

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施工最適化システムの構築

細川 佳史^{*1}・松浦 誠司^{*2}・田中 徹^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨：本研究は、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モデルの実施工現場適用性、ならびに、品質推定モデルを使用した施工条件最適化システムの構築について検討したものである。検討の結果、模擬トンネルの実験結果のみで構築された推定モデルでは、28日強度の推定は良好であるが、リバウンド率の推定は困難であることが認められた。施工条件最適化システムについては、現場実験の結果を学習させた品質推定モデルを使用して、吹付け角度が変化しても吹付けコンクリートの品質を一定に保つ最適施工条件の探索例を示した。

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、品質推定、施工条件最適化

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、トンネル実施工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-1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、吹付け施工可能の範囲内で圧送空気バルブを最も絞った状態にそれぞれ相当する。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

表-1 コンクリート配合

Gmax (mm)	SI' (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

SI': スランプ, C: 単位セメント量

*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 西松建設（株）技術研究所 技術研究部 土木技術研究課 工修（正会員）

*3 戸田建設（株）土木工事統轄部 土木工事技術部 工修（正会員）

*4 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 教授 工博（正会員）

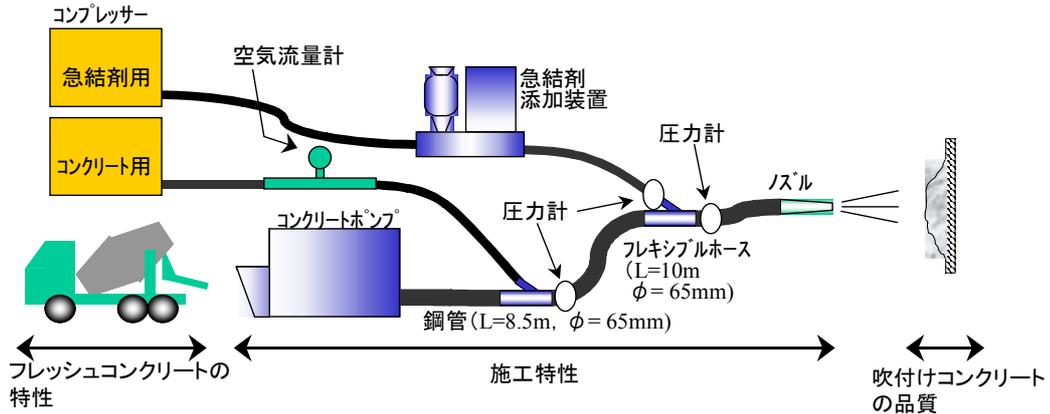


図-1 吹付けシステムの概要

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		

する。なお吐出量は全ケース 16m³/h 一定とした。

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 - G561 に準拠), 28 日強度, リバウンド率とした。28 日強度は, φ 75×100 (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質量から求め, 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質量から求めた。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ー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_{mtr} , 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_{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。

$$P_{fc} = NN1(C_{mtr}, C_{mix}, C_{env}) \quad (1)$$

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

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

NN2 および NN3 の入出力を表-3, 表-4 に示す。なお, 入出力因子の詳細については既報³⁾を参照されたい。

3.2 入力因子の検討

上記モデルでは, NN2 の入力因子である施工条件 C_{sh} に圧送空気流量が含まれていなかったが, 既報²⁾によれば, ニューロによる推定において, 圧送空気流量を入力因子に加えると推定精度が良好となることがわかっている。また本研究で実施した吹付け実験では, 圧送空気流量をコントロールすることで施工条件の管理を

表-3 NN2 の入出力因子

入力	配合条件 C_{mix}	施工条件 C_{sh}
	<ul style="list-style-type: none"> •単位体積質量 •V 細骨材 •V 粗骨材 	<ul style="list-style-type: none"> •吐出量 •圧送圧力 •吹付け距離 •吹付け角度 •圧送空気流量
	フレッシュコンクリート特性 P_{fc}	
出力	<ul style="list-style-type: none"> •スランプ •逆スランプ流下時間 	<ul style="list-style-type: none"> •空気量
	施工特性 P_{sh}	
	<ul style="list-style-type: none"> •圧送圧力の SD •衝撃力による鋼板ひずみの SD 	

*SD: 標準偏差 V: 単位体積

表-4 NN3 の入出力因子

入力	材料条件 C_{mr}	配合条件 C_{mix}
	<ul style="list-style-type: none"> •混和材種類 	<ul style="list-style-type: none"> •V セメント
	ベースコンクリート特性 P_{bc}	<ul style="list-style-type: none"> •V 混和材
	<ul style="list-style-type: none"> •コンクリート温度 	<ul style="list-style-type: none"> •V 水
	施工特性 P_{sh}	<ul style="list-style-type: none"> •V 粗骨材
出力	<ul style="list-style-type: none"> •圧送圧力の SD •衝撃力による鋼板歪の SD 	<ul style="list-style-type: none"> •V 繊維
	施工条件 C_{sh}	
	<ul style="list-style-type: none"> •急結剤添加率 •吹付け角度 	
	吹付けコンクリートの品質 Q_{sh}	
	<ul style="list-style-type: none"> •強度(24h 材齢) •リバウンド率 	<ul style="list-style-type: none"> •強度(28d 材齢)

行ったので、本吹付け実験の実測値を上記モデルで推定するにあたっては、モデルの入力因子に圧送空気流量を加えることが望ましい。したがってここでは、入力因子に圧送空気流量を加えて NN2, NN3 の再構築を行うこととし、その際、学習データの入力形態について併せて検討した。なお、再構築に用いたデータは全て模擬トンネルにおいて実施した 80 ケースに及ぶ吹付け実験によるものであるが、実験の範囲はトンネル施工現場を想定した配合条件、施工条件等を網羅している。

これまでは、入力ユニット数 l 、出力ユニット数 m のニューロでケース数 n のデータを学習させる場合、入力データは j 番目のケースにおける i 番目の入力因子のデータ p_{ij} ($i=1, \dots, l, j=1, \dots, n$) を各因子 p_i の最大値 $p_{i,max}$ で除して無次元化した P_{ij} を用いていた。しかしここでは、データ p_{ij} を、式(4)のように各因子の平均

値 $\langle p_i \rangle$ 、標準偏差 σ_{pi} で正規化した P'_{ij} としてニューロ構築に用いることとした。こうすることで、各因子 p_i はすべて平均値 0、標準偏差 1.0 のデータ集合となり、学習に用いるデータのバラツキ具合が各因子とも全て等価となる。

$$P'_{ij} = (p_{i,j} - \langle p_i \rangle) / \sigma_{pi} \quad (4)$$

ここで、最大値で除した P_{ij} と正規化した P'_{ij} のそれぞれがニューロの学習におよぼす効果について検討した。図-2 は、NN2 の学習において、式(5)にて示される二乗誤差の和 E が学習回数を重ねることによりどのように変化するかを示したものである。この図から、入力データを正規化して学習させることにより、飛躍的に学習効率が上がることが認められた。

$$E = \sum_j^n \sum_i^m \left(\frac{t_{i,j}}{t_{i,max}} - q_{i,j} \right)^2 \quad (5)$$

(ここに、 t_{ij} 、 q_{ij} はそれぞれ j 番目のケースにおける i 番目の教示値およびニューロの出力を、 $t_{i,max}$ は i 番目の教示データの最大値を表す)

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

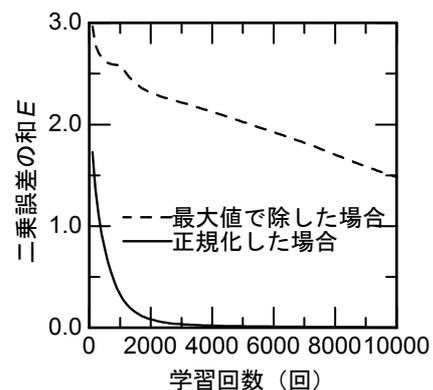


図-2 学習回数と二乗誤差の和の関係

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-3 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-4 に示す。また式 (6)より求められる推定値と実測値の平均誤差 e_k を表-5 に示す。

$$e_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j (M_{k,j} - Q_{k,j})^2} \quad (6)$$

(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 NN3 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，強度については概ね良好に推定できており，特に 28 日強度の推定が良好であったと考えられる。一方，リバウンド率については平均誤差が大きく，推定精度はかなり劣ったといえる。このような強度とリバウンド率の推定精度の差について，以下のとおり考察した。強度，リバウンド率に対して影響の大きい因子は，それぞれ，配合条件，施工条件であることが感度解析から明らかとなっている³⁾。このことから，強度の推定が容易であったのは，現場実験に用いた配合が学習データの平均的な値であったためと考えられる。一方，リバウ

ンド率については，ポンプ圧送方式，吐出量 16(m³/h)といった実施工現場における施工条件が，学習データにおいて別のケースで学習されており，施工現場と同一条件の学習データがないことから，推定が困難になったものと考えられる。特に，圧送方式と吐出量の間には相互作用が存在すれば，推定は更に困難となる。したがって，今後，本推定モデルのリバウンド率の推定精度を向上させるには，実施工現場の施工条件と同一かそれに近い条件におけるデータを多く学習させる必要があるものと考えられる。

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 NN2，NN3 に学習させ，品質推定モデルの再構築を行った。ここで，学

表-5 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

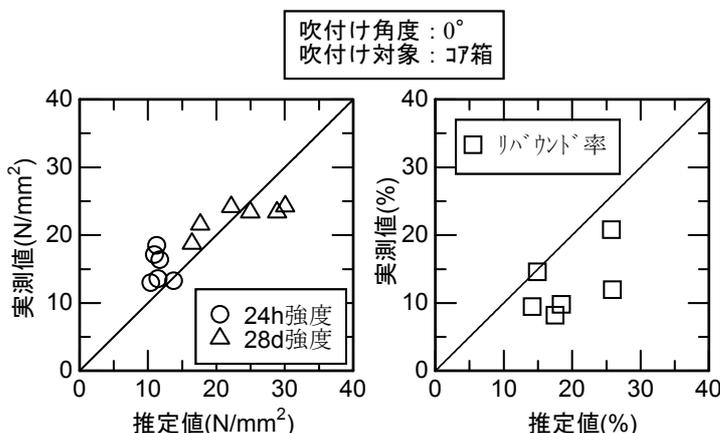


図-3 吹付け角度 0(°)における実測値と推定値の関係

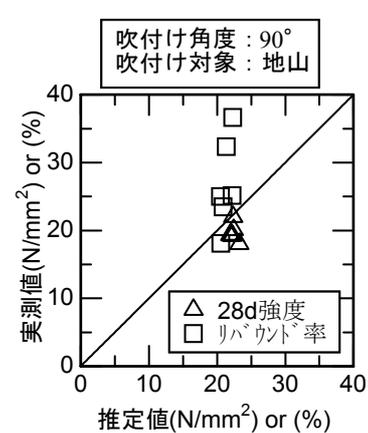


図-4 吹付け角度 90(°)における実測値と推定値の関係

表-6 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 (μm)
学習	2.27E-04	1.29E-02
未習	2.83E-03	2.44E+00

表-7 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

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 NN2, NN3 それぞれ 75 および 87 個、未習データは NN2, NN3 とともに 3 個である。NN2, NN3 の学習結果をそれぞれ表-6、表-7 に示す。NN3 の平均誤差のうち、24 時間強度の誤差が実測値の約 10(%)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 NN2, NN3 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 NN2, NN3 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 NN2 により施工特性 P_{sh} を求める(式(7))。

$$P_{sh} = NN2(L, A, V, Const) \quad (7)$$

②NN3 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} の探索を行う (式(8))。

$$Q_{sh} = NN3(P_{sh}, D, Const) \quad (8)$$

③NN2 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} の探索を行う(式(7))。

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、NN2, 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-8 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-9 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

表-8 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				
90°	12.5cm	2.3%	1.1 秒				

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

表-9 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

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事が認められた。
- (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、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。施工現場と同一の施工条件における学習データがないことがその原因と推測されたため、リバウンド率の推定精度の改善には、実施工現場の施工条件と同一かそれに近い条件におけるデータを多く学習させる必要があるものと考えられた。
- (3)現場実験のデータをニューロに学習させて

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共同研究の成果であり、共同研究者である(株)青木建設 舟川 勲氏、(株)エヌエムビー 清水哲史氏、(株)大林組 藤井 剛氏、鹿島建設(株)大野俊夫氏、(株)熊谷組 石関嘉一氏、佐藤工業(株) 小林裕二氏、清水建設(株) 多川博章氏、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) 平間昭信氏、(株) 間組 杉山 律氏、前田建設工業(株) 赤坂雄司氏、および協力会社である富士物産(株) 阿部隆夫氏、(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に深く感謝致します。

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. 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