

ごみ焼却灰を焼成造粒した人工砂の力学的性質

法政大学 学 小野 達也
 法政大学 佐伯 嘉彦
 法政大学 柏木 祐介
 法政大学 正 草深 守人

1. はじめに

本文は、一般廃棄物の焼却灰を焼成・造粒した人工砂を建設材料として再利用する際に必要となる基本的な力学的性質の幾つかを、具体的な用途を視野に入れて、検討したものである。対象とした人工砂は、一般廃棄物の焼却灰を1000℃のロータリーキルン内で不溶化剤を添加・焼成した焼成物を造粒することにより生産される有価物である。建設材料としての具体的な用途は路盤・路床材、埋戻し材、盛土材、ドレーン材等が考えられることから、本文では、主にせん断試験、CBR試験および盛土補強実験の結果について考察した。

2. 圧密排水3軸圧縮試験結果と考察

使用した人工砂は流動床焼却灰の焼成造粒物（造粒日H11.8.9、粒径<4.75 mm）であり、主な物理量は粒子質量 $\rho_s = 21.4 \text{ KN/m}^3$ 、自然含水比 $w_0 = 17.0 \%$ 、最適含水比 $w_{opt} = 30.3 \%$ 、最大乾燥密度 $\gamma_{dmax} = 11.5 \text{ KN/m}^3$ である。3軸試験用供試体（写真-1）は、最適含水比に調整した人工砂に普通ポルトランドセメントを重量比（乾燥重量） $C/W_s = 2.0, 3.0, 4.0 \%$ の割合で配合したものをモールド（ $\phi 50 \times h100 \text{ mm}$ ）内に3層に分けて打設・突固めることにより作成した。また、打設後モールド内で1日気中養生後にキャッピング・脱形し、 $20 \pm 3^\circ \text{C}$ の水槽内で14日間水中養生した。3軸圧縮試験条件は圧密排水条件で拘束圧を $\sigma_3 = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 \text{ MPa}$ とし、同種供試体に対し各拘束圧毎に3体の試験を実施した。

図-1は最大圧縮強度に関するMohr-Coulombの破壊基準線を偏差応力 q と静水圧応力 p で表したものである。図から明らかなように、セメントで結合した人工砂は、基本的には砂や砂礫材と同様に粒子間摩擦を主体とした材料であるが、セメントの配合量によりほぼ比例して粘着強度が向上する。また、図-2は図-1の直線式より次式に従って計算した粘着力 c と内部摩擦角 ϕ をセメント配合率 C/W_s との関係で示したものである。

$$\phi = \sin^{-1}(\tan \alpha) \quad c = \frac{a}{\cos \phi} \quad \text{ただし, } q = a + p \tan \alpha$$

図-2から分かるように、セメント配合率のわずかな増加（本実験では2.0～4.0%）により、粘着力は直線的かつ急激な改善を示した。一方、内部摩擦角は、セメント配合率の増加に伴って直線的に減少する。本実験の範囲では、これらの関係はそれぞれ次式のように表すことができる。

$$c = 0.0858 + 0.0443 \quad (\text{MPa}) \quad \phi = \frac{-5.7c}{W_s} + 52.4 \quad (\text{度})$$

以上のことから、本実験で使用した人工砂を建設材料として利用する場合は、その用途と設計条件（特に想定さ



写真-1 3軸圧縮試験供試体

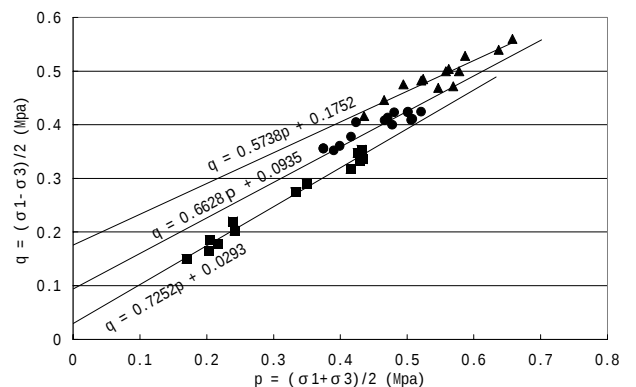


図-1 3軸圧縮試験結果

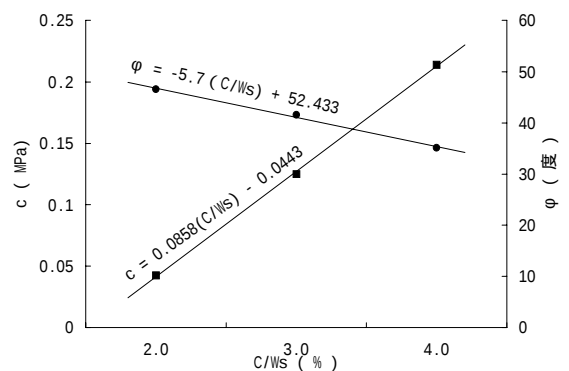


図-2 セメント配合率と c, ϕ

キーワード：ゴミ焼却灰，焼成，リサイクル，セメント，人工砂，3軸圧縮試験，CBR試験，盛土，補強
 〒184-0002 東京都小金井市梶野町3-7-2

れる応力状態)から粘着強度と摩擦強度の要求割合に応じてセメント配合率を適切に選定することが、品質はもちろんコスト面で重要であると考える。

3. CBR試験結果と考察

ここでは、人工砂の有力な用途として考えられている路盤材と路床材に着目したCBR試験を実施し、従来から広く利用されてきた砂礫、砂材料との比較を行う。

3軸圧縮試験と同様の手順で調整した試料を用いてCBR試験体を作成した。締固めは、φ150鋼製モールドを使用して、67回突固め/層×3層(ランマー44.1N、落下高450mm)とした。養生は、締固め直後に1日気中養生した後、4日間の水中養生(20±3℃)を行った。

CBR試験は、セメント配合率0.0%、2.0%、4.0%、6.0%の4種類に対してそれぞれ3試験体ずつ実施した。試験方法はJIS-A1211、JSF-T721の規定に従った。また、試験結果に基づくCBR値の算定は次式を採用した。

$$\text{CBR} = \frac{\text{貫入量2.5mm及び5mmの時の荷重強度}}{\text{標準荷重強度}} \times 100 (\%)$$

(注) 標準荷重強度 2.5mmの場合 6.9 (MPa)

5.0mmの場合 10.3 (MPa)

上式から算定された、各セメント量に対するCBR値(平均CBR値)と配合率の関係を図-3に示す。明らかに、セメントを全く加えていない配合率0.0%の供試体は、CBR値が16.9%と低く路盤用材料としては利用できないが、路床材としては十分利用可能と思われる。一方、セメントをわずか2.0%加えることで、CBR値は57.8%と急激に上昇し、優れた下層路盤用材料として利用できることが分かる。セメント量を4.0%、6.0%と上げていくとCBR値も62.7%、77.2%と上昇し、特に6.0%強のセメント配合を考えれば、上層用路盤材料としても利用できるものと判断できる。また、CBR値の上昇割合はセメント量が0.0%~2.0%の区間で急激な改良効果を示すことから、この区間のCBR値の上昇現象をより詳細に分析するための試験を行うことが、材料コストを下げる上で重要となるかもしれない。

4. 補強盛土の模型実験

用途開発の一つとして、粘土と人工砂をサンドイッチ状に組み合わせた補強盛土の模型実験を実施した(写真-2)。計測項目は法面及び天端面での変位計測や盛土内部の破壊形態の観測等である。また、比較のために粘土のみでの盛土についても同様な実験を行った。盛土斜面の勾配は60°とし、粘土層と人工砂層をそれぞれ3cm厚さで交互に締固めた互層盛土とした。補強層は人工砂とセメント(配合率4.0%)の混合物を締固めたものであり、粘土層は荒木田土を最適含水比(37%)で締固めた。

図-4は実験結果の一部として盛土法肩部における載荷荷重と鉛直変位の関係を示したものであり、法面の水平変位や破壊形態等の実験結果を総合すると、以下のような補強効果を期待出来るようである。

盛土法肩付近の地耐力は人工砂による補強により大幅に改善でき、かつ盛土自体の剛性が高まる。このことは、盛土の変形に伴う盛土上部施設の機能低下や二次応力の発生等による耐久性能の低下を防止する効果として期待できる。人工砂で補強した法面の水平変位の発生量は均質粘土盛土の水平変位に比べ大幅に抑制され、かつ水平変位の発生領域は法面の中央上部に位置し、下部にまで拡大しない。このことから、人工砂による補強は法面の滑りに対する安定性を向上させる効果を十分に期待できるものと思われる。

5. あとがき

ごみ焼却灰を原料とするリサイクル材料として開発された、人工砂は、少量のセメントを配合し、かつその用途を適切に選択すれば、優れた建設用材料として十分利用価値のある材料であると考えられる。

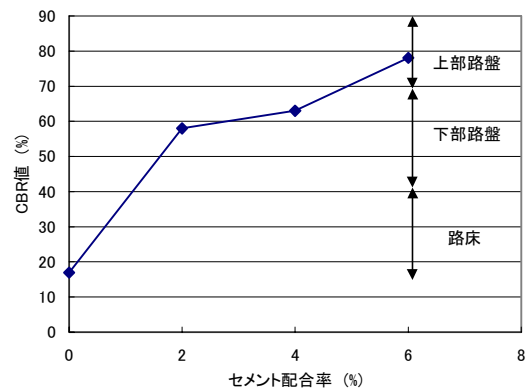


図-3 CBR試験結果

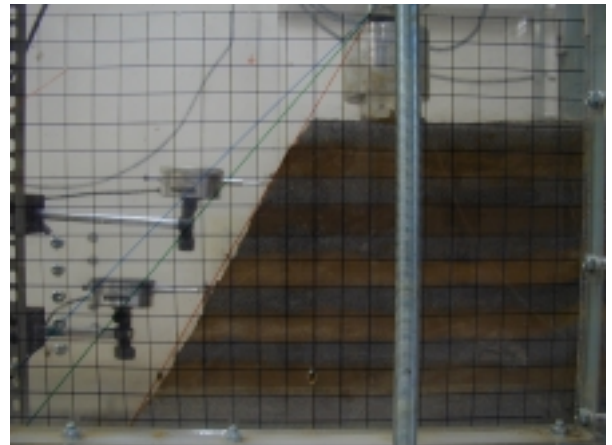


写真-2 補強盛土の載荷実験

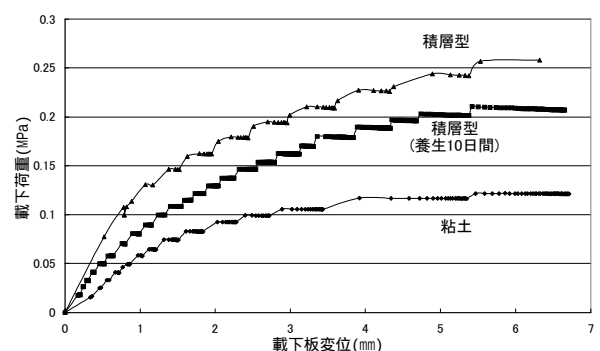


図-4 載荷板の荷重-沈下量