

パッシブサーモグラフィ法を利用した産業廃棄造粒物の締固め管理

中央工学校(学)○白井成也 日大生産工 柳内睦人
(株)丸正土木 桐生竜治 中央工学校 金光寿一
日大生産工(院)川久保政亮

1. はじめに

我が国では廃棄物最終処分場の残余年数が逼迫しており、処分量低減のためごみ焼却灰の再利用や資源化技術の開発が求められている。これまで焼却灰の再資源化には、超高温で熔融処理するしかなかった中間処理技術に対して、小規模焼却工場において焼却灰の無害化再資源化技術が開発され、その焼却灰・焼成物等の新たな再生資材の開発や有効利用が検討されている。この技術は、管理型最終処分場処理物の20～30%（新潟県）を占める焼却灰を小型の焼成炉により無害化焼成処理し、その焼成物を埋め戻し材等の土木資材として再利用するものである。

本研究は、産業廃棄物の焼却灰を焼成・粉碎・造粒したリサイクル材を盛土材、裏込め材、道路路盤等への適用性を確認するために力学特性試験とともにパッシブサーモグラフィ法を適用した締固め管理について検討した。締固めの管理基準は、土質や用途によって異なるが、品質規定方式では密度、締固め度、空気間隙率、飽和度等が用いられている。パッシブサーモグラフィ法は、広範囲の温度変化を視覚的及び定量的に求めることが可能であり、土の締固め度の相違によって温度場の変化が明瞭となるものと考えられる。

2. 産業廃棄物の焼却灰焼成物と骨材化

実験に供した試料は、(株)丸正土木から提供されたもので、建設廃棄物(産業廃棄物混合)を小規模焼却工場で焼成法融点以下に加熱(1,000～1,100℃)により有害物を含有した焼却灰、焼却飛灰(以下、主灰と称する)を無害化したものである。さらに、主灰だけでは品質強度を得ることは難しいため、セメントと混合・混練から造粒物を作製している。今回、造粒物の製造では、造粒攪拌機にて主灰を100kg攪拌5分、セメント10kg混練5分、水10kg混練15分の手順で製造している。写真-1に主灰



(a) 主灰 (b) 造粒
写真-1 製造された焼却灰焼成物

及び造粒を示す。

なお、原料となる焼却灰焼成品については、土壤汚染対策法に定められる第一種・第二種・第三種汚染物質すべてについて同法に指定された試験方法である、平成3年環境庁告示第46号付表・平成15年環境省告示第19号付表による方法で安全性を確認した。また、ダイオキシン類においては、基準値と比較して大幅に低い値であり、焼成によるダイオキシン類の分解が確認された。

3. 実験概要

一般に、道路盛土、宅地造成、埋戻し等の締固め管理では、土の密度など締固め特性を確認する必要がある。締固め試験では、主灰及び造粒の粒度分布が異なるために、最適な締固め強度を得るために両者を混合し最適な配合率とともに最適含水比を求めた。その力学特性では一軸圧縮試験及びCBR試験にて比較した。さらに、実現場を想定した締固め管理では、締固め強度を変えてパッシブサーモグラフィ法の適用性について検討した。また、二次元非定常熱伝導解析から熱特性の相違による再現性について検討した。

4. 焼却灰焼成物と物理特性

表-1は各試料の密度、単位容積質量、実績率及び吸水率である。なお、造粒(5mm以上)の密度は24時間吸水させた後に表面乾燥状態の試料を水中質量から求めたものである。

表-1 物理特性

試料	密度	単位容積質量	実績率	吸水率
	(kg/cm ³)	(kg/l)	(%)	(%)
主灰	2.754	1.322	48.00	1.23
造粒	2.326	1.224	52.62	9.56
造粒(5mm以上)	2.948	1.357	46.03	13.53

路盤材として単位容積質量があまりに小さいと所要の支持力を得られない恐れがある。JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」では、粒度調整スラグの単位容積質量として1.50kg/lの下限值が示されている。その単位容積質量は、例えば道路用鉄鋼スラグと比較すると全ての試料において下限値を下回っている。単位容積質量試験(JIS A 1104)では、試験容器に試料を入れて各層を突き棒にて突くように規定されているが、絶乾状態の試料では突く毎に容器内で飛散・拡散して密実になる状態はみられない。

一方、密度は造粒を除くとコンクリート骨材に使用される2.5～2.6g/cm³を満足している。この造粒の密度がやや小さい理由は、5mm以上の造粒密度が2.95g/cm³であることから細粒の中に軽い浮遊物が混入しているものと思われる。粒形の判定に用いられる実績率は、コンクリート用砕石では52%を下回る場合には不良品といわれており、造粒以外はこの数値を下回っている。吸水率では、セメントで固化した造粒は10%を超えており、路盤材料の使用では乾湿による体積変化の影響が示唆される。水中浸漬した造粒にはセメントからの溶融物が確認された。

(1) 焼却灰焼成物の粒度分布

図-1は各試料の粒度試験の結果である。一般に、土質工学では粒度の善し悪しを定量的に表現するために、均等係数(U_c)及び曲率係数が定義されている。加積質量比10%と60%に対応する粒径を D_{10} 、 D_{60} として、それらの比から粒度の善し悪しが判定される。従って、この均等係数 U_c の値が大きくなるほど粒度分布の範囲が広いことを示しており、密に詰まるかどうかの指標に利用される。また、曲率係数は加積曲線のなだらかさを示すものである。

その結果、主灰及び造粒の均等係数(U_c)はそれぞれ、2.8及び4.5である。 $U_c > 4$ は粒度配合が良い、 $U_c < 4$ は粒度配合が悪い。特に、造粒は均等係数 $U_c = 4.5$ 、また分布のなだらかさを示す曲率係数を得るものの、2.0mm以下の細粒分の割合が少なく単独の路盤材料への使用

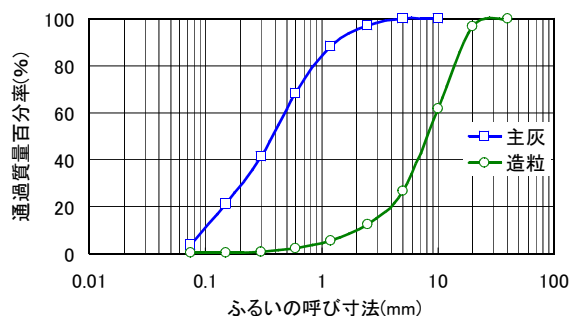


図-1 粒度分布の状況

は無理と思われる。砂のせん断強さは砂粒子間に働く摩擦力であり、砂のような粒状体では粒子の形状や粒径の配合によるかみ合わせによって大きく変化することになる。従って、単独での利用では表層部への敷き均しや擁壁背面への埋戻し材料などが考えられる。

一方、砂のせん断抵抗は球形の集合体よりも角張っていたり、細長いものが混じりあっている場合の方がかみ合わせは大きくなる。この粒径の大きな造粒の粒子間に細粒が混入すればせん断抵抗は増大するものと思われる、主灰と造粒を混合することによって締固め管理が要求される路盤材料への利用が示唆される。表-2及び図-2に造粒と主灰の混合の割合とその粒度分布を示す。

表-2 造粒と主灰の混合率

試料	混合率(%)【造粒/主灰】			
	80	60	40	20
造粒(kg)	4	3	2	1
主灰(kg)	1	2	3	4

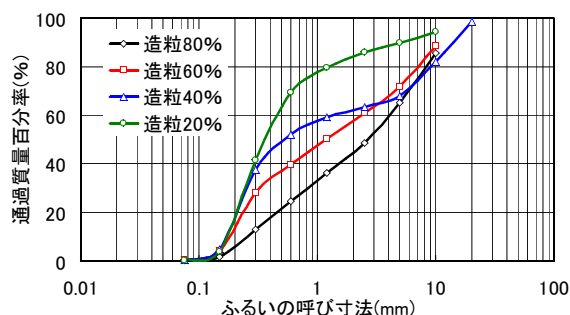


図-2 混合物の粒度分布状況

ふるい分け試験の結果では、造粒80%、主灰20%の割合が最も粒度分布がなだらかになる。その造粒80%、主灰20%の混合は、均等係数(U_c)が16.8、曲率係数($U'c$)が0.69となり、粒度分布は図-1と比較すると各試料よりもなだらかで範囲が広がっている。しかし、

表-3 粒度分布の状態

分布状態	混合率(%)			
	20	40	60	80
均等係数(U_c)	16.25	40.00	22.80	10.00
曲率係数(U'_c)	1.67	1.60	0.26	0.31

混練された造粒物は形状、粒径ともに均一性はなく混合の割合に対して相関は見られない(写真-1及び表-3参照)。

(2) 造粒の破砕値(損失率)

路盤の締固め時には大型ローラーを使用することになるため、造粒の破砕が懸念される。造粒の破砕試験は、締固め試験用のモールドを利用して行った。モールドに試料(15~10mm粒径)を詰めてスパーサーディスクを載せ、その上から400kNまで載荷した。

その結果、3981.6gの試料のふるい分け試験結果は、2.5mmに留まった試料が3009.4g、2.5mmを通った質量969.3gとなり、破砕値は24.3%が得られた。



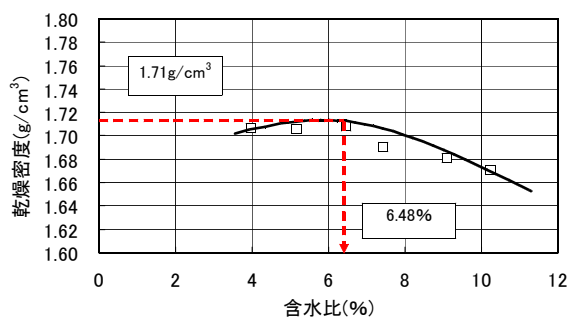
写真-2 圧縮試験(造粒)

写真-2は破砕試験と同様に400kNまで載荷した後に試料を抜き取り、圧縮強度試験を行った状況である。コンクリート用骨材として使用する場合にも破砕値は基準を満足しており、載荷後は密実な固化状態となっている。その最大圧縮強度は2.4N/mm²であった。試料は製造されて既に3ヶ月経過したものであるが、水和過程にある造粒製造早期に載荷すればさらに圧縮強度の向上が図れるものと思われる。

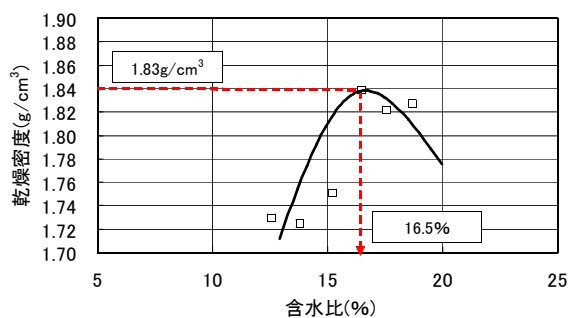
また、造粒(粒径5mm以上)の単粒子強度では10粒子の平均が1.86kNで、比較したコンクリート用碎石は4.25kN、両者の標準偏差は0.28kN及び0.78kNであった。造粒は自然骨材の単粒子強度に比べ、44%と弱いことが確認できる。

5. 締固め試験及びCBR試験

締固め試験は、JIS A 1210のD法に従った。試料5kgを6セット用意し、非繰返し法により徐々に水量を増やして行った。なお、締固め試験は、主灰、造粒及び両者の混合で行ったが、造粒単独では図-1に示すとおり細粒分が

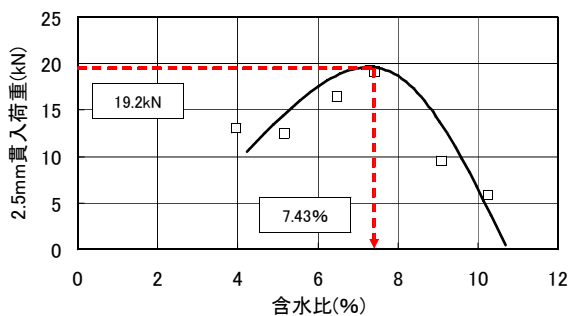


(a) 主灰

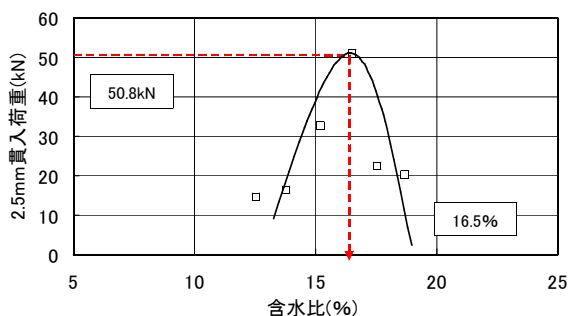


(b) 混合(造粒80%)

図-3 締固め曲線



(a) 主灰



(b) 混合(造粒80%)

図-4 貫入荷重と含水比の関係

少なく、かみ合わせが小さいために摩擦力が得られず、含水比を変えても全く締固まる状態にはならなかった。本項では、造粒と主灰の混合率80%の結果を図-3及び図-4示す。

その結果、主灰の最大乾燥密度($\rho_{d_{max}}$)は、1.71g/cm³となり、最適含水比(w_{opt})は約6.5%、造粒80%は最大乾燥密度は1.83g/cm³、最適含

水比は16.5%が得られる(図-3参照)。混合では、突固め時に若干の浮き水が確認された。含水比は仮に最適含水比付近で管理しても、この浮き水によって表層部の変形特性が変化することが容易に想像される。主灰単体とは異なりある程度粒径の大きい造粒が多く含まれるとサクションが保持されにくくなるものと思われる。従って、過度な湿潤側での含水比管理は避けた方が良い。

一方、非水浸CBR試験は、締固め試験後の供試体を用いて行った。混合の荷重の大きさは、50.8kNと主灰単体の19.1kNの2.5倍の強度を有する。しかし、浮き水によって供試体の底面と上面とは含水状態が異なり、貫入荷重に影響を及ぼすことが予測される。例えば、突固め後の含水率17.5%は、底面付近が16.1%に対して上面付近は19.0%であった。

6. サーモグラフィ法による締固め管理

実験に供した試験体は、締固め試験用のモールド(φ150mm)を利用して、試料は混合80%で行った。締固め条件は、図-3(b)で得られた最適含水比とし、ランマーによる締固め回数を各5層で15、30、55回の3種類とした。測定開始前の湿潤密度は、締固め15回が1.84g/cm³、30回が1.87g/cm³、55回が1.91g/cm³であった。また、測定後の表層部の含水比は、それぞれ6.36%、5.47%、8.51%であった。

赤外線カメラによる温度測定〔二次元非冷却マイクロボロメータ型、波長領域8.0～14.0μm、最小温度分解能0.05℃(at30℃)〕は、8月3日の時刻12:00から15:00まで測定距離120cmの位置から20分間隔で熱画像の撮り込みを行った。測定は締固めた直後から開始している。図-5には自動計測で得られた全天日射量と外気温を示す。平均風速は2.2 m/sであった。

写真-3及び写真-4に測定開始時と各試験体間に温度差が最も大きくなった13:00の熱画像を示す。また、図-6には測定開始時からの温度上昇を示す。その13:00の温度上昇は、締固め回数の規準を55回に仮定すると15回では規準よりも2.43℃、30回は1.99℃高くなっている。測定開始25分後の12:25においても1.82℃と1.56℃の温度差が生じており、熱画像から視覚的に締固めの相違が判読できる。このようにパッシブサーモグラフィ法は、表層部の空隙に蓄積される熱量を期待するもので、密度が小さいほど温度上昇が大きい。

なお、シミュレーション結果については、発表時に報告する。

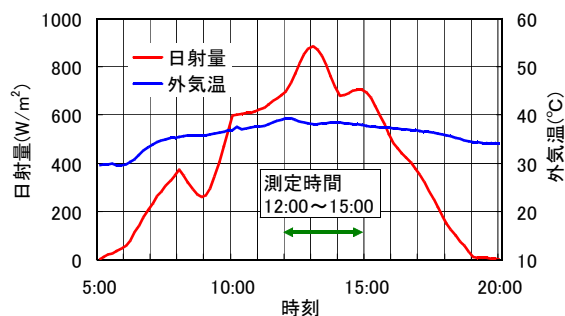
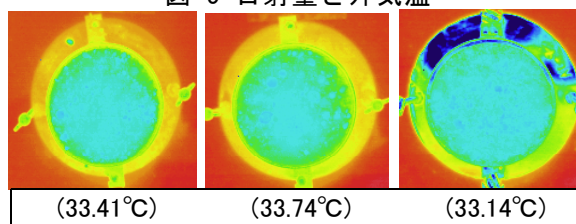
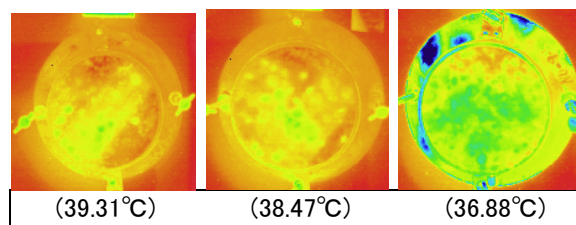


図-5 日射量と外気温



(a) 15回 (b) 30回 (c) 55回

写真-3 熱画像(12:00)



(a) 15回 (b) 30回 (c) 55回

写真-4 熱画像(13:00)

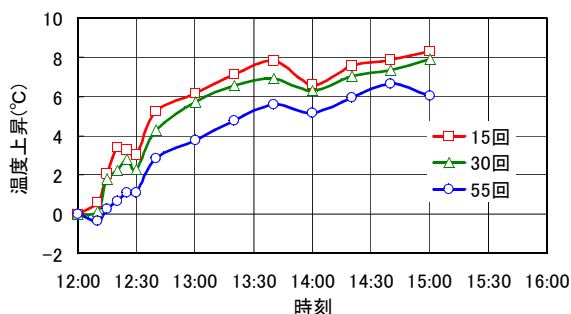


図-6 締固め回数と温度上昇変化の関係

7. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) 主灰の締固め曲線は平滑であり、最大乾燥密度の変化は小さかった。
- (2) 造粒単体の締固め試験では、細粒分が少なく、かみ合わせが小さいために摩擦力が得られず、含水比を変えても全く締固まる状態にはならなかった。
- (3) パッシブサーモグラフィ法による締固め管理では、湿潤密度が小さいほど温度上昇が大きくなり、熱画像から視覚的に締固め強度の確認ができた。