

礫分を含む一般廃棄物焼却灰の土質力学特性

前野祐二¹・平田 登基男²・永瀬 英生³・山内 正仁⁴・三原 めぐみ⁵

¹正会員 博(工) 鹿児島高専助教授 土木工学科 (〒899-5193 鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)

²正会員 工博 鹿児島高専教授 土木工学科 (〒899-5193 鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)

³正会員 工博 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

⁴正会員 工修 鹿児島高専講師 土木工学科 (〒899-5193 鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)

⁵正会員 鹿児島高専講師 一般科目 (〒899-5193 鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)

焼却灰は全国各地の焼却処理施設から排出され、一般廃棄物として埋立処分されている。国土の狭い我が国が、焼却灰で埋立てられた跡地や焼却灰を有効利用することは不可欠なことである。また、焼却灰には重金属など有害物質が含まれているので、漏水特に保護シートの安全性が問題となっている。焼却灰は焼却施設によって、粒度分布、組成が異なり、さらに同じ焼却施設であっても焼却される日により、粒度分布の異なる焼却灰が排出される。また、その焼却灰には空き缶や陶磁器片などが含まれ、大きな粒径のものも含まれる。そのため、焼却灰の土質力学特性は十分に明らかになっていないといえない。そこで、本研究では、礫分を含む焼却灰を試料として締固め試験、中型三軸装置による圧縮試験、 K_0 圧密試験、三軸圧縮試験および平均主応力一定試験を行い、これらの実験結果と従来からの研究を比較しながら、この焼却灰の土質力学特性を明らかにした。

Key Words: bottom ash, triaxial test, coefficient of earth pressure at rest, internal friction angle, dilatancy

1. まえがき

一般廃棄物処理・処分は、今日、重要な環境問題の一つとなっている。家庭から排出されたごみは、平成5年度で5030万トン¹⁾に及び、それに用いられる費用は2兆2813億円にも及んでいる。ごみのうち14.4%が資源化などの中間処理、11.3%が直接埋立、74.3%が直接焼却され、最終処分場には、1495.8万t(直接埋立712.4万t、焼却灰601.3万t、焼却外残渣182.1万t)が、埋立処分される²⁾。最終処分場埋立の中で焼却灰の占める割合は40%程度であるが、その割合は処分場によりかなり異なる。最終処分場埋立全体に占める焼却灰の割合が最も多い都道府県は神奈川県で、埋立場72.7万tのうち81.8%が焼却灰である。次に多いのが、大阪府で埋立場120万tの中で74.7%が焼却灰である。逆に、最も少ないのは鹿児島県で69.9万tのうち6.3%、次に少ないのが北海道で182.5万tのうち11.9%が焼却灰である³⁾。このように地域により一般廃棄物最終埋立に占める焼却灰の割合は異なるが、参考文献4)にあるように将来的には焼却灰の量がさらに増えてくるであろう。

一般廃棄物最終処分場は平成5年度で日本全国に2321カ所あり、残容量は1億4931万 m^3 となっており、残余年数は約8年と算定されている¹⁾。近年、焼却灰の溶融な

ど新しい技術が開発されているが、試験的に一部の焼却施設に導入されているに過ぎず、焼却灰のほとんどが埋立処分されている。一般廃棄物の最終埋立処分場の建設はあまり進まず、最終埋立処分場には今も絶えず焼却灰や破砕ごみが持ち込まれ、処分場の余命を確実に縮めている。さらに、国土の狭い我が国では新しい最終処分場を求めることが、物理的に非常に困難となってきている。このような現状を打開するため、国土の効率的利用を行う観点から埋立完了後の最終処分場の合理的跡地利用開発の必要性が一層高まってきている。

一般廃棄物埋立地の研究は、松本らの研究⁵⁾、油谷らの研究⁶⁾、松藤らの研究⁷⁾などがある。松本らは、東京湾の廃棄物埋立地を対象に様々な試験を行い、ちゅう介類および木・竹類など有機質を20%~50%程度含む都市ごみ埋立地盤の圧密沈下、せん断特性を明らかにしている。また、油谷らは大阪湾の一般廃棄物埋立地で動的貫入試験を行い、一般廃棄物埋立地におけるN値などの土質力学特性を明らかにしている。

焼却灰の土質力学試験としては岩谷らの研究⁸⁾や筆者らの研究^{9), 10), 11)}がある。岩谷らは、焼却灰を試料とした大型三軸試験を実施し、間隙比と内部摩擦角との関係を報告している。筆者はすでに参考文献9), 11)で2mm以下の焼却灰の土質試験結果を報告している。礫分を含む焼却

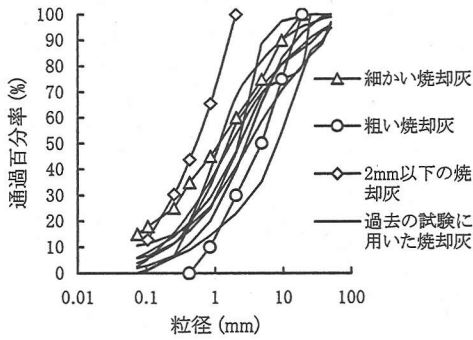


図-1 焼却灰の粒度分布

表-1 物理特性

	細かい焼却灰	粗い焼却灰
礫分	25%	60%
砂分	50%	50%
シルト分以下	15%	0%
均等係数	36	7
曲率係数	124	1
土粒子密度(g/cm ³)	2.519	2.452

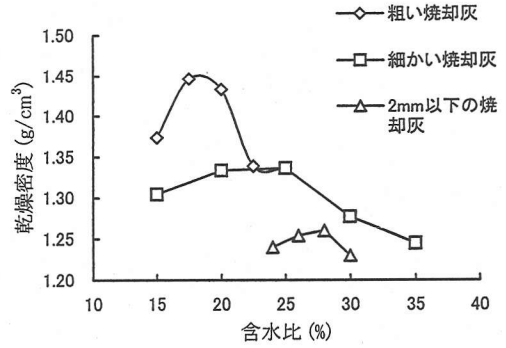


図-2 突固め曲線

ある。そこで、礫分を含んだ焼却灰について、中型三軸装置等で行い、その締固め特性、圧縮特性及びせん断特性など土質力学的特性を明らかにした。

2. 試料と物理特性

図-1に本実験で用いた「細かい焼却灰」、「粗い焼却灰」および「2mm以下の焼却灰」の粒度分布と過去の試験¹⁰⁾で用いた焼却灰の粒度分布をそれぞれ示す。図に示すように、2mm以下の粒子をかなり含む焼却灰を「細かい焼却灰」、細かい粒子をほとんど含まない焼却灰を「粗い焼却灰」と以下では称す。中型三軸装置の供試体直径が10cmなので試料の最大粒径は19mmとした。試料は、K市のごみ焼却場から搬入し、焼却灰をふるい分けした後、同一の粒度分布になるように粒度調整をしたものである。なお、礫分には細かい焼却灰が固結したものの、礫石、ガラス片、陶磁器片などが含まれる。

細かい焼却灰および粗い焼却灰の物理特性を表-1に示す。表に示すように細かい焼却灰は均等係数が大きく良好な配合であるが、曲率係数が大きく細かい部分の粒子が相対的に多い。一方、粗い焼却灰は細かい焼却灰より均等係数が小さく、貧配合と言えよう。また、強熱減量は3.4%で有機質をほとんど含んでいない。

写真-1、2に200倍と2000倍に拡大した5mm粒子の走査型電子顕微鏡写真をそれぞれ示す。写真-1に示すように細かい粒子は結合して大きな粒子を形成していることが明らかである。さらに写真-2に示すようにその粒子は5μm程度から15μm程度である。参考文献¹¹⁾でも2mm以下の焼却灰は細かい粒子の結合体であることを明らかにしている。焼却灰はきれいな砂である標準砂などは異なり、細かい粒子の結合体であると言える。

3. 突固め特性

細かい焼却灰、粗い焼却灰及び2mm以下の焼却灰を用いて、Aの突固め方法(ランマー重量2.5kg、モールド内径

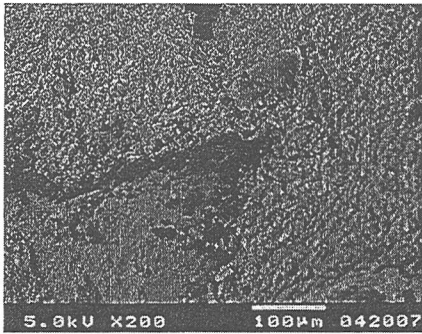


写真-1 5mm粒子表面(200倍)

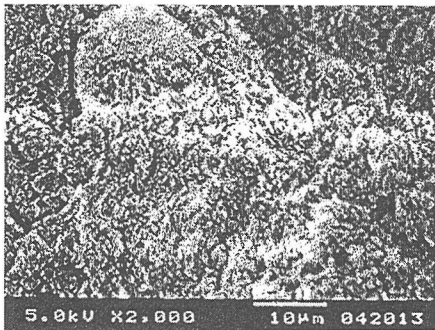


写真-2 5mm粒子表面(2000倍)

灰については詳細にまだ明らかにされていない。

そこで本研究は、一般廃棄物理立場の中で大きな割合を占めている礫分を含む焼却灰の埋立処分方法と合理的跡地利用を検討するためには、この焼却灰で埋立られた地盤の安定性、沈下特性などの地盤工学的特性を把握する必要が

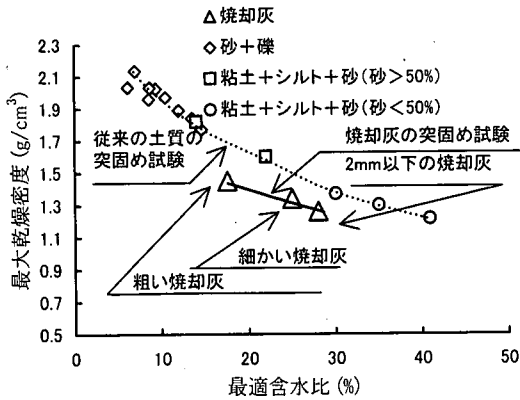


図-3 最大乾燥密度と最適含水比の関係

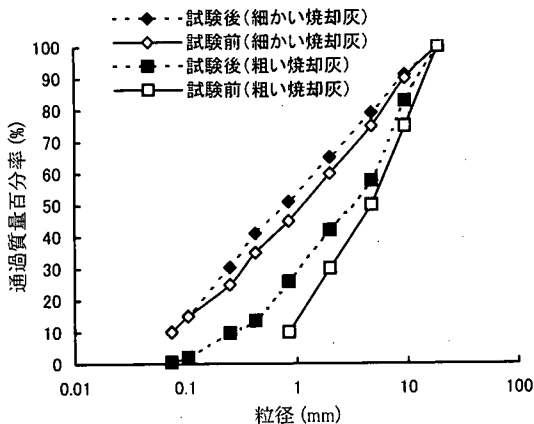


図-4 突固めによる粒子破砕

10cm, 3層突固め回数2.5回)で非繰返し法により突固め試験を行った。

図-2に粗い焼却灰, 細かい焼却灰及び2mm以下の焼却灰の突固め曲線をそれぞれ示す。粗い焼却灰は最適含水比17.5%, 最大乾燥密度1.45g/cm³, 細かい焼却灰は最適含水比25.0%, 最大乾燥密度1.34g/cm³, 2mm以下の焼却灰は最適含水比28.0%, 最大乾燥密度1.26g/cm³が得られた。粗い焼却灰の締固め曲線はかなり凸型形状を示しているが, 細かい焼却灰は緩やかな凸型形状を示している。すなわち, 粗い焼却灰は最適含水比に近いときだけよく締固まる。言い換えれば, 焼却灰中に2mm以下の焼却灰が多いほど最適含水比が大きくなり, 最大乾燥密度が小さくなる。

図-3に従来の土質の突固め試験^{12), 13)}と今回の焼却灰を用いた突固め試験による最大乾燥密度と最適含水比の関係を示す。従来の突固め試験から得られる最大乾燥密度と最適含水比の関係より, 今回の焼却灰は最大乾燥密度が0.2g/cm³程度小さい値を示している。また, 礫が含まれる粗い焼却灰でありながら礫が含まれている通常の土質よりも大きな最適含水比を示している。2mm以下の焼却灰は砂分が80%以上であるにもかかわらず, 砂分が50%以下

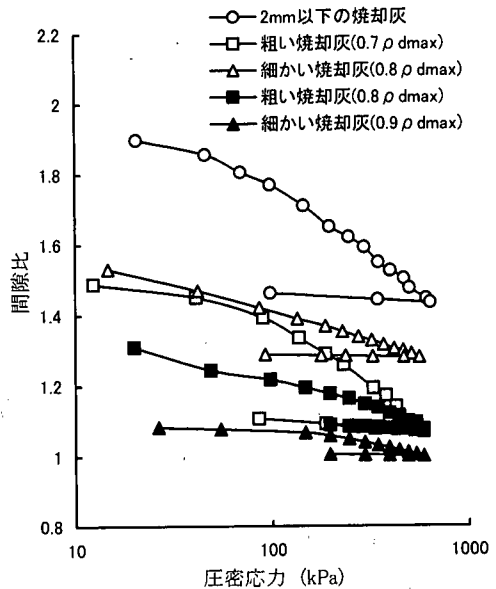


図-5 圧密応力と間隙比の関係

の通常の土質の最適含水比に近い値を示す。従って, 焼却灰の場合, 通常の土質と比較すると最大乾燥密度と, 最適含水比の関係は最大乾燥密度が0.2g/cm³程度小さい値で得られ, また, 焼却灰の最適含水比は同じ粒度のものと比較して大きな値が得られるようである。

図-4に突固めによる粒子破砕を示す。図に示すように細かい焼却灰は各粒径で4%~6%程度の通過質量百分率の増加がみられ, 礫分の減少量は5.1%, 砂分の増加量は4.8%で礫分の減少量と砂分の増加量がほぼ等しい。粗い焼却灰の場合は, 粒径9.5mm~2mmが7%程度の通過質量百分率の増加があり, 礫分の減少量は12.1%, 砂分の増加量は11.6%で細かい焼却灰と同様に礫分の減少量と砂分の増加量がほぼ等しい。すなわち, 細かい焼却灰の場合は, 比較的粒子破砕量が小さいが, 粗い焼却灰の場合は, より顕著な粒子破砕が生じている。

4. 圧密特性

焼却灰の圧密特性を明らかにするため等方圧密試験とK₀圧密試験を行った。

(1) 等方圧密試験

最大乾燥密度の8割, 9割の細かい焼却灰と最大乾燥密度の7割, 8割の粗い焼却灰, さらに最大乾燥密度の8割の2mmふるい通過焼却灰について中型三軸装置により等方圧密試験を行った。供試体は10層に分け丸棒で突固めながら密度管理をして作製した。作製された供試体に炭酸ガ

表-2 等方圧密特性一覧

	初期間隙比 e_0	圧縮指数 $\lambda = C_c / 2.3$	膨潤指数 $\kappa = C_s / 2.3$
細かい焼却灰 ($0.9 \rho_{dmax}$)	1.10	0.10	0.015
粗い焼却灰 ($0.8 \rho_{dmax}$)	1.31	0.19	0.034
細かい焼却灰 ($0.8 \rho_{dmax}$)	1.53	0.27	0.015
粗い焼却灰 ($0.7 \rho_{dmax}$)	1.49	0.48	0.044
2mm以下の焼却灰 ($0.8 \rho_{dmax}$)	1.9	0.51	0.033

ρ_{dmax} = 最大乾燥密度

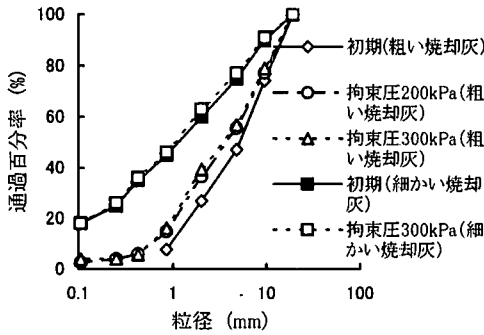


図-6 等方圧密による粒子破碎性状

スを3時間通気し、その後脱気水を3時間通水して、B値が0.95以上となった。また、供試体寸法は直径10cm、高さ20cmを標準とし、体積変化は排水量で計測した。

図-5に等方圧密試験で得られた間隙比と圧密応力の関係を示す。これらの圧密曲線には明確な降伏応力が現れず、間隙比は圧密応力が増えるに従って徐々に減少している。また、初期間隙比 e_0 、および粒度が異なることにより、圧縮指数 λ はそれぞれ異なる値を示している。

表-2に等方圧密特性一覧を示す。表に示すように初期間隙比が大きいほど圧縮指数が大きく、細かい焼却灰の方が圧縮指数 λ は小さい値を示している。これは、粗い焼却灰が細かい焼却灰より破碎量が多いためと考えられる。粗い焼却灰の圧縮指数0.4~0.5は通常の土質と比較するとかなり大きな値であるので、この場合圧縮により粒子破碎していると考えられる。

図-6に焼却灰の等方圧密による粒子破碎性状を示す。なお、このときの試料は粗い焼却灰が締固め度7割、細かい焼却灰が締固め度8割で、突固めをほとんど行わずに供試体作製を行ったので、供試体作製時の粒子破碎はほとんどないと考えられる。図に示すように等方圧密応力300kPaの場合、2mmふるい通過量は粗い焼却灰で10%程度、細かい焼却灰で3%増加している。すなわち、比較的小さな圧密応

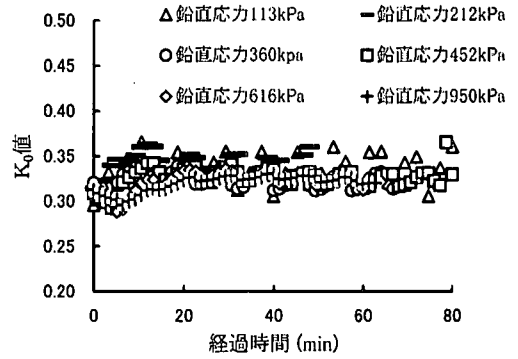


図-7 K_0 値と経過時間の関係(細かい焼却灰)

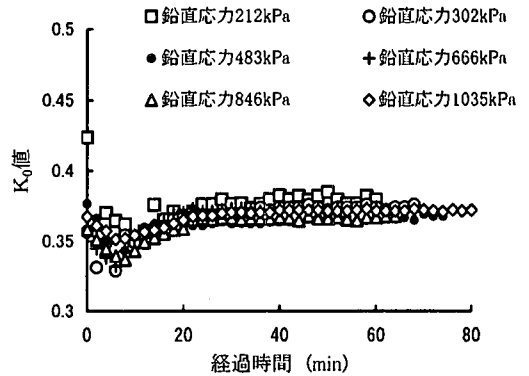


図-8 K_0 値と経過時間の関係(粗い焼却灰)

力でも焼却灰はかなり破碎しやすいと言える。

砂の圧縮指数は粒子破碎のない応力範囲において初期間隙比 e_0 により一義的に決まることが報告されている¹⁴⁾。一方、三浦ら¹⁵⁾は、標準砂の等方圧密試験結果から e - P 曲線に現れる降伏応力以降の圧縮が粒子破碎に依存すると報告している。服部らは¹⁶⁾降伏前の入が粒子破碎に起因せず、降伏応力以降の入が粒子破碎に起因していると述べている。

以上のことよりこの場合の焼却灰の圧密では、比較的小さいときから降伏応力に達して粒子破碎が発生し、ほとんど常に粒子破碎を伴いながら圧密が進行していると考えられる。

(2) K_0 圧密試験

地盤工学会の K_0 圧密試験の基準案¹⁷⁾に準拠して、締固め度9割の細かい焼却灰と締固め度8割の粗い焼却灰の供試体について K_0 圧密試験を行った。なお、B値がほぼ1.0になるまで時間をかけて通水した。この試験では中型三軸試験装置を用い、排水量は 0.03cm^3 (体積ひずみ $\epsilon_v = 0.0018\%$)、軸変位 0.01mm (軸ひずみ $\epsilon_a = 0.005\%$)の精

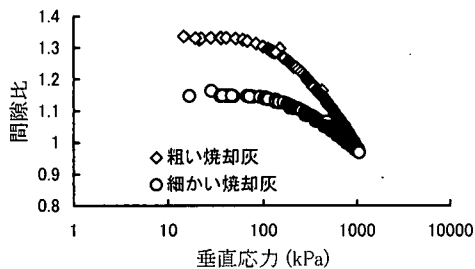


図-9 間隙比と垂直応力の関係

度で計測し、側方ひずみ ε_r ($\varepsilon_r = (\varepsilon_v - \varepsilon_a) / 2$) を求めた。試験は両面を排水状態にして行った。初期荷重においては K_0 値を仮定して応力を加え、その後鉛直荷重を1時間ごとに段階的に加え、拘束圧を制御して側方ひずみ 0.01%以下になるようにした。なお、荷重は徐々にいき、荷重中でも側方ひずみを 0.03%以下になるようにした。

図-7に細かい焼却灰の K_0 値と経過時間の関係を示す。いずれの荷重段階でも鉛直応力を加えた直後、 K_0 値は比較的小さな値を示しているが、時間が経過するにつれて一定値を示している。 K_0 値は、鉛直応力 113kPa を加えたとき、0.35~0.36の値を示しているが、鉛直応力が大きくなるほど、小さくなり、鉛直応力が 950kPa のとき 0.32~0.33 の値を示している。

図-8に粗い焼却灰の K_0 値と経過時間を示す。図-7と同様に、 K_0 値は、いずれの荷重段階でも荷重初期段階で、比較的小さいが、次第に一定値に収束している。鉛直応力 213kPa のとき、 K_0 値はほぼ 0.38 となり、鉛直応力 1085kPa のとき K_0 値は 0.36 程度を示している。鉛直応力を加えるに従って K_0 値は小さくなっている。参考文献(18)でも軸差応力が増加するに従って K_0 値が減少することが示されている。

図-7、図-8は同様な傾向を示したが、細かい焼却灰の K_0 値が粗い焼却灰より 0.03 程度小さい値を示した。

図-9に K_0 圧密試験による間隙比と垂直応力の関係を示す。初期間隙比は大きく異なるが鉛直荷重 1000kPa のときほぼ両試料の間隙比は同じ値を示している。細かい焼却灰のとき圧縮指数 $C_c = 0.23$ 、粗い焼却灰のとき圧縮指数 $C_c = 0.49$ が得られている。

5. 三軸圧縮試験

中型三軸装置で排水、非排水三軸圧縮試験を行った。供試体は、圧密試験の場合と同様である。密な供試体は、いずれも突固めで供試体を作製した。突固めによる粒子破碎はあるが、焼却灰埋立地盤の強度特性を求めることを目

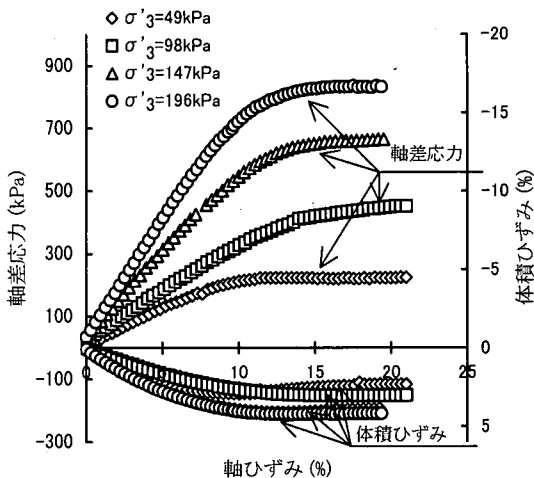


図-10 軸差応力と軸ひずみと体積ひずみの関係 ($0.8 \rho_{dmax}$)

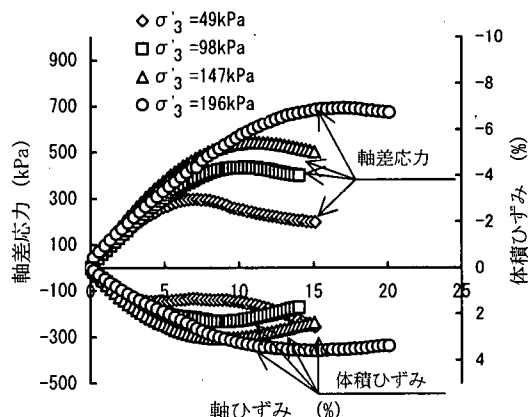


図-11 軸差応力と軸ひずみと体積ひずみの関係 ($0.9 \rho_{dmax}$)

的としたのでこの方法を採用した。なお、B値は0.9以上とした。また、拘束圧は49kPa、98kPa、147kPa、196kPaとした。

(1) 細かい焼却灰の場合

細かい焼却灰の試験では、最大乾燥密度の8割および9割で締められた供試体について排水及び非排水三軸圧縮試験を行った。

図-10、11に締め度8割、9割の細かい焼却灰を試料としたときの、排水試験による軸差応力及び体積ひずみと軸ひずみの関係をそれぞれ示す。

図-10に示すように締め度8割のとき、軸ひずみが増加するにしたがって、軸差応力は常に増加しているが、その増加の割合は拘束圧の増加とともに増加している。そして、いずれの拘束圧の場合も軸ひずみ12%程度から軸差応力はほぼ一定値を示している。また、体積ひずみは、軸ひずみが増加するに従って増加し、ほぼ10%程度から一定

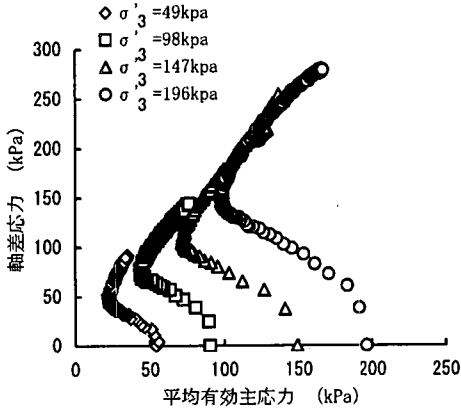


図-12 有効応力径路 ($0.8 \rho_{dmax}$)

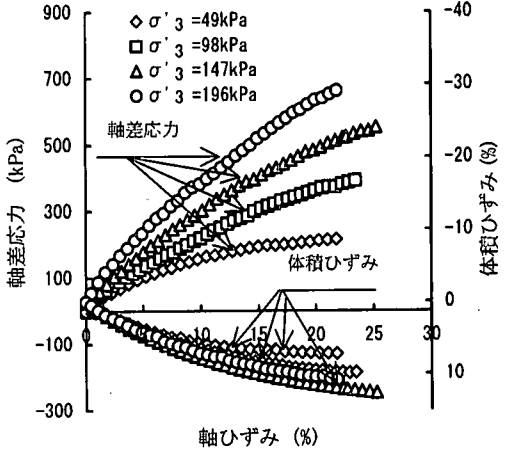


図-14 軸差応力と体積ひずみと軸ひずみの関係 ($0.7 \rho_{dmax}$)

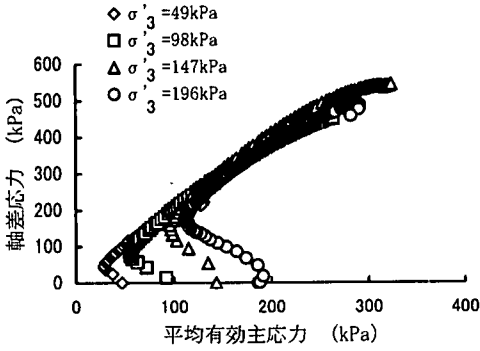


図-13 有効応力径路 ($0.9 \rho_{dmax}$)

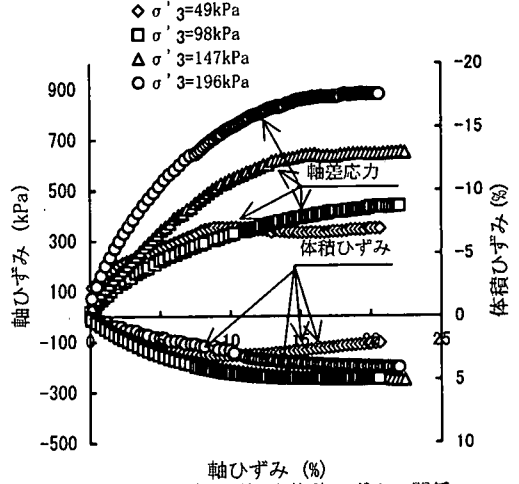


図-15 軸差応力と軸ひずみと体積ひずみの関係 ($0.8 \rho_{dmax}$)

値を示している。

図-11に示すように締固め度9割のとき、軸ひずみが増加するに従って軸差応力は増加し、その増加の割合は拘束圧が異なっても、ほぼ同じであるが、軸差応力のピーク値は拘束圧が大きくなるほど大きくなっている。体積ひずみの値は、軸ひずみが増加するに従って増加し、いずれの拘束圧でもほぼ同じ傾きで増加しているが、拘束圧が149kPaより小さいとき膨張傾向が多少窺える。

図-10と図-11の軸差応力のピーク値を比較すると、図に示すように図-10(締固め度8割)の方が大きい値である。これは供試体作製とせん断中の粒子破碎の影響と考えられる。締固め度8割の供試体はほとんど突固めを行わず作製したが、締固め度9割の供試体はかなり突固めを行って作製した。そのため、せん断開始時の粒度分布は締固め度9割の方が粒子破碎による細かい粒子(シルト分以下)多く含まれていると考えられる。

図-12, 13に締固め度8割, 9割の場合の非排水試験による有効応力径路をそれぞれ示す。

これらは同様の傾向を示しており、拘束圧が異なってもほぼ同一の破壊包絡線に至り、また、その形状もほぼ同じになっている。締固め度8割, 9割と比較的密な条件でも正のダイレイタンスを示すせん断特性はあまり現れておらず、このような焼却灰は粘土質や緩い砂質土に近い特性を示すようである。ただし、締固め度9割の場合、せん断の後半に正のダイレイタンス傾向が有効応力径路に現れている。

(2) 粗い焼却灰の場合

締固め度7割, 8割, 9割の粗い焼却灰について排水試験, 締固め度7割, 締固め度8割の粗い焼却灰について非排水試験を行った。なお、締固め度9割のときの供試体作製は、突固めエネルギーをかなり必要としたため、突固めによる粒子破碎が偏って起こらないように大きな等方圧を

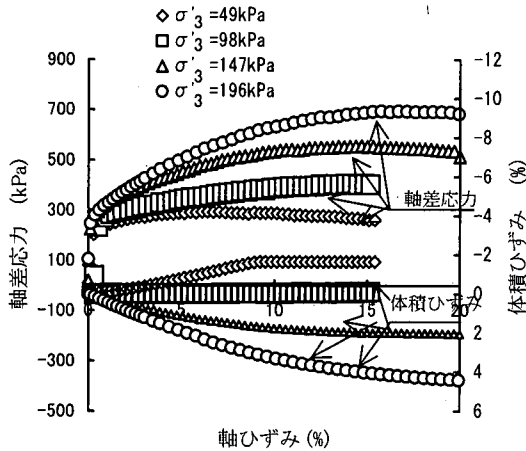


図-16 軸差応力と軸ひずみと体積ひずみの関係 ($0.9 \rho_{dmax}$)

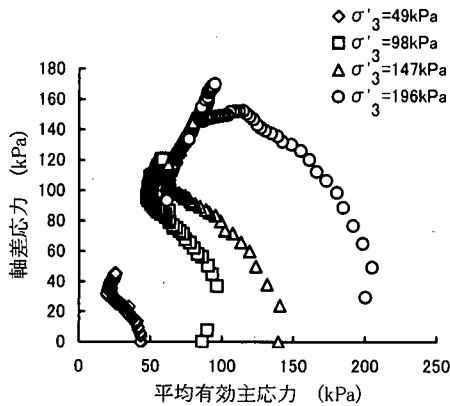


図-17 有効応力経路 ($0.7 \rho_{dmax}$)

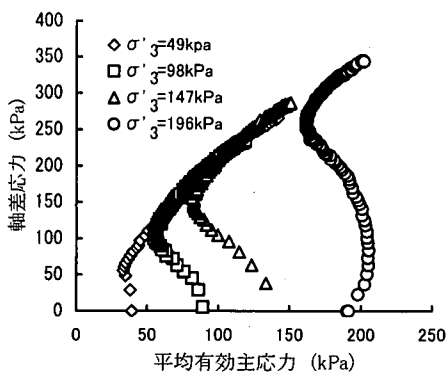


図-18 有効応力経路 ($0.8 \rho_{dmax}$)

加えて作製した。

図-14に締固め度7割, 図-15に締固め度8割, 図-16に締固め度9割のときの排水試験による軸差応力及び体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。締固め度7割のと

き, 軸差応力は軸ひずみが増加するに従ってほぼ直線的に増加し, 軸ひずみが20%になってもなお増加し続けている。また, その増加割合は拘束圧が大きいほど大きい。体積ひずみは拘束圧147kPaおよび196kPaのとき, ほぼ15%に至るなど細かい焼却灰の場合に比べて大きな値を示している。

締固め度8割のとき, 図-15に示すように軸差応力は軸ひずみが増加するに従って増加するが, 軸ひずみが15%程度でほぼ一定値を示している。体積ひずみも拘束圧が増加するに従って増加し, 軸ひずみ10%程度でほぼ一定値を示している。しかし, この体積ひずみは最大で5%程度であり, 締固め度7割の場合と比較するとかなり小さい。

締固め度9割のとき, 図-16に示すように载荷初期段階で軸差応力は軸ひずみがほとんど生じない状態で急増し, その後, 軸ひずみが増加するに従って軸差応力も増加している。そして, ピークに至った後, 軸差応力は一定値を示している。体積ひずみは, 拘束圧によって傾向が大きく異なり, 拘束圧が小さいほど膨張傾向を示している。また, 軸差応力のピークは締固め度9割の場合より締固め度8割の方が大きな値を示す。これも細かい焼却灰の場合と同様に粒子破碎により細かい粒子が増えたためと考えられる。図-16に示す締固め度9割の軸差応力のピーク値は694kPa($\sigma'_3=196\text{kPa}$)で, 図-11に示す細かい焼却灰(締固め度9割)の軸差応力のピーク値($\sigma'_3=196\text{kPa}$)とほぼ等しいことから, 実験の誤差ではないと推測できる。

図-17に締固め度7割, 図-18に締固め度8割のときの非排水圧縮試験による有効応力径路を示す。締固め度7割, 8割のとき有効応力径路は拘束圧が異なっても同一破壊包絡線に至っている。また, 有効応力径路は締固め度が異なっても, 全体的に負のダイレイタンス傾向を示しており, その傾向は拘束圧の影響を受けている。ただし, 締固め度8割のとき, 図-18に示すように有効応力径路は正の間隙水圧が締固め度7割のときよりも小さいため全体的に右に寄った形状で破壊包絡線に至っている。締固め度が大きくなったため, 正のダイレイタンスの性質が有効応力径路に多少現れてきたと考えられる。

(3) 強度特性

表-3に排水三軸圧縮試験結果を示す。破壊時の軸差応力はピーク値, または軸ひずみ15%のときの値を用い, 最小二乗法で求めた。この表より締固め度8割のときは, 粗い焼却灰が内部摩擦角 $\phi_{cd}=41.0^\circ$, 細かい焼却灰が内部摩擦角 $\phi_{cd}=42.5^\circ$, 締固め度9割のときは, 粗い焼却灰が内部摩擦角 $\phi_{cd}=35.3^\circ$, 細かい焼却灰が内部摩擦角 $\phi_{cd}=34.7^\circ$ が得られている。いずれの焼却灰も, 締固め度が同じであれば, 粗い焼却灰, 細かい焼却灰に拘わらず, ほ

表-3 排水三軸試験結果

焼却灰	締固め度 (%)	内部摩擦 (ϕ')	粘着力 (kPa)
粗い焼却灰	70	31.7	23.6
	80	41.0	19.7
	90	35.3	38.3
細かい焼却灰	80	42.5	4.09
	90	34.7	44.3

- 排水試験粗い焼却灰(70%)
- 排水試験粗い焼却灰(80%)
- 排水試験粗い焼却灰(90%)
- ▲ 排水試験細かい焼却灰(80%)
- 排水試験細かい焼却灰(90%)
- ◇ 非排水粗い焼却灰(70%)
- 非排水粗い焼却灰(80%)
- △ 非排水細かい焼却灰(80%)
- 非排水細かい焼却灰(90%)
- 排水三軸試験の近似直線
- 非排水三軸試験の近似直線

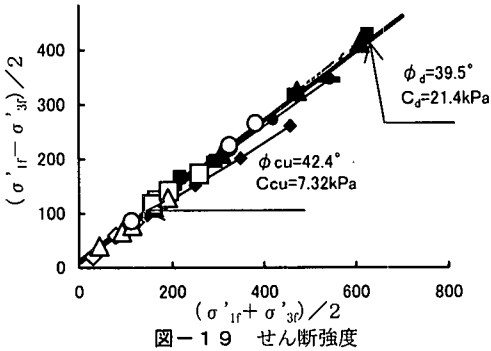


図-19 せん断強度

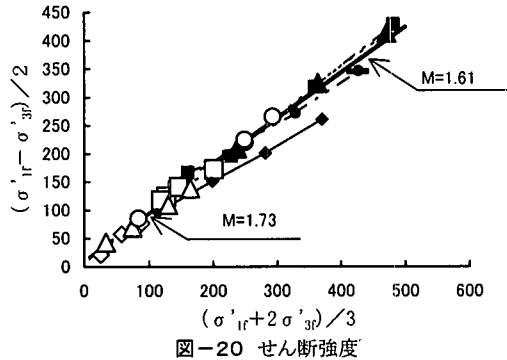


図-20 せん断強度

ほぼ同じ内部摩擦角が得られている。しかし、締固め度が大きなものの方が小さな内部摩擦角が得られている。この原因としては供試体作製のときの突固め、せん断により粒子破砕が発生し、細かい粒子が増加したため、締固め度が大きいほど逆に粘着力が増加したと考えられる。

図-19に二次元の応力表示でせん断強度のまとめを示す。排水三軸試験の結果についてはピーク値、または軸ひずみ15%での軸差応力、非排水三軸試験の結果については破壊包絡線に至ってからの軸差応力を用いてせん断強度を求めている。図に示すように粗い焼却灰、締固め度7割のときの排水及び非排水試験結果以外は、排水、非排水条

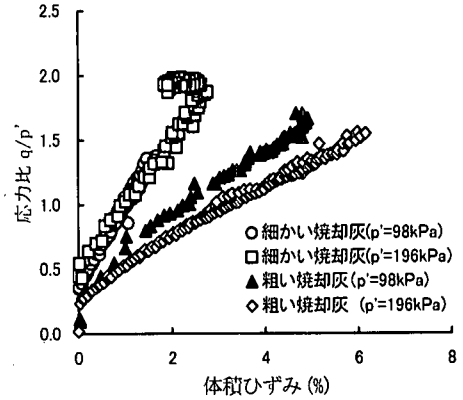


図-21 応力比と体積ひずみの関係

件によってそれぞれほとんど同一直線上にあると考え、最小二乗法により回帰直線を算出した。その結果、排水試験のデータより $\phi_{cd} = 39.5^\circ$ $C_{cd} = 21.4 \text{ kPa}$ が得られた。一方、非排水試験結果からは、 $\phi'_{cu} = 42.4^\circ$ $C'_{cu} = 7.32 \text{ kPa}$ が得られた。なお、最小二乗法の計算による相関係数はいずれも0.99以上が得られている。

図-20に三次元応力表示で軸差応力と平均有効主応力の関係を示す。軸差応力の値は図-19と同様である。図-19と同様に、締固め度7割の粗い焼却灰以外のすべての排水三軸圧縮試験結果とすべての非排水試験結果はそれぞれ直線で近似できるようなのである。そこで最小二乗法により近似した直線の傾きの2倍、Mは排水三軸試験で $M = 1.61$ 、非排水試験で $M = 1.73$ が得られた。このMは限界状態の勾配を示すものである。相関係数はそれぞれ0.99以上が得られた。Mの値が排水条件で異なるのは、排水試験の場合、軸ひずみ15%のときの軸差応力を用いているため、図-11、14~15に見られるようにまた限界状態に至っていないからと考えられる。従って、限界状態の勾配Mは非排水三軸試験結果から得られる1.73を採用した方が好ましいと考えられる。

この $M = 1.73$ から式 $M = 5 \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$ より、内部摩擦角 $\phi' = 42^\circ$ が得られる。この値をJakyの式 $K_0 = 1 - \sin \phi'$ に代入すると $K_0 = 0.33$ が得られた。この値は細かい焼却灰についての K_0 圧縮試験で得られた K_0 値とよく一致している。

6. 平均主応力一定試験

せん断中の変形を考える上で必ずダイレイタンス係数が必要である。そこでダイレイタンス係数Dを求めるために平均主応力一定試験を行った。供試体は正規圧密状態で行うために締固め度7割の粗い焼却灰と締固め度8割の細かい焼却灰とし、せん断速度は0.02mm/minの軸ひずみ速度として排水三軸圧縮試験を行った。ただし、平均主応力

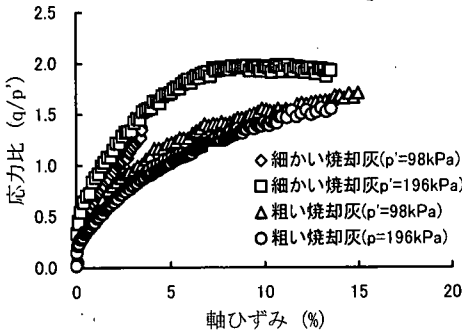


図-22 軸ひずみと応力比の関係

を一定にするために側圧を制御した。なお、制御はコンピュータで行い、計測、制御は10秒に1回の割合で行った。

図-21に応力比 q/p と体積ひずみの関係を示す。図に示すように細かい焼却灰のとき応力比と体積ひずみの関係はほぼ同一の直線で表すことができる。その結果、ダイレイタンシー係数 $D=0.05$ が得られた。粗い焼却灰のときその関係は直線的でなく、体積ひずみが小さい値から大きくなるまで応力比が曲線的に大きくなっている。以上のことから応力比と体積ひずみの関係が直線関係で表すことができるのは、粘性土のな性質が卓越する場合であり、その関係が曲線になるのは砂のような傾向を示す場合と考えてもよさそうである^{19), 20)}。すなわち、粗い焼却灰は砂に近い挙動を示すが、細かい焼却灰は粘性土に近い挙動を示すと考えられる。

図-22に応力比と軸ひずみの関係を示す。細かい焼却灰では軸ひずみ8%程度から応力比1.9で定常状態を示すが、粗い焼却灰の場合軸ひずみ15%を越えても定常状態を示さず、応力比が上昇している。細かい焼却灰の場合、応力比1.9が側圧一定試験より大きくになっているのは、図-20において最大軸差応力時の応力比を M としているためである。

7. まとめ

種々の土質試験を行い、焼却灰の土質力学特性について調べた結果、以下の挙動が認められた。

- 1) 大きな粒径の焼却灰粒子は $5\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ の粒子が結合して形成されている。
- 2) 締固め試験で得られる最大乾燥密度は通常の土質と比べ $0.2\text{g}/\text{cm}^3$ 程度小さい値が得られる。
- 3) 等方圧縮試験で得られる圧縮指数 λ は、初期間隙比が小さくなるほど小さい値を示す。
- 4) K_0 値は、粗い焼却灰のとき $0.36\sim 0.38$ 、細かい焼却灰のとき $0.32\sim 0.36$ の値を示す。
- 5) 排水三軸圧縮試験で得られる内部摩擦角 ϕ_{cd} は、粗い焼却灰と細かい焼却灰に拘わらず締固め度が一定なら

ほぼ同一の値が得られた。

- 6) 非排水三軸圧縮試験で得られる限界状態線の勾配 M から、Jacyの式で算出した K_0 値と K_0 試験で得られた K_0 値はほぼ同一の値が得られた。
- 7) 平均有効主応力一定試験により細かい焼却灰は粘性土に近い挙動を示すが、粗い焼却灰は、砂に近い挙動を示した。
- 8) 細かい焼却灰のダイレイタンシー係数は 0.021 が得られた。

参考文献

- 1) 山下 憲司：平成5年度一般廃棄物処理事業実態調査結果の概要、都市清掃、Vol. 49, No. 213, pp. 6-13, 1996。
- 2) 厚生省生活衛生局水道環境部環境整備課監修：廃棄物処理事業実態調査統計資料（一般廃棄物）、社団法人全国都市清掃会議 pp. 236, 1996。
- 3) 厚生省生活衛生局水道環境整備課監修：平成7年度版 平成5年度実績廃棄物処理事業実態調査統計資料（一般廃棄物）、1996。
- 4) 廃棄物学会編：廃棄物ハンドブック、オーム社、pp. 634, 1996。
- 5) 松本 喜博、穴澤 雄治、清水 恵助、斎藤 征剛、井深 隆史、山本 憲史、加藤 憲一、水越 和弥：東京港におけるごみ埋立地盤の土質学的研究（その1）-、第22回土質工学会研究発表会概要集 pp. 31-34, 1987。
- 6) Shinsuke Aburatani, Yosuke Hayashi, Teruhiro Nishikawa: Offshore waste disposal Osaka Bay Phoenix Project, Proceedings of the second international congress on environmental geotechnics, Vol. 3, pp. 623-628, 1996。
- 7) 松藤 康司、花嶋 正孝、長野 修治、柳瀬 龍二：廃棄物埋立地における学校の建設事例、土と基礎、Vol. 40, No. 6, pp. 17-22, 1992。
- 8) 岩谷 文方、三宅 達夫、和田 真郷、丸山 敦司：尼崎フェニックスにおける焼却灰の力学的特性、土と基礎、pp. 5-10, 1992。
- 9) 前野 祐二、平田 登基男、永瀬 英生：焼却灰の土質力学特性と有効利用、土木学会論文集、No. 568/III-39, pp. 199-207, 1997。
- 10) 平田 登基男、前野 祐二：一般廃棄物の土質力学特性とその改善方法、土と基礎、pp. 29-34, 1992。
- 11) 前野 祐二、平田 登基男、永瀬 英生：都市ごみ焼却灰の土質力学特性、廃棄物学会論文誌、Vol. 9, No. 1, pp. 29-38, 1998。
- 12) 森 満雄、阿部 道雄：礫まじり土の締固め密度の推定に関する基礎的研究、明星大学研究紀要理工学部32号、pp. 105-113, 1996。
- 13) 河上 房義、新編土質力学、森北出版、1969。
- 14) 吉村 優次、小川 正二：砂の等方圧密およびせん断特性に

- 及ぼす粒子形状の影響, 土木学会論文集, No. 487/III-26, pp. 187-196, 1994.
- 15) 三浦 哲彦, 山内 豊総: 高拘束圧下における標準砂の非排水せん断特性について, 土木学会論文集, No. 193, pp. 69-79, 1971.
- 16) 服部 隆行, 瀬戸 一法, 坂口 賢明, 北川 隆司, 日下部 治: 風化した広島型花崗岩の力学特性, 土木学会論文集, No. 589/III-42, pp. 1-10, 1998.
- 17) 海野 隆哉, 軽部 大蔵: 新規制定の「土の K_0 圧密試験三軸試験方法」について, 土と基礎, Vol. 43, No. 9, pp. 78-84, 1995.
- 18) 小田 美明, 三田地 利之: 飽和粘度の三軸 K_0 圧密試験方法について, 土木学会論文集, No. 448/III-19, pp. 45-52, 1992.
- 19) 柴田 徹: 粘土のダライタンスー, 京都防災研究年報第6号, pp. 128-134, 1963.
- 20) 村山朔郎, 八木 則夫: 京都防災研究所年報, No. 7, pp. 24-30, 1946.

(1998. 6. 29 受付)

SOME GEOTECHNICAL PROPERTIES OF BOTTOM ASH CONTAINING COARSE GRANULAR MATERIALS

Yuji MAENO, Tokio HIRATA, Hideo NAGASE, Masatoshi YAMAUCHI and Megumi MIHARA

Bottom granulated ash is discharged by all incineration plants for municipal waste and is buried at disposal sites as general solid waste. It is important to make use of these sites. However, the mechanical properties of bottom ash have not been well understood. The particle properties of typical bottom ash were observed with a scanning type electron microscope in the study. Various tests including the compaction test, isotopic consolidation test, drain triaxial compression test and undrained triaxial compression test were conducted on bottom ash. As a result, the particle shape characteristics of bottom ash, the particle breakage property, critical state line, coefficient of earth pressure at rest, stress-strain behavior and dilatancy characteristics of the materials are presented.