

## 塩害環境下でのコンクリート構造物の寿命予測に及ぼす要因の数値計算による評価

太平洋セメント(株) 正会員 ○山田 一夫  
 太平洋セメント(株) Hassan Zibara  
 太平洋セメント(株) 正会員 細川 佳史  
 太平洋セメント(株) 正会員 平尾 宙

## 1. 目的

鉄筋コンクリート構造物の塩害環境下における寿命予測は重要な課題である。このため、塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)浸透とそれに影響する要因について多くの研究がなされ、既存構造物の余寿命予測や新設構造物の寿命予測のために種々の Cl<sup>-</sup>浸透モデルが開発されてきている。種々の要因が Cl<sup>-</sup>浸透シミュレーションに反映されているが、これらの影響度を比較検討している例は限られている。要因ごとの影響度の理解は寿命予測の精度改善でも重要である。しかし、多くの要因を実験的に検討するには多大な労力を要する。そこで、本研究では、ある寿命予測モデルを用い各種要因の変化の影響度について数値解析により比較検討した。

## 2. 計算条件

本研究の目的から多くの要因を考慮できるモデル<sup>1)</sup>を用いた。このモデルでは Cl<sup>-</sup>浸透を単純拡散ではなく、他の浸透機構と浸透に影響する複数の要因、すなわち Cl<sup>-</sup>拡散係数(D)とその経時的減少、表面 Cl<sup>-</sup>量(C<sub>s</sub>)の蓄積、Langmuir 型の非線形 Cl<sup>-</sup>固定化曲線、温度による D の変化などを考慮できる。本研究で考慮した Cl<sup>-</sup>浸透に関する要因は、D、かぶり(c)、非線形 Cl<sup>-</sup>固定化、初期 Cl<sup>-</sup>含有量(C<sub>i</sub>)、表面 Cl<sup>-</sup>濃度(C<sub>s</sub>)および発錆 Cl<sup>-</sup>限界濃度(C<sub>th</sub>)、D の経時的減少である。なお、寿命は鉄筋腐食開始までの時間とした。

## 3. 拡散係数とかぶりの影響

D と c の影響を調べるため以下の条件を設定した。C<sub>s</sub>=17.6 kg/m<sup>3</sup> (コンクリート単位体積当りの Cl<sup>-</sup>質量)、C<sub>th</sub>=0.88 kg/m<sup>3</sup>、部材厚(L)=200 mm、Langmuir 型の Cl<sup>-</sup>固定化曲線:  $C_b = \alpha \cdot C_f / (1 + \beta \cdot C_f)$  (ここに、C<sub>b</sub>は固定 Cl<sup>-</sup>濃度(kg/m<sup>3</sup>)、C<sub>f</sub>は自由 Cl<sup>-</sup>濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $\alpha=5.036$ 、 $\beta=13.84$ : 普通ポルトランドセメント、水セメント比 50%の場合を想定)。D と c を変化させた計算結果を図-1 に示す。寿命は D に反比例し、c の二乗に比例する。文献<sup>2)</sup>によると D は測定方法により相当のばらつきを有する。D の不確実性が寿命予測に強く影響する。かぶり 80mm で D=1x10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s の場合、寿命は 60 年であるが、D が 1/2 となると寿命が 120 年となる。10 年単位の精度の寿命予測には D の値に誤差 10%以下の精度が必要である。

## 4. 塩化物イオン固定化の影響

寿命予測に及ぼす Cl<sup>-</sup>固定化の影響を調べるため、非線形の Cl<sup>-</sup>固定化曲線を考慮する場合と Cl<sup>-</sup>固定化を考慮しない場合について検討した。検討は以下の条件で行った。D=1x10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s、c=50 mm、L=200 mm、Langmuir 型固定化曲線(同前)とし、C<sub>s</sub> と C<sub>th</sub> を変化させた。

図-2 に異なる C<sub>s</sub> と C<sub>th</sub> における寿命予測に対する Cl<sup>-</sup>固定化の影響を示す。Cl<sup>-</sup>固定化を考慮するとすべての暴露条件で寿命は増加するが、Cl<sup>-</sup>固定化の効果は暴露条件 C<sub>s</sub> により異なり、より低い C<sub>th</sub> および C<sub>s</sub> でより顕著である。C<sub>s</sub>=13.2 kg/m<sup>3</sup>、C<sub>th</sub>=0.88 kg/m<sup>3</sup> の条件では、固定化の考慮の有無で寿命は各々 30 年と 12 年となる。定常状態の拡散試験や電気泳動試験では固定化を含まない D を評価している。本結果によると、固定化を反映しない試験結果を用いることは寿命予測に大きな誤差を与える。塩水浸せきにより求めた D にはセメントの Cl<sup>-</sup>固定化の影響が含まれ、予測モデルで Cl<sup>-</sup>固定化が無視されたとしても暗に固定化は反映されている。

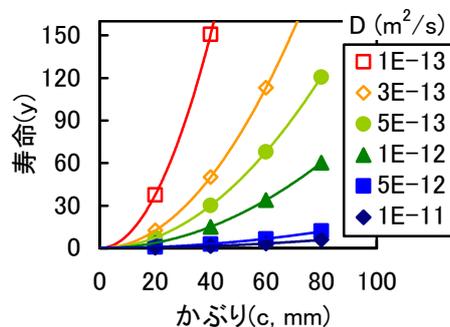


図-1 D とかぶりの寿命への影響 (C<sub>s</sub>=17.6 kg/m<sup>3</sup>, C<sub>th</sub>=0.88 kg/m<sup>3</sup>)

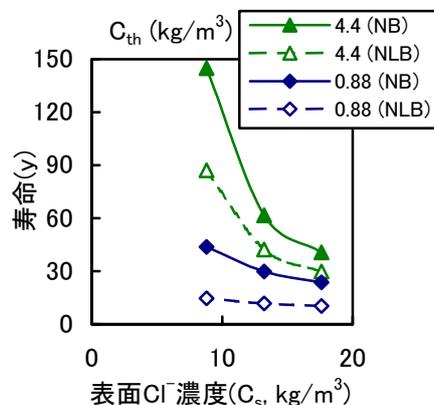


図-2 非線形固定化曲線を考慮した場合 (NLB) と考慮しない場合 (NB) の寿命予測 (D=10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s, c=50 mm)

キーワード 塩化物イオン、寿命予測、固定化、拡散係数、発錆限界、初期塩化物イオン量

連絡先 〒260-0822 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株)中央研究所セメント化学グループ TEL043-498-3907

## 5. 初期 Cl<sup>-</sup>含有量の影響

次に  $C_i$  の寿命への影響を検討する。最近、セメント中の Cl<sup>-</sup>規制値緩和の議論もあり、ここではコンクリート中の  $C_i$  がすべてセメントからもたらされると仮定し、セメントの Cl<sup>-</sup>含有量を  $C_i$  として表現した。Cl<sup>-</sup>浸透は単位セメント量  $350 \text{ kg/m}^3$  と仮定したコンクリートについて評価した。設定した  $C_i$  は、200 ppm (現行 JIS 規制値) および 350 ppm (国土交通省通達) である。その他の条件は以下とした。  $D=1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $L=100 \text{ mm}$ ,  $c=50 \text{ mm}$ , Langmuir 型固定化曲線(同前)とし、 $C_s$  と  $C_{th}$  を変化させた。図-3 に  $C_i$  が 200 ppm から 350 ppm に変化した場合の寿命減少割合を示す。検討範囲では寿命減少率は 4% 以下である。寿命の減少率は  $C_s$  が高い場合、すなわち厳しい塩害環境下で小さくなる。 $C_i$  の違いの影響は他の要因と比較すると限定的であり、重要度はより小さい。例えば、 $C_i$  の 200 ppm と 350 ppm の差による寿命の違いは数% であるが、Cl<sup>-</sup>固定化の考慮の有無は 100% 以上も影響する。土木学会コンクリート標準示方書(以下、示方書)では、飛沫帯では  $C_s=13 \text{ kg/m}^3$  および  $C_{th}=1.2 \text{ kg/m}^3$  の条件が示されている。この条件で、セメント中の塩素含有量が 200 ppm から 350 ppm に増加したことを考えると、本検討結果からは、寿命が 1.3% 減少することに対応する。示方書記載の方法で、 $C_i$  の違いが寿命に及ぼす影響を算定すると 2.0%( $W/C=0.50$ ,  $D=3.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )となる。

## 6. その他の因子

示方書では上記のように  $C_{th}$  と  $C_s$  が記されているが、この値もばらつきを含んだものと考えられる。 $D=10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $L=100 \text{ mm}$ ,  $c=50 \text{ mm}$ , Langmuir 型固定化曲線(同前),  $C_s=13.2 \text{ kg/m}^3$  の条件で、 $C_{th}$  を  $0.88 \text{ kg/m}^3$  と  $1.76 \text{ kg/m}^3$  に変化させると、各々寿命は 29 年と 36 年となる。逆に  $C_{th}=1.76 \text{ kg/m}^3$  とし、 $C_s$  を  $8.8 \text{ kg/m}^3$  と  $13.2 \text{ kg/m}^3$  に変化させると、各々寿命は 59 年と 37 年となる。どちらも数 10% の違いとなり、高精度の寿命予測には  $C_{th}$  や  $C_s$  を高精度で求めることが重要である。

また、 $D$  には時間依存性があり、例えば次式、 $D_t = D_{28}(t_{28}/t)^m + D_{ult}(1 - (t_{28}/t)^m)$  ( $D_t$ : 材齢  $t$  における拡散係数,  $D_{28}$ : 材齢 28 日  $t_{28}$  における拡散係数,  $D_{ult}$ : 長期材齢における拡散係数の収束値,  $m$ : 拡散係数の収束速度に関する定数)により表現される。ある研究<sup>3)</sup>によると  $m$  は水セメント比の関数とされており、別の研究<sup>4)</sup>では配合中のセメント系材料の関数としている。文献によると  $m$  の値は 0.1 から 1.2 程度である。また、 $D_t$  は時間の経過とともに減少し続けるものではなく、一定値  $D_{ult}$  に収束するものと予想される。 $C_s=13.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_{th}=0.18 \text{ kg/m}^3$ ,  $D_{28}=5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  とし、 $c$ ,  $m$  および  $D_{ult}$  を変化させ計算した結果を図-10 に示す。 $m$  が大きい場合には、 $D_{ult}$  は寿命に対し大きな影響を与えることになり、セメント系材料の選定時に考慮が必要となる。 $m=0.7$  では、 $D_{ult}$  を  $3 \times 10^{-13}$  から  $1 \times 10^{-13}$  にすることで、かぶり  $c$  が 60mm の場合には、寿命が 59 年から 145 年に延びることになる。セメント系材料ごとに  $D_{ult}$  を正確に求めるには長期間の実験が必要である。さらに現状では  $D$  の経時低下を高精度で見積もることは難しく、今後の検討が必要である。

## 7. 結論

既存の Cl<sup>-</sup>浸透モデルを用いた数値計算によると、種々の要因の変動は寿命予測に異なる影響を与えることが分かった。セメント中の Cl<sup>-</sup>規制値の変更(200ppm→350ppm)程度の初期 Cl<sup>-</sup>含有量の違い影響(数%)を除くと、すべての他の要因は本検討範囲では重要な影響(数 10%~100%)を及ぼすと予想された。この結果から寿命予測に内在する危険性と不確実性および重要な要因の推定精度を改善する必要性を明らかにした。影響度と推定精度から考え、 $D$ ,  $D$  の時間依存性、および  $C_{th}$  について今後の検討が必要である。また、Cl<sup>-</sup>固定化についてもどのように考慮するか検討すべきである。

## 参考文献

- 1) A. Boddy, E. Bentz, M. Thomas, R. Hooton, An overview and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model, Cem. Con. Res, Vol. 29, pp. 827-837, 1999
- 2) A. Delagrave, J. Marchand, E. Samson, Prediction of diffusion coefficients in cement-based materials on the basis of migration experiments, Cem. Con. Res, Vol. 26, pp. 1831-1842, 1996
- 3) P. Mangat, B. Molloy, Prediction of long term chloride concentration in concrete, Materials and Structures, Vol. 27, pp. 338-346, 1994
- 4) M. Thomas, P. Bamforth, Modelling chloride diffusion in concrete; Effect of fly ash and slag, Cem. Con. Res., Vol. 29, pp. 487-495, 1999

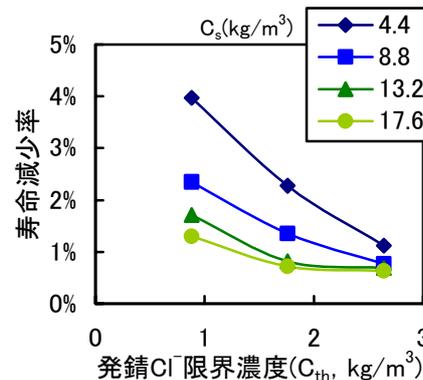


図-3  $C_i$  が 200 ppm から 350 ppm (セメント中の塩素含有率)に増加した場合における寿命予測値の減少率 ( $D=1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $c=50 \text{ mm}$ , 非線形固定化)

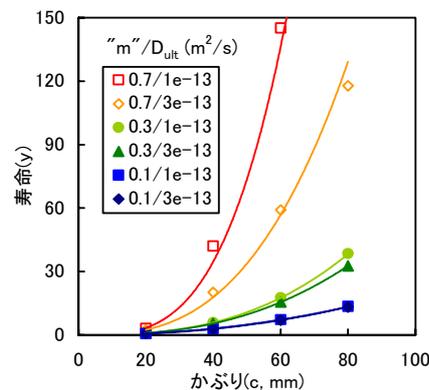


図-4 種々の  $D$  の材齢依存パラメータ  $m$  と  $D_{ult}$  とした場合における寿命予測 ( $C_s=13.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_{th}=0.18 \text{ kg/m}^3$ ,  $D_{28}=5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )