

## 産業廃棄物による埋立て地盤の液状化特性

柴田 英明\*・田中 正智\*\*

## Liquefaction Characteristics of Industrial Waste Fill Materials

Hideaki SHIBATA\*, Masatomo TANAKA\*\*

**概 要：**日本の都市部における産業廃棄物や一般廃棄物の22%が埋立て処分されているが、これらの埋立て処分場に対する跡地利用を考慮した地震対策は、ほとんど行われていない。本研究では、4つの産業廃棄物と火山灰を対象とした繰り返し三軸試験により、液状化特性について調査した。その結果、石炭灰や火山灰は豊浦砂よりも液状化を起こしやすいが、コンクリート廃材、焼却灰や浄水場発生土は豊浦砂よりも液状化を起こしにくいことがわかった。また、石炭灰に5%でも細粒分（0.075 mm 以下）を混ぜると、液状化を起こしにくくなることがわかった。

## 1. ま え が き

廃棄物は、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・利便性を追求する余り大量生産・大量消費型となり、多大な資源を消費しながら多種・多量に排出するようになった。人々の生活に伴って日々発生する一般廃棄物の量は2001年の建設白書によると、年間約5千万トンにもなり、これに加えて、産業廃棄物の排出量は全国で年間およそ4億トンにも達している。その中の一般廃棄物では、総排出量4935万トンのうち220万トンが資源化されるが、それ以外は直接あるいは大部分は焼却処理され、1500万トンが埋立て処分されている。これに対し、産業廃棄物の年間排出量3億9700万トンは、その約40%が中間処理によって減量され、39%が再生利用され、21%に相当する約8400万トンが最終処分されている。すなわち、毎年一般廃棄物、産業廃棄物の合計9900万トンもの量が毎年最終処分場に持ち込まれる勘定になり、処理方法で問題になっている。そして、廃棄物の処理方法の一つとして、最近になり、数は少ないが、大阪湾フェニックスや東京湾お台場等の海洋埋立てで、跡地利用を含めた廃棄物処理が行われてきた。また、一方、わが国は他国に比べると地震が多く、過去に大きな被害を受けている。それらの被害の中には、埋立て地盤の液状化によるものも少なくない。地震によって地盤に液状化が生じ、そのためにひどい被害がもたらされることがあるということが認識されたのは昭和39年の新潟地震以降である。過去の地震に際して、地中から砂や泥が水と一緒に噴き出

す現象が観察されており、低地など軟弱な地盤での地震被害を大きくすることがあった。また、新しく堆積した地盤・埋立て地盤などで発生することが多く、ときにはアースダムや鉱さいダムなど大規模な人工構造物の破壊をはじめ大きな被害を引き起こすことがある。このような事例がいくつか起き、埋立て地盤で液状化が発生しやすいことがわかり、そして埋立て地盤による液状化の研究が行われるようになった。しかし、盛土に対する耐震補強も進められているが、廃棄物による埋立て地盤の耐震性についての研究は、ほとんど行われていないのが現状である。本研究では、コンクリート廃材、石炭灰、焼却灰、浄水場発生土の4つの産業廃棄物と火山灰を地盤材料とし、これらの材料を埋立て地盤と想定した場合の液状化特性を調べることを目的とした。なお、石炭灰は東京電力磯子発電所産であり、フライアッシュⅡ種と呼ばれるものであり、浄水場発生土は埼玉県三郷浄水場より採取したものである。さらに、焼却灰は大阪湾フェニックスにて埋立て処分されたものを採取したものであり、火山灰は三宅島で噴出したものである。

## 2. 産業廃棄物の工学的性質

表1に各産業廃棄物の工学的性質を示している。また、各廃棄物の粒度分布を図1に、締固め試験結果を図2,3に示している。実験に用いた産業廃棄物の粒径は、将来的に砂の代替として考慮し、最大粒径を2 mmとした。各材料の密度（JIS A 1202に準ずる）は火山灰が最も大きく、 $\rho_s=2.86 \text{ g/cm}^3$ を示しており、コンクリート廃材や焼却灰が $2.53\sim 2.58 \text{ g/cm}^3$ とやや砂よりも小さくなっている。石炭灰は $2.12\sim 2.23 \text{ g/cm}^3$ と非常に小さく、浄水場発生土はさらに $1.85\sim 2.1 \text{ g/cm}^3$ と

\* 国土館大学理工学部 教授

\*\* 国土館大学理工学部 技術職員

表1 各産業廃棄物の工学的性質

試料	備考						
コンクリート廃材	$\rho_s = 2.53 \text{ g/cm}^3$	$U_c = 7.36$	Np	$\phi = 37.5^\circ$	$\rho_{dmax} = 1.51 \text{ g/cm}^3$	$\omega_{opt} = 24\%$	$S_r = 73\%$
焼却灰	$\rho_s = 2.58 \text{ g/cm}^3$	$U_c = 6.00$	Np	$\phi = 41^\circ$	$\rho_{dmax} = 1.48 \text{ g/cm}^3$	$\omega_{opt} = 25\%$	$S_r = 85\%$
石炭灰	$\rho_s = 2.23 \text{ g/cm}^3$	$U_c = 1.84$	Np	$\phi = 31^\circ$	$\rho_{dmax} = 1.33 \text{ g/cm}^3$	$\omega_{opt} = 23\%$	$S_r = 74\%$
火山灰	$\rho_s = 2.86 \text{ g/cm}^3$	$U_c = 7.36$	$I_p = 9.04$	$\phi = 36^\circ$	$\rho_{dmax} = 1.91 \text{ g/cm}^3$	$\omega_{opt} = 14\%$	$S_r = 73\%$
浄水場発生土	$\rho_s = 1.91 \text{ g/cm}^3$	$U_c = 39.1$	Np	$\phi = 45^\circ$	$\rho_{dmax} = 1.01 \text{ g/cm}^3$	$\omega_{opt} = 50\%$	$S_r = 79\%$

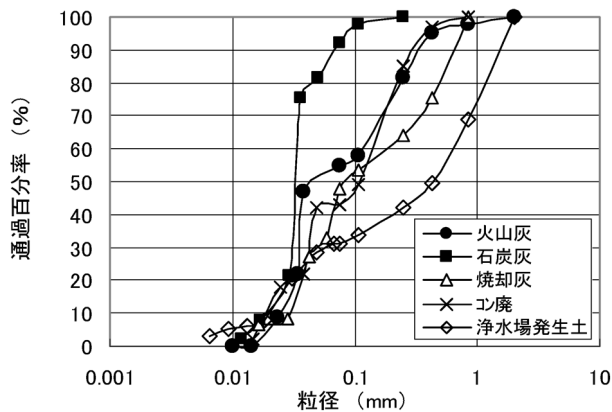


図1 各廃棄物の粒度分布

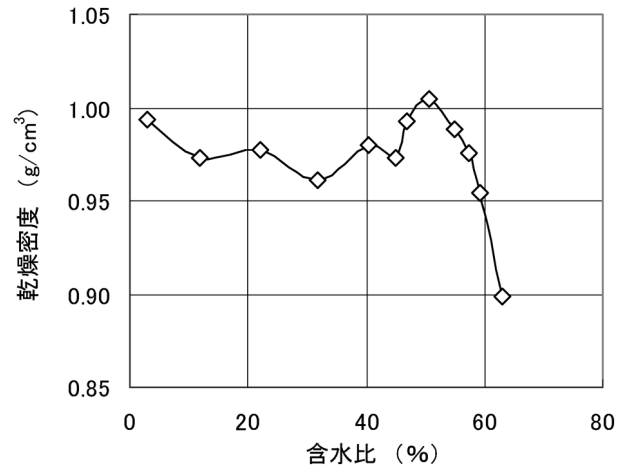


図3 浄水場発生土の締固め曲線

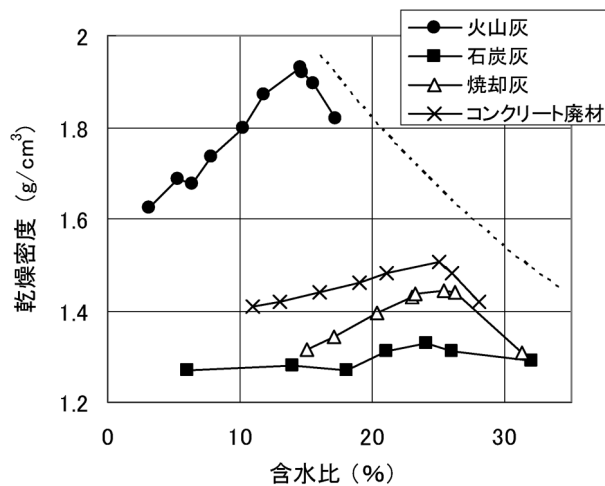


図2 各廃棄物の締固め曲線

小さい値を示している。石炭灰はもともと石炭を燃焼させた後の灰であり、浄水場発生土は河川に流れ込んでくる植物性のものがたくさん含まれることから、密度の低い材料となると推測できる。一方、液性限界塑性限界試験 (JIS A 1205に準ずる) については、コンクリート廃材、焼却灰、石炭灰、浄水場発生土がそれぞれ塑性限界ができず、NP (非塑性土) となっているのに、火山灰は見た目はさらさらした状態であるにもかかわらず、塑性限界ができ、 $I_p = 9.04$ を示している。次に突固めによる締固め試験 (JIS A 1210に準ずる) からはコンク

リート廃材で最大乾燥密度 ( $\rho_{dmax}$ )  $1.51 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比 ( $\omega_{opt}$ ) 24%飽和度 ( $S_r$ ) 73%、焼却灰で最大乾燥密度  $1.48 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比25%飽和度85%、石炭灰で最大乾燥密度  $1.33 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比23%飽和度74%、火山灰で最大乾燥密度  $1.91 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比14%飽和度73%とそれぞれ示しており、コンクリート廃材や火山灰はそのままでも十分路盤材や路床材として使用できるほどの密度を示すことがわかる。しかし、浄水場発生土は最大乾燥密度  $1.005 \text{ g/cm}^3$  最適含水比50.7%ときわめて低い値を示している。一方、これらの最適含水比付近の含水量を持つ廃棄物について、標準エネルギーで締固めて作成した供試体について、非圧密非排水条件で三軸圧縮試験 (JGSに準ずる) を行った結果、コンクリート廃材でせん断抵抗角  $37.5^\circ$  石炭灰でせん断抵抗角  $31^\circ$  焼却灰でせん断抵抗角  $41^\circ$  火山灰でせん断抵抗角  $36^\circ$  浄水場発生土でせん断抵抗角  $45^\circ$  を示している。この強度特性からも、コンクリート廃材や火山灰はほぼ豊浦砂のせん断抵抗角  $38^\circ$  に近い値を示すことがわかる。一方、浄水場発生土が遥かに砂粒子よりも強いという結果を示しているのは、浄水場発生土には植物性繊維の存在により、みかけ上の強度が大きくなったためと考えられる。

### 3. 繰返し三軸試験の概要

本試験は、地震時の地盤における液状化現象を室内で再現しようとするものである。実験装置に金属製の二つ割りモールドと厚さ0.2 mmのメンブレンを設置し、空中落下方式で試料をいれ、負圧法（負圧29.4 kN/m<sup>2</sup>）を用いて直径5 cm 高さ10 cmの供試体を作成する。その後、モールドを除去し、圧力円筒（セル）をかぶせて、セル内部を水で満たす。供試体に炭酸ガスを10分程度注入した後、脱気水を通水する。背圧を196 kN/m<sup>2</sup>まで加え、B値が0.95以上であることをチェックして、供試体が飽和した状態を確認し、有効拘束圧137.2 kN/m<sup>2</sup>で等方圧密する。排水量が落ち着いたのを確認してから非排水状態にして、応力制御による振動数0.25 Hzの繰返し荷重を正弦波で供試体に加えて液状化を発生させる。荷重発生方法は空圧制御方式である。液状化と判断する目安は、過剰間隙水圧が有効拘束圧137.2 kN/m<sup>2</sup>に等しくなったときを液状化とみなした。

### 4. 実験結果

#### 4.1 各廃棄物の液状化特性

はじめに、豊浦砂を例として、実測値をそれぞれ図4～6に示している。図4は時間と軸ひずみの関係を、図5は時間と間隙水圧の関係を、図6は時間と偏差応力の関係をそれぞれ示している。過剰間隙水圧が有効拘束圧137.2 kN/m<sup>2</sup>に等しくなったときを液状化が生じた時間と判断している。

つぎに、砂の液状化に対する抵抗力は、縦軸に繰返しせん断応力（ $\rho_d$ ）を有効拘束圧（ $2\rho_0'$ ）で除した繰返しせん断応力比（応力比と呼ぶ）を、横軸に繰返し回数を対数目盛で示した片対数グラフに表示するのが一般的である。ある繰返し回数で液状化を表示させるのに必要な

繰返しせん断応力は、有効拘束圧に比例するため、この応力比のグラフを用いれば、一義的に液状化抵抗力を表すことができる。応力比は一般に液状化強度比と呼ばれている。各廃棄物における応力比と繰返し回数の関係を図7, 8に示している。図7より、応力比と繰返し回数との関係は、どの廃棄物でも、応力比が大きいほど、繰返し回数が少なくなることを示している。即ち、応力比が大きいほど、液状化を起こしやすいが、ある応力比まで下げていくと、液状化を起こしにくくなるのがわかる。それぞれの廃棄物に対するその応力比は、火山灰0.063, 焼却灰0.102, コンクリート廃材0.111, 石炭灰0.068である。一方、図8より、石炭灰と浄水場発生土はどちらも繰返し回数が増加するにつれて応力比は減少する傾向を示しているが、その減少率は浄水場発生土の方が石炭灰よりも小さいことが分かる。応力比が0.11ではどちらも繰返し回数が1回であるのに、応力

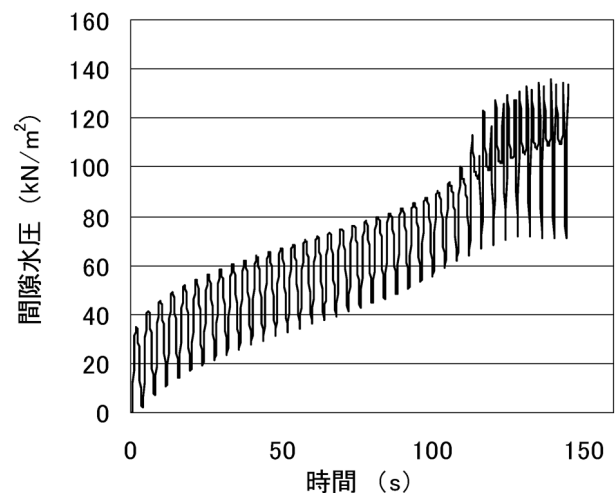


図5 過剰間隙水圧と時間との関係（豊浦砂）

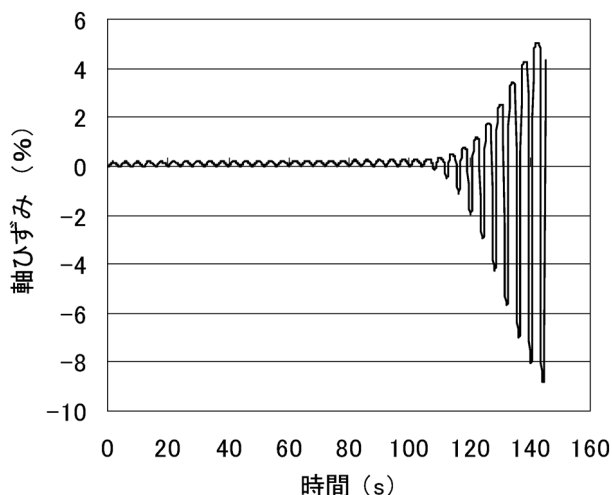


図4 軸ひずみと時間との関係（豊浦砂）

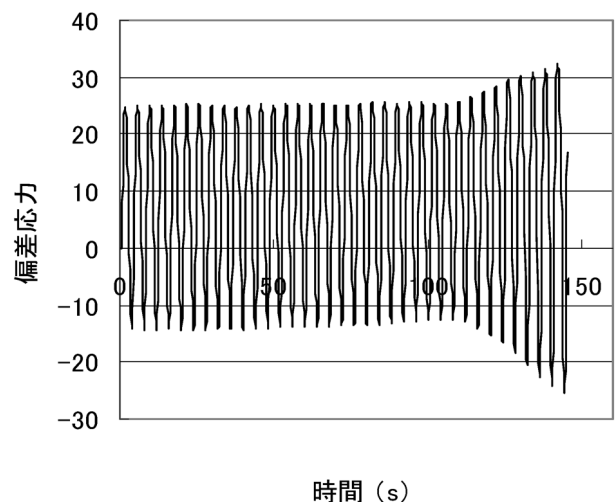


図6 軸差応力と時間との関係（豊浦砂）

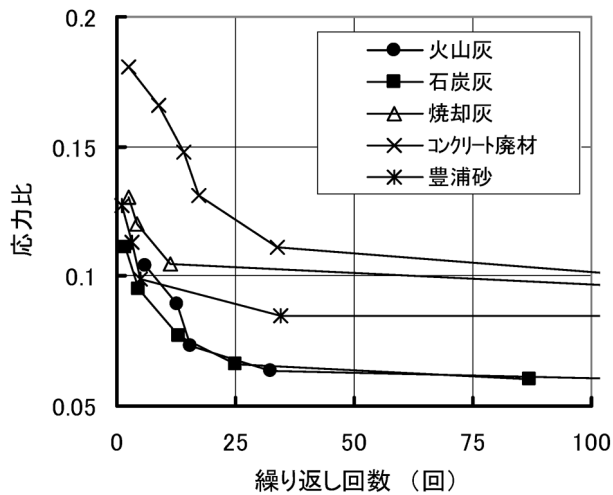


図7 応力比と繰返し回数との関係 (各廃棄物)

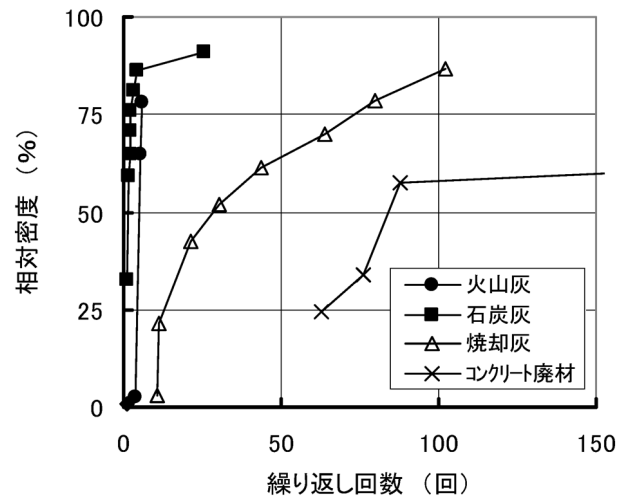


図9 相対密度と繰返し回数との関係 (各廃棄物)

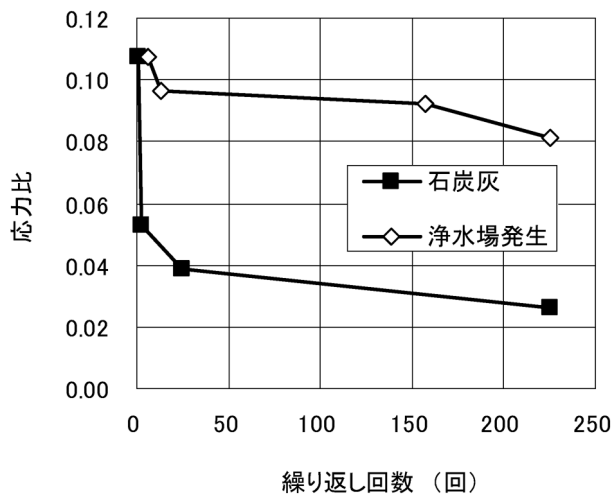


図8 応力比と繰返し回数との関係(石炭灰と浄水場発生土)

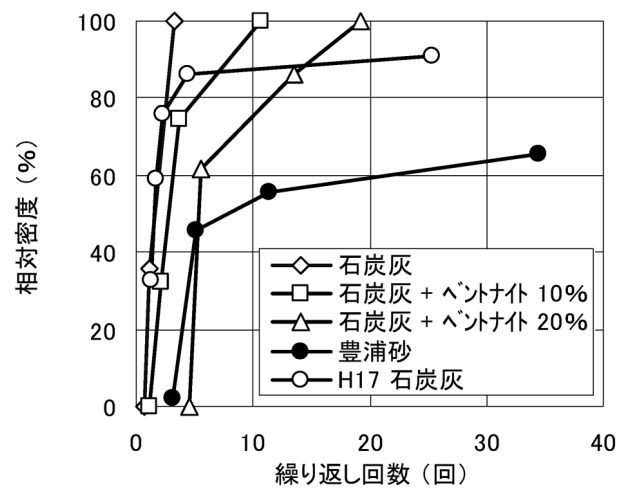


図10 相対密度と繰返し回数との関係 (石炭灰)

比が0.095では繰返し回数が石炭灰で1回であるのに対し、浄水場発生土では6回となっている。これは浄水場発生土の方が石炭灰よりも同一繰返し回数するとき応力比が大きくなることから、浄水場発生土の方が石炭灰よりも液状化を起こしにくい材料であることが分かる。

図9に各産業廃棄物の繰返し回数と相対密度の関係を示している。図9よりコンクリート廃材は、相対密度が増加するに従って、繰返し回数が増加する傾向を示しているが、石炭灰は、相対密度が85%までは、ほとんど繰返し回数は、増加しないことが分かる。即ち、繰返し回数が少ないことは、液状化がすぐ生じる事を示しているので、この図からコンクリート廃材や焼却灰は、豊浦砂よりも液状化を生じにくい材料であり、石炭灰や火山灰は、豊浦砂よりも液状化を生じやすい材料であると判断できる。次に、石炭灰における繰返し回数と相対密度の関係を図10に、浄水場発生土における繰返し回数と相対密度の関係を図11にそれぞれ示して

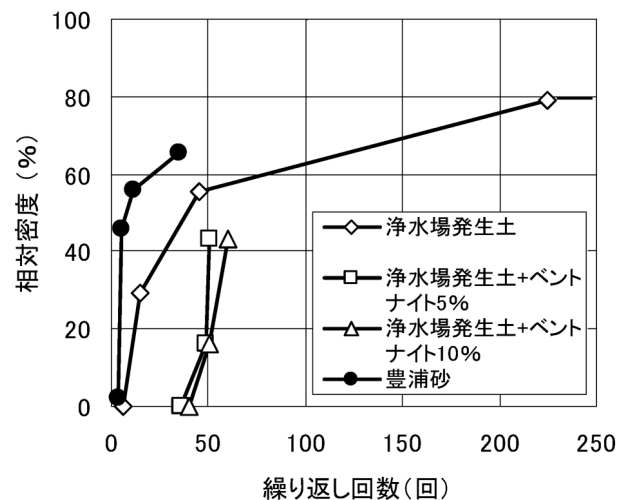


図11 相対密度と繰返し回数との関係 (浄水場発生土)

いる。それぞれの相対密度について比較してみると、石炭灰では図10より2種類の石炭灰ともに相対密度80%位までは繰り返し回数3回と少なく、すぐに液状化を起こす傾向を示している。また、豊浦砂と比較すると、相対密度60%で繰り返し回数が石炭灰で2回豊浦砂で22回と石炭灰のほうが豊浦砂よりも液状化を起こしやすい傾向を持つことが分かる。さらに浄水場発生土について検討すると、図11より、相対密度が大きくなるに従い、繰り返し回数は累乗的に増加し、相対密度80%で繰り返し回数200回を示すように、液状化を起こしにくくなることが分かる。また、豊浦砂と比較すると相対密度が60%のとき、繰り返し回数は豊浦砂が13回、一方浄水場発生土が80回と明らかに浄水場発生土のほうが豊浦砂よりも液状化を起こしにくいことが分かる。

#### 4.2 液状化抑制効果について

つぎに、使用した廃棄物にはほとんど粘土分が含まれていないので、それぞれの廃棄物に粘土分を混合した場合の液状化の発生状況について調査した。粘土分として、塑性指数の大きいベントナイトを使用した。それぞれの廃棄物の実験結果を図10, 11に示している。図10では、ベントナイトを石炭灰に重量比で10, 20%混合した場合の繰り返し回数と相対密度の関係を示している。図10よりベントナイトを10%含むとわずかずつではあるが、同一密度に対して繰り返し回数が増加する傾向を示している。また、ベントナイトを20%含むと顕著にその傾向が大きくなることが分かる。このことから、石炭灰単体では液状化を起こしやすい材料でも、粘土分を20%含むと液状化抑制効果をはっきりとあらわれることが分かる。一方、図11に浄水場発生土にベントナイトを重量比でそれぞれ5, 10%混合した場合の実験結果を示している。図11より石炭灰同様にベントナイトを含むと同一密度に対して繰り返し回数が増加することが確認できる。たとえば、相対密度40%で浄水場発生土の繰り返し回数が25回であるのに、ベントナイトを5%含む場合で繰り返し回数50回、10%含む場合で55回を示しており、わずかの粘土分を含むだけで、液状化抑制

効果を発揮することが分かる。

### 5. 結論および考察

上記実験結果より得られた結論、考察は次の通りである。

1. 石炭灰、浄水場発生土ともに密度が通常の土よりも低い。
2. 本実験結果より、同一粒径で比較すると、石炭灰や火山灰は豊浦砂よりも液状化を起こしやすいが、コンクリート廃材、焼却灰や浄水場発生土は豊浦砂よりも液状化を起こしにくいことがわかる。
3. 石炭灰、浄水場発生土ともに粘土分を混合することにより液状化を起こしにくくなる。このことから廃棄物による埋立て地盤を構築する場合、適度の粘土分を配合することにより液状化抑制効果を図ることができる。
4. 廃棄物によっては複合材とした場合、廃棄物単体よりも強度特性が弱くなるものもあることがわかった。また、実際の廃棄物はその生産地や生産過程により、その性質は異なり、さらに、廃棄物による埋立て地盤が1つの材料のみで埋立てられることはなく、複数の廃棄物による複合材料埋立て地盤となってしまうことから、今後、廃棄物個々の性質を考慮して、複合材料の混合方法を見極める必要があると思われる。

### 参 考 文 献

- 1) 液状化対策の調査・設計から施工まで：地盤工学会，1995.5
- 2) 廃棄物の地盤材料としての利用に関する研究委員会，報告書：土木工学会，2000.1
- 3) 土の繰り返し非排水三軸試験方法：地盤工学会基準
- 4) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告第1版（1998）
- 5) 経時的な変化に着目した一般廃棄焼却灰の液状化特性に関する研究：佐藤研一（福岡大学工学部助教授），2002.3