

焼却灰の土質力学特性と有効利用

前野祐二¹・平田 登基男²・永瀬 英生³

¹正会員 鹿児島高専助教授 土木工学科 (〒899-51 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 (〒899-51 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 北九州市戸畑区仙水町1-1)

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。そこで、焼却灰を試料とした圧縮試験、三軸試験、さらにセメント、消石灰を用いて安定処理した焼却灰を試料とした突固めによる締固め試験、CBR試験、一軸圧縮試験、溶出試験を行った。これらの実験結果と従来からの研究を比較しながら、焼却灰の土質力学特性、安定処理した焼却灰の路床材、路盤材への適用について検討した。その結果、焼却灰は、比較的大きな強度であることと、安定処理した焼却灰は、力学的には路床材、路盤材に利用できることが明らかになった。

Key Words: bottom ash, triaxial test, cement, lime, stabilized base course

1. まえがき

今日、ますます増え続ける一般及び産業廃棄物処分は、重要な課題となっている。しかし、最終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。また、一般廃棄物のひとつである焼却灰は、全国の焼却施設から排出され、その総量は、3,863t/日(1990)にも達している。この焼却灰は一般廃棄物埋立地に埋立処分されている。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。さらに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の開発が一層高まってきている。また、この焼却灰を埋立柱材、路盤材として活用することは、埋立処分地がなくなりつつある大都市では急務を要する問題である。

近年、焼却灰の有効利用を図るために焼却灰の溶融が考えられているが、まだコストなどいろいろな問題を抱えているため、実用化の例は少ない。

そこで本研究は、一般廃棄物埋立地の中で大きな割合を占めている焼却灰で埋立てられた処分地の跡地利用と焼却灰の有効利用を目的として、焼却灰の土質力学特性とセメント、消石灰で安定処理した焼却灰の土質力学特性と有効利用について検討した。

2. 焼却灰の物理特性

焼却灰は、鹿児島市の焼却施設から採取したもので、表-1にその焼却灰の物理特性を示す。

表に示すように灰分がほとんどであり、不燃分に鉄分が5.8%含まれ、その他には(ガラス、陶器類)が22.7%含まれている。土工学的分類は粒度分布より砂質土に分類される。土粒子密度は2.49g/cm³と普通の砂などと比較すると小さい値である。

3. 溶出試験

表-2に有害物質の溶出試験結果を示す。表に示すように鉛の溶出量は0.30mg/lと0.37mg/lが得られ、水質環境基準を満たしていないが、鉛以外は水質環境基準を満たしている。

この溶出試験結果は従来の研究結果²⁾と比較してもほぼ

表-1 物理特性

組成分析				
灰分	不燃分			
	合計	鉄分	その他	
71.5%	28.5%	5.8%	22.7%	
粒度分布				
れき分	砂分	20μ以下	均等係数	曲率係数
43.8%	49.8%	6.4%	20.96	1.07
強熱減量		土粒子密度 ρ _s =2.49g/cm ³		
灰分	全体	最大間隙比	2.583	
11.7%	8.4%	最小間隙比	1.692	

表-2 化学的成分

対象	水質環境基準 mg/l	溶出試験 mg/l
アルキル水銀	検出されない	検出されない
総水銀	0.0005 以下	0.0005 未満
カドミウム	0.01 以下	0.005 未満
鉛	0.01 以下	0.37, 0.30
六価クロム	0.05 以下	0.05 未満
シアン	検出されない	検出されない
PCB	検出されない	検出されない

同様な値が得られている。そこで本研究では、セメント、消石灰の添加が鉛の溶出に与える影響についても検討を行った。

4. 焼却灰の静的な締め固め

焼却灰の静的な締め固め特性を明らかにするために落下高さかほとんどない空中落下法で緩詰め供試体を作成し、三軸圧縮試験機で等方圧密を行った。なお、焼却灰は 2mm 以下の通過試料を用いた。

図-1 に間隙比と有効平均主応力の関係を示す。

図に示すように焼却灰の初期間隙比は 1.92 (0.853g/cm^3) とかなり緩詰めであり、平均有効主応力が 784.8kPa のときでも間隙比は 1.41 である。この値は付記の緩い砂^③と比較すると大きな値を示している。焼却灰の圧縮指数 λ が 0.424 ($C_e=0.424/0.434=0.977$)^④、かなり緩詰め砂の圧縮指数 λ が 0.008 である^③。従って、焼却灰は、標準砂などと比較すると静的な圧力で大きく圧縮することが明らかになった。このような特異な圧縮特性を示す理由は、この焼却灰がポーラスであることと、粒子破碎が原因と考えられる。そこで静的な締め固めによる粒子破碎を計測した。緩詰め状態で供試体を作成し、等方圧縮を行ったのち、粒度を測定した。図-2 は、その結果で平均有効主応力による粒度分布の変化を示している。

図に示すように応力加えるに従って粒子破碎が増加している。また、粒径別に比較すると細粒分 ($F_c \leq 75 \mu\text{m}$)

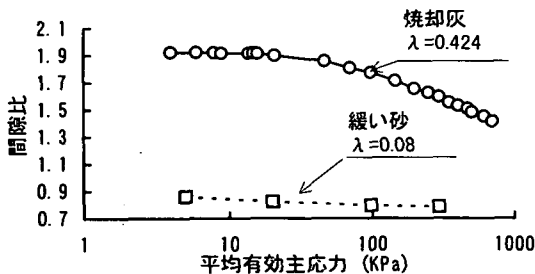


図-1 間隙比と平均有効主応力の関係

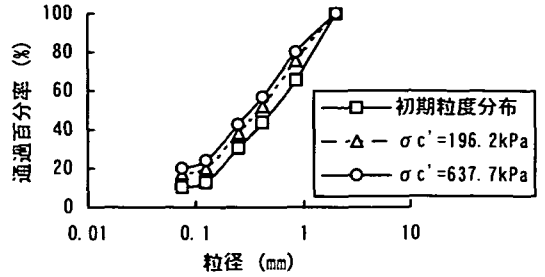


図-2 平均有効主応力による粒度分布

は $\sigma'_c=637.7\text{kPa}$ のとき増加量 (ΔF_c) が 9.4% である。この試料では等方圧縮だけで比較的大きな破碎が発生している。従って、図-1 に示す間隙比の急激な低下は粒子破碎が原因と考えられる。

従来の研究で、大型圧密試験機 (直径 30cm) による焼却灰の圧縮指数は 0.437~0.045 が得られている^⑤。なお、この大型試験機で得られた圧縮指数は、れき分 (鉄や陶器類、石など) も含んだ焼却灰の圧縮指数である。この 2mm 以下の焼却灰は、圧縮性がかなり大きいことが明らかになった。

5. 焼却灰の三軸試験

焼却灰の土質力学特性を明らかにするために、排水三軸試験と非排水三軸試験を行った。なお、試料はK市の焼却処理施設から採取後、乾燥させ、2mm 以下の通過させたものである。このような 2mm 以下だけの灰の力学特性を調べたのは、以下の理由による。すなわち、鹿児島県のある焼却処理施設では、ごみの分別収集が徹底し、この 2mm 以下の焼却灰と同様な不燃分を全く含まない焼却灰を排出している。他の地域でもこれから分別収集の徹底が進むことにより、この 2mm 以下の焼却灰が多く含まれる焼却灰が排出されるようになる。従って、このような焼却灰の力学特性に実際に適用できると考えているからである。

供試体は、空中落下法で落下高さがほとんどない緩詰め状態で供試体を作成した後、 CO_2 を 30 分間通気させ、更に脱気水を通水して B 値が 0.9 以上になるまで飽和させた。

供試体は、緩詰め状態と密詰め状態のものを作成した。緩詰めは 20.0kPa、密詰めは 637.7kPa の等方圧力を供試体に加え、せん断試験の前に予め締め固めたものである。なお、緩詰め供試体の間隙比は 1.90 (乾燥密度 0.858g/cm^3)、密詰め供試体の間隙比は 1.49 (乾燥密度 1.0g/cm^3) である。

他機関の研究で焼却灰の投入シミュレーションの結果、深さ 4~7m の間の乾燥密度が $0.75\sim0.8\text{g/cm}^3$ の値が得られている^⑥。従って、緩詰め焼却灰の乾燥密度は、この実験結果よりもわずかに大きな値であるので、海上埋立地盤

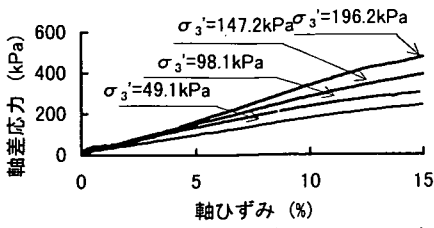


図-3 軸差応力と軸ひずみの関係 (緩CD)

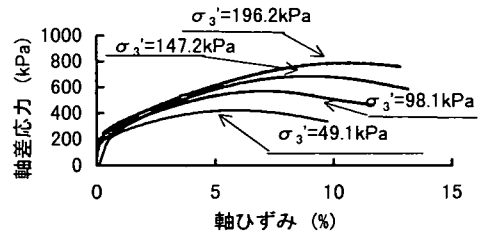


図-5 軸差応力と軸ひずみの関係 (密CD)

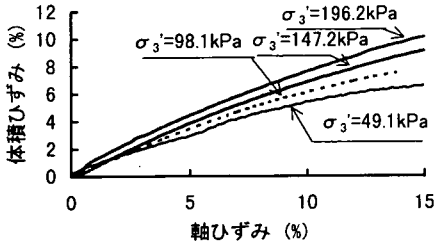


図-4 体積ひずみと軸ひずみの関係 (緩CD)

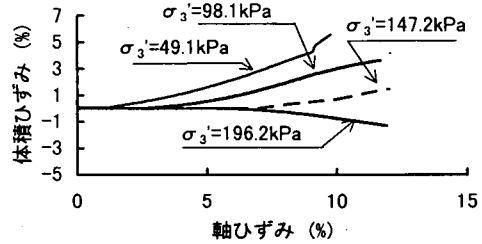


図-6 体積ひずみと軸ひずみの関係 (密CD)

に適応した密度と考えるとよいだろう。また、密締め供試体は、この焼却灰の最大乾燥密度が、 $1.25\text{g}/\text{cm}^3$ なので最大乾燥密度の8割 ($0.8\rho_{\text{max}}$) に相当する。

なお、せん断時の拘束圧は 49.1kPa, 98.1kPa, 147.2kPa, 196.2kPa とした。

(1) 排水三軸試験

緩詰め、密詰め状態での供試体を用いて排水三軸圧縮試験を行った。

図-3に緩詰め状態でのCD試験の軸差応力と軸ひずみの関係、図-4にその体積ひずみと軸ひずみの関係を示している。なお、体積ひずみは(+)が圧縮を示す。

図に示すように緩詰めの場合、軸ひずみが増すとともに直線的に軸差応力が上昇し、軸ひずみが15%になっても軸差応力のピークは現れていない。

体積ひずみも同様に軸ひずみが増すとともに直線的に上昇している。また、拘束圧が大きくなるに従って体積ひずみの値は大きくなっている。

図-5に密詰め状態でのCD試験の軸差応力と軸ひずみの関係、図-6に体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。図に示すように密詰めの場合、ひずみが小さいときに急激に軸差応力が増加し、変相点が現れている。変相点を過ぎてからも軸差応力は上昇し、ピークが現れている。また、体積ひずみは、軸ひずみが増えるときに生じていないが、軸ひずみが増えるほど体積ひずみが生じ、体積が小さくなっている。すなわち、通常の砂のようなダイレイタンスによる体積の増加は見られない。参考文献(6)に同様な傾向

の結果が得られている。

図-7に排水三軸試験の強度特性を示す。この図より緩詰めするとき内部摩擦角 $\phi = 25.8^\circ$ 、密詰め状態の時、 $\phi = 34.9^\circ$ 、粘着力は緩詰め状態のとき $C = 51.0\text{kPa}$ 、密詰め状態のとき $C = 77.8\text{kPa}$ が得られた。すなわち、締固めの程度によって、内部摩擦角が特に大きく改善され、また、粘着力も改善されていることが明らかになった。参考文献(5)に示された焼却灰の大型一面せん断試験結果では $0.8\rho_{\text{max}}$ (最大乾燥密度の8割) のとき粘着力 $13.7 \sim 86.3\text{kPa}$ 、せん断抵抗角 $11.8^\circ \sim 37.3^\circ$ が得られている。従って、本実験で得られた粘着力は、れき分を含んだ焼却灰と比較しても、大きな値を示す。

(2) 非排水三軸試験

非排水条件での三軸圧縮試験も行った。供試体は排水三軸試験と同様な方法で作成した緩詰めと密詰め状態を使用した。

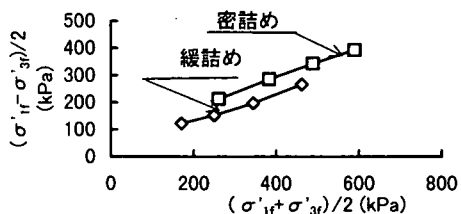


図-7 強度特性 (CD)

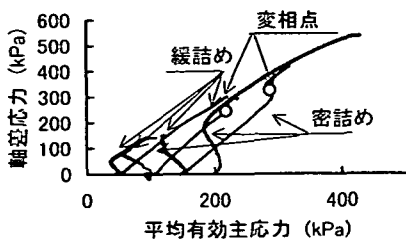


図-8 有効応力径路 (CUC)

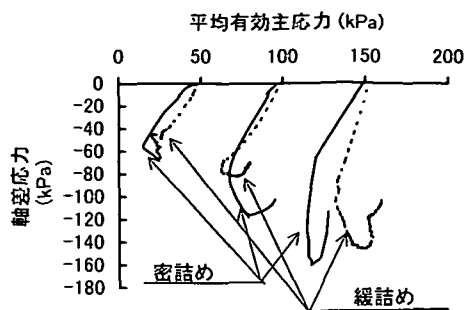


図-10 有効応力径路 (CUE)

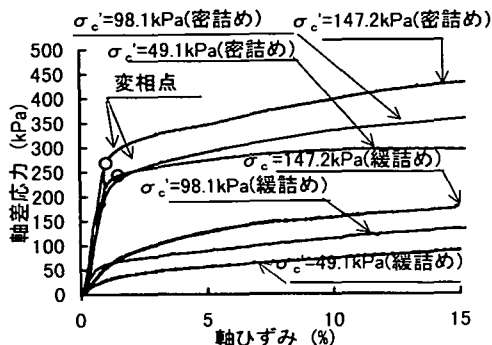


図-9 軸差応力と軸ひずみの関係 (CUC)

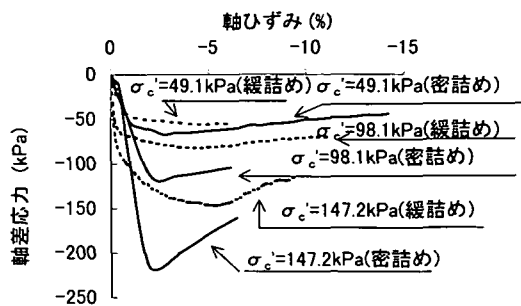


図-11 軸差応力と軸ひずみ (CUE)

緩詰め、密詰めの両状態の有効応力径路を図-8に、軸差応力と軸ひずみの関係を図-9に示す。図に示すように緩詰めの場合は、軸差応力が小さいときから間隙水圧が生じるため、応力パスは原点側に曲がりながら、破壊包絡線に至っている。一方、密詰めの場合は、軸差応力が小さいときは、ほとんど間隙水圧が生じず、軸差応力だけが增加するが、やがて変相点が生じ、間隙水圧が生じ、破壊包絡線に至っている。また、密詰めの場合の変相点は、図-9に示すように軸ひずみが小さな内に生じているが、緩詰めの場合、明確な変相点は生じていない。

次に非排水条件で緩詰め、密詰め両状態で三軸伸張試験を行った。

図-10に緩詰め、密詰め状態の有効応力径路を、図-11に緩詰め、密詰め状態の軸差応力と軸ひずみ関係を示す。

緩詰めと密詰めの応力径路を比較するとほぼ同様な形状の有効応力径路を示すが、密詰めの方が破壊時に大きな軸差応力を示している。軸ひずみと軸差応力は密詰め、緩詰め両方とも軸ひずみの小さなときにピークが生じている。密詰めはピーク後、軸差応力が急激に減少しているが緩詰めの場合は緩やかに減少している。

図-12に非排水三軸圧縮・伸張試験の強度特性を示す。これより、圧縮試験のとき、緩詰め状態が内部摩擦角 $\phi'=33.3^\circ$ 、粘着力 $C'=3.24\text{kPa}$ 、密詰め状態が、内部摩擦角 $\phi'=31.0^\circ$ 、粘着力 $C'=27.6\text{kPa}$ を得ている。非

水三軸圧縮試験とは異なり、密詰め、緩詰めの内部摩擦角は、ほぼ同じであるが粘着力は密詰めが緩詰めより、大きな値である。

伸張試験のとき、緩詰め状態が内部摩擦角 $\phi'=23.2^\circ$ 、粘着力 $C'=14.5\text{kPa}$ 、密詰め状態が内部摩擦角 $\phi'=27.5^\circ$ 、粘着力 $C'=25.7\text{kPa}$ を得た。すなわち、密詰め状態になることにより内部摩擦角と粘着力は多少改善されている。

これら非排水三軸圧縮・伸張試験結果より、この焼却灰は、内部摩擦角が大きく、粘着力もあり、比較的に大きな強度を示しているが、伸張強度は、圧縮強度と比較すると内部摩擦角、粘着力いずれも小さな値を示す。すでに焼却灰の繰返し非排水三軸試験で伸張側に大きなひずみが生じることを指摘している^{9,7)}。

以上のように全体的に圧縮強度に比べ、伸張強度が小さな値を示していることが明らかになった。緩詰めと密詰め

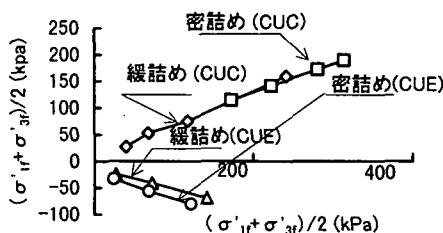


図-12 強度定数 (CU)

を比較すると粘着力が増加しているのは、有効拘束圧が大きくなるほどせん断応力が大きくなるため、粒子破碎の影響をより顕著に受けたからではないかと考えられる。文献8)でも密に締められた砂のモール破壊包絡線は、粒子破碎を生じる応力域において凸形にカーブすることを示している。

6. 突固め特性

図-13、図-14は焼却灰にセメント、消石灰を添加したときの突固め特性を示している。

図-13はA(ランマー重量24.5N、モールド内径10cm、突固め層数3、一層当たりの突固め回数25回、締固めエネルギー $55\text{cm}\cdot\text{N}/\text{cm}^2$)の突固め方法で、図-14はE(ランマー重量44.1N、モールド内径15cm、突固め層数3、一層当たりの突固め回数92回、締固めエネルギー $245\text{cm}\cdot\text{N}/\text{cm}^2$)の突固め方法で締固めたときの乾燥密度と含水比の関係を示している。なお、セメント、消石灰の添加率は2%、4%、6%としている。この添加率は乾燥土粒子重量に対する比率である。

また、試料は乾燥後、セメント、消石灰を添加して、5分間混合後、水を加えて含水比調整を行ってから、更に10分

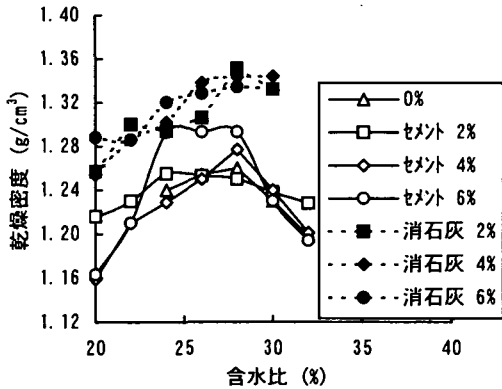


図-13 突固め特性 (A)

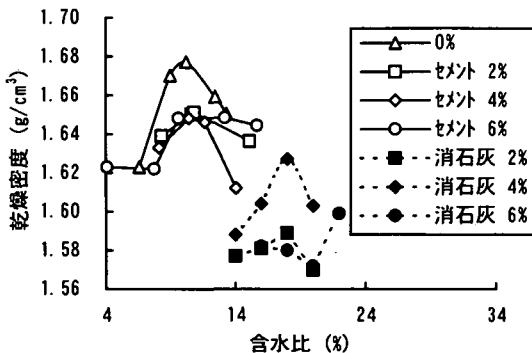


図-14 突固め特性 (E)

表-3 乾燥密度とCBR値

最大粒径	2mm	5mm	37.5mm
乾燥密度(g/cm^3)	1.61	1.61	1.62
CBR値 (%)	0.7%	0.7%	1.0%

間混合した。

図-13に示すようにAで突固めた場合、最適含水比は消石灰、セメントいずれを添加しても28%を示す。一方、最大乾燥密度は、セメント添加率を増やすに従って、その値はわずかに増加している。しかし、消石灰添加率を増やしても最大乾燥密度は、ほとんど変わらない。

Aの突固めによる最大乾燥密度は、全体的に消石灰を添加した場合が、セメントを添加した場合より大きな値を示す。

図-14に示すように、セメントを添加した焼却灰をEで突固めた場合、セメント添加率が異なっても、最適含水比12%、最大乾燥密度は $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ である。また、消石灰を添加した焼却灰の場合、添加率が変わっても、最適含水比は18%である。しかし、消石灰を添加した焼却灰の最大乾燥密度は、添加率が4%のときに他の添加率の場合と比較するとわずかではあるが大きな値である。

Eの突固めによる最大乾燥密度は、セメントを添加した場合の方が消石灰を添加した場合より、全体的に少しだけ大きな値を示している。

以上のことから、締固めエネルギーが大きいとき、最適含水比が小さいので、添加材としてセメントが最大乾燥密度を改善するのに適しているが、締固めエネルギーが小さいとき、最適含水比が大きいため、消石灰が最大乾燥密度を改善するのに適しているようである。

7. CBR試験

焼却灰を路床材として用いるためにCBR試験を行った。実験は焼却灰の2mm、5mm、37.5mmふるい通過試料(最適含水比12%、突固め方法E)を用いてCBR試験を行い、最大粒径の影響を考察した。表-3にその結果を示している。37.5mmふるい通過試料のCBR値は、1.0%、2mm、5mmふるい通過試料のCBR値は0.7%となり、3つの値はいずれも小さな値を示しているが、この3つの試料の中では、最大粒径がもっとも大きな37.5mmふるい通過試料のCBR値がわずかではあるが最も大きな値を示している。しかし、いずれにしても1%以下であることからこのままでは路床材として使うことはできない。

(1) セメント安定処理

実験は、19mmふるい通過の焼却灰にセメント量2%、4%、6%を添加して、7日(空气中4日、水浸3日)の養生後、CBR試験を行った。

図-15にCBR値とセメント添加率の関係を示して

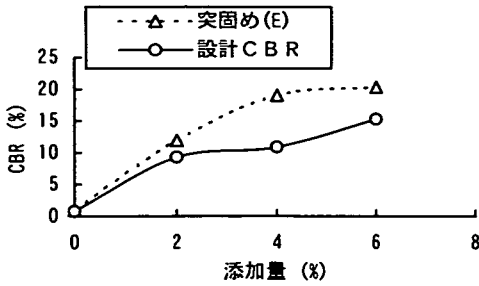


図-15 CBR値とセメント添加率の関係

いる。図に付記されている設計CBR値は1層当たり67回3層(ランマー重量44.1N, モルト内径15cm, 締固めエネルギー $175\text{cm}\cdot\text{N}/\text{cm}^2$)で突固めた供試体のCBR値である。この値を併記したのは、路床材としての判定の基準に設計CBR値が使用されているからである。図に示すようにCBR値はセメント添加率2%で11.9%, セメント添加率4%で19.09%, セメント添加率6%で20.29%が得られている。また、設計CBR値はセメント添加率2%で9.3%, セメント添加率4%で10.5%, セメント添加率6%で15.2%が得られた。一方、アスファルト舗装要綱に安定処理の路床材は、設計CBR値が3%以上が必要と規定されている。従って、セメント2%添加の焼却灰でも9.3%の設計CBR値が得られているので、このCBR値は基準を満たしている。

(2) 消石灰安定処理

実験は、19mmふるい通過の焼却灰に消石灰量2, 4, 6%を添加して、10日(空気中6日, 水浸4日)の養生後、CBR試験を行った。

図-16に最適含水比18%の焼却灰に消石灰を添加した場合のCBR値と石灰添加率との関係を示す。

図に示すようにCBR値, 設計CBR値はいずれも石灰の添加により急激に強度が増加している。消石灰添加率

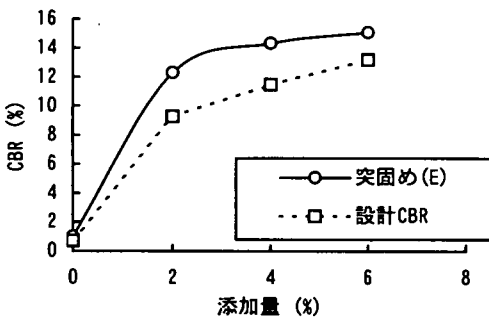


図-16 CBR値と消石灰添加率の関係(最適含水比)

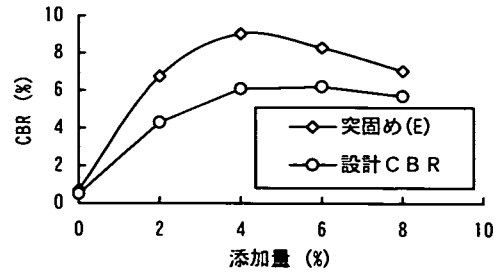


図-17 CBR値と消石灰添加率の関係(含水比37%)

2%以上でその設計CBR値は、3%以上なので、路床材に利用することが可能である。しかし、図-15のセメント安定処理の場合と比較するとCBR値は全体的に小さい。

以上のように消石灰を添加した焼却灰のCBR値は比較的大きいので、さらに焼却施設から排出された試料を含水比調整せずに十分な強度が得られるか検討した。

焼却施設から排出されたままの含水比(37%)の焼却灰に消石灰を添加して、突固めて供試体を作成した後、CBR試験を行った。

図-17は、その焼却灰に消石灰を添加した場合のCBR値と消石灰添加率の関係を示す。添加率は2, 4, 6, 8%とした。図に示すように消石灰が添加されていないとき、CBR値は0.45%とかなり小さな値を示しているが、消石灰を添加することにより急激にCBR値は上昇している。しかし、消石灰を4%以上添加しても、CBR値は上昇しなかった。また、設計CBR値もCBR値と同様な結果を示している。しかし、消石灰2%添加の場合でも設計CBR値は4%なので、路床材としての基準を満足している。

8. 一軸圧縮試験

路盤材としての利用可能性を検討するために焼却灰にセ

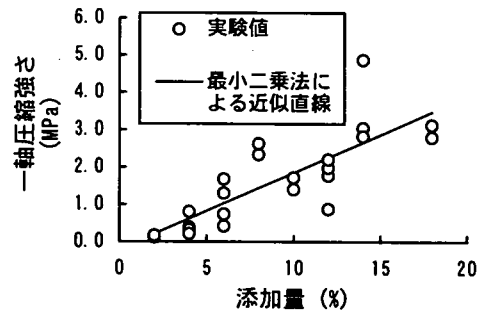


図-18 一軸圧縮強度とセメント添加率の関係

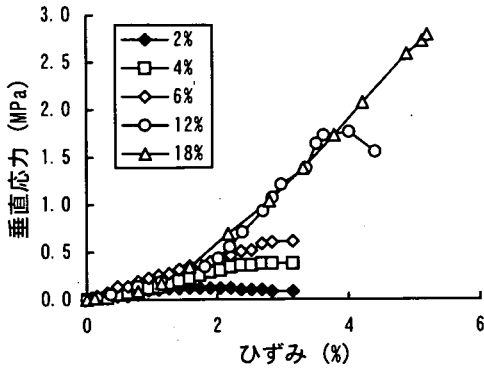


図-19 垂直応力と軸ひずみの関係

メントや消石灰を添加し、突固めた後、一軸圧縮試験を行った。なお、この試験では19mmふるい通過の焼却灰を用いた。

(1) セメント安定処理

セメントを2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18%添加した焼却灰の一軸圧縮試験(養生7日)を行った。なお、含水比は最適含水比28%に調整した

図-18に最適含水比で突固めた試料の一軸圧縮強さとセメント添加率の関係を示す。しかし、焼却灰自体がいろいろなものを含んでいるので強度が必ずしも一定値を示しているとはいえないが、この図が示すようにセメント添加率が増加するにつれて、直線的に一軸圧縮強さが増加している。

このデータを基に最小二乗法で近似直線を計算すると以下ようになる。

$$q_u = 0.2035X - 0.193$$

(q_u : 一軸圧縮強度 (MPa), X : 添加率(%))

なお、相関係数は0.84が得られた。

図-19はセメントの添加率ごとの圧縮応力と軸ひずみの関係を示している。この曲線の傾きである変形係数 E_{50} は、セメント添加率2%で2.7MPa、セメント添加率4%で8.8MPa、セメント添加率6%で12.0MPaであり、セメント添

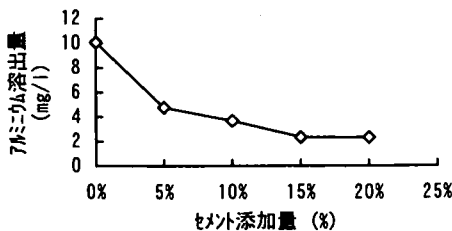


図-20 アルミニウム溶出量とセメント添加率の関係

加率が増加するにつれてその値が大きくなっている。しかし、セメント添加率12%~18%の焼却灰は、0%~2%までの軸ひずみのとき、変形係数が15.0MPa、それ以上の軸ひずみのとき、73.0MPaとなっている。すなわち、焼却灰はセメント添加率12%以下のとき変形係数 E_{50} の改善により、一軸圧縮強度を改善できるが、それ以上のセメント添加率を増やしても、単純に変形係数の改善はできないようである。

マサ土にセメントを添加した場合、セメント添加率4%で一軸圧縮強度は、2.5MPaに改善されているが、この結果と本論の焼却灰にセメント添加した場合を比較すると、本論の一軸圧縮強度は全体的に小さな値を示している。

セメントを添加した焼却灰がこのような強度特性を示す原因は、焼却灰に含まれるアルミニウムがセメントの水酸化カルシウム($\text{Ca}(\text{OH})_2$)と反応して水素ガスを発生するためであると考えられる¹⁰。

図-20にアルミニウム溶出量とセメント添加率の関係を示す。なお、溶出試験は環境庁の「産業廃棄物に含まれる金属などの検定方法、環境庁告示第13号、題名改正昭和55.10.29環境庁告示59号」に従って検液の作成、検定を行った。用いた試料は、焼却灰にセメント5, 10, 15, 20%を添加、突固め方法Aで突固めた後、1週間(空气中)恒温室で養生した。その後、その供試体を、砕き、さらに乳鉢で細かく砕いた試料の5mmふるい通過試料を用いて溶出試験を行った。検定は原子吸光法で行った。

図に示すようにアルミニウムの溶出量はセメント添加率0%~10%のときセメント添加率が増えるに従って、溶出量が、減少している。しかし、セメント添加率10%~20%のとき、アルミニウムの溶出量はほぼ一定値を示す。

以上のことからセメントを焼却灰に添加した場合、セメント添加率10%前後まで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がアルミニウムと化学反応し、水素ガスを発生するために、ポーラスな供試体ができて、通常安定処理土と比較して小さな強度が得られると考えられる。セメント添加率10%以上では、アルミニウム

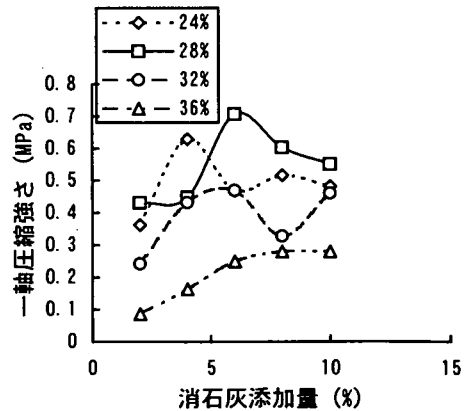


図-21 一軸圧縮強度と消石灰添加率の関係

との化学反応による水素ガスの増加量は少なくなり、珪酸カルシウム水和物や水酸化カルシウムが水素ガス発生でできた間隙を充填するが、間隙が十分に充填されず、上記のような強度特性が発現したと考えられる。

(2) 消石灰安定処理

消石灰2, 4, 6, 8, 10(%) 添加した焼却灰でAの突固めで供試体を作成後、一軸圧縮試験(養生10, 水浸6日, 空气中4日)を行った。

図-2.1に一軸圧縮強度と消石灰添加率の関係を示している。同じ消石灰添加率の中で、最適含水比に調整した焼却灰が必ずしも最大の一軸圧縮強度を示さなかったため、含水比毎に図示した。図に示すように消石灰添加率が2%, 6%, 8%のとき、最適含水比28%の試料が、他の含水比の試料よりも大きな一軸圧縮強度を示している。しかし、消石灰添加率4%のとき、含水比24%の試料が最も大きな一軸圧縮強度を示している。

消石灰添加率6%, 含水比28%の一軸圧縮強度は、他の消石灰添加の一軸圧縮強度と比較すると最も大きな値を示している。すなわち、消石灰添加率を6%以上増加させても、強度増加はできない。また、焼却場から排出された時の含水比に近い36%で調整した焼却灰は、消石灰の添加率が8%以下のとき添加量が增加するにつれて、一軸圧縮強度が增加しているが、添加量が8%以上のとき増加していない。

以上のことから消石灰添加率が増えるに従って必ずしも一軸圧縮強度が増えるとは言えないことが明らかになった。

9. セメント、消石灰添加による鉛溶出への影響

セメント、消石灰が添加された焼却灰の鉛溶出を調べた。図-2.2に鉛溶出率と添加率の関係を示している。

溶出試験は、8.(1)で記述した検定試験法および試料作成法による。なお、消石灰を添加した供試体は養生期間を消石灰を添加したものは10日間(空气中)恒温で養生した。なお、この実験で用いた焼却灰は焼却灰の排出ピットから採取したもので、3.で用いた焼却灰は焼却炉から排出され、ベルトコンベアーで運ばれている途中のものを採

取している。そのため、この実験で用いられている添加率0%の鉛の溶出量は表-2の鉛の溶出量よりも小さな値になっている。

図-2.2に示すようにセメントを添加した場合、添加率5%のときの溶出量は、添加物を加えないときの溶出量の約半分になっている。しかし、それ以上セメント添加率を増加させても溶出量は変化していない。

消石灰を添加した場合、消石灰添加率5%のときの溶出量は、セメントと同様に約半分になっているが、それ以上消石灰を添加した場合、逆に添加していないときの溶出量よりも大きくなっている。原因として、焼却灰の鉛は、pHが6~10では溶出しにくい¹⁾が、それ以上にpHが大きくなる²⁾か、小さくなると溶出しやすくなる³⁾ことから、消石灰を添加した場合pHが高くなり、逆に溶出しやすくなったと考えられる。

10. 結論

焼却灰を試料とした各種土質試験結果を検討し、以下の知見を得た。

- 1) 焼却灰は、静的圧縮で急激に圧縮されやすいが、もともとの間隙比が大きいため、標準砂などの間隙比と比較すると大きな間隙比を有する。
- 2) 排水三軸試験の結果より、緩詰め状態の焼却灰は応力が増加するとともに直線的にひずみは増加する。一方、密詰め状態の焼却灰は、急激にひずみが増加し、変相点に至るが、その後も強度が増加しピークを示す。また、その強度特性である内部摩擦角、粘着力は密詰め状態の方がわずかに大きい値を示す。
- 3) 非排水三軸圧縮試験の結果により、密詰め、緩詰め状態とも内部摩擦角はほとんど変わらないが、粘着力は密詰めの方が少し大きな値である。
- 4) 非排水三軸伸張試験の試験結果により、内部摩擦角、粘着力いずれも密詰めの方が、緩詰めより多少大きい値を示している。
- 5) 最適含水比に調整した焼却灰は消石灰、セメントを添加すると急激にCBR値が改善され、路床材として十分な力学強度が得られた。また、焼却施設から排出された状態の焼却灰は、含水比が35%~40%と高い値であるが、消石灰を2%添加しただけで、路床材として利用できるまでの力学強度まで改善できた。
- 6) 焼却灰はセメント添加率8%以上で下層路盤材(0.98Mpa以上)¹⁾に、セメント添加率18%以上で上層路盤材(2.9Mpa以上)²⁾に利用できる一軸圧縮強度が得られる。
- 7) 焼却灰に消石灰を添加した場合、添加率6%で最大の一軸圧縮強度0.7Mpaが得られた。しかし、それ以上消石灰の添加率を増やしても、強度が増加していな

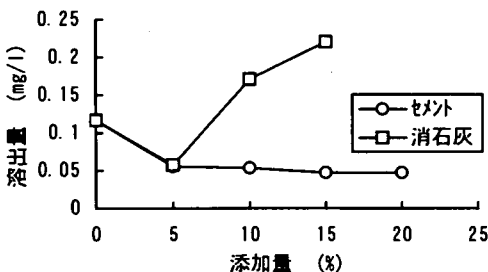


図-2.2 鉛溶出量と添加率の関係

い。従って、消石灰を添加した焼却灰は路盤材に利用することは難しい。

- 8) 焼却灰にセメント、消石灰を添加することにより鉛の溶出を減少させることはできるが、水質環境基準を下回ることはできない。

以上のように焼却灰のせん断特性、セメント、消石灰の安定処理による強度増加は明らかになった。

なお、本研究を進めるに当たり、鹿児島高専の土木工学科の卒研(平成6年度、平成7年度)諸君と鹿児島県工業技術センター神野氏、新村氏等の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境庁編, 平成7年版環境白書, p.174, 大蔵省印刷局, 1995.
- 2) 貴田 晶子, 野馬 幸生: 焼却灰の溶出特性, 都市清掃, 第41巻, 第164号, pp.223-228, 1988.
- 3) 木村 正孝, 宮田 隆雄, 野間口 明義, 関 元治: 低圧力下における砂の圧縮・膨張特性, 土木学会第43回年次学術講演概要集, pp.352-353, 1988.
- 4) Shoji, M., Ohata H., Matsumoto, T. and Morikawa, S.: Safety control of embankment foundation based on elastic-plastic analysis, 土質工学会論文報告集, Vol. 29, No. 2, pp.112-126, 1989.
- 5) 平田 登基男, 花嶋 正孝, 柳瀬 龍二: 焼却灰の土質特性, 鹿児島工業高等専門学校研究報告, 27号, pp.59-66, 1993.
- 6) 岩谷 文方, 三宅 達夫, 和田 真郷, 丸山 敦司: 尼崎沖フェニックスにおける焼却灰の力学特性, 土と基礎 Vol. 40, No. 6, pp.5-10, 1992.
- 7) 前野 祐二, 平田 登基男, 花嶋 正孝, 柳瀬 龍二: 地盤振動が焼却灰の埋立地盤に与える影響について, 第1回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.165-168, 1994.
- 8) 三浦 哲彦, 山内 豊聡: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集, 第260号, pp.109-118, 1977.
- 9) (社) 土質工学会編, 土質試験の方法と解説, p.244, 1990.
- 10) 沼田 和彦, 橘田 一臣, 丸田 俊久: 都市ごみ焼却灰の固化に関する一考察, 第31回地盤工学研究発表会講演概要集 pp.319-320, 1996.
- 11) 貴田 晶子, 野馬 幸生, 今田 輝二: 焼却残渣中の元素の溶出特性, 埋立地における高塩類問題と技術的対応, 廃棄物埋立処理処分部会報告書, 廃棄物学会研究委員会廃棄物埋立処理処分会編 pp.63-78, 1996.
- 12) (社) 日本道路協会編, アスファルト舗装要綱, pp.76-78, 1988.

(1996. 7. 1 受付)

MECHANICAL PROPERTIES OF BOTTOM ASH AND UTILIZATION OF STABILIZED BOTTOM ASH

Yuji MAENO, Tokio HIRATA and Hideo NAGASE

Bottom ash is discharged from every regional incineration plants and is buried at final disposal sites as general waste. It is significant to make use of these sites and bottom ash. Several series of drain triaxial compression tests and undrain triaxial compression tests of bottom ash were conducted in this study. Comparing the results of these experiments with those of past researches about bottom ash, this paper make the mechanical properties of bottom ash obvious. Moreover, several compaction tests, unconfined compression tests, CBR tests and dissolution tests of bottom ash stabilized by cement or lime were performed to investigate the utilization of bottom ash. Consequently, it was clear that the stabilized bottom ash can be utilized into a base course.