

砂質土を混入した石炭灰の締固めにおける密度管理の一手法

Compaction Control of Residual Coal Ash Mixing with Sand

井 上 章 (いのうえ あきら)

東京電力㈱千葉送変電工事事務所土木グループ 副長

島 田 茂 (しまだ しげる)

伸光エンジニアリング㈱技術管理部 部長

木 暮 敬 二 (こぐれ けいじ)

防衛大学校教授 土木工学教室

1. はじめに

石炭は樹木類の化石であり、炭化水素のほかに珪素、アルミニウム、鉄、カルシウムなどを含んでいる。これらの成分は燃焼後に主として酸化物の形で残り、これが石炭灰である。石炭の種類や燃焼方式によって異なるが、現在の主流である微粉炭燃焼方式では石炭質量の10～20%の石炭灰が発生する¹⁾。石炭灰の発生量は電気事業だけでも500万 t/年に達しようとしており、2010年には1千万 tを超える予測されている²⁾。

石炭灰は「再生資源の利用の促進に関する法律」(通称:リサイクル法)でいう再資源に相当し、特に電気事業から副産する石炭灰は有効利用を促進しなければならない指定副産物に定められている。このような状況の下で石炭灰は、セメントやコンクリートの原料、土木材料、建築材料などとして約50%は有効利用されているが、残りは埋立てなどの地盤材料として用いられている。地盤材料としての石炭灰の特徴としては、水との接触によってセメント水和物に似た生成物を形成し、自硬性をもつことが知られている³⁾。この自硬性は埋立てや盛土にとって重要であるが、密度によって変化し、不十分な転圧では強度発現がほとんど期待できない⁴⁾。また、石炭の産地によって石炭灰に含まれるCaOの含有量が変化し、5%程度以下だと自硬性がない^{3),5)}。そのため、石膏やセメントを添加して石炭灰を改良することもある⁶⁾。ただ、セメントなどの工業製品を用いての石炭灰の改良は一般にコストが高くなり、現地の適当な良質土を添加することによって石炭灰を改良し、締固め効果を向上させる工法の開発が期待されている。本報告は、現地発生の土質材料の有効利用と低コスト化を目的として、石炭灰に良質土(ここでは砂質土を用いた)を混合する石炭灰の改良における締固め密度管理の方法について考察するものである。

石炭灰に良質土を混合した材料の締固めの密度管理において問題となる一つが両者の粒子密度の違いである。石炭灰の粒子密度は1.9～2.3 g/cm³であり、鉱物粒子のおよそ85%程度である。このような粒子密度の異なる2種類の材料を混合して締固め材料として用いる場合、その密度管理において一つの問題が生ずる。すなわち、室内での締固め試験と施工現場における混合割合が

同じであれば何ら問題はなく、室内の締固め試験から得られた密度管理基準がそのまま適用できる。しかし、施工現場においては、混合プラントを用いるような場合以外においては、混合率を一定に保つことはかなり難しい作業となり、室内での混合率と異なってくるとともに、混合率に変動が生ずるのが普通である。そのため、室内の締固め試験から得られた慣用の密度管理基準だけで締固め管理を行うと、混合率の変動に伴って密度の測定結果にばらつきが生じ、正確な密度管理ができない。

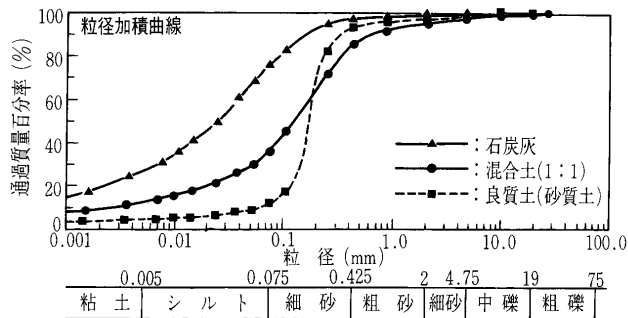
本報告は、石炭灰に良質土としての砂質土を加えた混合材料の、現場における締固め密度管理の精度の向上という観点から、粒子密度を考慮した締固め密度管理の一手法を提案し、現場における試験盛土と実際の盛土施工結果から提案方法の有用性を確かめたものである。

2. 対象とした石炭灰と砂質土

今回の一連の実験で検討の対象とした石炭灰は、1度埋立てられた石炭灰を変電所構築のために再度掘削したものであり、これを再び盛土材として利用することを目指した。再掘削された石炭灰は、元来もっている自硬性が失われているとともに、一般に高含水状態にある。そのため、これをそのままの状態盛土材として使用することはできない。ここでは、再掘削された石炭灰に砂質土を混合することによって、施工性の改良とともに締固め効果の向上を試みた。混合に用いた砂質土は石炭灰の上層にすでに盛られていた浚渫砂質土と考えられる土層である。要するに、現地発生の材料を低コストで有効に利用しようとするものである。表—1および図—1に用いた石炭灰と砂質土の物理的性質等と粒度分布を示した。なお、表と図において混合土とあるのは両者を1:1で混合した材料である。また参考値として、各々の材料について行った室内試験での平均CBR(%)と吸水膨張比

表—1 試料土の物理的性質等

項 目	対象土	石炭灰	砂質土	混合土 (1:1)
土粒子密度 ρ (g/cm ³)		2.264	2.693	2.512
含水比 w (%)		32.0	11.9	21.5
平均 CBR (%)		17.6	14.7	14.9
吸水膨張比 γ_e (%)		0.452	0	0.028



図—1 試料土の粒径加積曲線

(%) の値を示しておいた。石炭灰は、特に含水比は 32% と高く、粒径から見るとシルトに近く、そのままでは締固め材料としての再利用はできない状態の材料である。

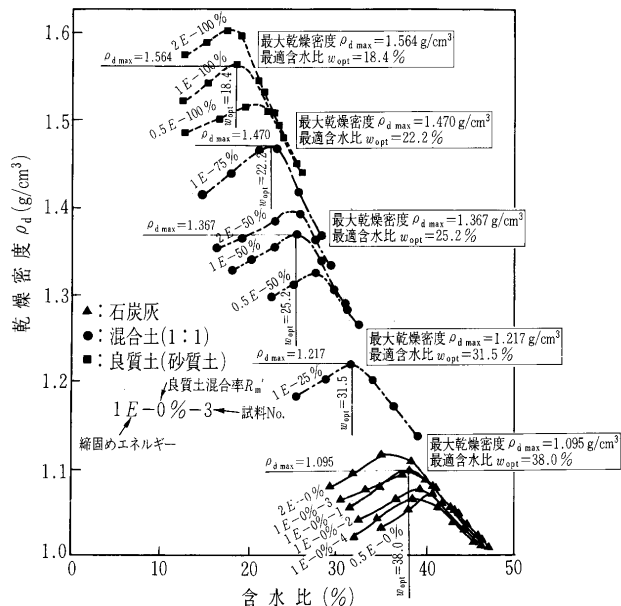
3. 室内締固め試験の概要

標準的な方法で試料調整した上記の石炭灰と砂質土を各々 140 kg 準備し、各種室内試験に供した。締固め試験は JIS の標準締固め試験に準拠した方法 ($\phi 15$ cm, ランマー質量 2.5 kg, 3 層, 55 回, 湿潤法で非繰返し法) によった⁷⁾。砂質土と石炭灰の混合率 R_m を湿潤状態における質量比 (ただし、混合率 R_m は乾燥状態における質量比) として、 $R_m' = \{\text{砂質土} / (\text{石炭灰} + \text{砂質土})\} \times 100(\%)$ と定義し、 R_m' を 0, 25, 50, 75, 100% の 5 段階に変化させた混合土を締固め試験に供した。表—1 や図—1 の 1:1 混合土は混合率 $R_m' = 50\%$ に相当する。締固めエネルギーは標準締固め試験におけるエネルギーを $1E$ としたとき、 $0.5E, 1E, 2E$ の 3 段階に変えた。締固め試験のほかに、強度特性を検討するための三軸 UU 試験, CBR 試験, 一面せん断試験等を実施したが、それらの結果についてはここでは触れない。また、石炭灰については、平成 3 年の環境庁告示第 46 号の付表に定められている方法に準拠して土壌溶出試験と土壌含有試験を行い、規定内にあることを確認している。

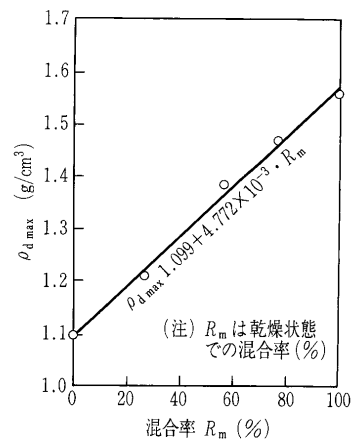
4. 実験結果と締固めにおける密度管理方法の検討

3. で述べたような各種の混合率と締固めエネルギーを用いたときの締固め曲線を示したのが図—2 である。混合率が増加するにしたがって最大乾燥密度が増大するとともに、最適含水比が低下することがはっきり認められ、砂質土の混合によって締固め特性が急速に改善されることがわかる。また混合率が同じ場合、当然のことながら締固めエネルギーの増加によって最大乾燥密度が大きくなるとともに最適含水比も低下している。図—2 の締固め曲線群から、締固めエネルギーが $1E$ における各曲線の最大乾燥密度を読みとり、これと水分を除外した 2 材料の乾燥状態にある混合率 R_m との関係を図示すると図—3 のようになり、よい直線関係が成り立っていることがわかる。

以上のような締固め試験結果に基づいて、粒子密度の



図—2 混合率と締固めエネルギーによる締固め曲線の変化

図—3 混合率 R_m と ρ_{dmax} の関係

異なる 2 種の土質材料を混合した場合の締固めにおける密度管理について考えてみる。いま、石炭灰の粒子密度を ρ_a 、添加混合する砂質土のそれを ρ_s 、混合土の粒子密度を ρ_m 、乾燥状態にある混合率を R_m とすると次の関係を導くことができる。

$$R_m = \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_a} \right) / \left(\frac{1}{\rho_s} - \frac{1}{\rho_a} \right) \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

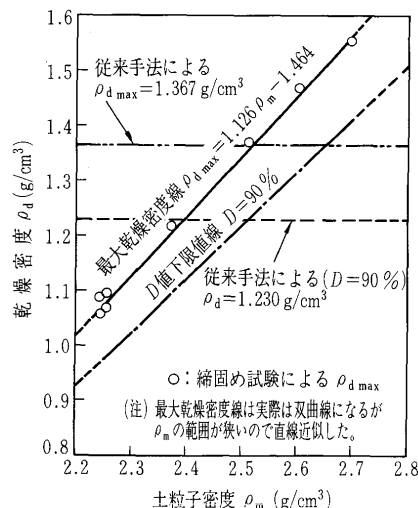
本実験に用いた石炭灰の $\rho_a = 2.264 \text{ g/cm}^3$ および砂質土の $\rho_s = 2.693 \text{ g/cm}^3$ を式(1)に代入すると次のような関係となる。

$$R_m = \frac{0.442 - 1/\rho_m}{0.0704} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

一方、図—3 に示したように、混合土を締固めたときの最大乾燥密度 ρ_{dmax} と混合率 R_m との間には直線関係がある。この回帰直線を求めると次のようになる。

$$\rho_{dmax} = 1.099 + 4.772 \times 10^{-3} \cdot R_m (\text{g/cm}^3) \quad \dots\dots\dots (3)$$

この回帰直線の相関係数 r は 0.9978 であり、高い相関性があるといえる。式(2), (3)より最大乾燥密度 ρ_{dmax} と混合土の粒子密度 ρ_m との関係は次のようになる。



図—4 締固め管理基準図

$$\rho_{d\max} = 4.095 - 6.778/\rho_m \quad (\text{g/cm}^3) \quad \dots\dots\dots (4)$$

つまり、式(3)の直線を仮定すると、粒子密度の異なる2種材料混合土の最大乾燥密度は混合土の混合率 R_m によって表される。さらに、対象としている石炭灰と砂質土の粒子密度 ρ_a と ρ_s の分布範囲の狭いこと、あるいは、現場施工における混合率の精度という観点から見ると、式(4)の双曲線に代えて直線で近似することが考えられる。式(4)の関係を直線で近似すると、相関係数 $r=0.9985$ で次のような関係となる。

$$\rho_{d\max} = 1.126 \cdot \rho_m - 1.464 \quad (\text{g/cm}^3) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(4)あるいは(5)は、粒子密度の異なる2種類の材料の混合土の締固めにおける密度管理においては、従来用いられていた慣用の密度だけではなく、混合土の粒子密度 ρ_m を考慮することの必要性を示すものである。

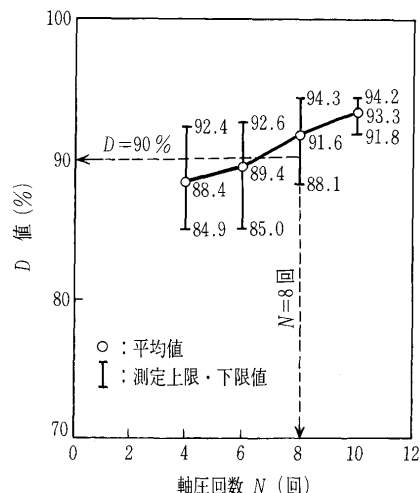
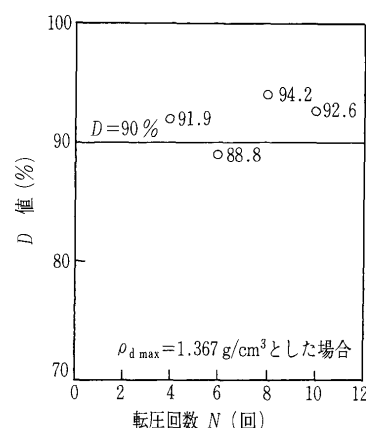
図—4は混合土の粒子密度 ρ_m と締固め後の乾燥密度 ρ_d との関係を表した図中に、 $\rho_{d\max}$ と締固め度 $D=90\%$ の直線を記入したものである。この図において、たとえば締固め度が90%以上という密度管理基準であれば、施工の結果が両直線の中にあればよい。つまり、混合した締固め度の粒子密度 ρ_m によって、必要とする乾燥密度が変わってくる。粒子密度の異なる2種類の材料を混合した土の締固め密度管理にあたって、 ρ_m を測定しておけばこの締固め密度管理図を利用することができる。

5. 試験盛土と現場施工による締固め密度管理方法の検討

5.1 試験盛土による締固め条件の設定

以上に示してきた室内試験に用いたのと同じ、掘削した石炭灰と砂質土を用いて試験盛土を行った。混合率 $R_m'=50\%$ の混合材料と0.8t級の振動ローラーを用い、転圧回数を4～10回に変えて、層厚40cmの試験盛土を作成し、各々の転圧回数での締固め土について、粒子密度 ρ_m 、含水比 w 、RIによる密度測定などを実施した。施工時の締固め含水比は24.9%であり、混合率50%の混合材料の最適含水比に近いものである。

混合土の粒子密度 R_m を考慮した提案方法により、こ

図—5 提案手法による N と D 値の関係図—6 従来手法による N と D 値の関係

の試験盛土における転圧回数と締固め度 (D) との関係を示したのが図—5である。目標とする管理値は締固め度 $D=90\%$ としたので、この試験盛土の結果から実際の盛土施工においては、転圧回数を $N=8$ 回に設定し、まき出し厚を40cm以内とし、0.8t級振動ローラーを用いることとした。なお、図—6には従来の慣用法による結果を示したが、明確な相関関係はみられない。これは、従来の方法では、材料の混合率の変動による締固め密度のばらつきに十分に対応できなかったことによるものと考えられる。

5.2 盛土施工による締固め密度管理方法の検討

上記のような締固め密度基準を含む施工仕様を設定し、実際の盛土施工を行い、混合締固め土の品質管理値から、提案した締固め密度管理方法の妥当性を考察する。

盛土が完成した後の仕上りの品質管理値の数例を示したのが図—7～9である。この盛土の施工においては、石炭灰と砂質土の混合にあたっての土量の計量をバケットによって行っている。混合率 R_m は50% (1:1) を目標に施工しているので、正確に計量ができているれば混合土の粒子密度 ρ_m は、石炭灰と砂質土の粒子密度の平均である 2.478 g/cm^3 になるはずである。しかし、図—7にみられるように、 ρ_m は $2.46 \sim 2.58 \text{ g/cm}^3$ 程度に分布し、平均値は 2.524 g/cm^3 であり、かなりのばらつきをもっている。このことは、締固めにおける密度管理に

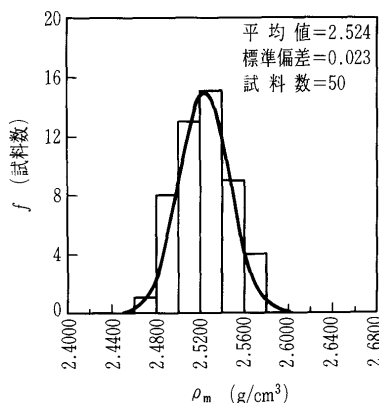


図-7 仕上り品質 (土粒子密度 ρ_m) の度数分布

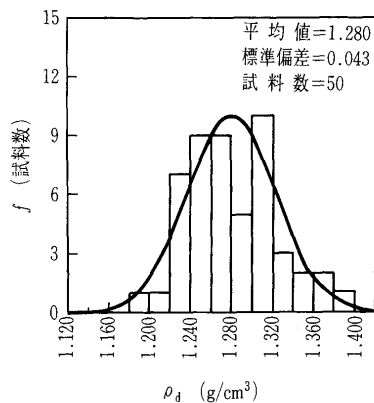


図-8 仕上り品質 (乾燥密度 ρ_d) の度数分布

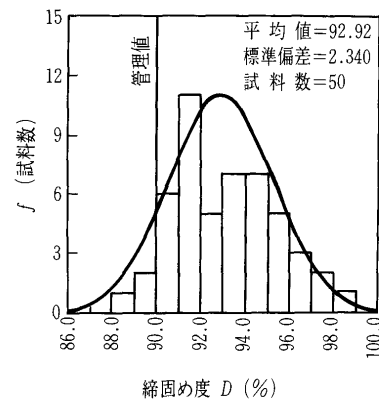


図-9 仕上り品質 (締固め度 D) の度数分布

ρ_m を考慮しなければならないことを示すものといえよう。また、図-8の乾燥密度 ρ_d の分布においては、特にばらつきが大きく、混合率の変動による混合材料の粒子密度の違いの影響が出ているといえよう。図-9の締固め度 (D) の分布においては、ほとんどは締固めの密度管理値90%をクリアしているが、かなりばらつきがある。締固め度については、RIの測定結果等のばらつきを考慮して、50箇所の測定結果から母平均の下側信頼限界を推定し、品質管理基準に対する判定を行った。その結果、締固め度90%の母平均の95%下側信頼限界は $D=92.2\%$ であり、今回設定した $D=90\%$ を十分に満足していることがわかった。

図-10はここで提案した締固め密度管理図 (図-4) に、盛土施工による乾燥密度 ρ_d をプロットしたものである。混合土の粒子密度 ρ_m によって、言い換えれば混合率の変動によって、乾燥密度は大きくばらついている。しかし、数個の例外を除いて、粒子密度 ρ_m を考慮した締固め密度管理直線である両直線内にあることがわかる。一方、慣用法に従って $R_m'=50\%$ の混合土の密度管理をすると、 ρ_m に関係なく、 $\rho_{dmax}=1.367 \text{ g/cm}^3$ と $\rho_{d90}=1.230 \text{ g/cm}^3$ の間に結果があれば合格ということになり、図にみられるように不合格の数が増大する。

6. おわりに

本報告においては、鉱物質土の粒子密度と異なる粒子密度をもつ石炭灰に砂質土を添加・混合した材料の、現場施工における締固め密度管理における精度の向上という観点から、粒子密度を考慮した締固めの密度管理の方法について一つの提案を行い、これの有用性を盛土施工結果から確認してきた。この方法は、実務的には締固め土の粒子密度の測定という手間が増えるだけである。実際の施工現場においては、計量を伴う混合プラントを用いることの少ないことを考えると、提案した方法は混合率のばらつきにも対応でき、実用的な方法といえよう。一方最近においては、発泡ビーズ、プラスチック廃材あるいはガラス廃材等を土に添加・混合する軽量土の利用も進んでいる。この場合も、粒子密度の異なる2種材

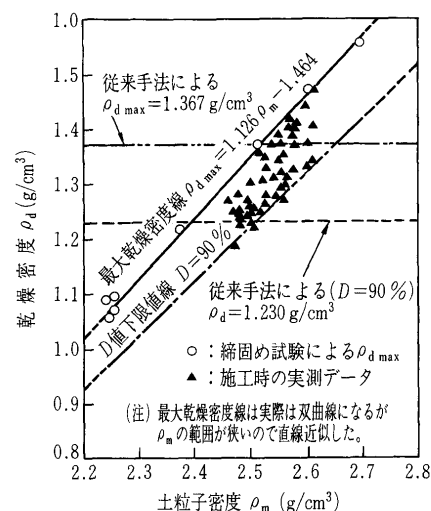


図-10 施工結果の管理基準図へのプロット

料の混合材料であり、本報告で考察したような問題が起こる。今後さらに、現場施工データの種類によって提案方法の妥当性を検討するとともに、軽量土などへの適用性についても考察を進めたいと考えている。

参 考 文 献

- 堀内澄夫：石炭灰の水域埋立てへの利用に関する研究，茨城大学学位論文，p. 2, 1996.
- 環境技術協会，日本フライアッシュ協会編：石炭灰ハンドブック，pp. I-1～I-5, 1995.
- 安田 稔：各種石炭灰の諸性状と有効利用の展望，電力土木，No. 204，pp. 21～31, 1986.
- 三木五三郎：石炭灰による土地造成の問題点，材料，Vol. 19，No. 205，pp. 900～904, 1970.
- 末次大輔・宮田喜壽・木暮敬二：水中で沈降堆積された石炭灰の力学特性，第3回環境地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会，pp. 103～106, 1999.
- 伴 一彦：石炭灰を利用した深層混合処理方法の技術開発の取り組み，第1回石炭灰の有効利用セミナー—上工材としての大量利用技術開発—講演集，pp. 41～59, 1995.
- 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，pp. 201～214, 1994.

(原稿受理 1999.12.3)