# 繰返しせん断作用下におけるフライアッシュの圧縮特性に関する研究

宇都宮大学 学生会員 〇藤沢直志 正会員 海野寿康 吉直卓也 安藤有司

### 1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災による福島原発事故以降、 日本の電力供給が大きく変わっている<sup>1)</sup>.現在,石炭火力発 電所の比率が高まり、全発電量の約3割を占めている.フ ライアッシュは年間20~30万トン埋立て処分されているが 処分場の容量にも限りがあり環境問題や経済的な面で新た に処分場を作るのも難しい. したがって既存の処分場に埋 め立て処分されたフライアッシュの減容化の必要性が高ま っている.既往の研究では2真空圧密工法や吸水振動締固め などでフライアッシュを減容化する方法が検討されている. ここで処分場中の廃棄フライアッシュの間隙比は 1.4 程度 (含水比 60%程度), N 値は 0~3 程度であり、非常に緩い 状態で堆積していることが報告されている<sup>3</sup>.

本研究では、減容化技術の開発に際し、フライアッシュ の収縮特性を把握するために行った繰返しせん断作用下に おける試料の圧縮特性把握試験の結果について示す.

表-1 試料の物理特性

土粒子密度 $\rho_s$	液性限界 wL	塑性限界 wp
2.296 g/cm <sup>3</sup>	46.012 %	NP
最大乾燥密度 $\rho_{\text{dmax}}$		最適含水比 Wopt
1.128 g/cm <sup>3</sup>		35.2 %







図-2 SEM による拡大写真

## 2. 試験装置と試験条件

用いた試験装置はステップモーター駆動の中空ねじり試 験装置であり、用いた試料は一般流通されているフライア

五洋建設株式会社 正会員 熊谷隆宏

ッシュである. 試料の物理特性を表-1と図-1に示す. 本研 究で用いたフライアッシュは、非塑性シルトに分類される. 粒子の拡大写真を図-2に示す.写真より今回用いたフライ アッシュの内,粘土分である直径5µm~20µmでは球状を しており、また、それよりも大きい粒子でも表面が滑らか であることが観察された.

供試体作成時の密度は、乾燥密度 0.967g/cm3 を目標値と して作成した. これは前述の通り一般的な処分場の含水比 が60%程度であることから飽和含水比が60%となるように 調整し作成したものである.

繰返し載荷は応力制御とひずみ制御の2通りである.応 力制御の繰返し試験では、初期有効拘束圧が 30kPa, 50kPa, 100kPa で繰返し応力振幅比を 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 とし、せん 断ひずみの絶対値が10%を超えた時点で試験を終了した. 一方、ひずみ制御の繰返し試験では、初期有効拘束圧が 50kPaで、ひずみ振幅を±2%とし供試体に与えた. どちら も繰返しせん断過程が終了した後に再圧密をし,3時間後の 排水量から体積ひずみを算出した.



図-3 有効応力経路と応力-ひずみ関係

#### 3. 繰返しせん断変形特性

応力制御の繰返し試験結果の代表例を図-3 に挙げる(拘 束圧 99.54kPa, 繰返し応力振幅比 0.10). 本研究で用いたフ ライアッシュは非塑性シルトだが,繰返しせん断によって 平均有効主応力が0.0kN/m<sup>2</sup>になり液状化した.

キーワード フライアッシュ、体積ひずみ、液状化、繰返しせん断履歴 連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部 TEL. 028-689-6218



図-4 液状化強度曲線

また液状化強度曲線は図-4のようになった.液状化強度比 R<sub>L20</sub>は0.185である.

#### 4. 繰返し載荷履歴による体積収縮特性

応力制御の繰返し載荷後の排水による体積ひずみの結果 について繰返し応力比との関係を図-5 に示す.体積ひずみ は拘束圧や繰返し応力振幅比に依存せず2.5~6%程度となっ ている.これは応力制御の試験では、(繰返し応力振幅比が 0.3 や 0.5 のケースは特に)供試体に対して与えられるせん 断応力が大きく、少ない載荷回数で液状化、せん断ひずみ が10%を超えて終了してしまうことによる.

ここで、海野らによる既往の研究<sup>4</sup>において、液状化後の 再圧密による体積収縮量は繰返しせん断ひずみ履歴に依存 するということが報告されている.そこで本研究では、既 往の研究同様に累加せん断ひずみを用いて整理した.ここ で累加せん断ひずみとは有効応力解析にて土の損傷を表現 するために内部変数として使われる量である.海野らによ る既往の研究において累加せん断ひずみは以下の式で定義 されている.

$$\gamma_{acm} = \int |\dot{\gamma}(t)| dt \tag{1}$$

ここでγ(t)は時刻tにおけるせん断ひずみ速度である. 図-6 に体積ひずみを繰返しせん断ひずみ履歴により整理した結 果を示す. 累加せん断ひずみが増加するにつれ,体積ひず みも増加している.ただし,応力制御の試験では供試体に 与える繰り返しせん断履歴が少ないため初期の体積収縮挙 動しかわからなかった.そこで本研究では,多量のひずみ 履歴を与えた場合のフライアッシュの体積収縮量を把握す るため,ひずみ制御の試験にて応力制御の試験では与えら れなかった繰返しせん断履歴を与えた. 図-7 に,図-6 にひ ずみ制御の試験結果を追加したものを示す.累加せん断ひ ずみが 10 を超えたあたりから体積ひずみが 8%程度に収束 した.ただし収束値の定量的な評価については,せん断条 件を変えた実験をさらに実施し,多方面からの検討が必要 と考えられる.

図-7 において海野らの実験式(2)、(3)を適用したところ, 今回の試験結果では材料定数 a が 0.4, 繰返しせん断による 間隙比の収束値 e<sub>∞</sub>が 1.22 となった.

$$\varepsilon_{v} = \left(e_{0} - e_{cyc}\right)(V_{s}/V_{0}) \tag{2}$$

$$e_{cyc} = e_{\infty} + (e_0 - e_{\infty}) \cdot e^{-a \cdot \gamma_{acm}}$$
(3)

eo:初期間隙比, Vs:土粒子体積, Vo:初期供試体体積.

#### 5. 結論

本研究より得られた知見は以下の通りである.

- 本研究に用いた非塑性シルトに分類されるフライアッシュは、液状化し液状化強度比 R<sub>L</sub>は 0.185 となった.
- 非排水条件でフライアッシュに繰返しせん断履歴を与 えると累加せん断ひずみが増加するにつれ体積ひずみ も増加し、最終的に体積ひずみは8%程度に収束する。

本研究では液状化後における体積ひずみは 8%となったが, 外力の与え方により変化する可能性がある。このため今後 さらに載荷条件等を変えた実験を実施する予定である.

参考文献 1)長期エネルギー需給見通し(案) http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\_policy\_subcommittee/mitosh i/010/pdf/010\_05.pdf. 2)秋本哲平,熊谷隆宏,米谷宏史,安藤有司:石炭 灰の減容化に関する研究,土木学会論文集B2, No.2, pp.1083~1088, 2015. 3)池田浩一,松尾憲親,田中全,溝上建:急速載荷時の石炭灰地盤の変形 挙動と貯炭場機器基礎の設計,電力土木 No.291, pp.75~79, 2001. 4)海野 寿康,風間基樹,渦岡良介,仙頭紀明:同一繰返しせん断履歴における乾燥 砂と飽和砂の体積収縮量の関係,土木学会論文集C, No.4, pp.757~766, 2006.



図-5 応力制御の繰返し載荷後の体積ひずみ



図-6 せん断ひずみ履歴と体積ひずみの関係



図-7 繰返し載荷後の体積ひずみ