

# 石炭灰および軟弱粘性土の造粒化と造粒材料の地盤材料特性<sup>†</sup>

吉本 憲正\* 兵動 正幸\*\* 中田 幸男\*

## Granulation Technique of Coal Ash and Cohesive Soil and Material Properties of Granulated Materials as Geo-Material

by

Norimasa YOSHIMOTO\*, Masayuki HYODO\*\* and Yukio NAKATA\*

In recent years, the generation of coal ashes from many thermal power stations and various kinds of industries has been increasing. And also soft dredged soils annually disposed in marine area have become a serious geo-environmental problem of various countries. It is difficult to reuse as construction materials due to the fine grain size and flying dust, and the disposal sites of these materials have been decreasing. Therefore, it is very important to reuse these materials. Granulation technique is a method which converts coal ashes and soft cohesive soils into high-strength particles. This is one of the soil improvement methods to make efficient use of these materials. In this study, the granulation technique of these materials was examined. And the geo-material properties of granulated materials were investigated. (1) As making the granulated materials, they were sensitive to the addition volume of water and the best volume of water exists. The grain diameter became uniform by lengthening the granulation time and the uniformity coefficient became small. (2) The aspect ratio  $A_r$  of the granulated materials was lower and roundness coefficient  $R_c$  was higher than those of natural sands. In other words, the particles of granulated materials were closer to sphere than those of natural sands but their surfaces were rougher. It was clear that single particle crushing strength of granulated materials was lower than that of natural sands though it depends on being low the additive rate for cement. (3) Shear behaviour of granulated materials was similar one of sand with particle breakage. In each granulated material to which the coefficient of curvature is similar, it was also shown that the particle strength correlated well with the secant angle obtained from shear tests and it was possible to estimate the shear strength of granulated materials.

**Key words:** Granulated materials, Coal ash, Cohesive soil, Geo-material, Granulation technique, Particle strength, Secant angle, Shear strength

### 1 緒 言

近年、良質な地盤材料の枯渇化と再生資源の有効利用の問題への取り組みは社会的な責務となってきた。そのため、多種多様な材料の地盤材料としての適用性が検討されている。石炭灰は、1991年に施行された「再生資源の利用促進に関する法律」(資源リサイクル法)により、指定副産物として指定され、有効利用の促進が義務付けられている。

港湾地域においては、航路などの確保のための浚渫工事で多量の浚渫土砂が発生している。浚渫土の多くは土砂処分場などに処分されているが、その処分地の容量や確保には限界があり、処分が困難になってきている現状にある。このような事情から、浚渫土砂の有効利用の促進が望まれている。

これらの産業副産物の地盤材料としての有効利用の一つの方法として、粒子を砂礫大に大きくする造粒化による方法がある。<sup>1)</sup>造粒化の利点は、粉末状の灰や粘土に比べて維持管理や取り扱いが容易になることである。加えて、造粒材は、人工的に作製されるために、その粒子強度が把握でき、自然土とは異なり、粒子の強度をコントロールすることが可能という利点もある。

そこで、このような利点を活用することを念頭におき、産業副産物である石炭灰および浚渫土砂である粘性土を造粒化し、砂質系の材料を開発することとそれらの造粒化方法について検討する。加えて作製された造粒材の力学特性を調べ、地盤材料特性について検討を行った。

### 2 使用した試料および造粒方法

本研究で用いた試料は、微粉炭燃焼火力発電所より排出された石炭灰、および浚渫土を想定した岩国沖合より採取された粘性土である。固化材として高炉セメントB種、造粒助材としてベントナイトを使用した。造粒助材は、粒径が小さく凝集効果を有するものとしてベントナイトを利用している。造粒材は粉体原材料の合計乾燥質量が500gとなるように種々の配合条件で配合し、適切な量の水を添加しミキサーを用いた攪拌造粒法により作製した。

Table 1に各造粒材の配合割合を示す。造粒材の砂礫の代替材としての利用を念頭におき、粒としての形が保たれればよいと考え、配合割合は、乾燥質量比で原料：固化材：助材 = 75：10：15、あるいは85：5：10とした。固化材と助材の割合は2種類であるが、原料は、石炭灰、粘性土、それらの混合の3種類とした。作製した

<sup>†</sup> 原稿受理 平成23年5月10日 Received May 10, 2011 ©2012 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

Table 1 Composition of granulated materials.

Sample	Coal ash (%)	Cohesive soil (%)	Cement (%)	Bentonite (%)	Water content $w$ (%)	Water content for clay $w_{clay}$ (%)
A75	75	0	10	15	20	0
A85	85	0	5	10	26	0
C75	0	75	10	15	24	0
C85	0	85	5	10	23	0
M75	52.5	22.5	10	15	21	93.3
M85	59.5	25.5	5	10	25	98.0

造粒材を区別するために、原料の種類と割合で区別できるように、石炭灰については、A75とA85、粘性土については、C75とC85、石炭灰と粘性土を混合したものについては、M75とM85と表記している。なお、粘性土については、初期含水比が高く、そのままの含水比では造粒化出来なかったことから、一旦乾燥させたものに再度適切な水を添加して造粒化している。石炭灰と粘性土を混合した造粒材については、石炭灰を加えることで含水比が下がり、造粒に適した水分量となるため、若干の含水比調整を行い、湿潤状態で混合し造粒化を行っている。原料の土粒子密度は、それぞれ石炭灰 ( $\rho_s = 2.15\text{g/cm}^3$ )、粘性土 ( $\rho_s = 2.61\text{g/cm}^3$ ) である。

原料に用いた試料の粒径加積曲線を Fig. 1 に示す。粘性土は、一度乾燥させることで団粒化するため、乾燥状態で使用する場合は、乳鉢ですり潰した図中の dry と表記したものをを用いている。湿潤状態 (wet) のものと比較するとすり潰した状態であってもミクロな団粒化状態にあることが推察できる。

造粒は、攪拌翼が自転運動と遊星運動により、攪拌できるミキサーを用いて行っている。攪拌速度は低速と高速で切り替えが可能である。主な造粒手順を以下に示す。

- ① 乾燥させた原料、固化材、助材を計量後、ミキサーの攪拌容器に投入し、均質になるまでゴムへらで混合する。
- ② 攪拌容器に所定の水を添加し、全体が馴染むまでゴムへらで混合する。石炭灰と粘性土を混合した造粒材の場合は、所定の水量になるまで、粘土を自然乾燥し、所定の水量になった時点で、計量さ

れた石炭灰、固化材、助材を投入し、全体が馴染むまでゴムへらで混合する。

- ③ 攪拌容器をミキサーにセットし、所定の攪拌速度、攪拌時間で攪拌し、造粒する。
- ④ 攪拌後、攪拌容器内の造粒材をバットに取りだし、その状態で1日仮養生を行う。仮養生後、ビニール袋にて常温密閉し、27日間養生させる。

造粒材の配合割合は、上述したとおりであるが、造粒条件の違いを検討するために、添加水量、攪拌速度、攪拌時間などを種々変化させて造粒材を作製した。種々の条件で作製された造粒材については、作製後の粒径分布などを比較し検討した。

### 3 種々の攪拌条件で作製された造粒材

種々の攪拌条件により作製された造粒材に対して、粒径分布などを比較・検討することで評価する。添加水量によって、作製後の造粒物は大きく性状が異なることが報告<sup>2)</sup>されていることを踏まえて、本研究においても、添加水量を種々変化させて検討を行った。Fig. 2 に、添加水率を 23 ~ 27.5% と変化させて作製された A85 の造粒材の粒径分布を示す。添加水率以外の条件は、低速攪拌 (自転運動: 135.5rpm, 遊星運動: 63.4rpm) で攪拌時間を 15 分としている。図より、添加水率  $w$  の増加に伴い粒径加積曲線が下に凸の形へと推移するが、27% から 27.5% にかけては、逆に粒径加積曲線が直線的な形に移行することが確認できる。このような粒径分布の変化が他の造粒材においても見られるか検討する目的で、添加水率  $w$  と均等係数  $U_c$  および平均粒径  $d_{50}$  の関係として Fig. 3 に示す。A75 を除く、すべての造粒材において、均等係数および平均粒径にピークが認められ、この配合割合で最も粒径が大きくなる添加水量が存在することが確認される。この結果は、造粒に必要な最適な水量が存在することを示唆している。図中には、自然砂として中国地方に広く分布しているまさ土 (宇部まさ土: U-Masado) の均等係数および平均粒径を併せて示している。中国地方においては、土工材料としてまさ土が広く使用されているため、まさ土の代替材としての利用を念頭におき、開発する造粒材の粒径分布は、まさ土と類似させることとしている。したがって、本研究の結果から、添加水量を調整することで、いずれの造粒材も目標とするまさ土

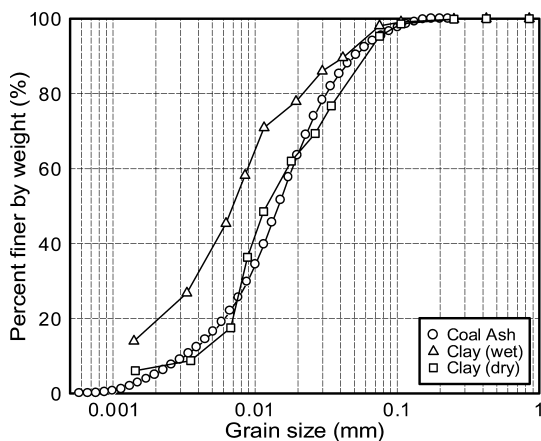


Fig. 1 Grain size distribution curves of materials.

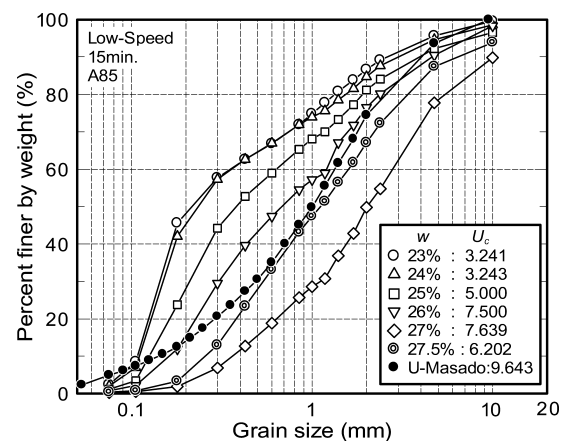


Fig. 2 Effect of water content on grain size distribution curves.

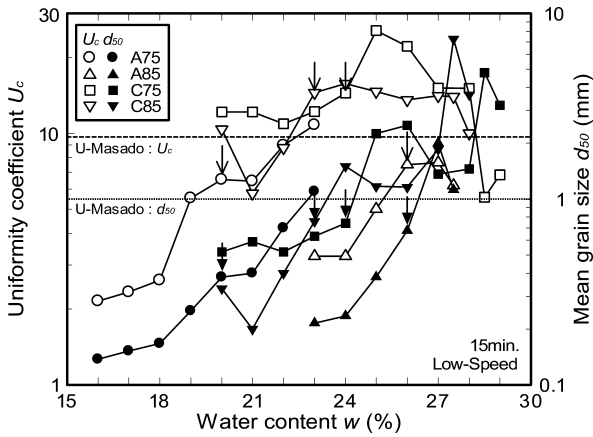


Fig. 3 Uniformity coefficient  $U_c$  and mean grain size  $d_{50}$  plots against water content  $w$ .

に近い粒径分布で作製が可能である。添加水量の決定については、まさ土の粒径分布に類似していることを条件に、粗粒分：20%程度，細粒分：3%程度という造粒基準に加え、再現性の高い造粒材の作製が可能な水量とした。その結果、添加水率は、Table 1に示す値となった。石炭灰と粘性土を混合した造粒材においては、石炭灰混入後の含水量（比）が所定の値となるように、事前に粘性土の含水比を調整（M75は  $w_{clay} = 93.3\%$ ，M85は  $w_{clay} = 98.0\%$ ）した。

攪拌時間による影響を検討するため、攪拌時間を種々変化させた検討を実施した。その結果を粒径加積曲線として Fig. 4に示す。攪拌時間は、5、15、30、60分間とし、A85を対象に実施した。攪拌条件は、低速攪拌（自転運動：135.5rpm，遊星運動：63.4rpm）で添加水率は上述で決定した26%である。攪拌時間が長くなるにつれ粒径加積曲線が立ち、均等係数が小さくなることから、粒径の揃ったものへと移行していくことがわかる。

攪拌速度を検討した結果を Fig. 5に示す。低速攪拌（自転運動：135.5rpm，遊星運動：63.4rpm）および高速攪拌（自転運動：283.0rpm，遊星運動：131.8rpm）で15分攪拌し作製した造粒材の粒径加積曲線において両者を比較すると低速攪拌において若干小さい粒径が作製されているが、均等係数からはあまり差が認められなかつ

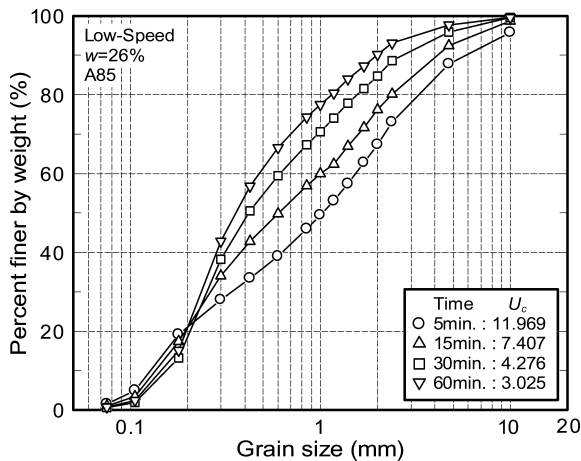


Fig. 4 Effect of granulated time on grain size distribution curves.

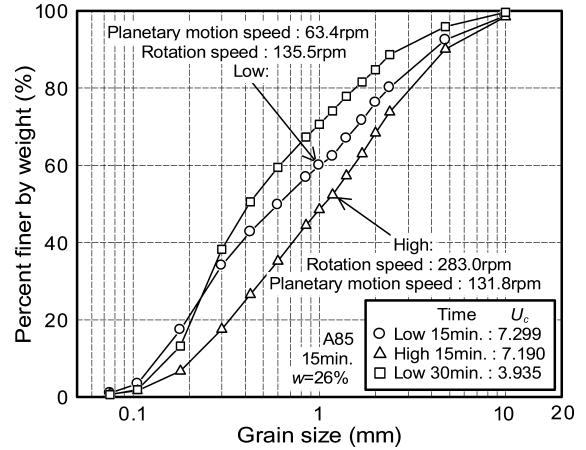


Fig. 5 Effect of speed and time on grain size distribution curves.

た。次に攪拌翼の回転数を概ね統一するために、低速攪拌では攪拌時間を30分として比較した結果について検討する。高速攪拌：15分と低速攪拌：30分の比較では、低速攪拌30分の方が均質な粒径の造粒材が作製されることが確認できる。ゆっくり時間をかけることで粒径が揃ったものになることがわかる。これらの攪拌速度に関する結果を整理し、均等係数および平均粒径と攪拌時間の関係として Fig. 6に示す。図より、均等係数および平均粒径共に攪拌時間の増加に伴い、値が減少していくことが明らかで、これらの関係は両対数軸上で直線的に変化する。この結果より、造粒の際の攪拌時間を制御するだけで粒径分布をコントロールすることが可能と考えられ、用途に応じた作製へと繋げられる。

#### 4 造粒材の物理的性質および粒子特性

作製された造粒材は、まさ土の粒径分布を目標とされているため、礫分を20～30%含むが、以後の物理的性質や力学特性の検討には、試験装置などの条件から2mm以下に粒度調整した試料に対して検討を進めている。粒度調整後の物理的性質を Table 2に示す。表中のG.C.A. A～Dは異なる造粒条件で別の機関により作製された造粒石炭灰を示している。造粒材は、細粒の粒子を団子状にして固化されたものであるため、細粒子の間隙に空気が封入されるなど内部間隙を多く含む。そのことを踏まえ、ここでは、作製した造粒材を乳鉢によりすり潰した

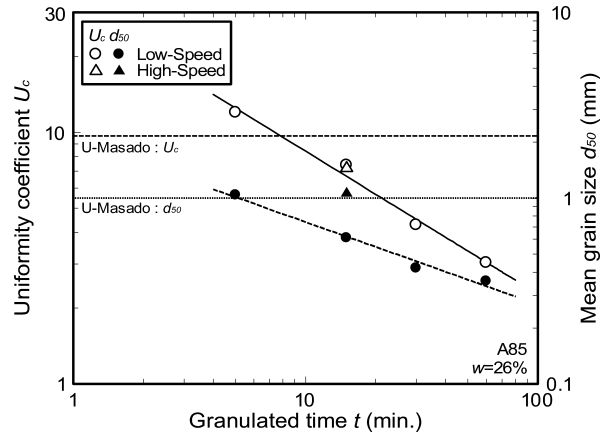


Fig. 6 Uniformity coefficient  $U_c$  and mean grain size  $d_{50}$  plots against granulated time.

Table 2 Physical properties of materials.

Sample	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{max}$	$e_{min}$	$d_{50}$ (mm)	$U_c$	$U_c'$	$A_r$	$R_c$
F75	2.612	2.610	1.676	0.210	3.091	0.602	1.362	1.882
F85	2.576	2.610	1.694	0.410	3.563	0.685	1.224	1.621
C75	2.679	2.281	1.436	0.380	7.039	0.455	1.389	1.745
C85	2.661	2.376	1.488	0.330	6.625	0.462	1.223	1.594
M75	2.569	2.630	1.554	0.175	3.529	0.643	1.411	1.638
M85	2.587	2.413	1.560	0.182	2.957	0.523	1.347	1.608
G.C.A. A	2.349	2.544	1.916	0.385	4.500	1.125	1.381	1.293
G.C.A. B	2.364	2.679	1.968	0.467	3.600	1.003	1.340	1.352
G.C.A. C	2.412	2.222	1.522	0.561	10.069	1.386	1.318	1.240
G.C.A. D	2.285	2.280	1.512	0.368	15.000	1.593	1.249	1.287
U-Masado	2.587	1.353	0.811	0.509	23.333	2.701	1.445	1.251

試料を用いて土粒子密度を真密度として測定している。G.C.A.については、見かけの土粒子密度を表記している。表より、粒度調整を行うことで、均等係数の値は小さくなり、単一粒径化が進んでいることがわかる。また、曲率係数の値も1以下となりなだらかではない粒径加積曲線になっていることが理解できる。最大・最小間隙比の値はいずれも大きな値をしていることが確認できる。

表中には、粒子の形状観察より得られる縦横比 $A_r$ と加登ら<sup>3)</sup>が提案している真円度 $R_c$ を併せて示している。形状観察は、顕微鏡を通して撮影されたデジタル画像(640×480pixel)に対して実施している。一試料に対して、30粒の画像観察データを平均して、その試料の代表値としている。縦横比 $A_r$ は式(1)で定義される値である。

$$A_r = \frac{b}{a} \quad (b \geq a) \quad (1)$$

ここに、 $b$ は投影粒子をだ円とみなしたときの長軸方向の長さ、 $a$ は短軸方向の長さである。

一方、真円度 $R_c$ は次式で決定される値であり、1に近い程形状が円に近く、大きくなるほど表面の形状が複雑であることを示すものである。

$$R_c = \frac{L^2}{4\pi A} \quad (2)$$

ここに、 $L$ は投影粒子の周囲長であり、 $A$ は投影粒子の断面積である。

Fig. 7に各造粒材の真円度 $R_c$ と縦横比 $A_r$ の関係を示

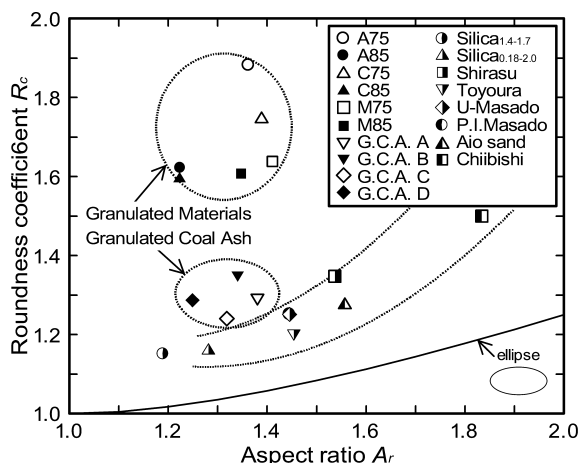


Fig. 7 Relationship between roundness coefficient  $R_c$  and aspect ratio  $A_r$ .

す。なお、図中には既往の研究<sup>3)</sup>より得られた自然砂の結果および著者らが造粒石炭灰に対して実施した結果も併せて示した。図中の縦軸は $A_r = 1$  ( $a = b$ )を示しており、 $R_c = 1$ では表面の滑らかな円を表す。 $A_r = 1$ の状態では $R_c$ が1より大きくなると、粒子の表面形状は粗くなっていくことを意味する。実線で示した曲線は、だ円に対する結果を示したものであり、縦横比が大きくなるにつれ表面が滑らかであっても真円度が大きくなることから、つまり、真円度は粒子の表面形状の複雑さだけでなく扁平さも含んで表現される値である。自然砂は、図中に示した破線の範囲内に主に分布しており、縦横比の増加に伴い真円度も増加する。一方で造粒石炭灰や本研究で作製した造粒材は、同程度の縦横比を示しており、真円度の値のみが大きな値を示している。この結果より、比較的粒子は丸い形をしているが、その表面は複雑な形状を有しているといえる。これは、細粒の粒子を団子状に固化させて造粒化しているためと思われる。造粒材に着目すると固化材添加量の増加に伴って粒子形状がより複雑化している。これは、固化材が全体に占める割合が高まることで、作製される造粒物の表面に複雑な形状を有した水和物が付着しやすくなったためと推察される。

粒子の形状だけでなく、その強度について、単粒子破碎試験装置<sup>3)~6)</sup>を用いて検討を行った。本研究で実施した単粒子破碎試験は、粒子が最も安定する状態で試験装置の下盤に配置し、上盤を下降させることにより、粒子を破碎させる試験である。試験結果より得られる荷重と変位の関係から最大荷重値 $F_f$ を粒子の初期高さ $d_0$ の二乗で除したものを破碎強度と定義し、同一条件で行った約30個の結果の平均値を単粒子破碎強度 $\sigma_m$ としている。

各造粒材の単粒子破碎強度と石炭灰の配合割合との関係を示したものをFig. 8に示す。図より石炭灰の配合割合が増加するにつれ単粒子破碎強度が増加する。Fig. 9に単粒子破碎強度と初期粒径の関係を示す。図中には、代表的な自然砂の結果および著者ら<sup>1)</sup>が行った造粒石炭灰に対する結果も併せて示している。既往の研究より、自然砂は試料によらず初期粒径が大きくなると単粒子破碎強度は小さくなり、1:0.79の様な勾配を持つことが報告されている。<sup>5), 6)</sup>これは、自然砂は粒径が小さくなるほど異種鉱物間の境界がとれて単一鉱物化し、強くて均質な内部構造を持つためと考えられている。一方、造粒石炭灰も含めた造粒材は粒径の影響をほとんど受けな

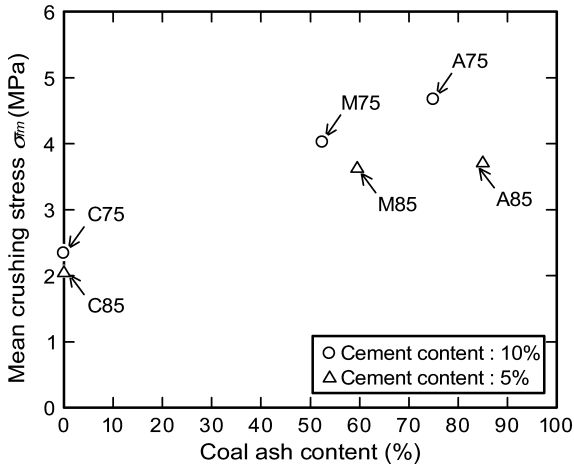


Fig. 8 Relationship between mean crushing stress and coal ash content.

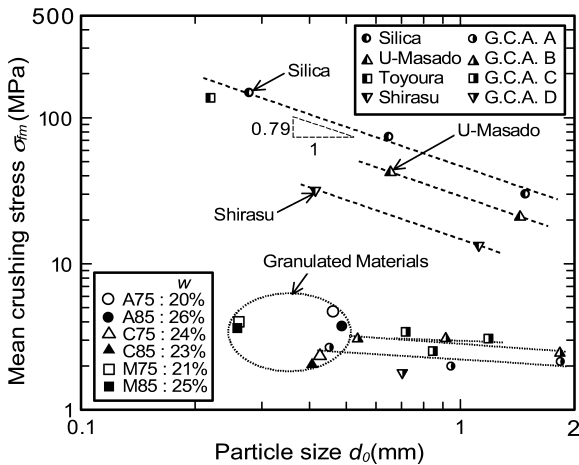


Fig. 9 Effect of particle size on mean crushing strength.

い、これは、造粒材はどの粒子サイズにおいても水和物が均等に生成しており、内部構造が均一であるためと考えられる。各造粒材において固化材添加量の増加に伴い、単粒子強度は高くなっているものの、いずれも同一粒径付近の自然砂の単粒子強度に比べ、低い強度を示している。

5 せん断特性

作製した造粒材のせん断特性を調べる目的で圧密排水三軸圧縮試験を実施した。3種類の造粒材 (C75, M75, M85) に対して、拘束圧  $\sigma'_c = 50, 100, 200, 400\text{kPa}$  の下、軸ひずみ速度  $0.1\%/min$  でせん断を行った。供試体は水中落下打撃法により所定の相対密度になるように作製している。供試体サイズは、直径  $50\text{mm}$ 、高さ  $100\text{mm}$  である。

Fig. 10 に代表的な結果として、M85 の主応力比と軸ひずみの関係および体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。図より、载荷初期の傾きは拘束圧の増加に伴い緩やかになっており、ピーク応力比が発現される軸ひずみの値が増加している。ピーク応力比の値は、拘束圧の増加とともに低下しており、拘束圧の依存性が確認できる。体積ひずみに着目すると拘束圧が増加するにつれ収縮挙動がより顕著になっている。このような結果は、Lee and Seed,<sup>7)</sup>Vesic and Clough,<sup>8)</sup>Been and Jefferies,<sup>9)</sup>Bolton<sup>10)</sup>

によって示された砂の研究結果と類似するものであり、造粒材も自然砂と同様の特性を有する。このような造粒材の挙動は、自然砂が広範な応力レベルで発揮する挙動を狭小な応力レベルで発揮していると捉えることができる。さらに、このような挙動は、単粒子破砕強度の低さや、過去の砂の粒子破砕の研究結果<sup>5)</sup>を踏まえると、粒子破砕に起因して生じていることを示唆している。このような変形挙動を踏まえて、せん断強度の拘束圧依存性について Fig. 11 に示す。Fig. 10 より、残留応力比はほとんど拘束圧に依存しないことから、ピーク時のセカントアンクル ( $\phi_{peak} = \sin^{-1}((\sigma_{a\ max} - \sigma_r)/(\sigma_{a\ max} + \sigma_r))$ ) と残留時のセカントアンクルの差と拘束圧の関係を示している。図より、造粒材によって拘束圧依存性は異なるものの、いずれも片対数軸上でほぼ直線的にピーク時のセカントアンクルが低下している。このような現象は、先にも述べたように粒子破砕に起因していると思われることから、単粒子破砕強度と何らかの関係があると考えられる。そこで、ピーク時のセカントアンクルと残留時のセカントアンクルの差を相対密度で正規化したものを縦軸に、単粒子破砕強度を拘束圧で正規化したものを横軸に取った関係図を Fig. 12 に示す。図中には、造粒石炭灰により得

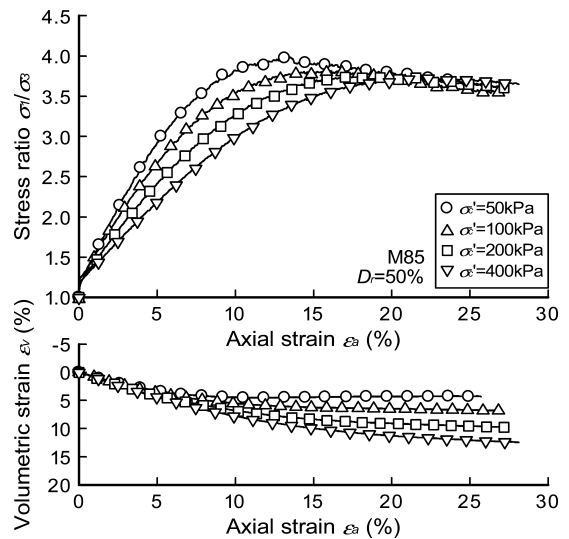


Fig. 10 Relationship between principal stress ratio and strain.

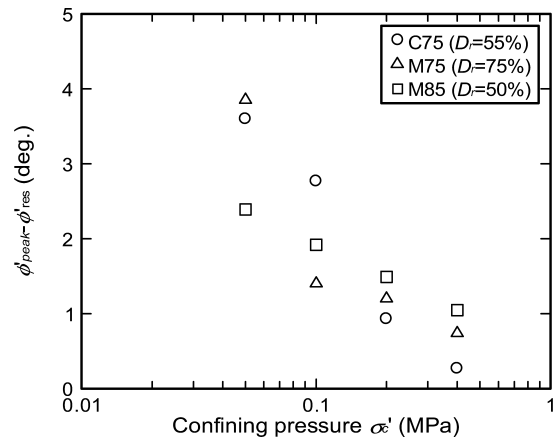


Fig. 11 Relationship between  $\phi_{peak} - \phi_{res}$  and confining pressure.

られた研究結果<sup>11)</sup>も併せて示す。図より、造粒材の結果も造粒石炭灰の結果程ではないが、ばらつきを含みつつ両者に一義的な関係が存在することが確認できる。ばらつきが大きいことや造粒石炭灰の結果と一致しない理由としては、粒径の範囲はいずれも同様であるが、Table 2に示すように均等係数や曲率係数、特に曲率係数に大きな差があり、それが結果へと影響したものと考えられる。

Vesic and Clough<sup>8)</sup>や Gutierrez<sup>12)</sup>は、相対密度や拘束圧の影響を加味した上でピーク時の応力比を算出できる式を Fig. 12 のような関係から提案している。同様に定式化したものを次式に示す。

$$\phi_{peak} = \phi_{res} + C'' \cdot D_r \cdot \ln \left( \frac{\sigma_{fm}}{\sigma_c'} \right) \quad (3)$$

ここで、 $C''$  は材料パラメータであり、 $D_r$  は相対密度である。また、 $\phi_{res}$  は限界状態の応力比である。本研究においては、残留時の応力比を限界状態の応力比と便宜上、仮定して用いている。結果より、両者に良い相関が認められたことから、この式を利用して強度の予測が可能で、必要強度に見合った造粒材の作製が可能と考えられる。また、粒径分布については、前述の通り、添加水量や攪拌時間などを調整することで制御することも併せると必要に応じた造粒材の作製が可能と考えられる。

## 6 結 言

本研究では、産業副産物および浚渫土砂の有効利用の一環として、石炭灰および粘性土の造粒化技術について検討を行った。作製された造粒材に対して、その地盤材料特性について調査した。得られた主要な知見をまとめると以下ようになる。

(1) 造粒材の作製において、添加水量、攪拌時間、攪拌速度を適切に調整することで任意の粒径分布を持つ造粒材が作製可能であることがわかった。特に添加水量に敏感であり、造粒に適切な水量が存在することも確認された。また、攪拌時間を長くすることで粒径が揃い均等係数が小さくなる。

(2) 造粒材は自然砂と比較して縦横比  $A_r$  が小さく、真円度  $R_c$  が大きい。つまり、球形ではあるが表面が角張っている材料である。セメントの添加率が低いことにもよるが粒子強度は自然砂にくらべ低い。

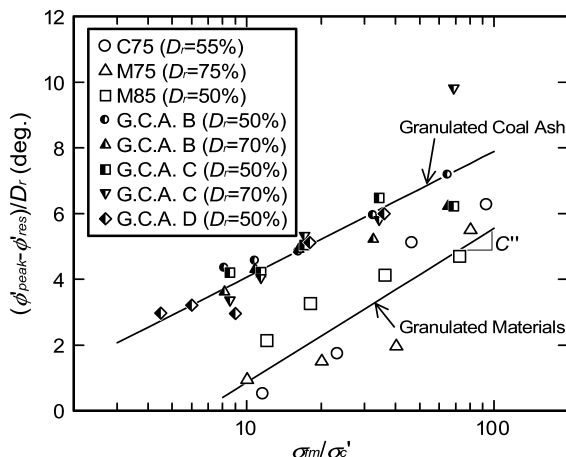


Fig. 12 Relationship between  $(\phi_{peak} - \phi_{res}) / D_r$  and  $\sigma_{fm} / \sigma_c'$ .

(3) 造粒材のせん断挙動は、粒子破碎を伴う砂のせん断挙動と類似する。粒径分布の類似した、曲率係数などが近いものについては、セカントアングルと粒子強度は良い関係を示し、造粒材のせん断強度を予測することが可能である。

## 参 考 文 献

- 1) N. Yoshimoto, M. Hyodo, Y. Nakata, H. Murata, T. Hongo and A. Ohnaka, "Particle characteristics of granulated coal ashes as geomaterial", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.54, No.11, pp.1111-1116 (2005).
- 2) E. Shimizu and T. Watanabe, "Basic research on granulate of soil", Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers, No.370/III-5, pp.95-104 (1986).
- 3) 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).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) K. H. Lee and H. B. Seed, "Drained strength characteristics of sands", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.93 (SM6), pp.117-141 (1967).
- 8) A. Vesic and G. W. Clough, "Behavior of granular materials under high stresses", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.94 (SM3), pp.661-688 (1968).
- 9) K. Been and M. G. Jefferies, "A state parameter for sands", Géotechnique, Vol.35, No.2, pp.99-112 (1985).
- 10) M. D. Bolton, "The strength and dilatancy of sands", Géotechnique, Vol.36, No.1, pp.65-78 (1986).
- 11) N. Yoshimoto, "Evaluation of shear strength of granulated coal ash by particle strength", Proceedings of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paper ID 215 (2011).
- 12) M. Gutierrez, "Modeling of the steady-state response of granular soils", Soils and Foundations, Vol.43, No.5, pp.93-105 (2003).