

報告 スランプ試験画像で機械学習したフレッシュコンクリート診断システムの開発と実用化

川又 篤*1・岩城 圭介*2・福岡 瑛莉奈*3・関 和彦*4

要旨：海外工事における自社バッチャープラントを用いて製造するレディーミクストコンクリートの品質管理を対象として、フレッシュコンクリート診断システムを開発した。フレッシュ性状の診断では、スランプ試験画像におけるスランプ形状および表面テクスチャーを要因とした AI システムを構築して、これを WEB アプリに実装することで、現地スタッフによるスマートフォンを用いた運用を可能とした。

キーワード：海外工事, レディーミクストコンクリート, 品質管理, AI, スランプ試験

1. はじめに

海外工事では、国内工事と比較して工事規模が大きく、あるいは施工場所が僻地であるため、現地のレディーミクストコンクリート（以下、生コン）工場のみでは生コンの供給量が不足する場合がある。そのような場合には、施工者が当該工事のために専用の現場生コン工場を新設・保有することで、自社で使用する生コンを自らの責任で製造・供給する必要がある。

本報では、現場生コン工場で製造する生コンの品質管理ツールとして開発したフレッシュコンクリート診断システムについて報告する。フレッシュコンクリートの診断のために、ミャンマーでの工事で取得したスランプ試験画像を用いて機械学習した AI を構築して、その精度について検証を行った。また、この AI を WEB アプリに実装することで、現地スタッフがスマートフォンにより利用可能なフレッシュコンクリート診断システムとした。

2. 海外工事における生コン品質管理の課題

現場生コン工場における生コン製造では、製造設備（バッチャープラント（以下、BP））の新設、計量装置・練混ぜ性能等の検査、使用材料の品質確認、試し練りによる配合選定を行う必要がある。また、日常管理では、骨材の表面水率の測定とそれに伴う現場配合の設定、計量・練混ぜを含む製造管理、出荷時のフレッシュコンクリート試験、コンクリート打設現場におけるフレッシュコンクリート試験および供試体採取による受入れ検査、採取した供試体の圧縮強度試験による硬化コンクリートの検査といった一連の品質管理を行う必要がある。加えて、定期的な製造設備のメンテナンスが必要である。

生コンの品質を安定化させるためには、国内・海外問わず、骨材の品質安定化が重要であるが、東南アジアや

南アジアの発展途上国での工事では、例えば細骨材が露天掘りであるため採取場所の若干の差異により、微粒分量の変動が生じることがある。また、雨季やスコールの影響で保管中の骨材の含水が極端に高くなる場合もある。さらに、高温環境下では、コンクリート温度の制御を目的に保管中の粗骨材への散水が適宜行われるため、粗骨材の含水が安定しない場合もある。以上のような要因により、細骨材・粗骨材の表面水率が変動しやすく、結果として材料分離等が生じて、生コンのフレッシュ性状が安定しにくい傾向にある。

経験の浅い現地スタッフでは、以上のような材料分離等のフレッシュ性状を独自に判断することは難しく、スランプ等の品質管理値が規定の範囲内であれば、特に留意することなく受け入れてしまう可能性がある。生コンの品質が不安定な状況が常態化すると、やがてコンクリート構造物のひび割れ等の欠陥や強度不足が生じる懸念が高まると考えられる。よって、生コンの適正な品質管理が、工事の円滑な進捗に不可欠である。

そこで本検討では、現地スタッフによるフレッシュ性状判定のスキルを補完し、現場の受入れ検査においてフレッシュコンクリートの診断を行うシステムを開発することとした。

3. 従来のスランプ試験におけるフレッシュ性状の評価

スランプ試験は、国内規格として JIS A 1101: 2020（コンクリートのスランプ試験方法）に規定されている。また、海外規格では、ISO 1920-2: 2016（Testing of concrete -Part 2: Properties of fresh concrete）や ASTM C143/C143M-12（Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete）などに規定されており、国際的に広く用いられる試験方法である。

*1 鉄建建設(株) 研究開発センター 材料グループ 主幹研究員 博士(工学) (正会員)

*2 鉄建建設(株) 研究開発センター 副所長 (正会員)

*3 鉄建建設(株) 土木本部 i-Con 推進部 ICT 施工推進グループ

*4 アイセイ(株) 技術開発部 課長 博士(工学)

スランプ試験は、各規格でほぼ共通形状のスランブコンクリートが使用されるため、海外工事の生コンのフレッシュ性状を評価する上で有用と考えられる。今回対象とする東南アジアや南アジアの国々でも一般的に用いられており、現地ワーカーによる試験が可能である。ミャンマーにおけるスランプ試験状況の例を写真-1に示す。

スランプ試験によるスランプ値は、フレッシュコンクリートの変形に対する抵抗性、すなわちコンシステンシーの評価に用いられている。目標とするスランプ値とその範囲は、対象構造物の打込み難易度やその他の施工条件を考慮して設定され、生コンの主たる品質管理項目として規定されている。しかし、スランプ値が規定値の範囲内であっても、材料分離や粘性過剰などのフレッシュ性状の問題を有している場合があり、それらは技術者の経験に基づく目視評価に委ねられている。

材料分離を評価する手法としては、スランプ試験後の外観観察の有効性が示されている¹⁾。材料分離の特徴としては、粗骨材の偏在やコンクリート縁からのペースト分の先流れが挙げられているが、主観的であり、定量的な判断が難しい点も指摘されている。

一方、スランプ試験画像から、フレッシュ性状を評価する手法が、親本らにより提案されている²⁾。本手法では、真上から撮影したスランプ試験画像を二値化処理し、同心円状に黒画素数をカウントする。黒画素は、主に粗骨材が存在する場合に表れるため、粗骨材の分布の均一性を評価可能としている。

また、高流動コンクリートのスランプフロー試験の画像から AI を用いて材料分離を判定するシステムが、三島らにより開発されている³⁾。本システムでは、WEB アプリを使用して、スランプフロー試験後の試料を真上から撮影すると、数秒後に材料分離判定結果が表示される。汎用の AI エンジンを用いて、目視判定結果が「正常」または「分離」となったスランプフローの画像を学習用データとして用いている。目視判定のセカンドオピニオンを得るためのツールとしての使用が期待されている。

4. フレッシュコンクリート診断システムの構築

4.1 AI 手法の概要

本検討では、前述の既往の研究を参考に、スランプ試験画像を分類して、それらを教師データとして機械学習することで診断 AI を構築した^{4),5)}。スランプ試験画像の分類は、スランプ形状および表面テクスチャーの 2 つの要因とした。構築したフレッシュコンクリート診断システムの概要を図-1 に示す。まず、(a)スランプ試験画像からのスランプしたコンクリート部分を検出・切り取りを行い、その後、(b)スランプ形状の診断、および(c)表面テクスチャーの診断を行う 3 段階の AI を構築した。AI には複数のアルゴリズムを試行して、(a), (b), (c)ともに、Meta AI が提供している Detectron2 ライブラリ⁶⁾の画像認識アルゴリズム Instance Segmentation を選定した。Instance Segmentation では、通常の画像分類とは異なり画素レベルでのラベルの割り当てが可能であり、物体の輪郭に沿ったセグメンテーションができるため、写真-1のように診断対象以外の情報が多い画像にも有効である。

4.2 使用したスランプ試験画像

教師データの作成には、ミャンマーの工事で、現地の品質管理スタッフがスマートフォンを用いて撮影した品質管理記録用のスランプ試験画像 570 枚を使用した。な



写真-1 スランプ試験状況の例 (ミャンマーの例)



図-1 AI 手法の概要

お、使用したスランブ試験画像のコンクリートのスランブは 200±25mm である。代表的な配合を表-1 に示す。

4.3 スランブしたコンクリート部分の検出・切り取り

各スランブ試験画像には、写真-1 に示すように、スランブしたコンクリート以外にも、試験結果を記入したホワイトボード、スランブ板、温度測定用試料が入ったカップ、地面を含む背景等が写り込む。また、天候や時間帯により明るさやコントラストも異なる。さらに、本検討で使用した AI では、GPU メモリの制限上、画像が内部で縦横 512 ピクセルに圧縮される。画像が圧縮されると、診断 AI がコンクリートの特徴を認識することが困難になることが予想された。そこで、検出を行う AI がスランブしたコンクリート部分が主となるように画像を正方形に切り取り、その後に縦横 512 ピクセルにリサイズした上で、診断 AI に渡すフローとした。検出・切り取り用 AI の教師データは、各スランブ試験画像のコンクリート部分を専用ツールにより手作業で囲んで作成した。

4.4 スランブ形状および表面テクスチャーの診断

(1) スランブ試験画像の分類方法

スランブ試験画像の分類方法としては、スランブ形状および表面テクスチャーの2つの要因を設定した。各要因に対して数水準のサンプルを模式図やコメントにより例示することで、分類基準を明確化できるよう工夫した。

スランブ形状のサンプル模式図を図-2 に示す。スランブ形状の水準は、材料分離の激しい方から「セメントペースト先走り」、「分離気味」、「適正」、「粘性過剰」の4水準とした。ここで、「セメントペースト先走り」は、極端な材料分離であり、前述の外観観察の「コンクリート縁からのペースト分の先流れ」と同様である。「分離気味」は、裾が広がったスランブ形状であり、「粘性過剰」は、スランブ板との付着により裾が広がらず膨れたスランブ形状である。「適正」は、「分離気味」と「粘性過剰」の中間であり、適度な粘性と流動性を兼ね備えるように見えるスランブ形状である。

表面テクスチャーのサンプル模式図を図-3 に示す。表面テクスチャーの水準は、「粗い」、「中間」、「滑らか」の3水準とした。ここで、「粗い」は、粗骨材を覆うペーストが薄く、粗骨材が目立ち、粗骨材の角の形が明確な表面テクスチャーである。「滑らか」は、粗骨材がモルタルに覆われており、粗骨材が目立たず、スランブコーンの跡がつくような表面テクスチャーである。「中間」は、「粗い」と「滑らか」の中間であり、粗骨材を覆うモルタルが厚く、粗骨材の形状が明確でない表面テクスチャーである。なお、海外工事の生コンは、AE コンクリートではないため、表面テクスチャーは粗い傾向にあることに留意する必要がある。

上記の2つの要因の各水準に、表-2 に示す評価値を

表-1 配合例

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
47.9	45.0	175	365	828	1004	5.66

C : セメント ASTM Type I (密度 3.15)

S : 細骨材(川砂, 表乾密度 2.67)

G : 粗骨材(砕石, 表乾密度 2.65)

Ad : 混和剤 ASTM Type G, Water reducing, High Range and Retarding

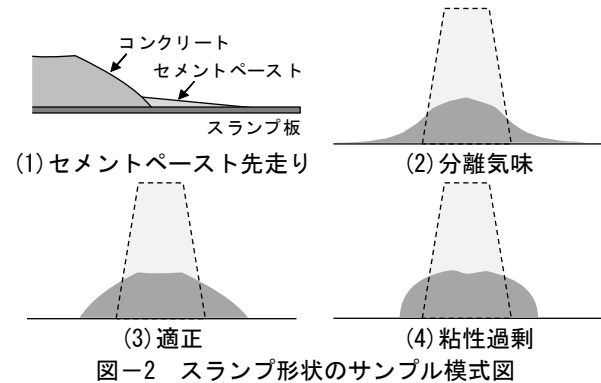


図-2 スランブ形状のサンプル模式図

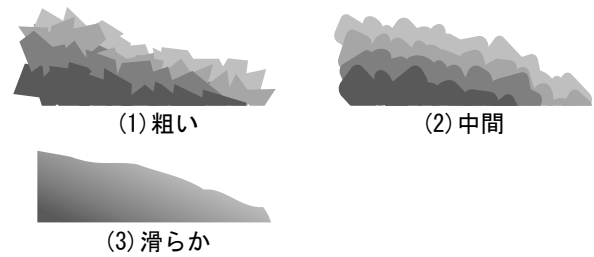


図-3 表面テクスチャーのサンプル模式図

表-2 各要因および各水準の評価値

要因	水準	評価値
スランブ形状	セメントペースト先走り	0
	分離気味	5
	適正	10
	粘性過剰	15
表面テクスチャー	粗い	0
	中間	5
	滑らか	10

与えた。各要因とも 10 が最も良い評価値である。

(2) 教師データの作成

コンクリート主任技士相当の技術者 3 人が、前項に示したスランブ形状と表面テクスチャーのサンプル例を念頭に置いて、スランブ試験画像 570 枚を各水準に分類した。ある評価者がスランブ試験画像を分類した例を表-3 に示す。表中のスランブ試験画像でも明らかなように、各水準への分類は曖昧さを有しており、評価者によって異なる分類となることがあった。そこで、技術者 3 人の評価値の平均値を算出して、各スランブ試験画像にラベル付与することで教師データとした。

分類されたスランブ試験画像の度数分布を図-4 に示

表-3 各要因および各水準に対応するスランプ試験画像の例

		スランプ形状			
		セメントペースト 先走り	分離気味	適正	粘性過剰
表面 テクスチャー	粗い				
	中間				
	滑らか	—	—		

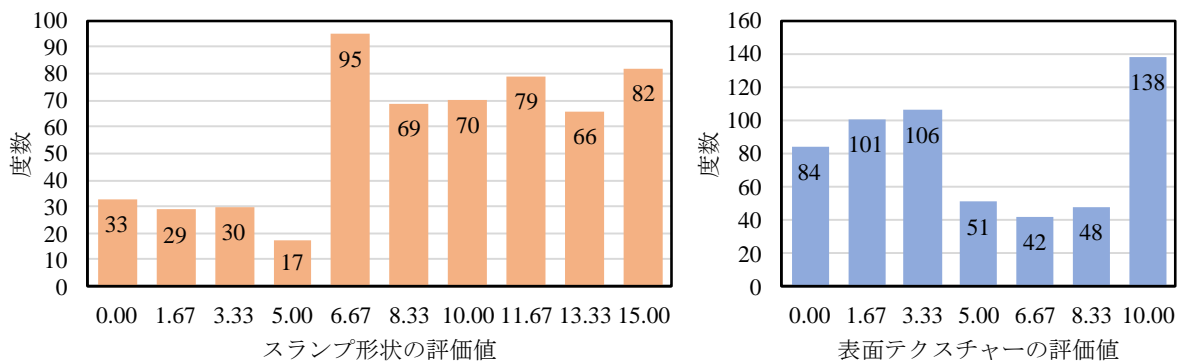


図-4 評価値の度数分布

す。スランプ形状では、評価値5未満の激しい材料分離が約16%と散見された。表面テクスチャーでは、評価値5未満の粗めの評価が約51%と大半であった。これらの結果は、画像サンプリングの影響も多少あると思われるが、ほぼ実情を反映していると考えられる。

4.5 AI手法の検証

(a)スランプしたコンクリート部分の検出については、前述の教師データを元に機械学習した Instance Segmentation の物体検出機能を利用して行った。検出される範囲としては、スランプしたコンクリート以外にも、カップに入った温度測定用試料や背景の一部が誤検出されるケースもあったが、検出された範囲に確率を設けて、確率が最大となる範囲を選定することで、安定してスランプしたコンクリート部分の検出が可能であった。

(b)スランプ形状および(c)表面テクスチャーの診断については、(a)で検出・切り取りしたスランプしたコンクリート部分の画像に対して、Instance Segmentation のセグメンテーション機能を利用して行った。この機能では、スランプしたコンクリート部分に対して、スランプ形状

および表面テクスチャーの各評価値に対する確率を出力して、確率が最大となる検出結果を選定することで、該当するラベルを割り当てる画像認識を行った。また、閾値を設定することで確率の低い検出結果を診断不能とするといった処理も可能とした。さらに、処理能力の高い Instance Segmentation や高性能な GPU を用いることで、短時間での結果の取得が可能であった。

5. フレッシュコンクリート診断システムの精度の検証

前章の3つのAIで構築したフレッシュコンクリート診断システムの精度を確認するために、クロスバリデーションを実施した。クロスバリデーションとは、データの分布の偏りを補正するために、データセットの組み合わせを変えて学習およびテストを行い、それらの精度の平均を取る手法である。本検討では、図-5に示すように570枚のスランプ試験画像を5セットに分割し、そのうち1セットをテスト用として固定するとともに、残りの4セットのうち1セットを除く3セットでの学習を4回実施した。これら4回の学習結果に基づき、テスト用

データセットをテストして AI 診断結果を得るとともに、式(1)により平均絶対値誤差 MAE (Mean Absolute Error) を求めた。さらに、 MAE を用いた式(2)により、評価値正答に対する診断結果の割合として精度 A を求めた。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (1)$$

$$A = (S_m - 2MAE) / S_m \times 100 \quad (2)$$

ここで、 MAE : 平均絶対値誤差

N : データ数

y_i : 評価値

\hat{y}_i : AI 診断結果

A : 精度(%)

S_m : 評価値の最大値

クロスバリデーションで得られた 4 回分の MAE と精度 A を表-4 に示す。スランブ形状と表面テクスチャーの平均 MAE は、それぞれ 1.795 と 1.156 であった。スランブ形状の MAE の方が大きいものの、これは評価値の最大値の違いに因るものである。評価値の最大値を用いて算定した平均精度は、スランブ形状で 76.1%、表面テクスチャーで 76.9%と同等であった。クロスバリデーションの No.1~4 の評価値と AI 診断結果の関係を図-6 に示す。なお、図中の各プロットに示した数値は度数である。破線として、 $\pm 20\%$ 、および表-2 に示す各水準の評価値の差 ± 5 を示した。大部分のプロットはほぼ $\pm 20\%$ 以内に分布し、良い相関を有していると考えられる。前述のように曖昧さのある教師データに基づく診断結果としては、実用に耐えると考えられる。

なお、各水準の評価値の差である ± 5 を超えるケースは、スランブ形状で全体の 3.7%、表面テクスチャーで全体の 0.5%であった。このようなケースでのスランブ形状の一例を写真-2 に示す。このケースでは、技術者の評価値の平均値は、「適正」と「分離気味」の間の 8.33 であったが、AI 診断ではスランブしたコンクリート周りの雨水を「セメントペースト先走り」と誤認識して 0 と診断した。また、他のケースでは、逆に「セメントペースト先走り」を認識しないケースもあった。このように技



写真-2 評価値と AI 診断結果が異なるケースの例

術者の評価とは異なる診断結果となる場合が稀にあることに留意する必要がある。

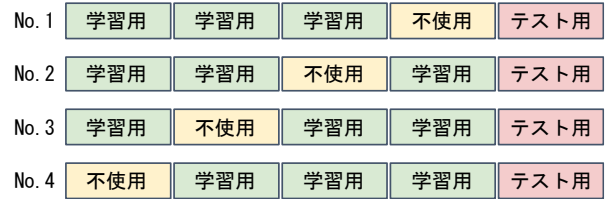
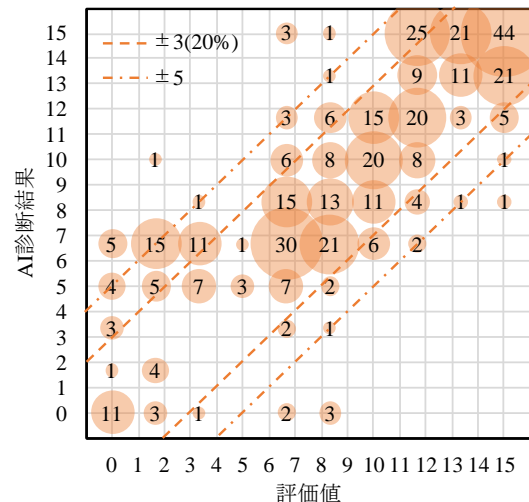


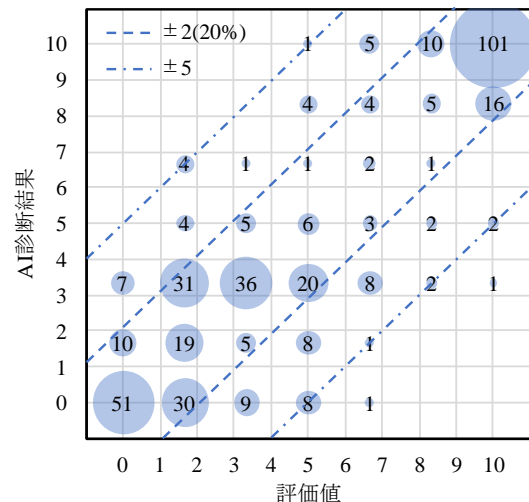
図-5 クロスバリデーションでの分割および組合せ

表-4 クロスバリデーションの結果

No.	スランブ形状		表面テクスチャー	
	MAE	精度 A	MAE	精度 A
1	2.009	73.2%	1.321	73.6%
2	2.025	73.0%	0.975	80.5%
3	1.604	78.6%	1.242	75.2%
4	1.542	79.4%	1.085	78.3%
平均	1.795	76.1%	1.156	76.9%



(1) スランブ形状



(2) 表面テクスチャー

図-6 評価値と AI 診断結果の関係

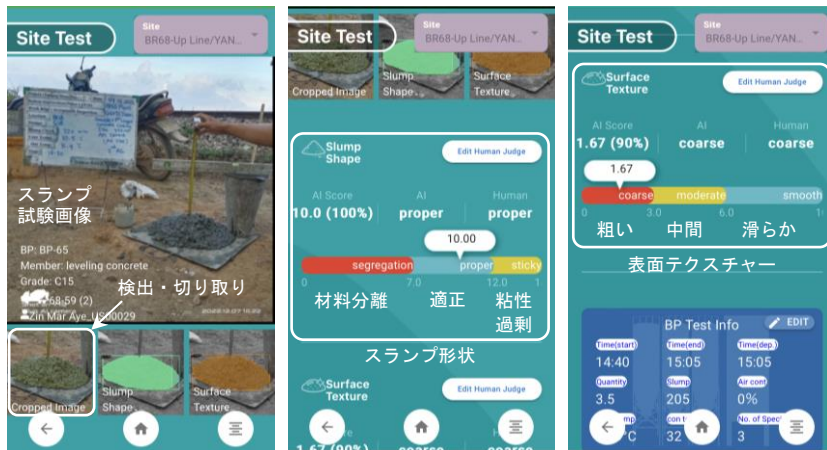


写真-3 フレッシュコンクリート診断結果の例



写真-4 診断結果一覧の例

6. WEB アプリへの実装

出荷時および受入れ検査時のフレッシュコンクリートの診断、および製造管理へのアラート発信を目的に、本システムを実装したスマートフォン用 WEB アプリを開発した。

本アプリでは、アジテータ車毎に現場名、配合、練混ぜ開始から打込み終了までの各種時刻、スランプを含む各種品質管理試験結果を記録することができる。フレッシュコンクリートの診断は、生コンの出荷時および現場での受入れ検査時に撮影したスランプ試験画像をアップロードして行う。アップロードから数十秒経過後には、スランプ形状および表面テクスチャーの評価値と分類結果が表示されて現場スタッフが閲覧できる。また、写真-2 のような診断結果と現場スタッフの目視評価が異なる場合は、目視評価結果も記録することができる。

診断結果の表示画面を写真-3 に示す。なお、診断結果の色表示は、直感的に理解しやすくするためにスランプ形状、表面テクスチャーともに3段階とし、最も注視すべき悪い診断結果である「材料分離/Segregation」、「粗い/Coarse」を赤色表示とした。

以上の一連の作業を、アジテータ車全車を対象に実施することで、各アジテータ車のスランプ形状と表面テクスチャーの診断結果を写真-4 に示すように一覧表示することができ、現場スタッフが診断結果の推移を直感的に把握することが可能となる。この情報は、生コン品質の安定性を監視するうえで重要と考えられ、例えば悪い診断結果の組合せが3回以上連続した場合に、生コン工場の製造管理に対してアラートを発信して、製造工程の点検を促すとともに、細骨材および粗骨材表面水率の再測定を指示することが可能となる。

7. まとめ

海外工事における BP を用いて製造する生コンの品質管理を対象として、フレッシュコンクリート診断システ

ムを開発した。フレッシュ性状の診断では、スランプ試験画像におけるスランプ形状および表面テクスチャーを要因とした AI システムを構築した。クロスバリデーションの結果、スランプ形状および表面テクスチャーの技術者の評価値に対する AI 診断結果の精度は、それぞれ 76.1%と 76.9%であった。このシステムを WEB アプリに実装することで、現地スタッフによるスマートフォンを用いた運用を可能とした。

謝辞

本システムの試行・適用にご協力いただいた Yangon-Mandalay Railway Improvement Project Phase1 (CP102)、鉄建建設・りんかい日産建設 JV の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺博志：現場打ちコンクリート施工の生産性向上、土木技術資料 59-1, pp.26-29, 2017
- 2) 親本俊憲, 平田真佑子：スマートデバイスを用いたコンクリートの材料分離判定の自動化、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.483-484, 2021.9
- 3) 三島直生, 鹿毛忠継, 山田義智, 崎原康平：AIによる高流動コンクリートの材料分離判断システムの開発に関する基礎研究、第73回セメント技術大会講演要旨, pp.96-97, 2019
- 4) 福岡瑛莉奈, 岩城圭介, 川又篤, 関和彦：スランプ画像によるフレッシュコンクリート評価診断システムの開発、土木学会年次学術講演会, V-446, 2022
- 5) 岩城圭介, 川又篤, 車紅升, 福岡瑛莉奈, 國澤博：スランプ試験の画像を用いたフレッシュコンクリート診断システムの開発と実用化、鉄建技術報告, No.36, 2022
- 6) Meta AI, detectron2 (閲覧日:2023/2/18) : <https://detectron2.readthedocs.io/en/latest/>