

前田建設工業(株) 正会員 出頭 圭三
同 上 正会員 佐藤 文則

1. まえがき

コンクリート構造物の劣化の進行は一般に図-1のように表されている。ここで、AB間は鉄筋の腐食が開始するまでの期間、B〜は鉄筋腐食の進行期間である。コンクリート構造物の耐久性設計では、寿命をABの期間と考えることが多い。しかし、各種劣化要因の影響は定性的に評価されることが多く、定量的な評価はあまりなされていない。このことが耐久性設計をおこなう際の大きな障害となっている。本報告は既往の文献を参考に、コンクリートの品質(特に水セメント比)やひびわれ、かぶりが長期の耐久性(50~100年程度)に及ぼす影響を定量的な視点から検討したものである。

2. 水セメント比の影響

コンクリート中への塩化物イオンの浸透速度は一般に拡散係数 D_c で評価されている。 D_c の値は、武若の研究によると普通セメントを使用したコンクリートの場合 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ の範囲で広くばらついている(図-2)。¹⁾この原因は、海中・干満帯、飛沫帯、海岸など異なる浸透メカニズムでの塩分浸透を全て拡散現象として評価しているためと考えられる。しかしここで重要なのは、拡散係数の値がばらついていることではなく、大きい場合で約 $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ($W/C=0.70$)、小さい場合でも約 $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ($W/C=0.30$)であることである。図-3は表面塩化物イオン量を1%とした場合の塩化物イオンの浸透状況を拡散係数を1オーダーずつ変えて示したものである。鉄筋腐食が生じる限界の塩化物イオン量を 1.2 kg/m^3 とすると、鉄筋腐食が開始するまでの期間はおおよそ表-1のように計算される。この結果によれば、表面塩化物イオン濃度が1%程度になる厳しい海洋環境の下では、かぶりが5cm程度の場合、腐食開始までの期間は10年以下である。水セメント比が著しく小さく、かぶりが10cmもある場合にこの期間はやっと50年程度となる。すなわち、コンクリート構造物の寿命を塩化物イオンの浸透から評価する場合には、かぶりが5cm程度の一般的な構造物の場合水セメント比が変わっても寿命はさほど変化せず、それほど重要な影響因子ではないといえる。

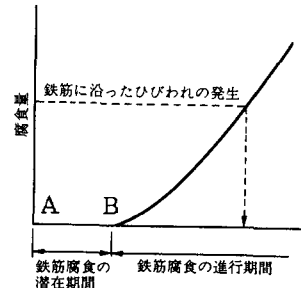


図-1 鉄筋腐食進行の概念図

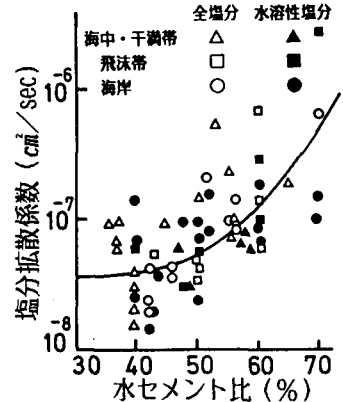


図-2 塩化物イオンの拡散係数

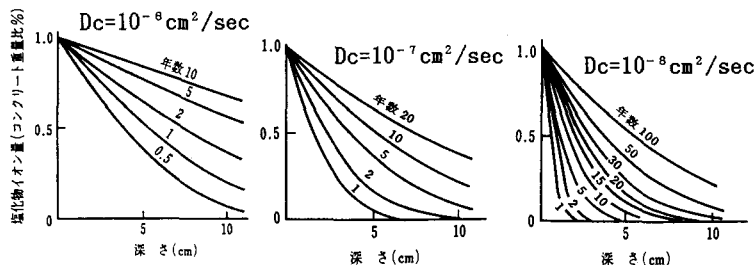


図-3 塩化物イオンの浸透

表-1 腐食開始までの期間

かぶり (cm)	拡散係数 D_c (cm^2/s)		
	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
2	<1年	<1年	1.5年
3	<1年	<1年	4年
5	<1年	1年	10年
8	<1年	2.5年	35年
10	<1年	5年	50年

3. ひびわれとかぶりの影響

ひびわれやかぶりの影響に関する最近の文献から参考となる部分を抜粋すると以下のようなものである。

①塩水噴霧試験3カ月の結果によると、水セメント比が50%以下ではひびわれ部（ひびわれ幅0.02~0.03mm）からの塩分の浸透が多いが70%では差がない。²⁾ この結果は2. で述べたコンクリートの塩分浸透の速さを裏付けるもので試験期間が数カ月長くなれば水セメント比50%の場合も差がなくなるものと推測される。

②水セメント比65%のコンクリートを海洋環境に2年間暴露した結果では、ひびわれがあると腐食はひびわれ位置からはじまっている（ひびわれ幅0.2~0.3mmおよび0.6~0.7mm）。腐食減量は、かぶりが30mmの場合にはひびわれの有無によりかなり差があるが、15mmの場合にはほとんど差がない。また、かぶりの大きい方（30mm）が小さい方（15mm）より腐食減量は小さい。³⁾ 暴露期間が長くなり5年程度になれば、30mmと15mmのかぶり差は鉄筋の腐食に対して有意ではなくなるものと推測される。

③水セメント比40, 50, 60%のコンクリートを海洋飛沫帯に5年間暴露した結果では、ひびわれがある場合でもかぶりが大きい方（30mmと20mm）が腐食面積率は小さい（ひびわれ幅0.2~0.3mm）。⁴⁾ ただし、水セメント比の影響はさほど大きくない。

④水セメント比が44~52%で暴露期間が20年の場合、かぶりが小さいとひびわれの影響は小さく、かぶり2cmではひびわれの有無、幅に関係なく一様に腐食する。かぶりが3および4cmと大きくなると次第に腐食減量が小さくなっている。⁵⁾

⑤水セメント比55%前後暴露期間が20年の場合、かぶり7cm以下では鉄筋の腐食面積率の違いは小さい。⁶⁾ これらをまとめると

- ・腐食の発生はひびわれがある方が早い。しかし、暴露期間が長くなるとひびわれの有無は腐食量とあまり関係がなくなる。
- ・かぶりは腐食量に影響を与える。かぶりが大きいほど腐食量は小さくなる。ひびわれがあってもかぶりの大きい方が腐食量は少ない。しかしながら暴露期間が20年の場合、かぶりが7cm以下では影響は小さい。

4. まとめ

コンクリート構造物の長期的な耐久性を塩化物イオンの浸透によって評価すると、水セメント比はあまり影響を与えない。特にかぶりが10cm未満の場合には水セメント比を小さくしても寿命はそれほど長くない。塩化物イオンの浸透に対しては表面塩化物イオン濃度の低減、かぶりの著しい増加などが有効であるといえる。同様に、ひびわれがある場合にはひびわれを経由して塩化物イオンが鉄筋にまで容易に達するため鉄筋周囲の塩化物イオン濃度が上昇し、鉄筋は早期に腐食し始める。しかし、通常のかぶりの範囲内（7~8cm程度）のコンクリート構造物では、早晚健全なコンクリート部分を経由して塩化物イオンが鉄筋に達するため、ひびわれの影響は隠れてしまうことになる。ひびわれの有無による腐食開始時期の差はかぶりが数cmと小さい場合には海洋環境下で5~10年程度と推定される。

コンクリート構造物の寿命を予測して耐久性設計を精度よく行うためには、コンクリート構造物の寿命を塩化物イオンの浸透だけではなく、浸透後の腐食の進行（図-1のB以降）を考慮して推定する必要がある。そうしなければ、厳しい海洋環境下のコンクリート構造物の耐久性設計は不可能となる。腐食速度まで考慮した場合にはコンクリートの品質が寿命に対してもっと有効に働くと考えられる。

参考文献

1)武若：土木学会第43回年次学術講演会、1988、pp. 36~37

2)橋内ほか：土木学会第47回年次学術講演会、1992、pp. 392~393

3)天沼ほか：コンクリート工学年次論文報告集、13-1, 1991、pp. 551~556

4)星野ほか：コンクリート工学年次論文報告集、11-1, 1989、pp. 621~626

5)太田ほか：土木学会第43回年次学術講演会、1988、pp. 284~285

6)福手ほか：土木学会論文集、No. 442/IV-16, 1992. 2, pp. 43~52