

高精細X線CT装置を利用した高炉水砕スラグと砂利の混合比管理の調査研究

材料技術室 松岡 弘己, 細谷 昌裕

Study on mixing ratio management of Granulated blast furnace slag and gravel
using X-ray CT scanner

Hiromi MATSUOKA and Masahiro HOSOYA

高炉水砕スラグ入り砂利の3次元CT像を撮影し、画像のコントラスト比から高炉水砕スラグと砂利の混合比を管理する手法を確立する調査研究を行った。1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいにとどまる高炉水砕スラグ2種類と砂利3種類を用意し、砂利に高炉水砕スラグを10, 25, 40, 55, 70%の重量割合で混合した試料を作製してマイクロフォーカスX線CT装置で測定を行った。測定した画像のコントラスト比から高炉水砕スラグと砂利の体積を求めたところ、試料の重量割合と測定した体積割合に相関があるデータが得られた。混合前の高炉水砕スラグと砂利の粗粒率がわかれば、混合後の混合割合を知ることができるため、混合比管理に利用できる可能性があることがわかった。

1. はじめに

千葉県は、砂利生産量が全国2位であり、山砂生産量では全国1位である¹⁾。東京湾岸地域のコンクリート用細骨材(砂利)には、千葉県産が多く使用されている。

しかし、千葉県の砂利採取場では、近年、砂利の粒度が細くなり、粒度の粗い良質な砂利が採取できなくなっている。粒度の粗い砂利を得るためには、新規採取場の開発を行うか、又は、粒度が粗い砕砂やスラグ骨材の混合を行うことが必要であるが、これ以上の新規採取場の開発は、自然環境への負荷が懸念される。砕砂の混合は、硬質な岩石を砕いて砕砂を生産するため、加工のためのエネルギーが必要であり、また、東京湾岸地域近辺にコンクリートに適した岩石を採取できる場所が少ないため、運搬にコストがかかる。

スラグ骨材のうち、高炉水砕スラグは、千葉県に高炉が2基あり、水砕スラグが副産物として生産されているため、運搬コストが安い。また、製鉄における副産物であるために、廃棄物リサイクルの観点から環境負荷低減に貢献でき、かつ、高炉水砕スラグ細骨材は、潜在水硬性があり、コンクリートの強度増進に効果がある特徴がある²⁾。このように利点の多い高炉水砕スラグ細骨材だが、コンクリート用細骨材として、あまり利用されていない³⁾。利用されていない理由の1つとして、貯蔵時に固まる性質があることから、管理に手間がかかるこ

とが挙げられる。砂利と高炉水砕スラグ細骨材を混合すると固まりにくいことから²⁾、事前に混合することが良いことがわかっているが、混合後の混合割合を確認する手段がないため、企業取引における混合割合の保証を行うことができない。

そこでの混合割合を確認することができる手法を開発することにより、混合後の工程管理、受入管理に利用することができ、企業間取引における信頼性を確保し、高炉水砕スラグ入り砂利の製造・販売を促進することが可能となる。また、砂利採取業者が採取場で混合することにより、環境負荷が低く高強度なコンクリートを実現できる高付加価値な砂利を製造することが可能となる。

本研究では、高炉水砕スラグと砂利はX線減弱係数が異なることから、マイクロフォーカスX線CT装置を用いて高炉水砕スラグ入り砂利の3次元CT像を撮影し、画像のコントラスト比から高炉水砕スラグと砂利の混合割合を管理する手法を確立することを目的として行った。

2. 実験方法

2.1 高炉水砕スラグと砂利の試料

高炉水砕スラグは、2製造業者から試料の提供を受け、試験に供した。内訳を表1に示す。

砂利は、コンクリート用骨材として出荷している製品とそれより粒度の細かい中目の砂利(3産地)を試験に供した。内訳を表2に示す。

表 1 高炉水砕スラグの種類

スラグ	業者	種類
スラグ 1	A	製品として出荷しているもの
スラグ 2	B	製品として出荷しているもの

表 2 砂利の種類

砂利	産地	種類
砂利 1	君津市法木	製品
砂利 2	市原市万田野	中目
砂利 3	君津市吉野	中目

2. 2 測定試料

高炉水砕スラグと砂利をJIS A 1102 骨材のふるい分け試験方法によりふるい分け、1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいとどまるものを試料とした。

1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいとどまるものを試料とすることにより、スラグの混合比率が低いときに、測定試料中の高炉水砕スラグ割合を高くする効果と、測定視野内の高炉水砕スラグと砂利の粒子数を多くする効果がある。

ふるい分けを行った3種類の砂利に、2種類の高炉水砕スラグを重量割合で10,25,40,55,70%混合して25gとなるようにはかり取った。この混合割合は、砂利に高炉水砕スラグを5~30%混合した場合の1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいを留まるもの高炉水砕スラグの割合に相当する。はかり取った試料を50mlプラスチック容器に入れ、10分間マイクロチューブローテータで混合を行った。

混合した試料は、プラスチックの中で密度が低く、X線を透過しやすい15mlポリプロピレン製試験管に入れて測定用試料(写真1)とした。

2. 3 真密度測定

前処理として、高炉水砕スラグ2種類と砂利3種類(1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいとどまるもの)を真空デシケータで真空引き(30分)を行った。

真密度は、密度・比重測定装置(ペンタピクノメータ、カンタクローム製)を用いて、サンプルセルに入れた試料の質量を測定してから真体積の測定し、試料の質量と真体積より、計算した。サンプルセルは容量135ml,測定ガスにヘリウムを使用した。

2. 4 測定

試料容器を3爪チャックで垂直に固定し(写真2),マイクロフォーカス X 線 CT 装置(TDM1000H-11(2K), ヤマト科学(株)製)で測定を行った。測定は、実際に企業が品質管理に用いることを考慮し、1回の測定が1時間以内で終了し、高炉水砕スラグと砂利のコントラストの違いがはっきりする測定条件(表3)で測定を行った。

1回目と2回目の測定位置と範囲を写真3に示す。1回目の測定は、測定視野が試料だけになり、容器と試料が接している所が入らないように測定を行った。2回目は出来るだけに多くの試料が視野に入るように測定容器を含めて測定を行った。



写真 1 測定試料



写真2 測定風景

表3 測定条件

CTスキャン条件	
X線管電圧	80 KV
X線管電流	110 uA
検出器の露光時間	0.100 秒
ビュー数	1500
フレーム平均数	20
ステップスキャン	あり
再構成条件	
XYマトリックス	1024
分解能	空間分解能優先
RFC処理	高精度
視野はみ出し補正	なし



写真3 測定位置と範囲

2. 5 混合割合(体積)の計算

CT 測定データの解析には、図1に示す VG STUDIOMAX(ポリリュームグラフィック製)を使用して、混合割合(体積)の計算を行った。

測定データ外周部分の偽像が発生した部分を削除した後、測定画像の明るさとそれらの度数を示したヒストグラムの谷を区切りとして、バックグラウンド、砂利、高炉水砕スラグと定義した。定義した砂利と高炉水砕スラグの体積を計算させ、高炉水砕スラグと砂利の体積割合を求めた。

3. 結果及び考察

3. 1 真密度測定結果

1.2mmふるいを通り、0.6mmふるいに留まる高炉水砕スラグ2種類と砂利3種類の真密度測定結果を表4に示す。

高炉水砕スラグと砂利の真密度は0.15 g/cm³以上の差があり、この差が高炉水砕スラグと砂利の3次元CT像におけるコントラスト差の原因となることが確認できた。

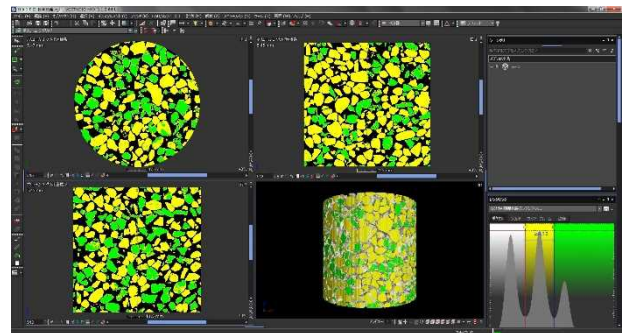


図1 VG STUDIOMAX

表4 真密度と粗粒率

スラグ	真密度 (g/cm ³)
スラグ1	2.875
スラグ2	2.838
砂利1	2.651
砂利2	2.669
砂利3	2.675

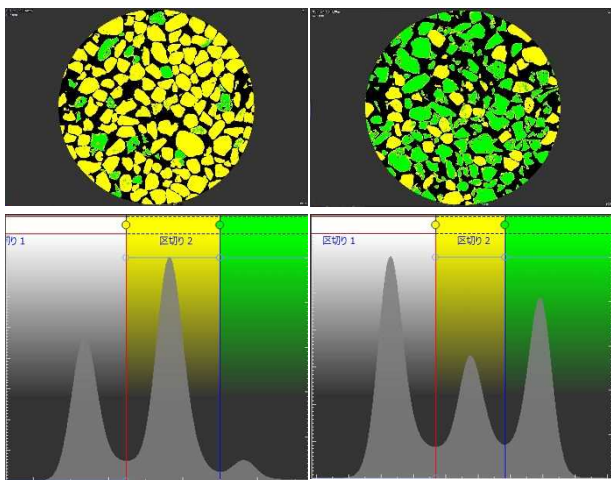
3. 2 測定結果

測定結果の例として、混合割合 10%及び 70%の
スラグ 1 と砂利 1 についての断面画像及びヒスト
グラムを図 2 に示す。

ヒストグラムは、左の山からバックグラウンド、砂
利、高炉水砕スラグに該当する測定画像の明るさ
を示している。

断面画像は、ヒストグラムの谷を区切りとして、
輝度の暗い部分が砂利で明るい部分が高炉水砕ス
ラグを示している。

このヒストグラムから、10%混合でも高炉水砕
スラグのピークを確認できた。



(a) 10% (b) 70%

図 2 断面画像とヒストグラム

3. 3 断面画像

混合砂利 1～3 の断面画像を図 3～5、スラグ
1 と 2 の断面画像を図 6、7 に示す。

図 3～5 より、砂利の部分にバックグラウンド
と高炉水砕スラグと認識している部分がある。砂
利は、さまざまな鉱物から構成されているため、砂
利の粒子中に密度の高い部分と低い部分が存在す
るためと考えられる。

図 6、7 より、高炉水砕スラグには空洞があり、
スラグ 1 よりスラグ 2 の方が空洞の個数が多い。
また、空洞の周りや高炉水砕スラグの外周に砂利
と同じ輝度の部分がある。

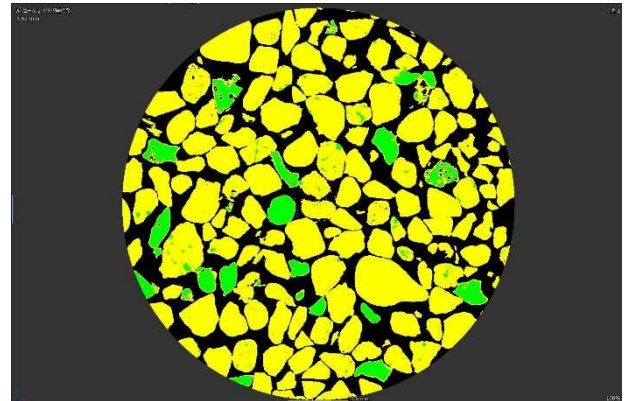


図 3 砂利 1 の断面画像(10%スラグ 1 と砂利 1)

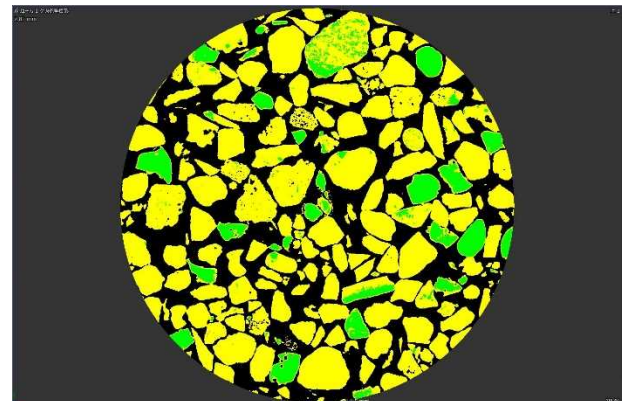


図 4 砂利 2 の断面画像(10%スラグ 1 と砂利 2)

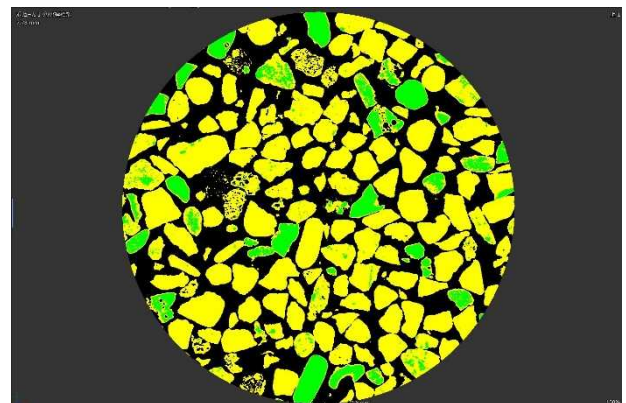


図 5 砂利 3 の断面画像(10%スラグ 1 と砂利 3)

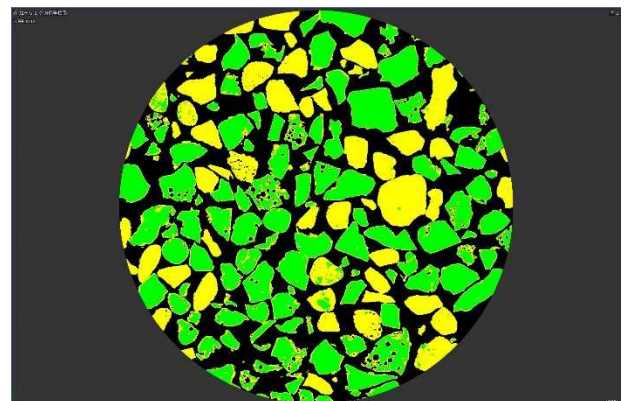


図 6 スラグ 1 の断面画像(70%スラグ 1 と砂利 1)

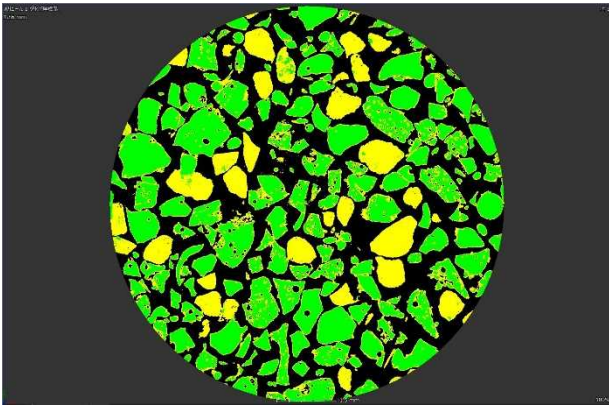


図7 スラグ2の断面画像(70%スラグ2と砂利1)

3. 4 測定割合(体積)の計算結果

混合割合(重量)とX線CTによる測定割合(体積)を比較したところ、相関があることが確認できた。この結果を図8に示す。

また、同じ混合割合(重量)の測定から計算した測定割合(体積)は、5%~9%異なった。計算した測定割合(体積)の近似曲線は、実際の混合割合(重量)より低い値を示し、かつ、高炉水砕スラグの混合割合が多くなるほど低い値を示した。これは、再構成条件のXYマトリックスを1024に設定しているため、測定範囲に含まれる境界面が多くなるほど、高炉水砕スラグの縁が砂利と認識されるためと考えられる。高炉水砕スラグと砂利の縁の画像を図9に示す。VG STUDIOMAXの断面画像は、通常、補間モードありのため、縁がなめらかに表示されるが、補間モードなしの断面画像は、高炉水砕スラグの縁がバックグラウンドとの中間色となっており、この部分が砂利と認識されると考えられる。

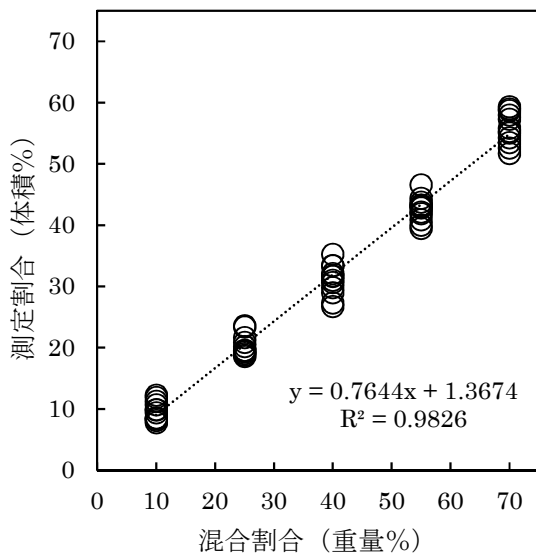


図8 全測定の計算結果

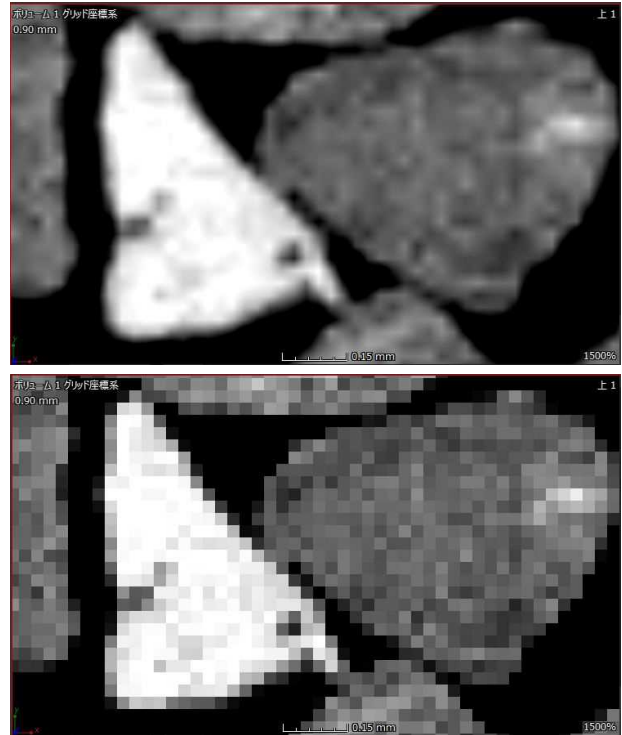


図9 補間モードあり(上)と補間モードなし(下)

高炉水砕スラグと砂利の組合せ別に、混合割合(重量)と1回目及び2回目の測定割合(体積)を計算した結果を図10~15に示す。

1回目は、スキャン直径が約10.9mm、2回目は、スキャン直径が約14.6mmの範囲で測定を行っている。すべての組合せで、1回目の測定より2回目の測定で測定割合(体積)が低くなることから、撮影範囲が測定割合(体積)に影響を与えていると考えられる。

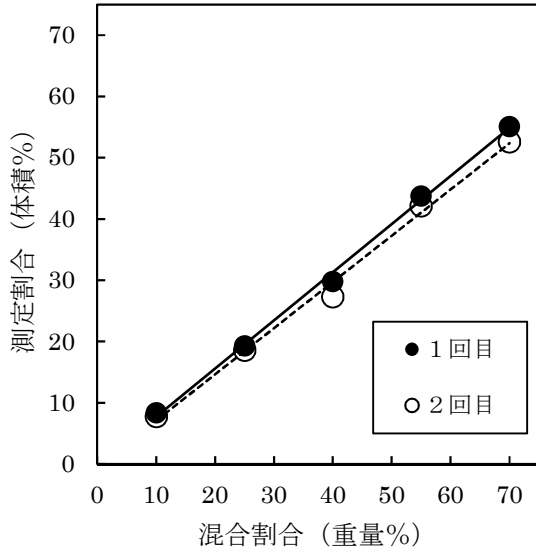


図10 砂利1とスラグ2の計算結果

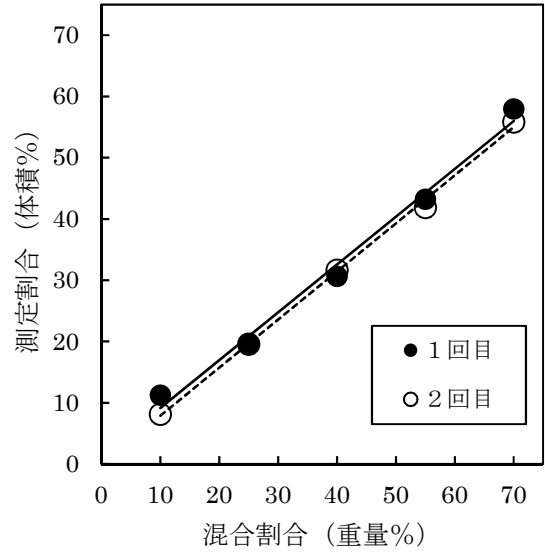


図13 砂利2とスラグ2の計算結果

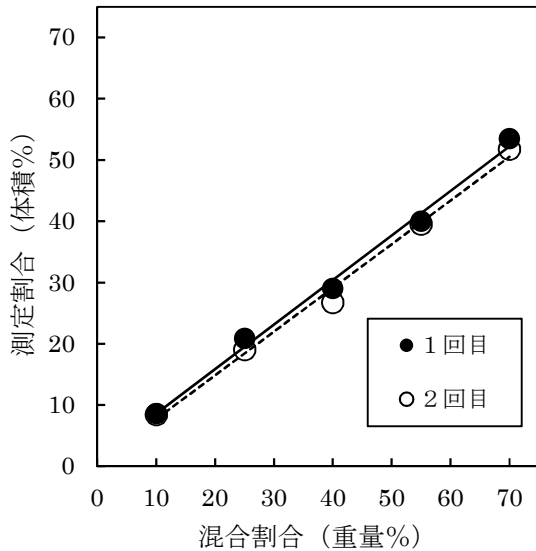


図11 砂利1とスラグ2の計算結果

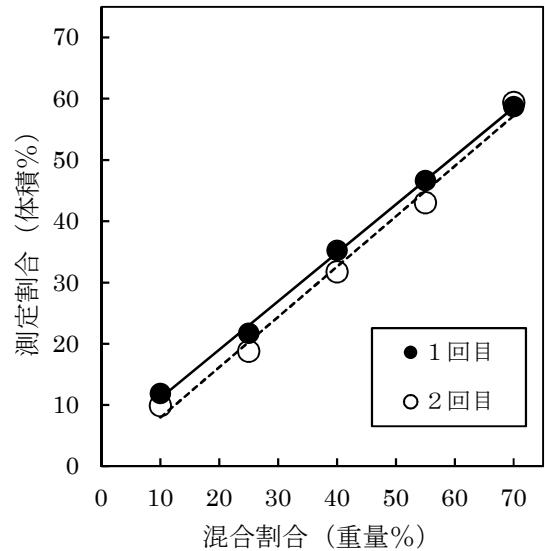


図14 砂利3とスラグ1の計算結果

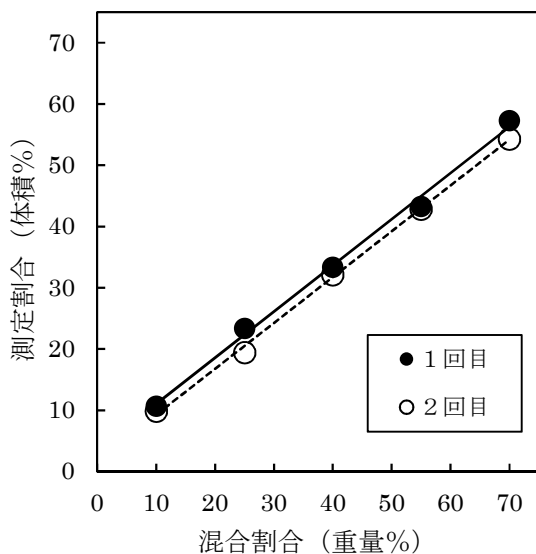


図12 砂利2とスラグ1の計算結果

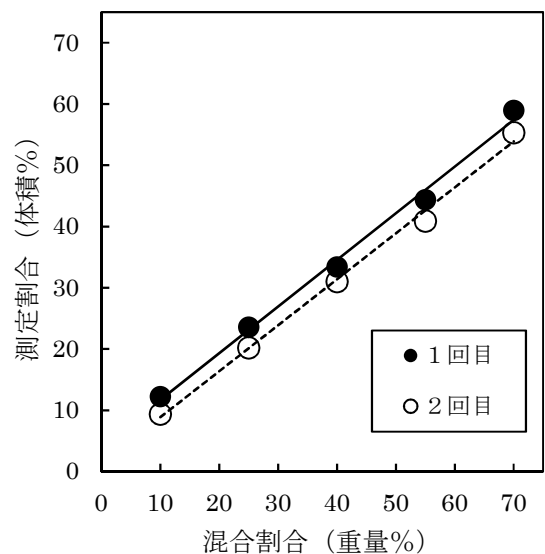


図15 砂利3とスラグ1の計算結果

図10～15の1回目及び2回目を平均した結果を図の16に示す。

測定割合(体積)は、同じ高炉水砕スラグより同じ砂利の方が近い値をとることから、高炉水砕スラグを変えるより、砂利の種類を変えることの方が測定割合(体積)に大きく影響を与えている。

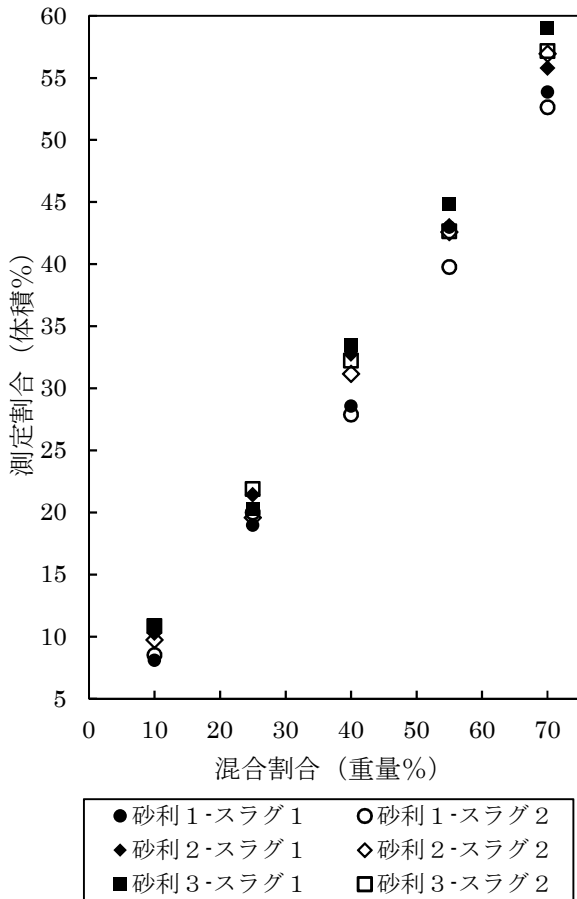


図16 砂利とスラグの組合せ別の結果

4. まとめ

本研究では、1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいにとどまる高炉水砕スラグ2種類と砂利3種類を用意し、砂利に高炉水砕スラグを10, 25, 40, 55, 70%の重量割合で混合した試料を作製した。その試料をマイクロフォーカスX線CT装置で測定を行い、測定した画像のコントラスト比から高炉水砕スラグと砂利の体積を求めた。その結果は、以下のとおりである。

- (1) 混合割合(重量)とX線CTによる測定割合(体積)に相関があることがわかった。混合前の高炉水砕スラグと砂利の粗粒率がわかれば、混合後の割合を知ることができるため、混合比管理に利用できる可能性がある。
- (2) 計算した測定割合(体積)の近似曲線は、実際の混合割合(重量)より低い値を示し、高炉水砕スラグの混合割合が多くなるほど低い値を示した。
- (3) 測定時の撮影範囲を大きくすると測定割合(体積)が低くなった。
- (4) 高炉水砕スラグと砂利では、砂利の違いのほかが測定割合(体積)に影響を与えた。

参考文献

- 1) 平成28年度砂利採取業務状況報告書集計表，経済産業省製造産業局素材産業課，国土交通省水管理・国土保全局水政課，2-6 (2018)
- 2) 鉄鋼スラグのコンクリート骨材への利用，鉄鋼スラグ協会，11 (2004)
- 3) 平成29年生コンクリート統計年報，経済産業省製造産業局素材産業課，52-55 (2018)