

論文 ニューラルネットワークによるコンクリートの塩化物透過性の評価

平間 貴司*1・大賀 宏行*2・国府 勝郎*3

要旨：混和材の種類、置換率、水結合材比などの配合条件と、養生期間、養生温度などの養生条件を変化させたモルタルについて急速塩化物透過性試験を行い、ニューラルネットワークを用いその結果の評価を行った。塩化物透過性に対するニューラルネットワークの適用性を示し、塩化物の透過性と圧縮強度に及ぼす各要因の影響度についてニューラルネットワークを通じた観点から検討を加えた。その結果、ニューラルネットワークの感度解析結果の良好なモデルを提案し、塩化物の透過性と圧縮強度との関係を明らかにした。

キーワード：ニューラルネットワーク、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ

1. 序論

塩化物の透過性状は、耐久性設計や補修材料の選定などにおいて重要な指標の1つとなっている。塩化物の透過性を低減する方法として混和材の利用が提案されているが、混和材を用いた場合に配合条件や養生条件に大きく影響を受けること、さらには圧縮強度のみにより塩化物透過性状を評価することが困難となる可能性があることなどの問題点がある[1]。ここでは、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混和材としてそれぞれ使用した供試体を用い、初期の養生期間、養生温度、水結合材比、混和材の置換率、砂結合材比、混和材の比表面積などが塩化物の移動と圧縮強度に対してどの程度の影響をもたらすのかをニューラルネットワーク（以下ネットワーク）を通して論じた。

本研究では、コンクリートの劣化現象の一つである「塩害」の進行を促進化した試験方法である急速塩化物透過性試験（Rapid Chloride Permeability Test 以下RCPTと略す）と圧縮強度試験の結果を教示値としてネットワークの適用を行い、混和材を置換した場合の塩化物透過性状と圧縮強度の関係をネットワークを通じた観点から検討し、構築したネットワークの出力値へ与える影響因子について感度解析を行うことによって、高炉スラグとフライアッシュの圧縮強度と耐久性への影響因子の貢献度を検討することを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

セメントはセメント協会の研究用セメントを使用した。また、混和材には高炉スラグ微粉末（略号SG）およびフライアッシュ（略号FA）を使用した。SGについては比表面積の異なる3種類を用いた。FAは比表面積が異なる6種類を用いた[2],[3],[4]。

2. 2 配合条件および養生条件

*1 茨城県 工修（正会員）

*2 東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻、工博（正会員）

*3 東京都立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻、工博（正会員）

本研究ではモルタル供試体を利用してコンクリートのモルタル部分の評価を行った。モルタルの配合は水結合材比を 35、50、60%、混和材の置換率をフライアッシュで 0、15、25%、高炉スラグ微粉末で 0、30、50、70%の範囲で変化させた。養生条件は、材齢を 7、28、91 日、養生温度を 10、20、30℃とした[2],[3],[4]。

2. 3 RCPT の試験方法

RCPT の試験方法は試験体にモルタル供試体を用い、初期電流値を主な指標とした以外は AASHTO T-277[5]に準拠して行った[2],[3],[4]。

3. RCPT ネットワークの構築

高炉スラグとフライアッシュを混和材としてセメント置換した場合にネットワークを通して RCPT の初期電流値と圧縮強度の関係の評価を行うことを目的としているため、高炉スラグ微粉末を使用した場合と、フライアッシュを使用した場合の 2 つのネットワークを考えた。

3. 1 学習方法

ネットワークは入力層、中間層、出力層の 3 層からなる「3 層階層型ネットワーク」を形成し、バックプロパゲーション法によって学習を進めた。学習関数にはシグモイド関数を使用し、学習の収束を早めるために「修正モーメント法」と学習比を 2 乗誤差の大きさによって逐次変化させていく「適応学習比」を使い工夫した。また、入力データと教示データの選択にあたっては、ネットワークの適用性を検討する段階では全データから無作為に抽出したデータで学習を行い、構築されたネットワークを用いて全体の予測を行った結果と母集団データの相関係数からネットワークの妥当性を判断した。感度解析を行う段階では、データ全体の出力値に与える影響因子の重みを解析する性質上、母集団データを使用して学習をさせた。ただし、実際にネットワークに実験データを入力するにあたっては、入力値と教示値をそれぞれ正規化して用いた。特に RCPT と圧縮強度に与える材齢の影響は初期の段階で顕著になるため常用対数を用いて正規化した。

3. 2 高炉スラグおよびフライアッシュを置換した場合のネットワークモデル

高炉スラグおよびフライアッシュをセメントの一部と置換して作製したモルタル供試体について RCPT を行う場合には、養生条件として、①養生期間、②養生温度、配合条件として、③高炉スラグあるいはフライアッシュの置換率、④砂結合材比、⑤水結合材比、⑥高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの比表面積、が塩化物の透過性と圧縮強度に影響を及ぼす要因と考えられるため[2],[3],[4]、①～⑥をネットワークの入力層に与える要素とした。ネットワークの出力のために与える教示値には無混和のモルタルを基準値=1 とした初期電流比と圧縮強度比の 2 つをネットワークの出力値として用いた。初期電流比を教示値として用いたのは RCPT の評価指標である電流量と RCPT 開始直後の電流である初期電流が非常によい相関を示すためである[6]。また、圧縮強度比をもう 1 つの出力値としたのは、混和材の種類によって塩化物の透過性と圧縮強度の相関関係が大きく変動することがあるため[1]、感度解析によってその傾向を評価するためである。本研究で構築したネットワークのモデルを図 1 に示した。

4. RCPT へのニューラルネットワークの適用結果

4. 1 ニューラルネットワークの適用性

混和材を置換したモルタルの圧縮強度と初期電流値を無混和の場合の圧縮強度と初期電流値で除したものをそれぞれ圧縮強度比、初期電流比としてネットワークに学習させた。

フライアッシュについては表1、図2に示すように圧縮強度比、初期電流比ともに相関係数 0.9 前後の良好な相関性を示した。このことは、本研究でネットワークの学習に使用したデータが全実験データから無作為に抽出したものであることから、フライアッシュを置換した場合にはRCPTと圧縮強度試験へのネットワークの適用が十分可能なことを示している。また、図3に示すように実際の実験データにおける圧縮強度と初期電流の関係が線形に近い関係を持つことから、フライアッシュを置換した場合の塩化物透過性状は圧縮強度から推測が可能であると考えられる。

高炉スラグ微粉末使用のモデルについては、ネットワークの初期電流比に対する出力結果が表1、図4に示すように相関係数が0.83と良好であることから、入力因子として用いた配合条件と養生条件から塩化物の透過性の予測がある程度可能であることが分かった。しかし、表1に示したように高炉スラグ微粉末を使用した場合のネットワークによる圧縮強度比の予測では相関係数が0.63程度と他の場合に比べ低い値を示している。このことから高炉スラグ微粉末を置換した場合の圧縮強度の予測には今回のネットワーク構築に選択した影響因子のみでは足りないことが分かった。これは実験値における初期電流と圧縮強度の関係が図3の高炉スラグ微粉末のプロットが示すように離散的であることから、高炉スラグ微粉末を用いた場合の塩化物透過性を抑制するためには、コンクリート構造物の設計をする際に

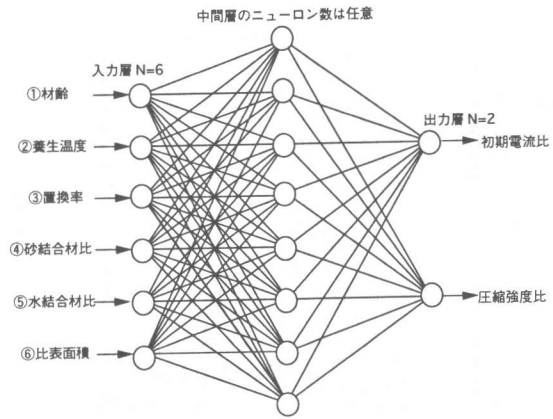


図1 ネットワークモデル

表1 ネットワークの出力結果の相関性

混和材名	高炉スラグ微粉末		フライアッシュ	
	データの抽出方法	全部	無作為	全部
中間層ニューロン数	1	10	1	10
学習回数	100000			
圧縮強度比相関係数	0.519	0.628	0.950	0.953
初期電流比相関係数	0.869	0.830	0.927	0.894

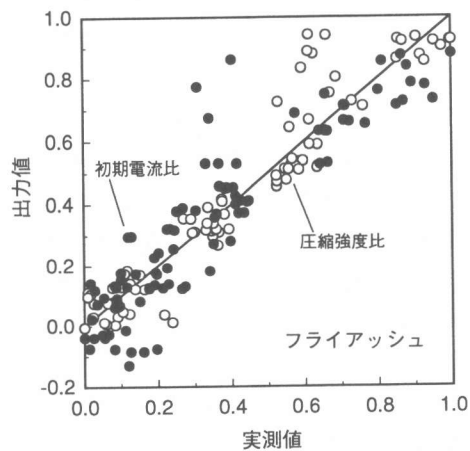


図2 実測値とネットワークの出力値の相関 (フライアッシュ)

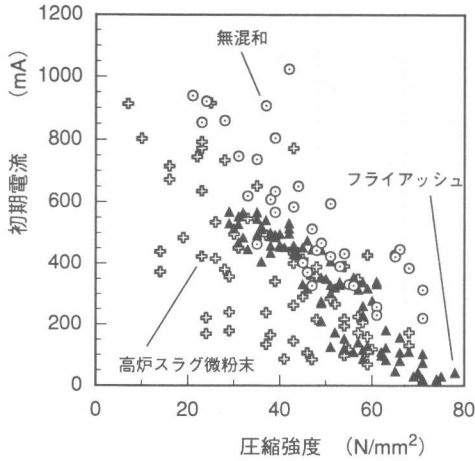


図3 圧縮強度と初期電流の関係

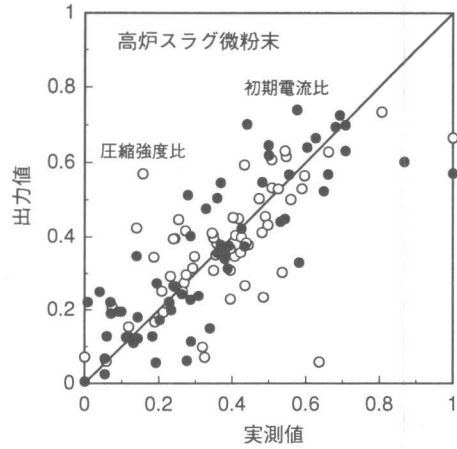


図4 実測値とネットワークの出力値の相関 (高炉スラグ微粉末)

力学的強度の確保を考慮するだけでなく、耐久性の面からの評価が重要な要素であることを示している。そして、この場合の耐久性の評価には表1、図2、図4の初期電流比の予測結果が良好であることから、本研究で構築したニューラルネットワークの適用が有効な方法であると思われる。

5. 感度解析

高炉スラグ微粉末を置換したモルタル供試体とフライアッシュを置換したモルタル供試体の2種類の混和材を用いた供試体について RCPT と圧縮試験を行ったため、混和材の種類別に2つのネットワークを構築した。ネットワークにおける中間層のニューロン数を決定するにあたっては、画像処理などに用いられる恒等写像の方法[7]を応用して中間層を1個とした特別なネットワークとした。このネットワークの適用には複数の中間層をもつネットワークとの相関係数を比較し、その精度が感度解析に適しているかどうかを判断した。なお、中間層のニューロン数が1つのモデルと複数のモデルの相関係数の差はもっとも大きいもので0.1程度にとどまった(表1)。こうして構築されたネットワークを用いて、混和材の種類によって影響度が変わってくると思われる「養生温度」、「混和材の置換率」、「混和材の比表面積」の複合要因が無混和の値との比較値である初期電流比に及ぼす影響度についての考察を行った。

5.1 養生温度と混和材の置換率との複合評価

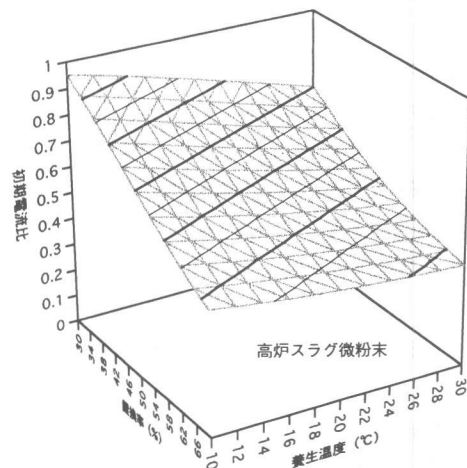


図5 養生温度と置換率の複合効果 (高炉スラグ微粉末)

高炉スラグ微粉末を置換した供試体について養生温度と置換率が初期電流比に与える影響を図5に示す。初期電流比を抑制するためには高炉スラグ微粉末の置換率を高く設定するか、養生温度を高くすべきことが認められる。養生温度が10℃では置換率の影響が大きい、養生温度の増大とともに置換率の影響は小さくなっている。フライアッシュを置換した供試体について養生温度と置換率が初期電流比に与える影響を図6に示す。本研究の条件下ではフライアッシュの置換率の増加による塩化物抑制効果は小さく、養生温度を高く確保することによって大きく抑制されることが認められる。特に養生温度が20℃以上の場合に顕著な塩化物透過性に対する抑制効果が得られることがわかる。

5. 2 養生温度と混和材の比表面積との複合評価

図7は高炉スラグ微粉末を用いた供試体の比表面積と養生温度が初期電流比に与える影響を示したものである。塩化物透過性の抑制対策として高炉スラグ微粉末の比表面積が小さい場合には高い養生温度が必要であり、比表面積が大きい場合には養生温度の影響はほとんど認められない。本研究の条件下において同一の塩化物抑制効果を得るためには、比表面積が7500cm²/g程度であれば養生温度が10℃必要であるのに対し、比表面積が4700cm²/g程度では30℃の養生温度が必要であることがわかる。フライアッシュを用いた供試体の比表面積と養生温度が初期電流比に与える影響を示したものが図8である。5.1の養生温度と混和材置換率との複合評価で述べたのと同様に、フライアッシュを混和した場合の塩化物透過性に対する抑制効果は養生温度に大きく影響を受ける結果となった。

6. コンクリートとモルタルのRCPT値の比較

RCPTの試験体にモルタル供試体を用いて

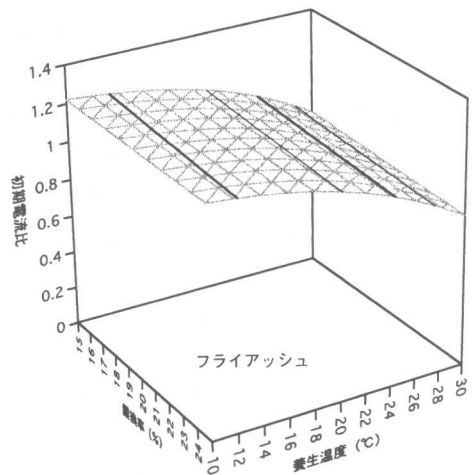


図6 養生温度と置換率の複合効果 (フライアッシュ)

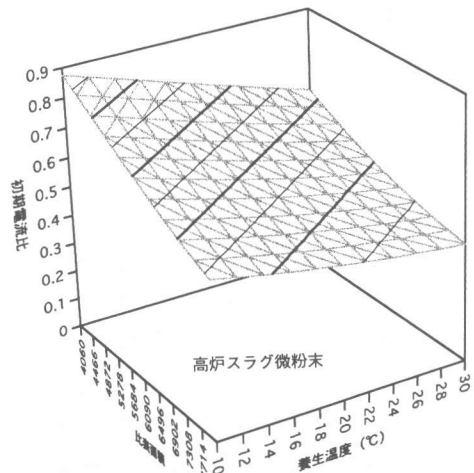


図7 養生温度と比表面積の複合効果 (高炉スラグ微粉末)

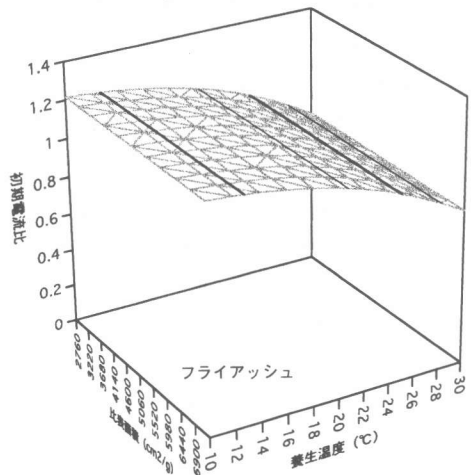


図8 養生温度と比表面積の複合効果 (フライアッシュ)

塩化物の透過性状の評価を行ったが AASHTO T-277 にも示されている様に、RCPT から塩化物透過の抑制度を判断するためにはコンクリートで試験を行わねばならないため粗骨材の影響を考慮せずには本来の塩化物抑制の指標をもたせるという意図を満足することはできない。粗骨材の影響の評価には、コンクリートをモルタル部 60%、粗骨材部 40%の容積比に分けて配合した。その結果、図 9 に示すように同一のモルタル骨材容積比であれば、コンクリートとモルタルの初期電流には W/C ごとに一定の対応がとれることが分かったが、粗骨材とモルタルの比抵抗の違い[8]から若干の傾きの差は見られるもののモルタルの初期電流からコンクリートの初期電流を予測することの可能性が示唆された。ただし、本研究では単一のモルタル骨材容積比についてのみの検討であるので、実際のコンクリートの配合を考慮しその他の配合条件の場合についても同様の検討を加える必要があると思われる。

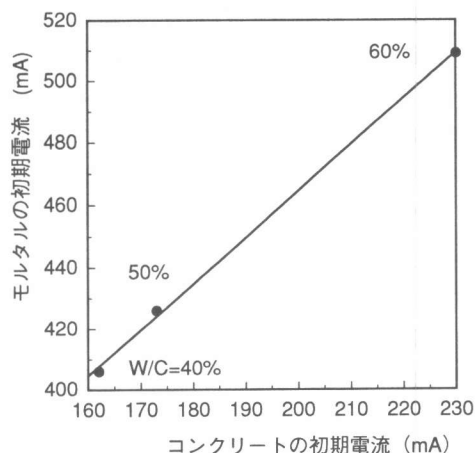


図 9 コンクリートとモルタルの初期電流の関係

7. 結論

ニューラルネットワークの精度評価については相関係数の大きさで行われるのが一般であるが、感度解析を行う場合、中間層に複数のニューロンを用いると精度評価は単なる数値合わせとなる危険性がある。本研究では、影響因子の感度解析を行う場合には恒等写像に用いる手法に見られるように中間層のニューロン数を 1 個とすることで入力因子の教示値に与える影響をつかむことができた。ネットワークの感度解析を行った結果、無混和と比べて高炉スラグを置換したものは、置換率を大きくするほど塩化物透過性は抑えることができるが、強度の面では大きな変化が現れないことから、圧縮強度による塩化物透過性の評価ができないことが関係づけられた。

また、RCPT においてモルタル供試体に対する塩化物の透過危険度を判定する場合には、粗骨材のもつ抵抗値が無いぶんコンクリートの場合と比較して多大な電流が流れるため同一の評価規格では難しい。本研究では、コンクリート中のモルタル分の抵抗と粗骨材の抵抗を合わせて電流を算出することでモルタルにおける塩化物透過指標の対応がとれた。

参考文献

- [1]大賀ら、セメント技術大会講演要旨集、第 51 回、1997 (投稿中) [2]大賀ら、土木学会年次学術講演会講演概要集、第 50 回、第 5 部、pp.244-245、1995、 [3] 大賀ら、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No1、1995、pp.349-352、1995、 [4]平間ら、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No1、pp.975-980、1996、 [5]AASHTO Designation T-277、 [6]大賀ら、生産研究、第 46 巻、第 7 号、pp.29-32、1994、 [7]臼井ら：基礎と実践ニューラルネットワーク、コロナ社、pp.35-43、 [8]鳥居ら、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.951-956、1996