

古紙を原料とする微細粉体を用いた高含水泥土処理における強度と運搬性の変化

○木田翔平・澤村康生・矢野隆夫・木村 亮
京都大学大学院工学研究科

1. はじめに

建設工事に伴い発生する建設汚泥や、浚渫土砂、軟弱土、ため池底泥などの高含水泥土（土質区分基準¹⁾においてコーン指数 200 kN/m² 未満の発生土）は、水を多量に含んでいるため、そのままでは搬出・積載・運搬することができない。そのため、適切な泥土処理が求められるが、その取扱いの難しさから処理や処分にかかる経済的・環境的コストが大きい。従来から広く用いられてきた一般的な泥土処理方法としては、セメント系固化材による安定処理が挙げられる。しかし、対象泥土の含水比が高い場合には多量の固化剤を添加する必要があること、固化に要する時間や既存の地盤とのなじみの悪さ²⁾などから、環境への負荷が懸念されている³⁾。一方、近年では、故紙破砕物と高分子系改良剤（ポリマー）を用いて余分な水分を吸水させた後にセメント系固化剤を添加する工法⁴⁾や、チップ化した竹を用いた泥土処理技術⁵⁾が検討されているが、低環境負荷性、即時性を兼ね備えた泥土処理方法は未だ少ない。

本研究では、高含水泥土処理方法として、古紙を微細に加工し粉末状にした微細粉体（Fine Cellulose Powder: FCP）を泥土に添加・攪拌することで、泥土の流動性を即時に低下させる方法（図-1）⁶⁾を用いる。本手法の処理メカニズムは、セルロースによる吸水を主とした物理的作用であると考えられるため、化学組成を問わず泥土を短時間で処理することができ、即時の運搬が可能となる。また、原料が古紙のみであるため、セメント系固化剤を用いる他の手法と比較して環境への負荷も少ない。これまでこの微細粉体を用いた高含水泥土処理に関しては、澤村ら⁶⁾により吸水特性をはじめとする諸特性、微細粉体を用いて処理した泥土のせん断強度の変化に関する検討が行われている。しかし、本手法による泥土処理の効果をさらに定量的に評価するためには、処理泥土の力学的特性の変化や、流動性を指標とした運搬性に関する検討が必要不可欠である。そこで本研究では、本手法を用いて処理した高含水泥土に対してコーン指数試験を実施し、その強度特性を検討した。また、フロー試験および振動台実験によりその運搬性について検討した。

2. 古紙を原料とする微細粉体（FCP）の概要と諸特性

2.1. 古紙を原料とする微細粉体の原料

本研究で対象とする微細粉体の原料は、紙粉とシュレッダー屑に区分される。図-2 に 2 種の原料をそれぞれ示す⁶⁾。紙粉とは、印刷・製本会社等において発生する裁断屑や研磨により発生する粉末である。シュレッダー屑はオフィスなどで発生する一般的なものや機密文書処理などにおいて発生する業務用シュレッダーで破砕された屑である。シュレッダー屑は紙粉よりも紙片サイズが大きいことが図からも確認できる。これら 2 種の原料を専用の製造機により微細加工したものを本研究では用いる。図-3 に本研究で用いる微細粉体を示す。なお以下では、紙粉またはシュレッダー屑を原料とする微細粉体をそれぞれ紙粉、シュレッダー屑と呼称する。



図-1 古紙を原料とする微細粉体を用いた高含水泥土処理⁶⁾



(a) 紙粉 (b) シュレッダー屑

図-2 微細粉体の原料となる古紙の種類⁶⁾



図-3 古紙を原料とする微細粉体

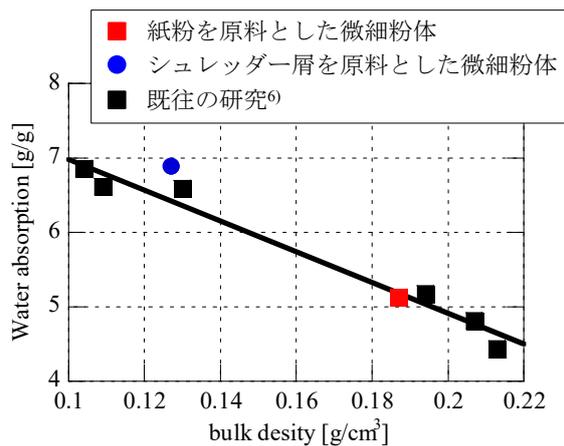


図-4 嵩密度と吸水量の関係⁶⁾を基に加筆

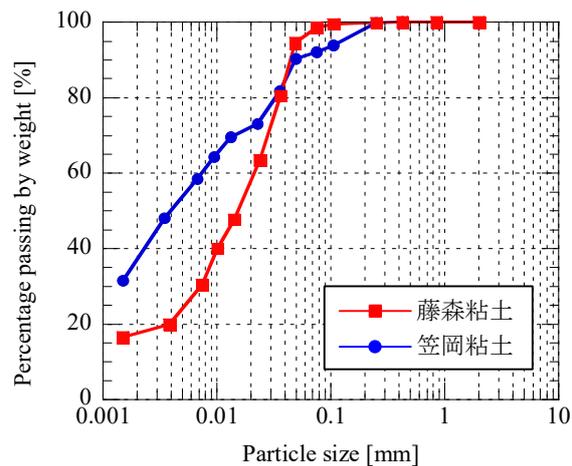


図-5 粒径加積曲線

表-1 実験で用いる試料の配合

Clay	Initial water content [%]		Type of FCP	Addition rate [%]
	Ratio to w_L	Moisture content		
Fujinomori $G_s = 2.68$ $w_L = 48.5$ $w_p = 28.0$ $I_p = 20.5$	2	97.0	Paper dust	0, 5, 10, 20, 30
	4	194.0		
	8	388.0		
	2	97.0	Shredder scrap	5, 10, 20, 30
	4	194.0		
	8	388.0		
Kasaoka $G_s = 2.70$ $w_L = 62.1$ $w_p = 29.6$ $I_p = 32.5$	2	124.2	Paper dust	0, 5, 10, 20, 30
	4	248.4		
	8	496.8		
	2	124.2	Shredder scrap	5, 10, 20, 30
	4	248.4		
	8	496.8		

※ 0%は、FCPを含まない藤森粘土、笠岡粘土に対して、含水比を変化させた基本ケース

※ 後述されるケース名は、Case-(粘土の種類)-($w_L \times \circ$)-(FCPの種類)-(添加率)のように記述する

2.2. 古紙を原料とする微細粉体の嵩密度および吸水量⁹⁾

古紙を原料とする微細粉体を添加した処理泥土の各種試験を実施するうえで、2種の微細粉体の諸特性を把握する必要がある。澤村ら⁹⁾は嵩密度試験および吸水試験を実施し、嵩密度と吸水量の関係が線形関数を用いて近似できることを確認している。本研究でも澤村らと同様の手順で嵩密度試験および吸水試験を実施し、2種の微細粉体の嵩密度と吸水率を求めた。

嵩密度試験では、2000 ml メスシリンダーに各試料を静かに投入しその重量を計測した。吸水試験では、1000 ml ビーカー、95 mm×70 mm の袋状ポリエステル製不織布、脱気水、攪拌用マグネチックスターラーを用いた。手順としては、はじめに不織布に試料を 3 g 投入し、不織布上部を数回折り返しホッチキスで数箇所止める。つぎに、脱気水が入った 1000 ml ビーカーに試験体を投入し、マグネチックスターラーにより 20 mm 攪拌子を用いて 300 rpm で攪拌し、24 時間吸水させる。吸水終了後、試験体をビーカーから取り出し、10 分間空中で放置して表面の余分な水滴をとりのぞく。その後、試験体の重量を計測し、計測値から不織布の吸水量を差し引いた値を試料の吸水量とする。図-4 に嵩密度と吸水量の関係を示す。同図には澤村ら⁹⁾の結果も併記している。シュレッダー屑の方が吸水量は大きい一方で、嵩密度は小さい。比表面積が大きいほど嵩密度は小さくなると考えられるため、比表面積が大きいほど吸水量が多くなるといえる。

3. 実験試料および試料作製方法

本研究では、高含水泥土の母材として藤森粘土と笠岡粘土を用いた。図-5 に母材となる粘土の粒径加積曲線、表-1 に実験試料の配合を示す。実験ケースは藤森粘土と笠岡粘土のそれぞれに紙粉またはシュレッダー屑を添加した 4 種類に大別できる。それら 4 種類について、微細粉体の添加量を種々に変化させた。高含水泥土の作製手順は以下の通りである。

① 乾燥状態の粘土に水を加え、所定の含水比 (それぞれの粘土の液性限界に対して、2 倍、4 倍、8 倍) に調整した粘

土スラリーを作製する。

- ② 作製した粘土スラリーを真空ポンプと攪拌機により2時間以上脱気・攪拌させ、飽和させる。
- ③ 試料を温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室で1日以上静置させ、含水比を測定する。
- ④ 粘土の含水量に対して、重量比で5、10、20、30%の微細粉体を添加し、十分に攪拌する。

4. 各実験の概要

4.1. コーン指数試験

古紙を原料とする微細粉体を用いて処理された高含水泥土の強度特性を把握するために、自動貫入装置によるコーン指数試験⁷⁾をJISA 1228に準拠して実施した。試験機の概要図を図-6に示す。また、本実験により得られる指標であるコーン指数の定義は以下のように定義される。

$$q_c = \frac{Q_c}{A} \times 10 \quad (1)$$

- q_c : コーン指数 [kN/m²]
 Q_c : 平均貫入抵抗力 [N]
 A : コーン先端の底面積 [cm²]

実験の手順を以下に示す。

- ① モールド (直径10 cm, 高さ12.7 cm) に、各実験ケースにおける試料を充填し供試体を作製する。
- ② 供試体を試験装置上に設置し、1 cm/s の速度で先端コーンおよびロッドを貫入させる。貫入量が供試体上端面から5 cm, 7.5 cm, 10 cm 時の貫入抵抗力を求め、コーン指数を算出する。
- ③ 実験後、供試体上層・中層・下層から試料を採取し含水比を計測する。

供試体の充填の際には、微細粉体の添加率が10%以下の試料は流動性が高いため、突き棒により気泡を除去しながら充填した。一方、添加率20%、30%の試料は流動性が比較的低いため、乳棒により何層かに分けて突き固めた。

4.2. フロー試験

フロー試験⁸⁾は、一般的にモルタルの流動性を評価するための目的の試験である。本研究で対象とする高含水泥土は、運搬時に繰返しの振動を受け流動化することが危惧される。そこで、本研究では古紙を原料とした微細粉体を用いて処理した泥土に対してフロー試験を実施し、運搬性を評価することを試みた。図-7に試験の概要図を示す。試験はJIS R 5201に準拠して行った。以下に実験手順を示す。

- ① フローコーン (上部内径69.57 mm, 下部内径99.68 mm, 高さ60.43 mm) を乾燥した布でよく拭いたフローテーブルの中央に設置する。
- ② 試料をフローコーンに充填し、表面をならす。
- ③ 直ちにフローコーンを取り去り、試料に15秒間に15回の落下振動を与える。
- ④ 落下終了後、試料が広がった径の最大と認める方向と、これに直角な方向とで計測し、その平均値を求める。
- ⑤ 上記①~④を合計2回実施し、得られた平均値をフロー値(ϕ)とする。

試料の充填方法は、上記のコーン指数試験で示した方法と同様である。

4.3. 振動台実験

本研究では、古紙を原料とする微細粉体を用いた処理泥土の運搬性の評価を目的として、前節のフロー試験を実施し

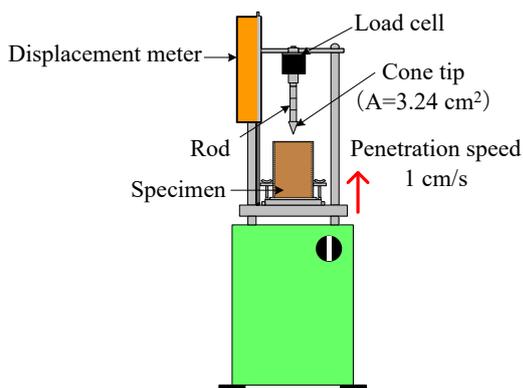


図-6 コーン指数試験の概要図

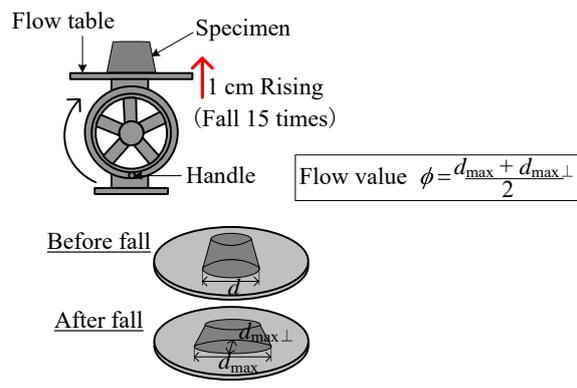


図-7 フロー試験の概要図

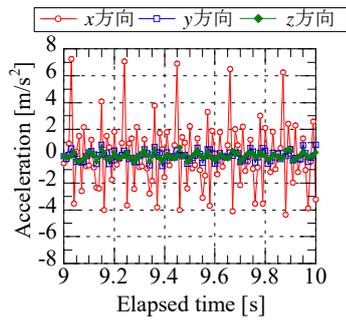


図-8 入力振動

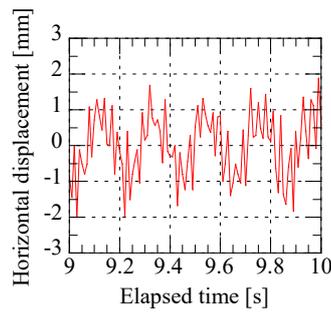


図-9 水平変位

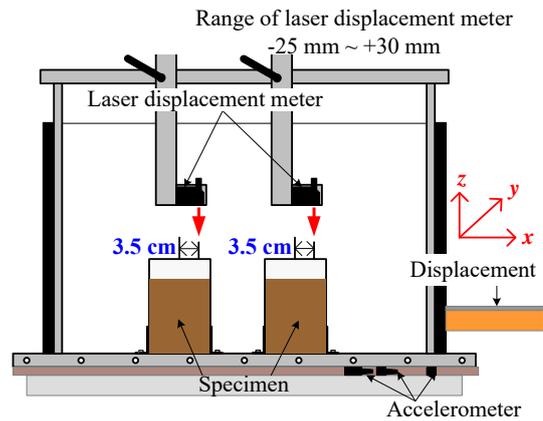


図-10 振動台実験の概要図

た。しかし、フロー試験で得られるフロー値からのみでは運搬性を直接評価することは難しい。そこで、処理泥土に一定の振動を与え、トラックの輸送時の振動を模擬した振動台実験を実施することで、より詳細に運搬性を検討した。

振動台実験は、藤森粘土を用いて液性限界の2倍の含水比 ($w=97.0\%$) に調整した飽和粘土スラリーを対象とし、微細粉体を添加しないケース、紙粉を原料とする微細粉体を5%、10%、30%添加・攪拌したケースの計4ケースを実施した。白田ら⁹⁾はトラック輸送振動の検討において、振動加速度が荷台後部で上下方向に 1.94 m/s^2 を示し、PSD (パワースペクトル密度) は上下方向において3~5 Hz付近で最大値約 $1.0 \text{ m}^2/\text{s}^3$ を示すことを確認している。そこで、この輸送振動の検討を基に、入力振動を5 Hz、振幅1 mmの正弦波と決定し、2時間振動を与えた。図-8に3方向の入力振動、図-9にx方向の水平変位をそれぞれ示す。また、実験の概要図を図-10に示す。供試体は、幅100 mm、奥行き100 mm、高さ150 mmの亚克力容器に高さ120 mmまで充填し、供試体表面の鉛直変位(上向き正)をレーザー変位計で計測した。

5. 試験結果

5.1. コーン指数試験

図-11にFCPの添加率とコーン指数の関係を示す。図より、微細粉体を添加していない場合はコーン指数は小さいが、添加量が増えるにつれてコーン指数が増加しており、含水比が200%を超えるような高含水泥土に対しても高い処理効果を発揮していることが確認できる。微細粉体の原料に着目すると、吸水率の高いシュレッター層を添加・攪拌した場合にコーン指数がより大きく、処理効果が高い。そこで、図-12にそれぞれの吸水率(紙粉: 5.125 g/g 、シュレッター層: 6.890 g/g)を基に、シュレッター層の添加率を紙粉の添加率に換算した場合の結果を示す。図より、紙粉とシュレッター層のグラフがほぼ一致していることが確認できる。これより、古紙を原料とした微細粉体を用いた高含水泥土の処理効果は、微細粉体の原料の種類によらず吸水率によって決まることが確認できる。

5.2. フロー試験

図-13にフロー試験の前後における供試体の様子を、図-14に微細粉体の添加率とフロー値の関係を示す。また、表2に実験ケースのコーン指数とフロー値をまとめたものを示す。フロー試験に用いるフローテーブルは直径が300 mmであるため、供試体の流動性が一定以上高いとフローテーブルから供試体の一部が落下し、フロー値が計測できない。本実験においても、微細粉体を添加していないケースおよび添加量5%のケースでは、供試体の流動性が高いためフロー値が計測できなかった。しかし、微細粉体を10%以上添加したケースでは、非常に高含水の泥土であってもフロー値が計測できる状態にまで流動性を低下させることができた。また、添加率が増加するにつれてフロー値が顕著に低下しており、流動性の大幅な低下が確認できた。図-15にフロー値とコーン指数の関係を示す。コーン指数が 10 kN/m^2 以下の範囲に焦点を当ててみると、コーン指数が小さい範囲ではフロー値が急激に増減していることが確認できる。よって、FCPを用いて高含水泥土を処理することにより、コーン指数による強度増加は僅かであっても、流動性は大幅に低下していることが判明した。

5.3. 振動台実験

図-16に振動台実験における供試体表面の3000秒後付近の鉛直変位を示す。微細粉体を添加していないケースでは、局所的に変位が増大している箇所を含め全体的に変位が大きい。一方で、微細粉体を添加・攪拌したケースでは明らかに変位が抑制されており、微細粉体による処理効果が確認できる。添加率5%のケースに着目すると、フロー試験においてフロー値が計測できなかったが、変位の抑制効果は確認できているため、泥土の運搬性は向上していると考えられる。

一般的なセメント系固化材による固化処理において、コーン指数 200 kN/m^2 が運搬性の指標として用いられる¹⁰⁾。今回微細粉体を 10% 添加・攪拌したケースでは、コーン指数が 2 kN/m^2 程度であっても、振動台実験における変位は小さかった。この時のフロー値は $\phi = 210.13 \text{ mm}$ であった。つまり、フロー値が計測できる程度に流動性が低下していれば、コーン指数が 200 kN/m^2 に満たない強度であっても、泥土の運搬は可能であると考えられる。そこで、図-17 に泥土の初期含水比とフロー値の関係を示す。初期含水比とフロー値には正のよい相関があることが確認できる。前節において、フロー試験より、フロー値から泥土の流動性について検討することができた。このことを踏まえると、泥土の初期含水比とフロー値の関係より、泥土の初期含水比が求めれば、フロー値を基に、泥土を運搬可能な状態に処理するうえで必要となる微細粉体の種類およびその添加率を算出できる。

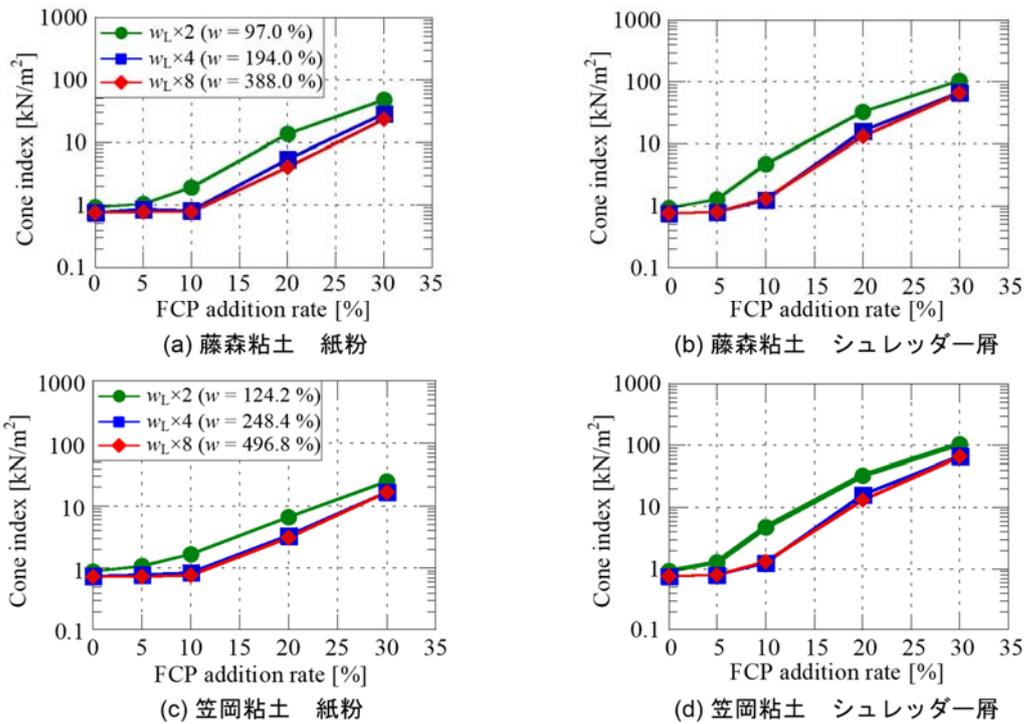


図-11 微細粉体の添加率とコーン指数の関係

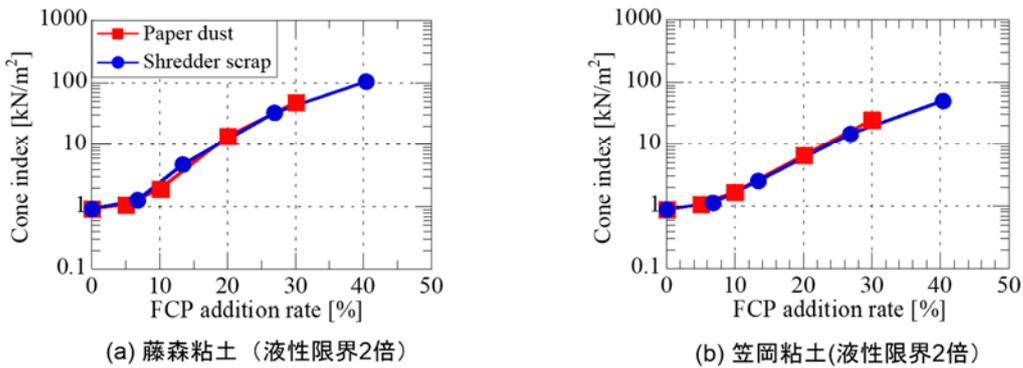


図-12 微細粉体の添加率とコーン指数の関係
(吸水量を基にシュレッダー屑の添加量を紙粉の添加量に換算)



図-13 フロー試験前後における供試体の様子

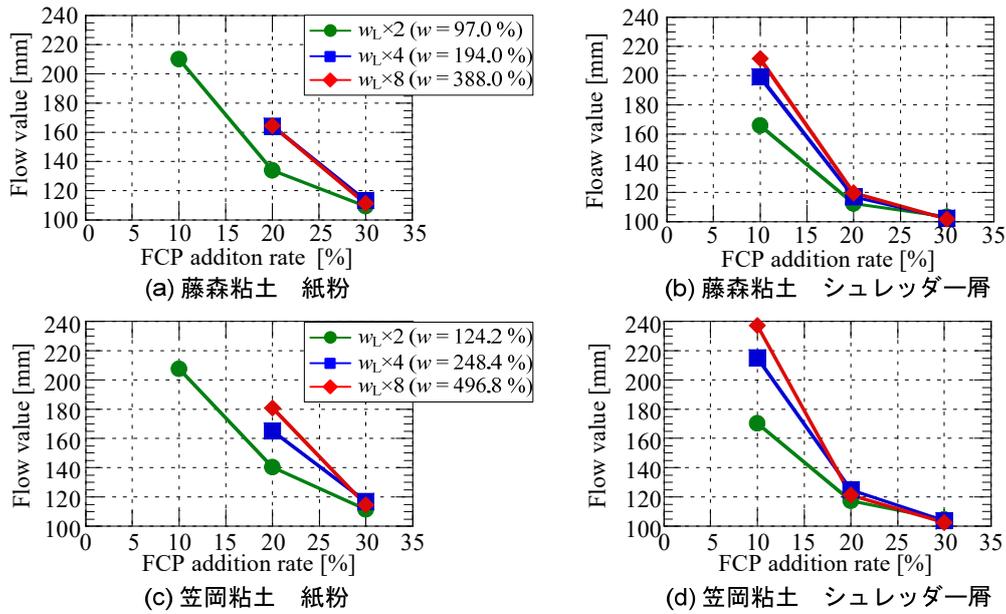


図-14 微細粉体の添加率とフロー値の関係

表-2 各実験ケースのコーン指数およびフロー値

Case	Cone index [kN/m ²]	Flow value [mm]	Case	Cone index [kN/m ²]	Flow value [mm]
Case-F- $w_L \times 2$ -0 %	0.9348	-	Case-K- $w_L \times 2$ -0 %	0.8870	-
Case-F- $w_L \times 2$ -P-5 %	1.0655	-	Case-K- $w_L \times 2$ -P-5 %	1.0924	-
Case-F- $w_L \times 2$ -P-10 %	1.9498	210.13	Case-K- $w_L \times 2$ -P-10 %	1.6577	207.67
Case-F- $w_L \times 2$ -P-20 %	13.7614	134.1	Case-K- $w_L \times 2$ -P-20 %	6.5436	140.39
Case-F- $w_L \times 2$ -P-30 %	48.7172	109.29	Case-K- $w_L \times 2$ -P-30 %	24.9254	111.61
Case-F- $w_L \times 4$ -0 %	0.7656	-	Case-K- $w_L \times 4$ -0 %	0.7533	-
Case-F- $w_L \times 4$ -P-5 %	0.8548	-	Case-K- $w_L \times 4$ -P-5 %	0.7844	-
Case-F- $w_L \times 4$ -P-10 %	0.8317	-	Case-K- $w_L \times 4$ -P-10 %	0.8378	-
Case-F- $w_L \times 4$ -P-20 %	5.4335	164.36	Case-K- $w_L \times 4$ -P-20 %	3.3373	165.34
Case-F- $w_L \times 4$ -P-30 %	28.5687	113.25	Case-K- $w_L \times 4$ -P-30 %	16.6262	116.96
Case-F- $w_L \times 8$ -0 %	0.7604	-	Case-K- $w_L \times 8$ -0 %	0.7317	-
Case-F- $w_L \times 8$ -P-5 %	0.7823	-	Case-K- $w_L \times 8$ -P-5 %	0.7412	-
Case-F- $w_L \times 8$ -P-10 %	0.7763	-	Case-K- $w_L \times 8$ -P-10 %	0.756	-
Case-F- $w_L \times 8$ -P-20 %	4.0436	164.56	Case-K- $w_L \times 8$ -P-20 %	3.0935	181.02
Case-F- $w_L \times 8$ -P-30 %	23.5399	111.18	Case-K- $w_L \times 8$ -P-30 %	16.7543	114.70
-	-	-	-	-	-
Case-F- $w_L \times 2$ -S-5 %	1.2838	-	Case-K- $w_L \times 2$ -S-5 %	1.1396	-
Case-F- $w_L \times 2$ -S-10 %	4.7456	165.66	Case-K- $w_L \times 2$ -S-10 %	2.5466	170.34
Case-F- $w_L \times 2$ -S-20 %	33.2142	112.64	Case-K- $w_L \times 2$ -S-20 %	14.6939	117.20
Case-F- $w_L \times 2$ -S-30 %	106.4693	103.54	Case-K- $w_L \times 2$ -S-30 %	50.9526	104.52
-	-	-	-	-	-
Case-F- $w_L \times 4$ -S-5 %	0.8028	-	Case-K- $w_L \times 4$ -S-5 %	0.8318	-
Case-F- $w_L \times 4$ -S-10 %	1.2686	199.31	Case-K- $w_L \times 4$ -S-10 %	1.2911	215.25
Case-F- $w_L \times 4$ -S-20 %	16.0834	117.06	Case-K- $w_L \times 4$ -S-20 %	9.9528	124.89
Case-F- $w_L \times 4$ -S-30 %	67.1124	102.53	Case-K- $w_L \times 4$ -S-30 %	40.4989	103.64
-	-	-	-	-	-
Case-F- $w_L \times 8$ -S-5 %	0.8011	-	Case-K- $w_L \times 8$ -S-5 %	0.7371	-
Case-F- $w_L \times 8$ -S-10 %	1.3069	211.50	Case-K- $w_L \times 8$ -S-10 %	1.1557	237.25
Case-F- $w_L \times 8$ -S-20 %	13.0435	119.68	Case-K- $w_L \times 8$ -S-20 %	10.5085	121.39
Case-F- $w_L \times 8$ -S-30 %	66.5571	101.92	Case-K- $w_L \times 8$ -S-30 %	46.4005	102.56

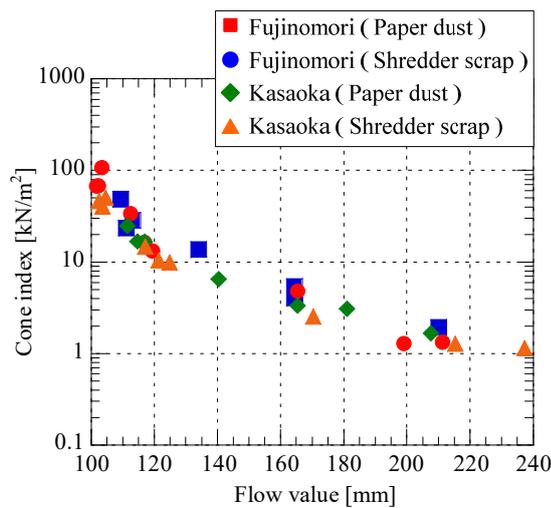


図-15 フロー値とコーン指数の関係

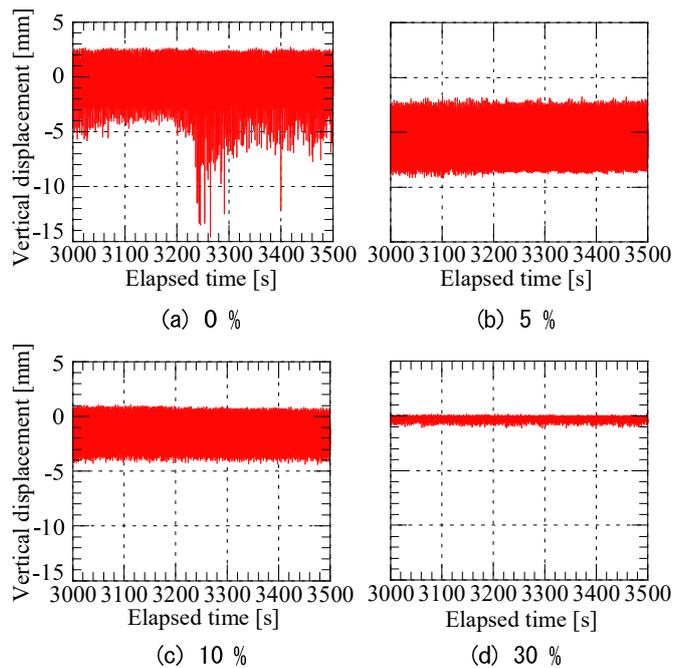


図-16 供試体表面の鉛直変位の時刻歴

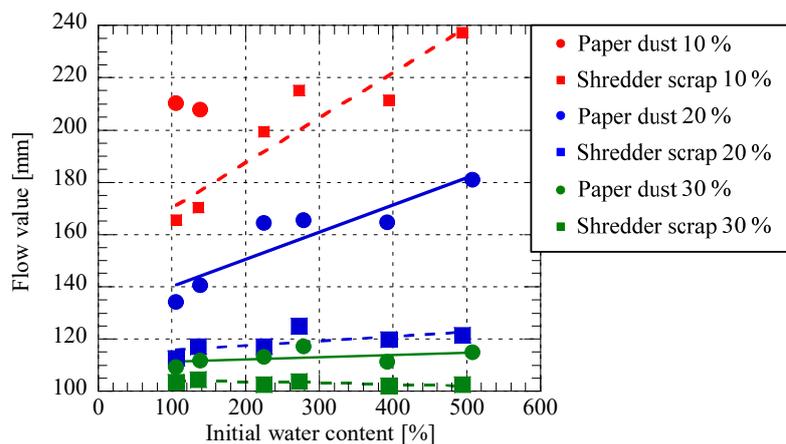


図-17 初期含水比とフロー値の関係

6. まとめ

本研究では、古紙を原料とする微細粉体を用いた処理泥土の強度特性と運搬性に関する検討を行った。本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- ① 古紙を原料とする微細粉体を添加・攪拌することで、含水比が 200 %を超えるような条件でも高含水泥土を処理することが可能である。
- ② 古紙を原料とする微細粉体を用いて高含水泥土処理を行う際の処理効果は、微細粉体の吸水率によって決まる。
- ③ 古紙を原料とする微細粉体を用いて高含水泥土を処理することにより、たとえコーン指数による強度増加が僅かであっても、フロー値が計測可能な状態にまで、泥土の流動性を低下させることが可能である。
- ④ 一般的なセメント系固化材による固化処理において指標とされるコーン指数 200 kN/m²に満たない強度であっても、フロー値が計測できる程度にまで流動性が低下していれば、運搬は十分に可能であると考えられる。
- ⑤ 泥土の初期含水比が分かれば、フロー値を基に、泥土を運搬可能にするうえで必要となる FCP の種類およびその添加率を算出することができる。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル 第4版，丸善出版，p.26, 2013.
- 2) 村田 修：流動化処理土工法，土木学会誌，Vol.87, No.4, pp.25-28, 2002.
- 3) 嘉門雅史，勝見 武：固体系廃棄物の地盤工学的有効利用と環境影響の概況，廃棄物学会誌，Vol.12, No.3, pp.140-149,

2001.

- 4) 森 雅人, 高橋 弘, 逢坂昭治, 堀井清之, 片岡 勲, 石井知征, 小谷謙二: 故紙破砕物と高分子系改良剤を用いた新しい高含水比泥土リサイクル工法の提案と繊維質固化処理土の強度特性, 資源と素材, Vol. 119, pp.155-160, 2003.
- 5) 古賀千佳嗣, 佐藤研一, 藤川拓朗: 軟弱地盤改良における竹の有効利用法の検討, 材料, Vol.65, No.9, pp.18-21, 2017.
- 6) 澤村康生, 矢野隆夫, 相原恵一, 西村正幸, 木村 亮: セルロースを主成分とする微細粉体による高含水泥土の力学特性変化, 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, No.15-4, pp.505-510, 2017.
- 7) 公益社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説 二分冊の一, 丸善出版, 2009.
- 8) 日本工業規格 JIS R 5201, 2015.
- 9) 白田浩幸, 椎名武夫, 石川 豊, 佐竹隆顕: 青果物の3次元輸送振動シミュレーションのための基礎研究, 農業施設, Vol.36, No.4, pp.215-222, 2006.
- 10) 一般社団法人セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル第4版, p.240, 2012.