

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (22)

— ニューラルネットワークによる吹付けコンクリートの品質推定手法の現場適用性 —

Properties of Shotcrete (22)

— On-site applicability of the quality prediction method for shotcrete using neural network —

細川佳史*・西村次男**・魚本健人***

Yoshifumi HOSOKAWA, Tsugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

吹付けコンクリートの品質においては、圧縮空気によるコンクリートの打設方法や急結剤の使用といった施工・材料面での特殊性や、施工機械、環境条件の相違など、品質に影響をおよぼす因子が多数存在し、これらが複雑相互に絡み合うことから、合理的な品質管理を行うことが難しい状況にある。この状況に対し筆者らはニューラルネットワークの優れた推定性能に着目、これを活用した品質推定・品質管理手法を検討してきた^{1,2)}。

筆者らは、東京大学において過去4年間実施した、吹付けコンクリートの高品質化を目的とする共同研究によって、膨大な実験データを得た。そしてそれをもとに種々の要因に対応するニューラルネットワーク（以下単にニューロと称す）による品質推定モデルを構築した³⁾。今回、トンネル実施現場における吹付け実験の機会を得たことから、本研究では、構築した推定モデルの実施工現場への適用性を検討した。また、その検討結果を踏まえ、実施工現場における品質管理手法の構築を試みた。

2. 吹付け実験の概要

2.1 配合と吹付けシステム

本実験で使用した吹付けコンクリートの配合を表1に示す。また、吹付けシステムの概要を図1に示す。実施工現場における吹付け方式は湿式方式であり、吹付け機はポンプ圧送式であった。また空気流量計および圧力計を図に示す箇所に設置した。

2.2 試験ケース

表2に試験ケースを示す。圧送空気流量の10 (m³/min) は圧送空気バルブの開放に、6 (m³/min) は、吹付け施工

可能な範囲内で圧送空気バルブを最も絞った状態でそれぞれ相当する。また、吹付け角度の0°は、JSCE-F 561に準じた木製パネル型枠（以下コア箱と称す）に吹付けた場合を、90°はトンネル掘削部の天頂部から左右45°の範囲を吹付けた場合にそれぞれ相当する。

2.3 測定項目

吹付けコンクリート品質の測定項目は24時間強度 (JSCE-G 561に準拠)、28日強度、リバウンド率とした。28日強度は、φ75×100 (mm) 形状のコアをコア箱供試体および地山天頂部から採取し、標準水中養生で養生したのち、JIS A 1108に準拠して測定した。リバウンド率は、吹付け角度0°の場合では、コア箱に吹付けた際に付着せず落下したリバウンド材の重量から求め、吹付け角度90°については、天頂部に2分間吹き付けを行い、吹付け範囲直下に生じた全リバウンド材の重量から求めた。また、吹付け施工中においては、配管内の圧力およびコンプレッサ

表1 コンクリート配合

Gmax (mm)	Sl' (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	C (kg/m ³)	急結剤添加率 (C×%)
15	17	2.5	60.4	360	7

Sl': スランプ, C: 単位セメント量

表2 試験ケース

No.	吹付け距離 (m)	圧送空気流量 (m ³ /min)	吹付け角度 (°)
1	1.0	10	0 (コア箱) および 90 (天頂部)
2	2.0		
3	3.0		
4	1.0	6	
4	2.0		
6	3.0		

*太平洋セメント株式会社

**東京大学生産技術研究所 物質・生命部門

***東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

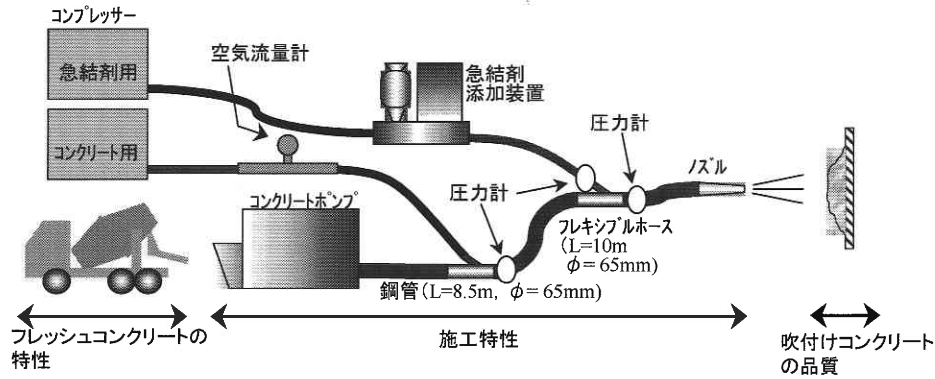


図1 吹付けシステムの概要図

一から送られるコンクリート圧送用の空気の流量を常時測定した。

3. 品質推定モデルの概要

3.1 ニューロによる品質推定モデル

本研究で検討する吹付けコンクリートの品質推定モデルは、図1に示した吹付けコンクリートの施工工程を3分割し、それぞれにNN1, NN2, NN3のニューロを構築して相互結合したものである。それぞれのニューロは次の特徴を有する。

- NN1：配合条件 C_{mix} , 材料条件 C_{mr} , 環境条件 C_{env} からフレッシュコンクリートの特性 P_{fc} を推定するニューロ
- NN2：施工条件 C_{sh} , 配合条件 C_{mix} , フレッシュコンクリートの特性 P_{fc} から施工特性 P_{sh} を推定するニューロ
- NN3：施工特性 P_{sh} , 施工条件 C_{sh} , 配合条件 C_{mix} , 材料条件 C_{mr} , ベースコンクリート特性 P_{bc} から吹付けコンクリートの品質 Q_{sh} を推定するニューロ

以上を式で示すと下記の式 (1), 式 (2), 式 (3) となり, NN1 および NN2 の出力がそれぞれ次段階のニューロの入力となっている。

$$P_{fc} = NN1(C_{mr}, C_{mix}, C_{env}) \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{sh} = NN2(P_{fc}, C_{mix}, C_{sh}) \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_{sh} = NN3(P_{sh}, C_{mr}, C_{mix}, C_{sh}, P_{bc}) \dots\dots\dots (3)$$

4. 現場実験による検証

ここでは、上記のように再構築した品質推定モデルの現場適用性について検討した。なお、ここではNN1によるフレッシュコンクリート特性 P_{fc} の推定値を用いず、フレッシュコンクリート特性が既知の場合における品質推定をNN2およびNN3によって行い、実測値と比較することとした。表2の6ケースの吹付け実験の実測値と品質推定モデルによる推定値の関係を、吹付け角度 0° のコア箱に吹き付けた場合の24時間強度, 28日強度およびリバウンド率については図2に、吹付け角度 90° の天頂部周辺に吹き付けた場合の28日強度およびリバウンド率については図3に示す。また式 (4) より求められる推定値と実測値の

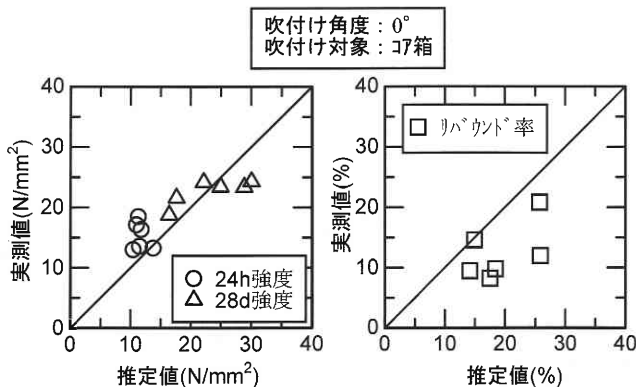


図2 吹付け角度 0° における実測値と推定値の関係

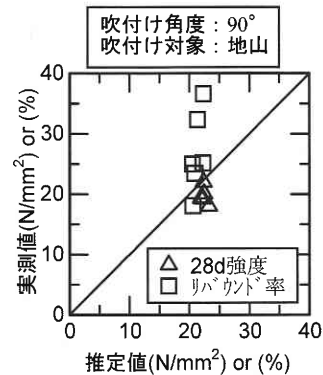


図3 吹付け角度 90° における実測値と推定値の関係

表 3 推定値と平均値の平均誤差 e_k

吹付け角 度 (°)	平均誤差 e_k		
	24h 強度 (N/mm ²)	28d 強度 (N/mm ²)	リバウンド 率(%)
0	4.51	3.90	8.18
90	—	3.04	7.81

表 4 NN2 の学習結果

NN2	平均誤差 e_k	
	圧送圧力の SD (MPa)	衝撃力ひずみの SD (μ)
学習	2.27E-04	1.29E-02
未習	2.83E-03	2.44E+00

表 5 NN3 の学習結果

NN3	平均誤差 e_k		
	24h 強度 (MPa)	28d 強度 (MPa)	リバウンド率 (%)
学習	4.98E-02	1.14E-01	5.97E-02
未習	1.67E+00	2.42E+00	1.33E+00

平均誤差 e_k を表 3 に示す.

$$e_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j (M_{k,j} - Q_{k,j})^2} \dots\dots\dots (4)$$

(ここに、 n は推定ケース数、 $M_{k,j}, Q_{k,j}$ ($j=1, \dots, n; k=1, \dots, m$; m は NN 3 の出力因子数) はそれぞれ実測値、推定値を表す)

これらの結果から、28 日強度は概ね良好に推定できているものと考えられる。一方 24 時間強度は平均誤差が 28 日強度より大きく、28 日強度ほどの推定精度はない。また、リバウンド率については平均誤差が強度よりかなり大きくなっており、推定精度はかなり劣るといえる。リバウンド率は強度よりも施工条件や施工環境の影響を受けやすく、模擬トンネルの実験データのみで構築した推定モデルでは、実施工現場のリバウンド率を推定することは現状では難しいと考えられる。リバウンド率の推定精度を上げるには、実施工現場のデータをニューロに学習させるのが最も確実であるが、推定モデルの改善という観点から言えば、より施工現場に則したデータ、例えばトンネル断面形状に関する情報を入力因子に加えることも有効であろう。

5. 品質管理への応用

5.1 品質推定モデルを用いた吹付け施工条件の最適化システム

(1) 品質推定モデルの再構築

ニューラルネットワークによる吹付けコンクリートの品質管理システムについては既報¹⁾にて報告されているが、ここでは、本研究にて構築された推定モデルを使用する吹付け施工条件の最適化システムについて検討した。

上記のとおり、模擬トンネルの実験データのみで構築した推定モデルによる実施工現場の品質推定は、一部に難しい面が認められたが、最適化システムの構築には、品質推定モデルに更に高い推定精度が求められる。そこで、現場実験で得られた表 2 の 6 ケースの実測値を新たに学習データに加え NN 2, NN 3 に学習させ、品質推定モデルの再構築を行った。ここで、学習終了条件は、過剰学習を防止するため、未習データが上昇に転ずる前とし、未習データは入力データのうち最大あるいは最小でない値を有するデー

タを選択した。用いたデータ数は、学習データが NN 2, NN 3 それぞれ 75 および 87 個、未習データは NN 2, NN 3 ともに 3 個である。NN 2, NN 3 の学習結果をそれぞれ表 4, 表 5 に示す。NN 3 の平均誤差のうち、24 時間強度が実測値を考慮すると若干高い値となったが、実用上は問題ないものと考えられる。したがって NN 2, NN 3 の学習は適切に行われ、実施工現場の品質を精度良く推定できる推定モデルを構築することができた。

(2) 吹付け施工条件最適化システムの概要

本研究にて提案する吹付け施工条件最適化システムにおいて、最適探索を行う対象は、吹付け距離 L , 圧送空気流量 A , 急結剤添加率 D , 吐出量 V とし、その外の施工条件ならびに配合条件等全ての条件 $Const$ は一定とした。最適探索は品質推定システムの NN 2, NN 3 を用いて次のとおり行った。

①吹付け距離 L , 圧送空気流量 A , 吐出量 V から NN 2 の式 (7) により施工特性 P_{sh} を求める。

$$P_{sh} = NN2(L, A, V, Const) \dots\dots\dots (5)$$

②NN 3 において所要品質 Q_{sh} を満足する最適施工条件、すなわち施工特性 P_{sh}^{opt} および急結剤添加率 D^{opt} の探索を式 (6) のうで行う。

$$Q_{sh} = NN3(P_{sh}, D, Const) \dots\dots\dots (6)$$

③NN 2 において最適施工特性 P_{sh}^{opt} を満足する最適施工条件、すなわち吹付け距離 L^{opt} , 圧送空気流量 A^{opt} , 吐出量 V^{opt} の探索を式 (5) のうで行う。

以上から求められる $L^{opt}, A^{opt}, D^{opt}, V^{opt}$ が所要品質を満たす最適施工条件である(最適施工特性 P_{sh}^{opt} は最適探索の過程で求められるが、実際の施工では制御できない因子であるから最適施工条件には含めない)。なお、NN 2,

NN3における最適探索のアルゴリズムは、既報⁴⁾にしたがい、変換法の一つである内点法によって、制約条件付きの問題を制約条件なしの問題に帰着させ、ニューロの学習アルゴリズムに用いられている最急降下法によった。

5.2 施工条件の最適化試算定

以上の施工条件最適化システムの適用例として、吹付け角度が0°から90°まで変化した場合の最適化試算定を行った。吹付け角度0°と90°では、吹付けコンクリートの品質に差が生じる場合が指摘されていることから¹⁾、ここでは吹付け角度45°、90°の品質が0°と同等となる施工条件の探索を試みた。

試算定の対象とした吹付けコンクリートの条件を表6に示す。この条件で角度0°で吹付けたときの28日強度、リバウンド率を所要品質とし、この品質を満足する角度45°、90°における施工条件を最適化システムにより探索した。その際の手順として、まずは吹付け距離、圧送空気流量、急結剤添加率の3条件を最適化対象とし、これで最適化不可の場合には吐出量をさらに最適化対象に加えて探索することとした。

試算定の結果として、最適化前後の施工条件と品質を表7に示す。角度0°および最適化前の角度45°、90°の施工条件と品質は、吹付け実験による実測値であり、吹付け角度の増加にともない品質が低下、とくにリバウンド率が大きくなっている。これを、本最適化システムの最適施工条件探索を行って得た値が最適化後に示される値であり、吹付け角度45°および90°において、0°と同等の品質が得られたことがわかる。ここで、角度45°では吹付け距離、圧送空気流量、急結剤添加率の3条件の最適化で所要品質が得

られたが、角度90°においては、上記3条件のみでは最適条件が得られなかったため、吐出量を最適化対象に加えて再度最適条件探索を行い、所要品質を得る事が可能となった。以上の試算定から、吹付け角度が変化しても品質が一定に保たれる施工条件が求められ、本最適化システムの有用性が確認された。

6. ま と め

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ニューロの入力因子を検討した結果、各因子の平均値と標準偏差で正規化した値を入力データとすると、ニューロの学習効率が上がることが認められた。
- (2) 模擬トンネルのデータを用いて構築した品質推定モデルの実現場適用性を検討した結果、28日強度の推定は良好であったが、リバウンド率の推定精度はかなり劣った。リバウンド率の推定精度の改善には、トンネル断面形状などの施工現場に即したデータをニューロの入力因子に加えることが有効と考えられる。
- (3) 現場実験のデータをニューロに学習させて推定モデルの精度を改善し、その推定モデルを利用した施工条件最適化システムを構築した。吹付け角度を変えた場合の最適施工条件探索に適用したところ、吹付け角度が変化しても品質が一定に保たれる施工条件が求められた。

謝 辞

本実験は、東京大学生産技術研究所における「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究による成果であり、共同研究各社、協力会社および関係各位に深く感謝致します。

(2002年3月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 小林裕二ほか：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管理システムの提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1369-1374，1999.6
- 2) 細川佳史ほか：ニューラルネットワークによる吹付けコンクリートの品質推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.1393-1398，2000.6
- 3) 細川佳史ほか：吹付けコンクリートの品質管理手法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1375-1380，2001.6
- 4) 大矢孝ほか：ニューラルネットワークを用いたコンクリート製造管理システムに関する研究，土木学会論文集，No.514/V-27，pp.9-18，1995.5

表6 吹付け角度を変化させた吹付けコンクリートの諸条件

吹付け角度	フレッシュコン特性			配合特性			施工条件 圧送圧力
	スランプ	空気量	逆スランプ 流下時間	単位体積 質量	粗骨材 体積	細骨材 体積	
0°	12.5cm	2.2%	1.18 秒	2334kg/m ³	0.266m ³	0.371m ³	0.45MPa
45°	12.0cm	2.4%	1.48 秒	2334kg/m ³	0.266m ³	0.371m ³	0.45MPa
90°	12.5cm	2.3%	1.1 秒	2334kg/m ³	0.266m ³	0.371m ³	0.45MPa

表7 最適化前後の施工条件と品質

	角度 (°)	施工条件				品質	
		距離 (m)	圧送空 気流量 (m ³ /min)	急結剤 添加率 (C×%)	吐出量 (m ³ /h)	28d 強度 (N/mm ²)	リバウ ンド率 (%)
所要品質 (実測値)	0	1.5	8.70	7.0	8.0	24.0	25.2
最適化前 (実測値)	45	1.5	8.61	7.0	8.0	21.2	26.9
	90	1.5	9.57	7.0	8.0	22.8	30.0
最適化後 (推定値)	45	1.7	10.88	6.7	8.0	23.1	25.2
	90	1.7	8.92	7.0	7.0	23.0	25.3