

# 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管理システムの提案

小林裕二<sup>\*1</sup>・田湯正孝<sup>\*2</sup>・西村次男<sup>\*3</sup>・魚本健人<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は吹付けコンクリートの品質が設計において基準とした強度および耐久性を満足するような施工が行われることを目的として2段階のニューラルネットワークと最適化の手法を用いた吹付け管理システムの提案を行うものである。本報では、実験で得られたデータを学習させたニューラルネットワークを用いて本システムの構築するとともに本システムを用いた算定例として設定した品質基準を満たす最適な設定条件の試算を行った。

**キーワード：**ニューラルネットワーク、吹付けコンクリート、品質管理システム、最適化

## 1. はじめに

近年、吹付けコンクリートは、施工機器の発達や混和材料等の研究開発が急速に行われた結果、仮設部材としての適用はもとより、シングルシェルライニングに代表されるような永久構造物として設計される例も増えつつある。このため、吹付けコンクリートも普通コンクリートと同様に設計において基準とした強度および耐久性を満たすように配合設計や施工管理を行う必要がある。しかし、吹付けコンクリート工法は、練上がったコンクリートを施工面に高圧の圧縮空気によって吹付けるといった特殊な施工方法であることから、施工箇所の条件変化への対応はノズルマンや吹付け機器の操作員のかんや経験にその大部分が委ねられている。<sup>1)</sup>そのためノズルマンの熟練度や能力によってコンクリートの品質が左右されやすく、場合によっては急結剤の過剰添加や吹付け機器の設定が不適切なことにより設計において基準とした強度や耐久性に満たない吹付けコンクリートの施工が行われている可能性がある。

本研究は、このような現状の問題に対する解決方法として、ニューラルネットワークと設定条件の最適化の手法<sup>2)</sup>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を行うものである。具体的には、配合条件や吹付け条件を種々に変化して行った吹付け実験<sup>3),4),5)</sup>から得られた強度およびリバウンドに関する実験結果に対して、ニューラルネットワークを適用し品質の推定を試みた。そして、構築したネットワークと最適化の手法を組み合わせることで、現場環境や施工箇所の条件変化に対しても目標基準を満足する吹付けコンクリートの品質が得られる配合条件や施工条件の適切な設定の探索を行なえるシステムの構築を目指したものである。

## 2. ニューラルネットワークの構築

### 2.1 入力に使用したデータ

本ネットワークの入力に使用したデータは、空気搬送方式の吹付け機を用いて、種々に条件を変化させて行った湿式方式の吹付け実験により得られたものである。

実験は、配合条件、吹付け機器の設定条件および施工箇所の条件を表1示すように変化させて行った。詳細な実験内容および結果については既往の報告<sup>3),4),5)</sup>に示す通りである。実験は表1に示すNo.1~10とNo.11~No.28の2回に分けて実施しており、1回目では配合条件

\*1 佐藤工業（株）土木本部 技術部門トンネルグループ（正会員）

\*2(株)大林組 土木技術本部 技術第2部

\*3 東京大学生産技術研究所 第5部（正会員）

\*4 東京大学国際・産学共同研究センター 教授 工博（正会員）

表1 実験ケース

No.	ベースコンクリート配合条件						吹付け機器類の設定条件					施工箇所の条件	
	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )	空気量(%)	高性能減水剤(C×%)	急結剤添加率(C×%)	吹付け圧力(MPa)	コンクリート吐出量(m <sup>3</sup> /hr)	吹付け距離(m)	急結剤添加位置(m)	圧送配管径(mm)	吹付け角度円周方向(°)	吹付け角度軸方向(°)
1	49	62	360	1.1 0.5 — 0.35 0.8 0.7 0.45 0.25 — —	7	5	4	1.5	3.1	50	0	0	
2	54												
3	59												
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11		64	360	2	—	7	8	1.5	2.6	65	0	0	
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25	50												
26													
27	64												
28													

の影響を調べることを目的に吹付け機器類の設定条件や施工箇所の条件を1つに固定して配合のみを変化させて行った。2回目のNo.11～No.28では配合条件を変化させた実験も追加して行っているが基本的には1種類の配合を用いて吹付け機器類の設定条件や施工箇所の条件を変化させてその影響を調べている。

ニューラルネットワークに使用したデータの数は、配合条件を変化した実験で10個、吹付け機器類の設定条件や施工箇所の条件を変化させた実験で18個の計28個のデータを使用した。このうちネットワークの学習に使用したデータは26個であり、2個のデータはネットワークの学習が適切に行われ、実験で行わなかつた場合についても実験結果の推定が可能か否かの検証に用いた。ニューラルネットワークは学習データのない範囲での推定に対する信頼性が低いため、検証用のデータには水準の中間値のデータを選んで使用した。

本解析で使用したデータはノズルマンの熟練度や能力の差による値の不確かさを取り除くため同一の実験者によって限られた制約条件のもとで、基本条件(No.3, No.12)以外の各条件についてはそれぞれ1回のみ行われた結果である。よって、測定方法に関しては統一されてい

るためそこから生じる誤差は小さいと考えられるが、各条件について1回のみ行われた実験から得られたデータであることから、その結果が母集団を適切に代表しているとは言い難いと考えられる。<sup>6)</sup>

しかし、本論文の趣旨は、吹付けコンクリートの品質管理システムの提案が目的であるため、データの精度や信頼性に関する議論はここではとくに行わず、本実験で得られたデータを各条件における母集団の代表値と仮定してネットワークへの入力に用いた。

## 2.2 ニューラルネットワークの入出力項目

本システムは2段階のネットワークを構築した。第1段階目のネットワークでは、図1に示すように吹付ける前のコンクリートの配合条件と吹付け機器類の設定条件を入力項目として、目視評価により得られた配管の脈動状態を出力項目としたネットワークを構築した。これは、経験を有する技術者により5段階の目視評価によって点数付けを行った結果である。具体的には実験で基本とした吹付けによる配管や吹き出すコンクリートの脈動状態の評価を基準点の3として、1：非常に悪い、2：悪い、4：良好、5：非常に良い、とした。つまり、吹付け時に配管や吹き出すコンクリートに激しく脈動が生

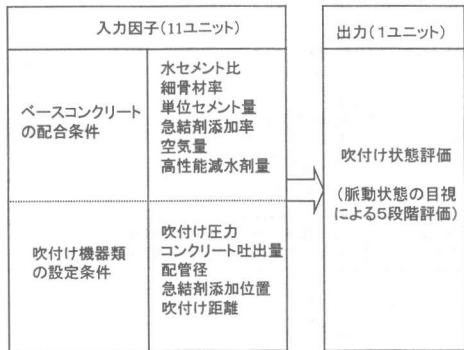


図1 第1段階ネットワークの入出力因子

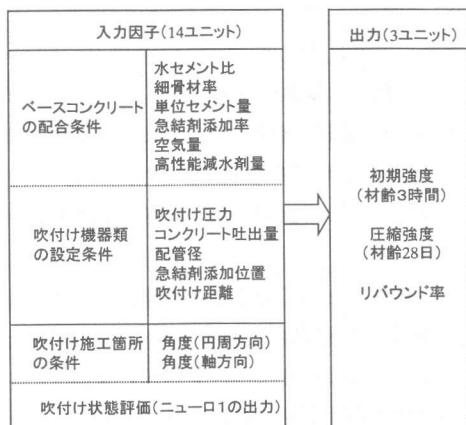


図2 第2段階ネットワークの入出力因子

じ閉塞が起こる可能性が高い状態を1とし、脈動がまったく生じない吹付け状態を5と評価した。

また、第2段階目のネットワークでは、図2に示すように、第1段階目のネットワークの入力項目の他に、吹付け施工箇所の条件と第1段階目のネットワークの出力項目である脈動状態の目視評価を入力項目として付け加えた。そして、吹付けコンクリートの品質項目である材齢3時間の初期強度・材齢28日の圧縮強度および施工性の評価としてのリバウンド率を出力項目とした。

ここで、ネットワークを2段階の構成としたのは、本研究では最終的に最適化の手法を用いて吹付けコンクリートの品質が目標基準を満たすように、配合条件や機器の設定条件を変化させることを目的としている。しかし、やみくも

に配合条件や機器の設定条件を変化させてしまえば、現実的でない設定条件のためにコンクリートが閉塞したり、激しい配管の脈動が生じて急結剤の混合状態が不均一になりやすく、吹付けコンクリートの品質が著しく低下することがあると報告されている。<sup>7)</sup>そこで、第1段階目のネットワークで脈動状態の目視評価を出力することで、配合条件や機器の設定条件を変化させた場合にも適切な吹付けが可能か否かの判定を行うことができるからである。

### 2.3 推定モデルと学習結果

本学習で使用したニューラルネットワークモデルは、階層型のネットワークモデルを採用し、学習方法はバックプロパゲーション法を使用した。学習は過剰学習を防止して、汎用性を持たせるために未学習データの平均二乗誤差が増加に転じる前に学習を終わらせる回数とした。また、中間層の数と中間層のユニット数については、とくに詳細な検討は行っていないが既往の研究<sup>8)</sup>を参考に、第1段階目も第2段階目も中間層1層、中間層のユニット数を20ユニットとした。

第1段階目のネットワークの学習結果を表2に示す。目視評価は5段階の整数値で与えられるため、推定値と教示値の誤差の絶対値が0.5より小さければ、推定値の小数点以下を四捨五入して整数とした場合に、両者の誤差はなくなると考えられる。表2より誤差の絶対値の最大

表2 学習結果(第1段階目)

目視評価点 (脈動状態)	平均2乗誤差		誤差の絶対値の最大値	
	学習データ	未学習データ	学習データ	未学習データ
目視評価点 (脈動状態)	0.120	0.314	0.445	0.427

表3 学習結果(第2段階目)

目視評価点 (脈動状態)	平均2乗誤差			
	目視評価を入力とした場合		目視評価を入力としない場合	
	学習データ	未学習データ	学習データ	未学習データ
初期強度 (材齢3時間)	0.001 (N/mm <sup>2</sup> )	0.265 (N/mm <sup>2</sup> )	0.027 (N/mm <sup>2</sup> )	0.582 (N/mm <sup>2</sup> )
圧縮強度 (材齢28日)	0.019 (N/mm <sup>2</sup> )	1.464 (N/mm <sup>2</sup> )	0.215 (N/mm <sup>2</sup> )	2.130 (N/mm <sup>2</sup> )
リバウンド率	0.012 (%)	3.766 (%)	0.229 (%)	3.784 (%)

値は学習データおよび未学習データでそれぞれ 0.445, 0.427 であったことから第 1 段階目のネットワークが適切に構築できたと判断した。

第 2 段階目のネットワークの学習結果を表 3 に示す。脈動状態の目視評価を入力として考慮する場合の方が考慮しない場合よりも、精度よい推定結果が得られた。また、誤差の大きさについては、リバウンド率の推定結果で若干大きくなつたが、本システムで最終的に管理の対象とした強度については実用上問題となる程度の大きさの誤差ではないと判断し適切なネットワークの構築がなされたものと判断した。

### 3. 品質管理システムの提案

#### 3.1 システムの概要

提案するシステムの全体の流れを図 3 に示す。本システムでは、第 1 段階目のネットワークで吹付けが可能か否かの判定を行い、第 2 段階目のネットワークで吹付けコンクリートの品質の推定を行うものとした。

吹付けコンクリートの施工ではベースコンクリートの配合条件や吹付け機器の種類・配管の構成など工事に先だって試験施工や過去の実績から判断して決めておくべきことと、吹付け圧力・コンクリート吐出量・吹付け距離および急結剤添加率など現場において施工箇所の条件や状態（土質条件・吹付け方向）に応じて、ノズルマンや機器の操作員の経験やかんに基づいた判断によって調節され設定されるものがある。

本システムでは基本的に、吹付けコンクリートの品質がばらつく主要原因の一つであると考えられる現場における設定条件の探索を行うものとした。

具体的には、修正前の品質が目標基準を満足するか否かの判定を行い目標基準を満足しない場合は、それを満たすように、現場において変化させることのできる条件を繰り返し変化することで修正していく。修正方法は、大矢ら<sup>2)</sup>が用いた最適化の手法と同様に、変換法の 1 つである内点法によって、制約条件付きの問題を制

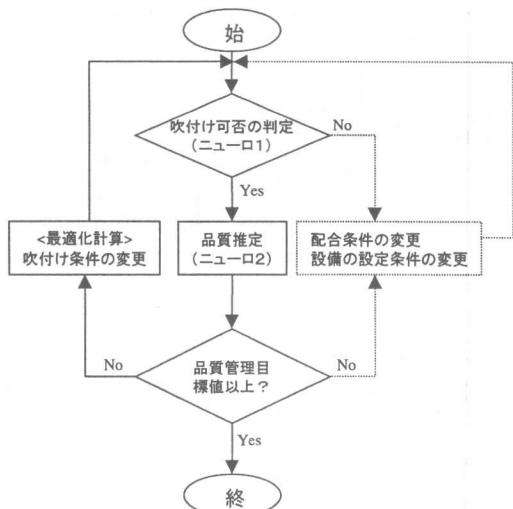


図 3 システムの流れ

約条件なしの問題に帰着させ、ニューラルネットワーク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て最適化を行うことにより行うものとした。

一方、現場において変化できる条件によっても基準を満たす吹付けコンクリートの品質が得られない場合は、配合条件や機器類の種類などの計画段階からの変更が必要であると判断しそれらの変更を行うものとした。

#### 3.2 システムを用いた試算定

構築した 2 段階のネットワークと最適化の手法を用いて、提案するシステムを用いての試算定を行った。

吹付け箇所の施工条件の一例として、ここではトンネルを施工する場合に欠くことができない円周方向に角度を変えて吹き付け施工を行う場合を考えた。図 4 は円周方向の角度以外の条件はすべて一定として行った吹付け実験の材齢 28 日の圧縮強度について示したものである。本実験で行った結果の範囲では、吹付ける向きによって違いが現れ、鉛直上向きに角度をつけて吹付けた場合に圧縮強度の低下がみられた。つまり、吹付けコンクリートの圧縮強度についての品質管理を水平に吹いた場合での供試体を行ったとすると、上向きに角度をつけて吹付けた場合では、基準に満たない品質の吹付けコン

クリートの施工が行われている可能性がある。

そこで本システムを用いて吹き付ける方向を変えた場合にも吹付けコンクリートの品質が目標とする基準を満たすように設定条件の探索を行った。目標とした品質基準は材齢3時間の初期圧縮強度と材齢28日の圧縮強度について表4のように管理目標値1、管理目標値2の2種類を設定した。ベースコンクリートの配合条件および機器類の種類・配管の構成は実験で行った条件で固定し、現場で変化することが可能な吹付け圧力・コンクリート吐出量・吹付け距離・急結剤添加率の4つの設定を最適化の手法を用いて変化させた。変化させるにおいては機器の能力の現実的な範囲とネットワークへの学習データの範囲を考慮して下記に示すような制約条件を設けた。

3.0 ≤ 吹付け圧力(MPa) ≤ 5.5

4 ≤ コンクリート吐出量(m<sup>3</sup>/hr) ≤ 10

0.5 ≤ 吹付け距離(m) ≤ 2.0

4 ≤ 急結剤添加率(C×%) ≤ 10

また、設定条件を変更した場合に1段階目のネットワークで随時行われる吹付け可否の判定について、脈動の目視評価が2より小さい値、つまり、2：悪い、1：非常に悪いとなった場合や、上記の設定を制約条件内で変化させてでも基準品質を満たさない場合には、計画時点からの見直しが必要であると判断してベースコンクリートの配合条件を表5に示す配合1から配合2に変更することとした。

### 3.3 試算定結果

修正前後の強度・リバウンド率および目視評価点の変化を表6に、修正前後の設定条件の変化を表7に示す。

管理目標値1に対しては目標品質に満たない上向き吹きに付けた場合について最適化が行われた。これより上向きに吹付けた場合について4条件を探索した設定にして吹付け施工を行うことで、すべての方向で目標品質を満たす施工が可能となることを示している。

管理目標値2では、現場で変化できるとし

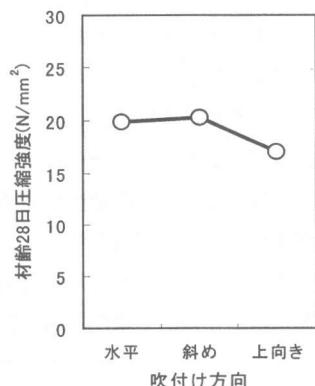


図4 吹付け方向と圧縮強度の関係

表4 品質管理目標値

	材齢3時間初期強度	材齢28日圧縮強度
管理目標値1	1.5 N/mm <sup>2</sup> 以上	18 N/mm <sup>2</sup> 以上
管理目標値2	3.5 N/mm <sup>2</sup> 以上	25 N/mm <sup>2</sup> 以上

表5 配合条件

	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )	空気量(%)	高性能減水剤(C×%)
配合条件1	64	60	360	2	-
配合条件2	50	60	460	2	0.7

た4条件の変化だけでは目標とした品質が得られず、配合条件を配合1から配合2と変化し再度計算を行うことによってすべての吹付け方向で目標基準を満たす設定条件が得られた。

### 4. まとめと今後の課題

普通コンクリートと比べると、さまざまな要因の影響により品質のばらつきが大きくなる可能性がある吹付けコンクリートに対して、ニューラルネットワークと最適化の手法を用いた品質管理システムの提案を行った。その結果、目標品質を満たす配合および施工条件の探索がある程度可能となった。

しかし、本システムにより探索した条件はニューラルネットワークに学習したデータによる重みとしきい値から算定される推定値によるものであり、本システムの正当性を立証するため

には探索した条件による裏付けとなるデータの収集が不可欠であると考える。また、本システムを実際の現場施工に適用するためには、ニューラルネットワークが適切に構築されることが必要不可欠な条件である。ニューラルネットワークは、学習に用いるデータの精度や範囲が直接システムの善し悪しに影響してしまうことから、本システムがより汎用性があり実用的なものとなるためには、今後より精度の高い広範囲におよぶデータの収集が必要であると考える。

### 謝辞

本研究は東大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、共同研究員である（株）青木建設 牛島栄氏、（株）NMB 富山徹氏、鹿島建設（株） 大野俊夫氏、（株）熊谷組 岡田喬氏、佐藤工業（株）大野一昭氏、清水建設（株）浅野篤氏、大成建設（株）坂本淳氏、（株）竹中土木 安藤慎一郎氏、電気化学工業（株）入内島克明氏、東急建設（株）伊藤正憲氏、飛島建設（株）平間昭信氏、西松建設（株）佐藤幸三氏、太平洋セメント（株）綾田隆史氏、（株）間 杉山律、前田建設工業（株）赤坂雄司氏、協力会社として参加頂いた富士物産（株）阿部隆夫氏、（株）北川鉄工所 見浦光夫氏、（株）東京測器研究所 佐藤達也氏、吹付け実験に参加された多くの方々、千葉工業大学卒論生 今村信仁氏、芝浦工业大学卒論生 久保田雄彦氏に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 土木学会、コンクリート標準示方書、1996, pp. 275-289
- 2) 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製造管理システムに関する研究、土木学会論文集、No. 514/V-18, pp. 65-74, 1993. 2.

表6 修正前後の品質

	吹付け方向	初期強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	リバウンド率 (%)	目標評価点
修正前品質 (実測値)	水平	2.2	23.7	25.4	3
	斜め45°	2.2	20.2	34.0	3
	上向き	2.2	17.0	39.5	3
管理目標1に対する修正品質 (推定値)	水平	2.2	23.7	25.4	3
	斜め45°	2.2	20.2	34.0	3
	上向き	1.5	18.0	42.3	5
管理目標2に対する修正品質 (推定値)	水平	5.1	35.6	11.0	4
	斜め45°	4.1	26.1	33.4	4
	上向き	3.6	25.0	44.6	5

表7 修正前後の設定条件

	吹付け方向	吹付け 圧力 (MPa)	コンクリー ト吐出量 (m <sup>3</sup> /hr)	吹付け 距離(m)	急結剤 添加率 (C×%)	ベースコン クリート 配合
修正前設定 (実測値)	水平	4.0	8.0	1.5	7.0	配合条件1
	斜め45°					
	上向き					
管理目標1に対する修正設 定	水平	4.0	8.0	1.5	7.0	配合条件1
	斜め45°					
	上向き					
管理目標2に対する修正設 定	水平	4.0	6.0	1.5	7.0	配合条件2
	斜め45°					
	上向き					

- 3) 東京大学生産技術研究所：「高品質吹付けコンクリートの開発」、共同研究報告書 1997
- 4) 安藤慎一郎ほか：吹付けコンクリートの品質に及ぼす各種吹付け条件の影響、コンクリート工学年次論文報告集、第 21 卷（投稿中）
- 5) 杉山律ほか：吹付けコンクリートの圧送性状（空気圧送とポンプ圧送）に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第 21 卷（投稿中）
- 6) 松島 学・松井邦人：採取個数から母集団の推定誤差に関する一考察、土木学会第 47 回年次学術講演会概要集 第 I 卷, pp. 1224-1225, 1992. 9.
- 7) 荒木昭俊ほか：EPMA を用いた吹付けコンクリート中の急結材濃度分布の評価、セメント・コンクリート論文集, pp. 248-255, 1998
- 8) 市川紘：階層型ニューラルネットワーク-非線形問題解析への応用、共立出版株式会社, 1993. 6.