

製紙廃棄物焼却灰造粒品の締固めおよび強度特性

秋田大学 学生会員 野呂田陽介

正会員 荻野俊寛

非会員 高橋貴之

学生会員 齋藤晟矢

正会員 及川洋

日本製紙(株) 非会員 谷口直樹

1.はじめに

製紙産業では大量の電力を必要とするため、多くの工場では発電用のボイラーを保有している。秋田県内の工場ではボイラーの燃料として石炭や木くずの他に、タイヤチップやPS(ペーパースラッジ)といった回収廃棄物などが使用されており、これらの焼却灰が大量に排出される。昨今、環境問題への関心の高まりをうけて、資源としての有効活用の観点からこれらの焼却灰も灰造粒品として製品化され、現在様々な用途での利用が検討されている。灰造粒品の生産量は年間およそ16000m³にもものぼるため、安定的かつ大量の需要源のひとつとして土木分野での利用が期待されているが、安全性や環境影響、土木材料としての力学的性質など、必要な知見が十分ではない。このような背景のもと本文は路盤材料としての利用を念頭に灰造粒品の力学的性質について検討した結果を報告するものである。

2.試験概要

実験に用いた試料は、製紙工場内の発電用ボイラーから排出される焼却灰に生石灰、リン酸、水を混合し、造粒したものである。当該ボイラーでは石炭、木くず、PS、タイヤチップなどを燃料としており、焼却灰には化学的に多くの成分が含まれているが、造粒過程での不溶化処理によって、灰造粒品として有害物質の溶出基準を満たしている。図-1に自然状態における試料の写真を示す。試料の土粒子密度は $\rho_s=3.012\text{g/cm}^3$ 、自然含水比は $w_n=30\sim 38\%$ 程度であり、粒径加積曲線を図-2に示す。平均粒径は $D_{50}=0.708\text{mm}$ 、均等係数は $d_{60}/d_{10}=200$ である。実験は突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)、CBR試験(JIS A 1211)および一軸圧縮試験(JIS A 1216)である¹⁾。締固め試験は突固めによる試料の粒子破碎を想定し、繰返し・非繰返し法の2つの条件で実施した。締固め試験方法はE法であり、ランマー質量4.5kg、ランマー落下高45cm、モールド内径15cm、モールド容積2209cm³、突固め回数3、各層の突固め回数92である。CBR試験は締固め試験で得られた最適含水比に調整された試料を用いて実施し、修正CBRを求めた。一軸圧縮試験では上記の試料に加え、セメント安定処理土としての使用を念頭に、所定のセメント系固化剤を添加した試料も用いて一軸圧縮強さを求めた。供試体は「安定処理土の静的締固めによる供試体作成」(JGS 0812-2009)¹⁾によって作成し、寸法は直径およそ50mm、高さおよそ100mmである。セメント添加率は0、2、5、10%とし、供試体作成後7日間空气中養生した後、一軸圧縮試験を実施した。供試体の乾燥密度は締固め試験で求めた締固め曲線を基準に各含水比に対応する乾燥密度の95%の値を目標として設定し、同条件で各3本の供試体を作製した。

3.試験結果および考察

図-3は繰返し法及び非繰返し法から得られた締固め曲線を示している。両者の締固め曲線は大きく異なっており、試料を繰返し使用した場合の締固め曲線は明瞭なピークを呈している。繰返し法で求めた最大乾燥密度 $\rho_{dmax1}=1.29\text{g/cm}^3$ 、非繰返し法で求めた $\rho_{dmax2}=1.13\text{g/cm}^3$ と非繰返し法の場合、最大乾燥密度が大幅に低下していることがわかる。これは非繰返し法の供試体では突固め時に土粒子を破碎するためのエネルギーとして締固めエネルギーが消費されるため、土を締固めるためのエネルギーが減少し、十分な締固めが行われなためだと考えられる。同様の実験結果は土粒子が破碎しやすい凝灰質砂の場合にも報告されている²⁾。一方で最適含水比 w_{opt} はいずれの場合も約39%と差はほとんど見られなかった。自然含水比が30~38%と幅があるのは、灰



図-1 自然状態における試料

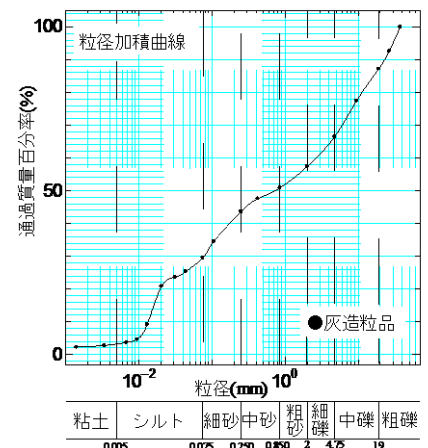


図-2 試料の粒径加積曲線

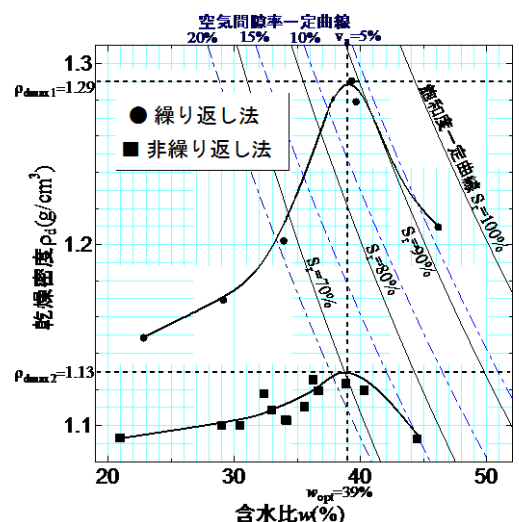


図-3 乾燥密度-含水比曲線

造粒品が製造段階で屋外に保存されており、そのときの環境の影響を受けるためだと考えられる。自然含水比と最適含水比を比較すると、自然含水比よりも最適含水比の方が1~9%ほど高い。

図-4 は非繰り返し法で求めた場合の乾燥密度と含水比および CBR の関係を示している。現場目標強度を最大乾燥密度の 95%に設定した修正 CBR の値は非繰り返し法の場合 49%である。表-1 は日本道路協会の定める路盤材料の強度規定である。これによると、下層路盤での品質規格は修正 CBR が 30%以上または、修正 CBR が 20%以上 30%未満となっており、本報告の灰造粒品が下層路盤としての品質規格を満たしていることがわかる。また、試料を繰返して用いた場合、非繰返し法よりも大きな乾燥密度を示すため、さらに大きな修正 CBR を示すと考えられる。このことは造粒工程において試料の粒度分布を最適化することによりさらなる強度増加が見込めることを示唆している。

図-5 は一軸圧縮試験から得られた圧縮ひずみと圧縮応力の関係を示しており、代表例として固化剤添加率 0%および 5%の結果を比較している。それぞれの配合における 3 本の曲線は同一配合条件で作製した 3 本の供試体の試験結果であり、これらのピークの平均値を一軸圧縮強さ q_u として定義している。固化剤を添加した場合の q_u は安定処理しない場合に比べおよそ 2.8 倍となっている。また、応力-ひずみ関係の立ち上がりの傾きも大きくなっており、強度、剛性ともに大幅に増加していることがわかる。変形係数として求めた E_{50} は固化剤の添加によっておよそ 2.3 倍になっている。セメント安定処理土の下層路盤としての品質規格は一軸圧縮強さが 980kN/m^2 であり(表-1), 固化剤添加率 5%の結果はこれを満たしている。

図-6 は一連の一軸圧縮試験から得られた固化剤添加率と一軸圧縮強さの関係を示している。試験結果より、試料の含水比が 35~45%の範囲において、固化剤添加率を 2%以上とすることで q_u が 980kN/m^2 以上になっており、品質規格を満たしていることがわかる。一方、 $w=20\%$ の場合、固化材を添加しても強度変化はほとんど見られないことから、試料の含水比が低い場合、セメントの水和反応に必要な水が不足しているものと考えられる。また、図-7 は乾燥密度と q_u の関係を示している。固化剤を添加しない試料は含水比によって差があるものの、 ρ_d とともに強度が増加する傾向が見られる。一方、含水比を一定($w=w_{opt}$)とした場合、固化剤を添加した試料の強度増加は無添加の場合よりも大きく、乾燥密度がおよそ 1.00 以上の範囲で $q_u > 980\text{kPa}$ を満たしている。また、固化剤添加量による強度の差はほとんど見られない。

4. 結論

本報告から得られる知見は以下の通りである。

- 1. 灰造粒品の修正 CBR 値は 49%であり、日本道路協会の定める品質規格のうち、下層路盤の条件を満たす。
- 2. 灰造粒品をセメント系の固化剤により安定処理した場合、含水比 35%~45%の範囲において固化剤添加率およそ 2%以上、乾燥密度 1.00g/cm^3 以上で $q_u > 980\text{kPa}$ となり、下層路盤の条件を満たす。

【参考文献】 1) 地盤材料試験の方法と解説 一二分冊の 1ー, 地盤工学会, 2009. 2) 久野悟郎, 赤沢 誠: 試料の取扱いの締固め試験結果に及ぼす影響, 第 13 回日本道路会議論文集, pp. 83-84, 1979. 3) 舗装施工便覧, 日本道路協会(平成 18 年版), pp. 73-92.

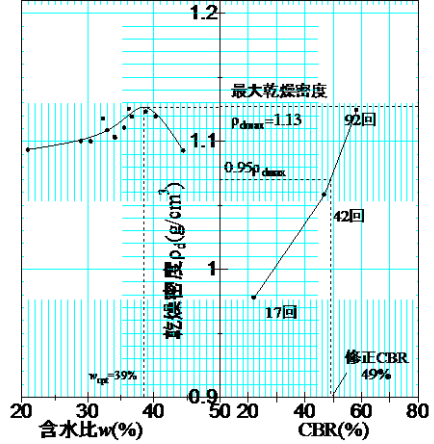


図-4 非繰り返し法の時の乾燥密度と含水比および CBR の関係

表-1 路盤材料としての強度規定

上層路盤	粒度調整砕石、粒度調整鉄鋼スラグ	修正CBR80以上
	セメント安定処理土	一軸圧縮強さ〔7日〕2.9MPa
下層路盤	クラッシャーラン、鉄鋼スラグ、砂等	修正CBR20以上30未満 または30以上
	セメント安定処理土	一軸圧縮強さ〔7日〕0.98MPa
注〔 〕は養生日数を示す。		
(出典) 舗装設計便覧 日本道路協会 H18. 2		

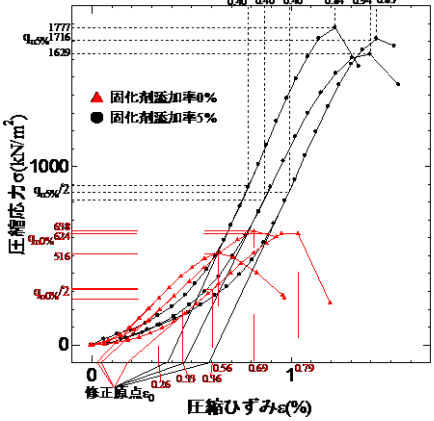


図-5 w=39% セメント添加率 5%における圧縮ひずみと圧縮応力の関係

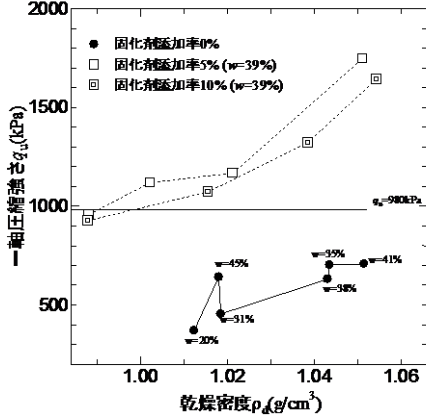
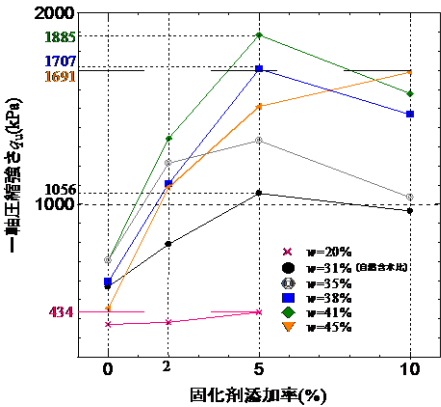


図-7 乾燥密度と一軸圧縮強さの関係