

論文 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

細川 佳史*1・小林 裕二*2・大野 俊夫*3・魚本 健人*4

要旨: 本研究は各種急結剤・混和材を使用した施工条件等が異なる吹付けコンクリートの品質を推定することを目的として行ったものであり、2つのニューラルネットワークを組み合わせることで、配合条件、吹付け条件および練混ぜ性状から、実際に吹付けを行うことなく、強度・リバウンド率の推定が可能であることを示した。

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, 急結剤, 混和材, 品質推定

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付ける、またノズル直前で急結剤を添加するという特徴と、施工において吹付け機器が種々存在すること(吹付け条件の相違)、施工環境が現場ごとに異なること(吹付け環境の相違)、吹付け作業員、いわゆるノズルマンの熟練度等、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。

ニューラルネットワークはパターン認識や定式化困難の事象の解析に優れることから、近年は土木分野にも活発に活用されるようになり、上記のように要因が複雑な吹付けコンクリートにおいても、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⁾。

また、近年、吹付けコンクリートにおいても高強度、高性能、高品質化が求められており、多様な混和材、急結剤などの材料開発・応用が検討されるようになった。

以上を背景として、本研究は、各種急結剤・混和材を使用した吹付けコンクリートの品質をニューラルネットワークを用いて推定する手法について検討することを目的として行った。

2. ニューラルネットワークの構築

2.1 使用材料および実験ケース

本研究にて検討した材料を表-1に示す。各種急結剤が4種類、混和材が3種類であり、急結剤は粉体、液体がそれぞれ2種類である。

本研究にてニューラルネットワークの構築を検討した吹付け実験は表-2および3に示す2ケースである。表-2の実験ケース1(以下単にケース1)では、大別して配合条件と吹付け施工条件を検討要因としており、配合については各種急結剤の種類、水セメント比、急結剤の添加率を、吹付け施工条件についてはコンクリートの圧送方式、および配管系統を要因とした。ここで、配管系統の種類については表-4に示すとおりである。また、表-3のケース2では、検討要因を配合のみとしており、各種混和材の種類、水セメント比、混和材の置換方法、置換率、スランプ、空気量を要因

表-1 使用材料

材料	名称	記号	諸元・主成分
混和材	シカフーム	SiF	比表面積 200,000cm ² /g
	ファイッシュ	FA	比表面積 3,730cm ² /g
	石灰石微粉末	LS	比表面積 3,900cm ² /g
急結剤	セメント鉱物系粉体	P1	主成分 カルシウムアルミネート系
	セメント鉱物系粉体	P2	主成分 カルシウムサルフォアルミネート系
	無機塩系液体	L1	主成分 アルミン酸塩
	アルカリフリー液体	L2	主成分 水溶性アルミニウム塩

*1 太平洋セメント㈱ 研究本部 佐倉研究所 工修(正会員)

*2 佐藤工業㈱ 土木本部 技術部門 トンネルグループ(正会員)

*3 鹿島建設㈱ 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)

*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 実験ケース1

No.	配合条件			吹付け施工条件	
	急結剤	W/C (%)	添加率 (C×%)	圧送方式	配管系統
1	P1	45.6	5	空気	A
2		56.9	7	ポンプ	
3		45.6	5	空気	
4	P2	45.6	10	空気	
5		56.9		ポンプ	
6		45.6		空気	
7	L1	45.6	5	空気	B
8		56.9	7	ポンプ	
9		45.6	5	空気	
10	L2	45.6	9	空気	C
11		56.9		ポンプ	
12		45.6		ポンプ	
13	P1	45.6	5	ポンプ	A
14			3.5		
15			6.5		
16	10				
17	7				
18	13				
19	L2	9	6.3	C	
20		6.3			
21		11.7			

表-4 ケース1の配管系統種類

記号	配管系統
A	FH*1～粉体急結剤混合管～FH～テパノスル
B	FH ～液体急結剤混合管～FH～テパノスル
C	FH ～液体急結剤混合管+ノスル

*1:レキシブルホース

表-5 ケース2の吹付け施工条件

圧送方式	配管系統	急結剤	急結剤添加率 (C×%)
空気圧送方式	A	P1	7.0 (W/C=56.9%)
			5.0 (W/C=45.6%)

とした。ここで、置換方法における“結合材”とは、セメントに対し内割（重量比）で各種混和材を添加すること、“細骨材”とは、砂に対し内割（体積比）で各種混和材を添加することを意味する。ケース2の吹付け施工条件は、表-5に示したとおり固定して実験を行った。

2.2 強度特性およびリバウンド率の推定

2.2.1 ネットワークモデルの設定

本検討では、ケース1および2のそれぞれについて、強度特性としてブルアウト試験による3時間強度、吹付け供試体から採取したコアの圧縮強度による28日強度の2項目、また吹付け供試体採取時に型枠へ吹付けた際発生するリバウンド率（但しノズルからのダレを除く）、以上3項目を推定項目とするニューラルネットワークの構築を行うこととした。

表-3 実験ケース2

No.	配合条件									
	混和材	W/C (%)	置換方法	置換率 (%)	SI' (cm)	Air (%)				
1	無添加	56.9	—	0	12	2				
2	SiF		結合材	10			5			
3							10			
4							15			
5							FA	細骨材	5	18
6										23
7					12	5				
8	2									
9	5									
10	LS		細骨材	10	2					
11					5					
12					2					
13	45.6		結合材	10	0	21	2			
14					5					
15		10								
16		15								
17		SiF			結合材	10	15			
18							25			
19							5			
20		FA			細骨材	10	15	21	2	
21							25			
22							5			
23	LS		結合材	10			21			
24							5			
25							5			
26	FA	細骨材	10	5						

ネットワークの形状は入力層、中間層、出力層を有する3層階層型とし、ネットワークの学習終了条件は、実測値と推定値の二乗誤差の全学習データにわたる和が0.001以下になったときとした。また、学習により構築されたネットワークの検証には、学習に使用していない未知データを入力して推定を行い、その推定値と実測値の二乗誤差の平均値により評価を行った。ただし、ニューラルネットワークの未知データによる推定では、入力データが学習データの範囲外の場合その推定値の信頼性が低いことが分かっており、未知データには、ケース1, 2において、急結剤添加率ないしは混和材置換率で中間値をとるデータを選定した。つまりケース1では、No.13と19、ケース2ではNo.3と13であり、それ以外が学習データとなる。

2.2.2 入力因子の検討

ここではネットワークへの入力因子の選定を行った。まず、以下に示す方法で配合条件のみを入力因子として上記3項目を推定することを試みた。ケース1では、全ての配合において単位水量が一定であるので、水セメント比をセメント量として入力した。したがって入力因子は急結剤種類、

単位セメント量，急結剤添加率である。

ケース2でも全配合で単位水量が一定であるのでケース1と同様の扱いとした。また，ケース2における混和材の添加においては2通りの置換方法があるが，本ケースでは単位粗骨材量を一定としていることから，置換方法に依らず単位混和材量を示すことで各配合が特定可能となるので，置換率をこれで表現した。スランブについては，同スランブでも混和材種類により減水剤添加率が異なること，また同種の混和材を使用したコンクリートのスランブは減水剤量で調整していることから，減水剤量でスランブを表現した。エア量については，吹付けコンクリートコアの7日，28日材齢圧縮強度がエア量2%と5%で有意差が認められなかったため，入力因子には加えなかった。したがって入力因子は，混和材種類，単位セメント量，単位混和材量，減水剤添加率，とした。

ここで，急結剤種類や混和材種類を入力因子として表現する方法について言及する。“種類”などのような数値でない要素を有する因子の場合には，“種類”の要素の個数分入力因子を用意して各要素と対応させ，ある要素を表現する場合，対応す

る入力因子に“1”を，それ以外の入力因子には“0”を入力することとした。急結剤種類を例にすると，急結剤は4種類であるから入力因子を4つ用意し（P1, P2, L1, L2）のように対応させ，P1を表現する場合は（1, 0, 0, 0），L2の場合は（0, 0, 0, 1）という要領である。

以上のように行ったネットワークによる学習及び構築したネットワークによる推定結果を図-1, 2に示す。ケース1では学習回数を増やしても終了条件を満たさなかった。図-1は学習データの二乗誤差の和が0.15のときの結果であるが，3時間強度の学習が特に困難となっている。一方，図-2のケース2では学習は終了したものの，28d強度の平均二乗誤差が，ケース2における実測値の分散（標準偏差の2乗）の平均値よりも大きく，適切なネットワークが構築されたとみなすことができなかった。

このように適切なネットワークが構築できなかった原因としては，次に述べるように吹付け時における施工性を要因として考慮しなかったためと考えた。

ケース2では圧送方式や圧送圧力などの施工条

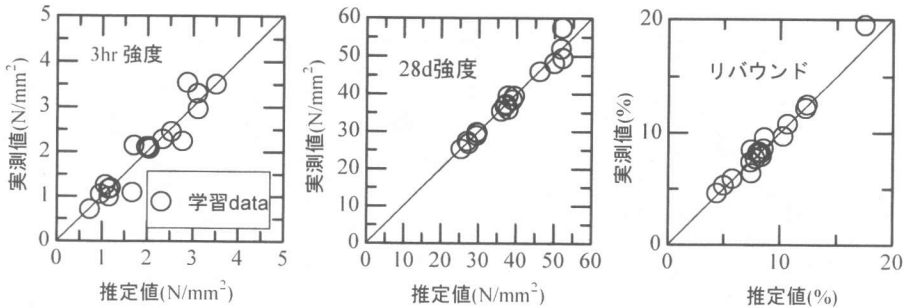


図-1 ケース1の学習結果（配合条件のみ）

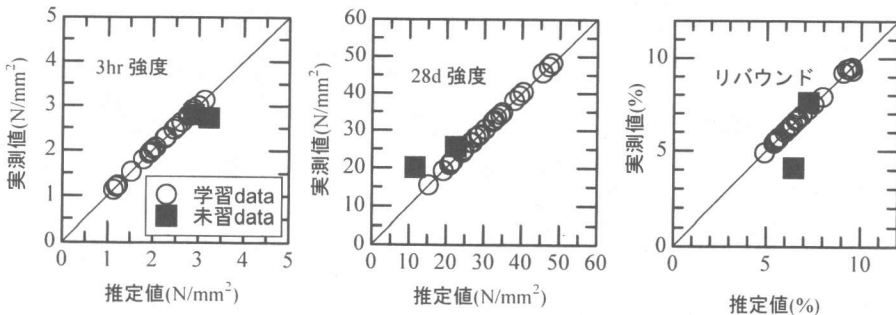


図-2 ケース2の学習および推定結果（配合条件のみ）

件を同一としている。しかし、混和材の置換がコンクリートの圧送性に影響を及ぼすことにより、圧送圧力や圧送エア流量が変化することが判明し²⁾、同一施工条件で吹付けることが困難となった。したがって、吹付けにあたっては、吹付け施工が可能となるよう圧送圧力を調節した。また、ケース1では、2種類のコンクリート配合に対して圧送圧力などの条件をそれぞれ一定としていたものの、急結剤種類により配管系統が異なり、またコンクリートはコンシステンシーを同一としながらも、細骨材表面水率の変動により日々僅かずつ製造条件が異なったことから圧送性が変化したため、適切な吹付けとなるよう圧送圧力を調節した。両ケースとも、圧送圧力は0.3~0.6MPaの範囲に調節されたが、この範囲の圧送圧力の変化は吹付けコンクリートの強度に影響を及ぼすことが知られている³⁾。

したがって以下では施工性を要因として考慮することとし、その因子としては、吹付け実験時に測定した圧送圧力および圧送エア流量を入力因子に含めることとした。圧送圧力のみでなく圧送エア流量も入力因子とした理由は、

- 1) 圧送エア流量はリバウンド率に影響を及ぼす²⁾
- 2) 図-3に示すように圧送圧力と圧送エア流量の間には明瞭な相関性が認められないということを考慮したためである。ここで、圧送圧力は、空気圧送方式においては圧送初期の圧力、ポンプ圧送方式においては圧送途中に差し込まれる圧縮空気の圧力を指す。なお、これら圧送エア流量および圧送圧力の測定方法の詳細については他の報告⁴⁾に示すとおりである。また、ケース1では2種類の圧送方式を用いているが、圧送圧力は圧送方式により異なるので、圧送方式も先述の急結剤種類を入力因子とした方法で入力因子に

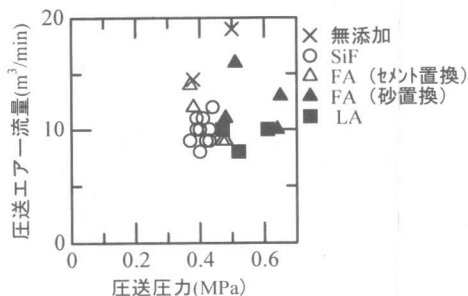


図-3 圧送圧力と圧送エア流量の関係

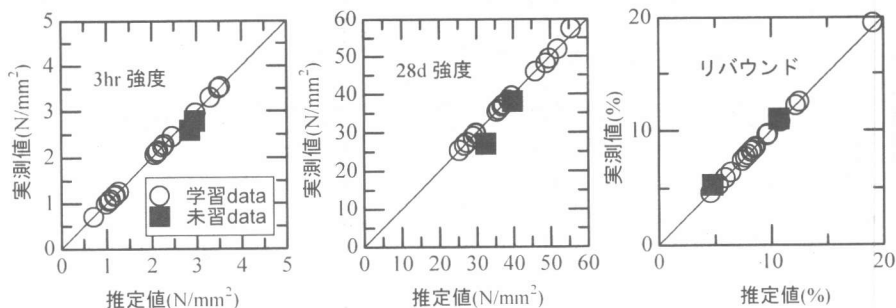


図-4 ケース1の学習および推定結果 (施工性を考慮)

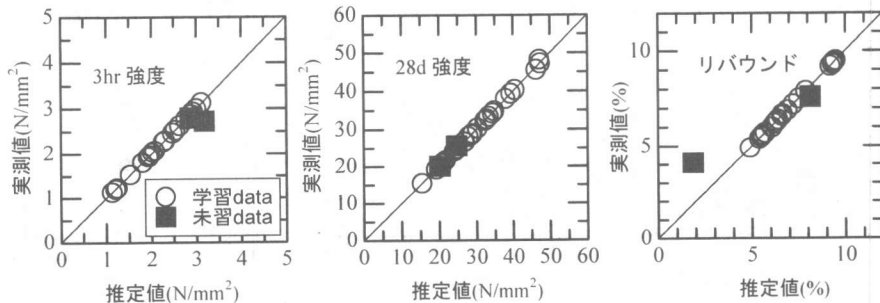


図-5 ケース2の学習および推定結果 (施工性を考慮)

加えた。図-4, 5は、圧送エアーク流量および圧送圧力を入力因子に加えて施工性を考慮した場合のネットワークの学習および推定結果である。配合条件のみではケース1は学習が達成されなかったが、ここではケース1, 2ともに学習が収束した。

また、表-6に示すとおり、ケース2では未知データの平均二乗誤差が配合条件のみの場合よりも減少しており、特に28d強度ではその差が大きい。表-6には各水準No.の3hr, 28d強度の実測値についての分散を、ケース1, 2それぞれで平均した値を併せて示した。未知データの平均二乗誤差と比較をしてみると、後者は前者より小さいことから、強度特性の推定に関しては適切なネットワークが構築されたと判断した。一方リバウンド率については測定は「ばらつき」が求められないため、強度特性のような考察はできないが、既報と同様、平均二乗誤差の値は実用上問題となる誤差ではないと判断した¹⁾。以上、構築したニューラルネットワーク(以下NNIと称する)の入力因子を表-7にまとめた。

2.3 圧送エアーク流量・圧送圧力の推定

このように、ケース1, 2それぞれについて、配合条件と圧送エアーク流量・圧送圧力といった施工性を入力因子とすることにより、強度特性および

表-6 実測値の誤差と推定値の誤差の比較

		実測値	推定値 (配合条件のみ)	推定値 (施工性を考慮)
		分散の平均	平均二乗誤差	平均二乗誤差
ケース1	3hr 強度	0.152	--	0.046
	28d 強度	26.333	--	15.383
	リバウンド率	--	--	0.182
ケース2	3hr 強度	0.321	0.129	0.104
	28d 強度	9.714	40.855	0.485
	リバウンド率	--	2.856	2.651

表-7 NNIの入力因子

	入力因子		
	配合条件	吹付け条件	施工性
ケース1	・急結剤種類 ・単位セメント量 ・急結剤添加率	・圧送方式	・圧送エアーク流量 ・圧送圧力
ケース2	・混和剤種類 ・単位セメント量 ・単位混和材量 ・減水剤添加率	—	

リバウンド率が推定可能なニューラルネットワークの構築が可能であることが明らかとなったが、フレッシュコンクリートの製造段階で吹付け施工時の圧送エアーク流量、圧送圧力が推定できれば、その推定値と配合条件・吹付け条件をNNIに入力することにより強度特性・リバウンド率が推定可能となる。したがって、ここでは圧送エアーク流量・圧送圧力の推定について検討した。

先述したとおり、フレッシュコンクリートの性状がコンクリートの圧送に大きな影響を及ぼす。したがって、入力因子としては表-7に示す急結剤種類・急結剤添加率を除いた配合条件の他に、フレッシュコンクリートの性状に影響を及ぼすものとして、練混ぜ性状を示すコンクリート製造時のミキサの油圧モータにかかる油圧の負荷値の最大値を加えた。

図-6, 7にネットワークの学習および構築したネットワークによる未知データの推定結果を示す。学習はNNIの場合より収束しづらいため学習終了条件を二乗誤差の和0.01以下としたが、未知データの二乗誤差の和はケース1, 2それぞれ7.82e-03, 9.46e-03と極めて小さい。したがって圧送エアーク流量、圧送圧力の推定に適切なネットワークが構築されたと判断した。このネットワーク

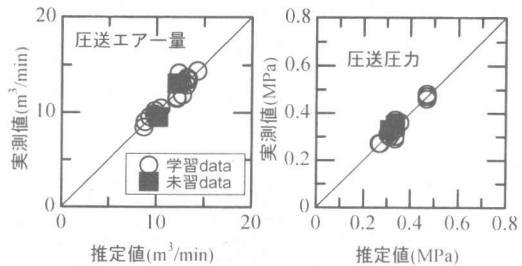


図-6 ケース1の圧送エアーク流量・圧送圧力の学習および推定結果

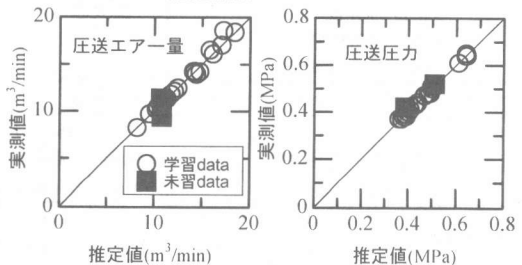


図-7 ケース2の圧送エアーク流量・圧送圧力の学習および推定結果

(以下 NN0 と称する) の入力因子を表-8 にまとめて示す。

NN0 と NN1 を組み合わせることにより、配合条件と吹付け条件から、吹付け時の実測値を用いることなく、つまり、実際に吹付けを行わなくとも強度とリバウンド率を推定することが可能となる。これを未知データについて試みた。結果を表-9 に示すが、ケース 1 の 28d 強度に誤差の大きい場合があるものの、ほぼ適切な推定がなされたものと考えられた。

3. まとめ

吹付け施工時における圧送エア流量、圧送圧力を考慮することにより、配合条件、吹付け条件から各種急結剤・混和材を使用した吹付けコンクリートの強度・リバウンド率を適切に推定するニューラルネットワークの構築が可能である。また、圧送エア流量、圧送圧力を、配合条件と吹付け条件および練混ぜ性状から適切に推定するニューラルネットワークの構築も可能であり、2 つのネットワークを組み合わせることにより、吹付けを行うことなく、配合条件、吹付け条件および練混ぜ性状から強度・リバウンド率が推定できる。以上の手法を用いることにより各種急結剤・混和材を使用した施工条件等が異なる吹付けコンクリートの品質推定が可能と考えられるが、推定精度の向上のためにはさらに多くの実験データが必要である。

表-8 NN0 の入力因子

	入力因子		
	配合条件	吹付け条件	練混ぜ性状
ケース 1	・単位セメント量	・圧送方式 ・配管系統	ミキサ負荷 最大値
ケース 2	・混和剤種類 ・単位セメント量 ・単位混和材量 ・減水剤添加率	—	

表-9 未習データの強度およびリバウンド率の推定

	3hr 強度			28d 強度			リバウンド率		
	実測値 (N/mm ²)	推定値 (N/mm ²)	2 乗誤差	実測値 (N/mm ²)	推定値 (N/mm ²)	2 乗誤差	実測値 (%)	推定値 (%)	2 乗誤差
ケース 1	2.59	2.09	0.244	38.1	44.1	36.744	11.0	11.8	0.642
	2.79	2.85	0.003	27.1	30.4	10.503	5.3	6.4	1.316
ケース 2	2.80	2.84	0.002	25.7	25.6	0.003	4.1	3.4	0.465
	2.73	3.07	0.113	20.1	21.0	0.856	7.6	8.1	0.306

謝辞

本研究は東京大学国際・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、東京大学生産技術研究所 西村次男氏をはじめ、共同研究員である(株)青木建設 駒田憲司氏、(株)ポゾリス物産 富山 徹氏、(株)大林組 田湯正孝氏、(株)熊谷組 岡田 喬氏、清水建設(株) 大槻直紀氏、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) 荒木昭俊氏、東急建設(株) 伊藤正憲氏、飛鳥建設(株) 田中 斉氏、西松建設(株) 松浦誠司氏、太平洋セメント(株) 大森啓至氏、(株)間組 杉山 律氏、前田建設工業(株) 赤坂雄司氏、協力会社として参加頂いた、戸田建設(株) 田中 徹氏、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 佐藤辰也氏、吹付け実験に参加された多くの方々、芝浦工業大学卒論生 伊藤秀彰氏、中澤 穰氏に深く感謝の意を表します。

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. 7
- 2) 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 (投稿中)
- 3) 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，Vol.21, No.2, pp.1351-1356, 1999. 7
- 4) 赤坂雄司ほか：圧送方式が吹付けコンクリートの諸性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22 (投稿中)