

都市ごみ焼却灰の静的及び動的力学特性に関する実験的研究

後藤 恵之輔* · 山中 稔*
小川 鉄平**An Experimental Study on Static and Dynamic Mechanical
Properties of Municipal Bottom Ash

by

Keinosuke GOTOH*, Minoru YAMANAKA*
and Teppei OGAWA**

The municipal bottom ash discharged from incineration plants is usually buried at the final disposal sites. The mechanical properties of this bottom ash was investigated in order to utilize these disposal sites. In this paper the authors carried out some physical, compaction, permeability, CIU and cyclic triaxial tests of the bottom ash samples. As a result of this investigation for the bottom ash it was cleared that the cohesion is nearly zero, the internal friction angle is a little bigger than a general sand, and the liquefaction resistance strength of bottom ash is larger than that of the Toyoura standard sand.

1. はじめに

環境問題に関しての意識の高まりとともに、廃棄物を減らすための努力が多方面でなされているが、排出される大量の廃棄物は、その大部分がリサイクルされずに埋立処分されており、埋立処分場の寿命を縮めてきた。日本では一般廃棄物の約73%が焼却処分され、約17%が全国約2000箇所の最終処分場で直接埋立処分されている¹⁾。さらに、埋立処分地の確保が困難で、かつ狭い国土の高度利用が求められている我が国では、ごみ焼却灰埋立地盤の積極的な利用を検討する必要があると言える。

ごみ焼却灰埋立地盤の地盤工学的特性については、これまでいくつかの研究や報告があるものの、未だ解決すべき問題が多く残されている。また、ごみ焼却灰は、有機物質を多量に含んでおり、埋立時に発生する問題が多く、化学的アプローチも必要であると言える。

本研究では、まずごみ焼却灰の詳細な地盤工学的特性の把握を目的として、ごみ焼却灰の物理特性を調べた後、静的及び動的せん断特性について三軸試験装置

を用いて実験を行った。さらに、走査型電子顕微鏡を用いることにより、ごみ焼却灰の表面形状を微視的に観察した。

2. 試料及び基本的物理特性

2.1 採取方法

実験に用いたごみ焼却灰は、N市の大型焼却場内に埋立処分される前の運搬用トラックから、乱した状態で採取した。採取するにあたり、室内試験を考慮して直径数cm以上の塊は排除した。採取試料は、電気集塵機で捕捉された飛灰を含んでおり、運搬時の飛散を防止するための散水が行われているため、埋立時の含水比 w_i は25.3%であった。

2.2 粒度分布

ごみ焼却灰の粒度分布においては、搬入ごみの質や大きさによりごみ焼却灰の粒度が変動することが予想されたために、その変動幅を確認することを目的に、数回粒度試験を実施した。

1998年4月24日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**大学院修士課程社会開発工学専攻 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

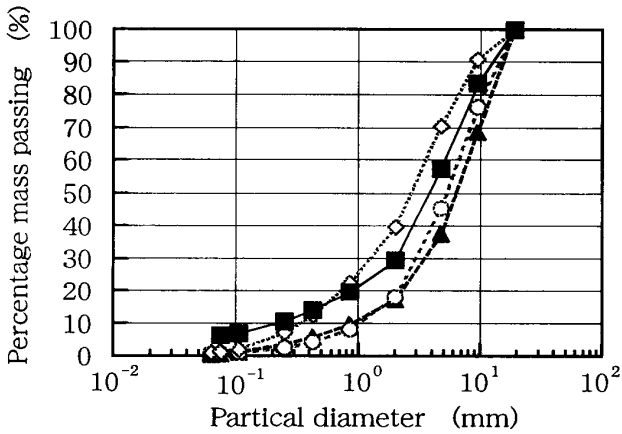


Fig. 1 Grain size distribution.

Figure 1 に、19mmふるい通過試料での粒径加積曲線を示す。実際の粒度よりも小さな粒度幅内での試験結果を表している。平均粒径 D_{50} は2.7~6.0mm, 均等係数 U_c は6.8~25.0と大きく、いずれの採取試料も粒度分布は悪いと判断される。これら粒度分布を平田ら²⁾ が用いたごみ焼却灰と比較すれば、本試料は礫分を最大30%多く含んでいるが、これは搬入されたごみ種による違いによるものと考えられる。

また、ごみ焼却灰粒子の密度 ρ_s は2.44~2.59g/cm³の範囲にあり、ばらつきが大きいと言えるが、砂質土の粒子密度と比較した場合に、若干小さい値を示

すと言える。

最大密度及び最小密度試験を行った結果、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は0.81g/cm³ ($e_{min}=2.13$), 最小乾燥密度 ρ_{dmin} は0.66g/cm³ ($e_{max}=2.84$) であり、どちらも非常に小さい値を呈することが明らかとなった。また両者の幅は小さいことから、このごみ焼却灰試料は締固めの難しい材料であることが伺える。

さらに強熱減量試験の結果から、強熱減量値が13.4%と比較的多くの有機物質を含んでいることが明らかとなった。

2.3 表面形状の観察

ごみ焼却灰の表面形状を調べるために、走査型電子顕微鏡により微視的観察を行った。

Photo 1 (a)~(c)に、ごみ焼却灰における倍率100倍、1000倍及び2000倍の顕微鏡写真をそれぞれ示す。Photo 1 (a)における倍率100倍において、角張った形状の粒子が互いに密着し固結している様子が分かる。Photo 1 (b)は、倍率1000倍において特にガラス質の部分を観察した写真であるが、ガラス質破片が熔融し、角が丸みを帯びるとともに、表面に気泡の抜けた跡と思われる小孔がいくつか観察できる。Photo 1 (c)は、ガラス物質以外の炭化した物質の表面形状を倍率2000倍で撮影した写真であるが、表面に無数の凹凸が存在

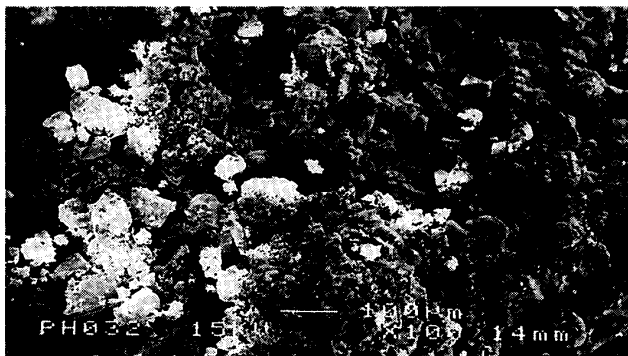


Photo 1 (a) Bottom ash particle(×100).

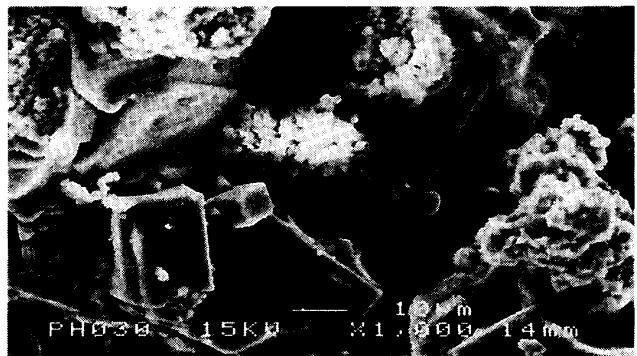


Photo 1 (b) Bottom ash particle(×1000).

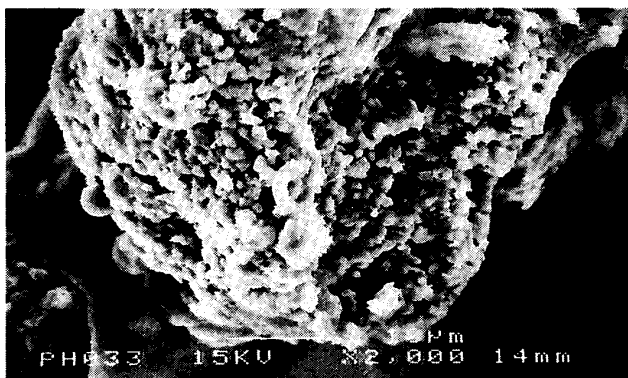


Photo 1 (c) Bottom ash particle(×2000).

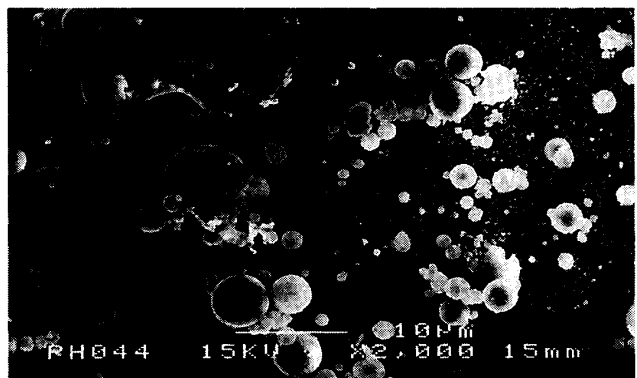


Photo 2 Coal ash particle(×2000).

し、大きな表面積を有している。以上の顕微鏡観察の結果から、ごみ焼却灰粒子は表面積が非常に大きく多孔質であり、粒子破碎の発生が予想されるとともに、水分を多く吸収・保持しやすいという特徴を有していることが伺える。Photo 2 に、石炭灰の倍率2000倍の顕微鏡写真を示す。粒子形状は球型であり、焼却灰と比較して、表面が非常になめらかであることが分かる。

一方、顕微鏡で表面を観察する前に、一度乾燥させたごみ焼却灰を、一昼夜外気に放置しておけば、翌日には含水比が21.5%に大きく上昇する性質、すなわち水分を多量に吸着する特異な性質を有していることが予想されていた。この性質は顕微鏡観察により、ごみ焼却灰の表面積が大きく多孔質であるために生じるものであろうことが明らかとなった。

2.4 X線回折

走査型電子顕微鏡で表面を観察すると同時に、X線同定により成分分析を行った。Figure 2 に示すように、ごみ焼却灰にはCa及びClが卓越し、この他にも様々な化学物質が含まれていることが明らかとなった。

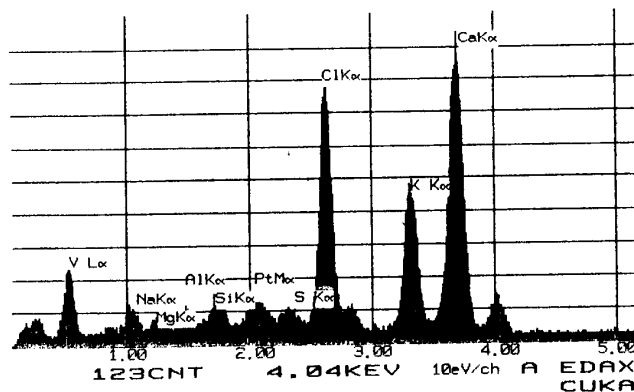


Fig. 2 X-ray analysis of the bottom ash.

3. 一般的力学試験

3.1 締固め試験

ごみ焼却灰の締固め特性を調べるために、突固めによる締固め試験 (JGS T 711) を、A-a 法及びC-a 法の2種類の締固めエネルギーにおいて実験を行った。

Figure 3 に、締固め曲線を示す。いずれの締固めエネルギーにおいても、明瞭なピークは見られない。これは、試料が粗粒であるとともに粒度分布が悪いためであると考えられる。得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} は、A-a 法及びC-a 法でそれぞれ 1.27g/cm^3 及び 1.37g/cm^3 と、いずれも小さな値を呈し、さらに締固めエネルギーが大きい場合でも ρ_{dmax} の上昇は小さいことが分かる。また、最大乾燥密度時の飽和度は、いずれの

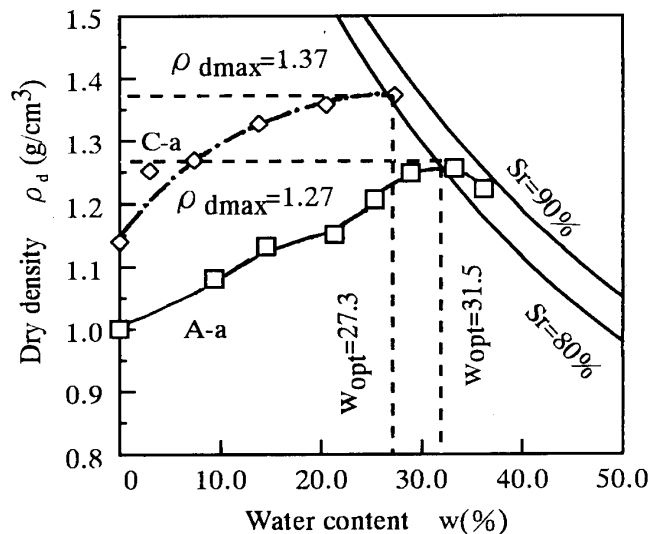


Fig. 3 Moisture-density curve.

場合においても $Sr=80\%$ であり、 Sr は一般的な砂質土と比較して低い傾向を示すことが明らかとなった。

一方、この締固め試験により得られた最適含水比 w_{opt} は、実際の埋立時含水比 $w_i=25.3\%$ に近い値を示している。埋立処分地では、この締固め特性を考慮して散水が行われているとは考えられないが、結果として締固めには良い条件で埋め立てられていると言える。

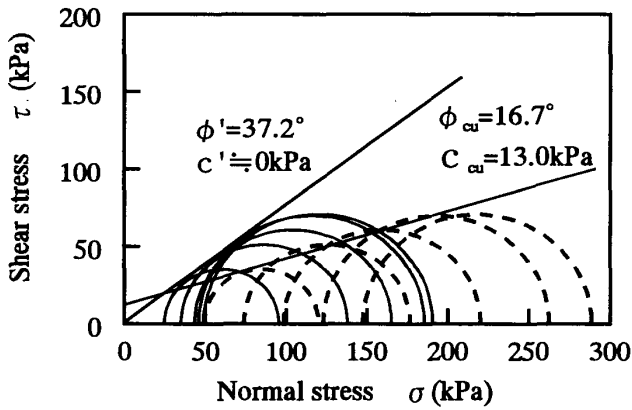
3.2 透水試験

変水位法により透水試験を行った。供試体の密度は、後述する三軸圧縮試験で供試体が自立する密度である $\rho_t=1.17\text{g/cm}^3$ 及び 1.27g/cm^3 とした。供試体の飽和度を高める方法として、吸水脱気法を用いた。実験に用いた試料は、透水容器の大きさから9.5mmふるい通過試料を使用した。

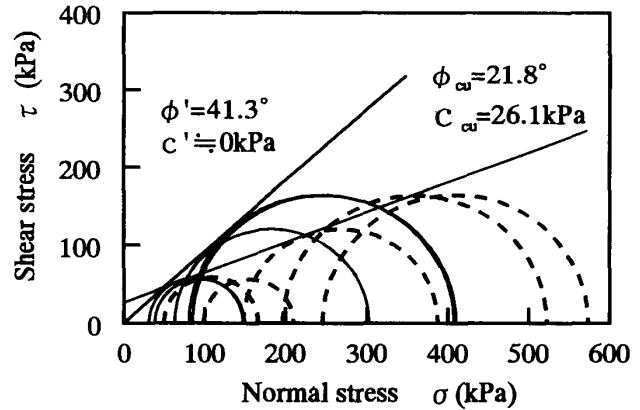
Table 1 に、得られた透水係数 k_T を示す。 $k_T=1.08 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 及び $2.58 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ がそれぞれ得られた。いずれの値も、中位の透水性を有していると言える。

Table 1 Coefficient of permeability.

Wet density (g/cm³)	Coefficient of permeability (cm/s)
1.17	1.08×10^{-2}
1.27	2.58×10^{-3}

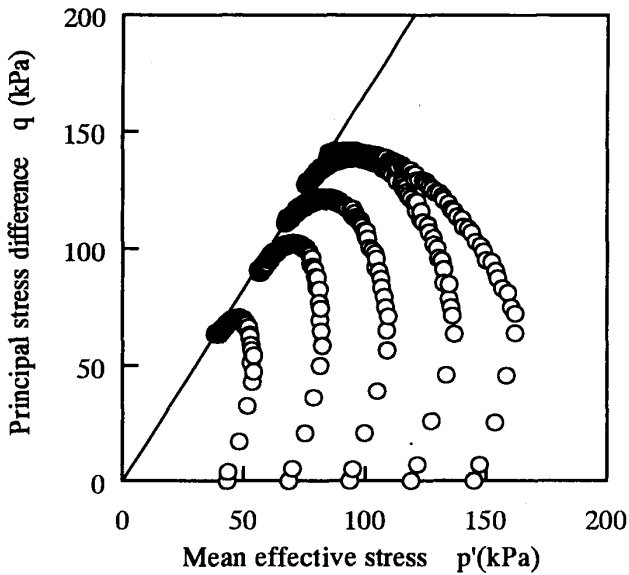


(a) $\rho_t = 1.17\text{g/cm}^3$

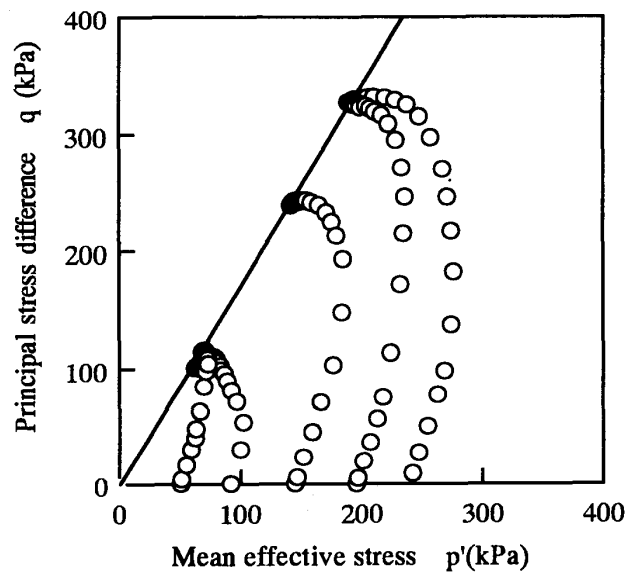


(b) $\rho_t = 1.27\text{g/cm}^3$

Fig. 4 Mohr's stress circle.



(a) $\rho_t = 1.17\text{g/cm}^3$



(b) $\rho_t = 1.27\text{g/cm}^3$

Fig. 5 Effective stress path.

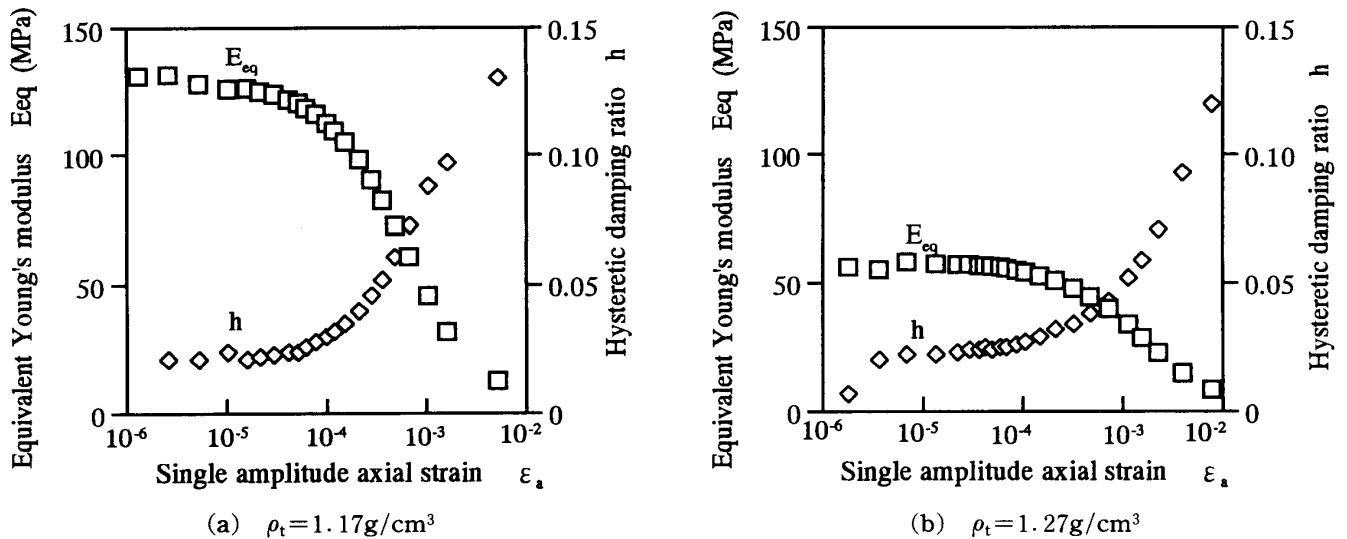
4. 静的三軸圧縮 (CIU) 試験

4.1 供試体条件

ごみ焼却灰の静的強度特性を得ることを目的として、圧密非排水三軸圧縮 (CIU) 試験を実施した。供試体寸法は直径 5 cm, 高さ 10 cm であり, ごみ焼却灰試料は 2 mm ふるい通過分を用いた。供試体密度は, 自立可能な密度として $\rho_t = 1.17\text{g/cm}^3$ 及び $\rho_t = 1.27\text{g/cm}^3$ と設定し, 締固め法により供試体を成形した。有効拘束圧は $\rho_t = 1.17\text{g/cm}^3$ の場合, 49 kPa から 147 kPa の範囲, $\rho_t = 1.27\text{g/cm}^3$ の場合, 49 kPa から 245 kPa の範囲でそれぞれ 5 条件で行った。いずれの密度条件においても背圧は 98 kPa とし, 飽和度を高めるために炭酸ガスを通気させ, B 値は 95% 以上になることを確認した。

4.2 結果及び考察

Figure 4 (a) と (b) に, 密度条件 $\rho_t = 1.17\text{g/cm}^3$ 及び 1.27g/cm^3 におけるモールの応力円をそれぞれ示す。有効応力により得られた内部摩擦角 ϕ' は, 37.2° 及び 41.3° とがそれぞれ得られ, 供試体密度が高くなるに伴い大きくなっている。また, 有効応力表示による粘着力 c' は, いずれの密度条件においてもほぼゼロであった。用いたごみ焼却灰のほとんどが粗粒分であることを考えれば, この c' がほぼゼロという値は妥当であると考えられる。他のごみ焼却灰の強度定数として, $\phi' = 21.2 \sim 54.6^\circ$ 程度と大きな値を呈する報告³⁾ もあり, 本供試体の粒度分布から判断しても, 得られた強度定数は妥当な値であると言える。粒子破碎に関しては, 試験前後で, 細粒分含有率が最大 6.2% か

Fig. 6 $E_{eq}, h \sim \epsilon_a$ curve.

ら約8%前後に増加しており、せん断過程で若干の粒子破碎が生じていることを確認している。

Figure 5 (a), (b) に密度条件 $\rho_t=1.17\text{g/cm}^3$ 及び 1.27g/cm^3 における有効応力経路図をそれぞれ示す。いずれの密度条件においても、有効拘束圧の値に関わらず、せん断初期の過剰間隙水圧の発生量は小さいことが言えるが、せん断の進行とともに過剰間隙水圧の発生量が大きくなり、破壊包絡線に近づくにつれ原点側に移動しようとする傾向が見られる。すなわち、今回採用した供試体密度では、正規圧密的なせん断挙動を示すことが分かった。

5. 動的変形特性

5.1 供試体作成及び試験条件

供試体密度条件及び作成方法は、前述の4.1と同様である。実験条件として、背圧98kPa、有効拘束圧98kPaにおいて圧密を行った後、周期0.5Hzで振幅一定の正弦波を、繰返し10回載荷させた。この試験は、繰返し載荷中の変形特性を求めるところを目的としており、得られた結果は、基本的に動的境界値問題に適用できる⁴⁾ものである。

5.2 結果及び考察

Figure 6 (a), (b) に、湿潤密度 $\rho_t=1.17\text{g/cm}^3$ 及び 1.27g/cm^3 における片振幅軸ひずみと等価ヤング率及び履歴減衰率の関係を示す。初期等価ヤング率は、 $\rho_t=1.17\text{g/cm}^3$ 条件の場合約130MPa、 $\rho_t=1.27\text{g/cm}^3$ 条件の場合約57MPaが得られた。密度が高い $\rho_t=1.27\text{g/cm}^3$ の方が、等価ヤング率が小さい値となった。 $\rho_t=1.17\text{g/cm}^3$ 条件の初期等価ヤング率と、豊浦標準砂の初期等価ヤング率⁴⁾とを比較すれば、本実験で用い

たごみ焼却灰の方が150MPa程度小さい値となった。また等価ヤング率が、片振幅軸ひずみ 2.0×10^{-5} 付近から低下している傾向は、どちらの供試体密度条件にも見られる。

本研究において、供試体密度と等価ヤング率については、負の相関関係が得られたが、著者ら⁵⁾によれば供試体密度と等価ヤング率は正の相関関係も得られている。この関係を明らかにするために、データの蓄積を行っているところである。一方、履歴減衰率は、いずれの密度条件においても、最終載荷時の値は0.13とほぼ同じ値を示している。また、履歴減衰率は、等価ヤング率が低下するときに上昇する傾向がある。

6. 繰返し非排水三軸試験

6.1 試験条件

ごみ焼却灰の液状化特性を調べるために、繰返し非排水せん断試験を行った。この試験は、地盤の液状化の可能性の判定や、液状化のしやすさの程度を調べる指標として用いられている⁶⁾。供試体に用いた試料及び作成方法は、前述の4.1と同様である。液状化が発生する条件として、一般的に供試体密度が低い場合に発生しやすいことが言われている⁷⁾。そこで、前述の力学試験を行ってきた供試体密度の中で最も小さい密度条件である、湿潤密度 $\rho_t=1.17\text{g/cm}^3$ において実験を行った。供試体を設置した後、炭酸ガス及び脱気水により飽和度を高めた。B値は95%以上になることを確認した上で、有効拘束圧一定条件下において正弦波を0.5Hz周期で載荷した。なお、有効拘束圧を98kPa、背圧を98kPaとした。液状化の発生条件として、DA10%の繰返し回数とした。

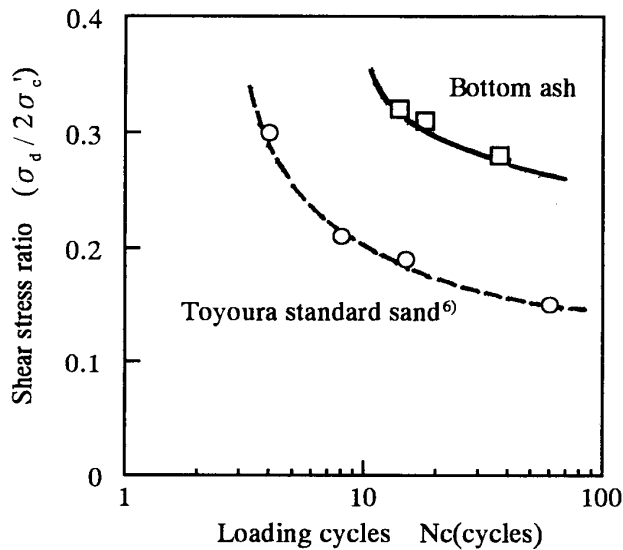


Fig. 7 Shear stress ratio~loading cycles.

6.2 結果及び考察

Figure 7に、ごみ焼却灰及び豊浦標準砂⁶⁾の繰返し回数とせん断応力比の関係を示す。ごみ焼却灰は、豊浦標準砂と比較して、せん断応力比が大きくなっても液状化し難いことが分かる。このことは、液状化強度が標準砂に比べて大きいことを意味する。ごみ焼却灰埋立地盤は、その粗粒かつ比較的均一な粒度分布から判断して、液状化の発生が懸念されるが、焼却されて間もないごみ焼却灰に関しては、十分な締固めにより液状化の発生を防ぐことができると考えられる。

7. まとめ

本研究により、ごみ焼却灰の地盤工学的力学特性として、以下のことが明らかとなった。

- (1) 物理特性として、ごみ焼却灰は密度が比較的小さく、粒度分布が悪い。
- (2) 締固め特性として、エネルギーを変化させても最大乾燥密度に大きな影響は与えない。また、最大乾燥密度は明瞭なピークを示さない。
- (3) ごみ焼却灰の透水性は、中位の透水性を有していると言える。
- (4) せん断特性として、粘着力を持たない試料であることが明らかとなった。また、内部摩擦角は一般的な土と比較して、若干大きい値を示す。
- (5) 液状化特性は、豊浦標準砂と比較すれば、液状化

しにくい試料と言える。

- (6) 顕微鏡観察の結果から、ごみ焼却灰粒子は表面積が非常に大きく多孔質であり、水分を吸収・保持しやすいという特徴を有している。

以上の結果から、ごみ焼却灰からなる地盤は、基礎的な力学試験から砂地盤と考えることができるが、動的力学試験からは、砂試料と異なる性質があるため、この性質が地盤工学的安定性にどのように影響するか、今後更なる検討が必要であると考えられる。また、ごみ焼却灰は埋立後はその性状が変化し、予想以上の沈下量やガス発生などの事例が近年多く報告されていることから、今後、埋立経過に対応した各種地盤工学的検討を行っていく必要があると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、空圧式高速デジタルサーボ型動的三軸装置を快く貸していただいた小倉喜久枝女史(テスコ(株))、及び走査型電子顕微鏡の使用に便宜を図っていただいた吉田英樹氏(長崎県産業技術センター)に、深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) S.F.Zakrzewski: 環境汚染のトキシコロジー, 化学同人, pp.190-200, 1995. 7.
- 2) 平田・前野: 一般廃棄物の土質力学特性とその改善方法, 土と基礎, Vol.40, No. 6, pp.29-34, 1992. 6.
- 3) 島岡・花嶋ら: 埋立廃棄物の力学特性と埋立構造物の安定性に関する実験, 土と基礎, Vol.45, No. 7, pp.24-26, 1997. 7.
- 4) 新規制定地盤工学基準・同解説, 地盤工学会, pp.69-110, 1996. 7.
- 5) 後藤・山中・小川: 都市ごみ焼却灰の静的せん断及び動的変形特性について, 第33回地盤工学研究発表会平成10年度発表講演集, pp.671-672, 1998. 7.
- 6) 土質試験の方法と解説, 土質工学会, pp.421-450, 1990. 3.
- 7) 安田: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, pp.11-17, 1988. 11.