

一般廃棄物焼却灰の土質特性の経時変化

土居 洋一¹・今泉 繁良²・山田 充彦³

¹ 正会員 宇都宮大学大学院 博士後期課程(〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)

² 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学研究科エネルギー環境科学専攻(〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)

³ 学生会員 宇都宮大学大学院 博士前期課程(〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)

一般廃棄物は、多くの場合焼却処理され、焼却灰の形で管理型処分場に埋立て処理される。この一般廃棄物焼却灰の埋立地盤は、長い年月を経て人工地盤を形成する。焼却灰の特性は従来の家庭ゴミとは物性が異なるため、埋立後の地盤特性に関しては不明な点が多い。そこで、都市ごみ焼却灰(炉底灰)を対象として、締め固め試験、一軸圧縮試験、透水試験、圧密試験を行った。特に、これらの特性に関する長期的な経時変化に着目して、短期的結果と比較しながら検討した。その結果、焼却灰は、経時的な強度の増加及び透水性の低下、圧縮性の減少等の特徴を有することを明らかにした。そして、これらの特徴が焼却灰中に含まれるカルシウムの水和反応に基づくことを、X線回折のスペクトル図、電子顕微鏡写真等の観察により示した。

Key Words : MSW-ash, curing times, properties of soil mechanics, ettringite scanning electron microscope

1. はじめに

わが国では、年間約5,000万トン(平成8年実績:5,110万トン)の一般廃棄物が排出されている¹⁾。この結果、国民一人当たりの一般廃棄物の排出量は、約1kg/日であり、回収された一般廃棄物は、体積の減量化及び衛生面的配慮から焼却処理されることになる。

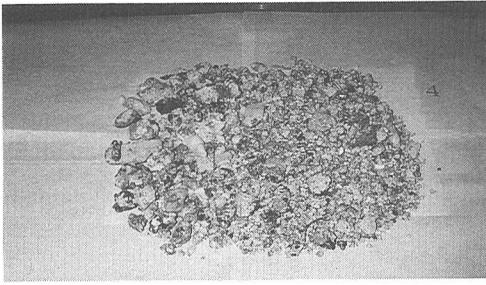
焼却された後の一般廃棄物焼却灰(都市ごみ焼却灰)は、有害重金属を含むことが多いため、そのまま建設資材として利用することは不可能であり、大部分が廃棄物最終処分場に埋立処分されている。他方、国土の狭いわが国では、廃棄物処分場が閉鎖された後の有効利用、すなわち跡地利用の問題は重要なことであることから、近年処分場に埋め立てられる焼却灰の土質工学的性質を把握する努力が進められている²⁾。

ところで、都市ごみの性質は、地域や季節によって変動するものであり、それを焼却した灰の物性も大きなバラツキを持つ。また、焼却炉の形式の違いによる差も大きい。焼却灰の化学組成成分を見ると基本的にカルシウムが多いが、鉄、シリカ等の含有量の違いが示されている。重金属等に関しては、ス

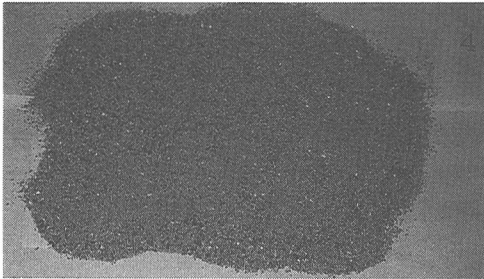
トカー炉の場合²⁾、火格子より下に落ちた炉底灰(ボトムアッシュ)では、鉛で730~11,500(mg/kg)、カドミウムで13~174(mg/kg)と含有量の違いも示されている。

都市ごみ焼却灰の土質工学的性質に関しては、焼却灰はもともとの間隙比が2.5~3.0と大きく、静的圧縮でも十分に圧縮される事が確認されている²⁾。また、最適含水比に調整した焼却灰に消石灰やセメントを添加した場合、CBR値が改善され、強度的には路床材料としての使用が可能な事も確認されている³⁾。海面埋立される都市ごみ焼却灰の性質について述べたものに、大阪フェニックス計画に基づく海面埋立処分場での採取試料の調査結果がある⁴⁾。これによると、焼却灰及び混合焼却灰の埋立を再現した圧密試験の結果、透水係数はほぼ 10^{-4} ~ 10^{-3} cm/secのオーダーで砂地盤と同等であり、盛土等による沈下は少なく、地盤の強度増加はあまり期待できないとされている。

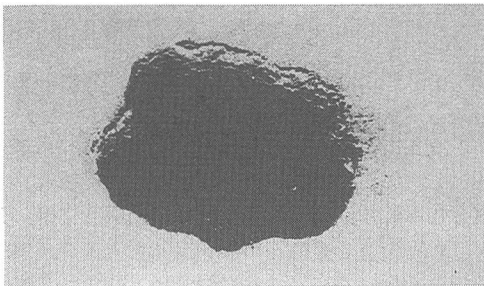
以上のように都市ごみ焼却灰を締め固めたときの基本的な土質特性は徐々に明らかになりつつあるが、都市ごみ焼却灰のなかには、CaOを30%以上含むものもあり、このCaOの存在により、土質特性、特に力学特性が時間の経過に伴い変化することが考えら



写真一 焼却灰（礫分）



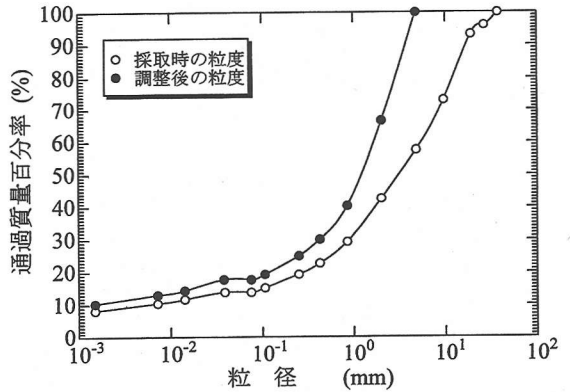
写真二 焼却灰（砂分）



写真三 焼却灰（細粒分）

れる。焼却灰の力学特性の経時変化は、跡地利用に際しての構造物設計のための基礎データとしてのみならず、埋め立て供用期間中における圧密沈下や排水能力にも影響を与え、しいては、投入可能な焼却灰容量の見積り、雨水・浸出水用の集排水システムの設計にも影響を与える重要な因子であると考えられる。しかしながら、今日まで都市ごみ焼却灰の力学特性の時間経過に伴う変化を実験的に明らかにした研究は見あたらない。

本研究では、締固めた都市ごみ焼却灰（炉底灰）に対して、一軸圧縮試験、透水試験、圧密試験を実施し、これらの特性の経時変化を明らかにすると共に、走査型電子顕微鏡観察とX線回折によって、その構造的根拠についても考察する。



図一 第2回採取焼却灰の粒度分布

表一 4.75mmふるいを通過した焼却灰の物理特性

	第1回採取	第2回採取
比重	2.549	2.516
液性限界	49.6%	NP
塑性限界	NP	NP
排出時含水比	55.6%	43.4%
粒度組成	礫分	16.3%
	砂分	53.7%
	細粒分	30.0%
		33.4%
		48.8%
		17.7%

2. 焼却灰の物理・化学的特性

(1) 物理・化学特性

使用した焼却灰はA市のストーカー炉を使用している焼却施設から採取した炉底灰（ボトムアッシュ）であり、冷却のために加水され湿潤状態にある。写真一～三は、採取時焼却灰をその粒径に従い、礫分、砂分、細粒分として示したものである。写真より、礫分（写真一）は鉄、ガラス、陶磁器等を多く含んでおり、表面的観察では空隙の多いポーラスな材料である。砂分（写真二）は、粒径の整った焼却灰と細かな不燃物物質から構成されており、全体のほぼ5割を占めている。このように、採取したままの焼却灰は不燃物である鉄、ガラス、陶磁器等の挟在物を含んでいるため、4.75mmふるい通過分を実験に用いた。

焼却灰の粒度分布を図一に、4.75mmふるいを通過した焼却灰の物理的特性を表一に示す。表より、4.75mmふるいを通過する焼却灰は、砂分が全体のほぼ半分を占めており、アッターベルク特性を考慮し

表一3 溶出量分析結果

単位: mg/ℓ

計量の対象	第1回採取 試料の結果	第2回採取 試料の結果	第2回採取 材令180日	基準値※1
水銀又はその化合物	0.0005未満	0.0005未満	0.0005未満	0.005以下
カドミウム又はその化合物	0.03未満	0.03未満	0.03未満	0.3以下
鉛又はその化合物	0.28	0.13	0.03未満	0.3以下
六価クロム又はその化合物	0.15未満	0.15未満	0.15未満	1.5以下
砒素又はその化合物	0.03未満	0.03未満	0.03未満	0.3以下
セレン又はその化合物	0.03未満	0.03未満	0.03未満	0.3以下

※1 総理府令第5号「有害な産業廃棄物に係わる判定基準を定める総理府令」(昭和48年制定、平成10年改定)

表一2 含有量分析結果

酸化物	第1回採取 含有量(%)	第2回採取 含有量(%)	普通ポルトランド セメント 含有量(%)
K ₂ O	—	1.10	—
Cl	1.98	1.17	—
SiO ₂	20.60	26.3	22.9
Fe ₂ O ₃	5.07	5.87	3.1
Al ₂ O ₃	14.30	13.7	5.2
CaO	22.10	23.9	64.2
MgO	2.57	2.70	1.4
灼熱減量	—	4.8	0.7

た日本統一土質分類に従うと、砂質土「SF」に分類される。また、比重は2.5~2.7の範囲にあるものが多いと報告されている⁵⁾とおり、今回の焼却灰の比重もこの範囲にある。なお、表一1の第1回採取と第2回採取の間には1年の時間経過があり、両者の物理的特性はかなり異なっている。このように、同一の焼却炉から排出された灰でも時期の違いにより、特性が異なるのが焼却灰の特徴と考える。以下の力学試験では、第2回採取の試料を使用した。

(2) 含有成分と重金属の溶出量

表一2は採取した焼却灰の化学組成を酸化物の比率で示したものである。また、普通ポルトランドセメントの鉱物組成も参考値⁹⁾として示した。

今回力学試験に使用する第2回採取の焼却灰は、ケイ酸が26%と最も多く、次いで酸化カルシウム(24%)、酸化アルミニウム(14%)となっている。酸化カルシウム含有率は、セメントに比べると1/3であるが、ケイ酸含有量はセメントとほぼ同じであり、セメントの組成に近いものであることがわかる。焼成温度や粒子寸法が異なるため、発現強度に違いがあると考えられるが、焼却灰も時間と共に固結する性質、すなわち、経時的な強度増加が期待される。

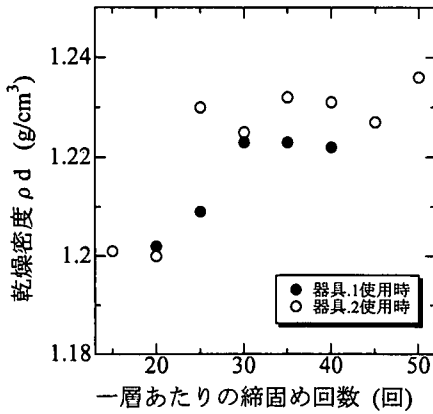
片岡らは⁷⁾、石炭灰の強度発現に関して、酸化カルシウムが多く、かつ酸性率 $(SiO_2+Al_2O_3)/(Fe_2O_3+CaO+MgO)$ が小さいほど一軸圧縮強度が大きくなることを指摘している。今回の焼却灰の酸性率は、第1回採取試料で117%、第2回採取試料では123%である。これに対して、普通ポルトランドセメントは40%、石炭灰では5~10%であるので、今回の試料の酸性率はセメントの約3倍であるが、強度の発現性が考えられる。

表一3は、環境計量証明事業所に依頼して実施した有害物質の溶出試験結果である。なお、分析は環境庁告示第13号「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」(S48.2.17)に則り行なわれた。表一3に示すように、第1回採取試料の鉛の溶出量が0.28 mg/ℓと他の物質に比較して多いが、総理府令第5号「有害な産業廃棄物に係わる判定基準を定める総理府令」(昭和48年)に定める判定値内に収まっており、管理型最終処分場に埋立処理することができる。

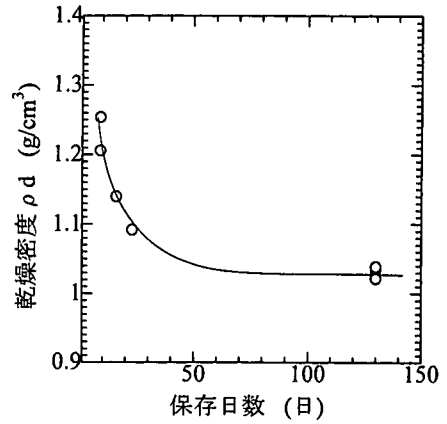
3. 締固め特性

一般廃棄物は、焼却施設において焼却処理後、灰の飛散防止の為に加水され、ダンプトラックで最終処分場に運搬され、ブルドーザー等で敷均し・締固められる。実際の処分場での焼却灰の特性をとらえるために、焼却施設から搬出される時の含水比での締固め特性を把握した。比較のために、試料を一旦空気乾燥させた後、最適含水比と最大乾燥密度を求めるための締固め試験も行った。

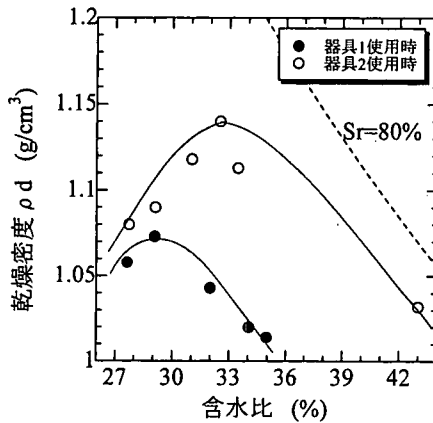
締固め試験では、直径10cmモールドと質量2.5kgで落下高さ30cmのランマーを用いることがJSF T711に定める方法であるが、後述する一軸圧縮試験と透水試験では、直径5cm高さ10cmの供試体を、圧密試験では直径6cm高さ2cmの供試体を用いるので、これらの供試体作製の締固め基準値を求めるために、



図一2 締固め回数と密度の関係



図一4 保存日数と締固め密度の関係



図一3 締固め試験結果

直径 5cm高さ10cmのモールドと質量1.175kg, 高さ 15.04cmのランマーを用いる締固め試験も行った。本論文では、前者を「器具1」、後者を「器具2」と呼ぶことにする。

排出時の含水比(43%)一定のもとで、「器具1」と「器具2」の両者を用いて、締固め層数を3層にして、一層当たりの締固め回数を変化させて実施した。

図一2は、一層当たりの締固め回数と乾燥密度の関係を示したものである。図より、「器具1」と「器具2」の両者とも、一層当たりの締固め回数が30回までは、締固め回数の増加と共に乾燥密度が増加する傾向が見られるが、それ以降は締固め回数を増加させても、乾燥密度はほぼ1.23g/cm³の一定値となる傾向がある。

図一3は最適含水比を求めるために行った締固め試験の結果である。「器具1」と「器具2」に対して、締固めエネルギーが同じ(55.18cm・N/cm³)となるように3層25回の条件で締固めた。図より、

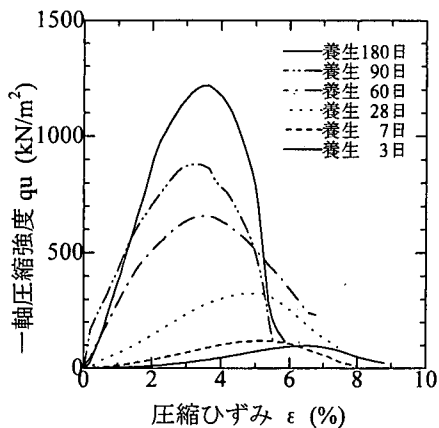
「器具1」による最適含水比は29.1%であり、その時の最大乾燥密度として1.07g/cm³を得た。他方、「器具2」では、最適含水比が32.5%で、最大乾燥密度が1.14g/cm³である。

ところで、これらの乾燥密度の値は、排出時含水比(43%)に対して得られた図一2に示す一層当たり25回締固め時の乾燥密度1.23g/cm³より小さく、不合理な結果となった。この原因としては、試料を一度乾燥させたことによる影響と試料採取後の締固め試験実施までの保存時間の違い(図一2に示した試験実施までの保存時間は9日間、図一3に示した試験実施までの保存時間は約70日)および後述するように含有カルシウム等の水和反応による団粒化の影響によるものと思われる。すなわち、図一4は排出時含水比で保管した試料の保存日数が締固め密度に与える影響を見るために、「器具2」を用いて3層25回で締固め試験を行った結果を示したものである。保存日数の増加に伴い最大乾燥密度が減少していることがわかる。図一3における43%の試験結果は、保存日数を考慮し図一4において保存日数70日に相当する $\rho_d=1.03\text{g/cm}^3$ の値をプロットしたものである。飽和度(Sr=80%)一定曲線を考慮するとこの点は、最適含水比以上における含水比に対する乾燥密度の低下を示す傾向の延長上にあると思われる。

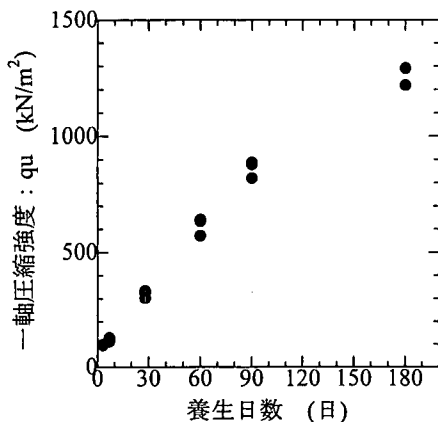
4. 一軸圧縮強度

(1) 試験方法

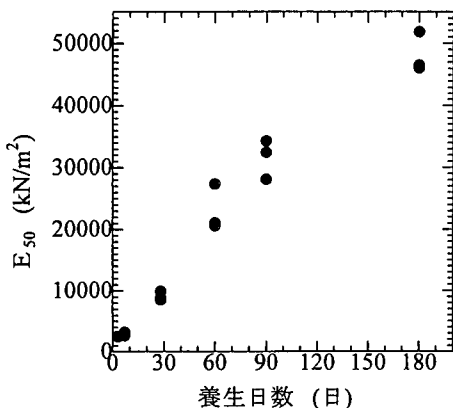
供試体の作製は、排出時含水比(43%)で「器具2」を用いて3層30回の締固めを実施した。この時、作製した供試体の乾燥密度が、 $1.20 \pm 0.02\text{g/cm}^3$ と



図一五 一軸圧縮強度の応力ひずみ曲線



図一六 一軸圧縮強度と養生日数の関係



図一七 E₅₀と養生日数の関係

なるように管理した。

供試体作製後、モールドを高分子フィルムシートで密封し、室温20℃、湿度60%の恒温室内で1、3、30、60、90、180日間養生した。所定の日数養生後、JSF T 511「土の一軸圧縮試験方法」に従い、軸ひずみ

速度を1%/minとして、圧縮力が最大値を示した後、その2/3に減少するまで軸ひずみを与えた。

(2) 試験結果と考察

各養生日数の一軸圧縮試験より得られた代表的な供試体（試験した3本の供試体中の平均的供試体）の応力-ひずみ曲線を図一5に示す。図から、締固められた焼却灰は養生日数と共に強度が増加し、ピーク強度を示すひずみも減少する傾向があり、剛性が大きくなるのがわかる。これらの傾向は、粘性土にセメントや石灰等を添加したときの養生効果の傾向⁸⁾と一致している。

一軸圧縮強さと養生日数の関係を図一6に示す。

図より、養生日数180日の範囲では養生日数と共に強度が増加し、特に90日までは直線関係にある。養生90日での強度は882kN/m²であり、養生3日での強度(98kN/m²)に比べ9倍になっている。石灰灰⁷⁾の場合、自硬性に伴う強度増加は養生30日ごろにピークとなり、その値は1000kN/m²であり、その後は著しい強度の増加は生じず平衡状態となるとされており、これと比べると、強度増加の程度が大きい。

図一7は、E₅₀と養生日数の関係を示したものであり、E₅₀も養生日数と共に増加している。養生1日から3日のE₅₀は、2,940kN/m²と低い、これは図一5からも分かるように、破壊ひずみが7.0%である塑性的な性質によるものである。

5. 透水係数

(1) 試験方法

排出時含水比の焼却灰で、「器具2」を用いて、3層30回の締固め条件で乾燥密度が1.20±0.02g/cm³となるように供試体を作製した。供試体作製後、モールド全体を高分子フィルムシートで密封し、室温20℃、湿度60%の恒温室内で1、3、30、60、90、180日間養生した。

所定の期間養生後、図一8(a)に示すように供試体の入ったモールドの上下端に試料への通水が出来るようにポーラスストーンを置き、これを有孔アルミニウム板で挟む形で固定した後、底部に脱気水を浸した真空槽内に設置した。次に、槽内を真空ポンプで約1日間吸引し供試体内部を脱気飽和した。その後、図一8(b)に示すように、脱気水で満たした越流水槽内に供試体を移し、供試体下部のアルミニウム板にスタンドパイプから通じるパイプを接合し、時間変化に伴うスタンドパイプ内の水位(h)の低下

表-4 透水試験結果一覧表

養生日数 (日)	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙比	飽和度 (%)	透水係数 (cm/s)
0	1.160	1.170	97.66	8.39E-06
3	1.158	1.254	96.74	9.59E-06
7	1.152	1.183	102.06	8.39E-06
28	1.147	1.192	100.96	2.17E-06
28	1.148	1.193	94.86	2.73E-06
60	1.143	1.212	90.68	2.00E-07
60	1.139	1.212	91.83	5.29E-08
90	1.136	1.212	86.69	2.11E-08
90	1.150	1.188	90.22	4.64E-08
180	1.140	1.198	86.35	水頭差 0

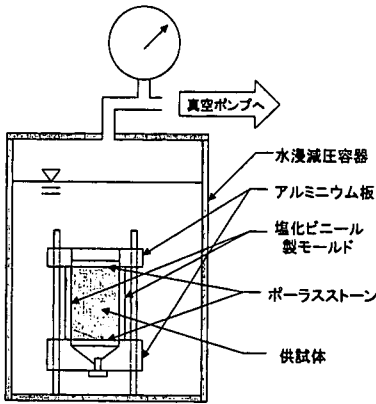


図-8 (a) 脱気装置概略図

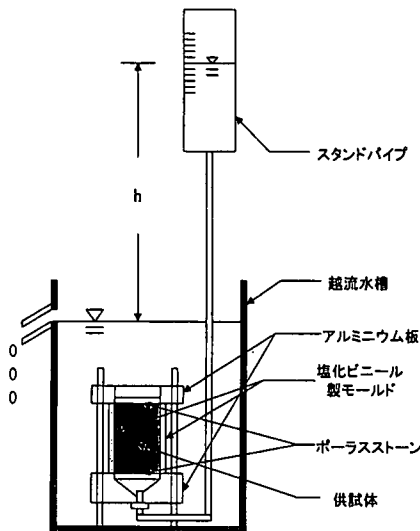


図-8 (b) 変水位透水試験装置概略図

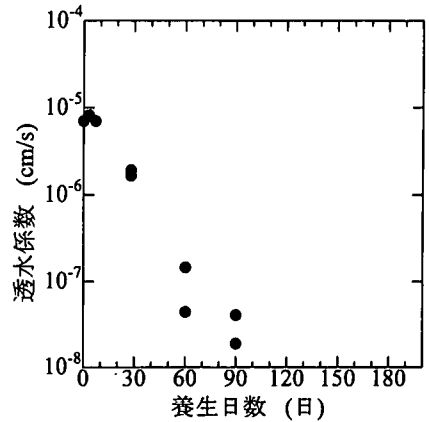


図-9 養生日数と透水係数の関係

を観測し（変水位透水試験法），透水係数を算出した。

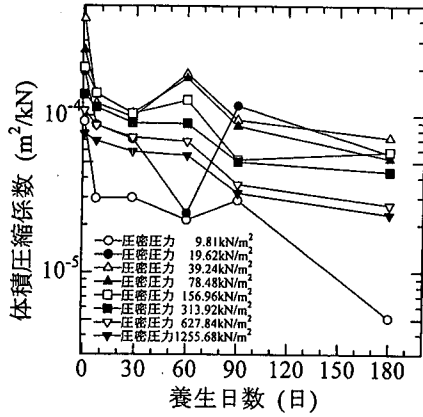
(2) 試験結果と考察

養生日数と透水係数の関係を図-9に示す。また、透水試験結果の一覧を表-4に示す。締め固め直後（養生0日）に 8×10^{-6} (cm/s)であった透水係数は、養生日数の増加に伴い急激に減少し、養生90日では 2×10^{-8} (cm/s)と養生0日の値の4/100に減少している。さらに、養生180日では160cmの水頭に対する6日間での水頭変化が0.1cmであったことより、事実上の不透水となった。

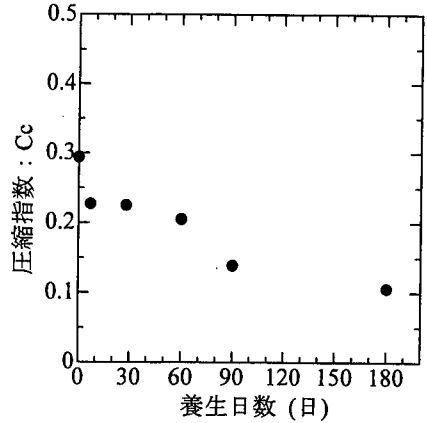
岩谷ら⁴⁾は、最適含水比で湿潤密度が0.8~1.05 g/cm³となるように締め固めた焼却灰の透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/sの範囲にあり砂地盤と同等であると

報告しているが、今回の試験結果はこれら数値の約1/100~1/10である。この差違の原因は乾燥密度の違いによるものである。

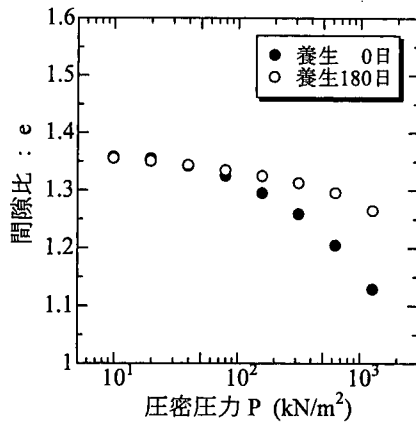
このように、焼却灰を排出時の含水比で締め固めている埋立地盤は、事実上は難透水地盤を形成すると考えられる。したがって、従来の混合型の処分場に比べて焼却灰だけを埋め立てている今日の処分場では、浸出水発生の誘因となる降雨は、内部に浸透しにくいこととなり、浸出水の絶対量が低減することになる。従来、処分場の流出係数は0.7程度を仮定しているが、透水係数が低いことはアスファルト等の舗装に於ける流出係数（0.9）程度を用いることが望ましいものと考えられる。



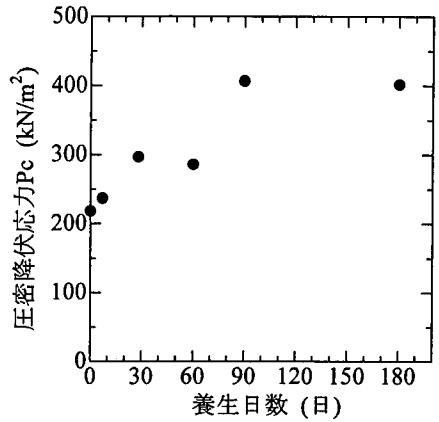
図一 1 0 養生日数と体積圧縮係数の関係



図一 1 2 圧縮指数と養生日数の関係



図一 1 1 e-logp曲線の養生日数の変化



図一 1 3 圧密降伏応力と養生日数の関係

6. 圧縮・圧密特性

(1) 試験方法

排出時含水比の焼却灰を、直径6.5cm、高さ10cmのモールドに質量1.175kg落下高さ15.04cmのランマーを用いて3層35回の条件で、乾燥密度 $1.20 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ となるように締め固めた。その後、これらの供試体をモールドごと高分子フィルムシートで密封し、室温 20°C 、湿度60%の恒温室で1, 3, 30, 60, 90, 180日間養生した。

所定の期間養生した後、JSF T 411「土の圧密試験方法」に従い、直径6cm、厚さ2cmの圧密試験用の供試体を成形し、圧密圧力を 9.8 kN/m^2 から $1,255.68 \text{ kN/m}^2$ までの8段階に変化させ、各荷重段階における圧密量を24時間計測した。

(2) 試験結果と考察

図一 1 0 は養生日数と体積圧縮係数の関係を示し

たものである。圧密試験は各養生日数ごとに3本の供試体に対して実施したので、体積圧縮係数の値としては、3本の供試体の結果の相乗平均を用いて表示した。図一 1 0 より、平均圧密応力が 156.98 kN/m^2 より大きいと、養生日数の増加に伴い体積圧縮係数が小さくなる傾向が見られ、養生30日では養生が無い場合の1/2程度に減少し、養生180日では1/4程度に減少している。しかし、平均圧密応力が 78.48 kN/m^2 以下の場合、結果のばらつきが著しく、養生日数との明確な関係を読み取ることができない。

図一 1 1 は e-logp 曲線の養生日数に伴う変化を示したものである。平均圧密応力が 156.96 kN/m^2 より大きいと、養生0日から180日の増加に伴い、間隙比が小さくなる。

圧縮指数と養生日数の関係を図一 1 2 に示す。養生無しの場合 C_c は 0.30 であったが、その後減少し養生180日には C_c が 0.10 と 3分の1以下となっている。岩谷ら⁴⁾は焼却灰と下水汚泥焼却灰を混合し、初期密度を $\rho_i = 0.8 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$ に調整して圧密試験を

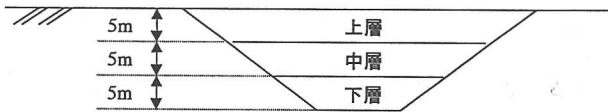


図-14 埋立状況の概略図

行い、圧縮指数 C_c が0.57~0.63にあると報告している。同時に埋立地盤では挟雑物が受け持つ上載荷重の割合が大きく、焼却灰の圧密沈下量は小さく、圧密による地盤強度の向上は期待されないと述べている。今回の実験によると6ヶ月経過後の圧縮指数 C_c の値は0.10でありこれより小さな値である。

図-13は e - $\log p$ 曲線の圧密降伏応力 P_c をキャサグランデの図解法で評価し、その値と養生日数の関係を示したものである。圧密降伏応力 P_c は養生無しでは 215kN/m^2 であったが、養生日数と共に増大し材令180日には 400kN/m^2 になっている。

(3) 圧密沈下の検討

従来、埋立処分場の埋立量の設計では、時間の経過に伴う生ごみの圧密沈下は見込まれていないが、経験的には設計処分容量の2割程度が多めに埋立て出来ると言われている。そこで、圧密試験の結果を用いた圧密量の試算を行ってみる。

圧密沈下の検討は、 i 層として敷かれた焼却灰層が、 j 層の敷設によって生じる圧密沈下量 S_{ij} は、 i 層中央部における j 層敷設前後の有効上載圧力 $P_{i,j-1}$ と $p_{i,j}$ を計算し、この圧力に対応する e - $\log p$ (図-11参照) 曲線上の間隙比 $e_{i,j-1}$ 、 $e_{i,j}$ を知ることによって、次式で計算できる。

$$S = \frac{e_{i,j-1} - e_{i,j}}{1 + e_{i,j-1}} \cdot h_i$$

ここに、 h_i は i 層の層厚(cm)

いま、埋立処分場の条件を次のように仮定する。

- ① 深さ15mの処分場に1層を5mとして3層に分けて焼却灰を埋立てる (図-14参照)。
- ② 浸出水は最下層の1層目のみ滞留する。
- ③ 焼却灰の排出時含水比における湿潤単位体積重量密度は 17kN/m^3 である。

このとき、 $p_{1,1}$ 、 $p_{1,2}$ 、 $p_{1,3}$ 、 $p_{2,2}$ 、 $p_{2,3}$ 、 $p_{3,3}$ の値は、それぞれ以下ようになる。

$$p_{1,1} = 2.5\text{m} \times (17-10)\text{kN/m}^3 = 17.5\text{kN/m}^2$$

$$p_{1,2} = 2.5\text{m} \times (17-10)\text{kN/m}^3 + 5.0\text{m} \times 17\text{kN/m}^3 = 102.5\text{kN/m}^2$$

$$p_{2,2} = p_{3,3} = 2.5\text{m} \times 17\text{kN/m}^3 = 42.5\text{kN/m}^2$$

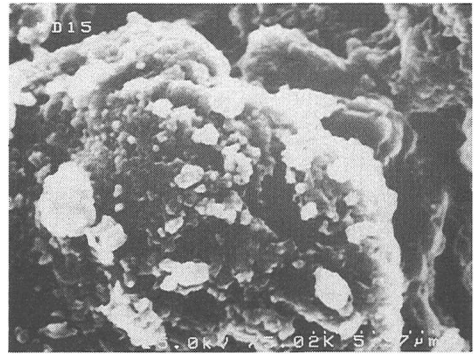


写真-4 養生0日の供試体

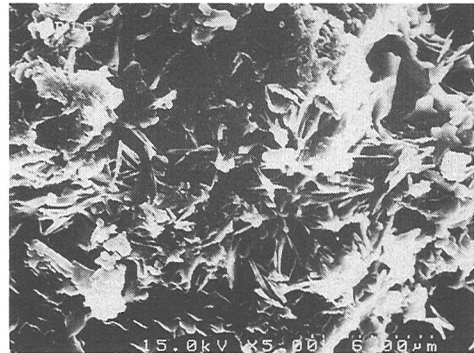


写真-5 養生180日の供試体

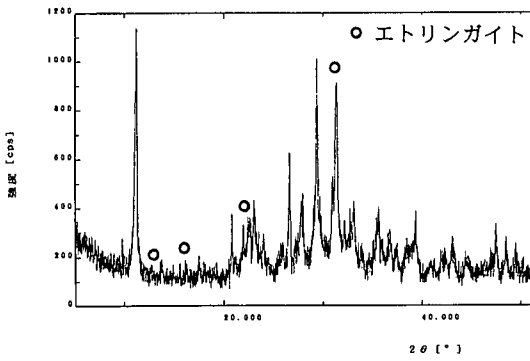
$$p_{1,3} = 2.5\text{m} \times (17-10)\text{kN/m}^3 + (5.0\text{m} + 5.0\text{m}) \times 17\text{kN/m}^3 = 187.5\text{kN/m}^2$$

$$p_{2,3} = (5.0\text{m} + 2.5\text{m}) \times 17\text{kN/m}^3 = 127.5\text{kN/m}^2$$

これらの有効上載圧に対応する間隙比は、養生日数0日の試験結果 (図-11) を用いると、 $e_{1,1} = 1.356$ 、 $e_{1,2} = 1.315$ 、 $e_{2,2} = e_{3,3} = 1.343$ 、 $e_{1,3} = 1.290$ 、 $e_{2,3} = 1.306$ となり、沈下量は1層目の埋立完了時には $s_1 = 1.5\text{cm}$ 、2層目完了時には $s_2 = 14.4\text{cm}$ 、3層目完了時には $s_3 = 31.7\text{cm}$ が得られる。

ところで、いま処分場内において、1つの層が敷き均されて、次の層が敷き均されるまでに6ヶ月以上の時間経過があるとすると、前に述べたように、この間に焼却灰は自硬現象が生じ、 e - $\log p$ 曲線も変化する。そこで、図-11に示した、養生180日の e - $\log p$ 曲線を用いると、 $e_{1,1} = 1.352$ 、 $e_{1,2} = 1.332$ 、 $e_{2,2} = e_{3,3} = 1.343$ 、 $e_{1,3} = 1.324$ 、 $e_{2,3} = 1.330$ となり、沈下量は1層目の埋立完了時は $s_1 = 0.8\text{cm}$ 、2層目完了時は $s_2 = 7.9\text{cm}$ 、3層目完了時は $s_3 = 15.1\text{cm}$ が得られる。

このように、埋め立て深さ15mに対する総沈下量は、養生0日の焼却灰では 31.7cm 、また、養生180日の焼却灰では 15.1cm となり、焼却灰単体で埋立て



図一15 X線回折結果

られた処分場の圧密沈下量は埋立層の1%程度である。この値は焼却灰混合処分地に対して、従来経験的に得られている20%と比べるとはるかに小さな値である。

7. 走査型電子顕微鏡写真とX線回折による考察

締固めた都市ごみ焼却灰は、養生日数の経過と共に一軸圧縮強度と圧密降伏応力が増大し、透水係数と圧縮指数が低下することが明らかとなった。このことを微視的構造の観点から理解するために、走査型電子顕微鏡写真の撮影とX線回折を実施した。

写真一4は排出時含水比で締固めた直後の養生0日の供試体、写真一5は180日間養生した供試体についての電子顕微鏡写真である。そして、図一15に養生180日供試体のX線回折の結果を示す。

写真一5を写真一4と比べてみると、養生180日の写真では、長さ2~3 μm の針状の物質が焼却灰粒子間に存在しているのが確認できた。これはエトリンガイトと思われる。ところで、より詳細なエトリンガイト生成の確認はX線回折において、横軸 2θ の 10° 、 $17\sim 18^\circ$ 、 $22\sim 23^\circ$ 、 $31\sim 32^\circ$ の位置にピークが現れることによって判断することでき、ことに $2\theta=10^\circ$ の位置でのピーク出現が一番確実なものである⁹⁾。図一15では、 $31\sim 32^\circ$ に大きな山が見られるが、 10° の位置でのピーク出現は弱い。このように、X線回折では、今回、全ての位置でのピークの出現を明確には確認できていないが、現状で考えられる強度発現の原因は、エトリンガイトの生成とセメントの急結作用と同様にカルシウム、アルミ等の含有成分の結合した塩（膠着物質）の生成による固結効果¹⁰⁾によるものと考えられる。

8. まとめ

近年一般廃棄物焼却灰のみを埋立処分する最終処分場が増加している。このタイプの処分場の埋立地盤の特性は、従来の焼却灰とごみとの混在型のものとは当然異なり、特に焼却灰中に含まれるカルシウム分等により、自硬性が存在することが考えられる。そこで、今回、締固めた都市ごみ焼却灰（炉底灰）の土質特性を、その経時的変化の観点から検討し、以下の知見を得た。

- (1) 排出時含水比で締固められた供試体の一軸圧縮強度は、養生日数と共に強度が増加し、養生180日で $qu=1,176\sim 1,274\text{kN/m}^2$ となった。
- (2) 排出時含水比で締固めた供試体の透水係数は、締固め直後では、 $8\times 10^{-6}\text{ (cm/s)}$ 程であったが、養生日数の増加に伴い急激に減少し、養生180日では $1\times 10^{-8}\text{ (cm/s)}$ と事実上の不透水性まで減少した。これらの透水係数の値は、従来、報告されていた値の1/100~1/10の値である。
- (3) 排出時含水比で締固めた場合の体積圧縮係数は、平均圧密応力が 156.96kN/m^2 より大きい場合には養生日数に伴い減少し、養生180日では養生が無い場合の1/4程度に減少する。
- (4) 圧縮指数は、養生無しの場合 $Cc=0.30$ であったが、その後減少し180日養生した場合には $Cc=0.10$ と1/3以下となっている。
- (5) 圧密降伏応力 pc は、養生無しでは 215kN/m^2 であるが、養生日数と共に増大し180日養生した場合 400kN/m^2 になっている。
- (6) 上に述べた力学的特性の経時変化は、焼却灰中に存在するカルシウムイオン質が水和反応した結果として生成される膠着物質とエトリンガイトの生成によるものであることが、X線回折とSEM（電子顕微鏡）写真により推察された。

参考文献

- 1) 環境庁：平成11年版環境白書，大蔵省印刷局，1999。
- 2) 産業廃棄物の処理と有効利用に関する研究委員会：地盤工学分野における廃棄物の処理と有効利用に関する調査報告書，地盤工学会，1996。
- 3) 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。
- 4) 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，Vol.40，No.6，pp.5-10，1992。

- 5) 平岡正勝, 酒井伸一: ごみ焼却飛灰の性状と処理技術の展望, 廃棄物学会誌, Vol. 5, No. 1, pp. 3-17, 1994.
- 6) 佐藤 健: セメントの諸比率・係数の工学的意味, セメント化学雑論, pp. 34-38, 1991.
- 7) 片岡哲之, 緒方信英, 岡本敏郎, 横倉俊幸: 締固めた石炭灰の強度特性, 第26土質工学会研究発表会, pp. 1883-1884, 1991.
- 8) 高橋直樹, 今泉繁良, 横山幸満: 軽焼ドロマイトで安定処理された湖沼底泥の土質特性、土と基礎、Vol. 42, No. 8, pp. 29-34, 1994.
- 9) 鳥居和之, 川村満紀, 柳場重正: 締め固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 372/V-5, pp. 65-74, 1986.
- 10) 笠井 順一: セメントを急結させるメカニズム, セメント化学雑論, pp. 47-50, 1991.

(1999. 7. 5 受付)

CHANGE OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF MSW-INCINERATED ASH WITH THE LAPSE OF TIME

Yoichi DOI, Shigeyoshi IMAIZUMI and Mitsuhiko YAMADA

In Japan, the incinerated ash of municipal solid waste (MSW) was disposed into controlled-type landfill. In this paper, the authors conducted the unconfined tests, oedometer tests and permeability tests using a compacted samples which experienced different curing time from 0 to 180 days. (1) In case of being compacted at disposed moisture content (43%), unconfined compression strength showed increasing tendency up to a value of $1,300\text{kN/m}^2$ at 180 curing days. (2) Coefficient of permeability decreased from $1 \times 10^{-4}\text{cm/sec}$ at non curing day to $1 \times 10^{-8}\text{cm/sec}$ at 180 days. (3) Compression index C_c was 0.3 for the sample with no curing days. But it lowered gradually down to a value of 0.1 as curing time passed to 180 days.