

コンクリート表層部の品質を考慮した塩害劣化の予測

香川大学
四国電力

学生会員
非会員

○古曳大哉
山口浩希

四国総合研究所
香川大学工学部

正会員
フェロー会員

中川裕之
松島 学

1. はじめに

近年、塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化が大きな社会問題となっている。塩害により劣化した構造物は構造性能や使用性に問題を生じ、供用を続けることが困難となる。塩害を受ける構造物を長期にわたって供用し続けるためには、塩害劣化の進行を適切に予測することが必要である。コンクリートはその表層部で品質が悪い部分が存在し、塩化物イオンの浸透が早くなる。そのため、かぶりの薄い構造物では品質の影響を受けて早期劣化が早まる。本研究では、表層のコンクリートの品質を考慮した劣化予測モデルを構築した。さらに、この予測モデルを実構造物の調査結果と比較することで、その妥当性を検証した。

2. 塩害劣化の進行過程と予測モデル

塩害劣化の進行過程を図1に示す。塩害劣化はその進行状況により、潜伏期、進展期、加速期、及び劣化期の4つの過程にわけて考えられる。塩害劣化の予測に重要なのは加速期までであり、本研究では加速期までの劣化予測モデルを構築した。

潜伏期は構造物の供用が開始され、コンクリート中に海洋から飛来した塩化物イオンが浸透する過程である。浸透した塩化物イオンは鉄筋近傍に蓄積され、これが腐食発生限界塩化物イオン濃度に達すると、鉄筋が腐食し始める。進展期は鉄筋の腐食が進行する過程である。鉄筋に生じた腐食生成物による内部膨張圧によってコンクリート内部にはひび割れが生じる。加速期は内部ひび割れが、コンクリート表面まで達し、鉄筋がより早く腐食する過程である。ひび割れから溶存酸素量の多い水が侵入し、直接鉄筋に供給されることで腐食速度が増大する。鉄筋の腐食量の増大が顕著となり、構造物の耐力や変形性能が低下する。

コンクリート中への塩化物イオンの浸透は、一般にFickの拡散方程式によって求められる。しかし、Fickの拡散方程式は、表層部の品質を考慮できない。表層部の品質が深さ方向に変化することを考慮するために、本研究では式(1)で表される差分法を用いることで、深さ方向の拡散係数の変化を表現した。式(1)で、 $C(x,t)$ は深さ $x(\text{cm})$ 、経過時間 $t(\text{年})$ での塩化物イオン濃度、 $D_c(x)$ は深さ $x(\text{cm})$ での拡散係数(cm^2/sec)である。

$$C(x,t+dt) = C(x,t) + \{C(x+dx,t) - 2C(x,t) + C(x-dx,t)\}D'_c(x) \cdot \frac{dt}{dx^2} \quad (1)$$

3. コンクリート表層部の品質評価

コンクリートは表面に近いほどその品質が悪いことが知られている。コンクリート表面は外気や日光に常時曝されており、内部の水分が蒸発し、空隙が生じ、密実性が低下する。空隙の増加によって塩化物イオンなどの劣化因子が侵入しやすくなるため、かぶりの浅い構造物では劣化の進行が早まる。実構造物から採取したコアの細孔径分布を図2に示す。縦軸の相対体積は空隙の量を表している。劣化因子の侵入経路となると考えられる $0.01 \sim 1\mu\text{m}$ 間の毛細管空隙の範囲を求積した量を品質の指標と考え、かぶり深さとの関係を求めた。毛細管空隙量とかぶり深さの関係を図3に示す。表面に近い $0\text{cm} \sim 3\text{cm}$ では空隙量が多くなっている。この関係をもとに、拡散係数の深さ方向の分布を考え、かぶりの浅い位置では表層部の品質を考慮し、拡散係数が大きく、かぶりの深い位置では最も空隙量が少ない深さ 2.5cm を基準とし一定となるような、図中に示す拡散モデルを採用した。

4. 予測モデルと実構造物の比較

予測モデルの妥当性を検証するため、実構造物と比較した。調査した構造物は、沿岸部の通路橋側壁である。写真を図4に示す。供用年数は調査時点で約41年である。海水飛沫を常に受ける位置にあり、塩害によって鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートがはく落している。かぶり厚さは 3.07cm と比較的浅い。この構造物から鉄筋やコンクリートコアを採取し、鉄筋の腐食量や塩化物イオン濃度を求めた。

劣化予測モデルによる予測は、塩化物イオンの浸透、鉄筋の腐食速度、及び腐食量である。塩化物イオンの経時変化の計算値を図5に示す。かぶり 3.07cm での塩化物イオン濃度の計算値を赤線、かぶりに鉄筋径を加えた鉄筋周囲での塩化物イオン濃度の計算値を青線、鉄筋周囲の塩化物イオン濃度の実測値を緑点で示す。塩化物イオンは供用開始からしばらくは大きく増加し、次第に収束する傾向がみられる。実測値は $2.0 \sim 5.0\text{kg}/\text{m}^3$ の範囲でばらついており、平均は $3.28\text{kg}/\text{m}^3$ である。鉄筋周囲での計算値は $3.23\text{kg}/\text{m}^3$ であり、ほぼ一致している。かぶり位置での計算値は $4.15\text{kg}/\text{m}^3$ であり、実測値より大きい。腐食

キーワード：塩害、細孔径分布、腐食量

発生は11.9年、ひび割れ発生は28.1年である。図6に腐食速度の経時変化を示す。腐食速度は腐食発生から増加し始め、ひび割れの発生とともに急激に増加している。これはひび割れ発生により腐食速度が3.7倍になるモデルとしたためである。図7に腐食量の平均の経時変化を示す。腐食量の実測値を緑点で示している。実測値は200～1000mg/cm²の範囲でばらついており、平均値は558.9mg/cm²である。腐食量の平均の計算値はひび割れ発生による腐食速度の増加を受けて急激に増加している。通路橋側壁の供用年数である41年での計算値は507.0mg/cm²であり、実測値の平均とおおむね一致している。

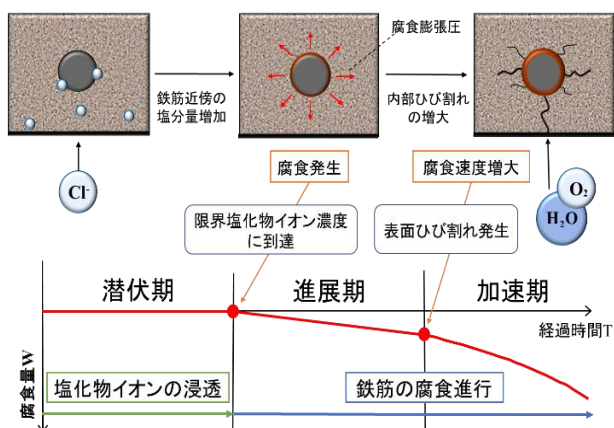


図1 塩害劣化の進行過程

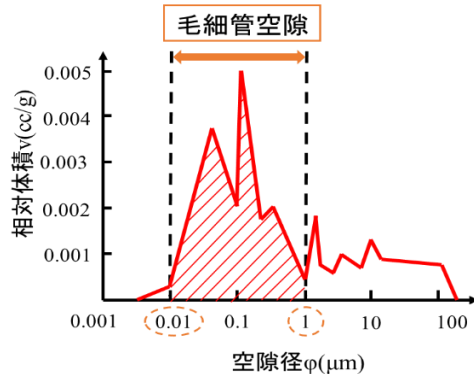


図2 細孔径分布

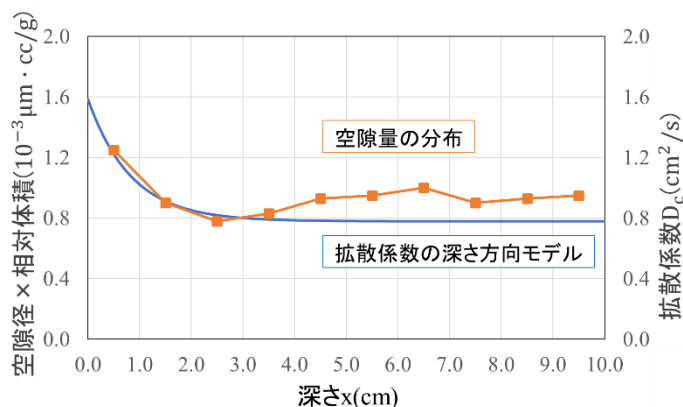


図3 空隙量と拡散係数の深さ方向の分布



図4 沿岸部通路橋側壁

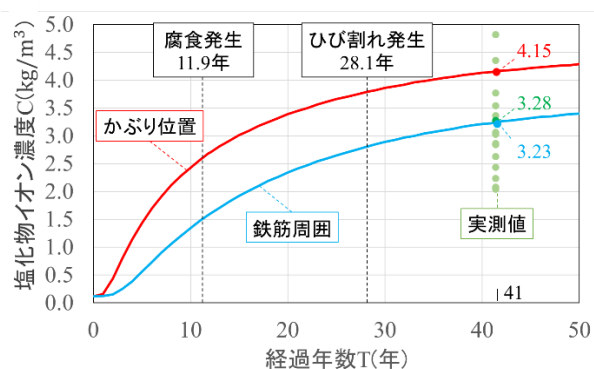


図5 塩化物イオン濃度の経時変化

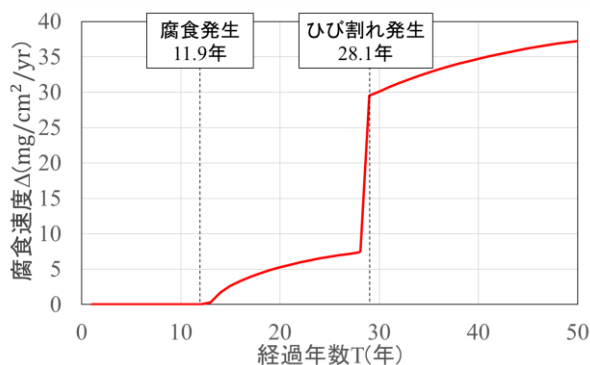


図6 腐食速度の経時変化

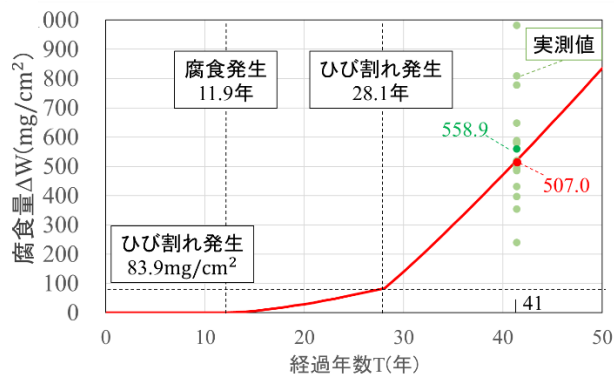


図7 腐食量の経時変化