

論文 構造物中の鉄筋腐食評価へのニューラルネットワークの適用

武田 均^{*1}・丸屋 剛^{*2}・松岡康訓^{*3}

要旨：本論文は海洋環境下におけるコンクリート構造物の劣化原因の一つであるコンクリート中の鋼材の腐食に関し、かぶりコンクリートの中性化深さ、鉄筋のかぶり、鉄筋位置の全塩化物量などの実構造物における実測値を用いて鉄筋の腐食程度を評価するために、最適化手法の一つであるニューラルネットワークの適用を検討したものである。

構築されたネットワークにより、鉄筋の腐食状態の推定が可能であることが明らかになった。

キーワード：鉄筋腐食，中性化深さ，塩化物量，かぶり，ニューラルネットワーク

1. はじめに

鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化程度を明らかにするための一連の調査としては、構造物の外観調査、コンクリートコアによる中性化深さや塩化物量などの調査、鉄筋のはつり出しによる目視調査、設計図書等による使用材料、コンクリートの配合、施工条件の調査などがある。これらの調査のうち、使用材料やコンクリートの配合、施工条件などの情報は得られないことが多い。一方、現状の構造物を調査することにより得られる調査時点の中性化深さ、塩化物量、鉄筋の目視調査結果などは比較的入手しやすい。

コンクリート中の鉄筋の腐食要因としては、pH、温度、溶存酸素、不動態被膜の破壊要因存在の有無、機械的（引張）応力の存在の有無などが挙げられる[1]。本論文では、中性化深さをコンクリートの配合、供用環境、供用期間等をモニタリングするセンサーと位置付けて、これを鉄筋の腐食因子の一つである酸素の移動を示す指標とした[2]。これにより、不動態被膜の破壊要因である塩化物イオンが存在する環境下における実構造物の鉄筋の腐食程度を、限られた調査データにより評価した。基本的には、調査データのうち鉄筋のかぶり、中性化深さ、鉄筋位置全塩化物量を鉄筋の腐食要因とし、目視による指標である鉄筋の腐食度を、これらの腐食要因により評価することとした。実構造物における鉄筋の腐食現象では、これらの要因の組合せが複雑であるため、鉄筋の腐食程度との明瞭な関係を把握するには詳細な検討が必要となる。したがって、鉄筋のかぶり、中性化深さ、鉄筋位置全塩化物量等の要因と鉄筋の腐食度との関係を、最適化手法の一つであるニューラルネットワーク(以下、ネットワーク)により抽出し検討した。

2. 学習に使用したデータに関する基本的な考え方

ネットワークの学習には、表-1に示す日本国内の3地域(調査No.1~3)の海洋環境下における橋梁、栈橋、躯体などの劣化調査で得られた252個のデータを使用した。各調査地域毎のデータの範囲と平均値を表-1に示す。各調査地域内においてはマクロ的な環境は共通である。調査1は、供用後13~18年を経過した16箇所の橋梁の床版および橋脚とその他海洋構造物の調査結果である。

-
- * 1 大成建設(株)技術研究所土木材料研究室研究員、工修（正会員）
 - * 2 大成建設(株)技術研究所土木材料研究室研究員、工博（正会員）
 - * 3 大成建設(株)技術本部技術企画部企画室室長、工博（正会員）

表-1 調査データの概要

調査No	供用年	入力データ							
		かぶり mm	中性化 深さ mm	鉄筋位置 全塩化物 量kg/m ³	ひび割れ1 浮き:2 なし:0	平均 気温 ℃	年間 降水量 mm	相対湿度 RH%	
1	最大	18	156	37.4	10.7	2	—	—	—
	最低	13	10	0.0	0.2	0	—	—	—
	平均	13	62	18.8	1.9	0	22.2	2104.3	77.2
2	最大	23	140	46.3	5.8	2	—	—	—
	最低	20	5	5.0	0.3	0	—	—	—
	平均	23	80	31.7	1.4	0	15.1	1198.5	70.8
3	最大	15	157	20.0	10.9	2	—	—	—
	最低	6	25	0.0	0.0	0	—	—	—
	平均	15	65	6.0	4.6	0	14.7	1592.0	68.8

表-2 腐食度の定義（4段階に統一）

腐食グレード(1)		腐食グレード(2)	
D	腐食なし	1	腐食なし、 薄い緻密な錆
C	部分的、 表面的点錆	2	部分的、点錆
B-2	全体的、表面的、 孔食なし	3	全体的
B-1	全体的、表面的、 孔食あり		
A-2	全体的、部分的 にリブ判別不可	4	断面欠損
A-1	断面欠損		

調査2は、供用後20～23年を経過した2箇所の栈橋および1箇所の躯体の調査結果である。調査3は、供用後15年を経過した1箇所の海洋構造物および補修後6年を経過した箇所の調査結果である。各調査とも調査方法はほぼ統一されていた。

外観調査は主に、目視によるひび割れ、剥離、剥落部の調査、ハンマーを用いたたたき調査によるコンクリートの浮き部等のスケッチである。

鉄筋のかぶりは、コンクリートコア採取箇所またはかぶりコンクリートのはつり箇所の実測値である。データの範囲は5～157mmであった。

鉄筋位置の全塩化物量はコンクリートコアの分析による全塩化物量であり、分析方法はJCI法である[3]。報告書毎に単位が異なっている場合には、コンクリートコアの比重によりコンクリート1m³当たりの重量に換算した。データの範囲は0.0～10.9kg/m³であった。各調査において、表面から100mm程度の内部で全塩化物量が2.0kg/m³を越えているデータがあり、一部の構造物では施工時に海砂をよく洗わずに使用したと考えられる。

中性化深さは、フェノールフタレインアルコール溶液による非変色域の実測値である。データの範囲は0.0～46.3mmであった。

鉄筋の腐食度は、かぶりコンクリートはつりにより露出した鉄筋の、調査担当者による目視観察の結果である。鉄筋の腐食度の評価基準は6段階および4段階の2種類の評価基準が使用されていたので、これらの評価基準を表-2のようにキーワードに分解し、4段階の評価基準に統一した。

かぶりコンクリート部分にひび割れや浮きが無い場合には、中性化深さを酸素の移動を評価する指標としている。一方、かぶりコンクリートにひび割れや浮きがある場合には、それらが鉄筋の腐食により発生したものであっても、鉄筋の腐食因子がかぶりコンクリート中を移動せずにひび割れや浮き部分から浸入することにより鉄筋の腐食を促進すると考えられる。したがって、外観のスケッチとコア採取およびはつり調査位置の記録を参考にして、健全部を0、ひび割れ部を1、浮き部を2と表し、ひび割れや浮きを腐食度への影響要因として数値化して考慮した。

以上の他に腐食要因として、腐食反応の機構から環境温度、環境湿度、機械的応力の存在の有無などが挙げられるが、機械的応力については、各々の構造物の設計図書や荷重条件などは入手が困難であることが多いため本論文では考慮しない。環境温度、環境湿度などの環境要因はコンクリートの中性化の進行や塩化物イオンの移動にも影響を及ぼしていると考えられる。したがって、環境温度や環境湿度については、一般に公開されている各気象台の気象情報を利用した。気象データの収集の範囲は供用期間中の5年間とし、調査対象構造物に最も近い気象台の観測結果

から年平均気温、年平均相対湿度、年間降水量を要因として加えた。

学習後のネットワークの精度を上げるために、学習するデータを抽出してあらかじめ矛盾を解消することも考えられるが、本論文で扱っている問題では、学習するデータを抽出するための十分な根拠がないこと、学習の目的は与えたデータを全て再現することではなく、与えたデータがどのような関係あるいは特徴を有しているかを再現するところにあることから、学習用にデータを抽出することは行わなかった。

また、鉄筋の腐食度は各調査担当者の判定によるものではあるが、表-2に示したような基準で評価するならば十分に確からしいと考えられる。

3. ネットワークの構築

ネットワークの学習には市販のニューラルネットワーク・シミュレーション・ソフトウェアを使用した。形式は階層型ネットワークを採用し、学習方法はバックプロパゲーション法とした。中間層および出力層の伝達関数には $\tanh(-1 < 1)$ 関数を用い、学習係数は学習回数と共に小さくする方法とした。

階層型のネットワークは入力層、中間層（隠れ層）、出力層からなる。各層には幾つかのニューロンがあり、各ニューロンは幾つかの入力値の総和としきい処理を行い、結合先のニューロンに1つの出力値を出力する。各々のニューロンの結合には適当な重みが設定されており、各ニューロンからの出力値にはこの重みを乗じて結合先のニューロンに伝達される。バックプロパゲーション法では、出力層においてネットワークからの出力値と学習のために与えたデータ(教師データ)との2乗誤差を計算し、この誤差を用いて各層のニューロンの誤差を計算する。これらの誤差により、各ニューロンにおけるしきい値と各ニューロン間の結合の重みを修正する。このように学習中には入力値が出力方向に次々に伝達し、出力層に達すると出力層で計算された誤差が出力層から入力層へと伝播されるという操作を繰返ししながら、徐々に出力層の誤差を最小化する[4]。

階層型ネットワークの中間層の数や中間層のニューロンの数を決める一般的な方法は無いが、中間層のニューロンの数や中間層の数が増え、構造が複雑になるほど情報処理能力が増え複雑な関数を表現できる。ただし、複雑なネットワークの学習には、多くの学習用データが必要となる。また、少数の例題で多くの学習を行うと汎化能力が低下したり、例題を記憶してしまうことも考えられる[4,5]。

したがって、ネットワークの構造を決定するにあたっては、簡単な構造で精度のよいネットワークを得るために、幾つかの構造のネットワークの学習を行い、出力層での相関係数を比較検討した。その結果、各要因に対応する7個のニューロンを持つ入力層、3個のニューロンを持つ中間層1、2つのニューロンを持つ中間層2と1つのニューロンを持つ出力層からなる4層構造のネットワークを選択した。学習には過学習を避けるため、収集した全データの75%を使用し、残りの25%は過学習のチェックに使用した。過学習のチェックは、確認用データを定期的に入力層から入力し、ネットワークによる出力値と教師用データとの相関を確認することにより行った。学習の終了時期は確認用データを入力したときの出力層の相関係数が下がり始める時点とした。

学習の結果、学習用データ組を1160サイクル（219000回）呈示したところで学習が終了した。終了時の出力層の学習用データに対する出力値と教師データの累積の相関係数は0.676であり、確認用データの相関係数は0.683であった。

4. 構築されたネットワークの評価

出力層の学習データ組の累積の相関係数のみにより学習後のネットワークを評価することは、ノイズを含む学習用データに対する正解率を考えていることと等価である。したがって、一定以上の相関係数を持つネットワークは調査データのノイズをも再現することになる。一方、調査データがどれだけのノイズを含むかは明らかでない。そこで、調査データから比較的簡単に理解される特徴や経験的で自明な特徴(経験的境界条件)をネットワークがどのように獲得しているかを調査し、学習が上手くいっているか否かを評価した。

4.1 かぶりと腐食度の関係における中性化の影響

図-1に、鉄筋の腐食度とかぶりの関係における調査データ全体の分布を示す。図-1には実線で最小自乗法による回帰直線を示した。一般にかぶりが大きければ、構造物の表面から浸入する鉄筋腐食因子が鉄筋に到達しにくく、腐食環境になりにくいため、鉄筋は腐食しにくいと考えられる。最小自乗法による直線は鉄筋の腐食度とかぶりが負の相関であることを示しており、調査データは経験的境界条件を満たしている。また、同一のかぶりでも、腐食度は1(腐食なし)から4(断面欠損)まで広く分布しており、かぶりが30mm以下では鉄筋が健全と判断されたデータはなく、腐食度2以下となる鉄筋のかぶりは20mm以上であった。

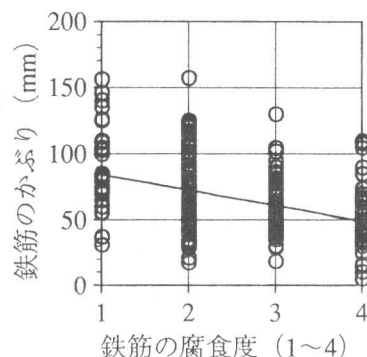


図-1 調査データの腐食度とかぶりの関係

図-2に、図-1に対応する、学習後のネットワークによる、鉄筋位置全塩化物量(0,0.6,1.2,2.0kg/m³)毎の、ひび割れや浮きがない場合の、腐食度とかぶりの関係における中性化の影響(範囲0~50mm,10mm間隔)を示す。図から、あるかぶり深さにおける鉄筋の腐食度は中性化深さが大きいほど大きい。同じ中性化深さでは、かぶりが少ないほど、鉄筋位置全塩化物量が増加するほど腐食度は大きい。これらの要因の影響により、同じかぶり深さでも腐食度は広く分布することになり、図-1の調査データの特徴と一致し、経験的境界条件を満たしている。ネットワークによる腐食度の予測値では、腐食度1および4と予測されたものはなかったが、上述のような、腐食度に及ぼす中性化深さ、かぶり、鉄筋位置全塩化物量の影響は、十分な塩化物が存在する場合に、中性化深さが大きいほど鉄筋の腐食因子である酸素が供給され、腐食が促進されるとする考え方に一致する[2]。

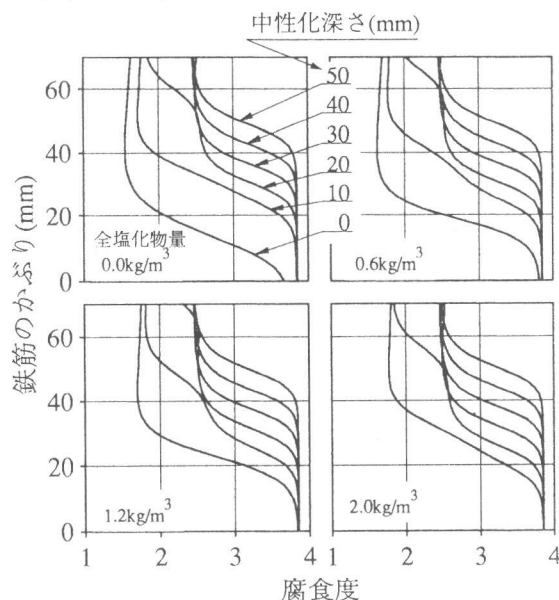


図-2 ネットワークによる腐食度とかぶりの関係

また、一定以上のかぶりがある場合に、腐食度2.5で曲線が重なり、2.5を越えると曲線の密度が濃くなっている。腐食度は調査担当者の判断による指標であるため、腐食度2と3で調査担当者毎に判断が分かれるために、2.5が一つの境界値となる可能性もある。このような影響がないとすれば、腐食が始まるまでと腐食が激しくなるときとは、腐食度に及ぼす中性化の影響度が異なっており、腐食が始まってから更に数倍中性化深さが進行した場合に腐食が激しくなると考えられる。また、腐食が激しくなる限界の中性化深さは、かぶりが少ないほど、鉄筋位置全塩化物量が増加するほど、小さいと考えられる。

4.2 かぶりと中性化深さの関係における鉄筋の腐食・非腐食境界

図-3に調査データによるかぶりと中性化関係における腐食度の分布を示す。図-3では、腐食度1と2を腐食なしとして白抜きで表し、3と4を腐食ありとして調査データを大きく2分する直線を引いた。直線の左上部は腐食なしも含むが、腐食ありが多い領域、右下部は腐食ありも含むが腐食なしが多い領域である。中性化がある程度進行してもかぶりが十分大きければ鉄筋の腐食に対する酸素の影響は少ないと考えられることから、かぶりと中性化深さの関係において、ある限界線が存在するものと考えられる。ただし、図-3では2つの要因のみが造る平面をみており、塩化物量などの他の腐食要因の影響のために、限界線が明瞭に現われていないことが考えられる。

図-4に、図-3に対応する、学習後のネットワークによる、ひび割れや浮きがない場合の、鉄筋位置全塩化物量毎のかぶりと中性化深さの関係における腐食度の分布を示した。図-4の曲線は腐食度の等高線を示したものであり、左上部ほど腐食度が大きい。

図-2と同様に腐食度1以下および4以上と予測されたものはないが、腐食ありと腐食なしの境界を腐食度2とすると、図-3と同様の直線となる。この境界線は、鉄筋位置全塩化物量が多くなるとともに、傾きはそのままかぶり軸上でかぶりが大きくなる方向に移動する。したがって、ある時点までは健全であった鉄筋が、鉄筋位置全塩化物量の増加と中性化の進行により腐食領域に移行することになる。これを面的に捉えたと、かぶり、中性化深さ、鉄筋位置全塩化物量の3次元軸上で鉄筋腐食の限界面を考えることができる。腐食度2の腐食限界面がかぶり軸で切片を持つことは、中性化深さが0mmでもかぶりが少ない場合には鉄筋が腐食することを示しており、中性化残りの考え方に一致する[6]。

また、腐食度3の線の傾きは腐食度2の線の傾きに比べてかなり大きい。このことは、4.1と同様に、調査担当者毎の腐食度の判断の影響がないとすれば、ひび割れや浮きがない場合には、腐食が始まっても直ちに腐食が激しくなるのではなく、さらに中性化が進行したり、鉄筋位置全塩化物が増加した場合に腐食が激しくなることを示していると考えられる。

4.3 ひび割れあるいは浮きの影響

調査データにはひび割れや浮き部分の調査データが一部含まれていた。このように、かぶりコンクリートが劣化している部分では、特に浮き部では著しい腐食が生じていることが多いが、中性化深さを酸素の供給量の指標とする考え方が適用できないため、ひび割れと浮きに関する情報も他の要因と同様にネットワークに学習させた。ネットワークによる予測では、浮きがある場合には、鉄筋位置全塩化物量が 0kg/m^3 の場合でも、中性化深さに関わらずかぶり $0\sim 60\text{mm}$ の範囲で

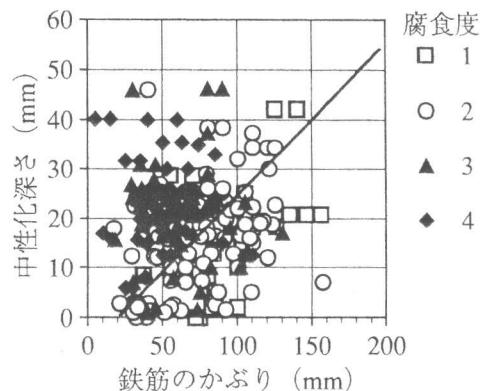


図-3 調査データのかぶりと中性化深さの関係

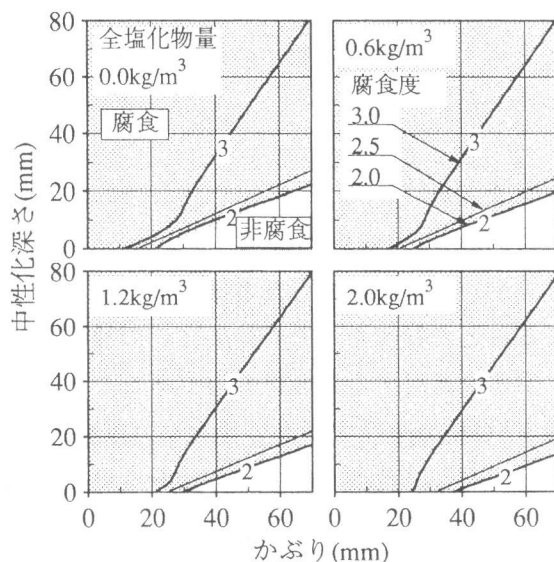


図-4 ネットワークから抽出したかぶりと中性化深さの関係における腐食度

は常に腐食度2以上であった。図-5にかぶり50mm、中性化深さ0mm、鉄筋位置全塩化物量 1.5kg/m^3 における、ひび割れと浮きが腐食度に及ぼす影響を示した。健全およびひび割れ部では腐食度は2を越えないが、浮きがある場合には腐食度が2を越え鉄筋が腐食していることを示している。腐食度1~1.5の範囲でひび割れ部よりも健全部の腐食度の方が若干大きいものの、腐食/非腐食の境界(腐食度2)に及ぼすひび割れあるいは浮きの影響についても、ネットワークは一般的な特徴を獲得しているものと考えられる。

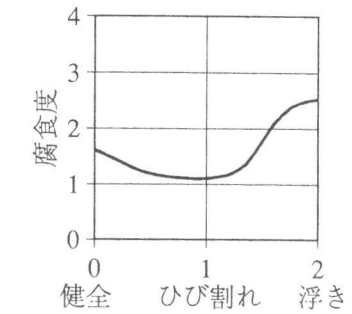


図-5 腐食度に及ぼす浮き・ひび割れの影響

4.4 ネットワークの評価

学習後のネットワークは、鉄筋の腐食問題に関してほぼ妥当な結果を出力しており、現実との大きな矛盾はない。したがって、使用データ、ネットワークの構造、学習条件などが妥当であったと考えられ、構造物中の鉄筋腐食評価に対し、ネットワークの適用は有効であることが明らかとなった。

5. まとめ

- 1) 鉄筋腐食の評価にニューラルネットワークを適用した。構築後のネットワークの評価は、ネットワークが獲得した各々の要因と腐食度との関係が、経験的境界条件に適合するかを検討することで行った。その結果、この種の問題に関して、ニューラルネットワークのような最適化手法を適用することが有効であることが明らかとなった。
- 2) ひび割れや浮きがない場合に、腐食度とかぶりの関係において、同一のかぶりであっても腐食度が広い範囲で分布する、あるいは、同一の腐食度であってもかぶりが広い範囲で分布することが、ネットワークによる予測でも示された。腐食度がこのような分布になるのは、中性化深さや鉄筋位置全塩化物量の影響であると考えられる。
- 3) 同一のかぶりでは、中性化深さが大きいほど腐食度は大きく、かぶりと中性化深さの関係において、鉄筋の腐食/非腐食境界が存在すると考えられる。また、この境界は鉄筋位置全塩化物量の増加に伴って、かぶり軸上でかぶりが深くなる方向に移動する。したがって、かぶり、中性化深さ、鉄筋位置全塩化物量の関係において、鉄筋の腐食/非腐食境界面が考えられる。
- 4) 鉄筋の腐食/非腐食境界面を通過する期間の評価に、中性化の進行や塩化物イオンの移動に関する既往の研究を用いることにより、鉄筋の腐食進行予測が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] 日根文雄著：腐食工学の概要，化学同人，1977.
- [2] 丸屋 剛，武田 均，松岡康訓：コンクリート中の鉄筋の腐食進行予測に関する一考察，土木学会第49回年次学術講演概要集，pp.554-555，1994.9.
- [3] コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，日本コンクリート工学協会，1987.
- [4] 甘利俊一：ニューラルネットワークの理論，科学，Vol.61，No.4，pp.205-213，Apr. 1991.
- [5] 篠本 滋：学習の数理，数理科学，No.338，pp.20-25，Aug. 1991.
- [6] 岸谷孝一，榎野紀元：コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究 その1，日本建築学会論文報告集，No.283，pp.11-15，1979.9.