

論文 ニューラルネットワークによる高流動コンクリートの性能評価に関する一考察

井波 良太*¹・足立 一郎*²・魚本 健人*³

要旨: 高炉スラグ微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートを対象とした室内実験から得られたデータをもとに、各要因（環境要因・配合要因・練混ぜ要因）と各性能評価試験の測定値との関係をニューラルネットワークによって学習させた。この学習から得られた重みから各要因が試験結果に与える影響について感度解析を行い、解析結果と実験から得られた影響度とを比較検討している。この結果、かなりの精度で感度解析結果と実験結果が一致した。このことから、配合設計・品質管理が困難である高流動コンクリートにおいてニューラルネットワークが適用できる可能性があると考えられる。

キーワード: 高流動コンクリート、ニューラルネットワーク、感度解析

1. はじめに

高流動コンクリートは、優れた自己充填性を有し、建設現場での省力化に非常に有効な高耐久・高性能コンクリートである^[1]。しかしながら、環境要因・配合要因・練混ぜ要因等の微妙な変化によって練上がり性状が大きく変化するため普通コンクリートに比べ配合設計・品質管理が非常に難しいという問題を有している。高流動コンクリートの配合設計・品質管理をより容易に行い適用範囲を拡大するには、これらの各要因と性能評価試験との関係を十分に把握し、練上がり性状をコントロールできるようにする必要がある。高流動コンクリートに関する研究は多方面に渡り数多く行われており、各要因と性能評価試験との関係の一部については既に研究が進んでいる。しかしながら、高流動コンクリートは普通コンクリートと比較して構成材料の種類が多く、また性能評価試験も多数存在しており、その関係全てを総合的に研究したものは非常に少ない。

そこで本研究は、高流動コンクリートにおける様々な要因が各性能評価試験結果に与える影響度をニューラルネットワークを用いて総合的に把握することを目的として実施したものである。

2. 実験概要

ニューラルネットワークは、学習データとして与えられた入出力関係を自己組織化するものであるので、精度の良い広範囲にわたるデータが多数必要である^[2]。そこで、以下の項目について十分検討を加え、実験を行った。

2.1 性能評価試験の選定

高流動コンクリートが自己充填するためには、流動性・材料分離抵抗性・鉄筋間通過性等を同時に満足しなければならない。そのため、普通コンクリートと比較してより多くの性能評価試験を行う必要がある。高流動コンクリートの性能評価試験については、試験器具の形状・寸法、測定方法等の違いによって数多くの種類が存在するが、その中から表-1に示す試験を選定した。

*1 千葉工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 千葉工業大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

*3 東京大学教授 東京大学生産技術研究所、工博 (正会員)

ただし、V漏斗流下試験・ボックス鉄筋間通過性試験装置については数種類の寸法があるが、今回は最も条件が厳しいもの（V漏斗の口径については7.5cm×6.5cm、ボックス試験については図-1に示すようなもの）を選択した。また、各試験とも測定項目がいくつか存在し、例えばV漏斗流下試験における相対速度のように計算を必要とするものも存在するが、将来的に現場においても容易にかつ迅速にデータ収集ができることを考慮し、実測値に計算を加えることなく試験現場で測定できる値のみを測定値として採用した。以上のことから、スランプフローについては流動幅（直径・2回）と50cm到達時間、V漏斗流下試験については流入直後および5分静置後の流下時間、ボックス試験については充填高さのみを測定値として採用することにした。さらに、硬化後の物性を評価するものとして材齢7日および28日における圧縮強度についても試験を行った。試験方法は全て土木学会高流動コンクリート研究小委員会性能評価分科会の「自己充填型の高流動コンクリートの試験方法(案)」^[3]に基づいて行った。

2.2 目標値の設定

本来の目的である性能（自己充填・高耐久・高強度）を十分に満足する高流動コンクリートを製造するためには、性能評価試験の目標値の設定が必要不可欠である。また、各要因の影響度を比較する上でも目標値の設定は必要であると考えられる。しかしながら、性能評価試験と同様に、現時点において統一された目標値というものは存在しない。そこで本研究では既往の研究を調査し、適当であると思われる値を目標値として表-2に示すように設定した。（ただし、ボックス試験については粗骨材がゲート部を完全に通過した状態を想定し20cm以上とした。）

2.3 配合の選定

最終的にニューラルネットワークで学習した重みを用いて行った感度解析の結果が、実際との関係を適切に感知しているかどうかを確認するために表-3に示すような各要因一つのみを変化させた配合を選定した。これらの配合に対し、合計77バッチについて各性能評価試験を行った。ここで、実験を行った全配合における各性能評価試験の目標達成状況を図-2に示す。図中の

表-1 試験項目および測定項目

試験名	測定項目
空気量	空気量
スランプフロー	フロー幅・50cm到達時間
V漏斗試験	流下時間(流入直後・5分静置後)
ボックス試験	充填高さ
圧縮強度試験	材齢7日・28日

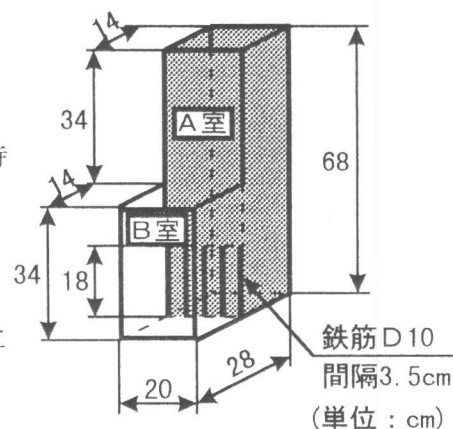


図-1 ボックス試験器

表-2 各測定項目の目標値

測定項目	目標値
空気量	4.0~7.0(%)
スランプフロー	65±5(cm)
50cm到達時間	5.0(sec)以内
V漏斗流下時間	直後・5分後共に15(sec)以内
ボックス充填高さ	20(cm)以上
圧縮強度	50(N/mm ²)以上

ボックス試験については粗骨材がゲート部を完全に通過した状態を想定し20cm以上とした。）

表-3 実験項目

変化項目	水準
練混ぜ時間(sec)	60・120・180・300・1000
水粉体比(%)	25・30・35・40・45
細骨材率(%)	40・45・50・55・60
単位粉体量(kg/m ³)	400・450・500・550・600
スラグ置換率(%/wt)	30・40・50・60・70・80
スラグ比表面積(cm ² /g)	4000・6000・8000・10000
S _p 添加率(%/P)	0.6・0.8・1.0・1.2
A _E 剤添加率(%/P)	0.4・0.6・0.8・1.0・1.2

目標達成率とは、各目標値を満足した配合数の全配合数に対する割合を百分率で表したものである。各試験の目標を達成した配合の数は、ボックス試験を除いてほぼ同一の値を示した。同一の頻度で目標値を満足するように配合を決定したにもかかわらず、ボックス試験は、他の試験に比べて目標を達成する配合の数が少ないことからボックス試験の目標値を満足することが最も困難であると考えられる。しかしながら、ボックス試験は高流動コンクリートを実構造物に適用する上で最も重要である鉄筋間通過性を評価する試験であることから、高流動コンクリートの性能を評価する場合、ボックス試験の結果を優先することが必要であると考えられる。また、スランプフロー試験の目標値を満足した配合のうち、複数または全ての試験の目標値を

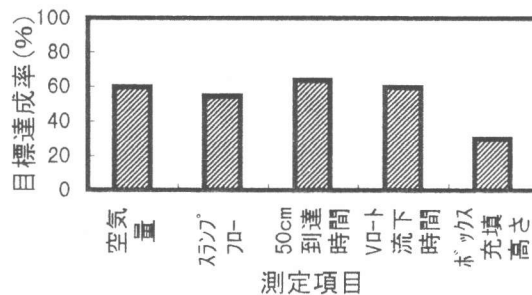


図-2 各性能評価試験の目標達成状況

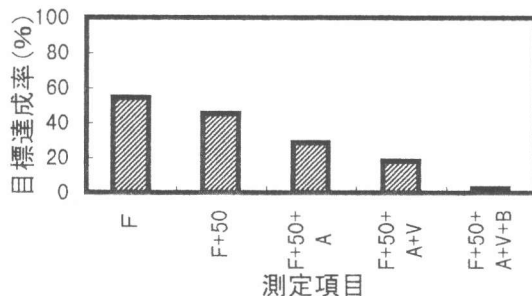


図-3 複数の試験に関する目標達成状況

満足した配合数の全配合数に対する割合を百分率で表したものを図-3に示す。図中のF・50・A・V・Bは、それぞれスランプフロー・50cm到達時間・空気量・V漏斗流下時間・ボックス充填高さを表している。図のように全ての目標値を満足する配合は全配合の5%にも満たないことから、性能評価試験全てを満足する高流動コンクリートは、非常に限られた範囲であることが分かる。

3. 性能評価試験結果の推定

実験を行った全ての配合および試験結果をニューラルネットワークの入力データとして用いた。

3. 1 入力因子の選定

入力因子の違いによって学習後のネットワークの精度は大きく変化する。そこで、入力因子としては、可能な限り少数の因子で環境・配合・練混ぜ要因を的確に表現していると考えられるものを選択し、以下のように合計10項目とした。

(1) 環境要因

実験室の環境上、室温については一定を保っていたが、湿度を一定に保つことが困難であったため、試験日によって実験室内の湿度が変化していた。また、練混ぜ時間・練混ぜ水の温度等の影響によって練上がり温度が変化していた。これらの影響によってフレッシュ時の物性は大きく変化すると考えられることから環境要因としては湿度および練上がり温度の2項目を選択した。

(2) 配合要因

示方配合における各材料の単位量、水結合材比・細骨材率等の割合を入力因子として選択する方法もあるが、水結合材比・細骨材率等の割合、細骨材の表面水率および練混ぜ量を網羅すると考えられることから水・セメント・高炉スラグ・粗骨材・細骨材・高性能減水剤・AE剤の各実際使用量、計7項目を配合要因として選択した。

(3) 練混ぜ要因

練混ぜ条件によってフレッシュ時の物性は当然変化する。本実験では同一の容量100リットルのパン型ミキサを使用し、練混ぜ量も50リットルと一定であるから練混ぜ条件で変化しているも

のは練混ぜ時間のみである。しかしながら、練混ぜ時間のみでは練り混ぜ条件を的確に表現することは不可能である。そこで、ミキサの積算消費電力を練混ぜ要因として使用した。

3. 2 出力因子の選定

高流動コンクリートは、特にフレッシュ時の性能が重要であることから、実験を行ったフレッシュ時の性能評価試験(空気量・スランプフロー・スランプフロー50cm 到達時間・V漏斗流下時間(流入直後・5分間静置後)・ボックス充填高さ)の結果全てを出力因子として使用した。

3. 3 推定方法

各性能評価試験結果の推定には既往の研究を参考に3層階層型ニューラルネットワークを用いた^[4]。各層のユニット数は、入力層10、中間層18、出力層6とした。ただし、入力因子と出力因子については、表-4に示したものを使用した。また、学習開始後平均二乗誤差の和が0.5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を終了した。

表-4 入出力因子

要 因	入力因子(10ユニット)	出力因子(6ユニット)
環境要因	湿度	スランプフロー スランプフロー50cm到達時間 空気量 V漏斗流下時間 (流入直後・5分静置後) ボックス充填高さ
	練上がり温度	
配合要因	水量	
	セメント量	
	高炉スラグ量	
	細骨材量	
	粗骨材量	
	高性能減水剤量	
AE剤量		
練混ぜ要因	積算消費電力	

4. 推定結果

4. 1 各性能評価試験値の推定結果

表-2の各性能評価試験値について推定結果の収束状況を表-5に示す。学習後の収束状況は、どの性能評価試験においても非常に良好であり、相関係数0.95以上と高精度の推定結果が得られた。以上のことから、入力したデータについてニューラルネットワークによる学習が適切に行われたと考えられる。

表-5 各測定項目の収束状況

測定項目	相関係数
空気量	0.950
スランプフロー	0.964
スランプフロー50cm到達時間	0.977
V漏斗流下時間(流入直後)	0.988
V漏斗流下時間(5分静置後)	0.980
ボックス充填高さ	0.987

4. 2 感度解析結果

学習より得られた重みを用いて、各入力因子が性能評価試験の結果に及ぼす影響度を求めるために全ての性能評価試験の目標値を満足した配合を基準として感度解析を行った。ここでは特に積算消費電力・高性能減水剤の添加量・高炉スラグの使用量のみが変化した場合のスランプフロー試験・ボックス鉄筋間通過性試験の結果に及ぼすそれぞれの影響度を図-4に示す。また、感度解析結果が妥当なものであるかどうかを確認するため、積算消費電力・高性能減水剤の添加量については実験結果も同図に示し、実験から得られた影響度と感度解析から求めた影響度が、どの程度一致するかについて比較検討した。図-4から分かるように、積算消費電力(練混ぜ時間)が増加すると、約300秒まではスランプフロー・ボックス充填高さ共に増加するが、その後は積算電力(練混ぜ時間)が増加するに従って、これらの値は極端に減少する傾向にある。また、高性能減水剤の添加量が増加することによって、スランプフローは増加し、ボックス充填高さについては約200gを境に上に凸のピーク型の傾向を示している。この傾向については、実験結果と感度解析結果がかなりの精度で一致していることから感度解析結果が妥当なものであり、感度解析によってこれらが及ぼす影響度を把握することが可能であると考えられる。また、高炉スラグの使用量が及ぼす影響度については、練混ぜ量を一定として実験を行ったため実験から求めるこ

とは不可能であるが、感度解析を行うことによって、このように一つの要因のみを変化させることができないために実験からは求めることが不可能な要因が及ぼす影響度についても把握することが可能である。以上のことからニューラルネットワークを用いて感度解析を行うことによって、各性能評価試験の目標値を満足する高流動コンクリートを製造することは、将来的に可能であると考えられる。

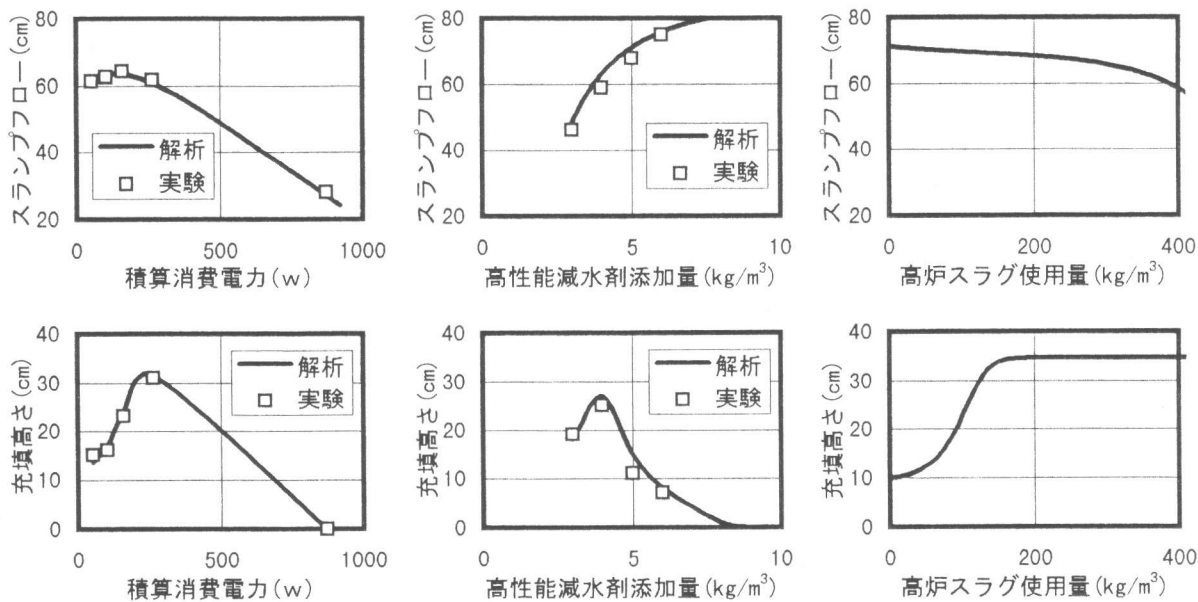


図-4 実験結果および感度解析結果

5. 各性能評価試験間および目標値間の関係の把握

高流動コンクリートの性能を正確に評価するためには多数の試験を行う必要があるが、現場において迅速に性能を評価するには、可能な限り少数の試験によって性能を評価することが理想的である。しかしながら、現時点では各性能評価試験ごとの関係が明確ではなく、それぞれの目標値が独立して存在しているため、試験項目を削減することができない。そこで、感度解析からある一つの試験値と他の試験値との関係を把握し、各試験の目標値間の関係を把握することを試みた。

2章3節で述べたようにボックス試験の目標値を満足することが最も困難であることからボックス試験に注目し、ボックス試験とその他の試験との関係をニューラルネットワークを用いて把握した。入力・出力因子は表-6に示すものを用い、各層のユニット数は、入力層7、中間層18、出力層1として3章3節と同様の学習をさせた。100万回学習後の収束状況は非常に良好であり、推定精度についても相関係数0.952と非常に良好な結果が得られた。感度解析の結果を図-5に示す。図から分かるように、ボックス試験の目標値を満足するために望ましい各性能評価試験の条件は、スランプフローについては約55cm以上、50cm到達時間については約3秒から約6秒、V漏斗流下時間については流入直後で約20秒以下、5分静置後については約13秒から約18秒という結果が得られた。以上のことから各性能評価試験間の関係および各試験の目標値間の関係についてもニューラルネットワークを用いて把握することが可能である。

表-6 入出力因子

入力因子(5ユニット)	出力因子(1ユニット)
スランプフロー	ボックス充填高さ
スランプフロー-50cm到達時間	
空気量	
V漏斗流下時間 (流入直後・5分静置後)	

このことから、ニューラルネットワークを用いて各試験の目標値を適切に設定することによって、高流動コンクリートの性能評価試験項目を削減することが将来的に可能であると考えられる。

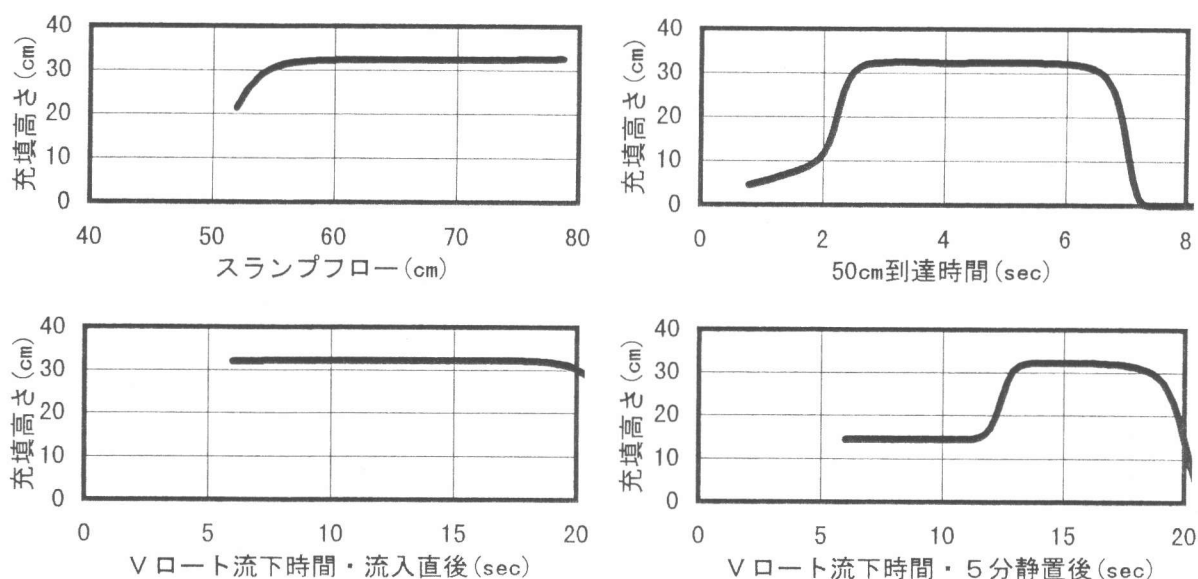


図-5 感度解析結果

6. まとめ

ニューラルネットワークを用いることによって入力項目と出力項目の関係を重みという形で表現することが可能であるため一つの入力項目のみが変化した場合の出力項目に与える影響度を把握することが可能となる。この特性を利用することにより以下のことが明らかになった。

(1) 室内実験データの範囲内では、環境・配合・練混ぜ等の各要因が高流動コンクリートの性能評価試験値に及ぼす影響について総合的かつ容易に把握することが可能である。また、実験からは把握することが不可能な要因の影響度についても感度解析から把握することが可能である。

(2) 入出力因子を変化させることによって各試験値間の関係および各試験の目標値間の関係についてもニューラルネットワークを用いて把握することが可能である。

謝辞 本論文は、東京大学生産技術研究所第五部魚本研究室において行った研究をとりまとめたものであり、ご助言・ご助力を頂いた同研究室の皆様、実験に協力して頂いた芝浦工業大学生増田樹久靖君に深く感謝致します。また、高炉スラグ微粉末を提供して頂いた新日鐵化学株式会社御中に深く感謝致します。なお、本研究費の一部は、平成六年度文部省科学研究費補助金試験研究(A)(1)(課題番号06505003・代表者：岡村 甫教授)によったものであることを付記する。

参考文献

- [1] 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993. 9
- [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-27, pp. 9-18, 1995. 5
- [3] 土木学会高流動コンクリート研究小委員会性能評価分科会: 自己充填型の高流動コンクリートの試験方法(案)、高流動コンクリートシンポジウム論文報告集, pp. 215-230, 1996. 3
- [4] 大矢 孝, 魚本健人, 堤 知明: ニューラルネットワークによるコンクリート製造時の品質推定、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 1273-1276, 1994. 6