

一般廃棄物焼却灰の保存期間が力学特性へ与える影響

Effect of Storing Time of the MSW-Incinerated Ash on Its Mechanical Properties

土 居 洋 一 (どい よういち)
住友建設(株)土木設計部 次長

今 泉 繁 良 (いまいずみ しげよし)
宇都宮大学大学院教授 工学研究科エネルギー環境科学専攻

1. はじめに

日本では一般家庭から排出される廃棄物の約7割が焼却処理されている¹⁾。そして、一般家庭から収集された家庭ごみを焼却した残渣が一般廃棄物焼却灰と定義される。家庭ごみは台所ごみや紙ごみが主体であり、焼却によりそのほとんどが焼失するが、灰と称される部分が残る。紙を例にとると、紙の原料である木材は植物であり、その生育過程で地中より採取したミネラルが灰においても残留し、主成分となり残渣が形成される。また、一般廃棄物を焼却する際、その焼成過程で有害な塩素水素ガスが発生することを抑制する目的で、炭酸カルシウム等のアルカリ剤が添加されている²⁾。このため、灰中に残留したカルシウム分の影響で焼却灰は高いアルカリ性を示す。

この焼却処理によって発生する焼却灰は、一般廃棄物最終処分場に埋立て処分され、特に、近年は最終処分場に埋立てられる廃棄物は焼却灰が主流となっている。従来より最終処分場跡地を公園や公共施設建設用地に活用する方策が実施されており³⁾、跡地利用に際して焼却灰の物性、特に土質特性を把握する必要性が求められている。

焼却灰の土質力学的特性に関する研究として、尼崎沖フェニックス⁴⁾では、埋立て用道路の支持力の確認、圧縮に伴う収容可能廃棄物量の推定を目的として調査が行われ、圧縮指数は0.63~0.57、透水係数はほぼ 10^{-4} ~ 10^{-3} cm/s にあり、砂礫地盤の特性と同程度であることが報告されている。また、乾燥密度と内部摩擦角の関係が直線的関係にあり、乾燥密度 0.7 t/m^3 で内部摩擦角が 32° 程度となることも示されている。

室内試験結果に関しては、前野ら⁵⁾が圧密試験および三軸圧縮試験を実施して、乾燥密度 $\rho_d=0.85 \text{ g/cm}^3$ 、初期間隙比 $e_0=1.92$ に締め固めた焼却灰の圧縮指数は $C_c=0.424$ でしらすに比べても大きく、静的な圧力でも圧縮しやすいことを報告している。筆者らも^{6),7)}、焼却灰中に含有するカルシウム分が締め固め後に水和反応し、養生日数の経過とともに一軸圧縮強度が増大し、圧縮指数、透水係数が減少することを実験的に示している。

しかしながら焼却灰の土質特性は、焼却すべき廃棄物の特性が地域・季節によって異なることから、統一的評価を与えることは現時点では難しい。そのため、今後も焼却灰に関する多くの土質実験が実施されることが期待

される。ところで、前述のカルシウム分による水和反応は、焼却灰の採取から締め固め供試体作製までの経過時間中にも進行すると考えられる。

そこで、本研究では試料採取から実験開始までの放置期間(日数)が締め固め特性や力学特性の結果に与える影響について検討した。

2. 使用した一般廃棄物焼却灰の基本性状

今回使用した焼却灰は、人口20万人規模の地方都市で排出された一般廃棄物焼却灰(ストーカー炉底灰)である。通常、焼却灰は冷却および運搬時の飛散防止を目的に、散水が行われている。このため採取時の含水比は40%程度となっている。排出された焼却灰は、鉄類・ガラス類・陶磁器類等の未燃部分や熔融団塊等の比較的大きな固体と微細な不燃物を含んだ灰分に分類される。本研究では、4.75 mm ふるいを通過した灰分を対象にして試験を行った。使用焼却灰の諸物性および成分分析結果を表1、2に示す。成分分析の結果、珪酸(Si)が43.5%、酸化アルミニウム(Al_2O_3)が14.1%、そして酸化カルシウム(CaO)が20.4%含まれている。

表1 焼却灰の物理特性

比重	2.551
排出時含水比	47.08%
液性限界	NP
塑性限界	NP
礫分相等	20.17%
砂分相等	48.78%
細粒分	31.05%

表2 成分分析結果

分析項目(成分単体)	含有量(%)	塩化物換算	含有量(%)
カリウム(K)	1.44	K_2O	1.74
塩化物(Cl)	1.25	Cl	1.25
珪素(Si)	19.00	SiO_2	43.50
鉄(Fe)	3.03	Fe_2O_3	4.33
アルミニウム(Al)	7.45	Al_2O_3	14.10
カルシウム(Ca)	14.10	CaO	20.40
マグネシウム(Mg)	1.88	MgO	3.13
熱灼減量	10		10
その他	41.86	その他	1.55

3. 試料の保存と試験項目

3.1 試料の保存条件

試料に供する焼却灰は中間処理施設（焼却場）で採取後、4.75 mm ふるいで分級し、それより細かい部分をポリエチレン製の袋で保存した。保存に際しては、1袋を約20 kg程度とし室温 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ で放置した。

放置日数を0, 7, 14, 28, 60, 90, 150日とし、所定日数経過後に以下に示す各試験を実施した。

3.2 試験項目

粒度試験（JIS A 1203）、締固め試験（JIS A 1210）、一軸圧縮強度試験（JIS A 1216）、透水試験（JIS A 1217, JSF T 311）および圧密試験（JIS A 1217, JSF T 411）を実施した。

一軸圧縮強度試験、透水試験の供試体は内径50 mm、高さ100 mmの円柱形供試体とし、乾燥密度が締固め試験から得られた最大乾燥密度に一致するようにした。なお、透水試験は変水位試験で行った。また、一軸圧縮強度試験、透水試験および圧密試験に関しては、供試体を締め固めた後、室温 20°C 、湿度60%の恒温湿室で養生し、0, 28, 90日経過したものについても実施した。

4. 試験の結果と考察

4.1 粒度試験

粒度分布と粒度組成の経時変化を図—1、表—3に示す。なお、粒度試験は手作業で1分間ふるった時に通過分が残留分の1%を超えなくなるまで実施し、その時の残留分を測定して、通過百分率を計算した。いずれの場合も、構成粒子の約50%が砂分であり、日本統一土質分類法の三角座標の表示法では、砂質土「SF」に該当する。しかし、放置日数の増加に伴い、各ふるいを通

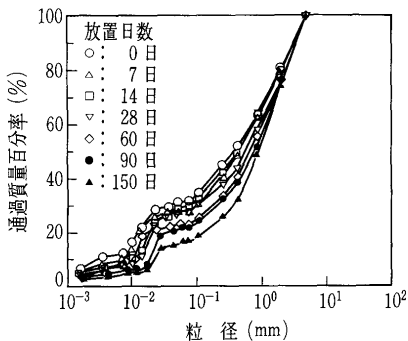
表—3 一般廃棄物焼却灰の粒度組成

放置日数	7日	14日	28日	60日	90日	150日
礫分相等 (%)	22.15	20.68	24.49	24.41	24.64	25.92
砂分相等 (%)	50.15	49.57	48.13	52.71	53.61	57.69
細粒分 (%)	27.70	29.75	27.38	22.88	21.75	16.39

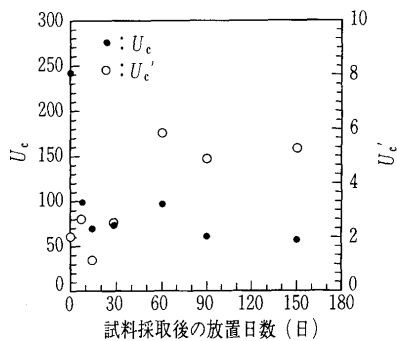
過する質量百分率は減少し、試料採取直後と150日放置後の粒度組成を比較すると、礫分相等が6%、砂分相等が9%に増加し、細粒分は逆に15%減少している。図—2は、放置日数と均等係数および曲率係数の関係を示したものである。均等係数 U_c は、試料採取直後は242であるが、急激に減少し放置7日以降は50～90の範囲にある。また、曲率係数 U'_c は試料採取直後は2.0であるが、放置期間の増加に伴い大きくなり150日では6となっている。以上の結果から、焼却灰の放置日数に伴い粒子の団粒化が生じ、粒度分布としては徐々に悪くなる傾向にあると考えられる。

4.2 締固め試験

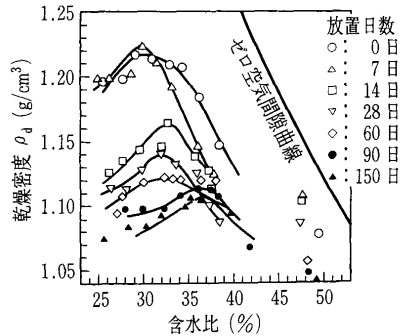
締固め曲線の変化を図—3に示す。また、放置日数と最大乾燥密度との関係を図—4に、最適含水比との関係を図—5に示す。これらの結果より、試料採取直後の試験で $1.22(\text{g}/\text{cm}^3)$ と評価された最大乾燥密度は、放置日数28日までに大きく減少し、その後は徐々に減少して150日経過後には $1.10(\text{g}/\text{cm}^3)$ となり、約10%低下している。最適含水比に関しては、当初30%であった最適含水比は、放置150日後には38%と高くなっている。通常の土では、同一エネルギーで締め固めた場合、粒径が大きいほど最大乾燥密度は大きくなり最適含水比は小さくなる。焼却灰の場合、図—1で示される砂分、礫分等の粒径は、細かな灰が集まり団粒した見掛けの砂分相等、礫分相等の径であり、内部には空隙が存在すると考



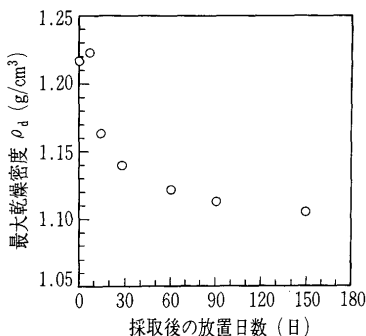
図—1 粒径加積曲線



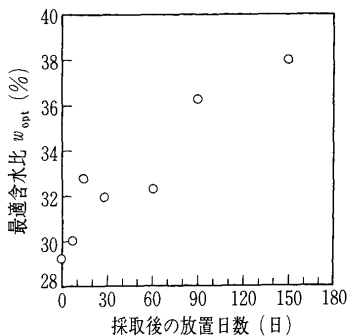
図—2 U_c , U'_c と放置日数の関係



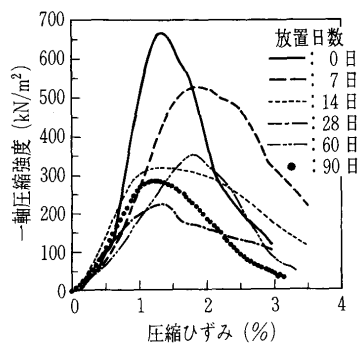
図—3 締固め試験結果



図—4 放置日数と最大乾燥密度の関係



図—5 放置日数と最適含水比の関係



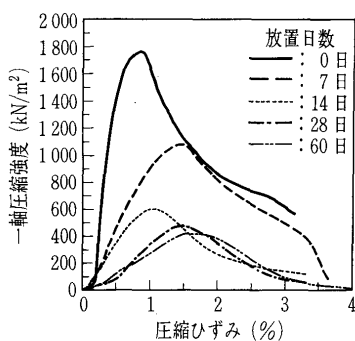
図—6 応力-ひずみ曲線（養生28日）

えられる。したがって、砂分相等、礫分相等が多くなるほど微細な空隙が多くなり、最大乾燥密度は下がり最適含水比は高くなると考える。

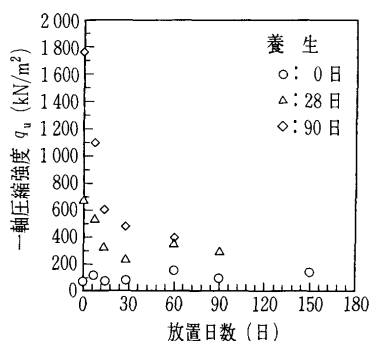
4.3 一軸圧縮試験

図一6は、一定期間放置した後で作成した供試体を28日間養生したときの応力-ひずみ曲線であり、図一7は90日間養生したときのものである。養生28日の曲線を見ると、放置日数0日すなわち採取直後に締め固めたものが最も大きい圧縮強度を示し、放置日数が長くなると圧縮強さが減少している。最大圧縮強度を示すひずみについては、1.0~2.0%にある。養生90日の場合、放置日数の増大とともに圧縮強さが低下し、その時のひずみは幾分増える傾向が見られる。

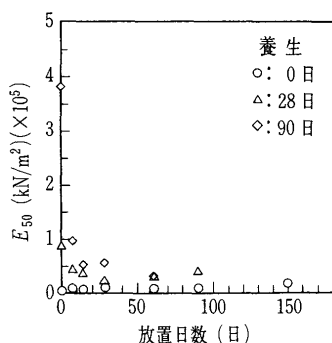
図一8は、一定養生後の一軸圧縮強度を放置日数の関係で整理したものである。この図によって、前述の強度低下の特徴を明確に見ることができる。養生0日では試料の放置日数にかかわらず強度は80~120 kN/m²の



図一7 応力-ひずみ曲線（養生90日）



図一8 放置日数と一軸圧縮強度の関係

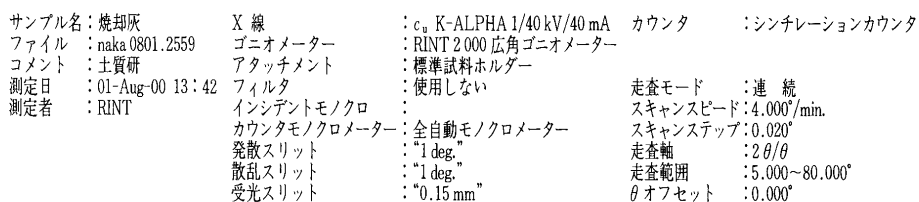


図一10 放置日数とE₅₀の関係

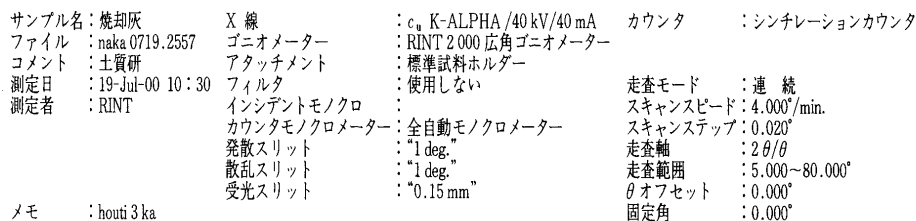
範囲にあるが、養生日数が28, 90日の強度では、放置日数の経過に伴い発現強度の低下が著しくなる。28日養生強度は、14日間の放置によって約60%に、90日養生では約30%まで低下している。これらの現象は、放置されている間にも保有する水分により粒子同士が水和反応を起こし、締固め後の反応が鈍化したことによると考えられる。

図一9は、採取直後（放置期間0日）と放置14日後の焼却灰をX線回折した結果である。二つの結果を比べると、14日放置した焼却灰では $2\theta=10\sim12^\circ$, $31\sim32^\circ$ 付近にピークの増加を見ることができる。これは、水酸化カルシウムの生成に伴い発現するピークといわれている。

図一10は、放置日数と変形係数（E₅₀）との関係である。放置日数が短ければ、締固め後の養生日数とともに変形係数がかかなり増大するが、放置日数が長くなると、養生日数に伴う変形係数の変化も少なくなる。そして、



図一9(1) X線回折結果（放置0日）



図一9(2) X線回折結果（放置14日）

一定養生期間での値は、放置日数とともに小さくなり、特に、養生日数が28, 90日と長くなるにつれて、放置日数が28日までの減少が著しい。なお、締固め直後（養生0日）の変形係数は放置日数の違いをほとんど受けなく、 $0.1 \sim 0.3 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ である。

4.4 圧密試験

図—11は放置日数と圧縮指数との関係を示したものである。放置0日の供試体に対する圧縮指数の値は、養生日数が0～90日の範囲で0.3～0.35の値を示す。放置日数が28日までは放置日数とともに値が小さくなり、約0.15程度と半減している。放置日数がそれ以上になると、ほぼ一定値を示している。なお、締固め後の養生が圧縮指数に与える影響については、放置日数が28日までは養生日数とともに小さくなる傾向が見られるが、それ以降は養生の影響が見られない。

4.5 透水試験

図—12は、放置日数と一定期間養生後の透水係数である。締固め直後（養生0日）の透水係数に関しては、放置日数に伴う大きな変動は見られず、 $1 \sim 3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ である。しかし、締固め後28, 90日間養生した後の透水係数は、放置日数が短いほど締固め直後に比べて低い値になる。すなわち、放置0日で締め固めた場合は、養生0日で 10^{-5} cm/s 程度の透水係数が養生90日では $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ となる。他方、放置14日では締固め直後には 10^{-5} cm/s であるが、養生90日では $3 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ となる。そして、放置60日以上試験では、養生日数の経過に伴う透水係数の変化は見られない。

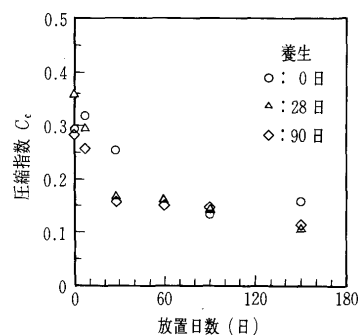
このように採取直後の焼却灰を締め固めて透水試験を行えば、その後の養生に伴い透水係数が減少するという、いわゆる自硬性の現象が確認できるが、2週間以上の放置をして試験を行うと、透水係数の減少を示さない結果が得られることになる。実際の処分場では、焼却灰が搬入されて短時間のうちに締固めが行われ難透水性地盤が形成されているので、室内試験においても採取直後の新鮮な材料を用いることが大切である。

5. ま と め

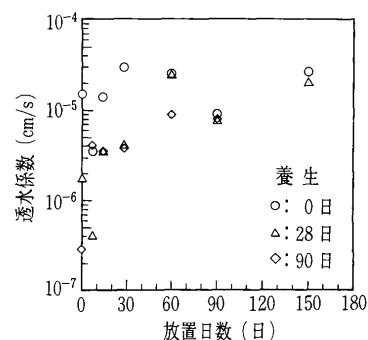
今回、一般廃棄物焼却灰に関して、試料採取から供試体を作成して土質試験を実施するまでの試料の放置期間を変化させて、放置日数が締固め特性、一軸圧縮強さ、圧縮特性、透水係数などの試験結果に与える影響を検討した。

その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- ① 採取焼却灰の放置日数が増すと粒度試験において、細粒分が減少して礫分相等と砂分相等の割合が増大する結果となり、粒子の団粒化が生じる。
- ② この団粒化はカルシウムによる水和反応によるものであり、X線回折では $2\theta = 10 \sim 12^\circ$, $31 \sim 32^\circ$ におけるピークの増加によって確認された。
- ③ 放置日数の経過に伴い、砂分相等、礫分相等の内



図—11 放置日数と C_c の関係（最適含水比）



図—12 放置日数と透水係数の関係

部に存在する微細な空隙により、締固め試験から得られる最大乾燥密度が低下し、最適含水比も減少した。

- ④ 放置日数の増大に伴い、最適締固め状態での供試体の一軸圧縮試験より得られる28日養生強度、90日養生強度は減少する。また、養生時間に伴う強度増加の割合は放置期間が長いほど小さい。
- ⑤ 透水係数に関しては、放置日数が長いほど最適締固め状態での供試体の透水係数は大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 環境庁編：環境白書，平成12年版，p. 147, 2000.
- 2) 水谷 聡・酒井伸一・高月 紘：小型カラム実験による都市ごみ焼却残渣からの重金属の溶出挙動とPbの吸着現象，第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 491～493, 1999.
- 3) 地盤工学会：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，pp. 147～167, 1996.
- 4) 岩谷文方・三宅達夫・和田眞郷・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. 10, pp. 5～10, 1992.
- 5) 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.
- 6) 今泉繁良・土居洋一・山田充彦：一般廃棄物焼却灰の土質特性に関する研究，第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 404～406, 1998.
- 7) 今泉繁良・土居洋一・山田充彦：一般廃棄物焼却灰の土質特性の経時変化に関する研究，第10回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp. 525～527, 1999.

(原稿受理 2000.8.21)