造粒石炭灰を混合した土の繰返しせん断特性[†]

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****

Cyclic Shear Characteristics of Soil Mixed with Granulated Coal Ash

by

Norimasa YOSHIMOTO*, Masayuki HYODO**, Yukio NAKATA*,
Hidekazu MURATA*, Takashi NISHIZONO***, Takashi HONGO****,
Akira OHNAKA**** and Kazuhiro SAIAI****

With the aim of using granulated coal ash mixed with natural sand as geo-material, laboratory experiments were performed on the composite material to understand its cyclic shear characteristics. A series of undrained cyclic shear tests was performed on loose samples of the composite material to assess the effect of the mixed proportion on the cyclic shear characteristics. The tests revealed that (1) the composite material in which the proportion of granulated coal ash mixed was about 50% or more has cyclic shear strength almost equal to that of pure granulated coal ash, irrespective of the type of natural sand used; (2) The cyclic shear strength of the composite material increased when the particle strength of the natural sand was low; (3) When the composite material consisted of about 30% natural sand, the initial shear modulus G_0 of the mixture was almost equal to that of granulated coal ash. Based on these test results, it was shown that when the mixed proportion of granulated coal ash was about 50%, the cyclic shear characteristics and dynamic deformation characteristics of the composite material were almost similar to those of pure granulated coal ash.

Key words : Granulated coal ash, Coal ash, Geomaterial, Composite material, Cyclic shear strength, Initial shear modulus, Particle strength

1 緒 言

現在、我が国におけるエネルギー供給面で重要な位置を占める石炭は、電気事業において大量の石炭灰を発生する。この石炭灰は大量利用の可能性の高い土木材料としての利用が期待されている。著者らは、石炭灰の有効利用を目的として、石炭灰にセメントや水を加えて砂礫大に造粒化した「造粒石炭灰」の地盤材料への適用性の検討を行ってきた。¹⁾これまでに得られた知見として、造粒石炭灰は繰返しせん断強度が自然砂より高く、埋立材料として有用性があることが確認されている。²⁾しかしながら、造粒石炭灰の生産状況を鑑みると埋立地の規模によっては安定供給が困難な場合が生じてくる。その場合、従来は天然の材料と併用し、場所によって異なる材料を用いて埋め立てられる。両者の繰返しせん断特性が顕著に異なるような場合には、繰返しせん断強度が低い方に依存し、繰返しせん断強度の高い材料で造成された地盤にも影響が及ぶことが懸念される。

本研究では、造粒石炭灰を天然の材料に混合して利用することを念頭に、混合材料としての繰返しせん断特性を把握することを目的とした。実験は、非排水繰返し三軸試験および中空ねじりせん断試験機による動的変形試

験とした。混合する自然砂の種類による影響について、粒度を同じに調整した2種類の自然砂を用いて検討した。

2 物理的性質および試験概要

試験に用いた造粒石炭灰 (Granulated Coal Ash: 以後、G.C.Aと呼ぶ) は、石炭灰:セメント:添加材 (キルダスト等) = 85:5:10で造粒され、試験時に2mm以下に粒度調整されている。含水比が最適含水比に近い40~50%の条件で屋外養生されたものを、試験時にあらかじめ自然乾燥させて用いた。混合する試料は、混合割合の影響や混合する試料の粒子特性の違いを検討するため、山口県下関市で採取した下関まさ土とシリカ砂 (以後、Silicaと呼ぶ) の2種類を用いた。下関まさ土については、採取時に礫分を含むため、2mm以下に粒度調整したもの (以後、S. Masado-Aと呼ぶ) と、粒子特性の違いを検討するため、Silicaの粒度分布に併せて調整したもの (以後、S. Masado-Bと呼ぶ) の2種類を用意した。

Table 1に用いた試料の物理的性質および乾燥質量比で規程した混合割合を示す。G.C.Aは石炭灰自身に気泡が含まれていること、造粒化により粒子に空隙が形成されることから、他の自然砂より土粒子密度が小さく、最

[†] 原稿受理 平成19年4月9日 Received Apr. 9, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Dept. of Civ. Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

** 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Dept. of Civ. Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

*** 応用地質(株) 〒463-8541 名古屋守山区瀬古東, OYO Corporation, Moriyama-ku, Nagoya, 463-8541

**** 宇部興産(株) 〒755-8633 宇部市小串, Ube Industries, Ltd., Kogushi, Ube, 755-8633

Table 1 Physical properties of materials and composition.

Sample	Composition (%)		ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	U_c
	G.C.A	Other				
G.C.A	-	-	2.285	2.280	1.512	14.86
S.Masado-A	-	-	2.664	1.144	0.583	6.43
Silica	-	-	2.652	0.850	0.524	3.72
S.Masado-B	-	-	2.681	1.240	0.762	3.72
G.C.A + S.Masado-A	70	30	2.387	1.849	1.218	12.56
	50	50	2.497	1.696	1.043	10.67
	30	70	2.571	1.488	0.865	8.82
	10	90	2.639	1.255	0.691	7.22
G.C.A+Silica	50	50	2.455	1.528	0.999	8.91
G.C.A+S.M-B	50	50	2.467	1.673	1.084	8.91

大間隙比・最小間隙比ともに大きな値を示すことが特徴である。Fig. 1 に G.C.A の混合割合と間隙比の関係を示す。図より G.C.A を自然砂に混合させることで、G.C.A の混合割合の増加に伴い、混合材料は G.C.A に近い最大間隙比・最小間隙比を有する。用いた試料の粒径加積曲線を Fig. 2 に示す。G.C.A が下関まき土より細粒分が多く粒径幅が広いことから、混合割合の増加に伴い混合材料の粒径幅は広がる。Silica の粒度分布は均等係数 U_c が 3.72 と小さいが、G.C.A を混合することで 8.91 へと変化し粒径幅が広がる。

繰返し三軸試験装置と繰返し中空ねじり単純せん断試験装置の 2 種類を用いて検討を行った。繰返し三軸試験は、繰返しせん断強度を取得する目的で、 $\sigma'_c = 100\text{kPa}$ の側圧一定条件で、応力制御方式とし、軸応力振幅一定、载荷周波数 0.1Hz の条件とした。供試体は、緩い埋立て地盤を想定して、水中落下法により作成し、いずれも直径 5cm、高さ 10cm であり、初期相対密度を $Dr = 50\%$ に統一している。繰返し中空ねじり単純せん断試験は、動の変形係数を取得する目的で、 $p' = \sigma'_c = 100\text{kPa}$ の平均有効主応力一定条件で、応力制御方式とし、せん断応力振幅一定、载荷周波数 0.1Hz の条件で行った。供試体（外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm）の初期相対密度は $Dr = 60\%$ になるように統一している。中空供試体も三軸供試体と同様に水中落下法により供試体を作成したが、供試体形状の違いの影響からか、最も緩い状態の密度が $Dr = 60\%$ であった。試験は、各供試体に対して、段階的にせん断ひずみレベルを増加させるようせん断応力を調整して行った。そして、各せん断ひずみレベルごとに

Fig. 1 Relationship between void ratio e and composition ratio.

Fig. 2 Grain size distribution of materials.

正弦波を 11 波载荷し、10 波目のせん断応力～せん断ひずみ関係からせん断剛性 G_{eq} を決定した。11 波目の载荷終了後、供試体を排水条件にて圧密後、次のせん断ひずみレベルで同様の実験を行った。

3 造粒石炭灰を混合した土の繰返しせん断挙動

Fig. 3 (a), (b) に残留過剰間隙水圧比 u_r の蓄積と軸ひずみ両振幅 ε_{DA} の発達状況を混合割合の違いで整理したものを示す。横軸は軸ひずみが $\varepsilon_{DA} = 5\%$ に至った時の繰返し回数で正規化された正規化繰返し回数 $N/N (\varepsilon_{DA}=5\%)$ を用いている。(a) G.C.A と S. Masado-A を種々の混合

(a) G.C.A+S.Masado-A

(b) G.C.A+Silica or S.Masado-B

Fig. 3 Double amplitude axial strain ε_{DA} and residual pore pressure ratio u_r/σ'_c plots against normalized number of cycles N/N (at $\varepsilon_{DA} = 5\%$).

割合で混合した場合の結果であり、(b) は、シリカ砂と S. Masado-B のそれぞれに 50% の G.C.A を混合した場合の結果である。混合割合の影響を比較するために、繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c = 0.2$ の同程度のものを用いている。

Fig. 3 (a) より、混合材料の残留過剰間隙水圧比 u_r/σ'_c の経路は、G.C.A を 3 割以上混合させることで、混合割合に影響せず、G.C.A とほぼ同等の挙動を示す。軸ひずみ両振幅の発達状況も残留過剰間隙水圧比と同様に、G.C.A を 3 割以上混合させることで、混合割合に影響しないことがわかる。

Fig. 3 (b) より、初期粒度分布を同様とした Silica と S. Masado-B では、軸ひずみの発達は、ほぼ類似した傾向を示すが、過剰間隙水圧比の経路に着目すると、S. Masado-B のほうが過剰間隙水圧の蓄積が大きくなる。しかし、G.C.A を 5 割混合することで材料の種類によらず、軸ひずみ両振幅の発達状況および残留過剰間隙水圧の蓄積は、G.C.A のそれとほぼ同等の挙動になる。以上より、G.C.A と自然砂の混合材料は、G.C.A を約 5 割以上混合させることで、混合する材料の種類によらず、G.C.A とほぼ同様の挙動を示す。

Fig. 4 に軸ひずみ両振幅 ε_{DA} と累積損失エネルギー ΣW の関係を示す。ここで、累積損失エネルギー ΣW は式 (1) で表され、Towhata and Ishihara,³⁾ 風間ら,⁴⁾ 増田ら,⁵⁾ 中山ら⁶⁾ などによって液状化挙動や液状化強度の評価に用いられている。累積損失エネルギー ΣW は、液状化に至るまでの過程において土が塑性変形して費やすことのできるエネルギー容量を表しており、この値が大きいほどエネルギー吸収能力が高い、つまり液状化に対して強いと考えることができる。

$$W(t) = \oint \tau(\gamma) d\gamma = \int_0^t \tau(t) \dot{\gamma}(t) dt \quad (1)$$

ここで、 t は時間を表し、 τ はせん断応力、 γ はせん断ひずみである。図より、軸ひずみ両振幅が $\varepsilon_{DA} = 5\%$ に至った時の累積損失エネルギーに着目すると、G.C.A は自然砂の 2～3 倍の値を示す。G.C.A に自然砂を混合した場合では、G.C.A と S. Masado-A を 5 割混合した場合が最も累積損失エネルギーが高く、G.C.A とほぼ同等の結果を得る。初期粒度分布を同様としたシリカ砂と S. Masado-B では、S. Masado-B において累積損失エネルギー

Fig. 4 Relationship between cumulative dissipated energy ΣW and double amplitude axial strain ε_{DA} .

ギーが高く、G.C.A を混合させた場合においても同様の傾向である。

本検討では、粒度分布、相対密度を揃えているため、このような結果の違いに影響を与える要因として、粒子の形状、粒子の強度が考えられる。著者らは造粒石炭灰について粒子の形状、粒子の強度から検討し、粒子の強度の違いが繰返しせん断挙動および強度に影響を与えていることを指摘している。²⁾このような指摘と別途実施した単粒子破碎試験^{7)~10)}から求めた単粒子破碎強度の結果 (Silica: $\sigma_{bm} = 44.1\text{MPa}$, S. Masado-B: $\sigma_{bm} = 25.5\text{MPa}$) を踏まえると、単粒子破碎強度の違いが試験中に起こる粒子破碎量を変化させ、累積損失エネルギーの違いを生じさせたものと考えられる。

G.C.A および自然砂に G.C.A を混合した材料は、載荷初期から軸ひずみ、累積損失エネルギーのいずれもが蓄積されており、載荷初期から徐々に塑性変形を生じている。つまり G.C.A と自然砂の混合材料は、混合させることで液状化に対して強い材料になると考えられる。

4 造粒石炭灰を混合した土の繰返しせん断強度

Fig. 5 に、軸ひずみ両振幅 5% に至るに必要な繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ と繰返し回数 N の関係を示す。(a) は G.C.A と S. Masado-A を種々の混合割合で混合した場合の結果であり、(b) は、Silica と S. Masado-B のそれぞれに 50% の G.C.A を混合した場合の結果である。Fig. 5 (a) より、G.C.A の混合割合が増加するに伴い、繰返しせん断強度

(a) G.C.A+S. Masado-A

(b) G.C.A+Silica or S. Masado-B

Fig. 5 Cyclic strength curves corresponding to double amplitude axial strain $\varepsilon_{DA} = 5\%$.

Fig. 6 Relationship between cyclic shear strength and composition ratio.

曲線は上方に移動する。Fig. 5 (b)より、初期粒度分布を揃えた Silica と S. Masado-B は、S. Masado-B 方が Silica よりも繰返しせん断強度曲線が上方に位置する。これは先述したように、Silica と S. Masado-B では単粒子破碎強度が異なっているため、S. Masado-B において試験中に起こる破碎量が大きいものと推測される。G.C.A を 50% 混合した場合を見ても、G.C.A と S. Masado-B を混合した場合の方が Silica よりも繰返しせん断強度曲線が上方に位置する。

造粒石炭灰の繰返しせん断強度の高さについて、著者らは、粒度分布や相対密度を揃え、粒子形状や粒子破碎量の大小関係に着目した自然砂との比較から検討を行っている。²⁾それより、圧密中に起こる粒子破碎によって粒子接点数の増加など構造が安定し、繰返しせん断強度が高くなると考察した。²⁾今回の実験結果においても、試験中に起こる粒子破碎が繰返しせん断強度へ影響を及ぼしていると考えられる。

Fig. 6 に Fig. 5 (a), (b) の繰返し強度の違いを混合材料の種類について考察するため、G.C.A の混合割合と繰返し回数 $N=10$ 回で軸ひずみ両振幅 $\epsilon_{DA}=5\%$ に至った時の繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ の関係を示す。図より、G.C.A の混合割合が増加するに伴い、繰返しせん断強度は増加する。混合する材料の種類についてみると、G.C.A の混合割合の増加に伴い、繰返しせん断強度に差が見られなくなり、S. Masado-A と Silica に 50% の G.C.A を混合した場合では、同等の繰返しせん断強度を持ち、G.C.A を 70% 以上混合させると、材料の種類によらず、G.C.A の繰返しせん断強度と同等の繰返しせん断強度を持つようになる。

Fig. 7 に Fig. 6 の強度増加率について評価するため、G.C.A の混合割合と $\epsilon_{DA}=5\%$ に至った時の G.C.A を混合しない場合の繰返し回数 $N=10$ 回における繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'_c$ で正規化した正規化繰返し応力比の関係を示す。

Fig. 7 より、G.C.A と S. Masado-A を混合した材料では、G.C.A を 50% 混合することで約 1.3 倍の繰返しせん断強度の増加がある。材料の種類の違いに着目すると、Silica に G.C.A を 50% 混合した材料は、約 1.5 倍の繰返しせん断強度の増加があり、若干ではあるが、S. Masado-B を混合した材料に比べ、強度増加が大きい。これは、

Fig. 7 Relationship between normalized cyclic shear strength and composition ratio.

Fig. 6 に示したように、Silica 自体の繰返しせん断強度が低いため、S. Masado-B より繰返しせん断強度の増加が顕著であったためと考えられる。

これらの影響を踏まえると、繰返しせん断強度は、試験中に起こる粒子破碎の影響を受けると考えられる。そこで、各試験後にふるい試験を行い、粒子破碎量を定量的に評価した。評価手法としては、三浦, 山内¹¹⁾によって提案されている表面積増加量 ΔS を用いた。表面積 S (cm^2/cm^3) は、単位体積あたりの面積で表現され、粒度試験から得られる平均粒径 d_m を実験より求め、式 (2) を用いて算出した。ここで、 F は各粒径の試料の残留率 (%), γ_w は水の単位体積重量 (kN/m^3), γ_d は乾燥単位体積重量 (kN/m^3) である。また、表面積増加量 ΔS は試験前後の表面積の差であり、式 (3) より算出される。

$$S = \sum \frac{F}{100} \cdot \frac{4\pi(d_m/2)^2}{(4/3)\pi(d_m/2)^3 G_s \gamma_w} \cdot \gamma_d \quad (\text{cm}^2/\text{cm}^3) \quad (2)$$

$$\Delta S = S_{\text{after}} - S_{\text{before}} \quad (\text{cm}^2/\text{cm}^3) \quad (3)$$

表面積増加量 ΔS と混合割合との関係を Fig. 8 に示す。図より、G.C.A を混合しない場合において、Silica と S. Masado-B では、単粒子破碎強度が Silica で $\sigma_{fm} = 44.1 \text{MPa}$, S. Masado-B で $\sigma_{fm} = 25.5 \text{MPa}$ と異なるため、表面積増加量が粒子強度の低い S. Masado-B において多くなっている。G.C.A と S. Masado-B を混合した場合においても、Silica と混合した場合より、S. Masado-B と

Fig. 8 Relationship between increase of surface area and composition ratio.

混合した場合において繰返しせん断後の表面積増加量が大きい。しかしながら、混合しない場合からの表面積増加量は、Silica を混合した場合の方が顕著であり、これが繰返しせん断強度の増加に反映されたと思われる。S. Masado-A と G.C.A の混合材料は混合割合が増加するに伴い、表面積増加量も増加している。この表面積増加量は粒子破砕量と関連していることから、Fig. 5 (a), (b)における繰返しせん断応力比の増加は、混合する材料の混合割合と、試験中における粒子破砕が起因するものと考えられる。天然材料の種類によらず、G.C.A を 50% 加えることで繰返しせん断強度が改善される理由として、天然の土に比べ G.C.A の方が破砕しやすく、それに起因する強度増加が発揮されたためと思われる。

5 造粒石炭灰を混合した土の初期せん断剛性率および履歴減衰率

Fig. 9 に G.C.A, S. Masado-A, Toyoura, G.C.A と S. Masado-A, Silica, S. Masado-B を混合した材料の等価せん断剛性率 G_{eq} と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を、Fig. 10 に繰返し載荷 10 回目の等価せん断剛性率 G_{eq} を初期せん断剛性率 G_0 で正規化した G_{eq}/G_0 と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を示す。比較のため図中には、豊浦砂 ($D_{50} = 0.2\text{mm}$ ：以後、Toyouura と表記する。) の結果も併せて示す。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。

Fig. 9, 10 より、Toyouura は最も上方に位置し、比較的弾性域が長い。片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA} = 0.01\%$ くらいから、等価せん断剛性率が急激に低下し、最終的には、その他の試料よりも低い値となる。 G_{eq}/G_0 で評価した結果を見ると Toyouura の剛性の急激な低下がより顕著に認められる。一方、G.C.A の等価せん断剛性率は低く推移するものの、急激な低下は認められず、S. Masado-A より高い値で推移し、S. Masado-A を下回ることはない。せん断ひずみの大きいところでのせん断剛性率が逆転するような結果の違いは、試料の液状化特性の影響を顕著に受けているものと考えられ、G.C.A が液状化しにくい材料であるためと思われる。G.C.A を混合した場合の試料については、Silica の結果が若干上方を推移するものの、その他の試料については概ね同様の結果を推移して

Fig. 9 Relationship between equivalent shear modulus and single amplitude shear strain.

Fig. 10 Relationship normalized equivalent shear modulus and single amplitude shear strain.

おり、 G_{eq}/G_0 で評価した結果では、ほぼ一致している。

Fig. 11 に繰返し載荷 10 回目の履歴減衰率 h と片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA}$ の関係を示す。図より各試料において、 $h \sim (\gamma)_{SA}$ 関係は、G.C.A の履歴減衰率 h が低く推移し、Toyouura が最も高い値で推移し、片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA} = 0.01\%$ くらいから急激な増加を示した。これは、Toyouura はひずみレベルが大きくなると液状化による剛性の低下が著しくなるため、結果として履歴減衰率 h が急激に増加したものと考えられる。Toyouura を除いたその他の結果は、値の大小はあるもののせん断ひずみの増加に伴いほぼ同様に緩やかに増加している。

G.C.A の混合割合の影響や混合する試料の種類の影響について検討するために、Fig. 12 に初期せん断剛性率 G_0 と混合割合の関係を、Fig. 13 に片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA} = 0.1\%$ の時の履歴減衰率 h と混合割合の関係を示す。

Fig. 12 より、初期せん断剛性率は、G.C.A を 30% 混合させることで G.C.A のみと同程度の値を示し、10% の混合で S. Masado-A よりも大幅に値が大きくなる。G.C.A を 50% 混合させた場合の結果については、Silica の方が S. Masado-B よりも大きい値を示しており、両者の粒子特性の影響によって差が生じたものと考えられる。

Fig. 13 より、片振幅せん断ひずみ $(\gamma)_{SA} = 0.1\%$ の時の履歴減衰率 h は、混合割合の増加に伴い小さくなり、G.C.A を約 50% 混合させることで G.C.A のみの場合と同

Fig. 11 Relationship between damping ratio and single amplitude shear strain.

Fig. 12 Relationship between initial shear modulus and composition ratio.

Fig. 13 Relationship between damping ratio and composition ratio.

程度の履歴減衰率を示す。片振幅せん断ひずみ ($\gamma_{SA} = 0.1\%$) の時の履歴減衰率 h の値が混合割合約 50% 以降においてほぼ一定の値を示す傾向は、Fig. 6 の繰返しせん断強度が約 50% 以降、ほぼ一定の値を示すことと類似している。これは、片振幅せん断ひずみ ($\gamma_{SA} = 0.1\%$) の時の履歴減衰率 h の値が液状化に起因して生じているためである。履歴減衰率 h は、損失エネルギーと弾性ひずみエネルギーの比であるため、G.C.A の G_{eq} が極端に小さくならず大ひずみレベルでも弾性ひずみエネルギーが大きいため、損失エネルギーが大きくても、結果として履歴減衰率 h はそれほど大きくはならないものと考えられる。

6 結 言

造粒石炭灰を天然の材料に混合して利用することを主目的とし、ここでは、混合材料の繰返しせん断特性を室内実験にて把握することとした。その結果を以下にまとめる。(1) 材料の種類によらず、G.C.A を約 50% 以上混合させることで、G.C.A と同等の繰返しせん断強度を持つ。(2) 混合する材料の粒子強度の影響は、粒子強度の低い S. Masado-B において繰返しせん断強度が高く、繰返しせん断強度の増加は圧密時および繰返しせん断中の粒子破碎が起因すると考えられる。(3) G.C.A の初期せん断剛性率 G_0 は Toyoura より低いものの S. Masado-A より高く、S. Masado-A に G.C.A を約 30% 混合させることで、G.C.A とほぼ同等の剛性を持つ。(4) 履歴減衰率 h については、繰返しせん断強度の場合と同様に G.C.A を

約 50% 混合することで G.C.A と同様の値を示す。すなわち、G.C.A を約 50% 混合することで、G.C.A と同程度の繰返しせん断特性および動的変形特性を示し、混合材料としての有用性が確認された。

参 考 文 献

- 1) N. Yoshimoto, M. Hyodo, Y. Nakata, E. Fujii, T. Ohue, I. Tsurutani and A. Ohnaka, "Compression and shear characteristics of granulated coal ash based on particle strength", Proceedings of the 5th Kankyoubankougaku Symposium, pp.235-240 (2003) The Japanese Geotechnical Society.
- 2) N. Yoshimoto, M. Hyodo, Y. Nakata, H. Murata T. Hongo and A. Ohnaka, "Liquefaction resistance of granulated coal ash", Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol.62, No.1, pp.246-257 (2006).
- 3) I. Towhata and K. Ishihara, "Shear work and pore water pressure in undrained shear", Soils and Foundations, Vol.25, No.3, pp.73-84 (1985).
- 4) M. Kazama, T. Suzuki and E. Yanagisawa, "Evaluation of dissipation energy accumulated in surface ground and its application to liquefaction prediction", Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers, No.631/III-48, pp.161-177 (1999).
- 5) M. Masuda, M. Kazama and E. Yanagisawa, "Evaluation of undrained cyclic shear strength using strain controlled cyclic tri-axial test", Proceedings of the Thirty-second Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Vol.1, pp.725-726 (1997) The Japanese Geotechnical Society.
- 6) Y. Nakayama, K. Nishida, T. Nishigata and K. Inoue, "Evaluation of liquefaction of decomposed granite soils by means of flow limit and dissipation energy", Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers, No.687/III-56, pp.303-308 (2001).
- 7) Y. Kato, Y. Nakata, M. Hyodo and H. Murata, "Geomaterial single particle crushing characteristics", Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers, No.673/III-54, pp.189-194 (2001).
- 8) Y. Kato, Y. Nakata, M. Hyodo and H. Murata, "Grains characteristics and one-dimensional compression properties of crushable soils", Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers, No.701/III-58, pp.343-355 (2002).
- 9) Y. Nakata, A. F. L. Hyde, M. Hyodo and H. Murata, "A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test", Géotechnique, Vol.49, No.5, pp.567-583 (1999).
- 10) Y. Nakata, Y. Kato, M. Hyodo, A. F. L. Hyde and H. Murata, "One dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength", Soils and Foundations, Vol.41, No.2, pp.39-51 (2001).
- 11) N. Miura and T. Yamanouchi, "Effect of particle-crushing on the shear characteristics of a sand", Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers, No.260, pp.109-118 (1977).