

石炭灰の地盤材料としての有効利用と環境への影響

UTILISATION OF COAL MINE FLY ASHES AS A GEOTECHNICAL MATERIAL

安原一哉*

堀内澄夫**

Kazuya YASUHARA and Sumio HORIUCHI

ABSTRACT; Geotechnical investigation on coal mine fly ashes has been carried out for the last ten years as a joint research by two groups at Ibaraki University and Shimizu Construction Co. Ltd.. This report reviews the results from this investigation, mainly at laboratories of two institutions which have been aimed at (1) use to reclamation and (2) utilization as a light weight geo-material.

KEYWORDS; Coal fly ash, reclamation, recycling, geo-material

1. はじめに

現在の日本のエネルギー事情は種々の困難な問題のために、依然として火力発電に依存するところが多い。なかでも、石炭火力は国内の資源の枯渇後は、海外炭に依存している。日本における石炭灰の発生量は、図-1に示すように、電力関係でも年間460トンにものぼり、1995年には700~800トンに達すると推定されている¹⁾。土木・建築材料をはじめとして、様々な方面への利用が検討されているが、実際に有効利用されているのは、全体の30~40%であり、残りは水域や陸上に埋立処分されている。最近になって、石炭灰が軽量である特性を利用して、軽量な地盤材料(盛土、構造物の裏込め材料、建築基礎など)として利用されることが試みられてきている。本文は、発表者らのグループが過去10年間にわたって、これら2つの目的のために行ってきた研究を、主として力学的側面(圧縮性、静的強度、動的強度、変形抵抗、透水性など)からまとめて、地盤材料としての有効性を明らかにした結果の概要を報告する。

2. 埋立地盤材料としての利用

2.1 埋立方法: 石炭灰の埋立方法として現在用いられている方法として、図-2に示すように、3つの方法がある。このうち、水流式と乾式が従来用いられてきたが、最近、打設式によると密度が高く、安定した埋立地盤が出来ることが明らかにされてきた²⁾。この方法の特徴は、石炭灰を埋め立てるとき、加水を何度かに分けて行うことによって密度を高めることが出来る点である。

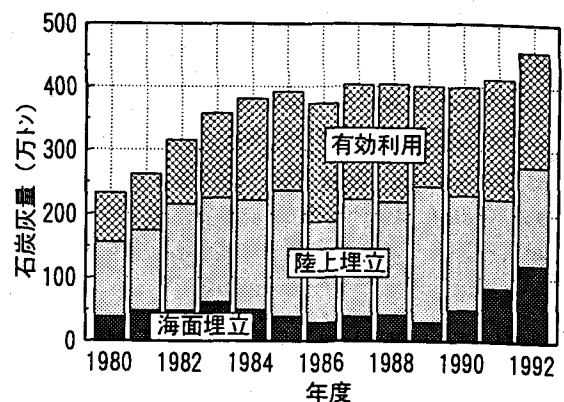


図-1 石炭灰発生量の推移

したがって、この打設式が今後は高濃度スラリー埋立方式として普及することが期待される。

2.2 静的安定性: 室内モデル土槽実験によると、平均乾燥密度は各々、水流式で 0.61 tf/m^3 、乾式で 0.89 tf/m^3 、打設式で 1.28 tf/m^3 となっている^{3), 4)}。得られた石炭灰埋立地盤の強度として、一軸圧縮強度と乾燥密度の関係を模式的に示すと図-3のようになる。この図は著者らの実験結果を嘉門⁵⁾がまとめたものである。これによって、

(1) 同一密度でも石炭灰の種類によって強度が異なるが、その程度は、石炭灰中のCaOの含有量による自己硬化性に依存する、(2) CaO含有量の多い石炭灰では長期材令効果(セメンテーション効果)が発現される、などが明らかになった。

* 茨城大学工学部、Dept. of Urban & Civil Eng., Ibaraki University, ** 同(清水建設技術研究所) Research Institute, Shimizu Construction Co. Ltd..

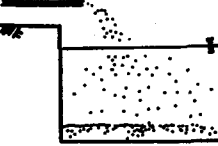
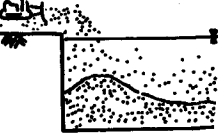
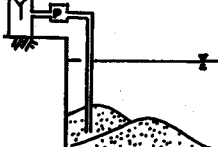
	埋立方法	埋立時の様子	埋立地盤の性状	
水流式	①石炭灰に多量の海水を混合し低密度状態でスラリー化する。 ②低密度スラリーを埋立処分池まで水流輸送する。 ③低密度スラリーをそのまま水面から投入し、埋立る。		密度	水中をゆっくりと沈降・堆積するため、地盤密度は低い。
			強度	密度が低いため、強度発現もほとんどない。
乾式	①石炭灰を最適含水比付近で加湿する。 ②ベルトコンベアやトラックなどを使用して加湿石炭灰を埋立処分池まで輸送する。 ③加湿石炭灰を水面から投入し埋立る。		密度	水中での拡散が少なくない。拡散・堆積部分の密度は低い。
			強度	拡散・堆積部分の強度は低い。
打設式	①石炭灰に水を分割添加し、高密度状態でスラリー化する。 ②圧送ポンプなどを使用して、高密度スラリーを埋立処分池まで輸送する。 ③高密度スラリーを水底から打設し、埋立る。		密度	陸上部の転圧埋立と同程度と、埋立密度は高い。
			強度	自己硬化性のある石炭灰であれば数kgf/cm ² の強度を発現する。

図-2 石炭灰の埋立方法と特徴

2.3 動的安定性：石炭灰はシルト系粒子から成るが、非活性であるため、液状化し易いことが今井ら⁸⁾の実験で指摘されている。著者ら⁷⁾の用いた石炭灰も同様で、図-4に示すように、粒度分布は液状化し易い範囲にあり、また、シルト質でありながら、コンシステンシー限界試験の出来ない非塑性(NP)材料である。モデル土槽に埋設された塩ビチューブ(高さ10cm、径5cm)から取り出された石炭灰供試体に対する非排水繰返し三軸試験結果による液状化強度曲線を比較したものが図-5である。ここで、水流式埋立の供試体は自立できなかったため、試験が実施できなかった。なお、乾式における支持力効果を上げるために、セメントを添加した乾式(DACと表示した)石炭灰に結果も比較のために併記している。これから、打設式とセメント添加された乾式石炭灰の動的強度が相対密度70%の豊浦砂の強度より大きくなっていることが注目される。また、打設式、乾式とも圧密時間の影響を強く受けることが図-6よりわかる。石炭灰の圧密・時間曲線の観察によると、圧密開始して1時間後にはほとんど体積変化が見られなかったことを考えると、このような強度増加は石炭灰の自己硬化性によるものと判断される。

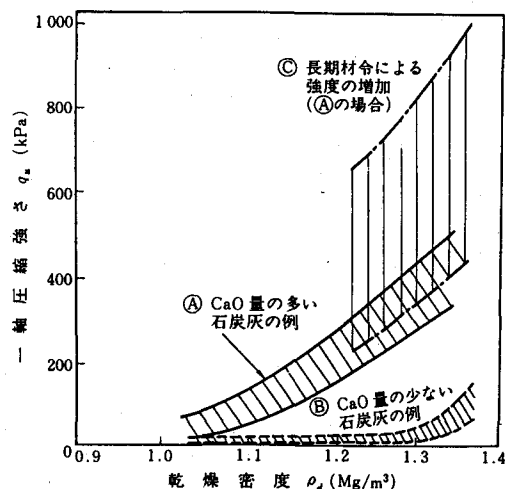


図-3 石炭灰の乾燥密度と強度の関係

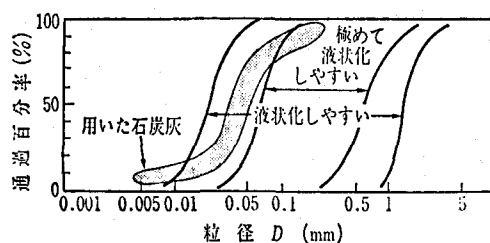


図-4 石炭灰の粒度加積曲線

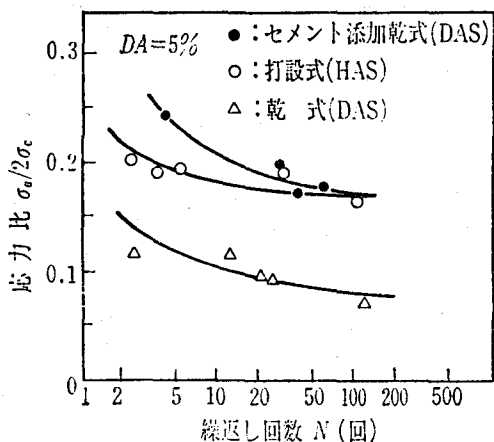


図-5 石炭灰の液状化強度に及ぼす埋立方法の影響

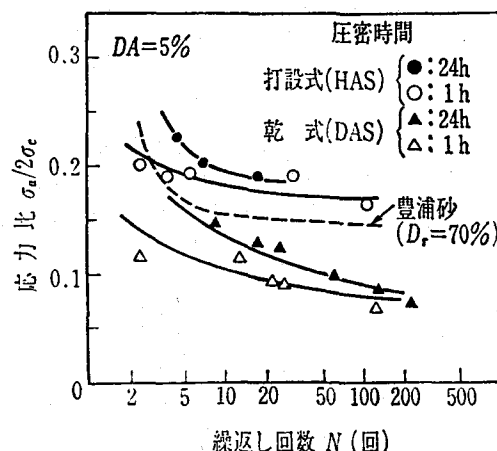


図-6 石炭灰の液状化強度に及ぼす圧密時間の影響

3. 石炭灰を添加した瞬結性の軽量材料

軽量の地盤材料として、気泡セメントペースト（気泡にセメントを添加した材料）を主体とした材料が道路や盛土に適用されてきている。この気泡セメントペーストに水ガラスを主体とした材料を添加して瞬結性を持たせ、新たな用途に適用すべく研究・開発を進めている。こうした中で瞬結性気泡セメントペーストへの石炭灰添加の有効性が明らかとなってきている。

3. 1 実験の方法： 実験に使用した材料を表-1にまとめる。水ガラスは淡水または海水で67%に希釈して使用した。材料を短時間で均一に混合するため、水ガラス溶液と気泡セメントペーストは無脈動ポンプで圧送し、スターティックミキサーで攪拌した。気泡ゲルのゲルタイムはカップ法で測定した。供試体は気中で密封して養生し、一軸圧縮試験で発現強度を把握した。

表-1 実験使用材料

気泡 セメント ペースト	セメント	普通ポルトランドセメント
	石炭灰	フライアッシュ（原粉）
	起泡剤	合成界面活性剤
水ガラス 溶液	水ガラス	JIS 3号水ガラス
	希釈水	淡水
		海水
		pH 8 に調整した人工海水

3. 2 実験の結果と考察： 図-7に水ガラス／セメント質量比とゲルタイムとの関係を示す。ゲルタイムは水ガラス／セメント比の低下にともなって短くなっており、この関係を利用すればゲルタイムを広い範囲で調節できる。また、水ガラスの希釈に海水を用いるとゲルタイムを大きく短縮させている。これは海水中の塩分によ

って水ガラスの一部が沈殿を生じて、実質的な水ガラス／セメント比を低下させるためである。一方、石炭灰の添加はゲルタイムにほとんど影響しておらず、ゲルタイムにはセメントと水ガラスの実質的な質量比のみを考慮しておけばよいことがわかる。

図-8は材令28日における材料の乾燥密度と強度の関係であり、発現強度は乾燥密度のみに依存している。石炭灰無添加の場合、乾燥密度はセメント添加量そのものである。この乾燥密度の調整を目的として石炭灰を添加したが、図から明らかなように石炭灰添加の有無は28日強度にほとんど影響していない。ただし若材令では石炭灰とセメントとの質量比(FA/C)の増加にともなって強度自体も低下していた。図-9に7日を基準とした強度増加の傾向をまとめるが、FA/Cが増加するにしたがって長材令での発現強度が大きくなっている。この傾向から、高

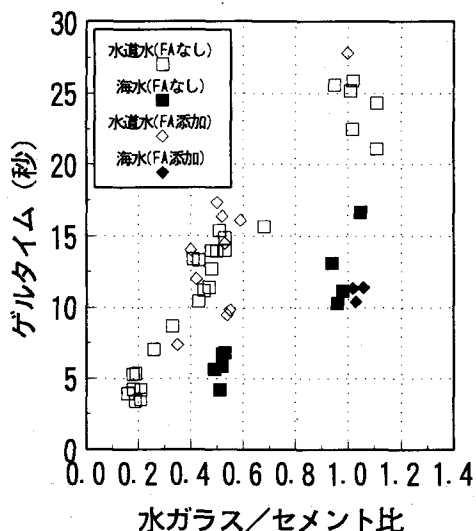


図-7 ゲルタイムと材料組成

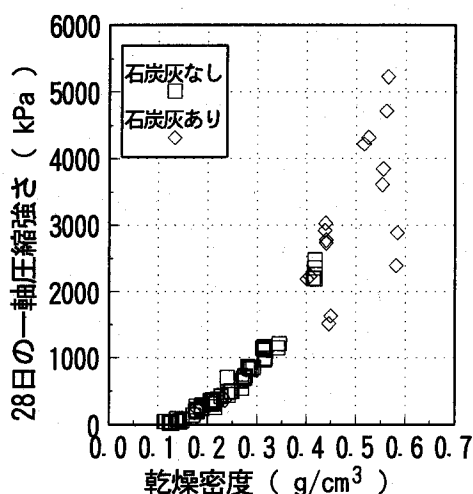


図-8 強度発現と石炭灰添加

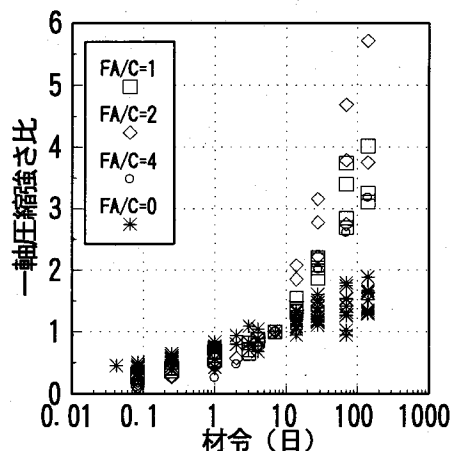


図-9 強度増加率への石炭灰添加の寄与

い初期強度が必要でない場合には石炭灰をセメントに混合して使用する方法が有効であるが、長期強度を抑制する必要がある場合には砕石粉のような石炭灰より不活性な材料を添加すべきと考えられる。

3. 3 残された課題と現況：軽量の地盤材料は軟弱な地盤上への構造物の構築に際して、周囲の環境をできるだけいじらずに対応できるメリットをもつ。本材料の瞬結軽量性を活かせば型枠の簡略化をはじめとして環境面への影響を更に小さくできる。現在、スケールアップに関する実験を終え、現場での適用を計画中である。

4. おわりに

本文では産業廃棄物の1つである石炭灰の地盤材料としての有効利用方法について、筆者らの研究・開発成果をレビューしてみた。ハンドリングのしやすさの点から、我々は石炭灰をスラリー状で取り扱うことを基本としているが、従来の土質工学での検討と同様、現在までの検

討も力学的な側面に主力が注がれている。

石炭灰スラリーの水中打設による水質への影響については Sugimoto らによる検討⁸⁾があり、打設式では石炭灰中の溶出成分の90%以上を埋立地盤中に捕捉しておくことが可能であると報告されている。これは従来の埋立方法に比較して排水処理が容易となることを意味している。また、石炭灰スラリーによる人工島の構築に際しての水質測定結果⁹⁾によれば、スラリーの打設によるpHの上昇は打設面から5cm以内に限られ、その上昇量も0.5以内であった。

石炭灰は比較的安全な、そしてセメントとの反応性や流動性に優れた材料であり、各種地盤材料として広く使用できると考えられるが、石炭灰の種類によっては環境基準に適合しないものもあるかもしれない。1度の失敗はその後の利用に大きな障害を残す。石炭灰の埋立てや利用に際して化学的、環境的な側面を十分に検討し、その結果として石炭灰の利用を更に進めてゆくことが肝要であると考えられる。

引用文献

- 堀内ほか：“石炭灰の水流式埋立における密度増加方法”，第1回環境地盤工学シンポジウム論文集，pp.177-182, 1994.
- Horiuchi, S. et al.: "Rheological and mechanical properties of high density fly ash slurry", Proc. 7th Intn'l Ash Utilisation Symp., pp.907-917, 1985.
- 安原ほか：“石炭灰の埋立地盤への有効利用に関する基礎的研究”，第34回土質工学シンポジウム論文集，pp.341-348, 1989.
- 安原ほか：“石炭灰埋立地盤の支持力特性とその解析”，第1回環境地盤工学シンポジウム論文集，pp.169-181, 1994.
- 嘉門：“廃棄物をめぐる地盤工学的課題（特別講演）”，第1回環境地盤工学シンポジウム論文集，pp.11-20, 1994.
- 三木ほか：“石炭灰の液状化特性”，第20回土質工学研究発表会講演概要集，pp.613-614, 1985.
- 安原ほか：“石炭灰による埋立地盤の液状化特性”，土と基礎，Vol.39, No.2, pp.5-10, 1991.
- Sugimoto, T. et al.: "Effective method for underwater disposal of coal fly ash", 2nd Intn'l Symp. on Environmental geotechnology, Vol.1, pp.428-437, 1989.
- Kawasaki, H. et al.: "Fly-Ash Slurry Island: II. Construction in Hakucho Ohashi Project", J. Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.4, No.2, pp.134-152, 1992.