

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2007～2008
課題番号：19760328
研究課題名 (和文) 造粒石炭灰の合理的作製方法の確立と長期安定性も含めた高度利用に関する研究
研究課題名 (英文) Establishment of rational preparation procedure of granulated coal ash and its long-term stability and value-added uses
研究代表者 吉本 憲正 (YOSHIMOTO NORIMASA) 山口大学・大学院理工学研究科・助教 研究者番号：00325242

研究成果の概要：人工造粒物である造粒石炭灰およびクリンカアッシュを対象に、詳細な実験的検討から粒子特性および集合体の力学特性を明らかにした。そして、明らかにされた特性と有効利用された事例の文献調査結果を踏まえて、粒子特性に基づいた合理的作製手法の提案とその特性を活かした高度な利用方法を提案した。また、環境への影響の観点から石炭灰に含まれる重金属類の溶出をカラム実験により検討し、透水量から長期的に調査しても環境へ与える影響が小さいといえることが確認された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	270,000	2,970,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤環境, 有効利用, 石炭灰

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 石炭灰の地盤材料としての有効利用に関する研究

石炭灰を排出された状態のまま(重金属などの微量物質は必要に応じて洗浄除去)地盤材料として利用する場合や改良材(改良助材)として利用する場合など、多様な形で研究が進められている。その内の一つに、石炭灰にセメントを加えて砂礫大に造粒化し、造粒石炭灰として利用する方法がある。これによれば、ハンドリング性能の向上や利用用途

の拡大、重金属などの微量物質の溶出の抑制も可能となる利点がある。これらのことから、造粒石炭灰やクリンカアッシュなどの人工造粒物に対して、有効利用を目的とした研究を進めることは、社会的貢献度が高い。

## (2) 粒子特性に着目した研究

造粒石炭灰の地盤材料としての適用性については、一連の室内試験を実施することにより評価され、その結果から有効利用できることと結論付けられることが一般的である。しかし、造粒石炭灰は粒子自身が人工材料である

ため、粒子強度に代表される粒子特性を理解し、その粒子強度が集合体としての力学特性に与える影響を明らかにしておくことは、利用用途を選択する上で重要であり、合理的に造粒物を作製するためには、重要な情報となりうる。

人工造粒物の一つと考えられるクリンカアッシュについても同様に粒子特性を明確にして、その特性を踏まえた上で利用することは重要である。特に粒子特性を理解した上で設計定数などを設定することは、安全性の面から考えても重要である。加えて、高度利用には、その特性を明らかにする必要がある。

### (3) 長期の安定性に着目した研究

石炭灰は、重金属などの微量物質を少なからず含有しており、環境基準を超えて溶出するものも存在する。これらの微量物質は、造粒化することにより生成された水和物などで封じ込められ、溶出が抑制される。そのため、長期的には実地盤環境下でのカルシウム (Ca) の溶脱によって水和物が劣化し、その影響で封じ込められている微量物質が溶出することも考えられる。造粒石炭灰の場合、コンクリートとは異なり、セメント量が少なく、透水性が高いため、コンクリートに比べて Ca の溶脱はより顕著に起こると考えられる。そのため、実地盤環境下での微量物質の溶出挙動や Ca の溶脱による微量物質の溶出の長期的挙動を理解しておくことは、将来的にも重要である。

## 2. 研究の目的

### (1) 粒子特性と集合体の力学特性との関係の評価

石炭灰の人工造粒物である造粒石炭灰とクリンカアッシュについて、粒子特性と集合体としての力学特性との関係を種々の物理試験および力学試験から明らかにし、両者の関係について評価する。

### (2) 合理的および高度利用の検討

(1) により得られた結果を踏まえ、合理的および高度利用について検討する。

### (3) 長期安定性に関する検討

造粒石炭灰からのカルシウム溶脱下におけるその他重金属類の溶出について、環境への影響について検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 粒子特性と集合体の力学特性との関係の評価

粒子特性の評価については、造粒石炭灰およびクリンカアッシュの一粒を取り出し、平板により挟み、粒子を破碎させる単粒子破碎試験により、粒子の強度特性を把握した。また、形状の特性を評価する目的で、平面に最も安定した状態で設置し、その上部からの観察による粒子の形状観察を実施し、数値化し

ている。

集合体の力学特性の調査には、主に三軸圧縮試験装置による圧密排水せん断試験を種々の拘束圧、密度条件下で実施した。

上述の粒子個々に対する実験や集合体に対する試験を実施し、両者の関係を整理することにより、研究を遂行した。

### (2) 合理的および高度利用の検討

粒子特性や力学特性を調査する実験などで得られた結果と既往の研究報告などを総合的な視点で評価し、造粒石炭灰の最適な作製方法および合理的な利用について整理した。

粒子特性の結果や集合体としての特性を踏まえた上で高度な利用方法について、サクシオン計測試験や飽和透水試験などを実施した。また、得られた実験結果を用いた飽和・不飽和浸透流解析や安定解析を実施し、集水地形でかつ斜面上に構築される盛土材への有用性について高度利用の観点から検討を行った。

### (3) 長期安定性に関する検討

ここでは、重金属などがセメントによって固定化される造粒石炭灰に着目し、造粒石炭灰が通常、地盤中で利用されることを前提に検討を進めた。また、安全側の評価を与えるために、地下水以下で利用されることを前提とした飽和条件でのカラム試験による長期の安定性の評価を行っている。地中の地下水中に存在するという環境を考えると、セメントおよびその水和物に含まれるカルシウム分が絶えず浸透している地下水によって溶脱され、それにより、固定化されているその他の重金属類の溶出が懸念されることとなる。そこで、本研究では、造粒石炭灰が長期間に遭遇する水の量と同等の量を流速を速めて接触させ、長期の安定へと置き換えて、検討している。

## 4. 研究成果

### (1) 粒子特性と集合体の力学特性との関係の評価

一連の単粒子破碎試験と排水三軸圧縮試験を実施し、造粒石炭灰やクリンカアッシュが粒子の特性の影響を大きく受けることが明らかとなった。特に造粒石炭灰については、拘束圧の依存性を一義的な関係として、式(1)で整理できることを明らかにした。また、図中の  $p_{cr}'$  と単粒子破碎強度とを関係付け、式(1)を式(2)へ置き換えることで、最終的に図-1のような関係が得られ、単粒子破碎強度を調べることにより、せん断強度の予測が可能となる。

$$\eta_{peak} = \eta_{cr} + CDr \ln \left( \frac{p_{cr}'}{p'} \right) \quad (1)$$

$$\eta_{peak} = \eta_{cr} + C' Dr \ln \left( \frac{\sigma_{fm}}{p'} \right) \quad (2)$$

ここで、 $C$  および  $C'$  は材料定数であり、それ以外は一連の実験などにより既知となる定数である。

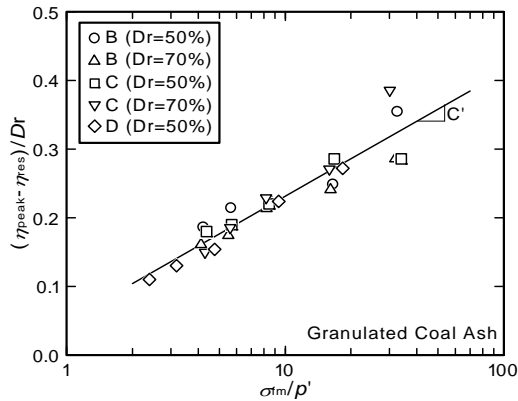


図-1  $(\eta_{peak} - \eta_{res}) / Dr \sim \sigma_{fm} / p'$  関係

### (2) 合理的および高度利用の検討

盛土材や埋立て材としては、自然砂と比較して粒子強度が低い造粒石炭灰であっても、集合体として地盤材料と同様の評価を行った結果、十分に適用できる。また、既往の文献調査などから、粒径が大きく自然砂と粒子強度に差がない造粒石炭灰については、SCP材としての能力が十分に期待できること、さらに排水機能の低下もほとんどないことから、透水性の能力についても期待できる。このような情報を基に、造粒石炭灰の粒子強度から考えられる利用用途をチャート式で整理したものが図-2である。

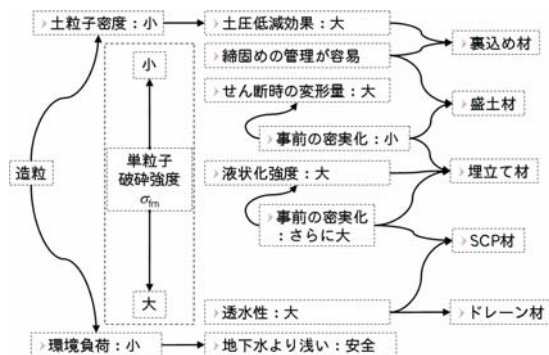


図-2 粒子強度からみた利用用途

図より、粒子強度によって利用先を決定できることから、逆に利用先を決定した上で、それに応じた造粒石炭灰を製造することも可能と思われる。このような造粒化による利用用途の拡大は、石炭灰に限らず粘性土においても可能であると考えられる。造粒化し粒子強度を適切にコントロールすることで、廃

棄物として処分されるようなものでも、良質な材料へと転換でき、自然土採取による環境破壊や処分場の延命化へ繋がると考えられる。

クリンカアッシュについては、粒子特性を詳細に調査し、その多孔質性に着目した高度利用について検討した。

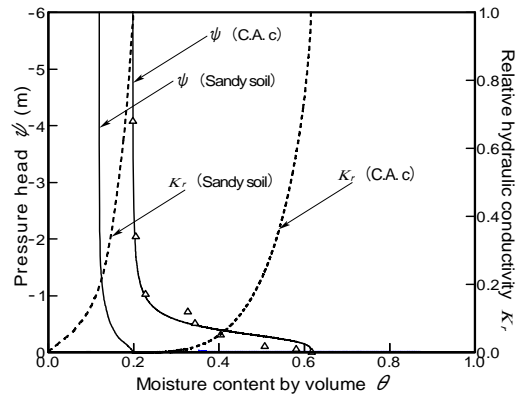
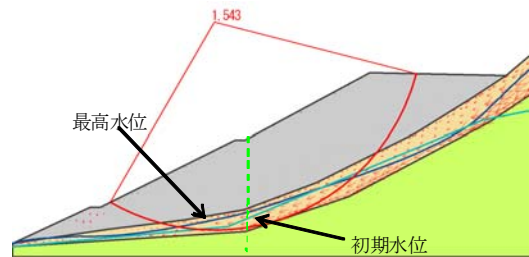


図-3 圧力水頭～体積含水率～比透水係数

図-3 に示すように、クリンカアッシュは、粒子が多孔質であるため、一般の砂質土に比べ、体積含水率と圧力水頭の関係が右へシフトすること、それに伴い、比透水係数と体積含水率の関係も右へシフトすることが明らかとなった。このような特性を材料定数として表現し、飽和・不飽和浸透流解析+安定解析を実施したところ、図-4のような結果が得られ、一般の砂質土において安全率が1を下回る条件でも、高い安全率を保持する結果が得られ、特性を利用した高度利用が可能と考えられる結果が得られた。



(b) クリンカアッシュ (S=1/1,000)

図-4 浸透流解析および安定解析結果

### (3) 長期安定性に関する検討

造粒石炭灰の重金属などの溶出についての長期安定性について、カラム試験により検討した、特にカルシウムの溶脱、長期の利用による物理的な破壊である粒子破碎の影響について調べた。図-5は、ホウ素の溶出量に対する濃度の推移であり、図-6は、カルシウムの濃度の推移である。これら両図より、カ

ルシウムは長期の浸透により、溶出濃度が徐々に低下しているが、ホウ素の溶出量が増加するわけではなく、ほぼ初期濃度を保っていることがわかる。これより、長期的な浸透を受けてもホウ素の濃度が高まることはなく、環境への影響は小さいことが伺える。物理的な破壊である破碎についても両者に大きな違いがないことがわかる。したがって、物理的に破壊されるようなことが生じても環境への影響は小さいと考えられる。

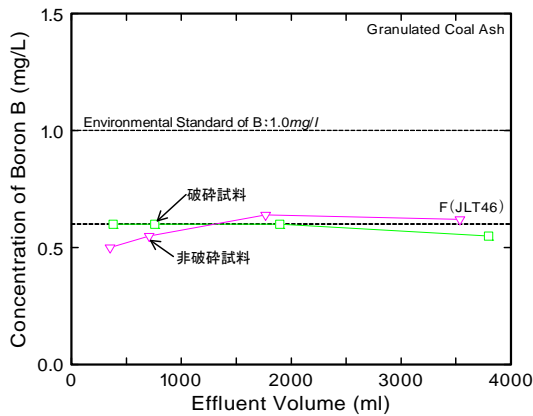


図-5 ホウ素の溶出濃度の推移

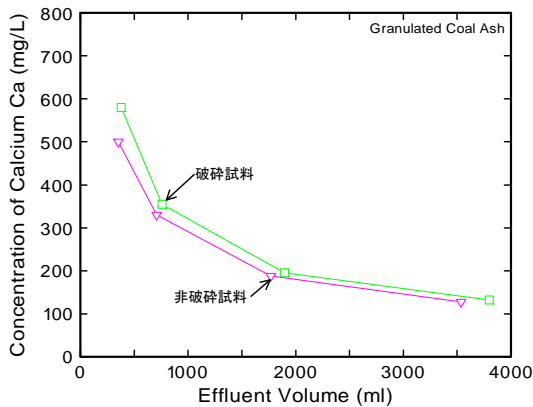


図-6 カルシウムの溶出濃度の推移

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① 吉永祐二, 穴井隆太郎, 吉本憲正, 兵動正幸, 池田陵志 : クリнкаアッシュの埋立て利用時における力学特性の評価, 第 8 回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 47-52, 2008. 査読有
- ② 穴井隆太郎, 吉本憲正, 兵動正幸, 吉永祐二, 中下明文 : クリнкаアッシュの粒子特性及び静的せん断特性, 第 8 回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 43-46, 2008. 査読有

- ③ Yoshimoto, N., Orense, R. P., Kanda, H. and Hyodo, M. : Earthquake Response of Granulated Coal Ash by Online Testing, Proceedings of 14th WCEE, Paper ID 04-01-0154, 2008. 査読無
- ④ 田中誠, 遠藤和人, 西村伸一, 吉本憲正 : 廃棄物の地盤工学的利用におけるリスクとは?, 地盤工学会誌, Vol. 56, No. 8, pp. 4-7, 2008. 査読無
- ⑤ 吉本憲正, 兵動正幸, 中田幸男, 村田秀一, 西園崇志, 本郷孝, 大中昭, 虫合一浩 : 造粒石炭灰を混合した土の繰返しせん断特性, 材料, Vol. 57, No. 1, pp. 71-76, 2008. 査読有
- ⑥ 若槻好孝, 田中等, 内田裕二, 入江功四郎, 兵動正幸, 吉本憲正 : クリнкаアッシュの材料特性と適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No. 4, pp. 271-285, 2007. 査読有
- ⑦ Yoshimoto, N. and Murata, H. : Leaching of Granulated Coal Ash and Migration of Trace Substances into the Surrounding Saturated Ground, Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, Part II, pp. 713-716, 2007. 査読有
- ⑧ Yoshimoto, N., Hyodo, M., Nakata, Y., Orense, R. P., Hongo, T., and Ohnaka, A. : Particle and Shear Characteristics of Granulated Coal Ashes as Geomaterial, Proceedings of IS-Kyushu 07, NEW HORIZONS in EARTH REINFORCEMENT, pp. 363-365, 2007. 査読有
- ⑨ 吉本憲正, 兵動正幸, 中田幸男, Orense, R. P. : 粒子強度に基づく造粒石炭灰の地盤材料としての利用先の検討, 土と基礎, Vol. 55, No. 10, pp. 23-25, 2007. 査読有
- ⑩ 吉本憲正, 兵動正幸, 中田幸男, 西原浩一郎, 本郷孝, 大中昭, 虫合一浩 : 造粒石炭灰中微量物質の地盤中での吸着及び移動, 第 7 回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp. 145-150, 2007. 査読有
- ⑪ 吉本憲正, 兵動正幸, 中田幸男, 西原浩一郎, 本郷孝, 大中昭, 虫合一浩 : 微量物質の造粒石炭灰からの溶出および飽和地盤内における移動とリスク評価, 第 6 回構造物の安全性・信頼性に関するシンポジウム, pp. 581-586, 2007. 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 吉永祐二, 兵動正幸, 吉本憲正, 穴井隆太郎, 池田陵志 : クリнкаアッシュの非排水繰返しせん断特性, 第 43 回地盤工学研究発表会, 2008. 7. 9, 広島国際会

議場

- ② 穴井隆太郎, 兵動正幸, 吉本憲正, 吉永祐二, 中下明文 : クリンカアッシュのせん断強度特性, 第 43 回地盤工学研究発表会, 2008. 7. 9, 広島国際会議場
- ③ 穴井隆太郎, 兵動正幸, 吉本憲正, 吉永祐二, 中下明文 : クリンカアッシュの物理的性質および粒子特性, 土木学会中国支部第 60 回研究発表会, 2008. 5. 31, 広島大学工学部
- ④ 吉永祐二, 穴井隆太郎, 吉本憲正, 兵動正幸, 池田陵志 : クリンカアッシュの非排水繰返しせん断特性とコーン貫入特性, 土木学会中国支部第 60 回研究発表会, 2008. 5. 31, 広島大学工学部
- ⑤ 吉本憲正, 兵動正幸, 中田幸男, 大中昭, 本郷孝, 虫合一浩 : 粒子強度による造粒石炭灰のせん断強度の評価, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007. 7. 4, 名古屋国際会議場
- ⑥ 神田浩彰, 吉本憲正, 兵動正幸, ORENSE Rolando, 大中昭, 本郷孝, 虫合一浩 : オンライン地震応答実験による造粒石炭灰の地震時応答特性, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007. 7. 4, 名古屋国際会議場
- ⑦ 神田浩彰, 吉本憲正, 兵動正幸, オレンセロランド, 大中昭, 本郷孝, 虫合一浩 : オンライン地震応答実験による造粒石炭灰の地震時応答, 土木学会中国支部第 59 回研究発表会, 2007. 6. 2, 山口大学工学部

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉本 憲正 (YOSHIMOTO NORIMASA)  
山口大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号 : 00325242

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし