

産業廃棄物を利用した流動化処理土に関する実験的研究

柴田 英明^{*1}, 田中 正智^{*2}

EXPERIMENTAL STUDY ON THE REUSE OF INDUSTRIAL WASTE IN LIQUEFIED SOIL STABILIZATION MATERIAL

Hideaki Shibata^{*1}, Masatomo Tanaka^{*2}

Abstract: Today's mass production and mass consumption society is a result of changes in the life style and social and economic activities of people, who have given priority to the pursuit of efficiency, comfort and convenience. Today, people are producing a huge amount of wastes while consuming a vast amount of resources. However, landfill has been a serious social issue especially in cities where the capacities of landfill sites are small. Thus, measures should be urgently implemented to reduce the amount of industrial wastes transported to landfill sites and promote recycling of the wastes. In order to increase the recycling of industrial wastes, attempts have been made to use the wastes as alternatives of soil materials as the method can treat a large quantity of wastes. In this study, the possibility of using various industrial wastes as materials for liquefied soil stabilization was investigated. Consequently, the following conclusions were obtained from the experimental results described above: 1) Coal ash and volcanic ash were found to be usable even intact as materials for liquefied soil stabilization. High strength can be expected by adjusting cement content. 2) Crushed stone powder can be used as materials that satisfy the standards of the Tokyo Metropolitan Government.

Key words: Liquefied soil stabilization, Lightweight Falling Weight Deflectometer (FWD), Coal ash, Unconfined Compression Strength

1. はじめに

今日の我々の社会・経済活動や生活様式の変化により、その効率性や快適性・利便性を追求するあまり、大量生産・大量消費型となり、多大な資源を消費しながら、多種、多量の廃棄物を排出するようになった。その廃棄物の15～20%が最終処分場に運ばれ、埋め立て処分されている。そして廃棄物の処理方法の一つとして、数はまだ少ないが、大阪湾フェニックスや東京湾お台場等の海面埋め立てで跡地利用を考慮した廃棄物処理が行われるようになってきた。しかし、その処理・処分問題が大きな社会問題となりつつあり、特に都市部では、最終処分場の埋め立て容量が限られており、ここに持ち込まれる産業廃棄物の減量化やリサイクルは早急に解決すべき問題となっている。一方、産業廃棄物のリサイクル

の観点から、大量に受入れ可能な地盤材料への代替についての試みが行われるようになってきた。本研究では、種々の産業廃棄物を流動化処理土の土質材料としての利用可能性について検討を試みた。流動化処理土とは土を泥水または水で解砕して流動化させた後、固化材を添加して安定化処理した人工土質材料である。この技術は、各ライフラインが縦横無尽に張り巡らされ、地下鉄駅舎等の複雑な形状の構造物が林立する都市部の地下空間において、自己充填性に富んだ埋め戻し材料として開発されたものである。

2. 産業廃棄物の工学的性質

試料として用いたものは、砕石粉、火山灰、石炭灰、浄水場発生土、コンクリート廃材、焼却灰である。火山灰⁵⁾は三宅島雄山が噴出したときのものであり、石炭灰は東京電力磯子発電所より産出したものでフライアッシュⅡ種と呼ばれるものである。砕石粉は岩石を砕いて山砂を作るときに出る石粉であり、神奈川県厚木付近で産出したものである。浄水場発生土は埼玉県三郷市三郷浄水場にてプレスフィルターとして排出したものであり、焼却灰は大阪湾フェニックスにて埋め立て処分されたも

^{*1} 国土館大学教授 理工学部理工学科
Department of Civil and Landscape Engineering, Kokushikan University, Tokyo

^{*2} 国土館大学技術職員 理工学部
Department of Civil and Landscape Engineering, Kokushikan University, Tokyo

表-1 各廃棄物の工学的性質

	密度(g/cm ³)	均等係数(%)	液性限界(%)	塑性限界(%)	塑性指数(IP)	最適含水比(%)	最大乾燥密度(g/cm ³)
碎石粉	$\rho_d=2.734\text{g/cm}^3$	27.50	30.09	16.97	$I_p=13.12$	15.0	$\rho_{dmax}=1.828\text{g/cm}^3$
浄水場発生土	$\rho_d=1.91\text{g/cm}^3$	39.10	NP	NP	$I_p=NP$	50.0	$\rho_{dmax}=1.005\text{g/cm}^3$
石炭灰	$\rho_d=2.13\text{g/cm}^3$	1.50	24.15	NP	$I_p=NP$	20.0	$\rho_{dmax}=1.531\text{g/cm}^3$
火山灰	$\rho_d=2.86\text{g/cm}^3$	7.37	25.3	16.29	$I_p=9.01$	15.0	$\rho_{dmax}=1.93\text{g/cm}^3$
コンクリート廃材	$\rho_d=2.53\text{g/cm}^3$	7.37	NP	NP	$I_p=NP$	25.0	$\rho_{dmax}=1.505\text{g/cm}^3$
焼却灰	$\rho_d=2.18\text{g/cm}^3$	6.00	NP	NP	$I_p=NP$	25.4	$\rho_{dmax}=1.445\text{g/cm}^3$

のを採取したものである。それぞれの廃棄物の物理的性質や工学的性質を表-1に示している。また、各廃棄物の粒度分布を図-1に示し、締め固め試験(JIS A 1210)結果を図-2に示している。実験に用いた試料は一般の土質材料(砂やシルト等)と比較するため、最大粒径を2mmとした。試料は火山灰以外は一度110℃で乾燥させた後、クラッシャーにて破碎して作成したものである。表-1より、火山灰は土粒子密度が2.86g/cm³と通常の土質材料より大きく、砂礫分に富み(72%)、細粒分の少ない(28%)粒度組成であるにもかかわらず、塑性状態を呈する含水領域がある。また、CaO含有率が約10%とセメントの65%に比べると1/6程度であるが、フライアッシュ(2.0~4.5%程度)等よりも豊富である。また、CaOと反応してセメント鉱物を形成するSiO₂やAl₂O₃も豊富に含んでいることから強度を発現しやすい材料といえる。一方、X線回析による組成分析の結果、安山岩に類似した組成であることが確認された。締め固め試験の結果、最大乾燥密度1.932g/cm³(最適含水比14.7%)と火山灰は非常に良く締まる材料であることが確認された。さらに一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った結果、固化材を添加せずとも十分自立する供試体が作成でき、 $q_u=128\sim172\text{kN/m}^2$ の強度が得られた。碎石粉は密度が2.73g/cm³と大きく、塑性指数が計測できる程度の細粒分を含む材料であり、締め固め時の最大乾燥密度も1.83g/cm³(最適含水比14.7%)と良く締まる材料である。石炭灰は密度が小さく2.13g/cm³を示しており、締め固め時の最大乾燥密度は1.53g/cm³と少し低めの値を示している。焼却灰やコンクリート廃材は密度が2.58, 2.53g/cm³と石炭灰よりも大きいが豊浦砂(2.64)よりも少し低い値であり、締め固め時の最大乾燥密度はそれぞれ1.48, 1.51g/cm³を示している。浄水場発生土はもっとも密度が低く、1.91g/cm³であり、締め固めを行っても最大乾燥密度が1.01g/cm³と低い値を示している。焼却灰は石炭灰同様密度が低く、2.18g/cm³を示しており、締め固め時の最大乾燥密度が1.45g/cm³である。

3. 流動化処理土への適用

3.1 品質基準

現在、流動化処理材に要求される一般的な品質は、各

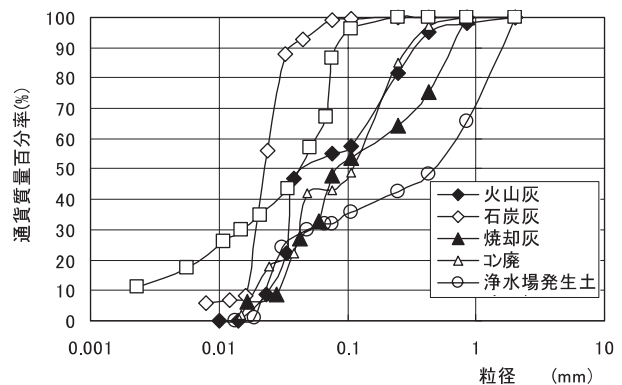


図-1 粒径加積曲線

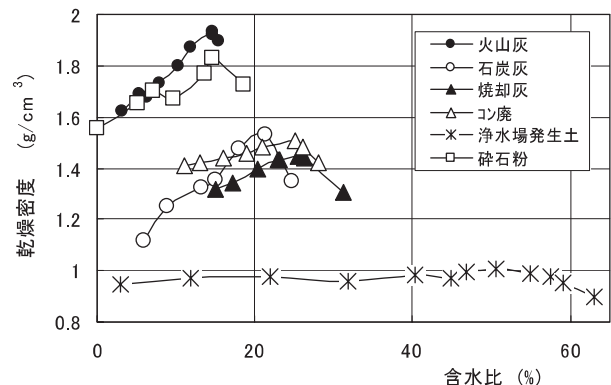


図-2 締め固め曲線

官公庁によって異なる^{1) 2) 3)}が、次の3項目が一般的である。流動性(フロー)、材料分離抵抗性(ブリージング)、固化後の強度(一軸圧縮強さ)である。以下に東京都、国土交通省、旧日本道路公団についてそれぞれ記述する。

(1) 東京都要綱²⁾

東京都では速硬型と遅硬型に分け、それぞれ基準を設けているが、本研究は遅硬型を参考とした。

フロー値 : 180~300mm

ブリージング率 : 1%未満

一軸圧縮強さ : 7日後 127.5kN/m²以上

: 28日後 549.4kN/m²以下

(2) 国土交通省¹⁾

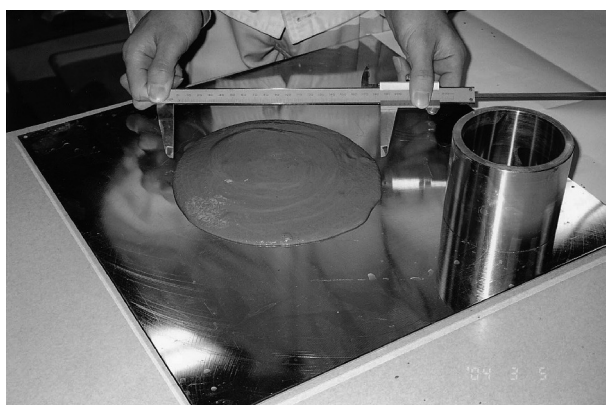


写真-1 フロー試験



写真-2 ブリージング試験

フロー値 : 160mm 以上 (圧送できる範囲)

ブリージング率 : 1~3%未満 適用用途別に設定

一軸圧縮強さ : 28日後 適用地点に応じて設定

(3) 旧日本道路公団³⁾

まだ、旧日本道路公団では、基準化されていないが目安として次の通りである。

フロー値 : 140~200mm (ポンプ圧送の可能性)

一軸圧縮強さ : 300~1000kN/m²

湿潤密度 : 1.39~1.88g/cm³

3.2 配合実験

本報告では、この流動化処理土としての産業廃棄物の適用性を確認することを目的とし、材料評価のため、下記の三つの試験を行った。

フロー試験 : JHS A 313 (8cm × 8cm 円筒シリンダー) に準じて配合直後に計測する。(写真-1 参照)

ブリージング試験 : JSCE-F-522 に準じて3時間後と20時間後に計測する。(写真-2 参照)

一軸圧縮試験 : JIS A 1108 に準じて7日後、28日後において3検体ずつ実施する。

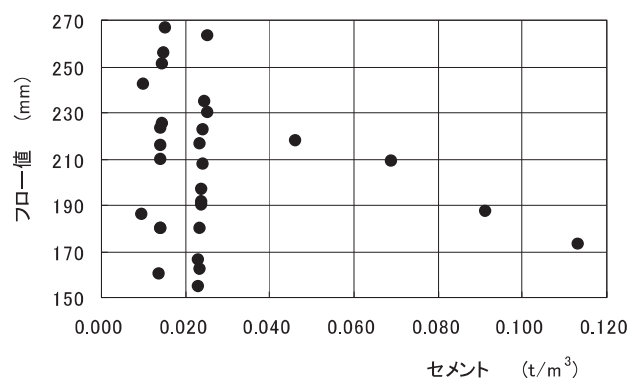


図-3 セメント量とフロー値との関係 (石炭灰)

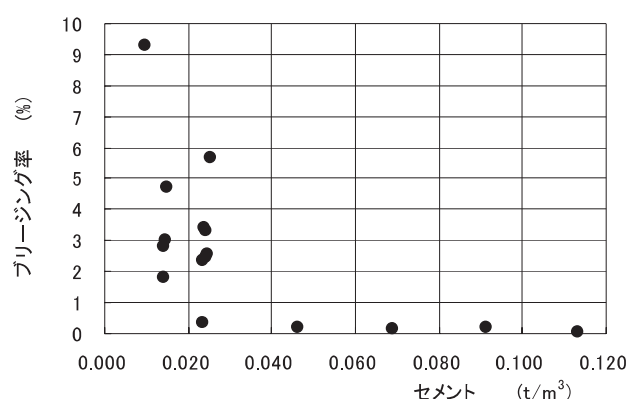


図-4 セメント量とブリージング率との関係 (石炭灰)

4. 実験結果

各廃棄物を単純に水と混合して泥水のでき具合を見ると、石炭灰、火山灰、砕石粉は泥水を作ることができたが、浄水場発生土、焼却灰、コンクリート廃材では泥水を作ることができなかった。これらの材料には石炭灰や木節粘土を添加して泥水を作ることにした。各廃棄物によって試験結果が異なるので、各廃棄物別に実験結果を報告する。

4.1 石炭灰

石炭灰とセメントをそれぞれの量で混ぜた場合の配合実験結果を図-3~5にそれぞれ示している。なお、セメント量は、流動化処理材1m³当たりの量をt(トン)で表示したものである。図-3はセメント量とフロー値との関係、図-4はセメント量とブリージングとの関係、図-5はセメント量と一軸圧縮強さとの関係を示している。図-3よりセメント量とフロー値の関係をみると、同じセメント量のところで大きさの違うフロー値が生じているが、これは泥水密度の違いによるもので、泥水密度が大きいほど、フロー値が大きくなることを示している。一方、同一泥水密度では、セメント量が増加するとフロー値が減少していくことを示している。また、セメント

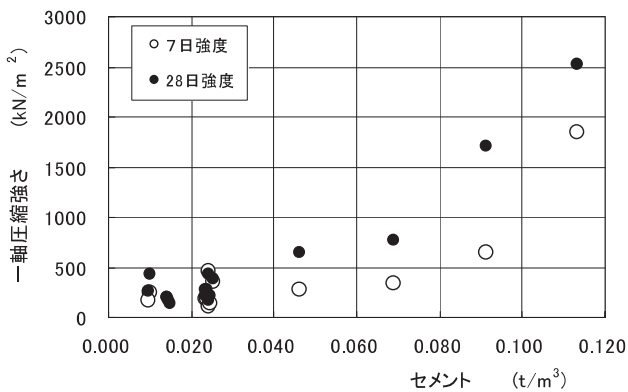


図-5 セメント量と一軸圧縮強さ (石炭灰)

量が 0.12t/m^3 のとき、フロー値が 170mm を示しており、このセメント量 0.12t/m^3 以下の範囲では、十分ポンプ圧送可能なセメント量であることがわかる。図-4よりセメント量とブリージング率の関係を見ると図-3と同様にセメント量が 0.02t/m^3 前後でばらついているが、これも泥水密度の違いによるものである。図より、セメント量が 0.03t/m^3 以下では、ブリージング率が1%以上であり、材料分離を生じるが、セメント量が 0.03t/m^3 以上ではブリージング率が1%以下であり、材料分離を起こしにくいことがわかる。図-5からセメント量と一軸圧縮強さの関係を見るとセメント量が増加するほど一軸圧縮強さも増加することがわかる。セメント量 0.115t/m^3 で材齢7日の一軸圧縮強さが 1800kN/m^2 、材齢28日の大きさが 2500kN/m^2 をそれぞれ示している。以上の結果より石炭灰は、少ないセメント量でも強度を発現しやすく、流動性に富んだ材料であることがわかる。また、強度を要求する施工現場でも十分適用できることがわかる。

4.2 火山灰

火山灰とセメントをそれぞれの量で混ぜた場合の配合実験結果を図-6～8にそれぞれ示している。図-6はセメント量とフロー値との関係、図-7はセメント量とブリージング率との関係、図-8はセメント量と一軸圧縮強さとの関係を示している。図-6よりセメント量とフロー値の関係を見ると、同一泥水密度でフロー値が 300mm 程度の泥水にセメント量を変えてフロー値を求めた結果、セメント量 0.101t/m^3 でフロー値 160mm が得られた。このことから $0.008\sim 0.101\text{t/m}^3$ のセメント量の範囲では、ポンプ圧送可能なフロー値 160mm 以上が得られることがわかる。図-7よりセメント量とブリージング率の関係を見ると、2つの傾向が見られ、セメント量が増加するとブリージングが減少していくことがわかる。また、ほとんどのセメント量で1%以上のブリージング率を示しており、この材料では、流動化調整剤の添加により、ブリージングの抑制を考慮する必要がある。

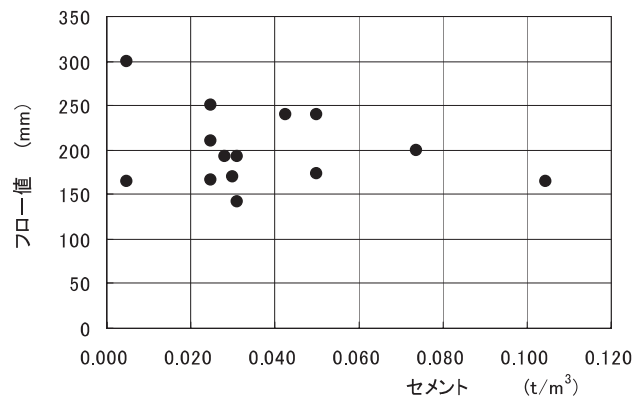


図-6 セメント量とフロー値との関係 (火山灰)

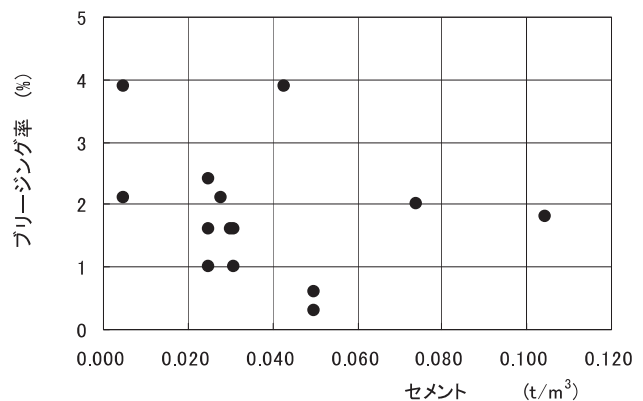


図-7 セメント量とブリージング率との関係 (火山灰)

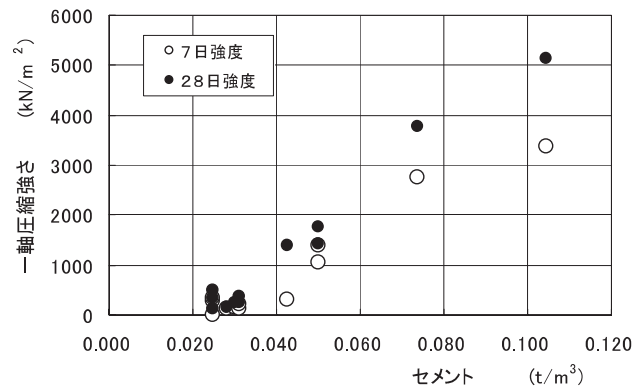


図-8 セメント量と一軸圧縮強さとの関係 (火山灰)

図-8よりセメント量と一軸圧縮強さとの関係を見ると、セメント量が増加すると一軸圧縮強さも増加することがわかる。即ち、材齢7日の一軸圧縮強さは、セメント量がわずかに 0.03t/m^3 と少なくとも 200kN/m^2 とすぐに強度を発現しており、また、材齢28日の一軸圧縮強さはセメント量 1.105t/m^3 で 5000kN/m^2 と大きな強度を発現することがわかる。次に、土質材料と水との配合比が異なり、単純にセメント量だけでは比較できないので、これらの結果をもとに、流動化処理土の練り上がり性状指標のひとつであるC/eと3つの品質項目との関係を図-9～

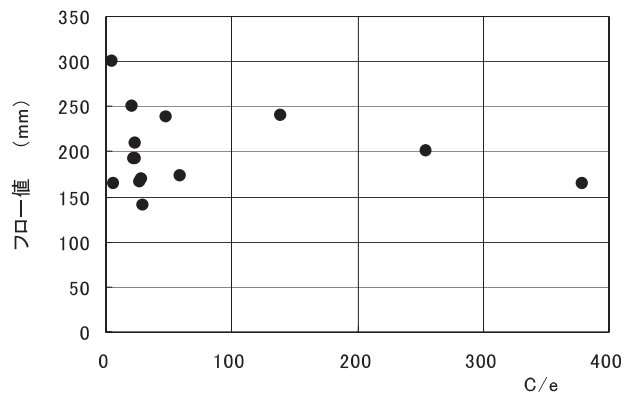


図-9 C/eとフロー値の関係（火山灰）

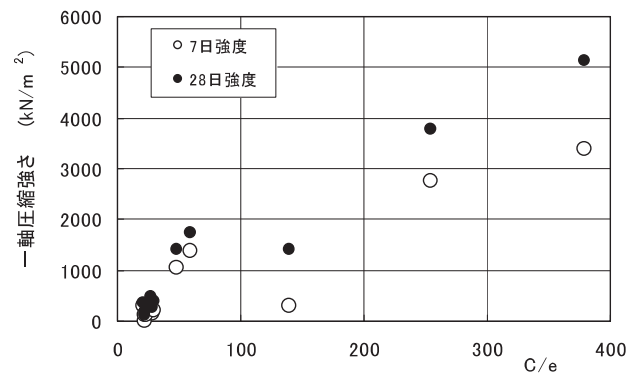


図-11 C/eと一軸圧縮強さの関係（火山灰）

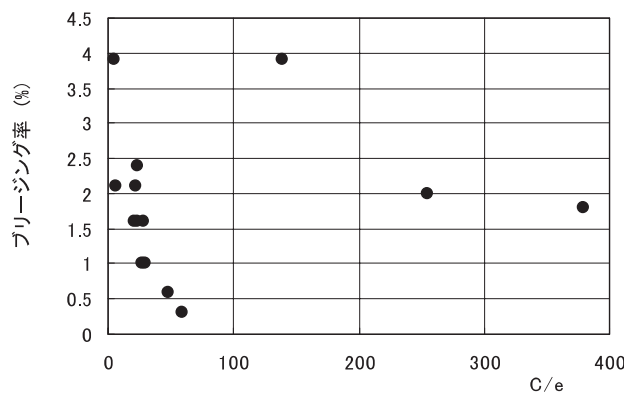


図-10 C/eとブリージング率の関係（火山灰）

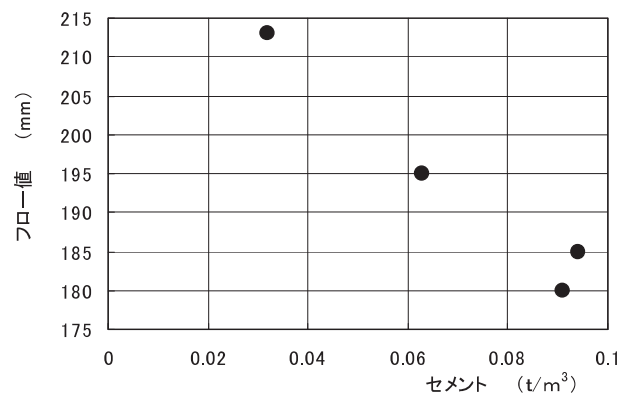


図-12 セメント量とフロー値との関係（砕石粉）

11に示している。なお、C/eとは固化材料（C）と土の間隙（e）との比で表した指標で、固化材のセメンテーション効果と土粒子の構造的な強さを合わせて表現した指標である。図-9より、C/eとフロー値との関係が、2つの傾向を示すことがわかる。即ち、 $C/e < 60$ の範囲で、C/eが増加すると、フロー値が急激に減少するものと、 $60 < C/e < 400$ の範囲でC/eが増加するにつれてフロー値が徐々に減少するものに分けることができる。一方、図-10より、C/eとブリージングとの関係も2つの傾向を示すことが顕著に表れている。即ち、 $C/e < 60$ の範囲では、C/eの増加に従い、ブリージング率が急激に減少する傾向を示すものと $60 < C/e < 400$ の範囲ではC/eの増加に従い、ブリージング率が徐々に減少する傾向を示すものがある。また、図-11よりC/eに対する一軸圧縮強さについては、 $C/e < 400$ の範囲で材齢7日も28日のどちらもC/eの増加に伴い、顕著に増加することを示している。

4.3 砕石粉

砕石粉とセメントをそれぞれの量で混ぜた場合の配合実験結果を図-12と13にそれぞれ示している。図-12はセメント量とフロー値との関係、図-13はセメント量と一軸圧縮強さとの関係を示している。砕石粉ではこの程

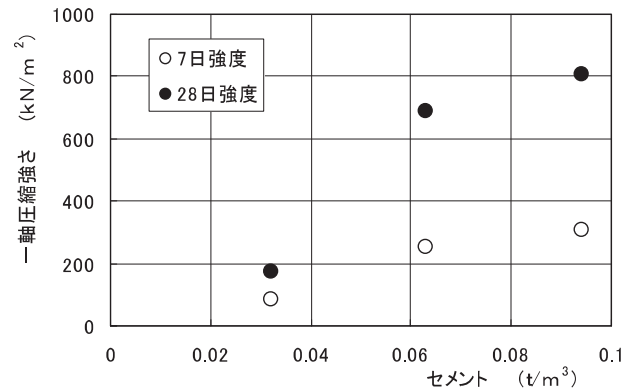


図-13 セメント量と一軸圧縮強さとの関係（砕石粉）

度のセメントを配合してもブリージングが生じないことがわかった。図-12よりセメント量とフロー値の関係をみるとセメント量が 0.01 t/m^3 以下ではフロー値が 180 mm 以上となることがわかる。即ち、このセメント量の範囲ではポンプ圧送可能な材料であることを示している。図-13より、セメント量と一軸圧縮強さの関係から、セメント量が 0.03 t/m^3 以上になると、材齢7日の一軸圧縮強さが東京都基準の 12 kN/m^2 以上を示し、材齢28日の強さもセメント量の増加に伴い増加し、セメント量 0.095 t/m^3 で 800 kN/m^2 を示すことがわかる。

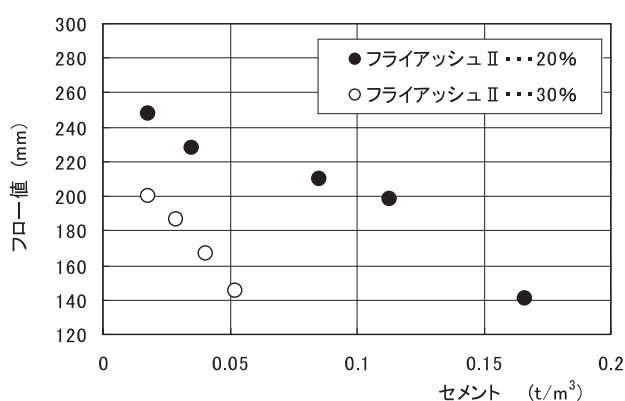


図-14 セメント量とフロー値との関係 (浄水場発生土)

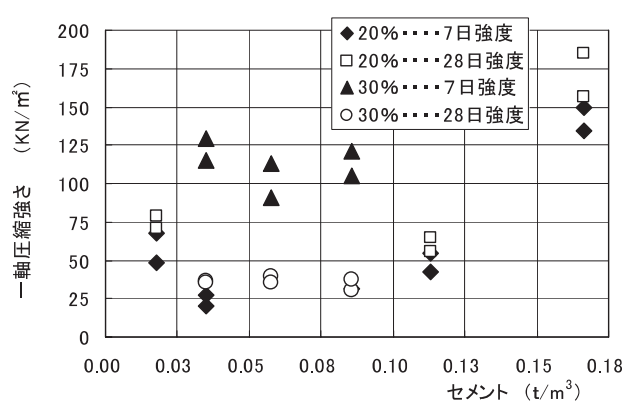


図-16 セメント量と一軸圧縮強さとの関係 (浄水場発生土)

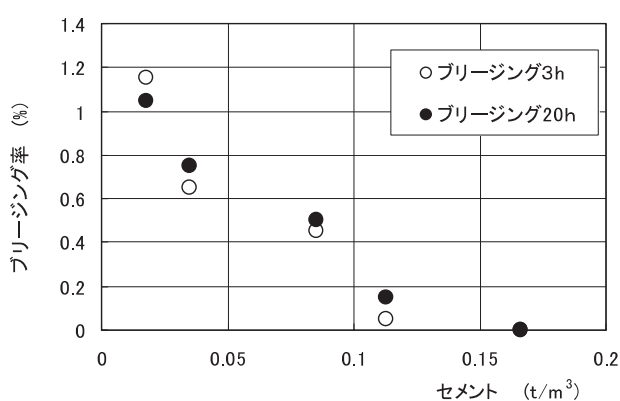


図-15 セメント量とブリージング率との関係 (浄水場発生土)

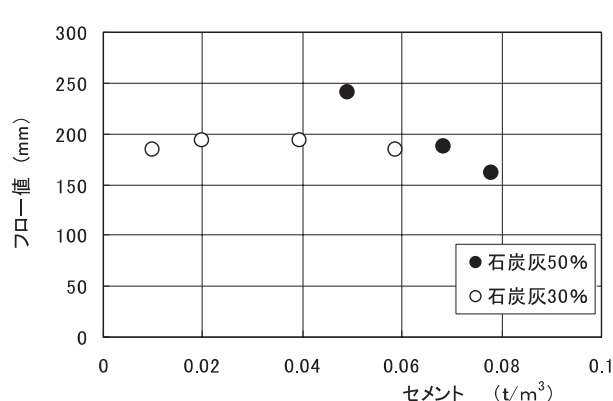


図-17 セメント量とフロー値との関係 (焼却灰)

4.4 浄水場発生土

浄水場発生土とセメントをそれぞれの量で混ぜた場合の配合実験結果を図-14～16にそれぞれ示している。図-14はセメント量とフロー値の関係、図-15はセメント量とブリージングとの関係、図-16はセメント量と一軸圧縮強さとの関係を示している。図-14より、石炭灰を20%混合した場合、セメント量の増加に伴い徐々にフロー値が減少していき、セメント量が0.15tまでは、フロー値160mm以上を保つことがわかる。一方、石炭灰を30%混合した場合はわずかなセメント量の増加でフロー値が小さくなってしまったことがわかった。図-15より、ブリージングについては、どのセメント量においてもほとんどが1%未満であることから、これらの配合ではあまりブリージングを考慮する必要がないことが分かった。図-16より、石炭灰を20%配合した場合、セメント量を0.13(t/m³)以上添加しないと、100kN/m²以上の強度を持たないことがわかる。一方、石炭灰を30%配合した場合、7日強度については、どのセメント量においても東京都の基準値127.5kN/m²程度の強度を示すが、28日強度については、7日強度の半分にまで、低下してしまい、この配合では強度の期待できない流動化処理土になってしまうことがわかった。浄水場発生土は、密度が1.91g/cm³と非常に小さく、また植物性の有機分を多量に含んでお

り、このことも、強度低下の要因の一つと考えられる。

4.5 焼却灰

単体では泥水の作成できない焼却灰に石炭灰を混合することにより、流動化処理土としての利用の可能性について調査した。石炭灰と焼却灰を重量比でそれぞれ1:1(混合材料1とする)、7:3(混合材料2とする)で混合した材料について所定の配合試験を行った結果をそれぞれ図-17～19に示している。図-17より、流動性については、混合材料のどちらも、このセメント量の範囲では、フロー値が160mm以上を示しており、十分流動性を持つ材料であると判断できる。次に図-18より、ブリージングについては、どちらの混合材料も2%以下と小さく、材料分離を起こしにくい材料となっていることが確認できる。さらに、図-19より、固化後の強度については、どちらの混合材料においても、7日後のquが127kN/m²以上あり、また、28日後のquが250kN/m²以下と東京都の基準内の強度を持つことが確認できる。

4.6 コンクリート廃材

焼却灰で30%程度の粘土分配合では、強度的に十分な強さが発揮しないことがわかったので、コンクリート廃材では粘土分30%と50%のそれぞれ配合した実験を

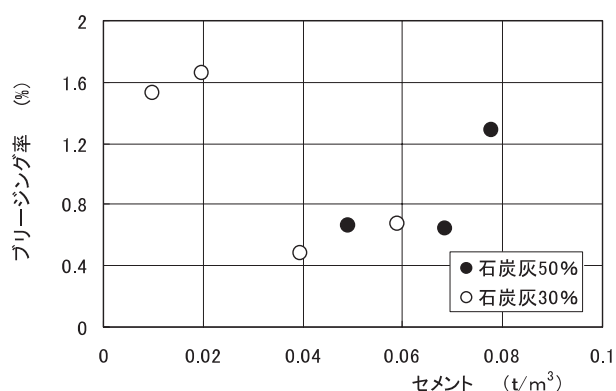


図-18 セメント量とブリージング率との関係 (焼却灰)

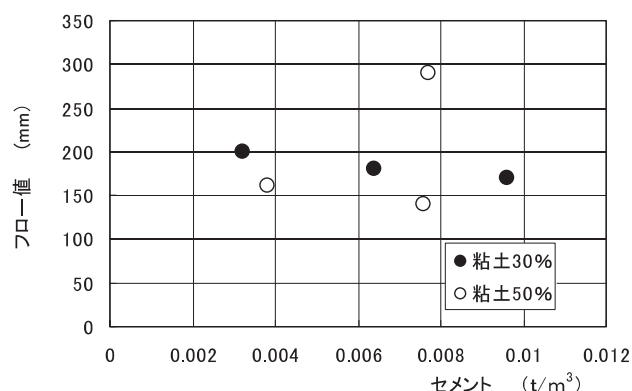


図-20 セメント量とフロー値との関係 (コンクリート廃材)

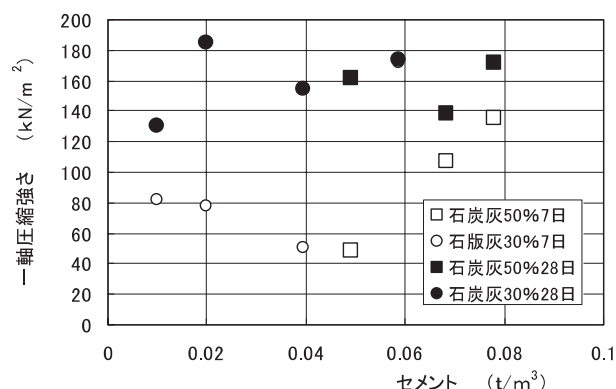


図-19 セメント量と一軸圧縮強さとの関係 (焼却灰)

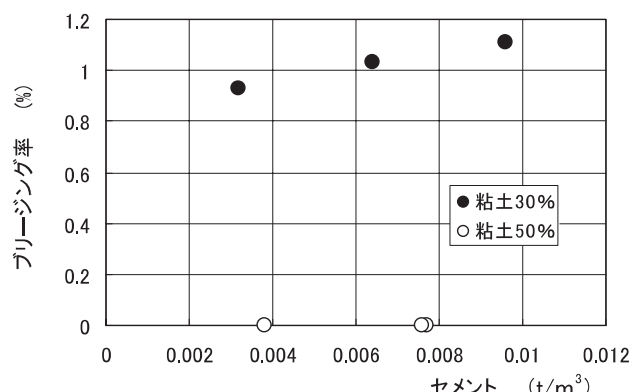


図-21 セメント量とブリージング率との関係 (コンクリート廃材)

行った。その結果を図-20～22に示している。図-20より、セメントの増加に従ってフロー値は小さくなる傾向を示しているが、本節粘土を50%配合した方がフロー値は、はるかに小さくなるのがわかる。図-21より、20時間後のブリージングを比較すると本節粘土を30%配合した方のブリージングは約2%を示しているが、本節粘土を50%配合した方は、ほとんどブリージングが0であり、50%配合の方がブリージングを起こしにくいことがわかる。図-22より、強度については、7日強度はどの配合でもほとんど強度は出ないが、28日強度では、どの配合でもセメント量の増加に伴い、強度も増加することがわかる。また、本節粘土30%配合では $c = 0.01\text{t/m}^3$ でやっと、人が歩ける程度の強さ 100kN/m^2 を越しているが、配合50%では、 $c = 0.01\text{t/m}^3$ と少なくとも、十分 150kN/m^2 を越すことがわかる。

4.7 各材料の強さの比較

廃棄物単体で泥水のできる材料について強さに関して比較するため、図-23に各材料におけるセメント量と材齢28日の一軸圧縮強さとの関係を示している。図-23より、碎石粉の強さを1とすると、石炭灰の強さが約2倍、火山灰の強さが約5倍となることがわかる。 $0.03 < c < 0.12\text{t/m}^3$ の範囲では、この3つの材料はポンプ圧送可能なフロー値を示すことから、それぞれの用途に応じて、

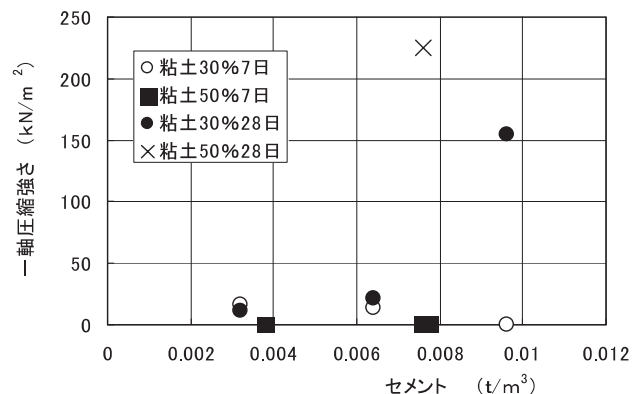


図-22 セメント量と一軸圧縮強さとの関係 (コンクリート廃材)

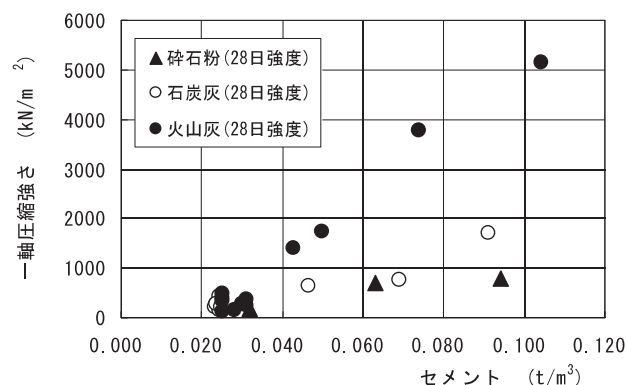


図-23 セメント量と一軸圧縮強さとの関係

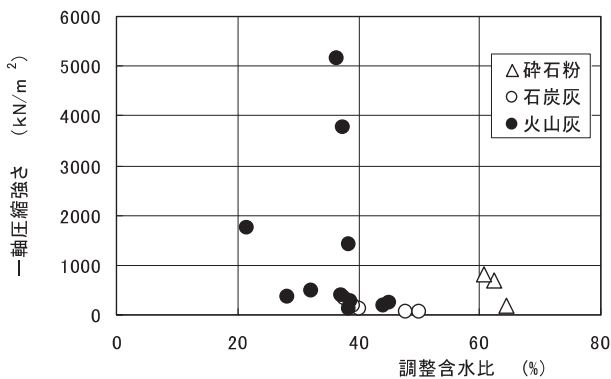


図-24 調整含水比と一軸圧縮強さとの関係

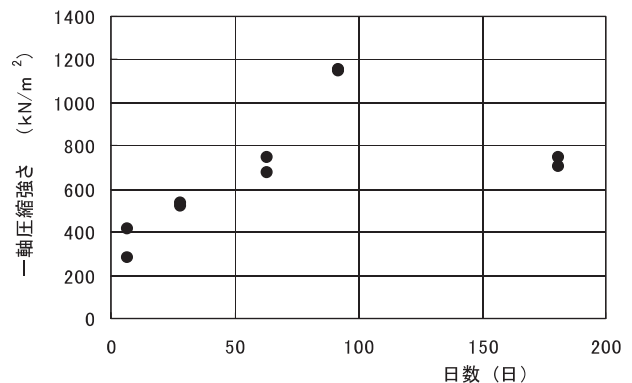


図-25 一軸圧縮強さ

使用できる材料であることがわかる。さらに、各材料の配合に必要な水の量（調整含水比）と材齢28日の一軸圧縮強さとの関係を図-24に示している。この図より、砕石粉の調整含水比が60～65%，石炭灰で40～50%，火山灰で30～40%とそれぞれ材料によって配合に必要な水の量が異なることがわかる。

5. 土槽実験による検証

数種類の産業廃棄物について流動化処理材への適用範囲について調査してきたが、ここで石炭灰を例として、実際の土槽を作成し、その強度の経日変化を調査したので、その結果を報告する。土槽は直径90cm深さ30cmとし、材料の配合は4.1項での実験結果を参考にして決定した。フロー値が210mm程度である。

石炭灰 : 1128.7kg/m³

水 : 470.7kg/m³

高炉セメント : 91.7kg/m³

写真-3は作成時の土槽である。図-25に一軸圧縮試験結果を示している。流動化処理材について東京都の基準では作成後7日と28日の強度のみでよいが、他への利用も考慮して半年間調査した。図-25より、7日で347kN/m² 28日で520kN/m²と東京都の基準内の強度を示している。さらに2ヶ月で709kN/m² 3ヶ月で1165kN/m²と強度増加が生じている。一方、6ヶ月で727kN/m²と3ヶ月目よりも強度低下が生じることが分かる。

6. 結論及び考察

上記の実験結果より、次のことが得られた。

1. 石炭灰はそのままでも、十分流動化処理土の土質材料に成り得ることがわかる。更にセメント量の調整により、高強度の期待できる材料であることがわかる。
2. 火山灰は材料分離を考慮して使用すれば、高強度の流動化処理材になり得る。



写真-3 土槽実験

3. 砕石粉は東京都の基準を満たす材料として使用できる。
4. 今までの実験では、廃棄物が保持している有害物質の溶出についての検討を行っていない。今後、さらに実際の現場等での対応を深めることにより、廃棄物の利用範囲を検討し進める必要がある。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省，流動化処理土利用技術マニュアル，pp1-72，1997，12月。
- 2) 松村真人，阿部忠行，杉本隆男，廣島実，土井内元，建設汚泥の流動化処理土への再生，平成10年度都土木年報，pp73-84，1998。
- 3) 地盤工学会北海道支部，火山灰地盤の工学的性質の評価法に関するシンポジウム，pp219-244，2002.9月。
- 4) 久野悟郎編著，土の流動化処理工法～建設発生土・泥土の再生利用技術，技報堂出版（1997）
- 5) 柴田英明他，三宅島火山災害の復旧に関する提案－火山灰の流動化処理材への利用－，土と基礎，51-9，2003。
- 6) 久野悟郎他，流動化処理土の一軸圧縮強さに関する2，3の考察，第33回地盤工学研究発表会1998。