

造粒石炭灰の地盤材料としての利用技術の開発に関する研究



所属名: 山口大学大学院
 理工学研究科
 発表者: 兵動 正幸

1. まえがき

1991年に施行された「再生資源の利用の促進に関する法律」(資源リサイクル法)において種々の再生資源の利用が求められてきた。特に地盤工学の分野では、一度に大量の消費が望めることからその利用の促進が期待されてきた。また、中国地方、特に瀬戸内海において、良質な地盤材料の枯渇化に伴う自然砂の使用が制限されてきており、再生資源の利用の促進は非常に重要な問題である。本研究では、再生資源の中でも石炭灰に着目している。さらに、造粒化された石炭灰の地盤材料としての有効利用について検討を進めた。この造粒石炭灰は、石炭灰に固化材を添加して砂礫大に造粒化されたものであり、重金属の溶出抑制や粉末状の灰と比較して維持管理が容易(飛散防止・屋外養生が可能)であることが利点として挙げられる。このような造粒化された材料の地盤材料としての利用についての知見はほとんどないことから、本研究では、まず、一般に地盤材料として扱われている自然土(砂や粘土)と、その力学特性を比較しながら検討を進める。また、粒子自身が人工材料であることに着目し、その粒子特性についても自然土と比較し、その特性が地盤材料としての力学特性にどのような影響を与えるか検討する。さらに、石炭灰に含まれる重金属などの微量物資の溶出について、自然地盤環境に即した条件下で実験を行い、溶出特性についても検討する。

2. 試料の物理的性質および粒子強度

本研究で用いた試料は2mm以下に粒度調整した造粒石炭灰3種類である。表-1に造粒石炭灰の配合割合および使用した造粒設備と養生方法を整理したものを示す。試料の物理的性質を表-2に示す。造粒石炭灰は石炭灰自身に気泡が含まれていること、造粒化により造粒石炭灰にも空隙が存在することから、比重が小さく、最大空隙比・最小空隙比ともに大きな値を示すことが特徴である。造粒石炭灰は、人工的に作製されるため、粒子の強度を容易に測定できる。そこで、粒子の強度を簡単に知るための試験として提案されている単粒子破碎試験^{1),2)}により粒子強度を調べた。粒子の強度は、単粒子破碎試験から得られる最大荷重値 F_f を初期の粒子高さ d_0 の2乗で除すことで単粒子破碎強度 σ_f と定義される。そして同一条件で行った個々の平均値を平均単

表-1 造粒石炭灰の配合、造粒設備及び養生状態

Sample	Composition (%)			Type of machine	Curing condition
	Coal ash	Cement	addition		
A	85	5	10	Model equipment	Natural dry
B	80	10	10		
C	85	5	10		
D	85	5	10	Actual equipment	$w = 40\sim 50\%$
E	85	5	10		
F	83	5	12		
G	83	5	12		

表-2 試料の物理的性質

Sample	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	d_{50} (mm)	U_c
A	2.349	2.544	1.916	0.385	4.62
B	2.364	2.679	1.968	0.467	3.82
C	2.412	2.222	1.522	0.561	10.1
D	2.285	2.280	1.512	0.368	14.8
E	2.390	2.547	1.752	0.255	8.34
F	2.400	2.109	1.431	0.630	12.0
G	2.304	2.494	1.678	0.446	7.08
Masado	2.587	1.353	0.811	0.509	1.10
P.I.Masado	2.624	0.967	0.491	0.546	7.00
Shirasu	2.307	1.494	0.775	0.175	11.8
Silica _{14-1.7}	2.639	0.881	0.632	1.550	1.10
Silica _{0.18-2.0}	2.655	0.936	0.588	0.736	2.20
Toyoura	2.643	0.973	0.635	0.200	1.20
Aio sand	2.633	0.958	0.582	0.400	2.74
Chiibishi	2.821	1.574	0.983	0.613	2.40
Wakasa	2.65	1.105	0.680	0.311	
Iwakuni clay	2.61	-	-	0.007	
Shirasu (F.C.=10%)	2.38	1.459	0.799	0.323	
Coal Ash F	2.153	-	-	0.016	4.21
S-Masado	2.664	1.144	0.583	0.552	11.1

粒子破碎強度 σ_{fm} と定義される。なお、本研究では約 30 個の試験結果を用いている。図-1 に平均単粒子破碎強度 σ_{fm} と材齢の関係を示す。図より、いずれも材齢と共に強度が増加していることがわかる。しかしながら、その強度の増加傾向は様々であることがわかる。これは、用いた石炭灰が異なることやそれに関連した練り混ぜ時間や配合の違いが強度発現に影響を及ぼしていると考えられる。平均単粒子破碎強度と粒径との関係を図-2 に示す。この図から、全ての造粒石炭灰の単粒子

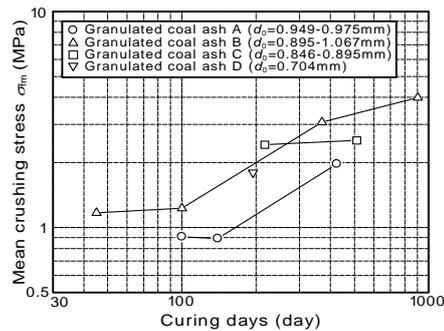


図-1 単粒子破碎強度と材齢の関係

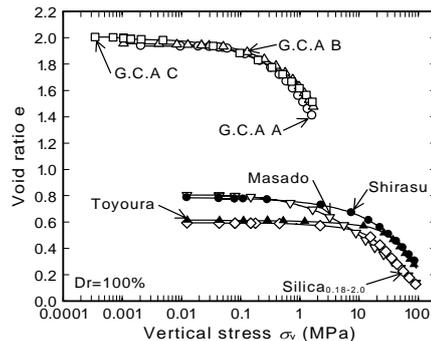


図-3 $e \sim \log \sigma_v$ 関係 (他材料との比較)

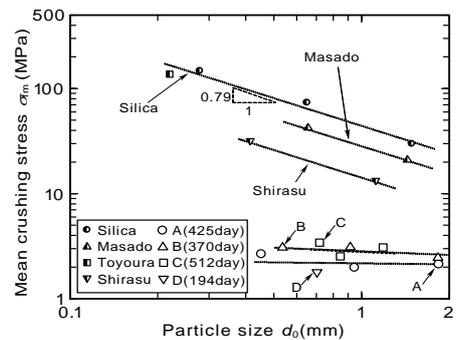


図-2 単粒子破碎強度～初期粒径関係

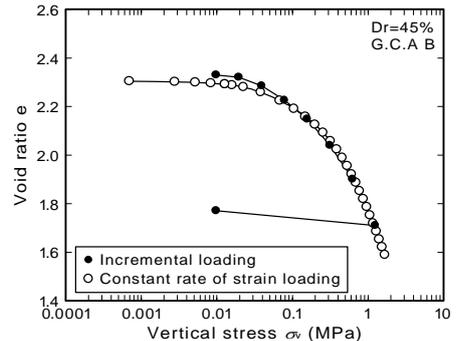


図-4 $e \sim \log \sigma_v$ 関係 (荷重方法の影響)

破碎強度 σ_{fm} は自然砂であるMasadoやShirasu (しらす), Silica (シリカ), Toyoura (豊浦砂) と比べて小さいことがわかる。また、自然砂は、試料の種類によらず初期粒径 d_0 が大きくなるに従い単粒子破碎強度は減少する傾向があり、その関係は両対数軸上で $1:-0.79$ の傾きを持つ直線関係で表現される³⁾。また、自然砂は単粒子破碎強度 σ_{fm} に一様な粒径の影響を受けることが既往の研究^{3),4)}により明らかにされている。この要因として、福本、原⁵⁾は、自然砂は d_0 が小さくなるほど異種鉱物間の境界が取れて単一鉱物化し、強くて均質な内部構造を持つようになるからと考えている。一方、造粒石炭灰においては、いずれの試料においても自然砂のような粒径の違いによる単粒子破碎強度 σ_{fm} の変化はみられなかった。これは、造粒石炭灰は各粒子において水和物が一様にできており、内部構造が自然砂と異なり、均質であるためと考えられる。

3. 一次元圧縮特性

図-3 に鉛直応力の増加に対する間隙比の変化を示す。図には造粒石炭灰A～CとMasado, Toyoura, Shirasu, Silica_{0.18-2.0}の相対密度 $Dr=100\%$ の結果を併せて示している。初期の間隙比が大きく異なるため、他の自然砂とは重なることはない。応力域こそ異なるものの、明確な降伏応力を示し、類似の挙動を示していることがわかる。応力域が異なるのは、前節で示したように粒子強度が小さいことに起因しており、造粒石炭灰の粒子強度が自然砂のそれに比べて小さいためである。そのため、低い応力域から破碎が生じ始め、間隙比が減少すると考えられる。

標準圧密試験は、造粒石炭灰 B を用いた。図-4 に試験より得られた圧縮曲線を、図-5 に沈下量～時間関係を示す。図-4 には、定ひずみ速度の同じ初期相対密度の結果も併せて示しているが、両者はほぼ同じ曲線上を推移しており、荷重方法による影響はないものと考えられる。また、図-5 には、造粒石炭灰の結果に加えて、小野田粘土の結果を併せて示している。図より、造粒石炭灰は静的な荷重に対する時間依存性は粘性土などと比べ小さく、荷重に対する沈下は早期に終了し、造粒石炭灰の変形は即時変形として捉えることができると考えられる。次に造粒石炭灰の圧縮性を評価するために、

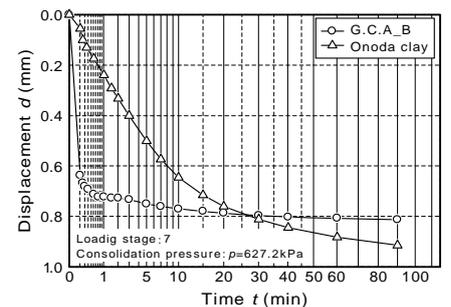


図-5 変位～時間関係(荷重段階 7)

他の地盤材料との比較を行った。

4. 排水せん断特性

排水せん断試験は、造粒石炭灰B($D_r=50, 70\%$), C($D_r=50, 70\%$), ($D_r=50\%$) に対して拘束圧 $\sigma'_c=50, 100, 200, 300, 400\text{kPa}$ の応力域において側圧一定、ひずみ速度一定 (0.1%/min) の条件で実施した。なお、試験に用いた造粒石炭灰は、図-1において、いずれも最も材齢の高いものと対応させている。応力比 $\eta(=q/p')$ と軸ひずみ ε_a の関係及び体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係を自然砂と比較したものを図-6 に示す。

図より、Silicaの低拘束圧の結果においてピーク応力比が大きいことがわかる。造粒石炭灰の拘束圧 50kPa の結果は P.I.Masado とほぼ同じであることがわかる。しかし、100kPaの結果においては、初期の立ち上がりが緩やかとなっていることがわかる。しかしながら

ら発揮されるピーク応力比はP.I.Masadoとほぼ同じである。また、このように拘束圧の変化で挙動が変わる現象は、Silicaの高拘束圧の結果においても認められ、これには粒子破碎の影響が含まれる。次に図-7 に造粒石炭灰のせん断挙動の代表的な例として造粒石炭灰B($D_r=50\%$)の応力比 $\eta(=q/p')$ と軸ひずみ ε_a の関係及び体積ひずみ ε_v と軸ひずみ ε_a の関係を示す。図より、造粒石炭灰のせん断挙動は拘束圧の影響を受け、低拘束圧から高拘束圧に推移するにつれて、応力比と軸ひずみの関係の立ち上がりが緩やかとなることやピーク応力比が低下していくことがわかる。また、体積ひずみと軸ひずみの関係においては、50kPaの結果では若干膨張挙動を示し、拘束圧の増加と共に収縮一方の挙動へと推移することがわかる。しかし、残留時の主応力比は拘束圧の影響が認められず、拘束圧に依らず一定の値に収束するという結果を得た。このような応力ひずみ関係に現れる挙動は、粒子強度の低さや、過去の砂の粒子破碎の研究成果²⁾、図-6の結果を踏まえると、粒子破碎に起因して生じていることを示唆するものといえる。ピーク強度の拘束圧依存性を明確に見るために、縦軸にピーク時の応力比 η_{peak} 、横軸にピーク時の平均有効主応力 p' をとったものを図-8 に示す。図より、いずれの造粒石炭灰もピーク時の応力比は低下していることがわかる。次に、残留時に着目して縦軸に残留時の応力比 η_{res} 、横軸に残留時の平均有効主応力 p' をとったものを図-9 に示す。図より、残留時の応力比はいずれの造粒石炭

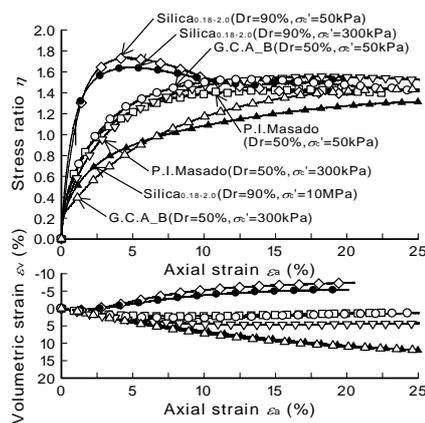


図-6 応力比～軸ひずみ～体積ひずみ関係

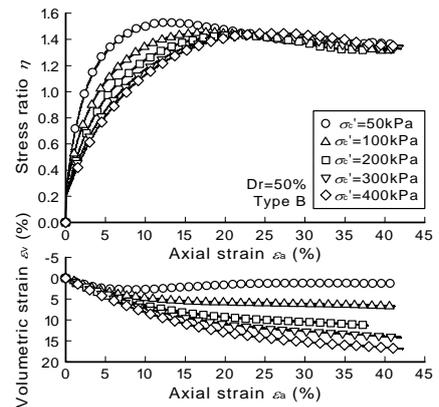


図-7 応力比～軸ひずみ～体積ひずみ関係

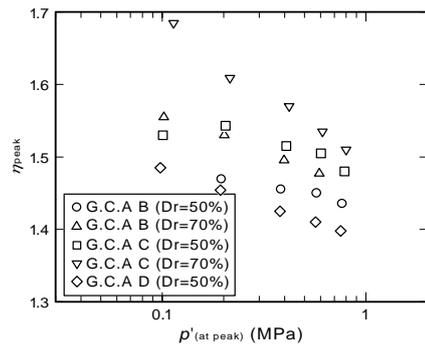


図-8 ピーク時の応力比～平均主応力関係

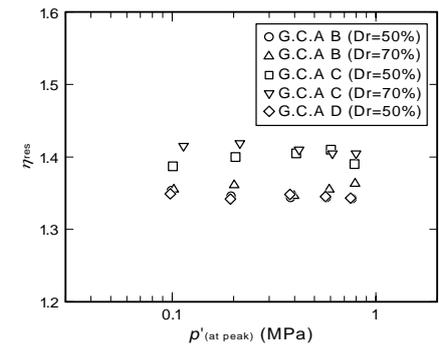


図-9 残留時の応力比～平均主応力関係

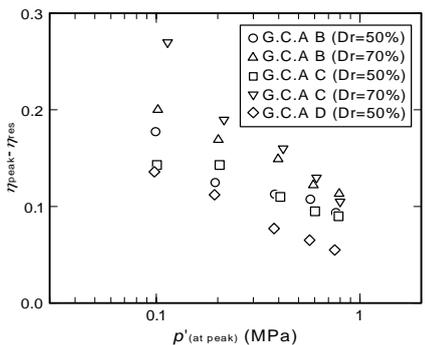


図-10 $\eta_{\text{peak}} - \eta_{\text{res}} \sim p'$ 関係

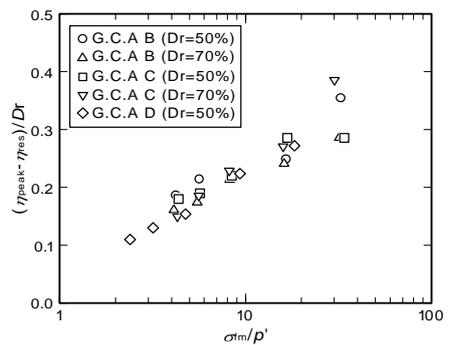
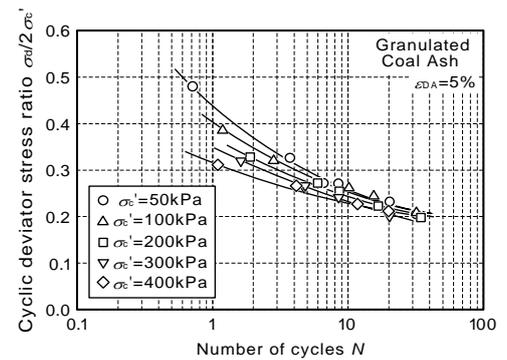


図-11 $\eta_{\text{peak}} - \eta_{\text{res}} \sim \sigma'_{\text{fm}} / p'$ 関係

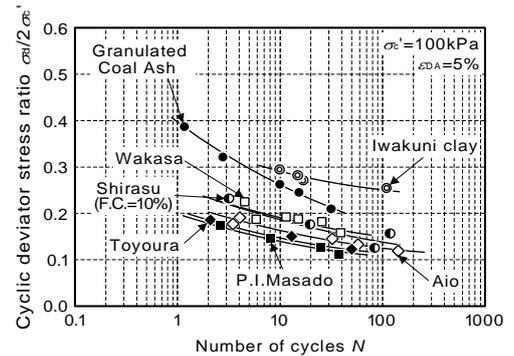
灰においても平均有効主応力の影響を受けず、ほぼ一定の値をとることがわかる。また、その値は造粒石炭灰の種類によって決定され、ここでは、BとDは、同じ応力比 $\eta_{res} = 1.37$ で表され、Cは $\eta_{res} = 1.4$ で表される。残留時は、図-7に示されるようにせん断ひずみの進行に対して応力比が変化しない状態であり、その時に発揮される強度は粒子間の摩擦抵抗によりもたらされるといえる。このことを踏まえると、図-9の結果が造粒石炭灰の種類ごとに一定の値をとるという結果も納得でき、過去の砂の粒子破碎の研究成果同様、残留時の強度は粒子の破碎に依存しないといえる。また、造粒石炭灰の排水せん断強度の拘束圧依存性をダイレイタンシーにより発揮される強度が、応力の増加により生じる粒子破碎によって次第に消失していくために起こる現象であると仮定し、ダイレイタンシーによる強度増分を $\eta_{peak}-\eta_{es}$ と定義する。この $\eta_{peak}-\eta_{res}$ を縦軸に、平均有効主応力を横軸にとったものを図-10に示す。図より、ダイレイタンシーにより発揮される強度は粒子破碎により低下するため、いずれの結果も右下がりの直線で表現されることがわかる。次に $(\eta_{peak}-\eta_{res})/D_r$ を縦軸に、平均単粒子破碎強度を平均有効主応力で正規化した σ_{fm}/p' を横軸にとったものを図-11に示す。この図は、横軸の平均単粒子破碎強度を平均有効主応力で正規化することで造粒石炭灰ごとに異なる粒子強度の影響を取り除き、縦軸の相対密度で正規化することにより、密度の影響を取り除いた結果といえる。図より、多少結果にばらつきが認められるものの、両者の間には良い相関が認められ、右上がりの直線で表現されることがわかる。この図より、相対密度、拘束圧を設定し、使用する造粒石炭灰の平均単粒子破碎強度とある拘束圧下での排水三軸試験から残留時の応力比を求めることで、任意のピーク時の応力比が推定されることがわかる。また、造粒石炭灰は平均単粒子破碎強度を容易に管理できるため、この結果を利用して使用目的に即したものを生産することも可能となると考えられる。

5. 繰返しせん断強度

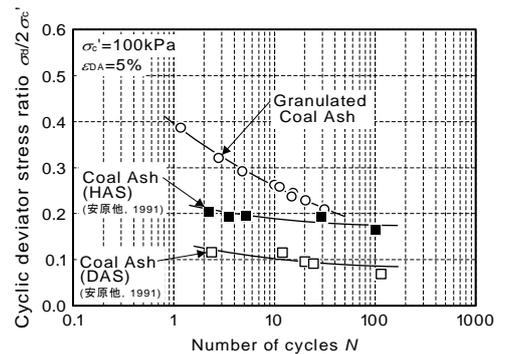
図-12に、軸ひずみ両振幅 $\epsilon_{DA}=5\%$ に至るに必要な繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma_c'$ と繰返し回数 N の関係を示す。なお、(a)は造粒石炭灰のみの結果であり、(b)は自然土との比較、(c)は石炭灰との比較である。図-12(c)中の石炭灰の結果は、安原ら⁶⁾によって行われた供試体作成方法(試料投入方法)の異なる石炭灰の液状化強度曲線であり、DASは乾式、HASはスラリー打設式を意味する。図-12(a)より、造粒石炭灰の繰返しせん断強度曲線には、拘束圧が高くなるにつれ下方へシフトする拘束圧依存性があることがわかる。この拘束圧依存性は少ない繰返し回数の場合に顕著に現れ、繰返し回数が多くなるにつれて曲線が収束する結果が得られた。また、(c)より、造粒石炭灰の繰返しせん断強度曲線は、石炭灰スラリー打設により密に作製された石炭灰供試体の繰返しせん断強度曲線よりも、上方に位置することがわかる。また、自然土との比較においては、まさ土や豊浦砂などの自然砂よりも上方に位置し、岩国粘土の結果に近いことがわかる。さらに同図より、繰返し回数 $N=20$ 回における繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma_c'$ を繰返しせん断強度として算出すると、造粒石炭灰の繰返しせん断強度は豊浦砂の約1.7倍もあることがわかる。



(a) 造粒石炭灰



(b) 自然土との比較



(c) 石炭灰との比較

図-12 繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma_c'$ と繰返し回数 N の関係

6. カラム試験による造粒石炭灰からの微量物質溶出特性

本研究では、自然環境に近い条件での溶出特性を把握することを目的に、溶媒を供試体下部より定圧条件で浸透させるカラム溶出試験を実施し、造粒石炭灰からの微量物質の溶出特性と地盤中における微量物質の移動特性を調べた。供試体サイズについては、直径 5cm×高さ 20cm とした。

用いた造粒石炭灰 (**G**ranulated **C**oal **A**sh) は、G.C.A-F と G.C.A-G の 2 種類である。どちらの造粒石炭灰も造粒設備及び養生状態は同一であるが、試験に供する際の試料準備(乾燥)方法が異なる。G.C.A-Fはカラム充填前に屋外で天日干しし、気乾状態にして保管し、試験時に含水比調整を行ったものである。G.C.A-Gは養生状態の湿潤状態を保持したまま保管し、試験に使用した。各試料の粒度分布は、粒径幅が約 0.03mm~20mmで細粒分が約 10%含まれている。なお、本研究では、2mm以下に粒度調整したものを用いている。表-3 に造粒石炭灰及び石炭灰 (Coal Ash : C.A-F) のバッチ溶出試験結果を示す。ここで示している石炭灰は、本研究で用いた造粒石炭灰の原料として利用されたものである。いずれも環境庁告示第 46 号法 (JLT-46) に準拠した溶出試験結果である。これより、本研究で用いた造粒石炭灰は土壤環境基準を満たす材料であることがわかる。また、造粒前の石炭灰C.A-Fにおいてホウ素 (B) が環境基準値を超えて溶出しているが、造粒することにより、環境基準値以下となり造粒の効果が確認できる。

カラム溶出試験は、表-4 に示したように試験No.①~⑧の 7 パターンを実施した。供試体は、含水比調整を行った試料を所定の密度になるように締固めや空中落下法により作成している。締固めの場合、同程度の締固めで比較を行うため、どちらの試料とも最大乾燥密度の 90% (Dc=90%) になるように締固めた。最大乾燥密度の 90%の乾燥密度はそれぞれ、G.C.A-Fは 0.967g/cm³であり、G.C.A-Gは 0.876g/cm³である。それ以外は空中落下法により作成した時の密度である。動水勾配*i*は 0.5 と 2.5 の 2 種類で、溶媒の種類としては、精製水 (pHは概ね 7 程度) を基準として、pHを 2 と 4 に調整したものと模擬海水を用いた。pHの調整には、酸性雨を考慮して硝酸水溶液を用いた。模擬海水には市販の人工海水を用いて、日本近海の平均値である pH=8.2 付近にpHを調整して使用した。なお、浸出液の採水は固液比 0.1:1~1:10 で行い、それらを分析し溶液中の微量物質を測定した。

図-13 に、石炭灰及び造粒石炭灰から溶出するAs及びBの溶出濃度と通水量との関係を示す。ここで、溶出濃度とは検出された累積溶出量を通水量で除した値である。石炭灰を造粒化することによりAs及びBの溶出濃度は数十分の一に低減されたことがわかった。これは、両者における微量有害物質の固定化形態の違いに起因すると考えられる。石炭灰では、その生成過程において一度ガス化した微量有害物質が、冷却されることで石炭灰粒子の表面付近に付着するような形で存在するが、造粒石炭灰では溶出抑制剤やセメントの使用により、微量有害物質がセメント水和物等で固定化される形になるため溶出が大幅に抑制されたものと考えられる。通水量に対するpHの推移を図-14 に示す。造粒石炭灰自身が高アルカリの材料であるため、低いpHの溶媒を浸透させても浸出水のpHはアルカリ側で推移し、中性に近い溶媒ほど、浸出水のpHは高くなることがわかる。G.C.A-Fについては、試料を乾燥させることでpHが若干低く推移していることがわかる。このようなpHの低下は、気乾状態にする際に空気中の二酸化炭素と造粒石炭灰中のカルシウム分が接触し、中性化反応を起こすためと考えられる。模擬海水の結果を見ると浸出初期に高アルカリであったものが、浸出後半では、中性へ (入力した時

表-3 バッチ溶出試験結果(環告 46 号)

Chemical Species	G.C.A-F	G.C.A-G	C.A-F
Total Chromium, T-Cr	N.D (<0.01)	N.D (<0.01)	N.D (<0.01)
Hexavalent Chromium, Cr(VI)	N.D (<0.01)	N.D (<0.01)	N.D (<0.01)
Arsenic, As	0.003	0.002	0.003
Boron, B	0.6	0.2	3.8
pH	10.5	11.2	7.2

JLT-46

表-4 造粒石炭灰のカラム試験条件

Sample	No.	Dry Density ρ_d (g/cm ³)	Hydraulic Gradient <i>i</i>	Solvent
G.C.A-F	①	0.967 (Dc=90%)	2.5	Pure Water
	②	0.900	2.5	Pure Water
G.C.A-G	③	0.876 (Dc=90%)	2.5	Pure Water
	④	0.876 (Dc=90%)	2.5	Sea Water
	⑤	0.876 (Dc=90%)	0.5	Pure Water
	⑥	0.876 (Dc=90%)	0.5	pH=4
	⑦	0.876 (Dc=90%)	0.5	pH=2
C.A-F	⑧	0.900	2.5	Pure Water

のpH)に近づくように推移していくことがわかる。このような中性化について、海水に含まれているMgSO₄が溶液中のOH⁻と反応しMg(OH)₂を形成することによって、OH⁻が低減することにより、pHが中性側にシフトすることが報告されており⁶⁾、今回も同様の反応が起こったと推察される。また、海水が弱アルカリ性であるため造粒石炭灰からのアルカリの溶脱が比較的少ないことも要因として推察される。図-15、図-16

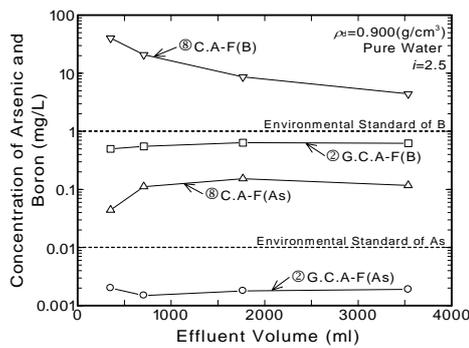


図-13 AsとBの溶出濃度変化(造粒の効果)

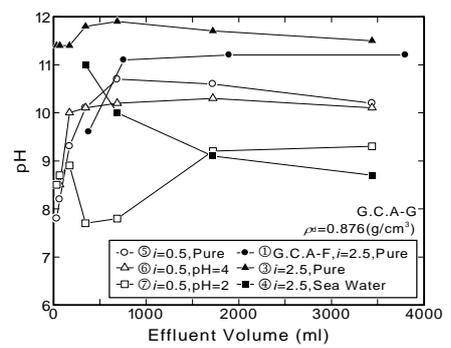


図-14 pHと通水量の関係(pH, 溶媒の影響)

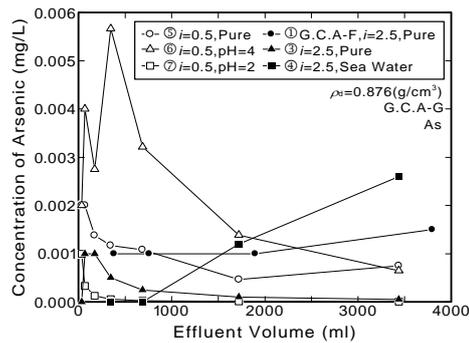


図-15 Asの溶出濃度変化(pH, 溶媒の影響)

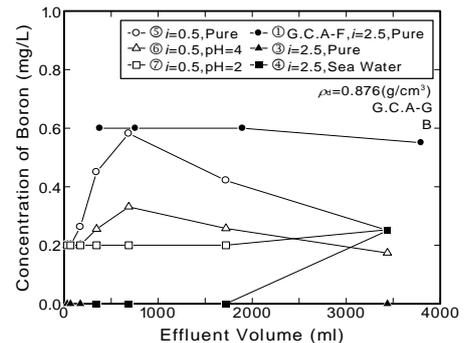


図-16 Bの溶出濃度変化(pH, 溶媒の影響)

に、造粒石炭灰から溶出するAs及びBの溶出濃度と通水量との関係を示す。図より、溶媒のpHの影響を受け、As、Bともに溶出量が増えることがわかる。AsのpH=4の結果以外は、pHの中性側への変化とともに溶出量が増加する傾向にある。試料を乾燥させたG.C.A-Fの結果は、先の述べたような中性化反応によって、浸出水のpHが若干低くなるが、その影響で溶出量が増加することがわかる。特に、Bにおいて顕著であり、溶媒のpH変化よりも溶質のpH変化においてその影響が大きいことがわかる。また、模擬海水においては、pHの変化に対して、溶出量は少なく、模擬海水中に含まれる他の物質の影響を受けたものと推察される。造粒石炭灰の使用環境を想定し、溶媒や溶質のpH条件を変化させることにより、AsやBの溶出濃度が増えることがわかった。しかしながら、本研究におけるいずれの条件下でも環境基準値を超えることはなかった。

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。(1) 造粒石炭灰の粒子強度は自然砂より低い材齢と共に増加すること、粒径の影響を受けないことがわかった。(2) 一次元圧縮試験より圧縮性が高いことがわかった。しかし圧縮に時間は要さず即時的変形である。(3) 造粒石炭灰のピーク強度は拘束圧依存性が確認され、残留強度は拘束圧の影響を受けず一定の値を示すことが明らかとなった。また、残留強度は粒子間の摩擦抵抗によりもたらされると考えられるため、造粒石炭灰の種類ごとに同じ値を示すことがわかった。 $(\eta_{peak} - \eta_{res})/D_r$ と σ_{fm}/p' の間には、一義的な関係が得られ、平均単粒子破砕強度やある拘束圧条件の残留強度が得られれば容易にピーク強度を予測することが可能となる。(4) 造粒石炭灰の繰返しせん断強度曲線は拘束圧に依存し、拘束圧の増加に伴い下方にシフトする。また、その傾向は繰返し回数の少ないところで顕著である。しかしながら、造粒石炭灰の繰返しせん断強度曲線は、石炭灰や自然砂と比較した場合上方に位置し、粘土に近い位置に存在し、繰返しせん断強度が高いことがわかった。そして、繰返しせん断強度は豊浦砂の約1.7倍であることがわかった。(5) 地盤環境に即したカラム溶出試験から、溶媒や溶質の条件の影響を受けるものの、環境基準を超えて溶出することはなかった。

〈参考文献〉

1) Nakata, Y. et.al. : A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test, *Géotechnique*, Vol.49, No.5, pp.567-583, 1999. 2) 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一: 地盤材料の単粒子破砕特性, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.189-194, 2001. 3) Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M. Hyde, A. F. L. and Murata, H. : 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. 4) 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一: 破砕性材料の粒子特性と一次元圧縮特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.343-355, 2002. 5) 福本武明, 原健夫: 粒状体の粒子破砕強度分布に関する研究, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.91-99, 1998. 6) 安原一哉・兵動正幸・平尾和年: 石炭灰による埋立て地盤の液状化特性, 土と基礎, Vol.39, No.2, pp.5-10, 1991. 7) 嘉門雅史, 乾徹, 佐々木和憲: 重金属汚染土およびその固化体の溶出特性に関する実験的検討, 材料, Vol.52, No.1, pp.45-48, 2004.