

## 塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食速度

香川大学大学院

学生会員 ○黒田 裕伸

(株)四国総合研究所

正会員 横田 優

(財)鉄道総合技術研究所

正会員 佐々木 孝彦

香川大学工学部

正会員 松島 学

### 1. はじめに

コンクリート中の鉄筋の腐食速度は分極抵抗が測定できると定量的に求められる。つまり、分極抵抗 $R$ の逆数が、腐食速度 $\Delta r$ と比例関係にあることから、腐食速度が計算できる。鉄筋コンクリート部材中の鉄筋の腐食は、中性化と塩害の複合劣化の場合に腐食速度が大きくなることが知られている。本研究は、塩害と中性化の複合劣化を受けたコンクリート構造物中にある鉄筋の腐食速度を推定する回帰モデルを構築する。回帰での説明因子は、既往の研究から 1)含水率, 2)中性化残り, 3)コンクリート中の塩化物イオン量を選んだ。評価因子として鉄筋の腐食速度を選んだ。回帰に用いるデータは、現場で得られる分極抵抗及び、環境条件の実測値である。回帰モデルを構築する手法は、非線形回帰手法であるニューラルネットワーク手法である。

### 2. 使用したデータ

使用したデータは、現場で採取した分極抵抗より求められる腐食速度とその環境である。対象構造物は、西日本に存在する RC 橋梁である。分極抵抗は交流インピーダンス法を採用した装置を用い、10Hz と 20mHz の 2 周波数のインピーダンス値から測定した。現場で得られたデータ組は全部で 46 個である。得られた分極抵抗に係数( $=9.13 \times 26 \text{ mV}$ )を乗じて腐食速度に変換した。

求められた腐食速度の範囲は、 $0.1 \sim 13.7 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$ で、平均値が  $1.6 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$ 、標準偏差が  $2.4 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$ である。しかし、現場で得られたデータであるため各説明因子は、全ての範囲を網羅しておらず、システム構築に都合のよいデータであるとは必ずしも言えない。含水率は 2.0%以上のデータしか無く、乾燥しているコンクリートのデータもない。塩化物イオン量は  $2.0 \text{ kg/m}^3$ 以下が主なデータであり、大きな塩化物イオン量は少ない。全て何らかの値を持っており、ゼロのデータは無い。

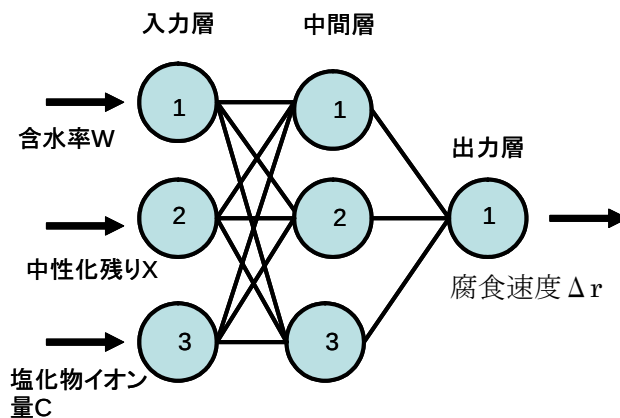


図-1 採用したニューラルネットワークシステム

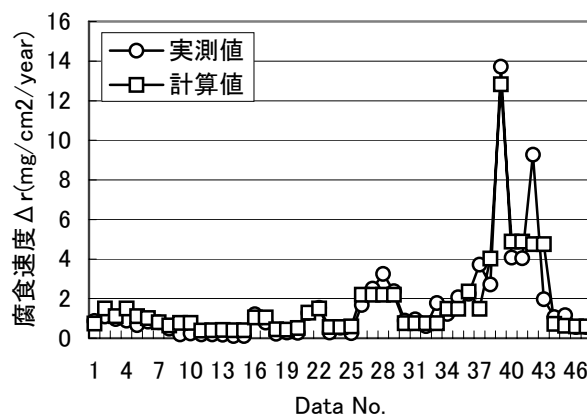


図-2 実測値と計算値の比較

### 3. ニューラルネットワークシステムの構築

本解析に用いたニューラルネットワークシステムの構造を図-1に示す。中間層の数が多いと複雑な問題を解くことができ、少ないと線形化が進むといわれている。中間層の数は、入力ユニットの数 $n_i$ 、中間ユニット $n_m$ 、出力ユニット $n_o$ とすると、 $2 \times (n_i \times n_m + n_m \times n_o)$ 組のデータが必要であるといわれている。中間層を3ユニットとすると、 $2 \times (3 \times 3 + 3 \times 1) = 24$ となる。本解析で用いるデータ組は46組で、中間層を3ユニットとすると、必要なデータ組は24組であることから、十分に解析できる範囲である。

構築した回帰システムの学習誤差は、徐々に小さくなり、学習回数6000回になると安定する。学習回数9000

キーワード：複合劣化、腐食速度、分極抵抗、塩害、中性化、ニューラルネットワーク

住所：761-0396 香川県高松市林町 2217-20 TEL：087-864-2154

回で、収束していると判断し、1万回で学習を打ち切った。46組のデータの実測値（○印）とニューラルネットワークシステムを用いて推定された推定値（□印）との関係を図-2に示す。ほとんどの値で、うまく推定できていると判断できる。

#### 4. 感度解析

含水率とニューラルネットワークシステムを用いて推定された腐食速度の関係を、塩化物イオン量を因子とし、図-3に示す。含水率が大きくなると指数的に腐食速度は大きくなる傾向が見られる。さらに塩化物イオン量が多くなると腐食速度が大きくなる傾向が見られる。このように実現現象の挙動をうまく説明できる。しかし、塩化物イオン量が大きい場合は線形的に上昇しており、感度の挙動が実測値をうまく説明できていない。塩化物イオン量、及び含水率が高い所の実測値データ数が少なく、回帰システムが外挿したことによると考えられる。

中性化残りとニューラルネットワークシステムを用いて推定された腐食速度の関係を、塩化物イオン量を因子とし、図-4に示す。中性化残りが大きくなると、腐食速度が小さくなる傾向を示した。塩化物イオン濃度が高くなると中性化残りが大きくても腐食速度が大きくなる傾向も示しており、全体として、実現現象をうまく説明している。

塩化物イオン量とニューラルネットワークシステムを用いて推定された腐食速度の関係を、含水率を因子とし、図-5に示す。塩化物イオン量が多くなると腐食速度が大きくなる傾向が見られる。実現現象を考えると、塩化物イオン量が少ないと腐食速度に与える影響は少なく、一定値を取ると考えられるが、この範囲のデータが少ないこともあり、うまく説明できないところがある。しかし、含水率が多くなると、あるいは、塩化物イオン量が多くなると腐食速度は大きくなり、全体として実現現象をうまく説明できている。

#### 5. まとめ

本研究で、明らかになったことを以降に箇条書きで示す。

- (1) 分極抵抗の現場データから得られた腐食速度を用いて、ニューラルネットワーク手法による回帰システムの構築を行った。推定誤差の無次元量は、平均-0.07、標準偏差 0.5 となった。
- (2) 感度解析の結果から、1)含水率が大きくなると急

激に腐食速度は大きくなる、2)中性化残りが小さくなると腐食速度は大きくなり、塩化物イオン量が多くなると、その傾向は顕著になる、3)塩化物イオン量が多くなると腐食速度が大きくなるなどの実現現象をうまく表現している。

以上のことからニューラルネットワークを用いた腐食速度の同定には妥当性があると考ええる。

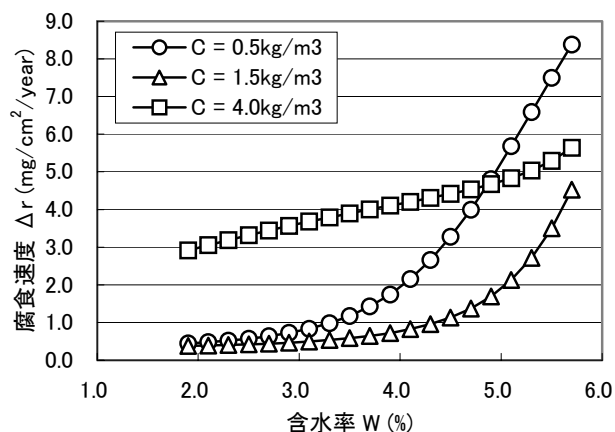


図-3 腐食速度  $\Delta r$  と含水率  $W$

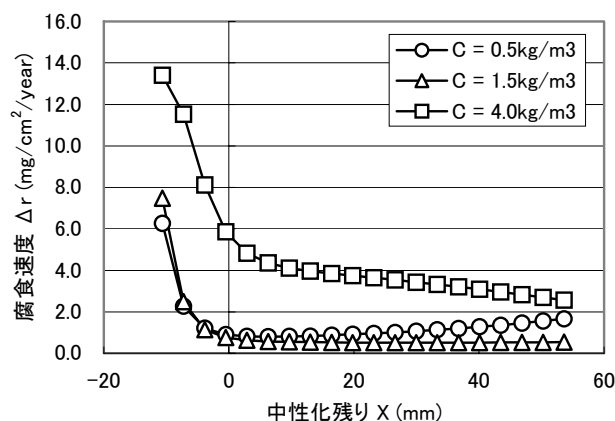


図-4 腐食速度  $\Delta r$  と中性化残り  $X$

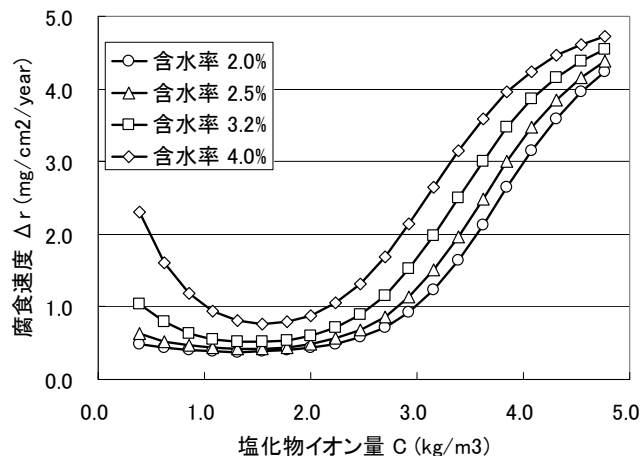


図-5 腐食速度  $\Delta r$  と塩化物イオン量  $C$