

# 論文 ニューラルネットワークを用いた高流動コンクリートのフレッシュ性状とレオロジー定数の推定

古賀 志門\*1・山田 義智\*2・平野 修也\*3・東舟道 裕亮\*4

**要旨:** 本研究は、高流動コンクリートのスランプフロー試験を対象として、機械学習の一種であるニューラルネットワークによりコンクリートのフレッシュ性状（スランプフロー値、500mm フロー到達時間、空気量等）の推定を試みた。また、既往の研究成果を用いて、スランプフロー値や500mm フロー到達時間よりレオロジー定数の推定式を導いた。さらに、ニューラルネットワークで推定したコンクリートのフレッシュ性状の各値をレオロジー定数の推定式に代入することで、対象となる高流動コンクリートのレオロジー定数を求めた。得られたレオロジー定数の有用性は、フローの広がり曲線をMPS法にて再現することで検証した。

**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、フレッシュ性状、レオロジー定数

## 1. はじめに

コンクリートのフレッシュ性状（スランプやスランプフロー、空気量など）を制御するためには、セメント量や単位水量、化学混和剤の使用量や細骨材率などによる調整とともに、試し練りを行い、目標のコンクリートのフレッシュ性状を得るのが一般的である。しかし、コンクリートのフレッシュ性状は、使用する材料特性や配（調）合、練混ぜ方法、さらには打込みの際の環境条件や経過時間によって大きく変化し、目標のコンクリートのフレッシュ性状を得るためには技術者の経験則への依存度が高く、数多くの試し練りを要する場合がある。特に高流動コンクリートの場合、使用する混和剤や粉体の使用量、さらには練混ぜ条件などの各種要因を調整するために多くの試し練りが必要である。

高流動コンクリートのフレッシュ性状の調整において、井波<sup>1)</sup>は高炉スラグ微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートの各種要因（環境要因・配合要因・練混ぜ要因）と各性能試験の実測値（スランプフロー値、500mm フロー到達時間、空気量、V 漏斗流下時間、ボックス充填高さ）との関係をニューラルネットワーク（以後、NN と称する）で学習させた結果、各種要因から各性能試験結果を推定できると報告している。また、丸山<sup>2)</sup>は遺伝的アルゴリズムを用いてコンクリートの要求性能型調合設計を試みている。これらの研究では、コンクリートを製造する際の各種要因から目標とするコンクリートのフレッシュ性状を合理的に実現することを目的としている。

一方、筆者らは、レオロジー定数を入力値として、数値解析を用いてコンクリートの充填解析を行うことを目的とした研究を進めている<sup>3),4)</sup>。コンクリートの充填解

析においては、正確なコンクリートのレオロジー定数が必要であり、煩雑な試験を行わずに、コンクリートに使用した材料や配（調）合等の各種要因からレオロジー定数を求めることができれば理想的である。

そこで、本研究では、まず、高流動コンクリートのスランプフロー試験を対象として、機械学習の一種であるNN 学習により、高流動コンクリートの各種要因からコンクリートのフレッシュ性状（スランプフロー値、500mm フロー到達時間、フローの流動停止時間、空気量）の推定を試みた。次に、既往の研究成果<sup>5)</sup>より、スランプフロー値や500mm フロー到達時間からレオロジー定数の推定式を導いた。

上述のNN 学習とレオロジー定数推定式を併せ用いることにより、コンクリートの材料・配（調）合情報、練混ぜ情報、環境情報（詳細は2.2 節）より対象となる高流動コンクリートのレオロジー定数を推定した。さらに本研究では、推定されたレオロジー定数の有用性を確認するために、MPS法を用いて解析的にフローの広がり曲線（5.2 節参照）を再現して検討したので報告する。

## 2. 高流動コンクリートのフレッシュ性状の推定方法

### 2.1 NN による学習について

本研究に用いるNN はバックプロパゲーションアルゴリズム<sup>6)</sup>（以後、BPA と称す）を用いた。ここでは、複数の学習データ（入力および出力データのペア）に対して、一組ずつBPA による結果と出力データの二乗誤差の総和で表せる評価関数E（式(1)参照）が十分小さくなるようにNN に用いる全ての重み係数（閾値も含む）を更新する（式(5)参照）。これを全ての学習データの組

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻（学生会員）

\*2 琉球大学 工学部工学科教授 博士(工学)（正会員）

\*3 (株)フローリック 技術本部コンクリート研究所主査 修士(工学)（正会員）

\*4 琉球大学 工学部技術部 修士(工学)（正会員）

に対して行い、各学習データに対する評価関数  $E$  (誤差) がすべて十分小さくなるまで繰り返す逐次修正法を用いた。

$$E[n] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_M} (y_i^M[n] - d_i)^2 \quad (1)$$

ここで、 $d_i$  は出力層 (M 層) の  $i$  番目ユニットに入力される実測データであり、 $N_M$  は出力層のユニット数、 $n$  は学習サイクル数を表すパラメータである。また、 $m$  層の  $i$  番目のユニットからの出力  $y_i^m[n]$  は式(2)で与えられ、式(1)では M 層 (出力層) の  $i$  ユニットの値 ( $y_i^M[n]$ ) が用いられている。

$$y_i^m[n] = F(x_i^m[n]) \quad (2)$$

ここで、 $F(\cdot)$  はシグモイド関数であり、次式で表される。

$$F(x_i^m[n]) = \frac{1}{1 + e^{-x_i^m[n]}} \quad (3)$$

式(1)や式(2)中に現れる  $x_i^m[n]$  は、第  $m$  層  $i$  番目のユニットへの入力の総和を表し、次式で求められる。

$$x_i^m[n] = \sum_j w_{ij}^m[n] y_j^{m-1}[n] \quad (4)$$

式(4)中の  $w_{ij}^m[n]$  は重み係数であり、 $m-1$  層の  $j$  番目のユニットから  $m$  層 ( $m=1,2,3,\dots,M$ ) の  $i$  番目のユニットへの重みを表し、次式で求められる。

$$w_{ij}^m[n+1] = w_{ij}^m[n] - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^m[n]} + \alpha (w_{ij}^m[n] - w_{ij}^m[n-1]) \quad (5)$$

式(5)の重み係数の修正式は最急降下法に基づいており、目標値への収束性を早めるための重み更新係数  $\eta=0.03$  と  $\alpha=0.04$  を用いている。これら重み更新係数の値は事前学習を行い決定している。

また、 $m$  層の 1 つ下の層に特殊なユニット (バイアスユニットと称し、図-1 参照) を設けており、ここからの出力は  $y_0^{m-1}[n] = -w_{i0}^m[n]$  によって与え、第  $m$  層  $i$  番目のユニットの閾値  $\theta_i^m[n]$  を表すものとする。

なお、式(5)右辺の偏微分の具体的な解法や、BPA の学

習ステップの詳細については、文献 6) を参照されたい。

## 2.2 本研究で用いた NN について

本研究で用いた NN の概略を図-1 に示す。ここでは、データ学習に際し、入力層には材料・配 (調) 合情報、練混ぜ情報、および環境情報のデータセットを入力した。入力層は 1 層であり、そのユニット数は 65 個である。入力層ユニットのデータセットの詳細を表-1 に示す。

中間層数およびそのユニット数については、層数は 5 層、各層ユニット数は 80 個と固定した (4 章参照)。出力層は 1 層 4 ユニットのコンクリートのフレッシュ性状 (スランプフロー値、500mm フロー到達時間、フローの流動停止時間、空気量) がそれぞれのユニットに入出力される。表-2 に出力層の詳細を示す。入力に際し、セメント種類、練混ぜ機の種類、練混ぜパターンは数値化できない。そこで、これらに該当する各入力層ユニットには 1 を入力し、該当しない場合には 0 を入力し

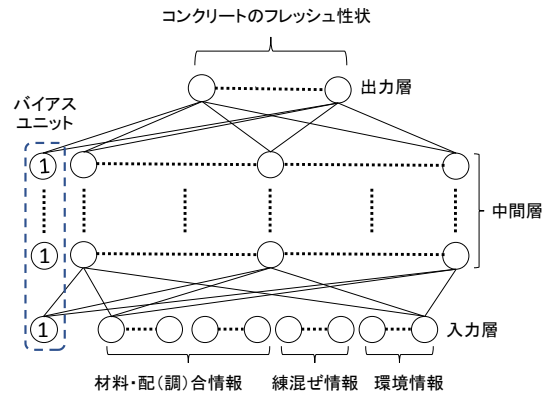


図-1 NN の概略図

表-2 出力層ユニットの詳細

出力ユニット 1	出力ユニット 2
スランプフロー値 (数値)	500mm フロー到達時間 (数値)
出力ユニット 3	出力ユニット 4
フローの流動停止時間 (数値)	空気量 (数値)

表-1 入力層ユニットのデータセットの詳細

材料・配(調)合情報		練混ぜ情報		環境情報	
セメント 関連	セメント種類 (7unit:1or0)	水関連	水質別の単位水量 (2unit:数値)	練混ぜ機の種類 (3unit:1or0)	コンクリート温度 (1unit:数値)
	製造会社別の単位セメント量 (8unit:数値)	化学混和剤 関連	化学混和剤製品別の使用量 (3unit:数値)	練混ぜパターン (3unit:1or0)	練上がり後の経過時間 (1unit:数値)
	セメント密度 (1unit:数値)		化学混和剤成分の使用割合 (4unit:数値)	練混ぜ時間 (1unit:数値)	気温 (1unit:数値)
粗骨材や 細骨材 関連	岩種分類別の単位粗骨材量 (4unit:数値)	*1: 表中の括弧内に「0unit:1or0」とある場合、条件に該当するunitには「1」を、該当しないunitには「0」を入力した。(「00種類」や「00パターン」と記した項目) *2: 表中の括弧内に「0unit:数値」とある場合、条件に該当するunitに正規化された数値を入力し、該当しないunitには「0」を入力した。 *3: 岩種の分類は、粗骨材 (細骨材) において、①砂利 (砂)、②碎石 (砕砂)、③人工軽量骨材の3種類の分類に加え、微粉末の影響の大きい④石灰石碎石 (砕砂) の4種類 (4unit) とした。 *4: 水質の分類は、①上水道水と②上水道水以外の水に分類した。 *5: 化学混和剤は、練込み型を対象とし、開発にあたりその成分配合を変えた。 *6: 練混ぜ機の種類は、①バン型、②強制2軸型、③螺旋アームの強制2軸型の3種類とした。 *7: 練混ぜパターンは、①材料一括投入、②モルタル先行練混ぜ、③5分静置 (混和剤効果発現) 型の3種類とした。 *8: セメント会社、混和材種別および化学混和剤製品は数多くあるが、学習効率を考えてunit数を制限した。	助剤製品別と添加量 (3unit:数値)	練混ぜ量 (1unit:数値)	相対湿度 (1unit:数値)
	粗骨材の表乾密度 (1unit:数値)				
	粗骨材の粗粒率 (1unit:数値)				
	粗骨材の実積率 (1unit:数値)				
	粗骨材のかさ容積 (1unit:数値)				
	粗骨材の最大寸法 (1unit:数値)				
	岩種分類別の単位細骨材量 (4unit:数値)				
	細骨材の表乾密度 (4unit:数値)				
細骨材の粗粒率 (4unit:数値)					
混和材 関連	混和材種別の単位使用量 (4unit:数値)				

た。一方、それ以外の数値化できる入力層ユニットおよび出力層ユニットの数値データには、以下の式(6)~式(8)による正規化処理を行った。

$$x_{max} = \max(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (6)$$

$$x_{min} = \min(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (7)$$

$$x'_i = \frac{x_i - x_{min}}{(x_{max} - x_{min})} \quad (8)$$

ここで、Nは全データ組数(356組)で、式(6)、(7)のmax(…)およびmin(…)は、要因毎のデータ群 $x_i$ ( $i=1,2,3,\dots,N$ )から最大値と最小値を求める演算である。また、 $x'_i$ は正規化されたi番目( $i=1,2,3,\dots,N$ )の数値データの値で、その値は0~1の範囲に収まる。

本研究では全データ356組の中から、学習に使用しない未学習検証データとして56組を取り分けた。なお、未学習検証データ56組のデータの一部は、5章で行うレオロジー定数の推定やMPS法による検討を目的として、スランブフロー値が大中小となるデータや、配(調)合が同じで練上がり後の経過時間の異なるデータを一部意図的に選択している。

一方、残り300組のデータについては、図-2に示すK=3のK-分割交差検証を行い、モデル①~③の交差検証データを用いてNN学習による学習データと交差検証データの平均誤差をチェックし、平均誤差が最も小さくなる学習モデルを採用した。なお、K-分割交差検証を行うデータ分割に際しては、ランダムなデータ組分けとした。

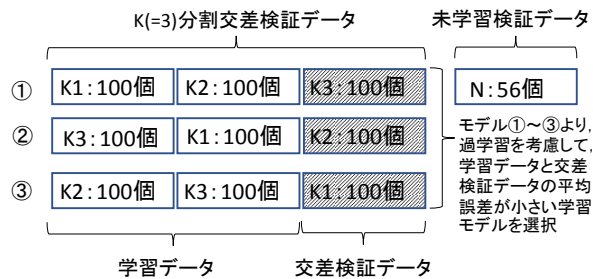


図-2 データの分割・学習概要

### 3. スランブフロー試験等の概要

#### 3.1 使用材料と配(調)合

本研究のスランブフロー試験で使用した骨材は、複数の産地、岩種、密度、粗粒率であり、使用したセメントも複数社製の多種類セメントを用いた。なお、水は上水道水のみを使用した。また、化学混和剤は複数の構成成分の組み合わせを用意した。

コンクリート配(調)合は、JIS A 5308の他、いわゆる大臣認定配合も含め、複数のW/C、単位水量、s/a、単位粗骨材かさ容積、化学混和剤使用量の組み合わせとしており、目標とするスランブフロー値は55cm~70cmの範囲

とした。

#### 3.2 練混ぜ条件と環境条件

練混ぜには、公称容量55リットルの強制二軸ミキサーを使用した。また、流動性の保持性能を比較するため、一部の試料では、練上がり直後を基点として経過時間5分、30分、60分、90分、120分等の時点でスランブフロー値、空気量、およびコンクリート温度の計測を行った。また、練混ぜを行った実験室の温度は10~30℃、湿度は60±5%である。

#### 4. 学習結果と検証結果について

本研究では、全学習データを用いた事前検討の中で、計算負荷も考慮し、中間層1~5層、各中間層のユニット数70~90ユニットの範囲で学習効率の検討を行った。その結果、中間層5層、各層80ユニットで学習効率がよい傾向が得られた。そこで、今回の学習モデルは、中間層数を5層、各中間層のユニット数を80個で固定した。ここでは、最大学習回数を10万回として、300組のデータを用いて2.2節で示したK-分割交差検証を行った。この検証の際には、学習回数に伴う交差検証データの誤差の推移を用いて過学習に陥っていないかを確認した。その結果、図-2に示すモデル③の学習回数5,000回の時、学習データと交差検証データの平均誤差が最も小さい結果となった(図-3参照)。本研究では、この学習回数5,000回時の重み(式(5)参照)を持つ学習モデルを採用した。

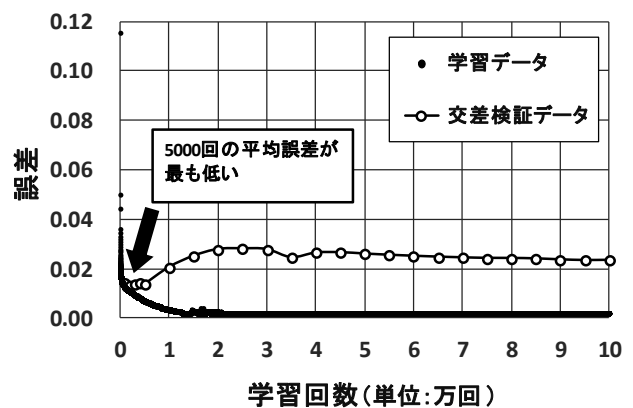


図-3 学習回数と学習誤差の関係

図-4に、採用した学習モデル(学習回数5,000回)で計算された学習データおよび、同じ学習モデルで求められた交差検証データと未学習検証データのコンクリートのフレッシュ性状(スランブフロー値、500mmフロー到達時間、フローの流動停止時間、空気量)の推定結果と実測値との関係を記す。ここで、正規化されたコンクリートのフレッシュ性状の各値は式(8)を用いて元の $x_i$ 値に戻している。

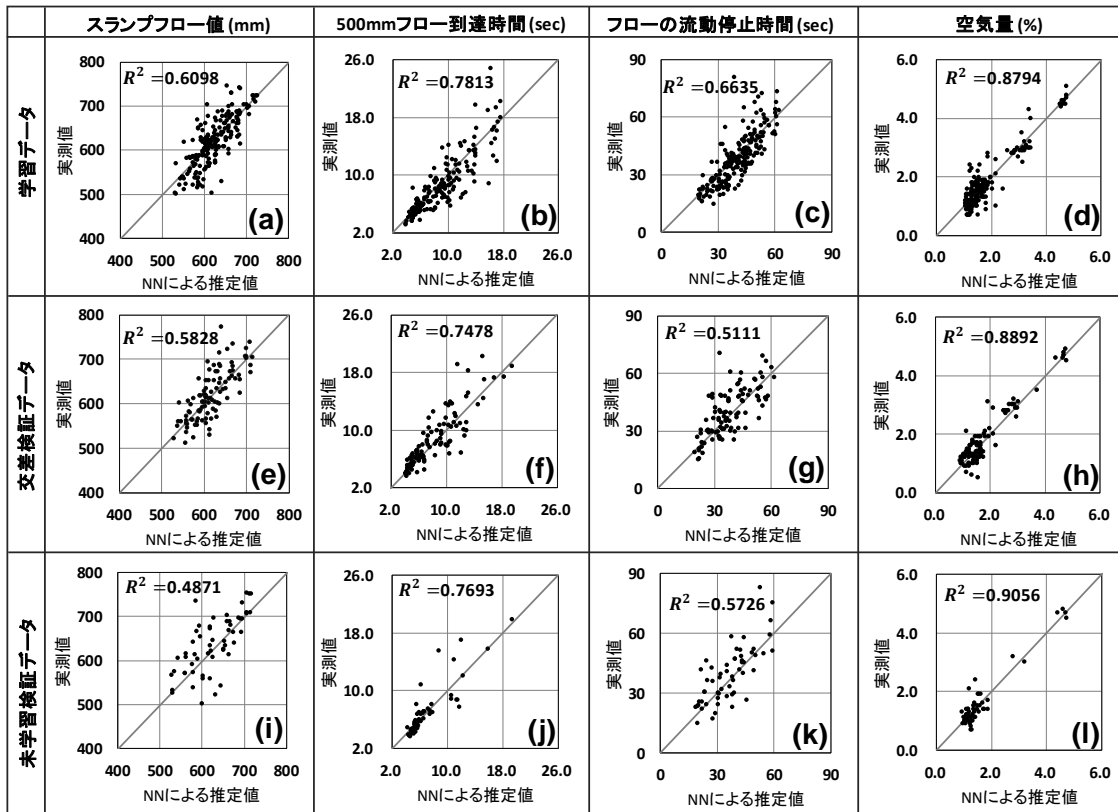


図-4 学習データ、交差検証データおよび未学習データの NN による推定結果と実測値の比較

図-4より、学習データの NN による推定結果はコンクリートのフレッシュ性状のいずれの値も実測値をよく捉えており、決定係数  $R^2$  も比較的高い。一方、交差検証データの結果では NN による推定値は、500mm フロー到達時間と空気量では実測値を捉えており決定係数  $R^2$  も高いが、スランブフロー値とフローの流動停止時間には多少のばらつきがある。未学習検証データでは、交差検証データと同様に 500mm フロー時間と空気量は実測値をよく捉えて決定係数  $R^2$  も高いが、スランブフロー値とフローの流動停止時間は推定値と実測値の間に多少のばらつきが認められる。

表-3 に中間層 5 層、各層 80 ユニットで 356 組の全てのデータを 10 万回学習させた場合の NN 学習結果と実測値の決定係数を示す。同表から推察されるように、学習データ数を増やして、過学習が起きないように学習回数を増やすことができれば、さらなる精度の向上が期待される。

本研究では、計算負荷の観点から中間層数やユニット数を固定した検討を行った。さらに、学習に用いたデータ数も不十分であり、今後は、中間層数やユニット数を詳細に検討し、かつ、学習データ数を増やして、精度を高めることが課題である。また、近年は汎化能力の高い他の機械学習方法も提案されており、それらの手法と比較検討を行い、最適な方法を模索していくことも課題である。

表-3 356 組全データの 10 万回学習結果

フレッシュ性状	スランブフロー値	500mmフロー到達時間	フローの流動停止時間	空気量
決定係数 $R^2$	0.9261	0.9852	0.9081	0.9808

## 5. NN と既往研究によるレオロジー定数の推定と検証

本章では、4 章で示した NN を用いて高流動コンクリートの各種要因からスランブフロー値と 500mm フロー到達時間を推定し、これらの値を既往の研究成果を利用したレオロジー定数推定式に代入することで、降伏値と塑性粘度求めた。さらに、得られたレオロジー定数（降伏値と塑性粘度）を用いて MPS 法によりフローの広がり曲線を再現することで、推定式で得られたレオロジー定数の有用性と、NN によるスランブフロー値と 500mm フロー到達時間の推定結果を検討した。

### 5.1 コンクリートのフレッシュ性状によるレオロジー定数の推定方法

#### (1) 既往の研究成果に基づくレオロジー定数推定式

ここでは、文献 5)にて行われた、球引上げ試験によるレオロジー定数とスランブフロー試験結果の関係を基に、レオロジー定数推定式を求めた。ここで推定式は、スランブフロー値と降伏値の関係式および、500mm フロー到達時間と塑性粘度の関係式の 2 つである。

なお、文献 5)では、スランブフロー値の表現をその半径で扱っているが、本研究では直径そのもので扱っている。また、文献 5)ではレオロジー定数を球引上げ試験開

始直後と終了直前の値に分けて検討しているが、その差は小さいため、本研究では区別することなく用いることにした。さらに、文献5)では400mmフロー到達時間と塑性粘度の相関が高いとしているが、本研究では一般的に測定されることが多い500mmフロー到達時間と塑性粘度の関係を用いることにした。

図-5および図-6には、文献5)の実験結果で得られたスランプフロー値(mm)と降伏値(Pa)の関係、および500mmフロー到達時間と塑性粘度の関係をそれぞれ示す。

式(9)に文献5)の実測結果によるスランプフロー値 $S_f$ (mm)と降伏値 $\tau_y$ (Pa)の近似式を示す。

$$\tau_y = 9473.2 \exp(-0.009S_f) \quad (9)$$

また、式(10)、(11)に文献5)の実測結果による500mmフロー到達時間 $t_{500}$ (sec)と塑性粘度 $\eta$ (Pa·s)の近似式を示す。

$$\eta = 3.7342t_{500} + 14.37 \quad (500\text{mm} \leq S_f < 600\text{mm}) \quad (10)$$

$$\eta = 7.8736t_{500} + 1.308 \quad (600\text{mm} \leq S_f) \quad (11)$$

ここで、スランプフロー値が500mm以上600mm未満の場合(式(10))とスランプフロー値600mm以上(式(11))で、500mmフロー到達時間 $t_{500}$ (sec)と塑性粘度 $\eta$ (Pa·s)の関係が異なっている。この理由は、スランプフロー値が500mmに近いコンクリートの場合、フローが500mmを超えるとせん断ひずみ速度がかなり小さくなり、塑性粘度よりも降伏値の影響が大きくなるためと考えられる。

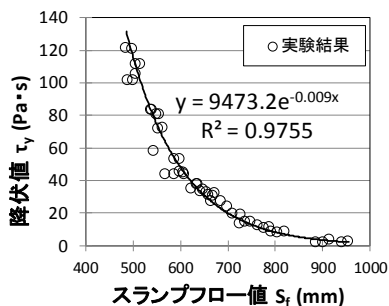


図-5 スランプフロー値と降伏値の関係

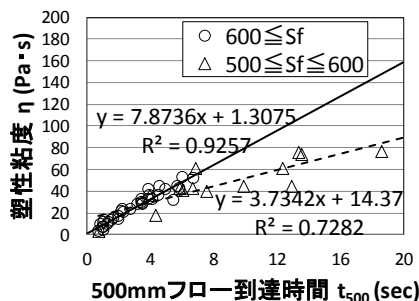


図-6 500mmフロー到達時間と塑性粘度の関係

## (2) MPS法の概要

本研究で用いたMPS法は、田中らが考案した圧力ポアソン方程式 $\eta$ を適用して高精度かつ安定的に計算が行えるように工夫している。ここで、コンクリートを粒子

モデルで表し、全粒子数は40,908個とした。スランプフロー板およびスランプコーンはポリゴンモデルで扱い、これらで生じるコンクリートとの境界面は、ノンスリップ条件とした。ここで、スランプコーンは人為的な引上げによって真上に移動する境界となり、その引上げ速度は文献5)を参考に40mm/sec一定とした。また、フレッシュコンクリートの流動構成式は、Bingham modelと一致するように工夫した連続関数であるRegularized Bingham modelを用いた<sup>8)</sup>。

今回用いたMPS法においては、限界せん断ひずみ速度以下の粒子が99%になった時を流動停止と判断した<sup>8)</sup>。

図-7にMPS法による解析に用いた対象モデルの断面図とコーンの引上げ移動の様子を示す。この図からも分かるように、本解析では、スランプコーンの影響も考慮したスランプフロー解析となっている。

文献9)は高流動コンクリートのスランプフローにスランプコーンの影響があることを指摘し、スランプコーンの移動を考慮した解析を行っている。しかし、スランプコーン形状を円筒形としており、実際のスランプコーン形状を正しく表現していない。

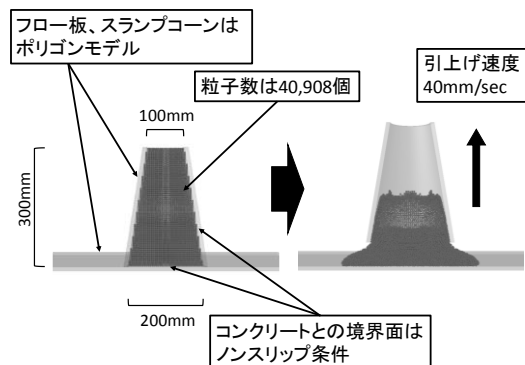


図-7 MPS解析モデルとコーン引上げの様子

## 5.2 NNで推定したレオロジー定数のMPS法による検証

ここでは、NN推定で求めたスランプフロー値と500mmフロー到達時間を用いて降伏値と塑性粘度を式(9)~(11)より推定し、これらを入力値としてMPS法で解析を行った。図-8には、実測およびNN推定によるフロー500mmとその到達時間、スランプフロー値とフローの流動停止時間を記号(●, ○)で記し、併せてMPS法によるフローの広がり曲線を実線で示す。図-8(a)は未学習検証データの内、スランプフロー値の最も小さい試料の結果であり、図-8(b)はスランプフロー値が中間である試料、また、図-8(c)はスランプフロー値の最大となる試料である。同図より、実測結果とNN推定結果を比較すると、スランプフロー値に多少の相違はあるものの、その傾向は捉えられている。

また、MPS法による広がり曲線の解析結果は、スラン

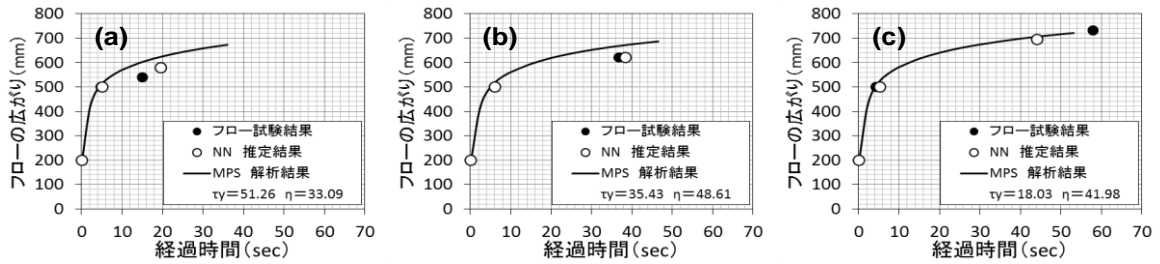


図-8 スランプフロー試験結果と NN 推定結果および MPS 解析結果

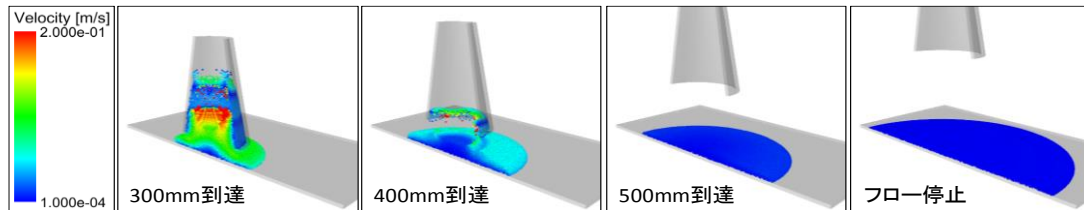


図-9 スランプフロー値が中間である試料 (図-8 (b)) の MPS 解析におけるフローの様子

プフロー値が最大の試料 (図中(c)参照) についてはよく再現できているが、スランプフロー値が小さい試料ほど実測および NN 推定結果より MPS 解析結果の方が流動する傾向にある (図中(a), (b)参照)。この理由として、スランプフロー値が小さい時、式(9)は降伏値を実際より低めに評価している可能性や、MPS 解析の流動停止判定基準に問題があることも考えられ、今後の検討課題である。

図-9 には、スランプフロー値が中間の試料 (図-8 (b)) の MPS 解析におけるフローの様子とその時の流動速度を示す。同図より、フロー開始直後でのコーンによるコンクリート流動の遮蔽や、時間経過によって徐々に流動速度が遅くなる様子が分かる。これらは、実際のフロー試験で体感されることであり、この観点から、本 MPS 解析は実際のフローの再現に有用であると言える。

## 6. まとめ

NN によって高流動コンクリートの各種要因からコンクリートのフレッシュ性状の実測値を概ね捉えることができた。より精度を上げるためには、数多くのデータを蓄積することが課題である。MPS 法は高流動コンクリートの解析法としての有効性は認められたが、レオロジー定数の推定結果および MPS 解析結果の精度には課題が残った。今後、NN と MPS 法に関する上記の課題の克服により、本研究手法のさらなる精度の向上が期待できると考えられる。

**謝辞:** 本研究の一部は、平成 29 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)一般、課題番号: 17H03344) による助成を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

1) 井波良太, 足立一郎, 魚本健人: ニューラルネットワーク

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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.81-86, 1996.6

2) 丸山一平, 長井宏憲, 野口貴文, 友澤史紀: 遺伝的アルゴリズムに基づく要求性能型調合設計手法の基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.823-828, 2000.6

3) 山田義智, 上原義己, 崎原康平: BIM と粒子法を採用したコンクリート充填シミュレーションの試み, 日本建築学会九州支部研究報告, Vol.55, pp.161-164, 2016.3

4) 浦野真次, 山田義智: 充填シミュレーションによるこれからのコンクリートの施工性能評価, セメント・コンクリート, No.853, pp.34-41, 2018.3

5) 小門武, 宮川豊章: スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.634, Vol.45, pp.113-129, 1999.11

6) 八名和夫, 鈴木義武: ニューロ情報処理技術-基礎と応用-, 海文堂, pp.41-53, 1992

7) 田中正幸, 益永孝幸: 疑似圧縮効果による MPS 法の安定化と圧力の平滑化, Transaction of JSCE, 20080025, 2008.10

8) 上原義己, 崎原康平, 山田義智, 浦野真次: 高精度手法を用いた MPS 法によるフレッシュコンクリートのスランプ解析に関する一考察, Cement Science and Concrete Technology, Vol.67, PP.626-633, 2013.3

9) 小門武, 細田尚, 宮川豊章: 数値流体解析による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.648, Vol.47, pp.109-125, 2005.5