

# 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (8)

—配合要因が強度特性に及ぼす要因の効果についての分析—

Properties of Shotcrete (8)

The statistical analysis of the influence of mix proportion factors on wet-mix shotcrete

小 林 裕 二\*・西 村 次 男\*・魚 本 健 人\*

Yuji KOBAYASHI, Tugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

## 1. はじめに

前報<sup>1), 2)</sup>までに筆者らは、吹付けコンクリートの配合条件の変化が品質や施工性に及ぼす影響を確認することを目的に、種々な配合における吹付け実験を実施し、その結果についての報告を行ってきた。本報は、それらの結果をふまえ、種々な配合要因が測定結果（強度特性）に及ぼす要因の効果についての情報を得ることを目的としたものである。

実験では1つの要因の効果は他の要因の条件を一定にして実験した結果から推定している。したがって、実験結果のみから得られる各要因の効果は、他の要因の条件をその固定した水準にした場合の効果であり、他の要因の条件が変わった場合についてもその効果が一貫して存在する保証はない。

そこで、実験結果にニューラルネットワークを適用することで、実験では行わなかった配合条件についての結果を推定することを試みた。そして、それらの結果に対して分散分析を行うことで、各要因の全分散に対する寄与を算出し、有為になった要因の主効果を示すことで配合条件における各要因の効果について考察を行った。

## 2. 実験結果のニューラルネットワークの適用

### 2.1 入出力因子の選定

ニューラルネットワークは、脳の神経回路の働きとその結合をモデル化したもので<sup>3)</sup>、多数のユニットが結合しあったネットワークを形成している。各ユニットに入った信号は、ユニット間の結合の重みをかけて次の層に伝わっていく。ニューラルネットワークの学習とは、これらの重みを最適化する操作である。よって、実験で得られた配合条

\*東京大学生産技術研究所 第5部

表1 入出力因子

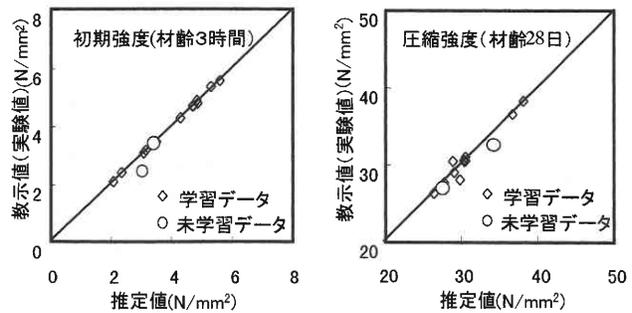
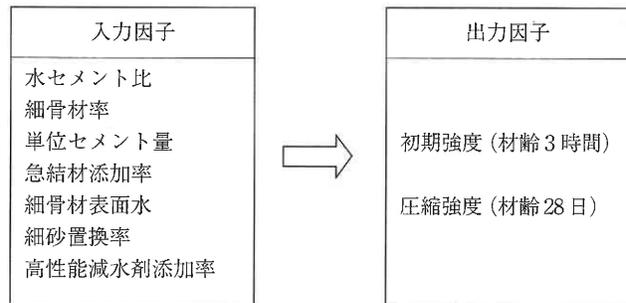


図1 推定結果

表2 推定結果のまとめ

項 目	平均誤差		相関係数	
	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)	0.03 (N/mm <sup>2</sup> )	0.27 (N/mm <sup>2</sup> )	0.982	0.950
圧縮強度(材齢28日)	0.77 (N/mm <sup>2</sup> )	0.63 (N/mm <sup>2</sup> )	0.998	0.981

件とその結果の組み合わせのデータを学習させることによって、これらの重みが適切に設定されれば、結果の得られていない未知の配合条件についても推定が可能であると考

えられる。本解析に用いたニューラルネットワークの種類は、3層の階層型ネットワークを使用した。選定した入力因子を表1に示す。

入力因子としては実験での配合条件における変動因子であった水セメント比・細骨材率・単位セメント量・細砂置換率・細骨材表面水率・急結剤添加率・高性能減水剤添加率の7要因を選定した。また、出力因子として吹付けコンクリート硬化体の材齢3時間でのプルアウト試験より換算した初期圧縮強度（以下、初期強度と称す）と材齢28日における圧縮強度（以下、圧縮強度と称す）を選定した。入力したデータは、実験によって得られた16組のデータであり、そのうちの14組のデータをニューラルネットワークの学習に使用し、無作為に選んだ2組のデータを本解析のニューラルネットワークが適切に構築されたかを検証するためのデータ（以下、未学習データ）として用いた。また、学習開始後の平均二乗誤差の和が $2 \times 10^{-4}$ 以下になったとき、または、学習回数が100万回に到達したときに学習が終了するように設定した。

2.1 学習結果

学習後のネットワークの収束状況と未学習データに対する推定結果を表2及び図1に示す。

学習に用いたデータによるネットワークの収束状況は、教示値と推定値の平均誤差が初期強度で $0.03 \text{ N/mm}^2$ 、圧縮強度で $0.77 \text{ N/mm}^2$ であり“ $y = x$ ”の直線に対する相関係数もそれぞれ0.982, 0.998と高い相関が得られ学習データの収束状況は良好である判断した。また、検証用に用いた未学習データの推定結果についても相関係数でそれぞれ0.950, 0.981とデータ数が2組と少ないものの比較的高い相関が得られたことから、本解析でのネットワークが適

表3 想定配合

配合要因	W/C (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	s/a (%)	細骨材表面水率 (%)	細砂置換率 (%)	高性能減水剤 (C×%)	急結剤添加率 (%)
水 準	48.6	360	57	1	0	0	6.2
	53.6	390	62	3	30	0.5	10.5
	58.6	420	67	5	50	1.0	14.1

切に構築され、これより、本ニューラルネットワークにより、本実験で行われていない配合条件での実験結果についてもある程度推定が可能であるとの見解を得た。

3. 分散分析

3.1 分析にもちいた配合条件

分散分析とは、種々な条件についての測定値に対する全分散を各要因のそれぞれの成分に分割し、それらの全分散に対する寄与を考察して、様々な平均間の比較を行うものである。ここでは、実験計画法における多元配置法<sup>4), 5)</sup>の考え方をを用いて表3に示す7要因3水準の $3^7$ 通りの配合条件における初期強度と圧縮強度の結果について解析を行うこととした。実験を行っていない配合条件についてはニューラルネットワークによって得られた重みから推定をおこなった結果を用いて分析をおこなった。

3.2 初期強度（材齢3時間）の分散分析結果

初期強度に対する分散分析の結果、有為となった配合要因の結果および各要因の因子寄与率を算出した結果を図2に示す。

初期強度については、急結剤添加率が危険率1%で有為

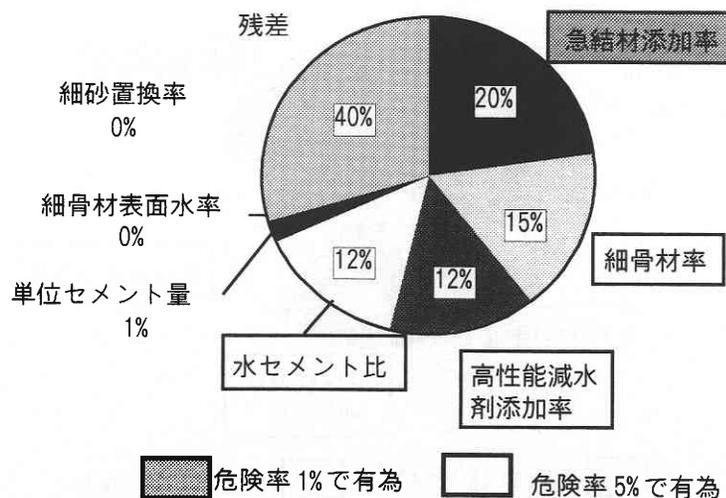


図2 初期強度の分散分析結果

研 究 速 報

となり因子寄与率は 20%，ついで細骨材率，高性能減水剤添加率，水セメント比が危険率 5% で有為となり，因子寄与率はそれぞれ 15%，12%，12% となる結果を得た。また，有為となった要因が全体の 50% を越える寄与率を占めており，その他の要因である単位セメント量・表面水率・細砂置換率が初期強度に与える影響はほとんどないという結果を得た。

検定の結果有為となった各要因の主効果を図 3 に示す。

初期強度に最も大きな影響を与えると考えられる急結剤添加率は添加率の増加に伴って強度が直線的に増加する傾向が認められた。細骨材率が 62% までの範囲では強度はほぼ一定であるが 67% まで増加させると急激な強度低下が見られている。また，高性能減水剤添加率の増加および水セメント比の増加により初期強度は低下する傾向が認められた。

これらの結果より，初期強度に対して有為になったこれらの配合要因を適切に調整することによって吹付けコンクリートの施工における初期強度に対する目標値を満足する配合を決定することが容易になると考えられる。具体的には，初期強度を増大させる方法としては，急結剤添加率を増大することが最も有効であるが，その他にも，高性能減水剤添加率を減少させ，水セメント比を低減した配合とすることが有効であると考えられる。

3.3 圧縮強度 (材齢 28 日) の分散分析結果

圧縮強度に対する分散分析の結果，有為となった配合要因の結果および各要因の因子寄与率を算出した結果を図 4 に示す。圧縮強度については，初期強度の結果と同様に急結剤添加率が危険率 1% で有為となり，因子寄与率は

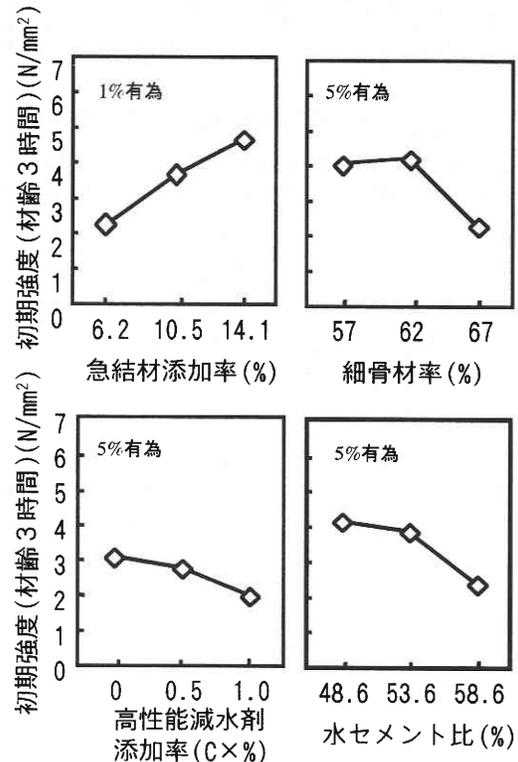


図 3 初期強度に対する各要因の主効果

17% となった。ついで単位セメント量，高性能減水剤添加率，細骨材率が危険率 5% で有為となり，因子寄与率は 15%，13%，11% となる結果を得た。一方，通常の普通コンクリートで強度に最も大きな影響があるとされている水セメント比の影響は吹付けコンクリートでは有為な要因とはならず，因子寄与率も 1% とほとんど圧縮強度には影響

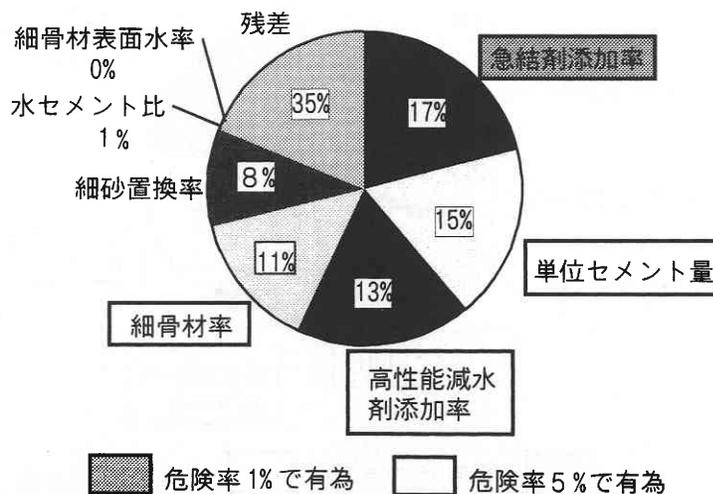


図 4 圧縮強度の分散分析結果

しないとの結果を得た。

検定の結果有為となった各要因の主効果を図5に示す。

圧縮強度に最も影響を与えるとの結果を得た急結剤添加率は、添加率が10%程度まででは圧縮強度はほぼ一定であるが14.1%まで添加すると圧縮強度が著しく低下する傾向を示した。その他に圧縮強度に影響を与える要因の効果としては、単位セメント量の増加および高性能減水剤添加率の増加に伴う強度の増加と細骨材率の増加に伴う強度の低下する傾向が認められた。

初期強度の結果と合わせて考察すると、初期強度および圧縮強度に最も影響するとの結果を得た急結剤添加率は、その増加によって、材齢3時間までの初期強度を直線的に増加させるが、10%程度以上の過剰の添加は材齢28日での圧縮強度の著しい低下を招くという互いに相反する傾向があることが分かった。よって、吹付けコンクリートの強度特性に関してのみ着目すると、急結剤の添加は初期強度発現性に対してはきわめて有効であるが、中長期における強度発現を阻害する傾向があるため、施工の可能となる範囲で最小限に抑えるようにし、できるだけ添加率の少なくなるような配合および施工条件することが重要であると考えられる。

#### 4. ま と め

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 配合条件を変化させた吹付け実験の結果をニューラルネットワークに適用した結果、収束状況は良好であり、本実験で行われていない配合条件での実験結果についても各入力因子の水準の範囲内であれば、ある程度推定可能であるとの見解を得た。
- (2) 材齢3時間での初期強度に対して分散分析を行った結果、最も影響を与える要因は、急結剤添加率であり、細骨材率、高性能減水剤添加率、水セメント比も初期強度に影響を与える要因であるとの結果となった。
- (3) 材齢28日での圧縮強度に対して分散分析を行った結果、最も影響を与える要因は、急結剤添加率であり、単位セメント量、高性能減水剤添加率、細骨材率も圧縮強度に影響を与える要因であるとの結果となった。

#### 5. お わ り に

本研究では、実験結果より得られた各配合条件での測定値をニューラルネットワークに学習させることで、未知の配合条件についてもその結果の推定を行い、その結果を含めたうえでの分析をおこなった。ニューラルネットワークでは、その最適化された重みから、学習の用いたデータの入力範囲内では、どのような条件においても推定値が得ら

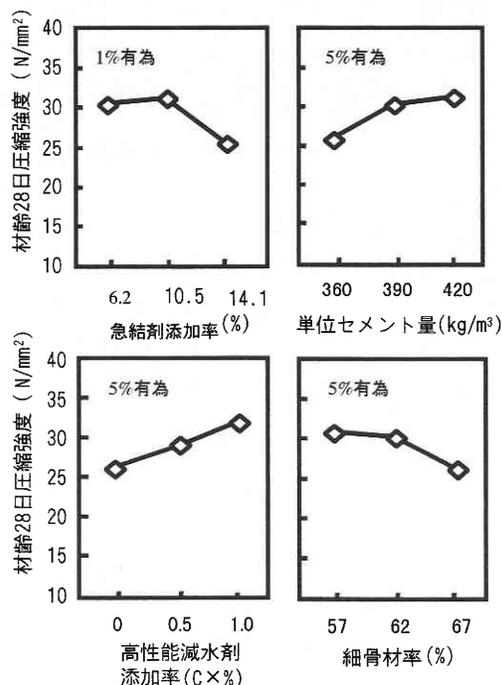


図5 圧縮強度に対する要因の主効果

れる。

しかし、湿式方式による吹付けコンクリート工法は吹付け前のコンクリートの状態（フレッシュ性状）によっては、その施工が困難となる場合がある。このことから、今回推定を行った配合条件の中にも、実際には吹付け施工をすることができない配合も含まれている可能性があり、本来ならそれらをも含めた分析を行うべきではなく、施工の可否の判定の条件を含めたうえでの検討が必要であると考えられる。しかし、現時点では、実験データが少ないためそこまでの詳細な検討は不可能であった。実験は現在もなお継続中であり、今後、多くのデータの蓄積を行うことで、より現実的な成果が得られるものであると考えられる。

(1998年8月20日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 荒木・平間・伊東・魚本:吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(4) —各種配合要因の変化に伴う吹付けコンクリートのリバウンド特性—:生産研究, 1998.4.
- 2) 小林・笹川・酒井・魚本:吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(5) —各種配合要因の変化が強度特性および空隙特性に及ぼす影響—:生産研究, 1998.5.
- 3) 大矢・魚本・堤:ニューラルネットワークを用いたコンクリート製造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.
- 4) 国分:土木材料実験,技報堂出版, 1988.7.
- 5) 北川:実験計画法抗張Ⅱ基礎編(2), 培風館, 1956.2.