

学位論文内容の要旨

学位論文題目

クリンカアッシュの材料特性及びせん断挙動

氏名

ウィンター マイケル ジェイムス

クリンカアッシュは、石炭火力発電所から生成される石炭灰の一種であり、ボトムアッシュとも呼ばれる。当初は産業廃棄物として処分されていたが、近年では、地盤材料として有効利用されている。しかし、クリンカアッシュの材料特性および力学挙動などの研究が自然砂と比べて少ないため、効率的な設計施工ができない状態にある。本研究ではクリンカアッシュの様々な材料特性を明確にし、クリンカアッシュの静的・動的せん断特性を明らかにするとともに地盤材料として有効な材料であることを明らかにすることとした。クリンカアッシュの材料特性は炭種及び生産される各発電所によってそれぞれ異なる。また、同じ発電所でも時間の経過によりクリンカアッシュの特性は異なる。これはさまざまな要因によるもので、例えばその石炭の産地や堆積環境、石炭火力発電所の燃焼方法や石炭灰の生成方法などが考えられる。そこで、幅広い物理特性を持つクリンカアッシュの力学特性について調べるために、西日本の6か所の石炭火力発電所から試料を集め、それぞれの試料について比較検討を行った。その結果より、様々な性質を持つクリンカアッシュの物理特性及びせん断特性を明らかにした。

第1章「はじめに」

第1章では、クリンカアッシュについての説明と生成過程について説明する。日本では、東日本大震災以来、石炭火力発電所が増加しているため、石炭の使用量が増加し、石炭灰の発生量も増加している。その増加とともに埋立処分地の確保が困難となり、他の材料として有効利用の方法を考えることが必要となっている。また資源のリサイクルに関する規則があり、より積極的に有効利用を行うことが奨励されている。前に述べたように、クリンカアッシュの性質が各発電所により異なるため、異なる性質からなる試料を広く調べる必要がある。文献レビューでは、クリンカアッシュについての既往の研究を調べ、これまで明らかとなったクリンカアッシュの物理及び力学特性について述べた。注目されているのは、クリンカアッシュは重金属の含有量が少なく、地盤材料として用いても環境への影響が低いことである。

第2章「クリンカアッシュの材料特性」

第2章では、本研究で用いる6炭種からなるクリンカアッシュの粒子密度、粒度分布、締固め特性、透水性などの材料特性を調べた結果を述べる。特に、粒子形状と単粒子破砕強度に着目し、それぞれの粒子形状と単粒子強度の定量化を行った。クリンカアッシュはその生成過程により粒子形状は複雑であり、角張っている。その分、脆弱であり自然砂と比較すると、単粒子破砕強度が低く破砕性材料である。しかし、粒子破砕強度が低くても複雑な粒子形状を有するクリンカアッシュは所定の拘束圧下においては、高いせん断強度を発揮する。

第3章「クリンカアッシュの静的せん断特性」

クリンカアッシュの静的せん断特性を評価するために、様々な条件の下で全炭種のせん断試験を行った。第3章では、三軸圧縮せん断試験機を用いて様々な締固め度または有効拘束圧の下で、実験を行った。実験結果として、クリンカアッシュは低い密度でも高いせん断強度を有し、締固め度が高くなるにつれてより高いせん断強度を示すことが明らかとなった。また、盛土材料としてよく用いられるまさ土と比較してもクリンカアッシュのせん断強度がより高いことからクリンカアッシュの優位性が認められた。これらに基づき、各締固め度および有効拘束圧の条件下で、クリンカアッシュのピーク強度を予測する式を提案した。

第4章「動的せん断特性」

第4章では、クリンカアッシュの液状化特性及び動的変形特性を調べるために、非排水繰返し三軸圧縮試験及びベンダーエレメント試験を行った。その結果、クリンカアッシュは高い液状化強度を有し、締固め度が高くなるとともに液状化強度が急増することが明らかとなった。これは、粒子強度や粒子形状に起因することを考察した。ベンダーエレメント試験によって、クリンカアッシュの初期せん断剛性率を調べた。様々な密度及び拘束圧の下で試験を行った結果、クリンカアッシュの初期せん断弾性係数はシリカ砂である豊浦砂よりもやや低い結果が得られた。一方、繰返し三軸試験機により動的変形試験を実施した。その結果、クリンカアッシュは豊浦砂に比べ、高いひずみ域に至るまで、弾性的であることが認められた。

第5章「まとめと結論」

第5章では、各章の結果をとりまとめて結論とした。またクリンカアッシュの地盤材料としての有効性を評価し、今後の課題についても記述した。

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目

Material Properties and Shear Behaviour of Clinker Ash

氏 名

WINTER Michael James

Clinker ash is formed from coal ash in coal-fired power stations. Although initially deemed as a waste byproduct, it has come to be used as a ground material in place of natural soil. However, research into the properties and behaviour of clinker ash is relatively little compared to that of natural soils, and as such this research hopes to shed light on the various material properties of clinker ash along with investigation into the shear behaviour in order to evaluate the validity of the use of clinker ash as a ground material. The properties of clinker ash vary in samples taken from different power plants, and even from the same power plant the properties of the clinker ash can vary over time. This is due to various factors, including how long and at what depth the original coal was in the ground, the vegetation on the ground surrounding the coal and also the process of incineration and formation process of the clinker ash. Therefore, in order to have a better grasp on the properties and characteristics of clinker ash, samples from 6 power plants in western Japan were investigated and compared. From this, it was possible to see how differences in material properties of the coal ash affected the shear behaviour of the samples.

Chapter 1 「Introduction」

In Chapter 1, a brief introduction is given of clinker ash and its process of generation. Attention is paid to the large amount of coal being used as an energy, which in turn leads to a large amount of coal ash being produced. As this amount increases, it becomes more difficult to store or dispose of and hence there is an importance for alternatives uses of it to be found. Laws and regulations regarding the handling of clinker ash are looked into, and it is noted that ever increasing and stricter laws relating to the environment and waste disposal also intensify the need to reduce the disposal of waste byproducts such as clinker ash. As noted, the properties and characteristics of clinker ash vary from sample to sample, and therefore it is important to investigate various samples, as results from one sample cannot be applied to all others. In the literature review, previous research regarding clinker ash is investigated, and this allows for a range of results to be found, through which the overall properties of clinker ash samples can be better understood. It is noted that the exceptionally low levels of heavy metals present in clinker ash mean that it is environmentally safe to use as a ground material.

Chapter 2 「Material properties of clinker ash」

In Chapter 2, the material properties of the 6 clinker ash samples used in this research are investigated, including particle density, particle distribution and the compaction and permeability characteristics. Particular attention is paid to the particle shape and strength. Due to the formation process of clinker ash, the particles have very complex shapes and are mostly sharp and angular. Compared with natural sands, it is found that the strength of individual particles is much lower for clinker ash, which is a crushable material. However, the rough, angular shapes of the clinker ash particles provide benefits to the shear strength characteristics, mentioned later, regardless of the lower crushing strength.

Chapter 3 「Static shear characteristics of clinker ash」

For evaluation of the static shear characteristics of clinker ash, a wide range of experiments were performed under a wide range of test conditions, using some or all of the samples of clinker ash in order to obtain a large pool of experimental data. In Chapter 3, monotonic shear strength is investigated through the use of a triaxial compression shear test machine, with tests performed under various degrees of compaction and confining pressures in order to also investigate the influence of those parameters on the shear behaviour of the clinker ash. It was found that the clinker ash samples have high shear strength which greatly increases with increased density of the specimens. Also, compared with the commonly used fill material Ube Masado, clinker ash displays higher shear strength. An equation is also proposed which can estimate the peak strength of clinker ash samples under various densities and confining pressures.

Chapter 4 「Dynamic shear characteristics」

In Chapter 4, cyclic shear behaviour is investigated through liquefaction tests and dynamic deformation tests. It was found that clinker ash has high liquefaction resistance which again increases greatly with increased degree of compaction. The results gained from these tests are investigated along with the material properties in order to find relationships and it was found that the particle strength and shape have considerable influence on the shear behaviour. The initial shear modulus of the samples was investigated through use of bender elements. Again tests were performed under various degrees of compaction and confining pressures, and it was found that the results for clinker ash were slightly lower than those of the natural sand Toyoura.

Chapter 5 「Summary and conclusions」

In Chapter 5, a summary of the research presented in this thesis is given, along with conclusions obtained. The viability for clinker ash as a ground material is evaluated along with proposals for possible future research.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 716 号	氏 名	Winter Michael James
最 終 試 験 担 当 者		主 査	中田 幸男
		審 査 委 員	松田 博
		審 査 委 員	鈴木 素之
		審 査 委 員	吉本 憲正
		審 査 委 員	Azizul Md Moqsud
		審 査 委 員	兵動 正幸
【論文題目】			
Material Properties and Shear Behaviour of Clinker Ash (クリンカアッシュの材料特性及びせん断挙動)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>クリンカアッシュは、石炭火力発電所から生成される石炭灰の一種であり、ボトムアッシュとも呼ばれる。これまで、産業廃棄物として処分されていたが、近年、地盤材料としての有効利用が検討され始めている。しかしながら、クリンカアッシュの材料特性および力学挙動などの研究成果が少ないため、適正な活用方法や、効率的な設計施工が確立されていない状況にある。</p> <p>本学位論文は、クリンカアッシュの様々な材料特性を明確にし、クリンカアッシュの静的・動的せん断特性を明らかにするとともに地盤材料として有効な材料であることを明らかにしている。クリンカアッシュの材料特性は、燃焼方法の違う発電所毎に、異なることが指摘されている。また、同じ発電所でも時間の経過によってクリンカアッシュの材料特性が異なることも指摘される。これは、例えばその石炭の産地や堆積環境、発電所の燃焼方法や燃焼後の処理方法などが考えられるが、系統立てて実験を行った事例がない。そこで、幅広い物理特性を持つクリンカアッシュの力学特性を把握するために、西日本の6か所の石炭火力発電所から試料を入手し、それぞれの試料の力学特性について比較検討を行っている。</p> <p>本学位論文は、5章で構成されている。各章の内容は以下のようになる。</p> <p>第1章では、クリンカアッシュの生成過程について説明し、リサイクル材としての利用に関する現状と畿央の研究について説明している。日本では、東日本大震災以来、石炭火力発電所が増加しているため、石炭の使用量が増加し、石炭灰の発生量も増加している。その増加とともに埋立処分地の確保が困難となり、他の材料として有効利用の方法を考えることが必要となっている。また、資源のリサイクルに関する規則により、積極的に有効利用を行うことが奨励されていることを示している。前述したように、クリンカアッシュの性質が各発電所により異なるため、異なる性質からなる試料を広く調べる必要があることを述べている。さらに、過去の研究から、これまで明らかとなったクリンカアッシュの物理及び力学特性について述べている。注目されている点は、クリンカアッシュは重金属の含有量が少なく、地盤材料として用いても環境への影響が低いことである。</p>			

第2章では、本研究で用いる6炭種からなるクリンカアッシュの粒子特性、物理特性、締固め特性、透水性などの材料特性を調べた結果について述べている。特に、粒子特性では、粒子形状と単粒子破碎強度に着目し、それぞれの粒子形状と単粒子強度の定量化を行っている。クリンカアッシュの粒子形状は、その生成過程に起因し、複雑で角張っている。一方で、粒子が脆弱であり、自然砂と比較すると、単粒子破碎強度が低く、破碎性材料とみなせる。

第3章では、クリンカアッシュの静的せん断特性を評価するために、様々な条件下で6炭種の単調なせん断挙動を説明している。ここでは、様々な締固め度や有効拘束圧の条件下で、圧密排水三軸圧縮試験を行っている。クリンカアッシュは、低い密度でも高いせん断強度を有し、締固め度が増加に伴いより高いせん断強度を示す。また、盛土材料としてよく用いられるまさ土と比較して、クリンカアッシュのせん断強度が高い。この結果に対し、粒子特性をパラメータとして、クリンカアッシュのせん断強度に対する推定式を提案している。

第4章では、クリンカアッシュの動的せん断挙動を把握するために、非排水繰返し三軸圧縮試験、ベンダーエレメント試験、動的変形試験について述べている。クリンカアッシュは、高い液状化強度を有し、締固め度が高くなるとともに液状化強度が急増する。これは、粒子強度や粒子形状に起因することを考察している。また、クリンカアッシュの初期せん断弾性係数がシリカ砂である豊浦砂よりもやや低い結果となる。さらに、クリンカアッシュのせん断剛性のひずみ依存特性から、豊浦砂に比べ、高いひずみ域に至るまで、弾性的であることを示している。

第5章では、各章の結果をとりまとめて結論としている。またクリンカアッシュの地盤材料としての有効性を評価し、今後の課題についても記述している。

公聴会での主な質問内容は、

- ・クリンカアッシュの盛土以外の適用場所
 - ・非排水せん断を受けた時の粒子特性の影響
 - ・ダイレタンシーの評価におけるパラメータの定義の確認
 - ・締固め時の含水比状態がせん断挙動に与える影響
 - ・ストレスダイレタンシー関係の評価方法の経緯
- 等であり、いずれの質問に対しても発表者から十分な回答がなされた。

以上より、本学位論文は、クリンカアッシュの材料特性およびせん断挙動に関して多くの知見を与え、独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分に値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、関連論文の発表状況は以下のとおりである（関連論文3編）。

- 1) M. Winter, N. Ohara, M. Hyodo, Y. Nakata, N. Yoshimoto, I. Yoshioka, A. Nakashita, Effect of particle strength on the monotonic shear strength of clinker ash, *Géotechnique Letters*, Vol.33, No.3, 112-118, 2013.
- 2) M. Winter, T. Sueshima, N. Yoshimoto, M. Hyodo, Y. Nakata, A. Nakashita, Y. Nakamura, Effect of particle characteristics on the shear strength of clinker ash, *Geomechanics from Micro to Macro*, 1099-1104, 2014.
- 3) M. Winter, N. Yoshimoto, Evaluation of the monotonic and cyclic shear characteristics of compacted clinker ash, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol.2, No.28, 1368-1371, 2015.