

論文 戻りコンクリートから製造した細骨材を使用した流動化処理土の物性に関する検討

船山 真里*1・細田 暁*2・武南 浩二*3・宮本 充也*4

要旨：戻りコンクリートに特殊凝集剤を添加して製造した IWA 細骨材を用いた流動化処理土の物性について検討した。IWA 細骨材とセメントと水のみで、適切なフレッシュ性状と圧縮強度を有する流動化処理土が製造できた。適切なフロー値と圧縮強度となる流動化処理土を得るための IWA 細骨材の粒度分布の範囲を示した。フロー値および圧縮強度が、単位体積質量と直線的な関係を示すことが明らかとなった。IWA 細骨材の製造過程におけるクラッシュの有無により、フロー値と単位体積質量の関係が異なり、クラッシュあり IWA 細骨材の場合小さいフロー値を示し、クラッシュによる微粒分が影響したためと考えられた。

キーワード：流動化処理土、戻りコンクリート、IWA 細骨材、粒度分布、フロー、圧縮強度

1. はじめに

経済活動の増大に伴って産業廃棄物の発生量は増加し、廃棄物の効率的な処分や再資源化が現代社会の大きな課題となっている。その一つに全国で年間数百万 m³ 発生している残コンクリート、戻りコンクリートがあり、リサイクル技術や再利用方法も検討されているが、多くは製造元である生コンクリート工場に戻されて、処分に多額の費用とエネルギーが消費されているのが実態である。戻りコンクリートは、骨材やセメント分などを含む貴重な資源と捉えることもでき、環境負荷低減や天然骨材減少の観点から、再利用が求められている。

本研究では、戻りコンクリートに特殊凝集剤を添加して造粒化させ、粗骨材を除去する等によって得た微粒分を含む細骨材を、流動化処理土に活用するための基礎的研究を行う。

既存の流動化処理土は、建設発生土に水とセメントを混練して作るものが主流であり、高い流動性、適切な強度発現性、材料分離抵抗性、適切な密度、などが求められる²⁾。

本研究で検討する流動化処理土は、戻りコンクリートから製造した細骨材とセメント、水を用いた埋め戻し材である。これらの材料を用いることで廃棄物である戻りコンクリートを全量有効活用でき、生コンクリート工場で流動化処理土の製造を完結させることができる。また、既存の流動化処理土のように建設発生土の土質によって品質が大きく影響を受けるのとは異なり、品質管理も比較的容易になる可能性があると考えている。

本研究では、戻りコンクリートから細骨材を製造するプロセスを説明し、製造した細骨材の物性、細骨材を使用した流動化処理土の流動性、ブリーディング、圧縮強度、単位体積質量についての実験結果を報告する。細骨材の粒度分布が流

動化処理土の物性に及ぼす影響も検討する。さらに、配合設計法の構築を目指し、フロー値および圧縮強度と単位体積質量の関係について考察する。

2. IWA 細骨材を用いた流動化処理土に関する基礎的実験

2.1 戻りコンクリートから製造した細骨材の物性

戻りコンクリートから骨材を製造する従来の方法として、戻りコンクリートを洗浄処理し、遠心攪拌させることで粗骨材と細骨材とスラッジ水に分ける回収骨材や、戻りコンクリートを硬化させて破碎し分級する再生骨材等、いくつかの手法がある。本研究ではそれらの方法とは異なり、凝集剤として、吸水作用のあるポリアクリルアミド-アクリル酸共重合体と急結作用のあるアルカリ性アルミニウム塩の二成分の薬剤を戻りコンクリートに添加する手法を用いる³⁾。ポリマー成分による脱水作用と、急結成分による硬化作用により、骨材周囲にモルタルやセメントペーストを付着、積層させて造粒する IWA システムと呼ばれる方法⁴⁾により製造した骨材を扱う。

この IWA システムを用いて製造した骨材を、本研究では IWA 骨材と呼ぶ。IWA 骨材を振動ふるいにかけて 5mm 以下のものを採取することで IWA 細骨材が得られる。IWA システムは、戻りコンクリートを洗浄処理する方法や硬化したコンクリートを破碎する方法とは異なり、直接戻りコンクリートに凝集剤を投入できるため、戻りコンクリートを容易に全量活用できる点で優れている。

本研究では、上述のふるい分けによる手法の他に、IWA 骨材のうち 5mm 以上に分級された骨材をクラッシュで破碎して 5mm 以下にし、それを 5mm 以下の IWA 骨材に加えて IWA 細骨材としたものも扱う。これら 2 種類を区別するため、IWA

*1 横浜国立大学 都市科学部都市基盤学科 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 博(工) (正会員)

*3 白石建設 有限会社 代表取締役

*4 有限会社 長岡生コンクリート 代表取締役

システムでふるい分けにより製造した細骨材を「IWA 細骨材」、クラッシュで破碎した骨材を加えた細骨材を「クラッシュあり IWA 細骨材」と呼ぶことにする。

実験に用いた細骨材の物性を表-1 に示す。クラッシュの破碎を伴わない IWA 細骨材として、静岡県の生コン工場で製造された 5mm 以下の細骨材を用いた。戻りコンクリートに、トラックアジテータの残水や洗浄水由来のスラッジから水をしばって天日干しをしたものを加えたものを用いて IWA システムと振動ふるいにより IWA 細骨材を製造した。スラッジを加える目的は廃棄物となるスラッジの活用である。戻りコンクリートの呼び強度は 18-27 程度であり、セメントの種類は普通ポルトランドセメントまたは高炉セメント B 種である。

クラッシュあり IWA 細骨材として、岡山県の生コン工場で製造された 5mm 以下の細骨材を用いた。この工場では、出荷したコンクリートの約 6 割が 21-15-20N または 21-18-20N で、残りの 4 割のうち約 2 割が 24-15-20N、約 1 割が 27-15-20N、約 1 割が 24-18-20N である。また出荷したコンクリートの約 9 割が普通ポルトランドセメントである。

使用した各細骨材について、密度と吸水率、粗粒率を JISA 1109, JISA 1104 に従い試験した。

表-1 実験で用いた細骨材

分類	記号	表乾 密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	絶乾 密度 (g/cm ³)	F.M.
IWA 細骨材	IS	2.32	12.41	2.06	3.06
クラッシュ あり IWA 細骨材	IS-C	2.42	6.98	2.26	2.68

2.2 流動化処理土の配合

本研究の 2. における実験では、表-1 に示す IS-C を用いた流動化処理土を練り混ぜ、物性に関する基礎的検討を行う。流動化処理土の配合を表-2 に示す。室内試験の水には水道水を、セメントには高炉セメント B 種を用いた。高炉セメント B 種の密度は 3.02g/cm³ である。物性試験は室内試験と実機試験の二種類を行った。室内試験では細骨材 1/2, セメント, 細骨材 1/2, 水の順に投入し、60 秒間ハンドミキサーで練り混ぜを行った。実機試験では IWA 細骨材, 水, セメントの順で投入し 25 秒練り混ぜたのちにトラックアジテータに投入し、30 秒間高速攪拌させた後に、各種の試験を行った。

2.3 計測項目と方法

(1) フロー試験

フロー試験には日本道路公団規格の試験方法であるエアモルタル及びエアミルクの試験方法 JHS A313-199 を用いた。

(2) ブリーディング試験

ブリーディング率の測定には土木学会規準のプレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率及び膨張率試験方法 JSCE-1986 を用いた。

(3) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験には土の一軸圧縮試験試験方法 JSCE-F 522-2018 を用いた。

(4) 単位体積質量

単位体積質量は 400ml の容器に試料を流し込み、上面をヘラで均した流動化処理土の質量を測定し、それを容器の容積で割って算出した。密な流動化処理土はせん断破壊時に固化強度以上のせん断抵抗を示すことや、密度効果によって安全性がより高まることが確認されている⁹⁾ため、単位体積質量の測定を行った。

2. では、以上の試験項目について、表-3 に示す値を目標値とした。本研究における目標値は、流動化処理土利用技術マニュアル⁹⁾が定める要求品質をもとに設定した。フロー値については、110mm から 140mm の時は流動勾配が大きくなるので施工にあたり打設エネルギーを与えるなど工夫が必要になると記載されているほか、フロー値 300mm 程度以上の流動化処理土をポンプ圧送すると非常に高い充填性が得られると記載されている⁹⁾ことから 240±80mm と設定した。ブリーディング率については、地下空間の充填を目的とする場合に設定されている値を参照して 3%未満と設定した。一軸圧縮強度の目標値については、地下構造物埋め戻しの用途別に定められており、本研究においては、密度 1.60g/cm³ 以上の場合の 100kN/m² 以上という目標値⁹⁾を参考に下限値を設定した。また上限値については再掘削を考慮して、バックホーで容易に再掘削可能である一軸圧縮強度 500~1000kN/m² 程度⁹⁾を参考に、1000kN/m² 程度以下と設定した。

表-2 IWA 細骨材を用いた流動化処理土の配合

骨材の 最大寸法 (mm)	単位量(kg/m ³)		
	水 W	セメント C	細骨材 S
5	367	50	1454

表-3 品質項目と目標値

品質項目	フロー試験	ブリーディング試験	一軸圧縮強度	単位体積質量
目標値	240±80 mm	3%未満	100kN/m ² 以上 1000kN/m ² 程度以下	1.60g/cm ³ 以上

3. 流動化処理土の基礎的実験の結果と考察

3.1 室内試験の結果

2. で説明した各試験についての結果を述べる。表-1 に示した IS-C を用いた流動化処理土の室内試験の結果を表-4 に示す。以下に、各試験の結果を述べる。

表-4 室内試験結果の一覧

品質項目	フロー値 (mm)	ブリーディング率 (%)		一軸圧縮強度 (kN/m ²)			単位体積質量 (g/cm ³)	
		3 時間	20 時間	7 日	28 日			
試験結果	255 × 240	1	2.44	2.68	1	125	301	1.83
		2	2.44	2.68	2	106	287	
		3	2.20	2.20	3	114	303	
		平均	2.36	2.52	平均	115	297	

(1) フロー値

最も直径が大きい部分とそれに直行する直径の両方のフロー値が目標値内に入り、目標範囲の中央値の 240mm に近い値となった。

フロー値の測定時に、流動化処理土が同心円状に均等に広がった。本研究の予備実験の段階では、流動化処理土が分離傾向にある場合は、同心円状に広がらなかったり、広がった流動化処理土の縁の近傍が波打ったりする傾向が見られた。この場合フロー値が大きくなる傾向があった。これは、材料分離による骨材の偏在が原因と思われた。また、予備実験の段階では、フロー試験後の中央付近に流動化処理土の山が残る場合もあった。この場合フロー値が小さくなる傾向があった。これは、配合に占める水の割合が少ないために粘性が大きくなったことが原因と思われた。表-2 の配合のフロー試験の結果が目標の中央値に近く、上記に示した材料分離や過度な粘性の傾向が見られなかったことから、良好なフレッシュ性状を示したと考えている。

(2) ブリーディング

ブリーディング率は、3 時間と 20 時間の両方において 3 本の試料すべての値が目標値の範囲内となった。材料分離による浮き水が明確に確認できた。ただし、流動化処理土利用技術マニュアル⁹⁾の中で、流動化処理土の利用用途によってはブリーディング率が 1%未満と定められているものもあるほか、ブリーディング率が 1%未満であれば泥水中の砂分の沈降を抑制できるという知見があるため、用途によってより小さいブリーディング率を目標値に設定する際には、適切な配合

を検討する必要がある。

(3) 一軸圧縮強度

材齢 7 日で供試体 3 本の平均が目標値の下限値を超え、材齢 28 日では目標値の上限値を超えずに目標値内に収まる結果となった。また、材齢 7 日から材齢 28 日までにおよそ 3 倍の強度増進が生じた。圧縮強度の発現には、配合やセメント種類、養生条件等の多くの影響要因があるため、今後は多くの実験データを蓄積する予定である。

(4) 単位体積質量

練り混ぜた直後の単位体積質量は、目標値を満たした。

3.2 実機試験の結果

表-1 に示した IS-C を用いて、生コンクリート工場の実機ミキサで練り混ぜた流動化処理土の物性試験の結果を表-5 に示す。以下に、各試験の結果を説明する。

表-5 実機試験結果の一覧

品質項目	フロー値 (mm)	ブリーディング率 (%)		一軸圧縮強度 (kN/m ²)			単位体積質量 (g/cm ³)	
		3 時間	20 時間	7 日	28 日			
試験結果	270 × 265	1	1.23	1.90	1	395	1100	1.84
		2	0.94	1.00	2	521	1070	
		3	1.18	1.71	3	443	1040	
		平均	1.12	1.54	平均	453	1070	

(1) フロー値

実機試験のフロー値も室内試験と同様に、目標値を満たした。材料分離や過度な粘性の傾向も見られず、良好なフレッシュ性状を示した。実機試験では、室内試験よりも大きいフロー値を示した。この差は、実機ミキサによる練混ぜとトラックアジテータの 30 秒間の高速撹拌による練混ぜ効率の違いによると思われる。

(2) ブリーディング

3 時間と 20 時間の両方において目標値の範囲内となった。室内試験と比較すると小さいブリーディング率となった。

(3) 一軸圧縮強度

材齢 28 日での圧縮強度が目標値の上限を 70kN/m² 上回る結果となった。フロー値の結果で考察したように、実機試験での練混ぜ効率の良さによる影響と考えられるが、配合設計において単位セメントを減らすなどの対応で十分に目標値の上限に収めることは可能である。また室内試験同様、材齢 7 日から材齢 28 日にかけて 3 倍程度増進した。室内試験と実機

試験の大きな差異については、今後検討を深める。

(4) 単位体積質量

練り混ぜた直後の単位体積質量を測定したところ、基準値より 0.24g/cm^3 大きくなり、室内試験結果と大きな差は見られない結果となった。

4. IWA 細骨材の適切な粒度分布の検討

戻りコンクリートから IWA システムにより製造した細骨材には様々な粗粒率、粒度分布が存在する。ここでは、図-1 に示すように、様々な粒度分布の細骨材を準備し、それらを用いた流動化処理土のフロー値と圧縮強度を調べた。

様々な粒度分布の細骨材を準備するために、まずクラッシュあり IWA 細骨材をふるい分けした。次に JIS A 5308 に示される粒度分布の中心、上限、下限の線を用いて、図-1 に示す各粒度分布の細骨材を、ふるい分けした骨材を組み合わせ製造した。それぞれの細骨材を用いて、表-2 に示す配合の流動化処理土に対してフロー値と圧縮強度（材齢 28 日）を求めた。なお粒度分布を変化させた場合、厳密には細骨材の密度は異なるが、本実験では細骨材の密度は一定と仮定して表-2 の配合をそのまま用いた。その結果を表-6 に示した。

さらに、図-1 に示す④と⑤の粒度分布を持つクラッシュを伴わない IWA 細骨材も準備し、流動化処理土のフロー値と圧縮強度を求めた。その結果も表-6 に示した。

本研究の検討範囲では、図-1 の④と⑤の間の粒度分布を持つ細骨材は、すべてフロー値と圧縮強度が本研究の目標値を満たし、材料分離や粘性過多でないことを確認した。IWA 細骨材には適切な品質の流動化処理土を得るための適切な粒度分布が存在することが分かった。今後、検討を重ねる予定である。

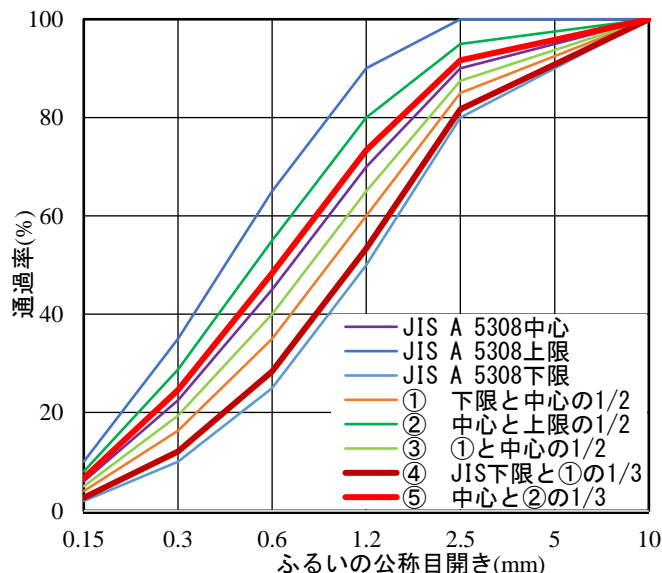


図-1 ふるい分けして作成した細骨材の粒度分布

表-6 粒度分布試験結果

細骨材の凡例	細骨材	F.M.	フロー値 (mm)		一軸圧縮強度 (kN/m ²) 28 日	フレッシュ性状	温度 (°C)
			-	平均			
JIS A 5308 中心	IS-C	3.09	240×240	240	231	良好	16
JIS A 5309 上限	IS-C	1.95	150×130	140	436	粘性過多	16
JIS A 5310 下限	IS-C	3.45	265×260	262.5	254	材料分離	17
①	IS-C	3.07	245×240	242.5	252	良好	17
②	IS-C	2.36	175×175	175	376	粘性過多	17
③	IS-C	2.89	230×230	230	293	良好	17
④	IS-C	3.31	245×240	242.5	289	良好	18
⑤	IS-C	2.60	210×205	207.5	312	良好	18
④	IS	3.31	270×265	267.5	573	良好	19
⑤	IS	2.60	210×210	210	600	良好	19

5. IWA 細骨材を用いた流動化処理土のフロー値と一軸圧縮強度の関係

表-7、表-8 に示した配合について、フロー値および材齢 28 日の一軸圧縮強度と、各配合の単位体積質量の関係について、IWA 細骨材を用いた場合を図-2、クラッシュあり IWA 細骨材を用いた場合を図-3 に示した。なお、表-1 に示した細骨材を使用し、水道水、高炉セメント B 種を用い、単位セ

メント量は 50kg/m^3 で固定した。

IWA 細骨材を用いた場合とクラッシュあり IWA 細骨材を用いた場合ともに、フロー値と一軸圧縮強度はそれぞれ、単位体積質量と直線的な相関がみられた。配合において細骨材量が増えると単位体積質量が増加し、それに応じてフロー値は小さくなり、一方で一軸圧縮強度は大きくなる傾向が明確に確認された。単位体積質量が増加するごとに水の単位量は

減少し W/C が小さくなるため圧縮強度が大きくなると考えている。

クラッシュあり IWA 細骨材を用いた方が IWA 細骨材に比べてフロー値が小さい値を示すのは、クラッシュした際に発生する微粒分が影響していると考えている。IWA 細骨材を用いた方が同じ単位体積質量の場合に圧縮強度が大きい傾向を示すのは、細骨材の製造時に加えたスラッジに含まれるカルシウムイオンが高炉セメントの水和に影響した可能性があると考えている。

図-2 におけるフロー値の近似直線の決定係数は 0.76、圧縮強度については 0.97 であった。図-3 におけるフロー値の近似直線の決定係数は 0.92、圧縮強度については 0.48 となった。今後、実験結果を積み重ねることにより、適切なフロー値と圧縮強度を得るための配合設計法を確立できる可能性があると考えている。

表-7 IWA 細骨材を用いた流動化処理土の配合

配合	単位量 (kg/m ³)			単位体積質量 (g/cm ³)	温度 (°C)
	C	W	IS-C		
1	50	397	1382	1.83	18
2	50	389	1401	1.84	19
3	50	382	1418	1.85	18
4	50	374	1437	1.86	18
5	50	370	1447	1.87	18
6	50	367	1454	1.87	18
7	50	361	1469	1.88	18
8	50	351	1493	1.89	18
9	50	337	1527	1.91	19

表-8 クラッシュあり IWA 細骨材を用いた流動化処理土の配合

配合	単位量 (kg/m ³)			単位体積質量 (g/cm ³)	温度 (°C)
	C	W	IS		
1	50	427	1255	1.73	19
2	50	397	1325	1.77	19
3	50	382	1360	1.79	18
4	50	374	1378	1.80	19
5	50	367	1394	1.81	19
6	50	361	1408	1.82	19
7	50	351	1431	1.83	19
8	50	337	1464	1.85	19
9	50	322	1499	1.87	19
10	50	308	1531	1.89	19

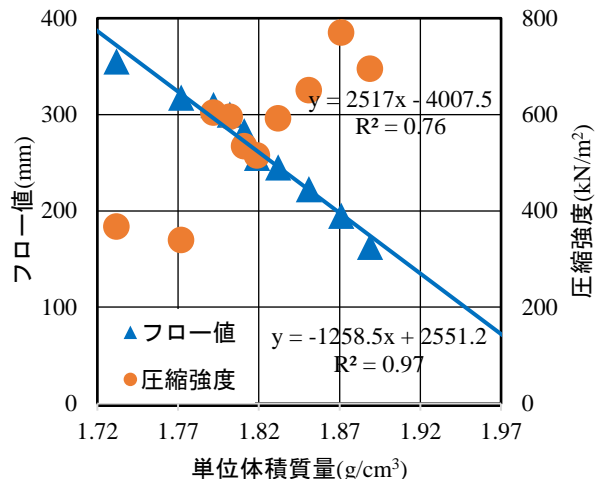


図-2 単位体積質量に対するフロー値および圧縮強度の関係 (IWA 細骨材)

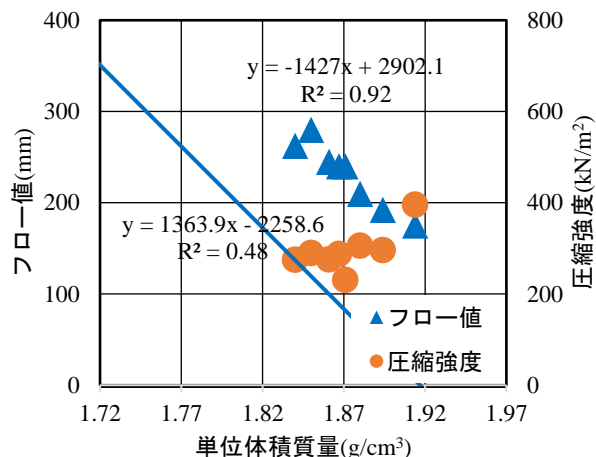


図-3 単位体積質量に対するフロー値および圧縮強度の関係 (クラッシュあり IWA 細骨材)

6. まとめ

戻りコンクリートに特殊凝集剤を添加する IWA システムにより製造した細骨材を用いた流動化処理土について室内試験および実機試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) IWA システムにより製造した細骨材と、セメント、水のみで、適切な品質の流動化処理土を製造できた。
- (2) 適切なフレッシュ性状と圧縮強度を有する流動化処理土を得るための、IWA システムにより製造した細骨材の適切な粒度分布の範囲を示した。
- (3) 流動化処理土におけるフロー値および一軸圧縮強度は、単位体積質量と直線的な相関を示した。細骨材量が増えることによる単位体積質量の増加に伴い、フロー値は小さくなり、一軸圧縮強度は大きくなる傾向が見られた。
- (4) IWA 細骨材の製造過程におけるクラッシュの有無により、フロー値と単位体積質量の関係が大きく異なった。クラッシュあり IWA 細骨材の方が小さいフロー値を示

し、クラッシュした際に発生する微粒分が影響していると考えられる。IWA 細骨材を用いた方が同じ単位体積質量の場合に圧縮強度が大きい傾向を示し、細骨材の製造時に加えたスラッジに含まれるカルシウムイオンが高炉セメントの水和に影響した可能性がある。

謝辞：本研究は、国土交通省関東地方整備局の「技術（シーズ）マッチング」の「生コンの廃棄物等を資源として革新的に活用する方法についての技術研究開発」（研究代表者：細田 暁）による支援を受けて実施しました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 十河茂幸, 中田善久, 小山明男, 宮里心一：残コンクリートの削減と有効利用に向けて, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.83-86, 2010.9
- 2) 土木研究所・流動化処理工法総合監理編：流動化処理土利用技術マニュアル, 技報堂出版, pp6-8, 2007
- 3) G. Ferrari, M. Mitsuya, A. Ferrari : New sustainable technology for recycling returned concrete, Construction and Building Materials, Vol.67, Part C, pp.353-359, Sep.2014
- 4) 大阪兵庫生コンクリート工業組合：回収骨材の有効利用マニュアル -IWA システム編-, 2014
- 5) 土木研究所・流動化処理工法総合監理編：流動化処理土利用技術マニュアル, 技報堂出版, pp50-54, 2007