一定とした場合のみを例として示している。今後は、表面濃度が変化する場合あるいは表面浸透量を仮定した場合について検討するとともに、各種要因のばらつきを含めて広範な実態調査を行ったうえで具体的な諸数値を設定し、これをもとに合理的な耐久性設計が確立されることが期待されている。

5. 塩害の防止対策

3 章の劣化機構から明らかなように、塩害の防止の基本は  $Cl^-$  をコンクリート中の鋼材の表面に近づけないことである。したがって、最も確実な塩害防止法は、 $Cl^-$  を含まない材料を用いて、環境条件を考慮し、ひびわれのない密実なコンクリートによって、適切なかぶりをとることである。しかし、現実上は、材料中に含まれる  $Cl^-$  を全く無くしたり、ひびわれを全く生じさせないことは困難であることも多い。しかも、これらの過度な要求は不合理である場合が多い。したがって、実際には許容値が定められている場合が多い。材料中の  $Cl^-$  量としては、 $1 \text{ m}^3$  のコンクリート中に含まれる量として、一般に次のような許容値が定められている。

表 1 耐久性から定まるコンクリートの最大の水セメント比 (%)

環境区分	施工条件	一般の現場施工の場合	工場製品または材料の選定および施工において、工場製品と同等以上の品質が保証される場合
(a) 海中 (b) 海上大気中 (c) 飛沫帯	中	50	50
	中	45	50
	帯	45	45

注：実績，研究成果等により確かめられたものについては，耐久性から定まる最大の水セメント比を，表の値に 5~10 程度を加えた値としてよい。

表 2 耐久性から定まるコンクリートの単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>)

環境区分	粗骨材の最大寸法	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	
		25 (mm)	40 (mm)
飛沫帯および海上大気中 海	中	330	300
	中	300	280

表 3 最小かぶり (C<sub>min</sub>) 算定の基本となる C<sub>0</sub> の値 (cm)

環境条件	部材	スラブ	はり	柱
一般の環境 腐食性環境 特に厳しい腐食性環境	スラブ	2.5	3.0	3.5
	はり	4.0	5.0	6.0
	柱	5.0	6.0	7.0

$C_{min} = \alpha \cdot C_0$   
 ここに， $C_{min}$ ：最小かぶり  
 $\alpha$ ：コンクリートの設計基準強度  $f'_{ck}$  に応じ，次の値とする。  
 $f'_{ck} \leq 180 \text{ kgf/cm}^2$  の場合  $\alpha = 1.2$   
 $180 \text{ kgf/cm}^2 < f'_{ck} < 350 \text{ kgf/cm}^2$  の場合  $\alpha = 1.0$   
 $350 \text{ kgf/cm}^2 \leq f'_{ck}$  の場合  $\alpha = 0.8$

(1) 一般の鉄筋コンクリートおよびポストテンション方式のプレストレストコンクリートの場合 0.60 kg/m<sup>3</sup>

(2) 耐久性が特に要求される鉄筋コンクリートやポストテンション方式のプレストレストコンクリートで，塩害や電食のおそれのある場合およびプレテンション方式によるプレストレストコンクリートの場合 0.30 kg/m<sup>3</sup>

そのほか，土木学会「コンクリート標準示方書」によれば，コンクリートの密実性として，海洋コンクリートの場合，水セメント比および単位セメント量が与えられており (表 1, 2 参照)，かぶりとしては環境条件に応じて表 3 のように与えられている。さらに，ひびわれ幅としては同様に表 4 のように与えられている。

以上は，コンクリート構造物における塩害防止上の基本であり，第 1 種防食法と呼ばれるものである。第 1 種防食法によってコンクリート構造物の設計施工が可能であれば塩害の防止の上ではほぼ問題ないと考えてよい。しかし，種々の制約条件からこれらの条件をすべては満足できない場合も多く，特にかぶりについては断面の増大により自重が過大に増加するなど困難な例が多い。そ

表 4 許容ひびわれ幅 (1) 鋼材の腐食に対する環境条件の区分

環境区分	環境条件
一般の環境	通常の屋外の場合，土中の場合等
腐食性環境	1. 一般の環境に比較し，乾湿の繰返しが多い場合および特に有害な物質を含む地下水位以下の土中の場合など鋼材の腐食に有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で海中や特に厳しい海洋環境にある場合等
特に厳しい腐食性環境	1. 鋼材の腐食に著しく有害な影響を与える場合等 2. 海洋コンクリート構造物で干満帯や飛沫帯にある場合および激しい潮風を受ける場合等

(2) 許容ひびわれ幅 (cm)

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件		
	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
異形鉄筋・普通丸鋼 P C 鋼材	0.005 c 0.004 c	0.004 c —	0.0035 c —

注) c: かぶり

のような場合にあつては，エポキシ樹脂塗装鉄筋，電気防食の使用など，いわゆる第 2 種防食法を用いる必要がある。第 2 種防食法については，日本コンクリート工学協会「海洋コンクリート構造物の防食指針 (案)」あるいは土木学会等から出版されている各種指針等を参照するとよい。塩化物イオンの制御の観点から，防食方法を分類した例を表 5<sup>25)</sup> に示す。

この中でも，エポキシ樹脂塗装鉄筋は，比較的防食効果が高いと期待されており，マクロセルも生じにくいと考えられる。一般に，エポキシ粉体塗料を用いて静電塗装された工場製品が用いられており，膜厚としては 200 ± 50 μm が標準とされている。施工時などに生じた塗膜の破れが腐食に与える影響については，まだ定量的に明確な評価が少なく<sup>26)</sup>，長期のコンクリートとの付着特性とともに今後さらに検討を要する課題であろう。エポキシ樹脂塗装鉄筋によるコンクリート部材の設計，施工に当たっては土木学会「エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 (案)」などによるとよい。

亜鉛めっき鉄筋は鉄筋表面の亜鉛めっき層による防食効果を期待するものであり，亜鉛そのものの腐食生成物は溶解度が高く，軸方向ひびわれは生じにくいと考えられている。亜鉛の犠牲陽極作用による電気防食的な効果についてはあまり期待されていない。一般にめっき付着量は 550 g/m<sup>2</sup> 以上とされている。飛沫帯などの厳しい腐食環境中においては高い防食効果をあまり期待できず，また他の鋼材との接触によるガルバニック腐食にも注意しなければならない。亜鉛めっき鉄筋によるコンクリート部材の設計，施工に当たっては土木学会「亜鉛めっき鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針 (案)」などによるとよい。

耐塩性鉄筋については，各社が種々の仕様のものを開発しており<sup>27)</sup>，その性能についても一様ではない。一

表 5 防食方法一覧

No.	分類	1種と2種の区別	項目	内容	備考
1	腐食性物質の環境からの除去	2	—	温・湿度制御 脱塩 <sup>*</sup> ・脱水	海洋環境や融氷剤使用に対しては困難
2	かぶりコンクリート中への浸入、浸透の抑制	1	密実性の増加	最大水セメント比の確保 最小セメント量の確保	防食上の大原則
			かぶりの増厚	最小かぶりの確保	
			ひびわれ幅	許容ひびわれ幅	
		2	コンクリート表面ライニング	合成樹脂材料によるライニング、塗装	補修用としても用いられる。補修できる箇所に用いるのが望ましい。
			樹脂含浸コンクリート	MMA、浸透性エポキシ、シランなどによる含浸	MMA については米国等における実績あり
			レジンコンクリート (REC) ポリマーセメントコンクリート (PCC) 内部シールコンクリート	不飽和ポリエステル、エポキシなどの REC SBR などの PCC ワックス・ビーズの使用	鉄筋、あるいはプレストレストコンクリートとしての実績は以外に少ない 捨て型枠としての試みあり
3	鋼材表面への到達の抑制	2	樹脂塗装鋼材	エポキシ樹脂塗装鉄筋	静電粉体塗装 200±50 μm
			めっき鋼材	亜鉛めっき鉄筋 その他	亜鉛の犠牲陽極効果も期待されるが？
4	防食性鋼材	2	耐塩性鉄筋		海洋環境や融氷剤使用に対しては厳しい
5	電位制御	2	電気防食	外部電源方式 流電陽極方式	一般に陰極防食が用いられる。補修用としても用いられる。
6	(防錆剤)	1	防錆剤	現在は亜硝酸系	海洋環境や融氷剤使用に対しては困難

\* コンクリート中から電気泳動的に Cl<sup>-</sup> を除去する試みもある

般には、海洋のような厳しい塩分雰囲気中での防食効果はそれほど大きくはないと考えられている。現在市販されている耐塩性鉄筋の性能についてはまだその評価が定まっておらず、それぞれで異なった性能を有しており、用い方に適切な配慮が必要である。なお、ステンレス鉄筋については、すでに英国などで実用化されているものの、費用的な点で敬遠されているのが実状である。

また、鉄筋コンクリート用防せい剤としては、現在亜硝酸カルシウム系にその主流が移りつつあり、海砂程度の少量の塩分に対しての効果が期待されている<sup>28)</sup>。

電気防食は、まだコンクリート構造物に対する応用の歴史は浅く、試験施工<sup>29)</sup> 段階ではあるものの、理論的には Cl<sup>-</sup> が臨界値以上存在していても腐食を停止することが可能であり、Cl<sup>-</sup> の無害化を図ることができる。基礎的な検討段階<sup>30)</sup> から、現場適用に対しての検討を早急に行うべき時期であると考えられる。

なお、そのほかでは、合成樹脂材料を用いた捨て型枠によるライニング等も現在試みられている。

### 6. 塩害における補修設計の考え方

塩害補修を開始しようとする時には、一般に構造物の余命が検討される場合が多い(図 8<sup>23)</sup> 参照)。この図より、補修対象構造物は次の 3 種類に分類することができる。

[1] 外観あるいはモニタリング等により腐食を生じてはいないと判断される場合(第 I 期)

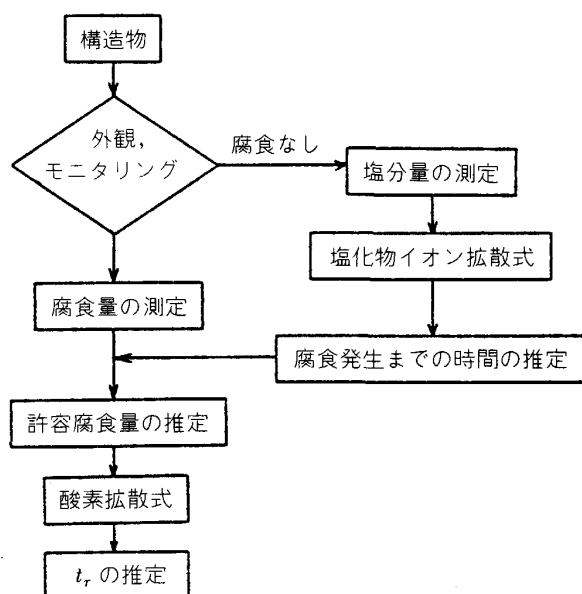


図 8 余命 (tr) 算定の概略フロー

まだ、Cl<sup>-</sup> が十分蓄積されてはいず、腐食が発生していない潜伏期にある。したがって、Cl<sup>-</sup> が許容値(たとえば、1.2 kg/m<sup>3</sup>)に達するまでの期間を Cl<sup>-</sup> の拡散から推定すればよい。なお、見掛けの拡散係数 D は、対象構造物における Cl<sup>-</sup> 量の測定結果から推定するのがよい<sup>31)</sup>。これが可能でない場合には、従来の実績より推定した値を用いる。

表 6 各劣化区分における補修の概念

	予防保全	補 修
潜 伏 期	Cl <sup>-</sup> の抑制	—
進 展 期	—	Cl <sup>-</sup> の減少, O <sub>2</sub> の抑制
加 速 期 劣 化 期	—	Cl <sup>-</sup> の減少, O <sub>2</sub> の抑制 (補強)

[2] モニタリング等により腐食が生じていることは明らかであるが、外観的には健全である場合(第Ⅱ期)

Cl<sup>-</sup> が蓄積され腐食は発生しているものの、まだ軸方向ひびわれ等の外観上の損傷は生じていない進展期にある。軸方向ひびわれが発生するのに要する期間は酸素の拡散から推定すればよいが、特に飛沫帯あるいは海上大気中のように酸素の供給が多いと考えられる場合には、既に述べたようにこの期間はきわめて短いものと考えられる。

[3] 腐食が進行し、外観的にも明らかに劣化している場合(第Ⅲ期)

対象構造物は加速期あるいは劣化期にあると考えられ、既述のように安全側で評価すればすでに寿命に達しており、補修が必要とされるが、その腐食量によっては補強も必要となる。

しかし、潜伏期にあっても、Cl<sup>-</sup> の拡散浸透を抑えることによって予防保全的な補修を行うことがあり、進展期にあっては酸素拡散の抑制あるいは Cl<sup>-</sup> の減少あるいは無害化による補修を行うことが望ましい。潜伏期にある場合には Cl<sup>-</sup> 量の増加を抑制し腐食の発生に至らせないことが要求される。既に進展期以降にある場合については、酸素の拡散浸透を抑制することによって腐食速度を減少させるか、あるいは Cl<sup>-</sup> を多量に含んだコンクリートのはつり等により Cl<sup>-</sup> 量を減少させ Cl<sup>-</sup> 量を腐食発生前の段階まで戻すかあるいは存在したとしても悪影響がないようなシステム例えば電気防食を用いることが要求される。したがって、塩害メカニズムからみた場合の、補修の最も基本的な概念を概略的にまとめると表 6<sup>32)</sup> のようである。

## 7. お わ り に

本来、耐久性設計には、対象構造物が要求される期間、劣化メカニズムから想定される限界状態に至らないことを、ある信頼性を持って保証することが要求される。また、補修の要否は、対象構造物の劣化度言い替えば健全度を評価し、同時にその要求機能を考慮して判断されるべきであり、要求される補修方法は劣化段階によって異なるものと考えられる。したがって、塩害あるいはアルカリ骨材反応におけるコンクリート構造物の劣化過程を明確に把握し定義することは耐久性設計、補修設計の確立に当たってきわめて重要な作業である。

補修には現在パッチング、ライニング等のコンクリート表面処理工法<sup>33)</sup>が中心として用いられており、加えて電気防食等も試み始められている。このような対応策はあるものの、コンクリート構造物に塩害やアルカリ骨材反応による損傷が生じることは決して好ましいことではない。このため、設計段階で事前に十分に配慮しようとする思想から生まれたのが耐久性設計であり、その試案も提案されつつある<sup>1)34)</sup>。しかし、十分な配慮なくして設計された場合、維持管理計画の中で補修設計の検討が求められる場合、あるいは技術の限界から損傷が生じてしまったような場合には、やはり補修が必要となる。

ここでは塩害の発生機構とそれに基づく耐久性設計と補修設計の考え方の基本を紹介した。これらは、劣化機構から統一された思想で語ることが可能である。しかし、実際のコンクリート構造物の損傷にあっては、塩害のみが生じるとは限らない。中性化、アルカリ骨材反応、凍害など種々の劣化機構との複合効果についてはまだまだ統一した見解が示されていないのが現状であろう<sup>35)36)</sup>。これらの複合劣化を含めて、今後の展開が期待されることである。

## 文 献

- 1) 例えば、(財)国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術(1986)[技報堂出版]
- 2) 宮川豊章: コンクリート構造物の損傷評価と補修(1989), p. 33 [日本材料学会]
- 3) CEB Task Group Durability: Durability of Concrete Structures (1982) [CEB]
- 4) B. ERLIN and G. J. VERBECK: Corrosion of Metals in Concrete (1975), p. 39 [ACI]
- 5) 大即信明, 横井聰之, 下沢 治: 土木学会論文報告集(1985) 360/V-3, p. 111
- 6) 宮川豊章: 京都大学博士論文, Early Chloride Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete (1985)
- 7) R. F. STRATFULL: HRR (1973) 433, p. 1
- 8) C. E. STEWART: ACI Journal, 72 (1975), p. 685
- 9) T. C. POWERS, L. E. COPELAND, J. C. HAYES and H. M. MANN: ACI Journal, 51 (1954), p. 285
- 10) J. M. ALDRED: Proc. 5th APCCC, Melbourne (1987), Session 17, p. 8
- 11) 木内 治, 宮川豊章, 岡田 清: 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, 38 (1983), p. 265
- 12) 岡田 清, 小柳 治, 宮川豊章: 土木学会論文報告集, (1979) 281, p. 75
- 13) 岡田 清, 宮川豊章: セメント技術年報, 33 (1979), p. 494
- 14) H. P. J. TAYLOR: Structural Engineer, 56A (1978) 3, p. 69
- 15) V. NOVOKSHCHENOV: Concrete International, 11 (1988) 9, p. 60
- 16) FIP: Corrosion of Steel, Report on Prestressing Steel (1978) [FIP]
- 17) 宮川豊章, 小林和夫, 藤井 学: コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集(1988), p. 17 [日本コンクリート工学協会]
- 18) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 九富 理: コンクリート工学年次講演論文集, 7 (1985), p. 113
- 19) 大即信明, 森 好生, 下沢 治: セメント・コンクリート(1982) 421, p. 30



- 20) 片脇清士, 山内幸裕: 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, **37** (1982), p. 269
- 21) 武若耕司, 松本 進: 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, **41** (1986), p. 569
- 22) 小林一輔, 出頭圭三: コンクリート工学, **24** (1986) 12, p. 91
- 23) 小林和夫, 宮川豊章, 久米生泰: 土木学会論文集 (1988) 390/V-8, p. 151
- 24) 例えば, ジョーンズ: 材料科学入門 II 構造と熱力学 (永宮健夫監訳) (1970), p. 77 [岩波書店]
- 25) 宮川豊章: 最新コンクリート工学 (岡田清編) (1986), p. 241 [国民科学社]
- 26) 武若耕司: コンクリート工学年次講演会論文集, **7** (1985), p. 105
- 27) 小門 武: 関西地区における海洋コンクリート構造物実験フィールドの開設について (海洋コンクリート構造物WG編) (1988), p. 54 [若手コンクリート研究会]
- 28) 日本コンクリート工学協会: 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案) (1990) [日本コンクリート工学協会]
- 29) 川又 清, 黒川 充, 片脇清士: 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, **43** (1988), p. 270
- 30) 本田 哲, 宮川豊章, 岡田 清: 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, **36** (1981), p. 171
- 31) 横田 優, 浮田和明, 重松俊一, 藤枝正夫: コンクリート工学年次論文報告集, **9** (1987) 1, p. 443
- 32) 宮川豊章, 小林和夫, 藤井 学: 鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関するシンポジウム論文集 (1989), p. 15 [日本コンクリート工学協会]
- 33) 日本コンクリート工学協会: 鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術-技術の現状-(1989) [日本コンクリート工学協会]
- 34) 土木学会: コンクリート構造物の耐久設計指針 (試案), コンクリート・ライブラリー No. 65 (1988) [土木学会]
- 35) 宮川豊章: 最近のコンクリート技術と話題 (1989), p. 64 [日本材料学会関西支部]
- 36) 川村満紀, 市瀬 誠, 寺野宣成: 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, **44** (1989), p. 600