

フレッシュコンクリートの写真を用いた 材料分離推定方法に関する研究

五百藏沙耶* 三谷和裕* 加藤貴之**

JIS 改正により材料分離が生じやすい普通強度領域で高流動コンクリートが規格化された。このコンクリートは、受入検査時に材料分離の有無を判断する必要があるが、定量的な評価方法は存在せず、現状では、判定者の主観で目視により評価している。本研究では、材料分離の評価方法および学習した AI を活用して写真から材料分離を推定する方法を検討した。その結果、材料分離の一種である粗骨材の沈降しやすさを評価する方法を示すとともに、本研究の範囲内では、AI を活用して写真から粗骨材の沈降しやすさをおおむね推定できることが分かった。

キーワード：高流動コンクリート、ディープラーニング、粗骨材の沈降、フレッシュコンクリート

1. はじめに

2019年に JIS A 5308 (レディーミクストコンクリート) が改正され、打込み作業の合理化および高密度な配筋のコンクリート構造物の充填性の改善などを目的として、普通強度領域の高流動コンクリートが標準化された。このコンクリートは、粉体量が少ないため、材料分離抵抗性が低くなる懸念されることから、受入検査時に材料分離の有無の確認が必要となった。現状では、材料分離の定量的な評価方法や評価基準はなく、目視で粗骨材、モルタルおよび水などの偏在を観察し、判定者の主観で材料分離の有無を判断している。

高流動コンクリート指針¹⁾では、多数のコンクリート技術者がスランプフローの状態、練り舟および一輪車内での繰り返し後の状態について、分離状態を各自で判定し、その結果から目視判定指数を求める方法が示されている。しかしながら、技術者が一定人数以上必要となるため、一般的な受入検査等での品質管理で活用することは難しい。

既往の AI を活用した品質管理の方法として、コンクリートの締固め時の画像と締固め完了の判定結果を組み合わせ、ディープラーニングで学習させることで、締固め時の画像から締固めの完了を判定する研究が行われている²⁾。

本研究では、普通強度領域の高流動コンクリート受入時における材料分離の評価を目的として、材料分離の一種である粗骨材の沈降しやすさの評価方法および Fig. 1 に示す方法でフレッシュコンクリートの写真から、AI を活用した画像解析により材料分離が推定可能か検討した。検討結果を以下に報告する。

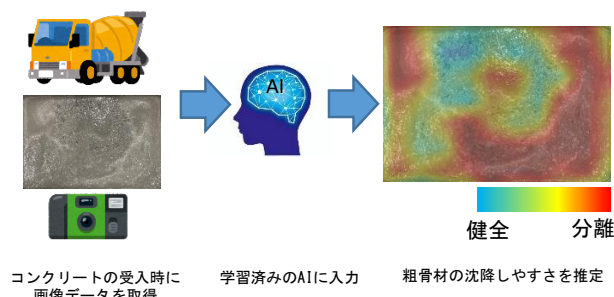


Fig. 1 材料分離の推定の方法

2. 材料分離の評価方法に関する検討

既往の研究にてコンクリートの材料分離抵抗性を評価する方法として、φ150×300mmの型枠にコンクリートをほぼ等しい2層に分けて詰め、各層5回突きで試験体を作製し、硬化後、試験体を上面と下面から20mmの位置で高さ方向に対して直行する方向(水平方向)に切断し、円形の切断面の粗骨材面積率を測定し、下面と上面の粗骨材面積率の比を求める方法が示されている³⁾。本研究では、この方法を参考に、学習データに使用する粗骨材の沈降しやすさを定量的に評価するため、試験方法および評価方法について検討を行った。

2. 1 粗骨材の分布状況の把握および粗骨材面積率の算出領域に関する検討

2. 1. 1 実験概要

(1) 使用したコンクリートの概要

使用したコンクリートは、混和剤量を変化させた粗骨材の沈降しやすさの異なる3種類とした。

(2) 試験体の作製方法

試験体は、前述した既往の研究による方法で各配(調)合3本作製した。なお、本研究では、粗骨材の沈降しやすさを把握するため、直径方向の中心を通るように Fig. 2 中

* 技術本部 技術研究所 基盤技術研究室
** 技術本部 技術研究所 環境工学研究室

の赤い破線の位置で鉛直方向に切断した。

2. 1. 2 実験結果および考察

Photo. 1 に切断面の粗骨材の分布状況を示す。写真は左側から右側になるにつれて混和剤量が多くなる配(調)合を示している。混和剤量が少ない配(調)合では、上面付近において粗骨材の沈降は見られなかったが、混和剤量が多くなると、10~20mm程度の深さまで粗骨材が沈降していることが確認できた。写真に示していない他の2本の試験体においても同様の傾向であった。

本実験により、粗骨材が沈降する深さは配(調)合によって異なり把握できないと考えられるため、前述した試験体を一定の位置(上面から20mmの位置)で水平に切断する方法では、粗骨材の沈降を評価することは難しいと考えられる。そこで、本研究では、粗骨材量に変化する領域を捉えることができるように、試験体を鉛直方向に切断することとした。粗骨材面積率を算出する領域は、試験体作製のばらつきを考慮し、上部は上面から50mmとし、下部は下面から50mmとした。

2. 2 試験体の作製方法に関する検討

2. 2. 1 実験概要

(1) コンクリートの使用材料および配(調)合

Table 1 にコンクリートの使用材料、Table 2 にコンクリートの配(調)合を示す。呼び強度27~45程度を想定して、水セメント比は40, 50%の2種類とした。粗骨材の沈降しやすさは、混和剤量または加水量を変えることによって変化させた。加水は、材料分離が生じていないと判断した混和剤量の配(調)合に対してあと添加で実施した。

(2) 試験体の作製方法および本数

ここでは、粗骨材の沈降しやすさの違いを明確に把握するために、試験体に一定の衝撃を与えた場合のコンクリート中の粗骨材の沈降について検討した。試験体は、寸法φ150×300mmとし、コンクリートを型枠に2層のほぼ等しい層に分けて詰め、各層を突き棒で5回突いた後、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)を参考に、フローテーブルを使って落下運動を5, 10, 15, 20回与えて作製した。試験体数は3本ずつ採取した。

(3) 粗骨材面積率の比の算出方法

Fig. 3 に上面および下面の粗骨材面積率を算出する領域を示す。試験体の硬化後、鉛直方向に切断し、切断面の上面および下面から50mmの領域の粗骨材面積率を求め、式(1)により、粗骨材面積率の比 R_a を算出した。各領域の粗骨材面積率は、5mm以上の骨材を粗骨材と見做して色付けし、画像処理により画素数の割合を計算して指定した範囲に占める粗骨材の面積率を求めた。各配(調)合の粗骨材面積率の比は3本の平均値とした。

$$R_a = A_b / A_t \cdots \text{式(1)}$$

ここに、 A_t : 上面から50mmの領域の粗骨材面積率(%)

A_b : 下面から50mmの領域の粗骨材面積率(%)



Fig. 2 試験体の切断方法および切断面

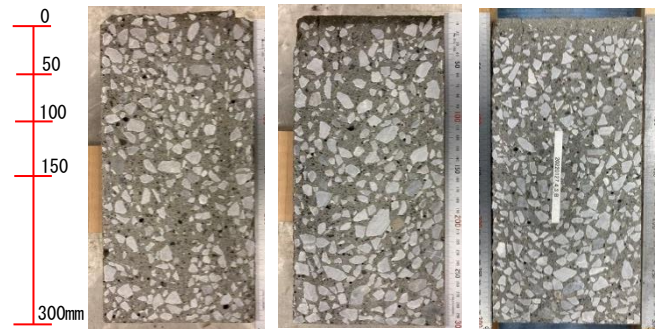


Photo. 1 切断面の粗骨材の分布状況
(混和剤量: 少→多)

Table 1 使用材料

記号	材料	密度(g/cm ³)
W	つくば市上水道水	1.00
C	普通ポルトランドセメント	3.16
S1	掛川産砂	2.56
S2	桜川産砕砂	2.64
G	横瀬産石灰砕石	2.65
Ad	高性能 AE 減水剤	1.02~1.10

Table 2 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (C×%)	加水量 (kg/m ³)
	W	C	S1	S2	G		
40	175	438	401	409	889	0.6, 0.75, 1.0	0
40	175	438	401	409	889	0.6	0, 15, 30
50	175	350	437	445	889	0.6, 0.75, 0.9	0
50	175	350	437	445	889	0.6	0, 15, 30

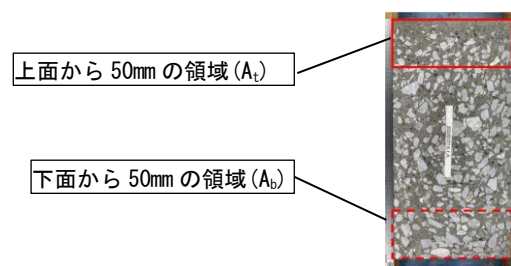


Fig. 3 粗骨材面積率算出領域

2. 2. 2 実験結果および考察

Fig. 4 に混和剤量を変化させた試験体の落下回数と粗骨材面積率の比, Fig. 5 に加水量を変化させた試験体の落下回数と粗骨材面積率の比の関係を示す. Fig. 4 より, 落下回数が5回および10回の場合では, 粗骨材面積率の比に変化がみられないものや混和剤量が増加しても, 粗骨材面積率の比が大きくなるものがあった. これは, 試験体作製時の試料採取および投入によるばらつきなどが影響していると推測される. 落下回数が15回では, 混和剤量が増加すると粗骨材面積率の比も大きくなる傾向が確認できた. 落下回数が20回の場合では, 混和剤量に変化しても粗骨材面積率の比の差は小さかった. Fig. 5 より, 落下回数が10回および15回では, 加水量を変化させた場合においても, 混和剤の場合と同様の結果が得られた. 落下回数が20回では, Photo. 2(b)より, 粗骨材が沈降しやすい配(調)合では, 粗骨材が大きく沈み上面の粗骨材量が減少したため, 粗骨材面積率の比は大きくなった.

上記のことから, 粗骨材が沈降しにくいコンクリートでのばらつきを少なくすることに加え, 粗骨材の沈降しやすさの異なるコンクリートの粗骨材面積率の比に差異をつける方法として, フローテーブルによる落下運動を行う場合は, 落下運動を15回とすることが適切であると考えられる.

3. AI を活用した材料分離の推定方法の検討

本章では, 測定した粗骨材の沈降しやすさを表す粗骨材面積率の比とフレッシュコンクリートの写真を対にしてAIに学習させた. 次に, 作成したAIを用いて別に練り混ぜたコンクリートの粗骨材面積率の比を推定し, その結果を検証した.

3. 1 実験概要

3. 1. 1 コンクリートの使用材料および配(調)合

Table 3 に学習に使用したコンクリートの配(調)合を, Table 4 に検証に使用したコンクリートの配(調)合を示す. 使用材料は, Table 1 と同様とした. コンクリートの配(調)合は, 水セメント比 40, 45, 50% の3種類とし, 混和剤および加水量はそれぞれ4水準とした. 加水は材料分離が生じていないと判断した混和剤量の配(調)合に対してあと添加で実施した.

3. 1. 2 データの作成方法

(1) フレッシュコンクリートの写真撮影方法

フレッシュコンクリートの写真は, 練上がったコンクリートを一輪車に移し, 切り返しをした後, 30秒および60秒経過時に真上から1200万画素のカメラを搭載したスマートフォンを用いて撮影した.

(2) 粗骨材面積率の比の求め方

試験体の作製方法は2章で行った方法と同様とした.

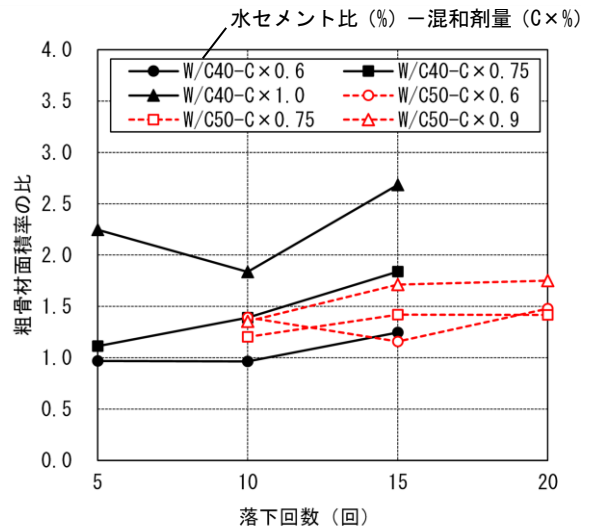


Fig. 4 落下回数と粗骨材面積率の比の関係 (混和剤量)

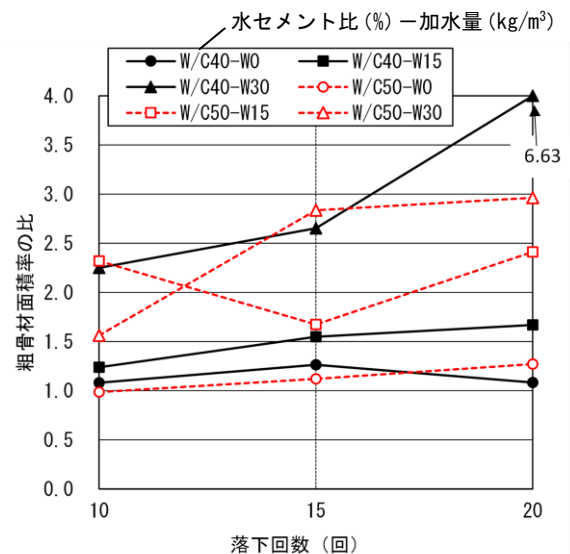


Fig. 5 落下回数と粗骨材面積率の比の関係 (加水量)

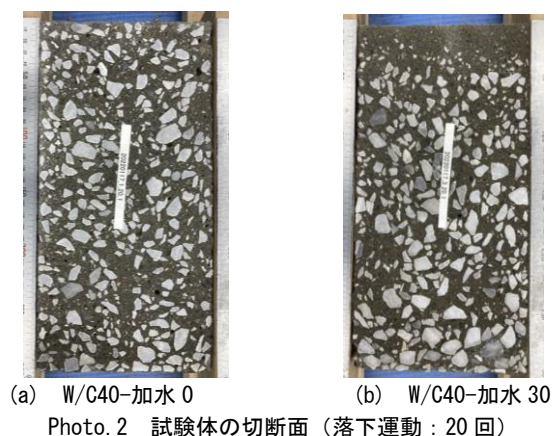


Photo. 2 試験体の切断面 (落下運動: 20回)

また, 粗骨材面積率の比の求め方も2章と同様とした.

3. 1. 3 学習方法

Fig. 6 に学習データの概要を示す. 写真をグリッド状に分割し, 図中の赤枠内に示すように, それぞれの写真と粗

Table 3 学習に使用したコンクリートの配(調)合

W/C (%)	単用量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)	加水量 (kg/m ³)
	W	C	S1	S2	G		
40	175	438	401	409	889	0.6, 0.8, 1.0, 1.2	0
40	175	438	401	409	889	0.8	0.15, 0.30, 0.45
50	175	350	437	445	889	0.65, 0.85, 1.05, 1.25	0
50	175	350	437	445	889	0.65	0.15, 0.30, 0.45

Table 4 検証に使用したコンクリートの配(調)合

W/C (%)	単用量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)	加水量 (kg/m ³)
	W	C	S1	S2	G		
40	175	438	401	409	889	0.6, 0.8, 1.0, 1.2	0
40	175	438	401	409	889	0.6	0.15, 0.30, 0.45
45	175	389	421	429	889	0.6, 0.8, 1.0, 1.2	0
45	175	389	421	429	889	0.6	0.15, 0.30, 0.45
50	175	350	437	445	889	0.6, 0.8, 1.0, 1.2	0
50	175	350	437	445	889	0.6	0.15, 0.30, 0.45

骨材面積率の比を対にしたものを使用して、回帰モデルを用いて学習を行った。学習範囲は、一輪車内のコンクリートのみとし、コンクリート以外の領域は含まないものとした。このとき、同一バッチの配(調)合については、30秒および60秒経過時の写真に対して、同じ粗骨材面積率の比を用いた。回帰モデルについてはディープラーニングの画像分類モデルである EfficientNet-B3⁴⁾をベースに構築した。

3. 1. 4 推定方法

Fig. 7にAIによる推定方法の概要を示す。対象の写真を学習時と同一条件でグリッド状に分割し、分割したそれぞれの写真について粗骨材面積率の比を推定した。その結果の平均値を全体の推定値とした。図中にはグリッドごとの粗骨材面積率の比の推定結果を記載した。また、推定結果は、青色を健全、赤色を分離とし、グラデーション状に表示させることで視覚的に分離状態が判断しやすい形の画像でも出力できるようにした。

3. 1. 5 検証方法

AIに学習データとは別に練り混ぜたコンクリートの写真から粗骨材面積率の比を推定させ、実際に試験で求めた粗骨材面積率の比との比較を行った。

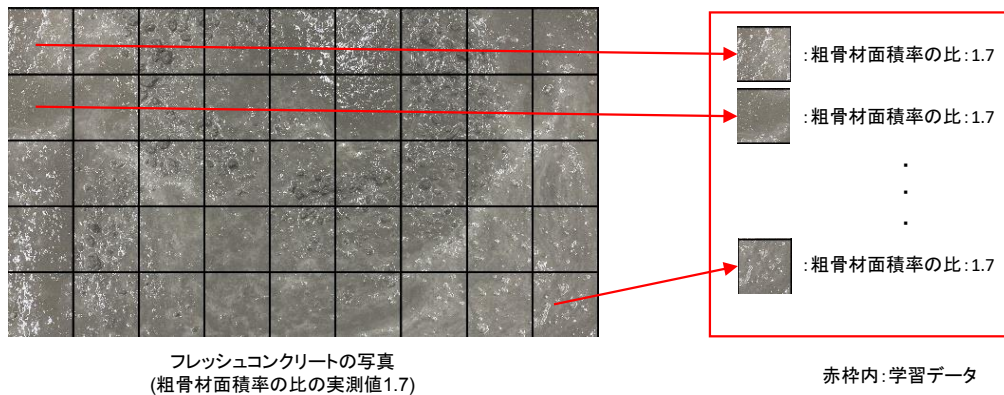


Fig. 6 AIの学習データの概要

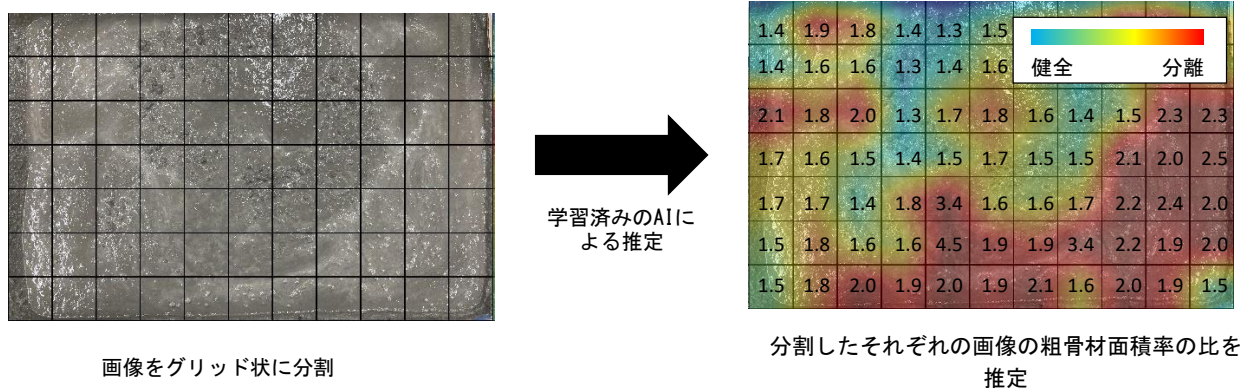


Fig. 7 AIによる推定方法の概要

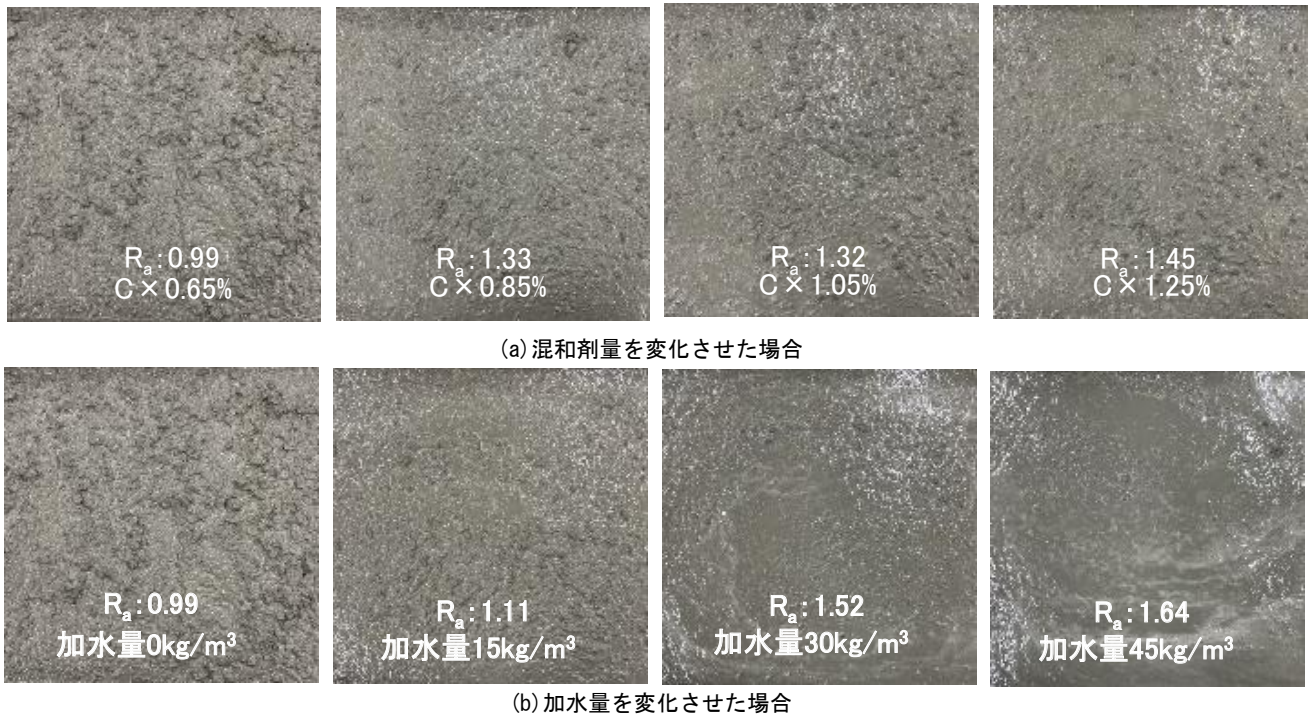


Fig. 8 学習に使用したコンクリート (W/C=50%)

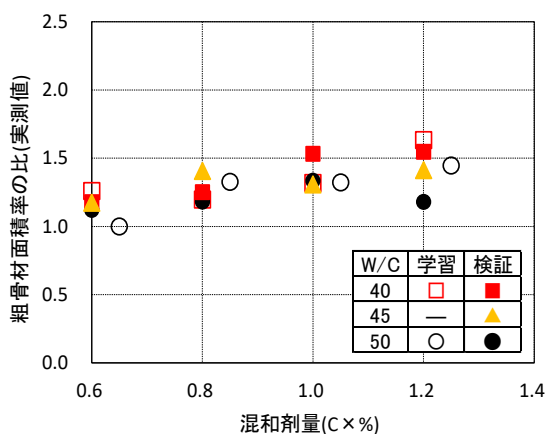


Fig. 9 混和剤量と粗骨材面積率の比の関係

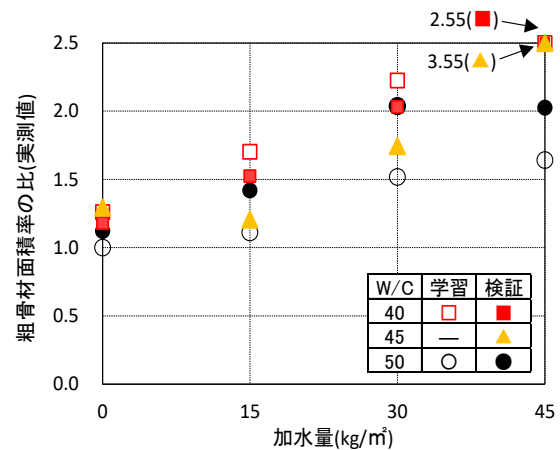


Fig. 10 加水量と粗骨材面積率の比の関係

3. 2 実験結果および考察

3. 2. 1 学習および検証に使用したデータ

(1) フレッシュコンクリートの写真

Fig. 8に水セメント比50%の学習に使用した写真および粗骨材面積率の比を示す。写真中上段に試験体から求めた粗骨材面積率の比 (Ra) の実測値, 下段にそれぞれの混和剤量または加水量について記載した。学習データおよび検証データともに材料分離を目視で評価した結果, 混和剤量および加水量を増加させると, 表面に見える粗骨材の減少や水, 気泡の浮きが顕著に認められた。他の水セメント比の場合も同様の傾向を示した。

(2) 粗骨材面積率の比

Fig. 9に混和剤量と粗骨材面積率の比の関係, Fig. 10に加水量と粗骨材面積率の比の関係を示す。図には, 学習お

よび検証に用いたコンクリートの試験結果を示している。学習データ, 検証データともに, ばらつきはあるが, 全体的にいずれの水セメント比においても混和剤量および加水量の増加に伴い, 粗骨材面積率の比が大きくなる傾向が確認できた。






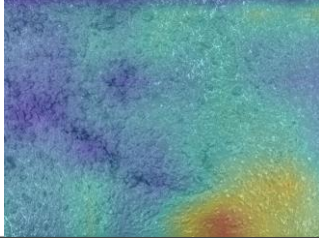

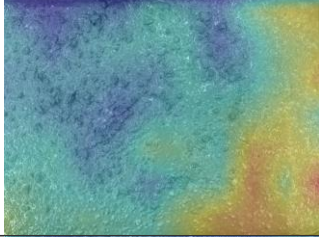

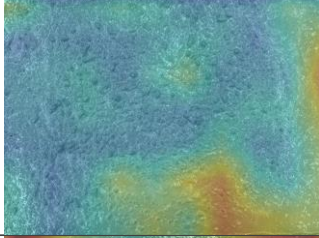

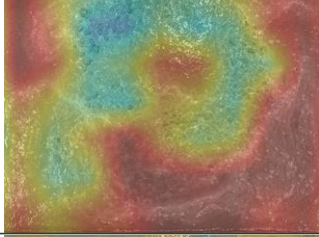

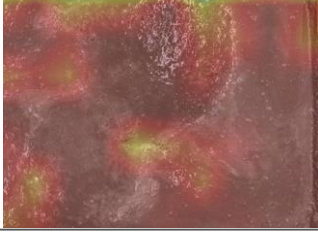
3. 2. 2 粗骨材面積率の比の推定結果の例

Table 5に水セメント比50%の粗骨材面積率の比の推定結果を示す。入力画像および推定画像も併せて示している。混和剤量および加水量を大きくするにつれて粗骨材面積率の比の推定値が大きくなり, 推定画像においても分離を表す色の面積が増加した。他の水セメント比の場合も同様の傾向を示した。

3. 2. 3 推定における写真撮影時期の比較

Fig. 11に切り返しから写真撮影までの経過時間の違い

Table 5 粗骨材面積率の比の推定結果(水セメント比 50%の場合)

条件	混和剤量 (G×%)	加水量 (kg/m ³)	入力画像	推定画像	粗骨材面積率の 比の推定値
基準	0.6	0			1.20
混和剤量 を変化	0.8	0			1.25
	1.0	0			1.34
	1.2	0			1.41
加水量を 変化	0.6	15			1.39
	0.6	30			1.84
	0.6	45			2.53

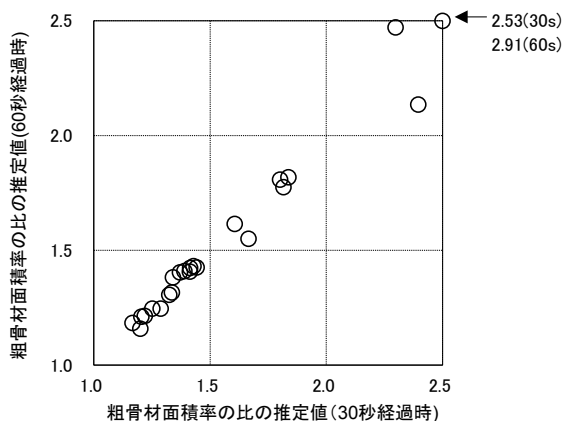


Fig. 11 経過時間の違いによる粗骨材面積率の比の推定値の関係

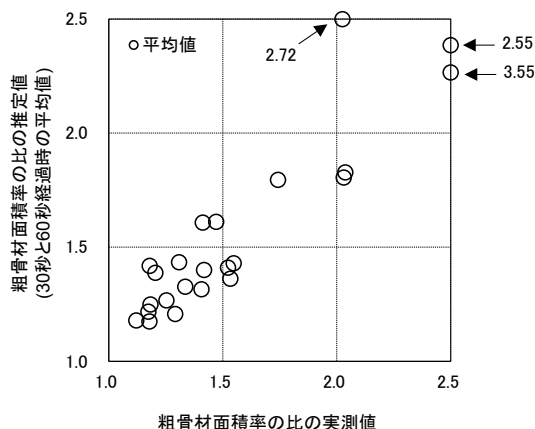


Fig. 12 粗骨材面積率の比の推定値と実測値の関係

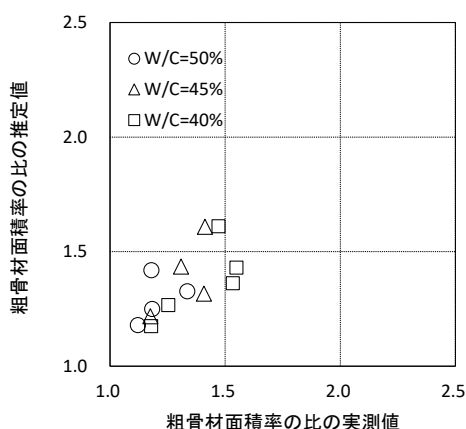


Fig. 13 粗骨材面積率の比の実測値と推定値の関係 (混和剤)

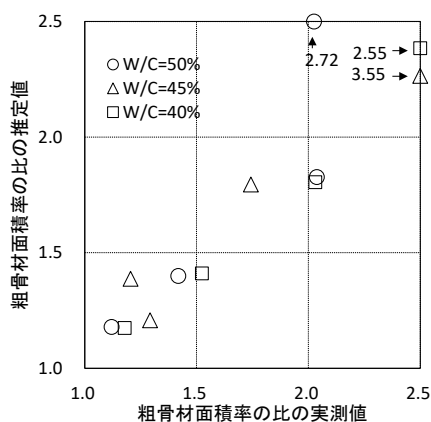


Fig. 14 粗骨材面積率の比の実測値と推定値の関係 (加水量)

による粗骨材面積率の比の推定値の関係を示す。30秒および60秒経過時の推定値は、同程度の値となった。この結果から、切り返し後30~60秒の範囲で写真を撮影すれば、同等の結果が得られると考えられる。そこで、以降の検討では、粗骨材面積率の比の推定値は、30秒および60秒経過時の平均値を使用することとした。Fig. 12に30秒および60秒経過時の平均値による推定値と実測値の関係を示す。実測値とおおむね同じ値を推定できている。

3. 2. 4 粗骨材面積率の比の実測値と推定値の比較

Fig. 13に混和剤量を変化させた粗骨材面積率の比の実測値と推定値の関係、Fig. 14に加水量を変化させた粗骨材面積率の比の実測値と推定値の関係を示す。

混和剤量を増加させた場合、学習データと別に練り混ぜた水セメント比40、50%のコンクリートだけでなく、学習をさせていない水セメント比45%のコンクリートにおいても、実測値と推定値はおおむね一致することが確認できた。加水量を変化させた場合においても同様の傾向であるが、粗骨材面積率の比の実測値が大きくなると、推定値の誤差が大きくなった。これは、粗骨材が沈降しや

すいコンクリートでは、粗骨材面積率の比の実測値のばらつきが大きくなりやすいためAIの推定の誤差も大きくなったと考えられる。

4. まとめ

本研究では、はじめに材料分離の一種である粗骨材の沈降しやすさを定量的に表す粗骨材面積率の比を求める方法およびその試験方法を検討した。次に粗骨材面積率の比とフレッシュコンクリートの写真を組み合わせてディープラーニングによって学習を行い、フレッシュコンクリートの写真から粗骨材面積率の比を予測するAIを作成した。検証の結果、作成したAIによって材料分離のしやすさを表す粗骨材面積率の比をおおむね推定可能なことが確認できた。

今後は、材料および配(調)合の異なるコンクリートへの適用や日射等の影響を大きく受ける屋外環境で実用化する方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説, pp. 185-188, 2021. 12
- 2) 林俊斉ほか3名：AIを活用したコンクリートの締固め完了判定技術, コンクリート工学, Vol. 60, No. 3, pp. 249-254, 2022. 3
- 3) 河野正典ほか7名：高流動性コンクリートの材料分離抵抗性評価に関する研究, 日本建築学会技術報告集, Vol. 26, NO. 64, pp. 827-832, 2020. 10
- 4) Tan, Mingxing, and Quoc V. Le. : EfficientNet : Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks., arXiv preprint arXiv, 1905. 11946, 2019

Study on Method for Estimating Segregation from Photographs of Fresh Concrete

Saya IOROI, Kazuhiro MITANI, Takayuki KATO

Abstract

The revised Japanese Industrial Standards (JIS) sets requirements for high-fluidity concrete across its normal range of strength, in which segregation can readily occur. This concrete requires the determination of segregation at the acceptance inspection. However, no quantitative evaluation method has been established to make this determination. Rather, the judgment relies on visual inspection by a human inspector. Our study investigates a method for evaluating segregation and a method for estimating segregation from photographs using artificial intelligence (AI) trained by deep learning. The method thus presented is suitable for evaluating the tendency of coarse aggregate settlement, a type of segregation. Within the scope of our study, we also confirmed that use of AI generally enables the estimation of the tendency of coarse aggregate settlement from photographs.

Key words: high-fluidity concrete, deep learning, coarse aggregate settlement, fresh concrete
