産業副産物の混合による泥土の改質について[†]

澤 孝平* 友久 誠司*

Improvement of Muddy Soil through the Mixing of By-Product of Industry

by

Kohei SAWA* and Seishi TOMOHISA*

The purpose of this study is to make clear the possibility of the utilization of muddy soil mixed with incinerated ash or iron/steel slag as an additive. The muddy soil used is dredged soil reclaimed from a river. The strength properties of the dredged soil mixed with various incinerated ashes and so on are tested using the CBR test or cone penetration test. This is in order to be able to use the treated soil as construction material for super embankments and as subgrade material on roads.

As a result, in the case where incinerated ashes are used as an additive, the treated soil mixed with incinerated ash gains high strength due to a reduction in the water content. When fluidized bed combustion coal fly ash is used as an additive, an increase in the strength of the treated soil was observed during aging, and it gives the greatest strength in comparison with other incinerated ashes. Furthermore, in order to gain high strength, it is more effective to decrease the water content of the dredged soil.

In the case where iron/steel slag is used as an additive, the treated soil mixed with slag, with a maximum grain size of 20 mm, passes the material standard for grain size distribution of super embankments. The greater the mixing rate of slag, the lower the water content and the higher CBR of the treated soil. The CBR of the treated soil mixed with a lot of fine-grain slag becomes high at a low mixing rate. By contrast, the CBR with a lot of coarse-grain slag becomes high at a high mixing rate.

Key words: CBR test, Cone penetration test, Incinerated ash, Iron and steel slag, Soil stabilization

1 緒 言

平成 12 年度に全国で発生した建設系廃棄物は約 8500 万トンで約 9% が建設汚泥である。そのリサイクルの実績によると、アスファルト・コンクリート塊やコンクリート塊の再利用率は 96% 以上であるのに対し、建設汚泥の再利用率はわずか 41% である。¹⁾ また、建設工事の大型化、地下空間の有効利用および都市の再開発などに伴って発生する建設発生土の量は年々増加している。建設発生土は廃棄物の範疇ではなく、再利用が要請されている。しかしながら、それらの多くは最終処分場で埋立て処分されており、今後は大規模な処分地の確保は難しくなっていることより、汚泥や泥土の有効利用技術の開発は緊急の課題とされている。^{2), 3)}

現在、建設汚泥等の有効利用の一手段としてセメント系固化材による固化処理が行われている。しかし、この方法は、汚泥が有機物を多く含む場合には大量の固化材を必要とし、コスト高になること、処理土が強アルカリになること、および固化処理土の強度発現が一様でないなどの欠点がある。⁴⁾

昭和 48 年のオイルショック以降にエネルギー源の多様化で石炭が見直されて以来の石炭灰をはじめ、下水汚泥や製紙汚泥など、各種の焼却灰の排出量が年々増加の一途を辿っている。また、かつて廃棄物であったものの、

再生利用の優等生といわれている高炉スラグでさえ、150 万 t/年もの量が最終処分場に廃棄されており、これらの状況が最終処分場の不足に拍車をかけている。⁵⁾

一方、東京・大阪の 6 河川では、超過洪水による破堤の防止や潤いの空間の確保などの目的で高規格堤防の整備が要請されており、淀川では 40 万 m³/年もの盛土材が必要である。そのため、そのままでは盛土材の品質規準を満足しない不良土も改質して利用せざるを得なくなっている。そこで、不良土と石炭灰等の焼却灰を混合することにより盛土材としての有効利用が可能となれば、最終処分地の延命や資源のリサイクルおよび環境保全の観点から大変有意義である。

本研究の目的は、建設現場から発生する低強度の浚渫土に、石炭の燃焼等によって発生する焼却灰や鉄鋼のスラグを混合して含水比の低下および粒度調整を行い、それらを建設材料として有効利用する可能性を追求する。具体的には、高規格堤防（規定の粒度範囲で $q_c = 400$ kPa）や道路路床（CBR = 3% 以上）などへの適用性を検討する。⁶⁾

2 試料および実験方法

用いた試料は、大阪府高槻市内の淀川の浚渫土 ($w_n = 32.0\%$, $w_L = 55.2\%$, $I_p = 26.6$, $\rho_s = 2.69$ g/cm³, 砂分 28%, シルト分 29%, 粘土分 43%, CBR = 0.7%, $q_c =$

[†] 原稿受理 平成 15 年 4 月 8 日 Received Apr. 8, 2003

* 正 会 員 明石工業高等専門学校都市システム工学科 〒674-8501 明石市魚住町西岡, Dept. of Civil Eng., Akashi National College of Tech., Uozumi-cho, Akashi, 674-8501

280kPa) であり、高規格堤防や道路路床の盛土材の基準以下のもので、実験には含水比を25%に調節して用いる (Fig. 1).

浚渫土の改質は次の2つの方法で行った。

【実験1】浚渫土に3種類の焼却灰を混合する方法

浚渫土に混合する添加材は微粉炭灰 (P-ash)・流動床灰 (F-ash) の2種類の石炭灰と、段ボール紙の再生過程で発生するペーパースラッジを焼却した製紙焼却灰 (S-ash) の3種類の焼却灰である。ここで、浚渫土の品質を改善したものを「改良土」と呼ぶ。

改良土の配合は浚渫土の湿潤質量に対し、焼却灰の固化活性の程度に応じて、微粉炭灰は10、20、30、40%の4種類、流動床灰は6、8、10%、また、製紙焼却灰は8、10、12%の3種類である。

供試体は15cm モールドを用いてJIS A 1210の呼び名Eの方法で作製し、成形直後および恒温密封条件で7日、14日間養生後、CBR試験・コーン貫入試験により改良土の評価を行う。また、改良効果に対する含水比の影響を検討するため、浚渫土の含水比を5%増加の30%に調整した浚渫土でも、同様の実験を行う。

【実験2】浚渫土に製鉄・製鋼スラグを混合する方法

粗粒材の混合による粒度改善により浚渫土の改質を目的とするものである。混合するスラグは水砕、徐冷、および製鋼の3種類の鉄鋼スラグであり、徐冷および製鋼スラグは最大粒径が20mmと10mmのものである (Table I)。また、最大粒径20mmの徐冷スラグ (徐冷20mmと呼ぶ) を用いて、粒径1.2mm～10mm以下の量をそれぞれ65% (細粒)、50% (中粒)、35% (粗粒) に調整したもの (粒度調整徐冷スラグと呼ぶ) も準備した。浚渫土とスラグを混合した改良土の配合は湿潤質量の割合で、(浚渫土：スラグ) が (5：5)、(6：4)、(7：3) の3種類である。

Fig. 1. Experimental procedure.

Table I. Properties of blast-furnace slag and steel making slag.

Addition material	Granulated slag	Air-cooled slag	Steel making slag
Maximum grain size (mm)	3	10 20	10 20
Water content (%)	3.3	8.1 3.9	5.7 4.9
Water absorption (%)	—	6.7 4.6	4.7 2.9
Density (g/cm ³)	—	2.46 2.47	2.81 3.18

3 結果と考察

3・1 焼却灰を混合する場合

Fig. 2は微粉炭灰を添加材として用いた改良土の微粉炭灰混合率とCBRの関係である。これによると、微粉炭灰混合率が多くなるほどCBRは増加する傾向にある。特に、混合率30%と40%改良土はCBRが大きく増加し、また、成形直後に比べ、7日あるいは14日養生後にはCBRが増加する傾向も見られる。

Fig. 3は、微粉炭灰を混合した供試体の含水比とCBRの関係である。混合率ごとの測定値を代表する●印を見ると、改良土の含水比は微粉炭灰の混合率に応じて一義的に決まり、CBRは改良土の含水比が小さいほど大きな値を示している。そして、道路の路床材としての材料基準 (CBR = 3%) を満足するには、微粉炭灰を30%以上混合し、含水比を20%以下にする必要がある。

Fig. 4は、3種類の焼却灰を混合した改良土の混合率とCBRの関係である。CBRの増加が顕著な範囲において、混合率1%当たりのCBRの増加量は、流動床灰を混合した場合が約4.75%であるのに対し、製紙焼却灰は

Fig. 2. Mixing rate of P-ash and CBR.

Fig. 3. Water content of treated soil and CBR.

Fig. 4. Mixing rate of incinerated ash and CBR.

0.75%, 微粉炭灰は0.30%となり、浚渫土の改質効果は流動床灰、製紙焼却灰、微粉炭灰の順で前者ほど大きいことが分かる。そして、浚渫土が道路の路床材としての材料基準 (CBR = 3%) を満足するには、流動床灰で6%, 製紙焼却灰で8%の混合率で良いのに比べて、微粉炭灰では30%以上の混合率が必要であることが分かる。

Fig. 5は焼却灰混合率とコーン指数の関係を示している。焼却灰混合率の増加に対するコーン指数の変化の幅は小さくなっているが、コーン指数はCBRと同様、流動床灰、製紙焼却灰、微粉炭灰の順で前者ほど大きな値を示している。また、最も貫入抵抗の小さい微粉炭灰でも、浚渫土に約10%混合することで高規格堤防の盛土材の基準 (コーン指数400kPa) を満足することが分かる。

Fig. 6は3種類の焼却灰を混合した供試体の養生方法とCBRの関係である。微粉炭灰と製紙焼却灰を混合した場合、養生の違いによりCBRはほとんど変化しないのに比べ、流動床灰を混合すると水浸養生により強度は大きく増加することが分かる。これは養生に伴い、流動床灰のCaOやSO₃成分による硬化反応が発揮された結果と考えられる。しかし、製紙焼却灰や微粉炭灰を混合した場合でも水浸による供試体の軟弱化は生じないことが分かる。

Fig. 7は、微粉炭灰を混合した改良土のCBRとコーン指数の関係である。両者の間には決定係数0.91の高い

相関関係があり、道路路床の盛土材としての基準、CBR = 3%を達成するためには、 q_c は約1MPaあれば良いことになる。その結果、CBR試験に代わり、より簡便な試験方法で改良土を評価することが可能である。

Fig. 8は、焼却灰混合率の最も多い配合において、浚渫土の含水比とCBRの関係を示したものである。浚渫土の含水比25%のものと30%を比較すると、わずかな含水比を5%減少させることにより、いずれの焼却灰を混合した改良土においてもCBRが6～13倍に増加していることが分かる。すなわち、天日乾燥等により浚渫土の含水比を低下させる前処理が、改良土のCBRの増加に大きな効果のあることが確認できる。

3・2 鉄鋼スラグを混合する場合

浚渫土と水砕、徐冷10mm、徐冷20mm、および粒度調整徐冷スラグ (粗粒) を (浚渫土 : スラグ) = (6 : 4) で混合した改良土の粒度分布をFig. 9に示している。最大粒径が10mm以下のスラグを用いる場合は、高規格堤防の盛土材としての粒度基準を満足できない。しかし、最大粒径が20mmのスラグを混合すると、改良土は高規格堤防の盛土材としての粒度基準を達成することがわかる。

Fig. 10は徐冷スラグ10mmと水砕スラグを混合した改良土の含水比とCBRの関係である。徐冷スラグ混合率は30～50%と異なるが、改良土の含水比とCBRの関

Fig. 5. Mixing rate of incinerated ash and cone index.

Fig. 7. CBR and cone index. (P-ash)

Fig. 8. Water content of dredged soil and CBR.

Fig. 6. Aging method and CBR.

Fig. 9. Grain size distribution of dredged soil and treated soil.

Fig. 10. Water content of treated soil and CBR.
(Air-cooled slag 10mm, Granulated slag)

Fig. 11. Mixing rate of slag and CBR.
(Particle size adjusting slag)

Fig. 12. Water content of treated soil and CBR.
(Particle size adjusting slag)

係はひとつの曲線で表わすことができる。そして、改良土の含水比が一定の値（以後、CBR急変含水比と呼ぶ）以上では徐冷スラグ混合率の違いによるCBRに差は見られないが、改良土の含水比がCBR急変含水比以下になると徐冷スラグ混合率の多いものほどCBRは大きくなる。今回の実験ではCBR急変含水比は約18%である。また、製鋼スラグを用いた実験でも同様の結果を得ている。

Fig. 10の破線はCBR急変含水比以下で、含水比の異なる浚渫土に水砕スラグを40%混合した改良土である。粒径の小さな水砕スラグの混合においてもCBRは改良土の含水比により一義的（寄与率0.88）に決まることが分かる。この結果は、混合する粗粒材料に吸水率や粒径の異なる碎石等を用いた前報⁷⁾と同様である。

Fig. 11は粗粒の3種類の粒度調整徐冷スラグを混合した結果である。混合率が30%では、いずれもCBRは3%以下の低い値であるが、細粒のスラグを混合した改良土が他の2倍程度のCBRを示している。そして、混合率を40%に増やすとCBRは大幅に増加し、30%の約3倍のCBRに、そして、混合率を50%に増やすと粗粒のスラグが最も高い値になる。

Fig. 12は粒度調整徐冷スラグを混合した改良土の含水比とCBRの関係である。いずれの改良土もスラグ混合率が増えると含水比が低下してCBRは大きくなる。当然、スラグ混合率が同じであれば改良土の含水比もほぼ同じ値を示すが、特に、改良土が低含水比になると、CBRの増加は粗粒のスラグが顕著である。この理由は次のように考えられる。スラグ混合率が少ない場合はスラグ粒子が改良土中に点在しており、粒径の小さい細粒のスラグが浚渫土中の水分を多く吸収するために大きなCBRを示す。一方、スラグ混合率を多くするとスラグ粒子が接近して粒子の移動を拘束し、その骨格構造が応力を伝達するため、粗粒のスラグがCBRの増加に貢献するものと考えられる。

4 結 言

高規格堤防や道路路床の盛土材としての材料基準に適合しない不良土に、石炭灰や鉄鋼スラグを混合して改質し、建設材料として使用する可能性について追究した。

その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 改良土は、焼却灰混合率の増加により含水比が低下し、強度が増加する。
- (2) 添加材としての改良効果は流動床灰、製紙焼却灰、微粉炭灰の順で前者ほど大きい。そして、流動床灰は養生の経過に伴い強度が増加する。
- (3) 改良前に不良土の含水比を低下することにより改良効果は大きくなる。
- (4) 泥土に最大粒径20mmのスラグを混合すると、高規格堤防の盛土材の粒度基準を達成できる。
- (5) 鉄鋼スラグの混合では、改良土の含水比が一定の値以上ではスラグの種類、混合率、粒径の違いによるCBRに差は見られない。しかし、改良土の含水比が低下し、一定の値以下になるとCBRは大幅に増加し、スラグ混合率の多いものほどCBRは大きくなる。
- (6) 徐冷スラグと製鋼スラグの種類による混合効果の違いはみられない。
- (7) 低含水比の改良土は、粗粒材料の混合が骨組み構造を形成して強度増加に貢献する。スラグ混合率が小さい場合は細粒子の多い配合で、混合率が大きい場合は粗粒子の多い配合で高いCBRが得られる。

(平成14年11月11日日本材料学会第5回地盤改良シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 国土交通省, 平成12年度建設副産物実態調査について, 3 (2002).
- 2) 土木学会建設副産物調査委員会, 建設副産物問題の解決に向けて, 1 (1995).
- 3) 番場正夫, JCM マンスリーレポート, 4, No.10, 3 (1995).
- 4) 喜田大三, 久保 博, 漆原知則, 材料, 31, 176 (1982).
- 5) 山田 優, 長坂勇二, 檜垣貴司, 河地 武, 土と基礎, 44, No.11, 59 (1996).
- 6) 澤 孝平, 友久誠司, 伊東和人, 第4回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 45 (2001).
- 7) 友久誠司, 澤 孝平, 日本鉄鋼協会春季シンポジウム論文集, 32 (2002).