繰返しせん断作用下におけるクリンカアッシュの圧縮特性の把握

宇都宮大学大学院　○柳田匡慶，海野寿康
五洋建設株式会社　熊谷隆宏・上野一彦

1．研究背景と目的

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．石炭灰は年間 40 万トン[1]埋立処分されているが処分場の容量にも限りがあり，また，環境問題や経済的な面で処分場を新造することも難しい状況にある．従って既設処分場に埋立処分された石炭灰を減容化，処分場を延命化することが求められる[2]．このような背景下，本研究では，振動締め固め工法等を用いた動的載荷による石炭灰の減容化技術を開発するあたり動的載荷に伴う土砂の体積圧縮特性を把握するため，載荷制御や排水条件の異なる繰返し載荷・再圧密試験を行い強制せん断作用下における土の圧縮特性の把握を試みた．本稿では，特に石炭灰のうち粒径の大きいクリンカアッシュの試験結果を示す．なお，同石炭灰の内，シルトであるフライアッシュについては，文献[3]にて既に報告している．

表-1 試料の物理特性

土粒子密度 ρ_s	2.372g/cm^3
最適含水比 w_{opt}	41.00　%
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	1.07g/cm^3

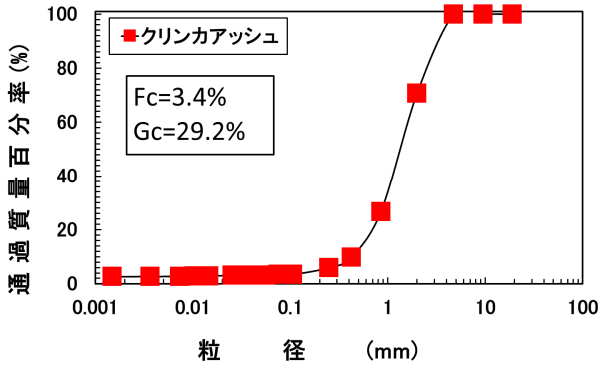

図-1 粒径加積曲線

2．試験装置と試験条件

試験に用いた装置は中空ねじり試験装置である．試料は 2mm 粒径以下のクリンカアッシュ用いた．物理特性を表-1 と図-1 に示す．

供試体作製時の密度は，密詰めと緩詰め状態の 2 ケースである．①乾燥密度 ρ_{dc}=0.98g/cm^3（密詰め供試体）を，②乾燥密度 ρ_{dc}=0.75g/cm^3（緩詰め供試体）を目標にして作製した．繰返し載荷は，応力制御とひずみ制御にて行っている．応力制御の繰返し試験では，初期有効拘束圧を 30kPa，50kPa，100kPa とし，繰返し応力振幅比を 0.1，0.2，0.3，0.5 とし，片振幅のせん断ひずみの絶対値が 10%を超えた時点で載荷を終了した．

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±3%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排水コックを開け再圧密し，排水量から体積ひずみを算出した．

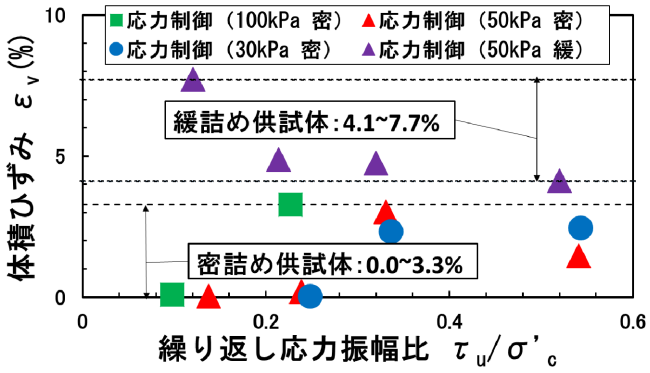

図-2 応力制御の繰返し載荷後の体積ひずみ

3．繰返し載荷履歴による体積収縮特性

応力制御繰返し載荷後の排水による体積収縮特性の結果について，繰返し応力比と体積ひずみの関係を図-2 に示す．図-2 より体積ひずみは，有効拘束圧や繰返し応力振幅比に依存せず，密詰め供試体は 0.0～3.3%，緩詰め供試体 4.1～7.7%程度となった．これは試験制御上，供試体に与えられるせん断応力が大きい場合，少ない載荷回数で液状化し，特に履歴が大きい場合は瞬時にせん断ひずみが 10%を超えて終了することによるものと推測される．

密詰め供試体では，繰返しせん断応力比が低い 0.1，0.2 の場合，有効拘束圧に関係なく載荷 200 回以内では液状化せず，繰返し載荷後の再圧密時で体積ひずみはほぼ生じない．以上より応力制御では十分な議論ができない結果となった．

著者らの既往研究[4]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ことが報告されている．このことから多量のひずみ履歴を与えた場合のクリンカアッシュの体積収縮量を把握するため，ひずみ制御試験にて多量の繰返しせん断ひずみ履

キーワード：クリンカアッシュ，体積圧縮，体積ひずみ，液状化，排水条件
連絡先　〒321-8585　栃木県宇都宮市陽東　7-1-2　宇都宮大学大学院工学研究科　TEL.　028-689-7044

歴を与えた．なお本研究では，既往の研究同様に累加せん断ひずみを用いる．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．既往研究において累加せん断ひずみは次式で定義されている．

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

$\dot{\gamma}(t)$：時刻 t におけるせん断ひずみ速度である．

図-3 は，密詰め供試体と緩詰め供試体の応力制御とひずみ制御の試験結果を累加せん断ひずみにて整理したものである．累加せん断ひずみが 10.0 を超えたあたりから密詰め供試体と緩詰め供試体の体積ひずみはそれぞれ約 4.5%と約 9.1%程度に収束する．しかし，各試験結果毎の体積ひずみの結果をみると個々の供試体で値がばらつく結果となった．特に緩詰め供試体のばらつきが大きくなる．これは，供試体作製時の密度のばらつきや供試体中の土粒子配置の不均質性によるものと考える．

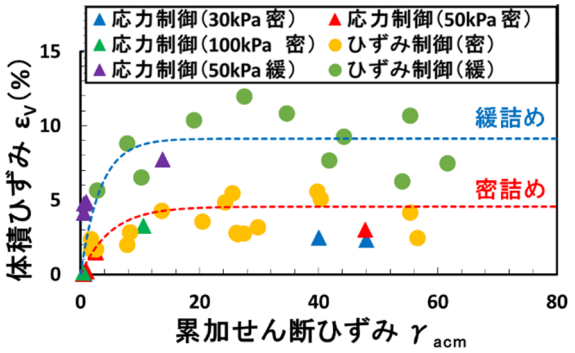

図-3 繰返し載荷後の体積ひずみ

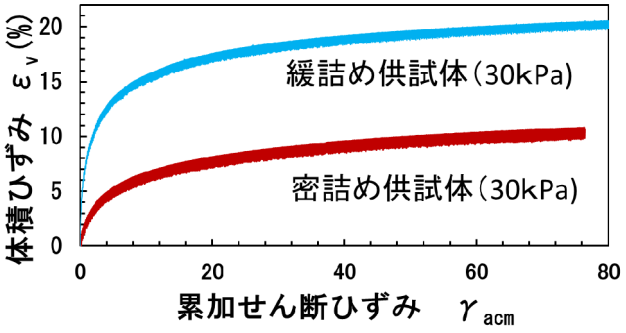

図-4 排水繰返し載荷中の体積ひずみ

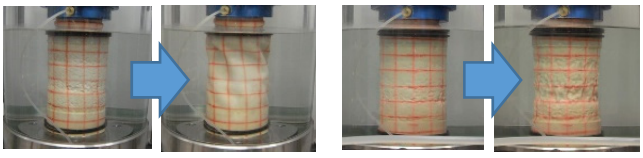

写真-1 載荷前・後の供試体の様子
（左：非排水，右：排水）

図-4 に排水・ひずみ制御繰返しせん断試験結果における体積収縮量の結果を示す．試験の有効拘束圧は 30kPa，波数は 300 回であり，密詰め供試体と緩詰め供試体の二通りである．試験の結果，体積ひずみの収束値は，非排水せん断後の排水量と一致せず，密詰め供試体は 10.6%，緩詰め供試体は 20.4%で収束した．

以上，二種類の試験において排水条件による繰返し載荷後の体積収縮の差については，著者らは次のように推測する．すなわち**写真-1** に示すようにひずみ制御非排水繰返し載荷では載荷に伴う液状化により上下に皺や縒れが発生し，供試体内の一様性が保たれておらず，液状化に伴うネッキングや土・水分離により，せん断履歴が局所的にしか作用していないことに起因する．一方，排水試験では供試体全体が収縮することにより要素の一様性が保たれ最後まで供試体全体にせん断履歴が作用することからこのような差が生じたのではないかと考えている．

なお，本研究中の排水せん断試験は，有効応力がせん断中に低下しないため，せん断中に粒子破砕する可能性がある．そこで試験の各過程における試料の細粒分を計測した．**表-2** は，一連の試験過程における各過程の細粒分含有率である．本データは，各過程において試験を終了し，粒度試験を実施し値を求めている．結果より圧密中あるいはせん断中ほとんど生じていないことがわかる．

表-2 各試験過程における細粒分含有率

基材料	圧密過程終了時	ひずみ制御 非排水載荷後の再圧密終了時	ひずみ制御 排水載荷時
11.5%	11.5%	8.8%	9.7%

4. 結論

本研究より得られた知見は以下の通りである．

- 応力制御での繰返し載荷後の排水による体積ひずみは有効拘束圧や繰返し応力振幅比に依存せず密詰め供試体は 0.0～3.3%，緩詰め供試体 4.1～7.7%程度となっている．
- 非排水条件でひずみ制御でクリンカアッシュに繰返しせん断履歴を与えと，その後の排水試験により，体積ひずみは密詰め供試体では約 4.5%，緩詰め供試体では約 9.1%にそれぞれ収束する．
- 一方，排水条件で同一履歴の繰返しせん断ひずみ履歴を与えた場合，載荷中に生じる体積ひずみは，密詰め供試体が 10.6%，緩詰め供試体が 20.4%となり，同一せん断ひずみ履歴でも発生する体積収縮量は 2 倍以上異なる結果となった．

参考文献

1) 一般財団法人石炭エネルギーセンター 「石炭灰全国実態調査報告書（平成 25 年度実績）」http://www.jcoal.or.jp/coalash7_25.pdf 2) 秋本哲平他：石炭灰の減容化方法に関する研究，土木学会論文集 B3(海洋開発)，No.2，pp. 1083-1088，2015. 4. 3）海野寿康他：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の把握，地盤工学研究発表会，pp.427～428，2016. 9. 4）海野寿康他：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.