

論文 吹付けコンクリートの品質管理手法に関する検討

細川佳史^{*1}・大野俊夫^{*2}・西村次男^{*3}・魚本健人^{*4}

要旨：吹付けコンクリートの品質管理手法構築の基礎的検討を目的として、ニューラルネットワークを適用した品質推定モデルの構築、およびその検証を行った。本検討の品質推定モデルは、吹付け施工工程を3分割してそれぞれにニューラルネットワークを構築することにより、入出力が相互結合された3つのネットワークにより構成されるものである。本モデルは、材料・配合・施工条件などから強度・リバウンド率を推定するものであり、検証の結果、品質推定の可能性が認められた。また感度解析により各要因が品質におよぼす影響度を比較検討した。

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、品質推定、感度解析

1はじめに

吹付けコンクリートの品質管理を考慮する場合、フレッシュコンクリートを圧縮空気で吹き付ける、またノズル直前で急結剤を添加するという特徴や、吹付け条件や環境の相違、吹付け作業員、いわゆるノズルマンの熟練度など、品質に影響を及ぼす因子が多数あり、これらが複雑相互に絡み合うことから品質管理が困難な状況にある。これに対し、ニューラルネットワークを活用した品質管理手法が検討されている¹⁾。

ニューラルネットワーク（以下単にネットワークと称す）の構築に際しては、品質に影響をおよぼすと考えられる要因について、信頼性の高いデータをなるべく多くかつ広範囲に採取しておくことが、推定精度の高いネットワークを得る必要条件となっている。筆者らは過去4年間、東京大学において吹付けコンクリートの高品質化を目的とした共同研究を進めており、種々の要因に関する膨大な実験データを既に得ている。そこで本研究は、吹付けコンクリートの品質管理手法構築の基礎的検討を目的として、共同研究のデータを使用し各種の配合・施工要因に対応したネットワークの構築、および構築したネットワークの検証を実施した。

2吹付け実験概要

2.1配合と吹付けシステム

基本配合は表-1に示すとおり一般強度および高強度の2種類とした。スランプおよび単位セメント量を表のように定めたため、W/Cは使用する骨材等の変動により年度ごとに相違し、一般強度でW/C=55.6~63.9%，高強度でW/C=43.3~45.6%となった。

吹付けシステムを図1に示す。システムは吹付け機から空気圧送するタイプ（空気圧送方式）とポンプ圧送と空気圧送を併用するタイプ（ポンプ圧送方式）の2種類とした。それぞれ図に示す個所に圧力計を設置し空気の圧力を測定した。施工条件の基準は表-2に示すとおりである。

2.2測定項目

測定項目は24時間および28日材齢強度、リバウンド率およびコンクリート吹付け時の衝撃力をとした。これらの詳細は他の文献^{2),3),4)}を参照されたい。

表-1 基本配合条件

	Sl' (cm)	Air (%)	Q (P×%)	C (kg/m ³)	備考
一般 強度	12	2	7.0	360	
				378	繊維入
高強度	21		5.0	450	
				462	繊維入

Sl':スランプ, Air:空気量

Q:急結剤添加率, C:単位セメント量, P:全粉体量

*1 太平洋セメント株中央研究所 第1研究部 コンクリート技術グループ 工修（正会員）

*2 鹿島建設株技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 主任研究員（正会員）

*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-2 基本施工条件

	圧送方式	圧送圧力(MPa)	距離(m)	吐出量(m ³ /h)	角度(deg)
一般強度	空気	0.45	1.5	8.0	0
	ポンプ	0.25			
高強度	空気	0.50			
	ポンプ	0.35			

2.3 要因および水準

過去4年間に実施した吹付け実験の要因と水準およびそれぞれの実験ケース数を表-3に示す。150ケースの実験結果がネットワークの学習に用いられた。

3 ニューラルネットワークの概要

3.1 学習方法

ネットワークは入力層と出力層の間に中間層を持つ有する3層階層型とした。ここで、中間層のユニット数 N_{int} は以下の式(1)にて一律に決定した。

$$N_{int} = (N_{inp} - 1) \times 2 \quad (1)$$

ここで N_{inp} は入力層のユニット数である。学習終了条件は、過剰学習を防止するため、学習データと未学習データの総平均誤差がほぼ同等となったときとし、上記を満たす前に未学習データの総平均誤差が増加に転じたときは、その時を学習終了とした。なお、総平均誤差とは以下の式(2)により求められる値である。

$$E_{total} (\%) = \sqrt{\sum_i^n \sum_j^m (t_{ij} - a_{ij})^2} / (n \cdot m) \times 100 \quad (2)$$

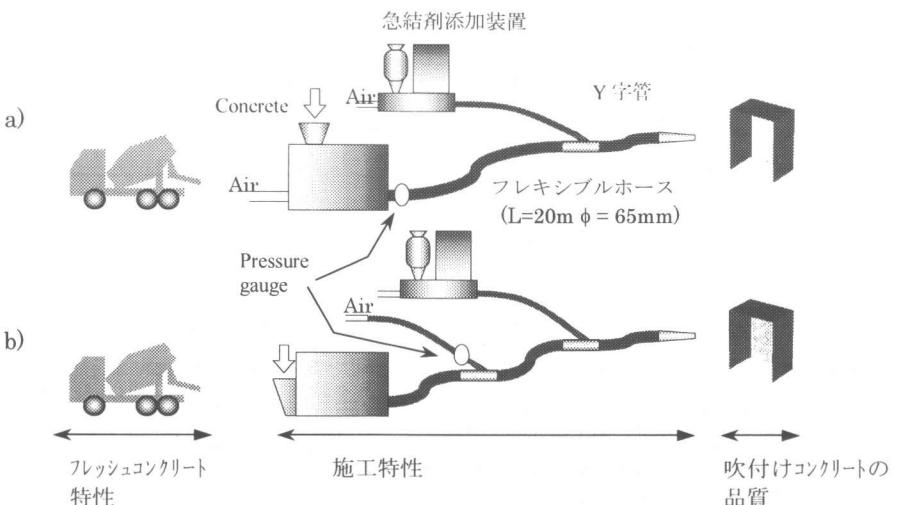


図-1 吹付けシステム概要図 a) 空気圧送方式 b) ポンプ圧送方

表-3 要因と水準およびケース数

要因	水準	ケース数
配合	W/C, s/a, スランプ, 単位セメント量, etc	22
吹付け条件	吹付け距離, 角度, 吐出量, 圧送圧力, 圧送方法, etc	54
混和材	種類, 添加量, スランプ, 空気量, etc	24
急結剤	添加率, 単位セメント量, etc	21
繊維	種類, 混入量, s/a, セメント量, etc	29
	total	150

ここで E_{total} は総平均誤差, n は実験ケース数, m は出力層のユニット数, t_{ij} は教示値, a_{ij} は推定値を示す。また、未学習データについては、実験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4ケース選択し未学習データとした。

3.2 ネットワークによる品質推定モデル

本研究では、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、それぞれの工程について以下のようないNN1, NN2, NN3のネットワークの構築を行うこととした。

NN1 : 配合条件 C_{mix} , 材料条件 C_{mtr} , 環境条件 C_{env} からフレッシュコンクリートの物性 P_{fc} を推定するネットワーク

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} を推定するネットワーク

NN3 : 施工特性 P_{sh} , 施工条件 C_{sh} , 配合条件 C_{mix} ,
 材料条件 C_{mtr} , 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} を推定するネットワーク

以上を式で示すと下記の式(3), (4), (5)のとおりであり, NN1 および NN2 の出力がそれぞれ次段階のネットワークの入力となっている。このように入出力が相互結合された 3 段階のネットワークを品質推定モデルとした。

$$P_{fc} = NN1(C_{mtr}, C_{mix}, C_{env}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P_{sh} &= NN2(P_{fc}, C_{mix}, C_{sh}) \\ &= NN2(NN1(\dots), C_{mix}, C_{sh}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Q_{sh} &= NN3(P_{sh}, C_{mtr}, C_{mix}, C_{sh}, P_{bc}) \\ &= NN3(NN2(\dots), C_{mtr}, C_{mix}, C_{sh}, P_{bc}) \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 各ネットワークの詳細

3.3.1 NN1 の入出力因子

NN1 の推定項目であるフレッシュコンクリート特性については、スランプ、空気量、逆スランプ流下時間の 3 項目とした。逆スランプ流下時間とは、30cm 以上の高さに設置した上下逆さまのスランプコーンから、これに充填されたフレッシュコンクリートが流下して全て排出されるまでの時間を示すものであり、フレッシュコンクリートの粘性を評価する目的で推定項目とした。これらにおよぼす影響が大きいと考えられる要因を材料条件、配合条件、環境条件のうちから選択し NN1 の入力因子とした。表-4 にそれを示す。実験データのうち材料の種類が異なるのは骨材および混和材であり、材料条件として入力されるのはそれらの値である。なお混和材種類の入力方法については文献¹⁾にしたがった。

3.3.2 NN2 の入出力因子

圧送圧力の変動やコンクリートが吹き付けられた際に生じる衝撃力が、品質に大きな影響をおよぼすことがわかっている^{2), 3)}。したがって NN2 の推定項目である施工特性については、圧送圧力の標準偏差（以下単に SD）および衝撃力による鋼板ひずみの SD の 2 項目とした。これらの推定項目に大きな影響をおよぼす要因として選択したものが表-5 に示した入力因子であり、選択にあたっては以下の考察に依った。まず、管内圧力についてはフレッシュコン

表-4 NN1 の入出力因子

材料条件 C_{mtr}	配合条件 C_{mix}
・混和材種類	・V*セメント
・細骨材 1FM	・V 水
・細骨材 2FM	・V 細骨材
・粗骨材 FM	・V 粗骨材
・細骨材 1 密度	・V 混和材
・細骨材 2 密度	・V 空気量
・粗骨材密度	・V 繊維
環境条件 C_{env}	・SP**剤添加率
・外気温	・AE***剤添加率

フレッシュコンクリート特性 P_{fc}
・スランプ
・逆スランプ流下時間

*V: 単位体積

SP: 高性能減水剤 *AE: 空気量調整剤

表-5 NN2 の入出力因子

配合条件 C_{mix}	施工条件 C_{sh}
・単位体積重量(理論値)	・圧送区間長
・V 細骨材	・吐出量
・V 粗骨材	・圧送圧力
・細骨材 FM	・吹付け距離
・粗骨材 FM	・吹付け角度
フレッシュコンクリート特性 P_{fc}	
・スランプ	・空気量
・逆スランプ流下時間	
施工特性 P_{sh}	
・圧送圧力の SD*	
・衝撃力による鋼板ひずみの SD	

*SD: 標準偏差

クリートのレオロジカルな特性が大きな影響をおよぼすことから⁴⁾、NN1 の出力であるスランプ、空気量、逆スランプ流下時間を入力因子とした。次に、衝撃力は、コンクリートが吹き飛ばされる速度に大きく依存すると考えられるため、速度に影響をおよぼす因子を選択する必要があるが、その選択を次のような粉体の空気輸送理論⁵⁾に基づいて行った。

円筒状（直径 D ）の水平輸送直管（距離 L ）に粉体を空気で定常輸送した場合の圧力損失は、輸送管内の空気が等温変化とみなした場合、次の式(6)にて示される ΔP_s の影響を受ける。

$$\Delta P_s = 0.0780k\Gamma \frac{F_r^{1+(\varepsilon/2.5)}}{R_c^\varepsilon} \frac{(1-\phi)^{2-\varepsilon}}{\phi} \left(\frac{D}{d_s} \right)^{1+\varepsilon} \frac{\rho_a^2}{\rho_s} \frac{L}{D} \frac{u_a^2}{2} \quad (6)$$

表-6 NN3 の入出力因子

	材料条件 C_{mtr}	配合条件 C_{mix}
入力	・混和材種類	・V セメント
	ベースコンクリート特性 P_{bc}	・V 混和材
	・コンクリート温度	・V 水
	施工特性 P_{sh}	・V 粗骨材
	・圧送圧力の SD	・V 繊維
	・衝撃力による鋼板ひずみの SD	施工条件 C_{sh}
		・急結剤添加率
出力	吹付けコンクリートの品質 Q_{sh}	
	・強度(24h 材齢)	・強度(28d 材齢)
	・リバウンド率	

ここで、 $\phi = u_s/u_a$: 粉体の速度 u_s と空気速度 u_a の比、
 $F_r = u_a/\sqrt{Dg}$: Froude 数、 R_e : Reynolds 数、 Γ : 粉体と空気の質量混合比、 ρ_a : 空気の密度、 ρ_s : 粉体の密度、 d_s : 粉体粒子の平均直径、 k および ε : 粉体粒子径により定まる定数、である。この式(6)から、コンクリート中の材料のうち衝撃力に対する寄与が大きいと考えられる細・粗骨材粒子の速度 u_s は、式(6)を構成する因子により規定されることがわかる。したがって、NN2 の入力因子にはこれらに相当するもの、あるいは関連性の強いものを因子とすれば良いことになる。すなわち、 ΔP_s については管内圧力、 Γ については吐出量とコンクリートの単位体積重量、 ρ_s についてはコンクリートの単位体積重量、 d_s については細・粗骨材の平均直径として考えると細・粗骨材の割合およびそれぞれの FM、といった関連性が考えられる。以上の考察によって NN2 の入力因子は表-5 のように定められた。

3.3.3 NN3 の入力因子

NN3 の推定項目である吹付けコンクリートの品質については、24 時間強度、28 日強度、リバウンド率の 3 項目とした。リバウンド率については急結剤の作用や施工特性の影響が支配的である^{2,4)}。また、強度に影響をおよぼす要因としては、施工特性の他に、混和材の種類や添加量、ベースコンクリートの配合が大きな影響をおよぼす。以上から NN3 の入力因子を表-6 に示すとおりとした。

4 結果および考察

4.1 学習結果

各ネットワークの学習結果を表-7、表-8、表-9

表-7 NN1 の学習結果

	平均誤差			総平均誤差(%)
	スランプ(cm)	空気量(%)	逆スランプ流下時間(sec)	
学習データ	1.696	0.412	0.526	8.51
未習データ	0.840	1.008	0.299	8.43

表-8 NN2 の学習結果

	平均誤差		総平均誤差(%)
	圧送圧力の SD(MPa)	衝撃力ひずみの SD(μm)	
学習データ	0.0024	2.104	7.585
未習データ	0.0014	2.383	7.614

表-9 NN3 の学習結果

	平均誤差			総平均誤差(%)
	24h 強度(MPa)	28d 強度(MPa)	リバウンド率(%)	
学習データ	1.337	2.234	2.360	7.433
未習データ	2.209	3.617	3.103	10.473

に示す。未学習データの総平均誤差は 7~10%となり、各ネットワークは同程度の推定精度を有するものと判断した。推定項目別にみていくと、スランプおよび空気量については許容誤差内の推定が可能であるが、逆スランプ流下時間については、実測値が約 1 秒前後であることを考慮すると、現状では学習を適切に行なうことが困難な状況である。強度およびリバウンド率の未学習データの平均誤差は約 2~3%となり、実測値のばらつきの範囲内であるから適切な学習が行われたものと判断した。

4.2 推定および検証結果

構築した品質推定モデルを使用して、吹付け距離、およびコンクリート吐出量といった施工条件をそれぞれ変化させた場合の 24 時間強度、28 日強度およびリバウンド率を、一般強度および高強度配合（共に基準配合）のコンクリートについて推定した。ここで、変化させた項目以外の施工条件は一定とした。結果を図-2、図-3 に示す。吹付け距離を増加させた場合は、一般強度、高強度のどちらの配合についても、28 日強度は増加し、リバウンド率はある距離で極小値をとるという推定結果となった。また、コンクリート吐出量を増加させた場合は、高強度配合の 28 日強度が増加し、両配合のリバウンド率が減少、あるいは吐出量 12~15m³/h 付近で極小になる推定結果となった。

また、本推定モデルを検証するため吹付け実験を

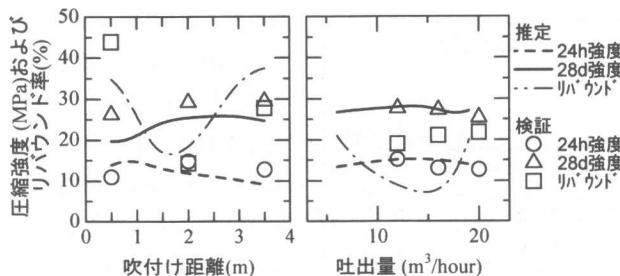


図-2 ネットワークによる推定とその検証結果（一般強度）

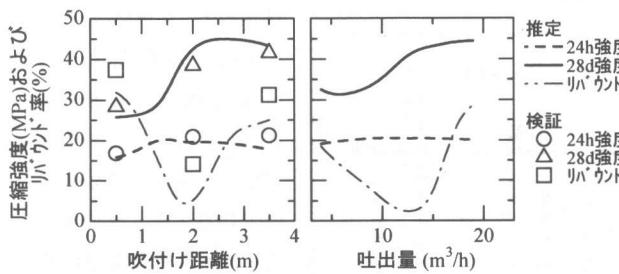


図-3 ネットワークによる推定とその検証結果（高強度）

別途実施し、吹付け距離については一般および高強度の基本配合について、吐出量については一般強度のみについて推定値との比較を試みた。ただし吐出量については、学習に用いた水準範囲である4~12m³/hより大きい12~20m³/hの範囲、いわゆる外挿域での検証とした。結果を図-2、図-3に示す。吹付け距離を変化させた場合の強度の推定値は、検証値とほぼ同様な値であることがわかる。また、リバウンド率は推定値と検証値の差がかなり大きくなる場合があるが、吹付け距離の増加に対する変化の傾向は推定できているものと考えられる。一方、吐出量を変化させた場合についてみてみると、リバウンド率の推定が困難であることが認められる。

一般にリバウンド率は要因の変化に対する変動が大きいので、強度に比して推定値と検証値との相違が大きくなりやすい。また、学習に用いた実験データは各要因とも3水準のみであり、要因の変化に対し値が大きく変動するリバウンド率についてはさらに多くの実験結果による学習が求められる。また、吐出量については外挿域での検証であるから推定はさらに困難となる。

ここで、吐出量については検証値を学習させモデルの推定精度の改善を試みた。図-4に結果を示すが、リバウンド率の推定精度が改善されている。以

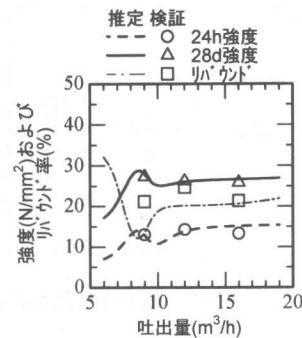


図-4 検証値を学習に加えたネットワークによる推定

上のように、強度についてはほぼ満足な推定値が得られ、リバウンド率についてはより詳細な実験データを学習に組み込むことで推定精度の改善が認められることから、本研究で構成した推定モデルは品質の推定方法として妥当なものと考えられた。

4.3 感度解析結果

表-1に示す2種類の基本配合を表-2に示す空気圧送方式の施工条件で吹き付けた場合について、NN2出力の施工特性 P_{sh} およびNN3出力の品質 Q_{sh} に対する入力因子の感度解析を行った。ここでは解析の対象となる入力因子が1%増加したときの出力因子の変化率を示した。結果を図-5、図-6に示す。この図から P_{sh} および Q_{sh} に最も影響をおよぼすのは、単位体積重量や単位セメント量などの配合条件であることがわかる。たとえば、圧送圧力SDについてはコンクリートの単位体積重量が、強度については単位セメント量がもっとも大きな影響力を持つ。したがって、吹付けコンクリートの品質管理について、特に強度の管理としては、コンクリート製造についての管理を重視する必要があり、特に計量精度は常に所要の精度、例えばJIS A 5308に記載の精度を有するよう管理される必要があるものと考えられる。一方リバウンド率についてみると、NN3におけるリバウンド率には配合条件の他にNN2の出力である施工特性も影響をおよぼしていることがわかる。NN2においては吹付け距離などの施工条件が施工特性に大きく影響をおよぼすことから、リバウンド率

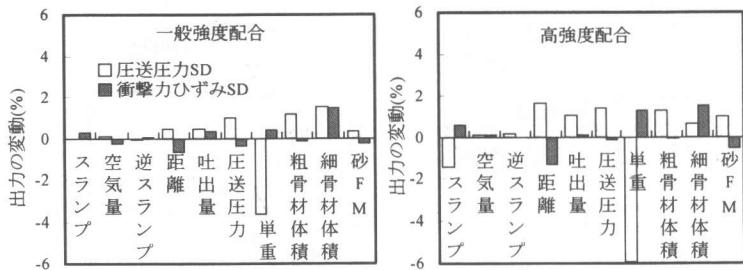


図-5 施工特性 P_{sh} におよぼす各要因の影響度

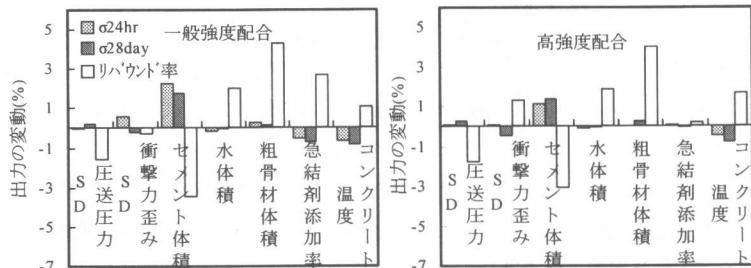


図-6 品質 Q_{sh} におよぼす各要因の影響度

の低減には施工条件の管理もかなり重要と考えられる。

5まとめ

- 1) 吹付けコンクリートの品質をニューラルネットワークで推定するために、吹付け工程を3分割し、それぞれの工程についてネットワークを構築して3段階構成の品質推定モデルを構築した。
- 2) 構築した推定モデルから各種施工条件を変動させた場合の品質の変化を推定した。その結果、推定値と実測値が大きく異なることがあるものの変化の傾向は構築したモデルで推定できているものと考えられた。
- 3) 感度解析の結果、施工特性や強度に最も影響するのは配合条件であり、吹付けコンクリートの品質管理としてはコンクリート製造の管理を重視する必要があるものと考えられた。

謝辞

本実験は、東京大学国際・産学共同研究センターにおける「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 駒田憲司氏、(株)エヌエムビー 清水

哲史氏、(株)大林組 保岡哲治氏、(株)熊谷組 岡田喬氏、佐藤工業㈱ 小林裕二氏、大成建設㈱ 坂本淳氏、太平洋セメント㈱ 大森啓至氏、(株)竹中土木 安藤慎一郎氏、電気化学工業㈱ 荒木昭俊氏、東急建設㈱ 伊藤正憲氏、戸田建設㈱ 田中徹氏、飛島建設㈱ 田中斎氏、西松建設㈱ 松浦誠司氏、および協力会社である富士物産㈱阿部隆夫氏、(株)北川鉄工所 見浦光夫氏、(株)東京測器研究所 佐藤辰也氏、(株)ブリヂストン深津章文氏、さらに各社より実験に派遣された多くの方々、また千葉工業大学卒論生 飯土井達也氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 小林裕二ほか：湿式吹付けコンクリートの施工条件が強度特性および空隙構造に与える影響、土木学会第54回学術講演会講演概要集、V, pp.954-955, 2000.9
- 3) 杉山律ほか：吹付けコンクリートの圧送性状に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.2, pp.1357~1362, 1999.6
- 4) 石関嘉一ほか：使用材料が吹付けコンクリートの施工性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.22, pp.1387~1392, 2000.7
- 5) 犀野武：粉体輸送技術、日刊工業新聞社、1991