

論文 モルタルの流動性や使用材料・配(調)合を用いた機械学習による高流動コンクリートの流動性予測と特徴量の影響分析

東舟道 裕亮*1・山田 義智*2・波平 康太*3・平野 修也*4

要旨：本研究では、高流動コンクリートの流動性の予測を目的として、簡便なモルタルフロー試験で得られるモルタルの流動性や使用材料・配(調)合の情報を特徴量(説明変数: 25 項目)として機械学習による予測手法を提案し、得られた予測値の有効性について検証した。また、各特徴量が高流動コンクリートの流動性へ及ぼす影響について検討した結果、特徴量を 4 項目まで削減しても、当初の 25 項目の場合と比べても遜色のない精度で予測できることが確認できた。なお、残った 4 項目の特徴量がコンクリートの流動性に与える影響を定量的に評価した。

キーワード：高流動コンクリート, モルタルの流動性, Random Forest, 重要度, Partial Dependence Plot

1. はじめに

近年、コンクリート工事においては、経験豊富な技術者の不足や構造物の部材形状の複雑化、大規模化および耐震性向上に伴う過密配筋により、コンクリート充填が困難になる場面が多くなっており、よりワーカブルなコンクリートが必要とされている。このようなコンクリート工事の現場事情を受け、2019 年 3 月には JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」が改正され、同年 5 月には主要構造部に使用する建築材料に関する告示(平成十二年建設省告示第 1446 号)も改正されて、普通強度域の高流動コンクリートの使用が期待されている。

しかし、高流動コンクリートの流動性は、使用する骨材およびセメントの材料特性や配(調)合、混和剤(材)の性質などによって変化する。また、所要のワーカビリティを得る上で技術者の経験則への依存度が高く、数多くの試し練りを必要とするのが実情である。

そこで、本研究では、高流動コンクリートのワーカビリティにおいて重要な流動性の予測を目的として、簡便なモルタルのフロー試験で得られるモルタルの流動性や使用材料・配(調)合の情報を特徴量(説明変数)とした機械学習による予測手法を提案し、得られた予測値の有効性を検証した。さらに、重要な特徴量が流動性へ及ぼす影響についても定量的に評価したので併せて報告する。なお、高流動コンクリートの流動性を評価する際には 500mm フロー到達時間(以後、 T_{500} と略す)が用いられるが、上述した JIS 改正では 500mm 未満の高流動コンクリートも定義されていることや、平野ら¹⁾の研究において 400mm フロー到達時間(以後、 T_{400} と略す)によりレオロジー定数を推定していることなどから、本研究では T_{400} の予測を目的とした検討を行った。

2. 使用材料および配(調)合

表-1 に本研究に用いたコンクリートの配(調)合を示す。本研究に用いたコンクリートの使用材料は、セメント(C)には普通ポルトランドセメントを使用し、練混ぜ水(W)には上水道水を用いた。細骨材には福岡県北九州市産石灰砕砂(S1)および茨城県桜川市産砕砂(S2)、千葉県君津市産山砂(S3)を使用し、粗骨材には東京都青海市産硬質砂岩碎石(G1)、山口県美祢市産石灰碎石(G2)、高知県鳥形山産石灰碎石(G3)、静岡県掛川市産山砂利(G4)の 4 種類を用いた。なお、S1、S2、G1、G3 では骨材のロットが変わっており、物性値がわずかに異なる。同表中にはロットの違いを色分け(無色、青、赤)で示している。

混和剤には、A 社製の増粘剤含有高性能 AE 減水剤(VSP)または高性能 AE 減水剤(SP)、消泡剤(DF)を使用した。配(調)合の内、Ser.1, 2, 9 では SP を使用し、その他の配(調)合では VSP を使用した。DF はコンクリート試料において空気量が 1%程度となるように添加した。

表-1 に示す各配(調)合において目標スランプフロー値を設定し、それに合わせて VSP または SP の添加率を調整した。本研究で用いたコンクリート試料は 109 配(調)合である。なお、同表のコンクリート配(調)合を基に粗骨材を除いたモルタル試料も作製した。

3. 各フロー試験の概要と粗骨材の表面積と円形度の測定方法

3.1 モルタル試料のフロー試験

モルタルの練混ぜには、ホバートミキサを使用し、セメントと細骨材を投入後 10 秒間空練りし、混和剤入りの水を注水して 2 分間練り混ぜた後に試験に供した。

モルタル試料のフロー試験は、JIS R 5201 規定のフロ

*1 琉球大学大学院 理工学研究科 修士(工学)(正会員)

*2 琉球大学 工学部工学科建築学コース教授 博士(工学)(フェロー会員)

*3 琉球大学 工学部工学科建築学コース

*4 株式会社フローリック 技術本部コンクリート研究所 主席研究員 博士(工学)(正会員)

表-1 コンクリートの配(調)合

Ser.	W/C (%)	目標スランブフロー値 (mm)	VSP (またはSP) (C*%)	DF※3	s/a (%)	かさ容積 (m³/m³)	単位量 (kg/m³)								
							W	C	S1※1	S2※1	S3※1	G1※2	G2※2	G3※2	G4※2
1	35	400, 500, 600	(0.735, 0.780, 0.825)	0.005	52.1	0.525	175	500	550	356	—	835	—	—	—
2	35	400, 500, 600	(0.735, 0.780, 0.825)	0.005	52.1	0.525	175	500	552	356	—	835	—	—	—
3	45	400, 500, 600	1.225, 1.350, 1.475	0.005	54.5	0.525	175	389	505	490	—	835	—	—	—
4	45	(500)	1.350	0.005	56.6	0.500	175	389	630	408	—	795	—	—	—
5	45	(500)	1.350	0.005	52.3	0.550	175	389	582	376	—	875	—	—	—
6	45	350, 400, 500, 600	1.000, 1.225, 1.350, 1.475	0.005	54.5	0.525	175	389	507	490	—	835	—	—	—
7	40	450, 500, 550	1.200, 1.250, 1.400	0.05	47.6	0.530	175	438	—	318	478	—	542	364	—
8	50	450, 500, 550	1.000, 1.150, 1.275	0.05	49.8	0.530	175	350	—	348	521	—	542	364	—
9	50	550	(1.400)	0.05	49.8	0.530	175	350	—	348	521	—	542	364	—
10	35	450, 550, 650	0.775, 0.850, 1.000, 1.225, 1.250, 1.300	0.05	50.5	0.525	175	500	507	328	—	815	—	—	—
11	35	450, 550, 650	0.750, 0.900, 1.200	0.05	48.2	0.550	175	500	484	313	—	854	—	—	—
12	35	450, 550, 650	0.750, 0.900, 1.175	0.05	47.7	0.555	175	500	479	310	—	862	—	—	—
13	35	450, 550, 650	0.725, 0.875, 1.175	0.05	48.7	0.525	175	500	489	316	—	423	—	435	—
14	35	450, 550, 650	0.725, 0.875, 1.175	0.05	46.3	0.550	175	500	465	301	—	443	—	456	—
15	35	450, 550, 650	0.725, 0.875, 1.175	0.05	45.8	0.555	175	500	460	298	—	447	—	460	—
16	35	450, 550, 650	0.700, 0.750, 0.900, 1.100, 1.200	0.05	48.4	0.525	175	500	486	314	—	425	—	—	418
17	35	450, 550, 650	0.725, 0.825, 0.875, 1.175	0.05	46.0	0.550	175	500	462	299	—	445	—	—	438
18	35	450, 550, 650	0.725, 0.875, 1.175	0.05	45.5	0.555	175	500	457	295	—	449	—	—	442
19	35	450, 550, 650	0.800, 1.000, 1.250	0.05	52.9	0.500	175	500	531	343	—	776	—	—	—
20	35	450, 550, 650	0.725, 0.925, 1.375	0.05	50.9	0.500	175	500	512	331	—	404	—	—	398
21	35	450, 550, 650	0.725, 0.900, 1.150	0.05	43.4	0.600	175	500	436	282	—	932	—	—	—
22	45	450, 550, 650	0.725, 0.900, 1.050, 1.125	0.05	53.1	0.525	175	389	563	364	—	815	—	—	—
23	45	450, 550, 650	0.650, 0.800, 1.050	0.05	51.0	0.550	175	389	541	350	—	854	—	—	—
24	45	450, 550, 650, 700	0.650, 0.800, 1.050, 1.200, 1.500	0.05	50.5	0.555	175	389	536	347	—	862	—	—	—
25	45	450, 550, 650	0.600, 0.800, 1.050	0.05	51.5	0.525	175	389	546	353	—	423	—	435	—
26	45	450, 550, 650	0.600, 0.800, 1.050	0.05	49.2	0.550	175	389	521	337	—	443	—	456	—
27	45	450, 550, 650	0.600, 0.800, 1.050	0.05	48.7	0.555	175	389	516	334	—	447	—	460	—
28	45	450, 550, 650	0.650, 0.825, 0.900, 1.100	0.05	51.2	0.525	175	389	542	351	—	425	—	—	418
29	45	450, 550, 650	0.575, 0.650, 0.800, 1.050	0.05	48.9	0.550	175	389	518	335	—	445	—	—	438
30	45	450, 550, 650	0.525, 0.750, 0.800, 1.000	0.05	48.4	0.555	175	389	513	332	—	449	—	—	442
31	45	450, 550, 650	0.700, 0.900, 1.350	0.05	55.4	0.500	175	389	587	380	—	776	—	—	—
32	45	450, 550, 650	0.625, 0.825, 1.275	0.05	53.6	0.500	175	389	568	367	—	404	—	—	398
33	45	450, 550, 650	0.600, 0.800, 1.200	0.05	46.5	0.600	175	389	492	318	—	932	—	—	—
34	45	650	1.200	0.05	45.0	0.600	185	411	465	301	—	932	—	—	—
35	45	600, 650	0.975, 1.100	0.05	44.3	0.600	175	389	470	304	—	485	—	—	478

※1：混合砂の密度は、Ser.1～6が2.65g/cm³、Ser.7～9が2.61g/cm³、Ser.10～35が2.66g/cm³。

※2：粗骨材の密度は、G1はSer.1～6、10～35ともに2.65g/cm³。G2は2.69g/cm³。G3はSer.7～9では2.71g/cm³、Ser.13～15と25～27では2.73g/cm³。G4は2.61g/cm³。

※3：DF添加量の単位は、Ser.1～6は(C*%)、Ser.7～35は(Ad*%)。

コーンを用いて実施した。Ser.1～9については、剛性と平滑性を有する500×500mmのガラス製平板上にて無振動で行い、ガラス板の下部からビデオカメラにてフローの広がり撮影した。一方、Ser.10～35については800×800mmの鋼製フロー板上にて無振動で行い、上部に設置したビデオカメラにてフローの広がりを撮影した。撮影したビデオ画像を基にコーン引上げ後のフローの広がりを表すフロー広がり曲線を作成し、150mmフロー到達時間（以後、 t_{150} と略す）とモルタルフロー値を求めた。なお、ガラス製平板と鋼製フロー板の違いによるモルタルフロー試験の測定結果にほとんど差異は認められなかったため、本研究では区別せずに以降の検討に用いた。

3.2 コンクリートのスランブフロー試験の概要

練混ぜは、強制二軸ミキサーを使用し、セメントと細骨材、粗骨材を投入後10秒間空練りした後に、混和剤入りの水を注水し2分間練り混ぜて試験に供した。

コンクリート試料のスランブフロー試験は、JIS A 1150

規定のスランブコーンを用いて鋼板上にて無振動で行い、上部からビデオカメラで撮影し、ビデオ画像を基にフロー広がり曲線を作成した。フロー広がり曲線を基にスランブフロー値および T_{400} 、 T_{500} をそれぞれ求めた。

3.3 粗骨材の表面積と円形度の測定方法

粗骨材の表面積および円形度の測定は、KEYENCE製ワンショット3D形状測定機VR-5000により実施した。JIS A 1102に基づき粒径5mm、10mm、15mm、20mmふるいにより粗骨材をふるい分け、各々から無作為に5粒ずつ採取して測定試料とした。試料を小口切断機で2分割した後、切断面を下向きに測定機の台上に設置した(写真-1(a))。撮影後、専用のアプリケーションにより3Dモデルが形成され(写真-1(b))、試料の表面積、切断面の周囲長および円形度を測定した。なお、切断に伴う試料の欠損を補正するため、カッター厚さ1mmを欠損部分の厚さと仮定し、切断面の周囲長を乗じて欠損部分の表面積を求め、この値を加算して粗骨材の表面積とした。

本研究では、粗骨材種類ごとに表乾密度と粒度分布が異なることを考慮して、粗骨材の比表面積[cm²/g]を算出した。この値を各配(調)合の粗骨材単位量[kg/m³]に乘じて、単位量当たりの表面積[m²/m³]を算出した。円形度は各粒径の平均値を求め、異種の粗骨材を混合使用する場合は質量割合に応じた平均円形度を配(調)合ごとに算出した。なお円形度は真円を1として小数で表され、粗骨材切断面の形状に対する相対的指標と位置付けられる。



(a) 測定試料 (b) 3D モデル
写真-1 粗骨材試料と 3D モデルの比較
(掛川産砂利 20mm の場合)

4. 特徴量と機械学習について

4.1 特徴量の基本統計量

使用材料の各情報と配(調)合を基に、機械学習で用いる特徴量(説明変数)である数値データ 23 項目の基本統計量およびラベルデータ 2 項目(混和剤種類: SP または VSP)の内訳を表-2 に示す。なお、同表には目的変数であるフロー試験結果より得られた T_{400} 、スランプフロー値の基本統計量も塗りつぶしで併せて示している。

4.2 機械学習の概要

(1) 学習器および学習方法の概要

本研究では、複数の決定木を組み合わせて学習モデルの構築を行う Random forest²⁾(以後、RF と略す)により学習を行った。学習方法は、本研究で収集した全データ 109 個の内、87 個(約 80%)を学習モデルの構築を行う学

習・交差検証データ、残り 22 個(約 20%)を機械学習のモデル構築には関与しない未学習データとしてランダムに取り分けた。その後、学習・交差検証データを用いて k 分割交差検証法による学習モデルの構築および汎化性能の評価を行った。k 分割交差検証法ではデータを任意で k 組に分割し、ある 1 組を除いた k-1 組を学習データとして学習モデルの構築を行い、残りの 1 組を交差検証データとして学習モデルの検証および評価を行う。この処理を分割した k 組のデータにて繰り返し行い、構築された k 個の学習モデルの内、学習・交差検証データ(87 個)の平均予測精度に最も近い学習モデルを採用した。

(2) ハイパーパラメータ調整法

上記の k 分割交差検証法におけるハイパーパラメータは、木の数を 50, 100, 250, 500 の 4 パターン、分割数 k を 5~10 の 6 パターン設定し、各組み合わせによるモデル構築と交差検証データの予測を行い、交差検証データの平均予測精度が最も高くなるパラメータを採用した。その結果、スランプフロー値の場合では木の数 500、分割数は k=6 が最適であり、 T_{400} の場合は木の数 50、分割数は k=7 が最適であった。

5. 学習結果とその考察

5.1 コンクリートの流動性の予測結果と考察

(1) スランプフロー値について

図-1 に RF によるスランプフロー値の予測結果を示す。なお、同図中には±10%の誤差区間を破線で示し、全データにおける誤差区間外の割合(OOR: Out Of Range)も併せて示す。また、図-2 に RF による機械学習で得られた特徴量の重要度(目的変数への寄与の度合い)の上位 10 項目を抜粋して示す。

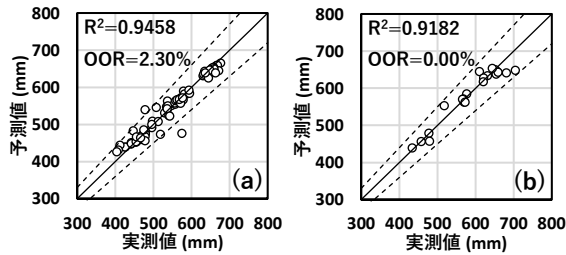
図-1(a)より、学習・交差検証データの予測結果の決定係数は $R^2=0.9458$ と非常に高い。また、同図(b)の未学習データの予測結果についても決定係数が $R^2=0.9182$

表-2 特徴量および目的変数の基本統計量

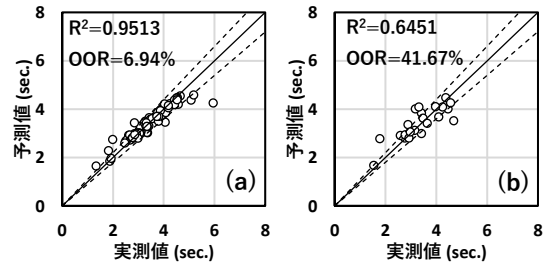
	単位量(kg/m ³)				W/C (%)	密度(g/cm ³)		吸水率(%)		粗粒率		モルタル密度 (g/cm ³)	実積率		モルタルの細骨材 体積分率	粗骨材 表面積(m ²)
	水	セメント	細骨材	粗骨材		細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材		細骨材	粗骨材		
平均値	175	438	854	861	41	2.654	2.654	0.97	0.622	2.79	6.73	2.286	0.676	0.602	0.479	179.44
中央値	175	389	851	858	45	2.658	2.65	0.96	0.54	2.80	6.72	2.287	0.677	0.608	0.483	180.30
標準偏差	0.96	56.40	72.19	43.37	5.19	0.01	0.02	0.15	0.18	0.08	0.05	0.022	0.003	0.013	0.04	11.47
最小	175	350	718	776	35	2.61	2.63	0.78	0.37	2.63	6.65	2.232	0.665	0.586	0.417	156.65
最大	185	500	1038	963	50	2.658	2.7	1.49	0.87	3.01	6.78	2.320	0.682	0.634	0.562	201.19
データ数	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109	109

	s/a (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	モルタル フロー値(mm)	t150 (sec.)	化学混和剤 添加率(C*%)	コンクリートの 粗骨材体積分率	粗骨材 円形度	スランプフロー値 (mm)	T400 (sec.)
平均値	49.7	0.54	255	0.68	0.967	0.324	0.699	554	3.53
中央値	49.8	0.53	257	0.67	0.9	0.322	0.703	565	3.42
標準偏差	3.0	0.03	35.81	0.40	0.24	0.02	0.008	79.93	0.95
最小	43.4	0.5	171	0.18	0.525	0.293	0.682	404	1.33
最大	56.6	0.6	347	1.67	1.5	0.366	0.704	705	7.07
データ数	109	109	109	109	109	109	109	109	109

	SP添加 0:無し 1:あり	VSP添加 0:無し 1:あり
0	102	7
1	7	102
合計	109	109



(a) 学習・交差検証データ (b) 未学習データ
図-1 RFによるスランプフロー値の予測結果



(a) 学習・交差検証データ (b) 未学習データ
図-3 RFによる T_{400} の予測結果

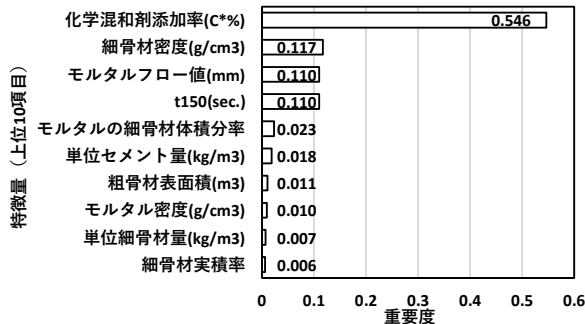


図-2 RFより得られた特徴量の重要度上位10項目
(スランプフロー値の場合)

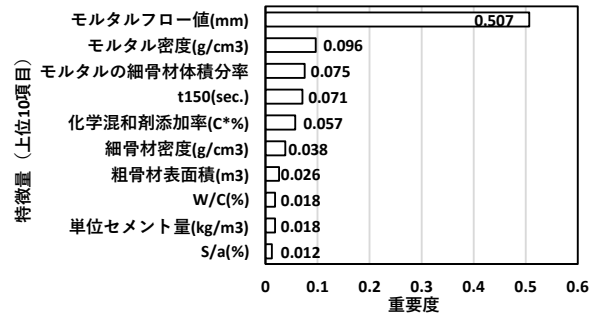


図-4 RFより得られた特徴量の重要度上位10項目
(T_{400} の場合)

と非常に高い精度で予測できている。

図-2の重要度が比較的高い特徴量上位4項目に着目すると、化学混和剤添加率が最も高く(0.546)、続いて細骨材密度(0.117)、モルタルフロー値(0.110)、 t_{150} (0.110)の順で重要度が高かった。この上位4項目の特徴量がスランプフロー値に与える影響については後述する。

(2) T_{400} について

図-3にRFによる T_{400} の予測結果を示し、図-4に特徴量の重要度の上位10項目を示す。なお、 T_{400} が6秒を超えたデータについては、スランプフロー値が400mmに近い流動停止直前のデータであり、その他のデータとは傾向が異なっていた。そのため、本研究ではこれらのデータ(3データ)を除いた106データを用いてRFによる T_{400} の学習と予測を行った。

図-3(a)より、学習・交差検証データの予測結果の決定係数は $R^2=0.9513$ と高い。一方、図-3(b)より、未学習データの予測結果は決定係数が $R^2=0.6451$ であり、ある程度の予測精度は認められた。予測精度が $R^2=0.65$ 程度となった一因として、 T_{400} はフローコーンの引き上げ速度の影響を受けると考えられ、実験者によって T_{400} の測定値にばらつきが生じていることが考えられる。

次に、図-4に示す重要度が比較的高い特徴量上位4項目に着目すると、モルタルフロー値が最も高く(0.507)、続いてモルタル密度(0.096)、モルタルの細骨材体積分率(0.075)、 t_{150} (0.071)の順で重要度が高かった。この上位4項目の特徴量が T_{400} に与える影響についても後述する。

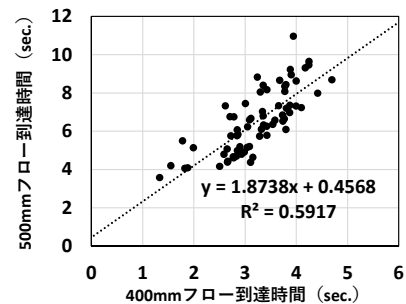


図-5 T_{400} と T_{500} の関係

(3) T_{400} と T_{500} の関係

本研究では T_{400} の予測を目的としているが、スランプフロー試験では T_{500} を測定するのが一般的であるため、参考として図-5に T_{400} と T_{500} の関係を示す。なお、ここではスランプフロー値が500mmを超え、かつ T_{500} が12秒未満のデータのみを用いており、データ数は71個であった。同図より、 T_{400} と T_{500} の関係における決定係数は $R^2=0.5917$ で、ある程度の相関があり、 T_{400} と T_{500} には2倍程度の差が認められる。

5.2 特徴量の削減検討

ここでは、データ収集の簡素化または予測精度の向上を目的として、前節にて行った特徴量25項目を用いたRFによる特徴量の重要度を参考にスランプフロー値と T_{400} の予測に影響の小さい項目の削減を行った。具体的には、重要度の一番低い項目から順に削減していき、その都度RFによる再学習・再予測を行い、予測精度が大きく低下する直前までこれらの作業を繰り返した。その

結果、スランブフロー値については化学混和剤添加率、細骨材密度、 t_{150} 、モルタルフロー値の4項目まで、 T_{400} についてはモルタルフロー値、モルタルの細骨材体積分率、モルタル密度、 t_{150} の4項目まで削減できた。なお、削減後に残った4項目について Variance Inflation Factor(VIF)を検証したところ、全ての特微量間で VIF の値が 10 未満であり多重共線性は認められなかった³⁾。

次節にて、削減後に残った影響の大きい特微量を用いた RF による学習・予測結果と各特微量の重要度および Partial Dependence Plot(PDP)⁴⁾を併せて示し、考察を行う。なお、PDP とは、着目する特微量のデータのみを変化させ、その特微量が学習モデルの予測精度に与える影響を平均値として可視化し評価するものである⁴⁾。

5.3 影響の大きい特微量による流動性予測結果と考察

(1) スランブフロー値の予測結果

図-6 に、特微量を4項目とした場合の RF によるス

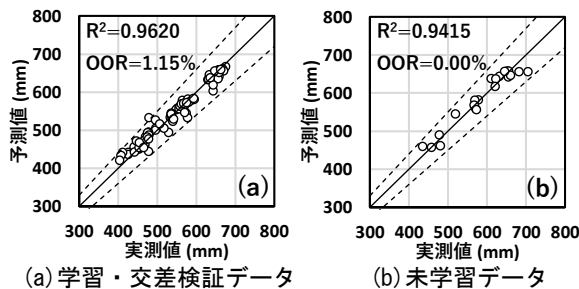


図-6 削減後のスランブフロー値の予測結果

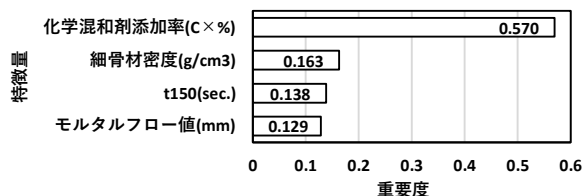


図-7 削減後のスランブフロー値の重要度

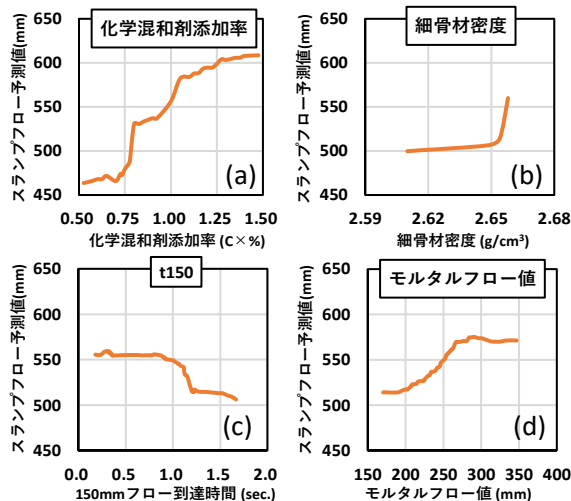


図-8 削減後の各特微量の PDP
(スランブフロー値の場合)

ランブフロー値の予測結果を示し、図-7 に各特微量の重要度を示す。図-6(a)より、学習・交差検証データの予測結果は決定係数が $R^2=0.9620$ であり、同図(b)の未学習データの予測結果も決定係数が $R^2=0.9415$ と非常に高い精度が得られた。また、これらの結果は 5.1 節の特微量 25 項目で行った場合に比べて僅かに高くなった。この理由として、スランブフロー値の予測において影響が大きい項目のみを厳選したことで、分散されていた重要度が集約され予測精度が向上したと考えられる。なお、削減後の重要度 4 項目は、5.1 節の重要度の上位 4 項目と同じであるが、 t_{150} とモルタルフロー値の順位が入れ替わっている。これは特微量を削減したことによる影響で順位が変動したものと考えられる。

図-8 に削減後の特微量 4 項目における PDP をまとめて示す。図-8(a)より、混和剤添加率については添加率が多くなるほどスランブフロー値が大きく増加しており、影響の大きさが確認できる。同図(b)の細骨材密度については、Ser.10~35 の配(調)合において密度の高い細骨材を使用しており、密度の低い細骨材を使用した Ser.1~9 よりも目標スランブフロー値を高めに設定したことが影響したものと考えられる。従って、今後は細骨材密度によって目標スランブフロー値の偏りのないデータを収集する必要がある。同図(c)のモルタルの t_{150} に関しては、 t_{150} が短いほどモルタルの粘性が低いため、コンクリートにおいても初期の流動速度が速くなり、その加速度によってスランブフロー値が大きくなる傾向があると考えられる。同図(d)より、モルタルフロー値が大きいほどスランブフロー値も大きくなる一般的な傾向が認められる。しかし、同図(c)では t_{150} が 1.2sec.以上、同図(d)ではモルタルフロー値が 300mm 以上の範囲においてスランブフロー値に与える影響が小さい。この原因として、上記の範囲のデータが少なく影響が表れなかった可能性が考えられる(t_{150} は 14 個、モルタルフロー値は 10 個)。

(2) T_{400} の予測結果

図-9 に特微量を4項目とした場合の RF による T_{400} の予測結果を示し、図-10 に各特微量の重要度を示す。図-9(a)より、学習・交差検証データによる予測結果の決定係数は $R^2=0.8360$ であり、同図(b)の未学習データの予測結果の決定係数は $R^2=0.6419$ であった。これらの結果は、削減前の予測精度に比べて学習・交差検証データでは決定係数が 0.12 程度下がっているが、未学習データの予測についてはほぼ同じ精度を保っている。また、削減後の重要度 4 項目は、5.1 節で示した重要度の上位 4 項目と同じだが、特微量の削減によりモルタルの細骨材体積分率とモルタル密度の順位が入れ替わっていた。

図-11 に示す削減後の特微量 4 項目における PDP については、同図(a)より、モルタルフロー値が大きいほど

コンクリートの流動速度も速くなる傾向があるため、それに伴い T_{400} が短くなったと考えられる。同図(b)のモルタルの細骨材体積分率については、図-12(a)に示す単位セメント量との関係より、細骨材体積分率が大きいほど単位セメント量が少なくなり粘性が低くなることから T_{400} が短くなると考えられる。これは今回の実験の配(調)

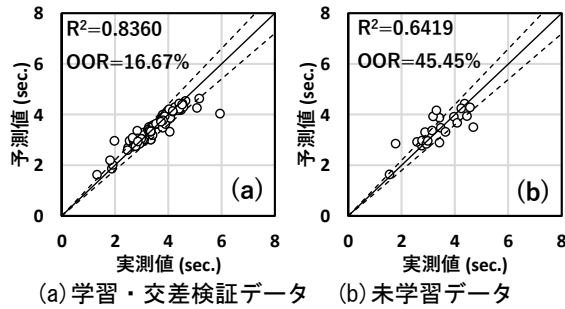


図-9 削減後の T_{400} の予測結果

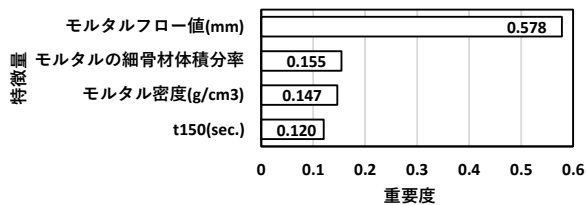


図-10 削減後の T_{400} の重要度

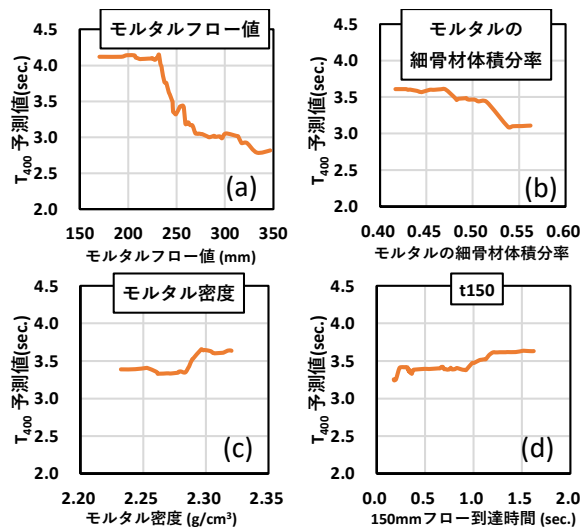


図-11 削減後における各特徴量のPDP

(T_{400} の場合)

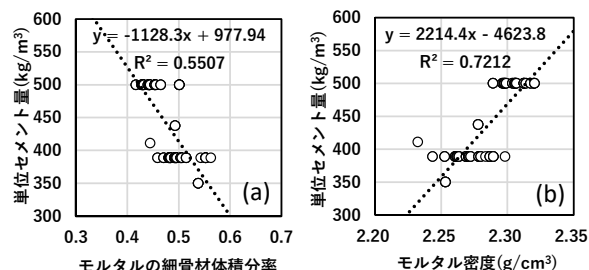


図-12 モルタルの細骨材体積分率およびモルタルの密度と単位セメント量の関係

合において、単位セメント量が少ないコンクリート試料では細骨材を増やして材料分離抵抗性を高めたためである。一方、図-11(c)のモルタル密度については、モルタル密度の高い試料ほど単位セメント量が多くなっているため(図-12(b)参照)、粘性が高くなり T_{400} が長くなると考えられる。なお、図-11(d)のモルタルの t_{150} との関係については、 t_{150} が長くなるほどモルタルの粘性が増加し、コンクリートの粘性が高くなるため T_{400} も長くなる傾向が認められる。

以上の結果から、本実験の範囲では、モルタルに関する情報(モルタルの流動性や配(調)合情報、細骨材の物性)のみで高流動コンクリートの流動性(スランプフロー値および T_{400})を良い精度で予測できることが確認された。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 特徴量 25 項目を用いた RF での機械学習により、高流動コンクリートの流動性を良い精度で予測できた。
- 2) 特徴量の重要度を参考に、スランプフロー値および 400mm フロー到達時間の予測に用いる特徴量を 4 項目まで削減でき、それらを用いた RF による予測結果は、25 項目の場合と同程度以上の精度が認められた。
- 3) 削減後の特徴量が高流動コンクリートの流動性に与える影響について PDP により定量的に評価した。
- 4) 本実験の範囲では、モルタルに関する情報(モルタルの流動性や配(調)合情報、細骨材の物性)のみで高流動コンクリートの流動性を良い精度で予測できることが確認された。

謝辞: 本研究は令和 3 年度科学研究費助成事業(基盤研究(C)(一般)、課題番号 21K04355、「高流動コンクリートのレオロジー定数推定法と振動および間隙通過性を考慮した充填解析」)の助成を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 平野修也ほか: 締固めを要する高流動コンクリートのレオロジー定数測定と MPS 解析によるその有効性の検証, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 87, No. 795, pp. 393-404, 2022.5
- 2) Leo Breiman: Random Forests, Machine Learning, Vol.45, pp5-32, 2001.10
- 3) 田村隆太ほか: 多重共線性を考慮した回帰式の変数選択問題の定式化, オペレーションズ・リサーチ 3 月号, Vol.63 No.3, pp.128-133, 2018.3
- 4) Friedman, Jerome H.: Greedy function approximation: A gradient boosting machine, The Annals of Statistics, Vol.29, No.29, pp.1189-1232, 2001.10