

論文 ニューラルネットワークを用いた吹付けコンクリートの品質推定

植松敬治^{*1}・魚本健人^{*2}

要旨：吹付けコンクリートにおいて、その吹付け後の品質は水セメント比等の配合条件のみならず、用いられる機械による影響や吹付けを行う者の勘といった人的要因などの施工条件にも大きく影響されると考えられ、品質管理が非常に困難である。そこで、本研究では、ニューラルネットワークを適用し、これらの条件を入力することによって、吹付け後の品質（強度特性）を推定し、感度解析を行った。その結果、施工条件を考慮する場合としない場合では、前者の方がより適切に品質を推定できた。

キーワード：ニューラルネットワーク、感度解析、品質推定、施工条件

1. はじめに

NATM(New Austrian Tunnel Method)工法の開発以来、トンネル工事において、吹付けコンクリートの重要性が増しており、現在その研究・開発が進んでいる。しかし、吹付けコンクリートは圧送した後圧縮空気によって壁面に吹き付けるという手順を踏むため、一般のコンクリートに比べ品質のばらつきが大きく、また、材料や配合及び施工条件がその品質にどのような影響を及ぼすのかについても明確になっておらず、特に実際の現場においては、その管理が非常に困難である。このような状況の中、吹付けコンクリートにおいて、配合条件や吹付け条件を統合的に考慮した配合設計手法が確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、任意の配合条件、環境条件に応じた最適な配合設計手法を確立することを念頭に置き、各種要因が硬化後の吹付けコンクリートの品質にどのような影響を与えるのかニューラルネットワークを用いて検討を行った。また、その解析においては、実際のトンネル施工現場のデータをもとにニューラルネットワークを用いて学習を行った後、感度解析を行うことによって品質に影響する因子の抽出を試みた。

2. ニューラルネットワーク¹⁾

2. 1. ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークとは、脳の神経回路（ニューロン）の働きとその結合をモデル化したもので、多数のユニットが結合しあつたネットワークを形成している。従来の逐次直列型の情報処理を行い論理的な推論をする計算法と違って、ニューラルネットワークは並列分散型の情報処理をしているので演算処理が速く、データの矛盾や欠落のある問題に対しても適切な教示値を与えることによって柔軟に対応できる。このようなことから、パターン認識問題、数式化や定式化が困難な問題の解決、組み合わせが膨大な問題の準最適

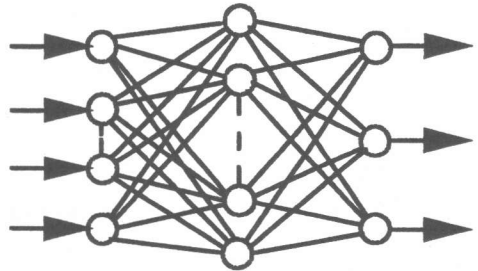


図-1 階層型ニューラルネットワーク

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻（正会員）

*2 東京大学生産技術研究所教授、工博（正会員）

解の究明などを得意とする。このニューラルネットワークには相互結合型のものと階層型のモデルがあるが、本研究では図-1に示す階層型のものを用いた。

2.2 ユニット

ユニットは脳細胞をモデル化したもので、図-2に示すような多入力、1出力の形をなす。ユニットの状態量 u_j は、入力 y_i に結合の重み ω_{ji} を乗じたものの総和からしきい値 θ_j を引いた値で表されるが(式1)、次のユニットへの出力はそれをある応答関数に変形して行われる。応答関数はシグモイド関数(式2,3)を用いた。すなわち、階層型のネットワークでは、入力層から入った信号は各ユニットで次のような変形を受けて、出力層まで伝達される。

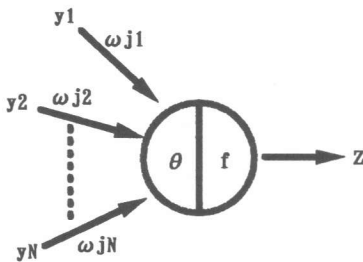


図-2 ニューラルネットワークのユニット

$$u_j = \sum_i \omega_{ji} \cdot y_i - \theta_j \quad (1)$$

$$y_i = f(u_i) \quad (2)$$

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (3)$$

2.3 学習方法

ニューラルネットワークの学習は、ある誤差関数を極小にするように、ネットワークの結合の重みとしきい値を決定する作業である。階層型ニューラルネットワークでは、学習データに対するネットワークの出力と、望ましい出力(教示値)との二乗誤差が減少する方向に重みとしきい値を変化させていく。

すなわち、誤差関数として

$$E = \frac{1}{2} \sum_{jk} (y_{jk} - \hat{y}_{jk})^2 \quad (4)$$

y_{jk} : ネットワークの出力 \hat{y}_{jk} : 教示値

を考える。

この誤差関数Eの極小値を求めるために、任意の重みの初期値 ω_{ji} から $\Delta\omega_{ji}$ ずつ変化させていく。

$$\Delta\omega_{ji} = -\varepsilon \frac{\partial E}{\partial \omega_{ji}} \quad (5)$$

これを最急降下法といい、傾きの急な方向に進んでいくことに相当する。

これらの式より、出力層の誤差をそれ以前の層(入力層方向の層)へと順に伝え、2乗誤差を最小化することができる。

3. 品質の推定

ニューラルネットワークはその性質上、入力する因子の数が多ければ多いほど、より現実に即した学習が期待できる。しかし、単に数を多くすれば良いのではなく、それぞれの因子は互いに独立したものであることが望ましい。従って、入力因子の選定には細心の注意を払った。

入力因子としては配合条件と吹付け条件の両方を考慮したが、配合条件のみを入力した場合についても検討を行い、学習効果がどのように変化するか確認することにした。

品質の推定に用いたデータは、すべて実際のトンネル工事現場で得られたデータである。基本となる配合はW/C=53%、単位セメント量 360kg/m^3 、材齢28日における設計強度 180kgf/cm^2 となっており、この配合をもとに各種要因を変化させている。

3.1 入力因子の選定

ニューラルネットワークの学習においては、先述したように、入力する因子の組み合わせの違いによって精度が大きく変化してくるため、すべての因子を入力するのではなく、配合条件・施工条件を的確に表現しうる互いに

独立した最小限の因子を選択して用いることにした。

3. 2 出力因子の選定

トンネル工事における吹付けコンクリートに対しては、掘削直後の崩落を防ぎ安全を確保するために早期強度が要求される。初期強度の特性を表す代表的な値として、コア供試体(φ50×100, JSCE-F561 準拠)の圧縮強度試験及びブルアウト試験(JSCE-G-561 準拠)の結果を教示値として利用し学習させた。

3. 3 推定方法

推定は表-1に示すような入力層16ユニット、中間層20ユニット、出力層4ユニットである3層階層型ニューラルネットワークを用いて行った。

また、学習の終了条件は学習開始後の平均二乗誤差の和が 1.0×10^{-5} 以下となったとき、もしくは、学習回数が100万回に達したときのいずれかとした。(今回学習を行ったすべてのケースについてはすべて前者の場合である)

3. 4 推定結果

学習後の推定結果を図-3に示す。ブルアウト試験・圧縮強度試験ともにそれぞれ教示値と推定値のあいだにかなり強い相関関係があることわかる。このことから、入力したデータについてニューラルネットワークによる学習が適切に行われたと考えられる。今回のケースでは学習データの数13と少ない値であったため、このように強い相関関係が容易に現われたと見ることができる。

4. 感度解析

4. 1 ニューロによる感度解析

学習後のニューラルネットワークの重みとしきい値から、感度を求める。

いま、(式1,2,3)で与えられる入・出力について、N層階層型ニューラルネットワークの出

力層の素子*i*に対する、出力層の素子*j*の感度

$\frac{\partial y_j^{(n)}}{\partial y_i^{(0)}}$ は、次のように展開される。

表-1 入出力因子

入力因子 (16ユニット)		出力因子 (4ユニット)
配合条件	W/P (35~53.1%) s/a (59.2~62%) 細骨材表面水率 (3.2~4.6%) セメント単位置量 (225~500kg/m ³) 各種混和材単位置量 (6種類) 各種急結剤添加量 (3種,4.5~9.9%)	圧縮強度 (材齢7日) ブルアウト強度 (材齢1,8,24hr)
吹付け条件	吹付け速度 圧送効率 最大吹付け圧	

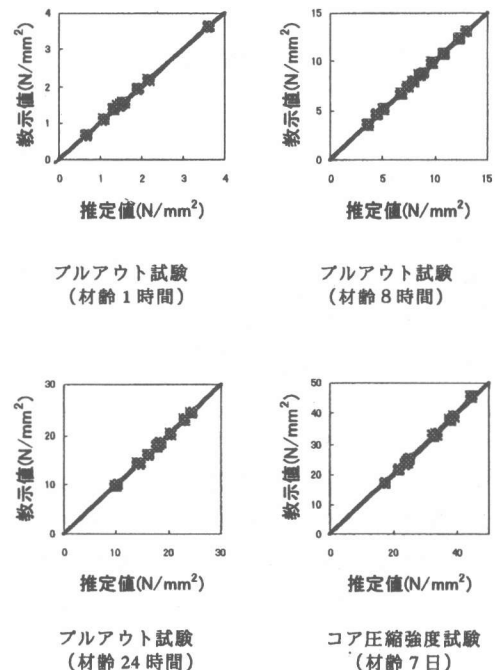


図-3 学習後の推定結果

$$\frac{\partial y_i^{(N)}}{\partial y_j^{(0)}} = \sum_{k_1} \sum_{k_2} \dots \sum_{k_{(N-1)}} \frac{\partial y_i^{(N)}}{\partial y_{k_1}^{(N-1)}} \cdot \frac{\partial y_{k_1}^{(N-1)}}{\partial y_{k_2}^{(N-2)}} \cdot \dots \cdot \frac{\partial y_{k_{(N-1)}}^{(1)}}{\partial y_j^{(0)}} \quad (6)$$

ここで、(式 1,2,3)より

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_i^{(l+1)}}{\partial y_j^{(l)}} &= \frac{\partial y_i^{(l+1)}}{\partial u_j^{(l)}} \cdot \frac{\partial u_j^{(l)}}{\partial y_j^{(l)}} \\ &= f'(u_j^{(l+1)}) \cdot \omega_{ij}^{(l)} \end{aligned} \quad (7)$$

である。

特に 3 層の場合には、

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_i^{(2)}}{\partial y_j^{(0)}} &= \sum_k \frac{\partial y_i^{(2)}}{\partial y_k^{(1)}} \cdot \frac{\partial y_k^{(1)}}{\partial y_j^{(0)}} \\ &= \sum_k f'(u_k^{(2)}) \cdot \omega_{ik}^{(1)} \cdot f'(u_k^{(1)}) \cdot \omega_{kj}^{(0)} \\ &= y_i^{(2)}(1-y_i^{(2)}) \sum_k \omega_{ik}^{(1)} \cdot y_k^{(1)}(1-y_k^{(1)}) \cdot \omega_{kj}^{(0)} \end{aligned} \quad (8)$$

である。

以上より、ネットワーク各層の重みとしきい値及び各ユニットの出力から、任意の入力ポイントにおける感度が計算されることになる。

4. 2 感度解析結果

今回の感度解析では、W/P=53.1%である基本配合を基準に、それぞれの因子を学習データの範囲内で最大値から最小値まで変化させたときの出力値の感度を求めた。図-4にブルアウト強度(材齢 1,8,24hr)の感度解析結果の一部を示す。W/P、s/aはどの材齢においてもブルアウト強度にほとんど影響していないことが分かる。また、急結剤添加率の増加に伴ってブルアウト強度は減少傾向を示し、

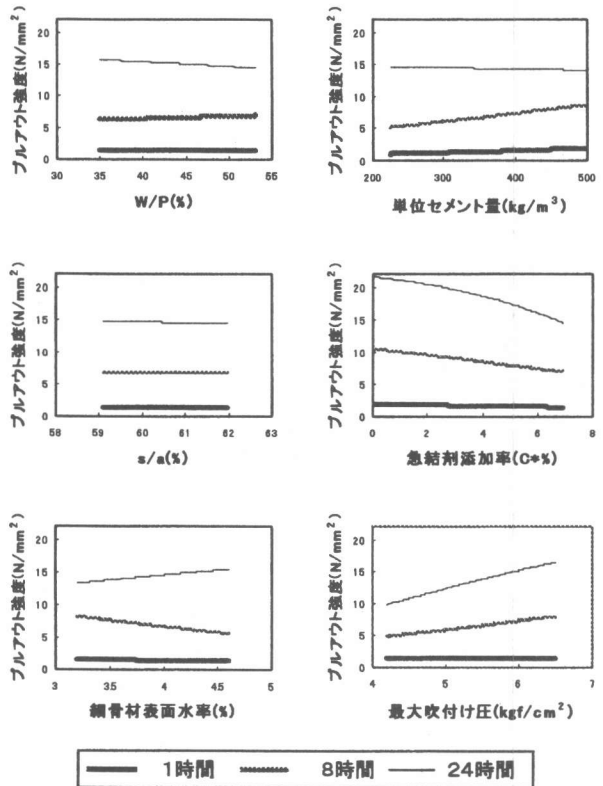


図-4 感度解析(ブルアウト強度)

最大吹付け圧の増加に伴ってブルアウト強度も増加傾向を示すことが分かる。単位セメント量に関しては、材齢 8hr では若干の増加傾向を示しているが、その他の材齢にはほとんど影響していないことが分かる。細骨材表面水率に関しては、材齢 8hr までは細骨材の表面水率の増加に伴ってブルアウト強度は減少傾向にあるが、材齢 24hr になると反対に増加傾向を示していることが分かる。吹付けコンクリートに用いられる急結剤はセメントの反応速度を速めるために添加するものであり、ブルアウト試験が吹付けコンクリートの初期の強度性状を示していることを考慮すると、急結剤の添加率が増加するとある程度ブルアウト強度が増加すると考えられる。しかし、ニューラルネットワークを用いた感度解析から得られた結果は、どの材齢においても減少傾向を示している。これは、前章で示したように

ニューラルネットワークはその性質上、どの因子を入力し、どの因子を入力しないかによっては入・出力因子の因果関係を誤って学習してしまう可能性を含んでいるからである。

そこで、今回選定した出力因子である7日圧縮強度への最適な入力因子を把握するために、表-1に示す配合条件のみを入力因子とした場合(13因子)と、配合条件および吹付け条件を考慮した場合(16因子)の2ケースに対して感度解析を用いて考察を行う。

4.3 入力因子数が感度解析結果に及ぼす影響

図-5に感度解析の結果の一部を示す(図中の細線は配合条件のみの結果を示し、太線

は吹付け条件も考慮した結果を示している)。

配合条件のみを入力因子として選定した場合、W/Pおよび単位セメント量が増加すると、7日強度は急激に減少する傾向にあり、細骨材表面水率および急結剤添加率の増加に伴って7日強度は増加傾向にあることが分かる。また、s/aの変化は7日強度に関してほとんど影響を与えないことが分かる。一方、吹付け条件を考慮した場合、最大吹付け圧が増加すると、7日強度は増加傾向にあり、細骨材表面水率および急結剤添加率の増加に伴って7日強度は減少傾向にあることが分かる。また、W/Pおよび単位セメント量は若干の増加傾向を示し、s/aにおいては配合条件のみ

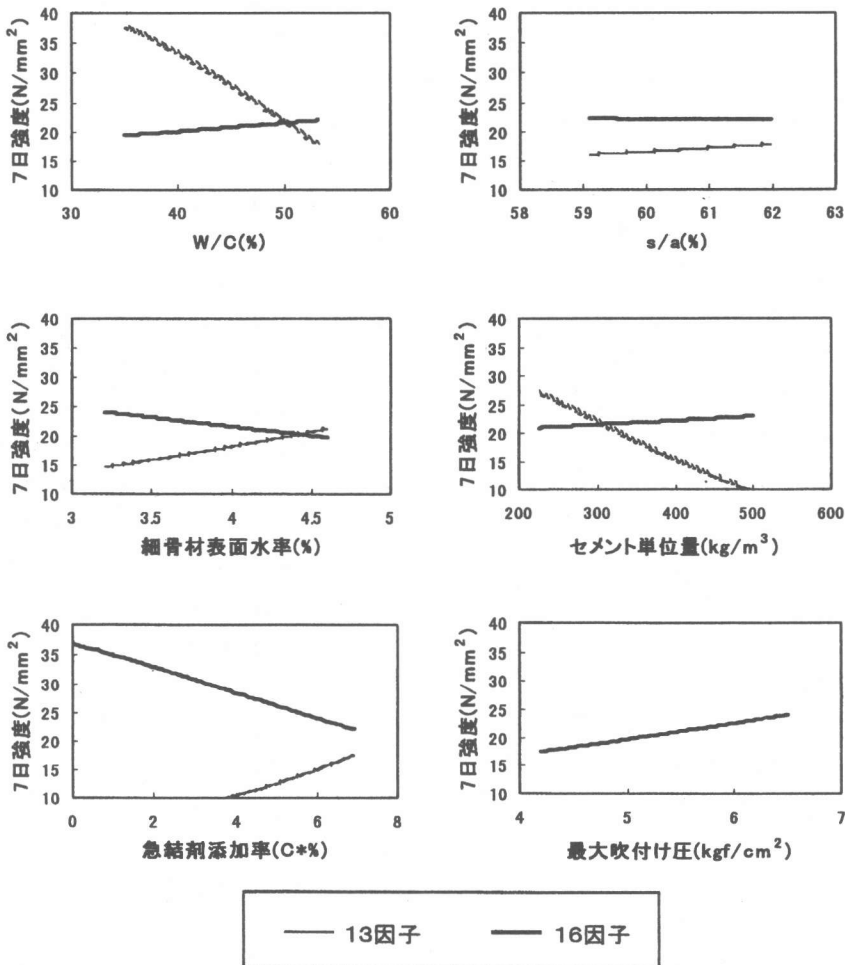


図-5 感度解析結果(7日強度)

の場合と同様にほとんど影響していないことが分かる。以上の結果により、7日強度に対して正方向の影響（図-5中の傾きが正のもの）を与える因子と負方向の影響（図-5中の傾きが負のもの）を抽出した結果を表-2に示す。

表-2 影響因子の抽出

	配合条件のみ	吹付け条件考慮
正方向	細骨材表面水率 急結剤添加率	最大吹付け圧
負方向	W/C セメント単位量	細骨材表面水率 急結剤添加率

表-2から分かるように、入力因子の違いによって7日強度に影響を与える因子（細骨材表面水率、急結剤添加率）の傾向が正反対になってしまうことが分かる。また、配合条件のみ考慮した場合においては、W/Pとセメント単位量が同様な傾向を示すが、セメント単位量のみが増加した場合を考えると、当然W/Pは減少する方向になるため、両者が7日強度に与える影響は反対方向になると考えられる。しかし、感度解析の結果を見ると両者の7日強度への影響は同じ方向になっており、実現象と異なっているように思える。また、全体的な傾向をみると吹付け条件を考慮した感度解析の方が、実現象に即しているように思われる。実際、当研究室が平成9年度に行った実規模模擬トンネルにおける吹付けコンクリートの実験の結果²⁾と比べてみても吹付け条件を考慮した場合の方が、より正しくその傾向を追えているといえる。

今回、吹付けコンクリートの品質推定の手法として、ニューラルネットワークの適用を試みたが、現段階では必ずしも良い結果を得たとは言えない。これは、吹付けコンクリートはその材料から完成に至るまでのプロセスにおいて、3つのブラックボックスを通過しなくてはならないからである。まず、個々の材料が”練混ぜ”という一つのブラックボック

スを通過することによって、フレッシュコンクリートになり、さらに、そのコンクリートが”ポンプ圧送”というもう一つのブラックボックスを通過して、最終的に”吹付け”という最後のブラックボックスを通過することによって始めて吹付けコンクリートとしての性状が得られると考えられる。したがって、配合条件および吹付け条件から直接的に、”練混ぜ”、”ポンプ圧送”、”吹付け”という複雑に絡まったブラックボックスを解明することは非常に困難であると考えられる。今後、各ブラックボックスの段階ごとにおけるデータの収集、つまり配合条件から練混ぜを通過したフレッシュ性状、フレッシュ性状からポンプ圧送を通過したコンクリートの性状、さらには急結剤を添加して吹付けを通過した吹付けコンクリートの性状を個々に把握していくことが必要であると思われる。

5. まとめ

本研究から得られた成果を以下に述べる。

吹付けコンクリートの品質を推定する場合、配合条件のみの場合と比較すると、吹付け条件を考慮した方が適切に推定することが可能であると考えられる。今後は、配合条件から練混ぜを通過したフレッシュ性状、フレッシュ性状からポンプ圧送を通過したコンクリートの性状、さらには急結剤を添加して吹付けを通過した吹付けコンクリートの性状を個々に把握していくことが必要であると思われる。

【謝辞】 本研究費の一部は日本道路公団からの受託研究費であることを付記する。

【参考文献】

- [1]大矢孝、魚本健人、堤知明：ニューラルネットワークを用いたコンクリートの製造管理システムに関する研究、土木学会論文集、No514/V-27.pp9-18.1995.5
- [2]小林裕二、魚本健人ほか：各種配合要因に伴う吹付けコンクリートコンクリートの強度および空隙特性、日本コンクリート工学協会年次論文報告集（投稿中）