

コンクリート構造物の劣化原因別劣化進行予測システムの構築

Development of a system for prediction of deteriorating progress of concrete structures

伊代田 岳 史*・魚 本 健 人**

Takeshi IYODA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

日本の経済成長も終わりを告げ、既設構造物をメンテナンスして使用することが必要不可欠となってきた。コンクリート構造物は様々な劣化原因により耐力低下するが、劣化レベルを定量的に把握し、いつ、どの構造物にメンテナンスを行うかを判定する必要がある。現在、劣化診断の多くは主に輪荷重等の物理的要因に着目しており、塩害等の化学的要因で検討している例はほとんどない。

そこで本研究では、劣化要因の中で化学的な要因である鉄筋腐食に注目し、劣化原因別に耐力計算をすることで劣化の進行を予測できるシステムを構築することを目的とした。

2. 劣化進行予測システム

コンクリート構造物の劣化は大きく分けてコンクリートの劣化と鉄筋の腐食が考えられる。コンクリートの劣化を起す劣化原因として考えられるものは、凍害、アルカリ骨材反応であり、鉄筋の腐食を原因とする劣化原因は塩害、中性化、また、コンクリートの劣化と鉄筋腐食が同時に起こる化学的腐食が考えられる。そこで本研究においては、鉄筋の腐食を発生させると考えられる塩害と中性化、化学的腐食の3つの原因を考え、それぞれについて劣化の進行を予測するシステムを構築した。

3. 塩害による劣化予測

3.1 塩害の劣化過程

従来から塩害による構造物の劣化進行過程は図1に示すモデルが一般的に用いられてきている¹⁾。

このモデルでは塩害による構造物の劣化進行過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4ステージに分けて説明す

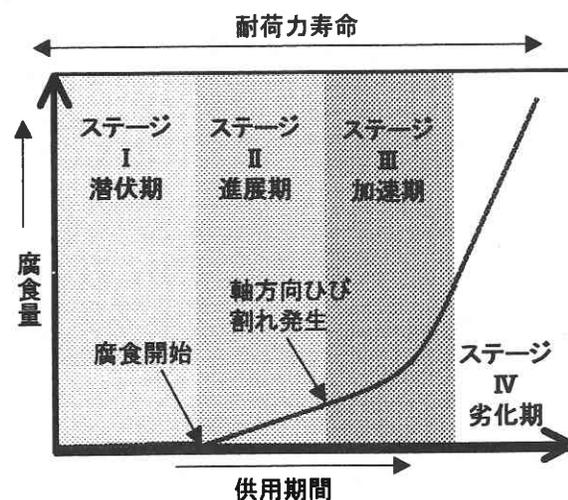


図1 塩害劣化進行過程

るものである。ステージIは、構造物の供用開始を起点としてコンクリート中の鉄筋が腐食するまでの期間を指す。つまり外部環境から鉄筋腐食を誘発する因子がコンクリート中に浸透し、その浸透量が鉄筋周辺で許容量を超えるまでの期間である。ステージIIは鉄筋の腐食開始を起点としてコンクリートに腐食ひび割れが発生するまでの期間を指す。鉄筋が腐食することで生じる腐食生成物が、膨張圧によりかぶりコンクリートにひび割れを生じさせる期間である。その後のステージIII、IVではコンクリート構造物を供用する上で、腐食によるひび割れの拡大による明らかな問題が生じるまでの期間である。ここでは鉄筋の腐食量、腐食速度がひび割れの影響を受けることになる。本研究ではこのようなモデルを解析的に検討して統一的に劣化予測を行う。

3.2 解析手法

まず、ステージIの外部環境からの腐食誘発因子(酸素、水、塩化物イオン)の浸透について考える。本研究におい

*東京大学生産技術研究所 第5部

**東京大学国際・産学共同研究センター

研 究 速 報

では簡易に考えるために塩化物イオンのみに注目した。塩化物イオンの浸透は丸屋らの拡散方程式²⁾(1)を適用することで塩化物イオンの浸透深さを経時的に求めた。

$$C(x, t) = S\sqrt{t} \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) - \frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right\} \dots\dots (1)$$

ここに、

- S : 表面塩分量係数, t : 供用期間 (days)
- D : 塩分の見かけの拡散係数 (cm²/day)
- x : コンクリート表面からの距離 (cm)

また、かぶり位置(鉄筋下面)に蓄積される塩分量と腐食量の関係については、森永の練り混ぜ水に含まれるNaCl量から鉄筋腐食速度を予測できる腐食速度推定式³⁾を適用した。本研究では、浸透してきた塩化物イオン量が鉄筋下面に到達した時に森永の提案している鉄筋腐食速度になると仮定した。そこで、ある濃度の塩化物イオンが到達したときの速度qを持つものとした。

次にステージIIにおける腐食開始と腐食ひび割れの発生の過程を考える。腐食開始時期に関しては、かぶり位置においてある濃度C1(コンクリート重量で0.05 wt%)の塩化物イオンが到達した時点と仮定し、 Δt_1 後に濃度C2がかぶり位置に到達するとして、腐食過程を経時的にモデル化した。ここで、 Δt_1 間は濃度C1が作用すると考えて腐食量 $\Delta Q = q \cdot \Delta t_1$ を算出し、t years後の総腐食量Qをその積分値として算出した。

一方、腐食ひび割れの発生時期に関しては、森永のひび割れ発生時の腐食量を求める式(2)³⁾により腐食ひび割れが発生するための総腐食量を算出し、先ほど求めた総腐食量Qが、ひび割れ発生時の腐食量 Q_{cr} に達したときにひび割れが発生すると考えて腐食ひび割れ発生時期を算出した。

$$Q_{cr} = q \cdot t = K \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^\beta r_1 \dots\dots (2)$$

ここに、 Q_{cr} : ひび割れ発生時の腐食量

r_1 : 内筒(鉄筋)半径

r_2 : 外筒(シリンダー)半径

K, β : コンクリートでは K=1.204,

$\beta=0.85$

腐食ひび割れが軸方向に発生した後の腐食速度に関しては対象とするコンクリート構造物が腐食性環境下にあることから、濱田らの文献⁴⁾より 10.2 mg/cm²/year で一定とし

た。ステージIII, IVでは構造物の供用性を確かめるために耐荷性、たわみ性の評価をする。腐食による生成物の膨張と鉄筋径の減少を考え、鉄筋径の減少から耐荷力がどのような経時変化をするかを計算した。この耐荷力の低下に関してはJCIの「コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書」で提案されている曲げ引張破壊耐力¹⁾を算定する以下の式により算出する。

$$Mu_{(corr)} = As_{(corr)} f_{y(corr)} d \left(1 - \frac{0.60 p_{(corr)} f_{y(corr)}}{f_c'} \right) \dots\dots (3)$$

ここに、

$Mu_{(corr)}$: 腐食した部材の曲げ引張破壊耐力

$As_{(corr)}$: 腐食した鉄筋の断面積

$f_{y(corr)}$: 腐食した鉄筋の降伏強度

d : 有効高さ (健全時と同様に扱う)

$p_{(corr)}$: 腐食した場合の鉄筋比 ($p_{(corr)} = As_{(corr)}/bd$)

f_c' : コンクリートの圧縮強度 (健全時と同様に扱う)

これらから構造物の環境条件、構造条件、材料条件を基に塩害環境下における劣化予測を一連の流れとして捉え、劣化予測モデルとして解析手法として構築した。

4. 中性化による劣化予測

4.1 中性化の劣化の進行過程

次に3.と同様に中性化の劣化進行過程モデルを図2のように想定する⁵⁾。これを用いてCO₂のコンクリート内への浸透から鉄筋腐食の発生、構造耐力低下までを経時的に求めた。ステージIはCO₂の浸透時期であり鉄筋に到達し腐食が開始するまでの時期を考える。ステージIIでは、鉄筋の腐食が開始してから腐食によるひび割れの発生を考える。ステージIIIでは、腐食ひび割れ発生から構造物の耐荷

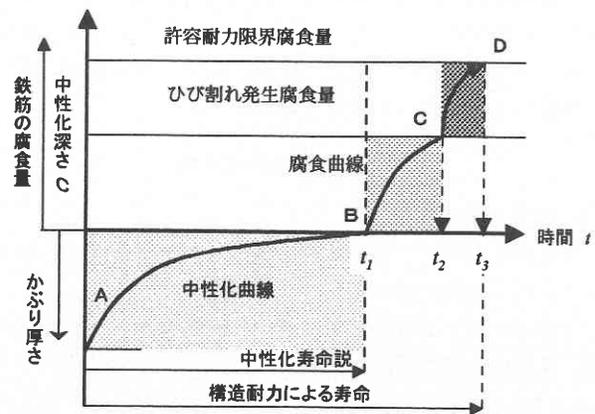


図2 中性化劣化進行過程

力が低下していく過程である。

4.2 解析手法

ステージ I における CO₂ ガスの浸透では、中性化深さの予測式である (3) 式の魚本・高田式⁶⁾を用いて鉄筋下面が中性化するまでの日数を推定した。

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) \cdot \exp(8.748 - 2563/T) \cdot (2.39WC^2 + 44.6WC - 3980) \times 10^{-4} \cdot \sqrt{Ct} \quad \dots (4)$$

ここに、

- X : 中性化深さ (mm), C : 炭酸ガス濃度 (%)
- T : 環境温度 (K), WC : 水セメント比 (%)
- t : 暴露期間 (週)

鉄筋下面が中性化領域になったときステージ II に移行し鉄筋の腐食が開始すると考えた。ステージ II での中性化による鉄筋腐食の進行は、森永の中性化領域での鉄筋腐食速度の推定式²⁾を利用して算出した。この推定式では不働態皮膜破壊後の腐食進行要因である温度、湿度、酸素の濃度の影響を考慮している。推定式により算出された腐食速度を用いて塩害の方法と同様に単位時間あたりの腐食量を算出し、総腐食量を求めた。総腐食量が森永の提案する腐食ひび割れ発生に必要な腐食量の算定式である (2) 式に達したときにひび割れが発生すると考えて腐食ひび割れ発生時期の算出を行った。ステージ III では腐食ひび割れ発生後の構造物耐力の算定を行った。腐食ひび割れ発生後はひび割れ部からの腐食因子の供給が過大になることから腐食速度を 10.2 mg/cm²/year で一定⁴⁾とした。耐力計算に関しては塩害と同様に計算した。

5 化学的腐食による劣化予測

5.1 化学的腐食の劣化の進行過程

化学的腐食環境下にあるコンクリート構造物は、腐食物質に接触する表面や局部から急速に劣化が進行するという厳しい環境下にあることが多い。コンクリート構造物の性能に与える影響としては、表面劣化による美観の低下やかぶりの損傷、鉄筋腐食、コンクリートの強度低下、さらに部材の耐荷力の低下があげられる。つまり、化学的腐食はかぶり等の損傷と鉄筋の腐食の両者を考える必要がある。

劣化の過程は、部材の耐荷力が低下する過程から以下のように考える⁷⁾。

状態 I : コンクリート中への腐食物質の浸透及び一部に表面劣化の発生 (潜伏期)

状態 II : 相当な部分の表面劣化の発生とかぶりコンクリートの劣化 (進展期)

状態 III : 著しい表面劣化、ひび割れの発生による急速な劣化の進行 (加速期)

状態 IV : かぶりコンクリートの欠損、鉄筋露出と腐食が生じ、耐荷力に影響 (劣化期)

5.2 解析手法

状態 I における腐食物質の侵食については未解明な部分が多いため、ある一定値を仮定し全断面において、毎年同様に浸食していくこととした。状態 II における鉄筋の腐食過程においては、かぶりの厚さが経時的に変化することを考慮し、腐食ひび割れ発生時の腐食量を算出する式 (4.b) が経時的に変化することに注意した。そのほかの条件は塩害腐食解析と同様とした。この仮定で耐力低下の計算を行った。

6. 解析結果

解析には図 3 に示すような梁の断面を考えた。断面は 40 × 80 cm でかぶり 5 cm、主鉄筋として D 13 を 4 本配筋している。この断面に対して個別に考えた塩害、中性化、化学的腐食の 3 種類の劣化を考え、耐力比を計算した結果

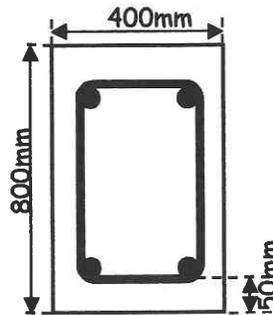


図 3 仮想断面図

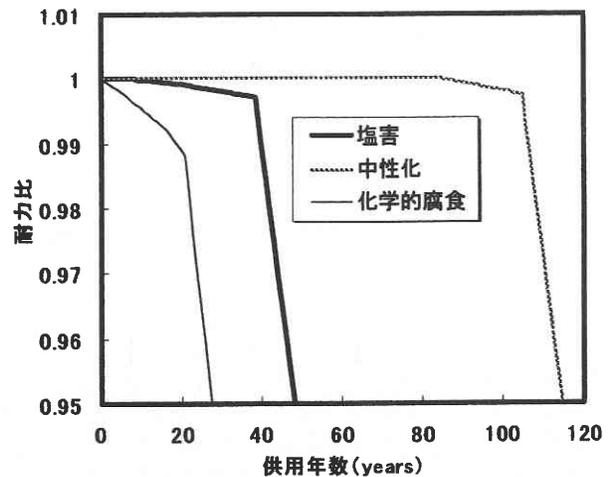


図 4 解析結果

研 究 速 報

を図4に示す。図より化学的腐食が最も早期に耐力低下することがわかる。つまり構造物には発生しやすい劣化原因が存在することが分かる。このことから発生しやすい劣化原因に対して注目して点検する必要があるといえる。また、図よりひび割れが発生した後の耐力は急激に低下していることがわかる。つまり、腐食が開始すると少量の耐力低下を起こすが、さほど大きく影響しないのに対し、ひび割れ発生後の耐力低下は著しいことがわかる。

7. ま と め

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 劣化原因別（塩害、中性化、化学的腐食）に劣化進行の予測を行えるシステムを構築した。
- (2) その結果、先行する劣化原因を推定することができた。これを利用することで複合劣化に対しても対応できるのではないかと考える。

(1999年8月9日受理)

参 考 文 献

- 1) JCI：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，1998.10.
- 2) 丸屋剛，宇治公隆：コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.597-602，1989.
- 3) 森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学博士論文.
- 4) 濱田宏，丸山久一，下村匠，青山敏幸：腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.811-816，1997.
- 5) 岸谷孝一，西澤紀昭他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化 技報堂出版.
- 6) 魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす影響，土木学会論文集，No.451/V-17，pp.119-128，1992.8.
- 7) 土木学会：コンクリートライブラリー81 コンクリート構造物の維持管理指針（案），1995.10.