

中空ねじりせん断試験によるクリンカアッシュの動的変形特性

山口大学大学院	学生会員	○赤松	諒亮
山口大学大学院	正会員	兵動	正幸
山口大学大学院	正会員	吉本	憲正
山口大学大学院	学生会員	大原	直人
中国電力株式会社	正会員	中下	明文
中国電力株式会社	正会員	中村	芳弘
復建調査設計	正会員	若槻	好孝

1. 背景・目的

石炭灰は生成過程の違いからクリンカアッシュとフライアッシュに大別され、フライアッシュはこれまでに数多くの研究がなされ、主にセメントの分野で有効利用され、その他にも多種多様に有効利用が拡大している。しかし、クリンカアッシュは、施工性に優れその有用性が認められているものの、その物理学的、力学的性質については十分に解明されていない状況にある。筆者らはこれまでクリンカアッシュの主として静的せん断特性を調べてきた¹⁾が、本研究では、このクリンカアッシュの耐震性を調べることを目的として、中空ねじりせん断試験機を用いて動的変形試験を行った。

2. 実験方法

本研究では、試料としてクリンカアッシュ 5 炭種を使用した。実験には三隅発電所(島根県浜田市)・碧南発電所(愛知県碧南市)・橘湾発電所(徳島県阿南市)・新小野田発電所(山口県小野田市)・松浦発電所(長崎県松浦市)の各発電所から採取されたクリンカアッシュと、比較資料として三河珪砂とまさ土を用いており、それぞれの粒径加積曲線を図-1 に示す。中空供試体は外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm であるため、各クリンカアッシュから、粒径 2cm 以上のものは取り除いて使用した。全ての試料に対し湿潤突き固め法($E_c=373kJ/m^2$)を適用し、5 層に分けて突き固めて供試体を作製した。この締固め状態は、クリンカアッシュにおいては、細粒分含有率の高いものでは締固度 $D_c=95\%$ 程度であるが、細粒分含有率の低い試料ものでは $D_c=79-80\%$ 程度であり、比較的緩い状態を対象としている。一方、まさ土では $D_c=90\%$ 、三河珪砂では相対密度 $D_r=64\%$ であった。これらの試料に対し有効拘束圧 $\sigma'_c=100kPa$ の等方圧密を行い、繰返しせん断は各ひずみレベル毎に非排水条件で供試体に周波数 $f=0.1Hz$ の正弦波形の繰返し荷重を 11 回与えて行なった。繰返しせん断後は、排水状態にして過剰間隙水圧を消散させた。

3. 実験結果

まず、各クリンカアッシュおよび比較のために同じ締固めエネルギーで突固めて作製した三河珪砂およびまさ土の等価せん断剛性率 G_{eq} および履歴減衰率 h の片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ との関係を図 2 に示す。いずれのクリンカアッシュも三河珪砂よりも初期剛性は低いが、細粒分含有率が低く比較的締固め度が高かった新小野田と松浦はまさ土よりも高く、細粒分の多いクリンカアッシュはまさ土と同程度かやや低い結果となった。また、履歴減衰率 $h(\%)$ はほとんどのクリンカアッシュは三河珪砂やまさ土よりも低い結果となり、その中でも新小野田が最も低い結果となった。

次に等価せん断剛性率 G_{eq} を初期せん断剛性率 G_0 で正規化した G_{eq}/G_0 および過剰間隙水圧と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を図 3 に示す。初期せん断剛性率 G_0 はそれぞれの曲線から $(\gamma)_{SA}=0.0001\%$ に対する G_{eq} を読み取り決定した。図より、三河珪砂やまさ土は低いひずみ域から等価せん断剛性率が低下しているのに対し、クリンカアッシュ

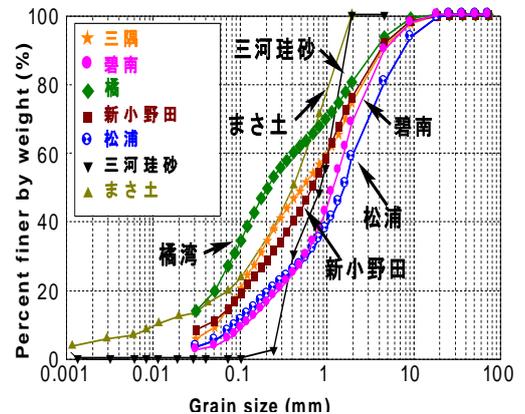


図 1 粒径加積曲線

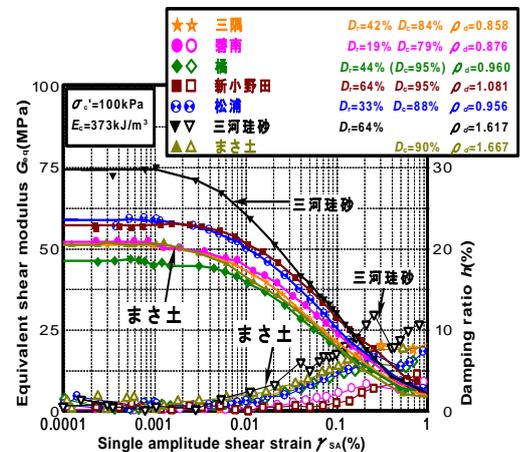


図-2 クリンカアッシュの動的変形特性

は剛性が低下し始めるひずみが高く,全体的に弾性域が長い傾向が認められる.また,間隙水圧で比較すると,三河珪砂やまさ土が大ひずみ域で間隙水圧が急激に上昇するのに対して,クリンカアッシュは大ひずみ域において一部間隙水圧の上昇が見られるが全体的には間隙水圧の上昇は抑えられる結果となっている.また,図4にクリンカアッシュ(三隅)とまさ土の片振幅せん断ひずみ(γ)_{SA}=1.0%以上のせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係を示す.まさ土は有効応力が急激に低下し,ひずみも増大し液状化のような挙動を示している.それに対してクリンカアッシュの有効応力の低下は抑制されており,ひずみも漸増的に発達する傾向が認められる.以上のことより,比較的緩詰めのクリンカアッシュは,初期剛性はさほど高くはないものの,大きなひずみ域まで弾性的であり,さらに間隙水圧の上昇を抑えることから,液状化も抑えられることになり,大きな地震に対して抵抗できる地盤材料と評価できる.次に,初期剛性 G_0 の間隙比に対する依存性について,図にクリンカアッシュそれぞれの G_0 と間隙比 e の関係を示す.図から間隙比 e の減少に伴う初期剛性 G_0 の増加傾向が認められる.本実験結果から初期せん断弾性係数の推定式を提案する.Hardin and Richart²⁾ が提案した微小ひずみ域における一般的なせん断弾性係数の推定式が次式で表される.

$$G_0 = Af(e) \left(\frac{p'}{\sigma'_r} \right)^n \quad (\text{MPa})$$

ここで A は実験定数, $f(e)$ は間隙比定数, p' は平均有効主応力 σ'_r は基準応力, n :せん断弾性係数の拘束圧依存性を示すパラメータであり一般的に $n=0.5$ が広く用いられている.そこで,基準応力を 100kPa とし,基準推定式 G_0 を図-10 に示した各クリンカアッシュの初期剛性と間隙比の関係の近似線から次式に決定した.

$$G_0 = 55.68e^{-0.25} \quad (\text{MPa})$$

図に実験のより測定した初期剛性 G_0 と提案式により算出される初期剛性 G_0 の関係を示す.図よりプロットは 1:1 の対角線上にあることから,推定式の妥当性が確認できる.

4.まとめ

- (1) クリンカアッシュの初期せん断剛性は三河珪砂と比較すると低いが,まさ土と同程度以上を得ることができる.
- (2) 大ひずみ域においてまさ土が液状化挙動を示すのに対し,クリンカアッシュは弾性域が長く,過剰間隙水圧を抑えることができることから,大きな地震に抵抗できる材料であると考えられる.
- (3) 初期剛性と間隙比の関係を用いることで,クリンカアッシュの初期剛性 G_0 の簡易推定式を提案することができた.

参考文献

- 1) 若槻好孝, 田中等, 内田裕二, 入江功四郎, 兵動正幸, 吉本憲正: クリンカ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, 2007.2) Hardin, B.O. and Richart, Jr. F. E. : Elastic wave velocities in granular soils, Proc. ASCE, Vol.89, No. SM1, pp.33-65, 1963 3) Shibuya, S. and Tanaka, H. : Estimate of Elastic Shear Modulus in Holocene Soil Deposits, Soils and Foundations, Vol.36, No.4, pp.45-55, 1996

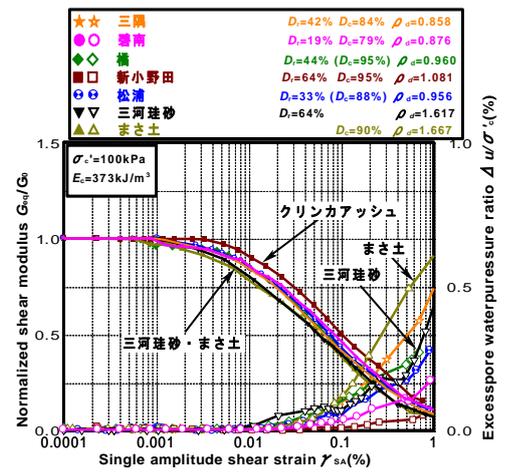
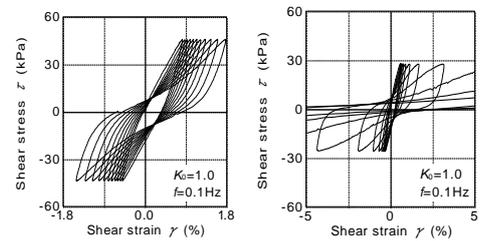


図-3 G_{eq}/G_0 および過剰間隙水と片振幅せん断ひずみ(γ)_{SA} の関係



クリンカアッシュ まさ土

図-4 せん断応力 τ (kPa) とせん断ひずみ (%) の関係

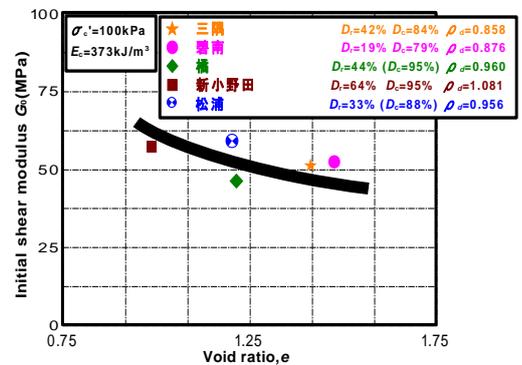


図-5 初期剛性 G_0 と間隙比の関係

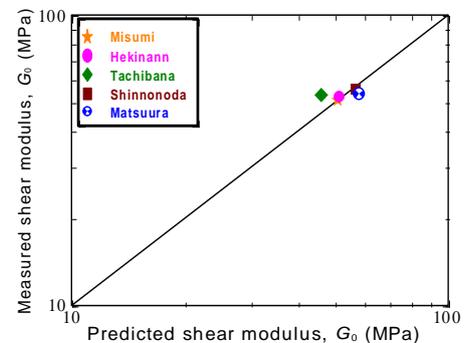


図-6 実測値の初期剛性 G_0 と計算値の初期剛性 G_0 の関係