

経時的に変化する焼却灰の力学特性と固結力発生メカニズム

福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 福岡大学大学院 ○学生員 権藤 清路

1.はじめに 一般廃棄物の処理問題は地球環境の保全にも影響を与える重要な課題となっている。我が国では、一般廃棄物の約 80%が焼却処理されており、排出される焼却灰はほとんど有効利用されず、破碎ごみ等と併せて約 750 万 t が最終処分場に埋立処分されているのが現状である。また、最終処分用地の確保の問題から、大阪湾フェニックスのような広域的な海面埋立処分場が増えていき、それを高度跡地利用していく必要がある。化学的に不安定な焼却灰を地盤材料として用いる場合、経時的な材料特性の変化の把握は重要な課題である。そこで、本研究では、まず地盤材料として取り扱う場合の焼却灰の基本的な物理・化学特性の把握を行った。次に、焼却灰の将来置かれる環境に着目し、一軸圧縮試験、溶出試験を行った。とくに固結力発生メカニズムについて詳細な検討を行った結果について報告する。

2. 焼却灰試料 実験は、A 市の焼却場より排出された焼却灰を、2mm 以下に分級した試料を用いた。焼却灰の基本性状として、表-1 に化学組成、表-2 に物理・力学特性について取りまとめている。焼却灰は一般の土に似たような組成であるが、Ca、Fe、Al 分が若干多いのが特徴である。また、これらの組成から、水和反応またはポズラン反応により、焼却灰内に固結力が生じることが示唆される。灰中に存在する水に浮く粒子や陶器片の存在などにより、得られた密度にはばらつきが見られる。しかし、これらの密度は真空脱気法¹⁾を用いることにより精度の高い結果を得ることができた。粒度及び締固め試験からは砂質土に似た結果が得られている。

3. 一軸圧縮特性 供試体 ($\phi 5 \times 10$ cm) は、最適含水比に調整した試料を、最大乾燥密度の 9 割の密度で締固め作製した。養生方法は、図-1 に示す地盤環境に基づき、気中、乾燥、水浸 (溶媒: 真水、海水) 養生を行った。実験は各養生方法にて一定期間 (0~365 日) 養生した供試体について一軸圧縮試験を行い、焼却灰の固結力が力学特性に及ぼす影響を調べた。図-2 に 365 日養生における一軸圧縮試験結果を示す。

表-1 化学組成 (%)

SiO ₂	40.92	K ₂ O	1.52
CaO	18.74	TiO ₂	1.31
Fe ₂ O ₃	12.14	SO ₃	1.06
Al ₂ O ₃	10.86	ZnO	0.41
Na ₂ O	2.73	MnO	0.27
MgO	2.41	CuO	0.23
P ₂ O ₅	1.9	Cl	0.21

表-2 物理・力学特性

	2mm以下
ρ_s (g/cm ³)	2.57
U_c	7.64
U_c^*	1.33
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.26
w_{opt} (%)	29.7
焼却灰量 U (%)	10.23

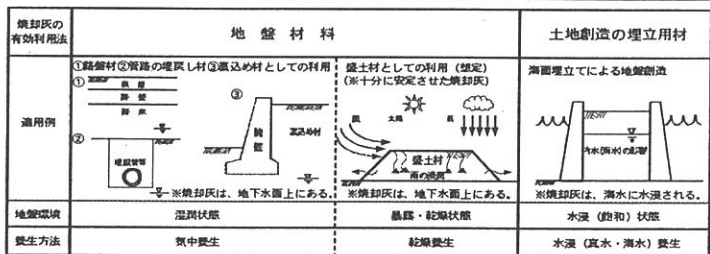


図-1 有効利用計画

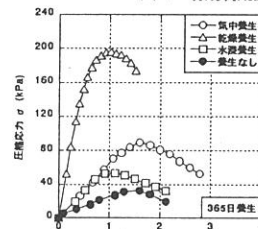


図-2 応力-ひずみ曲線

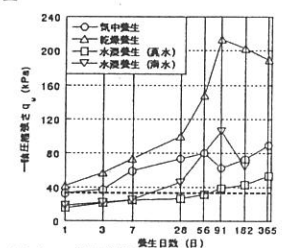


図-3 一軸圧縮強さと

養生日数の関係

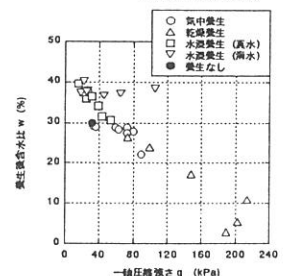


図-4 養生後含水比と一軸圧縮強さの関係

は増加していつている。これに対し、含水比の低下の著しい乾燥養生の供試体は、養生日数の経過に伴い強度は顕著に増加していたが、91 日養生を過ぎると減少傾向に転じている。これは、乾燥収縮によるひび割れが劣化の原因ではないかと思われる。水浸養生 (真水) の供試体は、常時水に浸かっているにもかかわらず、28 日養生を境に含水比が低下し、わずかではあるが強度増加傾向となり、365 日養生では初期値の 1.6 倍の強度が得られている。これは、モールドの通水部に無機塩類が膠着し、通水が妨げられることで、水和反応しやすい環境が作られたことに起因していると考えられる。水浸養生 (海水) では、91 日養生までは気中養生を上回る強度増加を見せたが、182 日養生では一転して減少している。これは、約 10%程度ある鉄含有物が、塩分の存在により供試体劣化の原因となったと推測される。図-4 に養生後含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。この結果より、焼却灰の強度は水分の影響を大きく受けていることが分かる。水浸養生 (海水) にはその傾向が見られなかった。

4. 溶出特性 一軸圧縮試験後の試料を用い、環告 46 号法に準じて溶出試験を行った。検液は分析器によって検液中の重金属 (Pb、Cd、Cu、Zn) を測定する。図-5 に電気伝導度と養生日数の関係を示す。NaCl を含んでいる水浸 (海水) 養生の値は、他の養生方法のものより高い値を示した。また、水浸 (真水) 養生では、養生日数の経過に伴い減少していったことから、無機塩類が洗い流されたためではないかと思われる。図-6 に pH と養生日数の関係を示す。ただし、破線は養生なしの値を示している。島岡ら²⁾の研究で指摘されているエイジング効果による pH の低下が、乾燥養生において顕著で

あることが分かる。図-7 に Pb と養生日数の関係を示す。また、定量下限値以下の濃度はすべて N.D. とした。養生方法の違いによる違いは顕著ではなかったが、pH の低下が著しかった乾燥養生は、経時に伴う溶出量の抑制が確認され、土壌環境基準をクリアしていた。また、気中養生にも同様な傾向が見られた。Cd に関しては全ての養生方法において、N.D. であった。以上のことから、焼却灰が有効利用される際に、周辺地盤の水分が多い状態では、焼却灰の重金属類の溶出が懸念され、空気に曝される環境に置かれると溶出が抑制されることが明らかになった。また、養生時の溶媒の違いによって異なる傾向を示すことから、焼却灰で形成された陸上埋立と海面埋立の地盤では、地盤工学的性質が異なることが推測される。

5. 固結メカニズムの検討 図-8, 9 に、養生なし及び乾燥 91 日養生における X 線回折図を示す。天然鉱物のメインピークが多いため、水和生成物の同定が困難であった。乾燥 91 日養生は、養生なしのものに比べると水和反応の初期生成物であるエトリンガイトのピークは見えにくくなっており、水和反応が進行している。また、その他の天然由来の鉱物および化合物はほぼ同様なものが同定されている。図-10(a), (b) に、0 日養生及び乾燥 91 日養生における 5000 倍の SEM 写真を示す。最も強い強度を示した乾燥養生の粒子は養生なしの粒子に比べて、明らかに空隙が少なくなっている。空隙にあるものが、水和生成物なのか無機塩類なのかは特定できなかった。しかし、焼却時において SOx, NOx 対策や塩素対策として炭酸カルシウムや消石灰などの Ca 源を吸着剤として使用しており、焼却灰には多くの Ca 分が残存していると考えられる。一軸試験の結果と照らしあわせると、その多くが無機塩類であると推測される。ここで、図-11 に粒径別強熱減量試験結果を示す(ただし、破線は 750℃時の 2mm 以下焼却灰の結果である)。細かい粒径になればなるほど強熱減量値が大きくなっていくのが分かる。また、各粒径とも 600~650℃の間で顕著な増加が見られる。ここで、含有有機物の酸化燃焼や鉱石中の結晶水の脱水は 500℃くらいまでに行われ、新城ら³⁾の研究によれば、CaCO₃ は約 540~700℃の間で熱分解を起こすことから、600~650℃の間の増加は炭酸塩類(CaCO₃ 等)の熱分解によるものであると考えられる。よって、焼却灰の強熱減量値は有機物+炭酸塩類のものであり、細かい粒子の多い焼却灰の方が大きな固結力を持つと考えられる。図-12 は 365 日養生(海水は 182 日)後の供試体の強熱減量と一軸圧縮強さの関係を示しており、養生により、強熱減量、一軸圧縮強さ共に増加していることが分かる。以上のことから、焼却灰の固結力は含水比の低下に伴う無機塩類の析出による、構造骨格の形成が主たるものであると考えられる。

6. まとめ 焼却灰の固結力発生メカニズムを検討した結果、以下の知見が明らかになった。①固結力の発生は含水比の影響に大きく依存していることが明らかになった。②溶出特性を調べた結果、エージング効果により pH が低下し、溶出量の抑制が確認された。③固結メカニズムの検討に際し、X 線回折と SEM 画像により、水和反応の進行と塩の析出による効果が大きいことが確認された。また、その事が強熱減量試験からも明らかになった。

【参考文献】1) 佐藤ら：一般廃棄物焼却灰の物理特性に関する研究，平成 13 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. A384-385，2002. 2) 島岡ら：「焼却灰飛の水混練に伴う鉛の不溶化現象について」，第 18 回全国都市研究発表会講演論文集，pp. 44-46，1997. 3) 新城ら：「強熱減量による土の炭酸カルシウム含有量の測定法」，第 34 回地盤工学研究発表会講演集，pp. 723-725，1999.

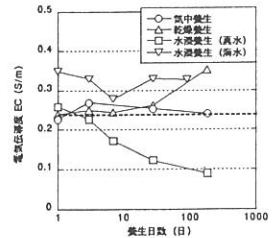


図-5 電気伝導率と養生日数の関係

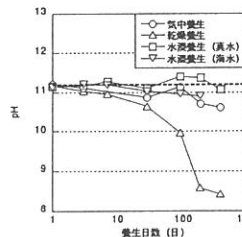


図-6 pH と養生日数の関係

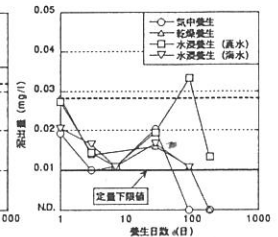


図-7 Pb 溶出量と養生日数の関係

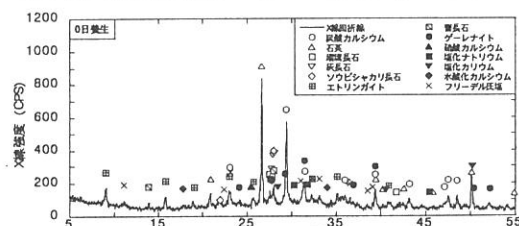


図-8 X線回折図(養生なし)

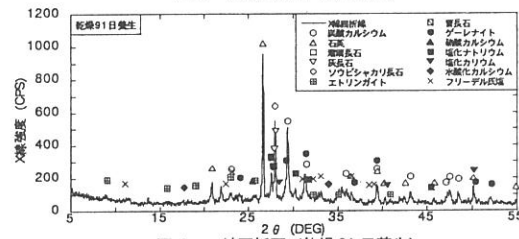
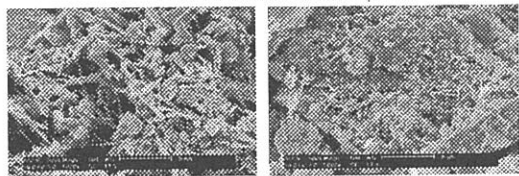


図-9 X線回折図(乾燥91日養生)



(a) 養生なし (b) 乾燥91日養生
図-10 SEM写真(5000倍)

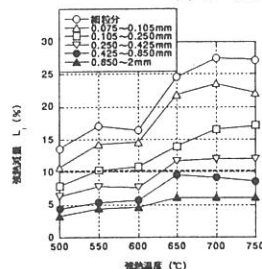


図-11 粒径別強熱減量試験結果

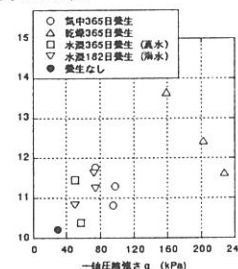


図-12 強熱減量と一軸圧縮強さの関係